

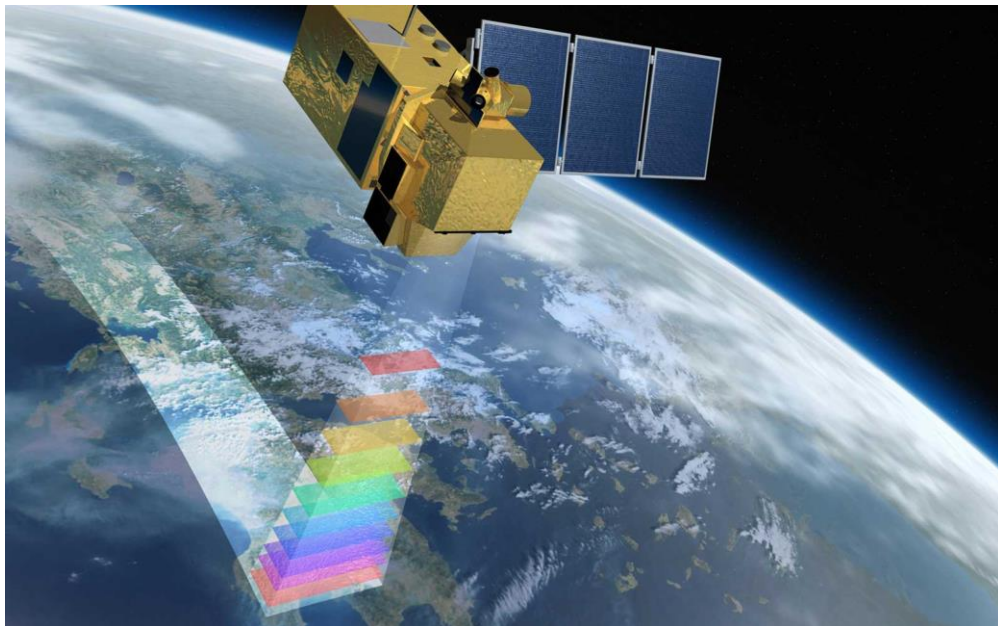


ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

**Χαρτογράφηση κατολισθητικών φαινομένων υψηλής ταχύτητας με
τη χρήση οπτικών δορυφορικών εικόνων**

Πτυχιακή Εργασία

Γκουγκουστάμος Ιωάννης



Αθήνα, Οκτώβριος 2018



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ισαάκ Παρχαρίδης (Επιβλέπων)

Καθηγητής Τηλεπισκόπησης - Φωτοερμηνείας,
Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Χρίστος Χαλκιάς

Καθηγητής Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών και
Εφαρμοσμένης Γεωγραφίας, Τμήμα Γεωγραφίας,
Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Ευθύμιος Καρύμπαλης

Καθηγητής Ποτάμιας και Παράκτιας Γεωμορφολογίας,
Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Εγώ, ο Ιωάννης Γκουγκουστάμος 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 προσβάλλει 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

Η εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του κύριου Ισαάκ Παρχαρίδη, καθηγητή του τμήματος Γεωγραφίας στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για τη πρόταση του θέματος, για την άψογη συνεργασία και καθοδήγηση.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κύριο Κωνσταντίνο Λουπασάκη, καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων και Μεταλλουργών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ο οποίος μοιράστηκε μαζί μου γνώσεις σχετικά με μια από τις περιοχές μελέτης.

Συνεχίζοντας, θέλω να ευχαριστήσω τους δύο καθηγητές που συμμετείχαν στην εξεταστική επιτροπή, τον κύριο Χρίστο Χαλκιά και τον κύριο Ευθύμιο Καρύμπαλη, καθώς και ολόκληρο το διδακτικό προσωπικό του Τμήματος Γεωγραφίας για τη συνεργασία και τις γνώσεις που απέκτησα κατά τη φοίτηση μου όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου που είναι δίπλα μου και με στηρίζουν.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΙ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ	11
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ	15
2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ.....	15
3. ΤΥΠΟΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ.....	17
3.1. ΠΤΩΣΕΙΣ	18
3.2. ΑΝΑΤΡΟΠΕΣ	19
3.3. ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	20
3.3.1. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΟΛΙΣΘΗΣΗ.....	20
3.3.2. ΜΕΤΑΘΕΤΙΚΗ ΟΛΙΣΘΗΣΗ	21
3.4. ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	22
3.5. ΡΟΕΣ.....	23
3.5.1. ΡΟΕΣ ΚΟΡΗΜΑΤΩΝ.....	23
3.5.2. ΡΟΕΣ ΠΥΡΟΚΛΑΣΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	24
3.5.3. ΡΟΕΣ ΓΗΣ.....	25
3.5.4. ΑΡΓΗ ΡΟΗ ΓΗΣ (ΕΡΙΠΥΣΜΟΣ).....	26
4. ΠΟΥ ΣΥΜΒΑΙΝΟΥΝ ΟΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	27
5. ΑΙΤΙΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ	27
5.1. ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	28
5.1.1. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΝΕΡΟ.....	28
5.1.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ.....	28
5.1.3. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ.....	29
5.2. ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ.....	29

6. ΕΠΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ.....	30
6.1. ΤΕΧΝΗΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	30
6.2. ΦΥΣΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	32
7. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΛΛΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ.....	34
8. ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΙΑΣΜΟΥ	34
8.1. ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΓΙΩΝ.....	35
8.2. ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΠΤΩΣΕΩΝ ΒΡΑΧΩΝ	36
8.3. ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΡΟΩΝ ΚΟΡΗΜΑΤΩΝ	36
9. ΟΠΤΙΚΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	38
9.1. SENTINEL-2	38
9.1.1. ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ.....	38
9.1.2. ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ	39
9.1.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ	39
9.1.4. ΤΥΠΟΙ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ	40
9.1.5. ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ	41
9.2. PLANETSCOPE	42
9.2.1. ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ.....	42
9.2.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ	42
9.2.3. ΤΥΠΟΙ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ	43
9.2.4. ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ	44
10. ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	45
10.1. PONZANO, ΙΤΑΛΙΑ	45
10.1.1. ΓΕΝΙΚΑ	45
10.1.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ	46
10.2. YAKIMA, USA.....	49
10.2.1. ΓΕΝΙΚΑ	49
10.2.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ	50
10.3. ΑΜΥΝΤΑΙΟ, ΕΛΛΑΔΑ.....	55
10.3.1. ΓΕΝΙΚΑ	55
10.3.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ	57

11. ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	60
11.1. SENTINEL-2	60
11.2. PLANETSCOPE	61
11.3. ASTER	61
12. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ	62
12.1. SNAP.....	62
12.2. ENVI	63
12.3. CIAS.....	63
12.4. EXCEL	63
12.5. ARCMAP	64
13. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	65
14. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	69
14.1. ΠΡΟ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ SENTINEL-2.....	69
14.2. ΠΡΟ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ PLANETSCOPE	71
14.3. COREGISTRATION / HISTOGRAM MATCHING	72
14.4. NORMALIZED CROSS CORRELATION.....	74
14.5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΡΧΕΙΟΥ ASCII	76
14.6. THRESHOLDING	76
14.7. ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ	79
15. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ.....	80
15.1. PONZANO (ITALY)	81
15.1.1. SENTINEL-2.....	81
15.1.2. PLANETSCOPE	83
15.1.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΑΛΛΗ ΜΕΛΕΤΗ / ΠΗΓΗ.....	85
15.2. YAKIMA (USA).....	87
15.2.1. SENTINEL-2.....	87
15.2.2. PLANETSCOPE	89
15.2.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΑΛΛΗ ΜΕΛΕΤΗ / ΠΗΓΗ.....	90
15.3. AMYNATAIO MINE (GREECE).....	92
15.3.1. SENTINEL-2.....	92

15.3.2. PLANETSCOPE	95
15.3.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΑΛΛΗ ΜΕΛΕΤΗ / ΠΗΓΗ.....	97
15.4. ΑΜΥΝΤΑΙΟ DEPOSITS AREA (GREECE).....	98
15.4.1. SENTINEL-2.....	98
15.4.2. PLANETSCOPE	100
16. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	102
17. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	104
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ	104
ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ	110
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ.....	110
ΠΗΓΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	113

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η εφαρμογή μιας μεθοδολογίας για τον εντοπισμό βασικών χαρακτηριστικών κίνησης εδαφών με τη χρήση οπτικών εικόνων τηλεπισκόπησης από τα δορυφορικά συστήματα Sentinel-2 και PlanetScope. Οι κινήσεις εδαφών ή κατολισθήσεις είναι ένα συχνό φαινόμενο, συμβαίνουν σε όλες περιοχές του κόσμου, επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό το φυσικό ανάγλυφο και την ανθρώπινη δραστηριότητα και για τον λόγο αυτό η μελέτη τους έχει μεγάλη σημασία. Συνήθεις τρόποι μελέτης του συγκεκριμένου φαινομένου αποτελούν η έρευνα πεδίου καθώς και η δημιουργία συμβολογραφημάτων μέσω της επεξεργασίας εικόνων ραντάρ. Η μεθοδολογία που προτείνεται σε αυτήν την εργασία διαφέρει από τους παραπάνω τρόπους καθώς χρησιμοποιεί οπτικές δορυφορικές εικόνες για την έρευνα και αποτελεί ουσιαστικά μια ακόμα δυνατότητα απόκτησης πληροφοριών πάνω στις μετακινήσεις εδαφικών μαζών. Αρχικά, αφού βρεθούν οι κατάλληλες εικόνες πριν και μετά το φαινόμενο που μελετάται, γίνεται εστίαση στην περιοχή μελέτης και περικοπή τους. Στη συνέχεια γίνεται εγγραφή της νεότερης εικόνας πάνω στην παλαιότερη εικόνα με τη χρήση εδαφικών σημείων ελέγχου. Αφού γίνει η εγγραφή και οι εικόνες είναι αγκιστρωμένες η μια πάνω στην άλλη, χρησιμοποιείται το φασματικό κανάλι του κόκκινου ορατού της κάθε εικόνας στο λογισμικό CIAS. Δημιουργείται ένα πολύγωνο της κατολίσθησης πάνω στην εικόνα και το λογισμικό υπολογίζει την κατεύθυνση και την μετατόπιση του εδάφους μέσα στο πολύγωνο αυτό μέσω του αλγόριθμου Normalized-Cross-Correlation, ο οποίος αντιστοιχεί ομάδες εικονοστοιχείων μεταξύ δύο εικόνων με βάση τη ομοιότητα τους. Τα αποτελέσματα εισάγονται σε Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών όπου θέτονται κάποια όρια στις μετρήσεις και γίνεται οπτικοποίηση τους πάνω σε χάρτη. Οι περιοχές μελέτης είναι τέσσερις και βρίσκονται στην Ελλάδα, στην Ιταλία και στις Η.Π.Α. Τέλος, γίνεται σύγκριση μεταξύ αυτών με πληροφορίες από άλλες έρευνες και μελέτες ώστε να ελεγχθεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία της μεθοδολογίας.

Λέξεις κλειδιά: Κίνηση εδαφών, κατολισθήσεις, Sentinel-2, PlanetScope, Normalized Cross Correlation

ABSTRACT

The subject of this research is the application of a methodology for the identification of basic soil motion characteristics, with the use of visual remote sensing images from the Sentinel-2 and PlanetScope satellite systems. Soil movements or landslides are a frequent event, they occur all over the world, they greatly affect natural morphology and human activity and for this reason their study is of great importance. Typical ways of studying this phenomenon are field studies as well as the production of interferograms through the processing of radar images. The methodology proposed in this work differs from the above mentioned as it uses visual satellite images for research and is essentially another possible way to obtain information on land movement. Initially, appropriate images before and after the phenomenon are downloaded and the study area of each image is clipped. Then the newer image is registered on top of the older image with the use of ground control points. Once precise coregistration is achieved, the red visible spectral band of each image is used in the CIAS software. A polygon of the landslide area is digitized on the image and the software calculates the direction and displacement of the soil within the polygon through the Normalized-Cross-Correlation algorithm, which matches groups of pixels based on their resemblance. The results are then imported into a Geographic Information System and thresholding is applied in the measurements before they are visualized on a map. The study areas are four and are they located in Greece, Italy and the U.S.A. Finally, a comparison between the results and information from other surveys and studies is carried out, to check the accuracy and reliability of the methodology.

Keywords: Soil movements, landslides, Sentinel-2, PlanetScope, Normalized Cross Correlation

ΚΑΤΑΛΟΓΟΙ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Περιστροφική κατολίσθηση που εξελίχθηκε σε ροή εδάφους.....	16
Εικόνα 2. Πτώση βράχων	18
Εικόνα 3. Ανατροπή	19
Εικόνα 4. Περιστροφική ολίσθηση	20
Εικόνα 5. Μεταθετική ολίσθηση	21
Εικόνα 6. Πλευρική επέκταση.....	22
Εικόνα 7. Ροή κορημάτων	23
Εικόνα 8. Λαχάρ	24
Εικόνα 9. Ροή γης.....	25
Εικόνα 10. Αργή ροή εδάφους (ερπυσμός)	26
Εικόνα 11. Καταστροφική κατολίσθηση στο χωριό Bondo της Ελβετίας.....	31
Εικόνα 12. Φράγμα που δημιουργήθηκε από κατολίσθηση στη περιοχή Hunza, Πακιστάν	33
Εικόνα 13. Τοίχος παρακράτησης μετακινούμενου υλικού κατολίσθησης	37
Εικόνα 14. Εργασίες μείωσης κλίσης πλαγιάς και σταθεροποίησης της	37
Εικόνα 15. Η διαμόρφωση της τροχιάς των δίδυμων δορυφόρων Sentinel-2.....	38
Εικόνα 16. Δορυφόροι μορφής Cubesat.....	43
Εικόνα 17. Θέση της περιοχής μελέτης Ronzano, Ιταλία.....	46
Εικόνα 18. Περιοχή κατολίσθησης.....	47
Εικόνα 19. Καταστροφές σε δρόμο και σπίτι του χωριού Ronzano λόγω της κατολίσθησης.....	48
Εικόνα 20. Ρωγμές στο έδαφος που οφείλονται στην κατολίσθηση	48
Εικόνα 21. Θέση της περιοχής μελέτης Yakima, USA	50
Εικόνα 22. Όρια της κατολίσθησης στη Yakima	52
Εικόνα 23. Ρωγμές που δημιουργήθηκαν στην πλαγιά λόγω της κατολίσθησης.....	53
Εικόνα 24. Το λατομείο της Yakima.....	54
Εικόνα 25. Η θέση του ορυχείου του Αμυνταίου.....	55
Εικόνα 26. Ρήγματα στο Αμύνταιο	56
Εικόνα 27. Όρια της κατολίσθησης του ορυχείου του Αμυνταίου	58
Εικόνα 28. Όρια της περιοχής εξωτερικών αποθέσεων του ορυχείου	58
Εικόνα 29. Η καταστροφική κατολίσθηση του ορυχείου.....	59
Εικόνα 30. Η κατολίσθηση και ο οικισμός Ανάργυροι.....	59
Εικόνα 31. Αντιστοίχιση ομάδων εικονοστοιχείων.	67

Εικόνα 32. Περιβάλλον εργασίας του λογισμικού SNAP	69
Εικόνα 33. Παράθυρο της λειτουργίας Resampling.....	70
Εικόνα 34. Εστίαση στην περιοχή μελέτης και αποκοπή της στα κανάλια RGB	71
Εικόνα 35. Διαδικασία coregistration με GCPs στο λογισμικό ENVI.....	72
Εικόνα 36. Διαδικασία Histogram Matching για τις δύο μονοχρωματικές εικόνες στο λογισμικό ENVI.	73
Εικόνα 37. Περιβάλλον του λογισμικού CIAS και δημιουργία πολυγώνου της κατολίσθησης..	74
Εικόνα 38. Περιβάλλον εργασίας του ArcMap	76
Εικόνα 39. Χειρωνακτική αφαίρεση μετρήσεων με βάση τις ισοϋψείς καμπύλες της περιοχής.	78
Εικόνα 40. Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων και δημιουργία χάρτη.	80
Εικόνα 41. Χαοτικές μετρήσεις από την επεξεργασία των εικόνων Sentinel-2.....	92
Εικόνα 42. Χαοτικές μετρήσεις από την επεξεργασία των εικόνων PlanetScope.	95

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Τα φασματικά κανάλια του δορυφορικού συστήματος Sentinel-2	40
Πίνακας 2. Δεδομένα Sentinel-2	60
Πίνακας 3. Δεδομένα PlanetScope.....	61
Πίνακας 4. Δεδομένα ASTER.....	61
Πίνακας 5. Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς μετατοπίσεων	75
Πίνακας 6. Παράμετροι Thresholding της κάθε περιοχής μελέτης.....	79
Πίνακας 7. Σύγκριση αποτελεσμάτων με δεδομένα άλλης μελέτης.	85
Πίνακας 8. Σύγκριση αποτελεσμάτων με δεδομένα άλλης μελέτης.	90

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 1. Αποτελέσματα Sentinel-2 για την κατολίσθηση του Ponzano (Italy).....	81
Χάρτης 2. Αποτελέσματα PlanetScope για την κατολίσθηση του Ponzano (Italy)	83
Χάρτης 3. Αποτελέσματα εικόνων Sentinel-2 για την κατολίσθηση της Yakima (USA)	87
Χάρτης 4. Αποτελέσματα εικόνων PlanetScope για την κατολίσθηση της Yakima (USA)	89
Χάρτης 5. Αποτελέσματα εικόνων Sentinel-2 για την κατολίσθηση του ορυχείου του Αμυνταίου (Greece).....	93
Χάρτης 6. Αποτελέσματα εικόνων PlanetScope για την κατολίσθηση του ορυχείου του Αμυνταίου (Greece).	96
Χάρτης 7. Αποτελέσματα εικόνων Sentinel-2 για την μετατόπιση του εδάφους στην περιοχή εξωτερικών αποθέσεων του ορυχείου του Αμυνταίου (Greece).....	98
Χάρτης 8. Αποτελέσματα εικόνων PlanetScope για την μετατόπιση του εδάφους στην περιοχή εξωτερικών αποθέσεων του ορυχείου του Αμυνταίου (Greece).....	100

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

GPS:	Global Positioning System
NCC:	Normalized Cross Correlation
DINSAR:	Differential SAR Interferometry
SAR:	Synthetic Aperture Radar
VHR:	Very High Resolution
ESA:	European Space Agency
RMSE:	Root Mean Square Error

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με το World Atlas of Natural Hazards (McGuire, 2004), οι κατολισθήσεις είναι ο πιο συχνός και ευρέως διαδεδομένος φυσικός κίνδυνος στη Γη. Μπορούν να συμβούν σε οποιοδήποτε έδαφος, ιδιαίτερα σε λοφώδεις και ορεινές περιοχές και κυρίως όταν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες εδάφους, υποστρώματος και υπογείων υδάτων και η κατάλληλη γωνία κλίσης (Varnes, 1978). Οι κατολισθήσεις χαρακτηρίζονται από μικρή πιθανότητα εξέλιξης σε καταστροφικό γεγονός, αλλά μπορούν να έχουν πολύ μεγάλες άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις στις ανθρώπινες κατασκευές (Canuti et al., 2004, Klose et al., 2014) και να προκαλέσουν τραυματισμούς και θανάτους. Μια κατολίσθηση και πλημμύρες στη Σιέρα Λεόνε στα μέσα του Αυγούστου του 2017 είχε μεγάλες ανθρώπινες απώλειες και πιο συγκεκριμένα 1141 νεκρούς (SWISS RE, 2018). Ο μετριασμός του κινδύνου κατολισθήσεων απαιτεί την κατανόηση της αλληλεπίδρασης της φύσης με την ανθρώπινη δραστηριότητα, την εκτίμηση του κινδύνου και την εύρεση λύσεων (Dai et al., 2002, Bonnard, 2004). Η χαρτογράφηση υφιστάμενων κατολισθήσεων σε περιοχές με γνωστή αστάθεια του εδάφους παράγει χάρτες που μπορούν να δώσουν πληροφορίες για στρατηγικές διαχείρισης ενός τέτοιου κινδύνου. Η παρακολούθηση είναι απαραίτητη για την πρόβλεψη μιας κατολίσθησης. Οι χάρτες δραστηριότητας κατολισθήσεων αποτελούν ένα εύκολο τρόπο εκτίμησης κινδύνων που συνδέονται με τη κίνηση εδαφών (Parise and Wasowski, 1999, Parise, 2001) και δείχνουν την έκταση της πλαγιάς που μπορεί να αστοχήσει, την πιθανή μέγιστη μετατόπιση του εδάφους και δίνουν έμφαση στις περιοχές όπου πιο λεπτομερείς μελέτες πρέπει να διεξαχθούν. Οι “παραδοσιακές” μέθοδοι παρακολούθησης εδάφους βασίζονται σε έρευνες πεδίου και περιλαμβάνουν κυρίως γεωδαιτικές μετρήσεις και μετρήσεις της κλίσης, δίκτυα Global Positioning System (GPS), επιμηκυνσιόμετρα κλπ. Ωστόσο αυτές οι μέθοδοι παρακολούθησης της παραμόρφωσης εδάφους, εκτός του ότι παρέχουν πληροφορίες μόνο για μερικά σημεία, παρουσιάζουν επίσης πολλά μειονεκτήματα όπως μεγάλο κόστος, είναι χρονοβόρες και ο εξοπλισμός μπορεί να εγκατασταθεί μόνο από ειδικούς, κάτι που σε πολλές περιπτώσεις είναι αδύνατο και επιπλέον δεν παρέχουν πληροφορίες σχετικά με γεγονότα του παρελθόντος (αναδρομικά προϊόντα). Οι δορυφόροι παρακολούθησης της Γης αποτελούν μια μη επεμβατική πηγή γνώσης, διαθέτουν μια πληθώρα διαφορετικών τύπων αισθητήρων που χρησιμοποιούν διαφορετικά μέρη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (αισθητήρες οπτικού φάσματος και ραντάρ), διαθέτουν ένα πλούσιο αρχείο εικόνων και διαφορετικές τεχνικές για την παροχή ενός μεγάλου εύρους μετρήσεων από το διάστημα, προσφέροντας έτσι διάφορες δυνατότητες για τη χαρτογράφηση και παρακολούθηση φυσικών και ανθρωπογενών κινδύνων (Cigna, 2018). Συγκεκριμένα για τις κατολισθήσεις, η ικανότητα ποσοτικοποίησης τους από το διάστημα χρησιμοποιώντας επαναλαμβανόμενες εικόνες εξαρτάται από την ακρίβεια της μεθόδου που

χρησιμοποιείται, από την συνολική μετατόπιση που έλαβε μέρος μεταξύ των εικόνων, από τον ρυθμό μετατόπισης και από την ύπαρξη αντίστοιχων χαρακτηριστικών στα δεδομένα τα οποία μπορούν να ανιχνευθούν με την πάροδο του χρόνου (Canuti et al., 2004, Delacourt et al., 2007, Kääb and Leprince, 2014). Από τη δεκαετία του 90' η επεξεργασία εικόνων SAR (DInSAR) έχει αποδειχθεί ένα ενδιαφέρον εργαλείο για τη μέτρηση και παρατήρηση της παραμόρφωσης του εδάφους (Massonnet and Rabaute, 1993, Massonnet and Feigl, 1998, Bamler and Hartl, 1998). Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι η ανάλυση της φάσης του ανακλώμενου κύματος ραντάρ από δύο ή περισσότερες εικόνες που καλύπτουν την ίδια περιοχή ώστε να παρατηρήσουν την μετατόπιση εδάφους. Τα τελευταία χρόνια με τη χρήση πολλών εικόνων SAR της ίδιας περιοχής, είναι δυνατή η ανάλυση παραμορφώσεων για μεγάλο χρονικό διάστημα χρησιμοποιώντας τεχνικές διαφορικής συμβολομετρίας SAR που ξεπερνάνε αρκετούς περιορισμούς της συμβολομετρίας με επαναλαμβανόμενη διέλευση. Αυτές οι παρόμοιες μέθοδοι, που εκμεταλλεύονται είτε μόνιμα συναφείς Persistent Scatterers (PSs) είτε χρονικά συναφείς Distributed Scatterers (DSs), είναι γνωστές με τους όρους Persistent ή Permanent Scatterer Interferometry (Ferretti et al., 2001, Werner et al., 2003) και Small Baseline Subset (Berardino et al., 2002). Και οι δύο μέθοδοι έχουν εφαρμοσθεί ευρέως για την παρακολούθηση της αστάθειας πλαγιών με ακρίβεια χιλιοστού (Fruneau et al., 1996, Colesanti et al., 2003, Delacourt, 2003, Berardino et al., 2003, Hilley et al., 2004, Strozzi et al., 2005, Colesanti & Wasowski, 2006, Rott & Nagler, 2006, Covenini et al., 2006, Bovenga et al., 2006, Peyret et al., 2008, Meisina et al., 2008, Castaneda et al., 2009, Cigna et al., 2013, Casagli et al., 2017). Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δυνατότητα δημιουργίας χαρτών ετήσιου ρυθμού μετατόπισης εδάφους ή αλλαγής αυτών των ρυθμών. Παρόλα αυτά διαπιστώνονται σημαντικές δυσκολίες κατά τη χρήση αυτής της τεχνικής. Αυτές οι δυσκολίες σχετίζονται με τη μεγάλη μεταβλητότητα της κλίσης (απότομη και τραχιά τοπογραφία χαρακτηριστική των περιοχών που είναι επιρρεπείς σε κατολισθήσεις) όσον αφορά τους μηχανισμούς κίνησης, την γεωμετρία της αστοχίας, το μέγεθος των ασταθών περιοχών και τους ρυθμούς παραμόρφωσης και προκαλούν αμφιβολίες σχετικά με τη φάση και τη συσχέτιση του σήματος. Επιπρόσθετα, σε περιοχές με έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο, οι τοπικές ατμοσφαιρικές μεταβολές μπορούν σε πολλές περιπτώσεις να έχουν μεγάλη επιρροή. Όλες αυτές οι παράμετροι συχνά επηρεάζουν την προ-επεξεργασία και κάνουν δύσκολη την εκτίμηση της μετατόπισης του εδάφους (Hanssen, 2001, Delacourt et al., 2003, Strozzi et al., 2005, Catani et al., 2005, Colesanti and Wasowski, 2006). Η παρακολούθηση και μέτρηση κατολισθήσεων με τη χρήση οπτικών δορυφορικών αισθητήρων είναι επίσης μια αποτελεσματική μέθοδος που χρησιμοποιείται από τα τέλη της δεκαετίας του 70' (Sauchyn and Trench, 1978) και βασίζεται κυρίως στην οπτική ερμηνεία. Η αύξηση των οπτικών αισθητήρων υψηλής ευκρίνειας (VHR), από τις αρχές του 2000, οδήγησε στην αύξηση νέων μεθόδων παρακολούθησης της κίνησης εδαφών, παρά το γεγονός ότι

οι οπτικές εικόνες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (Delacourt, 2007). Οι μέθοδοι μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τις βασισμένες σε εικονοστοιχεία και τις βασισμένες σε αντικείμενα, περιέχουν και οι δύο τεχνικές που εφαρμόζονται σε μονές και διαχρονικές εικόνες και συχνά χρησιμοποιούν επιπρόσθετα δεδομένα. Τα τελευταία χρόνια και από την αρχή της διαθεσιμότητας οπτικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές μέθοδοι με διαφορές στην επεξεργασία προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια των μετρήσεων για διάφορες συνθήκες (Stumpf et al., 2014, Lacroix et al., 2017, Yamaguchi et al., 2003, Nichol and Wong, 2004, Skakun et al., 2017, Stumpf et al., 2018). Η παρούσα ερευνητική εργασία στοχεύει στην εξέταση της περαιτέρω συμβολής των οπτικών δορυφορικών εικόνων μεσαίας ανάλυσης και πιο συγκεκριμένα των δορυφορικών συστημάτων Sentinel-2 και PlanetScope στην χαρτογράφηση των κατολισθήσεων με μέτρια και/ή μεγάλη ταχύτητα ανεξάρτητα από την αιτία που τις προκάλεσε σε τέσσερις περιοχές, οι οποίες είναι στις Η.Π.Α (Yakima County, WA), στην Ιταλία (Ponzano, Central Italy) και στην Ελλάδα (Amyntaio, Northern Greece), καθώς και στην εξακρίβωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων με βάση πληροφορίες από άλλες πηγές και μελέτες. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος αντιστοίχισης εικονοστοιχείων που βασίζεται στον αλγόριθμο Normalized-Cross-Correlation (NCC) (Debella-Gilo and Kääb, 2010, Heid and Kääb, 2012).

1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Υπάρχει μια πληθώρα ορισμών για το φαινόμενο της κατολίσθησης. Αυτό προκύπτει από τους διάφορους επιστημονικούς κλάδους που μελετούν το συγκεκριμένο φαινόμενο. Οι ορισμοί των Cruden και Varnes ωστόσο είναι αυτοί που έχουν επικρατήσει, και είναι οι εξής:

- Ως κατολίσθηση ορίζεται η κίνηση μιας μάζας πετρωμάτων, θραυσμάτων ή εδάφους στα κατάντη ενός πρσανούς (Cruden, 1991).
- Κατολίσθηση είναι κάθε κίνηση προς τα κατάντη μιας μάζας εδάφους ή πετρώματος υπό την άμεση επίδραση της βαρύτητας. Συνεπώς η κατολίσθηση περιλαμβάνει φαινόμενα όπως πτώσεις βράχων, ολισθήσεις, ερπυσμό και ροές (όπως ροές θραυσμάτων ή λασποροές) (Varnes, 1996).

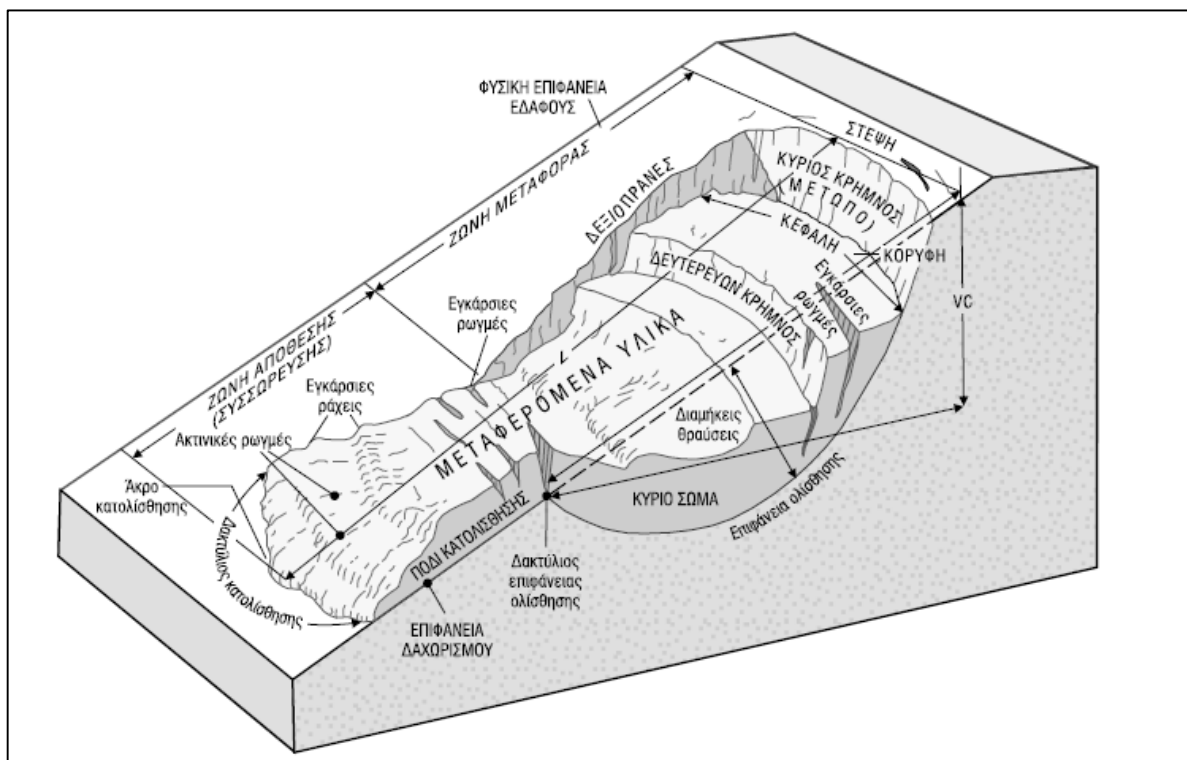
Πρέπει να σημειωθεί πως αν η μάζα κινηθεί μόνο προς την κατακόρυφη διεύθυνση, το φαινόμενο ονομάζεται καθίζηση, κατάρρευση ή κατάπτωση. Αν υπάρχει και κίνηση κατά την οριζόντια διεύθυνση, τότε χρησιμοποιείται ο γενικός όρος κατολίσθηση. Κατολισθήσεις μπορούν να εμφανιστούν επίσης σε υποθαλάσσιες πλαγιές προκαλώντας κύματα βαρύτητας (tsunami) και ζημιές στις ακτές (Παυλόπουλος, 2011).

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Μια τυπική κατολίσθηση συνοδεύεται από μια σειρά γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών (Παυλόπουλος, 2011):

1. Το κυρίως μέτωπο: Είναι η απότομη επιφάνεια, σχεδόν κατακόρυφη, που δημιουργείται στο αδιατάρακτο έδαφος που περιβάλλει την κατολίσθηση. Αποτελεί μορφολογικά το μέτωπο ενός κρημνού.
2. Δευτερεύοντα μέτωπα: Είναι οι απότομες κατακόρυφες επιφάνειες που δημιουργούνται εντός του διαταραγμένου υλικού της κατολίσθησης. Μορφολογικά πρόκειται για μικρά μέτωπα κρημνών.
3. Κεφάλι: Βρίσκεται στην κορυφή της κατολίσθησης και αποτελείται από τα ανώτερα τμήματα των υλικών που κατολίσθησαν.
4. Πόδι: Είναι η γραμμή διατομής μεταξύ του κατώτερου μέρους της επιφάνειας διάρρηξης και της αρχικής επιφάνειας του εδάφους.

5. Δάκτυλος: Είναι το τμήμα των υλικών που έχουν κατολισθήσει στη μεγαλύτερη απόσταση από το κύριο μέτωπο της κατολίσθησης.
6. Κορυφή: Είναι το ουσιαστικά αδιατάρακτο υλικό που βρίσκεται στα ψηλότερα σημεία του κύριου μετώπου.
7. Επιφάνεια διάρρηξης: Είναι η επιφάνεια αποχωρισμού των υλικών που κατολισθαίνουν από το σταθερό υπόβαθρο.
8. Επιφάνεια ολίσθησης: Είναι η επιφάνεια πάνω στην οποία γίνεται η κύρια μετατόπιση της μάζας που κατολισθαίνει. Το ανώτερο της τμήμα ταυτίζεται συνήθως με την επιφάνεια διάρρηξης, ενώ το κατώτερο, κάτω από το πόδι, είναι η προϋπάρχουσα επιφάνεια του πρανούς.
9. Κώνος ή γλώσσα: Είναι το τμήμα των υλικών που έχουν ξεπεράσει την επιφάνεια διάρρηξης.



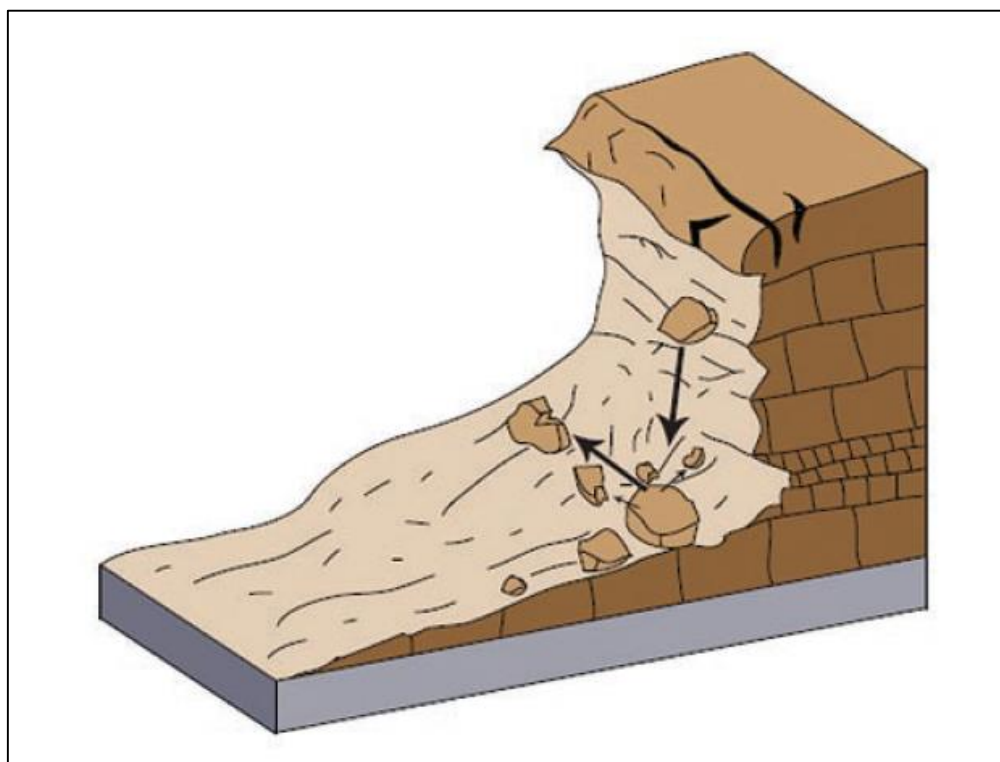
Εικόνα 1. Περιτροφική κατολίσθηση που εξελίχθηκε σε ροή εδάφους (Πηγή: Παυλόπουλος, 2011)

3. ΤΥΠΟΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Οι κατολισθήσεις μπορούν να ταξινομηθούν σε διαφορετικούς τύπους με βάση τον τύπο της κίνησης και τον τύπο των υλικών. Συνοπτικά, το υλικό μιας κατολίσθησης μπορεί να είναι είτε βράχοι, είτε έδαφος είτε και τα δύο. Αν το έδαφος αποτελείται κυρίως από υλικό με μέγεθος κόκκων άμμου ή μικρότερο τότε χαρακτηρίζεται ως γη, ενώ αν αποτελείται από υλικό με μεγαλύτερο μέγεθος, χαρακτηρίζεται ως κορήματα ή θραύσματα. Οι τύποι της κίνησης ουσιαστικά περιγράφουν την πραγματική διεργασία που προκαλεί την κίνηση της μάζας και είναι οι εξής: πτώσεις, ανατροπές, ολισθήσεις, επεκτάσεις και ροές. Οι κατολισθήσεις περιγράφονται χρησιμοποιώντας δύο όρους που αναφέρονται στο υλικό και στην κίνηση αντίστοιχα, όπως για παράδειγμα πτώσεις βράχων, ροές κορημάτων και άλλα. Μπορούν επίσης να είναι σύνθετες, περιλαμβάνοντας περισσότερους τύπους κίνησης, όπως για παράδειγμα βραχώδης ολίσθηση-ροή κορημάτων. Ο τύπος της κατολίσθησης καθορίζει την πιθανή ταχύτητα της, το μέγεθος της μάζας που μετακινείται, την απόσταση που θα διανύσει καθώς και τις πιθανές επιπτώσεις και μέτρα που πρέπει να ληφθούν (Highland and Bobrowsky, 2008). Ακολουθούν οι τύποι των κατολισθήσεων με τις περιγραφές τους.

3.1. ΠΤΩΣΕΙΣ

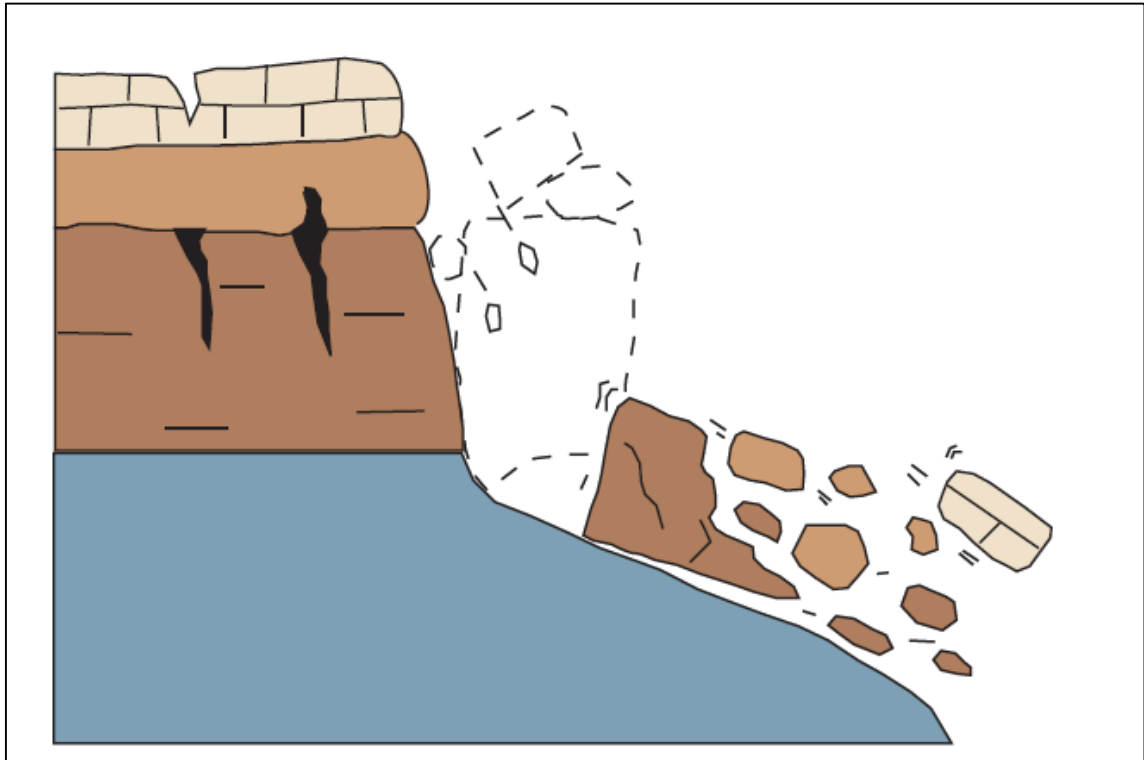
Οι πτώσεις είναι απότομες, καθοδικές κινήσεις βράχων ή εδάφους ή και των δύο καθώς αποσυνδέονται από απότομες πλαγιές ή από γκρεμούς. Αρχικά παρατηρείται μια προοδευτική απώλεια στήριξης της μάζας κατά μήκος ασυνεχειών, η οποία συνοδεύεται από μια διαστολή των ρωγμών και στην συνέχεια καταλήγει σε πτώση. Το υλικό που πέφτει χτυπάει σε κλίσεις μικρότερες από την αρχική κλίση που ξεκίνησε η πτώση, προκαλώντας αναπήδηση. Η μάζα μπορεί να σπάσει στο σημείο της κρούσης και να αρχίσει να κυλάει μέχρι το σημείο που το έδαφος γίνεται επίπεδο. Ο τύπος αυτός έχει προφανώς πολύ μεγάλη ταχύτητα μετακίνησης και οι αιτίες εκδήλωσης του μπορεί να είναι η διάβρωση από τα ρέματα και ποτάμια, οι εναλλαγές καιρικών συνθηκών, οι ανθρώπινες δραστηριότητες όπως εκσκαφές και τα σεισμικά γεγονότα (Highland and Bobrowsky, 2008, Varnes, 1978).



Εικόνα 2. Πτώση βράχων (Πηγή: Highland and Bobrowsky, 2008).

3.2. ΑΝΑΤΡΟΠΕΣ

Ως ανατροπή ορίζεται η μπροστινή περιστροφή μιας μάζας εδάφους ή βράχων μιας πλαγιάς, γύρω από ένα σημείο ή έναν άξονα που βρίσκεται κάτω από το κέντρο βάρους της μάζας που μετατοπίζεται. Οι ανατροπές μπορούν να γίνονται από βράχους, κορήματα (χονδρόκοκκα υλικά) ή από το έδαφος (κοκκώδες υλικό). Μπορεί να είναι περίπλοκες και σύνθετες. Αυτός ο τύπος κατολίσθησης μπορεί να έχει από εξαιρετικά αργή έως εξαιρετικά γρήγορη ταχύτητα μετακίνησης και οι αιτίες που τον προκαλούν μπορεί να είναι το βάρος του υλικού που βρίσκεται ψηλότερα από την μάζα που μετατοπίζεται, το νερό ή ο πάγος που εισχωρεί στις ρωγμές αυτής, η διάβρωση από ρέματα και ποτάμια, οι εκσκαφές, οι καιρικές συνθήκες και τα σεισμικά γεγονότα (Highland and Bobrowsky, 2008, Varnes 1978).



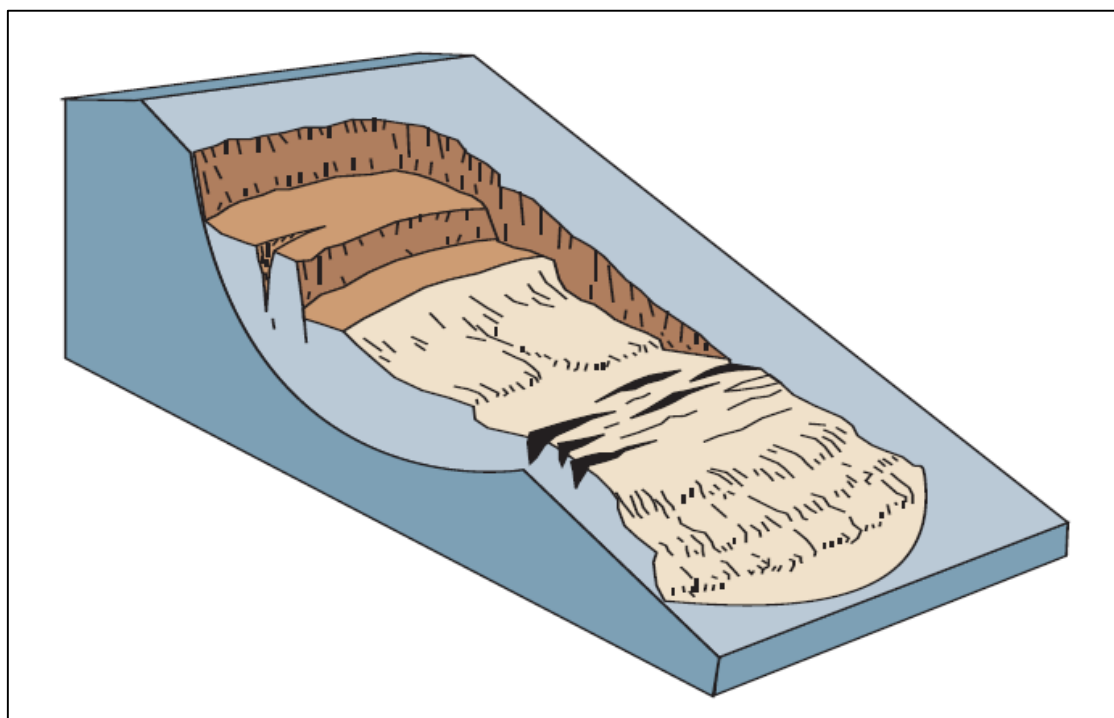
Εικόνα 3. Ανατροπή (Πηγή: Highland and Bobrowsky, 2008).

3.3. ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Μια ολίσθηση είναι μια καθοδική μετακίνηση μάζας εδάφους ή βράχων που συμβαίνει σε επιφάνειες θραύσης ή σε σχετικά λεπτές ζώνες έντονης διάτμησης (Highland and Bobrowsky, 2008). Υπάρχουν δύο τύποι ολισθήσεων:

3.3.1. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΟΛΙΣΘΗΣΗ

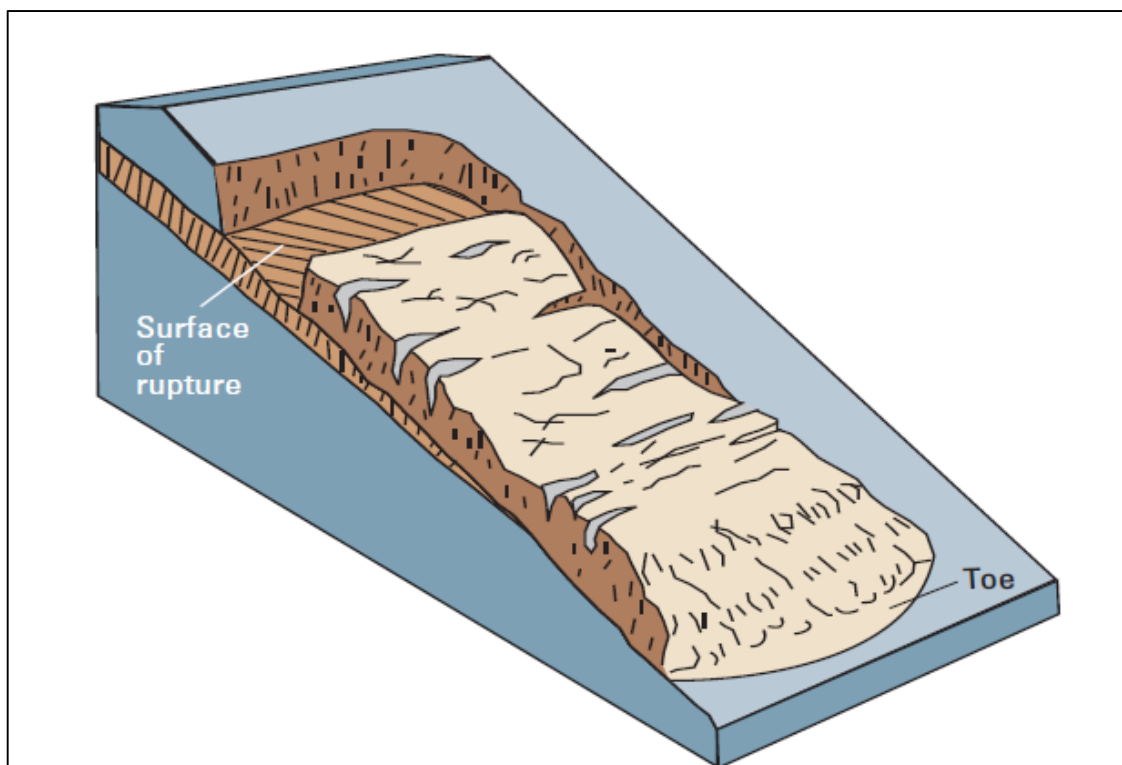
Είναι μια κατολίσθηση στην οποία η επιφάνεια θραύσης είναι κυρτή προς τα πάνω (σχήμα κουταλιού) και η κίνηση είναι περιστροφική γύρω από έναν άξονα που είναι παράλληλος προς την επιφάνεια του εδάφους και εγκάρσιος στην επιφάνεια της κατολίσθησης. Η μάζα που μετακινείται μπορεί, υπό ορισμένες συνθήκες, να κινηθεί κατά μήκος της επιφάνειας θραύσης ως μια συνεκτική μάζα με μικρές εσωτερικές παραμορφώσεις. Το ανώτερο μέρος του υλικού που μετατοπίζεται μπορεί να κινείται σχεδόν κάθετα, οπότε χαρακτηρίζεται ως βύθιση. Η ταχύτητα της μετακίνησης μπορεί να είναι εξαιρετικά αργή έως γρήγορη και οι αιτίες εκδήλωσης της μπορεί να είναι οι έντονες βροχοπτώσεις, το λιώσιμο χιονιού, η αύξηση του επίπεδου του υπόγειου νερού, η διάβρωση από τα ρέματα, τις λίμνες και τα ποτάμια και τα σεισμικά γεγονότα (Highland and Bobrowsky, 2008, Varnes, 1978).



Εικόνα 4. Περιστροφική ολίσθηση (Πηγή: Highland and Bobrowsky, 2008).

3.3.2. ΜΕΤΑΘΕΤΙΚΗ ΟΛΙΣΘΗΣΗ

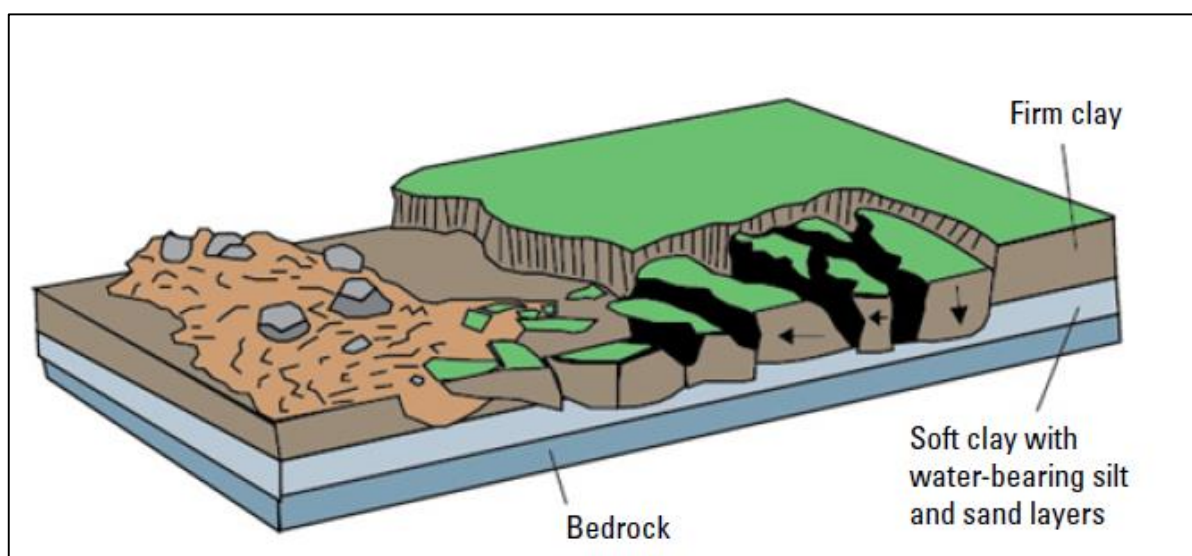
Η μάζα σε μια μεταθετική ολίσθηση κινείται προς τα κάτω και προς τα έξω, κατά μήκος μιας σχετικά επίπεδης επιφάνειας με μικρή περιστροφική κίνηση. Αυτός ο τύπος ολίσθησης μπορεί να συνεχίσει για μεγάλες αποστάσεις εάν η επιφάνεια της θραύσης έχει επαρκή κλίση, σε αντίθεση με τις περιστροφικές ολισθήσεις, οι οποίες τείνουν να αποκαθιστούν την ισορροπία τους. Το υλικό που μετακινείται μπορεί να αποτελείται από χαλαρά, μη σταθερά εδάφη μέχρι και μεγάλα κομμάτια βράχων, ή και τα δύο. Οι μεταθετικές ολισθήσεις συνήθως ξεκινούν σε γεωλογικές αστοχίες όπως κάποιο ρήγμα ή στο σημείο επαφής μεταξύ των πετρωμάτων και του εδάφους. Σε πιο βόρεια περιβάλλοντα η ολίσθηση μπορεί επίσης να γίνεται κατά μήκος ενός στρώματος πάγου. Η κίνηση μπορεί αρχικά να είναι αργή, αλλά στη συνέχεια να αυξηθεί και να γίνει μέτρια έως και εξαιρετικά γρήγορη. Οι αιτίες εκδήλωσης της είναι κυρίως έντονες βροχοπτώσεις, η αύξηση του επιπέδου του υπόγειου νερού που προκύπτει από τις βροχοπτώσεις, από το λιώσιμο χιονιού και από τις πλημμύρες, από άρδευση ή από διαρροή σωληνώσεων και από ανθρώπινη δραστηριότητα όπως εκσκαφές. Μπορεί επίσης να συμβεί λόγω σεισμικών γεγονότων (Highland and Bobrowsky, 2008, Varnes, 1978).



Εικόνα 5. Μεταθετική ολίσθηση (Πηγή: Highland and Bobrowsky, 2008).

3.4. ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Οι πλευρικές επεκτάσεις εμφανίζονται συνήθως σε επιφάνειες με πολύ ήπια κλίση ή σε επίπεδες επιφάνειες, κυρίως όταν ένα ισχυρό άνω στρώμα βράχων ή εδάφους υφίσταται επέκταση και κινείται πάνω από ένα υποκείμενο μαλακότερο και ασθενέστερο στρώμα. Τέτοιες αστοχίες συνήθως συνοδεύονται από κάποια γενική βύθιση προς στο ασθενέστερο υποκείμενο στρώμα. Στις επεκτάσεις βράχων, οι βραχώδεις σχηματισμοί επεκτείνονται, διαλύονται και απομακρύνονται αργά από το σταθερό έδαφος καθώς κινούνται πάνω από μια ασθενέστερη στρώση. Το πιο μαλακό και ασθενές στρώμα μπορεί, υπό ορισμένες συνθήκες, να συμπιεστεί και να ανέβει προς τα πάνω μέσω των ρωγμών των σχηματισμών. Στις επεκτάσεις εδάφους, το ανώτερο πιο σταθερό στρώμα επεκτείνεται κατά μήκος του ασθενέστερου υποκείμενου στρώματος διότι το δεύτερο έχει αρχίσει να ρέει μετά την υγροποίηση ή την πλαστική παραμόρφωση του. Αν μάλιστα το στρώμα αυτό είναι σχετικά παχύ, τα τεμάχια που έχουν προκύψει από θραύση και το επικαλύπτουν, μπορεί να βυθιστούν μέσα σε αυτό, να μετακινηθούν, να περιστραφούν, να αποσυντεθούν, να ρευστοποιηθούν ή και να αρχίσουν να ρέουν. Η ταχύτητα της μετακίνησης είναι αργή έως μέτρια και κάποιες φορές μπορεί να είναι γρήγορη. Οι αιτίες εκδήλωσης αυτού του τύπου κατολίσθησης μπορεί να είναι ένα σεισμικό γεγονός, η φυσική ή ανθρωπογενής υπερφόρτωση του εδάφους πάνω από μια μη σταθερή πλαγιά, η άνοδος του υπόγειου νερού λόγω βροχοπτώσεων και λιώσιμου χιονιού, η διάβρωση λόγω ρεμάτων και ποταμών και η πλαστική παραμόρφωση ενός μη σταθερού υλικού (Highland and Bobrowsky, 2008, Varnes, 1978).



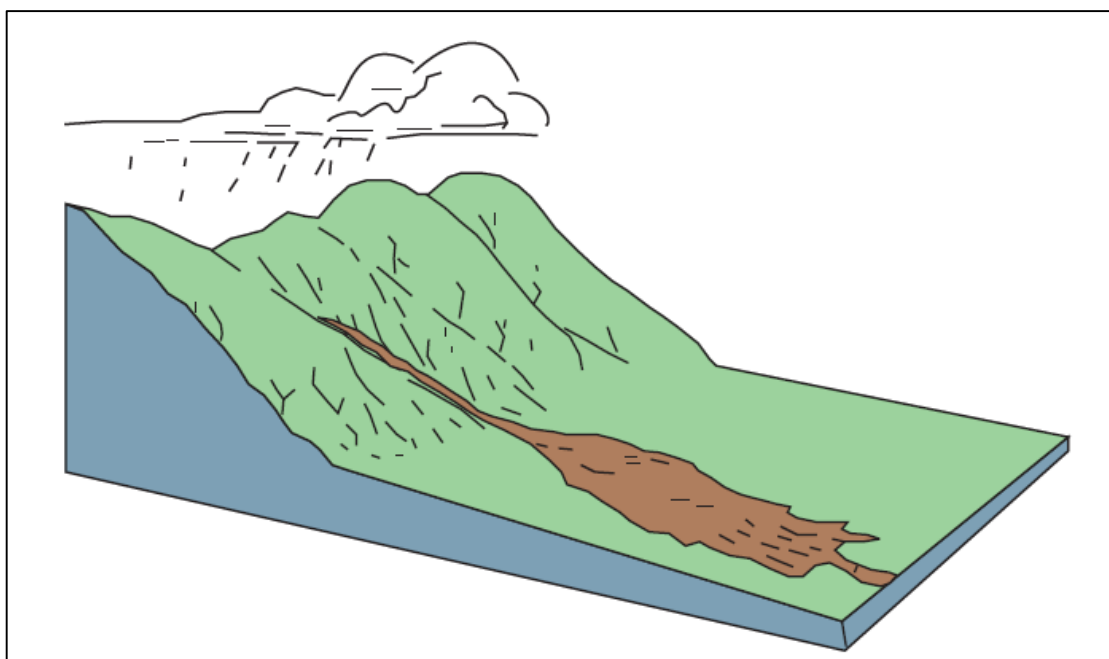
Εικόνα 6. Πλευρική επέκταση. Ένα ρευστό στρώμα βρίσκεται κάτω από το επιφανειακό στρώμα (Πηγή: Highland and Bobrowsky, 2008).

3.5. ΡΟΕΣ

Μια ροή είναι μια συνεχής κίνηση στην οποία οι επιφάνειες διάτμησης είναι βραχύβιες, συμπιεσμένες και συνήθως δεν διατηρούνται. Η ταχύτητα του υλικού που μεταφέρεται είναι παρόμοια με αυτή σε ένα ιξώδες υγρό (Highland and Bobrowsky, 2008). Ακολουθούν οι τύποι ροών.

3.5.1. ΡΟΕΣ ΚΟΡΗΜΑΤΩΝ

Η ροή κορημάτων είναι μια μορφή γρήγορης μετακίνησης μαζών στην οποία χαλαρό έδαφος, βράχοι και μερικές φορές οργανικά στοιχεία συνδυάζονται με νερό και ρέουν προς τα κάτω. Χαρακτηρίζεται λανθασμένα ως λασποροή λόγω της μεγάλης ποσότητας λεπτόκοκκου υλικού που μπορεί να περιέχεται στη ροή. Περιστασιακά, καθώς μια περιστροφική ή μεταθετική ολίσθηση αυξάνει την ταχύτητα της και η μάζα χάνει την εσωτερική της συνοχή ή αποκτά νερό, μπορεί να εξελιχθεί σε μια ροή κορημάτων. Ξηρές ροές μπορεί μερικές φορές να εμφανιστούν με μη συνεκτική άμμο (ροές άμμου). Οι ροές κορημάτων μπορεί να είναι θανατηφόρες, καθώς μπορεί να είναι εξαιρετικά γρήγορες και να συμβούν χωρίς καμία προειδοποίηση. Αιτίες εκδήλωσης τους μπορεί να είναι η έντονη επιφανειακή απορροή λόγω βροχοπτώσεων ή λιώσιμου χιονιού η οποία διαβρώνει και κινητοποιεί το έδαφος ή τους βράχους σε απότομες πλαγιές. Μπορούν επίσης να αποτελούν εξέλιξη άλλων τύπων κατολισθήσεων (Highland and Bobrowsky, 2008, Varnes, 1978).



Εικόνα 7. Ροή κορημάτων (Πηγή: Highland and Bobrowsky, 2008).

3.5.2. ΡΟΕΣ ΠΥΡΟΚΛΑΣΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

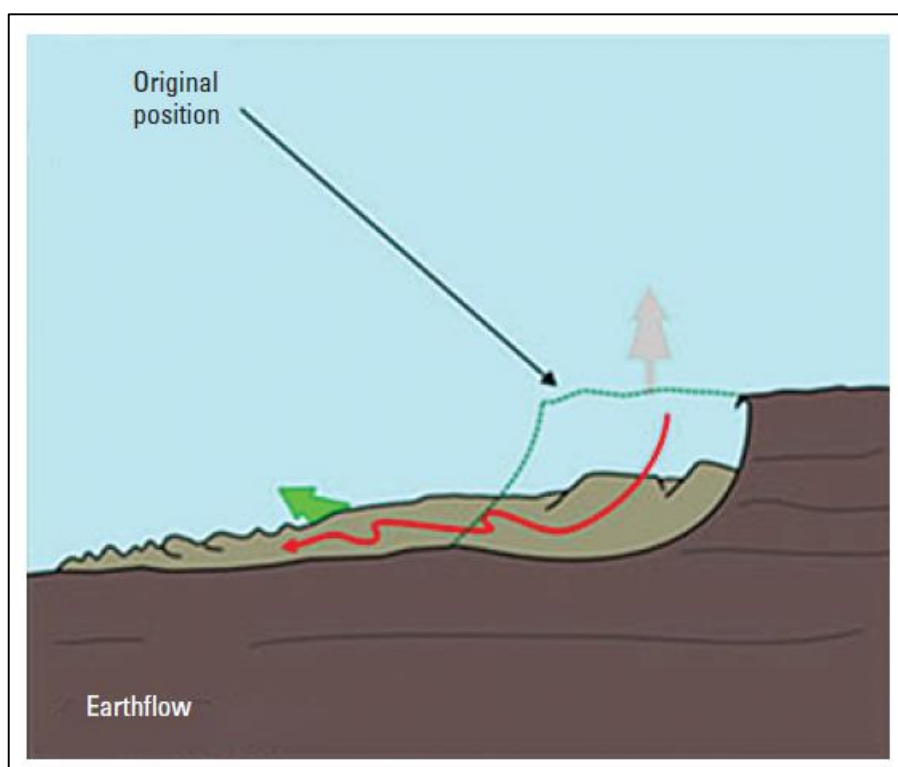
Διακρίνονται σε ψυχρές και θερμές ροές. Οι ψυχρές συμβαίνουν όταν τα υλικά που καλύπτουν τις πλαγιές των ηφαιστειακών κώνων βραχούν από τα νερά των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων ή το λιώσιμο του χιονιού. Οι θερμές ροές συμβαίνουν όταν τα υλικά βρέχονται από τους υπέρθερμους ατμούς κατά την έκρηξη των ηφαιστείων και ενεργοποιούνται. Ονομάζονται και λαχάρ, που είναι Ινδονησιακός όρος (Παυλόπουλος, 2011). Η ταχύτητα των λαχάρ μπορεί να είναι εξαιρετικά γρήγορη, ειδικά αν αναμειχθούν με τα νερά που προκύπτουν από το λιώσιμο του χιονιού και πάγου. Αν όμως δεν διαθέτουν πολύ νερό και έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε κορήματα, τότε κινούνται αργά όπως ένα ιξώδες υγρό (Highland and Bobrowsky, 2008).



Εικόνα 8. Λαχάρ (Πηγή: Highland and Bobrowsky, 2008).

3.5.3. ΡΟΕΣ ΓΗΣ

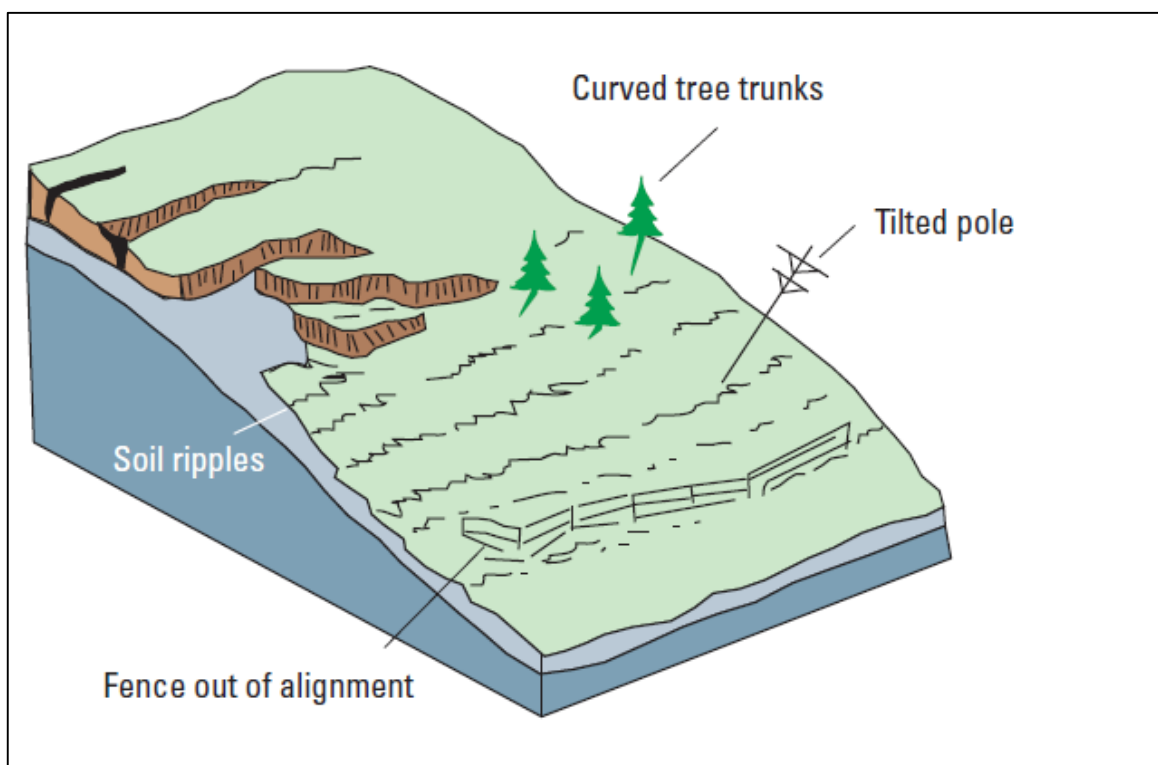
Οι ροές γης μπορούν να εμφανιστούν σε πλαγιές με ήπια έως μέτρια κλίση, σε έδαφος με λεπτόκοκκο υλικό, συνήθως άργιλο, αλλά και σε πολύ διαβρωμένο αργιλώδες υπόστρωμα. Η μάζα κινείται ως πλαστική ή παχύρρευστη ροή με ισχυρή εσωτερική παραμόρφωση. Ο ευαίσθητος θαλάσσιος άργιλος όταν διαταράσσεται είναι πολύ ευάλωτος και μπορεί να χάσει όλη τη δύναμη διάτμησης του με μια αλλαγή στη φυσική του περιεκτικότητα σε υγρασία, ξαφνικά να υγροποιηθεί και πιθανώς να καταστρέψει μεγάλες εκτάσεις καθώς ρέει για αρκετά χιλιόμετρα. Οι ολισθήσεις και οι πλευρικές επεκτάσεις μπορούν επίσης να εξελιχθούν σε ροές γης καθώς κινούνται καθοδικά. Η ταχύτητα τους μπορεί να κυμαίνεται από πολύ αργή (ερπυσμός) μέχρι πολύ γρήγορη και καταστροφική. Οι αιτίες που προκαλούν μια ροή γης μπορεί να είναι ο κορεσμός του εδάφους σε νερό λόγω βροχοπτώσεων και λιώσιμου χιονιού, η διάβρωση από ρέματα στη βάση της πλαγιάς, οι εκσκαφές και γενικότερα η ανθρώπινη δραστηριότητα, η υπερφόρτωση του εδάφους της πλαγιάς και σεισμικά γεγονότα (Highland and Bobrowsky, 2008, Varnes, 1978).



Εικόνα 9. Ροή γης (Πηγή: Highland and Bobrowsky, 2008).

3.5.4. ΑΡΓΗ ΡΟΗ ΓΗΣ (ΕΡΠΥΣΜΟΣ)

Πρόκειται για μια ανεπαίσθητα αργή, σταθερή καθοδική κίνηση του εδάφους ή των βράχων που σχηματίζουν την πλαγιά. Η κίνηση προκαλείται από εσωτερική διατμητική τάση αρκετή για να προκαλέσει παραμόρφωση, αλλά όχι για να προκαλέσει αστοχία του εδάφους. Υπάρχουν τρεις τύποι ερπυσμού: (1) ο εποχιακός, όπου η κίνηση γίνεται βαθιά μέσα στο έδαφος καθώς επηρεάζεται από τις εποχιακές μεταβολές της υγρασίας και της θερμοκρασίας, (2) ο συνεχής, όπου η διατμητική τάση υπερβαίνει συνεχώς την αντοχή του υλικού και (3) ο προοδευτικός, όπου οι πλαγιές πλησιάζουν στο σημείο αστοχίας για άλλους τύπους μαζικών κινήσεων. Η ταχύτητα κυμαίνεται από αργή έως πολύ αργή. Αιτίες εκδήλωσης του εποχιακού ερπυσμού είναι η βροχόπτωση και το λιώσιμο του χιονιού. Για άλλους τύπους ερπυσμού υπάρχουν πολλές αιτίες, όπως οι φυσικο-χημικές ιδιότητες του καιρού, οι διαρροές σωλήνων, η κακή αποστράγγιση, κατασκευές που το αποσταθεροποιούν και άλλα (Highland and Bobrowsky, 2008, Varnes, 1978).



Εικόνα 10. Αργή ροή εδάφους (ερπυσμός) (Πηγή: Highland and Bobrowsky, 2008).

4. ΠΟΥ ΣΥΜΒΑΙΝΟΥΝ ΟΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Κατολισθήσεις μπορούν να εμφανιστούν σχεδόν οπουδήποτε στον κόσμο. Η συνήθης άποψη ότι περιορίζονται σε εξαιρετικά απότομες πλαγιές και αφιλόξενο έδαφος δεν αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια την πραγματική φύση του φαινομένου. Οι περισσότερες χώρες του κόσμου έχουν επηρεαστεί κατά κάποιο τρόπο από κατολισθήσεις. Ο λόγος που έχουν τόσο μεγάλη γεωγραφική κάλυψη είναι ότι υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί μηχανισμοί που τις ενεργοποιούν. Επιπλέον, οι κατολισθήσεις μπορούν να συμβούν τόσο σε ξηρά όσο και σε υδάτινα περιβάλλοντα. Συμβαίνουν σε στρώματα κάτω από την επιφάνεια της γης, σε καλλιεργήσιμη γη, σε άγονες πλαγιές και σε δάση. Μπορούν να επηρεαστούν τόσο οι εξαιρετικά ξηρές περιοχές όσο και οι πολύ υγρές περιοχές και το σημαντικότερο είναι πως η παρουσία απότομων πλαγιών δεν είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία κατολισθήσεων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, πλαγιές με πάρα πολύ μικρές κλίσεις έχουν υποστεί κατολισθήσεις. Γενικότερα λοιπόν οι κατολισθήσεις μπορούν να συμβούν σχεδόν οπουδήποτε στον κόσμο, ωστόσο, είναι δυνατή η αναγνώριση ορισμένων χαρακτηριστικών που υποδεικνύουν την εμφάνισή τους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα κανάλια και τα ρέματα τα οποία συνδέονται με τις ροές κορημάτων και οι απότομες, εκτεθειμένες επιφάνειες του υποστρώματος ή οι μεγάλες αποθέσεις ογκόλιθων που συνδέονται με τις πτώσεις βράχων. Η γεωλογία της περιοχής είναι επίσης πολύ σημαντικός παράγοντας (Highland and Bobrowsky, 2008).

5. ΑΙΤΙΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Υπάρχουν δύο κύριες αιτίες που προκαλούν κατολισθήσεις: φυσικές και ανθρώπινες. Μερικές φορές οι κατολισθήσεις προκαλούνται ή γίνονται χειρότερες από το συνδυασμό των δύο παραγόντων (Highland and Bobrowsky, 2008).

5.1. ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Αυτή η κατηγορία έχει τρεις κύριους μηχανισμούς ενεργοποίησης που μπορούν να εμφανιστούν είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό - (1) νερό, (2) σεισμική δραστηριότητα, και (3) ηφαιστειακή δραστηριότητα. Τα αποτελέσματα όλων αυτών των μηχανισμών ποικίλλουν ευρέως και εξαρτώνται από παράγοντες όπως η απότομη κλίση της πλαγιάς, η μορφολογία, το σχήμα και ο τύπος του εδάφους, η υποκείμενη γεωλογία και αν υπάρχουν κατοικίες στις πληγείσες περιοχές (Highland and Bobrowsky, 2008).

5.1.1. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΝΕΡΟ

Ο κορεσμός των πλαγιών με νερό είναι η κύρια αιτία για την δημιουργία κατολισθήσεων. Ο κορεσμός αυτός μπορεί να προκύψει από έντονες βροχοπτώσεις, από το λιώσιμο του χιονιού, από μεταβολές στην ποσότητα των υπόγειων υδάτων, από την αλλαγή στη στάθμη του νερού στις ακτές, από τα φράγματα, τα κανάλια και τα ποτάμια. Οι κατολισθήσεις και οι πλημμύρες συνδέονται σε σημαντικό βαθμό, καθώς και οι δύο σχετίζονται με τα κατακρημνίσματα, την απορροή και τον κορεσμό του εδάφους με νερό. Μια πλημμύρα μπορεί να προκαλέσει μια κατολίσθηση υποσκάπτοντας τις όχθες των ρεμάτων και των ποταμών και με κορεσμό των πλαγιών από τα επιφανειακά νερά (χερσαία ροή). Ιδιαίτερα οι απότομες, καμένες από πυρκαγιές πλαγιές είναι επιρρεπείς στον κορεσμό με νερό λόγω του συνδυασμού της καύσης, της μείωσης της βλάστησης και της αλλαγής της χημείας του εδάφους λόγω της πυρκαγιάς. Οι ροές κορημάτων είναι ο συνηθέστερος τύπος κατολίσθησης στις καμένες πλαγιές. Οι πυρκαγιές προφανώς μπορεί να είναι αποτέλεσμα και φυσικής και ανθρώπινης δραστηριότητας (Highland and Bobrowsky, 2008).

5.1.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Πολλές ορεινές περιοχές που είναι ευάλωτες σε κατολισθήσεις έχουν βιώσει τουλάχιστον κάποια μέτρια σεισμική δραστηριότητα. Σεισμοί σε απότομες πλαγιές οι οποίες είναι επιρρεπείς σε κατολισθήσεις, αυξάνουν σημαντικά την πιθανότητα εμφάνισης τους από τη κίνηση του εδάφους. Οι πτώσεις και ανατροπές βράχων μπορούν επίσης να προκληθούν από την αποδυνάμωση των σχηματισμών αυτών ως αποτέλεσμα του σεισμού (Highland and Bobrowsky, 2008).

5.1.3. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Οι κατολισθήσεις λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας είναι από τους πιο καταστροφικούς τύπους κατολισθήσεων. Η ηφαιστειακή λάβα μπορεί να λιώσει γρήγορα το χιόνι και να προκαλέσει κατακλυσμό παρασέρνοντας βράχους, χώμα και τέφρα με το νερό που δημιουργείται, επιταχύνοντας γρήγορα στις απότομες πλαγιές και καταστρέφοντας οτιδήποτε βρίσκεται στην πορεία του. Αυτές οι ηφαιστειακές ροές κορημάτων (επίσης γνωστές ως λαχάρ, ένας ινδονησιακός όρος) μπορούν να φτάσουν σε πολύ μεγάλες αποστάσεις και μπορεί να καταστρέψουν ανθρώπινες κατασκευές σε επίπεδες περιοχές γύρω από τα ηφαίστεια. Οι πλαγιές ενός ηφαιστείου είναι νέες και γεωλογικά αδύναμες και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να καταρρεύσουν και να προκαλέσουν ολισθήσεις βράχων και γρήγορες ροές κορημάτων. Πολλά νησιά ηφαιστειακής προέλευσης παρουσιάζουν περιοδική αστοχία στα εδάφη (λόγω των ασθενών ηφαιστειακών επιφανειακών αποθέσεων) και μάζες εδάφους και πετρωμάτων ολισθαίνουν προς τον ωκεανό ή σε άλλα υδάτινα σώματα. Τέτοιες καταρρεύσεις μπορεί να δημιουργήσουν μαζικές υπο-θαλάσσιες κατολισθήσεις που μπορεί επίσης γρήγορα να μετατοπίσουν το νερό, δημιουργώντας στη συνέχεια θανατηφόρα τσουνάμι που μπορούν να ταξιδέψουν και να κάνουν ζημιές σε μεγάλες αποστάσεις, καθώς και σε τοπικό επίπεδο (Highland and Bobrowsky, 2008).

5.2. ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Οι πληθυσμοί που επεκτείνονται σε νέες περιοχές και δημιουργούν κοινότητες και πόλεις είναι ο κυριότερος παράγοντας με τον οποίο ο άνθρωπος συμβάλλει στην εμφάνιση των κατολισθήσεων. Η διατάραξη ή αλλαγή του συστήματος αποστράγγισης, η αποσταθεροποίηση πλαγιών και η μείωση της βλάστησης είναι οι πιο συνηθισμένες ανθρώπινες δραστηριότητες που μπορούν να προκαλέσουν κατολισθήσεις. Ωστόσο, οι κατολισθήσεις μπορούν επίσης να εμφανιστούν σε σταθερές περιοχές λόγω άλλων δραστηριοτήτων όπως η άρδευση, το πότισμα γκαζόν, η αποστράγγιση των δεξαμενών (ή η δημιουργία τους), οι διαρροές σωλήνων και οι ακατάλληλες εκσκαφές (Highland and Bobrowsky, 2008).

6. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Οι επιπτώσεις των κατολισθήσεων συμβαίνουν σε δύο κυρίως περιβάλλοντα: στο τεχνητό και στο φυσικό περιβάλλον.

6.1. ΤΕΧΝΗΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Οι κατολισθήσεις επηρεάζουν τις ανθρώπινες κατασκευές είτε αυτές βρίσκονται ακριβώς πάνω τους είτε κοντά τους. Οι οικισμοί που είναι χτισμένοι σε ασταθείς πλαγιές μπορεί να πάθουν ζημιές ή και να καταστραφούν πλήρως, καθώς οι κατολισθήσεις αποσταθεροποιούν ή καταστρέφουν τα θεμέλια και τους τοίχους. Μπορούν να προκαλέσουν ζημιές σε σωλήνες νερού, στους αποχετευτικούς αγωγούς, στα καλώδια ηλεκτρισμού, στους δρόμους και στις λεωφόρους. Οι εμπορικές επιχειρήσεις μπορούν να επηρεασθούν από τις κατολισθήσεις κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο που επηρεάζονται και οι κατοικίες. Σε μια τέτοια περίπτωση, οι συνέπειες μπορεί να είναι μεγάλες εάν η επιχείρηση είναι για παράδειγμα ένα κατάστημα όπου ενδέχεται να αντιμετωπίσει διακοπή της λειτουργίας του λόγω της ζημιάς στο κτήριο ή στους δρόμους πρόσβασης. Οι γρήγορες κατολισθήσεις, όπως οι ροές κορημάτων, είναι από τους πιο καταστροφικούς τύπους κατολίσθησης για τις κατασκευές, καθώς συχνά συμβαίνουν χωρίς προειδοποίηση, κινούνται πολύ γρήγορα, είναι πολύ ισχυρές και δεν είναι δυνατή η λήψη μέτρων αντιμετώπισης. Οι ταχέως μετακινούμενες κατολισθήσεις μπορούν να καταστρέψουν εντελώς ένα κτήριο, ενώ μια πιο αργή μπορεί να προκαλέσει μικρή ζημιά και η μικρή ταχύτητα της να επιτρέπει τη λήψη μέτρων αντιμετώπισης. Ωστόσο, αν δεν ληφθούν αυτά τα μέτρα, ακόμη και αργές κατολισθήσεις μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες καταστροφές με την πάροδο του χρόνου. Γρήγορες ροές και λαχάρ σε απότομες περιοχές μπορούν γρήγορα να καταστρέψουν κοινότητες και πόλεις λόγω της μεγάλης ταχύτητας και της ισχυρής δύναμης τους. Λόγω της φύσεως της κατολίσθησης και του γεγονότος ότι μπορούν να συνεχίσουν να δρουν μετά από ημέρες, εβδομάδες ή και μήνες, δεν είναι δυνατή η ανοικοδόμηση της πληγείσας περιοχής, εκτός εάν ληφθούν μέτρα αντιμετώπισης, που ακόμα και αυτά δεν εγγυούνται πάντα σταθερότητα. Μία από τις σημαντικότερες συνέπειες των κατολισθήσεων είναι στον τομέα της μεταφοράς και επηρεάζει ένα μεγάλο αριθμό ανθρώπων σε όλο τον κόσμο. Κατολισθήσεις πάνω σε δρόμους και σιδηροδρόμους, καθώς και η κατάρρευση οδών λόγω της αδυναμίας των υποκείμενων εδαφών είναι συχνά προβλήματα. Πτώσεις βράχων μπορούν να τραυματίσουν ή να σκοτώσουν οδηγούς και πεζούς και να προκαλέσουν ζημιές. Όλοι οι τύποι κατολισθήσεων μπορούν να οδηγήσουν σε προσωρινό ή μακροπρόθεσμο κλείσιμο κρίσιμων δρόμων για το εμπόριο, τον τουρισμό και για περιστατικά έκτακτης ανάγκης. Ακόμη

και οι αργές κατολισθήσεις (ερπυσμός) μπορούν να επηρεάσουν τις υποδομές μεταφοράς και να δημιουργήσουν προβλήματα στη συντήρηση. Καθώς ο ανθρώπινος πληθυσμός συνεχίζει να αυξάνεται, γίνεται όλο και περισσότερο ευάλωτος σε κινδύνους κατολίσθησης. Οι άνθρωποι τείνουν να κινούνται σε νέες περιοχές που μπορεί να θεωρούνταν πολύ επικίνδυνες στο παρελθόν, αλλά τώρα είναι οι μόνες που έχουν απομείνει και μπορούν να τους φιλοξενήσουν. Οι λανθασμένες ή ανύπαρκτες πολιτικές σχετικά με την χρήση γης επιτρέπουν την οικοδόμηση και τις κατασκευές σε εδάφη που θα ήταν πιο κατάλληλα για γεωργία, ως ανοιχτοί χώροι και πάρκα ή για άλλες χρήσεις πέρα από κατοικίες, κτίρια και κατασκευές (Highland and Bobrowsky, 2008).



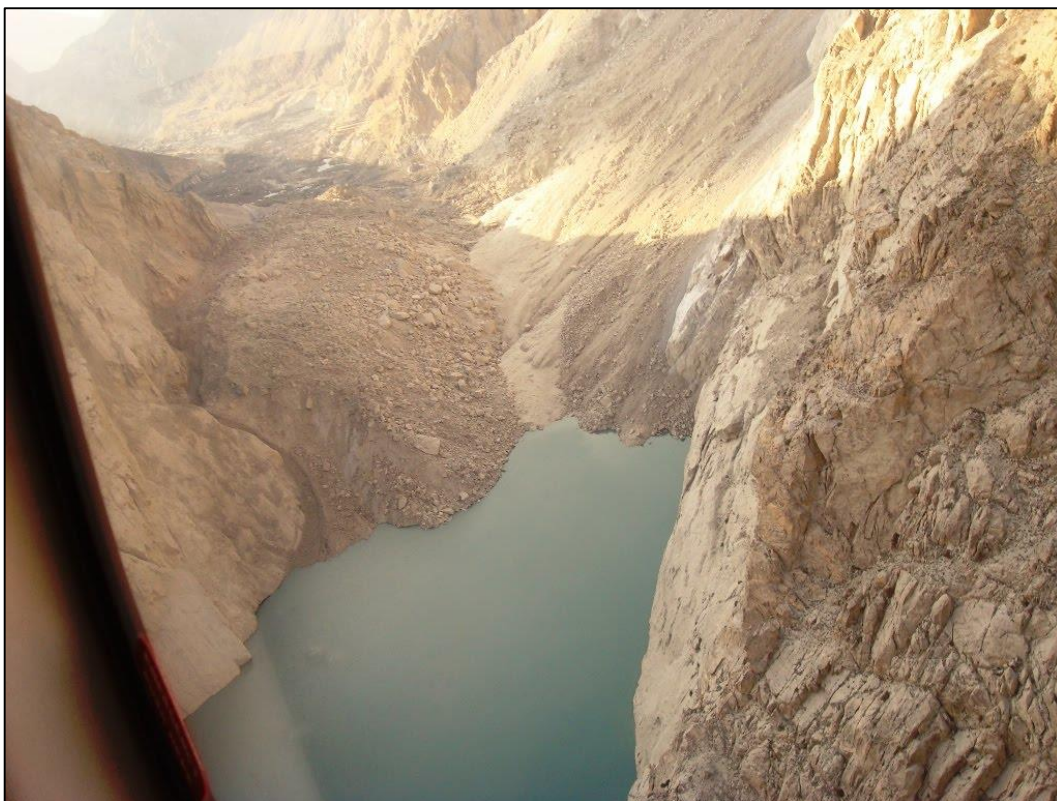
Εικόνα 11. Καταστροφική κατολίσθηση στο χωριό Bondo της Ελβετίας (Πηγή: <https://www.nytimes.com/2017/08/24/world/europe/switzerland-landslide-missing.html>, 24/8/2018).

6.2. ΦΥΣΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Οι κατολισθήσεις έχουν επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον:

- Στη μορφολογία της επιφάνειας της γης – στα ορεινά και πεδινά συστήματα, πάνω στην ξηρά και κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.
- Στα δάση και στα λιβάδια.
- Στην τοπική πανίδα, στα ποτάμια και στις λίμνες.

Τα δάση, τα λιβάδια και η άγρια ζωή επηρεάζονται αρνητικά από τις κατολισθήσεις, με τους δασικούς και υδρόβιους οικοτόπους να επηρεάζονται πιο εύκολα και σε κάποιες περιπτώσεις να καταστρέφονται εντελώς. Ωστόσο, επειδή οι κατολισθήσεις είναι ουσιαστικά τοπικό φαινόμενο, η χλωρίδα και η πανίδα μπορούν να επανέλθουν με το πέρασμα του χρόνου. Μπορεί επίσης υπό ορισμένες συνθήκες να επηρεάσουν θετικά τη μελλοντική άγρια ζωή βελτιώνοντας τους οικοτόπους των οργανισμών που αποτελούν τροφή για αυτή. Οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις είναι ένας γενικός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την καθοδική κίνηση υλικών από ρηχές σε πιο βαθιές περιοχές του ωκεανού. Συμβαίνουν σε ποταμούς, λίμνες και ωκεανούς. Πολύ μεγάλες υποθαλάσσιες κατολισθήσεις μπορούν να προκαλέσουν τσουνάμι. Η διάβρωση γκρεμών, είναι μια άλλη συνηθισμένη επίπτωση των κατολισθήσεων στο φυσικό περιβάλλον. Πτώσεις βράχων και εδάφους, ολισθήσεις και ροές είναι συχνοί τύποι κατολισθήσεων που επηρεάζουν τις παράκτιες περιοχές. Βράχοι που πέφτουν λόγω της διάβρωσης κρημνών μπορεί να είναι ιδιαίτερα επικίνδυνοι. Πολύ μεγάλα ποσά υλικού κατολισθήσεων μπορεί επίσης να είναι επικίνδυνα για την υδρόβια ζωή και η ταχεία απόθεση τους μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στην ποιότητα του νερού. Φράγματα μπορούν πολύ εύκολα να δημιουργηθούν όταν μια μεγάλη κατολίσθηση μπλοκάρει τη ροή ενός ποταμού, δημιουργώντας μια λίμνη πίσω από αυτό. Τα περισσότερα φράγματα έχουν μικρή διάρκεια ζωής καθώς το νερό σταδιακά τα διαβρώνει. Αν ωστόσο δεν καταστραφούν από τη διάβρωση και δεν αλλάξουν από την ανθρώπινη δραστηριότητα, τότε δημιουργούν νέες γεωμορφές και συγκεκριμένα λίμνες. Τέτοιες λίμνες μπορούν να διατηρηθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα, ή μπορεί ξαφνικά να απελευθερωθούν από τα φράγματα και να προκαλέσουν τεράστιες πλημμύρες (Highland and Bobrowsky, 2008).



Εικόνα 12. Φράγμα που δημιουργήθηκε από κατολίσθηση στη περιοχή Hunza, Πακιστάν (Πηγή: <https://blogs.agu.org/landslideblog/2010/01/25/continuing-concerns-about-the-landslide-dam-at-attabad-in-hunza-pakistan/>, 24/8/2018).

7. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΛΛΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ

Φυσικοί κίνδυνοι όπως πλημμύρες, σεισμοί, ηφαιστειακές εκρήξεις και κατολισθήσεις μπορούν να συμβούν ταυτόχρονα ή ένας ή περισσότεροι κίνδυνοι να προκαλέσουν έναν ή περισσότερους από τους υπόλοιπους. Οι κατολισθήσεις είναι συχνά αποτέλεσμα των σεισμών, των πλημμυρών και της ηφαιστειακής δραστηριότητας και μπορούν με τη σειρά τους να προκαλέσουν άλλους κινδύνους. Για παράδειγμα, μια κατολίσθηση λόγω σεισμού μπορεί να προκαλέσει ένα τσουνάμι αν αρκετό υλικό μεταφερθεί εντός της θάλασσας, τόσο ώστε να μετακινήσει μια μεγάλη μάζα νερού. Ένα άλλο παράδειγμα θα μπορούσε να είναι μια κατολίσθηση που προέκυψε από ηφαιστειακή δραστηριότητα και εμπόδισε τη ροή ενός ποταμού, με αποτέλεσμα να συγκεντρώσει το νερό πίσω από το φράγμα αυτό και να πλημμυρίσει την πίσω περιοχή. Η πλημμύρα αυτή με τη σειρά της μπορεί να προκαλέσει διάβρωση κρημών και κορεσμό του εδάφους με νερό. Είναι λοιπόν απαραίτητο να γίνεται εκτεταμένη μελέτη για όλους τους κινδύνους μιας περιοχής, όταν μελετάται η επιδεκτικότητα της σε κατολισθήσεις. Γενικότερα, πολύ λίγοι χάρτες υπάρχουν που δείχνουν τους πολλαπλούς κινδύνους για μια περιοχή καθώς συνήθως επικεντρώνονται μόνο σε έναν κίνδυνο (Highland and Bobrowsky, 2008).

8. ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΙΑΣΜΟΥ

Ο πιο απλός τρόπος μετριασμού των επιπτώσεων μιας κατολίσθησης είναι η αποφυγή κατασκευών και ανθρώπινων δραστηριοτήτων σε απότομες πλαγιές ή πάνω σε προϋπάρχουσες κατολισθήσεις. Αυτό όμως δεν είναι πάντα εφικτό. Η ύπαρξη σωστών πολιτικών χρήσης γης ώστε να εξασφαλιστεί πως οι κατασκευές δεν μειώνουν την σταθερότητα μιας πλαγιάς είναι μια άλλη προσέγγιση. Οι δύο αυτοί τρόποι βασίζονται σε χάρτες κατολισθήσεων. Σε περιπτώσεις που κατολισθήσεις επηρεάζουν ήδη υπάρχοντα κτήρια και δεν μπορούν να αποφευχθούν, υπάρχουν άλλες μέθοδοι μετριασμού. Σε κάποιες περιπτώσεις, τα συστήματα παρακολούθησης και προειδοποίησης δίνουν στους κατοίκους τη δυνατότητα να φύγουν προσωρινά από τις κατοικίες τους, όταν η πιθανότητα μιας κατολίσθησης είναι μεγάλη (Highland and Bobrowsky, 2008). Ακολουθούν μερικές μέθοδοι αντιμετώπισης για διάφορους τύπους κατολισθήσεων.

8.1. ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΓΙΩΝ

Η σταθερότητα αυξάνεται όταν το υπόγειο νερό δεν φτάνει στην μάζα που μπορεί να κινηθεί με:

- Αλλαγή της κατεύθυνσης της ροής του, μακριά από την μάζα που μπορεί να μετακινηθεί.
- Αποστράγγιση του, ώστε να μειωθεί η πιθανότητα ανόδου της στάθμης του υπογείου νερού.
- Κάλυψη της μάζας που μπορεί να μετακινηθεί με αδιάβροχη μεμβράνη.
- Μείωση την επιφανειακής άρδευσης. Η σταθερότητα επίσης αυξάνεται όταν το μεγαλύτερο βάρος του υλικού και οι κατασκευές είναι τοποθετημένες στο κατώτερο μέρος της πλαγιάς ή όταν αφαιρείται μια ποσότητα της μάζας από τα ψηλότερα σημεία και τοποθετείται αλλού.

Το φύτεμα και γενικότερα η ενίσχυση της βλάστησης μπορεί επίσης να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος σταθεροποίησης μιας πλαγιάς. Ένα άλλο μέτρο σταθεροποίησης είναι η χρήση τοίχων αντιστήριξης. Τέτοιοι τοίχοι είναι ουσιαστικά κατασκευές που υποστηρίζουν το έδαφος και χρησιμοποιούνται επίσης σε πλαγιές που προέκυψαν από ανασκαφές καθώς και για να αποτρέψουν την ολίσθηση εδάφους πάνω σε δρόμους και ιδιοκτησίες. Αποτρέπουν και μειώνουν την διάβρωση στα κατώτερα τμήματα μιας πλαγιάς από ποτάμια ή μπορούν να καθυστερήσουν έναν ερπυσμό. Δεν μπορούν ωστόσο να αποτρέψουν εντελώς μια κατολίσθηση από το να γίνει. Αυτοί οι τοίχοι μπορεί να είναι φτιαγμένοι από ξύλο, από χάλυβα, από πλαστικό και άλλα. Αν και κάθε τύπος τοίχου είναι κατάλληλος για κάποιο συγκεκριμένο είδος κατολίσθησης, το κόστος είναι συνήθως αυτό που καθορίζει ποιος τύπος θα χρησιμοποιηθεί (Popescu, 2002, Highland and Bobrowsky, 2008).

8.2. ANTIMETΩΠΙΣΗ ΠΤΩΣΕΩΝ ΒΡΑΧΩΝ

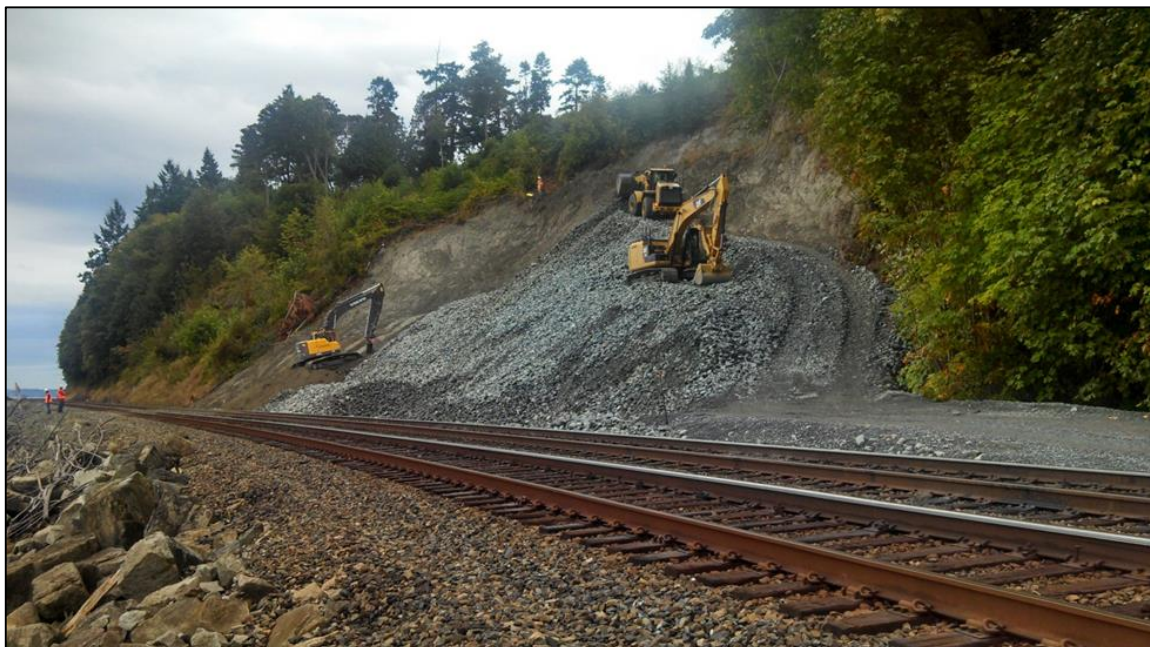
Οι πτώσεις βράχων γίνονται σε περιοχές με απότομες βραχώδεις πλαγιές και γκρεμούς, μπλοκάρουν μεγάλες οδούς απαραίτητες για την μεταφορά και τις επιχειρήσεις και προκαλούν θανάτους και τραυματισμούς ανθρώπων. Η αλλαγή των δρόμων και των λεωφόρων γύρω από περιοχές που γίνονται τέτοιες πτώσεις είναι μια μέθοδος αντιμετώπισης, που όμως δεν είναι πάντα πρακτική. Αρκετές κοινότητες τοποθετούν σήμανση σε περιοχές που ο κίνδυνος πτώσης βράχων είναι πιθανός. Ορισμένες μέθοδοι για τον περιορισμό του κινδύνου περιλαμβάνουν πλέγματα και δίχτυα παρακράτησης των μετώπων των πιθανών πτώσεων, τάφροι ώστε το υλικό να συγκεντρωθεί σε αυτούς κατά την πτώση, τοίχους που θα εμποδίσουν τη μετακίνηση του υλικού και άλλα (Popescu, 2002, Highland and Bobrowsky, 2008).

8.3. ANTIMETΩΠΙΣΗ ΡΟΩΝ ΚΟΡΗΜΑΤΩΝ

Λόγω της ταχύτητας και της έντασης των ροών κορημάτων, είναι πολύ δύσκολο να σταματήσουν αν ξεκινήσουν. Ωστόσο, υπάρχουν μέθοδοι για την αναχαίτιση και την εκτροπή τους κυρίως μέσω τοίχων αντιστήριξης και δημιουργίας λεκανών για την απόθεση των κορημάτων. Άλλες μέθοδοι περιλαμβάνουν την τροποποίηση πλαγιών, μέσω του ελέγχου της διάβρωσης τους, την ανάπτυξη της βλάστησης και την αποτροπή πυρκαγιών, που είναι γνωστό ότι ενισχύουν τις ροές κορημάτων (Popescu, 2002, Highland and Bobrowsky, 2008).



Εικόνα 13. Τοίχος παρακράτησης μετακινούμενου υλικού κατολίσθησης (Πηγή: <https://wsdotblog.blogspot.com/2015/01/what-were-doing-to-prevent-landslides.html>, 24/8/2018).



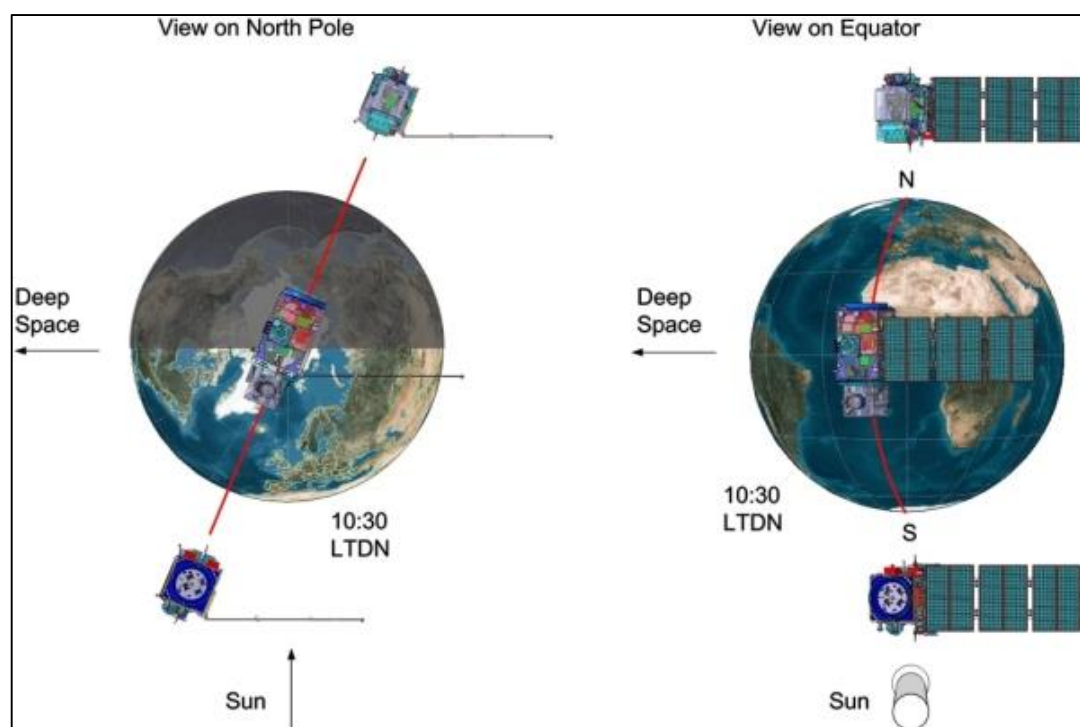
Εικόνα 14. Εργασίες μείωσης κλίσης πλαγιάς και σταθεροποίησης της (Πηγή: <https://wsdotblog.blogspot.com/2015/01/what-were-doing-to-prevent-landslides.html>, 24/8/2018).

9. ΟΠΤΙΚΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

9.1. SENTINEL-2

9.1.1. ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Η αποστολή Sentinel-2 έχει αναπτυχθεί από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος και είναι μέρος του προγράμματος Copernicus. Πρόκειται για έναν αστερισμό δύο δίδυμων δορυφόρων που κινούνται στην ίδια τροχιά με διαφορά φάσης 180° μεταξύ τους. Έτσι η επίσκεψη τους σε κάθε σημείο της γης γίνεται κάθε 5 μέρες. Οι δορυφόροι παρακολουθούν τη γη και παρέχουν οπτικές εικόνες υψηλής ανάλυσης και λόγω της υψηλής συχνότητας επίσκεψης σε κάθε σημείο, είναι πολύ χρήσιμοι σε μελέτες που διαρκούν μεγάλα χρονικά διαστήματα. Είναι εξοπλισμένοι με MSI (Multispectral Instrument) τελευταίας τεχνολογίας, που προσφέρει τις εικόνες υψηλής ανάλυσης σε 13 ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ο πρώτος δορυφόρος Sentinel-2A εκτοξεύθηκε στις 23 Ιουνίου 2015 και ο δεύτερος Sentinel-2B στις 07 Μαρτίου 2017 (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/overview>, 24/8/2018).



Εικόνα 15. Η διαμόρφωση της τροχιάς των δίδυμων δορυφόρων Sentinel-2 (Πηγή: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/overview>, 24/8/2018).

9.1.2. ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ

Οι στόχοι της αποστολής είναι οι εξής:

- Συστηματική απόκτηση πολυ-φασματικών εικόνων υψηλής ανάλυσης σε παγκόσμια κλίμακα.
- Συνέχεια της παροχής πολυ-φασματικών εικόνων όπως οι δορυφόροι SPOT και Landsat.
- Παρακολούθηση της γης και πιο συγκεκριμένα της βλάστησης, του εδάφους και της κάλυψης του νερού, των εγχώριων υδάτων και των παράκτιων περιοχών.
- Παρακολούθηση των χρήσεων γης και παραγωγή χαρτών με τις διαφορές που εντοπίζονται.
- Υποστήριξη στην δημιουργία δεδομένων κάλυψης γης.
- Υποστήριξη και παροχή δεδομένων σε περιπτώσεις καταστροφικών γεγονότων και κινδύνων.
- Παρακολούθηση της αλλαγής του κλίματος.

Αυτοί οι στόχοι εξασφαλίζουν πως η αποστολή Sentinel-2 συνεισφέρει σημαντικά σε θέματα που ασχολείται το πρόγραμμα Copernicus, όπως η κλιματική αλλαγή, η παρακολούθηση της γης, η διαχείριση γεγονότων εκτάκτου ανάγκης και η ασφάλεια (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/mission-objectives>, 9/6/2018).

9.1.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ

Οι δορυφόροι είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν για 7,25 χρόνια και το ύψος στο οποίο κινούνται οι είναι 786 km. Είναι ηλιοσύγχρονοι, δηλαδή κινούνται με τροχιά που εξασφαλίζει τις ίδιες συνθήκες φωτισμού της επιφάνειας από τον ήλιο. Ουσιαστικά οι καταγραφές πραγματοποιούνται την ίδια τοπική ώρα της ημέρας για κάθε περιοχή, καθώς ο ήλιος βρίσκεται στο ίδιο σημείο πάνω από τον ορίζοντα (https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_GR/SEMAPY4PVFG_2.html, 9/6/2018). Διαθέτουν MSI δηλαδή Multispectral Instrument ή αλλιώς Συσκευή Πολυ-φασματικής Σάρωσης. Αυτή η συσκευή αποκτά ταυτόχρονα εικόνες σε διάφορα κανάλια του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και το πλάτος της λωρίδας γήινης επιφάνειας που σαρώνει είναι 290 km. Ο αισθητήρας είναι τύπου Pushbroom δηλαδή συλλέγει σειρές δεδομένων εικόνας σε όλη την τροχιακή κίνηση του δορυφόρου. Οι σειρές αυτές συνδυάζονται για τη δημιουργία της τελικής εικόνας ενός προϊόντος (<https://el.glosbe.com/en/el/multispectral%20scanner>, 9/6/2018). Τα φασματικά κανάλια των δορυφόρων Sentinel 2 είναι 13, καλύπτουν το οπτικό και το κοντινό

υπέρυθρο φάσμα και δεν έχουν όλα την ίδια χωρική ανάλυση. Πιο αναλυτικά φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Band Number	S2A		S2B		Spatial resolution (m)
	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	
1	443.9	27	442.3	45	60
2	496.6	98	492.1	98	10
3	560.0	45	559	46	10
4	664.5	38	665	39	10
5	703.9	19	703.8	20	20
6	740.2	18	739.1	18	20
7	782.5	28	779.7	28	20
8	835.1	145	833	133	10
8a	864.8	33	864	32	20
9	945.0	26	943.2	27	60
10	1373.5	75	1376.9	76	60
11	1613.7	143	1610.4	141	20
12	2202.4	242	2185.7	238	20

Πίνακας 1. Τα φασματικά κανάλια του δορυφορικού συστήματος Sentinel-2 (Πηγή: <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>, 9/6/2018).

9.1.4. ΤΥΠΟΙ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Τα τελικά προϊόντα των δορυφόρων Sentinel-2 προκύπτουν μετά από διάφορα στάδια επεξεργασίας. Οι τύποι των τελικών προϊόντων διατίθενται δωρεάν και είναι δύο. Ο πρώτος τύπος είναι Level-1C και πρόκειται για εικόνα που απεικονίζει την επιφάνεια της γης ενώ δέχεται ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Ο δεύτερος τύπος είναι Level-2A και απεικονίζει την επιφάνεια της

γης χωρίς ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Και οι δύο τύποι είναι γεωμετρικά διορθωμένοι με βάση ψηφιακά μοντέλα εδάφους (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types>, 11/6/2018).

9.1.5. ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Η ποιότητα των δεδομένων, η συχνότητα με την οποία αποκτώνται καθώς και η γεωγραφική κάλυψη της συγκεκριμένης αποστολής, δίνουν τη δυνατότητα στους χρήστες να τα χρησιμοποιήσουν για έρευνα σε διάφορα θεματικά πεδία, όπως (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/thematic-areas>, 10/6/2018):

- Παρακολούθηση του εδάφους και πιο συγκεκριμένα της γεωργίας, της δασοκομίας, της τοπογραφίας, της κάλυψης της γης και της μελέτης διαχρονικών αλλαγών. Μπορεί να γίνει εστίαση στις σύγχρονες τάσεις αλλά και να προβλεφθούν μελλοντικές αλλαγές.
- Παρακολούθηση της κατάστασης και της δυναμικής των ωκεανών και των παράκτιων ζωνών, αποτελεσματική προστασία και διαχείριση του υποθαλάσσιου περιβάλλοντος και των πόρων και παρακολούθηση ρύπανσης από πετρελαιοκηλίδες και άλλα γεγονότα.
- Παρακολούθηση της ποιότητας και της κατάστασης της ατμόσφαιρας του πλανήτη, του πως αυτή μας επηρεάζει αλλά και πρόβλεψη καιρού.
- Αντιμετώπιση εκτάκτων γεγονότων. Ιστορικά δεδομένα μπορούν να παρέχουν μια γενική εικόνα για μια κατάσταση, ωστόσο η ανάλυση τωρινών δεδομένων είναι αυτή στην οποία θα βασιστεί η διαχείριση της.
- Παρακολούθηση συνόρων, θαλάσσιων διαδρομών και αναπτυσσόμενων καταστάσεων που αφορούν την ασφάλεια.
- Παρακολούθηση της κλιματικής αλλαγής, παρέχοντας εικόνες για τις περιοχές που έχουν επηρεασθεί και επηρεάζονται και συμβάλλοντας στην ανάπτυξη αρχείων δεδομένων για διαχρονικές μελέτες.
- Συμβολή σε θέματα αστικού και χωροταξικού σχεδιασμού.
- Παρακολούθηση του άνθρακα και άλλων φυσικών πόρων.

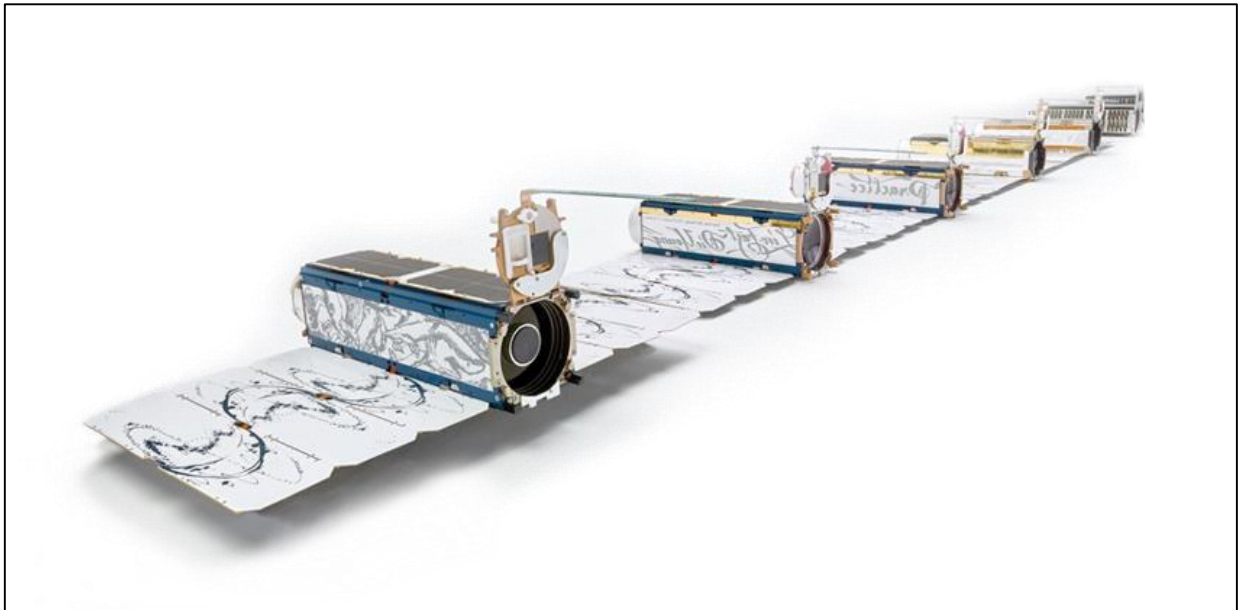
9.2. PLANETSCOPE

9.2.1. ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Η Planet είναι μια εταιρεία που σχεδιάζει, κατασκευάζει και λειτουργεί δορυφόρους και τα δεδομένα που αποκτά τα παρέχει στους πελάτες της μέσω μιας διαδικτυακής πλατφόρμας. Η προσέγγιση της εστιάζει στην ευελιξία του σχεδιασμού των δορυφόρων, του ελέγχου της αποστολής, των λειτουργικών συστημάτων, του τρόπου λειτουργίας της διαδικτυακής πλατφόρμας επεξεργασίας και της παράδοσης των εικόνων. Η εταιρεία λειτουργεί δύο αστερισμούς δορυφόρων, τον PlanetScope και τον RapidEye. Η συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιεί δεδομένα PlanetScope. Γενικά, οι εικόνες συλλέγονται και επεξεργάζονται σε διάφορες μορφές ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες χρήσεις, όπως χαρτογράφηση, έρευνα, εκπαίδευση, αντιμετώπιση κινδύνων και καταστροφών, γεωργία και γενικότερα για αναλύσεις και πληροφόρηση (Planet Imagery Product Specification: PlanetScope & Rapideye, 2016).

9.2.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ

Η εταιρεία σταδιακά εκτοξεύει ομάδες μεμονωμένων δορυφόρων, επομένως η ποσότητα τους σε τροχιά αυξάνεται συνεχώς παράλληλα με την ποιότητα τους χάρη στις συνεχείς βελτιώσεις στην τεχνολογία τους. Κάθε δορυφόρος είναι μορφής CubeSat 3U (10 cm. x 10 cm. x 30 cm.). Ο πλήρης αστερισμός θα αποτελείται περίπου από 120 δορυφόρους και θα είναι ικανός να απεικονίζει ολόκληρη τη γη κάθε μέρα, κάτι που αντιστοιχεί σε 150 εκατομμύρια km² ανά ημέρα. Η τροχιά τους βρίσκεται σε υψόμετρο 475 km και τα φασματικά κανάλια τους καλύπτουν το οπτικό φάσμα (red, green, blue). Κάποιοι δορυφόροι έχουν τη δυνατότητα να καλύπτουν επιπλέον και το κοντινό υπέρυθρο (near infrared). Οι εικόνες που αποκτούν είναι ενός καρέ (single frame images) και επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τη γωνία με την οποία βλέπει ο δορυφόρος τη γη σε αντίθεση με τους άλλους δορυφόρους που διαθέτουν αισθητήρες τύπου Pushbroom (Kääb et al., 2017). Η χωρική ανάλυση είναι 3,7 m και η λωρίδα γήινης επιφάνειας που συλλέγουν έχει διαστάσεις 24,6 km x 16,4 km. Χάρη στη ποσότητα δορυφόρων που βρίσκονται σε τροχιά, η επίσκεψη τους σε κάθε σημείο της γης γίνεται καθημερινά (Planet Imagery Product Specification: PlanetScope & Rapideye, 2016).



Εικόνα 16. Δορυφόροι μορφής Cubesat (Πηγή: <https://www.planet.com/products/planet-imagery/>, 25/8/2018)

9.2.3. ΤΥΠΟΙ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Η Planet προσφέρει τρεις τύπους προϊόντων: Basic Scene, Ortho Scene και Ortho Tile. Το Basic Scene αποτελεί το προϊόν με την λιγότερη προ-επεξεργασία και δέχεται ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Χρησιμοποιείται κυρίως από άτομα με εμπειρία στην επεξεργασία και γεωμετρική διόρθωση εικόνων καθώς δεν είναι διορθωμένο γεωμετρικά με βάση ένα μοντέλο ψηφιακού ανάγλυφου ή με βάση την τοπογραφία ώστε να εξαλειφθούν οι αλλοιώσεις. Το Ortho Scene προϊόν αποτελεί συνέχεια του Basic Scene καθώς έχει δεχθεί επιπλέον επεξεργασία. Ενώ δέχεται ατμοσφαιρικές επιδράσεις, είναι γεωμετρικά διορθωμένο με βάση ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους, επομένως δεν υπάρχουν αλλοιώσεις που οφείλονται στην τοπογραφία της περιοχής αλλά και στη γωνία λήψης της εικόνας. Τέλος το Ortho Tile είναι πολλά Ortho Scenes συγχωνευμένα σε μια λωρίδα και διαιρεμένα με βάση ένα καθορισμένο πλέγμα με όλα τα βήματα επεξεργασίας που προηγήθηκαν (Planet Imagery Product Specification: PlanetScope & Rapideye, 2016).

9.2.4. ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Τα προϊόντα των δορυφόρων PlanetScope μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα θεματικά πεδία όπως (<https://www.planet.com/products/monitoring/>, 11/6/2018):

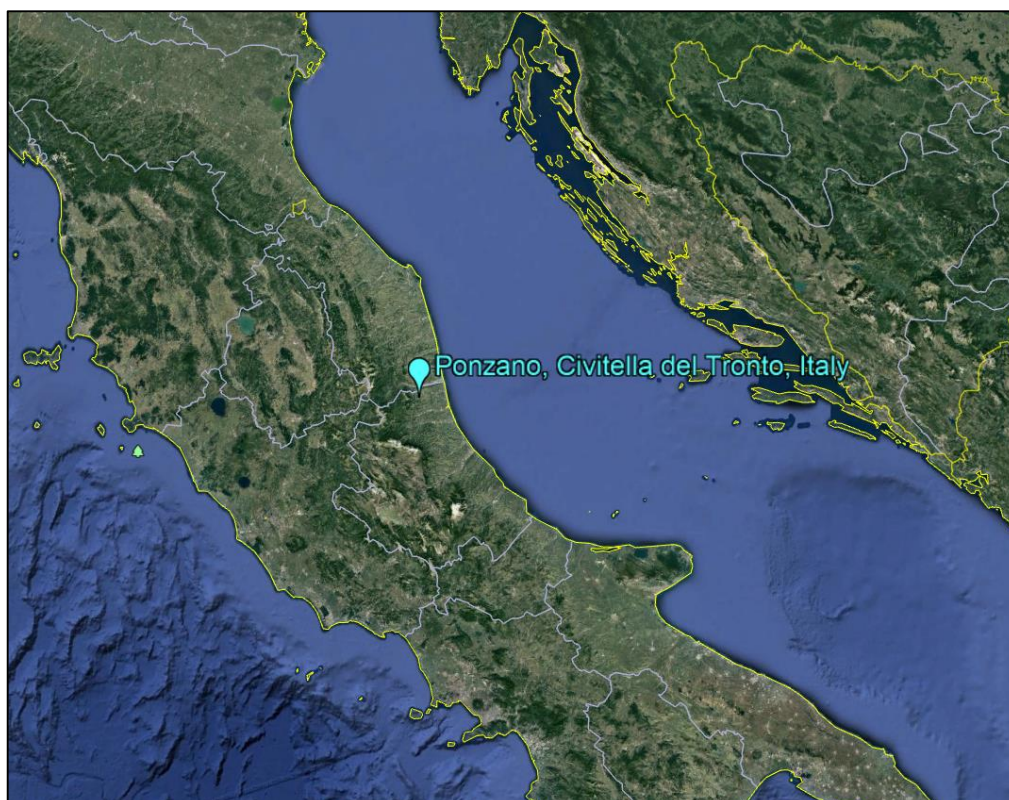
- Γεωργία: η παρακολούθηση των καλλιεργειών και ο εντοπισμός αλλαγών σε καθημερινή βάση κάνουν τη διαχείριση τους πιο αποτελεσματική, κερδοφόρα και βιώσιμη.
- Ασφάλεια και πληροφόρηση: η παρακολούθηση σε παγκόσμια κλίμακα και η ταχεία απόκτηση δεδομένων παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για γεγονότα και καταστάσεις σε ολόκληρο τον κόσμο.
- Ενέργεια και υποδομές: οι εικόνες υψηλής ανάλυσης σε παγκόσμια κλίμακα παρέχουν την δυνατότητα επίβλεψης έργων και ιδιοκτησιών, καλύτερης διαχείρισης κινδύνων για επιχειρήσεις και καλύτερης εκτίμησης της δραστηριότητας ανταγωνιστών σε πραγματικό χρόνο.
- Ασφάλιση: αξιοποιώντας την καθημερινή παρακολούθηση, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει μοντέλα τιμολόγησης, να εντοπίσει ευκαιρίες και να αξιοποιήσει νέες αγορές.
- Θάλασσα: η πλήρης κάλυψη των ανοιχτών υδάτων και θαλασσών δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εντοπίσει σκάφη, αντικείμενα, κινδύνους και δραστηριότητες σε οποιοδήποτε σημείο επιθυμεί.

10. ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

10.1. PONZANO, ITALIA

10.1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Το χωριό Ponzano βρίσκεται στον δήμο Civitella del Tronto, 3,42 χιλιόμετρα μακριά από την ομώνυμη πόλη και ο πληθυσμός του χωριού είναι περίπου 200 άτομα (<https://www.thelocal.it/20170223/landslide-tears-italian-village-apart-abruzzo-unstoppable>, 13/06/2018). Είναι χτισμένο πάνω σε μια λοφώδη περιοχή, σε υψόμετρο περίπου 360 μέτρων. Η μορφολογία της περιοχής συνδέεται στενά με την συμπιεστική τεκτονική του Μειόκαινου-Πλειόκαινου που σχημάτισαν την ορεινή ζώνη στην περιοχή Abruzzi (Mattei et al., 1995). Από τις αρχές τις Πλειστόκαινης εποχής, η περιοχή χαρακτηρίζονταν από μια τεκτονική φάση συμπίεσης που τελείωσε στα τέλη της εποχής. Αυτό σχετίζεται με την γενική ανύψωση και κλίση προς τα ανατολικά των δομών (Nisio et al., 1996). Στην περιοχή μελέτης, η τεκτονική κίνηση προκάλεσε μια μορφολογία με χαρακτηριστικές ήπιες πλαγιές, μέγιστης κλίσης 10°, που κοιτάζουν προς την ανατολή (Cantalamessa and Di Celma, 2004). Αυτές οι πλαγιές αποτελούνται από ασβεστολιθικά εδάφη Μεσοζωικής και Καινοζωικής εποχής, καθώς και από σχηματισμούς αργίλου (Centamore et al., 1991). Στην περιοχή μελέτης υπάρχουν θαλάσσια υλικά πυριτίου καθώς και ηπειρωτικά ιζήματα, σχηματισμοί ασβεστόλιθου και αργίλου (Speranza et al., 1997). Επίσης υπάρχουν σχηματισμοί από αμμόλιθους, πηλούς και πυρίτιο (Brozzetti et al., 2010). Τέλος στην περιοχή της κατολίσθησης υπάρχουν προσχωσιγενής και κατολισθητικές αποθέσεις του Ολόκαινου (Solari et al., 2018).



Εικόνα 17. Θέση της περιοχής μελέτης Ponzano, Ιταλία (Πηγή: Google Earth)

10.1.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ

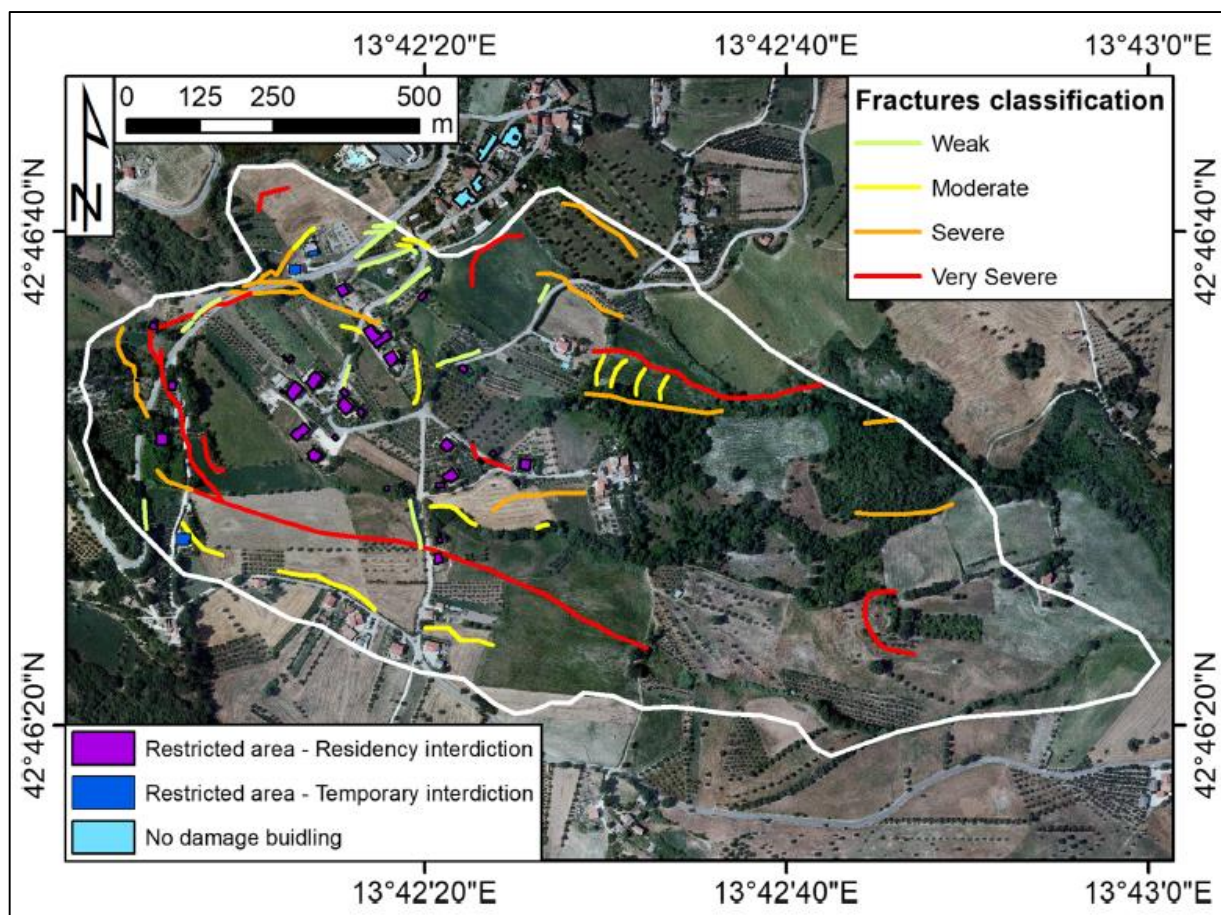
Στις 12 Φεβρουαρίου 2017 έγινε μια κατολίσθηση σε πλαγιά του χωριού Ponzano. Η πλαγιά κοιτάζει νοτιο-ανατολικά και η έκταση που επηρεάζεται είναι περίπου $0,6 \text{ km}^2$. Η κατολίσθηση, με όγκο που εκτιμάται στα $7 \times 10^6 \text{ m}^3$ προκλήθηκε από το συνδυασμό δύο παραγόντων (Solari et al., 2018):

1. Ο κορεσμός της πλαγιάς μετά από την άμεση και αργή διήθηση του νερού, το οποίο προέκυψε από το λιώσιμο του χιονιού λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας στα τέλη του Ιανουαρίου με αρχές Φεβρουαρίου. Πιο συγκεκριμένα, η μέση τιμή θερμοκρασίας για τον Ιανουάριο ήταν $-1,4^\circ \text{C}$, ενώ μέσα τις πρώτες 10 μέρες του Φεβρουαρίου η τιμή αυξήθηκε σε 8°C . Η μέγιστη πυκνότητα της χιονοκάλυψης κατά τη περίοδο του Ιανουαρίου ήταν μεταξύ 100 και 120 cm .
2. Ο κορεσμός της πλαγιάς με νερό λόγω των έντονων βροχοπτώσεων. Το ύψος της βροχής που καταγράφηκε μεταξύ 21 και 24 Ιανουαρίου και 6 με 10 Φεβρουαρίου είχε τιμή 77 mm και 81 mm αντίστοιχα, ενώ η μέση μηνιαία τιμή για τη συγκεκριμένη περιοχή είναι 60 mm (Vergni et al., 2016).

Η κατολίσθηση είναι σύνθετη καθώς αναγνωρίζονται δύο τύποι:

1. Ο πρώτος τύπος είναι περιστροφική ολίσθηση, που επηρεάζει το άνω μέρος και το κεφάλι της κατολίσθησης που βρίσκεται κοντά στην επαρχιακή οδό SP8.
2. Ο δεύτερος τύπος είναι ροή γης, που επηρεάζει το κεντρικό μέρος και το δάκτυλο της κατολίσθησης, και χαρακτηρίζεται από μια ρήξη επιφάνειας που βρίσκεται σε βάθος 15 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους.

Η μέγιστη ταχύτητα κίνησης που καταγράφηκε είναι 4-5 μέτρα την ημέρα. Μετά το γεγονός αυτό, ορίστηκε μια περιοχή περιορισμένης πρόσβασης που συμπίπτει με την περιοχή της κατολίσθησης και περιλαμβάνει 32 σπίτια που υπέστησαν ζημιές. Περίπου 100 άτομα αναγκάστηκαν να απομακρυνθούν. Η κατολίσθηση προκάλεσε σοβαρές ζημιές στον επαρχιακό δρόμο SP8 που συνδέει το χωριό Ponzano με την πόλη Civitella del Tronto και έκανε αδύνατη την χρήση ενός άλλου δρόμου που το συνδέει με το χωριό Villa Carosi (Solari et al., 2018).



Εικόνα 18. Περιοχή κατολίσθησης. Διακρίνονται τα απαγορευμένα κτήρια και τα κτήρια που δεν έχουν δεχθεί ζημιές. Επιπλέον έχει γίνει ταξινόμηση ρωγμών (σύμφωνα με Del Soldato et al., 2017) που δημιουργήθηκαν από την κατολίσθηση. Η άσπρη γραμμή αποτελεί την περίμετρο της κατολίσθησης (Πηγή: Solari et al., 2018).



Εικόνα 19. Καταστροφές σε δρόμο και σπίτι του χωριού Ponzano λόγω της κατολίσθησης (Πηγή: <https://www.express.co.uk/travel/articles/771456/landslide-Abruzzo-italy>, 25/8/2018).

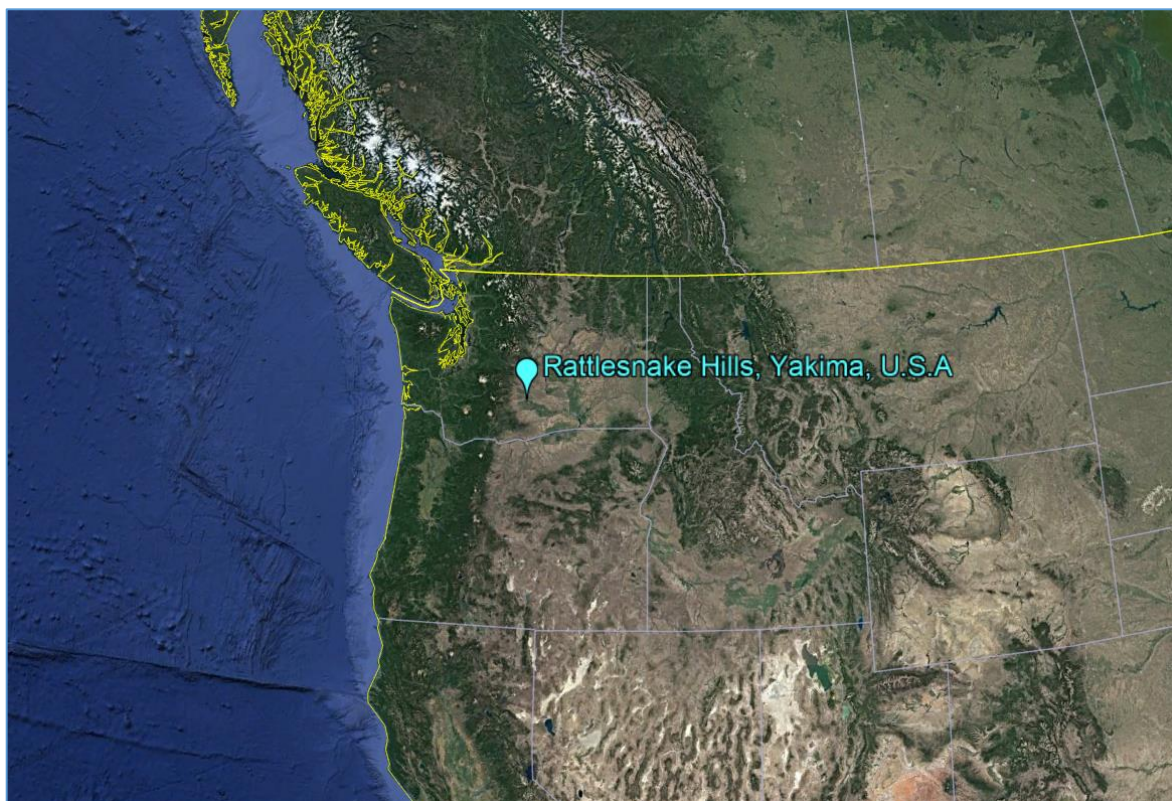


Εικόνα 20. Ρωγμές στο έδαφος που οφείλονται στην κατολίσθηση (Πηγή: <https://blogs.aqu.org/landslideblog/2017/02/24/ponzano-di-civitella-del-tronto/>, 25/8/2018).

10.2. YAKIMA, USA

10.2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Οι λόφοι Rattlesnake είναι μια μακρά κορυφογραμμή 26 km στην κομητεία της Yakima και της Benton, στην πολιτεία της Ουάσιγκτον των Η.Π.Α. Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στους λόφους Rattlesnake, 4,8 km νότια της πόλης Yakima, στην πλαγιά πάνω από ένα λατομείο. Σχετικά με τη μορφολογία, η περιοχή αποτελείται από βασάλτη Μειόκαινης εποχής του ποταμού Columbia. Συγκεκριμένα διακρίνονται δύο βασαλτικές ροές που χωρίζονται από ένα ιζηματογενές υπόστρωμα: η ροή Pomona και η ροή Umatilla που βρίσκεται κάτω από την Pomona. Η κορυφογραμμή των λόφων Rattlesnake έχει διεύθυνση Α-Δ. Οι πλαγιές που κοιτάζουν προς το βορρά είναι απότομες ενώ οι πλαγιές που κοιτάνε προς τον νότο είναι σχετικά ομαλές. Το ιζηματογενές υπόστρωμα αντιπροσωπεύει μια περίοδο περίπου ενός εκατομμυρίου ετών όπου η απόθεση ιζημάτων πάνω στην επιφάνεια βασάλτη Umatilla γίνονταν από ποτάμιες διεργασίες. Τη περίοδο αυτή οι κορυφογραμμές επηρεάστηκαν από την τεκτονική ανύψωση και αυτό είχε ως αποτέλεσμα υποστρώματα όπως αυτό να λεπτύνουν με την ανύψωση και να κυμαίνονται από πολύ μεγάλο πάχος στις χαμηλές περιοχές μέχρι πολύ μικρό ή και μηδενικό στις κορυφές. Πρόκειται ουσιαστικά ιζήματα πετρώδους ψαμμίτη τα οποία προέκυψαν από τα μητρικά ιζήματα αργίλου, ιλύος, άμμου και ποικίλων συγκεντρώσεων τέφρας. Οι καιρικές συνθήκες και η μεταβολές στη θερμότητα της τέφρας ήταν ευνοϊκές για την ανάπτυξη δευτερογενών αργίλων όπως ο ιλλίτης (Norrish, 2018).



Εικόνα 21. Θέση της περιοχής μελέτης Yakima, USA (Πηγή: Google Earth)

10.2.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ

Στις αρχές Οκτωβρίου 2017 παρατηρήθηκαν για πρώτη φορά μεγάλες ρωγμές στο έδαφος πάνω από το λατομείο καθώς τεμάχια βασάλτη ξεκίνησαν να ολισθαίνουν πάνω στο ασθενέστερο ιζηματογενές υπόστρωμα. Αυτές οι ρωγμές αυξήθηκαν σε μέγεθος ενώ νέες έχουν εμφανιστεί με την πάροδο του χρόνου. Ο τύπος της κατολίσθησης είναι μεταθετική ολίσθηση με έκταση 0,08 km², ταχύτητα περίπου στα 44 cm την εβδομάδα και νότια κατεύθυνση. Όταν ξεκίνησαν οι μετρήσεις, η κατολίσθηση είχε ταχύτητα περίπου 30,5 cm την εβδομάδα ενώ σύμφωνα με τις μετρήσεις στις 20 Μαΐου 2018 η ταχύτητα αυξήθηκε στα 46 cm περίπου την εβδομάδα (<https://www.dnr.wa.gov/rattlesnake-hills-landslide>, 13/06/2018). Για την συγκεκριμένη κατολίσθηση, το ανατολικό όριο καθορίζεται από μια ζώνη αστοχίας που έχει εξελιχθεί σε απότομη κατωφέρεια. Το βόρειο όριο της ολίσθησης μπορεί να επηρεάζεται από τη γεωλογική δομή των αστοχιών κατά μήκος της κορυφογραμμής, από την λέπτυνση ή εξαφάνιση του υποστρώματος ή από τη φυσική καμπυλότητα του εδάφους. Τα νότια και δυτικά όρια δεν περιορίζονται καθώς το υπόστρωμα είναι εκτεθειμένο στους τοίχους του λατομείου και στην δυτική πλαγιά πάνω από τη λεωφόρο I-82. Το νερό δεν φαίνεται να είναι παράγοντας σε αυτή τη

κατολίσθηση. Αυτό προκύπτει από την έλλειψη εντοπισμένης διαρροής στους τοίχους του λατομείου και από τις φυσικές πλαγιές, από τις ημίξηρες περιοχές και από το τοπογραφικό σχήμα της κορυφής, το οποίο δεν συμβάλλει στην διήθηση (Norrish, 2018). Γεωλόγοι και μηχανικοί παρακολουθούν το φαινόμενο και υποθέτουν πως το πιο πιθανό σενάριο είναι η κατολίσθηση να συνεχίσει να μετακινείται νότια και να συσσωρευτεί στο λατομείο. Σε αυτή τη περίπτωση αναμένονται πτώσεις βράχων στο λατομείο, οι οποίοι θα συσσωρευθούν στο δάχτυλο της κατολίσθησης και πιθανώς θα επιβραδύνουν και θα σταματήσουν την κίνηση. Επιπλέον πτώσεις βράχων νότια και δυτικά μπορεί να επηρεάσουν την οδό Thord, η οποία έχει κλείσει από τον δήμο της Yakima για προφύλαξη. Υπάρχουν και άλλα σενάρια με λιγότερες πιθανότητες, όπου η κατολίσθηση θα μπορούσε να συνεχίσει μέχρι την λεωφόρο I-82, να επηρεάσει κατοικίες δυτικά του λατομείου, ακόμα και να φτάσει στον ποταμό Yakima. Αυτά τα σενάρια όπως προαναφέρθηκε είναι λιγότερο πιθανά και τα όργανα μέτρησης (GPS, σεισμόμετρα, αεροφωτογραφίες, Lidar) θα καταγράψουν προειδοποιητικά σημάδια, δίνοντας τη δυνατότητα για έγκαιρο προγραμματισμό και διαχείριση αυτής της κατάστασης. Υπάρχουν ήδη σχέδια δράσης σε περίπτωση που εμφανιστούν αυτές οι υποδείξεις. Οι εργασίες του λατομείου έχουν σταματήσει και μεγάλα container γεμισμένα με τσιμεντόλιθους έχουν τοποθετηθεί στη νοτιοδυτική γωνία της κατολίσθησης, κατά μήκος της οδού Thord για να εμποδίσουν τις πτώσεις βράχων στη λεωφόρο I-82. Τέλος ο δήμος της Yakima έχει κλείσει τον δρόμο Thord και έχει προγραμματίσει την παράκαμψη της λεωφόρου I-82 μέσω νέων δρόμων (<https://www.dnr.wa.gov/rattlesnake-hills-landslide>, 13/06/2018).



Εικόνα 22. Όρια της κατολίσθησης στη Yakima (Πηγή: Washington Geological Survey, 2018).



Εικόνα 23. Ρωγμές που δημιουργήθηκαν στην πλαγιά λόγω της κατολίσθησης (Πηγή: <https://www.seattletimes.com/seattle-news/residents-below-slow-moving-landslide-near-yakima-wont-evacuate-as-crack-widens-officials-say/>, 25/8/2018).

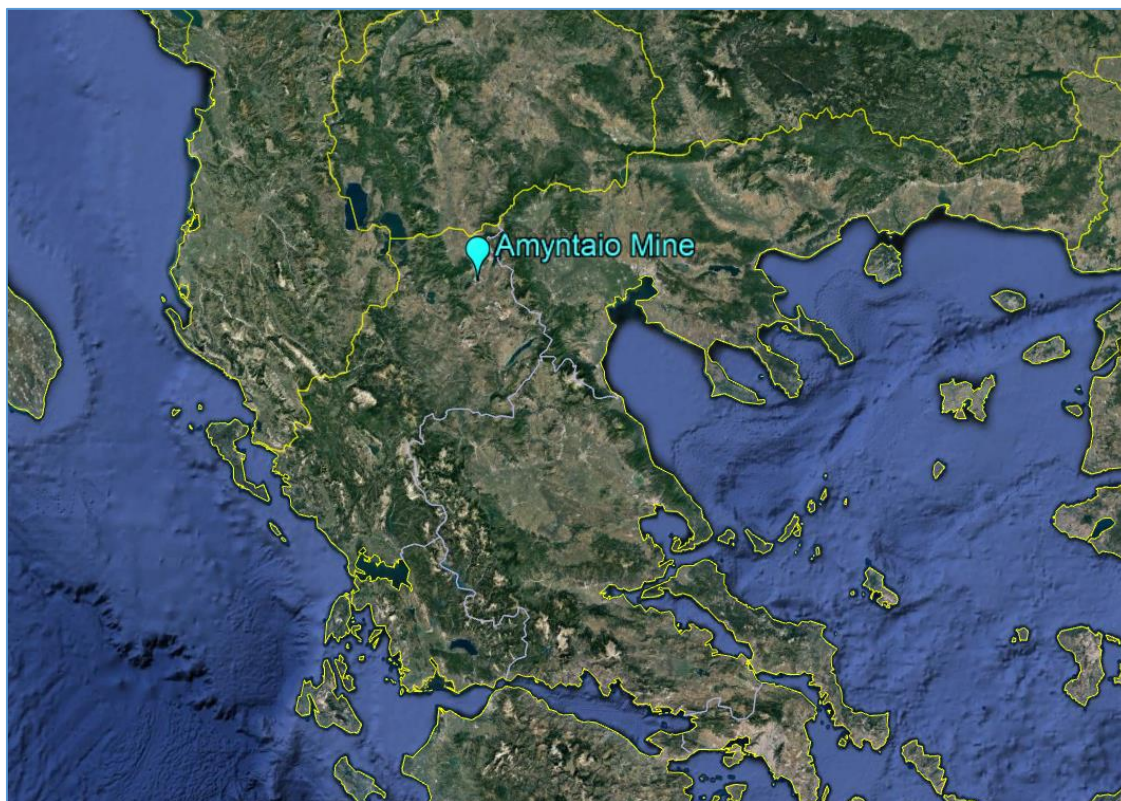


Εικόνα 24. Το λατομείο της Yakima (Πηγή: <https://geotechpedia.com/News/Show/1279/Huge-ridge-cracks-near-Yakima-prompts-evacuation-warning>, 25/8/2018).

10.3. ΑΜΥΝΤΑΙΟ, ΕΛΛΑΔΑ

10.3.1. ΓΕΝΙΚΑ

Το ορυχείο λιγνίτη βρίσκεται στην περιοχή του Δήμου Αμυνταίου στο νοτιοδυτικό τμήμα του νομού Φλώρινας, στην περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας και ξεκίνησε την λειτουργία του το 1989. Οι περιοχές μελέτης είναι δύο στην συγκεκριμένη περίπτωση. Η πρώτη είναι το δυτικό τμήμα του ορυχείου στο οποίο συνέβη μια καταστροφική κατολίσθηση και η δεύτερη είναι η περιοχή εξωτερικών αποθέσεων νοτιοδυτικά του ορυχείου και νοτιοανατολικά του κοντινότερου χωριού που είναι οι Ανάργυροι (<https://www.dei.gr/el/oruxeia/ptolemaida-amuntaio>, 18/6/2018). Η ευρύτερη περιοχή του δήμου Αμυνταίου χαρακτηρίζεται ως ορεινή – ημιορεινή. Δυτικά του ορυχείου βρίσκεται η λίμνη Ζάζαρη και νοτιοδυτικά η λίμνη Χειμαδίτιδα. Η Ζάζαρη έχει έκταση 2.000 στρέμματα και μέσο βάθος 4,6 m. Τροφοδοτείται από το μικρό ποτάμι του Σκλήθρου που πηγάζει από το Βέρνο και αυτή με την σειρά της τροφοδοτεί την γειτονική της λίμνη Χειμαδίτιδα (<http://www.naturagraeca.com/ws/129,191,65,1,1,Λίμνη-Ζάζαρη>, 18/6/2018), η οποία έχει έκταση 9.600 στρέμματα και το μέσο βάθος της είναι 1 μέτρο. Οι δύο λίμνες ανήκουν στο δίκτυο Natura 2000 (<http://www.naturagraeca.com/ws/129,191,129,1,1,Λίμνη-Χειμαδίτιδα>, 18/6/2018).



Εικόνα 25. Η θέση του ορυχείου του Αμυνταίου (Πηγή: Google Earth).

Η λιθολογία της περιοχής αποτελείται πετρώματα παλαιοζωικής εποχής, από ένα ανθρακικό κάλυμμα μεσοζωικής εποχής, από νεογενή ιζήματα, τεταρτογενείς αποθέσεις και τέλος από πιο πρόσφατες αποθέσεις όπως ασβεστολιθικοί σχηματισμοί. Στη λεκάνη του Αμύνταιου εντοπίζονται τρεις κύριες τεκτονικές γραμμές (Tzampoglou and Loupasakis, 2017):

1. Ρήγμα Πετρών - Ξινού Νερού - Αετού: Συνορεύει με το βορειοδυτικό άκρο της υπολεκάνης Χειμαδίτιδας – Πετρών και διαχωρίζει την λεκάνη της Φλώρινας από την λεκάνη Αμύνταιου – Πτολεμαΐδας. Το συνολικό του μήκος υπερβαίνει τα 30 km και η διεύθυνση του είναι ΒΑ-ΝΔ.
2. Ρήγμα Βεγορίτιδας: Ξεκινά στην βόρεια πλευρά της λίμνης. Εκτείνεται με διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ και το μήκος του είναι περίπου 9 km. Πρόκειται για ένα τυπικό ρήγμα νεοτεκτονικής δραστηριότητας.
3. Ρήγμα Χειμαδίτιδας – Ανάργυρων: έχει την ίδια διεύθυνση με το ρήγμα Βεγορίτιδας, συνολικό μήκος 10 km, διασχίζει το χωριό Ανάργυροι και συνορεύει με τη λίμνη Χειμαδίτιδα στα νοτιοδυτικά. Το ρήγμα εντοπίστηκε στις πλαγιές του ορυχείου του Αμύνταιου.



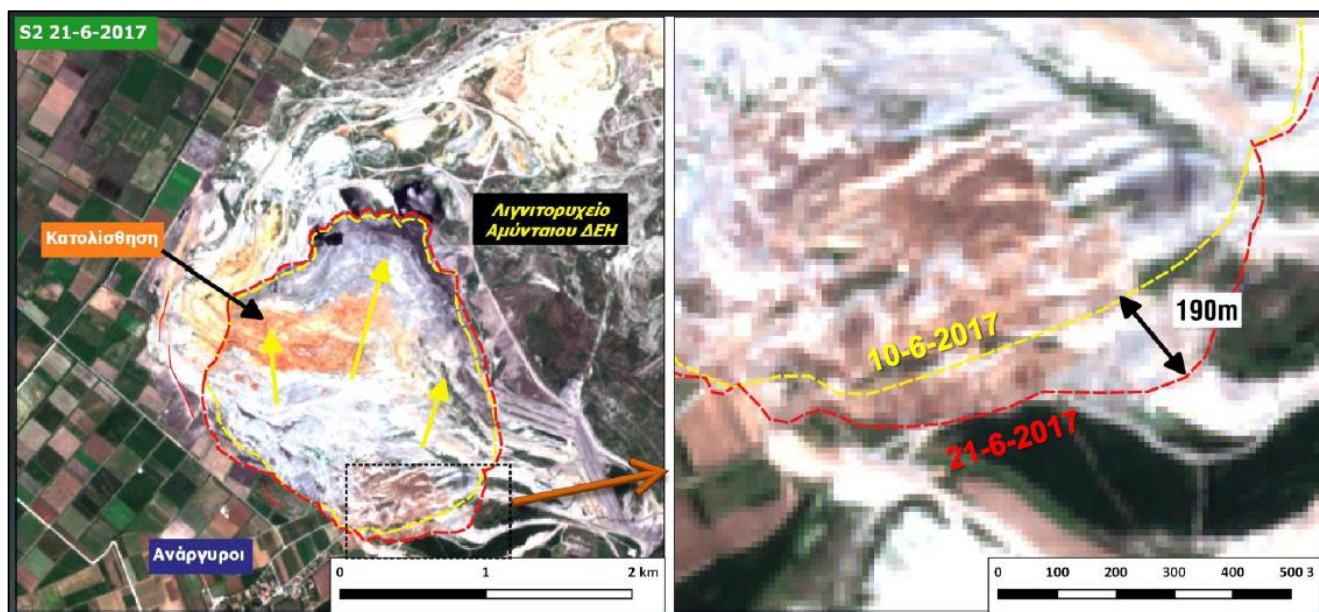
Εικόνα 26. Ρήγματα στο Αμύνταιο (Πηγή: Δημητρακόπουλος, 2001).

10.3.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ

Στις 10 Ιουνίου 2017 έγινε μια κατολίσθηση στη δυτική πλευρά του ορυχείου. Όγκοι χωμάτων 80 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων μετακινήθηκαν με αποτέλεσμα ολόκληρη η περιοχή να τεθεί σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης (<http://www.cnn.gr/news/ellada/story/84413/amyntaio-allaxe-o-xartis-meta-tin-katolisthisi-anagkastiki-apallotriosi-oikismoy-pics-vid>, 18/6/2018). Παράγοντες που τη δημιούργησαν είναι οι εξής (<http://www.cnn.gr/news/ellada/story/95631/ayto-einai-to-porisma-gia-tin-katolisthisi-sto-oryxeio-amyntaioy>, 18/6/2018):

1. Συνδυασμός της στροφικής λειτουργίας του δυτικού τμήματος του ΝΔ πρανούς και της μέσης κλίσης βύθισης της βάσης των λιγνιτικών στρώσεων προς τα ΒΔ.
2. Ενεργοποίηση των δύο ρηγμάτων της Βεγορίτιδας και, κυρίως, των Αναργύρων.
3. Πλήρωση με νερό της σημαντικής ρωγμής που εμφανίστηκε στις 15-05-2017 στη στέψη του δυτικού τμήματος του ΝΔ πρανούς και επεκτάθηκε στο σύνολο της στέψης του πρανούς.

Η καταστροφική κατολίσθηση προκάλεσε ζημιές στον εξοπλισμό της ΔΕΗ. Σκέπασε με χώμα 4 καδοφόρους εκσκαφείς καθώς και ένα σημαντικό τμήμα του κοιτάσματος λιγνίτη το οποίο πλέον δεν είναι απολήψιμο. Τα αποθέματα του ορυχείου πριν την κατολίσθηση ήταν περίπου 30 εκατ. τόνοι, ενώ οι εργασίες είχαν διακοπεί μια βδομάδα καθώς είχαν καταγραφεί πρόδρομα φαινόμενα (<http://www.cnn.gr/news/ellada/story/95631/ayto-einai-to-porisma-gia-tin-katolisthisi-sto-oryxeio-amyntaioy>, 18/6/2018). Μεγάλες ήταν οι ζημιές στα σπίτια του χωριού Ανάργυροι το οποίο εγκατέλειψαν οι κάτοικοί του καθώς και στα δίκτυα ηλεκτροδότησης και ύδρευσης (<http://www.iefimerida.gr/news/343519/i-katolisthisi-ton-80-ekat-kyvikon-homatos-allaxe-ton-harti-sto-amyntaio-aerofotografies>, 18/6/2018). Η δεύτερη περίπτωση εδαφικής μετακίνησης αφορά την περιοχή εξωτερικών αποθέσεων του ορυχείου που βρίσκεται νοτιοδυτικά του ορυχείου και νοτιοανατολικά του χωριού Ανάργυροι.



Εικόνα 27. Όρια της κατολίσθησης του ορυχείου του Αμυνταίου. Η έκταση της κατολίσθησης αυξήθηκε κατά το διάστημα 10-21 Ιουνίου μέχρι και 190 m (Πηγή: Valkaniotis et al., 2017).



Εικόνα 28. Όρια της περιοχής εξωτερικών αποθέσεων του ορυχείου που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη (Πηγή: Google Earth).



Εικόνα 29. Η καταστροφική κατολίσθηση του ορυχείου (Πηγή: <http://www.thetoc.gr/best-of-internet/article/deite-ti-prokalese-ti-bibliki-katolisthisi-sto-amuntaio>, 25/8/2018).



Εικόνα 30. Η κατολίσθηση και ο οικισμός Ανάργυροι (Πηγή: <http://www.thetoc.gr/best-of-internet/article/deite-ti-prokalese-ti-bibliki-katolisthisi-sto-amuntaio>, 25/8/2018).

11. ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι επτά εικόνες Sentinel-2, επτά εικόνες PlanetScope και δύο ψηφιακά μοντέλα εδάφους ASTER. Ακολουθούν λεπτομέρειες και χαρακτηριστικά των εικόνων με βάση το δορυφορικό σύστημα:

11.1. SENTINEL-2

STUDY AREA	DATE / TIME	SATELLITE	PRODUCT LEVEL	TEMPORAL SEPARATION (DAYS)	SOURCE
PONZANO (ITALY)	2017-01-01 / 10:04:12	Sentinel 2A	Level - 1C	60	Scihub (ESA)
	2017-03-02 / 10:00:21	Sentinel 2A			
YAKIMA (U.S.A)	2017-10-05 / 19:02:29	Sentinel 2B	Level - 1C	197	Scihub (ESA)
	2018-04-20 / 18:49:19	Sentinel 2B			
AMYNTAIO (GREECE)	2017-06-01 / 09:30:41	Sentinel 2A	Level - 1C	20	Scihub (ESA)
	2017-06-21 / 09:30:31	Sentinel 2A			
	2017-09-16 / 09:20:31	Sentinel 2A		107 (01 June - 16 September)	

Πίνακας 2. Δεδομένα Sentinel-2 (Πηγή: <https://scihub.copernicus.eu/>)

11.2. PLANETSCOPE

STUDY AREA	DATE / TIME	SATELLITE ID	PRODUCT TYPE	TEMPORAL SEPARATION (DAYS)	SOURCE
PONZANO (ITALY)	2016-09-28 / 09:07:10	0e2f	PSScene3Band	154	Planet
	2017-03-01 / 09:11:35	0e16			
YAKIMA (U.S.A)	2017-10-15 / 18:14:39	100b	PSScene3Band	187	Planet
	2018-04-20 / 18:22:20	102e			
AMYNTAIO (GREECE)	2017-05-31 / 08:34:07	0f43	PSOrthoTile	21	Planet
	2017-06-21 / 08:35:17	1005			
	2017-09-17 / 08:42:29	0e0e		109 (31 May - 17 September)	

Πίνακας 3. Δεδομένα PlanetScope (Πηγή: <https://www.planet.com/products/planet-imagery/>)

11.3. ASTER

STUDY AREA	DATE	SENSOR	PRODUCT TYPE	SOURCE
PONZANO (ITALY)	2011-10-17	ASTER	DEM	USGS Earthexplorer
YAKIMA (U.S.A)	2011-10-17	ASTER	DEM	USGS Earthexplorer

Πίνακας 4. Δεδομένα ASTER (Πηγή: <https://earthexplorer.usgs.gov/>)

Ο λόγος που δεν χρησιμοποιήθηκε DEM για τη μεγάλη κατολίσθηση του ορυχείου του Αμυνταίου είναι διότι το DEM δημιουργήθηκε το 2011 και από τότε το ορυχείο έχει αλλάξει σε τεράστιο βαθμό το μέγεθος και το σχήμα του. Επομένως δεν θα αντιπροσώπευε την πραγματική επιφάνεια του. Για τον ίδιο λόγο δεν χρησιμοποιήθηκε και στη δεύτερη περιοχή μελέτης καθώς αποτελεί χώρο εξωτερικών αποθέσεων του ορυχείου, κάτι που σημαίνει πως η επιφάνεια πιθανώς να έχει αλλάξει σημαντικά λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας και της συστηματικής απόθεσης υλικών.

12. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

12.1. SNAP

Το SNAP είναι ένα δωρεάν λογισμικό ανοικτού κώδικα το οποίο αναπτύσσεται από την ESA. Περιλαμβάνει διάφορες εργαλειοθήκες για την μελέτη εικόνων τηλεπισκόπησης. Για τη αποκοπή των περιοχών μελέτης από τις δορυφορικές εικόνες χρησιμοποιήθηκε το Sentinel-2 toolbox, το οποίο περιλαμβάνει ένα πλήθος εργαλείων απεικόνισης και επεξεργασίας οπτικών προϊόντων υψηλής ανάλυσης στα οποία περιλαμβάνεται ο αισθητήρας MSI του Sentinel-2. Παράλληλα χρησιμοποιείται για διάφορες αποστολές και παρέχει υποστήριξη διάφορων δεδομένων από διαφορετικά δορυφορικά συστήματα όπως RapidEye, SPOT, MODIS (Aqua and Terra), Landsat και άλλα (<http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox/>, 18/6/2018). Η αρχιτεκτονική της εργαλειοθήκης είναι ιδανική για την επεξεργασία και ανάλυση λόγω των ακόλουθων τεχνολογικών καινοτομιών (<http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>, 18/6/2018):

- Επεκτασιμότητα
- Φορητότητα
- Modular Rich Client Platform
- Generic EO Abstraction Data
- Διαχείριση πλακιδίων μνήμης
- Πλαίσιο επεξεργασίας γραφημάτων

12.2. ENVI

Το λογισμικό ENVI χρησιμοποιείται από επαγγελματίες χρήστες GIS, από επιστήμονες τηλεπισκόπησης και από αναλυτές εικόνων για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών και για την καλύτερη λήψη αποφάσεων. Επιτρέπει την προσθήκη νέων αλγορίθμων, την επέκταση των υπαρχόντων εργαλείων και μοντέλων, την διαχείριση εργασιών υψηλής συχνότητας και το συνδυασμό πολλών εργαλείων ώστε να παραχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Το ENVI υποστηρίζει διάφορους τύπους δεδομένων όπως παγχρωματικές, πολυφασματικές και υπερφασματικές εικόνες, δεδομένα LiDAR, SAR και FMV. Λειτουργεί με δεδομένα ανεξαρτήτου μεγέθους και διαθέτει αυτοματοποιημένα εργαλεία όπως: ανίχνευση αλλαγών, ανίχνευση ανωμαλιών, ανάλυση εικόνων και πολλά άλλα. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε για την ακριβή αγκίστρωση των δορυφορικών εικόνων με εδαφικά σημεία ελέγχου (<https://www.harrisgeospatial.com/SoftwareTechnology/ENVI.aspx>, 18/6/2018).

12.3. CIAS

Το CIAS είναι ένα απλό, δωρεάν λογισμικό που υπολογίζει μετατοπίσεις επιφάνειας παγετώνων μεταξύ δύο εικόνων. Αυτό γίνεται με βάση τον αλγόριθμο Normalized Cross Correlation ο οποίος αντιστοιχεί ομάδες εικονοστοιχείων μεταξύ δύο εικόνων με βάση τη ομοιότητα τους (<http://www.mn.uio.no/geo/english/research/projects/icemass/cias/>, 18/6/2018).

12.4. EXCEL

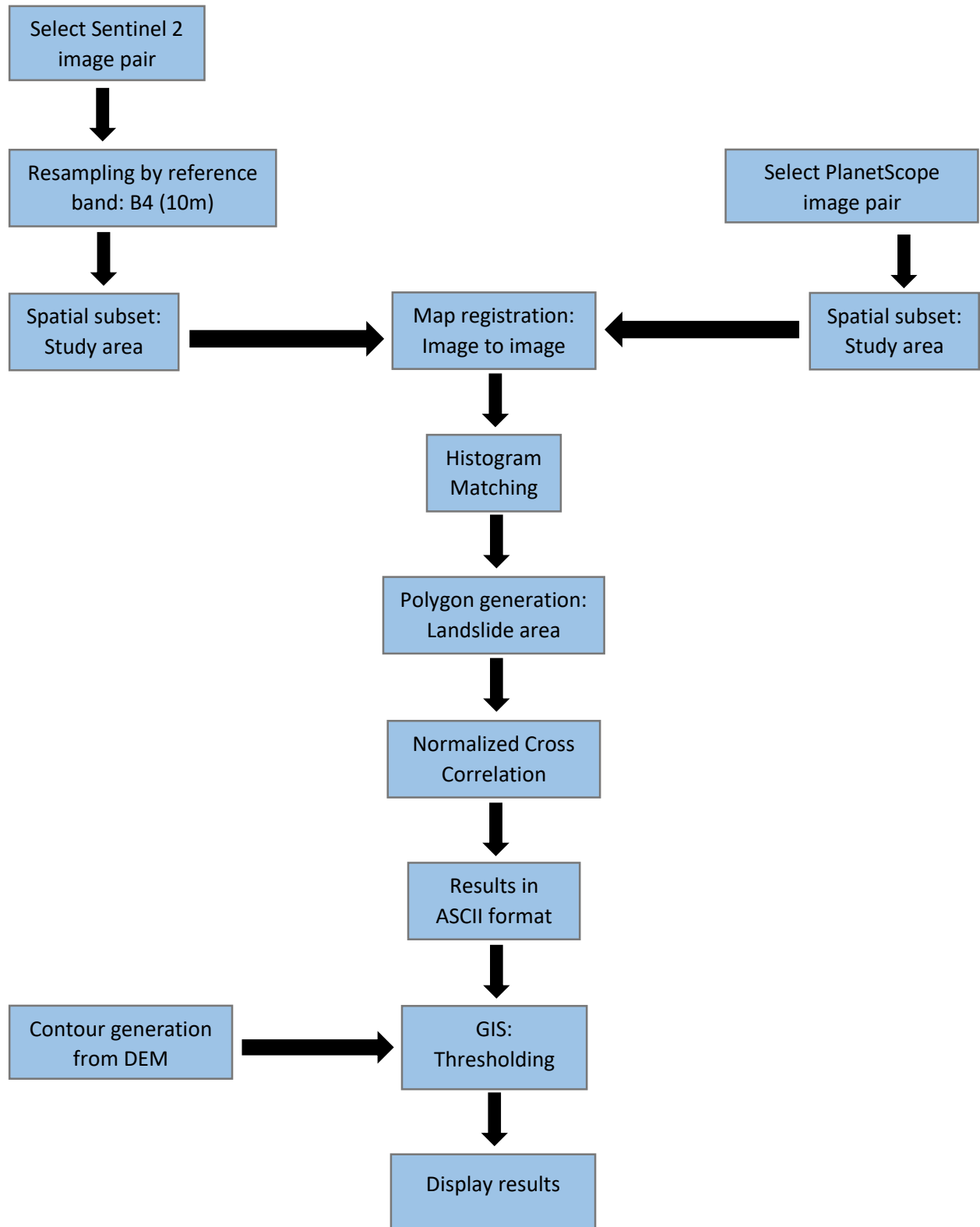
Το Excel είναι πρόγραμμα επεξεργασίας υπολογιστικών φύλλων που αναπτύχθηκε από τη Microsoft. Διαθέτει υπολογισμούς, εργαλεία γραφημάτων, συγκεντρωτικούς πίνακες και πολλές άλλες δυνατότητες. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε για την εισαγωγή των αποτελεσμάτων του CIAS σε στήλες, ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή τους στο ARCMAP (<https://products.office.com/el-gr/excel>, 14/8/2018).

12.5. ARCMAP

Το ARCMAP είναι ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία χαρτών και γεωγραφικών πληροφοριών. Παρέχει δυνατότητες πρόσβασης σε εικόνες και εξαγωγής πληροφοριών από αυτές, δημιουργίας και σχεδιασμού χαρτών και τρισδιάστατων σκηνών, ανάλυσης και διαχείρισης πληροφοριών. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας (<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>, 14/8/2018).

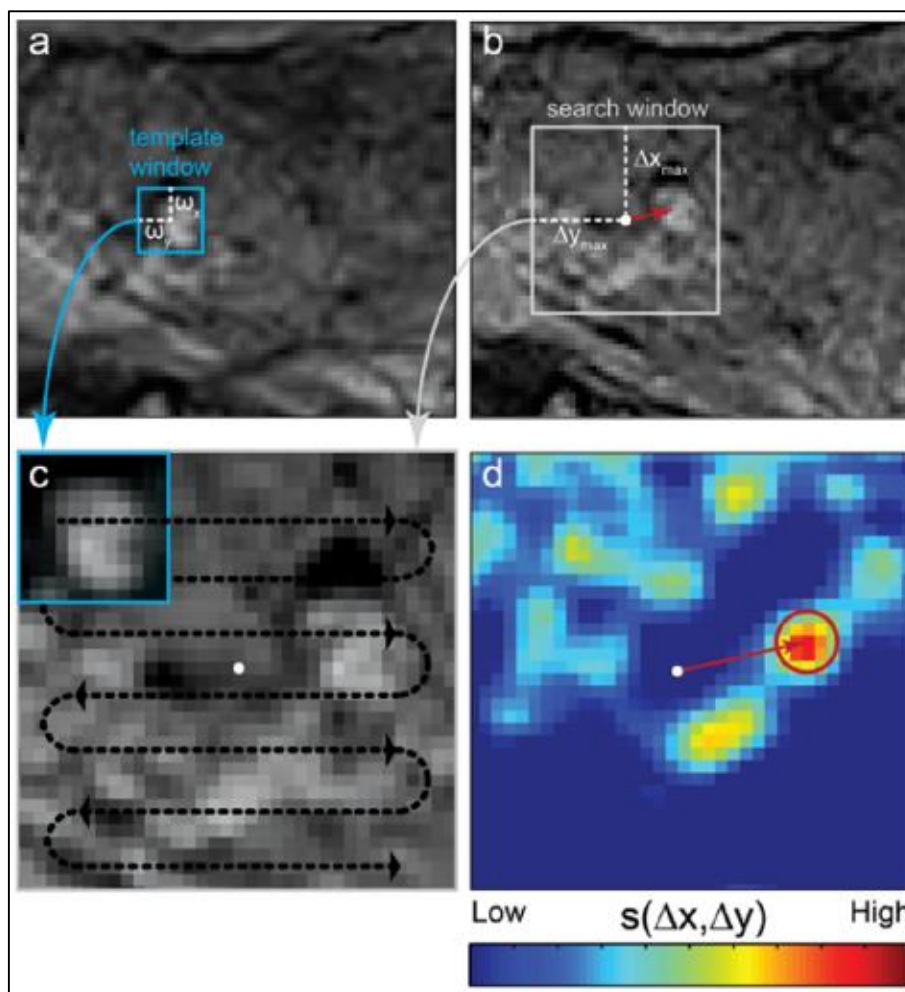
13. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο παρακάτω διάγραμμα ροής παρουσιάζονται τα βήματα της μεθοδολογίας:



Τα κυριότερα βήματα πάνω στα οποία βασίζεται η μεθοδολογία είναι δύο:

1. **Coregistration:** Η λειτουργία Coregistration ή αγκίστρωση ενώνει με ακρίβεια τα εικονοστοιχεία δύο εικόνων. Στη παρούσα μελέτη η διαδικασία αυτή γίνεται από τον ερευνητή χειρωνακτικά με την αναζήτηση των ίδιων εικονοστοιχείων στην παλαιότερη και νεότερη εικόνα αντίστοιχα και τοποθέτηση GCPs (Εδαφικών Σημείων Ελέγχου). Στη συνέχεια η νεότερη εικόνα διορθώνεται γεωμετρικά με βάση τα σημεία αυτά. Τα εικονοστοιχεία αναζητούνται σε περιοχές που έχουν παραμείνει σταθερές και όχι σε περιοχές που έχουν μετακινηθεί (Stumpf et al., 2016).
2. **Αντιστοίχιση ομάδων εικονοστοιχείων με βάση τον αλγόριθμο Normalized Cross-Correlation:** Η μέτρηση της μετατόπισης του εδάφους γίνεται με αντιστοίχιση ομάδων εικονοστοιχείων με βάση την ομοιότητα τους. Ο αλγόριθμος Normalized Cross-Correlation χρησιμοποιείται ευρέως για την διαδικασία αυτή. Αρχικά από την πρώτη εικόνα εξάγεται ένα πλαίσιο (a) με εικονοστοιχεία το οποίο καθορίζεται από τον ερευνητή. Το πλαίσιο αυτό αναζητείται σε μια περιοχή αναζήτησης (b) στη δεύτερη εικόνα, η οποία ορίζεται επίσης από τον ερευνητή. Αφού γίνει αναζήτηση με τη μορφή συρόμενου παράθυρου (c), η θέση που έχει τη μέγιστη ομοιότητα με το αρχικό πλαίσιο είναι και η θέση όπου αυτό έχει μετατοπισθεί (d) (Stumpf et al., 2016).



Εικόνα 31. Αντιστοίχιση ομάδων εικονοστοιχείων. Το πλαίσιο εικονοστοιχείων της παλαιότερης εικόνας αναζητείται στη περιοχή αναζήτησης της νεότερης εικόνας με τη μορφή συρόμενου παραθύρου και γίνεται αντιστοίχιση στη θέση με τη μέγιστη ομοιότητα $s(\Delta x, \Delta y)$ (Πηγή: Stumpf et al., 2016).

Γενικότερα παρόμοιες μεθοδολογίες που βασίζονται στο Coregistration μεταξύ δύο εικόνων και στον αλγόριθμο Normalized Cross-Correlation χρησιμοποιούνται για τις μελέτες παγετώνων. Ωστόσο στην εργασία αυτή γίνεται προσπάθεια εφαρμογής σε γεγονότα κατολισθήσεων. Ο λόγος είναι πως, όπως τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας ενός παγετώνα δεν αλλάζουν καθώς αυτός μετακινείται, έτσι και τα χαρακτηριστικά του εδάφους συγκεκριμένων τύπων κατολισθήσεων δεν αλλάζουν. Θεωρείται δηλαδή πως η κατολίσθηση συμπεριφέρεται ως ένας παγετώνας και τα χαρακτηριστικά του εδάφους είναι ίδια πριν και μετά τη μετακίνηση, απλώς μετατοπισμένα. Επομένως θεωρητικά είναι δυνατή η σωστή εφαρμογή της μεθοδολογίας. Εργασίες που χρησιμοποιούν παρόμοιες μεθοδολογίες για μελέτη παγετώνων και εδαφικών κινήσεων και στις οποίες βασίστηκε η παρούσα εργασία είναι οι εξής:

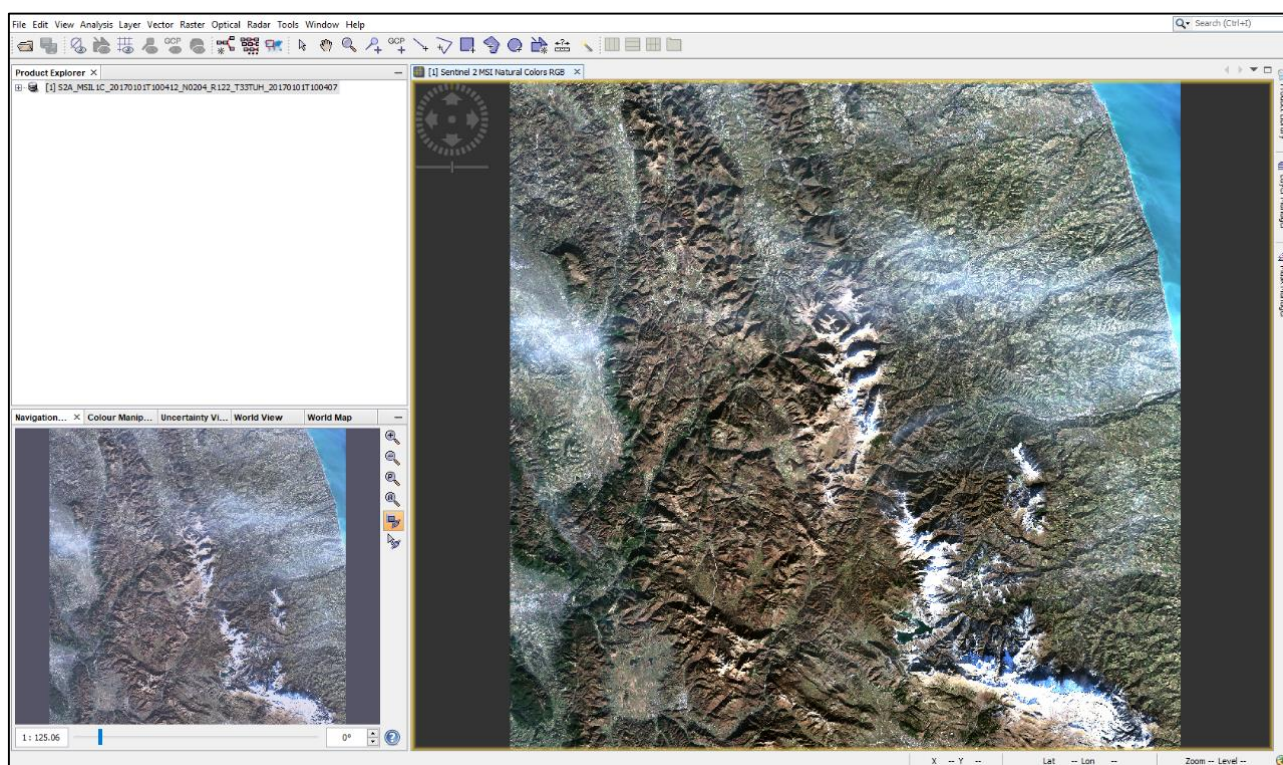
- Rockglacier kinematics derived from small-scale aerial photography and digital airborne pushbroom imagery (Roer et al., 2005).
- Remote Sensing of Mountain Glaciers and Permafrost Creep (Kääb et al., 2006)
- Surface elevation change and high resolution surface velocities for advancing outlets of Jostedalsbreen (Wangenstein et al., 2006).
- Surface displacements and surface age estimates for creeping slope landforms in Northern and Eastern Iceland using digital photogrammetry (Wangenstein et al., 2006).
- Coseismic displacements of the 14 November 2016 Mw 7.8 Kaikoura, New Zealand, earthquake using the Planet optical cubesat constellation (Kääb et al., 2017).
- Improved Co-Registration of Sentinel-2 and Landsat-8 Imagery for Earth Surface Motion Measurements (Stumpf et al., 2018).
- Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part I: Radiometric and Geometric Performance, and Application to Ice Velocity (Kääb et al., 2016).
- Rock glacier dynamics: implications from high-resolution measurements of surface velocity fields (Kääb et al., 2003).
- Monitoring of Earth Surface Motion and Geomorphologic Processes by Optical Image Correlation (Stumpf et al., 2016).

14. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Αρχικά γίνεται αναζήτηση των κατάλληλων εικόνων για τις περιοχές μελέτης πριν και μετά τα γεγονότα κατολισθήσεων. Ο κυριότερος παράγοντας στην αναζήτηση είναι να μην υπάρχει καθόλου κάλυψη από σύννεφα. Μετά την εύρεση των εικόνων ξεκινάει η προ-επεξεργασία τους η οποία γίνεται σε διαφορετικά λογισμικά ανάλογα με το δορυφορικό σύστημα. Για τις εικόνες των δορυφόρων Sentinel-2 η προ-επεξεργασία γίνεται στο λογισμικό SNAP ενώ για τις εικόνες των δορυφόρων PlanetScope η προ-επεξεργασία γίνεται στο λογισμικό ENVI.

14.1. ΠΡΟ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ SENTINEL-2

Γίνεται εισαγωγή της πρώτης εικόνας (πριν την κατολίσθηση) στο λογισμικό SNAP: Import / Optical Sensors / Sentinel-2 / S2-MSIL1C.

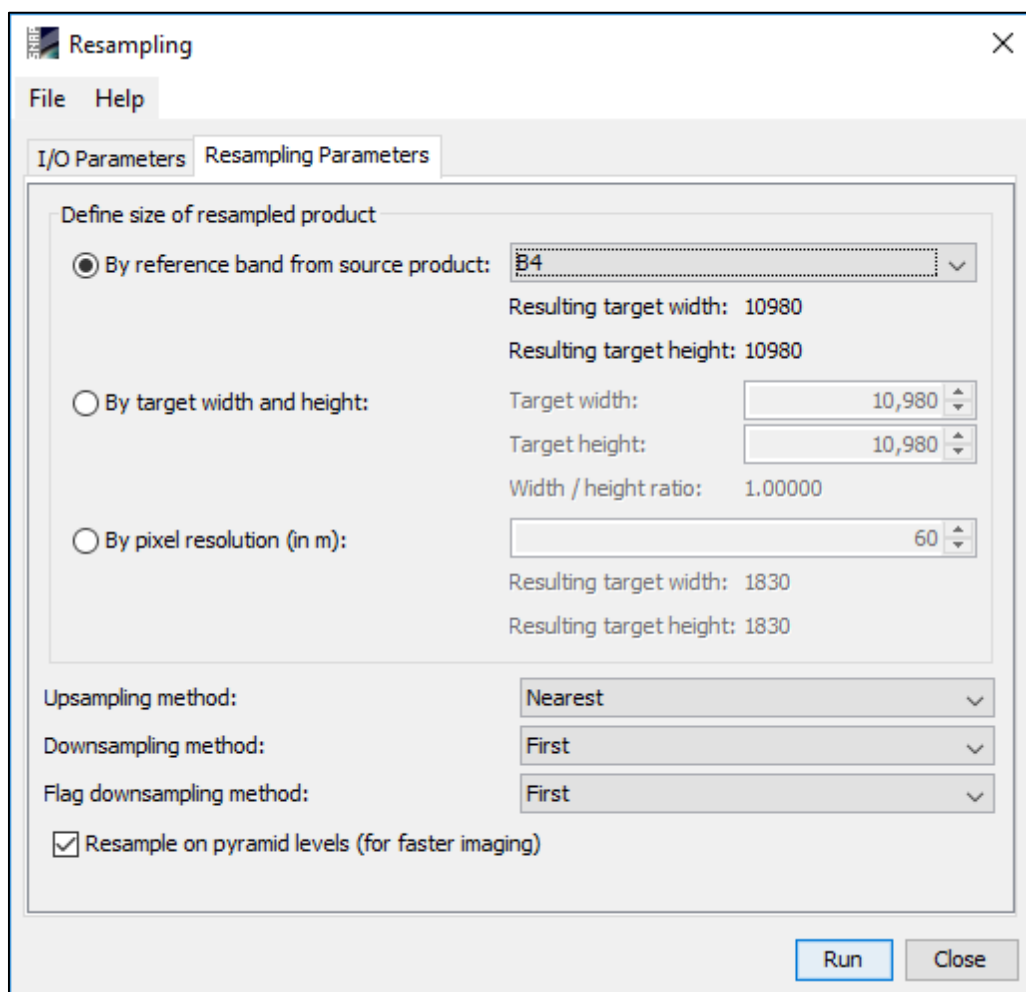


Εικόνα 32. Περιβάλλον εργασίας του λογισμικού SNAP. Έχει γίνει Import της δορυφορικής εικόνας της Ιταλίας πριν την κατολίσθηση.

Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία resampling με παράμετρο το φασματικό κανάλι 4 που αντιστοιχεί στο κόκκινο του ορατού: Raster / Geometric Operations / Resampling / by reference band: B4. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι διότι τα προϊόντα του Sentinel-2 περιέχουν 13 φασματικά κανάλια που δεν έχουν όλα την ίδια χωρική ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα:

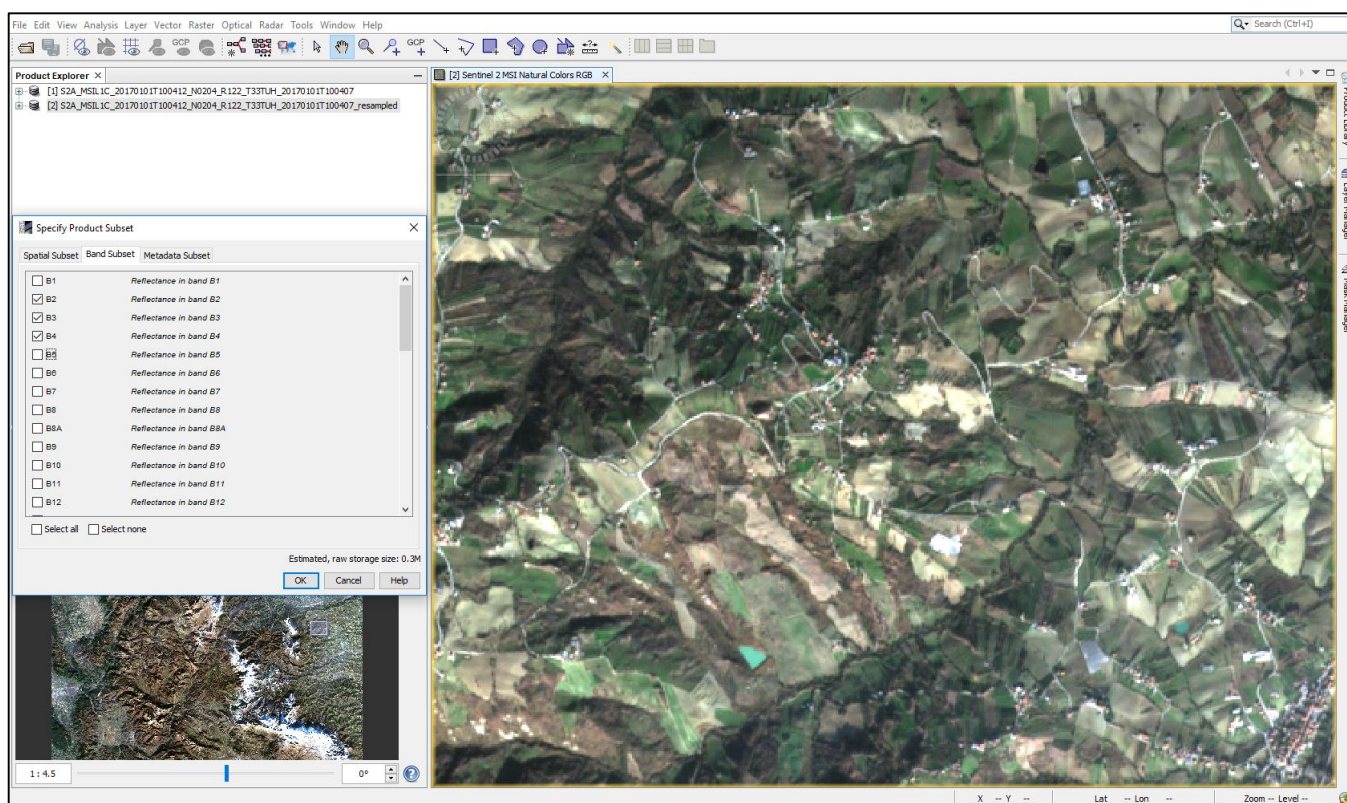
- Τα 4 κανάλια (Band 2, Band 3, Band 4, Band 8) έχουν χωρική ανάλυση 10 m.
- Τα 6 κανάλια (Band 5, Band 6, Band 7, Band 8a, Band 11, Band 12) έχουν χωρική ανάλυση 20 m.
- Τα 3 κανάλια (Band 1, Band 9, Band 10) έχουν χωρική ανάλυση 60 m.

Προκειμένου να γίνει αποκοπή της περιοχής μελέτης από ολόκληρη την εικόνα, το λογισμικό απαιτεί να έχουν όλα τα φασματικά κανάλια την ίδια χωρική ανάλυση κάτι που επιτυγχάνεται με τη διαδικασία resampling. Εφόσον η μελέτη γίνεται με τα οπτικά κανάλια, επιλέγουμε ως παράμετρο το κανάλι 4 (κόκκινο) που έχει 10 m χωρική ανάλυση.



Εικόνα 33. Παράθυρο της λειτουργίας Resampling. Έχει οριστεί ως παράμετρος το κανάλι 4.

Στη συνέχεια γίνεται εστίαση στη περιοχή μελέτης και αποκοπή αυτής από την υπόλοιπη εικόνα στα τρία κανάλια του οπτικού φάσματος: Spatial subset from view/ Band subset: Band 2, Band 3, Band 4. Αποτέλεσμα είναι να έχουμε εικόνες της περιοχής μελέτης στα φασματικά κανάλια του κόκκινου, πράσινου και μπλε. Τέλος εξάγονται σε μορφή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο επόμενο λογισμικό ENVI: Export / ENVI. Η παραπάνω διαδικασία ακολουθείται και για την δεύτερη εικόνα Sentinel-2, μετά την κατολίσθηση και οι δύο εικόνες εισάγονται στο λογισμικό ENVI.



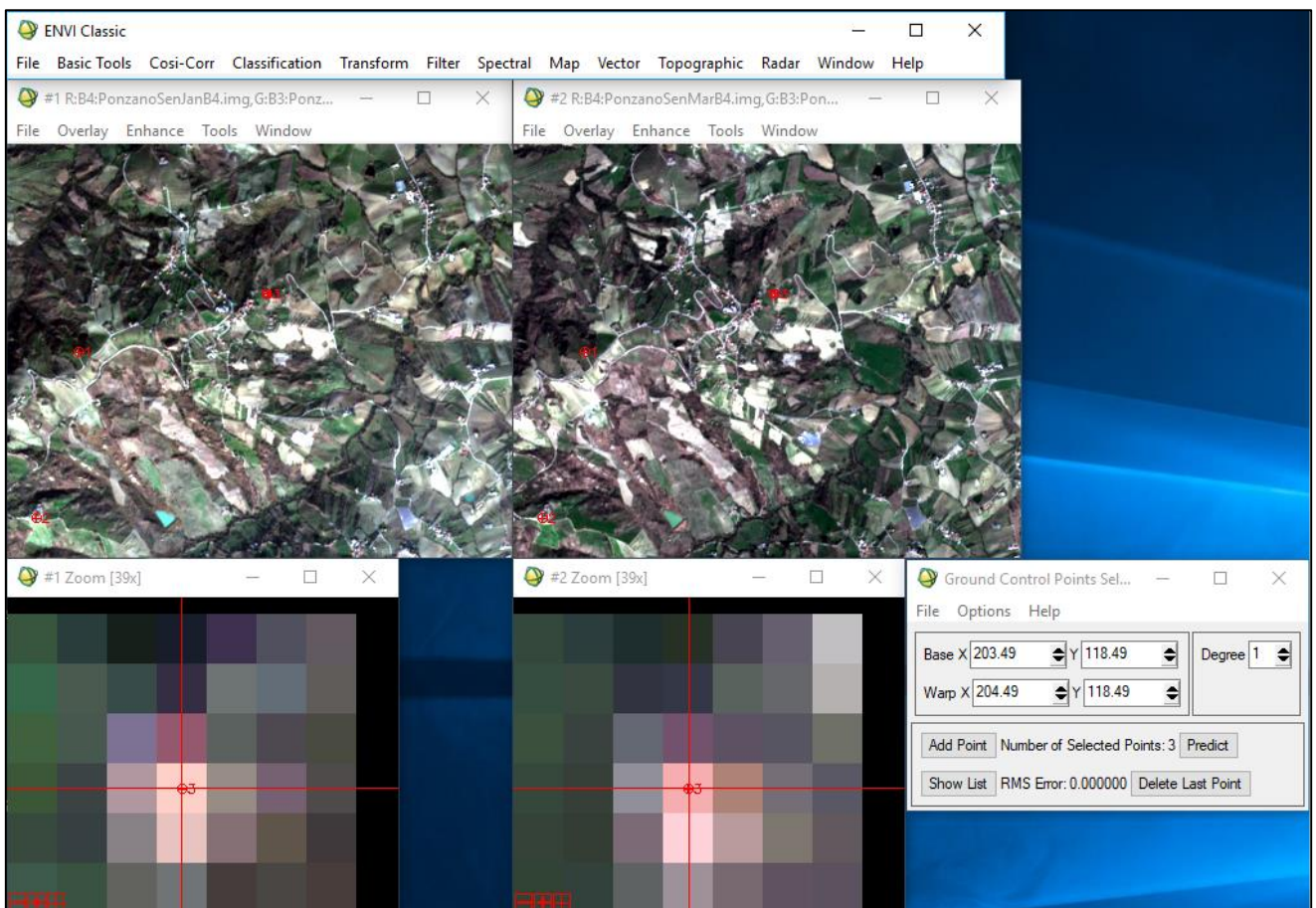
Εικόνα 34. Εστίαση στην περιοχή μελέτης και αποκοπή της στα κανάλια RGB.

14.2. ΠΡΟ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ PLANETSCOPE

Εισάγονται οι δύο εικόνες πριν και μετά το γεγονός κατολίσθησης στο λογισμικό ENVI: File / Open Image File / Available Bands List / RGB Color / Bands:3, 2, 1 και γίνεται εστίαση στην περιοχή μελέτης. Ακολουθεί αποκοπή της: Basic Tools / Resize Data / Spatial Subset:Image και άνοιγμα των νέων εικόνων που δημιουργήθηκαν στο λογισμικό.

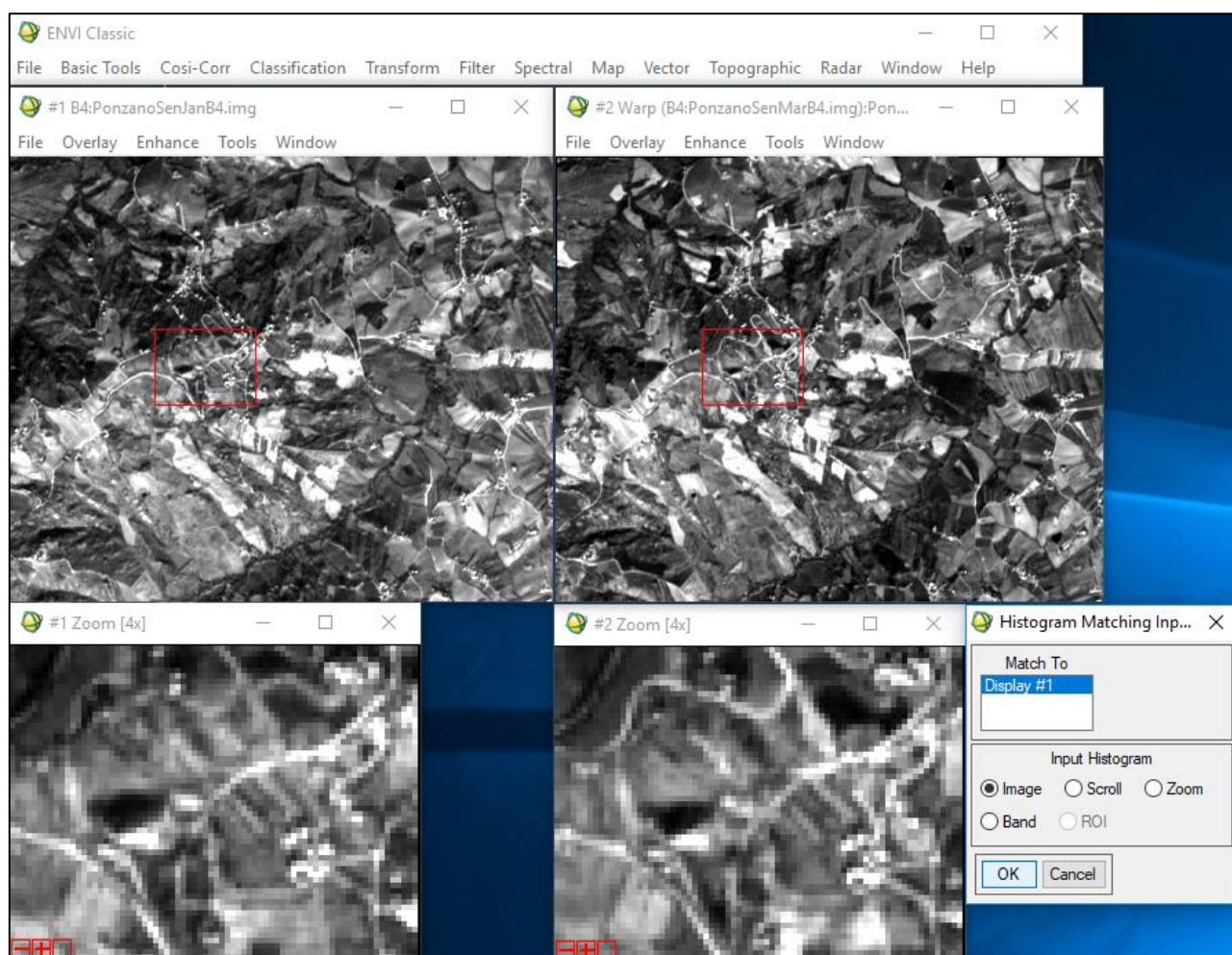
14.3. COREGISTRATION / HISTOGRAM MATCHING

Μετά την εισαγωγή των εικόνων στο ENVI, ακολουθεί το πρώτο πολύ σημαντικό κομμάτι της επεξεργασίας, το οποίο ονομάζεται coregistration ή αγκίστρωση των δύο εικόνων. Αναλυτικότερα γίνεται αγκίστρωση της νεότερης εικόνας πάνω στην παλαιότερη με τη χρήση σημείων εδαφικού ελέγχου: Map / Registration / Select GCPs / Image to image. Σε όλες τις περιπτώσεις επιλέγονται 10 σημεία γύρω από την περιοχή της κατολίσθησης. Είναι απαραίτητο τα σημεία να βρίσκονται σε περιοχές γύρω από την κατολίσθηση, δηλαδή σε σταθερό έδαφος καθώς η αγκίστρωση σημείων τα οποία έχουν μετακινηθεί είναι προφανώς λάθος, αλλοιώνει την εικόνα και βγάζει λάθος αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό είναι πολύ σημαντική η γνώση των ορίων της κατολίσθησης από άλλες πηγές πριν ξεκινήσει η μελέτη. Σε όλες τις περιπτώσεις η αγκίστρωση γίνεται με πολύ μεγάλη ακρίβεια, κάτι που φαίνεται και από τα RMSE (Root Mean Square Error) που είναι σχεδόν μηδενικά. Οι παράμετροι που επιλέγονται για την αγκίστρωση είναι: Method: Polynomial / Degree: 2 / Resampling: Nearest Neighbor.



Εικόνα 35. Διαδικασία coregistration με GCPs στο λογισμικό ENVI.

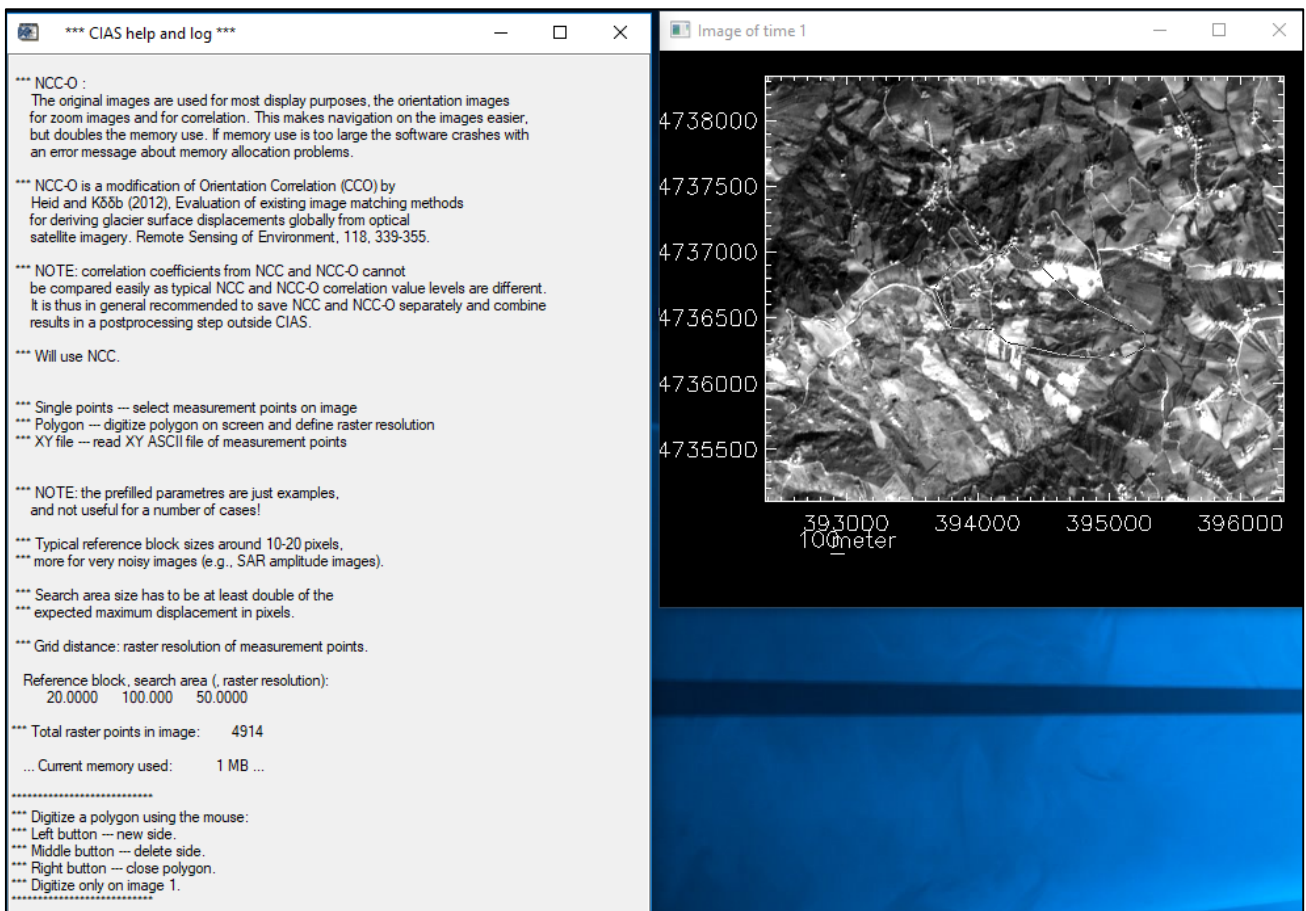
Μέχρι αυτό το σημείο χρησιμοποιούνται έγχρωμες εικόνες για την ευκολότερη αναγνώριση χαρακτηριστικών σημείων για την αγκίστρωση. Ωστόσο λόγω περιορισμένων δυνατοτήτων του επόμενου λογισμικού CIAS, οι εικόνες που χρησιμοποιούνται από το σημείο αυτό και μετά είναι μονοχρωματικές και πιο συγκεκριμένα το κανάλι του κόκκινου ορατού. Ακολουθεί η λειτουργία Histogram Matching. Ο λόγος είναι πως οι δύο εικόνες έχουν ληφθεί σε διαφορετικούς μήνες και επομένως οι συνθήκες φωτισμού από τον ήλιο είναι διαφορετικές: Enhance / Histogram Matching. Έτσι το εύρος τιμών των εικονοστοιχείων της νεότερης εικόνας γίνεται ίσο με το εύρος τιμών της παλαιότερης εικόνας. Ακολουθεί η αποθήκευση των εικόνων σε μορφή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο λογισμικό CIAS: Save image as:Tiff / Geotiff.



Εικόνα 36. Διαδικασία Histogram Matching για τις δύο μονοχρωματικές εικόνες στο λογισμικό ENVI.

14.4. NORMALIZED CROSS CORRELATION

Ακολουθεί το επόμενο πολύ σημαντικό κομμάτι της μεθοδολογίας όπου γίνεται υπολογισμός της μετακίνησης του εδάφους. Αναλυτικότερα, γίνεται εισαγωγή των δύο μονοχρωματικών αγκιστρωμένων εικόνων που θέλουμε να μελετήσουμε στο λογισμικό CIAS. Το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα αγκιστρώσεως των εικόνων, ωστόσο λόγω της ευελιξίας και της εύκολης χρήσης του ENVI, όλες οι αγκιστρώσεις εικόνων γίνονται εκεί και συνεπώς το βήμα αυτό παραλείπεται: Measure WITHOUT co-registration. Επιλέγεται ο αλγόριθμος: NCC (Normalized Cross-Correlation). Στη συνέχεια παρέχονται τρεις επιλογές. Η πρώτη είναι η τοποθέτηση σημείων πάνω στην παλαιότερη εικόνα χειρωνακτικά από τον ερευνητή, ώστε το πρόγραμμα να υπολογίσει την μετακίνηση τους. Η δεύτερη είναι η σχεδίαση ενός πολυγώνου πάνω στα όρια της κατολίσθησης, δημιουργώντας ένα πλέγμα σημείων μέσα σε αυτό για τα οποία το πρόγραμμα θα μετρήσει το πώς μετακινήθηκαν. Και η τρίτη επιλογή είναι να εισάγει ο ερευνητής ένα αρχείο με σημεία με συντεταγμένες XY και το λογισμικό να υπολογίσει την μετατόπιση τους. Γίνεται επιλογή πολυγώνου: Polygon σε όλες τις περιπτώσεις και σχεδίαση του πάνω ακριβώς στα όρια των κατολισθήσεων με βάση άλλες πηγές και μελέτες.



Εικόνα 37. Περιβάλλον του λογισμικού CIAS και δημιουργία πολυγώνου της κατολίσθησης.

Ο υπολογισμός γίνεται με τέσσερις παραμέτρους που ορίζονται από τον ερευνητή. Η πρώτη παράμετρος είναι το μέγεθος του πλαισίου της παλαιότερης εικόνας που θα αναζητηθεί στην νεότερη: Reference block size. Η δεύτερη παράμετρος είναι η περιοχή αναζήτησης: Search area size, δηλαδή ένα πλαίσιο στη νεότερη εικόνα μέσα στο οποίο θα γίνει η αναζήτηση του Reference block. Η τρίτη παράμετρος είναι η απόσταση που θα έχουν τα σημεία μεταξύ τους μέσα στο πολύγωνο: Grid distance ή πιο απλά το πόσο πυκνά ή αραιά θα είναι τα σημεία μέσα στο πολύγωνο. Η τέταρτη παράμετρος είναι η ταχύτητα που επιθυμεί ο ερευνητής να έχουν οι υπολογισμοί και παρέχονται δύο επιλογές: NORMAL (1st full resolution, 2nd 1/8 pixel) και FAST (1st 25% resolution, 2nd 1/8 pixel). Σε όλες τις περιπτώσεις έγινε η επιλογή: NORMAL. Όλες αυτές οι παράμετροι ορίζονται από τον ερευνητή ανάλογα με το πόσα σημεία θέλει να μελετήσει και το πόσο εκτιμάει πως αυτά μετακινήθηκαν. Οι παράμετροι που ορίζονται για την συγκεκριμένη εργασία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ / ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ	Reference Block Size (pixel)	Search Area Size (pixel)	Grid Distance (m)
Ponzano (Italy) / Sentinel-2	20	100	50
Ponzano (Italy) / PlanetScope	60	300	50
Yakima (USA) / Sentinel-2	20	40	20
Yakima (USA) / PlanetScope	30	50	20
Amyntaio-Mine (Greece) / Sentinel-2	30	100	50
Amyntaio-Mine (Greece) / PlanetScope	50	200	50
Amyntaio-Deposits Area (Greece) / Sentinel-2	50	100	50
Amyntaio-Deposits Area (Greece) / PlanetScope	80	150	50

Πίνακας 5. Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς μετατοπίσεων.

Το αποτέλεσμα είναι ένα αρχείο ASCII που περιέχει:

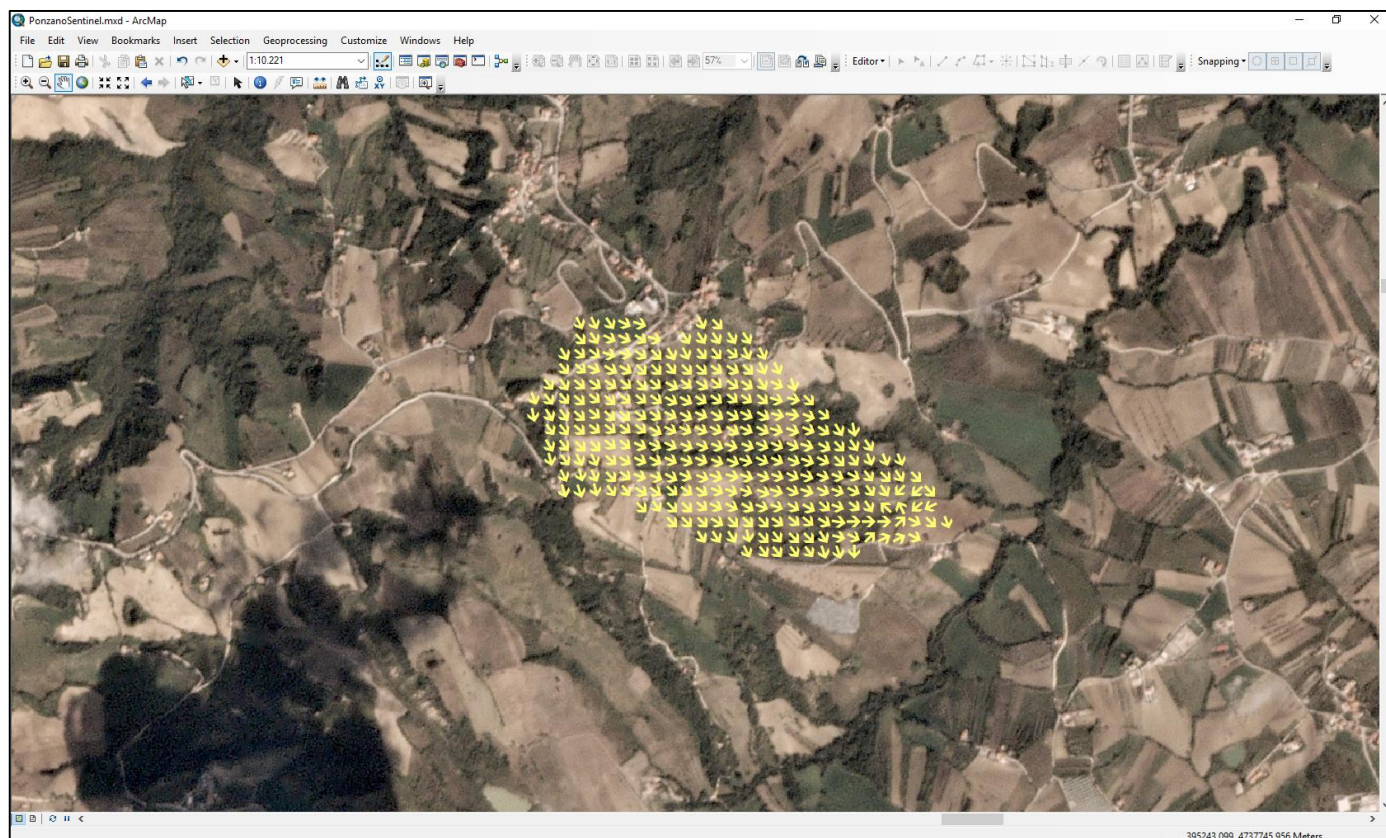
- **X,Y:** συντεταγμένες των κέντρων των πλαισίων που αναζητήθηκαν
- **dx:** την οριζόντια μετατόπιση του πλαισίου
- **dy:** την κατακόρυφη μετατόπιση του πλαισίου
- **length:** την συνολική απόσταση που μετακινήθηκε
- **direction:** τον προσανατολισμό της μετακίνησης σε μοίρες (0° : Βορράς)
- **max_corrcoeff:** το βαθμό ομοιότητας μεταξύ του αρχικού πλαισίου και του νέου πλαισίου
- **avg_corrcoeff:** την μέση ομοιότητα του αρχικού πλαισίου με την γύρω περιοχή

14.5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΡΧΕΙΟΥ ASCII

Το αρχείο αυτό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας στο λογισμικό ArcMAP. Πρέπει πρώτα να γίνει εισαγωγή του στο Excel και τοποθέτηση όλων των αποτελεσμάτων σε κελιά: Δεδομένα / Κείμενο σε στήλες / Οριοθετημένο / Οριοθέτες: κόμμα / Μορφοποίηση στήλης δεδομένων: Γενική. Στη συνέχεια το αρχείο αποθηκεύεται.

14.6. THRESHOLDING

Αφού το αρχείο εισαχθεί στο λογισμικό ArcMAP: File / Add data / Add XY data, δημιουργείται ένα νέο shapefile: Δεξί κλικ στο layer του αρχείου / Data / Export Data. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι για να είναι δυνατή η επεξεργασία των αποτελεσμάτων του αρχείου ASCII. Αντί για σημεία, χρησιμοποιούνται βέλη ώστε να είναι φανερή η κατεύθυνση της κίνησης και ευκολότερη η διαδικασία Thresholding.

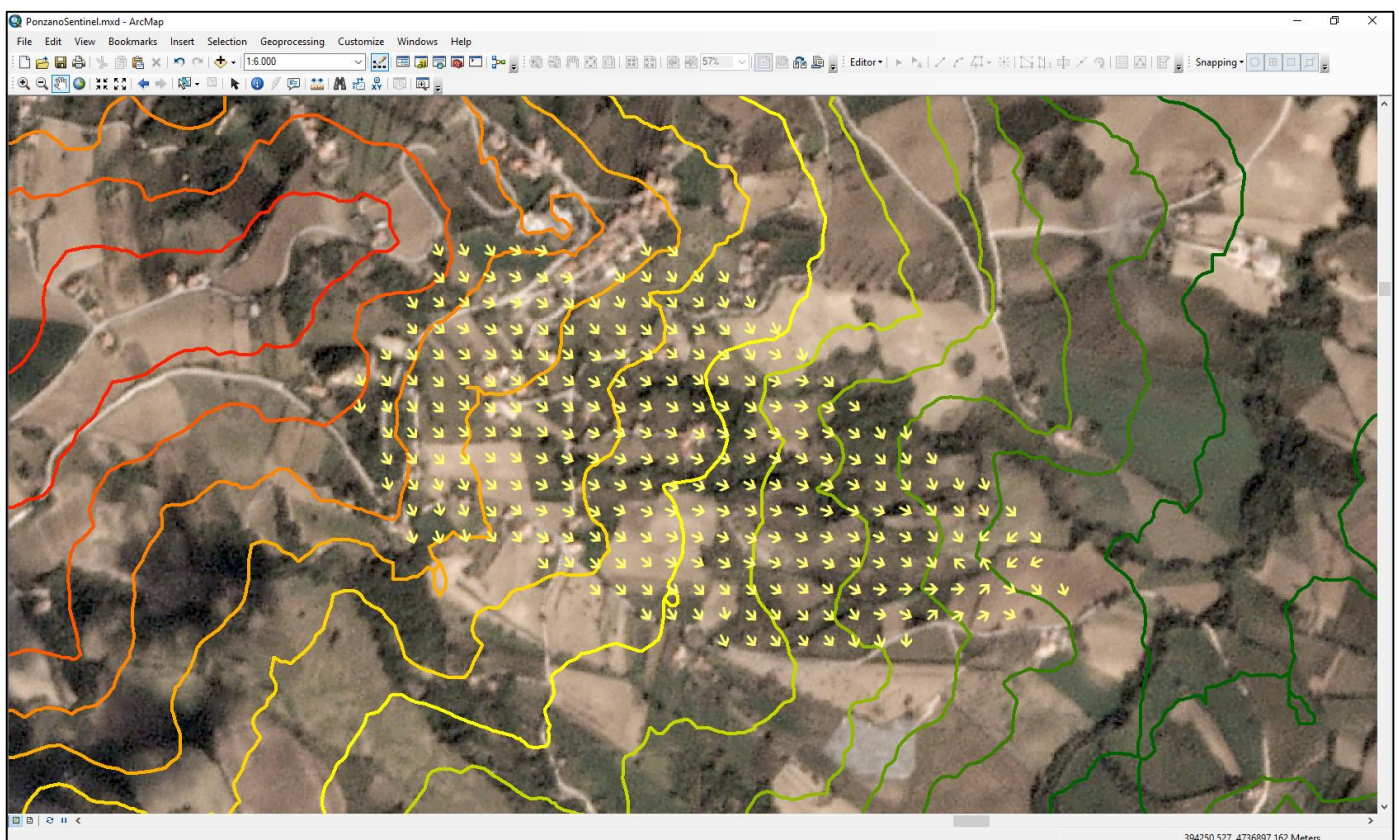


Εικόνα 38. Περιβάλλον εργασίας του ArcMap. Έχει γίνει εισαγωγή των αποτελεσμάτων του λογισμικού CIAS και απεικόνιση τους με βέλη.

Στη συνέχεια γίνεται εισαγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) ASTER. Γίνεται αποκοπή της περιοχής μελέτης από το DEM: ArcToolbox / Data Management Tools / Raster / Raster Processing / Clip / Input Raster: DEM / Output Extent: περιοχή μελέτης και ακολουθεί η δημιουργία ενός νέου shapefile με τις ισοϋψείς καμπύλες της περιοχής μελέτης: ArcToolbox / Spatial Analyst Tools / Surface / Aspect / Input Raster: DEM / Contour Interval: 25. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η χειρωνακτική αφαίρεση μετρήσεων που έχουν κατεύθυνση προς μεγαλύτερα υψόμετρα, δηλαδή λανθασμένων μετρήσεων. Στη συγκεκριμένη εργασία η χειρωνακτική αφαίρεση μετρήσεων γίνεται μόνο στο Ponzano (Italy) και στη Yakima (USA) διότι όπως προαναφέρθηκε το DEM δημιουργήθηκε το 2011 και από τότε το ορυχείο του Αμυνταίου έχει αλλάξει σε τεράστιο βαθμό το μέγεθος και το σχήμα του και δεν αντιπροσωπεύει την πραγματική επιφάνεια του. Για τον ίδιο λόγο δεν χρησιμοποιείται και στο χώρο εξωτερικών αποθέσεων του ορυχείου, καθώς η επιφάνεια πιθανώς να έχει αλλάξει σημαντικά λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας και των αποθέσεων. Ακολουθεί μια διαδικασία Thresholding, όπου θέτονται όρια στο Attribute Table του νέου shapefile. Η διαδικασία είναι διαφορετική για κάθε περιοχή μελέτης:

1. Ponzano (Italy): Προκειμένου να διατηρηθούν μόνο οι μετρήσεις με τη μεγαλύτερη ομοιότητα πριν και μετά την κατολίσθηση, ορίζεται: max_corrcoeff > 0,7, δηλαδή διατηρούνται όλες οι μετρήσεις που έχουν μέγιστη ομοιότητα μεγαλύτερη του 0,7 και οι υπόλοιπες αφαιρούνται. Επιπλέον με βάση τις ισοϋψείς καμπύλες γίνεται χειρωνακτική αφαίρεση των μετρήσεων που έχουν κατεύθυνση προς μεγαλύτερα υψόμετρα.
2. Yakima (USA): Προκειμένου να διατηρηθούν μόνο οι μετρήσεις με τη μεγαλύτερη ομοιότητα πριν και μετά την κατολίσθηση, ορίζεται: max_corrcoeff > 0,7, δηλαδή διατηρούνται όλες οι μετρήσεις που έχουν μέγιστη ομοιότητα μεγαλύτερη του 0,7 και οι υπόλοιπες αφαιρούνται. Επιπλέον με βάση τις ισοϋψείς καμπύλες γίνεται χειρωνακτική αφαίρεση των μετρήσεων που έχουν κατεύθυνση προς μεγαλύτερα υψόμετρα.

3. Amyntaio-Mine (Greece): Στη περίπτωση της καταστροφικής κατολίσθησης του ορυχείου δεν ορίζεται κάποιο όριο στη μέγιστη ομοιότητα καθώς το έδαφος άλλαξε εντελώς την εικόνα του. Αν για παράδειγμα οριστεί: $\text{max_corrcoeff} > 0,7$ τότε το μεγαλύτερο ποσοστό των μετρήσεων μέσα στα όρια της κατολίσθησης θα αφαιρεθεί, αφού το έδαφος εκεί δεν έχει απλώς μετατοπισθεί αλλά έχει αλλοιωθεί εντελώς και δεν γίνεται να εντοπισθούν παρόμοιες ομάδες εικονοστοιχείων. Ωστόσο γίνεται Thresholding στις τιμές της κατεύθυνσης σύμφωνα με πληροφορίες που δόθηκαν από τον κύριο Κ. Λουπασάκη καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων και Μεταλλουργών, ο οποίος συμμετείχε σε μελέτη για το συγκεκριμένο γεγονός. Πιο συγκεκριμένα ορίζεται: $330^\circ < \text{Direction} < 350^\circ$ για τις μετρήσεις στο νοτιοανατολικό κομμάτι της κατολίσθησης και $30^\circ < \text{Direction} < 60^\circ$ για την υπόλοιπη περιοχή.
4. Amyntaio-Deposits Area (Greece): Λόγω της έλλειψης μελετών και πληροφοριών για το χώρο εξωτερικών αποθέσεων του ορυχείου, απλά ορίζεται: $\text{max_corrcoeff} > 0,7$ ώστε όλες οι μετρήσεις που έχουν μέγιστη ομοιότητα μεγαλύτερη του 0,7 να διατηρηθούν και οι υπόλοιπες να αφαιρεθούν.



Εικόνα 39. Χειρωνακτική αφαίρεση μετρήσεων με βάση τις ισοϋψείς καμπύλες της περιοχής.

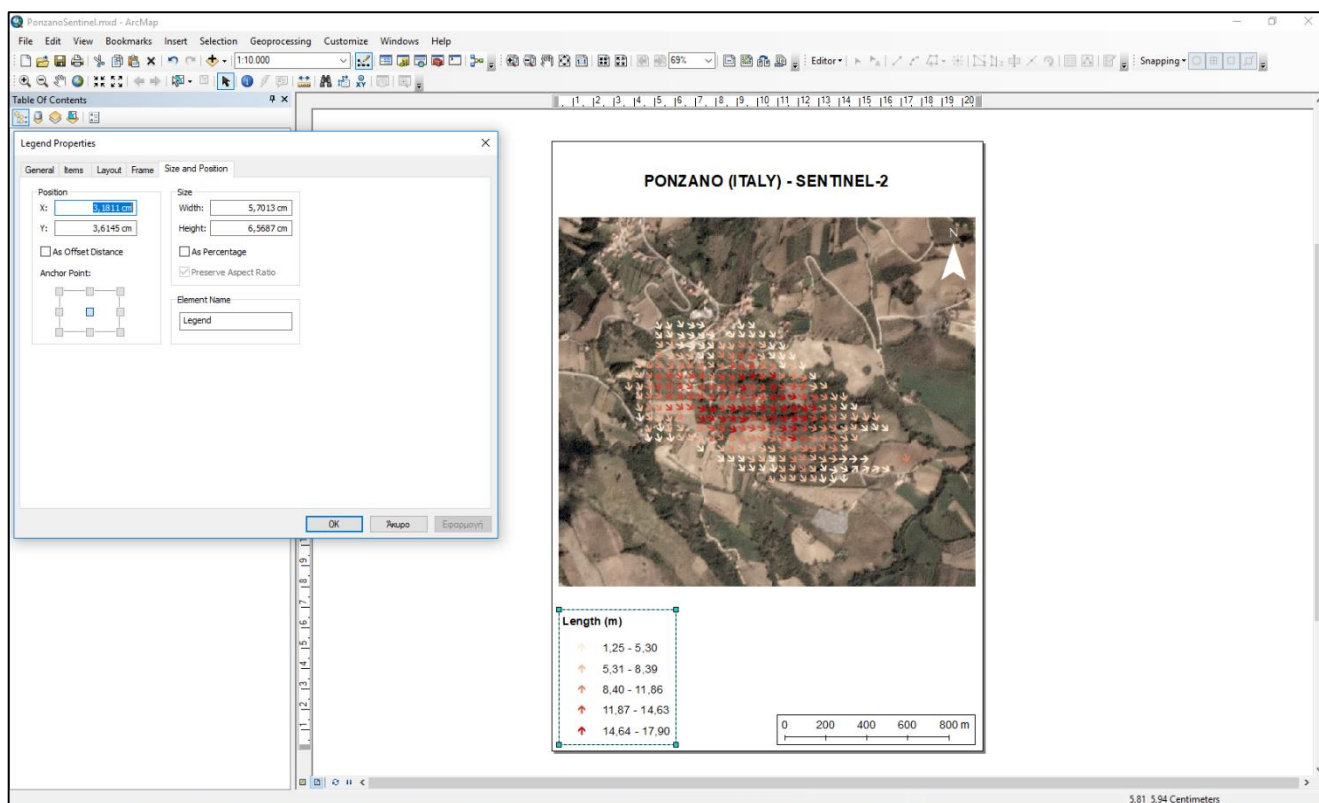
Οι παράμετροι για το Thresholding της κάθε περιοχής φαίνονται και στον παρακάτω πίνακα:

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ / ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ	Maximum Correlation Thresholding	Direction Thresholding	Manual Removal of Measurements
Ponzano (Italy) / Sentinel-2	>0,7	No	Yes
Ponzano (Italy) / PlanetScope	>0,7	No	Yes
Yakima (USA) / Sentinel-2	>0,7	No	Yes
Yakima (USA) / PlanetScope	>0,7	No	Yes
Amyntaio-Mine (Greece) / Sentinel-2	No	30° < Direction < 60° 330° < Direction < 350° (SE Area)	No
Amyntaio-Mine (Greece) / PlanetScope	No	30° < Direction < 60° 330° < Direction < 350° (SE Area)	No
Amyntaio-Deposits Area (Greece) / Sentinel-2	>0,7	No	No
Amyntaio-Deposits Area (Greece) / PlanetScope	>0,7	No	No

Πίνακας 6. Παράμετροι Thresholding της κάθε περιοχής μελέτης.

14.7. ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ

Τέλος γίνεται η οπτικοποίηση των μετρήσεων με τη χρήση βέλων που εκφράζουν τον προσανατολισμό (Direction) της μετακίνησης και την απόσταση της (Length): Properties / Symbology / Quantities / Graduated colors / Value: Length / Symbol: Arrow up / Advanced: Rotation: Direction σε χάρτη. Όλοι οι χάρτες δημιουργούνται με υπόβαθρο τις εικόνες του δορυφορικού συστήματος PlanetScope πριν τα γεγονότα κατολισθήσεων.



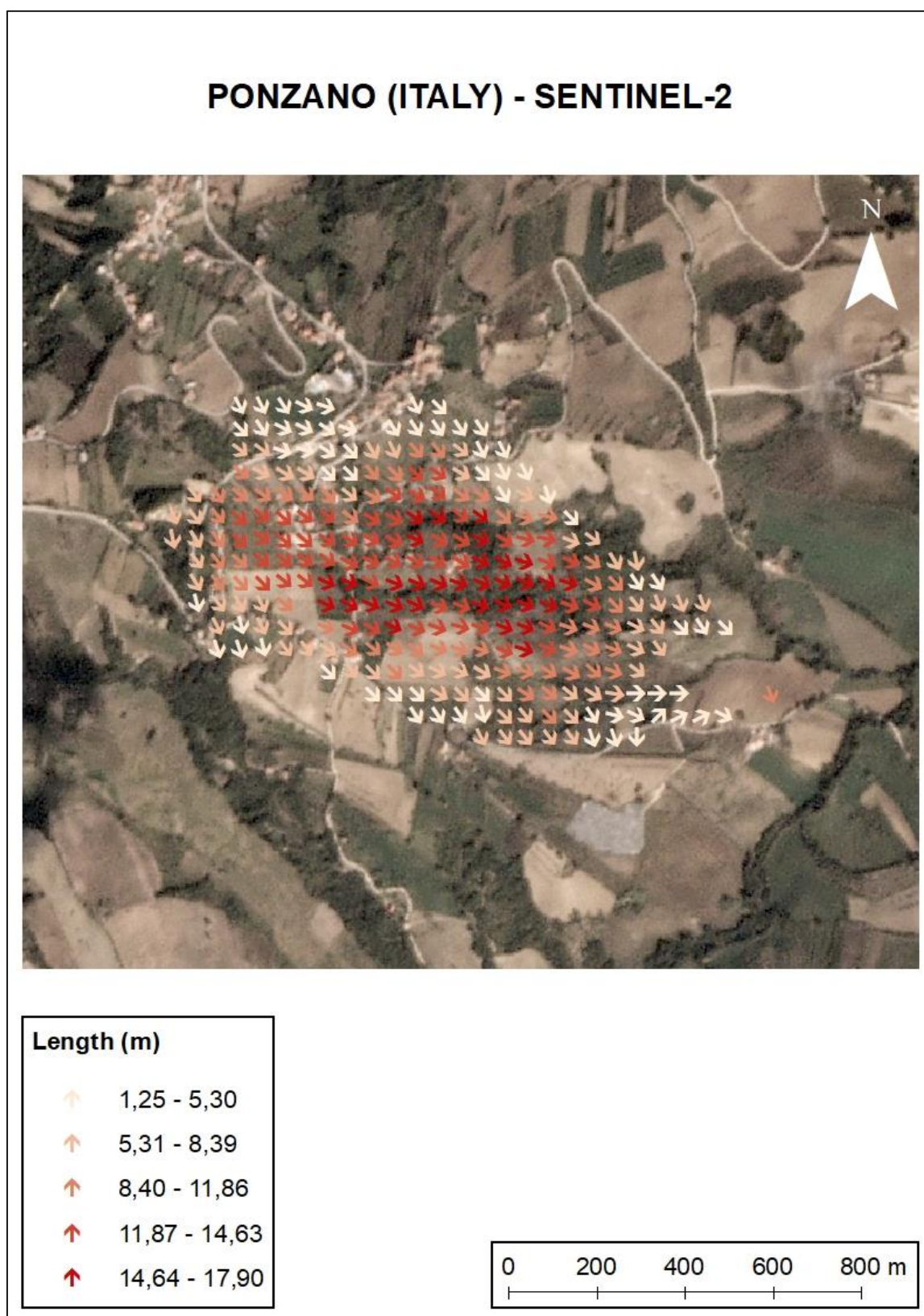
Εικόνα 40. Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων και δημιουργία χάρτη.

15. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε και σύγκριση τους με άλλες μελέτες και πηγές. Πιο αναλυτικά για τις περιοχές Ponzano (Italy) και Yakima (USA) παρουσιάζονται οι χάρτες που προέκυψαν από την επεξεργασία των εικόνων Sentinel-2 και PlanetScope μαζί με σχολιασμούς των μετρήσεων. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα δύο δορυφορικά συστήματα με δεδομένα από άλλες πηγές και μελέτες ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας. Για την μεγάλη κατολίσθηση του ορυχείου του Αμυνταίου παρουσιάζονται οι χάρτες που προέκυψαν, ωστόσο λόγω της απουσίας σχετικών μελετών, δεν μπορεί να γίνει παρόμοια σύγκριση και ο μόνος τρόπος ελέγχου της αξιοπιστίας των μετρήσεων είναι η σύγκριση τους με μετρήσεις που δόθηκαν από τον κύριο Κ. Λουπασάκη. Τέλος για την κίνηση του εδάφους στην περιοχή εξωτερικών αποθέσεων του ορυχείου δεν υπάρχουν καθόλου δεδομένα από άλλες πηγές, επομένως γίνεται απλώς παρουσίαση και σχολιασμός των χαρτών. Σε όλες τις περιπτώσεις για τις τιμές της κατεύθυνσης (Direction) θεωρείται πως 0° : Βορράς, 90°: Ανατολή κλπ.

15.1. PONZANO (ITALY)

15.1.1. SENTINEL-2



Χάρτης 1. Αποτελέσματα Sentinel-2 για την κατολίσθηση του Ponzano (Italy).

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

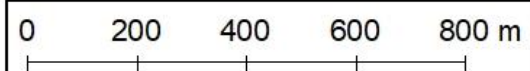
Από την επεξεργασία των εικόνων του δορυφορικού συστήματος Sentinel-2 είναι φανερό πως στην περίπτωση της κατολίσθησης του Ronzano η κύρια κατεύθυνση της μετατόπισης του εδάφους είναι ανατολική – νοτιοανατολική. Από τις 265 μετρήσεις οι 204 έχουν νοτιοανατολική κατεύθυνση ($112,5^\circ < \text{Direction} < 157,5^\circ$) και οι 41 έχουν ανατολική κατεύθυνση ($77,5^\circ < \text{Direction} < 112,5^\circ$). Οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα, με τη μέγιστη να έχει τιμή 17,9 m. Οι μικρότερες μετατοπίσεις εντοπίζονται περιμετρικά του κεντρικού τμήματος με τη μικρότερη να έχει τιμή 1,25 m στο δάκτυλο της κατολίσθησης. Στη συγκεκριμένη περιοχή παρατηρείται επίσης μια ελαφρά αλλαγή στην κατεύθυνση της κατολίσθησης καθώς 3 μετρήσεις κινούνται βορειοανατολικά.

PONZANO (ITALY) - PLANETSCOPE



Length (m)

↑	0,38 - 2,65
↑	2,66 - 5,46
↑	5,47 - 10,15
↑	10,16 - 12,82
↑	12,83 - 15,95



Χάρτης 2. Αποτελέσματα PlanetScope για την κατολίσθηση του Ponzano (Italy).

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Από την επεξεργασία των εικόνων του δορυφόρου PlanetScope φαίνεται πως η κύρια κατεύθυνση της κίνησης είναι ανατολική - βορειοανατολική. Από τις 126 μετρήσεις οι 74 έχουν ανατολική κατεύθυνση ($77,5^\circ < \text{Direction} < 112,5^\circ$) και οι 24 έχουν βορειοανατολική κατεύθυνση ($22,5^\circ < \text{Direction} < 77,5^\circ$). Οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα, με τη μέγιστη να έχει τιμή 15,95 m. Οι μικρότερες μετατοπίσεις εντοπίζονται περιμετρικά του κεντρικού τμήματος, με τη μικρότερη να έχει τιμή 0,38 m στο δάκτυλο της κατολίσθησης. Στη συγκεκριμένη περιοχή παρατηρείται έντονη αλλαγή στην κατεύθυνση της κατολίσθησης, καθώς 31 μετρήσεις κινούνται βόρεια-βορειοανατολικά.

15.1.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΑΛΛΗ ΜΕΛΕΤΗ / ΠΗΓΗ

Σύμφωνα με τη μελέτη: **Satellite radar data for back-analyzing a landslide event: the Ponzano (Central Italy) case study (Solari et al., 2018)** που δημοσιεύθηκε το 2018 για το συγκεκριμένο γεγονός, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία δεδομένων Radar είναι τα εξής:

- **Κύρια παραμόρφωση**: έχει κατεύθυνση νοτιοανατολική και μέγεθος που κυμαίνεται από 2,5 m έως 10,9 m ανάλογα με το μέρος της κατολίσθησης.
- **Μεγαλύτερες μετατοπίσεις**: Εντοπίζονται στο κεφάλι και στο κεντρικό τμήμα της κατολίσθησης (Villa Carosi).
- **Μικρότερες μετατοπίσεις**: Εντοπίζονται στο δάκτυλο της κατολίσθησης. Στη συγκεκριμένη περιοχή παρατηρείται αλλαγή στην κατεύθυνση της κατολίσθησης, όπου γίνεται βορειοανατολική.

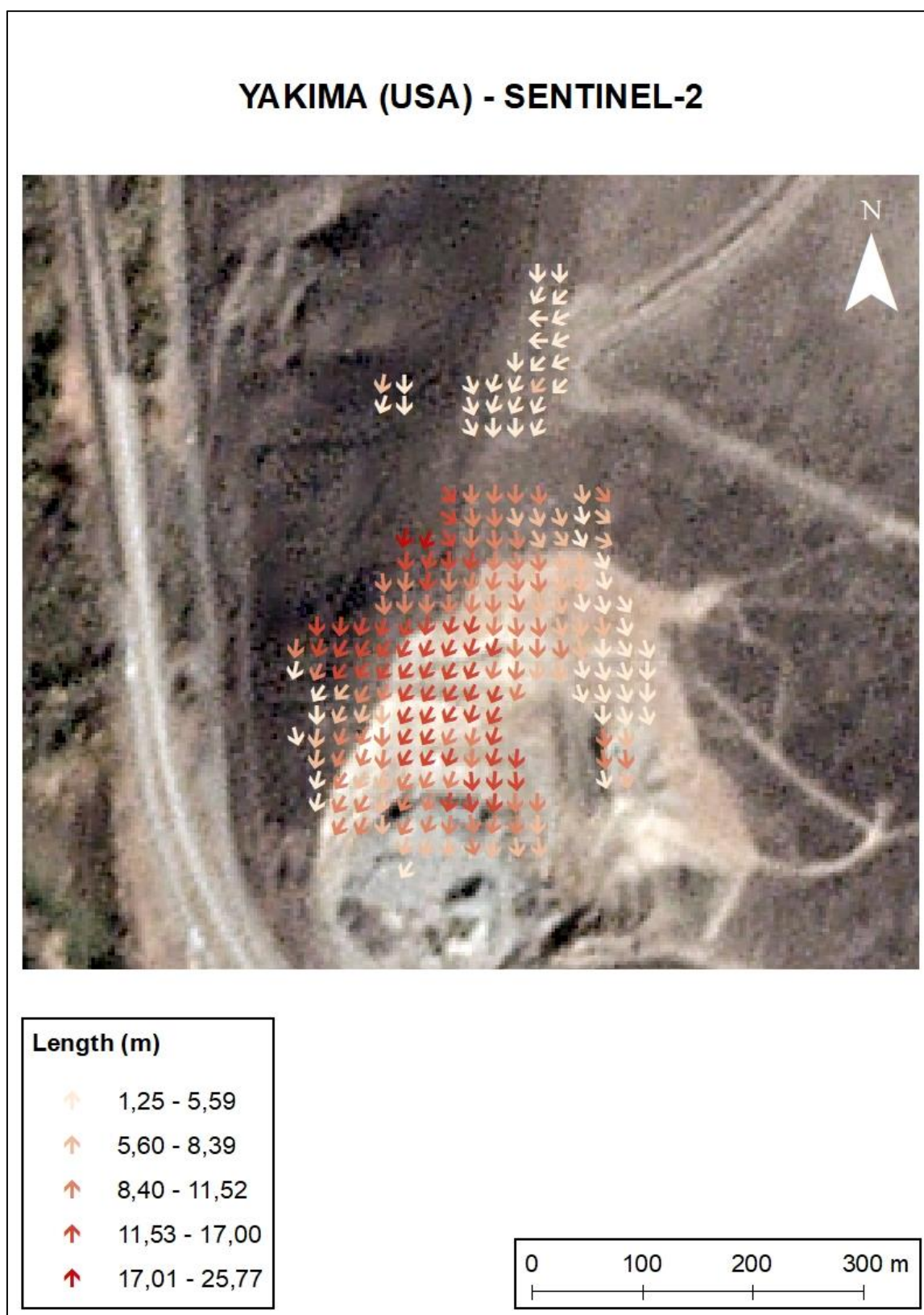
PONZANO (ITALY)	RADAR DATA	SENTINEL-2	PLANETSCOPE
Κατεύθυνση	Νοτιοανατολική (Βορειοανατολική στο Δάκτυλο)	Ανατολική- Νοτιοανατολική / (Βορειοανατολική στο Δάκτυλο)	Ανατολική – Βορειοανατολική / (Βόρεια-Βορειοανατολική στο Δάκτυλο)
Εύρος μετακίνησης	2,5 m - 10,9 m	1,25 m - 17,9 m	0,38 m - 15,95 m
Μεγαλύτερες μετατοπίσεις	Κεφάλι και κεντρικό τμήμα	Κεντρικό τμήμα	Κεντρικό τμήμα
Μικρότερες μετατοπίσεις	Δάκτυλο	Περιμετρικά	Περιμετρικά

Πίνακας 7. Σύγκριση αποτελεσμάτων με δεδομένα άλλης μελέτης.

Από τον πίνακα φαίνεται πως τα αποτελέσματα των δεδομένων Radar και Sentinel-2 για την κατεύθυνση είναι παρόμοια. Πιο συγκεκριμένα η κατεύθυνση είναι κυρίως νοτιοανατολική με τα δεδομένα Sentinel-2 να εντοπίζουν επιπλέον και μια έντονη ανατολική μετατόπιση. Αντίθετα τα αποτελέσματα που δίνουν οι εικόνες PlanetScope είναι διαφορετικά, με την κύρια μετατόπιση να είναι ανατολική. Σχετικά με την αλλαγή κατεύθυνσης στο δάκτυλο της κατολίσθησης, και στις τρεις περιπτώσεις εντοπίζεται να έχει βορειοανατολική κατεύθυνση, με τα δεδομένα PlanetScope να έχουν και μετρήσεις με κατευθύνσεις εντελώς βόρειες. Τα εύρη μετακίνησης που προκύπτουν από τα οπτικά δεδομένα είναι μεγαλύτερα από αυτά που προκύπτουν από τα Radar, κατά μερικά μέτρα. Οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα της κατολίσθησης για τα οπτικά δεδομένα, ενώ για τα δεδομένα Radar εντοπίζονται και στο κεφάλι. Τέλος, στα δεδομένα Radar οι μικρότερες μετατοπίσεις εντοπίζονται στο δάκτυλο, ενώ στα οπτικά δεδομένα εντοπίζονται σε περιοχές περιμετρικά του κεντρικού τμήματος, στις οποίες περιλαμβάνεται και το δάκτυλο.

15.2. YAKIMA (USA)

15.2.1. SENTINEL-2

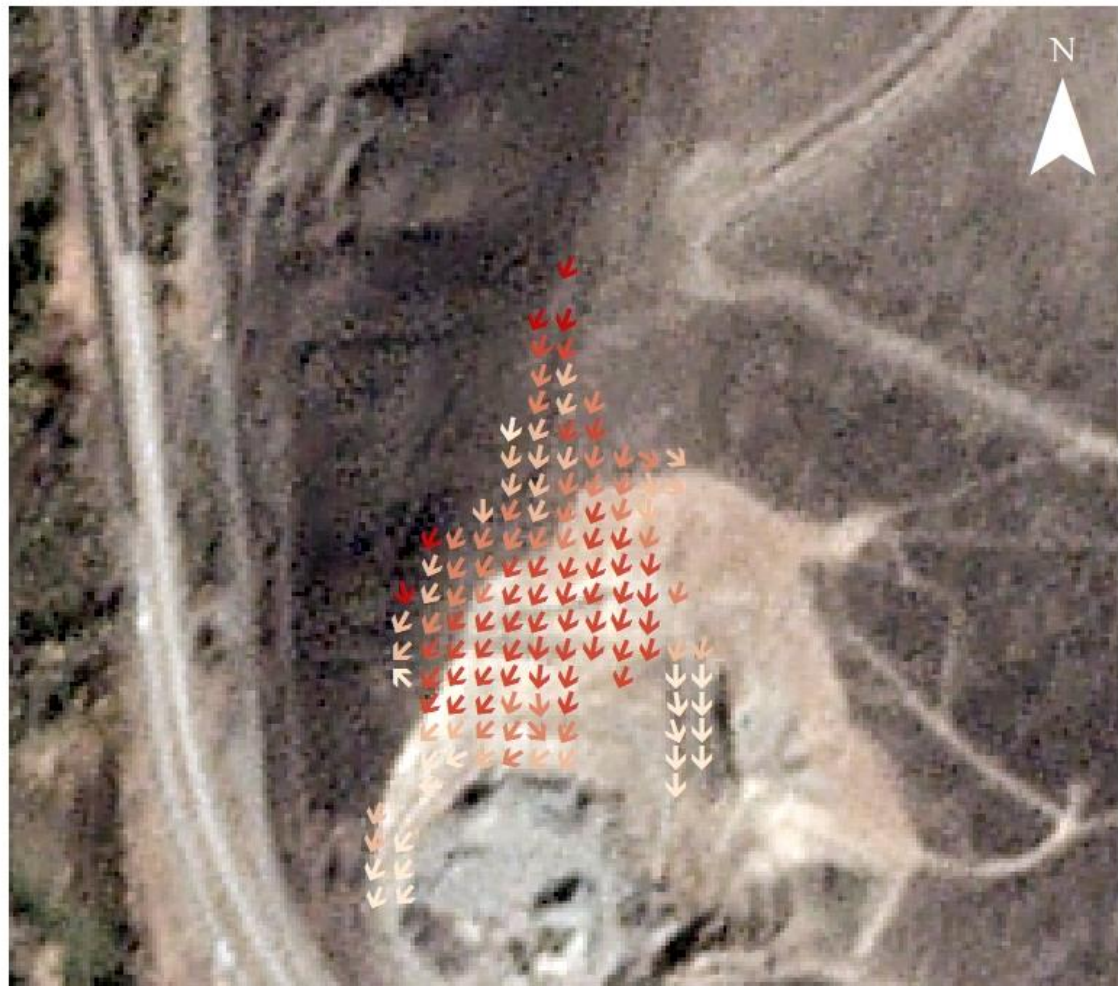


Χάρτης 3. Αποτελέσματα εικόνων Sentinel-2 για την κατολίσθηση της Yakima (USA).

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

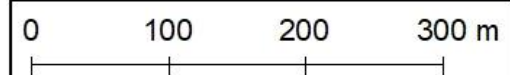
Από την επεξεργασία των εικόνων του δορυφόρου Sentinel-2 είναι φανερό πως στην περίπτωση της κατολίσθησης της Yakima, η κατεύθυνση της κίνησης είναι νότια-νοτιοδυτική. Από τις 226 μετρήσεις οι 154 έχουν νότια κατεύθυνση ($157,5^\circ < \text{Direction} < 202,5^\circ$) και οι 57 έχουν νοτιοδυτική κατεύθυνση ($202,5^\circ < \text{Direction} < 247,5^\circ$). Η μέγιστη μετατόπιση που μετρήθηκε είναι 25,77 m και η ελάχιστη είναι 1,25 m. Η μέση μετατόπιση του εδάφους υπολογίζεται στα 8,956842 m και εφόσον το χρονικό διάστημα μεταξύ των εικόνων είναι 197 ημέρες, η μέση ταχύτητα υπολογίζεται στα 0,045466 m/d.

YAKIMA (USA) - PLANETSCOPE



Length (m)

↑	0,75 - 3,82
↑	3,83 - 7,08
↑	7,09 - 9,58
↑	9,59 - 14,28
↑	14,29 - 34,16



Χάρτης 4. Αποτελέσματα εικόνων PlanetScope για την κατολίσθηση της Yakima (USA).

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Από την επεξεργασία των εικόνων του δορυφόρου PlanetScope φαίνεται πως η κύρια κατεύθυνση της κίνησης είναι νότια-νοτιοδυτική. Από τις 129 μετρήσεις οι 65 έχουν νότια κατεύθυνση ($157,5^\circ < \text{Direction} < 202,5^\circ$) και οι 58 έχουν νοτιοδυτική κατεύθυνση ($202,5^\circ < \text{Direction} < 247,5^\circ$). Η μέγιστη μετατόπιση που μετρήθηκε είναι 34,16 m και η ελάχιστη είναι 0,75 m. Η μέση μετατόπιση του εδάφους υπολογίζεται στα 8,516591 m και εφόσον το χρονικό διάστημα μεταξύ των εικόνων είναι 187 ημέρες, η μέση ταχύτητα υπολογίζεται στα 0,045543 m/d.

15.2.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΑΛΛΗ ΜΕΛΕΤΗ / ΠΗΓΗ

Σύμφωνα με τη μελέτη: **Rattlesnake Hills Landslide Evaluation (Norris, 2018)**, που δημοσιεύθηκε τον Ιανουάριο του 2018 για το συγκεκριμένο γεγονός, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την χρήση διάφορων μεθόδων ανίχνευσης της μετατόπισης του εδάφους όπως: Automated Motorized Total Stations, LiDAR και Radar, είναι τα εξής:

- **Κατεύθυνση κατολίσθησης:** Η κατεύθυνση της μετατόπισης είναι κυρίως νότια-νοτιοδυτική καθώς ισχύει: $195^\circ < \text{Direction} < 210^\circ$. Ωστόσο στη περιοχή βορειοδυτικά του λατομείου παρατηρείται αλλαγή στην κατεύθυνση σε εντελώς νοτιοδυτική καθώς: $235^\circ < \text{Direction} < 241^\circ$.
- **Μέση ταχύτητα κατολίσθησης:** Η μέση ταχύτητα της κίνησης είναι από 0,04572 m/d έως 0,0762 m/d.

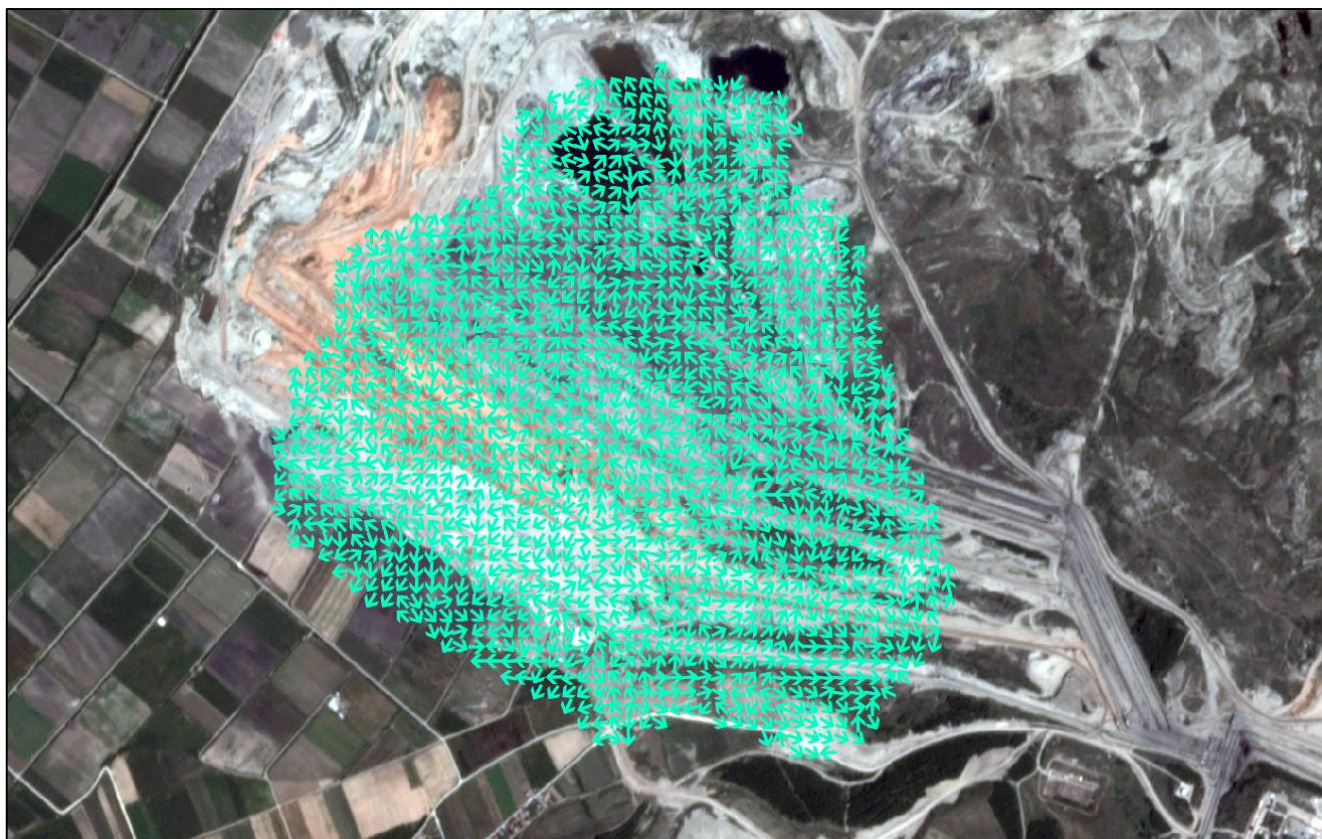
YAKIMA (USA)	AMTS, LIDAR, RADAR, GPS	SENTINEL-2	PLANETSCOPE
Κατεύθυνση κατολίσθησης	Νότια - Νοτιοδυτική / Εντελώς νοτιοδυτική στη περιοχή βορειοδυτικά του λατομείου	Νότια - Νοτιοδυτική	Νότια - Νοτιοδυτική
Μέση ταχύτητα	0,04572 m/d - 0,0762 m/d	0,045466 m/d	0,045543 m/d

Πίνακας 8. Σύγκριση αποτελεσμάτων με δεδομένα άλλης μελέτης.

Από τον πίνακα φαίνεται πως τα οπτικά δεδομένα δίνουν όμοια αποτελέσματα με τις άλλες μεθόδους μελέτης της κατολίσθησης όσον αφορά την γενική κατεύθυνση αυτής. Επιπλέον οι τιμές της μέσης ταχύτητας που προκύπτουν από την επεξεργασία των οπτικών δεδομένων συμπίπτουν με τη μέση ταχύτητα που προκύπτει από τις άλλες μεθόδους έρευνας. Ωστόσο τα οπτικά δεδομένα δεν καταγράφουν την αλλαγή της κατεύθυνσης της κατολίσθησης στη περιοχή βορειοδυτικά του ορυχείου.

15.3. AMYNTAIO MINE (GREECE)

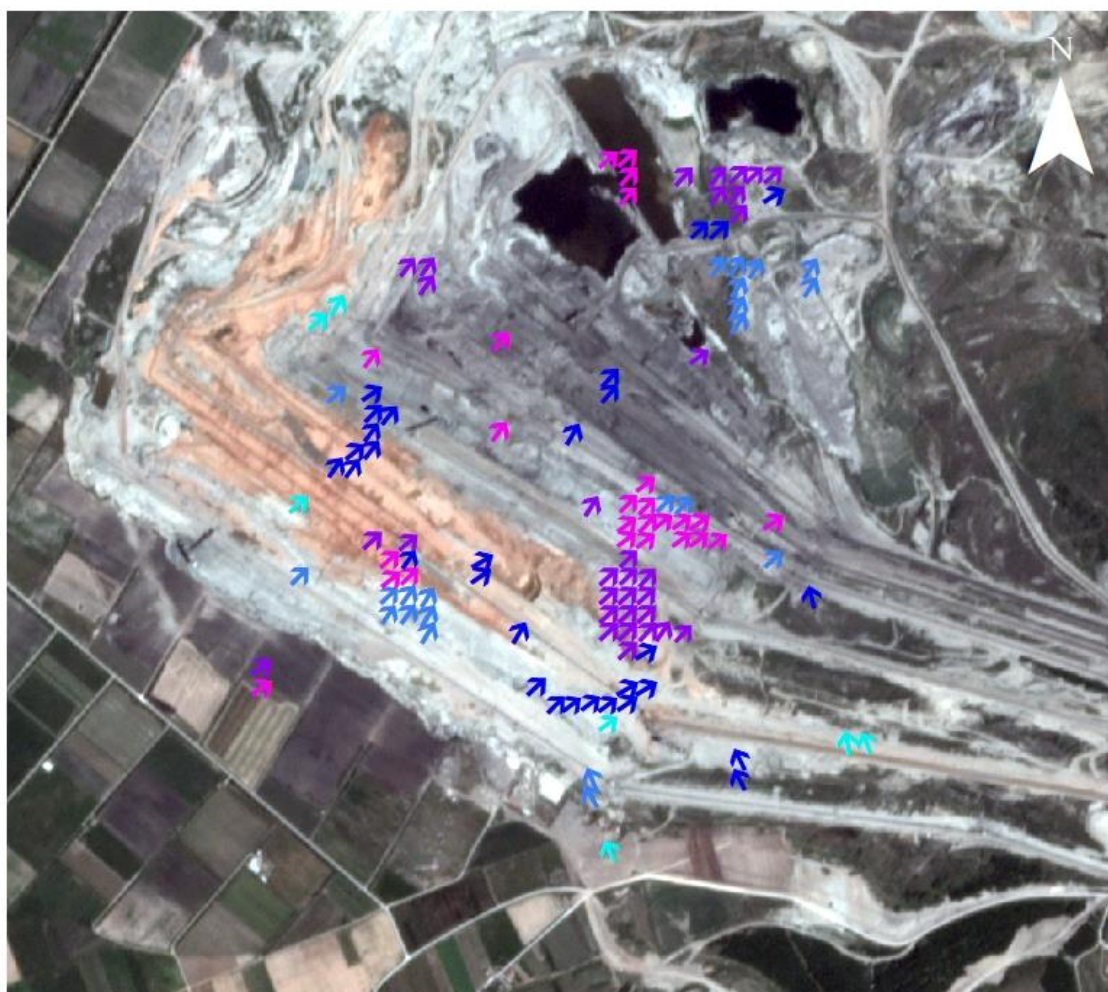
15.3.1. SENTINEL-2



Εικόνα 41. Χαοτικές μετρήσεις από την επεξεργασία των εικόνων Sentinel-2.

Οι αρχικές μετρήσεις (χωρίς διαδικασία Thresholding) που προκύπτουν από την επεξεργασία των εικόνων Sentinel-2 για την κατολίσθηση του ορυχείου του Αμυνταίου δεν ακολουθούν μια συγκεκριμένη κατεύθυνση αλλά κινούνται προς όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό προκύπτει από την χαοτική κίνηση του εδάφους, που άλλαξε εντελώς την εικόνα του και συνεπώς δεν ήταν δυνατός ο ακριβής εντοπισμός παρόμοιων ομάδων εικονοστοιχείων για αντιστοίχιση όπως με τις προηγούμενες περιοχές μελέτης. Ακολουθούν οι μετρήσεις που προκύπτουν μετά την διαδικασία Thresholding στη κατεύθυνση (Direction).

AMYNTAIO MINE (GREECE) - SENTINEL-2



Length (m)

↗	46,52 - 153,22
↖	153,23 - 263,05
↗	263,06 - 352,87
↖	352,88 - 423,03
↗	423,04 - 502,94

0 200 400 600 800 1.000 m

Χάρτης 5. Αποτελέσματα εικόνων Sentinel-2 για την κατολίσθηση του ορυχείου του Αμυνταίου (Greece).

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

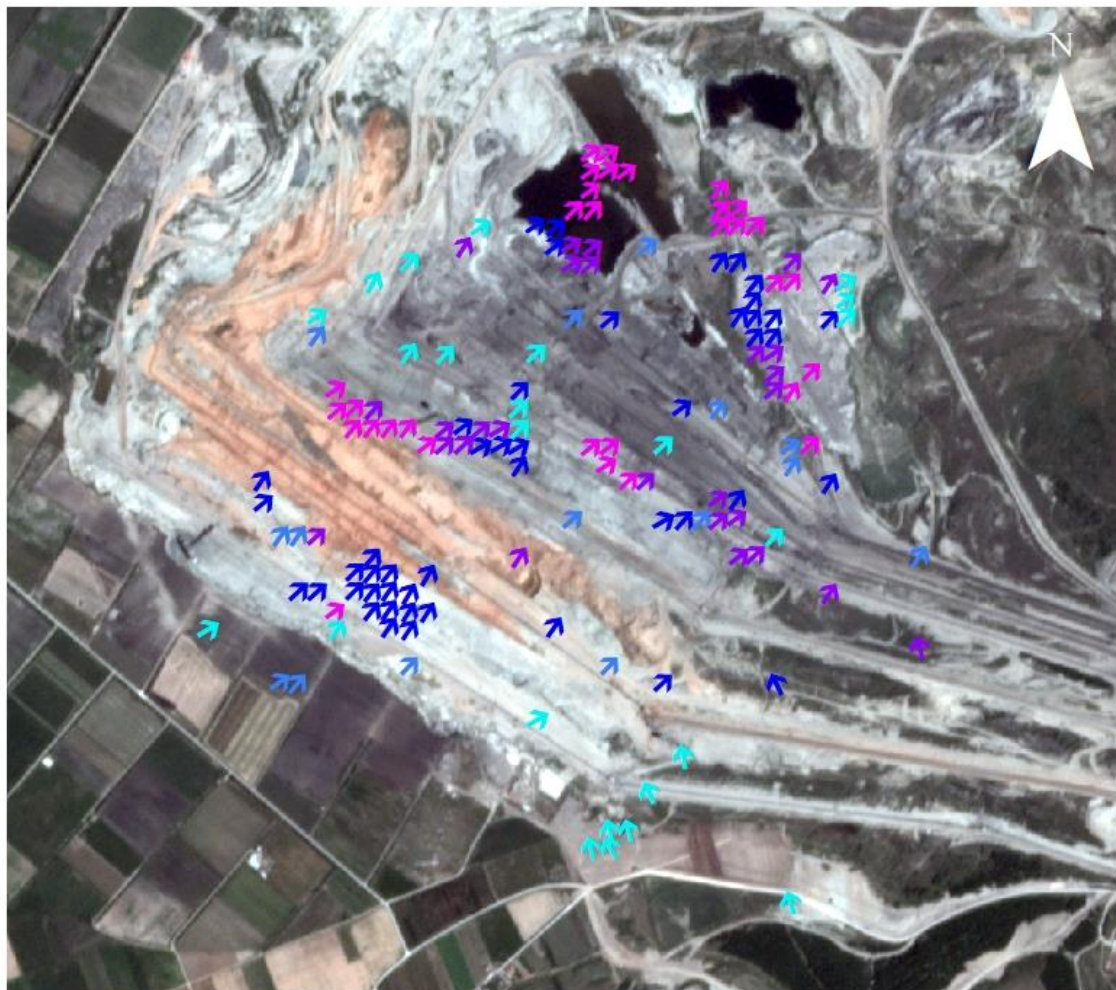
Εφόσον κατά την διαδικασία Thresholding των μετρήσεων ορίστηκαν συγκεκριμένες κατευθύνσεις ($330^{\circ} < \text{Direction} < 350^{\circ}$ για τις μετρήσεις στο νοτιοανατολικό κομμάτι της κατολίσθησης και $30^{\circ} < \text{Direction} < 60^{\circ}$ για την υπόλοιπη περιοχή), ο μόνος σχολιασμός που μπορεί να γίνει αφορά την συνολική μετατόπιση. Πιο συγκεκριμένα η μέγιστη μετατόπιση που μετρήθηκε είναι 502,94 m και εντοπίζεται στο κεντρικό τμήμα της, ενώ η ελάχιστη είναι 46,52 m και εντοπίζεται στο δυτικό τμήμα της. Παρατηρείται επίσης πως οι μετρήσεις που απομένουν μετά τον ορισμό συγκεκριμένων κατευθύνσεων είναι πάρα πολύ λίγες για τη συνολική έκταση που μετατοπίστηκε.



Εικόνα 42. Χαοτικές μετρήσεις από την επεξεργασία των εικόνων PlanetScope.

Οι αρχικές μετρήσεις (χωρίς διαδικασία Thresholding) που προκύπτουν από την επεξεργασία των εικόνων PlanetScope για την κατολίσθηση του ορυχείου του Αμυνταίου δεν ακολουθούν μια συγκεκριμένη κατεύθυνση αλλά κινούνται προς όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό προκύπτει από την χαοτική κίνηση του εδάφους, που άλλαξε εντελώς την εικόνα του και συνεπώς δεν ήταν δυνατός ο ακριβής εντοπισμός παρόμοιων ομάδων εικονοστοιχείων για αντιστοίχιση όπως με τις προηγούμενες περιοχές μελέτης. Ακολουθούν οι μετρήσεις που προκύπτουν μετά την διαδικασία Thresholding στην κατεύθυνση (Direction).

AMYNTAIO MINE (GREECE) - PLANETSCOPE



Length (m)

↑	1,10 - 97,33
↑	97,34 - 168,61
↑	168,62 - 230,45
↑	230,46 - 269,38
↑	269,39 - 315,19

0 200 400 600 800 1.000 m

Χάρτης 6. Αποτελέσματα εικόνων PlanetScope για την κατολίσθηση του ορυχείου του Αμυνταίου (Greece).

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

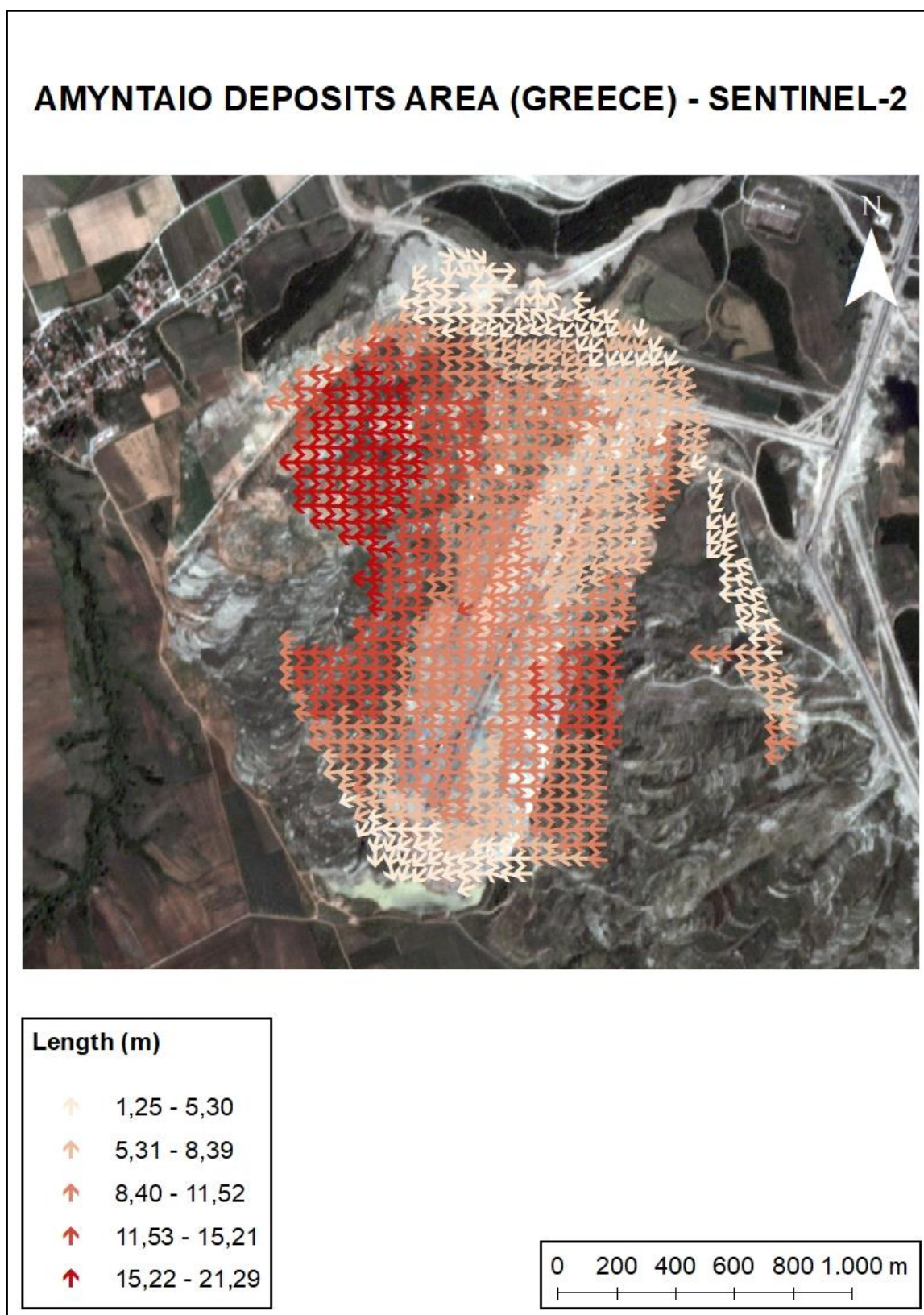
Εφόσον κατά την επεξεργασία των εικόνων ορίστηκαν συγκεκριμένες κατευθύνσεις για τις μετρήσεις ($330^{\circ} < \text{Direction} < 350^{\circ}$ για τις μετρήσεις στο νοτιοανατολικό κομμάτι της κατολίσθησης και $30^{\circ} < \text{Direction} < 60^{\circ}$ για την υπόλοιπη περιοχή), ο μόνος σχολιασμός που μπορεί να γίνει αφορά την συνολική μετατόπιση. Πιο συγκεκριμένα η μέγιστη μετατόπιση που μετρήθηκε είναι 315,19 m και εντοπίζεται στο βόρειο τμήμα της, ενώ η ελάχιστη είναι 1,10 m και εντοπίζεται στο δυτικό τμήμα της. Παρατηρείται επίσης πως οι μετρήσεις που απομένουν μετά τον ορισμό συγκεκριμένων κατευθύνσεων είναι πάρα πολύ λίγες για τη συνολική έκταση που μετατοπίστηκε.

15.3.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΑΛΛΗ ΜΕΛΕΤΗ / ΠΗΓΗ

Σύμφωνα με τον κύριο Κ. Λουπασάκη που συμμετείχε σε μελέτη για τη συγκεκριμένη καταστροφική κατολίσθηση του Αμυνταίου, η μετατόπιση του εδάφους έφτασε έως και τα 400 m. Από τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των εικόνων Sentinel-2 και PlanetScope προκύπτουν επίσης πολύ μεγάλες μετατοπίσεις. Πιο συγκεκριμένα η μέγιστη τιμή που προκύπτει από τις εικόνες Sentinel-2 είναι 502,94 m ενώ από τις εικόνες PlanetScope είναι 315,19 m. Επομένως, αν και είναι μεγάλες μετρήσεις, δεν ταυτίζονται ακριβώς. Πρέπει επίσης να σημειωθεί πως οι μετρήσεις που προέκυψαν από την επεξεργασία των εικόνων PlanetScope ήταν περισσότερες από αυτές των Sentinel-2.

15.4. AMYNTAIO DEPOSITS AREA (GREECE)

15.4.1. SENTINEL-2

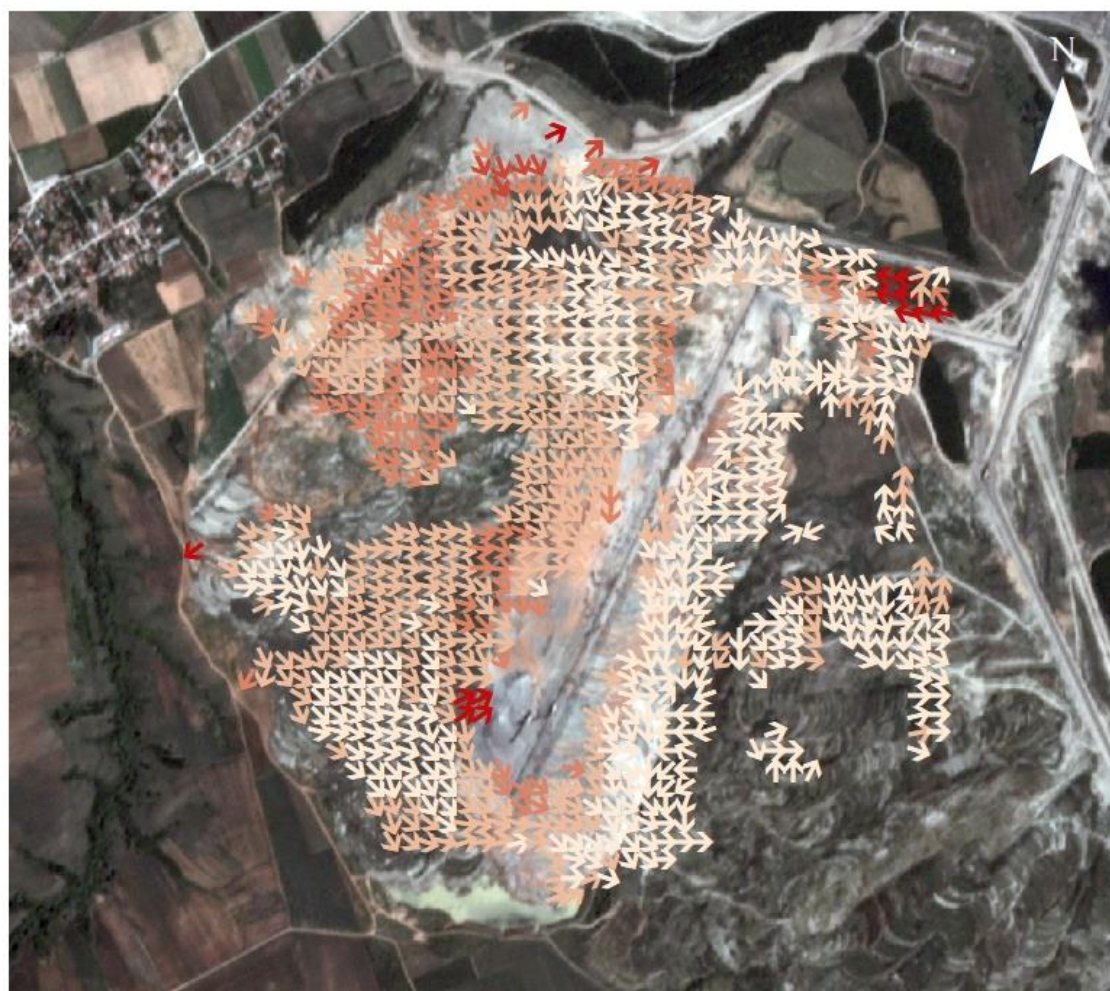


Χάρτης 7. Αποτελέσματα εικόνων Sentinel-2 για την μετατόπιση του εδάφους στην περιοχή εξωτερικών αποθέσεων του ορυχείου του Αμυνταίου (Greece).

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Από την επεξεργασία των εικόνων του δορυφόρου Sentinel-2 είναι φανερό πως στην περιοχή εξωτερικών αποθέσεων του ορυχείου η μετατόπιση του εδάφους έχει κατεύθυνση κυρίως δυτική και νοτιοδυτική. Από τις 900 μετρήσεις οι 796 έχουν δυτική κατεύθυνση ($247,5^\circ < \text{Direction} < 292,5^\circ$) και οι 76 έχουν νοτιοδυτική κατεύθυνση ($202,5^\circ < \text{Direction} < 247,5^\circ$). Η μέγιστη μετατόπιση που μετρήθηκε είναι 21,29 m και εντοπίζεται στο δυτικό τμήμα της περιοχής μαζί με τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις. Η ελάχιστη είναι 1,25 m και εντοπίζεται στο βόρειο τμήμα της περιοχής μαζί με μικρές μετρήσεις που έχουν μεγάλες διαφορές στις κατευθύνσεις τους.

AMYNTAIO DEPOSITS AREA (GREECE) - PLANETSCOPE



Length (m)

↗	0,39 - 1,66
↗	1,67 - 2,84
↗	2,85 - 5,09
↗	5,10 - 10,16
↗	10,17 - 116,01

0 200 400 600 800 1.000 m

Χάρτης 8. Αποτελέσματα εικόνων PlanetScope για την μετατόπιση του εδάφους στην περιοχή εξωτερικών αποθέσεων του ορυχείου του Αμυνταίου (Greece).

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Από την επεξεργασία των εικόνων PlanetScope είναι φανερό πως στην περιοχή εξωτερικών αποθέσεων του ορυχείου η μετατόπιση του εδάφους έχει κατεύθυνση κυρίως νοτιοανατολική και ανατολική. Από τις 875 μετρήσεις οι 412 έχουν νοτιοανατολική κατεύθυνση ($112,5^\circ < \text{Direction} < 157,5^\circ$) και οι 227 έχουν ανατολική κατεύθυνση ($77,5^\circ < \text{Direction} < 112,5^\circ$). Η μέγιστη μετατόπιση που μετρήθηκε είναι 116,01 m και εντοπίζεται στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής μαζί με κάποιες πολύ μεγάλες μετατοπίσεις (άνω των 77 m). Τέτοιες μετρήσεις πιθανόν να είναι ακραίες τιμές που παρέμειναν και μετά το Thresholding, καθώς είναι μόνο 13 από τις 875. Η ελάχιστη είναι 0,39 m και εντοπίζεται στο βόρειο τμήμα της περιοχής μαζί με άλλες μικρές μετρήσεις.

16. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη κατολισθητικών γεγονότων και εδαφικών κινήσεων μέσω της επεξεργασίας οπτικών δορυφορικών εικόνων. Η μεθοδολογία που επιλέχτηκε να εφαρμοστεί βασίζεται στην αντιστοίχιση ομάδων εικονοστοιχείων με βάση την ομοιότητα τους μεταξύ δύο εικόνων και χρησιμοποιείται ευρέως για τη μελέτη παγετώνων. Ωστόσο στην εργασία αυτή έγινε προσπάθεια εφαρμογής της σε γεγονότα εδαφικών μετατοπίσεων, καθώς υπάρχουν αρκετοί τύποι κατολισθήσεων και κινήσεων που διατηρούν τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας κατά την κίνηση και συνεπώς επιτρέπουν την αντιστοίχιση ομάδων εικονοστοιχείων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις τρεις περιπτώσεις κατολισθήσεων (Ponzano, Yakima, Amyntaio), συμπεραίνουμε πως η μεθοδολογία παράγει σχετικά αξιόπιστα αποτελέσματα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά μαζί με άλλες μεθόδους.

Πιο αναλυτικά, οι μετρήσεις της κατολίσθησης κοντά στο χωριό Ponzano συμπίπτουν σε ικανοποιητικό βαθμό με τα αποτελέσματα της επεξεργασίας δεδομένων Radar της μελέτης: **Satellite radar data for back-analyzing a landslide event: the Ponzano (Central Italy) case study (Solari et al., 2018)**. Η κατεύθυνση που προκύπτει από τις εικόνες Sentinel-2 (νοτιοανατολική) είναι σύμφωνη με την κατεύθυνση των δεδομένων Radar (νοτιοανατολική), ενώ η κατεύθυνση από τα δεδομένα PlanetScope είναι ελαφρώς διαφορετική (ανατολική). Τα εύρη μετακίνησης που προκύπτουν από τα οπτικά δεδομένα δεν συμπίπτουν ακριβώς με αυτά των δεδομένων Radar, αλλά είναι μεγαλύτερα από αυτά κατά μερικά μέτρα. Επιπλέον οι μεγαλύτερες και μικρότερες μετατοπίσεις εντοπίζονται σε σχετικά κοινά σημεία και για τα οπτικά δεδομένα και για τα Radar.

Συνεχίζοντας με την κατολίσθηση της Yakima, τα αποτελέσματα των οπτικών δεδομένων για την κατεύθυνση είναι σχετικά ίδια με τα αποτελέσματα άλλων μεθόδων μελέτης της κατολίσθησης που χρησιμοποιήθηκαν στη έρευνα: **Rattlesnake Hills Landslide Evaluation (Norrish, 2018)**. Επιπροσθέτως οι τιμές της μέσης ταχύτητας συμπίπτουν. Πρέπει να σημειωθεί πως οι δύο παραπάνω κατολισθήσεις ανήκουν στην κατηγορία των ολισθήσεων, που σημαίνει πως το έδαφος δεν αλλάζει σημαντικά την εικόνα και τη μορφή του, απλώς μετατοπίζεται. Συνεπώς η μεθοδολογία βγάζει σχετικά αξιόπιστα αποτελέσματα όταν εφαρμόζεται σε τέτοιους τύπους κινήσεων.

Στην περίπτωση της γρήγορης και καταστροφικής κατολίσθησης του ορυχείου του Αμυνταίου, η επιφάνεια άλλαξε εντελώς κάνοντας την αντιστοίχιση παρόμοιων πλαισίων μη αξιόπιστη και για το λόγο αυτό τα αρχικά αποτελέσματα ήταν χαοτικά με διάφορες κατευθύνσεις και τιμές μετακινήσεων. Μετά από τη διαδικασία Thresholding, οι μετρήσεις που παρέμειναν ήταν πολύ

λίγες για την έκταση της κατολίσθησης, είχαν ωστόσο πολύ μεγάλες τιμές. Παρόλα αυτά δεν μπορούμε να πούμε πως συμπίπτουν με ακρίβεια με τις τιμές που δόθηκαν από τον κύριο Κ. Λουπασάκη. Συνεπώς για τέτοιες περιπτώσεις εδαφικών κινήσεων η μεθοδολογία έχει προοπτικές, χρειάζεται όμως περεταίρω ανάπτυξη. Πιθανώς η χρήση έγχρωμων δορυφορικών εικόνων έναντι μονοχρωματικών να έδινε περισσότερες και πιο αξιόπιστες μετρήσεις καθώς θα λαμβάνονταν υπόψιν οι τιμές των εικονοστοιχείων από τρία φασματικά κανάλια, κάτι που δεν ήταν δυνατό στην παρούσα εργασία λόγω περιορισμών του λογισμικού CIAS.

Τέλος, στην περίπτωση της μετατόπισης εδάφους στη περιοχή εξωτερικών αποθέσεων του ορυχείου δεν μπορούμε να γνωρίζουμε αν τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα για δύο λόγους:

- Ο πρώτος είναι πως οι μετρήσεις που προκύπτουν από τα δύο δορυφορικά συστήματα έχουν εντελώς διαφορετικές κατευθύνσεις, με την κατεύθυνση που προκύπτει από τα δεδομένα Sentinel-2 να είναι δυτική-νοτιοδυτική ενώ από τα δεδομένα PlanetScope να είναι ανατολική-νοτιοανατολική. Εξαρχής δηλαδή τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των οπτικών εικόνων των δύο δορυφορικών συστημάτων δεν συμπίπτουν, κάτι που δεν συνέβη στις προηγούμενες περιπτώσεις. Ο ανθρώπινος παράγοντας και ο τρόπος που αποτίθεται το υλικό στο χώρο πιθανώς δεν αποτελούν αιτία για το αποτέλεσμα αυτό καθώς οι ημερομηνίες των εικόνων πριν και μετά τη κίνηση οριακά συμπίπτουν για τα δύο δορυφορικά συστήματα. Συνεπώς η πιθανότητα να άλλαξε τόσο πολύ η μορφή του εδάφους σε τόσο μικρό χρονικό διάστημα είναι ελάχιστη.
- Ο δεύτερος λόγος είναι πως δεν υπάρχουν σχετικές μελέτες για την σύγκριση των μετρήσεων, άρα κανένα από τα αποτελέσματα δεν μπορεί να εξακριβωθεί.

17. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

- Bamler, R., Hartl, P. (1998), “Synthetic aperture radar interferometry”, *Inverse Problems* 14, R1-R54
- Berardino, P., Costantini, M., Franceschetti, G., Iodice, A., Pietranera, L., and Rizzo, V. (2003), “Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratera (Basilicata, Italy)”, *Eng. Geol.*, Vol. 68, 31-51
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E. (2002), “A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No. 11, 2375–2383
- Bonnard, C., Forlati, F., Scavia, C. (2004), “Identification and Mitigation of Large Landslide Risks in Europe”, Chapter 2, The meaning of risk assessment related to large landslides, (Eds.) IMIRILAND project, 7-12
- Bovenga, F., Nutricato, R., Refice, A., Wasowski, J. (2006), “Application of multi-temporal differential interferometry to slope instability detection in urban/peri-urban areas”, *Engineering Geology* 88, 219–240
- Brozzetti, F., Boncio, P., Lavecchia, G., (2010), “Note illustrative della Carta Geologica d’Italia alla scala 1:50000”, Foglio 339, Teramo. Ispra, Roma
- Cantalamesa, G., Di Celma, C., (2004), “Sequence response to syndepositional regional uplift: insights from high-resolution sequence stratigraphy of late early Pleistocene strata, Periadriatic Basin, central Italy”, *Sediment Geol.* 164, 283–309
- Canuti, P., Casagli, N., Ermini, L., Fanti, R., Farina, P. (2004), “Landslide activity as a geoinicator in Italy: Significance and new perspectives from remote sensing”, *Environ. Geol.*, 45, 907–919
- Casagli, N., Frodella, W., Morelli, S., Tofani, V., Ciampalini, A., Intrieri, E., Raspini, F., Rossi, G., Tanteri, L., Lu, P. (2017), “Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning”, *Geoenvironmental Disasters*, 4:9

- Catani, F., Farina, P., Morettia, S., Nicob, G., Strozzi, T. (2005), “On the application of SAR interferometry to geomorphological studies: Estimation of landform attributes and mass movements”, *Geomorphology*, 66, 119-131
- Centamore, E., Cantalamessa, G., Micarelli, A., Potetti, M., Berti, D., Bigi, S., Morelli, C., Ridolfi, M. (1991), “Stratigrafia e analisi di facies dei depositi del Miocene e del Pliocene inferior dell’avanfossa marchigiano-abruzzese e delle zone limitrofe”, *Studi Geologici Camerti Volume Speciale CROP*, 11(2): 125-131.
- Cigna, F. (2018), “Observing Geohazards from Space”, *Geosciences*, 8, 59, doi: 10.3390/geosciences8020059
- Cigna, F., Bianchini, S., Casagli, N. (2013), “How to assess landslide activity and intensity with Persistent Scatterer Interferometry (PSI): the PSI-based matrix approach”, *Landslides*, Vol. 10:267–283
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2003), “Monitoring landslides and tectonic motion with the Permanent Scatterers technique”, *Engineering Geology* 68, 1–2, 3–14
- Colesanti, C., Wasowski, J. (2006), “Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry”, *Engineering Geology*, Vol. 88, 173-199
- Corsini, A., Farina, P., Antonello, G., Barbieri, M., Casagli, N., Coren, F., Guerri, L., Ronchetti, F., Sterzai, P., Tarchi, D. (2006), “Space-borne and ground-based SAR interferometry as tools for landslide hazard management in civil protection”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27(12), 2351-2369
- Cruden, D.M. (1991), “A simple definition of a landslide”, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, Vol. 43, 27-29
- Cruden, D.M., Varnes, D.J. (1996), “Landslide Types and Processes”, *Special Report*, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 247:36-75
- Dai, F.C., Lee, C.F., Ngai, Y.Y. (2002), “Landslide risk assessment and management: an overview”, *Engineering Geology*, 64, 65-87
- Debella-Gilo, M., Käab, A. (2010), “Sub-pixel precision image matching for measuring surface displacements on mass movements using normalized cross-correlation”
- Del Soldato, M., Bianchini, S., Calcaterra, D., De Vita, P., Di Martire, D., Tomás, R., Casagli, N. (2017), “A new approach for landslide-induced damage assessment”, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 8, 1524–1537

- Delacourt, C., Allemand, P., Berthier, E., Raucoules, D., Casson, B., Grandjean, P., Pambrun, C., Varel, E. (2007) “Remote-sensing techniques for analysing landslide kinematics: A review”, *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 178, 89-100
- Delacourt, C., Allemand, P., Squarzoni, C., Picard, F., Raucoules, D., Carnec, C. (2003), “Potential and limitation of ERS-Differential SAR Interferometry for landslide studies in the French Alps and Pyrenees”
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001), “Permanent Scatterers in SAR Interferometry”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 1, 8–20
- Fruneau, B., Achace, J., Delacourt, C. (1996), “Observation and modelling of the Saint-Etienne-de Tinée landslide using SAR interferometry”, *Tectonophysics*, 265, 181-190
- Hanssen, R.F. (2001), “Radar interferometry: data interpretation and error analysis”, *Remote Sensing and Digital Image Processing*, Kluwer Academic: Dordrecht, Netherlands
- Heid, T., Kääb, A. (2012), “Evaluation of existing image matching methods for deriving glacier surface displacements globally from optical satellite imagery”, *Remote Sensing of Environment*, 118, 339-355
- Highland, L.M., Bobrowsky, P., (2008) “The landslide handbook—A guide to understanding landslides”, Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
- Hilley, G.E., Bürgmann, R., Ferretti, A., Novali, F., Rocca, F. (2004) “Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterers analysis”, *Science*, 304, 1952-1955
- Kääb, A. (2005), “Remote Sensing of Mountain Glaciers and Permafrost Creep”
- Kääb, A., Altena, B., Mascaro, J. (2017), “Coseismic displacements of the 14 November 2016 M_w 7.8 Kaikoura, New Zealand, earthquake using the Planet optical CubeSat constellation”, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 17, 627-639
- Kääb, A., Kaufmann, V., Ladstädter, R., Eiken, T. (2003), “Rock glacier dynamics: implications from high-resolution measurements of surface velocity fields”, *Permafrost*, 501-506.
- Kääb, A., Leprince, S. (2014), “Motion detection using near-simultaneous satellite acquisitions”, *Remote Sensing of Environment*, 154, 164-179

- Kääb, A., Winsvold, S.H., Altena, B., Nuth, C., Nagler, T., Wuite, J. (2016), “Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part I: Radiometric and Geometric Performance, and Application to Ice Velocity”, *Remote Sens.*, 8, 598
- Klose, M., Highland, L., Damm, B., Terhorst, B. (2014) “Estimation of direct landslide costs in industrialized countries: Challenges, concepts, and case study”, *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*, 661–667
- Massonnet, D., Feigl, K.L. (1998), “Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface”, *Rev. Geophys.*, 36, 441-500
- Massonnet, D., Rabaute, T. (1993), “Radar interferometry: limits and potential”, *IEEE Trans. Geosci. Remot. Sen.*, 31, 455-464
- Mattei, M., Funiciello, R., Kissel, C. (1995), “Paleomagnetic and structural evidence for Neogene block rotations in the Central Apennines, Italy”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, 863– 883
- McGuire, B. (2004), “World atlas of natural hazards”, London, Hodder Arnold, 120 p
- Meisina, C., Zucca, F., Notti, D., Colombo, A., Cucchi, A., Savio, G., Giannico, C., Bianchi, M. (2008), “Geological Interpretation of PSInSAR Data at Regional Scale”, *Sensors*, 8 (11), 7469-7492
- Nichol, J., Wong, M.S. (2005), “Satellite remote sensing for detailed landslide inventories using change detection and image fusion”, *International Journal of Remote Sensing*, 26:9, 1913-1926
- Nisio, S., Prestininzi, A., Scarascia Mugnozza, G. (1996), “I calanchi del settore settentrionale della fascia periadriatica abruzzese: quadro morfotettonico e loro caratterizzazione”, *Studi Geologici Camerti*, 14, 29–45
- Norrish, N.I. (2018), “Rattlesnake Hills Landslide Evaluation”, *Wyllie & Norrish Rock Engineers Inc.*
- Parise, M. (2001), “Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard”, *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, Volume 26, Issue 9, 697-703
- Parise, M., Wasowski, J. (1999), “Landslide activity maps for landslide hazard evaluation: three case studies from Southern Italy”, *Natural Hazards*, Vol. 20, 2-3, 159-183

- Peyret, M., Djamour, Y., Rizza, M., Ritz, J.F., Hurtrez, J.E., Goudarzi, M., Nankali, H., Chery, J., Le Dortz, K., Uri, F., (2008), “Monitoring of the large slow Kahrod landslide in Alborz mountain range (Iran) by GPS and SAR interferometry”, *Engineering Geology*, 100, 131-141
- Planet (2016), “Planet Imagery Product Specification: PlanetScope & Rapideye”
- Popescu, M.E. (2002), “Landslide causal factors and landslide remedial options”, *Proc. 3rd International Conference on Landslides, slope stability and safety of infrastructures*, Singapore, pp. 61-81
- Raucoules, D., de Michele, M., Malet, J.P., Ulrich, P. (2013), “Time-variable 3D ground displacements from high-resolution synthetic aperture radar (SAR). Application to La Valette landslide (South French Alps)”, *Remote Sensing of Environment*, Volume 139, 198-204
- Roer, G.I., Kääb, A., Dikau, R. (2005), “Rockglacier kinematics derived from small-scale aerial photography and digital airborne pushbroom imagery”, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 49, 73-87
- Rott, H., Nagler, T. (2006), “The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards”, *Advances in Space Research*, 37, 710-719
- Sauchyn, D., Trench, N. (1978), “Landsat applied to landslide mapping”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 44, No.6, 735-741
- Skakun, S., Vermote, E., Roger, J.C., Justice, C. (2017), “Multispectral Misregistration of Sentinel-2A Images: Analysis and Implications for Potential Applications”, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 14, 2408–2412
- Solari, L., Raspini, F., Del Soldato, M., Bianchini, S., Ciampalini, A., Ferrigno, F., Tucci, S., Casagli, N. (2018), “Satellite radar data for back-analyzing a landslide event: the Ponzano (Central Italy) case study”, *Landslides*, 15, 773–782
- Speranza, F., Sagnotti, L., Mattei, M. (1997), “Tectonics of the Umbria-Marche-Romagna Arc (central northern Apennines, Italy): new paleomagnetic constraints”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102, 3153–3166
- Strozzi, T., Farina, P., Corsini, A., Ambrosi, C., Thüring, M., Zilger, J., Wiesmann, A., Wegmüller, U., Werner, C. (2005), “Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry”, *Landslides*, Vol.2 (3), 193–201

- Stumpf, A., Malet, J.P., Allemand, P., Ulrich, P. (2014), “Surface reconstruction and landslide displacement measurements with Pléiades satellite images”, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 95, 1–12
- Stumpf, A., Malet, J.P., Puissant, A., Travelletti, J. (2016), “Monitoring of Earth Surface Motion and Geomorphologic Processes by Optical Image Correlation”, *Land Surface Remote Sensing*, 147-190
- Stumpf, A., Michéa, D., Malet, J.P. (2018), “Improved Co-Registration of Sentinel-2 and Landsat-8 Imagery for Earth Surface Motion Measurements”, *Remote Sens.*, 10, 160
- SWISS RE, Sigma No 1/2018, “Natural catastrophes and man-made disasters in 2017: A year of record breaking losses”, p. 58
- Tzampoglou, P., Loupasakis, C. (2017), “Evaluating geological and geotechnical data for the study of land subsidence phenomena at the perimeter of the Amyntaio coalmine, Greece”, *Int. J. Min. Sci. Technol.*
- Varnes, D. J. (1978), “Slope movement types and processes”, Special Report 176, *Landslides: Analysis and Control*, Transportation and Road Research Board, National Academy of Sciences, 11-33
- Vergni, L., Di Lena, B., Chiaudani, A. (2016), “Statistical characterization of winter precipitation in the Abruzzo region (Italy) in relation to the North Atlantic Oscillation (NAO)”, *Atmospheric Research*, Vol. 178-179, 279–290
- Wangensteen, B., Guðmundsson, Á., Eiken, T., Kääb, A., Farbrøt, H., Etzelmüller, B. (2006), “Surface displacements and surface age estimates for creeping slope landforms in Northern and Eastern Iceland using digital photogrammetry”, *Geomorphology*, Vol. 80, 59-79
- Wangensteen, B., Tønsberg, O.M., Kääb, A., Eiken, T., Hagen, J.O. (2006), “Surface elevation change and high resolution surface velocities for advancing outlets of Jostedalsgreen”, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 88:1, 55-74
- Washington Geological Survey (2018), “The Rattlesnake hills landslide Yakima county, WA”
- Werner, C., Wegmüller, U., Strozzi, T., Wiesmann, A. (2003), “Interferometric point target analysis for deformation mapping”, *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Toulouse, France, 7, 4362–4364

Yamaguchi, Y., Tanaka, S., Odajima, T., Kamai, T., Tsuchida, S. (2003), “Detection of a landslide movement as geometric misregistration in image matching of SPOT HRV data of two different dates”, International Journal of Remote Sensing, 24:18, 3523-3534

ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ

Valkaniotis, S., Ganas, A., Papathanassiou, G. (2017), “Rapid Mapping of the Amyntaio-Anargyroi landslide (Western Macedonia, Greece) using combined remote sensing techniques”

Δημητρακόπουλος, Δ. (2001), “Υδρογεωλογικές Συνθήκες Ορυχείου Αμυνταίου. Προβλήματα κατά την εκμετάλλευση και αντιμετώπιση τους”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Παυλόπουλος, Κ. (2011), “Γεωμορφολογία - Εφαρμογές στις γεωεπιστήμες”

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

ArcGIS Desktop, ArcMap, στον διαδικτυακό τόπο: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>, τελευταία πρόσβαση: 14/8/2018

CNN Greece, Αμύνταιο: Άλλαξε ο χάρτης μετά την κατολίσθηση-Αναγκαστική απαλλοτρίωση οικισμού, στον διαδικτυακό τόπο: <http://www.cnn.gr/news/ellada/story/84413/amyntaio-allaxe-o-xartis-meta-tin-katolisthisi-anagkastiki-apallotriosi-oikismoy-pics-vid>, τελευταία πρόσβαση: 18/6/2018

CNN Greece, Αυτό είναι το πόρισμα για την κατολίσθηση στο Ορυχείο Αμυνταίου, στον διαδικτυακό τόπο: <http://www.cnn.gr/news/ellada/story/95631/ayto-einai-to-porisma-gia-tin-katolisthisi-sto-oryxeio-amyntaioy>, τελευταία πρόσβαση: 18/6/2018

ESA, Sentinel-2 Mission Objectives, στον διαδικτυακό τόπο: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/mission-objectives>, τελευταία πρόσβαση: 9/6/2018

ESA, Sentinel-2 Multispectral Instrument (MSI) Overview, στον διαδικτυακό τόπο: <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>, τελευταία πρόσβαση: 9/6/2018

ESA, Sentinel-2 Overview, στον διαδικτυακό τόπο:

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/overview>, τελευταία πρόσβαση: 24/8/2018

ESA, Sentinel-2 Product Types, στον διαδικτυακό τόπο:

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types>, τελευταία πρόσβαση: 11/6/2018

ESA, Sentinel-2 Toolbox, στον διαδικτυακό τόπο: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox/>, τελευταία πρόσβαση: 18/6/2018

ESA, SNAP, στον διαδικτυακό τόπο: <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>, τελευταία πρόσβαση: 18/6/2018

ESA, Thematic Areas, στον διαδικτυακό τόπο: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/thematic-areas>, τελευταία πρόσβαση: 10/6/2018

ESA, Δορυφορικές τροχιές, στον διαδικτυακό τόπο:

https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_GR/SEMAPY4PVFG_2.html, τελευταία πρόσβαση: 9/6/2018

EXPRESS, Hundreds evacuated as ‘unstoppable’ LANDSLIDE tears apart Italian village, στον διαδικτυακό τόπο: <https://www.express.co.uk/travel/articles/771456/landslide-Abruzzo-italy>, τελευταία πρόσβαση: 25/8/2018

Geotechpedia, Huge ridge cracks near Yakima prompts evacuation warning, στον διαδικτυακό τόπο: <https://geotechpedia.com/News/Show/1279/Huge-ridge-cracks-near-Yakima-prompts-evacuation-warning>, τελευταία πρόσβαση: 25/8/2018

Glosbe, Multispectral Scanner, στον διαδικτυακό τόπο:

<https://el.glosbe.com/en/el/multispectral%20scanner>, τελευταία πρόσβαση: 9/6/2018

Google Earth

HARRIS GEOSPATIAL SOLUTIONS, ENVI, στον διαδικτυακό τόπο:

<https://www.harrisgeospatial.com/SoftwareTechnology/ENVI.aspx>, τελευταία πρόσβαση: 18/6/2018

iefimerida, Η κατολίσθηση των 80 εκατ. κυβικών χώματος άλλαξε τον χάρτη στο Αμύνταιο - Αεροφωτογραφίες δείχνουν το μέγεθος της καταστροφής, στον διαδικτυακό τόπο:

<http://www.iefimerida.gr/news/343519/i-katolisthisi-ton-80-ekat-kyvikon-homatos-allaxe-ton-harti-sto-amyntaio-aerofotografies>, τελευταία πρόσβαση: 18/6/2018

Microsoft, Microsoft Excel, στον διαδικτυακό τόπο: <https://products.office.com/el-gr/excel>, τελευταία πρόσβαση: 14/8/2018

Naturagraeca, Λίμνη Ζάζαρη, στον διαδικτυακό τόπο: <http://www.naturagraeca.com/ws/129,191,65,1,1,Λίμνη-Ζάζαρη>, τελευταία πρόσβαση: 18/6/2018

Naturagraeca, Λίμνη Χειμαδίτιδα, στον διαδικτυακό τόπο: <http://www.naturagraeca.com/ws/129,191,129,1,1,Λίμνη-Χειμαδίτιδα>, τελευταία πρόσβαση: 18/6/2018

Planet, Planet Imagery and Archive, στον διαδικτυακό τόπο: <https://www.planet.com/products/planet-imagery/>, τελευταία πρόσβαση: 25/8/2018

Planet, Planet Monitoring, στον διαδικτυακό τόπο: <https://www.planet.com/products/monitoring/>, τελευταία πρόσβαση: 11/6/2018

The Landslide Blog - AGU Blogosphere, Continuing concerns about the landslide dam at Attabad in Hunza, Pakistan, στον διαδικτυακό τόπο: <https://blogs.agu.org/landslideblog/2010/01/25/continuing-concerns-about-the-landslide-dam-at-attabad-in-hunza-pakistan/>, τελευταία πρόσβαση: 24/8/2018

The Landslide Blog - AGU Blogosphere, Ponzano di Civitella del Tronto: a highly destructive landslide in Italy, στον διαδικτυακό τόπο: <https://blogs.agu.org/landslideblog/2017/02/24/ponzano-di-civitella-del-tronto/>, τελευταία πρόσβαση: 25/8/2018

The Local, An 'unstoppable' landslide is tearing apart a village in central Italy, στον διαδικτυακό τόπο: <https://www.thelocal.it/20170223/landslide-tears-italian-village-apart-abruzzo-unstoppable>, τελευταία πρόσβαση: 13/06/2018

The New York Times, At Least 8 Are Missing After Landslide in Swiss Alps, στον διαδικτυακό τόπο: <https://www.nytimes.com/2017/08/24/world/europe/switzerland-landslide-missing.html>, τελευταία πρόσβαση: 24/8/2018

The Seattle Times, Some residents below slow-moving landslide near Yakima won't evacuate as crack widens, officials say, στον διαδικτυακό τόπο: <https://www.seattletimes.com/seattle-news/residents-below-slow-moving-landslide-near-yakima-wont-evacuate-as-crack-widens-officials-say/>, τελευταία πρόσβαση: 25/8/2018

THETOC, Δείτε τι προκάλεσε τη βιβλική κατολίσθηση στο Αμύνταιο, στον διαδικτυακό τόπο: <http://www.thetoc.gr/best-of-internet/article/deite-ti-prokalese-ti-bibliki-katolisthisi-sto-amuntaio>, τελευταία πρόσβαση: 25/8/2018

UiO Department of Geosciences, Image correlation software CIAS, στον διαδικτυακό τόπο: <http://www.mn.uio.no/geo/english/research/projects/icemass/cias/>, τελευταία πρόσβαση: 18/6/2018

Washington State Department of Natural Resources, Rattlesnake Hills Landslide, στον διαδικτυακό τόπο: <https://www.dnr.wa.gov/rattlesnake-hills-landslide>, τελευταία πρόσβαση: 13/06/2018

WSDOT Blog, What we're doing to prevent landslides near rail lines, στον διαδικτυακό τόπο: <https://wsdotblog.blogspot.com/2015/01/what-were-doing-to-prevent-landslides.html>, τελευταία πρόσβαση: 24/8/2018

ΔΕΗ, Πτολεμαΐδα / Αμύνταιο, στον διαδικτυακό τόπο: <https://www.dei.gr/el/oruxeia/ptolemaida-amuntaio>, τελευταία πρόσβαση: 18/6/2018

ΠΗΓΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Copernicus Open Access Hub, στον διαδικτυακό τόπο: <https://scihub.copernicus.eu/>

Planet, στον διαδικτυακό τόπο: <https://www.planet.com/products/planet-imagery/>

USGS EarthExplorer, στον διαδικτυακό τόπο: <https://earthexplorer.usgs.gov/>