



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

«Μεθοδολογία παρακολούθησης βραχοπτώσεων
σε πρανή με τεχνικές επεξεργασίας βίντεο και
εικόνων»

ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΚΑΛΛΙΜΑΝΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΠΑΡΤΣΙΝΕΒΕΛΟΣ, ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΖΑΧΑΡΙΑΣ ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΝΤΩΝΗΣ ΒΑΦΕΙΔΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ, ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2014

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον», της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, στο εργαστήριο Γεωδαισίας και Πληροφορικής των Γεωεπιστημών. Το θέμα της εργασίας αφορά στην επεξεργασία εικόνων και βίντεο για την παρακολούθηση βραχοπτώσεων κατά μήκος πρανών οδοποιίας.

Το θέμα της μελέτης ανατέθηκε από τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Παναγιώτη Παρτσινέβελο τον οποίο και ευχαριστώ θερμά τόσο για την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων της διεξαγωγής της εργασίας καθώς και για την εμπιστοσύνη του στο να μου αναθέσει το συγκεκριμένο θέμα. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την άψογη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και για την συνεχή υποστήριξή του καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές του, καταλυτικής σημασίας για την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής τους Καθηγητές Ζαχαρία Αγιουτάντη και Αντώνη Βαφείδη καθώς και τον Διευθυντή του εργαστηρίου Γεωδαισίας και Πληροφορικής των Γεωεπιστημών, Καθηγητή Στέλιο Μερτίκα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Αχιλλέα Τριπολιτσιώτη ΜΗΧ.ΟΠ, επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου τόσο για τις πολύτιμες οδηγίες και συμβουλές του σε όλα τα στάδια της εκπόνησης της εργασίας καθώς και για την παροχή βιβλιογραφικού υλικού.

Περίληψη

Το οδικό δίκτυο κυρίως σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο περιβάλλεται από πρηνή και ως εκ τούτου είναι επιρρεπές σε φαινόμενα βραχοπτώσεων που συχνά προκαλούν καταστροφή περιουσιών και υποδομών αλλά και ανθρώπινες απώλειες. Η συχνότητα εκδήλωσης του φαινομένου ιδιαίτερα σε ορεινές περιοχές είναι τέτοια που καθιστά απαραίτητη την παρακολούθηση των φυσικών και τεχνητών πρηνών, ώστε να είναι δυνατή η έγκαιρη ανίχνευση της εκδήλωσης του φαινομένου για τη διακοπή της κυκλοφορίας ή/και την ενημέρωση των διερχόμενων οδηγών.

Η ανίχνευση των βραχοπτώσεων μπορεί να γίνει, μεταξύ άλλων τεχνικών, μέσω της περιοδικής παρακολούθησης του ανάγλυφου του φυσικού εδάφους και της εύρεσης των διαφορών που έχουν προκληθεί λόγω της μετακίνησης των τεμαχίων βράχου. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες γεωδαιτικές και γεωτεχνικές μέθοδοι ανίχνευσης των βραχοπτώσεων που χρησιμοποιούν εξοπλισμό όπως ρομποτικοί ολικοί γεωδαιτικοί σταθμοί, επίγειοι σαρωτές laser και επίγεια συστήματα συμβολομετρίας radar συνθετικού ανοίγματος (ground based interferometric SAR). Τα όργανα αυτά χαρακτηρίζονται από το υψηλό κόστος κτήσης γεγονός που καθιστά την χρήση τους εφικτή, κυρίως σε μεμονωμένες περιοχές ενδιαφέροντος.

Στην παρούσα εργασία, μελετάται μία μεθοδολογία χρήσης τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων και βίντεο για την αυτοματοποιημένη ανίχνευση βραχοπτώσεων, ως εναλλακτικού τρόπου στον εντοπισμό, παρακολούθηση και διαχείριση φαινομένων βραχοπτώσεων. Με την χρήση τεχνικών επεξεργασίας εικόνων μπορούν να παραχθούν Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους πριν και μετά τις μετακινήσεις των βραχοτεμαχίων από τα οποία μπορεί να ανιχνευθεί η μετατόπιση. Με την χρήση τεχνικών επεξεργασίας βίντεο μπορεί να καταγραφεί σε πραγματικό χρόνο η τροχιά των βραχοπτώσεων. Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται συνδυάζει χαμηλό κόστος εξοπλισμού, ευελιξία και μειωμένο χρόνο κατά τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης δεδομένων που προέκυψαν από πειραματική διάταξη που αποτελείται

από δύο κάμερες που καταγράφουν πτώσεις βραχοτεμαχίων σε ένα τεχνητό πρανές. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε συνοψίζεται σε πέντε βασικά βήματα:

1. Λήψη και προ-επεξεργασία εικόνων και δεδομένων βίντεο,
2. Παραγωγή και επεξεργασία των τρισδιάστατων μοντέλων για τον εντοπισμό των μετακινήσεων λόγω βραχοπτώσεων,
3. Επεξεργασία των βίντεο για τον εντοπισμό της τροχιάς των βραχοτεμαχίων,
4. Σύζευξη των ψηφιακών μοντέλων εδάφους και των τροχιών πτώσης με δεδομένα γεωφώνων,
5. Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων για τον περιορισμό των σφαλμάτων ανίχνευσης (false alarms).

Λέξεις κλειδιά

Βραχοπτώσεις, Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους, Ψηφιακή Φωτογραμμετρία, Επεξεργασία Βίντεο, Παρακολούθηση Πρανών

Abstract

Road networks, especially located in high relief areas are surrounded by steep slopes which are prone to rockfall phenomena often causing damage to properties, infrastructures and loss of human lives. The incidence rate of this phenomenon especially in mountainous areas is such that necessitates the monitoring of natural and man-made slopes, to allow early detection of the phenomenon in order to reallocate traffic and/or to inform incoming drivers.

Rockfall detection can be accomplished through various techniques, including, periodic monitoring of the digital surface model and the detection of the differences caused by the movement of the rock masses. In the international literature, geodetic and geotechnical methods have been proposed for rockfall detection using equipment such as robotic total geodetic stations, terrestrial lasers scanners and ground based interferometric synthetic aperture radar systems (SAR). These instruments are characterized by a high acquisition cost, which makes their use feasible mainly on small scale areas of interest.

In this study, a digital image processing and video methodology is presented, for an automated rockfall detection system, as an alternative technique to identify, monitor and manage rockfall phenomena. By using digital image processing techniques, digital surface models before and after rock movement events can be created in order to calculate the displacement. Using video processing techniques, the trajectory of the rockfall can be recorded in real time. The methodology presented, combines flexibility and low equipment and data processing costs. Specifically, the results of data analysis are presented, obtained from an experimental set consisted of two cameras that record rockfall incidents in an artificial slope. The methodology applied is summarized in five basic steps:

1. Acquiring and pre-processing of image and video data,
2. Production and processing of three-dimensional surface models, used for displacement detection due to rockfall,
3. Video processing for trajectory monitoring of the falling rocks,

4. Integration of digital surface models and trajectories with geophone data,
5. Optimization, in order to minimize detection errors (false alarms).

Key words

Rockfall, DTM, Digital Photogrammetry, Video Processing, Slope monitoring

Περιεχόμενα

Πρόλογος	2
Περίληψη	3
Abstract.....	5
Κατάλογος Περιεχομένων Εικόνων	9
Κατάλογος Περιεχομένων Πινάκων.....	10
Κατάλογος Περιεχομένων Διαγραμμάτων	10
1. Εισαγωγή	11
1.1. Περιγραφή Φαινομένου.....	12
1.2. Μέθοδοι, συστήματα και όργανα ανίχνευσης βραχοπτώσεων	15
1.2.1. Απεικονιστές.....	15
1.2.2. Γεωφυσικές μέθοδοι και όργανα	16
1.2.3. Γεωτεχνικά όργανα.....	17
1.2.4. Γεωδαιτικά όργανα	18
1.3. Σκοπός και στόχοι της εργασίας.....	20
2. Μεθοδολογία.....	23
2.1. Φωτογραμμετρία	23
2.2. Επίγεια Ψηφιακή Φωτογραμμετρία κοντινής εστίασης στις βραχοπτώσεις	25
2.3. Υφιστάμενες μέθοδοι παρακολούθησης βραχοπτώσεων και ολοκληρωμένα συστήματα.....	25
2.4. Μεθοδολογία επεξεργασίας εικόνας.....	29
2.5. Μεθοδολογία Επεξεργασίας Βίντεο	32
2.6. Μεθοδολογία, Αρχιτεκτονική Συστήματος	33
3. Δεδομένα Πειράματος.....	34
3.1. Περιοχή Μελέτης	34
3.2. Εξοπλισμός Πειράματος	36
3.3. Σχεδιασμός Πειράματος - Συλλογή Δεδομένων.....	38
4. Επεξεργασία των Δεδομένων Εικόνων και Θεωρία	42
4.1. Λογισμικά Επεξεργασίας.....	42
4.2. Επεξεργασία Δεδομένων Εικόνων	42
4.2.1. Εισαγωγή και εκτίμηση ποιότητας.....	44
4.2.2. Εύρεση κοινών σημείων.....	46

4.2.2.1.	Υπολογισμός παραμέτρων προσανατολισμού της κάμερας	49
4.2.2.2.	Προσανατολισμός και γεωαναφορά των εικόνων.....	50
4.3.	Ανακατασκευή Πυκνών Επιφανειών (dense surface reconstruction)	51
4.4.	Εξαγωγή 3D Μοντέλου	55
4.5.	Αυτοματοποίηση της επεξεργασίας.....	55
4.6.	Επεξεργασία των τρισδιάστατων μοντέλων	57
4.7.	Εξαγωγή σημείων μετακίνησης	59
5.	Επεξεργασία Δεδομένων Βίντεο	62
6.	Αποτελέσματα επεξεργασίας και σύζευξη με δεδομένα γεωφώνων.....	66
7.	Συμπεράσματα.....	68
	Παράρτημα	70
	Βιβλιογραφία	72
	Διαδίκτυο	78

Κατάλογος Περιεχομένων Εικόνων

Εικόνα 1-1. Μηχανισμοί πρόκλησης βραχοπτώσεων. Πηγή: Volkwein et al, 2011.....	13
Εικόνα 1-2. Βραχόπτωση στη Γαλλία, Άλπεις 2014, σιδηροδρομικό ατύχημα. Πηγή: <i>REUTERS, Olivier Anrigo και dailymail.co.uk</i>	14
Εικόνα 1-3. Βραχόπτωση στην Ελλάδα, Τέμπη 2009. Πηγή: <i>larissanet.gr</i>	14
Εικόνα 3-1. Περιοχή Μελέτης, δημιουργήθηκε σε περιβάλλον ArcMap, ESRI.	34
Εικόνα 3-2. Εικόνα από το πρανές της περιοχής μελέτης βραχοπτώσεων.	35
Εικόνα 3-3. Εικόνα κοντινή από το πρανές της περιοχής μελέτης βραχοπτώσεων.	35
Εικόνα 3-4. Αριστερά Σώμα Φωτογραφικής Μηχανής Canon EOS 600D, δεξιά το τρίποδο που χρησιμοποιήθηκε.	36
Εικόνα 3-5. Γεώφωνο. Πηγή: http://splay.pl/wp-content/uploads/2014/03/Geophone-Case-Compatible-to-Sercel-Bg4.jpg	37
Εικόνα 3-6. Ολικός Γεωδαιτικός σταθμός και πρίσμα. Πηγή: www.nasurvey.com	37
Εικόνα 3-7. Το σύστημα συλλογής δεδομένων της συγκεκριμένης μεθοδολογίας.	38
Εικόνα 3-8. Κατακόρυφη καταγραφή του σήματος από τα γεώφωνα στη θέση 5m.....	41
Εικόνα 3-9. Διαμήκη καταγραφή σήματος από τα γεώφωνα στη θέση 5m.....	41
Εικόνα 3-10. Εγκάρσια καταγραφή σήματος από τα γεώφωνα στη θέση 5m.	41
Εικόνα 4-1. Λήψη από camera 1, πριν την έναρξη των ρίψεων.	44
Εικόνα 4-2. Επιλογή Mask για Camera 1 και Camera 2.	44
Εικόνα 4-3. Το αποτέλεσμα εφαρμογής των markers, mask.....	45
Εικόνα 4-4. Το αποτέλεσμα του αραιού νέφους σημείων που κατασκευάστηκε από τον προσανατολισμό των εικόνων. Workflow -> Add Photos-> Align Photos (Accuracy: High, Pair preselection: Ground Control Points, Point limit: 60000).	50
Εικόνα 4-5. Αποτέλεσμα βήματος ανακατασκευής πυκνού νέφους σημείων. Workflow -> Build Dense Cloud (Quality Ultra High, Depth filtering: Moderate, Frames: All frames).	51
Εικόνα 4-6. Το αποτέλεσμα δημιουργίας πλέγματος (το συγκεκριμένο είναι από τις αρχικές εικόνες). Workflow -> Build Mesh (Surface type: Arbitrary, Source data: Dense cloud, Polygon count: High (205248), Interpolation: Enabled (default), Frames: All frames).	52
Εικόνα 4-7. Το αποτέλεσμα της χαρτογράφησης υψής στο τρισδιάστατο μοντέλο του πρανούς. Workflow -> Build Texture (Mapping mode: Generic, Blending mode: Average, Frames: All frames).	53
Εικόνα 4-8. Διαφορές μεταξύ των μοντέλων που μπορούν να εντοπιστούν με οπτική παρατήρηση από τον χρήστη, λόγω χαρτογράφησης της υψής.	54
Εικόνα 4-9. Το αρχικό και τελικό αποτέλεσμα του Agisoft. File -> export DEM -> Geotif Elevation Data.	55
Εικόνα 4-10. Αφαίρεση τιμών του δεύτερου μοντέλου από το πρώτο. Πηγή ArcGIS Help, Minus (Spatial Analyst).	57
Εικόνα 4-11. Αποτέλεσμα αφαίρεσης τελικού και αρχικού τρισδιάστατου μοντέλου.	57
Εικόνα 4-12. Κατωφλίωση μεγίστων και ελαχίστων διαφορών	59
Εικόνα 4-13. Εύρεση περιγράμματος περιοχής μελέτης.	60
Εικόνα 4-14. Απομόνωση αλλαγών σημαντικής κλίμακας και αφαίρεση θορύβου.	60
Εικόνα 4-15. Αφαίρεση ζώνης ορίου.	61
Εικόνα 5-1. Χρήση του λογισμικού Canon για τον καθορισμό της περιοχής μελέτης.	62
Εικόνα 5-2. Αριστερά η πρώτη εικόνα και δεξιά ο μέσος όρος των πρώτων 38 εικόνων.	63

Εικόνα 5-3. Η κατανομή του Gauss.	63
Εικόνα 5-4. Αρχικό σημείο ρίψης του βραχοτεμαχίου.	64
Εικόνα 5-5. Περίπου στο μέσο της πορείας του βραχοτεμαχίου.	64
Εικόνα 5-6. Προς το τέλος της ρίψης στο σημείο όπου εμφανίζεται μετακίνηση λόγω πρόσκρουσης και άλλων βραχοτεμαχίων.....	64
Εικόνα 5-7. Καταγεγραμμένη τροχιά της βραχόπτωσης.....	65
Εικόνα 6-1. Τρισδιάστατο μοντέλο αναγλύφου.....	66
Εικόνα 6-2. Τροχιά βραχοτεμαχίου και καταγραφή από γεώφωνα.....	67

Κατάλογος Περιεχομένων Πινάκων

Πίνακας 1-1. Επάρκεια των εργαλείων και τεχνικών ανάλογα με το στάδιο της έρευνας της αστάθειας πρανούς. Η παρακολούθηση κίνησης αφορά μόνιμη ή μακροχρόνια έρευνα. Πηγή: Rock Fall Engineering, Wiley 2011.	19
Πίνακας 3-2. Πίνακας με τα XYZ από Total Station.....	40
Πίνακας 6-1. Παρατηρήσεις βραχοπτώσεων με Δεδομένα Γεωφώνων.....	67

Κατάλογος Περιεχομένων Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2-2. Διάγραμμα Ροής Επεξεργασίας των Φωτογραφιών.....	31
Διάγραμμα 2-3. Αρχιτεκτονική συστήματος καταγραφής βραχοτεμαχίων.....	33
Διάγραμμα 3-1. Η κατανομή των σημείων ελέγχου (markers) στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων μας. Το γράφημα δημιουργήθηκε σε περιβάλλον Matlab.....	39

1. Εισαγωγή

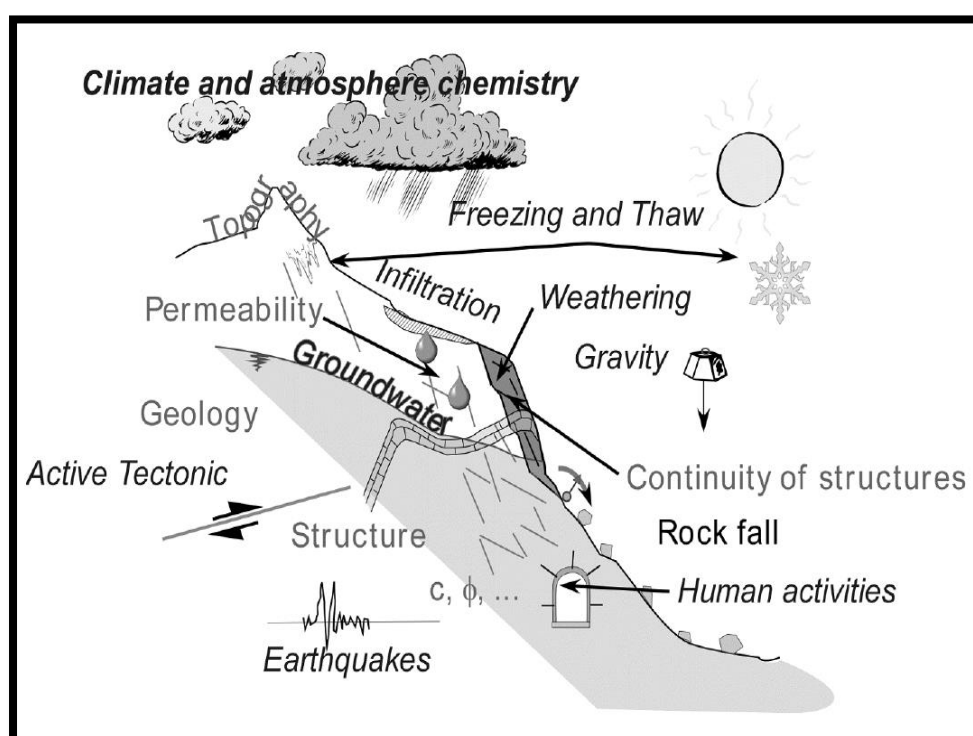
Τα χερσαία δίκτυα μεταφορών όπως τα οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα συχνά είναι ευάλωτα σε φαινόμενα βραχοπτώσεων και κατολισθήσεων όταν διασχίζουν ή παρακάμπτουν ορεινές περιοχές, φαράγγια και παρόμοια τοπογραφικά χαρακτηριστικά (Hungry et al., 1999). Επίσης, συχνά οι βραχοπτώσεις πλήττουν ορεινούς οικισμούς, παράκτιες ζώνες και αρχαιολογικά μνημεία. Παρά το γεγονός ότι οι βραχοπτώσεις δεν παρουσιάζουν το ίδιο μέγεθος οικονομικού κινδύνου όπως η μεγάλη κλίμακας αστοχίες σε πρηνή (όπου μπορούν και διακόπτουν την κίνηση σε αυτοκινητοδρόμους για αρκετές ημέρες), ο αριθμός των θανάτων που έχουν προκληθεί λόγω βραχοπτώσεων τείνει να είναι ίσος με τον αριθμό των θανάτων που έχουν προκληθεί συνδυαστικά λόγω προβλημάτων που σχετίζονται με αστάθεια πρηνών (Hoek, 2000). Συγκεκριμένα σε στοιχεία που αφορούν σε αυτοκινητόδρομους προκύπτει ότι σε ποσοστό 45% τα προβλήματα που παρουσιάζονται όσον αφορά αστάθεια πρηνών σχετίζονται με φαινόμενα βραχοπτώσεων (Badger & Lowell, 1992). Η αδυναμία πρόβλεψης της συχνότητας του φαινομένου αυτού λόγω της πολυπλοκότητας των διαφόρων μηχανισμών που το ενεργοποιούν οδηγεί κυρίως στην κατασκευή προληπτικών προστατευτικών μέτρων και σηματοδοτεί την ανάγκη εύρεσης κατάλληλων μεθόδων για την συνεχή παρακολούθηση του.

1.1. Περιγραφή Φαινομένου

Οι βραχοπτώσεις είναι διεργασίες που συμβαίνουν συνήθως σε απότομα πρανή, περιλαμβάνουν την αποκόλληση βραχοτεμαχίων, την πτώση τους, την κύλιση, την αναπήδηση και την μετακίνηση τους (Varnes, 1978). Οι βραχοπτώσεις μπορεί να προκληθούν λόγω φυσικών παραγόντων (γεωλογικούς, τεκτονικούς, κλιματολογικούς) αλλά και λόγω ανθρώπινων παρεμβάσεων (Εικόνα 1-1). Όλες οι πλαγιές με βραχώδη υποστρώματα είναι επιρρεπείς στην αποσάθρωση σε διάφορους βαθμούς, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε θραύση, διεύρυνση των αρθρώσεων των βραχοτεμαχίων και συνεπώς στην πρόκληση των βραχοπτώσεων. Ο βαθμός πρόκλησης των βραχοπτώσεων εξαρτάται από περιβαλλοντικούς παράγοντες που προκαλούν φυσική και χημική διάβρωση καθώς και από τον τύπο του βραχώδους υποστρώματος (Schumm & Chorley, 1964). Εκτός από τα ποσοστά αποσάθρωσης, οι μηχανισμοί ενεργοποίησης επίσης καθορίζουν εάν μια βραχοπτώση θα συμβεί ή όχι. Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες που οδηγούν σε αστάθεια των πρανών, συνολικά έχουν μικρότερη συμβολή σε σχέση με τους γεωλογικούς παράγοντες, όμως σε τοπική κλίμακα μπορούν να έχουν σημαντικό ρόλο.

Στην βιβλιογραφία περιγράφεται ένα ευρύ φάσμα μηχανισμών και συνθηκών ενεργοποίησης φαινομένων βραχοπτώσεων το οποίο θα μπορούσε να χωριστεί στα αίτια ενεργοποίησης της μετακίνησης και στους παράγοντες που οδηγούν στη μετακίνηση. Στην πραγματικότητα είναι αρκετά δύσκολο να γίνει διάκριση μεταξύ των παραγόντων που προωθούν τις βραχοπτώσεις και τα πραγματικά αίτια πυροδότησης μιας βραχοπτώσης αφού συχνά μια συγκεκριμένη διαδικασία που προκαλεί αποσάθρωση, ταυτόχρονα πυροδοτεί και την βραχοπτώση όπως η θραύση λόγω παγετού. Επίσης, πιθανό παράγοντα πρόκλησης βραχοπτώσης αποτελούν και τα ζώα. Η μορφολογία του πρανούς αλλά και το περιβάλλον στο οποίο δυνητικά ενδέχεται να μετακινηθεί το βραχοτεμάχιο είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν αν τελικά θα πυροδοτηθεί η βραχοπτώση.

Τα μεγέθη των θραυσμάτων ποικίλουν από μικρά βότσαλα και πέτρες έως και σε μεγάλα τμήματα χιλιάδων κυβικών μέτρων βράχων. Τα τεμάχια των βράχων που μετακινούνται μπορούν να επηρεάσουν άμεσα κτηριακές εγκαταστάσεις, αυτοκινητοδρόμους, σιδηροδρόμους και τεχνικά έργα (υποδομές παραγωγής ή παροχής ενέργειας). Τεμάχια βράχων που έχουν βρεθεί μετά την μετακίνησή τους σε δρόμους ή σιδηροδρόμους μπορούν έμμεσα να προκαλέσουν ζημιές μέσω αυτοκινητιστικών ατυχημάτων και εκτροχιασμών τρένων. Επιπροσθέτως μπορούν να προκαλέσουν υπερχειλίσεις ποταμών ή μετατοπίσεις υδάτινων όγκων.



Εικόνα 1-1. Μηχανισμοί πρόκλησης βραχοπτώσεων. Πηγή: Volkwein et al, 2011

Αποτελούν μια φυσική καταστροφή εξίσου σημαντική με τους σεισμούς και τις πλημμύρες που συχνά επιφέρει απώλειες τόσο οικονομικές αλλά και κοινωνικές. Σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες υπάρχουν προβλήματα βραχοπτώσεων και κατολισθήσεων σε ορυχεία και υπόγειες κατασκευές με εκατοντάδες θανάτους. Έχουν αναφερθεί θάνατοι λόγω βραχοπτώσεων και σε ανεπτυγμένες χώρες με πιο πρόσφατο το σιδηροδρομικό ατύχημα στη Γαλλία τον Φεβρουάριο 2014 (Εικόνα 1-2) όπου χάθηκαν δύο ανθρώπινες ζωές.

Ειδικότερα στην Ελλάδα έχουν καταγραφεί αρκετά ατυχήματα λόγω βραχοπτώσεων κυρίως κατά μήκος των αυτοκινητοδρόμων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα βραχόπτωσης λόγω αστοχίας του πρανούς το 2009 στην περιοχή των Τεμπών (Εικόνα 1-3), όπου στο έργο κατασκευής της νέας εθνικής οδού, μετά από έντονες βροχοπτώσεις προκλήθηκε βραχόπτωση με αποτέλεσμα την απώλεια ενός ανθρώπου και τη δημιουργία σοβαρών τεχνικών προβλημάτων.



Εικόνα 1-2. Βραχόπτωση στη Γαλλία, Άλπεις 2014, σιδηροδρομικό ατύχημα. Πηγή: *REUTERS, Olivier Anrigo και dailymail.co.uk*



Εικόνα 1-3. Βραχόπτωση στην Ελλάδα, Τέμπη 2009. Πηγή: *larissanet.gr*

1.2. Μέθοδοι, συστήματα και όργανα ανίχνευσης βραχοπτώσεων

Οι βασικές μέθοδοι ανίχνευσης βραχοπτώσεων βάσει βιβλιογραφικών αναφορών αφορούν σε επίγειες γεωφυσικές, γεωτεχνικές, γεωδαιτικές μεθόδους και σε μεθόδους τηλεπισκόπησης. Οι μέθοδοι τηλεπισκόπησης αποτελούνται από τεχνικές φωτογραμμετρίας, τεχνικές δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού και τεχνικές δορυφορικής συμβολομετρίας ραντάρ. Οι τεχνικές φωτογραμμετρίας στην καταγραφή βραχοπτώσεων χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, επίγεια και εναέρια φωτογραμμετρία. Ανάλογα με την απόσταση του αντικειμένου καταγραφής γίνεται διαχωρισμός και σε μεθόδους κοντινής απόστασης (close range).

Ανάλογα με τα όργανα καταγραφής που χρησιμοποιούνται μπορεί να γίνει διαχωρισμός στα συστήματα πρόβλεψης και καταγραφής για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Τα ολοκληρωμένα συστήματα καταγραφής συνήθως περιλαμβάνουν δύο, περισσότερες ή και όλες τις παρακάτω κατηγορίες οργάνων για την πληρέστερη παρακολούθηση του φαινομένου.

1.2.1. Απεικονιστές

Χωρίζονται σε επίγεια, εναέρια και δορυφορικά όργανα που χρησιμοποιούν μεθόδους τηλεπισκόπησης, φωτογραμμετρίας, επεξεργασίας εικόνων από αναλογικές και ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές και βίντεο. Επίσης υπάρχουν εναέριοι σαρωτές λέιζερ και όργανα ραντάρ που χρησιμοποιούνται στη συμβολομετρία ραντάρ και στην επίγεια διαφορική συμβολομετρία.

Τα δεδομένα που μπορούν να επεξεργαστούν οι μέθοδοι φωτογραμμετρίας αφορούν εικόνες, αεροφωτογραφίες, δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης, κτλ. Τα δορυφορικά δεδομένα αφορούν πολυφασματικές εικόνες ή και παγχρωματικές. Η ερμηνεία των εικόνων αποτελείται από τη στερεοεπεξεργασία, ελεγχόμενη και μη-ελεγχόμενη ταξινόμηση και τον εντοπισμό αλλαγών από εικόνες διαφορετικών χρονικών περιόδων.

Μια από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους αποτύπωσης πρανών για την ανίχνευση βραχοπτώσεων είναι μέσω των επίγειων σαρωτών λέιζερ (Abellan et al., 2010; Tonini & Abellan, 2013). Οι επίγειοι σαρωτές λέιζερ γνωστοί και ως LiDAR (Light Detection and Ranging system) είναι όργανα ενεργητικής απεικόνισης μπορούν να συλλέξουν εκατοντάδες ή χιλιάδες σημεία ανά δευτερόλεπτο και δίνουν ως άμεσο αποτέλεσμα νέφη σημείων (point clouds) (Slob & Hack, 2009). Τα δεδομένα μπορούν να συλλεχθούν με διάφορους τρόπους: στατικούς επίγειους αισθητήρες προσαρτημένους σε τρίποδα, υψηλού και χαμηλού ύψους πτήσης αεροσκαφών (Arko et al., 2013), κινούμενα επίγεια οχήματα (Vaaja et al., 2011) και υποβρύχια οχήματα. Λειτουργούν εκτοξεύοντας παλμούς φωτός σε μία καθορισμένη κατεύθυνση και καταγράφουν την ανακλώμενη ένταση του παλμού από το αντικείμενο ή την περιοχή μελέτης. Κάθε σημείο αποκτά με αυτόν τον τρόπο συγκεκριμένες συντεταγμένες στο τρισδιάστατο χώρο x , y , z σχετιζόμενες με την θέση του σαρωτή και η σχετιζόμενη με την ανακλώμενη ένταση του παλμού λέιζερ.

Το πλεονέκτημα τους αφορά στην ακριβή αποτύπωση της γεωμετρίας του χώρου. Στα μειονεκτήματα υπάρχει η δυσκολία διαχείρισης του τεράστιου όγκου δεδομένων και ότι δεν μπορεί να γίνει αποτύπωση για μεγάλες αποστάσεις μόνο από ένα όργανο. Εφόσον τα δεδομένα συλλεχθούν από διάφορα όργανα και βασίζονται σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων μπορούν να συγχωνευτούν για να είναι εφικτή η αποτύπωση μεγάλων εκτάσεων (Lato et al., 2009a; Iavarone and Vagners, 2003). Δευτερευόντως, ως μειονέκτημα θα μπορούσε να αναφερθεί το κόστος εξοπλισμού καθώς και ότι θέτει ως απαραίτητη προϋπόθεση την εξειδίκευση του χρήστη τόσο στην επεξεργασία των δεδομένων όσο και στην συλλογή (Lato and Malte, 2011).

1.2.2. Γεωφυσικές μέθοδοι και όργανα

Οι γεωφυσικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την διερεύνηση των πρανών και βασίζονται σε μετρήσεις φυσικών ιδιοτήτων που πραγματοποιούνται στο πεδίο από τις οποίες μπορούν να εξαχθούν οι φυσικές παράμετροι είτε μέσω διαδικασιών

αναστροφής ή ανάλυσης εικόνων. Οι βασικότερες γεωφυσικές μέθοδοι αφορούν στην ακουστική και μικρο-σεισμική παρακολούθηση (Arosio et al., 2009), σε συστήματα παλμών, ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις, γεωραντάρ, βαρυμετρική ανάλυση και στη γεωηλεκτρική τομογραφία.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις γεωτεχνικές μεθόδους. Υλοποιούνται σε γρήγορο χρονικό διάστημα, είναι μη επεμβατικές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πρηνή μεγάλης και μικρής κλίμακας προσφέροντας δυσδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα του υπεδάφους. Υστερούν σε σχέση με τις γεωτεχνικές μεθόδους στο ότι όσο το βάθος της μέτρησης αυξάνεται μειώνεται η ποιότητα ανάλυσης των μετρήσεων, η λύση συνήθως δεν είναι μοναδική για ένα συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων και ότι παρέχουν φυσικές παραμέτρους αντί για γεωλογικές ή γεωτεχνικές ιδιότητες (Deparis J. et al., 2011).

1.2.3. Γεωτεχνικά όργανα

Τα γεωτεχνικά όργανα αφορούν στα:

- Γεώφωνα, όπου καταγράφουν μηχανικές δονήσεις τις οποίες μετατρέπουν σε ηλεκτρικές.
- Κλισιόμετρα, όπου γίνεται παρακολούθηση της οριζόντιας μετατόπισης πρηνών ή άλλων δομικών στοιχείων.
- Καθιζήσιμετρα, όπου γίνεται μέτρηση των καθιζήσεων ή μετακινήσεων σε ένα ή πολλαπλά σημεία.
- Μηκυνσιόμετρα, όπου χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της γραμμικής μετακίνησης.
- Ρωγμόμετρα, μετρούν τις αλλαγές στις ρωγμές αλλά και την διάσταση, κατεύθυνσή τους.
- Πιεζόμετρα και σταθμίμετρα, μετρούν την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, της πίεσης των πόρων ή της πίεσης σε ένα κλειστό κύκλωμα ενός υγρού.

Όλα τα γεωτεχνικά όργανα έχουν τον ίδιο σκοπό, την μέτρηση διακυμάνσεων στις αποστάσεις μεταξύ δύο σημείων προσαρτημένων στο πρανές. Τα δύο αυτά σημεία μπορούν να απέχουν από 2 χιλιοστά μέχρι και δεκάδες μέτρα, κατά μήκος μιας ζώνης παραμόρφωσης ή σε μια γεώτρηση.

1.2.4. Γεωδαιτικά όργανα

Χωρίζονται στους ολικούς και ρομποτικούς γεωδαιτικούς σταθμούς, είναι ηλεκτρονικά όργανα ακριβείας που εμπεριέχουν ένα συνδυασμό ψηφιακού θεοδόλιχου, ηλεκτρομαγνητικών οργάνων μέτρησης μηκών, ένα υπολογιστή ή μικροεπεξεργαστή και μονάδα αποθήκευσης δεδομένων. Οι ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί διαφέρουν στο ότι έχουν την δυνατότητα αυτόματης ανίχνευσης των στόχων χρησιμοποιώντας CCD (charged coupled device) ή CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) οπτικούς αισθητήρες για τον εντοπισμό τους (Key & Lemmens, 2008; Ferriera & Santos, 2011).

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με όλες τις διαθέσιμες τεχνικές και την αξιολόγησή τους. Σύμφωνα με αυτόν τον πίνακα στην αξιολόγηση της επίγειας φωτογραμμετρίας όσον αφορά τη δυνατότητα παρακολούθησης κίνησης είναι σε φάση ανάπτυξης στην παρακολούθηση ασταθών πρανών. Όσον αφορά την προειδοποίηση σε πραγματικό χρόνο θα μπορούσε μόνο να συμβάλει, καθώς απαραίτητα απαιτείται συνδυασμός με άλλες τεχνικές.

Πίνακας 1-1. Επάρκεια των εργαλείων και τεχνικών ανάλογα με το στάδιο της έρευνας της αστάθειας πρανούς. Η παρακολούθηση κίνησης αφορά μόνιμη ή μακροχρόνια έρευνα. Πηγή: Rock Fall Engineering, Wiley 2011.

Μέθοδος / Χαρακτηριστικά	Ανίχνευση αστάθειας πρανών	Απόδοση Γεωμετρίας/ Δομής	Ανίχνευση κίνησης και ταυτοποίηση	Παρακολούθηση κίνησης	Προειδοποίηση σε πραγματικό χρόνο
GBInSAR επίγεια συστήματα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος	---	Πολύ χαμηλής χωρικής ανάλυσης	Υψηλή ανάλυση κατά μήκος της γραμμής όρασης (LOS)	Πολύ καλά αποτελέσματα όταν είναι υλικοτεχνικά εφικτό	Καλά αποτελέσματα όταν είναι υλικοτεχνικά εφικτό
GNSS	---	---	3D, μετρήσεις χιλιοστού, ακριβείς εντοπισμός μετακινήσεων.	Συνεχής χρονικά αλλά ακριβείς μόνο χωρικά	Μόνο ως βοηθητική μέθοδος
Κλισιόμετρα, ρωγμόμετρα, μηκυνσιόμετρα	---	---	Υψηλή ανάλυση, ακριβής εντοπισμός.	Υψηλή ανάλυση, αξιόπιστη και ακριβής μέθοδος	Αξιόπιστη και αποτελεσματική όταν ενσωματώνεται σε ένα δίκτυο παρακολούθησης
Εναέρια ή δορυφορικά οπτικά συστήματα	Πολύ καλή για γεωμορφολογική ανάλυση	Καλή για χάραξη περιγράμματος	Μόνο όταν υπάρχουν διαθέσιμα παλιότερα δεδομένα	---	---
Εναέριοι σαρωτές λέιζερ	Εξαιρετικά καλή για γεωμορφολογική ανάλυση	Καλή για χάραξη περιγράμματος και ανάλυση δομής	Μόνο όταν υπάρχουν διαθέσιμα παλιότερα δεδομένα	---	---
Προηγμένα συμβολομετρικά συστήματα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (Advanced InSAR)	Καλή για αστικές περιοχές, μέτρια σε φυσικές επιφάνειες	Μόνο για χάραξη περιγράμματος μεγάλων ενεργών ασταθών πρανών	Πολύ καλή χωρική και χρονική ανάλυση όταν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα	Μόνο εκ των υστέρων	---
Επίγεια φωτογραμμετρία	---	Καλή	Καλή	Τεχνική υπό ανάπτυξη	---
Επίγειοι σαρωτές λέιζερ	---	Εξαιρετική για ανάλυση δομής	Πολύ καλή υπό συγκεκριμένες συνθήκες	Δεν υλοποιείται σε επικίνδυνα και δυσπρόσιτα σημεία	Δεν υλοποιείται σε επικίνδυνα και δυσπρόσιτα σημεία

1.3. Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση χρήσης απλού εργαστηριακού εξοπλισμού (Ψηφιακή Φωτογραφική Μηχανή, Τρίποδο, Total Station, Γεώφωνα) και τεχνικών επεξεργασίας στερεοσκοπικών εικόνων στο να παραχθεί γρήγορα ένα μοντέλο καταγραφής/ανίχνευσης βραχοπτώσεων το οποίο ενδεχομένως να μπορεί να συμβάλει, συμπληρώσει ή και να αντικαταστήσει όπου είναι εφικτό παραδοσιακές μεθόδους καταγραφής βραχοπτώσεων. Σε περιοχές όπου δεν υπάρχει πρόσβαση στο πεδίο μελέτης η συγκεκριμένη μέθοδος να αξιολογηθεί ως προς την αποτελεσματικότητά της.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε χωρίζεται σε δύο μέρη:

- ❖ Το πρώτο αφορά στην ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων μέσω τεχνικών ψηφιακής φωτογραμμετρίας για την παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων.
- ❖ Το δεύτερο κομμάτι αφορά την επεξεργασία βίντεο με στόχο την συνεχή παρακολούθηση του πρανούς για τον άμεσο εντοπισμό πιθανής βραχόπτωσης.

Τα δύο μέρη αλληλοσυμπληρώνονται και με την σύνθεση τους αποτελούν ένα αναδραστικό σύστημα για την αποτίμηση βραχοπτώσεων. Για την υλοποίηση του παραπάνω σκοπού προκύπτουν τα επιμέρους ερωτήματα όπου αποτελούν και τους στόχους της εργασίας.

- Αρχικά θεωρείται πως μια συνήθης ψηφιακή φωτογραφική μηχανή (μη μετρική) μπορεί να αποτελέσει εργαλείο για την παραγωγή ενός τρισδιάστατου μοντέλου (Abianedo et al., 2009). Θα εξεταστούν τυχόν περιορισμοί καθώς και τυχόν περιπτώσεις αποτυχίας της εφαρμογής.
- Θα αξιολογηθεί ο συνολικός χρόνος που περιλαμβάνει την εγκατάσταση των φωτογραφικών μηχανών, συλλογής των εικόνων/βίντεο αλλά και των σημείων εδαφικού ελέγχου (gcr's) και επεξεργασίας των δεδομένων στα

αντίστοιχα λογισμικά για να υπάρχει μια σαφής εικόνα σε σχέση με συμβατικές μεθόδους.

- Θα καθοριστεί το κατά πόσο με την χρήση μεθόδων επεξεργασίας εικόνων και βίντεο μπορεί να παραχθεί ένα αξιόπιστο τρισδιάστατο μοντέλο αναγλύφου για τον εντοπισμό των βραχοπτώσεων.
- Τα παραγόμενα αποτελέσματα της επεξεργασίας των εικόνων και βίντεο θα αξιολογηθούν και εφόσον είναι ποιοτικά-ικανά θα αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο στην άμεση καταγραφή και διαχείριση φαινομένων βραχοπτώσεων.

Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή των περιεχομένων των κεφαλαίων:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο φαινόμενο των βραχοπτώσεων, στην περιγραφή των παραγόντων που το ενεργοποιούν καθώς και στις διαφορετικές μεθόδους καταγραφής του. Στο τέλος γίνεται αναφορά στον σκοπό της εργασίας καθώς και στους επιμέρους στόχους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση στα υφιστάμενα ολοκληρωμένα συστήματα παρακολούθησης των βραχοπτώσεων και στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία, για τις μεθόδους τεχνικών επεξεργασίας εικόνων και βίντεο. Επίσης γίνεται περιγραφή της ροής εργασιών και της αρχιτεκτονικής του συστήματος παρακολούθησης των βραχοπτώσεων.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή των δεδομένων του πειράματος, ξεκινώντας από την περιοχή μελέτης, τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε και τον σχεδιασμό του πειράματος. Τέλος γίνεται αναφορά στον τρόπο συλλογής των δεδομένων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αρχικά μια ανάλυση του θεωρητικού υποβάθρου του λογισμικού και ακολουθεί μια εκτενής περιγραφή της μεθοδολογίας προ-επεξεργασίας και επεξεργασίας των εικόνων και βίντεο που ακολουθήθηκε. Παράλληλα με το θεωρητικό υπόβαθρο παρατίθενται και τα βήματα επεξεργασίας των δεδομένων των εικόνων καθώς και τα αποτελέσματά τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην επεξεργασία δεδομένων βίντεο. Ακολουθεί περιγραφή των βημάτων που αφορούν στην μετατροπή του βίντεο σε διαδοχικά frames, καθορισμό της περιοχής μελέτης και την χρήση του αλγορίθμου ανίχνευσης των θέσεων μετακίνησης.

Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των εικόνων και βίντεο καθώς και γίνεται μια πρώτη συσχέτιση με τις καταγραφές των γεωφώνων.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, στο πλαίσιο των οποίων δίνονται και οι απαντήσεις στα αρχικά ερωτήματα που έχουν τεθεί όσον αφορά την συγκεκριμένη μεθοδολογία. Επίσης γίνονται κάποιες προτάσεις που αφορούν σε ενδεχόμενη βελτίωση της.

2. Μεθοδολογία

Το πρώτο μέρος της μεθοδολογίας στηρίζεται στην επεξεργασία στερεοσκοπικών εικόνων μέσω φωτογραμμετρικών τεχνικών για την παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων. Αρχικά θα γίνει αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο της φωτογραμμετρίας και σε παραδείγματα χρήσης μεθόδων τηλεπισκόπησης στις βραχοπτώσεις. Στη συνέχεια θα γίνει παρουσίαση των τεχνικών ψηφιακής φωτογραμμετρίας που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία καθώς και το διάγραμμα ροής εργασιών που ακολουθήθηκε. Μετέπειτα, θα πραγματοποιηθεί αναφορά στην μεθοδολογία της επεξεργασίας των βίντεο και της αρχιτεκτονικής του συστήματος.

2.1. Φωτογραμμετρία

Φωτογραμμετρία είναι η τέχνη, επιστήμη και τεχνική απόκτησης αξιόπιστων μετρητικών πληροφοριών για φυσικά αντικείμενα και το περιβάλλον, μέσω διαδικασιών καταγραφής, μέτρησης και ερμηνείας φωτογραφικών εικόνων, προτύπων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και άλλων φαινομένων (ASPRS, 2006).

Η ανάπτυξη της φωτογραμμετρίας εξαρτάται σαφώς από την γενικότερη ανάπτυξη της επιστήμης και της τεχνολογίας. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι οι τέσσερις μεγάλες φάσεις της φωτογραμμετρίας σχετίζονται άμεσα με τις τεχνολογικές εφευρέσεις της φωτογραφίας, των αεροπλάνων, υπολογιστών και ηλεκτρονικών. Η φωτογραμμετρία ξεκίνησε με την εφεύρεση της φωτογραφίας από τους Daguerre και Niepce το 1839. Η πρώτη γενιά, από τη μέση προς το τέλος του περασμένου αιώνα ήταν μια πολύ πρωτοποριακή και πειραματική περίοδος με αξιόλογα επιτεύγματα στην επίγεια και αέρια φωτογραμμετρία.

Η δεύτερη γενιά, που συνήθως αναφέρεται ως αναλογική φωτογραμμετρία, χαρακτηρίζεται από την εφεύρεση της στέρεο-φωτογραμμετρίας από τον Pulfrich (1901).

Με την έλευση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, η τρίτη γενιά άρχισε με το σύνθημα της αναλυτικής φωτογραμμετρίας. Ο Hellmut Schmid ήταν ένας από τους πρώτους με δυνατότητα πρόσβασης σε υπολογιστή (Schmid, 1953). Ανέπτυξε τη βάση της αναλυτικής φωτογραμμετρίας στη δεκαετία του πενήντα, χρησιμοποιώντας άλγεβρα πινάκων. Για πρώτη φορά υπήρξε μια σοβαρή προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί θεωρία προσαρμογής σε φωτογραμμετρικές μετρήσεις. Παρόλα αυτά χρειάστηκαν αρκετά χρόνια πριν να γίνουν διαθέσιμα τα πρώτα λειτουργικά προγράμματα σε υπολογιστές.

Η τέταρτη γενιά της ψηφιακής φωτογραμμετρίας, εξελίσσεται ταχέως ως μια νέα αρχή της φωτογραμμετρίας. Σε αντίθεση με όλες τις άλλες φάσεις, χρησιμοποιούνται ψηφιακές εικόνες αντί για αναλογικές αεροφωτογραφίες. Υπάρχει η δυνατότητα αποθηκευτικών χώρων που παρέχουν γρήγορη πρόσβαση στις ψηφιακές εικόνες και σε ειδικά τσιπ μικροεπεξεργαστών (Schenk, 2005).

Η πιο δημοφιλής μορφή για την αναπαράσταση τμημάτων της επιφάνειας της γης είναι το Ψηφιακό Μοντέλο Ανάγλυφου. Εδώ οι υψομετρικές διαφορές μετρώνται σε πλέγμα με συγκεκριμένα διαστήματα σημείων. Οι χάρτες είναι το πιο σημαντικό προϊόν της φωτογραμμετρίας. Παράγονται σε διάφορες κλίμακες και βαθμούς ακρίβειας.

2.2. Επίγεια Ψηφιακή Φωτογραμμετρία κοντινής εστίασης στις βραχοπτώσεις

Η ψηφιακή φωτογραμμετρία κοντινής εστίασης είναι μια υπολογιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ανάκτηση τρισδιάστατων πληροφοριών από ένα αντικείμενο το οποίο απεικονίζεται σε εικόνες, αντί να γίνονται απευθείας μετρήσεις επί του αντικειμένου μελέτης (Stylianidis et al., 2003).

Η φωτογραμμετρία κοντινής εστίασης έχει μια σειρά πλεονεκτημάτων έναντι των συμβατικών μεθόδων. Είναι εφικτό να γίνονται μετρήσεις σε περιοχές όπου δεν υπάρχει πρόσβαση ή είναι πολύ επικίνδυνη η προσέγγιση τους. Παρέχει ένα ευέλικτο πλαίσιο εργασίας διότι όλα τα δεδομένα που απαιτούνται για την παραγωγή των τρισδιάστατων μοντέλων μπορούν να αντληθούν αμέσως σε μια σειρά λήψεων. Η επεξεργασία των δεδομένων μπορεί να γίνει σε μετέπειτα χρονικό πλαίσιο. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρεις τύποι φωτογραφικών μηχανών, οι μετρικές, οι ημι-μετρικές καθώς και η μη-μετρικές. Το μικρό κόστος αρχικού εξοπλισμού σε σχέση με γεωδαιτικές και συμβατικές μεθόδους αποτελεί επίσης ένα μεγάλο πλεονέκτημα καθώς και η ευκολία στην μεταφορά του (Westoby et al., 2012). Επίσης απαιτεί λιγότερα άτομα, ένα άτομο μπορεί να είναι αρκετό για την συλλογή των δεδομένων σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους (Fryer, 1995).

2.3. Υφιστάμενες μέθοδοι παρακολούθησης βραχοπτώσεων και ολοκληρωμένα συστήματα

Τα τελευταία χρόνια παρατηρήθηκε αύξηση των ερευνών για βραχοπτώσεις λόγω της αντίστοιχης ανάπτυξης οικισμών σε λοφώδεις και ορεινές περιοχές. Μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση για την καταγραφή του φαινομένου είναι μέσω σεισμικών σημάτων. Τα σεισμικά σήματα που καταγράφονται κατά τη διάρκεια μιας βραχόπτωσης έχουν συγκεκριμένα χρονικά χαρακτηριστικά που διαφέρουν από άλλα σεισμογενή φαινόμενα (σεισμούς, εκρήξεις κτλ) (Vilajosana et al., 2008). Λόγω αυτής της διαφοροποίησης στην εξέλιξη της συχνότητας του χρόνου είναι εφικτό να

γίνει η ανίχνευση των βραχοπτώσεων με την χρήση δύο σταθμών καταγραφής. Επίσης λόγω της μη επεμβατικής φύσης τους έχουν χαμηλότερο κόστος και είναι κατάλληλα για ανίχνευση. Με τα σεισμικά σήματα είναι δυνατό να γίνει ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων πέρα από την ανίχνευση, καθώς και καταγραφή της εμφάνισης του φαινομένου του μεγέθους και της τοποθεσίας.

Ένα πρόγραμμα παρακολούθησης και ανάλυσης βραχοπτώσεων μπορεί να περιλαμβάνει χρήση επίγειων σαρωτών λέιζερ (LiDAR) και φωτογραφικών μηχανών συνεχόμενης λήψης σταθερού χρόνου για την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των εξωτερικών παραγόντων στις διεργασίες των βραχοπτώσεων (Brideau et al., 2012). Η ανίχνευση και ο προσδιορισμός των περιστατικών βραχοπτώσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω των διαφορών στα ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου (πριν και μετά) και οι χρονικές στιγμές από την καταγραφή των φωτογραφιών. Ο γεωμορφολογικός χαρακτηρισμός κάθε τοποθεσίας όπου βασίζεται σε ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου υψηλής ανάλυσης θα μπορεί να παρέχει στοιχεία σχετικά με συγκεκριμένους τύπους αστοχίας πρανών και σχετιζόμενων διεργασιών διάβρωσης (Leith et al., 2010). Στο σύστημα που περιγράφεται παραπάνω, όπου το χρονικό πλαίσιο του πειράματος είχε διάρκεια 2 έτη, έγινε χρήση φωτογραφικών μηχανών Canon EOS 1000D (λόγω της δυνατότητας απομακρυσμένης χρήσης, χειροκίνητης εστίασης και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Η λήψη δεδομένων μέσω των σαρωτών LiDAR πραγματοποιούταν κάθε τέσσερις μήνες και το σύστημα υποστηριζόταν από ηλιακή ενέργεια με την εγκατάσταση μικρών ηλιακών πάνελ με μπαταρίες μολύβδου όπου παρείχαν σταθερή ενέργεια σε κάθε εγκατάσταση. Για την προστασία από την υγρασία και την διαφορά θερμοκρασίας καθώς και για τις ανάγκες συντήρησης του, το σύστημα ήταν στεγασμένο σε ένα σφραγισμένο - προστατευμένο χώρο.

Μια διαφορετική μέθοδος αναφέρει την χρήση μονάδων LiDAR προσαρτημένων σε κινούμενο όχημα ως εναλλακτικό τρόπο καταγραφής δεδομένων αποφεύγοντας την έκθεση των ερευνητών και του εξοπλισμού σε εν δυνάμει κίνδυνο λόγω των βραχοπτώσεων και την παρακώλυση της κυκλοφορίας των διερχόμενων οχημάτων (Lato et al., 2009). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη προέρχονται από τρεις διαφορετικές πηγές: εναέρια, κινούμενο επίγειο όχημα

(TITAN) και υψηλής ανάλυσης στατικό εξοπλισμό Leica HDS 6000. Παρά τις απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, προηγμένη τεχνολογία και εργαλεία επεξεργασίας των δεδομένων κατά την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων, εντοπίστηκαν αρκετά πλεονεκτήματα στην χρήση των LiDAR. Τα στατιστικά μοντέλα μπορούν να υπολογίσουν την ζώνη μέσα στην οποία θα κινηθεί το βραχοτεμάχιο καθώς και τις τελικές θέσεις. Τα παραδοσιακά δυσδιάστατα μοντέλα είναι περιοριστικά και μπορούν να αποδώσουν ένα μόνο προφίλ κίνησης του βραχοτεμαχίου. Τα τρισδιάστατα μοντέλα επιτρέπουν άμεση αλληλεπίδραση της πτώσης του βραχοτεμαχίου με τις λεπτομέρειες της τοπογραφίας του πρανούς (Lan et al. 2010). Οι χάρτες ορατότητας επιτρέπουν τον υπολογισμό της απόστασης από μια γνωστή τοποθεσία, καθώς η πιθανή ορατότητα σχετίζεται με την τοπογραφία. Η ποιότητα των τοπογραφικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση επηρεάζει άμεσα το τελικό αποτέλεσμα. Μέσω του υπολογισμού της ορατότητας μπορούν να υπολογιστούν οι αποστάσεις κύλισης - μετακίνησης των βραχοτεμαχίων. Καθώς αναπτύσσονται οι ροές εργασιών που ενσωματώνουν την χρήση συστημάτων LiDAR, είναι σημαντικό ότι θα αναπτυχθεί επίσης και η αυτοματοποίηση στην εξαγωγή χαρακτηριστικών. Δεδομένου ότι το κόστος στην συλλογή δεδομένων LiDAR μειώνεται, τα συστήματα προσδιορισμού θέσης είναι πιο ακριβή και τα εργαλεία επεξεργασίας των δεδομένων πιο εύκολα στη χρήση, η ενσωμάτωση των κινητών επίγειων σαρωτών LiDAR σε τρένα μπορεί να είναι μέρος ενός ενεργού συστήματος εκτέλεσης εργασιών. Εφόσον τα τρένα μπορούν να εξοπλιστούν με σαρωτές LiDAR, διαφορεικά μοντέλα πραγματικού χρόνου μπορούν να δημιουργηθούν καθώς τα τρένα κινούνται στην σιδηροδρομική γραμμή. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να δημιουργηθεί ένας χάρτης επικινδυνότητας πραγματικού χρόνου ανιχνεύοντας περιοχές όπου υπήρξαν περιστατικά βραχοπτώσεων και μετακινήσεις βραχοτεμαχίων. Η λειτουργία του συστήματος επιτυγχάνεται μέσω της συγχώνευσης δεδομένων, εξαγωγής χαρακτηριστικών γνωρισμάτων, διαφορικής παρακολούθησης, ανάλυσης βραχοπτώσεων και ορατότητας.

Για τον κατάλληλο σχεδιασμό μέτρων προστασίας από τις βραχοπτώσεις είναι απαραίτητη η χαρτογράφηση των ζωνών διαφυγής των βραχοτεμαχίων. Η χαρτογράφηση συνήθως περιλαμβάνει στατιστικούς υπολογισμούς μέσω

προγραμμάτων προσομοίωσης π.χ. RockFall - Statistical Analysis of Rockfalls, RocScience. Μέσω του προγράμματος RockFall μπορεί να προσδιοριστεί η ενέργεια, η ταχύτητα, ο αριθμός βραχοτεμαχίων, το ύψος αναπήδησης για ολόκληρο το πρηνές καθώς και η ζώνη διαφυγής. επίσης μπορεί να βοηθήσει στην εκτίμηση κινδύνου με την χρήση μέτρων μετριασμού του κινδύνου. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί το Ψηφιακό Μοντέλο αναγλύφου της περιοχής μελέτης για να προσομοιώσει το πρηνές.

Τα ολοκληρωμένα συστήματα παρακολούθησης και ανίχνευσης βραχοπτώσεων περιλαμβάνουν συνδυασμούς διαφόρων μεθόδων που κυρίως αφορούν στην αναγνώριση ασταθών περιοχών για την αξιολόγηση ευστάθειας πρηνούς για μετέπειτα επεξεργασία με συστήματα προσομοίωσης βραχοπτώσεων. Για την περιγραφή του γεωλογικού υποβάθρου συνήθως γίνεται δειγματοληψία και εργαστηριακή ανάλυση για την ταυτοποίηση των γεωλογικών σχηματισμών και μηχανισμών που σχετίζονται με τις ζώνες αστάθειας όπου παρατηρούνται οι βραχοπτώσεις. Επίσης αναφέρεται στην βιβλιογραφία επεξεργασία δορυφορικών εικόνων υψηλής χωρικής ανάλυσης για την χαρτογράφηση των ζωνών αστάθειας και χρήση ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου (Yousseff et al., 2014).

Όσον αφορά τη μοντελοποίηση των βραχοπτώσεων υπάρχουν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις για την εκτίμηση κινδύνου: Τα εμπειρικά ή αλλιώς στατιστικά μοντέλα που βασίζονται σε τοπογραφικούς παράγοντες για την πρόβλεψη της ζώνης διαφυγής. Τα υπολογιστικά μοντέλα που στηρίζονται στην επεξεργασία ή προσομοίωση της κίνησης της πτώσης των βραχοτεμαχίων για την καταγραφή της ταχύτητας και των διάφορων τύπων της κίνησης (ελεύθερη πτώση, κύλιση). Τέλος, υπάρχουν τα μοντέλα που βασίζονται σε Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών στα οποία υπάρχουν διάφορα επίπεδα πληροφορίας για την περιοχή (σκληρότητα εδάφους, βλάστηση, γεωλογία, ύψος στάθμης της θάλασσας κτλ) (Dorren, 2003).

2.4. Μεθοδολογία επεξεργασίας εικόνας

Η μεθοδολογία της επεξεργασίας των εικόνων που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια τα οποία εφαρμόστηκαν ξεχωριστά δύο φορές για την κατασκευή δύο ψηφιακών μοντέλων εδάφους μια πριν την μετατόπιση των βραχοτεμαχίων και μια μετά (Διάγραμμα 2-2). Αναλυτική περιγραφή των παραμέτρων επεξεργασίας και των αποτελεσμάτων γίνεται στο τέταρτο κεφάλαιο:

1. Λήψη των εικόνων με προκαθορισμένες ρυθμίσεις και αποθήκευση τους με συγκεκριμένο τύπο αρχείου.
2. Ακολουθεί η εισαγωγή των εικόνων στο περιβάλλον επεξεργασίας και εκτίμηση της ποιότητας τους. Εφόσον πληρούν τις προϋποθέσεις τότε συμπεριλαμβάνονται στην επεξεργασία.
3. Με την χρήση των εδαφικών σημείων ελέγχου που έχουν συλλεχθεί από τον ολικό γεωδαιτικό σταθμό γίνεται η γεωαναφορά των εικόνων στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων μέσω του προσανατολισμού τους και στη συνέχεια δημιουργείται ένα αραιό νέφος σημείων.
4. Στη συνέχεια γίνεται η κατασκευή πυκνού νέφους σημείων, πλέγματος και υφής. Το πυκνό νέφος σημείων που έχει κατασκευαστεί μπορεί να γίνει εξαγωγή είτε με τη μορφή DEM είτε ως XYZ.
5. Από τα δύο ψηφιακά μοντέλα εδάφους (πριν και μετά) μέσω αριθμητικών υπολογισμών σε περιβάλλον MATLAB μπορούν να ανιχνευτούν οι πιθανές μετατοπίσεις των βραχοτεμαχίων.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθοδολογίας αφορούν:

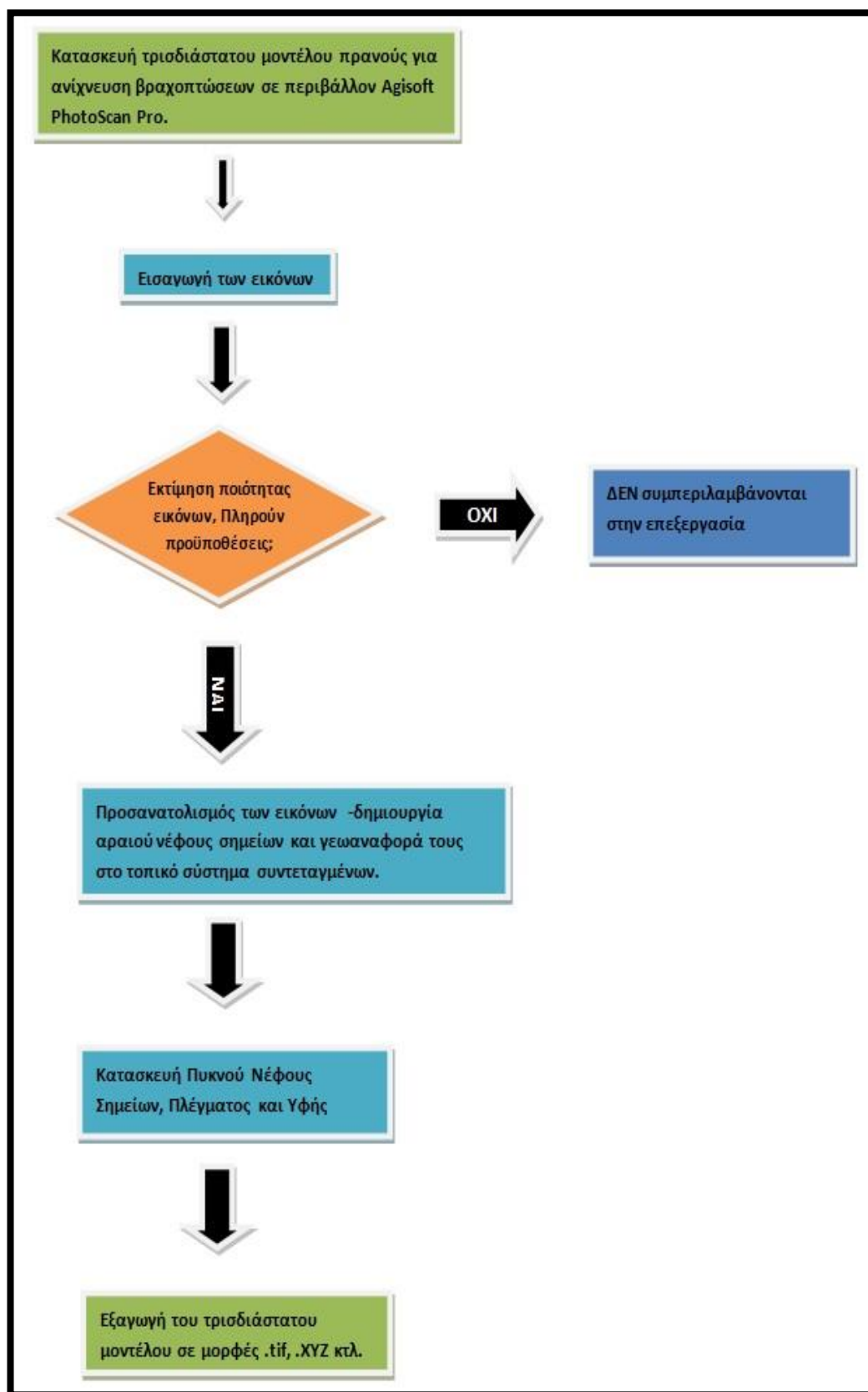
- ☐ Γρήγορη λήψη, επεξεργασία των δεδομένων και χαμηλό κόστος εξοπλισμού,
- ☐ Κατασκευή τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου πρσανούς μελέτης και δυνατότητα χρήσης του για περαιτέρω επεξεργασία σε λογισμικά όπως Rockfall Analyst (ArcGIS),

- ❑ Προσαρμοσμένη επεξεργασία ανάλογα με τον τύπο των εικόνων και την απαιτούμενη ακρίβεια (επίγεια, εναέρια).

Οι περιορισμοί της συγκεκριμένης μεθοδολογίας συνοψίζονται παρακάτω :

- ❑ Δεν υπάρχει δυνατότητα ανίχνευσης ενδιάμεσων σταδίων της βραχόπτωσης παρά μόνο οι τελικές θέσεις,
- ❑ Μετακινήσεις μικρών βραχοτεμαχίων απαιτούν εξοπλισμό μεγαλύτερης ακρίβειας για την καταγραφή τους,
- ❑ Εντοπίζονται αλλαγές οι οποίες δεν αντιστοιχούν σε βραχοπτώσεις (κίνηση βλάστησης κτλ),
- ❑ Λειτουργία μόνο σε συνθήκες ηλιοφάνειας.

Επειδή όμως υπάρχουν και οι περιορισμοί για αυτό το λόγο επιλέχθηκαν και τεχνικές επεξεργασίας βίντεο που ακολουθούν παρακάτω. Σκοπός είναι να υπάρχει ανάδραση μεταξύ των δύο συστημάτων για να εντοπιστούν οι λανθασμένες μετακινήσεις (από φυτά, ζώα κτλ) να μπορέσουν να απομονωθούν και για να εντοπιστούν, χωρικά και χρονικά, με τη μέγιστη ακρίβεια τα περιστατικά των βραχοπτώσεων.



Διάγραμμα 2-1. Διάγραμμα Ροής Επεξεργασίας των Φωτογραφιών.

2.5. Μεθοδολογία Επεξεργασίας Βίντεο

Οι τεχνικές επεξεργασίας βίντεο στηρίζονται σε αλγόριθμους τεχνητής όρασης και συνήθως χρησιμοποιούνται οι παρακάτω:

- ☐ Blob Analysis,
- ☐ Motion-based Object Detection, Estimation (Optical flow, Mixture of Gaussian),
- ☐ Background Subtraction,
- ☐ Feature Tracking, Detection, Extraction (FAST, BRISK, MSER, HOG, FREAK, SURF, Shi & Tomasi, Harris methods),
- ☐ Object Tracking, Detection, Recognition (Kanade-Lucas-Tomasi).

Η καταγραφή των ρίψεων σε βίντεο πραγματοποιείται για να μπορέσουμε να εντοπίσουμε τα σημεία που υπήρξε μετακίνηση καθώς και την τροχιά της πτώσης των βραχοτεμαχίων σε ένα δυσδιάστατο μοντέλο.

Κατά τη διάρκεια των τεχνητών ρίψεων που πραγματοποιήθηκαν η κάμερα παραμένει στατική. Εφόσον η κάμερα είναι στατική μπορεί να γίνει χρήση τεχνικών αφαίρεσης φόντου. Με την εύρεση της μέσης τιμής στα στιγμιότυπα (frames) που δεν υπάρχει μετακίνηση και την χρήση φίλτρων χαμηλών συχνοτήτων μπορεί να ανιχνευθεί το βραχοτεμάχιο που κινείται. Το μοντέλο αυτό θα χρησιμοποιηθεί για να γίνει έλεγχος και σύγκριση των αποτελεσμάτων με το τρισδιάστατο μοντέλο που θα κατασκευαστεί από την επεξεργασία των εικόνων.

Τα πλεονεκτήματα στην ανίχνευση κίνησης μέσω βίντεο είναι τα εξής:

- ☐ Καταγραφή βραχοπτώσεων σε πραγματικό χρόνο, δυνατότητα έγκαιρης ανίχνευσης της εκδήλωσης του φαινομένου για προειδοποίηση,
- ☐ Δυνατότητα καταγραφής της τροχιάς των βραχοτεμαχίων.

Οι περιορισμοί στην μεθοδολογία ανίχνευσης κίνησης μέσω βίντεο είναι οι εξής:

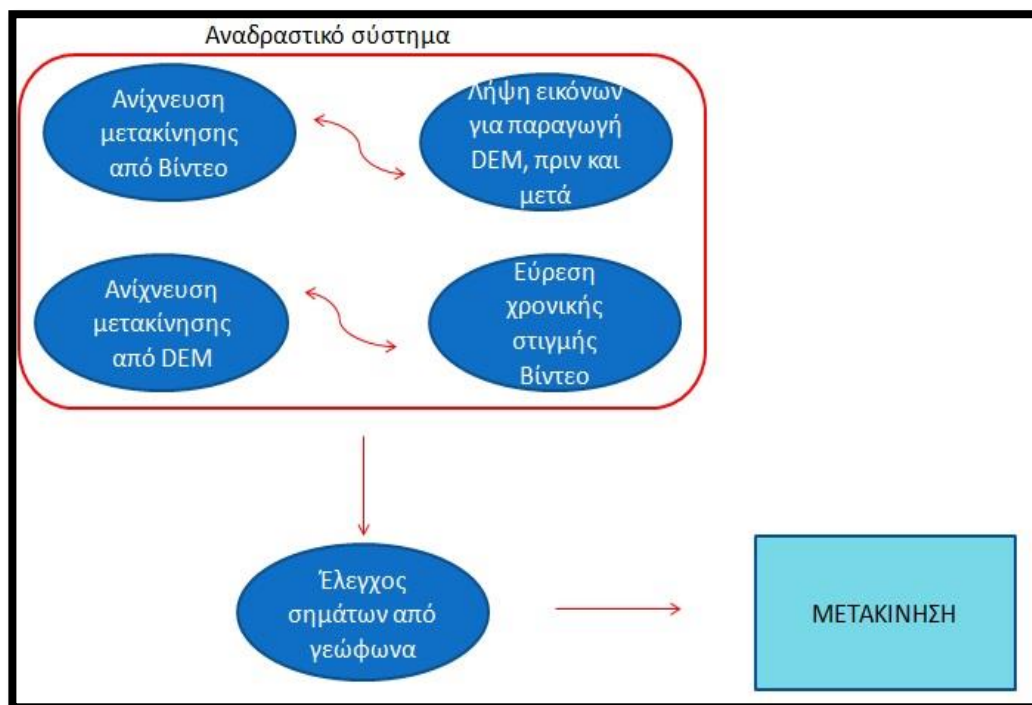
- ☐ Δυσκολία ανίχνευσης βραχοπτώσεων σε μη στατική κάμερα,
- ☐ Ανίχνευση κίνησης που δεν οφείλεται σε βραχύπτωση,

- ❑ Αδυναμία ανίχνευσης σταδιακών αλλαγών,
- ❑ Επιρρεπής σε θόρυβο, βροχή κτλ.

2.6. Μεθοδολογία, Αρχιτεκτονική Συστήματος

Τα στάδια της συνολικής μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε είναι τα εξής:

1. Λήψη και προ-επεξεργασία εικόνων και δεδομένων βίντεο
2. Παραγωγή και επεξεργασία των τρισδιάστατων μοντέλων για τον εντοπισμό των μετακινήσεων λόγω βραχοπτώσεων
3. Επεξεργασία των βίντεο για τον εντοπισμό της τροχιάς των βραχοτεμαχίων
4. Σύζευξη των ψηφιακών μοντέλων εδάφους και των τροχιών πτώσης με δεδομένα γεωφώνων
5. Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων για τον περιορισμό των σφαλμάτων ανίχνευσης (false alarms).



Διάγραμμα 2-2. Αρχιτεκτονική συστήματος καταγραφής βραχοτεμαχίων.

3. Δεδομένα Πειράματος

3.1. Περιοχή Μελέτης

Το Πολυτεχνείο Κρήτης είναι κτισμένο στο Ακρωτήριο Χανίων, 7km βορειοανατολικά της πόλης των Χανίων και εκτείνεται σε έκταση 3000 στρεμμάτων.

Εντός του Πολυτεχνείου Κρήτης επιλέχθηκε ένα πρανές μεταξύ του Κτιρίου Κ1 ΜΗΠΕΡ και του χώρου στάθμευσης του κτιρίου Επιστημών /ΗΜΜΥ και προκλήθηκαν τεχνητές πτώσεις με διάφορα μεγέθη βράχων. Ο λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο σημείο είναι επειδή το φυσικό έδαφος παρουσιάζει επιφανειακούς θύλακες χώματος με ταυτόχρονη όμως παρουσία βραχωδών εξάρσεων (Agioutantis et al., 2014).



Εικόνα 3-1. Περιοχή Μελέτης, δημιουργήθηκε σε περιβάλλον ArcMap, ESRI.



Εικόνα 3-2. Εικόνα από το πρανές της περιοχής μελέτης βραχοπτώσεων.



Εικόνα 3-3. Εικόνα κοντινή από το πρανές της περιοχής μελέτης βραχοπτώσεων.

3.2. Εξοπλισμός Πειράματος

➤ Φωτογραφική Μηχανή

Επιλέχθηκε το μοντέλο CANON DSLR EOS 600D με εστιακό φακό 18-55mm. Η συγκεκριμένη ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, μονού φακού, είναι υψηλής απόδοσης διαθέτει έναν αισθητήρα CMOS που παρέχει εξαιρετική λεπτομέρεια με περίπου 18.0 ενεργά megarixels, υψηλής ακρίβειας και υψηλής ταχύτητας αυτόματη εστίαση 9 σημείων, περίπου 3,7 fps (frames per second) συνεχούς λήψης, Live View shooting και Full HD λήψη βίντεο. Η ποιότητα του φακού, η δυνατότητα συνεχούς λήψης καθώς και η υψηλή ανάλυση στην καταγραφή βίντεο ήταν από τους λόγους που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη μηχανή.

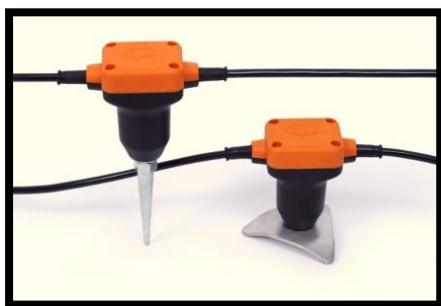
Έγινε χρήση 2 ίδιων μηχανών προσαρτημένες σε τρίποδα για σταθερή λήψη των εικόνων και των βίντεο.



Εικόνα 3-4. Αριστερά Σώμα Φωτογραφικής Μηχανής Canon EOS 600D, δεξιά το τρίποδο που χρησιμοποιήθηκε.

➤ Γεώφωνο

Το γεώφωνο είναι μια συσκευή η οποία μετατρέπει τις κινήσεις του εδάφους σε τάση, η οποία καταγράφεται σε ένα σταθμό καταγραφής. Η απόκλιση αυτής της καταγεγραμμένης τάσης από την baseline καλείται σεισμική απόκριση και αναλύεται από την δομή της γης.



Εικόνα 3-5. Γεώφωνο. Πηγή: <http://splay.pl/wp-content/uploads/2014/03/Geophone-Case-Compatible-to-Sercel-Bg4.jpg>

➤ Γεωδαιτικός Σταθμός και Κάτοπτρο (πρίσμα)

Για τον προσδιορισμό και την καταγραφή των x , y , z συντεταγμένων των σημείων που τοποθετήθηκαν οι κωδικοποιημένοι στόχοι έγινε χρήση ολικού γεωδαιτικού σταθμού της εταιρίας Topcon.



Εικόνα 3-6. Ολικός Γεωδαιτικός σταθμός και πρίσμα. Πηγή: www.nasurvey.com

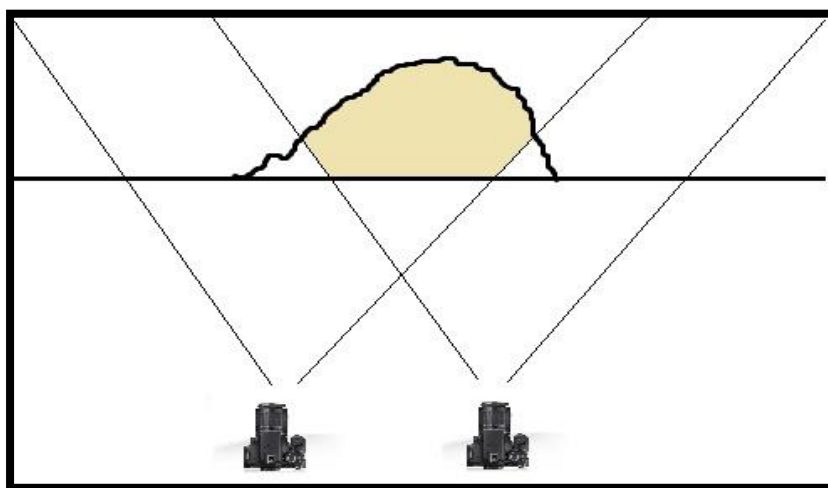
➤ Στόχοι (Agisoft) Coded targets

Κωδικοποιημένοι στόχοι αυτόματα αναγνωρίσιμοι παρέχονται από το λογισμικό Agisoft όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημεία αναγνώρισης του τοπικού συστήματος συντεταγμένων καθώς και της κλίμακας του μοντέλου, στην βελτιστοποίηση της διαδικασίας προσανατολισμού των εικόνων.

3.3. Σχεδιασμός Πειράματος - Συλλογή Δεδομένων



Η Τοποθέτηση και ρύθμιση των παραμέτρων των φωτογραφικών μηχανών.

Στην εικόνα 3-7 παρουσιάζεται το σύστημα συλλογής των δεδομένων της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε. Με την χρήση των δύο φωτογραφικών μηχανών λαμβάνονται εικόνες ταυτόχρονα και σύμφωνα με την θεωρία της στερεοσκοπικής όρασης μπορεί να γίνει συγχώνευση τους για την παραγωγή τρισδιάστατου αποτελέσματος (Partsinavelos et al., 2014). Σε επόμενο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στον τρόπο ελέγχου ποιότητας της εικόνας.



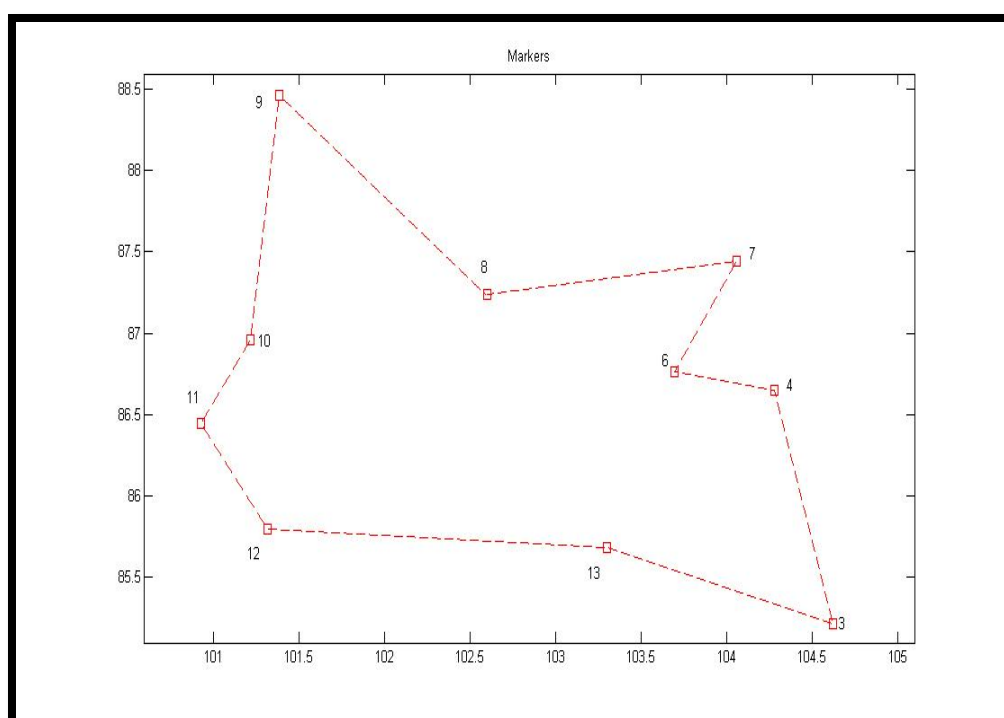
Εικόνα 3-7. Το σύστημα συλλογής δεδομένων της συγκεκριμένης μεθοδολογίας.

Παρακάτω δίνονται οι χειροκίνητες ρυθμίσεις που έγιναν στις φωτογραφικές μηχανές καθώς και οι πληροφορίες της μορφής αποθήκευσής τους. Αρχικά επιλέχθηκε χειροκίνητη εστίαση (MF, manual focusing) για να διατηρηθεί το ίδιο focal length σε όλες τις φωτογραφίες.

Επιλέχθηκε η καλύτερη δυνατή ποιότητα των φωτογραφιών (Raw Image and Higher Quality) με δύο τρόπους αποθήκευσης ως .cr2 (raw image)   και .JPG. Η ταχύτητα κλείστρου (shutter speed) ορίστηκε στο 1/125 και το διάφραγμα F5,6 (aperture). Σε καμία λήψη δεν έγινε χρήση flash.

Συντεταγμένες των στόχων μέσω του Γεωδαιτικού Σταθμού

Εφαρμόστηκε ένα τοπικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων της περιοχής μελέτης, μέσω των μετρήσεων του ολικού γεωδαιτικού σταθμού (total station) για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν σύστημα συντεταγμένων αναφοράς για όλες τις ρήψεις του πειράματος των βραχοπτώσεων.



Διάγραμμα 3-1. Η κατανομή των σημείων ελέγχου (markers) στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων μας. Το γράφημα δημιουργήθηκε σε περιβάλλον Matlab.

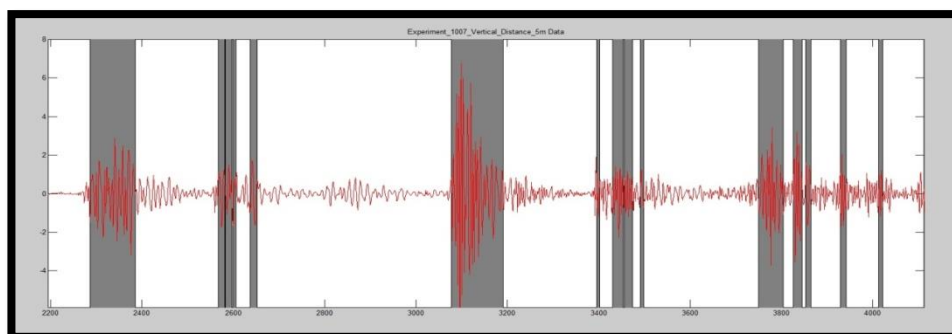
Πίνακας 3-1. Πίνακας με τα XYZ από Total Station.

	X	Y	Z	
3	101,384	88,461	100,589	marker
4	101,213	86,961	101,387	marker
6	100,925	86,442	101,846	marker
7	101,312	85,795	102,518	marker
8	103,299	85,679	102,606	marker
9	104,616	85,216	102,959	marker
10	104,278	86,649	101,966	marker
11	103,693	86,764	101,635	marker
12	104,055	87,440	100,999	marker
13	102,600	87,240	101,196	marker

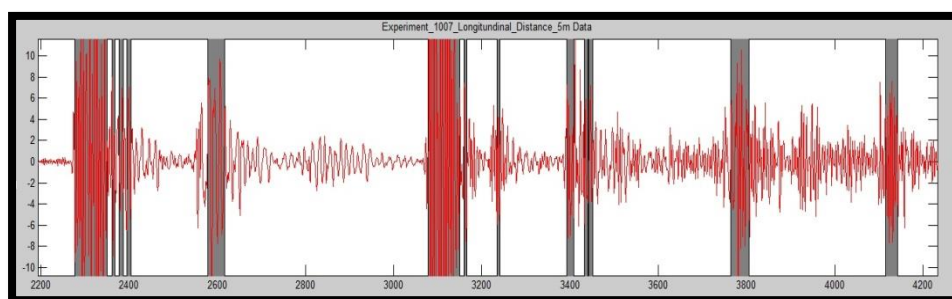
Καταγραφή δεδομένων από τα Γεώφωνα

Η έναρξη της καταγραφής των δεδομένων από τα γεώφωνα πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονα με την έναρξη λήψης των βίντεο. Ο λόγος που έγινε χρήση των γεωφώνων ήταν για να εντοπιστεί η αντιστοιχία του σήματος που καταγράφηκε από τα γεώφωνα κατά τη διάρκεια των ρίψεων σε σχέση με τις θέσεις των μετακινήσεων που καταγράφηκαν από τα βίντεο. Η τοποθέτηση των γεωφώνων έγινε σε συγκεκριμένες θέσεις στα 1, 5, 10, 15 μέτρα κατά μήκος του πρανούς.

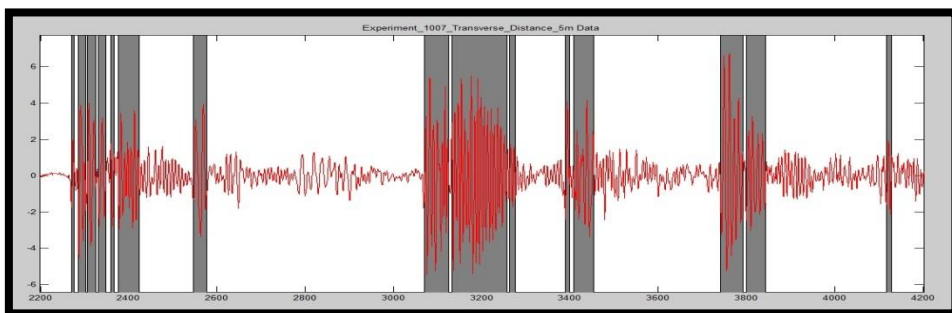
Έγινε ανάλυση των δεδομένων ώστε να ανακτηθούν τα κύματα που κατεγράφησαν στους άξονες x,y,z (εγκάρσια, διαμήκη και κατακόρυφα). Η καταγραφή των σημάτων για μια από πειραματικές ρίψεις φαίνεται στις εικόνες 3-8, 3-9, 3-10.



Εικόνα 3-8. Κατακόρυφη καταγραφή του σήματος από τα γεώφωνα στη θέση 5m.



Εικόνα 3-9. Διαμήκη καταγραφή σήματος από τα γεώφωνα στη θέση 5m.



Εικόνα 3-10. Εγκάρσια καταγραφή σήματος από τα γεώφωνα στη θέση 5m.

4. Επεξεργασία των Δεδομένων Εικόνων και Θεωρία

4.1. Λογισμικά Επεξεργασίας

Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη είναι τα: Agisoft Photoscan Pro, ArcGIS και Matlab.

Το Agisoft PhotoScan Pro και αποτελεί μια προηγμένη λύση ανακατασκευής τρισδιάστατων μοντέλων, η οποία έχει ως βάση την χρήση εικόνων, με στόχο την δημιουργία τρισδιάστατου περιεχομένου από λήψεις φωτογραφιών (Agisoft, 2014). Τόσο ο προσανατολισμός των εικόνων (alignment) όσο και η ανακατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου είναι μια διαδικασία πλήρως αυτοματοποιημένη.

Το ArcGIS είναι ένα λογισμικό γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS) που αναπτύχθηκε από την ESRI και περιλαμβάνει εργαλεία για την συλλογή, διαχείριση, επεξεργασία, ανάλυση, μοντελοποίηση και απεικόνιση δεδομένων που αναφέρονται στο χώρο και μεταβάλλονται στο χρόνο.

Το Matlab (Matrix Laboratory) είναι ένα λογισμικό αριθμητικών υπολογισμών και οπτικοποίησης αποτελεσμάτων. Βασικό στοιχείο αποτελούν οι πίνακες (μια εικόνα μπορεί να θεωρηθεί πίνακας τιμών), καθώς και η δυνατότητα προγραμματισμού και ανάπτυξης αλγορίθμων για διάφορες εφαρμογές.

4.2. Επεξεργασία Δεδομένων Εικόνων

Η ανακατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου έγινε για: δύο εικόνες αρχικές (πριν την βραχύπτωση), δύο εικόνες τελικές μετά τη βραχύπτωση. Παρακάτω θα γίνει μια αναλυτική περιγραφή του θεωρητικού υποβάθρου του λογισμικού Agisoft Photoscan Pro στο βαθμό που αυτό είναι δυνατό καθώς δεν υπάρχουν επακριβείς πληροφορίες για τους βελτιστοποιημένους αλγόριθμους που χρησιμοποιεί παρά μόνο μια γενικότερη βάση της θεωρίας στην οποία έχουν στηριχθεί.

Η ανάλυση των εικόνων εξαρτάται από την ποιότητα της φωτογραφικής μηχανής, των λήψεων και της γεωμετρίας τους. Σε αυτό το στάδιο για τις εικόνες καθορίζεται το μοντέλο για την βαθμονόμηση τους (εξαρτάται από τις ιδιότητες της φωτογραφικής μηχανής), επιτρέποντας σημαντική εξοικονόμηση στο χρόνο επεξεργασίας. Αυτό αποτελείται από το εστιακό μήκος x , y διαστάσεων pixel, συντεταγμένες των κύριων σημείων, ακτινική και εφαπτομενική παραμόρφωση του φακού και συνιστώσες μετασχηματισμών παραμορφώσεων.

Όσον αφορά τον εσωτερικό προσανατολισμό, συνήθως σε περιπτώσεις χρήσης φακού εστιακού μήκους 50mm, δεν χρειάζεται να γίνει εκ των προτέρων βαθμονόμηση της φωτογραφικής μηχανής το οποίο αποτελεί σημαντική εξοικονόμηση στο χρόνο της επεξεργασίας καθώς το ίδιο το λογισμικό θα υπολογίσει αυτόματα τους συντελεστές βαθμονόμησης εφαρμόζοντας το μοντέλο του Brown (Brown, 1966).

Όσον αφορά τον εξωτερικό προσανατολισμό οι έξι παράμετροι (x, y, z του προβολικού κέντρου της κάμερας σε πραγματικές συντεταγμένες, καθώς και οι γωνίες λήψεως της κάμερας) μπορούν να ανατεθούν σε κάθε εικόνα από το χρήστη σε αυτό το σημείο. Το λογισμικό έχει τη δυνατότητα εύρεσης κοινών σημείων μεταξύ των εικόνων αυτοματοποιημένα. Όμως για να αυξηθεί η γεωμετρική ακρίβεια μιας εικόνας και να επιτραπεί ακριβής προσδιορισμός των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού, βελτιώνοντας έτσι την ακρίβεια της γεωαναφοράς στα τελικά αποτελέσματα, είναι απαραίτητη η λήψη σημείων εδαφικού ελέγχου (GCP's). Στην παρούσα μελέτη οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού καθορίστηκαν μέσω 10 σημείων εδαφικού ελέγχου (GCP's).

4.2.1. Εισαγωγή και εκτίμηση ποιότητας

Κακής ποιότητας δεδομένα πχ. θολές φωτογραφίες εκτός εστίασης, φωτογραφίες με θόρυβο κτλ. μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τον προσανατολισμό των εικόνων καθώς και όλη την μετέπειτα επεξεργασία των εικόνων καθώς και να υποβαθμίσουν το τελικό αποτέλεσμα. Πριν ξεκινήσει η επεξεργασία διενεργήθηκε έλεγχος για την εκτίμηση της ποιότητας των εικόνων.

Το λογισμικό παρέχει την δυνατότητα δημιουργίας μάσκας στα δεδομένα που δεν πρέπει να συμπεριληφθούν στην επεξεργασία.

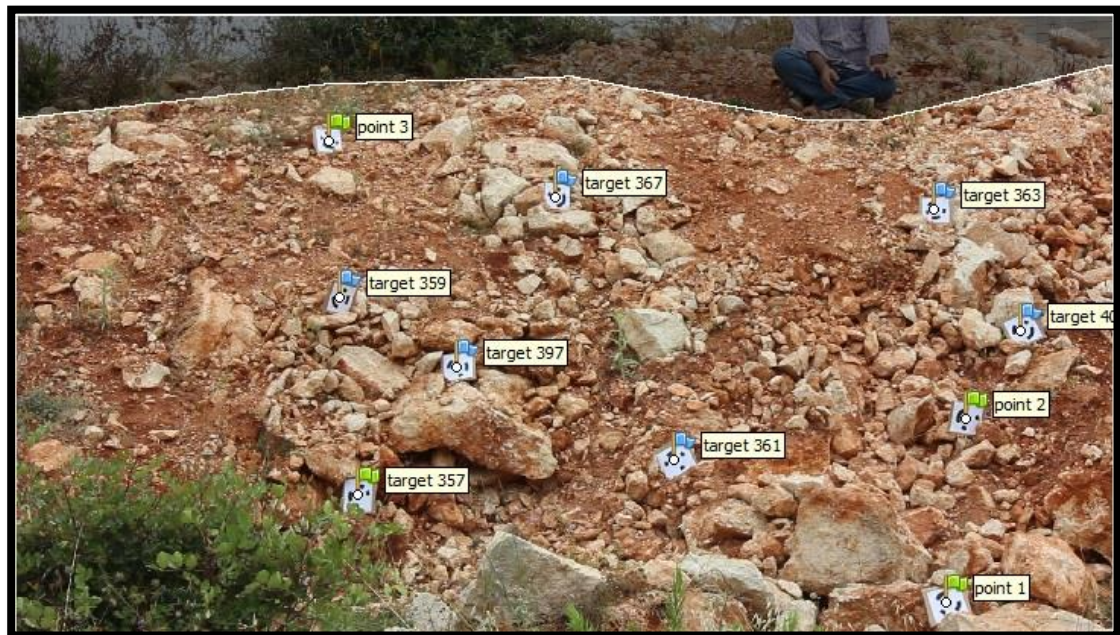


Εικόνα 4-1. Λήψη από camera 1, πριν την έναρξη των ρίψεων.



Εικόνα 4-2. Επιλογή Mask για Camera 1 και Camera 2.

Οι στόχοι (markers), που αποτελούν τα 10 σημεία εδαφικού ελέγχου στην παρούσα μελέτη, αναγνωρίζονται αυτόματα μέσω των αλγορίθμων του λογισμικού εφόσον πληρούν τις προδιαγραφές (μέγεθος στόχου, απόσταση από φακό κτλ). Με αυτόν τον τρόπο δεν χρειάζεται να γίνει χειροκίνητα η εισαγωγή τους και το αρχείο αυτό μπορεί να αποθηκευτεί για μετέπειτα χρήση του στα επόμενα ζεύγη εικόνων προς επεξεργασία.



Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> point 1	101.384000	88.461000	100.589000	0.171928	2	0.197
<input checked="" type="checkbox"/> point 2	101.213000	86.961000	101.387000	0.029640	2	0.051
<input checked="" type="checkbox"/> point 3	104.616000	85.216000	102.959000	0.156167	2	0.272
<input checked="" type="checkbox"/> target 357	104.055000	87.440000	100.999000	0.059294	2	0.016
<input checked="" type="checkbox"/> target 359	104.278000	86.649000	101.966000	0.025987	2	0.072
<input checked="" type="checkbox"/> target 361	102.600000	87.240000	101.196000	0.041426	2	0.048
<input checked="" type="checkbox"/> target 363	101.312000	85.795000	102.518000	0.086050	2	0.105
<input checked="" type="checkbox"/> target 367	103.299000	85.679000	102.606000	0.015001	2	0.126
<input checked="" type="checkbox"/> target 397	103.693000	86.764000	101.635000	0.047293	2	0.149
<input checked="" type="checkbox"/> target 407	100.925000	86.442000	101.846000	0.076908	2	0.083
Total Error				0.087472		0.134

Εικόνα 4-3. Το αποτέλεσμα εφαρμογής των markers, mask.

4.2.2. Εύρεση κοινών σημείων

Στη συνέχεια, μέσω των αλγορίθμων του λογισμικού ανιχνεύονται σημεία στις εικόνες, τα οποία είναι σταθερά όσον αφορά διακυμάνσεις της οπτικής γωνίας και του φωτισμού, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένας περιγραφέας (description) για κάθε σημείο βασιζόμενος σε συναρτήσεις γειτονίας (local neighborhood).

Αυτοί οι περιγραφείς χρησιμοποιούνται μετέπειτα για να ανιχνεύσουν αντιστοιχίες μεταξύ των φωτογραφιών. Αυτό είναι παρόμοιο με την γνωστή προσέγγιση SIFT αλλά χρησιμοποιεί διαφορετικούς αλγόριθμους για να επιτευχθεί υψηλότερη ποιότητα προσανατολισμού και ευθυγράμμισης των εικόνων.

Ο αλγόριθμος SIFT (Scale - Invariant Feature Transform) αναπτύχθηκε το 2004 από τον David G. Lowe, στο εργαστήριο του Πανεπιστημίου British Columbia στο Βανκούβερ του Καναδά (Lowe, 2004) και χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό και την περιγραφή των τοπικών χαρακτηριστικών σε μια εικόνα. Βασίζεται σε μια μεθοδολογία εξαγωγής διανυσμάτων περιγραφής από τις εικόνες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιόπιστη ταύτιση ενός αντικειμένου ή μιας περιοχής από εικόνες διαφορετικών λήψεων. Ο αλγόριθμος αυτός ακολουθεί 4 βασικά βήματα υπολογισμών για να δημιουργηθούν οι τάξεις των χαρακτηριστικών των εικόνων :

- Ανίχνευση ακρότατων στο χώρο κλιμάκωσης (Scale- space Extrema Detection)
- Εντοπισμός σημείων ενδιαφέροντος (Keypoint Localization)
- Ανάθεση Προσανατολισμού (Orientation assignment)
- Περιγραφέας σημείων ενδιαφέροντος (Keypoint Descriptor)

Για την συνταύτιση εικόνων και αναγνώριση, ο αλγόριθμος SIFT εντοπίζει και εξαγεί τα σημεία τοπικών χαρακτηριστικών από μια σειρά εικόνων αναφοράς και τα αποθηκεύει σε μια βάση δεδομένων ως διανύσματα με περιγραφικές ιδιότητες (θέση, κλίμακα, προσανατολισμό).

Μια νέα εικόνα ταυτοποιείται με μεμονωμένη σύγκριση των εκάστοτε χαρακτηριστικών της, βάσει των δεδομένων που έχουν αποθηκευτεί στη προηγούμενη βάση δεδομένων και βρίσκει υποψήφια κοινά χαρακτηριστικά σημεία βασιζόμενα στην Ευκλείδεια απόσταση των περιγραφικών διανυσμάτων τους. Η μελέτη του David G. Lowe συστήνει ταχύτατους αλγόριθμους επεξεργασίας κοντινότερου γείτονα (nearest neighborhood) ώστε να επιτευχθεί γρήγορη υλοποίηση των υπολογισμών σε μεγάλες βάσεις δεδομένων.

Ο περιγραφέας είναι ένα διάνυσμα, το μέτρο και η διεύθυνση του οποίου υπολογίζονται από πληροφορίες της γειτονιάς του εκάστοτε σημείου ενδιαφέροντος. Επιτρέπει σε ένα μοναδικό χαρακτηριστικό να αντιστοιχηθεί σωστά σε μια μεγάλη βάση χαρακτηριστικών με μεγάλο βαθμό πιθανότητας. Παρόλα αυτά σε μια εικόνα με θόρυβο, πολλά χαρακτηριστικά του υποβάθρου δεν θα αντιστοιχηθούν σωστά με την βάση δεδομένων. Οι σωστές ταυτοποιήσεις μπορούν να φιλτραριστούν μέσω αναγνώρισης υποσυνόλων των σημείων- ενδιαφέροντος που συμφωνούν στο αντικείμενο, στη θέση, κλίμακα, και προσανατολισμό της καινούργιας εικόνας. Η πιθανότητα ότι πολλά χαρακτηριστικά θα συμφωνούν τυχαία με τις ζητούμενες παραμέτρους είναι πολύ μικρότερη από την πιθανότητα κάθε μεμονωμένου χαρακτηριστικού να έχει ταυτοποιηθεί λάθος.

Ανίχνευση ακρότατων στο χώρο κλίμακας

Γίνεται εύρεση σημείων-κλειδιών χρησιμοποιώντας μια μέθοδο φίλτρων αποδοτικών αλγορίθμων στην αναγνώριση υποψήφιων θέσεων οι οποίες μετά εξετάζονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Το πρώτο στάδιο στην ανίχνευση σημείων κλειδιών αφορά στην αναγνώριση θέσεων και κλιμάκων όπου μπορούν να ταυτιστούν επανειλημμένα κάτω από διαφορετικές γωνίες λήψης του ίδιου αντικειμένου. Η ανεύρεση θέσεων οι οποίες δεν επηρεάζονται από την αλλαγή κλίμακας της εικόνας μπορεί να επιτευχθεί με την ανίχνευση σταθερών χαρακτηριστικών σε όλα τα πιθανά επίπεδα κλίμακας και παράγεται από την συνέλιξη ενός φίλτρου του Gauss με την εικόνα εισόδου.

Εντοπισμός σημείων-κλειδιών

Από την στιγμή που έχει βρεθεί ένα υποψήφιο σημείο-κλειδί, το επόμενο βήμα είναι η εκτέλεση μιας λεπτομερούς προσαρμογής του για την θέση, κλίμακα και τον λόγο καμπυλότητας. Αυτές οι πληροφορίες επιτρέπουν σε σημεία που έχουν χαμηλή αντίθεση ή είναι κακώς εντοπισμένα κατά μήκος ακμών να απορριφθούν. Για τον εντοπισμό της ακριβούς θέσης γίνεται χρήση της μεθόδου παρεμβολής. Το 2002 από τους Brown M. και Lowe D.G. αναπτύχθηκε μία μέθοδος τρισδιάστατης δευτεροβάθμιας συνάρτησης για τον καθορισμό της παρεμβαλλόμενης περιοχής του μεγίστου το οποίο συνέβαλε σημαντικά στην βελτίωση στο ταίριασμα στα τοπικά σημεία καθώς και στην ευστάθεια. Σε αυτή τη βελτίωση γίνεται χρήση του αναπτύγματος Taylor της συνάρτησης διαφοράς του Gauss και στη συνέχεια ακολουθεί απαλοιφή ακρότατων που βρίσκονται πάνω σε ακμές.

Ανάθεση του Προσανατολισμού

Η απόδοση του προσανατολισμού στο σημείο- κλειδί και η περιγραφική ιδιότητα διανύσματος υλοποιείται με τους υπολογισμούς της κλίμακας, του μέτρου και γωνίας κλίσης και με την εφαρμογή ενός Gaussian παραθύρου τυπικής απόκλισης στα βάρη. Τέλος εφαρμόζεται παρεμβολή ιστογράμματος.

Περιγραφή σημείων κλειδιών

Στο βήμα αυτό κάθε σημείο- κλειδί περιγράφεται από ένα διάνυσμα που περιλαμβάνει την θέση, προσανατολισμό και κλίμακά του. Αυτό περιλαμβάνει τον υπολογισμό του μεγέθους κλίμακας και προσανατολισμού για κάθε εικονοστοιχείο γειτονικό του σημείου κλειδιού και στις τιμές αυτές εφαρμόζεται παράθυρο του Gauss. Στη συνέχεια κατασκευάζεται ένα ιστόγραμμα με τους προσανατολισμούς και αυτό αποτελεί και τις περιγραφικές ιδιότητες του διανύσματος.

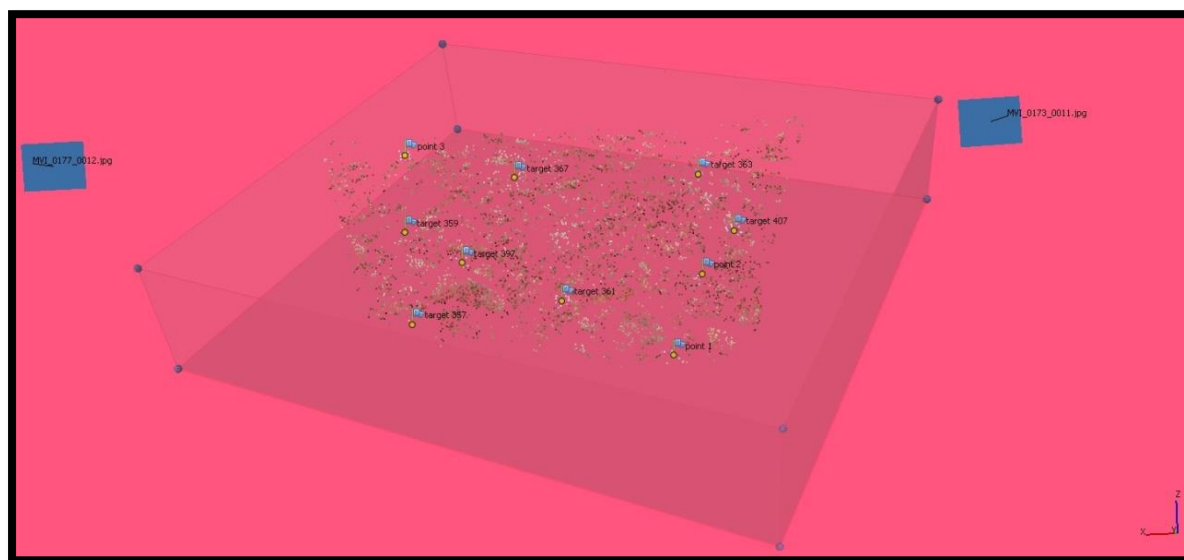
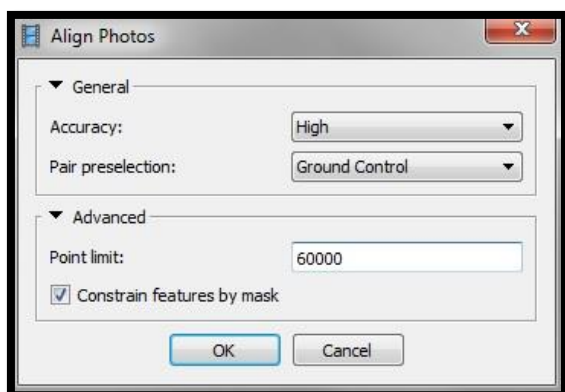
4.2.2.1. Υπολογισμός παραμέτρων προσανατολισμού της κάμερας

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού της κάμερας χρησιμοποιείται ο άπληστος αλγόριθμος (greedy) όπου βρίσκει κατά προσέγγιση την θέση της κάμερας και την βελτιώνει αργότερα χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία bundle-adjustment. Ο άπληστος αλγόριθμος κατασκευάζει μια λύση τμηματικά επιλέγοντας πάντοτε το επόμενο τμήμα το οποίο προσφέρει το πιο προφανές και άμεσο όφελος (Μιχαήλ, 2009). Ο αλγόριθμος bundle-adjustment αφορά στην πολύ-εικονική συνόρθωση δέσμης με αυτοβαθμονόμιση και αποτελεί μια μέθοδο αεροτριγωνισμού με την χρήση εξισώσεων συγγραμικότητας.

Η συνόρθωση με δέσμες (Triggs et al, 1999) σχετίζεται με την τελειοποίηση μιας οπτικής ανακατασκευής για την ταυτόχρονη παραγωγή βέλτιστης τρισδιάστατης δομής αλλά και εκτίμηση των οπτικών παραμέτρων. Βέλτιστη σημαίνει ότι οι εκτιμήσεις των παραμέτρων βρέθηκαν ελαχιστοποιώντας συναρτήσεις κόστους που ποσοτικοποιούν το πιθανό σφάλμα στο μοντέλο, και ταυτόχρονη ότι η λύση είναι βέλτιστη όσον αφορά τόσο τη δομή αλλά και τις παραμέτρους της κάμερας. Η δέσμη αναφέρεται στην δέσμη των ακτινών φωτός που ανακλώνται από κάθε τρισδιάστατο αντικείμενο και συγκλίνουν στο κέντρο κάθε φωτογραφικής μηχανής. Εφαρμόζει μία επαναληπτική μέθοδος Gauss-Newton, μη γραμμικές συναρτήσεις ελαχίστων τετραγώνων, υπολογίζοντας την μέση τιμή της πιθανοφάνειας και εκμεταλλευόμενη την χαμηλή πυκνότητα των πινάκων πληροφορίας του συστήματος ώστε να επιταχύνει την αναστροφή της (Ackermann, 1984; McLauchlan et al, 2000).

4.2.2.2. Προσανατολισμός και γεωαναφορά των εικόνων

Κατά τη διαδικασία του προσανατολισμού των εικόνων το πρόγραμμα εμφανίζει επιλογές όσον αφορά την ακρίβεια (υψηλή ακρίβεια δίνει καλύτερη εκτίμηση των θέσεων), την προεπιλογή σημείων ταύτισης (επηρεάζει το κατά πόσο γρήγορα θα γίνει η διαδικασία του προσανατολισμού) και καθορισμό μέγιστου αριθμού σημείων που λαμβάνονται υπ όψη κατά το συγκεκριμένο στάδιο επεξεργασίας.



Εικόνα 4-4. Το αποτέλεσμα του αραιού νέφους σημείων που κατασκευάστηκε από τον προσανατολισμό των εικόνων. Workflow -> Add Photos-> Align Photos (Accuracy: High, Pair preselection: Ground Control Points, Point limit: 60000).

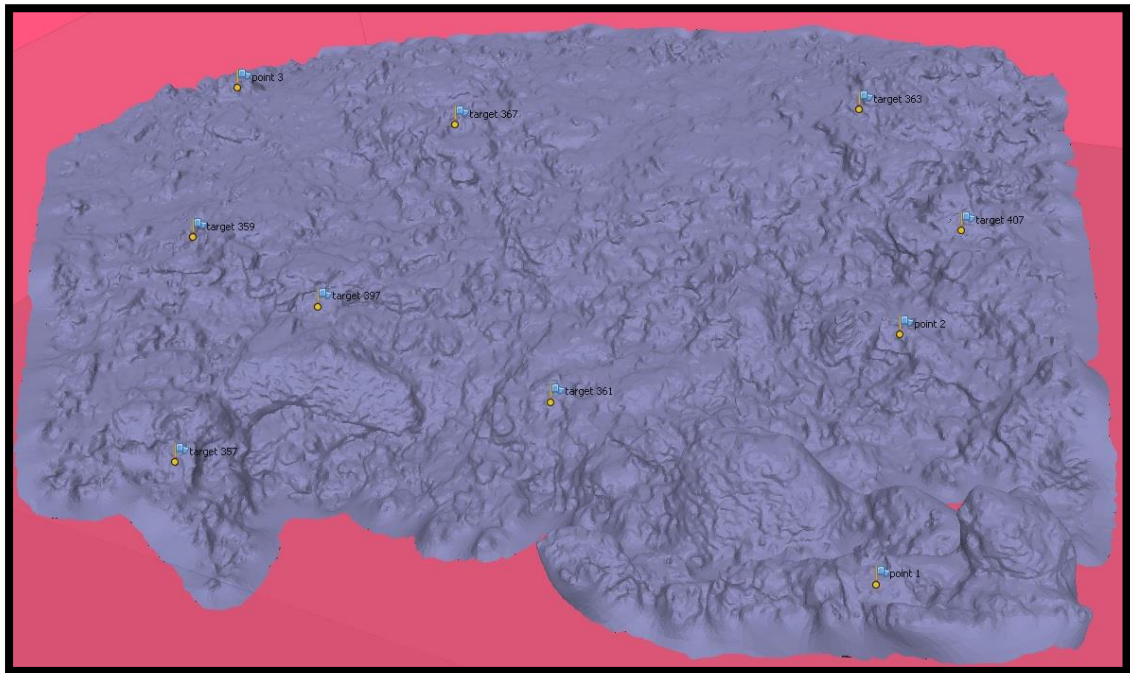
4.3. Ανακατασκευή Πυκνών Επιφανειών (dense surface reconstruction)

Η δημιουργία ενός DEM απαιτεί αλγόριθμους για την συρραφή των εικόνων και αυτόματο συσχετισμό τους. Υπάρχει δυνατότητα παρέμβασης από το χρήστη ώστε να οριστούν οι παράμετροι όσον αφορά αποτελεσματική επιθυμητή ανάλυση, αυτοματοποιημένη περικοπή λανθασμένων περιοχών και καθορισμός της ανακατασκευασμένης περιοχής ώστε να περιληφθεί στη δημιουργία του DEM.

Το παραγόμενο αποτέλεσμα μπορεί να αποθηκευτεί είτε σε μορφή GeoTiff υψομετρικά δεδομένα, ArcInfo ASCII, είτε ως XYZ αρχείο για περαιτέρω επεξεργασία. Επίσης και ως WaveFront OBJ, 3DS, VRML, COLLADA, Stanford PLY, Autodesk DXF, U3D και Adobe pdf (ως αρχείο τελικού report).



Εικόνα 4-5. Αποτέλεσμα βήματος ανακατασκευής πυκνού νέφους σημείων. Workflow -> Build Dense Cloud (Quality Ultra High, Depth filtering: Moderate, Frames: All frames).

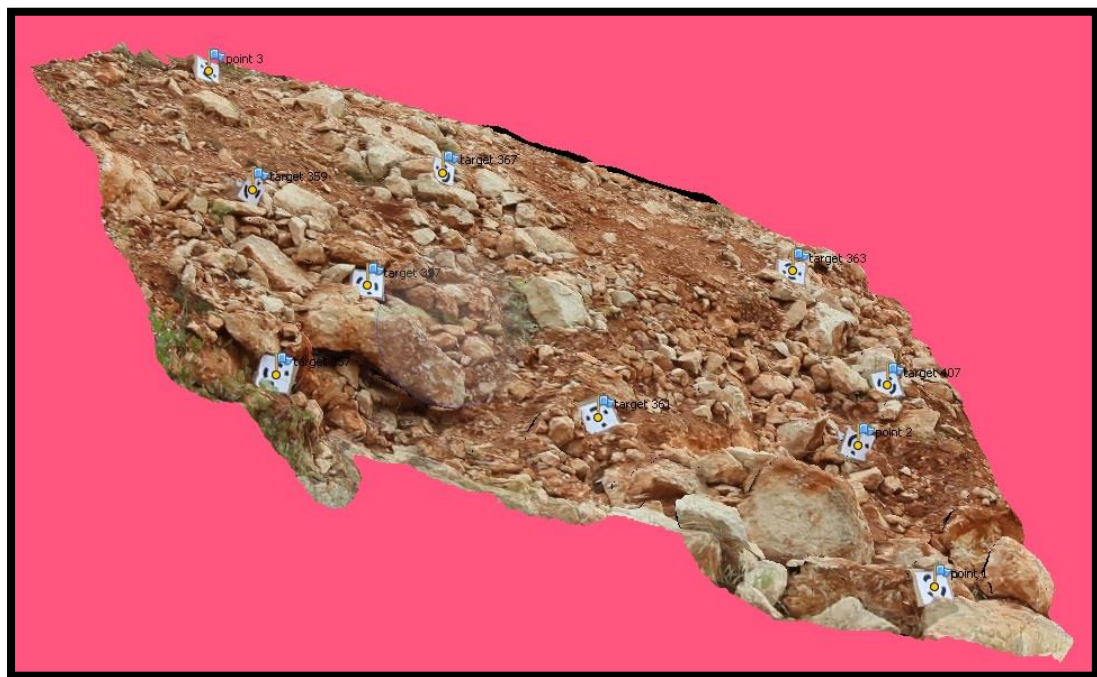
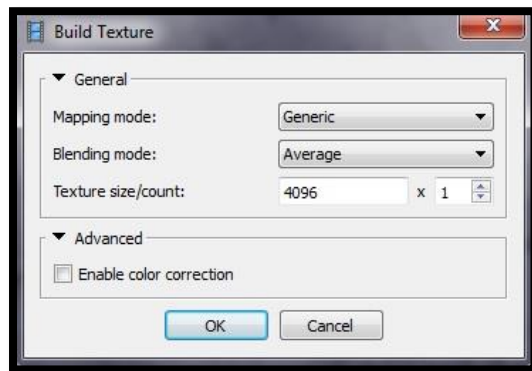


Εικόνα4-6. Το αποτέλεσμα δημιουργίας πλέγματος (το συγκεκριμένο είναι από τις αρχικές εικόνες). Workflow -> Build Mesh (Surface type: Arbitrary, Source data: Dense cloud, Polygon count: High (205248), Interpolation: Enabled (default), Frames: All frames).

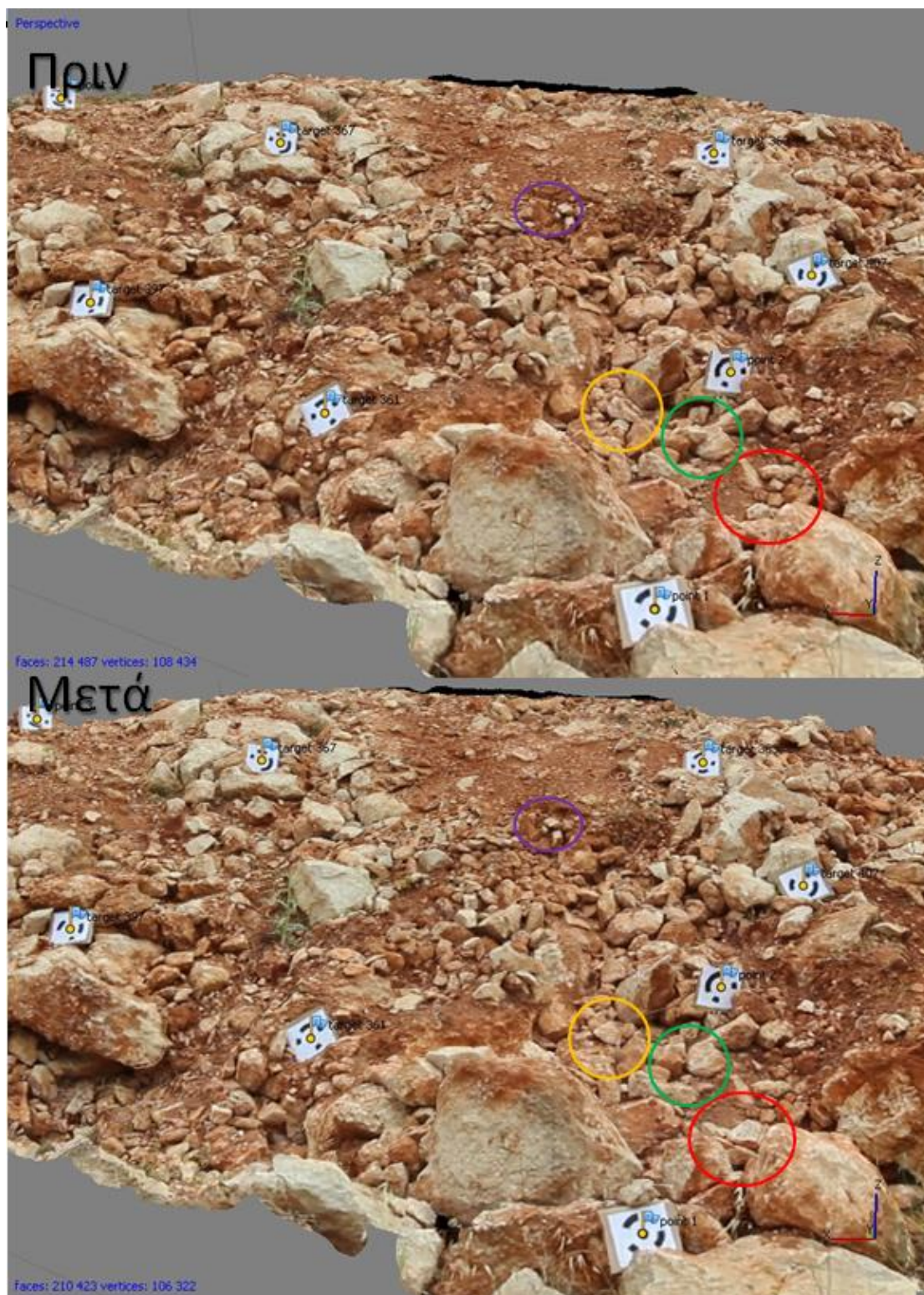
Χαρτογράφηση Υφής

Με την λειτουργία της χαρτογράφησης υφής μπορεί να γίνει αναπαράσταση της υφής του πρανούς, για καλύτερη απεικόνιση του μοντέλου. Θα ακολουθηθεί αυτό το βήμα μόνο για την διαδικασία της οπτικής σύγκρισης από τον χρήστη μεταξύ των μοντέλων πριν και μετά την βραχύπτωση. Όσον αφορά την μετέπειτα επεξεργασία των τρισδιάστατων μοντέλων δεν θα χρησιμοποιηθεί η υφή, καθώς οι πληροφορίες που χρειάζονται για την επεξεργασία των τρισδιάστατων μοντέλων είναι ήδη διαθέσιμες από το στάδιο της ανακατασκευής του πυκνού νέφους σημείων και τη δημιουργία πλέγματος.

Με την επιλογή Generic το ίδιο το πρόγραμμα δημιουργεί όσο τον δυνατόν ομοιόμορφη υφή. Στην λειτουργία ανάμειξης όπου αφορά τον τρόπο που συνδυάζονται οι τιμές pixel από διαφορετικές εικόνες, επιλέχθηκε ο μέσος όρος (average).



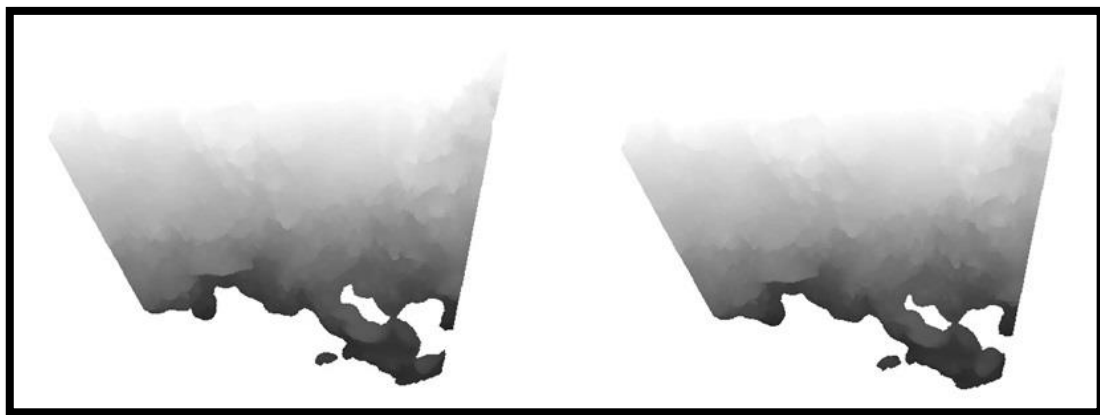
Εικόνα 4-7. Το αποτέλεσμα της χαρτογράφησης υφής στο τρισδιάστατο μοντέλο του πρανούς. Workflow -> Build Texture (Mapping mode: Generic, Blending mode: Average, Frames: All frames).



Εικόνα 4-8. Διαφορές μεταξύ των μοντέλων που μπορούν να εντοπιστούν με οπτική παρατήρηση από τον χρήστη, λόγω χαρτογράφησης της υφής.

4.4. Εξαγωγή 3D Μοντέλου

Το λογισμικό παρέχει την δυνατότητα εξαγωγής του ανακατασκευασμένου τρισδιάστατου μοντέλου σε ένα αρκετά μεγάλο πλήθος διαθέσιμων φορμάτ ώστε να μπορεί να γίνει μετέπειτα επεξεργασία σε αρκετά λογισμικά. Στην παρούσα εργασία έγινε εξαγωγή ως νέφος σημείων. Δημιουργήθηκαν λοιπόν δύο διαφορετικά DEM ένα αρχικό και ένα τελικό, για να υπολογιστούν οι διαφορές μεταξύ τους σε περιβάλλον ArcGIS.



Εικόνα 4-9. Το αρχικό και τελικό αποτέλεσμα του Agisoft. File -> export DEM -> Geotif Elevation Data.

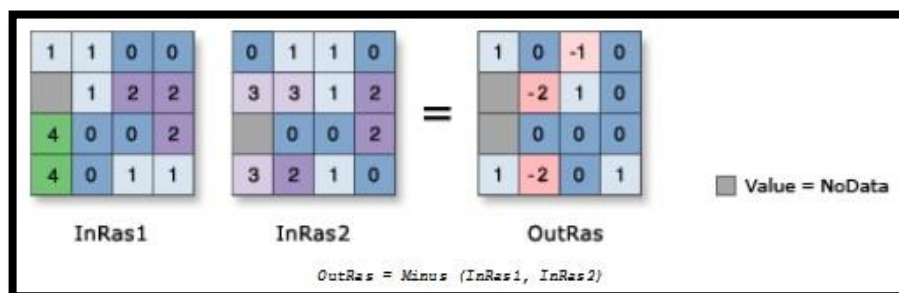
4.5. Αυτοματοποίηση της επεξεργασίας

Το λογισμικό δίνει την δυνατότητα υλοποίησης εργασιών ροής με πολλαπλά δεδομένα ταυτόχρονα. Η συγκεκριμένη λειτουργία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων προς επεξεργασία ή στη συνεχή ροή δεδομένων προς επεξεργασία. Με την εντολή 'επεξεργασία παρτίδας' (batch processing) δίνεται η δυνατότητα επιλογής των βημάτων επεξεργασίας και η παραμετροποίηση τους καθώς και η δυνατότητα επεξεργασίας όλων των δεδομένων αυτόματα ή μέρους των δεδομένων που δεν έχουν επεξεργαστεί ακόμα καθώς και η επιλογή συγκεκριμένων δεδομένων από τον χρήστη. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας εμφανίζεται ένα παράθυρο όπου δείχνει την πορεία της επεξεργασίας. Οι εντολές που μπορεί κάποιος να δρομολογήσει στην αυτόματη επεξεργασία είναι οι παρακάτω:

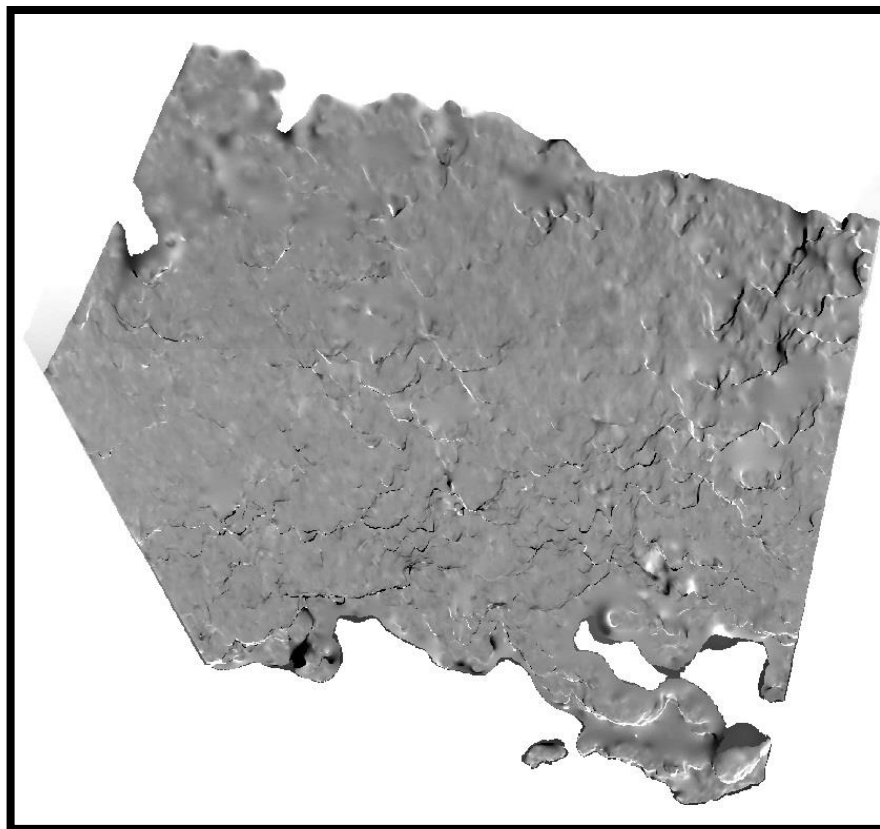
- Προσανατολισμός εικόνων
- Βελτιστοποίηση Προσανατολισμού των εικόνων
- Κατασκευή Πυκνού Νέφους Σημείων
- Κατασκευή Πλέγματος
- Κατασκευή Υφής
- Τεμαχισμός Πλέγματος
- Εισαγωγή των θέσεων των Φωτογραφικών μηχανών
- Εξαγωγή Μοντέλου
- Προσανατολισμός chunk (τεμαχίων)
- Συγχώνευση τεμαχίων
- Αποθήκευση μετά από κάθε ολοκληρωμένη διεργασία

4.6. Επεξεργασία των τρισδιάστατων μοντέλων

Το πρώτο βήμα στην επεξεργασία των τρισδιάστατων μοντέλων αφορά στην εισαγωγή των δεδομένων στο ArcGIS και χρήση της τεχνικής αφαίρεσης DEM για την ανίχνευση σημείων αλλαγών (πιθανά σημεία βραχοπτώσεων). Μέσω του εργαλείου Minus του ArcToolbox μπορεί να γίνει αφαίρεση τιμών των εικονοστοιχείων των τρισδιάστατων μοντέλων που κατασκευάσαμε εισάγοντας δύο μοντέλα κάθε φορά. Το αποτέλεσμα ουσιαστικά δείχνει τις τιμές των εικονοστοιχείων μετά την αφαίρεση του δεύτερου μοντέλου από το πρώτο.



Εικόνα 4-10. Αφαίρεση τιμών του δεύτερου μοντέλου από το πρώτο. Πηγή ArcGIS Help, Minus (Spatial Analyst).

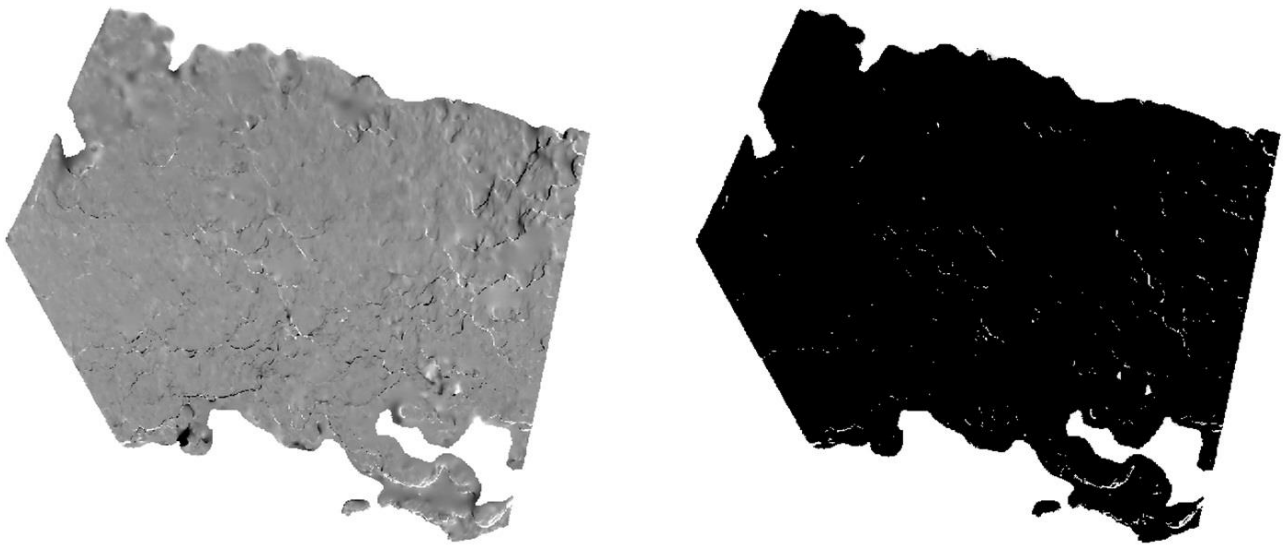


Εικόνα 4-11. Αποτέλεσμα αφαίρεσης τελικού και αρχικού τρισδιάστατου μοντέλου.

Στην παραπάνω εικόνα όπου αφορά το αποτέλεσμα της χρήσης του εργαλείου της αφαίρεσης, με λευκό χρώμα απεικονίζονται οι διαφορές μεταξύ των μοντέλων ενώ με γκρι τα σημεία που έχουν παραμείνει ίδια. Για ευκολότερη διαχείριση και ανάλυση των αποτελεσμάτων, στο επόμενο στάδιο ακολουθεί επεξεργασία του αποτελέσματος της αφαίρεσης σε περιβάλλον Matlab. Μέσω των βημάτων που περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει απομόνωση των σημείων με τις μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις στις τιμές, υποθέτοντας ότι αντιστοιχούν σε θέσεις όπου υπήρξε πιθανή μετακίνηση. Ενδέχεται να υπάρξει και εντοπισμός σημείων που δεν αντιστοιχούν σε μετακινήσεις (false alarms) όπου θα γίνει προσπάθεια ταυτοποίησης και διερεύνησης της δυνατότητας αφαίρεσης τους.

4.7. Εξαγωγή σημείων μετακίνησης

Εισάγοντας το αποτέλεσμα της αφαίρεσης στο λογισμικό Matlab και με μια σειρά από βήματα επεξεργασίας ψηφιακών εικόνων εντοπίζονται τα σημεία μετακίνησης βραχοτεμαχίων όπως φαίνονται παρακάτω.

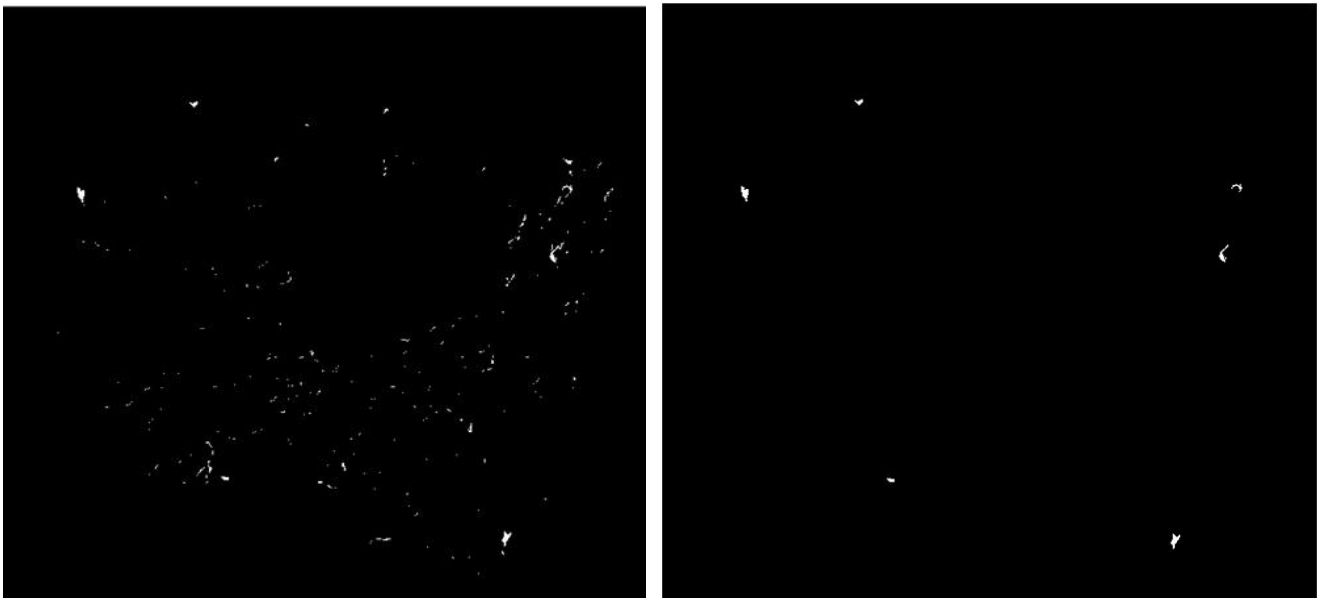


Εικόνα 4-12. Κατωφλίωση μεγίστων και ελαχίστων διαφορών

Αρχικά πραγματοποιήθηκε κατάτμηση της εικόνας με κατωφλίωση, για των εντοπισμό μεγίστων και ελαχίστων διαφορών (Εικόνα 4-12). Στη συνέχεια έγινε εύρεση του περιγράμματος της περιοχής μελέτης (Εικόνα 4-13), απομόνωση αλλαγών σημαντικής κλίμακας και αφαίρεση θορύβου (Εικόνα 4-14) και τέλος αφαίρεση ζώνης ορίου λόγω του ότι στην ζώνη του ορίου εντοπίστηκαν false alarm (Εικόνα 4-15).



Εικόνα 4-13. Εύρεση περιγράμματος περιοχής μελέτης.



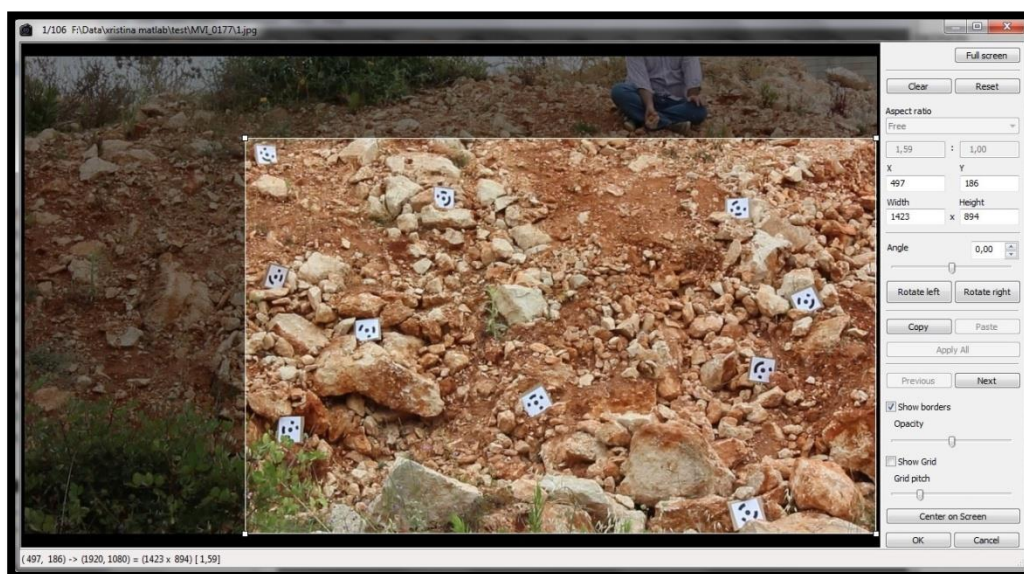
Εικόνα 4-14. Απομόνωση αλλαγών σημαντικής κλίμακας και αφαίρεση θορύβου.



Εικόνα 4-15. Αφαίρεση ζώνης ορίου.

5. Επεξεργασία Δεδομένων Βίντεο

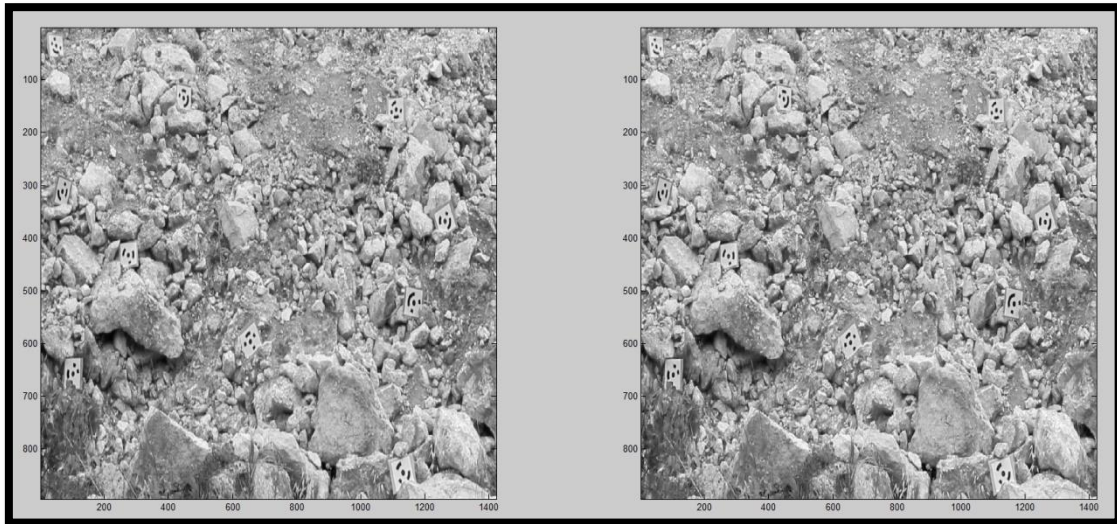
Μέσω των εργαλείων επεξεργασίας βίντεο στο λογισμικό Matlab είναι εφικτή η επεξεργασία των frame του βίντεο για τον εντοπισμό περιστατικών βραχοπτώσεων για την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Σε περιβάλλον Matlab (video to image) έγινε εξαγωγή όλων των frame του βίντεο σε εικόνες για περαιτέρω επεξεργασία. Για να καθοριστεί συγκεκριμένο τμήμα της περιοχής μελέτης, ώστε το σύστημα να μην δημιουργεί λανθασμένες καταγραφές από την κίνηση του χρήστη κατά τη ρίψη του βραχοτεμαχίου, ορίστηκε ως περιοχή ενδιαφέροντος ROI (region of interest) η συγκεκριμένη περιοχή που παρουσιάζεται παρακάτω μέσω της εφαρμογής Canon Digital Photo Professional. Μέσω batch processing εφαρμόστηκε σε όλες τις εικόνες του πειράματος.



Εικόνα 5-1. Χρήση του λογισμικού Canon για τον καθορισμό της περιοχής μελέτης.

Για την ανίχνευση - καταγραφή της κίνησης του βραχοτεμαχίου έγινε χρήση του παρακάτω αλγορίθμου.

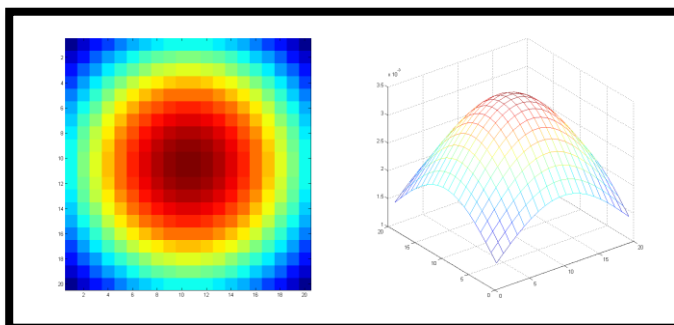
Αρχικά ο αλγόριθμος βρίσκει την λίστα με τις εικόνες για μπορεί να περιηγηθεί εύκολα, με αυτό τον τρόπο διαβάζει τις εικόνες -ορίστηκαν οι πρώτες 38- όπου δεν υπάρχει κίνηση λόγω βραχύπτωσης και υπολογίζει τον μέσο όρο τους ώστε το μοντέλο background να είναι απαλλαγμένο από θορύβους όπως η κίνηση της βλάστησης από τον αέρα κτλ.



Εικόνα 5-2. Αριστερά η πρώτη εικόνα και δεξιά ο μέσος όρος των πρώτων 38 εικόνων.

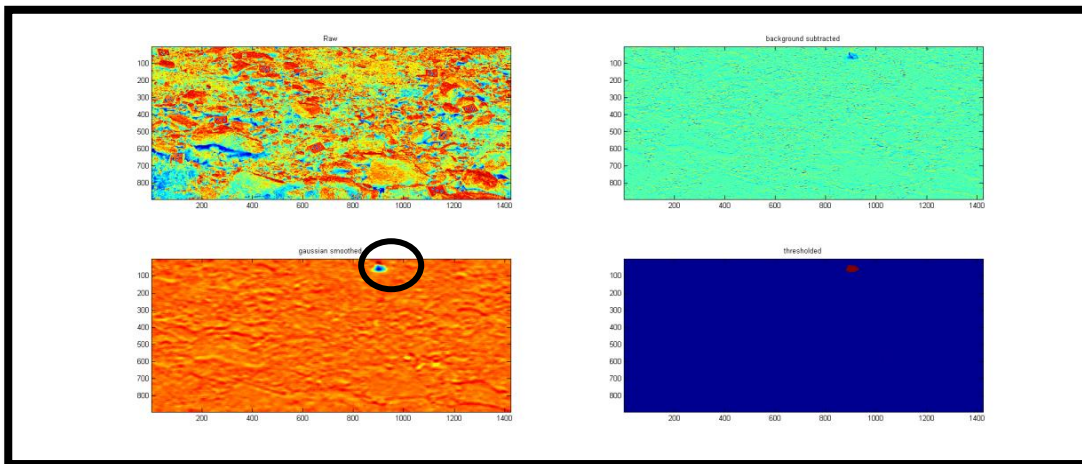
Γίνεται χρήση του φίλτρου συνέλιξης του Gauss με την εντολή **fspecial** ως μάσκα για να καθαρίσει η εικόνα από τυχόν ανωμαλίες ώστε να τονιστεί το επιθυμητό αντικείμενο (βραχοτεμάχιο). Ορίστηκε από την αρχή στα 20x20cm το κάθε pixel. Όσον αφορά το συγκεκριμένο φίλτρο στηρίζεται στη μαθηματική εξίσωση:

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

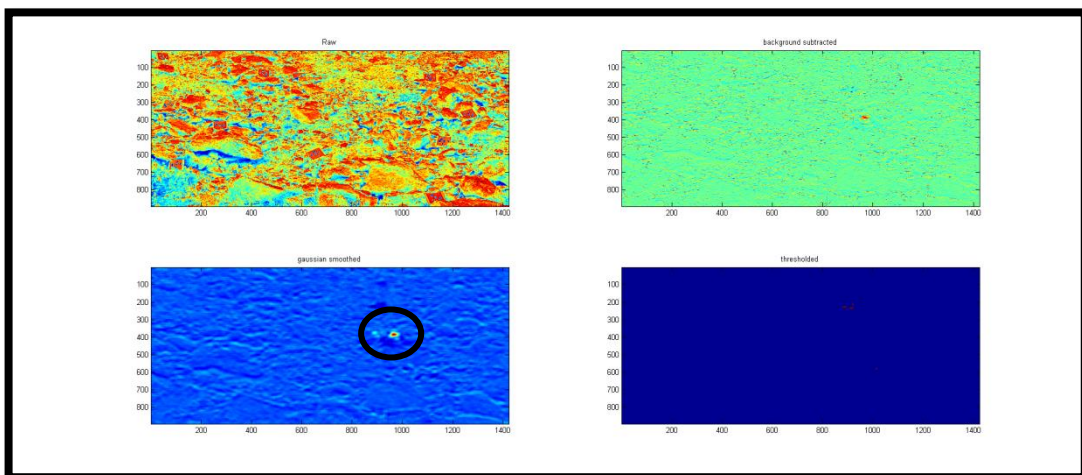


Εικόνα 5-3. Η κατανομή του Gauss.

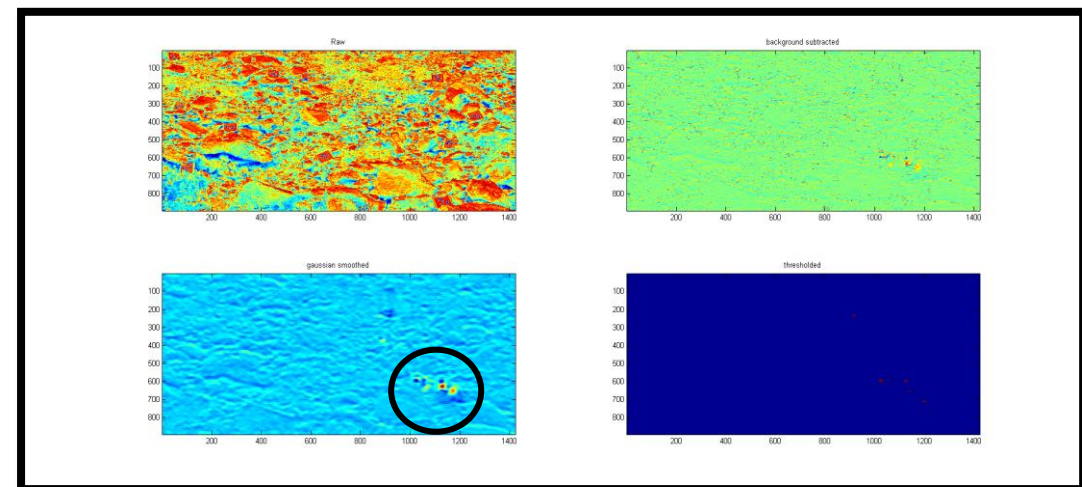
Ενδεικτικά παρατίθεται μέρος των αποτελεσμάτων καθώς στο παράρτημα βρίσκεται η πορεία της καταγεγραμμένης βραχόπτωσης.



Εικόνα 5-4. Αρχικό σημείο ρίψης του βραχοτεμαχίου.

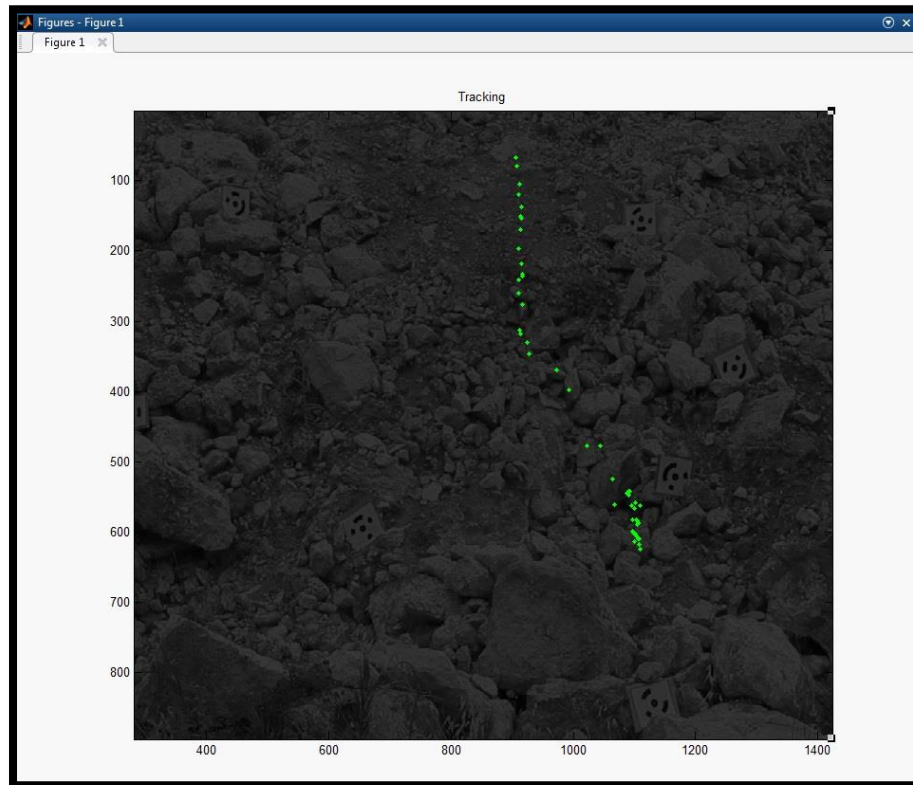


Εικόνα 5-5. Περίπου στο μέσο της πορείας του βραχοτεμαχίου.



Εικόνα 5-6. Προς το τέλος της ρίψης στο σημείο όπου εμφανίζεται μετακίνηση λόγω πρόσκρουσης και άλλων βραχοτεμαχίων.

Στη συνέχεια δημιουργούμε ένα πίνακα όπου αποθηκεύονται τα x, y της μετακίνησης των βραχοτεμαχίων. Στον πίνακα `CM_idx` βρίσκονται οι συντεταγμένες x, y της μετακίνησης της πέτρας ανά frame.

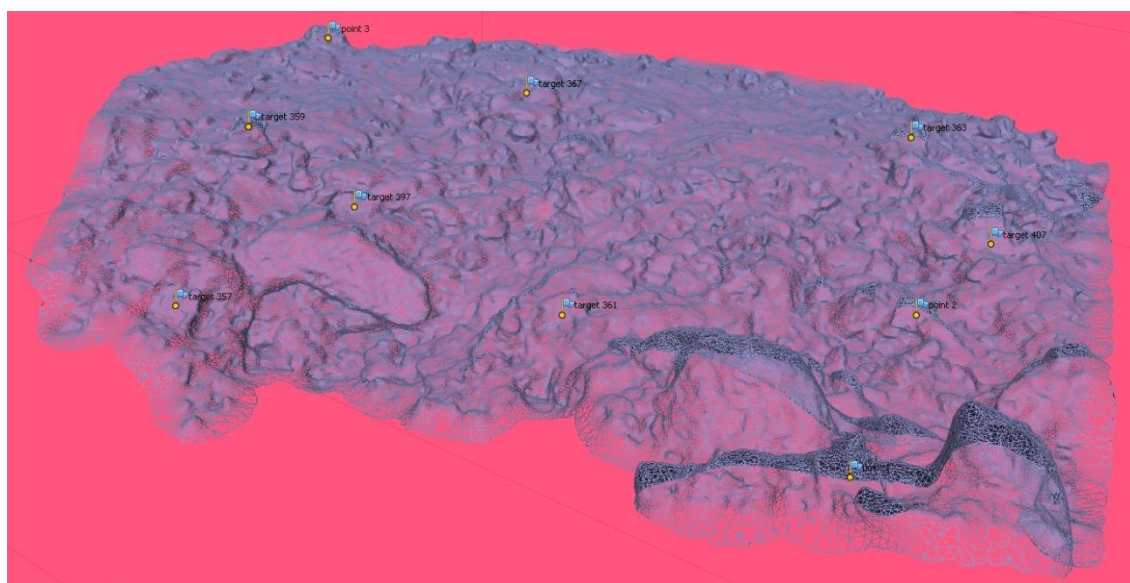


Εικόνα 5-7. Καταγεγραμμένη τροχιά της βραχόπτωσης.

6. Αποτελέσματα επεξεργασίας και σύζευξη με δεδομένα γεωφώνων

Η μεθοδολογία επεξεργασίας εικόνων που προτάθηκε παραπάνω έχει ως βασικό αποτέλεσμα την παραγωγή ενός τρισδιάστατου μοντέλου για την παρακολούθηση βραχοπτώσεων σε πρηνή. Η αυτοματοποίηση της διαδικασίας επεξεργασίας των εικόνων επιτρέπει σημαντική μείωση στο χρόνο που χρειάζεται για την παραγωγή των ψηφιακών μοντέλων εδάφους. Ανάλογα με τον αριθμό των εικόνων και την επεξεργαστική ισχύ του υπολογιστή, η επεξεργασία μπορεί να διαρκέσει από λίγα λεπτά μέχρι και μερικές ώρες από την στιγμή που ο χρήστης έχει καθορίσει σωστά τις παραμέτρους της αυτοματοποιημένης επεξεργασίας. Σημαντικό στοιχείο είναι ο έλεγχος ακρίβειας του παραγόμενου DEM που μπορεί να γίνει μέσα από το ίδιο το λογισμικό.

Για την επαλήθευση των δεδομένων των μετακινούμενων βραχοτεμαχίων που μας έδωσε η αφαίρεση των DEM, έγινε σύγκριση με μια απλή εφαρμογή σε περιβάλλον Matlab όπου μας έδωσε τις ίδιες θέσεις μετακίνησης. Στην περίπτωση της τρισδιάστατης απεικόνισης, μπορεί να γίνει περαιτέρω επεξεργασία του πυκνού νέφους σημείων σε διάφορα λογισμικά, όπως το MeshLab και το PCL. Στη συνέχεια παρατίθεται το κύριο προϊόν που είχε ως αποτέλεσμα η συγκεκριμένη μεθοδολογία.



Εικόνα 6-1. Τρισδιάστατο μοντέλο αναγλύφου.

Στην παρούσα μελέτη δεν ήταν εφικτό να γίνει άμεση συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τα δεδομένα των γεωφώνων, καθώς τα σήματα από τα γεώφωνα χρήζουν περαιτέρω επεξεργασίας. Μία πρώτη εικόνα των σημάτων δείχνει ότι τις χρονικές περιόδους που έχει εντοπιστεί ένα 'γεγονός' συμπίπτουν και με την μετατόπιση που έχει καταγράψει το βίντεο σε συγκεκριμένο frame.

Rock A		Geophone Sample		Notes
Event	Video Frame	Start	End	
1	46	2291	2331	
2	47	2331	2371	
3	48	2371	2571	roll 48-52
4	55	2651	2691	
5	58	2771	2891	roll 58-60
6	66	3091	3131	
7	74	3411	3771	roll 74-82
Rock B	74			
	82	3731	3771	
	86	3891	3931	
	89	4011	4371	roll 89-91

Πίνακας 6-1. Παρατηρήσεις βραχοπτώσεων με Δεδομένα Γεωφώνων.



Εικόνα 6-2. Τροχιά βραχοτεμαχίου και καταγραφή από γεώφωνα.

7. Συμπεράσματα

Γενικότερα τα κύρια οφέλη της επίγειας ψηφιακής φωτογραμμετρίας είναι τα εξής:

1. Σε περιπτώσεις που υπάρχει κίνδυνος προσέγγισης μιας περιοχής μελέτης ή είναι αδύνατη η πρόσβαση στην περιοχή, αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στην αποτύπωση πρηνών. Η αποτύπωση μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω φωτογραφικών μηχανών με κατάλληλο φακό. Επίσης η δυνατότητα εύκολης μεταφοράς του εξοπλισμού λόγω βάρους σε σχέση με τους σαρωτές αποτελεί πλεονέκτημα σε αποτυπώσεις δύσβατων περιοχών οι οποίες δεν μπορούν να προσεγγιστούν με όχημα (δάση, βουνά κτλ).
2. Ο χρόνος λήψης των δεδομένων και εγκατάστασης του εξοπλισμού είναι συγκριτικά αρκετά μικρότερος από όλες τις υπόλοιπες μεθόδους, κάτι που εξυπηρετεί σε περιπτώσεις άμεσης αποτύπωσης και ανακατασκευής μοντέλων αλλά και όταν υπάρχει ανάγκη για συνεχή ροή δεδομένων προς επεξεργασία.
3. Η ανάπτυξη των λογισμικών φωτογραμμετρίας αποτελεί σημαντικό εργαλείο καθώς μέσω της τρισδιάστατης απεικόνισης μπορεί να υπολογιστεί ο προσανατολισμός των ασυνεχειών σε ένα πρηνές καθώς και να μοντελοποιηθεί ώστε να γίνει ο σχεδιασμός μέτρων ασφαλείας. Η διαδικασία βαθμονόμησης της κάμερας και επεξεργασίας των δεδομένων είναι σε ένα βαθμό αυτοματοποιημένη. Είναι εφικτή η ταυτόχρονη επεξεργασία πολλών εικόνων κάτι που μπορεί να αποτελέσει σημαντική βοήθεια.
4. Το κόστος του εξοπλισμού είναι σημαντικά χαμηλότερο σε σχέση με τους σαρωτές λέιζερ. Σε περιπτώσεις βλάβης εκτός του ότι το κόστος επισκευής/αντικατάστασης είναι πολύ χαμηλότερο, επίσης είναι ευκολότερο να αντικατασταθεί άμεσα μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή (υψηλή διαθεσιμότητα στην αγορά), κάτι που δεν ισχύει για έναν επίγειο σαρωτή λέιζερ.

Ειδικότερα, σε ότι αφορά την παρούσα μελέτη, βάση των αποτελεσμάτων είναι ασφαλές να θεωρηθεί ότι η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε αποτελεί μια αρκετά

καλή λύση τόσο λόγω κόστους χρόνου, οικονομίας αλλά και για την αρκετά υψηλή ακρίβεια στην παραγωγή των DEM του πρανούς.

Γενικότερα μπορεί να αποτελέσει σημαντική βοήθεια για τον σχεδιασμό προληπτικών δράσεων, όπως κατασκευή στηριγμάτων σε πρηνή, αλλά και να δώσει συμπληρωματικά δεδομένα σε μελέτες που βασίζονται κυρίως σε γεωδαιτικές μεθόδους σε περιπτώσεις που οι επίγειοι σαρωτές λέιζερ αποτυγχάνουν να εντοπίσουν τις αλλαγές στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η ανάκλαση των επιφανειών των αντικειμένων ή του εδάφους έχει παρόμοιο προσανατολισμό με την γραμμή σκόπευσης του σαρωτή λέιζερ και δεν μπορούν να αναπαρασταθούν (Brideau et al, 2012).

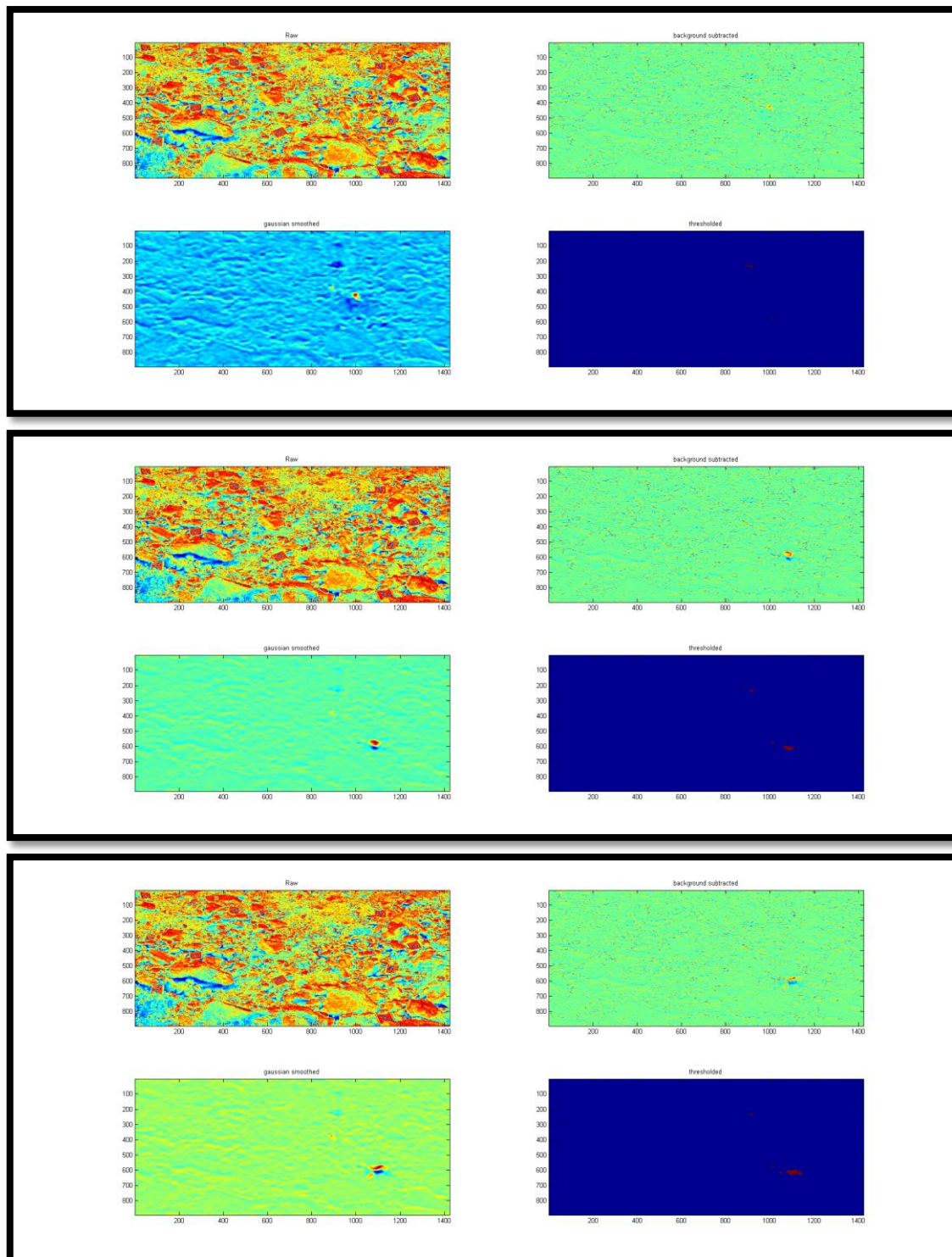
Δύο σημεία που απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή είναι κατά την λήψη των εικόνων και στον καθορισμό των παραμέτρων επεξεργασίας. Σε περιπτώσεις μειωμένης ηλιοφάνειας ή ύπαρξης νεφών υπάρχει αδυναμία του λογισμικού στην εύρεση επαρκούς πλήθους κοινών σημείων μεταξύ των εικόνων με αποτέλεσμα το νέφος σημείων που παράγεται να μην δίνει επιθυμητά αποτελέσματα για περαιτέρω επεξεργασία. Η χρήση φωτογραφικών μηχανών χωρίς προκαθορισμένες ρυθμίσεις ή διαφορετικές σε κάθε κάμερα ρυθμίσεις στην εστίαση του φακού οδηγούν σε λανθασμένα αποτελέσματα. Όσον αφορά στον καθορισμό των παραμέτρων πρέπει να δίνεται έμφαση στον τρόπο λήψης των δεδομένων ώστε να επιλεγθούν οι σωστές παράμετροι επεξεργασίας.

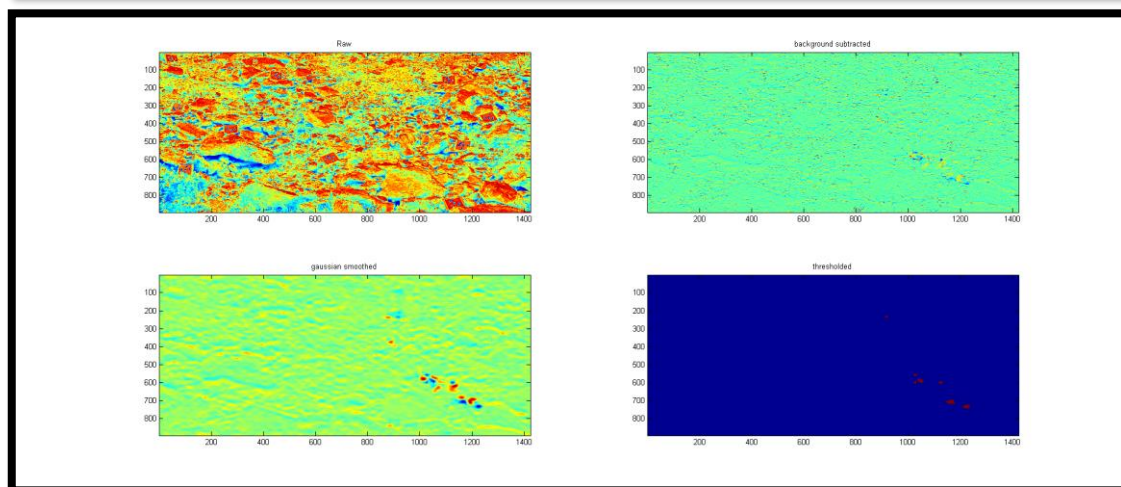
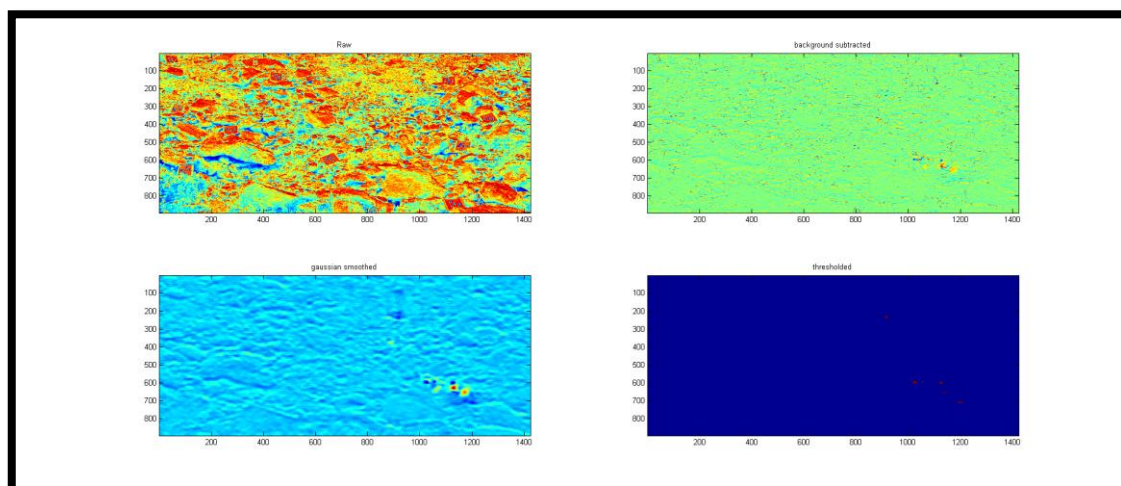
Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η συγκεκριμένη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε μπορεί χωρίς αμφιβολία να αποτελέσει είτε αυτούσια μέθοδο είτε να συνδυαστεί για την επίτευξη βέλτιστης ακρίβειας με τις διαθέσιμες γεωδαιτικές μεθόδους.

Μελλοντικές προτάσεις που αφορούν στην βελτίωση της μεθοδολογίας και αντιμετώπιση των προβλημάτων, στις οποίες απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση, είναι η χρήση προκαθορισμένων ρυθμίσεων στις φωτογραφικές μηχανές ανάλογα με την εφαρμογή μελέτης καθώς και ο συγχρονισμός των φωτογραφικών μηχανών για ταυτόχρονη λήψη και αποστολή των δεδομένων προς επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο.

Παράρτημα

Παρακάτω παρατίθενται τα συνολικά αποτελέσματα της επεξεργασίας του βίντεο. Στο τρίτο γράφημα αποτυπώνεται/ανιχνεύεται η μετακίνηση του βραχοτεμαχίου για κάθε frame.





Βιβλιογραφία

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Abellan A., Calvet J., Vilaplana M.J., Blanchard J., Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring, 2010
2. Ablanedo E.S, Rodriguez-Perez J.R., Arias-Sanchez P., Armesto J., Metric Potential of a 3D Measurement System Based on Digital Compact Cameras, Sensors 2009, 9, 4178-4194; doi:10.3390/s90604178, 2009
3. Ackermann F., Digital image correlation: performance and potential application in photogrammetry, The photogrammetric record volume 11, Issue 64, pages 429-439, October 1984 (online article 2006)
4. Agioutantis, Z., Steiakakis, C., Mertikas, S., Daskalakis, A., Tripolitsiotis, A., Kritikakis, G., Apostolou, E., Kaplanidis, G., Rockfall monitoring system for improvind road safety, Proc. The 2014 ISRM European Rock Mechanics Symposium (EUROCK2014), Vigo, Spain, 27-29th May 2014
5. Agisoft PhotoScan Professional Edition, Version 1.0, Publication date 2014
6. American Society Photogrammetry and Remote Sensing, ASPRS, Manual of Photogrammetry Fifth Edition Errata September 26, 2006
7. Arko L., Turner D., King H. D., Robinson S. A., Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to capture micro-topography of Antarctic moss beds, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013
8. Arosio D., Longoni L., M. Papini, M. Scaioni, I. Zanzi, and M. Alba, Towards rockfall forecasting through observing deformation and listening to

microseismic emissions, *Natural hazards Earth Systems*, Sici, 9, 1119-1131, 2009

9. Badger T.C., Lowell S., Rockfall Control Washington State. In *Rockfall Prediction and Control and Landslide Case Histories*, Transportation Research Record, National Research Council, Washington No 1342, 14-19, 1992
10. Brideau M. A., Massey C.I., Archibald G., Jaboyedoff M., Eberhardt E. (ed.), Froese C. (ed.), Turner K. (ed.) and Leroueil S. (ed.), *Terrestrial photogrammetry and LiDAR investigation of the cliffs associated with the seismically triggered rockfalls during the February and June 2011 Christchurch earthquakes*, CRC Press, oai:serval.unil.ch:BIB_F6D995667704, 2012
11. Brown D., *Decentering Distortion of Lenses, The prism effect encountered in metric cameras can be overcome through analytic calibration.*, D. Brown Associates, Inc. Eau Gallie, Florida, 1966
12. Brown M., Lowe D. G., *Invariant features for interest point groups*. In *British Machine Vision Conference*, Cardiff, Wales, pp. 656-665, 2002
13. Chen et al, *GNSS activities for natural disaster monitoring and climate change detection at GFZ-An overview in Advances in Earth Observation of global change*, E. Chuvienco, J. Li and X. Yang (eds), Springer, Chapter 12, 2010
14. Deparis J., Jongmans D., Garambois S., Levy C., Baillet L. Meric O., Chapter 1. *Geophysical Detection and Characterization of Discontinuities in Rock Slopes*, *Rockfall Engineering*, Wiley, 2011

- 15.** Dorren, K.A. Luuk, A review of rockfall mechanics and modelling approaches, Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics, Universiteit van Amsterdam, Progress in Physical Geography 27,1 pp. 69-87, 2003
- 16.** Ferriera R. and Santos V., State-of-the-art Total Stations: A look at new technologies, GIM International, Volume 25, Number 10, 2011
- 17.** Fryer J. G., Photogrammetric Monitoring of a Large Dam. FIG Commission 6, Symposium on Engineering Surveying, Cape Town, South Africa, February 6-10, 1995
- 18.** Hoek E., Practical rock engineering. Course notes, Consulting Engineering Inc. Canada, 2000
- 19.** Hungr O., Evans S.G., Hazzard J., Magnitude and Frequency of rockfalls and rockslides along the main transportation corridors of southwest British Columbia. Canada, Geotech Vol.36 p224-238, 1999
- 20.** Iavarone A, Vagners D, Sensor fusion: generating 3D by combining airborne and tripod mounted LiDAR data. In: International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, vol XXXIV. ISPRS, Regensburg, pp 1–7, 2003
- 21.** Key H., Lemmens M., Robotic total stations, GIM International, Volume 22, Issue 6, 2008
- 22.** Lan H., Martin D., Zhou C., Lim C., Rockfall hazard analysis using LiDAR and spatial modeling. Geomorphology 118 (210) 213-223, 2010

- 23.** Lato J. Matthew, Voge Malte, Automated mapping of rock discontinuities in 3D LiDAR and photogrammetry models, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 150-158, 2011
- 24.** Lato M., Diederichs MS, Hutchinson DJ, Bias correction for static LiDAR scanning of rock outcrops for structural characterization. *Rock Mech Rock Eng* 23:5–7. doi:10.1007/s00603-010-0086-4, 2009a
- 25.** Lato M., Hutchinson J., Diederichs M., Ball D., Harrap R., Engineering monitoring of rockfall hazards along transportation corridors: using mobile terrestrial LiDAR. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 935-946, 2009
- 26.** Lato M., Diederichs MS, Hutchinson DJ, Harrap R., Evaluating roadside rockmasses for rockfall hazards using LiRAR data: optimizing data collection and processing protocols, *Nat Hazards* (2012) 60:831-864, doi: 10.1007/s11069-011-9872y, 2011
- 27.** Lato M., Kemeny J., Harrap R.M., Bevan G., Rock bench: Establishing a common repository and standards for assesing rockmass characteristics using LiDAR and photogrammetry, *Computer & Geosciences* 50 (2013) 160-114, 2012
- 28.** Leith K., Pedrazzini A., Seifert R., Moore J., Kos A., Jaboyedoff M., Combined high resolution terrestrial LiDAR and time-lapse photography for rockfall monitoring and analysis. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 12, EDU2010-5937-1, 2010
- 29.** Lowe D. G., *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints* Computer Science Department University of British Columbia Vancouver, B.C., 2004

- 30.** McLauchlan P. F. & Jaenicke A., Image Mosaicing using Sequential Bundle Adjustment, School of EE, IT and Mathematics, University of Surrey, Guildford GU2 5XH, 2000
- 31.** Partsinevelos, P., Mertikas, S., Agioutantis, Z., Tsioukas, V., Tripolitsiotis, A., Zervos, P., “Rockfall detection along road networks using close range photogrammetry”, 2nd International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of Environment, 7-10 April 2014, Pafos, Cyprus, (poster presentation).
- 32.** SafeLand Deliverable 4.1, Review of Techniques for Landslide Detection, Fast Characterization, Rapid Mapping and Long-Term Monitoring. Edited for the SafeLand European project by Michoud C, Abellan A., Derron M.-H and Jaboyedoff M. Available at <http://www.safeland-fp7.eu>, 2010
- 33.** Schenk T., Introduction to Photogrammetry, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science The Ohio State University, 2005
- 34.** Schmid H., An Analytical Treatment of the Orientation of a Photogrammetric Camera, Ballistic Research Laboratories, 1953
- 35.** Schumm S.A., Chorley R.J., Talus weathering and scarp recession in the COlorado plateaus, Zeit. fur Geom., 10, 11-36
- 36.** Slob, S. & Hack, 3D terrestrial laser scanning as a new field measurement and monitoring technique, H.R.G.K., ITC, Delft, The Netherlands, 2009
- 37.** Steiakakis C., Partsinevelos P., Tripolitsiotis A., Agioutantis Z., Mertikas S., Vlahou G., Design and system architecture of the GEOIM rockfall monitoring

system, 5th Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection, 29th-31st May 2014, Lecco Italy, RocsExs 2014

- 38.** Stylianidis E. ,Patias P. , Tsioukas V., Sechidis L. and Georgiadis C., A digital close-range photogrammetric technique for monitoring slope displacements,11th International Symposium on Deformation Measurements, Santorini,Greece,25-28 May 2003
- 39.** Tonini M., Abellan A., Rockfall detection from terrestrial LiDAR point clouds: A clustering approach using R, Faculty of Geosciences and Environment, University of Lausanne, Switzerland, Journal of Spatial Information Science number 8 (2014) pp. 95-110, 2013
- 40.** Triggs B., McLauchlan P. F., Hartley R. I., Fitzgibbon A. W., Bundle Adjustment — A Modern Synthesis, International Workshop on Vision Algorithms Corfu, Greece, September 21–22, Proceedings, 1999
- 41.** Vaaja M., Hyypä J., Kukko A., Kaartinen H., Hyypä H., Alho P., Mapping Topography Changes and Elevation Accuracies Using a Mobile Laser Scanner. Remote Sens. 2011, 3, 587-600. 2011
- 42.** Varnes D.J., Slope movement types and processes. In Landslides, analysis and control. National Academy of Sciences, Transportation Research Board, Special Report 176, pp. 11-33, 1978
- 43.** Vilajosana I., Surinach E., Abellan A., Khazaradze G., Garcia D., Llosa J.,Rockfall induced seismic signals: case study in Montserrat, Catalonia. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8, 805-812, 2008

44. Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M., Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, 2012
45. Youssef A., Pradhan B., Al-Kathery M., Barthellos G., Skilodimou H., Assessment of rockfall hazard at Al-Noor Mountain, Makkah city (Saudi Arabia) using spatio-temporal remote sensing data and field investigation. Journal of African Earth Sciences, S1464-343X(14)00329-X, 2014

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Μιχαήλ Δ., Αλγόριθμοι και Πολυπλοκότητα, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεματικής Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, 2009
2. Πάτιας Π., Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία, Εκδόσεις Ζήτη, σελ.13, 1999

Διαδίκτυο

- ❖ rocscience.com/help/rockfall/webhelp/RocFall.htm
- ❖ larissanet.gr/2011/04/10/5852/
- ❖ dailymail.co.uk/news/article-2554650/Two-dead-seven-injured-tourist-train-popular-French-Alps-ski-resort-derails-landslide.html
- ❖ amerisurv.com/PDF/LaserScanningVsPhotogrammetry080108.pdf
- ❖ agisoft.ru/wiki/PhotoScan/Capabilities
- ❖ facility.unavco.org/project_support/tls/tls.html, Accessed: 27 July 2013
- ❖ dm.hua.gr/michail/teaching/algs/slides/040_Greedy.pdf
- ❖ surveying.wb.psu.edu/sur111/Lectures/surveyissue2.pdf
- ❖ studentdavestutorials.weebly.com