



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ**

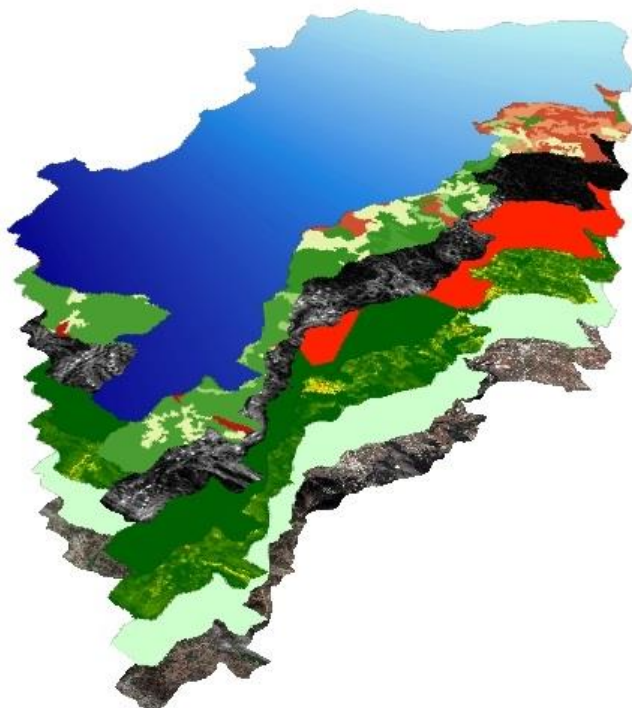
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

**Εφαρμογές GIS στην χαρτογράφηση της επιδεκτικότητας σε
διάβρωση.**

Εμπειρική Ανάλυση για την λεκάνη απορροής του Ξηριά.

Πτυχιακή εργασία

Ασλάνης Παύλος



Αθήνα, 2018



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ**

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Χαλκιάς Χρήστος

Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Καρύμπαλης Ευθύμιος

**Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο
Πανεπιστήμιο**

Κατσαφάδος Πέτρος

**Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο
Πανεπιστήμιο**

Ο Ασλάνης Παύλος

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.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στα πλαίσια της ολοκλήρωσης της πτυχιακής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον επιβλέπων καθηγητή μου, καθηγητή του Τμήματος Γεωγραφίας του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου κ. Χ. Χαλκιά αρχικά για την ανάθεση αυτού του θέματος καθώς και για την συνεχή καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας, συμβάλλοντας σημαντικά στην ολοκλήρωση της.

Επιπλέον, τον αναπληρωτή καθηγητή του Τμήματος Γεωγραφίας του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου κ. Ε. Καρύμπαλη, για τη σημαντική συμβολή και υποστήριξη σχετικά με την απόκτηση ορισμένων εκ των δεδομένων των παραγόντων υποβάθρου της περιοχής μελέτης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	xiii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	xvi

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Έδαφος.....	1
1.1 Παράγοντες σχηματισμού των εδαφών	3
1.2 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά του εδάφους	6
1.3 Κατηγορίες εδαφών ανάλογα με την μηχανική τους σύσταση (Υφή)	7
1.4 Εδαφική τομή	8
1.5 Ταξινόμηση εδαφών.....	10
2. Διάβρωση του εδάφους	19
2.1 Τύποι υδατικής διάβρωσης.....	21
2.2 Διάβρωση ανά τον κόσμο.....	24
2.3 Το πρόβλημα της διάβρωσης των εδαφών στην Ελλάδα.....	27
3. Εκτίμηση διάβρωσης του εδάφους	28
3.1 Προσεγγίσεις βασισμένες σε εμπειρικές μεθόδους	28
3.2 Προσεγγίσεις βασισμένες σε μοντελοποιημένες μεθόδους	30
3.3 Εμπειρικά Μοντέλα	30
3.3.1 Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (Universal Soil Loss Equation-USLE)	31
3.3.2 Τροποποιημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας - Modified USLE (MUSLE).....	33
3.3.3 Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας – Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).....	34
3.3.3.1 Συντελεστής διαβρωτικότητας βροχόπτωσης (R)	35
3.3.3.1.1 Αναλυτικός υπολογισμός συντελεστή R	35
3.3.3.1.2 Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού συντελεστή R	36
3.3.3.4 Συντελεστής διαβρωσιμότητας εδάφους (K)	41
3.3.3.5 Συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης (LS).....	45
3.3.3.6 Συντελεστής κάλυψης γης (C)	49
3.3.3.7 Συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης (P)	54
3.4 Προσδιοριστικά – Φυσικά Μοντέλα	54
3.4.1 WEPP (Water Erosion Prediction Project)	55
3.4.2 EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator).....	56
3.4.3 ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulator)	57

4. Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών	58
4.1 Γεωγραφικά δεδομένα	60
4.1.1 Πηγές εισαγωγής γεωγραφικών δεδομένων	61
4.2 Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών και διάβρωση του εδάφους.....	62

ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ-ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

5. Περιοχή Μελέτης	66
5.1 Γεωμορφολογία.....	66
5.2 Υδρογραφικό δίκτυο.....	67
5.3 Κλίμα.....	67
5.4 Γεωλογία.....	67
5.5 Βλάστηση και κάλυψη γης	68
6. Δεδομένα	69
7. Μεθοδολογία.....	71
7.1 Συντελεστής διαβρωτικότητας βροχόπτωσης (R)	72
7.2 Συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους (K)	75
7.3 Συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης (LS).....	80
7.3 Συντελεστής κάλυψης γης (C)	82
7.5 Συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης (P)	85
8. Αποτελέσματα.....	86
9. Έλεγχος των αποτελεσμάτων	89
10. Συμπεράσματα και προτάσεις	93

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Σχήμα 1: Συστατικά ιδανικού εδάφους προς καλλιέργεια	3
Σχήμα 2: Σύσταση οργανικής ύλης ιδανικού εδάφους προς καλλιέργεια	3
Σχήμα 3: Σχηματική απεικόνιση του ρόλου που παίζει η κλίση της τοπογραφίας στο πάχος του εδάφους	5
Σχήμα 4: Τρίγωνο μηχανικής σύστασης με το βασικό σύστημα ταξινόμησης του U.S.D.A.....	8
Σχήμα 5: Ενδεικτική σχηματική τομή από την επιφάνεια του εδάφους έως το μητρικό πέτρωμα	10
Σχήμα 6: Σχηματική αναπαράσταση της δράσης της σταγόνας στην εδαφική διάβρωση σε σχέση με τον χρόνο.....	20
Σχήμα 7: Τύποι υδατικής διάβρωσης.....	21
Σχήμα 8: Εκτίμηση μεταβολής αγροτικών εκτάσεων ευρωπαϊκών χωρών λόγω υδατικής διάβρωσης, για το διάστημα 1990-2050, ως ποσοστό επί της συνολικής χερσαίας επιφάνειας	27
Σχήμα 9: Νομογράφημα για τον υπολογισμό του συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας.....	43
Σχήμα 10: Θέση αντιπροσωπευτικών τιμών στο τρίγωνο μηχανικής σύστασης.....	45
Σχήμα 11: Σχέση μεταξύ NDVI και συντελεστή C με την χρήση εκθετικής συνάρτησης.....	53

ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Σχήμα 1: Περιοχή Μελέτης.....	66
Σχήμα 2: Διάγραμμα ροής εφαρμογή του RUSLE στα πλαίσια αυτής της εργασίας.....	72

Σχήμα 3: Μέση τιμή βροχόπτωσης ανά μήνα για τον σταθμό Βέλο	72
Σχήμα 4: Μέση τιμή βροχόπτωσης ανά μήνα για τον σταθμό Πυργέλα Άργους.....	73
Σχήμα 5: Μηχανική Σύσταση RGca όπως προκύπτει από την βάση δεδομένων LUCAS.....	77
Σχήμα 6: Μηχανική Σύσταση LPca όπως προκύπτει από την βάση δεδομένων LUCAS.....	78
Σχήμα 7: Θέση των RGca (μώβ) και LPca (πράσινο) στο τρίγωνο μηχανικής σύστασης του εδάφους	78
Σχήμα 8: Ποσοστά κάλυψης της λεκάνης ανά χρήση γης	83
Σχήμα 9: Κατανομή κλάσεων του βαθμού διάβρωσης	87
Σχήμα 10: Κατανομή κλάσεων του βαθμού διάβρωσης όπως προκύπτει στα πλαίσια των μελετών της European Commission.....	90
Σχήμα 11: Κατανομή διαφοράς κλάσεων	92

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Πίνακας 1: Αντιπροσωπευτικές τιμές K για κάθε εδαφική κατηγορία.....44

Πίνακας 2: Απαραίτητα δεδομένα μοντέλου WEPP55

ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Πίνακας 1: Κλάσεις εδαφικής δομής όπως προκύπτουν από την βάση δεδομένων ESDB77

Πίνακας 2: Αντιστοίχιση της εδαφικής διαπερατότητας με την εδαφική υφή79

Πίνακας 3: Τιμές συντελεστή K της περιοχής μελέτης79

Πίνακας 4: Κατηγορίες κάλυψης γης (CORINE-2000) της λεκάνης απορροής του Ξηριά, συνολική έκταση, ποσοστό επί της συνολικής έκτασης, και οι τιμές του συντελεστή κάλυψης του εδάφους C βάσει βιβλιογραφικών τιμών83

Πίνακας 5: Πίνακας κλάσεων του βαθμού διάβρωσης για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά (Natural Breaks).....87

Πίνακας 6 : Πίνακας κλάσεων του βαθμού διάβρωσης για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά (Natural Breaks) όπως προκύπτει από τις μελέτες της European Commission90

Πίνακας 7: Κατανομή της απόλυτης διαφοράς των κλάσεων του βαθμού διάβρωσης μεταξύ των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με αυτών των μελετών της European Commission, όπως προέκυψαν από τη λειτουργία «Combine».....92

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Χάρτης 1: Παγκόσμιος χάρτης εδαφικών απωλειών υπό την υδατική επίδραση ($tha^{-1}y^{-1}$) όπως προέκυψε με την εφαρμογή του μοντέλου USLE.....	26
Χάρτης 2: Ισοτιμικός χάρτης R ($MJ\ mm\ ha^{-1}h^{-1}$)	39

ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Χάρτης 1: Απλοποιημένος Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του Ξηριά.	68
Χάρτης 2: Θέση των μετεωρολογικών σταθμών.....	69
Χάρτης 3: Χάρτης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης της λεκάνης απορροής του Ξηριά	74
Χάρτης 4: Χάρτης του συντελεστή διαβρωτικότητας βροχόπτωσης (R-Factor) για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά	75
Χάρτης 5: Εδαφολογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του Ξηριά βάση ESDB, και τα αντιπροσωπευτικά σημεία της βάσης δεδομένων LUCAS.	76
Χάρτης 6: Χάρτης του συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας (K-Factor) της λεκάνης απορροής του Ξηριά	79
Χάρτης 7: Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (DEM) λεκάνης απορροής του Ξηριά	80
Χάρτης 8: Χάρτης του τοπογραφικού συντελεστή (LS-Factor) για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά	81
Χάρτης 9: Χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής του Ξηριά σύμφωνα με το Corine 2000.....	82
Χάρτης 10: Χάρτης του συντελεστή κάλυψης γης (C-Factor) για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά.....	84
Χάρτης 11: Χάρτης του συντελεστή ελέγχου διάβρωσης (P-Factor) για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά.....	85

Χάρτης 12: Χάρτης της μέσης ετήσιας εδαφικής απώλειας για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά	86
Χάρτης 13: Χάρτης κλάσεων του βαθμού διάβρωσης για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά	88
Χάρτης 14: Χάρτης της μέσης ετήσιας εδαφικής απώλειας για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά όπως προκύπτει από τις μελέτες της European Commission	89
Χάρτης 15: Χάρτης κλάσεων του βαθμού διάβρωσης για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά όπως προκύπτει από τις μελέτες της European Commission	91
Χάρτης 16: Χάρτης απόλυτης διαφοράς των κλάσεων του βαθμού διάβρωσης μεταξύ των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας και αυτών των μελετών της European Commission για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά.....	93

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Εικόνα 1: Εδαφική τομή εδάφους Έντισολ, παρουσιάζει ελάχιστα ή καθόλου στοιχεία εδαφογένεσης.....	11
Εικόνα 2: Εδαφική τομή Ινσέπτισολ.....	12
Εικόνα 3: Εδαφική τομή Ίστοσολ.....	13
Εικόνα 4: Εδαφική τομή Βέρτισολ.....	14
Εικόνα 5: Εδαφική τομή Μόλτισολ.....	15
Εικόνα 6: Εδαφική τομή Αρίντισολ	15
Εικόνα 7: Εδαφική τομή Σπόντοσολ.....	16
Εικόνα 8: Εδαφική τομή Άλφισολ	17
Εικόνα 9: Εδαφική τομή Ούλτισολ	18
Εικόνα 10: Εδαφική τομή Όξισολ	18
Εικόνα 11: Επιφανειακή διάβρωση (sheet erosion), με μεταφορά εδαφικού υλικού από όλη την επιφάνεια του εδάφους	22
Εικόνα 12: Αυλακωτή διάβρωση (rill erosion) σε επικλινή εδάφη.....	23
Εικόνα 13: Χαραδρωτική διάβρωση στην Βρετανία	23

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ως ένας από τους πιο σημαντικούς φυσικούς πόρους, το έδαφος σχετίζεται έμμεσα και άμεσα σχεδόν με όλες τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Η διάβρωση του θεωρείται ως μια από τις κύριες μορφές υποβάθμισης του εδάφους (Zhang et al., 2010) η οποία με την σειρά της θεωρείται μια από τις βασικότερες περιβαλλοντικές απειλές (Xu et al., 2012). Η διάβρωση του εδάφους διακρίνεται σε δύο κύριες μορφές με βάση το μέσο που την προκαλεί, την αιολική και την υδατική διάβρωση.

Με σκοπό την κάλυψη των βιοτικών αναγκών, την ανταπόκριση στις οικονομικές δυσκολίες και την επίτευξη ταχύτερης ανάπτυξης, ορισμένοι πληθυσμοί ανθρώπων και σε μεγαλύτερο βαθμό οι αναπτυξιακοί φορείς, χρησιμοποιούν εκτάσεις γης και εδαφικούς πόρους με ανορθολογικούς και μη βιώσιμους τρόπους (π.χ. καταστροφή δασικών εκτάσεων με σκοπό την αστική ανάπτυξη, υιοθέτηση ακατάλληλων καλλιεργητικών πρακτικών κ.λπ.) (De Meyer et al., 2011). Ως αποτέλεσμα των παραπάνω εμφανίζεται η επιτάχυνση του φαινομένου της διάβρωσης του εδάφους, η οποία οδηγεί σε αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα του εδάφους, στην αποδοτικότητα των καλλιεργειών και την ποιότητα του νερού, επιπλέον ενισχύει φαινόμενα όπως οι πλημμύρες, ροές κορημάτων και καταστροφές ενδιαιτημάτων (Park et al., 2011).

Τα GIS αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο περιβάλλον για μοντελοποίηση λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν ως προς την διαχείριση και οπτικοποίηση των δεδομένων. Συνεπώς, η ενσωμάτωση μοντέλων στα πλαίσια ενός GIS προσφέρει ένα ιδανικό περιβάλλον για την μοντελοποίηση των διεργασιών ενός τοπίου (Burroughs και McDonnell, 1998). Αν και όλες οι μορφές διάβρωσης υπήρξαν, τουλάχιστον σε κάποιο βαθμό αντικείμενο ανάλυσης και μοντελοποίησης χρησιμοποιώντας GIS και άλλες σχετικές τεχνολογίες όπως η τηλεπισκόπηση, η μεγαλύτερη έμφαση δόθηκε στην υδατική διάβρωση του εδάφους (Mitasova et al., 2013)

Η μοντελοποίηση της διάβρωσης του εδάφους αποτελεί την διαδικασία της περιγραφής της αποκόλλησης των σωματιδίων του εδάφους καθώς και την μεταφορά και απόθεση των ιζημάτων στην γήινη επιφάνεια (R.Lal, 1994). Υπάρχουν δύο κατηγορίες που μπορούν να διακριθούν τα μοντέλα διάβρωσης: τα εμπειρικά (expert-based) και τα φυσικά μοντέλα (process-based) (J.M. Van der knijff et al., 1999). Τα μοντέλα αυτά έχουν διάφορες εφαρμογές ανάλογα με τους στόχους που έχουν τεθεί από τους ερευνητές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των εδαφικών απωλειών και τον σχεδιασμό της προστασίας του περιβάλλοντος.

Το μοντέλο Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), αποτελεί μια τροποποιημένη και βελτιωμένη έκδοση του μοντέλου Universal Soil Loss Equation (USLE), που αναπτύχθηκε από τους Wischmeier και Smith (1978). Είναι το πιο διαδεδομένο εμπειρικό μοντέλο εκτίμησης της εδαφικής απώλειας που προκαλείται από την υδατική διάβρωση και συγκεκριμένα την επιφανειακή (sheet) και αυλακωτή (rill) διάβρωση. Στην RUSLE περιλαμβάνονται πέντε παράγοντες: ο παράγοντας διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (R-factor), ο παράγοντας διαβρωσιμότητας του εδάφους (K-factor), ο τοπογραφικός παράγοντας (LS-factor), ο παράγοντας κάλυψης γης (C-factor) και τέλος ο παράγοντας πρακτικών ελέγχου του φαινομένου της διάβρωσης (P-factor).

Περίληψη

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια για την εκτίμηση της μέσης ετήσιας εδαφικής απώλειας της λεκάνης απορροής του Ξηριά (Πελοπόννησος). Για τον σκοπό αυτό, εφαρμόστηκε με την χρήση ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών το μοντέλο RUSLE (μια τροποποίηση του μοντέλου USLE), και υπολογίστηκαν (σε ψηφιδωτή μορφή) οι επιμέρους συντελεστές του μοντέλου για την περιοχή μελέτης. Ο συντελεστής R υπολογίστηκε βάσει μηνιαίων και ετήσιων δεδομένων βροχόπτωσης. Ο υπολογισμός του συντελεστή K πραγματοποιήθηκε με την χρήση εδαφολογικών χαρτών που διατίθενται από την Εδαφολογική Γεωγραφική Βάση Δεδομένων της Ευρώπης (SGDBE) σε συνδυασμό με την βάση δεδομένων LUCAS. Για τον υπολογισμό του συντελεστή LS χρησιμοποιήθηκε ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο ανάλυσης 30μ (ASTER DEM). Ο συντελεστής C υπολογίστηκε με την αξιοποίηση της βάσης δεδομένων Corine 2000, ενώ ο συντελεστής P λόγω έλλειψης δεδομένων ορίστηκε ως 1 για όλη την έκταση της περιοχής μελέτης. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η μέση ετήσια εδαφική απώλεια ήταν μικρότερη από $6.8 \text{ t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ για περισσότερο από 85% της περιοχής μελέτης, ενώ η μέση τιμή του φαινομένου ήταν ίση με $3.52 \text{ t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$. Για τον έλεγχο αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των ταξινομημένων αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με αυτά των μελετών της Ευρωπαϊκής Κομισιόν. Η σύγκριση αυτή έδειξε ότι οι εκτιμήσεις των κλάσεων της εδαφικής διάβρωσης για το 85.6% της περιοχής μελέτης συμφωνούν με τις κλάσεις που προκύπτουν από τις μελέτες της Ευρωπαϊκής Κομισιόν. Γενικά, τα δεδομένα και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν χαρακτηρίζονται από αναξιοπιστία και εμφανίζουν μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας ως προς τον υπολογισμό των τιμών της εδαφικής διάβρωσης χρησιμοποιώντας το μοντέλο RUSLE για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα της παρούσας πτυχιακής εργασίας μπορούν να φανούν χρήσιμα για την αναγνώριση των χωρικών προτύπων του φαινομένου της εδαφικής διάβρωσης, γεγονός που μπορεί να καταστήσει αυτές τις μεθόδους υψηλής χρησιμότητας, καθώς τέτοιες πληροφορίες είναι κρίσιμες για τον έλεγχο της διάβρωσης και συνεπώς για την προστασία του περιβάλλοντος.

Λέξεις κλειδιά: Διάβρωση του εδάφους · Παγκόσμια Αναθεωρημένη Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας · Σ.Γ.Π · Λεκάνη απορροής Ξηριά

Abstract

In the current thesis, an effort to predict mean annual soil loss has been conducted for the watershed of Xerias (Peloponnese). For the prediction, the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model, a modification of the USLE model, has been adopted in a Geographical Information System framework. The RUSLE factors were calculated (in the form of raster layers) for the area of interest. The R-factor was calculated from monthly and annual precipitation data. The K-factor was estimated using soil maps available from the Soil Geographical Data Base of Europe (SGDBE) in conjunction with the LUCAS database. The LS-factor was calculated from a 30m digital elevation model (ASTER DEM). The C-factor was calculated using the Corine 2000 database. The P-factor in absence of data was set to 1. The results showed that in more than 85% of the study area the mean annual soil loss amounts were less than $6.8 \text{ t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ while the mean annual soil loss is predicted up to $3.52 \text{ t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$. For the reliability assessment of the results, a comparison has been made between the results of this thesis with the results of the European Commission researches. This comparison showed that the classes of soil loss estimations in 85.6% of the study area fell within the range of soil loss classes obtained from European Commission researches. In general, it can be said that the reliability of the used data and used methods is too low and too many uncertainties exist for a reliable calculation of soil loss amounts in the watershed of Xerias using the RUSLE model. Nonetheless, the results of this thesis could be proven useful for the identification of the spatial patterns of soil erosion, which can make these methods highly useful, as such information is critical for erosion control and thus for the protection of the environment.

Keywords: Soil erosion · RUSLE · GIS · Xerias Watershed

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία έχει ως στόχο, την ανάλυση και μοντελοποίηση του φαινομένου της εδαφικής διάβρωσης και ειδικότερα την αναγνώριση των χωρικών προτύπων του φαινομένου για την περιοχή της λεκάνης απορροής του Ξηριά στην Πελοπόννησο με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (G.I.S.).

Η εργασία χωρίζεται σε **10 ενότητες**:

Οι τέσσερις πρώτες ενότητες αποτελούν το θεωρητικό μέρος της εργασίας. Στην **πρώτη ενότητα**, γίνεται αναφορά στο θεωρητικό πλαίσιο που διέπει τον όρο «έδαφος». Δηλαδή δίνονται σχετικές πληροφορίες σχετικά με τον ορισμό του, τους παράγοντες σχηματισμού του, τα χαρακτηριστικά του και τις ταξινομήσεις που έχουν εφαρμοστεί.

Στην **δεύτερη ενότητα** γίνεται περιγραφή του όρου «διάβρωση του εδάφους». Πιο συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στην υδατική διάβρωση, τα αίτια που την προκαλούν και του τύπου στους οποίους διακρίνεται. Επίσης, παραθέτονται πληροφορίες για την εμφάνιση του φαινομένου σε όλη την έκταση της γήινης επιφάνειας καθώς και στον Ελληνικό χώρο.

Στην **τρίτη ενότητα**, γίνεται εκτενής αναφορά στους τρόπους εκτίμησης της εδαφικής διάβρωσης. Περιγράφονται οι τύποι των μοντέλων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μοντελοποίηση του φαινομένου και γίνεται σύντομη αναφορά σε αυτά τα μοντέλα. Ιδιαίτερη βάση δόθηκε στην περιγραφή του μοντέλου RUSLE, που και χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης.

Στην **τέταρτη ενότητα**, γίνεται αναφορά στους ορισμούς που έχουν επικρατήσει για τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), κάνοντας μια σύντομη αναδρομή στην ιστορία τους. Επιπλέον, γίνεται λόγος για την φύση των γεωγραφικών δεδομένων και των πηγών τους. Τέλος, περιγράφεται ο ρόλος των GIS στην ανάλυση του φαινομένου της εδαφικής διάβρωσης.

Η **πέμπτη ενότητα** έως και το τέλος της εργασίας αποτελεί το εμπειρικό μέρος και τη μελέτη περίπτωσης. Πιο συγκεκριμένα, στην πέμπτη ενότητα δίνονται μερικές χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την περιοχή μελέτης (λεκάνη απορροής του Ξηριά).

Στην **έκτη ενότητα**, αναφέρονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της μοντελοποίησης καθώς και οι πηγές αυτών.

Στην **έβδομη ενότητα**, αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εφαρμογή του μοντέλου RUSLE, ενώ στην **όγδοη ενότητα** παραθέτονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης.

Στην **ένατη ενότητα** πραγματοποιείται ο έλεγχος των αποτελεσμάτων, και τέλος στην **δέκατη ενότητα** αποτυπώνονται κάποια χρήσιμα συμπεράσματα.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Έδαφος

Το έδαφος κατέχει ζωτικό ρόλο στην διατήρηση της ζωής στην γη. Το 99.7% των τροφίμων που καταναλώνουν οι άνθρωποι σχετίζεται με το έδαφος, ενώ μόλις το 0.3% προέρχεται από τα υδατικά περιβάλλοντα (FAO, 1998). Ο ορισμός του εδάφους σχετίζεται με την λειτουργία που προσφέρει στον άνθρωπο που το ορίζει κάθε φορά (J.Sandor et al., 2004). Από μορφολογική άποψη ο οργανισμός Natural Resource Conservation Service (NRCS) ορίζει το έδαφος ως : «ένα φυσικό σώμα που αποτελείται από στερεά σώματα (ορυκτά και οργανική ύλη), ρευστά και αέρια που εμφανίζεται στην επιφάνεια της γης, καταλαμβάνει χώρο και εμφανίζει ένα ή και τα δυο από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά : ορίζοντες, οι οποίοι διακρίνονται από το μητρικό υλικό σαν αποτέλεσμα απώλειας, μεταφοράς και μετατροπής ενέργειας και ύλης ή από την ικανότητα υποστήριξης του ριζικού συστήματος των φυτικών οργανισμών» (Soil Survey Staff, 2014a).

Ο οργανισμός Soil Science Society of America (SSSA) ορίζει το έδαφος βάσει γενετικών και περιβαλλοντικών παραγόντων: «το έδαφος είναι τα μη ενοποιημένα ορυκτά και οργανική ύλη στην επιφάνεια της γης που φανερώνουν τις επιδράσεις των γενετικών και περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως είναι: το κλίμα, το ανάγλυφο και οι οργανισμοί που επιδρούν στο μητρικό υλικό για μια χρονική περίοδο. Το έδαφος διαφέρει από το μητρικό υλικό από το οποίο προέρχεται σε διάφορες φυσικές, χημικές, βιολογικές και μορφολογικές ιδιότητες» (SSSA, 2008).

Σύμφωνα με τον Κ.Παυλόπουλο (2011), το έδαφος αποτελεί ένα σχετικά μικρού πάχους επιφανειακό στρώμα της λιθόσφαιρας που αποτελείται από ανόργανα συστατικά (κυρίως τεμαχίδια ορυκτών), νερό, αέρα και ένα σημαντικό ποσοστό οργανικής ύλης. Το κύριο χαρακτηριστικό του εδάφους είναι η ικανότητα να αναπτύσσει και να συντηρεί τους φυτικούς οργανισμούς. Η ικανότητα αυτή οφείλεται στην αλληλεπίδραση πολλών παραγόντων όπως το νερό, ο αέρας, η ηλιακή ακτινοβολία, τα πετρώματα, τα φυτά και οι ζωικοί οργανισμοί. Συνεπώς, το έδαφος είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της λιθόσφαιρας με την ατμόσφαιρα, την υδρόσφαιρα και τη βιόσφαιρα.

Μερικοί από τους ορισμούς που έχουν δοθεί κατά καιρούς για το έδαφος είναι οι εξής:

- «Έδαφος είναι το ανώτερο, αποσαθρωμένο στρώμα του στερεού φλοιού της Γης» (Ramann, 1911).
- «Έδαφος είναι το ψαθυρό υλικό από το οποίο τα φυτά αντλούν θρεπτικά στοιχεία και βρίσκουν κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη τους»(Hilgard, 1914).
- «Έδαφος είναι ένα ανοιχτό φυσικό σύστημα». Φυσικό σε αντιδιαστολή με τα λογικά συστήματα και ανοιχτό αφού διάφορα συστατικά αφαιρούνται από αυτό ή προσθέτονται σε αυτό. Το έδαφος επομένως ως ανοιχτό σύστημα

δέχεται τις επιδράσεις του περιβάλλοντος, στο οποίο και ασκεί επιδράσεις. (Jenny, 1941).

- Ο Joffe (1936), ένας εκπρόσωπος της Ρωσικής σχολής της εδαφολογίας, αντιτάσσεται στην διατύπωση του Ramann (1911), με το σκεπτικό ότι δεν γίνεται διάκριση μεταξύ του εδάφους και χαλαρού πετρώματος. Έτσι σύμφωνα με τον Joffe (1936), «Το έδαφος είναι ένα φυσικό σώμα, το οποίο διαφοροποιείται σε ορίζοντες ορυκτών και οργανικών συστατικών, συνήθως μη ενοποιημένων, μεταβλητού βάθους, το οποίο διαφέρει από το υποκείμενο μητρικό υλικό σε μορφολογία, φυσικές ιδιότητες και σύσταση, χημικές ιδιότητες και σύνθεση, και βιολογικά χαρακτηριστικά.».
- Επίσης, σύμφωνα με νεότερες απόψεις το έδαφος αποτελεί μια εκδήλωση της δράσης της εδαφογενετικής διεργασίας, η οποία δεν τελειώνει ποτέ και όχι ένα αποτέλεσμα αυτής. Το έδαφος επομένως είναι ένα δυναμικό σύστημα, το οποίο εάν αποκοπεί από το περιβάλλον του θα καταλήξει σε μια μάζα αποσαθρωμένου υλικού (White , 1971).

Το έδαφος θεωρείται τμήμα της λιθόσφαιρας γιατί αποτελείται κυρίως από ανόργανα υλικά. Παρόλα αυτά όμως η σχέση του με τη βιόσφαιρα και την ατμόσφαιρα είναι σύνθετη και αλληλοεξαρτώμενη. Ο σχηματισμός του εδάφους ξεκινά με την αποσάθρωση των πετρωμάτων που είναι εκτεθειμένα στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Αποτέλεσμα της αποσάθρωσης είναι ο κατακερματισμός του πετρώματος με μηχανικό ή χημικό τρόπο. Το κύριο αποτέλεσμα της αποσάθρωσης των πετρωμάτων είναι ο σχηματισμός ενός στρώματος από χαλαρά ανόργανα υλικά που ονομάζεται αποσαθρωμένος μανδύας ή ρεγκόλιθος (regolith) (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

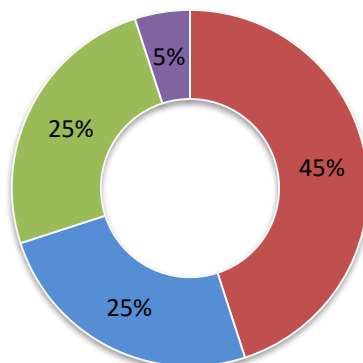
Ο αποσαθρωμένος μανδύας συνήθως εμφανίζει κατακόρυφη στρωμάτωση σε ότι αφορά το μέγεθος των τεμαχιδίων των υλικών από τα οποία αποτελείται με τα ογκωδέστερα και λιγότερο τεμαχισμένα τεμάχια να βρίσκονται στη βάση, ακριβώς πάνω από το μητρικό πέτρωμα και τα λεπτομερέστερα υλικά στα ανώτερα τμήματα (G.Tyler Miller, JR, 1999).

Το έδαφος λοιπόν, αποτελείται σε μεγάλο ποσοστό από λεπτόκοκκα θραύσματα ορυκτών και πετρωμάτων που είναι το τελικό προϊόν της αποσάθρωσης. Περιέχει επίσης μία αφθονία από ρίζες, υπολείμματα φυτών καθώς και ζωικούς οργανισμούς ζωντανούς και νεκρούς. Χαρακτηριστικό επίσης του εδάφους είναι ο σχηματισμός πόρων, οι πόροι είναι μικροσκοπικά κενά που γεμίζουν με αέρα, νερό, βακτήρια και μύκητες, που μεταβάλλουν τις χημικές ιδιότητες του εδάφους.

Οι αναλογίες των συστατικών των εδαφών ποικίλουν. Για αυτό το λόγο υπάρχουν διαφορετικά είδη εδαφών. Ωστόσο, ένα τυπικά «καλό» καλλιεργήσιμο έδαφος αποτελείται από ορυκτά σε ποσοστό 45%, αέρα σε ποσοστό 25% , νερό σε ποσοστό 25% και από οργανική ύλη σε ποσοστό 5% όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.

Συστατικά ιδανικού εδάφους προς καλλιέργεια

■ Ορυκτά ■ Νερό ■ Αέρας ■ Οργανική ύλη

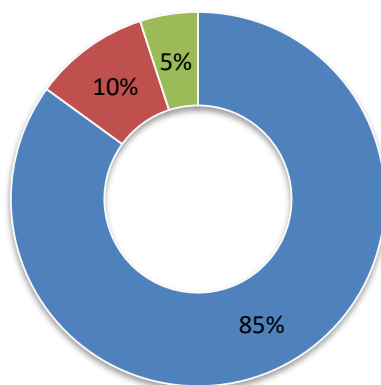


Σχήμα 1: Συστατικά ιδανικού εδάφους προς καλλιέργεια (πηγή: Κ.Παυλόπουλος, 2011)

Η οργανική ύλη αποτελείται από χουμικά συστατικά, ρίζες και έμβιους οργανισμούς σε αναλογίες 85%, 10% και 5% αντίστοιχα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2 (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

Σύσταση οργανικής ύλης ιδανικού εδάφους προς καλλιέργεια

■ χούμους ■ ρίζες ■ Εμβίοι οργανισμοί



Σχήμα 2: Σύσταση οργανικής ύλης ιδανικού εδάφους προς καλλιέργεια (πηγή: Κ.Παυλόπουλος, 2011)

1.1 Παράγοντες σχηματισμού των εδαφών

Σύμφωνα με τον Jenny (1940), το έδαφος λαμβάνετε υπόψιν ως μια λειτουργία. Οι παράγοντες που συμβάλουν στον σχηματισμό των εδαφών είναι το κλίμα, το μητρικό υλικό, η τοπογραφία, η δράση των οργανισμών και ο χρόνος.

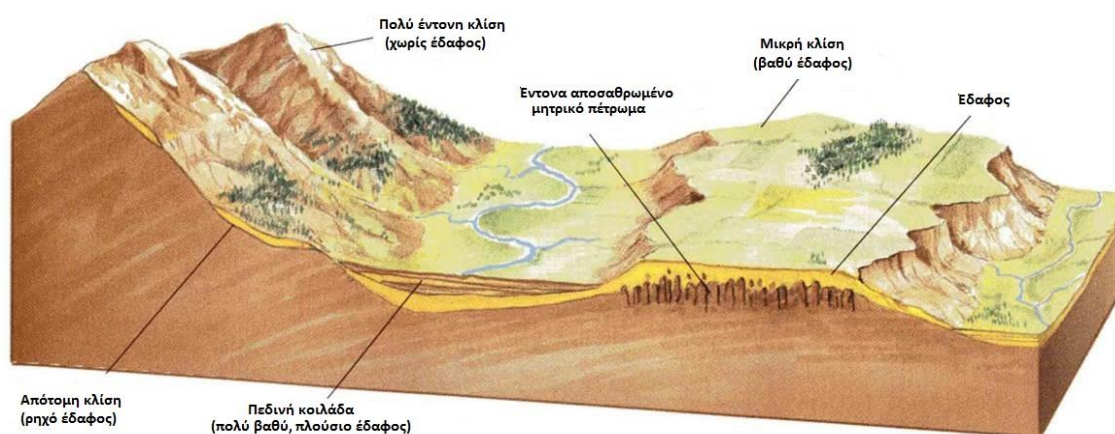
Η δημιουργία ενός εδάφους προϋποθέτει ότι μια ακολουθία ιζημάτων ή πετρωμάτων, παρέμεινε για αρκετό χρόνο στην επιφάνεια της γης χωρίς να καλυφθεί από άλλα ιζήματα, κάτω από την επίδραση των εξωγενών και βιολογικών διεργασιών.

Είναι σημαντικό ότι το έδαφος δεν πρέπει ποτέ να λαμβάνεται υπόψιν σαν το τελικό προϊόν μιας διεργασίας αλλά ένα από τα στάδια μιας συνεχούς διεργασίας που ονομάζεται εδαφογένεση. Αν μεταβληθεί ένας ή περισσότεροι από τους παράγοντες, που παίζουν ρόλο στο σχηματισμό του εδάφους και στον καθορισμό των χαρακτηριστικών του, η διαδικασία μπορεί κατά την πορεία της να διαφοροποιηθεί ή και να διακοπεί. Για παράδειγμα, η μακροπρόθεσμη μεταβολή των κλιματολογικών συνθηκών και των ειδών των ζωντανών οργανισμών, σε μια περιοχή, μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγή των εδαφογενετικών διεργασιών και συνεπώς σε διαφορετικό τύπο εδάφους (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

Οι παράμετροι που αποτελούν τους κύριους παράγοντες σχηματισμού των εδαφών όπως αναφέρθηκαν προηγουμένως :

- 1. Μητρικό υλικό:** Η «πρώτη ύλη» από την οποία προκύπτει το έδαφος ονομάζεται μητρικό υλικό και καθορίζει αρκετές από τις ιδιότητες του. Αυτό μπορεί να είναι πέτρωμα ή χαλαρό ιζημα, που έχει μεταφερθεί από αλλού και έχει αποτεθεί στην περιοχή που βρίσκεται σήμερα, με την επίδραση του επιφανειακού νερού, της βαρύτητας, του πάγου ή του ανέμου (Globe, 2014). Οποιοδήποτε και αν είναι το μητρικό υλικό με τη διεργασία της αποσάθρωσης, αργά ή γρήγορα με την πάροδο του χρόνου θρυμματίζεται, παρέχοντας την «πρώτη ύλη» για το σχηματισμό του εδάφους. Η φύση και το είδος του μητρικού υλικού επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά του εδάφους που σχηματίζεται από αυτό. Είναι προφανές ότι αυτός ο παράγοντας διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο έναντι των άλλων σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Όσο πιο νέο είναι ένα έδαφος, τόσο περισσότερα ορυκτά και χαρακτηριστικά περιέχει από τα πετρώματα ή τα ιζήματα από τα οποία προήλθε (Κ.Παυλόπουλος, 2011).
- 2. Κλίμα:** Τα εδάφη τείνουν να εμφανίζουν ισχυρή γεωγραφική συσχέτιση με το κλίμα, ειδικά σε παγκόσμια κλίμακα. Το κλίμα καθορίζει την ύπαρξη βλάστησης που αυτή με την σειρά της επιδρά στο σχηματισμό του εδάφους (M.Ritter, 2006). Τα κλιματικά στοιχεία με το σημαντικότερο ρόλο στο σχηματισμό των εδαφών είναι η θερμοκρασία και η υγρασία. Οι υψηλές θερμοκρασίες και η αυξημένη υγρασία επιταχύνουν τις χημικές και τις βιολογικές διεργασίες στα εδάφη. Αντίθετα οι χαμηλές θερμοκρασίες και η έλλειψη υγρασίας επιβραδύνουν τις χημικές αντιδράσεις και τη βιολογική δραστηριότητα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα εδάφη των θερμών και υγρών περιοχών να είναι καλύτερα σχηματισμένα και να έχουν μεγάλο πάχος, σε σχέση με τα αντίστοιχα εδάφη περιοχών με ψυχρό και ξηρό κλίμα (Κ.Παυλόπουλος, 2011). Με την πάροδο του χρόνου, το κλίμα τείνει να επιδρά σε μεγαλύτερο βαθμό στις ιδιότητες του εδάφους από το μητρικό πέτρωμα (M.Ritter, 2006).
- 3. Τοπογραφία (Μορφολογία):** Η τοπογραφία κατέχει σημαντικό ρόλο σε ότι αφορά την ανάπτυξη των εδαφών, κυρίως επηρεάζοντας την επιφανειακή απορροή (M.Ritter, 2006). Το πάχος του εδάφους σε μια περιοχή εξαρτάται από το ρυθμό με τον οποίο αναπτύσσεται η βάση και από το ρυθμό, με τον οποίο

ταπεινώνεται η επιφάνεια του, κυρίως λόγω της διάβρωσης (Κ.Παυλόπουλος, 2011). Σημαντικό ρόλο επίσης διαδραματίζει και ο προσανατολισμός με τον οποίο σχηματίζεται το έδαφος, πλαγίες με νότιο προσανατολισμό δέχονται πιο έντονη ηλιακή ακτινοβολία από αυτές με βόρειο προσανατολισμό, γεγονός που επηρεάζει την εδαφική υγρασία και θερμοκρασία, για παράδειγμα στα Απαλάχια Όροι (Β.Αμερική) στις πλαγίες με νότιο προσανατολισμό κυριαρχεί βλάστηση από κωνοφόρα (coniferus) δέντρα, ενώ σε αυτές με βόρειο προσανατολισμό από είδη φυλλοβόλων (hardwood) (Schoonover και Crim, 2015).



Σχήμα 3: Σχηματική απεικόνιση του ρόλου που παίζει η κλίση της τοπογραφίας στο πάχος του εδάφους. Συνήθως όσο μικρότερη είναι η τοπογραφική κλίση τόσο μεγαλύτερο και το πάχος του εδάφους (πηγή: CHARIM)

- 4. Η δράση των οργανισμών:** Σύμφωνα με το υπουργείο γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (U.S.D.A.), οι φυτικοί οργανισμοί, οι ζωικοί οργανισμοί, οι μικροοργανισμοί και οι άνθρωποι, επηρεάζουν με τη σειρά τους τις διαδικασίες σχηματισμού των εδαφών. Έχει εκτιμηθεί ότι ο μισός περίπου όγκος ενός εδάφους αποτελείται από νερό, αέρα και ένα μικρό ποσοστό καταλαμβάνεται από ζωντανά και νεκρά φυτά και ζώα σημαντικής σημασίας για τις εδαφογενετικές διεργασίες. Η παρουσία της βιολογικής δραστηριότητας είναι αυτή που διαφοροποιεί το έδαφος από ένα ίζημα (Κ.Παυλόπουλος, 2011).
- 5. Ο παράγοντας χρόνος:** Οι διαδικασίες σχηματισμού των εδαφών είναι συνεχής, ο χρόνος που απαιτείται ώστε όλοι οι παραπάνω παράγοντες να επιδράσουν στην διαδικασία σχηματισμού των εδαφών αποτελεί με την σειρά του έναν παράγοντα (U.S.D.A), κάποιες ιδιότητες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους μπορεί να μεταβληθούν γρήγορα σε διάστημα ωρών ή και λεπτών, ενώ άλλες (π.χ. που αφορούν τα ορυκτά του εδάφους) μεταβάλλονται πολύ αργά (Globe, 2014). Στην κλίμακα του γεωλογικού χρόνου τα εδάφη μπορούν να δημιουργούνται και να επαναδημιουργούνται, στα χρονικά όμως πλαίσια της ζωής του ανθρώπου θεωρείται ως μια μη ανανεώσιμη πηγή ζωής και ανάπτυξης (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

1.2 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά του εδάφους

Τα εδάφη εμφανίζουν διάφορες φυσικές και χημικές ιδιότητες, ιδιαίτερης χρησιμότητας για την περιγραφή και την ταξινόμηση τους. Ορισμένες από αυτές αναγνωρίζονται εύκολα ενώ υπάρχουν κάποιες που ο προσδιορισμός τους απαιτεί ακριβείς μετρήσεις (Κ.Παυλόπουλος, 2011). Ορισμένες από τις σημαντικές ιδιότητες του εδάφους είναι η υφή του (soil texture), ο ιστός του (soil structure) και το χρώμα.

1. Χρώμα: Το χρώμα είναι η πιο εμφανής ιδιότητα των εδαφών και μια από τις πιο καθοριστικές για την ταξινόμηση τους. Το χρώμα του εδάφους καθορίζεται από τρία χαρακτηριστικά του, την απόχρωση, την ένταση και την φωτεινότητα (J.E Schoonover et al., 2015). Παρέχει στοιχεία για το μητρικό πέτρωμα, τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής που σχηματίστηκε, καθώς και τις καλλιεργητικές του δυνατότητες. Οι εδαφολόγοι έχουν αναγνωρίσει 175 χρωματικές κατηγορίες εδαφών. Τα κύρια χρώματα είναι αποχρώσεις του μαύρου, του καφέ, του κόκκινου, του κίτρινου, του γκρι και του λευκού. Το χρώμα του εδάφους πολλές φορές αντανακλά το χρώμα των ορυκτών κόκκων από τους οποίους αποτελείται, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις αποδίδει το χρώμα των κηλίδων που καλύπτουν την επιφάνεια των κόκκων, οι κηλίδες αυτές οφείλονται συνήθως στα μεταλλικά οξείδια. Ενώ υπάρχουν περιπτώσεις που ο χρωματισμός του εδάφους οφείλεται στην παρουσία οργανικής ύλης (Κ.Παυλόπουλος, 2011). Το χρώμα μας δίνει πολύ χρήσιμες πληροφορίες για το πόσο κατάλληλο είναι ένα έδαφος για την ανάπτυξη καλλιεργειών. Παραδείγματος χάρη, το σκούρο καφέ ή μαύρο επιφανειακό χρώμα είναι πλούσιο σε άζωτο και έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε οργανική ύλη. Τα γκριζα, ζωηρά κίτρινα ή κόκκινα επιφανειακά εδάφη είναι φτωχά σε οργανική ύλη και χρειάζονται εμπλουτισμό με άζωτο για να αναπτυχθούν οι περισσότερες καλλιέργειες (G.Tyler Miller, JR, 1999).

2. Υφή: Υφή του εδάφους, δηλαδή η μηχανική του σύσταση ή την κοκκομετρική του σύσταση όπως αλλιώς ονομάζεται, αναφέρεται στο μέγεθος των κόκκων (σωματιδίων) που το αποτελούν και ορίζεται ως η εκατοστιαία αναλογία της άμμου(S), της ιλύος (Si) και της αργίλου (C) (Μ.Σακκαλλής, 2011), ή αλλιώς αναφέρεται στην αναλογία του κάθε τύπου σωματιδίου σε ένα δεδομένο έδαφος (R.T.Wright και D.F Boorse, 1981). Σύμφωνα με τον Μ.Σακκαλλή (2011), τα χαρακτηριστικά των εδαφικών σωματιδίων έχουν ως εξής:

Άμμος (2-0,02 mm): Παρουσιάζει μειωμένη ικανότητα συγκράτησης νερού και θρεπτικών στοιχείων, λόγω μεγάλης ταχύτητας διάχυσης του νερού.

Ιλύς (0,02-0,002 mm): Έχει αυξημένη ικανότητα συγκράτησης του νερού αλλά μειωμένη ικανότητα συγκράτησης θρεπτικών στοιχείων και προκαλεί δυσμενείς συνθήκες αερισμού για την ανάπτυξη φυτών.

Άργιλος(<0,002mm): Παρουσιάζει αυξημένη ικανότητα συγκράτησης νερού. Λόγω μειωμένης ταχύτητας διάχυσης του νερού μέσα στην άργιλο και προκαλεί δυσμενείς συνθήκες αερισμού για τις ρίζες των φυτών.

Η υφή του εδάφους επηρεάζει την ευκολία με την οποία το έδαφος μπορεί να καλλιεργηθεί. Τα αργιλώδη εδάφη καλλιεργούνται πολύ δύσκολα, επειδή ακόμα και οι μέτριες μεταβολές της περιεκτικότητας του σε υγρασία μπορεί να τα μετατρέψουν από πολύ κολλώδη και λασπώδη σε πολύ σκληρά έως πλινθώδους σύστασης. Τα αμμώδη εδάφη καλλιεργούνται πολύ εύκολα, επειδή δεν μετατρέπονται σε λασπώδη όταν είναι υγρά ούτε γίνονται σκληρά και με πλινθώδη σύσταση όταν αποξηραίνονται (R.T.Wright και D.F Boorse, 1981). Τα εδάφη τα οποία περιέχουν μείγματα αργίλου, ιλύος και άμμου σε ίσες αναλογίες θεωρούνται τα ιδανικότερα για την ανάπτυξη των φυτών (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

- 3. Ίστος - Δομή:** Η δομή του εδάφους καθορίζεται από τον τρόπο με τον οποίο ενώνονται τα εδαφικά σωματίδια (άμμος, ιλύς και άργιλος) και σχηματίζουν συσσωματώματα (Αντωνιάδης, 2001). Το μέγεθος, το σχήμα, η μορφή και η σταθερότητα των συσσωματωμάτων αυτών επιδρά στην ευκολία με την οποία το νερό ο αέρας και οι οργανισμοί (συμπεριλαμβανομένων και τις ρίζες των φυτών) κινούνται μέσα στο έδαφος (Κ.Παυλόπουλος, 2011). και στην αντίσταση του στη διάβρωση (Αντωνιάδης, 2001). Τα συσσωματώματα ταξινομούνται βάσει του σχήματος τους σε σφαιροειδή, πεπλατυσμένα, τετράγωνα και πρισματικά. Σε ορισμένα εδάφη και ιδιαίτερα σε αυτά που αποτελούνται από άμμο, δεν είναι σύνηθες να σχηματίζονται συσσωματώματα. Αντίθετα σε εδάφη που χαρακτηρίζονται από μεγάλα ποσοστά ιλύος και άργιλου τείνουν να αναπτύσσονται συσσωματώματα ενώ έχει διαπιστωθεί ότι σε υγρά εδάφη η συσσωμάτωση των κόκκων (σωματιδίων) είναι εντονότερη από ότι σε ξηρά (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

Ο ιστός του εδάφους επηρεάζει την εργασιμότητα του, το πορώδες και τη διαπερατότητα του (Fardon, 1995). Το πορώδες ορίζεται ως το ποσό των κενών χώρων μεταξύ των κόκκων ή των συσσωματωμάτων και ορίζεται σαν:

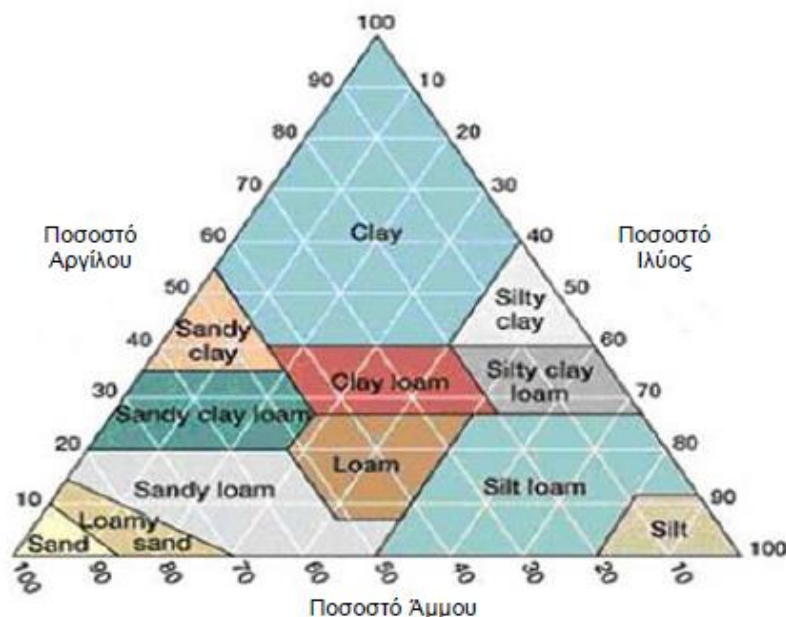
$$\text{Πορώδες} = \frac{\text{όγκος κενού χώρου}}{\text{συνολικός όγκος εδάφους}}$$

Το πορώδες εκφράζεται σαν ποσοστό ή κλάσμα και είναι μέγεθος που μετρά την ικανότητα του εδάφους να κατακρατά τον αέρα και το νερό (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

1.3 Κατηγορίες εδαφών ανάλογα με την μηχανική τους σύσταση (Υφή)

Τα εδαφολογικά εργαστήρια ταξινομούν τα εδάφη σε 12 κατηγορίες/κλάσεις κοκκομετρικής σύστασης ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής άμμου, αργίλου και ιλύος στο έδαφος.

Οι 12 αυτές κλάσεις εδαφών καταλαμβάνουν ορισμένη θέση και χώρο σε ένα ισοσκελές τρίγωνο το οποίο ονομάζεται τρίγωνο μηχανικής σύστασης των εδαφών. (Μ.Σακκαλλής, 2011).



Σχήμα 4: Τρίγωνο μηχανικής σύστασης με το βασικό σύστημα ταξινόμησης του U.S.D.A (πηγή: Brown, 2003)

Σύμφωνα με τον Μ.Σακκαλλή (2011), οι τρεις βασικότερες κατηγορίες εδαφών είναι τα αμμώδη ή ελαφρά εδάφη, τα πηλώδη ή μέσης σύσταση και τα αργιλώδη ή βαριά εδάφη, με ιδιότητες ανάλογες των ποσοστών άμμου, αργίλου, ιλύος που περιέχουν.

Αμμώδες έδαφος : Αμμώδες (Sandy)
Αμμοπηλώδες (Sandy loam)

Πηλώδες έδαφος : Πηλοαμμώδες (Loamy sand)
Αμμοαργιλοπηλώδες (Sandy clay loam)
Πηλώδες (Loam)
Ιλοαργιλοπηλώδες (Silty clay loam)
Ιλοαργιλοπηλώδες (Silty clay loam)
Ιλυώδες (Silt)

Αργιλώδες έδαφος : Αργιλοπηλώδες (Clay loam)
Ιλοαργιλώδες (Silty clay)
Αργιλοαμμώδες (Sandy clay)
Αργιλώδες (Clay)

1.4 Εδαφική τομή

Κατά τις διεργασίες δημιουργίας του εδάφους δημιουργείται μια κάθετη διαστρωμάτωση που συχνά (αν και όχι πάντοτε) είναι αρκετά σαφής. Αυτά τα οριζόντια στρώματα είναι γνωστά ως εδαφικοί ορίζοντες, και η κάθετη τομή διαμέσου των διαφόρων οριζόντων ονομάζεται εδαφική τομή ή προφίλ (R.T.Wright και D.F Boorse, 1981). Οι εδαφικοί ορίζοντες διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το χρώμα, το μέγεθος και τη σύσταση των εδαφικών σωματιδίων και ως προς τον τρόπο που τα σωματίδια αυτά ενώνονται μεταξύ τους (Μ.Σακκαλλή, 2011), και αποκαλύπτουν

πολλά για τους παράγοντες που αλληλεπιδρούν κατά τον σχηματισμό του εδάφους (R.T.Wright και D.F Boorse, 1981).

Ο ορίζοντας O αποτελεί το επιφανειακό στρώμα ενός εδάφους και αποτελεί την κύρια πηγή ενέργειας για την εδαφική κοινότητα (R.T.Wright και D.F Boorse, 1981). Ο μεγαλύτερος όγκος του καταλαμβάνεται από οργανικό υλικό. Ο ορίζοντας αυτός συναντάται συχνά σε εδάφη που αναπτύσσονται δάση ενώ απουσιάζει από περιοχές με χαμηλή και αραιή βλάστηση. Αρκετά συχνά ο ορίζοντας αυτός απουσιάζει πλήρως, και έτσι ο ανώτερος εδαφικός ορίζοντας θεωρείται ο ορίζοντας A (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

Ο ορίζοντας A ή όπως συχνά ονομάζεται επιφανειακό έδαφος, είναι ένα πορώδες μείγμα από οργανικό υλικό που έχει αποσυντεθεί μερικώς, το οποίο ονομάζεται χούμους (humus), και κάποια κομμάτια ανόργανων ορυκτών. Είναι συνήθως πιο σκούρος και πιο χαλαρός από τους βαθύτερους ορίζοντες.

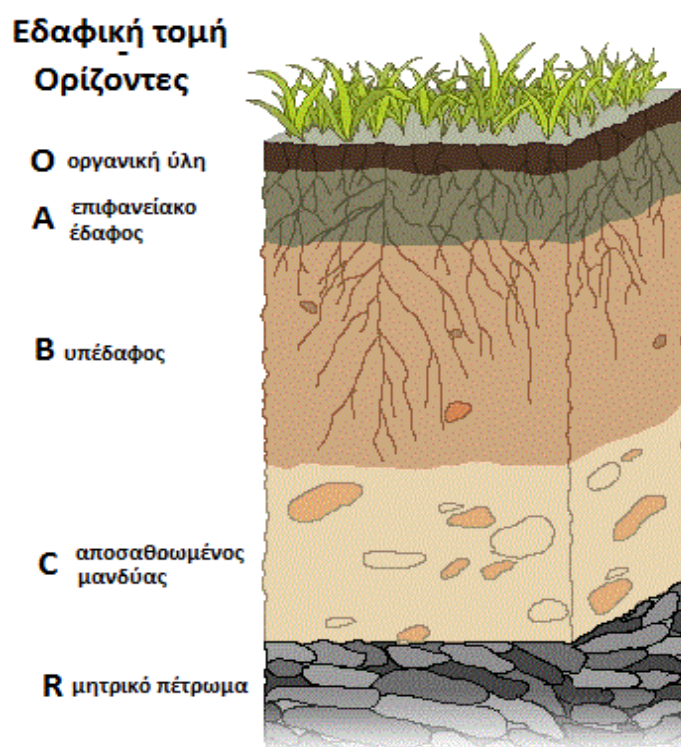
Σε αυτά τα δυο ανώτερα στρώματα είναι συγκεντρωμένες οι ρίζες των περισσότερων φυτών και η περισσότερη οργανική ύλη του εδάφους και χαρακτηρίζονται από μεγάλο πλήθος βακτηριδίων, μυκήτων και γαιοσκωλήκων που αλληλεπιδρούν σε πολύπλοκες τροφικές αλυσίδες. Τα βακτήρια και άλλοι αποικοδομητές οργανισμοί ανακυκλώνουν τα θρεπτικά συστατικά τα οποία χρειαζόμαστε εμείς και οι άλλοι οργανισμοί της ξηράς. Διασπούν κάποιες πολύπλοκες οργανικές ενώσεις σε πιο απλές ανόργανες ενώσεις διαλυτές στο νερό. Η υγρασία του εδάφους που περιέχει αυτά τα διαλυμένα θρεπτικά συστατικά απορροφάται από τις ρίζες των φυτών και μεταφέρεται κατά μήκος των βλαστών και στα φύλλα.

Ο ορίζοντας B συνήθως αποκαλείται το υπέδαφος (subsoil). Είναι ο εμπλουτισμένος ορίζοντας ή ιλλούβιος ορίζοντας στον οποίο αποτίθενται τα συστατικά που αποπλένονται από τους υπερκείμενους ορίζοντες. Είναι πλούσιος σε σίδηρο και αργίλιο ενώ η περιεκτικότητά του σε άργιλο είναι τις περισσότερες φορές μεγαλύτερη από του ορίζοντα A. Σε αρκετές περιπτώσεις η συγκέντρωση του αργιλίου σχηματίζει ένα αδιαπέρατο στρώμα που ονομάζεται hardpans ή claypans.

Ο ορίζοντας C συνήθως αποκαλύπτει την γεωλογική διεργασία που δημιούργησε το συγκεκριμένο τοπίο (R.T.Wright και D.F Boorse, 1981). Αποτελείται από ασύνδετα τεμάχια που έχουν προκύψει από την αποσάθρωση του μητρικού πετρώματος και ονομάζεται αποσάθρωμένος μανδύας ή ρεγκόλιθος. Στον ορίζοντα αυτό το οργανικό υλικό συνήθως απουσιάζει τελείως. Ενώ όσον αφορά τον ορίζοντα R πρόκειται για το μητρικό πέτρωμα που εμφανίζει τις περισσότερες φορές ελάχιστα ίχνη αποσάθρωσης.

Για την ανάπτυξη του εδαφικού προφίλ είναι απαραίτητη η παρουσία επιφανειακού νερού που προέρχεται από τις βροχοπτώσεις ή το λιώσιμο του χιονιού. Χαρακτηριστικό του επιφανειακού νερού είναι η ικανότητα μεταφοράς συστατικών από την επιφάνεια προς το εσωτερικό του εδάφους που σε συνδυασμό με την πάροδο του χρόνου, οδηγεί στη διαμόρφωση των εδαφικών οριζόντων (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

Τα εδαφικά προφίλ που εμφανίζουν όλους τους ορίζοντες ή αλλιώς όπως ονομάζονται ιδανικά προφίλ, αντιστοιχούν συνήθως σε εδάφη περιοχών με υγρό κλίμα, που η αποστράγγιση είναι ικανοποιητική και οι τοπογραφικές κλίσεις μικρές, ενώ έχουν παραμείνει τεκτονικά αδιατάρακτες για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Οι συνθήκες αυτές θεωρούνται ιδανικές και δεν υπάρχουν στα περισσότερα μέρη της γης. Έτσι σε πολλές περιπτώσεις το προφίλ ενός εδάφους μπορεί να έχει καλά ανεπτυγμένο μόνο έναν ορίζοντα ή μπορεί να έχει καλά ανεπτυγμένους όλους τους ορίζοντες αλλά να απουσιάζει ένας.



Σχήμα 5: Ενδεικτική σχηματική τομή από την επιφάνεια του εδάφους έως το μητρικό πέτρωμα (πηγή: USDA)

Πολλά εδάφη είναι πολύ νέα σε ηλικία, οπότε δεν έχουν προλάβει να αναπτύξουν ένα ολοκληρωμένο προφίλ. Τα εδάφη που περιέχουν μόνο τον ορίζοντα A πάνω από ένα αποσαθρωμένο μητρικό υλικό (ορίζοντας C) ονομάζονται ανώριμα εδάφη ενώ η ύπαρξη του ιλλούβιου ορίζοντα B στο προφίλ είναι ένδειξη ώριμου εδάφους. (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

1.5 Ταξινόμηση εδαφών

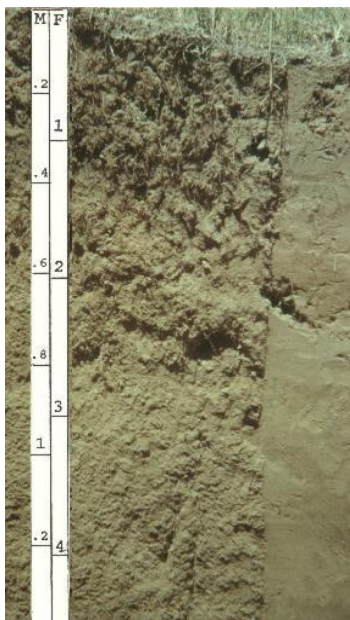
Η ταξινόμηση εδαφών αποτελεί μια συστηματική κατάταξη εδαφών που έχουν αναπτύξει ανά τα χρόνια οι εδαφολόγοι. Υπάρχουν διάφορα ταξινομικά συστήματα, που έχουν προταθεί άλλοτε βασιζόμενα στην παραγωγικότητα, άλλοτε στο ρόλο του κλίματος και της βλάστησης και άλλοτε στην ανάπτυξη της εδαφικής τομής. Σήμερα τα δύο επικρατέστερα συστήματα είναι αυτό του FAO/UNESCO και το American Soil Classification (Κ.Παυλόπουλος, 2011) στα οποία τα ονόματα των τάξεων σχετίζονται με ελληνικές, λατινικές ή και λέξεις άλλων γλωσσών και φανερώνουν κάποια από τα χαρακτηριστικά του εδάφους (U.S.D.A., 1999). Το πρώτο έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του παγκόσμιου εδαφολογικού

χάρτη αλλά στην επιστημονική κοινότητα φαίνεται να έχει επικρατήσει το δεύτερο. Άλλες σημαντικές προσπάθειες ανάπτυξης συστημάτων ταξινόμησης είναι αυτό της Αυστραλίας και της Ρωσίας, τα οποία διατηρούν πολλά μεν από τα κοινά ονόματα, αλλά δεν παρουσιάζουν ταξινομική ιεραρχία και είναι δύσκαμπτα σε περιπτώσεις ταξινόμησης νέων εδαφών και περιοχών με ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες που δεν έχουν ήδη κατηγοριοποιηθεί (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

Οι 10 ιεραρχικά ανώτερες τάξεις εδαφών στο Αμερικάνικο σύστημα είναι:

Έντισολ (Entisol): Τα εδάφη της τάξης των Έντισολ αποτελούν τα «νεότερα» ή πιο πρόσφατα σχηματισμένα από όλες τις υπόλοιπες τάξεις εδαφών (Schoonover και Crim, 2015) και καταλαμβάνουν περίπου το 16% την παγκόσμιας κατανομής των εδαφών, αποτελώντας την πιο διαδεδομένη τάξη. Διαμορφώνονται σε περιοχές όπου η εδαφογένεση έχει περιορισθεί ή έχει καθυστερήσει. Περιλαμβάνουν εδάφη πρόσφατων αλλουβιακών αποθέσεων, εδάφη που σχηματίζονται σε λοφώδεις ή ορεινές περιοχές, στα οποία παρατηρείται έντονη διάβρωση με το μητρικό υλικό να εκτίθεται στην επιφάνεια. Αποτελούν εδάφη επηρεασμένα από τις ανθρώπινες δραστηριότητες ή που είναι κορεσμένα με νερό, καθώς και εδάφη τα οποία περιέχουν ανθεκτικά στην αποσάθρωση ορυκτά. Τα Έντισολ παρουσιάζουν πολύ λίγες ή καθόλου ενδείξεις ανάπτυξης εδαφικών οριζόντων.

Στην Ελλάδα τα Έντισολ βρίσκονται συνήθως κοντά στα πεδία πλημμυρών των ποταμών και σε περιοχές με συχνή απόθεση νέων υλικών. Επιπλέον, τα Έντισολ που σχηματίστηκαν σε αλλουβιακές αποθέσεις είναι πολύ παραγωγικά, ενώ τα Έντισολ των λοφωδών περιοχών, στα οποία παρατηρείται μια έντονη διάβρωση δεν είναι παραγωγικά (Κ.Χαϊντούτη, 2006).



Εικόνα 1: Εδαφική τομή εδάφους Έντισολ, παρουσιάζει ελάχιστα ή καθόλου στοιχεία εδαφογένεσης (πηγή: USDA NRCS)

Ινσέπτισολ (Inceptisol): Είναι πιο ανεπτυγμένα εδαφικά από την προηγούμενη κατηγορία αλλά υπολείπονται των άλλων εδαφικών κατηγοριών (Κ.Παυλόπουλος, 2011) και καταλαμβάνουν το 9,9% της παγκόσμιας κατανομής των εδαφών. Η τάξη

αυτή περιλαμβάνει μία ευρεία ποικιλία εδαφών, δηλαδή εδάφη με ελάχιστη μέχρι μέτρια εξέλιξη στα οποία εμφανίζονται ορίζοντες, οι οποίοι δεν απαιτούν μεγάλα χρονικά διαστήματα για το σχηματισμό τους και ταυτόχρονα δεν αποτελούν χαρακτηριστικό γνώρισμα άλλων εδαφικών τάξεων (Κ.Χαϊντούτη, 2006).

Το τυπικό Ινσεπτισόλ έδαφος έχει έναν ανώτερο ανοιχτόχρωμο, σχετικά φτωχό σε οργανικά στοιχεία ορίζοντα (ochric epipedon) πάνω σε ένα μέτρια εξαλλοιωμένο, ελαφρά πλούσιο σε άργιλο ή οξειδωμένο εδαφικό ορίζοντα (cambric horizon) και απαντάται σε όλα τα κλίματα και τις περιοχές.

Στον ελληνικό χώρο τα Ινσέπτισολ εμφανίζονται κυρίως σε λοφώδεις και ορεινές περιοχές, καθώς και σε περιοχές με γεωλογικές αποθέσεις νεότερες της πλειστοκαινής περιόδου. Τα εδάφη της τάξης των Ινσέπτισολ μπορούν να χαρακτηριστούν ως ανόργανα εδάφη με ιλυώδη ή λεπτόκοκκη μηχανική σύσταση. Είναι πλούσια σε αποσαθρωμένα ορυκτά και έχουν ικανοποιητική υγρασία που εξασφαλίζει στις καλλιέργειες το απαιτούμενο νερό για την ανάπτυξή τους (Κ.Χαϊντούτη, 2006).



Εικόνα 2: Εδαφική τομή Ινσέπτισολ (πηγή : USDA NRCS)

Ίστοσολ (Histosol): Είναι εδάφη πολύ πλούσια σε οργανικά στοιχεία με καλή ανάπτυξη επιφανειακού ορίζοντα, και σχηματίζονται σε επίπεδες περιοχές με πολύ υψηλό υδροφόρο ορίζοντα και σε μονίμως κεκορεσμένα εδάφη (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

Τα Ιστοσόλ καταλαμβάνουν λιγότερο από το 2% της παγκόσμιας κατανομής των εδαφών (Η.Eswaran, P.F Reich, 2005) και συνήθως συναντώνται στον Καναδά, στην Σκανδιναβία, στην δυτική Σιβηρική πεδιάδα, στην Σουμάτρα, στο Βόρνεο και στη Νέα Γουινέα, καθώς και σε μικρότερες εκτάσεις σε τμήματα της Ευρώπης, στο ανατολικό τμήμα της Ρωσίας, στην Φλόριντα και σε βαλτώδεις περιοχές (USDA-NRCS).



Εικόνα 3: Εδαφική τομή Ίστοσολ (πηγή: USDA NRCS)

Βέρτισολ (Vertisol): Τα Βέρτισολ καταλαμβάνουν περίπου το 2,5% της παγκόσμιας κατανομής των εδαφών. Χαρακτηριστικό τους γνώρισμα είναι η μεγάλη περιεκτικότητα σε άργιλο (>30%) (Κ.Χαϊντούτη, 2006), με μεγάλη εδαφοτομή (>0.5 μ) και χαρακτηρίζονται από εποχιακές βαθιές ρωγμές (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

Τα περισσότερα Βέρτισολ εμφανίζουν σκούρους χρωματισμούς ακόμα και αν το ποσό της οργανικής ουσίας που περιέχουν είναι χαμηλό (1-2%). Σχηματίζονται συνήθως σε ασβεστόλιθους ή βασικά πυριγενή πετρώματα (π.χ. βαλσάτες) και γενικά σε μητρικά υλικά πλούσια σε ασβέστιο και μαγνήσιο. Εμφανίζονται σε ποικίλες κλιματικές ζώνες, από υγρές μέχρι ξηρές και από εύκρατες μέχρι τροπικές. Σε κάθε περίπτωση όμως απαραίτητη προϋπόθεση σχηματισμού τους είναι η εναλλαγή υγρής και ξηρής - θερμής περιόδου. Εξαιτίας της μεγάλης περιεκτικότητάς τους σε άργιλο τα Βέρτισολ εμφανίζουν χαμηλή διηθητική ικανότητα, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα κατά την άρδευση τους (Κ.Χαϊντούτη, 2006).

Η επικρατούσα βλάστηση των Βέρτισολ, χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλία σε είδη χορταριών και από λίγους διάσπαρτους θάμνους (χορτολίβαδα), σε επίπεδες περιοχές ή στους πρόποδες λοφωδών περιοχών (Κ.Παυλόπουλος, 2011). Τα Βέρτισολ συναντώνται μεταξύ 50°B και 45°N του ισημερινού, ενώ χαρακτηριστικά παραδείγματα περιοχών που επικρατεί το Βέρτισολ είναι η ανατολική Αυστραλία, το οροπέδιο Ντέκαν στην Ινδία και τμήματα του ανατολικού Σουδάν, της Αιθιοπίας, της Κένυας, του Τσαντ, και το χαμηλότερο τμήμα του ποταμού Παρανά στην Νότια Αμερική, άλλες περιοχές που επικρατεί το Βέρτισολ είναι το νότιο τμήμα της πολιτείας του Τέξας, η κεντρική Ινδία, η νοτιοανατολική Νιγηρία, η Θράκη, η Νέα Καληδονία και τμήματα της ανατολικής Κίνας (USDA-NRCS).



Εικόνα 4: Εδαφική τομή Βέρτισολ (πηγή: USDA NRCS)

Μόλισολ (Mollisol): Τα Μόλισολ καταλαμβάνουν περίπου το 7% της παγκόσμιας κατανομής των εδαφών. Χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτής της τάξης είναι η ύπαρξη μολλικού επιπέδου, αλλά υπάρχουν και εδάφη με μολλικό επίπεδο τα οποία δεν ταξινομούνται ως Μόλισολ (Κ.Χαϊντούτη, 2006).

Τα εδάφη αυτά έχουν ένα πολύ καλά αναπτυγμένο επιφανειακό σκουρόχρωμο ορίζοντα πλούσιο σε κατιόντα (ασβέστιο κ.λπ.) οργανικά στοιχεία και άργιλο πάνω σε έναν αργιλικό Β ορίζοντα (Κ.Παυλόπουλος, 2011). Η κύρια εδαφογενετική διαδικασία σχηματισμού των Μόλισολ είναι η συσσώρευση οργανικών στοιχείων, η οποία προέρχεται από το πυκνό ριζικό σύστημα λειμώνιας βλάστησης και οδηγεί στο σχηματισμό μολλικού επιπέδου (Κ.Χαϊντούτη, 2006). Τα εδάφη αυτή της τάξης απαντώνται τόσο σε περιοχές με χαμηλό υψόμετρο όσο και σε αλπικά περιβάλλοντα (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

Σχηματίζονται σε ασβεστόχα μητρικά υλικά και η βλάστηση που συνήθως αναπτύσσεται είναι λειμώνια. Έχουν υψηλή γονιμότητα και κοκκώδη ή ψιχοειδή δομή, με αποτέλεσμα να είναι πολύ παραγωγικά εδάφη (Κ.Χαϊντούτη, 2006) κάτι που τα καθιστά από τις πιο οικονομικά σημαντικές εδαφικές τάξεις (USDA-NRCS).

Στο παρελθόν τα Μόλισολ ήταν αρκετά διαδεδομένα στον ελλαδικό χώρο και καταλάμβαναν μεγάλες εκτάσεις. Στη σημερινή εποχή όμως υπάρχουν σε μικρή έκταση, είτε λόγω της έντονης διάβρωσης που απομάκρυνε τον επιφανειακό ορίζοντα είτε εξαιτίας της υποβάθμισης του μολλικού επιπέδου με αποτέλεσμα τα εδάφη αυτά πλέον να χαρακτηρίζονται ως Έντισολ ή Ινσέπτισολ (Κ.Χαϊντούτη, 2006).



Εικόνα 5: Εδαφική τομή Μόλιisol (πηγή: USDA NRCS)

Αρίντισολ (Aridisol): Αποτελούν χαρακτηριστικά εδάφη των ερημικών και υποερημικών περιοχών όπου οι βροχοπτώσεις δεν είναι ικανές να απομακρύνουν τα ευδιάλυτα κατιόντα με αποτέλεσμα να συγκεντρώνονται σχηματίζοντας υποεπιφανειακούς ορίζοντες πλούσιους σε ασβεστίτη, ή γύψο. Οι ορίζοντες αυτοί εμφανίζονται τσιμεντοποιημένοι σε μορφή ευμεγεθών συγκριμάτων ή συνεχών στρωμάτων και συνήθως απαντώνται σε περιοχές με ήπιες μορφολογικές κλίσεις (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

Τα Αρίντισολ χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλή συγκέντρωση οργανικών στοιχείων, γεγονός που αντικατοπτρίζει την έλλειψη φυτικών οργανισμών σε αυτά τα εδάφη όπου βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η έλλειψη νερού (USDA-NRCS).



Εικόνα 6: Εδαφική τομή Αρίντισολ (πηγή: USDA NRCS)

Σπόντοσολ (Spodosol): Τα Σπόντοσολ καταλαμβάνουν περίπου το 4% της παγκόσμιας κατανομής των εδαφών (USDA-NRCS, 2003). Το χαρακτηριστικό αυτών των εδαφών είναι ο υποεπιφανειακός ορίζοντας Β, ο οποίος είναι πολύ πλούσιος σε οξείδια του αργιλίου, του σιδήρου και σε οργανικά στοιχεία. Συνήθως είναι σκουρόχρωμος και πλούσιος σε χαλαζιακή άμμο και δεν περιέχει ευδιάλυτα κατιόντα. Υπόκειται ενός εκπλυμένου, ανοιχτόχρωμου σχεδόν λευκού και αμμούχου ορίζοντα.

Τα Σπόντοσολ δημιουργούνται πολύ γρήγορα σε λοφώδεις ή επίπεδες περιοχές με υγρό κλίμα και συνήθως χαρακτηρίζονται από δάση κωνοφόρων ή και μερικών αειθαλών δέντρων. Απαντώνται κυρίως σε εύκρατες αλλά και σε τροπικές και πολικές περιοχές (Κ.Παυλόπουλος, 2011).



Εικόνα 7: Εδαφική τομή Σπόντοσολ (πηγή: USDA NRCS)

Άλφισολ (Alfisol): Τα Άλφισολ καταλαμβάνουν περίπου το 10% της επιφάνειας της γης και απαντώνται σε όλες τις ηπείρους εκτός της Ανταρκτικής. Στην τάξη αυτή ανήκουν εδάφη τα οποία βρίσκονται σε προχωρημένο στάδιο εδαφογένεσης.

Χαρακτηριστικό των εδαφών της τάξης των Άλφισολ τα οποία περιλαμβάνουν ορίζοντες Α, Β και Ο είναι η ύπαρξη αργιλικού ορίζοντα (πλούσιος σε αργιλικά κατιόντα), ο οποίος σχηματίζεται από αλλουβιακή συγκέντρωση της αργίλου στους κατώτερους ορίζοντες της εδαφικής κατατομής. Γενικά τα Άλφισολ είναι παραγωγικά εδάφη. Η σωστή διαχείριση των εδαφών αυτών έγκειται στην ωφέλιμη χρήση της εδαφικής υγρασίας και των θρεπτικών συστατικών, χωρίς να οδηγούνται σε διάβρωση και εξάντληση των θρεπτικών τους στοιχείων. Επειδή είναι εδάφη μετρίως όξινα, συχνά θεωρείται απαραίτητη η προσθήκη ανθρακικού ασβεστίου ή οξειδίου του ασβεστίου για βελτίωση του pH και αύξηση της παραγωγής (Κ.Χαϊντούτη 2006).

Παραδείγματα περιοχών που επικρατούν τα Άλφισολ είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Οχάιο στις ΗΠΑ, το νότιο τμήμα της δυτικής Ευρώπης, οι Βαλτικές χώρες και η κεντρική Ρωσία, καθώς και οι άνυδρες περιοχές της Ινδικής υποηπείρου και αρκετά τμήματα της Λατινικής Αμερικής.



Εικόνα 8: Εδαφική τομή Άλφισολ (πηγή: USDA NRCS)

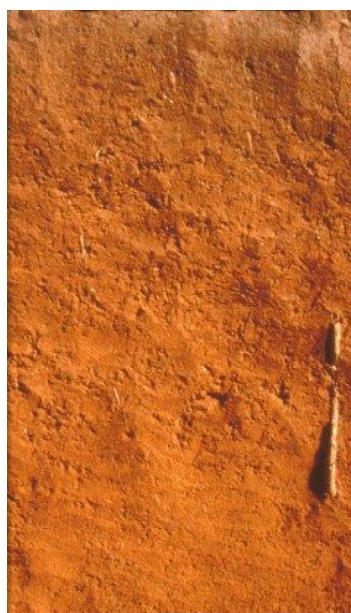
Ούλτισολ (Ultisol): Τα εδάφη της τάξης των Ούλτισολ μοιάζουν με τα Άλφισολ αλλά δεν περιέχουν καθόλου βασικά κατιόντα (π.χ. ασβέστιο, κάλιο). Ως εκ τούτου δεν έχουν καθόλου ασβεστιτικά ορυκτά και τα αργιλικά του ορίζοντα Β είναι συνήθως καολινίτης, ενώ η ύπαρξη γιββσίτη (υδροξείδιο του αργιλίου) υποδεικνύει ισχυρά εξαλλοιωμένα εδάφη και μεγάλη περίοδο εδαφογένεσης (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

Τα Ούλτισολ είναι γνωστά σαν κοκκινόχωμα (red clay soil) και τυπικά παρουσιάζουν μεγάλη οξύτητα, με pH χαμηλότερο του 5. Περιοχές που επικρατούν τα Ούλτισολ είναι νότιο τμήμα των ΗΠΑ, η νοτιοανατολική Κίνα, και άλλες υποτροπικές και τροπικές περιοχές, το βόρειο όριο εμφάνισης αυτής της τάξης εδαφών (εκτός αυτών σε απολιθωμένη κατάσταση) είναι έντονα καθορισμένα στην βόρεια Αμερική και ταυτίζονται με τα όρια της μέγιστης παγετοποίησης κατά την γεωλογική περίοδο του Πλειστόκαινου (USDA-NRCS).



Εικόνα 9: Εδαφική τομή Ούλτισολ (πηγή: USDA NRCS)

Όξισολ (Oxisol): Τα εδάφη της τάξης Όξισολ είναι γνωστά για την παρουσία τους σε τροπικά δάση, 15° - 25° βόρεια και νότια του ισημερινού. Τα Όξισολ δημιουργούνται κυρίως λόγω της αποσάθρωσης, της αποσύνθεσης έμβιων οργανισμών καθώς και της ανάδευσης που προέρχεται από τις δραστηριότητες ζωικών οργανισμών (USDA-NRCS). Αποτελούν βαθιά και ισχυρά αλλοιωμένα εδάφη με ομοιογενή εδαφοτομή και ολικά εκπλυμένα από κατίοντα. Είναι πολύ πλούσια σε καολινιτική άργιλο και οξειδία του αργιλίου και σιδήρου, και το χρώμα τους είναι συνήθως ερυθρωπό ή κιτρινωπό (Κ.Παυλόπουλος, 2011). Στην σήμερον ημέρα τα Όξισολ συναντώνται σχεδόν αποκλειστικά σε τροπικές περιοχές , στην Λατινική Αμερική και στην Αφρική (USDA-NRCS).



Εικόνα 10: Εδαφική τομή Όξισολ (πηγή: USDA NRCS)

2. Διάβρωση του εδάφους

Διάβρωση είναι γενικά η αέναη διαδικασία μεταφοράς των προϊόντων της αποσάθρωσης, είτε ως ασύνδετο κλαστικό υλικό είτε ως διαλυμένα άλατα στο νερό από τους χώρους παραγωγής προς τη θάλασσα. Ενδιάμεσα το υλικό μπορεί να «φιλοξενηθεί» πρόσκαιρα και περιστασιακά σε λεκάνες της χέρσου (οροπέδια, πεδιάδες). Η μεταφορά γίνεται κυρίως μέσω των υδρογραφικών δικτύων που αποστραγγίζουν μία περιοχή, αλλά και τον άνεμο, τους παγετώνες και τη βαρύτητα (Δ.Ι.Παπανικολάου και Χρ.Ι.Σιδέρης, 2014). Η διάβρωση της γήινης επιφάνειας είναι φαινόμενο που εμφανίστηκε από τότε που η γη στερεοποιήθηκε (Κ.Παυλόπουλος, 2011). Υπάρχουν διαφορετικές μορφές διάβρωσης ανάλογα με τις κινητήριες δυνάμεις από τις οποίες προκαλούνται (Mitasova et al., 2013):

- Υδατική διάβρωση
- Αιολική διάβρωση
- Παράκτια διάβρωση
- Βαρυτική διάβρωση (κατολισθήσεις, ροές κορημάτων)
- Παγετωνική διάβρωση

Η διάβρωση του εδάφους υπό την επίδραση του νερού (υδατική), περιλαμβάνει ένα σύνολο από φυσικές και μηχανικές διεργασίες και αποτελεί ευρέως διαδεδομένο πρόβλημα σε πολλές χώρες. Η διάβρωση είναι μέρος μιας φυσικής διαδικασίας που οδηγεί στην ομαλοποίηση του ανάγλυφου σε αντίθεση με τις διαδικασίες ορογένεσης. Η διάβρωση αυτή ονομάζεται φυσική σε αντιδιαστολή με την "επιταχυνόμενη" ή ανθρωπογενή διάβρωση, που οφείλεται κυρίως στις ανθρώπινες παρεμβάσεις στη φύση (υποβάθμιση ή πλήρη καταστροφή των δασών, σε ακατάλληλες καλλιεργητικές πρακτικές ή άλλες αγροτικές δραστηριότητες και σε επεμβάσεις στο φυσικό ανάγλυφο ή την κάλυψη του εδάφους).

Με δεδομένη την πολύ αργή διαδικασία δημιουργίας του εδάφους, οποιαδήποτε απώλεια εδάφους με ρυθμό μεγαλύτερο από 1 ton/ha/yr θεωρείται μη αναστρέψιμη για ένα διάστημα 50-100 ετών (Huber et al., 2008).

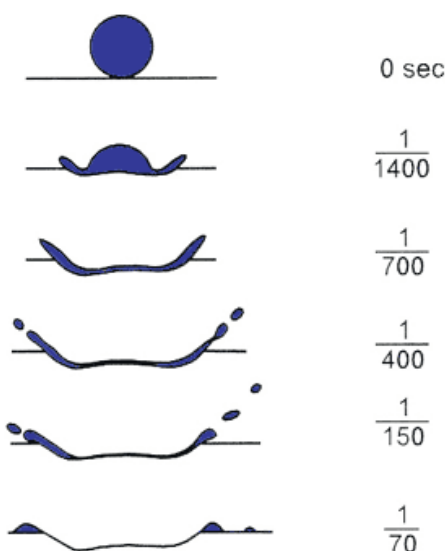
Χαρακτηριστικό της διαδικασίας της διάβρωσης είναι το μεγάλος εύρος στις εντάσεις εξέλιξης του φαινομένου. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατό σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, από μερικά λεπτά ως μερικές ώρες να διαβρωθεί έδαφος το οποίο για να δημιουργηθεί χρειάστηκαν εκατοντάδες χρόνια.

Η διάβρωση των εδαφών είναι ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά ζητήματα και προκαλεί αλυσιδωτά οικολογικά και κοινωνικοοικονομικά προβλήματα. Τα πιο εμφανή άμεσα προβλήματα που προκύπτουν είναι η μείωση της παραγωγικότητας και η επιτάχυνση της ερημοποίησης. Παράπλευρες επιπτώσεις του φαινομένου της διάβρωσης πέραν της απώλειας γονιμότητας στο σημείο όπου συμβαίνει, είναι η μείωση της αξίας της γης στο σημείο στο οποίο έχουμε απώλεια εδάφους, πιθανή ρύπανση στο σημείο απόθεσης, ιδιαίτερα όταν αυτό είναι υδάτινος αποδέκτης, λόγω μεταφοράς συσσωρευμένων αγροτοχημικών και λιπασμάτων, καταστροφές σε υποδομές, αρνητικές επιπτώσεις στα φυσικά ενδιαίτηματα και κατά συνέπεια στη βιοποικιλότητα (LIFE ENV/GR/000278 So.S., 2011).

Η υδατική διάβρωση ξεκινάει με την έναρξη της βροχής, καθώς οι βροχοσταγόνες πέφτουν και αποσπούν εδαφικά τεμαχίδια, τα οποία είτε παραμένουν αποκολλημένα στην αρχική τους θέση, είτε εξαιτίας της κρούσης των σταγόνων νερού μετατοπίζονται. Η διάβρωση επιταχύνεται όταν ο ρυθμός προσθήκης νερού στο έδαφος είναι μεγαλύτερος από τη διηθητικότητα (infiltration) του εδάφους και όταν γεμίσουν οι φυσικές κοιλότητες που μπορούν να συγκρατήσουν νερό, αυτό αρχίζει να ρέει επιφανειακά (run-off, απορροή).

Η ικανότητα της βροχόπτωσης να προκαλέσει επιφανειακή διάβρωση εξαρτάται από δύο κύριους παράγοντες (Κ.Παυλόπουλος, 2011):

- Ο πρώτος αναφέρεται στο διαχωρισμό και διασπορά των σωματιδίων της επιφάνειας από την κρουστική δύναμη των σταγόνων της βροχής.
- Ο δεύτερος παράγοντας σχετίζεται με την ικανότητα του νερού μέσω της επιφανειακής απορροής για τη μεταφορά σωματιδίων. Αν δεν υπήρχε απορροή, δεν θα υπήρχε διάβρωση.



Σχήμα 6: Σχηματική αναπαράσταση της δράσης της σταγόνας στην εδαφική διάβρωση σε σχέση με τον χρόνο (πηγή: Κ.Παυλόπουλος, 2011)

Η απορροή είναι αποτέλεσμα διάφορων συνθηκών. Οι παράγοντες που συμμετέχουν στην εμφάνιση του φαινομένου συμπυκνώνονται στην ικανότητα του εδάφους να απορροφά την βροχή και να αποστραγγίζει το νερό. Το φαινόμενο αυτό συνδέεται με την ικανότητα διήθησης (infiltration capacity), η οποία είναι η δυνατότητα εισχώρησης του νερού μέσα στο έδαφος (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

Ο ρυθμός ή έκταση του φαινομένου της διάβρωσης των εδαφών εξαρτάται από παράγοντες, όπως (Συλλαίος et al., 2007):

- Η ένταση και η ποσότητα της βροχής
- Η τοπογραφία, δηλαδή η κλίση και το μήκος κλίσης του αναγλύφου
- Η φυτοκάλυψη (ποσοστό φυτοκάλυψης, είδος φυτοκάλυψης)

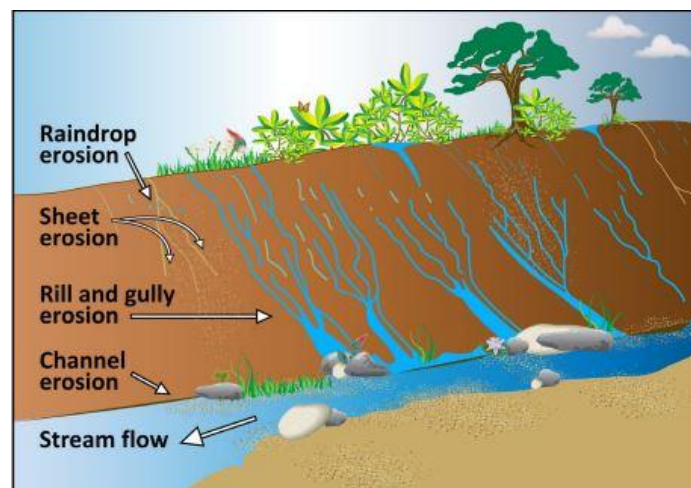
- Η σταθερότητα των εδαφικών συσσωματωμάτων ή αλλιώς η αντίσταση του εδάφους στη διάβρωση (π.χ. περιεκτικότητα αργίλου, οργανικών ουσιών)
- Η ικανότητα του εδάφους να απορροφά και να συγκρατεί το νερό (όσο μικρότερη η ικανότητα αυτή τόσο αυξάνεται η επιφανειακή απορροή)
- Η ανθρώπινη δραστηριότητα, δηλαδή οι γεωργικές πρακτικές (η άρδευση, η κατεργασία του εδάφους κ.λπ.)

2.1 Τύποι υδατικής διάβρωσης

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους, την τοπογραφία και τα χαρακτηριστικά της βροχής, η διάβρωση εμφανίζεται με διάφορες μορφές. Κατά τη διάρκεια της βροχοπτώσης η κάθε σταγόνα με την κινητική της ενέργεια (μέγεθος - ταχύτητα) προσκρούει και σπάει τα εδαφικά συσσωματώματα και είτε προκαλεί άμεση αναπήδηση των εδαφικών τεμαχιδίων, είτε τα θέτει σε αιώρηση και τα μεταφέρει χαμηλότερα με τη ροή.

Η υδατική διάβρωση κατηγοριοποιείται ως εξής :

- Επιφανειακή διάβρωση (sheet erosion)
- Ρυακοειδής- Αυλακωτή διάβρωση (rill erosion)
- Χαραδρωτή διάβρωση (gully erosion)
- Ενδο-ρυακοειδής διάβρωση (inter-rill erosion)
- Υπόγεια διάβρωση (underground erosion)
- Διάβρωση διασποράς (splash erosion)



Σχήμα 7: Τύποι υδατικής διάβρωσης (πηγή: N.Evelpidou,T.Gournelos)

Η επιφανειακή ή διάβρωση κατά στρώσεις (sheet, interrill erosion) οφείλεται κυρίως στις κρούσεις των σταγόνων της βροχής, ενώ οι πιο έντονες μορφές όπως η αυλακωτή (rill) και η χαραδροειδής (gully) διάβρωση, οφείλονται κυρίως στην επιφανειακή απορροή του νερού. Οι περισσότερες από τις μορφές της υδατικής διάβρωσης δεν εμφανίζονται απαραίτητως μόνες τους και γενικότερα, επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά του αναγλύφου καθώς επίσης και των βροχοπτώσεων (Ξανθάκης, 2011).

1. Επιφανειακή – διάβρωση κατά στρώσεις (sheet erosion)

Επιφανειακή διάβρωση συνιστά το πρώτο στάδιο κάθε τύπου διάβρωσης, και αποτελεί την ομοιόμορφη απομάκρυνση μίας λεπτής στρώσης εδάφους εξαιτίας της επίδραση της επιφανειακής απορροής υπό την ύπαρξη κλίσης. Το ποσό του εδάφους που αποκολλάται είναι μικρό , αλλά με την ροή κατά μήκους της κεκλιμένης επιφάνειας αυτό αυξάνεται και τότε μετατρέπεται σε αυλακωτή διάβρωση (rill erosion) (K.Arora, 2003; R.Suresh,2000).

Η κινητική ενέργεια των λεπτών υδάτινων ρευμάτων είναι μικρή και είναι σε θέση να αποπλύνει από την επιφάνεια μόνο τα πιο λεπτομερή προϊόντα της αποσάθρωσης (Κ.Παυλόπουλος, 2011). Η επιφανειακή διάβρωση είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη, καθώς μπορεί να μη γίνει άμεσα αντιληπτή (LIFE ENV/GR/000278 So.S., 2011). Επιπλέον, η ροή του νερού δημιουργεί αβαθή ρυάκια, τα οποία με την πάροδο του χρόνου βαθαίνουν και διαμορφώνουν τα πράνη τους (Πασχαλίδης, 2015)



Εικόνα 11: Επιφανειακή διάβρωση (sheet erosion), με μεταφορά εδαφικού υλικού από όλη την επιφάνεια του εδάφους (πηγή: LIFE ENV/GR/000278 So.S., 2011)

2. Ρυακοειδής – Αυλακωτή διάβρωση (rill erosion)

Πρόκειται για ένα επόμενο στάδιο της κλίμακας έντασης του φαινομένου της διάβρωσης και είναι αποτέλεσμα της συγκέντρωσης των επιφανειακών νερών (από την επιφανειακή- φυλλοειδή διάβρωση) σε βαθύτερα και ταχύτερης ροής μικρά κανάλια ή ρυάκια (Κ.Paulopoulos, 2011). Διαφέρει από την επιφανειακή διάβρωση ως προς την ελαφρώς αυξημένη κρίσιμη τιμή της ταχύτητας ροής και την διαβρωτική δύναμη (Συλλαίος et al., 2007). Επακόλουθο της αύξησης της ταχύτητας ροής είναι η απόσπαση κόκκων (σωματιδίων) του εδάφους και η απόπλυση των καναλιών σε βάθος μεγαλύτερο των 30cm (Κ.Παυλόπουλος, 2011).

Το φαινόμενο μπορεί να μην εύκολα παρατηρήσιμο σε περιοχές μόνιμης ή εποχικής καλλιέργειας, καθώς οι συνήθεις καλλιεργητικές πρακτικές «σβήνουν» τα ίχνη διάβρωσης, αλλά η απώλεια εδάφους έχει συμβεί και επιπλέον το καλλιεργημένο έδαφος είναι ευαίσθητο σε νέα φάση διάβρωσης (LIFE ENV/GR/000278 So.S., 2011), μπορεί όμως να γίνει έμμεσα αντιληπτό, με τον εντοπισμό συσσωρευμένων μεταφερμένων υλικών στη βάση της κλιτύς (Κ.Παυλόπουλος, 2011).



Εικόνα 12: Αυλακωτή διάβρωση (rill erosion) σε επικλινή εδάφη (πηγή: LIFE ENV/GR/000278 So.S., 2011)

3. Χαραδρωτική διάβρωση (gully erosion)

Κατά την διάρκεια έντονων καταιγίδων σε περιοχές όπου έχουν μεγάλες μορφολογικές κλίσεις η διάβρωση των εδαφικών σχηματισμών είναι εντονότερη και σχηματίζονται χαραδροειδή κανάλια μεγάλου βάθους και μεγάλου πλάτους σε σύντομο χρονικό διάστημα. Το νερό εμπλουτίζεται από εδαφικά υλικά και ροές κορημάτων, γεγονός που αυξάνει την κινητική του ενέργεια, δημιουργώντας έτσι εντονότερη διάβρωση και καταστροφές κατά μήκος του χαραδρωτού καναλιού (N.Evelpidou και A.Vassilopoulos, 2009). Το βάθος μιας τυπικής χαραδρωτικής διάβρωσης κυμαίνεται από 0.5m έως 25m με 30m (Πασχαλίδης, 2015). Οι χαραδρώσεις αυτές είναι ιδιαίτερα ασταθείς και υγρές και πολύ συχνά οδηγούν στην αποκοπή του εδάφους με ταχύτατους ρυθμούς, ιδιαίτερα σε ορεινές περιοχές (Μπαθρέλος et al., 2010)

Έλάχιστα μοντέλα υπολογισμού της διάβρωσης των εδαφών λαμβάνουν υπόψιν αυτόν τον τύπο διάβρωσης, λόγω των δυσκολιών που παρουσιάζει η μοντελοποίηση των διαστάσεων της χαραδρωτικής διάβρωσης (gully erosion) (V.Jetten και D.T. Favis-Mortlock, 2006).



Εικόνα 13: Χαραδρωτική διάβρωση στην Βρετανία (πηγή: Daily Mail)

4. Ενδο-ρυακοειδής διάβρωση (Inter-rill erosion)

Είναι η μετακίνηση του εδάφους από την κρούση των σταγόνων της βροχής και η μεταφορά του από «λεπτή» επιφανειακή απορροή της οποίας η διαβρωτική ικανότητα αυξάνεται λόγω των αναταράξεων που προκαλεί η κρούση των σταγόνων της βροχής. Η αποκόλληση των σωματιδίων του εδάφους λόγω της ενδο-ρυακοειδής διάβρωσης επηρεάζεται από την κάλυψη του εδάφους που παρέχεται από τους φυτικούς οργανισμούς καθώς και από τα κατάλοιπα τους (J.E. Gilley et al 1985).

Συχνά χρησιμοποιείται η έννοια της επιφανειακής διάβρωσης (sheet erosion) αντί της ενδο-ρυακοειδής (inter-rill erosion) σε αυτή την περίπτωση όμως παραλείπεται η δράση της βροχοσταγόνας και οδηγεί στην λανθασμένη εντύπωση ότι η απορροή συνήθως εμφανίζεται ως ένα ενιαίο «φύλλο» (Soil conservation AEM: Cornell University, 2010).

5. Υπόγεια διάβρωση (underground erosion)

Εμφανίζεται σε περιοχές όπου οι συνθήκες επιτρέπουν τη δημιουργία υπόγειων διόδων νερού. Συνήθως πρόκειται για εδάφη πλούσια σε άργιλο, όπου διευκολύνονται οι υπόγειες διαφυγές (Παναγούλια et al., 2006).

6. Διάβρωση διασποράς (splash erosion)

Η διάβρωση διασποράς προκαλείται από την πρόσκρουση των βροχοσταγόνων στο έδαφος και αναφέρεται στην αποκόλληση και μεταφορά μέσω εκτόξευσης μικρών τεμαχιδίων του εδάφους (Παναγούλια et al., 2006). Το μέγεθος αυτού του τύπου διάβρωσης είναι ανάλογο της έντασης των βροχοπτώσεων, ενώ η ταχύτητα των βροχοσταγόνων μπορεί να φτάσει τα 10 m/s (N.Evelpidou και A.Vassilopoulos, 2009).

2.2 Η διάβρωση ανά τον κόσμο

Σε παγκόσμιο επίπεδο, σχεδόν το 80% των αγροτικών εκτάσεων, εμφανίζει μέτρια έως υψηλή διάβρωση, ενώ το 10% εμφανίζει χαμηλή διάβρωση (Pimentel, 1993). Τα τελευταία 40 χρόνια εξαιτίας της διάβρωσης σχεδόν το 30% των εκτάσεων αυτών έχουν μετατραπεί σε μη παραγωγικές εκτάσεις με αποτέλεσμα ένα μεγάλο μέρος αυτών να εγκαταλειφθεί (Kendal και Pimentel, 1994). Επί του παρόντος το σύνολο των εκτάσεων (1.5 δισεκατομμύρια εκτάρια) που βρίσκονται υπό καλλιέργεια ισούται σχεδόν με τις εκτάσεις (2 δισεκατομμύρια εκτάρια) οι οποίες έχουν εγκαταλειφθεί ανά τα χρόνια από τότε που οι ανθρώπινοι πληθυσμοί άρχισαν να επιδίδονται σε καλλιεργητικές δραστηριότητες (Lal, 1990). Βάσει εκτιμήσεων, 10 εκατομμύρια εκτάρια καλλιεργήσιμης γης εγκαταλείπονται ετησίως λόγω της μείωσης της παραγωγικότητας του εδάφους που προκαλεί η διάβρωση (Faeth και Crosson 1994).

Αναλογικά τα μεγαλύτερα προβλήματα εξαιτίας της εδαφικής διάβρωσης αντιμετωπίζει η Κεντρική Αμερική και η Αφρική. Ωστόσο, όσον αφορά το συνολικό εμβαδό εκτάσεων που έχουν υποστεί διάβρωση προηγείται η Ασία, ακολουθούμενη από την Αφρική και την Ευρώπη. Οι απώλειες στην Αφρική, τη Λατινική Αμερική και την Ασία είναι 2-6 φορές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στην Ευρώπη και τη

Βόρεια Αμερική. Σύμφωνα με εκτιμήσεις του World Watch Institute σε χώρες όπως η Μαδαγασκάρη και η Κίνα ο συνδυασμός της αποψίλωσης των δασών και της γεωργικής δραστηριότητας σε εδάφη με μεγάλες κλίσεις οδηγούν σε απώλειες εδάφους που ξεπερνούν τους 80 τόνους ανά στρέμμα το χρόνο (LIFE ENV/GR/000278 So.S., 2011).

Σύμφωνα με, μια μελέτη του 1992 από το World Resources Institute και το Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών, σε μια περιοχή ίσης έκτασης μ' αυτή της Κίνας και της Ινδίας μαζί, το έδαφος έχει υποστεί σημαντική διάβρωση από το 1945. Από τη μελέτη αυτή, διαπιστώθηκε επίσης ότι το 15% περίπου των εκτάσεων της γης, παρουσίαζε τόσο μεγάλη διάβρωση εξαιτίας ενός συνδυασμού εντατικής βοσκής, αποψίλωσης των δασών και γεωργικών δραστηριοτήτων που δε σέβονται την οικολογική ισορροπία, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να καλλιεργηθεί, με τα δύο τρίτα των σημαντικά υποβαθμισμένων εδαφών να βρίσκονται στην Ασία και στην Αφρική.

Η παγκόσμια ζήτηση τροφίμων αυξάνεται κατακόρυφα, κάθε χρόνο πρέπει να εξασφαλίζουμε τροφή για 87 εκατομμύρια περισσότερους ανθρώπους με 24 δισεκατομμύρια μετρικούς τόνους (βάση εκτιμήσεων) λιγότερου επιφανειακού εδάφους, εξαιτίας της επιταχυνόμενης διάβρωσης. Η κατάσταση επιδεινώνεται καθώς πολλοί φτωχοί γεωργικοί πληθυσμοί στις αναπτυσσόμενες χώρες φυτεύουν εδάφη τα οποία είναι εύκολα διαβρώσιμα για να επιβιώσουν. Σύμφωνα με μια μελέτη των Ηνωμένων Εθνών που εκπονήθηκε το 1992, η κακή διαχείριση των αγροτικών εκτάσεων, κυρίως από φτωχούς αγρότες, ευθύνεται για το 70% περίπου της καταστροφής του εδάφους παγκοσμίως. Το 1995, ο ειδικός σε θέματα σχετικά με το έδαφος David Pimentel, εκτίμησε ότι η διάβρωση του εδάφους προκαλεί παγκοσμίως άμεσες ζημιές σε γεωργικές εκτάσεις και έμμεσες ζημιές σε υδάτινες οδούς, έργα υποδομής και στην ανθρώπινη υγεία, που υπολογίζονται σε 400 δισεκατομμύρια δολάρια, αξίας κατά μέσο όρο 46 εκατομμύρια δολάρια σε ζημιές ανά ώρα (G. Tyler Miller, 2004).

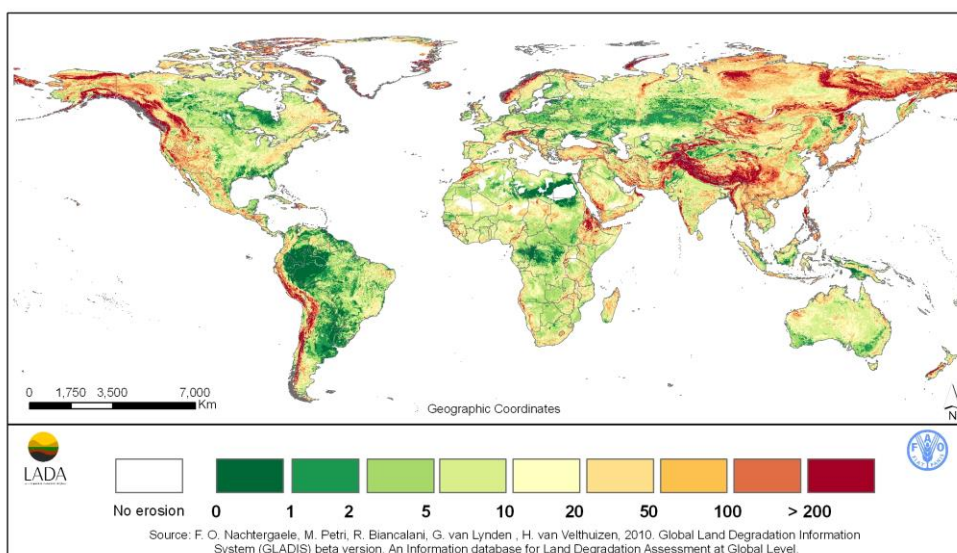
Στον Ισημερινό, τη Χιλή, το Περού, τη Βολιβία και την Κολομβία οι ετήσιες απώλειες εδάφους κυμαίνονται από 21 έως 57 τόνους ανά στρέμμα. Παρόμοια προβλήματα εμφανίζονται στην Κεντρική Αμερική και στη Τουρκία. Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο η υδατική διάβρωση υπολογίζεται ότι επηρεάζει το 16% της συνολικής έκτασης (χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η Ρωσική δημοκρατία) και για αυτόν τον λόγο θεωρείται από τις πιο διαδεδομένες μορφές διάβρωσης. Τα μεγαλύτερα προβλήματα εντοπίζονται στην Κεντρική Ευρώπη, τον Καύκασο και τη Μεσόγειο. Βάσει μελετών, η Ελλάδα και η Ουκρανία φαίνεται να καταλαμβάνουν τις δύο πρώτες θέσεις των χωρών που έχουν υποστεί κάποιου βαθμού διάβρωση, με ποσοστό μεγαλύτερο του 55% του συνολικού τους εδάφους (EEA, 2003).

Η περιοχή της Μεσογείου εμφανίζει ιδιαίτερη ευαισθησία στη υδατική διάβρωση, εξαιτίας του κλίματος. Πιο συγκεκριμένα οι μακρές περίοδοι ξηρασίας και υψηλών θερμοκρασιών που διακόπτονται από έντονες βροχοπτώσεις, σε συνδυασμό με το έντονο ανάγλυφο και τα εδάφη με μικρά ποσοστά φυτοκάλυψης και χαμηλά ποσοστά οργανικής ουσίας επιδεινώνουν τα αρνητικά αποτελέσματα της υδατικής δράσης. Άλλοι παράγοντες που ευνοούν τη διάβρωση συνδέονται άμεσα με την υιοθέτηση ακατάλληλων γεωργικών πρακτικών (όπως υπερβολική άρδευση,

κάψιμο φυτικών υπολειμμάτων, αγρανάπαυση χωρίς καλλιέργεια κάλυψης κλπ). Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, που εντείνει το πρόβλημα της διάβρωσης του εδάφους και που εμφανίζεται με μεγάλη συχνότητα στα Μεσογειακά οικοσυστήματα είναι οι δασικές πυρκαγιές, που επηρεάζουν τόσο τις ορεινές και ημιορεινές δασικές εκτάσεις, αλλά εξαιτίας των αυξημένων απορροών επηρεάζουν και τις πεδινές εκτάσεις (LIFE ENV/GR/000278 So.S., 2011).

Η διάβρωση του εδάφους στις χώρες της κεντρικής και βόρειας Ευρώπης είναι μικρότερη, εξαιτίας των λιγότερο διαβρωτικών χαρακτηριστικών των βροχοπτώσεων και του μεγαλύτερου ποσοστού φυτοκάλυψης, εξαίρεση αποτελούν οι αρόσιμες εκτάσεις και ιδιαίτερα οι εκτάσεις με πηλώδη εδάφη (Biielders et al., 2003).

Ο ακόλουθος χάρτης συνοψίζει την κατάσταση αναφορικά με την παγκόσμια υδατική εδαφική διάβρωση (Χάρτης 1).

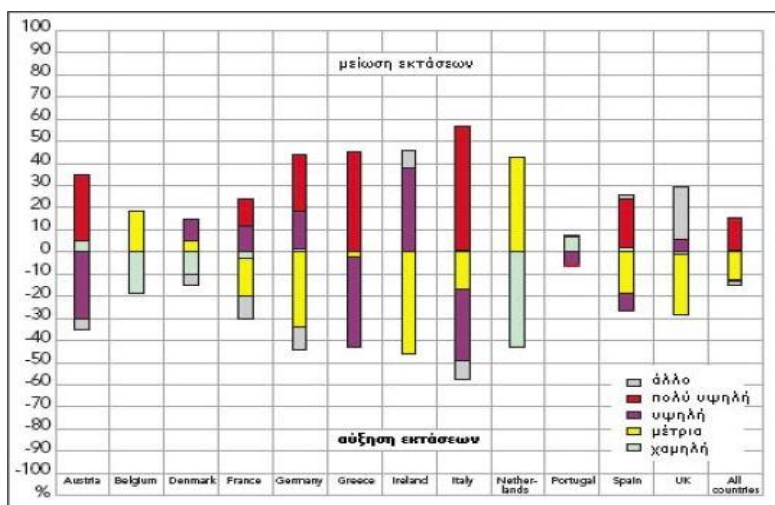


Χάρτης 1: Παγκόσμιος χάρτης εδαφικών απωλειών υπό την υδατική επίδραση ($tha^{-1}y^{-1}$) όπως προέκυψε με την εφαρμογή του μοντέλου USLE (πηγή: FAO, 2010)

Ορισμένοι επικριτές υποστηρίζουν ότι δεν υπάρχει ακριβής τρόπος μέτρησης της παγκόσμιας διάβρωσης του εδάφους και ότι οι εκτιμήσεις της διάβρωσης, του περιβαλλοντικού κόστους καθώς και των επιπτώσεων στην δημόσια υγεία που προκύπτουν είναι υπερβολικές. Διάφοροι είναι οι ερευνητές που συμφωνούν λέγοντας ότι, μόνο πρόχειρες εκτιμήσεις είναι εφικτές, αλλά διατείνονται ότι αυτές οι εκτιμήσεις από πολυάριθμες πηγές δείχνουν μια εντεινόμενη και ανησυχητική αύξηση της διάβρωσης του εδάφους (G. Tyler Miller, 2004).

Στο σχήμα 8 εμφανίζεται ένα σενάριο για τις μεταβολές των αγροτικών εκτάσεων σαν αποτέλεσμα της υδατικής διάβρωσης σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες για το διάστημα 1990-2050. Εξαιτίας της φύσης του φαινομένου της διάβρωσης, δεν υφίσταται κάποια ολοκληρωμένη μέθοδος προσέγγισης, η οποία αποτιμά την εξέλιξη του φαινομένου για όλη την έκταση της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Επομένως, το παρόν σενάριο, βασίζεται σε παραδοχές με καθολική ισχύ και αναδεικνύει αύξηση του κινδύνου της υδατικής διάβρωσης στο 80% των αγροτικών εκτάσεων των

χωρών της ΕΕ υπό την επίδραση της κλιματικής αλλαγής (LIFE ENV/GR/000278 So.S., 2011).



Σχήμα 8: Εκτίμηση μεταβολής αγροτικών εκτάσεων ευρωπαϊκών χωρών λόγω υδατικής διάβρωσης, για το διάστημα 1990-2050, ως ποσοστό επί της συνολικής χερσαίας επιφάνειας (πηγή: EEA-UNEP, 2000)

2.3 Το πρόβλημα της διάβρωσης των εδαφών στην Ελλάδα

Οι φυσικές, εδαφικές, γεωλογικές, γεωμορφολογικές, τοπογραφικές και κλιματολογικές συνθήκες της Ελλάδας ευνοούν την ανάπτυξη όλων των μορφών διάβρωσης. Τα ελληνικά εδάφη είναι από τα πιο ευαίσθητα στη διάβρωση εδάφη στον κόσμο για τους εξής λόγους (Χ.Γρηγοράκης, 1967, Πάνου, 1982, Η.Παρούσης, Σ.Αλεξανδρή και Α.Σιμόνης, 1990):

- 1) Περιέχουν οργανική ουσία σε χαμηλό ποσοστό, το οποίο:
 - Δεν ευνοεί τη δημιουργία ανθεκτικών εδαφικών συσσωματωμάτων στην διαβρωτική ικανότητα των σταγόνων του νερού της βροχής.
 - Δεν βελτιώνει τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους (υδατοδιαθετικότητα, υδατοχωρητικότητα και άλλα).
- 2) Τα ψαθυρά γεωλογικά υλικά, που υπάρχουν στα περισσότερα ελληνικά εδάφη
- 3) Το ανάγλυφο του ορεινού όγκου των ελληνικών εδαφών με τις πυκνές και μεγάλες κλίσεις που υπάρχουν
- 4) Η ξηρότητα του κλίματος σε συνδυασμό με τις ραγδαίες και καταρρακτώδεις βροχές.

Στην Ελλάδα, υπάρχει μεγάλη πίεση από την αστικοποίηση, δηλαδή αλλαγή της χρήσης γης από αγροτική σε αστική, ενώ υπάρχει ταυτόχρονα και ζήτηση για αγροτική γη, τόσο για τυπικές καλλιέργειες όσο και εγκαταστάσεις εντατικής παραγωγής αγροτικών προϊόντων (π.χ. θερμοκήπια), ενώ μία επιπλέον πίεση ασκείται και από την οικοδόμηση παραθεριστικών κατοικιών.

Εκτός από τους ανωτέρω λόγους υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επιταχύνουν τη διάβρωση του εδάφους στη χώρα μας, όπως είναι η περιορισμένη χρήση κοπριάς και άλλων οργανικών λιπασμάτων (χλωρή λίπανση, χρήση διαφόρων φυτικών υπολειμμάτων, αξιοποίηση των αστικών λυμάτων και άλλα), η χρήση βαρέων μηχανημάτων, η ανεπαρκής κάλυψη του εδάφους, η μονοκαλλιέργεια επί σειρά ετών, η σπορά σιτηρών στις ορεινές κλιτύες καθώς επίσης η υπερβόσκηση και οι συχνές πυρκαγιές που παρατηρούνται στους βοσκότοπους και τα δάση (Μ.Βιδάλη, 2013). Στην Ελλάδα η διάβρωση του είναι ο κύριος παράγοντας υποβάθμισης του εδάφους επηρεάζοντας το 1/3 της εδαφικής μάζας, το 26.5% της συνολικής επιφάνειας, δηλαδή έκταση 35 εκατομμυρίων στρεμμάτων, εμφανίζει έντονη επιφανειακή, αυλακωτή και χαραδρωτική διάβρωση (Παπαϊωάννου και Τάντος, 2006).

3. Εκτίμηση της διάβρωσης του εδάφους

Η αναγνώριση των χωρικών προτύπων του φαινομένου της εδαφικής διάβρωσης βοηθά στην κατανόηση του προβλήματος και τελικά στον αποτελεσματικό έλεγχο του. Μέχρι το 1900 οι επιστήμονες που ασχολούνταν με την εδαφική διάβρωση αντιμετώπιζαν το θέμα τοπικά, με μετρήσεις σε πειραματικές επιφάνειες (Van Rompaey et. al., 2003). Κατόπιν δημιουργήθηκε η ανάγκη της εκτίμησης της εδαφικής διάβρωσης σε διαφορετικές κλίμακες. Η προσέγγιση αυτή απαιτούσε τη χρήση μοντέλων. Την τάση αυτή ενίσχυε και η συνεχώς αυξανόμενη διαθεσιμότητα κλιματικών και τοπογραφικών δεδομένων σε ψηφιακή μορφή, που με τη βοήθεια των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, κάλυπταν ευρύτερες περιοχές.

Για την εκτίμηση της διάβρωσης του εδάφους μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες προσεγγίσεις. Αυτές μπορούν αρχικά να διακριθούν ως προς την βάση τους, σε εμπειρικές και μοντελοποιημένες προσεγγίσεις (J.M van der Knijff et al., 1999). Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται οι ιδιότητες αυτών των διαφορετικών προσεγγίσεων.

3.1 Προσεγγίσεις βασισμένες σε εμπειρικές μεθόδους

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εμπειρικής μεθόδου είναι η χαρτογράφηση της επικινδυνότητας της εδαφικής διάβρωσης στην Δυτική Ευρώπη από τον De Ploey (1989), παρουσιάζοντας περιοχές στις οποίες οι διαδικασίες διάβρωσης θεωρούνται σημαντικές. Ένα μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι δεν ορίζονται ξεκάθαρα τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό των περιοχών που εμφανίζουν επικινδυνότητα στην εδαφική διάβρωση (Yassoglou et al. 1998).

Η χρήση βαθμονόμησης παραγόντων που επηρεάζουν την επικινδυνότητα διάβρωσης του εδάφους αποτελεί μία άλλη προσέγγιση. Ένα παράδειγμα αποτελεί η εκτίμηση της επικινδυνότητας διάβρωσης του εδάφους CORINE για την περιοχή της Μεσογείου (CORINE, 1992). Η μεθοδολογία που επιλέχθηκε να ακολουθηθεί στο πρόγραμμα CORINE, είναι μία παραλλαγή της μεθόδου USLE (Universal Soil Loss Equation - Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας) (LIFE ENV/GR/000278 So.S., 2011).

Σύμφωνα με την παραπάνω μεθοδολογία, η εκτίμηση του κινδύνου διάβρωσης γίνεται σε δύο στάδια (A.Giordano και D.J Briggs, 1995):

- Εκτιμάται ο δυνητικός κίνδυνος διάβρωσης (potential erosion risk), ο οποίος βασίζεται στην εκτίμηση δεικτών διαβρωσιμότητας του εδάφους, διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης και της κλίσης του εδάφους. Η εκτίμηση αυτή εκφράζει την επιδεκτικότητα του εδάφους να υποστεί διάβρωση, ανεξάρτητα από τη χρήση και τη μεταχείρισή του και εκφράζει την χειρότερη δυνατή περίπτωση (worst case scenario).
- Εκτιμάται ο πραγματικός κίνδυνος διάβρωσης, λαμβάνοντας υπόψη τις χρήσεις γης και τις πρακτικές διαχείρισης. Η εκτίμηση αυτή εκφράζει την προσαρμογή της μεθόδου εκτίμησης του δυνητικού κινδύνου διάβρωσης ώστε να εμπεριέχεται η επίδραση της κάλυψης γης.

Η ανάλυση αυτή βασίστηκε στη βαθμονόμηση τεσσάρων δεικτών, την εδαφική διαβρωσιμότητα (4 κλάσεις), την διαβρωτικότητα της βροχής (3 κλάσεις) και την γωνία κλίσης (4 κλάσεις). Οι βαθμοί των παραγόντων πολλαπλασιάζονται, και δίνουν έναν συνδυαστικό βαθμό, ο οποίος αντιπροσωπεύει την πιθανή επικινδυνότητα διάβρωσης του εδάφους. Τέλος για την εκτίμηση της πραγματικής επικινδυνότητας, χρησιμοποιείται ένας επιπλέον δείκτης, αυτός της κάλυψης γης (2 κλάσεις).

Ο Montier (1998) ανέπτυξε μία εμπειρική μέθοδο για όλη την έκταση της Γαλλίας. Όπως με τη μέθοδο CORINE, η μέθοδος βασίστηκε στην βαθμονόμηση δεικτών σχετικούς με την καλυψη γης (9 κλάσεις), την επιδεκτικότητα της επιφάνειας εδάφους στην αποξύρανση (4 κλάσεις), την γωνία κλίσης (8 κλάσεις) και την διαβρωσιμότητα του εδάφους (3 κλάσεις). Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό αυτής της προσέγγισης είναι ότι λαμβάνονται υπόψη οι διαφορετικοί τύποι διάβρωσης που λαμβάνουν χώρα σε περιοχές καλλιέργειας, σε ορεινές περιοχές και σε μεσογειακά εδάφη (Morgan, 1995). Έτσι λαμβάνεται υπόψη ως έναν βαθμό η αλληλεπίδραση μεταξύ του εδάφους, της βλάστησης, της κλίσης και του κλίματος (Mirco Grimm, 2002).

Το πρόβλημα με τις περισσότερες μεθόδους οι οποίες βασίζονται στην βαθμονόμηση, είναι ο τρόπος με τον οποίο καθορίζεται ο κάθε βαθμός. Επιπρόσθετα, η ταξινόμηση των δεδομένων (π.χ. η χρήση κλάσεων για τις κλίσεις οδηγούν σε απώλειες πληροφοριών) και τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορεί να βασίζονται στα όρια (εύρος) και στο πλήθος των κλάσεων. Στους παράγοντες θα πρέπει να αντιστοιχούν κάποια βάρη (βαθμός σημαντικότητας) σε αντίθετη περίπτωση θεωρείται ότι όλοι οι παραγόντες-δείκτες επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο το φαινόμενο, κάτι το οποίο δεν αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα (Morgan, 1995). Τέλος επειδή η βαθμονόμηση δεικτών παράγει ποσοτικές κλάσεις διάβρωσης των οποίων η ερμηνεία τους μπορεί να είναι δύσκολη.

3.2 Προσεγγίσεις βασισμένες σε μοντελοποιημένες μεθόδους

Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος διαθέσιμων μοντέλων για την εκτίμηση της διάβρωσης του εδάφους. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους. Ένας τρόπος ορισμού υποκατηγοριών είναι η χρήση μιας χρονικής κλίμακας με βάση την οποία χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα ορισμένα μοντέλα είναι σχεδιασμένα για την εκτίμηση μακροπρόθεσμων απωλειών του εδάφους, ενώ άλλα για την εκτίμηση της διάβρωσης που προκύπτει από μεμονομένα επείσοδια βροχοπτώσεων (event-based). Έναλλακτικά ένας άλλος χρήσιμος διαχωρισμός γίνεται μεταξύ των *εμπειρικών* και *φυσικών μοντέλων*. Η επιλογή του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί για την μελέτη της διάβρωσης του εδάφους εξαρτάται από τον σκοπό της μελέτης, τα διαθέσιμα δεδομένα, τον διαθέσιμο χρόνο καθώς και το κόστος εφαρμογής του (J.M. Van der Knijff et al., 1999).

3.3 Εμπειρικά Μοντέλα

Τα εμπειρικά μοντέλα είναι στατιστικής φύσης και βασίζονται αρχικά στην παρατήρηση και την επαγωγική λογική. Είναι απλούστερα από τα υπόλοιπα είδη μοντέλων και απαιτούν την ύπαρξη υπαίθριων μετρήσεων σε μία συγκεκριμένη περιοχή και εξάγουν ως συμπεράσματα εξισώσεις με στατιστικές μεθόδους, οι οποίες θεωρείται ότι ισχύουν και για άλλες θέσεις στην ίδια περιοχή αναφοράς. Τα μοντέλα αυτά αμφισβητούνται συχνά ως προς τη διατύπωση μη ρεαλιστικών υποθέσεων (Ξανθάκης, 2011).

Ο Jager (1994) χρησιμοποίησε το εμπειρικό μοντέλο USLE για την εκτίμηση της επικινδυνότητας της διάβρωσης του εδάφους στην Βάδη-Βυρτεμβέργη (Γερμανία). Ο De Jong (1994) χρησιμοποίησε το μοντέλο των Morgan, Morgan και Finney (Morgan et al., 1984) σαν βάση για το μοντέλο που ανέπτυξε το οποίο ονομάστηκε SEMMED. Οι τιμές των μεταβλητών του μοντέλου αυτού, εκλήφθησαν από μετεωρολογικά δεδομένα, γεωλογικούς χάρτες, διαχρονικές δορυφορικές εικόνες, ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα και από έναν περιορισμένο αριθμό δεδομένων πεδίου. Με αυτόν τον τρόπο η επικινδυνότητα της διάβρωσης του εδάφους μπορεί να εκτιμηθεί για μία μεγάλη περιοχή, που παρουσιάζει έντονη χωρική διακύμανση των χαρακτηριστικών της χωρίς εκτενής έρευνες πεδίου. Το μοντέλο SEMMED έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή χαρτών της επικινδυνότητας της διάβρωσης για τμήματα της περιοχής Αρντές (Ardèche) και για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Πέν (Peyne) στην νότια Γαλλία (De Jong, 1994, De Jong et al., 1998).

Οι Kribby και King (1998) εκτίμησαν την επικινδυνότητα της διάβρωσης του εδάφους για ολόκληρη την έκταση της Γαλλίας με την χρήση μοντελοποιημένων μεθόδων. Το μοντέλο που ανέπτυξαν είναι μια απλοποιημένη μέθοδος εκτίμησης της διάβρωσης του εδάφους που προκύπτει από μεμονομένα επείσοδια βροχοπτώσεων. Το μοντέλο εμπεριέχει τους όρους διαβρωτικότητα του εδάφους, τοπογραφία και κλίμα. Όλα τα επείσοδια βροχοπτώσεων που ξεπερνούν ένα κατώφλι (η τιμή του οποίου εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους και την κάλυψη γης) θεωρούνται πως συνεισφέρουν στην επιφανειακή απορροή, και πως η διάβρωση του εδάφους είναι ανάλογη της απορροής. Τέλος, οι εκτιμήσεις των ετήσιων καθώς και των μηνιαίων τιμών της διάβρωσης ελήφθησαν έπειτα από την ενσωμάτωση των συχνοτήτων εμφάνισης επείσοδιων βροχόπτωσης.

Είναι γεγονός, πως προκύπτουν αρκετά προβλήματα με την εφαρμογή εμπειρικών μοντέλων σε περιφερειακή ή και μεγαλύτερη κλίμακα. Αρχικά όλα τα μοντέλα διάβρωσης του εδάφους αναπτύχθηκαν με βάση κλίμακες οικοπέδου-χωραφιού, το οποίο σημαίνει ότι σχεδιάστηκαν για την εκτίμηση σημειακής απώλειας του εδάφους. Όταν τα μοντέλα αυτά εφαρμόζονται σε μεγαλύτερες περιοχές, τα αποτελέσματα των μοντέλων πρέπει να ερμηνεύονται με μεγάλη προσοχή. Δεν μπορεί κανείς να έχει την απαίτηση ότι ένα μοντέλο που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση εδαφικών απωλειών σε ένα αγροτεμάχιο να παράγει ακριβείς εκτιμήσεις για την διάβρωση του εδάφους όταν αυτό εφαρμόζεται σε περιφερειακή κλίμακα με μέγεθος ψηφίδας ίση με 50 μέτρα ή μεγαλύτερη. Σημαντικό είναι επίσης οι μελετητές να γνωρίζουν τις διεργασίες που εμπεριέχονται στο κάθε μοντέλο (J.M van der Knijff et al, 1999).

Επίσης σε περιφερειακή κλίμακα είναι συνήθως αδύνατη η συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων των μοντέλων (π.χ. παράμετροι που αφωρούν το έδαφος και την βλάστηση) με εργασίες πεδίου. Συνήθως σε αυτές τις παραμετρούς αναθέτονται τιμές από υπάρχοντες χάρτες εδαφών ή βλάστησης ή μέσω εξισώσεων παλλινδρόμησης (μεταξύ π.χ. κάλυψη βλάστησης και δεικτών που προέρχονται από δείκτες δεδομένων τηλεπισκόπησης). Σε γενικές γραμμές όμως αυτό έχει άμεσο αντίκτυπο στην αξιοπιστία των δεδομένων και συνεπώς, οι σχετικές τιμές των απωλειών του εδάφους που παράγονται από τα μοντέλα αυτά σε τέτοιες κλίμακες είναι σε γενικά πλαίσια πιο αξιόπιστες από τις απόλυτες τιμές του φαινομένου. Το γεγονός αυτό δεν αποτελεί απόλυτα πρόβλημα, αρκεί κανείς να γνωρίζει πως τα αποτελέσματα των μοντέλων δίνουν μια γενική εικόνα των προτύπων του φαινομένου που εμφανίζονται στην περιοχή και πως δεν παρέχουν ακρίβεις απόλυτες τιμές του ρυθμού διάβρωσης. Εξαιτίας όλων αυτών, η διαθεσιμότητα των δεδομένων είναι ένας από το καθοριστικούς παράγοντες επιλογής του κατάλληλου μοντέλου για την μελέτη της διάβρωσης του εδάφους σε περιφερειακή/εθνική κλίμακα.

Πιθανόν το μεγαλύτερο πρόβλημα με την μοντελοποίηση της διάβρωσης είναι οι δυσκολίες που παρουσιάζονται στην προσπάθεια ελέγχου της αξιοπιστίας των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Σε περιφερειακή ή μεγαλύτερη κλίμακα, ουσιαστικά δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για την σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις πραγματικές απώλειες του εδάφους. Οι King et al. (1999) προσπάθησαν να επιβεβαιώσουν τα αποτελέσματα της εκτίμησης της επινιδυνότητας της διάβρωσης στην Γαλλία συσχετίζοντας τις εδαφικές απώλειες με την εμφάνιση λασπορών, κάτι το οποίο δεν ήταν απόλυτα δόκιμο, καθώς στην εμφάνιση τετοιων φαινομένων συνησφαίρουν και άλλες φυσικές διεργασίες (J.M van der Knijff et al, 1999).

3.3.1 Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (Universal Soil Loss Equation-USLE)

Το εθνικό κέντρο δεδομένων απορροής και διάβρωσης των Η.Π.Α. ιδρύθηκε από την Υπηρεσία Αγροτικών Ερευνών (USDA-ARS) του πανεπιστήμιου Περντιού (Purdue University) στην πολιτεία της Ιντιάνα με σκοπό την ανάπτυξη της USLE. Οι

αρμοδιότητες αυτού του κέντρου σχετίζονταν τον εντοπισμό, την συγκέντρωση και την συνένωση όλων των διαθέσιμων δεδομένων απορροής και των μελετών με θέμα την διάβρωση απο όλες τις Ηνωμένες Πολιτείες.

Οι Wischmeier και Smith (1965) ανέπτυξαν την Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (USLE) η οποία εκδόθηκε για πρώτη φορά στο εγχειρίδιο με αριθμό 282 του υπουργείου Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής. Η USLE βελτιωνώταν συνεχώς μέσω ερευνών και συλλογής επιπλέον δεδομένων. Έτσι, οι Wischmeier και Smith (1978) ανέπτυξαν μία νέα μορφή της USLE για την πρόβλεψη της εδαφικής διάβρωσης που προκαλεί η βροχόπτωση, το νέο μοντέλο και οι οδηγίες του εκδόθηκαν στο εγχειρίδιο με αριθμό 537 του υπουργείου Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής.

Η USLE υπολογίζει τη μέση ετήσια απώλεια που προκαλείται από την επιφανειακή (sheet) και αυλακωτή (rill) διάβρωση. Η μεταφορά μαζών δεν λαμβάνεται υπόψιν και η απόθεση ιζημάτων θεωρείται ότι δεν πραγματοποιείται στην περιοχή στην οποία εφαρμογής του μοντέλου (Zhang et al., 1995). Άλλο σημαντικό μειονέκτημα της USLE είναι ότι για τον υπολογισμό της εδαφικής υιοθετείτε ένας ιδιαίτερα απλουστευμένος τρόπος, που θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι δεν αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα (Kirkby, 1980). Ακόμα, το μοντέλο αυτό δεν είναι βασισμένο στο γεγονός (event-based) και ως εκ τούτου δεν μπορεί να αναγνωρίσει εκείνα τα γεγονότα τα οποία πιθανώς μπορούν να οδηγήσουν σε έντονη διάβρωση (Zhang et al., 1995). Τέλος, η USLE έχει αναπτυχθεί με βάση δεδομένα μικρών πειραματικών εκτάσεων με σχετικά ομοιόμορφα τοπογραφικά, εδαφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά και επομένως η εφαρμογή της σε λεκάνες απορροής μεγάλης κλίμακας είναι προβληματική. Αν και από τον υπολογισμό της USLE θα προκύψει ποσοτική εκτίμηση της εδαφικής απώλειας, τα αποτελέσματα θα πρέπει να ερμηνευθούν περισσότερο ως προς τα χωρικά πρότυπα εμφάνισης το φαινομένου και όχι ως ακριβής τιμή εδαφικών απωλειών. Έτσι τα αποτελέσματα θα ήταν προτιμότερο να λαμβάνονται υπόψιν ως μέτρο σύγκρισης και όχι ως απόλυτη τιμή. Βάσει των παραπάνω, οι πληροφορίες που προκύπτουν, για τον βαθμό εμφάνισης του φαινομένου της εδαφικής διάβρωσης μπορούν να φανούν ιδιαίτερα χρήσιμες.

Η πρόβλεψη των εδαφικών απωλειών με την μέθοδο αυτή, απαιτεί την εκτίμηση έξι παραγόντων (Wischmeier, 1976 - Wischmeier και Smith, 1978):

$$SE = RKLSCP$$

Όπου:

SE = Μέση ετήσια απώλεια εδάφους

$$SE = \left(\frac{\text{metric ton}}{\text{hectare. year}} \right)$$

R= Παράγοντας διαβρωτικής ικανότητας της βροχόπτωσης

$$R = \left(\frac{\text{megajoule. milimeter}}{\text{hectare. hour. year}} \right)$$

K = Παράγοντας διαβρωσιμότητας του εδάφους

$$K = \left(\frac{\text{metric ton} \cdot \text{hectare} \cdot \text{hour}}{\text{hectare} \cdot \text{megajoule} \cdot \text{millimeter}} \right)$$

L = Παράγοντας κλίσης

S= Παράγοντας μήκους κλίσης

C= Παράγοντας κάλυψης γής

P= Παράγοντας πρακτικών αντιμετώπισης της διάβρωσης του εδάφους

Η USLE υπολογίζει την μακροπρόθεσμη ετήσια ή εποχική απώλεια του εδάφους για έναν συγκεκριμένο συνδυασμό φυσικών παραγόντων και πρακτικών διαχείρισης (Wischmeier, 1976 ; Wischmeier και Smith, 1978).

Έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές ανά τα χρόνια, μερικοί από αυτούς είναι, Hayes (1976), Robinson (1979), Batista (1989), Sukresno (1991), Osborn et al. (1976), McCool et al. (1976), Roose (1976), Aina et al. (1976), Foster (1979), Kirby και Mehuys (1986,1987) και Montas και Madramootoo (1991) (D.Nikkami, 1999).

3.3.2 Τροποποιημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας - Modified USLE (MUSLE)

Σε πολλές λεκάνες απορροής, υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα μόνο για την ημέρησια βροχοπτώση τα οποία δεν είναι επαρκή για τον υπολογισμό της έντασης των βροχοπτώσεων και τον υπολογισμό του παράγοντα της διαβρωτικής ικανότητας των βροχοπτώσεων (R). Ο Williams (1975) αντικατέστησε τον παράγοντα R με έναν όρο ο οποίος, περιλαμβάνει την μέγιστη απόπλυση και την συνολική ποσότητα νερού που επιδρά στην περιοχή μελέτης κατά την διάρκεια βροχοπτώσεων (D.Nikkami, 1999). Η εξίσωση αυτή είναι η εξής:

$$S_y = 11.8(QV)^{0.56}KLSCP$$

Όπου:

S_y = Όγκος αποθέσεων (t)

Q = Μέγιστο ροής (m^3/s)

V = Όγκος νερού (m^3) που επιδρά στην περιοχή

$Q = 0.042 DA/t_p$, όπου $t_p = c_t(L_w L_c)^{0.0792}$

$$V = \frac{(P_i - 0.2S_r)^2}{P_i + 0.8S_r} , \text{όπου } S_r = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Όπου:

P_i = Ημερήσια βροχοπτώση (mm)

S_r = Παράγοντας απορροφητικότητας

CN = Καμπύλη απορροής η οποία εξαρτάται από την κάλυψη γης , τις υδρολογικές συνθήκες, και τον τύπο του εδάφους

DA = Έκταση περιοχής αποστράγγισης (hectare)

t_p = Η χρονική περίοδος απο την εμφάνιση της επιφανειακής απορροής μέχρι την εμφάνιση της μέγιστης τιμής του υδρογραφήματος.

C_t = Συντελεστής του εδάφους

L_w = Μήκος λεκάνης απορροής (m)

L_c = Η απόσταση απο το σημείο εκφόρτισης της λεκάνης απορροής μέχρι το κέντρο της.

Οι όροι **K**, **L**, **S**, **C**, **P** ορίζονται όπως ακριβώς και στην εξίσωση εδαφικής απώλειας (USLE).

Σύμφωνα με τον Williams (1975) η εξίσωση MUSLE μπορεί να εφαρμοστεί για μελέτες μεγάλων λεκανών απορροής εάν τα ηζήματα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα μέσα σε αυτή, και αν οι κύριοι παραπόταμοι της λεκάνης απορροής είναι υδραυλικά όμοιοι. Ο Fogel (1976) χρησιμοποίησε το μοντέλο αυτό για την παρουσίαση μιας μεθόδου υπολογισμού της στερεοπαροχής στη λεκάνη απορροής του Σίραν (Siran) στο Πακιστάν, ενώ οι Krishna et al. (1988) το ενσωμάτωσαν στο μοντέλο SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) για την μελέτη μιας λεκάνης απορροής κοντά στο Ρίεζελ (Riesel) του Τέξας.

3.3.3 Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας – Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

Η RUSLE (Renard *et al.*, 1997) είναι ένα εμπειρικό μοντέλο εκτίμησης της εδαφικής απώλειας που προκαλείται από την επιφανειακή (sheet) και αυλακωτή (rill) διάβρωση. Αποτελεί μια αναθεώρηση και βελτίωση των σχέσεων υπολογισμού των επιμέρους συντελεστών της USLE - Universal Soil Loss Equation (Wischmeier και Smith, 1978) και δημοσιεύτηκε για πρώτη φορά ως μηχανογραφημένη έκδοση το 1991 (Renard et al. 1991) στο εγχειρίδιο με αριθμό 703 του υπουργείου Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής. Έχει εφαρμοστεί από μια σειρά ερευνητών σε διάφορες κλίμακες και σε μεγάλη ποικιλία κλιμάτων ανά την υφήλιο (Φ.Βαχαβιώλος, 2014), έτσι θεωρείται το πιο διαδεδομένο μοντέλο εκτίμησης της υδατικής διάβρωσης παγκοσμίως. Βασικά χαρακτηριστικά του είναι η και εύκολη παραμετροποίηση και οι μικρές απαιτήσεις δεδομένων και χρόνου σε σχέση με τα περισσότερα μοντέλα υδατικής διάβρωσης (Κ.Φλαμπούρης, 2008).

Η μέθοδος βασίζεται στην παρακάτω πολλαπλασιαστική σχέση:

$$A = RKLSCP \quad [3.1]$$

Όπου:

A: μέση (συνήθως ετήσια) εδαφική απώλεια ($t\ ha^{-1}year^{-1}$)

R: συντελεστής διαβρωτικότητας βροχόπτωσης ($MJ\ mm\ ha^{-1}h^{-1}$) (Rainfall Erosivity factor)

K: συντελεστής διαβρωσιμότητας εδάφους ($t\ h\ MJ^{-1}mm^{-1}$) (Soil Erodibility factor)

L: συντελεστής μήκους κλίσης (αδιάστατο) (Slope Length factor)

S: συντελεστής βαθμού κλίσης (αδιάστατο) (Slope Steepness factor)

C: συντελεστής διαχείρισης - κάλυψης γης (αδιάστατο) (Cover Management factor)

P: συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης (αδιάστατο) (Support Practice factor)

Αναφορικά με τις μονάδες της παραπάνω σχέσης, η μέση εδαφική απώλεια λαμβάνει τις μονάδες που επιλέγονται για το συντελεστή διαβρωσιμότητας K και για το χρονικό διάστημα που επιλέγεται για το συντελεστή διαβρωτικότητας R (Φ.Βαχαβιώλος, 2014). Ενώ σύμφωνα με τους Foster και McCool (1981), όταν τα δεδομένα του μοντέλου είναι εξαρχής σε τιμές SI, οι τιμές μπορούν να υπολογιστούν κατευθείαν σε SI χωρίς να υπάρχει ανάγκη για μετατροπή από το αμερικάνικο σύστημα μονάδων.

3.3.3.1 Συντελεστής διαβρωτικότητας βροχόπτωσης – R

Ο συντελεστής αυτός αντιπροσωπεύει τη διαβρωτική δύναμη της βροχόπτωσης και περιγράφει την ένταση και την διάρκεια του κάθε επεισοδίου (P.Panagos et al., 2015). Ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης θεωρείται πως έχει τη σημαντικότερη επίδραση στο ενδεχόμενο ανάπτυξης εδαφικής διάβρωσης (Renard και Freimund, 1994). Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R (Rainfall Erosivity factor) ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$), στηρίζεται στην ανάλυση των εγχειριδίων των USLE και RUSLE, όπως αυτή περιγράφεται από τους Wischmeier και Smith (1978) και Renard et al. (1997).

Για την εξαγωγή όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστων και αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων είναι επιθυμητή η ύπαρξη πολυετών (> 20 ετών) αναλυτικών βροχομετρικών δεδομένων. Ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής αποτελεί ένα ιδιαίτερα ευαίσθητο και ευμετάβλητο μέγεθος, σε ετήσια, εποχική και μηνιαία βάση, ακόμα και στο επίπεδο των επιμέρους επεισοδίων βροχής.

Ο συντελεστής διαβρωτικότητας R, εν προκειμένω ο μέσος ετήσιος, προκύπτει ως το άθροισμα των συντελεστών διαβρωτικότητας των επιμέρους επεισοδίων βροχής κατά τη διάρκεια του έτους. Οι τιμές διαβρωτικότητας προκύπτουν από τον υπολογισμό του δείκτη διαβρωτικότητας EI_{30} για κάθε επεισόδιο, όπου ο όρος E ($MJ\ ha^{-1}$) αντιπροσωπεύει την ενέργεια του επεισοδίου βροχής και I_{30} ($mm\ h^{-1}$) είναι η μέγιστη ένταση μισάωρου (Φ.Βαχαβιώλος, 2014).

3.3.3.1.1 Αναλυτικός υπολογισμός συντελεστή R

Όταν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης ανά διαστήματα των 30 λεπτών ή και συντομότερων (Saavedra, 2005), για τον αναλυτικό υπολογισμό του R χρησιμοποιείται η σειρά των σχέσεων όπως αυτές περιγράφονται από τους Brown και Foster (1987), όπου:

Ο μέσος ετήσιος συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (R) ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ year^{-1}$) προκύπτει (P.Panagos et al., 2015):

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{mj} (EI_{30})_k \quad [3.2]$$

Όπου:

n: έτη μετρήσεων
j: δείκτης αριθμού ετών μετρήσεων
m: επεισόδια βροχής
k: δείκτης αριθμού επεισοδίων βροχής
E: συνολική κινητική ενέργεια βροχής ($MJ \, ha^{-1}$)
I₃₀: μέγιστη ένταση μισάωρου ($mm \, h^{-1}$)

Για τον υπολογισμό της συνολικής κινητικής ενέργειας και κατ' επέκταση του δείκτη διαβρωτικότητας EI_{30} κάθε επεισοδίου βροχής χρησιμοποιείται η σχέση:

$$EI_{30} = \left(\sum_{r=1}^0 e_r v_r \right) I_{30} \quad [3.3]$$

Όπου:

m: επιμέρους διάστημα επεισοδίου βροχής με σταθερή βροχόπτωση
r: δείκτης επιμέρους διαστήματος
 e_r : ειδική κινητική ενέργεια επιμέρους διαστήματος επεισοδίου βροχής ($MJ \, ha^{-1} mm^{-1}$)
 v_r : ύψος βροχής επιμέρους διαστήματος (mm)
I₃₀: μέγιστη ένταση βροχόπτωσης για διάστημα 30 λεπτών

Σύμφωνα με τους Brown και Foster (1987), η ειδική κινητική ενέργεια της βροχόπτωσης κάθε επιμέρους διαστήματος προκύπτει από τη σχέση (P.Panagos et al., 2015):

$$e_r = 0.29[1 - 0.72 \exp(-0.05 i_r)] \quad [3.4]$$

Όπου:

i_r : ένταση βροχής επιμέρους διαστήματος ($mm \, h^{-1}$)

3.3.3.1.2 Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού συντελεστή R

Όταν τα δεδομένα βροχόπτωσης ανά χρονικά διαστήματα των 30 λεπτών ή και συντομότερων δεν είναι διαθέσιμα, ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης μπορεί να υπολογιστεί με έμμεσο τρόπο και συγκεκριμένα με την χρήση του τροποποιημένου δείκτη Fournier (MFI) (Saavedra, 2005). Το πρόβλημα της έλλειψης των παραπάνω δεδομένων εμφανίζεται με μεγάλη συχνότητα, ενώ σύμφωνα με αρκετούς ερευνητές, η διαδικασία εφαρμογής των σχέσεων [3.2]-[3.4] αποτελεί μια επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία.

Σύμφωνα με τους Renard και Freimund (1994) η μεθοδολογία που ακολουθείται σε όλες τις προσπάθειες για έμμεσο προσδιορισμό του R στην περίπτωση έλλειψης αναλυτικών δεδομένων συμπυκνώνεται στα παρακάτω τέσσερα βήματα:

- Υπολογίζονται τιμές R σύμφωνα με τις παραπάνω αναλυτικές σχέσεις για σταθμούς με διαθέσιμα βροχομετρικά δεδομένα πλησίον ή στον ευρύτερο χώρο της περιοχής μελέτης.
- Κατασκευάζεται μια σχέση συσχέτισης του R με συνήθως διαθέσιμες τιμές βροχόπτωσης, όπως η μέσης μηνιαία ή ετήσια βροχόπτωση ή και ο τροποποιημένος δείκτης Fournier.
- Από την εξαγόμενη σχέση μπορούν να εκτιμηθούν τιμές R για τους σταθμούς της υπό μελέτη περιοχής.
- Η σχέση μπορεί να αποτυπωθεί και γραφικά με το σχεδιασμό ισοτιμικών καμπυλών ίσου R. Έτσι είναι δυνατό για κάθε σημείο εντός της περιοχής μελέτης να προσδιοριστεί το R με γραμμική παρεμβολή.

Η παρακάτω σχέση [3.5] αναπτύχθηκε από τους Wischmeier και Smith και τροποποιήθηκε από τον Arnoldus , και έχει ως εξής :

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \cdot 10^{(1.5 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_i^2}{P} \right) - 0.08188)} \quad [3.5]$$

Όπου, R σε $MJ \, mm \, ha^{-1} \, h^{-1}$

P_i : μηνιαία βροχόπτωση σε mm

P : ετήσια βροχόπτωση σε mm

Ο τροποποιημένος δείκτης Fournier προκύπτει από την παρακάτω σχέση [3.6]:

$$MFI = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P} \quad [3.6]$$

Όπου:

p_i : μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm)

P: μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)

Η συσχέτιση του συντελεστή R με τον τροποποιημένου δείκτη Fournier (MFI) θεμελιώθηκε από τον Arnoldus (1977). Η σχέση εκτίμησης του R που εξήγαγε ο Arnoldus (1977) στα πλαίσια των ερευνών του για την παραγωγή ισοδιαβρωτικού χάρτη του Μαρόκο, και που σύμφωνα με τον Παπάζογλου (2009) έχει εφαρμοστεί σχεδόν σε όλες τις ηπείρους είναι:

$$R = 0.264 \, MFI^{1.5} \quad [3.7]$$

Με την ίδια λογική, οι Renard και Freimund (1994), διέκριναν δύο κατηγορίες σχέσεων βάσει μιας οριακής τιμής του MFI:

$$R = 0.07397 MFI^{1.847} \quad MFI \leq 55mm \quad [3.8]$$

$$R = 95.77 - 6.081MFI + 0.477MFI^2 \quad MFI > 55mm \quad [3.9]$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι σχέσεις [3.8] και [3.9] προέκυψαν από βροχομετρικά δεδομένα με τιμές μέσης ετήσιας βροχόπτωσης από 67 έως 1.640 mm, τιμές MFI από 7 έως 150mm, και με διαβρωτικότητα R από 85 έως 11.000 $MJ\ mm\ ha^{-1}h^{-1}$ (Φ.Βαχαβιώλος, 2014).

Οι Ferro et al. (1991) για να αντιμετωπίσουν τα πιθανά σφάλματα που εμπεριέχονται στον υπολογισμό του συντελεστή R με την χρήση του MFI σε περιοχές που επικρατούν ανομοιογενείς συνθήκες βροχοπτώσεων, εισήγαγαν την έννοια του υπερετήσιου τροποποιημένου δείκτη Fournier (F_F) που περιγράφεται ως ο μέσος MFI για ένα σύνολο N ετών .

Η σχέση από την οποία προκύπτει ο υπερετήσιος τροποποιημένος δείκτης Fournier είναι η εξής:

$$F_F = \sum_{j=1}^N \frac{F_{a,j}}{N} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{12} \frac{p_{i,j}^2}{P_j} \quad [3.10]$$

Όπου:

$F_{a,j}$: ετήσιος τροποποιημένος δείκτης Fournier

N : αριθμός ετών

$p_{i,j}$: μηνιαία βροχόπτωση i μήνα, j έτους

P_j : ετήσια βροχόπτωση j έτους

Ο F_F χρησιμοποιείται, όπως και ο MFI σε σχέσεις για την εκτίμηση του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχής αλλά μόνο σε υπερετήσια βάση και όχι σε ετήσια ή/και εποχική. Μια τέτοια σχέση για την εκτίμηση του R που εφαρμόστηκε από τους Ferro et al. (1999) στη Σικελία και τη νότια Ιταλία είναι η εξής:

$$R = 0.5249F_F^{1.59} \quad [3.11]$$

Υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος εμπειρικών σχέσεων για τον υπολογισμό του συντελεστή R με την χρήση τιμών μέσης ετήσιας βροχόπτωσης. Οι Renard και Freimund (1994), εξήγαγαν τις παρακάτω σχέσεις:

$$R = 0.04830 P^{1.610} \quad P \leq 850mm \quad [3.12]$$

$$R = 587.8 - 1.219P + 0.004105P^2 \quad P > 850mm \quad [3.13]$$

Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, στην περιοχή της Βαυαρίας εξήχθη η σχέση (Rogler και Schwertmann, 1981):

Για την Ιταλία οι D'asaro και Santoro (1983) διατύπωσαν την σχέση :

$$R = 0.21 \cdot q^{-0.096} \cdot P^{2.3} \cdot NGP^{-2} \quad [3.16]$$

Όπου:

q : το υψόμετρο του σταθμού (m)

P : η ετήσια βροχόπτωση (mm)

NGP : ο ετήσιος αριθμός ημερών με βροχόπτωση

Μια ακόμα σχέση για την περιοχή της Ιταλίας είναι η παρακάτω (Torri *et al.*, 2006):

$$R = 3.08 P - 944 \quad [3.17]$$

Όπου το R σε $MJ \text{ mm ha}^{-1} h^{-1}$ και P η μέση ετήσια βροχόπτωση (mm).

Σε μία προσπάθεια υπολογισμού του συντελεστή R στην κεντρική Ιταλία συμπεριλαμβάνοντας με πιο ολοκληρωμένο τρόπο την ανομοιογένεια των βροχοπτώσεων της Μεσογειακής λεκάνης, ο Diodato (2004), πρότεινε την παρακάτω σχέση [3.18]:

$$R = 12.142 (abc)^{0.6446} \quad [3.18]$$

Όπου:

a : μέση ετήσια βροχόπτωση (cm)

b : ετήσια μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση (cm)

c : ετήσια μέγιστη ωριαία βροχόπτωση (cm)

Για την Πορτογαλία οι de Santos Loureiro και de Azevedo Couthino (2001) ανέπτυξαν τη σχέση:

$$R = \frac{\sum_{k=1}^{12} (7.05r_{10} - 88.92d_{10})}{N} \quad [3.19]$$

Όπου:

r_{10} : η μηνιαία βροχόπτωση που είναι μεγαλύτερη από 10 mm

d_{10} : ο αριθμός ημερών του μήνα με ημερήσιο ύψος βροχής μεγαλύτερο από 10 mm

N : ο αριθμός των μηνών του έτους που τέθηκαν για τον υπολογισμό

Ενώ ενδεικτικά, σε παγκόσμιο επίπεδο, οι Lo *et al.* (1985) χρησιμοποίησαν στη Χαβάη τη σχέση :

$$R = 38.64 + 3.48 \cdot P \quad [3.20]$$

Όπου, P η μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)

Ο El-Swaify (1985) για την Ταϊλάνδη υπολόγισε τον παράγοντα R χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$R = (38.35 + 0.35 \cdot P) \quad [3.21]$$

Όπου, P η μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)

Ο Roose (1997) στη Δυτική Αφρική κατέληξε στη σχέση για μετεωρολογικά δεδομένα τουλάχιστον 10 ετών:

$$R = P \cdot a \quad [3.22]$$

Όπου:

P = η μέση ετήσια βροχόπτωση

$a = 0.5 \pm 0.05$ στις περισσότερες περιπτώσεις
0.6 σε περιοχές κοντά σε θάλασσα (<40 km)
0.3 – 0.2 σε τροπικές ορεινές περιοχές
0.1 σε Μεσογειακές ορεινές περιοχές

Από τις παραπάνω σχέσεις υπολογισμού του συντελεστή R για τον Ευρωπαϊκό χώρο, οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες είναι η εξίσωση της Βαυαρίας [3.14] για την Βόρεια και Κεντρική Ευρώπη και η εξίσωση της Τοσκάνης [3.15] για τη Νότια Ευρώπη (Παπάζογλου, 2009), πιο συγκεκριμένα θεωρείται πως αποδίδει εξαιρετικά για τις κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου και ιδιαίτερα του Ελληνικού χώρου.

Σύμφωνα με τον Φ.Βαχαβιώλο (2014), η επιλογή της καταλληλότερης σχέσης για τον υπολογισμό του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης, καθορίζεται από τρεις κυρίως παράγοντες:

- την εγγύτητα της περιοχής μελέτης με την περιοχή εξαγωγής της εμπειρικής σχέσης
- την ενότητα κλιματικών χαρακτηριστικών και καθεστώτος βροχοπτώσεων
- τα διαθέσιμα βροχομετρικά δεδομένα

3.3.3.2 Συντελεστής διαβρωσιμότητας εδάφους – K

Η διαβρωσιμότητα του εδάφους εκφράζει την ποσότητα των εδαφικών απωλειών από μία πειραματική έκταση μήκους 22.13m και κλίσεως 9% υπό συνθήκες αγρανάπαυσης (Renard et al., 1996). Συνεπώς, ο συντελεστής K είναι αποτελεί μία εμπειρική προσέγγιση του βαθμού ευπάθειας ενός συγκεκριμένου εδαφικού τύπου στις διαβρωτικές διεργασίες και εξαρτάται από (Μ.Βιδάλη, 2013):

- Τη διηθητικότητα του εδάφους και
- Τη δομή του εδάφους.

Επιπλέον, η διηθητικότητα του εδάφους εξαρτάται από:

- Τη δομή του επιφανειακού ορίζοντα του εδάφους
- Την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία

- Την κοκκομετρική σύσταση του εδάφους
- Το είδος και την ποσότητα της αργίλου που περιέχει
- Το βάθος της εδαφικής κατατομής
- Την τάση που έχει το έδαφος να σχηματίζει επιφανειακή κρούστα
- Την παρουσία αδιαπέρατης εδαφικής στρώσης.

Οι τιμές του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους καθορίζονται από τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Συγκεκριμένα, η δομή, η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, η διαπερατότητα και η μηχανική σύσταση του εδάφους αποτελούν τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια υπολογισμού του συντελεστή K (Μπαθρέλος et al., 2010). Συνήθως, ένας εδαφικός τύπος είναι λιγότερος ευπρόσβλητος στη διάβρωση με μείωση του ποσοστού της ιλύος, ανεξάρτητα από το αν έχουμε αντίστοιχη αύξηση είτε στο ποσοστό της άμμου είτε στο ποσοστό της αργίλου.

Βάσει των εγχειριδίων των USLE και RUSLE, ο υπολογισμός του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους (K) ($t h MJ^{-1} mm^{-1}$), γίνεται με την χρήση νομογραφημάτων (Σχήμα 9), σε αυτή την περίπτωση, απαιτείται ο προσδιορισμός της μηχανικής σύστασης, του βαθμού διηθητικότητας και της δομής του εδάφους. Ο υπολογισμός του συντελεστή K , στην περίπτωση εδαφών με περιεκτικότητα σε άργιλο $< 70\%$ γίνεται μέσω της σχέσης [3.23], η οποία απαιτεί τον προσδιορισμό της οργανικής ουσίας του εδάφους και των εδαφικών στρώσεων (Wischmeier και Smith, 1978).

Οι τιμές που προκύπτουν για το K τόσο από το νομογράφημα όσο και από τη σχέση [3.23] είναι σε Αμερικανικές μονάδες και για μετατροπή σε μονάδες του SI πολλαπλασιάζονται με τον όρο 0.1317 (Foster et al., 1981).

$$K = \frac{[2.1 \cdot 10^{-4}(12 - OM)M^{1.14} + 3.25(s - 2) + 2.5(p - 3)]}{100} \quad [3.23]$$

Όπου:

OM : οργανική ουσία (%) ($OM = \% \text{ οργανικού άνθρακα} \cdot 1,724$)

M : δομή επιφανειακής εδαφικής στρώσης $[(100 - Ac) \cdot (L + Armf)]$

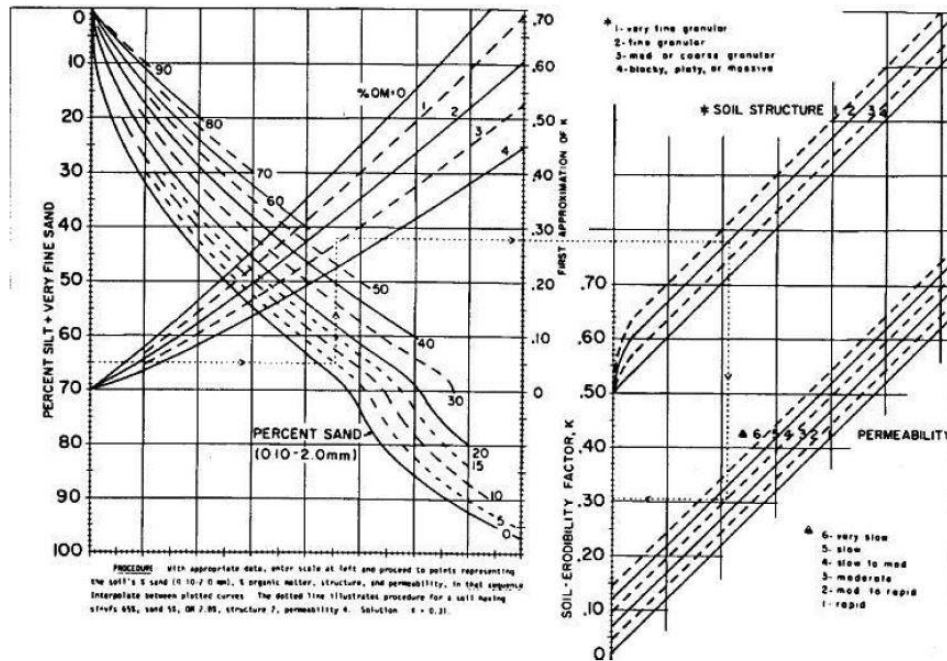
όπου Ac ποσοστό αργίλου ($< 0,002mm$),

L ποσοστό ιλύος ($0,002 \sim 0,05mm$),

$Armf$ ποσοστό άμμου ($0,05 \sim 0,1mm$)

s : εδαφική δομή

p : διαπερατότητα εδάφους



Σχήμα 9: Νομογράφημα για τον υπολογισμό του συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας (πηγή: Wischmeier και Smith 1978).

Για τη ορθή χρήση του νομογραφήματος, έχοντας τα κατάλληλα δεδομένα, ξεκινάμε από την αριστερή κλίμακα (ποσοστό ιλύος και πολύ λεπτής άμμου) και προχωράμε μέχρι το σημείο της καμπύλης που υποδεικνύει το ποσοστό της άμμου. Στη συνέχεια, κινούμαστε κατακόρυφα μέχρι το ποσοστό του οργανικού υλικού και ακολούθως η κίνηση γίνεται πάλι οριζόντια μέχρι την δεξιά κλίμακα του πρώτου σκέλους του νομογραφήματος όπου έχουμε την πρώτη προσέγγιση του K . Στο δεύτερο σκέλος, συνεχίζουμε την οριζόντια κίνηση από την πρώτη εκτίμηση του παράγοντα K μέχρι να φτάσουμε στο σημείο που αντιστοιχεί στην εδαφική δομή. Η κίνηση γίνεται κατακόρυφη για να συναντήσουμε την τάξη της εδαφικής διαπερατότητας. Τέλος, προχωράμε οριζόντια μέχρι την αριστερή κλίμακα του δεύτερου σκέλους του νομογραφήματος που μας δίνει την τελική εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας του εδάφους (Μ.Βιδάλη, 2013).

Μία άλλη μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή K εξήχθη από τους Römken et al, (1986), σχέση [3.24], η οποία συσχετίζει τη διάσταση των σωματιδίων του επιφανειακού εδαφικού στρώματος με το συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους και εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμες εκτενείς πληροφορίες για τις ιδιότητες των εδαφών (B.Wang et al., 2016), ενώ σύμφωνα με τους J.M van der Knijff et al. (2000) η σχέση αυτή μπορεί να καλύψει με αρτιότερο τρόπο την ποικιλία εδαφικών και γεωλογικών εμφανίσεων της Ευρωπαϊκής αλλά και των άλλων ηπείρων:

$$K = 0.0034 + 0.0405 \cdot \exp \left[-0.5 \left(\frac{\log D_g + 1.659}{0.7101} \right)^2 \right] \quad [3.24]$$

Όπου D_g είναι η μέση διάσταση των σωματιδίων του επιφανειακού εδαφικού στρώματος (mm) και προσδιορίζεται μέσω της σχέσης:

$$D_g = \exp \left(\sum f_i \cdot \ln \left(\frac{d_i + d_{i-1}}{2} \right) \right) \quad [3.25]$$

Όπου για κάθε κατηγορία σωματιδίων (άργιλο, ιλύ, άμμο):

d_i : μέγιστη διάσταση σωματιδίου(mm)

d_{i-1} : ελάχιστη διάσταση σωματιδίου (mm)

f_i : κλάσμα μάζας κατηγορίας σωματιδίων επί της συνολικής εδαφικής μάζας

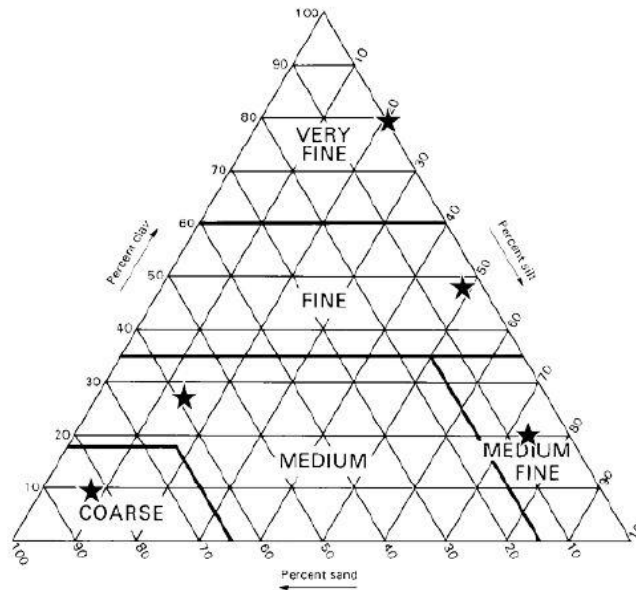
Η πιο δόκιμη διαδικασία για τον καθορισμό του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους, είναι η συλλογή εδαφικών δειγμάτων, και ο προσδιορισμός, μέσω εργαστηριακών αναλύσεων των εδαφικών χαρακτηριστικών που απαιτούνται από τις παραπάνω σχέσεις.

Βέβαια, σε περιπτώσεις που η χρήση των παραπάνω μεθόδων δεν είναι εφικτή, είναι δυνατή η άντληση τιμών εδαφικής διαβρωσιμότητας βιβλιογραφικά, από διάφορες ερευνητικές εργασίες. Η πρακτική αυτή μπορεί να μην είναι η πλέον ορθή, υιοθετείτε όμως ήδη από τις πρώτες δεκαετίες εφαρμογής της USLE, καθώς στο εγχειρίδιο της μεθόδου (Wischmeier και Smith, 1978) επισυνάπτονται τιμές K για μια σειρά εδαφών. Μεταγενέστερα σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, οι J.M. van der Knijff et al. (2000) δημιούργησαν τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1) που παρουσιάζει την κατάταξη και τις αντίστοιχες τιμές K για τις διάφορες κατηγορίες εδαφών (Φ.Βαχαβιώλος, 2014). Χαρακτηριστικό παράδειγμα για τον Ελλαδικό χώρο αποτελεί η μελέτη των Δ.Κουτσογιάννης και Κ.Τάρλα (1987), οι οποίοι ομαδοποίησαν τα εδάφη σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το βαθμό διαβρωσιμότητας τους από το νερό (υψηλή, μέτρια, χαμηλή).

Μικρές τιμές K παρατηρούνται σε εδάφη με μεγάλο λεπτόκοκκο αλλά και αντίθετα χονδρόκοκκο ποσοστό, ενώ για ενδιαμέση σύσταση οι τιμές παρουσιάζονται πιο αυξημένες (Φ.Βαχαβιώλος, 2014).

TEXT	Dominant surface textural class. (Present in: STU)	% clay	% silt	% sand	K
0	No information	-	-	-	
9	No texture (histosols, ...)	-	-	-	
1	Coarse (clay < 18 % and sand > 65 %)	9	8	83	0.0115
2	Medium (18% < clay < 35% and sand > 15%, or clay < 18% and 15% < sand < 65%)	27	15	58	0.0311
3	Medium fine (clay < 35 % and sand < 15 %)	18	74	8	0.0438
4	Fine (35 % < clay < 60 %)	48	48	4	0.0339
5	Very fine (clay > 60 %)	80	20	0	0.0170

Πίνακας 1: Αντιπροσωπευτικές τιμές K για κάθε εδαφική κατηγορία (πηγή: J.M van der Knijff et al., 2000)



Σχήμα 10: Θέση αντιπροσωπευτικών τιμών στο τρίγωνο μηχανικής σύστασης (πηγή: J.M van der Knijff et al., 2000)

3.3.3.3 Συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης – LS

Οι συντελεστές μήκους κλίσης (L-factor / slope length) και βαθμού κλίσης (S-factor / slope steepness) αποτελούν τον τοπογραφικό συντελεστή (LS) του μοντέλου RUSLE και προσδιορίζουν την επίδραση της γεωμορφολογίας και του αναγλύφου στην εμφάνιση του φαινομένου της εδαφικής διάβρωσης. Ο συντελεστής LS είναι ο λόγος της ποσότητας του εδάφους που χάνεται από την περιοχή που διαβρώνεται προς την ποσότητα του εδάφους που χάνεται από μία πειραματική έκταση μήκους 22.13 m και με κλίση 9% και υπό συνθήκες αγρανάπαυσης. Σύμφωνα με τους McCool et al. (1987) οι εδαφικές απώλειες εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε μεταβολές του βαθμού κλίσης παρά του μήκους κλίσης. Ενώ, σύμφωνα με τους Sigalos et al. (2010) ο τοπογραφικός συντελεστής (LS) θεωρείται ως ο πιο απαιτητικός ως προς τον υπολογισμό του

Η σχέση υπολογισμού του LS βάσει της USLE και όπως ορίζεται από τους Wischmeier και Smith (1978):

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^n (0.065 + 0.045S + 0.0065S^2) \quad [3.26]$$

Όπου:

L: συντελεστής μήκους κλίσης

S: συντελεστής βαθμού κλίσης

λ: μήκος κλίσης (m)

S: κλίση (%)

n: 0.2 για $S < 1\%$, 0,3 για $1\% \leq S \leq 3,5\%$, 0,4 για $3,5\% \leq S \leq 5\%$ και 0,5 για $S > 5\%$

Στην παραπάνω σχέση, ο πρώτος όρος αντιστοιχεί στην επίδραση του μήκους κλίσης, όπου η διάσταση 22,13 συνδέεται με το μήκος της πειραματικής επιφάνειας/έκτασης των εμπειρικών εξισώσεων USLE και RUSLE, και ο δεύτερος στην επίδραση του βαθμού της κλίσης (Φ.Βαχαβιώλος, 2014).

Η σχέση [3.26] που εφαρμόστηκε από τους Sigalos et al. (2010) με χρήση της γωνίας κλίσης (°) αντί της κλίσης (%) ως:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^n (65.4 \sin^2 \beta + 4.56 \sin \beta + 0.0654) \quad [3.27]$$

Όπου:

λ: μήκος κλίσης (m)

β: γωνία κλίσης (°)

n: 0.2 για $S < 1\%$,

0,3 για $1\% \leq S \leq 3,5\%$,

0,4 για $3,5\% \leq S \leq 5\%$ και 0,5 για $S > 5\%$.

Η γωνία κλίσης β προκύπτει ως (Sigalos et al., 2010):

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{S}{100} \right) \quad [3.28]$$

Όπου S η κλίση (%).

Η RUSLE χρησιμοποιεί την ίδια σχέση για το συντελεστή μήκους κλίσης L, όχι όμως και για τον υπολογισμό του S, όπου επιλέγονται οι σχέσεις που πρότειναν οι McCool et al. (1987) για μέτριες ($s < 9\%$) και απότομες κλίσεις ($s \geq 9\%$):

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^n (10.8 \sin \beta + 0.03) , \quad S < 9\% \quad [3.29]$$

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^n (16.8 \sin \beta - 0.5) , \quad S \geq 9\% \quad [3.30]$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω η μέθοδος υπολογισμού του τοπογραφικού συντελεστή (LS) βασίζεται στην αντίληψη ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κλίσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η εδαφική απώλεια χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η πολύπλοκη τρισδιάστατη φύση του αναγλύφου (Rober & Hillborn, 2000). Ωστόσο, ορισμένοι ερευνητές (Desmet & Govers, 1996; Moore & Burch, 1986; Mitas & Mitasova, 1996; Simms, Woodroffe, & Jones, 2003), εκμεταλλευόμενη τις δυνατότητες που προσφέρει η χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, ισχυρίστηκαν ότι οι εδαφικές απώλειες δεν εξαρτώνται από το μήκος κλίσης αλλά από την ανάντη συμβάλλουσα επιφάνεια. Ενώ σύμφωνα με τους Panagos et al. (2012) το σύνολο των σχέσεων που προτάθηκαν βάσει των παραπάνω ισχυρισμών θεωρείται πως οδηγεί σε ρεαλιστικότερους υπολογισμούς, ειδικά στις περιπτώσεις σύνθετων μορφολογικά επιφανειών.

Η σχέση που προτάθηκε από τους Moore και Burch (1986) είναι:

$$LS = \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^n \quad [3.31]$$

Όπου:

A_s : ανάντη επιφάνεια που συνεισφέρει στη διάβρωση (m^2)

β : γωνία κλίσης ($^\circ$)

m, n : συντελεστές που σύμφωνα με τους Panagos *et al.* (2012) λαμβάνουν τιμές 0,4 και 1,3 αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τους Moore και Wilson (1992), η σχέση εφαρμόζεται για πλαγίες με μήκη κλίσης $\lambda < 100$ m και γωνίες κλίσης $\beta < 14^\circ$ (Di Stefano *et al.*, 2000).

Η σχέση [3.31] χρησιμοποιήθηκε σε μια σειρά από εργασίες (J.M. Van der Knijff *et al.*, 2000), ελαφρώς τροποποιημένη, σύμφωνα με την αναθεώρηση των Moore *et al.*, (1993) ως:

$$LS = 1.4 \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^n \quad [3.32]$$

Οι Mitasova και Mitas (2001a), εξέλιξαν περαιτέρω την έρευνα για την εξαγωγή μιας αντιπροσωπευτικότερης σχέσης για το συντελεστή αναγλύφου καταλήγοντας στη σχέση (Φ.Βαχαβιώλος, 2014):

$$LS = (m + 1) \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin \beta}{0.09} \right)^n \quad [3.33]$$

Όπου:

A_s : ανάντη επιφάνεια που συνεισφέρει στη διάβρωση (m^2)

β : γωνία κλίσης ($^\circ$)

m, n : συντελεστές που κυμαίνονται από $0.4 \leq m \leq 0.6$ και $1 \leq n \leq 1.3$, ανάλογα με τον τύπο διάβρωσης – επιφανειακή ή αυλακωτή.

Ο συντελεστής L [3.34] σύμφωνα με τους Desmet και Govers (1996) , και ο συντελεστής S [3.35] σύμφωνα με τον Nearing (1997):

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{ij-in} + D^2)^{(m+1)} - A_{ij-in}^{(m+1)}}{x_{(i,j)}^m \cdot D^{(m+2)} \cdot 22.13^m} \quad [3.34]$$

$$S = -1.5 + \frac{17}{(1 + e^{(2.3 - 6.1 \sin \beta)})} \quad [3.35]$$

Όπου,

D: μέγεθος κελιού/ψηφίδας (grid) (m)

$$x_{i,j}: \sin a_{i,j} + \cos a_{i,j}$$

A_{ij-in} : συμβάλλουσα επιφάνεια (m^2) με συντεταγμένες (i,j) και

$m : 0 \leq m \leq 1$, τείνει στο 0 όταν το μέγεθος της ρυακοειδούς είναι ίδιο με αυτό της ενδορυακοειδούς διάβρωσης (P.Panagos, 2014),

$$m = F / (1 + F) \quad [3.36] \text{ , όπου}$$

$$F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{\sin^{0.8} \beta + 0.56} \quad [3.37] \text{ (McCool et al., 1989) ή}$$

$$F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{3 \cdot (\sin \beta)^{0.8} + 0.56} \quad [3.38] \text{ σύμφωνα με τους Renard et al. (1997).}$$

Οι Zhang et al. (2013) ανέπτυξαν ένα εργαλείο σε περιβάλλον GIS για την αυτοματοποίηση του υπολογισμού του τοπογραφικού παράγοντα LS το οποίο ονομάζεται LS-TOOL και αποτελεί την βάση για την επέκταση (add-in) GISus-M για το πιο διαδεδομένο λογισμικό GIS, το ArcGIS. Η μεθοδολογία υπολογισμού του παράγοντα LS εφαρμόζεται για κάθε ψηφίδα του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου (DEM).

Ο υπολογισμός του παράγοντα L προκύπτει από τον τύπο που πρότειναν οι Desmet και Govers, (1996) [3.34]. Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι (O'Callaghan και Mark, 1984; Quin et al., 1991; Tarboton, 1997) για τον υπολογισμό της ανάντη συμβάλλουσας επιφάνειας A_{ij-in} . Για την αναγνώριση των καναλιών το LS-TOOL χρησιμοποιεί την μεθοδολογία που προτάθηκε από τον Tarboton (1991) ενώ για τον υπολογισμό του m χρησιμοποιείται η σχέση [3.36] και [3.37] που προτάθηκαν από τους McCool et al., (1989).

Ο υπολογισμός του παράγοντα S προκύπτει όπως προτάθηκε από τους McCool et al. (1989) :

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03 \text{ όταν } \theta < 9\% , \quad [3.39]$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.5 \text{ όταν } \theta \geq 9\% , \quad [3.40]$$

Οι παραπάνω εξισώσεις εφαρμόζονται σε κλίσεις με μήκος μεγαλύτερο των 4.57m (15 ft.), δηλαδή μίας και αναφερόμαστε για ένα εργαλείο σε περιβάλλον Σ.Γ.Π σε περιπτώσεις που το μέγεθος του κελιού/ψηφίδας ενός DEM είναι μικρότερο από 4.57m, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω εξίσωση για τον υπολογισμό του συντελεστή S (McCool et al., 1987):

$$S = 3 \cdot (\sin \theta)^{0.8} + 0.56 \quad [3.41]$$

Τέλος, μία άλλη σχέση υπολογισμού του τοπογραφικού συντελεστή LS που προτάθηκε από τους Moore και Burch (1986), διατυπώνεται ακολούθως:

$$LS = \left((flow \ accumulation) \cdot \frac{Cell \ size}{22.13} \right)^{0.4} \cdot \left(\frac{(\sin slope)}{0.0896} \right)^{1.3} \quad [3.42]$$

Όπου:

Flow accumulation or flow length : συσσωρευμένη συμβολή των ανάντη κελιών στο εκάστοτε κελί.

Cell size: μέγεθος κελιού/ ανάλυση του κάνναβου (*m*)

Sin slope: sin της κλίσης σε μοίρες (°)

Στην παραπάνω εξίσωση το μέρος που αφορά το μήκος ροής (flow length) και την συγκέντρωση ροής (flow accumulation), εκφράζουν τον αριθμό των ανάντη κελιών ενός ψηφιδωτού αρχείου (raster) τα οποία συμβάλλουν στο εκάστοτε κελί (B.Jiang, 2013).

3.3.3.4 Συντελεστής κάλυψης γης – C

Ο συντελεστής κάλυψης γης (Cover Management factor) (αδιάστατος) κάνει λόγο για την επίδραση των καλλιεργειών και των σχετικών διαχειριστικών πρακτικών στο ρυθμό παραγωγής εδαφικής διάβρωσης (Φ.Βαχαβιώλος, 2014). Σύμφωνα με τους J.M. Van der Knijff et al., (2000) ο συντελεστής C είναι ο δεύτερος πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την διάβρωση του εδάφους, και αντικατοπτρίζει την επίδραση της καλλιέργειας του εδάφους. Το εύρος τιμών του C είναι από 1 έως 0, όταν ισούται με 1 σημαίνει ότι δεν υπάρχει κάλυψη και η επιφάνεια θεωρείται γυμνό έδαφος, ενώ όπου το C τείνει προς το 0 υποδηλώνεται έντονη κάλυψη (και ισχυρά προστατευμένο έδαφος) (T.Gia Pham, 2018).

Οι τιμές του C στη RUSLE, σε αντίθεση με την USLE που επιλέγονται από μικρή γκάμα τιμών C μέσω πινακοποιημένων δεδομένων, προκύπτουν μέσω της πολλαπλασιαστικής σχέσης:

$$C \sim SLR = PLU \cdot CC \cdot SC \cdot SR \cdot SM \quad [3.43]$$

Όπου:

C~SLR: συντελεστής φυτοκάλυψης (Soil Loss Ratio)

PLU: συντελεστής πρότερης χρήσης γης (Prior Land Use) – εύρος 0~1

CC: συντελεστής φυτοκάλυψης (Canopy Cover) – εύρος 0~1

SC: συντελεστής επιφανειακής κάλυψης (Surface Cover) – εύρος 0~1

SR: συντελεστής εδαφικής τραχύτητας (Surface Roughness) – εύρος 0~1

SM: συντελεστής εδαφικής υγρασίας (Soil Moisture) – εύρος 0~1

Οι παραπάνω συντελεστές προκύπτουν κατά σειρά από τις σχέσεις (Renard et al., 1997):

$$PLU = C_f C_b \exp \left[(-c_{ur} B_{ur}) + \left(\frac{c_{us} B_{us}}{C_f^{c_{uf}}} \right) \right] \quad [3.44]$$

Όπου:

C_f: συνοχή επιφανειακού εδαφικού στρώματος

C_b: σχετική αποτελεσματικότητα (συνδρομή) των φυτικών υπολειμμάτων της επιφανειακής εδαφικής στρώσης στην εδαφική συνοχή

c_{ur} , c_{us} : συντελεστές διόρθωσης σχετικοί με την επίδραση των φυτικών υπολειμμάτων

B_{ur} : ποσότητα νεκρών και ζωντανών ριζών στην επιφανειακή εδαφική στρώση ($\text{lb acre}^{-1}\text{in}^{-1}$)

B_{us} : ποσότητα φυτικών υπολειμμάτων στην επιφανειακή εδαφική στρώση ($\text{lb acre}^{-1}\text{in}^{-1}$)

c_{uf} : επίδραση της εδαφικής συνοχής στην αποτελεσματικότητα των φυτικών υπολειμμάτων

Σύμφωνα με τον Φ.Βαχαβιώλο (2014), ο συντελεστής φυτοκάλυψης CC υποδηλώνει την αποτελεσματικότητα της φυτοκάλυψης στην απομείωση της ενέργειας των σταγόνων της βροχόπτωσης και προκύπτει:

$$CC = 1 - F_c \cdot \exp(-0.1 \cdot H) \quad [3.45]$$

Όπου:

F_c : κλάσμα της φυτοκάλυψης επί της συνολικής έκτασης

H : ύψος πτώσης (ft) των σταγόνων της βροχόπτωσης μετά την πρόσκρουση τους στη φυτοκάλυψη

Ο συντελεστής επιφανειακής κάλυψης SC θεωρείται ο πιο σημαντικός μεταξύ των συντελεστών που επιδρούν στη διαμόρφωση των τιμών του συντελεστή φυτοκάλυψης C, μειώνοντας τη μεταφορική ικανότητα του νερού, προκαλώντας αποθέσεις σε περιοχές λιμναζόντων νερών και μειώνοντας την εδαφική επιφάνεια που παραμένει εκτεθειμένη στη διαβρωτική επίδραση της βροχόπτωσης (Renard *et al.*, 1997). Η επιφανειακή κάλυψη μπορεί να περιλαμβάνει, πέρα από τις αρόσιμες επιφάνειες, οργανικά και φυτικά υπολείμματα, βολβούς και ριζικά συστήματα, πέτρες και κροκάλες (Φ.Βαχαβιώλος, 2014). Η σχέση για τον υπολογισμό του SC είναι:

$$SC = \exp \left[-b \cdot S_p \cdot \left(\frac{0.24}{R_u} \right)^{0.08} \right] \quad [3.46]$$

Όπου:

b : εμπειρικός συντελεστής που υποδηλώνει την αποτελεσματικότητα της εδαφοκάλυψης στη μείωση της εδαφικής διάβρωσης

S_p : ποσοστό (%) επιφανειακής κάλυψης επί της συνολικής επιφάνειας

R_u : επιφανειακή τραχύτητα (in) αδιατάρακτου εδάφους

Το ποσοστό επιφανειακής κάλυψης S_p και δη του φυτικού υπολείμματος προκύπτει:

$$S_p = [1 - \exp(-a \cdot B_s)] \cdot 100 \quad [3.47]$$

Όπου:

a : λόγος επιφάνειας προς μάζας υπολείμματος (lb acre^{-1}) με τυπικές τιμές να περιέχονται σε πίνακες της RUSLE (Renard et al., 1997)

B_s : βάρος (ξηρό) του υπολείμματος που βρίσκεται στην εδαφική επιφάνεια (lb acre^{-1})

Η επιφανειακή τραχύτητα R_u (in) αδιατάρακτου εδάφους αμέσως πριν την άροση προκύπτει από τη σχέση:

$$R_u = 0.24 + [D_r \cdot (R_i - 0.24)] \quad [3.48]$$

Όπου:

R_i : Αρχική εδαφική τραχύτητα (in)

D_r : συντελεστής εξομάλυνσης της εδαφικής τραχύτητας, προκαλούμενης από την επίδραση ενδεχόμενης βροχόπτωσης.

Ο D_r προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$D_r = \exp \left[\frac{1}{2} (-0.14 \cdot P_t) + \frac{1}{2} (-0.012 \cdot EI_t) \right] \quad [3.49]$$

Όπου:

P_t : συνολικό ύψος (in) βροχής στο διάστημα που μεσολάβησε από την πιο πρόσφατη διατάραξη του εδάφους

EI_t : η ποσότητα ενέργειας της βροχόπτωσης για το αντίστοιχο διάστημα

Ο συντελεστής εδαφικής τραχύτητας SR προκύπτει από τη σχέση:

$$SR = \exp[-0.66 \cdot (R_u - 0.24)] \quad [3.50]$$

Τέλος, ο συντελεστής εδαφικής υγρασίας SM προκύπτει από δεδομένα πινάκων και εν γένει κατά τις υγρές περιόδους οι τιμές του πλησιάζουν το 1, ενώ αντίθετα κατά τις ξηρές πλησιάζουν το 0 (Φ.Βαχαβιώλος, 2014).

Ένας εναλλακτικός τρόπος προσδιορισμού του συντελεστή φυτοκάλυψης είναι η χρήση μεθόδων τηλεπισκόπησης, με ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων και χρήση δεικτών βλάστησης (Vegetation Indexes/VI's) και ιδιαίτερα του κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index/ NDVI) (Κουράκλη, 2010, Wang et al., 2003).

Ένας δείκτης βλάστησης δημιουργείται από το συνδυασμό των ψηφιακών τιμών σε διάφορα φασματικά κανάλια, οι οποίες προστίθενται, διαιρούνται ή πολλαπλασιάζονται μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγεται μια μοναδική τιμή για κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας η οποία υποδεικνύει την ποσότητα και το επίπεδο της υγιούς βλάστησης που υπάρχει σε αυτό. Τα φασματικά κανάλια που

επιλέγονται είναι στις περιοχές του κόκκινου και του εγγύς υπέρυθρου, στις οποίες ως γνωστό η βλάστηση παρουσιάζει φασματική απόκριση η οποία είναι αντίστροφη με αυτή των γυμνών από βλάστηση επιφανειών. Η αντίστροφη αυτή μεταβολή ελαττώνεται με τη γήρανση ή ξήρανση της βλάστησης, ή την εκδήλωση ασθένειας.

Σύμφωνα με τους Prasannakumar et al. (2012), ο κανικοποιημένος δείκτης βλάστησης (NDVI) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ζωτικότητας της βλάστησης – της υγείας της βλάστησης. Ο NDVI αποτελεί μια από τις συνηθέστερες τεχνικές φασματικής ανάλυσης που ανήκει στην κατηγορία της άλγεβρας εικόνας, δηλαδή δημιουργία νέας πιο ερμηνευτικής εικόνας με αριθμητικές πράξεις μεταξύ δύο καναλιών (Ι.Ν.Χατζόπουλος, 2012). Επίσης, οι Karydas et al. (2009) και οι Tian et al. (2009) αναφέρουν ότι εξαιτίας της ποικιλότητας των μοτίβων της κάλυψης γης, τα δεδομένα τηλεπισκόπησης διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στις εκτιμήσεις του συντελεστή φυτοκάλυψης – C.

Ο δείκτης NDVI, χρησιμοποιεί τα δορυφορικά κανάλια R και NIR

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad [3.51]$$

Όπου:

R : το ερυθρό τμήμα του φάσματος (0.63 – 0.69 μm)

NIR : το εγγύς υπέρυθρο τμήμα του φάσματος (0.76 – 0.9 μm)

Ο NDVI παρέχει μια ακατέργαστη εκτίμηση της υγείας της βλάστησης. Η τιμή κανονικοποιείται στο διάστημα -1 έως 1. Το μηδέν αντιστοιχεί στο γυμνό έδαφος, οι αρνητικές τιμές σε μάζες νερού και οι θετικές στην βλάστηση (0.6 για μια πολύ «πράσινη» περιοχή) (Ι.Ν.Χατζόπουλος, 2012). Τέλος, σύμφωνα με τους J.M. van der Knijff (1999) ο δείκτης NDVI είναι θετικά συσχετισμένος με την ποσότητα φυτικής βιομάζας, και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό διαφορών στην φυτική κάλυψη γης

Η Ευρωπαϊκή Κομισιόν και ειδικότερα το European Soil Bureau ανέπτυξαν μια εξίσωση [3.52] για την σχέση μεταξύ του NDVI και του συντελεστή C (J.M. Van der Knijff et al, 1999):

$$C = e^{-(NDVI/(-NDVI))} \quad [3.52]$$

Ο Sulistiyo (2011) απλοποίησε την εξίσωση [3.52] σε μία μη γραμμική εκθετική συνάρτηση:

$$Y = \alpha e^{(\beta X)} \quad [3.53]$$

Όπου:

Y = Ο συντελεστής C

X = οι τιμές του NDVI

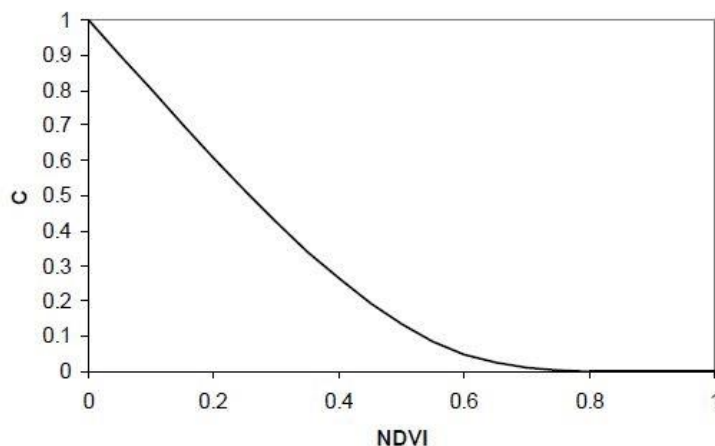
Το α και β είναι παράμετροι που καθορίζουν το σχήμα της καμπύλης NDVI – C. Οι J.M. van der Knijff et al. (1999) πρότειναν τις τιμές α=2 και β= 1.

Σύμφωνα με τους Zhou et al. (2008), Kouli et al. (2009) και J.M. van der Knijff (1999), ο συντελεστής C μπορεί να υπολογιστεί εφαρμόζοντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$C = \exp \left[-\alpha \cdot \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)} \right] \quad [3.54]$$

Όπου:

Το α και β είναι παράμετροι που καθορίζουν το σχήμα της καμπύλης NDVI – C. Όπως ειπώθηκε και για την σχέση [3.53], οι J.M. Van der Knijff et al. (1999) πρότειναν τις τιμές $\alpha=2$ και $\beta=1$.



Σχήμα 11: Σχέση μεταξύ NDVI και συντελεστή C με την χρήση εκθετικής συνάρτησης (πηγή: J.M van der Knijff et al., 1999)

Ο Sulistygo (2010) ανέπτυξε τις δυο παρακάτω εξισώσεις για τον υπολογισμού του συντελεστή κάλυψης γης – C, με την χρήση του κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης (NDVI):

- Γραμμική εξίσωση (Linear)

$$C = 0.6 - 0.77 NDVI \quad [3.55]$$

- Μη-γραμμική εξίσωση (Non-linear)

$$C = 5.77 \cdot \exp(-5.62 \cdot NDVI) \quad [3.56]$$

Ενώ σύμφωνα με τον Suriyaprasit (2008), προτείνεται η μη-γραμμική εξίσωση:

$$C = 0.227 \cdot \exp(-7.337 \cdot NDVI) \quad [3.57]$$

Τέλος ένας άλλος τρόπος υπολογισμού του παράγοντα C, όπως και στην περίπτωση του υπολογισμού της εδαφικής διαβρωσιμότητας K είναι η άντληση τιμών από την βιβλιογραφία. Σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητη η αξιοποίηση βάσεων δεδομένων κάλυψης γης/ χρήσης γης (π.χ. Corine) και η αντιστοίχιση των κατηγοριών κάλυψης/χρήσης γης που παρατηρούνται σε μια περιοχή με τιμές από την βιβλιογραφία.

3.3.3.5 Συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης – P

Ο συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης ή και συντελεστής υποστηρικτικών πρακτικών κατά της διάβρωσης (Support Practice factor), λαμβάνει τιμές από 0~1 (αδιάστατο), και αντικατοπτρίζει την επίδραση που μπορούν να έχουν διάφορες καλλιεργητικές και διαχειριστικές τεχνικές στην μείωση της εδαφικής διάβρωσης (Φ.Βαχαβιώλος, 2014). Ειδικότερα, αναφορικά με τις καλλιεργητικές πρακτικές, η παράλληλη στις ισοϋψείς καλλιέργεια, η καλλιέργεια με λωρίδες εναλλασσόμενων καλλιεργειών και η ανάπτυξη αναβαθμίδων και αναχωμάτων επηρεάζουν σημαντικά τη ανάπτυξη διάβρωσης (N.Μαμάσης et al., 2015).

Οι τιμές του συντελεστή P, εφόσον ακολουθούνται τεχνικές όπως οι παραπάνω μπορούν να μειώσουν σημαντικά την εδαφική διάβρωση. Αυτές οι τιμές μπορούν να χαρακτηριστούν ως θεωρητικές γιατί όλες οι σύγχρονες πρακτικές και δράσεις αποτροπής της διάβρωσης, επιβραδύνουν το φαινόμενο αλλά δεν το διακόπτουν (Παπάζογλου, 2009). Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Παναγούλια και Δήμου (2002), για καλλιέργεια παράλληλα με τις ισοϋψείς οι τιμές του συντελεστή P, κυμαίνονται μεταξύ 0,6~0,9, για λωρίδες εναλλασσόμενων καλλιεργειών και περιοδική εναλλαγή τους μεταξύ 0,3~0,45, και για χρήση αναβαθμίδων και σειράς μικρών αναχωμάτων κάθετων στην κλίση του εδάφους μεταξύ 0,12~0,18.

3.4 Προσδιοριστικά – Φυσικά Μοντέλα (physically-based models)

Τα φυσικά μοντέλα στοχεύουν στην προσομοίωση του συνόλου των μηχανισμών αλληλεπίδρασης της εδαφικής διάβρωσης και απαιτούν συνήθως έναν μεγάλο όγκο δεδομένων (Συλλαίος et al., 2007). Για την ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων είναι απαραίτητη η διεπιστημονική συνεργασία, δεδομένου ότι μεμονωμένα μοντέλα συντίθεται προκειμένου να προσομοιωθεί η διεργασία της εδαφικής διάβρωσης (Κουλούρη, 2004).

Τα μοντέλα αυτά έκαναν την εμφάνιση τους μετά την δεκαετία του '70, και βασίζονται σε φυσικούς νόμους μεταφοράς μάζας, ορμής και ενέργειας καθώς και στην κατανόηση των φυσικών διαδικασιών που διέπουν τα φαινόμενα της εδαφικής διάβρωσης και στερεομεταφοράς (Ξανθάκης, 2011). Έτσι για τον προσδιορισμό του φορτίου φερτών υλικών χρησιμοποιούνται μαθηματικές σχέσεις που σχετίζονται με τις υδρολογικές διαδικασίες μεταφοράς και απόθεσης φερτών υλικών. Χαρακτηριστικό αυτών των μοντέλων είναι οι υψηλές απαιτήσεις υπολογιστικής δύναμης για την πλήρη μοντελοποίηση της διαδικασίας παραγωγής φερτών υλικών.

Σύμφωνα με τους Merri et al., (2003) τα ποσοστά αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων τέτοιων μοντέλων συνδέονται άμεσα με πιθανά σφάλματα μετρήσεων των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων καθώς και με την έντονη χωρική ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών τους. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα από τα πιο διαδεδομένα φυσικά μοντέλα εδαφικής διάβρωσης.

3.4.1 WEPP (Water Erosion Prediction Project)

Το WEPP (Water Erosion Prediction Project) βασίζεται σε σύγχρονες μεθόδους της επιστήμης της υδρολογίας, και σχεδιάστηκε για να αντικαταστήσει την Universal Soil Loss Equation (USLE) για την εκτίμηση της διάβρωσης του εδάφους.

Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε από το υπουργείο γεωργίας των Η.Π.Α σε συνεργασία με άλλους τοπικούς φορείς, η πρώτη φάση ανάπτυξης του WEPP διήρκεσε από το 1985 έως το 1989 (Lafren et al, 1991), περιγράφει με μαθηματικές μεθόδους τις διαδικασίες αποκόλλησης, μεταφοράς και απόθεσης των σωματιδίων του εδάφους εξαιτίας υδρολογικών και μηχανικών δυνάμεων. Το WEPP υπολογίζει την απορροή και την διάβρωση σε ημερήσια βάση, και μπορεί να εφαρμόσκει σε πλαγιές ή σε μικρές λεκάνες απορροής. Το μοντέλο WEPP υπολογίζει τις χωρικές και χρονικές κατανομές της εδαφικής απώλειας και απόθεσης και παρέχει σαφείς υπολογισμούς για το πότε και πού παρουσιάζεται εδαφική διάβρωση, ώστε να εφαρμοστούν απαραίτητες πρακτικές αντιμετώπισης για τον περιορισμό της (Flanagan και Nearing, 1995).

Μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές με έκταση έως 260 ha (2.6 km^2) και λαμβάνει υπόψιν παράγοντες όπως το κλίμα, το έδαφος, την τοπογραφία καθώς και τις πρακτικές διαχείρισης και αντιμετώπισης (WEPP Software, 2004). Ένα διαφορετικό μοντέλο, το CLIGEN, χρησιμοποιείται για την απόκτηση των κλιματικών δεδομένων που αφορούν την βροχόπτωση, την θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία, και την ταχύτητα των ανέμων για την εισροή των δεδομένων του WEPP (Κ.Οκαλρ, 2005). Όλα τα απαραίτητα δεδομένα του μοντέλου WEPP συνοψίζονται στον Πίνακα 2.

Το Γεω-χωρικό περιβάλλον του μοντέλου WEPP (GeoWEPP) χρησιμοποιεί το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS) ArcGIS και την επέκταση Spatial Analyst, τα οποία έχουν αναπτυχθεί από την Environmental Systems Research Institute (ESRI). Το περιβάλλον αυτό καθιστά προσβάσιμες τις απαραίτητες βάσεις δεδομένων, οργανώνει τις προσομοιώσεις του μοντέλου, και δημιουργεί όλες τις απαραίτητες εισροές αρχείων του WEPP. Η τωρινή έκδοση του GeoWEPP επιτρέπει εκτιμήσεις μόνο για μικρές λεκάνες απορροής (<500 hectares) (GeoWEPP Software, 2004).

Input File	Data Needs
<i>Climate File</i> (hillslope and watershed components)	Meteorology Data, Precipitation, Wind, Temperature, Dew Point
<i>Slope File</i>	Overland Flow Elements (OFE), Hillside Length, Width, Slope
<i>Soil File</i> (one for each OFE and channel)	Soil Type, Texture, Porosity, Conductivity, organic matter (OM), cation exchange capacity (CEC), Albedo, Number and Depth of Soil Layers
<i>Plant/Management File</i> (one for each OFE and channel)	Plant Types, Characteristics, Growth Parameters, Management Practices
<i>Watershed Structure File</i>	Describes Watershed Configuration
<i>Watershed Channel File</i>	Characteristics of Channel, Shape, Depth, Erodibility, Hydraulic Parameters
<i>Impoundment File</i>	Characteristics of Impoundment and Outlets

Πίνακας 2: Απαραίτητα δεδομένα μοντέλου WEPP (πηγή: Κ.Οκαλρ, 2005).

Εν συντομία το μοντέλο WEPP (Κ.Οκαλρ, 2005):

- Βασίζεται σε διεργασίες.
- Υπολογίζει την επιφανειακή και ρυακοειδή διάβρωση που προκύπτει από την βροχόπτωση.
- Υπολογίζει την μέση ετήσια εδαφική απώλεια.
- Υπολογίζει την διάβρωση λεπτομερώς.
- Αποτελεί εργαλείο σχεδιασμού και αποτίμησης.

3.4.2 EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator)

Το μοντέλο EPIC (Williams et al., 1984) αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό της επίδρασης της διάβρωσης στην παραγωγικότητα του έδαφους. Από τα αρχικά στάδια ανάπτυξης του, το μοντέλο έχει διευρυνθεί και βελτιωθεί με στόχο την προσομοίωση των διαδικασιών της αγροτικής διαχείρισης. Το EPIC είναι ένα μοντέλο συνεχούς προσομοίωσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της επίδρασης των πρακτικών διαχείρισης του εδάφους στους υδατικούς πόρους και στην αγροτική παραγωγή. Τα κύρια δομικά στοιχεία του EPIC είναι οι προσομοιώσεις των καιρικών συνθηκών, της υδρολογίας, της διάβρωσης – ιζιματοαπόθεσης, του κύκλου των θρεπτικών συστατικών, της επίδρασης των παρασιτοκτόνων, της ανάπτυξης των φυτικών οργανισμών, της θερμοκρασίας του εδάφους, των καλλιεργιών, της οικονομίας (με την βοήθεια ενός ειδικού μοντέλου που περιγράφει την αύξηση της φυτικής παραγωγής, καθίσταται δυνατή η παροχή οικονομικών πληροφοριών), και του ελέγχου των φυτικών περιβάλλοντων. Το μοντέλο χαρακτηρίζεται από το μεγάλο μέγεθος του και από τις υψηλές απαιτήσεις σε υπολογιστική δύναμη (EPIC, 2004).

Για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής, ο όγκος της απορροής υπολογίζεται με την χρήση μια τροποποίησης της τεχνικής Soil Conservation Service (SCS). Ο συντελεστής διήθησης του EPIC χρησιμοποιεί τεχνικές διόδευσης φορτίου για την προσομοίωση της ροής μέσω των εδαφικών στρωμάτων. Η εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται με τέσσερις τρόπους, αυτούς των Hargreaves και Samani, Penman, Priestley-Taylor, και Penman-Monteith (Williams, 1994)

Το μοντέλο βροχόπτωσης του EPIC αναπτύχθηκε από τον Nicks (1974). Η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία προσομοιώνονται στο EPIC χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον Richardson (1981). Το μοντέλο αιολικής διάβρωσης του EPIC, WECS (Wind Erosion Continuous Simulation) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών των ανέμων καθώς και της αιολικής διάβρωσης. Ενώ το μοντέλο της σχετικής υγρασίας προσομοιώνει την μέση ημερήσια σχετική υγρασία μέσω της μέσης μηνιαίας τιμής με την χρήση τριγωνικής κατανομής (Sharpley και Williams, 1990).

Για την προσομοίωση της διάβρωσης από την βροχόπτωση και την απποροή, το EPIC διαθέτει έξι εξισώσεις: την USLE, την τροποποίηση της USLE από τους Onstad-Foster, την MUSLE, δύο διαφοροποιήσεις της MUSLE, και μία έκδοση της MUSLE που δέχεται σαν εισροές σταθερές. Οι έξι αυτές εξισώσεις είναι πανομοιότυπες με εξαίρεση το κομμάτι των ενεργειών. Τέλος το EPIC προσομοιώνει τις ακόλουθες διεργασίες που αφορούν την ρύπανση: νιτρικές απώλειες, μεταφορά της ρύπανσης

λόγο της εξάτμισης του νερού, μεταφορά του οργανικού αζώτου, απονίτρωση, ορυκτοποίηση, αζωτοποίηση, εξαέρωση, και απώλειες υδατοδιαλύτου φωσφόρου μέσω της επιφανειακής απορροής (Williams, 1994).

Μερικά μειονεκτήματα αυτού του μοντέλου είναι ότι δεν περιλαμβάνει την υπόγεια ροή, δεν υπάρχει αναφορά για τυχών ύπαρξη τεχνητών υδροροών και δεν προσομοιώνει την πορεία των ιζημάτων με λεπτομέρεια (K.Okalp, 2005).

Έν συντομία το EPIC (K.Okalp, 2005):

- Υπολογίζει την μείωση των σοδείων λόγω της διάβρωσης.
- Λειτουργεί για μεμονομένα επεισόδια βροχόπτωσης.
- Δίνει έμφαση στην επίδραση της διάβρωσης, στις αλλαγές που προκαλούνται στο έδαφος και στην παραγωγικότητα του.
- Είναι ένα συνεχές μοντέλο προσομοίωσης.
- Απαιτεί αρκετά λεπτομερή δεδομένα.
- Εφαρμόζεται σε σημεία και έτσι δεν λαμβάνει υπόψιν την μεταφορά ιζημάτων και απόθεση.

3.4.3 ANSWERS – (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulator)

Το μοντέλο ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulator) αναπτύχθηκε από τους Beasley et al. (1980) στα τέλη της δεκαετίας του 70'. Στην αρχική του μορφή το ANSWERS ήταν μια κατανεμημένη παράμετρος, το οποίο αναπτύχθηκε για την αξιολόγηση των «καλύτερων» πρακτικών διαχείρισης (best management practices – BMPs) της επιφανειακής απορροής και απώλειας ιζημάτων για λεκάνες απορροής με καλλιεργήσιμο κυρίως χαρακτήρα.

Το ANSWERS υποδιαιρεί τις λεκάνες απορροής σε ψηφίδες (κελία), οι οποίες εμπεριέχουν πληροφορίες για την χρήση γης, τις κλίσεις, τις ιδιότητες του εδάφους, τα θρεπτικά συστατικά, τις καλλιέργειες καθώς και για της πρακτικές αντιμετώπισης της διάβρωσης. Οι διαφορές που εμφανίζονται μεταξύ των ψηφίδων επιτρέπουν στο μοντέλο την διάκριση των διαφορών στην φύση των λεκανών απορροής και την αποτελεσματικότητα των εκάστοτε πρακτικών διαχείρισης – BMPs. Το τυπικό μέγεθος μιας ψηφίδας κειμένεται από 0.4 έως 1 ha, με τις μικρότερες ψηφίδες να παρέχουν πιο ακριβείς προσομοιώσεις. Για κάθε κελί το μοντέλο προσομοιώνει την παρεμπόδιση, την επιφανειακή κατακράτηση, την διείσδυση, την επιφανειακή απορροή, την διήθηση, την αποκόλληση και μεταφορά ιζημάτων. Το μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει τα αποτελέσματα των πρακτικών αντιμετώπισης της διάβρωσης όπως είναι οι νερόλακκοι, τεχνητές και φυσικές υδροροές καθώς και των διάφορων καλλιεργητικών τεχνικών (Bottcher et al. ,1981).

Ένα μειονέκτημα του μοντέλου ANSWERS ήταν το μοντέλο διάβρωσης που εμπεριείχε και που υπολόγιζε μόνο την συνολική μεταφορά ιζημάτων. Το μοντέλο τροποποιήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 80' για την προσομοίωση της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων του διαβρωμένου ιζήματος (Dillaha και Beasley, 1983) και την εκτίμηση της μεταφοράς των ιζημάτων. Οι Rewrts και Engel

(1991) ανέπτυξαν ένα περιβάλλον ΣΓΠ (GIS) για το μοντέλο αυτό. Στη δεκαετία του 80' αναπτύχθηκαν εκδόσεις για την μεταφορά του φωσφόρου (Storm et al., 1988) και του αζώτου (Dillağa και Beasley, 1983).

Η σημερινή έκδοση του μοντέλου ANSWERS-2000, αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 90' (Bouraoui και Dillağa, 1996). Στην έκδοση αυτή, τα υπό-μοντέλα των θρεπτικών συστατικών αναδιαμορφώθηκαν και προστέθηκαν βελτιωμένες συνιστώσες διήθησης, εδαφικής υγρασίας και ανάπτυξης των φυτικών οργανισμών με σκοπό τις συνεχείς μακροχρόνιες προσομοιώσεις.

Η ευκολία χρήσης είναι βασικό χαρακτηριστικό κάθε μοντέλου. Για αυτό τον λόγο αναπτύχθηκε το «Questions» για το μοντέλο ANSWERS-2000. Το οποίο αποτελεί ένα φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον για το ANSWERS-2000 (K.Okalp, 2005).

Εν συντομία το ANSWERS (K.Okalp, 2005):

- Είναι ένα εργαλείο διαχείρισης λεκανών απορροής, για την μοντελοποίηση της διάβρωσης και τον έλεγχο της απομάκρυνσης ιζήματος.
- Είναι εργαλείο ανάλυσης της ποιότητας του νερού
- Βασίζεται σε διεργασίες και σε γεγονότα
- Αναπαρηστάται με ψηφίδες
- Κυρίως περιορίζεται σε μεμονομένα επεισόδια βροχοπτώσης
- Περιορισμένη ικανότητα όσον αφορά την διάβρωση που προκύπτει από συγκεντρωμένες ροές
- Είναι ένα πλήρες δυναμικό μοντέλο

4. Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών

Ένα σημαντικό πρόβλημα στην μοντελοποίηση, καθώς και στην μοντελοποίηση της διάβρωσης του εδάφους αποτελεί η δυσκολία της αποτελεσματικής αξιοποίησης και χειρισμού μεγάλου όγκου δεδομένων. Η συλλογή δεδομένων που αφορούν την χωρική κατανομή σημαντικών ιδιοτήτων της γήινης επιφάνειας, των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, των ζωικών και φυτικών οργανισμών αποτελεί εδώ και μεγάλο χρονικό διάστημα αξιόλογο χαρακτηριστικό των οργανωμένων κοινωνιών του σύγχρονου κόσμου. Μέχρι πρότινος το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών των δεδομένων ήταν σε έντυπη μορφή και έντυπους χάρτες. Η ανάγνωση τους ήταν εύκολη, αλλά η ανάλυση των χωρικών προτύπων των χαρακτηριστικών διαφόρων φαινομένων καθώς και η αναγνώριση των αιτιών δημιουργίας αυτών των προτύπων στον χώρο αποτελούσε μια αρκετά δύσκολη διαδικασία.

Η πρόοδος που σημειώθηκε κατά το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα στον τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθώς και των μαθηματικών εργαλείων με εφαρμογές στην χωρική ανάλυση, αύξησαν τις δυνατότητες απόκτησης, αποθήκευσης και οπτικοποίησης δεδομένων για διάφορες πτυχές της γήινης επιφάνειας (Huxhold, 1991).

Ο τομέας των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με αυτόν των GIS, συνεπώς, εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών οδήγησε στην ανάπτυξη του τομέα των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π./GIS)

σαν ένα μοναδικό υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο παρέχει την δυνατότητα για χωρική οργάνωση και αποτελεσματική διαχείριση δεδομένων για την ανάλυση και μοντελοποίηση και τελικώς την οπτικοποίηση διάφορων μοντέλων. Τα GIS έτσι γίνονται ένα βασικό εργαλείο για ευρεία χρήση στον τομέα των περιβαλλοντικών επιστημών και εφαρμογών χρήσεων γης (Chuviesco, 1993). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μείωση των απαιτήσεων συλλογής δεδομένων, αποσπώντας σημαντικές πληροφορίες από ήδη υπάρχουσες βάσεις δεδομένων. Για παράδειγμα, μια σημαντική δυνατότητα που παρέχουν, είναι η εκτίμηση της κλίσης του αναγλύφου από υψομετρικά δεδομένα (Srinivasan και Engel, 1991).

Σύμφωνα με τον Dangermond (1992) τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) είναι μία οργανωμένη δομή υπολογιστικών μηχανημάτων, λογισμικού και γεωγραφικών δεδομένων σχεδιασμένα για την αποτελεσματική καταγραφή, ενημέρωση, χειρισμό, ανάλυση και οπτικοποίηση όλων των μορφών των πληροφοριών με γεωγραφική διάσταση. Ο Aronoff (1991) όρισε τα GIS ως κάθε χειροκίνητο ή βασισμένο σε υπολογιστές σύστημα το οποίο παρέχει τις τέσσερις παρακάτω δυνατότητες για τον χειρισμό γεω-αναφερμένων δεδομένων: εισροή, διαχείριση (απόκτηση και αποθήκευση), ανάλυση και εκροή γνώσης. Οι Star και Estes (1990) όρισαν ως GIS κάθε πληροφοριακό σύστημα το οποίο είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί με δεδομένα αναφερόμενα από χωρικές ή γεωγραφικές συντεταγμένες. Τον όρο Geographical Information Systems περιέγραψε και ο Burrough (1986) ως: «ένα ισχυρό εργαλείο για συλλογή, ανάκληση κατά βούληση, μεταφορά και παρουσίαση χωρικών δεδομένων από τον πραγματικό κόσμο για ένα συγκεκριμένο σκοπό»

Βάσει ενός πιο σύγχρονου ορίσμου, «GIS είναι ένα σύνολο υλικού, λογισμικού και διαδικασιών το οποίο με την κατάλληλη χρήση υποστηρίζει τη συλλογή, διαχείριση, ανάλυση, μοντελοποίηση και παρουσίαση δεδομένων με χωρική αναφορά. Αποτελεί επίσης σημαντικό εργαλείο υποστήριξης λήψεων αποφάσεων στην επίλυση ποικίλων προβλημάτων διαχείρισης και σχεδιασμού. Στις μέρες μας αποδίδεται και ως Geographical Information Science (Επιστήμη Γεωγραφικών Πληροφοριών – Ε.Γ.Π)» (Χ.Χαλκιάς, 2006).

Η ιστορία των γεωγραφικών πληροφοριακών συστημάτων είναι παλαιότερη ίσως από όσο πιστεύουμε. Τα πρώτα συστήματα επεξεργασίας χωρικών δεδομένων έκαναν την εμφάνισή τους στο τέλος της δεκαετίας του '50 (Garner, 1993). Τα GIS αναπτύχθηκαν ταυτόχρονα στη Βόρεια Αμερική, την Ευρώπη και την Αυστραλία. Ένα μεγάλο μέρος της δημοσιευμένης ιστορίας τους εστιάζει στη συμβολή των Η.Π.Α, επομένως είναι δύσκολο κανείς να έχει μια σφαιρική άποψη για την ιστορία των GIS (P.A.Longley et al., 2005). Η ανάπτυξη του πρώτου “πραγματικού” λογισμικού GIS έλαβε χώρα το 1960 στην Οττάβα του Καναδά από την υπηρεσία δασολογίας και αστικής ανάπτυξης και συγκεκριμένα από τον Roger Tomlinson, και ονομάστηκε Canada Geographic System (CGIS), ενώ σταμάτησε να χρησιμοποιείται στα μέσα της δεκαετίας του 1990 (D.Freeman et al., 1993).

Την δεκατία του 60' όπου και πρωτοεμφανίστηκαν, τα Σ.Γ.Π υποστηρίζονταν από μεγάλους υπολογιστές (mainframe), οι οποίοι βρίσκονταν συνήθως σε μεγάλα υπολογιστικά κέντρα. Από το μέσο της δεκαετίας του 70' μέχρι και τις αρχές της δεκαετίας του 80', ο κυρίαρχος τύπος υπολογιστών που υποστήριζαν τα GIS ήταν

μικρο-υπολογιστές που παρείχαν την δυνατότητα σε έναν μεγάλο αριθμό χρηστών να χρησιμοποιούν την ίδια μονάδα υπολογιστή (timesharing mode). Το δεύτερο μισό της δεκαετίας του 80' έλαβε χώρα μια ραγδαία ανάπτυξη στην χρήση των προσωπικών υπολογιστών, και τα GIS πλέον ήταν διαθέσιμα σε αυτούς. Το δεύτερο ταχύτερο κομμάτι ανάπτυξης που γνώρισαν τα μηχανήματα (hardware) των GIS ήταν στις αρχές της δεκαετίας του 90' όπου εμφανίστηκαν οι υπολογιστές με την αρχιτεκτονική των 32-bit οι οποίοι παρείχαν μεγαλύτερη υπολογιστική δύναμη από την υπάρχουσα, και εξαιρετικά για την εποχή γραφικά, καθώς και η μετέπειτα ανάπτυξη τεχνολογιών που επέτρεπαν την επικοινωνία των υπολογιστών μέσω δικτύων (Dangermond, 1992).

Αυτή η αναπτυσσόμενη τεχνολογία προσφέρει εξαιρετικές δυνατότητες για την ενίσχυση και μεταμόρφωση των διαδικασιών σχεδιασμού και διαχείρισης (Innes και Simpson, 1992). Τα GIS και άλλες σχετικές τεχνολογίες εφαρμόζονται σε διάφορους τομείς, ανάμεσα στους πιο σημαντικούς είναι η παρακολούθηση/μελέτη λεκανών απορροής, η διαχείριση φυσικών πόρων, η γεωργία, ο σχεδιασμός χρήσεων γης, η διαχείριση άγριας ζωής, η αυτοματοποιημένη χαρτογράφηση, ο αστικός σχεδιασμός, η γεωλογία, η οικολογία, η υδρολογία, η γεωτεχνία, η αρχαιολογία, ο σχεδιασμός παράκτιων ζωνών, η διαχείριση φυσικών και ανθρωπογενών κινδύνων καθώς και ο στρατιωτικός σχεδιασμός.

4.1 Γεωγραφικά δεδομένα

Τα δεδομένα αποτελούν το βασικό συστατικό ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών. Τα γεωγραφικά δεδομένα γενικά είναι ένα σύνολο από καταγραφές-μετρήσεις που σχετίζονται με φαινόμενα ή αντικείμενα του χώρου. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ένταξη δεδομένων σε ένα GIS, είναι να αναφέρονται σε οντότητες με γεωγραφική αναφορά.

Τα γεωγραφικά δεδομένα διακρίνονται σε χωρικά δεδομένα (spatial data) των οποίων βασικό χαρακτηριστικό αποτελεί η αναφορά τους στον χώρο, και στα περιγραφικά δεδομένα (descriptive), τα οποία αναφέρονται στις ιδιότητες κάποιων χωρικών θέσεων.

Σύμφωνα με την παραδοσιακή χωρική θεωρία της γεωγραφίας τα χωρικά δεδομένα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες χωρικών αντικειμένων, σε γραμμές, πολύγωνα και σημεία (Χ.Χαλκιάς, 2011).

Όλα τα χωρικά δεδομένα έχουν περιορισμένη ακρίβεια. Σφάλματα είναι πιθανόν να προκύψουν σε όλα τα στάδια παραγωγής και διαχείρισης της γεωγραφικής πληροφορίας, από το στάδιο της συλλογής των δεδομένων έως και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Η επίτευξη των λιγότερων πιθανών σφαλμάτων μπορεί να μην είναι η πιο οικονομική προσέγγιση, έτσι πρέπει συχνά να υπάρξει ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην μείωση των σφαλμάτων και του κόστους για την δημιουργία, διαχείριση και συντήρηση βάσεων δεδομένων. Παρόλλα αυτά τα σφάλματα θε πρέπει να διαχειρίζονται έτσι ώστε οι πληροφορίες που σχεδιάστηκε ένα Σ.Γ.Π να παρέχει να μην είναι λανθασμένες (Aronoff, 1991).

Υπάρχουν δύο θεμελιώδεις τρόποι για την οργάνωση και αναπαράσταση των γεωγραφικών δεδομένων σε ένα GIS : το ψηφιδωτό μοντέλο (raster model) και το διανυσματικό μοντέλο (vector model).

Όσον αφορά την δομή των ψηφιδωτών δεδομένων (raster data), ο χώρος υποδιαιρείται σε ψηφίδες (cells). Κάθε ψηφίδα της διάταξης αυτής μπορεί να αναφερθεί με βάση την σειρά και την στήλη στις οποίες ανήκει, και περιέχει μία τιμή για το χαρακτηριστικό/φαινόμενο το οποίο περιγράφει, πολλές ψηφίδες είναι πιθανόν να έχουν την ίδια τιμή ως γειτονικές (Aronoff, 1991). Καθώς τα ψηφιδωτά δεδομένα συχνά αντιστοιχούν σε πολύ μεγάλο μέγεθος αρχείων, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές συμπίεσης του όγκους τους, όπως είναι η κωδικοποίηση κατά μήκος γραμμών (run-length encoding), η κωδικοποίηση αλυσίδας (chain encoding), η κωδικοποίηση τετραγώνων (block encoding) (Χ.Χαλκιάς, 2011) και το δυαδικό, τετραδικό δέντρο (binary tree, quad tree) (Aronoff, 1991).

Στην δομή των διανυσματικών δεδομένων (vector data), η αναπαράσταση γίνεται με γραμμές, σημεία και πολύγωνα. Συνήθως οργανώνονται σε σύνολα δεδομένων ή θεματικά επίπεδα (themes ή layers) (π.χ. χρήσεις γης, γεωλογικοί σχηματισμοί κ.λ.π.). Σημειώνεται ότι θεματικά επίπεδα τα οποία καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις συχνά διαιρούνται σε τεμάχια (tiles) έτσι ώστε να είναι πιο εύκολη η διαχείριση τους (Χ.Χαλκιάς, 2011).

Τα σύγχρονα GIS παρέχουν δυνατότητες μετατροπής από ψηφιδωτά σε διανυσματικά δεδομένα και αντίστροφα, έτσι στις μέρες και τα δύο μοντέλα δεδομένων χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά και όχι ανταγωνιστικά, έχοντας εξίσου σημαντικό ρόλο στις διαδικασίες επεξεργασίας και ανάλυσης των γεωγραφικών δεδομένων (Χ.Χαλκιάς, 2011). Κάθε μοντέλο χωρικών δεδομένων τείνει να λειτουργεί αποτελεσματικότερα σε περιπτώσεις όπου η διαχείριση της χωρικής πληροφορίας γίνεται με τρόπο που ταιριάζει στο κάθε μοντέλο δεδομένων. Η υψηλή χωρική διακύμανση αναπαρηγοείται αποτελεσματικά με τα ψηφιδωτά μοντέλα τα οποία χαρακτηρίζονται από απλή δομή δεδομένων και οι λειτουργίες υπέρθεσης είναι ευκολές και αποτελεσματικές, αλλά η μη συνεκτική δομή των δεδομένων αυτών καθώς και ο μεγάλος όγκος γραφικών δεδομένων αποτελούν μερικά από τα μειονεκτήματα των ψηφιδωτών μοντέλων. Αντίθετα, τα διανυσματικά μοντέλα χαρακτηρίζονται από ενιαία και συνεκτική δομή δεδομένων, επιτρέπουν την αποτελεσματική επεικόνιση τοπολογίας και κατά συνέπεια είναι καταλληλότερα για την διεξαγωγή χωρικών αναζητήσεων και πράξεων που χρησιμοποιούν την τοπολογία. Τα προϊόντα ενός GIS με διανυσματικά δεδομένα, είναι πιο κοντά στην παραδοσιακή μορφή των χαρτών, αλλά παρουσιάζουν και μειονεκτήματα όπως το γεγονός ότι σε σύνθετες δομές δεδομένων παρουσιάζονται δυσκολίες στην εφαρμογή λειτουργιών υπέρθεσης και εμφανίζονται αναποτελεσματικά στην οπτικοποίηση υψηλών χωρικών διακυμάνσεων (Aronoff, 1991).

4.1.1 Πηγές εισαγωγής γεωγραφικών δεδομένων

Σε ένα GIS καταχωρούνται όλων των ειδών τα δεδομένα (mixed-data system). Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι διάφορες πηγές εισαγωγής δεδομένων:

- Παραδοσιακοί αναλογικοί χάρτες των διαφόρων οργανισμών και υπηρεσιών, φωτογραφίες, σκαριφήματα, σχηματικά διαγράμματα.
- Αρχεία σε *ascii* και *binary* μορφή τα οποία περιέχουν γεωμετρική πληροφορία.
- Συλλογές τοπογραφικών μετρήσεων Οι μετρήσεις αυτές μπορεί να έχουν γίνει με συμβατικές επίγειες μετρήσεις, με χρήση GPS (Global Positioning Systems).
- Ποικίλες ψηφιακές μορφές, όπως διανυσματική (vector), ψηφιδωτή (raster) μορφή, βάσεις δεδομένων, λογιστικά πακέτα, αεροφωτογραφίες που έχουν αποδοθεί με χρήση ψηφιακής φωτογραμμετρίας, δορυφορικές εικόνες εφαρμόζοντας τεχνικές δορυφορικής τηλεπισκόπησης κ.α.

4.2 Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών και διάβρωση του εδάφους

Η διάβρωση του εδάφους είναι ένα χωρικό φαινόμενο, συνεπώς η επιστήμη της γεωπληροφορικής κατέχει έναν σημαντικό ρόλο στην μοντελοποίηση της διάβρωσης. Τα δεδομένα τηλεπισκόπησης, οι υπάρχουσες βάσεις δεδομένων και χάρτες εξασφαλίζουν έναν μεγάλο όγκο δεδομένων που συνεισφέρουν στην διαδικασία της μοντελοποίησης (Petter, 1992). Τα δεδομένα τηλεπισκόπησης μπορούν να γεωαναφερθούν στην χωρική τους θέση για εφαρμογές σε περιβάλλον GIS (Yassoglou, 1989). Σε γενικές γραμμές οι τεχνικές γεωπληροφορικής εμφανίζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα στην μοντελοποίηση της διάβρωσης του εδάφους:

1. Γρήγορες και περιορισμένου κόστους εκτιμήσεις.
2. Δυνατότητα για μελέτη μεγάλων περιοχών.
3. Συνεχής παρακολούθηση των περιοχών μελέτης.
4. Δυνατότητες βελτίωσης των μοντέλων ανάλογα με την χωρική κλίμακα.

Η αξιοποίηση των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων (DEM) μέσω των GIS προσφέρει δυνατότητες για την εκτίμηση των τοπογραφικών παραγόντων. Με την χρήση ενός GIS, μπορούν να υπολογιστούν από ένα DEM, το μέγεθος μιας λεκάνης απορροής, η κλίση του αναγλύφου καθώς και η ποσότητα του νερού που διέρχεται από ένα συγκεκριμένο σημείο της επιφάνειας του εδάφους (Petter, 1992).

Οι ικανότητες των Σ.Γ.Π. είναι αρκετά χρήσιμες απο μόνες τους, αλλά γίνονται σημαντικότερες όταν συνδυάζονται με διάφορους τύπους αναλυτικών μοντέλων. (Dangermond, 1992).

Η μοντελοποίηση σε περιβάλλον GIS χαρακτηρίζεται ως η δημιουργία ψηφιακής βάσης δεδομένων η οποία μπορεί να αλληλεπιδρά με μαθηματικά μοντέλα. Για παράδειγμα με την χρήση ενός GIS, οι χωροθέτες μπορούν να συσχετίσουν την κάλυψη γης και τοπογραφικά δεδομένα με έναν μεγάλο αριθμό περιβαλλοντικών παραμέτρων που συσχετίζονται με διάφορους δείκτες όπως είναι η επιφανειακή

απορροή, η αποστράγγιση μίας λεκάνης απορροής και διάφορες παραμέτρους του εδάφους (Nikkami, 1999).

Η εφαρμογή των μοντέλων διάβρωσης σε περιβάλλον GIS εξασφαλίζει την αποτελεσματική διαχείριση των χωρικών δεδομένων, τον υπολογισμό των παραμέτρων για διαφορετικά σενάρια, την χωρική ανάλυση των αποτελεσμάτων των μοντέλων, και την αναπαράστασή τους. Τα GIS επιτρέπουν επίσης την στατιστική ανάλυση και μοντελοποίηση των διαδικασιών διάβρωσης που καταγράφηκαν μέσω μεθόδων τηλεπισκόπησης (Mitasova et al., 2013).

Στις αρχές τις δεκαετίας του 90', το Geographic Resources Analysis and Support System (GRASS) (Neteler και Mitasova, 2008) παρείχε ένα περιβάλλον για καινοτόμες έρευνες συνδέοντας τα GIS με μοντέλα υδρολογίας και διάβρωσης του εδάφους (Rewerts και Engel, 1991; Mitechell et al., 1993). Οι περισσότερες αναπτύξεις και εφαρμογές γεωχωρικών μοντέλων διάβρωσης του εδάφους εστιάζουν στην γεωργία, στην διατήρηση του εδάφους, στον έλεγχο της ρύπανσης, στην αειφόρο διαχείριση του εδάφους (Harmon και Doe 2001; Gaffer et al., 2008), και στην δασολογία, ειδικά μετά την εκδήλωση πυρκαγιών.

Σύμφωνα με τους Mitasova et al. (2013), μεταξύ των πρώτων εφαρμογών μοντέλων διάβρωσης του εδάφους σε περιβάλλον GIS ήταν ο υπολογισμός της Παγκόσμιας Εξίσωσης Εδαφικής Απώλειας (USLE) και η εξαγωγή του τοπογραφικού συντελεστή (LS factor) από ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα (DEMs). Οι Moore και Burch (1986) και αργότερα οι Moore και Wilson (1992) ήταν πρωτεργάτες όσον αφορά την εφαρμογή της USLE σε περιοχές με σύνθετη τοπογραφία, μελετώντας την σχέση της ενέργειας των χειμάρρων και της USLE. Γεγονός που οδήγησε σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών της USLE σε περιβάλλον GIS για περιοχές με σύνθετη τοπογραφία (Mitasova et al., 1996; Desment και Govers, 1996). Οι πιο πρόσφατες εφαρμογές της USLE χαρακτηρίζονται από μεγάλη διακύμανση στην κλίμακα εφαρμογής περιλαμβάνοντας μεγάλες λεκάνες απορροής με δεδομένα κάλυψης γης που προέρχονται από εικόνες δορυφορικής τηλεπισκόπησης (Suri et al., 2002; Cebecauer και Hofierka, 2008; Pandey et al., 2009a, b; Jain και Das, 2010).

Είναι γεγονός πως η USLE αναπτύχθηκε ως ένα απλό εργαλείο για τους αγρότες με σκοπό την διατήρηση των εδαφών, και έτσι οι περιγραφές των διαδικασιών διάβρωσης είναι αρκετά απλουστευμένες, η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα στο τομέα της μοντελοποίησης οδήγησε στην ανάπτυξη πολυπλοκότερων μοντέλων και στον συνδυασμό τους με GIS. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.4, η προσαρμογή του WEPP σε περιβάλλον GIS οδήγησε στην ανάπτυξη του Geo WEPP (Renschler, 2003), το οποίο εκτιμάει την ροή των ιζημάτων από δεδομένα που έχουν παραχθεί από ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα (DEM), ενώ υπό μελέτη βρίσκεται η ενσωμάτωση μοντέλων αιολικής διάβρωσης εντός του WEPP, γεγονός που αναπαριστά ένα σημαντικό βήμα προς την κατανόηση των συνδυαστικών επιπτώσεων αυτών των δύο μορφών διάβρωσης (Mitasova et al., 2013).

Σύμφωνα με τους Mitasova et al. (2013) στον Ευρωπαϊκό χώρο έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα διάβρωσης με έντονα γεωχωρικά χαρακτηριστικά, το European Soil Erosion Model (EUROSEM) (Morgan et al., 1998) αποτελεί μία δυναμική προσέγγιση εκτίμησης της μεταφοράς ιζημάτων. Το Limburg Soil Erosion Model (LISEM) (De Roo et al., 1996; Skeikh et al., 2010) είναι ένα φυσικό μοντέλο απορροής

και διάβρωσης που προσομοιώνει τις χωρικές επιδράσεις των επεισοδίων βροχόπτωσης σε μικρές λεκάνες απορροής και χρησιμοποιεί το ελεύθερο GIS PCRaster Environmental Software (Karssen et al., 2010). Ως ένα από τα πιο ολοκληρωμένα γεωχωρικά μοντέλα διάβρωσης το LISEM περιλαμβάνει την βροχόπτωση, την παρεμπόδιση, το επιφανειακό φορτίο στις μικροκολότητες του τοπογραφικού υποβάθρου, την διήθηση, την κατακόρυφη κίνηση του νερού, την επιφανειακή απορροή, την ροή του νερού στα αυλάκια που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες, την αποκόλληση των σωματιδίων λόγω της προσκρούσης των βροχοσταγόνων, την ικανότητα μεταφοράς και την αποκόλληση των σωματιδίων λόγω της επιφανειακής απορροής, περιλαμβάνεται επίσης η επίδραση της συμπίεσης του εδάφους καθώς και οι χαραδρoειδείς τομές (Mitasova et al., 2013).

Το μοντέλο SIMulation of Water Erosion (SIMWE) (Mitas και Mitasova, 1998; Mitasova et al., 2005) αναπτύχθηκε ως μία δισδιάστατη γενίκευση του WEPP για την καταγραφή των χωρικών προτύπων διάβρωσης, μεταφοράς ιζημάτων και απόθεσης σε συνθήκες υψηλής χωρικής διακύμανσης. Είναι ένας ισχυρός αλγόριθμος δειγματοληψίας διαδρομής και η ενσωμάτωση του σε περιβάλλον GIS διευκολύνει τις προσομοιώσεις ροής του νερού και των ιζημάτων σε επίπεδο υψηλών χωρικών αναλύσεων, περιλαμβάνοντας την επίδραση των μικρών διακυμάνσεων του εδάφους (Mitasova et al., 2013).

Οι περισσότερες εφαρμογές μοντέλων διάβρωσης σε περιβάλλον GIS εντοπίζουν τις περιοχές που παρουσιάζεται έντονη διάβρωση λόγω της συγκεντρωμένης υδατικής ροής, αναπτύχθηκαν επίσης μοντέλα που εστιάζουν στην εφήμερη χαραδρωτική διάβρωση (DeRose et al., 1998; Woodward 1999). Τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε παρατηρήσεις πεδίου και τροποποιημένες εξισώσεις μεταφοράς ιζημάτων εντός των καναλιών για την βελτίωση της ποσοτικοποίησης του διαβρωμένου ιζήματος λόγω του σχηματισμού εφήμερης χαραδρωτικής διάβρωσης. Στα πλαίσια αυτών των μοντέλων, χρησιμοποιούνται χρονοσειρές αεροφωτογραφιών σε συνδυασμό με διαχρονικά ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα για την χαρτογράφηση της τοποθεσίας ανάπτυξης και του ρυθμού διάβρωσης των χαραδρώσεων (Martinez-Casasnovas et al., 2004).

Με σκοπό τη βελτίωση των αποτελεσμάτων της χαρτογράφησης της διάβρωσης, συχνά συνδυάζονται στατιστικές προσεγγίσεις με μεθόδους τηλεπισκόπησης. Για παράδειγμα αναπτύχθηκαν δείκτες βασισμένοι στην λογιστική παλινδρόμηση για την χαρτογράφηση της πιθανότητας εμφάνισης του φαινομένου της διάβρωσης ως αποτέλεσμα της συγκεντρωμένης υδατικής ροής με την αξιοποίηση ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων υψηλής ανάλυσης (Pike et al., 2009). Επιπλέον χρησιμοποιούνται μοντέλα παλινδρόμησης βασισμένα σε δέντρα (tree-based) για τον υπολογισμό των τοπογραφικών παραμέτρων που εξηγούν την διακύμανση των μετρήσεων πεδίου της χαραδρωτικής διάβρωσης (Kheir et al., 2007). Ενώ, τα πιο πρόσφατα μοντέλα βασισμένα σε GIS μελετάνε τα χωρικά πρότυπα των ρυθμών διάβρωσης και απόθεσης σε πολύ υψηλές αναλύσεις με την χρήση επαναλαμβανόμενων μεθόδων σάρωσης με τεχνολογίες LiDAR (Light Detection And Ranging).

Πολλές σύγχρονες μελέτες υπογραμμίζουν ότι υπάρχουν σημαντικές αδυναμίες όσον αφορά την κατανόηση και παροχή δεδομένων των υπάρχοντων μοντέλων

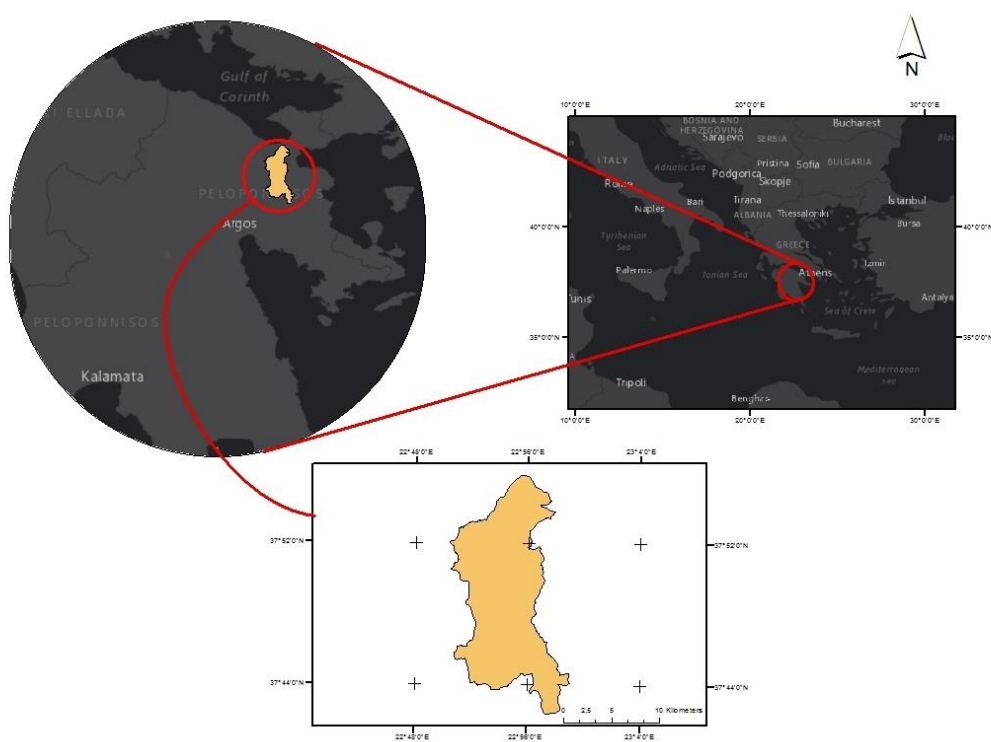
(Govers et al., 2007; Wainwrights et al., 2008; Polyakov et al., 2004; Finlayson και Montgomery, 2003; Jetten et al., 2003). Για παράδειγμα, οι Van Oost et al. (2005) τόνισαν πως οι επιδόσεις των υδρολογικών μοντέλων και των μοντέλων διάβρωσης που βασίζονται σε διεργασίες είναι ευαίσθητες σε μεγάλο βαθμό ως προς τον υπολογισμό των παραμέτρων και ότι τα αποτελέσματα τους είναι ανακριβή. Αυτές οι δυσκολίες που σχετίζονται με την ακρίβεια των χωρικών μοντέλων διάβρωσης προέρχονται συνήθως από τις χωροχρονικές διακυμάνσεις των διεργασιών της διάβρωσης ενώ η αβεβαιότητα συνδέεται με τις παραμέτρους των μοντέλων (Mitasova et al., 2013). Οι Jetten et al. (2003) κάνουν λόγο για βελτιωμένη απόδοση των μοντέλων με την χρήση πιο ολοκληρωμένων χωρικών πληροφοριών για την προσαρμογή και επαλήθευση των μοντέλων.

Τέλος είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η μοντελοποίηση της διάβρωσης του εδάφους στα πλαίσια ενός GIS εστιάζει περισσότερο στην ανάλυση της χωρικής κατανομής του φαινομένου, παρά στον ακριβή υπολογισμό τιμών εδαφικής απώλειας. Η πρόβλεψη περιοχών που εμφανίζουν υψηλό κίνδυνο διάβρωσης με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια είναι εξαιρετικής σημασίας για την διατήρηση των εδαφών μέσω της λήψης αντιδιαβρωτικών μέτρων (Mitasova et al., 1996).

ΕΜΠΕΡΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

5. Περιοχή μελέτης

Η λεκάνη απορροής του Ξηριά βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα του νομού Κορινθίας και οριοθετείται από τους ορεινούς όγκους Κνίσελο (795 m) και Τραπεζώνα (1137 m) στα νότια, Ψηλή Ράχη (1078 m), Παλουκόραχη (594 m), Προφήτη Ηλία (701 m) και Ακροκόρινθο (574 m) στα δυτικά και Μαύρη Ώρα (504 m), Όνεια (562 m) και Ράχη Σιμήτρη (143 m) στα ανατολικά (Ε.Καρύμπαλης, 2010). Η έκταση της, με σημείο εξόδου (στόμιο) την τομή του ρέματος με την σιδηροδρομική γραμμή Αθηνών-Πελοποννήσου στα όρια της πόλης, ανέρχεται σε 165.1 Km² (G.Baloutsos et al., 2000). Η κεντρική του κοίτη διανύει συνολικά απόσταση 32.5 km με διεύθυνση ροής από Ν προς Β εκβάλλοντας στις νότιες ακτές του Κορινθιακού κόλπου όπου έχει διαμορφώσει ένα δελταϊκό ριπίδιο έκτασης 1,9 Km² στις αποθέσεις του οποίου είναι κτισμένη η πόλη της Κορίνθου. Οι κυριότεροι παραπόταμοι είναι τα ρέματα Πλατάνια, Κλεισούρας, Βουκίνα και Πρεζή (Ε.Καρύμπαλης, 2010).



Σχήμα 1: Περιοχή Μελέτης

5.1 Γεωμορφολογία

Το υψόμετρο της λεκάνης απορροής του Ξηριά κυμαίνεται από 0 έως 1.137 μέτρα (Μπαθρέλος et al., 2017) και οι κλίσεις του αναγλύφου παρουσιάζουν έντονη διαφοροποίηση. Αναλυτικότερα, η εντονότερη κλίση του αναγλύφου είναι της τάξης των 50°, το 22.4 % της περιοχής χαρακτηρίζεται από κλίσεις μικρότερες των 5°, το 27.7% της περιοχής από κλίσεις που κυμαίνονται από 5° έως 10°, το 33.3% εμφανίζει κλίσεις μεταξύ 10° και 20°, ενώ το 16.6% της λεκάνης απορροής του Ξηριά χαρακτηρίζεται από κλίσεις που ξεπερνούν τις 20°.

5.2 Υδρογραφικό Δίκτυο

Όσον αφορά το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης, βασικό χαρακτηριστικό του είναι η δενδροειδής του μορφή, έχει μέση πυκνότητα 1.386 km/km^2 και το συνολικό μήκος της κεντρικής κοίτης ανέρχεται σε 32.5 Km. Επιπλέον η κεντρική κοίτη, σε απόσταση 12.5 Km από το στόμιο της λεκάνης διακλαδίζεται και σχηματίζει προς τα δεξιά την υπολεκάνη του Βουκίνου, έκτασης 48.513 km^2 και προς τα αριστερά την υπολεκάνη της Κλεισούρας, έκτασης 53.363 km^2 . Άλλο ιδιαίτερο γνώρισμα της κεντρικής κοίτης του χειμάρρου και κυρίως του τελευταίου τμήματος του προς την πόλη, είναι οι έντονες ανθρώπινες παρεμβάσεις υπό μορφή γεωργικών καλλιεργειών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα το μερικό ή ολικό μπάζωμα της κοίτης. (Γ.Μπαλούτσος et al., 2000)

5.3 Κλίμα

Ενδεικτικά των κλιματολογικών συνθηκών της λεκάνης απορροής είναι τα μέσα ετήσια ύψη βροχής των μετεωρολογικών σταθμών Βέλου Κορινθίας και Πυργέλας Άργους που ανέρχονται σε 475,9 και 480,7 mm αντίστοιχα με το μεγαλύτερο ποσοστό βροχόπτωσης (77,5%) να εντοπίζεται την περίοδο Οκτωβρίου–Μαρτίου. Οι μέσες ετήσιες θερμοκρασίες για τους σταθμούς του Βέλου και της Πυργέλας ($17,5^\circ\text{C}$ και $16,8^\circ\text{C}$ αντίστοιχα) κατατάσσουν το κλίμα της περιοχής στο χερσαίο Μεσογειακό (Ε.Καρύμπαλης, 2010).

5.4 Γεωλογία

Το νότιο τμήμα της λεκάνης δομείται από αλπικούς κυρίως σχηματισμούς που θεωρούνται ως ιζήματα μεταβατικού χαρακτήρα μεταξύ των ζωνών Πίνδου, Υποπελαγονικής και ενδεχομένως της νότιας απόληξης του Παρνασσού (Χάρτης 1). Στη μεγαλύτερη έκτασή τους περιλαμβάνουν ασβεστόλιθους Παλαιοζωϊκής ηλικίας (Τριαδικό–Ιουρασικό) ενώ πολύ μικρή έκταση στο νότιο και ανατολικό τμήμα της λεκάνης καταλαμβάνεται από Ιουρασικής ηλικίας σχιστοκερατόλιθους (Μπορνόβας et al. 1971). Το βόρειο τμήμα της λεκάνης αποτελείται από Πλειο-Πλειστοκαινικής ηλικίας αποθέσεις και συγκεκριμένα υφάλμυρης έως λιμναίας φάσης μάργες και κροκαλοπαγή ηλικίας Πλειόκαινου και εναλλαγές ποταμολιμναίων αποθέσεων μαργαϊκών κροκαλοπαγών, ψαμμιτών, αργίλων και πηλών Πλειστοκαινικής ηλικίας (Χάρτης 1). Οι πλαγιές των ορεινών όγκων καταλαμβάνονται από Ολοκαινικής ηλικίας πλευρικά κορήματα και κώνους κορημάτων ενώ κατά θέσεις εκατέρωθεν της κεντρικής κοίτης του χειμάρρου αναπτύσσονται Ολοκαινικές αλλουβιακές ποταμοχειμάρριες αποθέσεις. Η λιθολογία των σχηματισμών που καταλαμβάνουν τη λεκάνη έχει παίξει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη, τη μορφή και την υφή του υδρογραφικού δικτύου. Στο νότιο τμήμα της λεκάνης όπου εμφανίζονται οι αλπικοί σχηματισμοί έχει αναπτυχθεί ένα τραχύ υδρογραφικό δίκτυο που περιλαμβάνει μικρό αριθμό κλάδων μεγάλου κυρίως μήκους. Αντίθετα στις ευδιάβρωτες, ημιπερατές, Πλειο-Πλειστοκαινικές αποθέσεις που δομούν το βόρειο τμήμα της λεκάνης η υδρογραφική υφή είναι λεπτή και το υδρογραφικό δίκτυο εμφανίζει πολλούς κλάδους μικρών τάξεων μικρού σχετικά μήκους (Ε.Καρύμπαλης, 2010)



Χάρτης 1: Απλοποιημένος Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του Ξηριά (βασισμένος στον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ των Μπορνόβα κα. 1971) (πηγή: Ε.Καρύμπαλης, 2010)

5.5 Βλάστηση και κάλυψη γης

Η κάλυψη γης της λεκάνης και ειδικότερα η φυτοκάλυψη δε θεωρούνται θετικές από άποψη υδρολογικής προστασίας. Η Χαλέπιος πεύκη που ασκεί σημαντική υδρολογική προστασία καταλαμβάνει μόνο ένα μικρό ποσοστό της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης. Επιπλέον τα αείφυλλα πλατύφυλλα που αποτελούνται κυρίως από πουρνάρι, αποκλίνουν σημαντικά από τις κανονικές συνθήκες πυκνότητας λόγω της υπερβόσκησης και είναι έντοτα διασπασμένα. Οι υπόλοιπες μορφές φυτοκάλυψης (υποβαθμισμένη Χαλέπιος πεύκη και αείφυλλα πλατύφυλλα, χορτολιβαδικές εκτάσεις και γεωργικές καλλιέργειες) λόγω των ανθρωπογενών παρεμβάσεων και των βιολογικών τους χαρακτηριστικών, ασκούν ακόμα μικρότερη υδρολογική προστασία στη λεκάνη σε σχέση με τις προηγούμενες. Πιο συγκεκριμένα, σημαντικό μέρος των γεωργικών καλλιεργειών που καταλαμβάνουν υψηλό ποσοστό της έκτασης της λεκάνης στερούνται προστατευτικής βλάστησης κατά τα χειμερινή περίοδο που η περιοχή δέχεται το κύριο ποσοστό των βροχοπτώσεων. (Γ.Μπαλούτσος, 2000)

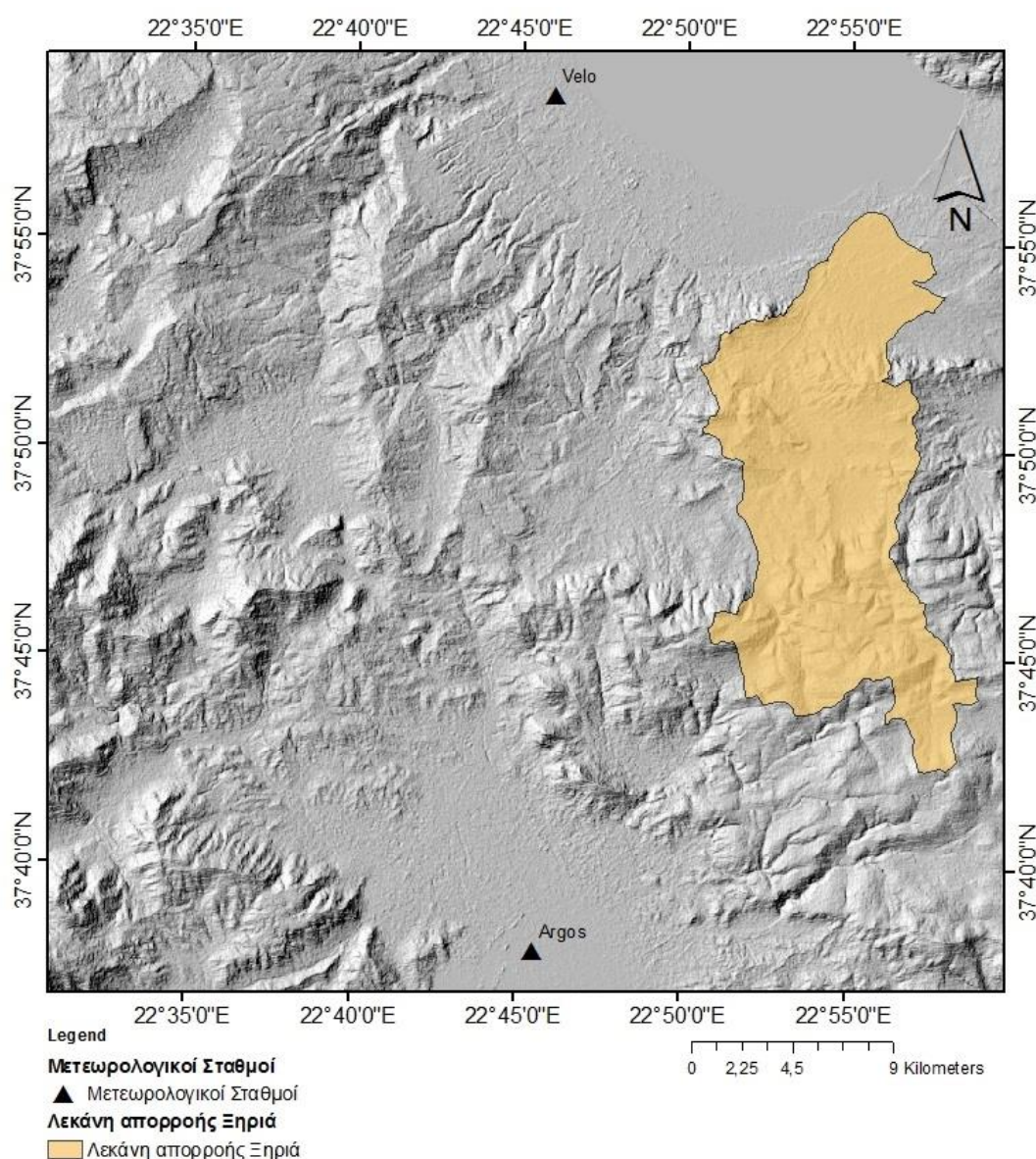
6. Δεδομένα

1. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα ελεύθερα διαθέσιμο ψηφιακό μοντέλο εδάφους ASTER (ASTER DEM), η λήψη του οποίου πραγματοποιήθηκε μέσω της ιστοσελίδας του [USGS Explorer](#). Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) ASTER με ανάλυση 30m, χρησιμοποιήθηκε για την απόκτηση των απαραίτητων δεδομένων που αφορούν το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης και ειδικότερα για τον υπολογισμό του συντελεστή μήκους κλίσης και βαθμού κλίσης (LS).

2. Κλιματικά δεδομένα

Τα κλιματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διατίθενται ελεύθερα στην ιστοσελίδα της [Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας \(Ε.Μ.Υ.\)](#) και αφορούν δύο μετεωρολογικούς σταθμούς, το Βέλο και την Πυργέλα Άργους, των οποίων η θέση φαίνεται στον παρακάτω χάρτη (Χάρτης 2).



Χάρτης 2: Θέση των μετεωρολογικών σταθμών

3. Εδαφολογικά δεδομένα

Λόγο του περιορισμένου όγκου των εδαφολογικών δεδομένων, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο εδαφολογικές βάσεις δεδομένων η ESDB και η LUCAS.

Η ESDB (European Soil Database- Ευρωπαϊκή Εδαφολογική Βάση Δεδομένων) βασίζεται στον Ευρωπαϊκό Χάρτη εδαφών κλίμακας 1:1.000.000 και διατίθεται από το [European Soil Data Center](#). Η ESDB περιέχει πολύγωνα με τους διακριτούς εδαφικούς τύπους (Soil Typological Units - STU), που περιγράφονται με ιδιότητες (Attributes) όπως δομή, βάθος, υγρασία κλπ.

Εκτός από το γεγονός ότι η Ευρωπαϊκή Εδαφολογική Βάση Δεδομένων καλύπτει ενιαία όλο τον ελληνικό χώρο, το κυριότερο πλεονέκτημα της είναι ότι τα στοιχεία της είναι άμεσα αξιοποιήσιμα με ελάχιστη προεργασία, γιατί είναι σε ηλεκτρονική μορφή. Αν υποθέσουμε ότι τα στοιχεία της βάσης δεδομένων είναι αξιόπιστα, το κυριότερο μειονέκτημα της είναι η μικρή κλίμακα (1:1.000.000). (EDY-ΥΠΕΚΑ).

Η βάση δεδομένων LUCAS (Land Use/Cover Area Survey) αποτελεί μια πανευρωπαϊκή προσπάθεια προς το σκοπό της κατασκευής μια περιεκτικής βάσης δεδομένων. Η βάση αυτή περιλαμβάνει δείγματα εδάφους από όλα τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης και είναι ελεύθερα διαθέσιμη μέσω του [European Soil Data Center](#). Ο τελικός στόχος αυτής της προσπάθειας είναι η LUCAS να αποτελέσει μια αξιόπιστη πηγή πληροφοριών για την εκτίμηση της ποιότητας του εδάφους ολόκληρης της Ευρωπαϊκής Ένωσης έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η αποτελεσματική κατάσχεση αγροτικών και περιβαλλοντολογικών πολιτικών από τις αρμόδιες αρχές. Αποτελείται συνολικά από 19969 δείγματα από το ανώτατο τμήμα του εδάφους (topsoil) τα οποία ελήφθησαν από είκοσι πέντε κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Για τη συλλογή τους ακολουθείται μια τυποποιημένη διαδικασία δειγματοληψίας, με δείγματα βάρους περίπου 0,5 kg το καθένα (πάχους 0-30 cm). Όλα τα δείγματα αναλύονται για το ποσοστό των χονδρόκοκκων τεμαχίων, την κατανομή μεγέθους σωματιδίων (% αργίλου, ιλύος, άμμου), pH, ποσοστό οργανικού άνθρακα και διάφορες άλλες χημικές παραμέτρους. Η πυκνότητα στο σύστημα δειγματοληψίας των σημείων είναι περίπου 1 ανά 199 km², που αντιστοιχεί σε μέγεθος κελιού κανάβου περίπου 14 km × 14 km (Panagos et al., 2014).

4. Δεδομένα κάλυψης γης

Για την απόκτηση δεδομένων που αφορούν την κάλυψη γης της περιοχής μελέτης αξιοποιήθηκε η βάση δεδομένων Corine-2000, η οποία διατίθεται ελεύθερα μέσω της ιστοσελίδας του [Copernicus](#). Το πρόγραμμα Corine land cover που εγκρίθηκε από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο το 1985 είχε ως στόχο την παροχή ενός μοναδικού και συγκρίσιμου συνόλου δεδομένων κάλυψης γης για την Ευρώπη. Η χαρτογράφηση της κάλυψης γης πραγματοποιήθηκε μέσω δορυφορικών εικόνων τηλεπισκόπησης (Landsat 7) σε κλίμακα 1:100.000. Η καταγραφή αυτή είχε ως αποτέλεσμα την διάκριση 44 ειδών κάλυψης του εδάφους. Το Corine Land Cover πανευρωπαϊκά μέχρι σήμερα έχει γίνει τρεις φορές το 1990, το 2000 και το 2010 ενώ στην Ελλάδα έγινε μόνο το 1990 και το 2000 (Β.Κ. Καττέ, 2014).

7. Μεθοδολογία

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3, το μοντέλο RUSLE είναι ένα εμπειρικό μοντέλο εκτίμησης της εδαφικής απώλειας που προκαλείται από την επιφανειακή (sheet) και αυλακωτή (rill) διάβρωση. Το RUSLE βασίζεται στο μοντέλο USLE το οποίο αναπτύχθηκε από τους Wischmeier & Smith (1978), και βελτιώθηκε και τροποποιήθηκε από τους Renard et al. (1997). Στο μοντέλο RUSLE χρησιμοποιούνται πέντε επιμέρους συντελεστές για την εκτίμηση των εδαφικών απωλειών. Αυτοί είναι: ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (R), ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους (K), ο συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης (LS), ο συντελεστής κάλυψης του εδάφους (C), και ο συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης (P). Τέλος το RUSLE βασίζεται στην παρακάτω πολλαπλασιαστική σχέση μεταξύ των συντελεστών της:

$$A = RKLSCP \quad [1]$$

Όπου:

A : μέση ετήσια εδαφική απώλεια ($t\ ha^{-1}year^{-1}$)

R : συντελεστής διαβρωτικότητας βροχόπτωσης ($MJ\ mm\ ha^{-1}h^{-1}$) (Rainfall Erosivity factor)

K : συντελεστής διαβρωσιμότητας εδάφους ($t\ h\ MJ^{-1}mm^{-1}$) (Soil Erodibility factor)

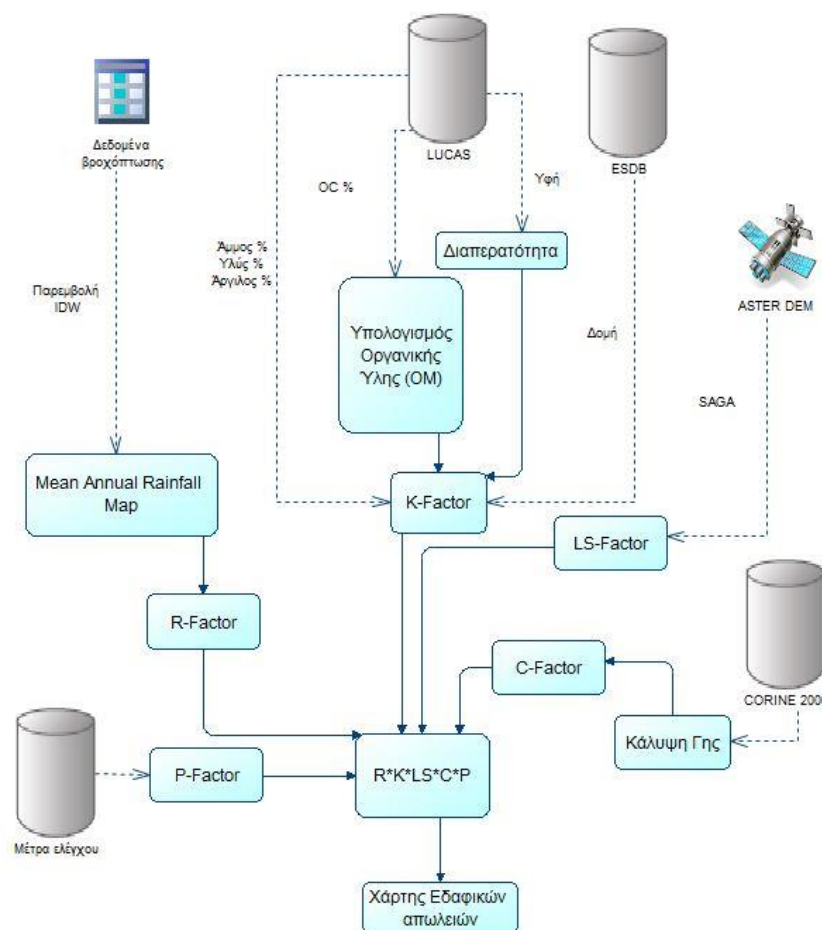
L : συντελεστής μήκους κλίσης (αδιάστατο) (Slope Length factor)

S : συντελεστής βαθμού κλίσης (αδιάστατο) (Slope Steepness factor)

C : συντελεστής κάλυψης γης (αδιάστατο) (Cover Management factor)

P : συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης (αδιάστατο) (Support Practice factor)

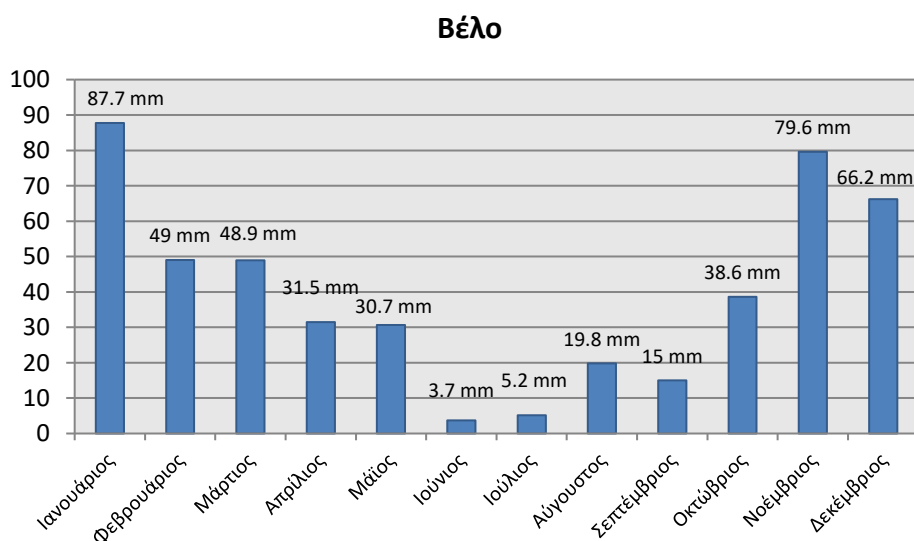
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2) παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για την εφαρμογή του μοντέλου RUSLE.



Σχήμα 2: Διάγραμμα ροής εφαρμογή του RUSLE στα πλαίσια αυτής της εργασίας

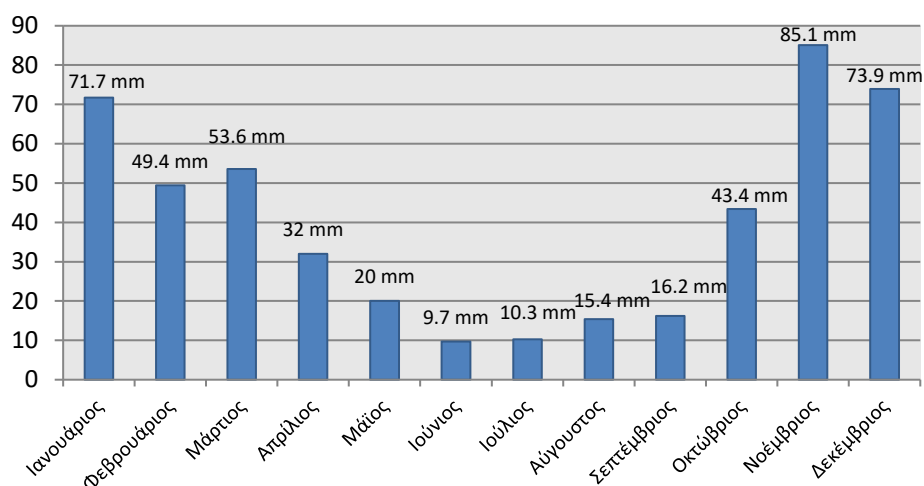
7.1 Συντελεστής διαβρωτικότητας βροχόπτωσης (R)

Για τον υπολογισμό του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης χρησιμοποιήθηκαν ελεύθερα δεδομένα της ΕΜΥ. Τα δεδομένα αντλήθηκαν από τους σταθμούς Βέλο και Πυργέλα Άργους, η θέση των οποίων παρουσιάζεται στον Χάρτη 2, και εκφράζουν τη μέση τιμή βροχόπτωσης (mm) ανά μηνά για την χρονική περίοδο 1971-2000.



Σχήμα 3: Μέση τιμή βροχόπτωσης ανά μήνα για τον σταθμό Βέλο

Πυργέλα Άργους



Σχήμα 4: Μέση τιμή βροχόπτωσης ανά μήνα για τον σταθμό Πυργέλα Άργους

Για τον υπολογισμό του συντελεστή R χρησιμοποιήθηκε η σχέση που εξήχθη από τους J.M van der Knijff et al. (1999) για την περιοχή της Τοσκάνης :

$$R = a P_j \quad [2]$$

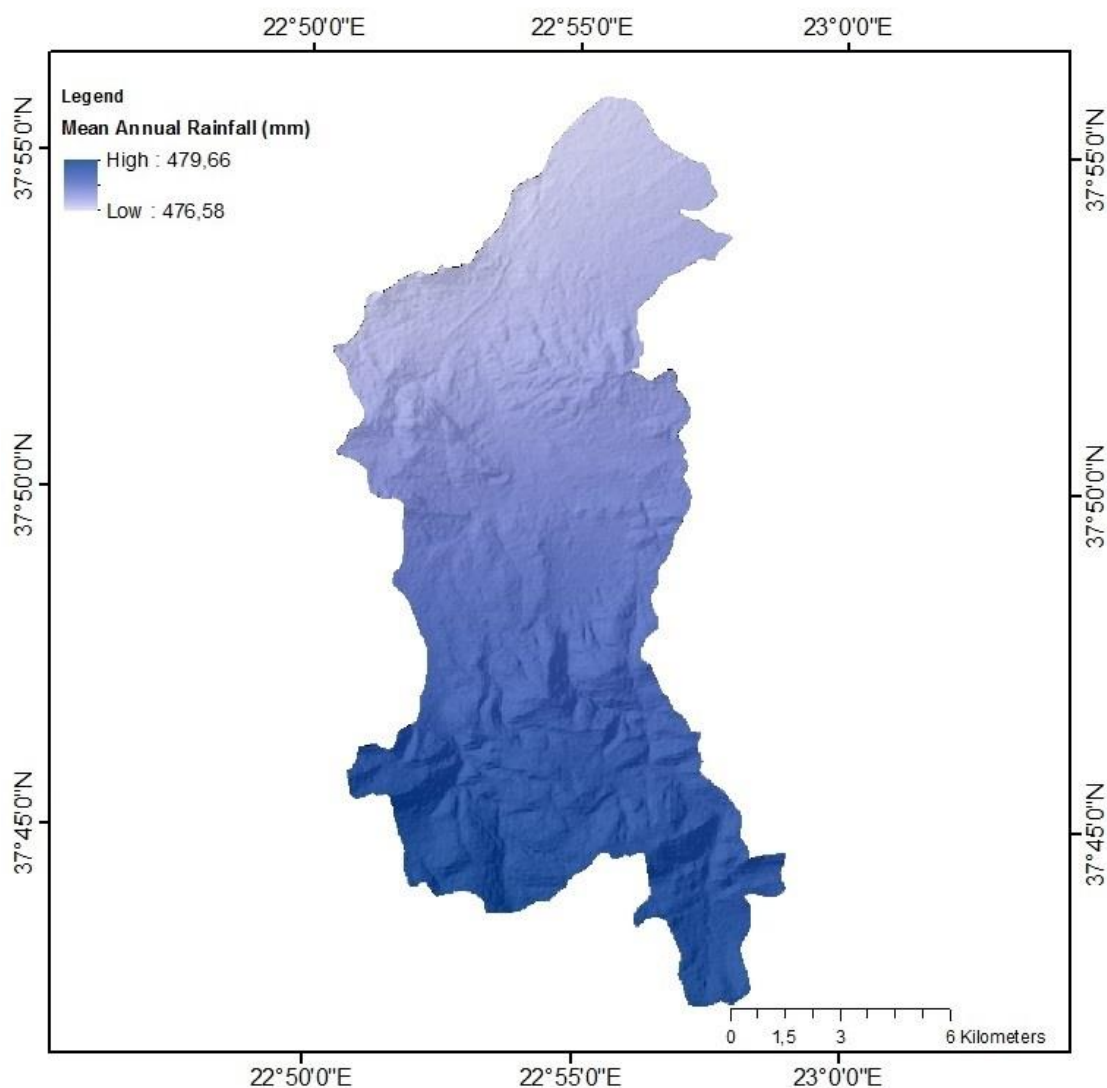
Όπου,

R σε $MJ \, mm \, ha^{-1} \, h^{-1}$

P_j : μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)

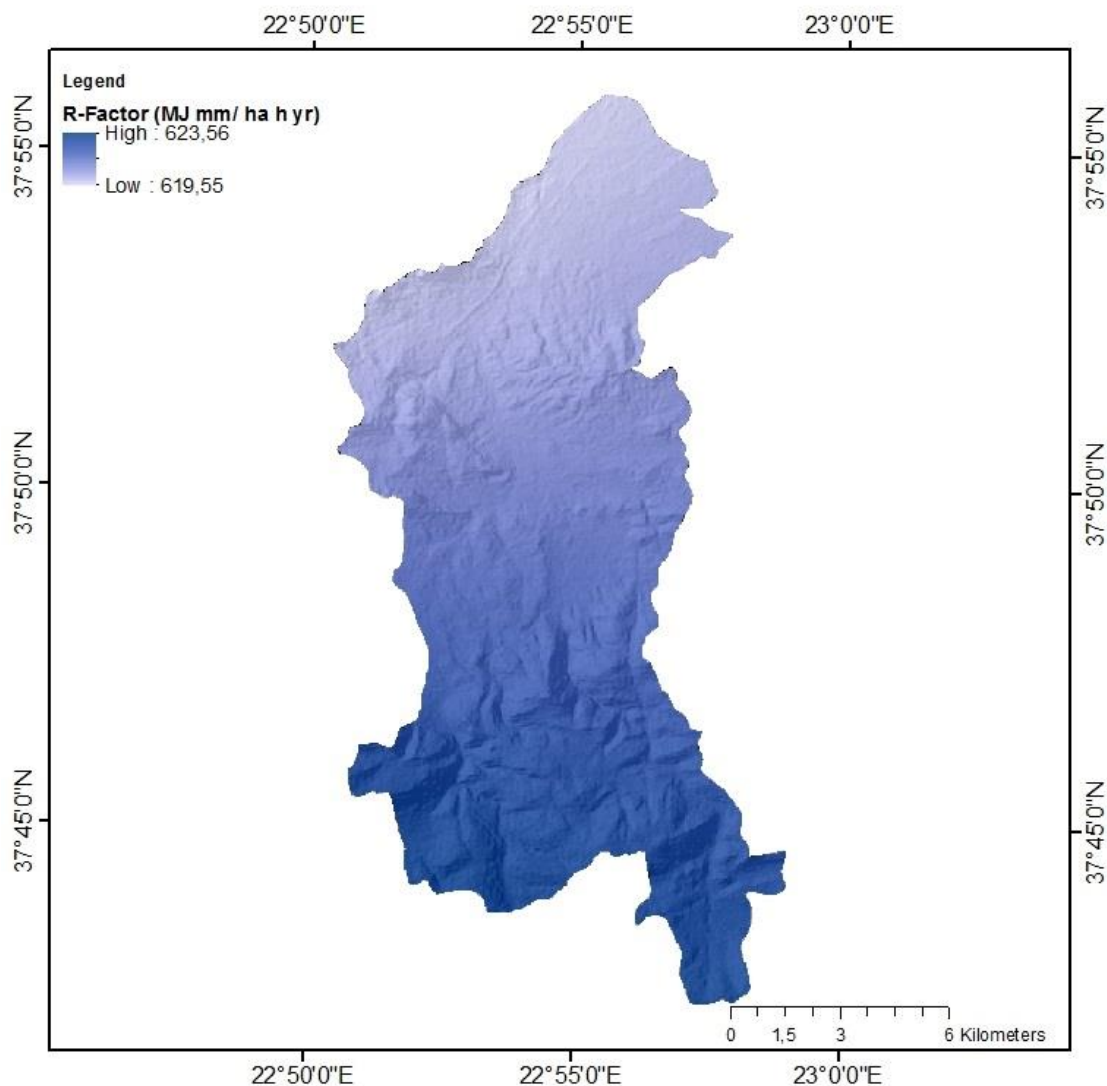
a : συντελεστής με εύρος τιμών 1.1 ~ 1.5 και συνήθη-προτεινόμενη από τον J.M van der Knijff τιμή το 1.3

Για την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης [2], είναι απαραίτητο η μέση ετήσια τιμή βροχόπτωσης να είναι σε μορφή ψηφιδωτών δεδομένων (raster format). Για τον λόγο αυτό τα αρχικά βροχομετρικά δεδομένα του κάθε σταθμού χρησιμοποιήθηκαν για την απόκτηση των μέσων ετήσιων τιμών ύψους βροχόπτωσης. Η θέση των σταθμών και η αντίστοιχη μέση ετήσια τιμή του ύψους της βροχόπτωσης εισήχθησαν στο λογισμικό ArcGIS ως σημειακά δεδομένα (point data). Έπειτα, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος παρεμβολής Inverse Distance Weighting (IDW), για την παραγωγή του χάρτη της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης για την περιοχή μελέτης. Στον παρακάτω χάρτη διακρίνεται η χωρική κατανομή του μέσου ετήσιου ύψους της βροχόπτωσης, με εύρος τιμών μεταξύ 476,58 mm και 479,66 mm.



Χάρτης 3: Χάρτης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης της λεκάνης απορροής του Ξηριά.

Με την εφαρμογή της σχέσης [2] προκύπτει ο χάρτης του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (R) ισοδιάστασης 50m (Χάρτης 4). Η σχέση εφαρμόστηκε μέσω της λειτουργίας του ArcGIS «raster calculator». Το εύρος τιμών του συντελεστή R κυμαίνεται από $619,55 \text{ MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}$ έως $623,56 \text{ MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}$, ενώ η μέση τιμή ανέρχεται στα $621,55 \text{ MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}$.



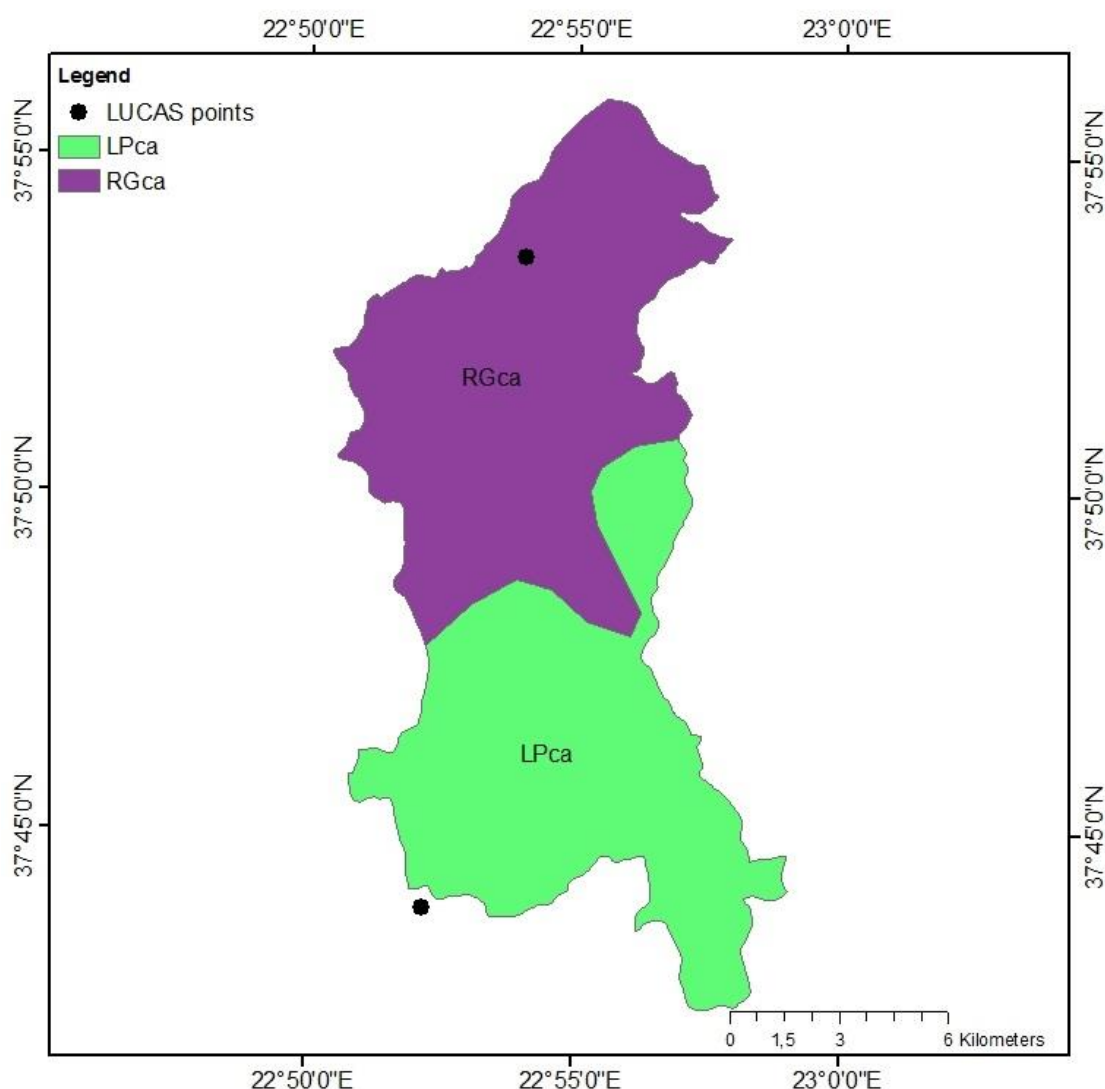
Χάρτης 4: Χάρτης του συντελεστή διαβρωτικότητας βροχόπτωσης (R-Factor) για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά.

7.2 Διαβρωσιμότητα του εδάφους (K)

Για τον υπολογισμό του συντελεστή K, συνδυάστηκαν δύο εδαφολογικές βάσεις δεδομένων, η Land Use and Coverage Area frame Survey (LUCAS) και η European Soil Database (ESDB). Αρχικά με την αξιοποίηση της ESDB, η λεκάνη απορροής του Ξηριά χωρίζεται σε δύο πολύγωνα όπως φαίνεται στον παρακάτω χάρτη (Χάρτης 5). Για το κάθε πολύγωνο η ESDB, εκτός των άλλων εμπεριέχει πληροφορίες για τον τύπο του εδάφους που επικρατεί στην περιοχή καθώς και για την εδαφική δομή του (s), σύμφωνα λοιπόν με την ESDB, το βόρειο πολύγωνο ανήκει στην τάξη των Regosol και το νότιο πολύγωνο ανήκει στην τάξη Leptosol και ειδικότερα χαρακτηρίζονται ως Calcaric Regosol (52.73% της συνολικής έκτασης) και Calcaric Leptosol (47.27% της συνολικής έκτασης) αντίστοιχα.

Η βάση δεδομένων LUCAS εμπεριέχει δύο σημεία πλησίον της λεκάνης απορροής του Ξηριά, τα οποία θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικά της περιοχής για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Το ένα βρίσκεται εντός του βόρειου πολυγώνου και το

δεύτερο πλησίον του νότιου πολυγώνου (Χάρτης 5). Για το κάθε σημείο η βάση δεδομένων LUCAS, εμπεριέχει πληροφορίες για την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανικό άνθρακα (OC), για την διαπερατότητα του εδάφους (p), καθώς και για την μηχανική σύσταση του εδάφους.



Χάρτης 5: Εδαφολογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του Ξηριά βάση ESDB, και τα αντιπροσωπευτικά σημεία της βάσης δεδομένων LUCAS.

Ο συντελεστής K υπολογίστηκε μέσω της παρακάτω σχέσης [3], (Wischmeier και Smith, 1978).

$$K = \frac{[2.1 \cdot 10^{-4}(12 - OM)M^{1.14} + 3.25(s - 2) + 2.5(p - 3)]}{100} \cdot 0.1317 [3]$$

Όπου:

OM : οργανική ουσία (%) ($OM = \% \text{ οργανικού άνθρακα} \cdot 1,724$)

M : δομή επιφανειακής εδαφικής στρώσης $[(100 - Ac) \cdot (L + Armf)]$

Όπου: A_c ποσοστό αργίλου (<0,002mm),

L ποσοστό ιλύος (0,002~0,05mm),

A_{rmf} ποσοστό άμμου (0,05~0,1mm)

s: συντελεστής εδαφικής δομής, όπου:

(s=1: πολύ λεπτό κοκκώδες, s=2: λεπτό κοκκώδες, s=3: τραχύ κοκκώδες, s=4 κρυσταλλώδες ή συμπαγές, Πίνακας 1).

p: βαθμός διαπερατότητα εδάφους, όπου:

(p=1: γρήγορη, p=2 γρήγορη προς μέτρια γρήγορη, p=3 μέτρια γρήγορη, p=4 μέτρια γρήγορη προς αργή, p=5 αργή, p=6 πολύ αργή, Πίνακας 2).

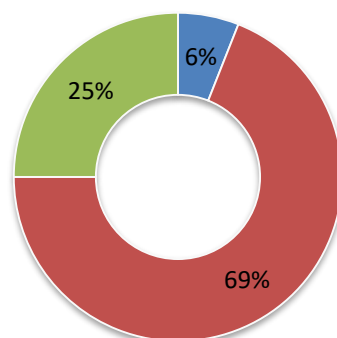
Structure class (s)	European Soil Database
1 (very fine granular: 1–2 mm)	G (good)
2 (fine granular: 2–5 mm)	N (normal)
3 (medium or coarse granular: 5–10 mm)	P (poor)
4 (blocky, platy or massive: > 10 mm)	H (humic or peaty top soil)

Πίνακας 1: Κλάσεις εδαφικής δομής όπως προκύπτουν από την βάση δεδομένων ESDB (πηγή: Panagos et al., 2014).

Σύμφωνα με τη βάση δεδομένων LUCAS, η μηχανική σύσταση του σημείου που θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικό για το βόρειο πολύγωνο (RGca) της λεκάνης απορροής του Ξηριά, όπως αυτή χωρίζεται σύμφωνα με την βάση δεδομένων ESDB, έχει ως εξής: 25 % άργιλο, 69% ιλύ και 6% άμμο (Σχήμα 1), ενώ αντίστοιχα η μηχανική σύσταση του σημείου που θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικό για το νότιο πολύγωνο (LPca) έχει ως εξής: 20 % άργιλο, 65% ιλύ και 15% άμμο (Σχήμα 2).

Μηχανική Σύσταση RGca

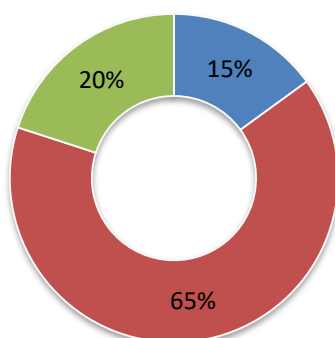
■ Άμμος (%) ■ Ίλος (%) ■ Άργιλος (%)



Σχήμα 5: Μηχανική Σύσταση RGca όπως προκύπτει από την βάση δεδομένων LUCAS

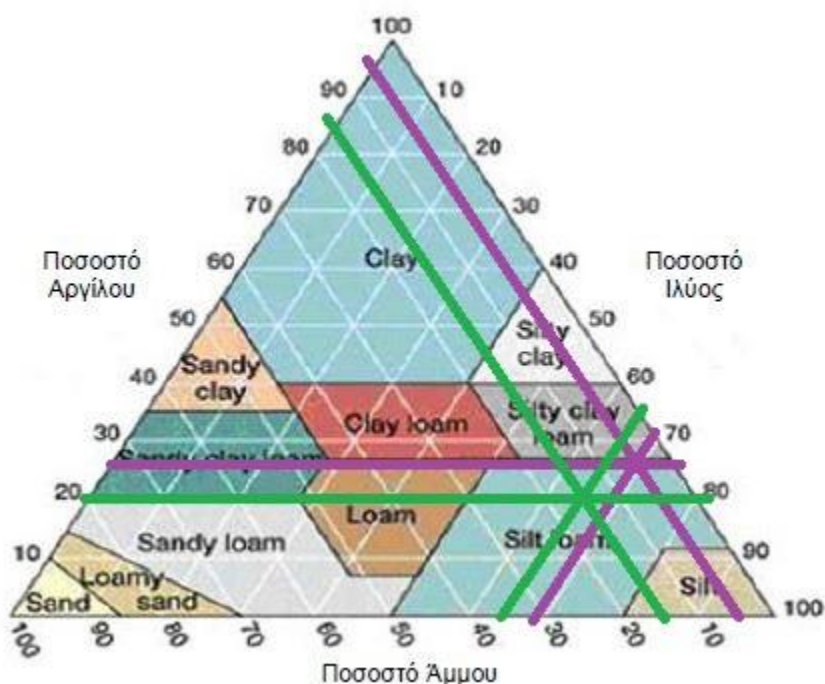
Μηχανική Σύσταση LPca

■ Άμμος (%) ■ Ίλος (%) ■ Άργιλος (%)



Σχήμα 6: Μηχανική Σύσταση LPca όπως προκύπτει από την βάση δεδομένων LUCAS

Με την χρήση του τριγώνου μηχανικής σύστασης του εδάφους, καθίσταται δυνατή η εκτίμηση της υφής των δύο εδαφικών τύπων. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 7) και τα δύο εδάφη ανήκουν στην κλάση ιλο-πηλώδη (Silty Loam).



Σχήμα 7: Θέση των RGca (μώβ) και LPca (πράσινο) στο τρίγωνο μηχανικής σύστασης του εδάφους.

Η εκτίμηση του βαθμού διαπερατότητας του εδάφους (p) γίνεται μέσω αντιστοίχησης της εδαφικής υφής με τις κλάσεις εδαφικής διαπερατότητας όπως αυτές προκύπτουν από το εγχειρίδιο με αριθμό 430 του υπουργείου γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (Panagos et al., 2014) (Πίνακας 2).

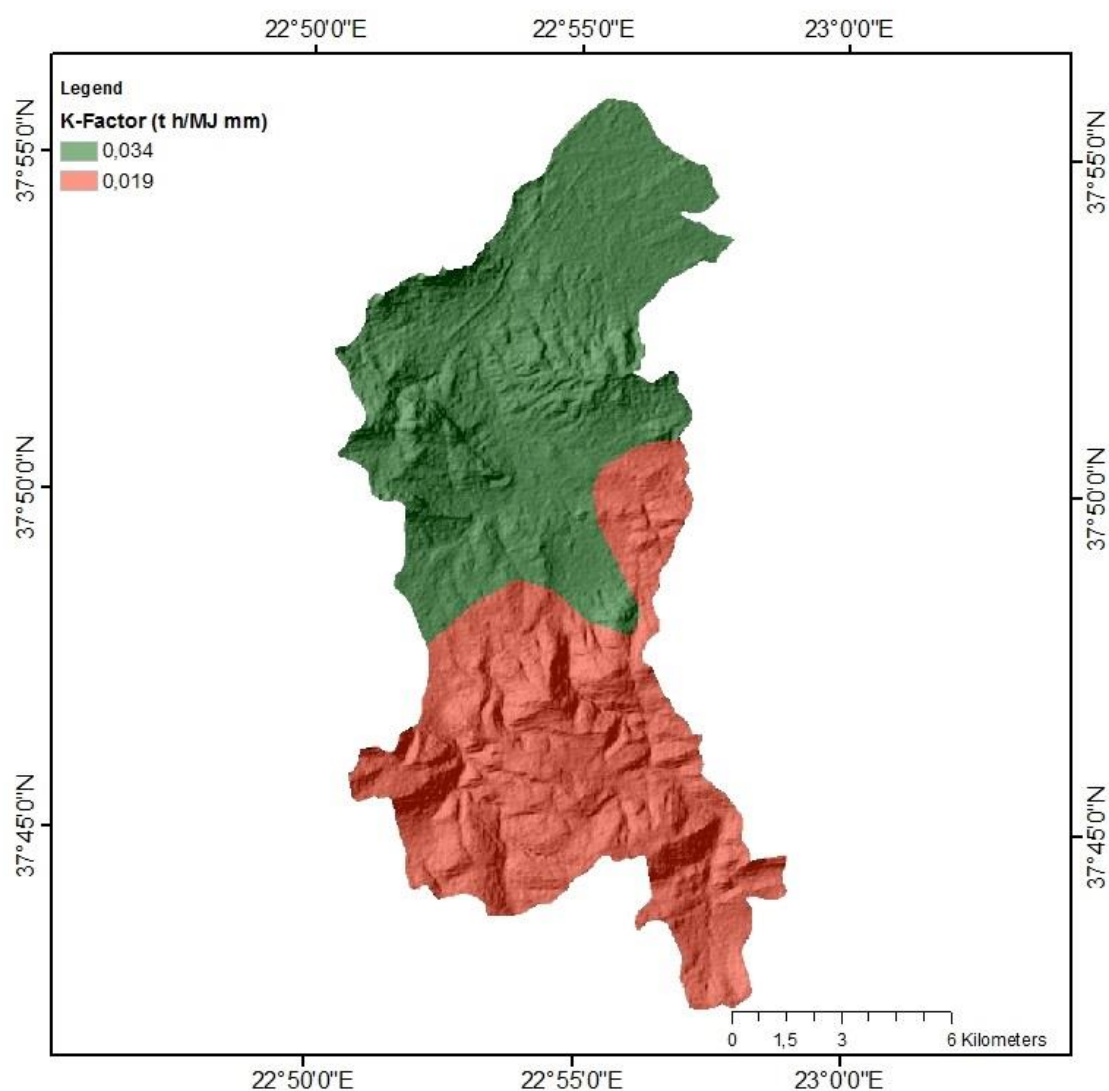
Permeability class (p)	Texture
1 (fast and very fast)	Sand
2 (moderate fast)	Loamy sand, sandy loam
3 (moderate)	Loam, silty loam
4 (moderate low)	Sandy clay loam, clay loam
5 (slow)	Silty clay loam, sand clay
6 (very slow)	Silty clay, clay

Πίνακας 2: Αντιστοίχιση της εδαφικής διαπερατότητας με την εδαφική υφή (πηγή: Panagos et al., 2014).

Τέλος με την εφαρμογή της σχέσης [3], προκύπτουν οι τιμές της εδαφικής διαβρωσιμότητας (K) για τον κάθε τύπο εδάφους.

Τάξη εδάφους	K-Factor
RGca	0,03403574
LPca	0,01924872

Πίνακας 3: Τιμές συντελεστή K της περιοχής μελέτης

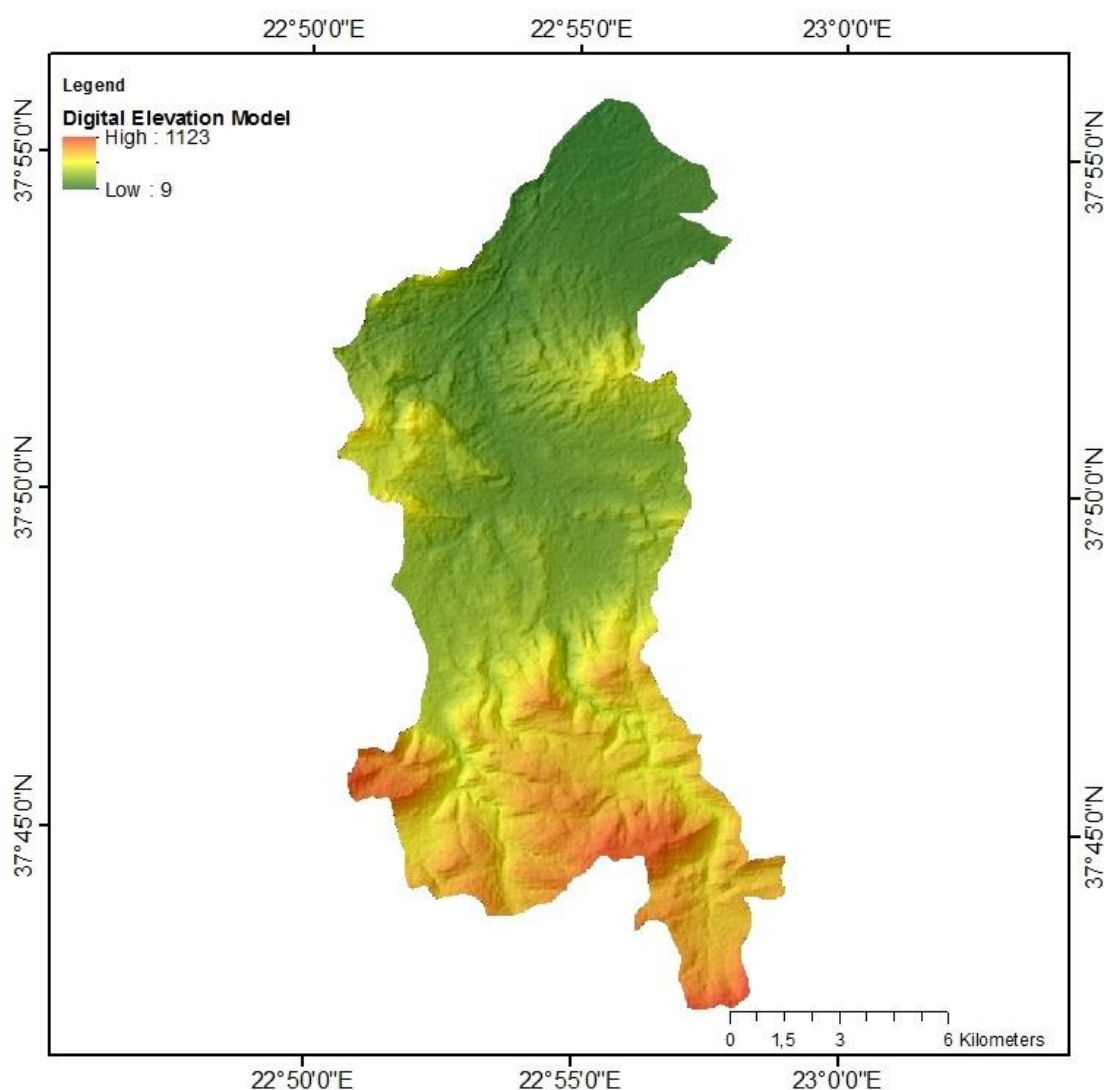


Χάρτης 6: Χάρτης του συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας (K-Factor), ισοδιάστασης 50m, για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά.

7.3 Συντελεστής μήκους και βαθμού κλίσης (LS)

Στη συνέχεια, ο τοπογραφικός συντελεστής LS υπολογίστηκε με την εφαρμογή της σχέσης που ανέπτυξαν οι Desmet και Govers (1996) για τον συντελεστή μήκους κλίσης (L) και της σχέσης των Wischmeier και Smith (1978) για τον συντελεστή βαθμού κλίσης (S). Η εφαρμογή τους υλοποιήθηκε με την χρήση γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών (GIS) ανοιχτού κώδικα και συγκεκριμένα του συστήματος Αυτοματοποιημένης Γεωεπιστημονικής Ανάλυσης (System for Automated Geoscientific Analyses- SAGA).

Απαραίτητο δεδομένο για τον υπολογισμό του τοπογραφικού συντελεστή αποτελεί ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) της περιοχής μελέτης. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε DEM του ASTER (30m) (Χάρτης 7).



Χάρτης 7: Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (DEM) λεκάνης απορροής του Ξηριά.

Το SAGA χρησιμοποιεί το DEM για τον αυτοματοποιημένο υπολογισμό του LS και εφαρμόζει την σχέση που προτάθηκε από τους Desmet και Govers (1996) για τον υπολογισμό του L :

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{ij-in} + D^2)^{(m+1)} - A_{ij-in}^{(m+1)}}{x_{(i,j)}^m \cdot D^{(m+2)} \cdot 22.13^m} \quad [4]$$

Όπου,

D: μέγεθος κελιού/ψηφίδας (m)

$x_{i,j}$: $\sin a_{i,j} + \cos a_{i,j}$, όπου α : προσανατολισμός κελιού με συντεταγμένες i,j

A_{ij-in} : συμβάλλουσα επιφάνεια (m^2) με συντεταγμένες (i,j) και

Ο δείκτης m υπολογίζεται σύμφωνα με τους McCool et al. (1989):

$$m = F/(1 + F) \quad [5], \text{ όπου}$$

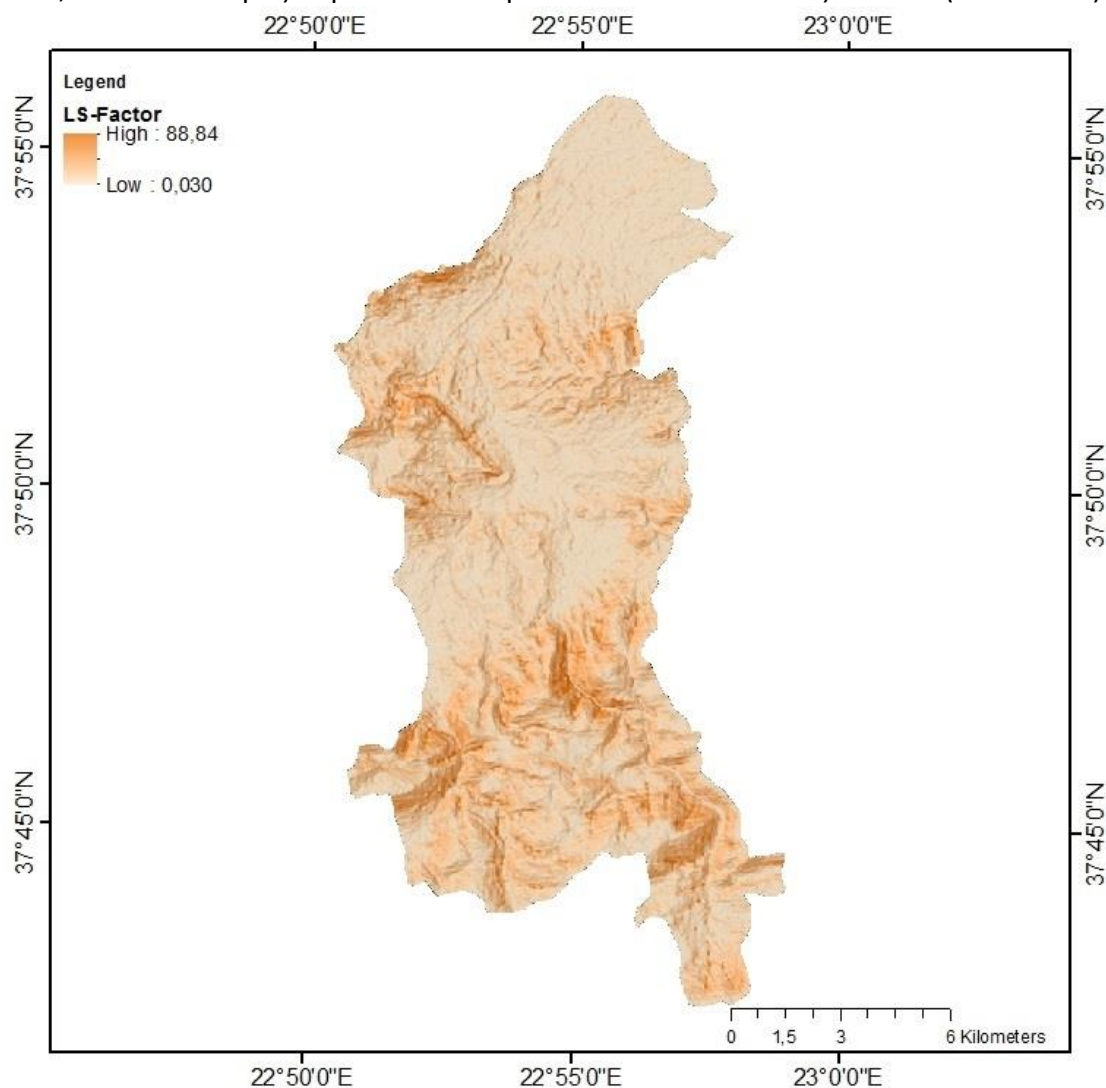
$$F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{3 \cdot (\sin \beta)^{0.8} + 0.56} \quad [6]$$

Ο υπολογισμός του παράγοντα S προκύπτει όπως προτάθηκε από τους Wischmeier και Smith (1978) :

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03 \text{ όταν } \theta < 5.14, \quad \text{όπου } \theta \text{ σε } ^\circ [7]$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.5 \text{ όταν } \theta \geq 5.14, \quad \text{όπου } \theta \text{ σε } ^\circ [8]$$

Ο ακόλουθος χάρτης (Χάρτης 8), ισοδιάστασης 30m, αφορά τον τοπογραφικό συντελεστή της λεκάνη απορροής του Ξηριά και δημιουργήθηκε βάσει της παραπάνω μεθοδολογίας. Η μέση τιμή του LS στο σύνολο της λεκάνης ισούται με 3.94, ενώ το εύρος τιμών του κυμαίνεται από 0.03 έως 88.84 (αδιάστατο).



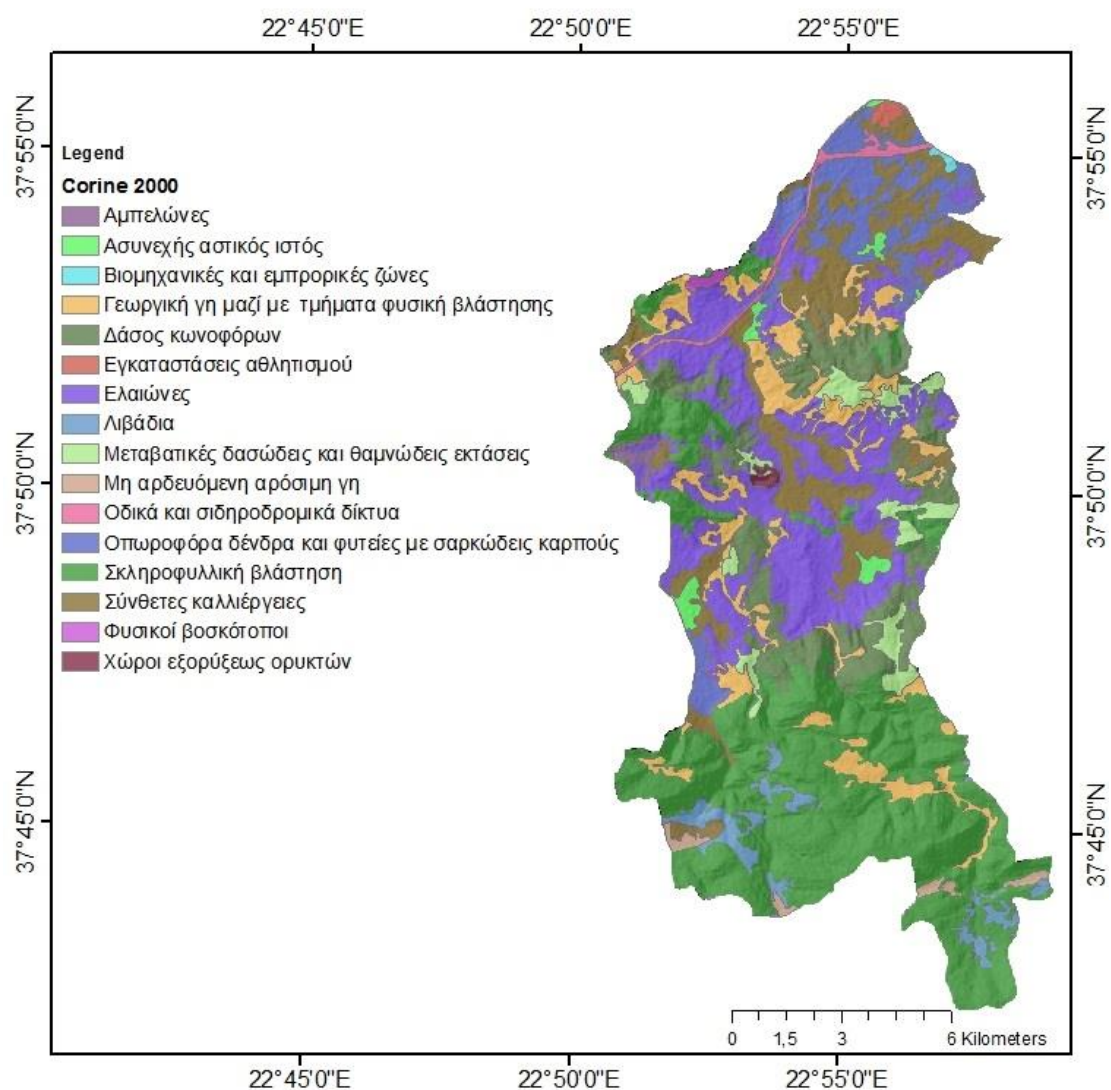
Χάρτης 8 : Χάρτης του τοπογραφικού συντελεστή (LS-Factor) για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά.

Παρατηρώντας λοιπόν τον χάρτη του LS μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι περιοχές με μεγαλύτερες κλίσεις, που είναι κυρίως και το πιο ορεινό τμήμα της περιοχής μελέτης, έχουν και τις μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή LS.

7.4 Συντελεστής κάλυψης γης (C)

Όσον αφορά τον υπολογισμό του συντελεστή C, οι τιμές προέκυψαν από επεξεργασία βιβλιογραφικών στοιχείων σε συνδυασμό με την αξιοποίηση της βάσης δεδομένων Corine 2000.

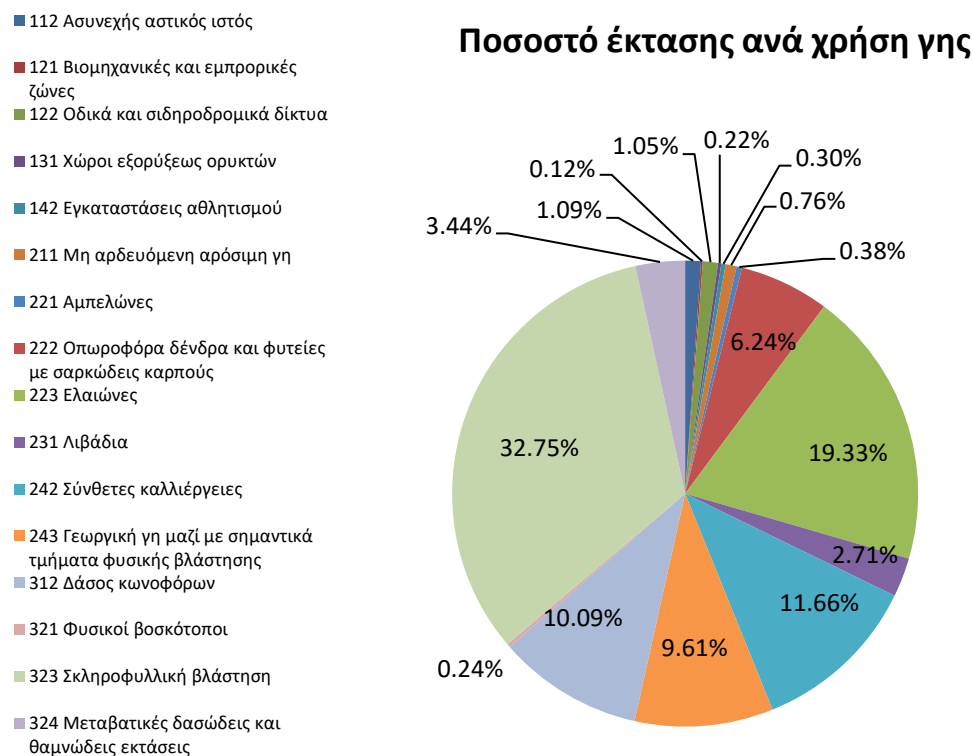
Οι χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής του Ξηριά σύμφωνα με το Corine 2000 περιγράφονται από τον παρακάτω χάρτη (Χάρτης 9):



Χάρτης 9: Χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής του Ξηριά σύμφωνα με το Corine 2000.

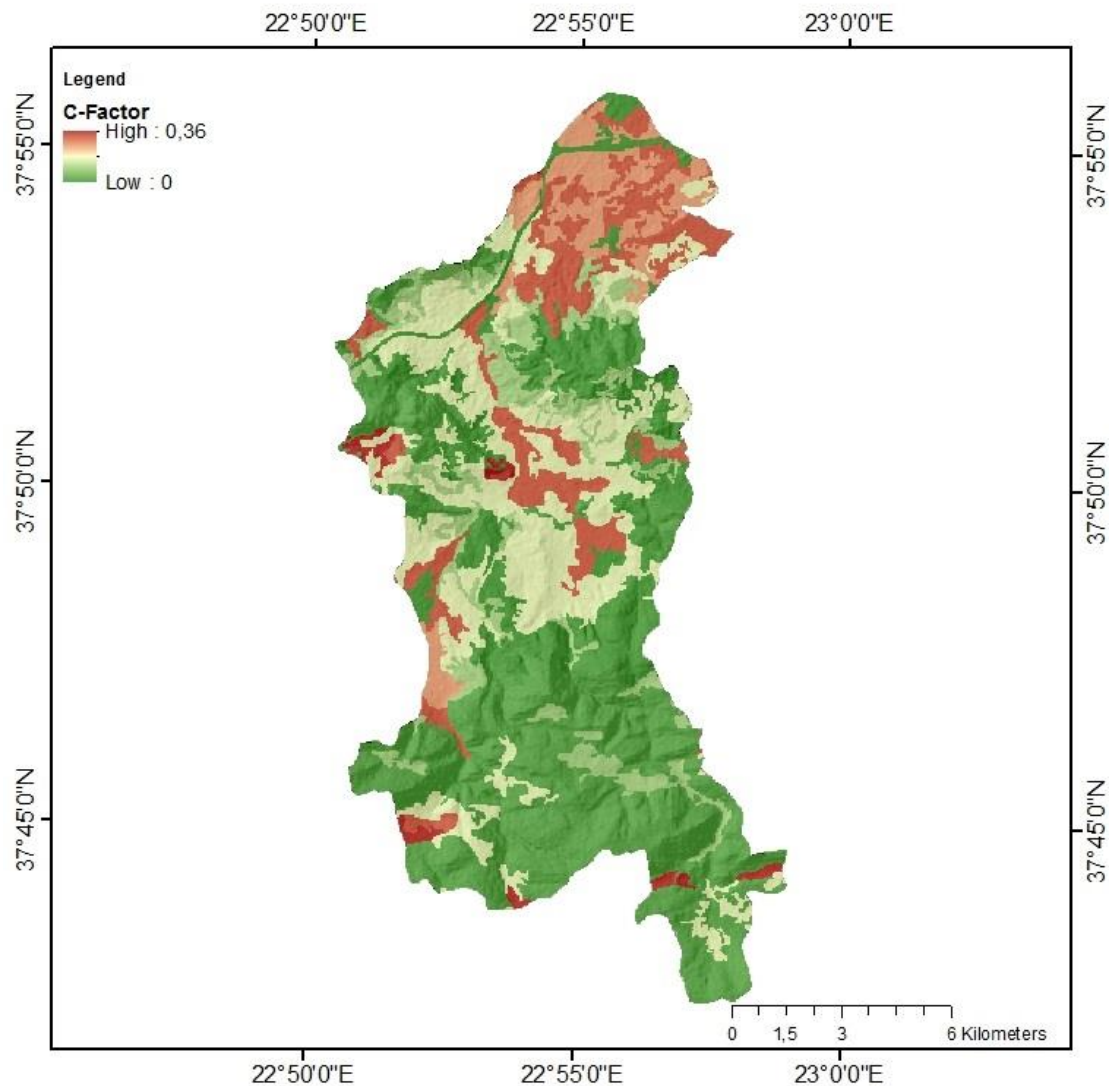
Code	Κατηγορία κάλυψης γης	Έκταση (km ²)	Ποσοστό έκτασης(%)	C-Factor
112	Ασυνεχής αστικός ιστός	1,80	1,09	0.001
121	Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες	0,20	0,12	0.01
122	Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα	1,70	1,05	0
131	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	0,37	0,22	0.36
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού	0,49	0,30	0.005
211	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	1,26	0,76	0.2
221	Αμπελώνες	0,62	0,38	0.2
222	Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	10,30	6,24	0.15
223	Ελαιώνες	31,92	19,33	0.1
231	Λιβάδια	4,48	2,71	0.1
242	Σύνθετες καλλιέργειες	19,26	11,66	0.18
243	Γεωργική γη μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης	15,86	9,61	0.07
312	Δάσος κωνοφόρων	16,66	10,09	0.001
321	Φυσιικοί βοσκότοποι	0,39	0,24	0.05
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	54,06	32,75	0.03
324	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	5,67	3,44	0.02

Πίνακας 4: Κατηγορίες κάλυψης γης (CORINE-2000) της λεκάνης απορροής του Ξηριά, συνολική έκταση, ποσοστό επί της συνολικής έκτασης, και οι τιμές του συντελεστή κάλυψης του εδάφους C βάσει βιβλιογραφικών τιμών.



Σχήμα 8: Ποσοστά κάλυψης της λεκάνης ανά χρήση γης

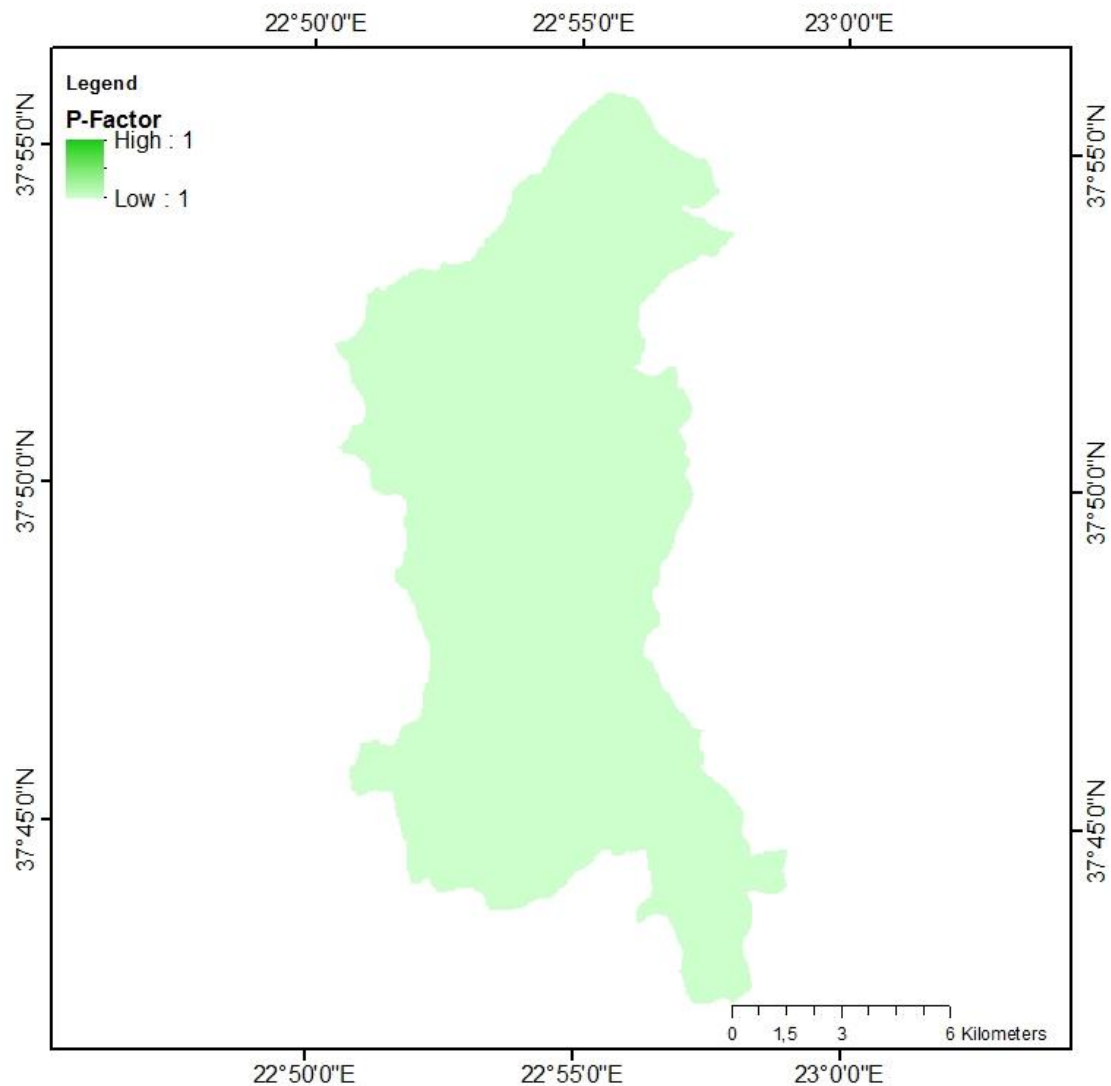
Στον ακόλουθο χάρτη (Χάρτης 10) ισοδιάστασης 50m, φαίνονται τα μεγέθη του συντελεστή C στο σύνολο της λεκάνης απορροής του Ξηριά. Κάθε κελί λαμβάνει μια τιμή βάσει του εύρους τιμών που συγκεντρώθηκαν από τη βιβλιογραφία. Η μέση τιμή του συντελεστή C που προέκυψε με τον τρόπο αυτό ανέρχεται σε 0.07 ενώ το εύρος τιμών κυμαίνεται από 0 έως 0.36 για τις πιο επιρρεπείς στη διάβρωση χρήσεις γης.



Χάρτης 10: Χάρτης του συντελεστή κάλυψης γης (C-Factor) για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά.

7.5 Συντελεστής P

Αναφορικά με τον συντελεστή μέτρων ελέγχου της διάβρωσης για την περιοχή της λεκάνης απορροής του Ξηριά, δεν υπάρχουν δεδομένα ύπαρξης σχετικών διατάξεων αναστολής των διαβρωτικών φαινομένων. Δεδομένου, μάλιστα ότι οι εν λόγω πρακτικές ελέγχου οφείλουν να έχουν συστηματικό και ολοκληρωμένο χαρακτήρα προκειμένου να μεταβάλουν το μέγεθος του συντελεστή P, η τιμή 1 λήφθηκε για το σύνολο της περιοχής μελέτης.

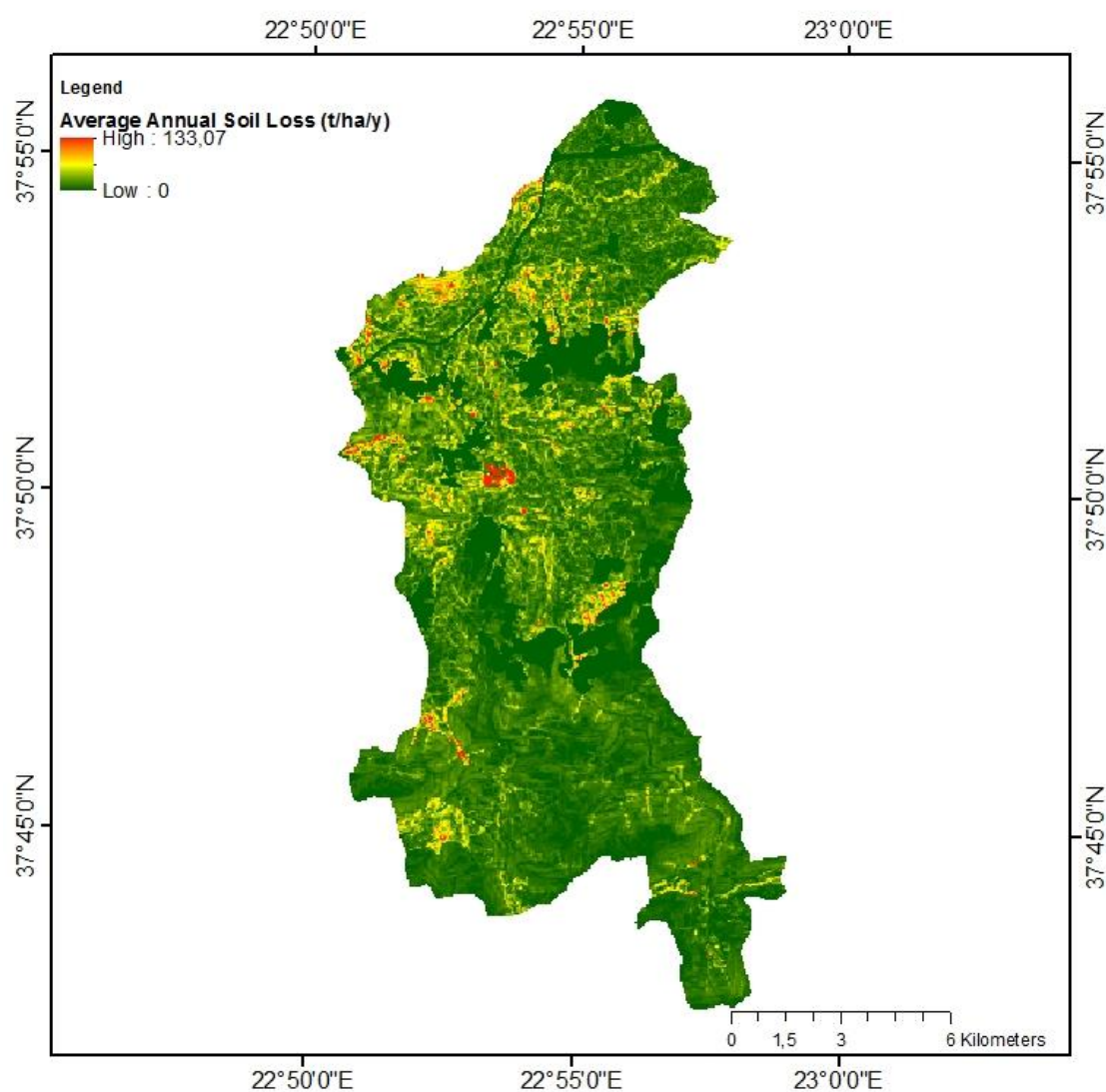


Χάρτης 11: Χάρτης του συντελεστή ελέγχου διάβρωσης (P-Factor) για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά

8. Αποτελέσματα

Αφού υπολογίστηκαν όλοι οι επιμέρους συντελεστές της εξίσωσης RUSLE, τελικό βήμα της μοντελοποίησης είναι η εφαρμογή της πολλαπλασιαστικής σχέσης $A=RKLSCP$. Με χρήση του εργαλείου Raster Calculator σε περιβάλλον GIS καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός του γινομένου και κατ' επέκταση της μέσης ετήσιας εδαφικής απώλειας.

Εφαρμόζοντας την σχέση [1], προκύπτει ο παρακάτω χάρτης (Χάρτης 12) ισοδιάστασης 50m, που παρουσιάζει τη χωρική διακύμανση της μέσης ετήσιας εδαφικής απώλειας ($t\ ha^{-1}yr^{-1}$) για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά με το εύρος τιμών να κυμαίνεται από $0\ t\ ha^{-1}yr^{-1}$ έως $133.07\ t\ ha^{-1}yr^{-1}$, ενώ η μέση τιμή προκύπτει ίση με $3.52\ t\ ha^{-1}yr^{-1}$:



Χάρτης 12: Χάρτης της μέσης ετήσιας εδαφικής απώλειας για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά

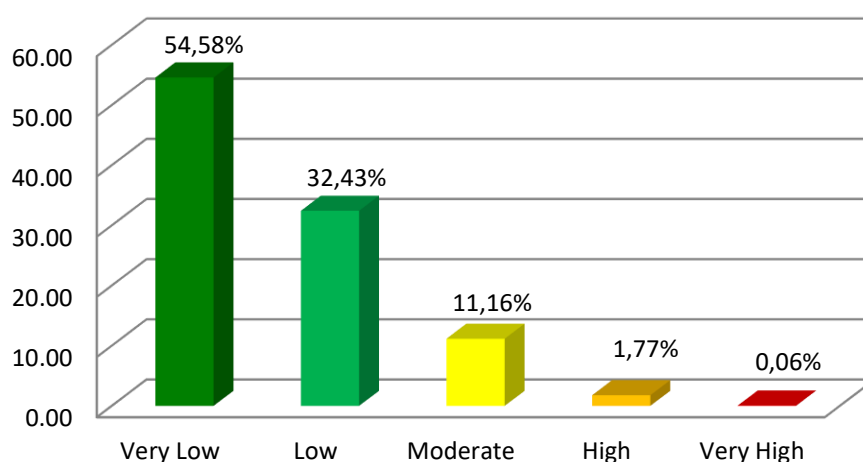
Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της φυσικής κατανομής (Natural Breaks) για την δημιουργία κλάσεων του βαθμού διάβρωσης στη λεκάνη απορροής του Ξηριά. Όπως προκύπτει από την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας της περιοχής μελέτης δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα προβλήματα διάβρωσης. Αναλυτικότερα, τα στατιστικά αποτελέσματα φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 4).

Κλάση διάβρωσης	Εύρος τιμών ($t\ ha^{-1}yr^{-1}$)	Έκταση (km^2)	Ποσοστό Έκτασης (%)
Very Low	0 - 2.7	89,92	54,58
Low	2.7 - 6.8	53,43	32,43
Moderate	6.8 - 14	18,38	11,16
High	14 - 54	2,92	1,77
Very High	>54	0,09	0,06

Πίνακας 5: Πίνακας κλάσεων του βαθμού διάβρωσης για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά (Natural Breaks).

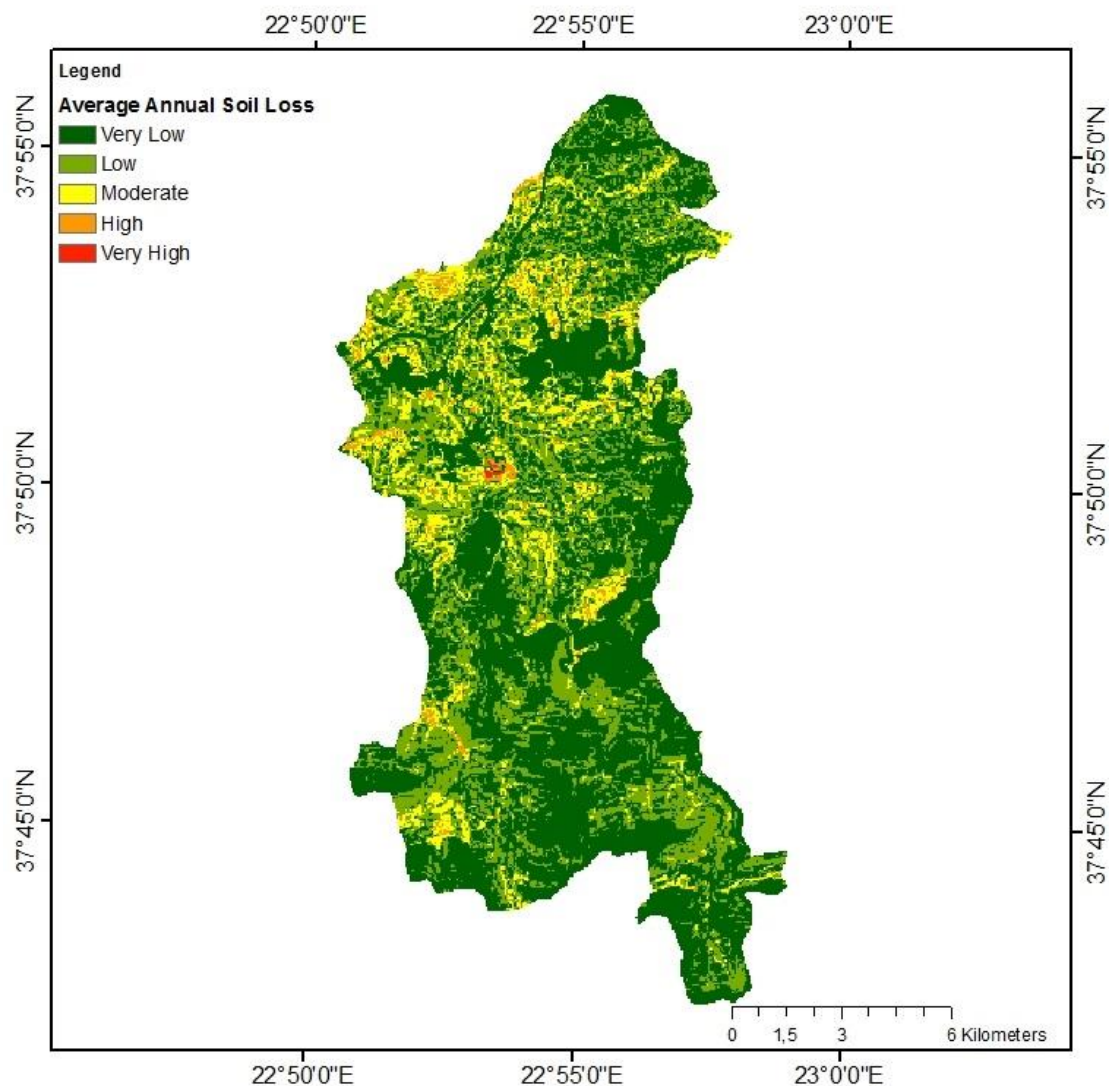
Η κατανομή των τιμών (Σχήμα 9), επί της συνολικής έκτασης, που υπολογίστηκαν για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά, με βάση την προηγούμενη μέθοδο δημιουργίας κλάσεων οδηγεί στη διαπίστωση ότι οι περιοχές υψηλού κινδύνου (High και Very High) δεν ξεπερνούν το 1.83% της συνολικής έκτασης. Πιο συγκεκριμένα το 54.58% της περιοχής μελέτης εμφανίζει πολύ χαμηλό βαθμό διάβρωσης, το 32.43% χαμηλό, το 11.16% μεσαίο, ενώ το 1.77% και 0.06% υψηλό και πολύ υψηλό αντίστοιχα.

Κατανομή βαθμού διάβρωσης (%)



Σχήμα 9: Κατανομή κλάσεων του βαθμού διάβρωσης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει, ο χάρτης κλάσεων του βαθμού διάβρωσης για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά (Χάρτης 4.13):



Χάρτης 13: Χάρτης κλάσεων του βαθμού διάβρωσης για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά.

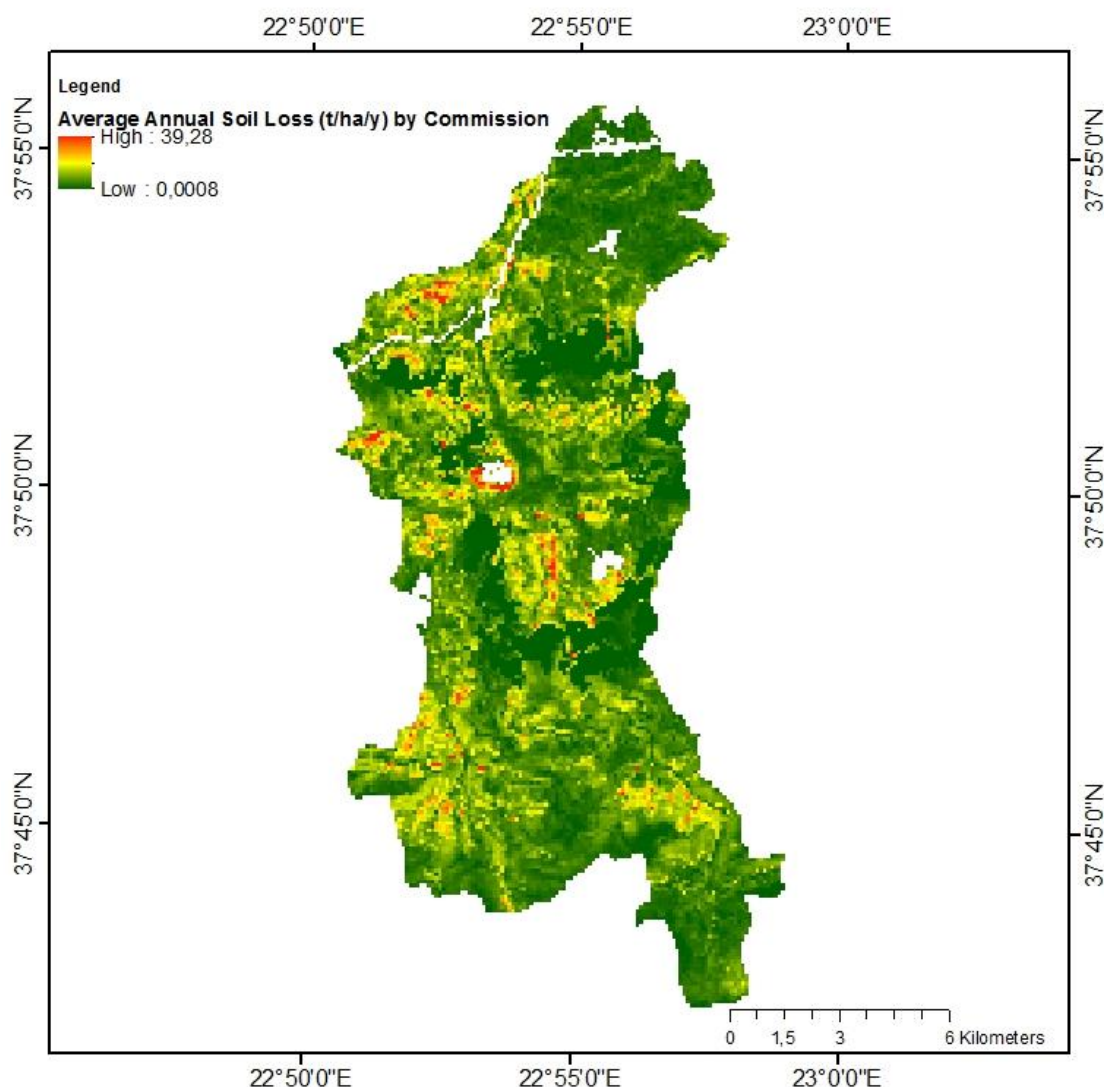
Σύμφωνα με τα παραπάνω, παρατηρείται ότι ένα μεγάλο ποσοστό έκτασης της περιοχής μελέτης, παρουσιάζει χαμηλή έως πολύ χαμηλή εδαφική απώλεια. Γενικώς, οι χαμηλότερες εκτιμήσεις βρίσκονται σε περιοχές με ήπιες κλίσεις σε συνδυασμό με την ύπαρξη βλάστησης η οποία παρέχει πολύ καλή αντιδιαβρωτική προστασία.

Αντίθετα, οι υψηλότερες εκτιμήσεις βρίσκονται σε περιοχές όπου εμφανίζονται απότομες μορφολογικές κλίσεις σε συνδυασμό με την ύπαρξη βλάστησης που χαρακτηρίζεται από χαμηλή προσφορά προστασίας στα εδάφη. Τέλος, σημαντικό είναι να αναφερθεί πως οι υψηλότερες τιμές του φαινομένου εμφανίζονται στην περιοχή εξόρυξης ορυκτών.

9. Έλεγχος των αποτελεσμάτων

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με αυτά του ευρωπαϊκού χάρτη εδαφικής διάβρωσης, όπως προκύπτει από την εφαρμογή του RUSLE 2015 (τροποποιημένη έκδοση του RUSLE), στα πλαίσια των μελετών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European Commission) που πραγματοποιήθηκαν το 2015.

Στον παρακάτω χάρτη ισοδιάστασης 100m, παρουσιάζεται η χωρική διακύμανση της μέσης ετήσιας εδαφικής απώλειας ($\text{t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$) για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά, βάσει των μελετών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Όπως φαίνεται στον παρακάτω χάρτη (Χάρτης 14), το εύρος τιμών των εδαφικών απωλειών κυμαίνεται από $0.0008 \text{ t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ έως $39.28 \text{ t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$, ενώ η μέση τιμή είναι ίση με $3.67 \text{ t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$.



Χάρτης 14: Χάρτης της μέσης ετήσιας εδαφικής απώλειας για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά όπως προκύπτει από τις μελέτες της European Commission.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε η ίδια μέθοδος όπως και στην περίπτωση ταξινόμησης των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας (Φυσική κατανομή -

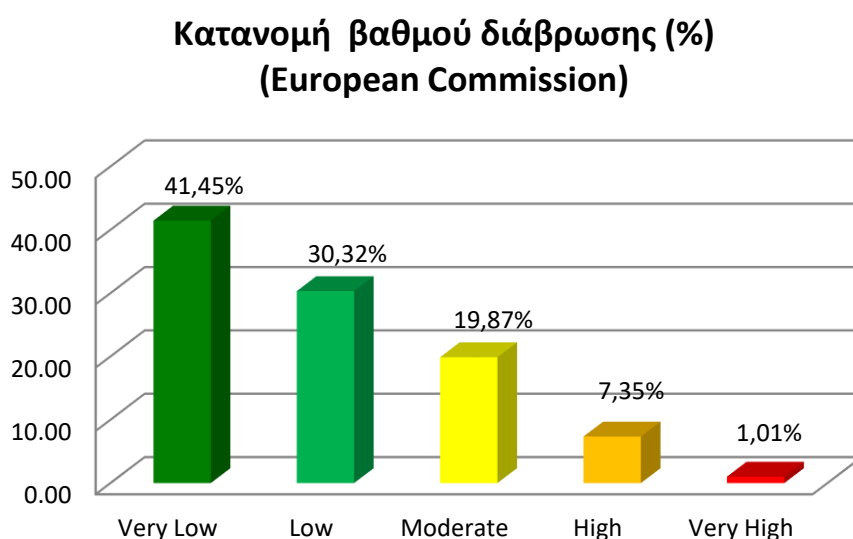
Natural Breaks) για την δημιουργία των κλάσεων του βαθμού διάβρωσης του εδάφους στη λεκάνη απορροής του Ξηριά.

Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 5), φαίνονται τα στατιστικά αποτελέσματα της ταξινόμησης.

Κλάση διάβρωσης	Εύρος τιμών ($t\ ha^{-1}yr^{-1}$)	Έκταση (km^2)	Ποσοστό Έκτασης (%)
Very Low	0 - 2.1	66,49	41,45
Low	2.1 - 4.8	48,63	30,32
Moderate	4.8 - 8.5	31,28	19,87
High	8.5 - 15.1	11,79	7,35
Very High	>15.1	1,63	1,01

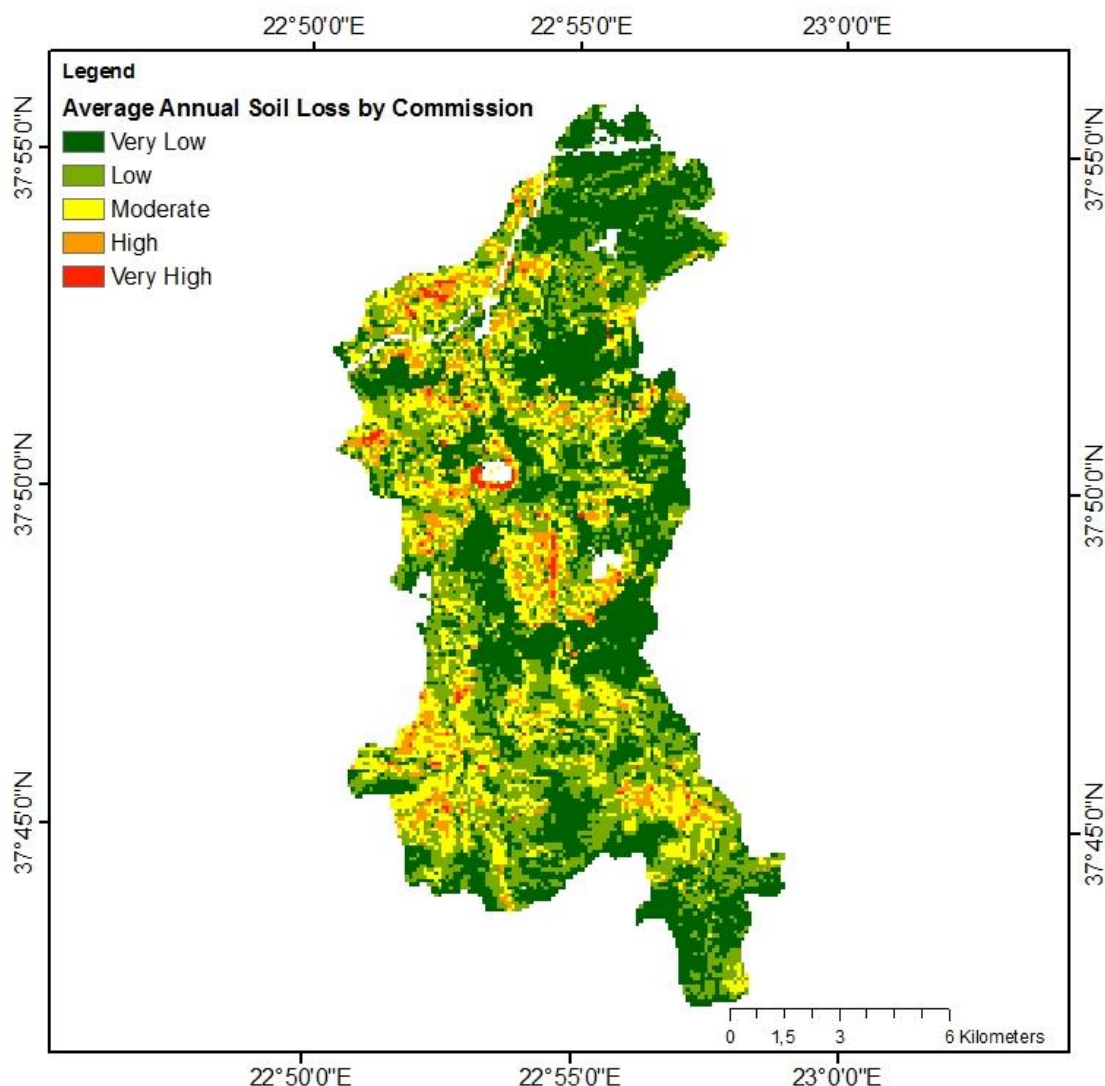
Πίνακας 6 : Πίνακας κλάσεων του βαθμού διάβρωσης για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά (Natural Breaks) όπως προκύπτει από τις μελέτες της European Commission.

Έτσι, όσον αφορά την κατανομή του βαθμού διάβρωσης (Σχήμα 10) βάσει των μελετών της European Commission, προκύπτει ότι οι περιοχές υψηλού κινδύνου (High και Very High) δεν ξεπερνούν το 8.36% της συνολικής έκτασης, ενώ είναι σημαντικό να σημειωθεί πως στα πλαίσια των μελετών της European Commission δεν εμπεριέχονταν στην μοντελοποίηση οι περιοχές που σύμφωνα με τον Corine 2000 ορίζονται ως ασυνεχείς αστικοί ιστοί, χώροι εξόρυξης καθώς και το οδικό δίκτυο.



Σχήμα 10: Κατανομή κλάσεων του βαθμού διάβρωσης όπως προκύπτει στα πλαίσια των μελετών της European Commission.

Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει, ο χάρτης κλάσεων του βαθμού διάβρωσης για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά (Χάρτης 15):



Χάρτης 15: Χάρτης κλάσεων του βαθμού διάβρωσης για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά όπως προκύπτει από τις μελέτες της European Commission.

Τέλος, η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε με την βοήθεια της εργαλειοθήκης «Spatial Analyst» και πιο συγκεκριμένα με την χρήση της λειτουργίας «Combine». Έτσι, είναι δυνατόν να γίνει ποσοτικοποίηση και οπτικοποίηση της διαφοράς των κλάσεων του βαθμού διάβρωσης που προκύπτουν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας με αυτά της εφαρμογής του RUSLE2015 στα πλαίσια των μελετών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.

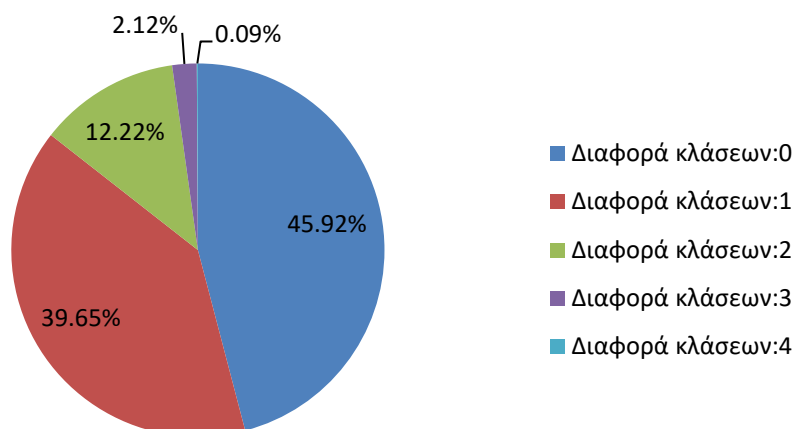
Όπως προκύπτει από την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων της λειτουργίας «Combine», το 45.9% της περιοχής μελέτης ταξινομείται στην ίδια κλάση βαθμού εκδήλωσης του φαινομένου της διάβρωσης, το 39.6% εμφανίζει διαφορά μίας κλάσης, το 12.2% εμφανίζει διαφορά δύο κλάσεων, ενώ το 2.1% και το 0.09% της περιοχής μελέτης εμφανίζει διαφορά τριών και τεσσάρων κλάσεων αντίστοιχα.

Πιο συγκεκριμένα, στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 6) παρουσιάζεται η κατανομή της απόλυτης διαφοράς των κλάσεων του βαθμού διάβρωσης, όπως προκύπτει με την χρήση της λειτουργίας «Combine»

Διαφορά Κλάσεων	Αριθμός κελιών	Ποσοστό Έκτασης (%)
0	7325	45,92
1	6325	39,65
2	1949	12,22
3	338	2,12
4	15	0,09

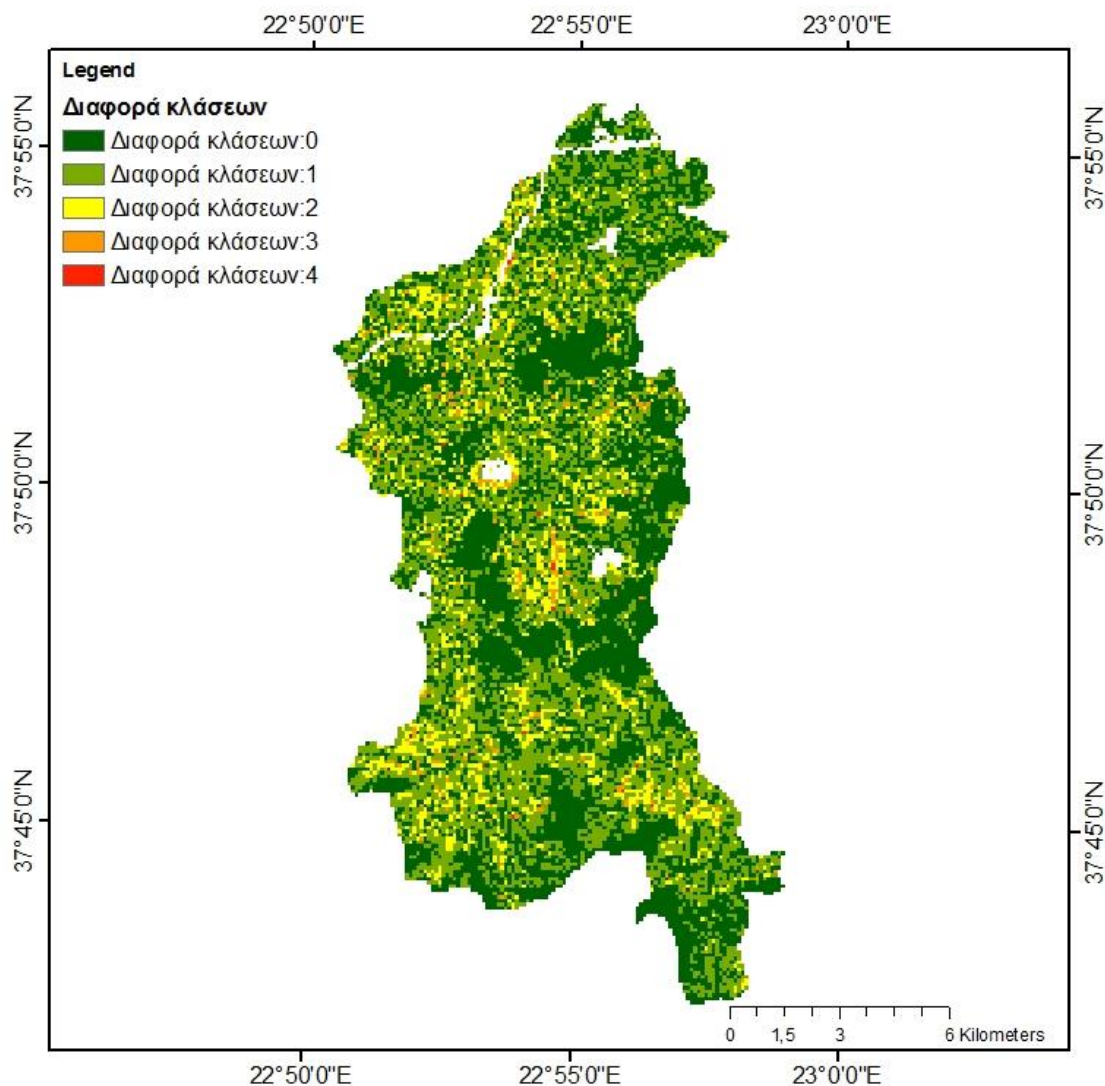
Πίνακας 7: Κατανομή της απόλυτης διαφοράς των κλάσεων του βαθμού διάβρωσης μεταξύ των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με αυτών των μελετών της European Commission, όπως προέκυψαν από τη λειτουργία «Combine».

Κατανομή διαφοράς κλάσεων



Σχήμα 11: Κατανομή διαφοράς κλάσεων.

Στον ακόλουθο χάρτη (Χάρτης 15), ισοδιάστασης 100m, παρουσιάζεται η απόλυτη διαφορά των κλάσεων βαθμού διάβρωσης, μεταξύ των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας και αυτών των μελετών της European Commission.



Χάρτης 16: Χάρτης απόλυτης διαφοράς των κλάσεων του βαθμού διάβρωσης μεταξύ των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας και αυτών των μελετών της European Commission για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά.

10. Συμπεράσματα και προτάσεις

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο RUSLE με στόχο την εκτίμηση των εδαφικών απωλειών υπό την υδατική επίδραση για τη λεκάνη απορροής του Ξηριά. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι υπολογιζόμενες εδαφικές απώλειες κυμαίνονται από μηδέν έως $133.07 \text{ ton ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$. Αυτές οι τιμές φαίνεται να είναι πολύ υψηλές, αλλά όταν εξετάζονται λεπτομερέστερα, διαπιστώνεται ότι για περισσότερο από το 80% της περιοχής μελέτης, οι εδαφικές απώλειες ήταν χαμηλές και δεν ξεπερνούσαν τους $6.8 \text{ ton ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$.

Κατά τον έλεγχο αξιοπιστίας του μοντέλου RUSLE, μπορούν να γίνουν αρκετές παρατηρήσεις. Κατ' αρχάς, με την αξιοποίηση βάσεων δεδομένων σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η χωρική ανάλυση αυτών, λόγω του ότι υψηλότερες χωρικές αναλύσεις θα οδηγήσουν σε πιο λεπτομερή αποτελέσματα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) ASTER για τον υπολογισμό του συντελεστή LS ενώ για τον υπολογισμό του συντελεστή K και C έγινε χρήση των

βάσεων δεδομένων LUCAS/ESDB και Corine-2000 αντίστοιχα. Η χωρική ανάλυση των προαναφερθέντων βάσεων δεδομένων ήταν χαμηλή, καθιστώντας δύσκολη τη λεπτομερή εξέταση της περιοχής μελέτης ως προς την εδαφολογία και την κάλυψη γης. Αντίθετα το DEM ASTER, με χωρική ανάλυση 30m, θεωρήθηκε ιδανικό για τον υπολογισμό του συντελεστή LS, κάτι που επιβεβαιώνεται από αρκετούς ερευνητές, οι οποίοι αναφέρουν πως τα μοντέλα που χρησιμοποιούν DEM ASTER αποδίδουν ικανοποιητικά, ειδικά σε υψόμετρα χαμηλότερα των 5.000m.

Δεύτερον, από τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Οι βάσεις δεδομένων ESDB και LUCAS που χρησιμοποιήθηκαν για την απόκτηση των εδαφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης, αφορούν όλη την έκταση της Ευρωπαϊκής Ένωσης και όχι την περιοχή μελέτης συγκεκριμένα. Δεδομένου ότι τα χαρακτηριστικά του εδάφους, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την γεωγραφική του θέση, τα υπολογισθέντα αποτελέσματα μπορούν να αποκλίνουν από την πραγματικότητα και να καταστήσουν τα αποτελέσματα λιγότερο αξιόπιστα. Αυτό επιβεβαιώνεται από ερευνητές που διαπίστωσαν τόσο υποεκτίμηση όσο και υπερεκτίμηση κατά των υπολογισμών του συντελεστή K με χρήση βάσεων δεδομένων μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, η βάση δεδομένων Corine-2000 που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του συντελεστή C θα μπορούσε να θεωρηθεί πως δεν αντιπροσωπεύει τις τωρινές συνθήκες, καθώς τα χωρικά πρότυπα της κάλυψης γης και ειδικότερα της βλάστησης είναι ιδιαίτερα δυναμικά και μπορούν να μεταβάλλονται από έτος σε έτος και ακόμη να εμφανίζουν και εποχικές διακυμάνσεις.

Τρίτον, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά την εφαρμογή τεχνικών παρεμβολής καθώς μπορούν να αυξήσουν την αναξιπιστία των αποτελεσμάτων όταν δεν εκτελούνται με τον σωστό τρόπο. Η μέθοδος παρεμβολής Inverse Distance Weighting (IDW) που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας για την δημιουργία του χάρτη του συντελεστή R, θεωρείται καλή τεχνική σύμφωνα με αρκετούς ερευνητές. Ωστόσο, κανείς από τους μετεωρολογικούς σταθμούς που χρησιμοποιήθηκαν για την άντληση των κλιματικών δεδομένων δεν βρισκόταν εντός της περιοχής μελέτης και επιπλέον δεν διέθεταν μακροχρόνια συνεχή δεδομένα βροχόπτωσης, καθιστώντας τα αποτελέσματα της παρεμβολής λιγότερα αξιόπιστα.

Τέταρτον, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός σχέσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή του μοντέλου RUSLE, και η επιλογή τους πρέπει να γίνει με ιδιαίτερη προσοχή. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, για τον υπολογισμό του συντελεστή R χρησιμοποιήθηκε η εμπειρική σχέση των J.M. van der Knijff et al. (2000). Η σχέση αυτή έχει χρησιμοποιηθεί σε έναν μεγάλο αριθμό μελετών, και θεωρείται πως αποδίδει εξαιρετικά για τις κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου και ιδιαίτερα του Ελληνικού χώρου. Η σχέση που προτάθηκε από τους Wischmeier και Smith (1978) και τους Renard et al. (1997) χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του συντελεστή K, αποτελεί την αλγεβρική προσέγγιση του νομογράφου και χαρακτηρίζεται από πολλούς ερευνητές ως η πιο ακριβής και διαδεδομένη σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή K. Για τον υπολογισμό του συντελεστή LS χρησιμοποιήθηκε η σχέση των Desmet και Govers (1996), η οποία εμπεριέχεται σαν αυτοματοποιημένο εργαλείο στην εργαλειοθήκη υδρολογίας του ελεύθερου λογισμικού GIS «SAGA». Αρκετοί ερευνητές αναφέρουν πως ο αυτοματοποιημένος υπολογισμός του συντελεστή LS παρέχει γρηγορότερα και ακριβέστερα αποτελέσματα σε σχέση με τις μη-αυτοματοποιημένες τεχνικές. Ενώ

τέλος, για τον συντελεστή C πραγματοποιήθηκε άντληση τιμών από την βιβλιογραφία.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας εκτός από την αξιολόγηση των δεδομένων και των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν, είναι χρήσιμο να γίνει αξιολόγηση και της διαθεσιμότητας των δεδομένων. Διαπιστώνεται ότι τα δεδομένα είναι εύκολα και ελεύθερα προσβάσιμα στο διαδίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, η λήψη του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) ASTER μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της ιστοσελίδας [USGS Explorer](#), τα κλιματικά δεδομένα διατίθενται ελεύθερα μέσω της ιστοσελίδας της [Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας](#), οι εδαφολογικές βάσεις δεδομένων είναι διαθέσιμες στην ιστοσελίδα της [European Soil Data Center](#) (ESDAC) ενώ η βάση δεδομένων κάλυψης γης Corine 2000 διατίθεται ελεύθερα στην ιστοσελίδα του προγράμματος [Copernicus](#).

Για τον υπολογισμό του συντελεστή P, δεν υπήρχαν διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τις πρακτικές ελέγχου της διάβρωσης του εδάφους, γεγονός που αποτελεί ένα κοινό πρόβλημα σε πολλές μελέτες. Για τον λόγο αυτό, θεωρήθηκε σκόπιμο η χρήση ενιαίας τιμής για τον συντελεστή P σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας με τα αποτελέσματα των μελετών της Ευρωπαϊκής Κομισιόν, αφού έγινε ταξινόμηση και των δύο με την μέθοδο της φυσικής κατανομής (Natural Breaks), παρατηρήθηκε ότι το 45.9% της περιοχής μελέτης ταξινομείται στην ίδια κλάση βαθμού εκδήλωσης του φαινομένου της διάβρωσης, το 39.6% εμφανίζει διαφορά μίας κλάσης, το 12.2% εμφανίζει διαφορά δύο κλάσεων, ενώ το 2.1% και το 0.09% της περιοχής μελέτης εμφανίζει διαφορά τριών και τεσσάρων κλάσεων αντίστοιχα. Οι διαφορές αυτές, ως επί το πλείστον οφείλονται στην επιλογή διαφορετικών μεθόδων καθώς και στα διαφορετικά δεδομένα που αξιοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των επιμέρους συντελεστών στις περιπτώσεις των δύο μοντελοποιήσεων.

Με βάση τα παραπάνω, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι αν και είναι εύκολη η απόκτηση των περισσότερων δεδομένων και οι μέθοδοι είναι εύκολο να εκτελεστούν, η αξιοπιστία τους είναι γενικά χαμηλή και υπάρχει μεγάλος βαθμός αβεβαιότητας ως προς τον υπολογισμό των τιμών της εδαφικής απώλειας στη λεκάνη απορροής του Ξηριά εφαρμόζοντας το μοντέλο RUSLE. Επομένως, θα ήταν προτιμότερη η χρήση κάποιας άλλης μεθόδου με σκοπό τον ακριβή υπολογισμό των εδαφικών απωλειών σε λεκάνες απορροής που εμφανίζουν ομοιότητες με αυτή του Ξηριά. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να φανούν χρήσιμα για την αναγνώριση και τον εντοπισμό των χωρικών προτύπων του φαινομένου της διάβρωσης, γεγονός που μπορεί να καταστήσει αυτές τις μεθόδους υψηλής χρησιμότητας, καθώς τέτοιες πληροφορίες είναι κρίσιμες για τον έλεγχο του φαινομένου της διάβρωσης και ανεκτίμητης αξίας υπό το πρίσμα της αειφόρου ανάπτυξης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ελληνόγλωσση

Αντωνιάδης, Β. (2001). *Σημειώσεις στο μάθημα Εδαφολογία: Τα εδάφη στα οικοσυστήματα*. Πανεπιστήμιο Αιγαίου Τμήμα Περιβάλλοντος

Βαχαβιώλος, Θ. (2014). *Εκτίμηση εδαφικής διάβρωσης, στερεοαπορροής και αποθέσεων ταμιευτήρα από εμπειρικές μεθόδους με έμφαση στην επίδραση της βροχόπτωσης*. Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Βιδάλη, Μ. (2013). *Εκτίμηση μοντέλου διάβρωσης και στερεοπαροχής στον ταμιευτήρα του φράγματος Πηνειού Νομού Ηλείας*. Μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Καρύμπαλης, Ε. (2010). *Επιλεγμένα θέματα για το μάθημα υδρολογία-διαχείριση υδατικών πόρων*. Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα, σσ. 23-31.

Καττέ, Β.Κ. (2014). *Η διαχρονική εξέλιξη των καλύψεων γης στο νησί Ικαρία τα τριάντα τελευταία χρόνια με την χρήση δορυφορικών εικόνων*. Μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

Κουλούρη, Μ. (2004). *Εδαφική υδατική διάβρωση και αλλαγή χρήσης γης στη Μεσόγειο: Εγκατάλειψη παραδοσιακής εκτατικής καλλιέργειας*. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, σσ. 218.

Κουράκλη, Π. (2010). *Εκτίμηση του κινδύνου πρόσχωσης των ταμιευτήρων νερού με τη χρήση των G.I.S. και της Τηλεπισκόπησης (Εφαρμογή: τεχνητή λίμνη Πολυφύτου Ν. Κοζάνης)*. Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σς. 197.

Κουτσογιάννης, Δ., Τάρλα, Κ. (1987). *Εκτιμήσεις Στερεοαπορροής στην Ελλάδα*, Τεχνικά Χρονικά, 7 (3).

Μαμάσης, Ν., Ευστρατιάδης, Α., Κουτσογιάννης, Δ. (2015). *Υδροηλεκτρικά έργα-Στερεομεταφορά*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μπαθρέλλος, Γ., Σκυλοδήμου, Χ., Χουσιανίτης, Κ. (2010). *Εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης στην νήσο Ζάκυνθο με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών*. 9ο Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο.

Μπαλούτσος, Γ., Κουτσογιάννης, Δ., Οικονόμου, Α., Καλλίρης, Π. (2000). *Διευρεύνηση της απόκρισης της λεκάνης απορροής Ξηριά Κορίνθου στην καταιγίδα της 11-13 Ιανουαρίου 1997 με τη μέθοδο SCS*. Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα, Τόμος 11, Τεύχος 1/2000, σσ. 77-90.

Ξανθάκης, Μ. (2011). *Η μελέτη της εδαφικής διάβρωσης σε ορεινές λεκάνες απορροής με σύγχρονα τεχνολογικά εργαλεία*. Διδακτορική Διατριβή, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών, σσ. 288.

Παναγούλια, Δ., Δήμου, Γ. (2002). *Μηχανική των Φερτών Υλικών*. Έκδοση 3η, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, σσ. 462.

Παναγούλια, Δ., Λυκούδη, Ε., Ζαρρής, Δ. (2006). *Εκτίμηση της στερεοαπορροής υδρολογικών λεκανών με συνδυαστική ανάλυση υδρολογικών και γεωμορφολογικών παραμέτρων*. Αθήνα.

Παπαϊωάννου, Α., Τάντος, Β. (2006). *Δασική Εδαφολογία*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Παπάζογλου, Π. (2009). *Εκτίμηση του βαθμού διάβρωσης στη λεκάνη του Ανθεμούντα*. Δράση 3 του έργου LIFE07/ENV/GR/000278-Soil Sustainability

Παπανικολάου, Δ. Ι., Σίδερης, Χρ. Ι. (2007). *Γεωλογία: Η Επιστήμη της Γης*. Εκδόσεις Πατάκη.

Πασχαλίδης, Γ. (2015). *Προσομοίωση στερεομεταφοράς σε λεκάνη απορροής κατάντη φράγματος*. Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Παυλόπουλος, Κ., (2011). *Γεωμορφολογία : Εφαρμογές στις Γεωεπιστήμες*. Εκδόσεις ΙΩΝ

Σακκαλλής, Μ. (2011). *Σημειώσεις εδαφολογίας–μετάφραση αγγλικών σημειώσεων δασικού κολεγίου Κύπρου*.

Συλλαίος, Ν., Μπίλας, Γ., Καραπέτσας, Ν. (2007). *Χαρτογράφηση και αξιολόγηση γεωργικών εδαφών με τη χρήση Τηλεπισκόπησης και GIS*. Πανεπιστημιακές σημειώσεις μαθήματος στο Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.

Φλαμπούρης, Κ., (2008). *Μελέτη της επίδρασης του παράγοντα βροχόπτωσης R στο νόμο RUSLE*. Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σσ 181.

Χαϊντούτη Κ., (2006). *Διαχείριση περιβάλλοντος*. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

Χαϊντούτη Κ., (2006). *Σημειώσεις Γενικής εδαφολογίας*. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

Χαλκιάς, Χ. (2011). *ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ (Συμπληρωματικές Σημειώσεις)*. Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα

Χαλκιάς, Χ. (2006). *Όροι και έννοιες επιστήμης γεωγραφικών πληροφοριών*. Αθήνα, Εκδόσεις ΙΩΝ.

Χατζόπουλος, Ι. Ν. (2012). *Γεωχωροπληροφορική Τοπογραφία*. Εκδόσεις Τζιόλα

Tyler Miller, G. JR. (2004). *Περιβαλλοντικές Επιστήμες*. Εκδόσεις ΙΩΝ

Richard, W.T., Boorse, D.F. (2013). *Περιβαλλοντική Επιστήμη, προς ένα βιώσιμο μέλλον*. 11ή έκδοση, Εκδόσεις Παρισιάνου.

Ξενόγλωσση

Arnoldus, H.M.J. (1977). *Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco*. FAO Soils Bulletin, 34, pp. 39-51.

Aronoff, S. (1991). *Geographic information Systems: A Management Perspective*. second printing, WDL Publications, Ottawa, Canada.

Arora, K. (2003). *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 6 th Edition, Standard Publishers Distributors, New Delhi

Brown, R.B. (2003). *Soil Texture*. UFDC Home - All Collection Groups, University of Florida.

Brown, L.C., Foster, G.R. (1987). *Storm erosivity using idealized intensity distributions*. Trans. ASAE 30, pp. 379–386.

Burrough, P.A., McDonnell, R.A. (1998). *Principles of Geographical Information*. Oxford University Press.

Chuvieco, E. (1993). *Integration of linear programming and GIS for land-use modeling*. Int. J. Geographical Information Systems, 7, pp. 71-83.

CORINE, (1992). *Soil Erosion Risk and Important Land Resources in the Southern Regions of the European Community*. EUR 13233, Luxembourg.

Dangermond, J. (1992). *What is a Geographic Information System (GIS)? Geographic Information Systems (GIS) and Mapping- Practices a Standards*. edited by A.I. Johnson, C.B. Pettersson, and J.L. Fulton, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 11- 17.

De Jong, S. M. (1994). *Derivation of vegetative variables from a Landsat TM image for modeling soil-erosion*. Earth Surface Processes and Landforms. 19 (2), pp. 165-178.

De Meyer, A., Poesen, J., Isabirye, M., Deckers, J., Raes, D. (2011). *Soil erosion rates in tropical villages: A case study from Lake Victoria Basin, Uganda*. Catena 84, pp. 89-98.

De Ploey, J. (1986). *Soil erosion and possible conservation measures in loess loamy areas*. in Chisci, G. and Morgan, R. P. C. (Eds), *Soil Erosion in the European Community: impact of changing agriculture*, Balkema, Rotterdam, pp. 157–163.

De Roo, A. P. J., Hazelhoff, L., & Burrough, P. A. (1989) *Soil erosion modeling using ANSWERS and geographical information systems*. In *Earth Surface Processes and Landforms*.

Desmet, P.J.J., Govers, G. (1996). *A GIS procedure for the automated calculation of the USLE LS factor on topographically complex landscape units*. *Journal of Soil and Water Conservation*, pp. 427–433.

Dillaha, T.A., Beasley, D.B. (1983). *Sediment transport from disturbed upland watersheds*. *Trans. of the ASAE* 26 (6), pp. 1766-1777.

Di Stefano, C., Ferro, V. & Porto, P. (2000). *Length slope factors for applying the Revised Universal Soil Loss Equation at basin scale in Southern Italy*. pp. 349-364.

Diodato, N. (2004). *Estimating RUSLE's rainfall factor in the part of Italy with a Mediterranean rainfall regime*. *Hydrology and Earth System Sciences* 8, pp. 103–107.

EEA, (2000). *Environmental signals 2000-European Environment Agency regular indicator report*. European Environment Agency

Engel B.A., Srinivasan, R., Arnold, J., Rewerts, C. (1993). *Nonpoint Source (NPS) Pollution Modeling Using Models Integrated with Geographic Information Systems (GIS)*. *Wat. Sci. Tech.* 28: pp. 685-690.

Eswaran, H., Reich, P.F. (2005). *World Soil Map*. *Encyclopedia of Soil in the Environment*, pp. 352-365.

Faeth, P., Cronsson, P. (1994). *Building the case for sustainable agriculture*. *Environment* 36 (1), pp. 16-20

FAO, (1998). *Food Balance Sheet*.

Ferro, V., Porto, P., Yu, B. (1999). *A comparative study of rainfall erosivity estimation for southern Italy and southeastern Australia*. *Hydrological Sciences Journal* 44, pp. 3–24.

Flanagan, D.C., Livingston, S.J. (1995). *WEPP User Summary*. NSERL Report No. 11, W. Lafayette IN: National Soil Erosion Research Laboratory. pp. 131

Flanagan, D.C., Nearing, M. A. (1995). *WEPP Hillslope Profile and Watershed Model Documentation*. NSERL Report No. 10, W. Lafayette In: National Soil Erosion Research Laboratory.

Fogel, M.M.L.H., Hekman, Duckstein, L. (1976). *A Stochastic Sediment yield Model Using the Modified Universal Soil Loss Equation*. The proceedings of a National Conference on Soil Erosion. May 24-26, Purdue University.

Foster, G. R., et. al. (1981). *Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI metric units*. Journal of Soil and Water Conservation 36(6): pp. 355-359.

Freeman D., Green, Hassell, Paterson, (1993). *Getting Started with GIS, Teaching Geography*. Vol. 18, No 2, pp. 57-60.

Gilley, J.E. (1985). *Interrill Soil Erosion – Part I: Development of Model Equations*, Vol 28, No. 1, pp. 147-153.

Giordano, A., Briggs, D.J. (1995). *CORINE Soil Erosion report*. European Commission, pp. 124

Globe, (2014). *Introduction-1*, Soil Pedosphere

Govers, G., Giménez, R., Van Oost, K. (2007). *Rill erosion: exploring the relationship between experiments, modeling and field observations*. Earth- Science Reviews 84 (3-4), pp. 87–102.

Hilgard, E. W. (1914). *Soils*. The Macmillan Company, New York

Huxhold, W.E., (1991). *An Introduction to Urban Geographic Information Systems*. Oxford University Press Inc., New York.

Innes, J.E., David, Simpson, M. (1992). *Implementing Geographic Information Systems for Planning: Lessons from the History of Technological Innovation*. Working paper 585, University of California at Berkeley.

Jenny, H. (1994). *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*. Dover publications, INC. New York

Jetten, V., Govers, G., Hessel, R. (2003). *Erosion models: quality of spatial predictions*. Hydrological Processes 17(5), pp. 887–900.

Jetten, V., Favis-Mortlock, D.T. (2006). *Modelling soil erosion in Europe*. In, Boardman, J. and Poesen, J. (eds). *Soil Erosion in Europe*, Wiley, Chichester. pp. 696-716

Jiang, B. (2013). *GIS-Based time series study of soil erosion risk using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model in a micro-catchment on Mount Elgon Uganda*, MSc Thesis, Lund University, Lund

Joffe, J. S. (1936). *Pedology*. Rutgers University Press, New Brunswick.

Karydas, C.G., Sekuloska, T., Silleos, G.N. (2009). *Quantification and site-specification of the support practice factor when mapping soil erosion risk associated with olive*

plantations in the Mediterranean island of Crete. Environmental Monitoring and Assessment 149, pp. 19-28.

Kendall, H.W., Pimentel, D. (1994). *Constraints on the expansion of the global food supply*. Ambio 23, pp. 198-205

Kheir, R., Wilson, J., Deng, Y. (2007). *Use of terrain variables for mapping gully erosion susceptibility in Lebanon*. Earth Surface Processes and Land-Forms 32(12), pp. 1770–1782.

Kirkby, M.J. (1980). *The stream head as a significant geomorphic threshold*. Thresholds in geomorphology, D.R.Coates & J.D.Vitek (eds), pp. 53-73.

Kirkby, M.J. (1980). *Modelling water erosion processes*. In Kirkby, M.J. and Morgan, R.P.C. (eds) Soil Erosion, pp. 183-216.

Lal, R. (1990). *Soil erosion and land degradation: The global risks*. Soil Degradation, New York, Springer-Verlag, pp. 129-172

Lal, R. (1994). *Soil Erosion: Research Methods*. St Lucie Press.

Lo A., El-Swaify S.A., Dangler E.W., Shinshiro L. (1985). *Effectiveness of EI30 as erosivity index in Hawaii*. Soil erosion and conservation, El-Swaify W.C., Moldenhauer and Lo A. (eds). Soil Conservation Society of America, Ankeny, pp. 384-392.

Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W. (2005). *Geographic Information Systems and Science*. Second Edition. New York: Wiley.

LUCAS, (2013). *Technical Reference Document C-1*. Instructions for Surveyors.

Martínez-Casasnovas, J.A., Ramos, M.C., Ribes-Dasi M. (2001). *Soil erosion caused by extreme rainfall events: mapping and quantification in agricultural plots from very detailed digital elevation models*. Elsevier, University of Lleida, Spain.

McCool D.K., Brown L.C., Foster G.R., Mutchler C.K., Meyer L.D. (1987). *Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation*. Trans. ASAE 30: pp. 1387-1396.

McCool, D. K., Foster, G. R., Mutchler, C. K., Meyer, L. D. (1989). *Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation*. Transactions of the ASAE, v. 32, n. 5, pp. 1571-1576.

Mitas, L., Mitasova, H. (1998). *Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention*. Water Resources Research 34(3), pp. 505–516.

Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., Iverson, L. (1996). *Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS*. International Journal of Geographical Information Science 10(5), pp. 629–641.

Mitasova, H., Mitas, L., Harmon, R. (2005). *Simultaneous spline interpolation and topographic analysis for LiDAR elevation data: methods for open source GIS*. IEEE GRSL 2(4), pp. 375–379.

Mitasova, H., Mitas, L. (2001a). *Multiscale soil erosion simulations for land use management*. Landscape Erosion and Evolution Modeling (edited by R.S. Harmon and W.W. Doe III), Springer US, New York, pp. 321-347.

Mitasova, H., Ullah, I., Barton, C.M., Hofierka, J. (2013). *GIS-based soil erosion modeling*. in John F. Shroder (Editor-in-chief), Bishop, M.P. (Volume editor), Treatise on Geomorphology, Vol 3, Remote Sensing and GIScience in Geomorphology, San Diego: Academic Press, pp. 228-258

Moore, I.D., Burch, G.J. (1986). *Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation*. Soil Science Society America Journal, 50, pp. 1294-1298

Moore, I.D., Turner, A.K., Wilson, J.P., Jensen, S.K., Band, L.E. (1993). *GIS and land surface-subsurface process modeling*. Geographic Information Systems and Environmental Modeling (edited by M. F Goodchild, L. T. Steyaert, and B. O. Parks), Oxford University Press, New York, pp. 196-230.

Moore, I.D., Wilson, J.P. (1992). *Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation*. Journal of Soil and Water Conservation, 4 (5), pp. 423-428.

Morgan, R.P.C. (1995). *Soil Erosion and Conservation*. Second Edition. Longman, Essex

Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E. (1998). *The European Soil erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments*, Earth Surface Processes and Landforms, 23, pp. 527-544.

Morgan, R.P.C, Morgan, D.D.V. & Finney, H.J. (1984). *A predictive model for the assessment of soil erosion risk*. Journal of agricultural engineering research 30, pp. 245-253.

Neteler, M., Mitasova, H. (2008). *Open Source GIS: a GRASS GIS Approach*. Springer.

Nikkami, D. (1999). *Optimizing the management of soil erosion using GIS*, PhD Thesis in the department of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University, Quebec Canada.

O'Callaghan, J.F., Mark, D.M. (1984). *The extraction of drainage networks from digital elevation data*. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 28, pp. 323-44.

Okalp, K. (2005). *Soil erosion risk mapping using Geographic Information Systems: A case study on Kocadere Creek watershed Izir*. MSc Thesis, Middle East Technical University.

Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Klik, A., Rousseva, S., Tadić, M.P., Michaelides, S., Hrabalíková, M., Olsen, P., Aalto, J., Lakatos, M., Rymaszewicz, A., Dumitrescu, A., Beguería, S., Alewell, C. (2015). *Rainfall erosivity in Europe*. *Science of The Total Environment*, pp. 801–814.

Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, M., Meusburger, K., Montanarella, L., Alewell, C. (2015). *The new assessment of soil loss by water erosion in Europe*. *Environmental Science & Policy* 54, pp. 438-447

Panagos, P., Karydas, C.G., Gitas, I.Z., Montanarella, L. (2012). *Monthly soil erosion monitoring based on remotely sensed biophysical parameters: a case study in Strymonas river basin towards a functional pan-European service*. *International Journal of Digital Earth*, 5 (6), pp. 461-487.

Panagos, P., Meusburger, K., Alewell, C., Montanarella, L., (2014). *Soil erodibility estimation using LUCAS point survey data of Europe*. *Environmental Modelling & Software*, 30, pp. 143-145.

Park, S., Oh, C., Jeon, S., Jung, H., Choi, C. (2011). *Soil erosion risk in Korean watersheds, assessed using the revised universal soil loss equation*. *Journal of Hydrology* 399 (3-4), pp. 263-273.

Petter, P. (1992). *GIS and Remote Sensing for Soil Erosion Studies in Semi-arid Environments*, PhD, University of Lund, Lund.

Pike, A., Mueller, T., Schorgendorfer, A., Shearer, S., Karathanasis, A. (2009). *Erosion index derived from terrain attributes using logistic regression and neural networks*. *Agronomy Journal* 101(5), pp. 1068–1079.

Pimentel, D. (1993). *World Soil Erosion and Conservation*. Cambridge, UK, Cambridge University Press.

Pimentel, D. (2003). *Soil erosion: A food and environmental threat*. Cornell University, Development and Sustainability, New York, pp. 119-137

Prasannakumar, V. et al. (2012). *Estimation of Soil Erosion Risk within a Small Mountainous Sub-Watershed in Kerala, India, Using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and Geo-Information Technology*. *Geoscience Frontiers*, vol. 3, no. 2, pp. 209–215.

Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C. (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil*

loss equation (RUSLE). USDA-ARS Agricultural Handbook 703, United States Department of Agriculture, Washington, D.C., USA. pp.384

Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Porter J.P. (1991). *RUSLE Revised universal soil loss equation*. Journal of Soil and Water Conservation, 46, pp. 30-33.

Renard, K.G., Freimund J.R. (1994). *Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE*. Journal of Hydrology 157. pp. 287–306.

Ritter, M.E. (2006). *The physical environment: an introduction to physical Geography*.

Roose E.J. (1977). *Use of the Universal Soil Loss Equation to predict erosion in West Africa*. Soil Erosion: Prediction and Control, 75-84. Special Publication no. 21, Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa, USA.

Römkens, M.J.M., Prasad, S.N., Poesen J.W.A. (1986). *Soil erodibility and properties*. In Proc. 13th Congr. Int. Soil Sci. Soc., vol.5, pp. 492-504.

Saavedra D. (2005). *Estimating spatial patterns of soil erosion and deposition in the Andean region using geo-information techniques: a case study in Cochabamba, Bolivia*. PhD thesis, Wageningen University, The Netherlands

Schoonover, J.E., Crim, J.F. (2015). *An Introduction to Soil Concepts and the Role of Soils in Watershed Management*. Journal of Contemporary Water Research & Education, vol. 154, no. 1, pp. 21–47

Sharpley, A.N., Williams, J.R. (1990). *EPIC-Erosion/productivity impact calculator, Model Documentation*. Technical Bulletin No. 1768, U.S. Department of Agriculture.

Sigalos, G., Loukaidi, V., Dasaklis, S., Alexouli-Livaditi, A. (2010). *Assessment of the quantity of the material transported downstream of Sperchios river, central Greece*. Proceedings of 12th International Congress of the Geological Society of Greece "Planet Earth: geological processes and sustainable development", Bulletin of the Geological Society of Greece, 43 (3), pp. 737-745.

Soil Survey Staff (2014). *Keys to Soil Taxonomy*. 12th Edition, USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington DC.

Srinivasan, R., Engel, B.A. (1991). *Effect of Slope Prediction Methods on Slope and Erosion Estimates*. American Society of Agricultural Engineers.

Star, J., Estes, J. (1990). *Geographic Information Systems, An Introduction*. Prentice-Hall Inc., New Jersey

Storm, D.E., Dillaha, T.A., Mostaghimi, S., Shanholtz, V.O. (1988). *Modeling phosphorus transport in surface runoff*. Transactions of the ASAE 31 (1), pp. 117-127.

Suresh, R. (2000). *Soil and Water Conservation Engineering*. Standard Publishers Distributors, New Delhi

Tian, Y.C., Zhou, Y.M., Wu, B.F., Zhou, W.F. (2009). *Risk Assessment of Water Soil Erosion in Upper Basin of Miyun Reservoir*, vol. 57. Environmental Geology, Beijing, China, pp. 937-942.

Van der Knijff, J.M., Jones, R.J.A., Montanarella, L. (1999). *Soil erosion risk assessment in Italy*. European Soil Bureau, EUR 19044 EN, pp. 52

Van der Knijff, J.M., Jones, R.J.A., Montanarella, L. (2000). *Soil erosion risk assessment in Europe*. JRC Scientific and Technical Report - EUR 19022 EN, European Soil Bureau, European Commission.

Whang, B., Zheng, F., Guan, Y. (2016). *Improved USLE-K factor prediction: A case study on water erosion areas in China*. International Soil and Water Conservation Research, Volume 4, Issue 3, pp. 168-176.

Williams, J.R. (1975). *Sediment yield prediction with Universal equation using runoff energy factor*. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources, ARS-S-40, USDA, Washington D.C., pp. 241-252

Williams, J.R. (1994). *The EPIC model*. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, U.S. Department of Agriculture, Agriculture Research Service.

Wischmeier, W.H. (1976). *Use and misuse of the Universal Soil Loss Equation*. Journal of Soil and Water Conservation, 31, pp. 5-9.

Wischmeier W.H., Smith D.D. (1965). *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains*. Agricultural Handbook no. 282, United States Department of Agriculture, Washington D.C., USA.

Wischmeier W.H., Smith D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses--A guide to conservation planning*. Agricultural Handbook no. 537, United States Department of Agriculture, Washington, D.C., USA.

Xu, L., Xu, X., Meng, X. (2012). *Risk assessment of soil erosion in different rainfall scenarios by RUSLE model coupled with Information Diffusion Model: A case study of Bohai Rim, China*. Catena 100, pp. 74-82.

Yassoglou, N.J., Kolias, V.J. (1989). *Computer assisted soil mapping for the evaluation of soil erosion risk and land quality in Greece*. Agriculture. Application of computerized EC soil map and climate data. Comm. Eur. Comm., EUR 12039 EN, pp. 237-246.

Yassoglou, N., Montanarella, L., Govers, G., Van Lynden, G., Jones, R.J.A., Zdruli, P., Kirkby, M., Giordano, A., Le Bissonnais, Y., Daroussin, J., King, D. (1998). *Soil Erosion in Europe*. European Soil Bureau.

Zhang, X., Wu, B., Ling, F., Zeng, Y., Yan, N. & Yuan, C. (2010). *Identification of priority areas for controlling soil erosion*. Catena 83, pp. 76-86.

Zhang, H., Yang, Q., Li, R., Liu, Q., Moore, D., He, H., Ritsema, J., Geissen, V. (2013). *Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor*. Computers & Geosciences 52, pp 177-188.

Διαδίκτυο

Soil Orders Map of the United States, USDA NRCS
<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/survey/class/maps/>. Εύρεση στις 2 Μαρτίου 2018.

Soil Survey, USDA NRCS,
<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/survey/>. Εύρεση στις 2 Μαρτίου 2018.

Understand the different types of soil erosion , Cornell University,
<https://nrcca.cals.cornell.edu/soil/CA5/CA0541.1-2.php>. Εύρεση στις 2 Μαρτίου 2018.

Erosion by water, ESDAC, <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/erosion> .Εύρεση στις 2 Μαρτίου 2018.

What is soil, Soil Science Society of America (SSSA),
https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/edu/?cid=nrcs142p2_054280 . Εύρεση στις 2 Μαρτίου 2018

Caribbean Handbook on Risk Information Management,
<http://www.charim.net/datamanagement/36>. Εύρεση στις 18 Απριλίου 2018

EPIC, <https://blackland.tamu.edu/models/epic/>. Εύρεση στις 20 Απριλίου 2018.

GeoWEPP, <http://geowepp.geog.buffalo.edu/about/>. Εύρεση στις 20 Απριλίου 2018.

GISus-M, UFRB, <https://www2.ufrb.edu.br/gisus-m/ls-factors>. Εύρεση στις 23 Απριλίου 2018

SAGA. System for Automated Geoscientific Analyses, 2011,
<http://www.saga-gis.org/en/index.html>. Εύρεση στις 25 Απριλίου 2018