ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

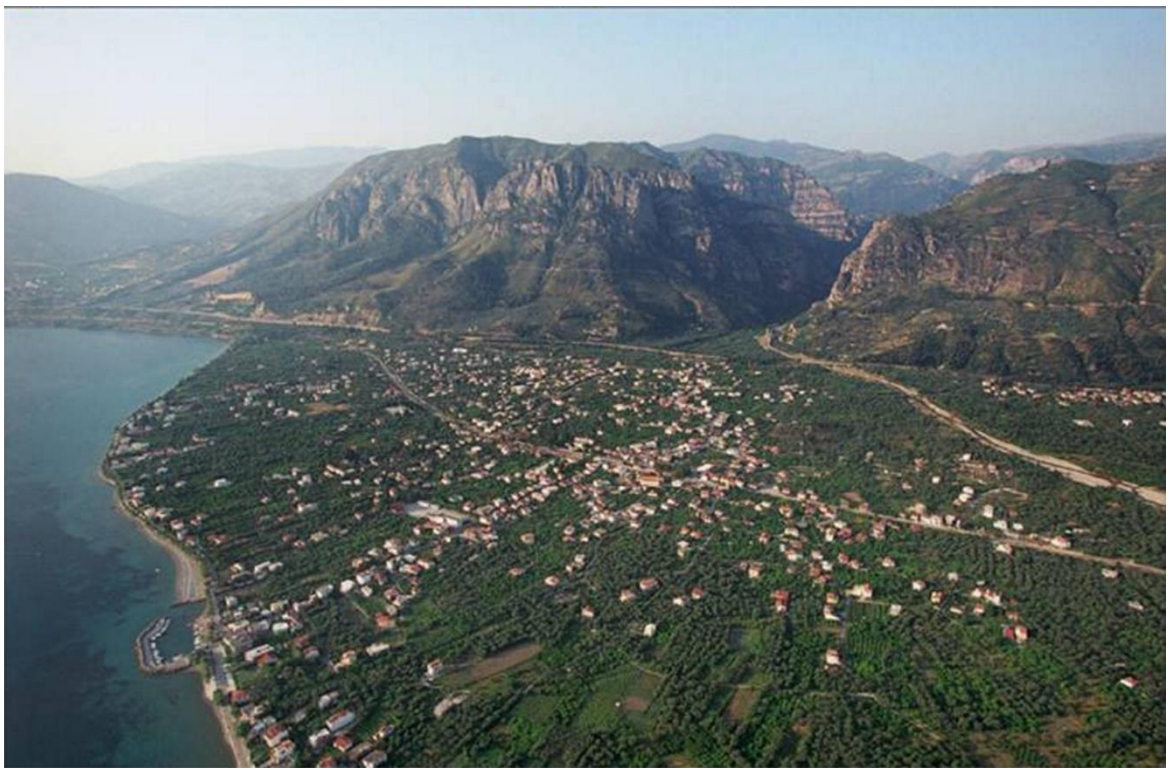
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΟΡΕΙΝΕΣ ΛΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΕΣΤΙΑΖΟΝΤΑΣ ΣΤΗΝ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΒΟΥΡΑΪΚΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ

Διδακτορική Διατριβή

Σωτήριος – Θεοφάνης Η. Καραλής

Αγρονόμος – Τοπογράφος Μηχανικός ΑΠΘ

ΜΔΕ «Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων», ΕΜΠ



Αθήνα, 2020

ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

Η Διδακτορική Διατριβή εξετάστηκε από την κάτωθι Επταμελή Επιτροπή:

Καρύμπαλης Ευθύμιος (Επιβλέπων)
Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Χρίστος Χαλκιάς
Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Νικόλαος Μαμάσης
Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο

Εμμανουήλ Βασιλάκης
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Νίκη Ευελπίδου
Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Σεραφείμ Πούλος
Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Ανδρέας Τσάτσαρης
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από το τμήμα Γεωγραφίας της Σχολής Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας και Εφαρμοσμένων Οικονομικών του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου δεν υποδηλώνει και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα.

Ο Σωτήριος – Θεοφάνης Η. Καραλής

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

1) Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.

2) Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

Η διερεύνηση της αλήθειας είναι από μια άποψη δύσκολη, από κάποια άλλη όμως, εύκολη. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι κανείς άνθρωπος δεν μπορεί να την συλλάβει πλήρως, όμως και κανένας δεν αποτυγχάνει εντελώς, αλλά ο καθένας λέει κάτι αληθινό για τη φύση των πραγμάτων, και ενώ μεμονωμένα, ως άτομα, συμβάλλουν ελάχιστα ή καθόλου στην αλήθεια, από την άθροιση όλων αυτών που λέγονται συγκεντρώνεται κάποιο ποσό γνώσης.
Επομένως, δεδομένου ότι η αλήθεια μοιάζει με την πόρτα της παροιμίας, την οποία κανείς δεν μπορεί να αποτύχει να χτυπήσει, απ' αυτή την άποψη είναι εύκολη (η διερεύνηση της αλήθειας), αλλά το γεγονός ότι μπορούμε να έχουμε μια ολόκληρη αλήθεια και όχι το συγκεκριμένο μέρος στο οποίο στοχεύουμε, δείχνει τη δυσκολία. Ίσως, καθώς οι δυσκολίες είναι δύο ειδών, η αιτία της παρούσας δυσκολίας δεν είναι στα πράγματα αλλά σε εμάς.

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΗΣ, ΜΕΤΑ ΤΑ ΦΥΣΙΚΑ

Σα χαλικάκι μες'το ρεύμα θα χαθείς…

ΒΑΓΓΕΛΗΣ ΓΕΡΜΑΝΟΣ, ΤΑ ΜΠΑΡΑΚΙΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, **Ευθύμιο Καρύμπαλη**, για την συμπαράσταση –υλική και ηθική- και την καθοδήγησή του σε όλόκληρο αυτό το διάστημα των έξι και πλέον χρόνων που διήρκεσε η διδακτορική μου έρευνα. Ο Θύμιος είναι ένας αφοσιωμένος επιστήμονας, ένας καλόκαρδος δάσκαλος και ένας ξεκαρδιστικού χιούμορ συνδαιτυμόνας και η συναναστροφή μας ήταν χαρά για μένα, όλο αυτό το διάστημα. Εύχομαι να συνεχιστεί και στο μέλλον η συνεργασία μας. Ευχαριστώ ακόμα τους άλλους καθηγητές της τριμελούς επιτροπής, τον **Χρίστο Χαλκιά**, και ιδιαίτερα τον **Νίκο Μαμάση** για τις καίριες επισημάνσεις του σε κρίσιμα σημεία της έρευνας. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τους υπόλοιπους καθηγητές της επταμελούς επιτροπής για την συνδρομή τους, τους **Νίκη Ευελπίδου**, **Εμμανουήλ Βασιλάκη**, **Ανδρέα Τσάτσαρη**, και ιδιαίτερα τον **Σεραφείμ Πούλο,** για τις παρατηρήσεις του πάνω στην δομή της εργασίας, στις οποίες βασίζεται η τελική διάρθρωση του παρόντος κειμένου.

Το αντικείμενο της έρευνας αυτής, η στερεοπαροχή των ποταμών, είναι ιδιαίτερα απαιτητικό καθώς απαιτεί εργασίες πεδίου και επιτόπιες μετρήσεις. Στις επισκέψεις μου στον Βουραϊκό ποταμό, που αριθμούν αισίως τις 27, συμμετείχαν συνολικά πάνω από 30 άτομα, οι περισσότεροι από το πρώην ΤΕΙ Αθήνας (σήμερα Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής) και το Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, αλλά κατά καιρούς και άνθρωποι που δεν έχουν καμμία σχέση με το γνωστικό αντικείμενο, όπως φίλοι και γνωστοί. Τα ονόματα όλων αναφέρονται στο παράρτημα «Ημερολόγιο μετρήσεων».

Ήμουν τυχερός να έχω την βοήθεια πολλών φοιτητών μου από το ΤΕΙ Αθήνας. Τους ευχαριστώ όλους. Ιδιαίτερα όμως πρέπει να αναφέρω τρεις από αυτούς που με συντρόφεψαν στο μεγαλύτερο μέρος των εργασιών πεδίου από την αρχή σχεδόν έως και το τέλος. Αυτούς τους τρεις, τον **Γιώργο Καρακώστα**, τον **Αλέξανδρο Ιορδάνου** και τον **Κώστα Χαρατσή** τους ευχαριστώ ιδιαίτερα από βάθος καρδιάς. Ξεχωριστά θα αναφέρω τον **Γιάννη Δικαιούλια**, απόφοιτο του τμήματος Τοπογραφίας του ΤΕΙ Αθήνας, που με τον ενθουσιασμό και την πληθωρική του παρουσία ηγήθηκε των εργασιών της απαιτητικής εργασίας αποτύπωσης με το LaserScanner και όχι μόνο.

Επίσης, πρέπει να αναφέρω τους ανθρώπους που μας στάθηκαν συμπαραστάτες στην Κάτω Ζαχλωρού όπου και καταλήγαμε σχεδόν κάθε φορά μετά τις μετρήσεις. Η οικογένεια του **Αντώνη** και της **Πόλυς Τριανταφύλλου** μας έκαναν να αισθανόμαστε σαν

το σπίτι μας και μας συνέδραμαν ουσιαστικά από την αρχή της γνωριμίας μας, διαθέτοντάς μας τα δωμάτια της πανσιόν τους και ανταμοίβοντας την δουλειά μας με τα εξαιρετικά εδέσματα της κουζίνας τους. Ο **Αντωνάκης Τριανταφύλλου**, μικρότερος γυιός, μας βοήθησε ιδιαιτέρως σε μετρήσεις. Τους ευχαριστώ ιδιαιτέρως. Επίσης, χρήσιμες πληροφορίες πήραμε από τον **Κ. Πλιατσικούρα**, παρατηρητή επί σειρά χρόνων του υδρομετρικού σταθμού της ΔΕΗ στη Κ. Ζαχλωρού.

Ακόμα ευχαριστώ τον **Κ.Τομπουζίδη**, Γεωλόγο του Φορέα Διαχείρισης Χελμού-Βουραϊκού με τον οποίον είχαμε μια χρήσιμη συνεργασία στην εγκατάσταση βροχομέτρου στο κτήριο του Φορέα στα Καλάβρυτα. Από τους συναδέλφους μου στο πρώην ΤΕΙ Αθήνας, πρέπει να ευχαριστήσω τον **Γιώργο Χλούπη**, αναπληρωτή καθηγητή, με τον οποίο κατασκευάσαμε διάφορα μετρητικά εργαλεία όπως σταθμημετρικούς σταθμούς και «έξυπνα» χαλίκια καθώς και τον **Θανάση Αυτουσμή**, ΕΤΕΠ του εργαστήριου Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Έργων Υποδομής ο οποίος μας διέθεσε το εργαστήριο και μας καθοδήγησε στις αναλύσεις. Η κα. **Marion Tissier**, αναπληρώτρια καθηγήτρια του TU Delft μας διέθεσε την αυθεντική βάση δεδομένων των Meyer-Peter και Mueller και την ευχαριστώ. Τέλος, ιδιαιτέρως ευχαριστώ τον **Ι. Κουβόπουλο** από τη Διεύθυνση Υ/Ε της ΔΕΗ για τη διάθεση των δεδομένων της Υπηρεσίας και τις ιδιαίτερα χρήσιμες υδρολογικές συμβουλές αντλημένες από την πολύτιμη εμπειρία του.

Σωτήρης Η. Καραλής

Αθήνα, Απρίλιος 2020

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1
1.1 ΟΡΙΣΜΟΙ 2
1.2 ΣΚΟΠΟΣ - ΣΤΟΧΟΙ 3
1.3 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ 4
1.4 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 5
1.5 STATE OF THE ART 12
1.5.1 Μοντέλα εκτίμησης εδαφικής απώλειας: ένα σύντομο ιστορικό 12
1.5.2 Εργαλεία και βάσεις δεδομένων κατά της απερήμωσης στην Ε.Ε. 16
1.5.3 Η χρήση της ΠΕΕΑ στην Ευρώπη και στην Ελλάδα 18
1.5.4 Άλλα μοντέλα εδαφικής απώλειας 20
1.5.5 Στατιστικά μοντέλα: επιλεκτική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας 22
1.5.6 Ερευνες εδαφικής απώλειας στην Ελλάδα 29
1.5.7 Στατιστικά μοντέλα στην Ελλάδα και διαθέσιμες μετρήσεις 33
1.5.8 Ερευνες με τηλεπισκοπικές μεθόδους 36
1.5.9 Πλούμια αιωρούμενου ιζήματος σε παράκτια ύδατα 37
2 ΘΕΩΡΙΑ 42
2.1 ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑ ΓΕΝΙΚΑ 42
2.1.1 Διάκριση του στερεοφορτίου 42
2.1.2 Βασική ορολογία 45
2.1.3 Συναρτήσεις μεταφοράς 49
2.1.4 Διαγράμματα από τη βάση δεδομένων των Meyer-Peter & Muller, 1948 50
2.1.5 Έναρξη κίνησης και συρτική τάση αναφοράς 51
2.1.6 Το μέγεθος των κόκκων – κλίμακες 52
2.1.7 Αιωρούμενο φορτίο - μονάδες 55
2.2 ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΟΙΤΗΣ 56
2.2.1 Το ζήτημα της ροής 56
2.2.2 Μη μόνιμη – ανομοιόμορφη ροή 57
2.2.3 Επιμερισμός της συρτικής τάσης 58
2.2.4 Μέθοδοι μέτρησης και τοπικότητα της συρτικής τάσης 59
2.2.5 Συνθήκη ίσης κινητικότητας 61
2.2.6 Η επιρροή της άμμου 61
2.2.7 Επιφανειακό στρώμα και υπόστρωμα 63
2.2.8 Μίγματα μικτού μεγέθους ιζηματος (πολυκλασματικά) 65
2.2.9 Συναρτήσεις απόκρυψης 66
2.2.10 Ανάπτυξη βαθμονομημένης καμπύλης παροχής-στερεοπαροχής 66
2.2.11 Τα μοντέλα του BAGS (Bedload Assessment for Gravel-bed Rivers) 70
2.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΦΟΡΤΙΟΥ ΑΠΟΠΛΥΣΗΣ 74
2.3.1 Πηγές και σύσταση του φορτίου 74
2.3.2 Μορφές διάβρωσης από το νερό 76
2.3.3 Γεωλογική και επιταχυνόμενη διάβρωση 80
2.3.4 Το πρόβλημα του συντελεστή στερεοαπορροής 84
2.4 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 94
2.4.1 Μορφομετρικοί δείκτες 95
2.4.2 Γενικές Παρατηρήσεις 97
2.4.3 Εργασία με δεδομένα τύπου ράστερ 99

2.4.4 Υψομετρική ανάλυση 100
2.4.5 Κοκκομετρία - Κροκαλομετρία 101
2.5 ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ 104
2.5.1 Τύποι ελέγχου σε υδατορεύματα και η καμπύλη σταθμης –παροχής 104
2.5.2 Έλεγχος αβεβαιότητας της καμπύλης σταθμης - παροχής 106
2.6 ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ – ΦΩΤΟΕΡΜΗΝΕΙΑ 107
2.6.1 Φασματικά χαρακτηριστικά του θαλασσινού νερού 107
2.6.2 Δείκτες αιωρούμενου ιζήματος 109
2.6.3 Μάσκες αιωρούμενου ιζήματος 111
2.6.4 Το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης 115
2.6.5 Σχετική ατμοσφαιρική διόρθωση 115
2.6.6 Σύγκριση μεταξύ των μεθόδων ατμοσφαιρικής διόρθωσης 117
3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ 119
3.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ 119
3.1.1 Αλπικό υπόβαθρο και γεωτεκτονικές ζώνες 119
3.1.2 Τεκτονισμός και γεωμορφολογική εξέλιξη 123
3.2 ΚΛΙΜΑ 126
3.2.1 Ατμοσφαιρικά Κατακρημνίσματα 128
3.2.2 Εξατμισοδιαπνοή και υδατικό ισοζύγιο 132
3.2.3 Υδατικό ισοζύγιο Thornthwaite 134
3.2.4 Κλιματικοί δείκτες Thornthwaite 136
3.3 ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΚΑΛΥΨΗ ΓΗΣ 139
3.3.1 Διοικητική διαίρεση – Δημογραφικά στοιχεία 139
3.3.2 Χρήσεις και κάλυψη γης 140
3.3.3 Δάση και δασικές εκτάσεις 141
3.3.4 Δορυφορικοί δείκτες βλάστησης και φαινολογία 142
3.3.5 Εδάφη 143
3.4 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ 146
4 ΔΕΔΟΜΕΝΑ, ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ 148
4.1 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ 149
4.2 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ 152
4.2.1 Υπολογισμός των δεικτών 154
4.2.2 Υψομετρία 160
4.2.3 Επιμήκεις τομές των κεντρικών κοιτών των ποταμών 161
4.2.4 Κροκαλομετρία 164
4.3 ΥΔΡΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ 166
4.3.1 Μέθοδοι και όργανα 166
4.4 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ 168
4.4.1 Ιστορικό και περιγραφή της θέσης Ζαχλωρού ΔΕΗ 168
4.4.2 Περιγραφή του ρεύματος στη θέση του υδρομετρικού σταθμού 171
4.4.3 Φαινομενολογία της καμπύλης στάθμης - παροχής. 173
4.4.4 Προσδιορισμός της σχέσης σταθμης - παροχής. 176
4.4.5 Συμπλήρωση των κενών και υδρολογική προσομοίωση 183
4.4.6 Διαχωρισμός των υδρογραφημάτων 188
4.4.7 Ανάλυση πλημμυρικών συχνοτήτων 188
4.4.8 Καμπύλη διάρκειας - παροχής 190
4.4.9 Υδραυλική γεωμετρία της διατομής 191

4.4.10 Στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών απορροής 192
4.4.11 Υδρολογικό καθεστώς 199
4.4.12 Η συμβολή των χιονοπτώσεων στο υδατικό ισοζύγιο 201
4.4.13 Δορυφορικά προϊόντα χιονοκάλυψης και προσομοιώσεις 202
4.5 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΕΣ ΦΕΡΤΩΝ - ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ 211
4.5.1 Ολοκληρωτικοί κατά το βάθος χειροκίνητοι δειγματολήπτες 211
4.5.2 Θολερόμετρα τύπου σωλήνα διαύγειας 213
4.5.3 Hydrolab MiniSonde5 215
4.5.4 Φορτίο κοίτης 216
4.5.5 Δειγματολήπτης Helley-Smith 218
4.5.6 Παγίδες φερτών υλικών 221
4.5.7 Έξυπνα χαλίκια - ιχνευτές 226
4.6 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ 229
4.6.1 Περιγραφή της θέσης Γεφυράκι Ζαχλωρούς 232
4.6.2 Το θολερόμετρο και οι καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής 234
4.7 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΠΥΘΜΕΝΑ 236
4.7.1 Περιγραφή της θέσης Γέφυρα Πλιατσικούρα 237
4.7.2 Βαθμονομημένη καμπύλη παροχής–στερεοπαροχής Γ. Πλιατσικούρα 241
4.7.3 Εξισώσεις του BAGS 244
4.8 ΓΕΩΡΟΕΣ – ΕΔΑΦΟΡΟΕΣ – ΡΗΧΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ 246
4.8.1 Ο προσχωματικός κώνος στην Ζαχλωρού 246
4.9 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΚΑΙ ΦΩΤΟΕΡΜΗΝΕΙΑΣ 250
4.9.1 Δέκτες και προϊόντα MODIS 252
4.9.2 Μεθοδολογία 255
4.9.3 Γεωγραφική έκταση της τηλεπισκοπικής έρευνας 258
4.9.4 Επιλογή των πρωτογενών δορυφορικών δεδομένων 260
4.9.5 Εφαρμογή της μεθόδου στη περιοχή μελέτης 262
4.9.6 Προγραμματισμός στην IDL 266
4.9.7 Πλεγματικά Δεδομένα βροχόπτωσης 268
4.9.8 Αλυσίδα επεξεργασίας εικόνων (flowchart) 269
4.10 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΕΜΠΕΙΡΙΚΟΥ - ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 273
4.10.1 Περιοχή μελέτης 273
4.10.2 Χρήση – κάλυψη γης 277
4.10.3 Γεωλογία – λιθολογία 278
4.10.4 Τεκτονισμός 278
4.10.5 Συσχετίσεις 281
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ 285
5.1 ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΟ ΚΑΙ ΠΥΘΜΕΝΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΟΝ ΒΟΥΡΑΪΚΟ 285
5.1.1 Αιωρούμενο φορτίο 285
5.1.2 Κατανομές ιζήματος 288
5.1.3 Φορτίο πυθμένα 291
5.1.4 Ανακεφαλαίωση 297
5.2 ΕΥΡΗΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ 302
5.2.1 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (Principal Components Analysis) 302
5.2.2 Προϊόντα MOD02 307
5.2.3 Προϊόν MOD09Q1 313
5.2.4 Προβλήματα και περιορισμοί 318

5.3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 319
5.3.1 Γραμμικά μοντέλα 319
5.3.2 Ακραίες (Outliers) και βαρύνουσες (leverage) τιμές 321
5.3.3 Κλίση λεκάνης 322
5.3.4 Κλίση–Βροχόπτωση–Λιθολογία–Γυμνό–Αλλούβια- Κατολισθήσεις 322
5.3.5 Κλίση–Βροχόπτωση–Λιθολογία 324
5.3.6 Τελικό μοντέλο 325
5.3.7 Το μοντέλο BQART 327
5.3.8 Ο ποταμός Αώος 331
5.4 ΣΥΖΗΤΗΣΗ 333
5.4.1 Εφαρμογή των μοντέλων 333
5.4.2 Σύγκριση με τηλεπισκόπηση & φωτοερμηνεία 334
6 ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 339
6.1 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΝΕΧΕΙΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ 345
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 347
8 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΗΜΕΡΟΛΟΓΙΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ 358
9 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ 364

Περίληψη

Η παρούσα εργασία κύριο σκοπό είχε την εκτίμηση του μεταφερόμενου φορτίου ιζήματος, αιωρούμενου και πυθμενικού, στην λεκάνη του Βουραϊκού ποταμού. Πιο ειδικά, η περιοχή μελέτης εντοπίστηκε μεταξύ των σταθμών του οδοντωτού σιδηροδρόμου Κερπινή (Χιλιομετρική θέση 18+000) και Κάτω Ζαχλωρού (Χιλιομετρική θέση 12+600). Για τον σκοπό αυτό υλοποιήθηκε ένα πρόγραμμα υδρομετρήσεων, μετρήσεων αιωρούμενου φορτίου, φορτίου πυθμένα και δειγματοληψιών κοίτης και διερχόμενου στερεοφορτίου το οποίο διήρκεσε περίπου 5 χρόνια (2013-2018), μέσα στα οποία έγιναν συνολικά 27 επισκέψεις. Τα υδρομετρικά δεδομένα προέρχονται από τον σταθμό της ΔΕΗ ανάντη της Ζαχλωρούς και συνίστανται σε συνεχή σταθμηγραφήματα του ποταμού για δύο διακριτές περιόδους, τις ενδεκαετίες 1980-1990 και 2004-2014, καθώς επίσης και τα στοιχεία των περίπου 330 υδρομετρήσεων που είχαν κάνει στη θέση αυτή τα συνεργεία της ΔΕΗ.

Για λόγους επαλήθευσης και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων αυτών, καθώς και για λόγους επέκτασης της έρευνας, αναπτύχθηκαν δύο ακόμα επιμέρους κατευθύνσεις της εργασίας. Η πρώτη χρησιμοποίησε μεθόδους και δεδομένα τηλεπισκόπησης και φωτοερμηνείας (ειδικότερα τα προϊόντα MOD02, MOD35 και MOD09Q1 του ραδιόμετρου MODIS της NASA), και επεκτάθηκε σε μεγάλο μέρος του ελλαδικού χώρου αλλά και εκτός αυτού (πιο ειδικά στους ποταμούς Σεμάν και Βγιόσε -Αώο- της Αλβανίας) καλύπτοντας 23 ποταμούς. Στόχος αυτής της έρευνας ήταν η συγκριτική ταξινόμηση του ιζηματολογικού δυναμικού των ποταμών αυτών μέσω της χρήσης δεικτών (γραμμικών συνδυασμών της ανακλαστικότητας στα κανάλια μπλέ, πράσινο, κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο), οι οποίοι ανιχνεύονταν μέσα σε ισάριθμα πολύγωνα, που σχεδιάστηκαν στις εκβολές των ποταμών αυτών στη θάλασσα, εκεί όπου σχηματίζονται τα πλούμιά τους μετά από τις μεγάλες πλημμύρες. Σε συνδυασμό με πλεγματικά δεδομένα βροχόπτωσης για την χρονική περίοδο 2004-2014 προέκυψαν αρκετά ενδιαφέροντα συμπεράσματα σε σχέση με την στερεοπαραγωγικότητα των ποταμών καθώς και ένας «άτλας» διάβρωσης του Ελληνικού χώρου.

Η δεύτερη κατεύθυνση που πήρε η έρευνα επιδίωξε την κατασκευή ενός εμπειρικού στατιστικού μοντέλου μέσω της ανάλυσης των συσχετίσεων των μετρημένων στερεοαπορροών σε 11 σταθμούς, σε έξι μεγάλους ποταμούς της Β. και ΒΔ Ελλάδας, έτσι

όπως δημοσιεύτηκαν από τους Ζαρρής κ.ά (2007), με μια πληθώρα παραμέτρων (~40) που προέκυψαν από την ανάλυση των λεκανών απορροής. Από τους παράγοντες αυτούς, οι πιο σημαντικοί αποδείχτηκε ότι είναι η μορφολογική κλίση, η λιθολογία της λεκάνης απορροής (ευδιάβρωτα πετρώματα όπως, κυρίως, ο φλύσχης) και η βροχόπτωση, με τους οποίους και κατασκευάστηκε το τελικό μοντέλο. Δοκιμάστηκαν και αξιολογήθηκαν σε αυτή την φάση και υφιστάμενα μοντέλα, όπως το BQART των Syvitski-Milliman (2007) και οι χάρτες της μεθόδου RUSLE2015 όπως δημοσιεύτηκαν πρόσφατα από το European Soil Data Center (Panagos et al., 2015).

Στο τέλος της εργασίας επιχειρείται η σύνθεση των παραπάνω αποτελεσμάτων και η εξαγωγή κάποιων γενικών συμπερασμάτων για τον Ελλαδικό χώρο.

Λέξεις κλειδιά: Μοντέλα στερεοαπορροής, φορτίο πυθμένα, τηλεπισκόπηση, ορεινές λεκάνες απορροής, Βουραϊκός ποταμός.

Abstract

The main objective of this thesis (DEVELOPMENT OF SEDIMENT TRANSPORT MODELS FOR GREEK MOUNTAINOUS CATCHMENTS FOCUSING ON VOURAIKOS RIVER CATCHMENT, NORTH PELOPONNESE) was to study qualitatively and quantitatively sediment transport in Vouraikos river, Greece, and the associated processes of soil/hillslope erosion. For this purpose a 5-year measurement program was scheduled and implemented by the writter and by personnel of two Universities, Harokopio University of Athens (HUA) and TEI Athens (now University of West Attica, UNIWA), and instrumented by a variety of devices and instruments, some of them home-made. From the reconnaissance visit in June 12, 2012, up to the last visit, in March 31, 2018, a total of 27 field visits were made.

Inevitably, for comparison and validation purposes, two other studies evolved as side-projects of the main objective stated initially. The first was a remote sensing study of 23 rivers of the penishula, where the objective was a comparative analysis of the rivers' sediment transport potential and seasonality. The second was the development of empirical statistical models (equations) for prediction of specific suspended sediment yield for mountainous basins of Greece.

Concerning the remote sensing study, 669 Level 1B Modis images (MOD02) were downloaded and processed. Equal-area polygons drawn in the mouth of the selected rivers were used as regions of interest and the suspended sediment load of each river was assessed with the use of indices, ratios and masks involving all 3 visible channels and NIR. Thus, the rivers were ranked according to their suspended sediment delivery, seasonal patterns of sediment discharge from the basins were assessed, effect of sand and dust storms on sediment productivity were identified and a "sediment atlas" was cosntructed. In a latter stage, product MOD09Q1, a level 3, 8-day composite was also used for the whole period of the platform's life, including the whole series of this product from 2000 to 2019 covering, this time, 23 rivers (including also Albanian rivers Vjose and Seman). In-depth analysis was based on MOD02 but final ranking was based on MOD09Q1.

Considering the empirical model development, the controls over suspended sediment yield in 11 stations situated along 6 major rivers of Western – Northern Greece (Arachthos, Achelooos, Evinos, Aoos, Kalamas and Aliakmon) were explored. The principal

controls were found to be slope and lithology followed by precipitation, runoff and landslide frequency. A model was built with the use of stepwise multiple regression analysis, that employed three variables: slope (in percent), precipitation (mean annual, in mm) and lithology (as percentage of the easily erodible geological formations within the catchment), where the contribution of lithology is an additive exponential term to the slope-precipitation power relationship. The proposed model achieves good statistics (NSE=0.84). From the other models tested with our dataset, BQART performs well, while RUSLE2015 of the ESDC performs poor.

Finally, overall results were recapitulated and synthesized, problems and limitations were discussed and proposals for further study were made.

Keywords: Sediment transport models, bedload, remote sensing, mountainous catchments, Vouraikos river.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1 Ξερολιθιές στην Τήνο. 1
Σχήμα 1-2 Οι πέντε λεκάνες απορροής της *ευρύτερης περιοχής μελέτης*. 5
Σχήμα 1-3 Φωτογραφίες και διαδρομή του Οδοντωτού 11
Σχήμα 1-4 Το ερμηνευτικό πλαίσιο του μοντέλου USLE 15
Σχήμα 1-5 Εκτιμώμενη ετήσια διάβρωση στη Μεσόγειο από τον χάρτη του PESERA 16
Σχήμα 1-6 Χάρτης του ρυθμού διάβρωσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση (2010) 19
Σχήμα 1-7 Η σχέση της στερεοαπορροής με την βροχόπτωση της λεκάνης 25
Σχήμα 1-8 Επίδραση του λιθολογικού υποβάθρου στην στερεοαπορροή..... 26
Σχήμα 1-9 Σεισμική και ηφαιστειακή δραστηριότητα στην Μεσόγειο..... 27
Σχήμα 1-10 Το μοντέλο WANSY2-D της Ν.Ζηλανδίας. 28
Σχήμα 1-11 Σύγκριση μεθόδων κατασκευής της καμπύλης παροχής - στερεοπαροχής.. 34
Σχήμα 2-1 Διάκριση του στερεοφορτίου κατά προέλευση και μηχανισμό μεταφοράς... 42
Σχήμα 2-2 Μηχανισμοί μεταφοράς του φορτίου υλικού πυθμένα. 43
Σχήμα 2-3 Η διάκριση με βάση την προέλευση του στερεοφορτίου 44
Σχήμα 2-4 Η καμπύλη έναρξης κίνησης του Shields 47
Σχήμα 2-5 Τροποποιημένο διάγραμμα Shields.. 48
Σχήμα 2-6 Διαγράμματα στερεομεταφοράς Meyer-Peter & Muller.. 51
Σχήμα 2-7 Κατανομές μεγέθους ιζήματος πυθμένα και συρτικές τάσεις 62
Σχήμα 2-8 Η επιρροή της άμμου του πυθμένα στις συρτικές τάσεις αναφοράς 62
Σχήμα 2-9 Η θωράκιση του πυθμένα 64
Σχήμα 2-10 Σύγκριση των τριών «πληθυσμών» ιζήματος 64
Σχήμα 2-11 Εκτίμηση του στερεοφορτίου των μεγαλύτερων ποταμών του κόσμου 75
Σχήμα 2-12 Σχηματοποίηση των κύριων μορφών διάβρωσης 76
Σχήμα 2-13 Ταξινόμηση γεωλισθήσεων με κριτήρια ταχύτητας κίνησης και υγρασίας . 78
Σχήμα 2-14 Ταξινόμηση κατολισθητικών τύπων κατά Varnes 79
Σχήμα 2-15 Στήλες χρονολόγησης και στρωματογραφία από Ερμιόνη και από την Αργολική πεδιάδα..... 82
Σχήμα 2-16 Χρονολόγηση των επεισοδίων αλλουβιακών αποθέσεων σε ηπειρωτική Ελλάδα και Αιγαίο..... 83
Σχήμα 2-17 Χρονικές κλίμακες για διαφορετικές εστίες προσφοράς ιζήματος σε λεκάνες απορροής..... 84
Σχήμα 2-18 Σχέση του συντελεστή στερεοαπορροής με το εμβαδόν της λεκάνης..... 86
Σχήμα 2-19 Χρονικές ασυνέχειες στην μεταφορά ιζήματος. 88
Σχήμα 2-20 Σκαρίφημα ορισμού της εξαγωγής αδιάστατης υψομετρικής καμπύλης.. 100
Σχήμα 2-21 Οι τρεις θεωρητικοί άξονες ενός βότσαλου 102
Σχήμα 2-22 Χαρακτηριστικές μορφές της καμπύλης στάθμης – παροχής 105
Σχήμα 2-23 Τυπικά αποτελέσματα παρουσίας αιωρούμενων ανόργανων στερεών και χλωροφύλλης στο θαλασσινό νερό..... 108
Σχήμα 2-24 Η διείσδυση του ηλιακού φωτός στο νερό 109
Σχήμα 2-25 Φασματικές καμπύλες νερού με διαφορετικές συγκεντρώσεις 110
Σχήμα 2-26 Παράδειγμα φάσματος φαινόμενης ανακλαστικότητας..... 112
Σχήμα 2-27 Σκηνή από τον MODIS πάνω από τις ανατολικές ακτές της Κίνας..... 113
Σχήμα 2-28 Διάγραμμα της φαινόμενης ανακλαστικότητας συναρτήσει του μήκους κύματος..... 113

Σχήμα 2-29 Διαφορές φαινόμενης ανακλαστικότητας για διαφορετικά μήκη κύματος 114
Σχήμα 2-30 Απόδοση της μάσκας αιωρούμενου ιζήματος – ρηχών νερών 114
Σχήμα 3-1 Διανομή των ζωνών Πίνδου και Τριπόλεως στην Πελοπόννησο. 119
Σχήμα 3-2 Τυπική στρωματογραφία της ζώνης Πίνδου. 121
Σχήμα 3-3 Λιθολογικοί σχηματισμοί της λεκάνης του Βουραϊκού ποταμού 122
Σχήμα 3-4 Σχηματική τομή εγκάρσια στην τάφρο του Κορινθιακού 124
Σχήμα 3-5 Προφίλ των ποταμοχειμάρρων που εκβάλλουν στον Κορινθιακό κόλπό 125
Σχήμα 3-6 Κλιμογράμματα για τους σταθμούς Καλαβρύτων 129
Σχήμα 3-7 Βροχοπτώσεις στους 3 σταθμούς της ΔΕΗ 130
Σχήμα 3-8 Στατιστικά διαγράμματα για την βροχόπτωση στην λεκάνη απορροής 131
Σχήμα 3-9 Σύγκριση των υπολογισμένων τιμών ετήσιας ΔΕ 133
Σχήμα 3-10 Αλγόριθμος του μοντέλου Thornewaite της USGS. 136
Σχήμα 3-11 Διαγράμματα υδατικού ισοζυγίου κατά Thornthwaite 138
Σχήμα 3-12 Χάρτης χρήσης - κάλυψης γης της ευρύτερης περιοχής μελέτης 140
Σχήμα 3-13 Κατάταξη εδαφών της περιοχής μελέτης κατά FAO, 1998. 143
Σχήμα 3-14 Κυτιόγραμμα του EVI για την περιοχή των Καλαβρύτων 144
Σχήμα 3-15 Απώλεια δασών και δασικών εκτάσεων στις πυρκαγιές του 2007/2008 145
Σχήμα 4-1 Οι θέσεις των μετρήσεων 148
Σχήμα 4-2 Προοπτική θέα της περιοχής μετρήσεων. 149
Σχήμα 4-3 Φωτογραφίες από τις εργασίες αποτυπώσεων 150
Σχήμα 4-4 Οι λογάριθμοι της υδρογραφικής πυκνότητας ανά τάξη 153
Σχήμα 4-5 Τρείς αδιάστατοι σύνθετοι δείκτες για τις λεκάνες της περιοχής μελέτης. 155
Σχήμα 4-6 Διαγράμματα συσχέτισης για κάποιους επιλεγμένους δείκτες. 156
Σχήμα 4-7 Λόγοι διακλάδωσης ανά τάξη και λεκάνη απορροής. 157
Σχήμα 4-8 Λόγοι μηκών ανά τάξη και λεκάνη απορροής. 158
Σχήμα 4-9 Ανάλυση κατά Horton 160
Σχήμα 4-10 Δείκτης αποστρογγύλωσης για τις 4 μετρηθείσες θέσεις 164
Σχήμα 4-11 Σύνοψη αποτελεσμάτων της κροκαλομετρίας σε 4 θέσεις του ποταμού 165
Σχήμα 4-12 Υψομετρικές καμπύλες. 161
Σχήμα 4-13 Μηκοτομές των 4 ποταμών της ευρύτερης περιοχής μελέτης. 162
Σχήμα 4-14 Μηκοτομή του Βουραϊκού και των κυρίων παραποτάμων του. 162
Σχήμα 4-15 Μέτρηση προφίλ ταχυτήτων στη θέση Αυλές 15/12/2013 166
Σχήμα 4-16 Μέτρηση ταχυτήτων με τον μυλίσκο στη θέση Ζαχλωρού ΔΕΗ 167
Σχήμα 4-17 Η λεκάνη απορροής του Βουραϊκού ποταμού 169
Σχήμα 4-18 Ο υδρομετρικός σταθμός της ΔΕΗ στην Ζαχλωρού 170
Σχήμα 4-19 Τυπολογία φυσικών ποτάμιων ρευμάτων σε χαμηλά νερά 172
Σχήμα 4-20 Διαγράμματα διασποράς των υδρομετρήσεων ανά μήνα 174
Σχήμα 4-21 Ζεύγη στάθμης-παροχής για όλες τις υδρομετρήσεις της ΔΕΗ Ζαχλωρού 175
Σχήμα 4-22 Οι υδρομετρήσεις της δεκαετίας του ’80 178
Σχήμα 4-23 Οι υδρομετρήσεις της δεκαετίας του 2000. 179
Σχήμα 4-24 Διαγράμματα ταχύτητας και διατομής έναντι της στάθμης. 180
Σχήμα 4-25 Η καμπύλη στάθμης – παροχής που υιοθετήθηκε 182
Σχήμα 4-26 Εννοιολογικό διάγραμμα του IHACRES 185
Σχήμα 4-27 Περίοδος βαθμονόμησης του μοντέλου IHACRES 185
Σχήμα 4-28 Υετογράφημα και υδρογράφημα για την περίοδο 2004-2014 186
Σχήμα 4-29 Προσομοιωμένοκαι παρατηρούμενο υδρογράφημα. 187
Σχήμα 4-30 Διάγραμμα περιόδου επαναφοράς – πλημμυρικής παροχής Βουραϊκού 189

Σχήμα 4-31 Σχέσεις μεγέθους απορροής με περίοδο επαναφοράς 190
Σχήμα 4-32 Καμπύλες διάρκειας-παροχής για τις δύο περιόδους απορροών..... 191
Σχήμα 4-33 Σχέσεις υδραυλικής γεωμετρίας στην θέση Ζαχλωρού ΔΕΗ 192
Σχήμα 4-34 Στατιστικά διαγράμματα της απορροής (1980-1990)..... 193
Σχήμα 4-35 Στατιστικά διαγράμματα της απορροής (2004-2014)..... 194
Σχήμα 4-36 Διάρκεια (σε ημέρες) των περιόδων υψηλών απορροών ανά μήνα..... 195
Σχήμα 4-37 Διάρκεια (σε ημέρες) των περιόδων χαμηλών απορροών ανά μήνα. 196
Σχήμα 4-38 Δείκτης βασικής ροής ανά έτος..... 197
Σχήμα 4-39 Δείκτης βασικής ροής ανά μήνα 198
Σχήμα 4-40 Μηνιαίο κλάσμα απορροής και μηνιαίος συντελεστής απορροής 200
Σχήμα 4-41 Παρουσίαση της μεθόδου εξαγωγής χρονοσειράς χιονοκάλυψης. 204
Σχήμα 4-42 Υψομετρικές ζώνες της περιοχής μελέτης 205
Σχήμα 4-43 Μηνιαία ποσοστά χιονοκάλυψης ανα ζώνη 206
Σχήμα 4-44 Πλήρης χρονοσειρά χιονοκάλυψης της λεκάνης του Βουραϊκού ποταμού 207
Σχήμα 4-45 Αποτελέσματα της προσομοίωσης της λεκάνης με το SRM 2004-2005..... 208
Σχήμα 4-46 Διαχωρισμός του υδρογραφήματος σε τρεις συνιστώσες 209
Σχήμα 4-47 Η συμβολή των τριών συνιστωσών σε μακροπρόθεσμη βάση ανά μήνα... 210
Σχήμα 4-48 Ο δειγματολήπτης αιωρούμενου ιζήματος DH48..... 212
Σχήμα 4-49 Θολερόμετρο τύπου σωλήνα διαύγειας (transparency tube)..... 214
Σχήμα 4-50 MiniSonde5 σε διαδικασία μέτρησης 215
Σχήμα 4-51 Χρονικές διακυμάνσεις ρυθμού μεταφοράς φορτίου πυθμένα 216
Σχήμα 4-52 Σύγκριση της αθροιστικής συνάρτησης πιθανότητας των ρυθμών μεταφοράς φορτίου πυθμένα από τον Einstein (1937) και τον Hamamori (1962) 217
Σχήμα 4-53 Παράδειγματα πιθανών κατανομών μέσων ρυθμών μεταφοράς..... 218
Σχήμα 4-54 Δειγματολήπτης φορτίου πυθμένα Helley-Smith..... 219
Σχήμα 4-55 Παγίδα τύπου Bunte..... 222
Σχήμα 4-56 Ο δειγματολήπτης και η πρωτότυπη παγίδα..... 223
Σχήμα 4-57 Η τοποθέτηση και η εξαγωγή παγίδων..... 224
Σχήμα 4-58 Η προετοιμασία των έξυπνων χαλικιών..... 225
Σχήμα 4-59 Αριστερά, τεχνητά χαλίκια. Δεξιά, βαμμένα χαλίκια δύο μεγεθών. 228
Σχήμα 4-60 Φωτογραφία από τη θέση γεφυράκι Ζαχλωρούς..... 231
Σχήμα 4-61 Τεκμηρίωση της θέσης Ζαχλωρού γεφυράκι..... 233
Σχήμα 4-62 Η καμπύλη παροχής - στερεοπαροχής αιωρούμενων..... 234
Σχήμα 4-63 Η καμπύλη ανάγνωσης θολερόμετρου-συγκέντρωσης..... 235
Σχήμα 4-64 Υδρογράφημα με δύο τιμές συγκεντρώσεων 236
Σχήμα 4-65 Φωτογραφία αμέσως ανάντη της Γ. Πλιατσικούρα κοιτώντας κατάντη..... 238
Σχήμα 4-66 Φωτογραφίες από τη θέση Γέφυρα Πλιατσικούρα στις 25/2/2018..... 239
Σχήμα 4-67 Μηκοτομή (επάνω) και οριζοντιογραφία(κάτω) του ποταμού από το RAS 240
Σχήμα 4-68 Σχέση μέσης ταχύτητας με την παροχή από τις 9 υδρομετρήσεις. 242
Σχήμα 4-69 Σύγκριση των εξισώσεων με τις μετρήσεις..... 244
Σχήμα 4-70 Σύγκριση των 5 εξισώσεων πυθμενικού φορτίου με τις μετρήσεις. 246
Σχήμα 4-71 Ο προσχωματικός κώνος στην αποτύπωση με το Laser scanner. 247
Σχήμα 4-72 Η λεκάνη που τροφοδοτεί τον προσχωματικό κώνο. 248
Σχήμα 4-73 Επάνω, φωτογραφία του κώνου που δημιουργείται από τις εδαφοροές .. 249
Σχήμα 4-74 Χρονοσειρά υψομετρικής διαφοράς αναγνώσεων δύο σταθμημέτρων..... 250
Σχήμα 4-75 Σχηματική διάταξη λειτουργίας υπερφασματικού σαρωτή (MODIS) 254
Σχήμα 4-76 Η περιοχή τηλεπισκοπικής έρευνας..... 259

Σχήμα 4-77 Η δομή αποθήκευσης των πρωτογενών δεδομένων στο δίσκο 261
Σχήμα 4-78 Μερικές από τις «καλές» τελικές εικόνες. 270
Σχήμα 4-79 Η διαδικασία της ατμοσφαιρικής διόρθωσης 271
Σχήμα 4-80 Δεξιά, η μάσκα νέφωσης για την εικόνα αριστερά. 272
Σχήμα 4-81 Χάρτης γεωγραφικής θέσης των λεκανών απορροής που μελετήθηκαν.... 274
Σχήμα 4-82 Χάρτες γεωγραφικής κατανομής 1635 σημαντικών κατολισθήσεων 281
Σχήμα 5-1 Μέση ετήσια στερεοπαροχή αιωρούμενου φορτίου από τις 2 καμπύλες παροχής - στερεοπαροχής και την εξίσωση Ryan – Emmet, για τις δύο περιόδους..... 286
Σχήμα 5-2 Ετήσια και μηνιαία κυτιογραφήματα αιωρούμενου φορτίου..... 287
Σχήμα 5-3 Σύγκριση αθροιστικών κατανομών για δύο θέσεις 290
Σχήμα 5-4 Σύγκριση κατανομών 2 δειγμάτων φορτίου με τις κατανομές χαλικομέτρησης και χύδην δείγματος για το Γ.Πλιατσικούρα 290
Σχήμα 5-5 Σύγκριση των 5 μοντέλων πυθμενικού φορτίου..... 292
Σχήμα 5-6 Ημερήσιο υδρογράφημα και μηνιαίες απορροές πυθμενικού φορτίου 293
Σχήμα 5-7 Μηνιαία και ετήσια κυτιογραφήματα για το φορτίο πυθμένα..... 294
Σχήμα 5-8 Ο δειγματολήπτης δεν καλύπτει την ζώνη πάνω από τον πυθμένα. 295
Σχήμα 5-9 Διάγραμμα αθροιστικού νερού – ιζήματος - χρόνου..... 296
Σχήμα 5-10 Διάγραμμα παροχής πυθμενικού φορτίου–συχνότητας απορροών..... 297
Σχήμα 5-11 Συμβολή του παραποτάμου Κερπινής στον Βουραϊκό ποταμό..... 299
Σχήμα 5-12 Η περιοχή της συμβολής. 300
Σχήμα 5-13 Στρωματογραφία της περιοχής..... 301
Σχήμα 5-14 Απόδοση δεικτών/μασκών στην χαρτογράφηση και οριοθέτηση αντίστοιχα, των πλουμίων τριών ποταμών 304
Σχήμα 5-15 Φασματική τομή σε πλούμιο στις εκβολές του Πηνειού ποταμού 305
Σχήμα 5-16 Η πορεία ενός δείκτη (NSMI) κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου..... 306
Σχήμα 5-17 Κατάταξη των ποταμών με την χρήση 3 δεικτών..... 309
Σχήμα 5-18 Κατάταξη των μηνών ως προς την παραγωγή αιωρούμενου ιζήματος. 310
Σχήμα 5-19 Χρονοσειρά δείκτη NDSSI ανά mm βροχής..... 311
Σχήμα 5-20 Δύο εικόνες MODIS 312
Σχήμα 5-21 Σύγκριση στερεοαπορροής για τρεις γεωγραφικές ομάδες ποταμών. 313
Σχήμα 5-22: Κατάταξη δυναμικότητας ποταμών ως προς δύο κανάλια. 313
Σχήμα 5-23 Κατάταξη ποταμών ως προς 3 μεγέθη..... 315
Σχήμα 5-24 Συνοπτικός ‘‘άτλας’’ αποτελεσμάτων. 316
Σχήμα 5-25 Κυτιογραφήματα τριών δεικτών για τις 17 λεκάνες απορροής. 317
Σχήμα 5-26 Εικόνα MODIS της 16ης Μαρτίου 2013 περιοχή Κορινθιακού-Πατραϊκού.. 318
Σχήμα 5-27 Διαγράμματα διασποράς της στερεοαπορροής..... 319
Σχήμα 5-28 Η σχέση της στερεοαπορροής με την βροχόπτωση..... 320
Σχήμα 5-29 Οι πιό βαρύνουσες παρατηρήσεις..... 321
Σχήμα 5-30 Σχετική σημασία των 6 σημαντικότερων παραμέτρων από την συνάρτηση relativeweights της R 323
Σχήμα 5-31 Σχετική σημασία των μεταβλητών 324
Σχήμα 5-32 Υπόθεση - εξίσωση εκθετικής συνεισφοράς φλύσχη στα υπόλοιπα 326
Σχήμα 5-33 Σύγκριση των μετρημένων τιμών στερεοαπορροής και των προβλέψεων από 5 εξισώσεις..... 330

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-1 Τα κυριώτερα ευρωπαϊκά προγράμματα για την απώλεια εδαφών 17
Πίνακας 1-2 Κατηγοριοποίηση μοντέλων εδαφικής διάβρωσης..... 20
Πίνακας 1-3 Βασικά χαρακτηριστικά μερικών από τα μοντέλα εδαφικής απώλειας 21
Πίνακας 1-4 Στοιχεία αιωρούμενων φορτίων και στερεοαπορροής..... 24
Πίνακας 1-5 Κάποιες μελέτες εδαφικής διάβρωσης και στερεομεταφοράς σε Ελλάδα.. 30
Πίνακας 1-6 Εκτιμήσεις στερεοαπορροής των λεκανών της ΔΕΗ από διαφορετικούς ερευνητές..... 35
Πίνακας 2-1 Ταξινόμηση και ονοματολογία ιζηματογενών κόκκων..... 54
Πίνακας 2-2 Οι ορισμοί των γεωμετρικών μέσων για πολυκλασματικές κατανομές 55
Πίνακας 2-3 Απαιτούμενα δεδομένα εισόδου για τα μοντέλα του BAGS..... 70
Πίνακας 2-4 Τα μοντέλα του BAGS..... 73
Πίνακας 2-5 Τυπολογία κατολισθητικών φαινομένων κατά Varnes 78
Πίνακας 2-6 Παραδείγματα εξισώσεων συσχέτισης του λόγου στερεομεταφοράς με ορισμένα χαρακτηριστικά της λεκάνης. 87
Πίνακας 2-7 Κατάταξη μοντέλων ως προς τη δομή και τη χωρική τους διάσταση 92
Πίνακας 2-8 Καταλληλότητα μοντέλων σε σχέση με τους επιδιωκόμενους σκοπούς 93
Πίνακας 2-9 Μορφομετρικές παράμετροι, τύποι υπολογισμού και μονάδες μετρησης. 96
Πίνακας 2-10 Δείκτες περιγραφικοί της μορφής των βότσαλων..... 103
Πίνακας 2-11 Κάποιοι από τους δείκτες / λόγους αιωρούμενου ιζήματος..... 110
Πίνακας 3-1 Μετεωρολογικές χρονοσειρές που χρησιμοποιήθηκαν..... 127
Πίνακας 3-2 Μέθοδοι υπολογισμού της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής..... 133
Πίνακας 3-3 Δείκτες θερμικού καθεστώτος και υγρασίας κατά Thornthwaite..... 137
Πίνακας 3-4 Ποσοστιαία κατανομή γενικευμένων κατηγοριών χρήσης-κάλυψης γης.. 140
Πίνακας 3-5 Η εδαφοκάλυψη των λεκανών Βουραϊκού και Σελινούντα το 1939..... 142
Πίνακας 4-1 Συγκεντρωτική κατάσταση των τοπογραφικών αποτυπώσεων..... 150
Πίνακας 4-2 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών μεθόδων μέτρησης βασικών γεωμετρικών μεγεθών. 153
Πίνακας 4-3 Τα βασικά γεωμορφολογικά μεγέθη των λεκανών απορροής..... 153
Πίνακας 4-4 Τιμές 26 μορφομετρικών παραμέτρων για λεκάνες της περιοχής μελέτης154
Πίνακας 4-5 Αναλυτικά αποτελέσματα της τοπολογίας των υδρογραφικών δικτύων .. 159
Πίνακας 4-6 Σύγκριση παροχών που δίνουν οι καμπύλες στάθμης - παροχής..... 181
Πίνακας 4-7 Στατιστικά μεγέθη της καμπύλης σταθμης - παροχής 1980-1990 183
Πίνακας 4-8 Στατιστικά μεγέθη της καμπύλης σταθμης - παροχής 2004-2014. 183
Πίνακας 4-9 Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συχνοτήτων βροχοπτώσεων..... 189
Πίνακας 4-10 Τιμές του ράστερ χιονοκάλυψης 203
Πίνακας 4-11 Σχέσεις έντασης δειγματοληψίας Helley-Smith - παγίδας φερτών 221
Πίνακας 4-12 Δεδομένα μετρήσεων στη θέση Ζαχλωρού γεφυράκι. 232
Πίνακας 4-13 Δειγματοληψίες αιωρούμενου ιζήματος με τον δειγματολήπτη DH48... 232
Πίνακας 4-14 Τα διαθέσιμα δεδομένα για την θέση Γ. Πλιατσικούρα..... 240
Πίνακας 4-15 Στοιχεία στερεοϋδρομετρήσεων στην Γ. Πλιατσικούρα..... 241
Πίνακας 4-16 Αποσπάσματα του φύλλου εργασίας του excel όπου αναπτύσσεται ο υπολογισμός των παραμέτρων της συνάρτησης μεταφοράς..... 243
Πίνακας 4-17 Τα δεδομένα εισόδου στις εξισώσεις του BAGS..... 245
Πίνακας 4-18 Κανάλια του MODIS και κύρια χρήση τους..... 256

Πίνακας 4-19 Κύρια προϊόντα του MODIS 257
Πίνακας 4-20 Τα επιλεγέντα 4 φωτεινά σημεία ελέγχου 264
Πίνακας 4-21 Τα στοιχεία που αναλύθηκαν ως ερμηνευτικές μεταβλητές 273
Πίνακας 4-22 Οι θέσεις των σταθμών των στερεοϋδρομετρήσεων..... 275
Πίνακας 4-23 Υδρολογικές- γεωμορφολογικές παραμέτροι των λεκανών απορροής... 276
Πίνακας 4-24 Κατηγοριοποίηση και κατανομή γεωλογικών σχηματισμών-3 έρευνες . 279
Πίνακας 4-2**5** Τιμές των κύριων μεταβλητών για τις λεκάνες της έρευνας[a]..... 280
Πίνακας 4-26 Οι συσχετίσεις μεταξύ των σημαντικότερων μεταβλητών..... 282
Πίνακας 5-1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμών αιωρούμενου φορτίου..... 285
Πίνακας 5-2 Τα εμβαδά των λεκανών στις θέσεις των μετρήσεων. 288
Πίνακας 5-3 Πιθανές εκδοχές της στερεοαπορροής αιωρούμενου 288
Πίνακας 5-4 Συγκεντρωτική κατάσταση των δειγματοληψιών κοίτης και όχθών..... 289
Πίνακας 5-5 Αποτελέσματα στερεοπαροχής πυθμενικού φορτίου από 5 εξισώσεις. ... 292
Πίνακας 5-6 Δεδομένα εισόδου στις εξισώσεις του BAGS 292
Πίνακας 5-7 Ανάλυση αποτελεσμάτων της πρώτης κύριας συνιστώσας 303
Πίνακας 5-8 Εύρη τιμών για τους χρησιμοποιούμενους δείκτες 305
Πίνακας 5-9 Πίνακας συσχετίσεων για τον Βουραϊκό..... 307
Πίνακας 5-10 Συγκεντρωτικός Πίνακας εξισώσεων - δείκτες καλής προσαρμογής..... 327
Πίνακας 5-11 Τιμές παραμέτρων & αποτελέσματα από εφαρμογή του BQART..... 329
Πίνακας 5-12 Τιμές παραγόντων & αποτελέσματα - μοντέλο BQART (λεκάνες ΔΕΗ).... 330
Πίνακας 5-13 Τιμές παραμέτρων και αποτελέσματα από εφαρμογή των Εξ. 5-6/5-7... 334
Πίνακας 5-14 Ορισμός των μασκών και του δείκτη που χρησιμοποιήθηκε..... 334
Πίνακας 5-15 Σύγκριση αποτελεσμάτων της Εξίσωσης 5-7 με προηγούμενες έρευνες. 335
Πίνακας 5-16 Σύγκριση διαφορετικών μοντέλων με ευρήματα τηλεπισκόπησης..... 336

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διάβρωση του εδάφους από το τρεχούμενο νερό, ή *υδατική διάβρωση*, έχει αναγνωριστεί παγκοσμίως σαν ένας από τους κύριους κινδύνους υποβάθμισης των γαιών. Η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε) έχει αναγνωρίσει την αντιμετώπιση της διάβρωσης σαν βασική προτεραιότητα προστασίας των εδαφών και εκτιμά το κόστος της σε αρκετά δις Ευρώ ετησίως. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα εδάφη στις Μεσογειακές χώρες και κυρίως σε περιοχές με ακατάλληλη διαχείριση εδάφους, με εγκατάλειψη καλλιεργειών, με εντατική οδοποιΐα και συχνές πυρκαγιές. Ο κάθε ένας από τους παραπάνω παράγοντες μόνος του ή/και σε συνδυασμό με το ξηρό κλίμα και την σφοδρότητα και εποχιακότητα των βροχοπτώσεων προκαλεί σοβαρά επιταχυνόμενη διάβρωση.

Σχήμα 1-1 Οι ξερολιθιές ή πεζούλες, προϊόν κοπιαστικής εργασίας, απαντώνται σε όλο τον πλανήτη και σκοπό έχουν την προστασία του ορεινού εδάφους από τη διάβρωση και την απόδοσή του στην γεωργία. Η φωτογραφία είναι από την Τήνο.

Τα κλάσματα του μητρικού πετρώματος/εδάφους που αποσπώνται από την κρουστική και συρτική δράση τόσο του πίπτοντος όσο και του ρέοντος νερού (βροχόπτωση και επιφανειακή απορροή), τα προϊόντα δηλαδή της υδατικής διάβρωσης, καταλήγουν -εν μέρει- στο υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής και μεταφέρονται στα κατάντη σε αποστάσεις που, κάθε φορά, είναι γενικά ανάλογες με τον όγκο τους και την ισχύ της ροής που τα μεταφέρει. Η στερεομεταφορά των προϊόντων της διάβρωσης από τους ποταμούς είναι ο βασικός παράγοντας διαμόρφωσης του γήινου αναγλύφου. Το θεωρητικό τέλος αυτής της διεργασίας είναι το πανεπίπεδο, το οποίο μπορεί να οριστεί ως μια πεδιάδα με

ομαλό ανάλυφο, αποτέλεσμα της μεταφοράς των ποταμών, που τείνει να χαμηλώσει το επίπεδο της χέρσου μέχρι το επίπεδο της θάλασσας και δημιουργεί τόσο μικρές κλίσεις, ώστε η δράση της διάβρωσης και της μεταφοράς αυτοαναστέλλονται. Η Αυστραλία είναι ένα παράδειγμα πανεπίπεδου. Ευτυχώς όμως, ο τεκτονισμός και οι αλλαγές της στάθμης της θάλασσας αναζωογονούν αέναα το γήινο ανάγλυφο.

Το ερευνητικό αντικείμενο της παρούσης διατριβής είναι η στερεομεταφορά των ποταμών του ελληνικού χώρου, με περίπτωση μελέτης τον Βουραϊκό ποταμό. Η δυσκολία του εγχειρήματος αυτού υπογραμμίζεται από δύο κυρίως γεγονότα, για τα οποία περισσότερος λόγος θα γίνει παρακάτω: την σπανιότητα των μετρήσεων στον ελλαδικό χώρο, και την δυσκολία των μετρήσεων καθ'εαυτών. Ωστόσο, όπως είναι φανερό από τα παραπάνω, στο συνεχές κλιτύων – υδατορευμάτων οι διεργασίες διάβρωσης εμπλέκονται με τις διεργασίες μεταφοράς, έτσι ώστε να μην είναι δυνατόν να πραγματευτεί κάποιος το ένα αντικείμενο δίχως να «ακουμπήσει» και το άλλο. Έτσι, και η παρούσα έρευνα ασχολήθηκε και με τις διεργασίες και τους μηχανισμούς διάβρωσης, αν και κυρίως σε μακροσκοπικό επίπεδο.

1.1 ΟΡΙΣΜΟΙ

Ως *στερεοπαροχή* ορίζεται η μάζα των φερτών που μετριέται στην διατομή κάποιου υδατορεύματος στη μονάδα του χρόνου (διαστάσεις M/T, συνηθέστερες μονάδες kg/s, kg/min, ή t/ημέρα) ενώ ως *στερεοαπορροή* ορίζεται η μάζα των φερτών που μετριέται στην διατομή κάποιου υδατορεύματος στην μονάδα του χρόνου *ανά μονάδα εμβαδού επιφανείας* της λεκάνης απορροής (διαστάσεις $M/T/L^2$, συνηθέστερες μονάδες t/km^2/έτος ή t/ ha /έτος). Από τους ορισμούς αυτούς γίνεται σαφές ότι η στερεοαπορροή είναι ένα μέγεθος χαρακτηριστικό των λεκανών απορροής που επιτρέπει την μεταξύ τους σύγκριση. Οι έννοιες αυτές είναι συνδεδεμένες με την εδαφική απώλεια ή διάβρωση (soil loss), η οποία ορίζεται ως η κατάτμηση και απόσπαση βράχου/εδάφους από τη θέση του λόγω της συνδυασμένης επίδρασης της βροχόπτωσης και της απορροής του βρόχινου νερού. Βέβαια, υπάρχουν και άλλα αίτια που προκαλούν την απώλεια εδαφών, όπως για παράδειγμα η αιολική διάβρωση που προκαλείται από την δράση του ανέμου, αλλά στην παρούσα εργασία θα περιοριζόμαστε στην υδατική διάβρωση που προκαλείται από τη δράση του νερού. Από το έδαφος που αποσπάται συνολικά από κάποια περιοχή (gross erosion ή ολική διάβρωση), μόνο ένα κλάσμα καταλήγει στο υδρογραφικό δίκτυο και διέρχεται (και,

ενδεχομένως, μετριέται) από μία διατομή κάποιου υδατορεύματος (net erosion ή καθαρή διάβρωση)· το υπόλοιπο μεταφέρεται κάπου κατάντη, αλλά δεν φτάνει στην διατομή μέτρησης. Ακόμα μία χρήσιμη διάκριση είναι αυτή μεταξύ των transport limited και supply limited ποταμών, όρων που μπορούν ελεύθερα να μεταφραστούν ως «περιοριζόμενη από την ροή μεταφορά» και «περιοριζόμενη από την τροφοδοσία μεταφορά». Στην πρώτη περίπτωση το παρεχόμενο από τις πλαγιές υλικό διάβρωσης δεν μπορεί να μεταφερθεί στην ολότητά του λόγω της ανεπαρκούς ισχύος της ροής, οπότε λαμβάνει χώρα απόθεση, ενώ στην δεύτερη περίπτωση η τροφοδοσία υπολείπεται της μεταφορικής ικανότητας των υδατορευμάτων, οπότε και λαμβάνει χώρα διάβρωση του αναγλύφου.

1.2 ΣΚΟΠΟΣ - ΣΤΟΧΟΙ

Ο βασικός σκοπός της έρευνας ήταν τόσο απλός, όσο και φιλόδοξος: να μελετηθεί ποιοτικά και να ποσοτικοποιηθεί η στερεοαπορροή στη λεκάνη απορροής του Βουραϊκού ποταμού. Δεν θα ήταν υπερβολή να ισχυρισθεί κανείς ότι παρόλη την εντατική έρευνα, δεν υπάρχει ακόμα μεταξύ της επιστημονικής κοινότητας, μία ενιαία και κοινά αποδεκτή μεθοδολογία εκτίμησης της εδαφικής απώλειας, εκεί όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις μεταφερόμενου φορτίου. Αλλά και εκεί όπου διεξάγονται μετρήσεις, πέραν της δυσκολίας που και αυτές οι ίδιες αντιμετωπίζουν, το έργο της εκτίμησης είναι επίσης δύσκολο. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται ακραίο παράδειγμα όπου σε τρεις μόνο ημέρες μεταφέρθηκε όγκος υλικού μεγαλύτερος από ότι τα προηγούμενα 10 χρόνια. Αυτό και μόνο το περιστατικό, αλλά και πολλά παρόμοια «καταστροφικού» χαρακτήρα, που μπορεί να ανήκουν στην κοινή εμπειρία πολλών ανθρώπων και άπτονται των σχέσεων συχνότητας – μεγέθους (frequency – magnitude) του φαινομένου, μαζί με το γεγονός ότι η «τεχνολογία» των μετρήσεων δεν μας εξασφαλίζει παρά ακρίβεια τάξης μεγέθους των μετρουμένων ποσοτήτων (θεωρούμενη καλή εάν είναι στα πλαίσια του ½ - 2 της πραγματικής ποσότητας), περιορίζει αναγκαστικά τις φιλοδοξίες για ακριβή αποτελέσματα, και ιδίως όταν οι πόροι, τεχνικοί, οικονομικοί και ανθρώπινοι είναι ανεπαρκείς. Στις ΗΠΑ για παράδειγμα, όπου το έργο της παρακολούθησης της στερεομεταφοράς των ποταμών θεωρείται σημαντικό, αυτό έχει αναληφθεί από μια συνεργασία σημαντικών επιστημονικών και διοικητικών οργανισμών τις οποίες συντονίζει η U.S.G.S (United States Geological Survey) στα πλαίσια ενός προγράμματος που λέγεται FISP (Federal Interagency Sedimentation Project).

Οι επιμέρους στόχοι μπορούν να συνοψιστούν στους εξής:

1. Να διερευνηθεί ποιοτικά και ποσοτικά η παραγωγή και μεταφορά ιζήματος εντός της λεκάνης απορροής μέσα από την οργάνωση ενός προγράμματος συστηματικών μετρήσεων και την δοκιμή νέων οργάνων, εργαλείων και τεχνολογιών.
2. Να διακριβωθούν οι μορφές διάβρωσης και οι πηγές του ιζήματος στη λεκάνη.
3. Να εξεταστούν/αξιολογηθούν τα υφιστάμενα μοντέλα εδαφικής διάβρωσης - στερεοαπορροής. Αν καταστεί δυνατόν, να δημιουργηθεί νέο μοντέλο.

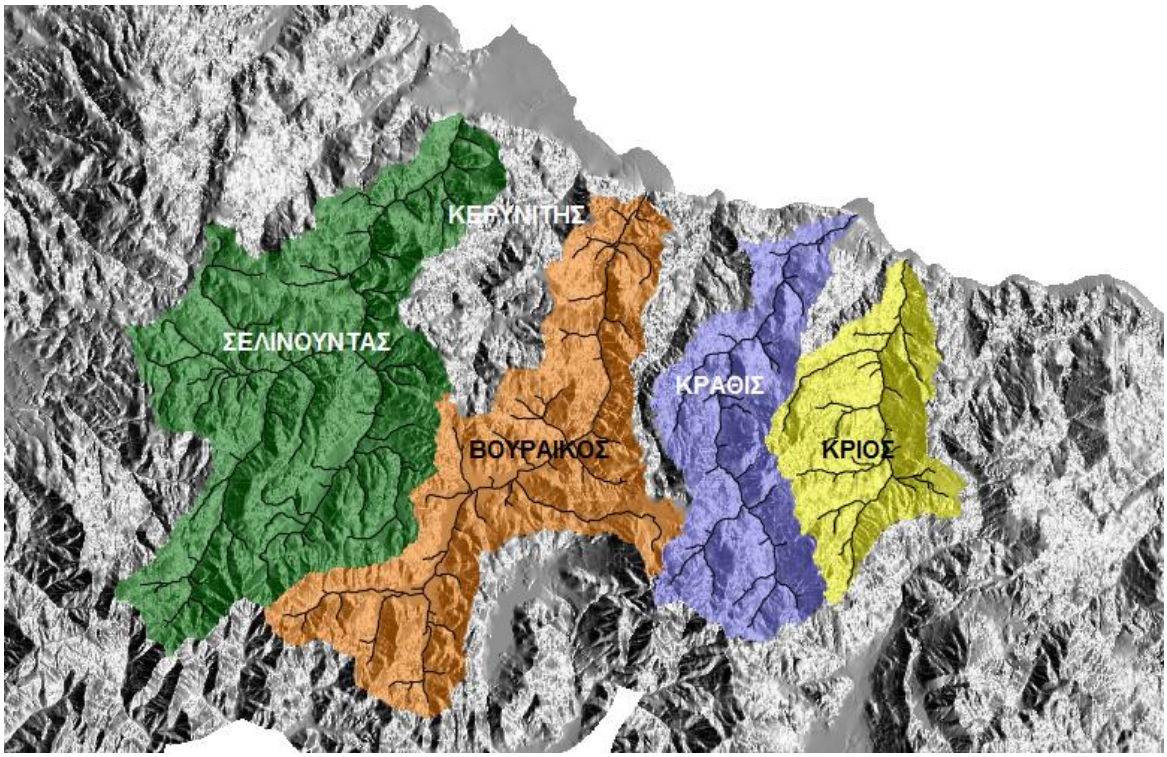
1.3 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη απορροής του Βουραϊκού ποταμού. Για την συγκεκριμένη επιλογή υπήρξαν πολλοί λόγοι:

- Η πρόσβαση σε κάθε σημείο του ποταμού εξασφαλίζεται άπρόσκοπτα χάρη στη λειτουργία του Οδοντωτού σιδηρόδρομου.
- Η λεκάνη παρακολουθείται - μετριέται για πολλές δεκαετίες. Εκτός από τρεις βροχομετρικούς σταθμούς εντός της λεκάνης, η ΔΕΗ λειτουργούσε και υδρομετρικό σταθμό (ο οποίος, δυστυχώς, έπαψε να λειτουργεί μέσα στο 2018) από τις αρχές της δεκαετίας του 1960. Για κάποια διαστήματα υδρομετρήσεις έκανε και το -τότε- Υπουργείο Δημόσιων Έργων. Υπήρχαν επομένως πρωτογενή υδρολογικά και μετεωρολογικά δεδομένα καλής ποιότητας που κάλυπταν μεγάλο χρονικό διάστημα.
- Η λεκάνη του Βουραϊκού έχει μελετηθεί επισταμένα από αρκετούς ερευνητές. Ένας από αυτούς είναι και ο επιβλέπων της παρούσης εργασίας Ε.Καρύμπαλης, αλλά και οι επιβλέποντες της διπλωματικής εργασίας του επιβλέποντος, Χ. Μαρουκιάν και Β. Σαμπό.
- Η απόσταση από την Αθήνα είναι μικρή επιτρέποντας συχνές επισκέψεις

Κατά την εκπόνηση της παρούσης διατριβής και προκειμένου να αποκτηθεί μία συγκριτική εικόνα της δυναμικότητας ιζηματομεταφοράς διαφορετικών ποταμών, η έρευνα στράφηκε και σε μεθόδους τηλεπισκόπησης και φωτοερμηνείας. Η τηλεπισκοπική αυτή έρευνα περιέλαβε 17 λεκάνες απορροής μερικών από τους μεγαλύτερους ελληνικούς

ποταμούς (με το προϊόν MOD02), και 23 λεκάνες απορροής (με το προϊόν MOD09Q1) των οποίων η έκταση αθροιστικά φτάνει το ένα τέταρτο περίπου της επικράτειας (~ 30,000 km^2). Σε αυτή την φάση της έρευνας και κυρίως για πρακτικούς λόγους που εξηγούνται στο οικείο κεφάλαιο, ο Βουραϊκός ποταμός εξετάζεται ως μία ενότητα μαζί με τους γετονικούς του Σελινούντα και Κερυνίτη, Κράθι και Κριό. Πέραν της γεωγραφικής εγγύτητας των λεκανών αυτών της Αιγιαλείας, η θεώρηση αυτή δικαιολογείται από την παρόμοια γεωλογική σύσταση και το κοινό κλιματολογικό καθεστώς. Η ενότητα αυτή ονομάζεται στη συνέχεια *ευρύτερη περιοχή μελέτης* (Σχ.1-2).



Σχήμα 1-2 Οι πέντε λεκάνες απορροής της *ευρύτερης περιοχής μελέτης*.

1.4 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το κεφάλαιο της ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ, κλείνει με την θεώρηση των πιο πρόσφατων κατευθύνσεων-τάσεων της διεθνούς και ελληνικής έρευνας πάνω στα ζητήματα της στερεοαπορροής των ποταμών, με τίτλο "state of the art". Γίνεται μια γενική επισκόπηση των χρησιμοποιούμενων μοντέλων με έμφαση στην πιο διαδεδομένη μέθοδο, που δεν είναι άλλη από την USLE (Universal Soil Loss Equation ή Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας - ΠΕΕΑ) και τις διάφορες παραλλαγές της (RUSLE, MUSLE), και στην συνέχεια παρατίθενται περιπτώσεις εφαρμογής -αυτού και άλλων- μοντέλων στην Ελλάδα (Έρευνες

εδαφικής απώλειας στην Ελλάδα). Επίσης παρουσιάζονται τα εργαλεία (μοντέλα) και οι βάσεις δεδομένων που έχουν αναπτυχθεί στα πλαίσια της έρευνας στην Ε.Ε (Ανάπτυξη εργαλείων και βάσεων δεδομένων κατά της απερήμωσης στην Ε.Ε.). Στην συνέχεια, εξετάζονται οι συνήθεις μέθοδοι ανάπτυξης στατιστικών – εμπειρικών μοντέλων και συζητούνται οι πιο καθοριστικοί παράγοντες, έτσι όπως αναδεικνύονται από την διεθνή και ελληνική εμπειρία (Στατιστικά μοντέλα: επιλεκτική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας). Στο τέλος παρουσιάζεται η έρευνα που κάνει χρήση φωτοερμηνείας δορυφορικών εικόνων μέσω της σύντομης παρουσίασης κάποιων επιλεγμένων μελετών από την Ελλάδα και το εξωτερικό (Έρευνες με τηλεσκοπικές μεθόδους – Πλούμια αιωρούμενου ιζήματος σε παράκτια ύδατα).

Στο δεύτερο κεφάλαιο (ΘΕΩΡΙΑ) παρουσιάζεται η γενική θεωρία, χωρισμένη χονδρικά στις εξής τρεις περιοχές: Θεωρία στερεομεταφοράς (αιωρούμενου και πυθμενικού φορτίου), Γεωμορφολογική ανάλυση και Τηλεπισκόπηση και Φωτοερμηνεία. Από την Υδρολογία παρουσιάζονται μόνο τα βασικά σημεία της θεωρίας της καμπύλης στάθμης – παροχής (2.5 – Υδρολογία), καθώς αυτή παρατίθεται κυρίως στο Κεφάλαιο 4 (4.3 – Υδρολογική διερεύνηση).

Η θεωρία, της στερεομεταφοράς ιδιαίτερα, είναι ανεξάντλητη οπότε γίνεται μια συνοπτική παράθεση της βασικής θεωρίας, με έμφαση στις εφαρμογές της παρούσης έρευνας. Στην αρχή παρουσιάζονται οι βασικές αδιάστατες μεταβλητές έτσι όπως προκύπτουν από την διαστατική ανάλυση, η καμπύλη του Shields και διαγράμματα από το αυθεντικό σετ των πειραματικών δεδομένων των Meyer-Peter & Muller (1948), που μας παραχωρήθηκαν από το TU DELFT. Κατόπιν, αναπτύσσονται σε δύο ξεχωριστά υποκεφάλαια οι υπολογιστικές μέθοδοι και τα μαθηματικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των δύο βασικών διακρίσεων του φορτίου: η μεταφορά του πυθμενικού φορτίου (2.2-Στερεομεταφορά φορτίου κοίτης) και η παραγωγή και μεταφορά του αιωρούμενου φορτίου (2.3-Παραγωγή και μεταφορά φορτίου απόπλυσης). Η ανάπτυξη στην περίπτωση του πυθμενικού φορτίου ακολουθεί κυρίως το SEDIMENT TRANSPORT PRIMER των Wilcock et al. (2009). Το υποκεφάλαιο αυτό, ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των παρακάτω μοντέλων μεταφοράς: (α) ανάπτυξη μοντέλου καμπύλης παροχής - στερεοπαροχής με βαθμονόμηση, και (β) την παράθεση των εξισώσεων που περιλαμβάνει το υπολογιστικό προσομοίωμα BAGS (Bedload Assessment for Gravel-bed Rivers) της US Department of Agriculture (Pitlick et al., 2009), που ενδείκνυνται για τον

υπολογισμό της στερεοπαροχής, ειδικά για υδατορεύματα με αδρομερείς πυθμένες και σχετικά μεγάλες κλίσεις, όπως είναι ο Βουραϊκός ποταμός. Τα υπολογιστικά αυτά μοντέλα χρησιμοποιούνται στο Κεφάλαιο 4 (Δεδομένα, Μετρήσεις και Μεθοδολογία) προκειμένου να υπολογιστεί η μεταφορική ικανότητα του Βουραϊκού ποταμού στην θέση Γέφυρα Πλιατσικούρα, όπου και έγιναν οι περισσότερες από τις μετρήσεις. Στο υποκεφάλαιο 2.3 παρουσιάζονται οι θεωρίες και τα μοντέλα υπολογισμού του αιωρούμενου φορτίου. Στη συνέχεια αναπτύσσεται διεξοδικά το πρόβλημα του συντελεστή στερεοαπορροής, καθώς σε αυτόν συμπυκνώνεται όλη η περιπλοκότητα των φαινομένων της εδαφικής διάβρωσης και της στερεομεταφοράς.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η θεωρία της ποσοτικής γεωμορφολογικής ανάλυσης των λεκανών απορροής και των υδρογραφικών δικτύων με αναφορές στην σχετική βιβλιογραφία (2.4 - Γεωμορφολογική ανάλυση) . Το κεφάλαιο κλείνει με την παρουσίαση κάποιων βασικών προαπαιτούμενων γνώσεων για την φωτοερμηνεία των δορυφορικών εικόνων του θαλασσινού νερού, την κατασκευή και χρήση δεικτών και μασκών καθώς και με το ζήτημα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο της διατριβής (ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ) εξετάζεται η ευρύτερη περιοχή μελέτης ως προς την γεωλογία, το κλίμα και την χρήση/κάλυψη γης, ενώ σύντομη αναφορά γίνεται και στα εδάφη. Έμφαση δίνεται στην εξατμισοδιαπνοή ως κύριου κλιματολογικού παράγοντα, για την εκτίμηση της οποίας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Monthly Water-Balance Model της USGS (McCabe & Markstrom, 2007).

Στο τέταρτο κεφάλαιο (ΔΕΔΟΜΕΝΑ, ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ) παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έγιναν στα πλαίσια της παρούσης διατριβής, τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν και οι μέθοδοι εξαγωγής αποτελεσμάτων (χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα). Κάτω από την κατηγορία «μετρήσεις» υπάρχουν τόσο διαφορετικά πράγματα όπως τοπογραφικές αποτυπώσεις, μετρήσεις ταχυτήτων και υπολογισμός παροχών, μετρήσεις στερεοφορτίου αιωρούμενου και πυθμενικού, δειγματοληψίες υλικού κοίτης, χαλικομετρήσεις και κροκαλομετρίες, που συμπληρώνονται, προκειμένου για τις δειγματοληψίες υλικού κοίτης και τα δείγματα του αιωρούμενου φορτίου, με τις αναλύσεις στο εργαστήριο. Στην αρχή αναφέρονται συνοπτικά οι τοπογραφικές αποτυπώσεις που πραγματοποιήθηκαν (4.1-Τοπογραφικές αποτυπώσεις), τα όργανα των υδρομετρήσεων (4.2-Υδρομετρήσεις), και έπειτα παρουσιάζεται αναλυτικά η υδρολογική διερεύνηση (4.3-

Υδρολογική διερεύνηση): παρουσιάζονται, ελέγχονται, αναλύονται και συμπληρώνονται τα διαθέσιμα υδρομετρικά και μετεωρολογικά δεδομένα που μας παραχωρήθηκαν από την ΔΕΗ. Τα υδρομετρικά αυτά δεδομένα προέρχονται από τον υδρομετρικό σταθμό της Ζαχλωρούς και συνίστανται σε συνεχή σταθμηγραφήματα του ποταμού (χρονική ανάλυση 15 λεπτών) για δύο διακριτές περιόδους, τις ενδεκαετίες 1980-1990 και 2004-2014, καθώς επίσης και τα δεδομένα των περίπου 330 υδρομετρήσεων που είχαν κάνει τα συνεργεία της ΔΕΗ καθ'όλη την διάρκεια λειτουργίας του σταθμού. Τα κενά στα υδρογραφήματα (το μεγαλύτερο από τα οποία ήταν διάρκειας εννέα μηνών λόγω βλάβης του σταθμού) συμπληρώθηκαν με τη χρήση ενός εμπειρικού «μηχανιστικού» μοντέλου, του IHACRES (Identification of Unit Hydrographs and Components from Rainfall, Evaporation and Streamflow data) (Jakeman et al., 1990). Με βάση τα παραπάνω στοιχεία κατασκευάστηκε κατ'αρχάς η καμπύλη στάθμης – παροχής για την συγκεκριμένη θέση, η οποία και χρησιμοποιήθηκε σε όλη την περαιτέρω ανάλυση. Από την επεξεργασία αυτή προέκυψαν οι πλημμυρικές συχνότητες του ποταμού και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά υδρολογικά μεγέθη όπως η καμπύλη διάρκειας – παροχής και η υδραυλική γεωμετρία της θέσης. Οι συγκεντρωτικές και αθροιστικές στατιστικές των χρονοσειρών της απορροής εξήχθησαν με το River Analysis Program (RAP) (Stewardson and Marsh, 2004). Ειδική έρευνα έγινε προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η συμβολή της χιονόπτωσης στην απορροή του ποταμού. Η έρευνα αυτή περιελάμβανε την χρήση ειδικού μοντέλου (του Snowmelt Runoff Model - SRM) (Martinec, 1975, Martinec et al., 2008), το οποίο απαιτεί δορυφορικά δεδομένα για την εφαρμογή του. Η έρευνα αυτή επαληθεύτηκε με την τεχνική του διαχωρισμού των υδρογραφημάτων που έγινε με το μοντέλο WETSPRO (Water Engineering Time Series PROcessing Tool) (Willems, 2009). Τέλος, και με βάση τα προηγουμένως εξαχθέντα αποτελέσματα, γίνεται περιγραφή του υδρολογικού καθεστώτος του Βουραϊκού ποταμού.

Οι εργασίες των στερεοϋδρομετρήσεων – δειγματοληψιών παρουσιάζονται σε τρια υποκεφάλαια: (4.5-Δειγματοληψίες φερτών, 4.6-Μετρήσεις αιωρούμενου φορτίου και 4.7-Μετρήσεις φορτίου πυθμένα). Ξεχωριστά αναφέρεται κατόπιν το φαινόμενο των ρηχών κατολισθήσεων στο ποτάμι μέσα από μια συγκεκριμένη περίπτωση προσχωματικού κώνου (4.8-Γεωροές-Εδαφοροές-Ρηχές κατολισθήσεις).

Στο επόμενο υποκεφάλαιο (4.10-Δεδομένα τηλεπισκόπησης και φωτοερμηνείας) παρουσιάζεται ο δέκτης MODIS και τα προϊόντα του, η περιοχή μελέτης της τηλεπισκοπικής έρευνας και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Όπως ειπώθηκε πρωτύτερα, κίνητρο για την έρευνα αυτή ήταν κυρίως η ανάγκη απόκτησης μιας αίσθησης

της σχετικής δυναμικότητας -όσον αφορά την στερεοπαροχή-, των διαφόρων ποταμών του ελλαδικού χώρου. Με αυτό τον τρόπο, μέσω της θέσης του Βουραϊκού ποταμού στην σειρά κατάταξης και της προσφυγής στην βιβλιογραφία ή/και σε μοντέλα, θα ήταν δυνατή η εκτίμηση της στερεοπαροχής του. Επίσης, θα μπορούσαν να διαφωτισθούν θέματα όπως η εποχιακότητα του φαινομένου, η εξάρτησή του από τις βροχοπτώσεις αλλά και από άλλους παράγοντες όπως η γεωλογία και η γεωμορφολογία της κάθε λεκάνης. Η βασική ιδέα είναι η παρακολούθηση της δραστηριότητας στον θαλάσσιο χώρο της εκβολής των ποταμών, όπου σχηματίζονται τα πλούμια τους, μέσω της μέτρησης σχετικών δεικτών που αναφέρονται στην βιβλιογραφία. Οι περιοχές ενδιαφέροντος (regions of interest) ήταν 17 ισεμβαδικά πολύγωνα (~20 km^2) που σχεδιάστηκαν στη θαλάσσια περιοχή των εκβολών ισάριθμων ποταμών, ενώ οι δείκτες ήταν γενικά γραμμικοί συνδυασμοί της ανακλαστικότητας στα κανάλια μπλέ, πράσινο, κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο ή/και μάσκες κατωφλίωσης. Τα δορυφορικά προϊόντα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από το όργανο MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), που είναι το βασικό καταγραφικό όργανο πάνω στις πλατφόρμες (δορυφόρους) Terra και Aqua της NASA. Αυτά ήταν 669 επιλεγμένες εικόνες MOD02 (και οι αντίστοιχες cloudmasks), καθώς και όλη η σειρά του προϊόντος MOD9Q1, από το 2000 έως και το 2019. Το MOD02 είναι επίπέδου 1B, επομένως απαιτήθηκε ατμοσφαιρική διόρθωση, ενώ το MOD9Q1 είναι επιπέδου 3, ατμοσφαιρικά διορθωμένο σύνθετο 8 ημερών (8 day composite). Η επεξεργασία αυτοματοποιήθηκε με κώδικες που γράφτηκαν στην γλώσσα IDL. Επίσης, αναζητήθηκαν και ανακτήθηκαν ημερήσια δεδομένα βροχοπτώσεων για όλο τον Ελληνικό χώρο σε ανάλυση 1 μοίρας από το Global Climatology Precipitation Project σε αρχεία netcdf, τα οποία μετά από κατάλληλη επεξεργασία μετατράπηκαν σε ημερήσια βροχόπτωση σε κάθε λεκάνη απορροής.

Στο τελευταίο υποκεφάλαιο (4.10-Δεδομένα του εμπειρικού-στατιστικού μοντέλου) παρουσιάζονται οι αναλύσεις και η εξαγωγή των φυσιογραφικών, υδρολογικών και γεωλογικών παραγόντων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του εμπειρικού μοντέλου καθώς και ο εντοπισμός των κυριώτερων συσχετίσεων με την στερεοαπορροή. Η οικεία έρευνα βασίστηκε στις τιμές της ειδικής στερεοαπορροής των Ζαρρή και Λυκούδη (2007) για 11 συνολικά θέσεις στερεοϋδρομετρήσεων σε λεκάνες της Δυτικής και Βόρειας Ελλάδας. Συγκεντρώθηκαν, ερμηνεύτηκαν και επεξεργάστηκαν τα χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής των 11 αυτών θέσεων. Η ανάλυση περιέλαβε το σύνολο των μορφομετρικών, φυσιογραφικών, βροχομετρικών, γεωλογικών και τεκτονικών δεδομένων

των λεκανών απορροής καθώς και της εδαφοκάλυψης τους, αλλά και δεδομένα από τους πρόσφατους χάρτες (RUSLE 2015) του European Soil Data Center (ESDC / JointResearchCenter / EU). Συνολικά εξετάσθηκαν οι συσχετίσεις με περίπου 40 παραμέτρους από τις οποίες οι πιο σημαντικές βρέθηκαν να είναι, με την σειρά, η μορφολογική κλίση, η ευδιάβρωτη λιθολογία και τέλος οι βροχοπτώσεις.

Το τελευταίο, έκτο Κεφάλαιο (ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ), είναι χωρισμένο σε τρία υποκεφάλαια στα οποία παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα από τις τρεις κατευθύνσεις έρευνας της διατριβής.

Στο 5.1 (Αιωρούμενο και πυθμενικό φορτίο στον Βουραϊκό) παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις του διερχόμενου αιωρούμενου φορτίου από την θέση Ζαχλωρού γεφυράκι και του πυθμενικού φορτίου στην θέση Γέφυρα Πλιατσικούρα.

Στο 5.2 (Ευρήματα Τηλεπισκόπησης) παρουσιάζεται η κατάταξη των 17 ποταμών όπως προέκυψε από την σύγκριση των δεικτών και μασκών που χρησιμοποιήθηκαν. Επιχειρείται κατόπιν, με βάση τα παραπάνω, η χαρτογράφηση ενός «άτλαντα» διάβρωσης του Ελληνικού ορεινού χώρου.

Στο 5.3 (Στατιστική ανάλυση) παρουσιάζεται η διαδικασία εξαγωγής ενός εμπειρικού στατιστικού μοντέλου πρόβλεψης της στερεοαπορροής με γενική ισχύ στον ελληνικό ορεινό χώρο. Το γραμμικό μοντέλο, για το οποίο οι απαιτήσεις ήταν να χρησιμοποιεί λίγες παραμέτρους, εύκολα διαθέσιμες και αντικειμενικές, κατασκευάστηκε με τις συνήθεις μεθόδους (βηματική παλινδρόμηση). Στο ίδιο υποκεφάλαιο γίνεται αναφορά στο μοντέλο BQART (Syvitksi & Milliman, 2007), το οποίο και χρησιμοποιήθηκε ως επαλήθευση της μεθόδου.

Τέλος, στο τελευταίο, 6^{ο} κεφάλαιο, ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, παρουσιάζονται σύντομα τα βασικά συμπεράσματα της έρευνας. Επίσης, γίνονται προτάσεις για την συνέχεια της έρευνας.

Στο Παράρτημα Α δίνεται υπό μορφή Πίνακα το χρονολόγιο των επισκέψεων των ερευνητικών ομάδων στον Βουραϊκό ποταμό, οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην κέθε επίσκεψη σε κάθε θέση του ποταμού και αναφέρονται οι συμμετέχοντες σε αυτές. Στο παράρτημα Β παραθέτουμε τις σχετικές δημοσιεύσεις που έγιναν κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσης διατριβής.

Σχήμα 1-3 Φωτογραφίες και διαδρομή του Οδοντωτού με τον οποίον είναι δυνατή η πρόσβαση σε ένα μεγάλο μέρος της κεντρικής κοίτης του ποταμού (πηγή Οδοντωτός Σιδηρόδρομος).

1.5 STATE OF THE ART

Σε αυτό το υποκεφάλαιο γίνεται μια γενική επισκόπηση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται σήμερα στην έρευνα διάβρωσης και μεταφοράς φερτών υλικών και αναφέρονται οι πιο πρόσφατες τάσεις. Όσο αφορά τις μετρήσεις (πάνω στις οποίες βασίζονται και τα μοντέλα), και περιοριζόμενοι μόνο στο αιωρούμενο φορτίο, σαν μοναδική πηγή παραμένουν οι παλιές μετρήσεις της ΔΕΗ στα ποτάμια της Ηπείρου και της Δυτικής Μακεδονίας (οι οποίες έχουν επανερμηνευτεί με διαφορετικές καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής, δες και Εδάφιο 1.4.8), ενώ κάποιοι ερευνητές στο μεταξύ εκτίμησαν την μέση υπερετήσια στερεοαπορροή ποταμών που καταλήγουν σε ταμιευτήρες, δια του υπολογισμού του όγκου και της πυκνότητας των αποθέσεων εντός του ταμιευτήρα, χρησιμοποιώντας για αυτό το σκοπό βαθυμετρικές αποτυπώσεις και γεωτρήσεις (Ζαρρής, 2002, Ξανθάκης, 2011).

1.5.1 Μοντέλα εκτίμησης εδαφικής απώλειας: ένα σύντομο ιστορικό

Τα τελευταία 40 περίπου χρόνια έχουν παρουσιαστεί δεκάδες μοντέλα εκτίμησης των απωλειών εδάφους από τη διάβρωση. Τα μοντέλα αυτά λειτουργούν σε ποικίλες χωρικές και χρονικές κλίμακες και έχουν ενσωματώσει διαφορετικές φυσικές διεργασίες με διάφορους βαθμούς πολυπλοκότητας. Η επιλογή του καταλληλου ανά περίπτωση μοντέλου θα πρέπει να γίνει μετά την σαφή διατύπωση των σκοπών και απαιτήσεων της εκάστοτε έρευνας. Σημαντικό κριτήριο επίσης, είναι η απαίτηση των μοντέλων αυτών σε δεδομένα εισόδου.

Μια παραστατική περιγραφή των μοντέλων είναι η παρομοίωση τους με κουτιά. Αυτά τα «κουτιά» τροφοδοτούνται με κάποια δεδομένα εισόδου και παράγουν κάποια αποτελέσματα. Το χρώμα του κουτιού αναπαριστά τον βαθμό απλοποίησης της πραγματικότητας που ενσωματώνει το μοντέλο και έχει τρία επίπεδα: τα μαύρα, τα γκρίζα και τα άσπρα κουτιά. Υπάρχουν κατ'αρχάς, τα λεγόμενα μαύρα κουτιά. Σε αυτά οι μηχανισμοί και οι φυσικές διεργασίες του φαινομένου που εξετάζεται δεν είναι γνωστά ούτε και ενδιαφέρουν. Τέτοια μοντέλα είναι συνήθως το αποτέλεσμα μιας απλής στατιστικής επεξεργασίας όπως μια σχέση παλινδρόμησης ή συσχέτισης δύο μεταβλητών. Ένα παράδειγμα ενός μοντέλου μαύρου κουτιού είναι η καμπύλη παροχής – στερεοπαροχής. Αν υπάρχει ικανός αριθμός ταυτόχρονων μετρήσεων παροχής και

στερεοπαροχής, τότε μπορεί να βρεθεί μια σχέση παλινδρόμησης που κατόπιν θα εφαρμοστεί σε κάθε είσοδο (παροχή) για να δώσει ένα αποτέλεσμα (την στερεοπαροχή).

Μοντέλα μεγαλύτερης πολυπλοκότητας, με την έννοια ότι θεωρούνται κάποιες φυσικές διεργασίες ενταγμένες μέσα σε ένα ερμηνευτικό πλαίσιο (conceptual framework), είναι τα γκρίζα κουτιά. Ένα καλό παράδειγμα τέτοιου μοντέλου είναι η γνωστή Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας, ή ΠΕΕΑ (USLE) (Wischmeier & Smith, 1965).

Η εξίσωση της είναι:

$$A = R\ K\ LS\ C\ P \tag{1-1}$$

όπου *A* είναι το απωλεσθέν έδαφος ανα μονάδα της επιφάνειας, που εκφράζεται στις μονάδες του *K* και για την περίοδο που έχει επιλεγεί για το *R*. Στην πράξη αυτές οι μονάδες επιλέγονται έτσι ώστε η απώλεια εδάφους να είναι σε US tons / acre / year. Ο *R*, ο παράγων βροχόπτωσης και απορροής, είναι ο αριθμός των μονάδων του δείκτη διαβρωτικών βροχοπτώσεων συν ένα παράγοντα για απορροή από λιωμένο χιόνι. Το *K*, ο παράγων διαβρωσιμότητας του εδάφους είναι ο ρυθμός απώλειας εδάφους ανά μονάδα δείκτη διαβρωτικής βροχόπτωσης για το δεδομένο έδαφος σε συνθήκες του αγρού βάσης. Τα *L* και *S* είναι το μήκος κλίσης και ο παράγων κλίσης σε σχέση με τον *αγρό βάσης* (το γινόμενό τους, *LS*, ονομάζεται τοπογραφικός παράγων). Ο C, ο παράγων κάλυψης και καλλιέργειας είναι ο λόγος του απωλεσθέντος εδάφους από μια επιφάνεια με συγκεκριμένη κάλυψη και καλλιέργεια προς την ίδια επιφάνεια αγρού βάσης και συνθηκών βάσης (έδαφος οργωμένο και χέρσο). Ο *C* παίρνει την τιμή 1 για αυτές τις συνθήκες. Ο *P*, τέλος, ο παράγων διαχειριστικής πρακτικής, είναι ο λόγος του απωλεσθέντος εδάφους με μια συγκεκριμένη πρακτική, όπως για παράδειγμα το όργωμα παράλληλα στις ισοϋψείς ή η ύπαρξη αναβαθμίδων, προς το απωλεσθέν εδάφος στον αγρό βάσης με όργωμα παράλληλο στην κλίση.

Σε αυτό το μοντέλο έχουν αναγνωριστεί και κατ'αρχήν κατανοηθεί οι κύριοι μηχανισμοί και τα φαινόμενα τους, αλλά η επεξεργασία εξακολουθεί να είναι στατιστικού/εμπειρικού χαρακτήρα. Στην ΠΕΕΑ για παράδειγμα, έχει κατανοηθεί ότι η επίδραση του ρέοοντος νερού πάνω στην απόσπαση και μεταφορά των τεμαχιδίων του εδάφους εξαρτάται από την κλίση και το μήκος της κλιτύος. Αυτές οι διεργασίες καθώς και η ένταση της βροχής, η φύση και η κάλυψη του εδάφους και τα τυχόν προστατευτικά μέτρα που έχουν ληφθεί, αντιπροσωπεύονται από συντελεστές ή παράγοντες (factors) που κατόπιν απλά πολλαπλασιάζονται μεταξύ τους για να δώσουν το τελικό αποτέλεσμα.

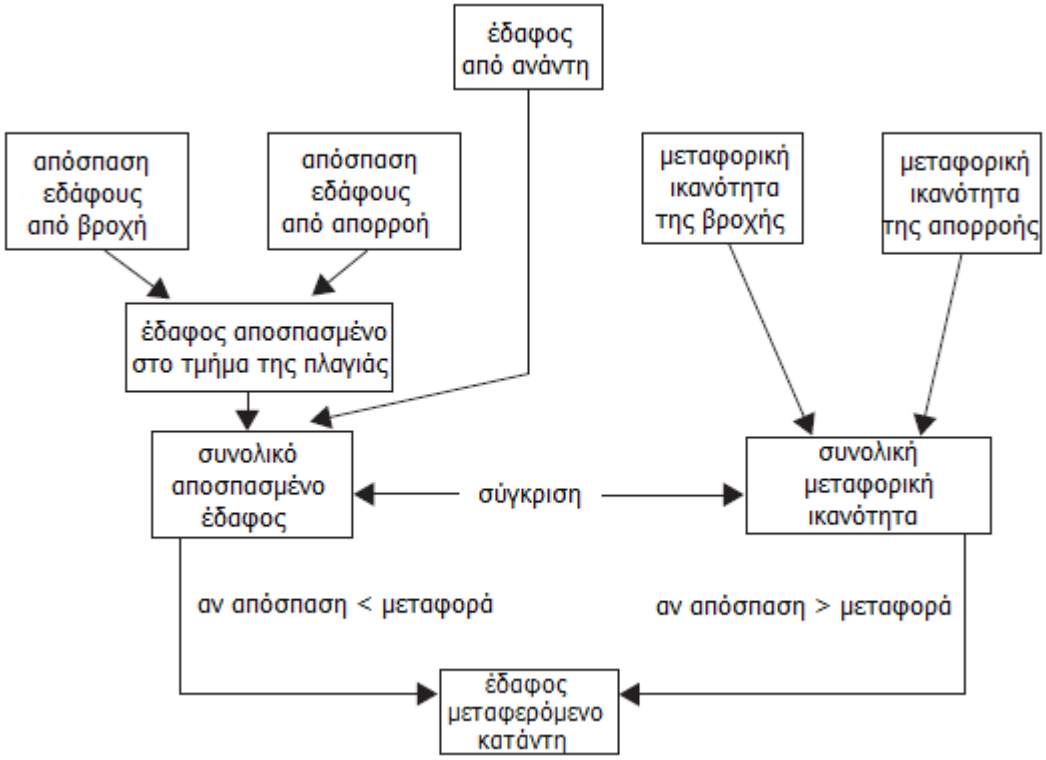
Η ΠΕΕΑ δημιουργήθηκε από την USDA ως εργαλείο σχεδιασμού προς χρήση των καλλιεργητών της ζώνης του καλαμποκιού[1] στην προσπαθειά τους να ανασχέσουν την απώλεια του γόνιμου εδάφους (topsoil) και να υποστήριξουν την μεσο-μακροπρόθεσμη αποδοτικότητα των καλλιεργειών τους. Κατά τις δεκαετίες του 1970 και 1980 με την αυξανόμενη περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση και την συνειδητοποίηση ότι το ίζημα είναι ο κατ'εξοχήν ρυπαντής των υδάτων, οι ανάγκες των χρηστών διευρύνθηκαν και τροποποιήθηκαν προς την κατεύθυνση της εκτίμησης της πορείας του ιζήματος από τους αγρούς και τα εργοτάξια στα υδάτινα σώματα, τις λίμνες και ποταμούς. Η ανταπόκριση των σχεδιαστών ήταν να προσθέσουν υδρολογικά μόντουλα (υπομοντέλα) βροχής – απορροής και διόδευσης στο αρχικό σώμα της ΠΕΕΑ, διατηρώντας όμως τους παράγοντές της όταν επρόκειτο να υπολογιστεί η απώλεια του εδάφους. Αυτά τα μοντέλα (AGNPS, ANSWERS, GAMES, CREAMS) ήταν βασισμένα στην μαθηματική διατύπωση των φυσικών μηχανισμών (process based) όσον αφορά το υδρολογικό τους κομμάτι, ενσωματώνοντας την αρχή της διατήρησης της μάζας και σημειώνοντας έτσι ένα πρώτο βήμα περαιτέρω «αποχρωματισμού».

Η σημερινή τάση στον σχεδιασμό μοντέλων είναι η αντικατάσταση των παραγόντων της ΠΕΕΑ με παραμέτρους που μπορούν να μετρηθούν στο πεδίο και επομένως να αποδώσουν τις μεταβολές των ιδιοτήτων του εδάφους σε χώρο και χρόνο. Για παράδειγμα, αντί για μία ενιαία τιμή του παράγοντα διαβρωσιμότητας του εδάφους (ο παράγοντας *K* της ΠΕΕΑ) τα εδάφη πλέον περιγράφονται με τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους όπως το πορώδες και η ικανότητα συμπύκνωσης, η συμπιεστότητα, η διατμητική αντοχή, η υδαρότητα και η πλαστικότητα κ.ά, ενώ ο παράγοντας της φυτοκάλυψης (*C* της ΠΕΕΑ) αντικαθίσταται από την «αρχιτεκτονική» της βλάστησης με παραμέτρους όπως το ύψος της, το μέγεθος και η πυκνότητα των κορμών κ.ά. Τα μοντέλα αυτά, έχοντας ενσωματώσει τις αρχές της διατήρησης (μάζας, ποσότητας κίνησης, ενέργειας) και εκφράζοντας τους μηχανισμούς με κάποια μορφή διαφορικών εξισώσεων μπορούν να θεωρηθούν άσπρα, ή, καλύτερα -σύμφωνα με έναν από τους σχεδιαστές τους- *υπόλευκα* (Morgan&Nearing, 2011). Αυτού του τύπου τα μοντέλα ονομάζονται και *φυσικά μοντέλα*. Μία λίστα των μοντέλων αυτών παρατίθεται παρακάτω στο Εδάφιο 1.4.4.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ενσωμάτωση ολοένα και περισσότερων φυσικών διεργασιών και μηχανισμών (process representation) στα μοντέλα και η αυξανόμενη

[1] Η ζώνη του καλαμποκιού (corn belt) είναι η περιοχή των μεσοδυτικών ΗΠΑ όπου γινόταν η καλλιέργεια του καλαμποκιού από το 1850 περίπου. Οι ΗΠΑ παρήγαγαν το 40% της παγκόσμιας παραγωγής (πηγή: Wikipedia)

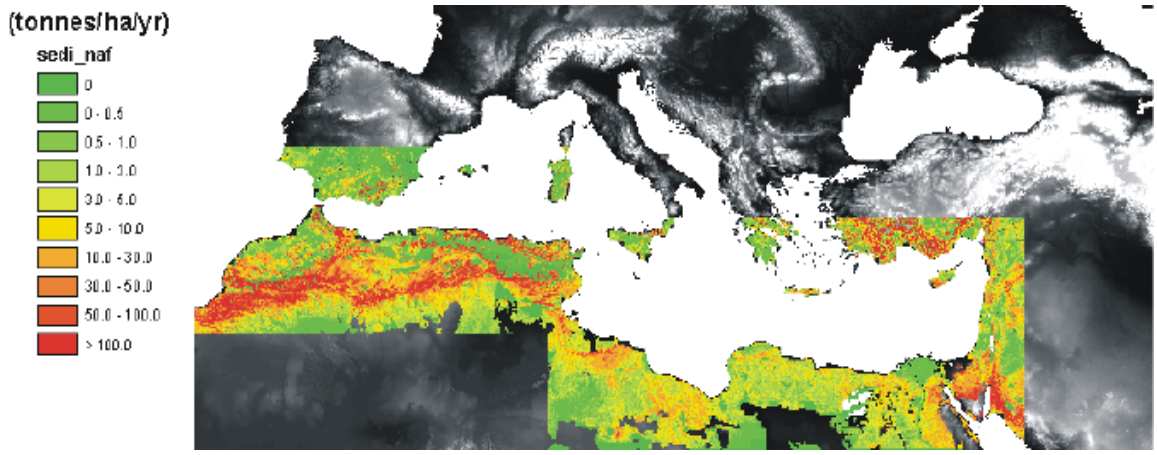
πολυπλοκότητά τους, ενώ αυξάνει δραματικά τις απαιτήσεις σε δεδομένα εισόδου και σε χρονοβόρες διαδικασίες βαθμονόμησης και αξιολόγησης, δεν εγγυάται αναγκαστικά ακριβέστερα αποτελέσματα. Πράγματι, οι αναφορές των ερευνητών που έχουν τρέξει τα διάφορα «λευκά» κουτιά σε διαφορετικά γεωλογικά και κλιματικά περιβάλλοντα είναι αντικρουόμενες, σε ότι αφορά την επιτυχία τους στην πρόβλεψη των απωλειών εδάφους σε σχέση με τα απλούστερα «γκρίζα» κουτιά όπως η ΠΕΕΑ. Για παράδειγμα, σε μια συγκριτική μελέτη σε τρείς λεκάνες στη Σικελία το μοντέλο WEPP βρέθηκε ότι έδινε καλύτερες προβλέψεις από την USLE (Amore et al, 2003) ενώ σε μια άλλη μελέτη στην λεκάνη του π. Piracicaba στο Σαο Πάολο της Βραζιλίας διαπιστώθηκε το αντίθετο (Bacchi et al, 2003).



Σχήμα 1-4 Το ερμηνευτικό πλαίσιο του μοντέλου USLE των Meyer & Wischmeier. Πρόκειται για ένα μοντέλο δύο φάσεων που θεωρεί ότι η απόσπαση του εδάφους γίνεται από την δράση της βροχής και της απορροής. Κάθε ένας από αυτούς τους μηχανισμούς έχει και μια μεταφορική ικανότητα που είναι συνάρτηση του μήκους και της κλίσης της κλιτύος (του τοπογραφικού παράγοντα). Για την περιγραφή κάθε ενός από αυτούς τους μηχανισμούς επιλέχθηκαν εμπειρικές εξισώσεις που είχαν προκύψει από την πολύ εκτεταμένη πειραματική βάση δεδομένων.

1.5.2 Εργαλεία και βάσεις δεδομένων κατά της απερήμωσης στην Ε.Ε.

Πλήθος ευρωπαϊκών προγραμμάτων έχουν υλοποιηθεί κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών, ξεκινώντας από την πρώτη χαρτογράφηση των χρήσεων γης (1ºCORINE landuse/cover) σε πανευρωπαϊκό επίπεδο στα μέσα της δεκαετίας του 1990, έως το πιο πρόσφατο LEDDRA (Land and Ecosystem Degradation and Desertification). Στα πλαίσια αυτών των προγραμμάτων και με την συνεργασία ειδικών, Πανεπιστημίων και Ερευνητικών Οργανισμών (όχι μόνο ευρωπαϊκών) ανταλλάχτηκαν εμπειρίες και γνώση, δημιουργήθηκαν εργαλεία και μοντέλα αλλά επίσης συγκροτήθηκαν μεγάλες βάσεις δεδομένων πληροφοριών σχετικών με τα εδάφη που είναι σήμερα προσβάσιμες σε κάθε ενδιαφερόμενο.



Σχήμα 1-5 Εκτιμώμενη ετήσια διάβρωση στη Μεσόγειο από τον χάρτη του PESERA (*Pan European Soil Erosion Risk Assessment)*, πρώτη έκδοση (Kirkby et al., 2004).

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η πρόσβαση σε κάθε ενδιαφερόμενο στα δεδομένα αυτά η Γενική Διεύθυνση Περιβάλλοντος της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (DG ENV) σε συνεργασία με άλλους ερευνητικούς και διοικητικούς - πολιτικούς φορείς της Ε.Ε (Joint Research Center – JRC, Eurostat, European Environmental Agency - EEA) ανέπτυξε τα *Κέντρα Δεδομένων Περιβάλλοντος* (Environmental Data Centers), των οποίων βασικός σκοπός είναι η υποστήριξη των πολιτικών και των αναγκών σε δεδομένα στο επίπεδο της Δ/νσης Περιβάλλοντος. Ένα από αυτά τα κέντρα, το κέντρο δεδομένων εδάφους, ESDAC (European Soil Data Center) είναι το θεματικό κέντρο για πληροφορίες και δεδομένα που αφορούν στα εδάφη σε Πανευρωπαϊκό επίπεδο.

Πίνακας 1-1 Τα κυριώτερα ευρωπαϊκά προγράμματα για την απώλεια εδαφών και την απερήμωση.

α/α	*Ονομασία προγράμματος*	*Έτος έναρξης*	*Σύντομη περιγραφή σκοπών*
1	***MEDALUS*** Mediterranean desertification and land use	1998	Στα πλαίσια του προγράμματος της Ευρωπαϊκής Ένωσης MEDALUS (Μεσογειακή Απερήμωση και Χρήση Γης), η απερήμωση μελετήθηκε κυρίως στα Ευρωπαϊκά Μεσογειακά περιβάλλοντα όπου η απώλεια εδάφους λόγω διάβρωσης και η συνακόλουθη απώλεια εδαφικών θρεπτικών στοιχείων χαρακτηρίζεται σαν η κυριότερη αιτία απερήμωσης.
2	***PESERA Pan European Soil Erosion Risk Assessment***	2000	Σκοπός του προγράμματος ήταν : 1. Η δημιουργία ενός φυσικού κατανεμημένου μοντέλου απώλειας εδαφών που μπορεί να εφαρμοστεί σε περιφερειακή κλίμακα 2. Η ανάπτυξη μιας στρατηγικής αξιολόγησης του μοντέλου και εκτίμησης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων του 3. Η ανάπτυξη στατιστικών μεθόδων που θα υπολογίσουν τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης πάνω σε γεωγραφικό κάναβο. 4. Η βαθμονόμηση του μοντέλου να βασιστεί πάνω σε μετρημένες τιμές. Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων ρυθμών απώλειας εδαφών σε επιλεγμένα σημεία στην Ευρώπη και παρήχθη ο σχετικός χάρτης.
3	***LADAMER*** Land degradation assessment in mediterranean europe	2002	Το έργο αυτό προτείνει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στην εκτίμηση της υποβάθμισης των εδαφών στην Μεσογειακή Ευρώπη. Ο στόχος είναι να προτείνει μια εκτίμηση του σταδίου απερήμωσης στην Μεσογειακή Ευρώπη σε μικρές κλίμακες και να αναγνωρίσει σημεία ενδιαφέροντος (hot spot areas) που αντιμετωπίζουν ιδιαίτερα υψηλό κίνδυνο απερήμωσης.
4	***LUCINDA*** Land Care In Desertification Affected Areas	2006	Ο στόχος του προγράμματος είναι να αντιμετωπίσει τους κινδύνους απερήμωσης παρέχοντας μια συνεκτική και ολοκληρωμένη βάση δεδομένων που περιέχει οδηγίες για την βιώσιμη διαχείριση της γης σε περιοχές που έχουν πληγεί. Τα δεδομένα προέρχονται από παρελθόντα και τρέχοντα προγράμματα της Ε.Ε.
5	***DESIRE*** Desertification mitigation and remediation of land	2007	Ο στόχος του προγράμματος είναι να βελτιώσει τον ορισμό των κατάλληλων δεικτών που χρησιμοποιούνται για την υποβάθμιση και απερήμωση σε επιλεγμένες περιοχές μελέτης καθώς και να επισκοπήσει την αποτελεσματικότητα των μέτρων προστασίας σε μια συμμετοχική προσέγγιση.

6	***LEDDRA*** Land and Ecosystem Degradation and Desertification	2010	Στόχος του προγράμματος είναι να αντιμετωπίσει το ζήτημα μιας ολιστικής εκτίμησης της ανταπόκρισης των οικοσυστημάτων στην απερήμωση και υποβάθμιση, σαν απαραίτητο υπόβαθρο χάραξης και υλοποίησης πολιτικών προστασίας.

1.5.3 Η χρήση της ΠΕΕΑ στην Ευρώπη και στην Ελλάδα

Η απώλεια εδάφους είναι μία από τις κύριες απειλές στα εδάφη των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με αρνητικές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και την βιοποικιλότητα, την γεωργική παραγωγή, τους υδατικούς πόρους και τις αποθήκες άνθρακα. Η θεματική επιτροπή εδάφους της Ευρωπαϊκής Επιτροπής έχει αναγνωρίσει την απώλεια εδάφους σαν σημαντικό ζήτημα και έχει προτείνει μια προσέγγιση παρακολούθησης της διάβρωσης. Μόλις το 2015, η επιστημονική επιτροπή από το Joint Research Center (JRC), του Ινστιτούτου Περιβάλλοντος και Αειφορίας (Institute for Environment and Sustainability) που είχε αναλάβει το έργο της χαρτογράφησης της διάβρωσης στα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, παρέδωσε τα αποτελέσματά της (με έτος αναφοράς το 2010) με τη μορφή βάσεων δεδομένων (datasets) και ψηφιακών χαρτών (Panagos et al, 2015).

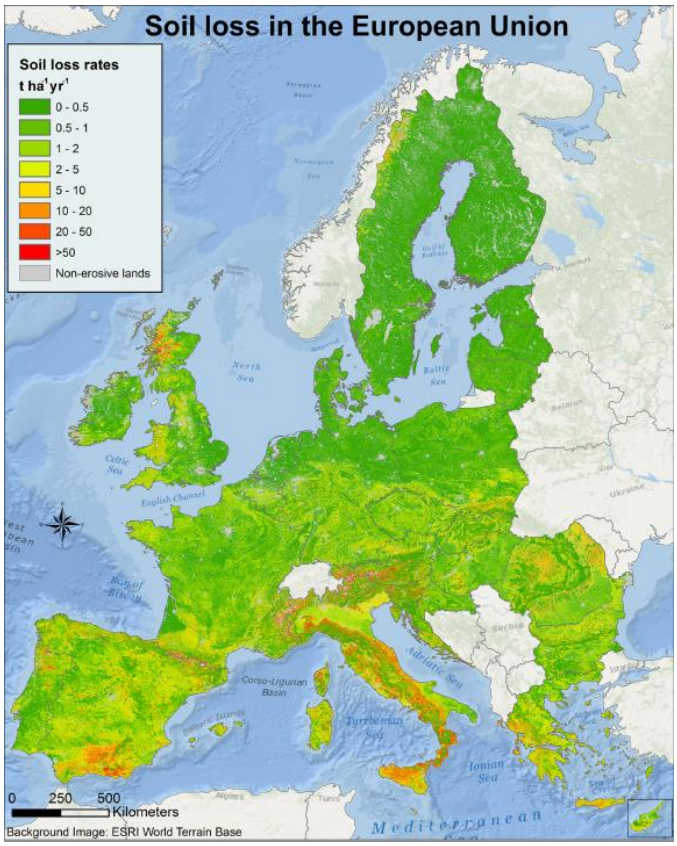
Η μεθοδολογία που αποφάσισε να χρησιμοποιήσει η επιστημονική επιτροπή για αυτό το έργο αυτό ήταν μια εκδοχή της ΑΠΕΕΑ2. Σύμφωνα με τους επιστήμονες : «*Το πιο κοινά χρησιμοποιούμενο μοντέλο είναι η USLE και η αναθεωρημένη της έκδοχή RUSLE, η οποία υπολογίζει την, σε μακροχρόνια βάση, μέση ετήσια απώλεια εδάφους που προκαλείται από επιφανειακή και αυλακωτή διάβρωση. Παρά το ότι η RUSLE δεν υπολογίζει τις απώλειες από την χαραδρωτική διάβρωση είναι η συχνότερα εφαρμοζόμενη μέθοδος για τον υπολογισμό της διάβρωσης σε μεγάλες κλίμακες, καθώς μπορεί να ενσωματώσει δεδομένα από μεγάλες περιοχές και παρέχει μια βάση για την διερεύνηση διαφορετικών σεναρίων και τη λήψη μέτρων περιορισμού της διάβρωσης. Επιπλέον, η πρόσφατη διαδικασία συλλογής δεδομένων εδαφικής απώλειας στα Ευρωπαϊκά κράτη από το ευρωπαϊκό δίκτυο παρακολούθησης και πληροφόρησης περιβάλλοντος (EIONET) αποκάλυψε ότι όλες οι συμμετέχουσες χώρες έχουν χρησιμοποιήσει τις USLE/ RUSLE για αυτόν το σκοπό*».

Η Ελλάδα βρίσκεται ψηλά στον κατάλογο διάβρωσης, με μέση απώλεια 4.13 t/ha/yr, πίσω από τις Ιταλία, Σλοβενία, Αυστρία, Μάλτα και Ισπανία (Σχ. 1-6). Τα αποτελέσματα δεν σημαίνουν ότι η Ελλάδα χάνει κάθε χρόνο περίπου 55 εκατομμύρια

τόνους εδάφους, καθότι ένα κλάσμα του παρασυρθέντος εδάφους αποτίθεται σε χαμηλότερες περιοχές. Ωστόσο, είναι βέβαιο ότι η Ελλάδα χάνει αρκετό έδαφος στην θάλασσα, όπως καταδεικνύεται και στην παρούσα έρευνα.

Οι ψηφιακοί χάρτες τόσο των επιμέρους παραγόντων (*R,LS,C,P,K*) της ΑΠΕΕΑ όσο και του τελικού αποτελέσματος είναι διαθέσιμοι στο κοινό και τους ερευνητές, πράγμα που σημαίνει ότι η εκτίμηση της απώλειας εδάφους για μια συγκεκριμμένη περιοχή της χώρας ή μια λεκάνη απορροής είναι πλέον εύκολη και γρήγορη.

Και στην Ελλάδα, οι μελετητές έχουν σχεδόν κατ'αποκλειστικότητα χρησιμοποιήσει την USLE/ RUSLE για την εκτίμηση της μέσης ετήσιας απώλειας εδάφους τόσο σε επίπεδο λεκανών απορροής, όσο και σε ευρύτερες περιοχές. Εκτός της USLE/ RUSLE, διαδεδομένη στη χώρα μας είναι και η μέθοδος EPM (Erosion Potential Method) του Gavrilovic (1988). Οι Κουτσογιάννης και Τάρλα (1987) έχουν προτείνει μια μέθοδο υπολογισμού της στερεοαπορροής (όχι της εδαφικής διάβρωσης, δες 1.5.7). Και τα δύο αυτά μοντέλα ανήκουν στην κατηγορία των ερμηνευτικών / εμπειρικών μοντέλων (γκρίζα κουτιά).



Σχήμα 1-6 Χάρτης του ρυθμού διάβρωσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση (2010) σε ανάλυση 100 μέτρων βασισμένη στην RUSLE2015 (πηγή European Soil Data Center). Η χώρα μας και κυρίως το δυτικό της τμήμα, είναι από τις πιο ευάλωτες περιοχές λόγω του συνδυασμού του ορεινού της αναγλύφου και των μεγάλων μορφολογικών κλίσεων με τις πλούσιες βροχοπτώσεις.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι όλες οι μεθοδολογίες είναι αρκετά ευαίσθητες στα δεδομένα εισόδου. Για παράδειγμα, στην USLE / RUSLE διπλασιασμός της τιμής του οποιουδήποτε παράγοντα συνεπάγεται διπλασιασμό του αποτελέσματος. Διπλασιασμός δύο παραγόντων συνεπάγεται τετραπλασιασμό του αποτελέσματος, κ.ό.κ. Καθώς οι χρήστες παίρνουν τα δεδομένα τους από πίνακες ή από GIS χωρίς την δυνατότητα κάποιας επαλήθευσης στο πεδίο (π.χ για τους *K, LS, C*), είναι λογικό τα αποτελέσματα να μη μπορούν να έχουν κάποια αξία σαν απόλυτες τιμές παρά μόνο σαν τάξη μεγέθους και σαν συγκριτικές τιμές. Ωστόσο, η εργασία του European Soil Data Center μπορεί να θεωρηθεί μια καλή αφετηρία εφόσον, εκτός της γεωγραφικής της κλίμακας και επιστημονικής πληρότητας καθώς και των πιο πρόσφατων δεδομένων καλής ποιότητας που χρησιμοποιήθηκαν, ελέγχεται συνεχώς μέσω συνεργασιών με ερευνητές, οργανισμούς και Πανεπιστήμια.

1.5.4 Άλλα μοντέλα εδαφικής απώλειας

Όπως ήδη αναφέρθηκε, διατίθενται πλέον στην επιστημονική κοινοτητα αρκετά μοντέλα εκτίμησης της εδαφικής απώλειας. Οι Καρύδας κ.ά. σε σχετικό τους άρθρο (2002), αναφέρουν 82 μοντέλα (!) και τα ταξινομούν σε 8 κατηγορίες. Οι κατηγορίες που προτείνουν οι συγγραφείς δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 1-2.

Πίνακας 1-2 Κατηγοριοποίηση μοντέλων εδαφικής διάβρωσης με βάση 8 κατηγορίες παραμέτρων

Παράμετροι μοντέλου	**Επιλογές μοντελοποίησης**
Περιοχή-έκταση	αγρός / πλαγιά / λεκάνη απορροής / γεωγραφική περιφέρεια
Διάρκεια	επεισοδίου – μέσου όρου στο χρονικό διάστημα
Παράγοντες	κλίμα / τοπογραφία / έδαφος / βλάστηση
Μηχανισμοί	απόσπαση από την βροχόπτωση / μεταφορά από την απορροή / απόσπαση από την απορροή
Χαρακτηριστικά	απώλεια εδάφους / απόθεση / στερεοαπορροή
Μορφές	επιφανειακή / αυλακωτή / χαραδρωτική / πρανική
Αλγόριθμοι	εμπειρικό – μηχανιστικό
Είδος εκτίμησης	ποιοτικό – ποσοτικό

Η διάκριση σε μοντέλα *επεισοδίου* (event) και σε *μέσου όρου* (Μ.Ο) ή συνεχούς χρόνου στη χρονική περίοδο, έχει να κάνει με την δυνατότητα του μοντέλου να

προσομοιώσει την επεισοδιακή διάβρωση από μεμονωμένα περιστατικά μικρής σχετικά διάρκειας, ή όχι (οπότε δίνει μέσες τιμές για τη χρονική περίοδο· μήνα, έτος). Συχνά χρησιμοποιείται και η διάκριση σε μοντέλα *αδρομερή* (lumped) ή *κατανεμημένα* (distributed). Η διάκριση αυτή έχει να κάνει με την αντιπροσώπευση της λεκάνης στο μοντέλο σαν ένα σύνολο με ενιαία χαρακτηριστικά, ή τον κατακερματισμό της σε επιμέρους περιοχές, οπότε το μοντέλο μπορεί να αποδώσει τα χωρικά πρότυπα διάβρωσης (ενίοτε και απόθεσης) στη λεκάνη.

Παρακάτω (Πίν. 1-3), παρουσιάζονται κάποια από τα πιο διαδεδομενα μοντέλα υιοθετώντας την βασική διάκριση που αναπτύχθηκε στο Εδάφιο 1.5.1, δηλαδή σε ερμηνευτικά / εμπειρικά (γκρίζα κουτιά) και σε φυσικά μοντέλα (άσπρα κουτιά). Ο χαρακτηρισμός αναφέρεται στην κύρια πλευρά του μοντέλου καθώς τα περισσότερα αποτελούνται από μια σύνθεση εμπειρικών και φυσικών υπομοντέλων.

Πίνακας 1-3 Βασικά χαρακτηριστικά μερικών από τα πιο διαδεδομένα μοντέλα εδαφικής απώλειας (τροποποιημένο από Merrit et al, 2003).

Μοντέλο	Τύπος	Κλίμακα	Δεδομένα, Είσοδοι - Έξοδοι	Αναφορά
ANSWERS	Φυσικό	Μικρές λεκάνες / Επεισοδίου	Απαιτήσεις σε δεδομένα: Υψηλές Αποτελέσματα: ίζημα, θρεπτικά	Beasley et al. (1980)
CREAMS	Φυσικό	Αγρός 40-400 εκτάρια / Επεισοδίου	Απαιτήσεις σε δεδομένα: Υψηλές Αποτελέσματα: διάβρωση, απόθεση, γεωχημικές ιδιότητες ιζήματος	Knisel (1980)
GUEST	Φυσικό	Αγρός /	Απαιτήσεις σε δεδομένα: Υψηλές Αποτελέσματα: συγκέντρωση ιζήματος	Yu et al. (1997) Rose et al. (1997)
LISEM	Φυσικό	Μικρές λεκάνες / Επεισόδιο	Απαιτήσεις σε δεδομένα: Υψηλές Αποτελέσματα: υδρογράφημα απορροής και στερεοαπορροής	Takken et al. (1999) De Roo and Jetten (1999)
USLE / RUSLE	Εμπειρικό	Πλαγιά / (Μέσου Ορ.)	Απαιτήσεις σε δεδομένα: Υψηλές Αποτελέσματα: διάβρωση	Wischmeier and Smith (1978)
WEPP	Φυσικό	Πλαγιά – λεκάνη /	Απαιτήσεις σε δεδομένα: Υψηλές Αποτελέσματα: απορροή, χαρακτηριστικά ιζήματος, τύπος απώλειας	Laflen et al. (1991)
EUROSEM	Φυσικό	Πλαγιά – λεκάνη / Επεισοδίου	Απαιτήσεις σε δεδομένα: Υψηλές Αποτελέσματα: απορροή, χαρακτηριστικά ιζήματος, τύπος απώλειας	Morgan et al (1998)
SWAT	Φυσικό	Λεκάνη / Μ.Ο	Απαιτήσεις σε δεδομένα: Υψηλές Αποτελέσματα: υδρογράφημα απορροής και στερεοαπορροής	Arnold and Williams, 1995
MIKE-11	Φυσικό	Λεκάνη / Επεισοδίου	Απαιτήσεις σε δεδομένα: Υψηλές Αποτελέσματα: υδρογράφημα απορροής και στερεοαπορροής	Hanley et al. (1998)

Είναι προφανές ότι τα κατανεμημένα μοντέλα επεισοδίου, δηλαδή αυτά που προσομοιώνουν μεμονωμένα συμβάντα (τα οποία συχνά είναι ενσωματωμένα σε περιβάλλοντα ΣΓΠ) είναι πολύ απαιτητικά σε δεδομένα, τόσο χωρικά όσο και χρονικά, γεγονός που περιορίζει την εφαρμογή τους.

1.5.5 Στατιστικά μοντέλα: επιλεκτική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας

Σε αυτό το εδάφιο θα γίνει αναφορά ειδικά στις Μεσογειακές και στις Ελληνικές συνθήκες και θα γίνει μια σύντομη ανασκόπηση των ευρημάτων και των συμπερασμάτων επιλεγμένων ερευνητικών εργασιών. Εκτός των σχετικών ερευνών που αφορούν το Μεσογειακό περιβάλλον, ιδιαίτερη μνεία θα γίνει σε ανάλογες έρευνες στην Νέα Ζηλανδία αφού διαπιστώθηκε ότι μπορούν να αντληθούν πολύτιμα συμπεράσματα από αυτές. Πρέπει να επισημανθεί ότι η στερεοαπορροή για την οποία γίνεται αναφορά παρακάτω είναι αυτή που οφείλεται στα αιωρούμενα φερτά, δεν περιλαμβάνονται δηλαδή ούτε η στερεοαπορροή σε διάλυση αλλά ούτε και το φορτίο υλικού πυθμένα.

Στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες να εξαχθεί κατά τόπους ένα γενικής εφαρμογής μοντέλο πρόβλεψης της στερεοαπορροής. Στην Ισπανία οι Versraeten et al (2003) ανέπτυξαν και εφάρμοσαν μια ποσοτική / ημι-ποιοτική ανάλυση βασιζόμενοι στις δημοσιευμένες τιμές στερεοαπορροής από 60 ταμιευτήρες της Ιβηρικής χερσονήσου. Επιλέγοντας 22 από αυτές ανέπτυξαν ένα μοντέλο τύπου Factorial Scoring Model (FSM), στο οποίο οι 5 παράγοντες (factors) ήταν η τοπογραφία (μορφολογικές κλίσεις της λεκάνης κοντά στον ταμιευτήρα), η παρουσία (μέγεθος και συχνότητα εμφάνισης) των χαραδρώσεων (gullies), η κάλυψη του εδάφους, η λιθολογία και το σχήμα της λεκανης απορροής. Για τον κάθε παράγοντα υπάρχει μια βαθμολογία (score) από το 1 (ήπιες συνθήκες) έως το 3 (ακραίες συνθήκες), και το γινόμενο των 5 αυτών αριθμών επί έναν συντελεστή προστίθεται σε έναν αρχικό όρο που οφείλεται στην επιφάνεια –και μόνο- της λεκάνης. Η γενική μορφή της εξίσωσης είναι η παρακάτω:

$$\mathrm{SSY} = \mathrm{a} * \mathrm{A}^{-\kappa} + \mathrm{b} * I + \mathrm{c} \qquad (1\text{-}2)$$

Όπου SSY (Suspended Sediment Yield), η στερεοαπορροή, δίνεται σε $t/km^2/y$, A είναι η επιφάνεια της λεκάνης (km^2), I είναι το αποτέλεσμα του γινομένου (score) των 5 παραγόντων και a,b,c και k είναι θετικοί αριθμοί – σταθερές. Το ποιοτικό στοιχείο της

εκτίμησης έγκειται σε μεγάλο βαθμό στην επι τόπου αναγνώριση της λεκάνης απορροής και ειδικότερα στον χαρακτηρισμό της κάλυψης του εδάφους, καθώς και την αναγνώριση και εκτίμηση των χαραδρώσεων (gullies). Υπάρχει μια μεγάλη συζήτηση όσον αφορά την καταλληλότητα των υφιστάμενων κατηγοριοποιήσεων, π.χ. του Corine Land Cover (CLC), προκειμένου να μπορούν να χρησιμεύσουν σαν έγκυροι δείκτες της φυτοκάλυψης του εδάφους (πραγματευόμαστε αυτό το ζήτημα στο Εδάφιο 4.10.2). Οι συγγραφείς επίσης σημειώνουν ότι οι παραπάνω παράγοντες πρέπει να εκτιμηθούν σε μια ζώνη περίπου 5 χιλιομέτρων από το κύριο υδρογραφικό δίκτυο και όχι σε όλη την έκταση της λεκάνης.

Η μεθοδολογία αυτή επεκτάθηκε αργότερα και στην Ιταλία από τον Joris deVente (2009) στην διδακτορική του έρευνα. Ο deVente βασίστηκε σε τιμές από 28 ταμιευτήρες στην Ιταλία και ανέπτυξε παραλλαγές του FSM, όπως για παράδειγμα η απόδοση συντελεστών βαρύτητας ή βαρών στους παράγοντες. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο deVente προσέθεσε τις κατολισθήσεις σαν παράγοντα στην περίπτωση των ποταμών της Ιταλίας ενώ ανέπτυξε και μοντέλα παραλλαγές του FSM που δεν ελάμβαναν υπόψη την επιφάνεια της λεκάνης (μοντέλα no area). Τα FSM μοντέλα, με βάση τις στατιστικές τους, κρίθηκαν επιτυχημένα για την Ισπανία (R^2=0.80), και λιγότερο επιτυχημένα για την Ιταλία (R^2=0.67, no area εκδοχή με κατολισθήσεις).

Από τα μοντέλα αυτά λείπει παραδόξως η βροχόπτωση, και αυτό δεν οφείλεται στο ότι οι ερευνητές δεν την περιέλαβαν στην ανάλυσή τους. Στην έρευνα για την ανάπτυξη του πρώτου FSM μοντέλου, οι Versraeten et al (2003) συμπεριέλαβαν 5 δείκτες βροχής (μεση ετήσια βροχόπτωση, μεση θερινή βροχόπτωση, μεση χειμερινή βροχόπτωση, τροποποιημένος δείκτης Fournier και δείκτης συγκέντρωσης βροχόπτωσης). Ωστόσο οι τιμές των δεικτών αυτών υπολογίστηκαν από παγκόσμια πλεγματικά δεδομένα (ειδικότερα από το CRU Global Climate Dataset) και όχι από τους τοπικούς σταθμούς με κάποια από τις ενδεδειγμένες μεθόδους (π.χ. πολύγωνα Thiessen). Αυτά τα δεδομένα, όπως διαπιστώθηκε στην παρούσα έρευνα, δεν έχουν την απαραίτητη ανάλυση έτσι ωστε να αναδείξουν τις διαφορές στην ποσότητα της βροχόπτωσης μεταξύ γειτονικών λεκανών, και επιπλέον υποτιμούν συστηματικά τις πραγματικές τιμές. Μια ματιά στις μέσες τιμές των βροχοπτώσεων στην Ισπανία που αναφέρονται στο κείμενο των Versraeten et al., αποκαλύπτει πολύ μικρές τιμές (500-700 χιλιοστά) και –το κυριώτερο- μικρές διαφορές από λεκάνη σε λεκάνη, δηλαδή μικρή χωρική βαθμίδα, γεγονός που δεν αφήνει να φανεί η επίδρασή της στην στερεοαπορροή.

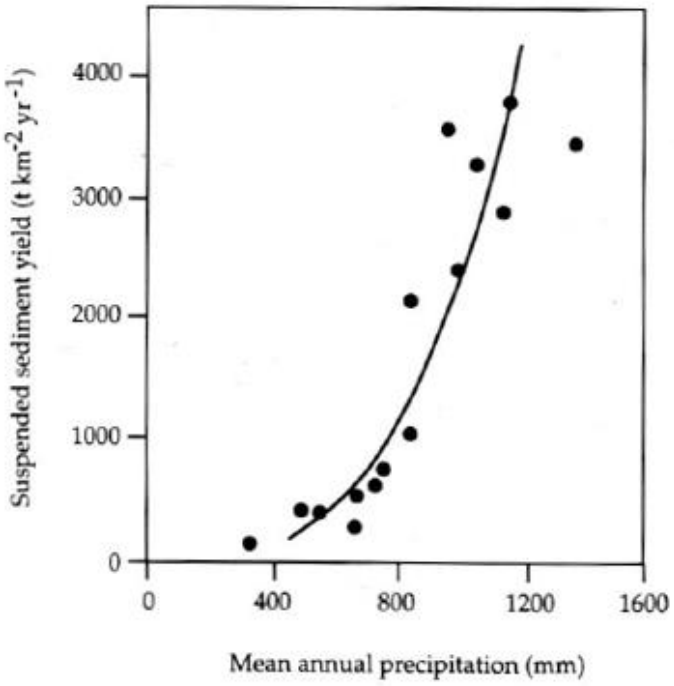
Μια καλή επισκόπηση των μεσογειακών συνθηκών δίνεται από τον J.C.Woodward (1995). Στο ίδιο άρθρο δίνονται και τιμές της ειδικής στερεοαπορροής για αρκετές λεκάνες του Μεσογειακού χώρου, τόσο για την Ευρώπη όσο και την Αφρική. Στην Ευρώπη δίνονται στοιχεία για λεκάνες της Αλβανίας, δηλαδή λεκάνες με πανομοιότυπες –όσο αφορά το κλιματικό και γεωλογικό καθεστώς- συνθήκες με τις ελληνικές λεκάνες της ΒΔ Ελλάδας που παρακολουθούσε η ΔΕΗ.

Πίνακας 1-4 Στοιχεία αιωρούμενων φορτίων και ειδικής στερεοαπορροής για λεκάνες απορροής της Μεσογείου από την βάση των Milliman και Syvitski (1992). Οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στις λεκάνες της Αλβανίας.(πηγή J.C.Woodward, 1995)

Ποταμός	*Χώρα*	*Επιφάνεια* (10^6 km^2)	*Στερεοπαροχή* (10^6 $t\ yr^{-1}$)	*Στερεοαπορροή* $t\ km^{-2}\ yr^{-1}$
Βόρεια Μεσόγειος (Ευρώπη)				
Semani	Αλβανία	0,0052	22,0	4200
Shkumbini	Αλβανία	0,0019	6,8	3600
Osumi	Αλβανία	0,0020	5,7	2800
Lamone	Ιταλία	0,0052	12,0	2400
Simento	Ιταλία	0,0018	4,0	2000
Savio	Ιταλία	0,0060	11,0	1900
Νότια Μεσόγειος (Αφρική)				
Djer	Αλγερία	0,00039	0,68	1700
El Harrach	Αλγερία	0,00039	0,63	1600
Isser	Αλγερία	0,0036	6,1	1700
Sebou	Μαρόκο	0,040	26,0	930
Meddjerdah	Αλγερία	0,021	13,0	620
Sous	Μαρόκο	0,016	1,6	260

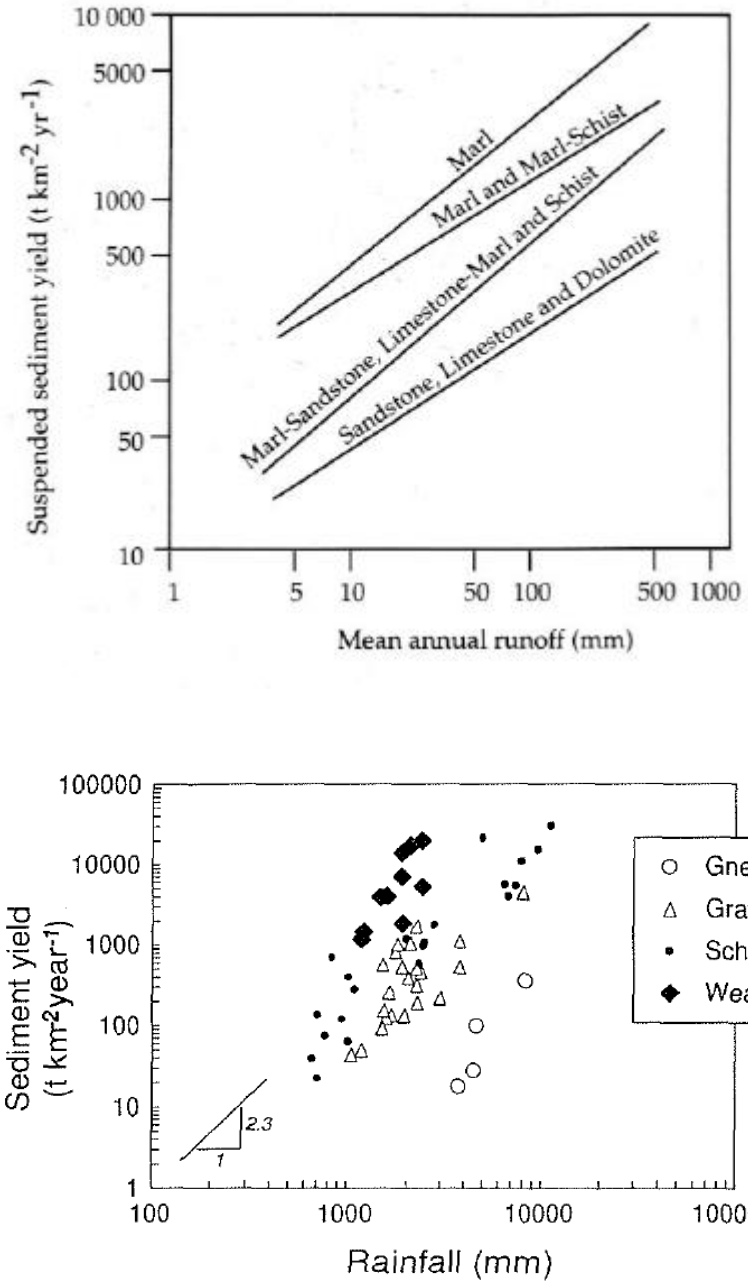
Σαν καθοριστικοί παράγοντες ελέγχου της ειδικής στερεοαπορροής καθώς και της στερεοπαροχής στην ευρύτερη περιοχη της Μεσογείου αναγνωρίζονται κατ' αρχήν η μορφολογική κλίση της λεκάνης απορροής (η τοπογραφία), οι βροχοπτώσεις ή/και η ένταση των βροχοπτώσεων, το λιθολογικό υπόβαθρο της λεκάνης (ευδιάβρωτα ή όχι πετρώματα), και τέλος η χρήση και η κάλυψη της γης. Οι παράγοντες αυτοί έχουν ήδη επισημανθεί στην εργασία των Milliman & Syvitski (1992). Στην κλασική αυτή έρευνα ως βασικοί παράγοντες ελέγχου της στερεοαπορροής θεωρούνται η τοπογραφία και η έκταση της λεκάνης, ενώ η υδαταπορροή και οι βροχοπτώσεις κρίνονται ως δευτερεύοντες παράγοντες ελέγχου. Ιδιαίτερη μνεία γίνεται στο γεωλογικό – λιθολογικό υπόβαθρο της

λεκάνης απορροής καθώς και στην κάλυψη της γης (του εδάφους) ως παράγοντες που πρέπει να αξιολογούνται ανά περίπτωση.



Σχήμα 1-7 Η σχέση της ειδικής στερεοαπορροής με την μέση βροχόπτωση της λεκάνης για ποτάμια στο Μαρόκο. (πηγή J.C.Woodward, 1995 - από Heusch & Millies-Lacroix, 1971)

Στην παραπάνω εργασία του J.C.Woodward (1995) γίνεται εκτεταμένη αναφορά της σημασίας του γεωλογικού - λιθολογικού υποβάθρου των λεκανών απορροής καθώς και της παρουσίας των μεσογειακών Badlands. Ο Woodward θεωρεί την μορφλογία που αναπτύσσεται σε περιοχές της Ελλάδας που καταλαμβάνονται από σχηματισμούς φλύσχη σαν semi-badland, γεγονός που σε έναν βαθμό εξηγεί τις αυξημένες στερεοαπορροές των Ελληνικών και Αλβανικών λεκανών. Στο συγκεκριμενο άρθρο περιγράφεται μια περιοχή με μορφολογικά χαρακτηριστικά badland, που βρίσκεται ανατολικά της Κόνιτσας, εντος της λεκάνης απορροής του ποταμού Αώου. Ο Αώος στην Γέφυρα της Κόνιτσας παρουσιάζει την μεγαλύτερη στερεοαπορροή σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα ελληνικά ποτάμια (>2000 t/km^2/yr) με την εξαίρεση ίσως του Άραχθου.



Σχήμα 1-8 Επίδραση του λιθολογικού υποβάθρου στην στερεοαπορροή. (πάνω, από J.C.Woodward, 1995, κάτω, από Hics et al., 1996)

Το επάνω διάγραμμα του Σχήματος 1-8 απεικονίζει την σχέση απορροής-στερεοαπορροής για λεκάνες διαφορετικής λιθολογικής σύστασης από τον Μεσογειακό χώρο (Woodward, 1995), ενώ το κάτω διάγραμμα του ίδιου σχήματος προέρχεται από την Ν. Ζηλανδία και απεικονίζει την σχέση βροχόπτωσης - στερεοαπορροής για ένα δείγμα 60 λεκανών με διαφορετικές κυρίαρχες λιθολογίες (Hics et al., 1996). Εάν θεωρηθεί η απορροή σαν υποκατάστατο της βροχόπτωσης –ή και το αντίστροφο-, τα δύο σχήματα ουσιαστικά παρουσιάζουν την επίδραση της λιθολογίας της λεκάνης στην στερεοαπορροή

με αξιοσημείωτη ομοιότητα αναμεσά τους. Παρατηρείται ότι τα απολύτα μεγέθη στην N. Ζηλανδία είναι μεγαλύτερα αφού εκεί έχουν σημειωθεί τιμές ειδικής στερεοαπορροής έως και 30,000 t/km^2/yr. Αυτό εν μέρει οφείλεται στις πολύ μεγαλύτερες τιμές της βροχόπτωσης που σε αρκετά μέρη της N. Ζηλανδίας φτάνει και τα 10 μέτρα τον χρόνο!

Τα ευρήματα των ερευνητών στην N. Ζηλανδία έχουν ιδιαίτερη σημασία και αξίζει να γίνει μια σύντομη αναφορά σε αυτά. Δεν θα πρέπει να ξενίζει η αναφορά σε έναν τόσο μακρυνό τόπο αφού η σχέσεις της N. Ζηλανδίας με τον Ελλαδικό χώρο έχουν ήδη επισημανθεί από αρκετούς ερευνητές όσον αφορά το γεωλογικό υπόβαθρο και κυρίως το τεκτονικό καθεστώς που αποτελεί μια από τις κύριες αιτίες διαμόρφωσης του ανάγλυφου. Πράγματι, η τεκτονική δραστηριότητα στην Ελλάδα είναι η μεγαλύτερη στον μεσογειακό χώρο και είναι συγκρίσιμη με μέρη όπως η Ιαπωνία, η N. Ζηλανδία και επιμέρους περιοχές της μέσης Ανατολής όπου οι ρυθμοί τεκτονικής ανύψωσης κυμαίνονται από μέτρα έως δεκάδες μέτρα ανά χιλιετία (Bailey et al., 1993).

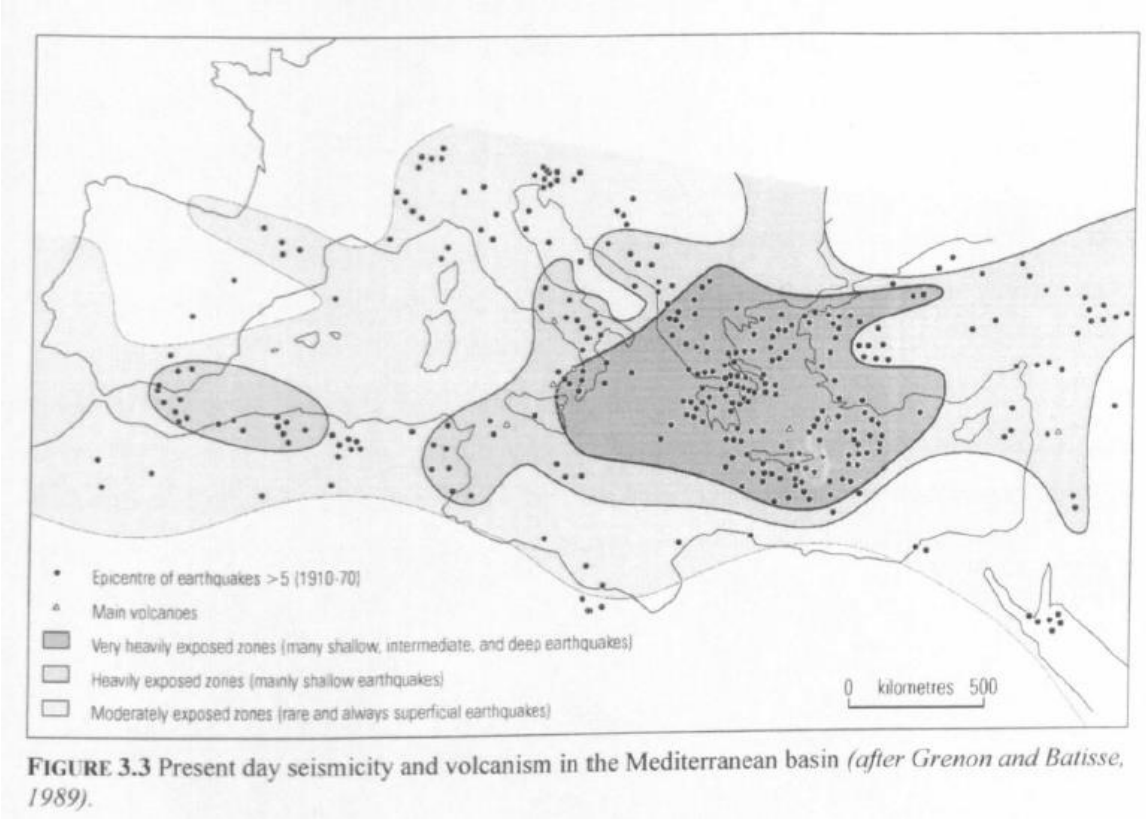


FIGURE 3.3 Present day seismicity and volcanism in the Mediterranean basin *(after Grenon and Batisse, 1989).*

Σχήμα 1-9: Σεισμική και ηφαιστειακή δραστηριότητα στην Μεσόγειο. Ο Ελλαδικός χώρος ανήκει στην ζώνη της πιο έντονης δραστηριότητας. (Πηγή The Mediterranean watershed, Grenon and Batisse, 1989)

Οι Hics et al. (1996), διερευνούν την σχετική σημασία βροχόπτωσης και γεωλογίας στην στερεοαπορροή. Τα δεδομένα τους περιλαμβάνουν 203 λεκάνες με έκταση από λιγότερο από 1km^2 έως 6640 km^2, βροχοπτώσεις από 665 έως και 11200 mm/yr, και τιμές

ειδικής στερεοαπορροής από 30-100 έως 10,000 – 30,000 t/km^2/yr. Ειδικότερα εξετάζουν το ποιός από τους δύο αυτούς παράγοντες φαίνεται ως ο επικρατέστερος σε ότι αφορά την διαμόρφωση των τιμών στερεοαπορροής.

Η επίδραση της γεωλογίας στην ειδική στερεοαπορροή υπήρξε αντικείμενο διαφωνίας μεταξύ των ερευνητών στη N. Ζηλανδία. Ο Griffiths (1981) από την έρευνά του στο νότιο νησί υποστήριξε ότι η γεωλογία είχε μικρή επιρροή και ότι ο κύριος παράγοντας διαμόρφωσης των τιμών της στερεοαπορροής είναι η μέση ετήσια βροχόπτωση. Αντίθετα, ο Adams (1980) υποστήριξε ότι η λιθολογία, ο μέσος τεκτονικός ρυθμός ανύψωσης και η πρόφατη γεωλογική/γεωμορφολογική ιστορία κατά την περίοδο του Τεταρτογενούς έχουν μεγαλη επίδραση στην παραγωγικότητα των λεκανών σε φερτά υλικά. Τα εξαγόμενα της έρευνας των Hics et al.(1996) -όπου χρησιμοποίησαν αρκετούς δείκτες βροχόπτωσης και έντασης της βροχόπτωσης-, φαίνονται να ενισχύουν την άποψη του Adams (1980) καθώς οι μεγαλύτερες τιμές –και στα δύο νησιά- συγκεντρώνονται κοντά στην ζώνη βύθισης της πλάκας του Ειρηνικού κάτω από την Ινδική πλάκα.

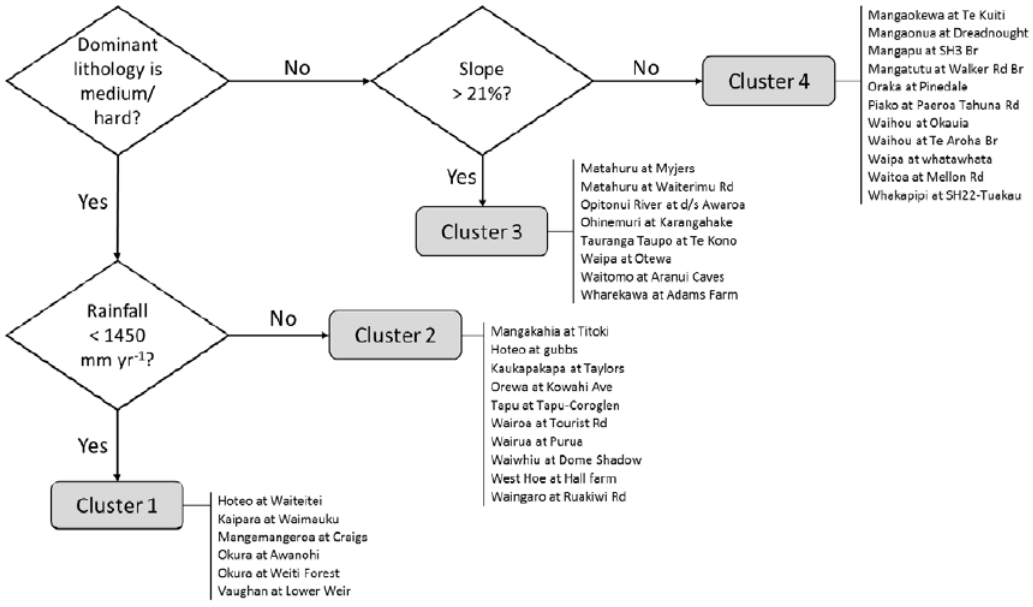


Figure 2-2: Classification of catchments into clusters for WANSY2-D model based on slope, rainfall, and lithology classes.

Σχήμα 1-10 Το μοντέλο WANSY2-D (no area) που χρησιμοποιείται για την περιοχή Waikato-Auckland-Northland της N.Ζηλανδίας, ομαδοποιεί τις λεκάνες ανάλογα με τις τιμές κλίσης και βροχόπτωσης, και κατόπιν εφαρμόζει άλλο τύπο στην κάθε μία. (Haddadchi and Hicks, 2016).

Η «κατάληξη» αυτής της διχογνωμίας εκφράζεται στο μοντέλο WANSY2-D (Σχ. 1-10) που εγκρίθηκε το 2016 για εφαρμογή στις περιοχές Waikato-Auckland-Northland της

Ν. Ζηλανδίας (Haddadchi and Hicks, 2016). Η δομή του μοντέλου αυτού, που δίνεται στο παραπάνω σχήμα υπονοεί ότι *στις «σκληρές», ανθεκτικές στη διάβρωση, λιθολογίες, κύριος παράγων ρύθμισης της παραγωγής των φερτών υλών είναι η βροχόπτωση, ενώ στις ευδιάβρωτες λιθολογίες κύριος παράγων είναι η μορφολογική κλίση της λεκάνης απορροής*.

1.5.6 Ερευνες εδαφικής απώλειας στην Ελλάδα

Το αυξανόμενο ενδιαφέρον των Ελλήνων ερευνητών για τα ζητήματα της απώλειας εδάφους και της ερημοποίησης κατά το πρόσφατο παρελθόν (μετά το 2000) έρχεται σε κραυγαλέα αντίθεση με την εγκατάλειψη των μετρήσεων στερεοαπορροής από όλες τις κρατικές επιχειρήσεις και οργανισμούς που εκτελούσαν τέτοια προγράμματα κατά το παρελθόν. Καθώς μάλιστα ο κατακερματισμός και η αποστελέχωση των επιχειρήσεων προχωρά μαζί με τις περικοπές στους προϋπολογισμούς τους (π.χ ΔΕΗ) και ο έλεγχός τους μεταβιβάζεται από την ιδιοκτησία του Δημοσίου σε ιδιώτες, η κατάσταση δεν προβλέπεται να καλυτερέψει, τουλάχιστον στο ορατό μέλλον. Σε ερευνητικό επίπεδο, και κυρίως από Πανεπιστήμια που συμμετέχουν σε (και χρηματοδοτούνται από) Ευρωπαϊκά προγράμματα υπάρχει μια μετρητική δραστηριότητα που αφορά κυρίως πειραματικούς αγρούς, μικρές δηλαδή περιοχές με ελεγχόμενες συνθήκες. Εξ'όσων γνωρίζουμε εκτιμήσεις στερεοαπορροής, βασισμένες σε μετρήσεις, έχουν γίνει από τους Αμαξίδη & Σκουλικίδη (2008) στην εκβολή του π. Κράθι (αιωρούμενο και πυθμενικό φορτίο, το πυθμενικό εκτιμήθηκε μέσω του πάχους των αποθέσεων), ενώ είναι χαρακτηριστικό ότι δεν έχει εκπονηθεί ποτέ κάποιο πρόγραμμα μετρήσεων πυθμενικού φορτίου, εκτός από τους Παπαλάσκαρη – Χρυσάνθου που μέτρησαν σε θέσεις πάνω στον π. Νέστο (2015).

Από την άλλη, ή έλευση των GIS στα μέσα τις δεκαετίας του 1990 και η γενίκευση της χρήσης τους μετά το 2000 οδήγησε σε μια εκθετική αύξηση της σχετικής αρθρογραφίας. Έτσι, σε σχετική έρευνα (Koutalakis et al., 2015) αναφέρεται οι έξι δημοσιεύσεις στην δεκαετία του 1980, έγιναν 21 δημοσιεύσεις στη δεκαετία του 1990 ενώ στη δεκαετία του 2000 ο αριθμός των σχετικών δημοσιεύσεων έφτασε τις 52. Από το 2010 εως και το 2015, ο αριθμός των δημοσιεύσεων έχει υπερβεί τις 32. Η θεματική αυτών των δημοσιεύσεων περιλαμβάνει τις χρήσεις και τους τύπους των εδαφών, τα φυσικά φαινόμενα της διάβρωσης, τις ανθρωπογενείς επιδράσεις και τα διατιθέμενα εργαλεία ανάλυσης. Ο παρακάτω Πίνακας 1-5 αποτελεί μια σύντομη επισκόπηση κάποιων από τις μελέτες αυτές, παρουσιάζοντας συνοπτικά και τα αποτελέσματά τους.

Πίνακας 1-5 Κάποιες μελέτες εδαφικής διάβρωσης και στερεομεταφοράς σε Ελλάδα και Κύπρο με τα αποτελέσματά τους και σχολιασμό.
Συμβολισμοί: ΟΑ (gross erosion amount – Ολική Απόσπαση), ΣΑ (sediment yield –ΣτερεοΑπορροή) , ΣΣΑ (συντελεστής ΣΑ = ΔΑ / ΣΑ), ΕΣΑ (ειδική ΣΑ), Δ.Ε διδακτορική έρευνα

α/α	*Μελετητές / πηγή*	*έτος*	*Γεωγραφική περιοχή*	*έργο*	*Μέθοδοι*	*Αποτελέσματα*	*Παρατηρήσεις*
1	Κουτσογιάννης & Ταρλά Δημοσίευση ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΡΟΝΙΚΑ	1987	π. Άραχθος π.Καλαμάς π. Αλιάκμων	-	Στατιστική ανάλυση παλινδρόμησης / συσχέτισης	Εμπειρικό μοντέλο εκτίμησης της στερεοαπορροής.	Η ανάλυση ανέδειξε δύο ερμηνευτικούς παράγοντες: την μέση ετήσια βροχόπτωση και το γεωλογικό υπόθεμα
2	Hrissanthou & Kalpaktsidou Πρακτικά Συμποσίου IAHSpubl.	2003	Ταμιευτήρας Γερμασόγιας Κύπρος 123 km^2	-	ιδιομοντέλο (In-house) με τρια μόντουλα: • Βροχή-απορροή • Επιφανειακή Διάβρωση • Μεταφορά στο υδρ. Δίκτυο 4 υπολεκάνες - 4 έτη	Σε mm /yr (1mm=123.000 m^3 /yr) Για όλη τη λεκάνη: 1.2 mm YD ετήσια εύρη (χιλ. τόνοι): 27-368 YD ~ 220-2.992 t/ km^2/yr Μέσο YA ~ 180 t/ km^2 Μέσος DR: 38%	Μέθοδοι Van Rijn, Yang-Stahl, Schmidt Υδρολογικό μοντέλο: Γιακουμάκης – Τσακίρης 1992 Μηνιαία αποτελέσματα, βήμα ημερήσιο, Εκτιμώμενος χρόνος ζωής ταμιευτήρα 140-190 έτη.
3	Παπάζογλου Π. Δημοσίευση δράσης	2009	Λεκάνη π.Ανθεμούντα Χαλκιδική 321 km^2	LIFE	USLE (PESERA, WEPP) για εκτίμηση της επιφανειακής διάβρωσης	YD: 200 έως >5.000 (t/ km^2/yr) ~50% της λεκάνης κάτω από 200 ~5% της λεκάνης πάνω από 5.000 Μεσαία συνολική χειμαρρικότητα	Μέθοδος Stiny-Herhenlidze για εκτίμηση πρανικής και χαραδρωτικής διάβρωσης Κελι: 100 μ
4	Στεφανίδης Π. και Καλιντέρης Ι. Πρακτικά Συμποσίου	2008	Δασικό πάρκο Τρωόδου, Κυπρος ~100 km^2	-	EPM Gavrilovic	Εύρος: 4-2500 m^3/km^2/yr ~11-6.625 t/ km^2/yr με s=2.65 Υπολογισμός DR	-
5	Κούλη κ.ά Δημοσίευση	2008	Χανιά, Κρήτη 9 λεκάνες 22-180 km^2	INTERREG III B ARCHIMED	USLE	YD Μέσα ετήσια 7.700-20.500 (t/ km^2/yr) Μέγιστα ετήσια: 115.000-400.000 (‘’)	Χρήση NDVI για εκτίμηση του C

α/α	*Μελετητές / πηγή*	*έτος*	*Γεωγραφική περιοχή*	*έργο*	*Μέθοδοι*	*Αποτελέσματα*	*Παρατηρήσεις*
6	Νικα κ.ά	2012	Λεκάνη Βοιωτικού Κηφισσού ~720 km^2	-	USLE, Jansen & Painter, Κουτσογιάννης & Τάρλα, Probst	Μέσο υπερετήσιο YD αιωρούμενο / συνολικό (t/ km^2) USLE /99,97 Jansen & Painter : 92/ 115 Κουτσογιάννης & Τάρλα : 28/ 35 Probst 1 :54/ 67 Probst 2 : 92/ 115	Εκτίμηση μηνιαίου ύψους απορροής με μοντέλο Thornthwaite USGS
7	Δ. Ζαρρής	2006	Λεκάνες απορροής τ. Κρεμαστών 3292 km^2	Δ.Ε ΕΜΠ	Αποτύπωση ταμιευτήρα Γεωτρήσεις	ΕΣΑ Λ. Αχελώου ~ 1.184 t/km^2/yr Λ.Αγραφιώτη ~ 2.034 (‘’) Λ.Ταυρωπού ~ 489 (‘’)	Μέση υπερετήσια στερεοαπορροή στη λεκάνη
8	Κουρακλή Δ.	2010	Λεκάνη απορροής τ.Πολύφυτου, Κοζάνη 848 km^2	Δ.Ε ΑΠΘ	EPM Gavrilovic	244.000 m^3 /yr ~646.600 t/ yr ΕΣΑ ~762 t/km^2/yr , DR: 41%	Χρήση NDVI για εκτίμηση του C
9	Ξανθάκης Μ.	2011	Λεκάνη τ. Μαραθώνα Αττική 118 km^2	Δ.Ε ΧΑΡΟΚ.	RUSLE, RMMF EPM Gavrilovic Αποτύπωση ταμιευτήρα Μετρήσεις πεδίου Γεωφυσικές διασκοπήσεις	Όγκος φερτών ~ 4,7 hm^3 (80 χρ.) YA ~ 508 t/km^2/yr με DR: 35% (υπόθεση) -> YD ~ 1450 t/km^2/yr	Προτείνεται η μέθοδος EPM
10	Panagos et al.	2014	Κρήτη	-	Μοντέλο G2	Μέση ετήσια τιμή ΔΑ~ 812 t/km^2/yr Μέγιστες τιμές ΔΑ~ 1400 t/km^2/yr	Το μοντέλο αποδίδει την ετήσια πορεία της διάβρωσης, το 80% της οποίας συμβαίνει κατά τους μήνες Οκτώβριο έως Ιανουάριο

α/α	*Μελετητές / πηγή*	*έτος*	*Γεωγραφική περιοχή*	*έργο*	*Μέθοδοι*	*Αποτελέσματα*	*Παρατηρήσεις*
11	Αμαξίδης Γ. και Σκουληκίδης Ν. Πρακτικά Συμποσίου	2006	Λεκάνη π. Κράθη Αχαϊα 148 km^2	-	Μετρήσεις αιωρούμενων Τοπογραφικές αποτυπώσεις αρχής – τέλους στην εκβολή	τοπική απόθεση ~ 77mm/yr ΥΑ ~100 $t/km^2/yr$ (αιωρούμενο) 23 $t/km^2/yr$ (κοίτης) αν DR: 35% ->YD ~ 350 $t/km^2/yr$	Μετρήσεις συγκεντρώσεων αιωρούμενων κατά τη διάρκεια επεισοδίων με συνεχές αυτόματο σύστημα
12	Ιγνατιάδης Η.	2015	Λεκάνη π. Κράθη Αχαϊα 148 km^2	Πτυχιακή ΤΕΙ Αθ. Επιβλέπων Σ.Καραλής	RUSLE, EPM Gavrilovic, Κουτσογιάννης & Τάρλα	ΔΑ RUSLE : 2.700 $t/km^2/yr$ EPM : 4.875 $t/km^2/yr$ ΣΑ Κουτσ. & Τάρλα: 98 $t/km^2/yr$	Πολύ καλή συμφωνία αποτελεσμάτων μεθόδου Κουτσογιάννη & Ταρλά με τις μετρήσεις των ερευνητών. Η μέθοδος EPM (και η RUSLE) απαιτούν expert knowledge για τον καθορισμό των τιμών των παραμέτρων.
13	Καραλής κά. Πρακτικά συνεδρίου	2014	Λεκάνη π. Άραχθου (Γ.Τσιμόβου) Ήπειρος ~640 km^2	Δ.Ε (τμήμα)	Μοντέλο τύπου stream power τροποποιημένο από Thornes (1990) Στερεουδρομετρήσεις από ΔΕΗ στη θέση για 13 χρόνια (156 μήνες).	Σε mm /yr (1mm=640.000 m^3 /yr) Από ΔΕΗ ΣΑ: 0.21mm/year 134.400 m^3 /yr 356.160 t/yr ΥΑ ~ 556 $t/km^2/yr$ Από μοντέλο ΔΑ: 0.28 mm/yr 181.760 m^3 /yr 481.664 t/yr YD ~753 $t/km^2/yr$	Δυναμικό Μοντέλο με μηνιαίο βήμα στην PCRaster GIS Χρησιμοποιεί, απορροή, κλίση, φυτοκάλυψη και συντελεστή διαθεσιμότητας ιζήματος k (στον Thornes, k είναι ο συντ.διαβρωσιμότητας) Κελι: 100 μ Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τους υπολογισμούς της ΔΕΗ

1.5.7 Στατιστικά μοντέλα στην Ελλάδα και διαθέσιμες μετρήσεις

Η πρώτη προσπάθεια εξαγωγής μιας εμπειρικής σχέσης γενικής εφαρμογής στη χώρα μας, που να προβλέπει την μέση υπερετήσια στερεοαπορροή αιωρούμενου φορτίου, (SSY - Suspended Sediment Yield σε t/km^2/έτος) συναρτήσει κάποιων ερμηνευτικών παραμέτρων - μεταβλητών, όπως π.χ η βροχόπτωση ή η λιθολογική σύσταση της λεκάνης απορροής, οφείλεται στους Κουτσογιάννη – Ταρλά (1987). Οι Κουτσογιάννης και Ταρλά μελέτησαν 7 θέσεις σε 3 ποταμούς της ΒΔ Ελλάδας (Άραχθος, Καλαμάς και Αλιάκμων), κατέστρωσαν τις καμπύλες απορροής – στερεοαπορροής με βάση τις στερεοϋδρομετρήσεις της ΔΕΗ, και στη συνέχεια εξέτασαν την επιρροή των εξής παραμέτρων πάνω στα αποτελέσματά τους: κλίση (που την ανέλυσαν σαν φαινόμενη κλίση και μέση κλίση του ποταμού), γεωλογική σύσταση, βροχοπτώσεις και θερμοκρασία. Οι συγγραφείς καταλήγουν ότι κύριο έλεγχο ασκούν η μέση ετήσια βροχόπτωση και το γεωλογικό υπόβαθρο των λεκανών και προτείνουν ένα *no area* μοντέλο με την εξής μορφή:

$$SSY = 15 * \gamma * e^{3P} \quad (1\text{-}3)$$

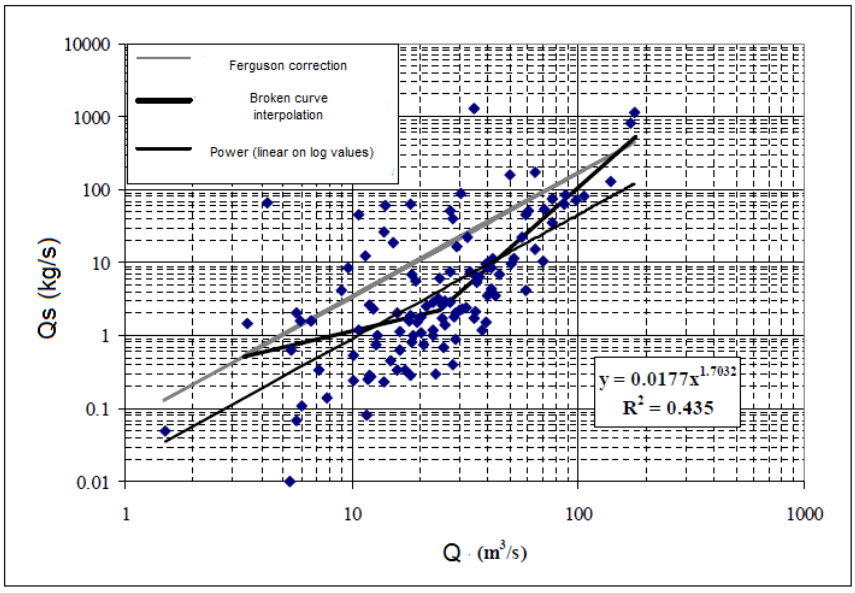
SSY σε t/km^2/y, P είναι η μέση ετήσια βροχόπτωση (mm), και γ είναι ο λεγόμενος γεωλογικός συντελεστής ο οποίος υπολογίζεται σαν σταθμισμένος μέσος από τα ποσοστά εμφάνισης τριων κατηγοριών γεωλογικών σχηματισμών, ομαδοποιημένων με βάση τη διαβρωσιμότητά τους (υψηλή διαβρωσιμότητα: αλλούβια, φλύσχης, μέτρια: μάργες, ψαμμίτες, σχιστόλιθοι, χαμηλή: ασβεστόλιθοι, δολομίτες, μεταμορφωμένα, εκρηξιγενή) επί έναν συντελεστή κ για κάθε κατηγορία (κ = 0,1 για τους χαμηλής διαβρωσιμότητας γεωλογικούς σχηματισμούς, κ = 0,5 για τους μέτριας και κ = 1 για τους υψηλής διαβρωσιμότητας). Η προσαρμογή του μοντέλου αυτού στις μετρήσεις των συγγραφέων είναι καλή.

Η δεύτερη προσπάθεια είναι αυτή των Poulos et al. (1996). Οι συγγραφείς μελέτησαν κυρίως την προέλαση των δέλτα των ποταμών και κατέληξαν σε μια απλή σχέση που συνδέει το ολικό υπερετήσιο φορτίο αιωρούμενων μόνο με την έκταση της λεκάνης απορροής:

$$Y = 1954 * A^{0,88} \quad (1\text{-}4)$$

όπου το Y δίνεται σε t/y, A είναι η επιφάνεια της λεκάνης απορροής σε km^2.

Περίπου 10 χρόνια μετά, το 2007, ακολούθησε η έρευνα των Ζαρρή – Λυκούδη στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «*Εκτίμηση της στερεοαπορροής υδρολογικών λεκανών με συνδυαστική ανάλυση υδρολογικών και γεωμορφολογικών παραμέτρων*». Στην έρευνα αυτή συμπεριελήφθησαν και οι μετρήσεις των αποθέσεων φερτών υλικών στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών που είχαν γίνει στα πλαίσια του διδακτορικού του πρώτου συγγραφέα. Συγκεντρώθηκαν συνολικά 11 θέσεις σε 5 ποταμούς (προστέθηκαν ο Αχελώος και ο Εύηνος). Η έρευνα αυτή βασίστηκε σε νέες τιμές της ειδικής στερεοαπορροής οι οποίες εξήχθησαν από τις στερεοϋδρομετρήσεις με την *μέθοδο της τεθλασμένης καμπύλης παλινδρόμησης* (Koutsoyiannis, 2000, Zarris and Koutsoyiannis, 2005). Η μέθοδος αυτή θεωρεί ότι η κλίση της ευθείας παλινδρόμησης μεταξύ της απορροής και της στερεοαπορροής κάμπτεται περίπου στην παροχή πλήρους κοίτης (bankfull discharge) και αποκτά πολύ μεγαλύτερη κλίση σε μεγαλύτερες παροχές (Σχ.1-11). Η μέθοδος αυτή κρίθηκε από τους συγγραφείς ως ακριβέστερη άλλων μεθόδων, όπως των διαφορετικών εποχιακών καμπυλών ή της διάκρισης ανερχόμενων και κατερχόμενων κλάδων του υδρογραφήματος, καθώς έδωσε αποτελέσματα κοντύτερα στις εκτιμήσεις των αποθέσεων των φερτών που προέκυψαν από την υδρογραφική αποτύπωση του ταμιευτήρα των Κρεμαστών (Zarris et al, 2002). Και άλλοι ερευνητές, πιό πρόσφατα, δημοσίευσαν παρόμοια συμπεράσματα (Kokpinar et al., 2015).



Σχήμα 1-11 Σύγκριση τριών διαφορετικών μεθόδων κατασκευής της καμπύλης παροχής - στερεοπαροχής από στερεοϋδρομετρήσεις στη θέση Τσίμοβο του Άραχθου ποταμού (Ζαρρής & Λυκούδη, 2007).

Οι Ζαρρής και Λυκούδη αφού κατέληξαν στις τιμές της στερεοαπορροής, χρησιμοποίησαν κατόπιν σαν ερμηνευτικές μεταβλητές μορφομετρικές και φυσιογραφικές παραμέτρους των λεκανών απορροής και επίσης υδρολογικές παραμέτρους (μέση ετήσια παροχή, μέση ετήσια πλημμυρική παροχή, όχι όμως βροχοπτώσεις). Οι συγγραφείς δεν διαπίστωσαν κάποια σημαντική σχέση της στερεοαπορροής με τις μορφομετρικές παραμέτρους των λεκανών απορροής αλλά, και αυτό ίσως είναι το πιο σημαντικό εύρημα της έρευνας αυτής, μια στατιστικά σημαντική, ισχυρή σχέση μεταξύ της ειδικής στερεοαπορροής και της μέσης ετήσιας πλημμυρικής παροχής. Στον Πίνακα 1-6 παρατίθενται οι εκτιμήσεις της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής των λεκανών απορροής που επεξεργάστηκαν οι Ζαρρής – Λυκούδη (2007) με την μέθοδο της τεθλασμένης καμπύλης στις 11 θέσεις (6 ποταμοί) καθώς και οι εκτιμήσεις άλλων ερευνητών μαζί με αυτήν της της ΔΕΗ.

Πίνακας 1-6 Εκτιμήσεις στερεοαπορροής των λεκανών απορροής της ΔΕΗ από διαφορετικούς ερευνητές

no	**Σταθμός**	**Ποταμός-Λεκάνη**	**Έκταση (km²)**	**Μέση ετήσια απορροή (mm)**	**Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)**	**SSY 1[b]** Zarris et al. (2007)	**SSY 2** Poulos et al. (1996)	**SSY 3** Koutsoyiannis και Tarla (1987)	**SSY 4** ΔΕΗ
			1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
	Υδρ.σταθμοί								
1	Αυλάκι	Αχελώος	1,361	1,168	1,314	1,698	607		856
2	ΠόροςΡηγανίου	Εύηνος	912	873	1,198	1,470	66	707	59
3	Γ.Πλάκας	Άραχθος	951	767	1,400	1,273		1,600	2,440
4	Γ. Τσίμοβου	Άραχθος	627	921	1,307	1,071		887	773
5	Γ.Γκόγκου*	Αραχθος	205	1,709	1,753	1,585		1,181	1,170
6	Γ. Κόνιτσας	Αώος	670	625	1,215	2,302	800		2,575
7	Κιοτέκι	Καλαμάς	1,544	690	1,297	519	1,242	385	1,229
8	Γ. Σουλόπουλο	Καλαμάς	714	769	1,270	261	212	196	568
9	Μ. Ιλαρίονα	Αλιάκμων	4,755	307	719	436	487		487
10	Σιάτιστα	Αλιάκμων	2,474	264	687	257		87	94
11	Γ. Γρεβενών**	Αλιάκμων	487	633	782	143	126	352	126
	Ταμιευτήρες[c]								
12	Κρεμαστά	Αχελώος	1,733		1,507	1,184			
13	Κρεμαστά	Αγραφ/ης	320		1,439	2,034			
14	Κρεμαστά	Ταυρωπός	1,239		1,460	489			
15	Μαραθών*	Χάραδρος	118		652	508			

SSY σε t km^{-2} y^{-1}. Οι αναφορές για το SSY είναι από Zarris et al. (2007) και αντιστοιχούν σε (1) Zarris and Lykoudi (2007), (2) Poulos et al. (1996), (3) Koutsoyiannis και Tarla (1987), και (4) ΔΕΗ.

[b]Μικρές διαφορές των τιμών SSY-1 σε σχέση με την αρχική τους δημοσίευση οφείλονται στο ότι υπολογίστηκαν (κατά τον μετασχηματισμό Qs (kg/s) -> SSY) με τις δικές μας τιμές των εμβαδών των λεκανών απορροής.

[c]Οι τιμές προέρχονται από βαθυμετρικές αποτυπώσεις Zarris et al., 2002, Xanthakis, 2011.

1.5.8 Ερευνες με τηλεπισκοπικές μεθόδους

Η παρακολούθηση και διακρίβωση της ποιοτικής κατάστασης των θαλασσών και των παράκτιων υδάτων με τη χρήση δορυφορικών μέσων είναι μια ελκυστική εναλλακτική λύση σε σχέση με τα παραδοσιακά μέσα (δειγματοληψίες από ερευνητικά σκάφη, σταθμοί - πλατφόρμες) λόγω της αχανούς έκτασης που πρέπει να καλυφθεί και του μεγάλου κόστους αυτών των επιχειρήσεων. Οι μέθοδοι τηλεπισκόπησης συμπληρώνουν τις παραδοσιακές πρακτικές δίνοντας τη δυνατότητα σχεδόν απεριόριστης συνοπτικής κάλυψης και, αναλόγως του δέκτη που χρησιμοποιείται, των μεταβλητών που ενδιαφέρουν, αποδεκτής έως πολύ ικανοποιητικής χρονικής κάλυψης. Ιδιαίτερα μετά το 2002 περίπου, όταν οι δορυφόροι Terra και Aqua της NASA έγιναν επιχειρησιακά ικανοί να προσφέρουν πλήρη κάλυψη της γήινης επιφάνειας κάθε 1-2 ημέρες σε αποδεκτή χωρική ανάλυση (250,500 και 1000 μέτρα), μια νέα εποχή στην χρήση της τηλεπισκόπησης ξεκίνησε. Ο δορυφόρος Terra (η «ναυαρχίδα του EOS» όπως χαρακτηρίζεται στο ιστότοπό του) τέθηκε σε τροχιά στις 18 Δεκεμβρίου 1999 ενώ περίπου 2,5 χρόνια αργότερα, στις 4 Μαίου 2002, τέθηκε σε τροχιά ο δορυφόρος Aqua. Όπως είναι φανερό, η παγκόσμια κάλυψη που εξασφαλίζει αυτό το συνδυασμένο σύστημα, η ιδανική χρονική ανάλυση (χρόνος επανεπίσκεψης ή χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο καταγραφές της ίδιας περιοχής) καθώς και η μεσαία χωρική ανάλυση (Moderate Resolution) το καθιστούν μοναδικό όργανο παρακολούθησης των δυναμικών διεργασιών της επιφάνειας της Γης και των Ωκεανών.

Αποτέλεσμα της *δωρεάν διάθεσης* στους ερευνητές ενός τέτοιου πλούτου επίγειων και θαλάσσιων παρατηρήσεων σε τακτική βάση, ήταν η διάδοση των εφαρμογών τηλεπισκόπησης πέρα από τους παραδοσιακούς χρήστες (ωκεανογράφοι, θαλάσσιοι βιολόγοι, δασολόγοι και γεωπόνοι, γεωδαίτες κ.ά) σε ένα ευρύτερο επιστημονικό κοινό. Η υδρολογία, μια κατ' εξοχήν επιστήμη της Γης, δεν μπορούσε να υστερήσει. Έτσι, πολύ σύντομα εμφανίστηκαν έρευνες που εντόπιστηκαν σε κάποια από τα πλέον ορατά και εντυπωσιακά παράκτια φαινόμενα, που δεν είναι άλλα από τα μεγάλα πλούμια ιζήματος που μεταφέρουν οι ποταμοί στην θάλασσα μετά από μεγάλα πλημμυρικά επεισόδια. Στην προσπάθεια ποσοτικοποίησης του αιωρούμενου φορτίου, TSS (Total Suspended Solids) ή TSM (Total Suspended Material) στα παράκτια ύδατα, οργανώθηκαν πολυάριθμες καμπάνιες in-situ μετρήσεων και δειγματοληψιών προκειμένου να συσχετιστούν οι δορυφορικές μετρήσεις με τις επίγειες (ground truthing). Κάποιες χαρακτηριστικές έρευνες

σε αυτό το αντικείμενο, επιλεγμένες από την μεγάλη πλεόν βιβλιογραφία, παρατίθενται περιληπτικά στο Εδάφιο 1.5.9 (Πλούμια αιωρούμενου ιζήματος σε παράκτια ύδατα).

Και όμως, σήμερα, παρόλη την προσθήκη πολλών ακόμα δορυφόρων και οργάνων τόσο από την NASA, όσο και από την ESA (European Space Agency), την εντατική έρευνα στα θέματα αυτά και την πρόοδο των λογισμικών GIS-Remote Sensing, δεν υπάρχει προϊόν που να αφορά το αιωρούμενο φορτίο TSS/TSM που να διατίθεται από κάποια διαστημική υπηρεσία στο κοινό. Αυτό το γεγονός υπογραμίζει την ανυπέρβλητη, προς το παρόν τουλάχιστον, δυσκολία της εύρεσης ενός μοναδικού δείκτη που να αντιπροσωπεύει αμφιμονοσήμαντα και σε όλη την ωκεάνια έκταση του πλανήτη, την περιεκτικότητα του νερού σε αιωρούμενο ίζημα.

1.5.9 Πλούμια αιωρούμενου ιζήματος σε παράκτια ύδατα

Στην περίπτωση των πλουμίων αιωρούμενου ιζήματος που προέρχονται από εκβολές ποταμών, λόγω της δυναμικής φύσης του φαινομένου που εξελίσσεται σε χρονικό διάστημα μόλις μερικών ημερών (ή και ωρών) μετά την πλημμύρα, η χρονική ανάλυση είναι το βασικό προαπαιτούμενο. Η χωρική ανάλυση είναι ζήτημα κλίμακας· για την παρακολούθηση πλουμίων του ποταμού Μισσισσιπή, για παράδειγμα, που εκτείνονται μερικές δεκάδες χιλιόμετρα μεσα στη θάλασσα, μέγεθος εικονοστοιχείου 1km είναι ικανοποιητικό, ενώ για την παρακολούθηση πλουμίων του Βουραϊκού ποταμού είναι προφανές ότι απαιτείται μικρότερο μέγεθος εικονοστοιχείου. Η χρονική ανάλυση του MODIS (σχεδόν ημερήσια κάλυψη) είναι ιδανική για την παρακολούθηση αυτών των φαινομένων, ενώ η χωρική ανάλυση είναι σχετικά καλή ιδίως για τα κανάλια 1-2 (250m) και αποδεκτή για τα κανάλια 3-7 (500m).

Η χρήση δορυφορικών εικόνων MODIS για την χαρτογράφηση αλλά και η ποσοτικοποίηση των πλουμίων αιωρούμενου ιζήματος που προέρχονται από εκβολές ποταμών στα παράκτια ύδατα έχει εφαρμοστεί σε πολλές περιπτώσεις μελέτης. Παρακάτω αναφέρονται μερικές αντιπροσωπευτικές τέτοιες εφαρμογές. Όλες αυτές οι έρευνες έχουν χρησιμοποιήσει εικόνες MODIS (το προϊόν που χρησιμοποιήθηκε στην κάθε μία αναγράφεται), εκτός αυτής (No.2) που έχει αξιοποιήσει εικόνες LANDSAT. Το ενδιαφέρον αυτής της έρευνας είναι ότι η μεθοδολογία της διαφέρει αισθητά από τις υπόλοιπες.

1. ***Using MODIS Terra 250m Imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters,*** Miller R. & McKee B., 2004. (προϊον: MOD02QKM, MOD03)

Σε αυτή την έρευνα, που είναι από τις πρώτες και τις συχνότερα αναφερόμενες του είδους, εξετάζεται η σχέση μεταξύ της ακτινοβολίας του καναλιού 1 (κόκκινο) του MODIS Terra και των συγκεντρώσεων ολικού αιωρούμενου υλικού (TSM, Total Suspended Material) όπως αυτές μετρήθηκαν σε τρεις παράκτιες περιοχές του βόρειου τμήματος του Κόλπου του Μεξικού κατα τη διάρκεια 6 επιχειρήσεων. Οι εικόνες διορθώθηκαν για την ατμοσφαιρική διαδρομή και κατόπιν συσχετίστηκε η διορθωμένη ανακλαστικότητα στο κανάλι 1 με τις μετρημένες in-situ συγκεντρώσεις TSM (mg/l). Αν και εκτεινόταν σε μεγάλη περιοχή και σε διαφορετικά θαλάσσια περιβάλλοντα (δέλτα Μισσισιπή, λιμνοθάλασσα Pontchartrain και περιοχή πίσω από τα φραγματικά νησιά Mississipi Sound), η παλινδρόμηση έδωσε αρκετά καλό συντελεστή προσδιορισμού (r^2=0.89).

2. ***Development of Remote Sensing Based Index for Estimating/Mapping Suspended Sediment Concentrationin River and Lake Environments,*** Hossein A. et al., 2006 (προϊον: LANDSAT 5 TM)

Σε αυτή την μελέτη ερευνάται η δυνατότητα κατασκευής ενός δείκτη που να αποδίδει την συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών προκειμένου να χρησιμοποιείται σαν υποκατάστατο των μετρήσεων σε περιπτώσεις που είναι δύσκολο αυτές να γίνουν, όπως κατά τη διάρκεια πλημμυρικών φαινομένων. Ο δείκτης αυτός, που κατασκευάζεται από 2 κανάλια του LANDSAT (μπλέ και εγγύς υπέρυθρο), ονομάζεται από τους συγγραφείς δείκτης κανονικοποιημένων διαφορών αιωρούμενου ιζήματος (NDSSI –Normalised Difference Suspended Sediment Index) και συσχετίζεται με in-situ μετρήσεις συγκεντρώσεων που έγιναν σε σχεδον πραγματικό χρόνο στον ποταμό Μισσισσιπή και στη λιμνοθάλασσα Pontchartrain σε περιστατικά πλημμύρας. Οι συγγραφείς επιπλέον συγκρίνουν ευνοϊκά τα αποτελέσματά τους με τα αποτελέσματα αριθμητικού υδροδυναμικού μοντέλου και καταλήγουν σε μια σχέση δύναμης μεταξύ του δείκτη αυτού και των μετρημένων συγκεντρώσεων. Καταλήγουν συμπεραίνοντας ότι ο δείκτης αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ποσοτικοποίηση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων στερεών σε αυτά τα περιβάλλοντα εφόσον προσδιοριστούν οι συντελεστές στη σχέση δύναμης.

3. ***Using MODIS250m Imagery to Estimate Total Suspended Sediment in a Tropical Open Bay,*** Rodriguez-Guzman V.R & Gilbes-Santaella F., 2009. (προϊον: MOD02QKM, MOD03)

Σε αυτή την έρευνα επιχειρείται η ανάπτυξη και η βαθμονόμηση ενός αλγόριθμου για την εκτίμηση των συγκεντρώσεων του ολικού αιωρούμενου ιζήματος (TSS, Total Suspended Sediment) στη βάση του R_{rs645} του καναλιού 1 του MODIS στον κόλπο Mayaguez Bay του Puerto Rico (R_{rs} ή Reflectance Remote Sensing, είναι η διορθωμένη για τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις ανακλαστικότητα στο επίπεδο του εδάφους). Η ανάπτυξη του αλγορίθμου έγινε στη βάση μετρήσεων τόσο των συγκεντρώσεων του ιζήματος όσο και της φασματικής υπογραφής του νερού in-situ και με διπλή συσχέτιση-παλινδρόμηση (συγκέντρωση αιωρούμενων με φασμα in-situ και φάσμα in-situ με τη R_{rs645} του MODIS). Η παλινδρόμηση έδωσε καλό συντελεστή προσδιορισμού (r^2=0.73).

4. ***MODIS Imagery of turbid plumes in San Diego coastal waters during rainstorm events,*** Lahet F. & Stramski D., 2010 (προϊον: MOD01, MOD03)

Σε αυτή την έρευνα επιχειρείται η παρακολούθηση και χαρτογράφηση των πλουμίων αιωρούμενου ιζήματος στην ακτή της Καλιφόρνιας κατά τη διάρκεια μεγάλων πλημμυρών το χειμώνα του 2004-2005. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι κανονικοποιημένες ακτινοβολίες (*nLw*, normalised water-leaving radiance) στα κανάλια 1 (κόκκινο) και 4 (πράσινο) του MODIS. Επιχειρήθηκε η βελτιστοποίηση των κατωφλίων της *nLw* που χρησιμοποιήθηκε για τον χωρικό προσδιορισμό του πλουμίου με συσχετίσεις με τη συνολική ποσότητα του νερού των βροχών.

5. ***Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (south bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery,*** Petus Caroline et al., 2010 (προϊον: MYD09GQ)

Σε αυτή την έρευνα επιχειρείται η ανάπτυξη εμπειρικών αλγορίθμων που να συνδέουν την συγκέντρωση ολικού αιωρούμενου υλικού (TSM) με την R_{rs645} του καναλιού 1 του MODIS στον Βισκαϊκό κόλπο στην εκβολή του ποταμού Adour, στην Ισπανία, καθώς και στον έλεγχο του ατμοσφαιρικά διορθωμένου προϊόντος που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη. Η συσχέτιση βασίστηκε σε δείγματα νερού που πάρθηκαν κατά τη διάρκεια μιας επιχείρησης όπου μετρήθηκαν in-situ η θολερότητα, οι συγκεντρώσεις TSM και οι οπτικές ιδιότητες του νερού με φασματοφωτόμετρο. Και εδώ αναφέρεται μια σημαντική συσχέτιση ανάμεσα

στην θολερότητα που μετρήθηκε και στην τιμή της ανακλαστικότητας στο κανάλι 1 του MODIS.

6. ***Using the Surface Reflectance MODIS Terra Product to estimate Turbidity in Tampa Bay, Florida,*** Moreno-Madrinan M. et al., 2010 (προϊον: MOD09GQ)

Όπως και στην παραπάνω, σε αυτή την έρευνα επιχειρείται η ανάπτυξη εμπειρικών αλγορίθμων που να συνδέουν την συγκέντρωση ολικού αιωρούμενου υλικού (TSM) με την R_{rs645} του καναλιού 1 του MODIS στον κόλπο Tampa στην Florida των ΗΠΑ, μετά από μεγάλες βροχές στη διάρκεια 2000-2007. Η συσχέτιση βασίστηκε σε δείγματα νερού που παίρνονται τακτικά στον κόλπο από την περιβαλλοντική επιτροπή της Κομητείας. Μετά από την εφαρμογή κάποιων κριτηρίων (εγγύτητας με ξηρά, βάθους νερού κ.ά) απέμειναν 273 ζευγάρια παρατηρήσεων δορυφόρου - δείγματος. Η παλινδρόμηση έδωσε καλό συντελεστή προσδιορισμού (r^2=0.76) .

7. ***Coupling remote sensing data with in-situ optical measurements to estimate suspended particulate matter under the Evros river influence (North-Eastern Aegean sea, Greece).*** Tsapanou A., Oikonomou E., Drakopoulos P., Poulos S., Sylaios G., 2019 (προϊον: LANDSAT 8/OLI)

Η έρευνα αυτή διεξήχθη στην θαλάσσια περιοχή του κόλπου της Αλεξανδρούπολης με σκοπό την μελέτη της διασποράς του πλουμίου του ποταμού Έβρου μετά από πλημμύρες. Είναι η πρώτη στο είδος της στον Ελληνικό χώρο καθώς συνδυάζει την ανάλυση δορυφορικών εικόνων L8/OLI με ταυτόχρονες in-situ μετρήσεις οπτικών ιδιοτήτων και συγκεντρώσεων δειγμάτων θαλασσινού νερού, σε 62 θέσεις κατά μήκος δύο διαδρομών του ερευνητικού σκάφους στις 2/6/2016. Αφού εξετάστηκαν οι συσχετίσεις, δοκιμάστηκε και βαθμονομήθηκε τοπικά ένα μοντέλο από την βιβλιογραφία που χρησιμοποιεί το κόκκινο κανάλι (Nechad et al., 2010), και, ακόμα, αναπτύχθηκε ένα νέο μοντέλο που χρησιμοποιεί το κόκκινο και το πράσινο κανάλι, το οποίο απέδωσε καλύτερα στην πρόβλεψη των συγκεντρώσεων αιωρούμενου ιζήματος (r^2=0.93). Οι συγγραφείς επιπλέον τονίζουν την ευαισθησία των διαφόρων αλγορίθμων στη δυναμική του επιφανειακού στρώματος ανάμιξης (αλατότητα, θερμοκρασία) καθώς και στην σύσταση του αιωρούμενου φορτίου (κοκκομετρική σύνθεση, χρώμα).

8. ***Sattelite-derived Suspended Sediment Distribution.*** Tsapanou A., Karditsa A., Poulos S. , 2020 (προϊόντα: LANDSAT 8/OLI, MODIS).

Στην έρευνα αυτή, που μπορούμε να θεωρήσουμε συνέχεια της προηγούμενης, επιχειρείται η χαρτογράφηση του πλουμίου του Έβρου ποταμού και η εκτίμηση των συγκεντρώσεων του αιωρούμενου ιζήματος σε αυτό, με τη χρήση δορυφορικών εικόνων τόσο του L8/OLI όσο και του MODIS-AQUA. Αυτά τα δορυφορικά προϊόντα συγκρίνονται σε σχέση με τις δυνατότητες που το καθένα παρέχει ως προς την επίτευξη αυτού του στόχου. Επιπλέον, όσον αφορά τις εικόνες του MODIS, δοκιμάζεται η εφαρμογή ενός αλγόριθμου από την βιβλιογραφία (TSM – Clark), και η μεταφορά του μοντέλου δύο καναλιών (κόκκινο-πράσινο) που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη έρευνα από τον L8/OLI στον MODIS. Η απόδοση του νέου αυτού μοντέλου κρίνεται επιτυχημένη αν και φαίνεται να υποεκτιμά συστηματικά τις συγκεντρώσεις κατά περίπου 20%.

Όπως φαίνεται από τις περιλήψεις των μελετών που παρατέθηκαν, οι μέθοδοι που ακολουθούνται εξαρτώνται από την διαθεσιμότητα δεδομένων (μετρήσεων συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων στο νερό σε σημεία που «βλέπει» ο δορυφόρος -match ups- και μετρήσεων οπτικών ιδιοτήτων του νερού μετρημένων επι τόπου με σπεκτροφωτόμετρα). Πιο ειδικά :

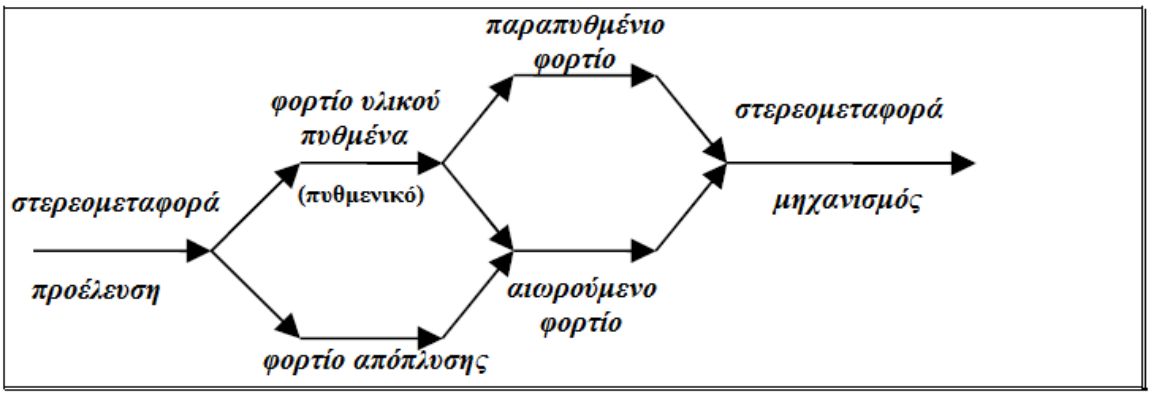
- Τα κανάλια που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως το κόκκινο και δευτερευόντως το πράσινο. Για αυτό υπάρχει και ένας επιπλέον λόγος: Το κόκκινο (κανάλι 1 του MODIS) προσφέρεται σε χωρική ανάλυση 250 και σε ξεχωριστό προϊόν προσφέροντας μια πολύ πιο λεπτομερειακή εικόνα της θαλάσσιας επιφάνειας.
- Οι ερευνητές χρησιμοποιούν το προϊόν επιπέδου 2 και προχωρούν σε απόλυτες ατμοσφαιρικές διορθώσεις των εικόνων αλλά και κατ' ευθείαν το προϊόν MOD09 επιπέδου 4 που είναι ατμοσφαιρικά διορθωμένο.
- Χρησιμοποιούνται τόσο οι ακτινοβολίες, όσο και οι ανακλαστικότητες
- Η συνηθέστερη προσέγγιση είναι η συσχέτιση της διορθωμένης για τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις ανακλαστικότητας (ή της ακτινοβολίας) του καναλιού 1 με τις μετρημένες συγκεντρώσεις και η εξαγωγή μιας εμπειρικής σχέσης παλινδρόμησης, συνήθως πολυωνυμικής μορφής.

2 ΘΕΩΡΙΑ

2.1 ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑ ΓΕΝΙΚΑ

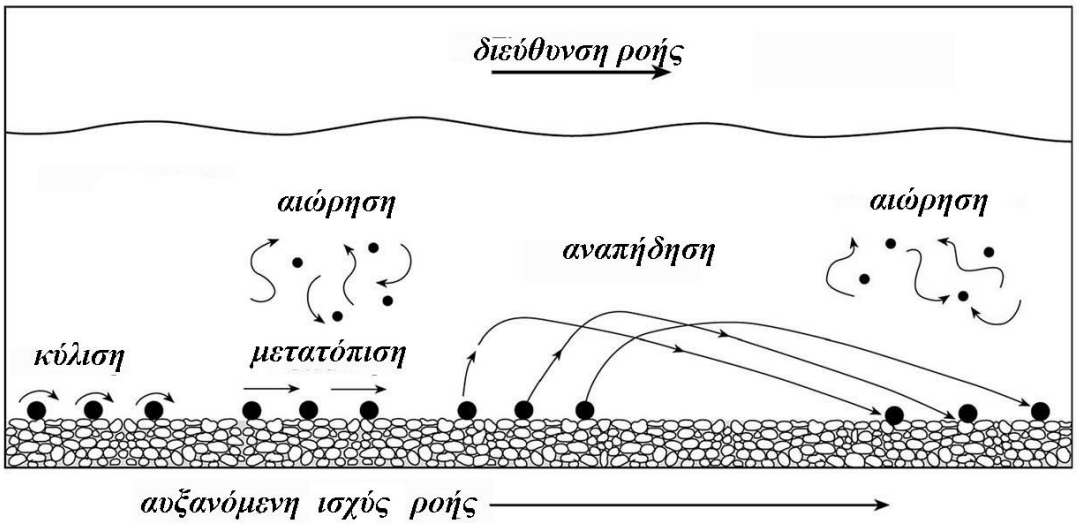
2.1.1 Διάκριση του στερεοφορτίου

Κατά τη διερεύνηση της διεργασίας της στερεομεταφοράς στα φυσικά υδατορεύματα, είναι συνηθισμένο να γίνεται διάκριση είτε με κριτήριο την προέλευση του φορτίου, είτε με κριτήριο τον μηχανισμό μεταφοράς του (μη-συνεκτικού) φορτίου (Σχ. 2-1).



Σχήμα 2-1 Διάκριση του στερεοφορτίου κατά προέλευση και κατά μηχανισμό μεταφοράς. Όπως φαίνεται, το υλικό που προέρχεται από τον πυθμένα (πυθμενικό) κινείται είτε κοντά στον πυθμένα σαν παραπυθμένιο φορτίο είτε τίθεται σε αιώρηση εάν η ροή είναι ισχυρή. Το φορτίο απόπλυσης ταξιδεύει πάντα σε αιώρηση. (Πηγή: TUDelft).

Αναγνωρίζονται δύο μηχανισμοί μεταφοράς: Τα μεγαλύτερα κλάσματα, καθώς είναι πολύ βαριά για να ανασηκωθούν πολύ πάνω από τον πυθμένα, κινούνται επάνω σε αυτόν με κύλιση και μετατόπιση (σύρση) ή πολύ κοντά σε αυτόν με αναπήδηση. Τα μικρότερα κλάσματα, καθώς η ροή δυναμώνει, αποσπώνται από τον πυθμένα και τίθενται σε αιώρηση από τις τυρβώδεις δίνες που αναπτύσσονται στο νερό. Γενικά, κόκκοι μικρότεροι από περίπου 1/8 mm συνήθως ταξιδεύουν πάντα σε αιώρηση ενώ κόκκοι μεγαλύτεροι από 8 mm συνήθως μετακινούνται σαν *παραπυθμένιο φορτίο*, ενώ τα ενδιάμεσα μεγέθη μεταφέρονται αναλόγως της ισχύος της ροής είτε σαν *αιωρούμενο φορτίο* είτε σαν παραπυθμένιο φορτίο.

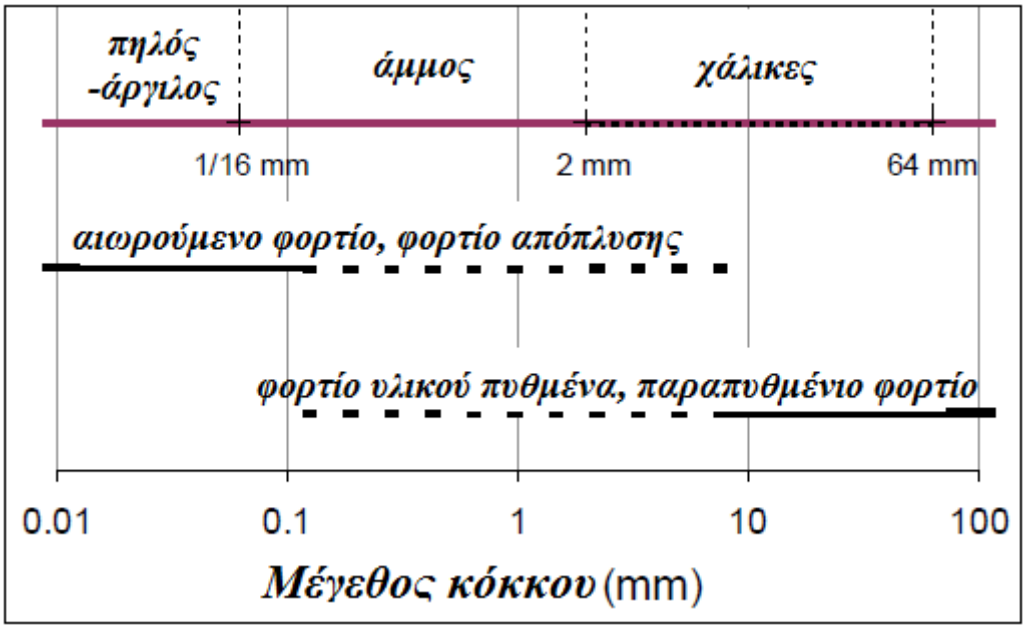


Σχήμα 2-2 Μηχανισμοί μεταφοράς του φορτίου υλικού πυθμένα. Σε μέτριες ταχύτητες έχουμε μόνο κύλιση. Εάν η ροή γίνει ισχυρή τότε οι μεγαλύτεροι κόκκοι μπορεί να αρχίζουν να μετατοπίζονται ή να αναπηδούν με μικρά άλματα, ενώ οι μικρότεροι κόκκοι θα τεθούν σε αιώρηση και θα παραμείνουν σε αιώρηση όσο οι τυρβώδεις ταχύτητες είναι μεγαλύτερες από τις ταχύτητες καθίζησης.

Εάν η διάκριση γίνει ως προς την προέλευση του φορτίου τότε είναι δυνατό να διακριθεί το *φορτίο υλικού κοίτης* ή *πυθμενικό φορτίο*το οποίο προέρχεται από τον πυθμένα και *φορτίο απόπλυσης* που είναι υλικό που προέρχεται από τις όχθες, τα πλημμυρικά πεδία, τις κλιτείς και συνολικότερα από την λεκάνη απορροής. Αυτό το τελευταίο δεν βρίσκεται στον πυθμένα παρά σε πολύ μικρές ποσότητες και γενικά είναι τόσο μικρής διαμέτρου (άργιλος, ιλύς και πολύ λεπτόκοκκη άμμος) ώστε από την στιγμή που εισέλθει στην κοίτη, μεταφέρεται συνεχώς σε αιώρηση μέχρι τη θάλασσα (ή τη λίμνη, σε περίπτωση κλειστής λεκάνης) με ελάχιστη καθίζηση ή, γενικότερα, αλληλεπίδραση με τον πυθμένα. Ωστόσο, όπως στην περίπτωση του Βουραϊκού ποταμού, το υλικό αυτό κατά τη μεταφορά του μπορεί προσωρινά να αποθηκευτεί σε σημεία της κοίτης του ποταμού που προσφέρονται για απόθεση, όπως πίσω από ογκόλιθους ή μεγάλων διαστάσεων κροκάλες, στις εσοχές που δημιουργούν οι ρίζες των δέντρων και σε χαλικοσωρούς.

Το όριο μεταξύ παραπυθμένιου και αιωρούμενου φορτίου δεν είναι σαφές και εξαρτάται από την ισχύ της ροής (Σχ. 2-2). Εάν η ροή είναι ισχυρή τότε κάποια κλάσματα θα τεθούν σε αιώρηση, αλλά, και τότε, τα πιο μεγάλα από αυτά θα ταξιδεύουν κοντά στον πυθμένα. Αυτό το γεγονός κάνει προβληματική όχι μόνον την δειγματοληψία του αιωρούμενου φορτίου, αλλά ακόμα και τον σαφή διαχωρισμό του από το πυθμενικό φορτίο. Αυτή η δυσκολία είναι που οδηγεί στη *διάκριση με κριτήριο την προέλευση* του φορτίου και όχι του μηχανισμού με τον οποίο μεταφέρεται. Υπάρχουν ορισμενα επιπλεόν πλεονεκτήματα στην υιοθέτηση της διάκρισης με βάση την προέλευση: το φορτίο υλικού

πυθμένα μπορεί να ορισθεί και να μετρηθεί. Επομένως, είναι *προβλέψιμο* με βάση τις επικρατούσες υδροδυναμικές συνθήκες και την σύσταση του πυθμένα της κοίτης. Σε αντίθεση, το φορτίο απόπλυσης δεν είναι προβλέψιμο και χρειάζεται κανείς να γνωρίζει τις διεργασίες με τις οποίες εισάγεται στο ποτάμι. Επίσης, η διάκριση αυτή μπορεί να επιτρέψει την μελέτη της αλλαγής στην σύσταση του πυθμένα όταν αλλάζει η παροχή ιζήματος στο ποτάμι.



Σχήμα 2-3 Η διάκριση με βάση την προέλευση του στερεοφορτίου σε φορτίο υλικού πυθμένα και σε φορτίο απόπλυσης συνεπάγεται την αναγνώριση, χονδρικά, 4 κλάσεων μεγέθους κόκκων. Η πρώτη κλάση είναι φορτίο απόπλυσης ενώ οι τρεις υπόλοιπες είναι πυθμενικό φορτίο που διαχωρίζεται περαιτέρω με βάση τον μηχανισμό μεταφοράς του. (Wilcock et al, 2009).

Στα ορεινά χειμαρρώδη υδατορεύματα το φορτίο απόπλυσης αποτελείται από άργιλο, ιλύ και πολύ λεπτή άμμο. Αυτό το υλικό παγιδεύεται και αποτίθεται συχνά πίσω από πεσμένους κορμούς ή σε εσοχές και κοιλότητες που δημιουργούν οι ρίζες των δέντρων στις όχθες του ποταμού και τίθεται σε κίνηση από μέτριας έντασης πλημμυρικές ροές. Το λεπτόκοκκο υλικό του πυθμένα αποτελείται από μεσαία έως χονδρόκοκκη άμμο και ψηφίδες (κόκκοι διαμέτρου 1-2 mm) το οποίο μετακινείται είτε με αιώρηση είτε με πυθμενική μεταφορά (Σχ. 2-3). Η δειγματοληψία αυτού του υλικού είναι προβληματική. Τα πιο μεγάλα κλάσματα αποτελούν τον "*σκελετό*" (framework) (υλικό της βάσης) του πυθμένα και μετακινούνται αποκλειστικά με πυθμενική μεταφορά. Στην κοιτη ποταμών όπως ο Βουραϊκός υπάρχουν επίσης άφθονα μεγάλων διαστάσεων βραχώδη τεμάχη (μεγάλες κροκάλες και ογκόλιθοι), τα οποία προέρχονται από κατολισθήσεις από τις

πλαγιές. Τα μεγάλων διαστάσεων αυτά υλικά δεν μετακινούνται σχεδόν ποτέ αλλά η παρουσία τους είναι καθοριστικής σημασίας στην ανάληψη μεγάλου μέρους της συρτικής τάσης που εξασκείται από το ρέον νερό στην κοίτη, όπως θα αναλυθεί αργότερα.

Για λόγους πληρότητας θα πρέπει να αναφερθεί ότι ένας ακόμα μηχανισμός μεταφοράς είναι όταν το ίζημα βρίσκεται σε διάλυση, δηλαδή σε ιοντική μορφή. Το ποσοστό της συμμετοχής αυτού του μηχανισμού στην συνολική στερεομεταφορά εξαρτάται από την λιθολογία των γεωλογικών σχηματισμών της λεκάνης απορροής και τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν εντός αυτής.

2.1.2 Βασική ορολογία

Γενικά, η θεωρητική διερεύνηση του φαινομένου της στερεομεταφοράς μπορεί να γίνει είτε με ανάλυση της ισορροπίας των δυνάμεων που ασκούνται στους κόκκους που βρίσκονται πάνω στον πυθμένα (*ανάλυση ευστάθειας*), είτε με *διαστατική ανάλυση*. Θα επιλεγεί εδώ ο δεύτερος τρόπος διότι, ενώ οδηγεί στα ίδια συμπεράσματα, είναι απλούστερος, γενικότερος, και πιο κατανοητός σε άλλες ειδικότητες επιστημόνων εκτός των μηχανικών.

Ορίζεται πρώτα ο μοναδιαίος ογκομετρικός ρυθμός μεταφοράς φερτών υλικών ή *μοναδιαία στερεοπαροχή*, στο ποτάμι, $\boldsymbol{q_s}$, σαν κυβικά μέτρα στερεάς ύλης ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα πλάτους της κοίτης του ποταμού. Αυτό σημαίνει ότι η στερεοπαροχή θα έχει διαστάσεις $[L^3T^{-1}L^{-1}]$, ή $[L^2T^{-1}]$, και μονάδες m^2/s. Γνωρίζοντας την μοναδιαία στερεοπαροχή και ολοκληρώνοντας κατά το πλάτος της *ενεργής διατομής* του ποταμού, $\boldsymbol{B}$ (πλάτος κατά το οποίο λαμβάνει χώρα στερεομεταφορά) εκτιμάται η ολική στερεοπαροχή, $\boldsymbol{Q_s}$. Επομένως, $\boldsymbol{Q_s} = \boldsymbol{q_s B}$ με μονάδες m^3/s. Εάν, όπως συνήθως συμβαίνει, απαιτείται η ολική στερεοπαροχή με όρους μάζας του μεταφερόμενου υλικού, πολλαπλασιάζεται το $\boldsymbol{Q_s}$ με την πυκνότητα των φερτών υλικών ($\boldsymbol{\rho_s}$ = 2650kg/m^3) και κατόπιν ανάγεται ο χρόνος σε ώρες ή ημέρες έτσι ώστε η στερεοπαροχή να δοθεί με όρους μάζας του μεταφερόμενου υλικού σε μονάδες χρόνου, δηλαδή σε kg/λεπτό ή t/ημέρα.

Για την διαστατική ανάλυση χρησιμοποιούνται οι φυσικές ποσότητες που καθορίζουν την σχέση: η ισχύς της ροής εκφράζεται με το $\boldsymbol{\tau}$, δηλαδή την συρτική τάση στον πυθμένα, και το βάθος, $\boldsymbol{h}$, της ροής. οι φυσικές ιδιότητες των υλικών εκφράζονται με τις πυκνότητες του ιζήματος και του νερού, $\boldsymbol{\rho_s}$, $\boldsymbol{\rho}$, αντίστοιχα, την συνεκτικότητα του υγρού, $\boldsymbol{\mu}$, και το ίζημα εκφράζεται με τη χαρακτηριστική διάμετρο του κόκκου, $\boldsymbol{D}$. Τέλος, το

σύστημα εκφράζεται με την επιτάχυνση της βαρύτητας, το $\boldsymbol{g}$. Τα παραπάνω συμβολίζονται ως εξής:

$$q_s = f(\tau, h, D, \rho, \rho_s, \mu, g) \tag{2-1}$$

Με 7 μεταβλητές και 3 διαστάσεις, θα προκύψουν 7-3 = 4 αδιάστατοι αριθμοί που θα περικλείουν όλες τις σχέσεις. Αυτοί οι αριθμοί δίνονται παρακάτω μαζί με τις συνηθέστερες ονομασίες τους (όπου $\nu = \mu/\rho$, η κινηματική συνεκτικότητα του νερού): Η *σχετική πυκνότητα* (συμβολίζεται και σαν G).

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} \tag{2-2}$$

Η αδιάστατη στερεοπαροχή, η *παράμετρος μεταφοράς του Einstein (*συμβολίζεται και σαν *Φ*)

$$q^* = \frac{q_s}{\sqrt{(s-1)gD^3}} \tag{2-3}$$

Η αδιάστατη συρτική τάση, ή *αριθμός Shields* (συμβολίζεται και σαν *θ*)

$$\tau^* = \frac{\tau}{(s-1)\rho g D} \tag{2-4}$$

Ο ρητός αριθμός Reynolds (Reynolds explicit), ή *αδιάστατη παράμετρος ιζήματος* (sediment parameter).

$$S^* = \frac{D\sqrt{(s-1)gD}}{\nu} \tag{2-5}$$

Πράγματι, η ποσότητα εντός της ρίζας έχει μονάδες ταχύτητας (οπότε ο αριθμός Reynolds ισούται πάλι με μήκος*ταχύτητα*πυκνότητα/συνεκτικότητα).

Το τελικό αποτέλεσμα της διαστατικής ανάλυσης συνοψίζεται στη σχέση

$$q^* = f(\tau^*, S^*, s, \frac{D}{h}) \tag{2-6}$$

Οι παραπάνω αδιάστατες παράμετροι έχουν κατάλληλη φυσική σημασία. Η αδιάστατη στερεοπαροχή q^* εκφράζει τον λόγο της ογκομετρικής παροχής ιζήματος q_s προς το γινόμενο $\boldsymbol{wD}$ όπου $\boldsymbol{w}$ είναι η τερματική ταχύτητα καθίζησης του κόκκου με ονομαστική διάμετρο $\boldsymbol{D}$. Η αδιάστατη συρτική τάση εκφράζει τον λόγο της συρτικής τάσης προς το βάρος του ιζήματος, ανά μονάδα επιφάνειας. Ο αριθμός αυτός διατυπώθηκε πρώτα από τον Shields (1936) στα πειράματα του που είχαν σαν αποτέλεσμα την καμπύλη του Σχήμα 2-4 που φέρει το όνομά του (Shields, 1936). Εάν, περαιτέρω θεωρήθεί ότι τα *s*,

S^* και D/h μένουν σχετικά σταθερά ή μεταβάλλονται σε ένα μικρό εύρος, τότε προκύπτει η σχέση

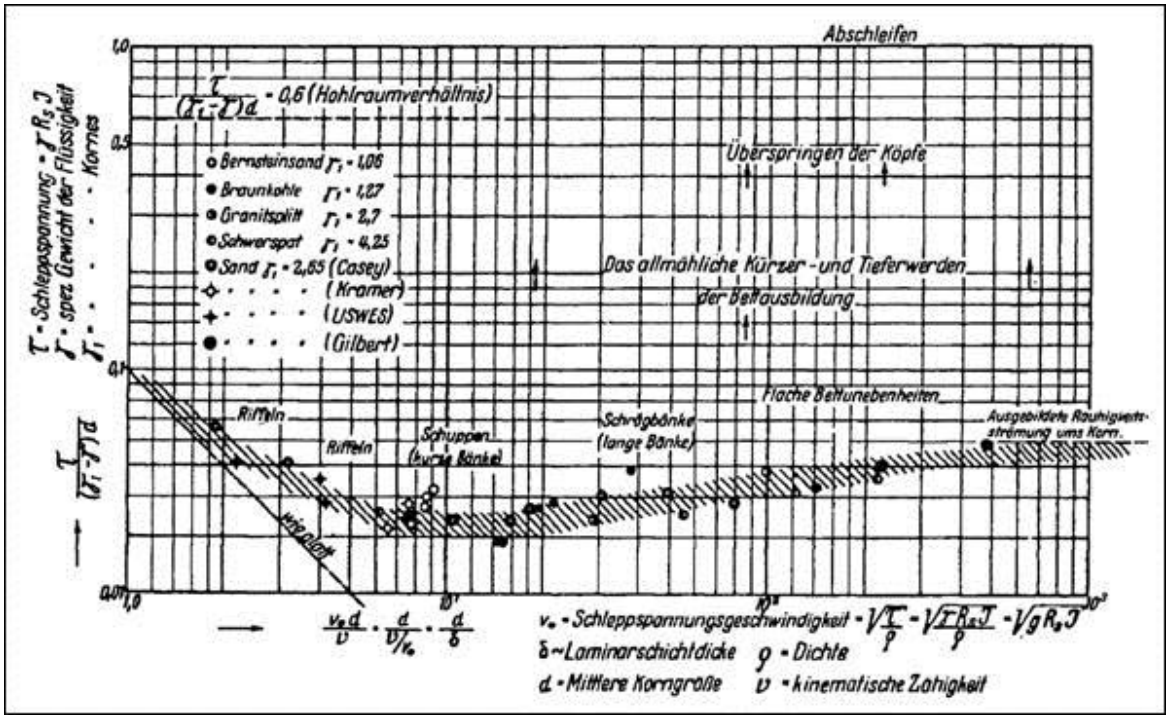
$$q^* = f(\tau^*) \qquad (2\text{-}7)$$

Δηλαδή, η στερεοπαροχή εξαρτάται κυρίως από την συρτική τάση που εξασκείται στον πυθμένα. Ειδικότερα, όταν η συρτική τάση $\boldsymbol{\tau}$ ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή $\boldsymbol{\tau_c}$ (για κόκκο διαμέτρου D) τότε ο κόκκος αυτός θα τεθεί σε κίνηση. Αυτή η κρίσιμη τιμή $\boldsymbol{\tau_c}$ βρίσκεται από το διάγραμμα του Shields (Σχ. 3-4).

Η τάση στον πυθμένα και η διατμητική ταχύτητα (ταχύτητα τριβής) δίνονται από τις δύο βασικές σχέσεις που ισχύουν για μόνιμη και ομοιόμορφη ροή σε δίαυλο:

$$\tau = \rho g R_h S, \text{ συρτική τάση (Pa)} \quad \text{και} \quad u_* = \sqrt{\tau/\rho}, \text{ ταχύτητα τριβής (m/s)} \qquad (2\text{-}8)$$

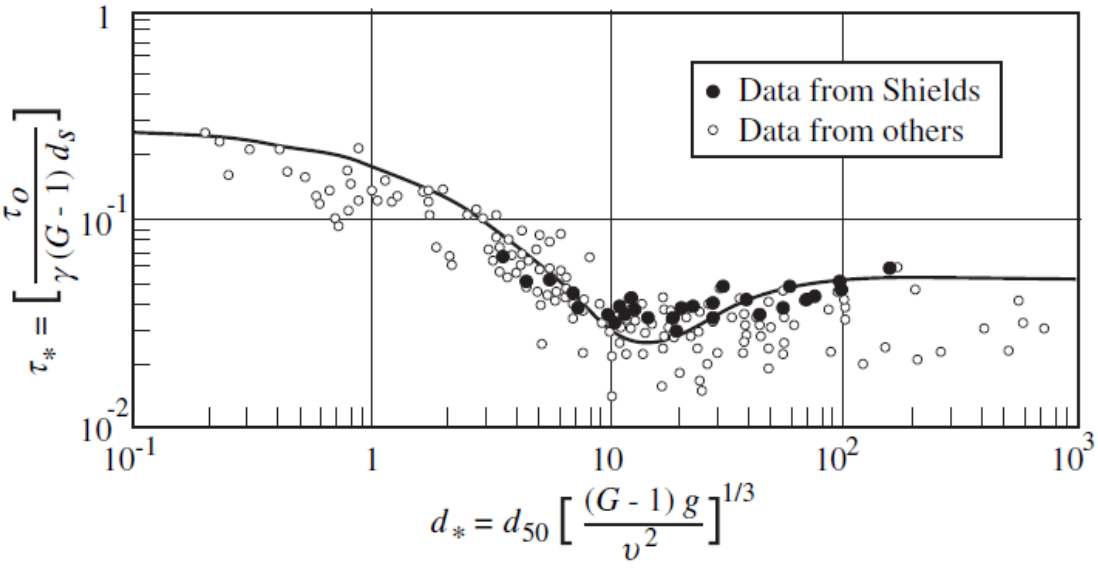
Όπου οι R_h ,S, είναι η υδραυλική ακτίνα και η μηκοτομική κλίση του διαύλου αντίστοιχα.



Σχήμα 2-4 Η καμπύλη έναρξης κίνησης του Shields. Στον x-άξονα είναι ο αριθμός Reynolds τριβής, ενώ στον y-άξονα είναι ο αριθμός Shields (Shields, 1936).

Η u_* είναι η λεγόμενη *ταχύτητα τριβής* ή σύρσης (shear velocity) που ονομάζεται έτσι επειδή έχει μονάδες ταχύτητας (και που τυχαίνει να είναι και η τιμή της ταχύτητας πολύ κοντά στον πυθμένα).

Στο παραπάνω διάγραμμα του Shields η διάμετρος του κόκκου, $\boldsymbol{d_s}$ (ή D) εμφανίζεται τόσο στον οριζοντιο x-άξονα όσο και στον κατακόρυφο, y-άξονα με αποτέλεσμα να χρειάζονται δοκιμές για να βρεθεί η κρίσιμη συρτική τάση για κόκκο συγκεκριμμένης διαμέτρου. Για το λόγο αυτό προτιμάται η παραλλαγή του διαγράμματος του Σχήματος 3-5, όπου είναι δυνατή η κατ' ευθείαν εύρεση της κρίσιμης συρτικής τάσης χωρίς επαναλήψεις.



Σχήμα 2-5 Τροποποιημένο διάγραμμα Shields. Όπου G είναι το s και $\gamma = \rho g$ (το ειδικό βάρος). Σε αυτό το διάγραμμα η κρίσιμη αδιάστατη συρτική τάση (αριθμός Shields) δίνεται βάσει του $d_* = R_{ep}^{2/3}$ (Julien, 2010) που λέγεται και παράμετρος Bonneville.

Μερικοί αριθμοί Reynolds που χρησιμοποιούνται επίσης, είναι οι παρακάτω:

$R_* = u_* D/\nu$ Αριθμός Reynolds τριβής (shear Reynolds number)

$R_p = w_s D/\nu$ Αριθμός Reynolds κόκκου (grain / particle Reynolds number)

όπου w_s είναι η ταχύτητα καθίζησης του κόκκου και u_* η ταχύτητα τριβής όπως ήδη αναφέρθηκε.

Η έναρξη της κίνησης είναι ένα φυσικό όριο και σαν τέτοιο δεν μπορεί να προσδιοριστεί ικανοποιητικά. Ο Shields θεωρούσε κρίσιμη κατάσταση όταν κινούνταν το 50% περίπου των κόκκων που προεξείχαν από την επιφάνεια της κοίτης. Επιπλέον τα πειράματά του έγιναν σε υλικό σχεδόν ενιαίας διαμέτρου πάνω σε επίπεδη κοίτη, μια κατάσταση που δεν απαντάται σχεδόν ποτέ στα χειμαρρώδη υδατορεύματα με μεγάλες κλίσεις όπου το υλικό του πυθμένα εκτείνεται σε ένα μεγάλο εύρος μεγεθών.

2.1.3 Συναρτήσεις μεταφοράς

Οι προσεγγίσεις των ερευνητών χωρίζονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες: αυτές που αναπτύσσονται με βάση την συρτική τάση στον πυθμένα, αυτές με βάση την ισχύ του ρεύματος (stream power) και αυτές με βάση την ταχύτητα του νερού. Μια εξαίρεση είναι η θεωρία του Einstein (του υιού Χανς-Άλμπερτ) που είναι πιθανολογική στην ουσία της συνδυάζοντας τις γνώσεις της υδροδυναμικής της εποχής του. Από τις προσεγγίσεις αυτές θα θα αναλυθεί παρακάτω η πρώτη κατηγορία, δηλαδή θα γίνει αναφορά στα μοντέλα που βασίζονται στην συρτική τάση στον πυθμένα.

Γενικά, οι *συναρτήσεις μεταφοράς* (transport functions) βασίζονται σε μια εκτίμηση της *πλεονάζουζας συρτικής τάσης* (excess shear stress) η οποία εκφράζεται με όρους όπως $\boldsymbol{\tau - \tau_c}$ ή $\boldsymbol{\tau/\tau_c}$ όπου $\boldsymbol{\tau}$ είναι η ασκούμενη συρτική τάση στους κόκκους του πυθμένα ενώ $\boldsymbol{\tau_c}$ είναι η κρίσιμη συρτική τάση, πέραν της οποίας κόκκοι δεδομένης διαμέτρου τίθενται σε κίνηση. Για παράδειγμα, η συνάρτηση των Meyer-Peter and Muller (1948), η οποία θεωρείται και η αρχή όλων των σχετικών μοντέλων, αλλά και αρκετά χρησιμοποιούμενη και συνιστώμενη για περιβάλλοντα όπως αυτό της Ελλάδας (Χρυσάνθου και Παπαλάσκαρης, 2015), εκφράζεται ως εξής:

$$q^* = 8(\tau^* - \tau_c^*)^{\frac{3}{2}} \tag{2-9}$$

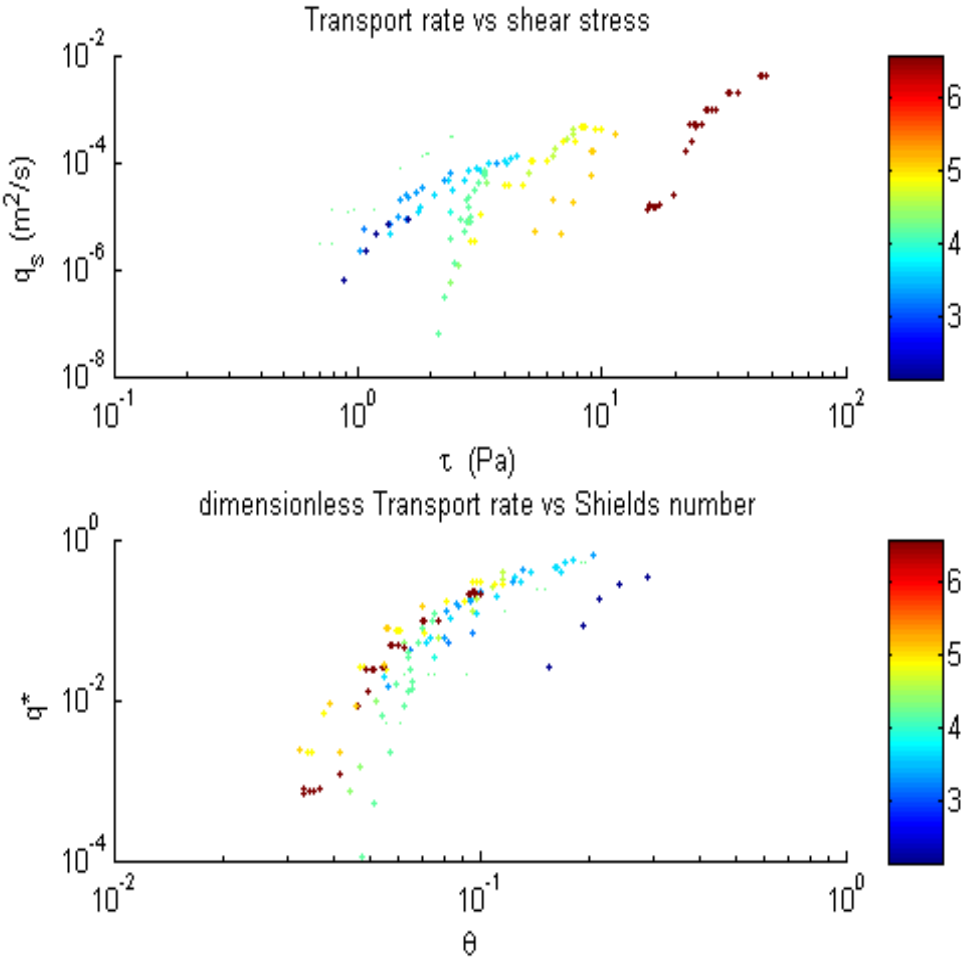
Σε αυτή την περίπτωση η (αδιάστατη) πλεονάζουσα $\boldsymbol{\tau_c^*}$ συρτική τάση $\tau^* - \tau_c^*$ υψώνεται στην 3/2 και πολλαπλασιάζεται με το 8 προκειμένου να δώσει την (αδιάστατη) στερεοπαροχή. Οι αδιάστατες τιμές μπορούν να μεταβληθούν σε διαστατικές χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που παρατέθηκαν παραπάνω. Λόγω της φύσης των συναρτήσεων στερεομεταφοράς (συναρτήσεις δύναμης) μικρά λάθη στην εκτίμηση του τ^* κοντά στο τ_c^* οδηγούν σε μεγάλες αποκλίσεις (τάξης μεγέθους) στα τελικά αποτελέσματα. Δυστυχώς, η μεγαλύτερη στερεομεταφορά σε υδατορεύματα με αδρομερείς πυθμένες συμβαίνει σε τιμές του τ^* όχι πολύ μεγαλύτερες από την τ_c^* (ακόμα και σε πλημμύρες το $\boldsymbol{\tau/\tau_c}$ σπάνια υπερβαίνει το 2) (Wilcock et al. ,2009).

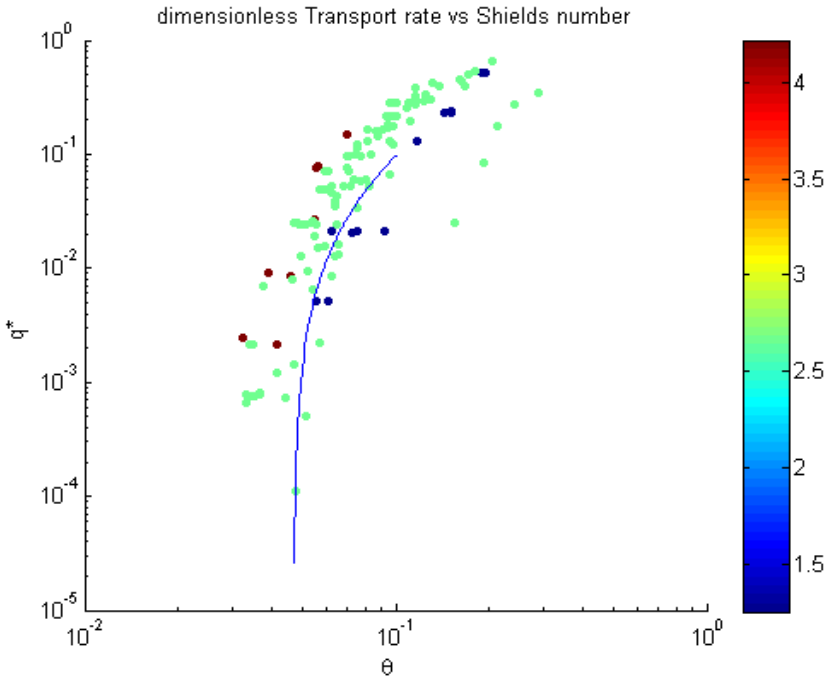
Με βάση τον ορισμό του αριθμού Shields κατατάσσονται οι πηγές σφάλματος στις εκτιμήσεις, σε τρεις κατηγορίες:

1. Εκτίμηση του $\boldsymbol{\tau}$ (το πρόβλημα της ροής)
2. Εκτίμηση του $\boldsymbol{D}$ (το πρόβλημα του ιζήματος)
3. Εκτίμηση του $\boldsymbol{\tau_c}$ (το πρόβλημα έναρξης της κίνησης)

2.1.4 Διαγράμματα από τη βάση δεδομένων των Meyer-Peter & Muller, 1948

Στο παρακάτω Σχήμα 2-6 παρατίθενται διαγράμματα από τα αυθεντικά δεδομένα των πειραμάτων των Meyer-Peter & Muller (πηγή TU Delft). Σκοπός είναι η υπογράμμιση της σημασίας της χρήσης αδιάστατων μεγεθών όπως ο αριθμός Shields (θ) και η αδιάστατη παράμετρος μεταφοράς του Einstein (q* ή Φ).





Σχήμα 2-6 Διαγράμματα στερεομεταφοράς Meyer-Peter & Muller. Επάνω: ρυθμός μεταφοράς συναρτήσει του θ, με το χρώμα των σημείων να αναπαριστά το μεγεθός τους. Μέσον: Με χρήση του της αδιάστατης μεταφοράς Φ όλα τα μεγέθη κόκκων συμπίπτουν σε μία καμπύλη, εκτός των μικρότερων (μπλέ), λόγω ύπαρξης γεωμορφών στον πυθμένα (φραγματικές μορφές). Μετά την διόρθωση της συρτικής τάσης σε αυτή την περίπτωση. Κάτω: όλα τα μεγέθη συμπίπτουν ικανοποιητικά και η εξίσωση Meyer-Peter & Muller που δίνεται από την μπλέ γραμμή περιγράφει καλά την γενική τάση.

2.1.5 Έναρξη κίνησης και συρτική τάση αναφοράς

Η κρίσιμη συρτική τάση $\boldsymbol{\tau_c}$ είναι ένα φυσικό όριο ή κατώφλι: η τιμή της $\boldsymbol{\tau}$ πάνω από την οποία οι κόκκοι τιθενται σε κίνηση. Ως τέτοιο είναι δύσκολο να μετρηθεί. Οι ερευνητές που διεξάγουν πειραματικές μετρήσεις αναφέρουν τις δυσκολίες αυτής της μέτρησης: αν εστιάζει κανεις σε κάποιο κόκκο πόση ώρα πρέπει να τον παρατηρεί και πόση επιφάνεια πρέπει να κοιτά μέχρι να βεβαιωθεί ότι κινείται; Όταν η ροή είναι τυρβώδης, όταν δηλαδή το $\boldsymbol{\tau}$ μεταβάλλεται τοπικά και χρονικά συνεχώς, αυτές οι ερωτήσεις δεν μπορούν εύκολα να απαντηθούν.

Αν ο σκοπός είναι η εκτιμηση της στερεοπαροχής, ένα *πρακτικό υποκατάστατο* είναι να υποκατασταθεί η κρίσιμη συρτική τάση $\boldsymbol{\tau_c}$ με την *συρτική τάση αναφοράς* $\boldsymbol{\tau_r}$ που είναι η συρτική τάση αυτή που προκαλεί μια μικρή, σταθερή και προκαθορισμένη στερεοπαροχή.

Επομένως, η τάση αναφοράς $\boldsymbol{\tau_r}$ θα είναι κοντά στην κρίσιμη συρτική τάση $\boldsymbol{\tau_c}$ αλλά λίγο μεγαλύτερη από αυτήν.

Για τον καθορισμό της, χρειάζεται κατ' αρχάς ο ορισμός μιας νέας αδιάστατης παραμέτρου στερεοπαροχής (Parker & Klingeman, 1982).

$$W^* = \frac{q^*}{(\tau^*)^{3/2}} = \frac{(s-1)gq_s}{\left(\tau/\rho\right)^{3/2}} = \frac{(s-1)gq_s}{\rho_s u_*^3} \qquad (2\text{-}10)$$

Αυτή η τιμή στερεοπαροχής, που αντιστοιχεί στην τάση αναφοράς, έχει οριστεί σαν W* = 0.002. Παρατηρούμε ότι η σχέση αυτή δεν περιέχει το D, γεγονός που διευκολύνει την ανάπτυξη γενικών μοντέλων στερεοπαροχής. Καθώς η W* ορίζεται με βάση την *q**, οι δυό τους είναι αμοιβαία εναλλάξιμες και έτσι κάθε υπάρχουσα εξίσωση στερεοπαροχής μπορεί να γραφτεί με όρους της W*. Για παράδειγμα η σχέση M-PM μπορεί να γραφτεί ως

$$W^* = 8(1 - 0.996\frac{\tau_r^*}{\tau^*})^{\frac{3}{2}} \qquad (2\text{-}11)$$

Αν συγκριθεί με την διατύπωση της με βάση την *q**

$$q^* = 8(1 - \frac{\tau_c^*}{\tau^*})^{\frac{3}{2}} \qquad (2\text{-}12)$$

Διαπιστώνεται ότι, πράγματι, η $\boldsymbol{\tau_r}$ είναι λίγο μεγαλύτερη από την $\boldsymbol{\tau_c}$ ($\boldsymbol{\tau_c}$=0.996 $\boldsymbol{\tau_r}$).
Η κρίσιμη τάση αναφοράς χρησιμοποιείται από τα μοντέλα του BAGS (δες 2.2.11).

2.1.6 Το μέγεθος των κόκκων – κλίμακες

Στην μεταφορά των φερτών από τη ροή του νερού στην κοίτη, το μέγεθος των κόκκων έχει σημαντικό ρόλο. Είναι φανερό πως είναι δυσκολότερο να μετακινηθεί μια μεγαλύτερη πέτρα απ' ότι μια μικρότερη (*επιρροή απολύτου μεγέθους)* ενώ οι μικρότεροι κόκκοι όταν βρίσκονται σε ένα μίγμα διαφόρων μεγεθών, είναι δυσκολότερο να μετακινηθούν απ' ότι εάν θα βρίσκονταν σε ένα πιο ομοιόμορφο μίγμα, δηλαδή σε ένα μίγμα με καλύτερη ταξινόμηση (*επιρροή του σχετικού μεγέθους)*. Είναι προφανές ότι στα φυσικά ποτάμια υδατορεύματα που ο πυθμένας της κοίτης αποτελείται συνήθως από ένα σύμφυρμα στερεών κόκκων πολύ διαφορετικών μεγεθών, η επιρροή του σχετικού μεγέθους είναι

σημαντική. Λόγω του μεγάλου εύρους των μεγεθών που απαντώνται στα φυσικά ποτάμια υδατορεύματα η κλίμακα μέτρησης είναι λογαριθμική (γεωμετρική) και όχι αριθμητική. Η λογαριθμική κλίμακα που χρησιμοποιείται βασίζεται σε δυνάμεις του 2. Χρησιμοποιήθηκε κατ'αρχάς η κλίμακα *Φ*, στην οποία η διάμετρος, D, του κόκκου σε χιλιοστά ορίζεται ως:

$$D = 2^{-\phi} \qquad \text{και αντίστοιχα} \qquad -\phi = \ell og_2(D) = \frac{\ell n(D)}{\ell n(2)}$$

Στην κλίμακα *Φ* οι μεγάλου μεγέθους κόκκοι αντιστοιχούν σε αρνητικές τιμές του *Φ* ενώ οι μικρών διαστάσεων κόκκοι αντιστοιχούν σε θετικά *Φ*. Λόγω αυτής της, κάπως αντιδιαισθητικής κατάταξης, χρησιμοποιείται η κλίμακα *Ψ,* κατά την οποία:

$$D = 2^{\psi} = 2^{-\phi} \qquad \text{και αντίστοιχα} \qquad \psi = -\phi = \ell \mathrm{og}_2(\mathrm{D}) = \frac{\ell \mathrm{n}(\mathrm{D})}{\ell \mathrm{n}(2)}$$

Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι προκειμένου για τους φυσικούς κόκκους που είναι πάντοτε ακανόνιστου σχήματος, η *διάμετρος* μπορεί να οριστεί με διαφορετικούς τρόπους:

- *Διάμετρος κόσκινου*: είναι το μήκος ενός κόσκινου τετραγωνικού ανοίγματος από το οποίο ο κόκκος θα περάσει, για να συγκρατηθεί στο αμέσως επόμενο κόσκινο μικρότερου ανοίγματος, πχ 1mm < D < 2mm. Αυτή η διάμετρος μπορεί να καθοριστεί ικανοποιητικά σε αδρομερέστερους κόκκους.
- *Ιζηματολογική διάμετρος*: είναι η διάμετρος ενός σφαιρικού κόκκου χαλαζία (quartz) που έχει την ίδια *ταχύτητα καθίζησης* με τον κόκκο. Αυτή η διάμετρος βρίσκει εφαρμογή στους πολύ μικρούς κόκκους.
- *Ονομαστική διάμετρος*: είναι η διάμετρος της σφαίρας που έχει την ίδια μάζα (και πυκνότητα) με τον κόκκο.

Στον Πίνακα 2-1 δίνεται η ταξινόμηση που χρησιμοποιείται διεθνώς.

Οι κατανομές μεγέθους των κόκκων σχεδιάζονται σαν καμπύλες αθροιστικής συχνότητας οι οποίες δίνουν το *επί τοις εκατό διερχόμενο* για κάθε συγκεκριμένο μέγεθος. Εάν πρόκειται να υπολογιστούν οι ρυθμοί μεταφοράς διαφορετικών κλάσεων μεγέθους σε ένα μίγμα, χρησιμοποιείται η αναλογία των διαφορετικών αυτών κλάσεων στο μίγμα.

Πίνακας 2-1 Ταξινόμηση και ονοματολογία ιζηματογενών κόκκων

Διάμετρος κόκκων (mm)	*Φ κλίμακα*	*Ψ κλίμακα*	*Ονοματολογία Τάξης μεγέθους*	
4096	-12	12	ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ (boulders)	ογκόλιθοι (κοτρώνες)
2048	-11	11		
1024	-10	10		
512	-9	9		
256	-8	8	ΚΡΟΚΑΛΕΣ (cobbles)	κροκάλες
128	-7	7		
64	-6	6		
32	-5	5	ΧΑΛΙΚΕΣ (pebbles)	βότσαλα
16	-4	4		
8	-3	3		
4	-2	2		
2	-1	1		ψηφίδες ή κόκκοι (granules)
1	0	0	ΑΜΜΟΣ (sand)	πολύ χονδρόκοκκη άμμος
0,5	1	-1		χονδρόκοκκη άμμος
0,25	2	-2		μεσόκοκκη άμμος
0,125	3	-3		λεπτόκοκκη άμμος
0,062	4	-4		πολύ λεπτόκοκκη άμμος
0,031	5	-5	ΙΛΥΣ (silt)	χονδρόκοκκη ιλύς
0,016	6	-6		μεσόκοκκη ιλύς
0,0078	7	-7		λεπτόκοκκη ιλύς
0,0040	8	-8	ΑΡΓΙΛΟΣ (clay)	άργιλος
0,0020	9	-9		
0,00098	10	-10		
0,00049	11	-11		
0,00024	12	-12		

Ας είναι D_1, D_2,…D_{N+1} τα μεγέθη των κόκκων με αναλογούντα επί τοις εκατό διερχόμενα ποσοστά τα P_{f1}, P_{f2}, …P_{fN+1}. Επομένως, οι N κλάσεις μεγέθους (μεταξύ D_1 και D_2, D_2 και D_3,... D_N και D_{N+1}), θα έχουν αντίστοιχα ογκομετρικά ποσοστά στο μίγμα F_1, F_2,…F_N. Το μέσο μέγεθος κάθε κλάσματος και το ογκομετρικό ποσοστό στο μίγμα που του αναλογεί, υπολογίζονται ως εξής:

$$\overline{D}_i = \sqrt{D_i\, D_{i+1}}\,, \qquad \overline{\Psi}_i = \frac{\Psi_i + \Psi_{i+1}}{2}, \qquad \overline{F}_i = \frac{|F_i + F_{i+1}|}{100}$$

Το κέντρο μιας κοκκομετρικής σύνθεσης δείγματος (κσδ) αντιπροσωπεύεται από το μέσο:

$$\overline{\Psi} = \sum_{i=1}^{N} \overline{\Psi}_i\, F_i \;, \quad D_g = 2^{\overline{\Psi}}$$

όπου $\overline{\Psi}$ είναι ο αριθμητικός μέσος στην κλίμακα Ψ, και D_g είναι ο γεωμετρικός μέσος.

Η διασπορά της κ.σ.δ. εκφράζεται από την τυπική απόκλιση:

$$\sigma_\Psi = \sqrt{\sum_1^N (\bar{\Psi}_i - \bar{\Psi})^2 F_i}, \quad \sigma_g = 2^{\sigma_\Psi}$$

όπου σ_Ψ είναι η αριθμητική τυπική απόκλιση στην κλίμακα Ψ, και σ_g είναι η γεωμετρική τυπική απόκλιση σε mm. Οι τύποι συνοψίζονται στον Πίνακα 2-2.

Πίνακας 2-2 Οι ορισμοί των γεωμετρικών μέσων για πολυκλασματικές κατανομές (Parker, 1982).

$D_i = \sqrt{D_{b,i}\, D_{b,i+1}}$, $\Psi_i = \frac{\Psi_{b,i}+\Psi_{b,i+1}}{2}$, $f_i = f_{f,i+1} - f_{f,i}$	N+1 σημεία ορίζουν N κλάσεις μεγέθους. Η κλάση i ορίζεται από τα ($D_{b,i}$, $D_{b,i+1}$) και ($f_{f,i}$, $f_{f,i+1}$)
$\bar{\Psi} = \sum_{i=1}^N \Psi_i f_i$, $\sigma = \sqrt{\sum_1^N (\Psi - \bar{\Psi})^2 f_i}$	$\bar{\Psi}$ = μέσο μέγεθος κλάσματος στην κλίμακα Ψ σ = τυπική απόκλιση στην κλίμακα Ψ D_g = γεωμετρικός μέσος σ_g = γεωμετρική τυπική απόκλιση (≥ 1)
$D_g = 2^{\bar{\Psi}}$, $\sigma_g = 2^{\sigma}$	

Η διάμετρος D_{50} θεωρείται γενικά αντιπροσωπευτική της κοκκομετρικής σύνθεσης του πυθμένα ενός ρεύματος, ενώ η τραχύτητα του ρεύματος δίνεται από μια μεγαλύτερη διάμετρο, συνήθως την D_{90}. Τέλος, χρήσιμοι σαν περιγραφείς της δομής της κοίτης είναι και οι όροι *framework-supported bed / matrix-supported bed*. Εάν το ποσοστό της άμμου στον πυθμένα είναι μικρό (κάτω από περίπου 25%), τα βότσαλα είναι σε επαφή μεταξύ τους (framework-supported bed). Αν όμως το ποσοστό της άμμου είναι μεγαλύτερο από 40%, τότε τα βότσαλα στην πραγματικότητα βρίσκονται μέσα στην άμμο, χωρίς να έρχοναι σε επαφή μεταξύ τους (matrix-supported bed). Αυτή η διάκριση έχει σημασία γιατί οι κόκκοι σε ένα matrix-supported bed τείνουν να κινούνται με μεγαλύτερους ρυθμούς.

2.1.7 Αιωρούμενο φορτίο - μονάδες

Η συχνότερα χρησιμοποιούμενη μονάδα συγκέντρωσης ιζήματος στο νερό είναι τα mg/l η και είναι ο λόγος της μάζας του ιζήματος (των αιωρούμενων φερτών) προς τον όγκο του μίγματος νερού-ιζήματος. Άλλες μονάδες είναι το Kg/m^3 (1 mg/l = $1g/m^3$), η συγκέντρωση κατ' όγκο C_v, η συγκέντρωση σαν μέρη στο εκατομμύριο (parts per million-ppm) C_{ppm}, και η συγκέντρωση κατά μάζα C_w.

$$C_v = \frac{\text{όγκος ιζήματος}}{\text{ολικός όγκος}} = \frac{\forall_s}{\forall_t} = 1 - p_o$$

$$C_w = \frac{\text{βάρος ιζήματος}}{\text{ολικό βάρος}} = \frac{W_s}{W_t} = \frac{C_v s}{1 + (s-1)C_v}$$

όπου p_o το πορώδες και s η σχετική πυκνότητα, $s = \rho_s/\rho$ (πυκνότητα στερεών προς πυκνότητα νερού, συνήθως ίση με 2.65).

$$C_{ppm} = 10^6 C_w$$

Η συγκέντρωση σε μέρη στο εκατομμύριο είναι 1,000,000 φορές η συγκέντρωση κατά βάρος. Η συγκέντρωση σε mg/l και η C_v δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$C_{mg/l} = \frac{\frac{1mg}{l} s\, C_{ppm}}{s + (1-s)10^{-6} C_{ppm}} = \rho s C_v = \frac{10^6 mg}{l} s C_v$$

Στο εργαστήριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο μέθοδοι, η εξάτμιση και η φίλτρανση. Στην πρώτη τα δείγματα εξατμίζονται και μετράται το βάρος του στερεού υπολείμματος.

Η διαδικασία των μετρήσεων – δειγματοληψιών χωρίζεται σε τρεις επί μέρους τομείς: *κοκκομετρία της κοίτης*, *μετρήσεις αιωρούμενων* και *μετρήσεις φορτίου πυθμένα*, που συνοδεύονται από εργαστηριακές μετρήσεις - αναλύσεις.

2.2 ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΟΙΤΗΣ

2.2.1 Το ζήτημα της ροής

Η προσπάθεια του υπολογισμού της συρτικής τάσης στον πυθμένα ενός υδατορεύματος γενικά παρουσιάζει τις εξής δυσκολίες: α) Μη μόνιμη ροή, ανομοιόμορφη ροή β) επιμερισμός της συνολικής συρτικής τάσης σε δύο συνιστώσες, και γ) τοπική μεταβλητότητα στην τιμή της συρτικής τάσης.

2.2.2 Μη μόνιμη – ανομοιόμορφη ροή

Αν και η τιμή της συρτικής τάσης υπολογίζεται για συνθήκες μόνιμης και ομοιόμορφης ροής δεν πρέπει να διαφεύγει ότι συνθήκες ομοιόμορφης ροής είναι μάλλον σπάνιες στα φυσικά υδατορεύματα και κυρίως στα ποτάμια με χειμαρρώδη χαρακτηριστικά όπου η γεωμετρία της κοίτης καθώς και η κλίση της βαθιάς γραμμής αλλάζουν συνεχώς και συνήθως με απότομο τρόπο. Οι συνθήκες ομοιόμορφης ροής αποτελούν επομένως μια προσέγγιση της πραγματικής κατάστασης. Αυτός είναι και ο λόγος που αναζητώνται τμήματα της διαδρομής του ποταμού για τα οποία μια τέτοια προσέγγιση είναι βάσιμη (ευθύγραμμα τμήματα με σχετικά σταθερή διατομή και επιμήκη κλίση κοίτης), προκειμένου να γίνουν μετρήσεις και να εγκατασταθούν σταθμοί. Επιπλέον, μεγάλο τμήμα της στερεομεταφοράς μπορεί να λαμβάνει χώρα σε κατάσταση μη μόνιμης ροής όταν η παροχή στο ποτάμι αυξάνεται ή μειώνεται εξαιτίας κάποιου πλημμυρικού επεισόδιου.

Η ισορροπία των δυνάμεων σε ένα τμήμα του ρεύματος εκφράζεται από τις εξισώσεις Saint Venant (Yu et al, 2017). Σε περίπτωση μίας διάστασης, αυτή γράφεται:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} = gS - g\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\rho R} \tag{2-13}$$

Στο αριστερό σκέλος της εξίσωσης βρίσκεται η επιτάχυνση του υγρού (τοπική και μεταθετική) ενώ στο δεξί σκέλος βρίσκονται οι δρώσες δυνάμεις, που με την σειρά είναι, η συνιστώσα της βαρύτητας κατά την διεύθυνση της ροής, η (υδροστατική) πίεση και τέλος, η διατμητική τάση που εξασκεί το στερεό όριο στο νερό. Αν λύσουμε ως προς $\boldsymbol{\tau}$ θα πάρουμε:

$$\tau_0 = \rho g R\left(S - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{U}{g}\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{1}{g}\frac{\partial U}{\partial t}\right) \tag{2-14}$$

Σε περίπτωση μόνιμης και ομοιόμορφης ροής όλοι οι όροι πλην του S μηδενίζονται και ξαναπαίρνουμε την γνωστή σχέση $\tau = \rho g R S$. Σε περιπτώσεις όμως μη μόνιμων ή ανομοιόμορφων ροών οι υπόλοιποι όροι στα εντός της παρένθεσης μπορεί να πάρουν σημαντικές τιμές, και επομένως οι υπολογισμοί να μην αντιπροσωπεύουν την

πραγματικότητα. Ειδικότερα, εάν θεωρήσουμε τον μη μόνιμο όρο $\frac{\partial U}{\partial t}$ αμελητέο, τότε η σχέση γίνεται:

$$\tau_0 = \rho g R \left(S - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{U}{g}\frac{\partial U}{\partial x} \right) = \rho g R S_f \qquad (2\text{-}15)$$

όπου η ποσότητα S_f είναι η κλίση της γραμμής ενέργειας και λέγεται κλίση τριβής (friction slope). Η κλίση τριβής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$S_f = \frac{d}{dx}\left(z_b + h + \frac{U^2}{2g} \right) \qquad (2\text{-}16)$$

όπου, κατά τα γνωστά, οι όροι εντός της παρένθεσης είναι το φορτίο βαρύτητας, το φορτίο πίεσης και το φορτίο ταχύτητας ανά μονάδα μάζας του υγρού. Η κλίση τριβής σε ροές ανοιχτών αγωγών μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από υδραυλικά 1Δ λογισμικά όπως το HEC-RAS.

2.2.3 Επιμερισμός της συρτικής τάσης

Από την συνολική συρτική τάση $\boldsymbol{\tau}$ που ασκείται από το νερό στον πυθμένα του υδατορεύματος ένα τμήμα της μόνο ασκείται επί των κόκκων. Το υπόλοιπο αναλώνεται στην υπερνίκηση των εμποδίων που παρουσιάζονται στη ροή. Αυτά τα εμπόδια μπορεί να είναι ογκόλιθοι είτε εφήμερες γεωμορφές (σχηματισμοί κατά μήκος της κοίτης) που δημιουργούνται επάνω στον πυθμένα όπως ρυτίδες, φραγματικές μορφές απόθεσης, και που συλλογικά ονομάζονται *σχηματισμοί κοίτης*. Εφόσον λοιπόν υπολογιστεί η συρτική τάση στον πυθμένα πρέπει κατόπιν να επιμεριστεί σε δύο τμήματα (dragpartition), καθώς ενδιαφέρει μόνον το τμήμα αυτό που ασκείταιστους κόκκους του πυθμένα. Αυτό το τμήμα της συνολικής συρτικής τάσης, $\boldsymbol{\tau'}$, ονομάζεται επιφανειακή ή *επιδερμική τριβή* (skin friction). Για τον επιμερισμό της τάσης υπάρχουν διάφορες έμμεσες μέθοδοι που βασίζονται στις γνωστές σχέσεις Manning ή Chezy. Ο τύπος του Manning είναι

$$U = \frac{\sqrt{S} R^{2/3}}{n} \qquad (2\text{-}17)$$

Όπου n είναι ο συντελεστής τραχύτητας του Manning. Μιά άλλη σχέση, που ονομάζεται σχέση Strickler, συνδέει την τραχύτητα της κοίτης με το μέγεθος του κόκκου

$$n_D = 0.013D^{1/6} \tag{2-18}$$

για το D σε mm.

Αν πολλαπλασιάσουμε με $(\rho g)^{2/3}S^{1/6}$, αναδιευθετήσουμε και υψώσουμε στην 3/2 και χρησιμοποιήσουμε επίσης την ισότητα $\tau = \rho gRS$, καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση

$$\rho g S^{1/4}(nU)^{3/2} = \tau_0 \tag{2-19}$$

Αν χρησιμοποιήσουμε την τιμή του n_D στον παραπάνω τύπο παίρνουμε

$$\rho g(0.013)^{3/2}(SD)^{1/4}U^{3/2} = \tau' \tag{2-20}$$

Το τελευταίο που χρειάζεται, είναι να καθοριστεί ποιο μέγεθος κόκκου είναι το πιο αντιπροσωπευτικό της τραχύτητας του πυθμένα. Για αυτό το λόγο συχνά χρησιμοποιείται το D_{90} ή το D_{84} που είναι οι διάμετροι αυτές από τις οποίες το 90% ή το 84% αντίστοιχα των κόκκων είναι μικρότεροι. Αν χρησιμοποιήσουμε το 2*D_{65} με ρ =1000 kg/m^3 και g = 9.81 m/s^2 παίρνουμε τελικά:

$$\tau' = 17(SD_{65})^{1/4}U^{3/2} \tag{2-21}$$

Αν το D δίνεται σε mm και το U σε m/s, το απότέλεσμα είναι σε Pa.

Επομένως η επιδερμική τριβή εξαρτάται κυρίως από την μέση ταχύτητα και λιγότερο από την κλίση και το μέγεθος του αντιπροσωπευτικού κόκκου.

2.2.4 Μέθοδοι μέτρησης και τοπικότητα της συρτικής τάσης

Σημαντικό ζήτημα και πηγή σφαλμάτων στους υπολογισμούς είναι η χωρική μεταβλητότητα της συρτικής τάσης, το γεγονός δηλαδή ότι αυτή μεταβάλλεται σημαντικά τόσο μέσα στην διατομή όσο και κατά το μήκος του ρεύματος. Όπως επισημαίνουν οι ερευνητές και όπως διαπιστώθηκε στα πλαίδια της παρούσας διατριβής, η στερεομεταφορά είναι ένα έντονα *τοπικό φαινόμενο*. Επειδή οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι μη γραμμικές,

μικρά λάθη στον υπολογισμό της $\boldsymbol{\tau}$ έχουν σαν αποτέλεσμα μεγάλες αποκλίσεις στα τελικά αποτελέσματα.

Ένας τρόπος για την εκτίμηση της τοπικής $\boldsymbol{\tau}$, σε κάποιο σημείο της διατομής ,$\boldsymbol{\tau_l}$, είναι η μέτρηση των ταχυτήτων κατά την κατακόρυφο σε ορισμένες αποστάσεις απο τον πυθμένα, δηλαδή το *προφίλ ταχυτήτων*, u(z), οπου με u συμβολίζεται η ταχύτητα σε κάποιο σημείο, σε αντίθεση με την μέση ταχύτητα στην διατομή U (=Q/A), ενώ z είναι η απόσταση του σημείου αυτού απο τον πυθμένα. Με βάση τη θεωρία του τυρβώδους οριακού στρώματος οι ταχύτητες του νερού θα ακολουθούν μια λογαριθμική σχέση, που μπορεί να αποδοθεί ως εξής:

$$\frac{u}{u_*} = 2.5\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \tag{2-22}$$

όπου u_* είναι η ταχύτητα τριβής, ενώ z_0 είναι το ύψος πάνω από τον πυθμένα όπου η ταχύτητα είναι μηδενική. Γνωρίζοντας την u_* μπορούμε να πάρουμε την τοπική συρτική ταση, ως $\tau_l = {u_*}^2\,\rho$ κάνοντας την υπόθεση ότι το λογαριθμικό στρώμα επεκτείνεται καθ'όλη την κατακόρυφο.

Αν η παραπάνω σχέση ξαναγραφεί χρησιμοποιώντας την μέση κατά την κατακόρυφο ταχύτητα,U_l, θα λάβει τη μορφή:

$$\frac{U_l}{u_*} = 2.5\ln\left(\frac{h}{ez_0}\right) \tag{2-23}$$

Όπου e είναι η βάση των φυσικών λογαρίθμων και h το βάθος του νερού. Δεύτερος τρόπος λοιπόν, είναι μια εκτίμηση της U_l από τις μετρήσεις και μια εκτίμηση του Z_0, όπως, για παράδειγμα, $Z_0 = 0.1*D_{90}$.

Τρίτος τρόπος είναι μια μέτρηση ταχύτητας κοντά στον πυθμένα και μια εκτίμηση του Z_0. Ο Wilcock (1996) συνέκρινε τις τρεις μεθόδους και διαπίστωσε ότι η μέθοδος που βασίζεται στην προσαρμογή του λογαριθμικού προφίλ δίνει την μικρότερη ακρίβεια, ενώ την μεγαλύτερη ακρίβεια δίνει η δεύτερη μέθοδος. Πλεονέκτημα της πρώτης μεθόδου βέβαια είναι ότι δεν χρειάζεται εκτίμηση του Z_0. Ο τρίτος τρόπος δίνει μια ενδιάμεση

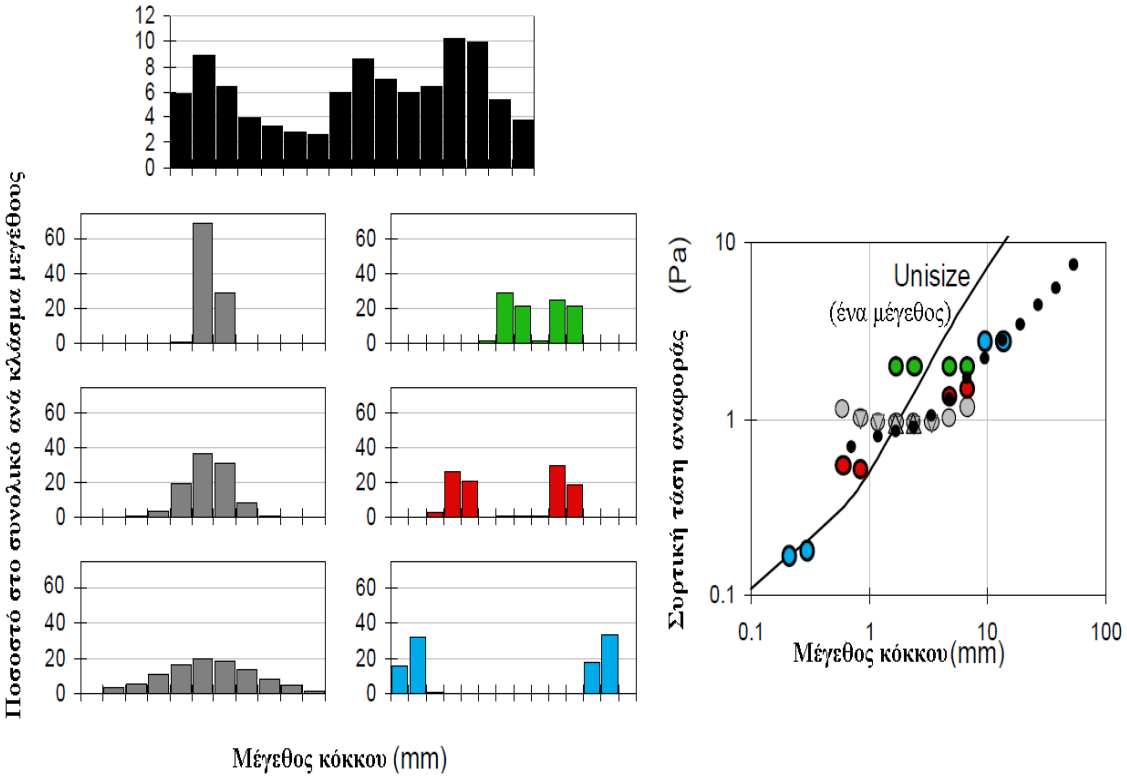
ακρίβεια αλλά έχει το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζεται παρά μια μέτρηση της ταχύτητας και έτσι μπορεί να γίνει γρήγορα.

2.2.5 Συνθήκη ίσης κινητικότητας

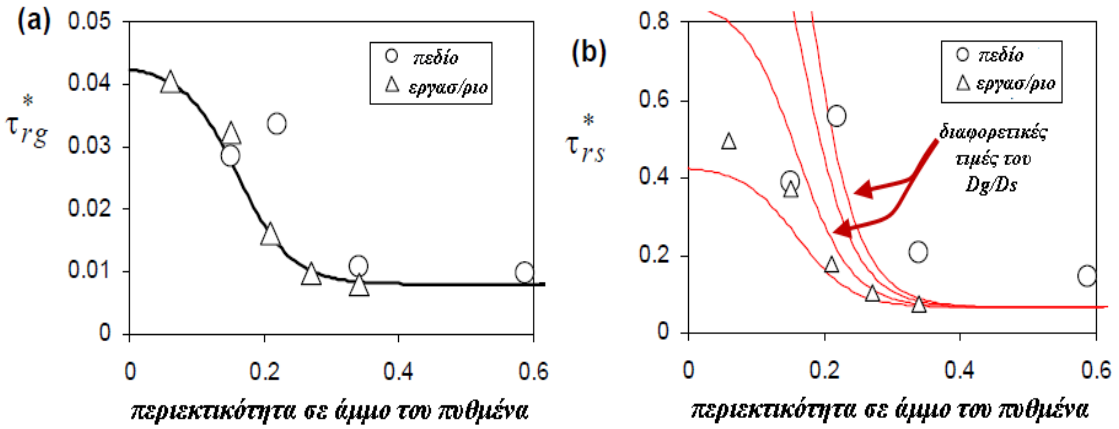
Τα μοντέλα μεταφοράς και η καμπύλη του Shields, στα οποία έγινε αναφορά, αναπτύχθηκαν για πυθμένες με ομοιογενές ίζημα (unisize sediment), όπου οι κόκκοι δηλαδή είναι σχετικά καλά διαβαθμισμένοι και η διασπορά γύρω από το μέσο μέγεθος είναι μικρή. Γιά ίζημα σχετικά καλά διαβαθμισμένο και με μονοκόρυφη (unimodal) κατανομή μεγεθών, περιέργως διαπιστώθηκε ότι όλοι οι κόκκοι, ανεξαρτήτως μεγέθους, θα έχουν περίπου την ίδια κρίσιμη τιμή! Αυτό είναι ένα βασικό στοιχείο της υπόθεσης της *ίσης κινητικότητας* που αποτέλεσε αντικείμενο έντονης διένεξης των ερευνητών πριν από περίπου 20 χρόνια. Αυτό που συμβαίνει, είναι ότι η τάση των μεγαλύτερων κόκκων να τεθούν σε κίνηση πιο δύσκολα, εξισορροπείται από την επίδραση της ανάμιξης των κόκκων διαφορετικών μεγεθών στο ίδιο μίγμα, με αποτέλεσμα οι κόκκοι όλων των μεγεθών να τίθενται σε κίνηση περίπου στην ίδια τιμή της κρίσιμης τάσης. Η κρίσιμη αυτή τάση μπορεί να βρεθεί από την καμπύλη του Shields παίρνοντας για D, το D_{50}.

2.2.6 Η επιρροή της άμμου

Κατά την διενέργεια πειραμάτων συνθηκών έναρξης κίνησης σε διάφορα περιβάλλοντα και διαφορετικά πυθμενικά μίγματα ιζήματος, διαπιστώθηκε ότι ένας τύπος δεν ταίριαζε καλά στο γενικό πρότυπο. Αυτός ο τύπος ήταν οι πυθμένες με αδρομερή υλικά που περιείχαν άμμο λίγο περισσότερο από ένα μικρό ποσοστό. Αυτά τα ιζήματα έχουν γενικά δικόρυφη κατανομή με την μεγαλύτερη κορυφή στην περιοχή των χαλίκων και μια μικρότερη κορυφή στην περιοχή της άμμου. Παρατηρήθηκε ότι η $\boldsymbol{\tau_c}$ για το κλάσμα της άμμου ήταν πολύ μικρότερη από αυτή των χαλίκων (δηλαδή η άμμος ετίθετο σε κίνηση σε πολύ μικρότερες ροές, «παραβιάζοντας» έτσι την αρχή της ίσης κινητικότητας) και επίσης, η $\boldsymbol{\tau_c}$ για το κλάσμα των χαλίκων ήταν μικρότερη γενικά σε τέτοια μίγματα ιζημάτων απ' ότι σε μίγματα ιζημάτων δίχως άμμο. Η περιεκτικότητα σε άμμο λοιπόν, φαίνεται ότι επηρεάζει τόσο την κίνηση των αδρομερέστερων κόκκων, όσο και την κίνηση των κόκκων μικρότερων διαστάσεων (Σχ. 2-7,2-8).



Σχήμα 2-8 Διαφορετικές κατανομές μεγέθους ιζήματος πυθμένα και μετρημένες κρίσιμες συρτικές τάσεις. (Από Wilcock et al., 2009)



Σχήμα 2-7 Η επιρροή της περιεκτικότητας σε άμμο του πυθμένα στις συρτικές τάσεις αναφοράς. Η τάση αναφοράς για τους χάλικες (τ_{rg}) μειώνεται σημαντικά καθώς μεγαλώνει η περιεκτικότητα σε άμμο. Η συμπεριφορά της τάσης αναφοράς για την άμμο (τ_{rs}) είναι πιο σύνθετη και εξαρτάται απο τα σχετικά αντιπροσωπευτικά μεγέθη των δύο κλασμάτων. (Από Wilcock et al., 2009)

Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την μεταβολή που επέρχεται στην δομή του πυθμενικού υλικού καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε άμμο: Ο πυθμένας μεταβάλλεται από *framework supported* (όπου οι μεγάλοι κόκκοι ακουμπούν μεταξύ τους) σε *matrix*

supported (όπου οι μεγάλοι κόκκοι εδράζονται - επικάθονται σε άμμο που βρίσκεται μεταξύ τους).

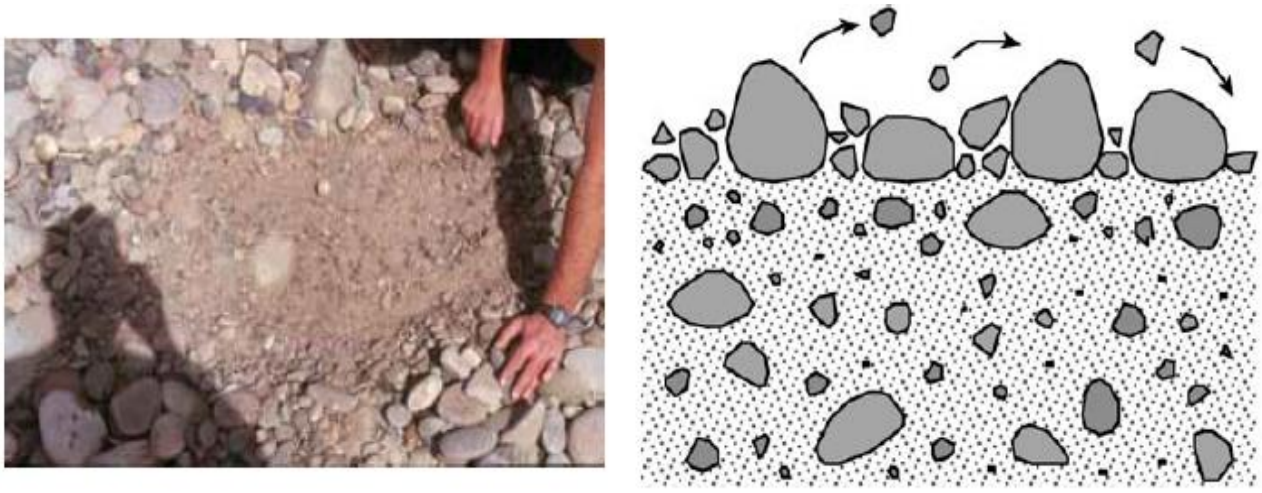
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-8 για μονοκόρυφες κατανομές, (αριστερά κάτω, οι γκρίζες) η μετρούμενη κρίσιμη τάση είναι περίπου η ίδια, λόγω της αρχής της «ίσης κινητικότητας». Αντίθετα, για δικόρυφες κατανομές (δεξιά, οι έγχρωμες) με κενά μεταξύ των κορυφών, οι συρτικές τάσεις αναφοράς είναι διαφορετικές και διακριτές. Η κατανομή επάνω (μαύρη) που αναπαριστά ένα φτωχά διαβαθμισμένο μίγμα ιζήματος με τρεις κορυφές, δίνει μια συνεχή σειρά τάσεων, ενώ η γραμμική σχέση αναπαριστά την περίπτωση ιζήματος που αποτελείται αποκλειστικά από κόκκους ενός μόνο μεγέθους (unisize).

Η επιρροή της περιεκτικότητα του υλικού σε άμμο είναι σημαντική. Το γεγονός ότι αυτό το φαινόμενο δεν αντιπροσωπεύεται στα μοντέλα μεταφοράς υπήρξε ο λόγος για τον οποίο αναπτύχθηκε το μοντέλο δύο κλασμάτων, χαλίκων και άμμου, για το οποίο θα γίνει λόγος στη συνέχεια όταν παρουσιαστούν τα μοντέλα του BAGS (Wilcock, 2002).

2.2.7 Επιφανειακό στρώμα και υπόστρωμα

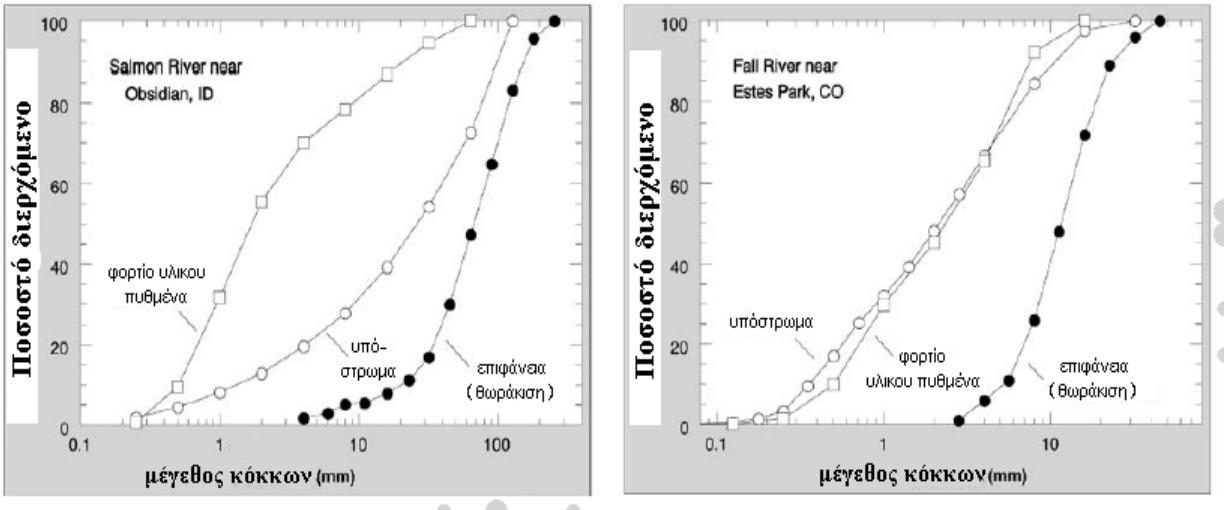
Στα αλλουβιακά υδατορεύματα (τα ποτάμια δηλαδή η κοίτη των οποίων καταλαβάνεται από αλλουβιακές αποθέσεις) η σύνθεση του επιφανειακού στρώματος ιζήματος είναι διαφορετική από αυτή του υποστρώματος. Το υλικό του υποστρώματος είναι πιό λεπτόκκοκο και περισσότερο ομοιογενές. Αυτή το φαινόμενο ονομάζεται *θωράκιση* του πυθμένα και το επιφανειακό μίγμα ιζηματος ονομάζεται στρώμα θωράκισης (Σχ. 2-9).

Η κατακόρυφη διαλογή θέτει το κρίσιμο ζήτημα του ποιό ίζημα αποτελεί το φορτίο πυθμένα (από που τροφοδοτείται η μεταφορά), και επομένως ποιά διάμετρος θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή των μοντέλων στερεομεταφοράς. Αυτό το ερώτημα δεν μπορεί να απαντηθεί εάν δεν υπάρχουν δείγματα του πυθμενικού φορτίου. Η μεγάλη πλειονότητα των μελετών έχει υποδείξει ότι, το πυθμενικό φορτίο, αν ολοκληρωθεί σε ένα εύρος ροών, θα είναι πιο λεπτόκοκκο από το επιφανειακό ύλικό και πλησιέστερο σε ότι αορά τη σύνθεσή του με το υλικό του υποστρώματος.



Σχήμα 2-9 Η θωράκιση του πυθμένα αναφέρεται στην κατάσταση όπου το επιφανειακό στρώμα είναι πολύ πιο αδρομερές και ανομοιογενές απ' ότι το υπόστρωμα του.

Πολλά μοντέλα που βασίζονται σε flume experiments έχουν αναπτυχθεί με βάση το υλικό του υποστρώματος. Αυτή η υπόθεση ενέχει έναν κίνδυνο: διαθέσιμοι για έναρξη κίνησης και για επακόλουθη μεταφορά, κάθε στιγμή μέσα στο ποτάμι, είναι οι κόκκοι της επιφάνειας του πυθμένα και όχι του υποστρώματος. Η ροή αποκτά προσβαση στο υπόστρωμα μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις ισχυρών ροών. Η σύνθεση του μεταφερόμενου φορτίου υλικού πυθμένα θα εξαρτάται από το ιστορικό των ροών στο ποτάμι και από την διαθεσιμότητα υλικού προς μεταφορά (Σχ. 2-10).



Σχήμα 2-10 Σύγκριση των τριών «πληθυσμών» ιζήματος. Για το ρεύμα στα αριστερά το πυθμενικό φορτίο είναι πιο λεπτόκοκκο από το το υλικό του υποστρώματος (και φυσικά της επιφάνειας). Για το ρεύμα στα δεξιά είναι φανερό από την ομοιότητα της κοκκομετρικής σύνθεσης τους, ότι το μεταφερόμενο φορτίο πυθμένα προέρχεται από το υπόστρωμα. Από Wilcock et al., 2009

Η απουσία πειραματικών δεδομένων και ταυτόχρονων μετρήσεων μεταφερόμενου υλικού και σύνθεσης υλικού πυθμένα ήταν που οδήγησε τους περισσότερους ερευνητές να προσαρμόσουν τα μοντέλα τους στο υλικό του υποστρώματος. Σήμερα ωστόσο, υπάρχουν τέτοια πειραματικά δεδομένα και τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν πάνω σε αυτά, βασίζονται στην σύσταση της επιφάνειας της κοίτης.

Οι παρατηρήσεις στο πεδίο και τα πειράματα ανέδειξαν το φαινόμενο της *μερικής μεταφοράς* ή επιλεκτικής μεταφοράς, το οποίο ορίζεται ως η κατάσταση κατά την οποία μόνο ένα μέρος των κόκκων του πυθμένα μετακινούνται κατά την διάρκεια ενός επεισοδίου μεταφοράς. Η μερική μεταφορά μπορεί να μετρηθεί είτε σαν κίνηση ενός ποσοστού του συνολικού μίγματος ιζήματος του πυθμένα (κινήθηκαν το 50% όλων των κόκκων) είτε σαν ποσοστό του κάθε κλάσματος.

2.2.8 Μίγματα μικτού μεγέθους ιζηματος (πολυκλασματικά)

Η απλούστερη λύση για να συμπεριληφθούν τα διαφορετικά μεγέθη στις εξισώσεις, είναι να γίνει η παραδοχή ότι το υλικό του πυθμένα συντίθεται από i διαφορετικές κλάσεις μεγέθους κόκκων, D_i, οι οποίες εμφανίζονται στο συνολικό μίγμα με συχνότητες (ποσοστά), f_i. Για να περιγραφεί το συνολικό μίγμα χρησιμοποιείται η D_m, η διάμεσος διάμετρος του μίγματος (ή και η D_{50})

Η βασική υπόθεση για πολλά μοντέλα ιζήματος μικτού μεγέθους - πολυκλασματικά (mixed size sediment) είναι ότι ο κλασματικός ρυθμός μεταφοράς, ή ή κλασματική στεροπαροχή, q_{si}, όταν διαιρεθεί (scaled by) με το ποσοστό του κάθε κλάσματος στον πυθμένα, f_i, θα είναι συνάρτηση του αριθμού Shields τ_c^* και του κρίσιμου αριθμού Shields για το κάθε κλάσμα τ_{ci}^*, δηλαδή

$$q_i^* = f(\tau_i^*, \tau_{ci}^*) \tag{2-24}$$

$$q_i^* = \frac{q_{si}}{f_i\sqrt{(s-1)gD_i^3}} \tag{2-25}$$

$$\tau_i^* = \frac{\tau}{(s-1)\rho g D_i} \tag{2-26}$$

$$\tau_{ci}{}^{*} = \frac{\tau_{ci}}{(s-1)\rho g D_i} \quad (2\text{-}27)$$

Οι βασικές υποθέσεις πίσω από την σχέση αυτή είναι οι παρακάτω:

i. Το ποσοστό κάθε κλάσματος, f_i, στο μίγμα, επηρεάζει την μεταφορά μόνο κατά το ότι καθορίζει την ποσότητα υλικού που είναι διαθέσιμη για μεταφορά. Μεταβολές στην τιμή f_i, κάποιου κλάσματος δεν αναμένεται να επηρεάσουν την στερεοπαροχή των υπόλοιπων κλασμάτων.

ii. Η επιρροή των $S^*, s, \frac{Dm}{h}$ στη μεταφορά θεωρούνται αμελητέες ή ότι ενέχονται ήδη στον κρίσιμο αριθμό $\tau_{ci}{}^{*}$.

iii. Η ίδια συναρτησιακή σχέση ισχύει για κάθε κλάσμα του μίγματος.

2.2.9 Συναρτήσεις απόκρυψης

Έγινε ήδη αναφορά στην επιρροή της περιεκτικότητας του ιζήματος σε άμμο στην κρίσιμη συρτική τάση ή στην συρτική τάση αναφοράς. Παρόμοια επίδραση στην κρίσιμη συρτική τάση έχει η ύπαρξη πολλών μεγεθών στα μικτού μεγέθους ιζήματα. Οι μικρότεροι κόκκοι, καθώς τείνουν να «κρυφτούν» ανάμεσα στους μεγαλύτερους είναι πιο δύσκολο να μετακινηθούν, ενώ οι μεγαλύτεροι, καθώς είναι περισσότερο εκτεθειμένοι απ' ότι θα ήταν σε ένα ομοιογενές μίγμα ίσων διαμέτρων, είναι πιο εύκολο να μετακινηθούν. Για να περιληφθεί αυτή η συμπεριφορά στα μοντέλα, εισήχθησαν από τους ερευνητές οι συναρτήσεις απόκρυψης. Οι συναρτήσεις απόκρυψης επομένως περιγράφουν τις μεταβολές στις κρίσιμες συρτικές τάσεις συναρτήσει των σχετικών μεγεθών των διαφορετικών κλασμάτων δηλαδή των λόγων D_i / D_m . Σε κάποια μοντέλα η συνάρτηση είναι πιο περίπλοκη, καθώς υποθέτει ότι τα μικρότερα κλάσματα είναι σχεδόν ισοκινητικά, ενώ τα αδρομερέστερα κλάσματα επιδεικνύουν σημαντική διαφοροποίηση.

2.2.10 Ανάπτυξη μοντέλου καμπύλης παροχής-στερεοπαροχής με βαθμονόμηση

Εάν διατίθεται ικανός αριθμός από ταυτόχρονες μετρήσεις παροχής και στερεοπαροχής μπορεί να προσαρμοστεί μια καμπύλη που να συσχετίζει την παροχή με την στερεοπαροχή,

και επομένως να υπάρχει μια εμπειρική σχέση που να συνδέει τα δύο μεγέθη, παρόμοια με την καμπύλη στάθμης – παροχής. Παρακάτω, αναπτύσσεται η μεθοδολογία κατασκευής μιας τέτοιας καμπύλης με βαθμονόμηση. Στο Εδάφιο 4.7.2 κατασκευάζεται η καμπύλη αυτή με τα στοιχεία των μετρήσεων για τη θέση Γέφυρα Πλιατσικούρα.

Η σημαντικότερη πλευρά της ανάπτυξης ενός μοντέλου στερεομεταφοράς είναι η ανάπτυξη μιας βάσης για την απόδοση της *ισχύος της ροής* μέσω της παροχής. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου είναι ιδιαίτερα χρήσιμη γιατί συνήθως η διαθέσιμη πληροφορία που είναι διαθέσιμη για μια θέση παρατήρησης είναι η παροχή. Η σχέση παροχής - στερεοπαροχής εκφράζεται συνήθως από μια σχέση δύναμης:

$$Q_s = \alpha Q^{\beta} \tag{2-28}$$

Αν η σχέση αυτή ξαναγραφεί για μια κατάσταση αναφοράς (παροχή και στεροπαροχή) και διαιρέσουμε τις δύο εκφράσεις κατά μέλη θα πάρουμε:

$$\frac{Q_s}{Q_{sr}} = \left(\frac{Q}{Q_r}\right)^{\beta} \tag{2-29}$$

Με γνωστές τιμές των Qr, Qsr θα μπορούσε να προβλεφθει η Qs για κάθε τιμή της Q.
Για να περιγραφεί η διαδικασία, ξεκινάμε με μια απλή φόρμουλα, ή εξίσωση μεταφοράς, θεωρώντας ότι η στερεοπαροχή είναι ανάλογη με την συρτική τάση υψωμένη στην τρίτη δύναμη (την φόρμουλα Einstein – Brown).

$$q^* \propto (\tau^*)^3 \tag{2-30}$$

Για τους σκοπούς μας, αυτό που χρειαζόμαστε είναι

$$q_s \propto (\tau')^3 \tag{2-31}$$

όπου τ', η είναι η επιδερμική τριβή. Αν ξαναγράψουμε την Εξ.2-31 για μια κατάσταση αναφοράς (reference) και διαιρέσουμε κατά μέλη

$$\frac{q_s}{q_{sr}} = \left(\frac{\tau'}{\tau_r{}'}\right)^3 \quad (2\text{-}32)$$

Επόμενο βήμα είναι η σύνδεση της τ με την U. Αυτό μπορεί να γίνει με την μέθοδο επιμερισμού της ολικής τάσης που αναπτύχθηκε στο Εδάφιο 2.2.3. Επαναλαμβάνουμε εδώ την σχέση στην οποία είχαμε καταλήξει:

$$\tau' = 17(SD_{65})^{1/4}U^{3/2}$$

Αν ξαναγράψουμε την παραπάνω σχέση για μια κατάσταση αναφοράς και διαιρέσουμε πάλι κατά μέλη θα πάρουμε

$$\frac{\tau'}{\tau_r{}'} = \left(\frac{U}{U_r}\right)^{3/2} \quad (2\text{-}33)$$

Σε συνδυασμό με την (2-32) παίρνουμε τελικά

$$\frac{q_s}{q_{sr}} = \left(\frac{U}{U_r}\right)^{4.5} \quad (2\text{-}35)$$

Επομένως, γίνεται φανερό ότι ο λόγος της στερεομεταφοράς σε δύο διαφορετικές ταχύτητες, μία εκ των οποίων θεωρούμε ταχύτητα αναφοράς, είναι ίσος με τον λόγο των ταχυτήτων τους υψωμένο σε μία δύναμη. Οι παραδοχές για να περάσουμε σε αυτή τη σχέση είναι ότι η κλίση και η κοκκομετρική σύσταση του πυθμένα δεν έχει άλλαξει, όπως επίσης και ότι το πλάτος της ενεργής διατομής της κοίτης (το πλάτος της διατομής το οποίο παράγει στερεομεταφορά), δεν έχει μεταβληθεί με την μεταβολή της ταχύτητας.

Αυτό που απομένει είναι η σύνδεση της μέσης ταχύτητας U με την παροχή Q. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τις σχέσεις *υδραυλικής γεωμετρίας* που χαρακτηρίζουν την διατομή. Η βασική ιδέα της υδραυλικής γεωμετρίας σε μια θέση (at-a-station, σε αντίθεση με της υδραυλική γεωμετρία στα κατάντη-downstream), είναι ότι το πλάτος της διατομής B, το βάθος της ροής h, καθώς και η μέση ταχύτητα U, θεωρείται ότι ακολουθούν σχέσεις δύναμης με την παροχή Q, δηλαδή

$$B=\alpha Q^{b}\ ,\ h=cQ^{f},\ U=kQ^{m} \qquad (2\text{-}36)$$

και επειδή Q = BhU, θα πρέπει $ack = 1$, $b+f+m = 1$

Χρησιμοποιώντας την σχέση $U=kQ^{m}$ μαζί με την Εξίσωση 2-36 παίρνουμε τελικά

$$\frac{q_s}{q_{sr}} = \left(\frac{Q}{Q_r}\right)^{4.5m} \qquad (2\text{-}37)$$

Μπορούμε να εξαγάγουμε τους συντελεστές k, m σε μια διατομή υδρομετρήσεων. Τα συγκεντρωτικά στοιχεία από διάφορετικά υδατορεύματα δίνουν τιμές του κ από 0.3 έως 0.8 πράγμα που σημαίνει ότι ο εκθέτης β στην σχέση κυμαίνεται από 1.4 έως 3.6 (Wilcock et al., 2009)

Για τη σύνθεση του μοντέλου, χρειάζεται μια εκτίμηση των συρτικών τάσεων αναφοράς, (για ένα ή περισσότερα κλάσματα μεγέθους). Εάν είναι διαθέσιμες μετρήσεις, οι τιμές αυτές μπορούν να ληφθούν από τα δείγματα. Οι τιμές για τις τάσεις αναφοράς όσο και της καμπύλης μπορούν να υπολογιστούν με μια ευθεία υπολογιστική διαδικασία. Οι μετρημένες τιμές της στερεοπαροχής σχεδιάζονται σαν συνάρτηση της παροχής. Για ένα εύρος παροχών οι οποίες καλύπτονται από τις ταυτόχρονες μετρήσεις στερεοαπορροής -και επεκτεινόμενες σε μεγαλύτερες παροχές-, η ταχύτητα υπολογίζεται σαν συνάρτηση της παροχής από κάποια σχέση υδραυλικής γεωμετρίας, η συρτική τάση εκτιμάται από κάποια μέθοδο επιμερισμού της ολικής συρτικής τάσης ενώ η στερεοαπορροή υπολογίζεται από κάποια συνάρτηση μεταφοράς της μορφής:

$$q^{*} \propto \mu(\varphi^{*})^{\nu}$$

Με βάση τις μετρήσεις της παρούσας έρευνας και με την παραπάνω μεθοδολογία καταρτίστηκε βαθμονομημένη καμπύλη παροχής – στερεοπαροχής για την θέση Γέφυρα Πλιατσικούρα (Εδάφιο 4.7.2), η οποία και χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της μεταφοράς του φορτίου κοίτης από τα υδρογραφήματα.

2.2.11 Τα μοντέλα του BAGS (Bedload Assessment for Gravel-bed Rivers)

Το υπολογιστικό πακέτο BAGS (Bedload Assessment for Gravel-bed Rivers) σε μορφή αρχείου xls, είναι μιά σειρά μοντέλων γραμμενων σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic (VBA) για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής ειδικά για υδατορεύματα με αδρομερείς πυθμένες και σχετικά μεγάλες κλίσεις (US Department of Agriculture). Τα μοντέλα που περιλαμβάνει το BAGS είναι τα παρακάτω:

1. Εξίσωση επιφανειακού στρώματος του Parker (1990)
2. Εξίσωση υποστρώματος των Parker-Klingeman-Mclean (1982)
3. Εξίσωση υποστρώματος των Parker-Klingeman (1982)
4. Εξίσωση επιφανειακού στρώματος δύο μεγεθών άμμου-χαλίκων του Wilcock (2001)
5. Εξίσωση επιφανειακού στρώματος Wilcock - Crowe (2003)
6. Διαδικασία βαθμονόμησης των Bakke and others (1999) του μοντέλου Parker-Klingeman (1982).

Τα μοντέλα αυτά απαιτούν μια σειρά δεδομένων εισόδου (Πίν. 2-3).

Πίνακας 2-3 Απαιτούμενα δεδομένα εισόδου για τα μοντέλα του BAGS

		Parker	PKM	PK	W	WC	B
	Διατομή (γεωμετρία)	•	•	•	•	•	•
	Μέση κλίση τριβής	•	•	•	•	•	•
	Παροχή	•	•	•	•	•	•
	Κατανομή ιζήματος επιφανείας	•				•	•
	Ποσοστά άμμου-χαλίκων				•		
	Κατανομή ιζήματος υποστρώματος			•			•
	Μετρήσεις				•		•

Η βασική περιγραφή των μοντέλων παρατίθεται στον Πίνακα 2.4 που ακολουθεί. Για τα πολλών κλασμάτων μοντέλα ιζήματος (***i***-κλάσματα μεγέθους στο μίγμα) τα σύμβολα *pi, fi, Fi* αναφέρονται στα ποσοστά σε τρεις διακριτούς «πληθυσμούς» ιζημάτων: δείγμα φορτίου, υπόστρωμα και επιφανειακό στρώμα αντίστοιχα. Με τον ίδιο τρόπο συμβολίζονται και οι παράμετροι W, φ, τ (W_i, φ_i, τ_i). B = πλατος ρεύματος.

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ φ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ τ_r^*
Parker (1990)	$$W_i^* = \begin{cases} 11.9\left(1-\frac{0.853}{\phi}\right)^{4.5} & \phi_{50} > 1.59 \\ 0.00218\exp\left[14.2(\phi-1)-9.28(\phi-1)^2\right] & 1.0 \le \phi_{50} \le 1.59 \\ 0.00218\,\phi^{14.2} & \phi_{50} < 1.0 \end{cases}$$ ΌΠΟΥ $W_i^* = \frac{(s=1)gq_{b_i}}{u_*^3 F_i}$	$\phi = \omega\phi_{sg}\left(\frac{D_i}{D_{sg}}\right)^{-0.0951}$ Hiding function $\omega = 1+\frac{\sigma_\phi}{\sigma_{\phi 0}}(\omega_0-1)$ Straining function $\phi_{sg} = \frac{\tau^*_{sg}}{\tau^*_{r_{sg}}}$ Transport stage	(sg -> surface gravel) $\tau^*_{sg} = \frac{u_*^2}{(s-1)gD_{sg}}$ Η συρτική τάση υπολογίζεται από την σχέση Keulegan: $\frac{U}{u_*} = 2.5\ln\left(11\frac{R}{k_s}\right)$ (R: υδραυλική ακτίνα) $ks = 2D_{90}$ $\tau r_{sg} = 0.0386$
	Μοντέλο επιφανειακού στρώματος πολυκλασματικό για αδρόκοκκα (εξαιρούνται D<2mm). Η παράμετρος φ υπολογίζεται από μια σειρά εξισώσεων. σ_0, $\omega_0 = f(\varphi_{sg})$ από πίνακες. Στερεοπαροχή (B = πλατος ρεύματος): $Q_{b_i} = \frac{W_i^* F_i B\, u_*^3 \rho_s}{(s-1)g}$		
Parker-Klingeman-Mclean (1982)	$$W^* = \begin{cases} 11.2\left(1-\frac{0.822}{\phi_{50}}\right)^{4.5} & \phi_{50} > 1.65 \\ 0.0025\exp\left[14.2(\phi_{50}-1)-9.28(\phi_{50}-1)^2\right] & 0.95 \le \phi_{50} \le 1.65 \\ 0.0025\,\phi_{50}^{14.2} & \phi_{50} < 0.95 \end{cases}$$	$\phi_{50} = \frac{\tau^*_{50}}{\tau^*_{r_{50}}}$ Transport stage	$\tau^*_{50} = \frac{u_*^2}{(s-1)gD_{50_{sub}}}$ $ks = 10.7D_{50sub}$ $\tau r_{50} = 0.0876$
	Μοντέλο υποστρώματος μονοκλασματικό $Q_b = \frac{W^* B\, u_*^3 \rho_s}{(s-1)g}$		

ΜΟΝΤΕΛΟ	***ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ***	***ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ φ***	***ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ τ_r^****
Parker-Klingeman (1982)	$$\frac{P_i(s-1)gQ_b}{f_i B u_*^3} = 11.2\left[1 - 0.853\frac{\tau^*_{r50}}{\tau^*_{50}}\left(\frac{D_i}{D_{50}}\right)^{\beta}\right]^{4.5}$$	$\beta = 0.018$ Hiding coefficient	$\tau^*_{r50} = 0.0876$
	Μοντέλο υποστρώματος πολυκλασματικό		$$Q_{b_i} = \frac{W_i^* f_i B u_*^3 \rho_s}{p_i(s-1)g}$$
Wilcock (2001)	$$W_g^* = \begin{cases} 11.2\left(1 - 0.846\frac{\tau_{r_g}}{\tau}\right)^{4.5}, & \tau > \tau_{r_g} \\ 0.0025\left(\frac{\tau}{\tau_{r_g}}\right)^{14.2}, & \tau \le \tau_{r_g} \end{cases}$$ $$W_s^* = 11.2\left(1 - 0.846\sqrt{\frac{\tau_{r_s}}{\tau}}\right)^{4.5}$$		Οι συρτικές τάσεις αναφοράς τ_{rg} τ_{rs} υπολογίζονται από παλινδρόμηση (με MET) από *δείγματα* φορτίου πυθμενικού
	Μοντέλο υποστρώματος δικλασματικό . (άμμος – χάλικες)		
	$$Q_b = Q_{b_g} + Q_{b_s}$$ $$Q_{b_g} = \frac{W_g^* f_g \rho_s B u_*^3}{(s-1)g} \qquad Q_{b_s} = \frac{W_s^* f_s \rho_s B u_*^3}{(s-1)g}$$		

ΜΟΝΤΕΛΟ	***ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ***	***ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ φ***	***ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ τ_r****
Wilcock - Crowe (2003)	$W_i^* = \begin{cases} 0.002\phi^{7.5} & \phi < 1.35 \\ 14\left(1 - \frac{0.894}{\phi^{0.5}}\right)^{4.5} & \phi \geq 1.35 \end{cases}$	$\phi = \frac{\tau}{\tau_{r_i}}$	$\tau_{r_i} = \tau_{r_{50}}\left(\frac{D_i}{D_{50}}\right)^b$ $b = \frac{0.67}{1 + \exp\left(1.5 - \frac{D_i}{D_m}\right)}$ $\tau^*_{r_m} = \frac{\tau_{r_m}}{(s-1)gD_m}$ $\tau^*_{r_m} = 0.021 + 0.015\exp(-20F_s)$
	Μοντέλο επιφανειακού στρώματος πολυκλασματικό ***Το συνολικό ίζημα εκπροσωπείται από το Dm*** $Q_{b_i} = \frac{W_i^* F_i B u_*^3 \rho_s}{(s-1)g}$		
Bakke et al.(1999)	Πρόκειται για διαδικασία βαθμονόμησης του μοντέλου Parker-Klingeman (1982). Χρησιμοποιούνται δείγματα μετρήσεων στερεοφορτίου και δειγματοληψίες πυθμένα (επιφανειακές είτε υποστρώματος) για να υπολογιστούν τοπικά οι β (εκθέτης στην συνάρτηση απόκρυψης) και τ^*_{rD50} (η αδιάστατη τάση αναφοράς για το D_{50})		

Πίνακας 2-4 Τα μοντέλα του BAGS

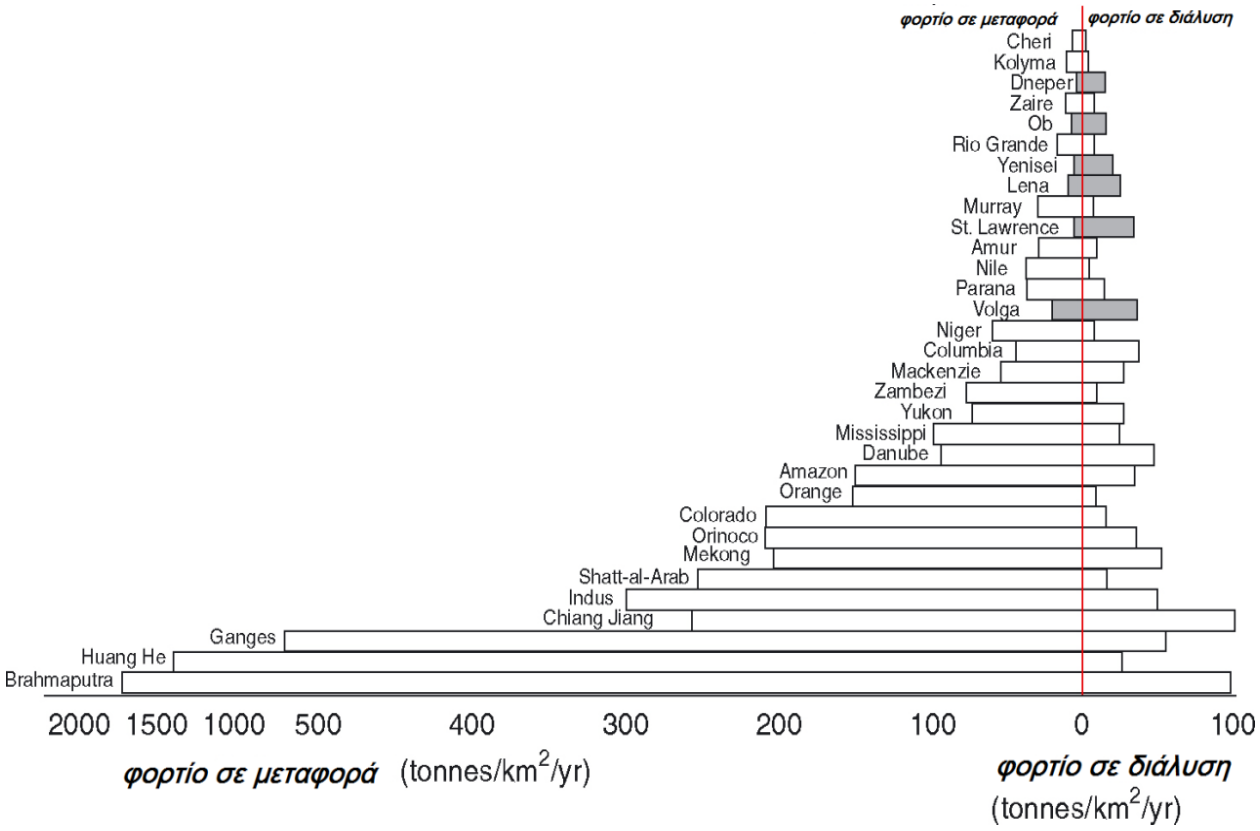
2.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΦΟΡΤΙΟΥ ΑΠΟΠΛΥΣΗΣ

Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο παρουσιάστηκε η βασική θεωρία της μεταφοράς του πυθμενικού φορτίου (υλικού κοίτης) από την πλευρά της συρτικής τάσης. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά η θεωρία της παραγωγής και μεταφοράς του υλικού απόπλυσης (washload), που αποτελεί το αιωρούμενο φορτίο. Το φορτίο απόπλυσης προσφέρεται από την λεκάνη απορροής (τις κλιτείς και τα πλημμυρικά πεδία καθώς και από άλλες πηγές, όπως οι κώνοι κορημάτων κλπ) και είναι ανεξάρτητο των υδραυλικών συνθηκών στα υδατορεύματα (είναι supply-limited), με την έννοια ότι η μεταφορά του δεν εξαρτάται από την ισχύ της ροής· από την στιγμή που θα εισέλθει στι κοίτες του υδρογραφικού δικτύου θα συνεχίσει την πορεία του μέχρι τις εκβολές του κεντρικού ποταμού στη θάλασσα, ή σε κάποια λίμνη ή ταμιευτήρα. Το πιο αδρομερές υλικό του φορτίου αυτού (κυρίως χονδρόκοκκη άμμος και ψηφίδες, κοκκοι με διάμετρο από 1/16 του χιλιοστού έως 2 χιλιοστά) βρίσκεται σε αιώρηση όταν εισέρχεται στο ποτάμιο ρεύμα (η ροή είναι ισχυρή, η καταιγίδα βρίσκεται σε εξέλιξη). Η άμμος αυτή θα μεταφέρεται σε αιώρηση όσο η ροή είναι ισχυρή -όπως συνήθως είναι συμβαινει στην περίπτωση ενός πλημμυρικού γεγονότος- και με αυτό τον τρόπο θα μεταφερθεί μέχρι το σημείο εξόδου. Αν η ροή εξασθενίσει, είτε σαν αποτέλεσμα της μείωσης της παροχής, είτε λόγω τοπικών συνθηκών (πχ είσοδος σε μια περιοχή μικρής μορφολογικής κλίσης ή σε κάποιο τοπογραφικό βύθισμα που έχει σαν αποτελεσμα πτώση της ταχύτητας ροής), μπορεί να αποτεθεί τοπικά. Μπορεί ακόμα να παγιδευτεί πίσω από κορμούς, σε μικρές κοιλότητες της όχθης κλπ. Η άργιλος και η ιλύς (<1/16 του χιλιοστου) θα ταξιδεύουν πάντα σε αιώρηση και επομένως είναι αυτά τα κλάσματα που συνθέτουν κυρίως το φορτίο απόπλυσης. Παρακάτω θα περιγραφούν συνοπτικά οι πηγές του ιζήματος και οι διεργασίες με τις οποίες αυτό γεννάται, αποτίθεται και μεταφέρεται.

2.3.1 Πηγές και σύσταση του φορτίου

Η σύσταση του φορτίου εξαρτάται κυρίως από την λιθολογία των γεωλογικών σχημαισμών που καταλαμβάνουν τη λεκάνη απορροής και τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-11. Ο Leopold (2005) αναφέρει ότι στις ημιερημικές νοτιοδυτικές ΗΠΑ το διαλυμένο φορτίο αποτελεί το 1-2% του συνολικού φορτίου ενώ σε ανατολικές περιοχές των ΗΠΑ όπως η Πενσυλβάνια, το διαλυμένο φορτίο μπορεί να

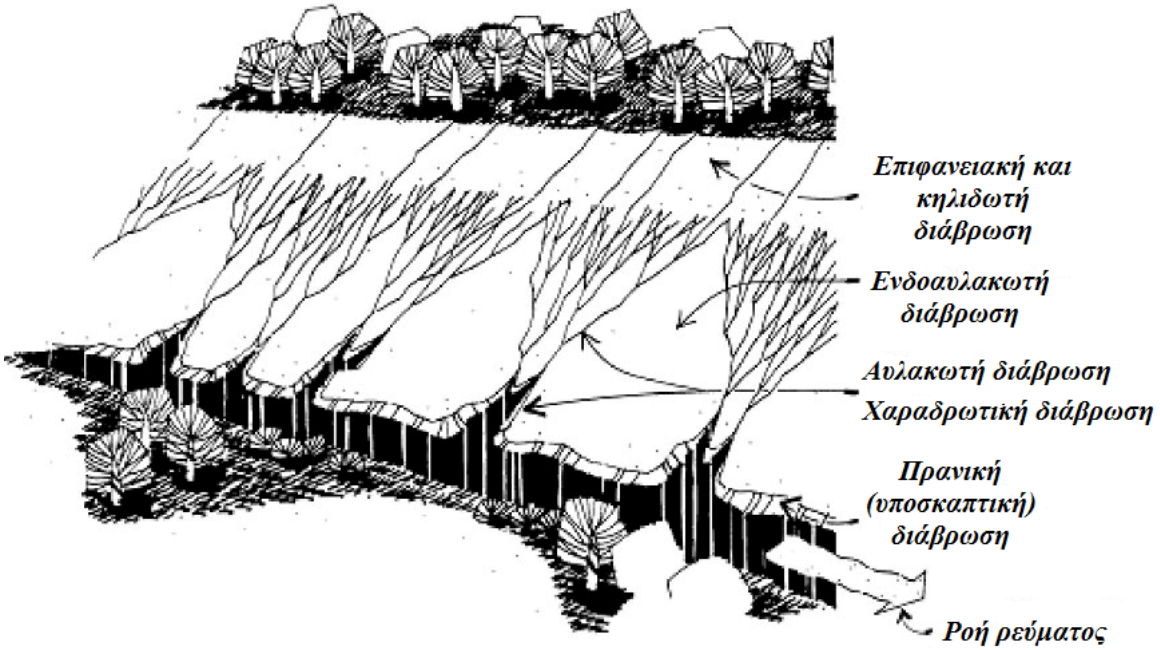
φτάσει και το 64% του συνολικού. Από το μη διαλυμένο φορτίο το συντριπτικά μεγαλύτερο κλασμα είναι το φορτίο σε αιώρηση, Στο Little Granite Creek, στο Wyoming των ΗΠΑ, οι μετρήσεις φορτίου πυθμένα και αιωρούμενου φορτίου επί 13 έτη οδηγούν στη διπίστωση ότι το βάρος του αιωρούμενου φορτίου είναι από 15 έως 25 φορές μεγαλύτερο από το βάρος του φορτίου πυθμένα (Ryan & Emmett, 2002). Παρόλο που η αναλογία φορτίο σε σύρση / αιωρούμενο φορτίο εξαρτάται από την φύση του χειμάρρου / ποταμού, είναι γενικά παραδεκτό ότι το φορτίο σε σύρση είναι -στις περισσότερες περιπτώσεις- ένα μικρό κλάσμα του συνολικού φορτίου (1-10%).



Σχήμα 2-11 Εκτίμηση του στερεοφορτίου των μεγαλύτερων ποταμών του κόσμου και διαχωρισμός σε μεταφερόμενο φορτίο και διαλυμένο φορτίο. Με γκρίζο χρώμα σημειώνονται οι ποταμοί που αποστραγγίζουν λεκάνες που κυριαρχούνται από παγετώδεις (periglacial) διεργασίες (Anderson & Anderson, 2010).

2.3.2 Μορφές διάβρωσης από το νερό

Η διάβρωση που οφείλεται στο νερό, στην οποία θα γίνεται αναφορά στα επόμενα, περιλαμβάνει την απόσπαση και μεταφορά τεμαχιδίων του στερεού φλοιού της γης η οποία προκαλείται από την κρουστική, διαλυτική, παρασυρτική και καταθρυπτική ενέργεια του νερού και της βροχής. Συχνά ο όρος διάβρωση χρησιμοποιείται σαν δείκτης της γενικής υποβάθμισης των λεκανών απορροής. Μια άλλη σημαντική διεργασία υποβάθμισης των λεκανών απορροής με σημαντική συνεισφορά στην «παραγωγή» υλικού προς μεταφορά από τα υδρογραφικά δίκτυα, είναι οι κινήσεις υλικών λόγω βαρύτητας.



Σχήμα 2-12 Σχηματοποίηση των κύριων μορφών διάβρωσης που λαμβάνουν χώρα στις κλιτύες.

Επιφανειακή διάβρωση είναι η διεργασία κατά την οποία τα νερά της επιγανειακής απορροής αποσπούν και παρασύρουν με ομοιόμορφο τρόπο λεπτά στρώματα των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών. Κηλιδωτή είναι η διάβρωση που προκαλείται από την πρόσκρουση των σταγόνων της βροχής. Σε κάποια απόσταση από το «φρύδι» της κλιτύος δημιουργούνται μικρές αυλακώσεις ή ρυάκια όπου το νερό συγκεντρώνεται με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ταχύτητά του. Αυτές οι αυλακώσεις (rills) μπορεί να ενωθούν στα κατάντη και να δημιουργήσουν μεγαλύτερων διαστάσεων χαραδρωτικές μορφές ή χαντάκια (gullies). Στον πόδα της κλιτύος λαμβάνει χώρα υποσκαφή (υποσκαφή πρανών όχθεων) που προκαλείται από την ροή του ρεύματος (Σχ. 2-12). Μιά ακόμα μορφή διάβρωσης είναι η κατά βάθος διάβρωση. Αυτή αναπτύσσεται σε ανθεκτικά πετρώματα και

λαμβάνει μεγάλες διαστάσεις. Η πρανική και η φαραγγωτή διάβρωση, ενίοτε και η κατά βάθος, είναι αξονικές διαβρώσεις, λαμβάνουν δηλαδή χώρα κατά την διεύθυνση της ροής του χειμάρρου, ενώ οι άλλες μορφές είναι εγκάρσιες διαβρώσεις που μεταφέρουν υλικό στην κοίτη του χειμάρρου, ενίοτε σχηματίζοντας κώνους απόθεσης στην συμβολή τους.

Οι διεργασίες με τις οποίες το γήινο ανάγλυφο ταπεινώνεται είναι πολλές και περιλαμβάνουν την διάλυση, την διάβρωση και την μεταφορά από το νερό, τον ερπυσμό των εδαφών υπό την επίδραση της βαρύτητας καθώς και τις γεωολισθήσειςή γεωροές και τις γεωκατακρημνίσεις. Αυτές οι διεργασίες ονομάζονται και *χειμαρρικά φαινόμενα* ενώ οι επιφάνειες που προκύπτουν από την απόσπαση των υλικών λόγω των φαινομένων αυτών αποτελούν τις *εστίες παραγωγής φερτών υλών* και χαρακτηρίζονται από το όνομα του χειμαρρικού φαινομένου το οποίο τις προκαλεί, ως διαβρωσιγενείς, αποσαρθρωσιγενείς, ολισθησιγενείς και ρηξιγενείς επιφάνειες (Κωτούλας, 1979).

Τα *κατολισθητικά φαινόμενα* ταξινομούνται με κριτήρια όπως η ταχύτητα κίνησης (αργή ή γρήγορη), άξονας κίνησης (ευθύς ή καμπύλος), υλικό (βράχοι, λατύπες, έδαφος ή λάσπη), συνθήκες υγρασίας του υλικού κ.α. Το σύστημα Varnes (Πίνακας 4-3, Σχήμα 4-14), αποτελεί μια από πληρέστερες και ευρέως αποδεκτές ταξινομήσεις όλων των κινήσεων που μπορούν να παρατηρηθούν σε φυσικά ή τεχνητά πρανή εκτός των καθιζήσεων (Τζαφτάνη, 2013). Η ταξινόμηση αυτή, που χρησιμοποιείται και από την Βρεττανική Γεωλογική Εταιρεία, στηρίζεται σε δυο κύρια κριτήρια, τον τύπο κίνησης και τον τύπο του υλικού που μετακινείται. Ανάλογα με τον τύπο της κίνησης, διακρίνονται:

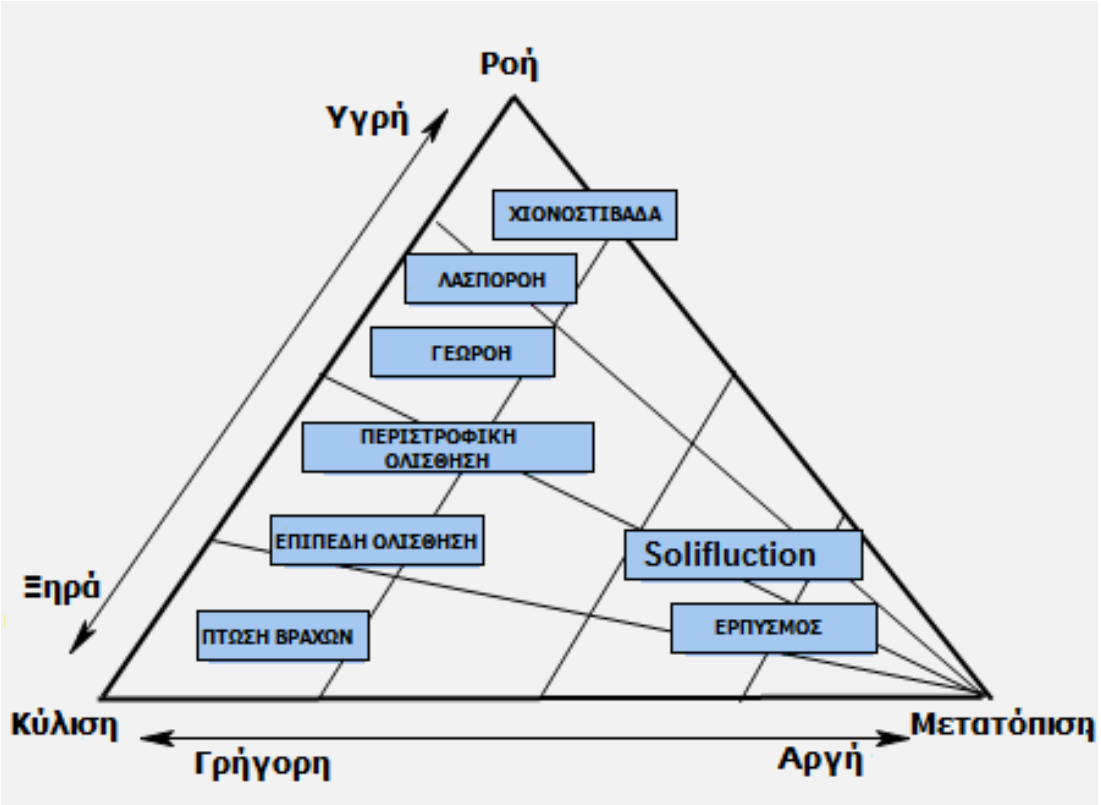
- καταπτώσεις (falls)
- ανατροπές (topples)
- ολισθήσεις (slides)
- πλευρικές εξαπλώσεις (lateral spreads)
- ροές (flows)
- σύνθετες κινήσεις (complex).

Ανάλογα με το υλικό που μετακινείται διακρίνονται οι κινήσεις που εκδηλώνονται στο βραχώδες γεωλογικό υπόθεμα (bedrock) και στα μηχανικά εδάφη (engineering soils) που χωρίζονται στα κορήματα (debris) και στις γαίες (earth).

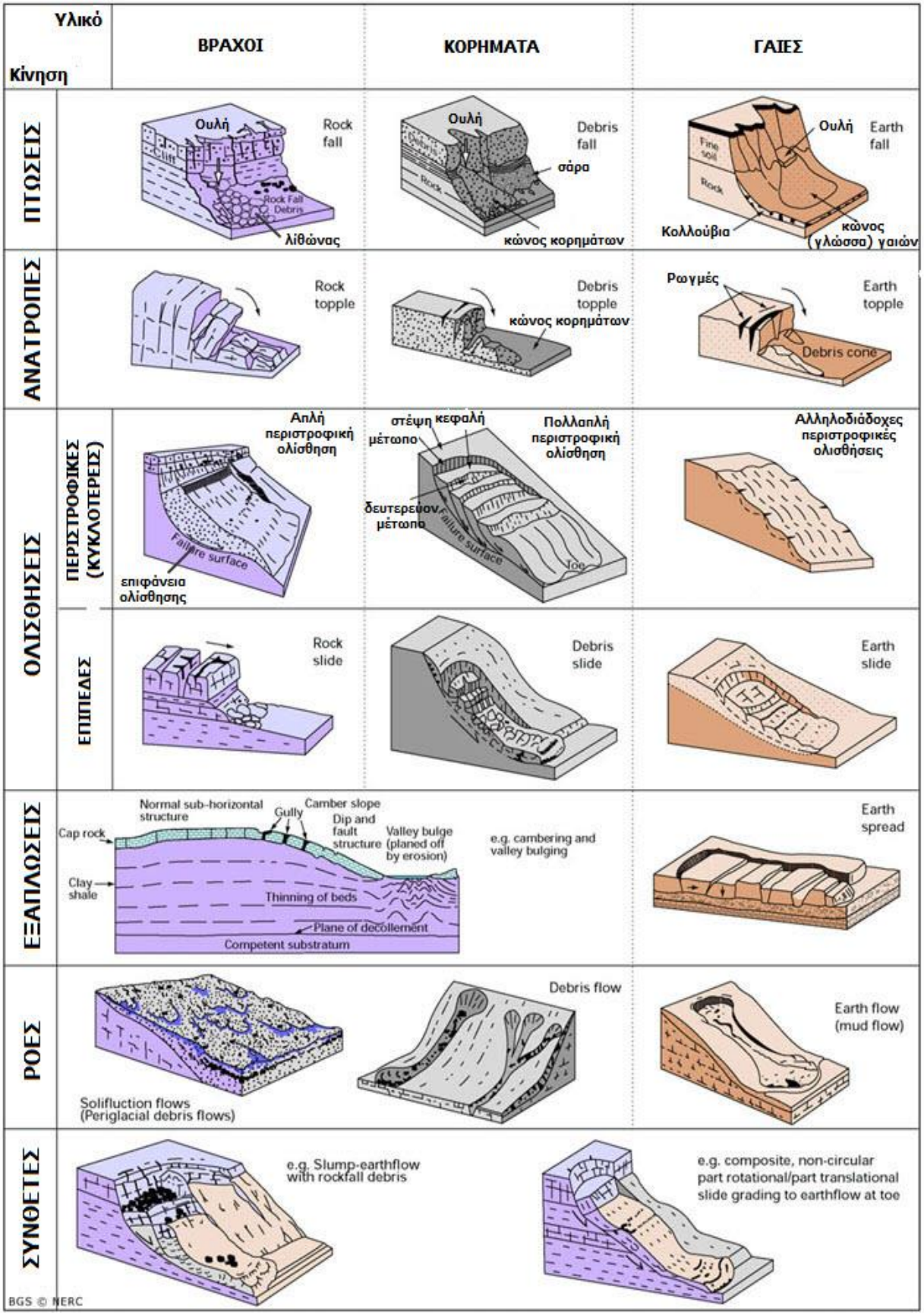
Πίνακας 2-5 Τυπολογία κατολισθητικών φαινομένων κατά Varnes (από Τζαφτάνη, 2013)

ΤΥΠΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ		ΤΥΠΟΣ ΥΛΙΚΟΥ (πριν τη μετακίνηση)		
		Υπόβαθρο	Έδαφος	
Καταπτώσεις		Καταπτώσεις βράχων	Καταπτώσεις κορημάτων	Καταπτώσεις γαιών
Ανατροπές		Ανατροπές βράχων	Ανατροπές κορημάτων	Ανατροπές γαιών
Ολισθήσεις	Περιστροφικές Μεταθετικές	Ολίσθηση βράχων	Ολίσθηση κορημάτων	Ολίσθηση γαιών
Πλευρικές εξαπλώσεις		Βράχων	Κορημάτων	Γαιών
Ροές		Ροή βράχων	Ροή κορημάτων	Ροή γαιών
Σύνθετες		Συνδυασμός δυο ή περισσότερων κύριων τύπων μετακίνησης		

Στο Σχήμα 2-13 παρουσιάζεται μια ταξινόμηση γεωλισθήσεων με κριτήρια την ταχύτητα κίνησης και την υγρασία του υλικού.



Σχήμα 2-13 Ταξινόμηση γεωλισθήσεων με κριτήρια ταχύτητας κίνησης και υγρασίας του υλικού. Το Soilifluction είναι μια ειδική μορφή ερπυσμού και οφείλεται στην αργή «ανασηκωτική» ροή εδαφών και κορημάτων που συμβαίνει σε περιπαγετωνικές περιοχές (περιοχές permafrost) λόγω της διαδοχής παγώματος και ξεπαγώματος του εδάφους.



Σχήμα 2-14 Ταξινόμηση κατολισθητικών τύπων κατά Varnes (Πηγή: ιστότοπος της Βρεττανικής Γεωλογικής Εταιρείας http://www.bgs.ac.uk/landslides/how_does_BGS_classify_landslides.html

2.3.3 Γεωλογική και επιταχυνόμενη διάβρωση

Η διάβρωση είναι μια διηνεκής διεργασία ταπείνωσης του γήινου αναγλύφου και είναι συνήθως μια αργή διαδικασία, όταν αυτή εξελίσσεται σε αδιατάρακτο, φυσικό περιβάλλον, όπου με αυτούς τους όρους εννοείται η απουσία ανθρωπογενών επεμβάσεων. Η ανθρωπογενής παρέμβαση στο φυσικό περιβάλλον που κυρίως περιλαμβάνουν τις εκχερσώσεις δάσους για αγροτική ή αστική χρήση, την βόσκηση, την υλοτομία, τις μεταλλευτικές εκμεταλλεύσεις, την κατασκευή μεγάλων και μικρών τεχνικών έργων κά, προκαλεί επιταχυνόμενη διάβρωση. Στο σχετικά πρόσφατο παρελθόν οι αμμοθύελλες (dustbowl) της δεκαετίας του 1930 στις μεσοδυτικές ΗΠΑ,υπήρξαν η πιο κραυγαλέα απόδειξη της καταστρεπτικής επίδρασης της αλόγιστης επέκτασης των γεωργικών καλλιεργειών (αλλά και της γεωργίας αφ'εαυτής) στην απώλεια εδαφών, σαν αποτέλεσμα της αιολικής διάβρωσης. Οι πρωτοφανείς τους διαστάσεις ανάγκασαν εκατοντάδες χιλιάδες ανθρώπους να εγκαταλείψουν τον τόπο τους (Steinbeck , 1939).

Προκαλεί εντύπωση, τόσο ο πολλαπλασιαστικός χαρακτήρας της ανθρωπογενούς επίδρασης στην διάβρωση και την επακόλουθη απώλεια εδαφών, όσο και το μεγάλο ιστορικό της βάθος· ο ημιερημικός και πολλαπλά υποβαθμισμένος χαρακτήρας μεγάλου τμήματος του μεσογειακού τοπίου μπορεί σε μεγάλο βαθμό να αποδοθεί στην ανθρώπινη παρουσία και εκμετάλλευση, ήδη από την αρχή του Ολόκαινου. Στο χώρο της Μεσογείου οι συνέπειες της γεωργίας, της υπερβόσκησης και της υλοτομίας στο σχετικά πρόσφατο παρελθόν (μετά τον $18^{ο}$ αιώνα) έχουν επισημανθεί και τεκμηριωθεί ήδη, αν και όχι με ποσοτικούς όρους πάντοτε, τόσο από τις αρμόδιες δασικές / γεωργικές υπηρεσίες, όσο και από αρκετούς ερευνητές. Πέραν της γεωργίας και της κτηνοτροφίας κατά καιρούς υπήρξε επίσης εκτεταμένη υλοτόμηση για την ναυπήγηση πλοίων, για καυσοξύλευση καθώς και για βιομηχανική παραγωγή κάρβουνου.

Όπως αναφέρουν οι Κοσμάς κ.ά (2002), μαρτυρίες υποβάθμισης για την αρχαϊκή εποχή και την κλασική περίοδο έχουμε από τον Όμηρο στην Ιλιάδα καθώς και από τον Πλάτωνα στον Κριτία, αντίστοιχα. Ο Πλάτωνας αναφερόμενος στην Αττική σημειώνει την εμφάνιση μεγάλων πλημμυρών και κατολισθήσεων, την εξαφάνιση των δασών και την απογύμνωση των βοσκοτόπων. Στο τέλος της Ρωμαϊκής περιόδου το 50% των δασών όλης της μεσογειακής λεκάνης είχε εκχερσωθεί (Kaplan et al., 2009).

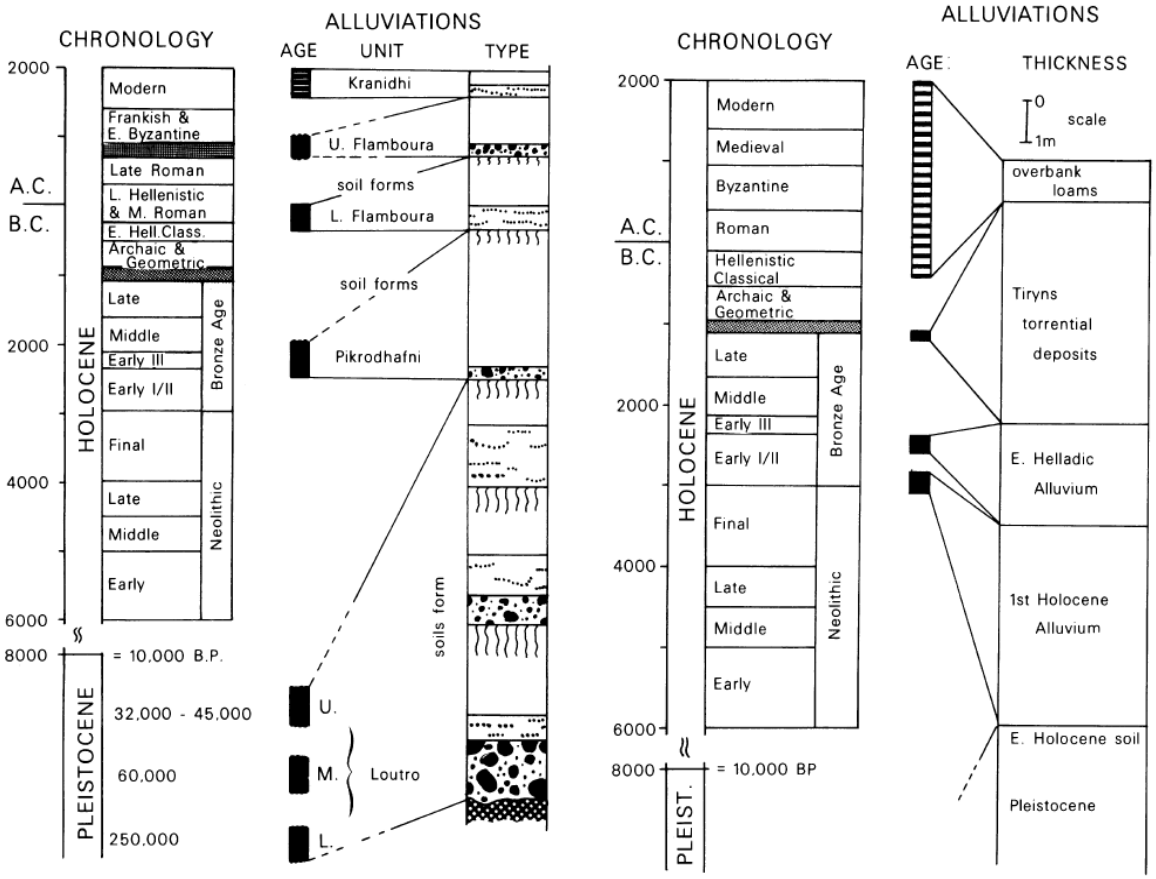
Η πρώτη ερμηνεία ενός μεγάλου όγκου συγκεντρωμένων παρατηρήσεων σχετικά μες την αλλουβιακή προιστορία των μεσογειακών περιβαλλόντων υπήρξε η θεωρία του

Vita-Finzi. Ο Vita-Finzi (1969) υπόστήριξε ότι υπήρξαν δύο περίοδοι ή φάσεις απόθεσης-πρόσχωσης: η παλαιά και η σύγχρονη, μεταξύ των οποίων μεσολάβησε μια περίοδος κατά βάθους διάβρωσης. Στις περίοδους πρόσχωσης αλλουβιακό υλικό απετέθη στις κοίτες των χειμάρρων, στις πεδιάδες και στις κοιλάδες καθώς και στην παράκτια ζώνη, ενώ η φάση διάβρωσης εκβάθυνε ξανά τις αλλουβιακές κοίτες παρασύροντας πολύ από το υλικό που είχε αποτεθεί στις πεδιάδες και τις κοιλάδες. Συμφωνα με το μοντέλο αυτό, η παλαιά φάση πρόσχωσης έλαβε χώρα στο ανώτερο Πλειστόκαινο (50.000-10.000 B.P.) για να την διαδεχτεί μια φάση διάβρωσης κατά το Ολόκαινο που και πάλι έδωσε τη θέση της σε μια νέα αλλουβιακή φάση πρόσχωσης που η αρχή της τοποθετήθηκε στο τέλος της Ρωμαϊκής περιόδου (ca. A.C. 400) και που συνεχίζεται έως σήμερα. Αίτιο της διαδοχής των φάσεων πρόσχωσης – διάβρωσης θεωρήθηκαν οι αλλαγές στο κλίμα. Η αφήγηση αυτή χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα στην αρχαιολογική έρευνα και αναζωπύρωσε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στις φάσεις και τα αίτια απόθεσης και διάβρωσης του Μεσογειακού χώρου.

Σε μιά γεωαρχαιολογική έρευνα του Πανεπιστημίου του Stanford, (Argolid Exploration Project[2]) που ξεκίνησε το 1979 και διήρκεσε σχεδόν 10 χρόνια περιλαμβάνοντας τρείς περιοχές της Ελλάδας (Χερσόνησος της Ερμιόνης, Αργολικό πεδίο και Θεσσαλική πεδιάδα), οι Tjeed van Andel και M. H. Jameson θέλησαν να εξετάσουν την βασιμότητα της υπόθεσης ότι οι μεγάλες εποχές διάβρωσης και προσχωσης στον Ελλαδικό χώρο συνδέονται μάλλον με κλιματικές μεταβολές, όπως υποστήριξε ο Vita-Finzi και άλλοι, παρά με την εισαγωγή της γεωργίας και τον ανθρώπινο εποικισμό γενικώτερα. Η ανάλυση των στοιχείων που προέκυψαν υποδείκνυε την μεγαλύτερη σημασία του ανθρώπινου εποικισμού σαν καθοριστικού παράγοντα. Στο άρθρο τους «*Land Use and Soil Erosion in Prehistoric and Historical Times»* (Van Andel et al., 1990) οι συγγραφείς σημειώνουν: «*με την εξαίρεση της πρώϊμης φάσης διάβρωσης του Ολόκαινου, τα δεδομένα είναι συμβατά με ένα μοντέλο όπου η ένταση και η χρονική διαδοχή της αποσταθεροποίησης των κλιτύων εξαρτάται από τοπικές οικονομικές και πολιτικές συνθήκες*». Στο τέλος του ίδιου άρθρου οι συγγραφείς συμπεραίνουν: «*Οι ιστορίες εδαφικής διάβρωσης και απόθεσης του Ολόκαινου στις τρεις περιοχές έρευνας στον Ελλαδικό χώρο συμφωνούν μεταξύ τους μόνο εν μέρει, ακόμα και εάν ληφθούν υπόψη οι μεγάλες αβεβαιότητες στην χρονολόγηση. Με έκπληξη κατά κάποιο τρόπο,δεδομένης της μεγάλης αύξησης της θερμορασίας της μεσοπαγετώδους περιόδου και της αύξησης των*

[2]http://humanitieslab.stanford.edu/31/280

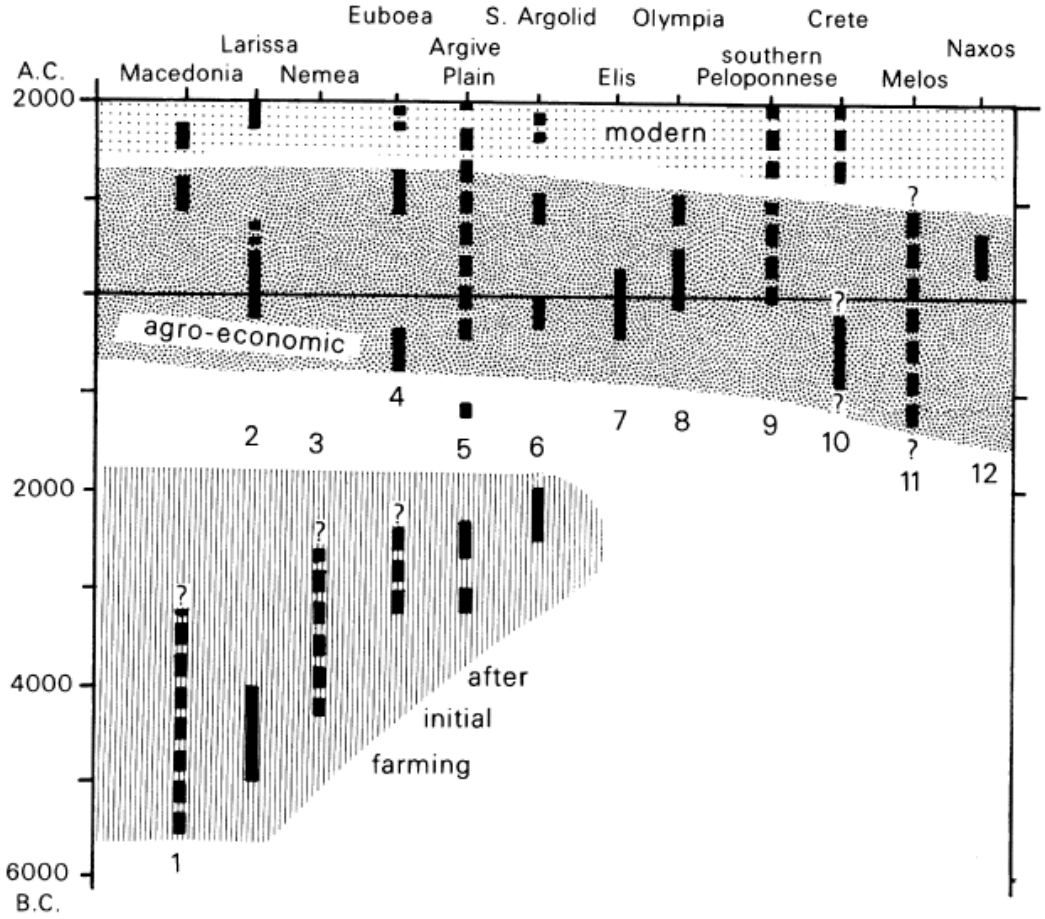
βροχοπτώσεων που αυτή συνεπέφερε, τα τοπία των περιοχών αυτών φαίνεται να παρέμειναν σταθερά από το ανώτερο Πλειστόκαινο έως και την αρχή του Ολόκαινου. Η αποσταθεροποίηση των κλιτύων και η πρόσχωση σημειώθηκε πολύ αργότερα, περίπου 1000 χρόνια μετά τον ανθρώπινο εποικισμό και την εξάπλωση της γεωργίας. Στο Αργολικό πεδίο και την Θεσσαλική πεδιάδα αυτές οι πρώτες αποθέσεις υπήρξαν επίσης και οι πιο εκτεταμμένες και ογκώδεις: Η χωρική τους εξάπλωση και η επίδραση τους στο τοπίο ξεπερνά αυτή όλων των κατοπινών επεισοδίων[3]*. Στην νότια Αργολίδα η πρώϊμη φάση, αν και αρκετά διακριτή, είναι μικρότερη από τις αποθέσεις της όψιμης Ελληνιστικής – Πρώϊμης Ρωμαϊκής εποχής και θαμμένη κάτω από αυτές*».



Σχήμα 2-15: Στήλες χρονολόγησης και στρωματογραφία από την χερσόνησο της Ερμιόνης (αριστερά) και από την Αργολική πεδιάδα (δεξιά). Τα μαύρα κουτιά συμβολίζουν επεισόδια πρόσχωσης και χρονολογούνται με βάση τη θέση τους στην στήλη. Αυτά τα σύντομα σχετικά επεισόδια ακολουθούνται από περιόδους εδαφογένεσης όπου το τοπίο παραμένει σταθερό (διακεκομμένες γραμμές: ενδιάμεσες φάσεις, κυματιστές καταλήξεις: αβεβαιότητες στη χρονολόγηση). Στο Αργολικό πεδίο τα τρία κύρια επεισόδια πρόσχωσης χρονολογούνται εντός της εποχής του χαλκού, παρέχοντας μια ένδειξη ότι υπεύθυνη ήταν η ανθρώπινη εγκατάσταση και η εξάπλωση της γεωργίας.

[3] Εδώ το επεισόδιο χρησιμοποιείται με την έννοια της φάσης ή μιάς μεγάλης χρονικής περιόδου που χαρακτηρίζεται από την κυριαρχία μίας διεργασίας (πρόσχωσης ή διάβρωσης).

Η επίδραση της ανόδου της στάθμης της θάλλασας στα διαστήματα που εξετάζονται θεωρείται μικρή (της τάξεως μερικών μέτρων). Στην σημερινή της στάθμη η θάλασσα έφτασε περίπου 6000 B.P (πριν από σήμερα) (Καρύμπαλης, 2010).

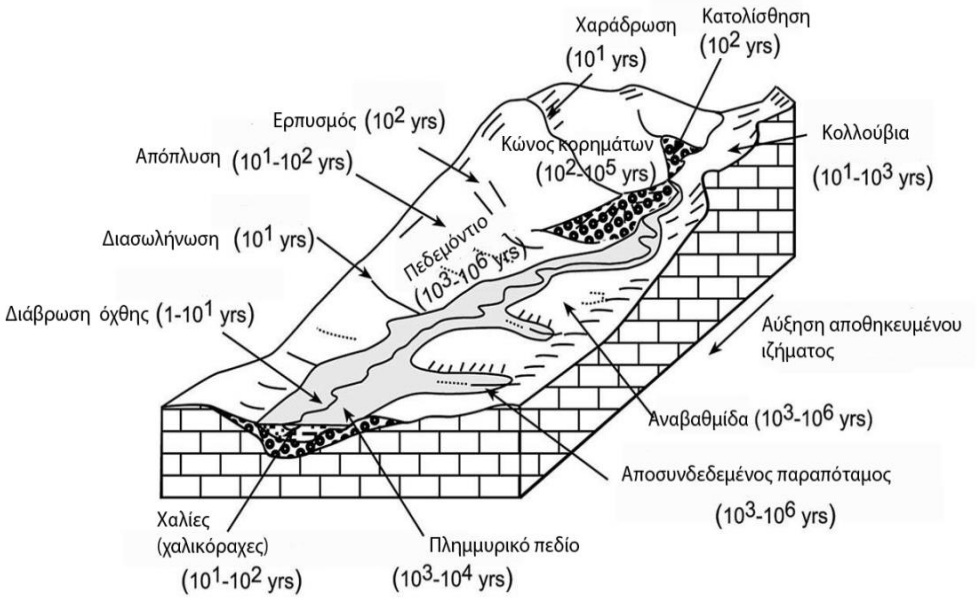


Σχήμα 2-16 Χρονολόγηση των επεισοδίων αλλουβιακών αποθέσεων στην ηπειρωτική Ελλάδα και το Αιγαίο. Οι διακεκομμένες μάυρες στήλες αντιπροσωπεύουν αβεβαιότητες στη χρονολόγηση ή διακοπή της συνέχειας του επεισοδίου. Από το διάγραμμα αυτό συμπεραίνει κανείς ότι η παλαιότερη φάση πρόσχωσης διακόπτεται γύρω στα μέσα της εποχής του Χαλκού (~2000 πΧ) και ακολουθεί μια φάση διάβρωσης για περίπου 1000 χρόνια. Το νεώτερο επεισόδιο πρόσχωσης ξεκινά περίπου κατά την αρχαϊκή εποχή (~ 1000 πΧ) και συνεχίζεται με μια ενδιάμεση φάση σταθεροποίησης (περίπου 1200 - 1500 μΧ) έως σήμερα (ibid).

Αν και οι αβεβαιότητες παραμένουν, ο τεκτονισμός του Ελλαδικού χώρου είναι έντονος και, εν πολλοίς, τα ευρήματα έχουν συνήθως έντονο τοπικό χαρακτήρα που διαφοροποιεί τόσο την ανατολική από την δυτική Μεσόγειο, όσο και κοντινές σχετικά περιοχές μεταξύ τους, η επιστημονική έρευνα κλίνει στο να αποδώσει τα αίτια των αλλουβιακών επεισοδίων πρόσχωσης που έχουν τεκμηριωθεί στον Μεσογειακό χώρο στην ανθρωπογενή επίδραση μάλλον παρά σε κλιματικούς παράγοντες.

2.3.4 Το πρόβλημα του συντελεστή στερεοαπορροής

Εφαρμόζοντας ένα οποιοδήποτε μοντέλο διάβρωσης λαμβάνεται ως αποτέλεσμα η ποσότητα του εδάφους που αποσπάστηκε από την αρχική του θέση μέσα σε ενα κάποιο χρονικό διάστημα. Δεν γνωρίζουμε όμως αν το έδαφος αυτό παρέμεινε εντός της λεκάνης απορροής ή όχι. Από την σκοπιά της γεωργίας αυτό το έδαφος είναι χαμένο και η τύχη του δεν ενδιαφέρει. Από όλες τις άλλες σκοπιές όμως που εξετάζουν την συνολική μεταφορά, η πορεία του παρασυρθέντος εδάφους, δηλαδή η ενδεχόμενη αποθήκευση του στις διάφορες «δεξαμενές» ή «καταβόθρες» ιζήματος και ο χρόνος παραμονής του σε αυτές, είναι κρίσιμα στοιχεία της κατανόησης των φαινομένων (Σχ. 2-17). Η ποσότητα του εδάφους που αποσπάσθηκε σε κάποιο χρονικό διάστημα ορίζεται ως *ολική διάβρωση* (gross erosion) ενώ το κλάσμα αυτό που βρήκε το δρόμο του μέχρι το σημείο εξόδου είναι η *καθαρή διάβρωση* (net erosion). Ο λόγος τους (καθαρή / ολική διάβρωση), ονομάζεται *συντελεστής στερεοαπορροής*, κατά τον συντελεστή απορροής της υδρολογίας, C (= ενεργή βροχή προς την συνολική) και είναι μικρότερος, συνήθως *πολύ* μικρότερος, της μονάδας. Η καθαρή διάβρωση, δηλαδή η στερεοαπορροή, συνήθως εκτάριο ή τετραγωνικό χιλιόμετρο, (ΣΑ) συμβολίζεται παρακάτω ως SSY (Specific Sediment Yield).

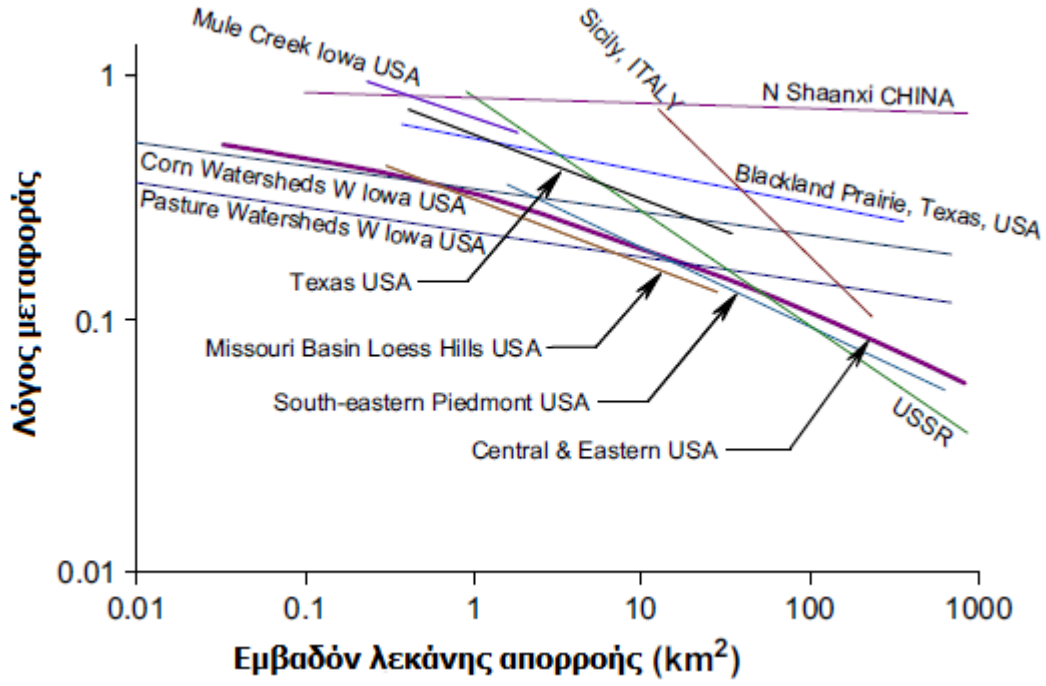


Σχήμα 2-17 Χρονικές κλίμακες για διαφορετικές εστίες προσφοράς ιζήματος σε λεκάνες απορροής. Οι κολλουβιακές και αλλουβιακές γεωμορφές λειτουργούν τόσο σαν πηγές παραγωγής όσο και σαν χώροι αποθήκευσης ιζήματος. Ο χρόνος παραμονής των εστιών αυτών σαν πηγές ή αποθήκες ιζήματος εξαρτάται από την τοποθεσία τους καθώς και από την περίοδο επαναφοράς των σημαντικών γεωμορφικών διεργασιών (Fryirs&Brierley, 2013).

Κατά την εξέταση του λόγου αυτού πρέπει να θεωρηθούν όλες τις διεργασίες της στερεομεταφοράς εντός μιάς λεκάνης απορροής, γεγονός που τον καθιστά σημαντικό για την εμβάθυνση στο φυσικό φαινόμενο και τους μηχανισμούς της στερεοαπορροής. Η ανάγκη εμβάθυνσης και πειραματικών δεδομένων έχει επισημανθεί ήδη από πολλούς ερευνητές. Ο Wollman (1977) διατύπωσε προγραμματικά αυτήν την ανάγκη: «*Απαιτείται μια μεγάλη προσπάθεια για να γίνει κατανοητή η σύνδεση μεταξύ της διάβρωσης από την γήινη επιφάνεια και την μεταφορά στα υδατορεύματα....Ποιές τότε θα είναι οι κατάλληλες διαδρομές και οι χρονικές σταθερές της κίνησης του ιζήματος*;» Η πρακτική σημασία μιας καλής εκτίμησης του λόγου αυτού είναι ότι δίνει τη δυνατότητα προβλεψης της ολικής διάβρωσης σε μια λεκάνη από την γνώση της καθαρής στερεοαπορροής, εφόσον μετράται η τελευταία σε κάποιο σημείο του ποταμού. Για έργα μηχανικού, όπως η κατασκευή ταμιευτήρων ή ακτομηχανικές παρεμβάσεις στην παράκτια ζώνη, η στερεοαπορροή είναι το μόνο που χρειάζεται να γνωρίζει κανείς. Ακόμα, η γνώση της στερεοαπορροής, θα μπορούσε να δώσει τη δυνατότητα ασφαλούς πρόβλεψης για επιπτώσεις διαφορετικών σεναρίων αλλαγής των χρήσεων γης. Καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις οι εκτιμήσεις της ολικής διάβρωσης προέρχονται από μοντέλα, οι αβεβαιότητες στην εκτίμηση αυτού του συντελεστή ενισχύονται σημαντικά, δίχως –επιπλέον- να είναι δυνατή η αποτίμηση της συνεισφοράς του κάθε παράγοντα στο συνολικό σφάλμα. Ωστόσο, από την εποχή που ο Wollman διατύπωσε προγραμματικά την ανάγκη περαιτέρω έρευνας και μετρήσεων η εντατική επιστημονική έρευνα έχει πράγματι συγκεντρώσει ένα μεγάλο όγκο πειραματικών δεδομένωνπου επίσης προέρχονται από εκτός των ΗΠΑ λεκάνες, και μια μεγάλη ποικιλία μοντέλων, δίνοντας σήμερα την δυνατότητα να διατυπωθούν συμπεράσματα με μεγαλύτερη βεβαιότητα. Στη συνέχεια, θα γίνει μια σχετικά λεπτομερής επισκόπηση των προσπαθειών αυτών ξεκινώντας από τις αρχικές και καταλήγοντας στις πιο πρόσφατες.

Έχει διαπιστωθεί ότι ένα συνήθως πολύ μικρό κλάσμα του διαβρωθέντος εδάφους αντιπροσωπεύεται στην στερεοαπορροή. Αυτό το γεγονός επαληθεύεται αδιαμφισβήτητα και από τις μετρήσεις της στερεοπαροχής σε υδρομετρικούς σταθμούς πάνω στο ίδιο ποτάμι που απέχουν μια ικανή απόσταση μεταξύ τους. Σε σχετική του, κλασική πλέον αναφορά, ο Walling (1983) παραθέτει τέτοιες μετρήσεις από 6 μεγάλους ποταμούς σε διαφορετικές χώρες και ηπείρους, όπου η απώλεια ιζήματος μεταξύ σταθμών κυμαίνεται απο 13% έως και 66%. Το εύρος του λόγου μεταφοράς για μια συγκεκριμένη λεκάνη θα εξαρτάται από μια πληθώρα γεωμορφολογικών και κλιματικών παραγόντων μεταξύ των οποίων η φύση, η έκταση και θέση των πηγών προσφοράς του ιζήματος, τα χαρακτηριστικά

του αναγλύφου και των μορφολογικών κλίσεων, η μορφή και η κατάσταση του υδρογραφικού δικτύου, η βλάστηση και η φυτοκάλυψη, οι χρήσεις γης και η υφή του εδάφους. Καθοριστικό παράγοντα αποτελεί η έκταση της λεκάνης. Η USGS στις ΗΠΑ έχει διατυπώσει μια γενικευμένη σχέση, χωρίς αναφορά σε τοπικές συνθήκες, που αποδίδει τον λόγο μεταφοράς σαν σχέση δύναμης του εμβαδού της επιφάνειας της λεκάνης, A. Παρόμοιες σχέσεις εχουν διατυπωθεί και σε άλλες χώρες (Σχ.2-18).



Σχήμα 2-18 Σχέση του συντελεστή στερεοαπορροής με το εμβαδόν της λεκάνης. Εντύπωση προκαλούν τα στοιχεία από την Κίνα όπου δεν διαφαίνεται καμμία απολύτως τάση ελάττωσης του συντελεστή με την αυξανόμενη επιφάνεια. Από Lu et al., 2006.

Εμπειρικές εξισώσεις επίσης έχουν προταθεί από αναλύσεις παλινδρόμησης πολλών μεταβλητών. Οι μεταβλητές με τις οποίες συσχετίζονται οι συντελεστές στις σχέσεις αυτές είναι ενδεικτικοί των εξαρτήσεων και ελέγχων που υφίστανται πάνω στην τιμή του λόγου. Στον παρακάτω Πίνακα, 2-6, παρατίθενται κάποιες από αυτές .

Κατά την ανάλυση του φαινομένου χρειάζεται να γίνει τόσο μια χρονική όσο και μια χωρική ολοκλήρωση (temporal - spatial lumping / aggregation). Η χρονική ολοκλήρωση μπορεί να ιδωθεί σαν ο αριθμός των επιπέδων ανάλυσης, από αυτό του επεισοδίου έως την μεγάλης κλίμακας οπτική του συστήματος (χρονικό παράθυρο). Στο επίπεδο των μεμονωμένων επεισοδίων η εργασία του Piest (1975) έδειξε σημαντική διαφοροποίηση των τιμών του συντελεστή. Κατά την περίοδο 1965-1971 ο Piest υπολόγισε

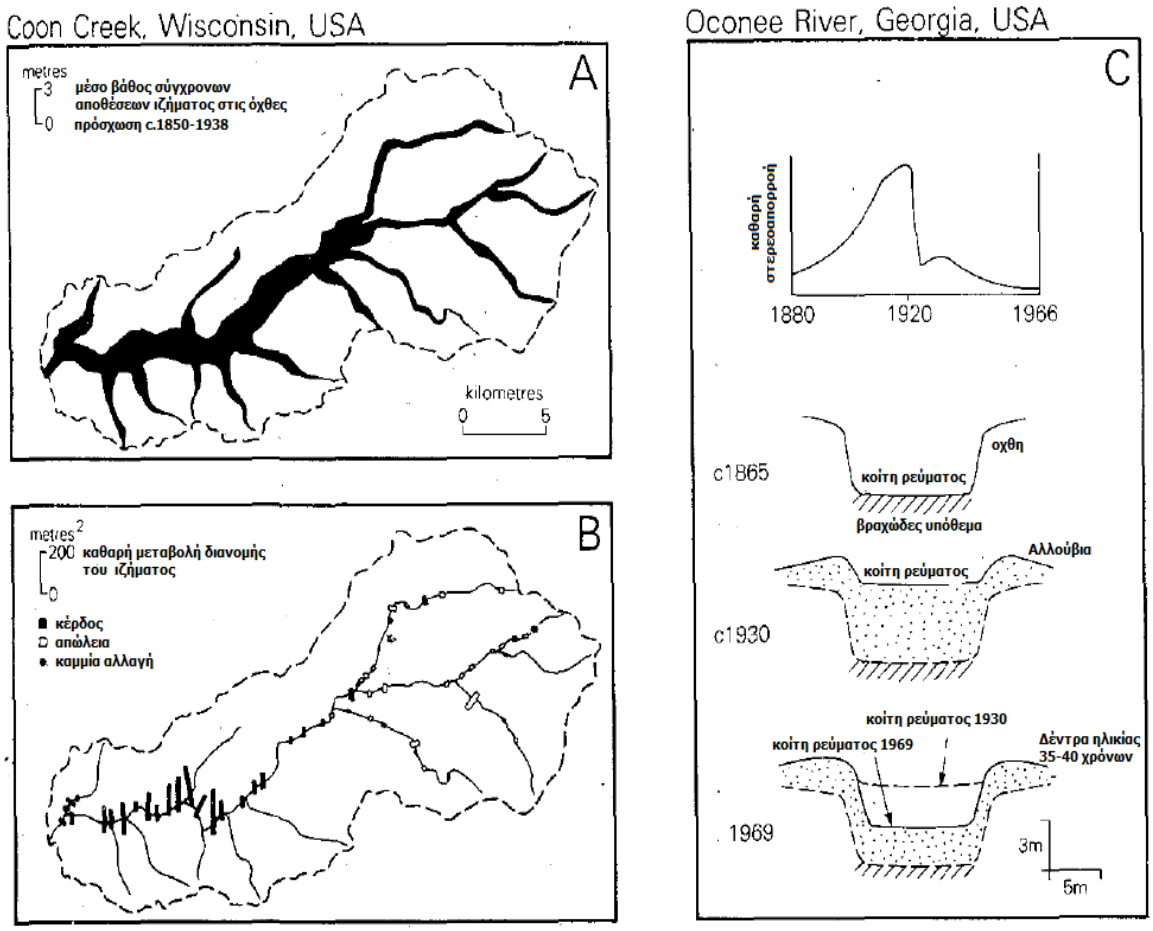
και κατέγραψε την ολική και καθαρή διάβρωση συνολικά 55 επεισοδίων σε μια μικρή λεκάνη 30 εκταρίων κοντά στο Treynor, στην Iowa των ΗΠΑ, και τα αποτελέσματά του κατέδειξαν την απουσία ισχυρής συσχέτισης μεταξύ ολικής και καθαρής διάβρωσης. Οι λόγοι στερεομεταφοράς κυμάνθηκαν από 1% έως 554% και έδειξαν ότι επηρεάζονται από τις προγενέστερες συνθήκες υγρασίας και την εποχή του έτους. Σε ετήσια βάση οι συντελεστές κυμάνθηκαν από 6% έως 72% με μέση τιμή στην επταετία 46%, και ήταν συσχετισμένοι με το εύρος της ετήσιας βροχόπτωσης και την χρονική της κατανομή. Οι συγγραφείς αναγνώρισαν ότι τα υπολογισθέντα μεγέθη μπορεί απλά να αντανακλούν σφάλματα στον υπολογισμό της ολικής διάβρωσης, είναι αδύνατον όμως να εκτιμήσει κανείς την σχετική τους σημασία.

Πίνακας 2-6 Παραδείγματα εξισώσεων συσχέτισης του λόγου στερεομεταφοράς με ορισμένα χαρακτηριστικά της λεκάνης. DR = Λόγος μεταφοράς, R = ανάγλυφο λεκάνης, L= μήκος λεκάνης, A = εμβαδό λεκάνης, BR = λόγος διακλάδωσης, SLP = κλίση του κύριου ρεύματος, CN =αριθμός καμπύλης SCS, RO = ετήσια βροχόπτωση, Rc = πυκνότητα χαράδρωσης. Μονάδες διαφορετικές. Από Walling, 1983.

Συγγραφέας	*Γεωγραφική περιοχή*	*Εξίσωση*
Maner (1958)	Kansas, USA	logDR=2.962+0.869logR-0.854logL
Roehl (1962)	Southeastern USA	logDR=4.5-0.23log10A-0.510cologR/L – 2.786BR
Williams and Berndt (1972)	Brushy Creek, Texas, USA	$DR = 0.627SLP^{0.403}$
Williams (1977)	Texas, USA	$DR =1.366*10^{-11}A^{-0.1}R/L^{0.363}\ CN^{5.444}$
Mutchier and Bowie (1975)	Pigeon Roost Creek, Mississippi, USA	DR = 0.488-0.006A+0.010RO
Mo and Meng (1980)	Dali River Basin, Shaanxi, China	DR=1.29+1.37lnRc-0.025lnA

Η εξασθένιση του «στερεοκύματος» κατά την κίνησή του (κατά την αντίστοιχη εξασθένιση του πλημμυρικού κύματος δια της αποθήκευσης και τριβής στην υδρολογική διόδευση), και η επανακινητοποίησή του σε μεγαλύτερες χρονικές περιόδους έχει τεκμηριωθεί από τον Trible (1975) στις έρευνές του της επιταχυνόμενης λόγω γεωργίας διάβρωσης στις υπώρειες της Georgia, στον ποταμό Coon Creek στο Winsconsin των ΗΠΑ. Χρησιμοποιώντας ιστορικές πηγές, μαρτυρίες και μετρήσεις απέδειξε ότι ένα μόνο μικρό ποσοστό του ιζήματος που χάθηκε κατά την περίοδο της ισχυρής διάβρωσης ενίσχυσε την στερεοαπορροή του ποταμού, ενώ το μεγαλύτερο μέρος αποτέθηκε στην λεκάνη (Σχ. 2-

19). Ωστόσο, είναι πολύ ενδεικτικό ότι όταν εισήχθησαν βελτιωμένες πρακτικές προστασίας του εδάφους από τους καλλιεργητές, το επίπεδο της στερεοαπορροής δεν έπεσε στα προηγούμενα επίπεδα, κάτι που θα περίμενε κανείς. Απέδωσε την καθυστέρηση αυτή στην επανακινητοποίηση και παράσυρση του αποθηκευμένου ιζήματος στην λεκάνη απορροής, όπου δηλαδή οι χώροι απόθεσης ιζήματος (*δεξαμενές*) μετατράπηκαν σε *πηγές* ιζήματος.



Σχήμα 2-19 Χρονικές ασυνέχειες στην μεταφορά ιζήματος όπως περιγράφηκαν από τον Trible (1969, 1975). Στο Α φαίνεται η έκταση και το βάθος απόθεσης στις όχθες και στις παρόχθιες περιοχές των κοιλάδων του χειμάρρου, ενώ στο Β σημειώνονται οι αλλαγές κατά την πιο πρόσφατη περίοδο 1938-1974. Στο C παρουσιάζεται ένα τυπικό πρότυπο πρόσχωσης και διάβρωσης ποταμού σε υπώρειες στην Georgia.

Η χωρική ολοκλήρωση ή *χωρικό παράδοξο* συνδέεται με τις δυσκολίες της προσπάθειας να αποδοθούν τα χαρακτηριστικά της στερεομεταφοράς μιας μεγάλης περιοχής με έναν μόνο αριθμό. Η χωρική ετερογένεια των σημαντικών γεωλογικών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών θα πρέπει να έχει σαν αποτέλεσμα την σημαντική διακύμανση της μεταφοράς μέσα σε ένα σύστημα. Για παράδειγμα, ο Burns (1979) πρότεινε κάθε πηγή να θεωρείται σαν να έχει ένα μοναδικό δυναμικό στερεομεταφοράς και

ότι η πιθανότητα μεταφοράς του ίζηματος από αυτήν τη πηγή θα πρέπει να συσχετίζεται με τη σχετική της θέση στο ποτάμιο σύστημα και τον υδροκρίτη. Αυτές οι ιδέες έχουν σήμερα εξελιχτεί σε νεώτερα μοντέλα που υπολογίζουν χρόνους μεταφοράς και κατανομές πιθανοτήτων. Η διατύπωση της έννοιας της *μεταβλητής συνεισφέρουσας επιφάνειας* κατά την διάρκεια μιας καταιγίδας, που αναπτύχθηκε από τον Kirkby και αποτυπώθηκε στο υδρολογικό μοντέλο TOPMODEL (Beven,1997) βοήθησε την ανάπτυξη αυτών τών ιδεών. Καθώς η επιφάνεια που συνεισφέρει άμεση απορροή (βροχή κατ' ευθείαν στο ποτάμι) μεγαλώνει, οι κλάδοι επεκτείνονται προς τα ανάντη και επίσης αναπτύσσονται πλευρικά, εφόσον οι συνθήκες το επιτρέπουν. Με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερο ποσοστό από το ίζημα που βρίσκεται αποθηκεύμενο κοντά στο υδατόρευμα (όχθες, κοιλάδα, κώνοι κορημάτων, αναβαθμίδες) μπορεί να παρασυρθεί από την ροή του νερού.

Κατά τον Walling ο συντελεστής στερεομεταφοράς είναι ένα μαύρο κουτί και οι περιορισμοί του κουτιού αναφαίνονται όταν κανείς εξετάσει τις χρονικές και χωρικές κλίμακες του φαινομένου. Καθώς ενσωματώνει όλα τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι δύσκολο να απομονώσει κανείς τους κύριους ελέγχους και εξαρτήσεις. Η τοπικότητα επίσης είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό. Αρκεί κανείς να δεί τα νούμερα από την Κίνα, όπου οι συντελεστές είναι κοντά στο 100% για όλα τα μεγέθη των λεκανών (στην περιοχές του Loess στην Κίνα παρουσιάζονται *υπερσυγκεντρώσεις* ιζήματος οι οποίες αλλάζουν τις υδραυλικές ιδιότητες της ροής, με κυριότερη επίδραση την αναίρεση σχεδόν της δυνατότητας καθίζησης). Στην προσπάθειά του να συντάξει αξιόπιστες οδηγίες για την εκτίμηση της στερεοαπορροής (καθαρή διάβρωση) στο Colorado, ο Frickel (1975) θεώρησε απαραίτητο να περιορίσει την απόδοση του ιζήματος από τις κλιτείς *μόνο* στους κλάδους 1^{ης}, 2^{ης} και 3^{ης} τάξης του υδρογραφικού δικτύου, ενώ η μεταφορά του θεώρησε ότι γίνεται στους κλάδους μεγαλύτερης τάξης. Οι πρώτες περιοχές θεωρήθηκαν *πηγές ιζήματος* και η διάβρωσή τους υπολογίστηκε μέσω της μεθόδου USLE, ενώ για την μεταφορική ικανότητα των κλάδων μεγαλύτερης από την 3^{η} τάξη αποδόθηκαν τιμές σε κάθε κλάδο και η μέση τιμή υπολογίστηκε με μεσοσταθμικό τρόπο με βάρη τα μήκη των κλάδων.

Μία από τις πρώτες ολοκληρωμένες προσπάθειες υπολογισμού του συντελεστή στερεοαπορροής με τη χρήση μοντέλων είναι αυτή του Williams (1978). Ο Williams χρησιμοποίησε την μέθοδο MUSLE (Modified USLE), μία εκδοχή της USLE κατά την οποία ο παράγων διαβρωτικότητας *R* αντικαθίσταται με εναν σύνθετο παράγοντα που εκφράζει την συνδυασμένη διαβρωτική ενέργεια *βροχής και απορροής* στην προσπάθεια να υπολογιστεί το έδαφος που διαβρώθηκε κατά την διάρκεια ενός μεμονωμένου επεισοδίου.

$$Y = 11.8(Q q_p)^{0.56}\, KCPLS \qquad (2\text{-}38)$$

όπου Y είναι η στερεοπαροχή μιας μεμονωμένης καταιγίδας (σε μετρικούς τόνους), Q είναι ο όγκος απορροής (m^3), q_p είναι η στιγμιαία παροχή αιχμής (m^3/s), ενώ οι υπόλοιποι παράγοντες είναι αυτοί της USLE. Η Q υπολογίστηκε με ένα υδρολογικό μοντέλο με ημερήσιο βήμα βασισμένο στην μέθοδο του αριθμού καμπύλης της SCS[4] (σήμερα NRCS), ενώ η q_p υπολογίστηκε με μια μέθοδο βελτιστοποίησης του στιγμιαίου μοναδιαίου υδρογραφήματος. Τέλος, το ίζημα που αποσπάστηκε από το επεισόδιο διοδεύτηκε με μία εξίσωση διόδευσης που λαμβάνει υπόψη την διάμετρο του ιζήματος και βαθμονομείται με έναν συντελεστή διόδευσης, β. Αφού βαθμονομήθηκε το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε για ενα αριθμό 35 λεκανών στο Texas δίνοντας αρκετά καλά αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πολύ διαδεδομένο μοντέλο SWAT (Soil and Water Assessment Tool) της USDA υπολογίζει την διάβρωση και την στερεομεταφορά με πολύ παρόμοιο τρόπο, πράγμα αναμενόμενο, καθώς ο Williams είναι ένας από τους σχεδιαστές του.

Στις νεώτερες προσπάθειες συγκαταλέγονται οι παρακάτω:

1. Προσέγγιση δεξαμενών (αποθήκευσης ιζήματος) συνδεδεμένων εν σειρά: (α) αποθήκευση στην κλιτύ και μεταφορά από την κλιτύ στο εγγύτερο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου και (β) αποθήκευση στο ποτάμι και διόδευση κατάντη μέσω του υδρογραφικού δικτύου. Εισάγονται οι έννοιες του χρόνου παραμονής του ιζήματος στην κάθε δεξαμενή (Sediment Residence Time, SRT) που υπολογίζεται μέσω της εκτίμησης του χρόνου διαδρομής της επιφανειακής απορροής πολλαπλασιαζόμενου με έναν συντελεστή που είναι συνάρτηση του μεγέθους των κόκκων του ιζήματος. Σαν πιο σημαντικός έλεγχος στην διαδικασία αναδεικνύεται ο λόγος του SRT προς την μέση διάρκεια των αποτελεσματικών βροχοπτώσεων (effective rainfall duration). Η μέθοδος εφαρμόστηκε από τους Lu et al (2006) στην λεκάνη του ποταμού Murray Darling, ενός από τους μεγαλύτερους ποταμούς της Αυστραλίας.

[4] πρόκειται για εμπειρική μέθοδο υπολογισμού της απορροής από τη βροχόπτωση που αναπτύχθηκε από την United States Department of Agriculture (USDA) Soil Conservation Service (SCS) και βασίζεται στις ιδιότητες του εδάφους. Κάθε έδαφος χαρακτηρίζεται από μια καμπύλη που αποδίδει το ποσοστό βροχόπτωσης που γίνεται απορροή.

2. Μοντέλο Pelletier: πρόκειται για ένα μοντέλο που σκοπό έχει να εκτιμήσει την μακροπρόθεσμη μέση παραγωγή και μεταφορά ιζήματος σε μεγάλες περιοχές της γης για αυτό και εφαρμόζεται σε κάναβο σημείων και όχι σε λεκάνες απορροής. Το μοντέλο διαχωρίζει την απόσπαση του ιζήματος από τις κλιτείς και τις λεκάνες των κλάδων μικρής τάξης από την μεταφορά του σε μεγαλύτερης τάξης αλλουβιακές κοίτες. Προκειμένου να υπολογίσει την απόσπαση συνεκτιμά την κλίση και την υφή του εδάφους, την μέση μηνιαία βροχόπτωση και το μέσο μηνιαίο LAI ενώ η διόδευση γίνεται με ένα κριτήριο μεταφοράς που εξαρτάται από τον αριθμό Rouse. Το μοντέλο έχει εφαρμοστεί σε 128 ποταμούς του κόσμου με ικανοποιητικά αποτελέσματα (Pelletier, 2012).
3. Προσέγγιση συνδεσιμότητας (flow connectivity): η προσέγγιση αυτή έχει αναπτυχθεί κυρίως σε σχέση με την έννοια της *συνδεσιμότητας*, μιας έννοιας που επιχειρεί να περιγράψει την σχέση μεταξύ της απορροής και των πηγών του ιζήματος στις λεκάνες μικρής τάξης και των αντίστοιχων δεξαμενών (χώρων απόθεσης). Ειδικότερα, η συνδεσιμότητα εννοείται σαν η πιθανότητα ενός κόκκου ιζήματος να φτάσει στην πλησιέστερη δεξαμενή και εξαρτάται από την απόσταση, τα χαρακτηριστικά της διαδρομής και την διαθέσιμη κινούσα επιφανειακή απορροή (Borselli et al., 2008). Η συνδεσιμότητα εκφράζεται με τον δείκτη συνδεσιμότητας (index of connectivity) που αποτελείται από δύο συνιστώσες: την ανάντη (upslope) συνιστώσα που εξαρτάται από το εμβαδόν της ανάντη επιφανείας, την μέση κλίση της και τις χρήσεις γης, και την κατάντη (downslope) συνιστώσα που εκφράζει την αποτελεσματικότητα της απόθεσης (trap efficiency) και εξαρτάται από το μήκος και την κλίση της κατάντη πορείας καθώς και από τις χρήσεις γης. Οι δείκτες αυτοί μπορούν να υπολογιστούν είτε με επιτόπια αυτοψία είτε σε περιβάλλον ΣΓΠ, είτε, καλύτερα, με έναν συνδυασμό των δύο. Πάνω σε αυτές τις αρχές έχει δημιουργηθεί και ένα σχετικό μοντέλο που τρέχει στο GrassGIS (De Rossa et al., 2016).

Σημαντική έρευνα και πρόοδος έχει γίνει και στην γειτονική Ιταλία για την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων. Ο Diodato (2006) χρησιμοποίησε ένα φειδωλό σε απαιτήσεις (parsimonious) δεδομένων εισόδου μοντέλο τύπου Thornes,ενώ χρησιμοποιώντας δείκτες βροχόπτωσης και παλαιοκλιματολογικές μετρήσεις (πχ σε ιζήματα από την ηφαιστειακή τέφρα πρόσφατων εκρήξεων) συνέθεσε κλιματολογικές χρονοσειρές για την περίοδο 1675-2004 καθώς και ιστορικές σειρές χρήσεων γης από αγροτικά αρχεία, σε μια προσπάθεια να

αναπαραστήσει την ιστορική εξέλιξη της διάβρωσης πριν και μετά την περίοδο της αναδάσωσης[5] στην λεκάνη του ποταμού Calore (3015 km^2) στην νότια Ιταλία. Το μοντέλο του Thornes, που αποτελεί την εξέλιξη των πρώτων παρόμοιων διατυπώσεων σχέσεων δύναμης του Musgrave (1947), αποτελεί την αρχετυπική έκφραση των μοντέλων τύπου ισχύος ρεύματος (stream power), και έχει την παρακάτω εξίσωση:

$$E = kQ^m S^n e^{-iV} \quad (2\text{-}39)$$

όπου E = διάβρωση (mm μήνα^{-1}), k = εδαφική τρωτότητα (αδιάστατη), Q = επιφανειακή απορροή (mm μήνα $^{-1}$), m = εμπειρικός εκθέτης (1.66), S = κλίση (m m^{-1}), n = σταθερά της κλίσης (2.0), V = φυτοκάλυψη (%), i = συντελεστής, αδιάστατος (0.07).

Στην παραλλαγή του Diodato ο παράγων της απορροής αντικαταστάθηκε από τον παράγοντα R της RUSLE ενώ μειώθηκε η συνεισφορά των παραγόντων της κλίσης και της τρωτότητας του εδάφους στο τελικό αποτέλεσμα. Συμπερασματικά, η ανάλυση του Diodato ανέδειξε την επιρροή των χρήσεων γης σαν υπέρτερη αυτής των κλιματικών αλλαγών.

Πίνακας 2-7 Κατάταξη μοντέλων ως προς τη δομή και τη χωρική τους διάσταση (de Vente et al., 2013)

Τύπος	**Μοντέλα**
Παλινδρόμησης	Γραμμική παλινδρόμηση, ART, BQART (αδρομερή)
Παραγοντικά	FSM, PSIAC, SSY index, SPADS (αδρομερή εκτός του SPADS)
Εμπειρικά	WATEM-SEDEM, Pelletier, WBsed (κατανεμημένα)
Φυσικά	AGNPS, LISEM, PESERA, SWAT (κατανεμημένα)

Είναι φανερό ότι στο πρόβλημα του συντελεστή στερεοαπορροής συμπυκνώνεται όλη η περιπλοκότητα των φαινομένων εδαφικής διάβρωσης και στερεομεταφοράς. Παρατίθεται χρήσιμος πίνακας (Πίν. 2-8) ανακεφαλαίωσης από την πρόσφατη συστηματική επισκόπηση των σχετικών μοντέλων και μεθόδων από τους deVente et al (2013). Οι συγγραφείς έκαναν επισκόπηση της δημοσιευμένης βιβλιογραφίας για 14 μοντέλα τα οποία έχουν κατατάξει ώς προς τη δομή τους σε μοντέλα παλινδρόμησης, εμπειρικά-ερμηνευτικά, φυσικά και παραγοντικά (factorial scoring models, παρόμοιας δομής με την USLE), ενώ ως προς την χωρική τους διάσταση σε αδρομερή και

[5] Η περίοδος που ακολούθησε την αγροτική μεταρύθμιση στην Ιταλία (1780 – 1810 μΧ) συνοδεύτηκε από εκτεταμμένη εκχέρσωση των δασών καθώς οι αγρότες αναζητούσαν την επέκταση των καλλιεργειών τους. Τα δάση επανέκαμψαν εν μέρει μετά τον 19ο αιώνα.

κατανεμημένα.

Πίνακας 2-8 Καταλληλότητα μοντέλων σε σχέση με τους επιδιωκόμενους σκοπούς (de Vente et al., 2013)

Αντικειμενικός σκοπός	*Προτεινόμενη μέθοδος / μοντέλο*
1. Επιλογή ερμηνευτικών παραγόντων στερεοαπορροής	Στατιστική ανάλυση παλινδρόμησης / συσχέτισης
2. Εκτίμηση στερεοαπορροής	FSM (A<10.000 km^2) PSIAC (A<10.000 km^2) BQART (A>10.000 km^2) WBMsed (A>10.000 km^2) SSYindex (A>10.000 km^2) Pelletier (A>10.000 km^2)
3. Εντοπισμός πηγών στερεοαπορροής	SPADS WATEM-SEDEM AGNPS LISEM
4. Εκτίμηση ρυθμών διάβρωσης	PESERA WATEM-SEDEM AGNPS LISEM
5. Αναγνώριση κύριων διεργασιών διάβρωσης	FSM (A<10.000 km^2) PSIAC SSYindex σχέση SSY-A (επιφάνεια)
6. Εκτίμηση της επίδρασης των χρήσεων γης, της κλιματικής αλλαγής και των μέτρων προστασίας στους τοπικούς ρυθμούς διάβρωσης	PESERA WATEM-SEDEM AGNPS LISEM
7. Εκτίμηση της επίδρασης των χρήσεων γης, της κλιματικής αλλαγής και των μέτρων προστασίας στον συντελεστή στερεοαπορροής	WBMsed Pelletier PESERA WATEM-SEDEM AGNPS LISEM

2.4 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η ποσοτική γεωμορφολογία των υδρογραφικών δικτύων βασίζεται στη μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των κλάδων των υδρογραφικών δικτύων και των αντίστοιχων λεκανών απορροής (Morisawa, 1981).

Πρωτογενή (μετρούμενα) χαρακτηριστικά είναι το μήκος των κλάδων, το εμβαδόν και η περίμετρος των λεκανών απορροής καθώς και η υψομετρική τους κατανομή. Δευτερογενή ή παράγωγα χαρακτηριστικά προκύπτουν από τον συνδυασμό και τη στατιστική επεξεργασία των πρωτογενών στοιχείων. Αυτά είναι παραμέτροι και δείκτες που εκφράζουν ποσοτικά τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε υδρογραφικού δικτύου και της λεκάνης απορροής, όπως για παράδειγμα οι παράμετροι υφής της λεκάνης (υδρογραφική πυκνότητα και συχνότητα). Η γεωγραφική διανομή των μορφομετρικών παραμέτρων και δεικτών και η ερμηνεία τους λαμβάνοντας υπόψη τα γεωλογικά, τεκτονικά και κλιματικά χαρακτηριστικά βοηθά τη διερεύνηση των κύριων διεργασιών διαμόρφωσης του αναγλύφου (Μαρουκιάν, 1987).

Μιά άλλη εξίσου σημαντική ερευνητική περιοχή όπου η ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση βρίσκει εφαρμογή είναι η εκτίμηση του πλημμυρικού δυναμικού των λεκανών απορροής. Εδώ και πολλά χρόνια οι υδρολόγοι έχουν διαπιστώσει ότι οι διαφορές μεταξύ της μορφής και του τύπου των υδρογραφικών δικτύων και κυρίως στη διαδοχική κατά τάξη απορροή, τόσο την πλανιμετρική (επιπεδομετρική) δομή, όσο και την υψομετρική τους κατανομή (που ονομάζουμε τοπογραφία ή ανάγλυφο της λεκάνης) έχουν άμεση σχέση με υδρολογικές παραμέτρους και κυρίως με την πλημμυρική τους απόκριση (Howard, 1990). Αυτή η διαπίστωση αποκτά πρακτικό ενδιαφέρον για τους μηχανικούς στο σχεδιασμό αντιπλημμυρικών έργων και για την πολιτική διοίκηση, στην υιοθέτηση και αναθεώρηση των μέτρων αντιπλημμυρικής προστασίας καθώς και στον εντοπισμό των πιο ευάλωτων στις πλημμύρες λεκανών απορροής. Για παράδειγμα, κατά την εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου (το παλαιότερο μοντέλο εύρεσης της παροχής αιχμής), απαιτείται ο χρόνος συγκέντρωσης ή συρροής. Για τον υπολογισμό του *χρόνου συγκέντρωσης*, δηλαδή τον χρόνο που απαιτείται για την ροή να φτάσει από το πιό απομακρυσμένο –υδραυλικά- σημείο της λεκάνης στο θεωρούμενο σημείο εξόδου, έχουν από παλιά προταθεί διάφοροι εμπειρικοί τύποι (όπως αυτός του Giandotti).

2.4.1 Μορφομετρικοί δείκτες

Σύμφωνα με τον Strahler (1957) υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες υπολογιζόμενων παραμέτρων: α) οι μετρούμενες παράμετροι γραμμικής κλίμακας, όπως το εμβαδό της λεκάνης, η περίμετρος, το μέγιστο υψόμετρο, το υψόμετρο της εξόδου, το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου εντός της λεκάνης απορροής, το συνολικό μήκος των ισοϋψών της λεκάνης, η κλίση της λεκάνης, η υδρογραφική πυκνότητα, το μέσο υψόμετρο της λεκάνης, το υψόμετρο του κεντροειδούς, το μήκος και η κλίση της μέγιστης υδάτινης διαδρομής (του κυρίου ρεύματος) και, β) παράμετροι που αποτελούν αδιάστατους αριθμούς όπως ο αριθμός τραχύτητας του Melton, ο δείκτης κυκλικότητας της λεκάνης απορροής, ο δείκτης επιμήκυνσης, ο δείκτης αναγλύφου και ο λόγος αναγλύφου, ο δείκτης τραχύτητας που υπολογίζεται από τον δείκτη αναγλύφου, και άλλοι δείκτες.

Στον Πίνακα 2-9 παρατίθενται οι συνηθέστεροι δείκτες και παράμετροι καθώς και ο τρόπος υπολογισμού τους. Οι περισσότεροι δείκτες υπολογίζονται από μικρό αριθμό μετρούμενων μεγεθών όπως το εμβαδόν της επιφάνειας, την περίμετρο, το μήκος του κυρίου ρεύματος και υψομετρικές διαφορές. Κάποιοι δείκτες συντίθενται από τις ίδιες παραμέτρους, για παράδειγμα ο δείκτης συμπαγούς και ο δείκτης κυκλικότητας της λεκάνης.

Από τις μορφομετρικές παραμέτρους ίσως η πιο σημαντική είναι η *υδρογραφική πυκνότητα*, $D = \Sigma L_{ch} / A$. Η παράμετρος αυτή (με μονάδες km^{-1}) είναι ένα καλός δείκτης της γραμμικής κλίμακας της λεκάνης και το εύρος των τιμών που παίρνει είναι πολύ μεγάλο, επιτρέποντας έτσι την κατηγοριοποίηση λεκανών απορροής που βρίσκονται σε πολύ διαφορετικά γεωλογικά και κλιματικά περιβάλλοντα. Ενδεικτικά, οι τιμές της υδρογραφικής πυκνότητας ξεκινούν από το 2 σε ανθεκτικά ψαμιτικά πετρώματα και φτάνουν έως και το 1000 σε πολύ ευδιάβρωτες περιοχές (Badlands). Ο Schumm (1956) ονόμασε το αντίστροφο της υδρογραφικής πυκνότητας, *σταθερά συντήρησης της κοίτης* (constant of channel maintenance). Ο δείκτης αυτός, με μονάδες μήκους, έχει μια φανερή φυσική σημασία: πόσα τετραγωνικά χιλιόμετρα απαιτούνται για να «συντηρηθεί» ένας κλάδος μήκους ενός χιλιομέτρου. Η υδρογραφική πυκνότητα συνδέεται επίσης με το μήκος της επιφανειακης απορροής. Το μήκος της επίγειας απορροής ορίζεται σαν η απόσταση από τον υδροκρίτη έως την κοιλάδα όπου ρέει ο κλάδος και υπολογίζεται ως το αντίστροφο της διπλάσιας υδρογραφικής πυκνότητας.

Πίνακας 2-9 Μορφομετρικές παράμετροι, τύποι υπολογισμού και μονάδες μετρησης (όπου e= 20m, η ισοδιάσταση).

Σύμβο-λο	*Μορφομετρική παράμετρος*	*Περιγραφή / Σχέση*	*Αναφορά*
A	Εμβαδό της λεκάνης (km^2)	Η επίπεδη έκταση της επιφάνειας που οριοθετείται από τον υδροκρίτη.	
P	Περίμετρος της λεκάνης (km)	Το μήκος της οριζόντιας προβολής του υδροκρίτη.	
Cr	Μέγιστο υψόμετρο (m)	Το μέγιστο υψόμετρο της λεκάνης.	
H_{out}	Υψόμετρο εξόδου (m)		
No	Πλήθος των κλάδων όλων των τάξεων		
ΣL_{ch}	Συνολικό μήκος των κλάδων (km)	Το άθροισμα του μήκους όλων των κλάδων εντός της λεκάνης απορροής.	Horton, 1945
ΣL_{con}	Συνολικό μήκος των ισοϋψών (ισοδιάστασης e) στη λ.α (km)	Το συνολικό μήκος των ισοϋψών που διασχίζουν τη λεκάνη απορροής	Roche, 1963
Sl	Κλίση των κλιτύων της λ.α	$Sl = e*\Sigma L_{con}/ A$	Roche, 1963
Dd	Υδρογραφική πυκνότητα	$Dd = \Sigma L_{ch} / A$	Horton, 1945
F	Υδρογραφική συχνότητα	$F = No / \Sigma L_{ch}$	Strahler, 1952
R	Δείκτης αναγλύφου της λ.α (m)	$C_r - H_{out}$	Strahler, 1952
L_{lfp}	Μήκος της μέγιστης υδάτινης διαδρομής (km)	Από το σχηματισμό του κοντά στον υδροκρίτη, έως την έξοδο	Schumm, 1956
M	Αριθμός τραχύτητας Melton (ruggedness number)	$M = R*A^{-0.5}$	Melton, 1956 , Chunch and Mark, 1980
Circ	Δείκτης κυκλικότητας της λ.α	$Circ=4\pi A/P^2$	Miller, 1953
Elong	Δείκτης επιμήκυνσης της λ.α	$Elong.=2\sqrt{(A/\pi)}/L_{lfp}$	Schumm, 1956
Comp	Δείκτης συμπαγούς	$Comp = P/2\sqrt{\pi A}$	Gravelius, 1914
R_{ratio}	Λόγος αναγλύφου	$R_{ratio} =R/ L_{lfp}$	Schumm, 1956
R_{gd}	Δείκτης τραχύτητας	$R_{gd} = R_{ratio}*D$	Strahler, 1968
E	Magnitudo –Εύρος	Το πλήθος των κλάδων $1^{ης}$ τάξης κατά Strahler	
T_c	Χρόνος συρροής (ΔH, διαφορά υψομέτρων βαρύκεντρου με έξοδο)	$T_c = (4A^{0.5} +1.5 L_{lfp}) / 0.8 \Delta H^{0.5}$	Giandotti, 1934
f	Δείκτης μορφής (form factor)	$f = A/ L_{lfp}^{\ 2}$	Horton, 1945

Ένας ακόμα σχετικός δείκτης είναι η υδρογραφική συχνότητα που ισούται με το πλήθος των κλάδων διαιρούμενο με το εμβαδόν της λεκάνης απορροής. Η υδρογραφική πυκνότητα συνδυαζόμενη με παραμέτρους αναγλύφου δίνει σύνθετους δείκτες, όπως η τραχύτητα (ruggedness) της λεκάνης, που σχετίζονται με την ένταση της διάβρωσης εντός της λεκάνης.

Ο απλούστερος δείκτης αναγλύφου, που ονομάζεται ανάγλυφο, R (relief), είναι απλά η υψομετρική διαφορά του μέγιστου μείον το ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης.Ο δείκτης αναγλύφου ορίζεται ως Rratio =R/ Llfp, είναι δηλαδή στην πραγματικότητα μιά γενικευμένη μορφολογική κλίση του αναγλύφου. Το ανάγλυφο συμμετέχει στον ορισμό δύο ακόμα δεικτών, του αριθμού Melton, M = R*A-0.5 και του δείκτη τραχύτητας της λεκάνης, Rgd = Rratio*D. Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον αυτών των δεικτών που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-17, είναι η παρατηρημένη θετική συσχέτισή τους με την διάβρωση και την απώλεια εδάφους της λεκάνης (Karalis et al., 2014). Οι τιμές των δεικτών γενικά διατάσσονται αντιστρόφως ανάλογα με την επιφάνεια των λεκανών.

2.4.2 Γενικές Παρατηρήσεις

Όπως αναφέρθηκε, τα πρωτογενή δεδομένα όλης της περαιτέρω επεξεργασίας είναι μήκη, εμβαδά και υψομετρικές διαφορές, όλα μετρημένα από τοπογραφικό χάρτη κάποιας κλίμακας. Αυτό είναι αρκετά πιο σύνθετο απ’ότι ακούγεται. Αν πρόκειται να ψηφιοποιηθούν κλάδοι υδρογραφικού δικτύου από κάποιο χάρτη, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο τρόπος με τον οποίο ο φωτοερμηνευτής σχεδιάζει τις κοίτες (που συμβολίζονται με τη γνωστή διακεκομμένη ή συνεχόμενη γραμμή μπλε χρώμτος) στον τοπογραφικό χάρτη, δηλαδή τις ισουψείς γραμμές που έχουν ληφθεί από τη φωτογραμμετρία, στους χάρτες γενικής χρήσης 1:50.000 της ΓΥΣ. Αν αναζητά το γνωστό σχήμα V των ισοϋψών, που συμβολίζει μια κοιλάδα, για τη χάραξη της γραμμής, όπως γίνεται κατά κόρον, η χάραξη εξαρτάται από την ανάλυση της ισοϋψούς, και επομένως είναι η κλίμακα του χάρτη που καθορίζει τόσο την ύπαρξη, όσο και την επέκτασή των ρευμάτων στα ανάντη, προς τον υδροκρίτη. Γίνεται φανερό ότι η κλίμακα του χάρτη που επηρεάζει τη χαρτογράφηση των κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου επηρεάζει και την αριθμηση των κλάδων και συνεπώς την ταξη του κεντρικού κλάδου.

Όπως χαρακτηριστικά αναφέρουν οι Leopold et al. (1964) το ρεύμα Arroyo caliente, εμβαδού λεκάνης περίπου 70 στρεμμάτων, είχε χαρακτηριστεί ως πρώτης τάξης

σε έναν χάρτη κλίμακας 1:63360 (2 inches to a mile), της λεκάνης ενός μεγαλύτερου ρεύματος, του Arroyo de los frijoles, στο Νέο Μεξικό των ΗΠΑ. Το Arroyo de los frijoles, όπως προέκυπτε από αυτόν το χάρτη, ήταν ρεύμα 4ης τάξης. Όταν έγινε διαθέσιμη μια πιο λεπτομερής αποτύπωση (μεγαλύτερης κλίμακας) του Arroyo caliente, αποκαλύφθηκε μεγάλος αριθμός κοιτών/κλάδων, η μεγαλύτερη των οποίων ήταν ρεύμα 4ης τάξης. Αυτό είχε σαν συνέπεια να προστεθεί το 4 στην τάξη όλων των ρευμάτων του δικτύου του Arroyo de los frijoles, και το ίδιο να χαρακτηριστεί πλέον ως 8ης τάξης ρεύμα. Γίνεται λοιπόν σαφές ότι για κάποια από τα πρωτογενή στοιχεία, τα αποτελέσματα εξαρτώνται από την κλίμακα του χάρτη. Για το λόγο αυτό η σύγκριση τάξεων και δεικτών υδρογραφικών δικτυων από διαφορετικές περιοχές πρέπει να λαμβάνετι υπόψη την κλίμακα των χαρτών από τους οποίους προήλθε η χαρτογράφηση των δικτύων.

Η γενικότερη θεωρία της τοπολογίας των υδρογραφικών δικτύων, οι λεγόμενοι νόμοι των υδρογραφικών δικτύων, θεμελιώθηκε με την πρωτοποριακή εργασία του Horton (1945) η οποία ελαφρώς τροποποιήθηκε από τον Strahler (1957). Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία τα υδατορεύματα κατηγοριοποιούνται σε τάξεις· τα υδατορεύματα πρώτης τάξης είναι στα ανάντη του δικτύου (δεν δέχονται εισροές απο άλλα υδατορεύματα) ενώ τα δεύτερης τάξης υδατορεύματα προκύπτουν από τη συμβολή δύο ρευμάτων πρώτης τάξης, κόκ. Οι παρατηρήσεις σε πολλές λεκάνες απορροής δείχνουν ότι τόσο ο αριθμός των κλάδων κάθε τάξης όσο και άλλα χαρακτηριστικά τους, όπως τα μήκη τους ή τα εμβαδά των λεκανών τους ακολουθούν μια γεωμετρική σειρά, αναλόγως αύξουσα είτε φθίνουσα. Βασική τοπολογική ιδιότητα του υδρογραφικού δικτύου είναι ο λόγος διακλάδωσης R_B, ο οποίος είναι ο λόγος μεταξύ του πλήθους των κλάδων κάποιας τάξης προς το πλήθος των κλάδων της αμέσως ανώτερης τάξης. Αυτός ο λόγος τείνει να διατηρείται σταθερός για όλες τις τάξεις και, αν είναι έτσι, η λεκάνη χαρακτηρίζεται από αυτό το λόγο. Ο λόγος αυτός υπολογίζεται από την κλίση της γραμμής παλινδρόμησης πάνω σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα όπου στον οριζόντιο άξονα είναι οι τάξεις του δικτύου και στον κατακόρυφο είναι ο λογάριθμος της μετρούμενης ποσότητας: πλήθος ρευμάτων R_B, μέσο μήκος R_L, μέσο εμβαδόν των λεκανών τους R_A, και μέση κλίση R_{SL}. Αν δύο λεκάνες, ανεξαρτήτως μεγέθους, χαρακτηρίζονται από τους ίδιους λόγους τότε είναι *γεωμετρικά όμοιες* και όλες οι μετρήσεις των μηκών (περιμέτρου, μηκών ρευμάτων ή αναγλύφου) θα έχουν μεταξύ τους σχέση ενός δεδομένου λόγου, του λόγου ομοιότητας.

2.4.3 Εργασία με δεδομένα τύπου ράστερ

Η μέτρηση μηκών και εμβαδών σε έναν αναλογικό τοπογραφικό χάρτη γινόταν παλιά με τα ειδικά μηχανικά όργανα, τα πλανίμετρα. Σήμερα, όλα τα σχετικά λογισμικά χρησιμοποιούν αλγόριθμους που λειτουργούν σε ράστερ δεδομένα, ειδικά σε υψομετρικά μοντέλα εδάφους που έχουν προέλθει από φωτογραμμετρικές μεθόδους, τα ΨΥΜΕ. Τα Ψηφιακά Υψομετρικά Μοντέλα Εδάφους είναι τετράγωνα κελιά (ψηφίδες) τοποθετημένα σε κάναβο με βάση κάποιο προβολικό σύστημα. Για να μετρηθεί η γεωμετρία τα δεδομένα μετατρέπονται σε διανυσματικά (raster to vector). Η βιβλιογραφία είναι πολύ μεγάλη και οι αλγόριθμοι πάμπολλοι. Εδώ θα γίνει αναφορά μόνο πολύ σύντομα σε κάποια πρακτικά ζητήματα που μπορούν να επηρεάσουν την αξιοπιστία των μετρήσεων.

Ένα βασικό πλεονέκτημα των ράστερ δεδομένων είναι ότι είναι σχετικά ανεξάρτητα της κλίμακας, με την έννοια ότι το υδρογραφικό δίκτυο που κατασκευάζουν σημειώνει τη φορά της ροής σε όλα τα κελιά. Επομένως, το ζήτημα του που θα είναι η αρχή (κορυφή) του κλάδου, δηλαδή σε τι απόσταση από τον υδροκρίτη, λύνεται με τον ορισμό του κατωφλίου συμβάλλουσας επιφάνειας.

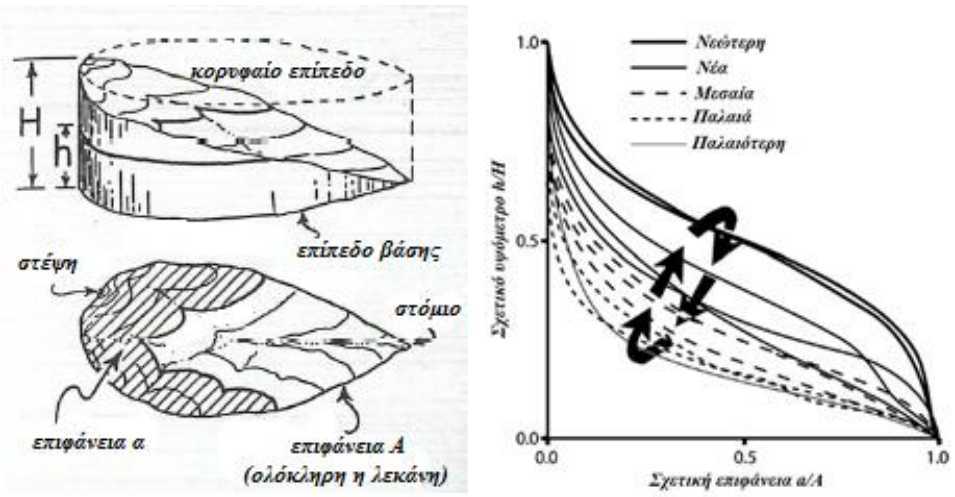
Το βασικό πρόβλημα στα ράστερ δεδομένα είναι οι υπολογισμοί ειδικά των περιμέτρων. Τα μήκη στα ράστερ δεδομένα, όπως ήδη αναφέρθηκε, μετρώνται μόνο εφόσον μετατραπούν με κάποιο αλγόριθμο μετατροπής σε διανυσματικα δεδομένα, δηλαδή σημεία, γραμμές και πολύγωνα. Στην ακραία περίπτωση αν η «πραγματική» γραμμή που μετράται είναι η διαγώνιος του τετραγώνου, τότε αντί να ληφθεί 1.41 ως μήκος, λαμβάνεται 2, δηλαδή τιμή μεγαλύτερη κατά 40%! Επιπλέον, υπάρχει εξάρτηση αυτής της υπερεκτίμησης του μήκους από τον προσανατολισμό της γραμμής. Οι σχετικοί αλγόριθμοι στα μοντέλα κάνουν τη μετατροπή με βάση κάποιες σταθερές αλλά, έχουμε την εντύπωση ότι ο κίνδυνος υπερεκτίμησης δεν αποφεύγεται εντελώς (δες πίνακα σύγκρισης αποτελεσμάτων).

Ένα επιπλέον πρόβλημα είναι η fractal διάσταση των μηκών (Mandelbrot, 1967), δηλαδή το γεγονός ότι το μήκος τους αλλάζει αναλόγως της κλίμακας στην οποία μετρώνται ή, ισοδύναμα, αναλόγως με το μήκος της μονάδας του μέτρου με το οποίο μετρώνται (π.χ το άνοιγμα του διαβήτη). Ας σημειωθεί ότι ο υπολογισμός του εμβαδού είναι ανεξάρτητος κλίμακας, κυρίως γιατί τα σφάλματα τείνουν να αλληλοαναιρούνται ενώ στη μέτρηση των μηκών, τα σφάλματα είναι συσσωρευτικά (Sposito, G. , 1998). Έτσι, καθώς η κλίμακα μεγαλώνει πολλοί δείκτες που έχουν στη σχέση τους επιφάνεια και

περίμετρο θα αλλάζουν τιμή, π.χ ο δείκτης συμπαγούς ($P/2\sqrt{\pi A}$) θα μεγαλώνει και ο δείκτης κυκλικότητας ($4\pi A/P^2$) θα μικραίνει, και μάλιστα ανάλογα με το τετράγωνο της περιμέτρου.

2.4.4 Υψομετρική ανάλυση

Η υψομετρική ανάλυση απεικονίζει την κατανομή της μάζας της λεκάνης απορροής από την βάση έως την κορυφή της. Η μορφή της αδιάστατης υψομετρικής καμπύλης θεωρείται χαρακτηριστική του γεωμορφολογικού σταδίου εξέλιξης της λεκάνης (Σχ. 2-20).



Σχήμα 2-20 Αριστερά: Σκαρίφημα ορισμού της εξαγωγής της αδιάστατης υψομετρικής καμπύλης. Για κάθε ισοϋψή σημειώνεται το h/H και το α/Α. Δεξιά: το στάδιο εξέλιξης που αντιστοιχεί στην κάθε μορφή.

Όπως φαίνεται στο σχήμα, στο στάδιο της νεότητας η καμπύλη είναι κυρτή στο δεύτερο μισό της. Αντιθέτως, στο στάδιο γήρατος (με τη δράση της διάβρωσης και απογύμνωσης) η καμπύλη είναι μόνο κοίλη. Η εξέλιξη μετά το στάδιο της ωριμότητας (μεσαία) είναι αργή ενώ κατά το στάδιο της νεότητας είναι πιο γρήγορη. Ενδιαφέρον η καμπή (σημείο μετάβασης της καμπύλης από κοίλη σε κυρτή) που στο στάδιο της ωριμότητας παρατηρείται στα 8/10 με 9/10 περίπου της σχετικής επιφάνειας για να εξαφανιστεί αργότερα. Η τεκτονική δράση ή η μεταβολή του απόλυτου βασικού επιπέδου (στάθμης θάλασσας) λόγω ευστατισμού μπορεί να προκαλέσει την αναγέννηση της λεκάνης τη μετάβαση δηλαδή εκ νέου στο αρχικό στάδιο νεότητας.

2.4.5 Κοκκομετρία - Κροκαλομετρία

Η κατανομή του μεγέθους των κλασμάτων στην κοίτη και τις όχθες του ποταμού μπορεί να μετρηθεί με κάποια μέθοδο επι τόπου ή να ληφθεί δείγμα ιζήματος προκειμένου να κοσκινιστεί και ζυγιστεί στο εργαστήριο. Στην προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί η μεροληψία του παρατηρητή κατά την επιλογή του (η οποία συνήθως ευνοεί τα μεγαλύτερα κλάσματα), η δειγματοληψία του υλικού της κοίτης μπορεί να γίνει γενικά με τρεις τρόπους:

1. **Χαλικομέτρηση – Wolman's pebble count** (line count): ο παρατηρητής επιλέγει έναν προκαθορισμένο αριθμό από βότσαλα/κροκάλες στην επιφάνεια του πυθμένα σε ίσες αποστάσεις κατά μήκος μιάς γραμμής (που υλοποιείται πχ από μια απλωμένη μετροταινία) και συνήθως εκτείνεται σε μια μεγάλη επιφάνεια (~100 m^2).
2. **Μετρήσεις σε κάναβο - grid count**: ο παρατηρητής επιλέγει βότσαλα/κροκαλες πάνω στις γωνίες ενός κανάβου (που υλοποιείται πχ από τεντωμένους σπάγκους πιασμένους σε καρφιά) και συνήθως εκτείνεται σε μια μικρή επιφάνεια (~1-10 m^2). Τέτοιες μετρήσεις μπορούν να γίνουν και από φωτογραφίες.
3. **Τοπικά δείγματα - areal samples**: Επιλέγονται για μέτρηση *όλα* τα βότσαλα/κροκάλες που βρίσκονται σε μια μικρή προκαθορισμένη επιφάνεια της κοίτης (~0.1-1m^2), χρησιμοποιώντας συχνά κόλλα ώστε να μην χαθούν τα μικρά κλάσματα του δείγματος. Σε αυτήν την κατηγορία θα πρέπει να ενταχθεί και η απόσπαση ενός μεγάλου, ενιαίου όγκου υλικού, με φτυάρι (χύδην δείγμα - bulk sample).

Ανεξαρτήτως του τρόπου επιλογής των χαλίκων, η μέτρησή τους στις δύο πρώτες περιπτώσεις μπορεί να γίνει με τη χρήση κοινού μέτρου – μεταλλικού χάρακα καλύτερα- είτε με τη χρήση οργάνου που λέγεται χαλικόμετρο (gravelometer), ενός πλαισίου από αλουμίνιο με ορθογώνια ανοίγματα καθορισμένου μεγέθους (σε ολόκληρα και μισά της κλίμακας *Φ*) απ'όπου ο χειριστής δοκιμάζει να τις περάσει μία προς μία, ενώ ο γραφέας σημειώνει την τιμή του ανοίγματος από την οποία πέρασε η κάθε μία. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για 100-200 επιλεγμένα βότσαλα/κροκάλες. Η χρήση του χαλικόμετρου δεν είναι πολύ ευαίσθητη σε σφάλματα του χειριστή και για αυτό προτιμάται σε σχέση με την μέτρηση με χάρακα. Όμως, το χαλικόμετρο μετράει μόνο τον β-άξονα της κροκάλας (δες παρακάτω, Σχ.2-21), οπότε εάν σκοπός της δειγματοληψίας είναι μια ολοκληρωμένη

γεωμορφολογικού – ιζηματολογικού τύπου εκτίμηση των χαλίκων/κροκαλών (κροκαλομετρία) θα πρέπει αυτά να μετρηθούν με τον χάρακα. Στην τρίτη περίπτωση, αυτή του χύδην δείγματος, το υλικό πρέπει να μεταφερθεί για κοσκίνιση στο εργαστήριο, όπου θα ζυγιστεί, θα γίνει η διανομή του στα διαφορετικά μεγέθη με τη χρήση των κόσκινων και του δονητή, και κατόπιν θα ζυγιστεί το κάθε κλάσμα, έτσι ώστε να προκύψει η αναλογία του στο σύνολο.

Σε αυτή την τελευταία περίπτωση οι αναλογίες προκύπτουν κατά βάρος και όχι κατά αριθμό (πλήθος). Έχει υπάρξει αρκετή συζήτηση για το τι είναι καλύτερο, ωστόσο γενικά προτιμάται η αναλογία κατά βάρος που είναι και η μόνη δυνατή στην περίπτωση μεγάλων δειγμάτων. Υπάρχουν τύποι που μπορούν, αν χρειαστεί, χονδρικά να μετατρέψουν μια κατά αριθμό αναλογία σε κατά βάρος αναλογία.

Σχήμα 2-21 Αριστερά, οι τρεις θεωρητικοί άξονες ενός βότσαλου. Στο κέντρο το χαλικόμετρο (gravelometer) με ανοίγματα στην κλίμακα Φ (Εργαστήριο Φυσικής Γεωγραφίας Χαροκόπειου). Δεξιά, σειρά κοσκίνων σε δονητή στο Εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος του πρώην ΤΕΙ Αθήνας. Τα δείγματα ζυγίζονται πριν και μετά από την διαλογή τους σε κλάσματα.

Το επιφανειακό στρώμα, η στρώμα θωράκισης (armor layer/pavement),είναι πάντοτε πολύ αδρομερέστερο του υποστρώματος. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική καθώς διαφορετικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για την κίνηση του κάθε στρώματος. Ωστόσο, ακόμα πιο θεμελιώδης είναι η διακρίβωση της προέλευσης του φορτίου πυθμένα, δηλαδή εάν αυτό προέρχεται από τα κλάσματα του στρώματος θωράκισης ή από το υπόστρωμα. Η σύνθεση του φορτίου πυθμένα δίνει μια πρώτη απάντηση στο ερώτημα αυτό. Στην χαλικομέτρηση όσο και στην κροκαλομετρία τα δείγματα λαμβάνονται βασικά από το επιφανειακό στρώμα, ενώ τα χύδην δείγματα περιέχουν υλικά τόσο του επιφανειακού στρώματος όσο και του υποστρώματος. Ένα άλλο ζήτημα που έχει να κάνει με τον

σχεδιασμό της δειγματοληψίας είναι οι θέσεις στο ποτάμι απ' όπου θα ληφθούν τα δείγματα. Μπορεί η θέση να είναι μέσα στην κοίτη του ποταμού, χαμηλά στις όχθες είτε για παράδειγμα σε μιά εκτεθειμμένη ράχη από χάλικες/κροκάλες (gravelbar). Στην τελευταία περίπτωση ξέρουμε ότι τα δείγματα αφορούν υλικό φορτίου πυθμένα, δηλαδή το υλικό που μετακινείται με τις ισχυρές ροές, μιας και την προηγούμενη φορά αυτό δεν βρισκόταν στη θέση αυτή.

Οι ολοκληρωμένες μετρήσεις γεωμορφολογικού – ιζηματολογικού χαρακτήρα περιλαμβάνουν την μέτρηση και των τριών αξόνων του βότσαλου (ενώ με το χαλικόμετρο μετριεται μόνο ο b-άξονας). Οι σχέσεις μεταξύ του b-άξονα και των τετράγωνων ανοιγμάτων των κόσκινων ή του χαλικόμετρου εξαρτώνται από την πλατύτητα (flatness) του βότσαλου. Σε αυτές τις μετρήσεις μετρούνται επίσης και άλλα χαρακτηριστικά του βότσαλου όπως οι γωνίες καμπυλότητας του (με τη βοήθεια ειδικής καρτέλας), η λιθολογία του κ.ά. Έχουν αναπτυχθεί αρκετοί δείκτες που περιγράφουν την μορφή του βότσαλου οι πιο κοινοί από τους οποίους αναφέρονται στον Πίνακα 2-10. Η εξαγωγή των τιμών των δεικτών και η μελέτη τους σε σχέση με τη θέση τους στο ποτάμι μπορεί να δώσει χρήσιμες ενδείξεις προέλευσης ή διεργασιών. Γενικά η μορφή και η σφαιρικότητα δηλώνουν προέλευση ενώ η αποστρογγύλωση δηλώνει απόσταση από την πηγή. Για παράδειγμα, σφαιρικές μορφές προέρχονται από πετρώματα ομοιόμορφης σύνθεσης και δομής όπως γρανίτες και ψαμμίτες, ενώ πεπλατυσμένα τεμάχη συνήθως προέρχονται από λεπτοπλακώδη πετρώματα ιζηματογενούς συχνά προέλευσης όπως ασβεστόλιθοι κ.ά. Στενόμακρα κυλινδρικά τεμάχη προέρχονται από σχιστόλιθους, κάποιους γνεύσιους κ.ά.

Πίνακας 2-10 Δείκτες περιγραφικοί της μορφής των βότσαλων

Δείκτης	*Φόρμουλα*	*Εισηγητής*	*Παρατηρήσεις*
Σφαιρικότητα (sphericity)	$\Psi = (BC/A^2)^{1/3}$	Krumbein (1941)	από 0 έως 1, όπου 0 είναι πολύ γωνιώδες και 1 είναι σφαίρα
Αποστρογγύλωση (roundness)	$P = 2\ r_s / A$	Cailleux (1947)	από 0 έως 1000, όπου 0 είναι πολύ γωνιώδες και 1000 είναι αποστρογγυλεμένο (2 διαστάσεις)
Πλατύτητα (flatness)	(A+B)*100/ 2C	Cailleux (1947)	

όπου A,B,C τα μήκη των τριών αξόνων του βότσαλου, r_s η τιμή της πιο οξείας γωνίας του βότσαλου

2.5 ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

Τα υδρολογικά μεγέθη παρουσιάζεται με λεπτομέρειες στο υποκεφάλαιο 4.3 (Υδρολογική διερεύνηση). Παρακάτω θα γίνουν μόνο κάποιες βασικές παρατηρήσεις επάνω στην καμπύλη στάθμης – παροχής και τον έλεγχο αβεβαιότητάς της.

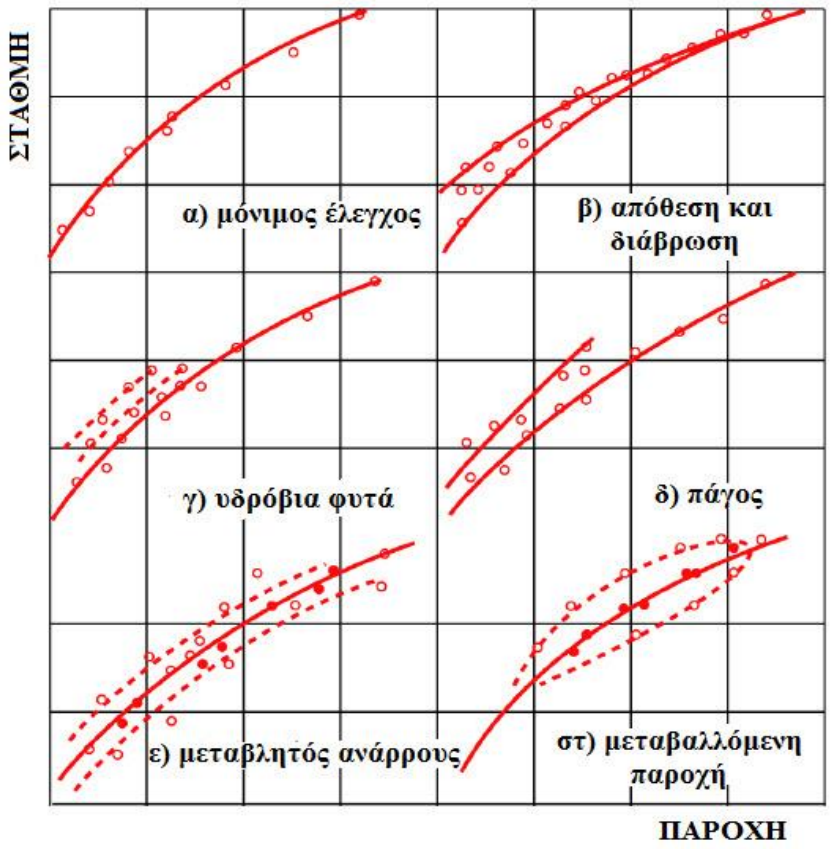
2.5.1 Τύποι ελέγχου σε υδατορεύματα και η καμπύλη σταθμης –παροχής

Η μορφή καθώς και η αξιοπιστία και σταθερότητα της σχέσης σταθμης –παροχής (σ-π), ελέγχονται είτε από την διατομή του ρεύματος στην θέση του σταθμημέτρου, είτε από ένα τμήμα του ρεύματος κατάντη του σταθμημέτρου. Αυτό ονομάζεται *έλεγχος σταθμού* (station control). Ο χαρακτήρας της καμπύλης σταθμης - παροχής εξαρτάται από τον τύπο του ελέγχου, που με τη σειρά του εξαρτάται από την γεωμετρία της διατομής και τα φυσικά χαρακτηριστικά του ρεύματος κατάντη της διατομής. Οι έλεγχοι σταθμού ταξινομούνται με διάφορους τρόπους (Coenders & Luxemburg, 1997), ως:

- Έλεγχος διατομής και έλεγχος τμήματος (section and channel control)
- Φυσικοί και τεχνητοί έλεγχοι (natural and artificial controls)
- Πλήρεις, σύνθετοι και μερικοί έλεγχοι (complete, compound and partial controls)
- Μόνιμοι και μεταβαλλόμενοι έλεγχοι (permanent and shifting controls)

Όταν ο έλεγχος είναι τέτοιος ώστε οποιαδήποτε αλλαγή στα φυσικά χαρακτηριστικά της διώρυγας κατάντη δεν επηρεάζει τη ροή στον σταθμό, τότε έχουμε τον *έλεγχο διατομής*. Τέτοιες περιπτώσεις περιλαμβάνουν τις φυσικές ή τεχνητές στενώσεις, τους καταρράκτες και τις υδατοπτώσεις πάνω από τις βαθμίδες που σχηματίζονται από χαλικοσωρούς ή «χαλίες» (gravel bars - επιμήκη φράγματα από χάλικες) μέσα στη ροή. Ο έλεγχος διατομής αναγκαστικά λοιπόν περιλαμβάνει μια περιοχή *κρίσιμης ροής* σε μικρή απόσταση κατάντη. Όταν, αντίθετα, οι κατάντη διακυμάνσεις μπορούν να μεταφερθούν ανάντη τότε υπάρχει *έλεγχος τμήματος*. Σε τέτοια περίπτωση η καμπύλη σταθμης - παροχής εξαρτάται από τη γεωμετρία και τη τραχύτητα του ρεύματος κατάντη του σταθμού. Το τμήμα που ελέγχει τη σχέση αυτή είναι τόσο μεγαλύτερο όσο μικρότερη είναι η κλίση της βαθιάς γραμμής.

Ένας *τεχνητός έλεγχος* αναφέρεται σε κατασκευές τεχνικών έργων, όπως για παράδειγμα εκχειλιστές, που σκοπό έχουν να σταθεροποιήσουν τοπικά τη σχέση σταθμης - παροχής. Οι *φυσικοί έλεγχοι* μπορεί να είναι στενώσεις της διατομής, μικροί καταρράκτες καθώς και οι υπόλοιπες περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω στην περιγραφή των ελέγχων τμήματος.



Σχήμα 2-22 Χαρακτηριστικές μορφές της καμπύλης στάθμης – παροχής για διαφορετικές περιπτώσεις ελέγχων σε φυσικά ποτάμια ρεύματα. (Πηγή: TUDelft)

Σε αρκετές περιπτώσεις οι έλεγχοι σταθμού είναι συνδυασμός ελέγχου διατομής σε *χαμηλά νερά* (χαμηλές παροχές και στάθμες) και ελέγχου τμήματος σε *ψηλά νερά*, οπότε ταξινομούνται ως *σύνθετοι έλεγχοι*. Οι περιπτώσεις *μερικού ελέγχου* αναφέρονται σε ένα περιορισμένο εύρος στάθμεων στις περιπτώσεις σύνθετου ελέγχου, στις μεταβατικές καταστάσεις όταν ο έλεγχος διατομής αρχίζει να χάνεται, καθώς βυθίζεται στο νερό που ανεβαίνει κατάντη της διατομής της κρίσιμης ροής (tailwater).

Σε προσχωματικά ποτάμια υδατορεύματα, όπου δηλαδή παρατηρούνται περιοδικές αποθέσεις φερτών υλών ή διάβρωσης, ή περιπτώσεις ελέγχου τμήματος με όχθες και πυθμένα που διαβρώνονται, η καμπύλη σταθμης - παροχής μετακινείται. Αυτές είναι οι περιπτώσεις *μεταβαλλόμενου ελέγχου*. Ο μεταβαλλόμενος έλεγχος πέρα από τη διάβρωση

και απόθεση μπορεί και να οφείλεται σε ανάπτυξη υδρόβιων φυτών στον πυθμένα της κοίτης είτε σε υπερχείλιση και συσσώρευση νερού στις παρόχθιες περιοχές, δηλαδή τα πλημμυρικά πεδία (floodplains).

2.5.2 Έλεγχος αβεβαιότητας της καμπύλης σταθμης - παροχής

Ένας πρώτος έλεγχος της ποιότητας της προσαρμογής της γραμμής παλινδρόμησης στα διαθέσιμα δεδομένα είναι το τυπικό σφάλμα της εκτίμησης (standard error of the estimate, Se, ή η τυπική απόκλιση των σφαλμάτων της γραμμής παλινδρόμησης) που δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta Q_i - \overline{\Delta Q})^2}{n-2}} \tag{2-40}$$

όπου ΔQi είναι το μέτρο της διαφοράς μεταξύ της παρατηρημένης (μετρημένης) παροχής, Qi, και της υπολογισμένης τιμής της παροχής από την καμπύλη σταθμης - παροχής, Qc, και μπορεί να εκφραστεί σε απόλυτες τιμές ή σε ποσοστό της παρατηρημένης τιμής ως εξής:

$$\Delta Q_i = Q_i - Q_c \tag{2-41}$$

και

$$\Delta Q_i = \frac{Q_i - Q_c}{Q_i} x100\% \tag{2-42}$$

Επίσης για κάθε συγκεκριμένη τιμή της στάθμης μπορούν να υπολογιστούν τα όρια εμπιστοσύνης 95% από την ακόλουθη σχέση:

$$S_{mr} = S_e \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(P_i - \bar{P})^2}{{S_P}^2}} \tag{2-43}$$

$$CL_{95\%} = \pm t\, S_{mr}$$

όπου S_{mr} είναι το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής (standard error of the mean relationship), και

t είναι η τιμή της κατανομής Student για πιθανότητα 95%

$P_i = \ln(h_i - h_o)$

S_P^2 είναι η διακύμανση του P

$CL_{95\%}$ είναι τα όρια εμπιστοσύνης 95%

Με τη βοήθεια της προηγούμενης σχέσης μπορούν να χαραχτούν τα όρια εμπιστοσύνης και να ελεγθεί εάν οι υδρομετρήσεις βρίσκονται μέσα στη ζώνη που αυτά ορίζουν. Ένας ακόμα στατιστικός έλεγχος που μπορεί να γίνει είναι να εξεταστεί ο αριθμός των θετικών και αρνητικών αποκλίσεων από την καμπύλη (δοκιμή ελέγχου αποκλίσεων). Εάν,

n ο συνολικός αριθμός των σημείων

n_1 ο αριθμός των θετικών αποκλίσεων

p η πιθανότητα της απόκλισης να είναι θετική (= 0.5)

Εξετάζεται η ανηγμένη μεταβλητή τ με την κανονική κατανομή. Η τ ορίζεται ως εξής

$$\tau = \frac{|n - n_1| - 0.5}{\sqrt{np(1-p)}} \qquad (2\text{-}44)$$

Η τιμή του τ συγκρίνεται με την κρίσιμη τιμή του t-Student, για επίπεδο εμπιστοσύνης 5% και για βαθμούς ελευθερίας ίσους με το πλήθος των παρατηρήσεων (Καββαδίας, 1993). Αν είναι μικρότερη από την κρίσιμη τιμή τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι τα δεδομένα δεν παρουσιάζουν κάποια μεροληψία (bias).

2.6 ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ – ΦΩΤΟΕΡΜΗΝΕΙΑ

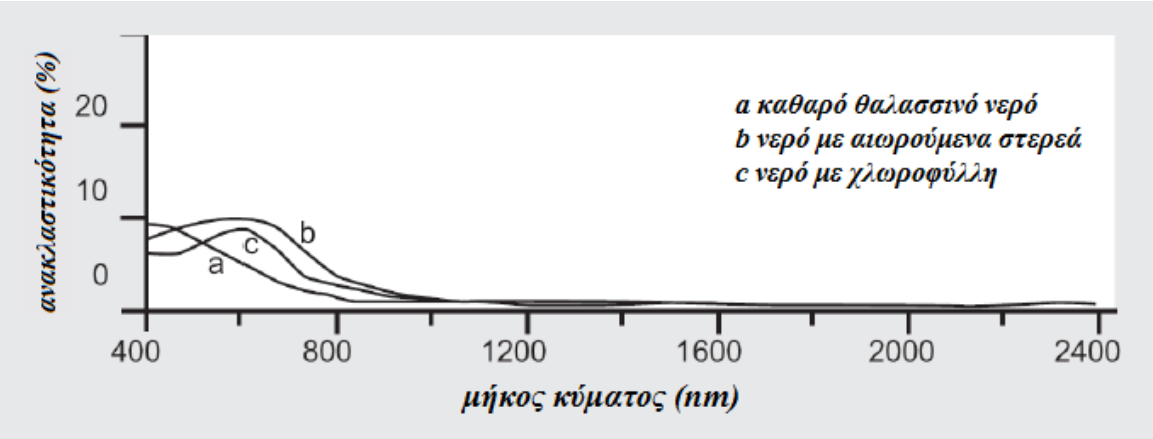
Παρακάτω θα γίνει μια σύντομη υπενθύμιση των βασικών αρχών της φωτοερμηνείας δορυφορικών εικόνων του θαλασσινού νερού, καθώς η βασική θεωρία της τηλεπισκόπησης θεωρείται γνωστή. Επίσης, γίνεται πιο αναλυτική αναφορά στις μεθόδους ατμοσφαιρικής διόρθωσης και στην σύγκρισή τους.

2.6.1 Φασματικά χαρακτηριστικά του θαλασσινού νερού

Η ανακλαστικότητα του καθαρού θαλασσινού νερού είναι γενικά χαμηλή. Η μέγιστη ανακλαστικότητά του σημειώνεται στην μπλέ περιοχή του ορατού φάσματος και μειώνεται

καθώς το μήκος κύματος αυξάνεται. Για την διάκριση στεριάς - θάλασσας η καλύτερη περιοχή είναι το εγγύς και το μέσο υπέρυθρο (0.74 - 2.50 μm). Σε αυτές τις περιοχές του φάσματος τα θαλάσσια σώματα εμφανίζονται πολύ σκούρα, σχεδόν μαύρα, καθώς απορροφούν όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία (Μηλιαρέσης, 2006).

Οι οπτικές ιδιότητες του νερού εξαρτώνται από την παρουσία και τη συγκέντρωση διαλυμένων ή σε αιώρηση υλικών, οιασδήποτε προέλευσης καθώς και από το βάθος του νερού (Σχ.2-23,2-24).

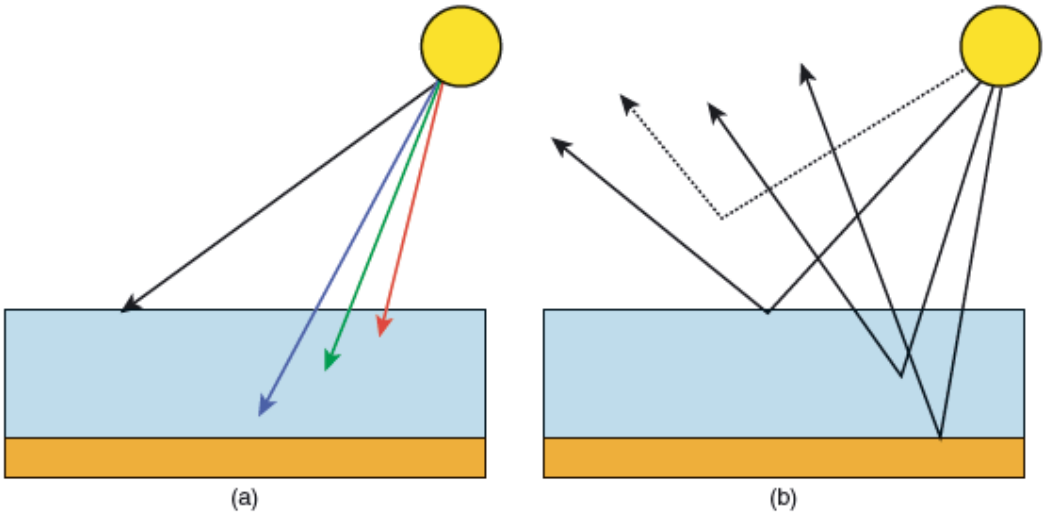


Σχήμα 2-23 Τυπικά αποτελέσματα παρουσίας αιωρούμενων ανόργανων στερεών και χλωροφύλλης στο θαλασσινό νερό. Πηγη Principles of Remote Sensing, 2009, Tempfi et al -Eds.

Η παρουσία διαλυμένου ή/και αιωρούμενου υλικού, είτε οργανικής προέλευσης είτε ανόργανης, έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή των ιδιοτήτων απορρόφησης και σκέδασης του νερού. Για παράδειγμα, το καθαρό θαλασσινό νερό αποτελείται από καθαρό νερό και διαλυμένα άλατα που συνιστούν περίπου το 35‰ (επι τοις χιλίοις) του βάρους του. Αυτά τα άλατα αυξάνουν τη σκέδαση του φωτός περίπου 30% πάνω από αυτή του καθαρού γλυκού νερού. Στο ορατό φάσμα δεν έχουν επίδραση στην απορρόφηση της ακτινοβολίας αλλά είναι πιθανόν να αυξάνουν την απορρόφηση στο υπεριώδες και σίγουρα την αυξάνουν στα πολύ μεγάλα μήκη κύματος (>0.1 m).

Τα αιωρούμενα σωματίδια στις θάλασσες έχουν προέλευση οργανική ή ανόργανη. Οργανικής προέλευσης είναι οι ιοί, τα βακτήρια, τα οργανικά κολλοειδή, το φυτοπλανκτόν, οργανικά κατάλοιπα (organic detritus) καθώς και μεγαλύτερα σωματίδια όπως το ζωοπλανκτόν. Τα ανόργανα σωματίδια συνήθως αποτελούνται από λεπτή χαλαζιακή άμμο, αργιλικά ορυκτά η οξείδια μετάλλων των οποίων το μέγεθος ποικίλλει από λιγότερο από 1 μm έως μερικές δεκάδες μm. Αναγνωρίζεται γενικά ότι, κατά περίπτωση, τα ανόργανα σωματίδια έχουν μεγαλύτερη επίδραση στις οπτικές ιδιότητες του θαλασσινού νερού στα παράκτια ύδατα.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-23, η παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων προκαλεί την σκέδαση της ακτινοβολίας και ο βαθμός της σκέδασης είναι ανάλογος της συγκέντρωσης των στερεών, του μεγέθους τους αλλά και του χρώματός τους. Στο μεγαλύτερο εύρος των παρατηρούμενων χαμηλών ή μεσαίων συγκεντρώσεων έχει παρατηρηθεί μια γραμμική σχέση μεταξύ του αιωρούμενου υλικού και της ανακλαστικότητας στο ορατό και το υπέρυθρο, αν και η σχέση αυτή γίνεται μη γραμμική σε μεγάλες συγκεντρώσεις. Επιπλέον, η κορυφή της καμπύλης της ανακλαστικότητας μετακινείται προοδευτικά προς μεγαλύτερα μήκη κύματος καθώς οι συγκεντρώσεις αυξάνονται, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα κατά την εκτίμηση των συγκεντρώσεων του ιζήματος από δορυφορικά δεδομένα. Μια άλλη πηγή σφάλματος μπορεί να είναι η μη ομοιόμορφη κατανομή τους στο χώρο (patchiness).



Σχήμα 2-24 Η διείσδυση του ηλιακού φωτός στο νερό εξαρτάται από το μήκος κύματος. Η σχηματική απεικόνιση αφορά μια περίπτωση καθαρού και ήρεμου νερού. Αριστερά (a): Η μαύρη ακτίνα στα αριστερά αντιπροσωπεύει την ακτινοβολία στα μεγαλύτερα μήκη κύματος (υπέρυθρο+) η οποία απορροφάται εντελώς στα πρώτα λίγα εκατοστά. Αντίθετα, στο μπλέ η διείσδυση μπορεί να φτάσει εως μερικές δεκάδες μέτρα. Στα δεξιά, (b): από δεξιά στα αριστερά αναπαριστάται η ανάκλαση των ηλιακών ακτίνων: ανάκλαση από τον πυθμένα (σε ρηχά νερά), ανάκλαση από τα αιωρούμενα/διαλυμένα σωματίδια (που ονομάζεται και volume reflectance) και επιφανειακή ανάκλαση. Με την διακεκομένη γραμμή συμβολίζεται η ανάκλαση / σκέδαση από την ατμόσφαιρα (ακτινοβολία ατμοσφαιρικής διαδρομής). Πηγή Principles of Remote Sensing, 2009, Tempfi et al -Eds.

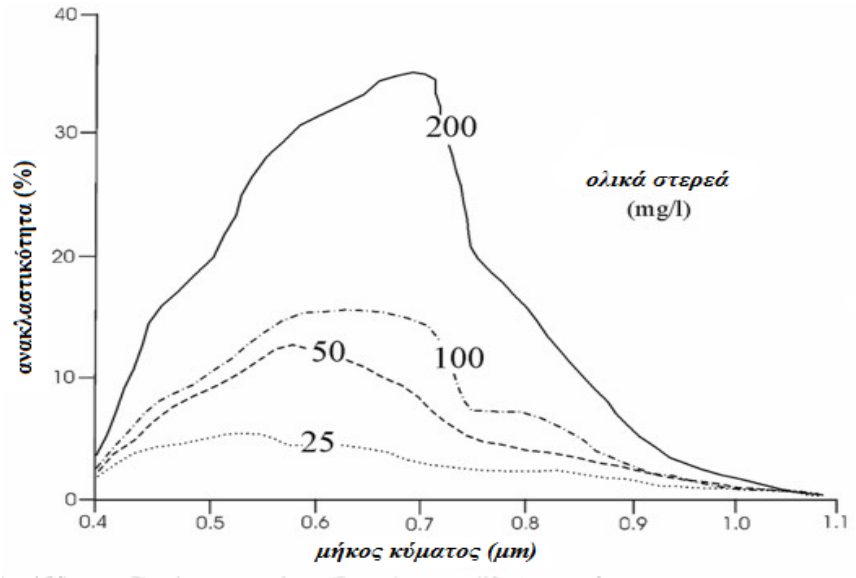
2.6.2 Δείκτες αιωρούμενου ιζήματος

Με βάση τα φασματικά χαρακτηριστικά του νερού και με σκοπό τον εντοπισμό, τη χαρτογράφηση και την ποσοτικοποίηση του περιεχόμενου ιζήματος στα παράκτια νερά, έχουν αναπτυχθεί και προταθεί από ερευνητές διάφοροι δείκτες, που συλλογικά θα

αποκαλούμε δείκτες αιωρούμενου ιζήματος. Οι δείκτες αυτοί είναι στη λογική των κανονικοποιημένων δεικτών που, όπως και ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης NDVI, θεωρητικά παίρνουν τιμές από -1 έως +1. Η απόδοση της εφαρμογής του κάθε δείκτη έχει να κάνει με την ευαισθησία του δέκτη. Κάποιοι από τους δείκτες της βιβλιογραφίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-11.

Πίνακας 2-11 Κάποιοι από τους συνηθέστερους δείκτες / λόγους αιωρούμενου ιζήματος που έχουν κατά καιρούς προταθεί (ρ, ανακλαστικότητα).

α/α	*Ονομασία*	*Φόρμουλα*	*Αναφορά - Παρατηρήσεις*
1	NDSSI	$\frac{\rho_{blue} - \rho_{nir}}{\rho_{blue} + \rho_{nir}}$	*Azad Hossain et al. , 2006*
2	NSMI	$\frac{\rho_{red} + \rho_{green} - \rho_{blue}}{\rho_{red} + \rho_{green} + \rho_{blue}}$	*Luis Montalvo , 2012*
3	NSWI	$\frac{\rho_{red} - \rho_{nir}}{\rho_{red} + \rho_{nir}}$	
4	green2blue	$\frac{\rho_{green}}{\rho_{blue}}$	λόγος των καναλιών πράσινο προς μπλέ
5	red2nir	$\frac{\rho_{red}}{\rho_{nir}}$	λόγος των καναλιών κόκκινο προς εγγύς υπερυθρο



Σχήμα 2-25 Φασματικές καμπύλες νερού με διαφορετικές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών. Η ανακλαστικότητα του νερού φαίνεται ανάλογη με την ποσότητα στερεών που περιέχει (από την ιστοσελίδα http://www.geol-amu.org/notes/m1r-1-8.htm, Spectral Reflectance of Land Covers, Farooq S. 2011).

Όπως φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα 2-25, η ύπαρξη ιζήματος αυξάνει την ανακλαστικότητα του νερού κυρίως στην περιοχή του πράσινου (κανάλι 4 του MODIS: 545 - 565 μm) και του κόκκινου (κανάλι 1 του MODIS: 620 – 670 μm) και επίσης στην περιοχή του εγγυς υπέρυθρου. Ενώ σε μικρές τιμές συγκέντρωσης η κορυφή είναι αμβλεία πάνω από την περιοχή κοκκινου – υπέρυθρου, όσο αυξάνεται η συγκέντρωση τόσο η κορυφή της καμπύλης ανακλαστικότητας μετακινείται προς το εγγύς υπέρυθρο. Έτσι η διαφορά υπέρυθρου μείον κόκκινου μπορεί να χρησιμεύσει σαν δείκτης «νέου ιζήματος». Τα μεγαλύτερα από 1.1 μm. μήκη κύματος δεν επηρεάζονται, ενώ η κορυφή της καμπύλης μετακινείται προς μεγαλύτερα μήκη καθώς η περιεκτικότητα αυξάνεται, φτάνοντας μέχρι το εγγύς υπέρυθρο.

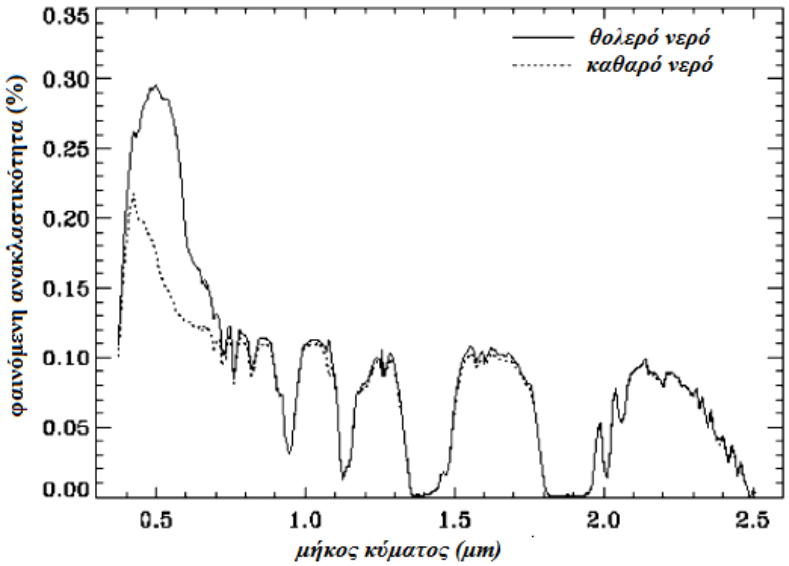
2.6.3 Μάσκες αιωρούμενου ιζήματος

Οι μάσκες, σε αντίθεση με τους κανονικοποιημένους δείκτες που παίρνουν όλες τις τιμές από -1 έως +1, έχουν τιμές 0 ή 1 και χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπηση για να ορίσουν περιοχές ενδιαφέροντος. Ένα παράδειγμα είναι η μάσκα στεριάς-θάλασσας. Αν ενδιαφέρει η θάλασσα αποδίδεται η τιμή 1 στη θάλασσα και 0 στη στεριά, αν ενδιαφέρει η στεριά γίνεται το αντίθετο. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι μάσκες προέρχονται από κατωφλίωση στις τιμές κάποιου καναλιού ή συνδυασμού καναλιών. Οι εκφράσεις συντάσσονται με λογικούς τελεστές. Για παράδειγμα, η έκφραση *green> 0.2 and red≥ 0.4,* σε κάποιο σχετικό λογισμικό,θα δώσει την τιμή 1 στα εικονοστοιχεία που έχουν τιμές στο κόκκινο μεγαλύτερες από την τιμή 0.2 και τιμές στο πράσινο μεγαλύτερες ή ίσες από 0.4 και 0 στα υπόλοιπα. Οι τιμές 0.2 και 0.4 είναι οι χρησιμοποιούμενες τιμές – κατώφλια.

Η παρακάτω ανάπτυξη που χρησίμευσε σαν πρότυπο για την ανάλυση που πραγματοποιηθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, βασίζεται στην εργασία *"Remote Sensing of Suspended Sediments and Shallow Coastal Waters"*, Li R. et al, 2003 (IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing).

Κίνητρο των συγγραφέων ήταν η κατασκευή μάσκας για τα παράκτια ύδατα με σκοπό να βελτιωθεί ο αλγόριθμος ανίχνευσης αεροζόλ πάνω από τους ωκεανούς από τον δέκτη MODIS. Ο αλγόριθμος ανίχνευσης αεροζόλ χρησιμοποιούσε 6 κανάλια του MODIS με κέντρα στα 0.55-, 0.66-, 0.86-, 1.24-, 1.64- και 2.1 μm (κανάλια 4,1,2,5,6 και 7) προκειμένου να εξαγάγει μοντέλα και οπτικά βάθη του αεροζόλ. Ο αλγόριθμος θεωρούσε ότι στα καθαρά νερά η ανακλαστικότητα στα μήκη 0.86-, 1.24-, 1.64- και 2.1 μm είναι

μηδενική ενώ η ανακλαστικότητα στα 0.55μm και 0.66μm είναι τυπική των καθαρών νερών τύπου 1[6]. Έτσι, τιμές πάνω από τις αναμενόμενες σε αυτά τα κανάλια ερμηνεύονταν ως αύξηση του οπτικού βάθους του αεροζόλ. Πολύ ρηχά παράκτια νερά αλλά και νερά με μεγάλη περιεκτικότητα σε αιωρούμενο υλικό έδιναν τέτοιες τιμές και ερμηνεύονταν λανθασμένα σαν αεροζόλ. Η έρευνα συμπεριέλαβε μελέτη της φαινόμενης ανακλαστικότητας[7] με αναλύσεις από μετρήσεις του AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer), Σχήμα 2-26.



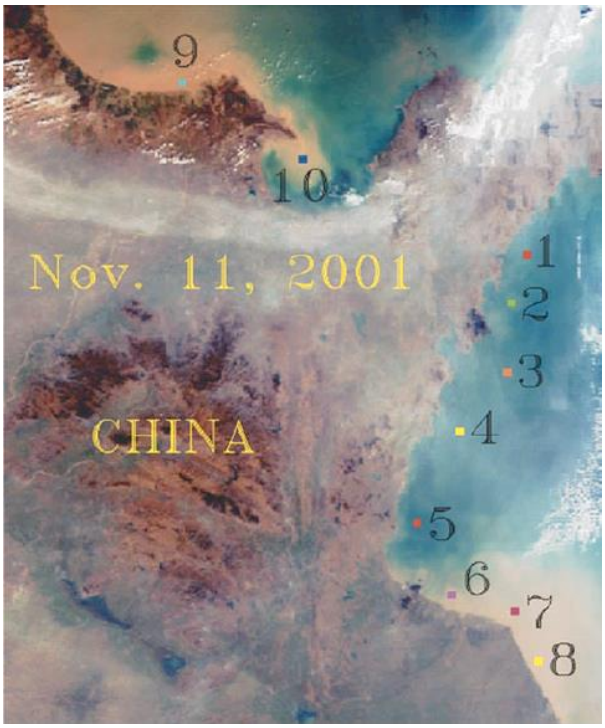
Σχήμα 2-26 Παράδειγμα φάσματος φαινόμενης ανακλαστικότητας (που μετρήθηκε με το AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer) από το αεροσκάφος της NASA, ER-2 σε υψόμετρο 20 km πάνω από μια θαλάσσια έκταση με μεγάλη θολερότητα (συνεχής γραμμή) και μια άλλη κοντινή περιοχή με σχετικά πιο καθαρά νερά (εστιγμένη γραμμή). Οι μετρήσεις έγιναν κοντά στο αεροδρόμιο της Χονολουλού στη Χαβάη, τον Απρίλιο του 2000, πηγη Li R. et al, 2003.

Συμπερασματικά, η έρευνα καταλήγει στο ότι οι μετρήσεις του MODIS πάνω από τη θάλασσα στα μήκη 0.47-, 1.24-, 1.64- και 2.1 μm (το μπλέ και τα τριά SWIR, short wave infrared) επηρεάζονται κυρίως από την σκέδαση από το αεροζόλ και την απορρόφηση και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διατύπωση ενός φασματικού «νόμου» με τη μορφή σχέσης δύναμης. Οι μετρήσεις στην περιοχή 0.55÷0.86 μm επηρεάζονται τόσο από το αεροζόλ όσο και από την ύπαρξη αιωρούμενου ιζήματος. Επομένως, κάθε τιμή στην

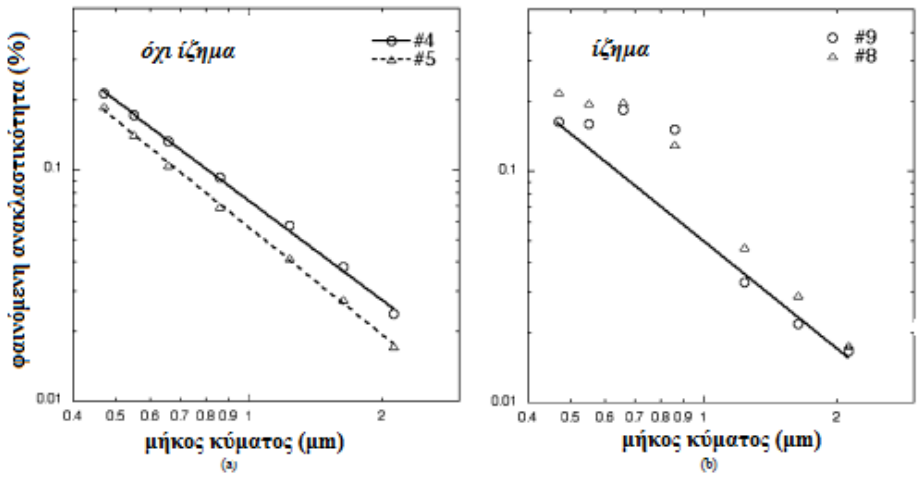
[6] Στην ορολογία της ωκεάνιας τηλεπισκόπησης διαχωρίζονται τα νερά σε δύο τύπους (Cases), 1 και 2. Σύμφωνα με τους Morel και Prieur (1977) που εισήγαγαν τη διάκριση «…δύο ακραίες περιπτώσεις μπορούν να αναγνωριστούν και να διαχωριστούν. Η περίπτωση 1 είναι αυτή με συγκέντρωση χλωροφύλλης μεγάλη σε σχέση με άλλα σωματίδια…. σε αντίθεση, στην περίπτωση 2 τα ανόργανα σωματίδια κυριαρχούν..… Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει διαλυμένη κίτρινη ουσία (yellow substance) σε διάφορες ποσότητες… Μια ιδανική περίπτωση 1 θα ήταν μια καθαρή καλλιέργεια φυτοπλανκτόν και μια ιδανική περίπτωση 2 θα ήταν αιωρούμενα ανόργανα σωματίδια με μηδενική συγκέντρωση χρωστικών ουσιών.

[7] φαινόμενη ανακλαστικότητα (apparent reflectance) είναι η ανακλαστικότητα η μη διορθωμένη για τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Ισούται με την ανακλαστικότητα του στόχου συν αυτή της ατμόσφαιρας.

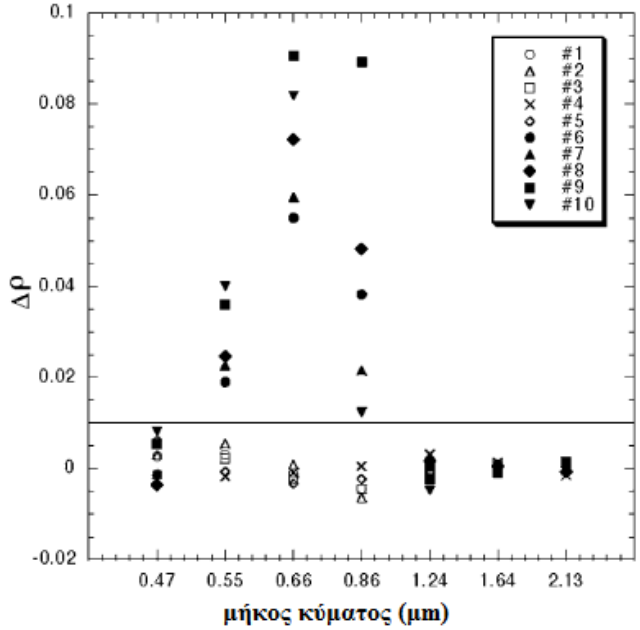
περιοχή αυτή πάνω από την τιμή της εξίσωσης παλινδρόμησης, μπορεί να θεωρηθεί ότι οφείλεται στην ύπαρξη σημαντικών ποσοτήτων αιωρούμενων στερεών στο νερό. Επόμενο βήμα είναι η επιλογή αντιπροσωπευτικών σημείων πάνω σε εικόνες του MODIS και η προσαρμογή μιας ευθείας τάσης που αντιπροσωπεύει το φασματικό «νόμο». Η διαδικασία παρουσιάζεται στα Σχήματα 2-27 έως 2-29, ενώ στο Σχήμα 2-30 φαίνεται η απόδοση της μάσκας σε διαφορετικές θαλάσσιες περιοχές του πλανήτη.



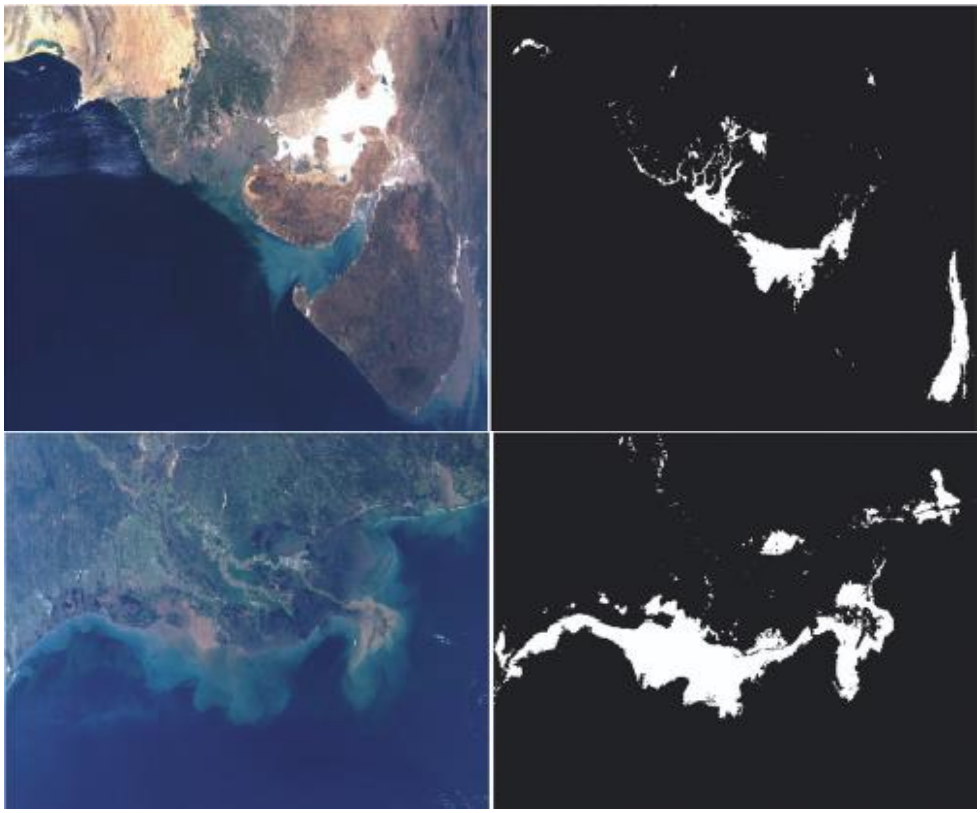
Σχήμα 2-27 Σκηνή από τον MODIS πάνω από τις ανατολικές ακτές της Κίνας το Νοέμβριο του 2001. Τα σημεία 1-5 είναι περιοχές χαμηλού ιζήματος ενώ τα σημεία 6-10 είναι περιοχές μεγάλης περιεκτικότητας σε ίζημα. Η ύπαρξη αεροζόλ στη σκηνή μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή. πηγη Li R. et al, 2003.



Σχήμα 2-28 (a) Διπλό λογαριθμικό διάγραμμα της φαινόμενης ανακλαστικότητας συναρτήσει του μήκους κύματος για 'καθαρές' και 'θολερές' περιοχές που αντιστοιχούν στα σημεία της παραπάνω σκηνής. Η γραμμή τάσης στο (b) είναι ο «νόμος» και χαράχτηκε από την περιοχή του σημείου 9 από τις τιμές ανακλαστικότητας στα μήκη κύματος 0.47-, 1.24-, 1.64- και 2.13-μm. πηγη Li R. et al, 2003.



Σχήμα 2-29 Διαφορές φαινόμενης ανακλαστικότητας, Δρ, για τα μήκη κύματος 0.47-, 0.55–, 0.66-, και 2.13 μmγια όλα τα επιλεγμένα σημεία της σκηνής του σχήματος 4.10. Η διαφορά ανακλαστικότητας υπολογίζεται ως η διαφορά της μετρηθείσας ανακλαστικότητας από την τιμή που υπολογίζεται από τη σχέση δύναμης (το «νόμο») για το συγκεκριμένο μήκος κύματος. Η γραμμή στο 0.01 είναι το κατώφλι πάνω από το οποίο χαρακτηρίζονται τα εικονοστοιχεία σαν περιοχές υψηλής συγκέντρωσης αιωρούμενων για τη δημιουργία της μάσκας. πηγη Li R. et al, 2003.



Σχήμα 2-30 Αποτελέσματα του αλγορίθμου της μάσκας αιωρούμενου ιζήματος – ρηχών νερών σε δύο περιοχές. Πάνω: Θάλασσα της Αραβίας, 28 Οκτώβρίου 2001. Κάτω: Δέλτα του Μισσισσιπή, 5 Μαρτίου 2001. Η μάσκα φαίνεται αρκετά επιτυχής στην οριοθέτηση των περιοχών με αιωρούμενα σωματίδια. πηγη Li R. et al, 2003.

2.6.4 Το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης

Ένα τμήμα των πρωτογενών δορυφορικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην έρευνα (MOD02), αντιπροσωπεύουν, μετά το μετασχηματισμό τους από DN (ραδιομετρική βαθμονόμηση), ακτινοβολίες / ανακλαστικότητες στην κορυφή της ατμόσφαιρας (στο δέκτη). Στη γενική περίπτωση απαιτούν διόρθωση για την ακτινοβολία της ατμοσφαιρικής διαδρομής και για την σκέδαση/απορρόφηση από αεροζόλ, έτσι ώστε να μετασχηματιστούν σε ακτινοβολίες / ανακλαστικότητες στο επίπεδο του εδάφους (ή της θάλασσας). Αυτή η διαδικασία ονομάζεται *απόλυτη ατμοσφαιρική διόρθωση* και απαιτεί τη γνώση των συνθηκών της ατμόσφαιρας και πολύ μεγάλη υπολογιστική προσπάθεια, αν και υπάρχουν κάποιες μέθοδοι σχετικά απλής ατμοσφαιρικής διόρθωσης (Tempfi et al -Eds-, 2009). Ωστόσο, πέραν της απόλυτης ατμοσφαιρικής διόρθωσης υπάρχει και η *σχετική ατμοσφαιρική διόρθωση* που θα περιγραφεί με λεπτομέρεια παρακάτω, μιας και είναι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε.

2.6.5 Σχετική ατμοσφαιρική διόρθωση

Οι μέθοδοι σχετικής ατμοσφαιρικής διόρθωσης αποφεύγουν κάθε είδους εκτίμηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Βασίζονται στην υπόθεση ότι για ένα φασματικό κανάλι η σχέση μεταξύ της ακτινοβολίας στο δέκτη και αυτής στο έδαφος ακολουθεί μια γραμμική σχέση, την ίδια για όλη την ποικιλία των γήινων χαρακτηριστικών που είναι παρόντα στην εικόνα. Αυτή η υπόθεση είναι μια προσέγγιση στην πραγματικότητα, αλλά αρκετά ακριβής για την αντιμετώπιση πολλών προβλημάτων των πρακτικών εφαρμογών όπου υπάρχουν περισσότερο σημαντικές πηγές σφάλματος. Υπάρχουν δύο μέθοδοι σχετικής ατμοσφαιρικής διόρθωσης (Tempfi et al -Eds-, 2009):

Δύο μετρήσεις ανακλαστικότητας**.** Το αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου είναι μια απόλυτα διορθωμένη ατμοσφαιρικά εικόνα, και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μόνη της για εντοπισμό αλλαγών ή εκτίμηση παραμέτρων ή ποσοτικοποίηση ροών. ‘Απόλυτα’ σημαίνει ότι η εικόνα που προκύπτει από τη διαδικασία διόρθωσης έχει φυσικές μονάδες και οι υπολογισμένες ακτινοβολίες του εδάφους είναι συμβατές με τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί την χρήση φορητού ραδιόμετρου ικανού να μετρήσει στα ίδια μήκη κύματος που έχει και το δορυφορικό κανάλι. Πριν από τη διάβαση του δορυφόρου πρέπει να έχουν επιλεγεί δύο περιοχές, μία φωτεινή και μία σκοτεινή, για δειγματοληψία με το ραδιόμετρο (σημεία ελέγχου). Οι

περιοχές πρέπει να είναι ομοιόμορφης κάλυψης, να έχουν έκταση 2-3 εικονοστοιχείων και να είναι αδιαμφισβήτητα αναγνωρίσιμες στην εικόνα. Στη διάρκεια διάβασης του δορυφόρου οι περιοχές αυτές μετρούνται σε όλα τα μήκη κύματος με το ραδιόμετρο. Μόλις αποκτηθεί η εικόνα από το δορυφόρο και μετά την ραδιομετρική της βαθμονόμηση, διαβάζεται η ακτινοβολία σε κάθε σημείου ελέγχου. Με βάση αυτές τις τιμές και τις μετρήσεις στα σημεία ελέγχου προκύπτει μια γραμμική σχέση που εφαρμόζεται κατόπιν σε όλα τα εικονοστοιχεία. Το αποτέλεσμα είναι μια εικόνα με ακτινοβολίες στο επίπεδο του εδάφους.

Δυό επιφάνειες αναφοράς. Το αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου είναι μια εικόνα με ανακλαστικότητες συγκρίσιμες με την ατμόσφαιρα (τις ατμοσφαιρικές συνθήκες) μιας εικόνας που έχει ληφθεί σε μια προηγούμενη ημερομηνία. Με αυτή τη μέθοδο δεν παράγονται απόλυτες τιμές ακτινοβολίας σε καμία από τις δύο εικόνες και μόνο συγκριτικά αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν. Η μέθοδος αυτή, που επίσης εφαρμόζεται για κάθε κανάλι ξεχωριστά, είναι ικανή να παράξει μια ομοιόμορφη βάση σύγκρισης προκειμένου να μελετηθούν, για παράδειγμα, αλλαγές στη χρήση γης ή παράμετροι όπως δείκτες κά.

Η μέθοδος βασίζεται στην ύπαρξη τουλάχιστον δύο περιοχών (σημείων ελέγχου), μιάς φωτεινής και μιας σκοτεινής, με κατα το δυνατόν ομοιόμορφη κάλυψη. Οι περιοχές αυτές πρέπει να διατηρούν σταθερές τις ανακλαστικές τους ιδιότητες στο χρόνο και θα πρέπει να έχουν έκταση τουλάχιστον ίση με 2-3 εικονοστοιχεία. Φωτεινά σημεία ελέγχου μπορεί να είναι για παράδειγμα αεροδρόμια, μεγάλες αμμώδεις παραλιακές ζώνες, νταμάρια και λατομεία, ενώ σκοτεινά σημεία ελέγχου μπορούν να αναζητηθούν σε βαθειές λίμνες ή στη θάλασσα. Υποτίθεται ότι οι περιοχές αυτές διατηρούν αμετάβλητη την ανακλαστικότητά τους εφόσον η κάλυψή τους δεν μεταβάλλεται με το χρόνο. Κάθε διαφορά στην ανακλαστικότητα στα σημεία αυτά μεταξύ δύο εικόνων που έχουν διαφορετική ημερομηνία λήψης μπορεί να αποδοθεί μόνο στην επίδραση της ατμόσφαιρας.

Η διαδικασία διόρθωσης ορίζει μία εικόνα σαν εικόνα αναφοράς ή master image και όλες τις υπόλοιπες σαν εικόνες- στόχους ή slave images. Η ανακλαστικότητα ενός «φωτοσταθερού[8]» εικονοστοιχείου στην εικόνα αναφοράς την ημερομηνία 1 ειναι ρ_M και η ανακλαστικότητα του ίδιου εικονοστοιχείου την ημερομηνία 2 στην εικόνα-στόχο είναι ρ_S. Εάν οι ατμόσφαιρικές συνθήκες ήταν ίδιες τότε $\rho_M = \rho_S$. Εάν όχι, η διαφορά στην

[8] Αν και η ορολογία του φωτοσταθερού σημείου ανήκει στη Φωτογραμμετρία και αναφέρεται σε σημεία σταθερά στο χώρο, βρίσκουμε ότι ταιριάζει ιδιαίτερα και σε αυτή την περίπτωση, μόνο που εδώ η «σταθερότητα» αναφέρεται στις ανακλαστικές ιδιότητες του σημείου.

ανακλαστικότητα που οφείλεται στη διαφορετική ατμόσφαιρα μετριέται ως $\Delta\rho=\rho_M - \rho_S$. Αν θεωρήσουμε δύο σημεία, ένα φωτεινό (bright) και ένα σκοτεινό (dark) θα έχουμε τις διαφορές $\Delta\rho_b$ και $\Delta\rho_d$. Από αυτά τα δύο 'αμετάβλητα' εικονοστοιχεία προκύπτει μια γραμμική εξίσωση της μορφής $\Delta\rho = \alpha * \rho_S + \beta$ με την οποία κατόπιν μετασχηματίζεται όλη η εικόνα- στόχος έτσι ώστε οι ανακλαστικότητες στα φωτοσταθερά σημεία να είναι ίδιες στις δύο εικόνες, την αναφορά και το στόχο. Το αποτέλεσμα θα είναι μια εικόνα-στόχος που έχει την ίδια ατμόσφαιρα με την εικόνα αναφοράς. Με άλλα λόγια, η ατμόσφαιρα της εικόνας αναφοράς επιβλήθηκε τεχνητά σε όλες τις εικόνες- στόχους, έτσι ώστε αυτές πλέον να μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους, εφόσον έχουν πλέον την ίδια «ατμόσφαιρα».

2.6.6 Σύγκριση μεταξύ των μεθόδων ατμοσφαιρικής διόρθωσης

Η μέθοδος σχετικής ατμοσφαιρικής διόρθωσης που ονομάζεται και σχετική ραδιομετρική κανονικοποίηση (Relative Radiometric Normalization, RRN), βρίσκει εφαρμογές σε σύγκριση εικόνων διαφορετικών ημερομηνιών λήψης (multi temporal images) κυρίως για σκοπούς ανίχνευσης μεταβολών (change detection). Η διαδικασία όπως αναφέραμε, βασίζεται στον εντοπισμό μέσα στην εικόνα σημείων των οποίων οι ανακλαστικές ιδιότητες μένουν αμετάβλητες στο χρόνο, και τα οποία χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την κανονικοποίηση των εικόνων-στόχων. Αυτά τα σημεία ονομάζονται ψευδο-σταθερά χαρακτηριστικά (Pseudo Invariant Features, PIF). Σαν παραλλαγή αυτής της μεθόδου αναφέρεται και η μέθοδος «απόλυτης κανονικοποίησης» (absolute normalization) κατά την οποία η εικόνα αναφοράς διορθώνεται ατμοσφαιρικά προτού χρησιμοποιηθεί για τον μετασχηματισμό των εικόνων-στόχων. Πλεονέκτημα της παραλλαγής αυτής είναι ότι όλη η χρονοσειρά των εικόνων αποκτά φυσικές μονάδες ακτινοβολίας.

Πέραν του παραδοσιακού τρόπου εντοπισμού των φωτοσταθερών αυτών σημείων (περιοχών στη πραγματικότητα) που η επιλογή τους γίνεται από τον φωτοερμηνευτή, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι αυτόματης επιλογής τους. Η συνηθέστερη μέθοδος αυτόματης επιλογής των ψευδο-φωτοσταθερών σημείων ονομάζεται multivariate alteration detection (MAD) και βασίζεται στη στατιστική μεθοδολογία της Ανάλυσης Κανονικοποιημένης Συσχέτισης (Canonical Correlation Analysis, CCA).

Σχετικές συγκριτικές εργασίες έχουν δείξει την ανωτερότητα της σχετικής ραδιομετρικής κανονικοποίησης σε σχέση με την απόλυτη διόρθωση, τουλάχιστον όταν ο

σκοπός της μελέτης είναι η ανίχνευση αλλαγών σε χρονοσειρές εικόνων, όπως είναι και η περίπτωση της παρούσας έρευνας. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε δύο τέτοιες εργασίες.

Οι Schroeder T. et al. (2006) έκαναν σύγκριση 5 μεθόδων ατμοσφαιρικής διόρθωσης σε εικόνες LandSat, εκ των οποίων 2 απόλυτης και 3 σχετικής. Αναφέρουν στην εισαγωγή: «*Σύμφωνα με τη θεωρία η πλήρης απόλυτη ατμοσφαιρική διόρθωση των εικόνων μιας χρονοσειράς θα πρέπει να ελαχιστοποιεί τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις με αποτέλεσμα μια σειρά εικόνων που θα εμφανίζονται πιο ομοιογενείς στα φασματικά τους χαρακτηριστικά σε σχέση με τις μη διορθωμένες εικόνες. Διαψεύδοντας αυτή τη θεωρία, παρουσιάζουμε εδώ στοιχεία που δείχνουν με ποιό τρόπο μέθοδοι απόλυτης ατμοσφαιρικής διόρθωσης .... στην πραγματικότητα μετατρέπουν την χρονοσειρά των εικόνων σε εικόνες λιγότερο ομοιογενείς μεταξύ τους*».

Οι Bernardo N. (2016) επιχειρούν σύγκριση μεταξύ απολύτων και σχετικών μεθόδων ατμοσφαιρικής διόρθωσης σε εικόνες LandSat-8 με σκοπό την εκτίμηση των συγκεντρώσεων αιωρούμενου υλικού (TSM) στον ταμιευτήρα Barra Bonita στην πολιτεία του Sao Paulo στη Βραζιλία. Τα σφάλματα από τις διορθώσεις εκτιμήθηκαν με βάση μετρήσεις των συγκεντρώσεων in situ και τα αποτελέσματα κυμάνθηκαν από 11.5% έως 133.45% RMSE για την απόλυτη διόρθωση και από 12.5% έως 49.94% RMSE για τις σχετικές διορθώσεις. Καταλήγουν διαπιστώνοντας «*Για τη βελτίωση των εκτιμήσεων ανακλαστικότητας από μια δορυφορική εικόνα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι σχετικής κανονικοποίησης (διόρθωσης) που δίνουν καλύτερα αποτελέσματα από τις μεθόδους απόλυτης διόρθωσης. Η διαδικασία κανονικοποίησης .. απέδωσε ορθότερες εκτιμήσεις συγκεντρώσεων αιωρούμενου υλικού για όλα τα κανάλια*».

Τα πλεονεκτήματα της σχετικής ατμοσφαιρικής διόρθωσης σε σχέση με την απόλυτη για τους σκοπούς της παρούσας έρευνας είναι και ο λόγος που έγινε επιλογή και των προϊόντων επιπέδου 1B και όχι μόνον αυτών του επιπέδου 3, όπως το προϊόν MOD09 που είναι ατμοσφαιρικά διορθωμένο, παρόλο που η επιλογή αυτή είχε σαν αποτέλεσμα ασύγκριτα μεγαλύτερο φόρτο εργασίας.

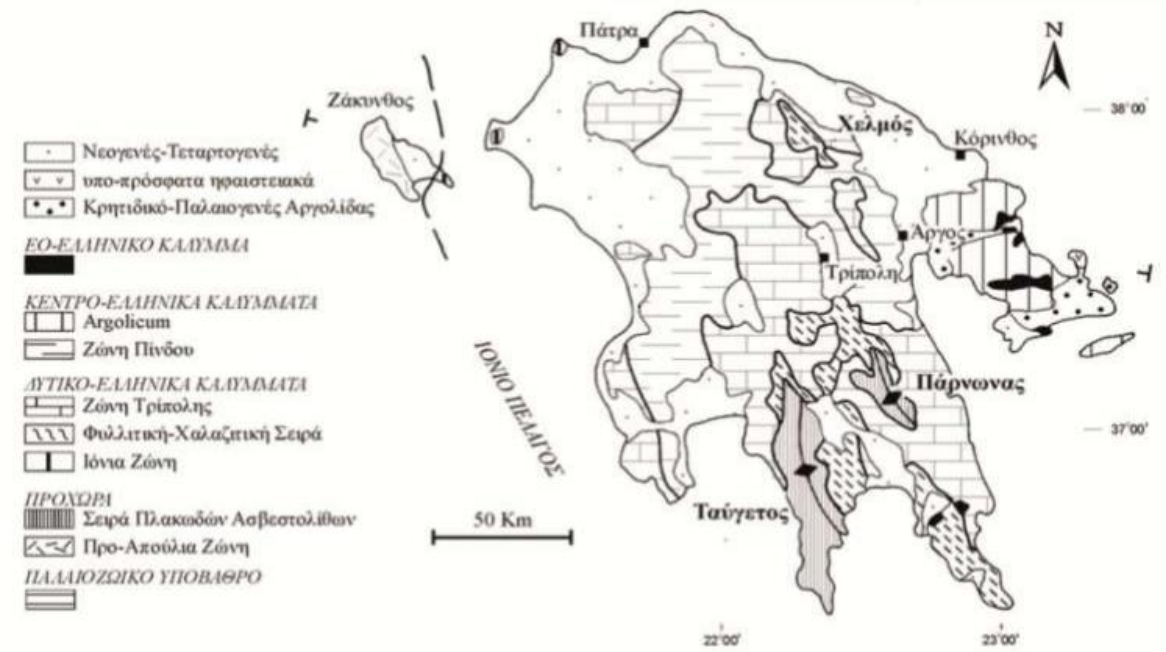
3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Περιοχή μελέτης είναι ειδικότερα η λεκάνη του Βουραϊκού ποταμού ενώ ευρύτερη περιοχή μελέτης θεωρείται, όπως αναφέρθηκε ήδη, η Αιγιαλεία και ειδικά οι λεκάνες των ποταμοχειμάρρων Σελινούντα, Κερυνίτη, Βουραϊκού, Κράθη και Κριού. Παραλιακά, η ζώνη αυτή εκτείνεται από το Αίγιο στα δυτικά έως την Αιγείρα στα ανατολικά.

3.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ

3.1.1 Αλπικό υπόβαθρο και γεωτεκτονικές ζώνες

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της ευρύτερης περιοχής του Βουραϊκού ποταμού υπάγονται κυρίως στην γεωτεκτονική ενότητα Ωλονού – Πίνδου, η οποία έχει επωθηθεί με την μορφή καλύμματος και λεπιοειδή δομή επάνω στην ενότητα Γαβρόβου – Τριπόλεως (Σχ. 3-1). Η τελευταία κυρίως εμφανίζεται σαν τεκτονικό παράθυρο στο όρος Χελμός (Αροάνια). Συγκεκριμένα, στην περιοχή μελέτης απαντώνται φαιόχρωμοι, λεπτοπλακώδεις, πολυπτυχωμένοι ασβεστόλιθοι, ερυθροί ραδιολαρίτες και ο φλύσχης που ανήκουν στην ενότητα Ολονού - Πίνδου. Στο Σχήμα 3-2 απεικονίζεται η στρωματογραφική κολώνα της ενότητας. Σε αντίθεση με τους Παλαιοζωικής ηλικίας σχηματισμούς σημαντική έκταση της περιοχής καταλαμβάνεται από σημαντικού πάχους κροκαλοπαγή ηλικίας Πλειόκαινου - Πλειστόκαινου (Καλαβρίου).

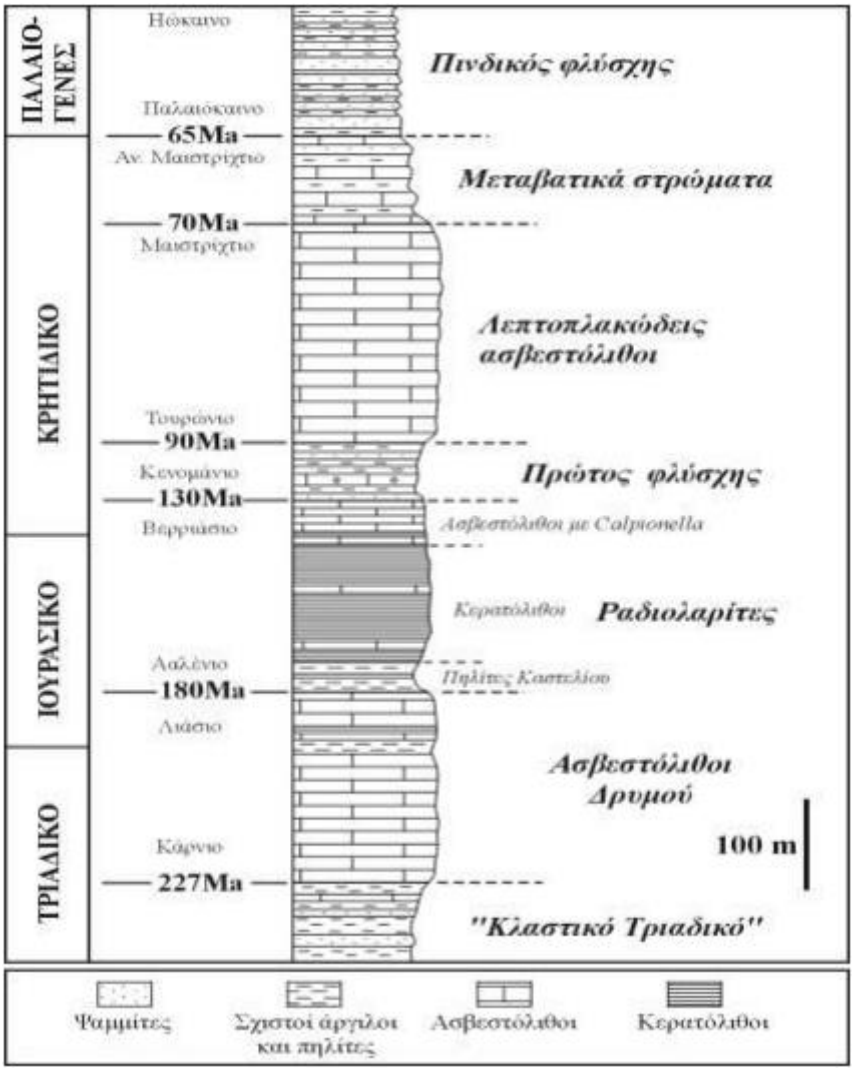


Σχήμα 3-1 Διανομή των ζωνών Πίνδου και Τριπόλεως στην Πελοπόννησο.

Η γεωγραφική κατανομή των γεωλογικών σχηματισμών ποικίλει σημαντικά εντός της λεκάνης (Σχ. 3-3). Το νότιο τμήμα αυτής καταλαμβάνεται από κερατόλιθους – πυριτικούς σχιστόλιθους και μάργες, ενώ στις περιοχές μεγαλύτερου υψόμετρου εμφανίζονται ασβεστόλιθοι. Στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης επικρατούν τα κροκαλοπαγή Καλαβρίου ηλικίας, τα οποία επικάθονται σε στρώματα μαργών και ψαμμιτών. Τα κροκαλοπαγή παρουσιάζουν έντονα φαινόμενα τεμαχισμού, καταπτώσεων και μετακινήσεων. Στα χαμηλότερα τμήματα ο ποταμός ρέει σε λεπτοπλακώδη ασβεστολιθικά πετρώματα της ενότητας Ολονού -Πίνδου, όπου η κατά βάθος διάβρωση έχει διαμορφώσει βαθύ φαράγγι με μεγάλης μορφολογικής κλίσης κλιτείς, που κατά θεσεις καλύπτονται από πλευρικά κορήματα και κώνους κορημάτων ως αποτέλεσμα αποσάθρωσης των ασβεστολιθικών πετρωμάτων υψηλότερων τοπογραφικά περιοχών.

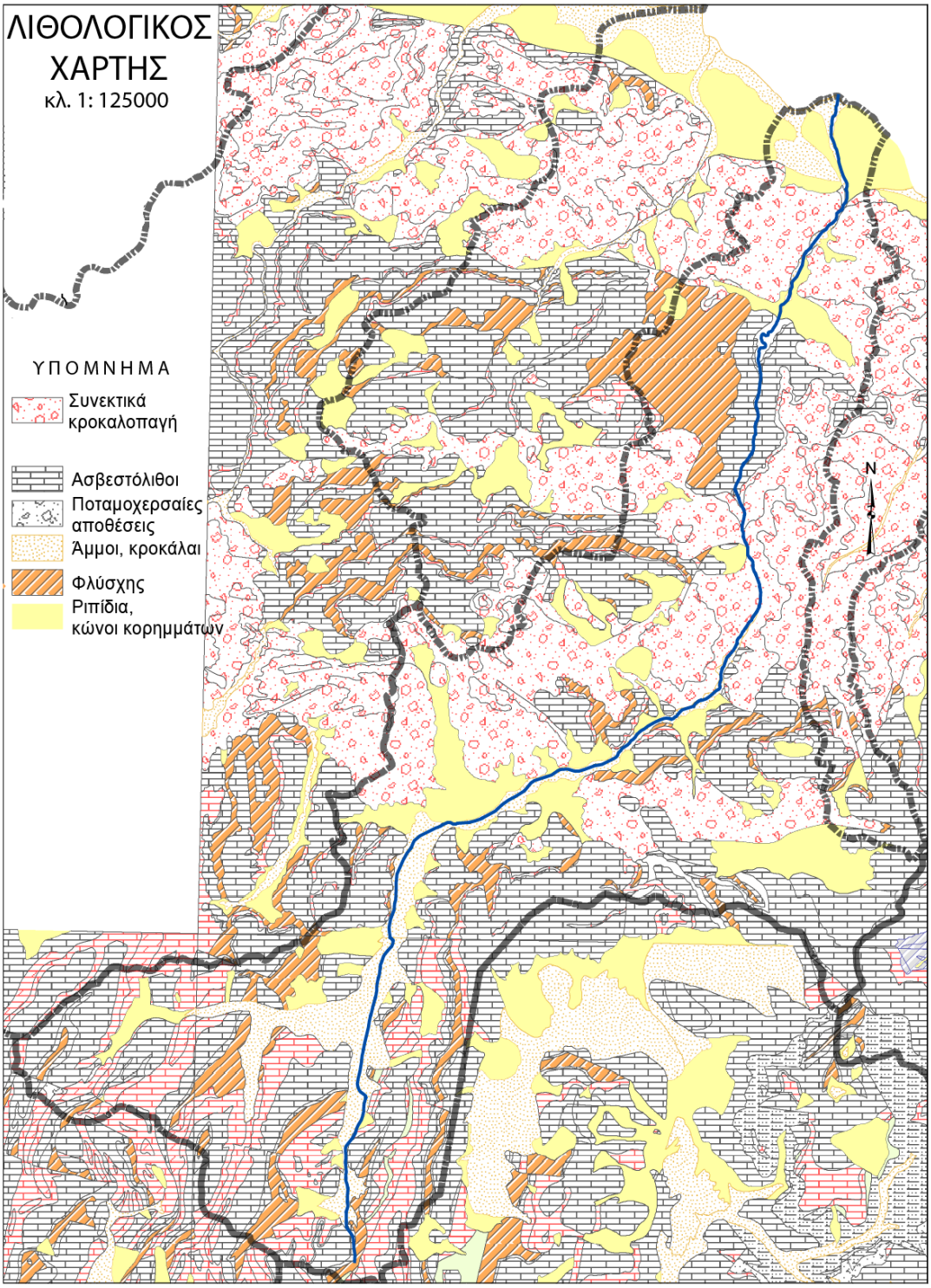
Από τα πετρώματα αυτά, τα μεταλπικά κροκαλοπαγή, είναι ιδιαίτερα συνεκτικοποιημένα, υπόκεινται μεν σε διάβρωση, αλλά όχι πολύ ισχυρή. Οι ασβεστόλιθοι είναι ιδιαίτερα ανθεκτικοί στη διάβρωση και περισσότερο επιρρεπείς στην διάλυση από το νερό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Οι εμφανίσεις ασβεστολίθων στην περιοχή εναλλάσσονται με στρώματα κερατολίθων και είναι πολυπτυχωμένοι και συχνά κατακερματισμένοι με αποτέλεσμα να είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς σε διεργασίες αποσάθρωσης. Αυτό σε συνδυασμό με το μεγάλο ύψος βροχής, τις μεγάλες μορφολογικές κλίσεις και την σεισμική δραστηριότητα της περιοχής οδηγούν συχνά σε φαινόμενα κίνησης υλικών λόγω βαρύτητας (από πτώσεις βράχων έως ερπυσμούς και κατολισθήσεις).

Ο ιδιάζων ιστός της ενότητας Ωλονού – Πίνδου σε συνδυασμό με το έντονο ανάγλυφο που προέκυψε κατά την πρόσφατη μετεορογενετική ανύψωση της περιοχής έχουν δώσει επίσης γένεση σε ένα μεγάλο αριθμό κατολισθήσεων. Η εμφάνιση κατολισθητικών φαινομένων είναι συνηθισμένη στην περιοχή**,** και κατά μήκος της κοίτης του χειμάρρου παρατηρούνται υλικά παλαιών αλλά και νεώτερων κατολισθήσεων. Τα υλικά αυτά αποτελούν οπωσδήποτε ένα μεγάλο τμήμα του μεταφερόμενου φορτίου, ενώ μερικές φορές η παρουσία τους μεταβάλλει την προϋπάρχουσα μορφολογία της περιοχής και εμποδίζει την ομαλή εξέλιξη του ποταμού.



Σχήμα 3-2 Τυπική στρωματογραφία της ζώνης Πίνδου.

Επιπλέον, οι πυριτικοί και αργιλλικοί σχιστόλιθοι του φλύσχη είναι σχηματισμοί που εύκολα αποσαρθρώνονται, και είναι κυρίως αυτοί που παρέχουν την κύρια ποσότητα των αδρομερέστερων υλικών (ογκόλιθων, μεγάλου μεγέθους κροκαλών) που μεταφέρει το ποτάμι. Αντίθετα, η αποσάθρωση σχηματισμών όπως οι μάργες, οι αργιλλοπυριτικές αποθέσεις και τα κροκαλοπαγή, τροφοδοτούν το ποτάμι με λεπτομερέστερο υλικό όπως κροκάλες, χάλικες και άμμο.

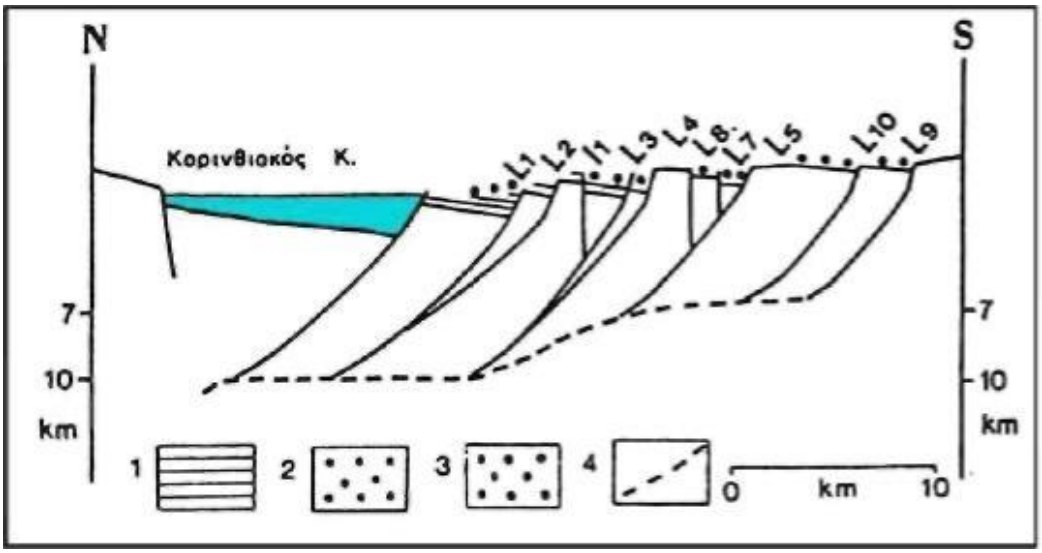


Σχήμα 3-3 Λιθολογικοί σχηματισμοί της λεκάνης του Βουραϊκού ποταμού, πηγή ΙΓΜΕ, κλ. 1:50.000, φύλλα Δάφνη, Κερτέζι, Αμυγδαλέα, Αίγιο.

3.1.2 Τεκτονισμός και γεωμορφολογική εξέλιξη

Ο Κορινθιακός κόλπος, στον οποίο εκβάλει ο Βουραϊκός ποταμός, είναι μία ασύμμετρη τεκτονική τάφρος που έχει σχηματιστεί από το Ανώτερο Μειόκαινο και έπειτα. Κατά την διάρκεια του Πλειόκαινου και του Τεταρτογενούς η ευρύτερη περιοχή της βόρειας Πελοπονήσου ανυψώνεται με σημαντικά γρήγορους ρυθμούς (Armijo et al., 1996). Ο τεκτονισμός της περιοχής εκδηλώνεται με ένα σύστημα ρηγμάτων γενικής διεύθυνσης Α-Δ, παράλληλων εν πολλοίς με την ακτογραμμή. Η περιοχή οριοθετείται από μεγάλα κανονικά ρήγματα διεύθυνσης περίπου Α-Δ με σημαντικότερα (από δυτικά προς τα ανατολικά), αυτά του Ψαθόπυργου, του Αιγίου, της Ελίκης που χωρίζεται στο δυτικό και το ανατολικό τέμαχος, και του Ξυλοκάστρου. Τα ρήγματα αυτά είναι ενεργά και σε αυτά οφείλεται μέρος της σεισμικής δραστηριότητας της περιοχής (Sorel, 2000, Fernandez-Blanco et al., 2019).

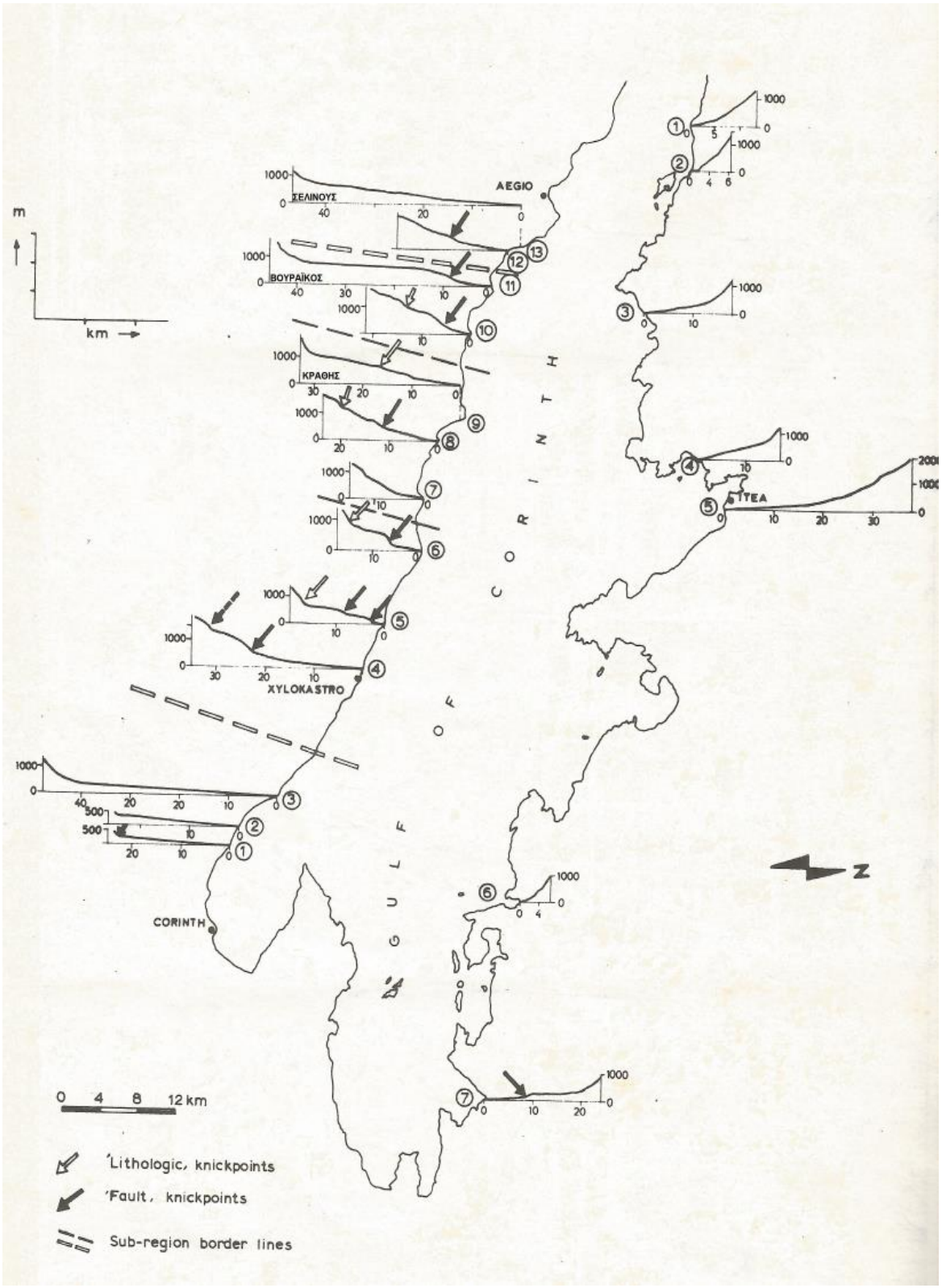
Είναι χαρακτηριστικό ότι οι λιμναίοι και θαλάσσιοι σχηματισμοί ηλικίας Πλειόκαινου – Πλειστόκαινου απουσιάζουν εντελώς από τις παράκτιες περιοχές της νότιας Στερεάς ενώ αντίθετα καταλαμβάνουν σημαντική έκταση της βόρειας Πελοποννήσου. Χαρακτηριστικές είναι οι μορφολογικές διαφορές μεταξύ της βόρειας και νότιας υφαλοκρηπίδας του κόλπου. Τα υποθαλάσσια φαράγγια αποτελούν χαρακτηριστικό της μορφολογίας της νότιας υφαλοκρηπίδας (Β. Πελοπόννησος), ενώ αντίθετα παρόμοιες γεωμορφές δεν υπάρχουν στην υφαλοκρηπίδα της Ν. Στερεάς. Ο ρυθμός τεκτονικής ανύψωσης στις περιοχές κοντά στο Αίγιο, υπολογίζεται στα 1 – 1.3 mm/έτος και μειώνεται προοδευτικά προς τα ανατολικά (Armijo et al., 1996). Ο λόγος ρυθμού διάβρωσης / ρυθμού ανύψωσης για τις περιοχές αυτές βρέθηκε μικρότερος του 1 (Ζεληλίδης κ.ά, 2001). Η αλληλεπίδραση μεταξύ τεκτονικών διεργασιών και επιφανειακής διάβρωσης έχει, κατά κάποιο τρόπο, ‘σημαδέψει’ την σημερινή μορφολογία της περιοχής (Vasilakis et al., 2007). Η όλη ανύψωση υπολογίζεται σε 1.000 μ. πάνω από την σημερινή μέση στάθμη της θάλασσας (Doutsos and Piper, 1990) ενώ σύμφωνα με άλλους η ανύψωση αυτή φθάνει τα 1.700 μ. (Seger and Alexander,1993). Στο σκαρίφημα του Σχήματος 3-4 απεικονίζεται μια εγκάρσια τομή της τάφρου του Κορινθιακού κόλπου στο ύψος των Καλαβρύτων όπου φαίνεται η ανύψωση των λιμναίων και θαλάσσιων αποθέσεων που αποτελούν παλαιά δελταϊκά ριπίδια των εκβολών των -τότε- υδρογραφικών δικτύων.



Σχήμα 3-4 Σχηματική τομή εγκάρσια στην τάφρο του Κορινθιακού μεταξύ Καλαβρύτων, Αιγίου και Ελέας. 1: Λιμναίες-λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις 2: Δελταϊκά ριπίδια 3. Αποθέσεις ποταμού και αλλουβιακά ριπίδια 4: Χαμηλής κλίσης επιφάνεια αποκόλλησης (πηγή: Doutsos and Poulimenos, 1992**).**

Οι Σαμπώ και Μαρουκιάν (1981) σχεδίασαν και ανέλυσαν εγκάρσιες επιμήκεις τομές κατά μήκος των κεντρικών κοιτών των υδρογραφικών δικτύων και από τις δύο πλευρές του Κορινθιακού κόλπου. Οι επιμήκεις αυτές τομές είναι ενδεικτικές της εξάρτησης των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών των ποτάμιων συστημάτων από την τεκτονική δράση και δομή της περιοχής, συμπεραίνοντας ότι η πρώτη είναι ένας σημαντικός μάρτυρας της δεύτερης. Περαιτέρω, υπέδειξαν την διαφορική ανύψωση που υφίσταται η ακτογραμμή της Β. Πελοποννήσου και διέκριναν σε αυτή τρεις ζώνες –blocks (Σχ. 3-5).

Σε ότι αφορά την περιοχή μας, τα σημεία κάμψης (knickpoints), τα οποία αποτελούν τοπικά βασικά επίπεδα ελέγχοντας κάθε φορά την εξέλιξη των ανάντη τμημάτων του ποταμών της Β. Πελοποννήσου και του Βουραϊκού ειδικότερα (Καρύμπαλης κ.ά, 1991), έχουν είτε λιθολογική είτε τεκτονική προέλευση. Από την ανάλυση των Σαμπώ και Μαρουκιάν προκύπτει ότι τα σημεία κάμψης που βρίσκονται στα μεγαλύτερα υψόμετρα οφείλονται σε λιθολογικά αίτια καθώς βρίσκονται στις επαφές γεωλογικών σχηματισμών διαφορετικής αντοχής στην διάβρωση (των συνεκτικών κροκαλοπαγών με χαλαρά κροκαλοπαγή), ενώ τα κατώτερα σημεία κάμψης έχουν τεκτονική προέλευση (οφείλονται δηλαδή σε ρήγματα διεύθυνσης περίπου Α-Δ που τέμνουν τις κεντρικές ποτάμιες κοίτες). Ειδικότερα, κατά μήκος της κοίτης του Βουραϊκού, εμφανίζεται ένα σημείο κάμψης τεκτονικής αιτίασης, νότια του Διακοφτού και αρκετά κοντά στην εκβολή του ποταμού.



Σχήμα 3-5 Προφίλ των κυριώτερων ποταμοχειμάρρων που εκβάλλουν στον Κορινθιακό κόλπό όπου φαίνονται και τα όρια των τεκτονικών blocks της Β. Πελοποννήσου (Από Σαμπώ και Μαρουκιάν, 1981**).**

Η κεντρική κοίτη του Βουραϊκού ποταμού, σύμφωνα με τους Σαμπώ και Μαρουκιάν (1989), μπορεί να διαιρεθεί μορφολογικά στα εξής τέσσερα τμήματα:

I. Το *ορεινό τμήμα*, όπου επικρατούν οι απότομες κλίσεις
II. Το *ανώτερο τμήμα*, με πολύ χαμηλές κλίσεις
III. Το *κατώτερο τμήμα*, όπου υφίσταται η πιο δυναμική διάβρωση και εκβάθυνση, πράγμα που γίνεται αντιληπτό από τις πολύ απότομες κλιτείς και τα αρκετά σημεία κάμψης που παρατηρούνται και
IV. Το *βορειότερο τμήμα*, με μικρές κλίσεις που περιλαμβάνει και τη διαδρομή του ποταμού στο δελταϊκό του ριπίδιο.

Εξ'αιτίας των γενικών γεωτεκτονικών συνθηκών που επικρατούν στη Β. Πελοπόννησο, συμπεραίνεται από τους συγγραφείς ότι οι διαδικασίες απόθεσης είναι ενεργές στο ανώτερο τμήμα (το οποίο είναι ουσιαστικά το υψίπεδο των Καλαβρύτων), ενώ στο κατώτερο τμήμα συνεχίζει να λαμβάνει χώρα ισχυρή διάβρωση, και παρατηρούνται σε αυτό πολλαπλά σημεία καμψης. Σε παρόμοια συμπεράσματα συντείνουν και νεώτερες έρευνες (Vasilakis et al., 2007). Στο βορειότερο τμήμα του ποταμού, πριν τις εκβολές (που είναι ουσιαστικά το ριπίδιο του ποταμού), υφίσταται ποτάμια απόθεση.

3.2 ΚΛΙΜΑ

Το κλίμα είναι συνάρτηση τόσο του υδρολογικού όσο και του ενεργειακού ισοζυγίου ενός τόπου, και καθορίζει άμεσα τις χρήσεις και την κάλυψη της γης. Στο πλαίσιο εκπόνησης της διδακτορικής αυτής διατριβής, συγκεντρώθηκαν και αναλύθηκαν μετρητικά δεδομένα ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχοπτώσεων, χιονοπτώσεων) και θερμοκρασιών από μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής, δορυφορικά δεδομένα δυνητικής και πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, δεδομένα φαινολογίας, καθώς και δορυφορικά δεδομένα χιονοπτώσεων. Οι σταθμοί αυτοί ανήκουν στην ΕΜΥ (σταθμοί Αιγίου και Καλαβρύτων) και στη ΔΕΗ (μετεωρολογικός σταθμός με βροχόμετρο στα Καλάβρυτα και βροχομετρικοί σταθμοί Κερπινής και Λαγοβουνίου). Τα δορυφορικά δεδομένα προέρχονται από προϊόντα του οργάνου-αισθητήρα MODIS που διαθέτουν οι δορυφόροι AQUA και TERRA του EOS (Earth Observing System) της NASA, για τα οποία περισσότερος λόγος γίνεται στο Κεφάλαιο 6. Επίσης, από βροχογράφο που εγκαταστάθηκε

στην ταράτσα του κτιρίου του Φορέα Διαχείρισης Χελμού-Βουραϊκού (Καλάβρυτα) από το πρώην ΤΕΙ Αθήνας τον Δεκέμβριο του 2015, προέκυψαν ενδιαφέροντα στοιχεία έντασης και διάρκειας των βροχοπτώσεων. Τα διαθέσιμα στοιχεία συνοψίζονται στον Πίνακα 2-1.

Πίνακας 3-1 Μετεωρολογικές χρονοσειρές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία

α/α	*Σταθμός*	*Μεταβλητή*	*Περίοδος*	*Χρονικό βήμα*	*Ιδιοκτήτης*
1	Καλάβρυτα	Βροχόπτωση Χιοχόπτωση	2004-2014	ημερήσιο	ΔΕΗ
2	Κερπινή	Βροχόπτωση Χιοχόπτωση	2004-2014	ημερήσιο	ΔΕΗ
3	Λαγοβούνι	Βροχόπτωση Χιοχόπτωση	2004-2014	ημερήσιο	ΔΕΗ
4	Καλάβρυτα	Βροχόπτωση Νέφωση Θερμοκρασία Σχετική υγρασία ανεμογράμματα	1975-1999	ημερήσιο	ΕΜΥ
5	Αίγιο	Όπως παραπάνω	1994-2003	ημερήσιο	ΕΜΥ
6	Καλάβρυτα	Βροχόπτωση	12/2015 – 8/2016	60 s.	**Πρώην ΤΕΙ Αθήνας** – Φορεάς Διαχείρισης

Από τις κλιματικές ταξινομήσεις ίσως η πιο γνωστή και ευρέως διαδεδομένη είναι αυτή κατά Köppen. Ο Vladimir Köppen ήταν κλιματολόγος και γεωγράφος-βοτανολόγος (plant geographer) στο Πανεπιστήμιο του Graz στην Αυστρία και η προσπάθεια του ήταν να κατηγοριοποιήσει τις κλιματικές ζώνες έτσι ώστε να συμπίπτουν με τα όρια εξάπλωσης των κυριότερων τύπων βλάστησης. Ωστόσο, τα όρια των κλιματικών ζωνών κατά Köppen, καθώς καθορίζονται από κάποιες τιμές – κατώφλια, είναι γραμμές που δεν επιτρέπουν την συνεχή στο χώρο μετάβαση των κλιματικών κατηγοριών από την μία στην άλλη. Η ταξινόμηση Köppen-Geiger εφαρμοζόμενη στην Ελλάδα, δεν δίνει παρά έναν κλιματικό τύπο για όλη τη νότια και κεντρική χώρα, και συγκεκριμένα τον *Csa*, δηλαδή το τυπικά Μεσογειακό κλίμα. Τα κλίματα της κατηγορίας C χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (μέση θερμοκρασία του ψυχρότερου μήνα μεταξύ -3 ˚C και 18 ˚C), έχουν ξηρά καλοκαίρια (γράμμα s) και μέση θερμοκρασία θερμότερου μήνα πάνω από 22 ˚C (γράμμα a).

Η κλιματική ταξινόμηση κατά Thornthwaite (1948) είναι πιο κατάλληλη για την ανάδειξη της κλιματικής ποικιλίας της Ελλάδας. Η ποικιλία αυτή στους κλιματικούς τύπους οφείλεται στην γεωγραφική θέση της χώρας, στο ανάγλυφό της και την διανομή ξηράς-θάλασσας. Ο Charles Thornthwaite είναι αυτός που εισήγαγε την έννοια της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (ως την ποσότητα του νερού που εξατμίζεται και διαπνέεται από μια περιοχή σε –υποθετικές-συνθήκες πλήρους και αδιάλειπτης επάρκειας υγρασίας), στην προσπάθειά του να υπολογίσει την πραγματική εξατμισοδιαπνοή, δηλαδή την ποσότητα του νερού που *πράγματι* διαφεύγει στην ατμόσφαιρα από την συνδυασμένη δράση της εξάτμισης και της διαπνοής των φυτών. Το εργαλείο που ανέπτυξε ο Thornthwaite για τον σκοπό αυτό είναι το υδατικό ισοζύγιο ή ισοζύγιο υγρασίας, κατά το οποίο, με γνώση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (που υπολογίζεται με κάποια από τις διαθέσιμες μεθόδους: ισοζυγίου μάζας, ισοζυγίου ενέργειας ή συνδυαστικές μεθόδους) και των κατακρημνισμάτων σε κάποια περιοχή, εκτιμάται η πραγματική εξατμισοδιαπνοή καθώς και άλλοι χρήσιμοι κλιματικοί δείκτες, όπως ο δείκτης υγρασίας (moisture index, lm) και ο δείκτης θερμικού καθεστώτος (thermal index). Αξίζει να αναφερθεί ότι η ταξινόμηση κατά Thornthwaite, παρά το γεγονός ότι έχει προτεθεί το 1948, εξακολουθεί και σήμερα να εφαρμόζεται ευρύτατα όχι μόνο για εφαρμογές στην γεωργία και δασολογία για τις οποίες ουσιαστικά αναπτύχθηκε, αλλά και σε μελέτες σχετικές με την κλιματική αλλαγή ή μελέτες συντήρησης υποδομών**.**

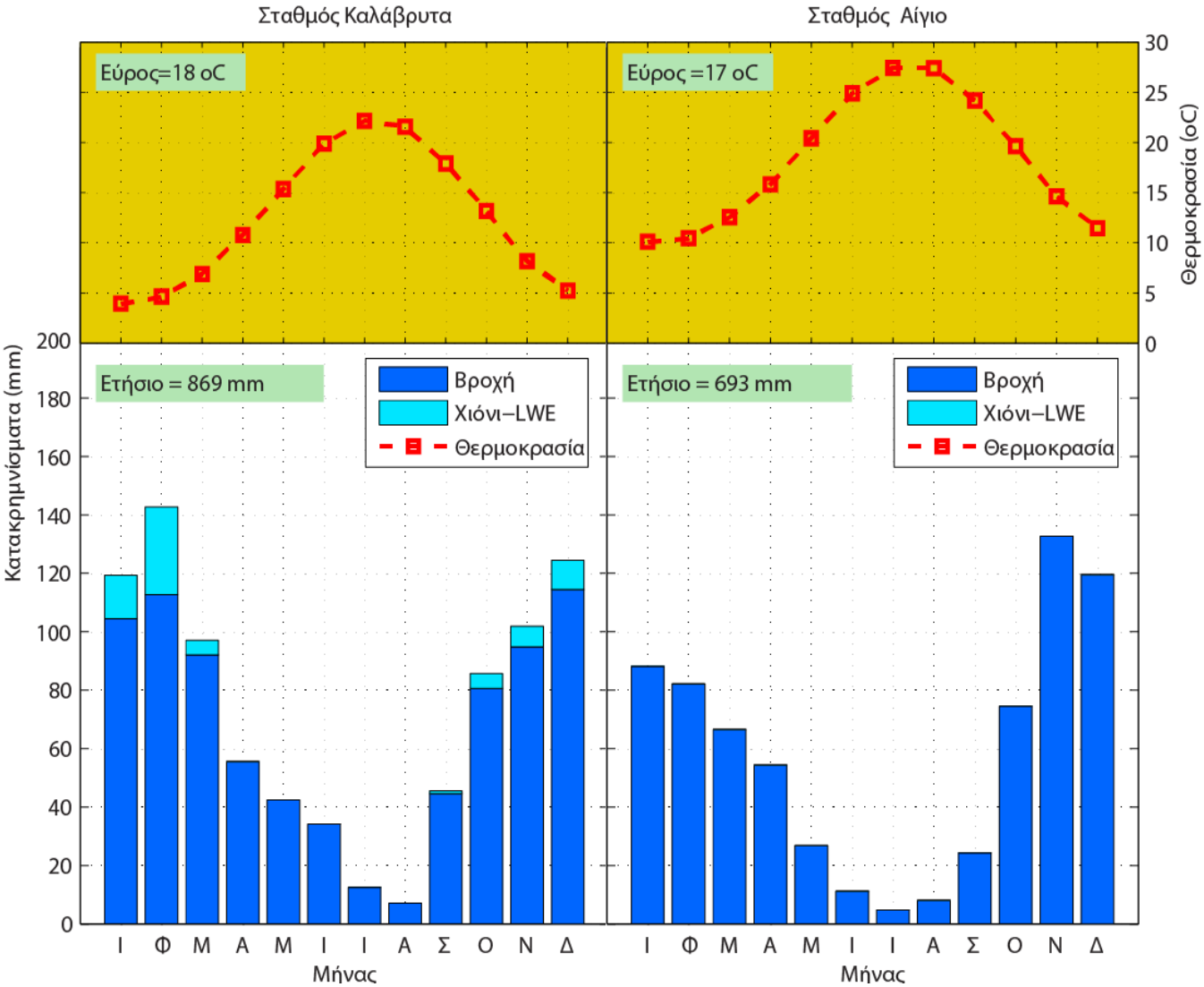
3.2.1 Ατμοσφαιρικά Κατακρημνίσματα

Οι κατακρημνίσεις στην ευρύτερη περιοχή της βορειοδυτικής Πελοποννήσου) εμφανίζουν μια ισχυρή καθοδική βαθμίδα τόσο από δυτικά προς τα ανατολικά, όσο και από τα νότια (τα βουνά της κεντρικής Πελοποννήσου) προς τα βόρεια (τον Κορινθιακό κόλπο). Η βαθμίδα αυτή, από το Βορρά προς το Νότο, είναι βέβαια η βροχοβαθμίδα, μιας και από τον Κορινθιακό κόλπο μέχρι τις κορυφές των ορέων υπάρχουν σημαντικές υψομετρικές διαφορές που αντιστοιχούν στα υψόμετρα των κορυφών των ορέων Χελμού, Ερύμανθου και Παναχαϊκού.

Διάφοροι μελετητές (Βουδούρης & Λαμπράκης, 1993), έχουν διαχωρίσει το νομό Αχαίας με βάση τις τιμές των κλιματολογικών στοιχείων, σε δύο τμήματα, το δυτικό και το ανατολικό. Αυτά χωρίζονται από τον ανατολικό υδροκρίτη του ποταμού Σελινούντα. Ο υδροκρίτης αυτός διέρχεται από τις κορυφογραμμές των Κυρήνειων Ορέων και του

Ερύμανθου. Οι βροχοπτώσεις είναι μεγαλύτερες στο δυτικό τμήμα το οποίο παρουσιάζει βροχοβαθμίδα 63mm/100m, ενώ το ανατολικό τμήμα παρουσιάζει βροχοβαθμίδα ίση με 46mm/100m (Νίκας, 2004). Οι χρονοσειρές βροχοπτώσεων των τριών σταθμών της ΔΕΗ, από τις οποίες προέκυψαν τα κλιμογράμματα του Σχήματος 2-6, ελέγθηκαν για ομοιογένεια με την μέθοδο της διπλής αθροιστικής καμπύλης (ή καμπύλης διπλής μάζας - double mass curve) και βρέθηκαν απολύτως ομοιογενή. Η ανάλυση της συμβολής των χιονοπτώσεων στην απορροή της λεκάνης συζητείται αναλυτικά στο Εδάφιο 4.3.13.

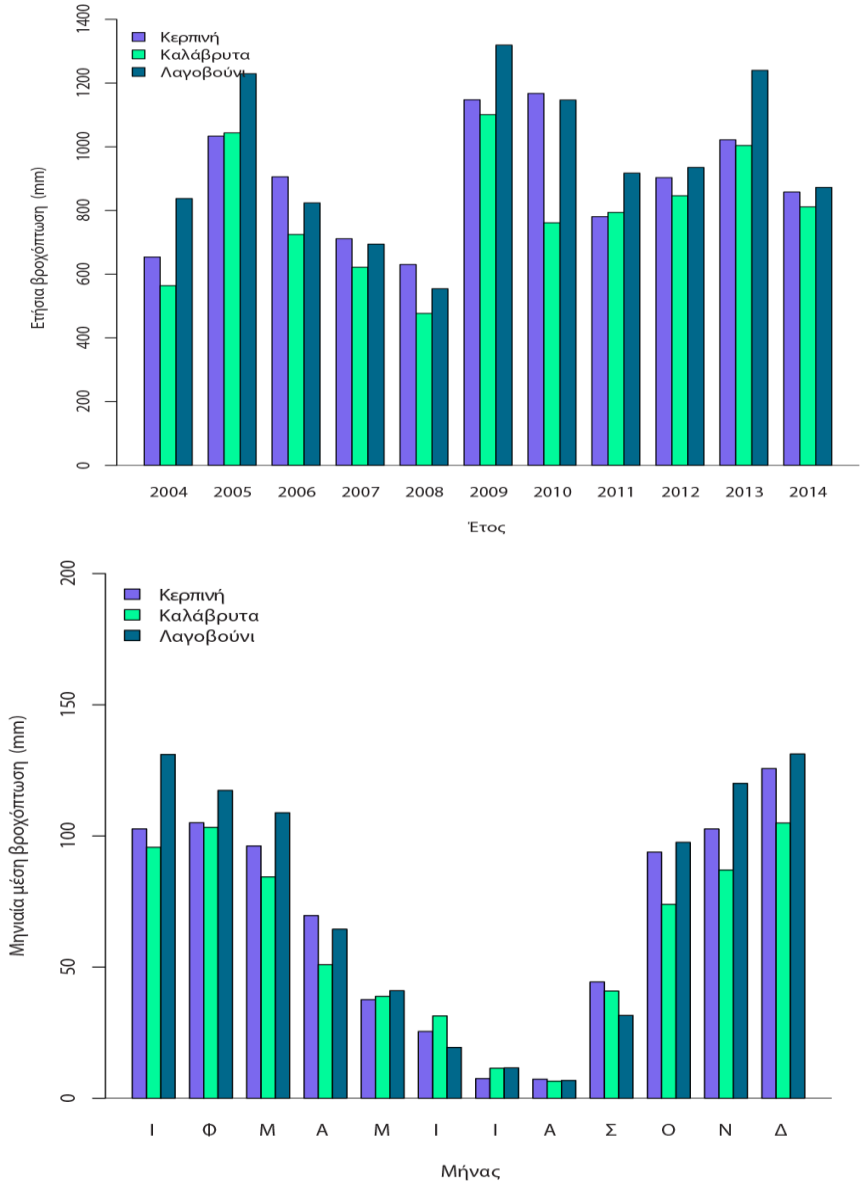
Τα δεδομένα του Αίγιου προέρχονται από την ΕΜΥ, ενώ τα δεδομένα των Καλαβρύτων προέρχονται από την ΔΕΗ. Η χιονόπτωση δίνεται σε ισοδύναμο ύψος βροχής (Liquid Water Equivalent). Όπως φαίνεται από τα κλιμογράμματα του Σχήματος 3-6, υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δεδομενων των δύο σταθμών παρά την



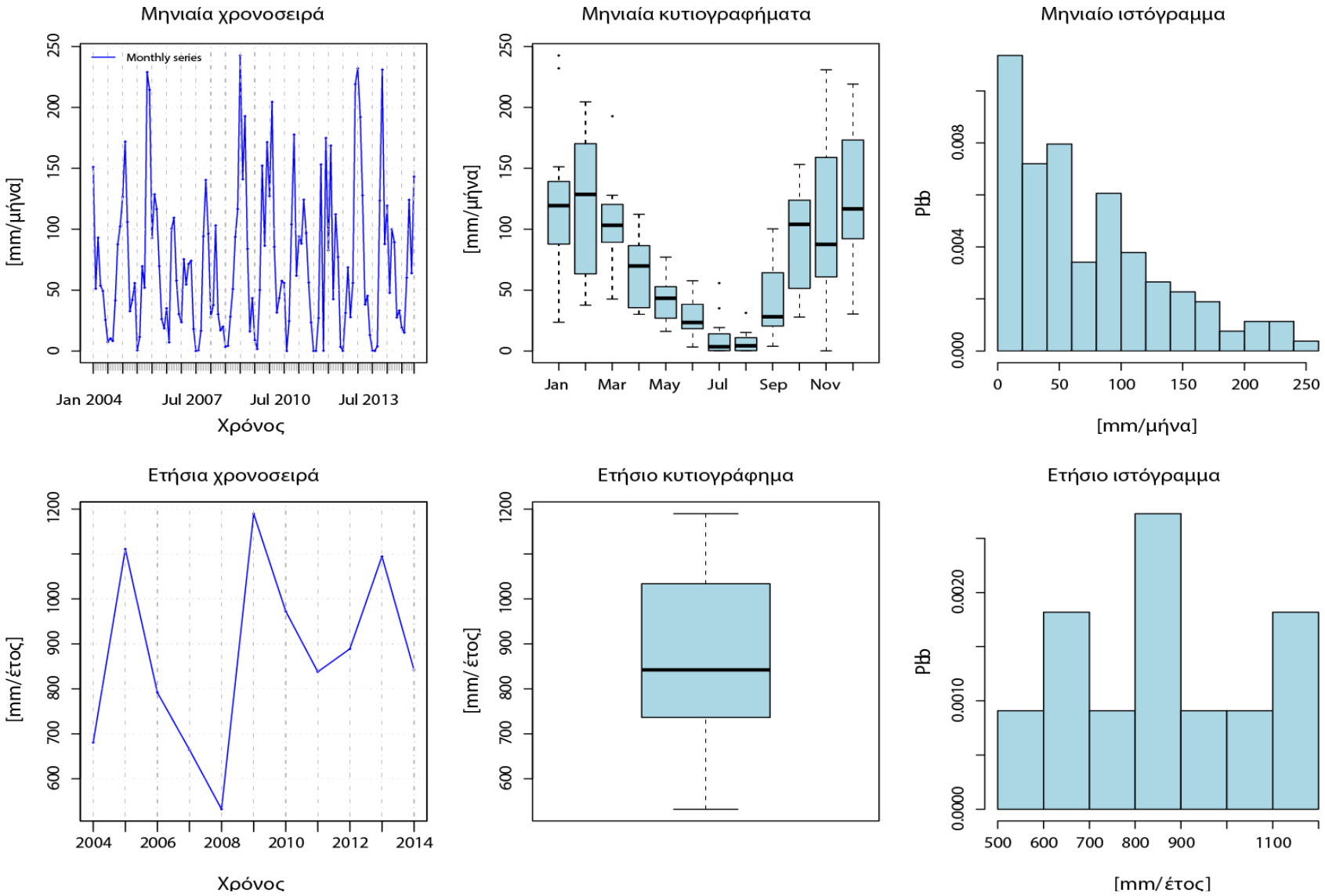
Σχήμα 3-6 Κλιμογράμματα για τους σταθμούς Καλαβρύτων (2004-2014, υψόμετρο σταθμού 710m) και Αιγίου (1974-2003, υψόμετρο σταθμού 64m). (πηγή δεδομένων ΔΕΗ και ΕΜΥ)

εγγύτητά τους. Το ύψος των κατακρημνισμάτων είναι κατά 176 mm μεγαλύτερο στα Καλάβρυτα (περίπου 20% υψηλότερο) ενώ το χιόνι (~75 mm) αποτελεί περίπου το 9% των ετήσιων κατακρημνισμάτων (δεν υπάρχουν στοιχεία χιονοπτώσεων για το Αίγιο, εικάζεται όμως ότι αυτές θα είναι μικρές, δεδομένου ότι ο σταθμός είναι παράκτιος).

Οι μέγιστες βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις στα Καλάβρυτα συμβαίνουν τους μήνες Δεκέμβριο, Ιανουάριο και Φεβρουάριο. Στο Αίγιο οι πιο βροχεροί μήνες, με διαφορά, είναι ο Νοέμβριος και ο Δεκέμβριος, το δε ύψος βροχής τους μήνες αυτούς είναι μεγαλύτερο από αυτό στα Καλάβρυτα. Τα κλιμογράμματα με τις τιμές θερμοκρασίας και κατακρημνισμάτων είναι τα βασικά στοιχεία κλιματικής κατάταξης κατά Köppen. Η ετήσια πορεία και η μηνιαία κατανομή των βροχοπτώσεων συνοψίζονται στα Σχήματα 3-7, 3-8.



Σχήμα 3-7 Βροχοπτώσεις στους 3 σταθμούς της ΔΕΗ που είναι εγκατεστημένοι εντός της λεκάνης απορροής του Βουραϊκού ποταμού. Το πάνω διάγραμμα απεικονίζει την ετήσια πορεία ανά σταθμό για τα έτη 2004-2014, ενώ το κάτω την μηνιαία πορεία των βροχοπτωσεων ανά σταθμό.



Σχήμα 3-8 Στατιστικά διαγράμματα για την βροχόπτωση στην λεκάνη απορροής. Οι ημερήσιες τιμές που αναλύονται εδώ έχουν προκύψει από παρεμβολή Thiessen με τους τρεις σταθμούς της ΔΕΗ στο διάστημα 2004-2014.

3.2.2 Εξατμισοδιαπνοή και υδατικό ισοζύγιο

Αν και υπάρχουν διαφορετικές εκδοχές σχετικά με τον ορισμό της, η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET / ΔΕ) μπορεί γενικά να οριστεί σαν η ποσότητα του νερού που θα μπορούσε να εξατμιστεί από το έδαφος και τα υδάτινα σώματα και να διαπνεύσει από την βλάστηση, χωρίς άλλους περιορισμούς από τις απαιτήσεις της ατμόσφαιρας. Η έννοια της ΔΕ συνιστά έναν χρήσιμο δείκτη που αντιπροσωπεύει την μέγιστη δυνατή απώλεια νερού προς την ατμόσφαιρα σε μία περιοχή με βλάστηση. Η εξατμισοδιαπνοή ευθύνεται για την απώλεια στην ατμόσφαιρα του 60% κατά μέσο όρο των κατακρημνισμάτων σε πλανητική κλίμακα (Hornberger et al, 2014). Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (ΕΤ /ΠΕ) ορίζεται σαν η πραγματική ποσότητα νερού που χάνεται στην ατμόσφαιρα από τις διεργασίες εξάτμισης και διαπνοής και είναι εξ'ορισμού ίση με την δυνητική σε συνθήκες επάρκειας νερού. Όταν όμως το νερό αρχίζει και περιορίζεται και δεν είναι αρκετό για την εξατμισοδιαπνοή σε δυνητικούς ρυθμούς, τότε οι απώλειες νερού μειώνονται παρόλες τις αυξημένες απαιτήσεις της ατμόσφαιρας. Η έννοια της ΔΕ πρωτοχρησιμοποιήθηκε από τον Thornthwaite (Halstead, 1951) στην προσπάθειά του να υπολογίσει την πραγματική εξατμισοδιαπνοή. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται με διάφορες μεθόδους, κάποιες από τις οποίες συνοψίζονται στον Πίνακα 3-2.

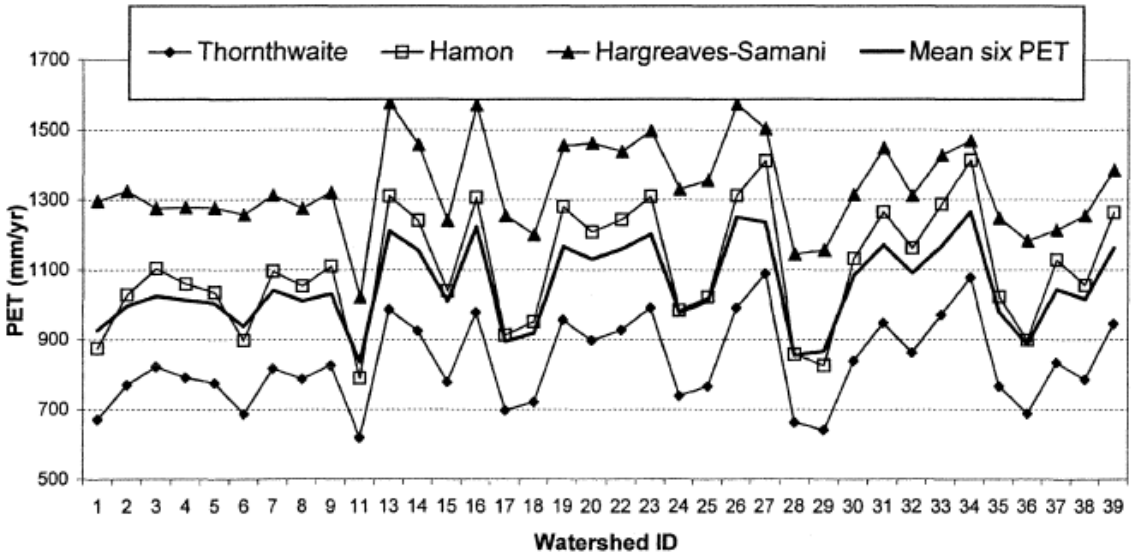
Για λόγους τυποποίησης των υπολογισμών η έννοια της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής έχει υποκατασταθεί από την έννοια της *εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς* η οποία ορίζεται ως η εξατμισοδιαπνοή από μία ιδεατή εκτεταμένη επιφάνεια, καλυμμένη πλήρως από ομοιόμορφη χαμηλή χλόη που σκιάζει πλήρως το έδαφος και βρίσκεται σε συνθήκες ενεργού ανάπτυξης χωρίς έλλειψη νερού (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1997). Η εξατμισοδιαπνοή από κάθε άλλη μορφή βλάστησης μπορεί να προκύψει από αυτήν της καλλιέργειας αναφοράς. Επομένως, η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς αντιστοιχεί σε συνθήκες δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

Μία βασική διαίρεση των μεθόδων υπολογισμού της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής είναι ανάμεσα σε μεθόδους ακτινοβολίας και σε μεθόδους θερμοκρασίας. Γενικά, οι μέθοδοι ακτινοβολίας θεωρούνται ακριβέστερες. Έχουν γίνει πολλές μελέτες σύγκρισης μεταξύ των μεθόδων. Οι Lu et al. (2005) συνιστούν την χρήση των μεθόδων Turc και Hamon (1961) για τις νότιοανατολικές ΗΠΑ. Σε μία μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην Ιαπωνία, οι Alqaeed et al. (2006) συγκρίνοντας τα αποτελέσματα διαφόρων μεθόδων με

μιά μέθοδο αναφοράς (την FAO56-PM, που ειναι η μέθοδος Pennman – Monteith κανονικοποιημένη από τον FAO και η οποία θεωρείται ακριβέστερη, αλλά και πολύ απαιτητική σε μετεωρολογικά δεδομένα), προτεινουν την εφαρμογή της μεθόδου Thornthwaite, εάν δεν είναι διαθέσιμα δεδομένα ακτινοβολίας.

Πίνακας 3-2 Μέθοδοι υπολογισμού της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και απαιτούμενα μετεωρολογικά δεδομένα. Οι αστερίσκοι δηλώνουν ότι αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν και ένα διορθωτικό συντελεστή ή συντελεστή βαθμονόμησης.

α/α	*Μέθοδος*	*Θερμοκρασία*	*Ακτινοβολία*	*Σχετική Υγρασία*	*Άλλη*
1	Thornthwaite (1948)	Μέση ημερήσια	-		Διάρκεια ημέρας
2	Hamon (1963)	Μέση ημερήσια	-		Διάρκεια ημέρας *
3	Hardgreaves – Samani (1985)	Ημερήσιο max/min	Εκτός ατμόσφαιρας		
4	Priestley – Taylor (1972)	Μέση ημερήσια	Καθαρή ακτινοβολία		*
5	Turc (1961)	Μέση ημερήσια	Ηλιακή ακτινοβολία	Μέση ημερήσια	
6	Makking (1957)	Μέση ημερήσια	Ηλιακή ακτινοβολία		



Σχήμα 3-9 Σύγκριση των υπολογισμένων τιμών ετήσιας ΔΕ για 39 περιοχές στις ΝΑ ΗΠΑ **(Lu et al., 2005)**. Η μέθοδος Hamon είναι κοντά στον μέσο όρο των 6 μεθόδων που αναφέρονται στον πίνακα 2-2. Σε σχέση με τον Μ.Ο, η μέθοδος Thornthwaite υποεκτιμά την ΔΕ ενώ η μέθοδος Hardgreaves – Samani την υπερεκτιμά**.**

Οι Xu και Sing (2001), συνιστούν την βαθμονόμηση των εξισώσεων θερμοκρασίας με βάση τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες. Οι κυριώτερες μέθοδοι και οι απαιτήσεις τους σε δεδομένα δίνονται στον Πίνακα 3-2, ενώ στο Σχήμα 3-9 συγκρίνονται οι προβλέψεις τους. Η επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιήσει κάποιος εξαρτάται κυρίως από την διαθεσιμότητα των απαιτούμενων δεδομένων. Στην περίπτωση της λεκάνης του Βουραϊκού ποταμού, όπου δεν είναι διαθέσιμα δεδομένα ακτινοβολίας, για να υπολογιστεί τη ΔΕ χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Hamon, σε δύο σταθμούς όπου υπήρχαν δεδομένα ημερήσιων θερμοκρασιών, δηλαδή τα Καλάβρυτα και το Αίγιο. Το Αίγιο θεωρείται αντιπροσωπευτικό της παράκτιας ζώνης της περιοχής μελέτης ενώ τα Καλάβρυτα είναι αντιπροσωπευτικά του μεγαλύτερου τμήματος των ορεινών κοιλάδων της περιοχής μελέτης. Οι μεγάλου υψόμετρου κορφές και τα αλπικά λιβάδια δεν αντιπροσωπεύονται.

Η δυνητική αλλά και η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (μαζί με άλλες μεταβλητές του ενεργειακού ισοζυγίου) διατίθενται επίσης από το δορυφορικό προϊόν MODIS16. Το προϊόν αυτό καλύπτει, με ανάλυση 1km^2, περίπου 109 εκατομμύρια km^2 και παρέχεται σε χρονική ανάλυση 8 ημερων, μηνιαία και ετήσια, ενώ περιλαμβάνει τα έτη από το 2000 έως και σήμερα. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί είναι μία εκδοχή της μεθόδου Pennman. Ωστόσο, από μία πρώτη συγκριτική έρευνα πάνω στις τιμές που δίνει το δορυφορικό προϊόν φάνηκε ότι μάλλον υπερεκτιμά τόσο την ΔΕ, όσο και την ΠΕ. Για το λόγο αυτό οι δορυφορικές εκτιμήσεις δεν ελήφθησαν υπόψη παρά μόνο συμβουλευτικά.

3.2.3 Υδατικό ισοζύγιο Thornthwaite

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή μπορεί να μετρηθεί σε πύργους ροής (flow towers), παρατηρητήρια μεγάλου ύψους εξοπλισμένα με κατάλληλα όργανα, όπου ατμοσφαιρικές μεταβλητές όπως θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου, σχετική υγρασία κ.ά μετρούνται σε διάφορα ύψη πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, έτσι ώστε να υπολογίζονται οι βαθμίδες τους κατά το ύψος. Καθώς αυτές οι βαθμίδες αντιπροσωπεύουν τις ροές, μπορεί να υπολογιστεί με σχετική ακρίβεια η πραγματική εξατμισοδιαπνοή. Ωστόσο, καθώς τέτοιες εγκαταστάσεις υπάρχουν σε λίγα μέρη, εφαρμόζονται κάποιες άλλες μέθοδοι για τον υπολογισμό ή, καλύτερα, την εκτίμηση της πραγματικής απώλειας νερού από εδάφη και καλλιέργειες. Η πρώτη τέτοια μέθοδος, η μέθοδος του υδατικού ισοζύγιου, αναπτύχθηκε από τον Thornthwaite και παρότι προτάθηκε το 1948 χρησιμοποιείται και σήμερα σε πολλές παραλλαγές και βελτιώσεις της.

Η μέθοδος είναι απλή στη σύλληψή της και απαιτεί για την εφαρμογή της δύο συνήθως διαθέσιμες μετεωρολογικές μεταβλητές σε μηνιαία βάση, το ύψος των κατακρημνισμάτων και την θερμοκρασία, από την οποία υπολογίζεται η δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Η μέθοδος συγκρίνει το ύψος των κατακρημνισμάτων για τον κάθε μήνα με το ύψος της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Εάν τα κατακρημνίσματα είναι περισσότερα, τότε η πραγματική εξατμισοδιαπνοή ισούται με την δυνητική. Εάν όχι, η λεκάνη ξηραίνεται και το διαθέσιμο νερό εξαντλείται με βάση μια εκθετική σχέση ξήρανσης του εδάφους (soil drying curve). Οι υπολογισμοί πρέπει να ξεκινήσουν από τον μήνα όπου το νερό στο έδαφος ισούται με την μέγιστη ικανότητα αποθήκευσης, την AWC (Available Water Capacity). Καθώς η AWC είναι μία οριακή συνθήκη, πρέπει να γίνει κάποια εκτίμησή της.

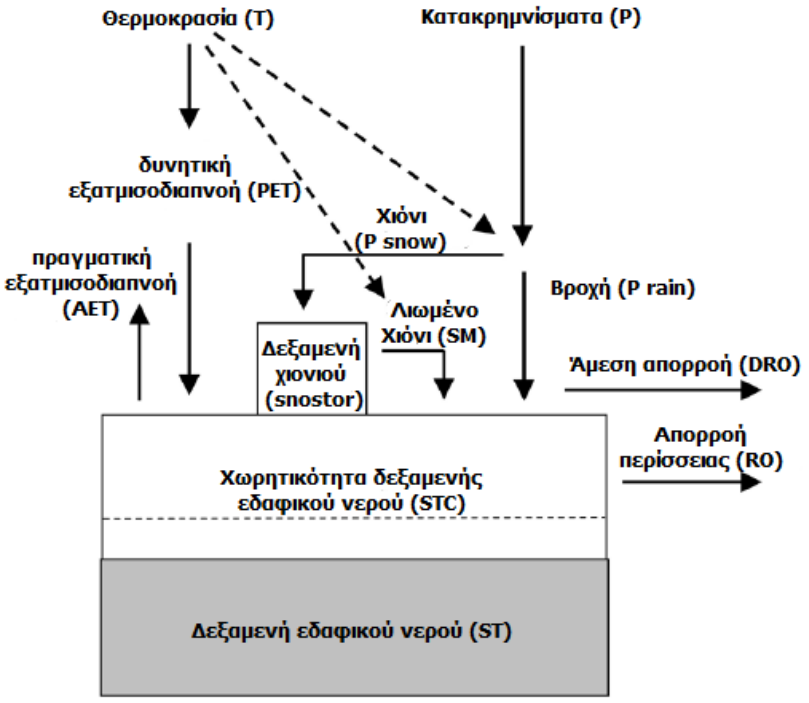
Η μέθοδος αυτή βέβαια είναι αδρή, καθώς υιοθετεί μηνιαίο βήμα. Επίσης, οι παραδοχές που κάνει (π.χ. ότι όλα τα κατακρημνίσματα εξατμισοδιαπνέονται στον δυνητικό ρυθμό, εκθετική καμπύλη αποξήρανσης του εδάφους, δεν προβλέπεται άμεση απορροή) δεν επιβεβαιώνονται πλήρως και σε όλες τις περιπτώσεις. Επιπλέον, η τιμή της AWC θα πρέπει να υποτεθεί. Τέλος, τα σφάλματα τόσο στα ύψη των κατακρημνισμάτων όσο και στα υπολογιζόμενα ύψη της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, μπορούν να συσσωρευτούν και να δώσουν πολύ εσφαλμένα αποτελέσματα.

Μία πιό λεπτομερειακή παραλλαγή -όσο αφορά τα στοιχεία του ισοζυγίου- της μεθόδου του Thornthwaite για την εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, ενσωματώθηκε από την USGS (McCabe & Markstrom, 2007) σε ομώνυμο λογισμικό (Monthly Water-Balance Model). Το λογισμικό αυτό απαιτεί σαν δεδομένα εισόδου τις μηνιαίες μέσες θερμοκρασίες, τις μηνιαίες συνολικές βροχοπτώσεις και το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Με το πρόγραμμα αυτό υπολογίστηκαν τα στοιχεία του ενεργειακού ισοζυγίου. Καθώς το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί την μέθοδο του Hamon για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής υπήρξε σχεδόν τέλεια συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων .

Στο επόμενο Σχήμα 3-10 παρουσιάζεται η βασική αρχιτεκτονική του μοντέλου αυτού.

3.2.4 Κλιματικοί δείκτες Thornthwaite

Η μεθόδος του υδατικού ισοζυγίου χρησιμοποιείται, εκτός από την εκτίμηση των παραμέτρων των υδατικών ισοζυγίων λεκανών απορροής, και στον τομέα της κλιματικής ταξινόμησης καθώς έχει σαν εξαγόμενα χρήσιμους κλιματικούς δείκτες. Δύο από τους δείκτες αυτούς, οι πιό βασικοί, είναι οι ακόλουθοι:



Σχήμα 3-10 Αλγόριθμος του μοντέλου Thornewaite της USGS.

1. *Δείκτης θερμικής αποτελεσματικότητας* I_θ: Πρόκειται για την μέση ετήσια τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και αντιπροσωπεύει ουσιαστικά την θερμοκρασία του τόπου. Με βάση αυτόν το δείκτη γίνεται η ταξινόμηση του σταθμού σε μικροθερμικό, μεσοθερμικό ή μεγαθερμικό καθεστώς, κάθε ένα από τα οποία υποδιαιρείται σε περισσότερες κατηγορίες.
2. *Δείκτης υγρασίας* I_m: Αυτός καθορίζει την επάρκεια υγρασίας του εδάφους και δίνεται από τον τύπο $I_m=100[(P / PE) – 1]$. Μέ βάση τις τιμές αυτού του δείκτη γίνεται η κατάταξη σε τύπους κλίματος όπως υγρό, ύφυγρο, ξηρό κλπ.

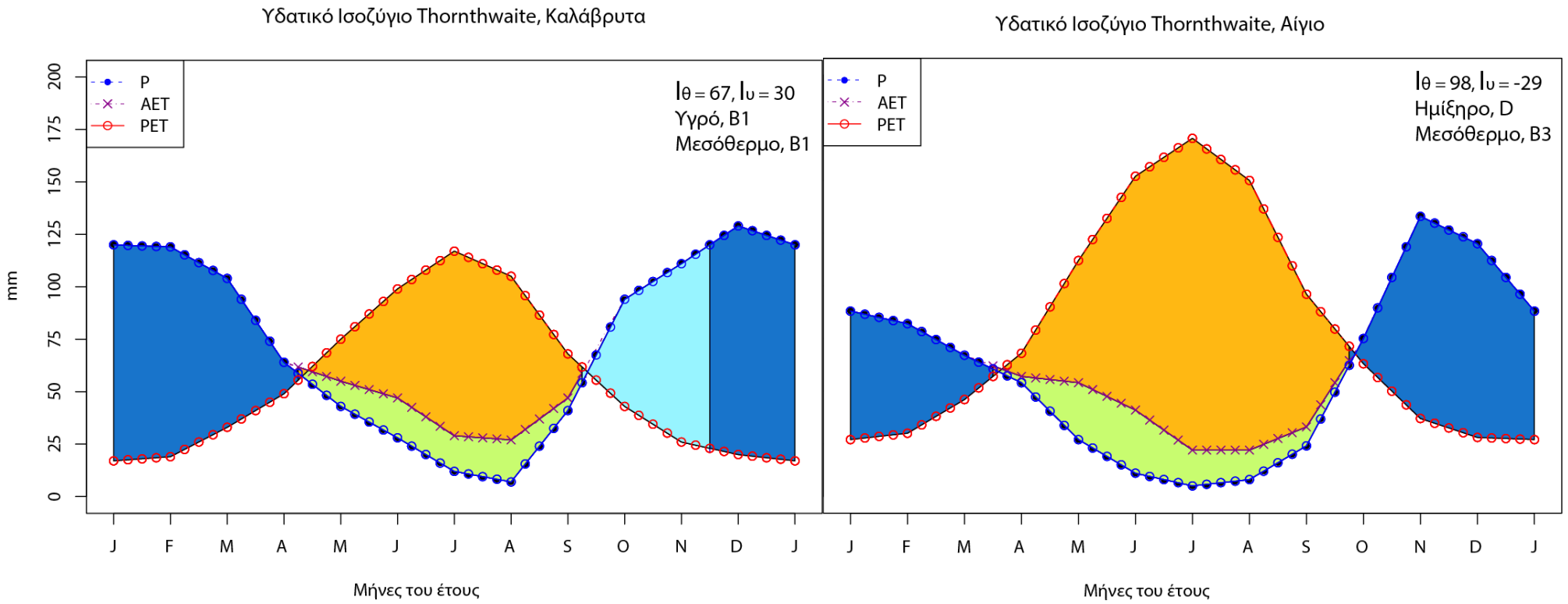
Στον Πίνακα 3-3 δίνονται οι κατηγορίες αυτές μαζί με τα σύμβολά τους.

Πίνακας 3-3 Δείκτες θερμικού καθεστώτος και υγρασίας κατά Thornthwaite (τιμές σε cm).

Δείκτης θερμικής αποτελεσματικότητας ή θερμικού καθεστώτος (ετήσια PE) I_ϑ			*Δείκτης υγρασίας* $100[(P / PE) - 1]$ I_υ		
Τύποι	Τιμές I_θ	Χαρακτηρισμός	Τύποι	Τιμές I_m	Χαρακτηρισμός
E	0 ÷ 14.2	Παγωμένα	E	-60.0 ÷-40	Ξηρό
D	14.3÷28.5	Τούντρα	D	-39.9 ÷-20	Ημίξηρο
C_1	28.6÷42.7	Μικρόθερμα	C_1	-19.9 ÷0.0	Ημίυγρο προς ξηρό
C_2	42.8 ÷57.0	Μικρόθερμα	C_2	0 ÷ 19.9	Ημίυγρο προς υγρό
B_1	57.1÷71.2	Μεσόθερμα	B_1	20 ÷ 39.9	Υγρό
B_2	71.3÷85.5	Μεσόθερμα	B_2	40 ÷ 59.9	Υγρό
B_3	85.6÷99.7	Μεσόθερμα	B_3	60 ÷ 79.9	Υγρό
B_4	99.8÷114.0	Μεσόθερμα	B_4	80 ÷ 99.9	Υγρό
A	>114.0	Μεγάθερμα	A	>100	Διάβροχο

Με τα αποτελέσματα του ύψους δυνητικής εξατμισοδιαπνοής που υπολογίστηκαν και τα δεδομένα των βροχοπτώσεων που ήταν διαθεσιμα από την ΔΕΗ και την ΕΜΥ, σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα υδατικού ισοζυγίου για τις περιοχές των Καλαβρύτων και του Αιγίου του παρακάτω Σχήματος 3-11.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, στα ορεινά της Αιγιαλείας δημιουργείται πλεόνασμα ύδατος το οποίο συντηρεί μόνιμη ροή σε Σελινούντα και Βουραϊκό, και διαλείπουσα σε Κράθη και Κριό (όχι καθ'όλη τη διάρκεια του έτους). Οι μέσες ετήσιες παροχές, υπολογισμένες από την ΔΕΗ (Νίκας, 2004) εκτιμώνται σε 5 m^3/s (1965-1999), 3.3 m^3/s (1964-1967) αντίστοιχα και 1.7 m^3/s (1960-1978) για τον Κράθη.



Σχήμα 3-11 Διαγράμματα υδατικού ισοζυγίου κατά Thornthwaite για τα Καλάβρυτα και το Αίγιο. Πάνω δεξιά δίνονται επίσης και οι τιμές των σχετικών δεικτών και οι χαρακτηρισμοί του κλίματος που προκύπτουν από αυτούς. Σημειώνεται ότι στα Καλάβρυτα το θερινό έλλειμμα εδαφικής υγρασίας αναπληρώνεται γύρω στον Δεκέμβριο (κάθετη γραμμή), επιτρέποντας την επιφανειακή απορροή του νερού. Αντίθετα, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στο Αίγιο.

3.3 ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΚΑΛΥΨΗ ΓΗΣ

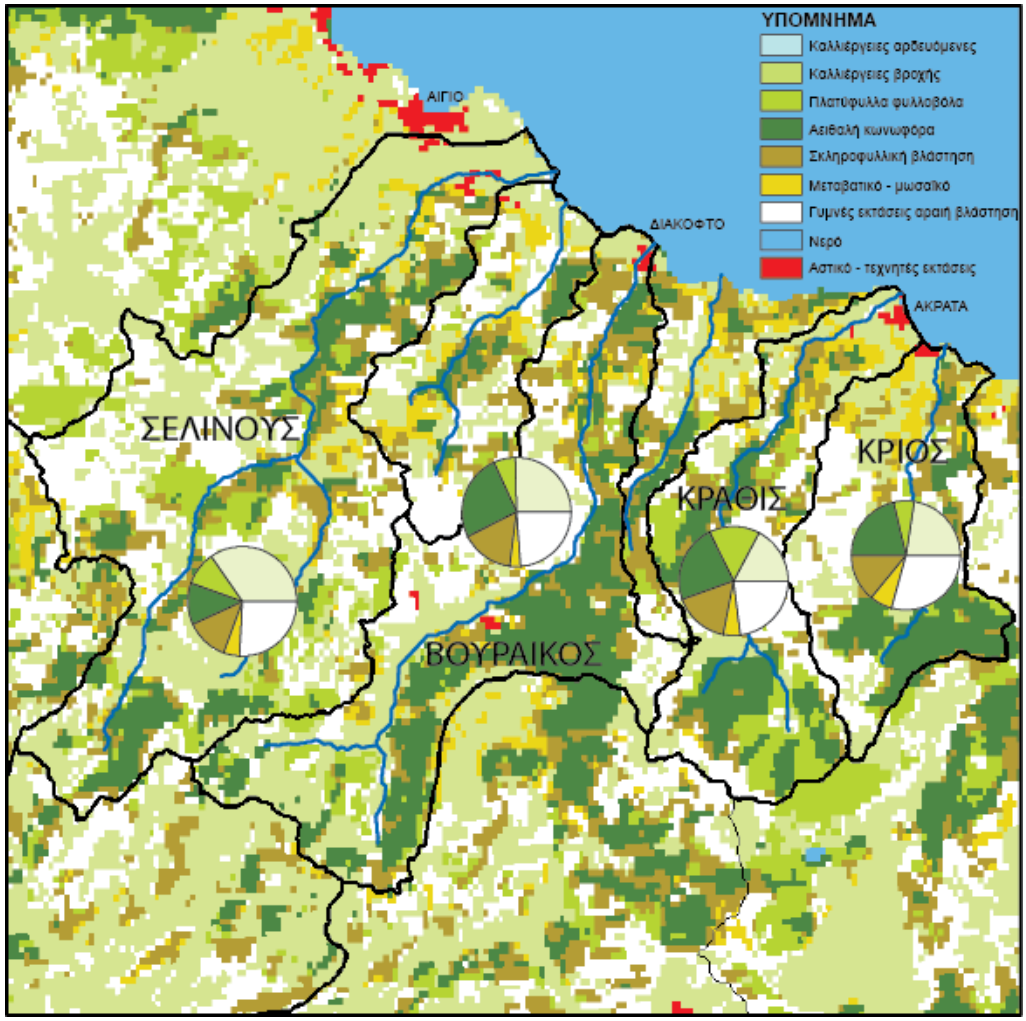
3.3.1 Διοικητική διαίρεση – Δημογραφικά στοιχεία

Η Αχαΐα, είναι ένας από τους επτά νομούς της Πελοποννήσου. Στην αρχαιότητα ονομαζόταν Αιγιαλός και αποτελείτο από δύο περιοχές, την ανατολική, που ήταν η Αιγιαλεία, με πρωτεύουσα την Σικυώνα και πληθυσμό Πελασγικό αρχικά και αργότερα Ίωνες, και τη δυτική περιοχή, τη χώρα των Επειών. Διοικητικά, ο νομός Αχαΐας υπάγεται στην Περιφέρεια Δυτικής Ελλάδος, μαζί με τους νομούς Αιτωλοακαρνανίας και Ηλείας. Η έκταση του νομού αντιστοιχεί στο 2,48% της έκτασης της χώρας και το 28,82% της έκτασης της Περιφέρειας Δυτικής Ελλάδας. Στην βορειανατολική Αχαΐα η μεγαλύτερη πόλη είναι το Αίγιο, που αποτελεί το δεύτερο λιμάνι, την δεύτερη πόλη σε πληθυσμό και το δεύτερο εμποροβιομηχανικό κέντρο μετά την Πάτρα. Στην διάρκεια των τελευταίων 50 ετών υπάρχει μια σαφής τάση αστικοποίησης, που εκδηλώνεται με εγκατάλειψη της ορεινής περιοχής (Επαρχία Καλαβρύτων) και αντίστοιχη αύξηση κυρίως της επαρχίας Πατρών, αλλά και δευτερευόντως και της επαρχίας Αιγιαλείας. Μόνο ένα μικρό ποσοστό (14 %) του πληθυσμού της περιοχής έρευνας διαμένει στις ορεινές περιοχές, ενώ το μεγαλύτερο μέρος (86 %) διαμένει στις αστικές περιοχές του πεδινού τμήματος και κυρίως στο Αίγιο (45 %).

Ως προς την απασχόληση των κατοίκων, ένας κύριος τομέας απασχόλησης είναι ο πρωτογενής, δηλαδή η γεωργία και κατά δεύτερο λόγο η κτηνοτροφία και η αλιεία. Ένα σημαντικό κομμάτι των κατοίκων, ασχολείται και με τον δευτερογενή τομέα, αν και τα τελευταία χρόνια σημειώνεται εκτεταμένη αποβιομηχάνιση της περιοχής, με το κλείσιμο αρκετών μεγάλων βιομηχανικών μονάδων. Παρά ταύτα συνεχίζει να λειτουργεί ένας αριθμός μικρών βιομηχανικών και βιοτεχνικών μονάδων. Οι περισσότερες από τις μονάδες αυτές είναι συγκεντρωμένες κυρίως γύρω από τις αστικές περιοχές Αιγίου, Διακοπτού και Καλαβρύτων. Τέλος, ιδιαίτερη ανάπτυξη στο νομό παρουσιάζει ο τομέας του τουρισμού, οποίος αναπτύσσεται κυρίως στις παράκτιες περιοχές του νομού, αλλά κατά δεύτερο λόγο και στα ορεινά, με τη δημιουργία ξενώνων και χιονοδρομικών κέντρων.

3.3.2 Χρήσεις και κάλυψη γης

Παρακάτω δίνονται σε 9 γενικευμένες κατηγορίες οι χρήσεις και η κάλυψη της γης από τον παγκόσμιο χάρτη χρήσεων γης της ESA, ο οποίος περιλαμβάνει 23 κατηγορίες (Global landcover map, 2009)



Σχήμα 3-12 Χάρτης χρήσης - κάλυψης γης της ευρύτερης περιοχής μελέτης (πηγή ESA).

Πίνακας 3-4 Ποσοστιαία κατανομή των 9 γενικευμένων κατηγοριών χρήσης-κάλυψης γης για τις λεκάνες απορροής της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

ΧΡΗΣΗ ΓΗΣ	Σελινούς	Βουραϊκός	Κράθης	Κριός
2.Καλλιέργειες βροχής	34	25	17	23
3.Πλατύφυλλα φυλλοβόλα	10	6	15	6
4.Αειθαλή κωνωφόρα	12	26	23	21
5.Σκληροφυλλική βλάστηση	13	15	16	14
6.Μεταβατικό – μωσαϊκό	5	3	5	7
7.Γυμνές εκτάσεις – αραιή βλάστηση	26	24	23	29

Μεγάλο μέρος της περιοχής καλύπτεται από καλλιέργειες αρδευόμενες από τη βροχή. Πρόκειται για ελαιώνες καθώς και μικρότερες εκτάσεις αμπελώνων και οποροφώρων δέντρων, κυρίως εσπεριδοειδών. Η φυσική βλάστηση (δάση, θαμνότοποι, φυσικοί βοσκότοποι) αποτελεί επίσης μεγάλο μέρος της κάλυψης. Οι περιοχές που καλύπτονται από φυσική βλάστηση, όπως φαίνεται και στον σχετικό χάρτη, είναι κυρίως οι ορεινές και ημιορεινές ζώνες, ενώ αντίθετα το σύνολο σχεδόν των πεδινών και παράκτιων περιοχών καλύπτεται από καλλιέργειες. Από τα δάση, το μεγαλύτερο μέρος είναι τα αειθαλή κωνοφόρα, συγκεκριμμένα τα δάση ελάτης που αναπτύσσονται στις ΒΔ υπώρειες του Χελμού και της Ζήρειας. Τέλος, μεγάλη έκταση καταλαμβάνεται από αραιή ή και καθόλου βλάστηση. Η ύπαρξη των εκτάσεων αυτών οφείλεται σε ένα βαθμό στις πυρκαγιές του 2007 (ο χάρτης του Σχήματος 3-12 είναι του 2009).

3.3.3 Δάση και δασικές εκτάσεις

Η δασική βλάστηση της λεκάνης του Βουραϊκού ανήκει στις διαπλάσεις των αειφύλλων πλατύφυλλων και της ελάτης. Εκτός αυτών συναντάται η χαλέπιος πεύκη στο βορειότερο τμήμα της λεκάνης, η Καστανιά παρά την Κέρτεζη, η πλατύφυλλος δρυς παρά το Σκεπαστό, καθώς και συστάδες και μεμονωμένα άτομα πλατάνου και ιτιάς που ακολουθούν την κοίτη του χειμάρρου καθώς και των παραχειμάρρων. Η χαλέπιος πεύκη σχηματίζει συστάδες μέσης μορφής με υποόροφο από τα πλατύφυλλα. Η ελάτη εμφανίζεται σε λωρίδα παρά τη κορυφογραμμή της ανατολικής κλιτύος της λεκάνης, από τα Καλάβρυτα μέχρι νότίως της Μονής Μεγάλου Σπηλαίου. Εκτός από κάποιες συστάδες στο Βραχνί και στο Σούβαρδο το υπόλοιπο δάσος είναι μετρίως πυκνό ή και αραιό. Από τα αείφυλλα πλατύφυλλα το μεγαλύτερο μέρος έχει τη μορφή βοσκοτόπου οφειλόμενου σε μεγάλο βαθμό στην έντονη βοσκή, την ξύλευση και εκρίζωση των θάμνων. Στη ζώνη των αειφύλλων πλατύφυλλων συναντάται κυρίως ο Πρίνος αλλά οι Κουμαριά, Φιλίκη, Ερείκη, Αριά και άλλα σκληροφυλλικά είδη σε μικρότερη αναλογία. Επίσης, κοντά στα Καλάβρυτα συναντώνται και Κερασιές.

Σε σχέση με την έκταση των αμιγώς δασικών εκτάσεων, εάν θεωρήσουμε συγκρίσιμα τα στοιχεία του Δασαρχείου Καλαβρύτων του 1939 (Πιν. 3-5) με τα σημερινά δεδομένα, σημειώνεται μια ανάκαμψη των δασών στην περιοχή, η οποία προφανώς οφείλεται στην ύφεση της βοσκής και της ξύλευσης στα νεώτερα χρόνια.

Πίνακας 3-5 Η εδαφοκάλυψη των λεκανών Βουραϊκού και Σελινούντα το 1939 (πηγή: Δασαρχείο Καλαβρύτων)

Εδαφοκάλυψη	*Βουραϊκός (στρ)*	*%*	*Σελινούς (στρ)*	*%*
Δάση υψηλά ή μέσα κωνοφόρων .	23,000	9,7		16,4
Δάση πρεμνοφυή πλατυφύλλων, Δρυός, Καστανιάς	20,000	8,4	50,000	13,6
Δασικές εκτάσεις με αραιή ή μη ανεπτυγμένη βλάστηση	110,000	46,2	125,000	34,2
Αλπικές εκτάσεις	5,000	2,1	-	
Γεωργικώς καλλιεργούμενες γαίες	80,000	33,6	115,000	31,5
Εντελώς γυμνές εκτάσεις (αποψιλωθείσες)	-	-	15,000	4,1
ΣΥΝΟΛΟ	238,000	100	365,000	100

3.3.4 Δορυφορικοί δείκτες βλάστησης και φαινολογία

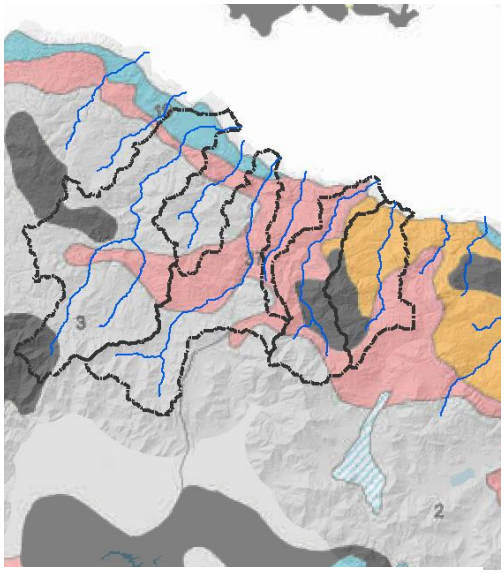
Ο κύριος στόχος πολλών προϊόντων τηλεπισκόπησης είναι ο χαρακτηρισμός του τύπου, της ποσότητας καθώς και της κατάστασης της βλάστησης που είναι παρούσα στην δορυφορική εικόνα. Η ένταση της ανακλώμενης από κάποια επιφάνεια ακτινοβολίας εξαρτάται από την ένταση και την σύσταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και τις ανακλαστικές ιδιότητες της επιφάνειας. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται με τον χρόνο και τις συνθήκες της ατμόσφαιρας, μια απλή μέτρηση του ανακλώμενου φωτός δεν αρκεί για τον χαρακτηρισμό της επιφάνειας με έναν συνεχή, επαναλαμβανόμενο τρόπο. Αυτό το πρόβλημα λύνεται αν συνδυαστούν μετρήσεις από δύο φασματικά κανάλια για να σχηματιστεί ένας *δείκτης βλάστησης* (Vegetation Index, VI). Οι δείκτες βλάστησης κατασκευάζονται παίρνοντας διαφορές, λόγους, λόγους διαφορών ή αθροισμάτων ή σχηματίζοντας γραμμικούς συνδυασμούς των καναλιών. Οι δείκτες βλάστησης σκοπό έχουν να ενισχύσουν το σήμα της βλάστησης, ελαχιστοποιώντας τις επιπτώσεις της ηλιακής ακτινοβολίας και των ανακλαστικών ιδιοτήτων του εδάφους Οι κυριώτεροι δείκτες βλάστησης είναι ο δείκτης κανονικοποιημένων διαφορών, NDVI (Normalised Difference VI), και ο ενισχυμένος δείκτης βλάστησης, EVI (Enhanced VI). Οι δείκτες αυτοί παρέχονται ως *προϊόντα* (products) του οργάνου MODIS, του δορυφόρου Terra της NASA. *Φαινολογία* είναι ο επιστημονικός κλάδος που περιλαμβάνει τον προσδιορισμό, την καταγραφή, τη μελέτη και τη διερεύνηση της έναρξης και της λήξης των διαφόρων σταδίων

ανάπτυξης των φυτών, καθώς και των δραστηριοτήτων της πανίδας από έτος σε έτος και σε σχέση πάντοτε με τις μεταβολές και τις αλλαγές του καιρού και του κλίματος. Στα ετήσια στάδια ανάπτυξης των φυτών περιλαμβάνεται η έκπτυξη φύλλων, η ανθοφορία, το πέταγμα της γύρης, η ωρίμανση των καρπών, το κιτρίνισμα και η πτώση των φύλλων κ.ά.

Προκειμένου για την δορυφορική φαινολογία, ο ετήσιος κύκλος χαρακτηρίζεται από 4 κύριες ημερομηνίες μετάβασης: α) *άνθηση*, η ημερομηνία έναρξης της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, 2) *ωριμότητα*, η ημερομηνία κατά την οποία η φυλλική επιφάνεια λαμβάνει τη μέγιστη τιμή, 3) *γηρασμός*, η ημερομηνία που ξεκινά η απότομη πτώση της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας και 4) *αδράνεια*, η ημερομηνία που η φωτοσυνθετική δραστηριότητα σχεδόν μηδενίζεται. Αυτοί οι κύκλοι για την περιοχή μελέτης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-14 που ακολουθεί.

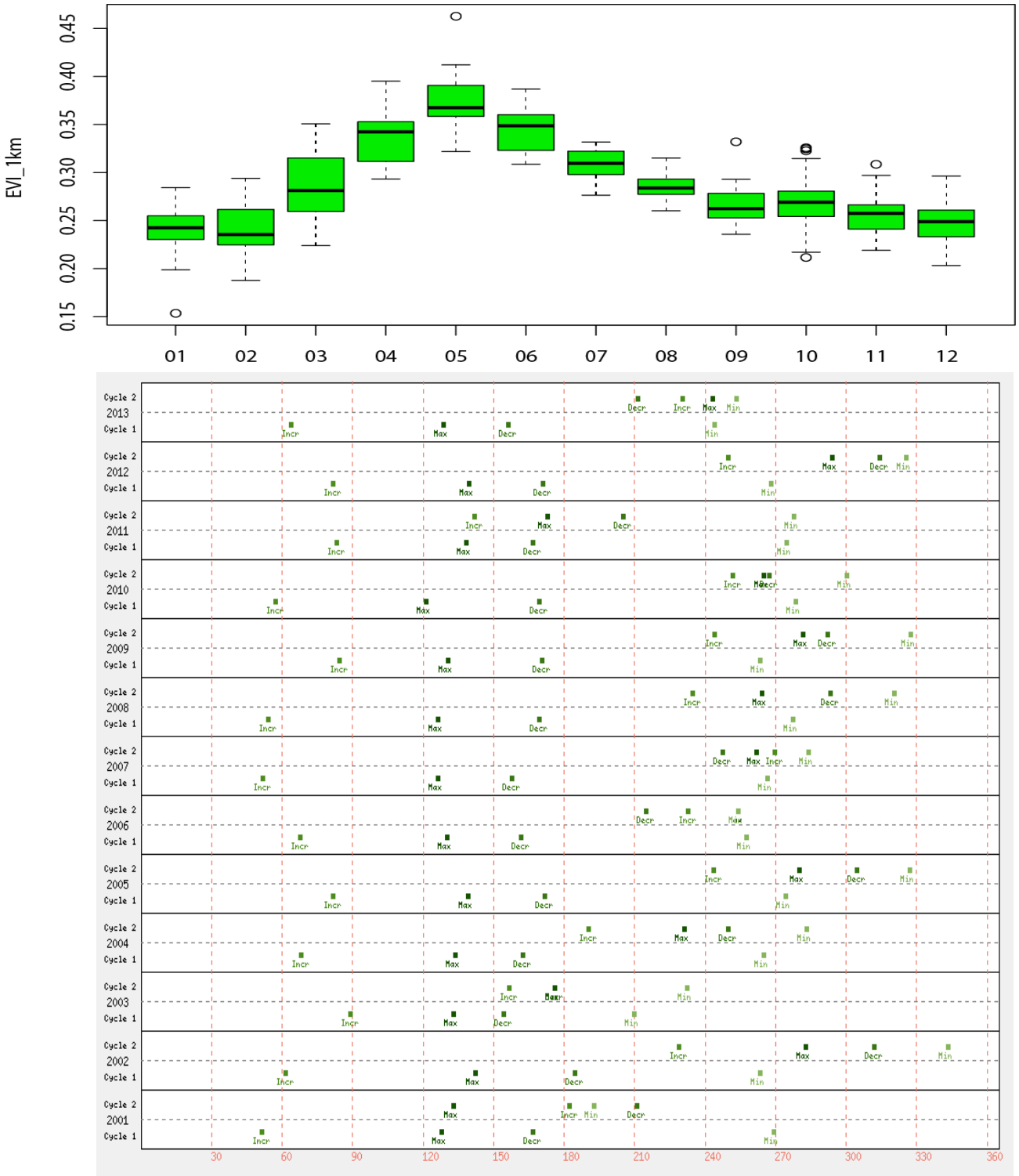
3.3.5 Εδάφη

Ο σχηματισμός των εδαφών είναι ένα από τα κύρια αποτελέσματα της αποσαρθρώσεως των πετρωμάτων. Οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν το σχηματισμό των εδαφών είναι το *μητρικό πέτρωμα*, το *κλίμα*, το *ανάγλυφο*, το *βιοέδαφος* (η φυτοκάλυψη και οι ζωντανοί οργανισμοί που διαβιούν στο έδαφος) και ο *χρόνος* (Παπαπέτρου-Ζαμάνη, 1995). Από τους παραπάνω παράγοντες, το κλίμα και ο χρόνος έχουν συχνά απομονωθεί σαν πιο σημαντικοί. Το κλίμα είναι σε μεγάλο βαθμό συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους του τόπου και οι παρατηρήσεις των εδαφολόγων ότι τα εδάφη διανέμονταν σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος, δηλαδή ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες και ήταν αρκετά ανεξάρτητα του μητρικού πετρώματος, οδήγησε στην ταξινόμηση των εδαφών σε *ζωνοεδάφη*, δηλαδή σε μεγάλες ζώνες γεωγραφικού πλάτους. Τα εδάφη εκείνα των οποίων τα χαρακτηριστικά προσδιορίζονται από τις τοπικές συνθήκες ονομάζονται *ενδοζωνοεδάφη*. Σε αυτή την ταξινόμηση εντάσσονται και τα *αζωνικά* εδάφη των οποίων οι εδαφοτομές δεν έχουν αναπτυχθεί καλά ή απουσιάζουν εντελώς. Υπάρχουν και άλλες κατατάξεις εδαφών μεταξύ των οποίων είναι η ταξινόμηση FAO/UNESCO καθώς και της αμερικάνικης USDA

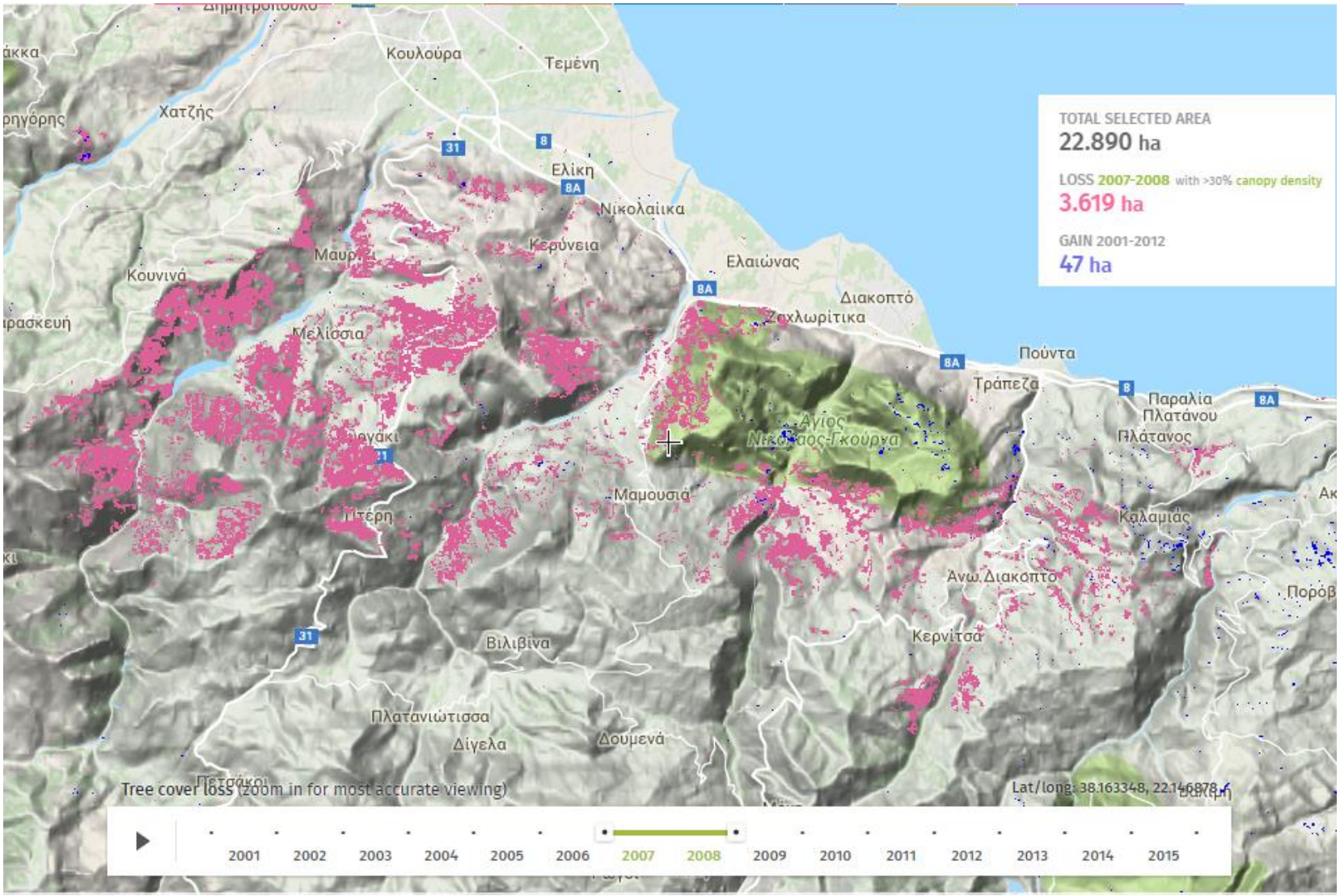


Σχήμα 3-13 Κατάταξη εδαφών της περιοχής μελέτης κατά FAO, 1998. (από Ν. Γιάσογλου, 2004).

που αναγνωρίζει 10 κύριες τάξεις με υποτάξεις σε κάθε μία από τις κύριες. Οι κύριες τάξεις στο αμερικάνικο σύστημα είναι τα Έντισολς, τα Ινσέπτισολς, τα Ίστοσολς, τα Βέρτισολς, τα Μόλισολς, τα Αρίντισολς, τα Σποντοσολς, τα Άλφισολς, τα Ούλτισολς και τα Όξισολς.



Σχήμα 3-14 Πάνω, κυτιόγραμμα του EVI για την περιοχή των Καλαβρύτων, συνδυασμένο με φαινολογικά διαγράμματα της ίδιας περιοχής (κάτω) για τα έτη 2001 έως και 2013, και τα δύο από προϊόντα MODIS. Ο κύριος κύκλος της βλάστησης (cycle 1) ξεκινά κατά τον Μάρτιο-Απρίλιο (άνθηση), ωριμάζει τον Μάϊο (μέγιστο), ξεκινά τον γηρασμό του τον Ιούνιο για να πέσει σε αδράνεια κατά τους μήνες Σεπτέμβριο – Οκτώβριο. Υπάρχει και δεύτερος κύκλος (cycle 2) ο οποίος ολοκληρώνεται στους μήνες Σεπτέμβριο έως Νοέμβριο.



Σχήμα 3-15 Απώλεια δασών και δασικών εκτάσεων (με πάνω από 30% πυκνότητα βλάστησης) στις πυρκαγιές του 2007 και 2008 που έπληξαν την περιοχή μελέτης. (Πηγή: http://www.globalforestwatch.org). Συνολικά, σύμφωνα με τον παραπάνω οργανισμό, στην ζώνη μεταξύ του δυτικού υδροκρίτη του Σελινούντα και του ανατολικού υδροκρίτη του Κριού (ζώνη μεταξύ Δερβενίου και Αιγίου), κατά τα έτη 2007 και 2008 χάθηκαν περίπου 36 km^2 δασικών εκτάσεων.

Στο Σχήμα 3-13 απεικονίζεται η κατάταξη κατά FAO (1998) από την Εθνική επιτροπή κατά της ερημοποίησης. Τα εδάφη με ανοιχτό γκρίζο χρώμα (2 και 3) αναφέρονται σαν Leptosols (calcaric Leptosols) με μητρικό υλικό τον ασβεστόλιθο. Τα εδάφη με ροζ χρώμα (37) σαν Luvisols, με μητρικό υλικό κροκαλοπαγή Τεταρτογενούς ηλικίας και Πλειστοκαινικής ηλικίας αποθέσεις, με κίτρινο (28) τα Cambisols με μητρικό υλικό ασβεστούχα κροκαλοπαγή, και τέλος, με μπλέ (19) τα Fluvisols με μητρικό υλικό αλλουβιακες αποθέσεις ηλικίας Ολόκαινου. Με μαύρο είναι οι εμφανίσεις πετρώδους υπόβαθρου (outcrops).

Τα εδάφη της περιοχής μελέτης, είναι κυρίως ρεντζίνες επί των ασβεστολίθων, λεπτόκοκκα ασβεστούχα εδάφη βασικά, ασυνεχή και αβαθή ως επι το πλείστον. Την παραλιακή ζώνη των ριπιδίων καταλαμβάνουν αλλουβιακά αποθέματα που προέρχονται από τους ποταμούς της περιοχής, ενώ όμορη ζώνη σημαντική έκτασης καταλαμβάνουν μαργογενείς ρεντζίνες με αξιόλογο βάθος και συνέχεια (Κατακουζηνός, 1967). Στα ανατολικά υπάρχουν όξινα ποντζολικά εδάφη, επίσης ασυνεχή και αβαθή, ενώ στις κορυφές των ορέων υπάρχουν αλπικά χουμώδη, τύπου Ranker, ασυνεχή και μικρού βάθους. Τα εδάφη αυτά, στην αμερικάνικη κατάταξη ανήκουν στην κατηγορία των Μόλισολς και την υποκατηγορία των Ξέρολς.

3.4 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάστηκε η ευρύτερη περιοχή μελέτης που αποτελείται από το ανατολικό τμήμα του νομού Αχαίας και ταυτίζεται σχεδόν με τα όρια του Δήμου Αιγιαλείας, ως προς τη γεωλογία – λιθολογία, το κλίμα, τις χρήσεις-κλύψεις γης και την γεωμορφολογία της. Η γεωλογία της περιοχής εντάσσεται στην ενότητα Ωλονού – Πίνδου και κυρίως περιλαμβάνει φαιόχρωμους ασβεστόλιθους, λεπτοπλακώδεις και πολυπτυχωμένους καθώς και ερυθρούς ραδιολαρίτες. Μεγάλο τμήμα της περιοχής καταλαμβάνεται από κροκαλοπαγή Πλειοπλειστοκαινικής ηλικίας, σημαντικού βάθους. Ο τεκτονισμός της περιοχής εκδηλώνεται με ένα σύστημα ρηγμάτων γενικής κατεύθυνσης Α-Δ. Τα ρήγματα αυτά, σχεδόν κάθετα στην κοίτη του Βουραϊκού ποταμού, δημιουργούν σημεία κάμψης (knick points) τα οποία ελέγχουν κάθε φορά την εξέλιξη των ανάντι τμημάτων του ποταμού, όπου συντελείται ισχυρή κατά βάθος καθώς και οπισθοδρομούσα διάβρωση.

Το κλίμα της περιοχής παρουσιάζει σημαντική διαφοροποίηση από την παράκτια ζώνη έως τους ορεινούς όγκους της ενδοχώρας. Στις παράκτιες ζώνες επικρατεί ο ξηρός – άνω μεσόθερμος θαλάσσιος μεσογειακός τύπος, στο εσωτερικό κυριαρχεί ο χερσαίος υγρός – κάτω μεσόθερμος μεσογειακός τύπος, ενώ στους ορεινούς όγκους, ο ορεινός τύπος κλίματος. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στην περιοχή των Καλαβρύτων ξεπερνά τα 850 χιλιοστά και στο Αίγιο σχεδόν φτάνει τα 700 χιλιοστά.

Η βλάστηση είναι πλούσια κυρίως στο εσωτερικό όπου δεσπόζουν μεγάλα δάση ελάτης στις υπώρειες του Χελμού και του Ερύμανθου, ενώ στα παράλια επικρατούν οι αγροτικές δενδρώδεις καλλιέργειες βροχής, κυριώς ελαιώνες καθώς και πευκώνες χαλεπίου πεύκης. Η χαλέπιος πεύκη σχηματίζει συστάδες μέσης μορφής με υποόροφο από πλατύφυλλα και γενικά σκληροφυλλικά είδη. Συστάδες και μεμονωμένα άτομα πλατάνου και ιτιάς ακολουθούν την κοίτη των χειμάρρων. Ωστόσο, ένα μεγάλο τμήμα του εδάφους είναι γυμνό, γεγονός που οφείλεται εν μέρει και στις πυρκαγιές του 2007.

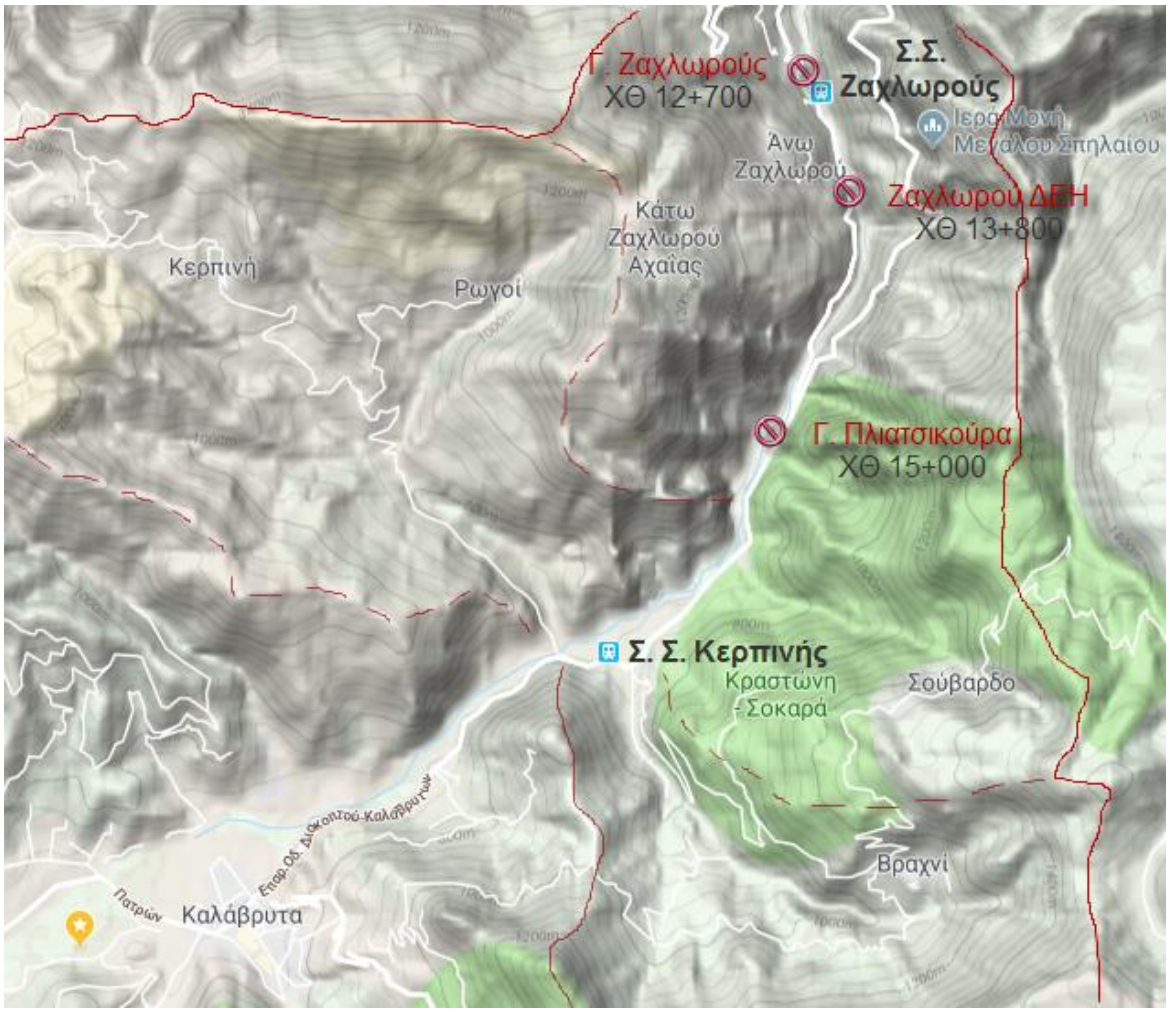
Τα εδάφη της περιοχής στο μεν νότιο τμήμα είναι ασβεστολιθικής προέλευσης ουδέτερα με αργιλλοπηλώδη έως αργιλλώδη υφή ενώ στο βόρειο τμήμα υπάρχουν εδάφη από ασβεστούχες νεογενείς αποθέσεις, αλκαλικά με ποικίλη υφή. Υπάρχουν επίσης και εκτεταμμένες εμφανίσεις βράχων. Εκτός των αλλούβιων αποθέσεων της παραλιακής ζώνης τα εδάφη γενικά είναι ασυνεχή και μικρού βάθους.

Η ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση της λεκάνης απορροής αναδεικνύει το υψηλό διαβρωτικό δυναμικό των λεκανών της ευρύτερης περιοχής μελέτης, ανάμεσα στους οποίους όμως ο Βουραϊκός δεν φαίνεται να είναι ο πιο παραγωγικός.

4 ΔΕΔΟΜΕΝΑ, ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται :

1. Οι μετρήσεις που έγιναν κατά την διάρκεια των επισκέψεων στον Βουραϊκό ποταμό, τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η βασική θεωρία των μετρήσεων με τα όργανα αυτά. Οι μετρήσεις αυτές περιλαμβάνουν τοπογραφικές αποτυπώσεις, υδρομετρήσεις (μετρήσεις ταχυτήτων και παροχών), γεωμορφολογικές μετρήσεις (κροκαλομετρίες και χαλικομετρήσεις) καθώς και δειγματοληψίες φερτών, που χωρίζονται σε μετρήσεις αιωρούμενου φορτίου και μετρήσεις πυθμενικού φορτίου.
2. Οι πηγές και η μεθοδολογία επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων, και
3. Οι πηγές, τα υπόβαθρα και η επεξεργασία των δεδομένων των γεωλογικών, γεωμορφολογικών και υδρολογικών παραγόντων του στατιστικού μοντέλου.



Σχήμα 4-1 Οι θέσεις των μετρήσεων. Η Γέφυρα Πλιατσικούρα, ο υδρομετρικός σταθμος της ΔΕΗ και το γεφυράκι της Ζαχλωρούς εκτείνονται σε ένα μήκος 3 χιλιομέτρων πάνω στον ποταμό. Οι χιλιομετρήσεις είναι της σιδηροδρομικής γραμμής του Οδοντωτού.

Σχήμα 4-2 Προοπτική θέα της περιοχής των μετρήσεων και της λιθολογίας της.

4.1 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ

Έγιναν πλήρεις τοπογραφικές αποτυπώσεις σε 3 θέσεις του ποταμού. Στις Αυλές Καλαβρύτων, στην θέση του υδρομετρικού σταθμού της ΔΕΗ (Ζαχλωρού ΔΕΗ), καθώς και στην θέση του γεφυριού του Πλιατσικούρα. Οι αποτυπώσεις έγιναν με θεοδόλιχο και με Laser Scanner (Πίνακας 4-1). Σκοπός των αποτυπώσεων ήταν η απόδοση του εδάφους με την απαραίτητη λεπτομέρεια, έτσι ώστε κατ' αρχάς να μπορεί να υπολογιστεί η κλίση της βαθιάς γραμμής με ασφάλεια. Τα μοντέλα εδάφους που προέκυψαν από τις αποτυπώσεις χρησίμευσαν για την δημιουργία επιφάνειας στο πρόγραμμα HEC-RAS, όπου έγιναν και οι υδραυλικές προσομοιώσεις και αναλύσεις. Επιπλέον, με τη χρήση του Laser scanner, δόθηκε η δυνατότητα να αποτυπωθούν λεπτομερειακά οι αναβαθμίδες του ποταμού στην Ζαχλωρού ΔΕΗ, καθώς και ο κώνος πρόσχωσης που δημιουργείται από τις ρηχές κατολισθήσεις υλικού μισγάγγειας που συμβάλλει 65 μέτρα περίπου μετά τον υδρομετρικό σταθμό της ΔΕΗ στην Ζαχλωρού.

Πίνακας 4-1 Συγκεντρωτική κατάσταση των τοπογραφικών αποτυπώσεων που έγιναν

Ημ/νία	*Θέση*	*Όργανο*	*Παρατηρήσεις*
26-27 /4/2013	Αυλές	Γεωδαιτικός σταθμός LEICA	Αποτύπωση ζώνης ποταμού μήκους ~ 150 μ.
4-5/10/2014	Ζαχλωρού ΔΕΗ	Γεωδαιτικός σταθμός LEICA	Αποτύπωση ζώνης ποταμού μήκους ~ 150 μ.
17-18/11/2014	Ζαχλωρού ΔΕΗ + Γ. Πλιατσικούρα	Laser scanner LEICA	Αποτύπωση ζώνης ποταμού μήκους ~ 150 μ. + Μία στάση οργάνου
29-30/10/2016	Γ. Πλιατσικούρα	Γεωδαιτικός σταθμός LEICA	Αποτύπωση ζώνης ποταμού μήκους ~ 360 μ.
25/2/2017	Γ. Πλιατσικούρα	Γεωδαιτικός σταθμός LEICA	Συμπλήρωση της προηγούμενης αποτύπωσης

Σχήμα 4–3 Φωτογραφίες από τις εργασίες αποτύπωσης.

4.2 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

Στην παρούσα μελέτη αξιοποιήθηκαν μετρήσεις των ποσοτικών μορφομετρικών χαρακτηριστικών των υδρογραφικών δικύων και των αντίστοιχων λεκανών απορροής τους από διαφορετικές πηγές. Η πρώτη πηγή είναι οι υπολογισμοί που είχαν γίνει σε αναλογικούς χάρτες (αλλά σε περιβάλλον GIS) των βασικών γεωμετρικών μεγεθών στα πλαίσια μικρού ερευνητικού προγράμματος στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο (Karalis et al, 2014). Υπολογίστηκαν τα μήκη των κλάδων των υδρογραφικών δικτύων, τα εμβαδά των λεκανών απορροής, οι περιμετροί τους, τα μήκη των ισοϋψών εντός των λεκανών, καθώς και όλοι οι παράγωγοι δείκτες για τη λεκάνη απορροής των ποταμών της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Η δεύτερη πηγή είναι το πρόσθετο r.basin (Di Leo & Di Stefano, 2013) του λογισμικού GRASSv.7 που υπολογίζει αυτόματα 31 μορφομετρικές παραμέτρους και δείκτες καθώς και τις στατιστικές των υδρογραφικών δικτύων, με μόνη είσοδο το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο επιφάνειας της λεκάνης και τις συντεταγμένες του σημείου εξόδου.

Το υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους (ΨΥΜΕ) ανάλυσης 25m που προέκυψε από τους τοπογραφικούς χάρτες της ΓΥΣ κλίμακας 1:50.000 με ισοδιάσταση 20m. Το υπόβαθρο αυτό είναι το ίδιο και για τις δύο πηγές (Σχήμα 2-32). Έχει ενδιαφέρον να συγκριθούν τα αποτελέσματα από τις διαφορετικές μεθόδους. Σημειώνεται ότι οι υπολογισμοί στο r.basin εγιναν με δύο κατώφλια δημιουργίας ρεύματος, 1km^2 (1000 στρ.) και 0.01 km^2 (10 στρ.), που αναφέρονται σαν πηγές 2α και 2β στον Πίνακα 2-7. Με 1 σημειώνονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις. Το σημείο εξόδου έχει τοποθετηθεί στην έξοδο του ποταμού από την κοιλάδα, δηλαδή στην κορυφή του δελταϊκού του ριπίδιου. Οι υπολογισμοί του ερευνητικού (πηγή 1) με τη πηγή 2β (r.basin με κατώφλι 0.01 km^2) γενικά είναι σε καλή συμφωνία εκτός ίσως από τις περιμέτρους των λεκανών.

Παρατηρείται ότι η τιμή του κατωφλίου δημιουργίας ρεύματος είναι η βασική παράμετρος που καθορίζει την τάξη και τα μήκη του δικτύου, ενώ δεν επηρεάζει τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, με την πηγή 2α οι Σελινούς, Βουραϊκός και Κριός ήταν 4^{ης} τάξης κλάδοι και ο Κράθης ήταν 3^{ης} τάξης, ενώ με την αλλαγή στο κατώφλι γίναν όλοι 6^{ης} τάξης, εκτός από το Κριό που έγινε 5^{ης} τάξης. Υπάρχει μια όχι μικρή υπερεκτίμηση της περιμέτρου από το πρόγραμμα r.basin σε ότι αφορά τις λεκάνες των ποταμών Σελινούντα και Βουραϊκού, της τάξης του 15%, η οποία μάλλον οφείλεται στους λόγους που αναφέρθηκαν στο Εδάφιο 2.4.2.

Πίνακας 4-2 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών μεθόδων μέτρησης των βασικών μορφομετρικών μεγεθών.

	Σελινούς			*Βουραϊκός*			*Κράθης*		
Πηγή	***1***	***2α***	***2β***	***1***	***2α***	***2β***	***1***	***2α***	***2β***
A, km^2	330	335	335	239	237	237	143	145	139
P, km	109	122	122	112	125	125	75.8	61.9	61.9
N, (πλήθος κλάδων)	-	101	1081	-	69	770	-	41	391
ΣL_{ch} *μήκους κλάδων , km*	741	218	745	554	141	537	390	82.6	259
Κλίση (%)	48.6	19.6	19.6	42.0	19.5	19.5	55.1	22.6	18.9

Αντίθετα, στον Κράθη η περίμετρος είναι μικρότερη κατά περίπου 12%, ενώ και το συνολικό μήκος του δικτύου είναι σημαντικά μικρότερο. Οι διαφορές στη θέση του σημείου εξόδου (όπως φαίνεται από τα διαφορετικά εμβαδά), δεν δικαιολογούν τόσο μεγάλη απόκλιση στα μήκη των κλάδων. Για να διατηρηθεί κοινή η βάση σύγκρισης θα υιοθετηθεί στη συνέχεια η πηγή 2β, εκτός από τις κλίσεις που θα παρθούν από την πηγή 1 (έχει διαπιστωθεί ότι οι κλίσεις στο GRASS βγαίνουν περίπου 50% μικρότερες από ότι στο Arc-GIS). Οι τιμές των παραμέτρων που υπολογίστηκαν δίνονται παρακάτω στους πίνακες 4-3 και 4-4, ενώ οι τύποι υπολογισμού και οι αναφορές παρουσιάζονται στον Πιν.2-9, στο εδάφιο 2.4.3.

Πίνακας 4-3 Οι τιμές των ποσοστικών γεωμορφολογικών παραμέτρων των υδρογραφικών δικτύων και των αντιστοίχων λεκανών απορροής της ευρύτερης περιοχής.

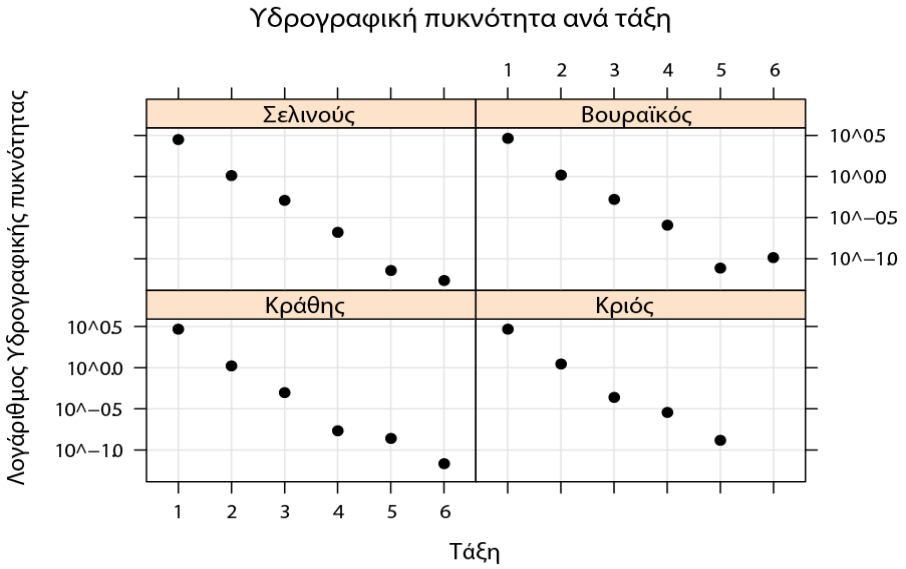
Ποταμός	*Τάξη*	*Πλήθος κλάδων N*	*ΣL_{ch} km*	*A km^2*	*Δείκτης αναγλύφου R (H_{max}-H_{min}) m*	*Μήκος κύριου κλάδου km*	*Μέση κλίση κλιτύων (%)*
Σελινούς	6	1081	745.89	335.6	2057	43.3	48.6
Βουραϊκός	6	770	537.59	237.0	2246	42.0	42.0
Κράθης	6	437	293.19	145.4	2261	29.9	55.1
Κριός	5	391	259.21	112.6	1845	23.4	39.8

Πρέπει, τέλος, να διευκρινιστεί ότι οι μετρήσεις αφορούν την προβολή μηκών και επιφανειών πάνω σε ένα οριζόντιο επίπεδο, και επομένως τα πραγματικά μεγέθη είναι τόσο μεγαλύτερα όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση του αναγλύφου. Επιπλέον, προκειμένου για μεγάλης έκτασης επιφάνειες της γης, σημαντική είναι η επιλογή του γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς (ισεμβαδικές προβολές).

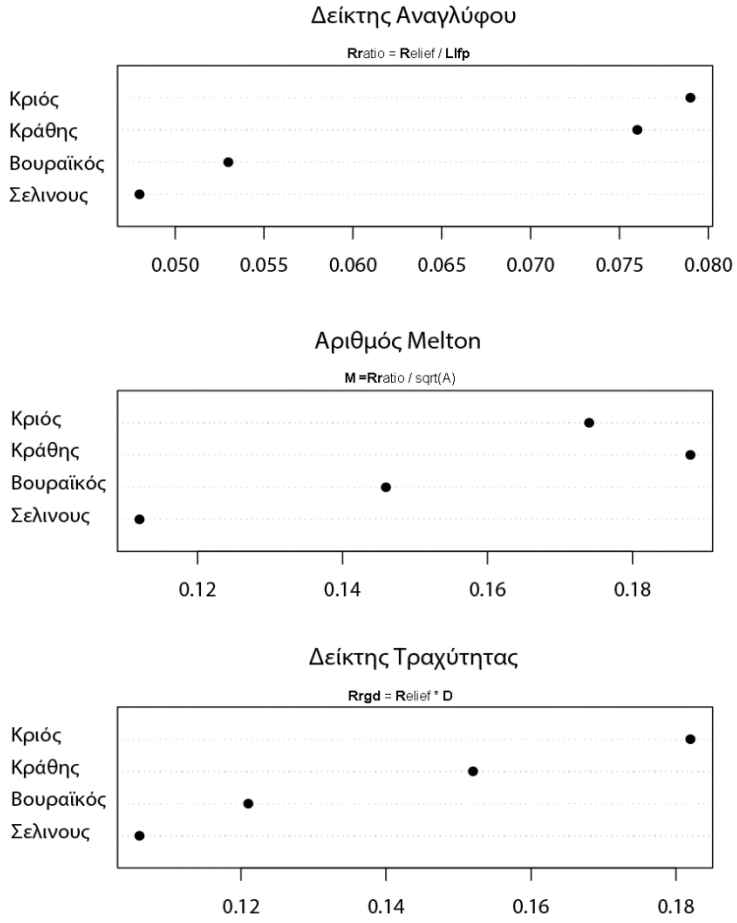
4.2.1 Υπολογισμός των δεικτών

Πίνακας 4-4 Τιμές 26 μορφομετρικών παραμέτρων για τις λεκάνες της περιοχής μελέτης όπως υπολογίστηκαν από το r.basin. (**e: η ισοδιάσταση των ισοϋψών, ΣL_{con} το άθροισμα των μηκών των ισοϋψών εντός της λεκάνης απορροής).**

Μορφομετρικές παράμετροι και δείκτες	*Τύπος*	*Σελι-νούς*	***Βουραϊ-κός***	*Κρά-θης*	*Κριός*
Εμβαδόν λεκάνης **A** (km^2)		335	237	139	112
Περίμετρος λεκάνης **P** (km)		122	125	79	62
Μέγιστο υψόμετρο λεκάνης $\mathbf{H_{max}}$ (m)		2128	2317	2335	1862
Υψόμετρο της εξόδου λεκάνης $\mathbf{H_{out}}$ (m)		70	70	73	17
Δείκτης αναγλύφου λεκάνης **R** (m)		2057	2246	2261	1845
Μέσο υψόμετρο λεκάνης $\mathbf{H_{avg}}$ (m)		897	981	1147	1021
Κλίση των κλιτύων λεκάνης **Sl** (%)	$\mathbf{Sl} = e*\Sigma L_{con}/ A$	19.6	19.6	23	18.9
Μήκος κυρίου ρεύματος $\mathbf{L_{lfp}}$ [km]		17.7	17.5	12.6	9.9
Δείκτης συγκέντρωσης	$\mathbf{Comp} = P/2\sqrt{\pi A}$	5.92	7.19	5.95	5.17
Δείκτης κυκλικότητας	$\mathbf{Circ} = 4\pi A/P^2$	0.28	0.19	0.28	0.37
Δείκτης επιμήκυνσης	$\mathbf{Elong}=2\sqrt{(A/\pi)}/L_{lfp}$	0.48	0.41	0.45	0.51
Δείκτης μορφής – (Shape Factor)		7.75	5.65	4.67	4.81
Χρόνος συγκέντρωσης [hr]		3.81	3.29	2.42	2.26
Μήκος κύριου ρεύματος [km]		43.3	42.02	29.92	23.39
Μέση κλίση κύριου ρεύματος %		4.47	4.15	5.91	7.50
Μέσο μήκος κλιτύων [m]		5697	4731	3745	4156
Μέγιστη τάξη (Strahler)		6	6	6	5
Πλήθος κλάδων ολικό, **N**		1081	770	437	391
Συνολικό μήκος κλάδων $\mathbf{\Sigma L_{ch}}$ [km]		746	538	293	259
Υδρογραφική συχνότητα Α τάξης [N/km^2]	$\mathbf{F} = N / \Sigma L_{ch}$	2.13	2.08	1.78	2.23
Υδρογραφική πυκνότητα [km/km^2]	$\mathbf{D} = \Sigma L_{ch} / A$	2.22	2.26	2.10	2.31
Λόγος διακλάδωσης -Bifurcation Ratio		4.02	3.72	3.31	3.98
Λόγος μήκους - Length Ratio		2.09	2.02	1.88	2.27
Λόγος επιφανείας - Area ratio		4.74	4.15	3.96	4.86
Λόγος κλίσης - Slope ratio		1.77	2.30	1.52	1.45

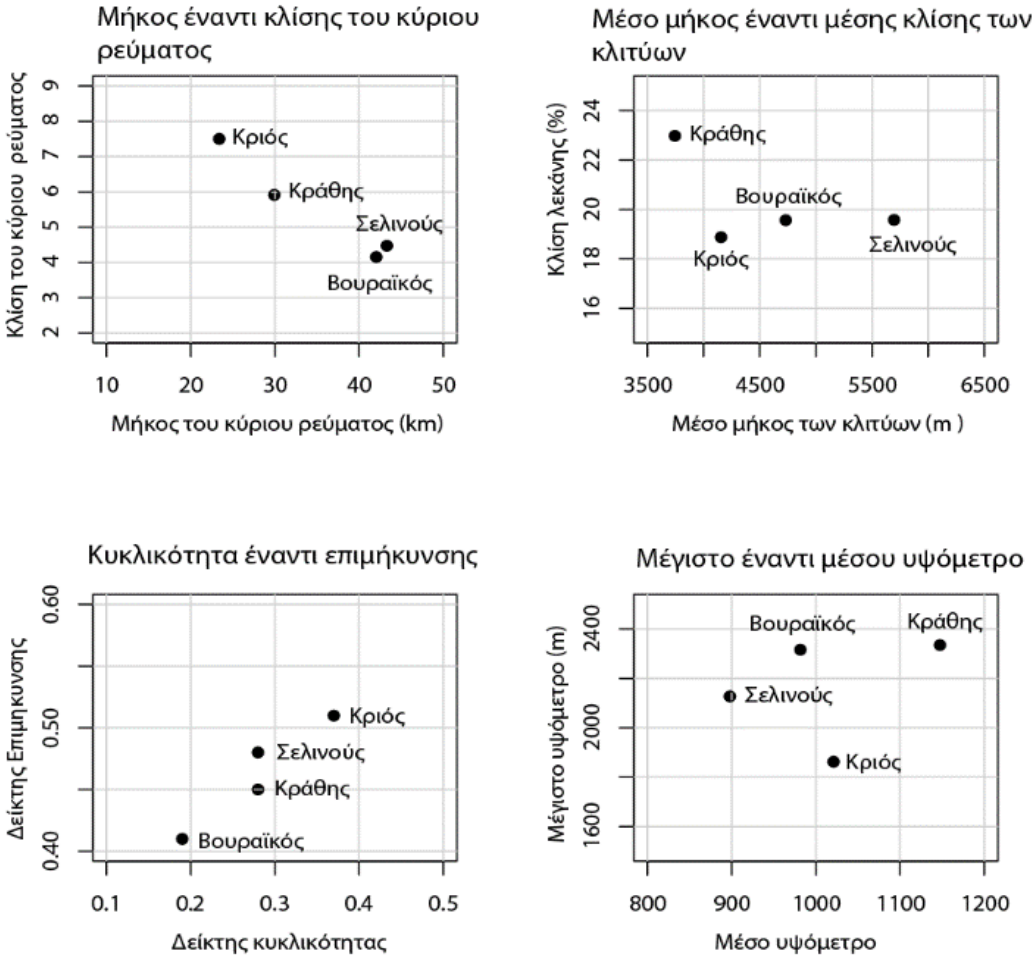


Σχήμα 4-4 Οι λογάριθμοι της υδρογραφικής πυκνότητας ανά τάξη, σχηματίζουν μια καλά ορισμένη γεωμετρική σειρά με εξαίρεση τον Βουραϊκό, ίσως λόγω της μικρής έκτασης του καθαρού εμβαδού 6ης τάξης λόγω του φαραγγιού.



Σχήμα 4-5 Τρείς αδιάστατοι σύνθετοι δείκτες για τις 4 λεκάνες της ευρύτερης περιοχής μελέτης .

Οι τιμές της υδρογραφικής πυκνότητας παρουσιάζουν μια σταδιακή πτώση με την άνοδο της τάξης ακολουθώντας τον κανόνα της υδρογραφικής υφής. Αυτό σημαίνει ότι σταδιακά μεγαλύτερες εκτάσεις αποστραγγίζονται από μικρότερα μήκη κλάδων. Εξαίρεση αποτελεί η μετάβαση στην 6^{η} τάξη για το υδρογραφικό δίκτυο του Βουραϊκού ποταμού. Η πιθανότερη αιτία είναι η σχετικά μικρή έκταση λεκάνης που αντιστοιχεί στον κλάδο 6^{ης} τάξης εξαιτίας της κατά βάθους διάβρωση της κεντρικής κοίτης του ποταμού, που έχει διαμορφώσει ένα έντονο φαράγγι και λεκάνη μικρού πλάτους.

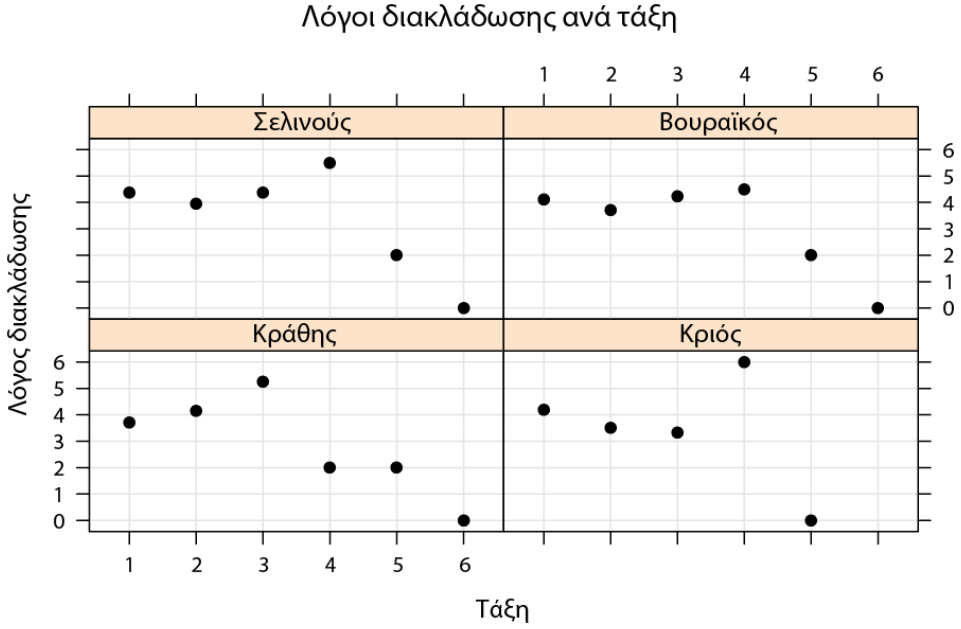


Σχήμα 4-6 Διαγράμματα συσχέτισης για κάποιους επιλεγμένους δείκτες.

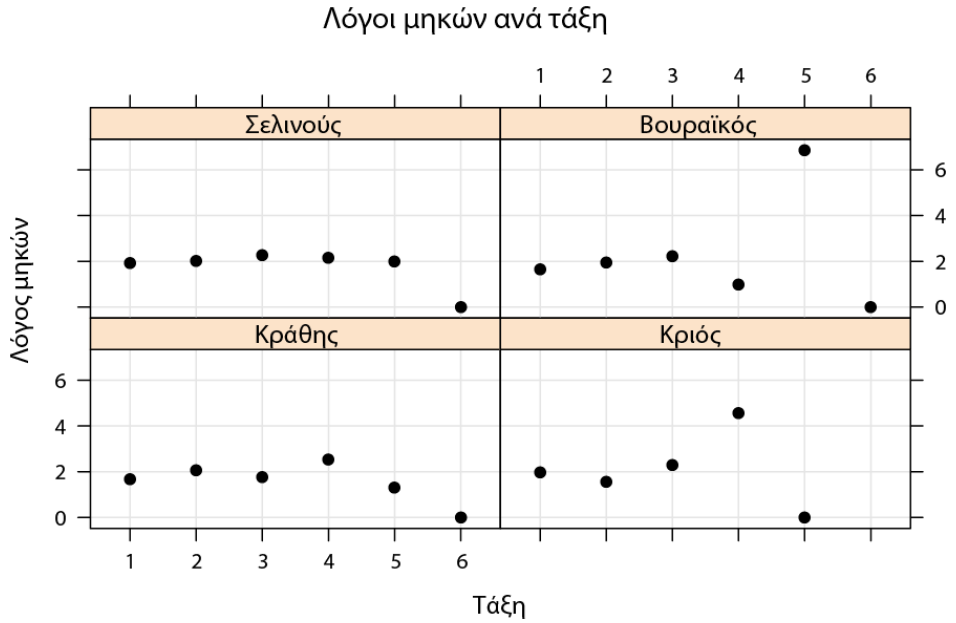
Στο Σχήμα 4-6, το επάνω αριστερά διάγραμμα μπορεί να ερμηνευτεί σαν ένδειξη της ταχύτητας αποστράγγισης της κοίτης του ποταμού. Ο Κριός έχει τη μεγαλύτερη κλίση και το μικρότερο μήκος και άρα θα αποκρίνεται γρηγορότερα, σε αντίθεση με τους Βουραϊκό και Σελινούντα. Επάνω δεξιά, αντίστοιχο διάγραμμα για

τις κλιτείς των λεκανών. Ο Κράθης φαίνεται να συγκεντρώνει γρηγορότερα την απορροή στην κοίτη του, ενώ για τους τρεις άλλους ποταμούς, καθώς έχουν παρόμοια κλίση, η σειρά θα ορίζεται από το μέσο μήκος των κλιτύων, που όπως φαίνεται είναι σημαντικά μεγαλύτερο στον Σελινούντα. Κάτω αριστερά δίνεται η μορφή των λεκανών μέσω του συνδυασμού των δεικτών κυκλικότητας και επιμήκυνσης (ο δείκτης επιμήκυνσης μικραίνει όσο περισσότερο επιμήκης είναι η λεκάνη). Έτσι, η κυκλικότερη λεκάνη είναι αυτή του Κριού, ενώ η πιο επιμήκης είναι αυτή του Βουραϊκού. Μεταξύ των άλλων, πιο επιμήκης είναι του Κράθη. Τέλος, κάτω δεξιά δίνονται τα μέσα και τα μέγιστα υψόμετρα για τις 4 λεκάνες απορροής. Ο Κράθης βρίσκεται στην κορυφή έχοντας με διαφορά την μεγαλύτερη δυναμική ενέργεια. Αυτή η δυναμική ενέργεια είναι δυνατόν να εκδηλώνεται τόσο στην ένταση της διάβρωσης όσο και την στερεομεταφορική ικανότητα της λεκάνης. Με βάση την γενική εικόνα μπορεί να υποτεθεί ότι οι διεργασίες διάβρωσης είναι πιο έντονες στον Κριό και τον Κράθη και λιγότερο έντονες στους Βουραϊκό και Σελινούντα.

Ο βασικός τοπολογικός δείκτης των υδρογραφικών δικτύων είναι ο λόγος διακλάδωσης. Οι λόγοι διακλάδωσης και οι λόγοι μηκών ανά τάξη, δίνονται στα παρακάτω Σχήματα 4-7 και 4-8. Αναλυτικά αποτελέσματα της τοπολογίας δίνονται στον Πίνακα 4-5 που ακολουθεί, καθώς και στο Σχήμα 4-9.



Σχήμα 4-7 Λόγοι διακλάδωσης ανά τάξη και λεκάνη απορροής.

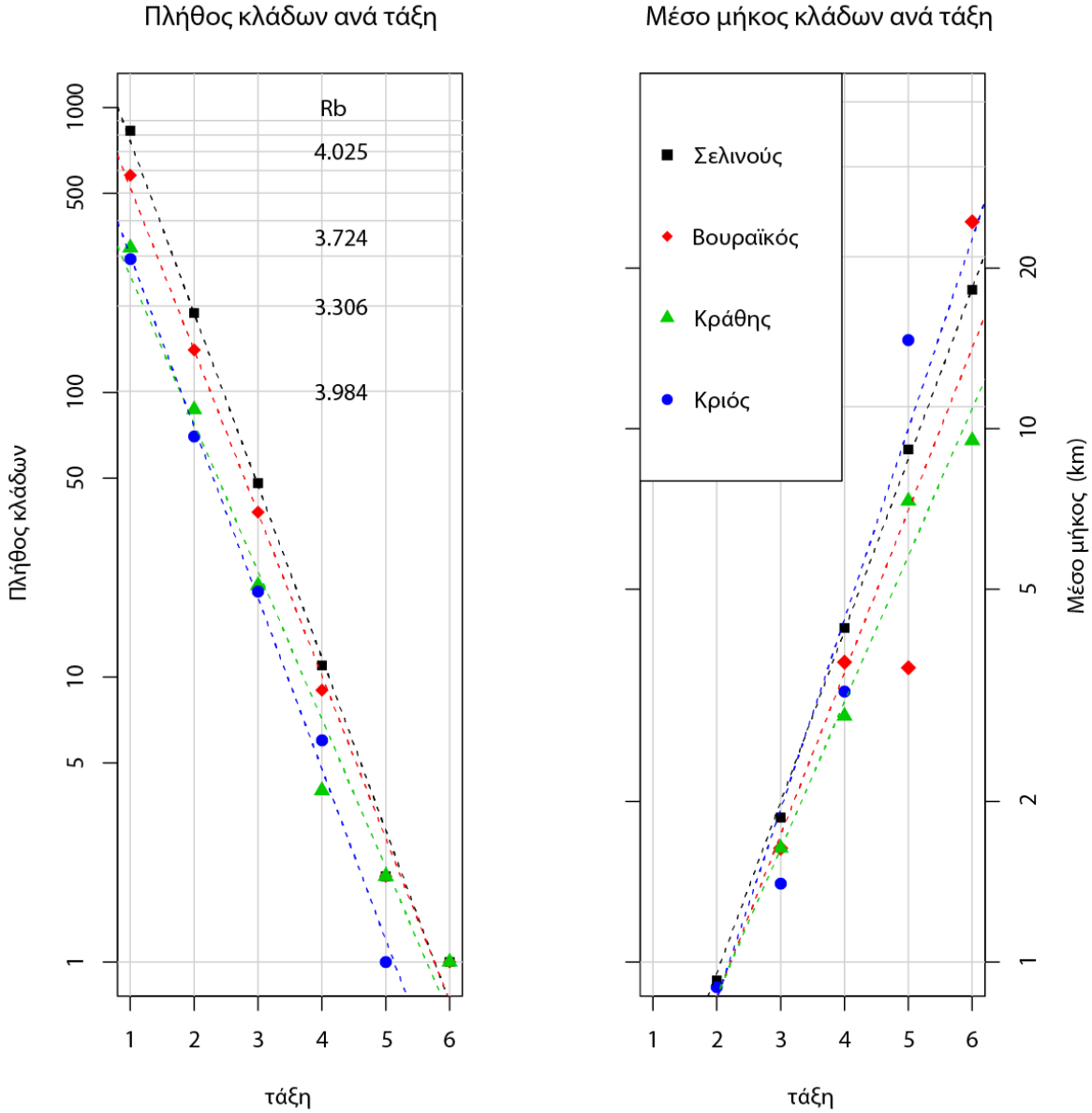


Σχήμα 4-8 Λόγοι μηκών ανά τάξη και λεκάνη απορροής.

Από τις τιμές των λόγων διακλάδωσης και μηκών γίνεται φανερό ότι παρατηρούνται «ανωμαλίες» στην διαδοχική κατά τάξη απορροή των δικτύων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του Βουραϊκού ποταμού οι τιμές των λόγων των αριθμών των κλάδων μεταξύ $1^{ης}$ -$2^{ης}$, $2^{ης}$ -$3^{ης}$, και $3^{ης}$ - $4^{ης}$ έχουν τιμές αρκετά υψηλότερες του 2. Αυτό οφείλεται στον μεγάλο αριθμό κλάδων μικρότερης τάξης που δεν δημιουργούν κλάδους ανώτερης τάξης αλλά απορρέουν απευθείας σε αυτούς. Επίσης πολύ υψηλή τιμή είναι αυτή του λόγου μηκών μεταξύ κλάδων $5^{ης}$ και $6^{ης}$ τάξης για τον Βουραϊκό που σημαίνει πολύ μεγάλο μήκος του κλάδου $6^{ης}$ τάξης σε σχέση με αυτό της $5^{ης}$. Γενικά, οι ανωμαλίες στη διαδοχική κατά τάξη απορροή αποτελούν ένδειξη επιρρέπειας του δικτύου σε πλημμυρικά συμβάντα καθώς η απορροή δεν θεωρείται «φυσιολογική». Οι υψηλοί λόγοι έχουν σαν αίτιο και το γενικότερο τεκτονικό καθεστώς της περιοχής που χαρακτηρίζεται από έντονη τεκτονική ανύψωση κατά την περίοδο του Τεταρτογενούς.

Πίνακας 4-5 Αναλυτικά αποτελέσματα της τοπολογίας των υδρογραφικών δικτύων. (N: πλήθος κλάδων, ΣLi – ΣAi, σύνολικά μήκη κλάδων και εμβαδά ανά τάξη, R_b-R_L-R_A-R_{SI} **:** λόγοι διακλάδωσης πλήθους κλάδων, μήκους κλάδων, εμβαδών και κλίσης λεκανών, $L_{avg.i}$ -$R_{b.avg}$ -$R_{L.avg}$ -$SI_{avg.i}$ μέσοι όροι αντίστοιχων λόγων)
Οι μέσες τιμές των λόγων έχουν υπολογιστεί με δύο τρόπους.

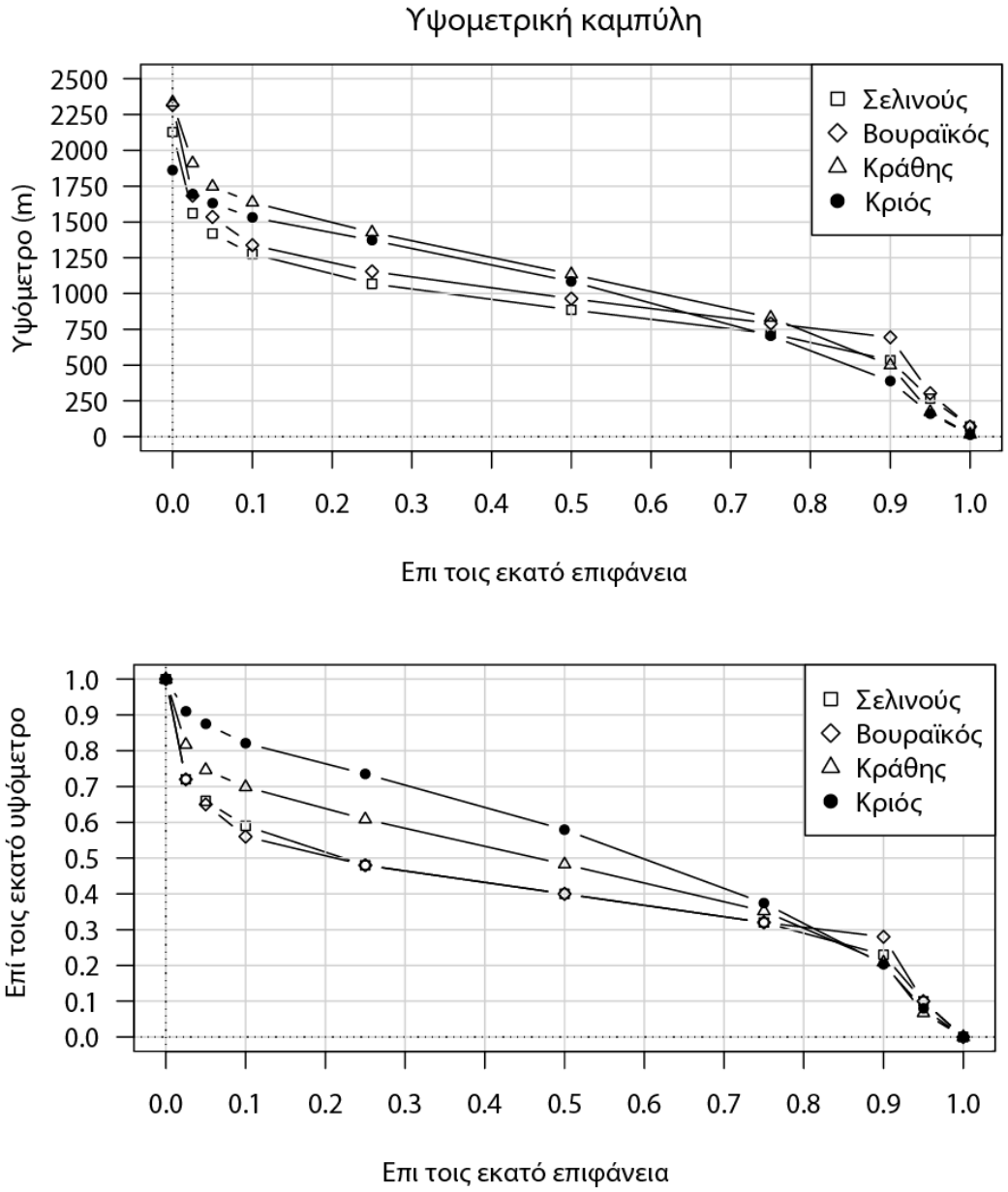
Ποτ.	Τάξη	N	ΣLi km	ΣAi km²	R_b	$R_{b.avg}$	$L_{avg.i}$ km	R_L	$R_{L.avg}$	$A_{avg.i}$ km²	R_A	$R_{A.avg}$	$SI_{avg.i}$ %	R_{SI}	$R_{SI.avg}$
Σελινούς	1	829	397.8	141.7	4.4	4.02	0.48	1.92	2.09	0.17	0	4.74	0.29	1.69	2.02
	2	190	175.5	170.7	3.9	4.03	0.92	2.02	2.07	0.89	5.25	4.23	0.17	1.52	2.08
	3	48	89.5	174.8	4.4		1.87	2.27		3.64	4.05		0.11	2.31	
	4	11	46.5	223.6	5.5		4.23	2.16		20.32	5.58		0.05	2.35	
	5	2	18.3	254.0	2.0		9.14	1.99		127.01	6.24		0.02	0.92	
	6	1	18.2	335.6	0		18.21	0		335.57	2.64		0.02	0	
Βουραϊκός	1	579	293.4	100.8	4.1	3.72	0.51	1.64	2.02	0.17	0	4.14	0.30	1.40	2.30
	2	141	117.7	113.9	3.7	3.71	0.83	1.95	2.73	0.81	4.63	3.27	0.21	1.56	2.27
	3	38	62.1	118.1	4.2		1.63	2.23		3.11	3.84		0.13	1.62	
	4	9	32.8	128.3	4.5		3.65	0.97		14.25	4.58		0.08	1.67	
	5	2	7.1	93.1	2		3.56	6.96		46.53	3.26		0.00	0.03	
	6	1	24.4	237.6	0		24.43	0		237.58	5.11		0.03	0	
Κράθης	1	322	153.8	52.2	3.7	3.31	0.48	1.67	1.88	0.16	0	3.96	0.33	1.24	1.52
	2	87	69.3	65.8	4.1	3.41	0.80	2.05	1.86	0.76	4.67	3.46	0.27	1.43	1.51
	3	21	34.4	69.4	5.3		1.64	1.77		3.31	4.37		0.18	2.30	
	4	4	11.6	67.8	2.0		2.89	2.53		16.95	5.13		0.08	1.24	
	5	2	14.6	106.2	2.0		7.32	1.30		53.09	3.13		0.07	1.33	
	6	1	9.5	139.6	0		9.50	0		139.60	2.63		0.05	0	
Κριός	1	294	134.4	45.7	4.2	3.98	0.45	1.96	2.27	0.15	0	4.85	0.28	1.39	1.45
	2	70	62.8	56.5	3.5	4.25	0.89	1.56	2.59	0.81	5.20	3.17	0.21	1.37	1.64
	3	20	28.1	64.2	3.3		1.40	2.28		3.21	3.97		0.15	1.02	
	4	6	19.3	67.4	6.0		3.21	4.56		11.24	3.50		0.15	2.75	
	5	1	14.7	112.4	0		14.66	0		112.44	10.01		0.05	0	



Σχήμα 4-9 Ανάλυση κατά Horton. Στο διάγραμμα αριστερά σημειώνονται και οι μέσοι λόγοι διακλάδωσης ανά λεκάνη (Rb).

4.2.2 Υψομετρία

Σύμφωνα με την ερμηνεία που δόθηκε στο Εδάφιο 2.4.4 (Υψομετρική ανάλυση), οι υψομετρικές καμπύλες των λεκανών του Σχήματος 4-12 φανερώνουν ότι οι λεκάνες των Κράθη και Κριού διαθέτουν μεγαλύτερο διαβρωτικό δυναμικό από αυτές του Βουραϊκού και του Σελινούντα.

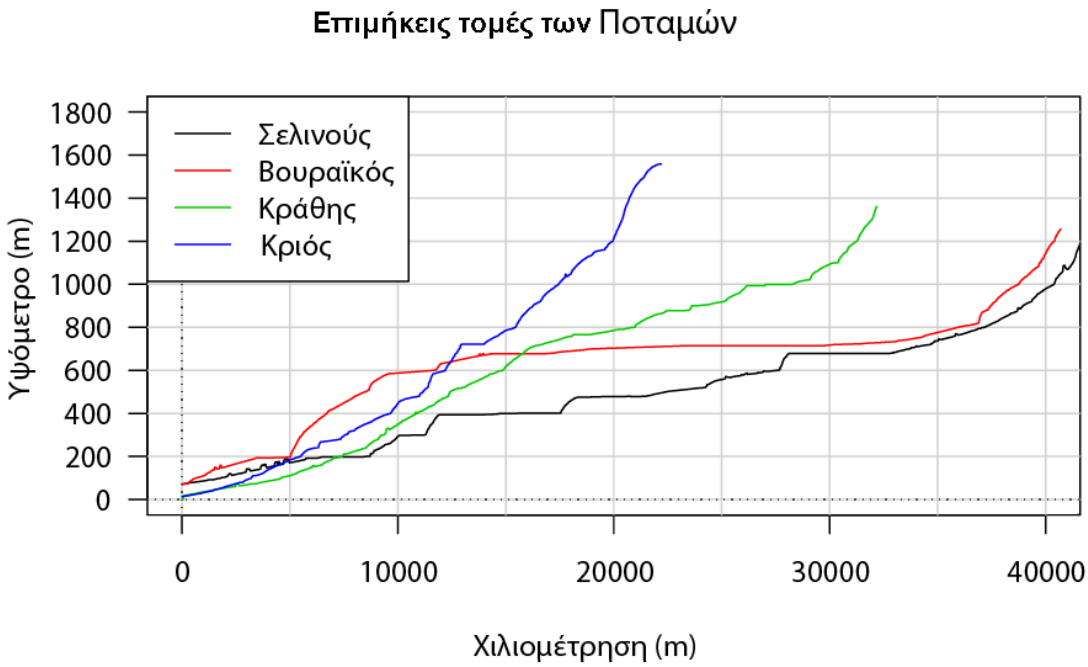


Σχήμα 4-10 Υψομετρικές καμπύλες. Διαστατική (πάνω) και αδιάστατη (κάτω) μορφή της υψομετρικής καμπύλης για τις λεκάνες της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

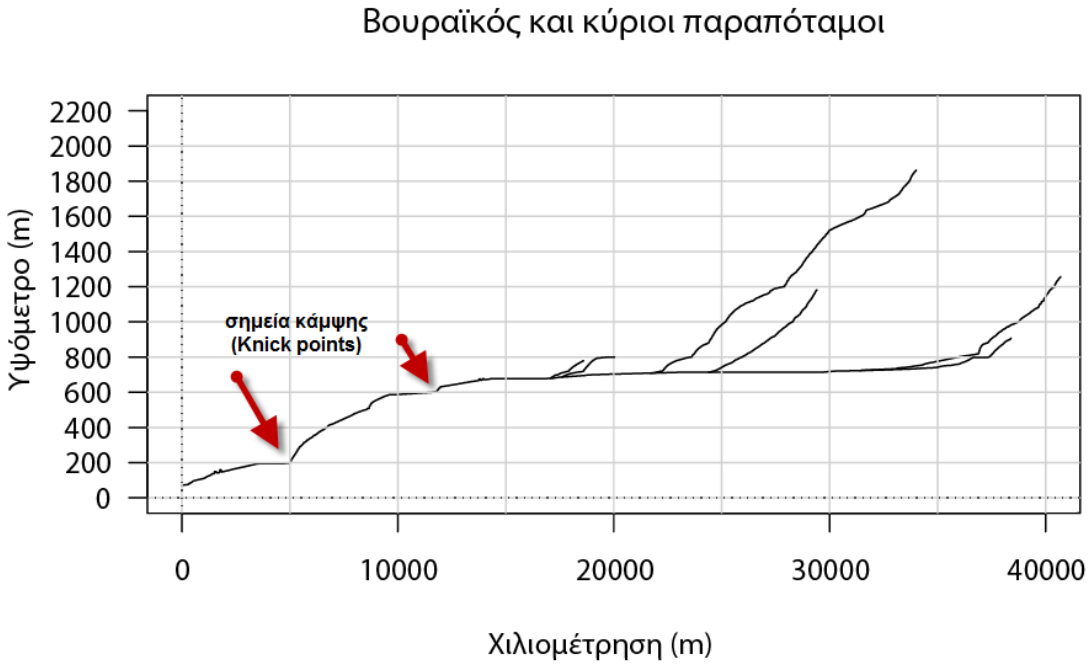
4.2.3 Επιμήκεις τομές των κεντρικών κοιτών των ποταμών

Οι επιμήκεις τομές των τεσσάρων ποταμών που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4-13 και 4-14, μπορούν να δώσουν πολύτιμα στοιχεία σχετικά με την επίδραση της τεκτονικής και την παρουσία σημείων κάμψης που αναπτύσσονται κατά μήκος της κοίτης. Επιπλέον

αποτελούν μια ένδειξη της μεταφορικής ικανότητας του ποταμού στα επιμέρους τμήματά του.



Σχήμα 4-11 Επιμήκεις τομές των 4 ποταμών της ευρύτερης περιοχής μελέτης.



Σχήμα 4-12 Επιμήκης τομή τομή του Βουραϊκού και των κυρίων παραποτάμων του.

Οι επιμήκεις τομες των κεντρικών κοιτών των τεσσάρων ποταμών δείχουν την παρουσία αρκετών σημείων καμπής. Κάποια από αυτά οφείλονται στη λιθολογία των γεωλογικών σχηματισμών πάνω στους οποίους ρέουν οι κοίτες ενώ υπάρχουν και κάποια που οφείλονται στην παρουσία ρηγμάτων που διέρχονται κάθετα ή σχεδόν κάθετα στις κοίτες. Τα λιθολογικά σημεία καμπής παρατηρούνται κυριως εκεί που οι παλαιοί Μεσοζωϊκής ηλικίας σχηματισμοί, που είναι αρκετά ανθεκτικοί στην διάβρωση, έρχονται σε επαφή με τους Πλειο-Πλειστοκαινικής ηλικίας σχηματισμούς που κατά κανόνα είναι περισσότερο ευδιάβρωτοι.

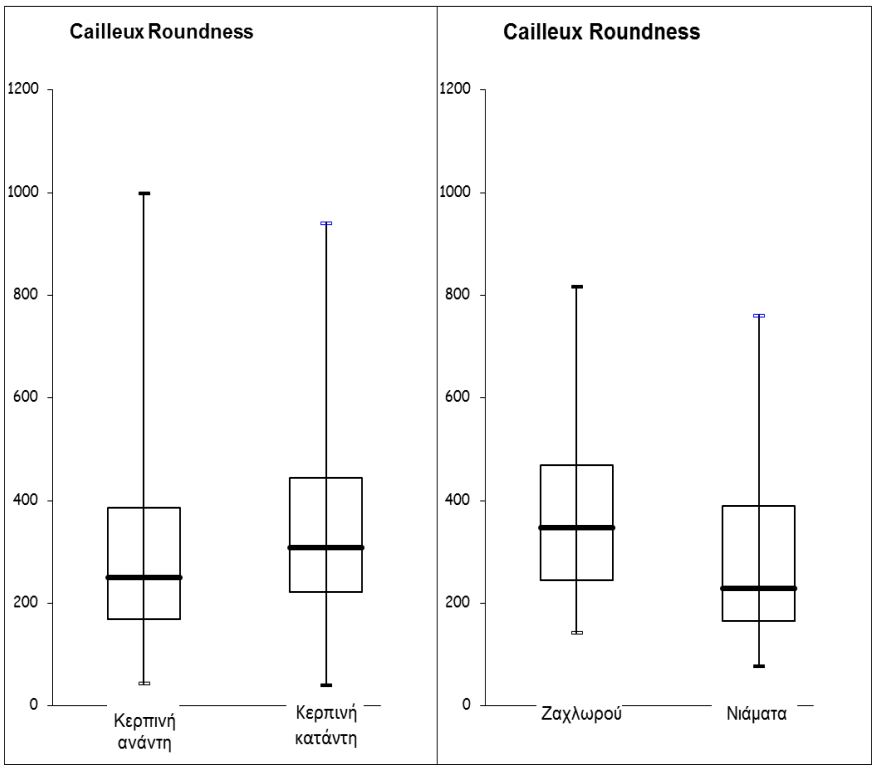
Χαρακτηριστικη είναι η παρουσία σημείων καμπής σε όλες τις κεντρικές κοίτες των ποταμών στο υψόμετρο περίπου των 650 με 700 μ., που κατά κάποιον τρόπο χωρίζουν τις κεντρικές κοίτες σε δύο επιμέρους τμήματα με διαφορετική κλίση. Τα σημεία αυτά πιθανά αντιστοιχούν στις περιοχες μέχρι τις οποίες έχει «φθάσει» η επίδραση της μεταβολής του βασικού επιπέδου λόγω της τεκτονικής ανύψωσης. Τα ανάντη τμήματα είναι κατά κύριο λόγο μικρότερης κλίσης και αντιστοιχούν στην παλαιότερη φάση της εξέλιξης των ποταμών. Αντίθετα τα κατάντη τμήματα είναι επηρεασμένα από τις μεταβολές του βασικού επιπέδου (στάθμη θάλασσας) λόγω της συνδυασμένης δράσης του ευστατισμού και του τεκτονισμού. Φαίνεται ότι η διαβρωτική ικανότητα των ποταμών είναι ισχυρότερη στα κατάντη τμήματα καθώς οι κλίσεις των κεντρικών κοιτών σε αυτά είναι μεγαλύτερες γεγονός που αποτελεί ένδειξη μεγαλύτερης ταχύτητας ροής του νερού αλλά και μεταφορικής ικανότητας.

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της κεντρικής κοίτης του Βουραϊκού ποταμού είναι η παρουσία ενός τμήματος μήκους περίπου 5 χλμ. μεγάλης κλίσης που αντιστοιχεί στη διαδρομή του ποταμού στο εντυπωσιακό φαράγγι που έχει διαμορφωθεί εξαιτίας της ισχυρής κατά βάθους διάβρωσης. Αντίθετα το ανάντη τμήματης λεκάνης γενικά έχει πολύ ήπιο ανάγλυφο και η κλίση της κοίτης είναι επίσης πολύ μικρή. Ο Βουραϊκός ποταμός είναι ένα από τα ποτάμια της Βόρειας Πελοποννήσου όπου η κατά βαθος διάβρωση κατάφερε να διατηρήσει όλο το μήκος του ποταμού με ροή προς το Κορινθιακό κόλπο. Είναι γνωστό πως αρκετά ποτάμια δεν «κατάφεραν» να διατηρήσουν τη ροή τους προς τη θάλασσα με αποτέλεσμα το ανώτερο τμήμα τους να αποκοπεί και να ακολουθήσει αντίθετη διεύθυνση ροής (δηλαδή από Β προς Ν) διαμορφώνοντας κλειστές λεκάνες όπως αυτές της Φενεού και της Στυμφαλίας.

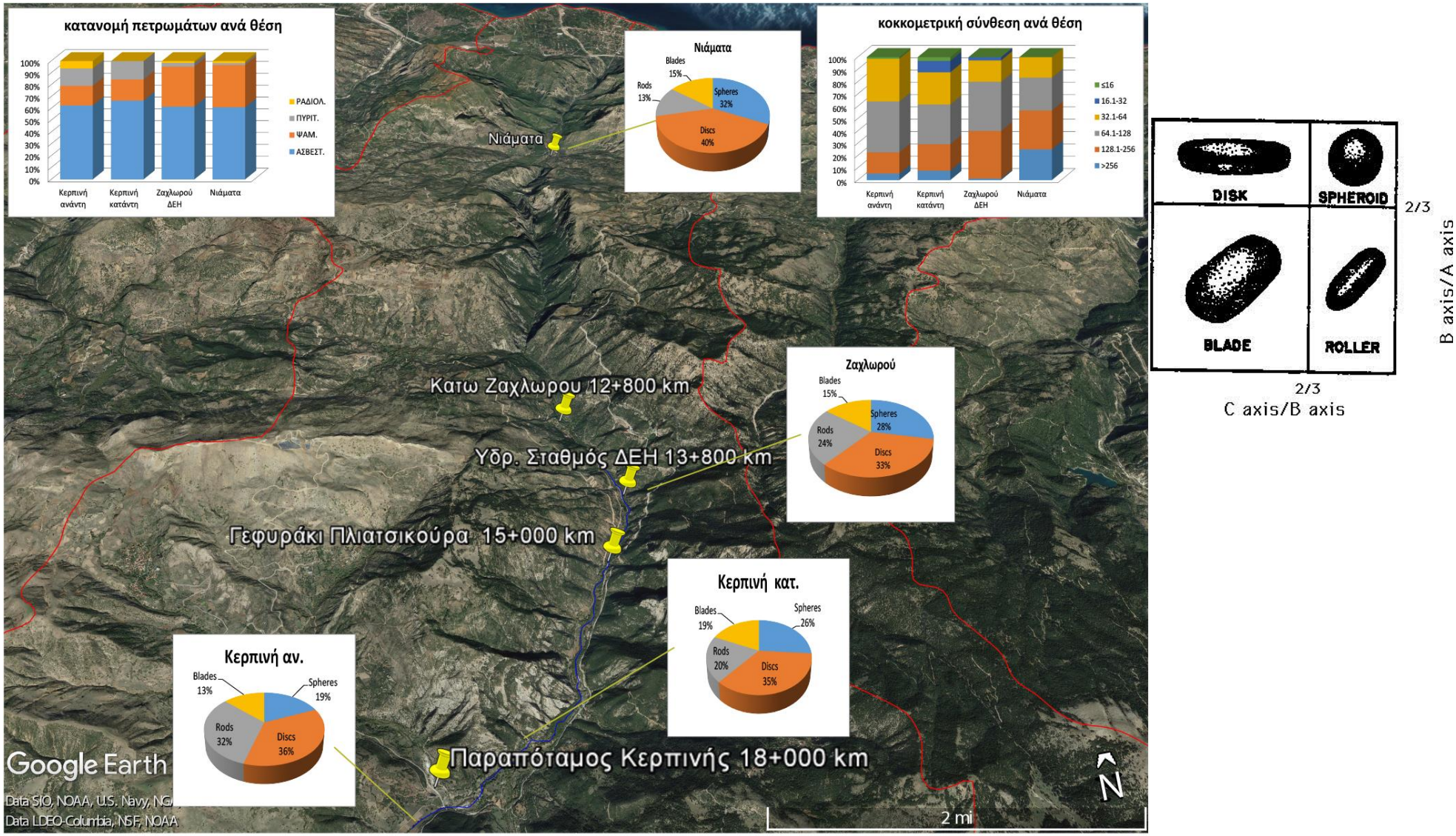
4.2.4 Κροκαλομετρία

Η κροκαλομετρία αναφέρεται στην ολοκληρωμένη, γεωμορφολογικού τύπου, μέτρηση που έγινε σε τεσσερις θέσεις στο ποτάμι, τον Οκτώβριο του 2013. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στο Σχήμα 4-11.

Οι δείκτες αποστρογγύλωσης του Σχήματος 4-10 καταδεικνύουν ότι στα Νιάματα (δες χάρτη, Σχ.4-11) τα κλάσματα είναι κυρίως τοπικής προέλευσης και δεν μεταφέρονται με το ποτάμι από ανάντη.



Σχήμα 4-13 Δείκτης αποστρογγύλωσης για τις 4 μετρηθείσες θέσεις. Γενικά παρατηρείται αύξηση της αποστρογγύλωσης με την πορεία του ποταμού προς την εκβολή του με εξαίρεση τα Νιάματα όπου σημειώνεται η μικρότερη τιμή. Στη συγκεκριμένη θέση οι κροκάλες έχουν προέλθει από κλάδους (κοίτες) παραποτάμων που συμβάλλουν στην περιοχή αυτή και δεν μεταφέρονται με το ποτάμι από ανάντη. Είναι πιθανό το υλικό αυτό να προέρχεται από υλικό κατολισθήσεων στις πλαγιές των κοιλάδων στην ανάντη των Νιαμάτων περιοχή, το οποίο δεν έχει υποστεί σημαντική μεταφορά που να έχει προκαλέσει την αποστρογγύλωση.



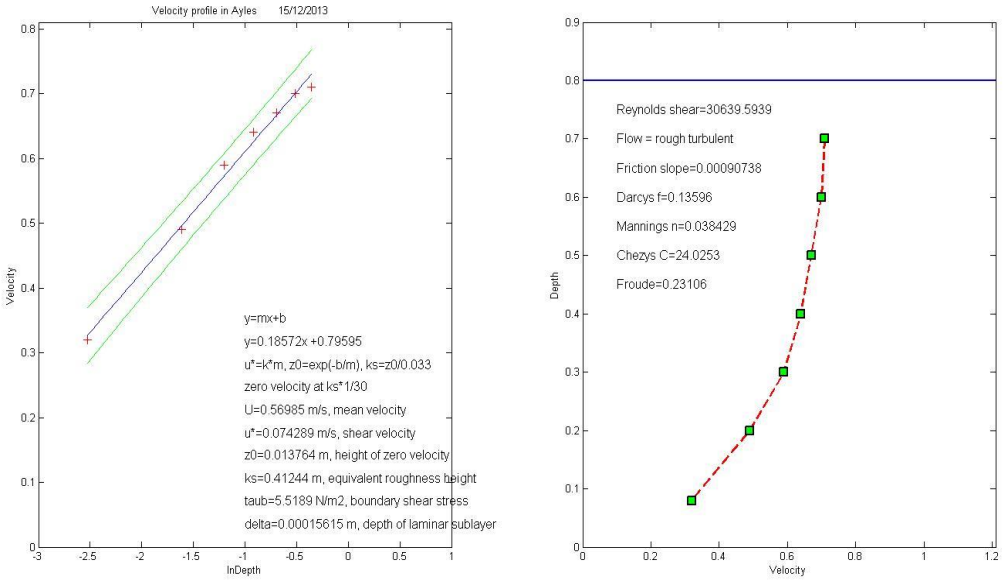
<u>Σχήμα 4-14</u> Σύνοψη αποτελεσμάτων της κροκαλομετρίας σε 4 θέσεις του ποταμού. Ονοματολογία του χάλικα με βάση 4 βασικά σχήματα κατά Zingg (1935).

4.3 ΥΔΡΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Καθ'όλη τη διάρκεια της εξαετούς έρευνας (2013-2019) έγιναν τακτικές υδρομετρήσεις, δηλαδή μετρήσεις ταχυτήτων / παροχών σε διάφορες θέσεις του ποταμού, με συχνότητα περίπου μία φορά τον μήνα, εκτός από τους θερινούς μήνες. Οι μετρήσεις αυτές σκοπό είχαν την διακρίβωση των υδραυλικών συνθηκών της ροής καθώς και την κατάρτιση καμπυλών στάθμης – παροχής στις θέσεις Γεφυράκι Ζαχλωρούς και Ζαχλωρού ΔΕΗ.

4.3.1 Μέθοδοι και όργανα

Οι υδρομετρήσεις έγιναν κυρίως με δύο μυλίσκους, και κάποιες με το Qliner, όργανο που μετρά όλο το προφίλ ταχυτήτων κατά το βάθος με τεχνολογία Doppler, όργανα του Εργαστηρίου Υδατικών Πόρων (πρώην ΤΕΙ Αθηνών). *Γ*ια τον υπολογισμό των παροχών ακολουθήθηκε η *μέθοδος των ορθογωνίων (mid-section method)* (Shaw, 1993).



Σχήμα 4-15 Μέτρηση προφίλ ταχυτήτων στη θέση Αυλές 15/12/2013. Δεξιά, είναι οι ταχύτητες σε διάφορα βάθη σχεδιασμένες σε αριθμητική κλίμακα, ενώ στα αριστερά έχει προσαρμοστεί ένα λογαριθμικό προφίλ με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων με πολύ καλά αποτελέσματα (δεν συμβαίνει βέβαια πάντοτε αυτό).

Εάν γίνουν μετρήσεις ταχύτητας σε διάφορα ύψη πάνω από τον πυθμένα σε μια κατακόρυφο, το αποτέλεσμα είναι το προφίλ των ταχυτήτων σε αυτή την κατακόρυφο. Σύμφωνα με τη θεωρία (της τυρβώδους ροής σε ανοιχτούς αγωγούς και την θεωρία του οριακού στρώματος) το προφίλ αυτό μπορεί να μας δώσει όχι μόνο την συρτική τάση στον

πυθμένα αλλά και άλλες σημαντικότατες πληροφορίες για τον τύπο και τα χαρακτηριστικά της ροής.

Σχήμα 4-16 Μέτρηση ταχυτήτων με τον μυλίσκο στη θέση Ζαχλωρού ΔΕΗ. Πάνω στην γέφυρα είναι απλωμένη μετροταινία με την οποία ο βοηθός οδηγεί το χειριστή του μυλίσκου να σταθεί στις θέσεις στη διατομή όπου θα μετρηθούν οι ταχύτητες (κατακόρυφοι – verticals).

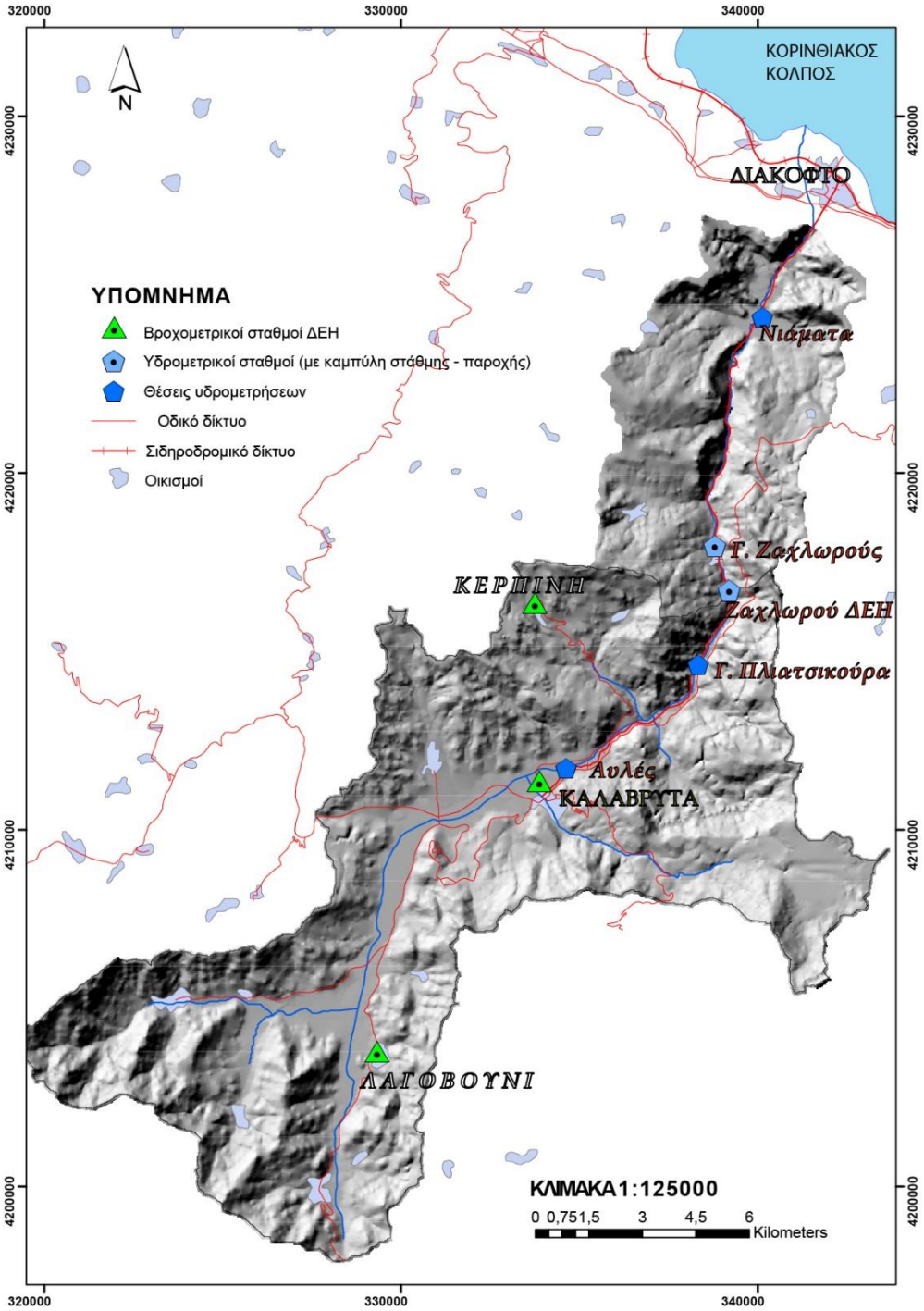
Πιο ειδικά, το προφίλ είναι ένας τρόπος να εκτιμηθούν τα εξής: η συρτική τάση στον πυθμένα τ_b, η ταχύτητα τριβής u_*, η κλίση τριβής S_f, όλοι οι συντελεστές τραχύτητας (n Manning, f Darcy, C Chezy), το πάχος του στρωτού οριακού στρώματος d, καθώς και το ισοδύναμο (κατά Nikuradse) ύψος τραχύτητας, k_s. Τα μεγέθη αυτά δίνονται στο Σχήμα 4-46.

4.4 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

4.4.1 Ιστορικό και περιγραφή της θέσης Ζαχλωρού ΔΕΗ

Το σύνολο των δεδομένων υδρομετρίας που αφορούν την περιοχή μελέτης προέρχονται από τον υδρομετρικό σταθμό της ΔΕΗ στη θέση Ζαχλωρού (δες χάρτες στα Σχήματα 4-15, 4-16). Ο υδρομετρικός σταθμός αυτός, τύπου πλωτήρα, αποτελείται από καταγραφικό μηχανισμό μέσα σε κλωβό, στερεωμένο πάνω σε κλαδιά δέντρου με σκάλα πρόσβασης, δύο σταθμήμετρα (κατακόρυφους πήχεις) τοποθετημέναστην δεξιά όχθη του ποταμού, από τα οποία το πρώτο βρίσκεται σε απόσταση 2 μέτρων κατάντη του πλωτήρα ενώ το δεύτερο σε απόσταση 20 μέτρων περίπου κατάντη του πρώτου, και τέλος, σιδερένια γέφυρα εδραζόμενη σε βάθρα από σκυρόδεμα (φωτογραφίες στο Σχήμα 4-16). Ο σταθμός τοποθετήθηκε αρχικά το 1979-80 από την ΔΕΗ (η γέφυρα κατασκευάστηκε το 1999-2000) και βρίσκεται, κατά προσέγγιση, στην ΧΘ: 13+900 της σιδηροδρομικής γραμμής Διακοφτού – Καλαβρύτων, περίπου ένα χιλιόμετρο ανάντη της Κάτω Ζαχλωρούς. Στις αρχές της δεκαετίας του 1960, όταν η ΔΕΗ εγκαινίασε την συστηματική υδρολογική παρακολούθηση της λεκάνης, είχαν επιλεγεί και άλλες θέσεις υδρομετρήσεων, οι οποίες αργότερα εγκαταλείφθηκαν.

Στην θέση αυτή, τα συνεργεία της ΔΕΗ έχουν πραγματοποιήσει 334 υδρομετρήσεις σε ένα διάστημα 32 περίπου χρόνων, από τον Φεβρουάριο του 1980 έως τον Ιανουάριο του 2011, οπότε και σταμάτησαν λόγω των περικοπών στους σχετικούς προϋπολογισμούς της επιχείρησης. Τα στοιχεία αυτών των υδρομετρήσεων, δηλαδή ο κατάλογος με τα ζεύγη στάθμης – παροχής και τις αναγνώσεις του πρώτου σταθμημέτρου (και του δεύτερου μετά το 1993), διατέθηκαν ευγενικά από την επιχείρηση για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής. Επίσης, για 63 επιλεγμένες υδρομετρήσεις διατέθηκαν και τα πρωτογενή δελτία.



Σχήμα 4-17 Η λεκάνη απορροής του Βουραϊκού ποταμού. Σημειώνονται οι βροχομετρικοί και υδρομετρικοί σταθμοί καθώς και οι θέσεις των υδρομετρήσεων.

Τα δελτία αυτά αναλύθηκαν με δικό μας λογισμικό πρόγραμμα, και για την κάθε υδρομέτρηση υπολογίστηκαν μια σειρά από υδραυλικές παραμέτρους που περιλαμβάνουν: την υγρή διατομή (A), την βρεχόμενη περίμετρο (P), την υδραυλική ακτίνα (RH =A/P), τη μέση ταχύτητα (Vmean = Q/A), τη μέγιστη ταχύτητα (Vmax), το άνω πλάτος του νερού (T), το μέγιστο βάθος (Dmax) και το υδραυλικό βάθοςτου νερού (DH = A/T). Επιπλέον, για τις υδρομετρήσεις, όπου υπήρχαν αναγνώσεις και στα δύο σταθμήμετρα, έγινε ο υπολογισμός της κλίσης της επιφάνειας του νερού (S).

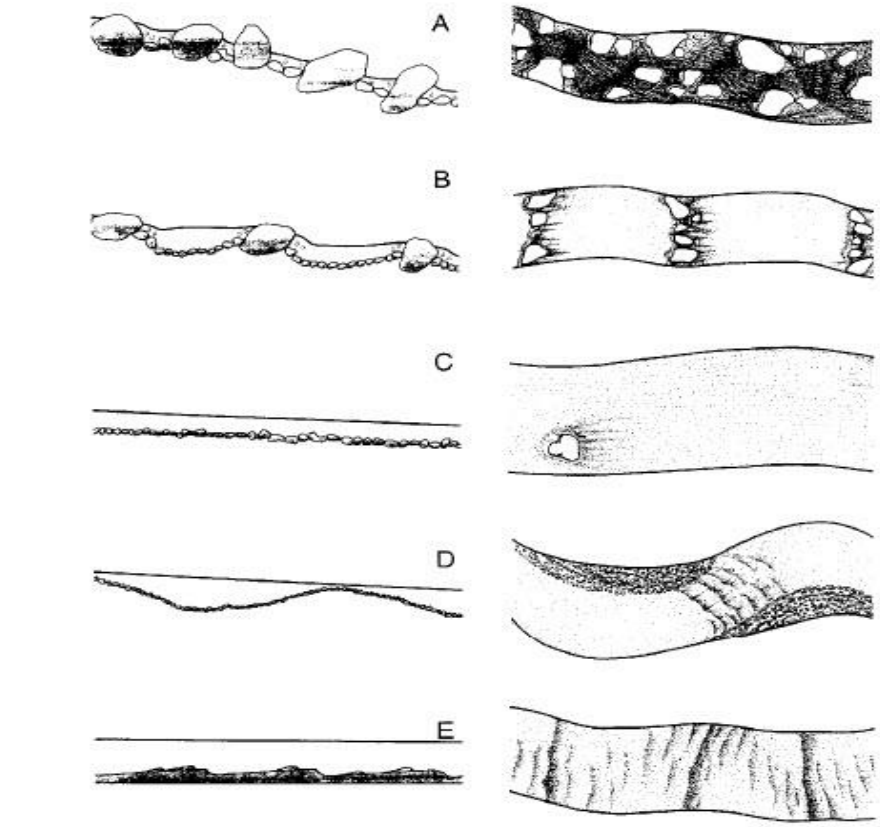
Σχήμα 4-18 Ο υδρομετρικός σταθμός της ΔΕΗ στην Ζαχλωρού. Πάνω: φαίνονται ο κλωβός του σταθμού, η ξύλινη σκάλα προσβασης και ο σωλήνας του πλωτήρα, ενώ δεξιά φαίνεται και ο πήχυς απ' όπου λαμβάνεται η ανάγνωση της στάθμης. Κάτω: θέα προς ανάντη του ποταμού όπου φαίνεται η σιδερένια γέφυρα που κατασκεύασε η ΔΕΗ για την διενέργεια των υδρομετρήσεων, ενώ αριστερά διακρίνεται ο κλωβός και ο πήχυς.

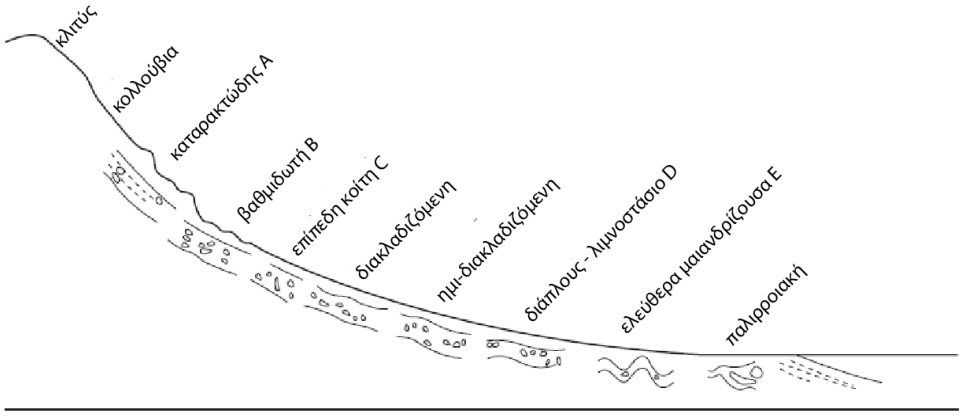
4.4.2 Περιγραφή του ρεύματος στη θέση του υδρομετρικού σταθμού

Το τμήμα του ρεύματος του Βουραϊκού στην θέση του σταθμού χαρακτηρίζεται από μια διαδοχή φυσικών βαθμίδων, η «σκαλοπατιών», που έχουν δημιουργηθεί από μεγάλες κροκάλες που έχουν διαταχθεί λίγο – πολύ εγκάρσια στη ροή (step – pool channel). Αυτή η μορφή προσομοιάζει περισσότερο στην περίπτωση Β του παρακάτω Σχήματος 4-17.

Ας υποτεθεί ένα σταθμήμετρο τοποθετημένο στην πάνω αριστερά βαθμίδα της περίπτωσης Β του Σχήματος 4-17, και ας εξετάστεί ο τύπος του ελέγχου σταθμού που αυτή η διάταξη προσφέρει. Στα χαμηλά νερά και στα ενδιάμεσα νερά (εννοούνται οι στάθμες), πάνω από τις βαθμίδες δημιουργείται περιοχή κρίσιμης ροής, επομένως ασυνέχεια, ο έλεγχος είναι έλεγχος διατομής, ενώ σε ψηλές στάθμες οι βαθμίδες βυθίζονται κάτω από την ανερχόμενη επιφάνεια του νερού και δεν αναπτύσσεται πλέον κρίσιμη ροή πάνω από αυτές, με αποτέλεσμα ο έλεγχος να γίνεται έλεγχος τμήματος. Επομένως, είναι ασφαλές το συμπέρασμα ότι σε μια τέτοια διάταξη θα υπάρχει σύνθετος έλεγχος ο οποίος θα είναι επίσης μερικός στα χρονικά διαστήματα που μεσολαβούν έως ότου βυθιστούν εντελώς οι βαθμίδες κάτω από το νερό στα κατάντη (tailwater). Επιπλέον ο έλεγχος θα είναι και μεταβαλλόμενος, εφόσον υφίσταται περιοδική διάβρωση ή απόθεση φερτών.

Δυστυχώς όμως, δεν είναι αυτό το μόνο πρόβλημα της συγκεκριμένης θέσης. Σε απόσταση περίπου 65 μέτρων κατάντη της γέφυρας υδρομετρήσεων (~80 μέτρα κατάντη του σταθμήμετρου, με τις αποστάσεις μετρημένες κατά μήκος της βαθιάς γραμμής) στην κοίτη του Βουραϊκού εκβάλλει καταρρακτώδης παραπόταμος με χειμαρρική ροή που αποθέτει μεγάλες ποσότητες αδρομερών φερτών υλικών στην κεντρική κοίτη του ποταμού, φράσσοντας έτσι το μεγαλύτερό της τμήμα με τη δημιουργία ενός ριπιδίου αδρομερών υλικών. Η μεταφορά αδρομερών υλικών συμβαίνει σχεδόν πάντα με τις πρώτες μεγάλες βροχές του φθινοπώρου, δηλαδή στα τέλη του Αυγούστου, ή κατά τη διάρκεια του Σεπτέμβρη (σύμφωνα και με τη μαρτυρία του παρατηρητή του σταθμού). Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε κατά την εργασία πεδίου επί 4 συνεχόμενα έτη και φαίνεται ότι πρόκειται για ένα πρότυπο που επαναλαμβάνεται σχεδόν κάθε χρόνο.





ΦΑΣΗ	χειμάρρου	βότσαλων (shingle)	ιλύος	παλίρροιας
ΖΩΝΗ	παραγωγής	μεταφοράς	απόθεσης	
Κλιτύος	Ποτάμιο			ΣΥΣΤΗΜΑ

<u>Σχήμα 4-19</u> Επάνω: Τυπολογία φυσικών ποτάμιων ρευμάτων σε χαμηλά νερά, αριστερά σε μηκοτομή και δεξιά σε κάτοψη. Η περίπτωση Α αναφέρεται σαν καταρράκτώδης (cascade) και χαρακτηρίζεται από μεγάλη τύρβη που αναπτύσσονται κυρίως γύρω απο μεγάλου μεγέθους κροκάλες. Η Β περίπτωση είναι η βαθμιδωτή μορφή (step – pool)που χαρακτηρίζει το ρεύμα του Βουραϊκού στη θέση του υδρομετρικού σταθμού. Η περίπτωση Γ αντιστοιχεί σε επίπεδη κοίτη (plane bed), ενώ η περίπτωση Δ στη τη μορφή διάπλου – λιμνοστάσιο (pool – rifle) με άσπρα νερά στους διάπλοες και ήρεμα πάνω από τα λιμνοστάσια. Τέλος, η περίπτωση Ε χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη γεωμορφών πυθμένα ή σχηματισμών κοίτης (dune – ripple) που συνηθέστερα είναι θίνες και αμμορυτίδες (Από Montgomery και Buffington, 1997). Κάτω: Σχηματικό διάγραμμα μεταβάσεων σε ποτάμια συστήματα κατά μήκος της επιμήκους τομής της κεντρικής κοίτης ενός ποταμού (από Moshley & Schumm, 2001).

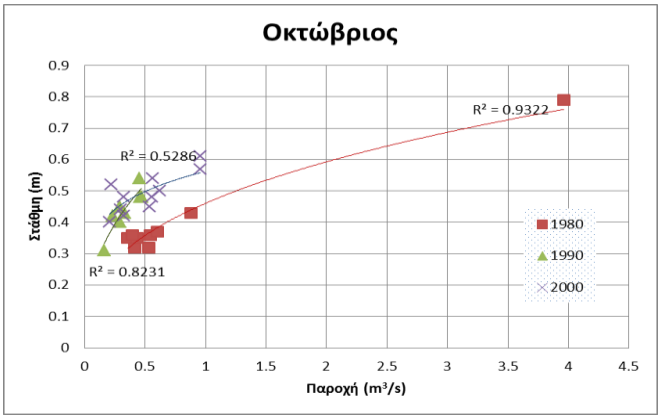
Όταν φράσσεται το ρεύμα, λόγω του ανάρρου (καμπύλη υπερύψωσης – backwater curve), όλο το τμήμα του ρεύματος ανάντη της έμφραξης μετατρέπεται σε μια λίμνη, ή, σωστότερα, σε μια βαθμιδωτή διαδοχή από μικρές λίμνες, με πολύ μικρές ταχύτητες του νερού και με σχεδόν ενιαία κλίση της πιεζομετρικής γραμμής, με τις βαθμίδες να είναι και πάλι βυθισμένες. Έτσι, υφίσταται έλεγχος τμήματος ακόμα και σε χαμηλά νερά. Καθώς προχωρά η υδρολογική χρονιά, οι πλημμύρες αρχιζουν να διαβρώνουν το προσχωματικό κώνο των φερτών, το ριπίδιο, μέχρι τις μεγάλες παροχές, που συμβαίνουν είτε τον Δεκέμβριο, είτε Φεβρουάριο – Μάρτιο (σπανιώτερα τον Ιανουάριο), οπότε το φράγμα παρασύρεται ολόκληρο και ο έλεγχος γίνεται και πάλι σύνθετος (έλεγχος διατομής στις χαμηλές στάθμες και έλεγχος τμήματος στις ψηλές).

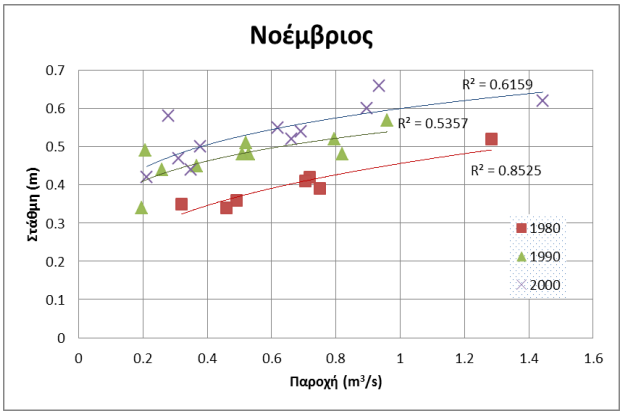
Τέλος, ένα ακόμα πρόβλημα της συγκεκριμένης θέσης είναι ένας ακόμα προσχωματικός κώνος, μικρότερων διαστάσεων, που δημιουργείται ακριβώς ανάντη του σταθμού, από μικρή μισγάγγεια (που περνά μέσω οχετού κάτω από την σιδηροδρομική γραμμή) και καταλήγει στο κύριο ρεύμα περίπου 2 μόλις μέτρα ανάντη του πλωτήρα. Τα φερτά υλικά που μεταφέρει μπορούν να προσχώσουν εντελώς την περιοχή του πλωτήρα ή ακόμα και να τον ακινητοποιήσουν εντελώς. Αποτέλεσμα είναι η στάθμη να μην καταγράφεται καθόλου ή, η στάθμη που καταγράφεται να μην αντιπροσωπεύει την πραγματική. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε κατά την επίσκεψή στο πλαίσιο της έρευνας πεδίου στις 8/10/2015 όπου διαπιστώθηκε ότι ο πλωτήρας ήταν ακινητοποιημένος. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η μη καταγραφή της πλημμύρας που έλαβε χώρα το προηγούμενο βράδυ.

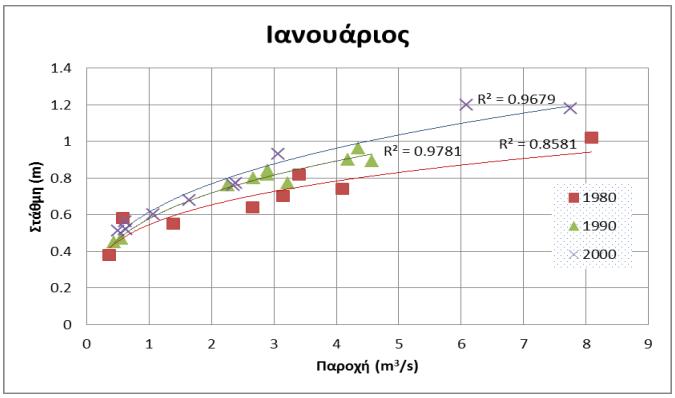
Συνοψίζοντας, η συγκεκριμμένη θέση έχει πολλά προβλήματα και δεν προσφέρει καλό έλεγχο. Ωστόσο, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι η μόνη πηγή καλής ποιότητας πρωτογενών υδρομετρικών δεδομένων τα οποία καλύπτουν μια σχετικά μεγάλη χρονική περίοδο. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν τα υδρομετρικά αυτά δεδομένα .

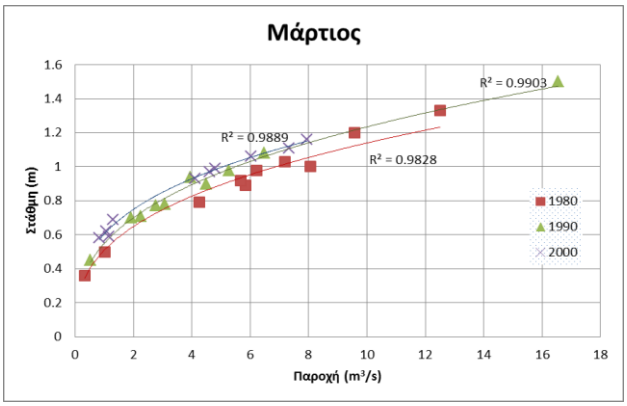
4.4.3 Φαινομενολογία της καμπύλης στάθμης - παροχής

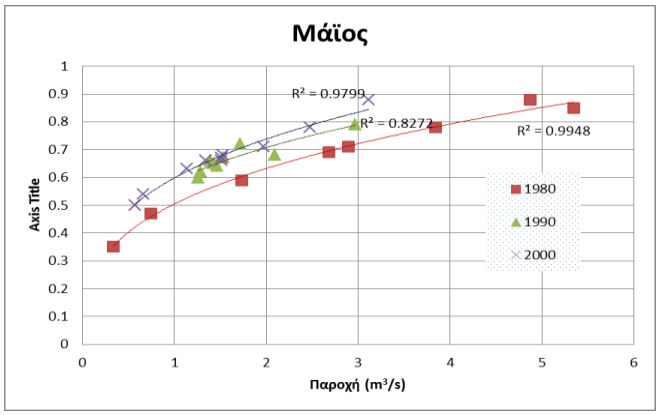
Τα δεδομένα των υδρομετρήσεων αναλύθηκαν γραφικά προκειμένου να αναζητηθούν οι κυρίαρχες μορφές της σχέσης σταθμης - παροχής. Με αυτό το σκοπό, οι μετρήσεις χωρίστηκαν κατ’ αρχάς ανά δεκαετίες και κατόπιν ανά μήνες, σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα διασποράς, χαράχτηκαν γραμμές παλινδρόμησης (τάσης) και εξετάστηκε η διασπορά γύρω από αυτές (Σχήμα 4-18 και Σχήμα 4-19)

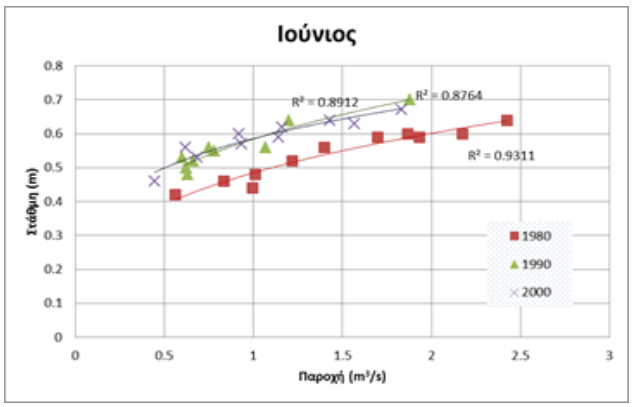


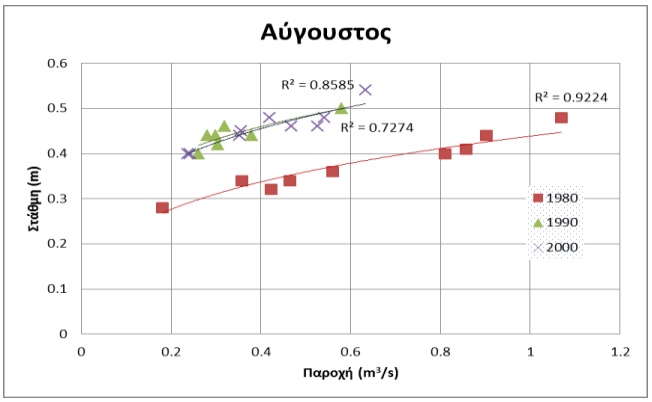


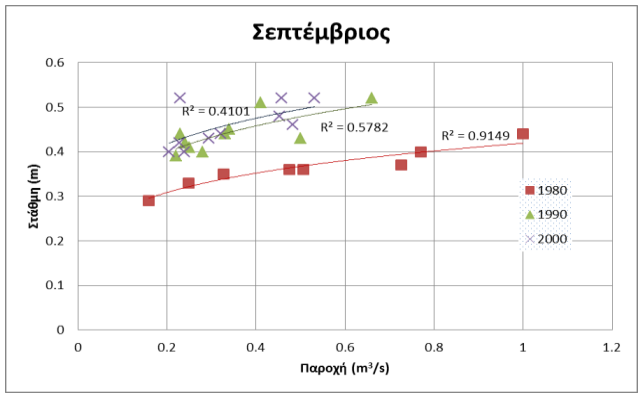






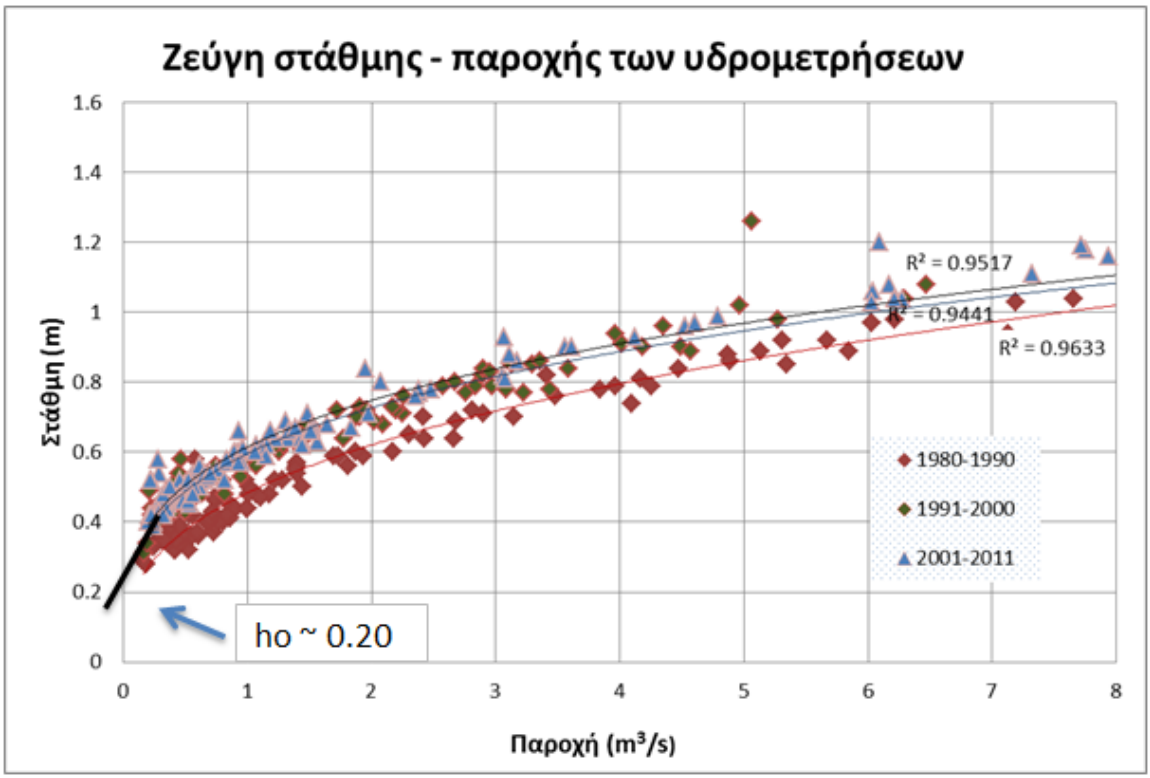






Σχήμα 4-20 Διαγράμματα διασποράς των υδρομετρήσεων ανά μήνα, για 8 μήνες του χρόνου και τρεις δεκαετίες. Στο κάθε διάγραμμα φαίνονται ξεχωριστά οι μετρήσεις για κάθε δεκαετία. Στα σημεία έχει χαραχτεί μια γραμμή τάσης τύπου δύναμης. Δίνεται και ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) για την κάθε γραμμή.

Η σχέση που συνήθως προσαρμόζεται καλύτερα στα διαγράμματα αυτά είναι σχέση δύναμης (power relationship), και επομένως παρουσιάζεται ως ευθεία σε ένα διπλό λογαριθμικό διάγραμμα. Ωστόσο, κάποιες φορές και ανάλογα και με τις τιμές της στάθμης, μπορεί και να ταιριάζει καλύτερα κάποια γραμμική σχέση. Ειδικώτερα, η ΔΕΗ (Υδρολογικά δεδομένα, Βορεια και Δυτική Πελοπόννησος, 1964) συνήθως προσάρμοζε μια σύνθετη καμπύλη που αποτελούνταν από ευθεία γραμμή στις μεγάλες παροχές και καμπύλη στις μικρές παροχές (που παρουσιάζουν και τη μεγαλύτερη διασπορά). Η σύνθετη αυτή καμπύλη χαράζονταν με το χέρι (ή με καμπυλόγραμμο) και δεν ενδιέφερε η αναλυτική σχέση (η εξίσωσή της) γιατί η μετατροπή της στάθμης σε παροχή γινόταν μία φορά την ημέρα, όταν δηλαδή γινόταν η ανάγνωση του σταθμημέτρου από τον παρατηρητή. Αυτό βέβαια δεν είναι πρακτικό όταν σκοπός είναι η μετατροπή μιας συνεχούς σειράς στάθμεων (τα σταθμηγραφήματα του υδρομετρικού σταθμού με ανάλυση 30 ή και 15 λεπτών) σε παροχές. Συχνά κατασκευάζονταν δύο κλάδοι, ο καθένας από τους οποίους είχε ισχύ σε κάποια καθορισμένη χρονική περίοδο.



Σχήμα 4-21 Ζεύγη στάθμης-παροχής για όλες τις υδρομετρήσεις (330) της ΔΕΗ στη θέση Ζαχλωρού. Στα σημεία έχουν περάσει γραμμές παλινδρόμησης τύπου δύναμης. Η γραμμή τάσης προεκτείνεται γραφικά προς τα πίσω (τον y - άξονα) και τέμνει τον άξονα των y περίπου στο ho = 0.20 (ho, στάθμη μηδενικής παροχής).

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η σχέση στάθμης – παροχής μετακινείται, δηλαδή ανεβαίνει ή κατεβαίνει ανά δεκαετία. Υπάρχει εμφανής διαφορά κυρίως μεταξύ της δεκαετίας του 1980 και των δύο επόμενων δεκαετιών.
- Η θέση του υδρομετρικού σταθμού φαίνεται να έχει προσχωθεί, εφόσον οι ίδιες παροχές σημειώνονται με μικρότερη στάθμη στη δεκαετία του 80, σε σχέση με τη στάθμη των επόμενων δύο δεκαετιών, και ιδίως στις μικρές και μεσαίες παροχές.
- Κατά τις δεκαετίες 1990 και 2000 η θέση των μετρήσεων φαίνεται να σταθεροποιείται, αν και φαίνεται ακόμα μια μικρή μετακίνηση της καμπύλης προς τα πάνω.
- Στους μήνες των μεγάλων παροχών (Φεβρουάριος – Μάρτιος – Απρίλιος αλλά και Ιανουάριος) η διασπορά των σημείων των υδρομετρήσεων είναι πολύ μικρότερη. Αντίθετα σημαντικά μεγαλύτερη διασπορά εμφανίζεται στους θερινούς μήνες (Ιούλιο – Αύγουστο – Σεπτέμβριο). Σε αυτό συντελεί το γεγονός ότι για τους μήνες αυτούς δέν υπάρχουν (μετρημένες) μεγάλες παροχές, η παρουσία των οποίων διευρύνει το εύρος τιμών με αποτέλεσμα η συσχέτιση να είναι καλύτερη.

4.4.4 Προσδιορισμός της σχέσης σταθμης - παροχής.

Η σχέση της στάθμης με την παροχή προσεγγίζεται συνήθως καλύτερα από μιά σχέση δύναμης, που προέρχεται από αναλογία με τη σχέση του Chezy για ανοιχτούς αγωγούς, $Q = A*V = A*C\sqrt{(R_H*S)}$. Αυτή η σχέση είναι της μορφής:

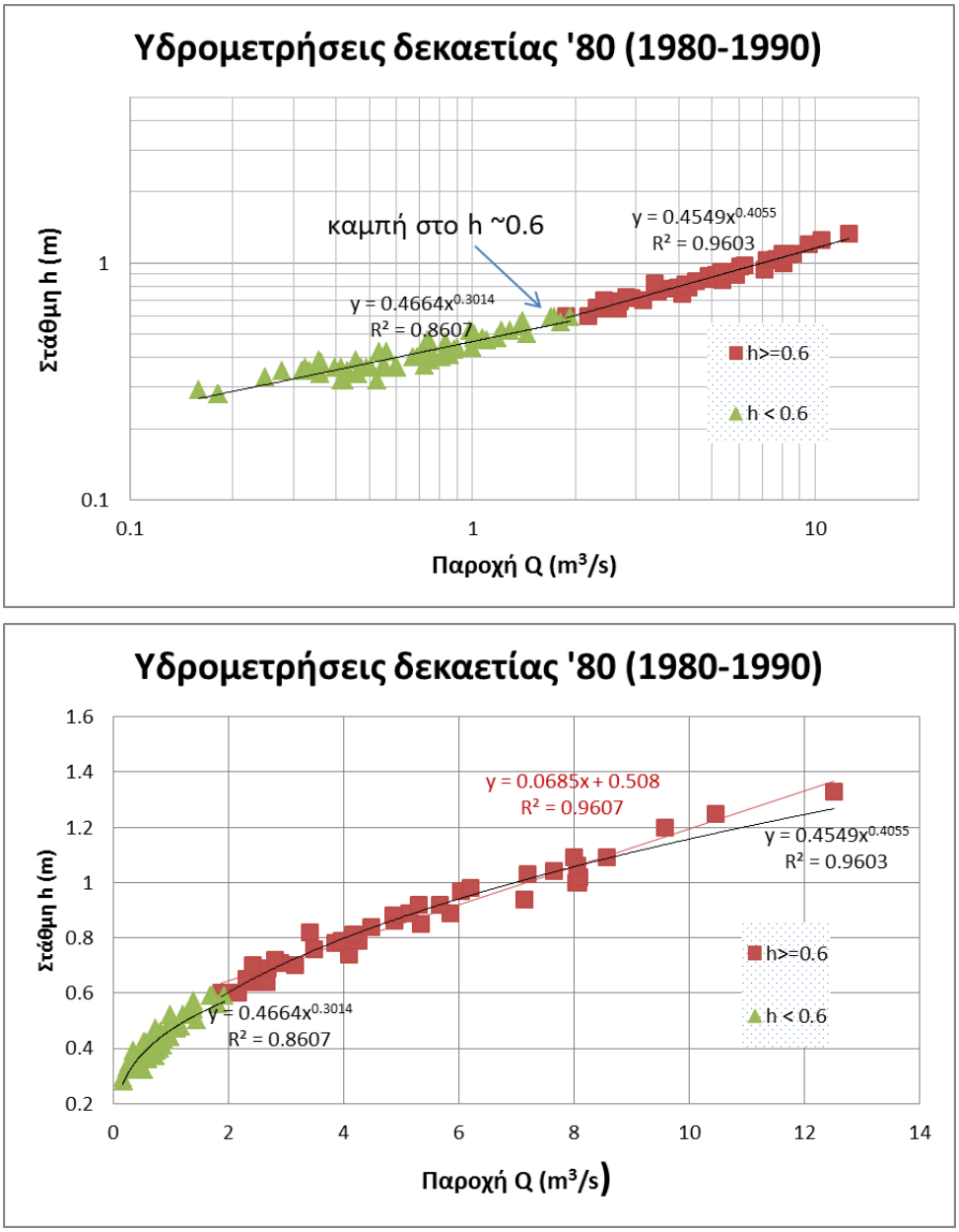
$$Q = a * (h - h_o)^b \qquad (4\text{-}1)$$

όπου τα a,b είναι συντελεστές ειδικοί για τη θεωρούμενη θέση, και ειδικώτερα ο b εξαρτάται από την μορφή του διαύλου. Το h είναι η μετρούμενη στάθμη, ενώ το h_o είναι η τιμή αυτή της στάθμης για την οποία η παροχή Q, είναι μηδενική. Η τιμή αυτή (εκεί όπου γραμμή σταθμης - παροχής τέμνει τον άξονα y – στάθμες) είναι περισσότερο «αριθμητική» παρά πραγματική. Παίρνοντας το λογάριθμο και στα δύο σκέλη της Εξίσωσης 4-1:

$$logQ = loga + b * log\,(h - h_o) \qquad (4\text{-}2)$$

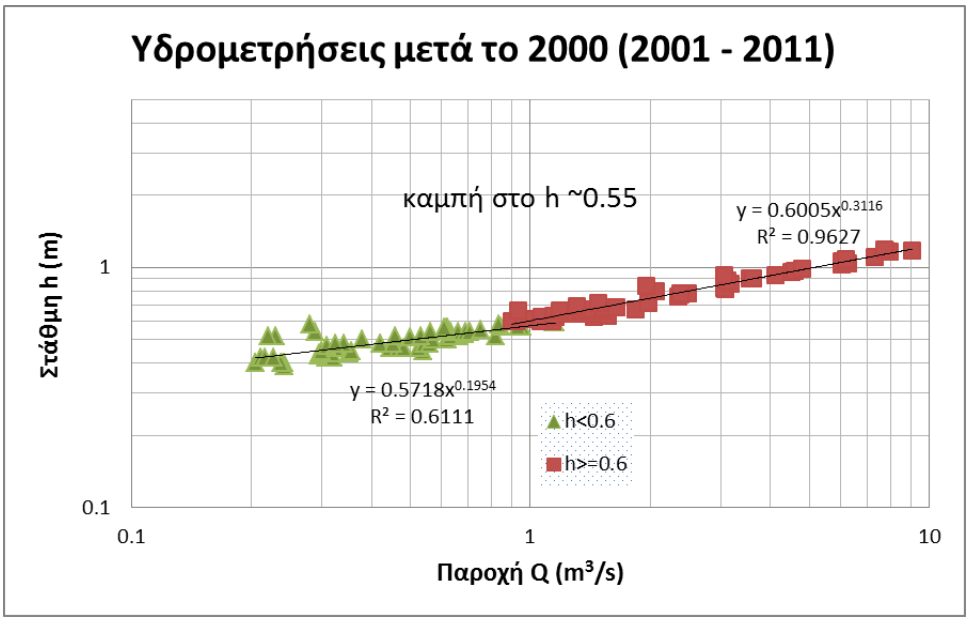
Η παραπάνω εξίσωση είναι εξίσωση ευθείας γραμμής μεταξυ του logQ και τουlog(h-ho) με κλίση b και τεταγμένη επι την αρχή, logα. Επομένως μπορούν να προσδιορισθούν τα a,b, εφαρμόζοντας μια ευθεία γραμμή τάσης μεταξυ του logQ και του log(h-ho) με την τεχνική των ελαχίστων τετραγώνων. Το h_o μπορεί να βρεθεί ψάχνοντας για την τιμή του που θα δώσει τον καλύτερο συντελεστή προσδιορισμού της γραμμής τάσης. Κατά τον υπολογισμό της καμπύλης σταθμης - παροχής με την παραπάνω τεχνική, είναι επίσης σύνηθες να αναζητώνται σημεία «αλλαγής» της σχέσης σε κάποιες τιμές της στάθμης. Αυτά τα σημεία καμπής φανερώνουν την αλλαγή του ελέγχου (shifting control) που ενδεχομένως συμβαίνει σε κάποια στάθμη, και φανερώνονται σε διπλά λογαριθμικά διαγράμματα. Αν υπάρχουν τέτοια σημεία τότε η καμπύλη σταθμης - παροχής θα έχει διαφορετική αναλυτική έκφραση για κάθε εύρος στάθμεων. Ας σημειωθεί ότι πολύ σημαντικό ζήτημα είναι επίσης η επέκταση της καμπύλης για τις υψηλές στάθμες (πέρα από το εύρος των μετρημένων).

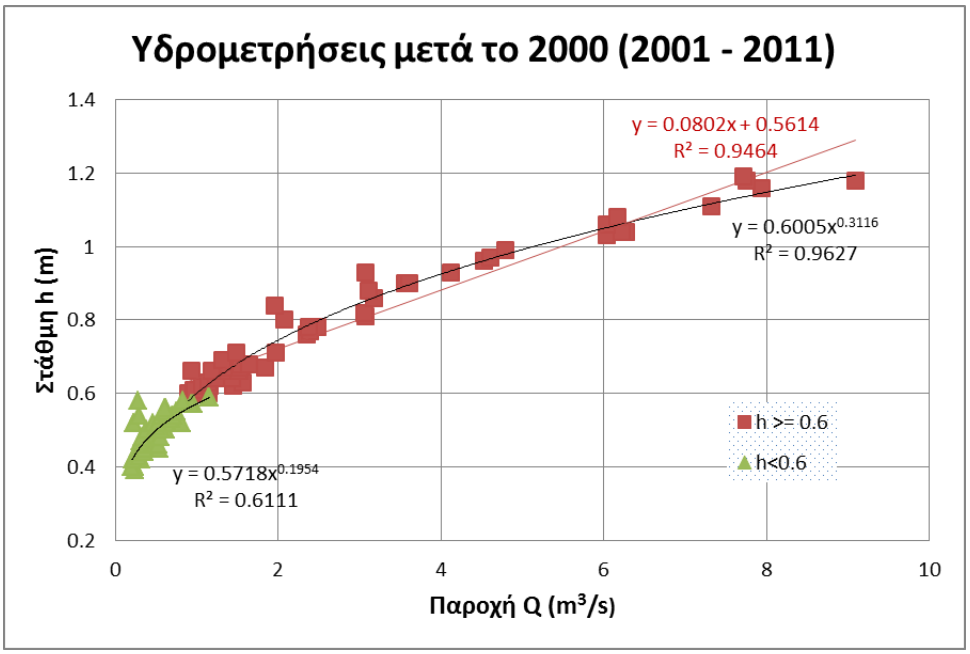
Από την μελέτη των διαγραμμάτων φαίνεται ότι, τόσο στη δεκαετία του ’80 όσο και σε αυτή του 2000, υπάρχει ένα σημείο καμπής περίπου στη περιοχή h = 0.5÷0.6. Αυτό το σημείο πιθανόν να σηματοδοτεί την αλλαγή του ελέγχου από έλεγχο διατομής (σε χαμηλές στάθμες) σε έλεγχο τμήματος (σε μεγαλύτερες στάθμες). Αυτό φαίνεται επίσης και από την κλίση της ελεύθερης επιφάνειας που δίνεται από τις αναγνώσεις των δύο σταθμημέτρων κατά τις υδρομετρήσεις.



Σχήμα 4-22 Οι υδρομετρήσεις της δεκαετίας του ’80 σε αριθμητικό διάγραμμα (κάτω) και σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα (πάνω). Φαίνεται η ύπαρξη ενός σημείου καμπής στην στάθμη h =0.5 ÷ 0.6. Στο αριθμητικό διάγραμμα έχουν χαραχτεί, για τις στάθμες h>0.6, δύο καμπύλες, μία γραμμική και μία δύναμης οι οποίες φαίνονται να δίνουν το ίδιο συντελεστή προσδιορισμού.

Σε σχέση με την επέκταση της γραμμής σταθμης - παροχής, τουλάχιστον για τη δεκαετία του ’80 τόσο μια γραμμική σχέση όσο και μια σχέση δύναμης ταιριάζουν το ίδιο καλά με τα δεδομένα (Σχ. 4-20). Αυτό το γεγονός καθιστά κρίσιμη την επιλογή της κατάλληλης εξίσωσης, δεδομένου ότι σε μεγαλύτερες -από τις μετρημένες- στάθμες, αυτή θα δώσει πολύ διαφορετικές τιμές της παροχής, με τη γραμμική σχέση να δίνει αρκετά μικρότερη τιμή της παροχής στις μεγάλες στάθμες.

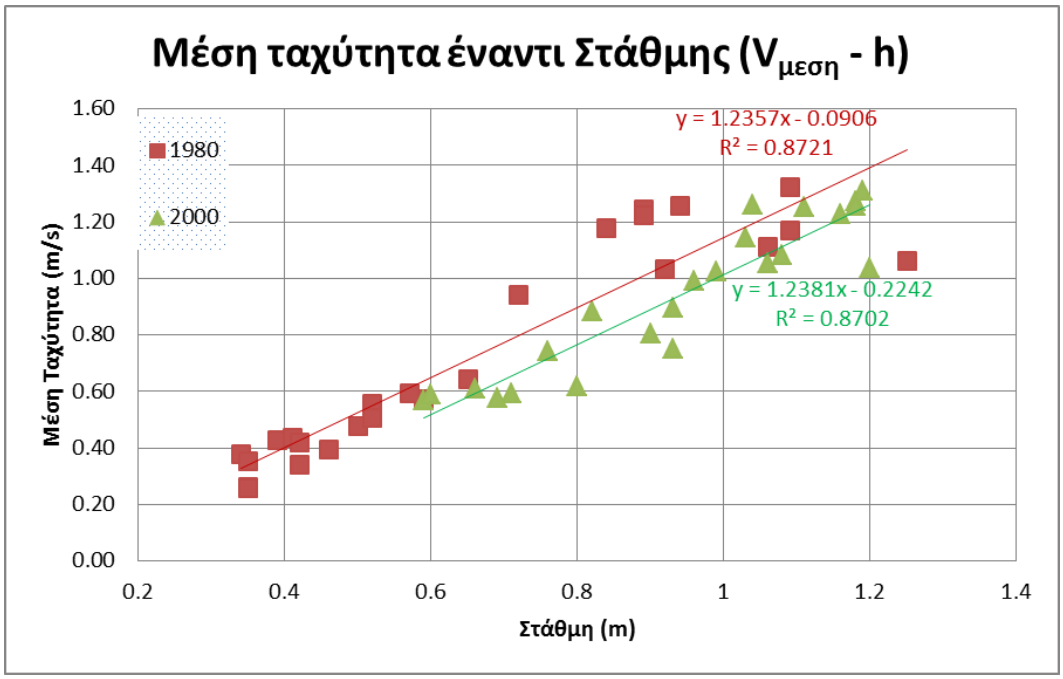


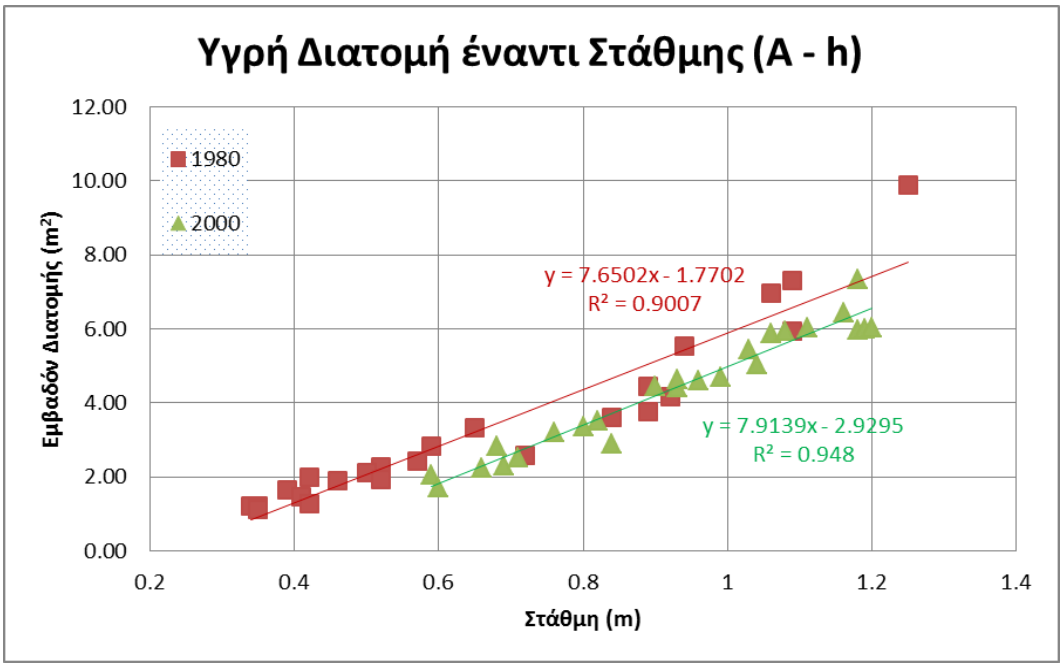


Σχήμα 4-23 Οι υδρομετρήσεις της δεκαετίας του 2000 σε αριθμητικό διάγραμμα (κάτω) και σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα (πάνω). Φαίνεται η ύπαρξη ενός σημείου καμπής στη στάθμη h ~0.55. Στο αριθμητικό διάγραμμα έχουν χαραχτεί, για τις στάθμες h>0.6, δύο καμπύλες, μία γραμμική και μία δύναμης, με τη δεύτερη να δίνει καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα.

Η μέθοδος για την *επέκταση της καμπύλης* σταθμης - παροχής που εφαρμόστηκε είναι η μέθοδος διατομής – ταχύτητας (area-velocity method) (Shaw, 1994). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο σχεδιάζονται τα διαγράμματα διασποράς στάθμης h – υγρής διατομής A, και στάθμης h – μέσης ταχύτητας, $V_{μέση}$ (Σχήμα 4-22), και χαράζονται γραμμές παλινδρόμησης στα σημεία (αν υπάρχει αποτύπωση της διατομής είναι δυνατό να ληφθεί

το πρώτο διάγραμμα από αυτή). Τα στοιχεία αυτά (A, $V_{μέση}$) προέκυψαν από την ανάλυση των δελτίων των υδρομετρήσεων.





Σχήμα 4-24 Διαγράμματα της μέσης ταχύτητας και της υγρής διατομής έναντι της στάθμης για το σύνολο των 63 υδρομετρήσεων που αναλύθηκαν, κατηγοριοποιημένες ανά δεκαετία. Παρουσιάζεται και εδώ το φαινόμενο της μετατόπισης της γραμμής παλινδρόμησης ενώ οι γραμμές είναι σχεδόν παράλληλες.

Από τις γραμμές τάσεων αυτές μπορεί να υπολογιστεί, για μιά μεγαλύτερη στάθμη, τόσο η υγρή διατομή όσο και η μέση ταχύτητα, οπότε η παροχή σε αυτή τη στάθμη προκύπτει σαν $Q = AV_{μέση}$. Με τις παραπάνω σχέσεις γίνεται έλεγχος για το ποιά γραμμή τάσης δίνει καλύτερα αποτελέσματα για μεγαλύτερες στάθμες. Αυτός ο έλεγχος πραγματοποιείται στον Πίνακα 4-6. Η μεγαλύτερη στάθμη στην οποία έχει γίνει υδρομέτρηση είναι h = 1.25 m. Η μέγιστη καταγεγραμμένη στάθμη στα σταθμηγραφήματα είναι 2.13 m για το διάστημα 1980-1990 και 1.86 m για το διάστημα 2003-2015. Οι ελάχιστες καταγεγραμμένες τιμές της στάθμης είναι 0.05 m και 0.37 m αντίστοιχα.

Πίνακας 4-6 Σύγκριση των παροχών που δίνουν οι διαφορετικές καμπύλες στάθμης - παροχής (σχέση δύναμης και γραμμική σχέση) με τις παροχές που προκύπτουν από τη μέθοδο επιφάνειας – ταχύτητας για μεγάλες τιμές της στάθμης.

	1980					2000				
h	A	V	Q = AV	$Q_{δυν αμ.}$	$Q_{γραμ.}$	A	V	Q = AV	$Q_{δυν αμ.}$	$Q_{γραμ.}$
1	5.88	1.15	6.73	6.91	7.18	4.98	1.01	5.05	4.91	5.47
1.5	9.71	1.76	17.11	16.63	14.48	8.94	1.63	14.60	14.40	11.70
1.86	12.46	2.21	27.51	25.88	19.74	11.79	2.08	24.51	24.63	16.19
2	13.53	2.38	32.21	29.96	21.78	12.90	2.25	29.05	29.40	17.94
2.13	14.52	2.54	36.91	33.99	23.68	13.93	2.41	33.61	34.24	19.56

Με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω καταλήξαμε στις παρακάτω σχέσεις για την καμπύλη σταθμης – παροχής:

Διάστημα 1980-1990 (ho =0.20m) (4-3)

h≤0.45 $Q = 6.3469*(h-0.20)^{1.4268}$

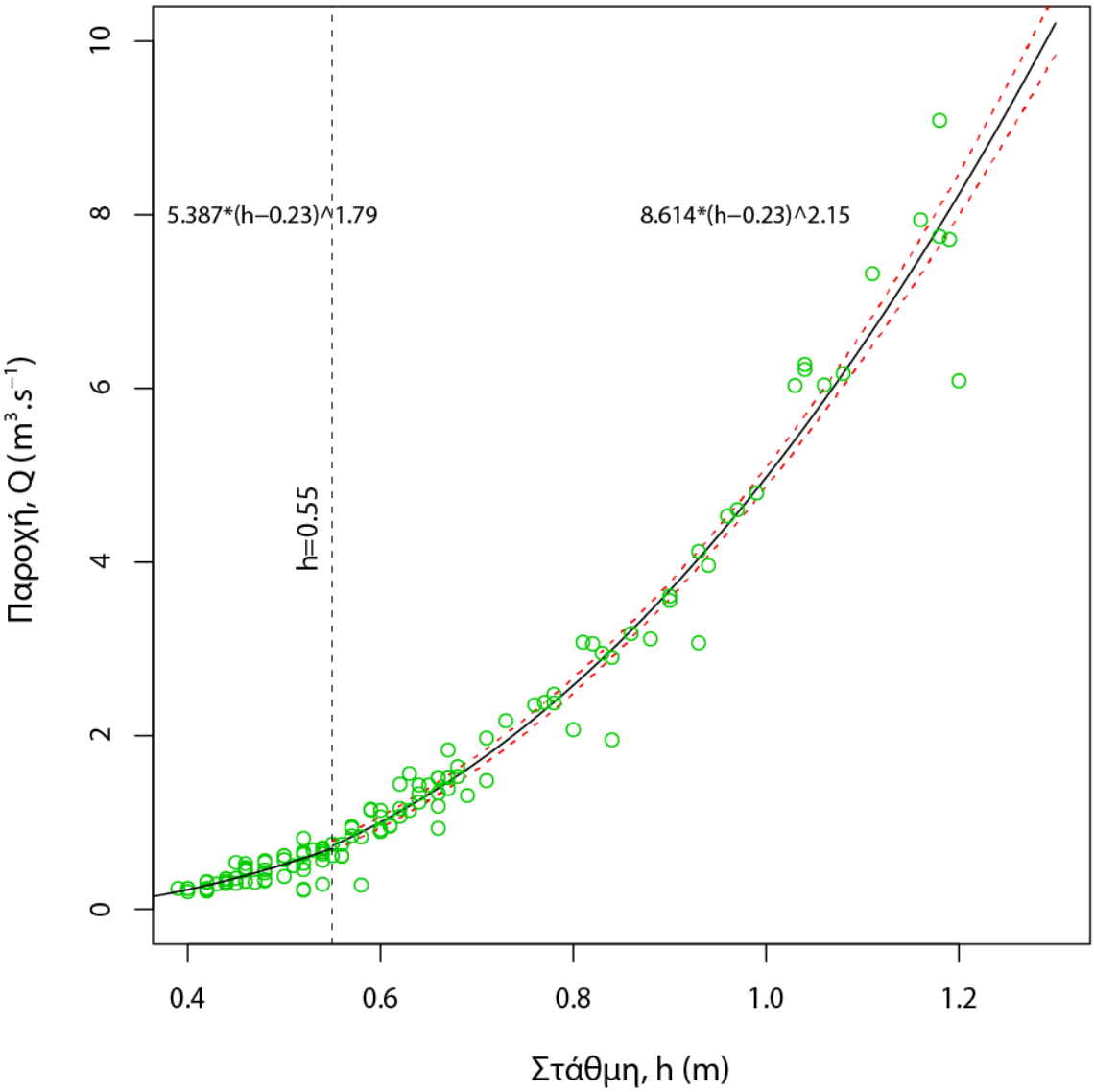
0.45<h<0.60 $Q = 9.5324*(h-0.20)^{1.7194}$

h≥0.60 $Q = 10.3479*(h-0.20)^{1.8088}$

Διάστημα 2001-2014 (ho =0.23m) (4-4)

h≤0.55 $Q = 5.3871*(h-0.23)^{1.7884}$

h>0.55 $Q = 8.6144*(h-0.23)^{2.15}$



Σχήμα 4-25 Η καμπύλη στάθμης – παροχής που υιοθετήθηκε. Οι υδρομετρήσεις (127 πράσινοι κύκλοι) αφορούν την περίοδο 2000-2011. Η εξίσωση της ευθείας αλλάζει στη στάθμη h = 0.55. Με διακεκομμένο κόκκινο χρώμα είναι τα όρια διαστήματος εμπιστοσύνης 95%.

Με βάση τις σχέσεις του Εδαφίου 2.5.2 (Έλεγχος αβεβαιότητας της καμπύλης στάθμης – παροχής) έγινε έλεγχος των καμπυλών σταθμης - παροχής και συνοψίζεται στους παρακάτω Πίνακες 4-7 και 4-8.

Πίνακας 4-7 Στατιστικά μεγέθη της καμπύλης στάθμης - παροχής του διαστήματος 1980-1990

	Se	Se (%)	N	n(+)	n(-)
Ολόκληρη	0.329	19.12	105	50	55
Τμηματικά					
h≤0.45	0.119	25.69	46	28	18
0.45< h<0.60	0.168	14.96	20	6	14
h≥0.60	0.516	9.80	39	16	23

Πίνακας 4-8 Στατιστικά μεγέθη της καμπύλης σταθμης - παροχής του διαστήματος 2004-2014.

	Se	Se (%)	N	n(+)	n(-)	τ
Ολόκληρη	0.334	28.92	119	63	56	10.2
Τμηματικά						
h≤0.55	0.118	39.91	52	26	26	7.1
h>0.55	0.435	15.88	67	37	30	7.2

Συμπερασματικά, η υιοθετηθείσα καμπύλη έχει ικανοποιητικά στατιστικά χαρακτηριστικά. Οι αντιπαραβολές δε, των εξαγομένων της καμπύλης με τα αποτελέσματα των υδρομετρήσεων μας ήταν πολύ ικανοποιητικές.

4.4.5 Συμπλήρωση των κενών και υδρολογική προσομοίωση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπήρχαν διαθέσιμα τα ψηφιοποιημένα από την ΔΕΗ σταθμηγραφήματα για δύο διακριτές χρονικές περιόδους: την ενδεκαετία 1980 – 1990 και την ενδεκαετία 2004-2014. Αφού έγινε η μετατροπή τους σε υδρογραφήματα (με τις καμπύλες στάθμης – παροχής) ακολούθησε ο έλεγχος τους προκειμένου να ανακαλυφθούν κενά ή/και ενδεχόμενα λάθη (δες Σχήμα 4-26). Στόχος ήταν να υπάρξει μια συνεχής και χωρίς λάθη σειρά πάνω στην οποία να μπορεί να βασιστεί η ανάλυση. Η έμφαση δόθηκε στην υδρολογική δεκαετία 2004-2014. Σκοπός ήταν τόσο η ολοκληρωμένη υδρολογική ανάλυση και η αναγνώριση του υδρολογικού καθεστώτος του Βουραϊκού ποταμού όσο και η ανάλυση των πλημμυρικών συχνοτήτων του ποταμού.

Στην ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν κυρίως τρία εργαλεία με την παρακάτω σειρά· το IHACRES (Identification of Unit Hydrographs and Components from Rainfall, Evaporation and Streamflow data), το WETSPRO (Water Engineering Time Series PROcessing Tool) και το RAP (River Analysis Package). Τα IHACRES και RAP ανήκουν

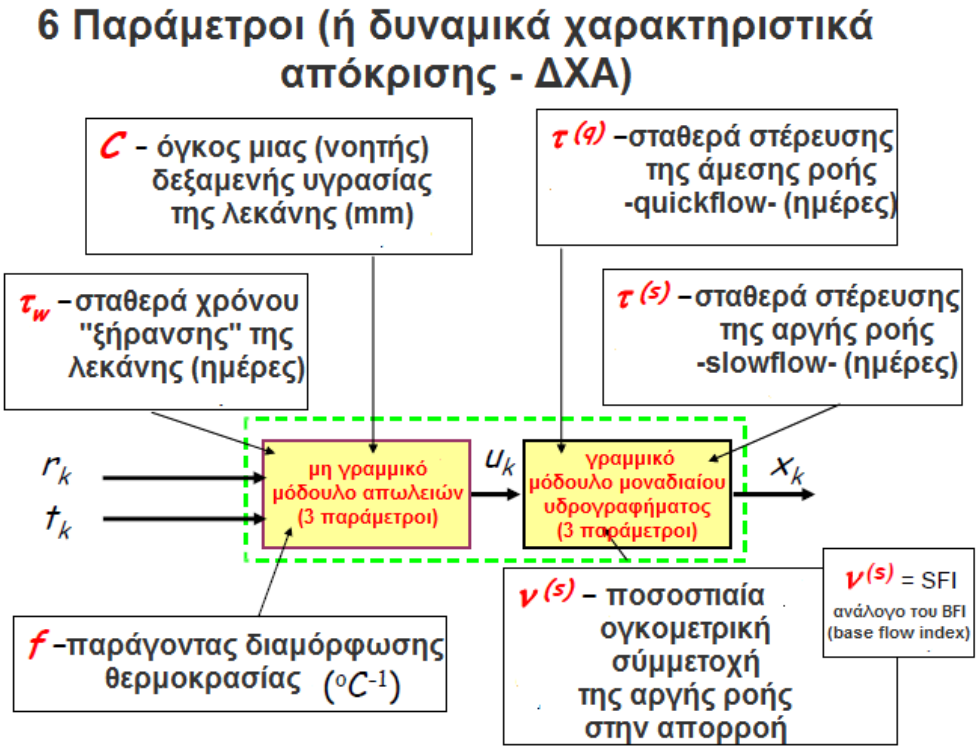
στην εργαλειοθήκη (toolkit) του Αυστραλιανού *eWater* κυβερνητικού ερευνητικού κέντρου του Πανεπιστημίου της Μελβούρνης εντεταλμένου στην ανάλυση της υδρολογικής, εδαφολογικής και μετεωρολογικής πληροφορίας, ενώ το WETSPRO ανήκει στα εργαλεία Water Engineering του *Καθολικού Πανεπιστημίου του Leuven* (Katholieke Universiteit Leuven, Hydraulics Section) στο Βέλγιο.

Τα σταθμηγραφήματα που παραχωρήθηκαν από την ΔΕΗ είχαν κάποια χρονικά κενά· το μεγαλύτερο (διάρκειας 9 σχεδόν μηνών) αφορούσε το διάστημα από 31/12/2013, οπότε μια μεγάλη πλημμύρα χάλασε τον σταθμηγράφο, έως τις 26/9/2013 οπότε ξανατέθηκε σε λειτουργία το όργανο (Σχήμα 4-26).

Το IHACRES (Jakeman et al., 1990) είναι ένα μοντέλο βροχής - απορροής που χρησιμοποιεί τις βροχοπτώσεις και την δυνητική εξατμισοδιαπνοή (ή, σε περίπτωση έλλειψης αυτής της μεταβλητής, τη θερμοκρασία σαν υποκατάστατό της) προκειμένου να προσομοιώσει τα υδρογραφήματα απορροής. Η βασική ιδέα είναι αυτή της γραμμικής δεξαμενής (linear reservoir) και του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Η προσέγγιση βασίζεται στην αναγνώριση και ποσοτικοποίηση διακριτών δυναμικών χαρακτηριστικών απόκρισης (ΔΧΑ) του ποταμού (dynamic response characteristics) από τα δεδομένα. Τα απαιτούμενα δεδομένα είναι, όπως αναφέρθηκε, υδρογραφήματα απορροής, θερμοκρασίες (ή δυνητική εξατμισοδιαπνοή) και βροχοπτώσεις στη λεκάνη απορροής, όλα με ημερήσιο βήμα. Η αρχιτεκτονική του μοντέλου δίνεται στο Σχήμα 4-24.

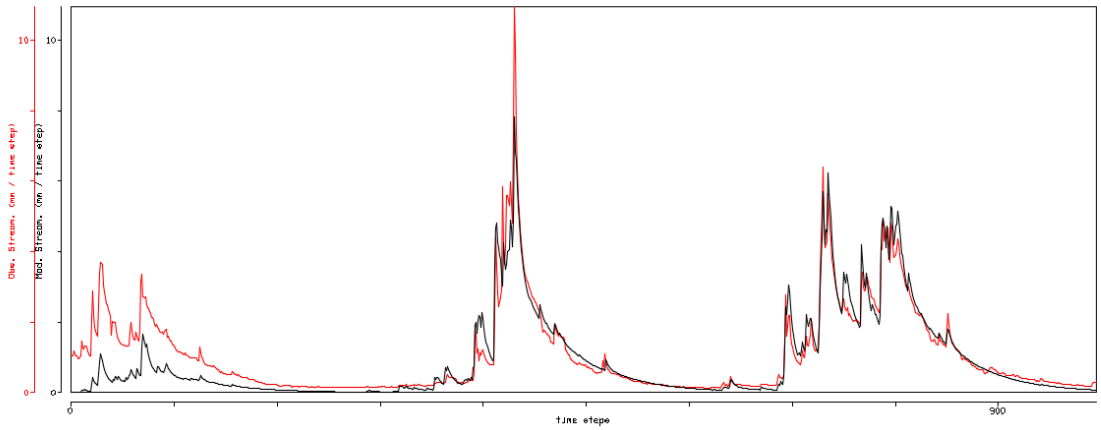
Σαν περίοδος βαθμονόμησης του μοντέλου επελέγη η περίοδος των 3 πρώτων ετών λόγω του ότι η σειρά της απορροής είναι συνεχής (δεν έχει κενά) και επίσης περιλαμβάνει τόσο υψηλές αιχμές όσο και μεσαίες αλλά και μικρές αιχμές. Η περίοδος αυτή έδωσε (και με τις δύο διαμορφώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω) αρκετά καλά στατιστικά χαρακτηριστικά (απο τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω μόνο δύο ζευγάρια, το πρώτο με το μεγαλύτερο R_{NS} και το δεύτερο με το μικρότερο Bias):

- $4^{η}$-> R_{NS}=0.925, Bias = 18.61 mm/έτος ή R_{NS}=0.865, Bias = -0.006 mm/έτος
- $5^{η}$-> R_{NS}=0.925, Bias = 11.56 mm/έτος ή R_{NS}=0.904, Bias = -0.003 mm/έτος

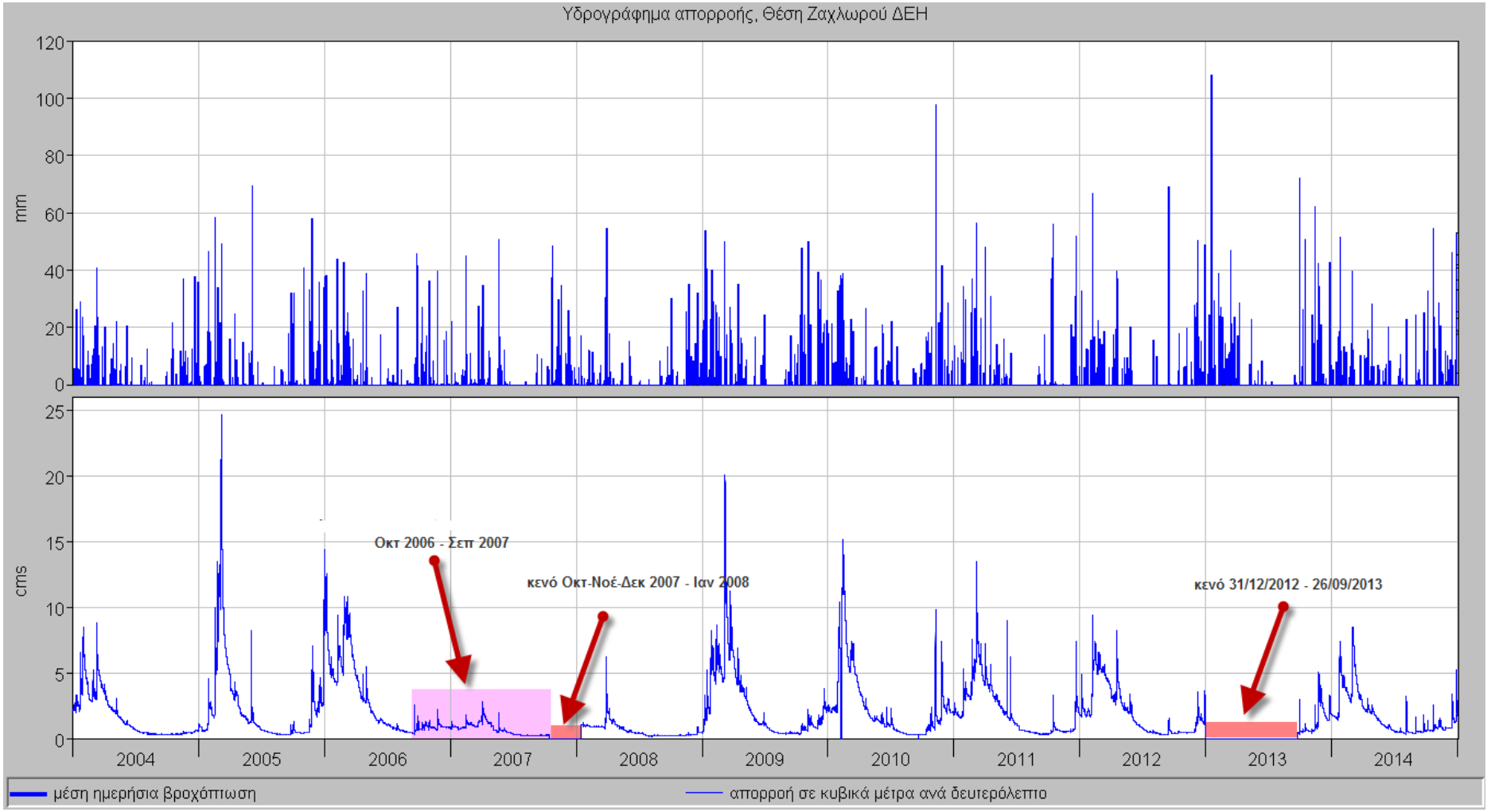


Σχήμα 4-26 Εννοιολογικό διάγραμμα του IHACRES και τα 6 δυναμικά χαρακτηριστικά απόκρισης. r_k :βροχόπτωση, t_k :θερμοκρασία, u_k :ενεργή βροχόπτωση, x_k :απορροή, k χρονικό βήμα.

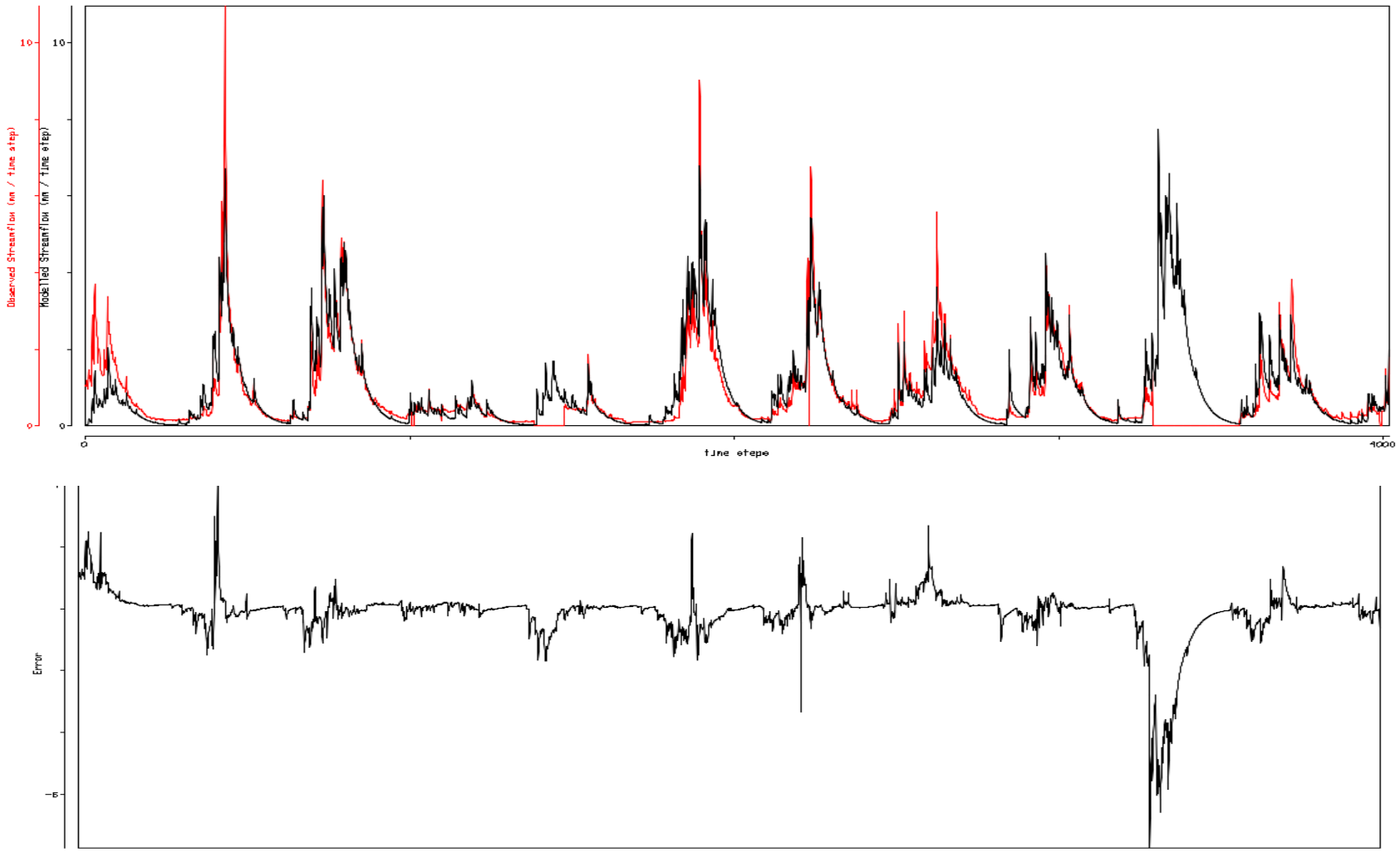
Δεδομένου ότι η διαμόρφωση 5 (δύο γραμμικές δεξαμενές παράλληλα) φάνηκε να δίνει ελαφρά καλύτερα στατιστικά αποτελέσματα, επελέγη αυτή για να τρέξει η προσομοίωση. Η περίοδος βαθμονόμησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-25.



Σχήμα 4-27 Περίοδος βαθμονόμησης του μοντέλου, περίπου 3 έτη (οι απορροές σε χιλιοστά). Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα (κόκκινο το παρατηρούμενο, μαύρο το προσομοιωμένο υδρογράφημα), το μοντέλο IHACRES γενικά: υπερεκτιμά τις μικρές απορροές (πρώτο έτος), υποεκτιμά τις μεγάλες απορροές (δεύτερο έτος) και εκτιμά αρκετά καλά τις ενδιάμεσες απορροές (τρίτο έτος). Το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά καλά τους κατιόντες κλάδους των υδρογραφημάτων (τις καμπύλες στέρευσης).



Σχήμα 4-28 Υετογράφημα και υδρογράφημα για την περίοδο 2004-2014, όπου φαίνονται οι χρονικές περίοδοι χωρίς μετρήσεις. Οι απορροές είναι οι μέσες ημερήσιες ενώ οι βροχές έχουν προκύψει από τους 3 σταθμούς της ΔΕΗ εντός της λεκάνης απορροής του Βουραϊκού ποταμού (Λαγοβούνι, Καλάβρυτα, Κερπινή) με βάρη κατά Thiessen. Οι πολύ χαμηλές απορροές της διετίας 2007-2008 οφείλονται στα πολύ μικρά ύψη βροχής καθώς και στις πολύ υψηλές τιμές θερμοκρασιών εκείνων των ετών (αυξημένη εξατμισοδιαπνοή).



Σχήμα 4-29 Προσομοιωμένο (μαύρο) και παρατηρούμενο (κόκκινο) υδρογράφημα. Το κάτω διάγραμμα δείχνει το σφάλμα της προσομοίωσης. Οι συνεχείς τιμές του σφάλματος σημειώνονται στο 10ο έτος (2013) όπου υπάρχει το μεγάλο κενό (χρονικής διάρκειας 9 μηνών) στα δεδομένα.

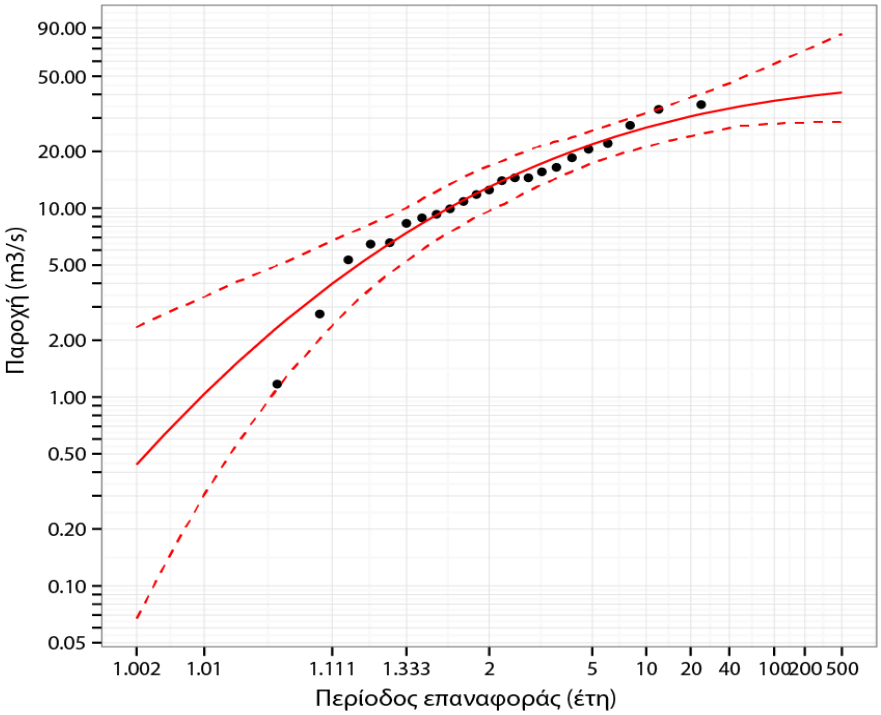
4.4.6 Διαχωρισμός των υδρογραφημάτων

Με εξαίρεση τα υδατορεύματα με διαλείπουσα ροή, στα υπόλοιπα ένα σημαντικό κλάσμα της απορροής είναι αποτέλεσμα της εκφόρτισης των υπόγειων νερών, δηλαδή των νερών των υπόγειων υδροφόρων σχηματισμών που συνθέτουν την υδρογεωλογική λεκάνη (η οποία μπορεί να μην ταυτίζεται με την υδρολογική λεκάνη). Αυτό το κλάσμα ονομάζεται *βασική ροή* (ή και ροή υποβάθρου) και, καθώς οι μεταβολές του είναι αργές, αναφέρεται και ως αργή ροή. Το υπόλοιπο νερό στον ποταμό συντίθεται από δύο συνιστώσες: την *υποδόρια απορροή*, που είναι ρηχή υποεπιφανειακή πλημμυρική ροή που λαμβάνει χώρα εντός του εδάφους αλλά κοντά (σχετικά) στην επιφάνεια του, και την *επίγεια απορροή* που αποτελείται από το νερό που κυλά πάνω στην επιφάνεια του εδάφους σε μικρές νεροσυρμές ή σαν ενιαίος λεπτός μανδύας νερού (υδροστρωματοροή). Η επίγεια ροή είναι πολύ άμεση, ή γρήγορη, ενώ η υποδόρια ροή είναι λιγότερο άμεση από την επίγεια αλλά όχι τόσο αργή όσο η βασική ροή.

Ο διαχωρισμός των υδρογραφημάτων έγινε με τη χρήση του λογισμικού WETSPRO (Water Engineering Time Series PROcessing Tool) (Willems, 2009). Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην αρχή της γραμμικής δεξαμενής (εκθετική απομοίωση της απορροής σε περιόδους χωρίς βροχόπτωση) και χρησιμοποιεί μια τεχνική χαμηλοδιαβατού φίλτρου (lowpass filter) προκειμένου να φιλτράρει τις υψηλές συχνότητες (μεγάλες τιμές απορροής). Τα αποτελέσματα του διαχωρισμού παρουσιάζονται στο Εδάφιο 4.3.13 (Σχ.4-44).

4.4.7 Ανάλυση πλημμυρικών συχνοτήτων

Ο σκοπός της ανάλυσης συχνοτήτων των υδρολογικών δεδομένων είναι να συνδεθεί το εύρος (το μέγεθος) ακραίων γεγονότων με την συχνότητα εμφάνισής τους (η την περίοδο επαναφοράς τους), με τη χρήση στατιστικών κατανομών. Τα ακραία περιστατικά ή γεγονότα η συχνότητα εμφάνισης των οποίων μελετάται, μπορεί να είναι παροχές ή στάθμες ενός ποταμού, όγκοι ή εντάσεις βροχόπτωσης κ.ά. Για την ανάλυση των πλημμυρικών συχνοτήτων ενός ποταμού συνήθως χρησιμοποιούνται οι κατανομές LogNormal ή LogPearson3, ενώ για την ανάλυση ακραίων περιστατικών βροχής η κατανομή Gumbel (extreme value, type I).

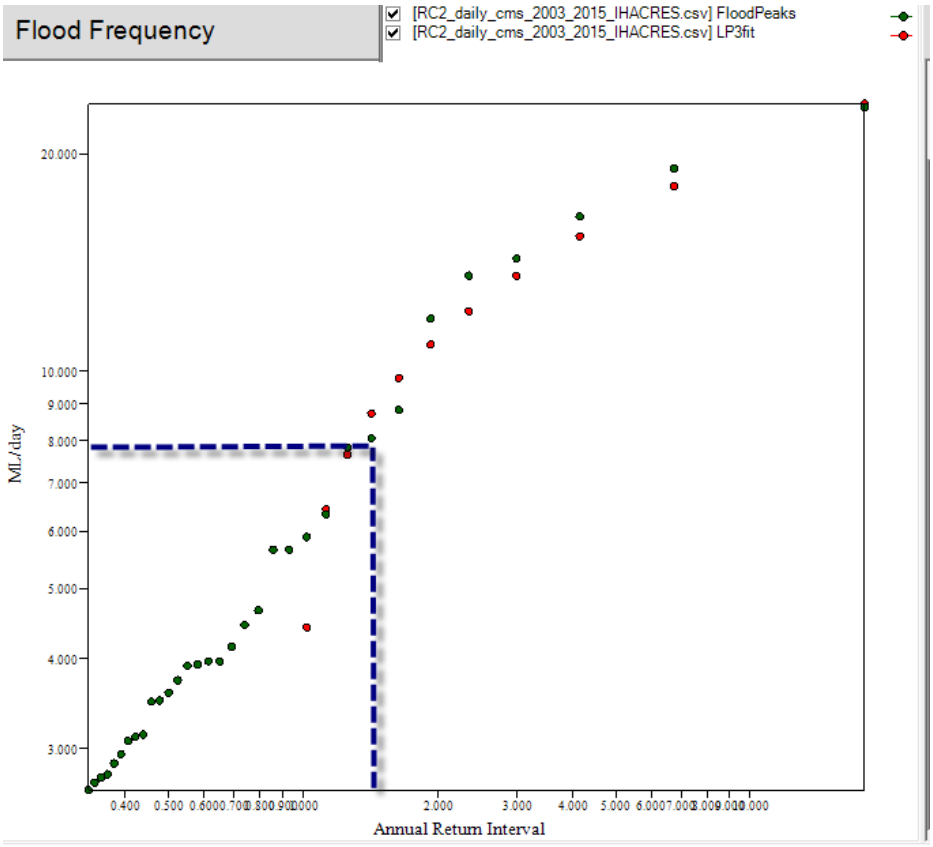


Σχήμα 4-30 Διάγραμμα περιόδου επαναφοράς – πλημμυρικής παροχής για τα δεδομένα του Βουραϊκού ποταμού, με χρήση της συνάρτησης κατανομής LogPearson3.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσίαζονται στον Πίνακα 4-9 και στα Σχήματα 4-28, 4-29. Η σειρά που χρησιμοποιείται είναι η σειρά ετήσιων μέγιστων (23 σημεία). Πρόκειται για τις μέγιστες ετήσιες παροχές των ετών 1980 - 1990 και των ετών 2004 – 2014.

Πίνακας 4-9 Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συχνοτήτων βροχοπτώσεων για 3 διαφορετικές κατανομές.

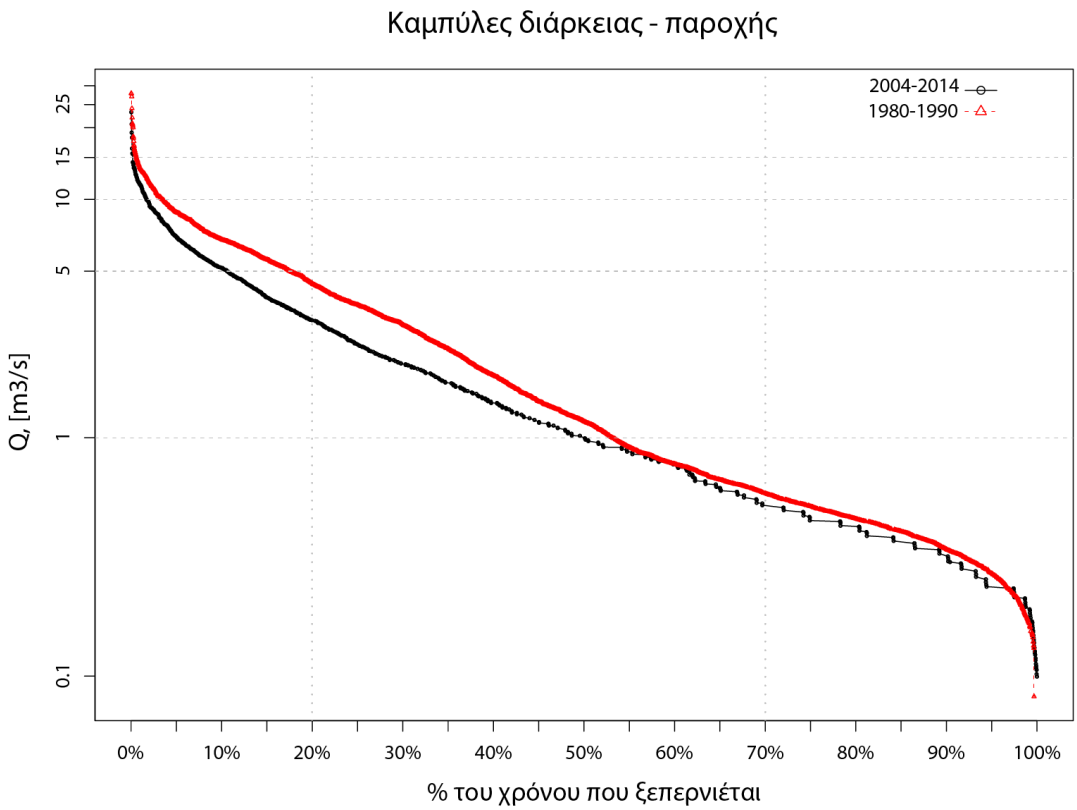
Περίοδος επαναφοράς, T (έτη)	*EV I (Gumbel) (m^3/s)*	*LogNormal (m^3/s)*	*LogPearson 3 (m^3/s)*
2	12.71	11.28	11.43
5	20.57	21.68	21.75
10	25.77	30.51	30.22
25	32.34	43.90	42.72
50	37.22	55.54	53.26
100	42.06	68.59	64.76



Σχήμα 4-31 Σχέσεις μεγέθους απορροής με περίοδο επαναφοράς από τις μερικές σειρές. Σημειώνεται η τιμή της παροχής για την παροχή πλήρους κοίτης (bankfull discharge) περίπου 8 κυβικά μέτρα το δευτερόλεπτο, η οποία γενικά θεωρείται ότι συμβαίνει 2 φορές στα 3 χρόνια και κατά την οποία η κοίτη του ποταμού καλύπτεται με νερό έως τις όχθες της. Η παροχή πληρους κοίτης είναι μια σημαντική παράμετρος στους υπολογισμούς της στερεοαπορροής καθώς θεωρείται η παροχή που διαμορφώνει μορφολογικά το ποτάμι.

4.4.8 Καμπύλη διάρκειας - παροχής

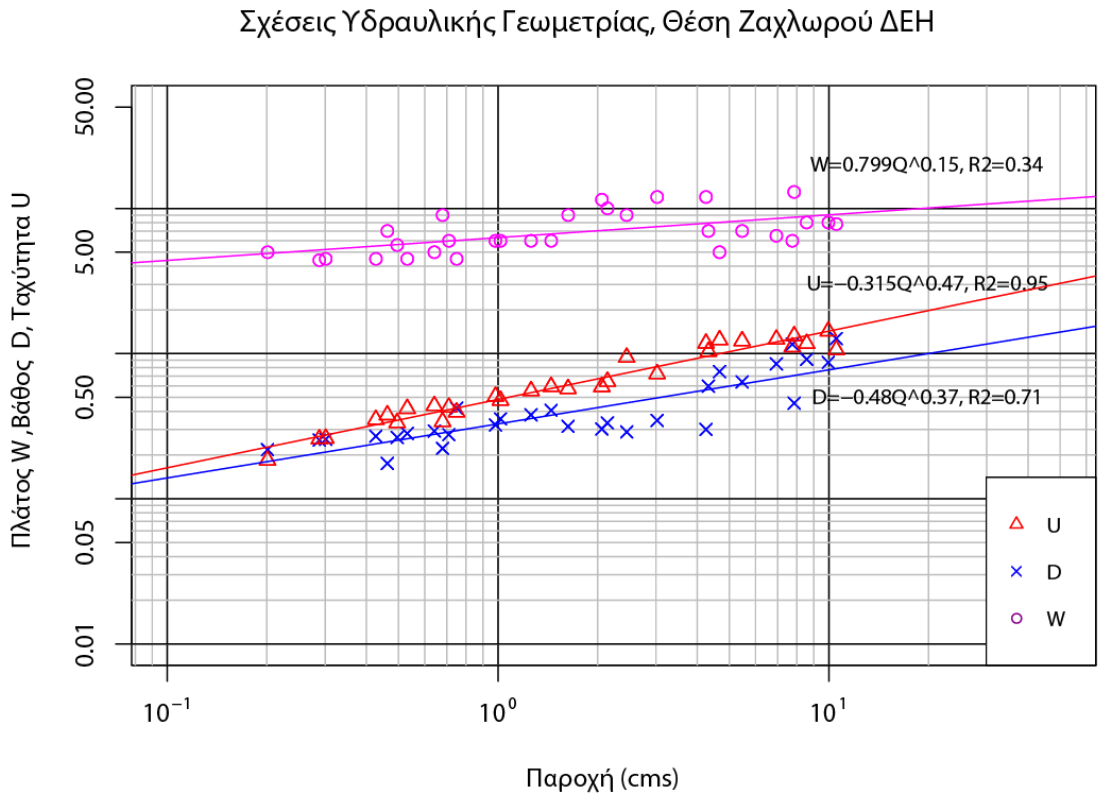
Η καμπύλη διάρκειας-παροχής είναι μια βασική παράμετρος της υδρολογικής συμπεριφοράς του υδατορεύματος. Από τις πλήρεις χρονοσειρές της απορροής εξήχθησαν οι καμπύλες του Σχήματος 4-30.



Σχήμα 4-32 Καμπύλες διάρκειας-παροχής για τις δύο περιόδους απορροών που ήταν διαθέσιμες. Οι δύο καμπύλες ταυτίζονται σχεδόν στις χαμηλές παροχές, αλλά στις υψηλές διακρίνεται καθαρά ότι η περίοδος 1980-1990 ήταν πιο πλούσια σε νερό. Για παράδειγμα, την πρώτη περίοδο στο 20% του χρόνου η παροχή ήταν πάνω από 5 m^3/s, ενώ κατά τη δεύτερη περίοδο πάνω από 5 m^3/s σημειώθηκε μόνο το ~12% του χρόνου.

4.4.9 Υδραυλική γεωμετρία της διατομής

Η υδραυλική γεωμετρία (hydraulic geometry) είναι μία θεωρία της ποτάμιας γεωμορφολογίας που αναζητά τις σχέσεις μεταξύ των κύριων υδραυλικών παραμέτρων όπως είναι η μέση ταχύτητα, το μέσο βάθος και το πλάτος του ποταμού με την παροχή. Η υδραυλική γεωμετρία εξετάζει τις σχέσεις αυτές τόσο σε μια θέση του ποταμού (at-a-station) όσο και την μεταβολή τους στα κατάντη (downstream). Από την ανάλυση των υδρομετρήσεων εξήχθησαν οι καμπύλες του Σχήματος 4-31.

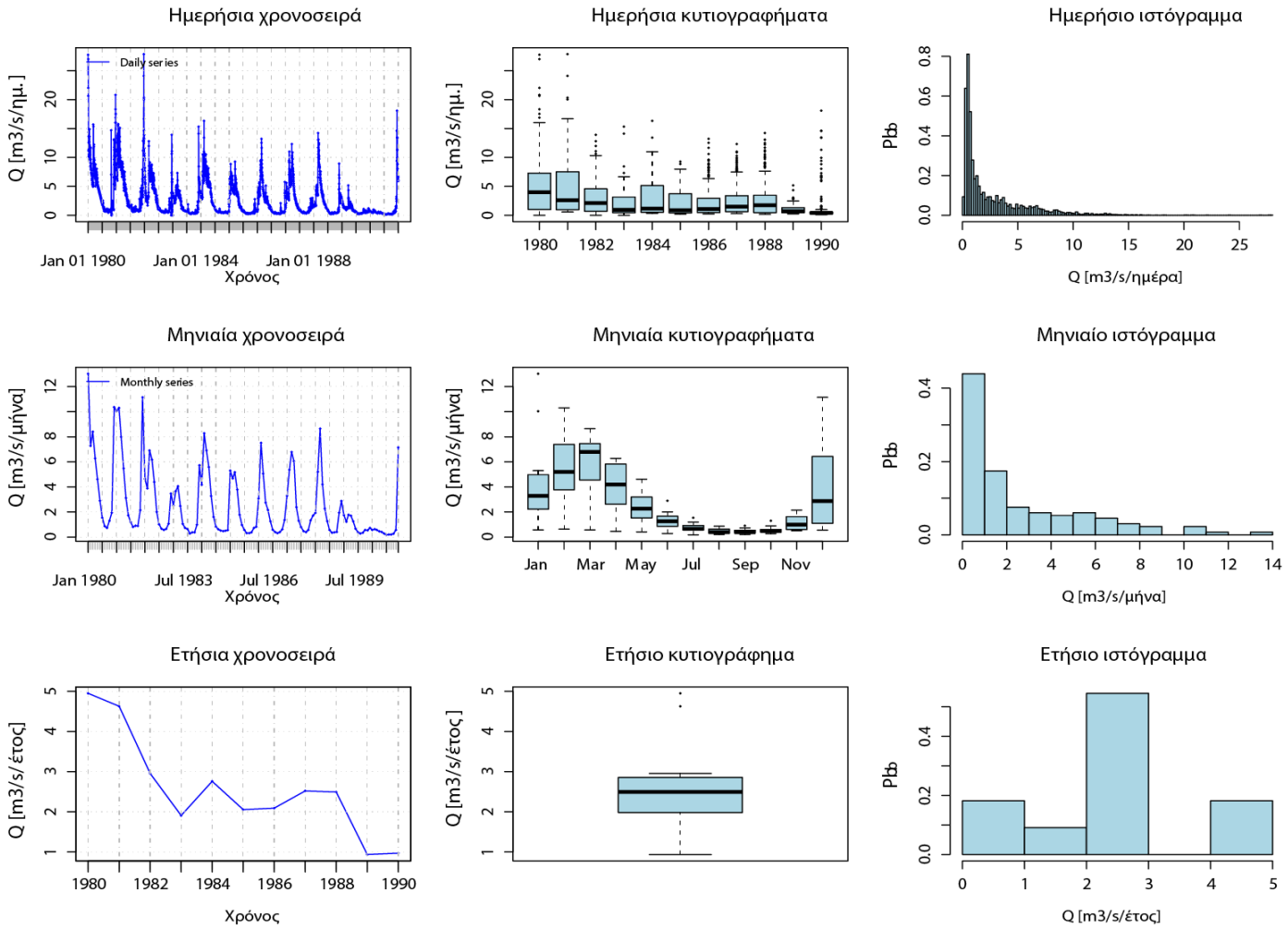


Σχήμα 4-33 Σχέσεις υδραυλικής γεωμετρίας στην θέση Ζαχλωρού ΔΕΗ. Πρόκειται για τα δεδομένα 30 επιλεγμένων υδρομετρήσεων από την ΔΕΗ στη θέση αυτή. Όπως φαίνεται, οι σχέσεις μέσου βάθους, D (=A/W όπου W το πλάτος της ελεύθερης επιφάνεια του νερού, A η υγρή επιφάνεια), μέσης ταχύτητας U, και πλάτους W του ποταμού είναι καλά ορισμένες σαν σχέσεις δύναμης με την παροχή Q του ποταμού. Η μεγαλύτερη διασπορά που εμφανίζεται με το πλάτος W πιθανόν να οφείλεται στον τρόπο υπολογισμού του από τα δεδομένα των υδρομετρήσεων.

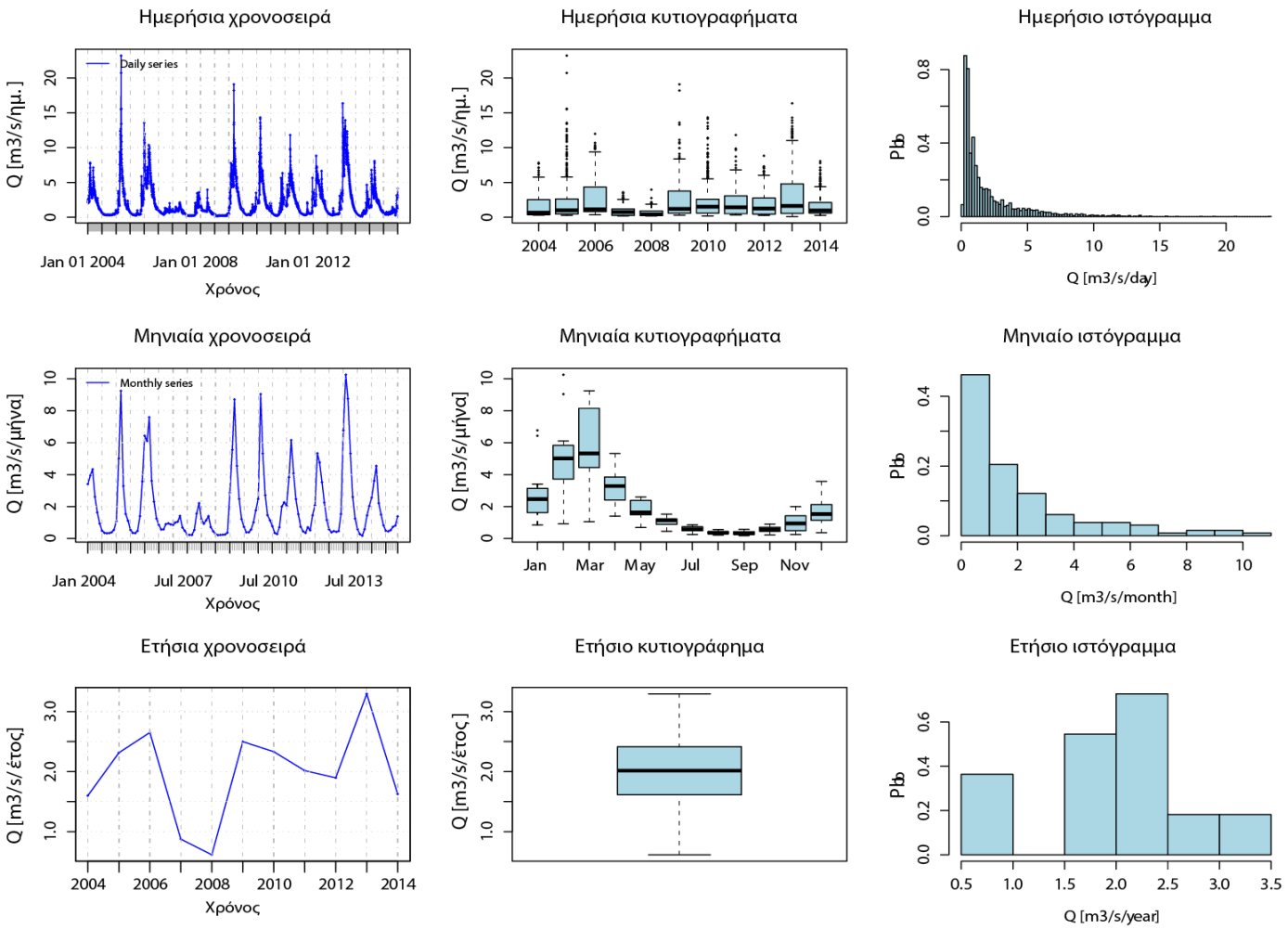
4.4.10 Στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών απορροής

Οι συγκεντρωτικές και αθροιστικές στατιστικές των χρονοσειρών της απορροής εξήχθησαν με το River Analysis Program (RAP) (Stewardson & Marsh, 2004). Οι αναλύσεις έγιναν με τις ημερήσιες σειρές των απορροών σε χιλιοστά, για μεν την ενδεκαετία 2004-2014 έτσι όπως προέκυψαν από την συμπλήρωση των υδρογραφημάτων με το IHACRES, για δε την ενδεκαετία 1980 – 1990 με μικρές μόνο συμπληρώσεις, μιας και δεν υπήρχαν σημαντικής διάρκειας κενά υδρομετρήσεων σε αυτή.

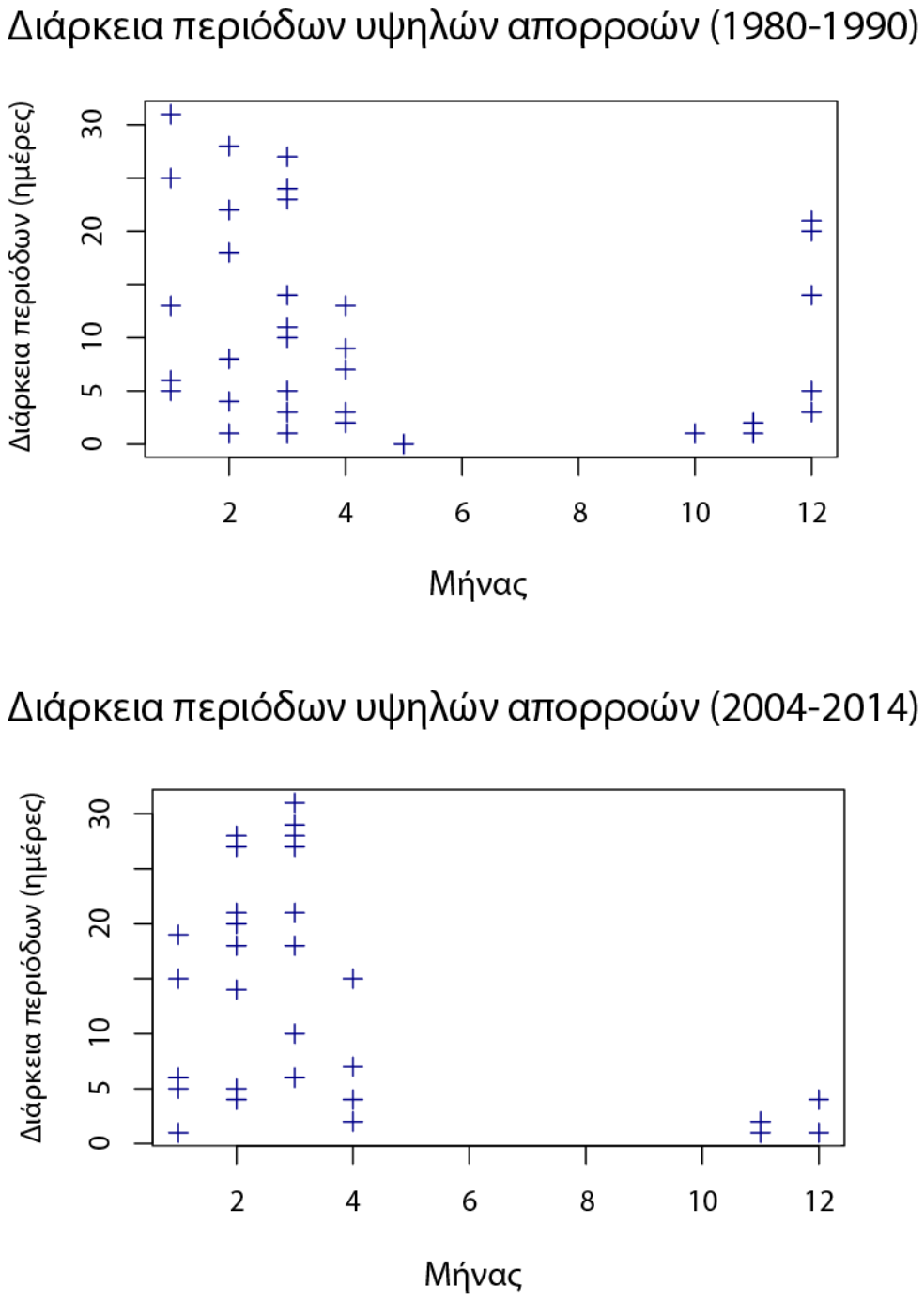
Τα αποτελέσματα δίνονται στα Σχήματα 4-32 έως 4-37 που ακολουθούν.



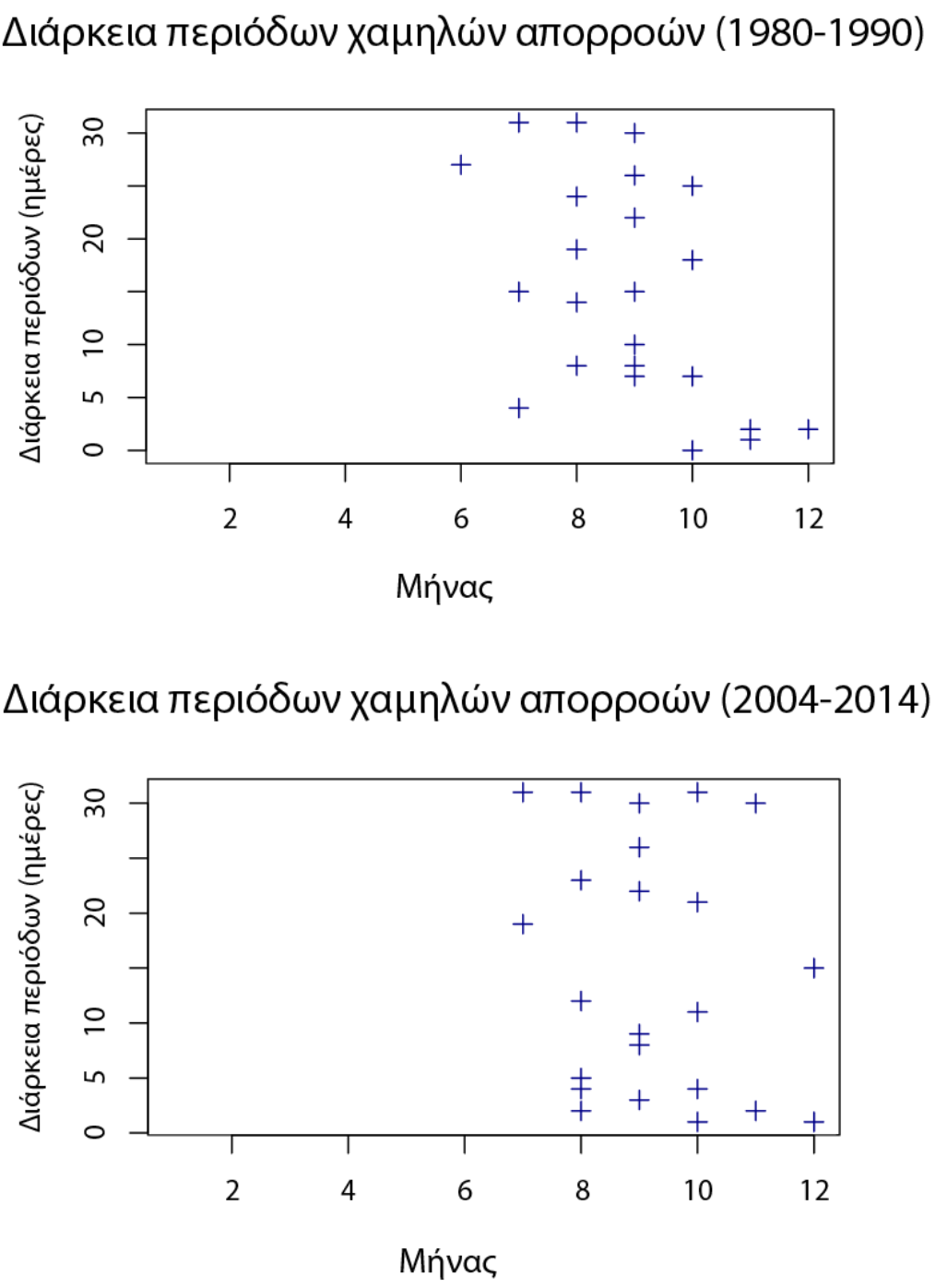
Σχήμα 4-34 Στατιστικά διαγράμματα της απορροής για την πρώτη περίοδο (1980-1990). Τα κυτιογραφήματα δίνουν την κατανομή των δεδομένων (εδώ 12 μηνιαίες τιμές αθροιστικής απορροής για κάθε έτος) με όρους min - 1ο ποσοστημόριο (25%) – διάμεσος (2^{ο} ποσοστημόριο= 50%) – 3^{ο} ποσοστημόριο (75%) και max. Τιμές της μεταβλητής που απέχουν περισσότερο θεωρούνται ακραίες - outliers και σημειώνονται με τα μικρά κυκλάκια.



Σχήμα 4-35 Στατιστικά διαγράμματα της απορροής για την δεύτερη περίοδο μετρήσων (2004-2014). Όπως φαίνεται, στη 2η περίοδο οι απορροές είναι σημαντικά μικρότερες αλλά το ετήσιο πρότυπο είναι ίδιο, με τον Μάρτιο να έχει την μεγαλύτερη απορροή, ενώ ακολουθεί ο Φεβρουάριος και ο Απρίλιος. Ένα χιλιοστό απορροής αντιστοιχεί σε περίπου 184 χιλιάδες κυβικά μέτρα νερού (η επιφάνεια της λεκάνης απορροής ανάντη της Ζαχλωρού είναι 183.7 km^2.)



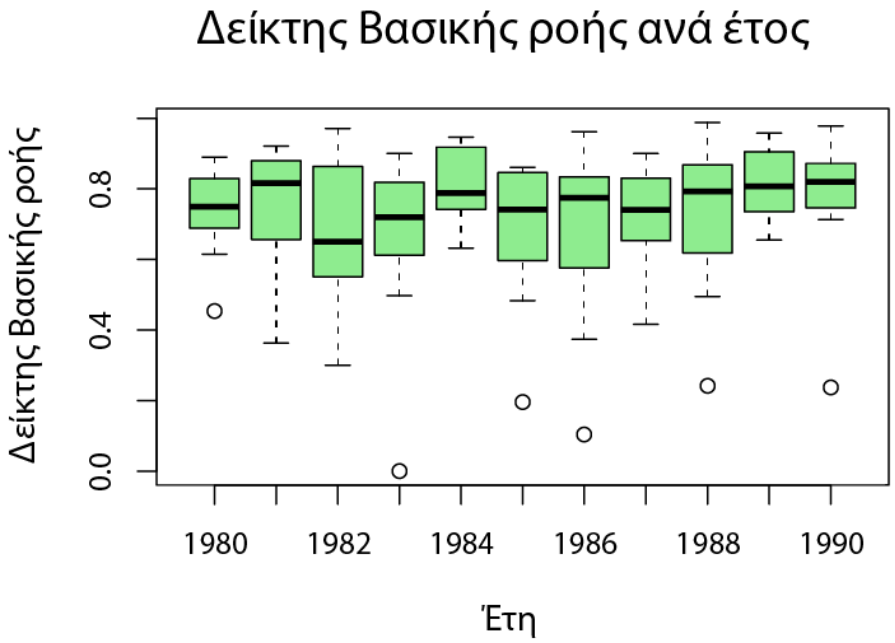
Σχήμα 4-36 Διάρκεια (σε ημέρες) των περιόδων υψηλών απορροών ανά μήνα για την πρώτη περίοδο μετρήσεων (πάνω) και την δεύτερη περίοδο (κάτω). Οι υψηλές περίοδοι (high spells) ορίστηκαν σαν περίοδοι που η απορροή είναι μεγαλύτερη από το 90^{ο} ποσοστημόριο της ετήσιας μέσης απορροής.

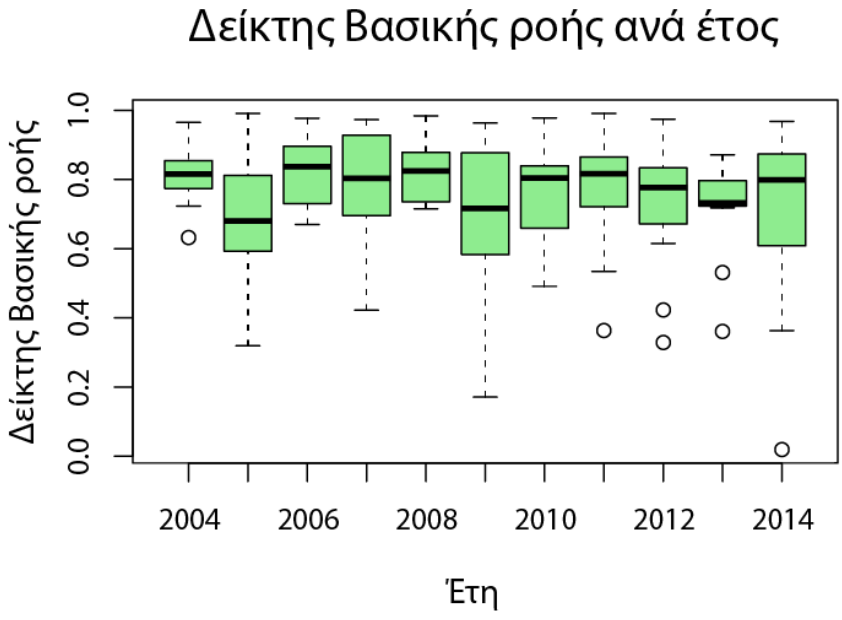


Σχήμα 4-37 Διάρκεια (σε ημέρες) των περιόδων χαμηλών απορροών ανά μήνα για την πρώτη (πάνω) και την δεύτερη (κάτω) περίοδο μετρήσεων. Οι χαμηλές περίοδοι (lowspells) ορίστηκαν σαν περίοδοι που η απορροή είναι μικρότερη από το 10^{ο} ποσοστημόριο της ετήσιας μέσης απορροής.

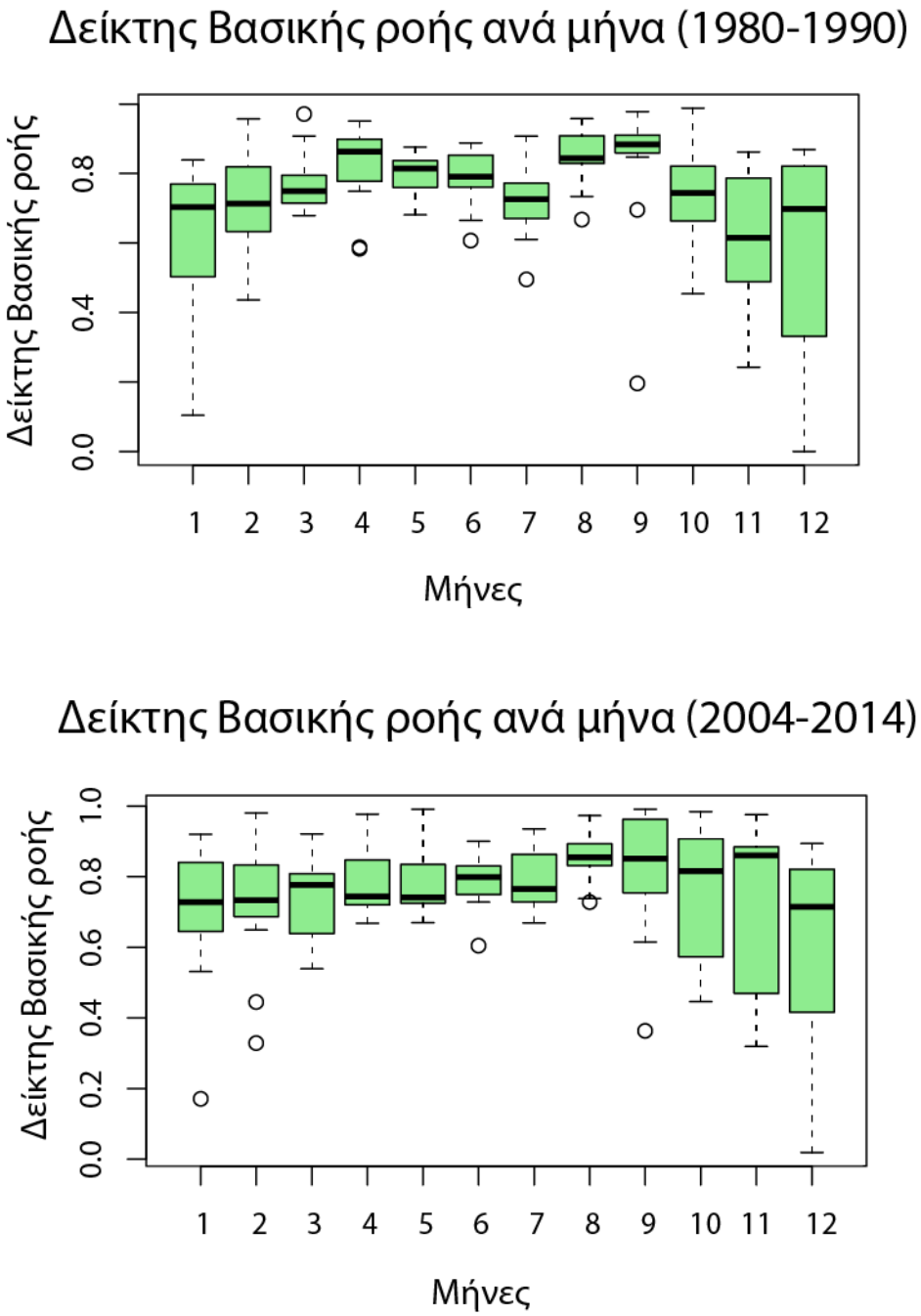
Ενώ οι χαμηλές απορροές εμφανίζονται, όπως είναι αναμενόμενο, τους καλοκαιρινούς μήνες, είναι ενδιαφέρον ότι τόσο ο Δεκέμβριος, όσο και ο Νοέμβριος παρουσιάζουν, κατά περίσταση, τόσο υψηλές απορροές (δες προηγούμενο διάγραμμα), όσο και χαμηλές απορροές.

Ο δείκτης βασικής ροής είναι μια εκτίμηση του κλάσματος της συνολικής απορροής που δεν προέρχεται άμεσα από τις βροχοπτώσεις.





Σχήμα 4-38 Δείκτης βασικής ροής (baseflow index = κλάσμα της συνολικής απορροής) ανά έτος για την πρώτη περίοδο (πάνω) και την δεύτερη περίοδο (κάτω).



Σχήμα 4-39 Δείκτης βασικής ροής (baseflowindex = κλάσμα της συνολικής απορροής) ανά μήνα για την πρώτη (πάνω) και την δεύτερη (κάτω) περίοδο υδρομετρήσεων.

Η βασική ροή αντιπροσωπεύει πάνω από το 70% της συνολικής απορροής και πάνω από το 80% κατά τους θερινούς μήνες. Η εκτίμηση αυτή επιβεβαιώνεται και από τον διαχωρισμό των υδρογραφημάτων.

4.4.11 Υδρολογικό καθεστώς

Η έννοια του υδρολογικού καθεστώτος μιας λεκάνης απορροής είναι σχετικά παλαιά, αλλά έχει πιο πρόσφατα αποκτήσει ένα εμπλουτισμένο περιεχόμενο, κυρίως μετά την Οδηγία για τα Νερά της Ε.Ε (2000/60), της οποίας ο διακυρηγμένος στόχος είναι η επίτευξη μιας «καλής χημικής και οικολογικής κατάστασης» των ποταμών και γενικότερα των υδάτινων σωμάτων μέχρι το 2015. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει οι υφιστάμενες συνθήκες να μην διαφέρουν αισθητά από κάποιες αδιατάρακτες, «φυσικές» συνθήκες αναφοράς. Έτσι, οι πληροφορίες που περιγράφουν το υδρολογικό καθεστώς αποκτούν σημασία μιας και επιτρέπουν τον έλεγχο και την σύγκριση των υφιστάμενων συνθηκών με κάποιες συνθήκες αναφοράς. Το υδρολογικό καθεστώς παίζει έναν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της βιολογικής συνθεσης, της δομής και της λειτουργίας των ποτάμιων και παρόχθιων οικοσυστημάτων.

Το υδρολογικό καθεστώς ενός υδατορεύματος ορίζεται στη βάση των μηνιαίων διακυμάνσεων της απορροής και εκφράζεται ως κλάσμα της μέσης μηνιαίας απορροής του κάθε μήνα (που έχει υπολογιστεί για μια σειρά ετών) ως προς την συνολική ετήσια απορροή υπολογιζόμενη και αυτή ως υπερετήσιος μέσος, η οποία αναφέρεται και σαν υπερετήσιος τύπος (inter-annual module) (Musy & Higy, 2011). Έτσι, ορίζεται το *μηνιαίο κλάσμα απορροής* (monthly discharge coefficient) ως:

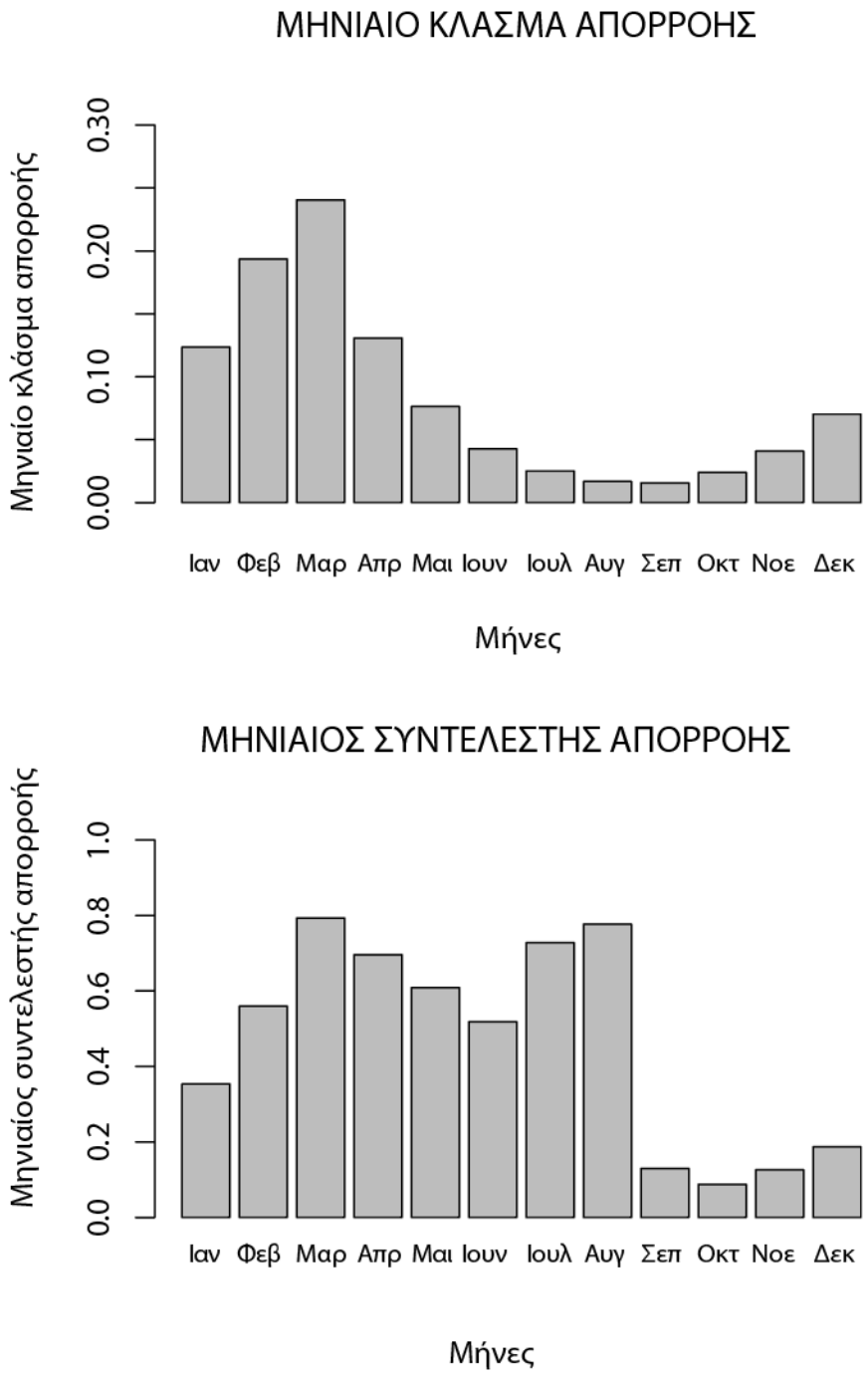
$$C_m\,(\%) = \frac{\mu\eta\nu\iota\alpha\acute{\iota}\alpha\ \alpha\pi\acute{o}\rho\rho o\acute{\eta}}{\upsilon\pi\varepsilon\rho\varepsilon\tau\acute{\eta}\sigma\iota o\varsigma\ \tau\acute{\upsilon}\pi o\varsigma}\,100 \qquad (4\text{-}5)$$

Η καμπύλη των μηνιαίων κλασμάτων απορροής για μια σειρά ετών (Σχήμα 2-24) επιτρέπει να διερευνηθεί ο συστηματικός χαρακτήρας των εποχιακών διακυμάνσεων, η τροφοδοσία (δίαιτα) του ποταμού και η σύγκριση διαφορετικών λεκανών μεταξύ τους.

Ορίζεται επίσης και ο *ετήσιος συντελεστής απορροής* (annual runoff coefficient) με τον παρακάτω λόγο:

$$C_a\,(\%) = \frac{L}{P}\,100 \qquad (4\text{-}6)$$

όπου L το μέσο ύψος της ετήσιας απορροής και P το μέσο ύψος της ετήσιας βροχόπτωσης. Κατ' αναλογία μπορεί να οριστεί και μηνιαίος συντελεστής απορροής. Οι δείκτες αυτοί για την λεκάνη απορροής του Βουραϊκού ποταμού παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα 4-38.



Σχήμα 4-40 Μηνιαίο κλάσμα απορροής (επάνω) και μηνιαίος συντελεστής απορροής (κάτω) για τη λεκάνη του Βουραϊκού ποταμού στην Ζαχλωρού. Οι αυξημένες τιμές του συντελεστή απορροής τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο οφείλονται στο λιώσιμο του χιονιού.

Έχουν προταθεί πολλά συστήματα ταξινόμησης του υδρολογικού καθεστώτος απο τα οποία κάποια περιλαμβάνουν και κλιματολογικούς παράγοντες εκτός των απορροών. Μια απλή ταξινόμηση που προτάθηκε πρώτα από τον Parde (1933), αναγνωρίζει τρεις τύπους καθεστώτων:

- Απλό καθεστώς: χαρακτηρίζεται από ένα μέγιστο και ένα ελάχιστο μέσα στη χρονιά και συνήθως μία πηγή τροφοδοσίας του νερού του ποταμού. Αυτό το καθεστώς εμφανίζει δύο διακριτές υδρολογικές περιόδους.
- Μικτό καθεστώς: 2 ελάχιστα και 2 μέγιστα μέσα στη χρονιά, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές πηγές τροφοδοσίας του ποταμού (πχ παγετώνες, χιόνι, βροχή).
- Σύνθετο καθεστώς: πολλά ακρότατα και πολλές πηγές τροφοδοσίας.

Προκειμένου να διερευνηθεί η τροφοδοσία της απορροής ήταν αναγκαίο να ποσοτικοποιηθούν οι διαφορετικοί όροι του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης, ερευνώντας ειδικά την απορροή του λιωμένου χιονιού. Αυτή η διερεύνηση παρατίθεται παρακάτω.

4.4.12 Η συμβολή των χιονοπτώσεων στο υδατικό ισοζύγιο

Για την ποσοτικοποίηση της συμβολής της τήξης του χιονιού στο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης του Βουραϊκού ποταμού χρησιμοποιήθηκε ένα απλό μοντέλο degree-day, ιδιαίτερα διαδεδομένο, το Snow Melt Runoff Model (SRM). Το SRM (Martinec et al., 2008) έχει αναπτυχθεί ειδικά για την πρόβλεψη της τήξης του χιονιού και έχει εφαρμοστεί εκτεταμένα σε ορεινές λεκάνες για αυτό τον σκοπό, ενώ πιο πρόσφατα έχει δοκιμαστεί και σε σενάρια κλιματικής αλλαγής (Abudu et al., 2012).

Το λιώσιμο του χιονιού θεωρείται ότι εξαρτάται από την θερμοκρασία του αέρα όσο αυτή βρίσκεται πάνω από ένα όριο, συνήθως την θερμοκρασία τήξης του χιονιού. Αυτή είναι η βάση των λεγόμενων μεθόδων θερμοκρασίας – ημέρας (degree-day) σύμφωνα με τις οποίες η συνολική ημερήσια ποσότητα λιωμένου χιονιού ισούται με ένα συντελεστή επί την διαφορά θερμοκρασίας της κάθε ημέρας από μια θερμοκρασία βάσης. Αυτός ο συντελεστής αναλογίας ονομάζεται συντελεστής θερμοκρασίας – ημέρας, (degree-day coefficient). Η τιμή του όμως δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται τόσο χρονικά όσο και τοπικά αντανακλώντας την περίπλοκη φύση της θερμοδυναμικής τήξης του χιονιού, έτσι ώστε στις εφαρμογές αντιμετωπίζεται σαν χρονοσειρά. Σε σχέση με πιο σύνθετες μεθόδους ενεργειακού ισοζυγίου οι μέθοδοι θερμοκρασίας-ημέρας έχουν πολύ μικρότερες απαιτήσεις σε δεδομένα εισόδου ενώ τα αποτελέσματά τους είναι ικανοποιητικά (Hock, 2003).

Οι οριακές συνθήκες εκτός από την βροχόπτωση και την θερμοκρασία είναι η χρονοσειρά της χιονοκαλυμμένης έκτασης σε κάθε ζώνη (Snow Covered Area- SCA) που

ονομάζονται καμπύλες (εξάλειψης της) χιονοκάλυψης (Snow Depletion Curves - SDC). Η βάση αυτής της προσέγγισης είναι ότι τα μοτίβα της εξάλειψης της χιονοκάλυψης είναι παρόμοια κάθε χρόνο. Ωστόσο, η SDC για μία δεδομένη λεκάνη μπορεί να διαφοροποιείται από χρόνο σε χρόνο λόγω του διαφορετικού όγκου του χιονιού που σωρεύτηκε και των συνθηκών τήξης. Η ίδια SCA μπορεί να αντιστοιχεί σε διαφορετικές ποσότητες αποθηκευμένου χιονιού. Όσο περισσότερο είναι το ισοδύναμο νερό (Snow Water Equivalent - SWE), τόσο πιο αργά θα μειωθεί η SCA από την δράση μιας δεδομένης χρονοσειράς θερμοκρασιών.

4.4.13 Δορυφορικά προϊόντα χιονοκάλυψης και προσομοιώσεις

Η χρήση του SRM απαιτεί την είσοδο της χρονοσειράς των καμπυλών χιονοκάλυψης, SDC. Αυτή μπορεί να προετοιμαστεί μόνο από δορυφορικά δεδομένα[9]. Μεταξύ των προϊόντων εδάφους MODIS (MODIS Land Products), υπάρχουν 7 προϊόντα δεδομένων χιονιού (MODIS Snow Data Products), από τα οποία χρησιμοποιήθηκε το MODIS10A2. Πρόκειται για ένα χρονικό σύνθετο προϊόν 8-ημερών (8day composite), με μέγεθος εικονοστοιχείου 500 m (για την ακρίβεια 469 m), σε δική του προβολή και διανομή (MODIS sinusoidal), με δύο επιστημονικά σετ δεδομένων (Science Data Sets, SDS) και σε μορφή HDF – EOS (Hierarchical Data Format – Earth Observing System).

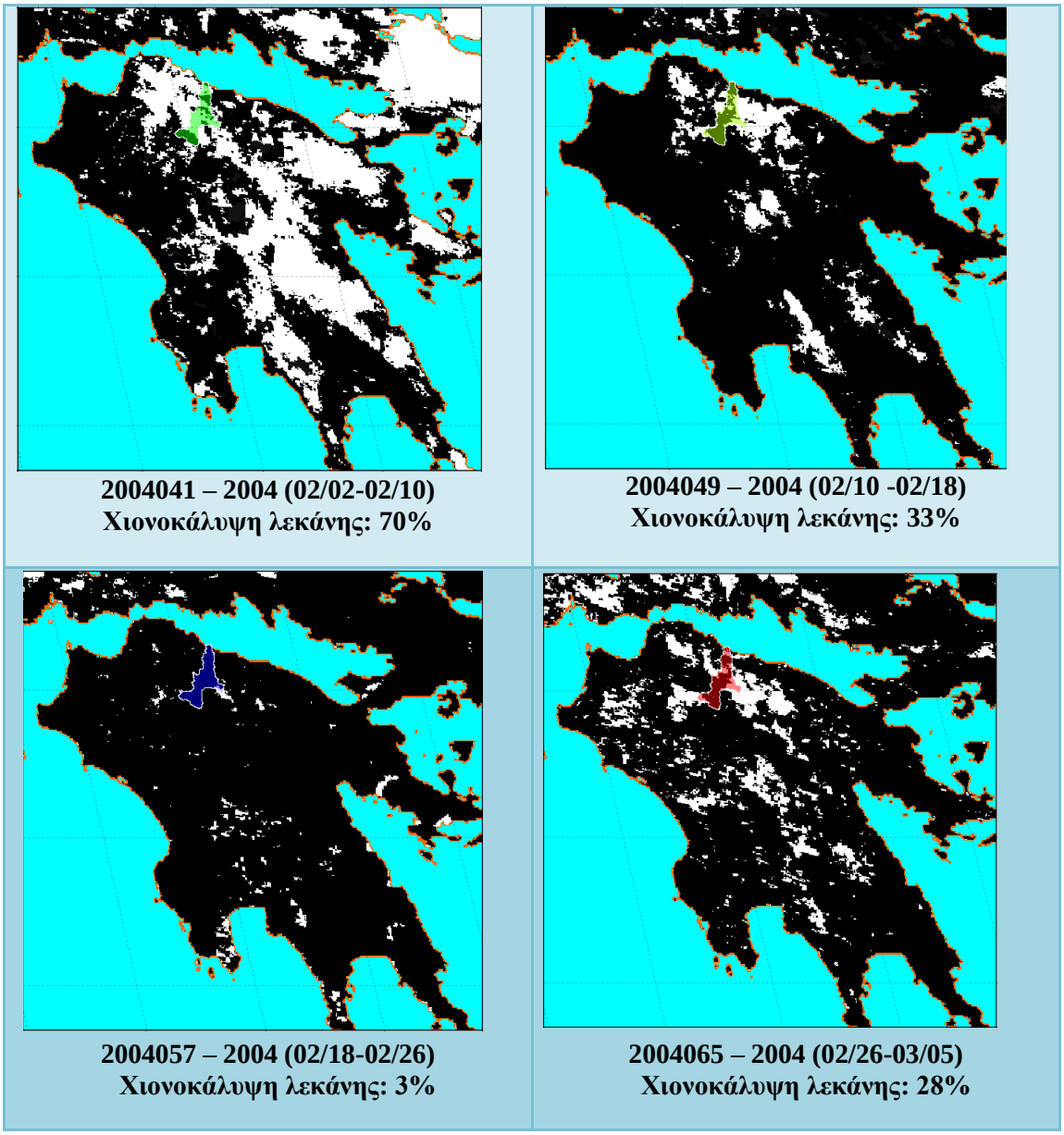
Το πρώτο από τα δύο αυτά σετ δεδομένων (maximum snow extend) σε μορφή ψηφιδωτού (ράστερ) με μεταδεδομένα, που είναι αυτό το οποίο χρησιμοποιήθηκε, είναι η μέγιστη χιονοκάλυψη στην διάρκεια των 8 ημερών, δηλαδή δίνει την τιμή «χιόνι» σε κάθε εικονοστοιχείο που αναγνωρίστηκε σαν καλυμμένο με χιόνι μία ή περισσότερες ημέρες μέσα στο προηγούμενο διάστημα των 8 ημερών. Το δεύτερο ψηφιδωτό (eight day snow cover) είναι μια «χρονοκάψουλα» που δίνει με έναν πιο περίπλοκο τρόπο τις ημέρες στις οποίες σημειώθηκαν χιονοπτώσεις μέσα στο 8-ήμερο. Κάθε εικονοστοιχείο στο ράστερ μέγιστης χιονοκάλυψης έχει μία από 10 δυνατές τιμές που η σημασία τους δίνεται στον παρακάτω Πίνακα 4-10.

[9] Προκειμένου να μην διακόπτεται η ανάπτυξη των θεμάτων με παράθεση των προδιαγραφών και των αλγορίθμων, και γενικότερα της επιστημονικής και τεχνικής τεκμηρίωσης του κάθε δορυφορικού προϊόντος, παραπέμπεται ο αναγνώστης στο σχετικό υποκεφάλαιο 4.9.1 Δέκτες και προϊόντα MODIS.

Πίνακας 4-10 Τιμές του ράστερ χιονοκάλυψης (SDS: maximum snow extend, product: MODIS10A2)

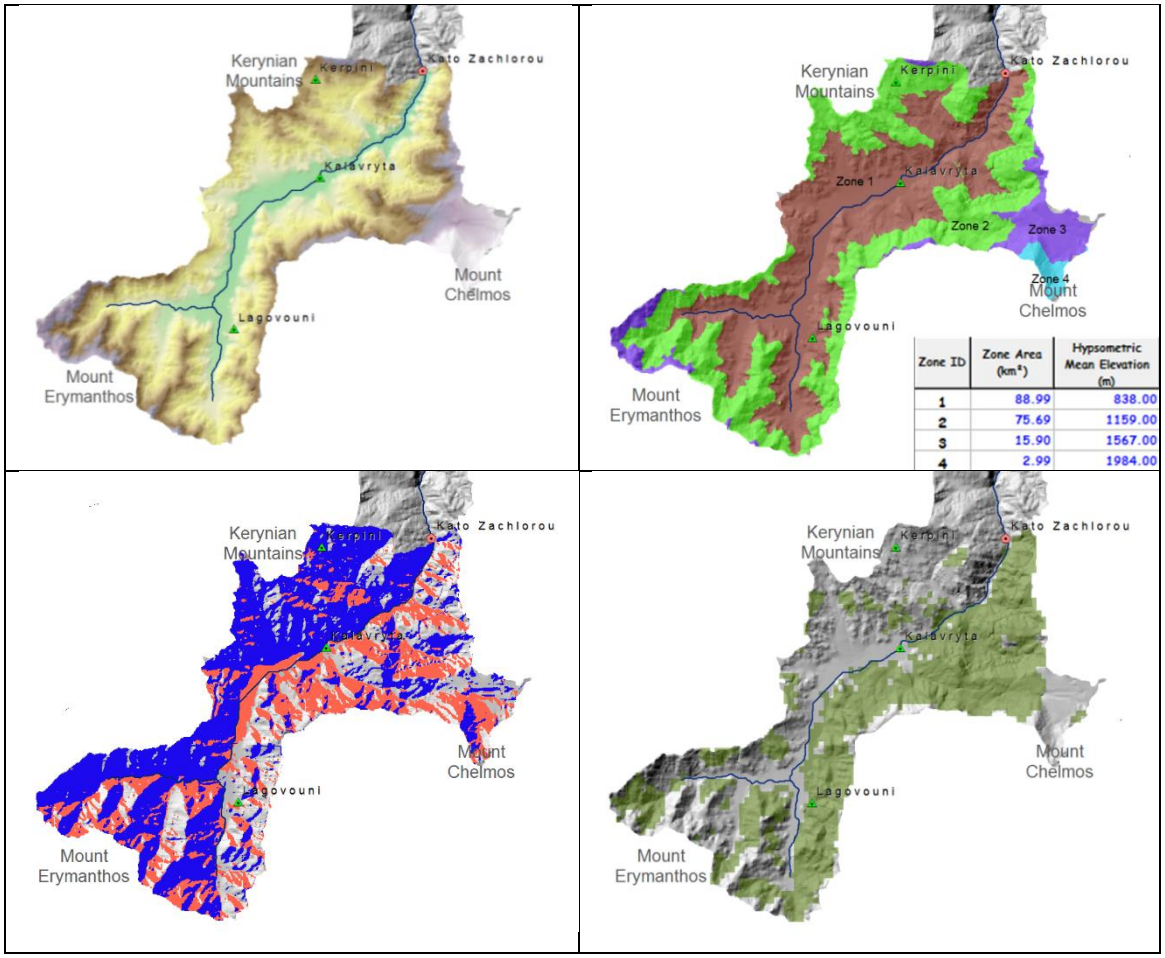
Τιμή εικονοστοιχείου	Σημασία
0	Λείπουν δεδομένα - missing data
1	Χωρίς απόφαση - no decision
11	Νύχτα - night
25	Όχι χιόνι - No snow
37	Λίμνη - lake
39	Ωκεανός / Θάλασσα - ocean
50	Σύννεφα - cloud
100	Πάγος σε λίμνη - lake ice
200	**Χιόνι - snow**
254	Δέκτης κορεσμένος - Detector saturated
255	Τιμή πλήρωσης - fill

Διαθέτοντας δορυφορικά δεδομένα για το χρονικό διάστημα από 2004/02/10 έως 2015/25/01 (συνολικά 505 αρχεία HDF), αναλύθηκε η συμβολή του λιωμένου χιονιού στην απορροή του Βουραϊκού ποταμού για την δεκαετία 2004 – 2014 (10 υδρολογικά έτη). Η βροχόπτωση εκτιμήθηκε με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen για τους 3 διαθέσιμους σταθμούς της ΔΕΗ, και η μέση ημερήσια θερμοκρασία πάρθηκε από τον σταθμό των Καλαβρύτων. Η θερμοβαθμίδα θεωρήθηκε ότι είναι 0.7°C / 100m (Nikas, 2004) με υψόμετρο βάσης το υψόμετρο των Καλαβρύτων (710 m). Δεν ελήφθη υπόψη βροχοβαθμίδα. Η παροχή υπολογίστηκε από την καμπύλη στάθμης – παροχής (Εξ. 4-3, 4-4), ενώ όπως ήδη αναφέρθηκε, τα κενά στη λειτουργία του υδρομετρικού σταθμού (με πιο μεγάλο το 9μηνο από Φεβρουάριο έως Οκτώβριο 2013) συμπληρώθηκαν με χρήση του μοντέλου IHACRES. Στο Σχήμα 4-39 παρουσιάζεται παραστατικά η μέθοδος.

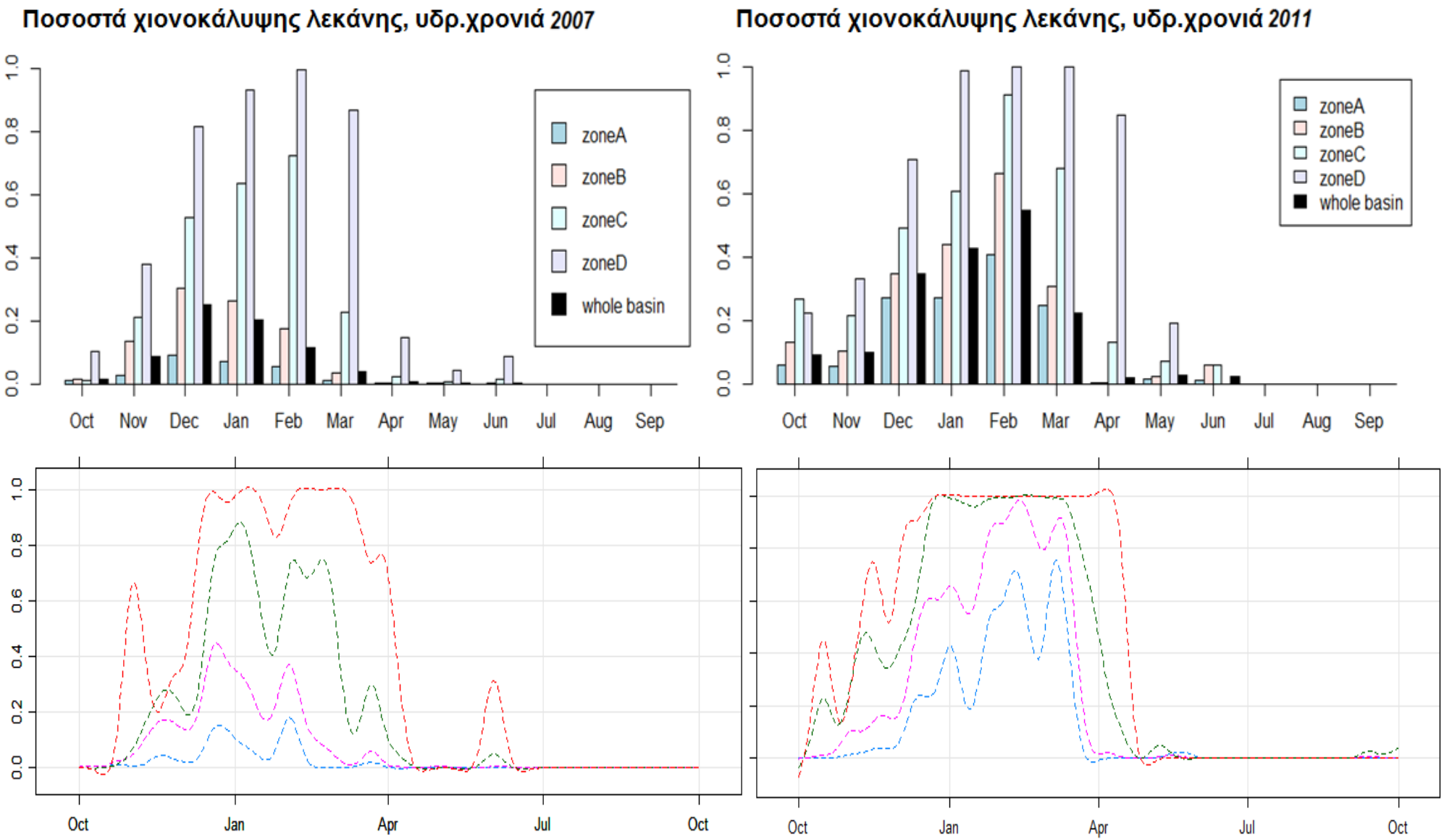


Σχήμα 4-41 Παρουσίαση της μεθόδου εξαγωγής χρονοσειράς χιονοκάλυψης της λεκάνης απορροής του Βουραϊκού ποταμού, με τη χρήση του δορυφορικού προϊόντος MODIS10A2. Μέ άσπρο χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές με χιονοκάλυψη κατά τη διάρκεια των 8 προηγούμενων ημερών από την ημερομηνία έκδοσης του προϊόντος. Διακρίνεται η λεκάνη του Βουραϊκού η οποία λειτουργεί σαν «μάσκα» μέσα στην οποία αριθμούνται τα εικονοστοιχεία με χιόνι και υπολογίζεται το ποσοστό τους.

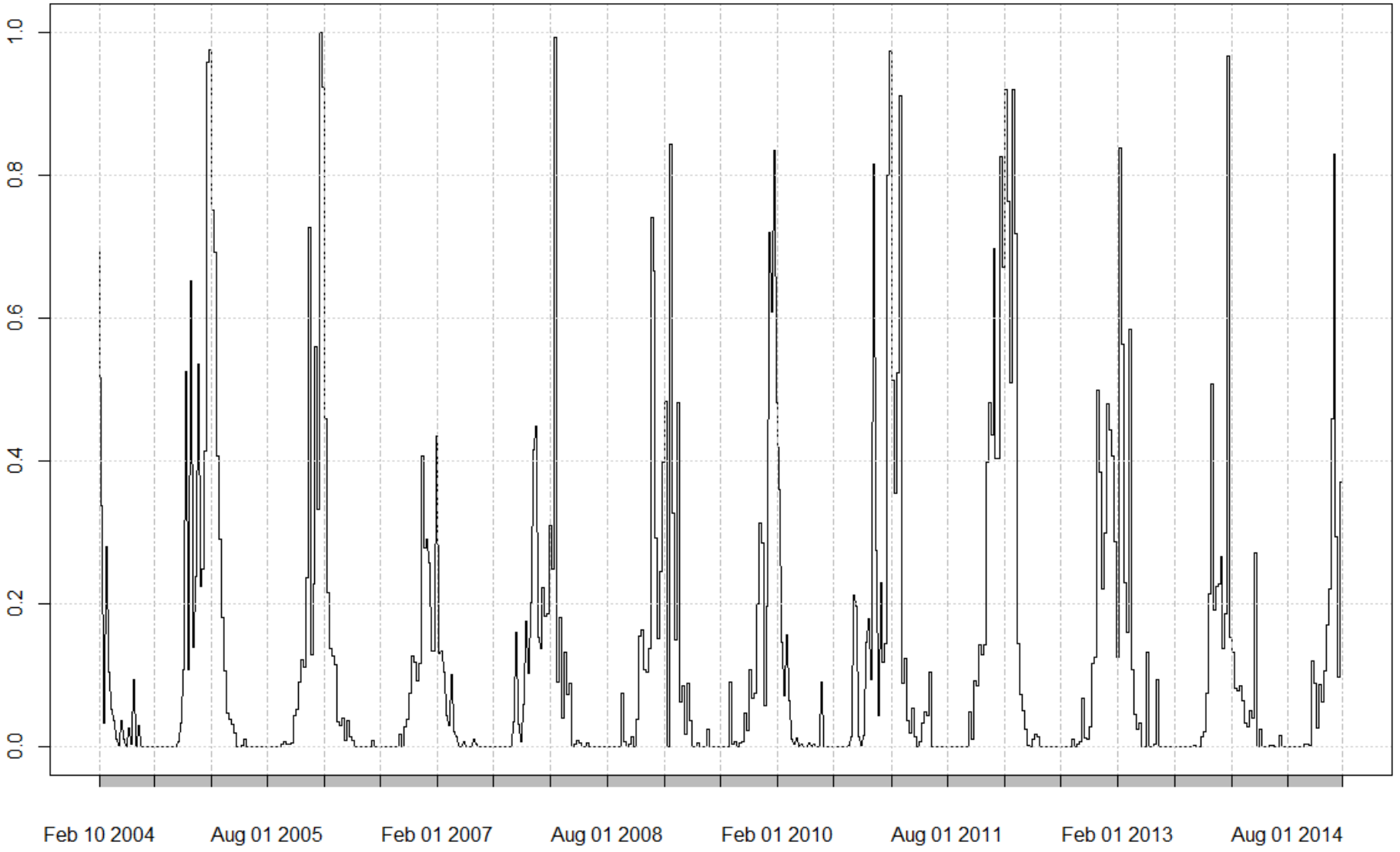
Τα αποτελέσματα της διαδικασίας εξαγωγής της χρονοσειράς ποσοστιαίας χιονοκάλυψης της λεκάνης του Βουραϊκού, εισήχθησαν στο μοντέλο SRM σαν οριακές συνθήκες μαζί με τις χρονοσειρές της θερμοκρασίας και βροχόπτωσης, και κατόπιν έγιναν οι προσομοιώσεις, δοκιμάζοντας τις τιμές των συντελεστών. Στο Σχήμα 4-40 φαίνονται οι υψομετρικές ζώνες που χρησιμοποιήθηκαν από το μοντέλο.



Σχήμα 4-42 Υψομετρικές ζώνες της περιοχής μελέτης (επάνω δεξιά). Οι δύο υψηλότερες ζώνες αντιπροσωπεύουν μόνο το 20% της συνολικής έκτασης της λεκάνης. Στο κάτω αριστερά πάνελ φαίνεται ο προσανατολισμός της επιφάνειας χωρισμένος σε δύο κύριες κατηγορίες: με μπλέ χρώμα είναι το ανάγλυφο με Νότιο-Ανατολικό προσανατολισμό ενώ με γκρίζα – κόκκινα χρώματα φαίνονται οι περιοχές με ΒόρειοΔυτικό προσανατολισμό. Στο κάτω δεξιά πάνελ δίνεται η δασοκάλυψη της λεκάνης. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσει κανείς ότι οι δασωμένες πλαγίες είναι αυτές που έχουν ΒΔ προσανατολισμό.

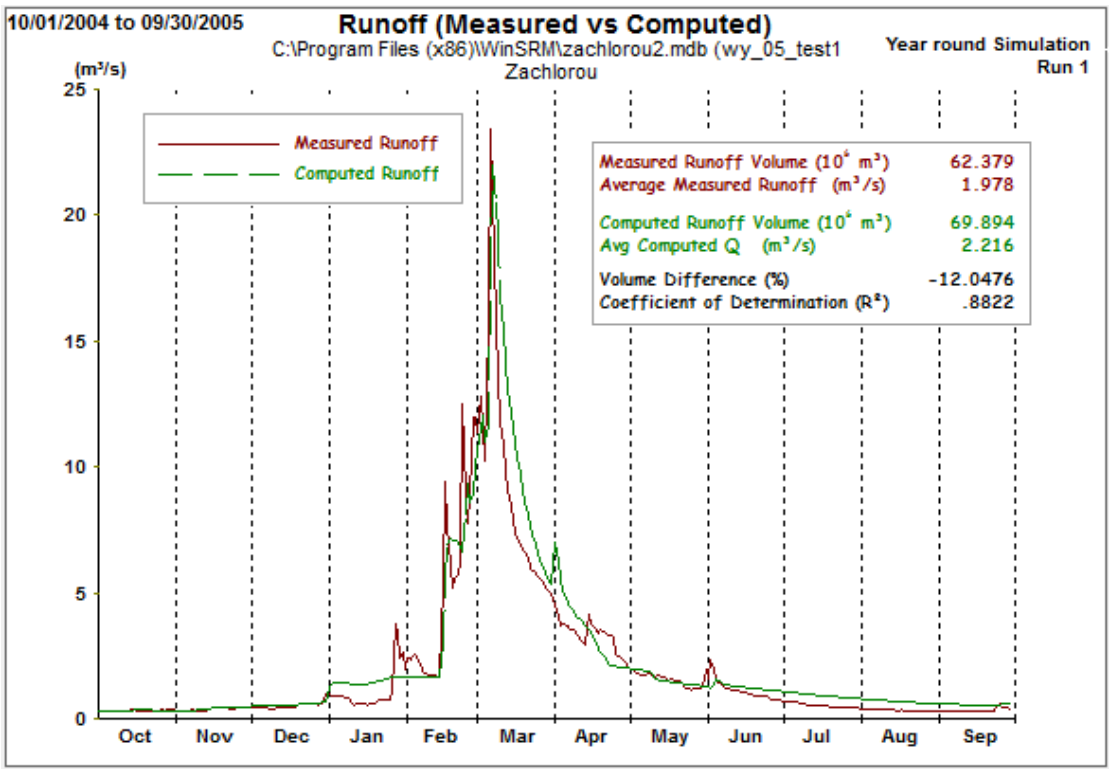


Σχήμα 4-43 Επάνω, μηνιαία ποσοστά χιονοκάλυψης ανα ζώνη για μια φτωχή σε νερό χρονιά (2007) και για πλούσια νε νερό χρονιά (2011). Κάτω οι αντίστοιχες συνεχείς καμπύλες χιονοκάλυψης ανά υψομετρική ζώνη (οι ζώνες συμβολίζονται με διαφορετικά χρώματα). Παρατηρείται ότι το έτος 2007 υπήρξε χιοχόπτωση τον Ιούνιο.



Σχήμα 4-44 Πλήρης χρονοσειρά χιονοκάλυψης της λεκάνης του Βουραϊκού ποταμού για το διάστημα 2004 – 2014. Το χρονικό βήμα είναι το οκταήμερο.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ήταν ικανοποιητικά (Σχήμα 4-43). Οι συντελεστές R^2 κυμάνθηκαν από 0,6 – 0,9 ενώ οι διαφορές στους όγκους της υπολογισμένης απορροής δεν ήταν μεγαλύτερες από 25% από την μετρημένη. Συνοπτικά, για τα 10 χρόνια που έγιναν προσομοιώσεις, η συμβολή του λιωμένου χιονιού στην συνολική απορροή κυμάνθηκε από 5% στις φτωχές υδρολογικά χρονιές έως 15% στις πλούσιες υδρολογικά χρονιές. Το λιώσιμο του χιονιού ξεκινάει από τον Ιανουάριο και συνεχίζεται έως και τον Αύγουστο. Έτσι μόνο μπορεί να εξηγηθεί ο ιδιαίτερα υψηλός συντελεστής απορροής των μηνών Ιουλίου και Αύγουστου (δες Σχήμα 4-38).

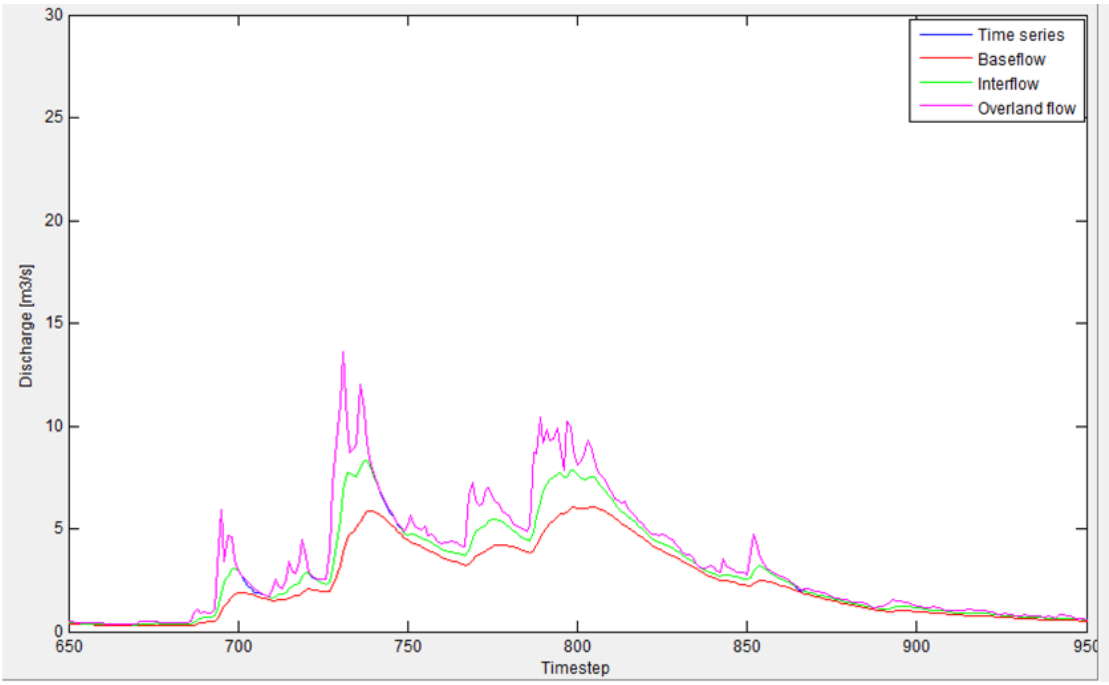


Σχήμα 4-45 Αποτελέσματα της προσομοίωσης της λεκάνης με το SRM για την υδρολογική χρονιά 2004-2005.

Τα αποτελέσματα κατ'αρχάς συμφωνούν με τις υφιστάμενες μετρήσεις της χιονοτράπεζας της ΔΕΗ στην Κερπινή (κλιμογράμματα, Σχήμα 3-6). Σε αυτές, το ισοδύναμο ύψος νερού (Liquid Water Equivalent – LWE) ανέρχεται σε ποσοστό 9% των ετήσιων κατακρημνισμάτων.

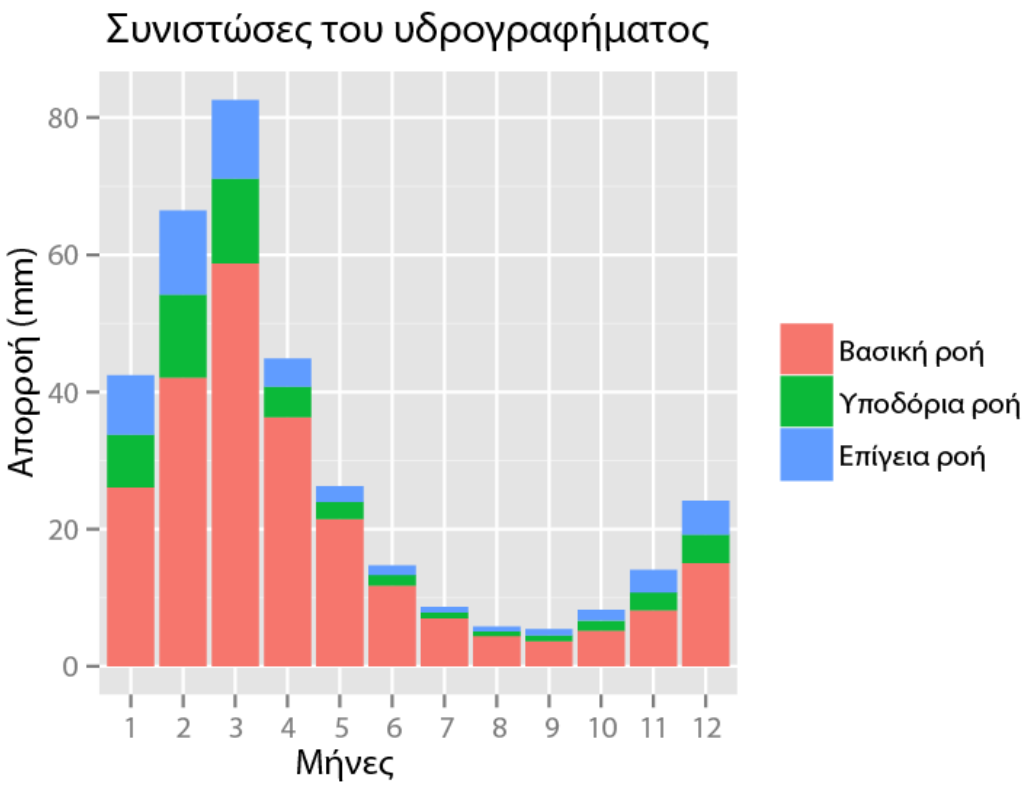
Για να αξιολογηθούν περαιτέρω τα αποτελέσματα του μοντέλου SRM χρησιμοποιήθηκε το WETSPRO για να γίνει ο διαχωρισμός του υδρογραφήματος σε τρεις συνιστώσες: την βασική ροή, την υποεπιφανειακή πλημμυρική ροή και την επίγεια ροή (Σχήμα 4-44). Από την εμπειρία που αποκομίστηκε παρατηρώντας το ποτάμι σε

διαφορετικές εποχές του χρόνου, θεμελιώθηκε η πεποίθηση ότι η υποεπιφανειακή, ή υποδόρια ροή, προέρχεται κυρίως από το λιωμένο χιόνι, εκτός από τις περιπτώσεις των ισχυρών ανοιξιάτικων καταιγίδων όπου ένα τμήμα της υποδόριας ροής προέρχεται από την βροχή. Από τον διαχωρισμό αυτό προκύπτει ότι το 70% προέρχεται από την βασική ροή, ενώ το υπόλοιπο 30% συντίθεται εξίσου από την υποδόρια και την επίγεια απορροή. Άν λοιπόν η υπόθεση αυτή είναι σωστή, δηλαδή πράγματι η υποδόρια απορροή προέρχεται κυρίως από το λιωμένο χιόνι, τότε η συμβολή του χιονιού στην συνολική απορροή θα είναι μεταξύ 10-15%.



Σχήμα 4-46 Διαχωρισμός του υδρογραφήματος σε τρεις συνιστώσες με την εφαρμογή του μοντέλου WETSPRO(Υδρολογική χρονιά 2005-2006). Το πρόγραμμα κάνει τον διαχωρισμό με βάση τις σταθερές στέρευσης για την κάθε επιμέρους ροή. Αυτές τις δίνει ο χρήστης αφού αναλύσει πρώτα τα δεδομένα του αναζητώντας σημεία καμπής πάνω σε ημίλογαριθμικά διαγράμματα.

Η συμβολή της κάθε συνιστώσας στην μηνιαία απορροή δίνεται στο Σχήμα 4-45.



Σχήμα 4-47 Η συμβολή των τριών συνιστωσών σε μακροπρόθεσμη βάση ανά μήνα. Σαν ποσοστό στη συνολική απορροή η μεν βασική ροή αποτελεί το 70% ενώ το υπόλοιπο 30% ισομοιράζεται σε υποδόρια και επίγεια απορροή.

Συμπερασματικά, η υδρολογική δίαιτα του Βουραϊκού είναι ένα απλό καθεστώς με ένα μέγιστο, ένα ελάχιστο, μια πηγή τροφοδοσίας, ενώ διακρίνονται δύο εποχιακές περίοδοι. Ειδικώτερα, ο Βουραϊκός μπορεί να χαρακτηριστεί ως μικτό βροχο-χιονο τροφοδοτούμενο ποτάμι με σημαντικές ενδοετήσιες διακυμάνσεις.

4.5 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΕΣ ΦΕΡΤΩΝ - ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, το συνολικό ποτάμιο φορτίο ιζήματος διαχωρίζεται σε δύο κυρίως κατηγορίες οι οποίες απαιτούν διαφορετικές μεθόδους και όργανα μέτρησης στο πεδίο και στο εργαστήριο. Παρακάτω γίνεται μια σύντομη υπενθύμιση των βασικών όρων με έμφαση στις μεθόδους μέτρησης (πρωτόκολα) και τα χρησιμοποιούμενα όργανα.

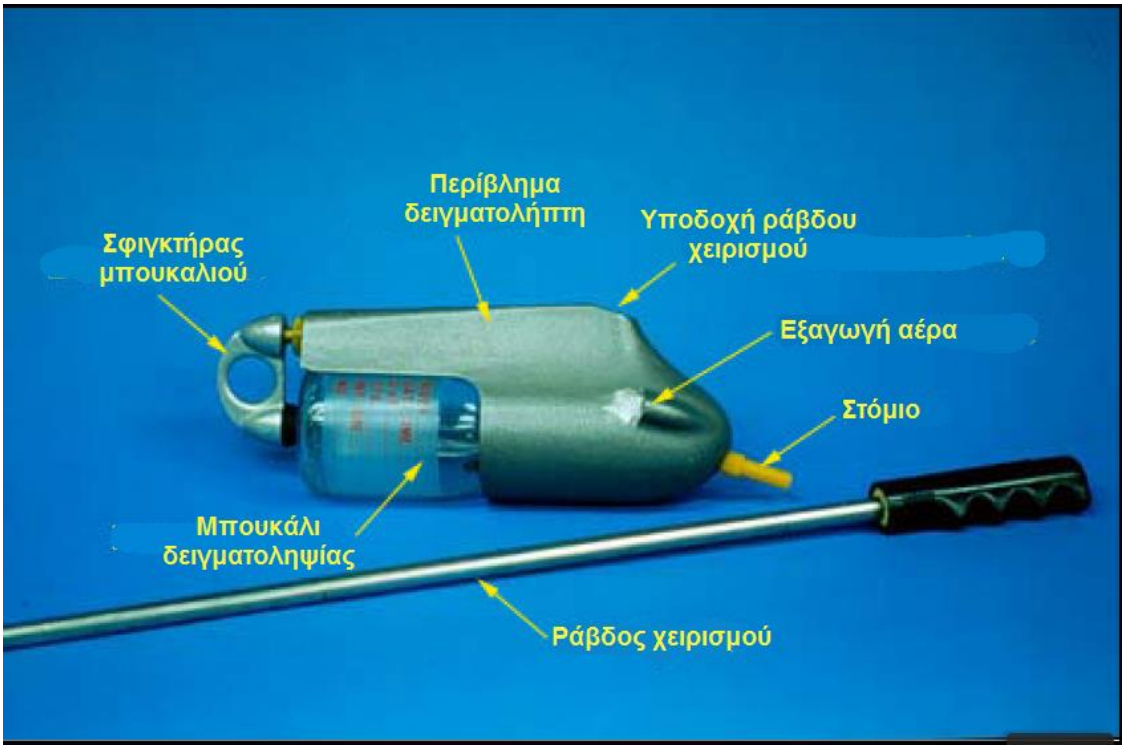
Φορτίο σε αιώρηση (suspended load): Αποτελείται από άμμο+ιλύ+άργιλο που διατηρούνται σε αιώρηση λόγω της τύρβης. Από αυτά το λεγόμενο *φορτίο απόπλυσης (washload)* αποτελείται από ιλύ και άργιλο και είναι σωματίδια μικρότερα από 62 μm. Επιπλέον, ενώ υπάρχει μια ακόμα διάκριση ανάμεσα στα *αιωρούμενα στερεά (suspended solids)* που περιλαμβάνουν και τα οργανικής προέλευσης στερεά σωματίδια και το *αιωρούμενο ίζημα (suspended sediment)* που περιλαμβάνει μόνο τα ορυκτής προέλευσης φερτά (mineral solids).

Φορτίο κοίτης (Bedload): αναφέρεται στα ογκώδη χαλίκια και ογκόλιθους της κοίτης που λόγω του βάρους τους δεν μπορούν να βρίσκονται σε αιώρηση. Επειδή αυτό το φορτίο τίθεται σε κίνηση μόνο κατά τη διάρκεια ακραίων πλημμυρικών παροχών η μέτρησή του είναι ιδιαίτερα δύσκολη.

Κάποιοι συγγραφείς αναγνωρίζουν και μια ακόμα διάκριση που είναι το *ενδιάμεσο φορτίο ή φορτίο αναπήδησης* (saltation load): Αποτελεί έναν ενδιάμεσο μεταξύ των δύο παραπάνω τρόπο μεταφοράς και το φορτίο αυτό κινείται κοντά στον πυθμένα. Είναι κόκκοι αρκετά μεγάλου βάρους για να μην βρίσκονται σε αιώρηση αλλά και αρκετά ελαφροί ώστε να αναπηδήσουν στον πυθμένα όταν οι συνθήκες ροής είναι κατάλληλες. Συνηθέστερο όμως και πιο πρακτικό, είναι αυτό το φορτίο να θεωρείται τμήμα του φορτίου κοίτης μιας και στην πραγματικότητα υποβαστάζεται στην κίνησή του από τον πυθμένα.

4.5.1 Ολοκληρωτικοί κατά το βάθος χειροκίνητοι δειγματολήπτες

Τα όργανα με τα οποία συλλέγεται το νερό του ποταμού για ανάλυση στο εργαστήριο αναφέρονται ως "ολοκληρωτικοί κατά το βάθος χειροκίνητοι δειγματολήπτες" (Depth-intergrated Hand held samplers). Το DH48 (Σχήμα 4-48) είναι ένα ελαφρύ όργανο (1,6 kg), σχεδιασμένο για την χειροκίνητη συλλογή δειγμάτων νερού από προσπελάσιμα ποτάμια (που επιτρέπουν διάβαση της κοίτης τους) και ανήκει στον κατάλογο οργάνων του FISP (Federal Interagency Sedimentation Project).



Σχήμα 4-48 Ο δειγματολήπτης αιωρούμενου ιζήματος DH48 που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις αιωρούμενων ιζημάτων. Το όργανο ανήκει στον εξοπλισμό του εργαστηρίου Φυσικής Γεωγραφίας του Χαροκόπειου Πανεπιστήμιου. Στη ράβδο του προστέθηκε μια επέκταση ενός μέτρου έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από χαμηλές γέφυρες.

Το περίβλημα (η κάσα) του οργάνου, μήκους 24 εκατοστών, είναι ένα ρύγχος από αλουμίνιο, υδροδυναμικά σχεδιασμένο ώστε να μην επηρεάζει το πεδίο ροής του νερού στο μπροστινό μέρος. Εντός του -κατά την διάρκεια της βύθισής του στο νερό- κρατιέται στερεωμένο το μπουκάλι του νερού με την χρήση ρυθμιζόμενου σφιγκτήρα στο πίσω μέρος. Από το μπροστινό μέρος προεξέχει ένα χάλκινο ή πλαστικό στόμιο διαμέτρου περίπου 6,4 χιλιοστών και μήκους περίπου 5 εκατοστών, μέσω του οποίου το νερό μπαίνει στο μπουκάλι. Καθώς το μπουκάλι γεμίζει με νερό ο αέρας βγαίνει από παράπλευρη οπή ιδίου ανοίγματος. Ο χειρισμός του οργάνου (πλήρες ανέβασμα και κατέβασμα σε μία θέση) γίνεται με ράβδο από αλουμίνιο (διαμέτρου 1,25 εκατοστά).

Ο όρος "ισοκινητική" δειγματοληψία, που χαρακτηρίζει τον σχεδιασμό αυτών των όργανων, σημαίνει ότι η ταχύτητα της φλέβας του νερού που μπαίνει στο στόμιο είναι ίση με την τοπική ταχύτητα του νερού του ρέματος. Ολοκλήρωση κατά το βάθος σημαίνει ότι η συσκευή πρέπει να βυθιστεί έως τον πυθμένα και μετά να ανασυρθεί στην επιφάνεια, ενώ ο ρυθμός ανόδου πρέπει να είναι ίσος με τον ρυθμό καθόδου. Επιπλέον, όταν το μπουκάλι βγει από το νερό, πρέπει να μην είναι εντελώς γεμάτο αλλά κατά το 80% περίπου. Έτσι διασφαλίζεται ότι δεν παρέμεινε σε κάποιο ύψος πολύ ώρα ώστε να γεμίσει κυρίως από το

νερό σε αυτό το ύψος. Ο λόγος για την δειγματοληψία κατά το βάθος είναι ότι τα πιο βαρειά ιζήματα όπως η άμμος συγκεντρώνονται κοντά στην κοίτη, σύμφωνα με το διάγραμμα που ακολουθεί. Επίσης, όπως και με την ταχύτητα του νερού και την παροχή του ρεύματος, δεν αρκεί μια θέση δειγματοληψίας για μια αντιπροσωπευτική μέτρηση σε κάποια διατομή.

Στις μετρήσεις αναφέρονται δύο *πρωτόκολα*: Το πρώτο (*equal discharge increment method*) απαιτεί να έχει γίνει πρώτα μέτρηση ταχυτήτων + παροχών με μυλίσκο στο ποτάμι. Κατόπιν το ποτάμι χωρίζεται σε 5 κατακόρυφα τμήματα ίσης παροχής και λαμβάνεται μια μέτρηση στο κάθε ένα τμήμα. Στο δεύτερο πρωτόκολο (*equal width increment method*) που συνιστάται για μικρά προσπελάσιμα υδατορεύματα, ο χειριστής πρέπει να χωρίσει την διατομή σε 10-20 ίσα τμήματα. Στο βαθύτερό της σημείο κάνει μετά μια μέτρηση και καταγράφει τον ρυθμό ανεβοκατεβάσματος (transit rate) του μπουκαλιού. Με τον ίδιο ρυθμό κάνει στην συνέχεια και τις μετρήσεις στα υπόλοιπα τμήματα της διατομής. Κατόπιν τα δείγματα ανακατεύονται, αναδεύονται και επαναδειγματίζονται δυό ή τρεις φορές.

Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στη θέση Γεφυράκι Ζαχλωρούς η διατομή της κοίτης χωρίστηκε σε τρία τμήματα και ελήφθη ένα δείγμα ανά τμήμα. Μετά την επεξεργασία στο εργαστήριο (ξήρανση – ζύγιση του στερεού υπολείμματος) η συγκέντρωση υπολογιζόταν σαν σταθμισμένος μέσος των τριών αυτών μετρήσεων. Η στάθμιση ήταν ανάλογη της παροχής του κάθε τμήματος έτσι όπως προέκυπτε από τις υδρομετρήσεις. Υπήρξαν όμως και περιπτώσεις που ελήφθη μόνο ένα δείγμα στην διατομή και (αναγκαστικά) θεωρήθηκε σαν αντιπροσωπευτικό για την συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στο νερό.

4.5.2 Θολερόμετρα τύπου σωλήνα διαύγειας

Για την εκτίμηση της ποσότητας των αιωρούμενων στερεών στο νερό χρησιμοποιούνται γενικά τρεις τρόποι: η μέτρηση των ολικών αιωρούμενων στερεών (Total Suspended Solids, TSS), η μέτρηση της θολερότητας (turbidity) και η μέτρηση της διαύγειας (transparency). Η μέτρηση της θολερότητας γίνεται με ειδικά όργανα, τα θολερόμετρα, ενώ για την μέτρηση της διαύγειας ενός υδάτινου σώματος χρησιμοποιούνται οι δίσκοι Secchi και οι σωλήνες διαύγειας. Για την μέτρηση του TSS απαιτείται όπως ειπώθηκε παραπάνω, ανάλυση στο εργαστήριο. Πρόκειται για μια διαδικασία χρονοβόρα και πολύ ευαίσθητη σε σφάλματα. Η θολερότητα, μία οπτική ιδιότητα του νερού -μέτρο της σκέδασης του φωτός από τα αιωρούμενα σωματίδια-, μετριέται με ειδικά ακριβά όργανα, τα νεφελόμετρα, σε

μονάδες NTU (Nephelometric Turbidity Unit). Γενικά, συγκέντρωση 1 mg/l αντιστοιχεί σε 1 με 2 NTU. Τέλος, η αρχή του δίσκου Secchi για την εκτίμηση της διαύγειας είναι απλή: όσο πιο βαθιά στο νερό αναγνωρίζεται ένα καθορισμένο ασπρόμαυρο μοτίβο, τόσο πιο διαυγές είναι το νερό και τόσο μικρότερη είναι η περιεκτικότητά του σε φερτά. Όπως είναι αναμενόμενο, οι τρεις αυτές μεταβλητές σχετίζονται ισχυρά μεταξύ τους, κυρίως η θολερότητα με την διαύγεια καθώς και οι δύο είναι οπτικές ιδιότητες. Η σχέση αυτών των δύο μεταβλητών με την συγκέντρωση αιωρούμενου υλικού εξαρτάται από την κατανομή μεγέθους των περιεχόμενων σωματιδίων καθώς και από την λιθολογική τους σύσταση, το σχήμα και το χρώμα τους.

Το θολερόμετρο τύπου σωλήνα διαύγειας (Σχ. 4-49) είναι ένα απλό, φτηνό και ευκολόχρηστο όργανο, που βασίζεται στην αρχή του δίσκου Secchi. Το όργανο αυτό δεν δίνει μονάδες θολερότητας αλλά μια ένδειξη για την ποσότητα των αιωρούμενων σωματιδίων που περιέχει το νερό. Παρόλο που η χρήση του ενέχει κάποιον υποκειμενισμό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της συγκέντρωσης των στερεών στο νερό εφόσον υπάρχει κάποια σχέση συσχέτισης ανάγνωσης βάθους – συγκέντρωσης αιωρούμενων. Πρέπει δηλαδή να παρθούν δείγματα με το DH48 σε διάφορες τιμές του βάθους του νερού (ανάγνωση βάθους), να γίνει η επεξεργασία στο εργαστήριο και κατόπιν με βάση την καμπύλη παλινδρόμησης να αποδοθούν τιμές συγκέντρωσης για κάθε βάθος νερού (σε κάθε ανάγνωση). Η διεθνής εμπειρία (Dahlgren et al.2004, Anderson & Davie, 2004) έχει δείξει ότι οι σχέσεις αυτές είναι καλά ορισμένες και συνεπείς σε ένα μεγάλο εύρος τοπικών συνθηκών.

Σχήμα 4-49 Θολερόμετρο τύπου σωλήνα διαύγειας (transparency tube). Το νερό συλλέγεται μέσα στον σωλήνα μέχρι επάνω. Κατόπιν ο παρατηρητής αφαιρεί το νερό σταδιακά από την βάση (το σωληνάκι στην αριστερή φωτογραφία) και σημειώνει σε ποιό ύψος διακρίνει καθαρά το ασπρόμαυρο πώμα. Εάν το νερό είναι καθαρό μπορεί να το διακρίνει με ολόκληρη τη στήλη νερού από πάνω του (24 ίντες = 61 εκατοστά), αλλιώς θα πρέπει να αφαιρεί σιγά-σιγά το νερό μέχρι να το διακρίνει καθαρά (δεξιά φωτογραφία) οπότε και σημειώνει το ύψος της στήλης.

4.5.3 Hydrolab MiniSonde5

Το όργανο αυτό της Eco Environmental, μετρά τις βασικές φυσικές ιδιότητες του νερού και συγκεκριμένα την θερμοκρασία, το pH, το διαλυμένο οξυγόνο και την αγωγιμότητα του νερού (Σχ. 4-50). Ανήκει στον εξοπλισμό του εργαστηρίου Υδατικών Πόρων του ΤΕΙ Αθήνας. Το όργανο έχει εξωτερική διάμετρο 44mm και μήκος με τον θάλαμο μπαταριών 75 mm. Το βάρος του είναι 1.3 kg. Επιπλέον συνοδεύεται από personal digital assistant (PDA) εφοδιασμένο με λειτουργικό Windows. Μέσω αυτού είναι δυνατή η ρύθμιση του οργάνου και η επιτόπου παρακολούθηση (και η καταγραφή) των τιμών των μετρούμενων παραμέτρων. Μπορεί να αποθηκεύσει στην μνήμη του 120.000 μετρήσεις.

Με δεδομένη την θερμοκρασία και την αγωγιμότητα του νερού το όργανο δίνει και την αλατότητα (περιεκτικότητα σε άλατα) του νερού. Επίσης, το όργανο καταγράφει το βάθος που βρίσκεται η κεφαλή του κάτω από την επιφάνεια του νερού και σε συνδυασμό με ένα καλώδιο 25μ είναι κατάλληλο για δημιουργία προφίλ των παραπάνω ιδιοτήτων του νερού μέχρι αυτό το βάθος.

Σχήμα 4-50 το MiniSonde5 σε διαδικασία μέτρησης. Οι αισθητήρες του οργάνου βρίσκονται μέσα στο νερό. Διακρίνεται επίσης το PDA μέσω του οποίου καταγράφονται και αποθηκεύνται οι τιμές των φυσικοχημικών παραμέτρων.

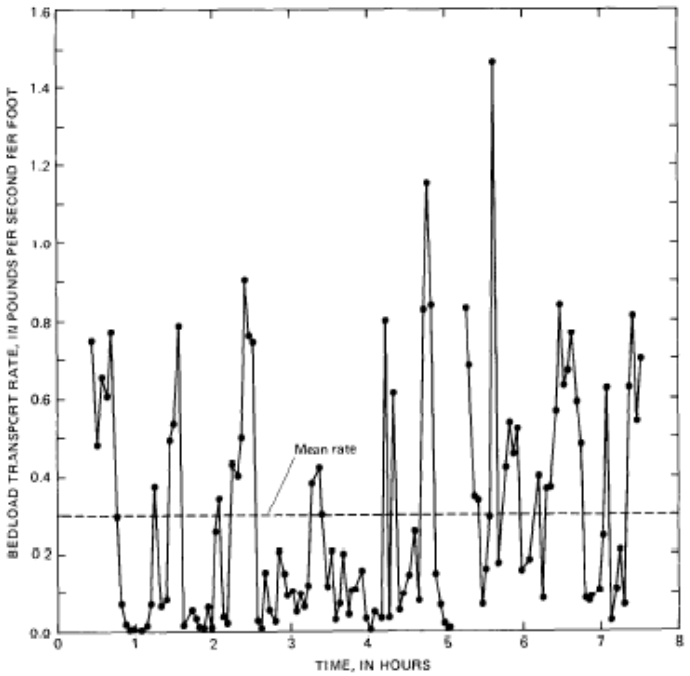
Αυτό το όργανο χρησιμοποιήθηκε κυρίως κατά τα έτη 2013-2014. Κατόπιν, λόγω βλαβών των αισθητήρων χρησιμοποιήθηκε μόνο περιστασιακά.

4.5.4 Φορτίο κοίτης

Το φορτίο κοίτης ή πυθμένα είναι αυτό που κινείται με κύλιση, σύρση ή αναπήδηση πάνω στον πυθμένα του ρεύματος σε αποστάσεις, κάθε φορά, ίσες με μερικές διαμέτρους του.

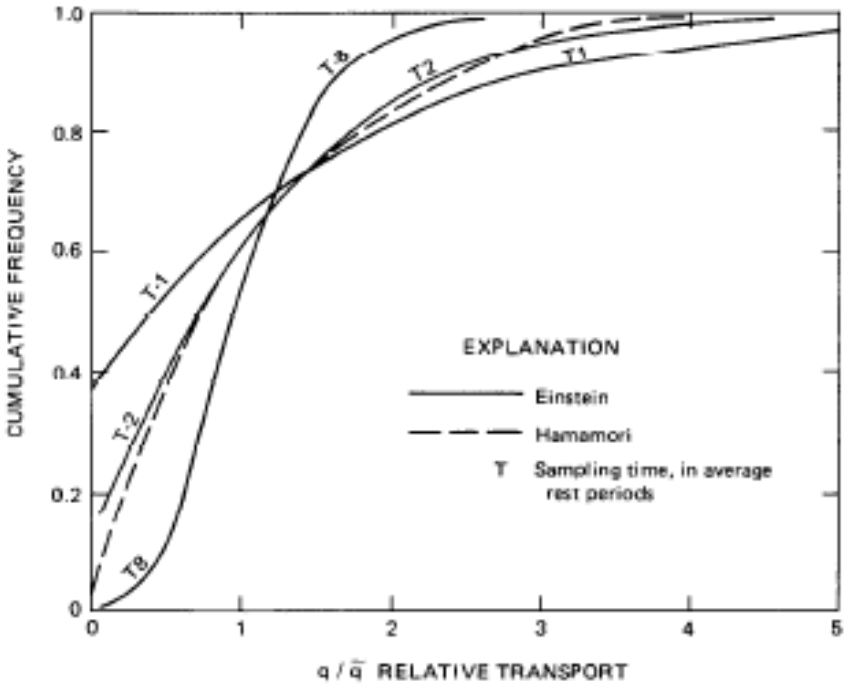
Η πυθμενική μεταφορά είναι εξαιρετικά μεταβαλλόμενη στο χώρο και στο χρόνο. Οι μεταβολές είναι ήδη έντονες κατά την διάρκεια μόνιμης ροής (Σχ. 4-51) και εντείνονται ακόμα περισσότερο όσο η παροχή αλλάζει. Εάν υπάρχουν στον πυθμένα γεωμορφές (σχηματισμοί κοίτης), όπως αμμώδη φράγματα ή ράχες και αμμορυτίδες, τότε η στερεοπαροχή εξαρτάται απολύτως από τη θέση που λαμβάνεται το δείγμα: είναι μηδενική πάνω από τα κοίλα και μέγιστη στις κορυφές. Έχει διαπιστωθεί από τη παρατήρηση ότι η κίνηση των φερτών υλών γίνεται κατά «κύματα» ή παλμούς ή κύκλους. Στη προσπάθεια να ληφθούν αντιπροσωπευτικά δείγματα, πρέπει να συνυπολογιστούν όλες αύτές οι μεταβλητές.

Η χρονική μεταβλητότητα σε δείγματα φορτίου πυθμένα που συλλέγονται κατά τη διάρκεια μόνιμης ροής σε μια μόνο κατακόρυφο (vertical), εξαρτώνται κυρίως από το λόγο του χρόνου δειγματοληψίας προς το χρόνο που απαιτείται για να διέλθει ένας κύκλος φερτών υλών από τη θέση δειγματοληψίας (περίοδος). Εάν ο χρόνος δειγματοληψίας είναι ίσος ή μεγαλύτερος από την περίοδο αυτή σε κάποιο σημείο, τότε η χρονική μεταβλητότητα θα είναι μικρή. Όσο όμως ο χρόνος δειγματοληψίας μικραίνει σε σχέση με τη διάρκεια της περιόδου, τόσο η μεταβλητότητα θα αυξάνεται.



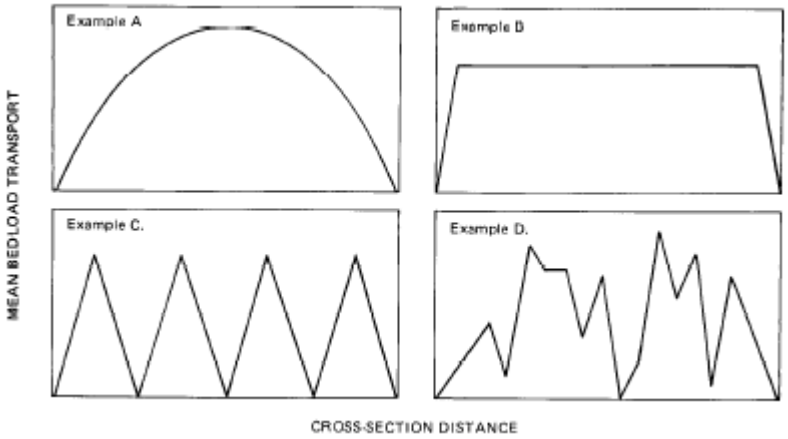
Σχήμα 4-51 Χρονικές διακυμάνσεις ρυθμού μεταφοράς φορτίου πυθμένα (σε pounds/sec) για 120 διαδοχικά δείγματα από πυθμένα ρεύματος με σταθερή παροχή (Carey 1985).

Οι Einstein (1937) και Hamamori (1962) ανέπτυξαν θεωρητικές κατανομές για να περιγράψουν τη χρονική κατανομή των ρυθμών μεταφοράς του φορτίου πυθμένα. Ο Einstein βάσισε την κατανομή του στην υπόθεση ότι τα βότσαλα κινούνται με τυχαία ακολουθία αναπήδησης και ανάπαυσης στον πυθμένα, όπου ο χρόνος ανάπαυσης (rest period) είναι αρκετά μεγαλύτερος από το χρόνο αναπήδησης. Ο Hamamori ανέπτυξε τη κατανομή του για να περιλάβει την ύπαρξη φραγματικών γεωμορφών στον πυθμένα. Ο χρόνος T του Einstein, είναι ένας αδιάστατος χρόνος δειγματοληψίας που εκφράζεται με όρους μέσου χρόνου ανάπαυσης. Η κατανομή Einstein με T=2 (ο χρόνος δειγματοληψίας είναι ίσος με δύο χρόνους ανάπαυσης) σχεδόν ταυτίζεται με την κατανομή Hamamori, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-52.



Σχήμα 4-52 Σύγκριση της αθροιστικής συνάρτησης πιθανότητας των ρυθμών μεταφοράς φορτίου πυθμένα από τον Einstein (1937) και τον Hamamori (1962). Στα x είναι η αδιάστατη σχετική μεταφορά q/qμέσο. Ο χρόνος T, μετριέται σε χρόνους ανάπαυσης.

Μεγάλη είναι επίσης και η χωρική μεταβλητότητα των ρυθμών μεταφοράς, δηλαδή η διακύμανση των ρυθμών μεταφοράς κατά πλάτος της διατομής της δειγματοληψίας, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4-53.



Σχήμα 4-53 Παράδειγματα πιθανών κατανομών μέσων ρυθμών μεταφοράς κατά την διατομή της κοίτης του ρεύματος: A, η μεταφορά μεταβάλλεται ομοιόμορφα, B, η μεταφορά είναι σταθερή, C, η μεταφορά είναι ασταθής με διαφορετικές τάσεις και D, η μεταφορά είναι ένας απρόβλεπτος συνδυασμός διαφορετικών τάσεων.

Λόγω των παραπάνω παραγόντων, θα πρέπει να ληφθούν αρκετά δείγματα σε πολλές κατακορύφους στη διατομή, και επιπλέον, αυτά θα πρέπει να παρθούν σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα προκειμένου να μπορεί με ασφάλεια να θεωρηθεί η ροή μόνιμη.

Ένα άλλο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται κατά τη δειγματοληψία του φορτίου πυθμένα είναι αυτό του *αντιπροσωπευτικού δείγματος*. Για να είναι το δείγμα αντιπροσωπευτικό, θα πρέπει ο δειγματολήπτης:

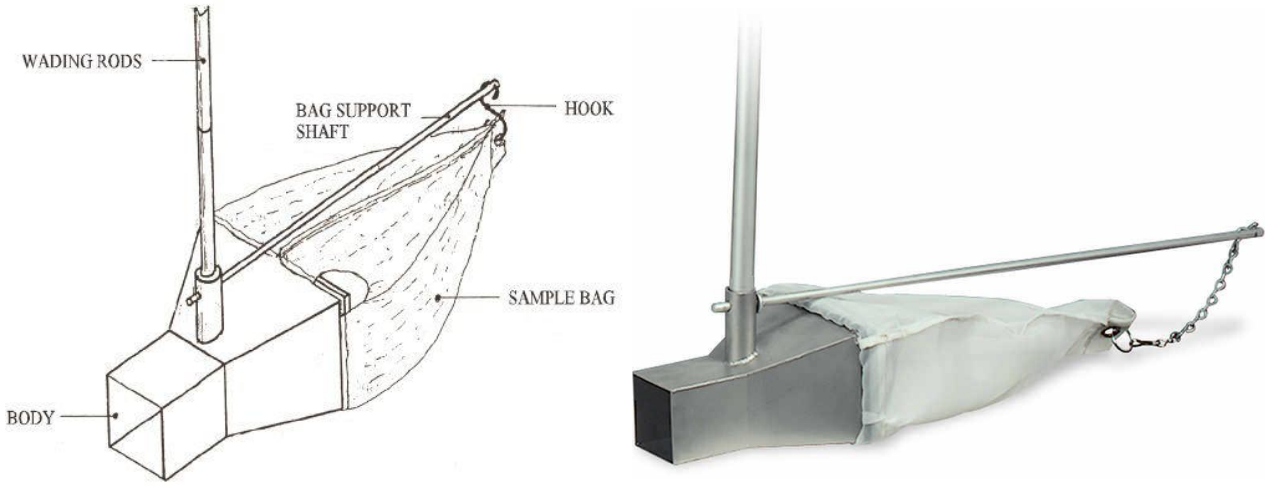
- Να παγιδεύσει, κατά το χρόνο δειγματοληψίας, όλα τα φερτά υλικά που κανονικά (σε απουσία του δειγματολήπτη), θα πέρναγαν από τη συγκεκριμένη θέση.
- Να μην παγιδεύσει (να απορρίψει) τα φερτά υλικά που κανονικά δεν θα πέρναγαν από τη θέση που έχει τοποθετηθεί.

Ο βαθμός στον οποίο ο παραπάνω στόχος επιτυγχάνεται, αποκαλείται «*αποτελεσματικότητα της δειγματοληψίας*» (sampling efficiency), και ορίζεται σαν η μάζα του δείγματος προς τη μάζα του ιζήματος που θα πέρναγε από την ίδια θέση και στον ίδιο χρόνο, εάν ο δειγματολήπτης δεν ήταν εκεί.

4.5.5 Δειγματολήπτης Helley-Smith

Το συνηθέστερο όργανο δειγματοληψίας φορτίου υλικού πυθμένα είναι ο δειγματολήπτης Helley-Smith (Σχ**.** 4-54). Πρόκειται για βελτίωση από τους αμερικάνους Edward Helley και Winchell Smith μιας ολλανδικής συσκευής που βασιζόταν στην ιδέα ότι μια μικρή βαθμιαία πλάτυνση της χοάνης εισόδου στα κατάντη θα προκαλούσε αύξηση της διαφοράς

της πίεσης τόσο, όσο να εξισοροπήσει την επιρροή της τριβής καθώς το νερό εισέρχεται στην οπή.



Σχήμα 4-54 Δειγματολήπτης φορτίου πυθμένα Helley-Smith. Το άνοιγμα μπορεί να είναι 3 ίντσες είτε 6 ίντσες.

Καθώς η χρήση του οργάνου αυτού γενικεύτηκε στις ΗΠΑ κατά την δεκαετία του 1950 έγινε φανερό ότι θα έπρεπε να καθοριστούν κάποια πρωτόκολα μέτρησης προκειμένου οι μετρήσεις από διαφορετικούς παρατηρητές σε διαφορετικά ποτάμια και θέσεις να είναι (α) αξιόπιστες και (β) συγκρίσιμες.

Παρατίθεται παρακάτω ένα απόσπασμα από την αναφορά της USGS (1988) με τίτλο «Field methods for measurement of fluvial sediment" προκειμένου να αποκτήσει ο αναγνώστης μια ιδέα για τις δυσκολίες των μετρήσεων.

«Η εμπειρία στο πεδίο έχει δείξει ότι η συλλογή περίπου 40 ανεξάρτητων μετρήσεων ρυθμών μεταφοράς φορτίου πυθμένα στη διατομή είναι πρακτικά δυνατή, και ικανή για σχετικά ασφαλή υπολογισμό της στερεοπαροχής (Emmett, 1980a). Για την επίτευξη του στόχου αυτού μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα παρακάτω πρωτόκολα:

1. *Ξεκινώντας από την μια όχθη και προχωρώντας προς την άλλη, συλλέγουμε ένα δείγμα ανα κατακόρυφο (vertical), σε 20 ισαπέχουσες κατακορύφους στη διατομή, ξαναγυρνάμε στην αρχική όχθη και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία. Αυτή η μέθοδος αναφέρεται σαν SEWI (Single equal-width-increment). Ο χρόνος που ο δειγματολήπτης μένει στον πυθμένα πρέπει να είναι ο ίδιος για κάθε κατακόρυφο. Τα δείγματα μαζεύονται στο κέντρο των 20 ισου πλάτους λωρίδων στις οποίες έχει διαιρεθεί η διατομή. Τα δείγματα μπορούν να αθροιστούν σε ένα ή να τοποθετηθούν*

σε διαφορετικές σακούλες, εάν ενδιαφέρει την ανάλυση η διαφοροποίηση των ρυθμών μεταφοράς στη διατομή.

2. *Ξεκινώντας από την μια όχθη και προχωρώντας προς την άλλη, συλλέγουμε ένα δείγμα ανα κατακόρυφο σε 4 ή περισσότερες ισαπέχουσες κατακορύφους στη διατομή, ξαναγυρνάμε στην αρχική όχθη και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία μέχρι να φτάσουμε τα 40 δείγματα. Αυτή η μέθοδος αναφέρεται σαν MEWI (Multiple equal-width-increment). Αν πρόκειται να αθροιστούν σε ένα τα δειγματα, τότε ο χρόνος παραμονής στον πυθμένα πρέπει να είναι ο ίδιος, αλλοιώς (σε περίπτωση αποθήκευσης σε διαφορετικά δοχεία ή σακούλες) μπορεί να διαφέρει. Όπως και στην πρώτη μέθοδο, οι κατακόρυφες θα πρέπει να βρίσκονται στο κέντρο των ίσου πλάτους λωρίδων.*
3. *Ξεκινώντας από την μια όχθη και προχωρώντας προς την άλλη, συλλέγεται ένα δείγμα ανα κατακόρυφο σε 4 ή περισσότερες μη ισαπέχουσες κατακορύφους στη διατομή, ξαναγυρνάμε στην αρχική όχθη και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία μέχρι να φτάσουμε τα 40 δείγματα. Αυτή η μέθοδος αναφέρεται σαν UWI (Unequal width-increment). Αυτή η μέθοδος προϋποθέτει κάποια πρότερη γνώση των ταχυτήτων και των βαθών στη διατομή. Η επιλογή του που θα τοποθετηθούν οι κατακόρυφες, εξαρτάται από την μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής».*

Οι Hubbel & Stevens (1986) προσπάθησαν να εκτιμήσουν το εύρος των πιθανών σφαλμάτων που θα μπορούσαν να προκύψουν από τις διαφορετικές μεθόδους δειγματοληψίας σχεδιάζοντας ένα υποθετικό μοντέλο δειγματοληψίας. Χρησιμοποίησαν την κατανομή του Hamamori για να προσομοιώσουν τη χρονική μεταβλητότητα στις ισαπέχουσες κατακορύφους και υπέθεσαν ότι ο δειγματολήπτης είχε 100% αποτελεσματικότητα. Το μοντέλο υπολογίστηκε με δύο διαφορετικά πρότυπα ρυθμών μεταφοράς στη διατομή: στο πρώτο έχουμε ομοιόμορφους ρυθμών μεταφοράς στη διατομή, ενώ στο δεύτερο έχουμε ασύμμετρη κατανομή με μεγαλύτερους ρυθμών μεταφοράς στην μία πλευρά της διατομής. Στη πρώτη περίπτωση, το μέγιστο πιθανό σφάλμα που θα έδινε η MEWI θα ήταν 35% ενώ στη SEWI θα έφτανε το 50%. Στη δεύτερη περίπτωση, η χρήση της SEWI θα μπορούσε να δώσει μέχρι και 80% σφάλμα, ενώ η MEWI θα έδινε σφάλμα 120%.

Από τη παραπάνω συζήτηση γίνεται φανερό ότι δεν υπάρχει μία μέθοδος που να είναι κατάλληλη σε όλες τις περιπτώσεις, και δεν μπορεί να εφαρμοστεί ένα μοναδικό

πρωτόκολλο μετρήσεων. Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ισαπεχουσών κατακορύφων, MEWI συλλέγοντας όμως λιγότερα από 40 δείγματα. Ο λόγος είναι ότι το πλάτος της διατομής της κοίτης στη θέση μέτρησης δεν ξεπερνούσε τα 4 μέτρα, επομένως ο αριθμός των 40 δειγμάτων ήταν υπερβολή.

4.5.6 Παγίδες φερτών υλικών

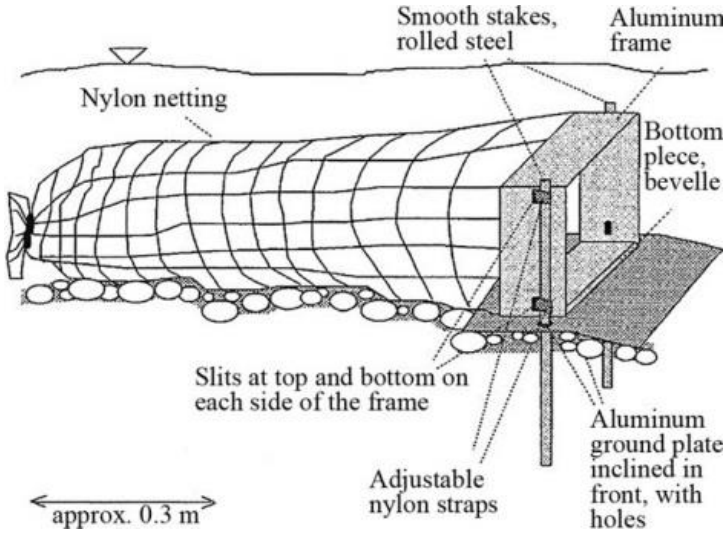
Οι παγίδες φερτών υλικών είναι ένας νεώτερος τύπος δειγματολήπτη (Σχ. 5-20). Οι παγίδες, είτε είναι με δίκτυ (net traps), είτε απλές τρύπες στην κοίτη (pit traps) επενδεδυμένες (με κάποιο π.χ πλαστικό δοχείο), τοποθετούνται στον πυθμένα της κοίτης του ποτάμιου ρεύματος και μπορούν να αφεθούν εκεί για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα, εφόσον βέβαια δεν γεμίσουν στο μεταξύ ή δεν στομώσουν από π.χ. φύλλα ή/και άλλα οργανικά υλικά που μεταφέρει το ποτάμι (Bunte et al., 2007).

Πίνακας 4-11 Σχέσεις έντασης δειγματοληψίας μεταξύ Helley-Smith και παγίδας φερτών υλικών.

Ολοκληρωτική δειγματοληψία	***6,5 m X 3600 s = 23,400 m*s***	***100%***
Helley-Smith	[13κατακόρ X 0.15 m] X [120 s] = 234 m*s	1%
Παγίδα φερτών	[0.30 m] X [3600 s] = 1080 m*s	4,6%

Οι παγίδες τείνουν πλέον να επικρατήσουν στους δειγματολήπτες φορτίου πυθμένα καθώς έχουν καλύτερη απόδοση ή «ένταση δειγματοληψίας» (sampling intensity). Η ένταση δειγματοληψίας ορίζεται σαν ποσοστό επί της *ολοκληρωτικής δειγματοληψίας* που ιδανικά θα ήταν εάν μπορούσε να καλύφθεί ολόκληρο το πλάτος της διατομής της κοίτης όλο τον χρόνο. Για παράδειγμα, για ένα ποτάμιο ρεύμα με πλάτος διατομής κοίτης ίσο με 6.5 μέτρα, τα μεγέθη έντασης δειγματοληψίας για (α) Helley-Smith ανοίγματος 15 εκατοστών (6 ίντσες) με 13 κατακορύφους και χρόνο παραμονής στον πυθμένα 120 s και (β) παγίδα ανοίγματος 30 εκατοστών που παρέμεινε για μιά ώρα στην θέση της, θα ήταν όπως στον Πίνακα 4-11.

Έτσι, με δύο παγίδες η ένταση θα ήταν 9,2 % κ.ό.κ. Ωστόσο, ένας περιοριστικός παράγοντας στη χρήση των παγίδων είναι η δυσκολία τοποθέτησης και εξαγωγής τους σε όχι μικρές παροχές, και συγκεκριμένα όπου το βάθος του νερού ξεπερνά τα 30-40 εκατοστά (Σχήμα 4-55) .



Σχήμα 4-55 Παγίδα τύπου Bunte (από την σχεδιάστρια του). Έχει πλαίσιο από αλουμίνιο με διαστάσεις 30εκ. πλάτος επί 20 εκ. ύψος επί 10 εκ. βάθος. Το πλαίσιο πατάει σε μια φαρδειά επιφάνεια επαφής και μπήγεται στον πυθμένα. Τα χαλίκια συλλέγονται στο νάϋλον δίχτυ που ακολουθεί και έχει μήκος περίπου 100 εκατοστά. Αφού τοποθετηθεί αφήνεται στο ποτάμι για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα. Οι παγίδες αυτού του τύπου ονομάζονται net traps.

Στις φωτογραφίες των Σχημάτων 4-56 και 4-57 δείχνονται τα όργανα αυτά και η χρήση τους στο ποτάμι κατά τη διαδικασία στερεοϋδρομετρήσεων.

Σχήμα 4-56 Δεξιά επάνω, ο δειγματολήπτης και η πρωτότυπη παγίδα στο εργαστήριο Φυσικής Γεωγραφίας του Χαροκόπειου Πανεπιστήμιου. Κάτω, ο δειγματολήπτης συναρμολογημένος και έτοιμος για χρήση. Αριστερά, ο δειγματολήπτης σε μέτρηση στο γεφυράκι του Πλιατσικούρα.

Σχήμα 4-57 Η τοποθέτηση και η εξαγωγή παγίδων όταν το βάθος του νερού ξεπερνά τους 35-40 πόντους είναι δύσκολη (φωτογραφίες επάνω). Κάτω αριστέρα, μέτρηση ταχυτήτων του νερού μπροστά στην είσοδο της παγίδας με μυλίσκο. Στο βάθος το γεφυράκι του Πλιατσικούρα. Κάτω δεξιά, και οι τρεις παγίδες σε μέτρηση.

Σχήμα 4-58 Πάνω δεξιά η προετοιμασία των έξυπνων χαλικιών και τα χαλίκια αποτεθειμένα στο ποτάμι. Συνολικά 55 έξυπνα χαλίκια αφέθηκαν στο ποτάμι περίπου 360 μ. ανάντη της γέφυρας του Πλιατσικούρα αφού έγινε η τοπογραφική αποτύπωση του τμήματος αυτού. Σε δέντρα στις όχθες κατά μήκος της διαδρομής αυτής, μπήκαν «ποταμόσημα» δηλαδή ταμπέλες με σημειωμένη την χιλιομετρική θέση από την αρχή (δες κάτω αριστερά). Σκοπός της σήμανσης είναι να μπορεί να βρεθεί εύκολα η χιλιομετρική θέση που βρέθηκε το κάθε ένα βότσαλο, χρησιμοποιώντας πχ απλά μια μετροταινία. Ο ανιχνευτής που χειρίζεται το scanner βλέπει στην οθόνη τον αριθμό του βότσαλου που βρέθηκε και ο βοηθός που ακολουθεί τον ανιχνευτή από την όχθη μετράει την απόσταση από το κοντινότερο ποταμόσημο και την σημειώνει στο τετράδιο.

Έχοντας διαθέσιμη μια παγίδα, παραγγελία από ΗΠΑ μαζί με τον Helley-Smith του Εργαστηρίου Φυσικής Γεωγραφίας του Χαροκόπειου, κατασκευάστηκαν σε μηχανουργείο άλλες 2 κάνοντας κάποιες μικρές αλλαγές στον σχεδιασμό της, και χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα κατά την περίοδο 2015-2016. Αργότερα όμως εγκαταλείφθηκε η χρήση τους λόγω των δυσκολιών που αναφέρθηκαν, προς όφελος του Helley-Smith, του οποίου, αν και η χρήση επίσης δυσκολεύει σε υψηλές παροχές, ωστόσο μπορεί να γίνει από χαμηλό γεφυράκι (όπως το γεφυράκι του Πλιατσικούρα) χωρίς να απαιτείται διάβαση του ρεύματος. Μια επιπλέον δυσκολία στην χρήση των παγίδων είναι η εκτίμηση του πλάτους ενεργής διατομής. Με τον όρο αυτό εννοούμε το τμήμα αυτό της διατομής όπου συμβαίνει στερεομεταφορά. Εάν για παράδειγμα χρησιμοποιηθεί μία παγίδα, θα πρέπει να υποτεθεί κατόπιν στους υπολογισμούς ότι σε ολόκληρο το πλάτος της διατομής λαμβάνει χώρα αυτή η μεταφορά; Αν τοποθετηθούν δύο παγίδες εκ των οποίων η μία δεν συλλέξει τίποτα, τι υπόθεση θα πρέπει να γίνει για το πλάτος της ενεργής διατομής; Η αλλαγή της θέσης της παγίδας κατα τη διάρκεια των μετρήσεων, που μπορεί να δώσει απάντηση στο παραπάνω ερώτημα, είναι πρακτικά πολύ δύσκολη. Η εμπειρία από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, υποδεικνύει ότι η μεταφορά συμβαίνει συνήθως σε μια σχετικά στενή λωρίδα γύρω από την βαθιά γραμμή.

Τέλος, θα πρέπει να τονισθεί ότι οι μετρήσεις μεταξύ των δύο οργάνων δεν είναι συμβατές. Οι καμπύλες παροχής-στερεοπαροχής που δίνει ο Helley-Smith έχουν πολύ πιο μεγάλες κλίσεις και γενικά προβλέπουν μεγαλύτερους ρυθμούς στερεοπαροχής από αυτές των παγίδων, εκτός από τις μεγάλες τιμές όπου οι δύο καμπύλες συναντώνται. Λόγω του μεγάλου αριθμού των στερεοϋδρομετρήσεων που έχουν γίνει στις ΗΠΑ με τον Helley-Smith, έχουν αναπτυχθεί σχέσεις προσαρμογής (Bunte and Abt, 2009), μετατροπής δηλαδή των μετρήσεων από Helley-Smith σε μετρήσεις με τη χρήση παγίδας.

4.5.7 Έξυπνα χαλίκια - ιχνευτές

Παρ'όλο που η παρούσα έρευνα δεν στάθηκε δυνατό να ολοκληρώσει την χρήση κάποιων από τις τεχνικές των ιχνευτών, με την έννοια της δυνατότητας εξαγωγής συμπερασμάτων από αυτές, ωστόσο θεωρείται σκόπιμο να παρατεθούν παρακάτω, οι προσπάθειες και οι κατασκευές που έγιναν.

Η χρήση σημαδεμένων χαλικιών ή ιχνευτών (tracers), έχει μεγάλο παρελθόν στην ποτάμια υδραυλική και την ποτάμια γεωμορφολογία. Η χρήση των ιχνευτών ξεκινά από τα

τέλη της δεκαετίας του 1930 με τον Einstein, που χρησιμοποίησε βαμμένα χαλίκια σε εργαστηριακά πειράματα. Ο απλούστερος τρόπος να σημαδευτεί ένα χαλίκι και να μετατραπεί σε ιχνευτή είναι η βαφή του, ωστόσο μεταξύ των ιχνευτών αυτού του είδους περιλαμβάνονται μαγνητισμένα χαλίκια, «εξωτικά» χαλίκια, δηλαδή βότσαλα με χρώμα και υφή διαφορετική από αυτά που απαντώνται στο ποτάμι, ραδιενεργά χαλίκια κ.ά.

Μεταξύ των πληροφοριών που μπορούν να δοθούν από την παρακολούθηση της μετακίνησης των ιχνευτών είναι οι ρυθμοί μεταφοράς, η έναρξη της κίνησης, οι περίοδοι κίνησης και ανάπαυσης (rest), και τα μήκη των βημάτων μετακίνησης. Προϋπόθεση όμως για μελέτες έναρξης της κίνησης είναι η δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης του ποταμού σε βάση πλημμύρας προς πλημμύρα. Εάν για παράδειγμα, βαμμένα χαλίκια βρεθούν σε κάποια θέση κατάντη από αυτήν που αφέθηκαν ένα μήνα μετά την «πόντισή» τους, δεν θα είναι γνωστό κάτω από ποιές συνθήκες μετακινήθηκαν (ποιά ροή τα έθεσε σε κίνηση), ούτε εάν βρέθηκαν εκεί κάνοντας ενδιάμεσες στάσεις (βήματα). Αν υπάρχει η δυνατότητα επίσκεψης στο ποτάμι σε συνεχή – καθημερινή βάση οι ερωτήσεις αυτές είναι δυνατόν να απαντηθούν. Όμως, έστω και οι σποραδικές επισκέψεις μπορούν να δώσουν κάποιες πληροφορίες σε σχέση με τους μέσους ρυθμούς μεταφοράς και την μεταφορική ικανότητα του ποταμού. Με αναφορά στο προηγούμενο παράδειγμα, θα γίνει αντιληπτό ότι ροές ορισμένης ισχύος είναι δυνατόν να κινητοποιήσουν χαλίκια ορισμένου μεγέθους και όχι μεγαλύτερα. Επίσης παρέχεται μιά ένδειξη για την μεταφορική ικανότητα του ποταμού στα τμήματα όπου αφέθηκαν οι ιχνευτές. Ένα πρόβλημα στις μελέτες με ιχνευτές είναι ο χαμηλός βαθμός ανάκτησης τους, δηλαδή η επανεύρεση τους στην κοίτη μετά από κάποιο διάστημα. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται ποσοστά ανάκτησης από 5% για βαμμένα χαλίκια έως και 100% για ραδιενεργά χαλίκια (Hassan and Engerzinger, 2003).

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβης χρησιμοποιήθηκαν ιχνευτές τριών ειδών: βαμμένα χαλίκια, τεχνητά χαλίκια και έξυπνα χαλίκια. Τα βαμμένα χαλίκια είναι η πιο απλή μέθοδος. Πράγματι, δοκιμαστικά περισσότερο, βάφτηκε ένας αριθμός από χαλίκια δύο τάξεων μεγέθους, μικρά (~2-3 εκ) και μεσαία (5-6 εκ), και τοποθετηθηκαν δίπλα στην όχθη του ποταμού, στην θέση Ζαχλωρού ΔΕΗ στις 15 Νοεμβρίου 2015, για να αναζητηθούν στην επόμενη επίσκεψή στο πεδίο. Στην επόμενη επίσκεψή (20 Δεκεμβρίου 2015) δεν βρέθηκε ούτε ένα στη θέση όπου είχαν τοποθετηθεί. Ανιχνεύτηκε η κοίτη μέχρι και 50 μέτρα στα κατάντη, και βρέθηκαν 5 από τα μεσαία σε αποστάσεις έως και 30 μέτρων από το σημείο απόθεσης παρόλο που, στο μεσοδιάστημα οι παροχές δεν ξεπέρασαν τα 2 m^3/s. Μία σημαντική παρατήρηση είναι ότι η μεταφορά τους συνέβη κατά μήκος των βαθύτερων σημείων της κοίτης, καθώς εκεί βρέθηκαν όλα τα ανακτηθέντα χαλίκια. Η αναζήτηση έγινε

μέχρι τα 50 μέτρα διότι μετά την απόσταση αυτή το ποτάμι σχηματίζει μικρούς καταρράκτες, οπότε η προσβαση είναι δύσκολη έως αδύνατη.

Σχήμα 4-59 Αριστερά, τεχνητά χαλίκια. Σχεδιάστηκαν (αριστερά) και κατασκευάστηκαν με τον 3D printer του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικού Χαρακτηρισμού Υλικών του ΤΕΙ Αθήνας (μέσον). Στο εσωτερικό τους (ένθετη φωτογραφία πάνω) έχουν LED που αναβοσβήνει έτσι ώστε να μπορεί να αναγνωριστεί το χαλίκι εύκολα ανάμεσα στα υπόλοιπα. Δεξιά, βαμμένα χαλίκια δύο μεγεθών.

Αργότερα, σε μια προσπάθεια να συστηματοποιηθεί αυτή η έρευνα, έγινε συνεργασία με το Εργαστήριο Ηλεκτρονικού Χαρακτηρισμού Υλικών του πρώην ΤΕΙ Αθήνας και τον επικεφαλής καθηγητή κ. Γιώργο Χλούπη, στην κατασκευή (α) τεχνητών χαλικιών και (β) έξυπνων χαλικιών και σαρωτή (radioscanner). Τα τεχνητά χαλίκια δεν είναι παρά πλαστικά κελύφη που περιέχουν μια μικρή μπαταρία και φωτισμό LED, καθώς και μικρά βαρίδια (για να προσομοιώσουν το ειδικό βάρος των πραγματικών χαλίκων). Στην συνέχεια σφραγίζονται και ρίχνονται στο ποτάμι. Προγραμματίζονται ώστε να αρχίσουν να αναβοσβήνουν 12 ή 24 ώρες μετά την ρίψη τους, έτσι ώστε να διευκολύνεται η ανίχνευσή τους στην κοίτη. Σκοπός εδώ ήταν η διερεύνηση των συνθηκών έναρξης κίνησης, καθώς προγραμματίστηκε η ρίψη τους να γίνει μία μέρα και η αναζήτησή τους την επόμενη, εάν και εφόσον είχε μεσολαβήσει κάποια ισχυρή ροή στο μεταξύ. Επειδή αυτού του τύπου ο πειραματισμός προϋποθέτει συνεχή παρουσία στο ποτάμι -τουλάχιστον κατά περιόδους-, τελικά δεν χρησιμοποιήθηκαν.

Περισσότερο βάρος δόθηκε στα λεγόμενα «έξυπνα» χαλίκια. Η τεχνολογία πάνω στην οποία βασίζεται αυτή η εφαρμογή ονομάζεται Radio Frequency identification (RFID). Βασίζεται στον εφοδιασμό επιλεγμένων βότσαλων με ένα μικρό παθητικό αναμεταδότη (tag). Κάθε αναμεταδότης, περίπου στο μέγεθος του νομίσματος των δύο Ευρώ αλλά αρκετά ελαφρύτερος, περιέχει μια μικρή κεραία, έναν μικροεπεξεργαστή και

την ελάχιστη ποσότητα μνήμης που απαιτείται έτσι ώστε να αποθηκεύσει έναν κωδικό αριθμό (id) που τον χαρακτηρίζει. Αυτός ο κωδικός μπορεί να διαβαστεί από μια συσκευή αναγνώρισης (σαρωτή) μέσω ράδιο-σύνδεσης, εφόσον ο σαρωτής βρεθεί κοντύτερα από περίπου 40 εκατοστά από τον αναμεταδότη. Πρόκειται για μια σχετικά φτηνή και ασφαλή τεχνολογία που έχει ήδη χρησιμοποιηθεί στην Ιταλία, απ'όσο γνωρίζουμε, σε εφαρμογές παρακολούθησης της πορείας των βότσαλων σε παραλίες μετά από ισχυρές τρικυμίες (Bertoni et al., 2010).

Τοποθετήθηκαν 55 τέτοια tags σε τυχαία επιλεγμένα χαλίκια από την κοίτη του Βουραϊκού με εποξική κόλλα, αφού πριν ζυγίστηκαν και μετρήθηκαν και οι τρεις άξονες τους. Κατόπιν, τοποθετήθηκαν μέσα στο ποτάμι, περίπου 360 μέτρα ανάντη της Γέφυρας του Πλιατσικούρα. Για τους σκοπούς της εφαρμογής αυτής αποτυπώθηκε το τμήμα αυτό της διαδρομής του ποτάμιου ρεύματος, μήκους περίπου 360 μέτρων, πάνω στη γραμμή που ενώνει τα βαθύτερα σημεία της κοίτης του ποταμού, στις 29 και 30 Οκτωβρίου 2016. Κατά την επόμενη επίσκεψη, στις 17 Φεβρουαρίου 2017, με βάση την τοπογραφική αποτύπωση, τοποθετήθηκαν «ποταμόσημα[10]», δηλαδή σημάδια υλοποιημένα από πλαστικοποιημένες ταμπέλες πάνω σε δέντρα στις όχθες του ποταμού (δες Σχ. 4-58), όπου αναγράφονταν η χιλιομετρική θέση του σημείου (με μηδέν στο γεφυράκι του Πλιατσικούρα). Σκοπός είναι ο εύκολος υπολογισμός, με τη βοήθεια μιας μετροταινίας, της χιλιομετρικής θέσης που θα βρεθεί το κάθε έξυπνο χαλίκι. Ωστόσο, παρόλη την προετοιμασία, κατά την επόμενη επίσκεψή μας, μετά από 2 μήνες, η σάρωση των περίπου 360 αυτών μέτρων δεν εντόπισε παρά ένα χαλίκι.

Γίνεται φανερό από τις παραπάνω περιγραφές ότι η χρήση των μεθόδων των ιχνευτών προϋποθέτει επίπεδα τεχνικής προετοιμασίας, υποστήριξης και κινητοποίησης πόρων που δεν ήταν δυνατά στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

4.6 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η προσπάθεια εκτίμησης του αιωρούμενου φορτίου είναι πολύ δυσκολότερη και αρκετά αβέβαιη ακόμα και σε περιπτώσεις μεγάλων χρονοσειρών μετρήσεων. Ο κύριος λόγος είναι ότι το φορτίο αυτό εξαρτάται από την διαθεσιμότητά του στη λεκάνη απορροής, και πολύ

[10] Κατά το οδόσημα.

λιγότερο από τις ιδιότητες της ροής που μπορούν να γνωστούν με αρκετά μεγαλύτερη βεβαιότητα.

Οι δειγματοληψίες του αιωρούμενου φορτίου έγιναν σχεδόν αποκλειστικά στην θέση του μικρού γεφυριού στο χωριό της Κάτω Ζαχλωρούς (γεφυράκι Ζαχλωρούς). Στα Σχήματα 4-60 και 4-61 δίνεται η τεκμηρίωση της θέσης αυτής με σχέδιο, φωτογραφία, καθώς και τη καμπύλη στάθμης-παροχής έτσι όπως αυτή προέκυψε από 7 υδρομετρήσεις στη συγκεκριμένη θέση. Με βάση την καμπύλη αυτή υπολογίστηκε η παροχή από τη στάθμη και στη συνέχεια, από τις συγκέντρωσεις των αιωρούμενων έτσι όπως προέκυψαν από τις αναλύσεις στο εργαστήριο, έγινε δυνατός ο υπολογισμός της στερεοπαροχής σε μετρικούς τόνους/ημέρα για 9 ημερομηνίες στο χρονικό διάστημα από 19 Νοεμβρίου 2013 έως 26 Ιανουαρίου 2014. Οι μετρήσεις αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-9. Εκτός των μετρήσεων αυτών, πραγματοποιήθηκαν δύο συνεχείς –ημερήσιες- σειρές μετρήσεων με το θολερόμετρο, η πρώτη από από 21 Δεκεμβρίου 2015 έως και 26 Φεβρουαρίου 2016, ένα διάστημα δύο περίπου μηνών, και η δεύτερη τους μήνες Μάρτιο και Απρίλιο του 2018. Συγχρόνως με την ανάγνωση του θολερόμετρου καταγραφόταν η στάθμη στον πήχυ, έτσι ώστε να είναι διαθέσιμη και η παροχή την ώρα της δειγματοληψίας.

Παρακάτω αναπτύσσονται και παρουσιάζονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του διερχόμενου φορτίου από τη θέση Γέφυράκι Ζαχλωρούς. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε και η εξίσωση των Ryan & Emmett (2002) καθώς διαπιστώθηκε ότι έδινε, προκειμένου για το πυθμενικό φορτίο, αποτελέσματα πολύ κοντά στις μετρήσεις μας. Η εξίσωση αυτή έχει αναπτυχθεί στο Little Granite Creek, Wyoming, στις ΗΠΑ, σαν σχέση δύναμης. Το υδατόρευμα αυτό, που είναι από τα καλύτερα μελετημένα και τεκμηριωμένα στις ΗΠΑ, έχει αρκετές ομοιότητες με τον Βουραϊκό όσον αφορά τον ορεινό χαρακτήρα, τις γεωμετρικές διαστάσεις του ρεύματος καθώς και την διανομή του ιζήματος. Οι διαφορές έγκεινται κυρίως στην μεγαλύτερη κλίση (~ 1.9%) στην θέση μέτρησης, καθώς και στην υδρολογία της λεκάνης απορροής, καθώς το Little Granite Creek είναι χιονοτροφοδοτούμενο κυρίως ρεύμα, με σχετικά μικρές πλημμυρικές εξάρσεις (Ryan & Emmett, 2002).

Σχήμα 4-60 Φωτογραφία από τη θέση γεφυράκι Ζαχλωρούς. Στο μεσαίο βάθρο φαίνεται και ο πήχυς που τοποθετήθηκε.

4.6.1 Περιγραφή της θέσης Γεφυράκι Ζαχλωρούς

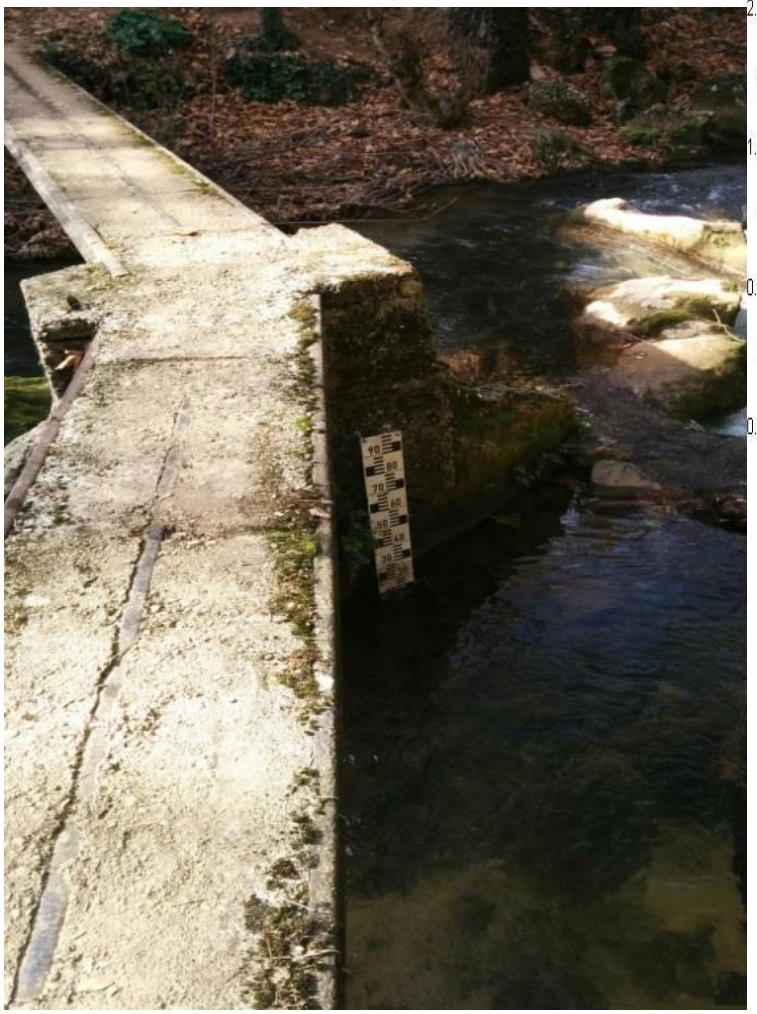
Στη θέση αυτή το ρεύμα παρουσιάζει αρκετά διαφορετικό χαρακτήρα, και εμφανίζεται έντονα χειμαρρικό. Δεν υπάρχει αλλουβιακό υπόστρωμα και οι μεγάλοι ογκόλιθοι που δεσπόζουν στην κοίτη, σε συνδυασμό με την μεγάλη κλίση του ρεύματος δίνουν την εντύπωση τμήματος όπου η ισχύς της ροής είναι τόσο μεγάλη, ώστε να εκκενώνει αποτελεσματικά το ίζημα δίχως αποθήκευση, παρά μόνο σε μικρές κοιλότητες-κόλπους άμμου και ιλύος κοντά στις όχθες. Στη θέση γεφυράκι Ζαχλωρούς έχουν γίνει οι μετρήσεις που παρατίθενται συνοπτικά στους παρακάτω πίνακες 4-12 και 4-13.

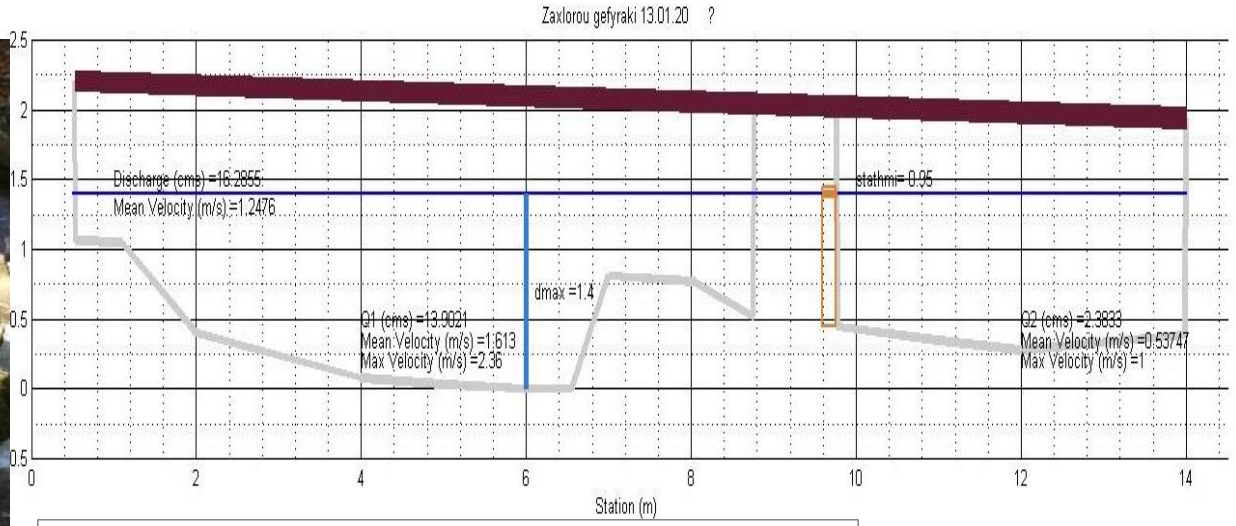
Πίνακας 4-12 Δεδομένα μετρήσεων στη θέση Ζαχλωρού γεφυράκι.

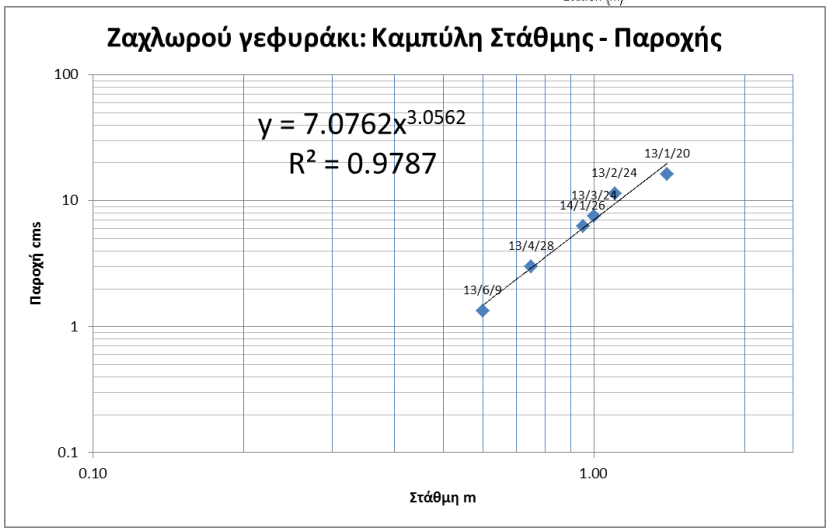
Δεδομένα	*Νο / Ναι-οχι*	*Παρατηρήσεις*
Υδρομετρήσεις	9	με μυλίσκο
Δειγματοληψίες αιωρούμενων	9	Με το DH48 Εύρος παροχών 1.5 – 7.1 m^3/s
Χρονοσειρές παροχών / στάθμεων	Ναι	Δύο σειρές 21/12/15 – 26/02/16 και 25/2/18 – 30/04/18
Χρονοσειρές σωλήνα διαύγειας (θολερόμετρου)	Ναι	Όπως παραπάνω
Τοπογραφική αποτύπωση	Όχι	

Πίνακας 4-13 Δειγματοληψίες αιωρούμενου ιζήματος με τον δειγματολήπτη DH48 στο Γ. Ζαχλωρούς

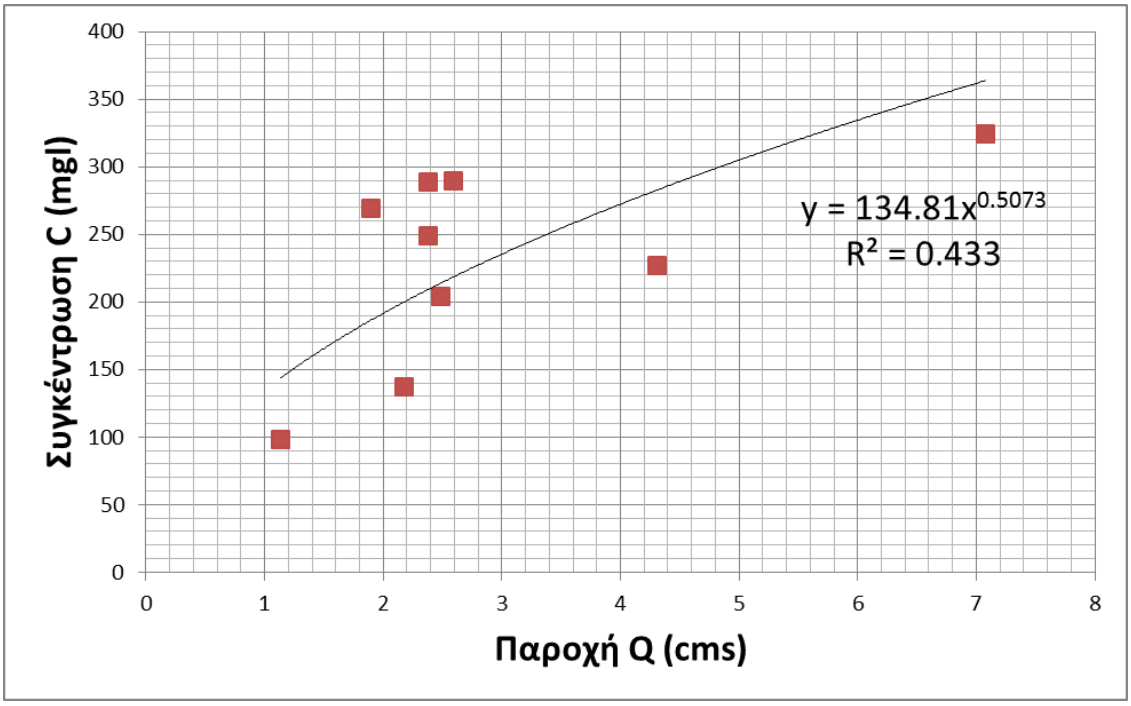
α/α	*Ημερομηνία*	*Ένδειξη σταθμη-μέτρου*	*Στάθμη (m)*	*Q (cms)*	*C (mgl) μέση*	*Qs t/d*	*Παρατηρήσεις min-max C*
1	19/11/2013	0.10	0.55	1.14	98	9.7	3 θέσεις (60-108 mgl)
2	22/11/2013	0.20	0.65	1.90	269	44.2	3 θέσεις (249-307 mgl)
3	27/11/2013	0.40	0.85	4.31	227	84.5	3 θέσεις (210-233 mgl)
4	15/12/2013	0.23	0.68	2.18	137	25.8	3 θέσεις (100-153 mgl)
5	29/12/2013	0.25	0.70	2.38	249	51.2	3 θέσεις (237-253 mgl)
6	13/1/2014	0.25	0.70	2.38	289	59.4	3 θέσεις (257-298 mgl)
7	16/1/2014	0.27	0.72	2.59	290	64.9	3 θέσεις (257-282 mgl)
8	25/1/2014	0.26	0.71	2.48	204	43.7	3 θέσεις (120-246 mgl)
9	26/1/2014	0.55	1.00	7.08	324	198.2	3 θέσεις (130-435 mgl)







Σχήμα 4-61 Τεκμηρίωση της θέσης Ζαχλωρού γεφυράκι. Σκαρίφημα της θέσης επάνω, και φωτογραφία όπου διακρίνεται ο πήχυς ανάγνωσης της στάθμης. Κάτω, η καμπύλη σταθμης-παροχής για την θέση από 7 υδρομετρήσεις. Στην υδρομέτρηση που απεκονίζεται στο σκαρίφημα (20 Ιαν. 2013) είχαμε την μεγαλύτερη μετρημένη από εμάς πλημμύρα στο ποτάμι (17 cms). Μέγιστο βάθος νερού 1.40 m και μέγιστη ταχύτητα 2.36 m/s.



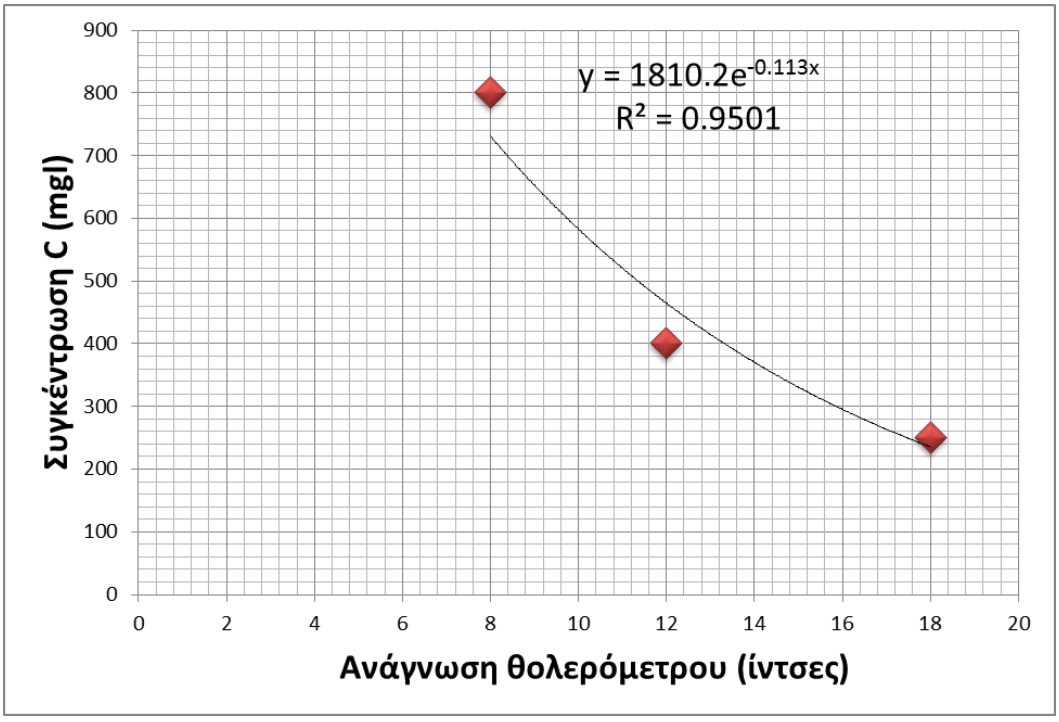
Σχήμα 4-62 Η καμπύλη παροχής - στερεοπαροχής αιωρούμενων τύπου σχέσης δύναμης που προέκυψε από τις δειγματοληψίες αιωρούμενου φορτίου.

4.6.2 Το θολερόμετρο και οι καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής

Οι δύο διμηνιαίες σειρές των ταυτόχρονων μετρήσεων θολερόμετρου – καταγραφής στάθμης, θα επέτρεπαν τον υπολογισμό του διερχόμενου αιωρούμενου φορτίου αυτών των περιόδων, εφόσον υπήρχε μια καλά εδραιωμένη σχέση ανάγνωσης θολερόμετρου – συγκέντρωσης ιζήματος στο νερό. Αυτή είναι η διαδικασία βαθμονόμησης του θολερόμετρου. Τέτοιες σχέσεις έχουν εξαχθεί αλλού και έχει φανεί ότι είναι μεν ειδικές ανά ποταμό και ίσως θέση, αλλά είναι σταθερές και αξιόπιστες. Αυτή η μέτρηση όμως είναι αρκετά υποκειμενική καθώς ο καθένας ερμηνεύει αλλιώς το εάν βλέπει τον ασπρόμαυρο σταυρό (Σχ. 4-49) *με σαφήνεια* κάτω από το θολό νερό του σωλήνα (οπότε και παίρνει την ανάγνωση του ύψους της στήλης). Όσο μικρότερη είναι η στήλη που απαιτείται για να φανεί καθαρά το σύμβολο της τάπας του σωλήνα, τόσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του νερού σε ίζημα. Εδώ είναι μια περίπτωση όπου χρειάζεται βαθμονόμηση του παρατηρητή. Σε δοκιμές που κάναμε μεταξύ μας υπήρξαν διαφορές ακόμα και 3 ιντσών στην εκτίμηση του ύψους της στήλης! Συγκρίνοντας τις δικές μας εκτιμήσεις με αυτές του παρατηρητή, του μικρού Αντώνη Τριανταφύλλου, είδαμε ότι υπάρχει γενικά υποεκτίμηση απο μεριάς του, τού ύψους της στήλης. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές κατά την πρώτη

διμηνία, Δεκέμβριος 15 – Φεβρουάριος 16, όπου οι αναγνώσεις του είναι, οι περισσότερες, 24 ίντσες, δηλαδή γεμάτος σωλήνας (για μικρές συγκεντρώσεις χρησιμοποιείται και σωλήνας του μέτρου). Πιστεύουμε ότι σε εκείνη την περίοδο απλά βιαζόταν να τελειώσει τις μετρήσεις και δεν έδινε την σημασία που έπρεπε στην διαδικασία. Πράγματι, όταν κλήθηκε να επαναλάβει τις μετρήσεις, δύο χρόνια αργότερα, και αφού του επισημάνθηκε η απαίτηση ακριβείας σε αυτή την μέτρηση και πως θα πρέπει να γίνεται, οι σειρές που έδωσε ήταν πολύ καλύτερες σε ποιότητα.

Για να αντιμετωπιστεί καλύτερα αυτό το θέμα κάναμε ένα πείραμα στον χώρο του πρώην ΤΕΙ Αθήνας και στο εργαστήριο Γεωπληροφορικής. Αφού κατασκευάσαμε τρία δείγματα με περιεκτικότητες 250, 500 και 1000 mgl καλέσαμε τους σπουδαστές να πάρουν την ανάγνωση στα τρία αυτά δείγματα εξηγώντας τους τους κανόνες. Από το πείραμα αυτό προέκυψε η καμπύλη του Σχήματος 4-63. Αυτή η καμπύλη χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή της σχέσης ανάγνωση θολερόμετρου παρατηρητή – συγκέντρωσης ιζήματος στο νερό. Η παροχή υπολογίστηκε από την καταγεγραμμένη στάθμη με την καμπύλη στάθμης – παροχής που κατασκευάστηκε για τη θέση αυτή από τις 9 υδρομετρήσεις.

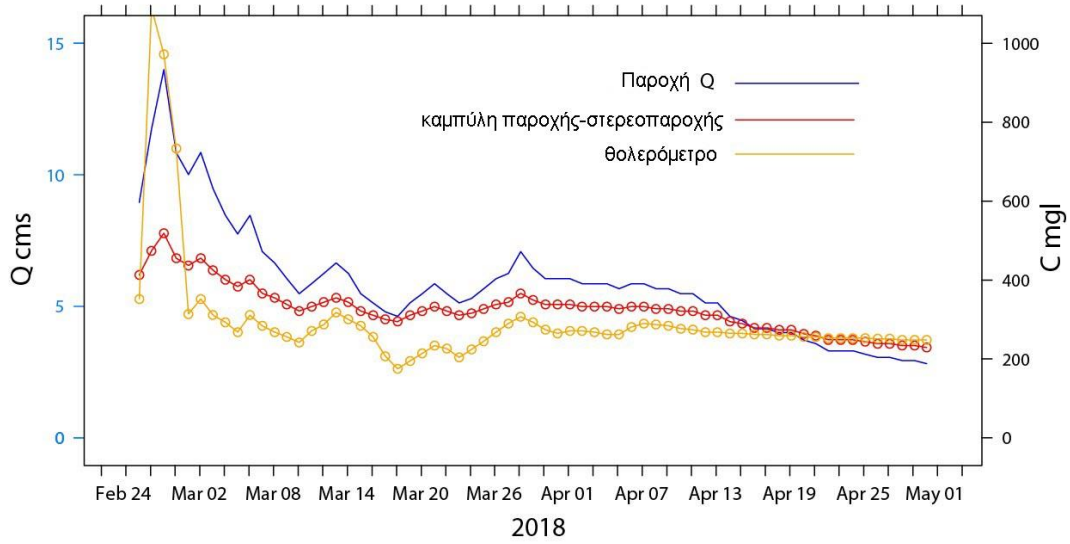


Σχήμα 4-63 Η καμπύλη ανάγνωσης θολερόμετρου-συγκέντρωσης από το πείραμα. Εδώ προτιμήθηκε μια εκθετική σχέση που δίνει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, από τη σχέση δύναμης στις μεγάλες παροχές.

Στο Σχήμα 4-64 φαίνεται πως οι συγκεντρώσεις του θολερόμετρου δίνουν την χαρακτηριστική εικόνα της απόπλυσης του λεπτού ιζήματος αμέσως μετά την πλημμύρα: στην αιχμή, κοντά στα 15 cms, η συγκέντρωση φτάνει τα 1000 mgl ενώ την άλλη μέρα

πέφτει ήδη στα 250-300 mgl, ενώ αντίθετα, η συγκέντρωση απο την καμπύλη παροχής - στερεοπαροχής παρακολουθεί πολύ πιο αδρά αυτήν την πορεία, ενώ βρίσκεται πάνω από την άλλη στις παροχές κοντά στα 5 cms. Σε χαμηλότερες παροχές οι δύο συγκεντρώσεις συγκλίνουν. Σημείο ενθαρρυντικό για την εφαρμογή της καμπύλης παροχής - στερεοπαροχής είναι ότι τα αποτελέσματα σε στερεοπαροχή, για αυτό το διάστημα, είναι ίδιο και για τις δύο καμπύλες.

Η σύγκριση των δύο καμπυλών μπορεί να φανεί στις μετρήσεις της δεύτερης περιόδου 25/2/18 – 30/4/18 όπως φαίνεται στο επόμενο Σχήμα 4-64.



Σχήμα 4-64 Υδρογράφημα με δύο τιμές συγκεντρώσεων, μία από την καμπύλη παροχής-στερεοπαροχής και μία από το θολερόμετρο.

4.7 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΠΥΘΜΕΝΑ

Το φορτίο αυτό θεωρείται εξόχως δύσκολο να μετρηθεί και η παρακάτω παράγραφος του Hubbel (1964), είναι ακόμα επίκαιρη:

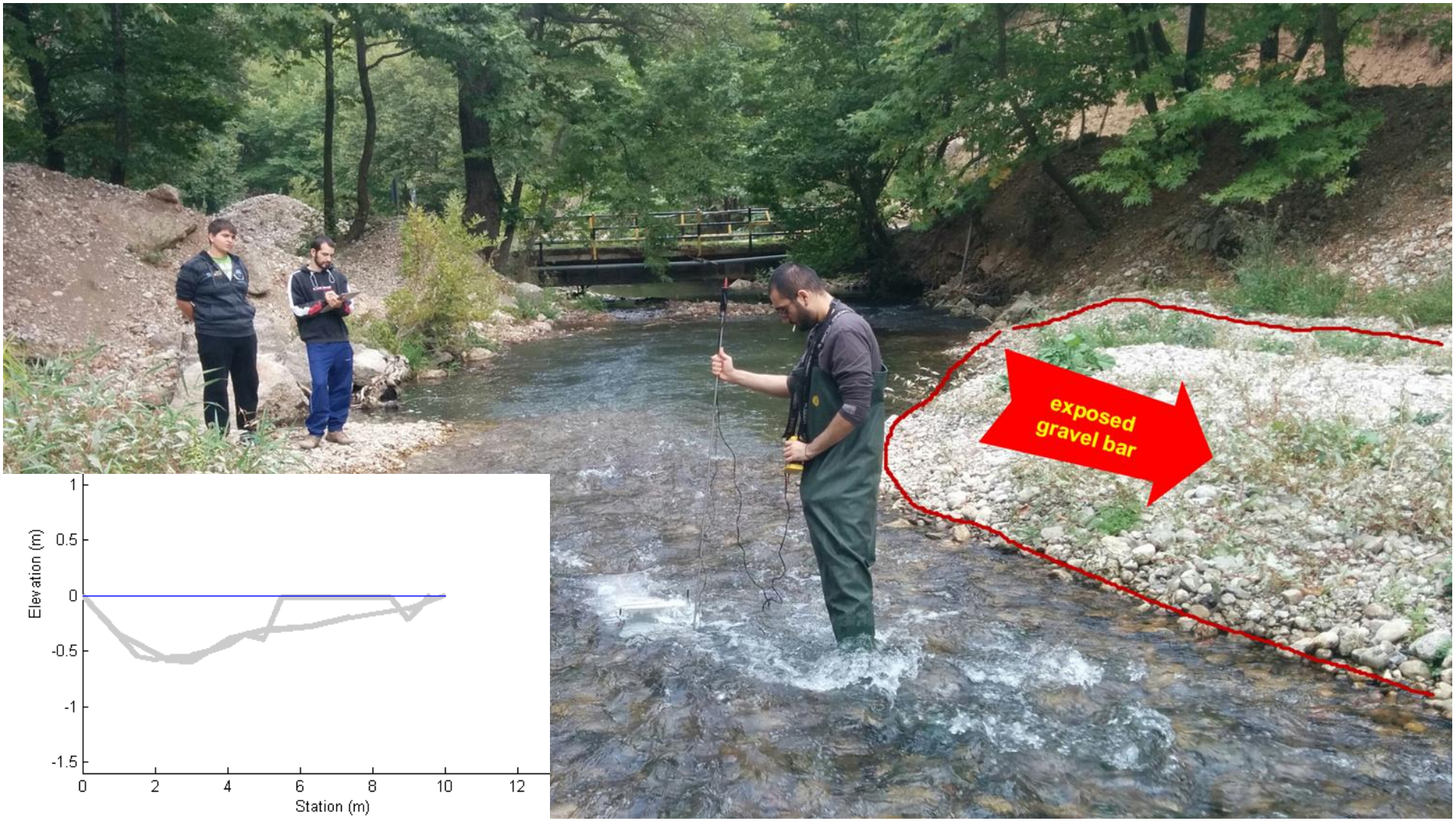
«Στο παρελθόν έχουν γίνει προσπάθειες να προσδιοριστεί η πυθμενική στερεομεταφορά με τρεις γενικούς τρόπους: με άμεση μέτρηση με την βοήθεια κάποιας μετρητικής διάταξης/οργάνου, με διερεύνηση των φυσικών σχέσεων που διέπουν την κίνηση αυτή, έτσι ώστε η πυθμενική στερεομεταφορά να μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά, και με ποσοτικές παρατηρήσεις πάνω στα αποτελέσματα διεργασιών απόθεσης και διάβρωσης. Δυστυχώς, οι άμεσες μετρητικές μέθοδοι υπήρξαν χρήσιμες μόνο σε ένα περιορισμένο εύρος

ροών, η διερεύνηση των φυσικών σχέσεων δεν έφτασε στο επίπεδο αυτό που θα μπορούσε να δώσει την δυνατότητα αναλυτικού υπολογισμού, ενώ οι ποσοτικές παρατηρήσεις των γεωμορφολογικών διεργασιών έχουν δώσει πληροφορίες μόνο για τον χαρακτήρα του τμήματος του ποταμού που μελετήθηκε. Σαν αποτέλεσμα, δεν υπάρχει μία μοναδική μεθοδος ή διάταξη, εμπειρική είτε θεωρητική, που να έχει γίνει καθολικά αποδεκτή σαν απολύτως κατάλληλη για τον υπολογισμό της μεταφοράς του φορτίου πυθμένα στο εύρος των συνθηκών που απαντώνται στη φύση.»

Παρακάτω αναπτύσσονται και παρουσιάζονται οι πέντε εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του διερχόμενου φορτίου από τη θέση της Γέφυρας Πλιατσικούρα (Σχ.5-31 και 5-32). Οι εξισώσεις αυτές είναι η (βαθμονομημένη) καμπύλη παροχής – στερεοπαροχής, τρεις εξισώσεις του BAGS, και η εξίσωση των Ryan & Emmett (2002).

4.7.1 Περιγραφή της θέσης Γέφυρα Πλιατσικούρα

Στην θέση της Γ. Πλιατσικούρα το ποτάμι μπορεί να χαρακτηριστεί σαν plain-bed, χωρίς δηλαδή αναβαθμίδες. Στην πραγματικότητα η Γ. Πλιατσικούρα βρίσκεται αμέσως κατάντη από σημείο αλλαγής της μηκοτομικής κλίσης του ποταμού. Ανάντη υπάρχει πιο ήπια κλίση, της τάξης του 1%, σε πορεία με ελαφρείς μαιανδρισμούς, ενώ στη θέση της γέφυρας η κλίση είναι 1.5% περίπου (Σχ.5-34). Αυτό σημαίνει ότι σε αυτό το μήκος θα εμφανίζονται φαινόμενα μη ομοιόμορφης ροής. Οι πηγές του ιζήματος είναι κυρίως οι συμβάλλοντες εποχιακοί παραχείμαρροι, οι οποίοι κατάγουν μεγάλες ποσότητες αδρομερούς υλικού ανάμικτου με ψηφίδες. Το υλικό αυτό, προκειμένου να μην εμποδίζει την ροή του ποταμού, συγκεντρώνενται με χρήση μηχανημάτων και αποτίθεται στην αριστερή όχθη του ποταμού (κοιτώντας κατάντη).



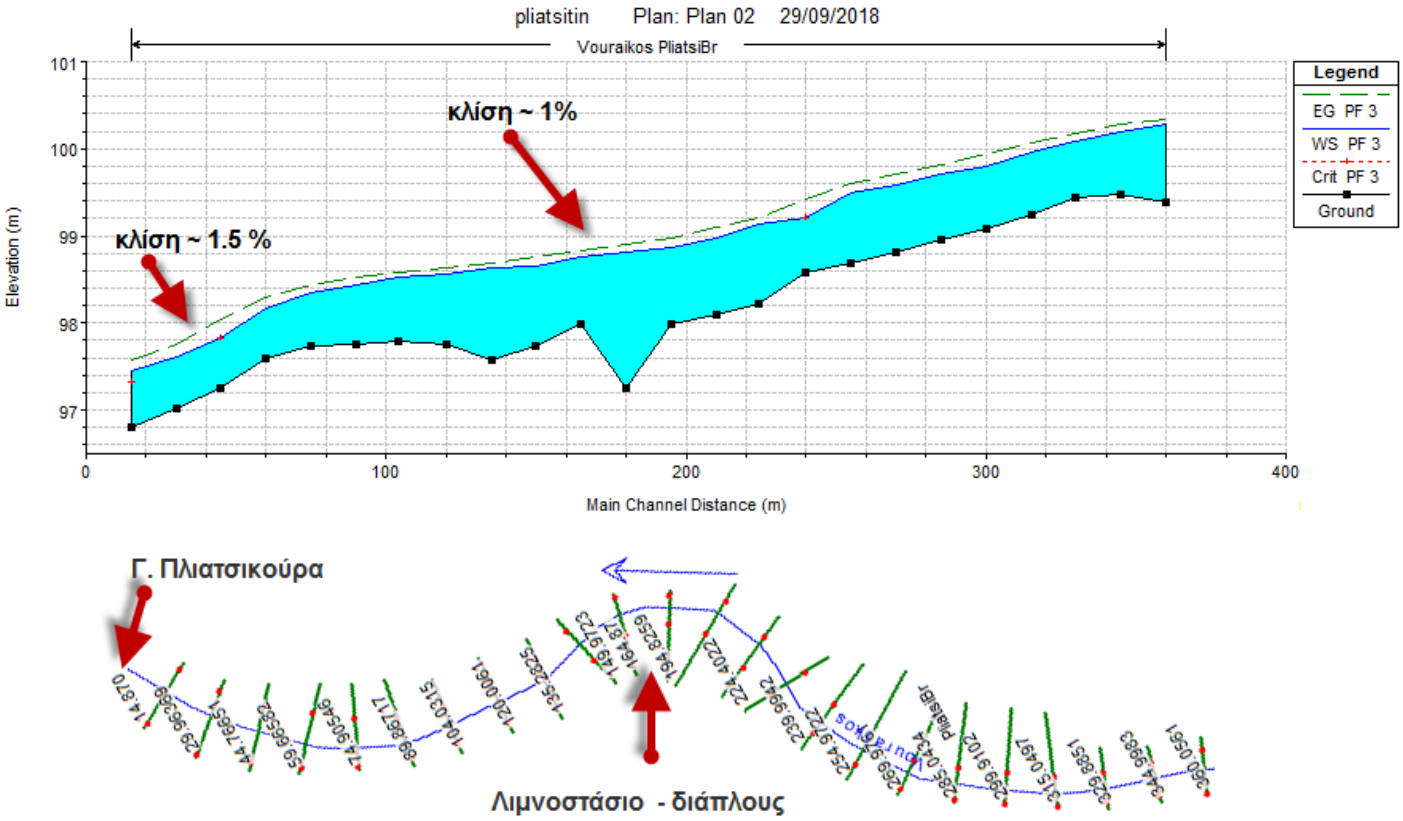
Σχήμα 4-65 Φωτογραφία αμέσως ανάντη της Γ. Πλιατσικούρα κοιτώντας κατάντη. Στο ένθετο δίνονται διατομές της κοίτης στη γέφυρα σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Όπως φαίνεται το δεξί τμήμα μπαζώνεται συχνά και ανοιχτός μένει ένας σχετικά αβαθής διάδρομος 5 μέτρων περίπου. Στα δεξιά της φωτογραφίας διακρίνεται χαλία (χαλικοσωρός) αντιπροσωπευτική του μεταφερόμενου φορτίου. Οι χαλικοσωροί στα αριστερά της εικόνας προέρχονται από τους μικρούς συμβάλλοντες χειμάρρους. Τα φερτά αυτά μεταφέρονται με προωθητές και σωρεύονται στην αριστερή όχθη του ποταμού.

Σχήμα 4-66 Φωτογραφίες από τη θέση Γέφυρα Πλιατσικούρα στις 25/2/2018.

Στη θέση αυτή έχουν γίνει 9 υδρομετρήσεις από τις οποίες οι 8 με ταυτόχρονες μετρήσεις στερεοπαροχής. Στη θέση διαθέτουμε 5 μετρήσεις πυθμενικού φορτίου με δειγματολήπτη H-S και 4 με παγίδες φερτών. Επίσης, έχουμε αναλύσεις δείγματων από το μεταφερόμενο φορτίο (την θωράκιση) καθώς και από το υπόστρωμα. Σύνοπτικά στην θέση αυτή είναι διαθέσιμα τα δεδομένα του Πίνακα 4-14.

Πίνακας 4-14 Τα διαθέσιμα δεδομένα για την θέση Γ. Πλιατσικούρα

Δεδομένα	*Ναι-οχι*	*Παρατηρήσεις*
Υδρομετρήσεις	9	8 με μυλίσκο, 1 με Qliner
Στερεοϋδρομετρήσεις (ταυτόχρονες)	8	Από τις οποίες 5 με Helley-Smith Εύρος παροχών 0.5 – 8.5 m3/s
Χρονοσειρές παροχών / στάθμεων	Όχι	Χρησιμοποιούνται οι σειρές της Ζαχλωρούς
Υδραυλικά χαρακτηριστικά	Ναι	Μέση κλίση, υδραυλική γεωμετρία
Κατανομή ιζήματος	Ναι	Χαλικομετρήσεις (pebble count) και χύδην δείγματα φορτίου
Τοπογραφική αποτύπωση	Ναι	Διατομή, κατα μήκος κλίση



Σχήμα 4-67 Μηκοτομή (επάνω) και οριζοντιογραφία(κάτω) του ποταμού από το RAS ανάντη της Γ. Πλιατσικούρα. Η προσομοιούμενη παροχή είναι 8 cms, περίπου η παροχή πλήρους κοίτης (bankful). Το βαθύ σημείο είναι λιμνοστάσιο στην προηγούμενη ελαφρά μαιανδρίζουσα πορεία του ρεύματος και η θέση του σημειώνεται στην οριζοντιογραφία (κάτω).

Τα στοιχεία των δειγματοληψιών στην θέση αυτή δίνονται στον Πίνακα 4-15.

Πίνακας 4-15 Στοιχεία στερεοϋδρομετρήσεων στην Γ. Πλιατσικούρα

	Ημ/νια	*Q*	*W*	*B*	*Qs*	*Rh*	*U*	U_{max}	d_h	D_{max}
		cms	*g*	*m*	*t/d*	*m*	*m/s*	*m/s*	*m*	*m*
1	**10/07/2015**	0.46	5	2	0.02	0.22	0.29	0.65	0.23	0.40
2	**14/11/2015**	0.57	-	-	-	0.24	0.76	1.17	0.25	0.44
3	**19/12/2015**	0.95	-	-	-	0.24	0.70	1.13	0.25	0.36
4	**27/02/2016**	2.67	-	-	-	0.25	1.10	1.69	0.25	0.58
5	**9/04/2016**	3.03	-	-	-	0.30	1.00	1.27	0.30	0.60
6	**25/02/2017**	2.62	663	3	0.2	0.32	1.08	1.47	0.32	0.57
7	**1/04/2017**	2.29	501	2	0.3	0.29	0.97	1.30	0.30	0.48
8	**24/02/2018**	8.33	15744	6	15	0.47	1.63	2.17	0.49	0.75
9	**31/03/2018**	4.22	2352	4	2.5	0.38	1.09	1.58	0.39	0.60

Q παροχή, W βάρος δείγματος, B πλάτος διατομής (ενεργής), qs- Qs στερεοπαροχή, Rh υδραυλική ακτίνα, U- U_{max} ταχύτητες (μέση-μέγιστη), d_h- D_{max} βάθη (μέσο – μέγιστο) .

4.7.2 Βαθμονομημένη καμπύλη παροχής–στερεοπαροχής Γ. Πλιατσικούρα

Σαν εφαρμογή της βαθμονομημένης καμπύλης παροχής - στερεοπαροχής (Εδάφιο 2.2.11), θα καταρτισθεί παρακάτω μιά τέτοια εξίσωση για την θέση της Γέφυρας Πλιατσικούρα. Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στο άρθρο του P. Wilcock (2001), *Towards a practical method for estimating sediment-transport rates in gravel-bed rivers*. Η κεντρική ιδέα είναι η χρήση μετρήσεων σε μικρές τιμές στερεοπαροχής προκειμένου να βαθμονομηθεί η φόρμουλα στερεοπαροχής. Τα βασικά σημεία είναι τα παρακάτω:

- Η μέση ταχύτητα συνδέεται με την παροχή μέσω της υδραυλικής γεωμετρίας σε μία θέση (at-a-station).
- Βάσει της ταχύτητας και του D_{65} γίνεται ο επιμερισμός της συρτικής τάσης σε τ' μέσω της σχέσης Strickler,
- Επιλέγεται με δοκιμές η τ_{ref} αυτή που δίνει W*=0.002 (τ_{ref} = συρτ. τάση αναφοράς)

Σύμφωνα με την θεωρία της υδραυλικής γεωμετρίας σε-μιά-θέση, η παροχή συνδέεται με την μέση ταχύτητα με μια σχέση δύναμης του τύπου (Σχ. 4-68):

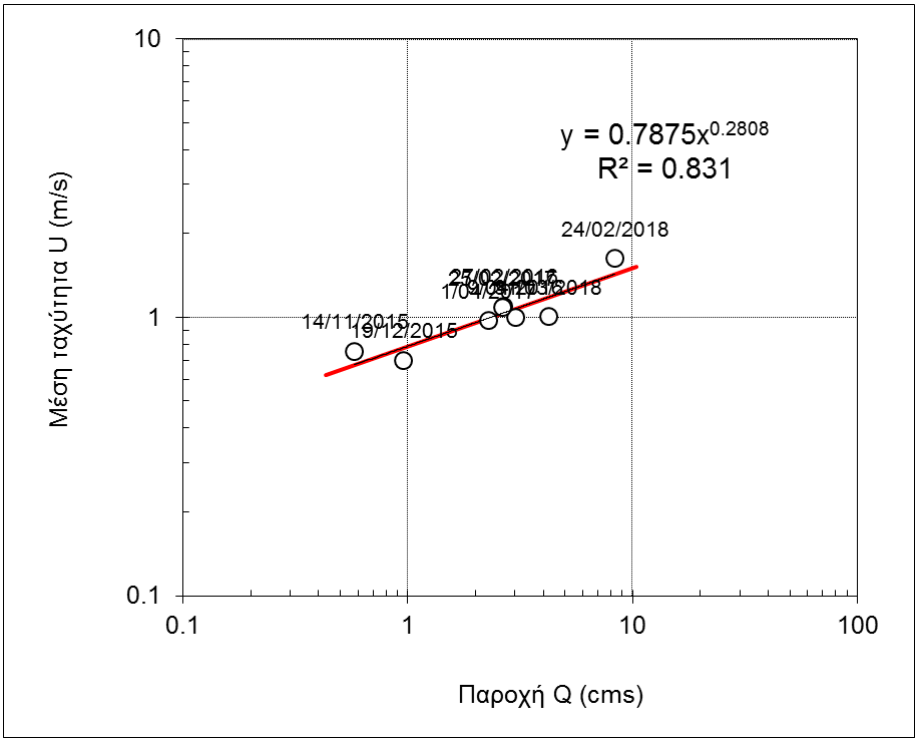
$$U = kQ^m$$

Από την συνολική συρτική τάση $\boldsymbol{\tau}$ που ασκείται από το νερό στον πυθμένα του υδατορεύματος ένα τμήμα της μόνο ασκείται επί των κόκκων, το $\boldsymbol{\tau'}$ ή επιδερμική τριβή (skin friction). Το υπόλοιπο αναλώνεται στην υπερνίκηση των εμποδίων που παρουσιάζονται στη ροή (ογκόλιθοι. όταν δεν υπάρχουν σχηματισμοί κοίτης στο ποτάμι). Εφόσον λοιπόν υπολογιστεί η συρτική τάση στον πυθμένα $\boldsymbol{\tau}$ πρέπει κατόπιν να επιμεριστεί σε δύο τμήματα (drag partition), καθώς ενδιαφέρει μόνον το τμήμα αυτό που ασκείται στους κόκκους του πυθμένα.

Η σύνδεση γίνεται μέσω της σχέσης του Strickler, που συνδέει την τραχύτητα της κοίτης με το μέγεθος του κόκκου.

$$n_d = 0.013D^{1/6}$$

Με αυτό τον τρόπο έχουμε την εκτίμηση για την ενεργή τάση στους κόκκους $\boldsymbol{\tau'}$.



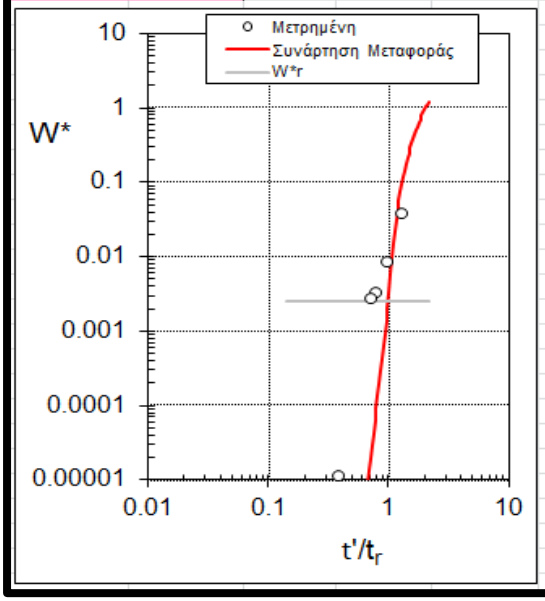
Σχήμα 4-68 Σχέση μέσης ταχύτητας (U=Q/A) με την παροχή από τις 9 υδρομετρήσεις.

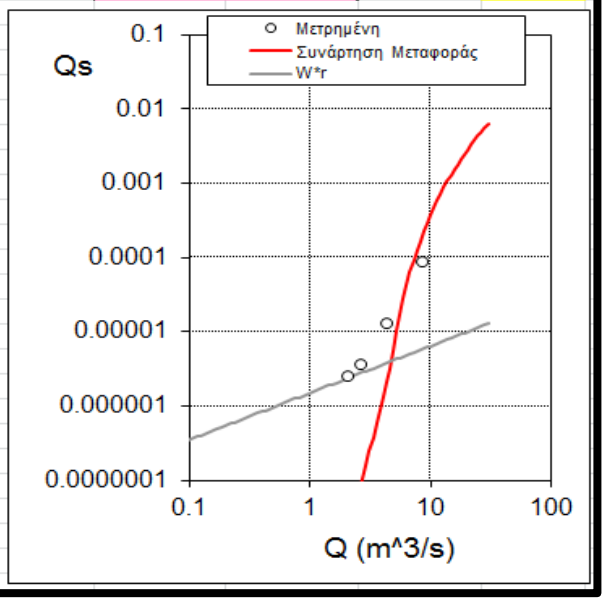
Στον Πίνακα 4-16 παρουσιάζεται η κατάστρωση και οι τιμές των μεταβλητών και στο Σχήμα 4-68 παρουσιάζονται οι προβλέψεις της εξίσωσης σε σχέση με τις μετρήσεις.

Πίνακας 4-16 Αποσπάσματα του φύλλου εργασίας του excel όπου αναπτύσσεται ο υπολογισμός των παραμέτρων της συνάρτησης μεταφοράς.

κλίση S	0.015	
D65	80	(mm) D65 του υλικού κοίτης
D50	45	(mm) D50 του υλικού κοίτης
b	7	(m) πλάτος ενεργής διατομής
τr	24	(Pa) Συρτική τάση αναφοράς
τ*r	0.033	Αριθμός Shields αναφοράς

Μετρημένη Q (m^3/s)	Μετρημένη Qs (m^3/s)	τ' (Pa)	τ'/τr -	qs (m^2/s)	W* -	Μετρημένη Q (cfs)	Μετρημένη Qs (tons/day)	b εν. διατομή θεωρηθείσα	Μετρημένη Qs tonnes/day
0.47	4.25E-09	9.0	0.38	6.07E-10	1.14E-05	16.53	0.00		0.000963
2.63	3.67E-06	18.7	0.78	5.24E-07	3.32E-03	92.84	0.92		0.831066
2.00	2.60E-06	16.7	0.69	3.71E-07	2.80E-03	70.63	0.65		0.589065
8.33	8.82E-05	30.4	1.27	1.26E-05	3.86E-02	294.20	22.22	5	20
4.22	1.32E-05	22.8	0.95	1.89E-06	8.89E-03	149.00	3.33	3.5	3





k	0.788
m	0.281

$$U = kQ^m$$

Επιμερισμός τάσης

$$\tau' = 17\left(SD_{65}\right)^{1/4} U^{3/2}$$

$$\tau' = 17\,k^{3/2}\left(SD_{65}\right)^{1/4} Q^{3m/2}$$

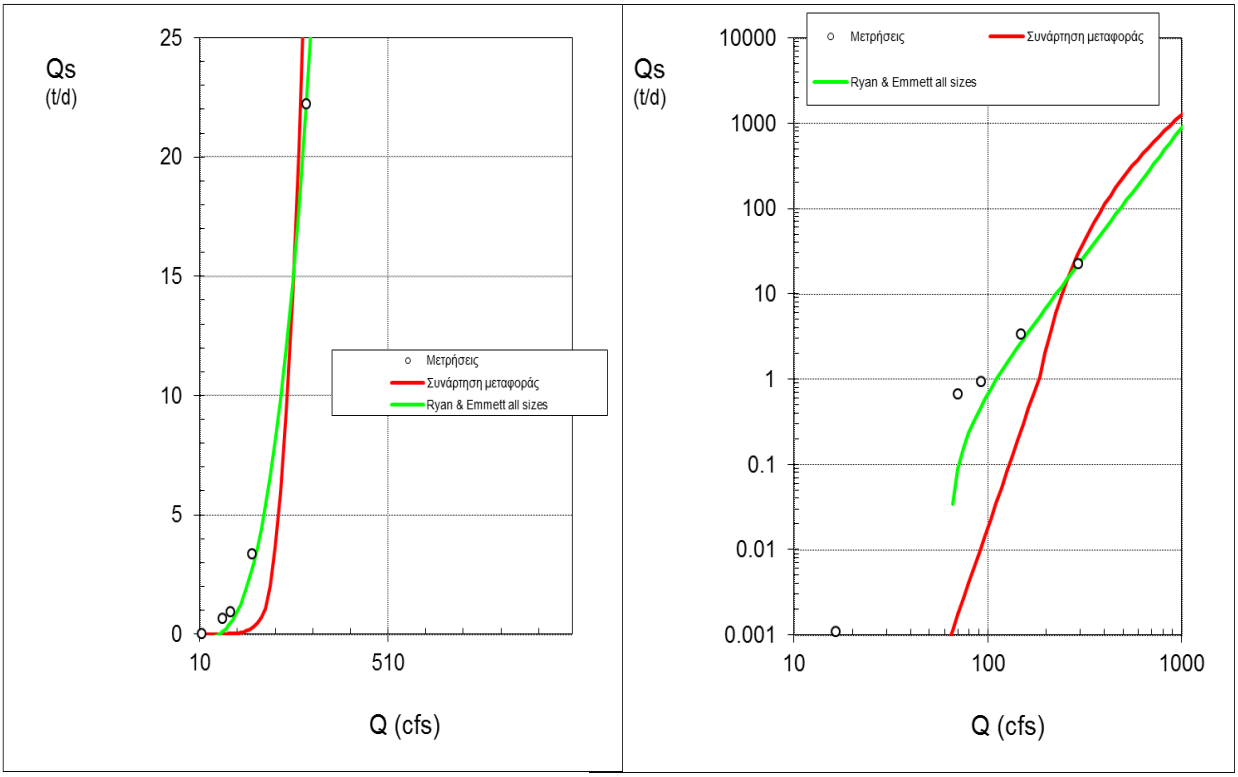
Συνάρτησημεταφοράς

$$W^* = 11.2\left(1 - 0.846\frac{\tau_r}{\tau}\right)^{4.5} \quad \text{for} \quad \frac{\tau}{\tau_r} > 1$$

$$W^* = 0.0025\left(\frac{\tau}{\tau_r}\right)^{14.2} \quad \text{for} \quad \frac{\tau}{\tau_r} < 1$$

$$W^* = \frac{(s-1)gq_s}{(\tau/\rho)^{1.5}}$$

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί, η εξίσωση αυτή είναι μια παραλλαγή της δικλασματικής συνάρτησης μεταφοράς επιφανειακού στρώματος δύο μεγεθών άμμου-χαλίκων του Wilcock (2001). Στο Σχήμα 4-69 φαίνεται πως οι μετρημένες τιμές προβλέπονται με αρκετή ακρίβεια από την εξίσωση Ryan & Emmett.



Σχήμα 4-69 Σύγκριση των εξισώσεων με τις μετρήσεις σε ημιλογαριθμική (αριστερά) και λογαριθμική κλίμακα (δεξια). Η συνάρτηση μεταφοράς (κόκκινη γραμμή) είναι η Wclb2 (Wilcock calibrated 2). Η πράσινη γραμμή είναι η εξίσωση Ryan – Emmett.

4.7.3 Εξισώσεις του BAGS

Το BAGS είναι ένα πρόγραμμα που ενσωματώνει εξισώσεις ειδικά για αλλουβιακά ποτάμια ορεινού χαρακτήρα με αδρομερείς πυθμένες. Απο τις εξισώσεις που περιλαμβάνει επιλέχτηκαν αυτές που βασίζονται στην κατανομή του επιφανειακού στρώματος (στρώμα θωράκισης), δηλαδή των αδρομερέστερων κλασμάτων στον πυθμένα του ρεύματος. Αυτές οι εξισώσεις είναι η Parker 1990, Wilcock 2001, Wilcock – Crowe 2003 από τις οποίες η δευτερη βασίζεται στις ίδιες αρχές με την βαθμονομημένη Wilcock. Δοκιμάστηκαν έτσι συνολικά 5 εξισώσεις, οι Ryan and Emmett, Wilcock clb, Wilcock clb2, Parker 1990 και Wilcock – Crowe 2003 οι οποίες θα ονομάζονται συντομογραφικά RE, Wclb, Wclb2, P90,

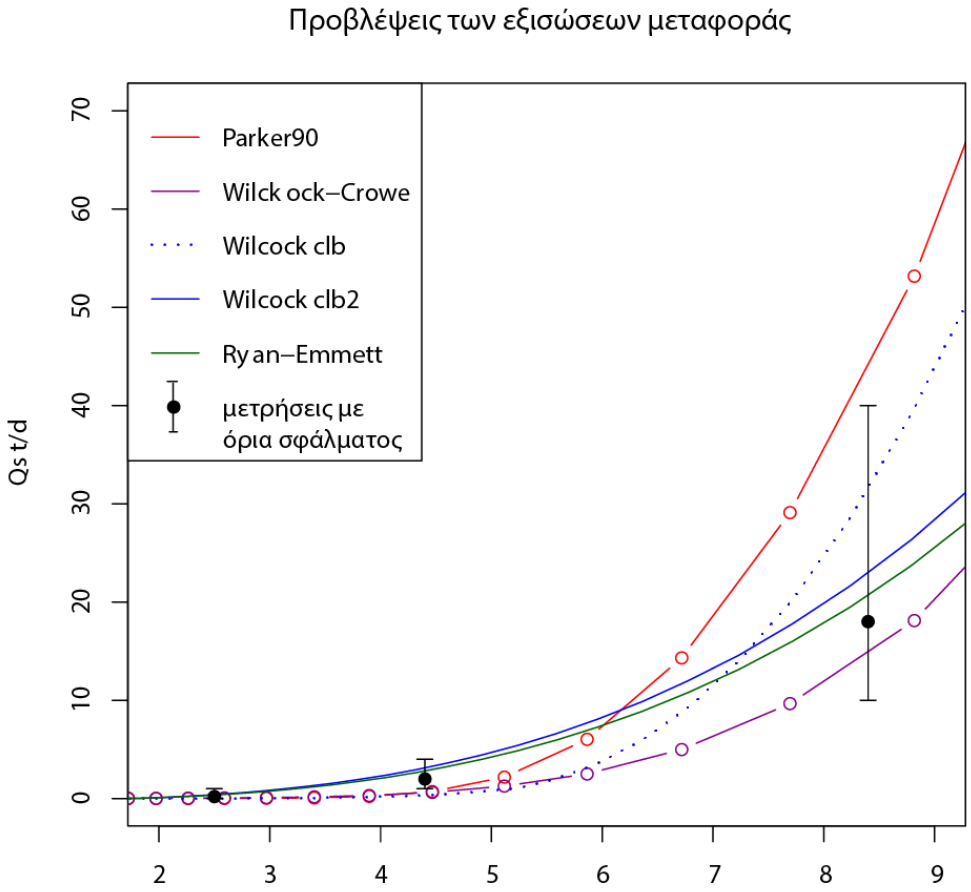
WC. Προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα των εξισώσεων αυτών, τρέξανε με τα ίδια δεδομένα εισόδου, τα οποία δίνονται στον Πίνακα 4-17.

Πίνακας 4-17 Τα δεδομένα εισόδου στις εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο BAGS.

Είσοδοι	*Εξισώσεις*	*Τιμές - παρατηρήσεις*
Μέση κλίση, S	Wclb, Wclb2, P90, WC	0.015 (1.5%)
n Manning	Wclb, Wclb2, P90, WC	0.05
Κατανομή ιζήματος		D16 = 23.24 / D50 = 62.49
επιφανείας	Wclb, Wclb2, P90, WC	D84 = 116.84 / Dmed=52.35
Μετρήσεις	Wclb, Wclb2	5 δείγματα

Πρέπει να σημειωθεί ότι από τις υπόλοιπες εξισώσεις, όπως τις Meyer – Peter & Muller, Kalinske, Einstein – Brown, Karim – Kennedy, Engelund & Hansen, Ackers – White, μόνο η τελευταία έδωσε αποτελέσματα κοντά στις μετρήσεις μας. Όλες οι άλλες υπερεκτιμούν κατά πολλές τάξεις μεγέθους την μεταφορά. Στο Σχήμα 4-70 συγκρίνονται οι προβλέψεις των 5 εξισώσεων με τις μετρημένες τιμές. Επειδή αυτές οι μετρήσεις ενέχουν ήδη μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας, παρουσιάζονται σαν εύρος από το ½ έως το διπλάσιο της μετρηθείσας ποσότητας.

Παρατηρείται ότι οι RE ,Wclb2, αλλά και η WC πλησιάζουν καλά στις μετρήσεις, η P90 πρέπει να θεωρείται σαν υπερπρόβλεψη, ενώ και η Wclb φαίνεται να αυξάνει πολύ τις προβλέψεις της μετά τα 8 m^3/s. Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που παρατηρείται είναι ότι οι RE και Wclb2 προβλέπουν ένα μικρό ρυθμό μεταφοράς στα 4.5 m^3/s ενώ οι άλλες ξεκινάνε αργότερα, από τα 4.5 m^3/s (P90) και 5 m^3/s (Wclb, WC). Από αυτή τη σύγκριση θεωρήθηκε ότι καλύτερα αποτελέσματα θα δώσουν οι RE και Wclb2, με την WC να εκπροσωπεί το κάτω όριο.



Σχήμα 4-70 Σύγκριση των 5 εξισώσεων πυθμενικού φορτίου με τις μετρήσεις.

4.8 ΓΕΩΡΟΕΣ – ΕΔΑΦΟΡΟΕΣ – ΡΗΧΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

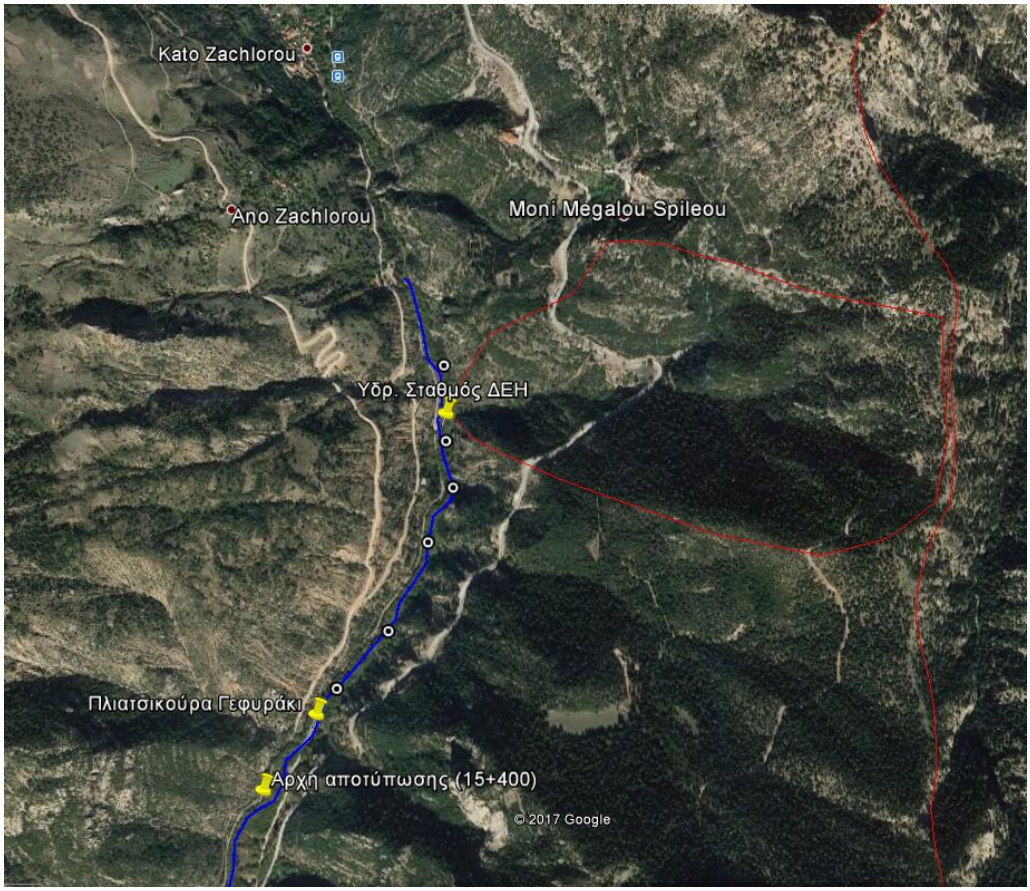
4.8.1 Ο προσχωματικός κώνος στην Ζαχλωρού

Ένα μεγάλο κομμάτι του μεταφερόμενου φορτίου από το ποτάμι προέρχεται από το υλικό που τακτικά αποθέτουν οι κατολισθήσεις στην κοίτη του. Στην θέση της ΔΕΗ πριν την Ζαχλωρού και περίπου 40 μ. κατάντη του σταθμού, εκβάλλει καταρρακτώδης παραπόταμος που αποθέτει μέσω γεωλισθήσεων μεγάλες ποσότητες αδρομερών φερτών υλικών πάνω στην κεντρική κοίτη, φράσοντας έτσι το μεγαλύτερό τμήμα της με ένα προσχωματικό ριπίδιο (Σχ. 4-73). Αυτές οι γεωλισθήσεις συμβαίνουν σχεδόν πάντοτε με τις πρώτες μεγάλες βροχές του φθινοπώρου, δηλαδή στα τέλη του Αυγούστου, ή μέσα στον Σεπτέμβριο (σύμφωνα και με τη μαρτυρία του παρατηρητή του σταθμού, Κ.Πλιατσικούρα). Υπήρξαμε και εμείς μάρτυρες αυτού του φαινομένου επί 4 συνεχόμενα χρόνια και έχουμε πειστεί ότι πρόκειται για ένα πρότυπο που επαναλαμβάνεται σχεδόν

κάθε χρόνο. Στο Σχήμα 4-72 παρουσιάζεται η θέση του και η λεκάνη απορροής του δικτύου του ποταμού που τον δημιούργησε. Η λεκάνη αυτή ξεκινά από τον υδροκρίτη, αλλά διακόπτεται από την οδό Διακοπτού – Καλαβρύτων. Σχεδόν κάθε χρόνο, μετά τις πρώτες ισχυρές βροχοπτώσεις του Σεπτεμβρίου, αποθέτει άφθονο υλικό, φτωχά ταξινομημένο, στην δεξιά όχθη του ποταμού (κοιτώντας κατάντη) αφήνοντας μόνο ένα στενό δίαυλο στην ροή του νερού. Η αποτύπωση του κώνου με το Laser scanner έδωσε την δυνατότητα ο όγκος να κυβιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια, και έτσι να υπάρχει μια μέτρηση για την ποσότητα του υλικού που μεταφέρεται συστηματικά, σχεδόν κάθε χρόνο, και προκυπτει από την διάβρωση μιας επιφάνειας μικρότερης από 1 km^2. Περίπου 200 στρ. είναι η έκτασή της κάτω από την επαρχιακή οδό.

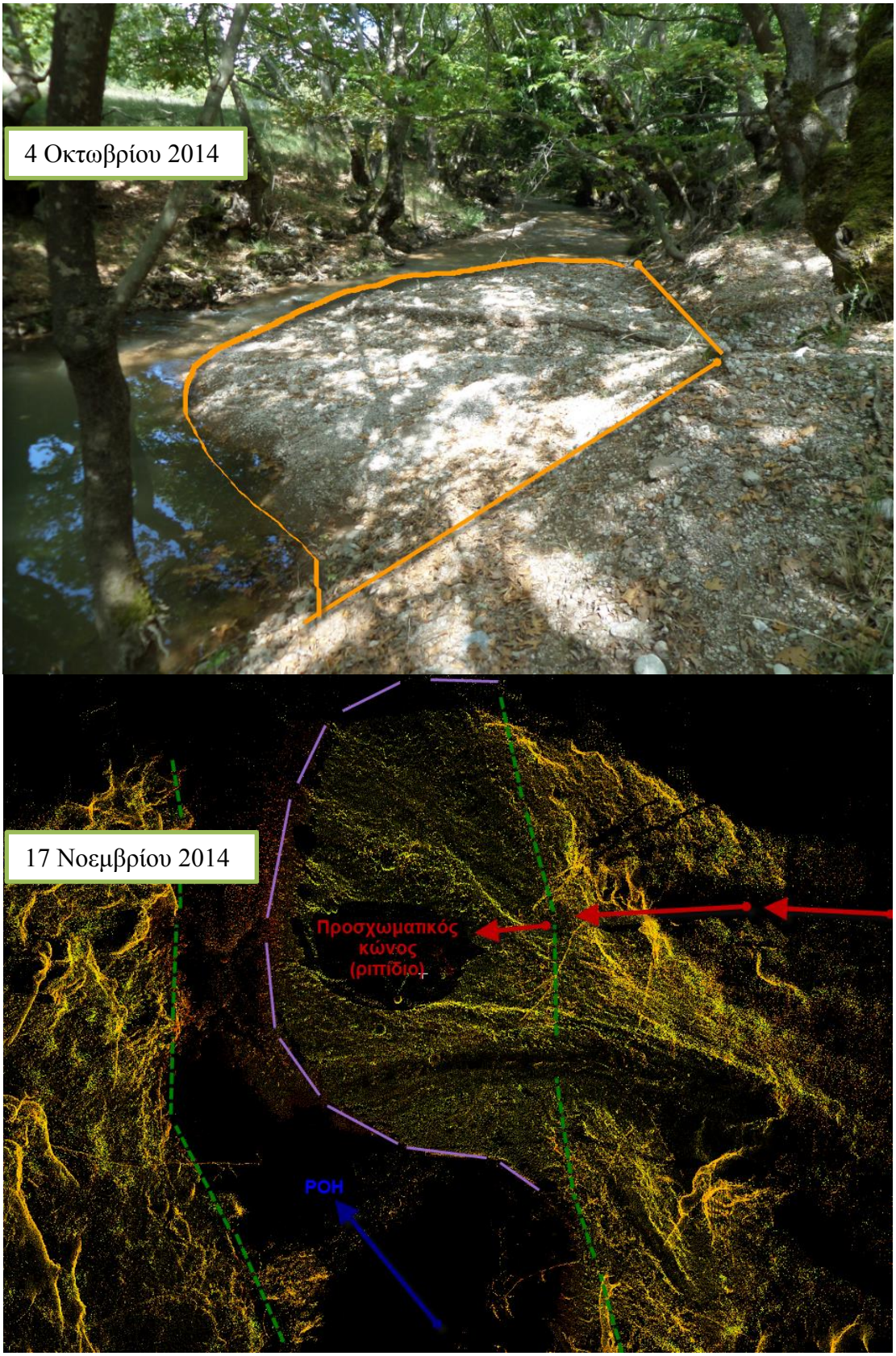
Σχήμα 4-71 Ο προσχωματικός κώνος στην αποτύπωση με το Laser scanner.

Με βάση την λεπτομερή αποτύπωση (Laser scanner), ο όγκος του υλικού του ριπιδίου σε πλήρη ανάπτυξη (όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-73) είναι περίπου 40 m^3. Όταν το ρεύμα είναι φραγμένο από το ριπίδιο τότε δημιουργείται καμπύλη υπερύψωσης η οποία αποτυπώνεται στις αναγνώσεις του δεύτερου σταθμήμετρου. Πράγματι, στην θέση, για αρκετά μεγάλο διάστημα, γίνονταν αναγνωσεις από δύο σταθμήμετρα. Οταν δεν είναι φραγμένη η θέση, όπως μας είπε ο παρατηρητής της θέσης, Κ.Πλιατσικούρας, στο δεύτερο σταθμήμετρο διαβάζονται περίπου 10 εκατοστά παραπάνω. Όταν υπάρχει καμπύλη υπερύψωσης η διαφορά στις δύο αναγνώσεις υπερβαίνει τα 15 εκ. Αυτή η ευτυχής συγκυρία δίνει την δυνατότητα να παρατηρήσουμε την δημιουργία και εξάλειψη του προσχωματικού κώνου σε ετήσια βάση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-74.

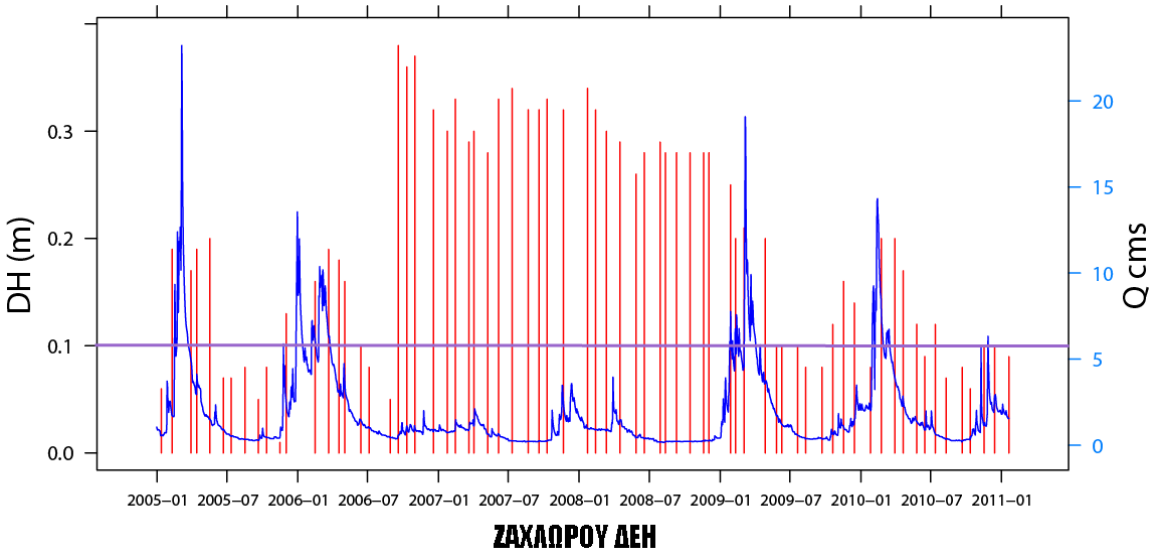


Σχήμα 4-72 Η λεκάνη που τροφοδοτεί τον προσχωματικό κώνο κατάντη του υδρομετρικού σταθμού της ΔΕΗ έχει έκταση λίγο μικρότερη από ένα τετραγωνικό χιλιόμετρο (~0.9 km^2) ενώ κάτω από την επαρχιακή οδό Καλαβρύτων – Διακοφτού είναι μικρότερο από μισό τετραγωνικό χιλιόμετρο.

Παρατηρώντας το Σχήμα 4-74 βγαίνει το συμπέρασμα ότι το υλικό που αποτέθηκε τον Οκτώβριο του 2006 δεν απομακρύνθηκε παρά δύο χρόνια αργότερα, τον Ιανουάριο του 2009. Εντύπωση προκαλεί επίσης ότι η εκτόνωση δεν συμβαίνει αμέσως μετά τις πλημμύρες των Ιανουαρίου – Φεβρουαρίου, αλλά απαιτείται επιπλέον χρόνος, ως εάν το ριπίδιο να επιμένει και μετά τις μεγάλες παροχές. Με την πρώτη ματιά η περίοδος επαναφοράς του φαινομένου είναι 2 φορές στα 3 χρόνια. Ωστόσο, για να γίνουν πιο λεπτομερείς υπολογισμοί πρέπει να εφαρμοστούν οι εξισώσεις και για την θέση αυτή. Η κυριώτερη σημαντική διαφορά που έχει η θέση της Ζαχλωρούς ΔΕΗ από την Γ. Πλιατσικούρα είναι η κατα μήκος κλίση, που στη θέση της ΔΕΗ είναι περίπου 1%, μικρότερη απο αυτή στην Γ. Πλιατσικούρα (1.5%).



Σχήμα 4-73 Επάνω, φωτογραφία του κώνου που δημιουργείται από τις εδαφοροές μετά τις πρώτες βροχές του Σεπτεμβρίου – Οκτωβρίου. Κάτω, σε κάτοψη, η επιφάνεια του κώνου έναν μήνα αργότερα, από την αποτύπωση με το Laser scanner. Ο κώνος έχει μείνει σχεδόν άθικτος. Εάν η χρονιά είναι φτωχή σε βροχές ένα μεγάλο μέρος του κώνου μπορεί να παραμείνει.



Σχήμα 4-74 Χρονοσειρά υψομετρικής διαφοράς των αναγνώσεων των δύο σταθμημέτρων. Όταν η διαφορά υψομέτρων (DH) είναι μεγαλύτερη από ~ 0.1m τότε το ρεύμα είναι μερικά φραγμένο από το ριπίδιο στα κατάντη. Οι ημερομηνίες των αναγνώσεων είναι αυτές των υδρομετρήσεων της ΔΕΗ.

Σε κάθε περίπτωση το προσφερόμενο υλικό από τις πλαγιές στην μελετούμενη περιοχή (κατάντη της Κερπινής, κατώτερο τμήμα του Βουραϊκού) είναι πολύ μεγάλο εφόσον 250 στρέμματα αποθέτουν μέσω γεωλισθήσεων στη κοίτη του ποταμού από, περίπου, 50 έως 80 τόνους (40 κυβικά επί 2650 επί, έστω 0.5 έως 0.7, -πορώδες-) τον χρόνο. Επομένως, το ποτάμι σε αυτό του το μήκος είναι οπωσδήποτε περιοριζόμενο από την μεταφορά (transport limited).

4.9 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΚΑΙ ΦΩΤΟΕΡΜΗΝΕΙΑΣ

Είναι γνωστό ότι σήμερα στην Ελλάδα δεν διεξάγονται μετρήσεις αιωρούμενου φορτίου από καμμιά υπηρεσία ή οργανισμό. Οι δημοσιευμένες μελέτες βασίζονται ως επί το πλείστον σε μοντέλα και σπανιότερα σε μετρήσεις (δες και Εδάφιο 1.5.6, *'Ερευνες εδαφικής απώλειας στον Ελληνικό χώρο*), και έτσι η αξιοπιστία τους είναι περιορισμένη. Ο ερευνητής που βρίσκεται ενώπιον αυτής της έλλειψης είναι αναγκασμένος να προσφύγει σε άλλες μεθόδους. Και αυτές δεν μπορεί να είναι άλλες από τις τεχνικές τηλεπισκόπησης και φωτοερμηνείας που έχουν πολλαπλασιαστεί την τελευταία 20ετία, ωφελούμενες από την πληθώρα των δορυφόρων και των δορυφορικών δεδομένων που προσφέρονται πλέον ως επί το πλείστον δωρεάν, καθώς και από την πρόοδο στα λογισμικά τηλεπισκόπησης και ΓΣΠ. Έτσι, και η παρούσα έρευνα στράφηκε αναγκαστικά προς μία τέτοια κατεύθυνση. Η

αρχική ιδέα ήταν η ποιοτική -κατ' αρχάς- εκτίμηση και σύγκριση των χαρακτηριστικών των πλουμίων του Βουραϊκού ποταμού (ένταση του φαινομένου, συχνότητα εμφάνισης και εποχιακότητα) με αυτά των γειτονικών του ποταμών της βόρειας Πελοποννήσσου (Σελινούς, Κράθης, Κριός) στο διάστημα μιας 10ετίας (δηλαδή της χρονικής περιόδου μεταξύ των ετών 2004 και 2013 για την οποία είναι διαθέσιμα τα υδρολογικά – μετεωρολογικά δεδομένα από την ΔΕΗ). Η δυνατότητα όμως λήψης δορυφορικών εικόνων από μια πολύ μεγαλύτερη σε έκταση περιοχή καθώς και το γεγονός ότι η επεξεργασία για αυτήν την μεγαλύτερη περιοχή δεν απαιτεί πολύ περισσότερο χρόνο, οδήγησε στην απόφαση να επεκταθεί η περιοχή έρευνάς. Έτσι λοιπόν η συγκεκριμένη μεθοδολογία εφαρμόστηκε για 21 ποταμούς της Ελληνικής επικράτειας (όπου βρίσκεται η εκβολή τους) και 2 ακόμα της Αλβανίας. Αυτή η διευρυμένη πειραματική βάση παρέσχε μεγάλες δυνατότητες στην αναλυτική έρευνα και την αναζήτηση συσχετίσεων. Τα ερευνητικά ερωτήματα που καλείται να απαντήσει η τηλεπισκοπική έρευνα συνοψίζονται στα εξής:

1. Πως συγκρίνονται οι ποταμοί μεταξύ τους σε ότι αφορά το αιωρούμενο φορτίο τους;
2. Υπάρχουν διαφορές ως προς το αιωρούμενο φορτίο μεταξύ ποταμών διαφορετικών περιοχών, πχ αυτοί της δυτικής Ελλάδας με αυτούς της ανατολικής Ελλάδας;
3. Ποιοί είναι οι μήνες με τη μεγαλύτερη παραγωγικότητα σε αιωρούμενο ιζημα – υπάρχει ετήσιο πρότυπο και ποιό – διαφέρει απο ποτάμι σε ποτάμι;
4. Ποιές είναι οι υδρολογικές χρονιές με τη μεγαλύτερη παραγωγικότητα σε αιωρούμενο φοτίο;
5. Σχετίζονται αυτές με τις βροχοπτώσεις ή/και τις παροχές;
6. Διαφαίνεται συσχέτιση του αιωρούμενου ιζήματος με άλλα χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής όπως χρήσεις γης, γεωλογία, μορφολογικές κλίσεις και ανάγλυφο, μέση θερμοκρασία του αέρα, πυρκαγιές κ.ά;
7. Ποιά η βεβαιότητα των αποτελεσματων της εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθοδολογίας;

Πρόκειται επομένως για μια πρωτογενή έρευνα, με την έννοια ότι δεν θεωρείται τίποτα δεδομένο (δεν υπάρχουν παραδοχές), αλλά επιχειρείται να γίνει καταγραφή και σύγκριση των συγκεντρώσεων αιωρούμενου ιζήματος, μέσω ανάλυσης δορυφορικών εικόνων, σε επιλεγμένες περιοχές, αυτές των εκβολών των ποταμών στα παράκτια ύδατα

της Ελλάδας. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να θεωρηθούν και ως πειραματικά δεδομένα. Η προτεινόμενη πρωτότυπη αυτή έρευνα, θα φανεί βοηθητική στην αξιολόγηση μοντέλων αιωρούμενων ιζημάτων σε λεκάνες απορροής.

4.9.1 Δέκτες και προϊόντα MODIS

Καθώς το σύνολο των προϊόντων προέρχονται από τον δέκτη MODIS, θα περιγραφεί παρακάτω σύντομα ο δέκτης αυτός, τα χαρακτηριστικά του καθώς και τα δορυφορικά προϊόντα που παράγονται από αυτόν.

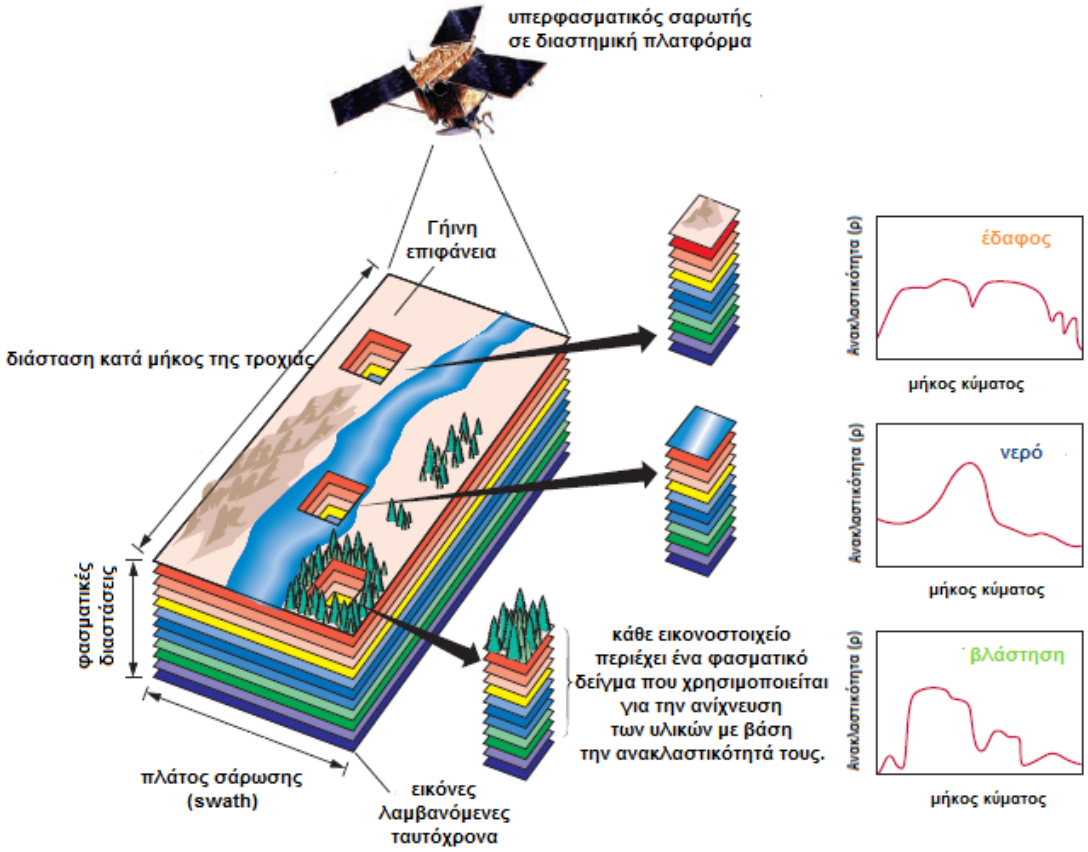
Ο υπερφασματικός δέκτης MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) είναι το βασικό καταγραφικό όργανο πάνω στις πλατφόρμες (δορυφόρους) Terra και Aqua. Οι δορυφόροι αυτοί είναι τμήμα του προγράμματος EOS (Earth Observing System) της NASA που περιλαμβάνει και άλλα καταγραφικά όργανα και δορυφόρους, όπως οι δέκτες CZCS, AVHRR και HIRS. Η τροχιά του δορυφόρου Terra είναι ηλιοσύγχρονη, έτσι σχεδιασμένη ώστε να περνά πάνω από τον ισημερινό με κατεύθυνση από τον βορρά προς το νότο το πρωί (μεσο-πρωϊνή τροχιά καθόδου), ενώ ο Aqua διέρχεται πάνω από τον ισημερινό με κατεύθυνση από νότο προς βορρά, το απόγευμα (μεσο-απογευματινή τροχιά ανόδου). Σε μία ηλιοσύγχρονη τροχιά ο δορυφόρος περνά πάνω από τον ισημερινό την ίδια ώρα και έτσι αποφεύγεται η σύγχυση από το διαφορετικό μέγεθος/προσανατολισμό των σκιών. Και οι δύο δορυφόροι, ο Terra MODIS και ο Aqua MODIS, καλύπτουν έτσι ολόκληρη την επιφάνεια της Γης κάθε 1-2 ημέρες, καταγράφοντας δεδομένα σε 36 φασματικά κανάλια (Πιν.4-19) ή σε εύρος μήκους κύματος από 0.4 έως 14.4 μm (Σχ. 4-75). Το πλάτος της λωρίδας καταγραφής (swath) είναι 2330 km ενώ η ραδιομετρική τους διακριτική ικανότητα είναι 12bits (2^{12}=4096 διαβαθμίσεις του γκρίζου). Η χωρική διακριτική τους ικανότητα εξαρτάται από το κανάλι: για τα δύο πρώτα κανάλια (κόκκινο και υπέρυθρο) είναι 250m, για τα κανάλια 3-7 (όπου περιλαμβάνονται και το πράσινο και το μπλέ) είναι 500m, ενώ για τα υπόλοιπα 29 κανάλια είναι 1km (Salomonson et al., 2006). Σύμφωνα με τη μπροσούρα του (NASA, 2005), «*ο MODIS παίζει έναν ζωτικό ρόλο στην ανάπτυξη αξιολογημένων, παγκόσμιας εμβέλειας διαδραστικών μοντέλων ικανών να προβλέπουν τις παγκόσμιες μεταβολές με τέτοια ακρίβεια ώστε να υποστηρίζουν τις πολιτικές αποφάσεις που αφορούν την προστασία του περιβάλλοντος*». Περίπου 150 (!) προϊόντα (products) παράγονται από τις παρατηρήσεις των αισθητήρων MODIS στους δορυφόρους Terra και Aqua και διατίθενται δωρεάν στους ερευνητές (δες Πίνακα 4.19). Τα προϊόντα αυτά καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα γεωφυσικών μεταβλητών σχετικών με την

ξηρά, τον ωκεανό και την ατμόσφαιρα, μεταβλητών απαραίτητων για την μελέτη των διεργασιών και τάσεων του δυναμικού συστήματος της Γης. (Salomonson et al., 2006).

Τα διάφορα προϊόντα κατηγοριοποιούνται στη βάση της επεξεργασίας που έχουν υποστεί. Η έννοια του σταδίου επεξεργασίας ή *επιπέδου του προϊόντος* αναφέρεται ακριβώς στον βαθμό επεξεργασίας που έχει υποστεί το πρωτογενές προϊόν. Τα επίπεδα αυτά είναι τα παρακάτω:

1. Level 0: πρωτογενείς μετρήσεις ακτινοβολίας (raw radiance counts) στον αισθητήρα.
2. Level 1A: βαθμονομημένα δεδομένα Level-0 (Level-0 data with appended calibration and navigation data, instrument and spacecraft telemetry)
3. Level 1B: βαθμονομημένες ακτινοβολίες στο ύψος του αισθητήρα (calibrated radiances at sensor level). Αυτό το «ύψος» ονομάζεται και κορυφή της ατμόσφαιρας (TOA, Top Of Atmosphere).
4. Level 2: τιμές γεωφυσικών παραμέτρων που έχουν προέλθει από το επίπεδο Level-1A με βαθμονόμηση αισθητήρα, ατμοσφαιρικές διορθώσεις και βιο-οπτικούς αλγόριθμους.
5. Level 3: ομαδοποιημένα κατά χρόνο και τόπο και γεωαναφερμένα σε κάποιο προβολικό σύστημα. Το προβολικό σύστημα όπου αποθηκεύονται τα προϊόντα MODIS είναι το GOODES SINUSOIDAL.
6. Level 4: προϊόντα επιπέδου 3 μετά την εφαρμογή μοντέλων.

Τα προϊόντα επιπέδου 1A και 1B είναι τα βασικά πρωτογενή δεδομένα από τα οποία παράγονται όλα τα υπόλοιπα και είναι αυτά που συνήθως επιλέγουν οι ερευνητές (κυρίως τα 1B) εάν θέλουν να αναπτύξουν τους δικούς τους αλγόριθμους επεξεργασίας.



Σχήμα 4-75 Σχηματική διάταξη λειτουργίας υπερφασματικού σαρωτή (MODIS) και φασματικές υπογραφές κάποιων βασικών υλικών.

Πέραν του επιπέδου επεξεργασίας, άλλο χαρακτηριστικό των προϊόντων είναι η συλλογή που ανήκουν. *Συλλογή (collection)* ονομάζεται, χονδρικά, κάθε ομάδα προϊόντων που έχουν παραχθεί με έναν συγκεκριμένο αλγόριθμο (ή μάλλον με μια διαδοχή αλγορίθμων, μια συγκεκριμένη και πάντα ίδια ροή εργασιών). Καθώς η επιστημονική έρευνα προχωρά και καθώς νέα όργανα και πλατφόρμες αλλά και νέοι επίγειοι σταθμοί επαλήθευσης (ground truthing) εισέρχονται στο στάδιο παραγωγής, (πολλά προϊόντα προέρχονται από δεδομένα πολλών οργάνων) οι αλγόριθμοι μεταβάλλονται και βελτιώνονται. Όταν κριθεί ότι οι βελτιώσεις είναι τέτοιες που μπορούν να δικαιολογήσουν μια νέα συλλογή, τότε όλο το προηγούμενο πρωτογενές υλικό επανεπεξεργαζεται από τους νέους αλγόριθμους και εκδίδεται σε μια νέα συλλογή.

4.9.2 Μεθοδολογία

Σκοπός της τηλεπισκοπικής εργασίας ήταν η ποιοτική - συγκριτική, κατ'αρχάς, διερεύνηση της στερεοαπορροής αιωρούμενου υλικού των ποταμών μέσω της μελέτης των πλουμίων αιωρούμενου ιζήματος που σχηματίζονται στην θαλάσσια περιοχή της εκβολής τους κατά τη διάρκεια πλημμυρικών γεγονότων. Αυτό επιτυγχάνεται εξετάζοντας δύο πτυχές του φαινομένου: την έκταση που καταλαμβάνουν τα πλούμια και τη χρονική τους εξέλιξη αφενός, και αφετέρου την συγκέντρωση των αιωρούμενων μέσα στο πλούμιο. Με βάση την ανάπτυξη στις προηγούμενες ενότητες, η πρώτη διεργασία μπορεί να μελετηθεί με *μάσκες* πλουμίων ενώ η δεύτερη με κάποιους *δείκτες* αιωρούμενου ιζήματος. Οι δύο αυτές διεργασίες δεν είναι ανεξάρτητες (τόσο η κατασκευή της μάσκας όσο και οι τιμές των δεικτών εξαρτώνται από τις τιμές ανακλαστικότητας στα ίδια, πολλές φορές, κανάλια), οπότε απαιτείται επιπλέον μια μεθοδολογία απο-σύνδεσης.

Η έρευνα έκανε χρήση δύο τύπων προϊόντων MODIS, με ξεχωριστή επεξεργασία για το καθένα. Το πρώτο είναι τα MOD02QKM και MOD02HKM επιπέδου 1B και το δεύτερο είναι το MOD09Q1 επιπέδου 3 (https://lpdaac.usgs.gov/products/mod09q1v006/). Το προϊόν MOD09Q1 είναι ένα σύνθετο 8 ημερών για το οποίο ανακτήθηκε ολόκληρη η διαθέσιμη μέχρι σήμερα (2000-2019) σειρά. Αυτό το προϊόν είναι ατμοσφαιρικά διορθωμένο και παρέχει τις τελικές τιμές της ανακλαστικότητας (την «καλύτερη» ή πιο «ασφαλή» εκτίμηση μέσα στο 8ήμερο) σε δύο κανάλια (κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο), σε χωρική ανάλυση 250 μέτρων. Στο προϊόν αυτό οι δυνατότητες σχηματισμού δεικτών αλλά και μασκών είναι λιγότερες λόγω των δύο μόνο καναλιών που αυτό παρέχει. Από την άλλη όμως αποζημιώνει με την πλήρη κάλυψη όλης της χρονικής περιόδου και από το γεγονός ότι είναι ήδη ατμοσφαιρικά διορθωμένο και έτοιμο για ανάλυση (analysis ready sample).

Πίνακας 4-18 Κανάλια του MODIS και κύρια χρήση τους (Κανάλια 1- 19 σε nm και με SNR = Signal-to-noise ratio . Κανάλια 20 - 36 σε μm και με NE(Δ)T = Noise-equivalent temperature difference). Μονάδες ακτινοβολίας: W/m^2 μm sr. (https://modis.gsfc.nasa.gov/)

Κύρια χρήση	Κανάλι	Εύρος	Φασματική ακτινοβολία	Απαιτούμενο SNR/ NE(Δ)T (20-36)
Ξηρά/νέφη/αεροζόλ όρια	1	620 - 670	21.8	128
	2	841 - 876	24.7	201
Ξηρά/νέφη/αεροζόλ ιδιότητες	3	459 - 479	35.3	243
	4	545 - 565	29.0	228
	5	1230 - 1250	5.4	74
	6	1628 - 1652	7.3	275
	7	2105 - 2155	1.0	110
Θαλάσσιο χρώμα/ Φυτοπλανκτόν/ Βιογεωχημεία	8	405 - 420	44.9	880
	9	438 - 448	41.9	838
	10	483 - 493	32.1	802
	11	526 - 536	27.9	754
	12	546 - 556	21.0	750
	13	662 - 672	9.5	910
	14	673 - 683	8.7	1087
	15	743 - 753	10.2	586
	16	862 - 877	6.2	516
Ατμοσφαιρικοί Υδρατμοί	17	890 - 920	10.0	167
	18	931 - 941	3.6	57
	19	915 - 965	15.0	250
Επιφάνεια/νέφη Θερμοκρασίες	20	3.660 - 3.840	0.45(300K)	0.05
	21	3.929 - 3.989	2.38(335K)	2.00
	22	3.929 - 3.989	0.67(300K)	0.07
	23	4.020 - 4.080	0.79(300K)	0.07
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	24	4.433 - 4.498	0.17(250K)	0.25
	25	4.482 - 4.549	0.59(275K)	0.25
Νέφη Cirrus υδρατμοί	26	1.360 - 1.390	6.00	150(SNR)
	27	6.535 - 6.895	1.16(240K)	0.25
	28	7.175 - 7.475	2.18(250K)	0.25
Ιδιότητες νεφών	29	8.400 - 8.700	9.58(300K)	0.05
Όζον	30	9.580 - 9.880	3.69(250K)	0.25
Επιφάνεια/νέφη Θερμοκρασίες	31	10.780 - 11.280	9.55(300K)	0.05
	32	11.770 - 12.270	8.94(300K)	0.05
Υψόμετρο κορυφών νεφών	33	13.185 - 13.485	4.52(260K)	0.25
	34	13.485 - 13.785	3.76(250K)	0.25
	35	13.785 - 14.085	3.11(240K)	0.25
	36	14.085 - 14.385	2.08(220K)	0.35

Πίνακας 4-19 Κύρια προϊόντα του MODIS (https://modis.gsfc.nasa.gov/)

ΠΡΟΪΟΝ	ΧΩΡΙΚΗ / ΧΡΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ
Μάσκα νέφωσης ***Cloud mask***	Σε ανάλυση 250m και 1000m την ημέρα και 1000m την νύχτα
Συγκέντρωση αερολυμάτων και οπτικές ιδιότητες ***Aerosol concentration and optical properties***	Σε ημερήσια ανάλυση
Ιδιότητες νεφών ***Cloud properties***	Οπτικό βάθος, ενεργός ακτίνα σωματιδίων, θερμοδυναμική φάση, υψόμετρο κορυφής νεφών, θερμοκρασία κορυφής νεφών, ανακλαστικότητα στρωμάτων σε ανάλυση 1-5 km την ημέρα και 5 km την νύχτα
Ολικό κατακρημνίσιμο νερό ***Total precipitable water***	Σε ανάλυση 1-5 km κατά την διάρκεια της ημέρας και 5 km την νύχτα.
Βλάστηση–φυτοκάλυψη και κάλυψη γης, συνθήκες και παραγωγικότητα ***Vegetation and land-surface cover, conditions, and productivity***	❖ Ανακλαστικότητα επιφανείας σε ανάλυση 250 m,500 m,1km ❖ Δείκτες βλάστησης διορθωμένοι για την επίδραση της ατμόσφαιρας, του εδάφους, την πόλωση του φωτός και τις επιδράσεις διεύθυνσης σε ανάλυση 250 m και 500 m ❖ Κάλυψη γης: • Παγκόσμια, 1-km IGBP κατάταξη καλύψεων γης • Συνεχή πεδία βλάστησης (Vegetation continuous fields), κλάσματα χρήσεων γης στο εικονοστοιχείο (sub-pixel land cover components) • Μετατροπή φυτοκάλυψης (Vegetative cover conversion), Προειδοποίηση μεταβολής κάλυψης γης (global land cover change alarm) σε ανάλυση 250 m • Καθαρή Πρωτογενής παραγωγικότητα, δείκτης φυλλικής έκτασης, απορροφόμενη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (intercepted photosynthetically active radiation) σε ανάλυση1km
Πλεγματικά προϊόντα ατμόσφαιρας ***Gridded atmosphere products***	Σε ανάλυση 10° παγκόσμια, για περίοδο ημερήσια, 8-ημερη και μηνιαία.
Φωτιά και θερμικές ανωμαλίες ***Fire and thermal anomalies***	Σε ανάλυση 1-km
Χιόνι και κάλυψη θαλάσσιου πάγου και ανακλαστικότητα ***Snow and sea-ice cover and reflectance***	Σε ανάλυση 500-m και 5-km στο πλέγμα κλιματικής προσομοίωσης (Climate Modeling Grid)
Θερμοκρασία επιφάνειας ***Surface temperature*** Θερμοκρασία ατμόσφαιρας και προφίλ υδρατμών ***Atmospheric temperature and water vapor profiles***	Σε ανάλυση 1-ημέρα και νύχτα, επιδερμική θερμοκρασία και θερμοκρασία όγκου (skin and bulk) με στόχο απόλυτης ακρίβειας 0.3°C - 0.5°C πάνω από τους ωκεανούς και 1°C πάνω από την χέρσο; Οι θερμοκρασίες των ωκεανών διατίθενται ημερήσια σε ανάλυση 1 km (granules), και παγκόσμια σε ημερήσια, εβδομαδιαία και μηνιαία βάση και σε ανάλυση 4.6 km, 36 km, και 1°.
Ωκεάνιες και θαλάσσιες βιο-οπτικές ιδιότητες ***Ocean bio-optical properties including water-leaving radiances***	Σε ανάλυση 1-km ημερήσια και παραγωγικότητα σε ανάλυση 4.6 km, 36 km και 1°

4.9.3 Γεωγραφική έκταση της τηλεπισκοπικής έρευνας

Η γεωγραφική περιοχή για την οποία επιλέχτηκε να ανακτηθούν και επεξεργαστούν δορυφορικά δεδομένα για το προϊόν MOD02 είναι αρκετά μεγάλη και περιλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα του Ελληνικού χερσαίου χώρου και ένα μεγάλο τμήμα του θαλάσσιού χώρου (χάρτης του Σχ.4-76). Ορίζεται από τα γεωγραφικά πλάτη 36^o νότιο έως 41^o βόρειο και τα γεωγραφικά μήκη 21^o δυτικό έως 24^o ανατολικό. Οι λόγοι για αυτή την επιλογή είναι πολλοί, αλλά ο πιο σημαντικός είναι η αναγκαιότητα ύπαρξης μέσα στη σκηνή σημείων που θα χρησιμεύσουν για την σχετική ατμοσφαιρική διόρθωση των εικόνων, τόσο στη στεριά όσο και στη θάλασσα. Δεύτερος σημαντικός λόγος είναι η ύπαρξη στη σκηνή των εκβολών πολλών ποταμών της Ελλάδας, γεγονός που θα επιτρέψει μια συγκριτική μελέτη της στερεομεταφορικής ικανότητας καθενός από τα επιμέρους ποτάμια συστήματα. Στο γεωγραφικό αυτό πλαίσιο που επιλέχθηκε υπάρχουν οι εκβολές 17 ποταμών και ποταμοχειμάρρων.

Η έρευνα με το προϊόν MOD09Q1 συμπεριέλαβε συνολικά 23 εκβολές, προσθέτοντας τις εκβολές του Νέστου και του Έβρου σε Μακεδονία και Θράκη αντίστοιχα, τον Άραχθο και Αλιάκμονα καθώς και τους Αώο και Σεμάνι που εκβάλλουν στην Αλβανική ακτογραμμή. Οι δύο ποταμοί αυτοί χαρακτηρίζονται από την μεγαλύτερη στερεοαπορροή σε ολόκληρο τον μεσογειακό χώρο (Woodward, 1995, Simeoni et al., 1997).

Εντός του γεωγραφικού αυτού πλαισίου η καθ'αυτό περιοχή μελέτης περιορίζεται σε μια σχετικά μικρή επιφάνεια. Η έκταση της λεκάνης απορροής του Βουραϊκού ποταμού είναι 270 km^2 περίπου, και η στερεοπαροχή του του είναι αρκετά μικρή σε σχέση με άλλα ποτάμια της Ελλάδας. Αυτή η διαπίστωση καθώς και το γεγονός της εγγύτητας του με άλλους ποταμοχειμάρρους της περιοχής, πράγμα που δυσχεραίνει αντικειμενικά την διάκριση των πλουμίων τους, οδήγησε στην θεώρηση σαν περιοχής μελέτης όλης της περιοχής της ΒΑ Αχαίας που περιλαμβανει τις λεκάνες απορροής των ποταμών Σελινούντα, Βουραϊκού, Κράθι και Κριού. Η θεώρηση αυτή κρίθηκε σκόπιμη εξαιτίας της γειτνίασής τους καθώς και των παρόμοιων γεωλογικών, τεκτονικών, γεωμορφολογικών και κλιματολογικών χαρακτηριστικών τους. Εντός της ευρύτερης περιοχή μελέτης με έκταση ~ 1000 km^2, εξετάζεται κάθε ένας από αυτούς τους ποταμοχειμάρρους και ξεχωριστά. Η επιλογή αυτή (που, υπενθυμίζουμε, αφορά μόνο την επεξεργασία των προϊόντων MOD02) προϋποθέτει την παραδοχή ότι οι πλημμυρικές απορροές του Βουραϊκού, των οποίων τα

χαρακτηριστικά είναι γνωστά, θα είναι αντιπροσωπευτική των απορροών όλων των άλλων ποταμών της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

Σχήμα 4-76 Η περιοχή τηλεπισκοπικής έρευνας περιέλαβε 23 πολύγωνα πλουμίων (στον χάρτη με κόκκινο χρώμα) που αντιστοιχούν σε 21 ποταμούς του Ελλαδικού χώρου και 2 της Αλβανίας.

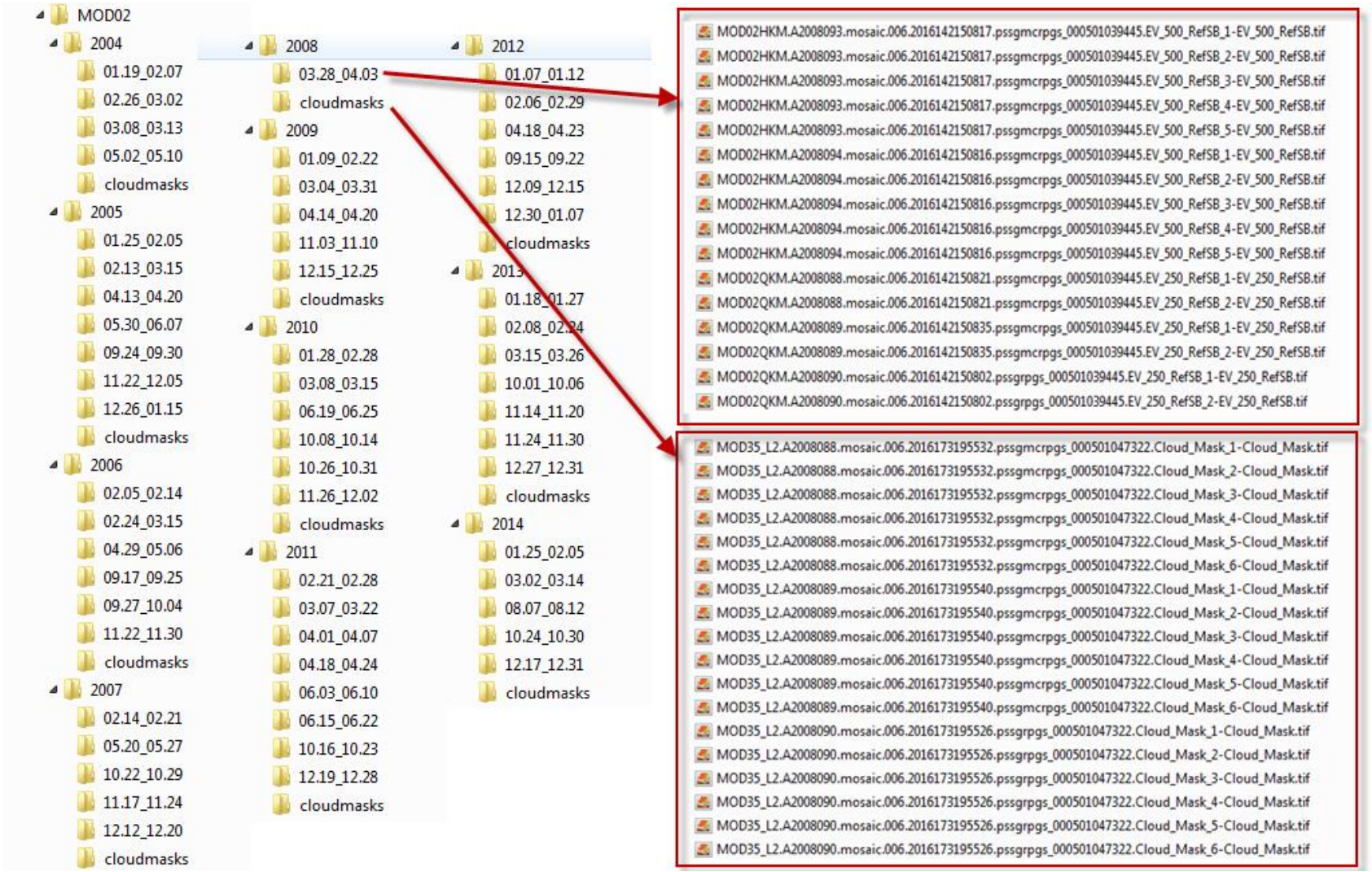
4.9.4 Επιλογή των πρωτογενών δορυφορικών δεδομένων

Με βάση τις αιχμές του υδρογραφήματος της θέσης Ζαχλωρού ΔΕΗ που κατασκευάστηκε για την χρονική περίοδο 2004 έως 2014 (11 έτη) επελέγησαν τα περιστατικά πλημμύρας. Η διάρκεια αυτών των περιστατικών υψηλών παροχών του ποταμού, που εφεξής θα αναφέρονται ως *επεισόδια*, ποικίλει από λίγες ημέρες έως και μερικές εβδομάδες. Για τις ημέρες κάθε επεισοδίου στη συνέχεια, αναζητήθηκαν και ανακτήθηκαν τα προϊόντα MOD02QKM και MOD02HKM από το LAADS (Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System) της NASA. Τα προϊόντα αυτά, επιπέδου 1B, περιέχουν τις φασματικές ακτινοβολίες των 7 πρώτων καναλιών του MODIS στο δέκτη. Από την ίδια διεύθυνση, επίσης ανακτήθηκε το προϊόν μάσκας νέφωσης του MODIS (MOD35) για τις ίδιες ημέρες. Συνολικά ανακτήθηκαν τα πρωτογενή αυτά δεδομένα για 669 ημέρες που ήταν μοιρασμένες σε 60 επεισόδια. Όπως αναφέρθηκε τα αρχεία είναι σε μορφή HDF. Ωστόσο, στο LAADS παρέχεται η δυνατότητα να αποθηκεύσει κανείς τα αρχεία σε μορφή Geotiff. Επιπλέον μπορεί κανείς να ζητήσει μεταεπεξεργασία (post-processing) των πρωτογενών αρχείων επιτυγχάνοντας:

- Αλλαγή προβολικού συστήματος
- Αποκοπή περιοχής ενδιαφέροντος (spatial subsetting)
- Επιλογή συγκεκριμμένων SDS, πχ ορισμένων μόνο φασματικών καναλιών (spectral subsetting)
- Δημιουργία μωσαϊκού (Mosaicking)
- Αλλαγή μορφής (format) αρχείων
- Φιλτράρισμα βάσει πχ ποσοστού νέφωσης στην εικόνα (δεν ζητήθηκε)

Η αποφυγή, μέσω της μεταεπεξεργασίας αυτής, ενός πολύ σημαντικού τμήματος της συνήθους αλυσίδας επεξεργασίας (που σχεδόν πάντα περιλαμβάνει τα παραπάνω στάδια) είναι πάρα πολύ σημαντική. Κάθε SDS κατεβαίνει σε ξεχωριστό αρχείο tif, οπότε απαιτείται η διαχείριση χιλιάδων αρχείων (Σχ. 4-7). Για την ακρίβεια, ο συνολικός αριθμός των αρχείων φθάνει τα 8697 (7 αρχεία - ένα για κάθε κανάλι) - συν τα αρχεία της μάσκας νέφωσης, 6 αρχεία για κάθε ημέρα = 13 αρχεία για κάθε ημέρα, επί 669 ημέρες =8697 αρχεία!). Ωστόσο, σε σχέση με την εξοικονόμηση χρόνου και αποφυγής λαθών που μπορεί να κάνει κανείς στη διαδικασία αυτή, η επιλογή αυτή είναι η ασφαλέστερη.

Προκειμένου για το προϊόν MOD09Q1, η ανάκτηση της πλήρους σειράς έγινε από το site ***Α**ρρ***EEARS** της NASA (Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples, https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears).



Σχήμα 4-77 Η δομή αποθήκευσης των πρωτογενών δεδομένων στο δίσκο. Κάτω από κάθε έτος βρίσκονται τα επεισόδιά του.Σε κάθε φάκελο επεισοδίου αποθηκεύονται τα αρχεία tif με τα δεδομένα επιπέδου 1Β έτσι όπως ανακτήθηκαν από το LAADS. Για κάθε ημέρα του επεισοδίου υπάρχουν 5 αρχεία MOD02HK (ανακλαστικότητες των καναλιών 3-7, ανάλυση 500 m) και 2 αρχεία MOD02QKM (ανακλαστικότητες των καναλιών 1-2, ανάλυση 250 m). Κάτω από το κάθε έτος βρίσκεται επίσης ο φάκελος cloudmasks όπου αποθηκεύτηκαν τα προϊόντα μάσκας νέφωσης (MOD35_L2) για όλες τις ημέρες όλων των επεισοδίων του έτους, 6 αρχεία για κάθε ημέρα. Όλα τα αρχεία έχουν μορφή geotiff.

4.9.5 Εφαρμογή της μεθόδου στη περιοχή μελέτης

Η εφαρμογή της διαδικασίας ραδιομετρικής κανονικοποίησης ή σχετικής ατμοσφαιρικής διόρθωσης απαιτεί την ύπαρξη 'φωτοσταθερών' σημείων στην εικόνα. Απαιτούνται δυο κατ'ελάχιστον σημεία, ένα φωτεινό και ένα σκοτεινό. Αναζητήθηκαν κατάλληλα τέτοια σημεία στο Google Earth. Πολύ βοηθητική σε αυτό αποδείχτηκε η λειτουργία historical imagery του Google Earth που επιτρέπει την πρόσβαση σε εικόνες παλαιότερων χρονολογιών. Και αυτό, διότι τα σημεία-περιοχές πρέπει να έχουν διατηρήσει τις ανακλαστικές ιδιότητές τους αμετάβλητες από το 2004 μέχρι και το 2014 τουλάχιστον, που είναι η χρονική διάρκεια της χρονοσειράς μας. Επιπλέον, κρίθηκε αναγκαία η επιλογή περισσότερων του ενός φωτεινών φωτοσταθερών ώστε να υπάρχει η δυνατότητα κανονικοποίησης περισσότερων εικόνω εφόσον, επιλέγοντας μόνο ένα, δεν θα μπορούσε να εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός στις περιπτώσεις που αυτό θα ήταν νεφοσκεπές. Η αναζήτηση έγινε με βάση τις εξής προϋποθέσεις / κριτήρια:

1. Οι περιοχές θα έπρεπε να έχουν έκταση τουλάχιστον ίση με 2 εικονοστοιχεία και να διακρίνονται ευκρινώς στην εικόνα. Η μέγιστη χωρική ανάλυση των εικονοστοιχείων μας είναι a = 500m (κανάλια 3-7) πράγμα που σημαίνει ότι η επιλεγείσα περιοχή θα πρέπει να έχει χοντρικά διαστάσεις 1.5 x1.5 km[11].
2. Το υψόμετρο της περιοχής δεν θα πρέπει να αφίσταται πολύ του υψομέτρου της περιοχής μελέτης, πραγμα που σημαίνει για την περίπτωσή μας ότι δεν θα πρέπει είναι πολύ μεγαλύτερο του μηδέν.
3. Εφόσον επιλέγονται περισσότερες της μιας περιοχές, αυτές θα πρέπει να είναι ευνοϊκά τοποθετημένες στην εικόνα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι εάν η μία είναι νεφοσκεπής η άλλη πρέπει να (έχει αρκετές πιθανότητες να) είναι ανέφελη επομένως να είναι αρκετά μακριά.
4. Οι επιλεγείσες περιοχές να έχουν σχετικά κοντινές τιμές ανακλαστικότητας.

Η αναζήτηση των φωτεινών φωτοσταθερών που να πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις δεν ήταν εύκολη, παρά την μεγάλη έκταση της περιοχής (σχεδόν ολόκληρη η ηπειρωτική Ελλάδα). Το βασικό πρόβλημα είναι οι διαστάσεις των περιοχών που είναι

[11] Η θεματική διακριτική ικανότητα ορίζεται σαν η δυνατότητα που μας δίνει μια δορυφορική εικόνα να διακρίνουμε δύο αντικείμενα, σχετίζεται άμεσα με τη φασματική, ραδιομετρική και χωρική διακριτική ικανότητα και ισούται με 2.83xa = 1414 m, αν a=500m (Μηλιαρέσης).

αρκετά μεγάλες, γεγονός που αποκλείει περιοχές όπως διάδρομοι αεροδρομίων κά. Η τελική επιλογή αφορούσε κυρίως μεγάλα λατομεία και λάκκους μεταλλευτικής εκμετάλλευσης, που ευτυχώς είναι αρκετά σε ολόκληρη την Ελλάδα.

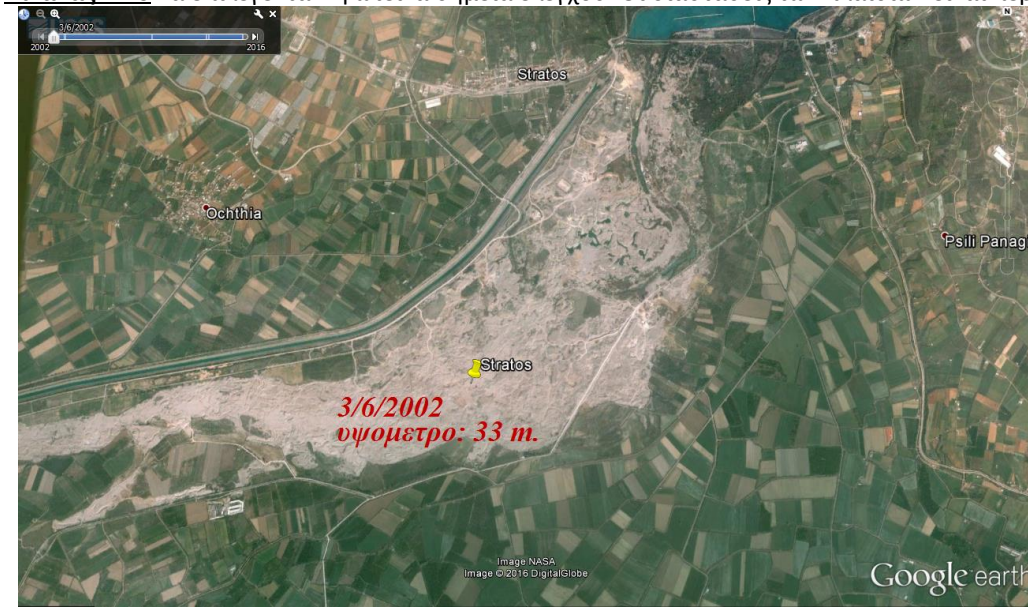
Εξετάζοντας τις εικόνες που ήταν διαθέσιμες, παρατηρήθηκε ότι συχνά τα σύννεφα καλύπτουν είτε την ανατολική είτε τη δυτική Ελλάδα με όριο μεταξύ τους την οροσειρά της Πίνδου. Λαμβάνοντας υπόψη και αυτόν τον παράγοντα επιλέχθηκε ένα σημείο στην Δυτική Ελλάδα (το χέρσο τμήμα κάτω από τη διώρυγα φυγής του φράγματος του Στράτου), ένα σημείο στην ανατολική Ελλάδα (λατομείο κοντά στο Τρούπι της Βόρειας Εύβοιας), ένα σημείο στην Βόρεια Ελλάδα (ανενεργός λάκκος εκμετάλλευσης στο νότιο πεδίο της Πτολεμαιδας) και ένα σημείο στη κεντρική Στερεά Ελλάδα (κορυφή του βουνού Παλιοβούνα κοντά στην Καλαβρούζα). Επιβεβαιώθηκε ότι οι περιοχές αυτές ήταν ‘ίδιες’ και πριν από το 2004 (με εξαίρεση την Πτολεμαίδα, υπήρχε κατάλληλη ιστορική εικόνα στο GoogleEarth) και ελέγχθηκε εάν ξεχωρίζουν στις εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν. Τα φωτεινά σημεία ελέγχου είναι τελικά τα εξής, με σειρά προτεραιότητας:

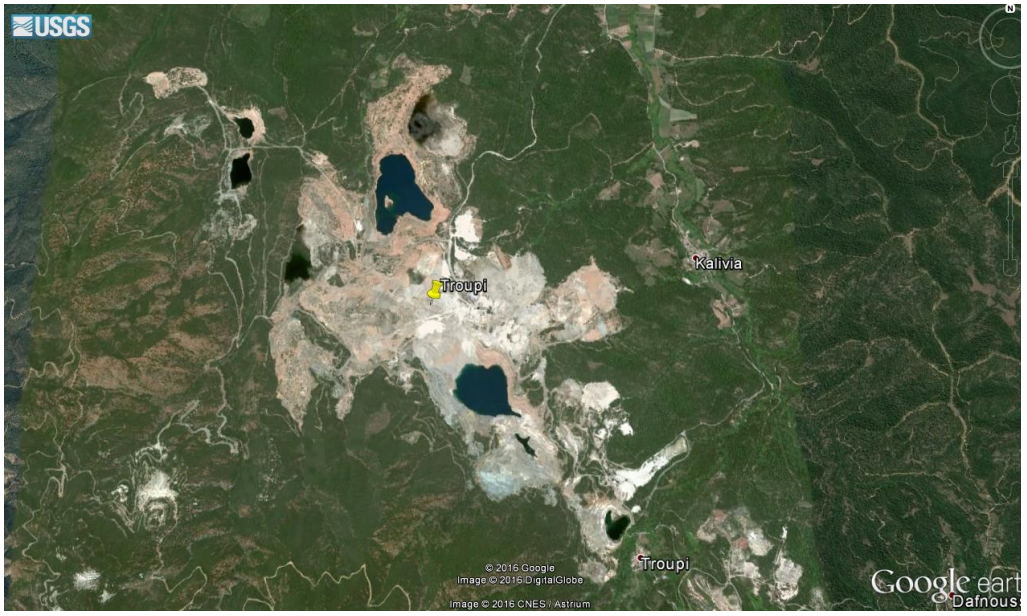
1. Στράτος (φ=38◦ 38’42, λ=21◦ 18’51)
2. Τρούπι (φ=38◦ 44’21, λ=23◦ 24’49)
3. Πτολεμαίδα (φ=40◦ 26’27, λ=21◦ 40’53)
4. Καλαβρούζα (φ=38◦ 21’47, λ=21◦ 52’26)

Η σειρά προτεραιότητας αναφέρεται στο πρόγραμμα κανονικοποίησης, δηλαδή εάν ο Στράτος ήταν νεφοσκεπής χρησιμοποιείτο το Τρούπι, εάν ήταν και αυτό νεφοσκεπές, η Πτολεμαίδα κόκ. Ως σκοτεινό ‘φωτοσταθερό’ θεωρήθηκε το πιο σκοτεινό σημείο της θάλασσας, όπου και να ήταν αυτό. Αυτό ήταν το εύκολο σημείο της διαδικασίας, καθώς γινόταν απλά μια αναζήτηση της ελάχιστης τιμής σε κάθε κανάλι (που να είναι στη θάλασσα) η οποία και κατόπιν χρησιμοποιείτο. Σε αυτό βοήθησε η μεγάλη θαλάσσια έκταση που περιελάμβανε η εικόνα γιατί πολύ συχνά μεγάλα τμήματα ήταν νεφοσκεπή.

Ακολουθεί ο Πίνακας 4-20 με δορυφορικές εικόνες των περιοχών αυτών σε ιστορικές και πρόσφατες ημερομηνίες.

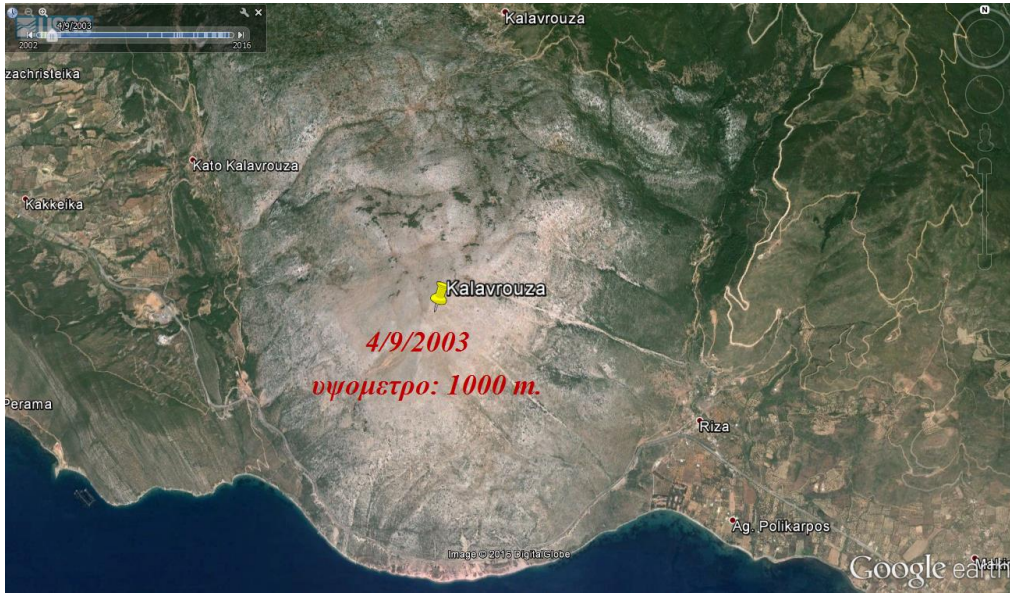
Πίνακας 4-20 Τα επιλεγέντα 4 φωτεινά σημεία ελέγχου. Οι διαστάσεις των πλαισίων είναι περίπου 7.6 km x 4.7 km. Στα αριστερά οι ιστορικές εικόνες, στα δεξιά οι πιο πρόσφατες.





Exochi
Charavgi
Prolemaida
13/2/2011
υψομετρο: 730 m.
Akrini
Klitos
Image © 2016 DigitalGlobe
Google earth

USGS
Charavgi
Prolemaida
Akrini
Klitos
Google earth


Kalavrouza
Kato Kalavrouza
Kakkeika
Kalavrouza
4/9/2003
υψομετρο: 1000 m.
Riza
Ag. Polikarpos
Image © 2016 DigitalGlobe
Google earth

USGS
Kalavrouza
Kato Kalavrouza
Kakkeika
Kalavrouza
Riza
Ag. Polikarpos
Google earth

4.9.6 Προγραμματισμός στην IDL

Η επεξεργασία έγινε με προγράμματα που γράφτηκαν στη γλώσσα προγραμματισμού IDL[12](Interactive Data Language). Η γλώσσα αυτή έχει στοιχεία από τις γλώσσες FORTRAN και C και είναι κατάλληλη ιδίως για την διαχείριση μεγάλων σειρών δεδομένων (n-διάστατων πινάκων). Χρησιμοποιείται κατ' εξοχήν σε επιστημονικές περιοχές που έχουν να κάνουν με ανάλυση και επεξεργασία εικόνας, από την Αστρονομία και την Μετεωρολογία, και βέβαια την Τηλεπισκόπηση, έως εφαρμογές ιατρικής τεχνολογίας όπως οι τομογράφοι κ.λπ.

Τα προγράμματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: αυτά που είναι κρίκοι της αλυσίδας επεξεργασίας (workflow) και τα βοηθητικά. Η αλυσίδα επεξεργασίας παρουσιάζεται στο Εδάφιο 4.9.8. Τα βοηθητικά έχουν σκοπό να διευκολύνουν την ανάλυση εξάγοντας στατιστικές παραμέτρους και ιστογράμματα και τυπώνοντας αναφορές. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των προγραμμάτων αυτών.

1. **Correct_refl_multiple_tif.pro**: (ραδιομετρική βαθμονόμηση) Αυτό το πρόγραμμα ανοίγει και διαβάζει από τα metadata του tif αρχείου τις σταθερές του μετασχηματισμού που είναι οι reflectance scale και reflectance offset (υπάρχουν και οι radiance scale, radiance offset) και στη συνέχεια μετασχηματίζει όλον τον **Πίνακα** με βάση αυτές τις σταθερές. Γράφει το αποτέλεσμα με τις διορθωμένες ανακλαστικότητες για 4 κανάλια (μπλέ, πράσινο, κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο) σε ένα αρχείο τύπου ENVI Raster (dat + hdf).
2. **Cloudmask_from_MOD35tif.pro**: Αυτό το πρόγραμμα δημιουργεί τη μάσκα νέφωσης (σε μορφή ENVI Raster) από τα αντίστοιχο tif αρχείο (μόνο το πρώτο από τα 6) χρησιμοποιώντας bitwise operators. Επίσης δημιουργεί άλλα δύο αρχεία που είναι η glintmask και η snowmask. Αυτά τα Raster χρησιμοποιούνται συμβουλευτικά για την διακρίβωση της κατάστασης των φωτοσταθερών καθώς και της περιοχής μελέτης.
3. **Quickly_find_min.pro**: Βοηθητικό πρόγραμμα (εκτός αλυσίδας επεξεργασίας) που δημιουργήθηκε για να εξυπηρετήσει την εύρεση της εικόνας αναφοράς. Διαβάζει

[12]Οι πρώτες εκδοχές της IDL αναπτύχθηκαν στη δεκαετία του 1970 στο εργαστήριο Ατμοσφαιρικής και Διαστημικής Φυσικής (Laboratory for Atmospheric and Space Physics) του Πανεπιστημίουτου Κολοράντο στο Boulder. Στο εργαστήριο αυτό, ο David Stern είχε αποδυθεί στη προσπάθεια να επιτρέψει στους επιστήμονες να ελέγχουν υποθέσεις χωρίς την ανάμιξη προγραμματιστών που θα έγραφαν ή θα τροποποιούσαν κώδικες. πηγή:Wikipedia.

όλα τα ράστερ με τις διορθωμένες ανακλαστικότητες, το ράστερ της μάσκας νέφωσης καθώς και τη μάσκα στεριάς – θάλασσας και την μάσκα της περιοχής ενδιαφέροντος (Region of Interest, ROI) και τυπώνει αρχείο κειμένου όπου περιέχεται, για κάθε ημέρα, η ελάχιστη τιμή ακτινοβολίας για κάθε ένα από τα 4 κανάλια, το ποσοστό νέφωσης σε στεριά, θάλασσα και περιοχή ενδιαφέροντος.

4. **Correct_refl_single_tif_7bands.pro**: Βοηθητικό πρόγραμμα που δημιουργήθηκε για την ανάλυση της εικόνας αναφοράς (master image) καθώς και οποιαδήποτε άλλης εικόνας που θα επιλέξει ο χρήστης. Κάνει ότι και το Correct_refl_multiple_tif.pro (ραδιομετρική βαθμονόμηση) αλλά σε όλα τα 7 κανάλια και τα γράφει σε μορφή ENVI Raster.
5. **Get_spectra_from_philamda_list.pro**: Βοηθητικό πρόγραμμα που δημιουργήθηκε για την εξαγωγή δεδομένων από τη εικόνα αναφοράς. Επιστρέφει, για όλα τα κανάλια, τιμές ανακλαστικότητας για λίστα σημείων που δίνονται με μορφή ζευγαριών (φ, λ). Σκοπός είναι να λαμβάνονται οι ανακλαστικότητες των φωτοσταθερών σημείων από την εικόνα αναφοράς.
6. **Get_stats_from_sample_areas.pro:** Βοηθητικό πρόγραμμα που δημιουργήθηκε για την φασματική ανάλυση εικόνων. Με στοιχεία εισόδου περιοχές ενδιαφέροντος (rois) και μια εικόνα, το πρόγραμμα επιστρέφει στατιστικές (μέσους όρους κλπ) καθώς και ιστογράμματα για την κάθε περιοχή ενδιαφέροντος και για το κάθε κανάλι, και τις τυπώνει σε αρχείο κειμένου.
7. **ProcessMultiplefiles_slavery.pro**: Το πρόγραμμα που κάνει την σχετική ατμοσφαιρική διόρθωση (ραδιομετρική κανονικοποίηση). Δεδομένα εισόδου είναι τα ράστερ με τις διορθωμένες ανακλαστικότητες και η μάσκα νέφωσης και εξαγόμενα είναι τα ράστερ των εικόνων-στόχων. Βρίσκει τις τιμές της ανακλαστικότητας στα φωτεινά φωτοσταθερά, καθώς και στο σκοτεινό φωτοσταθερό και με βάση τις τιμές της εικόνας αναφοράς μεταχηματίζει όλα τα εικονοστοιχεία για κάθε ένα από τα 4 κανάλια. Το πρόγραμμα ελέγχει εάν τα φωτοσταθερά είναι νεφοσκεπή με βάση τη μάσκα νέφωσης και κατά προτεραιότητα επιλέγει το φωτοσταθερό που θα χρησιμοποιήσει για τον μετασχηματισμό. Επίσης τυπώνει αρχείο κειμένου που περιέχει το φωτοσταθερό που χρησιμοποιήθηκε για τον μετασχηματισμό, εφόσον αυτός έγινε. Δεν μετασχηματίζονται όλες οι ημέρες παρά αυτές όπου κάποιο απο τα φωτοσταθερά είναι ανέφελο. Σε περίπτωση που ο μετασχηματισμός δεν είναι δυνατός επειδή όλα τα φωτοσταθερά είναι νεφοσκεπή

τυπώνει *null*. Σε αυτή την περίπτωση δεν γράφεται εικόνα-στόχος (περίπου το 57% των ημερών ανήκει σε αυτή την κατηγορία).

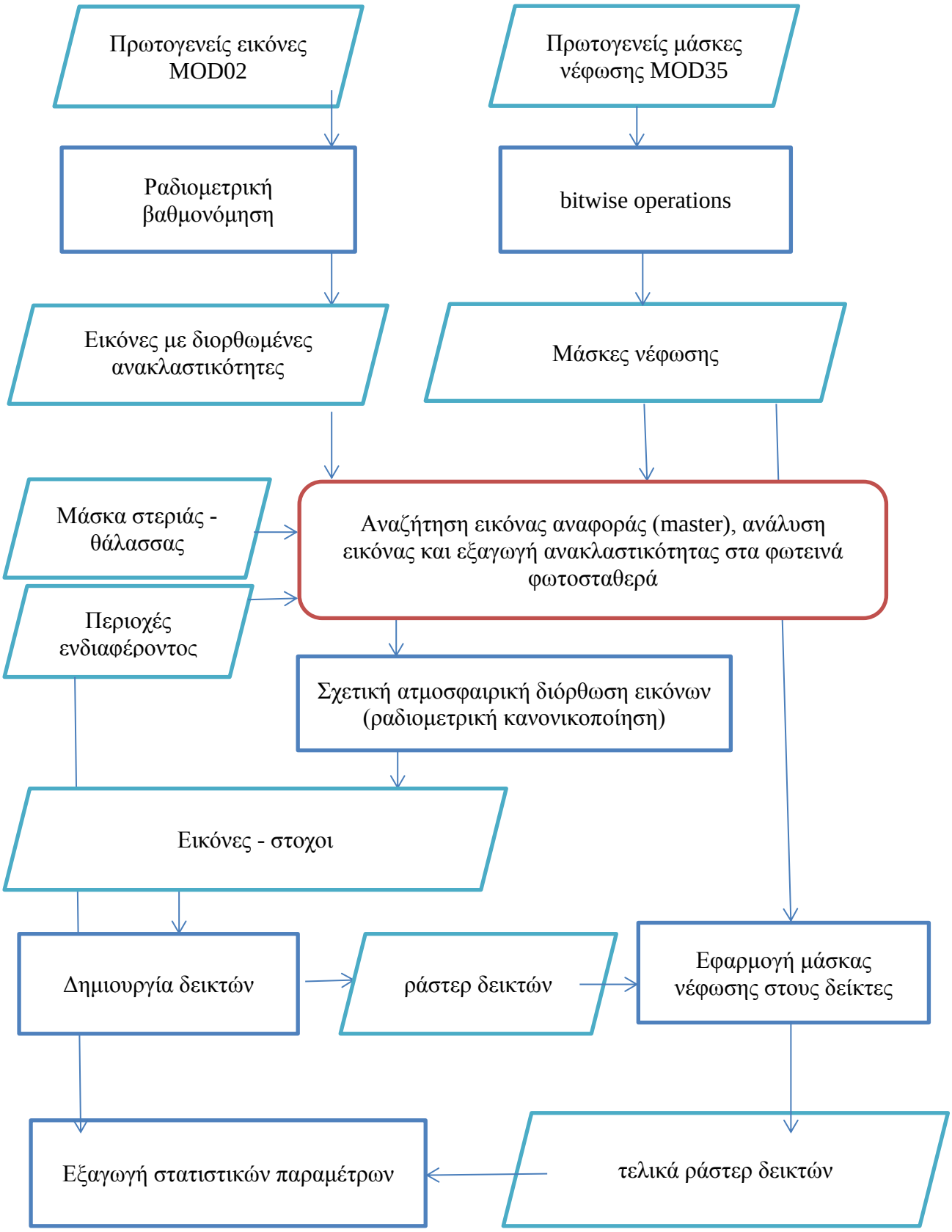
8. **Create_susp_sediment_indices.pro**: Αυτό το πρόγραμμα λαμβάνει σαν δεδομένα εισόδου τα ράστερ των εικόνων-στόχων και δημιουργεί 5 δείκτες αιωρούμενου ιζήματος καθώς και δύο μάσκες αιωρούμενου ιζήματος. Εξάγει τα 7 αυτά ράστερ σε μορφή ενός ENVI Raster.
9. **Cloudmask_indices.pro**: Αυτό το πρόγραμμα λαμβάνει σαν δεδομένα εισόδου τα ράστερ με τους δείκτες και το ράστερ της μάσκας νέφωσης και σημαδεύει τα νεφοσκεπή εικονοστοιχεία με τιμή NaN (not a number). Εξάγει τα αποτελέσματα σε μορφή ENVI Raster. Σκοπός είναι να μπορούν να υπολογιστούν σωστά οι στατιστικές παράμετροι.
10. **My_raster_roi_stats.pro:** Το πρόγραμμα αυτό διαβάζει όλα τα αρχεία των δεικτών και επιστρέφει σε αρχείο κειμένου πλήρη στατιστικά μεγέθη για όλους τους δείκτες για όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος (rois).

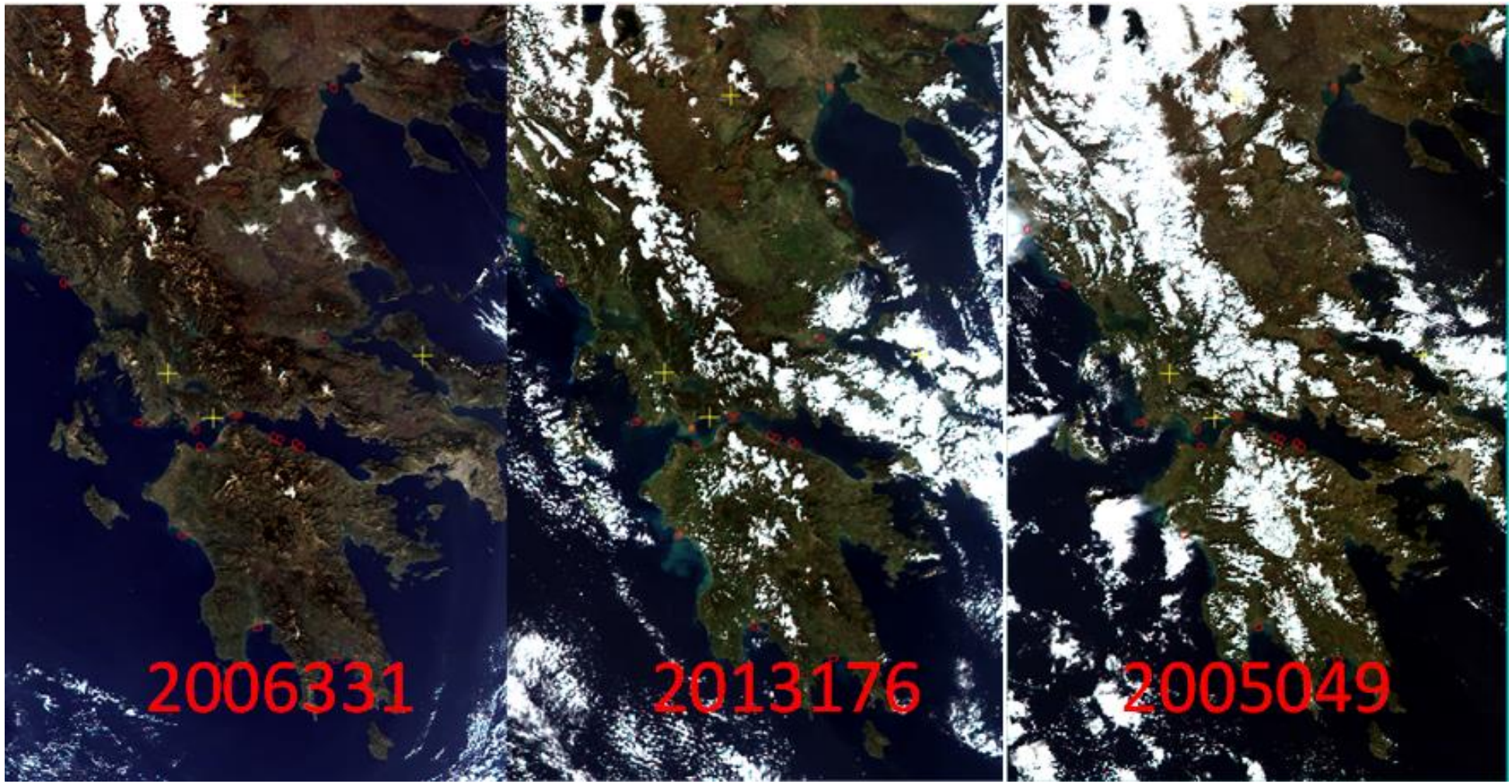
Κατα την διαδικασία ραδιομετρικής κανονικοποίησης, από τις αρχικές 669 εικόνες, «πέρασαν» στο τελικό στάδιο οι 382. Ένα ποσοστό 43% των εικόνων χάθηκε, αφού όλα τα φωτοσταθερά βρέθηκαν να είναι νεφοσκεπή. Στα Σχήματα 4-78, 4-79 παρουσιάζονται μερικές από αυτές τις εικόνες ενώ στο Σχήμα 4-80 παρουσιάζεται περίπτωση μάσκας νέφωσης.

4.9.7 Πλεγματικά Δεδομένα βροχόπτωσης

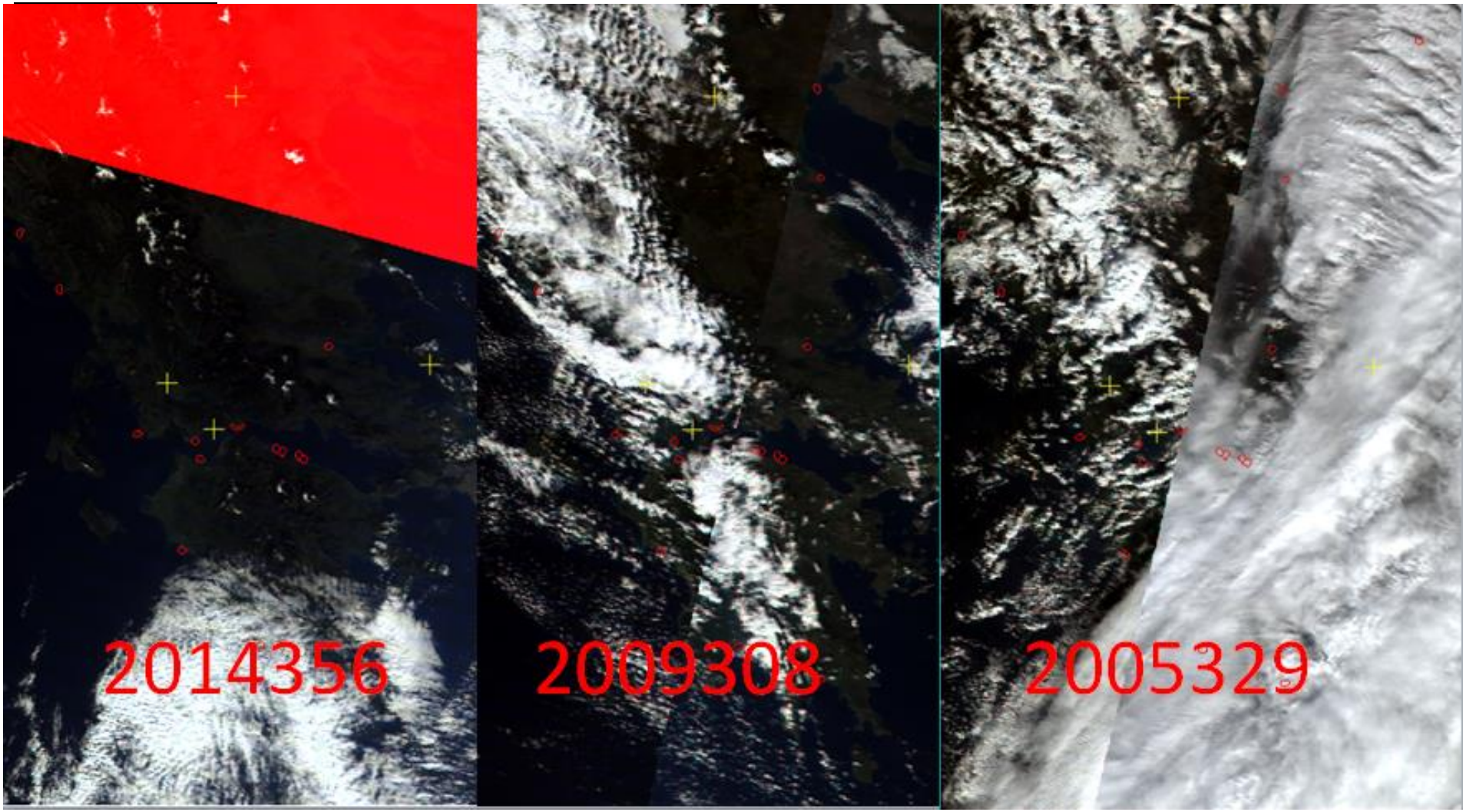
Αναζητήθηκαν και ανακτήθηκαν ημερήσια δεδομένα βροχοπτώσεων για όλο τον Ελληνικό χώρο σε ανάλυση 1 μοίρας από το Global Climatology Precipitation Project σε αρχεία netcdf. Το προϊόν αυτό (GPCP 1 degree daily precipitation) παρέχεται ξεκινώντας από τον Οκτώβριο 1996 έως σήμερα. Βασίζεται στο μηνιαίο GPCP προϊόν για την συνολική μηνιαία βροχόπτωση και χρησιμοποιεί κυρίως παρατηρήσεις στο υπέρυθρο από γεωσύγχρονους δορυφόρους για τον υπολογισμό της ημερήσιας τιμής (Pendergrass, 2016). Κατόπιν, με χρήση της R ως GIS υπολογίστηκε η ημερήσια βροχόπτωση για κάθε μία λεκάνη απορροής.

4.9.8 Αλυσίδα επεξεργασίας εικόνων (flowchart)

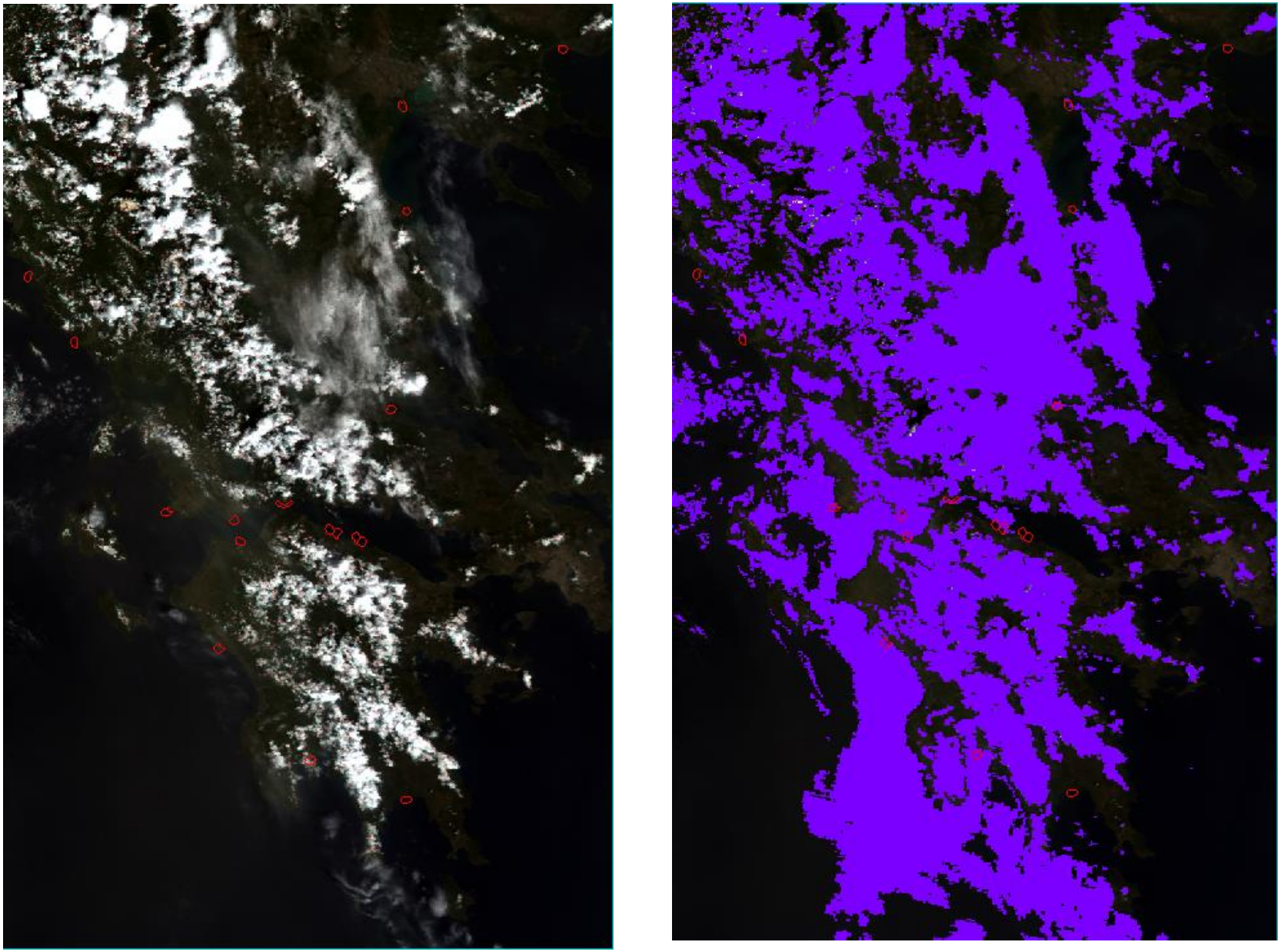




Σχήμα 4-78 Μερικές από τις «καλές» τελικές εικόνες. Η πρώτη αριστέρα είναι αυτή που επιλέχθηκε για εικόνα αναφοράς (master image), μιας και είχε ελάχιστη τιμή στο εγγύς υπέρυθρο (ένας δείκτης της «θολούρας» (haze) της ατμόσφαιρας) και επιπλέον ελάχιστη νέφωση. Με τα κίτρινα σταυρουδάκια είναι τα σημεία των φωτοσταθερών ενώ με κόκκινα πολυγωνάκια είναι οι περιοχές των πλουμίων μέσα στις οποίες υπολογίστηκαν οι τιμές δεικτών και μασκών. Οι παραπάνω εικόνες, όπως και οι υπόλοιπες 379, είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους μιας και έχουν τις ίδιες ατμοσφαιρικές συνθήκες – αυτές της εικόνας master.



Σχήμα 4-79 Η διαδικασία της ατμοσφαιρικής διόρθωσης εφαρμόστηκε και σε πολλές μη αξιόπιστες εικόνες όπως αυτές του σχήματος, είτε λόγω σφάλματος της μάσκας νέφωσης που έδινε ανέφελο φωτοσταθερό εκεί όπου ήταν νεφοσκεπές, είτε επειδή ήτανε μωσαϊκά από δύο διαφορετικές διελεύσεις του δορυφόρου. Αυτές οι περιπτώσεις συνήθως έδιναν πολύ υψηλές τιμές για κάποιους δείκτες και αποκλείστηκαν από την περαιτέρω ανάλυση αφού έγινε φιλτράρισμα με κάποιες τιμές – κατώφλια.



Σχήμα 4-80 Δεξιά, η μάσκα νέφωσης για την εικόνα αριστερά. Γενικά, οι μάσκες νέφωσης είναι ακριβείς όχι όμως σε όλες τις περιπτώσεις. Συχνά, επηρεάζονται από την παρουσία χιονιού.

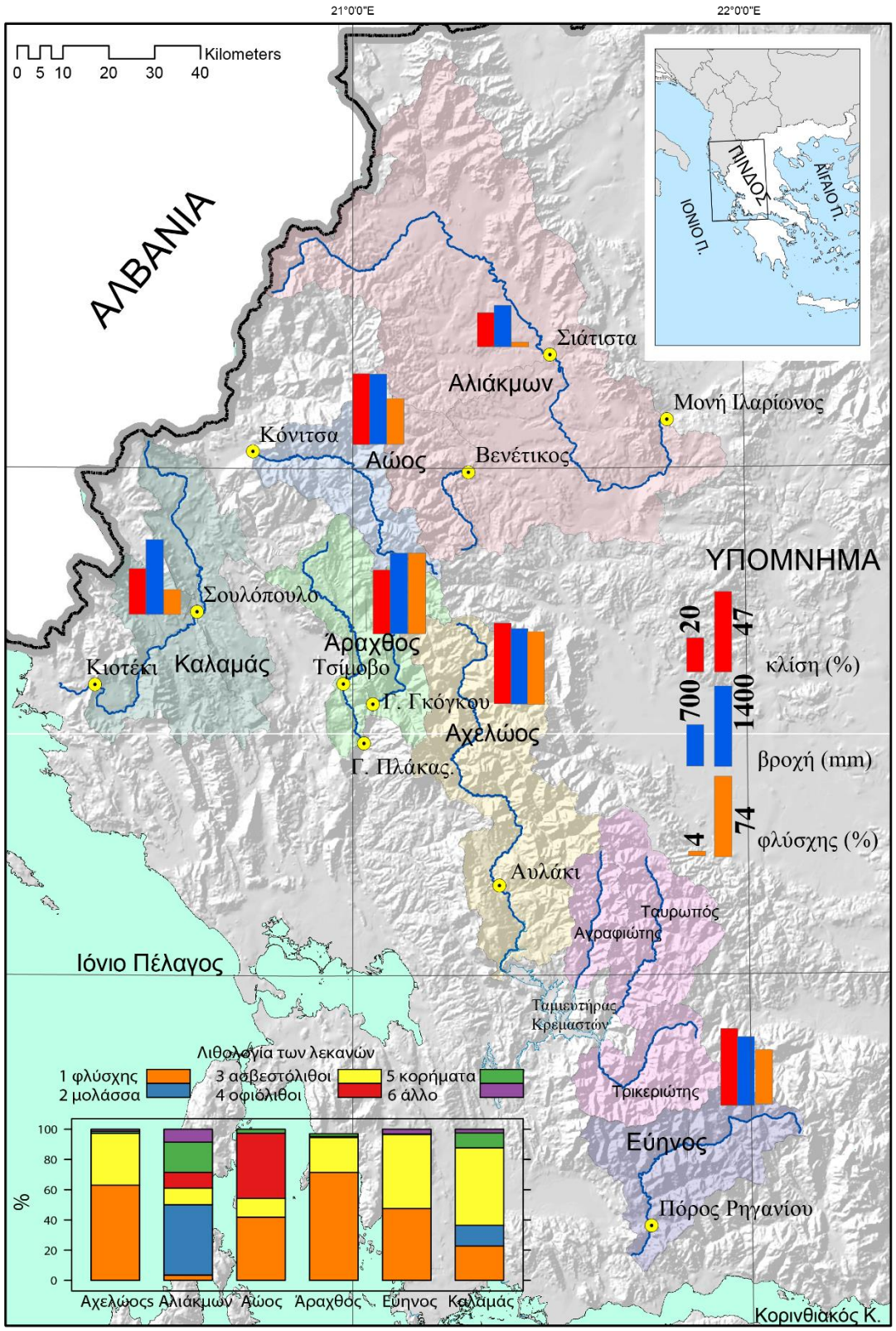
4.10 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΕΜΠΕΙΡΙΚΟΥ - ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.10.1 Περιοχή μελέτης

Η στατιστική έρευνα βασίστηκε στις τιμές της στερεοαπορροής των Ζαρρή και Λυκούδη (2007) τα οποία αφορούν 11 θέσεις σε έξι λεκάνες απορροής. Συγκεντρώθηκαν ή δημιουργήθηκαν, κατά περίπτωση, ερμηνεύτηκαν και αναλύθηκαν τα χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής στις 11 αυτές θέσεις (Πιν. 4-22). Η ανάλυση περιέλαβε το σύνολο των μορφομετρικών, φυσιογραφικών, βροχομετρικών, γεωλογικών και τεκτονικών δεδομένων των λεκανών απορροής, στοιχείων εδαφοκάλυψης καθώς και δεδομένα από το ESDC. Οι παραμέτροι που εξετάστηκαν παρατίθενται στον παρακάτω Πίνακα 4-21.

Πίνακας 4-21 Τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν και αναλύθηκαν ως ερμηνευτικές μεταβλητές

Κατηγορία	***Παράμετροι***	***Παρατηρήσεις***
Φυσιογραφία	Μορφολογική κλίση της λεκάνης απορροής, κλίση της κεντρικής κοίτης του ποταμού, κλίση κοντά στο σημείο μέτρησης	Υπολογίστηκαν σε ArcGIS περιβάλλον σαν %.
Μορφομετρία	Εμβαδόν- περίμετρος- μέγιστο υψόμετρο - υψόμετρο της εξόδου λεκάνης, συνολικό μήκος κοιτών του υδρογραφικού δικτύου. Δείκτες: κυκλικότητας, επιμήκυνσης, συγκέντρωσης, αναγλύφου, τραχύτητας και άλλοι (Λόγοι διακλάδωσης + shape factor Horton / Strahler).	Υπολογίστηκαν από το r.basin του GRASS
Υφή - ανάγλυφο	Υδρογραφική συχνότητα λεκάνης, υδρογραφική πυκνότητα λεκάνης	Υπολογίστηκαν με βάση τα στοιχεία του ΥΔΡΟΣΚΟΠΙΟΥ (ψηφιοποιημένα υδατορεύματα στο 1:50,000)
Χρήση – κάλυψη γής	Ποσοστά κωδικών επιλεγμένων κατηγοριών, αλλουβιακή κατάσταση	Πηγή: Corine Land Cover, 2006 (CLC) Τριψήφιος κωδικός
Γεωλογία - Λιθολογία	Ποσοστά εμφανίσεων 5 κυρίων κατηγοριών γεωλογικών σχηματισμών	Πηγή: Γεωλογικοί χάρτες του ΙΓΜΕ 1:50,000 – προηγούμενες μετρήσεις
Τεκτονισμός	Δείκτης συχνότητας κατολισθήσεων εντός της λεκάνης, συχνότητα εμφάνισης ρηγμάτων εντός της λεκάνης (μήκη / km^2)	Πηγές: Χάρτες από Ν. Σαμπατάκη, Τμήμα Γεωλογίας Παν.Πατρών + δεδομένα ΥΔΡΟΣΚΟΠΙΟΥ
Βροχοπτώσεις	Μέση ετήσια βροχόπτωση λεκάνης	Πηγή: Διαχειριστικές μελέτες, 2006. Μέθοδος: πολύγωνα Thiessen
RUSLE factors	R, LS, K, C RUSLE	Πηγή: χάρτες ESDC



Σχήμα 4-81 Χάρτης γεωγραφικής θέσης των λεκανών απορροής που μελετήθηκαν. Δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής, μορφολογική κλίση, μέση ετήσια βροχόπτωση και ποσοστό έκτασης λεκάνης που καταλαμβάνεται από σχηματισμούς φλύσχη.

Πίνακας 4-22 Οι θέσεις των σταθμών των στερεοϋδρομετρήσεων
* Π. Καλαρίτικος ** Π. Βενέτικος

α/α	**Υδρομετρικοί σταθμοί** *Θέση*	***Ποταμός*** *(Λεκάνη απορροής)*	*Συν/νες ΕΓΣΑ*
			X Y
1	Αυλάκι	Αχελώος	
2	Πόρος Ρηγανίου	Εύηνος	272896 - 4339733
3	Γ.Πλάκας	Άραχθος	303631 - 4264270
4	Γ. Τσίμοβου	Άραχθος	244352 - 4371821
5	Γ.Γκόγκου*	Αραχθος	240241 - 4384967
6	Γ. Κόνιτσας	Αώος	
7	Κιοτέκι	Καλαμάς	222230 - 4436525
8	Γ. Σουλόπουλο	Καλαμάς	186085 - 4386730
9	Μ. Ιλαρίονα	Αλιάκμων	208145 - 4401670
10	Σιάτιστα	Αλιάκμων	312758 - 4440610
11	Γ. Γρεβενών**	Αλιάκμων	287802 - 4455530

Υπενθυμίζεται ότι σκοπός της έρευνας αυτής ήταν η εξαγωγή ενός εμπειρικού – στατιστικού μοντέλου πρόβλεψης της στερεοαπορροής στη βάση υδρολογικών και γεωμορφολογικών μεγεθών των λεκανών απορροής. Έτσι, μετά την δημιουργία ή την συγκέντρωση, κατά περίπτωση, των σχετικών μεγεθών, ακολουθεί (Εδάφιο 4.10.5) η εύρεση των συσχετίσεων με την στερεοαπορροή στην κάθε λεκάνη. Η κατασκευή του μοντέλου γίνεται στο επόμενο, $5^{ο}$, Κεφάλαιο (Αποτελέσματα και Συζήτηση).

Στον Πίνακα 4-23 παρατίθενται τα κυριώτερα χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής καθώς και οι εκτιμήσεις της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής που επεξεργάστηκαν οι Ζαρρής – Λυκούδη (2007) με την μέθοδο της τεθλασμένης καμπύλης στις 11 θέσεις (6 ποταμοί). Γίνεται φανερό ότι οι εκτιμήσεις των Ζαρρή – Λυκούδη είναι μεγαλύτερες από αυτές των Κουτσογιάννη – Ταρλά, για όλες τις θέσεις εκτός της θέσης Γ. Πλάκας στον ποταμό Άραχθο.

Παρακάτω, κρίνεται σκόπιμο να γίνει ειδική αναφορά σε κάποιους δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 4-23 *Υδρολογικές και γεωμορφολογικές παραμέτροι των λεκανών απορροής της έρευνας*

no	Σταθμός	Ποταμός-Λεκάνη	Συντομογραφία	Έκταση (km^2)	Μέση ετήσια απορροή (mm)	Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)	C	Μέσο υψόμετρο λεκάνης H (m)	Περίοδος μετρήσεων	n[b]	Συντ. μεταβλ.[c]	E[c]	SSY 1[d]	SSY 2	SSY 3	SSY 4
				1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*
	Υδρ. Σταθμοί															
1	Αυλάκι	Αχελώος	acheloos	1,361	1,168	1,314	0.89	1,223	1966-70	30	0.87	0.72	1,698	607		856
2	ΠόροςΡηγανίου	Εύηνος	evinos	912	873	1,198	0.73	976	1970-82	35	0.34	0.34	1,470	66	707	59
3	Γ.Πλάκας	Άραχθος	arachthos	951	767	1,400	0.55	1,050	1966-76	123	0.84	0.55	1,273		1,600	2,440
4	Γ. Τσίμοβου	Άραχθος	ara-ts	627	921	1,307	0.71	1,024		112	0.96	0.38	1,071		887	773
5	Γ.Γκόγκου*	Αραχθος	ara-gk	205	1,709	1,753	0.97	1,291		83	0.56	0.73	1,585		1,181	1,170
6	Γ. Κόνιτσας	Αώος	aoos	670	625	1,215	0.51	1,405	1969-83	73	1.33	0.65	2,302	800		2,575
7	Κιοτέκι	Καλαμάς	kalamas	1,544	690	1,297	0.53	541	1970-78	45	0.50	0.37	519	1,242	385	1,229
8	Γ. Σουλόπουλο	Καλαμάς	kal-soul	714	769	1,270	0.61	650	1970-78	45	0.57	0.64	261	212	196	568
9	Μ. Ιλαρίονα	Αλιάκμων	aliakmon	4,755	307	719	0.43	904	1965-80	47	0.50	0.38	436	487		487
10	Σιάτιστα	Αλιάκμων	ali-sia	2,474	264	687	0.38	982	1965-83	61	0.97	0.56	257		87	94
11	Γ. Γρεβενών**	Αλιάκμων	ali-ven	487	633	782	0.81	1,226	1965-83	81	0.72	0.83	143	126	352	126
	Ταμιευτήρες[e]															
12	Κρεμαστά	Αχελώος		1,733		1,507							1,184			
13	Κρεμαστά	Αγραφιώτης		320		1,439							2,034			
14	Κρεμαστά	Ταυρωπός		1,239		1,460							489			
15	Μαραθών*	Χάραδρος		118		652							508			

[a]SSY σε t km^{-2} y^{-1}. C ο συντελεστής απορροής. Οι αναφορές για το SSY είναι από Zarris et al. (2006) και αντιστοιχούν σε (1) Zarris and Lykoudi (2007), (2) Poulos et al. (1996), (3) Koutsoyiannis και Tarla (1987), και (4) ΔΕΗ.

[b]Στη στήλη 7, n είναι το πλήθος των μετρήσεων (σημείων) της καμπύλης (data points).

c Στις στήλες 8 και 9 δίνονται χαρακτηριστικοί αριθμοί της απόδοσης των καμπυλών παροχής - στερεοπαροχής για την αναφορά των Ζαρρή-Λυκούδη (SSY-1). Ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι ο λόγος του μέσου προς την τυπική απόκλιση των ετήσιων τιμών SSY, ενώ Ε είνα η απόδοση του μοντέλου (Nash-Sutcliffe Efficiency).

[d]Μικρές διαφορές των τιμών SSY-1 σε σχέση με την αρχική τους δημοσίευση οφείλονται στο ότι υπολογίστηκαν (κατά τον μετασχηματισμό Qs (kg/s) -> SSY) με τις δικές μας τιμές των εμβαδών των λεκανών απορροής.

[e]Οι τιμές στους ταμιευτήρες προέρχονται από βαθυμετρικές αποτυπώσεις και οφείλονται στους Zarris et al., 2002 και Xanthakis, 2011.

4.10.2 Χρήση – κάλυψη γης

Η βάση Corine Land Cover (CLC) είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη κατηγοριοποίηση των χρήσεων – καλύψεων γης σε πανευρωπαϊκό επίπεδο. Ωστόσο, η βάση αυτή δεν έχει εξαχθεί για χρήσεις εκτίμησης της έκθεσης του εδάφους στην διαβρωτική επίδραση της βροχής και της επιφανειακής απορροής. Στην συγκεκριμμένη ανάλυση αυτό που ενδιαφέρει κυρίως, είναι το εάν υφίσταται προστατευτική φυτοκάλυψη του εδάφους εντός της λεκάνης απορροής. Για παράδειγμα, ενώ τα δάση θεωρούνται αποτελεσματική προστατευτική φυτοκάλυψη, υπάρχουν διαφορές μεταξύ των δασών κωνοφώρων και των δασών πλατύφυλλων, φυλλοβόλων ή αειθαλών, και η προστατευτική δράση της φυτοκάλυψης εξαρτάται καθοριστικά από τον υποόροφο. Ένα πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι το που θα πρέπει να ενταχτούν οι τόσες μικτές ή μεταβατικές χρήσεις. Επιπλέον, τα λίγα σημεία μετρήσεων που είναι διαθέσιμα δεν επιτρέπουν την λεπτομερειακή ανάλυση της επιρροής της κάθε κατηγορίας κάλυψης γης. Για τους λόγους αυτους επιχειρήθηκε ένας δυαδικός διαχωρισμός: θεωρήθηκαν μόνο οι χρήσεις με τον κωδικό 33 (Ελάχιστη βλάστηση), που προσδιορίζουν εδάφη γυμνά ή σχεδόν γυμνά από βλάστηση (barren), σαν παράγοντας προς συσχέτιση με την στερεοαπορροή.

Ο διψήφιος CLC κωδικός 33 περιέχει τους εξής τριψήφιους κωδικούς: κ.331 – Παραλίες Αμμόλοφοι Αμμουδιές, κ.332 – Απογυμνωμένοι Βράχοι, κ.333 - Αραιή Βλάστηση. Διαπιστώθηκε (από παρατήρηση στο GoogleEarth) ότι η εμφάνιση του κ.331 στις λεκάνες απορροής που μελετήθηκαν ουσιαστικά υποδεικνύει τις περιοχές αλλουβιακών πλημμυρικών πεδίων κατά μήκος των κοιτών των ποταμών. Λαμβάνοντας υπόψη το συμπέρασμα των Ζαρρή και Λυκούδη (2007) περί της ισχυρής συσχέτισης μέγιστης ετήσιας πλημμυρικής παροχής και στερεοαπορροής και θεωρώντας αυτές τις περιοχές σαν πηγές παραγωγής ιζήματος στις μεγάλες πλημμύρες (ενώ είναι χώροι απόθεσης - παγίδες ιζήματος σε μικρές και μεσαίες παροχές) δημιουργήθηκε ένας νεός δείκτης που του δόθηκε η ονομασία *αλλουβιακή κατάσταση* του ποταμού (Karalis et al., 2018). Αυτός ο δείκτης είναι το ποσοστό του μήκους της κοίτης του ποταμού που διέρχεται από πεδία αλλουβιακών αποθέσεων και εξήχθη με τεχνικές GIS από την βάση δεδομένων για τα ποτάμια που μελετήθηκαν. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης πράγματι έδειξαν θετική συσχέτιση της στερεοαπορροής με αυτόν τον δείκτη.

4.10.3 Γεωλογία – λιθολογία

Οι κατατάξεις σε αυτή την κατηγορία,πέραν του γεγονότος ότι οι ίδιοι γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν άλλη συμπεριφορά αναλόγως με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους και κυρίως τον τεκτονισμό τους, επομένως αναφερόμαστε σε μια «μέση» συμπεριφορά τους, επιπρόσθετα παρουσιάζουν κάποια από τα προβλήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω: σχετικό υποκειμενισμό στην ταξινόμηση των δεκάδων κατηγοριών που υπάρχουν στους χάρτες του ΙΓΜΕ και αδυναμία λεπτομερέστερης data-driven ανάλυσης που οφείλεται στα λίγα διαθέσιμα σημεία μετρήσεων. Το πρόβλημα αυτό αποτυπώνεται στον παρακάτω Πίνακα 4-24 όπου παρατίθεται η γεωλογική ανάλυση από τρεις διαφορετικές έρευνητικές προσεγγίσεις.

Μετά από την αρχική θεώρηση και δοκιμές, κρίθηκε σκόπιμο και για την παράμετρο αυτή να εφαρμοστεί δυαδική κατηγοριοποίηση: ευδιάβρωτα – μη ευδιάβρωτα. Καθώς ο φλύσχης αποτελεί τον βασικό ευδιάβρωτο γεωλογικό σχηματισμό στην περιοχή έρευνας, στην συνέχεια του κειμένου θα θεωρούμε τους δύο όρους συνώνυμους («φλύσχης»≡ ευδιάβρωτο), εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά.

4.10.4 Τεκτονισμός

Για την δημιουργία των 2 σχετικών δεικτών – παραμέτρων σε αυτή την κατηγορία χρησιμοποιήθηκαν χάρτες του Koukis et al. (2005) από το Γεωλογικό τμήμα του Πανεπιστημίου Πατρών, καθώς και τα χαρτογραφημένα ρήγματα που υπάρχουν στην βάση δεδομένων του ΥΔΡΟΣΚΟΠΙΟΥ. Έτσι, σαν *πυκνότητα ρηγμάτων* (fault density) θεωρήθηκε ο λόγος μήκος συνόλου ρηγμάτων που βρίσκονται εντός της λεκάνης / επιφάνεια λεκάνης, ενώ από την ψηφιοποίηση του χάρτη συχνότητας κατολισθήσεων (δες Σχ. 4-82) προέκυψε ο *δείκτης συχνότητας κατολισθήσεων* (landslides frequency index) σαν αριθμός κατολισθήσεων ανά 100 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Θα πρέπει να υπογραμμιστεί ότι η ακρίβεια των παραπάνω δεικτών και κυρίως του πρώτου (πυκνότητα ρηγμάτων) δεν είναι γνωστή. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι δεν είναι γνωστή η ακρίβεια με την οποία έχουν χαρτογραφηθεί τα ρήγματα σε κάθε περιοχή, ποια από τα ρήγματα αυτά είναι ενεργά,κ.λπ. Ωστόσο, ο συνδυασμός των δεικτών αυτών αποτυπώνει -έστω και αδρά- τον τεκτονισμό των λεκανών απορροής, καθώς οι δείκτες αυτοί προέρχονται από διαφορετικές πηγές.

Πίνακας 4-24 Κατηγοριοποίηση και κατανομή γεωλογικών σχηματισμών 13 λεκανών απορροής από 3 έρευνες

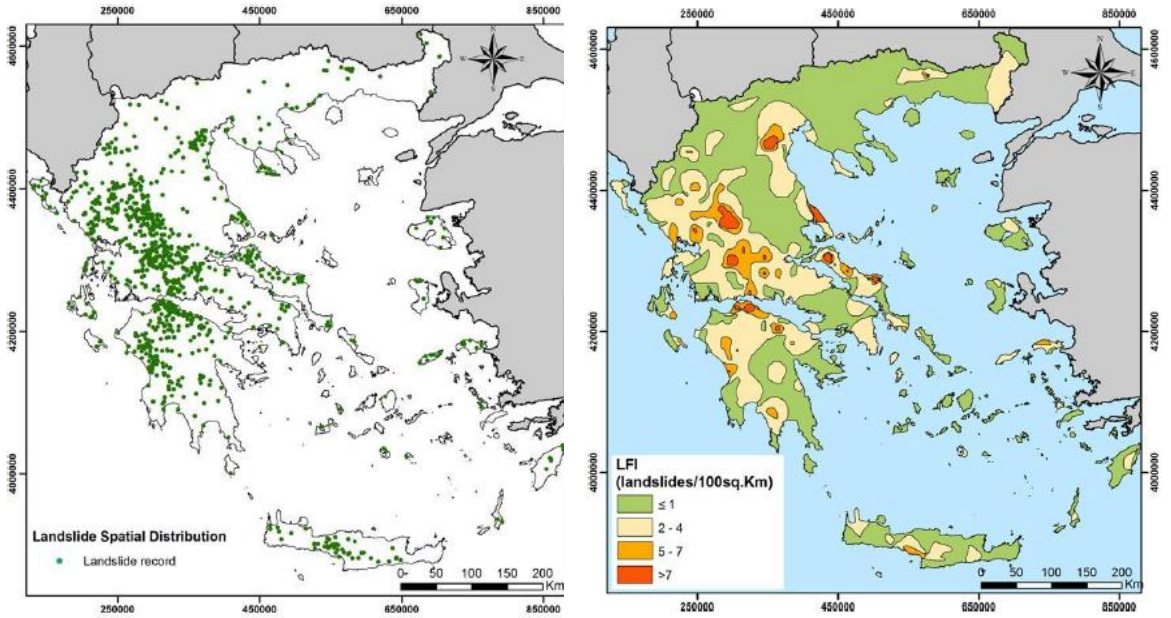
	Αγρα φιώτης	Αλιά κμων	Αώος	Αραχθος	Εύηνος	Καλαμας	Ταυρωπός	Αχελώος	Καλαμας – Σουλοπ.	Αλιάκμ. Σιάτιστα	Αλιάκμ. Βενετ.	Αραχθος – γ.Γκογκ	Αραχθος – γ.Τσιμοβ
Από Ζαρρή -Λυκούδη (2007)													
Κώνοι κορημάτων - σύγχρονες	0.9	20.0	2.7	1.8	0.4	9.9	0.5	1.3	17.0	20.1	4.0	3.4	0.3
Κροκαλοπαγή, ψαμμίτες άμμοι	0.0	46.5	0.0	0.0	0.0	13.7	0.0	0.0	1.4	49.7	46.2	0.0	0.0
Φλύσχης	**56.5**	**3.6**	**41.9**	**71.4**	**47.6**	**22.8**	**48.9**	**63.1**	**11.3**	**2.3**	**13.4**	**59.3**	**84.0**
Ασβεστόλιθοι	34.0	11.0	12.5	23.2	49.0	51.3	46.0	34.3	65.4	14.8	3.0	27.0	13.6
Τριαδικά λατυποπαγή	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Τοφφίτες	8.6	0.0	0.0	3.0	3.1	0.0	4.6	1.4	0.0	0.0	0.0	10.2	1.1
Γνεύσιοι, σχιστόλιθοι, αμφιβολίτες	0.0	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0
Γρανίτες- γρανοδιορίτες, μονζονίτες	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5	0.0	0.0	0.0
Οφιόλιθοι	0.0	10.4	43.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	33.5	0.0	1.0
Από Κουτσογιάννη – Ταρλά (1987)													
Αλλουβιακές αποθέσεις				5.0		17.0					20.9	18.9	
Φλύσχης				**67.8**		**17.5**					**9.6**	**1.8**	
Ψαμμίτες - μάργες - σχιστόλιθοι				1.6		15.0					1.5	47.8	
Ασβεστόλιθοι - δολομίτες				23.5		50.5					68.0	7.3	
Μεταμορφωμένα - εκρηξιγενή				2.1		0.0					0.0	24.2	
Παρούσα έρευνα													
Αλλουβιακές αποθέσεις	2.2	11.6	1.0	3.4	2.9	16.1	48.6	3.3	7.6	2.9	22.1	11.7	4.8
Φλύσχης	**19.0**	**3.5**	**39.5**	**48.6**	**43.5**	**15.3**	**0.1**	**51.8**	**35.7**	**37.8**	**9.0**	**1.9**	**20.2**
Ψαμμίτες - μάργες - σχιστόλιθοι	3.3	27.1	3.2	10.2	10.5	7.1	6.8	5.7	11.9	5.7	4.1	21.2	20.1
Ασβεστόλιθοι - δολομίτες	56.6	16.1	8.0	32.4	42.0	50.5	38.0	34.8	43.6	47.1	69.2	23.4	3.3
Μεταμορφωμένα - εκρηξιγενή	18.1	18.3	48.6	13.3	0.2	0.0	5.3	2.6	0.4	2.9	0.0	10.2	45.3
Κώνοι κορημάτων - κατολισθήσεις	0.7	1.6	4.4	1.8	0.9	2.9	0.2	0.9	0.7	3.0	1.1	1.9	0.1

Αλιάκμων=Αλιάκμων στη Μ.Ιλαρίονα, Άραχθος=Άραχθος στην γ.Πλάκας, Καλαμάς=Καλαμάς στο Κιοτέκι, Αχελώος=Αχελώος στο Αυλάκι, Αώος=Αώος στη γ.Κόνιτσας

Πίνακας 4-25 Τιμές των κύριων μεταβλητών για τις λεκάνες της έρευνας[a]

no	*Σταθμός*	*Ποταμός*	*Κλίμα*		*Κλίσεις*		*Καλυψη γης*	*Λιθολογια*	*Υψόμετρα (m)*		*DD*	*Αλλουβ*	*Τεκτονισμός – mass wasting*		*Μορφομετρία*			
			T ˚C	**R**	**Κλίση %**	**LS**			**Hmax**	**Hmin**			**Ρήγματα**	**LFI**	**Comp**	**Circ**	**Len**	**Elon**
1	**Αυλάκι**	**Αχελώος**	15	988	46.5	8.40	0.59	0.63	2392	349	3.02	0.15	0.24	4.70	2.16	0.21	84.6	0.49
2	**Πόρος Ριγ.**	**Εύηνος**	16	1354	44.6	7.96	0.30	0.48	2387	119	3.15	0.23	0.21	4.60	1.75	0.33	40.0	0.85
3	**Τσίμοβο**	**Άραχθος**	13	1207	33.5	6.01	0.38	0.74	2222	363	3.63	0.00	0.37	3.60	2.10	0.23	43.6	0.65
4	**Γκόγκου**	**Άραχθος**	12	939	45.4	8.69	0.91	0.59	2420	367	2.97	0.16	0.26	2.70	1.67	0.36	15.0	1.08
5	**Πλάκα**	**Άραχθος**	13	1256	36.8	6.58	0.51	0.71	2420	240	3.46	0.00	0.54	3.50	2.31	0.19	58.6	0.59
6	**Σουλόπουλο**	**Καλαμάς**	13	1749	21.8	3.53	0.44	0.11	2116	181	2.29	0.00	0.11	2.30	2.31	0.19	48.6	0.62
7	**Κιοτέκι**	**Καλαμάς**	14	1838	26.4	4.51	0.41	0.23	2154	5	2.19	0.00	0.09	2.20	2.38	0.18	101	0.44
8	**Κόνιτσα**	**Αώος**	12	721	40.9	7.27	0.44	0.42	2627	443	2.90	0.04	0.07	2.00	2.05	0.24	49.6	0.59
9	**Βενέτικος**	**Αλιάκμων**	11	682	29.9	5.49	0.42	0.13	2203	601	6.46	0.00	0.08	1.00	1.65	0.37	20	1.25
10	**Σιάτιστα**	**Αλιάκμων**	10	651	20.1	3.74	0.32	0.02	2505	501	5.62	0.04	0.09	1.40	1.85	0.29	85.6	0.69
11	**Ιλαρίων**	**Αλιάκμων**	10.5	650	19.6	3.59	0.32	0.04	2505	300	6.08	0.03	0.06	1.40	2.04	0.24	170	0.47

[a]T είναι η θερμοκρασία, η R RUSLE είναι σε Mj mm ha^{-1} h^{-1} y^{-1}, η κλίση σε %, η LS RUSLE είναι αδιάστατη, η κάλυψη γής είναι το κλάσμα της κατηγορίας 33 (γυμνό ή με ελάχιστη κάλυψη έδαφος) εντός της λεκάνης, η Λιθολογία είναι είναι το κλάσμα της έκτασης του φλύσχη εντός της λεκάνης, DD είναι η υδρογραφική πυκνότητα, Αλλουβ είναι το κλάσμα της κατηγορίας 333, Ρήγματα ως (km^{-1}), LFI είναι ο δείκτης συχνότητας κατολισθήσεων, Comp, Circ, Elon είναι ο δείκτης συμπαγούς, η κυκλικότητα και η επιμήκυνση της λεκάνης απορροής αντίστοιχα, Len το μήκος της κεντρικής κοίτης,



Σχήμα 4-82 Χάρτες γεωγραφικής κατανομής των 1635 σημαντικών κατολισθήσεων στην Ελλάδα (πάνω), και (κάτω) χάρτης συχνότητας κατολισθήσεων (αριθμός κατολισθήσεων / 100 km^2). Πηγή: Koukis et al., 2005).

4.10.5 Συσχετίσεις

Στην συνέχεια σχολιάζονται οι σχέσεις της στερεοαπορροής με τις μεταβλητές αυτές που αποδείχτηκαν πιο ισχυρές με βάση τις συσχετίσεις. Από τον Πίνακα 4-26 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η πιο ισχυρή θετική συσχέτιση της ειδικής στερεοαπορροής είναι με την κλίση S, καθώς και με τον όρο LS (LengthSlope) της RUSLE. Οι δύο αυτές μεταβλητές συσχετίζονται μεταξύ τους πάρα πολύ, έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι ουσιαστικά αντιπροσωπεύουν το ίδιο πράγμα. Η ισχυρή αυτή συσχέτιση με την κλίση της λεκάνης μπορεί να δώσει μια σχέση απλής παλινδρόμησης που προβλέπει αρκετά καλά την στερεοαπορροή.

- Η ειδική στερεοαπορροή επίσης συσχετίζεται ισχυρά θετικά με την ποσοστιαία εμφάνιση φλύσχη στην λεκάνη. Με την κάλυψη γης – το ποσοστό αραιής/καθόλου βλάστησης στην λεκάνη (Barren) - εμφανίζεται μια μετρίως θετική συσχέτιση. Η αλλουβιακή κατάσταση του ποταμού παρουσιάζει ισχυρότερη θετικη συσχέτιση.

Πίνακας 4-26 Οι συσχετίσεις μεταξύ των σημαντικότερων μεταβλητών. Με έντονα γράμματα είναι συσχετίσεις με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%. Υπογραμμισμένες είναι οι συσχετίσεις με επεξηγηματική αξία.

	SSY	*A*	*Tmp*	*Q*	*Qs*	*R.RUSLE*	*Prec.*	*Runoff*	*Slope*	*LS.RUSLE*	*Relief*	*MeanH*	*Land cover*	*Lithology*	*DD*	*Alluvial*	*Faults*	*LFI*	*Comp*	*Circ*	*Len*	*K.RUSLE*	*C.RUSLE*
SSY		-0.36	0.35	-0.12	0.48	-0.12	0.60	0.53	**0.87**	**0.85**	0.48	**0.64**	0.41	**0.73**	-0.51	0.52	0.35	0.58	-0.03	-0.01	-0.29	-0.26	-0.46
A			-0.17	0.60	0.49	-0.34	-0.59	-0.54	-0.56	-0.52	0.33	-0.28	-0.38	-0.49	0.52	-0.16	-0.32	-0.33	0.08	-0.17	**0.92**	**0.89**	**0.70**
Tmp				0.38	0.46	0.48	0.32	0.33	0.52	0.46	0.39	-0.17	-0.05	0.36	-0.52	**0.67**	0.15	**0.81**	0.18	-0.18	0.01	-0.21	-0.22
Q					0.68	-0.09	-0.31	-0.23	-0.16	-0.17	0.20	-0.17	-0.21	-0.16	0.17	0.13	-0.08	0.23	0.28	-0.36	**0.66**	0.57	0.35
Qs						-0.24	-0.09	-0.11	0.28	0.26	0.63	0.19	-0.15	0.21	-0.03	0.30	0.05	0.40	0.25	-0.36	**0.61**	0.45	0.04
R.RUSLE							0.49	0.20	-0.04	-0.12	0.17	**-0.74**	-0.04	0.15	**-0.74**	-0.04	0.20	0.37	**0.62**	-0.52	-0.10	-0.34	0.02
Prec.								**0.87**	**0.67**	**0.65**	0.23	0.12	**0.74**	**0.75**	**-0.82**	0.35	0.56	0.58	0.21	-0.15	-0.49	-0.44	-0.26
Runoff									**0.76**	**0.77**	0.00	0.34	**0.86**	**0.69**	-0.54	0.57	0.43	0.54	-0.18	0.24	-0.54	-0.39	-0.29
Slope										**0.99**	0.23	**0.64**	0.55	**0.80**	-0.45	**0.71**	0.45	**0.72**	-0.25	0.25	-0.53	-0.44	-0.61
LS.RUSLE											0.20	**0.69**	0.59	**0.79**	-0.39	**0.72**	0.45	**0.67**	-0.32	0.32	-0.52	-0.41	-0.57
Relief												-0.13	-0.05	0.17	-0.40	0.38	0.11	0.35	0.29	-0.33	0.43	0.28	0.33
H mean													0.43	0.42	0.20	0.32	0.17	0.10	-0.56	0.50	-0.42	-0.15	-0.51
Land cover														0.46	-0.35	0.33	0.32	0.18	-0.17	0.22	-0.42	-0.23	-0.08
Lithology															-0.50	0.35	**0.83**	**0.79**	0.10	-0.10	-0.42	-0.40	-0.53
DD																-0.25	-0.28	-0.57	-0.51	0.47	0.28	0.49	0.16
Alluvial																	0.09	**0.63**	-0.48	0.46	-0.24	-0.15	-0.07
Faults																		**0.63**	0.21	-0.19	-0.30	-0.28	-0.25
LFI																			0.17	-0.19	-0.21	-0.34	-0.30
Comp																				**-0.99**	0.40	0.03	0.13
Circ																					-0.48	-0.09	-0.17
Len																						**0.79**	**0.61**
K.RUSLE																							0.53
C.RUSLE																							

Q η μέση ετήσια παροχή, Q_s η μέση ετήσια στερεοπαροχή, A η έκταση της λεκάνης απορροής, Prec.η μέση ετήσια βροχόπτωση, Runoff η μέση ετήσια απορροή, Slope η κλίση (%) της λεκάνης, Relief το ανάγλυφο (m), MeanH το μέσο υψόμετρο, Land cover το ποσοστό γυμνού εδάφους, Lithology το ποσοστό εμφάνισης φλύσχη, DD η υδρογραφική πυκνότητα, Alluvial το ποσοστό αλλούβιων στη λεκάνη, Faults τα μήκη των ρηγμάτων, LFI ο δείκτης κατολισθήσεων, Comp-Circ-Len οι δείκτες συμπαγούς,κυκλικότητας και επιμήκυνσης , LS.RUSLE-K.RUSLE-C.RUSLE οι αντίστοιχοι παράγοντες της RUSLE.

- Η στερεοαπορροή επίσης συσχετίζεται με την μέση ετήσια βροχόπτωση P. Δεν παρουσίαζεται καμμία συσχέτιση με την διαβρωτικότητα της βροχής R της RUSLE.

- Η υδρογραφική πυκνότητα παρουσιάζει μετρίως αρνητική συσχέτιση με την στερεοαπορροή. Είναι κατ' αρχήν παράδοξο όσο μεγαλώνει η υδρογραφική πυκνότητα να μικραίνει η στερεοαπορροή, καθώς μεγάλες τιμές της υδρογραφικής πυκνότητας σημαίνουν πιο πυκνό δίκτυο και μεγαλύτερη συνδεσιμότητα (connectivity) της λεκάνης, δηλαδή ευκολία μεταφοράς του υλικού στα κατάντη. Να σημειωθεί ότι οι τιμές έχουν προκύψει από τα μήκη των ψηφιοποιημένων ρευμάτων, επομένως εξαρτώνται από την ακρίβεια της ψηφιοποίησης του υδρογραφικού δικτύου. Μια πιο λεπτομερής ματιά αποκαλύπτει ότι το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στον Αλιάκμονα, που παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές υδρογραφικής πυκνότητας και μικρές τιμές στερεοαπορροής. Αν ο Αλιάκμων βγεί από την βάση δεδομένων, δεν παρουσιάζεται κάποια σχέση μεταξύ στερεοαπορροής και υδρογραφικής πυκνότητας.

- Ο συντελεστής σχήματος της λεκάνης (form factor Horton) επίσης παρουσιάζει μετρίως αρνητική συσχέτιση με την στερεοαπορροή. Η τιμή του συντελεστή σχήματος είναι εξαγόμενο του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε (r.basin GRASS) και δεν μπορεί να αναπαραχθεί. Ενδιαφέρον είναι ότι, καθώς οι μικρότερες τιμές υποδηλώνουν πιο κυκλικές λεκάνες, η στερεοαπορροή φαίνεται να ευνοείται κυρίως στις επιμήκεις λεκάνες. Η διεθνής βιβλιογραφία είναι διχασμένη ως προς αυτό το θέμα, όμως οι περισσότεροι ερευνητές φαίνεται να συμφωνούν ότι η στερεοαπορροή ευνοείται σε πιο κυκλικού σχήματος λεκάνες. Από τις υπόλοιπες μορφομετρικές μεταβλητές, καμμία δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική συσχέτιση με την στερεοαπορροή.

- Οι παράγοντες του τεκτονισμού, όπως είναι αναμενόμενο, εμφανίζονται να ευνοούν την στερεοαπορροή. Ειδικότερα, ο δείκτης των κατολισθήσεων (LFI) εμφανίζει μετρίως θετική συσχέτιση, ενώ η πυκνότητα των ρηγμάτων δεν εμφανίζει κάποια ιδιαίτερη συσχέτιση. Αυτό μπορεί και να οφείλεται σε λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί (κλίμακα/ακρίβεια χαρτογράφησης ρηγμάτων, ενημέρωση της βάσης δεδομένων, κ.λπ).

- Τέλος, πολλές από τις ερμηνευτικές μεταβλητές φαίνεται να συσχετίζονται ισχυρά μεταξύ τους. Πέραν της πλήρους σχεδόν ταύτισης της κλίσης με το LSτης RUSLE, το ποσοστό εμφάνισης φλύσχη συσχετίζεται ισχυρά θετικά με την παρουσία ρηγμάτων, τις κατολισθήσεις και την κλίση. Σε κάθε περίπτωση αυτές οι συσχετίσεις θέτουν ζητήματα «συγραμμικότητας» των δεδομένων (collinearity) οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στην κατασκευή του γραμμικού μοντέλου.

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1 ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΟ ΚΑΙ ΠΥΘΜΕΝΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΟΝ ΒΟΥΡΑΪΚΟ

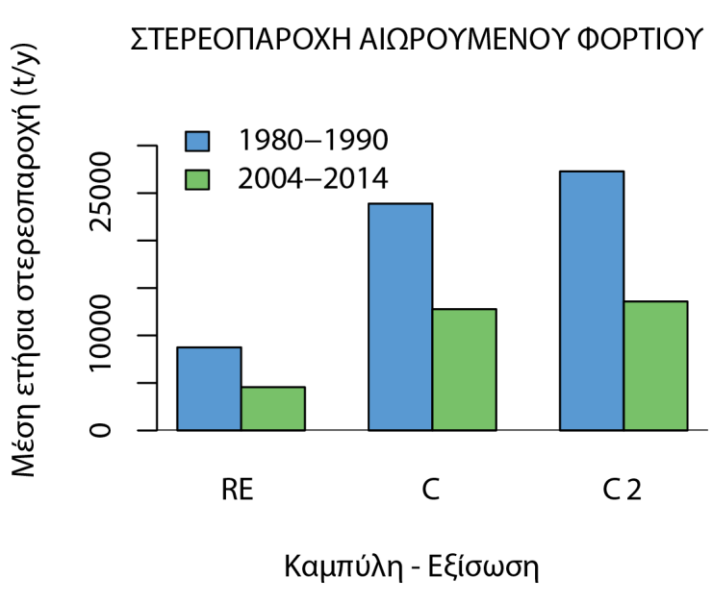
5.1.1 Αιωρούμενο φορτίο

Υπολογίστηκε η στερεοαπορροή του αιωρούμενου με δύο καμπύλες παροχής - στερεοπαροχής για τις δύο δεκαετείς περιόδους που διαθέτουμε, καθώς και με την σχέση Ryan – Emmett που αναπτύχθηκε για το Little Granite Creek. Η δεύτερη καμπύλη παροχής - στερεοπαροχής (Qs_2) είναι μια *τεθλασμένη παλινδρόμηση* που προβλέπει μεγαλύτερη κλίση για τιμές της παροχής μεγαλύτερες από την παροχή πλήρους κοίτης. Τα αποτελέσματα μακροσκοπικά, δηλαδή σε επίπεδο μέσων τιμών, δεν βρέθηκαν να διαφέρουν σημαντικά ανάμεσα στις δύο καμπύλες, ενώ η σχέση Ryan - Emmett έδωσε αρκετά μικρότερες τιμές, που όμως δικαιολογούνται από την υδρολογία του Little Granite Creek. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5-1 και στα Σχήματα 5-1, 5-2 (Qs_2).

Πίνακας 5-1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμών αιωρούμενου φορτίου για τις δύο περιόδους.

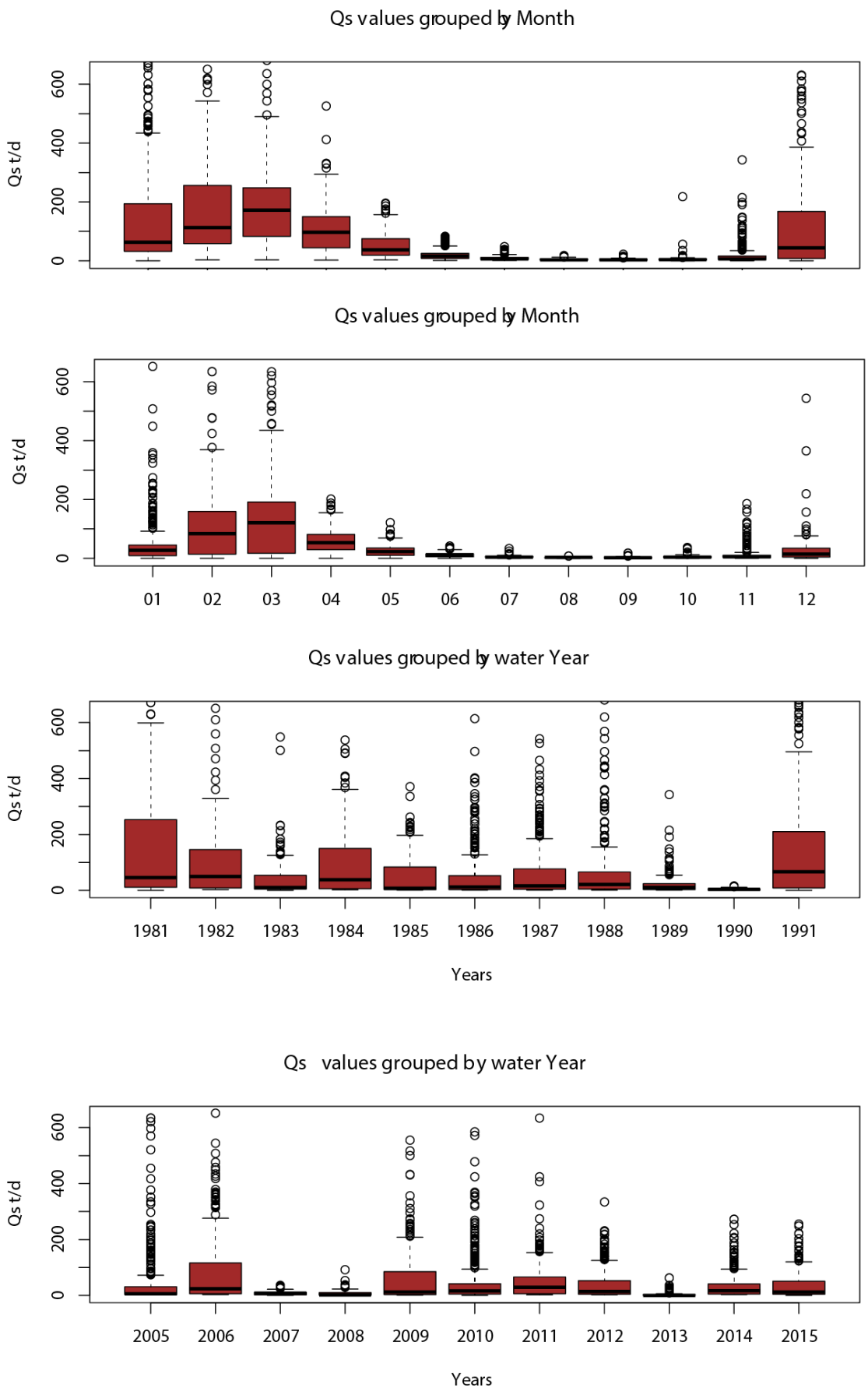
		Q *cms*	*G*	*C* *cmg*	*Qs*	*C2* *cmg*	*Qs₂*
Μέση	Α περ.	2.57	26.14	187	71.35	194	81.49
ημερήσια t/d	Β περ.	1.67	13.61	146	38.2	148	40.56
Μέση ετήσια	Α περ.		8751		23889		27285
t/y	Β περ.		4557		12780		13582
max / min	Α περ΄.		20995/ 375	737	55906/1377	1735	67518/ 1381
ετήσια t/y	Β περ.		10156/ 287	671	27996/910	1393	29129/906
Σύνολο	Α περ΄.	892*	105016		286671		22988
περιόδων t	Β περ.	580*	54680		153361		12358

Το G είναι από την σχέση Ryan – Emmett (Little Granite Creek).



Σχήμα 5-1 Μέση ετήσια στερεοπαροχή αιωρούμενου φορτίου από τις 2 καμπύλες παροχής - στερεοπαροχής και την εξίσωση Ryan – Emmet, για τις δύο περιόδους.

Οι δύο καμπύλες παροχής - στερεοπαροχής που χρησιμοποιήθηκαν δίνουν τιμές αιωρούμενου φορτίου από 24 έως 27 χιλιάδες μετρικούς τόνους τον χρόνο, στην πρώτη περίοδο, και περίπου 13 χιλιάδες t/y την δεύτερη περίοδο, με μέσο όρο και των δύο περιόδων περίπου 22 χιλιάδες t/y. Η σχέση των Ryan & Emmett προβλέπει πολύ λιγότερη μεταφορά, μόλις 9.5 χιλιάδες t/y, για την πρώτη περίοδο και 4.5 χιλιάδες t/y για την δεύτερη, με μέσο όρο περίπου 7 χιλιάδες t/y. Η μέγιστη τιμή που σημειώνεται είναι 67.5 χιλιάδες t/y στην πρώτη περίοδο (υδρολογική χρονιά 1984) και 28 χιλιάδες t/y για την δεύτερη.



Σχήμα 5-2 Ετήσια (πάνω) και μηνιαία κυτιογραφήματα αιωρούμενου φορτίου Qs για τις δύο περιόδους. δύο περιόδους.

Εφόσον γίνουν δεκτές ως ρεαλιστικές οι τιμές που προέκυψαν από τις καμπύλες παροχής - στερεοπαροχής που χρησιμοποιήθηκαν, και επιχειρηθεί η αναγωγή του αιωρούμενου φορτίου στην μονάδα εμβαδού, δηλαδή ανά km^2 (στερεοαπορροή, SSY), θα βρεθούμε αντιμέτωποι με το πρόβλημα του καθορισμού της συμβάλλουσας λεκάνης. Τα εμβαδά των λεκανών στις θέσεις των μετρήσεων δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 5-2.

Πίνακας 5-2 Τα εμβαδά των λεκανών στις θέσεις των μετρήσεων.

Λεκάνη στη θέση	*Εμβαδόν (km^2)*	*Εμβαδόν χωρίς Κερπινή (km^2)*
Ζαχλωρού γεφυράκι	186.5	16.8
ΔΕΗ Ζαχλωρού	183.7	14.0
Γέφυρα Πλιατσικούρα	179.8	10.1
Γέφυρα Κερπινής	169.7	-

Μπορούν να γίνουν κατ' αρχάς οι υποθέσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-3.

Πίνακας 5-3 Πιθανές εκδοχές της στερεοαπορροής αιωρούμενου $t/km^2/y$

Συμβάλλουσα Επιφάνεια Γ. Πλιατσικούρα	*Ολόκληρη*	*Μόνο κατάντη Κερπινής*	*20% συμβολή Κερπινής*	*50% συμβολή Κερπινής*
Εμβαδόν (km^2)	186.5	16.8	51	102
SSY ($t/km^2/y$)	118	1310	431	216

5.1.2 Κατανομές ιζήματος

Η εκτίμηση των βασικών διαμέτρων του ιζήματος (του στρώματος θωράκισης είτε του υποστρώματος) όπως π.χ των D_{50} ή D_{90}, είναι απαραίτητη, καθόσον αυτές αποτελούν στοιχεία εισόδου για όλα τα μοντέλα. Συγκεντρωτικά, οι δειγματοληψίες που έγιναν σε διάφορες θέσεις του ποταμού, καθώς και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον Πίνακα 5-1. Η ανάλυση των δειγμάτων φορτίου πυθμένα από τους δειγματολήπτες Helley-Smith και τις παγίδες, γινόταν κατά περίπτωση είτε με επι τόπου διαλογή μεγεθών με το χαλικόμετρο και ζύγιση -σε περιπτώσεις μικρών δειγμάτων μερικών δεκάδων γραμμαρίων-

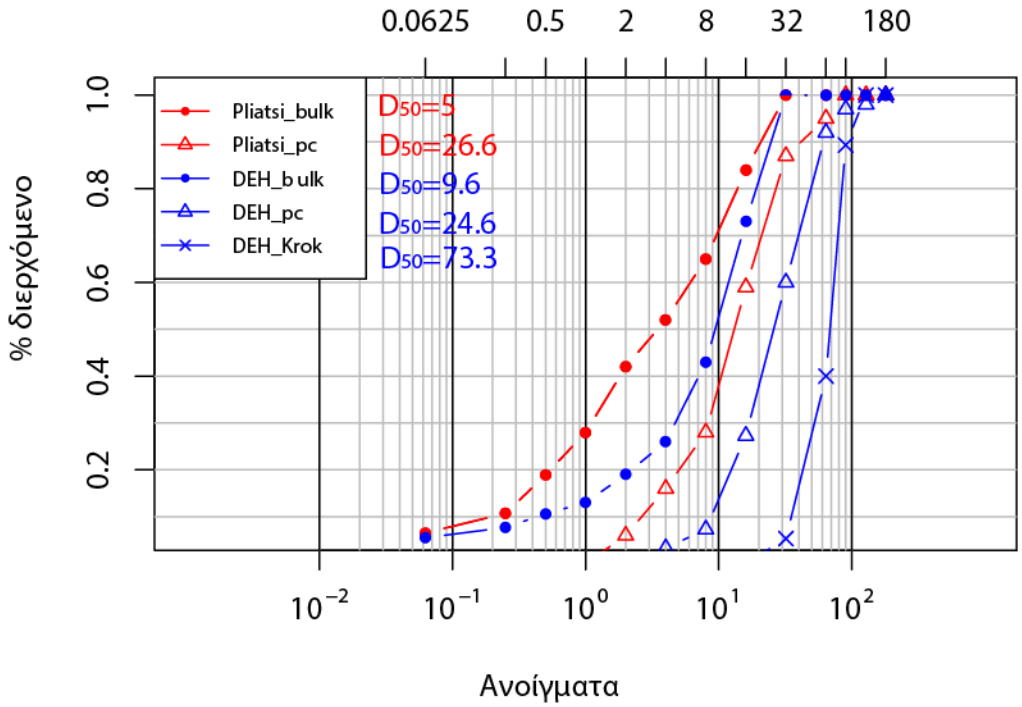
είτε, σε περιπτώσεις μεγάλων δειγμάτων, με κοσκίνιση και ζύγιση στο Εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος του -πρώην- ΤΕΙ Αθήνας.

Πίνακας 5-4 Συγκεντρωτική κατάσταση των δειγματοληψιών κοίτης και όχθών

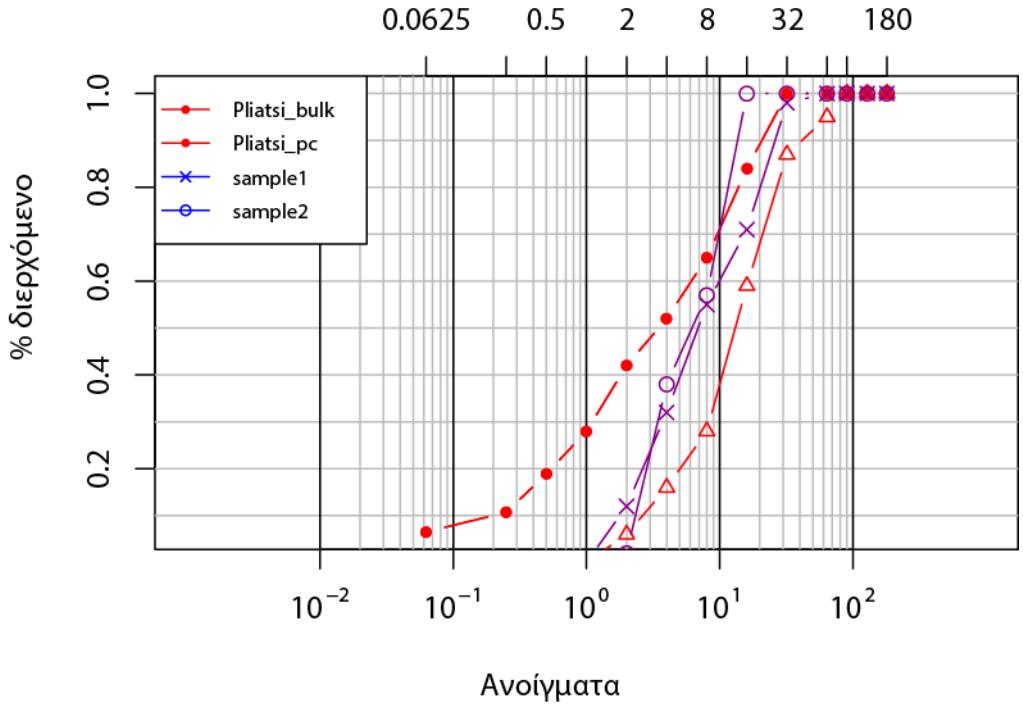
Ημερομηνία	*Θέσεις*	*Τύπος δειγματοληψίας*	*Παρατηρήσεις*
5-6 Οκτ.2013	Ζαχλωρού ΔΕΗ, Νιάματα, Κερπινή ανάντη, Κερπινή κατάντη	κροκαλομετρία (χάρακας και καρτέλα γωνιών)	Μετρήθηκαν πέτρες κυρίως μέσα στην κοίτη του ποταμού αλλά και στις όχθες.
15 Νοε. 2014	Ζαχλωρού ΔΕΗ	χαλικομέτρηση (χαλικόμετρο)	Δείγμα από εκτεθειμμένο gravel bar
7 Οκτ. 2015	Γ. Πλιατσικούρα	χαλικομέτρηση (χαλικόμετρο)	Δείγμα από εκτεθειμμένο gravel bar
14-15 Δεκ. 2015	Ζαχλωρού ΔΕΗ, Γ. Πλιατσικούρα	χύδην δείγματα (εργαστήριο)	Δείγματα με φτυάρι ~ 10kg από εκτεθειμμένα gravel bar

Στις περιπτώσεις των χύδην δειγμάτων και των δειγμάτων φορτίου η κατανομή προέρχεται από ζύγιση, ενώ στις άλλες περιπτώσεις (χαλικομετρήσεις και κροκαλομετρία), η κατανομή προέρχεται από τα μεγέθη (b -άξονας) που μέτρηθηκαν. Όπως φαίνεται η κάθε μέθοδος δίνει διαφορετικά αποτελέσματα, κάτι που γίνεται πιο φανερό στις αθροιστικές κατανομές (ποσοστά διερχόμενα) των επόμενων Σχημάτων 5-3 και 5-4.

Η χαλικομέτρηση δίνει συστηματικά περισσότερο αδρομερή κατανομή από τα χύδην δείγματα, πράγμα αναμενόμενο. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η παρουσία μικρών κλασμάτων (άμμου και ιλύος) σε ποσοστά από 20% στην θέση Ζαχλωρού ΔΕΗ, έως και 40%. στην Γ. Πλιατσικούρα.



Σχήμα 5-3 Σύγκριση αθροιστικών κατανομών για δύο θέσεις, Ζαχλωρού ΔΕΗ με μπλέ και Πλιατσικούρας με κόκκινο, και τριών μεθόδων (χύδην δείγματα, χαλικομέτρηση και κροκαλομετρία). Είναι φανερό τόσο από το σχήμα των κατανομών όσο και από τις τιμές του D50 που προέκυψαν από την κάθε μία ότι οι διαφορές είναι πολύ μεγάλες.



Σχήμα 5-4 Σύγκριση κατανομών 2 δειγμάτων φορτίου (Helley-Smith) με τις κατανομές χαλικομέτρησης και χύδην δείγματος για το Γ.Πλιατσικούρα. Η σύνθεση των δειγμάτων βρίσκεται ανάμεσα στις άλλες δύο και μάλλον κοντύτερα σε αυτή της χαλικομέτρησης. Αυτό είναι μιά ένδειξη για την προέλευση του φορτίου πυθμένα.

5.1.3 Φορτίο πυθμένα

Υπενθυμίζεται ότι από τα μοντέλα του BAGS δοκιμάστηκαν συνολικά 5 εξισώσεις, οι παρακάτω: Ryan and Emmett (RE), Wilcock clb (Wclb), Wilcock clb2 (Wclb2), Parker 1990 (P90) και Wilcock – Crowe 2003 (WC). Προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα από τις εξισώσεις αυτές, χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια δεδομένα εισόδου, τα οποία δίνονται στον Πίνακα 4-17, τον οποίο παραθέτουμε παρακάτω ξανά. Υπολογίστηκαν δύο ενδεκαετείς χρονοσειρές (1980-1990 και 2004-2014) με 5 εξισώσεις. Στα επόμενα διαγράμματα δίνονται οι προβλέψεις της Wclb2 σαν πιο πιθανές. Ωστόσο, όπως φαίνεται στα συγκεντρωτικά αποτελέσματα, σε μακροπρόθεσμη βάση (δεκαετία), οι 4 εξισώσεις τείνουν να δίνουν πολύ κοντινά αποτελέσματα, ενώ η P90 δίνει σχεδόν τις διπλάσιες τιμές. Οι χρονοσειρές παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-5 παρακάτω και τα κυτιογραφήματα στο Σχήμα 5-6.

Πίνακας 5-5 Τα δεδομένα εισόδου στις εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο BAGS.

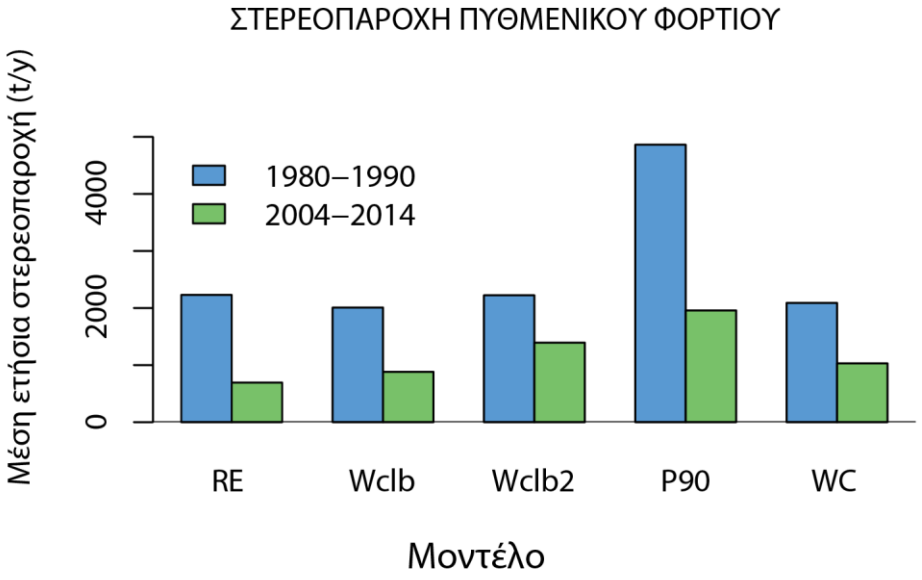
Είσοδοι	*Εξισώσεις*	*Τιμές - παρατηρήσεις*
Μέση κλίση, S	Wclb, Wclb2, P90, WC	0.015 (1.5%)
n Manning	Wclb, Wclb2, P90, WC	0.05
Κατανομή ιζήματος		D16 = 23.24 / D50 = 62.49
επιφανείας	Wclb, Wclb2, P90, WC	D84 = 116.84 / Dmed=52.35
Μετρήσεις	Wclb, Wclb2	5 δείγματα

Η πρώτη παρατήρηση εξετάζοντας το Σχήμα 5-7 είναι ότι η μεταφορά του πυθμενικού φορτίου συμβαίνει κυρίως κατά την τετραμηνία Δεκέμβριος – Μάρτιος. Είναι επίσης σαφές ότι η δεύτερη δεκαετία, πολύ φτωχότερη σε νερό, έχει μεταφέρει πολύ λιγότερο (αδρομερές) ίζημα. Συνοπτικά αποτελέσματα για τις πιο χαρακτηριστικές τιμές του μεταφερόμενου ιζήματος (μέσα, μεγιστα, ελάχιστα) δίνονται στον Πίνακα 5-6 που ακολουθεί.

Παρά τις διαφορές τους οι 4 εξισώσεις, εκτός της P90, δίνουν περίπου ίδια αθροίσματα για την πρώτη περίοδο, ενώ κατά στην δεύτερη και υδρολογικά φτωχή περίοδο υπάρχει μεγαλύτερη διασπορά των υπολογισθέντων τιμών.

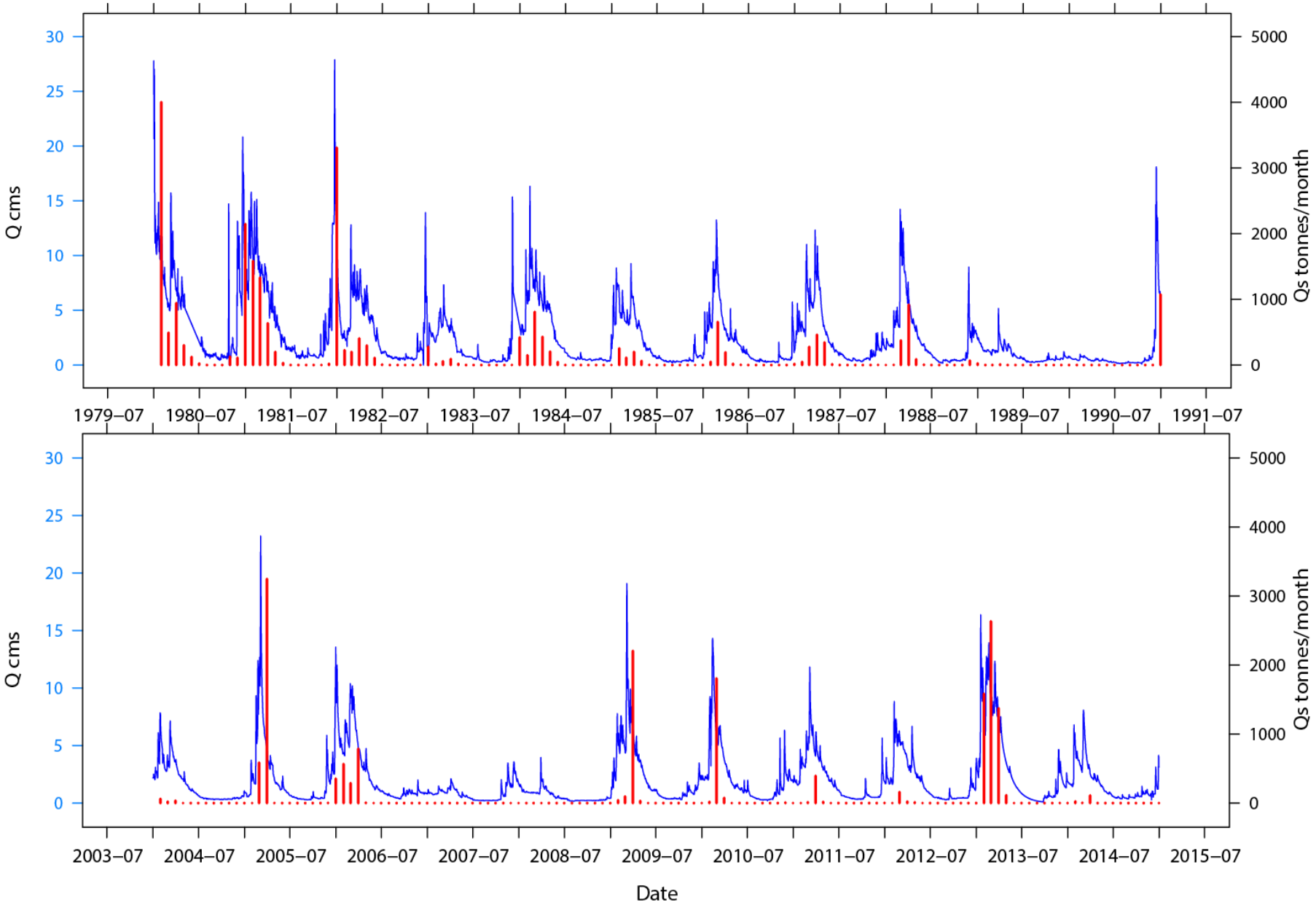
Πίνακας 5-6 Συνοπτικά αποτελέσματα στερεοπαροχής πυθμενικού φορτίου από τις 5 εξισώσεις.

Q μέση ημερήσια A :2,57 - B :1,66		**Ryan Emmet**	**Wilcock clb**	**Wilcock clb2**	**Parker90**	**Wilcock Crowe**
Μέση ημερήσια t/d	Α περ.	6.10	5.50	6.06	13.3	5.72
	Β περ.	2.07	2.63	4.16	5.85	3.07
Μέση ετήσια t/y	Α περ.	2229	2008	2223	4862	2090
	Β περ.	693	882	1393	1958	1030
Μέγιστη τιμή t/d	Α περ.	848	714	794	2156	1075
	Β περ.	489	485	879	1505	744
Σύνολο περιόδων t/y	Α περ.	24519	22091	24450	53485	22988
	Β περ.	8319	10591	16712	23503	12358
Μέση μηνιαία τιμή τετραμηνίας Δεκ-Απρ. t/μήνα	Α περ.	5567	5020	5552	12761	5503
	Β περ.	1953	2483	4128	5785	3038

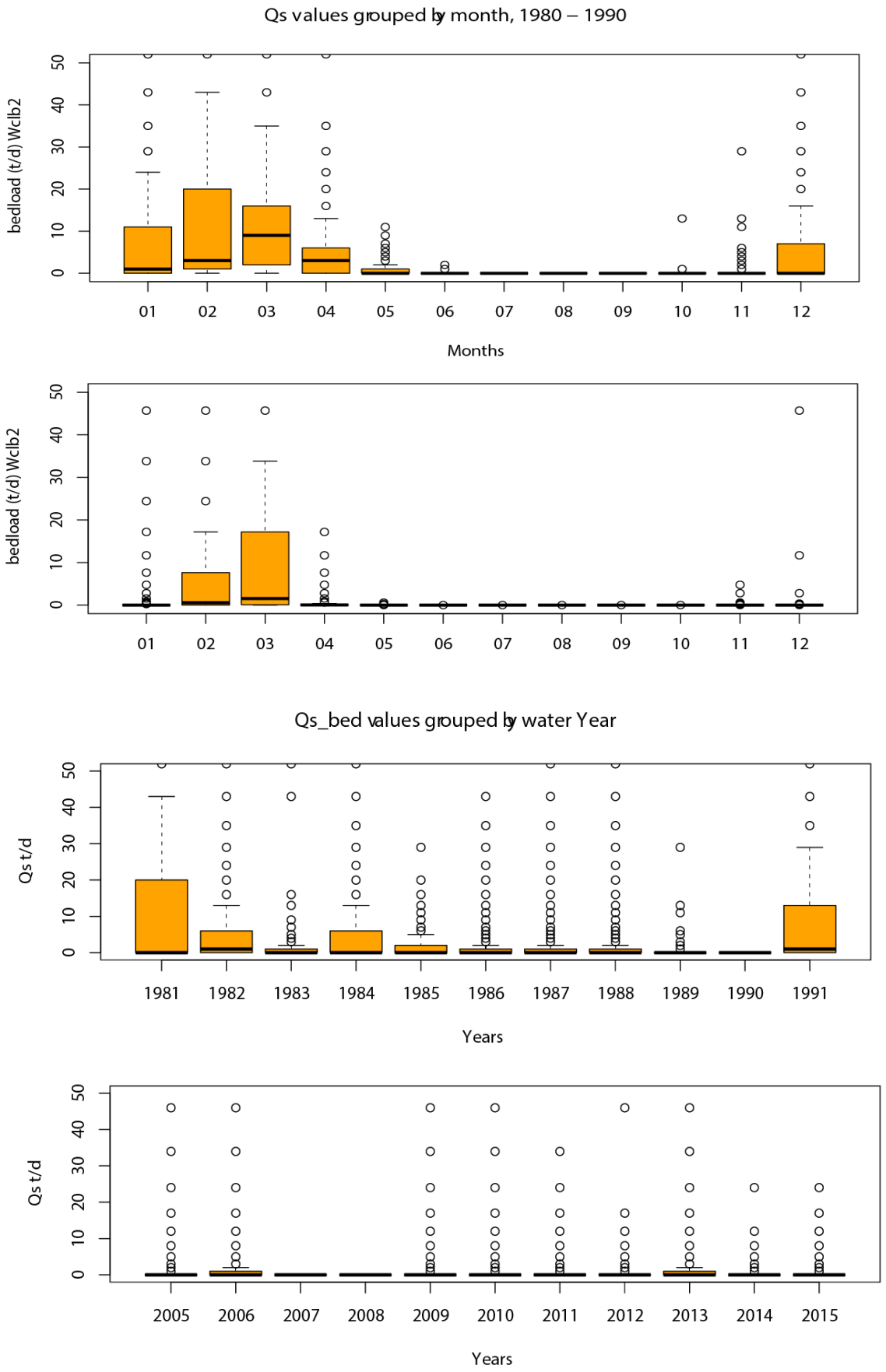


Σχήμα 5-5 Σύγκριση αποτελεσμάτων των 5 μοντέλων πυθμενικού φορτίου.

Στα επόμενα Σχήματα 5-6 και 5-7 δίνονται αντίστοιχα οι χρονοσειρές στερεοπαροχής και τα κυτιογραφήματα φορτίου κοίτης ανά μήνα και υδρολογική χρονιά.

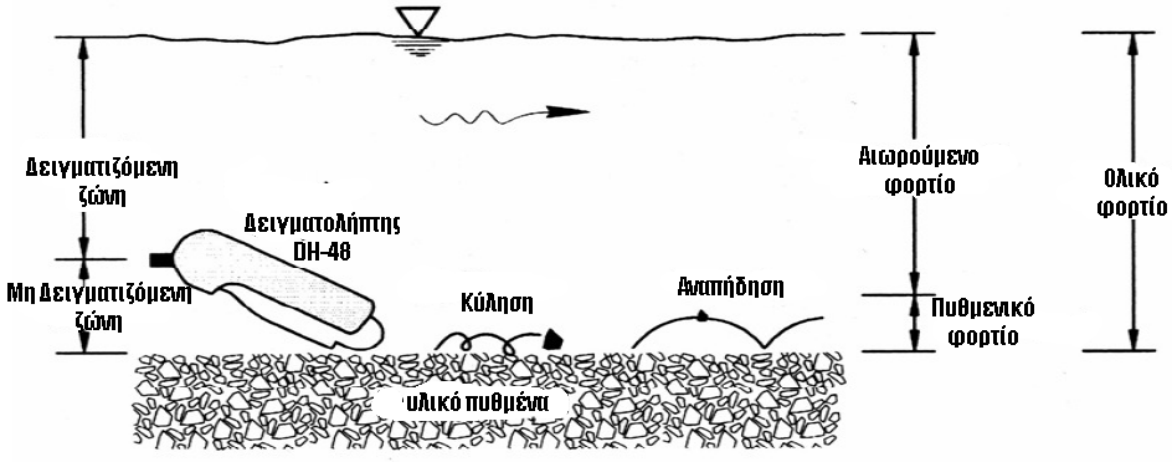


<u>Σχήμα 5-6</u> Ημερήσιο υδρογράφημα και μηνιαίες στερεοαπορροές πυθμενικού φορτίου για τις δύο περιόδους. Οι ποσότητες του φορτίου έχουν υπολογιστεί με την εξίσωση Wclb2.



Σχήμα 5-7 Μηνιαία και ετήσια κυτιογραφήματα για το φορτίο πυθμένα Qs για τις δύο περιόδους.

Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν περιέχουν και την συμβολή του μικρότερου ιζήματος, αυτό των ψηφίδων (~2mm) στην συνολική απορροή υλικού πυθμένα, εκτός του μοντέλου Parker90 που περιλαμβάνει μόνο κλάσματα μεγαλύτερα από 2 mm. Η χοντρή άμμος δεν εκπροσωπείται στα δείγματα ούτε του Helley - Smith μιάς και το δίκτυ του είναι μεγαλύτερου ανοίγματος από 3 mm, αλλά ούτε και του DH-48, μιας και ο δειγματολήπτης αυτός δεν κάθεται στον πυθμένα (Σχ. 5-8).

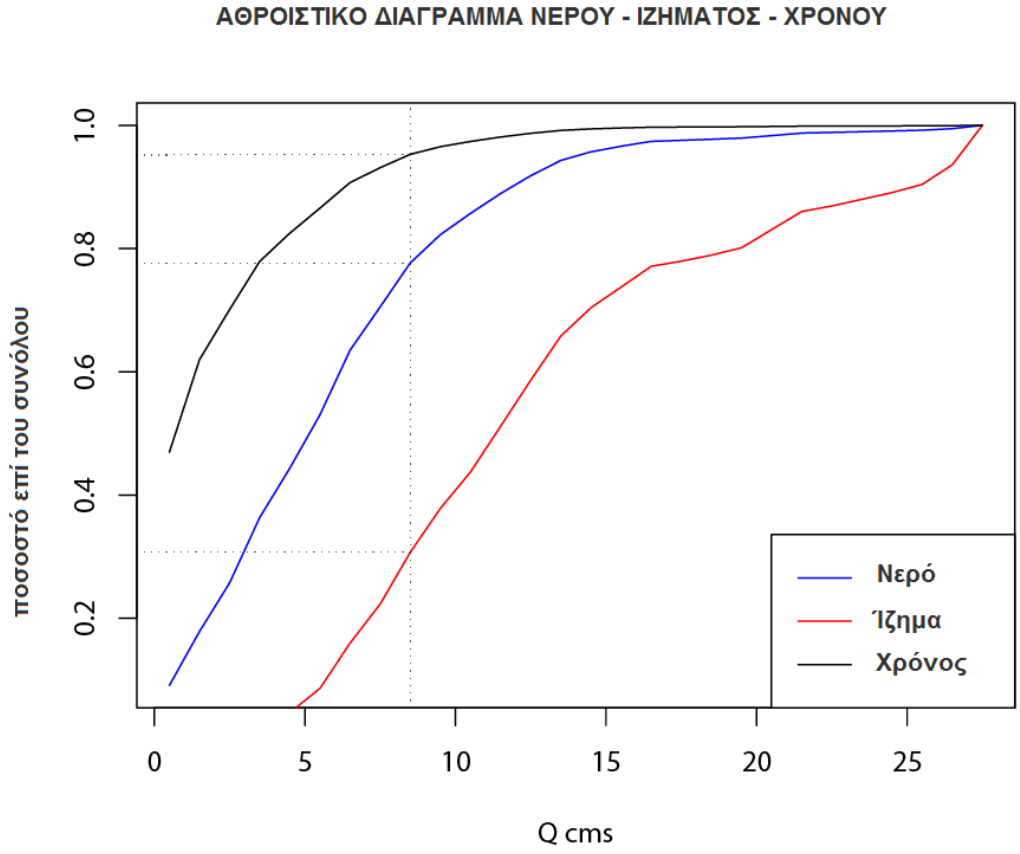


Σχήμα 5-8 Ο δειγματολήπτης δεν καλύπτει την ζώνη πάνω από τον πυθμένα (Morris and Fan, 2009).

Τα χύδην δείγματα από μεταφερόμενο φορτίο που αναλύθηκαν έχουν αρκετά μεγάλες περιεκτικότητες σε άμμο: 30% στην Γ. Πλιατσικούρα και περίπου 15% στην Ζαχλωρού ΔΕΗ. Όπως είδαμε, η περιεκτικότητα σε άμμο του πυθμένα ευνοεί την κίνηση τόσο των μικρών όσο και των μεγαλύτερων κλασμάτων, αλλά η προσφορά της άμμου είναι αρκετά εποχιακή. Σε κάθε περίπτωση, αυτό είναι ένα ζήτημα που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης, μιας και το φορτίο σε αυτή την κατηγορία μεγέθους πρέπει να είναι σημαντικό.

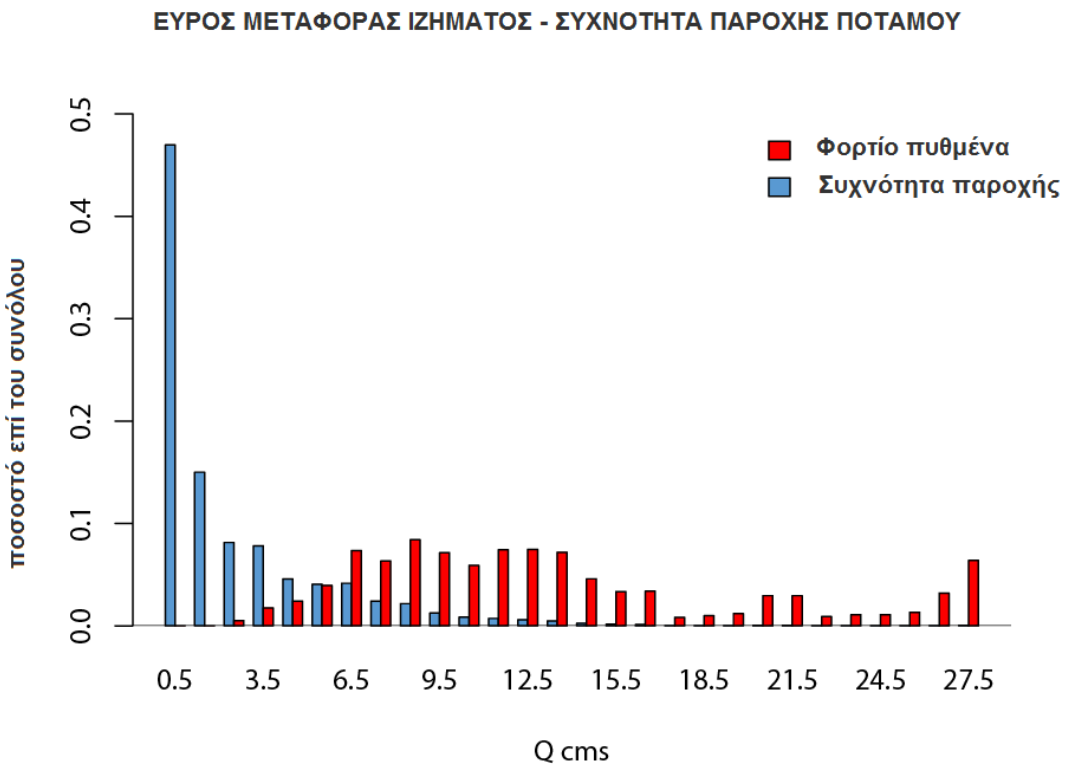
Από την ανάλυση και θεώρηση των αποτελεσμάτων μπορούν να βγούν αρκετά συμπεράσματα. Μάλιστα, οι τιμές που υπολογίζονται μπορούν να θεωρηθούν σχετικά ασφαλείς αφού οι διάφορες εξισώσεις δείχνουν να συγκλίνουν σε μακροπρόθεσμη βάση (μέσες ετήσιες τιμές, αθροίσματα). Ωστόσο παραμένουν τα ζητήματα των δεδομένων εισόδου, στα οποία τα μοντέλα έχουν μεγάλη ευαισθησία όπως διαπιστώθηκε, και είναι κυρίως η κατανομή του ιζήματος (η αντιπροσωπευτική διάμετρος) και ο συντελεστής τραχύτητας στη διατομή.

Στο Σχήμα 5-9 διαπιστώνεται ότι μέχρι την παροχή 5 m^3/s, που μεγαλύτερη ή ίση της συμβαίνει μόνο στο 20% του χρόνου και μέχρι την οποία έχει διαρρεύσει το 40% του νερού, δεν σημειώνεται καμία μεταφορά φορτίου πυθμένα. Έως και την παροχή πλήρους κοίτης (~8 m^3/s), έχει μεταφερθεί μόνο το 30% του ιζήματος, έχει διαρρεύσει το 80 % του νερού, ενώ μεγαλύτερη ή ίση συμβαίνει μόνο στο ~4% του χρόνου.



Σχήμα 5-9 Διάγραμμα αθροιστικού νερού – ιζήματος - χρόνου.

Μία παρόμοια εικόνα εμφανίζεται στο Σχήμα 5-10. Οι ροές που μεταφέρουν την πλειοψηφία του πυθμενικού φορτίου (~75%) είναι στο εύρος 5 -15 cms. Ωστόσο, στις πολύ μεγάλες πλημμυρικές παροχές (δεκαετίας) παρατηρείται αξιόλογη μεταφορά. Δυστυχώς σε αυτές τις παροχές, ακόμα και εάν τα συνεργεία είναι παρόντα, δεν υπάρχουν δυνατότητες μετρήσεων.



Σχήμα 5-10 Διάγραμμα στερεοπαροχής πυθμενικού φορτίου – συχνότητας απορροών. ροών.

5.1.4 Ανακεφαλαίωση

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο καθώς και η εφαρμογή των μοντέλων του BAGS στον Βουραϊκό ποταμό δίνουν μια πρώτη εκτίμηση του δυναμικού στερεοπαροχής του ποταμού αυτού. Συγκεκριμένα, από το τμήμα του ποταμού που ορίζεται από τη θέση Γέφυρα Πλιατσικούρα έως την Ζαχλωρού υπολογίστηκε ότι διέρχονται ετησίως περίπου ~20 χιλιάδες τόνοι αιωρούμενου φορτίου και ~1500 τόνοι πυθμενικού φορτίου (μέσοι όροι των δύο περιόδων) και ότι η μεταφορά αυτή συμβαίνει κυρίως στο τετράμηνο από Δεκέμβριο έως και Μάρτιο. Η διακύμανση μεταξύ των διαφορετικών ετών είναι σημαντική. Επισημαίνεται ότι τα μοντέλα και οι εξισώσεις εκτιμούν την στερεομεταφορική ικανότητα του ποταμού σε κάποια θέση, δηλαδή την μεταφορά που θα λάμβανε χώρα εφόσον το προς μεταφορά υλικό είναι διαθέσιμο. Οι συνεχείς κατολισθήσεις που συμβαίνουν όπως είδαμε σε πολλά σημεία με τις πρώτες βροχές του φθινοπώρου, παρέχουν αυτό το υλικό σε τακτική βάση. Έτσι, είναι ασφαλές να

θεωρηθεί ότι, προκειμένου για το πυθμενικό φορτίο, οι υπολογισθείσες ποσότητες είναι κοντά σε αυτές που πράγματι μεταφέρονται.

Η δυσκολία εκτίμησης της στερεοαπορροής στην περίπτωση του ποταμού αυτού έγκειται στην ποσοτική εκτίμηση του ρόλου που παίζει το υψίπεδο των Καλαβρύτων στην παγίδευση του αιωρούμενου φορτίου. Είναι πιθανόν το μεγαλύτερο τμήμα του αιωρούμενου ιζήματος που προέρχεται από το τμήμα της λεκάνης ανάντη της γέφυρας της Κερπινής (θεωρούμε ότι αυτό το σημείο σημειώνει την μετάβαση από το ανώτερο στο κατώτερο τμήμα) αποτιθεται κατά την διαδρομή του ποταμού από την κοιλάδα. Αυτό ενισχύεται από την πολύ μικρή κλίση της κοίτης του ποταμού σε αυτό του το τμήμα και επιβεβαιώνεται από την σύσταση της αμμώδους κοίτης του. Έτσι, θα πρέπει να υποτεθεί ότι το μεγαλύτερο τμήμα του αιωρούμενου φορτίου που διέρχεται από την Ζαχλωρού, προέρχεται κυρίως από την λεκάνη κατάντη της Κερπινής, χωρίς όμως αυτό το κλάσμα να μπορεί να εκτιμηθεί ακριβέστερα. Όπως αναφέρθηκε ήδη στο Εδάφιο 3.1.2, οι Σαμπώ και Μαρουκιάν (1989) συμπεραίνουν ότι το ίζημα που προκύπτει από τη διάβρωση του ορεινού τμήματος της λεκάνης αποτίθεται στο ανώτερο τμήμα αυτής (δηλαδή στο υψίπεδο των Καλαβρύτων), ενώ το κατώτερο τμήμα συνεχίζει να υφίσταται ισχυρή διάβρωση κυρίως λόγω των υψηλών μορφολογικών κλίσεων που επικρατούν σε αυτό. Στο παραλιακό τμήμα (το δελταϊκό ριπίδιο), αλλά και λίγο ανάντη αυτού (στην περιοχή Νιάματα), ένα τμήμα του φορτίου αυτού αποτίθεται.

Ειδικότερα, όπως φαίνεται από τις επόμενες φωτογραφίες από την περιοχή της συμβολής του παραποτάμου της Κερπινής με το κύριο ρεύμα του Βουραϊκού, (Σχήματα 5-11,5-12,5-13), η περιοχή της συμβολής λειτουργεί ως μία μεγάλη «αποθήκη» ιζήματος. Έτσι, ο Βουραϊκός ποταμός, σε αντίθεση με τους γειτονικούς του ποταμούς όπως για παράδειγμα ο Σελινούντας, δεν μεταφέρει το διαβρούμενο υλικό από όλη την λεκάνη απορροής του στην παραλιακή ζώνη και στη θάλασσα, αλλά κυρίως από το τμήμα αυτό της λεκάνης κατάντη της Κερπινής, που αντιπροσωπεύει μόνο το 40% περίπου της συνολικής έκτασης της λεκάνης απορροής του (περίπου 100 km^2 από 270 km^2). Ίσως αυτός είναι και ο λόγος που τα ευρήματα της εφαρμογής των μεθόδων τηλεπισκόπησης (Κεφάλαιο 5.2) τοποθετούν τον Βουραϊκό χαμηλότερα, σε ότι αφορά το αιωρούμενο ίζημα, σε σχέση με τους γειτονικούς του ποταμούς Κράθη και Κριό που έχουν μικρότερης έκτασης λεκάνες απορροής.

<u>Σχήμα 5-11</u> Επάνω: συμβολή του παραποτάμου Κερπινής στον Βουραϊκό ποταμό. Στο βάθος η λεκάνη απορροής της Κερπινής. Κάτω: στη συνέχεια της πορείας του ο Βουραϊκός μπαίνει σε στενή, V-σχήματος κοιλάδα.

Σχήμα 5-12 Η περιοχή της συμβολής είναι μια μεγάλων διαστάσεων δεξαμενή ιζήματος. Το περισσότερο υλικό αποθηκεύεται εκεί και προσχώνει τη θέση σταδιακά.

Σχήμα 5-13 Όπως διαπιστώνεται από τη στρωματογραφία της περιοχής, φερτά όλων των διαμέτρων κατάγονται από τον παραπόταμο της Κερπινής και αποτίθενται.

5.2 ΕΥΡΗΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, προκειμένου για τα προϊόντα MOD02QKM και MOD02HKM, 382 από τις 699 εικόνες πέρασαν στο στάδιο της τελικής επεξεργασίας. Για την κάθε μία από τις εικόνες αυτές υπολογίστηκαν πλήρεις στατιστικές παράμετροι (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, max-minκ.ά) 6 δεικτών (4 δεικτών και δύο λόγων) και 3 μασκών (ποσοστό που καταλαμβάνει η μάσκα) μέσα στα 17 πολύγωνα ενδιαφέροντος (rois).

5.2.1 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (Principal Components Analysis)

Η ανάλυση κυρίων συνιστωσών (PCA) δορυφορικών πολυφασματικών εικόνων, είναι ένας μαθηματικός μετασχηματισμός που χρησιμοποιείται για ποικίλους χαρτογραφικούς σκοπούς. Στην περίπτωση των 4 καναλιών του MOD02 ο μετασχηματισμός παράγει μια ομάδα από 3 ασυσχέτιστες μεταξύ τους συνιστώσες που είναι γραμμικοί συνδυασμοί των αρχικών και στις οποίες κατανέμεται το σύνολο της διασποράς των αρχικών καναλιών (Μηλιαρέσης, 2006). Μια βασική εφαρμογή του μετασχηματισμού είναι η μείωση των καναλιών της αρχικής εικόνας (data reduction).

Υπολογίστηκε ο μετασχηματισμός από επιλεγμένα τμήματα των εικόνων. Σκοπός ήταν ο υπολογισμός ενός μετασχηματισμού που θα είναι αντίστοιχος περιοχών με ιδιαίτερα φασματικά χαρακτηριστικά. Αυτές οι περιοχές αντιστοιχούσαν σε τρεις περιπτώσεις που αναγνωρίστηκαν οπτικά: καθαρή θάλασσα, θάλασσα κυριαρχούμενη από αιωρούμενο ίζημα και θάλασσα κυριαρχούμενη από αιωρούμενο υλικό (με αξιόλογη παρουσία οργανικού υλικού). Έτσι, στις εικόνες των κυρίων συνιστωσών που θα προέκυπταν θα ήταν ενισχύμένες οι περιοχές με φασματικά χαρακτηριστικά ανάλογα προς αυτά των περιοχών από τις οποίες υλοποιήθηκε ο μετασχηματισμός.

Από την παραπάνω ανάλυση (Πίν.5-6) που έγινε με το ομώνυμο εργαλείο στο ArcGIS, παρατηρούνται τα εξής: στην καθαρή θάλασσα τα κανάλια είναι πολύ λιγότερο συσχετισμένα μεταξύ τους, μια καθαρή ένδειξη ότι η ανακλαστικότητα όλων ενισχύεται από την παρουσία αιωρούμενου υλικού. Στην καθαρή θάλασσα, η σύσταση του πρώτου ιδιοδιανύσματος (1^{ης} ΚΣ) προέρχεται κυρίως από την συνεισφορά (loadings) του μπλέ καναλιού και μειώνεται καθώς αυξάνεται το μήκος κύματος ενώ το ποσοστό της διασποράς που ερμηνεύεται είναι μόνο 55-70%. Αντίθετα, στην θάλασσα με αιωρούμενο ίζημα η κύρια συνεισφορά στο πρώτο ιδιοδιάνυσμα προέρχεται από το κόκκινο κανάλι ενώ ακολουθεί το εγγύς υπέρυθρο. Η συνεισφορά του μπλέ σχεδόν εκμηδενίζεται ενώ η

συνεισφορά του πράσινου μειώνεται. Το ποσοστό διασποράς που ερμηνεύεται αυξάνεται σε 75-89%. Στην θάλασσα με μεγάλη παρουσία οργανικού υλικού (Θερμαϊκός κόλπος κυρίως) η κύρια συνεισφορά προέρχεται από το πράσινο κανάλι, η συνεισφορά του μπλέ αυξάνεται, μειώνεται το κόκκινο ενώ το εγγύς υπέρυθρο σχεδόν εξαφανίζεται. Το ποσοστό διασποράς που ερμηνεύεται είναι 62-86%.

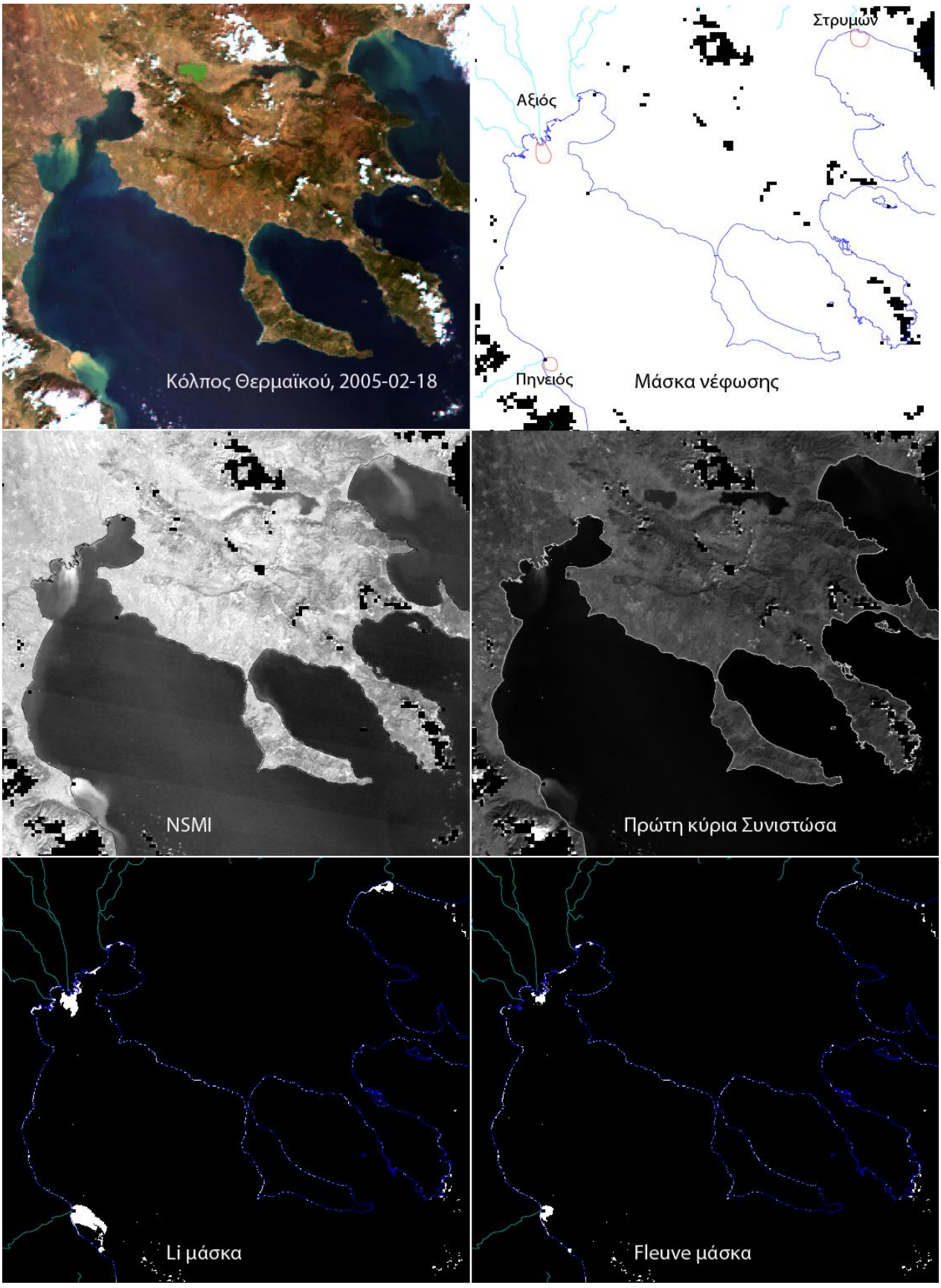
Πίνακας 5-7 Ανάλυση αποτελεσμάτων της πρώτης κύριας συνιστώσας για τρεις διαφορετικές περιοχές. Γενικά, η πρώτη κύρια συνιστώσα αντιστοιχεί στην μέση τιμή της φωτεινότητας των καναλιών που συμμετέχουν στον μετασχηματισμό (Μηλιαρέσης, 2006).

Κανάλι	*Καθαρή θάλασσα*	*Θάλασσα με αιωρούμενο ίζημα*	*Θάλασσα με αιωρούμενο υλικό*
Μπλέ 459 – 479 μm	0.74÷0.8	0.12÷0.17	0.34÷0.38
Πράσινο 545 – 565 μm	0.48÷0.5	0.34÷0.39	0.72÷0.86
Κόκκινο 620 – 670 μm	0.22÷0.3	0.78÷0.82	0.32÷0.55
Εγγύς Υπερυθρο 841 – 876 μm	0.15÷0.2	0.42÷0.46	0.15÷0.03
Ποσοστό της διακύμανσης που ερμηνεύεται από την πρώτη συνιστώσα	56÷70	75÷89	62÷86

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις αποφασίστηκε να προταθεί ένας επιπλέον δείκτης, αυτός της πρώτης συνιστώσας για θάλασσα με αιωρούμενο ίζημα, ο οποίος τελικά και χρησιμοποιήθηκε σαν υποκατάστατο της συγκέντρωσης αιωρούμενων ιζημάτων για την σύγκριση των ποταμών, καθώς ενσωματώνει και τα 4 κανάλια. Πράγματι, ερευνητές έχουν τεκμηριώσει μια σημαντική συσχέτιση αυτής της πρώτης συνιστώσας με τις συγκεντρώσεις TSS στο θαλασσινό νερό (Fan and Warner, 2014). Η δημιουργία αυτού του επιπλέον δείκτη είναι απλή:

$$PC1 = 0.15*\rho_{blue} + 0.35*\rho_{green} + 0.80*\rho_{red} + 0.43*\rho_{nir} \quad (5\text{-}1)$$

Η απόδοση μερικών δεικτών και μασκών παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-14.

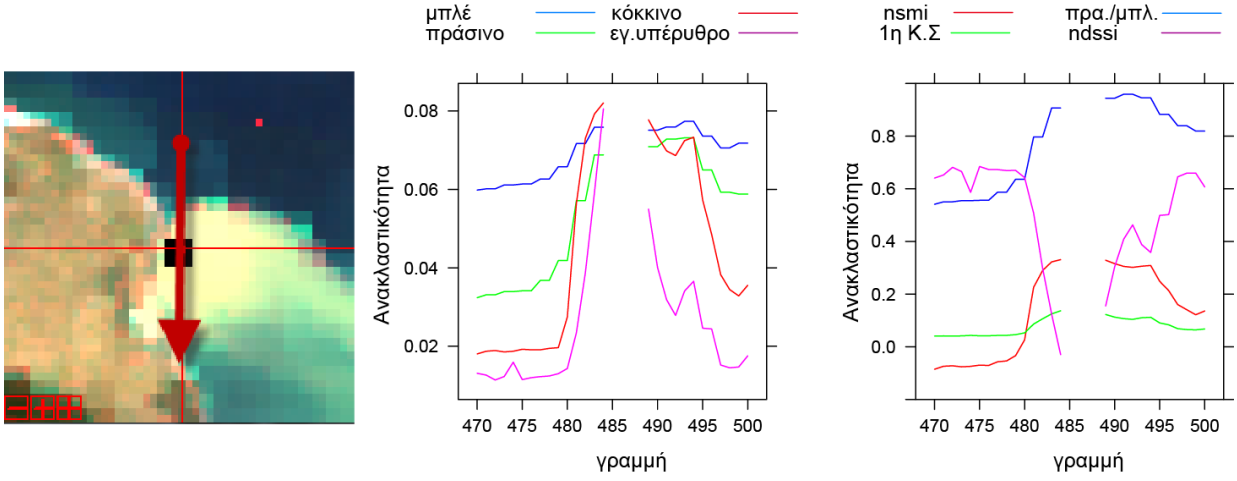


Σχήμα 5-14 Απόδοση δεικτών/μασκών στην χαρτογράφηση και οριοθέτηση αντίστοιχα, των πλουμίων τριών ποταμών - 18 /2 /2005. Πάνω δεξιά η μάσκα νέφωσης. Στο μέσον, τα πλούμια των π. Πηνειού και Αξιού διακρίνονται καθαρά και για τους δύο δείκτες. Κάτω, η μάσκα fleuve είναι πιο συντηρητική από την μάσκα Li καθώς δίνει μικρότερη έκταση του πλούμιου. Η τρίτη μάσκα, NSMI, βρίσκεται κάπου ανάμεσα σε αυτές τις δύο.

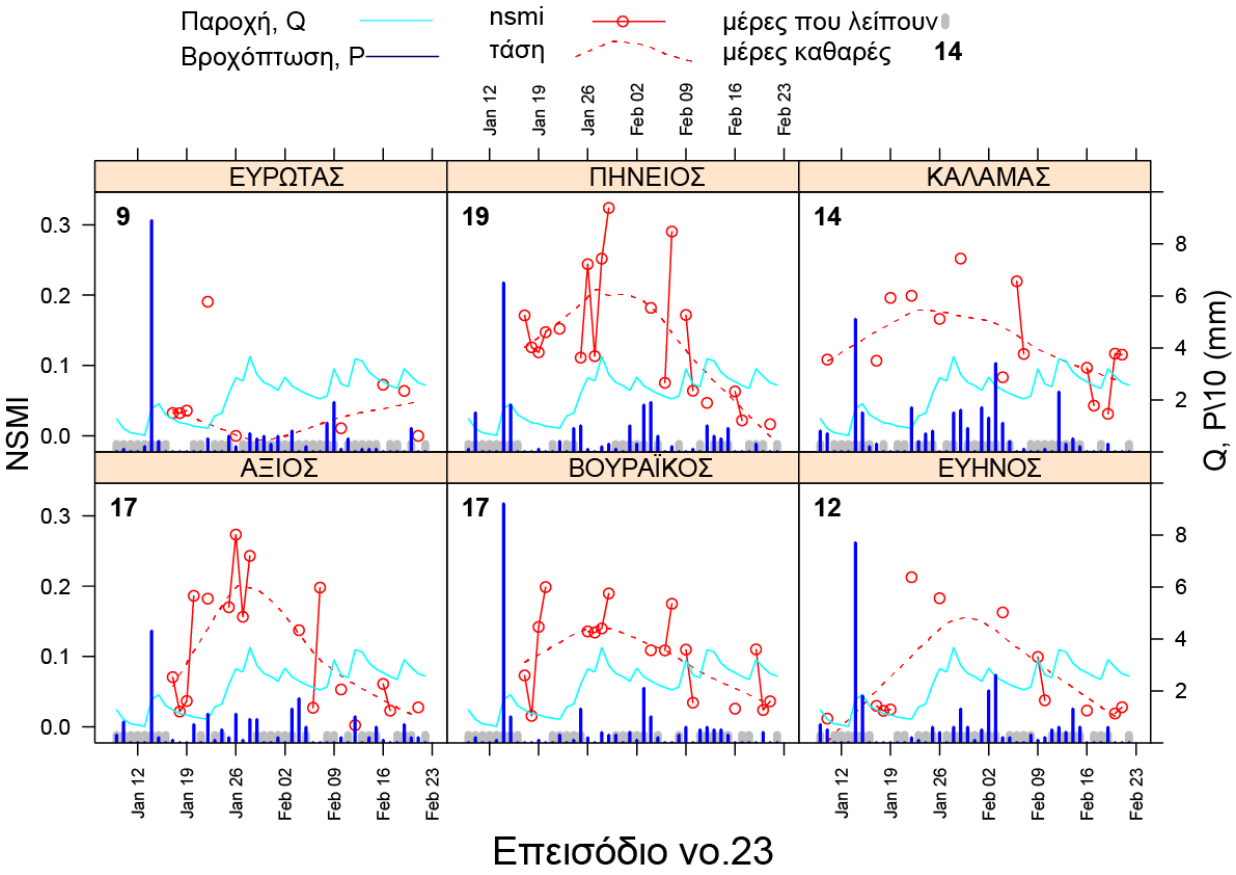
Τα αποτελέσματα ελέγθηκαν με το λογισμικό ENVI όπου αναλύθηκε η συμπεριφορά και το εύρος τους. Ο δείκτης RNWI και ο λόγος κόκκινου / εγγ. υπέρυθρου φάνηκε ότι δεν συμπεριφερόταν μονότονα και έτσι αποκλείστηκε από περαιτέρω ανάλυση. Εξετάστηκαν οι κατανομές των τιμών των δεικτών και ιδιαίτερα τα maxima / minima. Αποδείχτηκε ότι τα μέγιστα σε NSMI και NDSSI οφείλονταν σε μη αξιόπιστες εικόνες ή σε περιπτώσεις λαθών της μάσκας νέφωσης. Έτσι, αποκλείστηκαν τα μέγιστα και η περαιτέρω ανάλυση περιορίστηκε σε ωφέλιμα εύρη. Επίσης, εφαρμόστηκε φίλτρο ώστε η νεφοκαλυμμένη επιφάνεια σε κάθε πολύγωνο πλουμίου να μην ξεπερνά το 30%.

Πίνακας 5-8 εύρη τιμών για τους χρησιμοποιούμενους δείκτες

α/α	Δείκτες + λόγοι	**Κανάλια που συμμετέχουν**	**Εύρος τιμών**
1	NSMI	μπλέ, κόκκινο, πράσινο	-0.2 ÷0.5
2	NDSSI	μπλέ, εγγ. υπέρυθρο	-0.9 ÷ 0.9
3	RNWI	κόκκινο, εγγ. υπέρυθρο	
4	1stPC / 1η ΚΣ	μπλε, κόκκινο, πράσινο, εγγ. υπέρυθρο	-0.1÷ 0.3
5	Πρασινο / Μπλέ	πρασινο, μπλέ	
6	Κόκκινο / Εγγ. υπέρυθρο	κόκκινο, εγγ. υπέρυθρο	
	Μάσκες		
1	Li	κόκκινο	0÷1
2	Fleuve	κόκκινο, εγγ. υπέρυθρο	0÷1
3	NSMI	μπλέ, κόκκινο, πράσινο	0÷1



Σχήμα 5-15 Φασματική τομή σε πλούμιο στις εκβολές του Πηνειού ποταμού κατά μήκος του κόκκινου βέλους. Το μήκος της τομής είναι 30 γραμμές * 250 μ = 7,5 χιλιόμετρα. Στο μεσαίο διάγραμμα απεικονίζονται οι τιμές της ανακλαστικότητας των 4 καναλιών, όπου φαίνεται η αύξηση κυρίως στο κόκκινο και το εγγύς υπέρυθρο μέσα στο πλούμιο. Στο μέσο το κενό προέρχεται από τη μάσκα νέφωσης που το έχει -λανθασμένα- θεωρήσει σαν νέφος. Στο δεξί διάγραμμα φάινεται η συμπεριφορά των τιμών 4 δεικτών που λίγο-πολύ είναι παρόμοια, αλλά με άλλο εύρος. Πχ η 1η ΚΣ αυξάνεται κατά 0,1 περίπου, η τιμή του δείκτη NSMI κατά 0,4 ενώ ο δείκτης NDSSI εμφανίζεται πιο ευαίσθητος με εύρος 0,65 περίπου. Αξίζει να επισημανθεί ότι για τον δείκτη NDSSI όσο περισσότερα είναι τα αιωρούμενα τόσο μικραίνουν οι τιμές του.



Σχήμα 5-16 Η πορεία ενός δείκτη (NSMI) κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου σε 6 διαφορετικά ποτάμια. Διακρίνονται επίσης η ημερήσια βροχόπτωση P από το GCPP (που έχει διαιρεθεί με το 10) και μια γραμμή τάσης. Το επεισόδιο αυτό είναι το μεγαλύτερο σε διάρκεια (45 ημέρες από 9 Ιανουαρίου έως 23 Φεβρουαρίου, 2009). Με εξαίρεση τον Ευρώτα, φαίνεται κορύφωση της στερεοπαροχής γύρω στα τέλη του Ιανουαρίου σε όλα τα ποτάμια και κατόπιν βαθμιαία υποχώρησή της. Ας σημειωθεί ότι από τις 45 ημέρες, οι ωφέλιμες (αυτές για τις οποίες υπήρχε εικόνα) κυμαίνονται από μόνο 9 για τον Ευρώτα έως 19 για τον Πηνειό.

Προκειμένου να απλουστευτεί η ανάλυση έγινε ανάλυση της συσχέτισης μεταξύ των δεικτών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-9. Όπως ήταν αναμενόμενο εμφανίζονται ισχυρές συσχετίσεις. Ο δείκτης NSMI συσχετίζεται ισχυρά με το λόγο πράσινο/μπλέ και τις μάσκες Li και NSMI, ενώ ο δείκτης NDSSI συσχετίζεται ισχυρά με τη μάσκα fleuve. Καλή συσχέτιση εμφανίζεται μεταξύ βροχόπτωσης και απορροής στον Βουραϊκό. Ο δείκτης που καλύτερα συσχετίζεται με την βροχόπτωση, αν και ασθενώς (0.44), είναι ο λόγος πράσινο/μπλέ. Ο ίδιος δείκτης συσχετίζεται και με την παροχή (0.50). Τέλος, η βροχόπτωση που ανακτήθηκε από το GPCP συσχετίζεται πολύ καλά με την Thiessen τριών σταθμών βροχόπτωση του Βουραϊκού (r=0.92). Γενικά το προϊόν αυτό φαίνεται να υποεκτιμά τις ακραίες τιμές, αλλά αυτό θα μπορούσε και να είναι σωστό δεδομένου ότι οι τρεις σταθμοί μας βρίσκονται σε μεγάλα υψόμετρα, όπου η βροχόπτωση

είναι μεγαλύτερη. Τα παραπάνω αποτελέσματα ισχύουν γενικά για κάθε ποτάμι ή κάθε άλλη ομαδοποίηση (ομάδες ποταμών κ.λπ).

Πίνακας 5-9 Πίνακας συσχετίσεων για τον Βουραϊκό. Οι τιμές των δεικτών έχουν πρώτα ολοκληρωθεί σε μηνιαίους μέσους (σύνολα για την Βροχόπτωση, P) Q είναι η παροχή.

	nsmi	*πρασ/ μπλε*	*κοκκ/ εγγ.υπ*	*ndss*	***P (mm)***	***Q (mm)***	*li μασκα*	*Fleuv μασκα*	*nsmi μασκα*
nsmi	1	0.87	0.07	0.71	0.24	0.32	0.85	0.77	0.79
πρασ/ μπλε		1	-0.15	0.82	0.44	0.50	0.94	0.87	0.96
κοκκ/ εγγ.υπ			1	-0.58	0.08	0.08	-0.27	-0.42	-0.36
ndssi				1	0.17	0.20	0.87	0.88	0.91
P (mm)					1	**0.92**	0.37	0.26	0.37
Q (mm)						1	0.35	0.25	0.40
li μασκα							1	0.97	0.96
fleuve μασκα								1	0.93
nsmi μασκα									1

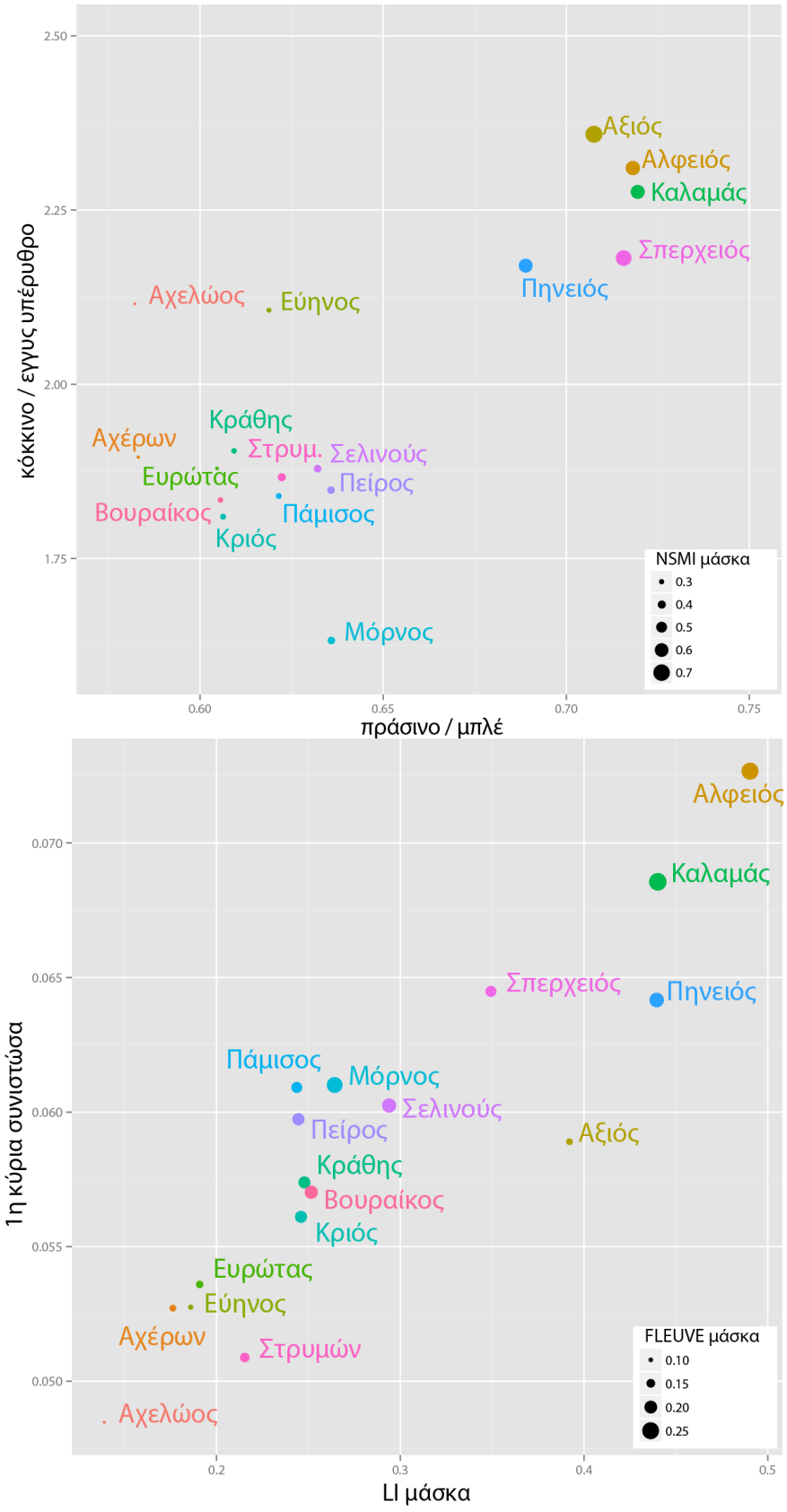
5.2.2 Προϊόντα MOD02

Στην προσπάθεια κατάταξης των ποταμών κατά σειρά μεγέθους στερεοαπορροής προέκυψε το θέμα της επιλογής δείκτη για την κατάταξη, καθώς ο κάθε δείκτης έδινε ελαφρώς διαφορετικές κατατάξεις. Επιχειρήθηκαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί συσχέτισης μεταξύ τιμών των δεικτών και μασκών και οι καλύτεροι (πιο -μεταξύ τους- συνεπείς) συνδυασμοί παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.

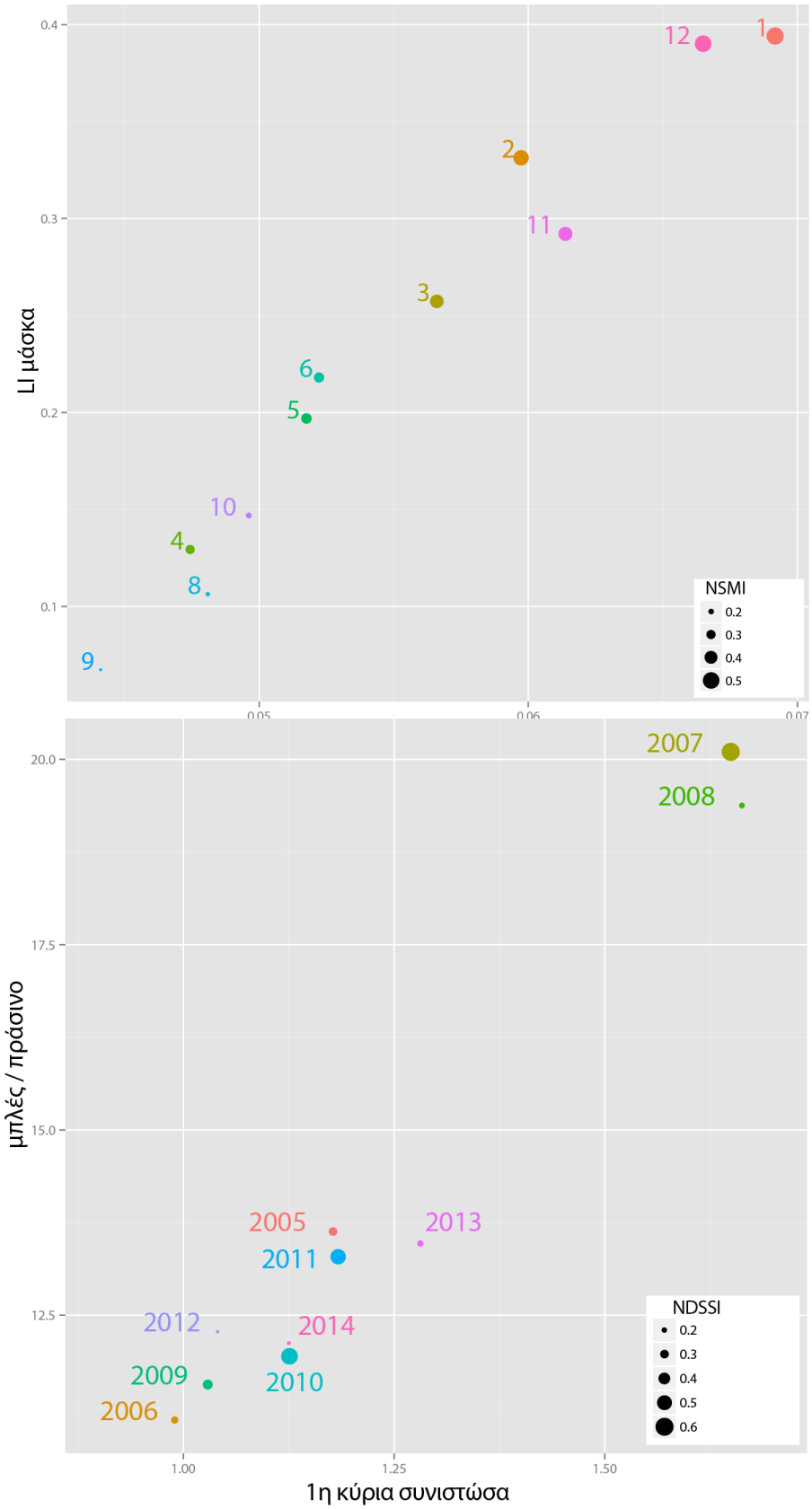
Δεδομένης της αβεβαιότητας της όλης διαδικασίας, είναι περισσότερο ασφαλές να διακριθούν ομάδες-συστάδες ή clusters ποταμών. Στην πρώτη ομάδα, των πιο παραγωγικών σε αιωρούμενο υλικό ποταμών (ετήσια στερεοπαροχή), θα πρέπει να ενταχθούν οι ποταμοί Αλφειός, Καλαμάς, Πηνειός, Σπερχειός και Αξιός. Στην τρίτη ομάδα, των λιγότερο παραγωγικών σε αιωρούμενο ίζημα ποταμών, θα πρέπει να εντάχθούν οι Ευρώτας, Αχέρωντας και Στρυμώνας. Στην δεύτερη, ενδιάμεση κατηγορία εντάσσονται όλοι οι υπόλοιποι με μεγάλη αβεβαιότητα για τις μεταξύ τους σχέσεις και κυρίως για την ένταξη των ποταμών Εύηνου και Αχελώου. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλες τις κατατάξεις

οι 4 ποταμοί της ευρύτερης περιοχής της ΒΔ Πελοποννήσου εμφανίζονται παρόμοιοι σε παραγωγικότητα αιωρούμενου ιζήματος, με πρώτο τον Σελινούντα. Ίσως αυτό οφείλεται και στο γεγονός ότι όπως ήδη αναφέρθηκε στην όλη μεθοδολογία οι εκτιμήσεις για τον ποταμό Σεληνούντα έγιναν θεωρώντας τον μαζί με τον γειτονικό ποταμό Κερυνίτη. Θεωρήθηκε δηλαδή ότι το πλούμιο του Σελινούντα περιλαμβάνει και αυτό του Κερυνίτης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποκτούν οι κατατάξεις όταν ληφθεί υπόψη η βροχόπτωση εντός της λεκάνης απορροής. Μπορούν έτσι να κατασκευαστούν σύνθετοι δείκτες όπως για παράδειγμα ο λόγος των δεικτών NDSSI /NSMI ανά χιλιοστό ύψους βροχής για κάθε υδρολογική χρονιά ή ακόμα NDSSI ανά χιλιοστό ύψους βροχής και τετραγωνικό χιλιόμετρο. Η μελέτη των σύνθετων αυτών δεικτών έδωσε κάποια ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

Η κατάταξη των μηνών είναι σχεδόν η ίδια για κάθε δείκτη (όχι όμως για κάθε ομάδα ποταμών). Οι μήνες Ιανουάριος και Δεκέμβριος είναι οι πρώτοι σε στερεοαπορροές, ενώ ακολουθούν οι μήνες Φεβρουάριος και Νοέμβριος. Έτσι, το τετράμηνο αυτό είναι, απ'οτι φαίνεται, το πιο αποδοτικό στην μεταφορά αιωρούμενου υλικού στις θάλασσες. Στη συνέχεια ακολουθεί ο Μάρτιος και αρκετά πιο κάτω βρίσκονται οι μήνες Μαϊος και Ιούνιος, πάνω από τους Οκτώβριο και Απρίλιο, κάτι που φαίνεται κατ'αρχάς παράδοξο.

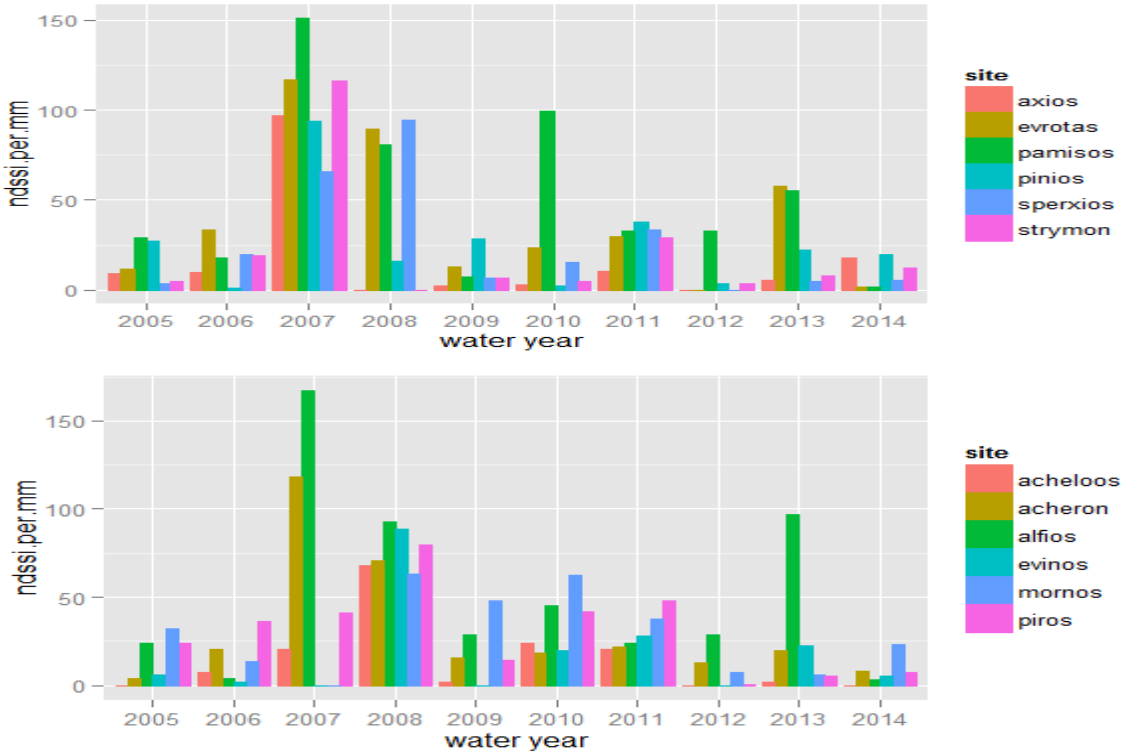


Σχήμα 5-17 Κατάταξη των ποταμών με την χρήση 3 δεικτών. Πάνω, οι λόγοι πρασινο/μπλε και κόκκινο/εγγ.υπέρυθρο μαζί με τη μάσκα NSMI (μέγεθος σημείου). Κάτω, η μάσκα Li έναντι της 1ης ΚΣ (κύριας συνιστώσας) και με την μάσκα Fleuve (μέγεθος σημείου).



Σχήμα 5-18 Πάνω, κατάταξη των μηνών ως προς την παραγωγή αιωρούμενου ιζήματος όλων των ποταμων. Κάτω κατάταξη των υδρολογικών ετών, διαιρεμένη όμως με το συνολικό ύψος βροχόπτωσης της κάθε μιάς. Οι χρονιές που εμφανίζονται μακράν πρώτες σε αυτή την κατάταξη, το 2007 και 2008, είναι οι χρονιές με τις λιγότερες βροχοπτώσεις! Ο λόγος γι'αυτό είναι η μεταφορά σκόνης από την Αφρική, όπως διαπιστώθηκε στη συνέχεια.

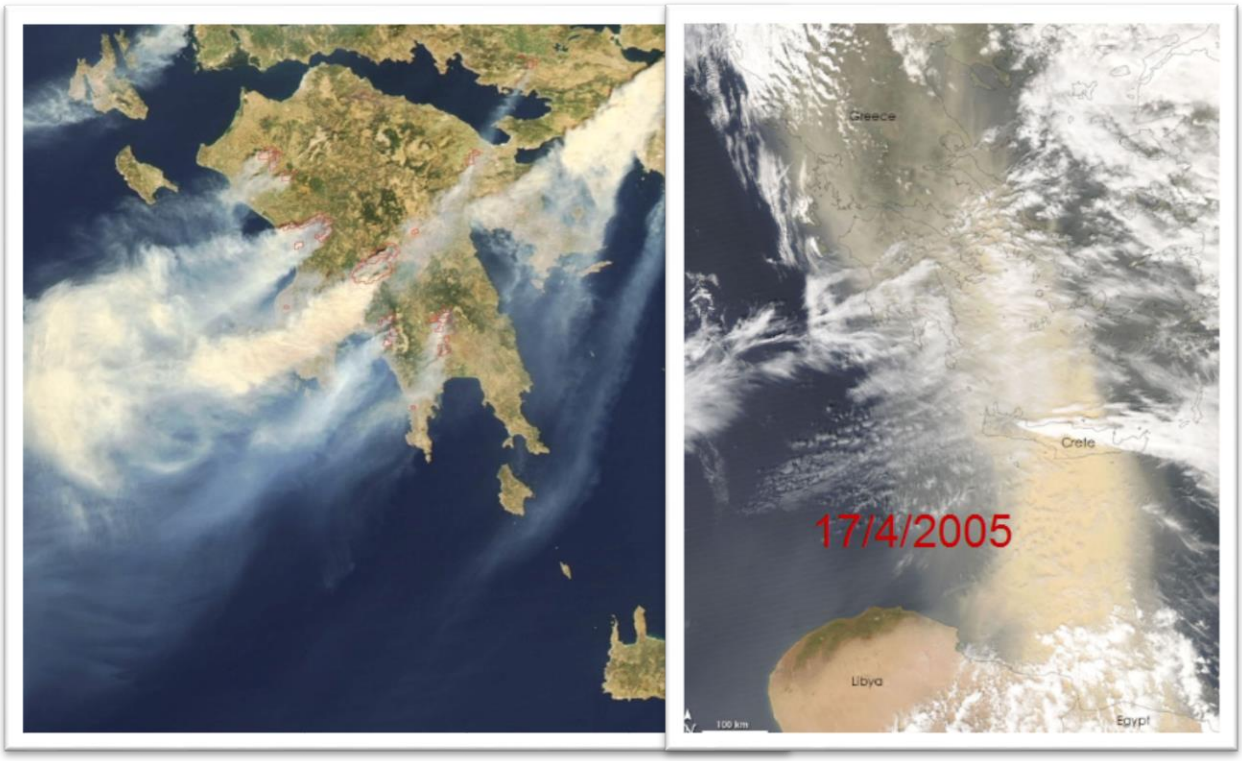
Οπως φαίνεται στην κατάταξη των υδρολογικών ετών (Σχ. 5-18) οι χρονιές 2007 και 2008, ενώ ήταν οι χρονιές με τις λιγότερες βροχές, εμφανίζουν την μεγαλύτερη αποδοτικότητα σε στερεοαπορροή! Μια πρώτη σκέψη ήταν ότι αυτό το παράδοξο μπορεί να οφείλονταν στις πυρκαγιές του καλοκαιριού του 2007. Ωστόσο, η υδρολογική χρονιά του 2007 ξεκινάει από τον Οκτώβριο του 2006, επομένως οι πυρκαγιές, σε όσες λεκάνες επηρεάστηκαν, θα έπρεπε να φανούν το 2008 και όχι το 2007. Κατασκευάζοντας τον σύνθετο δείκτη NDSSI ανά χιλιοστό βροχής, εξετάστηκαν οι χρονοσειρές ανά ποταμό. Τα αποτελέσματα για 12 ποτάμια φαίνονται στο επόμενο Σχήμα 5-19.



Σχήμα 5-19 Χρονοσειρά δείκτη NDSSI ανά mm βροχής για τα 10 υδρολογικά έτη για 12 ποτάμια. Η απότομη εκτίναξη του δείκτη τα έτη 2007-2008 παρουσιάζεται σχεδόν σε όλα τα ποτάμια και με μεγαλύτερη ένταση σε Ευρώτα και Πάμισο, που είναι ποτάμια –ιδίως ο Ευρώτας- πολύ χαμηλής παραγωγικότητας σε ίζημα. Η απάντηση στο παράδοξο αυτό ήρθε τελικά από την Αφρική!

Η 'φαινόμενη' έξαρση αυτή των ετών 2007 και 2008 στην στερεοπαροχή μπορεί τελικά να αποδοθεί στην κορύφωση των φαινομένων μεταφοράς σκόνης από την Αφρική. Πράγματι, η ελληνική και διεθνής αρθρογραφία συμπεραίνει ότι «..*Διερευνώντας τις μέσες θερμοκρασίες και τους γεωδυναμικούς χάρτες στα 850 hPa είναι εμφανής μια μετατόπιση θερμών αερίων μαζών που μεταφέρουν Αφρικανική σκόνη προς την κεντρική Μεσόγειο την διετία 2007-2008 και προς την ΝότιοΔυτική Αφρικανική ακτή και τα Κανάρια νησιά την τριετία 2009-2011*» (Pey et al., 2013). Εξετάζοντας τις χρονοσειρές από τους σταθμούς της Φινοκαλιάς στην Κρήτη και της Αγίας Μαρίνας στην Κύπρο, όπου παρακολουθείται

τακτικά το PM_{10} (σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 10 μm) συναντάται η μέγιστη τιμή στη μέν Κρήτη το 2006, με μέτρηση 2500 μg (με άνω όριο τα 50), ενώ στην Κύπρο η μέγιστη τιμή 8-ετίας συναντάται σε επεισόδιο στις αρχές του 2006 (Mihalopoulos et al., 2011). Για να συμπληρωθεί αυτή την εικόνα αξίζει να αναφερθεί ότι ο Αϋγουστος του 2006 ήταν ο θερμότερος των προηγούμενων 105 χρόνων για την Ελλάδα, ενώ ο Αύγουστος του 2003 ήταν ο θερμότερος του μητρώου για όλη την Ευρώπη!

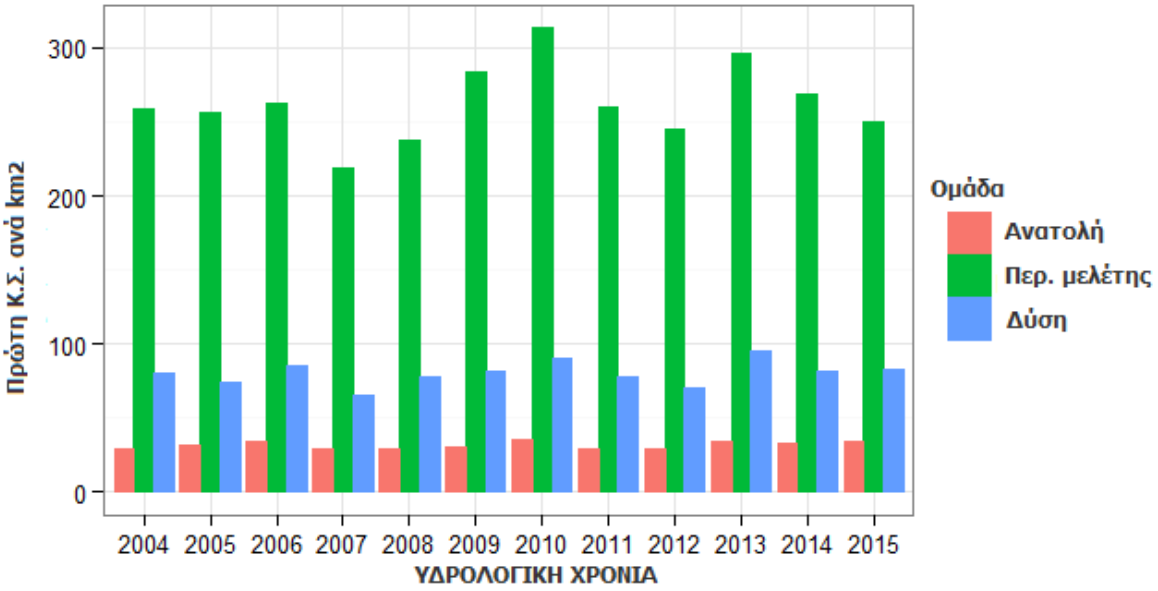


Σχήμα 5-20 Δύο εικόνες MODIS. Αριστερά, οι καπνοί από τις πυρκαγιές του 2007 μεταφέρονται νοτιοδυτικά από τους ανέμους. Δεξιά, μεγάλος αεροχείμαρρος άμμου και σκόνης με αφετηρία την Λιβυκή έρημο καλύπτει όλη την Ελλάδα. Πηγή Wikipedia.

Η ποσότητα του υλικού που μεταφέρεται δεν είναι μικρή: $25x10^6$ τόνοι ετησίως για την λεκάνη της ανατολικής Μεσογείου, ήδη από το 1979 με τάσεις αύξησης (Yaalon and Ganor, 1979, Mihalopoulos et al., 2010). Διαπιστώνεται λοιπόν, ίσως με κάποια απογοήτευση, ότι το σύστημα που μελετάμε δεν είναι κλειστό (Σχ. 5-20). Το προφανές συμπέρασμα είναι ότι τα φορτία αιωρούμενου υλικού που μεταφέρονται από τους ποταμούς στις θάλασσες δεν έχουν αναγκαστικά παραχθεί εντός των λεκανών απορροής τους.

Εάν οι ποταμοί ομαδοποιηθούν περαιτέρω σε τρεις μεγάλες γεωγραφικές ομάδες, αυτούς που αποστραγγίζουν περιοχές της δυτικής Ελλάδας, τους 4 της ευρύτερης περιοχής μελέτης, και τέλος αυτούς της ανατολικής Ελλάδας μαζί με αυτούς που βρίσκονται στη νότια Ελλάδα (Πηνειός, Σπερχειός, Αξιός, Στρυμώνας, Ευρώτας και Πάμισος), και

επιχειρηθεί να εξεταστεί η παραγωγικότητα σε αιωρούμενο ίζημα της κάθε ομάδας προκύπει η παρακάτω εικόνα του Σχήματος 5-21.

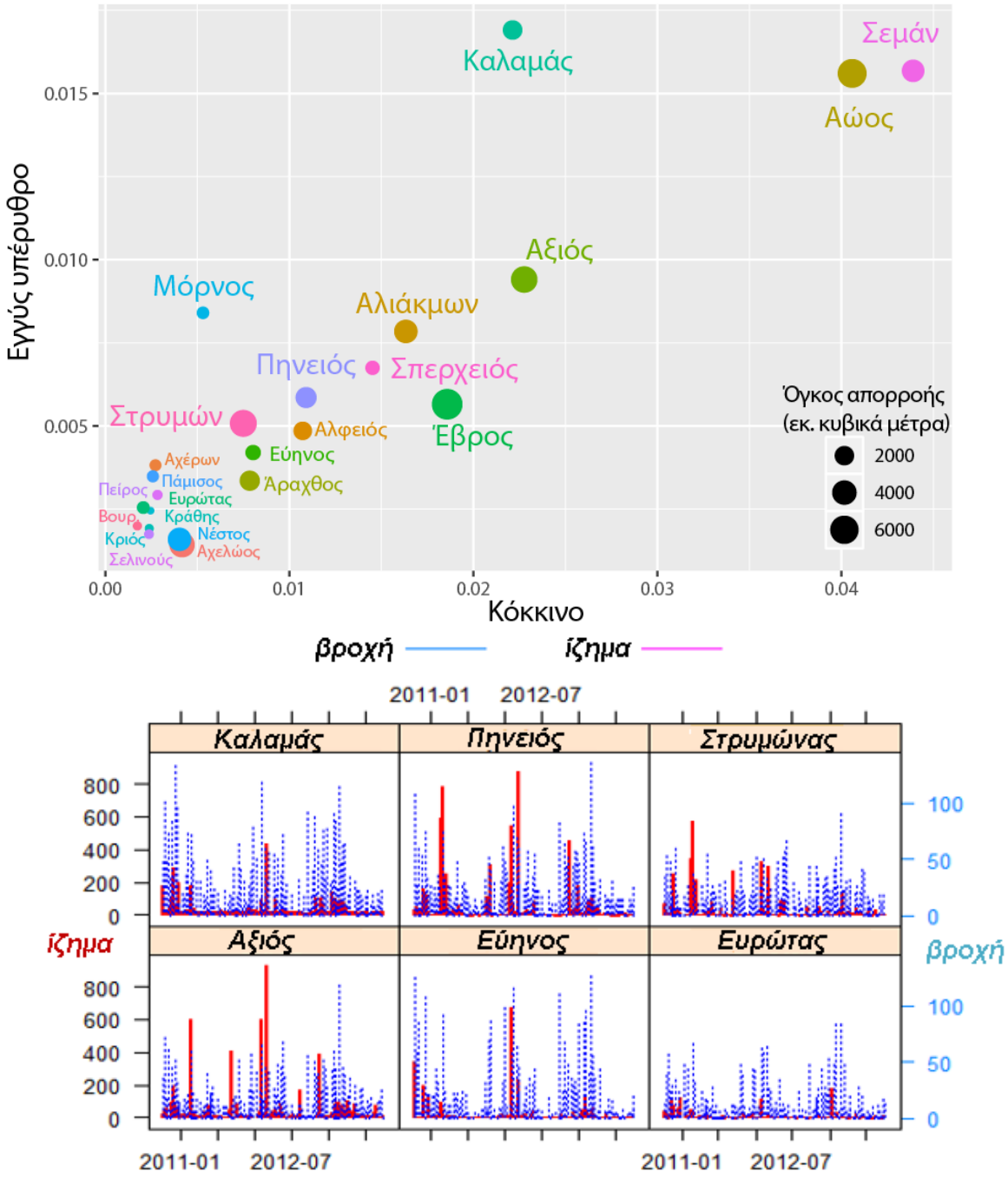


Σχήμα 5-21 Σύγκριση στερεοαπορροής για τρεις μεγάλες γεωγραφικές ομάδες ποταμών.

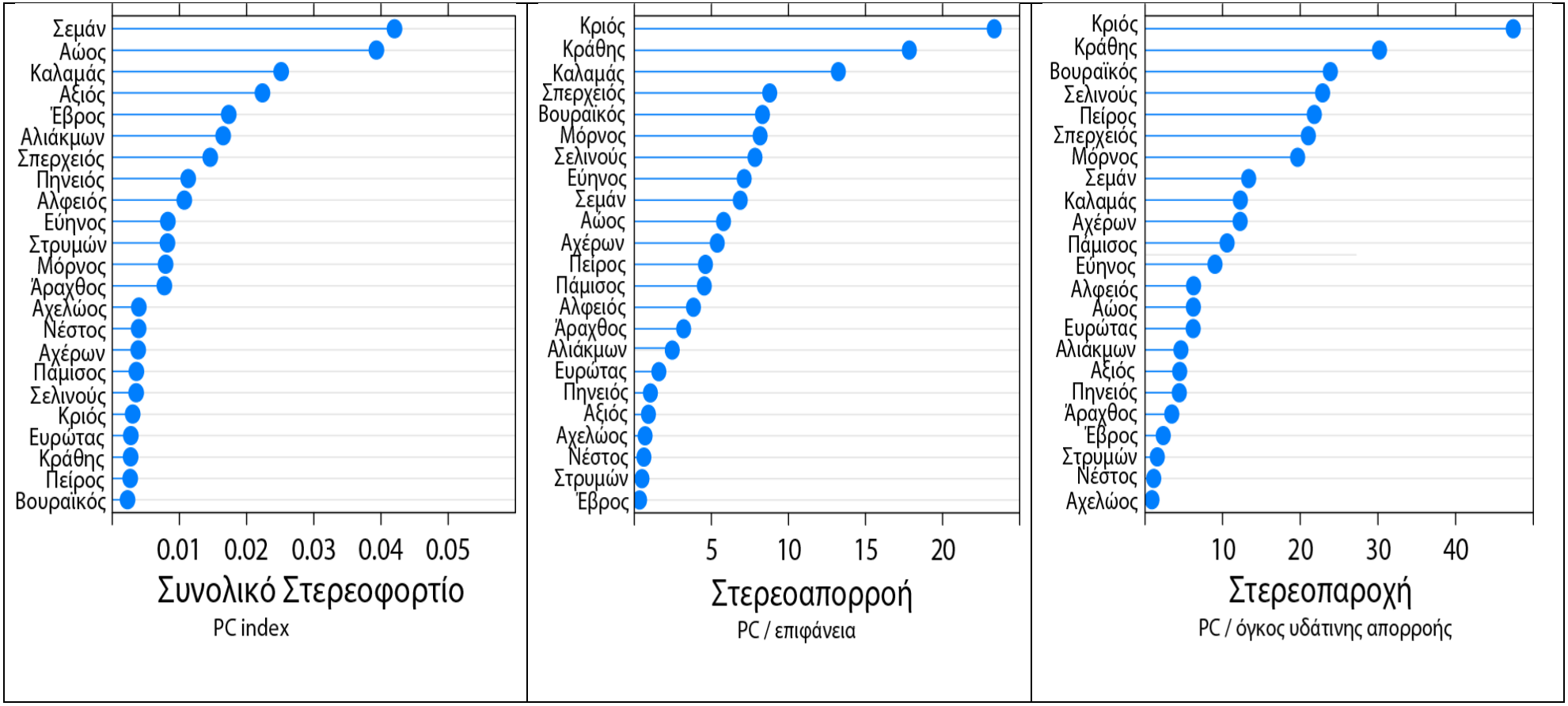
Η σύγκριση δείχνει ότι οι 4 μικροί ποταμοχειμαρροι της ΒΔ Πελοποννήσου (ευρύτερη περιοχή μελέτης) εμφανίζουν με διαφορά τις μεγαλύτερες τιμές. Οι ποταμοί της Δυτικής Ελλάδας έχουν περίπου την διπλάσια στερεοπαροχή από αυτούς της ανατολικής και νότιας Ελλάδας, ενώ και αυτοί δεν παράγουν παρά το 1/3 περίπου των ποταμών της περιοχής μελέτης. Ο δείκτης που χρησιμοποιήθηκε είναι η 1η Κυρια Συνιστώσα (συνδυασμός ανακλαστικότητας 4 καναλιών).

5.2.3 Προϊόν MOD09Q1

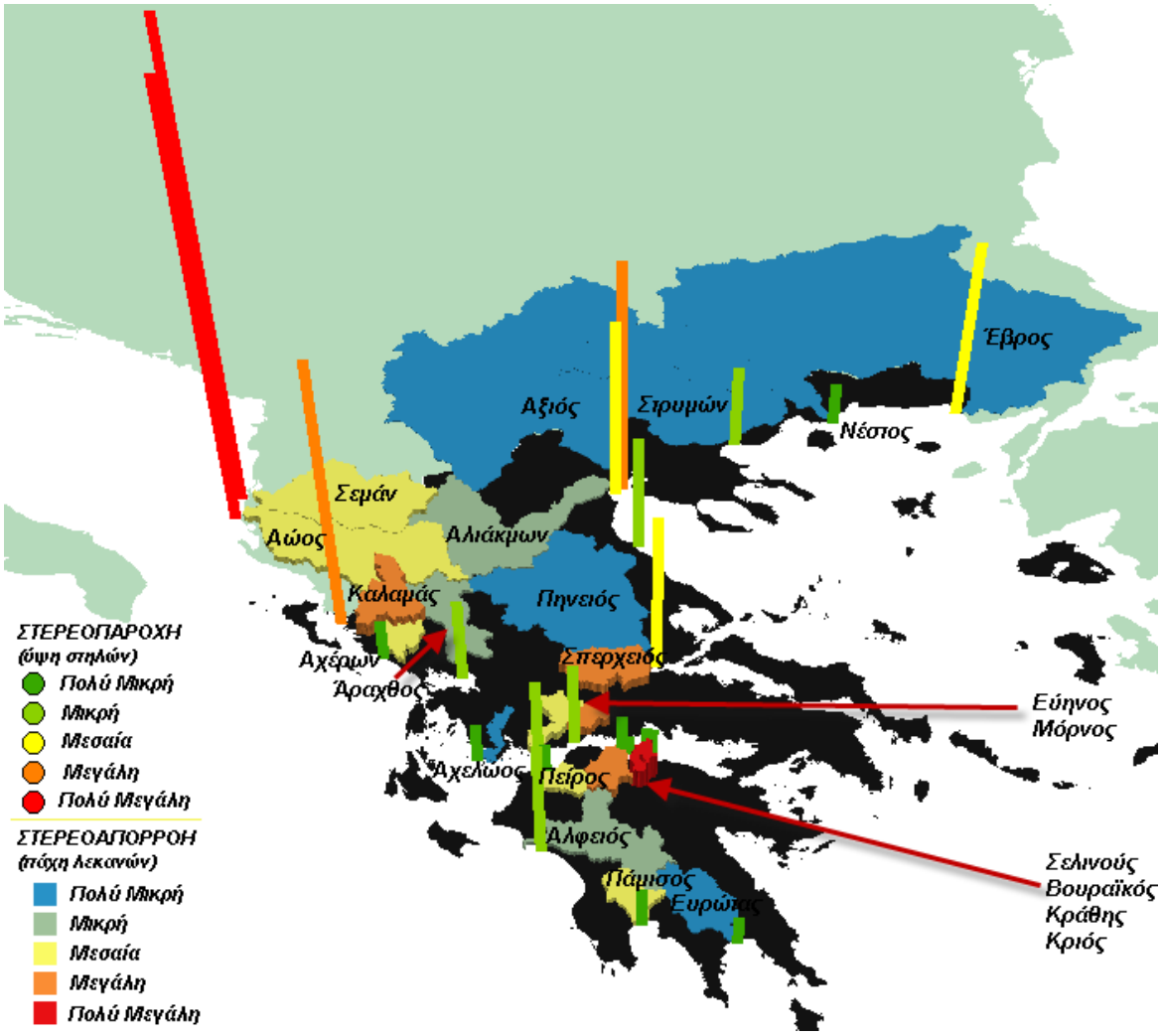
Τα αποτελέσματα από την ανάλυση αυτού του προϊόντος παρουσιάζονται στα Σχήματα 5-22 και 5-23 παρακάτω, και αφορούν ολόκληρη την διαθέσιμη χρονοσειρά 20 χρόνων (2000-2019), περίπου 920 αρχεία εικόνας για το κάθε κανάλι . Χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές ανακλαστικότητας στα κανάλια κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο, και η τιμή $0.80\rho_{red} + 0.44\rho_{nir}$ (μέγεθος σημείου), η οποία αποτελεί ένα μεγάλο μέρος της πρώτης συνιστώσας, όπως αυτή προέκυψε από την ανάλυση κύριων συνιστωσών (δες 5.2.1, Εξ.5-1). Υπενθυμίζεται ότι το προϊόν αυτό είναι ατμοσφαιρικά διορθωμένο, γεγονός που διευκολύνει την ανάλυση.



Σχήμα 5-22 Κατάταξη δυναμικότητας ποταμών ως προς τα δύο κανάλια (πάνω), και χρονοσειρά βροχόπτωσης και στερεοπαροχής για την υδρολογική χρονιά 2011 για 6 ποτάμια (κάτω).

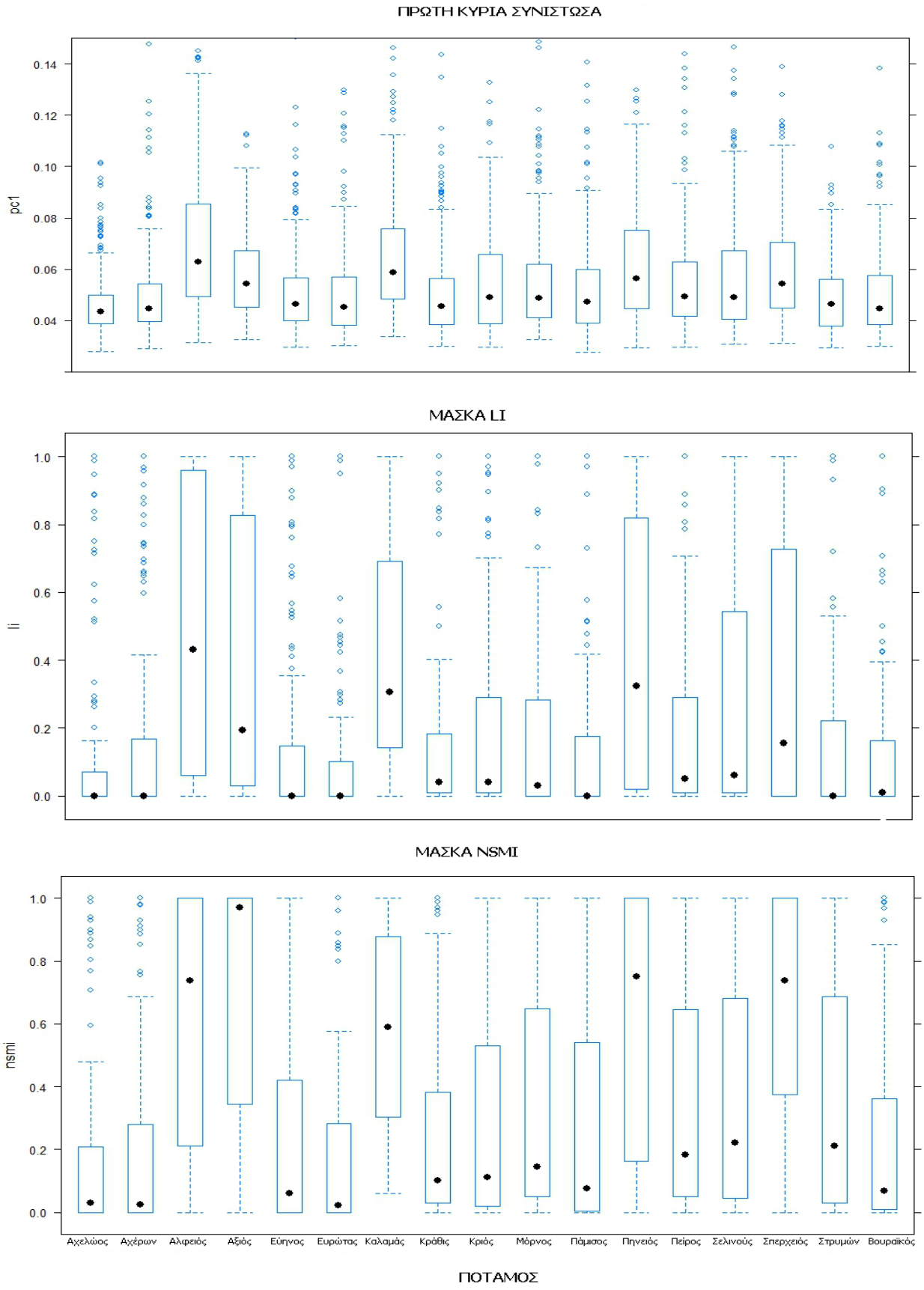


Σχήμα 5-23 Κατάταξη των 23 ποταμών ως προς 3 μεγέθη. Ολικό φορτίο, στερεοαπορροή και στερεοπαροχή βασισμένα στην μέση τιμή (μέρους) της πρώτης κύριας συνιστώσας για παρατηρήσεις 20 χρόνων. Κλίμακες αυθαίρετες.



Σχήμα 5-24 Συνοπτικός ‘‘άτλας’’ αποτελεσμάτων. Η στερεοαπορροή δίνεται με το πάχος των λεκανών ενώ η στερεοπαροχή (total flux) δίνεται με το ύψος των ράβδων στις εκβολές των ποταμών.

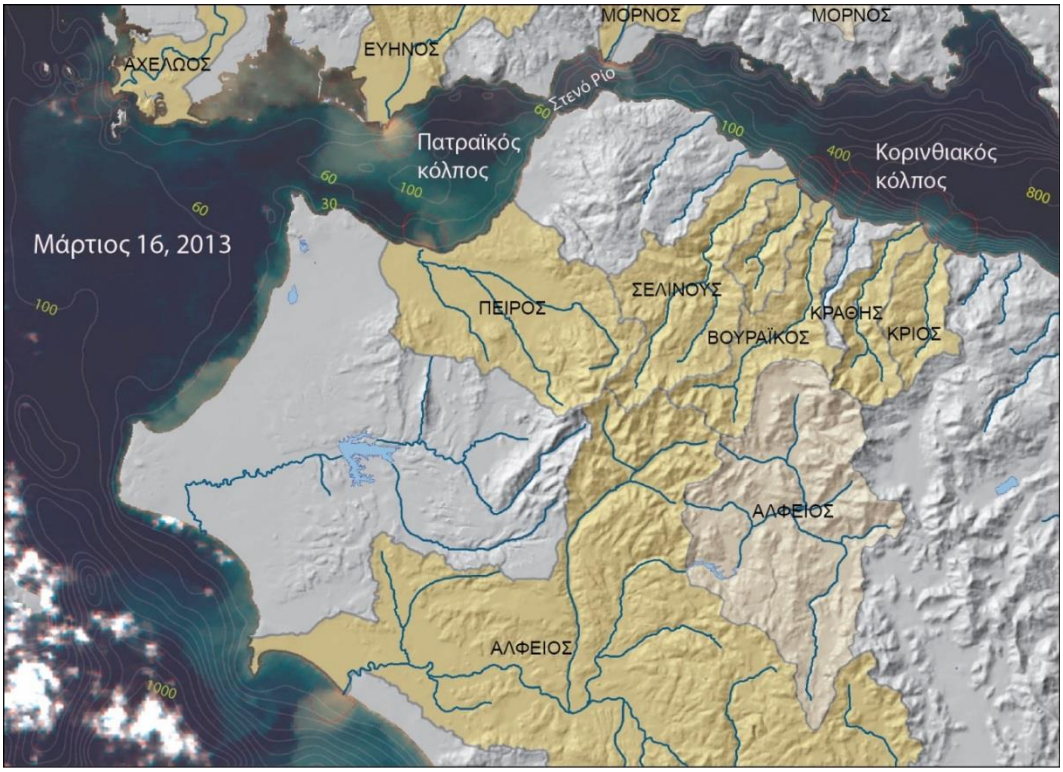
Τα αποτελέσματα από το MOD09Q1 επιβεβαιώνουν εν γένει αυτά του MOD02, τουλάχιστον όσον αφορά τα πιο παραγωγικά συστήματα ποταμού/λεκάνης. Οι δύο ποταμοί της Αλβανίας πράγματι έρχονται πρώτοι στο ολικό φορτίο με μεγάλη διαφορά από τους υπόλοιπους, γεγονός που επιβεβαιώνει και η βιβλιογραφία . Από τους ελληνικούς ποταμούς πρώτοι έρχονται οι Καλαμάς και Αξιός και ακολουθούν οι Έβρος, Αλιάκμων και Σπερχειός. Από αυτούς, λίγο υπολείπονται οι Πηνειός και Αλφειός. Ως στερεοαπορροή (ίζημα/επιφάνεια) οι πρώτες θέσεις ανήκουν στους Κριό, Κράθη και Καλαμά.



Σχήμα 5-25 Κυτιογραφήματα τριών δεικτών για τις 17 λεκάνες απορροής (MOD02).

5.2.4 Προβλήματα και περιορισμοί

Στην παρακάτω εικόνα της 16ης Μαρτίου 2013 (Σχήμα 5-26), φαίνονται τα κυρίαρχα μοτίβα της ανεμογενούς κυκλοφορίας στους κόλπους Πατραϊκό και Κορινθιακό. Στον αβαθή Πατραϊκό κόλπο υπάρχει σημαντική ανακυκλοφορία που επηρεάζεται από αδρανειακές κινήσεις (Coriolis). Με την επίδραση των κυρίαρχων ανέμων στην περιοχή (Δυτικοί – ΒόρειοΔυτικοί) αναπτύσοονται πολύ ισχυρά ρεύματα, ισχυρότερα από τα παλιρροϊκά (Fourniotis and Horsch, 2015). Οι Piper et al. (1982), σημειώνουν ότι παρατηρούνται στον Πατραϊκό κόλπο επεισόδια ισχυρών ανέμων, σταθερής διεύθυνσης και ταχύτητας από τον βορρά διαρκείας περισσότερο από 24 ώρες, τα οποία οδηγούν τα αιωρούμενα ιζήματα από τον Πατραϊκό στον Κορινθιακό κόλπο μέσω του στενού Ρίο-Αντίριο, όπου και συνεχίζουν την πορεία τους κατά μήκος της ακτογραμμής της Βόρειας Πελοποννήσου. Αυτός είναι και ο λόγος που το πλούμιο του Μόρνου, που εκβάλλει αμέσως δυτικά του Αντίριου δεν αποκτά σχεδόν ποτέ πλήρη ανάπτυξη. Λόγω αυτών των μοτίβων, το αιωρούμενο ίζημα που μεταφέρεται π.χ από τον Εύηνο, τον Μόρνο και τον Πείρο στις εκβολές τους μπορεί να επηρεάσει τα αιωρούμενα ιζήματα στις εκβολές του Σελινούντα ή των γειτονικών του ποταμών. Επομένως οι εκτιμήσεις, για αυτήν ειδικά την περιοχή, καθώς επίσης και για τους Αξιό και Αλιάκμονα, δεν μπορούν να θεωρηθούν ιδιαίτερα ασφαλείς.



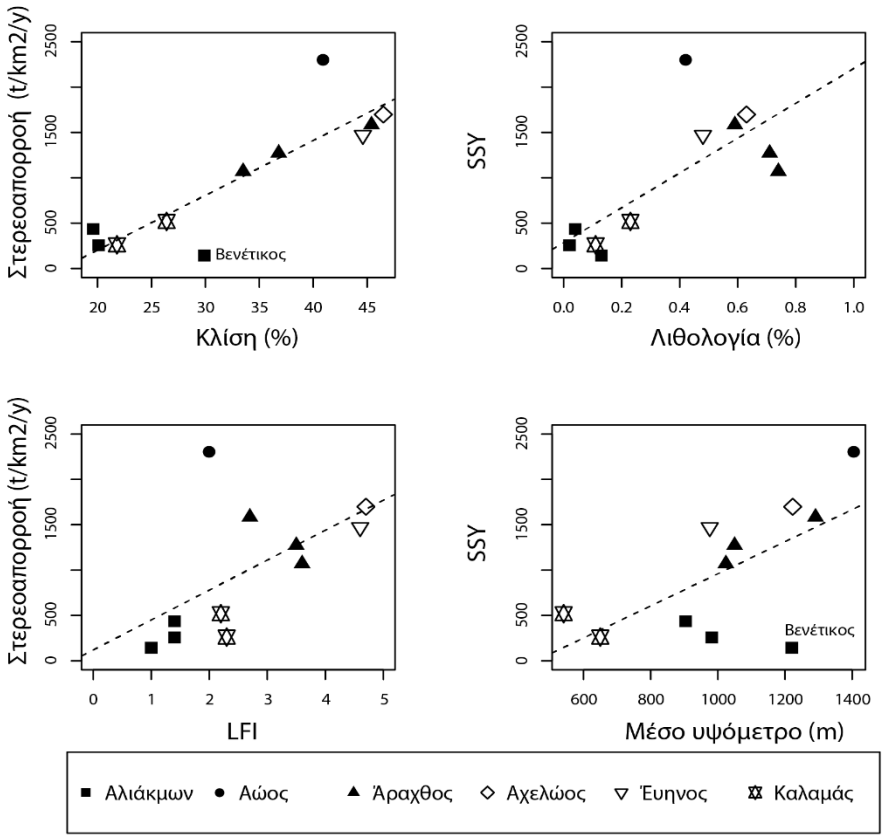
Σχήμα 5-26 Εικόνα MODIS της 16ης Μαρτίου 2013 στην θαλάσσια περιοχή δυτικού Κορινθιακού και Πατραϊκού κόλπου.

5.3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Σε αυτό το εδάφιο θα αναπτυχθούν σχέσεις πολλαπλής παλινδρόμησης της ειδικής στερεοαπορροής με τις κύριες ερμηνευτικές μεταβλητές, προκειμένου να καταλήξουμε σε ένα γενικό μοντέλο. Στην ανάλυση χρησιμοποιείται η συνήθης τεχνική της βηματικής παλινδρόμησης (step wise regression). Όλοι οι σχετικοί πίνακες και τα σχήματα έχουν εξαχθεί από τα κατάλληλα λογισμικά προγράμματα της R.

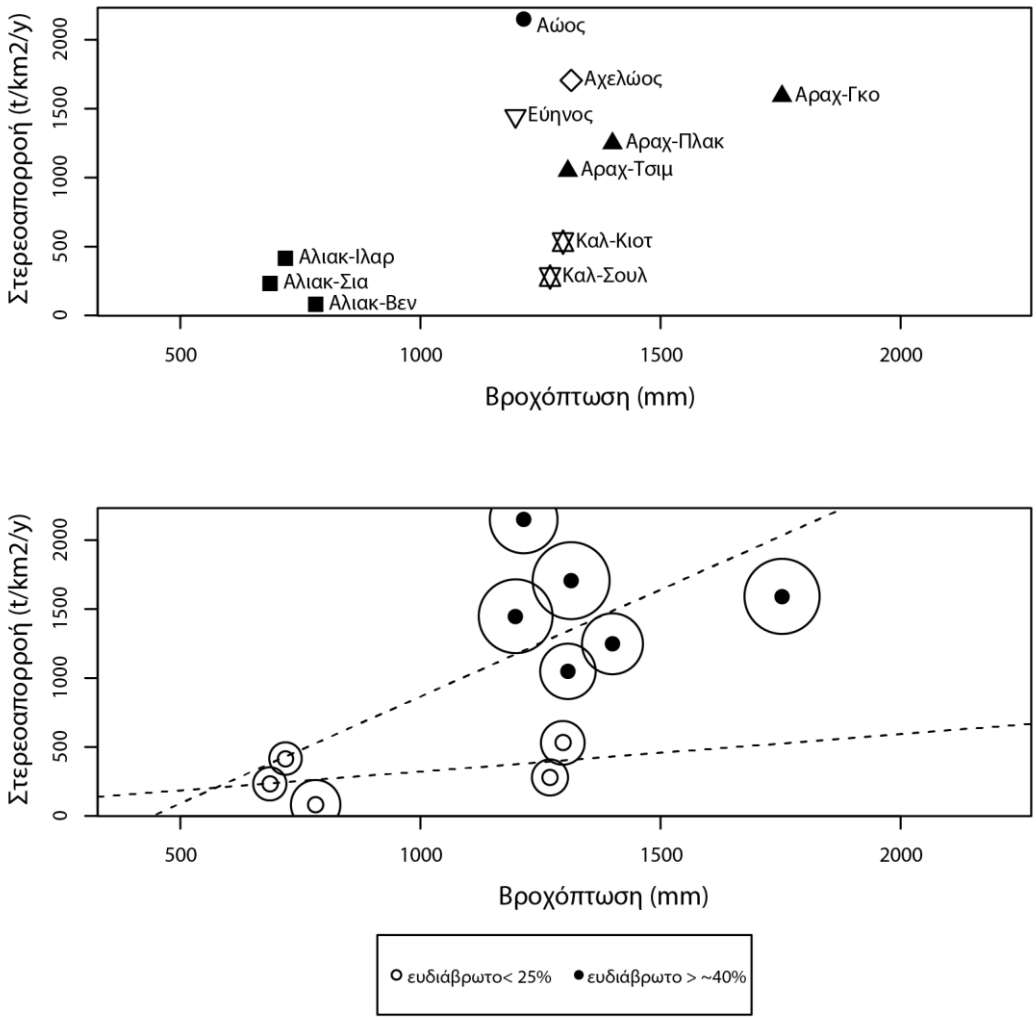
5.3.1 Γραμμικά μοντέλα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ισχυρότερη σχέση ειδικής της στερεοαπορροής είναι αυτή με την κλίση της λεκάνης απορροής. Με την εξαίρεση δύο θέσεων (Βενέτικος του Αλιάκμονα και Αώος – που είναι και οι ακραίες τιμές της διαθέσιμης βάσης δεδομένων), η συμφωνία είναι σχεδόν τέλεια. Αυτό είναι θετικό καθώς είναι δυνατή η εξαγωγή μιας ασφαλούς σχέσης από μόνη την κλίση. Από την άλλη πλευρά δυσχεραίνει



Σχήμα 5-27 Διαγράμματα διασποράς της στερεοαπορροής με τέσσερις σημαντικές παραμέτρους.

την έρευνα για την σημασία των υπόλοιπων παραγόντων. Στο Σχήμα 5-27 δίνονται τα διαγράμματα διασποράς με 4 σημαντικούς παράγοντες.



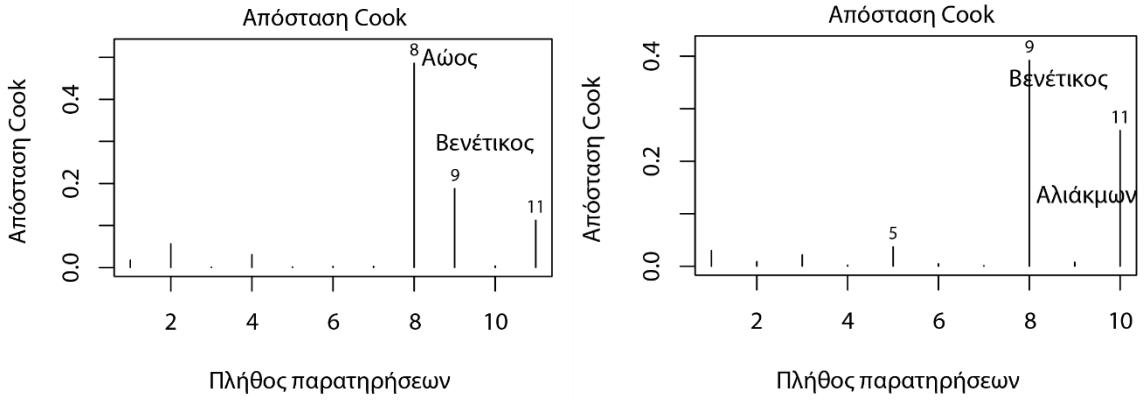
Σχήμα 5-28 Η σχέση της στερεοαπορροής με την βροχόπτωση. Στο κάτω διάγραμμα φαίνονται δύο γραμμές τάσης: μία για τα ποτάμια με μικρό ποσοστό ευδιάβρωτης λιθολογίας (φλύσχη) εντός της λεκάνης απορροής τους και μία για τα ποτάμια με υψηλό (>40%) ποσοστό φλύσχη. Οι ακτίνες των κύκλων συμβολίζουν την μέση κλίση της λεκάνης.

Η σχέση της στερεοαπορροής με την βροχόπτωση χρειάζεται μια πιο προσεκτική ματιά. Στο διάγραμμα του Σχήματος 5-28 φαίνεται ότι ποτάμια με περίπου την ίδια βροχόπτωση εντός της λεκάνης απορροής (εννοείται πάντοτε η μέση ετήσια) εμφανίζουν τεράστιες διαφορές στην παραγωγικότητά τους σε αιωρούμενο ίζημα.

Ενώ η ερμηνεία στο Σχήμα 5-28 για την διασπορά στις τιμές της στερεοαπορροής είναι η έκταση της λεκάνης που καταλαμβάνεται από σχηματισμούς φλύσχη, δηλαδή εξόχως ευδιάβρωτο υπόβαθρο, θα μπορούσε η εξήγηση να προέρχεται από τις μεγαλύτερες τιμές της κλίσης. Ουσιαστικά, και αυτό είναι ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της βάσης δεδομένων, τα ποτάμια με λεκάνες με μικρό ποσοστό φλύσχη δεν αυξάνουν ιδιαίτερα την στερεοαπορροή τους με περισσότερες βροχές (τάση Αλιάκμων – Καλαμάς), αλλά τυχαίνει ο Καλαμάς να έχει επίσης γενικά μικρότερες κλίσεις από τα υπόλοιπα ποτάμια (εκτός του Αλιάκμονα). Έτσι, δεν μπορεί κανεις να είναι απόλυτα σίγουρος για την ερμηνεία αυτή και πιθανότατα στο αποτέλεσμα αυτό συμβάλλουν και οι δύο αιτίες (τόσο η παρουσία ευδιάβρωτου -φλύσχης-, όσο και η μεγάλη κλίση).

5.3.2 Ακραίες (Outliers) και βαρύνουσες (leverage) τιμές

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερό ότι δύο ποτάμια, ο Αώος και ο Βενέτικος (παραπόταμος του Αλιάκμονα) απέχουν αισθητά και συστηματικά από τις διάφορες γραμμές τάσης. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε σφάλματα των μετρήσεων (συμπεριλαμβανόμενης της καμπύλης παροχής – στερεοπαροχής), αλλά μπορεί να αποτελεί μια ένδειξη ότι οι κύριες διεργασίες στερεοαπορροής σε αυτές τις λεκάνες διαφέρουν από αυτές των υπόλοιπων λεκανών.



Σχήμα 5-29 Οι πιό βαρύνουσες (από άποψη επιρροής στο αποτέλεσμα) παρατηρήσεις. Πάνω με τον Αωό (όλα τα σημεία, n = 11) και κάτω χωρίς τον Αώο (n=10). Η τιμή για τον Αώο είναι κοντά στην τιμή αποκοπής (0.57), όταν όμως ο Αώος εξαιρείται, ο Βενέτικος γίνεται η πιο βαρύνουσα παρατήρηση. Ο Αλιάκμων στην Μ.Ιλαρίωνος είναι επίσης βαρύνουσα παρατήρηση.

Ο εντοπισμός των σημείων με μεγάλο ειδικό βάρος (leverage) στις εξισώσεις είναι μια σημαντική λειτουργία των σχετικών προγραμμάτων γραμμικής παλινδρόμησης. Για κριτήριο λαμβάνεται η λεγόμενη απόσταση του Cook (Cook's distance), Σχήμα 5-29.

Για την εξαγωγή των εξισώσεων παρακάτω, αφαιρέθηκε ο Αώος, πιστεύοντας ότι αποτελεί μια ξεχωριστή περίπτωση, η οποία θα συζητηθεί ειδικά στο τέλος.

5.3.3 Κλίση λεκάνης

Όπως διαπιστώθηκε, η κλίση είναι μακράν η αποτελεσματικότερη ερμηνευτική μεταβλητή της ειδικής στερεοαπορροής. Έτσι, μπορεί να προκύψει μια σχέση απλής παλινδρόμησης μεταξύ των δύο, η οποία εξηγεί από μόνη της το 77% της διασποράς των τιμών της στερεοαπορροής. Η σχετική εξίσωση (χωρίς τον Αώο) είναι η παρακάτω:

$$SSY = -861.66 + 53.9\ S \qquad (5\text{-}2)$$

με $R^2 = 0.77$ και p-value= 0.0001193

Αν χρησιμοποιηθεί η LS RUSLE ,

$$SSY = -875.4 + 309.6\ LS \qquad (5\text{-}3)$$

με $R^2 = 0.74$ και *p*-value= 0.00065

5.3.4 Κλίση–Βροχόπτωση–Λιθολογία–Γυμνό–Αλλούβια- Κατολισθήσεις

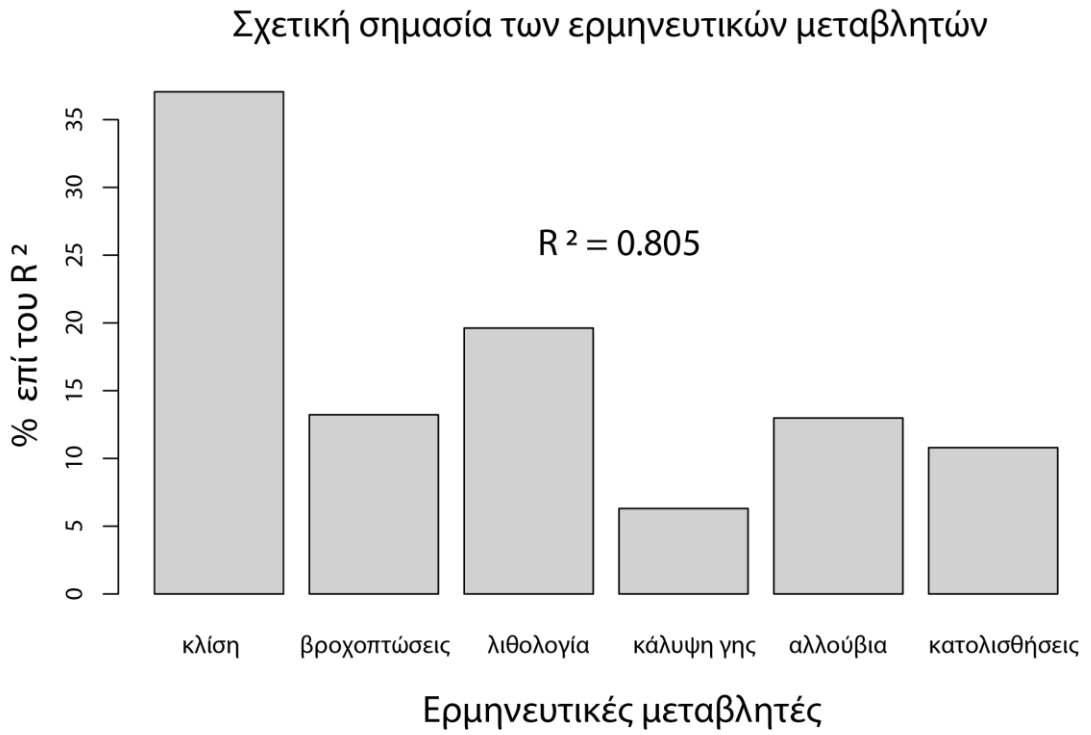
Η πολλαπλή παλινδρόμηση, με περισσότερες της μιας ερμηνευτικές μεταβλητές, είναι ισχυρότατο μαθηματικό εργαλείο για την διερεύνηση των σχέσεων και των εξαρτήσεων ενός φαινομένου. Η διαδικασία της σταδιακής ή βηματικής παλινδρόμησης (stepwise multiple regression) συνίσταται στην πρόσθεση κάθε φορά μιας επι πλέον μεταβλητής σε ένα υφιστάμενο μοντέλο ή, ανάποδα, στην κάθε φορά αφαίρεση μιας μεταβλητής από ένα υφιστάμενο μοντέλο και την εξέταση των στατιστικών του μοντέλου σε σχέση με το προηγούμενο. Ωστόσο, η σειρά με την οποία κάθε μεταβλητή προστίθεται ή αφαιρείται έχει σημασία. Ευτυχώς υπάρχει μια πολύ χρήσιμη συνάρτηση στην R, η relative weights[13], η

[13] Robert I.Kabacoff , ***R in Action***, Manning Editions, 2011.

οποία δίνει την σχετική βαρύτητα της κάθε μεταβλητής δοκιμάζοντας όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Το αποτέλεσμα της συνάρτησης αυτής δίνεται στο παρακατω Σχήμα 5-30, και περιέχει την εκτίμηση για τις 6 σημαντικότερες μεταβλητές: κλίση λεκάνης, βροχόπτωση, παρουσία φλύσχη, γυμνό έδαφος, αλλουβιακή κατάσταση του ποταμού και κατολισθήσεις.

Η εξίσωση που προκύπτει από την χρήση των 6 αυτών μεταβλητών είναι η εξής:

$$\begin{aligned} \text{SSY} \quad &= -1102.7 + 65.6 * S + 0.61 * P + 227.2 * L - 1172 \\ &* Bar - 117.9 * All - 134.3 * LFI \end{aligned} \tag{5-4}$$



Σχήμα 5-30 Σχετική σημασία των 6 σημαντικότερων παραμέτρων στην Εξ.7-8 από την συνάρτηση relativeweights της R. Όπως φαίνεται οι σημαντικότερες είναι η κλίση, η παρουσία φλύσχη εντός της λεκάνης απορροής και η αλλουβιακή κατάσταση μαζί με την βροχόπτωση. Μικρότερη σημασία έχει η κάλυψη του εδάφους (Barren).

Η εξίσωση αυτή έχει $R^2 = 0.805$, ελαφρά μεγαλύτερο από αυτό της εξίσωσης με μόνη την κλίση. Ωστόσο, το προσαρμοσμένο (adjusted) R^2 είναι 0.51 και οι στατιστικές της (F statistic, p-value), καθώς και ο «θόρυβος» της (Residual Standard Error) είναι χειρότερες. Επιπλέον, και αυτό είναι το ζήτημα με την πολλαπλή παλινδρόμηση με πολλές μεταβλητές, είναι «αντιδιαισθητική». Για παράδειγμα, σε δύο ίδιες κατα τα άλλα λεκάνες, αυτή με τις περισσότερες κατολισθήσεις θα έχει μικρότερη στερεοαπορροή.

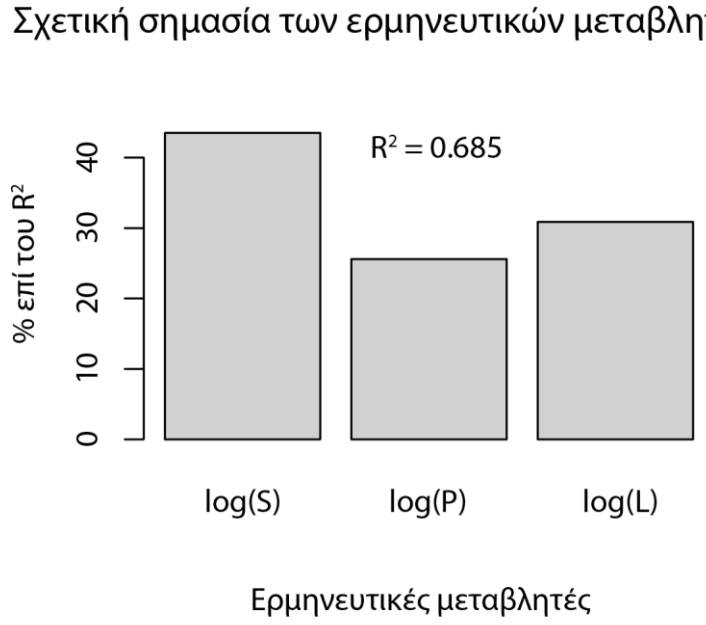
Δεδομένων αυτών των προβλημάτων, η προσπάθεια εντοπίστηκε στην εξαγωγή ενός μοντέλου που να περιέχει μόνο τις τρεις κυριώτερες μεταβλητές: μέση κλίση, S (%), βροχόπτωση (mm), P, και λιθολογία (φλύσχης), L (κλάσμα). Επιπλέον, στην ανάλυση χρησιμοποιούνταιοι λογάριθμοι των μεταβλητών, μιας και η διεθνής βιβλιογραφία αναφέρει ότι η κατανομή τους είναι λογαριθμοκανονική. Ο αριθμός των διαθέσιμων σημείων (11) δεν είναι αρκετός εξάλλου, ώστε να κριθούν από αυτά οι κατανομές (η κανονική και η λογαριθμοκανονική ταιριάζουν εξίσου καλά).

5.3.5 Κλίση–Βροχόπτωση–Λιθολογία

Η πρώτη εκδοχή σε αυτή την περίπτωση θα ήταν μια σχέση δύναμης (με τους λογάριθμους). Η εφαρμογή της δίνει την παρακάτω εξίσωση (με 10 σημεία):

$$\mathrm{SSY} = 0.014S^{1.41}P^{0.85}L^{0.05} \qquad (5\text{-}5)$$

Αυτή η εξίσωση έχει $R^2 = 0.69$ και p-value = 0.05. Αλλά είναι αδύναμη τόσο στους συντελεστές της (μεγάλες p-values) όσο και σε bootstrap testing (threefold validated R^2 = 0.31). Η σχετική βαρύτητα των λογάριθμων των μεταβλητών σε αυτή την εξίσωση δίνεται στο Σχήμα 5-31.



Σχήμα 5-31 Σχετική σημασία των μεταβλητών στην Εξίσωση 5-5.

5.3.6 Τελικό μοντέλο

Η δεύτερη, τελική, εκδοχή είναι ένα μοντέλο με δύο βήματα - όρους:

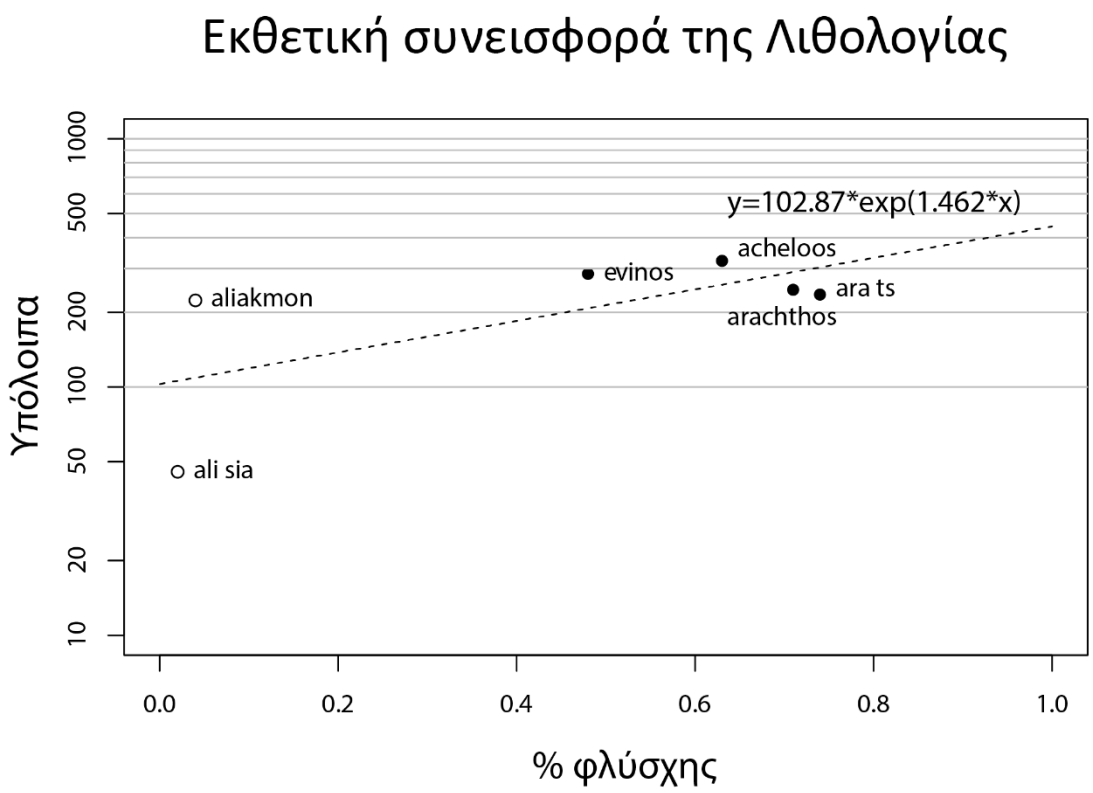
1. Εξάγεται η στερεοαπορροή από την κλίση και την βροχόπτωση. Θεωρείται ότι η εξίσωση αυτή είναι κατάλληλη για τις ανθεκτικές στη διάβρωση λιθολογίες. Πράγματι, ο μέσος όρος των υπολοίπων αυτής της εξίσωσης παλινδρόμησης για τις λεκάνες δίχως φλύσχη είναι κοντά στο μηδέν. Προκύπτει όμως (για τις λεκάνες με φλύσχη >~40%) ένα *υπόλοιπο* σαν διαφορά του παρατηρημένου με αυτό που προβλέφτηκε (SSY_residual), με μέση τιμή περίπου 250.
2. Το *υπόλοιπο* αυτό ερμηνεύεται με την παρουσία του φλύσχη (ευδιάβρωτο έδαφος) στην λεκάνη εκθετικά, θεωρώντας τον συνεχή μεταβλητή.

Η παλινδρόμηση (με τους λογάριθμους, 10 σημεία) της ειδικής στερεοαπορροής σε βροχόπτωση και κλίση δίνει την παρακάτω εξίσωση:

$$\mathbf{SSY = 0.0049\ S^{1.51}\ P^{0.94}} \qquad (5\text{-}6)$$

όπου η SSY σε t/km^2/y, η βροχόπτωση σε χιλιοστά και η μορφολογική κλίση της λεκάνης σε %. Αυτή η εξίσωση «προβλέπει» την ειδική στερεοαπορροή σε λεκάνες που καταλαμβάνονται από ανθεκτικούς στη διάβρωση γεωλογικούς σχηματισμούς, δηλαδή όταν ο φλύσχης στην λεκάνη δεν ξεπερνά το ~25%. Η εξίσωση δεν προσθέτει κάποια σημαντική βελτίωση της προβλεπτικής ικανότητας (R^2=0.69) αλλά περιγράφει καλύτερα τις λεκάνες με πιο ανθεκτική στη διάβρωση γεωλογία, καθώς επίσης έχει καλύτερα χαρακτηριστικά bootstrap (threefold validated R^2 = 0.50).

Εάν σχεδιαστούν τα (θετικά μόνο) υπόλοιπα της Εξίσωσης 5-6 από τις παρατηρημένες τιμές της SSY, έναντι της μέσης λιθολογίας (κλάσμα φλύσχη στην λεκάνη), όπως φαίνεται στο διάγραμμα του παρακάτω Σχήματος 5-32, μπορεί κανείς να διακρίνει μια σαφή τάση επιρροής της λιθολογίας σε αυτά.



Σχήμα 5-32 Υπόθεση και εξίσωση εκθετικής συνεισφοράς φλύσχη στα υπόλοιπα της σχέσης κλίσης-βροχής.

Με αυτή την υπόθεση μπορεί να γραφτεί η τελική σχέση.

$$\mathbf{SSY = 0.0049\ S^{1.51}\ P^{0.94} + 102.87\ e^{1.46L}} \qquad (5\text{-}7)$$

Η εξίσωση αυτή προβλέπει αρκετά καλά τις παρατηρημένες τιμές ($R^2 = 0.90$, RMSE = 222) και είναι όσο μακριά μπορεί να φτάσει η ανάλυση με τα (λίγα ομολογουμένως) διαθέσιμα δεδομένα, δίχως να προχωρά σε «υπερπρόβλεψη» (overprediction). Ωστόσο, λόγω του τρόπου ανάπτυξής της, τα bootstrap χαρακτηριστικά της δεν είναι καλά.

Σαν μια επαλήθευση της Εξίσωσης 5-7 με ανεξάρτητα δεδομένα (από αυτά που χρησίμευσαν για την ανάπτυξή της), υπολογίστηκαν οι τιμές στερεοαπορροής για τις τρείς λεκάνες όπου έχουν γίνει βαθυμετρικές αποτυπώσεις στους ταμιευτήρες (στα Κρεμαστά οι Αχελώος και Αγραφιώτης και στον Μαραθώνα ο Χάραδρος, no. 12, 13, και 15 στον Πίνακα 4-23). Ο Ταυρωπός (no. 14) είναι εμφανές outlier.

Τα αποτελέσματά ήταν 2120 (έναντι 2034), 1716 (έναντι 1184), και 218 (έναντι 508) t km^{-2} y^{-1} αντίστοιχα, που δίνουν μια καλή συσχέτιση με τις μετρημένες τιμές (r^2 = 0.86).

Τα γραμμικά μοντέλα ανακεφαλαιώνονται στον επόμενο Πίνακα 5-9, δίνοντας και κάποια μέτρα καλής προσαρμογής σύμφωνα με τους Legates and McCabe (1999).

Πίνακας 5-10 Συγκεντρωτικός Πίνακας εξισώσεων μαζί με δείκτες καλής προσαρμογής (RMSE , E = Nash Suttcliff efficiency, Percent Bias, tau Kendall). Το ταυ του Kendall μετρά την ομοιότητα κατάταξης δύο σειρών.

No.	**Εξίσωση**	***Παρατηρήσεις***
5-2	**SSY = -861.66 + 53.9 *S***	n=10
	RMSE= 218(39%), PBIAS = 0, E = 0.83, d = 0.96, R^2 = 0.86, τ = 0.67	S >~ 20%
5-3	**SSY = -758.46 + 278.59 *LS***	n=10
	RMSE= 228 (41%) , PBIAS = 0, E = 0.82, d = 0.96, R^2 = 0.85, τ = 0.70	LS >~ 2.8
5-6	**SSY = 0.0049 $S^{1.51}P^{0.94}$**	n=10
	RMSE= 222(43%), PBIAS = 8.6, E = 0.80, d = 0.96, R^2 = 0.69, τ = 0.78	
5-7	**SSY = 0.0049 $S^{1.51}$ $P^{0.94}$ + 102.87$e^{1.46L}$**	n=10
	RMSE= 222(38%), PBIAS = -12.4, E = 0.84, d = 0.96, R^2 = 0.90, τ =0.78	

Εύρος μτβλ: 20< κλίση <47; 700<Βροχόπτωση<1750; 2% <Λιθολογία<74%;200<Επιφάνεια<4750

Η σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων (από 5 μοντέλα) τιμών της στερεοπαροχής παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-33, αφού πρώτα παρουσιαστεί σύντομα το μοντέλο BQART. Από την εφαρμογή του μοντέλου αυτού, όπως θα φανεί παρακάτω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι μπορεί σίγουρα να προταθεί σαν μια αξιόπιστη μέθοδος εκτίμησης της στερεοαπορροής. Το μειονέκτημα της είναι κυρίως ότι, καθώς απαιτεί δεδομένα απορροής, μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε μετρούμενες λεκάνες.

5.3.7 Το μοντέλο BQART

Το μοντέλο BQART εκτιμά την μακροπρόθεσμη ροή ιζημάτων που μεταφέρονται από τους ποταμούς βασιζόμενο σε χαρακτηριστικά μορφοτεκτονικά (επιφάνεια λεκάνης, ανάγλυφο), κλιματικά-υδρολογικά (θερμοκρασία, απορροή-Q), και έναν παράγοντα (B), ο οποίος συνοψίζει το λιθολογικό και παγετωνικό χαρακτήρα της λεκάνης, την ικανότητά της να

παγιδεύει ίζημα, καθώς και τις ανθρωπογενείς πιέσεις, επεμβάσεις και τροποποιήσεις της φυσικής της κατάστασης (Syvitski and Milliman, 2007). Ο παράγων Β μπορεί να θεωρηθεί και σαν ίσος με την μονάδα (πλανητικός μέσος) αν δεν υπάρχουν πιο συγκεκριμένες πληροφορίες πάνω στις επί μέρους κατηγορίες που περιλαμβάνει. Η εξίσωση έχει τη μορφή:

$$Qs = \omega B Q^{0.31} A^{0.50} RT \quad \text{για } T > 2^{\circ}\text{C} \qquad (5\text{-}8)$$

$$Qs = 2\omega B Q^{0.31} A^{0.50} R \quad \text{για } T \leq 2^{\circ}\text{C}$$

όπου Q η απορροή, A η επιφάνεια, R το ανάγλυφο, T η μέση ετήσια θερμοκρασία και ω μία σταθερά που εξαρτάται από το εάν τα αποτελέσματα (Qs) απαιτούνται σε kg/s (ω = 0.02) ή MT/y (ω =0.0006).

Αν η λιθολογία της λεκάνης είναι γνωστή, το *B* παίρνει την τιμή του *L,* του υποπαράγοντα της λιθολογίας στην εξίσωση που δίνει τον παράγοντα Β, και είναι:

$$B = IL(1\text{-}T_e)E_h \qquad (5\text{-}9)$$

όπου E_h η ανθρωπογενής πίεση (που εκτιμάται από το ΑΕΠ της περιφέρειας και την πυκνότητα κατοίκησης σε αυτή), T_e η ικανότητα παγίδευσης ιζήματος (έλη ή υγρότοποι στην εκβολή, κυρίως), και *I,* η ύπαρξη και σημασία παγετώνων εντός της λεκάνης.

Στον παρακάτω Πίνακα 5-10 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί για τις 17 λεκάνες της τηλεπισκόπησης και στον Πίνακα 5-11 συνοψίζονται οι τιμές των παραγόντων και τα αποτελέσματα του μοντέλου για τις 11 λεκάνες που μετρούσε η ΔΕΗ. Είναι εντυπωσιακή και σίγουρα ενθαρρυντική η καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα αποτελέσματα των Ζαρρή-Λυκούδη (2007), καθώς, σύμφωνα με τους συγγραφείς, το μοντέλο αντλεί από μια βάση δεδομένων 488 ποταμών και ερμηνεύει το 96% της μεταξύ τους διασποράς. Η συσχέτιση μεταξύ υπολογισμένων και μετρημένων τιμών είναι $r = 0.91$. Για τον παράγοντα της λιθολογίας οι συγγραφείς αναγνωρίζουν 6 μεγάλες κατηγορίες, σαν μέσες στη λεκάνη (basin-averaged) με τιμές από 0.5 έως 3, ενώ το 4 χρησιμοποιείται για ειδικές περιπτώσεις όπως περιοχές εμφάνισης loess[14]. Αυτό είναι το βέλτιστο εύρος σύμφωνα με τους δημιουργούς του μοντέλου.

[14] Χώμα αιολικής εναπόθεσης, ανοιχτού καφέ ή γκριζωπού χρώματος που αποτελείται από πολύ μικρά κομμάτια χαλαζία.

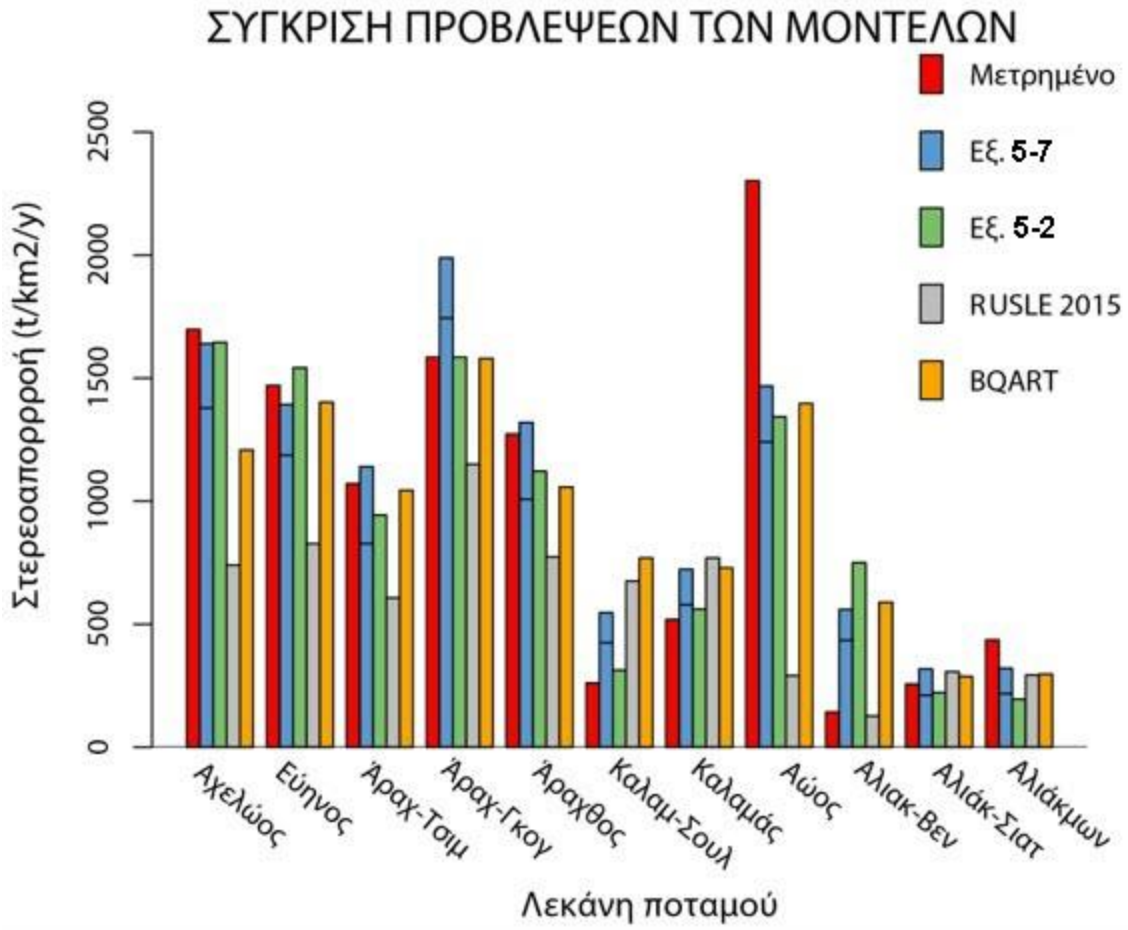
Πίνακας 5-11 Τιμές παραμέτρων και αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου BQART (λεκάνες τηλεπισκοπικής έρευνας).

Ποταμός	*Επιφάνεια* *km²*	*Q* *km³*	*L*	*E_h* .	*T_E*	*B*	*R* *km*	*T* *˚C*	*Qs BQART* *kg/s*	*SSY BQART* *t/km²*	*Φορτίο BQART* *ton*10⁶*	*Qs LQART* *kg/s*	*SSY LQART* *t/km²*	*Φορτίο LQART* *ton*10⁶*	*ΦορτίοΕξ 5-7* *ton*10⁶*
	1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***8***	***9***	***10***	***11***	***12***	***13***	***14***	***15***
ΑΛΦΕΙΟΣ	2907	1.714	1.5	1.00	0.20	1.8	1.500	17.5	40	435	**1.27**	50	544	**1.58**	**1.85**
ΑΞΙΟΣ	23747	5.000	0.5	1.00	0.20	0.8	1.620	11.0	36	48	**1.14**	45	60	**1.43**	**4.41**
ΑΧΕΛΩΟΣ	420	4.383	0.5	1.00		0.8	0.321	16.0	2	125	0.05	2	125	0.05	0.11
ΑΧΕΡΟΝΤΑΣ	718	0.315	1.5	1.00	0.50	0.8	2.005	13.5	8	334	0.24	15	668	0.48	0.59
ΒΟΥΡΑΙΚΟΣ	273	0.095	2.0	1.00		2.0	2.258	15.5	11	1,288	0.35	11	1,288	0.35	0.25
ΕΥΗΝΟΣ	828	0.917	2.0	1.00		2.0	2.391	15.0	40	1,531	**1.27**	40	1,531	**1.27**	0.47
ΕΥΡΩΤΑΣ	1736	0.444	1.3	1.00	0.30	1.2	2.055	18.0	31	566	0.98	31	566	0.98	0.77
ΚΑΛΑΜΑΣ	1899	2.048	1.5	1.00		1.8	2.115	13.0	45	745	**1.42**	45	745	**1.42**	**1.37**
ΚΡΑΘΙΣ	155	0.091	1.7	1.00		1.7	2.271	15.5	7	1,442	0.22	7	1,442	0.22	0.17
ΚΡΙΟΣ	130	0.064	2.0	1.00		2.0	1.757	16.0	5	1,326	0.17	5	1,326	0.17	0.11
ΜΟΡΝΟΣ	399	0.404	2.0	1.00		2.0	2.426	15.0	22	1,736	0.69	22	1,736	0.69	0.41
ΠΑΜΙΣΟΣ	794	0.341	1.5	1.00		1.7	1.590	18.0	17	688	0.55	17	688	0.55	0.33
ΠΗΝΕΙΟΣ	8184	2.558	1.5	1.00	0.20	1.8	2.787	14.5	117	452	**3.70**	147	565	**4.63**	**2.42**
ΠΥΡΡΟΣ	576	0.122	1.5	1.00		2.0	2.169	16.0	13	713	0.41	13	713	0.41	0.23
ΣΕΛΙΝΟΥΣ	450	0.155	1.5	1.00		1.7	2.019	16.0	12	808	0.36	12	808	0.36	0.38
ΣΠΕΡΧΕΙΟΣ	1661	0.693	1.5	1.00		1.8	2.128	17.0	39	750	**1.24**	39	750	**1.24**	0.90
ΣΤΡΥΜΩΝ	4141	0.877	0.5	1.00	0.50	0.4	2.186	11.0	7	57	0.23	15	113	0.47	**1.05**

Στον Πίνακα γίνεται εφαρμογή του μοντέλου BQART($Qs = \omega BQ^{0.31}A^{0.50}RT$)με δύο τρόπους. Στον πρώτο $B = IL(1\text{-}T_e)E_h$ (στήλες 9,10,11) ενώ στον δεύτερο*(L*QART- στήλες 12,13,14),*B = L, δηλαδή χωρίς να λαμβάνονται υπόψη η ικανότητα κατακράτησης ιζήματος από τα φράγματα* T_E *και οι ανθρωπογενείς πιέσεις,* E_h*στην λεκάνη. Οι ανθρωπογενείς πιέσεις αυξάνουν το B ενώ η ικανότητα κατακράτησης το ελαττώνει. Στην στήλη 15 δίνονται για σύγκριση τα αποτελέσματα της εξ.7-6. Το μοντέλο* BQART παρουσιάζεται αναλυτικά στο εδάφιο 7.2.Οι παραδοχές που έγιναν και οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται στον πιο αναλυτικό Πίνακα 7-4.

Πίνακας 5-12 Τιμές παραγόντων και αποτελέσματα από το μοντέλο BQART (λεκάνες ΔΕΗ)

no	*Σταθμός-Θέση*	*B (L)*	*Q (km^3)*	*A (km^2)*	*R (km)*	*T (˚C)*	*Qs BQART (kg/s)*	***SSY BQART***	***SSY Zarris et al.***
1	Αχελώος Αυλάκι	2	1.583	1,361	2.043	16.0	55.6	**1289**	**1698**
2	Εύηνος	2	0.798	912	2.268	16.5	41.8	**1446**	**1470**
3	Άραχθος, γεφ. Τσίμοβο	2	0.590	627	1.859	12.5	20.0	**1004**	**1071**
4	Άραχθος, γεφ. Γκόγκου.	2	0.360	205	2.053	12.0	10.3	**1580**	**1584**
5	Άραχθος, γεφ. Πλάκας	2	0.744	951	2.181	12.5	30.7	**1018**	**1273**
6	Καλαμάς Σουλόπουλο	1.5	0.508	670	1.935	13.0	16.3	**769**	**278**
7	Καλαμάς Κιοτέκι	1.5	1.022	1,544	2.149	14.0	35.7	**729**	**519**
8	Αώος	3	0.442	670	2.185	12.0	31.6	**1489**	**2302**
9	Βενέτικος (Αλιάκμων)	1.2	0.536	487	1.602	11.5	8.0	**521**	**143**
10	Αλιάκμων Σιάτιστα	1.2	0.719	2,474	2.005	11.0	24.9	**317**	**257**
11	Αλιάκμων Μ. Ιλαρίωνος	1.2	1.536	4,755	2.205	12.0	51.2	**339**	**436**



Σχήμα 5-33 Σύγκριση των μετρημένων (Ζαρρής & Λυκούδη, 2007) τιμών στερεοαπορροής ($tkm^{-2}y^{-1}$) και των προβλέψεων από 2 εξισώσεις (εξ.5-7 & 5-2), το μοντέλο BQART και τους χάρτες RUSLE2015 του ESDC. Η οριζόντια γραμμή αντιπροσωπεύει την Εξ.5-6. Η RUSLE2015 δίνει gros serosion (ολική απώλεια), επομένως θα πρέπει να θεωρείται ακόμα μικρότερη (κατά τον συντελεστή στερεομεταφοράς της κάθε λεκάνης). Η προσέγγιση από τις εξισώσεις και το BQART είναι ικανοποιητική. Αντίθετα, η RUSLE2015 υποεκτιμά σημαντικά και συστηματικά την στερεοαπορροή. Για τον Καλαμά όλα τα μοντέλα προβλέπουν στερεοαπορροή μεγαλύτερη από την μετρημένη.

5.3.8 Ο ποταμός Αώος

Θα πρέπει να γίνει ιδιαίτερη αναφορά στον ποταμό Αώο, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας. Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι ο ποταμός Αώος εντάσσεται σε μια άλλη κατηγορία, και ότι μοντέλα βασισμένα (trained) πάνω στα υπόλοιπα ποτάμια δεν θα προέβλεπαν την συμπεριφορά του σε ότι αφορά τις διεργασίες που σχετίζονται με την στερεοαπορροή. Αυτό ισχύει, όχι μόνο για τις εξισώσεις της παρούσας έρευνας αλλά και για το μοντέλο BQART. Αν λοιπόν ο Αώος είναι μια ακραία περίπτωση στερεοαπορροής χωρίς όμως να παρουσιάζει μέγιστες τιμές ούτε στην λιθολογία, ούτε στις βροχοπτώσεις ούτε τις κλίσεις, τότε που οφείλονται αυτές του οι επιδόσεις;

Μια πρώτη παρατήρηση είναι ότι, όπως φαίνεται και στον χάρτη του Σχήματος 4-81, ο Αώος είναι ο μόνος ποταμός με διεύθυνση ροής από Α-.ΝΑ προς Δ-ΒΔ, προς την Αλβανία (όπου ονομάζεται Vjose και διανύει ακόμα 150 km πριν εκβάλλει στη θάλασσα). Όλα τα άλλα ποτάμια έχουν γενικά διευθύνσεις ροής από Β προς Ν, ή από ΒΔ προς ΝΑ. Αυτός ο προσανατολισμός σημαίνει ότι κατά την προέλαση των χειμερινών κυκλονικών συστημάτων (cyclonic tracks), που συνήθως έχουν Δ ή ΒΔ αφετηρία (Flokas et al., 2010), και οι δύο πλαγιές της κοιλάδας του ποταμού θα είναι εκτεθειμμένες στον επιθετικό καιρό, ενώ τα υπόλοιπα ποτάμια θα έχουν τις ανατολικές τους πλαγιές προστατευμένες. Επιπλέον, υπάρχουν σημαντικές ενδείξεις για το ισχυρό δυναμικό αιφνίδιων πλημμυρών (flash flooding) του Αώου. Οι πιο μεγάλες καταιγίδες συμβαίνουν κατά τους χειμερινούς μήνες, όπως η μέγιστη καταγεγραμμένη βροχόπτωση και πλημμύρα που συνέβη την πρωτοχρονιά του έτους 1971. Σε δύο ημέρες (31 Δεκεμβρίου 1970 και 1 Ιανουαρίου 1971), στον σταθμό της Βωβούσας, στα ανάντη της λεκάνης, κατεγράφη βροχόπτωση 315 mm. Την 1^{η} Ιανουαρίου 1971, κατεγράφη παροχή-ρεκόρ 1779 m^3s^{-1} στον υδρομετρικό σταθμό της Γέφυρα Μπουραζανίου (Hamlin, 2000), αμέσως κατάντη της συμβολής του Αώου με τον Βοϊδομάτη[15]. Ανάντη της γέφυρας αυτής, η λεκάνη των δύο ποταμών είναι περίπου 1000 km^2, και η καταγεγραμμένη αυτή παροχή είναι εξαιρετικά μεγάλη για αυτήν την επιφάνεια, με βάση τις περιβάλλουσες καμπύλες επιφάνειας λεκάνης – μέγιστης πλημμύρας που πρότεινε η Mimikou (1990). Η παροχή αυτή γίνεται ακόμα περισσότερο εντυπωσιακή αν ληφθεί υπόψη ότι το μεγαλύτερό της μέρος οφείλεται στον μικρότερο ποταμό Βοϊδομάτη

[15] Έχει ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι το υδρολογικό έτος 1970-71, στο οποίο εντάσσεται αυτό το ακραίο γεγονός, είναι το δεύτερο σε στερεοπαροχή στο μητρώο του ποταμού, με μέση ετήσια τιμή 185 kg/s (πρώτο είναι το 1974-75 με μέση ετήσια τιμή 200 kg/s). Οι αιχμές αυτών των ετών δεν συναντώνται στις κοντινές του λεκάνες, όπως για παράδειγμα στον Καλαμά, πράγμα που σημαίνει ότι είναι καθαρά τοπικά φαινόμενα.

(Hamlin, 2000). Εξετάζοντας συνοπτικές ατμοσφαιρικές συνθήκες σε καιρικά διαγράμματα (weather charts) κατά την εκδήλωση μεγάλων πλημμυρικών γεγονότων σε Βοϊδομάτη και Αώο (single event climatology), ο Hamlin (2000) συμπέρανε ότι οι μεγαλύτερες πλημμύρες συνέβαιναν όταν η περιοχή ήταν στην υπήνεμη πλευρά (lee) ενός ψυχρού μετώπου που προήλαυνε προς τα ανατολικά. Αυτό έχει επιβεβαιωθεί έκτοτε και από άλλους ερευνητές (Maheras et al., 2004, Housos and Nartzokas, 2006). Η ραγδαία και επίμονη βροχόπτωση σε αυτές τις περιπτώσεις ενισχύεται περαιτέρω και από ορογραφικά αίτια. Η γεωμορφολογία του Αώου, ακριβώς ανάντη της γέφυρας της Κόνιτσας, στην περιοχή των ασβεστόλιθων, κυριαρχείται από ένα εντυπωσιακό φαράγγι βάθους 1000 m και πλάτους 2500 m . Αυτό πιθανότατα όχι μόνο ενισχύει το ορογραφικό χαρακτήρα των βροχοπτώσεων αλλά επίσης συντελεί στην ενισχυμένη διοχέτευση (funneling) του επιθετικού καιρού στα ανάντη. Ο Αώος έχει επιπλέον το μεγαλύτερο μέσο υψόμετρο από όλες τις λεκάνες και στις κορυφές του παραμένει χιόνι ακόμα και τον Αύγουστο. Η ραγδαία και επίμονη βροχόπτωση πάνω στο χιόνι (rain-on-snow effect) μεγιστοποιεί ακόμα περισσότερο την απορροή. Τέλος, είναι διαπιστωμένη η ύπαρξη badlands στην λεκάνη. Ο Woodward (1995) αναφέρει την ύπαρξη ενός badland στα ανατολικά της γέφυρας της Κόνιτσας. Η μορφολογία των badland έχει προκύψει από την αλληλεπίδραση της βροχόπτωσης με τους ευδιάβρωτους γεωλογικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στην συγκεκριμένη περιοχή. Οι διεργασίες διαμόρφωσης της ιδιαίτερης αυτής μορφολογίας αποτελεί ένδειξη έντονων διαβρωτικών διεργασιών και άρα υψηλών τιμών στερεοαπορροής.

Συμπερασματικά, φαίνεται ότι ο ιδιαίτερος προσανατολισμός της λεκάνης του π. Αώου σε συνδυασμό με τα συχνότερα εμφανιζόμενα καιρικά συστήματα στην περιοχή, καθώς επίσης και το δυναμικό αιφνίδιων πλημμυρών και η ύπαρξη badlands της λεκάνης είναι οι κύριες αιτίες για την ακραία συμπεριφορά (σε ότι αφορά την στερεοαπορροή) του ποταμού αυτού.

Ας αναφερθεί επίσης ότι στον Καλαμά, όλα τα μοντέλα προβλέπουν μεγαλύτερη στερεοαπορροή από την υπολογισμένη από τους Ζαρρής κ.ά και Κουτσογιάννη και Ταρλά, (η οποία πράγματι εμφανίζεται πολύ μικρή), και φαίνεται ότι οι εκτιμήσεις των Πούλος κ.ά και της ΔΕΗ είναι κοντύτερα στην πραγματικότητα,

5.4 ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Σε αυτό το εδάφιο γίνεται η σύγκριση και σύνθεση των αποτελεσμάτων από τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή. Εφαρμόζοντας το εμπειρικό μοντέλο που αναπτύχθηκε (Εξισώσεις 5-6 και 5-7), καθώς και το BQART (σε δύο παραλλαγές) στις 17 λεκάνες που περιέλαβε η τηλεπισκοπική έρευνα, και κατόπιν συγκρίνοντας τις προβλέψεις τους τόσο μεταξύ τους, και με τιμές από τη βιβλιογραφία, όσο και σε σχέση με την καταταξή τους από την τηλεπισκόπηση, προκύπτουν χρήσιμες παρατηρήσεις και ενδιαφέροντα συμπεράσματα.

5.4.1 Εφαρμογή των μοντέλων

Στον Πίνακα 5-13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των Εξ.5-6 και 5-7 στις 17 λεκάνες ποταμών του Ελληνικού χώρου. Οι πρώτοι πέντε ποταμοί, οι μόνοι με ετήσιο φορτίο στη θάλασσα μεγαλύτερο από 1 εκατομμύριο μετρικούς τόνους, σημειώνονται με έντονα γράμματα.

Στην τελευταία στήλη δίνεται η μέση ταχύτητα των ανέμων στην θαλάσσια περιοχή της εκβολής των ποταμών. Ο λόγος που αναζητήθηκαν οι ανεμολογικές συνθήκες στις περιοχές των εκβολών των ποταμών είναι η σκέψη ότι σε περιοχές εκβολών με ισχυρους ανέμους το πλούμιο θα διασκορπίζεται πιο γρήγορα, επομένως θα έχει μικρότερη πιθανότητα να φανεί στην δορυφορική εικόνα. Κάποιοι από τους ποταμούς εκβάλλουν σε κλειστούς κόλπους (όπως οι Αξιός και Σπερχειός) αλλά και σε μη κλειστούς κόλπους (όπως ο Πατραϊκός), όπου τα αιωρούμενα ιζήματα στις εκβολές θα πρέπει να έχουν μεγαλύτερη διάρκεια παραμονής και αιώρησης καθώς τα διατηρει και η θαλάσσια ανακυκλοφορία. Φυσικά, εκτός από τους ανέμους, την διεργασία διασποράς των πλουμίων επηρεάζουν οπωσδήποτε σε σημαντικό βαθμό το κυματικό καθεστώς, τα παράκτια επιμήκη ρεύματα (longshore currents) και η παλίρροια. Η προσπάθεια συνεκτίμησης όλων αυτών των παραγόντων απαιτεί ιδιαίτερη και σε βάθος έρευνα που ξεφεύγει από τους σκοπούς της διατριβής αυτής. Σε κάποια επόμενη φάση της έρευνας θα πρέπει να δοθεί μια εκδοχή της τηλεπισκοπικής κατάταξης σταθμισμένη για την επιρροή των ανέμων στις εκβολές των ποταμών.

Πίνακας 5-13 Τιμές παραμέτρων και αποτελέσματα στερεοπαροχής από την εφαρμογή των Εξ. 5-6/5-7

α/α	*ΠΟΤΑΜΟΣ*	*Λιθο-Λογια*	*Βροχή*	*Κλίση*	*SSY 5-6*	*SSY 5-7*	*Επι-φάνεια*	*Φορτίο Ετήσιο Εξ.5-7*	*Ταχ. Ανέμου**
			mm	*%*	*t/km²*	*t/km²*	*km²*	*εκ.τον*	*m/s*
1	ΑΛΦΕΙΟΣ	0.33	1100	25.42	469	*635*	2907	**1.85**	4.2
2	ΑΞΙΟΣ	0.22	553	8.12	44	*186*	23747	**4.41**	2.9
3	ΑΧΕΛΩΟΣ	0.10	908	13.06	143	*262*	420	0.11	4.5
4	ΑΧΕΡΩΝ	0.15	1300	29.62	691	*819*	718	0.59	2.4
5	ΒΟΥΡΑΙΚΟΣ	0.50	927	36.65	693	*907*	273	0.25	2.8
6	ΕΥΗΝΟΣ	0.59	1008	21.18	328	*570*	828	0.47	3.2
7	ΕΥΡΩΤΑΣ	0.30	836	21.53	282	*441*	1736	0.77	3.6
8	ΚΑΛΑΜΑΣ	0.23	1297	26.40	579	*723*	1899	**1.37**	3.5
9	ΚΡΑΘΙΣ	0.37	965	42.40	897	*1073*	155	0.17	3.3
10	ΚΡΙΟΣ	0.49	900	34.88	626	*837*	130	0.11	3.2
11	ΜΟΡΝΟΣ	0.57	998	38.11	788	*1024*	399	0.41	3.5
12	ΠΑΜΙΣΟΣ	0.31	922	19.06	257	*418*	794	0.33	3.3
13	ΠΗΝΕΙΟΣ	0.29	654	15.60	138	*295*	8184	**2.42**	4.4
14	ΠΥΡΡΟΣ	0.48	596	20.34	188	*396*	576	0.23	3.5
15	ΣΕΛΙΝΟΥΣ	0.42	938	35.26	661	*851*	450	0.38	4.5
16	ΣΠΕΡΧΕΙΟΣ	0.43	908	23.41	346	*539*	1661	0.90	2.3
17	ΣΤΡΥΜΩΝ	0.15	550	16.37	126	*255*	4141	**1.05**	4.0

*Τα μετεωρολογικά δεδομένα προέρχονται από το SWAT, ετήσιο φορτίο από την Εξ.5-6/7.

5.4.2 Σύγκριση με τηλεπισκόπηση & φωτοερμηνεία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η επιλογή του δείκτη με τον οποίο θα μετρηθεί το συνολικό δυναμικό του κάθε ποταμού είναι ένα κρίσιμο ζήτημα στην κατάταξή τους. Τα ποσοστά των διαφορετικών μασκών δείχνουν την μέση έκταση του πλουμίου μέσα στα πολύγωνα μέτρησης και αντανακλούν το μέγεθός τους. Οι δείκτες/λόγοι των καναλιών αντανακλούν την συγκέντρωση ή και την σύσταση και το χρώμα του αιωρούμενου υλικού μέσα στο πλούμιο. Τέλος, η τιμή της πρώτης κύριας συνιστώσας που περιλαμβάνει και τα 4 κανάλια μπορεί να θεωρηθεί σαν πιο ακριβής δείκτης της ποσότητας των αιωρούμενων ιζημάτων. Με βάση τα παραπάνω, μπορεί να θεωρηθεί ότι η μάσκα Li (κόκκινο) μαζί με την 1^{η} κύρια συνιστώσα (1^{η}ΚΣ) δίνουν την συνολική δυναμικότητα του κάθε ποταμού σε ίζημα.

Πίνακας 5-14 Ορισμός των μασκών και του δείκτη που χρησιμοποιήθηκε στην κατάταξη δυναμικότητας.

ΜΑΣΚΑ - ΔΕΙΚΤΗΣ	ΤΥΠΟΣ
LI	$\rho_{red} > 0.031$
FLEUVE	$\rho_{red} > 0.031$ and $\rho_{nir} > 0.020$
NSMI	$\rho_{red} + \rho_{green} - \rho_{blue} > 0$
1^{η} Κυρια Συνιστώσα	$0.15*\rho_{blue} + 0.35*\rho_{green} + 0.80*\rho_{red} + 0.43*\rho_{nir}$

ρ: ανακλαστικότητα

Πίνακας 5-15 Σύγκριση αποτελεσμάτων της Εξίσωσης 5-7 με προηγούμενες έρευνες.

α/α	ΠΟΤΑΜΟΣ	SSY 5-7 t/km²	*Επιφ. Ολική* km²	ΦΡΑΓΜΑ	Vol hm³	Επίφ. ανάντη Φραγμ. km²	Ικανοτητα συγκρά-τησης	Επιφ. μη συμβ. km²	Επιφ. τελική km²	Φορτίο 5-7 (εκ.τον)	Vol απορροής hm³	Ε (ΚΜ²)	Υ από Θερ. (1000m³/km²)	SSY Θερ. t/km²	Vol απορροής hm³	SY IZ-A (φορτίο)
		1	*2*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*	*15*	*16*
1	**ΑΛΦΕΙΟΣ**	635	**3595**	**ΛΑΔΩΝΑΣ**	***57***	***789***	***0.87***		***2907***	**1.85**	1,714	***3,610***	622	235	***2,245***	0.85
2	**ΑΞΙΟΣ**	186	**23747**						***23747***	**4.41**	***5,000***	***23,747***	**224**	**85**	***5,319***	2.01
3	ΑΧΕΛΩΟΣ	262	**5350**						***420***	0.11	***4,383***	***5,350***	**614**	**232**	***3,285***	1.24
4	ΑΧΕΡΩΝ	819	**718**						***718***	0.59	***315***					
5	ΒΟΥΡΑΙΚΟΣ	907	**273**						***273***	0.25	***95***					
6	ΕΥΗΝΟΣ	570	**1163**	**ΑΡΑΧΩΒΑ**	***138***	***344***	***0.97***		***828***	0.47	***917***	***1,070***	*1,375*	519	***1,599***	0.56
7	ΕΥΡΩΤΑΣ	441	**1736**						***1736***	0.77	***444***					
8	**ΚΑΛΑΜΑΣ**	723	**1899**						***1899***	**1.37**	***2,048***	***1,826***	***1,296***	**489**	***2,366***	0.89
9	ΚΡΑΘΙΣ	1073	**155**						***155***	0.17	***91***					
10	ΚΡΙΟΣ	837	**130**						***130***	0.11	***64***					
11	ΜΟΡΝΟΣ	1024	**974**	**ΛΙΔΩΡΙΚΙ**	***700***	***580***	***0.99***		***399***	0.41	***404***	***1,010***	1,118	422	***1,089***	0.43
12	ΠΑΜΙΣΟΣ	418	**794**						***794***	0.33	**341**					
13	**ΠΗΝΕΙΟΣ**	295	**9500**	**ΣΜΟΚΒΟ**	***20***	***380***	***0.83***	***1000***	***8184***	**2.42**	***2,558***	***10,750***	*357*	135	***3,838***	1.45
14	ΠΥΡΡΟΣ	396	**576**						***576***	0.23	***122***					
15	ΣΕΛΙΝΟΥΣ	851	**450**						***450***	0.38	***155***					
16	ΣΠΕΡΧΕΙΟΣ	539	**1661**						***1661***	0.90	***693***	***1,780***	*642*	242	***1,143***	0.43
17	**ΣΤΡΥΜΩΝ**	255	**5141**					***1000***	***4141***	**1.05**	***877***	***16,550***	315	119	***5,213***	1.97

Οι στήλες 4-7 αφορούν λεκάνες με φράγματα κάποιας σημασίας (Μόρνος, Εύηνος, Πηνειός, Αλφειός) για τις οποίες κάνουμε έναν υπολογισμό της ικανότητας κατακράτησης με βάση την εξίσωση (Brown, 1943, Verstraeten &Poesen, 2000]**: TE = 100*[1-1/(1+0.0021*(D*C/A))]** όπου Cη χωρητικότητα του ταμιευτήρα (m^3), Α επιφάνεια απορροής (km^2) και D μία σταθερά που κυμαίνεται από 0,046 έως 1. Με 0,046 η ικανότητα κατακράτησης ιζήματος είναι η ελάχιστη. Οι μεγάλοι ταμιευτήρες όπως του Μόρνου θεωρείται ότι κατακρατούν εντελώς το ίζημα. Για τον Αχελώο οι υπολογισμοί αφορούν μόνο το τμήμα κατάντη του Φρ. Στράτου (420 τ.χλμ). Μικρά φράγματα(Αλφειούσα) στον Αλφειό (Ρογί) στον Καλαμά, δεν θεωρούμε ότι έχουν καμμιά ικανότητα κατακράτησης. Στην στήλη 8 θεωρούμε ότι ένα τμήμα των λεκανών Πηνειού και Στρυμώνα δεν συμμετέχουν στην επιφάνεια που παράγει ίζημα (βάλτοι, υγρότοποι και λίμνες κά). Για τον Αξιό οι συνθήκες δεν είναι γνωστές επιφάνεια μείον μη συμβάλλουσα επιφάνεια συν επιφάνεια ανάντη φράγματος επί 1 μείον ικανότητα συγκράτησης). Στο εμβαδόν του Σελινούντα έχει προστεθεί και ο Κερυνίτης. Η ετήσια απορροή νερού στήλη 11- προέρχεται από τις διαχειριστικές μελέτες του ΥΠΑΝ.Οι στήλες 12,13και 15 προέρχονται από την εργασία «Ο ρόλος των φραγμάτων στην υδάτινη και ιζηματολογική δίαιτα της Ελληνικής παράκτιας ζώνης», (Πούλος,) και προσφέρονται για σύγκριση: Στήλη 1 (SSY) με 14 και 10 με την 16 (SY). Η 16 έχει υπολογιστεί το πλαίσιο της παρούσας έευνας με τα εμβαδά τα οποία έχει χρησιμοποιήσει στην έρευνα του ο Πούλος 2000) (στήλη 12) ενώ η 14 είναι η αναγωγή της 13 (από κυβικά μέτρα σε τόννους, με ειδικό βάρος 2.65).Οι υπογραμμισμένες τιμές στην στ.14 προέρχονται από μετρήσεις ενώ οι υπόλοιπες από εφαρμογή τύπου (Πούλος, 2000).

Στον Πίνακα 5-14 υπενθυμίζονται οι φασματικοί τύποι για τους δείκτες. Η μάσκα NSMI που περιλαμβάνει και το πράσινο και μπλέ κανάλι δείχνει την παρουσία αιωρούμενου υλικού –οργανικής είτε ανόργανης προέλευσης- στην εκβολή, ενώ στο κόκκινο (μάσκα Li) και στο εγγύς υπέρυθρο (μάσκα Fleuve) αντανακλάται κυρίως το ανόργανο υλικό (ίζημα). Στον Πίνακα 5-15 γίνονται κάποιοι υπολογισμοί της ικανότητας κατακράτησης των μεγάλων φραγμάτων σε μια προσπάθεια ακριβέστερης εκτίμησης του φορτίου που καταλήγει στη θάλασσα. Στον Πίνακα 5-16 συνοψίζονται οι υπολογισμοί του μέσου ετήσιου φορτίου με την εφαρμογή των μοντέλων και συγκρίνονται με τις εκτιμήσεις των Πούλος κ.ά (2000) καθώς και με τις προβλέψεις της RUSLE15. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι οι τιμές της RUSLE15 είναι για gross erosion[16] και άρα είναι οι θεωρητικά μέγιστες (δηλαδή με συντελεστή στερεοπαροχής μονάδα). Οι τιμές της net erosion θα πρέπει να θεωρούνται μικρότερες κατά τον συντελεστή στερεοπαροχής της κάθε λεκάνης. Στη συνέχεια, όταν γίνεται αναφορά στο μοντέλο, εννοούνται οι Εξισώσεις 5-6 και 5-7 που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, ενώ όταν γίνεται αναφορά στα ευρήματα της τηλεπισκόπησης εννοούνται αυτά από το προϊόν MOD09Q1.

Πίνακας 5-16 Σύγκριση εφαρμογής διαφορετικών μοντέλων με ευρήματα τηλεπισκόπησης

Κατάταξη RS[c]	ΠΟΤΑΜΟΣ	Φορτίο Υ μοντέλου (ΕΞ.5-6/5-7) εκ.τόνοι	Φορτίο Υ BQART LQART εκ.τόνοι	Φορτίο Υ RUSLE15[a] ESDC εκ.τόνοι	Φορτίο (Υ) ΠΟΥΛΟΣ εκ.τόνοι	Επιφάνεια km^2	Vol απορροής hm^3
1	ΚΑΛΑΜΑΣ	**1.10** - 1.37	**1.42** – *	**1.56**	**0.93**	1,899	2,048
2	ΑΞΙΟΣ[b]	**1.04** - 4.41	1.14–1.43	**2.59**	**2.01**	23,747	5,000
3	ΣΠΕΡΧΕΙΟΣ	**0.57** - 0.90	**1.24** – *	0.59	0.40	1,661	693
3	ΠΗΝΕΙΟΣ	**1.13** - 2.42	**3.70**–4.36	**2.46**	**1.10**	8,184	2,558
3	ΑΛΦΕΙΟΣ	**1.36** - 1.86	**1.27**-1.58	**1.49**	**0.68**	2,907	1,714
4	ΣΤΡΥΜΩΝ[b]	0.52 -1.05	0.23-0.47	0.75	**0.49**	4,141	877
4	ΜΟΡΝΟΣ	0.31 - 0.41	0.69 – *	0.23	0.17	399	404
4	ΕΥΗΝΟΣ	0.27 -0.47	**1.27** – *	0.65	0.43	828	917
5	ΑΧΕΡΟΝΤΑΣ	0.50 -0.59	0.24-0.48	**0.83**	-	718	315
5	ΑΧΕΛΩΟΣ	0.06 -0.11	0.05 – *	0.17	0.10	420	4,383
6	ΣΕΛΙΝΟΥΣ	0.30 - 0.38	0.36 – *	0.31	-	450	155
6	ΠΑΜΙΣΟΣ	0.20 -0.33	0.55 – *	0.32	-	794	341
6	ΠΕΙΡΟΣ	0.11 - 0.23	0.41 – *	0.33	-	576	122
6	ΚΡΑΘΙΣ	0.14 - 0.17	0.22 – *	0.10	-	155	91
6	ΚΡΙΟΣ	0.08 -0.11	0.17 – *	0.09	-	130	64
6	ΕΥΡΩΤΑΣ	0.49 -0.77	0.98 – *	0.67	-	1,736	444
7	ΒΟΥΡΑΙΚΟΣ	0.19 -0.25	0.35 – *	0.15	-	273	95

* ίδια τιμή από τα δύο μοντέλα (BQART-LQART). [a]grosserosion [b]μόνο το Ελληνικό τμήμα της λεκάνης απορροης. [c]RS = RemoteSensing (η κατάταξη των ποταμών σε ότι αφορά το αιωρουμενο ίζημα στις εκβολές τους όπως προέκυψε από την εφαρμογή των μεθόδων τηλεπισκόπησης). Με έντονα γράμματα σημειώνονται οι 5 μεγαλύτεροι κάθε κατάταξης.

[16]Gross erosion: επι τόπου απώλεια εδάφους, net erosion: κλάσμα της επι τόπου απώλειας που φτάνει στο σημείο μέτρησης.

Η συμφωνία των μοντέλων – εκτιμήσεων και των μετρήσεων (κατάταξη RS) είναι εντυπωσιακή. Οι πρώτοι 5 ποταμοί της κατάταξης RS (σημειωμένοι με έντονα γράμματα στον πίνακα) είναι οι ίδιοι στο μοντέλο, ενώ είναι οι 4 από τους 5 πέντε στα BQART και RUSLE15 καθώς και στις τιμές του Σ. Πούλου.

Σε σχέση με τις διαφορές που παρατηρούνται μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Οι ποταμοί Στρυμώνας, Ευρώτας και Αχέροντας έχουν μέσες μορφολογικές κλίσεις λεκάνης απορροής μικρότερες από 20%, που είναι η μικρότερη κλίση στις λεκάνες που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή του μοντέλου (το ίδιο ισχύει για τους ποταμούς Πηνειό, Αξιό και Αχελώο). Επομένως, είναι πιθανόν η σχέση αυτή να μην βρίσκει ικανοποιητική εφαρμογή στις λεκάνες αυτές. Επίσης, οι ποταμοί Στρυμώνας και Αχέροντας χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη δεξαμενών ιζήματος όπως λίμνες – αποξηραμένα έλη και παράκτιοι υγρότοποι. Ειδικές συνθήκες φαίνεται ότι επικρατούν και στον π. Ευρώτα (καρστ). Η επιφάνεια της λεκάνης που παράγει στερεοαπορροή πολλαπλασιάζεται με την ειδική στερεοαπορροή (SSY) για να δώσει την συνολική μέση ετήσια στερεοαπορροή (Y - Φορτίο), επομένως το αποτέλεσμα είναι αρκετά ευαίσθητο στην εκτίμηση της επιφάνειας αυτής, που δεν είναι αναγκαστικά η συνολική τους επιφάνεια, ιδίως στις μεγάλες λεκάνες.

Η μέση επιφάνεια της μάσκας NSMI (προϊόν MOD02), που περιλαμβάνει κόκκινο και πράσινο, αντανακλά την ποσότητα του αιωρούμενου υλικού (TSM) και είναι μεγαλύτερη για τον Αξιό και κατόπιν για τους Αλφειό, Πηνειό, Σπερχειό και Καλαμά. Οι λεκάνες απορροής των ποταμών αυτών περιλαμβάνουν περιοχές εντατικής γεωργικής εκμετάλλευσης και το αιωρούμενο υλικό σε αυτές θα πρέπει να περιλαμβάνει όχι μόνον χλωροφύλλη και άλλα οργανικά σώματα (φύλλα, κλαδιά κ.ά) αλλά και αστικά και γεωργικά λύματα χρωματισμένα από φυτοφάρμακα και παρασιτοκτόνα. Επιπλέον, στην περίπτωση του Αξιού και του Σπερχειού όπου η εκβολή γίνεται σε κλειστούς κόλπους σχετικά προφυλαγμένους από τον άνεμο, το «σήμα» θα ενισχύεται από την ανακυκλοφορία στην θαλάσσια λεκάνη και την μεγαλύτερη διάρκεια αιώρησης του ιζήματος. Το υδάτινο δυναμικό αυτών των λεκανών είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από των υπολοίπων. Αυτά αντανακλώνται στο μέσο μέγεθος της μασκας NSMI καθώς, όπως διαπιστώθηκε στο Κεφάλαιο 2, ο λόγος πράσινο/μπλέ συσχετίζεται καλά με την μέση ετήσια απορροή.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, αλλά και από την εφαρμογή των μεθόδων τηλεπισκόπησης, η ποσότητα του αιωρούμενου ιζήματος ανόργανης προέλευσης (TSS) αντανακλάται περισσότερο στο κόκκινο (μάσκα Li) και στο υπέρυθρο (μάσκα Fleuve). Επιπλέον, όσο αφορά το υπέρυθρο διαπιστώθηκε ότι δεν ‘μεταφέρεται’, οπότε είναι

μικρότερες οι πιθανότητες να δώσει «σήμα» σε γειτονικές εκβολές. Η ταξινόμηση με βάση την μάσκα Fleuve δίνει τους ποταμούς Μόρνο και Σελινούντα ισοδύναμους με τους Πηνειό και Αλφειό και πάνω από τους Αξιό και Σπερχειό σε ότι αφορά την παραγωγικότητά τους σε ανόργανο ίζημα, ένδειξη που ενισχύεται από τις σταθμισμένες για τον άνεμο τιμές.

Γενικά, για μέσης έκτασης λεκάνες, με μορφολογικές κλίσεις >~20% και μη ιδιαίτερες γεωργικές χρήσεις εκτιμάται ότι το μοντέλο δίνει καλά αποτελέσματα. Ένδειξη για αυτό είναι ότι συγκρίνεται πολύ καλά τόσο με υφιστάμενες μελέτες και μετρήσεις, όσο και με τα ευρήματα των μεθόδων τηλεπισκόπησης.

6 ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εμπειρία που αποκτήθηκε από τις στερεοϋδρομετρήσεις μπορεί να συνοψιστεί στα παρακάτω:

- Για την μέτρηση του φορτίου πυθμένα, οι παγίδες (Bunte traps) μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε μικρές παροχές (η στάθμη του νερού να μην ξεπερνά τα 40-50 εκατοστά). Αντίθετα, ο δειγματολήπτης Helley-Smith μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μεγαλύτερες παροχές, εφόσον όμως υπάρχει μια χαμηλή γέφυρα από όπου να είναι δυνατή η χρήση του οργάνου. Το άνω όριο της παροχής για την δυνατότητα μέτρησης του φορτίου πυθμένα με τον δειγματολήπτη Helley-Smith είναι, κατά προσέγγιση, το 80-90% της παροχής πλήρους κοίτης.
- Η χρήση έξυπνων χαλικιών είναι πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την διερεύνηση των συνθηκών έναρξης της κίνησης. Η εφαρμογή όμως της μεθοδολογίας αυτής απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και παραμονή της ερευνητικής ομάδας στο πεδίο για σχετικά μεγάλα χρονικά διαστήματα.
- Για τη μέτρηση του αιωρούμενου φορτίου, συστήνεται η χρήση του θολερόμετρου (σωλήνα διαύγειας) καθώς πρόκειται για ένα απλό, εύκολο στη χρήση και οικονομικό όργανο, δίχως ανάγκη για συντήρηση. Εφόσον βαθμονομηθεί επί τόπου, με ταυτόχρονη λήψη δειγμάτων νερού σε όλο το εύρος των παροχών, και χρησιμοποιούμενο από έναν πεπειραμένο παρατηρητή σε ημερήσια βάση, μπορεί, σε συνδυασμό με την καμπύλη στάθμης – παροχής, να δώσει μια αξιόπιστη ποσοτική εκτίμηση του διερχόμενου αιωρούμενου φορτίου σε κάποια θέση.

Η ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση, η μελέτη των επιμήκων τομών των κεντρικών κοιτών των ποταμών και οι τιμές των μορφομετρικών δεικτών των υδρογραφικών δικτύων και των λεκανών απορροής (Βουραϊκός, Σελινούντας, Κριός, Κράθης) οδήγησαν στις παρακάτω διαπιστώσεις:

- Τα υδρογραφικά δίκτυα των τεσσάρων αυτών ποταμών διανύουν ένα νέο στάδιο εξέλιξης όπου οι διαβρωτικές διεργασίες είναι ισχυρές.
- Μεταξύ των ποταμών αυτών, ο Βουραϊκός είναι αυτός με το μικρότερο δυναμικό στερεοαπορροής, ενώ οι Κριός και Κράθης είναι αυτοί με το μεγαλύτερο. Αυτό κυρίως οφείλεται στην ύπαρξη του υψιπέδου των Καλαβρύτων που λειτουργεί σαν μια μεγάλων διαστάσεων «δεξαμενή ιζήματος», όπου αποτίθεται το μεγαλύτερο

μέρος από το αιωρούμενο φορτίο που προέρχεται από το ορεινό τμήμα της λεκάνης. Μια δεύτερη περιοχή απόθεσης ιζήματος είναι αυτή πριν από τα Νιάματα, αμέσως μετά από την έξοδο του ποταμού από τους ασβεστόλιθους. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται τόσο από την απλή σύγκριση των δελταϊκών τους ριπιδίων, όσο και από τα ευρήματα της εφαρμογής των μεθόδων τηλεπισκόπησης. Η κύρια πηγή του φορτίου των ιζημάτων είναι οι κατολισθήσεις στο κατώτερο τμήμα του ποταμού, δηλαδή στο τμήμα από την Γέφυρα Κερπινής έως τα Νιάματα.

- Σημαντικό ρόλο στη διαβρωτική ικανότητα των ποταμών έχει η επίδραση της τεκτονικής δραστηριότητας που προκαλεί την ανύψωση του αναγλύφου των λεκανών απορροής και την ισχυρή κατά βάθος διάβρωση κατά μήκος των κεντρικών κοιτών των υδρογραφικών δικτύων.

Από την ανάλυση των υδρομετρικών δεδομένων της ΔΕΗ από τον υδρομετρικό σταθμό τύπου πλωτήρα της υπηρεσίας στην θέση Ζαχλωρού (επιφάνεια της λεκάνης απορροής ανάντη του σταθμού ~184 km^2), προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Κατά την περίοδο 2004-2014 η επιφανειακή απορροή της λεκάνης μειώθηκε σημαντικά (μέση ημερήσια παροχή 1.66 m^3/s έναντι 2.67 m^3/s της πρώτης περιόδου, 1980-1990). Η μείωση αυτή είναι πιθανότατα αποτέλεσμα της μείωσης των βροχοπτώσεων και των χιονοπτώσεων (δυστυχώς δεν υπάρχουν αξιόπιστα βροχομετρικά δεδομένα για την πρώτη περίοδο) ή/και της αύξησης της θερμοκρασίας. Το αποτέλεσμα είναι η σταδιακή πρόσχωση της θέσης των υδρομετρήσεων.
- Το χιόνι συνεισφέρει κατά μέσο όρο σε ποσοστό ~10% στην ετήσια απορροή. Η συνεισφορά αυτή αφορά το εξάμηνο από τον Φεβρουάριο έως και τον Ιούλιο.
- Η βασική ροή αποτελεί το 70% της συνολικής απορροής σε ετήσια βάση ενώ το υπόλοιπο 30% ισομοιράζεται σε υποδόρια και επιφανειακή απορροή. Η πλημμυρική συμπεριφορά του ποταμού χαρακτηρίζεται από απότομες κορυφώσεις και το ίδιο απότομες εκφορτίσεις. Τα πλημμυρικά φαινόμενα συμβαίνουν κυρίως τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο.
- Η υδρολογική δίαιτα του Βουραϊκού ποταμού είναι ένα απλό καθεστώς με ένα μέγιστο, ένα ελάχιστο, μια πηγή τροφοδοσίας, ενώ διακρίνονται δύο εποχιακές

περίοδοι. Ο Βουραϊκός μπορεί να χαρακτηριστεί ως μικτό βροχο-χιονο τροφοδοτούμενο ποτάμι με σημαντικές ενδοετήσιες διακυμάνσεις.

- Η παροχή πλήρους κοίτης (bankfull), με περίοδο επαναφοράς 2 φορές στα 3 χρόνια, υπολογίστηκε σε ~8 m^3/s. Η παροχή αυτή θεωρείται σημαντική από γεωμορφολογικής πλευράς μιας και είναι αυτή που κυρίως διαμορφώνει τα χαρακτηριστικά της κοίτης του ρεύματος.
- Με βάση την κατανομή Gumbel (Extreme Value distribution I) που είναι η πιο συντηρητική σε σχέση με τις κατανομές LogNormal και LogPearson3, η πλημμυρική συμπεριφορά του ποταμού (περίοδος επαναφοράς σε έτη – παροχή σε κυβικά μέτρα ανά δευτερόλεπτο), έχει ως εξής: 2-13, 5-21, 10-26, 25-32, 50-37,100-42.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο καθώς και η εφαρμογή των μοντέλων του BAGS στον Βουραϊκό ποταμό δίνουν μια πρώτη εκτίμηση του δυναμικού στερεοπαροχής του ποταμού αυτού. Συγκεκριμένα:

- Από τη θέση Γέφυρα Πλιατσικούρα υπολογίστηκε (μέσοι όροι των δύο χρονικών περιόδων) ότι διέρχονται *ετησίως* περίπου 1500 μετρικοί τόνοι φορτίου πυθμένα.
- Από τη θέση Κάτω Ζαχλωρού υπολογίστηκε (μέσοι όροι των δύο χρονικών περιόδων) ότι διέρχονται *ετησίως* περίπου 22 χιλιάδες μετρικοί τόνοι αιωρούμενου φορτίου (μέγιστη τιμή 67 χιλιάδες τόνοι, ελάχιστη τιμή 1400 τόνοι).
- Η μεταφορά αυτή λαμβάνει χώρα κυρίως στο τετράμηνο από Δεκέμβριο έως και Μάρτιο.
- Επισημαίνεται ότι τα μοντέλα και οι εξισώσεις εκτιμούν την στερεομεταφορική ικανότητα του ποταμού σε κάποια θέση, δηλαδή την μεταφορά που θα λάμβανε χώρα εφόσον το προς μεταφορά υλικό είναι διαθέσιμο. Οι συνεχείς κατολισθήσεις που ενεργοποιούνται με τις πρώτες βροχές του φθινοπώρου παρέχουν άφθονο υλικό σε τακτική βάση. Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί ότι οι υπολογισθείσες ποσότητες φορτίου πυθμένα είναι αυτές που πράγματι μεταφέρονται. Εμφανίζονται ωστόσο έτη, που η μεταφορά είναι σχεδόν μηδενική με αποτέλεσμα τη γρήγορη πρόσχωση της θέσης. Η πρόσχωση της θέσης τεκμηριώνεται αναμφίβολα από την ανάλυση των στοιχείων των υδρομετρήσεων μεταξύ της πρώτης, 1980-90, και της δεύτερης περιόδου, 2004-14.

- Η δυσκολία εκτίμησης της στερεοαπορροής στην περίπτωση του Βουραϊκού ποταμού έγκειται στην ποσοτική εκτίμηση του ρόλου που παίζει το υψίπεδο των Καλαβρύτων στην «παγίδευση» του αιωρούμενου φορτίου. Είναι πιθανόν το μεγαλύτερο τμήμα του αιωρούμενου ιζήματος που προέρχεται από το τμήμα της λεκάνης ανάντη της γέφυρας της Κερπινής (θεωρούμε ότι αυτό το σημείο σημειώνει την μετάβαση από το ανώτερο ήπιας κλίσης στο κατώτερο απότομο τμήμα) αποτίθεται κατά μήκος της κοίτης κατά την διαδρομή του ποταμού από την κοιλάδα. Αυτό ενισχύεται από την πολύ μικρή κλίση της κοίτης του ποταμού σε αυτό του το τμήμα και επιβεβαιώνεται από την παρουσία αμμωδών ιζημάτων στην κοίτη του. Έτσι, θα πρέπει να υποτεθεί ότι το μεγαλύτερο τμήμα του αιωρούμενου φορτίου που διέρχεται από την Ζαχλωρού, προέρχεται κυρίως από την λεκάνη κατάντη της Κερπινής, χωρίς όμως το κλάσμα αυτό να μπορεί να εκτιμηθεί ακριβέστερα. Όπως αναφέρθηκε, οι Σαμπώ και Μαρουκιάν (1989) συμπεραίνουν ότι το ίζημα που προκύπτει από τη διάβρωση του ορεινού τμήματος της λεκάνης αποτίθεται στο ανώτερο τμήμα αυτής (δηλαδή στο υψίπεδο των Καλαβρύτων), ενώ στο κατώτερο τμήμα κυρίαρχη διεργασία είναι η ισχυρή διάβρωση, κυρίως λόγω των υψηλών μορφολογικών κλίσεων που επικρατούν σε αυτό. Στο τμήμα της διαδρομής του ποταμού από τα Νιάματα έως και το δελταϊκό ριπίδιο στο Διακοφτό, λαμβάνει χώρα απόθεση ενός τμήματος αυτού του φορτίου.

Η στατιστική ανάλυση συσχέτισε το σύνολο των μορφομετρικών, φυσιογραφικών, βροχομετρικών, γεωλογικών και τεκτονικών δεδομένων των λεκανών απορροής, στοιχείων εδαφοκάλυψης και δεδομένων από το European Soil Data Center (~40 μεταβλητές) με μια βάση δεδομένων των τιμών της στερεοαπορροής 11 θέσεων σε 6 λεκάνες απορροής ποταμών της Β. και ΒΔ Ελλάδας, όπως αυτές δημοσιεύτηκαν από τους Ζαρρή κ.ά (2007). Τα συμπεράσματα είναι τα εξής:

- Η πιο ισχυρή θετική συσχέτιση της στερεοαπορροής είναι με την μορφολογική κλίση S, και με τον όρο LS (Length Slope) της RUSLE2015. Η στερεοαπορροή επίσης συσχετίζεται ισχυρά θετικά με την εμφάνιση φλύσχη στην λεκάνη καθώς και με την βροχόπτωση. Μετρίως θετική συσχέτιση υπάρχει μεταξύ της στερεοαπορροής και της κάλυψη γης – το ποσοστό αραιής/καθόλου βλάστησης στην λεκάνη (Barren). Η

στερεοαπορροή επίσης συσχετίζεται, ισχυρότερα από ότι με την κάλυψη γης, με την αλλουβιακή κατάσταση του ποταμού.

- Η ισχυρή θετική συσχέτιση με την κλίση της λεκάνης δίνει μια σχέση απλής παλινδρόμησης που προβλέπει, ήδη, αρκετά καλά την στερεοαπορροή. Το μοντέλο πρόβλεψης της στερεοαπορροής που χρησιμοποιεί την κλίση (%), την γεωλογία (ποσοστιαία εμφάνιση φλύσχη στη λεκάνη απορροής) και την βροχόπτωση (mm/έτος), που κατασκευάστηκε με την μέθοδο της τμηματικής πολλαπλής παλινδρόμησης, επιτυγχάνει ακόμα καλύτερα στατιστικά χαρακτηριστικά. Στο μοντέλο αυτό ο υποκειμενικός παράγων, ο οποίος υπεισέρχεται στην επιλογή των τιμών των παραμέτρων στα διάφορα μοντέλα, περιορίζεται μόνο στην γεωλογία της λεκάνης απορροής.
- Από τα υφιστάμενα μοντέλα και με την βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε, το BQART βρέθηκε να είναι αρκετά αξιόπιστο ενώ η χρήση των υπόλοιπων (RUSLE, EPM, SWAT κ.λπ.) είναι προβληματική. Ένας επιπλέον λόγος είναι ότι μοντέλα τύπου USLE υπολογίζουν την ολική διάβρωση, επομένως για να εκτιμηθεί η τιμή της στερεοαπορροής σε κάποια θέση του ποταμού χρειάζεται και μια εκτίμηση του συντελεστή στερεοαπορροής, διαδικασία που εισάγει επιπλέον αβεβαιότητες. Το μειονέκτημα του BQART, έγκειται στο ότι απαιτεί γνώση της απορροής του ποταμού, επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε ποταμούς που παρακολουθούνται με μετρήσεις. Όμως, υπάρχουν πλέον αρκετά αξιόπιστα υδρολογικά μοντέλα ώστε να μπορεί η υδάτινη απορροή να εκτιμηθεί με χρήση προσομοιώσεων.

Η τηλεπισκοπική – φωτοερμηνευτική έρευνα υπήρξε μία πρωτότυπη συμβολή της παρούσας διατριβής στην γενικότερη γνώση του παράκτιου χώρου της χώρας, και ειδικότερα στην αναζήτηση της γνώσης του ιζηματολογικού δυναμικού των ποταμών της. Η πειραματική μέθοδος της μέτρησης του αιωρούμενου φορτίου στις εκβολές των ποταμών με τη χρήση δορυφορικών εικόνων, δεν περιλαμβάνει καμία θεωρητική προαπαίτηση (π.χ. κανέναν συντελεστή, παράμετρο, ή χαρακτηριστικό της λεκάνης απορροής). Μπορεί να θεωρηθεί μια ασφαλής και αντικειμενική μέθοδος, αν και όχι με ποσοτικούς όρους, της εκτίμησης του σχετικού ιζηματολογικού δυναμικού διαφόρων ποταμών, όπως αυτό εκδηλώνεται με τα πλούμια αιωρούμενου ιζήματος που αναπτύσσονται στη θαλάσσια

περιοχή των εκβολών μετά τις μεγάλες πλημμύρες . Η μέθοδος αυτή ενέχει βέβαια αβεβαιότητες, κυρίως για ποταμούς που οι εκβολές τους βρίσκονται σε μικρή σχετικά απόσταση (όπως Αξιός-Αλιάκμων, Κριός-Κράθης, Σελινούντας – Βουραϊκός). Τα σημαντικότερα συμπεράσματα (από τα οποία κάποια αναφέρονται ήδη στην διεθνή βιβλιογραφία, αλλά προέκυψαν και ανεξάρτητα από την παρούσα διατριβή) είναι τα εξής:

- Ο λόγος των ακτινοβολιών στα κανάλια πράσινο/μπλέ, παρουσιάζει σημαντική θετική συσχέτιση με την υδάτινη απορροή του ποταμού. Όμως, το μέγεθος της υδάτινης απορροής δεν συσχετίζεται αναγκαστικά με το φορτίο φερτών υλών ανόργανης προέλευσης.
- Το αιωρούμενο φορτίο στο θαλάσσιο νερό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ανακλαστικότητας κυρίως στα μήκη κύματος του πράσινου, του κόκκινου και του εγγύς υπέρυθρου. Στο μήκος κύματος του πράσινου όμως, η ανακλαστικότητα αυξάνεται σε νερά με μεγάλη ποσότητα χρωστικών και χλωροφύλλης (π.χ. ευτροφικές λίμνες ή δέλτα), είναι επομένως παρακινδυνευμένο να χρησιμοποιηθεί το πράσινο για τον εντοπισμό των φερτών ορυκτής προέλευσης, δηλαδή αυτών που προέρχονται από την αποσάθρωση και διάβρωση των πετρωμάτων της χέρσου.
- Οι πιο παραγωγικοί σε αιωρούμενο ποτάμιο υλικό ανόργανης προέλευσης (ετήσιο φορτίο), είναι οι ποταμοί Καλαμάς και Αξιός, και κατόπιν οι Έβρος, Αλιάκμονας και Σπερχειός και, κατόπιν, οι Πηνειός Θεσσαλίας και ο Αλφειός. Από τους σχετικά μεγάλους ποταμούς (με λεκάνες απορροής έκτασης μεγαλύτερης των 500 τ.χλμ.) πολύ μικρό φορτίο φαίνεται να μεταφέρουν οι Νέστος, Αχέροντας και Ευρώτας.
- Σε ότι αφορά τη στερεοαπορροή, δηλαδή το συνολικό φορτίο ανά επιφάνεια, οι Κριός και Κράθης εμφανίζουν τις μεγαλύτερες τιμές, ενώ ακολουθεί ο ποταμός Καλαμάς. Οι ποταμοί της Δ. Ελλάδας βρέθηκε ότι είναι πολύ παραγωγικότεροι από αυτούς της Ν. και Ανατολικής Ελλάδας.
- Η κατάταξη των μηνών είναι σχεδόν η ίδια για κάθε δείκτη (όχι όμως για κάθε ομάδα ποταμών). Οι μήνες όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη στερεοπαροχή Ιανουάριος και Δεκέμβριος, ενώ ακολουθούν οι μήνες Φεβρουάριος και Νοέμβριος. Το τετράμηνο αυτό είναι το πιο σημαντικό στην μεταφορά αιωρούμενου υλικού στις θάλασσες. Ακολουθεί ο Μάρτιος και πιο κάτω βρίσκονται οι μήνες Μάϊος και Ιούνιος. Οι ποταμοί της Δ. Ελλάδας προηγούνται κατά περίπου έναν μήνα σε αυτή τη δραστηριότητα από αυτούς της Α. και Ν. Ελλάδας.

- Στην Ελληνική χερσόνησο υφίσταται αξιόλογη μεταφορά εξωγενούς υλικού από την Αφρική και την Μ. Ανατολή, τουλάχιστον όσον αφορά την παρουσία του στις δορυφορικές εικόνες (και ίσως όχι όσον αφορά την μάζα του υλικού), γεγονός που οφείλεται στα φαινόμενα αεροχειμάρρων μεταφοράς σκόνης που συνήθως λαμβάνουν χώρα την άνοιξη των θερμότερων ετών. Αυτή εκδηλώνεται κυρίως στα ποτάμια Πάμισο και Ευρώτα, αυτά δηλαδή που έχουν νότιο προσανατολισμό και βρίσκονται εγγύτερα στην πηγή.

Η χρήση και αξιοποίηση λογισμικών για τους σκοπούς της διατριβής οδήγησε στις εξής διαπιστώσεις - παραινέσεις:

- Συστήνεται με θέρμη η χρήση της **R** ως περιβάλλον και γλώσσα προγραμματισμού. Ακριβέστερα, η R είναι γλώσσα scripting και όχι ακριβώς γλώσσα προγραμματισμού (programming). Δεν είναι τυχαίο ότι η R μαζί με την Python, είναι οι δύο ταχύτερα αναπτυσσόμενες γλώσσες στην επιστημονική κοινότητα, όσον αφορά τη δημοφιλία τους. Τα πάνω από 6000 εξειδικευμένα πακέτα που διαθέτει αυτή τη στιγμή η R για κάθε εφαρμογή, η ύπαρξη αναλυτικής τεκμηρίωσης από ερευνητές, ινστιτούτα και πανεπιστήμια, και η διάθεση πλήθους κωδίκων (scripts), καθιστούν την R ένα χρησιμότατο εργαλείο στην επιστημονική έρευνα.
- Δεν είναι μόνον οι στατιστικές αναλύσεις και τα υψηλού επιπέδου διαγράμματα που μπορεί η γλώσσα αυτή να παράσχει, αλλά και οι δυνατότητές της ως αναλυτικού GIS, πολύ πιο αξιόπιστου και γρήγορου από τα γνωστά εμπορικά λογισμικά (Arc-GIS), με αξιόλογες επίσης χαρτογραφικές δυνατότητες, κάτι που ίσως να μην είναι τόσο γνωστό.

6.1 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΝΕΧΕΙΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η έρευνα που εκπονήθηκε με αφορμή την παρούσα διατριβή μπορεί να συνεχιστεί πάνω στους τρείς άξονες που αναφέρονται παρακάτω.

1. Υιοθέτηση και γενίκευση της χρήσης του σωλήνα διαύγειας (θολερόμετρου) με σκοπό την παρακολούθηση και ποσοτικοποίηση του διερχόμενου αιωρούμενου

υλικού για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στον Βουραϊκό ποταμό, με σκοπό τον έλεγχο των ευρημάτων της διατριβής.

2. Χρήση των «έξυπνων» χαλικιών για περισσότερο εμπεριστατωμένη μελέτη των συνθηκών έναρξης κίνησης του σχετικά μεγάλων διαστάσεων υλικού. Για να γίνει αυτό απαιτείται παρουσία της ερευνητικής ομάδας επί τόπου και συνεχώς για διαστήματα κάποιων ημερών, οπότε θα είναι δυνατή η παρακολούθηση των χαλίκων σε βάση μεμονωμένων πλημμυρικών επεισοδίων.
3. Επέκταση της μεθοδολογίας τηλεπισκόπησης με χρήση εικόνων και άλλων δορυφόρων πέραν του MODIS, καθώς και με μεγαλύτερες χρονοσειρές. Η επεξεργασία των εικόνων MODIS έχει αυτοματοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό, διευκολύνοντας την συμπερίληψη των πλήρων χρονοσειρών στην ανάλυση, ενώ για την χρήση εικόνων άλλων δορυφόρων θα χρειαστεί επαναπρογραμματισμός. Το τμήμα αυτό της έρευνας πρέπει να συμπληρωθεί τόσο με μετρήσεις πεδίου συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων στο νερό σε συγκεκριμένα σημεία, όσο και με επιτόπιες μετρήσεις οπτικών ιδιοτήτων του νερού με σπεκτροφωτόμετρα. Αυτό είναι κάτι που ήδη έχει αρχίσει να γίνεται, όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο της Εισαγωγής.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abudu, S., Cui C.L., Saydi M., King J.P, 2012. **Application of snowmelt runoff model (SRM) in mountainous watersheds: A review.** Water Science and Engineering, 2012, 5(2):123-136 doi: 10.3882/j.issn.1674-2370.2012.02.001

Adams, J., 1979. **Sediment loads of North Island rivers, New Zealand-A reconnaissance** J,. Hydrol. N. Z., 18, 36-48, 1979.

Alkaeed Othoman, Flores C., Jinno K., Tsutsumi A., 2006. **Comparison of Several Reference Evapotranspiration Methods for Itoshima Peninsula Area, Fukuoka, Japan**. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, Vol. 66, No.1.

Amaxidis, G., & Skoulikidis, N., 2008. **An estimation of sediment discharge in a river's delta system** . *8th symposium on Oceanography and Fisheries* .

Amore E., Modica, C., Nearing, M. A., Santoro, V. C., 2003. **Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins**. *J. Hydrol. 293*, 100–114.

Anderson, R., & Anderson, S. 2010. **Geomorphology, the mechanics and chemistry of Landscapes**. Cambridge University Press.

Anderson Paul &. Davie Robert D., 2004. **Use of Transparency Tubes for Rapid Assessment of Total Suspended Solids and Turbidity in Streams**, Lake and Reservoir Management, 20:2, 110-120, DOI: 10.1080/07438140409354355

Armijo, R., Meyer, B., King, G., Rigo, A. & Papanastassiou, D. 1996. **Quaternary evolution of the Corinth Rift and its implications for the late Cenozoic evolution of the Aegean**. Geophys. J. Int 126, 11-53.

Bacchi O. S., Reichardt, K., Sparovek, G. , 2003. **Sediment spatial distribution evaluated by three methods and its relation to some soil properties**. *Soil Tillage Res. 69*, 117–125.

Bailey G.N., King, G., and Sturdy, D.,1993. **Active tectonics and land-use strategies: a Paleolithic example from northwest Greece**, Antiquity, 67, pp. 292-312.

Bernardo N., Watanabe F. , Rodrigues T., Alcantara E., 2016. An investigation into the effectiveness of relative and absolute atmospheric correction for retrieval the TSM concentration in inland waters Model. Earth Syst. Environ. (2016) 2:114 DOI 10.1007/s40808-016-0176-9

Bertoni D., Giovanni S., Benelli G., Pozzebon A., Raguaseo G., 2010. **Transport trajectories of "smart" pebbles on an artificial coarse-grained beach at Marina di Pisa (Italy): implications on beach morphodynamics**. 18th International Sedimentological Congress - Mendoza, Argentina, 2010

Beven, K. ,1997. **TOPMODEL, a critique**. *Hydrological Processes*, Vol.11 1069-1085

Borselli L., Cassi P., Torri D., 2008. **Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment**, Catena 75 (2008) 268–277, doi:10.1016/j.catena.2008.07.006

Bunte, Kristin, Swingle, Kurt W. and Abt, Steven R. , 2007. **Guidelines for using bedload traps in coarse-bedded mountain streams: Construction, installation, operation, and sample processing.** Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-191. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Bunte Kristin and Abt Steven R., 2009. **Transport relationships between bedload traps and a 3-inch Helley-Smith sampler in coarse gravel-bed streams and development of adjustment functions.** Report submitted to the Federal

Interagency Sedimentation Project 3909 Halls Ferry Rd. Vicksburg, MS 39180
Burns, R.G.,1979. **An improved sediment delivery model for Piedmont forests**. Georgia Inst. Technol., Atlanta, Ga.

Coenders Miriam, Luxemburg Wim, **Hydrological Measurements, Course notes** CIE 4440, TU Delft
Centeri C., Barta C., Jakab G.,Szalai Z., Bíró Z. 2009. **Comparison of EUROSEM, WEPP, and MEDRUSH model calculations with measured runoff and soil-loss data from rainfall simulations in Hungary**. *J. Plant Nutr. Soil Sci*, 789–797.

Dahlgren R.,Van Nieuwenhuyse E. Litton G. 2004 **Transparency tube provides reliable water-quality measurements**. http://CaliforniaAgriculture.ucop.edu
De Rosa P., Cencetti C., and Fredduzzi A., 2016. **A GRASS tool for the Sediment Delivery Ratio mapping**. PeerJ Preprints doi.org/10.7287/peerj.preprints.2227v1
De Roo APJ, Wesseling CG, Ritsema CJ. 1996. **LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. 1. Theory, input and output.** *Hydrological Processes 10*, 1107-1117.
De Vente J. 2009. **Soil Erosion and Sediment Yield in Mediterranean Geoecosystems**. PhD dissertation, Departement Aard- en Omgevingswetenschappen, Faculteit Wetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven.
Desmet, P. , 1996. **A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units**. *J. Soil and Water Cons.* , 51: 427-433.
Di Leo, M., & Di Stefano, M. , 2013. **An open source approach for Catchment's Physiographic Characterization**. AGU Fall Meeting 2013. San Fransisco, CA Diodato N., 2006. **Modelling net erosion responses to enviroclimatic changes recorded upon multisecular timescales**. Geomorphology. Elsevier Publ. doi:10.1016/j.geomorph.2006.02.007
Doutsos, T., and Piper, D.J.W., 1990. **Listric faulting, sedimentation, and morphological evolution of the Quaternary eastern Corinth rift, Greece: first stages of continental rifting**. Geol. Soc. Am. Bull. 102. 812-829.
Doutsos, T. and Poulimenos, G., 1992. **Geometry and Kinematics of active faults and their seismotectonic significance in the Western Corinth-Patras rift (Greece)**. Jour. of Str. Geol. Vol. 14. No 6, 689-699.

Einstein, H.A.. 1937, Die Eichung des im Rhein venvenderen Geschiebefangers [**Calibrating the bedload trap as used in the Rhine**]: Schweixer, Bauxeitung, v. 110, no. 12, p. 29-32.

Fan C., and Warner R., 2014. **Characterization of Water Reflectance Spectra Variability: Implications for Hyperspectral Remote sensing in Estuarine Waters**. Marine Science 2014, 4(1):1-9. Doi: 10.5923/j.ms.20140401.01
Fernandez-Blanco D., de Gelder G., Lacassin R., Armijo R., 2019. **A new crustal fault formed the modern Corinth Rift**. Earth-Science Reviews 199 (2019) 102919
Flocas H., Simmods I., Kouroutzoglou J., Keay K., 2010. **On Cyclonic tracks in Eastern Mediterranean**. DOI 10.1175/2010JCLI3426.1
Fourniotis N. and Horsch G., 2015, **Baroclinic circulation in the Gulf of Patras (Greece)**, Ocean Engineering 104, August 2015. DOI: 1016/j.oceaneng.2015.04.080

Foster *G. R., L. J. Lane, J. D. Nowlin, J. M. Laflen, R. A. Young*. 1980. **A model to estimate sediment yield from field-sized areas: Development of model.** *In: W. G. Knisel (ed.) CREAMS: A field scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Managem.* U. S. Dept. of Agric., Sci. and Educ. Admin., Conser. Rep. No. 26.pp. 36-64.

Frickel, D.G., Shown, L.M., and Patton, P.C., 1975. **An evaluation of hillslope and channel erosion related to oil-shale development in the Piceance basin, N.W Colorado.** Colo.Pep.Nat.Resour.,Colo. Water Resourm Circ.30

Fryirs, K., & Brierley, G. , 2013. **Geomorphic analysis of River systems**. Willey - Blackwell.

Geeson N, Brandt C.,Thornes J., 2002. **Mediterranean desertification: a mosaic of processes and responses**. John Wiley & Sons Ltd.

Griffiths, G. A., 1982. **Spatial and temporal variability in suspended sediment yield of North Island basins, New Zealand**, Water Resour. Bull., 18,575-584, 1982.

Haddadchi, A and Hicks, M., 2016. **Models for estimating sediment yields in the Waikato-Auckland-Northland region. A comparison**. Prepared for Auckland Council by the National Institute of Water and Atmospheric Research, NIWA. Auckland Council technical report, TR2016/036

Halstead, M. , 1951. **Theoretical Derivation of an Equation for Potential Evapotranspiration**. New Jersey: The Johns Hopkins University, Laboratory of Climatology.

Hamamori. A.. 1962**, A theoretical investigation on the fluctuations of bedload transport**: Delft Hydraulics Laboratory Report R4.21 p

Hamlin, R.B.H., 2000**. Environmental change and catastrophic flooding in the Voidomatis and Aoos basins, Northwest Greece**. PhD dissertation, School of Geography, University of Leeds.

Hamon, W. (1961). **Estimating potential evapotranspiration** . *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulic Division*.

Hanuphab et al. T., Suwanprasit C., Srichai N., 2012. **Effects of DEM resolution and source on hydrological modeling**. *33th Asian Conference on Remote Sensing.* Pattaya, Thailand.

Hassan M. and Engerzinger P., 2003. **Use of Tracers in Fluvial Geomorphology in: Tools in Fluvial Geomorphology.** Editors Kondolf G.M and Piegay Herve. John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-471-49142-X

Hicks, M., Hill J., Shankar U., 1996. **Variation of suspended sediment yield around New Zealand: the relative importance of rainfall and geology**. Proceedings of the Exeter Symposium "Erosion and Sediment yield: Global and Regional perspectives", IAHS Publ. no.236.1996

Hornberger. *, G.M., Raffensperger, J.P., Wiberg, P.L., D'Odorico, P***.,** 2014. **Elements of Physical Hydrology**. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Hossain, A., Chao, X., Jia, Y., **Development of Remote Sensing based index for Estimating/Mapping Suspended Sediment Concentration in River and Lake Environments.**

Horton, R., 1945. **Erosional development of streams and their drainage basins : a hydrophysical approach to quantitative morphology**. Geological Society of America Bulletin, 56(3),pp. 275-370.

Houssos E. and Bartzokas A., 2006**. Extreme precipitation events in NW Greece**. Advances in Geosciences, 7 , 91-96, 2006 EGU

Howard, A., 1990. **Role of Hypsometry and Planfrom in basin hydrologic response.** *Hydrological Processes*, Vol 4, 373-385.

Hubbell, D.W., 1964, **Apparatus and techniques for measuring bedload.** U.S.Geological Survey Water-Supply Paper 1748.74 p.

Huffman, G. J., D. T. Bolvin, and R. F. Adler. 2016. **GPCP Version 1.2 One-Degree Daily Precipitation Data Set**. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. https://doi.org/10.5065/D6D50K46. Accessed 23 03 2020.

Jakeman A.J., Littlewood I.G., Whitehead P.G., 1990. **Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments**, Journal of Hydrology, 117, pp 275-300.

Julien P., 2010. **Erosion and Sedimentation**, *2nd edition.* Cambridge University Press.

Kaplan Jed O., Krumhardt Kristen M., Zimmermann Niklaus , 2009. **The prehistoric and preindustrial deforestation of Europe**. Quaternary Science Reviews 28 3016–3034

Karalis S., E. Karymbalis, K. Valkanou, C. Chalkias,P. Katsafados, K. Kalogeropoulos, V. Batzakis, A. Bofilios., 2014. **Assessment of the relationships among morphometric parameters and hydrologic indices**. *International Journal of Geosciences*, 1571-1583.

Karalis S., Karymbalis E., Mamassis N., 2018. **Models for sediment yield in mountainous Greek catchments**. Geomorphology 322 (2018) 76–88

Karydas. G., Panagos, P., Gitas,Z., 2002. **A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics**. *Int. J. Dig. Earth, 16*, 663–680.

Kirkby, M.J., Jones, R.J.A., Irvine, B., Gobin, A, Govers, G., Cerdan, O., Van Rompaey, A.J.J., Le Bissonnais, Y., Daroussin, J., King, D., Montanarella, L., Grimm, M., Vieillefont, V.,Puigdefabregas, J., Boer, M., Kosmas, C., Yassoglou, N., Tsara, M., Mantel, S., Van Lynden,G.J. and Huting, J. ,2004. **Pan-European Soil Erosion Risk Assessment: The PESERA Map**,Version 1 October 2003.European Soil Bureau Research Report

Koyli M., Soypios P., Valianatos F., 2007. **Soil erosion using the Revised Universal Soil Loss Equations in a GIS framework** , Chania, Northwestern Crete, Greece. Environmental Geology DOI 10.1007/s00254-008-1318-9

Koutalakis. , Zaimes N., Iakovoglou V., Ioannou K., 2015. **Reviewing soil erosion in Greece.** *International journal of Environment, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, Vol9, No 8 .

Kokpinar M. Ali, Altan-Sakarya A. Burcu, Kumcu S. Yurdagul and Gogus Mustafa (2015). **Assessment of sediment yield estimations for large watershed areas: a case study for the Seyhan, Demirköprü and Hirfanlı reservoirs in Turkey**, Hydrological Sciences Journal, 60:12, 2189-2203, DOI: 10.1080/02626667.2014.959954

Koukis G, Sabatakakis N, Nikolaou N, Loupasakis C (2005). **Landslide hazard zonation in Greece**. In: Sassa K, Fukuoka H, Wang F, Wang G (eds) Landslides risk analysis and sustainable disaster management, part IV. Springer, Berlin. pp 291–296. doi: 10.1007/3- 540-28680-2_37

Koutsoyiannis, D., 2000. **Broken line smoothing: a simple method for interpolating and smoothing data series**, Environmental Modelling & Software, 15, 139-149.

Kosmas C., Dalanatos N.G., Lopez-Bermudez F., Romero-Diaz M.A., 2002. **The Effect of Land Use on Soil Erosion and Land Degradation under Mediterranean**

Conditions in Mediterranean desertification: a mosaic of processes and responses (Geeson N.A., Brandt C.J., Thornes J.B., Eds.)

Lahet, F., Stramski, D., 2010. **MODIS imagery of turbid plumes in San Diego coastal waters during rainstorm events**. Remote Sensing of Environment 114(2010) 332-344. doi: 10.1016/2009.09.017

Legates, R.D.and McCabe, G.J., 1999. **Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation**. Water Resources Research, VOL.35, NO.1, pp 233-241.

Leopold, L., 2005. **A view of the River**. Harvard University Press.

Leopold L., Wolman M.G., Miller J., 1964. **Fluvial Processes in Geomorphology**, Dover Publications, New York.

Li, R-R., Kaufman, Y., Gao, B., Davis, C., 2003. **Remote Sensing of Suspended Sediments in Shallow Coastal Waters**. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, Vol.41, No. 3, March 2003.pp559

Lu Jianbiao, Sun Ge, McNulty Steven, Amatya Devendra, 2005. **A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the Southeastern United States**. *Journal of the American Water Resources Association*, 621-633.

Mandelbrot, B. 1967. **How Long Is the Coast of Britain?** Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. *Science*.

Martinec, J., 1975. **Snowmelt runoff model for stream flow forecasts**. Nordic Hydrology, 6(3), 145-154. [doi:10.2166/nh.1975.010]

Martinec, J., Rango, A., and Roberts, R. T., 2008. **Snowmelt Runoff Model (SRM) User's Manual**, 19-39. New Mexico: New Mexico State University Press.

Madrinan-Moreno, M., Al-Hamdan, M., Rickman, D., Muller-Karger, F., 2010. **Using the Surface Reflectance MODIS Terra Product to Estimate Turbidity in Tampa Bay, Florida**. Remote Sensing, 2010, 2 , 2713-2728; doi:10.3390/rs2122713

Maheras P., Tolika K., Anagnostopoulou C., Vafiadis M., Patrikas I., Flocas H., 2004. **On the relationships between circulation types and changes in rainfall variability on Greece**. International Journal of Climatology 24:1695-1712

McCabe, G., & Markstrom, S., 2007. **A Monthly Water-Balance Model Driven By a Graphical User Interface.** Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.

Merrit W., Letcher R., Jakeman A., 2003. **A review of erosion and sediment transport models**. *Environmental Modelling & Software 18*, 761–799.

Mosley, M.P., Schumm, S.A., 2001. **Gravel-bed rivers – the view from the hills**. In Mosley, M.P. (Ed) Gravel bed Rivers V. New Zealand Hydrological Society: Wellington, New Zealand, 479-505

Morgan, R., & Nearing, M., 2011. **Handbook of Erosion Modelling.** Blackwell Publishing Ltd. ISBN: 978-1-405-19010-7.

Meyer-Peter & Muller, 1948. **Formulas for sediment transport**, TU Delft repository, IAHSR 2nd meeting, Stockholm, appendix 2 http://resolver.tudelft.nl/uuid:4fda9b61-be28-4703-ab06-43cdc2a21bd7

Mihalopoulos N., Kleanthous, S Kouvarakis G. , Gkikas3 A., Vasilliadou2 E., Ganor, E., I. Osetinsky, A. Stupp, and P. Alpert , 2010**. Increasing trend of African dust, over 49 years, in the eastern Mediterranean**, J. Geophys. Res., 115, D07201, doi:10.1029/2009JD012500.

Miller, R., McKee, B., 2004. **Using MODIS Terra 250m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters**. Remote Sensing of Environment 93(2004) 259-266. doi: 10.1016/2004.07.012

Milliman, J., & Syvitski, J., 1992. **Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers**. *The Journal of Geology*, pp 525-544.

Mimikou, M. (1990). **Regional analysis of hydrological variables in Greece**. IAHS, 195-201.

Moreira E., Elliot W. , Hudak A., 2005. **Effects of dtm resolution on slope steepness and soil loss prediction on hillslope profiles**. *XXXII Congresso Brasileira de Sciencia do solo.*

Morgan R. P., Quinton, R., Smith, G., Govers, J.W., Poesen, K., Auerswald, G., Chisci, D. Torri M., Styczen, E., 1998. **The european soil erosion model (eurosem): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments**. *Earth Surf. Process. Landforms 23*, 527–544.

Morgan, R., & Nearing, M., 2011. **Handbook of Erosion Modelling**. Blackwell Publishing Ltd. ISBN: 978-1-405-19010-7.

Montalvo L., 2012. **Spectral analysis of suspended material in coastal waters: A comparison between band math equations.**

Montgomery David R., Buffington John M., 1997. **Channel-reach morphology in mountain drainage basins**. GSA Bulletin (1997) 109 (5): 596–611.

Morel Anclré and Prieur Louis, 1977**. Analysis of variations in ocean color**. Laboratoire de Physique et Chimic Marinew, Station Marine de Villefranche-sur-Mer, 06230 Villefranche-sur-Mer, France.

Morris, Gregory L. and Fan, Jiahua. 1998. **Reservoir Sedimentation Handbook**, McGraw-Hill Book Co., New York.

Musgrave, G., 1947. **The quantitative evaluation of factors in water erosion, a first approximation.** *J. Soil Wat. Conserv*. 2(3), 133-138

Musy Andre and Higy Christophe, 2011. **Hydrology, a science of Nature.** English edition Taylor & Francis.

Panagos, P., Borreli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L.,Alewell, .C., 2015. **The new assessment of soil loss by water erosion in Europe**. *Environmental Science & Policy*. 54: 438-447. DOI:10.1016/j.envsci.2015.08.012

Pardé, M., 1933. **Fleuves et rivières**. Paris.

Parker Gary & Klingeman Peter, 1982. **On why gravel streams are paved**. Water resources research, **VOL. 18, NO. 5, PAGES 1409-1423, OCTOBER 1982**

Pelletier, J.D., 2012. **A spatially distributed model for the long-term suspended sediment discharge and delivery ratio of drainage basins**. J. Geophys. Res., 117(F2): F02028.

Pendergrass, Angeline & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 02 Jul 2016. "**The Climate Data Guide: GPCP (Daily): Global Precipitation Climatology Project**." Retrieved from https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcp-daily-global-precipitation-climatology-proj

Petus, C., Chust, G., Gohin, F., Doxaran, D., Froidefond, J-M, Sagarminaga, Y., 2010. **Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery**. Continental Shelf Research, March 2010, Vol.30, Issue 5, p 379-392. Dx.doi.org/ 10.1016/j.csr.2009.12.007

Pey, J., Querol, X., Alastuey, A., Forastiere, F., Stafoggia, M., 2013. **African dust outbreaks over the Mediterranean Basin during 2001-2011: PM_{10} concentrations, phenomenology and trends, and its relation with synoptic and**

mesoscale meteorology. Atmospheric Chemistry and Physics, 13,1395-1410,2013. Doi: 10.5194/acp-13-1395-2013

Piest, R.F., Kramer, L.A. and Heinemann, H.G.,1975 **Sediment movement from loess-ial watersheds**. In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources. U.S.Dept.Agric., Publ ARS-S-40,pp.130-141.

Pitlick, John, Cui, Yantao, Wilcock, Peter., 2009. **Manual for computing bed load transport using BAGS (Bedload Assessment for Gravel-bed Streams) Software.** Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-223. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 45 p.

Piper, D.J.W. Panagos, A.G., Kontopoulos, N.& Spiliotopoulos, M., 1982. **Coastal processes and morphology, Gulf of Patras, Greece.** Z. Geomorph. N.F., 26(3), 365-374.

Poulos, S., & Chronis, E., 1997. **The importance of River systems in the evolution of the Greek coastline**. *Bulletin of Institute of Oceanography., NS18 (247 p.) (2 p.3/4)*, pp. 75-96.

Poulos, S.E, Collins, M and Evans, G, 1996. **Water-sediment fluxes from Greek rivers, southeastern Alpine Europe: annual yields, seasonal variability, delta formation and human impact**. Zeitschrift fur geomorphologie, N.F.,40/2,243-261.

Renard K.G., Foster, G.R., Weesies G.A., 1997. **Predicting Soil Erosion by Water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation** *(RUSLE)*. USDA Agricultural Handbook No. 703.

Rodriguez-Guzman, V. and Gilbes-Santaella, F., 2009. **Using MODIS 250m Imagery to Estimate Total Suspended Sediment in a Tropical Open Bay**. International Journal of Systems applications, Engineering & Development, Issue 1, Vol.3. p36-44

Ryan, S., & Emmett, W., 2002. **The Nature of Flow and Sediment Movement in Little Granite Creek Near Bondurant, Wyoming**. United States Department of Agriculture Forest Service Rocky Mountain Research Station General Technical Report RMRS-GTR-90.

Sabot, V. and Maroukian, H.,1981. **Geomorphology and Tectonics in and around the gulf of Corinth, Greece**. *International Symposium on the Hellenic Arc and Trench.* Athens.

Sabot, V. and Maroukian, H., 1989. **River discharge and stream channel changes along a torrent in Northenrn Peloponnesus, Greece**. Second internatioal conference on Geomorphology. Frankfurt / Main, September1989.

Salomonson V.V., Barnes W., Masuoka E.J., 2006. **Introduction to MODIS and an Overview of Associated Activities**. In: Qu J.J., Gao W., Kafatos M., Murphy R.E., Salomonson V.V. (eds) Earth Science Satellite Remote Sensing. Springer, Berlin, Heidelberg

Schroeder T. Cohen, W., Song, C., Canty, M, Yang, Z., 2006. **Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in Wetern Oregon** . Remote Sensing of the Environment.

Schumm, S.A. , 1956. **Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey.** *Geological Society of America Bulletin*, **67**, 597-646.

Seger, M. J. and Alexander, J., 1993. **Distribution of Plio-Pleistocene and Modern coarse-grained deltas south of the Gulf of Corinth, Greece. Controls and Signatures in Sedimentary Successions** (Editors L Frostick and R Steel) Tectonic Spec. Pub. Int. Assoc.of Sedimentologists, 20, 37-48.

Selby, M., 1991. **Hillslope materials and processes**, *2nd edition.* Oxford: Oxford University Press.

Shaw Elizabeth, 1994. **Hydrology in Practice.** Taylor & Francis e-Library, 2005.

Shields, I., 1936. **Anwendung der Xhnlichkeitmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung**. Berlin: Mitt. Preuss. Ver. -Ans t.

Simeoni U., Pano N., Ciavola P., 1997. **The coastline of Albania: morphology, evolution and coastal management issues**. Bulletin de l'Institut oceanographique, Monaco, n° special 18 (1997)

Sorel, D. 2000. **A Pleistocene and still-active detachment fault and the origin of the Corinth-Patras rift, Greece**. Geology 28(1), 83-86.

Sposito, G., 1998. **Scale Dependence and Scale Invariance in Hydrology**.

Steinbeck, J., 1939. **Τα σταφύλια της οργής**. Εκδόσεις Παπαδόπουλος, Μτφρ. Μ. Μακρόπουλος.

Stewardson, M. and Marsh, N. 2004. **River Analysis Program** (RAP) brochure. Available from : http:/www.it.net.au/tools/RAP.

Strahler, A., 1957. **Quantitative analysis of watershed Geomorphology**. *Am. Geophys. Union Trans.*, (σσ. 38 (6), 913-920).

Syvitski, J., Milliman, J., 2007. **Geology, Geography, and Humans Battle for Dominance over the delivery of Fluvial Sediment to the Coastal Ocean**. J. Geol. Vol. 115, 1–19.

Tempfi K., Kerle N., Huurneman G., Jansen L., (Eds), 2009. **Principles of Remote Sensing**. The International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC). 7500 AA Enschede, The Netherlands.

Thornthwaite, C., 1948. **An Approach Toward a Rational Classification of Climate**. *Geographical Review*, Vol. XXXVIII, pp. 55 - 94.

Trimble, S.,1975. **A volumetric estimate of man-induced soil erosion on the southern piedmont plateau**. *Present and Prospective Technology for predicting sediment Yields and Sources.* USDA Publ. ARS-S-40, pp.142-152.

Tsapanou Athina, Oikonomou Emmanouil, Drakopoulos Panagiotis, Poulos Serafeim & Sylaios Georgios, 2019. **Coupling remote sensing data with in-situ optical measurementsto estimate suspended particulate matter under the Evros river influence** (North-East Aegean sea,Greece), International Journal of Remote Sensing, DOI: 10.1080/01431161.2019.1685713

Van Andel et al., Z. E. , 1990. **Land Use and Soil Erosion in Prehistoric and Historical Greece.** *Journal of Field Archaeology*, Vol17, p.379-396.

Van Deursen, W., 1995. **A geographical information system and dynamic model development and application of a prototype spatial modeling language**. Utrecht: PhD thesis, Utrecht Knag/Faculteit Ruimtelijke Weten schappen Universiteit Utrecht, Netherlands.

Vasilakis E.,Skourtsos E., Kranis H. 2007. **Estimation of Tectonic uplift rate using quantified morphometric indices**. 8th Pan-Hellenic Geographical Conference, Greek Geographical Society. October 4-7 2007 Athens.

Verstraeten G., Poesen J., de Vente J., Koninckx X., 2003. **Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiqualitative analysis using reservoir sedimentation rates.** Geomorphology 50 (2003) 327–348.

Vita-Finzi, C., 1969. **The Mediterranean Valleys: Geological Changes in Historical Times**. Cambridge: Cambridge University Press.

Walling D.E. ,1983. **The sediment delivery problem**. Journal of Hydrology, 65 (1983) 209-237. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.

Wilcock P., Pitlick, J., Cui, Y., 2009. **Sediment Transport Primer: Estimating Bed-Material Transporting Gravel-bed Rivers**. United States Department of Agriculture-Forest Service Rocky Mountain Research Station General Technical Report RMRS-GTR-226.

Wilcock, P. R , 2001. **Toward a practical method for estimating sediment-transport rates in gravel-bed rivers**. Earth Surf. Process. Landforms 26, 1395–1408 (2001)

Wilcock P., 1996. **Estimating local bed shear stress from velocity observations.** WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 32, NO. 11, PAGES 3361-3366, NOVEMBER 1996

Willems Patrick, 2009. **A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models** Environmental Modelling & Software Volume 24, Issue 3, March 2009, Pages 311-321

Williams, J.R 1978. **A sediment yield routing model**. In: Verificarion of Mathematical and Physical Models in Hydroulic Engineering. Am. Soc. Civ. Eng., New York, N.Y

Wischmeier , W., & Smith, D., 1978. **Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation plannin***g*. USDA Agricultural Research Service.

Wischmeier W., 1959. **A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation**. Soil Science Society of America Proceedings 23: 246–9.

Wischmeier, W., & Smith, D., 1965. **Prediction rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Guide for selection of practices for soil and water conservation**. USDA Agricultural.

Wolman, M.G.,1977. **Changing needs and opportunities in the sediment field.** Water Resourc.Res., 13:50-54

Woodward, J.C., 1995. **Patterns of Erosion and Suspended Sediment Yield in Mediterranean River Basins** In: IDL Foster and BW Webb (Ed.), Sediment and Water Quality in River Catchments. John Willey & Sons Ltd.

Xu, C.-Y., & Singh, V., 2001. **Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation**. *HYDROLOGICAL PROCESSES*, 15, 305–319.

Yaalon D.H. and Ganor E.. 1979**. East Mediterranean Trajectories Dust carrying Storms from the Sahara and Sinai**. In: Morales (ed) Saharan dust, Wiley, Chichester, pp.187-193.

Yu, C.-W., Liu, F., and Hodges, B. R. 2017: **Consistent initial conditions for the Saint-Venant equations in river network modeling**, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 4959-4972, https://doi.org/10.5194/hess-21-4959-2017,

Zarris, D., Lykoudi, E. and Koutsoyiannis, D., 2002. **Sediment yield estimation from a hydrographic survey: A case study for the Kremasta reservoir basin**, Greece, Proc. of the 5th International Conference "Water Resources Management in the Era of Transition",Athens, 4-8 September, pp 338-345.

Zarris, D., and Koutsoyiannis, D., 2005. **Evaluating sediment yield estimations from large-scale hydrologic systems using the rating curve concept**, RMZ-Materials and Geoenvironment, Vol. 52, No. 1, 157-159.

Zarris D., Lykoudi E. and Panagoulia D., 2007. **Sediment yield estimates in North-western Greece and analyses with hydrologic and geomorphologic factors**.

Βουδούρης, Κ., & Λαμπράκης, Ν. , 1993. **Στατιστικά χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων της Δυτικής Ελλάδας.** *2ο Συνέδριο Υδρογεωλογίας*, (σσ. 33-41).

Γεωργόπουλος, Γ., 1939. **Γενικαί Εκθέσεις Αποκαταστάσεως ορεινής λεκάνης χειμάρρων Βουραϊκού, Σελινούντος, Κράθιδος.** Υπουργείο Γεωργίας, Διεύθυνσις Δασών, Ορεινά Υδρονομικά Έργα.

Γιάσογλου Ν., **Χάρτης εδαφικών ενώσεων της Ελλάδας** (2004), Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών - Εθνική Επιτροπή κατά της Ερημοποίησης

Ζεληλίδης Α., Αβραμίδης Π., Βουδούρης Σ Κ., Πουλημένος Γ., (2001): **Επίδραση της εξέλιξης των πλειοκαινικών και πλειστοκαινικών περιβαλλόντων ιζηματογένεσης στις υδρογεωλογικές συνθήκες της λεκάνης Σελινούντα**. Ορυκτός Πλούτος 118/2001, σελ. 21-32

Ιγνατιάδης Η. , Καραλής Σ. , Κάτσιος Ι. , 2015. **Χρήση ΣΓΠ και επεκτάσεων για την εκτίμηση της διάρβρωσης σε λεκάνες της ΒΑ Πελοποννήσου**. 23η Πανελλήνια Συνάντηση χρηστών ArcGIS, Αθήνα.

Καβαδίας Γ., Τζοβαρίδης Σ., Μαμάσης Ν., Ναλμπαντης Ι. , 1993. **Κατάρτιση των καμπυλών στάθμης – παροχής**, Τεύχος 8/4 του προγράμματος Υδροσκόπιο (Δημιουργία Εθνικής Τράπεζας Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας) ΥΠΕΧΩΔΕ - ΕΜΠ.

Καρύμπαλης, Ε., 1996**. Γεωμορφολογικές παρατηρήσεις στη λεκάνη απορροής του Εύηνου ποταμού**. *Διδακτορική Διατριβή*. Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Κουρακλή Π., 2010. **Εκτίμηση του κινδύνου πρόσχωσης των ταμιευτήρων νερού με την χρήση GIS και της τηλεπισκόπησης. Εφαρμογή τεχνητή λίμνη Πολυφύτου Κοζάνης**. Διδακτορική Διατριβή. ΑΠΘ, Σχολή Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο διευθέτησης ορεινών υδάτων.

Κουτσογιάννης Δ., Τάρλα Κ. 1987. **Εκτιμήσεις Στερεοαπορροής στην Ελλάδα**, Τεχνικά Χρονικά Α, Τόμος 7, Τεύχος 3

Κουτσογιάννης, Δ., & Ξανθόπουλος, Θ. , 1997. **Τεχνική Υδρολογία**. Αθήνα: ΕΜΠ.

Κωτούλας, Δ. , 1979. **Διευθετήσεις χειμαρρωδών ρευμάτων**. Θεσσαλονίκη.

Μαρουκιάν, Χ., 1987. **Φυσικογεωγραφικές παρατηρήσεις στην υδρογραφική λεκάνη του Σπερχειού ποταμού**. Διδακτορική Διατριβή, Τμημα Γεωλογίας Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Μηλιαρέσης Γ.,2006. **Φωτοερμηνεία – Τηλεπισκόπηση**. Εκδόσεις ΙΩΝ.

Νίκας, Κ., 2004. **Υδρογεωλογικές Συνθήκες ΒΑ τμήματος του Νομού Αχαΐας**. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.

Ξανθάκης Μ., 2011. **Μελέτη της εδαφικής διάβρωσης σε ορεινές λεκάνες απορροής με σύγχρονα τεχνολογικά εργαλεία**. PhD thesis, School of Geography, Harokopio University. 288 pp

Παπάζογλου Π. 2009. **Εκτίμηση του βαθμού διάβρωσης στη λεκάνη του Ανθεμούντα**. Αναφορά Δράσης 3 του έργου LIFE07/ENV/GR/000278

Παπαπέτρου - Ζαμάνη, Α., 1995. **Γεωμορφολογία.** Αθήνα: Συμμετρία.

Πούλος Σεραφείμ Ε, 1999. **Ο ρόλος των φραγμάτων στην υδάτινη και ιζηματολογική δίαιτα της ελληνικης παράκτιας ζώνης** 5ο Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο / Ελληνική Γεωγραφική Εταιρεία (11, 12, 13 Νοεμβρίου 1999, Αθήνα, Ελλάδα.

Τζαφτάνη, Φ., 2013. **Τα αίτια και ο μηχανισμός λειτουργίας των κατολισθητικών φαινομένων στις ορεινές λεκάνες απορροής των χειμαρρικών ρευμάτων του ελλαδικού χώρου: αρχές και συστήματα διευθέτησης**. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος. Τομέας Δασοτεχνικών και Υδρονομικών Έργων. Εργαστήριο Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων.

Φλαμπούρης, Κ., 2008. **Μελέτη της επίδρασης του παράγοντα R στον νόμο USLE.** Θεσσαλονίκη, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, Πολυτεχνική Σχολή.

Χρυσάνθου Βλάσιος, Παπαλάσκαρης Θωμάς, 2015. **Σύγκριση υπολογισμών και μετρήσεων στερεοπαροχής φορτίου κοίτης σε υδατορεύματα της ΒΑ Ελλάδας**. ΠΡΑΚΤΙΚΑ - 3ο Κοινό Συνέδριο ΕΥΕ – ΕΕΔΥΠ – ΕΥΣ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 10-12 Δεκεμβρίου 2015

Ζαρρής, Δ., Λυκουδη, Ε και Παναγούλια Δ., 2007. **Εκτιμηση της στερεοαπορροης υδρολογικων λεκανων με συνδυαστικη αναλυση υδρολογικων και γεωμορφολογικων παραμετρων**.

Ζαρρής, Δ., Λυκουδη, Ε., Κουτσογιαννης, Δ., 2001. **Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες**. Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας και Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, σσ. 95-108, Αθήνα. Ιστοσελίδα: http://www.itia.ntua.gr/e/docinfo/488/.

ΔΕΗ (εκδότης) 1960-1964: ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ – ΒΟΡΕΙΑ ΚΑΙ ΔΥΤΙΚΗ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ.

USGS report, 1988, Field methods for measurement of fluvial sediment

ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ

https://modis.gsfc.nasa.gov/

https://modis.gsfc.nasa.gov/about/media/modis_brochure.pdf

http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php.

http://www.globalforestwatch.org)

8 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΗΜΕΡΟΛΟΓΙΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

ΗΜΕΡΟΛΟΓΙΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ
2012

α/α	Ημερομηνία	Ζαχλωρού ΔΕΗ	Ζαχλωρού γεφυράκι	Πλιατσικού γέφυρα	Κερπινή παραπότ.	Αυλές	Νιάματα	Συμμετοχή
1	12,06,16	2. Επίσκεψη Γέφυρα Μενεγάτου. 3. Επίσκεψη Γέφυρα Σκεπαστού. 4. Επίσκεψη Γέφυρα Στις αυλές 1η. 5. Επίσκεψη Γέφυρα Στις αυλές 2η 5. Επίσκεψη Γέφυρα Κερπινής 6. Επίσκεψη Γέφυρα Νιάματα						Χαλκιάς Χ., Καρύμπαλης Ε., Φερεντίνου Μ., Καραλής Σ. Θ., Καλογερόπουλος Κ.
2	12.12.02	4. Επίσκεψη Γέφυρα Στις αυλές 1η. 5. Επίσκεψη Γέφυρα Στις αυλές 2η - ταχύτητες 6. Επίσκεψη Γέφυρα Πλιατσικούρα						Καραλής

ΗΜΕΡΟΛΟΓΙΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ
2013

α/α	Ημερομηνία	Ζαχλωρού ΔΕΗ	Ζαχλωρού γεφυράκι	Πλιατσικού γέφυρα	Κερπινή παραπότ.	Αυλές	Νιάματα	Συμμετοχή
1	13.01.20		ταχύτητες		ταχύτητες			Καραλής, Κουτσοσίμος, Παλαιοκρασσάς.
2	13.02.23_24		ταχύτητες		ταχύτητες	ταχύτητες		Καραλής, Καρύμπαλης, Καλογερόπουλος, Κουτσοσίμος.
3	13.03.23_24		ταχύτητες + προφίλ		ταχύτητες	ταχύτητες + προφίλ	ταχύτητες	Καραλής, Κουτσοσίμος, Παλαιοκρασσάς.
4	13.04.26_27		ταχύτητες			ταχύτητες + αποτύπωση	ταχύτητες	Καραλής, Κουτσοσίμος, Παλαιοκρασσάς, Καλογερόπουλος, Πισσίας, Ρούμελης, Ρίζος.
5	13.06.8_9	ταχύτητες + προφίλ	ταχύτητες			ταχύτητες	ταχύτητες	Καραλής, Καλογερόπουλος.
6	13.10.5_6	ταχύτητες + κροκαλομετρ			κροκαλομετρ	ταχύτητες	ταχύτητες + κροκαλομετρ	Καραλής, Καρύμπαλης, Καλογερόπουλος, Μπατζάκης, Μποφίλιος.
7	13.11.16_17	ταχύτητες + αποτύπωση				ταχύτητες	ταχύτητες	Καραλής, Καλογερόπουλος, Ιορδάνου, Κολιόλιου.
8	13.12.14_15	ταχύτητες				ταχύτητες + προφίλ	ταχύτητες	Καραλής, Καλογερόπουλος, Ιορδάνου.

ΗΜΕΡΟΛΟΓΙΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ
2014

α/α	Ημερομηνία	Ζαχλωρού ΔΕΗ	Ζαχλωρού γεφυράκι	Πλιατσικού γέφυρα	Κερπινή παραπότ.	Αυλές	Νιάματα	Συμμετοχή
9	14.01.25		ταχύτητες			Ταχύτητες + προφίλ		Καραλής, Καστανάρας
10	14.04.5_6	ταχύτητες			ταχύτητες	ταχύτητες	ταχύτητες	Καραλής, Ιορδάνου, Καρακώστας, Ψαρρά, Καραντζά, Κυριαζής.
11	14.10.4_5	Αποτύπωση LaserScanner						Καραλής, Ιορδάνου, Δικαιούλιας.
12	14.11.17_18	Αποτύπωση LaserScanner						Καραλής, Δικαιούλιας, Καρακώστας, Ιωάννα Σοφιού, Σοφία Μαβινάκη

ΗΜΕΡΟΛΟΓΙΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ
2015

α/α	Ημερομηνία	Ζαχλωρού ΔΕΗ	Ζαχλωρού γεφυράκι	Αυλές – άλλα	Πλιατσικούρας γέφυρα	Συμμετοχή
13	15.01.02	ταχύτητες				Καραλής, Κομπότης.
14	15.03.07	Ταχύτητες Θολερόμετρο DH48 δείγμα	ταχύτητες + προφιλ			Καραλής, Ιγνατιάδης.
15	15.10.07-08	qliner + παγίδα		Qliner (δοκιμ)	ταχύτητες + παγίδα + Helley-Smith	Καραλής, Καρακώστας, Ιορδάνου, Χαρατσής.
16	15.11.14-15	ταχύτητες (qliner) + παγίδες βάψιμο κροκαλ. + δειγματοληψία κοίτης			ταχύτητες + παγίδες βάψιμο κροκαλ. + δειγματοληψία κοίτης	Καραλής, Καρακώστας, Ιορδάνου, Χαρατσής
17	15.12.19-20	ταχύτητες (qliner) + παγίδα αναζήτηση βαμμ. χαλίκων	ΜΠΗΚΕ Ο ΠΗΧΥΣ Qliner (δοκιμ) + ταχύτητες Θολερόμετρο + DH48 δείγμα	Εγκατάσταση βροχογράφου στο κτίριο του Φορέα Διαχείρισης (Αντ.) -> Αρχή μετρ. Θολερόμετρο + δειγματοληψιών + ΦΩΤΟ ταινιών σταθμημέτρου κάθε τέλος μήνα	ταχύτητες	Καραλής, Καρακώστας, Ιορδάνου, Χαρατσής

ΗΜΕΡΟΛΟΓΙΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ
2016

α/α	Ημερομηνία	Ζαχλωρού ΔΕΗ	Ζαχλωρού γεφυράκι	Αυλές – άλλα	Πλιατσικούρας γέφυρα	Συμμετοχή
18	16.02.27	ταχύτητες	(2 μήνες θολερόμετρο)		ταχύτητες + παγίδες	Καραλής, Καρακώστας, Ιορδάνου
19	16.04.09-10	ταχύτητες + παγίδα	Θολερόμετρο DH48 δείγμα		ταχύτητες + παγίδα	Καραλής, Καρακώστας, Χαρατσής
20	16.09.20-21			Πεζοπορία και χιλιομέτρηση από Καλάβρυτα έως Κ. Ζαχλωρού		Καραλής, Καρύμπαλης, Βασίλης Μπατζάκης, Χρήστος Πολυκρέτης, Χριστίνα Τσόδουλου, Μαρτίνα Carraro
21	16.10.29-30			Καθέλκυση 55 smart pebbles	Αποτύπωση τμήματος 400 μ. ανάντη γ.Πλιατσικούρα (15+000 – 15+400)	Καραλής, Καρακώστας, Χαρατσής, Δικαιούλιας, Ιορδάνου

ΗΜΕΡΟΛΟΓΙΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

2017

α/α	Ημερομηνία	Ζαχλωρού ΔΕΗ	Ζαχλωρού γεφυράκι	Αποτύπωση reach	Πλιατσικούρας γέφυρα	Συμμετοχή
22	17.02.25	Σταθμη 0,80		Τοποθέτηση ποταμόσημων κατά μήκος της αποτύπωσης. Βλάβη scanner	ταχύτητες + Helley-Smith	Καραλής, Κάτσιος, Καρακώστας
23	17.04.01	Σταθμη 0,73		scanner	ταχύτητες + Helley-Smith	Καραλής, Χαρατσης, Καρακώστας
2018						
24	18.2.24	Στάθμη 1,20 **Αφαιρέθηκε ο σταθμός!!**			ταχύτητες + Helley-Smith DH48 δείγμα	Καραλής, Κάτσιος, Καρακώστας, Ναλμπαντίδου
25	18.3.31	Στάθμη 1,00	Στάθμη 0.50 DH48 δείγμα		ταχύτητες QLiner2 + Helley-Smith	Καραλής, Καπράλος Ν., Καρακώστας

9 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Year	*Title*	*Magazine – Congress (Peer-reviewed)*	*Summary*
2013 /14	**Assessment of the Relationships among Catchments' Morphometric Parameters and Hydrologic Indices** **Sotirios Karalis, Efthimios Karymbalis, Kanella Valkanou, Christos Chalkias, Petros Katsafados, Kleomenis Kalogeropoulos, Vasileios Batzakis, Antonios Bofilios**	**8th IAG, International Conference Geomorphology, Paris, August 2013 + International Journal of Geosciences 2014**	This study focused on the investigation of possible relationship between morphometric characteristics of small to medium drainage basins and hydrological indices in order to discover morphometric parameters "predictors" of flash flood potential of ungauged catchments. Twenty-two morphometric parameters of twenty-seven drainage basins (ranging in area between 3.6 km2 and 330.5 km^2) located in the northern part of the Peloponnese in southern Greece were calculated utilizing GIS software **ArcGIS10**. Hydrological modeling was performed using **TOPMODE**L, and **LISEM**, a physically based hydrologic and soil erosion GIS model. Rainfall-runoff simulations were performed for an extreme precipitation event. Funded by HUA.
2014	**Development and testing of a simple soil erosion model** **Sotirios Karalis, Ioannis Katsios , Efthimios Karymbalis**	**1st International GEOMAPPLICA Conference – Skiathos Isl. Greece September 2014**	This work aimed at the development of a dynamic wash erosion model for the upper basin of Arachthos river in Epirus, NW Greece. Wash erosion is soil erosion by water running across the land surface and the model simulated Erosion (E) based on runoff (Q), slope gradient (S), vegetation cover (V) and a "sediment availability" factor (k) of the basin (modified after Thornes, 1990). **PCRaster GIS** is used for the development of the model.
2016	**Obtaining and testing coarse grain size distributions from photographic grid counts** **Karalis S.1, Aytousmis A.1, Iordanou A.1, Karakostas G.1, Charatsis K.1 and Karymbalis E.2**	**Proceedings of the 14th Intern. Conference of the Geological Society of Greece, Thessaloniki, May 2016**	The grain size distribution (GSD) of surface bed material in alluvial rivers is of interest in many geological, ecological and engineering applications. In this work we tested the possibility of obtaining such a distribution from photographs taken at the field (grid sampling), compared with the standard method which is the "pebble count". The motive of the work was to explore the opportunity of substituting field work for laboratory work.

Year	*Title*	*Magazine – Congress (Peer-reviewed)*	*Summary*
2016	**Natural and human causes of a flash flood in a small catchment (Rhodes Island, Greece) based on atmospheric forcing and runoff modeling techniques** **Karalis Sotirios Katsafados Petros Karymbalis ιios, Tsanakas Valkanou**	**POSTER in EGU-2016 Vienna Austria**	This study investigated the natural (hydro-meteorological and geomorphological) and human induced factors responsible for a flash flood event that occurred on November 22nd, 2013 in a small ungauged catchment (covering an area of about 24km2) of Rhodes Island, Greece. The flood killed four people and caused over €10 million worth of damages located mainly around the Kremasti village. The reconstruction of this extreme hydro-meteorological event was attempted by using detailed spatiotemporal rainfall information, a physically based hydrological model (**LISEM**) and the 1D hydraulic model **HEC-RAS**. Furthermore, the human impacts, which were responsible for extreme flood discharge within the drainage basin, were recorded and mapped.
2017	**Snow-cover monitoring with MODIS product 10A2** **Karalis S. , G.Karakostas and I.Katsios**	**10th World Congress of European Water Resources Association, Athens 5-9 July 2017**	This research aimed at the monitoring of the snow cover of watersheds of NW Peloponnese with the purpose to use time series of snow cover data (in the form of Snow Depletion Curves) as input to a Snow Melt Model. The entire time series (10 water years) of the **MODIS** 8-day composite snow product **MOD10A2** was downloaded and processed. The overall purpose was to understand the hydrologic regime of Vouraikos river particularly the contribution of snowmelt. The **Snowmelt Runoff Model** (SRM), a conceptual hydrological model based on the degree-day method was used for the simulations with good results.

Year	*Title*	*Magazine – Congress (Peer-reviewed)*	*Summary*
2018	**Observations from mid-term monitoring of suspended sediment river plumes using Modis imagery**	**11th International Conference of the Hellenic Geographical Association – Lavrio June 2018**	669 Level 1B Modis images (**MOD02**) over a wide geographical area covering most of Greece, along with their corresponding Modis cloud product (**MOD35**), were downloaded and processed in order to conduct a comparative study over the activity of 17 rivers and streams of various sizes, with regards to their suspended sediment delivery. Results were compared with published studies, model applications and recent maps (**RUSLE2015**) of soil erosion from **European Soil Data Center**, highlighting the strength and weakness of each method and providing useful insight on the controls of sediment transport.
2018	**Models for Sediment Yield in Mountainous Greek Catchments**	**11th International Conference of the Hellenic Geographical Association + GEOMORPHOLOGY MAGAZINE**	In this study we explored the controls over suspended sediment yield in 11 stations situated along 6 major rivers of Western – Northern Greece (Arachthos, Achelooos, Evinos, Aoos, Kalamas and Aliakmon). We investigated the correlations among specific sediment yield values and many geomorphic - topographic, morphometric, textural, tectonic, geological-lithological and climatic (precipitation-runoff) characteristics of the corresponding basins, along with land cover variables and RUSLE factors (LS, R, K and C RUSLE), from maps of the European Soil Data Center. We found the principal controls to be slope and lithology followed by precipitation, runoff and landslide frequency. With the use of stepwise multiple regression analysis we constructed a model that employed three variables: slope , precipitation and lithology (as percentage of flysch within the catchment), The **proposed model** achieves good statistics (NSE=0.84). From the other models tested with our dataset **BQART** performs well while **RUSLE2015** of the ESDC performs poor.

Year	*Title*	*Magazine – Congress (Peer-reviewed)*	*Summary*
2019	**Assessing Bedload in Vouraikos River, NW Peloponnese, Greece**	**15th International Congress of the Geological Society of Greece** Athens, 22-24 May, 2019	In this work we briefly presented the results of a 5-year long measurements program, regarding bedload transport.
2019	**Estimating Suspended Sediment Transport through Transparency Tube in Vouraikos River, NW Peloponnese, Greece**	**15th International Congress of the Geological Society of Greece** Athens, 22-24 May, 2019	In this workt we briefly presented the results of a 5-year long measurements program, regarding suspended sediment transport.
2019	**ASSESSING RIVER'S RELATIVE SEDIMENT DICHARGE POTENTIAL USING MODIS IMAGERY,**	**Poster in 9th IAG, International Conference Geomorphology,** Athens, September 2019	In this work we have integrated product MOD09Q1 in the analysis and we presented our final results.