

# Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών  
*Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος*

## Μεταπτυχιακή Διατριβή



**Αξιολόγηση και Δυνητική Παρακολούθηση της Εξέλιξης των Τεχνικών Έργων Αποκατάστασης σε Κατολισθέν Πρανές με Χρήση Δεδομένων Υπέρ-Υψηλής Ευκρίνειας από Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος (Drone). (Εφαρμογή στον Υπερχειλιστή του Φράγματος Αποσελέμη, Α. Κρήτη).**

**Χριστόφορος Καρατζάνης**

Επιβλέπων Καθηγητής  
Δρ. Γιώργος Χαρ. Μηλιαρέσης

Ιούνιος 2018

# **Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου**

**Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών**

**Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών  
Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος**

## **Μεταπτυχιακή Διατριβή**

**Αξιολόγηση και Δυνητική Παρακολούθηση της Εξέλιξης των Τεχνικών Έργων Αποκατάστασης σε Κατολισθέν Πρανές με Χρήση Δεδομένων Υπέρ-Υψηλής Ευκρίνειας από Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος (Drone). (Εφαρμογή στον Υπερχειλιστή του Φράγματος Αποσελέμη, Α. Κρήτη).**

**Χριστόφορος Καρατζάνης**

**Επιβλέπων Καθηγητής  
Δρ. Γιώργος Χαρ. Μηλιαρέσης**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στη Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

**Ιούνιος 2018**



## *Αφιερώσεις*

Στους Γονείς μου,  
στη Σύζυγο μου και  
στον αγαπημένο μου Γιό, τον μικρό Δημητράκο.

## Περίληψη

Η εργασία αυτή έχει σκοπό την δυνητική παρακολούθηση της εξέλιξης των τεχνικών έργων αποκατάστασης σε κατολισθθέν πρανές με χρήση δεδομένων υπέρ-υψηλής ευκρίνειας από Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος.

Οι στόχοι της εργασίας είναι αρχικά η τεχνική αξιολόγηση εκτεταμένης σε έκταση κατολίσθησης από δεδομένα υπέρ-υψηλής ανάλυσης με σύνθεση ψηφιακών υψομετρικών δεδομένων (ΨΥΜΕ), στη συνέχεια η εκτίμηση των επιπτώσεων και ο προγραμματισμός των τεχνικών έργων αποκατάστασης, και τέλος, η δυνατότητα επαναπροσδιορισμού των τεχνικών έργων ανάλογα με τα νέα δεδομένα που προκύπτουν κατά την εξέλιξη των εργασιών.

Το βασικό ερευνητικό ερώτημα αφορά στην αξιολόγηση και ένταξη της σύγχρονης τεχνολογίας των Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών στην αξιολόγηση κατολισθητικών φαινομένων με ασφάλεια, συνοπτικό τρόπο, και με σύνθεση δεδομένων με υπέρ-υψηλή χωρική ανάλυση, σε χρονικές στιγμές της επιλογής μας, που δεν είναι δυνατόν να υλοποιηθεί στο πεδίο λόγω κόστους και επικινδυνότητας αλλά και τη διερεύνηση της δυνατότητας ένταξης της σύγχρονης τεχνολογίας των Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών στην υλοποίηση και παρακολούθηση τεχνικών έργων σε τοπικό, αλλά και περιφερειακό επίπεδο.

Τα προσδοκώμενα αποτελέσματα είναι ψηφιακοί ορθοφωτοχάρτες και ψηφιακά μοντέλα υπερύψηλης ανάλυσης, που ενδεχομένως θα οριοθετήσουν ζώνες διαφορικής επικινδυνότητας ως προς το υπό μελέτη φαινόμενο, θα υποστηρίξουν την λήψη αποφάσεων σε σχέση με τα έργα αποκατάστασης, θα βοηθήσουν στον προγραμματισμό των εργασιών και τέλος, θα επιτρέψουν την ασφαλή πρόσβαση μέσω τηλεπισκοπικών εικόνων στο πεδίο.

Η αναγκαιότητα και σπουδαιότητα της έρευνας συσχετίζεται τόσο με την μείωση του κόστους και την καλύτερη εποπτεία αλλά και την κλιματική αλλαγή αφού τα ακραία καιρικά φαινόμενα που αποτελούν ένα πολύ σημαντικό παράγοντα (βροχοπτώσεις μεγάλης έντασης) στην χωρική εκδήλωση κατολισθήσεων. Εκτιμάται ότι τα κατολισθητικά φαινόμενα θα είναι πιο συχνά, πιο έντονα και με μεγαλύτερη χωρική έκταση, με αποτέλεσμα μεγάλες καταστροφές στις υποδομές (οδικό δίκτυο, φράγματα,, καλλιεργήσιμες εκτάσεις, στους οικισμούς κ.α). Από την άλλη πλευρά η πρόσβαση σε πεδίο κατολίσθησης είναι εξαιρετικά επικίνδυνη, μειώνοντας τις δυνατότητες ακριβούς χωρικής εκτίμησης των επιπτώσεων με

παραδοσιακές μεθόδους. Επομένως προκειμένου να αποτυπωθεί το συμβάν με μεγάλη χωρική ακρίβεια, να προσδιορισθούν επακριβώς τα έργα αποκατάστασης, και να παρακολουθηθεί η εξέλιξη τους, είναι απαραίτητο να διερευνηθούν οι δυνατότητες που προσφέρουν τα Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών -και το αντίστοιχο λογισμικό- σε αυτό το πεδίο.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή δομείται σε πέντε κεφάλαια: Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται βασικές έννοιες όσο αφορά τις κατολισθήσεις, την κλιματική αλλαγή και τον ρόλο που έχει διαδραματίσει στην εκδήλωση αυτών. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση για την εφαρμογή των κατάλληλων τεχνολογιών για την ανίχνευση, παρακολούθηση και έγκαιρη προειδοποίηση για την εξέλιξη των κατολισθητικών φαινομένων ανά τον κόσμο και τη σημασία αυτών για τον μετριασμό του κινδύνου. Το τρίτο κεφάλαιο αφορά την περιοχή αποτύπωσης της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, τον εξοπλισμό και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη και επεξεργασία των δεδομένων. Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται και τα δεδομένα που συλλέχθηκαν με το Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) 3DR SOLO, εξοπλισμένο με την κάμερα GoPro Hero 4 Black. Το τέταρτο κεφάλαιο αφορά στο σχολιασμό των αποτελεσμάτων από την αποτύπωση της κατολίσθησης. Αναφέρονται αναλυτικότερα τα υπέρ της χρήσης Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (Μ.Ε.Ι.Ο.) στην έρευνα της κατολίσθησης του φράγματος του Αποσελέμη. Στο πέμπτο κεφάλαιο βρίσκονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τα αποτελέσματα της αποτύπωσης.

## **Summary**

This paper examines monitoring and evaluation of restoration development techniques in landslides, using data from UAVs. It is about the presentation of this new and cost-effective three-dimensional photo formatting method.

The objectives of this paper are the technical assessment of the extent of landslide from ultra high resolution data by composing DEMs and photo mosaics, the impact assessment and planning of remedial engineering projects and the the possibility of redefining the technical works according to the new data that arise during the progress of the works.

The main research question concerns the evaluation and integration of modern drones technology in the assessment of landslide phenomena safely, in a concise way, and with data synthesis with ultra-high spatial resolution at times of our choice that cannot be implemented in the field due to cost and risk, and exploring the possibility of incorporating modern drones technology into the implementation and monitoring of technical projects at local and regional level.

The expected results are digital orthophotomaps and digital elevation models of ultra-high resolution. To support decision-making in relation to restoration projects and assist in the planning of work, allowing secure access to the field through remote sensing terrain visualization.

The necessity and importance of this research effort is related both to cost reductions and better surveillance but also to climate change since extreme weather events, which are a very important factor (heavy rainfall), in the spatial manifestation of landslides. It is estimated that landslide phenomena will be more frequent, more intense and with greater spatial extent, resulting in major disasters in infrastructure (road network, dams, arable land, settlements, etc.). On the other hand, access to landslide is extremely risky, reducing the scope for accurate spatial impact assessment using traditional methods. Therefore, in order to capture the event with great spatial accuracy, accurately identify the recovery works, and monitor the landslide process evolution in time and in space, it is necessary to explore the possibilities offered by the drones - and the corresponding software - in this field.

The structure of this paper consists of in five chapters. The first chapter presents and analyzes basic concepts of landslides and how climate changes connects with triggering factors of landslides. The second chapter provides a bibliographic review of appropriate technologies applications for detection, monitoring and early warning procedures of landslides' evolution, around the world, and the importance for mitigating risk. The plot area of this paper, the equipment and the software used is analyzed in the third chapter. Also the data collected from the UAV 3DR SOLO, equipped with GoPro Hero 4 Black are included in this particular chapter. The presentation of the results from the capture of the landslide is in the fourth chapter. More details are given in favor of the use of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in the survey of the landslide of Aposelemis Dam. In the fifth chapter are the conclusions drawn from the results of this survey.

## **Ευχαριστίες**

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους από τους ανθρώπους που γνώρισα, συνεργάστηκα μαζί τους και έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίησή της.

Πρώτο από όλους θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας, Καθηγητή Γεώργιο Χαρ. Μηλιαρέση, για την πολύτιμη καθοδήγηση του και την εμπιστοσύνη και εκτίμηση που μου έδειξε.

Θα θελα επίσης να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στους γονείς μου και τη σύζυγο μου, που με υπομονή και κουράγιο πρόσφεραν την απαραίτητη ηθική συμπαράσταση για την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

# Πινάκας περιεχομένων

## Κεφάλαιο 1

1

1.1 Τι είναι κατολίσθηση .....	1
1.2 Βασικά συστήματα ταξινόμησης.....	6
1.3 Χωρο-χρονικοί παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνιση των κατολισθήσεων	12
1.4 Καταγραφή προβλήματος.....	20

## Κεφάλαιο 2

29

Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	29
2.1 Σημασία ανίχνευσης και παρακολούθησης κατολισθήσεων .....	29
2.2 Παραδειγματικές περιπτώσεις.....	31
2.3 Χρήση Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (Μ.Ε.Ι.Ο.) για έγκαιρη προειδοποίηση.....	31
2.3.1. Εισαγωγή.....	31
2.3.2 Διεξαχθείσες έρευνες - παρουσίαση μεθόδων .....	33
2.3.1.3 Συμπεράσματα έρευνας.....	39
2.4. Χρήση multi-copter στην έρευνα των κατολισθήσεων .....	40
2.4.1 Εισαγωγή.....	40
2.4.2 Οικογένεια multi-copter τύπου Saturn .....	41
2.4.3 Εφαρμογές σε αποστολές αποτύπωσης κατολισθήσεων.....	44
2.4.4 Συμπεράσματα έρευνας .....	47
2.5. Παρακολούθηση της εξέλιξης μιας κατολίσθησης με Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.).....	48
2.5.1 Εισαγωγή.....	48
2.5.2 Περιγραφή εξοπλισμού .....	49
2.5.3 Γεωαναφορά δεδομένων .....	49
2.5.4 Συλλογή δεδομένων .....	50
2.5.5 Συμπεράσματα έρευνας .....	52
2.6 Εκτίμηση της ακρίβειας παρακολούθησης κατολισθήσεων με Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.).....	54
2.6.1 Εισαγωγή.....	54
2.6.2 Περιγραφή εξοπλισμού .....	55

2.6.3 Καταλληλότητα Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (Μ.Ε.Ι.Ο.) για παρακολούθηση .....	55
2.6.4 Περιγραφή εξοπλισμού .....	57
2.6.5 Περιοχή μελέτης .....	58
2.6.6 Συμπεράσματα έρευνας - Αξιολόγηση ακριβείας .....	60
2.7 Χρήση Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (Μ.Ε.Ι.Ο.) στην καταγραφή και παρακολούθηση εκτεταμένης κατολίσθησης .....	62
2.7.1 Εξοπλισμός.....	63
2.7.2 Περιοχή μελέτης και περιγραφή συμβάντος .....	63
2.8 Συμπέρασμα βιβλιογραφικής ανασκόπησης .....	70
<b>Κεφάλαιο 3</b>	<b>74</b>
Μεθοδολογία .....	74
3.1 Περιοχή μελέτης - Φράγμα Αποσελέμη .....	74
3.1.1 Γεωμορφολογία.....	75
3.1.2 Στρωματογραφία.....	75
3.1.3 Τεκτονική .....	76
3.1.4 Στάθμη υπόγειου νερού .....	76
3.2 Κατολίσθηση πρानούς υπερχειλιστή Φράγματος Αποσελέμη.....	78
3.3 Τεχνικές λήψης δεδομένων.....	81
3.3.1 Σχεδιασμός πτήσεων με Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) με το λογισμικό Mission Planner.....	81
3.3.2 Εξοπλισμός αποτύπωσης .....	83
3.3.3 Δημιουργία 3D μοντέλου κατολίσθησης με το Agisoft Photoscan.....	87
3.3.4 Τρόπος λειτουργίας του λογισμικού Agisoft Photoscan.....	90
3.4 Δεδομένα από Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος.....	93
<b>Κεφάλαιο 4</b>	<b>130</b>
Σχολιασμός αποτελεσμάτων .....	130
<b>Κεφάλαιο 5</b>	<b>136</b>
Συμπέρασμα.....	136
<b>Κεφάλαιο 6</b>	<b>138</b>
Βιβλιογραφία.....	138

# Πίνακες / Εικόνες / Σχήματα

## ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1. Ταξινόμηση μετακίνησης πρανών κατά Varnes (1978).....	8
Πίνακας 2. Ταξινόμηση θραύσεων-μετακινήσεων σε βραχώδη πρανή, (Hoek-Bray, 1977). .....	11
Πίνακας 3. Ορισμός χαρακτηριστικών των διαστάσεων και γεωμετρικών στοιχείων μιας τυπικής περιστροφικής κατολίσθησης σύμφωνα με την Επιτροπή κατολισθήσεων της Διεθνούς Ένωσης Τεχνικής Γεωλογίας (IAEG Commission on Landslides, 1990). Οι αριθμοί σε παρένθεση αναφέρονται στο Σχήμα 8 (β). .....	21
Πίνακας 4. Περιγραφή των χαρακτηριστικών και ονοματολογίας μιας περιστροφικής κατολίσθησης σύμφωνα με την Επιτροπή Κατολισθήσεων της Διεθνούς Ένωσης Τεχνικής Γεωλογίας (IAEG Commission on Landslides 1990). Οι αριθμοί σε παρένθεση αναφέρονται στο Σχήμα 8 (α).....	23
Πίνακας 5. Σύγκριση μεθόδων παρακολούθησης κατολισθήσεων (Casagli et al., 2017)...	37
Πίνακας 6. Τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων τηλεπισκόπησης (Casagli et al., 2017) .....	39
Πίνακας 7. Τυπικές χωρικές αναλύσεις και οπτικά πεδία διαφορετικών πλατφορμών τηλεπισκόπησης - με χωρικό κενό διακριτικής ικανότητας μεταξύ 1 και 10 cm το οποίο θα μπορούσε να γεμίσει με μικρά Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (M.E.I.O.). (Nebiker S. et al., 2008).....	39
Πίνακας 8 Τεχνικά χαρακτηριστικά κάμερας GoPro Hero 4Black.....	87
Πίνακας 9. Συντεταγμένες λήψης 44 φωτογραφιών από την αποτύπωση της περιοχής κατολίσθησης με Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος.....	98

## ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1. Παρουσίαση του Saturn Mini X-21 Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος (Rossi et al., 2017).....	43
Εικόνα 2. Το Saturn 2 Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος, σχεδιασμένο και κατασκευασμένο στο Department of Earth Sciences του University of Florence. (Rossi et al., 2017).....	43
Εικόνα 3. Δημιουργία καμπύλων ίσης μετατόπισης σε μάζα κατολίσθησης (Vid Peterman, 2015).....	51

Εικόνα 4. Γεωμορφολογικός χάρτης της κατολίσθησης στο Hollin Hill (M. V. Peppra et al., 2016).....	59
Εικόνα 5. Η περιοχή έρευνας στο Pechgraben (Linder G. et al., 2016) .....	64
Εικόνα 6. Cosi-Corr surface movement maps; (a) 2011B–2012A; (b) 2012A–2013A; (coordinate system: GDA94 UTM55S) (Turner D. et al., 2014) .....	71
Εικόνα 7. Περιοχή Φράγματος Αποσελέμη (Google Earth).....	74
Εικόνα 8. Όψη της κατολίσθησης (Γεω. Περ. Σύμβουλοι Μηχανικοί Α. Ε., 2017).....	78
Εικόνα 9. Τοπογραφική αποτύπωση στο φρύδι της κατολίσθησης (Γεω. Περ. Σύμβουλοι Μηχανικοί Α. Ε., 2017).....	79
Εικόνα 10. Όψη της κατολισθαίνουσας μάζας (Γεω. Περ. Σύμβουλοι Μηχανικοί Α. Ε., 2017).....	79
Εικόνα 11. Αποκάλυψη των αγκυρίων που είχαν τοποθετηθεί στο πρανές (Γεω. Περ. Σύμβουλοι Μηχανικοί Α. Ε., 2017).....	80
Εικόνα 12. Πανοραμική απεικόνιση της περιοχής κατολίσθησης (Γεω. Περ. Σύμβουλοι Μηχανικοί Α. Ε., 2017).....	80
Εικόνα 13. Περιβάλλον εργασίας του Mission Planner.....	81
Εικόνα 14. Τυπικό πλάνο σχεδιασμού πτήσης και λήψης φωτογραφιών (Servet Yaprak et al, 2018) .....	82
Εικόνα 15. Το τετρακόπτερο Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.), 3DR SOLO, της εταιρίας 3D Robotics.....	84
Εικόνα 16. Το Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) 3DR SOLO και ο συνοδός εξοπλισμός του. ....	85
Εικόνα 17. Η GoPro Hero 4Black προσαρμοσμένη στον βραχίονα του τετρακόπτερου Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) 3DR SOLO.....	86
Εικόνα 18. Η κάμερα GoPro Hero 4 Black, που χρησιμοποιήθηκε.....	86
Εικόνα 19. Περιβάλλον εργασίας του Agisoft Photoscan Pro, που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων. ....	88
Εικόνα 20. Σενάρια λήψης φωτογραφιών του υπό μελέτη αντικειμένου ( <a href="http://www.agisoft.com">http://www.agisoft.com</a> ).....	92
Εικόνα 21. Προετοιμασία εξοπλισμού στο πεδίο για την αποτύπωση.....	94
Εικόνα 22. Πορεία πτήσης Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους πάνω από την κατολίσθηση και σημεία λήψης φωτογραφιών - Πτήση 1.....	95

Εικόνα 23. Πορεία πτήσης Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους πάνω από την κατολίσθηση και σημεία λήψης φωτογραφιών - Πτήση 2.....	95
Εικόνα 24. Θέσεις λήψεως φωτογραφιών κατά την αποτύπωση .....	96
Εικόνα 25. Θέσεις λήψεως φωτογραφιών κατά την αποτύπωση .....	96
Εικόνα 26. Τρόποι αλληλεπικάλυψης κατά τη διάρκεια λήψης φωτογραφιών (Antonio D'Argenio, 2012).....	97
Εικόνα 27. Λήψη φωτογραφίας Νο 1 .....	99
Εικόνα 28. Λήψη φωτογραφίας Νο 2 .....	99
Εικόνα 29. Λήψη φωτογραφίας Νο 3 .....	100
Εικόνα 30. Λήψη φωτογραφίας Νο 4 .....	100
Εικόνα 31. Λήψη φωτογραφίας Νο 5 .....	101
Εικόνα 32. Λήψη φωτογραφίας Νο 6 .....	101
Εικόνα 33. Λήψη φωτογραφίας Νο 7 .....	102
Εικόνα 34. Λήψη φωτογραφίας Νο 8 .....	102
Εικόνα 35. Λήψη φωτογραφίας Νο 9 .....	103
Εικόνα 36. Λήψη φωτογραφίας Νο 10.....	103
Εικόνα 37. Λήψη φωτογραφίας Νο 11.....	104
Εικόνα 38. Λήψη φωτογραφίας Νο 12.....	104
Εικόνα 39. Λήψη φωτογραφίας Νο 13.....	105
Εικόνα 40. Λήψη φωτογραφίας Νο 14.....	105
Εικόνα 41. Λήψη φωτογραφίας Νο 15.....	106
Εικόνα 42. Λήψη φωτογραφίας Νο 16.....	106
Εικόνα 43. Λήψη φωτογραφίας Νο 17.....	107
Εικόνα 44. Λήψη φωτογραφίας Νο 18.....	107
Εικόνα 45. Λήψη φωτογραφίας Νο 22.....	108
Εικόνα 46. Λήψη φωτογραφίας Νο 23.....	108
Εικόνα 47. Λήψη φωτογραφίας Νο 24.....	109
Εικόνα 48. Λήψη φωτογραφίας Νο 25.....	109
Εικόνα 49. Λήψη φωτογραφίας Νο 26.....	110
Εικόνα 50. Λήψη φωτογραφίας Νο 29.....	110
Εικόνα 51. Λήψη φωτογραφίας Νο 30.....	111
Εικόνα 52. Λήψη φωτογραφίας Νο 31.....	111
Εικόνα 53. Λήψη φωτογραφίας Νο 32.....	112

Εικόνα 54. Λήψη φωτογραφίας Νο 33.....	112
Εικόνα 55. Λήψη φωτογραφίας Νο 34.....	113
Εικόνα 56. Λήψη φωτογραφίας Νο 35.....	113
Εικόνα 57. Λήψη φωτογραφίας Νο 36.....	114
Εικόνα 58. Λήψη φωτογραφίας Νο 37.....	114
Εικόνα 59. Λήψη φωτογραφίας Νο 40.....	115
Εικόνα 60. Λήψη φωτογραφίας Νο 41.....	115
Εικόνα 61. Λήψη φωτογραφίας Νο 42.....	116
Εικόνα 62. Λήψη φωτογραφίας Νο 43.....	116
Εικόνα 63. Λήψη φωτογραφίας Νο 44.....	117
Εικόνα 64. Νέφος σημείων (αραιό) .....	118
Εικόνα 65. Νέφος σημείων (αραιό) .....	118
Εικόνα 66. Νέφος σημείων (πυκνό) .....	119
Εικόνα 67. Νέφος σημείων (πυκνό) .....	119
Εικόνα 68. Δημιουργία του πολυγωνικού πλέγματος.....	120
Εικόνα 69. Δημιουργία του πολυγωνικού πλέγματος.....	120
Εικόνα 70. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης.....	121
Εικόνα 71. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης.....	121
Εικόνα 72. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης.....	122
Εικόνα 73. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης.....	122
Εικόνα 74. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης.....	123
Εικόνα 75. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης.....	123
Εικόνα 76. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης.....	124
Εικόνα 77. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης.....	124
Εικόνα 78. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης.....	125
Εικόνα 79. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης.....	125
Εικόνα 80. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης.....	126
Εικόνα 81. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους.....	127
Εικόνα 82. Ορθοφωτοχάρτης περιοχής αποτύπωσης .....	127
Εικόνα 83. Ορθοφωτοχάρτης περιοχής αποτύπωσης σε περιβάλλον Google Earth.....	128
Εικόνα 84. Ορθοφωτοχάρτης περιοχής αποτύπωσης σε περιβάλλον Google Earth.....	128
Εικόνα 85. Ορθοφωτοχάρτης περιοχής αποτύπωσης σε περιβάλλον Google Earth.....	129
Εικόνα 86. Ορθοφωτοχάρτης περιοχής αποτύπωσης σε περιβάλλον Google Earth.....	129

## ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση υπολογισμού συντελεστή ασφάλειας πρανούς (Hoek & Bray).....	4
Σχήμα 2. Τύποι κατολισθήσεων (Varnes 1978, τροποποιημένο από Cruden & Varnes 1996).....	8
Σχήμα 3. Προοδευτική μείωση του ΣΑ ενός πρανούς μέχρι το επίπεδο ενεργής αστάθειας (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).....	15
Σχήμα 4. Διαστασιολόγηση κατολίσθησης (Hoek & Bray).....	15
Σχήμα 5. Μοντέλα ροής υπόγειου νερού για κυκλική ανάλυση αστοχίας. Στις περιπτώσεις 2-4, η θέση του υδροφόρου ορίζοντα καθορίζεται από το λόγο $x/H$ . (Hoek & Bray).....	16
Σχήμα 6. Νομόγραμμα κυκλικής αστοχίας για κατάσταση νερού 3 (Hoek & Bray) .....	16
Σχήμα 7. Εξέλιξη των μεταβολών της ταχύτητας δύο τμημάτων της κατολίσθησης La Clapière συναρτήσει των ημερήσιων βροχοπτώσεων που καταγράφεται στο Saint-Etienne-de-Tinée σε διάστημα 33 ετών (στοιχεία από Meteo-France περιόδου 1967-2008 & από OMIV περιόδου 2010 - 2015). Οι γραμμές δείχνουν την εξέλιξη της μέσης ταχύτητας. Η χρονοσειρά της ταχύτητας κατασκευάζεται από προηγούμενες μελέτες (Follacci 1987, Helmstetter et al., 2004, Schlögel et al., 2015b) για τα δεδομένα αναφοράς (δεδομένα από την CEREMA).....	17
Σχήμα 8. Συσχετισμός μεταξύ μετατοπίσεων από PS και βροχοπτώσεων (ENVISAT, φθίνουσα τροχιά) (Rosi A, et al., 2013) .....	18
Σχήμα 9. Συσχετισμός μεταξύ βροχοπτώσεων και μηνιαίων μετρήσεων εδαφικών μετατοπίσεων από RSI (radar satellite interferometry) (ENVISAT, αύξουσα τροχιά) (Rosi A, et al., 2013).....	19
Σχήμα 10. (α) Μορφή, χαρακτηριστικά και ονοματολογία περιστροφικής ολίσθησης (β) Τυπικές διαστάσεις περιστροφικής ολίσθησης (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).....	24
Σχήμα 11. Σκαρίφημα μορφολογίας κατολίσθησης (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007) .....	24

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Τι είναι κατολίσθηση

Στο γενικό όρο Μετακίνηση Μαζών (Mass Movement ή Mass Wasting) περιλαμβάνονται όλες οι βαρυτικές και προς τα κατόντη ενός πρανούς μετακινήσεις αποσαθρωμένων πετρωμάτων. Ο όρος υποδηλώνει ότι η δύναμη της βαρύτητας είναι η κύρια δύναμη ενεργοποίησης μετακινήσεων μαζών και ότι στη διαδικασία δεν συμπεριλαμβάνεται απαραίτητα κάποιο μέσο μεταφοράς όπως ο αέρας, το τρεχούμενο νερό, ο πάγος ή η ρέουσα λάβα.

Η μετακίνηση υλικού προς τα κατόντη μιας πλαγιάς συμβαίνει όταν η δύναμη της βαρύτητας υπερβαίνει τη δύναμη της τριβής. Το μέγεθος της δύναμης που προκαλεί τη μετακίνηση των μαζών εξαρτάται από δυο παράγοντες: τον όγκο του υλικού που μετακινείται και την κλίση της πλαγιάς ή του πρανούς (Vid. Peterman, 2015).

Συχνά μάζες βράχων, χιονιού και πάγου αποκολλώνται σε απότομες πλαγιές ορεινών περιοχών και κινούνται προς κατόντη. Οι μάζες, οι οποίες τυπικά έχουν τη μορφή αναρίθμητων διακριτών τεμαχίων ή κόκκων, επιταχύνουν αρχικά έως ότου η γωνία κλίσης της πλαγιάς πλησιάσει την οριζόντιο και η τριβή τους φέρει σε κατάσταση ηρεμίας. (Savage S.B. and Hutter K., 1989)

Ο όρος κατολίσθηση αποδίδει «την περιγραφή ενός φυσικού φαινομένου που συνίσταται στη μετακίνηση προς τα κατόντη και προς τα έξω των υλικών που αποτελούν τα πρανή, φυσικά ή τεχνητά, δηλαδή των πετρωμάτων, των εδαφών και των μεταφερομένων υλικών ή του συνδυασμού των υλικών αυτών» (Γ. Κούκης, 1985).

Σύμφωνα με τον Varnes, 1978, ο όρος **“Slope Movement”** (Μετακίνηση υλικών επί της πλαγίας) είναι περισσότερο ευρύς και γενικός και υποδηλώνει την προς τα κατόντη και προς τα έξω κίνηση υλικών που συνθέτουν τα πρανή, υπό την επίδραση της βαρύτητας (Casagli et al., 2017).

Αν και ο όρος **“Κατολίσθηση”** είναι ο πλέον κοινός και ευρέως χρησιμοποιούμενος, ο Brunsden (1984), προτείνει τον όρο “Μετακίνηση Μαζών”, καθώς πρόκειται για μια διαδικασία που δεν απαιτεί την ύπαρξη μεταφορικού μέσου όπως νερό, αέρα ή πάγος. Αργότερα ο Cruden, 1991 χρησιμοποίησε τον όρο “Landslides” (κατολίσθηση) για να περιγράψει την κίνηση πετρώματος, εδάφους ή κορημάτων προς τα κατόντη ενός πρανούς.

Ο όρος **“κατολισθητικά φαινόμενα”** είναι ο πλέον αποδεκτός για όλες τις αστοχίες πρανών, ερπυσμούς, ολισθήσεις, ροές, ανατροπές, καταπτώσεις, κλπ, σε ξηρά και θάλασσα.

Ο όρος **“κατολίσθηση (Landslide)”** αναφέρεται μόνο στις ταχέως εκδηλούμενες κινήσεις εδαφικών μαζών και αφορά περιπτώσεις που “η ελκτική δύναμη της βαρύτητας σε γεωλογικούς σχηματισμούς υπερβαίνει την αντίσταση τριβής για κίνηση προς τα κάτω”.

Διάφοροι ορισμοί έχουν δοθεί κατά καιρούς για τις κατολισθήσεις, μερικές από τις οποίες είναι:

A. “μία γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος, εναπομένοντος εδάφους ή ιζήματος ενός πρανούς, της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω”, Terzaghi (1950).

B. “μία γρήγορη κίνηση που οφείλεται στην ολίσθηση πετρωμάτων ενός τμήματος πρανούς που διαχωρίζεται από το υπόλοιπο σταθερό τμήμα με μία καλά καθορισμένη επιφάνεια”, Zaruba - Mencl (1969).

C. Ο Coates (1977), δίνει τους παρακάτω όρους-προϋποθέσεις για κατάταξη μίας κίνησης στις κατολισθήσεις:

- Να ανήκει στις κινήσεις μαζών.
- Η δύναμη που παίζει πρωτεύοντα ρόλο να είναι η βαρύτητα.
- Το μετακινούμενο υλικό να είναι τμήμα όρους ή λόφου
- Το μετακινούμενο υλικό να περιλαμβάνει μέρος του μανδύα ή του μητρικού πετρώματος ή και τα δύο.
- Η ζώνη ή το επίπεδο της κίνησης να μην ταυτίζεται με γεωλογικό ρήγμα.
- Η κίνηση να γίνεται προς τα κάτω και προς τα έξω με ελεύθερη επιφάνεια.
- Η ταχύτητα της κίνησης να είναι σχετικά μεγάλη (ο ερπυσμός όχι).
- Η κίνηση να εκδηλώνεται με πτώση, ολίσθηση ή ροή.

D. "κίνηση πρανών" αντί του όρου "κατολίσθηση" που περιλαμβάνει κάθε κίνηση πρανούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό (Varnes, 1980, συμφωνεί και ο Nemcok, 1982).

#### Συντελεστής Ασφάλειας ενός πρανούς:

Για να γίνει κατανοητή η αιτιολογία και ο μηχανισμός εκδήλωσης των κατολισθητικών φαινομένων, είναι σκόπιμο να εισαχθεί η έννοια του Συντελεστή Ασφάλειας (ΣΑ).

Κάθε πρανές αποτελεί ένα πολύπλοκο δυναμικό σύστημα του οποίου, η συμπεριφορά σχετικά με την κατάσταση ευστάθειάς του μεταβάλλεται συνεχώς στην πορεία του χρόνου. Σε κάθε χρονική στιγμή, η κατάσταση ή ο βαθμός ευστάθειας του πρανούς εκφράζεται ποσοτικά, από την αριθμητική τιμή του Συντελεστή Ασφάλειας ΣΑ. Ο ΣΑ είναι ο λόγος της διατμητικής αντοχής της μάζας του γεωλογικού του υλικού (εδαφική μάζα ή βραχομάζα ή μεικτού τύπου μάζα) - δηλαδή της αντίστασης στη μετακίνηση της κατά μήκος μιας ή περισσότερων επιφανειών - προς τις επικρατούσες σε αυτήν διατμητικές τάσεις - εγγενείς ή επιβαλλόμενες που επικουρούν το έργο της βαρύτητας.

Δηλαδή,  $SA = \frac{s}{\tau}$ , όπου  $s$  είναι η διατμητική αντοχή και  $\tau$  οι διατμητικές τάσεις. Όταν  $SA=1$ ,

σημαίνει ότι βρισκόμαστε σε κατάσταση οριακής ή ασταθούς ισορροπίας και οδηγούμαστε σε εκδήλωση κατολίσθησης.



Οι σχετιζόμενοι με τη γεωτεκτονική εξέλιξη - λιθολογική διάρθρωση ονομάζονται "πρωτογενείς", ενώ οι σχετιζόμενοι με τη γεωμηχανική συμπεριφορά "δευτερογενείς" (Peppas et al., 2016).

Στους πρωτογενείς παράγοντες που οφείλονται σε φυσικές διεργασίες περιλαμβάνονται :

- i. Η γεωλογική δομή και η τεκτονική της περιοχής
- ii. Η γεωδυναμική εξέλιξη σε περιοχές με νεοτεκτονική δραστηριότητα (π.χ. η τάφρος του Κορινθιακού)
- iii. Η λιθολογική διάρθρωση της περιοχής (συγκεκριμένες δομές ευνοούν περισσότερο την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων)
- iv. Η κινητικότητα του υπόβαθρου (επανάδραση παλαιών ρηγμάτων)
- v. Η σεισμικότητα
- vi. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα

Οι δευτερογενείς παράγοντες που αποτελούν το αίτιο μείωσης της ευστάθειας και το έναυσμα αστοχίας είναι αποτέλεσμα φυσικών διεργασιών είτε ανθρωπογενούς παρέμβασης, διακρίνονται σε:

1. Ενδογενείς, οι αναφερόμενοι σε μείωση της αντοχής, όπως:

- ✓ Οι διαβρωτικές διεργασίες.
- ✓ Η φυσική και χημική αποσάθρωση.
- ✓ Οι υπερβολικές διακυμάνσεις του περιεχόμενου νερού.
- ✓ Η αύξηση της πίεσης των πόρων.

2. Εξωγενείς, οι αναφερόμενοι σε αύξηση των τάσεων, όπως.

- ✓ Υπερφόρτιση του πρανούς.
- ✓ Εκσκαφές στη βάση του πρανούς (απομάκρυνση αντιστήριξης στον πόδα).
- ✓ Αύξηση του ύψους και της κλίσης του πρανούς.
- ✓ Φυσικές (κυματισμός κλπ) ή τεχνητές (εκρήξεις, κινήσεις βαρέων οχημάτων κλπ) δονήσεις.
- ✓ Αποψιλώσεις ποικίλης αιτιολογίας.

## 1.2 Βασικά συστήματα ταξινόμησης

Τα δύο πιο γνωστά συστήματα ταξινόμησης των κατολισθήσεων, που εξελίχθηκαν βέβαια στην πορεία του χρόνου και είναι γενικότερα αποδεκτά σήμερα, είναι αυτά που προτάθηκαν από τον J.N. Hutchinson (1968) και D.J. Varnes (1978). Και τα δύο βασίζονται στις παρακάτω τέσσερις κύριες παραμέτρους:

- α. τύπος κίνησης, (5 τύποι: ολισθήσεις, καταπτώσεις, ανατροπές, πλευρικές εξαπλώσεις, ροές-ρεύματα)
- β. τύπος υλικού, (3 τύποι: βραχώδεις, εδαφικό, κορήματα),
- γ. ταχύτητα κίνησης, (7 φάσματα τιμών: από εξαιρετικά ταχεία 5μ/δευτ., έως εξαιρετικά αργή  $\leq 50$ χλστ/έτος)
- δ. περιεχόμενη υγρασία. (4 κατηγορίες: ξηρή κατάσταση, παρουσία υγρασίας αλλά όχι κινούμενο νερό, σημαντική παρουσία νερού κινούμενου ή επιφανειακά λιμνάζοντος, και πλήρως κορεσμένο με νερό υλικό που ρέει σαν ρευστό σε μικρές κλίσεις πρανούς )

Το σύστημα ταξινόμησης του **Varnes** (1978), περιλαμβάνει όλους τους τύπους μετακίνησης που θα μπορούσαν να παρατηρηθούν σε πρανή (εκτός κλασσικών καθιζήσεων) και όχι μόνο των κατολισθήσεων με τη στενή έννοια. Ο κάθε ταξινομικός τύπος εκφράζεται από δύο ονόματα. Το πρώτο αναφέρεται στον τεχνικογεωλογικό τύπο του υλικού και το δεύτερο στον τεχνικογεωλογικό τύπο της κίνησης (Πίνακας 1).

Έτσι, ανάλογα με τον τεχνικογεωλογικό τύπο του υλικού, διακρίνουμε:

- i. την κατηγορία των βραχωδών σχηματισμών (rock), όπου η κίνηση αναφέρεται είτε σε συμπαγή-μεμονωμένα τεμάχια, είτε σε βραχομάζα (rockmass) αποτελούμενη από σύνολο βραχωδών τεμαχίων διακεκριμένων μέσω δομικών ασυνεχειών (διακλάσεις, στρώσεις, κλπ) και
- ii. δύο κατηγορίες εδαφικών σχηματισμών: τα κορήματα (debris) με επικράτηση αδρομερούς-χονδρόκοκκου υλικού και τις γαίες (earth) με επικράτηση του λεπτομερούς-λεπτόκοκκου υλικού

Ανάλογα δε, με τον τύπο της κίνησης, διακρίνουμε:

- i. τις καταπτώσεις (falls)
- ii. τις ανατροπές (topples)

- iii. τις ολισθήσεις (slides)
- iv. τις πλευρικές εξαπλώσεις (lateral spreads)
- v. τις ροές (flows)
- vi. τις σύνθετες κινήσεις (complex)

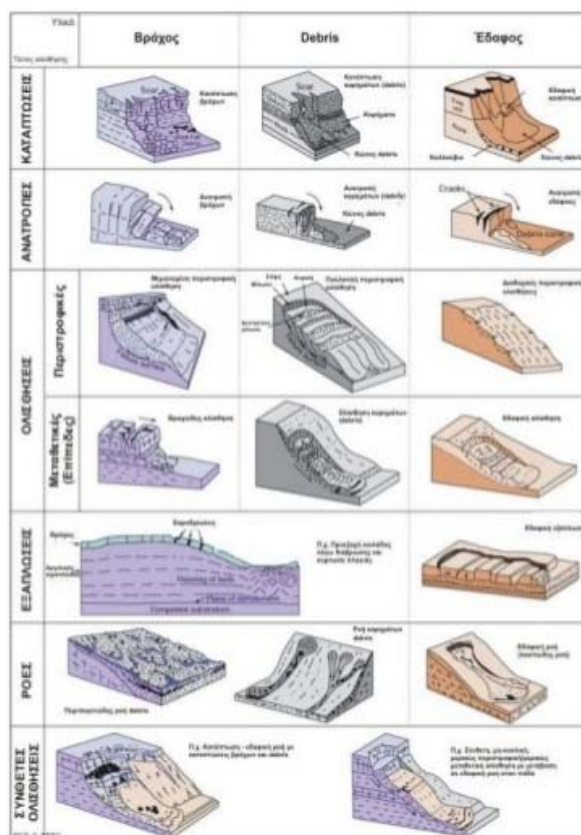
Ας σημειωθεί τέλος ότι, ο τύπος της σύνθετης κατολίσθησης δεν εμφανίζεται στην επίσημη, ισχύουσα σήμερα ταξινόμηση, παρά το γεγονός ότι οι περισσότερες κατολισθητικές κινήσεις είναι σύνθετες. Δηλαδή, συνδυάζουν περισσότερες του ενός τύπου κινήσεις, πλην όμως, σχεδόν πάντοτε ένας τύπος είναι ο χαρακτηριστικός που επικρατεί.

ΤΥΠΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ (αστοχίας)		ΤΥΠΟΣ ΥΛΙΚΟΥ (πριν την κίνηση)		
		Βραχώδης σχηματισμός	Εδαφικός σχηματισμός	
			Επικρατούν τα αδρομερή υλικά, <i>κορήματα (debris)</i>	Επικρατούν τα λεπτόκοκκα υλικά, <i>γαίες (earth)</i>
<b>Πτώσεις</b>		Πτώσεις βράχων	Πτώσεις κορημάτων	Πτώσεις γαιών
<b>Ανατροπές</b>		Ανατροπές βράχων	Ανατροπές κορημάτων	Ανατροπές γαιών
<b>Ολισθήσεις</b>	<b>Περιστροφικές</b>	μικρή καθίζηση (αρχικά) και Περιστροφή βράχων	μικρή καθίζηση (αρχικά) και Περιστροφή κορημάτων	μικρή καθίζηση (αρχικά) και Περιστροφή γαιών
	<b>Μεταθετικές</b> (ή στρωματοειδείς)	Ολίσθηση ενιαίας βραχομάζας (με παρουσία ή μη διακλάσεων)	Ολίσθηση κορημάτων	Ολίσθηση γαιών

<b>Πλευρικές εκτάσεις</b> (lateral spreads)	Πλευρική έκταση βράχων	Πλευρική έκταση κορημάτων	Πλευρική έκταση γαιών
<b>Ροές</b>	Ροή βράχων	Ροή κορημάτων	Ροή γαιών
<b>Σύνθετες</b>	Συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων μετακίνησης		

Πίνακας 1. Ταξινόμηση μετακίνησης πρανών κατά Varnes (1978).

Η ταξινόμηση περιλαμβάνει όλες τις εδαφικές μετακινήσεις που μπορούν να παρατηρηθούν σε πρανή εκτός των εδαφικών υποχωρήσεων και των καταρρεύσεων.



Σχήμα 2. Τύποι κατολισθήσεων (Varnes 1978, τροποποιημένο από Cruden & Varnes 1996)

Ο **Erskine** (1973), παίρνοντας υπόψη περιβαλλοντολογικά στοιχεία και τις απαιτήσεις για επιμέρους χρήσεις γης, εισάγει πρώτος το κριτήριο της ενεργότητας τους (activity), με βάση το οποίο ταξινομεί τις κατολισθήσεις στις παρακάτω τέσσερις κατηγορίες:

- i. σταθεροποιημένες κατολισθήσεις (αυτές που δεν έχουν ενδείξεις πρόσφατης ενεργοποίησης)
- ii. πρόσφατα ενεργές κατολισθήσεις (αυτές όπου εκδηλώνονται πρόσφατες κινήσεις, χωρίς προηγούμενο παρελθόν)
- iii. κατολισθήσεις που ανέδρασαν πρόσφατα (μετά από μία περίοδο σταθεροποίησης) και
- iv. ενεργές κατολισθήσεις (αυτές με μακρύ, χρονικά, παρελθόν μετακινήσεων που δείχνουν να μην έχουν σταθεροποιηθεί).

Οι **Zaruba - Mencl** (1976, 1982) χρησιμοποιώντας την εμπειρία της γεωλογικής δομής της χώρας τους κατέταξαν τις κατολισθητικές κινήσεις σε δύο κατηγορίες γεωλογικού υλικού:

- αυτές που αφορούν τους εδαφικούς σχηματισμούς του τεταρτογενούς καλύμματος (χαλαρές αποθέσεις, ζώνη αποσάθρωσης ή κερματισμού) και
- αυτές που αφορούν τη βραχομάζα του προ-τεταρτογενούς υποβάθρου (διάφορες κατηγορίες γεωλογικής δομής)

Οι τύποι μετακίνησης που αντιστοιχούν σ' αυτές είναι οι εξής:

περιστροφικές, μεταθετικές-στρωματοειδείς, καταπτώσεις, ροές-ρεύματα, ερπυσμοί, συνθλίψεις-εξαπλώσεις μαλακών πετρωμάτων.

"Η ταξινόμηση αυτή είναι σχετικά απλή και χρησιμοποιήθηκε αρκετά στην Ελλάδα επειδή θεωρείται ότι ανταποκρίνεται στις γεωλογικές συνθήκες της χώρας μας" (Κούκης Γ., 1980).

Οι περιστροφικές, είναι ολισθήσεις επί κυκλοειδούς τομής επιφανειών και εκδηλώνονται κυρίως σε σχηματισμούς χαλαρούς ή με μέτρια διαγένεση, γενικά σημαντικού πάχους.

Καταπτώσεις βράχων παρατηρούνται σε πολύ απότομα πρανή και βραχώδεις ακτές. Πρόκειται για αποκολλήσεις τεμαχών και στη συνέχεια κίνηση στην επιφάνεια του πρανού ή ελεύθερη πτώση στο κενό.

Οι ολισθήσεις βραχωδών μαζών εκδηλώνονται κατά μήκος προετοιμασμένων (μίας, δύο-σφηνοειδείς ή και περισσότερων) επιφανειών ασυνέχειας που κλίνουν προς το πρηνές.

Οι μεταθετικές ή στρωματοειδείς κατολισθήσεις εκδηλώνονται σε πρηνή, όπου τα κορήματα και τα υλικά αποσάθρωσης επικάθονται σε αργιλομαργαϊκά ή σχιστολιθικά πετρώματα ή όπου το ίδιο το πέτρωμα είναι σε κατάσταση κερματισμού και αποσάθρωσης. Το πάχος του μετακινούμενου υλικού είναι γενικά μικρό. Το επίπεδο ολίσθησης είναι περίπου παράλληλο προς το φυσικό πρηνές. Ανάλογες κατολισθητικές κινήσεις εκδηλώνονται σε ιζηματογενείς σχηματισμούς με σαφώς εκφρασμένη στρώση και κλίση στρωμάτων ομόρροπη προς το πρηνές.

Οι συνθλίψεις-εξαπλώσεις μαλακών πετρωμάτων, αφορούν πρηνή δομημένα από σύνθετους στρωσιγενείς γεωλογικούς σχηματισμούς, όπως ο φλύσχης, όπου στρώματα μαλακών πετρωμάτων αργιλοπηλιτικής σύστασης παρεμβάλλονται μεταξύ σκληρών ανθεκτικών πετρωμάτων. Η υπέρβαση της κρίσιμης μηχανικής αντοχής των μαλακών πετρωμάτων (λόγω του βάρους των υπερκείμενων ή και λόγω αποσάθρωσης) έχει σαν πρώτο αποτέλεσμα την θραύση ή λέπτυνση του πάχους και ταπείνωση της άνω επιφάνειας με ταυτόχρονη πλευρική τους εξάπλωση (spreading). Συνοδευτικό αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η αστοχία και μετακίνηση προς τα κάτω της συνολικής βραχομάζας του πρηνούς αναφοράς. (Ε. Ρόζος)

Σε ρεύμα γαιών μπορεί να μεταπέσει οποιαδήποτε κατολίσθηση, όταν τα εδαφικά υλικά διαβρεχτούν, ώστε να επέλθει κορεσμός τους, που έχει σαν συνέπεια την αύξηση του φορτίου, τη μείωση της διατμητικής αντοχής και της τριβής. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη κινητική ενέργεια της ολισθαίνουσας μάζας. Τα ρεύματα κορημάτων θεωρούνται περισσότερο σαν μεταφερόμενο υλικό με συνεχή αλλαγή μετώπου κίνησης και εσωτερική αναδιάταξη του υλικού και όχι σαν ολίσθηση μάζας. Πρόκειται για την γνωστή ταχεία κίνηση πλευρικών κορημάτων φυσικών κλιτύων.

Ροή από υγροποίηση της άμμου ή παρεμφερούς κοκομετρικά αδρομερούς υλικού, μπορεί να προκληθεί τόσο από απότομες μεταβολές της στάθμης του υπόγειου νερού όσο και από δονήσεις. Απόπλυση στρώματος άμμου και ροής είναι δυνατή όταν

αμμώδες στρώμα παρεμβάλλεται μεταξύ δύο υδατοστεγών συνεκτικών εδαφικών στρώσεων.

Οι **Hoek και Bray** (1977), στην ταξινόμησή τους, που έγινε ευρέως αποδεκτή, διακρίνουν τύπους μετακίνησης που επιμερίζονται στις (δύο) κατηγορίες των απλών και σύνθετων θραύσεων και αφορούν βραχώδη πρανή (Πίνακας 2)

<b>Απλές θραύσεις</b> (ή αστοχίες: failures)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Επίπεδες ολισθήσεις</li><li>• Κυκλικές ολισθήσεις</li><li>• Ανατροπές τεμαχών</li><li>• Πτώσεις τεμαχών</li></ul>
<b>Σύνθετες θραύσεις</b> (ή αστοχίες: failures)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Σφηνοειδείς ολισθήσεις (ελεγχόμενες από δύο επιφάνειες)</li><li>• Ολισθήσεις και ανατροπές</li><li>• Προοδευτικές θραύσεις-μετακινήσεις</li></ul>

Πίνακας 2. Ταξινόμηση θραύσεων-μετακινήσεων σε βραχώδη πρανή, (Hoek-Bray, 1977).

Τα κατολισθητικά φαινόμενα είναι πολύ συνήθη στον Ελλαδικό χώρο, καθώς η λιθολογική σύσταση και η σχετικά μικρή ηλικία των περισσότερων σχηματισμών, η δράση πρόσφατων τεκτονικών δυνάμεων, η γεωμορφολογική εξέλιξη και οι υψηλές βροχοπτώσεις, δημιουργούν κατάλληλες συνθήκες για την εκδήλωση συχνών αστοχιών πρανών ποικίλης κλίμακας.

Οι μεγαλύτερες σε επιφανειακή εξάπλωση κατολισθήσεις (Linder G. et al., 2016), στον Ελληνικό χώρο, εντοπίζονται σε τεκτονικά καταπονημένους σχηματισμούς (π.χ. από επωθητικές κινήσεις) και σε θέσεις με πολύ απότομο ανάγλυφο και κάτω από την ισχυρή δράση κλιματολογικών συνθηκών. Αντίθετα, οι πλέον συχνές σε εμφάνιση κατολισθήσεις προκαλούνται κυρίως από το συνδυασμό της ανθρωπογενούς δραστηριότητας, πυρκαγιές κλπ. και των αυξημένων ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

## 1.3 Χώρο-χρονικοί παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνιση των κατολισθήσεων

Με τον όρο **κλιματική αλλαγή** αναφερόμαστε στη μεταβολή του παγκοσμίου κλίματος και ειδικότερα σε μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών που εκτείνονται σε μεγάλη χρονική κλίμακα. Τέτοιου τύπου μεταβολές περιλαμβάνουν στατιστικά σημαντικές διακυμάνσεις ως προς τη μέση κατάσταση του κλίματος ή τη μεταβλητότητά του, που εκτείνονται σε βάθος χρόνου δεκαετιών ή περισσότερων ακόμα ετών. Οι κλιματικές αλλαγές οφείλονται σε φυσικές διαδικασίες, καθώς και σε ανθρώπινες δραστηριότητες με επιπτώσεις στο κλίμα, όπως η τροποποίηση της σύνθεσης της ατμόσφαιρας.

Στη Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για τις Κλιματικές Μεταβολές (UNFCCC), η κλιματική αλλαγή ορίζεται ειδικότερα ως η μεταβολή στο κλίμα που οφείλεται άμεσα ή έμμεσα σε ανθρώπινες δραστηριότητες, διακρίνοντας τον όρο από την κλιματική μεταβλητότητα που έχει φυσικά αίτια.

Τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της υπερκατανάλωσης προϊόντων του πρωτογενή τομέα, της αλόγιστης υπερκατανάλωσης των φυσικών πόρων και την αύξηση του πληθυσμού της γης υποβαθμίστηκε το φυσικό περιβάλλον με αποτέλεσμα να υπάρχει μια ανισορροπία μεταξύ των χωρών του ανεπτυγμένου και αναπτυσσόμενου κόσμου. Παγκόσμιος σκοπός των κρατών, φορέων και συλλόγων είναι η συνεργασία μεταξύ τους για την αειφόρο ανάπτυξη σε όλα τα γεωγραφικά επίπεδα και την καταπολέμηση της ανισότητας σε διεθνές επίπεδο. Ταυτόχρονα, είναι χαρακτηριστικό ότι έχει αναπτυχθεί ένα παγκόσμιο κίνημα που ζητά την ισοκατανομή των περιβαλλοντικών βαρών και την κλιματική δικαιοσύνη.

Σύμφωνα με έκθεση του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος που δημοσιεύεται σήμερα, περιοχές της Ευρώπης βρίσκονται αντιμέτωπες με την άνοδο της στάθμης της θάλασσας και με ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως οι συχνότεροι και εντονότεροι καύσωνες, οι πλημμύρες, οι ξηρασίες και οι καταιγίδες που οφείλονται στην κλιματική αλλαγή.

Η κατανόηση των αντιλήψεων περί κλιματικής αλλαγής και των δραστηριοτήτων προσαρμογής μπορεί να δώσει μια εικόνα για το τι μπορεί να βοηθήσει (J.A. Ekstrom et al., 2016).

### Ραγδαία βροχόπτωση

Η έντονη - ραγδαία βροχόπτωση (μεγάλο ύψος βροχής σε μικρό χρονικό διάστημα) αποτελεί βασικό εναυσματικό παράγοντα κατολισθητικών κινήσεων. Είναι γενικότερη διαπίστωση, ότι ακόμα και λίγες ώρες έντονης βροχόπτωσης (καταιγίδα) αποτελούν κατώφλια έναρξης πολλών τύπων αβαθών κατολισθητικών κινήσεων σε εδαφικούς σχηματισμούς ή σε αποσαθρωμένες ζώνες ή μανδύες βραχωδών σχηματισμών. Οι συνήθεις κατολισθητικοί τύποι που παρατηρούνται είναι αβαθείς περιστροφικές ή επίπεδες ολισθήσεις, και ροές (σε εδαφικό υλικό ή κορήματα) και οφείλονται στην κρίσιμη αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, με αποτέλεσμα την υπέρβαση της διατμητικής αντοχής και την αστοχία του πρανούς. Ταυτόχρονα η παρουσία του βάρους του νερού στο σώμα του πρανούς (εσωτερικά ή και εξωτερικά) αυξάνει τις προϋπάρχουσες επί τόπου τάσεις και διευκολύνει το έργο της βαρύτητας.

Πολλές μελέτες σε διάφορες περιοχές, εμφανίζουν συγκεκριμένες συσχετίσεις μεταξύ συνδυασμού τιμών κατωφλίων έντασης και διάρκειας βροχόπτωσης, και της εκδήλωσης συγκεκριμένων τύπων κατολισθητικών φαινομένων.

Για παράδειγμα ένα τεχνητό γεγονός βροχοπτώσεων εφαρμόστηκε στην πλαγιά μίας δασικής περιοχής στο Ruedlingen της βόρειας Ελβετίας. Το πείραμα αυτό προκάλεσε μια κατολίσθηση η οποία είχε ως αποτέλεσμα την κινητοποίηση περίπου 130,0 m<sup>3</sup> κατολισθαίνουσας μάζας (Akca D., 2013).

Όμως ιδιαίτερα σε περιοχές έντονης και συνεχούς παρουσίας φαινομένων αστάθειας, είναι προφανής η συνεχής μεταβολή του ανάγλυφου που συνεπάγεται αντίστοιχες μεταβολές των υδρολογικών, υδρογεωλογικών και τεχνικογεωλογικών παραμέτρων. Επομένως, είναι εύλογο να προκύπτουν συνεχείς ποσοτικές μεταβολές (χωρικές και χρονικές) της σχέσης μεταξύ κατωφλίων βροχόπτωσης και κατολισθητικών φαινομένων. Για να εκδηλωθούν βαθιές κατολισθητικές κινήσεις (π.χ. μέχρι το

βραχώδες υπόβαθρο) απαιτείται μεγάλης διάρκειας βροχοπτώση ώστε το νερό να έχει τον απαιτούμενο χρόνο να εισχωρήσει σε μεγάλο βάθος.

#### Πτώση και άνοδος στάθμης νερού

##### A) πτώση στάθμης:

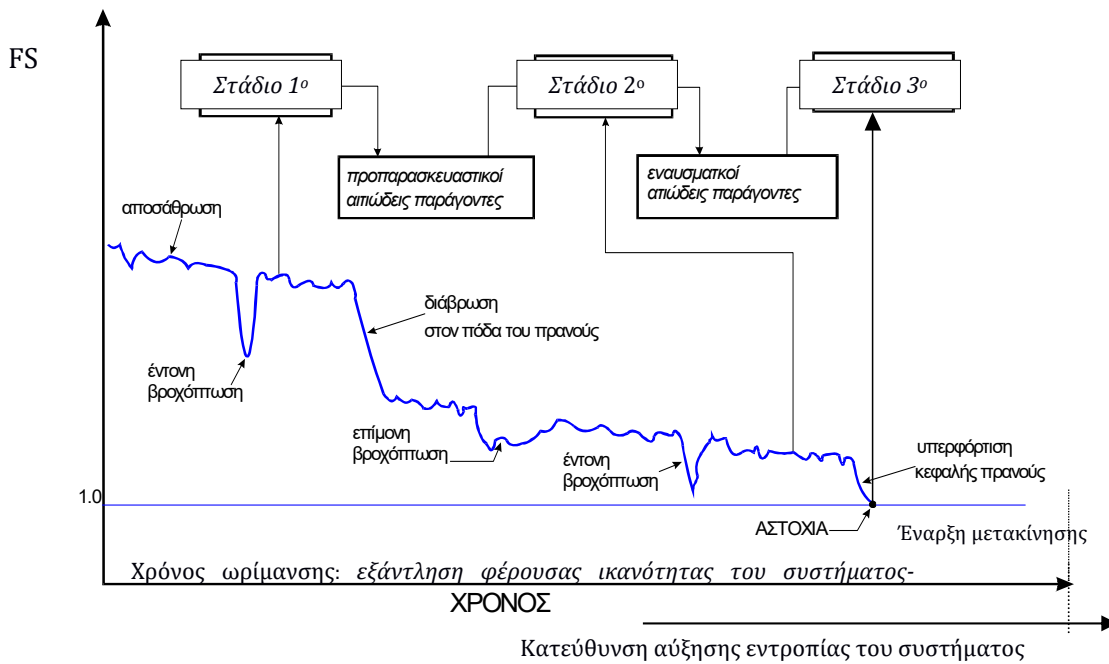
η απότομη πτώση στάθμης του νερού (rapid draw-down) σε ταμιευτήρες και άλλα σώματα επιφανειακής παρουσίας νερού (λίμνες, ποταμοί, θάλασσα), είναι διαπιστωμένο πως αποτελεί εναυσματικό παράγοντα εκδήλωσης κατολισθητικών κινήσεων. Στην περιοχή του υλικού που βρίσκεται κάτω από τη στάθμη, η πίεση του νερού των πόρων είναι υδροστατική. Με την απότομη όμως πτώση της στάθμης, οι υφιστάμενες, στο χαμηλής περατότητας αργιλικό υλικό, υδροστατικές πιέσεις δεν εκτονώνονται γρήγορα, με συνέπεια να αυξηθούν δραματικά οι διατμητικές τάσεις. Όταν αυτές υπερβούν την αντοχή του υλικού επέρχεται αστοχία και εκδήλωση κατολισθητικών κινήσεων στο πρανές αναφοράς.

##### B) άνοδος στάθμης:

η άνοδος της στάθμης του υπόγειου νερού στα πρανή λόφων, παρατηρείται μετά από παρατεταμένες βροχοπτώσεις (μεγαλύτερης διάρκειας από τις μέση τιμή της περιοχής), ή συνδέεται με ανύψωση της στάθμης γειτνιαζόντων σωμάτων νερού. Η άνοδος αυτή συνεπάγεται αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων και αντίστοιχη, προφανή, μείωση της ενεργού διατμητικής αντοχής του κορεσμένου υλικού των πρανών. Η υπέρβαση δε του κατωφλίου της κρίσιμης αντοχής, οδηγεί το πρανές σε αστοχία.

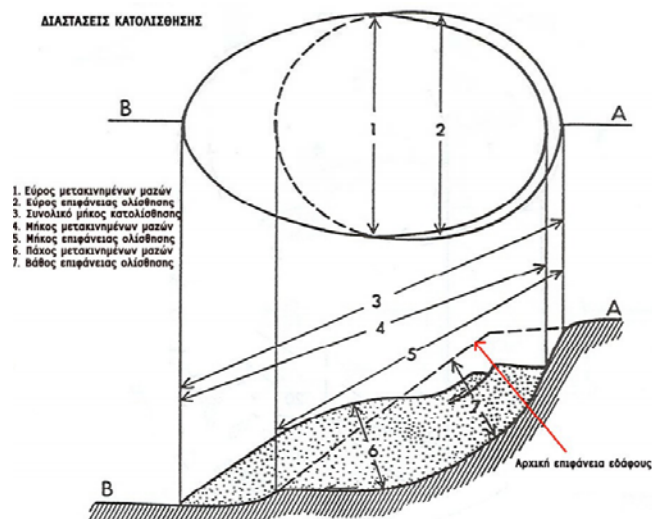
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3), απεικονίζεται η προοδευτική μείωση του ΣΑ ενός πρανούς μέχρι το επίπεδο ενεργής αστάθειας (αφετηρία για εκδήλωση κίνησης), από τη μακρόχρονη δράση προπαρασκευαστικών αιτιωδών και την επεισοδιακή -ολιγόχρονη δράση εναυσματικών παραγόντων. Η χρονική διάρκεια που απαιτείται για τη μείωση του συντελεστή ασφάλειας του πρανούς από δεδομένη αφετηριακή τιμή μέχρι την οριακή τιμή 1,0, εκφράζει το χρόνο ωρίμανσης για τη εκδήλωση του συγκεκριμένου, κατά περίπτωση, κατολισθητικού φαινομένου. Στο χρόνο αυτό, η προσφερόμενη στο σύστημα του πρανούς ενέργεια από τους προπαρασκευαστικούς και εναυσματικούς παράγοντες αυξάνει σταδιακά την εντροπία του που συνεπάγεται προοδευτική

εξάντληση της φέρουσας ικανότητας του (διαθέσιμης διατμητικής αντοχής στην επιφάνεια αστοχίας) μέχρι της πλήρους εξουδετέρωσής της (Rossi et al., 2017).



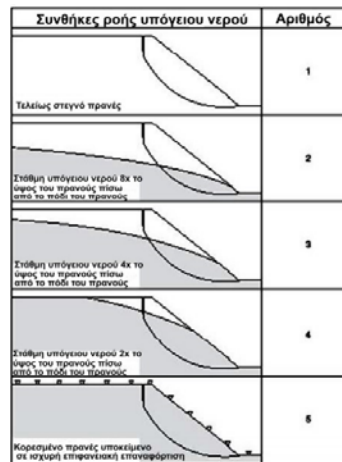
Σχήμα 3. Προοδευτική μείωση του ΣΑ ενός πριναούς μέχρι το επίπεδο ενεργής αστάθειας (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

Ένας από τους βασικότερους παράγοντες για την εκδήλωση μίας κατολίσθησης είναι το υπόγειο νερό.

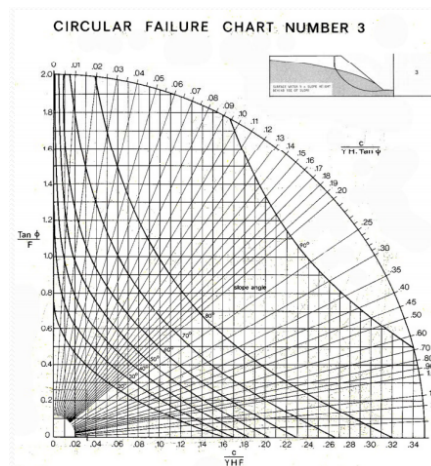


Σχήμα 4. Διαστασιολόγηση κατολίσθησης (Hoek & Bray)

Οι Hoek & Bray δίνουν για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας  $F$ , διάφορα νομογράμματα κυκλικής αστοχίας (Σχήμα 6), που συνδέουν τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά του σχηματισμού όπως γωνία τριβής, συνοχή και φαινόμενο βάρος, αλλά και με το ύψος του πρανούς.



Σχήμα 5. Μοντέλα ροής υπόγειου νερού για κυκλική ανάλυση αστοχίας. Στις περιπτώσεις 2-4, η θέση του υδροφόρου ορίζοντα καθορίζεται από το λόγο  $x/H$ . (Hoek & Bray)

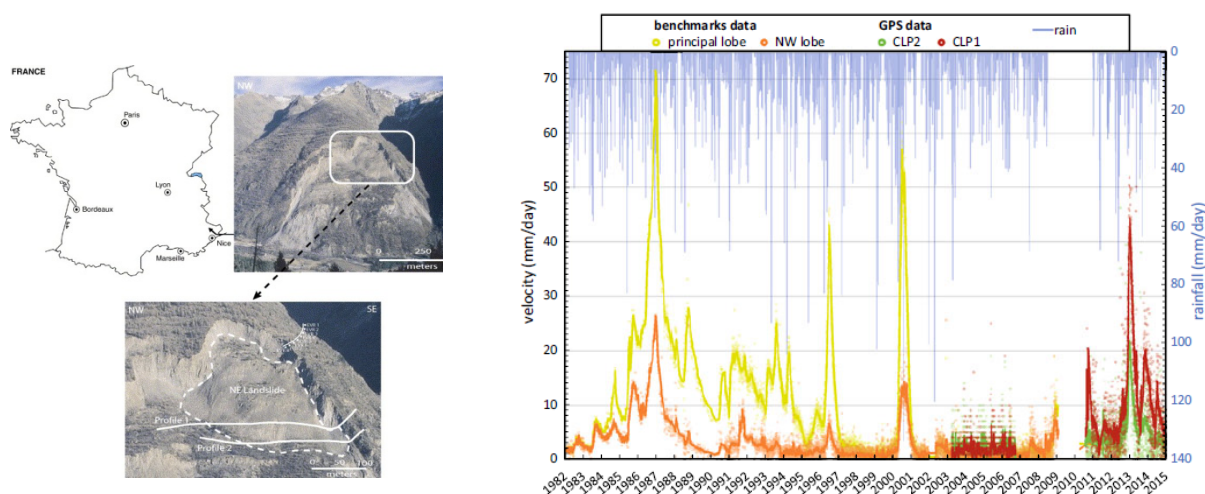


Σχήμα 6. Νομόγραμμα κυκλικής αστοχίας για κατάσταση νερού 3 (Hoek & Bray)

Τα νομογράμματα έχουν προκύψει από τη χρήση σχέσης που εφαρμόστηκε για ένα μεγάλο αριθμό πρανών με διαφορετική γεωμετρία και συνθήκες νερού, προκειμένου να ευρεθεί ο κρίσιμος συνδυασμός επιφάνειας ολίσθησης και εφελκυστικών ρωγμών στην άνω επιφάνεια ή στην επιφάνεια του πρανούς.

### Ο ρόλος του νερού στην αστοχία του La Clarière, στη Γαλλία

Η αστοχία του La Clarière (Σχήμα 7), στη Γαλλία αποτελεί μία από τις ταχύτερες κατολισθήσεις στον κόσμο, σήμερα η μεγαλύτερη στην Ευρώπη με όγκο 50 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων και μία από τις πιο μελετημένες. Από το 2003, η κατολίσθηση του La Clarière έχει εξοπλιστεί με τρεις μόνιμους σταθμούς GPS: δύο εντός του σώματος κατολισθήσεων και έναν στην αντίθετη πλαγιά, στη νότια όχθη της κοιλάδας Tinée, η οποία θεωρείται σταθερή. Μέσω των σταθμών μέτρησης υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης της αστοχίας ως δυναμικό φυσικό σύστημα. Ο γεωλογικός σχηματισμός που απαντάται στην περιοχή της κατολίσθησης παρατηρείται αποσαθρωμένος σε μεγάλο βάθος. Οι παρεμβατικές επιδράσεις (π.χ. μετεωρολογία, σεισμικότητα) στο υπό μελέτη σύστημα τροποποιούν την ισορροπία του και παράγουν σημαντικές δυναμικές αλλαγές. Η διείδυση του νερού είναι ο κυρίαρχος παράγοντας επιρροής στην περίπτωση του La Clarière DSL, προκαλώντας την τροποποίηση των υδραυλικών ιδιοτήτων και των μηχανικών παραμορφώσεων.

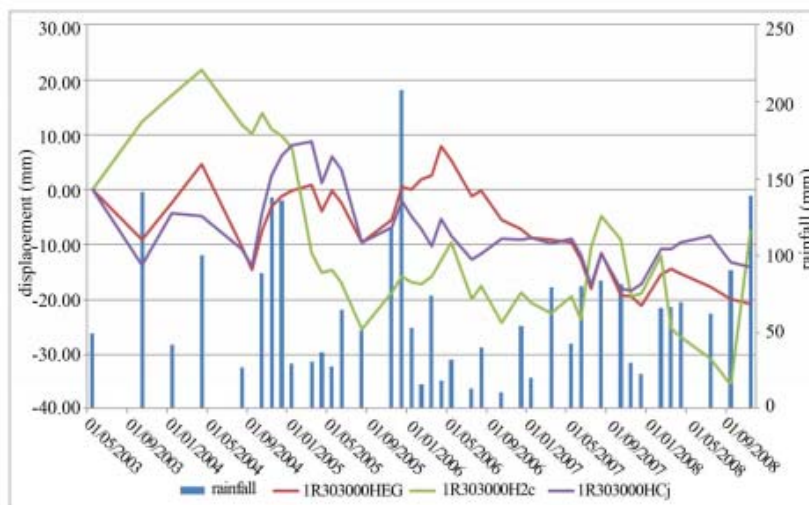


Σχήμα 7. Εξέλιξη των μεταβολών της ταχύτητας δύο τμημάτων της κατολίσθησης La Clarière συναρτήσεως των ημερήσιων βροχοπτώσεων που καταγράφεται στο Saint-Etienne-de-Tinée σε διάστημα 33 ετών (στοιχεία από Météo-France περίοδου 1967-2008 & από OMIV περίοδου 2010 - 2015). Οι γραμμές δείχνουν την εξέλιξη της μέσης ταχύτητας. Η χρονοσειρά της ταχύτητας κατασκευάζεται από προηγούμενες μελέτες (Follacci 1987, Helmstetter et al., 2004, Schlögel et al., 2015b) για τα δεδομένα αναφοράς (δεδομένα από την CEREMA).

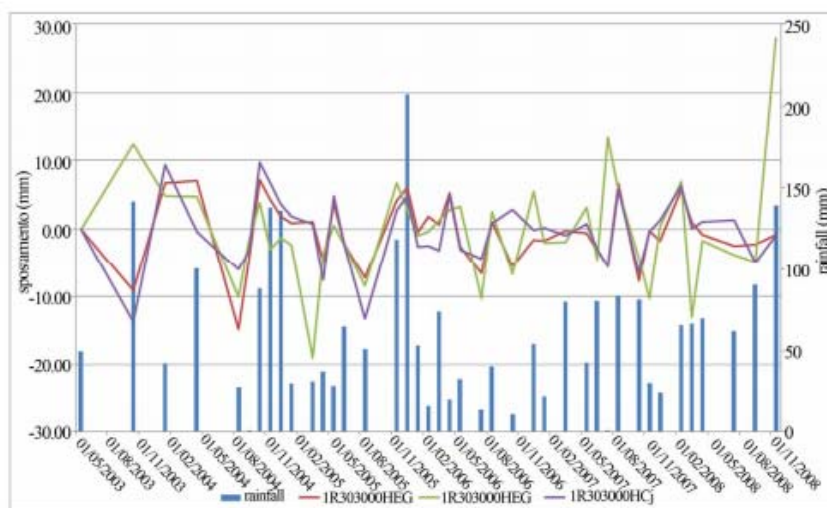
### Ο ρόλος του νερού στην αστοχία του Ricasoli Village, στην Ιταλία

Το Ricasoli είναι ένα χωριό που βρίσκεται στην κοιλάδα του ποταμού Άνω Άρνο (Τοσκάνη). Η περιοχή ιστορικά υπόκειται σε εκτεταμένα φαινόμενα αστάθειας. Η μορφολογία την περιοχής βοηθά στην πρόκληση πολυάριθμων κατολισθήσεων, οι οποίες προκαλούν την υποχώρηση κατοικιών του οικισμού. Για την κατανόηση της συμπεριφοράς αυτών των φαινομένων, έχει γίνει πλήρης χαρακτηρισμός των κατολισθήσεων από την άποψη της κινηματικής, των μηχανικών ιδιοτήτων και των συνθηκών ενεργοποίησης των κατολισθήσεων (Rosi A. et al., 2013).

Για το σκοπό αυτό έχουν διανοιχθεί αρκετές γεωτρήσεις, εξοπλισμένες τόσο με κλισιόμετρα όσο και με πιεζόμετρα και έχει συλλεχθεί και αναλυθεί αριθμός δειγμάτων. Εκτός από την παραδοσιακή ανάλυση, η δορυφορική συμβολομετρία ραντάρ έχει χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της εξέλιξης των κατολισθήσεων και τη συσχέτιση τους με τις βροχοπτώσεις (Rosi A. et al., 2013). Ακολούθως δίνονται δύο σχήματα (Σχήμα 8, Σχήμα 9) που περιγράφουν τις συσχετίσεις των βροχοπτώσεων και τον μετακινήσεων από τις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή. (Σχήμα 8, 9)



Σχήμα 8. Συσχετισμός μεταξύ μετατοπίσεων από PS και βροχοπτώσεων (ENVISAT, φθίνουσα τροχιά) (Rosi A, et al., 2013)



Σχήμα 9. Συσχετισμός μεταξύ βροχοπτώσεων και μηνιαίων μετρήσεων εδαφικών μετατοπίσεων από RSI (radar satellite interferometry) (ENVISAT, αύξουσα τροχιά) (Rosi A, et al., 2013)

## 1.4 Καταγραφή προβλήματος

### Μορφολογικά στοιχεία

Η Διεθνής Ένωση Τεχνικής Γεωλογίας (International Association of Engineering and the environment, IAEG) αναγνωρίζοντας την ανάγκη ύπαρξης μίας ενιαίας διεθνούς ονοματολογίας των κατολισθήσεων σύστησε μία Ειδική Διεθνή Επιτροπή (Commission on Landslides), η οποία το 1990 πρότεινε μία λεπτομερή ονοματολογία για τις περιστροφικές ολισθήσεις, η οποία σε γενικές γραμμές συμπληρώνει αυτήν του Varnes που αναφέρθηκε παραπάνω. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά και η ονοματολογία που προτάθηκαν, περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια στους Πίνακες που ακολουθούν και απεικονίζονται στο Σχήμα που τους συνοδεύει. Επισημαίνεται ότι, η συγκεκριμένη ονοματολογία χρησιμοποιείται για την περιγραφή όλων των κατολισθήσεων γενικότερα (όχι μόνον των περιστροφικών) σε διεθνές πλέον επίπεδο. Επισημαίνεται ότι, ο καθορισμός των παρακάτω γεωμετρικών χαρακτηριστικών τα οποία περιγράφουν τις διαστάσεις μιας τυπικής κατολίσθησης είναι βασικής σημασίας για την εκτίμηση του όγκου της κατολισθαίνουσας μάζας, που αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο σχεδιασμό των μέτρων αποκατάστασης και αντιμετώπισης του φαινομένου.

Τα χρήσιμα γεωμετρικά στοιχεία που θα πρέπει να μετρώνται, κατά τη μελέτη μιας κατολίσθησης δίνονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 3).

A /A	Ονομασία	Ορισμός
1	Πλάτος ολισθαίνουσας μάζας (Wd)	Η μέγιστη απόσταση μεταξύ των πλευρικών ορίων της ολισθαίνουσας μάζας, κάθετα στο μήκος της (Ld)
2	Πλάτος επιφανειακής ολίσθησης (Wx)	Η μέγιστη απόσταση μεταξύ των πλευρών της κατολίσθησης, κάθετα στο μήκος της επιφάνειας ολίσθησης (Lx)
3	Μήκος ολισθαίνουσας μάζας (Ld)	Η ελάχιστη απόσταση από την κορυφή στο άκρο της κατολίσθησης
4	Μήκος επιφάνειας ολίσθησης (Lx)	Η ελάχιστη απόσταση από την στέψη μέχρι την απόληξη της επιφάνειας ολίσθησης
5	Βάθος της ολισθαίνουσας μάζας (Dd)	Το μέγιστο βάθος της μάζας που έχει ολισθήσει, μετρημένο κάθετα στο

		επίπεδο που ορίζουν τα Wd και Ld
6	Βάθος της επιφάνειας ολίσθησης (Dx)	Το μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης από την αρχική επιφάνεια του εδάφους, μετρημένο κάθετα στο επίπεδο που ορίζουν τα Wx και Lc
7	Ολικό μήκος (L)	Η ελάχιστη απόσταση από τη στέψη της κατολίσθησης μέχρι το άκρο της
8	Μήκος της κεντρική γραμμής (Lc)	Η απόσταση από τη στέψη μέχρι το άκρο της κατολίσθησης κατά μήκος των σημείων που ισαπέχουν από τις πλευρές της κατολίσθησης και τα όρια της επιφάνειας θραύσης

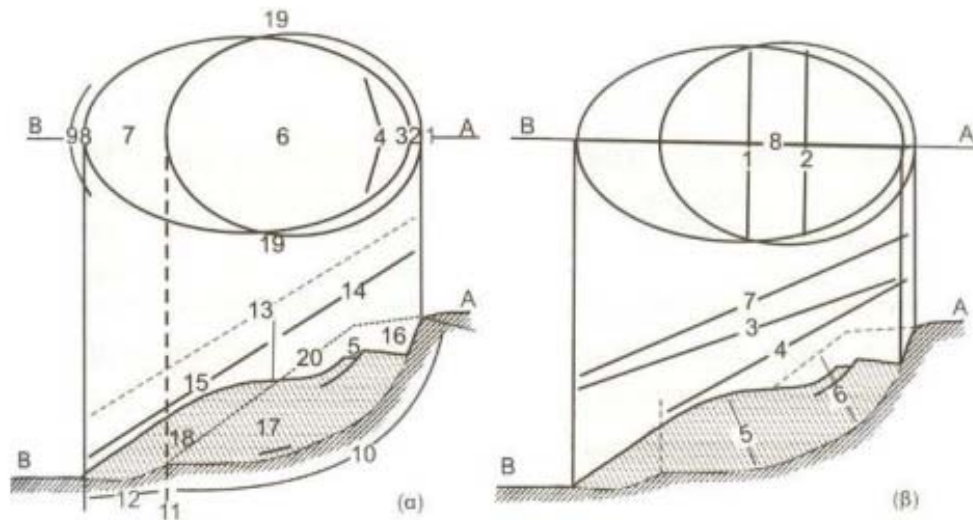
Πίνακας 3. Ορισμός χαρακτηριστικών των διαστάσεων και γεωμετρικών στοιχείων μιας τυπικής περιστροφικής κατολίσθησης σύμφωνα με την Επιτροπή κατολισθήσεων της Διεθνούς Ένωσης Τεχνικής Γεωλογίας (IAEG Commission on Landslides, 1990). Οι αριθμοί σε παρένθεση αναφέρονται στο Σχήμα 8 (β).

A /A	Ονομασία	Ορισμός
1	Αρχική επιφάνεια του εδάφους (Original ground surface)	Η μορφολογία της επιφάνειας του εδάφους πριν την εκδήλωση της κατολίσθησης. (20)
2	Στέψη (Crown)	Το ανώτερο σταθερό τμήμα του φυσικού εδάφους, το πλησιέστερο προς την κατακρήμνιση. (2)
3	Κύρια κατακρήμνιση ή Κύρια απότομη πλαγιά (Main scarp)	Απότομο βύθισμα της επιφάνειας του φυσικού εδάφους στο ανώτερο τμήμα της ολίσθησης (στέψη), που προκλήθηκε από την κίνηση της ολισθαίνουσας μάζας. Είναι το ορατό μέρος της επιφάνειας αστοχίας. (10)
4	Κορυφή (Top)	Το υψηλότερο σημείο επαφής της μετακινούμενης μάζας και της κύριας κατακρήμνισης. (13)
5	Κεφαλή (Head)	Τα ανώτερα τμήματα της κατολίσθησης κατά μήκος της επαφής της μετακινούμενης μάζας (13) και της κύριας κατακρήμνισης (2).
6	Κύρια κατακρήμνιση (Main scarp).	Η απότομη επιφάνεια του φυσικού εδάφους στο ανώτερο τμήμα της ολίσθησης, που προκλήθηκε από την κίνηση της ολισθαίνουσας μάζας.
7	Δευτερεύουσα	Δευτερεύουσα επιφάνεια θραύσης της

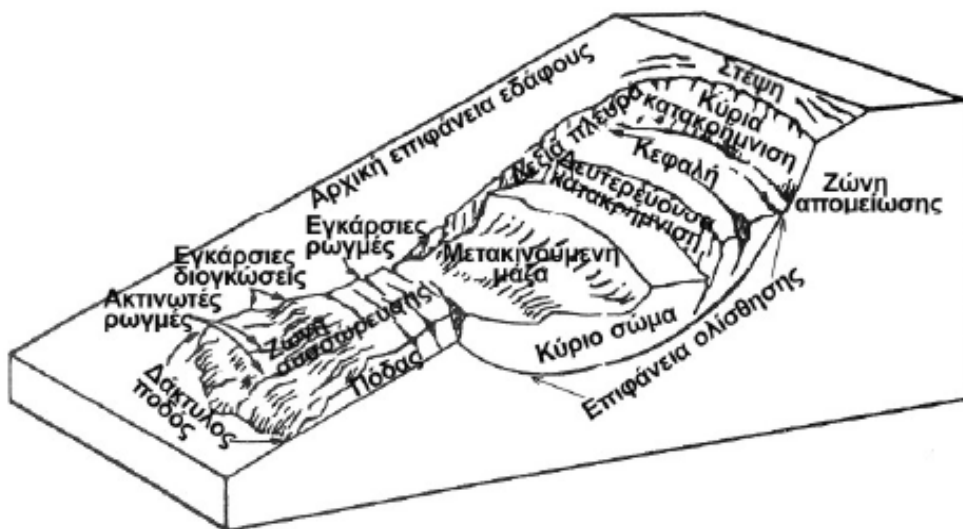
<b>A /A</b>	<b>Ονομασία</b>	<b>Ορισμός</b>
	κατακρήμνιση ή Δευτερεύουσα απότομη πλαγιά (Minor scarp)	μετακινούμενης μάζας που έχει προέλθει από διαφορικές μετακίνησης της μάζας αυτής.
8	Κύριο σώμα (Main body)	Το τμήμα της μετακινούμενης μάζας που υπέρκειται τα επιφάνειας ολίσθησης (10), μεταξύ της κύριας κατακρήμνισης και της απόληξης της επιφάνειας ολίσθησης (11).
9	Πόδι (Foot)	Το τμήμα της κατολίσθησης που έχει μετακινηθεί πέραν της απόληξης της επιφάνειας ολίσθησης (11) και το οποίο περιέκειται της αρχικής επιφάνειας του εδάφους.
10	Άκρο (Tip)	Το σημείο της απόληξης (9) που απέχει τη μεγαλύτερη απόσταση από την κορυφή της κατολίσθησης
11	Απόληξη ή Δάχτυλο (Toe)	Το κατώτερο, συνήθως κύριο όριο της μετακινούμενης μάζας (13). Απέχει τη μεγαλύτερη απόσταση από την κύρια κατακρήμνιση.
12	Επιφάνεια ολίσθησης ή θραύσης (Surface of rupture)	Η επιφάνεια που αποτελεί επέκταση της κύριας κατακρήμνισης κάτω από την μετακινούμενη μάζα της κατολίσθησης πάνω στην οποία έγινε η ολίσθηση
13	Απόληξη της επιφάνειας ολίσθησης ή Δάχτυλο της επιφάνειας θραύσης (Toe of Surface of rupture)	Η τομή μεταξύ του κατωτέρου τμήματος της επιφάνειας ολίσθησης ή θραύσης (10) και της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους (20).
14	Επιφάνεια διαχωρισμού ή αποκόλλησης (Surface of separation)	Τμήμα της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους (20) που καλύπτεται από το πόδι (7) της κατολίσθησης
15	Μετακινούμενη ή Εκτοπισμένη μάζα (Displaced material)	Υλικό μετατοπισμένο από την αρχική του θέση στο πρηνές, λόγω της κατολίσθησης. Σχηματίζει τόσο τη μάζα βύθισης (17) όσο και τη μάζα διόγκωσης (18).
16	Ζώνη απομείωσης (Zone of depletion)	Περιοχή της κατολίσθησης στην οποία το μετατοπισμένο υλικό (17, 18) βρίσκεται κάτω από την αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους (20).

<b>A /A</b>	<b>Ονομασία</b>	<b>Ορισμός</b>
17	Ζώνη συσσώρευσης	Περιοχή της κατολίσθησης στην οποία το μετατοπισμένο υλικό (17, 18) βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους (20).
18	Απομείωση (Depletion)	Όγκος που περιορίζεται από την κύρια τομή της κατακρήμνισης (2), της απομειούμενης μάζας (17) και της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους (20)
19	Απομειούμενη Μάζα βύθισης (Depleted mess)	Τμήμα του μετατοπισμένου υλικού (13), που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια ολίσθησης (10), αλλά κάτω από την αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους (20).
20	Συσσώρευση ή Διόγκωση (Accumulation)	Τμήμα του μετατοπισμένου υλικού (13), που βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους (20).
21	Πλευρά (Flank)	Αμετακίνητο υλικό, δίπλα στις πλευρές της επιφάνειας της κατολίσθησης (20), όπως φαίνεται από τη στέψη και είναι προέκταση της κύριας κατακρήμνισης. Για την περιγραφή των πλευρών, προτιμώνται οι ενδείξεις της πυξίδας, διαφορετικά, περιγράφονται ως δεξί ή αριστερό έχοντας ως στάση τη στέψη. (1)
22	Εγκάρσιες ρωγμές (Transverse cracks)	Ρωγματώσεις εγκάρσια στην κύρια διεύθυνση της κίνησης, μεταξύ κύριου σώματος και ποδός.
23	Ακτινωτές ρωγμές (Radial cracks)	Ρωγματώσεις στον πόδα της κατολίσθησης
24	Εγκάρσιες διογκώσεις (Transverse ridges).	Διογκώσεις στον πόδα της κατολίσθησης.

Πίνακας 4. Περιγραφή των χαρακτηριστικών και ονοματολογίας μιας περιστροφικής κατολίσθησης σύμφωνα με την Επιτροπή Κατολισθήσεων της Διεθνούς Ένωσης Τεχνικής Γεωλογίας (IAEG Commission on Landslides 1990). Οι αριθμοί σε παρένθεση αναφέρονται στο Σχήμα 8 (α).



Σχήμα 10. (α) Μορφή, χαρακτηριστικά και ονοματολογία περιστροφικής ολίσθησης (β) Τυπικές διαστάσεις περιστροφικής ολίσθησης (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007)



Σχήμα 11. Σκαρίφημα μορφολογίας κατολίσθησης (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007)

Η πρόσβαση σε μία περιοχή κατολίσθησης είναι πολλές φορές εξαιρετικά επικίνδυνη, μειώνοντας τη δυνατότητα ακριβούς χωρικής εκτίμησης των επιπτώσεων με τη χρήση των παραδοσιακών μεθόδων. (Scaioni M. et al., 2014) Προκειμένου να αποτυπωθεί το συμβάν με μεγάλη χωρική ακρίβεια για να είναι δυνατό να προσδιορισθούν επακριβώς τα έργα αποκατάστασης και να υπάρχει τακτική παρακολούθηση της εξέλιξης τους,

είναι απαραίτητο να διερευνηθούν οι δυνατότητες που προσφέρουν εναλλακτικές μέθοδοι αποτύπωσης.

Υπάρχουν τρεις τρόποι παρακολούθησης των μετακινήσεων οπτικά, ενόργανα και με τοπογράφηση. Η παρακολούθηση οπτικά αποτελείται από επί τόπου επιθεώρηση με παράλληλη λήψη φωτογραφιών ή/ και σημειώσεων. Η ενόργανη παρακολούθηση περιλαμβάνει εγκατάσταση εξοπλισμού για περιοδική ή απομακρυσμένη παρακολούθηση, διακεκομμένη ή συνεχή συλλογή δεδομένων. Με την ενόργανη παρακολούθηση είναι δυνατό να ληφθούν μετρητές καθίζησης, μετακινήσεις, πιεζομετρικές μετρήσεις υπογείων υδάτων κ.α.. Η τοπογραφία περιλαμβάνει όλους τους τύπους φυσικών μετρήσεων.

Η τοπογραφία υψηλής ανάλυσης συνδέεται παραδοσιακά με υψηλό κόστος κεφαλαίου και υλικοτεχνικής υποστήριξης (Westoby M.J. et al., 2012). Από την άλλη μεριά τα τελευταία χρόνια δίνεται η δυνατότητα υπάρξει με χρήση μιας φθηνής φωτογραφικής μηχανής που τοποθετείται σε ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος αναψυχής να αποτελέσει εργαλείο έρευνας και αποτύπωσης (Balek J., Blahut J., 2017).

Συγκρίνοντας δεδομένα που λαμβάνονται με έρευνα πεδίου και δεδομένα που λαμβάνονται μέσω εναλλακτικών μεθόδων, π.χ. με χρήση Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (M.E.I.O.), ο αριθμός των μετρήσεων είναι πολύ μεγαλύτερος. Σε σύγκριση με τα δεδομένα πεδίου εργασίας, μία εναλλακτική μέθοδος δείχνει επίσης ότι μπορεί να είναι ακριβής και αξιόπιστη. (Abellán A. et al., 2006).

Η ενόργανη παρακολούθηση των μετακινήσεων πραγματοποιείται με μεθόδους προσδιορισμού τόσο των απόλυτων όσο και των σχετικών μετακινήσεων. Τα αντίστοιχα όργανα διακρίνονται σε γεωδαιτικά και ημιγεωδαιτικά (Milev, 1985).

Οι τοπογραφικές μετρήσεις για λεπτομερείς μελέτες διεργασιών όπως η διάβρωση ή η μετακίνηση μαζών αποκτώνται συνήθως από ακριβούς σαρωτές λέιζερ ή από αυστηρή φωτογραμμετρία. Πλέον, χρησιμοποιούνται εναλλακτικές τεχνικές βασισμένες σε ελεύθερα διαθέσιμα λογισμικά υπολογιστών που επιτρέπουν στους γενικούς γεωεπιστήμονες να δημιουργούν εύκολα ακριβή 3D μοντέλα από τις φωτογραφίες που έχουν ληφθεί με φωτογραφική μηχανή καλής ποιότητας (James M.R., Robson S., 2011).

Τα γεωδαιτικά είναι όργανα υψηλής ακρίβειας που χρησιμοποιούνται για περιοδικές μετρήσεις, μετρώντας φαινόμενα μετακινήσεων που εξελίσσονται αργά και με το χρόνο. Αντίθετα τα ημιγεωδαιτικά όργανα βρίσκονται μόνιμα εγκατεστημένα πάνω ή μέσα στα έργα προσφέροντας συνεχή παροχή πληροφοριών, μετρώντας μετακινήσεις που εξελίσσονται γρήγορα με την πάροδο του χρόνου.

Η ολοκληρωμένη παρακολούθηση των μετακινήσεων εξασφαλίζεται με τη συνδυασμένη χρήση και των δύο μεθοδολογιών.

Οι γεωδαιτικές τεχνικές χρησιμοποιούνται παραδοσιακά κυρίως για τον προσδιορισμό των απόλυτων μετατοπίσεων επιλεγμένων σημείων στην επιφάνεια του αντικειμένου σε σχέση με ορισμένα σημεία αναφοράς που θεωρείται ότι είναι σταθερά. (Niethammer U., 2010). Ενώ οι ημιγεωδαιτικές τεχνικές χρησιμοποιούνται κυρίως για μετρήσεις σχετικής παραμόρφωσης εντός του παραμορφώσιμου αντικειμένου και του περιβάλλοντός του.

Τα νέφη σημείων για παράδειγμα μπορούν να δώσουν πληροφορίες για την μορφολογία μιας περιοχής (Brodu N., Lague D., 2012) και να δώσουν πιθανά και πληροφορίες για παλαιότερες κατολισθήσεις.

Με δεδομένη την κλιματική αλλαγή και τα ακραία καιρικά φαινόμενα που αποτελούν ένα πολύ σημαντικό παράγοντα (βροχοπτώσεις μεγάλης έντασης) στην χωρική εκδήλωση κατολισθήσεων, εκτιμάται ότι τα κατολισθητικά φαινόμενα θα είναι πολύ πιο συχνά, πολύ πιο έντονα και με μεγαλύτερη χωρική έκταση, με αποτέλεσμα μεγάλες καταστροφές στις υποδομές (οδικό δίκτυο, φράγματα, κ.α.), καλλιεργήσιμες εκτάσεις, στους οικισμούς κ.α. Από την άλλη πλευρά η πρόσβαση σε πεδίο κατολίσθησης είναι εξαιρετικά επικίνδυνη, μειώνοντας τις δυνατότητες ακριβούς χωρικής εκτίμησης των επιπτώσεων με παραδοσιακές μεθόδους.

Η μελέτη των κατολισθήσεων μιας περιοχής αποσκοπεί στην αναγνώριση των αιτιών που την προκαλούν. Επειδή τα αίτια είναι συνήθως περισσότερα από ένα, γίνεται αξιολόγηση της σπουδαιότητας του καθενός, ώστε αναλόγως να κατασκευαστούν τα κατάλληλα έργα.

Η μελέτη αρχίζει με τη διερεύνηση της ιστορικότητας των κατολισθήσεων από πληροφορίες των κατοίκων, καθώς και των τεχνικών υπηρεσιών της περιοχής. Έπειτα ακολουθεί η χαρτογράφηση όλων των κατολισθήσεων της περιοχής όπου για κάθε μια από αυτές καταγράφονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που την περιγράφουν. Επίσης παρακολουθείται η εξέλιξη των κινήσεων της κατολισθαίνουσας μάζας στο χρόνο. Στη συνέχεια από ένα γεωλογικό και ένα τοπογραφικό χάρτη της περιοχής μπορούν να διαπιστωθούν οι σχέσεις των κατολισθήσεων με τη γεωλογική δομή και το ανάγλυφο της περιοχής αντίστοιχα. Τέλος, διερευνώνται τα πρόσφατα κατασκευαστικά έργα στην περιοχή αλλά και οι βροχοπτώσεις.

Τα μέτρα αντιμετώπισης γενικά αποσκοπούν στα εξής :

a) Στη μείωση της διατμητικής τάσης που εξασκείται από το βάρος των πετρωμάτων. Για να επιτευχθεί αυτό, συνιστάται απομάκρυνση των ασταθών υλικών από το πρηνές και κατάλληλη διαμόρφωσή του με αναβαθμίδες ώστε να αποκτήσει ηπιότερη κλίση.

b) Στην πρόσθεση εξωτερικών δυνάμεων κυρίως στον πόδα της κατολίσθησης. Χρησιμοποιούνται συνήθως για το σκοπό αυτό τοίχοι αντιστήριξης, οι διαστάσεις των οποίων εξαρτώνται από τις διαστάσεις της μάζας που κατολισθαίνει. Η θεμελίωσή τους πρέπει να γίνεται στο υγιές υπόβαθρο και επίσης πρέπει να συνοδεύονται από αποχετευτικούς σωλήνες, ώστε να αποστραγγίζεται το νερό από το κύριο σώμα της κατολίσθησης. Οι τοίχοι αντιστήριξης κατασκευάζονται με σκυρόδεμα, λιθόδεμα ή συρματοκιβώτια (σαραζανέτ).

c) Αύξηση της εσωτερικής αντοχής των πετρωμάτων. Αυτό γίνεται κυρίως με την απομάκρυνση του νερού είτε από την επιφάνεια του πρηνούς είτε υπόγεια. Στην πρώτη περίπτωση προστατεύεται το πρηνές με αδιαπέρατο κάλυμμα, φυτοκάλυψη ή στραγγιστήριους τάφρους, οχετούς. Στη δεύτερη περίπτωση κατασκευάζονται πηγάδια, υδρογεωτρήσεις, στραγγιστήριες σήραγγες. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα, όπου κατά τη διάνοιξη ενός δρόμου έχει διαπιστωθεί ότι η κύρια αιτία μιας κατολίσθησης στην περιοχή ήταν η υποσκαφή και απομάκρυνση υλικών από το πόδι της κατολίσθησης. Τότε δεν αρκεί μόνο η κατασκευή ενός προστατευτικού τοιχίου για να σταθεροποιηθεί το πρηνές. Χρειάζεται επιπλέον κατασκευή αποστραγγιστικών

έργων, επειδή οι περιστροφικές κινήσεις των επιμέρους τεμαχίων στα μέτωπα της κατολίθησης δημιουργούν ιδανικές συνθήκες για τη συγκράτηση νερού. Έτσι λοιπόν το κόστος για τη σταθεροποίηση των πρανών αυξάνει μετά την εκδήλωση των κατολισθητικών φαινομένων. Για την καλύτερη λοιπόν προφύλαξη από τον κίνδυνο των κατολισθήσεων, κάθε είδους κατασκευή σε ασταθή πρανή πρέπει να γίνεται κατόπιν προσεκτικής μελέτης των συνθηκών και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή.

# Κεφάλαιο 2

## Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Σημασία ανίχνευσης και παρακολούθησης κατολισθήσεων

Οι κατολισθήσεις αποτελούν πολύπλοκα και δυναμικά φαινόμενα που έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν καταστροφικά μια κοινωνία.

Διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη και τη διαμόρφωση του τοπίου και σε κάποιες χώρες ειδικά αποτελούν σημαντικό παράγοντα απώλειας ανθρώπινων ζωών, τραυματισμών, υλικών ζημιών, κοινωνικοοικονομικής αναστάτωσης αλλά και περιβαλλοντικής υποβάθμισης, (Nadim F. et al., 2006) ειδικά δε εάν συνδέονται με άλλες φυσικές καταστροφές όπως είναι οι σεισμοί, οι ηφαιστειακές εκρήξεις, έντονα καιρικά φαινόμενα ή πυρκαγιές.

Η εφαρμογή των κατάλληλων τεχνολογιών για την ανίχνευση, παρακολούθηση και έγκαιρη προειδοποίηση καθίστα ολοένα και πιο κρίσιμη τη χρήση προληπτικών μέτρων από τις αρμόδιες αρχές για τη μείωση του κινδύνου καταστροφών που οφείλονται σε κατολισθητικά φαινόμενα.

Επομένως, κρίσιμες είναι οι αξιόπιστες προσεγγίσεις για την ερμηνεία, την παρακολούθηση και τον μετριασμό των κινδύνων. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες κατολισθήσεων που σχετίζονται με διαφορετικούς τύπους υλικών, μηχανισμούς κίνησης και ταχύτητες (Cruden και Varnes, 1996). Η επιλογή της καταλληλότερης προσέγγισης παρακολούθησης και ο καθορισμός της απαραίτητης ευαισθησίας για την ανίχνευση της αποτυχίας είναι συνεπώς ένα σημαντικό στοιχείο.

Για παράδειγμα, αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με τον όγκο υλικού μπορούν να βοηθήσουν τις κυβερνητικές υπηρεσίες να εκτιμήσουν το συμβάν και τον αριθμό των ημερών που απαιτούνται για να καθαρίσουν τα συντρίμια από σε περίπτωση κατολίσθησης (Martha T.R. et al., 2010).

Λόγω της παγκόσμιας αλλαγής του κλίματος και του γεγονότος ότι οι ορεινές περιοχές θα κατοικηθούν με προοδευτικό ρυθμό, οι κατολισθήσεις αποτελούν τεράστια απειλή για το περιβάλλον, τις υποδομές και τους ανθρώπους που ζουν κοντά στις πληγείσες περιοχές. Για τους παραπάνω λόγους, η μελέτη της δυναμικής των κατολισθήσεων σε τοποθεσίες όπως στη Super - Sauze, στις γαλλικές Άλπεις, που δημιουργήθηκε κατολίσθηση υπό μορφή λασπορροής έχει επωφεληθεί από τις αναδυόμενες μεθόδους ανίχνευσης και παρακολούθησης κατολισθήσεων όπως είναι η μικροσεισμική παρακολούθηση και η τηλεπισκόπηση με μη επανδρωμένο εναέριο όχημα, για τον εντοπισμό μικρορωγμών στο έδαφος. (Walter M. et al., 2009).

## **2.2 Παραδειγματικές περιπτώσεις**

Η ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη καθιστά τις μεθόδους "Παρατήρησης της Γης" πιο αποτελεσματικές για την ανίχνευση, τη χαρτογράφηση, την παρακολούθηση και την εκτίμηση επικινδυνότητας κατολισθητικών φαινομένων (Travelletti J. et al., 2012).

Οι πλατφόρμες Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (Μ.Ε.Ι.Ο.) αποτελούν σήμερα μια πολύτιμη πηγή δεδομένων για θέματα επιθεώρησης, επιτήρησης, χαρτογράφησης και τρισδιάστατης μοντελοποίησης (Remondino F. et al., 2011).

Στο πλαίσιο του FP7, ένα SafeLand πρόγραμμα χρηματοδοτούμενο από την ΕΕ, ετοιμάστηκε ένα ερωτηματολόγιο για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τη χρήση τηλεπισκόπησης για τη μελέτη κατολισθήσεων προέκυψε πως η ανίχνευση και η χαρτογράφηση κατολισθήσεων πραγματοποιείται κυρίως με αεροφωτογραφίες, που συχνά συνδέονται με οπτικές εικόνες και εικόνες με ραντάρ. Όσον αφορά την παρακολούθηση κατολισθήσεων, τα δορυφορικά ραντάρ υπερεισχύουν των άλλων τύπων δεδομένων. Η τηλεπισκόπηση χρησιμοποιείται κυρίως για την ανίχνευση / χαρτογράφηση και την παρακολούθηση ροών και πλευρικών εξαπλώσεων με κατά προτίμηση ευρεία κλίμακα ανάλυσης, (Tofani V. et al., 2013).

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται αναφορά σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σε περιοχές κατολισθήσεων, από διάφορους φορείς, κυρίως σε ερευνητικό επίπεδο, με σκοπό να αναδείξουν και να επισημάνουν τα θετικά και τα αρνητικά στις διάφορες μεθόδους τηλεπισκόπησης.

## **2.3 Χρήση Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (Μ.Ε.Ι.Ο.) για έγκαιρη προειδοποίηση**

### **2.3.1. Εισαγωγή**

Η παρακολούθηση μετακινήσεων και η αποτύπωση της επιφάνειας του εδάφους μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο από φωτογραφίες όσο και από εικόνες ραντάρ για να μελετηθούν αργές μετακινήσεις μαζών ή ολισθήσεις.

Η δυνατότητα πραγματοποίησης πολυάριθμων σημειακών μετρήσεων μετατόπισης πάνω στην ολισθαίνουσα μάζα επιτρέπει την ανίχνευση και αποτύπωση των εδαφικών παραμορφώσεων, την παρακολούθηση του μηχανισμού κατολισθήσεως και τον εντοπισμό των μεταβολών της ταχύτητας κατά την εξέλιξη των κατολισθήσεων. Όλα τα παραπάνω βοηθούν στην κατανόηση του φαινομένου και τη μοντελοποίηση του για περαιτέρω διερεύνηση.

Σήμερα στον τομέα του εντοπισμού και της παρακολούθησης ασταθών πρανών έχουν εξελιχτεί διάφορες μέθοδοι που χρησιμοποιούν προηγμένες τεχνολογίες επίγειας έρευνας, όπως GB-InSAR, TLS, IRT, η ψηφιακή φωτογραμμετρία (DP) και εφαρμόζονται, για διαχείριση βραχυπρόθεσμων ή μακροπρόθεσμων κατολισθήσεων. Χαρακτηρίζονται από αποδοτικότητα κατά τη λειτουργία και ακρίβεια στη συλλογή δεδομένων που δεν επιτυγχάνονται με τις παραδοσιακές μεθόδους.

Αντιπροσωπευτικά χαρακτηριστικά των μεθόδων αυτών είναι η απόκτηση δεδομένων υψηλής ανάλυσης, η ευελιξία, η φορητότητα, η προσάρτηση αισθητήρων χαμηλού κόστους, καθώς και η εύκολη και γρήγορη επεξεργασία των δεδομένων (Eisenbeiss H., Sauerbier M., 2011).

Αυτός ο εξοπλισμός επιτρέπει τη συστηματική και εύκολη ανανέωση βάσης δεδομένων μετρήσεων, η οποία μπορεί να ενισχύσει την εφαρμογή συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης σε επισφαλή πρανή.

Η διαθεσιμότητα προηγμένων τεχνολογιών τηλεανίχνευσης στον τομέα της ανάλυσης κατολισθήσεων επιτρέπει τη γρήγορη και εύκολη λήψη και ενημέρωση των δεδομένων, τη βελτίωση των παραδοσιακών τεχνικών, καθώς και τη βελτιστοποίηση της επιτόπιας έρευνας σε επικίνδυνες ή δυσπρόσιτες περιοχές, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα την ασφάλεια των μελετητών.

Μεταξύ των μεθόδων αυτών τις τελευταίες δεκαετίες, οι εικόνες υψηλής ανάλυσης (VHR) και η μέθοδος Synthetic Aperture Radar (SAR) αποτελούν πολύ αποτελεσματικά εργαλεία για αυτές τις εφαρμογές, δεδομένου ότι μπορεί να επιτευχθεί πολύ υψηλή χωρική ανάλυση μέσω των οπτικών συστημάτων και τους αισθητήρες νέας γενιάς.

### 2.3.2 Διεξαχθείσες έρευνες - παρουσίαση μεθόδων

Η αξιολόγηση με τις διάφορες μεθόδους πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια σεναρίου άμεσου κινδύνου, μακροπρόθεσμης παρακολούθησης και διαχείρισης έκτακτης ανάγκης. Ενώ όλα τα αποτελέσματα επικυρώθηκαν μέσω επιτόπιας έρευνας.

Από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν με χρήση Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (M.E.I.O.) - DP (Digital Photogrammetry) σε δύο αβαθείς κατολισθήσεις προέκυψαν κάποια συμπεράσματα τα οποία αναλύονται στη συνέχεια. Αναφέρεται ότι η μία κατολίσθηση εξελίσσεται με αργούς ρυθμούς και η άλλη με γρήγορους.

Ενώ παράλληλα για την διερεύνηση της τοπογραφίας, την παρακολούθηση και τον χαρακτηρισμό των βραχοπτώσεων ασταθών βράχων, έγινε συνδυασμένη χρήση των μεθόδων **GB-InSAR**, **TLS** και **IRT**.

Στη μέθοδο SAR (Synthetic Aperture Radar) χρησιμοποιείται μικροκυματική ακτινοβολία radar για τη χαρτογράφηση εδαφικών μετακινήσεων. Για να δημιουργηθεί μια εικόνα SAR, διαδοχικοί παλμοί ραδιοκυμάτων μεταδίδονται προς μια σκηνή-στόχο και η ηχώ του κάθε παλμού λαμβάνεται και καταγράφεται. Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες ζώνες σε εφαρμογές SAR είναι η ζώνη C (5-6 GHz, μήκος κύματος ~ 5,6 cm), ζώνη X (8-12 GHz, ~ 3,1 cm μήκος κύματος) και ζώνη L (1-2 GHz ~ μήκος κύματος 23 cm) με χρονική ανάλυση ανάλογα με τον χρόνο ανασκόπησης του δορυφόρου.

Μια εικόνα SAR αποτελείται από εικονοστοιχεία που χαρακτηρίζονται από εύρος και φάση. Οι τιμές φάσης μιας μόνο εικόνας SAR εξαρτώνται εν μέρη από την απόσταση "αισθητήρα-στόχου" και είναι το στοιχείο κλειδί για την ανίχνευση της μετατόπισης εδάφους. Η τεχνική SAR Interferometry επικεντρώνεται στις μεταβολές στη μέτρηση της φάσης σήματος στην πάροδο του χρόνου, μέσω της ανάλυσης τουλάχιστον δύο εικόνων. Μια κατάλληλη προσέγγιση για την εκμετάλλευση της μεταβολής φάσης μεταξύ δύο διαδοχικών εικόνων ραντάρ που αποκτήθηκαν στον ίδιο στόχο είναι η Διαφορική Interferometric SAR (Casagli et al., 2017).

Η μέθοδος επίγειας σάρωσης Laser **TLS** παράγει και εκπέμπει δέσμη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ο ανιχνευτής λέιζερ, με μεγάλη ακρίβεια μετρά (χιλιοστόμετρο ή εκατοστόμετρο) το οπίσθοσκεδαζόμενο σήμα λέιζερ και είναι σε θέση να αποκτήσει την ακριβή θέση ενός καννάβου σημείων, που χαρακτηρίζεται από τις καρτεσιανές συντεταγμένες (x, y, z). Ο μεγάλος αριθμός σημείων προσφέρει μεγάλης ακρίβειας 3D αποτύπωση του αντικειμένου, σε σύντομο χρονικό διάστημα. Με τον καθορισμό των συντεταγμένων των ειδικών ανακλαστήρων λέιζερ μέσα στην περιοχή της έρευνας (DGPS-RTK Morelli et al., 2012, Tapete et al., 2015 Pazzi et al., 2016) είναι δυνατή η προβολή του 3D ψηφιακού μοντέλου υψηλής ανάλυσης σε ένα παγκόσμιο σύστημα αναφοράς.

Η μέθοδος επίγειας σάρωσης Laser TLS χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο σε μελέτες κατολισθήσεων, για την αποτύπωση γεωμετρικών και γεωστατικών χαρακτηριστικών και για την παρακολούθηση των ασταθών βράχων. Χάρη στην υψηλή ανάλυση της σάρωσης, είναι επίσης δυνατή η εξαγωγή και μικρότερων χαρακτηριστικών, όπως ο προσανατολισμός των κρίσιμων ασυνεχειών μέσα στη βραχώμαζα. Επιπλέον, η τεχνική αυτή δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού μετατοπίσεων του εδάφους συγκρίνοντας δεδομένα που λαμβάνονται περιοδικά από την ίδια περιοχή.

Το **IRT** είναι ο κλάδος της τηλεπισκόπησης που ασχολείται με τη μέτρηση της εκπεμπόμενης θερμοκρασίας από την επιφάνεια του εδάφους. Το προϊόν μιας υπέρυθρης θερμογραφικής έρευνας είναι ένα σύνολο εικονοστοιχείων (θερμογράφημα), που συλλέγονται μέσω θερμικής κάμερας. Η παρουσία αστοχιών, υπόγειων εγκοίλων, υγρασίας και διαρροών, επηρεάζει τα θερμικά χαρακτηριστικά του υλικού (πυκνότητα, θερμική ικανότητα και αγωγιμότητα) επομένως, η παρουσία ανομοιογένειας στο παρατηρούμενο σενάριο θα εμφανιστεί στον αντίστοιχο χάρτη ως θερμική ανωμαλία σε σχέση με το περιβάλλον. Τα τελευταία χρόνια η IRT έχει ευρεία εφαρμογή στον τομέα των γεωεπιστημών, παρ' όλα αυτά στη μελέτη κατολισθήσεων εξακολουθεί να χρησιμοποιείται πειραματικά, εκτός από μερικές ενδιαφέρουσες πειραματικές μελέτες.

Η **UAV-DP** είναι μια μέθοδος για την απόκτηση πυκνών δεδομένων σημείων σε κατολισθήσεις από στερεοσκοπικές αλληλεπικαλύψεις φωτογραφικών ακολουθιών που λαμβάνονται από μια βαθμονομημένη ψηφιακή φωτογραφική μηχανή.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, με την ταχεία ανάπτυξη των τεχνικών DP και τη διαθεσιμότητα εύχρηστων και σχετικά φτηνών ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών, η τεχνική αυτή βρήκε εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως την παρακολούθηση κατολισθήσεων. Ο συνδυασμός της ραγδαίας ανάπτυξης χαμηλού κόστους μικρών Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (Μ.Ε.Ι.Ο.) και η βελτίωση των συμβατικών αισθητήρων όσον αφορά το κόστος και το μέγεθος τους, οδήγησαν σε εφαρμογές στην περιβαλλοντική τηλεπισκόπηση, στην μοντελοποίηση επιφανειών και την παρακολούθηση φαινομένων (Casagli et al., 2017).

Στις επίγειες μεθόδους, πολλές φορές είναι απαραίτητο να γίνονται χρονοβόρες και επικίνδυνες δραστηριότητες, όπως η τοποθέτηση σημείων ελέγχου εδάφους στην περιοχή μελέτης. Σε αυτόν τον τομέα η φωτογραμμετρία με Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.) έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα (Harwin S., Lucieer A., 2012): μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο, ευελιξία, υψηλή ανάλυση, χαμηλό κόστος ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει τη συλλογή πληροφοριών σε επικίνδυνες θέσεις με ασφάλεια (Πίνακας 5). Επιπλέον, η ανάπτυξη νέων αλγορίθμων ψηφιακής φωτογραμμετρίας βασισμένη στις τεχνικές Structure from Motion (Westbi et al., 2012) και Multi-View Stereo (MVS) (James και Robson, 2012) επιτρέπει τη λήψη 3D δεδομένων υψηλής ανάλυσης. Στην περίπτωση της παρακολούθησης και του χαρακτηρισμού των κατολισθήσεων, η απόκτηση αεροφωτογραφιών με χρήση Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών επιτρέπει να αποφευχθούν φαινόμενα σκίασης, τα οποία μπορούν να μειώσουν δραστικά την ακρίβεια των ψηφιακών μοντέλων που προκύπτουν.

Τεχνική τηλεπισκόπησης	Μελέτη περίπτωσης	Τύπος αστάθειας	Είδος εφαρμογής	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Optical VHR (OOA)	Giampilieri	Shallow soil slides – Debris flows	Landslide mapping	i) great density of spatial information, ii) numerous platforms, iii) high spatial, temporal and spectral resolution, iv) OOA approaches able to delineate areas affected by	i) high cost; ii) on-demand acquisition; iii) cloud cover; iv) acquisition limited to daylight, v) OOA thresholds definition between changed and unchanged areas

Τεχνική τηλεπισκόπησης	Μελέτη περίπτωσης	Τύπος αστάθειας	Είδος εφαρμογής	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
				landslides	
Spaceborne SAR (PSI)	Nebrodi e Peloritani	Complex, rotational and deep-seated landslides	Landslide detection and mapping	i) good cost/benefit ratio, ii) coverage of wide areas; iii) millimeter accuracy; iv) availability of historical archives (since 1992); v) day-night and all weather acquisition.	i) detection of fast movements; ii) monitoring in deferred time; iii) presence of dense vegetation cover; iv) geometric distortions; v) unusable to detect N-S oriented landslides.
UAV-DP	Ricasoli	Shallow landslides	Landslide characterization and mapping	i) Low cost, rapid survey; ii) high repeatability; iii) high resolution data; iv) avoidance of shadowing effects.	i) Restrictive UAV flight regulations; ii) skilled operator required; iii) negative effect of vegetation on the point cloud.
TLS - IRT	Elba island	Rock slides	Landslide risk scenario assessment	i) Favorable logistic conditions (up-close survey); ii) Rapid 3D surface, geo-structural and geo-mechanical survey; iii) detailed unstable masses detection-volume calculation.	TLS: i) point cloud resolution related to scenario distance; ii) negative effect of vegetation on the point cloud. IRT: iii) scenario thermal contrasts related to slope orientation-roughness and solar radiation (daily/seasonal variations).
GB-InSAR - TLS - IRT	San Leo	Rock fall	Landslide long-term monitoring	i) Multi-system approach for wide range of instability process detection and analysis; GB-InSAR: ii) millimeter accuracy; iii) continuous monitoring. iv) day-night and all weather acquisition.	i) Intrinsic limitation of each adopted technique (L.O.S, range of detectable velocity, repetition time). IRT-TLS: ii) only periodical check. GB-InSAR: iii) uncapability for detecting rapid and perpendicular displacements with respect to the L.O.S.;

Τεχνική τηλεπισκόπησης	Μελέτη περίπτωσης	Τύπος αστάθειας	Είδος εφαρμογής	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
					iv) ambiguity in locating displacements for overhanging- slope sectors.
GB-InSAR	Santa Trada	Translational slide	Landslide Emergency management	i) Rapid installation; ii) day-night and all weather acquisition; iii) early warning and rapid assessment of risk scenario.	i) System loss of coherence, spatial and temporal decorrelation due to vegetation cover; ii) not favorable alignment between system L.O.S. and landslide movement direction (only 15–35% of displacement detected).

Πίνακας 5. Σύγκριση μεθόδων παρακολούθησης κατολισθήσεων (Casagli et al., 2017)

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί και η δυνητική χρήση της μεθόδου PSI και της GB-InSAR για τον μετριάσμό του κινδύνου κατολίσθησης αξιολογήθηκε επίσης κατά την παρακολούθηση της κατολίσθησης San Fratello (Σικελία, Ιταλία). Έντονα και εξαιρετικά γεγονότα βροχοπτώσεων είναι οι κύριοι παράγοντες που προκάλεσαν διάφορες κινήσεις στις πλαγιές, αργιλοπυριτικής ιζηματογενούς κάλυψης (Federica Bardi et al., 2015).

Στη συνέχεια παρατίθενται συνοπτικά τα στοιχεία από την έρευνα κατολισθητικών φαινομένων που πραγματοποιήθηκε σε περιοχή της Ιταλίας.

Οι περιοχές μελέτης περιλαμβάνουν δύο διαφορετικές περιοχές μιας οροσειράς (Peloritani και Nebrodi, Νήσος Σικελία, Νότια Ιταλία), όπου γεωλογικά θεωρείται ως πρόσφατα ανυψωμένη περιοχή, με απότομες πλαγιές και μικρού πάχους αργιλώδες εδαφικό μανδύα. Μέσα σε ένα βράδυ (1/10/2009) λόγω έντονων βροχοπτώσεων προκλήθηκαν πάνω από 600 κατολισθήσεις, που είχαν μορφή είτε εδαφικών ροών είτε ροής κορημάτων, σε μια έκταση περίπου 50 km<sup>2</sup>.

Σκοπός αυτής της έρευνας ήταν η προσπάθεια μιας νέας προσέγγισης για την ταχεία χαρτογράφηση των νέων κατολισθήσεων χρησιμοποιώντας τεχνικές ανίχνευσης αλλαγών στο ανάγλυφο (Casagli et al., 2017).

Η μεθοδολογία αυτή στοχεύει σε μια ημι-αυτοματοποιημένη και ταχεία ανάλυση των δεδομένων με ελάχιστη συμμετοχή των χειριστών και ελάχιστη εργασία πεδίου.

Σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους υπερτερεί όσο αναφορά (i) τη δυνατότητα κατάτμησης της εικόνας με βελτιστοποίηση κλίμακας που καθορίζεται από το ίδιο το πρόβλημα και (ii) δυνατότητα ανανέωσης των μετρήσεων συστηματικά.

Σε αυτή την ενότητα διερευνώνται οι δυνατότητες των μεθόδων που παρουσιάστηκαν παραπάνω καθώς και η συνδυαστική τους χρήση για την ανίχνευση, χαρτογράφηση και παρακολούθηση των κατολισθήσεων. Τα χρησιμοποιούμενα συστήματα τηλεπισκόπησης απαριθμούνται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 6).

Τύπος Συστήματος	Οπτικό VHR	SAR	GB-INSAR	TLS	UAV-DP	IRT
Δορυφόρος/Μοντέλο Συσκευής	Quickbird	Envisat/Ers/Radarsat1/CSK	Ellegi-LiSALab	Riegl LMS-Z420i	Canon Ixus 240hs	FLIR SC620
Μήκος κύματος	VIS/N-IR 0.4–0.9μm	C-band (5.6cm) X-band (3.1cm)	Ku band (≈1.7 cm)	N-IR (0.74–1.4 μm)	VIS (0.39/0.74μm)	LW-IR (7.5–13μ)
Αναθεώρηση χρόνου / Ποσοστό μέτρησης	1–3.5days	35/24(days) 12hours (at 40latitude)	≈1/4 min	12000 pt/s	24 frame/s	30 frame/s
Εικόνα χωρική / ανάλυση	2.4m	20×5/10×5/1×1 (m)	0.3×0.75 cm (at 100m distance)	0.008°	4608 × 3456 pix	640×480 pix
Μέγιστη απόσταση / εμβέλεια	450–482km	772-774/782-785/793/620 (km)	3–4km	800 m	150m	–40/500C
N-E-ελλειψοειδές	23m (horizontal)	2-6-1.5m(C-Band)	< 1mm	± 10 mm	1–5cm	± 2C

Τύπος Συστήματος	Οπτικό VHR	SAR	GB-INSAR	TLS	UAV-DP	IRT
ύψος / ακρίβεια		1-4-1.5m (X band)				

Πίνακας 6. Τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων τηλεπισκόπησης (Casagli et al., 2017)

Στον πίνακα (Πίνακας 7) που ακολουθεί δίνεται μια επισκόπηση των διαφορετικών πλατφορμών τηλεπισκόπησης με την τυπική χωρική ανάλυση των πολυφασματικών καναλιών τους και με τα τυπικά πεδία θέασης (Nebiker S. et al., 2008).

Remote Sensing Platform	Typical Spatial Resolution (MS)	Typical Field-of-View (FOV)
Satellite	2-15 m	10-50 km
Aircraft (piloted)	0.2-2 m	2-5 km
<i>Miniature UAV ?</i>	<i>1-20 cm</i>	<i>50-500 m</i>
Ground-based	< 1 cm	< 2 m

Πίνακας 7. Τυπικές χωρικές αναλύσεις και οπτικά πεδία διαφορετικών πλατφορμών τηλεπισκόπησης - με χωρικό κενό διακριτικής ικανότητας μεταξύ 1 και 10 cm το οποίο θα μπορούσε να γεμίσει με μικρά Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (M.E.I.O.). (Nebiker S. et al., 2008)

### 2.3.1.3 Συμπεράσματα έρευνας

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ως άνω μελέτη κατολισθήσεων στις περιοχές Peloritani και Nebrodi της Ιταλίας είναι τα ακόλουθα.

Λόγω του ότι τα τελευταία χρόνια, οι τεχνικές τηλεανίχνευσης για την ανίχνευση κατολισθήσεων επιδέχονται συνεχείς βελτιώσεις, μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη διαχείριση των κινδύνων κατολίθησης, καθώς επιτρέπουν την αποτύπωση μεγάλων επιφανειών με πυκνή χωρική δειγματοληψία, προσφέροντας σαφή πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά τοπογραφικά συστήματα (όπως τα GPS) που είναι μεν ακριβή αλλά σίγουρα με περιορισμένο αριθμό σημείων ελέγχου.

Παρόλα αυτά η κάθε κατολίθηση αποτελεί μια διαφορετική περίπτωση, συνεπώς η επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας που πρέπει να υιοθετηθεί είναι κρίσιμη και μπορεί να αφορά τεχνικά θέματα, οικονομικό προϋπολογισμό, περιβαλλοντικούς παράγοντες και ειδικό χαρακτηριστικό των κατολισθήσεων που πρέπει να παρακολουθούνται.

Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για αποτελεσματικές διαδικασίες πολιτικής προστασίας στις περιοχές που είναι εκτεθειμένες σε εκδήλωση κατολισθήσεων, ο στόχος των ερευνητών στο εγγύς μέλλον είναι να βελτιωθεί η ικανότητα διερεύνησης των εν λόγω μεθόδων και κατά συνέπεια να επεκταθούν οι τομείς εφαρμογής τους (Casagli et al., 2017).

## **2.4. Χρήση multi-copter στην έρευνα των κατολισθήσεων**

### **2.4.1 Εισαγωγή**

Στο τρέχον κεφάλαιο περιγράφονται οι πιθανές εφαρμογές φωτογραμμετρίας για έρευνες κατολισθήσεων που αποκτήθηκαν με χρήση multi-copter Saturn, μιας οικογένειας καινοτόμων multi-copter, που αναπτύχθηκε στο Τμήμα Επιστημών της Γης του Πανεπιστημίου της Φλωρεντίας.

Όπως αναφέρεται και στο προηγούμενο κεφάλαιο τα τελευταία χρόνια, ο συνδυασμός της ταχείας ανάπτυξης των χαμηλού κόστους μη επανδρωμένων αεροσκαφών (Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.)) με βελτιωμένη τεχνολογία μπαταρίας και μείωση των διαστάσεων και του κόστους των αισθητήρων έχει ανοίξει ο δρόμος για της επανάστασης στη βιομηχανία της γεωδαισίας.

Η χρήση της εναέριας φωτογραμμετρίας για ερευνητικούς σκοπούς, από εικόνες υψηλής ανάλυσης που αποκτήθηκαν από μη επανδρωμένα αεροσκάφη (drones) που πετούν σε χαμηλό ύψος (από 50 m έως 150 m) γίνεται ολοένα και πιο σύνθητες.

Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα στη διερεύνηση των κατολισθήσεων, καθώς η δυνατότητα χρήσης ενός νέου, οικονομικά προσιτού εργαλείου για την απόκτηση ακριβών και λεπτομερών μορφολογικών δεδομένων σε ασταθείς πλαγιές μπορεί να λειτουργήσει ως υποστηρικτική μέθοδος στα πλαίσια των γεωλογικών ερευνών. Σε σχέση με την επίγεια τοπογραφία, την αερομεταφερόμενη ή τη δορυφορική τηλεπισκόπηση, η τηλεπισκόπηση με χρήση Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (Μ.Ε.Ι.Ο.) έχει πολλά πλεονεκτήματα. Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η παροχή δεδομένων σε

σχεδόν πραγματικό χρόνο, η ευελιξία στην επιλογή του πλέον κατάλληλου αισθητήρα, το χαμηλό κόστος, η υψηλή ανάλυση και η δυνατότητα λήψης δεδομένων ακόμη και σε δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Στη συνέχεια αναλύεται η διαδικασία της έρευνας που πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικές θέσεις στην περιοχή της Τοσκάνης, της Ούμπρια και της Σικελίας της Ιταλίας. Σε αυτές τις έρευνες χρησιμοποιήθηκε το μη επανδρωμένο αεροσκάφος (multi-copter) με την ονομασία Saturn που αναπτύχθηκε πρόσφατα στο Πανεπιστήμιο της Φλωρεντίας.

Οι έρευνες αυτές δείχνουν πόσο γρήγορα θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα ακριβές μοντέλο ψηφιακού εδάφους χρησιμοποιώντας αεροφωτογραφίες που αποκτήθηκαν με ένα τέτοιου τύπου multi-copter.

Αυτή η τεχνολογία συμβάλλει περαιτέρω στην παρακολούθηση των κατολισθήσεων, συγκρίνοντας τις πολλαπλές απεικονίσεις που πραγματοποιούνται από το Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος.

#### **2.4.2 Οικογένεια multi-copter τύπου Saturn**

Συνήθως τα multi-copter έχουν δομή "αράχνης" με κεντρικό σώμα και πολλούς ακτινικούς βραχίονες που υποστηρίζουν τη διάταξη προώθησης της συσκευής.

Για να βελτιώσει τη δομή των υφιστάμενων multi-copter, το Τμήμα Επιστημών της Γης της Φλωρεντίας έχει αναπτύξει ένα καινοτόμο περιμετρικό πλαίσιο το οποίο υποστηρίζει πλήρως τη δυναμική των πτήσεων, γεγονός που του επιτρέπει να ξεπεράσει ορισμένα κρίσιμα ζητήματα για μεγάλο ωφέλιμο φορτίο ή για εφαρμογές σε μεγάλες πτήσεις.

Το νέο πλαίσιο είναι κατοχυρωμένο με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στην Ιταλία και το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας εν αναμονή της PCT (Συνθήκη συνεργασίας για τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας) εφαρμόζεται σε 117 χώρες στον κόσμο, οι οποίες έλαβαν την πρώτη θετική έκθεσή του την άνοιξη του 2014.

Η βελτιωμένη δομή έχει τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά:

- Αυξημένος χώρος χωρίς περιορισμούς στην ηλεκτρονική τοποθέτηση, το σύστημα πτήσης και τα όργανα.
- Η κεντρική περιοχή ωφέλιμου φορτίου μπορεί να συνδεθεί με άκαμπτο τρόπο ή ακόμα και με εύκαμπτο στήριγμα για να μειώσει σημαντικά τους κραδασμούς από το σύστημα πρόωσης.
- Μεγαλύτερη ευελιξία της πρόωσης με ένα μόνο πλαίσιο: χωρίς τροποποιήσεις στο πλαίσιο, είναι δυνατό να αλλάξει ο αριθμός των συστημάτων προώθησης (τρία, τέσσερα, έξι κ.λπ.) ακόμη και κατά τη διάρκεια της πτήσης.
- Η ευέλικτη διάταξη προώθησης της επιτρέπει να ταιριάζει με την ανάγκη κάθε αποστολής: π.χ. λιγότεροι κινητήρες για να αυξήσουν την αυτονομία, περισσότερους κινητήρες για να επιτρέψουν μεγάλο ωφέλιμο φορτίο.
- Μεταβλητή γεωμετρία προώθησης για να διατηρηθεί η τέλεια ισορροπία με όλους τους τύπους ωφέλιμων φορτίων και για τη διαχείριση έκτακτης προσγείωσης σε περίπτωση βλάβης της μονάδας προώθησης.

Η οικογένεια Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών με βάση το παραπάνω πλαίσιο, ονομάζεται Saturn, αποτελείται από δύο τύπους με διαφορετικές διαμορφώσεις, ένα μικρότερο που ονομάζεται Saturn Mini X-21 με διάμετρο 0,55 m και ένα μεγαλύτερο που ονομάζεται Saturn2, με διάμετρο 1,1m, με βάση την ίδια δομή.

Ενώ το Saturn Mini X-21 (Εικόνα 1) έχει σχεδιαστεί κυρίως για φωτογραμμετρικές και υπερφασματικές αποστολές όπου η αντοχή είναι πιο σημαντική από το ωφέλιμο φορτίο (έχει μέση διάρκεια ζωής 30 λεπτά), το Saturn 2 (Εικόνα 2), χάρη στο υψηλό ωφέλιμο φορτίο του (10 κιλά κατά την απογείωση) έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν αισθητήρες όπως LIDAR ή θερμικές κάμερες.



Εικόνα 1. Παρουσίαση του Saturn Mini X-21 Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος (Rossi et al., 2017)



Εικόνα 2. Το Saturn 2 Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος, σχεδιασμένο και κατασκευασμένο στο Department of Earth Sciences του University of Florence. (Rossi et al., 2017)

Το Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος Saturn διαθέτει ενσωματωμένο και πλήρως διαμορφωμένο σύστημα απόκτησης δεδομένων με ένα πλαίσιο για την προσαρμογή επιστημονικών οργάνων, όπως διάφορους τύπους αισθητήρων. Τέλος τα multi-copters του Saturn είναι ικανά για αυτόνομη πτήση, από την απογείωση μέχρι την προσγείωση και τη διαχείριση έκτακτης ανάγκης.

### **2.4.3 Εφαρμογές σε αποστολές αποτύπωσης κατολισθήσεων**

#### ***Αποστολές παρακολούθησης (surveying missions)***

Το φθινόπωρο του 2015 ξεκίνησε ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα γεωλογικής έρευνας για τη στήριξη του σχεδιασμού των έργων αποκατάστασης στις πλαγιές γύρω από την περιοχή Castello della Sala της Umbria της Ιταλίας (Rossi et al., 2017).

Μια αποστολή τοπογραφικού ελέγχου διεξήχθη γύρω από ένα διάσημο οινοποιείο (όπου παράγεται το λευκό κρασί Cervaro), χρησιμοποιώντας το Saturn2, εξοπλισμένο με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, Sony-DSCW7 με 8 MPix ανάλυση. Οι εικόνες που ελήφθησαν υπέστησαν ορθό-διόρθωση χρησιμοποιώντας 11 σημεία ελέγχου εδάφους (Ground Control Points - GCPs) τα οποία ερευνήθηκαν χρησιμοποιώντας διαφορετικά GPS, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ορθό-διορθωμένου μωσαϊκού με ανάλυση 10cm.

Επιπλέον, οι αεροφωτογραφίες συνδυάστηκαν για να δημιουργήσουν ένα αρχείο νεφών σημείων (point-cloud) υψηλής ανάλυσης από το οποίο, μετά την απομάκρυνση της βλάστησης, σχηματίστηκαν ισοϋψείς γραμμές 0,4 m και δημιουργήθηκε DTM μεγέθους κυψέλης 10 cm. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή λεπτομερούς γεωμορφολογικής ανάλυσης με στόχο την ταυτοποίηση των κύριων τοπογραφικών χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τις αστάθειες και ως βάση για το σχεδιασμό των έργων αντιμετώπισης για τη σταθεροποίηση των πλαγιών Β και ΒΔ παρειών του λόφου.

Ένα άλλο παράδειγμα τοπογραφικής έρευνας, με Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος, πραγματοποιήθηκε στην κατολίσθηση Scillato στη Σικελία της Νότιας Ιταλίας. Η κατολίσθηση στην περιοχή Scillato είναι μια μεγάλη ολίσθηση που εκδηλώθηκε κατά μήκος ενός κεντρικού αυτοκινητόδρομου στη Σικελία. Τον Ιούνιο του 2016 διεξήχθη μια έρευνα πάνω σε μια περιοχή με έκταση πάνω από 1 km<sup>2</sup> για να παρέχει στην ομάδα μηχανικών και γεωλόγων έναν ακριβή τοπογραφικό χάρτη της περιοχής αστάθειας που θα χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό των έργων σταθεροποίησης. Στα πλαίσια της παραπάνω έρευνας αποκτήθηκαν πάνω από 1060 εικόνες, ενώ στο έδαφος ερευνήθηκαν με διαφορεικό GPS περίπου 70 GCPs. Το προκύπτον νέφος σημείων περιέχει περισσότερα από 270 εκατομμύρια σημεία.

### **Περιοδικές απεικονίσεις (multi-temporal mission)**

Μια φωτογραμμετρική έρευνα με περιοδικότητα στη λήψη μετρήσεων διεξήχθη μεταξύ 2015 και 2016 στη βόρεια πλαγιά του Ricasoli, μια σύνθετη ολίσθηση που βρίσκεται στην Τοσκάνη της Ιταλίας. Ο στόχος της ανάλυσης ήταν να ανιχνευθούν τα κύρια μορφολογικά χαρακτηριστικά της κατολίσθησης με αισθητήρες υψηλής ανάλυσης για να ανιχνευθεί η εξέλιξή τους στο χρόνο και να αξιολογηθεί περαιτέρω η ικανότητα της τεχνικής για ανίχνευση και παρακολούθηση κατολισθητικών φαινομένων.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν τρεις έρευνες αερο-φωτογραμμετρίας, στις 30 Ιουλίου 2015, στις 2 Μαρτίου 2016 και στις 6 Απριλίου 2016 αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας το Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος Saturn 2. Το Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος ήταν εξοπλισμένο με μια συμβατική ψηφιακή φωτογραφική μηχανή RGB με ανάλυση 8 MPix. Το μέσο υψόμετρο πτήσης ήταν 70m a.g.l με αποτέλεσμα εικόνες με ανάλυση εδάφους 0,02 m.

Το αρχείο DTM που προέκυψε από την προηγούμενη έρευνα συγκρίθηκε για λόγους επικύρωσης της τεχνικής με ένα αρχείο DTM που είχε προκύψει με τη χρήση ενός επίγειου ανιχνευτή λέιζερ στις 30 Μαρτίου του 2015. Από τη σύγκριση αναδείχθηκαν διαφορές μεταξύ των δύο επιφανειών κάτω από 0,1 m (Rossi et al., 2015).

Η ποσοτική σύγκριση μεταξύ των τριών DEM που προέκυψαν από τις τρεις φωτογραμμετρικές έρευνες επέτρεψε την ανίχνευση δύο μικρού βάθους κατολισθήσεων στην εξεταζόμενη περιοχή. Η πρώτη κατολίσθηση (LS1) πραγματοποιήθηκε μεταξύ Ιουλίου 2015 και Μαρτίου 2016 με έκταση 950m<sup>2</sup> και εκτιμώμενο όγκο περίπου 450m<sup>3</sup>. Η δεύτερη κατολίσθηση (LS2) ανιχνεύθηκε συγκρίνοντας τις αποτυπώσεις Μαρτίου 2016 και Απριλίου 2016. Η LS2 ήταν μικρότερη από την LS1 με έκταση 320m<sup>2</sup> και όγκο 70m<sup>3</sup>. Η διαφορά μεταξύ των DEM επέτρεψε επίσης να προσδιοριστεί η έναρξη της θραύσης στη στέψη και οι ζώνες επιρροής των δύο κατολισθήσεων.

### **Αποτύπωσης δομών βραχόμαζας (structural mapping mission)**

Χάρη στην υψηλή ανάλυση των οπτικών εικόνων που αποκτήθηκαν από τα Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη και τα προκύπτοντα νέφη σημείων που δημιουργούνται

είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν αναλύσεις της γεωλογικής δομής σε 2D και 3D περιβάλλον εντοπίζοντας τις παρατηρούμενες ασυνέχειες της βραχώμαζας, με τη χρήση συγκεκριμένων αλγόριθμων.

Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή με Saturn Mini X21 προέκυψε νέφος σημείων. Από τη διαδικασία αυτή είναι δυνατό να ληφθούν δεδομένα για χαρακτηριστικές παραμέτρους της βραχώμαζας όπως ο προσανατολισμός, ο αριθμός συστημάτων ασυνεχειών, η απόσταση / συχνότητα (για τον προσδιορισμό του δείκτη RQD), η εμμόνη, το μέγεθος των τεμαχών και η τραχύτητα που εξαρτάται από την κλίμακα.

Σε περιπτώσεις ανθρωπογενών παρεμβάσεων όπως στην περίπτωση του λατομείου μαρμάρου στην Carrara, η όψη της πλαγιάς του βράχου είναι επίπεδη. Σε αυτή τη περίπτωση, μόνο τα ίχνη των ασυνεχειών είναι ανιχνεύσιμα από το αρχείο point-cloud, με την προϋπόθεση ότι τα διαθέσιμα δεδομένα σχετίζονται με ψηφιακή εικόνα υψηλής ανάλυσης.

Τα ίχνη ασυνεχειών μπορούν να αναπαρασταθούν από 2D γραμμές (polylines) στο επίπεδο του πρηνούς και μπορεί να γίνει μια ποσοτική ανάλυση 2D, με βάση το μήκος και τη γωνία κλίσης τους στο επίπεδο αναφοράς γνωστού προσανατολισμού. Στην πραγματικότητα, η προσέγγιση 2D μπορεί να επιτευχθεί με αυτόματη εξαγωγή των επιφανειών ή με ψηφιοποίηση από τον μελετητή των ιχνών των επιπέδων των ασυνεχειών του βράχου (Gigli & Casagli, 2011).

Στην περίπτωση του λατομείου μαρμάρου Carrara η ανάλυση αυτή υποδεικνύει την πιθανή διέξοδο για την εξαγωγή δεδομένων των κυριότερων επιπέδων αστοχίας που δημιουργούνται από τις ασυνέχειες της βράχου και τη χρήση τους για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας του πρηνούς.

#### **2.4.4 Συμπεράσματα έρευνας**

Η τρέχουσα μελέτη περιγράφει τις πιθανές εφαρμογές φωτογραμμετρικών δεδομένων για έρευνες κατολισθήσεων που αποκτήθηκαν με τη χρήση multi-copter Saturn, που αναπτύχθηκε στο Τμήμα Επιστημών της Γης του Πανεπιστημίου της Φλωρεντίας.

Παρουσιάστηκαν συνοπτικά διάφορες περιπτωσιολογικές μελέτες για την επεξεργασία της εγκεκριμένης μεθοδολογίας. Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής θα μπορούσε να είναι στην τοπογραφία όπου, με την απόκτηση δεδομένων σε μορφή νέφους σημείων υψηλής ανάλυσης μπορεί να δημιουργηθεί ένας λεπτομερής γεωμορφολογικός χάρτης της υπό διερεύνηση περιοχής, προσδιορίζοντας τα κύρια μορφολογικά χαρακτηριστικά της.

Επίσης συνδυάζοντας τις φωτογραμμετρικές απεικονίσεις μιας ασταθούς περιοχής σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, είναι δυνατή η μέτρηση επιφανειακών παραμορφώσεων με ακρίβεια εκατοστών. Τέλος, δεδομένα νέφους σημείων υψηλής ανάλυσης και εικόνες από ασταθείς βραχώδεις επιφάνειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή των παραμέτρων των ασυνεχειών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω στις γεωτεχνικές αναλύσεις (Rossi et al., 2017).

## **2.5. Παρακολούθηση της εξέλιξης μιας κατολίσθησης με Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.)**

### **2.5.1 Εισαγωγή**

Στην παρούσα παράγραφο γίνεται αναφορά στην παρακολούθηση κατολισθήσεων μέσω της χρήσης ενός Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (Μ.Ε.Ι.Ο.). Συγκεκριμένα θα γίνει αναφορά σε ένα παράδειγμα εντοπισμού και παρακολούθησης των κινήσεων της κατολίσθησης της Potoska Planina που βρίσκεται πάνω από τον οικισμό Koroska Bela στα βουνά Karavanke στη βορειοδυτική Σλοβενία (Vid Peterman, 2015).

Μια υπάρχουσα γεωλογική έρευνα στην περιοχή έδειξε μετακίνηση εδάφους με ρυθμό μεγαλύτερο από 10 cm ετησίως. Εντούτοις, έχουν εντοπιστεί πολύ μεγαλύτερες μετακινήσεις από τότε - αρκετά σημαντικές ώστε να παρατηρηθούν με τη βοήθεια ενός Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (Μ.Ε.Ι.Ο.). Με την πρόθεση να αξιολογηθεί η δυναμική της κατολίσθησης, στήθηκε ένα σύστημα περιοδικών παρατηρήσεων δύο φορές το χρόνο - στα μέσα της άνοιξης και στα μέσα του φθινοπώρου.

Η σημερινή δραστηριότητα της κατολίσθησης της Potoska Planina θεωρείται ως μια ολίσθηση αργής κίνησης - δηλ. ερπυσμός - που μπορεί τελικά να μετατραπεί σε ροή κορημάτων.

Η περιοχή της κατολίσθησης είναι περίπου 2.000m<sup>2</sup> και βρίσκεται σε υψόμετρο 1.200m. Το σχετικό υψόμετρο της κατολίσθησης είναι περίπου 600m πάνω από τον οικισμό Koroska Bela, γεγονός που καθιστά την κατολίσθηση δύσκολα προσβάσιμη.

Μέχρι το 2015 είχαν πραγματοποιηθεί πέντε διαδοχικές μετρήσεις. Όμως στην παρούσα παράγραφο θα αναλυθεί η περιγραφή των αποτελεσμάτων και της αξιολόγησης της δυναμικής των κατολισθήσεων της πρώτης μέτρησης καθώς η μεθοδολογία δεν έχει αλλάξει.

Ο προσδιορισμός της δυναμικής κατολισθήσεων παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον για τους γεωλόγους που μελετούν την κατολίσθηση. Έχοντας αυτό υπόψη οι ερευνητές

εισήγαγαν ένα σύστημα περιοδικών παρατηρήσεων που περιλαμβάνει δύο ανεξάρτητες τεχνικές έρευνας:

α) φωτογραμμετρία με Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.) βασισμένη σε πρότυπη φωτογραμμετρική προσέγγιση, ενισχυμένη με αυτόματη ανίχνευση αλλαγών και β) την κλασική ταχυμετρία.

Στην περιοχή γύρω από την κατολίσθηση τοποθετήθηκε ένα γεωδαιτικό δίκτυο σταθερών σημείων που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των θέσεων των φωτογραμμετρικών σημείων ελέγχου εδάφους κατά τη διάρκεια κάθε μέτρησης.

Για την καταγραφή αλληλεπικαλυπτόμενων αεροφωτογραφιών της περιοχής κατολίσθησης χρησιμοποιήθηκε ένα Hexacopter Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.).

Επίσης τοποθετήθηκε ένα δίκτυο ταχυμετρικών σημείων ελέγχου που κινούνται με την κατολίσθηση. Αυτό πρόσφερε ανεξάρτητο έλεγχο των φωτογραμμετρικών παρατηρήσεων της κατολίσθησης.

### **2.5.2 Περιγραφή εξοπλισμού**

Ο εξοπλισμός αποτελείται από ένα Hexacopter Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) για την καταγραφή επικαλυπτόμενων αεροφωτογραφιών της περιοχής κατολίσθησης. Φέρει κάμερα Olympus E-P2 με αισθητήρα 18mm 12 Megapixel και φακό φωτογραφικής μηχανής σταθερού μήκους με εστιακή απόσταση 17 mm. Η κάμερα έχει ρυθμιστεί σε χαμηλή τιμή ISO, συνήθως ISO 100, και υψηλή ταχύτητα κλείστρου (1/1250).

### **2.5.3 Γεωαναφορά δεδομένων**

Η γεωαναφορά των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω της χρήσης σημείων ελέγχου εδάφους, τα οποία σηματοδοτήθηκαν ως μαύροι κυκλικοί στόχοι με λευκό φόντο. Ένας ταχυμετρικός σταθμός χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των θέσεων των σημείων ελέγχου και για την εκτέλεση των απαιτούμενων μετρήσεων. Μερικά από τα σημεία ελέγχου σταθεροποιήθηκαν σε μεγαλύτερους ογκόλιθους της κατολίσθησης,

ενώ άλλα τοποθετήθηκαν σε χαλύβδινες ράβδους και ενσωματώθηκαν στην κατολισθαίνουσα μάζα (Vid Peterman, 2015).

#### **2.5.4 Συλλογή δεδομένων**

Για την λήψη των αλληλεπικαλυπτόμενων αεροφωτογραφιών της περιοχής κατολίσθησης, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, χρησιμοποιήθηκε ένα Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (M.E.I.O.). Οι εικόνες ελήφθησαν από ύψος 40 μέτρων πάνω από το επίπεδο του εδάφους με οριζόντια επικάλυψη 75% και κάθετη επικάλυψη 66%.

Τα σημεία ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν για τη γεωαναφορά των φωτογραμμετρικών δεδομένων επισημάνθηκαν αναγνωρίζοντας τους μαύρους κυκλικούς στόχους σε λευκό φόντο.

Επομένως στην περιοχή γύρω από την κατολίσθηση δημιουργήθηκε ένα γεωδαιτικό δίκτυο σταθερών σημείων όπου χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των θέσεων των φωτογραμμετρικών και ταχυμετρικών σημείων ελέγχου κατά την εκτέλεση περιοδικών μετρήσεων. Για κάθε μέτρηση χρησιμοποιήθηκαν 9 φωτογραμμετρικά σημεία ελέγχου στο έδαφος και 6 ταχυμετρικά σημεία. Οι θέσεις όλων των σημείων ελέγχου προσδιορίστηκαν έπειτα ακολουθώντας μια τυποποιημένη διαδικασία. Προκειμένου να εκτιμηθεί η δυναμική κατολίσθησης, απαιτείται η σύγκριση με τις μετέπειτα αντίστοιχες μετρήσεις. Κατά συνέπεια η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στην αυτόματη αντιστοίχιση των επόμενων χρονικά φωτογραμμετρικών μετρήσεων.

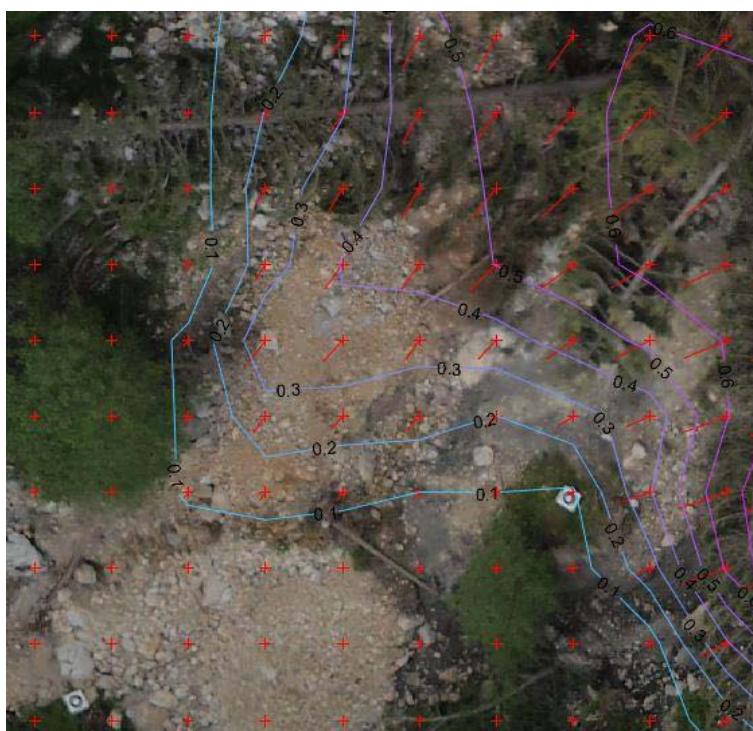
Για παράδειγμα προκειμένου να υπολογιστούν οι μετατοπίσεις μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης μέτρησης, ακολουθείται η εξής διαδικασία: λήψη αρχικών και δευτερευόντων φωτογραμμετρικών συνόλων δεδομένων και αντιστοίχιση ανά σημείο.

Στη συνέχεια, επιλέγοντας ένας σημείο από το πρώτο νέφος σημείων - στο εξής *σημείο αναζήτησης* - επιλέγονται από το δεύτερο νέφος σημείων μόνο εκείνα τα σημεία των οποίων η απόσταση από το σημείο αναζήτησης είναι μικρότερη από ένα συγκεκριμένο όριο (π.χ. 2 μέτρα σε αυτή την περίπτωση). Αυτά τα σημεία ονομάζονται "train points".

Επομένως γίνεται αντιστοίχιση μεταξύ του σημείου αναζήτησης και των "train points". Για κάθε τέτοιο ζεύγος σημείων υπολογίζεται η μικρότερη απόσταση μεταξύ τους. Ο στόχος είναι να βρεθεί το ζεύγος με τη μικρότερη απόσταση (Vid Peterman, 2015).

Μια περιοχή κατολίσθησης 2000 m<sup>2</sup> σε αυτή την περίπτωση δίνει κατά μέσο όρο 0,6 υποψήφιους φορείς μετατόπισης ανά τετραγωνικό μέτρο. Αυτά τα δεδομένα όμως εξακολουθούν να περιέχουν και ψευδείς δείκτες μετατόπισης. Για να εξαλειφτούν τα λάθη, ελέγχεται επίσης και η διανυσματική κατεύθυνση, δηλ. κατά πόσο συμφωνεί η διανυσματική κατεύθυνση με τα πλησιέστερα γειτονικά σημεία.

Οι ισοκαμπύλες μετατόπισης (Εικόνα 3), είναι πολύ χρήσιμες όταν πρόκειται για απεικόνιση κατολίσθησης. Αυτά τα δεδομένα επιτρέπουν μια πολύ σαφή αναπαράσταση της δυναμικής των κατολισθήσεων τόσο για μεγάλες όσο και για εξαιρετικά μικρές μετατοπίσεις και είναι πολύ χρήσιμη για τους γεωλόγους που στη συνέχεια το χρησιμοποιούν για να υπολογίσουν και να αξιολογήσουν τόσο την περιοχή όσο και τη κατολισθαίνουσα μάζα.



Εικόνα 3. Δημιουργία καμπύλων ίσης μετατόπισης σε μάζα κατολίσθησης (Vid Peterman, 2015)

Για τις περιοδικές μετρήσεις της κατολίσθησης στην Potoska Planina, τοποθετήθηκαν 9 σημεία ελέγχου σε όλη την κατολίσθηση με έκταση περίπου 2000 τετραγωνικών μέτρων. Προκειμένου να εκτιμηθεί η ακρίβεια του διανύσματος μετατόπισης, η ασφαλέστερη και πιο σωστή προσέγγιση είναι η σύγκριση δύο ανεξάρτητων μετρήσεων. Όλες οι μετρήσεις μετατοπίσεων στην Potoska Planina ήταν επιτυχείς.

### **2.5.5 Συμπεράσματα έρευνας**

Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή και από την σύγκριση διανυσμάτων μετατόπισης προκύπτει ότι οι μικρότεροι φορείς μετατόπισης μπορούν να παρατηρηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι οι μεγαλύτεροι (Vid Peterman, 2015).

Επιπλέον, οι συνιστώσες μετατόπισης στους άξονες X και Y τείνουν να είναι πιο αξιόπιστες από ότι την κάθετη συνιστώσα Z.

Έχει αποδειχθεί ότι τα Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.) χαμηλού κόστους μπορούν να παρέχουν δεδομένα τηλεπισκόπησης υψηλής ανάλυσης για κατολισθήσεις (Niethammer U. et.al., 2009). Χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ορθό-μωσαϊκών υψηλής ανάλυσης και DTM που επιτρέπουν την ανάλυση των σχισμών και των μετατοπίσεων της επιφάνειας του εδάφους.

Το πιο σημαντικό όμως συμπέρασμα της έρευνας είναι ότι προκύπτει πως ακόμη και οι μετατόπισης μικρής κλίμακας (περίπου 10 cm) μπορούν να παρατηρηθούν επιτυχώς μέσω της φωτογραμμετρίας.

Από οικονομικής απόψεως μια έρευνα με χρήση Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (Μ.Ε.Ι.Ο.), σχετικά με τη δραστηριότητα μιας κατολίσθησης είναι πολύ συμφέρουσα. Καθώς για να εκτελεστεί μια τέτοια έρευνα, απαιτείται μια ημέρα εργασίας για μια ομάδα δύο ατόμων. Για παράδειγμα στην συγκεκριμένη έρευνα χρειάστηκαν 3 ώρες για να ταξιδέψουν και να μεταφέρουν εξοπλισμό προς και από την περιοχή, 1,5 ώρες για να σηματοδοτήσουν και να μετρήσουν τις θέσεις του σημείου ελέγχου εδάφους και μία επιπλέον 0,5 ώρα για να μετρήσουν τις θέσεις του

ταχυμετρικού σημείου ελέγχου. Μια πτήση Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (Μ.Ε.Ι.Ο.) με εγγραφή αεροφωτογραφιών είναι η ταχύτερη από άλλες αντίστοιχες έρευνες, λαμβάνοντας μόνο περίπου 20 λεπτά. Άλλα 20 λεπτά απαιτούνται για να προγραμματιστεί η αποστολή πτήσης Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (Μ.Ε.Ι.Ο.). Απαιτούνται λίγο περισσότερες από 5 ώρες εργασίας εδάφους, μαζί με 2 ημέρες εργασίας γραφείου, προκειμένου να επεξεργαστούν και να υπολογιστούν όλα τα δεδομένα και να συντάξουν λεπτομερείς τεχνικές εκθέσεις.

Τα προβλήματα που μπορείς να αντιμετωπίσεις όταν χρησιμοποιείς μια τέτοια μέθοδο έγκειται στο γεγονός ότι επηρεάζονται από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Στην συγκεκριμένη έρευνα οι έντονες ριπές ανέμου ανάγκασαν το συνεργείο να διακόψει την έρευνα και να προσγειώσει το Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.), επεκτείνοντας την έρευνα για άλλη μια μέρα.

Σε σύγκριση με τις κλασικές ταχυμετρικές μετρήσεις, ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των μετρήσεων αυτών είναι η πληρότητα των δεδομένων. Οι φορείς μετατόπισης υπολογίζονται για το σύνολο της κατολίσθησης και όχι μόνο για τυχαία σημεία ενδιαφέροντος.

Όλα αυτά δίνουν τη δυνατότητα στους ερευνητές να αναλύσουν με ακρίβεια την επίδραση των καιρικών συνθηκών, όπως η ποσότητα βροχοπτώσεων, στην επίδραση τους στη δυναμική των κατολισθήσεων.

## 2.6 Εκτίμηση της ακρίβειας παρακολούθησης κατολισθήσεων με Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.)

### 2.6.1 Εισαγωγή

Συνήθως γεωτεχνικές και γεωφυσικές έρευνες χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της δομής των κατολισθήσεων. Ωστόσο, επειδή οι περισσότερες γεωτεχνικές τεχνικές παρέχουν παρατηρήσεις σε διακριτές θέσεις, αποδίδουν χαμηλή χωρική ανάλυση (Merritt et al., 2014). Ορισμένες γεωφυσικές μέθοδοι προσφέρουν υψηλότερη ανάλυση, παρέχοντας παρατηρήσεις βασιζόμενες σε διατομές, ωστόσο, παρέχουν συχνά έμμεσες πληροφορίες που απαιτούν επικύρωση από παρατηρήσεις συγκριτικής αξιολόγησης που λαμβάνονται με άλλες τεχνικές (Chambers et al., 2011, Merritt et al., 2014).

Η μέθοδος εναέριας σάρωσης με λέιζερ (Airborne laser scanning - ALS) και η επίγεια σάρωση με λέιζερ (terrestrial laser scanning -TLS) παρέχουν δεδομένα σε μορφή νέφους σημείων υψηλής πυκνότητας που επιτρέπουν την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους υψηλής ποιότητας (DEM) (Ackermann, 1999, Pirotti et al., 2013). Και οι δύο τεχνικές είναι σχετικά δαπανηρές και, στην περίπτωση του TLS, μπορεί να εμφανιστούν αποκλείσεις λόγω των λοξών γωνιών πρόσπτωσης της ακτίνας (Eisenbeiß, 2009).

Τα Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.) εξοπλισμένα με compact κάμερες είναι προσιτά για πολλές φωτογραμμετρικές εφαρμογές επειδή προσφέρουν αποδοτικές και οικονομικά εφικτές λύσεις σε σύγκριση με τις παραδοσιακές φωτογραμμετρικές έρευνες.

Επίσης, η πρόσφατη ανάπτυξη αλγορίθμων αντιστοίχισης εικόνων ανά pixel (π.χ. stereo semi-global matching algorithm Hirschmüller, 2008), που χρησιμοποιείται στις προσεγγίσεις SfM (Snavely et al., 2008), διευκολύνει την αυτόματη δημιουργία πυκνών σημείων από επικαλυπτόμενες εικόνες (Remondino et al., 2014).

Οι παρατηρήσεις που προέρχονται από Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.) βασισμένες σε μια ροή εργασίας SfM μπορούν να συμπληρώσουν σύγχρονες έρευνες εδάφους και να ενισχύσουν την ερμηνεία της κατολισθητικής δραστηριότητας.

Τα μικρά μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.)) μπορούν να δώσουν μια σειρά από δεδομένα της επιφάνειας του εδάφους που λαμβάνονται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους με αυτοματοποιημένο τρόπο και οικονομικά συμφέρον.

### **2.6.2 Περιγραφή εξοπλισμού**

Στην παρούσα παράγραφο περιγράφεται η διερεύνηση των δυνατοτήτων ενός μίνι Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (Μ.Ε.Ι.Ο.), εξοπλισμένου με μια compact κάμερα Panasonic Lumix DMC-LX5, για να καταγράψει παραμορφώσεις επιφάνειας σε αποδεκτά επίπεδα ακρίβειας για την αξιολόγηση της κατολίσθησης.

Για την επικύρωση των αποτελεσμάτων της έρευνας, τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τις παρατηρήσεις που λαμβάνονται με τυπικές τεχνικές τοπογραφίας.

Τα δεδομένα συλλέγονται με απόσταση δείγματος εδάφους 6cm (GSD) και φαίνεται ότι επιτυγχάνουν ακρίβεια λίγων εκατοστών σε ανεξάρτητα σημεία ελέγχου (ICPs).

Το σφάλμα επανεγγραφής των παραγόμενων μοντέλων εξετάζεται επίσης σε σύγκριση με σταθεροποιημένες περιοχές εκτός κατολίσθησης. Μέσω αυτής της αξιολόγησης σφάλματος, η μελέτη εκτιμά ότι η ευαισθησία στον κάθετο άξονα σε πραγματική αλλαγή εδάφους της κατολίσθησης είναι ίση με 9 cm.

### **2.6.3 Καταλληλότητα Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (Μ.Ε.Ι.Ο.) για παρακολούθηση**

Από τα διαθέσιμα στοιχεία παλαιότερων ερευνών αναφέρονται τα ακόλουθα παραδείγματα: ο Niethammer (2012) παρακολούθησε μια κατολίσθηση στις γαλλικές Άλπεις χρησιμοποιώντας ένα μίνι quad-rotor Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.), εξοπλισμένο με μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Praktica Luxmedia, από περίπου 200 μέτρα υψόμετρο. Δημιούργησε ένα DEM 6 cm GSD χρησιμοποιώντας μια

προσέγγιση SfM, επαρκή για τον εντοπισμό λεπτών επιφανειακών σχισμών πλάτους 10 cm που δεν μπορούσαν να ανιχνευθούν σε συμβατικές αερομεταφερόμενες εικόνες.

Σε μια παρόμοια μελέτη, ο d'Oleire-Oltmanns (2012) έλαβε ένα DEM 5 εκ. Χρησιμοποιώντας ένα μίνι Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (M.E.I.O.) σταθερής πτέρυγας που πετούσε σε υψόμετρο 85 μ. Με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Panasonic Lumix GF1 για να παρακολουθεί την ανάπτυξη του χλοοτάπητα στο Μαρόκο, με ακρίβεια μερικών εκατοστών σε ICPs.

Και οι δύο αυτές μελέτες έδειξαν ότι τα συστήματα mini- Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (M.E.I.O.) εξοπλισμένα με compact ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές είναι ικανά να παρέχουν DEMs με ανάλυση και ακρίβεια συγκρίσιμη με TLS για εφαρμογές παρακολούθησης (Eltner et al., 2015 ).

Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες έχουν αποκαλύψει την ύπαρξη συστηματικών σφαλμάτων στην αυτόματη ροή εργασίας SfM. Όμως αυτά τα σφάλματα έχει παρατηρηθεί ότι προέρχονται από διάφορες πηγές όπως χαμηλή επικάλυψη, θολή εικόνα, διαμόρφωση πτήσης, αριθμός και διανομή GCP, εξαρτάται επίσης από τα διάφορα μοντέλα φωτογραφικών μηχανών που χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά λογισμικά SfM.

Για παράδειγμα, η χαμηλή επικάλυψη μπορεί να οδηγήσει σε ασυμμετρίες κατά τη διάρκεια του αρχικού σταδίου ευθυγράμμισης της εικόνας και να δημιουργήσει ασυνέχειες στο ανασυσταθέν νέφος σημείων. Όσο υψηλότερη είναι η αλληλοεπικάλυψη των εικόνων τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των οπτικών ακτινών που τέμνουν ένα σημείο αντικειμένου, επιτυγχάνοντας έτσι καλύτερο προσδιορισμό του σημείου (Haala and Rothermel, 2012). Θολές εικόνες μπορεί να προκληθούν από τον άνεμο, την ξαφνική αναταραχή και την κίνηση προς τα εμπρός του Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (M.E.I.O.) (Sieberth et al., 2014). Η θολούρα καταστρέφει την ευκρίνεια της εικόνας που μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα βαθμονόμησης της κάμερας στην συνέχεια. Οι James και Robson (2014) απέδειξαν ότι οι παράλληλες γραμμές πτήσης μπορούν να προκαλέσουν κατακόρυφα συστηματικά σφάλματα με μοτίβο κοίλου σχήματος, λόγω της κακής γεωμετρίας του δικτύου απεικόνισης. Σύμφωνα με την ανάλυσή τους, αυτά τα σφάλματα μπορούν να μειωθούν σημαντικά όταν αποκτώνται συγκλίνουσες εικόνες ή οι γραμμές πτήσης μεταφέρονται σε αντίθετες κατευθύνσεις.

Στην ίδια μελέτη επισημάνθηκε επίσης ότι οι ομοιόμορφα κατανεμημένες GCP πρέπει να συμπεριληφθούν στην προσαρμογή δέσμης προκειμένου να μειωθούν τα προαναφερθέντα συστηματικά λάθη.

Επιπλέον, οι Eltner και Schneider (2015) διερεύνησαν το Agisoft PhotoScan, ένα δημοφιλές εμπορικό λογισμικό SfM, και κατέδειξαν ότι το μοντέλο γεωμετρίας της κάμερας (geometric camera model) δεν μπόρεσε να λύσει εξ' ολοκλήρου την παραμόρφωση του φακού μιας φωτογραφικής μηχανής Panasonic Lumix DMC-LX3. Αυτό διαπιστώθηκε ότι είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην περίπτωση φωτογραφικών μηχανών χαμηλού κόστους και ελλείπει GCP. Η μη εξουσιοδοτημένη παραμόρφωση μπορεί να σχηματίσει συστηματικά μοτίβα σε σχήμα κοίλο, τα οποία αναγνωρίστηκαν είτε στις ανόθευτες εικόνες (Eltner και Schneider, 2015) είτε στις κατανομές κατακόρυφων σφαλμάτων στις ICPs (James and Robson, 2014).

Εκτός από συστηματικά λάθη άλλες πρόσφατες μελέτες έχουν ασχοληθεί με το θόρυβο που προκαλείται στην αποτύπωση από τη βλάστηση (Javernick et al., 2014, Tonkin et al., 2014). Οι Tonkin et al., (2014) ανέφεραν ότι οι διαφορές ύψους μεταξύ των παρατηρήσεων που ελήφθησαν με SfM και ένα συνολικό σταθμό, ήταν υψηλότερες σε περιοχές με βλάστηση σε σχέση με τις περιοχές με χαμηλή βλάστηση. Οι Javernick et al. (2014) προσδιόρισαν περιοχές με ύψος βλάστησης υψηλότερο από 0,40 m σε DEM που προέρχεται από SfM. Δημιούργησαν πρώτα μια ανάλυση DEM 0,50 m με τον υπολογισμό της ελάχιστης ανύψωσης κάθε εικονοστοιχείου. Στα πλαίσια παρακολούθησης κατολισθήσεων, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη όλες οι πηγές σφάλματος, προκειμένου να εκτιμηθεί αξιόπιστα η πραγματική αλλαγή εδάφους. Ως αποτέλεσμα της ανάλυσης, η ακρίβεια ποσοτικοποιείται για μια κατολίσθηση σε μια περίοδο παρακολούθησης δύο ετών.

#### **2.6.4 Περιγραφή εξοπλισμού**

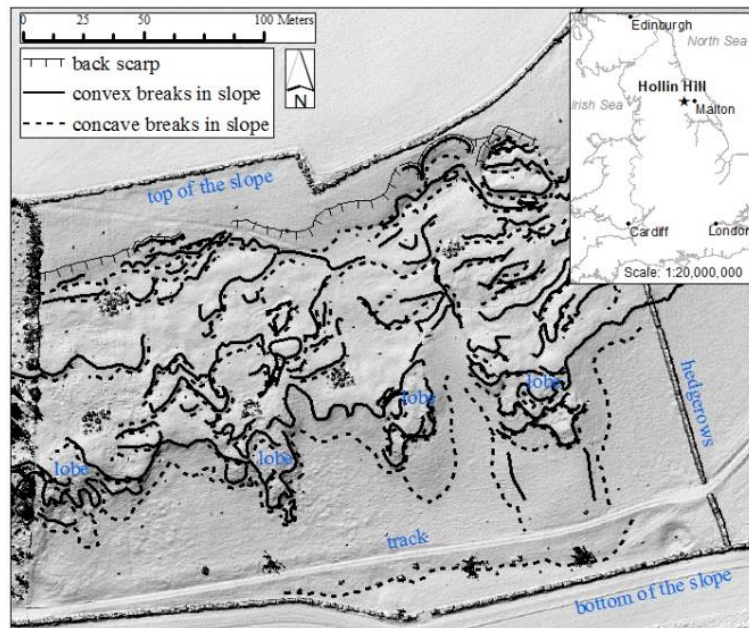
Για τη συλλογή δεδομένων σε αυτό το έργο χρησιμοποιήθηκε ένα mini fixed-wing Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) (Quest UAV 300) του Πανεπιστημίου Newcastle. Το Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) αυτό έχει μέγιστο ωφέλιμο φορτίο 5 kg και διάρκεια πτήσης περίπου 15 λεπτά (με μπαταρία λιθίου).

Είναι εξοπλισμένο με μια compact ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, έναν ενσωματωμένο δέκτη παγκόσμιου δορυφορικού συστήματος δορυφορικής πλοήγησης (Global Navigation Satellite System - GNSS) και μια μονάδα Micro-Electro Mechanical System-Inertial Measurement Unit (MEMS-IMU). Περιέχει επίσης έναν μικροεπεξεργαστή με λογισμικό αυτόματου πιλότου που ερμηνεύει τις προκαθορισμένες παραμέτρους αποστολής πτήσης επιτρέποντας του να πετάει αυτόνομα.

Η ενσωματωμένη κάμερα είναι μια Panasonic Lumix DMC-LX5 με φακό Leica, ονομαστικής εστιακής απόστασης 5.1 mm για την ορατή λήψη εικόνας. Η κάμερα διαθέτει αισθητήρα CCD μήκους  $1 / 1,63$  "(8,07 x 5,56 mm) με μέγεθος εικονοστοιχείου  $2 \times 2 \mu\text{m}$ , δημιουργώντας μια εικόνα  $3648 \times 2736$  εικονοστοιχείων και είναι μέσα σε gel για την απόσβεση κραδασμών και προσαρτάται στο σώμα του Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (M.E.I.O.).

### **2.6.5 Περιοχή μελέτης**

Η περιοχή μελέτης των κατολισθήσεων βρίσκεται στο Hollin Hill ( $54^{\circ} 6' 38.90''\text{N}$ ,  $0^{\circ} 57' 36.84''\text{W}$ ), στο Βόρειο Γιορκσάιρ, Ηνωμένο Βασίλειο όπου αποτελεί παρατηρητήριο κατολισθήσεων της British Geological Survey (BGS). Ο χώρος καταλαμβάνει γεωργικές εκτάσεις που χρησιμοποιούνται για ακατέργαστη βόσκηση και φυτεύονται κυρίως με χορτάρι και περιστασιακά δέντρα και θάμνους. Η περιοχή μελέτης εκτείνεται περίπου 290 m A-Δ και 230 m B-N. Έχει μέση κλίση  $12^{\circ}$  και διαφορά υψομέτρου 50 μέτρων από B-N (M. V. Peppas et al., 2016).



Εικόνα 4. Γεωμορφολογικός χάρτης της κατολίσθησης στο Hollin Hill (M. V. Peppra et al., 2016)

Οι Chambers et al. χαρακτήρισαν την κατολίσθηση Hollin Hill ως μια πολύ αργή κίνηση εδαφικής ροής με ένα μέσο ρυθμό μετατόπισης 2 m / yr. Πολλές ρωγμές έχουν σχηματιστεί στην στέψη, ενώ το ολισθαίνον υλικό στον πόδα έχει σχηματίσει τέσσερις λοβούς, όπως απεικονίζεται στην παραπάνω εικόνα. Οι επιφανειακές και υποεπιφανειακές κινήσεις παρακολουθούνται από το BGS με πολλαπλές γεωφυσικές, γεωτεχνικές και επίγειες RTK-GNSS μεθόδους (M. V. Peppra et al., 2016).

Αυτή η ενεργή κατολίσθηση αποτελεί μια ιδανική περιοχή μελέτης για να ερευνηθεί κανείς τις δυνατότητες της προσέγγισης με Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) για την εκτίμηση των παραμορφώσεων κατολισθήσεων. Έξι έρευνες πεδίου διεξήχθησαν για μια περίοδο σχεδόν δύο ετών.

Κατά τη διάρκεια της επιτόπιας εργασίας πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες εργασίες:

- (1) Ο GNSS (base station) σταθμός βάσης τοποθετήθηκε σε σταθερό έδαφος
- (2) ορίζονται κυκλικοί στόχοι διαμέτρου 0,40 μ. κατανέμονται ομοιόμορφα στην κατολίσθηση και εξετάζονται σε ταχεία στατική λειτουργία GNSS
- (3) συλλέγονται αποτυπώσεις με Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) και
- (4) ανιχνεύονται τα σημειακά ύψη των χαρακτηριστικών κοίλων/κυρτών σημείων της κατολίσθησης

Λόγω χρονικών περιορισμών, οι τοπογραφικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερις εποχές, τον Δεκέμβριο του 2014, τον Μάρτιο του 2015, τον Ιούνιο του 2015 και τον Φεβρουάριο του 2016.

Για τις τρεις πρώτες έρευνες, η κάμερα ορίστηκε με ταχύτητα κλείστρου 1/800 s, με ISO 400 και διάφραγμα. Ένα διάστημα έκθεσης 2,5 δευτερολέπτων επέτρεψε τη λήψη εικόνας με επικάλυψη 60% προς τα εμπρός/πίσω και 40% πλευρικά, θεωρώντας σταθερή ταχύτητα του Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (Μ.Ε.Ι.Ο.) 20 m/s.

Μετά την καλύτερη κατανόηση των λειτουργικών δυνατοτήτων του Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (Μ.Ε.Ι.Ο.) υπό διαφορετικές συνθήκες ανέμου, οι ρυθμίσεις για τις τρεις τελευταίες έρευνες άλλαξαν. Συγκεκριμένα, το διάστημα έκθεσης ρυθμίστηκε στα 2 δευτερόλεπτα και η πλευρική επικάλυψη αυξήθηκε στο 70% για να καταστεί δυνατή η καλύτερη κάλυψη της επικάλυψης. Η κάμερα έχει ρυθμιστεί με σταθερή ταχύτητα κλείστρου 1/800 s για μείωση της θόλωσης εικόνας, ISO 100 για να εξασφαλίσει ότι οι εικόνες έχουν καταγραφεί με χαμηλό θόρυβο (Sieberth et al., 2014) και σταθερό διάφραγμα f/2. Ενώ, στις τελευταίες τρεις έρευνες προστέθηκαν επιπλέον γραμμές πτήσης σε αντίθετες κατευθύνσεις, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη διαμόρφωση πτήσεων και να ελαχιστοποιηθούν τα συστηματικά λάθη.

### **2.6.6 Συμπεράσματα έρευνας - Αξιολόγηση ακριβείας**

Για τον προσδιορισμό του τρόπου με τον οποίο τα σφάλματα αυτά επηρέασαν τα αποτελέσματα, διεξήχθη μια αξιολόγηση της ακριβείας. Ως αποτέλεσμα αυτής της αξιολόγησης, υπάρχουν σαφείς αποδείξεις ότι για τις τρεις πρώτες έρευνες οι καμπύλες παραμόρφωσης αποκλίνουν περισσότερο από το σημείο αναφοράς από ό, τι οι υπόλοιπες που είχαν καλύτερο δίκτυο αλληλοεπικαλύψεων εικόνας (M. V. Peppas et al., 2016).

Εκτός από τα διαφορετικά δίκτυα απεικόνισης, και οι διαφορετικές ρυθμίσεις της κάμερας επηρεάζουν αντίστοιχα τα αποτελέσματα.

Λόγω των διαφορετικών πηγών σφάλματος, παρατηρήθηκαν κατακόρυφα σφάλματα ειδικά για την πρώτη έρευνα κυρίως σε περιοχές χαμηλής επικάλυψης εικόνων. Στις υπόλοιπες έρευνες, το μέγεθος του κάθετου σφάλματος ήταν σχετικά μικρό, αν και τον Ιούνιο του 2015 εμφανίστηκαν υψηλότερα σφάλματα πιθανότατα λόγω ισχυρών ριπών ανέμου που αποσταθεροποίησαν το Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) δημιουργώντας θολές εικόνες πάνω από την περιοχή. Η χρήση τέτοιων θολών εικόνων μπορεί να οδηγήσει σε κάθετες παραμορφώσεις.

Όσο αναφορά το οριζόντιο επίπεδο δεν παρατηρήθηκαν συστηματικά σφάλματα, που σημαίνει ότι πραγματοποιήθηκε μια αξιόπιστη έρευνα σε όλες τις εποχές. Υπάρχουν, ωστόσο, μερικές αποκλίσεις στις μετρήσεις (πχ το Σεπτέμβριο του 2015) το οποίο μπορεί να προέκυψε από κάποιες θολές εικόνες που ελήφθησαν σε αυτή την περιοχή και οι οποίες υποβαθμίζουν τη διαδικασία της ανάλυσης των δεδομένων.

Παρόλο που οι πολύ θολές εικόνες αποκλείστηκαν στην αρχή της διεργασίας επεξεργασίας, μερικές παρέμεναν καθώς δεν μπορούσαν να αφαιρεθούν, λόγω ανεπαρκών επικαλυπτόμενων εικόνων.

Ακόμη παρατηρείται σφάλμα (11.5 cm) το Μάιο του 2014 το οποίο είναι ορατό μόνο από δύο εικόνες λόγω του ανεπαρκούς δικτύου απεικόνισης σε αυτήν την περιοχή. Εντούτοις, συμπεριλαμβάνοντας τις νέες γραμμές πτήσης προς αντίθετες κατευθύνσεις, ήταν δυνατό να παραχθούν DEM με σχετικά χαμηλές κάθετες παραμορφώσεις, όπως αποδεικνύεται από τις τελευταίες τρεις έρευνες.

Τα αποτελέσματα έχουν δείξει ότι η κάθετη ακρίβεια RMSE ακρίβειας περίπου 10 cm μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση των GCPs και της μεγάλης αλληλοεπικάλυψης των εικόνων. Επίσης με την προσθήκη επιπλέον γραμμών πτήσης προς αντίθετες κατευθύνσεις τα σφάλματα μειώνονται σημαντικά.

Η έρευνα αυτή απέδωσε τιμή κάθετης ευαισθησίας  $\pm 9$  cm και αυτό θεωρείται αποδεκτό την κατολίσθηση του Hollin Hill, αφού τα πιο ενεργά μέρη της κατολίσθησης υπερβαίνουν την αλλαγή ύψους  $\pm 9$  cm κατά τις επαναλαμβανόμενες επισκέψεις.

## **2.7 Χρήση Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (Μ.Ε.Ι.Ο.) στην καταγραφή και παρακολούθηση εκτεταμένης κατολίσθησης**

Τον Ιούνιο του 2013, οι ισχυρές βροχοπτώσεις πυροδότησαν μια μεγάλη κατολίσθηση αρκετών εκατομμυρίων κυβικών μέτρων σε ένα μικρό χωριό της Αυστρίας. Χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι για την παρακολούθηση της κατολίσθησης, όπως είναι οι γεωφυσικές μέθοδοι και το Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (GNSS).

Ακόμη ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος χρησιμοποιήθηκε για την περιοδική αξιολόγηση της κατολίσθησης.

Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν εννέα πτήσεις με multicopter εξοπλισμένο με μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή με single-lens reflex camera (DSLR) που επέδωσε αρκετές χιλιάδες εικόνες.

Με βάση αυτές τις εικόνες και τις λεπτομερείς μετρήσεις του GNSS της περιοχής κατολίσθησης, προέκυψαν ορθοφωτογραφίες καθώς και τα παραγόμενα Ψηφιακά Επιφανειακά Μοντέλα (DSMs) με ακρίβεια μικρότερη από  $\pm 10$  cm.

Από αυτά τα δεδομένα επίσης βοήθησαν στον εντοπισμό ρωγμών, της κατεύθυνσης ροής και της ταχύτητας, οι μετατοπίσεις μάζας καθώς και η πρόοδος της κατασκευής των μέτρων αποκατάσταση.

Οι μετρήσεις με το GNSS χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό θέσης συγκεκριμένων σημείων με μεγάλη ακρίβεια, προκειμένου να εκτιμηθούν οι ρυθμοί μετατόπισης σε συγκεκριμένα τμήματα κατολισθήσεων. Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται γενικά για τη γεωαναφορά. Χρησιμοποιούνται γεωηλεκτρικές μέθοδοι για τη μέτρηση του κορεσμού του εδάφους, του πορώδους ή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υγρού πόρων. Σε συνδυασμό με διαβαθμισμένες διαστρωματώσεις γεωτρήσεων, αυτές οι παράμετροι μπορούν να δώσουν μια εικόνα της σύνθεσης του εδάφους.

Για δεκαετίες, έχουν εφαρμοστεί τεχνικές τηλεπισκόπησης με σκοπό τη διερεύνηση και κατανόηση της συμπεριφοράς των κατολισθήσεων.

Το Ιντερφερόμετρο Ραντάρ (InSAR) παρέχει εικόνες υψηλής ανάλυσης από δορυφορικές ή επίγειες θέσεις. Επιπλέον, η μέθοδος LiDAR μπορεί να εφαρμοστεί είτε από δορυφόρους και αερομεταφερόμενα συστήματα είτε από επίγειες πλατφόρμες. Τα τελευταία χρόνια, η διαδικασία των φωτογραμμετρικών ερευνών με τη χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών αυξάνεται. Τα αποκαλούμενα "multicopters" είναι πολύ ευέλικτα (Quadrocopter, Hexacopter, Octocopter), μπορούν να εξοπλιστούν με διάφορους αισθητήρες, που κυμαίνονται από κάμερες, αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας μέχρι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, LiDAR και υπερφασματικές κάμερες. Ο κύριος περιορισμός των multicopters είναι το περιορισμένο βάρος του ωφέλιμου φορτίου, ανάλογα με το μέγεθος, το μοντέλο και ο χρόνος διάρκειας της μπαταρίας τους.

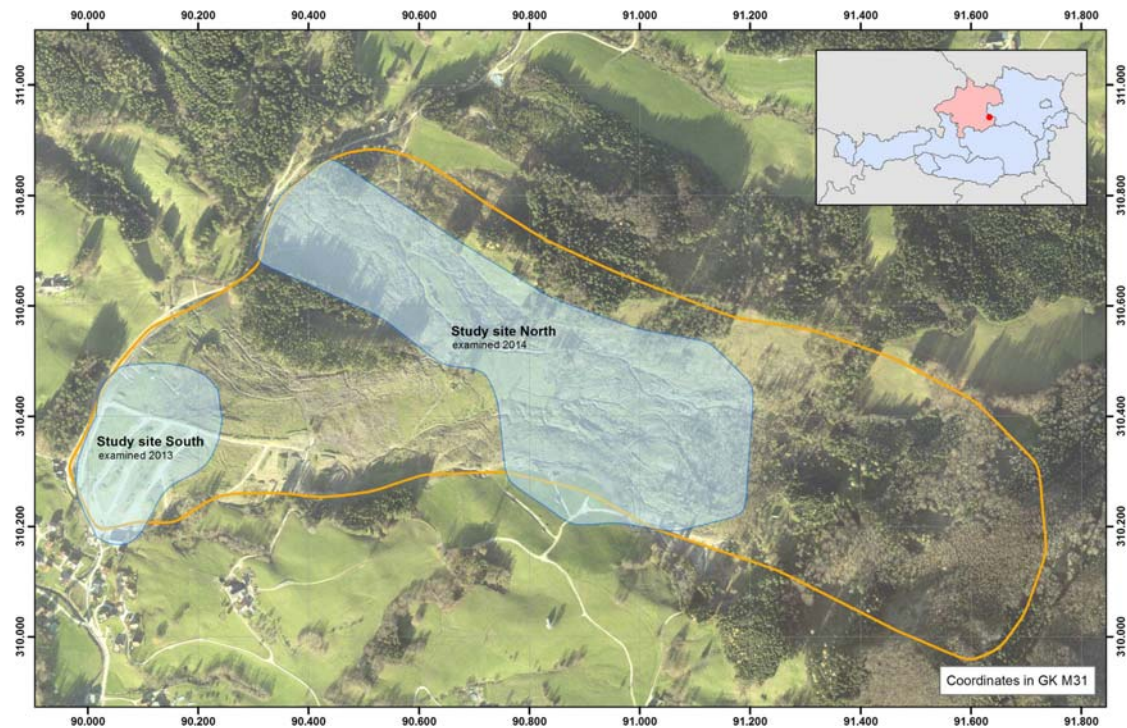
### **2.7.1 Εξοπλισμός**

Στην τρέχουσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε ένα rotary-wing Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (M.E.I.O.) εξοπλισμένο με μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή (DSLR) για την απόκτηση εικόνων three-band υψηλής ανάλυσης, για την παρακολούθηση μιας μεγάλης κατολίσθησης.

Για δύο περιοχές, πραγματοποιήθηκαν αρκετές πτήσεις για διάστημα 6 εβδομάδων και 4 μηνών, αντίστοιχα. Τα προκύπτοντα ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DSM) και οι ορθοφωτογραφίες με ανάλυση εδάφους 10 cm παρείχαν αποδείξεις για της κατολίσθησης.

### **2.7.2 Περιοχή μελέτης και περιγραφή συμβάντος**

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στο Pechgraben, μια μικρή περιοχή στα βόρεια του χωριού Großraming 47 ° 53 'B, 14 ° 33' A (Εικόνα 5).



Εικόνα 5. Η περιοχή έρευνας στο Pechgraben (Linder G. et al., 2016)

Η γεωλογία της περιοχής αντιπροσωπεύεται κύρια από ασβεστόλιθο, ψαμμίτη και λεπτόκοκκα υλικά, όπως άμμος και άργιλος. Παρόλο που η περιοχή βρίσκεται σε μια περιοχή ασβεστόλιθου / φλύσχη, ένα γεωλογικό παράθυρο, που αποτελείται από τεράστιους γρανιτοειδείς όγκους, βρίσκεται σε απόσταση περίπου 1 km από την κατοικημένη περιοχή.

Μετά από έντονες βροχοπτώσεις στα τέλη της άνοιξης του 2013, μια περιοχή περίπου 70 εκταρίων, συμπεριλαμβανομένου ενός όγκου αρκετών εκατομμυρίων κυβικών μέτρων υλικού, άρχισε να κινείται προς το χωριό Pechgraben.

Η κατολίσθηση έφτασε μέγιστη ταχύτητα περίπου 10 m / ημέρα. Ο χείμαρρος του Ahornleitenbach απειλήθηκε να μπλοκαριστεί από τη μάζα της κατολίσθησης. Μεγάλοι ογκόλιθοι χρησιμοποιήθηκαν ως φράχτες στη ροή της κατολισθαίνουσας μάζας και απομακρύνθηκε το υλικό που απειλούσε τον οικισμό.

Μέχρι στιγμής, το νοτιοδυτικό τμήμα είναι σε κίνηση, ενώ στο βόρειο τμήμα (με έκταση 25-30 ha) μπορούν να προσδιοριστούν μετατοπίσεις μεταξύ 0,5 και 1 m την εβδομάδα.

Επιλέχθηκαν δύο επιμέρους περιοχές για την παρακολούθηση με Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.): η μία βρισκόταν στο βόρειο τμήμα, όπου η κατολίσθηση βρίσκεται ακόμη σε κίνηση, η άλλη βρισκόταν στο νότιο τμήμα όπου η παρακολούθηση πραγματοποιήθηκε μεταξύ Ιουνίου και Ιουλίου 2013. Εκτός από τις πτήσεις με Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.), εκτελέστηκαν και άλλες μέθοδοι παρακολούθησης και στις δύο θέσεις μελέτης, όπως οι περιοδικές μετρήσεις GNSS καθορισμένων σημείων αναφοράς, οι αερομεταφερόμενες σαρώσεις με λέιζερ (ALS) και γεωφυσικές διασκοπίσεις (Linder G. et al., 2016).

Ένα rotary-wing Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) χρησιμοποιήθηκε για την λήψη αεροφωτογραφιών υψηλής ανάλυσης από συγκεκριμένες ενότητες της περιοχής κατολίσθησης. Το BARF Mikro Kopter Okto XL έχει διάσταση περίπου 73 × 73 × 50 cm και έχει βάρος απογείωσης περίπου 4,9 kg (συμπεριλαμβανομένης κάμερας και μπαταριών). Σε σύγκριση με άλλα συστήματα Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.), όπως οι χαρταετοί, τα μπαλόνια ή τα αεροπλάνα, τα multicopter είναι πολύ πιο σταθερά, έχουν λιγότερες δονήσεις και έχουν την ικανότητα να απογειώνονται και να προσγειώνονται κάθετα. Το multicopter χρησιμοποιεί το GNSS για τη θέση X και Y καθώς και έναν βαρομετρικό αισθητήρα για τον προσδιορισμό του ύψους από το επίπεδο εδάφους (AGL). Οι χωρικές θέσεις καταχωρούνται συνεχώς σε μια κάρτα micro-SD. Αυτές οι καταχωρημένες θέσεις χρησιμοποιούνται στη συνέχεια κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των δεδομένων.

Όλες οι εικόνες τραβήχτηκαν με μια φωτογραφική μηχανή Canon EOS 650D DSLR. Αυτή η κάμερα έχει ανάλυση 18 megapixel (MP) και σταθερή εστιακή απόσταση 20 mm (ισοδύναμη με φακό πλήρους μεγέθους 32 mm λόγω του συντελεστή καλλιέργειας). Η κάμερα ρυθμίστηκε ώστε να ενεργοποιείται αυτόματα σε σταθερό χρονικό διάστημα 2 δευτερολέπτων, ανεξάρτητα από τη θέση ή τον προσανατολισμό της στο διάστημα. Με αυτή τη μέθοδο, θα μπορούσε να αποκτηθεί μια αρκετά μεγάλη ποσότητα εικόνων για τη φωτογραμμετρική ανάλυση.

Το λογισμικό ελέγχου πτήσης που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται BMikroKopter Tool και έχει σχεδιαστεί ειδικά για Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.) τύπου BMikroKopter. Το λογισμικό χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργήσει ένα raster αρχείο

των σημείων από το GNSS στον αέρα, τα οποία ακολούθησε με καθορισμένη ταχύτητα και καθορισμένο υψόμετρο πτήσης από το έδαφος από το χρήστη.

Πριν από τη μετακίνηση επί τόπου, καθορίστηκαν αρκετές προϋποθέσεις:

Οι σωστές καιρικές συνθήκες παίζουν σημαντικό ρόλο στις πτήσεις με Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.). Η βροχή έχει αρνητικό αντίκτυπο τόσο στα ηλεκτρονικά όσο και στην ποιότητα των εικόνων. Επιπλέον, οι ισχυρές ριπές ανέμου μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια της διαδρομής GNSS και την ευκρίνεια των εικόνων. Έτσι, η πρόγνωση του καιρού ελέγχθηκε προσεκτικά. Με βάση τις εμπειρίες, οι βέλτιστες καιρικές συνθήκες για την εκτίμηση των κατολισθήσεων είναι ένας συννεφιασμένος ουρανός χωρίς βροχή και χωρίς άνεμο.

Η τοπογραφία της περιοχής ενδιαφέροντος αξιολογήθηκε κατά προσέγγιση χρησιμοποιώντας το Google Earth, προκειμένου να καθοριστεί το υψηλότερο και το χαμηλότερο σημείο και η μέση κλίση, η οποία είναι σημαντική για τη δημιουργία της διαδρομής με GNSS. Για την πτήση, ήταν σημαντικό να διασφαλιστεί η διαθεσιμότητα τουλάχιστον πέντε δορυφόρων GNSS στην περιοχή, ανάλογα με το χρόνο, τον προσανατολισμό και την τοπογραφία του χώρου μελέτης.

Έχοντας προσδιορίσει όλες τις πληροφορίες, δημιουργήθηκε ένα πλέγμα πτήσης, παρέχοντας ένα σταθερό ύψος πτήσης πάνω από το έδαφος, μια εμπρόσθια επικάλυψη 90% και μια πλευρική επικάλυψη 70%.

Το μέσο υψόμετρο πτήσης ρυθμίστηκε σε 80-100 m από το έδαφος προκειμένου να επιτευχθεί μια απόσταση δειγματοληψίας εδάφους (GSD) περίπου 1,7-2,2 cm. Έχει ρυθμιστεί μια μέση ταχύτητα 2 m/s και η ταχύτητα κλείστρου της κάμερας ρυθμίστηκε στα 1/320s.

Αξιολογήθηκαν διάφοροι συνδυασμοί GCP προκειμένου να ληφθεί μια βέλτιστη γεωμετρία. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι στα χρησιμοποιούμενα GCP, τα αντίστοιχα σφάλματα θα μπορούσαν να μειωθούν σημαντικά επιλέγοντας συγκεκριμένα και λιγότερα GCPs. Επιπλέον, για όλους τους συνδυασμούς, το μέσο σφάλμα των GCP μεταξύ της θέσης GNSS και της φωτογραμμετρικής θέσης κυμαίνεται μεταξύ  $11,6 \pm 4,9$ cm.

Για να ελέγξουν την ακρίβεια ενός Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (Μ.Ε.Ι.Ο.)-DSM χωρίς τη χρήση GCP, το ίδιο DSM γεωαναφέρθηκε μόνο από τις θέσεις των 952 εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν. Οι θέσεις καθορίστηκαν από το ενσωματωμένο σύστημα GNSS του Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Όχηματος (Μ.Ε.Ι.Ο.).

Η σύγκριση και των δύο μοντέλων (GCP-referenced vs. multicopter-referenced) έδειξε απόκλιση  $11,3 \text{ m} \pm 1,6 \text{ m}$ , ενώ η κλίμακα ήταν σχεδόν ίδια, αλλά οι θέσεις των μοντέλων διέφεραν. Αυτό το αποτέλεσμα είναι σημαντικό όταν ασχολούμαστε με περιοχές όπου η χρήση των GCP δεν είναι δυνατή και δεν απαιτείται ακριβής τοποθέτηση του μοντέλου. Μια τέτοια διαδικασία θα μπορούσε να εφαρμοστεί για να γίνει μια πρώτη επισκόπηση μιας περιοχής, π.χ., για την εκτίμηση ζημιών.

Τα υψηλής ανάλυσης DSM και οι ορθοφωτοχάρτες επέτρεψαν την ανίχνευση και την παρακολούθηση των ρωγμών και μικρών μεταβολών στην επιφάνεια του εδάφους. Στην υπό διερεύνηση περιοχή σε διάστημα 37 ημερών, οι ρωγμές επιφάνειας μετακινήθηκαν κατά μέσο όρο περίπου  $2,25 \text{ m}$  προς τα Δ - ΝΔ, με ρυθμό κίνησης περίπου  $6,1 \text{ cm/ημέρα}$ .

Η εφαρμογή των Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (Μ.Ε.Ι.Ο.) για την παρακολούθηση των κατολισθήσεων είναι ένα πρακτικό εργαλείο για τη διαχείριση των κινδύνων και των καταστροφών. Παρέχει τη δυνατότητα λήψης πολλών εικόνων κατά τη διάρκεια κάθε πτήσης σε σταθερό ύψος. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την ευθυγράμμιση φωτογραφιών καθώς και για τη δημιουργία σύννεφων σημείων 3D είναι το Agisoft PhotoScan. Από τις αεροφωτογραφίες που ελήφθησαν, δημιουργήθηκαν DSMs με ακρίβεια  $\pm 10 \text{ cm}$  μέσα σε λίγες ώρες. Ως εκ τούτου, η ανίχνευση ρωγμών στην επιφάνεια του εδάφους γίνεται πιο εύκολη. Τα υψηλής ακρίβειας Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.)-DSMs χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της κατολισθαίνουσας μάζας και τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν βρίσκονται σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις πεδίου (Linder G. et al., 2016).

Η ορθοφωτολογική σειρά επέτρεψε την τεκμηρίωση των επιφανειακών αλλαγών και παρέιχε μια γενική εικόνα των εργασιών κατασκευής και του σχεδιασμού των μέτρων αποκατάστασης. Όσον αφορά την ακρίβεια, τα αποτελέσματα της γεωαναφοράς έδειξαν ότι ο αριθμός των GCP μπορεί να μειωθεί σε έξι, ενώ η ακρίβεια εξακολουθεί να

διατηρείται. Παρόλα αυτά, λαμβάνοντας υπόψη τα σφάλματα μέτρησης ή την ανεπαρκή ορατότητα του GCP στις εικόνες, πρέπει να μετρηθούν τουλάχιστον 10-15 GCP για να έχουν επαρκή δεδομένα για να αναφερθούν στο μοντέλο.

Η διαφορά μεταξύ του GCP-referenced και του Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (M.E.I.O.)-referenced μοντέλου είναι κατά προσέγγιση 11,3 m και οφείλεται είτε στην ακρίβεια των μονάδων του GNSS (περίπου 2,5 m) είτε σε σφάλματα στην αναφορά.

Οι συντεταγμένες από τις ρωγμές που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια της κατολίσθησης κυμαίνονται από μερικά εκατοστά έως και μερικά μέτρα. Με τις διαδοχικές αποτυπώσεις της περιοχής κατά τη διάρκεια του χρόνου παρακολούθησης είναι δυνατή η εκτίμηση της ανάπτυξης τέτοιων επιφανειακών ρωγμών. Επιπλέον η λεπτομερής αποτύπωση των ρωγμών είναι δυνατή αλλά δεν πραγματοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη λόγω του μεγέθους της κατολίσθησης και του μεγάλου αριθμού ρωγμών (Linder G. et al., 2016).

Μια άλλη σημαντική πτυχή αυτής της μελέτης είναι η εκτίμηση της ταχύτητας ροής της κατολισθαίνουσας μάζας. Για παράδειγμα στο βόρειο τμήμα της κατολίσθησης εντοπίστηκαν τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες κίνησης. Ενώ επίσης εντοπίστηκαν και περιοχές που δεν είχαν μετακινηθεί κατά την εξέλιξη του φαινομένου.

Οι ορθοφωτογραφίες υψηλής ανάλυσης από Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (M.E.I.O.) έχουν τη δυνατότητα να εντοπίζουν ακόμη και τις μικρότερες αλλαγές στην τοπογραφία, οι οποίες μπορούν να ποσοτικοποιηθούν σε συνδυασμό με Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (M.E.I.O.)-DSM υψηλής ανάλυσης.

Το λογισμικό των Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (M.E.I.O.) βελτιώνεται συνεχώς, όμως ο κύριος περιορισμός της παρακολούθησης των Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (M.E.I.O.) είναι η διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Με τη βελτίωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας, θα είναι δυνατή η κάλυψη μεγαλύτερων περιοχών χωρίς να χρειάζεται να χωριστεί σε μικρές περιοχές, γεγονός που απαιτεί χρόνο (προσγείωση, αλλαγή μπαταριών, εκκίνηση) και δημιουργεί πλεονάζοντα δεδομένα (ίδιες διαδρομές πτήσης κ.α.). Ένας άλλος περιορισμός είναι η διαθεσιμότητα

δορυφόρων GNSS για αυτόματα ελεγχόμενες πτήσεις, η οποία πρέπει να ελεγχθεί πριν από την εκκίνηση. Ειδικά σε ορεινές περιοχές, αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα ή και ζημιά στο Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) κατά τη διάρκεια της απογείωσης ή της προσγείωσης.

Παρά τους περιορισμούς αυτούς, τα Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.) είναι αποτελεσματικά και πρακτικά εργαλεία για την παρακολούθηση των κατολισθήσεων καθώς καθιστούν δυνατή την εκτίμηση σημαντικών γεωγραφικών δεδομένων μέσα σε λίγες ώρες. Επιπλέον, το σύστημα αυτό είναι αρκετά ευέλικτο καθώς μπορεί να παρακολουθεί απότομες κοιλάδες ακόμα και κάθετες πλαγιές.

Γενικά η ακρίβεια της φωτογραμμετρίας βελτιώθηκε τα τελευταία χρόνια λόγω της χρήσης ψηφιακών εικόνων, αλγορίθμων αντιστοίχισης εικόνας κ.α. Έτσι καθώς η φωτογραμμετρία παρέχει γεωμετρικές πληροφορίες καθώς και εικόνες ή πληροφορίες σχετικά με την υφή των υπό μελέτη κάθε φορά αντικειμένων, αποτελεί και μια καλή τεκμηρίωση.

Αντιθέτων η σάρωση με λέιζερ είναι συχνά δαπανηρή και χρονοβόρα ενώ τα Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.) αποτελούν ένα γρήγορο, οικονομικό και πρακτικό εργαλείο και παρέχει στον χρήστη εικόνες αεροφωτογραφιών υψηλής ευκρίνειας και DSM μέσα σε λίγες ώρες.

Τέλος η μελέτη τεκμηριώνει ότι τα Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.) είναι ικανά να εκτελούν σε ορεινό ανάγλυφο πτήσεις να παρέχουν ακριβή geodata υψηλής ποιότητας και με μικρούς κύκλους επανάληψης, επιτρέποντας την παρακολούθηση των κατολισθήσεων και την παρακολούθηση ακόμη και μικρών ρωγμών προκειμένου να προσδιοριστούν οι κατευθύνσεις ροής.

## 2.8 Συμπέρασμα βιβλιογραφικής ανασκόπησης

Η εφαρμογή των κατάλληλων τεχνολογιών για την ανίχνευση, παρακολούθηση και έγκαιρη προειδοποίηση, όσο αφορά την εξέλιξη των κατολισθητικών φαινομένων κρίνεται αναγκαία, με αξιόπιστες προσεγγίσεις τόσο στην ερμηνεία, όσο και στην παρακολούθηση, για τον μετριασμό των κινδύνων.

Η αυξανόμενη ζήτηση για αποτελεσματικές διαδικασίες πολιτικής προστασίας σε περιοχές εκτεθειμένες σε εκδήλωση εδαφικών ασταθειών, έθεσε νέους στόχους στις ερευνητικές διαδικασίες με σκοπό τη βελτίωση της ικανότητας των υφιστάμενων μεθόδων αποτύπωσης, αλλά και την διερεύνηση νέων.

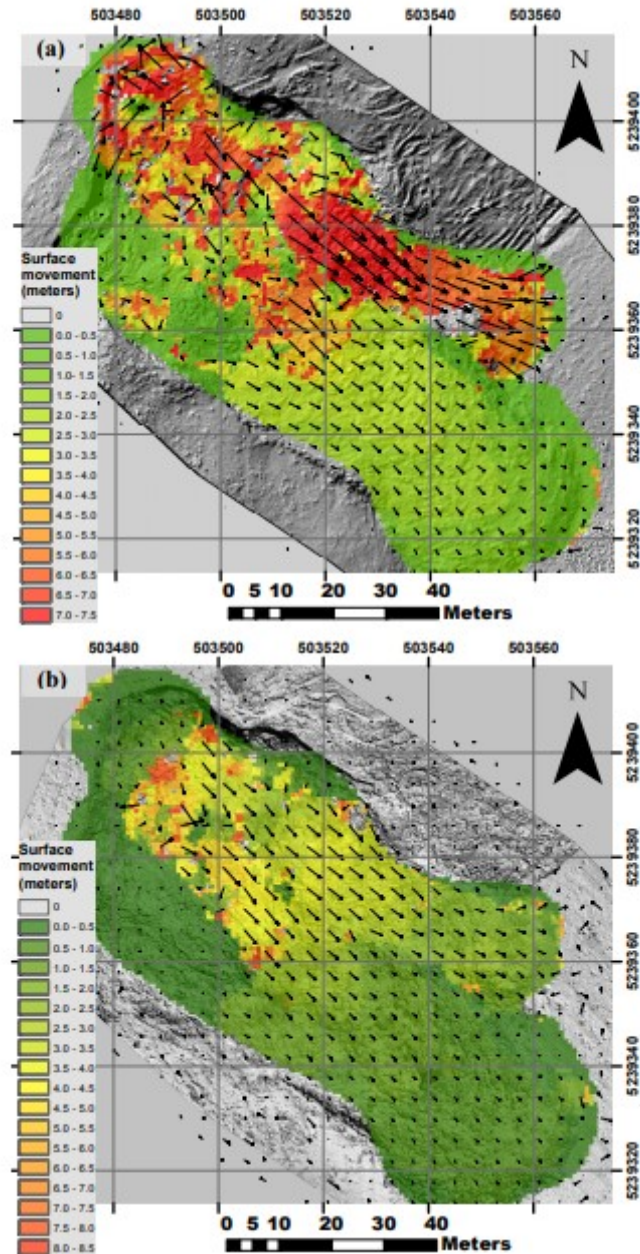
Τα τελευταία χρόνια η χρήση της εναέριας φωτογραμμετρίας για ερευνητικούς σκοπούς, από εικόνες υψηλής ανάλυσης που αποκτήθηκαν από μη επανδρωμένα αεροσκάφη, χαμηλού ύψους πτήσης (από 50 m έως 150 m), γίνεται ολοένα και πιο σύνηθες (Colomina I., Molina P., 2014).

Η χρήση Μη Επανδρωμένων Αεροσκάφων ήρθε να θέσει νέες βάσεις στον τομέα της έρευνας των περιοχών που εμφανίζουν φαινόμενα αστάθειας, αυξάνοντας σημαντικά την ταχύτητα και την ακρίβεια του ελέγχου, μειώνοντας παράλληλα σημαντικά το κόστος και τον κίνδυνο ατυχήματος κατά την διάρκεια της επιθεώρησης, αφού δεν εμπλέκεται άμεσα ο ανθρώπινος παράγοντας.

Οι νέες αυτές τεχνολογίες που βασίζονται στη χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών, έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών, από την παρακολούθηση και αποτύπωση παγετώνων (Immerzeel W.W. et al, 2014) έως και την εφαρμογή στην αποτύπωση αρχαίων μνημείων με λεπτομέρεια και ακρίβεια.

Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή οικονομικών αεροφωτογραφιών και οι αεροφωτογραφίες λαμβάνονται με γεωμετρικές λύσεις στην κλίμακα εκατοστών, παρέχοντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα για τακτικές έρευνες με δυνατότητα επαναλήψεων σε σύντομα χρονικά διαστήματα. (Uwe Niethammer, 2013). Μπορούμε με αυτόν τον τρόπο να παρακολουθούμε την εξέλιξη

μίας κατολίσθησης σε τακτά χρονικά διαστήματα. Στην εικόνα που ακολουθεί δίνεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα παρακολούθησης κατολίσθησης από το 2011 έως το 2013 (Εικόνα 6).



Εικόνα 6. Coseismic surface movement maps; (a) 2011B-2012A; (b) 2012A-2013A; (coordinate system: GDA94 UTM55S) (Turner D. et al., 2014)

Η καταγραφή κατολισθήσεων όπως και ζημιών από φυσικά φαινόμενα, μπορεί να επιτυγχάνεται πλέον ταχύτατα με την δυνατότητα του κρατικού μηχανισμού να επεμβαίνει στα σημεία που χρήζουν άμεσης προσοχής, έχοντας πλήρη εικόνα του

μεγέθους του συμβάντος. Τα Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Μ.Ε.Ι.Ο.) είναι ικανά να εκτελούν σε ορεινό ανάγλυφο πτύσεις να παρέχουν ακριβή δεδομένα υψηλής ποιότητας και με μικρούς κύκλους επανάληψης, επιτρέποντας εκτός από την παρακολούθηση των κατολισθήσεων και την παρακολούθηση μικρών ρωγμών προκειμένου να προσδιοριστούν οι κατευθύνσεις κίνησης.

Η φωτογραμμετρία με χρήση Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (Μ.Ε.Ι.Ο.), πλεονεκτεί καθώς προσφέρει μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο, ευελιξία, υψηλή ανάλυση, χαμηλό κόστος και συλλογή πληροφοριών σε επικίνδυνες θέσεις με ασφάλεια. (Turner D. et al., 2015). Ένα ακόμη πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, είναι η δυνατότητα απόκτησης δεδομένων σε μορφή νέφους σημείων υψηλής ανάλυσης, δίνοντας τη δυνατότητα να δημιουργηθεί ένας λεπτομερής γεωμορφολογικός χάρτης της υπό διερεύνηση περιοχής. Το πρόβλημα που μπορεί να αντιμετωπίσει κάποιος όταν χρησιμοποιεί μια τέτοια μέθοδο έγκειται στο γεγονός ότι επηρεάζονται από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες.

Στην περίπτωση της παρακολούθησης και του χαρακτηρισμού των κατολισθήσεων, η απόκτηση αεροφωτογραφιών με χρήση Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους επιτρέπει να αποφευχθούν φαινόμενα σκίασης, τα οποία μπορούν να μειώσουν δραστικά την ακρίβεια των ψηφιακών μοντέλων που προκύπτουν. Επίσης συνδυάζοντας τις φωτογραμμετρικές απεικονίσεις μιας ασταθούς περιοχής σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, είναι δυνατή η μέτρηση επιφανειακών παραμορφώσεων με ακρίβεια εκατοστών.

Σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους υπερτερεί όσο αναφορά (i) τη δυνατότητα κατάκτησης της εικόνας με βελτιστοποίηση κλίμακας που καθορίζεται από το ίδιο το πρόβλημα και (ii) τη δυνατότητα ανανέωσης των μετρήσεων συστηματικά. Επιτρέπουν την αποτύπωση μεγάλων επιφανειών με πυκνή χωρική δειγματοληψία, προσφέροντας σαφή πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά τοπογραφικά συστήματα (π.χ. GPS) που μπορεί να είναι ακριβή, αλλά παρέχουν περιορισμένο αριθμό σημείων ελέγχου.

Από τις διαφορετικές έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί για την αποτύπωση κατολισθητικών φαινομένων από διαφορετικά πανεπιστήμια ανά τον κόσμο,

προκύπτει ως γενικό συμπέρασμα ότι η χρήση των Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (Μ.Ε.Ι.Ο.), επιτρέπει τη γρήγορη και εύκολη λήψη και ενημέρωση των δεδομένων, την επί πλέον βελτίωση των παραδοσιακών τεχνικών, καθώς και τη βελτιστοποίηση της επιτόπιας έρευνας σε επικίνδυνες ή δυσπρόσιτες περιοχές, εξασφαλίζοντας την ασφάλεια των μελετητών.

Ως εκ τούτου, το Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) μπορεί να αποδείξει την ικανότητά του να παράγει πολύτιμα δεδομένα χαρτογράφησης μιας κατολισθήσης και πληροφορίες παραμόρφωσης. (Shi B., Liu C., 2015).

Σήμερα, στην επιστημονική κοινότητα, η χρήση αυτών των συστημάτων δεν αποτελεί καινοτομία, αλλά με μια βαθύτερη ανάλυση της βιβλιογραφίας προκύπτει έλλειψη κωδικοποιημένων σύνθετων μεθοδολογιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο για επιστημονικά πειράματα αλλά και για κανονικές συνθήκες έκτακτης ανάγκης (Giordan D. et al., 2017).

# Κεφάλαιο 3

## Μεθοδολογία

### 3.1 Περιοχή μελέτης - Φράγμα Αποσελέμη

Το φράγμα Αποσελέμη βρίσκεται σε απόσταση 500 μέτρων από τον οικισμό Ποταμιές (Εικόνα 7). Είναι το μεγαλύτερο υδρευτικό έργο της Κρήτης που δημιουργήθηκε προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες των βορείων παραλίων της ανατολικής Κρήτης, από το Ηράκλειο μέχρι τον Άγιο Νικόλαο Λασιθίου. Η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 2012.



Εικόνα 7. Περιοχή Φράγματος Αποσελέμη (Google Earth)

Το φράγμα συγκεντρώνει τα νερά από τα Λασιθιώτικα όρη ενώ η χωρητικότητά του ξεπερνά τα 30.000.000 m<sup>3</sup>.

Σήμερα στο φράγμα, που είναι πλέον η μεγαλύτερη τεχνική λίμνη του νησιού, έχουν βρει καταφύγιο πτηνά διαφόρων ειδών μετατρέποντας την περιοχή σε υδροβιότοπο.

Τα νερά της λίμνης της Λαγκάδας, όπως λέγεται η ευρύτερη περιοχή, προέρχονται κυρίως από τις πηγές της Κασταμονίτσας και από το Οροπέδιο Λασιθίου.

### **3.1.1 Γεωμορφολογία**

Η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται από μέτριο έως τοπικά έντονο μορφολογικό ανάγλυφο με μέση κλίση φυσικού ανάγλυφου 20° έως 27° και τοπικά 35° έως 40°. Τα υψόμετρα του φυσικού ανάγλυφου στην περιοχή κυμαίνονται από 150.0m έως 290.0m περίπου. Το απόλυτο υψόμετρο της ερυθράς κυμαίνεται από 155.0m έως 275.0m.

Κύριος γεωμορφολογικός παράγοντας είναι το ρέμα, το οποίο αποτελεί παραπόταμο του Αποσελέμη ποταμού, σε διεύθυνση περίπου N - ΒΑ. Το υδρογραφικό δίκτυο στην ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται πολυσχιδές, με στενές κοίτες και απότομες κλίσεις κλιτύων, ένδειξη του νεαρού σταδίου διάβρωσης, στο οποίο βρίσκεται η ευρύτερη περιοχή και επομένως δεν έχει φθάσει ακόμα σε κατάσταση ισορροπίας. Επίσης η μορφή του υδρογραφικού δικτύου υποδεικνύει τον γενικά αδιαπέρατο χαρακτήρα των γεωλογικών σχηματισμών του υπόβαθρου. (Γεω. Περ. Σύμβουλοι Μηχανικοί Α. Ε., 2017)

### **3.1.2 Στρωματογραφία**

Το αλπικό υπόβαθρο στην περιοχή του έργου δομείται από σχηματισμούς που ανήκουν στην ενότητα Φυλλιτών - Χαλαζιτών, Περμοτριάδικής ηλικίας.

Στη στενή περιοχή μελέτης, υπόβαθρο αποτελούν κατά κανόνα οι μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι και φυλλίτες (rh-sch). Πρόκειται για μαρμαρυγικούς - ανθρακικούς σχιστόλιθους και φυλλίτες με μικροκρυσταλλικό - λεπιδοβλαστικό ιστό. Το χρώμα του σχηματισμού είναι γκριζοκάστανο έως γκριζοπράσινο. Στη μάζα τους, παρατηρούνται φλέβες και κοίτες με χαλαζία, πηγματίτη ή απλίτη μικρού πάχους (1 - 2 cm και κατά θέσεις έως 20 cm), οι οποίες αναπτύσσονται κατά κύριο λόγο παράλληλα προς τις επιφάνειες σχιστότητας.

Κατά θέσεις και στα βαθύτερα κατά κανόνα τμήματα, παρουσιάζουν κυανότεφρο – μελανό χρώμα και υπεροχή της φυλλιτικής φάσης με αυξημένη παρουσία λεπτών χαλαζιτικών ενστρώσεων (rh). Ο σχηματισμός των σχιστολίθων - φυλλιτών χαρακτηρίζεται από χαμηλό βαθμό μεταμόρφωσης, είναι γενικά τεκτονισμένος και ανομοιόμορφος. Επίσης, χαρακτηρίζεται από έντονη αποσάθρωση στο ανώτερο επιφανειακό τμήμα, το πάχος της οποίας είναι τοπικά έως της τάξης των 2.0 - 2.5 m.

Επωθημένοι πάνω από τους σχηματισμούς της ενότητας Φυλλιτών – Χαλαζιτών, συναντώνται σχηματισμοί της ενότητας της Τρίπολης και συγκεκριμένα Κρητιδικό Ασβεστόλιθοι. Οι ασβεστόλιθοι αυτοί είναι τεφρού έως μελανού χρώματος, μέσο-παχυστρωματώδεις έως άστρωτοι βιτουμενιούχοι, με πλούσια νηρητική πανίδα, έντονα κερματισμένοι και κατά θέσεις έντονα καρστικοποιημένοι. Ασύμφωνα στο φυλλιτικό υπόβαθρο, επικάθονται πρόσφατοι μεταλπικοί σχηματισμοί. Αφορούν κυρίως σε: Κορήματα – αποσαθρώματα (SC) και υλικά σύμμεκτης φάσης, ως προϊόντα διάβρωσης του υποβάθρου. Αποτελούνται από αργιλοϊλυώδη υλικά καστανού έως γκριζοκαστανού χρώματος, με διάσπαρτες λατύπες σχιστόλιθου. Αποθέσεις κοίτης (RD) και Αλλουβιακές αποθέσεις (AL), σύγχρονες και παλαιότερες αποθέσεις του κύριου ρέματος, στην ενεργή και ευρύτερη κοίτη αντίστοιχα. Αποτελούν χαλαρής δομής έως τοπικά ασύνδετα υλικά, τα οποία συνίστανται κυρίως από αργιλοϊλίες, αργιλώδεις άμμους και κροκάλες. (Γεω. Περ. Σύμβουλοι Μηχανικοί Α. Ε., 2017)

### **3.1.3 Τεκτονική**

Η έντονη πτύχωση – παραμόρφωση του φυλλιτικού υποβάθρου και η επώθηση των κρητιδικών ασβεστόλιθων επάνω σ' αυτό, αποτελούν τα σημαντικότερα τεκτονικά γεγονότα, τα οποία προσδιορίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή.

### **3.1.4 Στάθμη υπόγειου νερού**

Σύμφωνα με της μετρήσεις των πιεζόμετρων PW5 και PW7 που τοποθετήθηκαν στον τελευταίο αναβαθμό του πρανούς σε υψόμετρο 237m, η στάθμη του υπόγειου νερού βρισκόταν βαθύτερα του δρόμου (+222,0) στο ποδαρικό του πρανούς.

Στο ΡW5 η στάθμη ήταν σταθερή χειμώνα και καλοκαίρι, σε υψόμετρο +215,3 τον Ιούνιο 2014 και σε υψόμετρο +215,5 τον Ιανουάριο 2015.

Ομοίως σταθερή ήταν η στάθμη και στο ΡW7, σε υψόμετρο +220,77 τον Σεπτέμβριο 2014 και σε υψόμετρο +221,1 τον Ιανουάριο 2015.

Εδώ επισημαίνεται ότι την ίδια περίοδο παρατηρούνταν διηθήσεις στις αποστραγγιστικές οπές, στο πρανές ανάντη της οδού, σε υψόμετρα μεγαλύτερα από το υψόμετρο της στάθμης που μετρούσαν τα πιεζόμετρα. Αυτό εξηγείται από την χαμηλή διαπερατότητα και την τεκτονική δομή του σχηματισμού, ο οποίος αφενός συγκρατεί υδροφόρο ορίζοντα σε μια ζώνη παράλληλα με την επιφάνεια του εδάφους και αφετέρου από την ανάπτυξη επιλεκτικής υδροφορίας επί των επιφανειών σχιστότητας, ή σε ζώνες διακλάσεων της βραχομάζας. (Γεω. Περ. Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε., 2017)

## 3.2 Κατολίσθηση πρανούς υπερχειλιστή Φράγματος Αποσελέμη

Στο φράγμα του Αποσελέμη, στην περιοχή του πρανού του υπερχειλιστή, εκδηλώθηκε τον Ιανουάριο του 2015 εκτεταμένη κατολίσθηση έκτασης 15 έως 20 στρεμμάτων (Εικόνα 8, Εικόνα 9, Εικόνα 10, Εικόνα 11 & Εικόνα 12).

Το πρανές του υπερχειλιστή κατασκευάστηκε με αναβαθμούς κλίσης 1υ:1β και ύψος αναβαθμού 14μ. Το μέγιστο ύψος του πρανού είναι 60μ. Στο πρανές είχαν κατασκευαστεί μέτρα υποστήριξης τα οποία περιελάμβαναν αγκύρια μήκους 7.0m και 4.7m εναλλάξ σε κάνναβο 2.5m x 2.5m και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 10cm οπλισμένο με δομικό πλέγμα T131. Επίσης στο πρανές είχαν διανοιχτεί οπές αποστράγγισης σε βάθος 12.0m έως 16.0m σε κάνναβο 4m x 4m με κλίση 1.5% προς τα άνω.

Ενδεικτικές φωτογραφίες από τη κατολίσθηση παρατίθενται στη συνέχεια.



Εικόνα 8. Όψη της κατολίσθησης (Γεω. Περ. Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε., 2017)



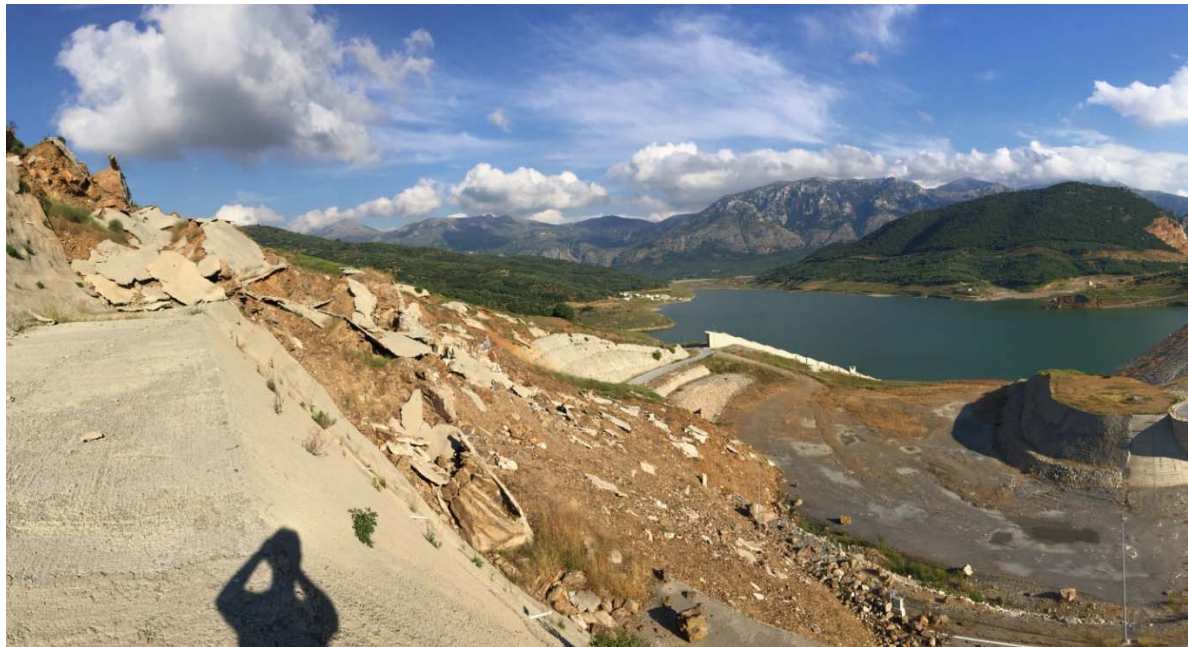
Εικόνα 9. Τοπογραφική αποτύπωση στο φρύδι της κατολίσθησης (Γεω. Περ. Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε., 2017)



Εικόνα 10. Όψη της κατολισθαίνουσας μάζας (Γεω. Περ. Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε., 2017)



Εικόνα 11. Αποκάλυψη των αγκυρίων που είχαν τοποθετηθεί στο πρανές (Γεω. Περ. Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε., 2017)



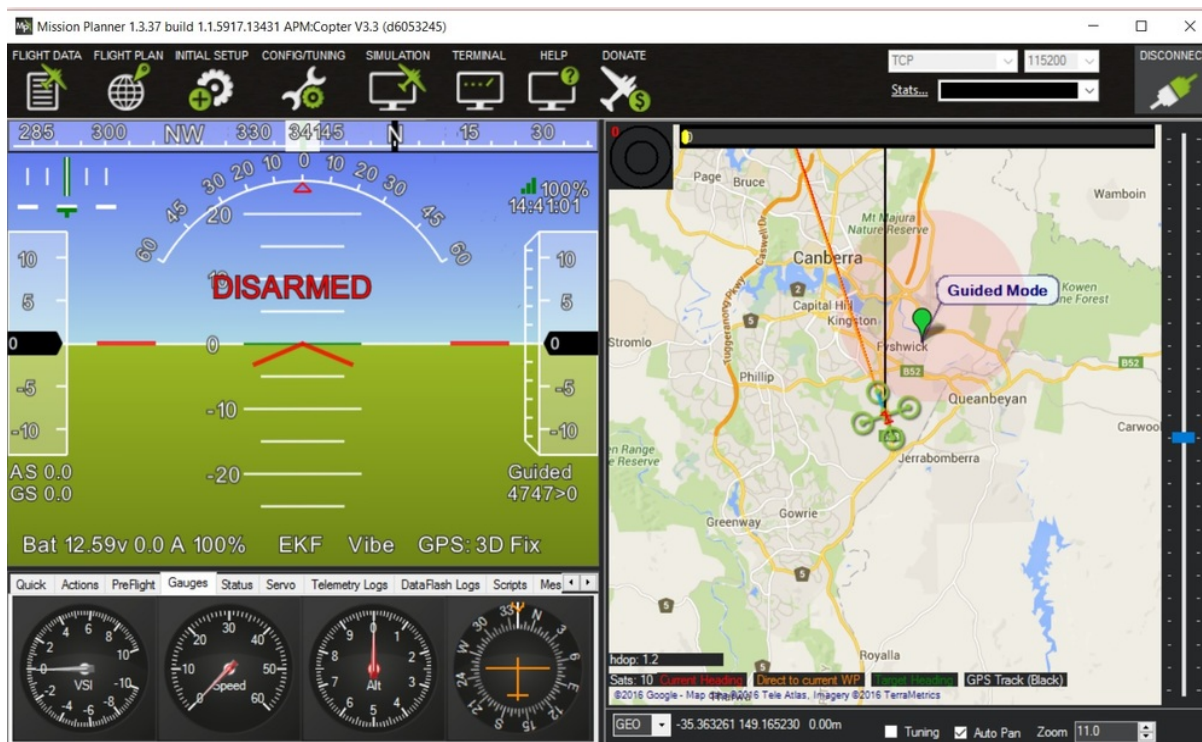
Εικόνα 12. Πανοραμική απεικόνιση της περιοχής κατολίσθησης (Γεω. Περ. Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε., 2017)

## 3.3 Τεχνικές λήψης δεδομένων

Μετά από την επί τόπου επίσκεψη στην περιοχή της κατολίσθησης για την εκτίμηση του μεγέθους και της έκτασης της, ακολούθησε ο σχεδιασμός των πτήσεων και της παραμετροποίησης, καθώς και της ρύθμισης του εξοπλισμού στο γραφείο, αφού είχαν συλλεχθεί όλα τα αναγκαία δεδομένα στο πεδίο.

### 3.3.1 Σχεδιασμός πτήσεων με Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) με το λογισμικό Mission Planner

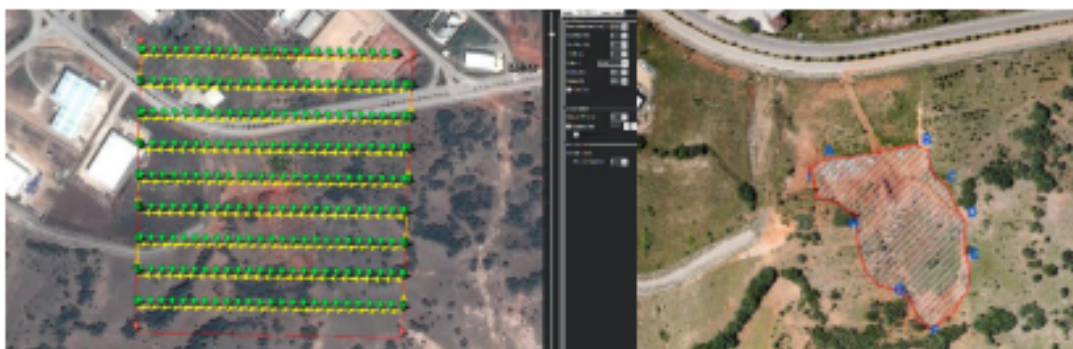
Ο σχεδιασμός των πτήσεων πραγματοποιήθηκε από το, ανοιχτού κώδικα, λογισμικό Mission Planner της εταιρίας Arducopter (Εικόνα 13), το οποίο είναι συμβατό με το Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) 3DR SOLO που χρησιμοποιήθηκε για την αποτύπωση και λειτουργεί ουσιαστικά σαν σταθμός επίγειου ελέγχου (Ground Station Control) για τον προγραμματισμό και την παρακολούθηση των πτήσεων (Εικόνα 14).



Εικόνα 13. Περιβάλλον εργασίας του Mission Planner

Το λογισμικό, Mission Planner, είναι συμβατό μόνο με το λειτουργικό σύστημα Windows. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως βοηθητικό πρόγραμμα διαμόρφωσης, είτε ως σύστημα επιπλέον ελέγχου του Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους.

Period	Flight Date	Flight Altitude (m)
1	February 17, 2016	100
2	March 22, 2016	100
3	April 9, 2016	100
4	June 10, 2016	100
5	July 21, 2016	100



Εικόνα 14. Τυπικό πλάνο σχεδιασμού πτήσης και λήψης φωτογραφιών (Servet Yaprak et al., 2018)

Παρέχει αρκετές δυνατότητες στον χειριστή, όπως το να μπορεί να τοποθετηθεί το λογισμικό για τον αυτόματο πιλότο (APM, PX4.) που ελέγχει το όχημά. Με τη λειτουργία αυτή δίνει τη δυνατότητα στο χειριστή να επιλέξει σημείο προσγείωσης ή προσγείωση στο σημείο απογείωσης μετά την ολοκλήρωση της αποστολής. Διευκολύνοντας κατά πολύ τον χειριστή καθώς δεν απαιτείται να το οδηγήσει ο ίδιος ξανά στο σημείο απογείωσης.

Επίσης μπορεί να ρυθμίζεται, να διαμορφώνεται και να συντονίζεται το όχημά για βέλτιστη απόδοση. Επιτρέπει τον σχεδιασμό, την αποθήκευση και τη φόρτωση αυτόνομων αποστολών σε αυτόματο πιλότο με απλή καταχώρηση σημείων στο Google ή σε άλλους χάρτες. Επιπλέον μπορεί κάποιος να κατεβάσει και να αναλύσει τα αρχεία καταγραφής αποστολών που δημιουργήθηκαν από τον αυτόματο πιλότο. Παρέχει διασύνδεση με προσομοιωτή πτήσης στον υπολογιστή για τη δημιουργία ενός πλήρους προσομοιωτή του Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (M.E.I.O.).

Παρέχει επίσης τη δυνατότητα η επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος να πραγματοποιηθεί μέσω περιβάλλοντος google earth ή bing maps και να παρέμβει ο χειριστής στον καθορισμό των παραμέτρων πτήσης όπως ανάλυση εδάφους, υψόμετρο πτήσης, τύπος φωτογραφικής μηχανής και φακού. Ακόμη κατά τη διάρκεια της αποτύπωσης έχει τη δυνατότητα εμφάνισης πληροφοριών πτήσης, όπως διάρκεια πτήσης, αριθμό φωτογραφιών, μέγεθος έκτασης κ.α. καθώς και δεδομένα πραγματικού χρόνου όπως ταχύτητα αέρα, εδάφους, υψόμετρο και πολλά ακόμη δεδομένα τηλεμετρίας που βοηθάνε στον πλήρη έλεγχο της πτήσης.

Προσφέρει τη δυνατότητα εύκολης δημιουργίας κανάβου για την λήψη φωτογραφιών και δυνατότητα κάθετης αποτύπωσης (όπως για παράδειγμα όψεις κτηρίων)

Με κατάλληλο υλικό τηλεμετρίας δίνει επίσης τη δυνατότητα να παρακολουθείται η κατάσταση του οχήματός κατά τη λειτουργία, η καταγραφή πληροφοριών για τα αρχεία αυτόματου πιλότου επί του σκάφους, η προβολή και ανάλυση αρχείων τηλεμετρίας και τέλος η λειτουργία του οχήματος με προβολή FPV.

Με το εν λόγω λογισμικό δίνεται επιπλέον η δυνατότητα, εφόσον καταλήξει ο χρήστης σε μία συγκεκριμένη διαδρομή, να εφαρμόζεται σε ακόλουθες πτήσεις πάντα η ίδια διαδρομή, με απόλυτη ακρίβεια. Αυτή η λειτουργία είναι χρήσιμη, για παράδειγμα, στην περίπτωση παρακολούθησης της εξέλιξης ενός τεχνικού έργου.

Σε συνέχεια του προγραμματισμού των πτήσεων και της διαδικασίας λήψης δεδομένων με το Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.), ακολουθεί η διαδικασία επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων που συλλέχθηκαν. Ο αρχικός στόχος αυτής της διαδικασίας είναι η δημιουργία νέφους σημείων.

### **3.3.2 Εξοπλισμός αποτύπωσης**

Η αποτύπωση στο πεδίο πραγματοποιήθηκε με το τετρακόπτερο Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.), 3DR SOLO, της εταιρίας 3D Robotics (Εικόνα 15). Το SOLO διαθέτει λειτουργίες όπως η πτήση με το πάτημα ενός κουμπιού και η φωτογράφιση με τη βοήθεια ηλεκτρονικών συσκευών και tablet. Επίσης διαθέτει δυο επεξεργαστές, έναν

πάνω στο χειριστήριο και έναν πάνω στο Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) που χρησιμεύουν στη σύνδεση του μέσω ασυρμάτου δικτύου για τη μεταφορά δεδομένων.



Εικόνα 15. Το τετρακόπτερο Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.), 3DR SOLO, της εταιρίας 3D Robotics.

Διαθέτει πολλές παγκοσμίως πρώτες τεχνολογίες και μια σειρά από ενσωματωμένα χαρακτηριστικά ασφάλειας και υποστήριξης. Είναι το μόνο all-in-one Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος που προσφέρει live video streaming HD από την κάμερα σε αποστάσεις έως και 800 μέτρα, σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω του χειριστηρίου του, με έξοδο HDMI καλωδίου (Εικόνα 16).



Εικόνα 16. Το Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) 3DR SOLO και ο συνοδός εξοπλισμός του.

Τα Τεχνικά Χαρακτηριστικά το 3DR SOLO είναι τα εξής:

- Διάρκεια πτήσης 20 λεπτά; 15 λεπτά με φορτίο
- Ακτίνα δράσης 1km
- Μέγιστη Ταχύτητα 55 mph (89 km/h)
- Ωφέλιμο φορτίο 800g
- Μέγιστο υψόμετρο 122m σύμφωνα με τον κανονισμό FAA ρυθμιζόμενο από το χρήστη MOTORS 880 kV
- PROPELLERS 10 ιντσών (24 εκατοστά) διαμέτρου 4,5 ίντσας (144 εκατοστά)
- Ενισχυμένες με γυαλί έλικες από πλαστικό
- AUTOPILOT SOFTWARE APM σε Pixhawk 2 HD MEDIA LINK 3DR
- Σύνδεση ασφαλούς δικτύου Wi-Fi
- ΡΑΔΙΟΦΩΝΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ 2.4 GHz
- ΒΑΡΟΣ 3.3 lbs. (1,5 kg) / 3,9 lbs. (1,8 kg) με GoPro® και Solo Gimbal
- ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ 10 ιντσών (25 cm) ύψος, 18 ιντσών (46 cm) motor-to-motor
- ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΠΤΗΣΗΣ 5200 mAh 14,8V DC Πολυμερές λιθίου

Το 3DR SOLO συνεργάζεται με διάφορα επιπλέον λογισμικό για αποτυπώσεις καθώς και λογισμικά που εξυπηρετούν τον προγραμματισμό των πτήσεων. Με το παρεχόμενο λογισμικό και εφαρμογές, η δημιουργία αυτόματων αποστολών έρευνας και η παρακολούθηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο είναι εύκολα προσβάσιμες σε διάφορες πλατφόρμες.

Η φωτογραφική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για τους σκοπούς της αποτύπωσης είναι η GoPro Hero 4 Black (Εικόνα 17 & Εικόνα 18). Πρόκειται για μια μηχανή υπέρ-υψηλής ανάλυσης, 12MP, κατάλληλη για αποτυπώσεις και έρευνες, με Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.).



Εικόνα 17. Η GoPro Hero 4Black προσαρμοσμένη στον βραχίονα του τετρακόπτερου Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) 3DR SOLO



Εικόνα 18. Η κάμερα GoPro Hero 4 Black, που χρησιμοποιήθηκε

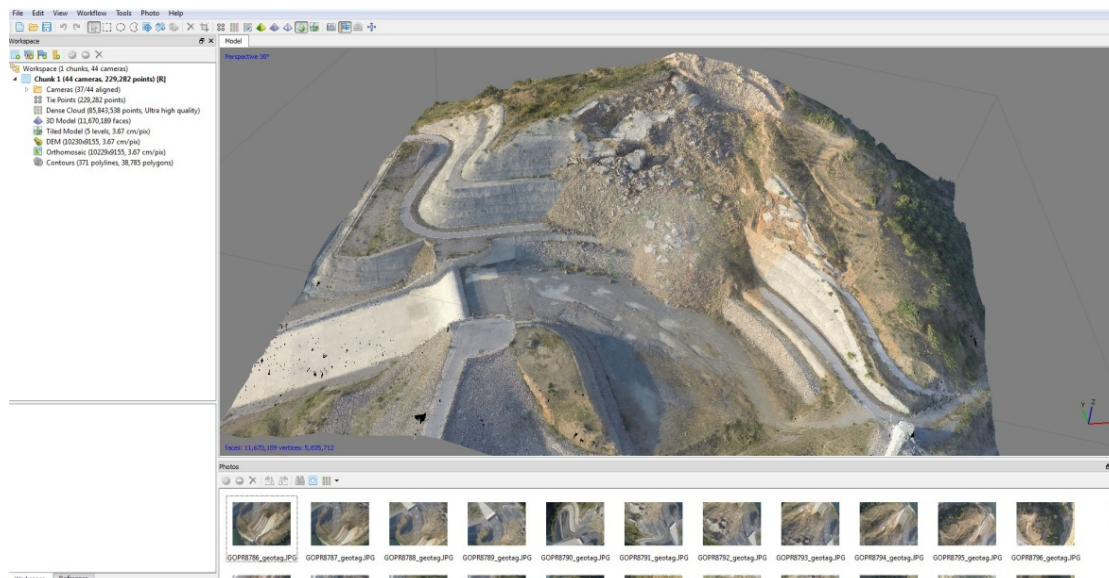
Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 8) δίνονται τα χαρακτηριστικά της φωτογραφικής μηχανής που χρησιμοποιήθηκε.

GoPro Hero 4 Black	
Φωτογραφίες:	12 MP, 4000x3000
Βίντεο:	4K, 30 fps
Φακός:	Ultra wide-angle with reduced distortion, Ultra-sharp image quality
Φωτογραφίες/δευτερόλεπτο	30/1, 30/2, 30/3, 10/1, 10/2, 10/3, 5/1, 3/1
Μπαταρία:	1160 mAh lithium-ion επαναφορτιζόμενη
Ανθεκτικότητα:	σε χτυπήματα, αδιάβροχη
Αποθηκευτικός χώρος:	microSD μέχρι 128GB
Μέγεθος:	41x59x29.6mm
Βάρος:	3.1 oz
Διαθέτει:	Wi-Fi/Bluetooth

Πίνακας 8 Τεχνικά χαρακτηριστικά κάμερας GoPro Hero 4Black

### 3.3.3 Δημιουργία 3D μοντέλου κατολίσθησης με το Agisoft Photoscan.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων είναι το Agisoft Photoscan Pro (Εικόνα 19). Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο λογισμικό, που μπορεί να εκτελέσει τις διαδικασίες που απαιτούνται για την εξαγωγή ενός τρισδιάστατου μοντέλου. Είναι πολύ ευέλικτο στο να δημιουργεί 3D αποτυπώσεις υπό οποιοσδήποτε συνθήκες και χρησιμοποιείται σε πληθώρα εφαρμογών σε επαγγελματικό και ερασιτεχνικό επίπεδο, με υφή από εικόνες.



Εικόνα 19. Περιβάλλον εργασίας του Agisoft Photoscan Pro, που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων.

Το λογισμικό είναι διαθέσιμο σε εκδόσεις Standard και Pro, η τυπική έκδοση επαρκεί για εργασίες διαδραστικών μέσων, ενώ η έκδοση Pro είναι σχεδιασμένη για τη δημιουργία περιεχομένου GIS. Το λογισμικό αναπτύχθηκε από την Agisoft LLC που βρίσκεται στην Αγία Πετρούπολη της Ρωσίας. Χρησιμοποιείται ευρέως από πολλές εταιρείες Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (Μ.Ε.Ι.Ο.) και από επαγγελματίες σε όλο τον κόσμο.

Το λογισμικό Agisoft PhotoScan Standard δημιουργεί αυτόματα επαγγελματικής ποιότητας 3D μοντέλα με υφή από εικόνες. Το πρόγραμμα παρέχει εξαιρετική ευθυγράμμιση των φωτογραφιών, χωρίς να απαιτούνται ειδικοί στόχοι ή συγκεκριμένες συνθήκες λήψης.

Οι μορφές αρχείων που υποστηρίζει για εισαγωγή δεδομένων είναι (input formats): JPEG, TIFF, PNG, BMP, JPEG Multi-Picture Format (MPO) και οι μορφές αρχείων που υποστηρίζει για εξαγωγή δεδομένων είναι (output formats): OBJ, PLY, VRML, COLLADA, Universal 3D, FBX, 3DS, PDF.

Τα κύρια Χαρακτηριστικά του προγράμματος επιγραμματικά είναι:

α) Ευθυγράμμιση φωτογραφιών, β) Παραγωγή νέφους σημείων (αραιό / πυκνό), γ) Παραγωγή πολυγωνικού μοντέλου και δ) Απεικόνιση της υφής.

Από την άλλη πλευρά το λογισμικό Agisoft PhotoScan Pro επιτρέπει τη δημιουργία υψηλής ανάλυσης ορθοφωτογραφίες με γεωαναφορά (ακρίβειας μεγαλύτερη των 5 cm με σημεία ελέγχου εδάφους - GCP) και εξαιρετικής λεπτομέρειας ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου (Digital Elevation Model - DEM) - πολυγωνικά μοντέλα με υφή (Αρβανιτοπούλου Στυλιανή, 2014). Η πλήρως αυτοματοποιημένη ροή εργασίας επιτρέπει και σε έναν μη ειδικό να επεξεργαστεί χιλιάδες αεροφωτογραφίες σε έναν υπολογιστή για να παράγει φωτογραμμετρικά προϊόντα επαγγελματικού επιπέδου. Καθώς τόσο ο προσανατολισμός των εικόνων (alignment) όσο και η ανακατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου είναι μια διαδικασία πλήρως αυτοματοποιημένη.

Αναλυτικότερα τα κύρια χαρακτηριστικά της έκδοσης αυτής του προγράμματος είναι:

α) Τριγωνισμός τόσο από αεροφωτογράφιση όσο και από κοντινές λήψεις, β) Παραγωγή νέφους σημείων (αραιό/πυκνό), γ) Παραγωγή πολυγωνικού μοντέλου (απλό/με υφή), δ) Εισαγωγή - χρήση συστήματος συντεταγμένων, ε) Παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου (DEM), στ) Παραγωγή ορθοφωτογραφιών, ζ) Γεωαναφορά χρησιμοποιώντας δεδομένα καταγραφής πτήσης και/ή GCPs, η) Πολυφασματική επεξεργασία εικόνων, θ) 4D ανακατασκευή δυναμικών σκηνών, ι)Υποστήριξη Python scripting (Χριστίνα Καλλιμάνη, 2014).

Εν γένη τα πλεονεκτήματα του προγράμματος, είναι η απλότητα της λειτουργίας του, η ακρίβεια, οι προηγμένοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή πολύ πυκνού νέφους σημείων και η ευκολία στην στόχευση των φωτοσταθερών σημείων. (Κωνσταντίνος Γ. Περάκης, 2015). Το αρνητικό του από την άλλη πλευρά είναι ότι απαιτείται ένα δυνατό υπολογιστικό σύστημα (κυρίως μνήμη RAM) για μπορέσεις να είναι εφικτή και η επεξεργασία των δεδομένων. (Δρόσος Γ. Σάββας, 2015).

Όλα τα λογισμικά συστήματα που έχουν δημιουργηθεί μέχρι τώρα, φαίνεται ότι απλοποιούν την προσπάθεια και διευκολύνουν, ολοένα και περισσότερο την εργασία του Τοπογράφου Μηχανικού. Το λογισμικό PhotoScan ανήκει σε αυτή την κατηγορία, όμως δεν παύει η να χρειάζεται αρκετές ώρες επεξεργασίας.

Επίσης είναι εύχρηστο και κατανοητό προς τον χρήστη. Διαθέτει διάφορες και απλές εντολές για την υλοποίηση της κάθε χρήσης. (Χριστοφόρου Κων/νος, 2012).

Το λογισμικό έχει υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις, καθώς τα αρχεία που δημιουργούνται είναι αρκετά μεγάλα. Για το λόγο αυτό απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι αναμονής σε κάθε υπολογισμό που πραγματοποιείται.

Στην προκειμένη περίπτωση τα χαρακτηριστικά του συστήματος Η/Υ είναι:

- i7 με 6πύρινο επεξεργαστή στα 3,33GHZ χρονισμό.
- 24 GB Ram.
- Nvidia Quadro k4200 Επαγγελματική κάρτα γραφικών με 4gb GDDR5 μνήμη.
- SSD δίσκος.

#### **3.3.4 Τρόπος λειτουργίας του λογισμικού Agisoft Photoscan.**

Το λογισμικό λειτουργεί σε 4 βασικά στάδια. Η ροή των εργασιών που ακολουθήθηκε μέσω του λογισμικού Agisoft Photoscan για κάθε μία περίπτωση δημιουργίας νέφους σημείων έχει ως εξής:

Πρώτο στάδιο αποτελεί η ευθυγράμμιση των θέσεων των εικόνων και την δημιουργία μάσκας στις φωτογραφίες. Σε αυτό το στάδιο το λογισμικό αναζητεί κοινά σημεία στις φωτογραφίες και με αυτό το τρόπο τις χωροθετεί με τη σειρά λήψης. Επιπλέον μας εμφανίζει τις θέσεις λήψεων πάνω στο τρισδιάστατο χώρο και προσαρμόζει αυτόματα τις παραμέτρους της φωτογραφικής μηχανής. Μετά το πέρας της επεξεργασίας, ένα πρώτο αραιό σύνολο σημείων που αποτελούν το αντικείμενο έχει δημιουργηθεί. Μάσκα είναι η διαδικασία στην οποία ο χρήστης ορίζει τις περιοχές της φωτογραφίας από τις οποίες το λογισμικό θα λάβει πληροφορίες για τη κατασκευή του μοντέλου. (N. Μπιλάλης, E. Μαραβελάκης, 2014).

Οι μάσκες διευκολύνουν το λογισμικό γλυτώνοντας από περιττά σημεία του περιβάλλοντος και εξοικονομείται και χρόνος και συντελούν στην αύξηση της ακρίβειας στη πιστότητα και την ποιότητα του εξαγόμενου μοντέλου.

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του πυκνού νέφους σημείων. Βάσει των ήδη υπολογισμένων θέσεων λήψης και διαθέτοντας επιλογές για την εξαγόμενη ποιότητα του νέφους δημιουργούμε ένα πυκνό νέφος σημείων το οποίο μπορεί, ανάλογα την ποιότητα που επιλέξουμε, να αποτελείται από κάποιες χιλιάδες μέχρι πολλά εκατομμύρια τρίγωνα.

Τρίτο βήμα αποτελεί η δημιουργία του πολυγωνικού πλέγματος. Το λογισμικό ενώνει τα σημεία του νέφους και δημιουργεί ουσιαστικά την επιφάνεια του μοντέλου. Το λογισμικό δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει ανάμεσα σε δύο αλγοριθμικές μεθόδους. Η πρώτη αφορά οποιασδήποτε μορφής αντικείμενο και η δεύτερη για αποτύπωση εδάφους και επιπέδων από αεροφωτογραφίες.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας το πρόγραμμα δίνει δυνατότητα επεξεργασίας του πλέγματος όπως κλείσιμο οπών, αφαίρεση περιττών κομματιών καθώς και δυνατότητα υποδιαίρεσης του πλέγματος. Όπως και σε κάθε στάδιο ο χρήστης μπορεί να εξάγει το μοντέλο και να το επεξεργαστεί σε οποιοδήποτε άλλο λογισμικό 3D επεξεργασίας και έπειτα να το εισάγει ξανά στο Photoscan για την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης.

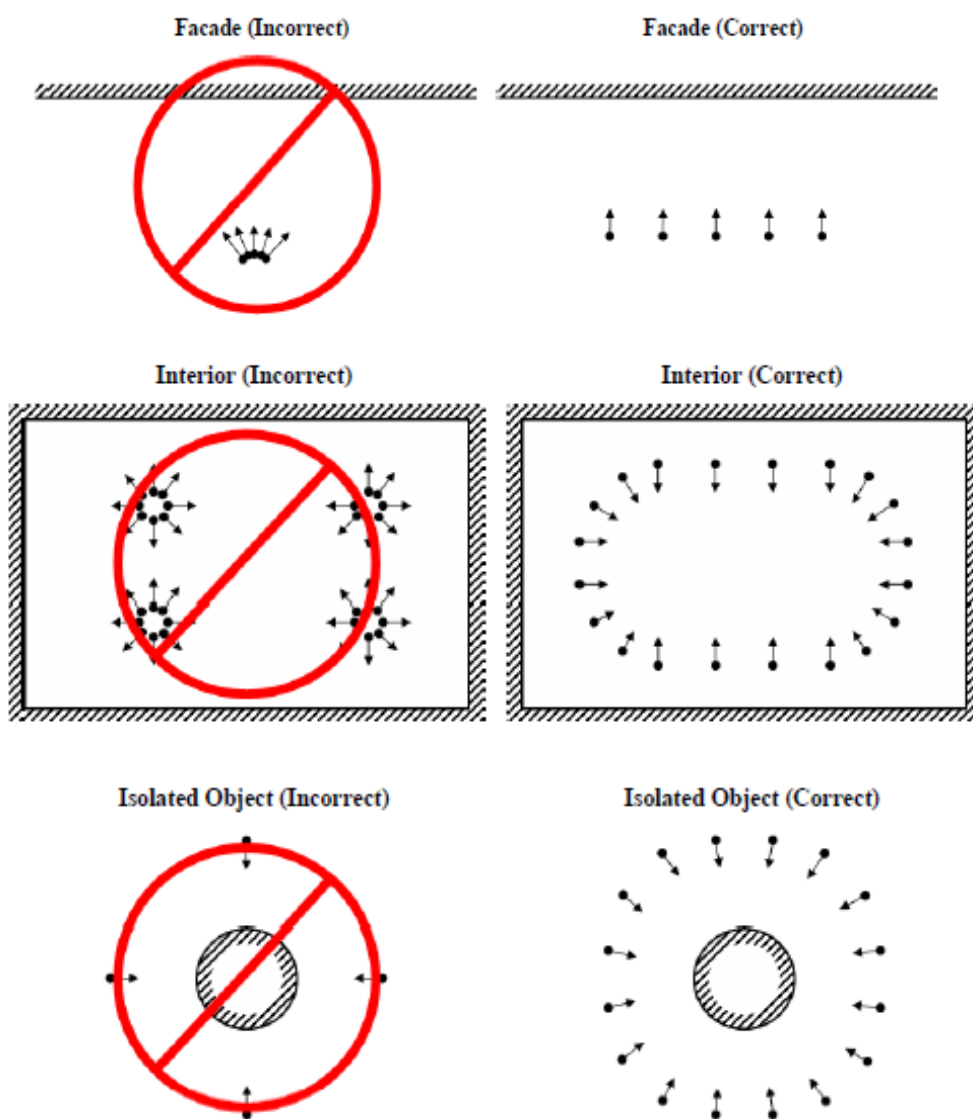
Αφού έχει δομηθεί η γεωμετρία του μοντέλου, σειρά έχει η αποτύπωση της υφής πάνω στο μοντέλο. Η υφή λαμβάνεται από το σύνολο των φωτογραφιών αλλά υπάρχει και επιλογή να ληφθεί από μεμονωμένες φωτογραφίες.

Πριν την εισαγωγή των φωτογραφιών στο πρόγραμμα, θα πρέπει να αναφερθεί ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η λήψη τους, οι ρυθμίσεις της φωτογραφικής μηχανής και μερικά σημεία που αφορούν τον εξοπλισμό.

Ο τρόπος λήψης της φωτογραφίας είναι ίσως το πιο σημαντικό κομμάτι σε όλη τη διαδικασία της μοντελοποίησης. Η επαρκής κάλυψη μεταξύ των διαδοχικών λήψεων είναι απαραίτητα στοιχείο στις φωτογραφίες ώστε να μπορέσει μετέπειτα το λογισμικό να συλλέξει τις πληροφορίες από αυτές και να δημιουργήσει το νέφος σημείων. Ένα άλλο όμως σημαντικό στοιχείο είναι και οι θέσεις της φωτογράφισης.

Για μακροσκελή αντικείμενα μπορεί να γίνει και οριζόντια μετακίνηση για λήψη διατηρώντας σταθερή απόσταση μεταξύ των λήψεων (λήψη σε πρόσοψη). Να σημειωθεί ότι για να υπάρξει απόλυτη σταθερότητα κατά τις λήψεις, η χρήση τριπόδου στη φωτογραφική μηχανή, εάν το επιτρέπουν οι συνθήκες και το μέγεθος του αντικειμένου είναι απαραίτητη. (Μακατουνάκης Χαράλαμπος, 2016).

Τα ακόλουθα στοιχεία αντιπροσωπεύουν συμβουλές σχετικά με τα κατάλληλα σενάρια λήψης (Agisoft PhotoScan User Manual, 2016):



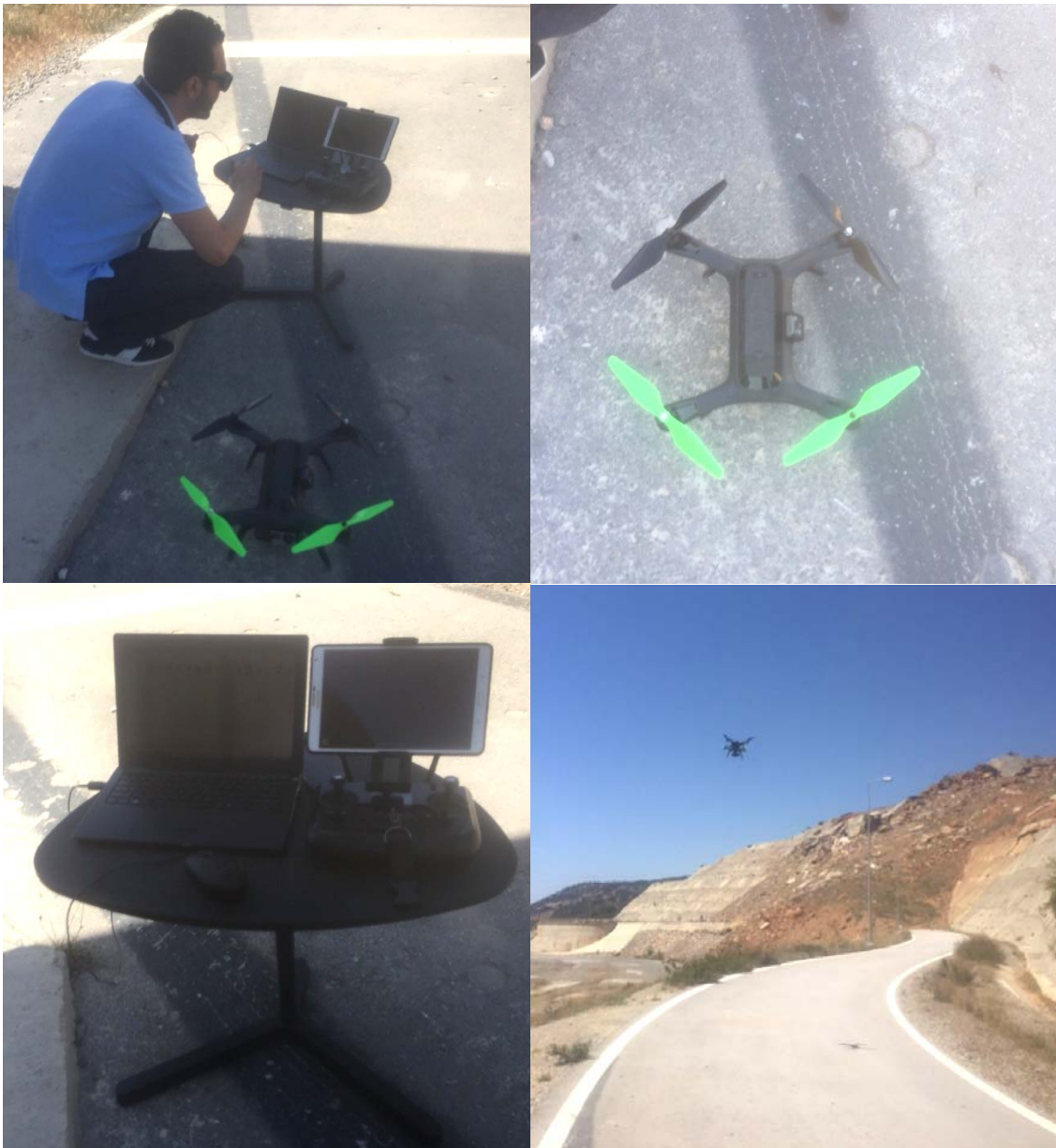
Εικόνα 20. Σενάρια λήψης φωτογραφιών του υπό μελέτη αντικειμένου (<http://www.agisoft.com>)

### 3.4 Δεδομένα από Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος

Σχετικά με την αποτύπωση της περιοχής, η δυσκολία που παρουσιάστηκε έγκειται στο γεγονός ότι η αποτύπωση αφορούσε ένα πρανές με μεγάλη κλίση (περίπου 60m υψομετρική διαφορά) και μεγάλη έκταση, επομένως η αποτύπωση έπρεπε να γίνει εξ ολοκλήρου μπροστά από το μέτωπο του πρανούς. Αυτό συνεπάγεται κάποιες ώρες μελέτης στο γραφείο και πολλές δοκιμές στο πεδίο για τον εντοπισμό της κατάλληλης διαδρομής ώστε να καλυφθεί ολόκληρη η περιοχή χωρίς κενά. Δεν είναι για παράδειγμα ένα κτίριο που θα μπορούσες να περιστρέφεις το Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.) γύρω του σε διάφορα υψόμετρα και να σκανάρεις την επιφάνεια του. Για το λόγο αυτό έπρεπε να παρθούν διάφορα δεδομένα και διάφορες φωτογραφίες ώστε να βγει ένα αντιπροσωπευτικό μοντέλο της περιοχής αποτύπωσης.

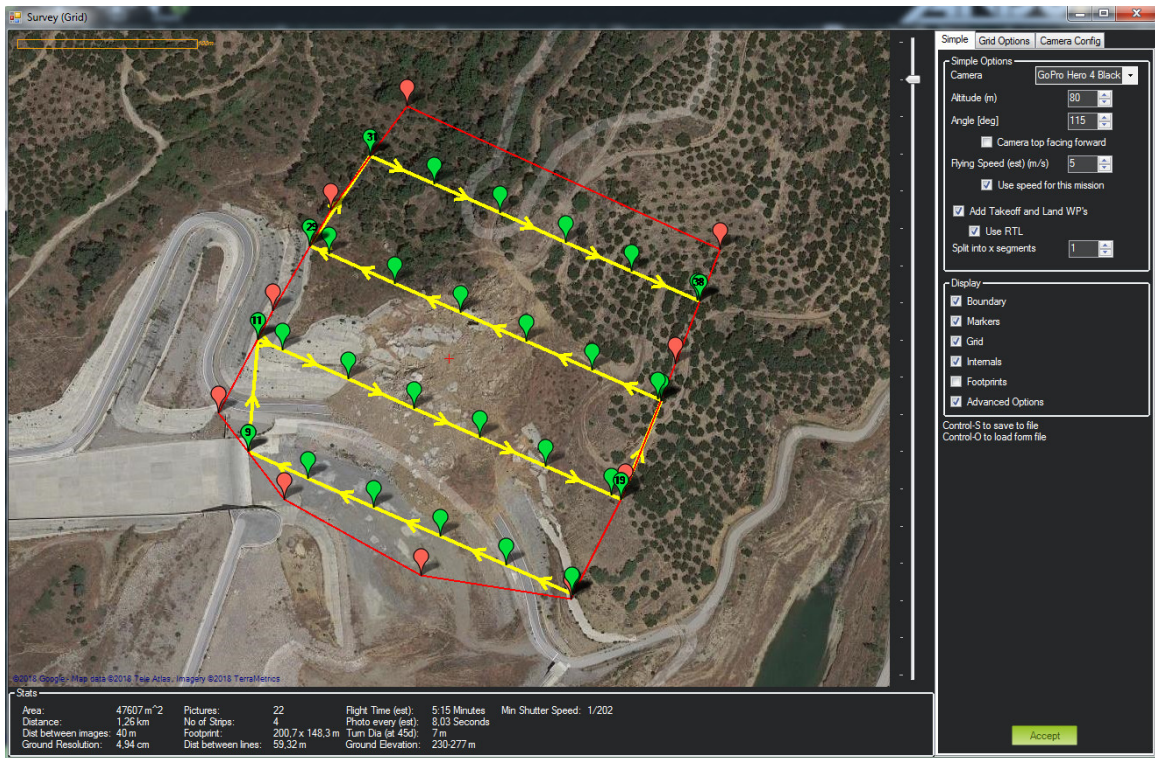
Μετά από διάφορες δοκιμές και πτήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο (Εικόνα 21), επιλέχθηκε ο συνδυασμός φωτογραφιών από δύο διαφορετικές διαδρομές από τις οποίες συλλέχθηκαν 44 φωτογραφίες υψηλής ανάλυσης, καλύπτοντας το σύνολο του μοντέλου από διάφορες οπτικές γωνίες. Από το σύνολο των φωτογραφιών έγινε επεξεργασία σε 37 από αυτές.

Η περιοχή μελέτης αποτελεί μια μορφολογικά δύσκολη περιοχή αποτύπωσης, καθώς είναι μεγάλης έκτασης με απότομες κλίσεις. Λόγω της μεγάλης υψομετρικής διαφοράς ( $\approx 60\text{m}$ ), από το χαμηλότερο μέχρι το ψηλότερο σημείο της αποτύπωσης.

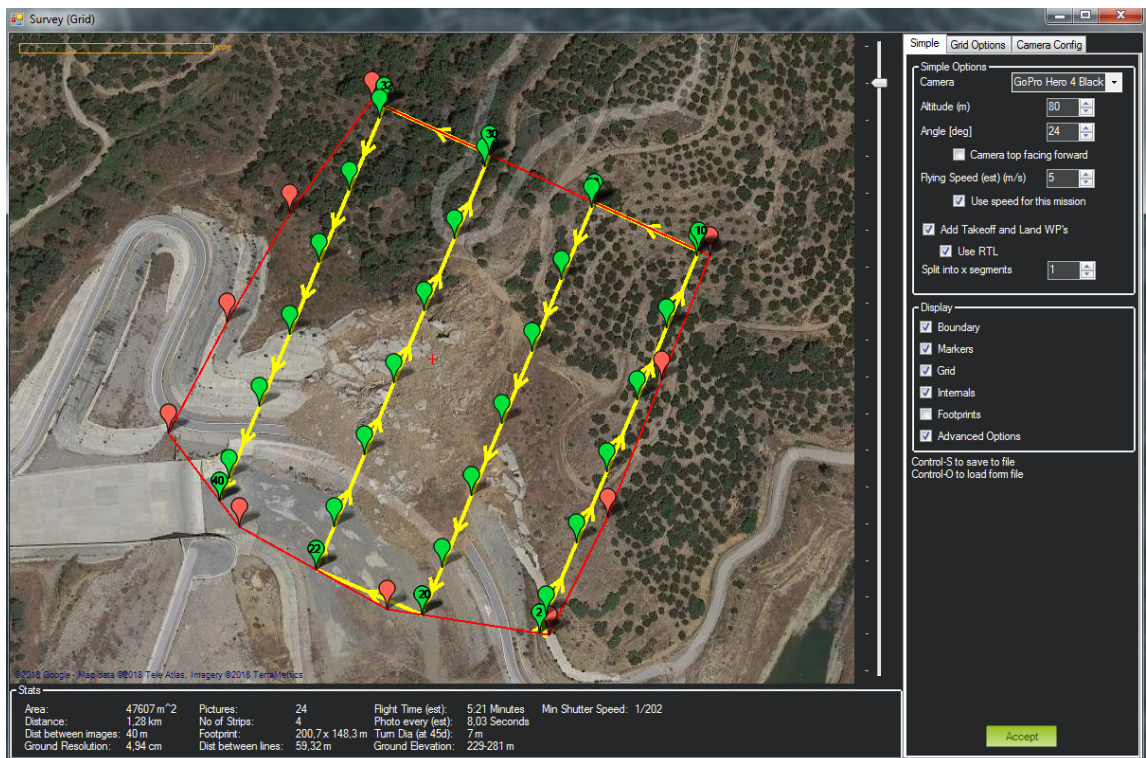


Εικόνα 21. Προετοιμασία εξοπλισμού στο πεδίο για την αποτύπωση.

Οι δύο διαφορετικές διαδρομές που εκτελέστηκαν δίνονται στις ακόλουθες εικόνες (Εικόνα 22, Εικόνα 23). Η περιοχή αποτύπωσης δίνεται με κόκκινο χρώμα, η πορεία πτήσης με την κίτρινη γραμμή και με πράσινο χρώμα φαίνονται οι θέσεις λήψης των φωτογραφιών.



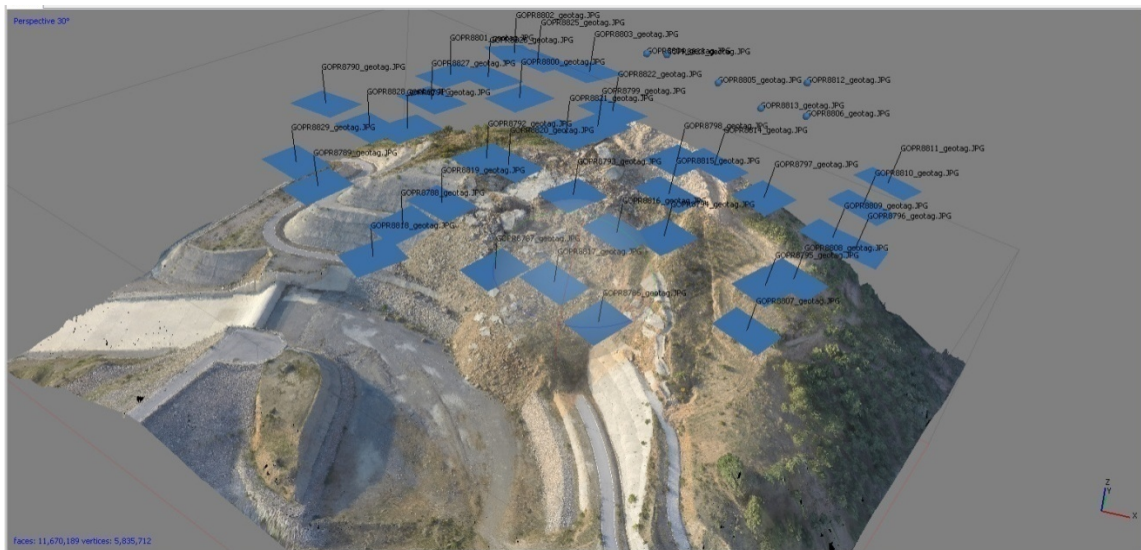
Εικόνα 22. Πορεία πτήσης Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους πάνω από την κατολίσθηση και σημεία λήψης φωτογραφιών - Πτήση 1



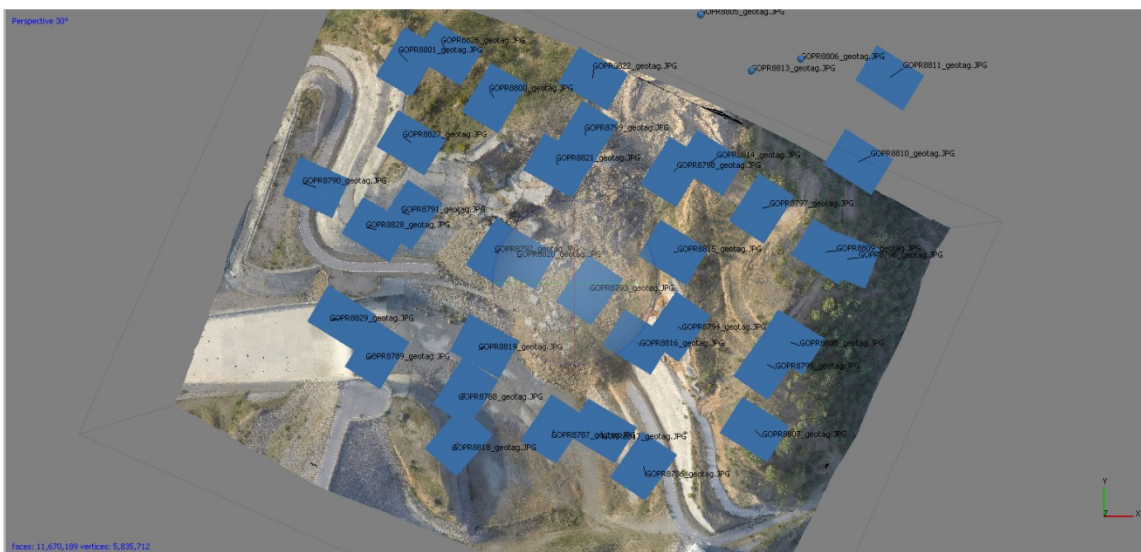
Εικόνα 23. Πορεία πτήσης Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους πάνω από την κατολίσθηση και σημεία λήψης φωτογραφιών - Πτήση 2

Το ύψος πτήσης διατηρήθηκε κατά την αποτύπωση σταθερό στα 80m από το χαμηλότερο σημείο της αποτύπωσης (τα υψόμετρα αποτύπωσης κυμαίνονται από +229,0 έως +281,0).

Κατά τη διάρκεια της πτήσης αποτυπώθηκαν 47,607m<sup>2</sup> έκτασης της περιοχής κατολίσθησης, με λήψεις φωτογραφιών ανά 40m (Εικόνα 24, Εικόνα 25). Το Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος εκτέλεσε προκαθορισμένη πορεία, μήκους 1,26 km στην πρώτη και 1,28 km στη δεύτερη πτήση, σε χρόνο 5 λεπτών για κάθε μία διαδρομή.

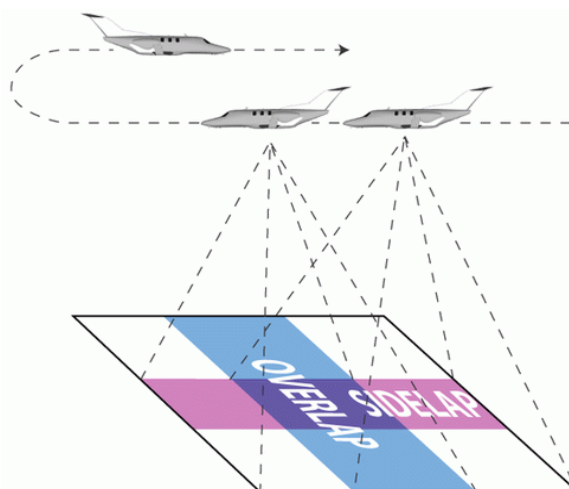


Εικόνα 24. Θέσεις λήψεις φωτογραφιών κατά την αποτύπωση



Εικόνα 25. Θέσεις λήψεις φωτογραφιών κατά την αποτύπωση

Η αλληλεπικάλυψη φωτογραφιών (Εικόνα 26) που προγραμματίστηκε ώστε να γίνεται αυτόματη λήψη φωτογραφιών είναι 80% (overlap) και 60% (sidelap).



Εικόνα 26. Τρόποι αλληλεπικάλυψης κατά τη διάρκεια λήψης φωτογραφιών (Antonio D'Argenio, 2012).

Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται οι συντεταγμένες λήψης των 44 φωτογραφιών:

Φωτογραφία	Γεωγραφικό Μήκος	Γεωγραφικό Πλάτος	Υψόμετρο
1	25,403046	35,251498	297,81
2	25,402601	35,251657	298,44
3	25,402208	25,251799	298,19
4	25,401811	35,251942	298,10
5	25,401382	35,2525,5	297,42
6	25,401718	35,252568	294,63
7	25,402113	35,252424	294,67
8	25,402559	35,252263	294,81
9	25,402956	35,252121	294,70
10	25,403352	35,251978	294,61
11	25,403808	35,252243	293,61
12	25,403574	35,252480	295,29
13	25,403177	35,252623	295,79
14	25,402785	35,252764	295,88
15	25,402387	35,252906	296,77

16	25,401990	35,253050	296,95
17	25,401991	35,253472	295,55
18	25,402382	35,253494	295,86
19	25,402780	35,253349	295,33
20	25,403164	35,253210	294,54
21	25,403603	32,253050	294,83
22	25,403423	35,251699	296,73
23	25,403590	35,252026	296,54
24	25,403780	35,252394	296,20
25	25,403946	35,252721	295,63
26	25,404110	35,253041	295,44
27	25,403602	35,253358	296,45
28	25,403383	35,253005	296,38
29	25,403219	35,252682	296,52
30	25,403032	35,252314	296,18
31	25,402867	35,251989	295,97
32	25,402701	35,251664	296,11
33	25,402040	35,251670	296,70
34	25,402178	35,252034	295,10
35	25,402364	35,252394	294,70
36	25,402530	35,252714	294,29
37	25,402696	35,253037	293,73
38	25,402879	35,253395	294,80
39	25,402424	35,253800	295,72
40	25,402203	35,253460	295,32
41	25,402015	35,253090	295,47
42	25,401848	35,252763	295,81
43	25,401679	35,252435	295,61
44	25,401513	35,252109	295,57

Πίνακας 9. Συντεταγμένες λήψης 44 φωτογραφιών από την αποτύπωση της περιοχής κατολίσθησης με Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι 37 από τις 44 φωτογραφίες που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του μοντέλου της περιοχής κατολίσθησης.



Εικόνα 27. Λήψη φωτογραφίας Νο 1



Εικόνα 28. Λήψη φωτογραφίας Νο 2



Εικόνα 29. Λήψη φωτογραφίας Νο 3



Εικόνα 30. Λήψη φωτογραφίας Νο 4



Εικόνα 31. Λήψη φωτογραφίας Νο 5



Εικόνα 32. Λήψη φωτογραφίας Νο 6



Εικόνα 33. Λήψη φωτογραφίας Νο 7



Εικόνα 34. Λήψη φωτογραφίας Νο 8



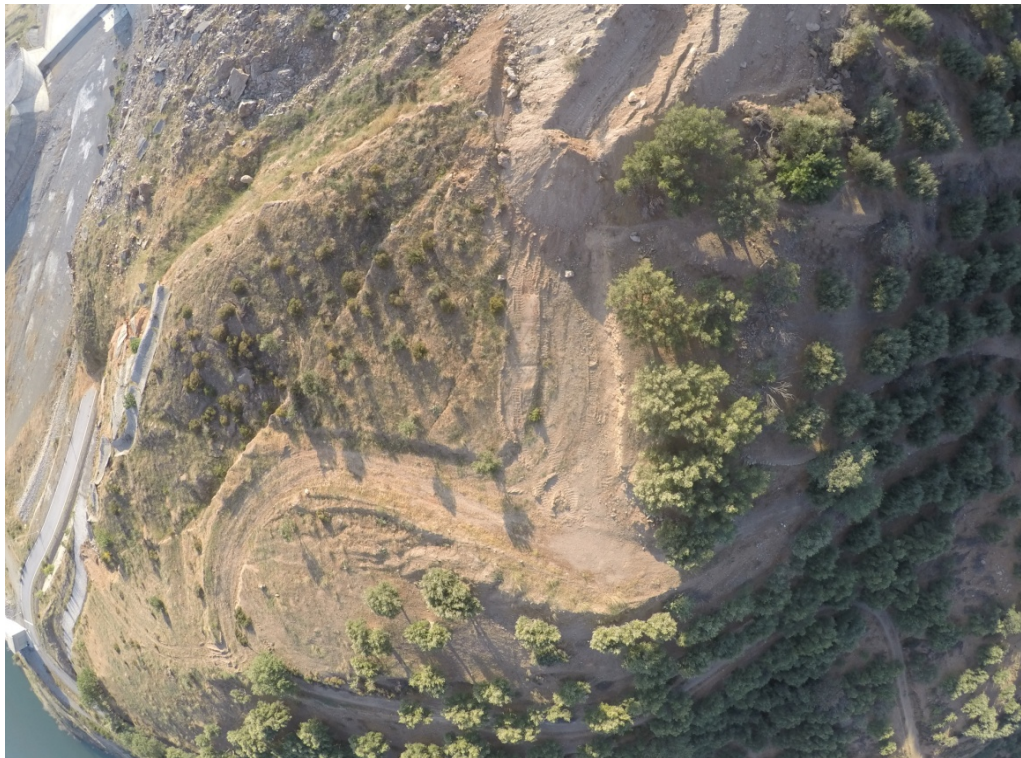
Εικόνα 35. Λήψη φωτογραφίας Νο 9



Εικόνα 36. Λήψη φωτογραφίας Νο 10



Εικόνα 37. Λήψη φωτογραφίας Νο 11



Εικόνα 38. Λήψη φωτογραφίας Νο 12



Εικόνα 39. Λήψη φωτογραφίας Νο 13



Εικόνα 40. Λήψη φωτογραφίας Νο 14



Εικόνα 41. Λήψη φωτογραφίας Νο 15



Εικόνα 42. Λήψη φωτογραφίας Νο 16



Εικόνα 43. Λήψη φωτογραφίας Νο 17



Εικόνα 44. Λήψη φωτογραφίας Νο 18



Εικόνα 45. Λήψη φωτογραφίας Νο 22



Εικόνα 46. Λήψη φωτογραφίας Νο 23



Εικόνα 47. Λήψη φωτογραφίας Νο 24



Εικόνα 48. Λήψη φωτογραφίας Νο 25



Εικόνα 49. Λήψη φωτογραφίας Νο 26



Εικόνα 50. Λήψη φωτογραφίας Νο 29



Εικόνα 51. Λήψη φωτογραφίας Νο 30



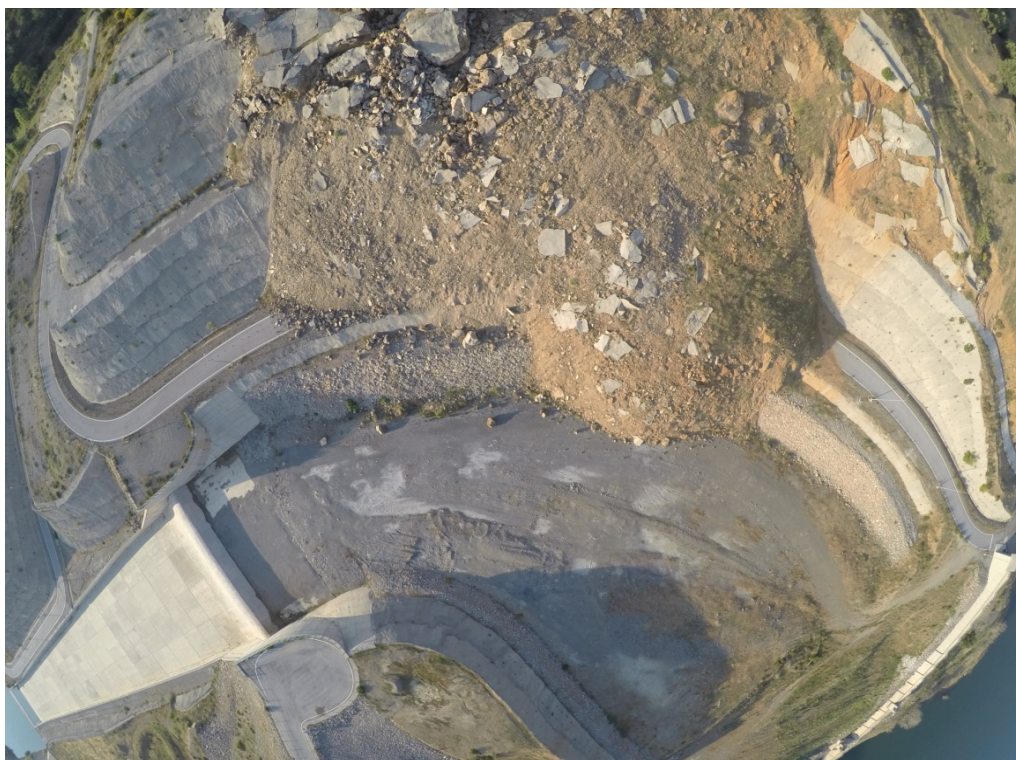
Εικόνα 52. Λήψη φωτογραφίας Νο 31



Εικόνα 53. Λήψη φωτογραφίας Νο 32



Εικόνα 54. Λήψη φωτογραφίας Νο 33



Εικόνα 55. Λήψη φωτογραφίας Νο 34



Εικόνα 56. Λήψη φωτογραφίας Νο 35



Εικόνα 57. Λήψη φωτογραφίας Νο 36



Εικόνα 58. Λήψη φωτογραφίας Νο 37



Εικόνα 59. Λήψη φωτογραφίας Νο 40



Εικόνα 60. Λήψη φωτογραφίας Νο 41



Εικόνα 61. Λήψη φωτογραφίας Νο 42



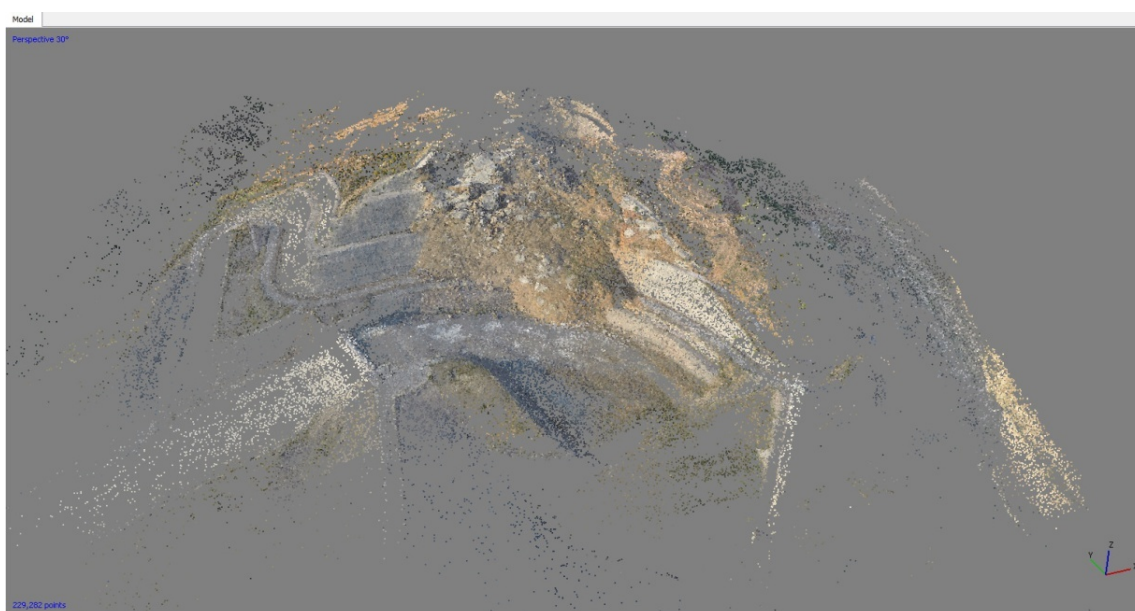
Εικόνα 62. Λήψη φωτογραφίας Νο 43



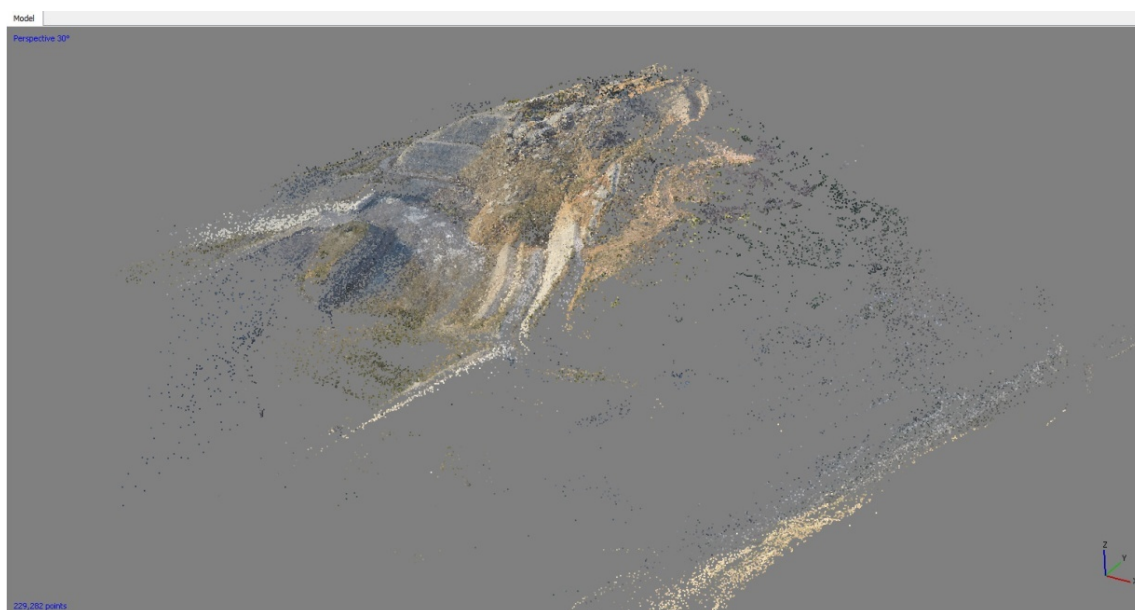
Εικόνα 63. Λήψη φωτογραφίας Νο 44

Από το συνδυασμό των παραπάνω φωτογραφιών προκύπτει αρχικά το νέφος σημείων (αραιό και πυκνό), ακολούθως γίνεται τριγωνοποίηση των στοιχείων για να φτιαχτεί στη συνέχεια το τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής μελέτης. Με τη σειρά που δημιουργούνται δίνονται:

A) Το Νέφος σημείων (αραιό), το οποίο αποτελείται από 229.282 σημεία.



Εικόνα 64. Νέφος σημείων (αραιό)

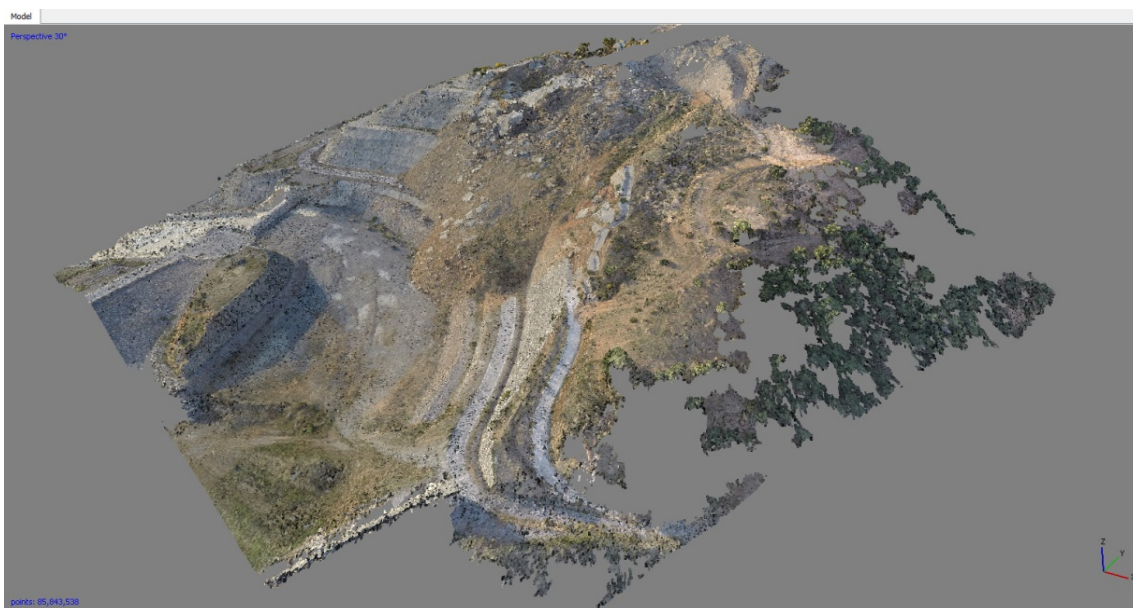


Εικόνα 65. Νέφος σημείων (αραιό)

Β) Το πυκνό νέφος σημείων, το οποίο αποτελείται από 85.843.538 σημεία.

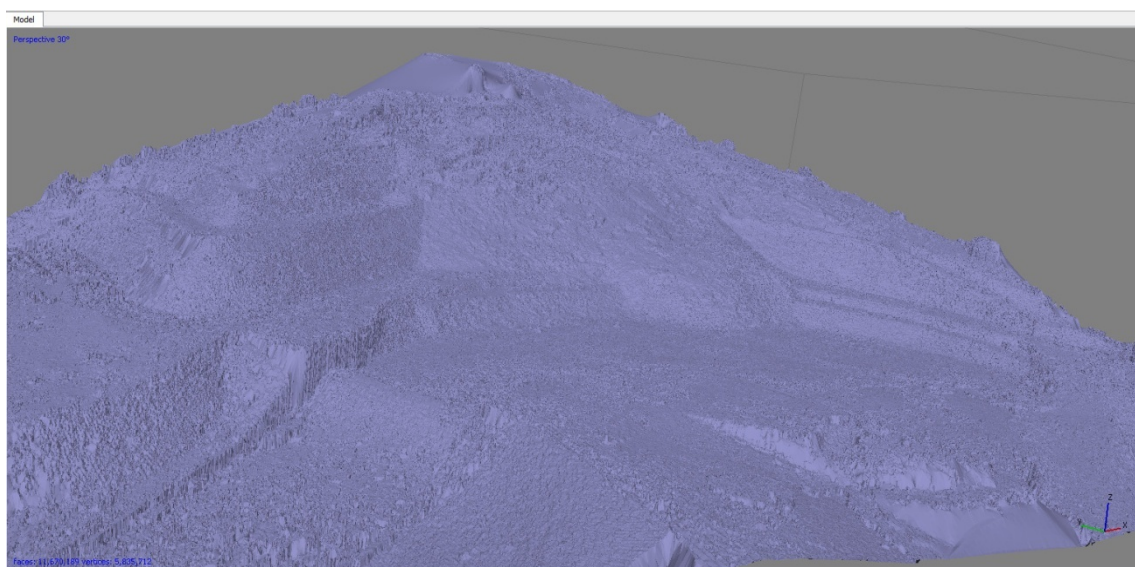


Εικόνα 66. Νέφος σημείων (πυκνό)

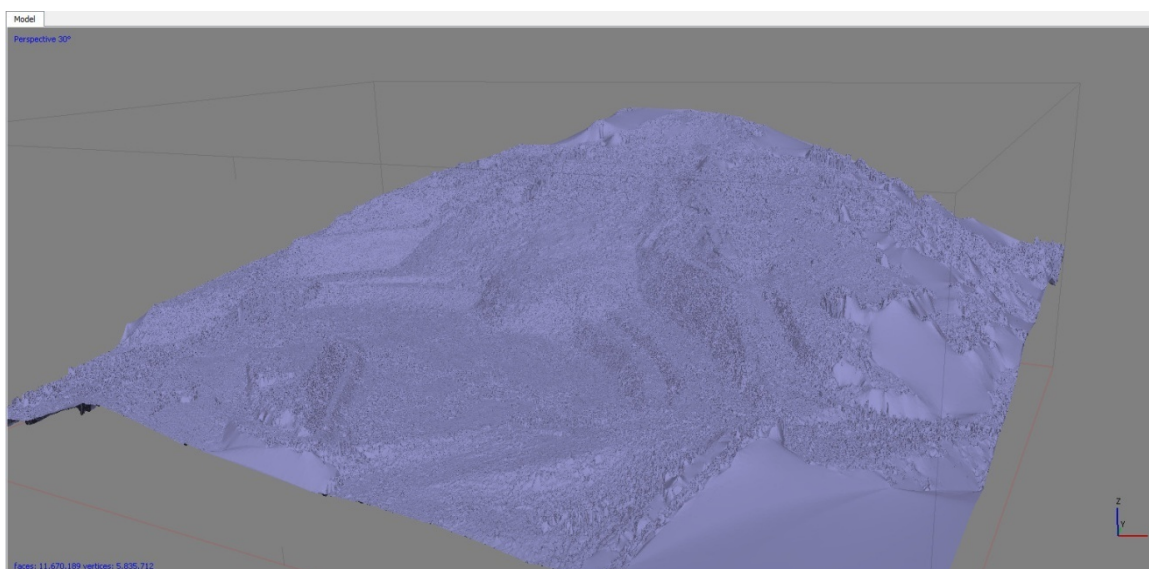


Εικόνα 67. Νέφος σημείων (πυκνό)

Γ) Τα το μοντέλο με τρίγωνα, το οποίο αποτελείται από 11.670.189 επιφάνειες.

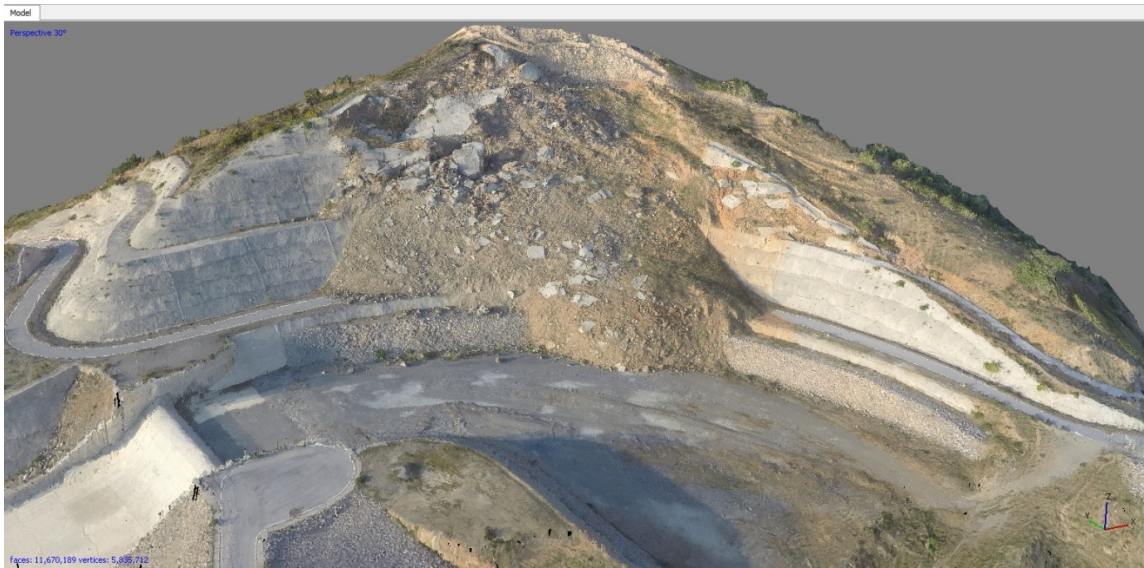


Εικόνα 68. Δημιουργία του πολυγωνικού πλέγματος

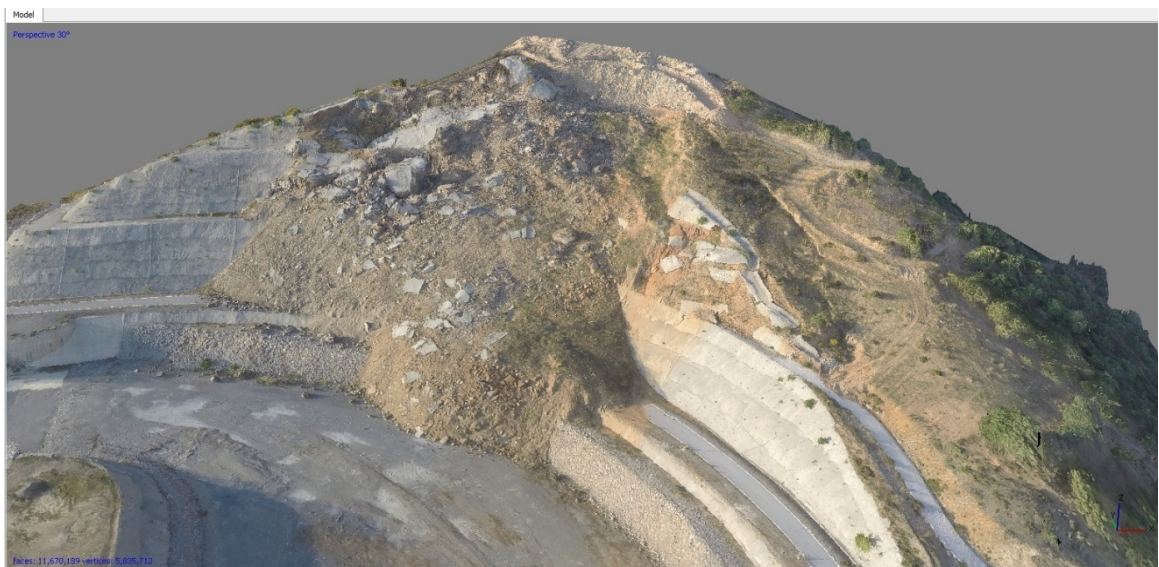


Εικόνα 69. Δημιουργία του πολυγωνικού πλέγματος

Δ) Το τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής, το οποίο αποτελείται από πέντε επίπεδα, με 3,67 cm/pxl.



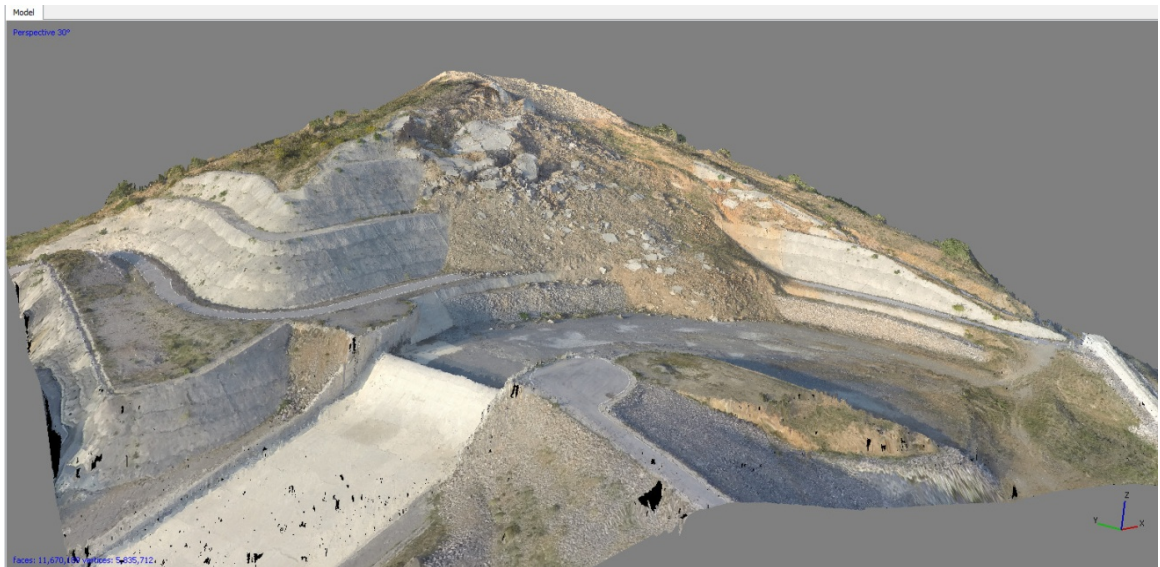
Εικόνα 70. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης



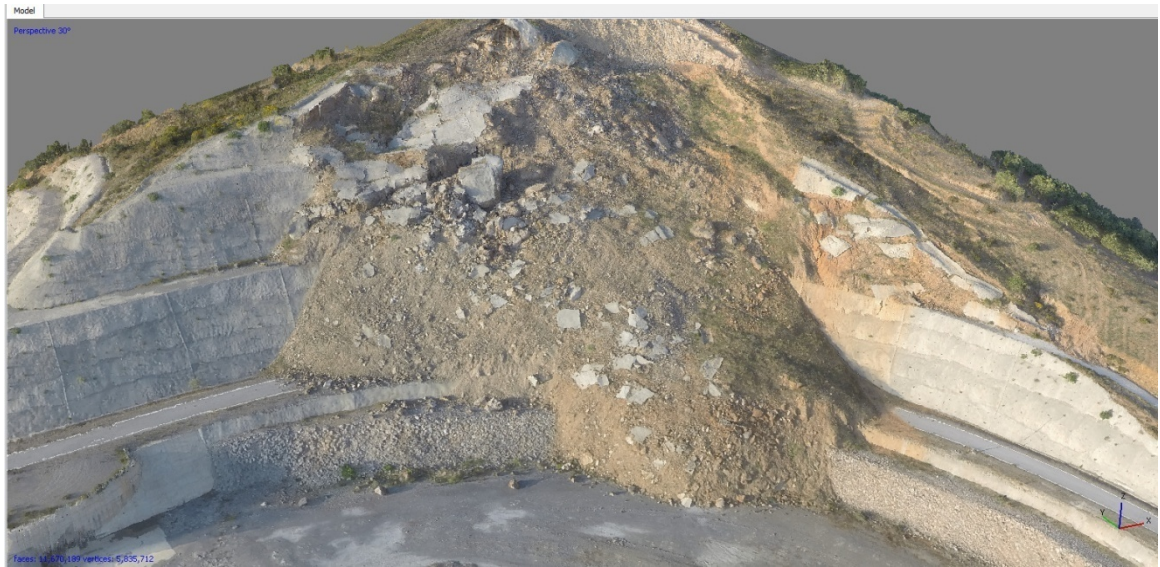
Εικόνα 71. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης



Εικόνα 72. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίθησης



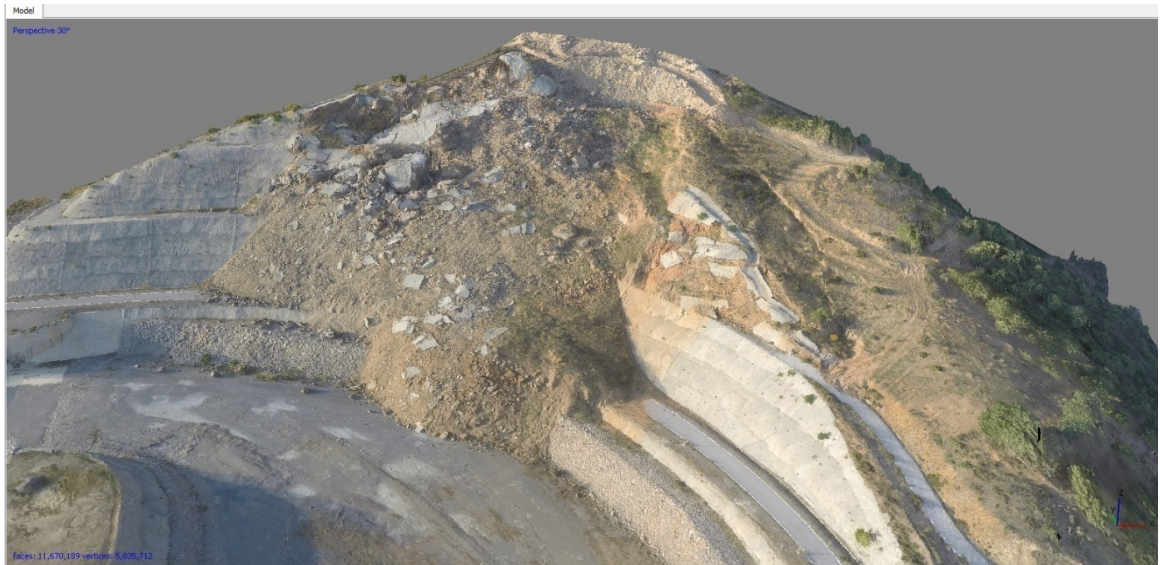
Εικόνα 73. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίθησης



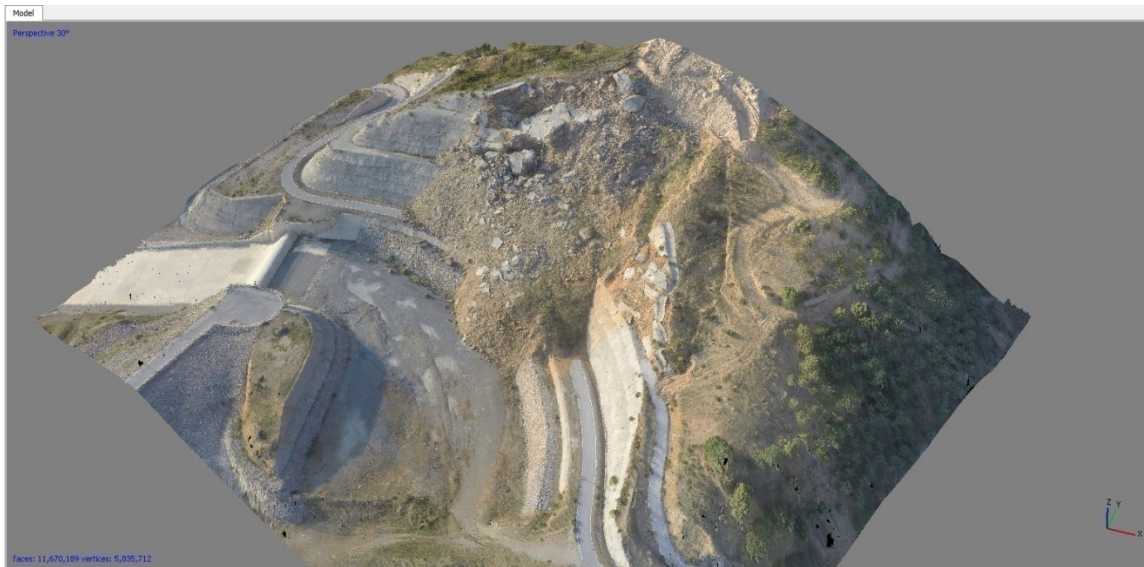
Εικόνα 74. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης



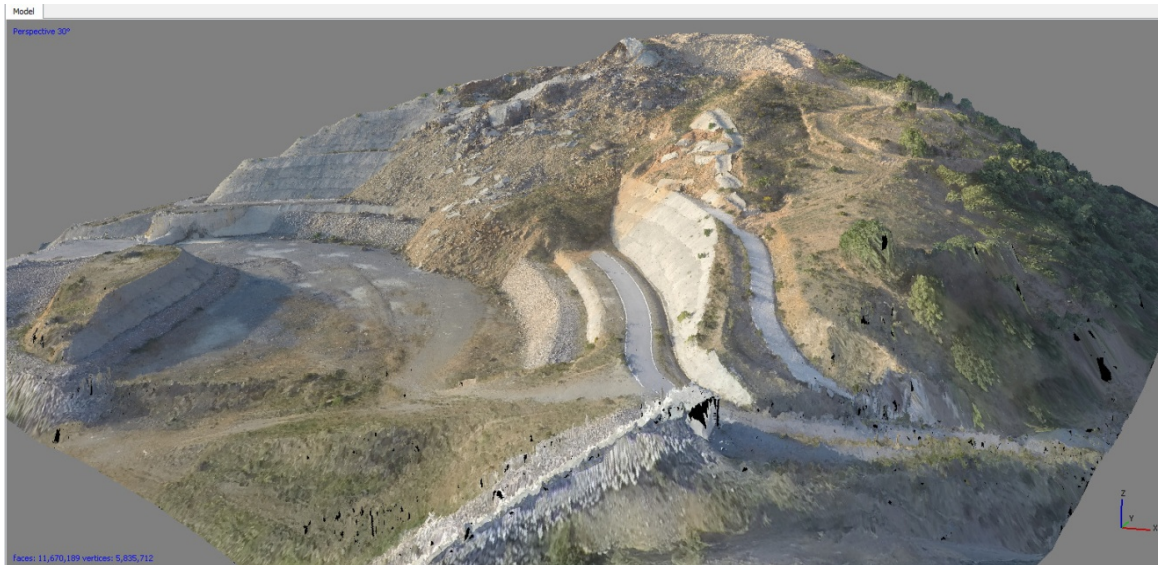
Εικόνα 75. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης



Εικόνα 76. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης



Εικόνα 77. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης



Εικόνα 78. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίθησης



Εικόνα 79. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίθησης



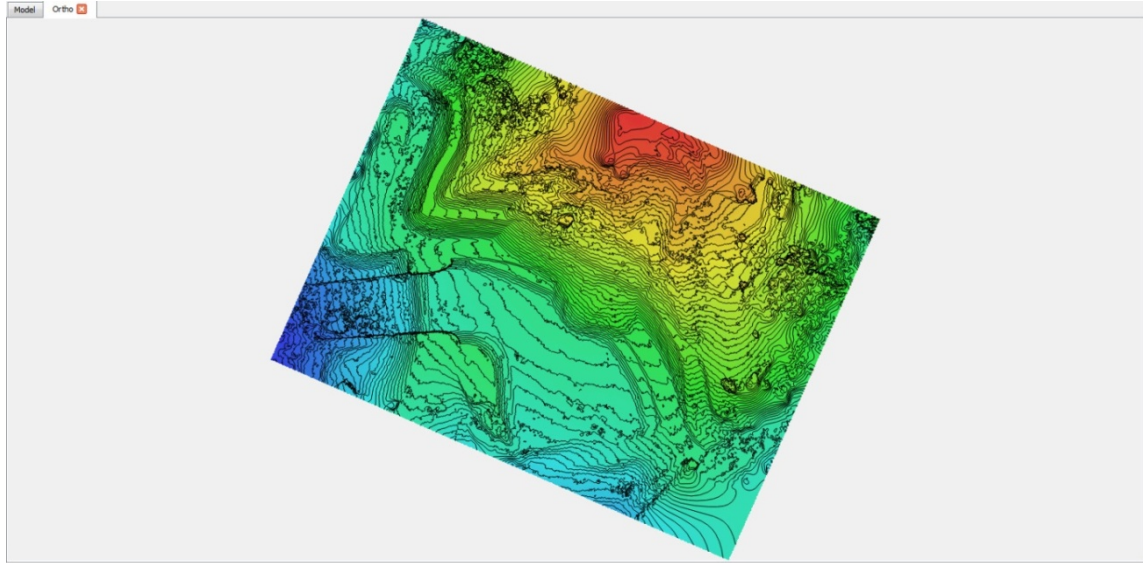
Εικόνα 80. Τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής κατολίσθησης

Έπειτα από την εξαγωγή του 3D μοντέλου υπάρχει η δυνατότητα να παραχθούν διάφορα αρχεία ανάλογα την περίπτωση και την εφαρμογή κάθε φορά.

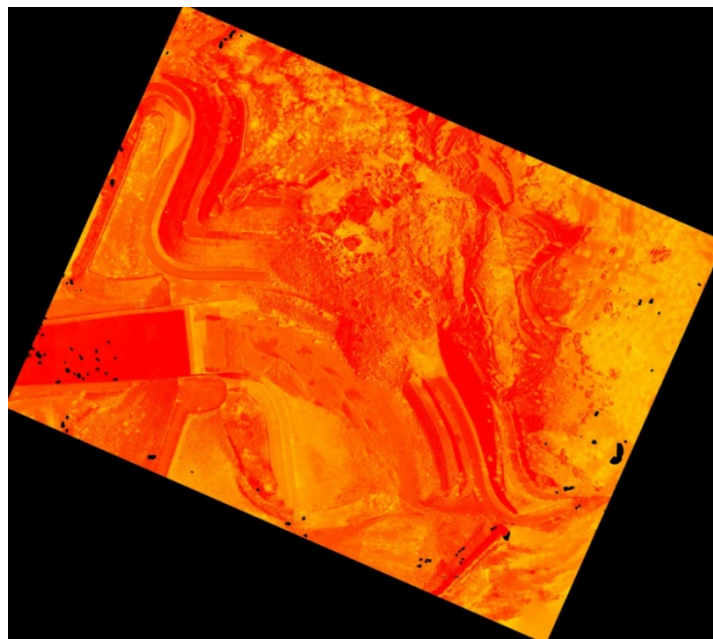
Ένα από τα πλεονεκτήματα του λογισμικού είναι ότι "συνεργάζεται" με αρκετά προγράμματα δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να επεξεργαστεί περαιτέρω ή να διαμορφώσει τα δεδομένα του και σε άλλα προγράμματα, ανάλογα τις ανάγκες του.

Όπως αναφέρεται και σε προηγούμενη παράγραφο, το Agisoft, μπορεί να εισάγει δεδομένα από αρχεία JPEG, TIFF, PNG, BMP, JPEG Multi-Picture Format (MPO), δηλαδή εικόνες, χάρτες, αεροφωτογραφίες που διαθέτουμε. Εξαγωγή αρχείων μπορεί να κάνει σε μορφή: GeoTIFF, xyz, ASPRS LAS, Google KMZ/KML, COLLADA, VRML, OBJ, PLY, 3DS, FBX, Universal 3D, PDF, κα. τα οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε, ενδεικτικά αναφέρονται, σε προγράμματα όπως το AutoCAD, ArcGIS, Google Earth κ.α. με σκοπό την χρήση τους για έρευνες, καταγραφή δεδομένων, υπολογισμό αποστάσεων/όγκων υλικών/έκτασης προβλήματος κ.α.

Υπάρχει η δυνατότητα να γίνει εξαγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους και ορθοφωτοχάρτη. Τα δεδομένα αυτά μπορεί κανείς να τα δει συνδυαστικά με άλλα προγράμματα για να αποκτήσει μια γενικότερη εικόνα. Ακολούθως δίνονται κάποιες χαρακτηριστικές εικόνες από τις δυνατότητες αυτές του λογισμικού.

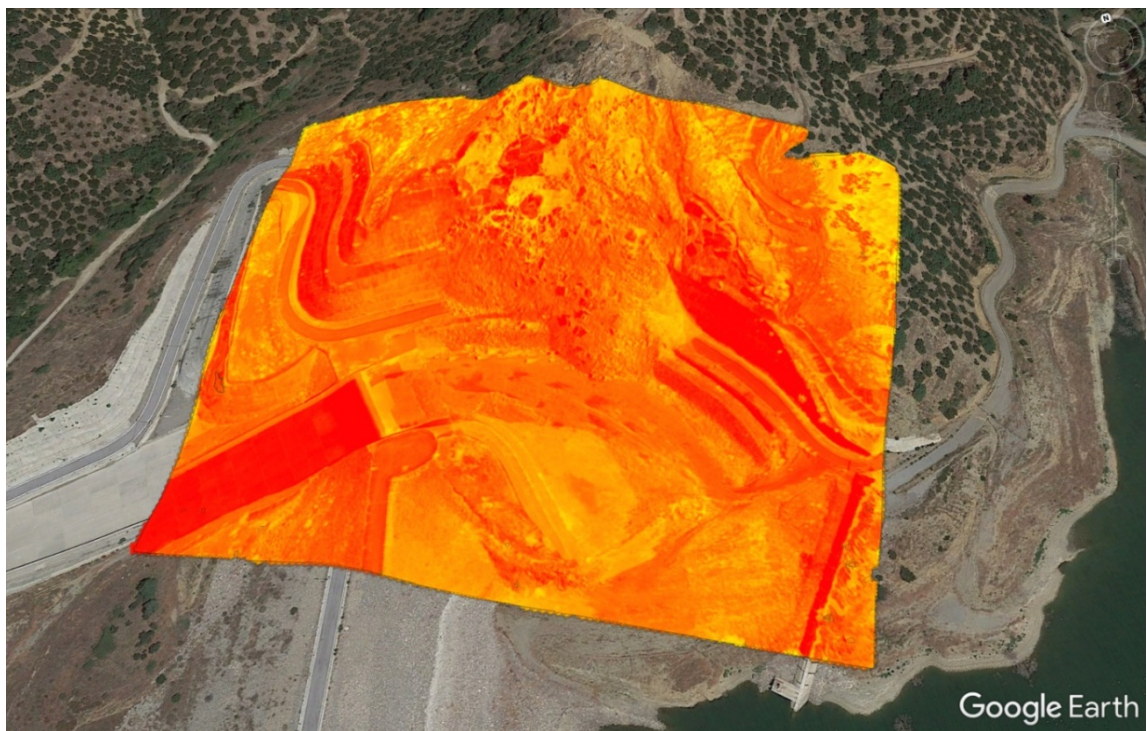


Εικόνα 81. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους



Εικόνα 82. Ορθοφωτοχάρτης περιοχής αποτύπωσης

Για παράδειγμα μπορεί να εισάγει στο Google Earth αρχείο ορθοφωτοχάρτη, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Στις εικόνες αυτές μπορεί να διακρίνει κάποιος την ακρίβεια με την οποία αλληλεπικαλύπτονται τα δεδομένα της αποτύπωσης και οι ορθοφωτοχάρτες του Google Earth (Εικόνα 82-86).



Εικόνα 83. Ορθοφωτοχάρτης περιοχής αποτύπωσης σε περιβάλλον Google Earth



Εικόνα 84. Ορθοφωτοχάρτης περιοχής αποτύπωσης σε περιβάλλον Google Earth



Εικόνα 85. Ορθοφωτοχάρτης περιοχής αποτύπωσης σε περιβάλλον Google Earth



Εικόνα 86. Ορθοφωτοχάρτης περιοχής αποτύπωσης σε περιβάλλον Google Earth

# Κεφάλαιο 4

## Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Με τον όρο κλιματική αλλαγή αναφερόμαστε στη μεταβολή του παγκοσμίου κλίματος και ειδικότερα σε μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών που εκτείνονται σε μεγάλη χρονική κλίμακα. Τέτοιου τύπου μεταβολές περιλαμβάνουν στατιστικά σημαντικές διακυμάνσεις ως προς τη μέση κατάσταση του κλίματος ή τη μεταβλητότητά του, που εκτείνονται σε βάθος χρόνου δεκαετιών ή περισσότερων ακόμα ετών. Οι κλιματικές αλλαγές οφείλονται σε φυσικές διαδικασίες, καθώς και σε ανθρώπινες δραστηριότητες με επιπτώσεις στο κλίμα, όπως η τροποποίηση της σύνθεσης της ατμόσφαιρας.

Στην περίπτωση των κατολισθητικών φαινομένων, η κλιματική αλλαγή αναμένεται να αυξήσει την διάρκεια αλλά και την συχνότητα ραγδαίων βροχοπτώσεων επηρεάζοντας σε μεγάλο βαθμό την αύξηση της συχνότητας και της έκτασης των κατολισθητικών φαινομένων, αφού η έντονη - ραγδαία βροχόπτωση (μεγάλο ύψος βροχής σε μικρό χρονικό διάστημα) αποτελεί βασικό εναυσματικό παράγοντα κατολισθητικών κινήσεων.

Είναι γενικότερη διαπίστωση, ότι ακόμα και λίγες ώρες έντονης βροχόπτωσης (καταιγίδα) αποτελούν κατώφλια έναρξης πολλών τύπων αβαθών κατολισθητικών κινήσεων σε εδαφικούς σχηματισμούς ή σε αποσαθρωμένες ζώνες ή μανδύες βραχωδών σχηματισμών. Οι συνήθεις κατολισθητικοί τύποι που παρατηρούνται είναι αβαθείς περιστροφικές ή επίπεδες ολισθήσεις, και ροές (σε εδαφικό υλικό ή κορήματα) και οφείλονται στην κρίσιμη αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, με αποτέλεσμα την υπέρβαση της διατμητικής αντοχής και την αστοχία του πρανούς. Ταυτόχρονα η παρουσία του βάρους του νερού στο σώμα του πρανούς (εσωτερικά ή και εξωτερικά) αυξάνει τις προϋπάρχουσες επί τόπου τάσεις και διευκολύνει το έργο της βαρύτητας.

Πολλές μελέτες σε διάφορες περιοχές, εμφανίζουν συγκεκριμένες συσχετίσεις μεταξύ συνδυασμού τιμών κατωφλίων έντασης και διάρκειας βροχόπτωσης, και της εκδήλωσης συγκεκριμένων τύπων κατολισθητικών φαινομένων.

Επιπροσθέτως η πτώση και η άνοδος της στάθμης του νερού σε ταμιευτήρες είναι παράγοντας που επηρεάζει τις κατολισθήσεις. Δηλαδή η απότομη πτώση στάθμης του νερού (rapid draw-down) σε ταμιευτήρες και άλλα σώματα επιφανειακής παρουσίας νερού (λίμνες, ποταμοί, θάλασσα), είναι διαπιστωμένο πως αποτελεί εναυσματικό παράγοντα εκδήλωσης κατολισθητικών κινήσεων. Στην περιοχή του υλικού που βρίσκεται κάτω από τη στάθμη, η πίεση του νερού των πόρων είναι υδροστατική. Με την απότομη όμως πτώση της στάθμης, οι υφιστάμενες, στο χαμηλής περατότητας αργιλικό υλικό, υδροστατικές πιέσεις δεν εκτονώνονται γρήγορα, με συνέπεια να αυξηθούν δραματικά οι διατμητικές τάσεις. Όταν αυτές υπερβούν την αντοχή του υλικού επέρχεται αστοχία και εκδήλωση κατολισθητικών κινήσεων στο πρανές αναφοράς.

Άλλος παράγοντας που συνδέεται με την κλιματική αλλαγή είναι η άνοδος της στάθμης του υπόγειου νερού στα πρανή λόφων, που παρατηρείται μετά από παρατεταμένες βροχοπτώσεις (μεγαλύτερης διάρκειας από τις μέση τιμή της περιοχής), ή συνδέεται με ανύψωση της στάθμης γειτνιαζόντων σωμάτων νερού. Η άνοδος αυτή συνεπάγεται αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων και αντίστοιχη, προφανή, μείωση της ενεργού διατμητικής αντοχής του κορεσμένου υλικού των πρανών. Η υπέρβαση δε του κατωφλίου της κρίσιμης αντοχής, οδηγεί το πρανές σε αστοχία.

Είναι σαφές ότι η κλιματική αλλαγή θα επηρεάσει αρνητικά το φαινόμενο των κατολισθήσεων με αύξηση της συχνότητας και της γεωγραφικής τους έκτασης, επηρεάζοντας τεχνικά και συγκοινωνιακά έργα, παραγωγικές αλλά και οικιστικές περιοχές. Είναι επομένως απαραίτητη ή χρήση μέσων και τεχνικών που θα αποτυπώνουν άμεσα και μεγάλη ακρίβεια την εξέλιξη του φαινομένου των κατολισθήσεων.

Όπως αναφέρεται και σε προηγούμενα κεφάλαια τα τελευταία χρόνια παρατηρείται η χρήση της εναέριας φωτογραμμετρίας για ερευνητικούς σκοπούς, από εικόνες υψηλής

ανάλυσης που αποκτήθηκαν από Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.), χαμηλού ύψους πτήσης εφαρμόζεται ολοένα και περισσότερο, συνεπώς οι προηγμένες και αυτοματοποιημένες φωτογραμμετρικές διεργασίες που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, επιτρέπουν την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων (όπως τα νέφη σημείων) για την παραγωγή τρισδιάστατων ψηφιακών προϊόντων υψηλού βαθμού ακρίβειας.

Θεωρείται μια οικονομική μέθοδος για την παραγωγή αεροφωτογραφιών και οι αεροφωτογραφίες λαμβάνονται με γεωμετρικές λύσεις στην κλίμακα εκατοστών.

Είναι ικανά να εκτελούν σε ορεινό ανάγλυφο πτύσεις να παρέχουν ακριβή δεδομένα υψηλής ποιότητας και με μικρούς κύκλους επανάληψης, επιτρέποντας εκτός από την παρακολούθηση των κατολισθήσεων και την παρακολούθηση μικρών ρωγμών προκειμένου να προσδιοριστούν οι κατευθύνσεις κίνησης.

Όπως έχουμε προαναφέρει η φωτογραμμετρία με χρήση Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (Μ.Ε.Ι.Ο.), πλεονεκτεί καθώς προσφέρει μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο, ευελιξία, υψηλή ανάλυση, χαμηλό κόστος και συλλογή πληροφοριών σε επικίνδυνες θέσεις με ασφάλεια. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, είναι η δυνατότητα απόκτησης δεδομένων σε μορφή νέφους σημείων υψηλής ανάλυσης, δίνοντας τη δυνατότητα να δημιουργηθεί ένας λεπτομερής γεωμορφολογικός χάρτης της υπό διερεύνηση περιοχής.

Οι γενικότεροι στόχοι είναι: α) η τεχνική αξιολόγηση εκτεταμένης σε έκταση κατολίσθησης από δεδομένα υπέρ-υψηλής ανάλυσης, β) η εκτίμηση των επιπτώσεων και ο προγραμματισμός των τεχνικών έργων αποκατάστασης, γ) η δυνητική παρακολούθηση της εξέλιξης των τεχνικών έργων αποκατάστασης με Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος και δ) η δυνατότητα επαναπροσδιορισμού των τεχνικών έργων ανάλογα με τα νέα δεδομένα που προκύπτουν κατά την εξέλιξη των εργασιών.

Η περιοχή αποτύπωσης του πρηνούς υπερχειλιστή στο Φράγμα Αποσελέμη, αποτελεί μια μορφολογικά δύσκολη περιοχή αποτύπωσης, καθώς είναι μεγάλης έκτασης με

απότομες κλίσεις. Λόγω της μεγάλης υψομετρικής διαφοράς ( $\approx 60\text{m}$ ), από το χαμηλότερο μέχρι το ψηλότερο σημείο της αποτύπωσης.

Μετά από διάφορες δοκιμές και πτήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο, επιλέχθηκε ο συνδυασμός φωτογραφιών από δύο διαφορετικές διαδρομές από τις οποίες συλλέχθηκαν 44 φωτογραφίες υψηλής ανάλυσης, καλύπτοντας το σύνολο του μοντέλου από διάφορες οπτικές γωνίες. Από το σύνολο των φωτογραφιών έγινε επεξεργασία σε 37 από αυτές.

Στήθηκαν συνολικά στο Agisoft 17 μοντέλα για μέχρι να καταλήξουμε στο τελικό αποτέλεσμα με μεγάλους χρόνους αναμονής σε κάθε περίπτωση που εξετάστηκε.

Από την συγκεκριμένη εφαρμογή τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι:

**Ταχύτητα αποτύπωσης:** Για τον προγραμματισμό και την υλοποίηση της αποτύπωσης με το Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (M.E.I.O.) 3DR SOLO καθώς και την τελική επεξεργασία των αεροφωτογραφιών απαιτήθηκαν συνολικά πέντε ημέρες. Συγκεκριμένα, οι εργασίες πεδίου, διήρκεσαν περίπου 3 ώρες, ενώ με τις παραδοσιακές μεθόδους αποτύπωσης θα απαιτούνταν σίγουρα μία με δύο μέρες. Προσφέρει ουσιαστικά μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο.

**Ευκολία αποτύπωσης:** Όπως είναι φυσικό η εναέρια αποτύπωση με χρήση Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (M.E.I.O.) υπερτερεί συγκρίνοντας τη με την επίγεια αποτύπωση. Προϋποθέτει όμως μια προεργασία στο γραφείο, για να καταλήξει π χειριστής στην διαδρομή που θα ακολουθήσει το Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος. Όμως μπορούμε να πούμε ότι με την εναέρια αποτύπωση παρακάμπτονται όλες οι δυσκολίες και τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από την δύσκολη και επικίνδυνη προσβασιμότητα του εδάφους, όπως στην περιοχή αποτύπωσης που παρουσιάζει απότομη κλίση πρανούς, ασταθές έδαφος κ.α. Το Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (M.E.I.O.) είναι ικανό να εκτελεί σε απότομο ανάγλυφο πτύσεις, παρέχοντας ταυτόχρονα ακριβή δεδομένα υψηλής ποιότητας, με μικρούς κύκλους επανάληψης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία λεπτομερούς γεωμορφολογικού χάρτη της υπό διερεύνηση περιοχής

**Κόστος της αποτύπωσης:** Αναφορικά με το κόστος της συγκεκριμένης μεθόδου, δηλ. του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την αποτύπωση και των ανθρωποωρών είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με την επίγεια αποτύπωση. Ο εξοπλισμός Μη Επανδρωμένο Ιπτάμενο Όχημα (Μ.Ε.Ι.Ο.)/κάμερα κοστίζουν περίπου 2.000 ευρώ, ενώ αντίστοιχα ένας γεωδαιτικός σταθμός έχει περίπου το διπλάσιο κόστος. Επίσης ο χρόνος που ελαχιστοποιήθηκε έχει αντίκρισμα και στο κόστος, καθώς απαιτεί λιγότερες εργατοώρες.

**Ασφάλεια λήψης:** Με τη χρήση Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (Μ.Ε.Ι.Ο.) για την αποτύπωση, μειώθηκε σημαντικά, πέρα από το κόστος και ο κίνδυνος ατυχήματος κατά την διάρκεια της αποτύπωσης, καθώς δεν εμπλέκεται άμεσα ο ανθρώπινος παράγοντας.

**Συμβατότητα με άλλα προγράμματα:** Λόγω του ότι το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των δεδομένων, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εξαγάγει τα αποτελέσματα της αποτύπωσης του σε διάφορους τύπους αρχείων (Geo TIFF, xyz, ASPRS LAS, Google KMZ/KML, COLLADA, VRML, OBJ, PLY, 3DS, FBX, Universal 3D, PDF, κ.α.), μπορούν άμεσα και εύκολα να χρησιμοποιηθούν από άλλα προγράμματα, να υποστούν επεξεργασία και να βγουν συμπεράσματα. Για παράδειγμα από το πολυγωνικό πλέγμα, με την κατάλληλη επεξεργασία στο πρόγραμμα ArcGIS μπορεί να δώσει κλίσεις κλυτιών, προσανατολισμό πρανών, κ.α.

Ενδεικτικά αναφέρονται, συμβατά προγράμματα όπως το AutoCAD, ArcGIS, Google Earth κ.α., στα οποία μπορεί να γίνει εισαγωγή των δεδομένων με σκοπό την χρήση τους για έρευνες (γεωλογικές, γεωτεχνικές), υπολογισμό αποστάσεων, όγκων υλικών, έκτασης του προβλήματος κ.α.

Ουσιαστικά μια χαμηλού κόστους προσέγγιση με χρήση Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (Μ.Ε.Ι.Ο.) που βασίζεται στην τηλεανίχνευση, δίνοντας μοντέλα ψηφιακής επιφάνειας υψηλής ανάλυσης κατολισθήσεων (U. Niethammer et al., 2010).

Σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους υπερτερεί όσο αναφορά (i) τη δυνατότητα κατάτμησης της εικόνας με βελτιστοποίηση κλίμακας που καθορίζεται από το ίδιο το

πρόβλημα και (ii) τη δυνατότητα ανανέωσης των μετρήσεων συστηματικά. Επιτρέπει την αποτύπωση μεγάλων επιφανειών με πυκνή χωρική δειγματοληψία, προσφέροντας σαφή πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά τοπογραφικά συστήματα (π.χ. GPS) που μπορεί να είναι ακριβή, αλλά παρέχουν περιορισμένο αριθμό σημείων ελέγχου.

# Κεφάλαιο 5

## Συμπέρασμα

Σε κάθε περίπτωση, ο τρόπος και το είδος μίας καταγραφής εξαρτώνται από το είδος και τον σκοπό της εφαρμογής, τις προδιαγραφές της έρευνας, σε συνδυασμό με το διαθέσιμο κόστος και το χρόνο που είναι διαθέσιμα για την πραγματοποίησή της.

Η χρήση Μη Επανδρωμένου Ιπτάμενου Οχήματος (Μ.Ε.Ι.Ο.) ήρθε να θέσει νέες βάσεις στον τομέα της έρευνας των περιοχών που εμφανίζουν φαινόμενα αστάθειας, καθώς δίνουν λύσεις για την ανίχνευση, την παρακολούθηση και την έγκαιρη προειδοποίηση, όσο αφορά την εξέλιξη των κατολισθητικών φαινομένων.

Δεν υπάρχει αμφιβολία όμως ότι η εναέρια φωτογραμμετρία με χρήση Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους έχει βοηθήσει και βοηθάει, καθώς συνεχώς εξελίσσεται, στον εντοπισμό και καταγραφεί προβλημάτων αστάθειας με σκοπό την έγκαιρη προειδοποίηση και αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων.

Τα προσδοκώμενα αποτελέσματα υλοποιήθηκαν στο σύνολο τους, δηλαδή η σύνθεση γεωχωρικών δεδομένων, όπως ψηφιακοί ορθοφωτοχάρτες, χάρτες υπέρ-υψηλής ανάλυσης, φωτομωσαϊκά και υπέρ-υψηλής ανάλυσης ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα εδάφους που:

- οριοθετούν ζώνες επικινδυνότητας, ως προς το υπό μελέτη φαινόμενο
- υποστηρίζουν την λήψη αποφάσεων σε σχέση με τα έργα αποκατάστασης
- βοηθούν στον προγραμματισμό των εργασιών και
- επιτρέπουν την ασφαλή πρόσβαση μέσω 3-d τηλεπισκοπικών εικόνων στο πεδίο για να δοθεί η δυνατότητα παρακολούθησης της εξέλιξης των εργασιών αποκατάστασης.

Συνοψίζοντας, η αξιολόγηση και ένταξη της σύγχρονης τεχνολογίας των Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών στην υλοποίηση και παρακολούθηση τεχνικών έργων σε τοπικό, περιφερειακό αλλά και κρατικό επίπεδο επιφέρει οικονομίες κλίμακας αλλά δίνει και τη δυνατότητα, εξαιρετικά μεγάλης, ακρίβειας στην αποτύπωση και στην παρακολούθηση τους, σε χρόνο και συχνότητα της επιλογής μας ανάλογα με την εξέλιξη του φαινομένου και των εργασιών πεδίου.

# Κεφάλαιο 6

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική Βιβλιογραφία

Αρβανιτοπούλου Στυλιανή (2014) *Τρισδιάστατη Αποτύπωση Πρανών με Μεθόδους Επίγειας Φωτογραμμετρίας – Δυνατότητες και Πιθανές Εφαρμογές στην Αντιμετώπιση του Κατολισθητικού Κινδύνου*. Αθήνα: Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών & Τ.Ε.Ι. Σερρών

Γεω. Περ. Σύμβουλοι Μηχανικοί Α. Ε. (2017) *Εργασίες Παρακολούθησης Πρώτης Πλήρωσης Ταμιευτήρα Φράγματος Αποσελέμη - Γεωτεχνική Μελέτη Αποκατάστασης και Σταθεροποίησης Πρανούς Υπερχειλιστή*. Ηράκλειο, Κρήτης

Γιώργος Χ. Μηλιαρέσης (2003) *Φωτοερμηνεία – Τηλεπισκόπηση*. Αθήνα: Εκδόσεις ΙΩΝ

Δούτσος Θ. (2000) *Γεωλογία: Αρχές και Εφαρμογές*. Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας. Αθήνα: Εκδόσεις Leader Books.

Δρόσος Γ. Σάββας (2015) *Τρισδιάστατη Αποτύπωση Αντικειμένων με Μη Επανδρωμένα Εναέρια Μέσα – UAV*. Αθήνα: Ε.Μ.Π.

Καββαδάς Μ. (2005) *Στοιχεία Εδαφομηχανικής*. 7η Έκδοση, Αθήνα: Τυπογραφείο Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Κατσικάτσος Γ. Χ. (1992) *Γεωλογία της Ελλάδας*. Αθήνα: Ο.Ε.Δ.Β.

Κούκης Γ., Ζιούρκας Κ. (2002) *Κατολισθητικές Κινήσεις στον Ελληνικό Χώρο – Στατιστική Θεώρηση*. Ορυκτός Πλούτος, 58, 39-58.

Κούκης Γεώργιος Χρ., Σαμπατακάκης Νικόλαος Σ. (2002) *Τεχνική Γεωλογία*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.

Κούκης Γεώργιος Χρ., Σαμπατακάκης Νικόλαος Σ. (2007) *Γεωλογία Τεχνικών Έργων*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.

Κωνσταντίνος Γ. Περάκης, Ιωάννης Ν. Φαρασλής, Αθανάσιος Κ. Μωυσιάδης (2015) *Η Τηλεπισκόπηση σε 13 ενότητες Θεωρία Μέθοδοι και Εφαρμογές*. Αθήνα: Εκδόσεις Κάλλιπος.

Μακατουνάκης Χαράλαμπος (2016) *Μελέτη και Αξιολόγηση Τεχνικών Τρισδιάστατης Μοντελοποίησης Χαμηλού Κόστους*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.

Μπιλάλης Ν., Μαραβελάκης Ε. (2014) *Συστήματα CAD/CAM και Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση, 2η Έκδοση*. Αθήνα: Εκδόσεις ΚΡΙΤΙΚΗ.

Ρόζος Ε., *Κατολισθητικά Φαινόμενα*. Σημειώσεις Μαθήματος Τεχνικής Γεωλογίας Ε.Μ.Π.

Χριστίνα Καλλιμάνη (2014) *Μεθοδολογία Παρακολούθησης Βραχοπτώσεων σε Πρανή με Τεχνικές Επεξεργασίας Βίντεο και Εικόνων*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.

Χριστοφόρου Κων/νος (2012) *Τρισδιάστατη Αποτύπωση Αρχαιολογικής Ανασκαφής Μωσαϊκών με Εφαρμογή Συστήματος Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας: Βασιλική στο Ακρωτήριο της Κύπρου*. Λεμεσός: Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου.

## Ξένη Βιβλιογραφία

Abellán A., J.M. Vilaplana, and J. Martínez (2006) *Application of a Long-Range Terrestrial Laser Scanner to a Detailed Rockfall Study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain)*. *Engineering Geology*, Volume 88/Issue 3-4, Pages 136-148.

Akca D. (2013) *Photogrammetric Monitoring of an Artificially Generated Shallow Landslide*. *Photogramm*, Volume 28/Issue 142, Pages 178-195.

Antonio D'Argenio (2012) *sRPA and Geomatics: Why Small Drones are Mapping Tools*.

Balek J., Blahut J. (2017) *A Critical Evaluation of the use of an Inexpensive Camera Mounted on a Recreational Unmanned Aerial Vehicle as a Tool for Landslide Research*. *Landslides*, Volume 14/Issue 3, Pages 1217–1224.

Bardi F., W. Frodella, A. Ciampalini, S. Bianchini, C. Del Ventisette, G. Gigli, R. Fanti, S. Moretti, G. Basile, & N. Casagli (2014) *Integration Between Ground Based and Satellite SAR Data in Landslide Mapping: The San Fratello Case Study*. *Geomorphology*, Volume 223, Pages 45-60.

Brodu N., Lague D. (2012) *3D Terrestrial Lidar Data Classification of Complex Natural Scenes Using a Multi-Scale Dimensionality Criterion: Applications in Geomorphology*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 68, Pages 121-134.

Casagli et al. (2017) *Spaceborne, UAV and Ground-Based Remote Sensing Techniques for Landslide Mapping, Monitoring and Early Warning*. *Geoenvironmental Disasters*, Volume 4, Page 9.

Colomina I., Molina P. (2014) *Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 92, Pages 79–97.

Delacourt C., Allemand P., Berthie E., Raucoules D., Casson B., Grandjean P., Pambrun C., Varel E. (2007) *Remote - Sensing Techniques for Analyzing Landslide Kinematics: A Review*. Bulletin de la Societe Geologique Volume 178/Issue 2, Pages 89–100.

Edouard Palis I., Thomas Lebourg I., Emmanuel Tric I., Jean-Philippe Malet I., Maurin Vidal (2016) *Long-Term Monitoring of a Large Deep-Seated Landslide, (La Clapiere, South-East French Alps): Initial Study*. Landslides, Volume 14/Issue 1, Pages 155-170.

Eisenbeiss H., Sauerbier M. (2011) *Investigation of UAV Systems and Flight Modes for Photogrammetric Applications*. The Photogrammetric Record, Volume 26/Issue 136, Pages 400-421.

Farina P., Rossi G., Tanteri L., Salvatici T., Gigli G., Moretti S., Casagli N. (2017) *The Use of Multi-Copter Drones for Landslide Investigations*. 3rd NASL (North America symposium for Landslides), June 4-8 Sept., Virginia, USA.

Giordan D., Hayakawa Y., Nex F., Remondino F., Tarolli P. (2018) *Review Article: The Use of Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) for Natural Hazards Monitoring and Management*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., Volume 18, Pages 1079-1096.

Harwin S., Lucieer A. (2012) *Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced Via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery*. Remote Sensing , Volume 4/Issue 6, Pages 1573–1599.

Immerzeel W.W., Kraaijenbrink P.D.A., Shea J.M., Shrestha A.B., Pellicciotti F., Bierkens M.F.P., de Jong S.M. (2014) *High-Resolution Monitoring of Himalayan Glacier Dynamics Using Unmanned Aerial Vehicles*. Remote Sens. of Environ., Volume 150, Pages 93–103.

JA Ekstrom et al. (2016) *Gauging Climate Preparedness to Inform Adaptation Needs: Local Level Adaptation in Drinking Water Quality in CA, USA*. Climatic Change, Volume 140/Issue 3-4, Pages 467-481.

James M.R., Robson S. (2012) *Straightforward Reconstruction of 3D Surfaces and Topography with a Camera: Accuracy and Geoscience Application*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, Volume 117/Issue F3, Pages 217-226.

Koukis G., Tsiabaos G., Sabatakakis N. (1994) *Slope Movements in the Greek Territory: A Statistical Approach*. Proceedings of 7th International Congress I.A.E.G., Lisboa-Portugal, Balkema. Pages 4621-4628.

Linder G. et al. (2016) *UAV Monitoring and Documentation of a Large Landslide*. Applied Geomatics, Volume 8/ Issue 1, Pages 1–11.

M. V. Peppas et al. (2016) *Accuracy Assessment of a UAV-Based Landslide Monitoring System*. *The International Archives of the Photogrammetry*. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B5, Pages 895-902.

Martha T.R., Kerle N., Jetten V., Van Westen K., Kumar K.V. (2010) *Characterising Spectral, Spatial and Morphometric Properties of Landslides for Semi-Automatic Detection Using Object-Oriented Methods*. *Geomorphology*, Volume 116/Issue 1–2, Pages 24–36.

Martha T.R., Kerle N., Jetten V., van Westen C.J., Kumar K.V. (2010) *Landslide Volumetric Analysis Using Cartosat-1-Derived DEMs*. *IEEE Geosci. Remote Sens.* Volume.7/Issue 3, Pages 582–586.

Nadim F., Kjekstad O., Peduzzi P., Herold C., Jaedicke C. (2006) *Global Landslide and Avalanche Hotspots*. *Landslides*, Volume 3/Issue 2, Pages 159–173.

Nebiker S., Annen A., Scherrer M., Oesch D. (2008) *A Light-Weight Multispectral Sensor for Micro UAV—Opportunities for Very High Resolution Airborne Remote Sensing*. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Volume 37, Pages 1193–1198.

Niethammer U., Rothmund S., Joswig M. (2009) *UAV - Based Remote Sensing of the Slow-Moving Landslide Super-Sauze*. In: Malet J.-P., Remaître A., Boogard T. (Eds) *Proceedings*

of the International Conference on Landslide Processes: from geomorphologic mapping to dynamic modeling, Strasbourg, CERG Editions.

Niethammer U., Rothmund S., James M.R., Travelletti J., Joswig M. (2010) *UAV-Based Remote Sensing of Landslides*. In Proceedings of the International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK. Volume 21–24, Pages 496–501.

Remondino F., Barazzetti L., Nex F., Scaioni M., Sarazzi D. (2011) *UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling - Current Status and Future Perspectives*. International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS Zurich 2011 Workshop, Volume XXXVIII-1/Issue C22.

Rosi A., Vannocci P., Tofani V., Gigli G., Casagli N. (2013) *Landslide Characterization Using Satellite Interferometry (PSI), Geotechnical Investigations and Numerical Modeling: The Case Study of Ricasoli Village (Italy)*. Int J Geosci, Volume 4/Issue5, Pages 904–918.

Savage S.B. and Hutter K. (1989) *The Motion of a Finite Mass of Granular Material Down a Rough Incline*. Journal of Fluid Mechanics, Volume 199, Pages 177-215.

Scaioni M., Longoni L., Melillo V., Papini M. (2014) *Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives*. Remote Sensing, Volume 6/Issue 10, Pages 9600–9652.

Servet Yaprak, Omer Yildirim, Tekin Susam, Samed Inyurt, Irfan Oguz (2018) *The Role of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) In Monitoring Rapidly Occuring Landslides*. EGU Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions.

Shi B., Liu C. (2015) *UAV for Landslide Mapping and Deformation Analysis*. Proc. SPIE 9808, International Conference on Intelligent Earth Observing and Applications, 98080P.

Tofani V., Segoni S., Agostini A., Catani F., Casagli N. (2013) *Technical Note: Use of Remote*

*Sensing for Landslide Studies in Europe*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., Volume 13, Pages 299-309.

Travelletti J., Delacourt C., Allemand P., Malet J.P., Schmittbuhl J., Toussaint R., Bastard M. (2012) *Correlation of Multi-Temporal Ground-Based Optical Images for Landslide Monitoring: Application, Potential and Limitations*. ISPRS J Photogramm Remote Sens., Volume 70, Pages 39–55.

Turner D., Lucieer A., De Jong S.M. (2015) *Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*. Remote Sensing, Volume 7, Pages 1736–1757.

Turner D., Lucieer A., Wallace L. (2014) *Direct Georeferencing of Ultrahigh-Resolution UAV Imagery*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Volume 52, Pages 2738–2745.

Uwe Niethammer (2013) *UAV-Basierte Fernerkundungsmethoden der Aerogeophysik für die Hochauflösende Beobachtung von Alpinen Rutschhängen*. Institut für Geophysik der Universität Stuttgart.

Vid Peterman (2015) *The International Archives of the Photogrammetry*. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/Issue W4, Pages 215-218.

Walter M., Niethammer U., Rothmund S., Joswig M. (2009) *Joint Analysis of the Super-Sauze (French Alps) Mudslide by Nanoseismic Monitoring and UAV-Based Remote Sensing*. First Break, Volume 27, Pages 53–60.

Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M. (2012) *'Structure-from-Motion' Photogrammetry: A Low-Cost, Effective Tool for Geoscience Applications*. Geomorphology, Volume 179, Pages 300–314.

## **Πηγές από το διαδίκτυο**

Agisoft LLC (2016) Agisoft PhotoScan Professional, v 124. [www.agisoft.com](http://www.agisoft.com)

Κλιματική αλλαγή. [el.Wikipedia.org](http://el.Wikipedia.org).

Connected Workflows: Drones in Construction, Autodesk BIM 360, [info.bim360.autodesk.com](http://info.bim360.autodesk.com).

ESCADRONE, Solo Mapper, Drone for Mapping and photography. [escadrone.com](http://escadrone.com)

European Environmental Agency 2018. [www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu)

Mikrokopter 2010, Official Mikrokopter open source quad-rotor homepage. [www.mikrokopter.com](http://www.mikrokopter.com)

ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ. [http: www.wwf.gr](http://www.wwf.gr)