



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ
ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ
ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΣΕΡΡΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
& ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ**



**ΔΙ-ΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΡΟΛΗΨΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ»**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

**Ζαλούμη Ελισάβετ
Τοπογράφος Μηχανικός Τ.Ε.**

**Διαχρονική Παρακολούθηση Επιφανειακών Μεταβολών σε Ενεργά
Ρήγματα με τη χρήση Επίγειου LiDaR και Γεωφυσικών
Διασκοπήσεων**

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

**Αλεξόπουλος Ιωάννης
Φουντούλης Ιωάννης
Βούλγαρης Νικόλαος**

**Επίκουρος Καθηγητής (Επιβλέπων)
Αναπληρωτής καθηγητής
Αναπληρωτής Καθηγητής**

**ΑΘΗΝΑ
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2012**

Ευχαριστίες

Μόλις έπιασα το στυλό και άρχισα να σκέφτομαι πόσους ανθρώπους επιθυμώ να ευχαριστήσω για τη συμμετοχή τους, ο καθένας με τον τρόπο του σε αυτό το εγχείρημα, και λέω εγχείρημα γιατί θέλω να τονίσω πως αυτή η εργασία αποτελεί κατά κάποιο τρόπο μία “πιλοτική εφαρμογή”, αν μπορώ να το πω έτσι, αντελήφθην πως η δουλειά αυτή είναι πράγματι αποτέλεσμα πολλών παραγόντων και συγκυριών που συνετέλεσαν ξεχωριστά για τη διεκπεραίωσή της.

Άλλοι παράγοντες αφορούν ανθρώπους που θέλησαν να προσφέρουν από καρδιάς και άλλοι αποτελούν απλά γεγονότα, που καθόλου τυχαία δεν συνέβησαν δεδομένες χρονικές στιγμές, οι οποίες στην πορεία αποδείχτηκαν οι καταλληλότερες.

Έτσι λοιπόν, οι συγκυρίες τα έφεραν να κάνω μία κουβέντα περί διπλωματικής εργασίας τον Ιούνιο του 2011 με το Μανώλη Βασιλάκη, η οποία απ’ ότι φάνηκε ήταν καταλυτική για την απόφασή μου να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, αν και δεν είχα ιδέα με ποιο τρόπο θα μπορούσε να στηθεί όλο αυτό, αφού δεν είχαμε τον βασικό εξοπλισμό.

Δεν ξέρω πως, ήταν μάλλον απλά να το αποφασίσω, κι όλα συνέβησαν κάπως μαγικά. Μέσω ενός συναδέλφου ήρθα σε επαφή με τον Γιώργο Παυλάκο, στέλεχος της METRICA A.E., η εταιρεία που μας παρείχε τον εξοπλισμό, του είπα την σκέψη μας για τη συγκεκριμένη εφαρμογή και αμέσως βάλαμε μπρος για την υλοποίησή της, καθώς το ενδιαφέρον για τα αποτελέσματα υπήρχε και από τις δύο πλευρές πια, δοκιμάζοντας κάτι καινούριο για όλους.

Η τεχνογνωσία της ομάδας της METRICA A.E., οι φοιτητές/εθελοντές του εργαστηρίου Γεωφυσικής του τμήματος, η προσωπική προσφορά, συμπαράσταση και δουλειά μερικών, μα κύρια η εμπιστοσύνη του Γιάννη Αλεξόπουλου (επιβλέπων), ο οποίος έδωσε την ιδέα για το “πάντρεμα” της εδαφικής με την υπεδαφική έρευνα, για την επίτευξη αυτού του στόχου, είναι κάποιοι από τους βασικούς συντελεστές.

Θα ήθελα σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω αρχικά τον ίδιο, τον κ. Ι. Αλεξόπουλο αφενός για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής μου εργασίας και αφετέρου για την αμέριστη συμπαράστασή του καθ’ όλη την διάρκεια των απαιτούμενων εργασιών μέχρι την ολοκλήρωσή της, την εταιρεία METRICA A.E. που ειλικρινά στάθηκε αρωγός στην όλη προσπάθεια παρέχοντάς μας από εξοπλισμό μέχρι προσωπικό, τόσο στις εργασίες πεδίου όσο και γραφείου για την πρώτη επεξεργασία των δεδομένων.

Επίσης, ευχαριστώ τον Μανώλη Βασιλάκη για το χρόνο που αφιέρωσε αναζητώντας λύσεις, συμβουλευόντάς με και παρέχοντας τον υπολογιστή του γραφείου του σε κάποιες περιπτώσεις που μας ήταν απαραίτητες οι δυνατότητές του κατά την επεξεργασία των δεδομένων, καθώς και μία σειρά ανθρώπων του χώρου.

Ευχαριστώ, όλους εσάς που εργαστήκατε και προσφέρατε με κάθε τρόπο:

Γιώργο Παυλάκο, Ερρίκο Σκάση, Παναγιώτη Πέτρου, Βίκτωρα Πλευράκη, Σπυρίδων Δίλαλο, Αναστάσιο Σταύρου, Δημήτριο Μιχιελιουδάκη, Κατερίνα Σταυριανάκη, Γεώργιο Νταβαρίνο, Σοφία Κωνσταντινίδου, Αρετή Μαυροπούλου και Χριστίνα Μερκάι.

Ιδιαίτερα όμως ευχαριστώ δύο φίλους, η υποστήριξη των οποίων ήταν εξίσου σημαντική για μένα. Τόσο, που χωρίς την βοήθειά τους, ίσως η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας και κατ' επέκταση αυτού του πτυχίου να μην ήταν εφικτή. Ευχαριστώ ολόψυχα τους φίλους Ευανθία Βακράκου και Γρηγόρη Ράμμο για τη φιλοξενία τους, όλους αυτούς τους μήνες, που επέτρεψε την παραμονή μου στην Αθήνα.

Τέλος, ευχαριστώ τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον κ. Ι. Φουντούλη και κ. Ν. Βούλγαρη, καθώς και τον κ. Δ. Παπανικολάου ως πρόεδρο του μεταπτυχιακού, ο οποίος έδωσε την ευκαιρία σε μένα και τους συμφοιτητές του έτους μου, που το είχαν ανάγκη, να παρατείνουμε τη διάρκεια των σπουδών μας.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	1
I. Τρισδιάστατη Σάρωση	
1.1 Επίγειος Τρισδιάστατος Σαρωτής (Terrestrial Laser Scanner)	7
1.1.1 Αρχές λειτουργίας – Καταγραφή δεδομένων	8
1.1.2 Τύποι – Χαρακτηριστικά - Ακρίβειες	11
1.2 Επίγεια τρισδιάστατη σάρωση LiDaR σε γεωλογικές εφαρμογές και φυσικές καταστροφές	14
1.2.1 Εφαρμογή τεχνικής LiDaR σε γεωλογικές εφαρμογές	15
1.2.2 Καταλληλότητα 3D σάρωσης για παρακολούθηση κατολισθητικών φαινομένων	16
II. Μεθοδολογία – Εργασίες Πεδίου	
2.1 Γεωλογικά στοιχεία	21
2.1.1 Τεκτονική και Νεοτεκτονική δομή – Το ρήγμα της Ψάθας	22
2.1.2 Γεωλογικό καθεστώς περιοχής μελέτης	25
2.2 Τοπογραφική αποτύπωση	30
2.3 Γεωφυσικές διασκοπήσεις	34
2.4 Επίγεια τρισδιάστατη σάρωση LiDaR	36
2.4.1 Προεργασία σαρώσεων	36
2.4.2 Διαδικασία σάρωσης	38
2.4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά Leica Scanstation C10	40
III. Επεξεργασία δεδομένων και στοιχείων	
3.1 Επεξεργασία δεδομένων σαρώσεων LiDaR	43
3.1.1 Σύνδεση σαρώσεων (Registration)	44
3.1.2 Γεωαναφορά μοντέλου	49
3.2 Δημιουργία ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου (Dem)	51
3.2.1 Βάσει ισοϋψών καμπύλων από Τ.Δ. κλίμακας 1:5.000	51
3.2.2 Δεδομένα LiDaR 1 ^{ης} σάρωσης	53
3.3 Αφαίρεση μεταξύ ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου από Τ.Δ. κλίμακας 1:5.000 και δεδομένα 1 ^{ης} σάρωσης	55
3.4 Αφαίρεση ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου (DEM) δεδομένων LiDaR.....	56
3.5 Αφαίρεση «point cloud» 1 ^{ης} και 2 ^{ης} σάρωσης στα κορήματα	57
3.6 Γεωφυσικά αποτελέσματα – Γεωηλεκτρικά Τομογράμματα.....	60
IV. Αποτελέσματα - Αξιολόγηση - Συμπεράσματα	
4.1 Παραγωγή ενιαίου τρισδιάστατου μοντέλου «point cloud» με χρωματική υφή	66
4.2 Διαχρονικές εδαφικές μεταβολές 1972-2011	67
4.3 Εδαφικές μεταβολές από δεδομένα LiDaR 1 ^{ης} και 2 ^{ης} σάρωσης.....	70

4.4 «Point Cloud» μεταβολών στην περιοχή των κορημάτων από δεδομένα LiDaR	71
4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων σύγχρονων τεχνικών λεπτομερούς αποτύπωσης σε σχέση με την κλασική τοπογραφία	73
4.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου τρισδιάστατης σάρωσης LiDaR	75
4.7 Υπεδαφική δομή.....	76
Βιβλιογραφία	

Εισαγωγή

Αν και ένα σημαντικό ποσοστό καταστροφικών φαινομένων είναι κλιματικού χαρακτήρα ή έχουν να κάνουν με ακραία καιρικά φαινόμενα, τα περισσότερα από αυτά οφείλονται σε φυσικές διεργασίες γεωδυναμικού χαρακτήρα. Πρόκειται δηλαδή για ταχέως εξελισσόμενα έντονα γεωλογικά φαινόμενα επιφανείας και βάθους, που συνδέονται με τη διαρκή κινητικότητα της λιθόσφαιρας (Παπανικολάου, Δ., Σίδερης, Χ., 2005). Καθώς η παρουσία των αένων αυτών φυσικών διεργασιών θα συνεχίσει να υπάρχει λόγω της συνεχούς μετατόπισης των λιθοσφαιρικών πλακών, γίνεται σαφές πως η αντιμετώπιση των φυσικών καταστροφών έγκειται στην ελαχιστοποίηση των δυσμενών επιπτώσεων τους στο ανθρωπογενές περιβάλλον. Συνεπώς, στόχο αποτελεί η όσο το δυνατόν βαθύτερη γνώση αυτών των φυσικών φαινομένων και της εξέλιξής τους, η οποία επιτρέπεται πλέον με τη χρησιμοποίηση της σύγχρονης τεχνολογίας που μπορεί να συμβάλει με κάθε τρόπο στην μελέτη και ανάλυσή τους.

Οι ενεργές διαρρήξεις, οι οποίες παράγουν μία δυναμική και συνεχώς εξελισσόμενη μορφολογία κατά μήκος των κατόπτρων των ρηγμάτων αλλά και της ευρύτερης περιοχής όπου τα συναντάμε, αποτελούν τέτοιο παράδειγμα φαινομένου γεωδυναμικού χαρακτήρα, αφού η εμφάνισή τους οφείλεται στην εκτόνωση συσσωρευμένων τάσεων. Η δράση των τεκτονικών αυτών δυνάμεων έχει ως αποτέλεσμα τις σχετικές μετατοπίσεις όλης της επιφάνειας ενός ρήγματος, οι οποίες δημιουργούν με τη σειρά τους μορφολογικές ασυνέχειες παράγοντας μικρότερες δομές επιδεκτικές στη διάβρωση, που είτε κατολισθαίνουν σταδιακά, είτε αποκολλώνται από το αρχικό υλικό στην περίπτωση που συναντούμε βραχώδη εδάφη προκαλώντας καταπτώσεις.

Για την αποτύπωση, τη χαρτογράφηση και το χαρακτηρισμό τέτοιων περιοχών με σκοπό την χωροχρονική παρακολούθηση της εξέλιξης του φαινομένου, δεδομένου πως η κατάσταση μεταβάλλεται συνεχώς και μπορεί να επιδεινωθεί οποιαδήποτε στιγμή λόγω άμεσης εξάρτησης από τις καιρικές συνθήκες, επιτακτική γίνεται η ανάγκη συλλογής χωρικών δεδομένων μεγάλης ανάλυσης σε ορισμένες χρονικές περιόδους. Τα προβλήματα που προκύπτουν σχετικά με την απόκτηση της απαιτούμενης πληροφορίας σε τέτοιες δυναμικές περιοχές είναι η δυσκολία προσβασιμότητας στις απότομες επιφάνειες, η ασφάλεια κατά την διάρκεια των μετρήσεων, η απαίτηση πολύωρης εργασίας στο πεδίο, η ακρίβεια των μεθόδων συλλογής δεδομένων και η έλλειψη παλαιότερων δεδομένων λόγω όλων αυτών των δυσκολιών.

Η πλέον σύγχρονη τεχνική λεπτομερούς αποτύπωσης, που έρχεται να αυτοματοποιήσει όλη αυτή τη διαδικασία με τη δυνατότητα απομακρυσμένης συλλογής πληροφορίας από το αντικείμενο ενδιαφέροντος και προσφέροντας μία σειρά από οφέλη, είναι αυτή της τρισδιάστατης σάρωσης ή LiDaR(Light Detection and Range), εναέριας ή επίγειας, η οποία βασίζεται στη τεχνολογία των τρισδιάστατων σαρωτών (3D Laser Scanners).

Πρόκειται για συστήματα τα οποία συλλέγουν και καταγράφουν αυτόματα τρισδιάστατες συντεταγμένες μιας επιφάνειας ή ενός αντικειμένου σε πραγματικό χρόνο (βλ. Εικ. 1). Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την ανάλυση της μορφολογίας επιφάνειας ενός ρήγματος και κατά συνέπεια της λεπτομερούς χαρτογράφησης των δομών της. Η απόδοση της τρισδιάστατης γεωμετρίας με «νέφος σημείων» (point cloud) και όχι με μεμονωμένα σημεία όπως γίνεται στις κλασικές μεθόδους αποτύπωσης, αποδίδει όλες τις λεπτομέρειες της επιφάνειας που σαρώνεται, χωρίς κενά και ανακρίβειες σε πολύ σύντομο χρόνο.



Εικόνα 1 Leica ScanStation C10

Το «νέφος σημείων» ενός αντικειμένου που έχει σαρωθεί αποτελεί δεδομένο έτοιμο για μετρήσεις από σημείο σε σημείο (αποστάσεις - γωνίες), τρισδιάστατη αναπαράσταση, μοντελοποίηση, παραγωγή ισοϋψών, δισδιάστατων σχεδίων αλλά και για εφαρμογές σε σχεδιαστικά προγράμματα CAD. Εκτός όμως της γεωμετρικής πληροφορίας του χώρου, που είναι άμεσα συσχετισμένη με την ιδιότητα του τοπογράφου, η τρισδιάστατη σάρωση παρέχει πολύτιμα στοιχεία για την υφή και το υλικό των αντικειμένων που αποτυπώνονται, χάρη στην ενσωματωμένη κάμερα του σαρωτή, με την οποία γίνεται καταγραφή της χρωματικής πληροφορίας (RGB).

Η εργασία που ακολουθεί αποσκοπεί στην παρουσίαση των δυνατοτήτων της τεχνικής της επίγειας τρισδιάστατης σάρωσης LiDaR και πιο συγκεκριμένα, στη διαχρονική παρακολούθηση επιφανειακών μεταβολών με την εφαρμογή της, σε μια περίπου κάθετη επιφάνεια ενεργού ρήγματος με πολλές τεκτονικές δομές σε αυτή, αλλά και με μεγάλες ποσότητες από εύθραυστα υπολείμματα υλικών στο πάνω μέρος της. Η συστηματική μελέτη και επέμβαση σε μια περιοχή τεκτονικής ασυνέχειας, η οποία αποτελεί ταυτόχρονα φυσικό πρανές της μιας οριογραμμής κύριου οδικού άξονα και όπου παρατηρούνται κατολισθητικά φαινόμενα, απαιτεί ένα λεπτομερές υπόβαθρο αποτύπωσης για την τεκμηρίωση της σύνθετης γεωμετρίας και της μορφής της. Η τοπογραφική αποτύπωση και απόδοση των πρανών κατά μήκος του οδικού δικτύου κατατάσσονται στις εργασίες καθοριστικής σημασίας, τόσο για την γεωτεχνική ανάλυση όσο και για την αξιολόγηση της ασφάλειάς του.

Το αντικείμενο μελέτης αφορά στην επιφάνεια του ενεργού ρήγματος της Ψάθας αλλά και στην ευρύτερη περιοχή κατά μήκος της επαρχιακής - παραλιακής οδού Αλεποχωρίου - Ψάθας - Βιλίων, στο τμήμα που διέρχεται από το ρήγμα με μεγάλο ορατό άλμα της τάξης

των 185m. Βρίσκεται στο ανατολικό άκρο του Κορινθιακού κόλπου και πρόκειται για μία περιοχή με έντονες τεκτονικές παραμορφώσεις αφού η ίδια αποτελεί ρηξιγενή μεταβατική ζώνη, όπου σύμφωνα με την έκθεση γεωτεχνικής μελέτης του Μπέλλα Μ. (2002), εκδηλώθηκαν καταπτώσεις συνολικού όγκου περί τα 40m³.

Η παρούσα εργασία αποτελείται από τέσσερα (4) συνολικά κεφάλαια.

Το 1^ο κεφάλαιο αναφέρεται γενικά στη τεχνική της επίγειας τρισδιάστατης σάρωσης, όπου περιγράφονται οι βασικές αρχές αυτής, τα μέρη του συστήματος ενός επίγειου σαρωτή, οι αρχές λειτουργίας του, οι τύποι σαρωτών που υπάρχουν καθώς και οι ακρίβειες που μπορούν να επιτευχθούν με αυτή τη μέθοδο αποτύπωσης. Επιπλέον, γίνεται μία αναφορά σχετικά με την καταλληλότητα αυτής της τεχνικής στην παρακολούθηση κατολισθητικών φαινομένων και άλλων γεωλογικών εφαρμογών ή μελετών καταστροφικών φαινομένων, στις οποίες έχει χρησιμοποιηθεί σύμφωνα με τη βιβλιογραφία.

Στο 2^ο κεφάλαιο αναπτύσσεται η μεθοδολογία των εργασιών πεδίου που έλαβαν χώρα στην περιοχή μελέτης. Αρχικά, γίνεται μια αναφορά στα γεωλογικά στοιχεία, όπως η τεκτονική και νεοτεκτονική δομή, καθώς και στο γεωλογικό καθεστώς. Έπειτα, αναλύονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά την πρακτική εφαρμογή της τοπογραφικής αποτύπωσης, των γεωφυσικών διασκοπήσεων, καθώς και της επίγειας τρισδιάστατης σάρωσης, η οποία περιλαμβάνει το στάδιο προεργασίας λήψεων και την διαδικασία συλλογής δεδομένων του αντικειμένου. Επιπρόσθετα, δίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του σαρωτή Leica ScanStation C10 που χρησιμοποιήθηκε για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Ακολουθεί το 3^ο κεφάλαιο, με την περιγραφή της επεξεργασίας όλων αυτών των δεδομένων και στοιχείων, που αφορά στην δημιουργία των ενιαίων τρισδιάστατων μοντέλων δεδομένων LiDaR δύο διαφορετικών χρονικών περιόδων και γεωαναφορά αυτών, στην δημιουργία ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων αναγλύφου (DEM-Digital Elevation Model) από τις ισοϋψείς καμπύλες τοπογραφικών διαγραμμάτων (κλ. 1:5.000) αλλά και των δεδομένων της 1^{ης} σάρωσης, στην αφαίρεση των DEM αλλά και των «point cloud» της εκάστοτε σάρωσης, καθώς και στην δημιουργία των γεωηλεκτρικών τομογραμμάτων.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και γίνεται μία αξιολόγηση αυτών, όσον αφορά στο ενιαίο τρισδιάστατο μοντέλο υψηλής ανάλυσης με χρωματική υφή, στις διαχρονικές εδαφικές μεταβολές μεταξύ 1972-2011 αλλά και 1^{ης} - 2^{ης} σάρωσης από τη σύγκριση των DEM που παρήχθησαν με διαφορετικές μεθοδολογίες για την ευρύτερη περιοχή, καθώς και στο «point cloud» των μεταβολών που προέκυψε από την αφαίρεση των δύο διαφορετικών χρονικά «point cloud». Ακολουθεί μία σύγκριση των αποτελεσμάτων των σύγχρονων τεχνικών λεπτομερούς αποτύπωσης σε σχέση με αυτά των μεθόδων αποτύπωσης της κλασικής τοπογραφίας, αξιολογώντας έτσι τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της επίγειας τρισδιάστατης σάρωσης LiDaR. Τέλος, παρουσιάζονται η γεωλογική αξιολόγηση των γεωφυσικών αποτελεσμάτων και η ανάδειξη της υπεδαφικής δομής με την κατασκευή γεωλογικών τομών και τρισδιάστατων απεικονίσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι

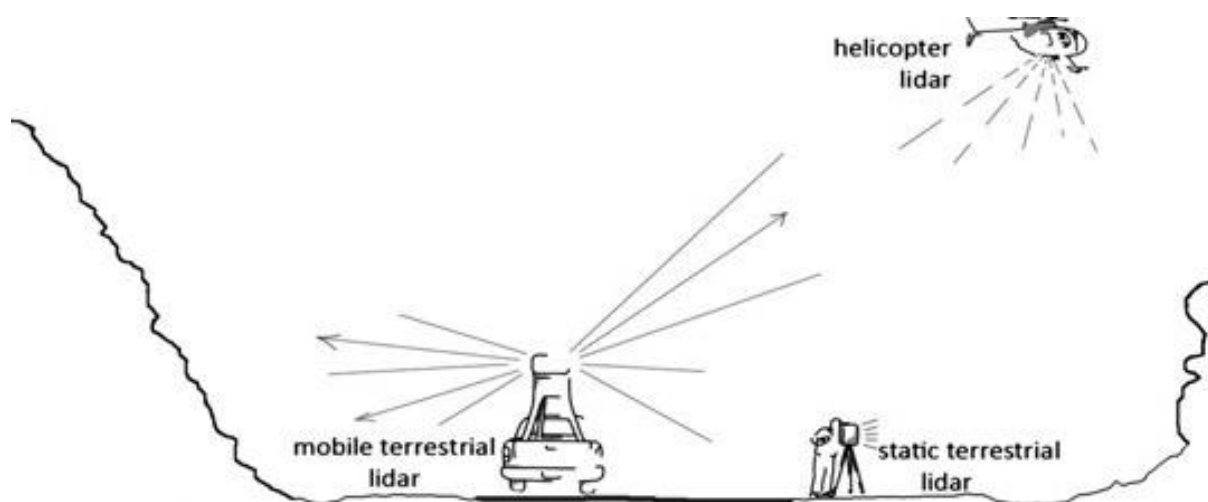
Τρισδιάστατη Σάρωση

Τα συστήματα τοπογραφικής αποτύπωσης διακρίνονται σε αυτά που μπορούν να δώσουν μονοδιάστατη πληροφορία, όπως η απλή μετροταινία και σε αυτά που παρέχουν τρισδιάστατη πληροφορία θέσης, οριζοντιογραφικά και υψομετρικά. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται στην κλασσική τοπογραφία και είναι οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί EDM (Electronic Distance Measurement) και τα συστήματα προσδιορισμού θέσης GPS (Global Positioning System). Αυτά τα συστήματα είναι αξιόπιστα, έχουν μεγάλες ακρίβειες, αλλά παρέχουν μόνο σημειακή πληροφορία.

Η φωτογραμμετρία, θεωρείται ένα πεδίο που είχε πρωτοπορήσει τις προηγούμενες δεκαετίες στο χώρο των αποτυπώσεων, αποδίδοντας ολόκληρες επιφάνειες, με την αντικατάσταση των παραδοσιακών φιλμ και της μηχανικής επεξεργασίας, σε υψηλής ανάλυσης ψηφιακών καμερών και επεξεργασίας μέσω λογισμικών αντίστοιχα, αλλά η πλέον σύγχρονη τεχνική συλλογής τρισδιάστατης χωρικής πληροφορίας μιας επιφάνειας ή ενός αντικειμένου, είναι αυτή της μεθόδου LiDaR (Light Detection and Ranging), συχνά αναφερόμενο και ως «3D Laser Scanning».

Αυτό το σύστημα μέτρησης, που βασίζεται στην εκπομπή δέσμης φωτός, επιτρέπει την ταχεία απόκτηση ψηφιακών δεδομένων, περιγράφοντας μία επιφάνεια με μεγάλη λεπτομέρεια, με τη μέθοδο της τρισδιάστατης επίγειας ή εναέριας σάρωσης.

Η επίγεια τρισδιάστατη σάρωση εφαρμόζεται είτε με την χρήση ειδικού τρίποδα, όπου τοποθετείται ο σαρωτής, στερεωμένος στο έδαφος (Static Scanning), είτε με την τοποθέτησή του σε ειδική κινητή πλατφόρμα σε αυτοκινούμενο όχημα (Mobile Scanning), ενώ στην εναέρια σάρωση (Airborne Scanning) οι μετρήσεις πραγματοποιούνται από αεροπλάνα ή ελικόπτερα στα οποία προσαρμόζεται ειδική βάση με όλο το σύστημα του σαρωτή.



Εικόνα 1.1 Τεχνική LiDaR [Lato et al., 2012]

1.1 Επίγειος Τρισδιάστατος Σαρωτής (Terrestrial Laser Scanner)

Σε αντίθεση με τα τοπογραφικά όργανα όπου ο χειριστής επιλέγει τα σημεία που θα αποτυπώσει, οι σαρωτές αποτυπώνουν τυχαία αλλά μεθοδικά, ένα πυκνό σύνολο σημείων. Ο χειριστής επιλέγει μόνο το τμήμα του αντικειμένου που επιθυμεί να σαρωθεί και την πυκνότητα των σημείων (L. Bornaz, F. Rinaudo, 2004).

Ένα σύστημα επίγειου σαρωτή εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας συνήθως αποτελείται από (βλ. Εικ. 1.2):

A. Τον σαρωτή, που περιλαμβάνει:

- τον πομπό και τον δέκτη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπει και λαμβάνει σήμα αντίστοιχα
- την καταγραφική μονάδα στην οποία καταγράφονται η επιστροφή του σήματος και ο χρόνος εκπομπής-λήψης
- το χρονόμετρο για την μέτρηση του χρόνου μετάβασης και επιστροφής του εκπεμπόμενου σήματος
- το σύστημα των περιστρεφόμενων καθρεφτών που κατευθύνει την δέσμη της ακτινοβολίας.

B. Την μπαταρία, για την τροφοδοσία του συστήματος.

Γ. Την μονάδα ελέγχου, η οποία βρίσκεται ενσωματωμένη στο σαρωτή και έτσι ο χρήστης μπορεί να διαχειρίζεται την όλη διαδικασία πολύ εύκολα από την οθόνη και έπειτα να μεταφέρει τα δεδομένα του με USB-flash, ή εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιείται ένα χειριστήριο (Controller) που συνδέεται ασύρματα με υπέρυθρες (Bluetooth), από όπου επίσης γίνονται οι ρυθμίσεις του οργάνου.

Επιπλέον, δίνεται η επιλογή σύνδεσης με φορητό υπολογιστή, όπου είναι εγκατεστημένο το λογισμικό σάρωσης και επεξεργασίας των δεδομένων, ώστε ο χρήστης να έχει οπτική επαφή με τα αποτελέσματα της εκάστοτε σάρωσης σε πραγματικό χρόνο. Αυτό παρέχει την δυνατότητα να γίνεται επιτόπιος έλεγχος και άμεση παρέμβαση σε περίπτωση που το αποτέλεσμα δεν είναι ικανοποιητικό.

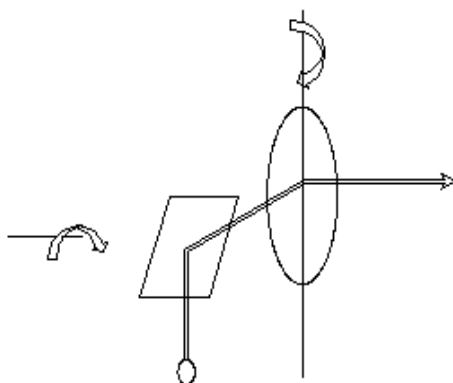
1.1.1 Αρχές λειτουργίας – Καταγραφή δεδομένων

Η λειτουργία του τρισδιάστατου σαρωτή βασίζεται στην εκπομπή και λήψη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας laser (Light Amplification by Stimulated Emission of



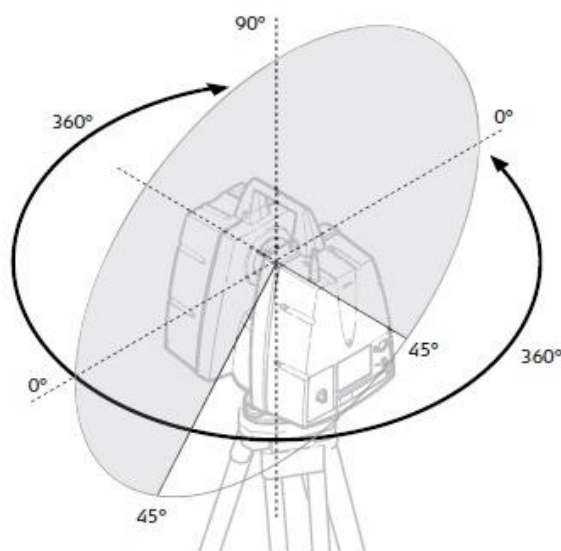
Εικόνα 1.2 Μέρη συστήματος σαρωτή

Radiation - ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας) σε συχνότητα που ορίζει ο κατασκευαστής, συνήθως υπέρυθρη. Η δέσμη αυτή προσπίπτει σε ένα σύστημα καθρεφτών, που περιστρέφονται με σερβομηχανισμό και εξασφαλίζουν την κίνησή της στον χώρο (βλ. Σχ. 1.1).



Σχήμα 1.1 Σύστημα καθρεπτών [Abellán et al., 2006]

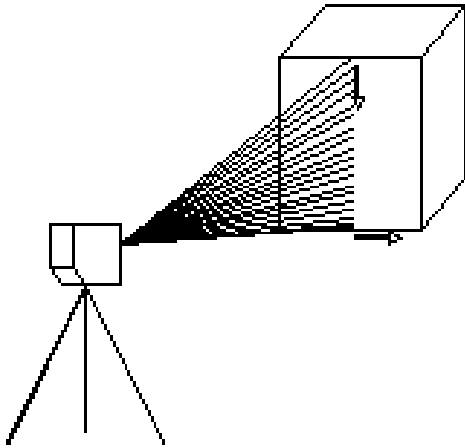
Το εύρος σάρωσης εξαρτάται κάθε φορά από το μοντέλο και την τεχνολογία του κάθε σαρωτή, αλλά στα περισσότερα πρόσφατα μοντέλα η δυνατότητα κίνησης της δέσμης φωτός φτάνει σχεδόν ολόκληρο κύκλο, τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη έννοια. Ενδεικτικά, το προκαθορισμένο εύρος σάρωσης του Leica ScanStation C10 είναι γωνίας $360^\circ \times 270^\circ$ (βλ. Σχ. 1.2).



Σχήμα 1.2 Εύρος σάρωσης $360^\circ \times 270^\circ$ (Leica ScanStation C10 Brochure)

Το εύρος της γωνίας δέσμης ορίζει το οπτικό πεδίο του σαρωτή. Η δέσμη προσπίπτει στο αντικείμενο και ανακλάται καταργώντας έτσι τον ανακλαστήρα που χρησιμοποιείται στην κλασική τοπογραφία. Στην συνέχεια επιστρέφει στον δέκτη όπου και καταγράφεται ο χρόνος μετάβασης - επιστροφής της, οι γωνίες σάρωσης με τις οποίες εκπέμπεται η δέσμη

από τον σαρωτή (οριζόντια - κατακόρυφη γωνία) και η ένταση i της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας. Η σάρωση του προς αποτύπωση αντικειμένου προκύπτει σαν διαδοχική σειρά στηλών διαδοχικών σημείων που σχηματίζουν μια τρισδιάστατη εικόνα (βλ. Σχ. 1.3).



Σχήμα 1.3 Σύστημα λειτουργίας σαρωτή (L. Bornaz, F. Rinaudo, 2004)

Τα σημεία του αντικειμένου που αποτυπώνονται με την τεχνική της σάρωσης, ενώ διακρίνονται ως μεμονωμένα σημεία στην οθόνη του υπολογιστή, παρουσιάζονται ενιαία με τη μορφή ενός «νέφους σημείων» (point cloud) που σχηματίζει και αποδίδει με ακρίβεια την τρισδιάστατη γεωμετρία του αντικειμένου που σαρώνεται. Αναφέρεται επίσης και ως *DDSM - Dense Digital Surface Model - Πυκνό Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας* (L. Bornaz, F. Rinaudo, 2004).

Τα δεδομένα αυτά που προκύπτουν κατά τη σάρωση καταγράφονται αυτόματα στην καταγραφική μονάδα του σαρωτή και μεταφέρονται στη μονάδα ελέγχου, δηλαδή έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή υψηλών δυνατοτήτων, όπου και επεξεργάζονται. Η απαίτηση μονάδας ελέγχου υψηλών δυνατοτήτων προκύπτει από την ανάγκη διαχείρισης αρχείων μεγάλου όγκου δεδομένων.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, η πληροφορία που μπορεί να παραχθεί κατά την καταγραφή είναι:

- ✓ ο χρόνος μετάβασης - επιστροφής του σήματος
- ✓ οι γωνίες σάρωσης κατά την εκπομπή της δέσμης
- ✓ η ένταση i της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας και το RGB

Αυτό το σύνολο πληροφοριών κάνουν εφικτό τον υπολογισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων κάθε σημείου χρησιμοποιώντας γεωμετρικές εξισώσεις (βλ. Σχ. 1.4). Ο σαρωτής καταγράφει τις δύο γωνίες θ και ϕ καθώς και την απόσταση ρ . Με τις γωνίες αυτές υπολογίζονται οι πολικές συντεταγμένες και οι καρτεσιανές συντεταγμένες (x, y, z) των σημείων του αντικειμένου ως εξής:

Για το x , από το τρίγωνο που σχηματίζουν οι πλευρές α, x και y δίνεται η σχέση:

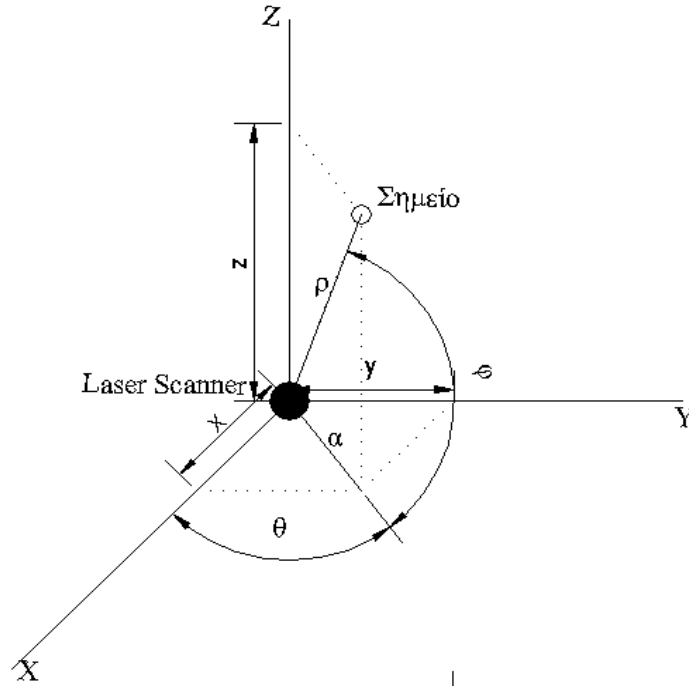
$$\cos \theta = \frac{x}{\alpha} \Rightarrow x = \cos \theta * \alpha \quad (1)$$

το α υπολογίζεται από το τρίγωνο με πλευρές α, z και ρ :

$$\cos \phi = \frac{\alpha}{\rho} \Rightarrow \alpha = \cos \phi * \rho \quad (2)$$

Από τις σχέσεις **(1)** και **(2)**, η εξίσωση υπολογισμού του x θα είναι:

$$x = \cos \theta * \cos \phi * \rho$$



Σχήμα 1.4 Απεικόνιση των στοιχείων θ , ϕ , ρ , στο τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς (L. Bornaz, F. Rinaudo, 2004)

Αντίστοιχα για το y και από το ίδιο τρίγωνο α , x και y έχουμε:

$$\sin \theta = \frac{y}{\rho} \Rightarrow y = \sin \theta * \rho \quad (3)$$

Από τις σχέσεις **(3)** και **(2)**, η εξίσωση υπολογισμού του y θα είναι:

$$y = \sin \theta * \cos \phi * \rho$$

Τέλος το z υπολογίζεται από το τρίγωνο με πλευρές α , z και ρ :

$$\sin \phi = \frac{z}{\rho} \quad \text{οπότε,}$$

$$z = \sin \phi * \rho$$

Η απόσταση προκύπτει από το χρόνο μετάβασης - επιστροφής του σήματος εκπομπής και υπολογίζεται μέσω του τύπου: $\frac{(c * \Delta t)}{2}$, όπου c η ταχύτητα διάδοσης της ακτινοβολίας στον χώρο, Δt ο χρόνος από την στιγμή εκπομπής μέχρι την επιστροφή και το γινόμενο αυτό δια δύο γιατί ο χρόνος Δt αναφέρεται στον χρόνο μετάβασης και επιστροφής.

Για κάθε σημείο υπάρχει μια αντίστοιχη τετράδα (x, y, z, i), που παρέχει πληροφορία για τη θέση αλλά και την υφή του αντικειμένου. Με την τιμή i της επιστρεφόμενης ενέργειας, δίνεται χρωματική απόχρωση στα αντικείμενα που αποτυπώνονται, ανάλογα με τον δείκτη ανακλαστικότητας του κάθε υλικού.

Τα προϊόντα των σαρώσεων μπορούν να είναι:

- «Νέφη σημείων» (point clouds). Τέτοιας μορφής προϊόντα μπορούν πολύ εύκολα να παρουσιαστούν μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή σε τρισδιάστατο περιβάλλον, ενώ αποτελούν ένα ικανοποιητικό προϊόν για αντικείμενα απλού σχήματος ή όψεις. Αντίθετα, για αντικείμενα πιο σύνθετης γεωμετρίας, τα «νέφη σημείων» δεν διευκολύνουν την αναγνώριση και ερμηνεία της μορφής των αντικειμένων, ενώ ταυτόχρονα ο μεγάλος αριθμός σαρώσεων που απαιτείται για την πλήρη αποτύπωση τους, συνεπάγεται την απώλεια ακρίβειας κατά την επεξεργασία τους.
- Πλέγμα τριγώνων (Mesh), όπου αποδίδεται η πραγματική μορφή μίας επιφάνειας πραγματοποιώντας παρεμβολή ανάμεσα σε πολύγωνα που σχηματίζονται από τα σαρωμένα σημεία.
- Ψηφιακές εικόνες απόστασης από το σαρωτή (Range Images)
- Παραμετρικές επιφάνειες ή μοντέλα

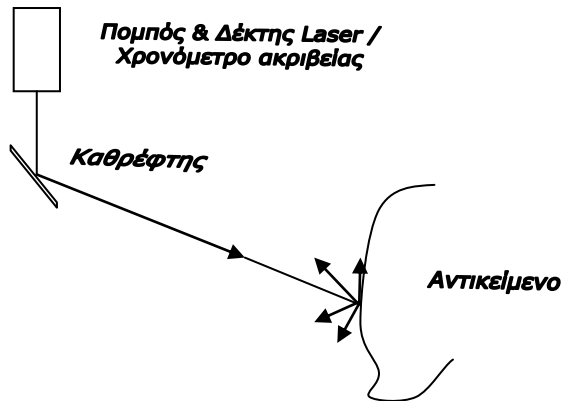
1.1.2 Τύποι - Χαρακτηριστικά - Ακρίβειες

Οι επίγειοι τρισδιάστατοι σαρωτές κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους σε:

➤ Ranging

Η μέθοδος των παλμών χρησιμοποιείται από τους σαρωτές μέσης και μεγάλης εμβέλειας. Τα όργανα εκπέμπουν την ακτίνα laser και η απόσταση μεταξύ του πομπού, του οργάνου και της επιφάνειας, στην οποία μερικώς ανακλάται η ακτίνα, υπολογίζεται από το χρόνο που χρειάζεται ο παλμός για να επιστρέψει στο δέκτη του οργάνου (βλ. Σχ. 1.5).

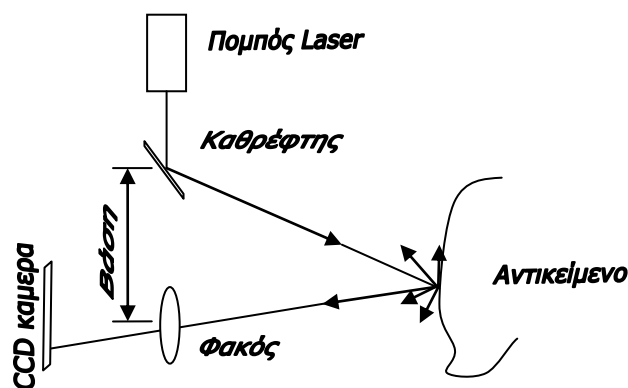
Ο χρόνος μετράται με υψηλής ακρίβειας χρονόμετρα και η απόσταση υπολογίζεται από τη σχέση $s = \frac{1}{2} * c * \Delta t$, όπου Δt ο χρόνος επιστροφής του σήματος και c η ταχύτητα του φωτός.



Σχήμα 1.5 Αρχή λειτουργίας Ranging σαρωτή

► Triangulation

Οι σαρωτές αυτού του τύπου αποτελούνται από μία βάση, στο ένα άκρο της οποίας βρίσκεται ο πομπός της ακτίνας laser, που εκπέμπεται με γνωστή αυξανόμενη γωνία πάνω στο αντικείμενο, ενώ στο άλλο άκρο της είναι τοποθετημένη μία ψηφιακή CCD (Charge Coupled Device) κάμερα (βλ. Σχ. 1.6), που εντοπίζει το στίγμα της ακτίνας επί του αντικειμένου με επίσης γνωστή γωνιακή κίνηση.



Σχήμα 1.6 Αρχή λειτουργίας Triangulation σαρωτή

Η επίλυση του τριγώνου που δημιουργείται από το σημείο εκπομπής της ακτίνας, το σημείο ανάκλασης στην επιφάνεια του αντικειμένου και το προβολικό κέντρο της μηχανής CCD, οδηγεί στον υπολογισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων των σημείων που αποτελούν την επιφάνεια του αντικειμένου.

Η αρχή του τριγωνισμού με σταθερή βάση, χρησιμοποιείται στη γεωδαισία και είναι γνωστό ότι η ακρίβεια προσδιορισμού της απόστασης οργάνου – αντικειμένου, ελαττώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης.

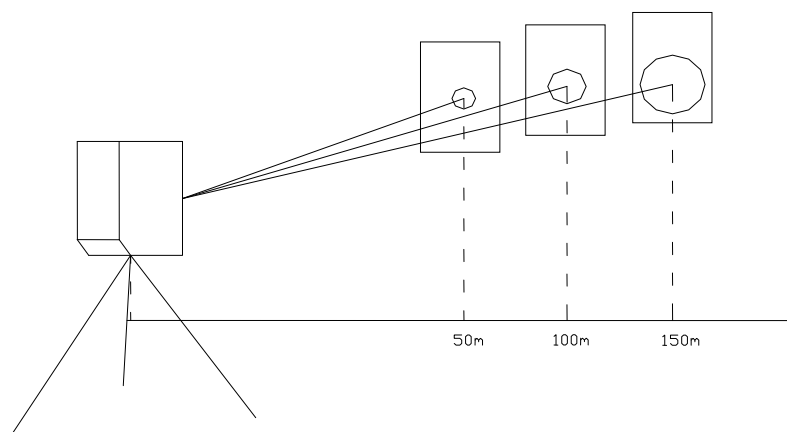
Οι σαρωτές τύπου Triangulation, πετυχαίνουν μεγαλύτερες ακρίβειες σε αντικείμενα που βρίσκονται σε βεληνεκές μικρότερο των δύο μέτρων, ενώ οι τύπου Ranging σαρωτές,

φτάνουν έως και 500 μέτρα απόσταση. Πάντως, η παραπάνω μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και με την τοποθέτηση δύο CCD μηχανών στα δύο άκρα της βάσης.

Άλλη μία κατηγοριοποίηση σαρωτών αφορά στον τρόπο υπολογισμού της απόστασης σημείου – σαρωτή. Υπάρχουν οι “Time Of Flight” σαρωτές, οι οποίοι διαθέτουν χρονόμετρο και η απόσταση υπολογίζεται από το χρόνο μετάβασης – επιστροφής του εκπεμπόμενου σήματος, καθώς και οι “Phase Comparison” σαρωτές, όπου χρησιμοποιείται η διαφορά φάσης μεταξύ του αρχικού και του λαμβανόμενου κύματος. Ο σαρωτής Leica ScanStation C10, που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εφαρμογή, ανήκει στην κατηγορία Ranging και είναι μεθόδου “Time Of Flight”.

Το επόμενο θέμα που τίθεται, όπως και σε οποιαδήποτε μέτρηση ενόργανη ή μη, είναι η ακρίβεια. Η ακρίβεια των μετρήσεων αυτής της μεθοδολογίας είναι άμεσα συσχετισμένη με την απόσταση μεταξύ σαρωτή και αντικειμένου, την ανακλαστικότητα των επιφανειών που σαρώνονται, αλλά και το μέγεθος της κουκίδας της δέσμης laser. Οι ακρίβειες που είναι δυνατόν να επιτευχθούν στην αποτύπωση με σάρωση είναι αρκετά υψηλές και πιο συγκεκριμένα, ο προσδιορισμός της τρισδιάστατης θέσης μεμονωμένων σημείων γίνεται με ακρίβεια της τάξης των $\pm 1-6\text{mm}$ για συνήθεις αποστάσεις των 50m του αντικειμένου από τον σαρωτή. Όμως, η ακρίβεια βελτιώνεται σημαντικά όταν ακολουθήσει επεξεργασία των δεδομένων (νέφη σημείων) και γίνει μοντελοποίηση επιφάνειας με τιμές που ανέρχονται στα $\pm 2\text{mm}$, ενώ η ακρίβεια μέτρησης των γωνιών κυμαίνεται στα $\pm 60 \mu\text{rad}$. Γενικότερα, οι ακρίβειες διαφοροποιούνται αναλόγως τον κατασκευαστή και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε οργάνου.

Οι σαρωτές τύπου Ranging, είναι σε θέση να αποτυπώνουν σημεία που απέχουν από 1 έως και 300 μέτρα από το σημείο λήψης, αλλά όπως προαναφέρθηκε όσο αυξάνεται η απόσταση, τόσο μειώνεται η ακρίβεια. Οι διαστάσεις της κουκίδας (spot) της δέσμης είναι 4.5mm στα 50m, ενώ αυτή μεγαλώνει ανάλογα με την απόσταση. Ενδεικτικά στα 200 μέτρα η κουκίδα έχει διάσταση 2.9 cm.



Σχήμα 1.7 Διαστάσεις κουκίδας (spot) laser

1.2 Επίγεια τρισδιάστατη σάρωση LiDaR σε γεωλογικές εφαρμογές και φυσικές καταστροφές

Η εκδήλωση των ακραίων, σε ένταση και έκταση, φυσικών φαινομένων ή καταστροφικών φαινομένων μέσα στο χρόνο, υπήρχε πάντοτε στη γεωλογική ιστορία, με διαφορετικές επιπτώσεις κάθε φορά, καθώς αυτές εξαρτώνται τόσο από την ύπαρξη ή μη οργανωμένων κοινωνιών στην συγκεκριμένη γεωγραφική θέση, όσο και από το επίπεδο διαβίωσης αυτών, του πολιτισμού και της τεχνολογικής τους ανάπτυξης (Λέκκας Ε, 2000).

Μία τοπογραφική αποτύπωση με τη μέθοδο της επίγεια τρισδιάστατης σάρωσης LiDaR μπορεί να παρέχει γρήγορα και λεπτομερή δεδομένα, για τη δημιουργία τοπογραφικών χαρτών ή ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου (DEM) κατά τη διάρκεια ενός καταστροφικού φαινομένου, όταν η άμεση παρέμβαση κρίνεται απαραίτητη. Είναι πολύ σημαντικό να δημιουργηθούν χάρτες άμεσα για την αποκατάσταση ενός καταστροφικού γεγονότος, αλλά και την πρόληψη από την εκδήλωση ενός δεύτερου [Prokop and Panholzer, 2009].

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της μεθοδολογίας είναι ότι η συλλογή των δεδομένων γίνεται ενεργά, άμεσα σε ψηφιακή μορφή και σε πραγματικό χρόνο και έτσι τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα για τη χρήση σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Η μορφολογία μπορεί εύκολα να παρουσιαστεί λόγω της αφθονίας σημείων και μπορεί να συλλεχθεί πληροφορία σε μέρη που είναι δύσκολο να αποτυπωθούν με άλλες μεθόδους την στιγμή του συμβάντος.

Σύμφωνα με τους [Ono et al., 2000], το πιο σημαντικό για τις μετρήσεις τοπογραφίας τη στιγμή ενός καταστροφικού γεγονότος είναι να αποκτηθούν τα αποτελέσματα όσο το δυνατόν γρηγορότερα και να υπάρχει μία επαρκής ακρίβεια ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις απαραίτητες κινήσεις-αποφάσεις. Τα στοιχεία που θεωρούνται απαραίτητα την στιγμή μιας καταστροφής είναι:

1. Δυνατότητα μετρήσεων σε σύντομο χρονικό διάστημα
2. Επαρκή ακρίβεια των μετρήσεων, με βάση την οποία μπορούν να ληφθούν οι κατάλληλες αποφάσεις
3. Δυνατότητα απόκτησης και εξαγωγής δεδομένων σε ψηφιακή μορφή, έτσι ώστε να μπορούν άμεσα να χρησιμοποιηθούν
4. Δυνατότητα μετρήσεων με ανεξαρτησία φωτισμού (κατά τη διάρκεια της νύχτας)
5. Δυνατότητα απόκτησης δεδομένων έξω από την πληγείσα περιοχή-θέση συμβάντος
6. Δυνατότητα μετρήσεων ανεξαρτήτου καιρικών συνθηκών

Η χρήση της τρισδιάστατης σάρωσης αποτελεί μια εναλλακτική μεθοδολογία λεπτομερούς χαρτογράφησης και ένα σημαντικό εργαλείο στις αποτυπώσεις τέτοιων απρόσιτων περιοχών, αφού δίνει την δυνατότητα παραγωγής τρισδιάστατων ψηφιακών συντεταγμένων παρέχοντας υψηλή ακρίβεια, ταχύτητα, ασφάλεια κατά την διαδικασία συλλογής της πληροφορίας, ευκολία στην επεξεργασία και μοντελοποίηση των

δεδομένων, καθώς και μείωση του κόστους παραγωγής συγκριτικά με τις κλασικές μεθόδους αποτύπωσης.

Παράλληλα, γίνεται καταγραφή της χρωματικής πληροφορίας της επιφάνειας που σαρώνεται με τη βοήθεια ενσωματωμένης κάμερας, απευθείας από τον σαρωτή, η οποία φωτογραφίζει ότι υπάρχει στο οπτικό πεδίο που ο χρήστης έχει επιλέξει. Έτσι, μπορεί να γίνει συσχέτιση των ψηφιακών αυτών εικόνων με το «νέφος σημείων» που συλλέγονται από την ίδια λήψη και να παραχθεί πληροφορία για τις δομές, την τραχύτητα, τη σχιστότητα και τις διακλάσεις που εμφανίζονται κατά μήκος τέτοιων επιφανειών.

1.2.1. Εφαρμογή τεχνικής LiDaR σε γεωλογικές εφαρμογές

Η επίγεια τρισδιάστατη σάρωση ή η τεχνική LiDaR (Light Detection and Ranging), αποτελεί μία καινοτομία στην συλλογή τρισδιάστατων χωρικών πληροφοριών που επιτρέπει την ανάδειξη στοιχείων γεωλογικού ενδιαφέροντος με πρωτοφανή ανάλυση και ακρίβεια. Με ακρίβεια αποτύπωσης λίγων εκατοστών και την δυνατότητα βελτίωσης ποσοτικών στοιχείων, μπορεί να εισαχθεί στο χώρο συλλογής και ανάλυσης στοιχείων γεωλογικού ενδιαφέροντος, ανοίγοντας νέους ορίζοντες στην έρευνα για ένα ευρύ φάσμα πεδίων που βασίζονται στην επιστήμη της γεωλογίας. Ενοποίηση με μετρητικές εικόνες επιτρέπουν την δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων για φωτοερμηνεία, οπτικοποίηση και επιμόρφωση [Buckley *et al.*, 2008].

Η χρήση χωρικών δεδομένων γεωλογικού περιεχομένου είναι μείζονος σημασίας για τις γεωεπιστήμες. Η συλλογή ψηφιακών χωρικών δεδομένων όπως μέγεθος, γεωγραφική θέση και προσανατολισμός, γίνεται πλέον με έναν αυτοματοποιημένο τρόπο χάρη της τεχνολογικής προόδου, η οποία οφείλεται κύρια στην συνεχιζόμενη εξέλιξη των δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών και επιτρέπει την άμεση επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων, καθώς και την επιλογή τεχνικών βελτιστοποίησής τους, δίνοντας έτσι την δυνατότητα πρόσβασης σε δύσβατες περιοχές αλλά και μειώνοντας σημαντικά το χρόνο εργασίας στο πεδίο.

Στις γεωλογικές επιστήμες η δυνατότητα του συστήματος παγκόσμιου προσδιορισμού θέσης (GPS), είχε τεράστιο αντίκτυπο στον τρόπο συλλογής ανόμοιων δεδομένων επιτρέποντας την ενοποίησή τους με έναν ακριβή τρόπο. Αυτή η συγκέντρωση των γεωαναφερμένων δεδομένων έχει ωφελήσει πολλές μελέτες επιτρέποντας δορυφορικές εικόνες, αεροφωτογραφίες, φωτογραφίες, πληροφορίες ιζηματογένεσης και γεωλογικά δεδομένα να μπορούν να αναλυθούν σ' ένα ενιαίο σύστημα συντεταγμένων, διευκολύνοντας την ερμηνεία.

Παρά της δυναμικής της σάρωσης ως ένα χρήσιμο εργαλείο στις γεωλογικές μελέτες, η τεχνική είναι ακόμη μακριά από την τυποποίηση ενός προτύπου, αν και είναι σίγουρο πως αυτό θα διαφοροποιηθεί στο άμεσο μέλλον λόγω της εξέλιξης της γεωπληροφορικής.

Παράδειγμα, οι *Slob et al.*, (2002) χρησιμοποίησαν ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους για να μελετήσουν τοπικά τον προσανατολισμό επιφάνειας κατά μήκος προεξοχής βράχου. Οι *Bellian et al.*, (2005) παρέχουν μία περιεκτική περίληψη της μελέτης τους σε μορφολογικές διαφοροποιήσεις, ενώ οι *Labourdette & Jones*, (2007) μελέτησαν στοιχεία για τις επιπτώσεις λιμναίων αποθέσεων συνδυάζοντας και εναέριες λήψεις φωτογραφιών. Στη γεωμορφολογία, οι *Lim et al.*, (2005), επίσης συνδυάζοντας τη φωτογραμμετρία και την τρισδιάστατη σάρωση, παρακολούθησαν την εξέλιξη των ενεργών παράκτιων πρανών, πραγματοποιώντας συνεχόμενες αποτυπώσεις για περίοδο 12 μηνών [*Buckley et al.*, 2008].

Μελέτες στο πεδίο της γεωλογίας διεξάγονται σε διάφορες κλίμακες, από μικρές μέχρι πολύ μεγάλες. Έτσι, αναλόγως τη λεπτομέρεια που απαιτείται στην εκάστοτε εφαρμογή, ορίζεται και η καταλληλότητα του Laser Scanner που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Για παράδειγμα, σε μελέτες κλίσεων πρανών, όπως απότομη πλευρά βράχου, απαιτείται συνήθως μία κλίμακα τουλάχιστον μερικών εκατοντάδων μέτρων μέχρι και χιλιομέτρων. Για μία τέτοια εφαρμογή, ένας σαρωτής μεγάλου βεληνεκούς (1000m) και ακρίβειας της τάξης των 0.10m, είναι περισσότερο κατάλληλος (*Bellian et al.*, 2005)

Αντίθετα, σε μία μελέτη για λεπτομερή χαρτογράφηση απαιτείται πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια, αν και η έκταση του αντικειμένου μελέτης μπορεί να είναι πολύ μικρότερη (*Sagy et al.*, 2007). Σε τέτοιες περιπτώσεις λοιπόν, χρησιμοποιούνται μικρής εμβέλειας σαρωτές που η ακρίβεια των μετρήσεών τους φτάνει τα 0.01m σε απόσταση 50m από το αντικείμενο προς αποτύπωση.

Πράγματι, η κύρια διαφορά μεταξύ των τοπογραφικών σαρωτών είναι η εμβέλεια, δηλαδή η ακρίβεια και η επιλογή του μήκους κύματος που χρησιμοποιούνται. Διαφορετικά μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, συνεπάγεται διαφορετικές ιδιότητες της δομής της δέσμης φωτός κατά την εκπομπή της. Οι μεγαλύτερης εμβέλειας σαρωτές χρησιμοποιούν μεγαλύτερης συχνότητας ακτινοβολία, όπου το μάτι είναι λιγότερο ευαίσθητο.

1.2.2 Καταλληλότητα 3D σάρωσης για παρακολούθηση κατολισθητικών φαινομένων

Οι κατολισθήσεις συγκαταλέγονται στην κατηγορία των φυσικών καταστροφών και μάλιστα η εκδήλωσή τους αποτελεί μείζον θέμα στους τομείς διαχείρισης τέτοιων φαινομένων, ειδικά όταν πρόκειται για θέματα ασφάλειας του οδικού δικτύου, όπου η παρουσία τέτοιων γεγονότων είναι πολυσύχναστη.

Οι τύποι των κατολισθήσεων εξαρτώνται από τον τρόπο εκδήλωσής τους και μπορεί να οφείλονται σε μεγάλης κλίμακας ολισθήσεις πρανών, καταπτώσεις, υποβάθμιση του εδάφους και αστοχίες. Ασταθή πρανή ενέχουν μεγάλο κίνδυνο που μπορούν να προκαλέσουν, εκτός από υλικές ζημιές στις υποδομές, ατυχήματα ή ακόμα να κοστίσουν και ανθρώπινες ζωές. Για το λόγο αυτό, περιοχές επιδεκτικές σε κατολισθητικά φαινόμενα

απαιτούν συνεχείς μελέτες και αναλύσεις μεγάλης ακρίβειας με σκοπό την βελτίωση των συνθηκών και την λήψη των απαραίτητων μέτρων κάθε φορά.

Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει τεκμήριο για τις αρμόδιες υπηρεσίες της πολιτείας ώστε να προλάβουν την καταστροφή μιας κατολίσθησης ή να απαντήσουν άμεσα κατά τη διάρκεια της καταστολής. Όταν μία κατολίσθηση συμβεί, είναι απαραίτητο να δράσουν προληπτικά, για την πιθανότητα μιας δεύτερης και να ερευνήσουν τους παράγοντες της κατολισθαίνουσας περιοχής, βασισμένοι σε ταχείες μετρήσεις και σχέδια διαχείρισης κρίσης. [Travelletti et al., 2008].

Οι περιπτώσεις στις οποίες μπορεί να βοηθήσει η εφαρμογή της τρισδιάστατης σάρωσης για την ανάλυση ευστάθειας πρανών είναι είτε ο χαρακτηρισμός των κατολισθήσεων ή καταπτώσεων, είτε η μελέτη προσανατολισμού των ασυνεχειών.

Ο χαρακτηρισμός των κατολισθήσεων είναι η διαδικασία απόκτησης δεδομένων για την ευστάθεια του πρανούς και μέχρι πρότινος η πληροφορία αυτή προέκυπτε από τις κλασικές μεθόδους αποτύπωσης των πλαγιών και των φυσικών βραχωδών επιφανειών. Σε αυτό το μέρος περιγράφεται η χρήση της τεχνικής LiDaR, που σε συνδυασμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων που μας παρέχει και των ψηφιακών εικόνων που έχουν ληφθεί για τη επιφάνεια ενδιαφέροντος, μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες για τον προσανατολισμό ασυνεχειών, το μήκος, το άνοιγμα, την τραχύτητα και το μέγεθος των βράχων.

Αφού πραγματοποιηθεί η διαδικασία της σάρωσης και γίνει η γεωαναφορά σύμφωνα με τις τεχνικές που αναφέρονται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 3.1.2, το επόμενο βήμα είναι να δημιουργηθεί η επιφάνεια mesh (τριγωνισμός) από το «νέφος σημείων ή point cloud». Κατά την δημιουργία του mesh μπορεί να γίνει ένα φιλτράρισμα των εσφαλμένων σημείων που έχουν σαρωθεί εκτός της επιφάνειας ενδιαφέροντος ώστε να μην διαστρεβλωθεί το αποτέλεσμα κατά τον τριγωνισμό. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αφαιρώντας τα σημεία που βρίσκονται έξω από το αντικείμενο μελέτης καθώς και τα περιττά-εσφαλμένα σημεία όπως δέντρα, αυτοκίνητα, σκιές, θάμνοι, σκόνες, πινακίδες κ.α., τα οποία δεν βρίσκονται πάνω στη επιφάνεια του πρανούς. Η αφαίρεση των σημείων εκτός περιοχής και των αντικειμένων που βρίσκονται μεταξύ σαρωτή και επιφάνειας, γίνεται χειροκίνητα με την διαδικασία καθαρισμού «θορύβου» όπως αυτή περιγράφεται στο κεφάλαιο τρία (3). Η αφαίρεση της βλάστησης όμως συνηθίζεται να γίνεται με την εφαρμογή κάποιων φίλτρων.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, άλλη σημαντική εφαρμογή του LiDaR σχετικά με τις κατολισθήσεις είναι ο χαρακτηρισμός των καταπτώσεων. Αυτό συμπεριλαμβάνει τον χαρακτηρισμό της περιοχής όπου λαμβάνουν χώρα κατολισθητικά φαινόμενα, τον καθορισμό της πορείας των τεμαχών, καθώς και την παρακολούθηση των συμβάντων, πραγματοποιώντας περιοδικές λήψεις στη περιοχή ενδιαφέροντος.

Ο χαρακτηρισμός μπορεί να περιλαμβάνει τον χαρακτηρισμό σταθερών βραχομαζών καθώς και την εκτίμηση κινδύνου. Περιοχές όπου εκδηλώνονται καταπτώσεις είναι συχνά δύσκολα προσβάσιμες χρησιμοποιώντας τις κλασικές μεθόδους αποτύπωσης. Για παράδειγμα σε απότομες απομακρυσμένες πλαγιές όπου συμβαίνουν ολισθήσεις μία τέτοια τεχνική αποδεικνύεται οικονομικά συμφέρουσα και χωρίς να ενέχει κίνδυνο.

Επίσης, άλλο παράδειγμα αποτελεί η αποτύπωση πρηνούς όπου υπάρχει κύλιση ογκολίθων λόγω αποσάθρωσης και πάλι εγκυμονεί ο κίνδυνος κατάπτωσης. Με την τρισδιάστατη σάρωση είναι εύκολο να οριστούν ο αριθμός και το μέγεθος των ογκολίθων. Οι επαναλαμβανόμενες σαρώσεις διαφορετικών εποχών στο ίδιο σημείο μπορεί να δώσει πληροφορία και για την εξέλιξη του φαινομένου της αποσάθρωσης.

Η περιοχή όπου συμβαίνουν καταπτώσεις ορίζει το μέγεθος και την αρχική τοποθεσία των ογκολίθων που θα μπορούσαν να επιδράσουν σ' ένα οδικό δίκτυο. Εάν ένας ογκόλιθος αποκολληθεί από την αρχική του θέση, αυτός συχνά ακολουθεί μία πορεία κατά μήκος ενός ήδη δημιουργημένου "μονοπατιού" μέχρι να φτάσει στο δρόμο. Συνεπώς, οι χαρακτηρισμοί τέτοιων μονοπατιών συχνά ορίζουν την αρχική θέση, την ταχύτητα και άλλες πτυχές ενός τέτοιου φαινομένου.

Ειδικότερα, τα χαρακτηριστικά αυτών των "μονοπατιών" πρέπει να αποδοθούν σωστά και να κατανοηθούν με σκοπό τον σχεδιασμό και την τοποθέτηση προστατευτικών συρματοπλεγμάτων ή άλλων μέτρων αντιστήριξης και προστασίας. Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία αυτών των περιοχών είναι τα τοπογραφικά προφίλ τα οποία μπορούν να παραχθούν από τα δεδομένα του LiDaR χρησιμοποιώντας τα εργαλεία των τομών στα διάφορα λογισμικά επεξεργασίας τρισδιάστατων δεδομένων. Οι τομές δημιουργούνται μέσω του μοντέλου Mesh ή πλέγμα τριγώνων.

Συχνά ένας αποκολλημένος βράχος ή ογκόλιθος δεν κάνει τη διαδρομή απευθείας από την αρχική του θέση όταν αποσπαστεί, μέχρι τον τελικό του προορισμό. Αντίθετα, αυτοί ολισθαίνουν αργά και κατά περιόδους με άλλη ταχύτητα που εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Τέτοιες συμπεριφορές μπορούν να κατανοηθούν χρησιμοποιώντας την τεχνική LiDaR, λαμβάνοντας δεδομένα της μορφολογίας του πρηνούς στην ίδια τοποθεσία σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές της τεχνικής LiDaR είναι η **διαχρονική παρακολούθηση επιφανειακών μεταβολών** (rockfall monitoring), η οποία ακολουθήθηκε και στην συγκεκριμένη εφαρμογή. Η παρακολούθηση διεξάγεται σαρώνοντας το ίδιο κομμάτι επιφάνειας από το ίδιο σημείο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Το σύνηθες χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο σαρώσεων είναι έξι μήνες, αλλά φυσικά η συχνότητα των λήψεων αυξάνεται για περιοχές αυξημένης επικινδυνότητας.

Οι περιοδικές σαρώσεις επεξεργάζονται με σκοπό να εκτιμηθούν οι καταπτώσεις ή εδαφικές μεταβολές, βάσει κάποιων αλγόριθμων "change algorithms", οι οποίοι υπάρχουν

σε διάφορα λογισμικά επεξεργασίας LiDaR δεδομένων. Ουσιαστικά, αυτό που κάνουν αυτοί οι αλγόριθμοι είναι μία αφαίρεση των δύο διαφορετικών «point clouds». Αυτό που προκύπτει είναι ένα τρίτο «point cloud» με τις σχετικές διαφορές μεταξύ των δύο διαφορετικών χρονικά λήψεων και η απόδοση γίνεται με χρωματικές αλλαγές. Από τον υπολογισμό αυτών των διαφορών μπορούν να εντοπιστούν οι μετακινήσεις και τα μεγέθη βραχομαζών ή και μικρότερων τεμαχών αλλά και να εκτιμηθεί ο συνολικός όγκος συσσώρευσης υλικού.

Πάντως, απαραίτητο βήμα πριν την εφαρμογή του αλγόριθμου στο εκάστοτε λογισμικό αποτελεί η ευθυγράμμιση των δύο point clouds, για την οποία είθισται να χρησιμοποιείται ο ICP (Iterative Closest Point) αλγόριθμος, ώστε να επιτυγχάνονται μεγαλύτερες ακρίβειες.

Τώρα, το μέγεθος των τεμαχών των οποίων η αποκόλληση-μετακίνηση μπορεί να εντοπιστεί να υπολογιστεί με την συγκεκριμένη μεθοδολογία εξαρτάται κάθε φορά από την θέση και την απόσταση του σαρωτή από το αντικείμενο, καθώς όπως προαναφέρθηκε όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια τόσο μεγαλώνει το μέγεθος της δέσμης φωτός με αποτέλεσμα να μειώνεται η διακριτική ικανότητα. Ενδεικτικά αναφέρεται πως για μία απόσταση των 60m εκτιμάται πως είναι δυνατό να προσδιοριστούν μετακινήσεις ογκόλιθων της τάξης των 0.15m.

Τέλος, άλλη μία εφαρμογή του LiDaR για τα πρανή κατά μήκος οδικών δικτύων, είναι η λεπτομερής τρισδιάστατη αποτύπωση του περιβάλλοντα χώρου η οποία μπορεί να παρέχει “as-build” πληροφορίες για την εκτίμηση παραμέτρων του αυτοκινητόδρομου όπως το πλάτος και βάθος των ρείθρων, το ύψος της επικλινούς επιφάνειας-πρανούς, το πλάτος του οδοστρώματος κ.τ.λ.

Οι παράμετροι, πολλές από τις οποίες μπορούν να υπολογιστούν από το «point cloud», στα περισσότερα συστήματα εκτίμησης κατολισθητικού κινδύνου είναι:

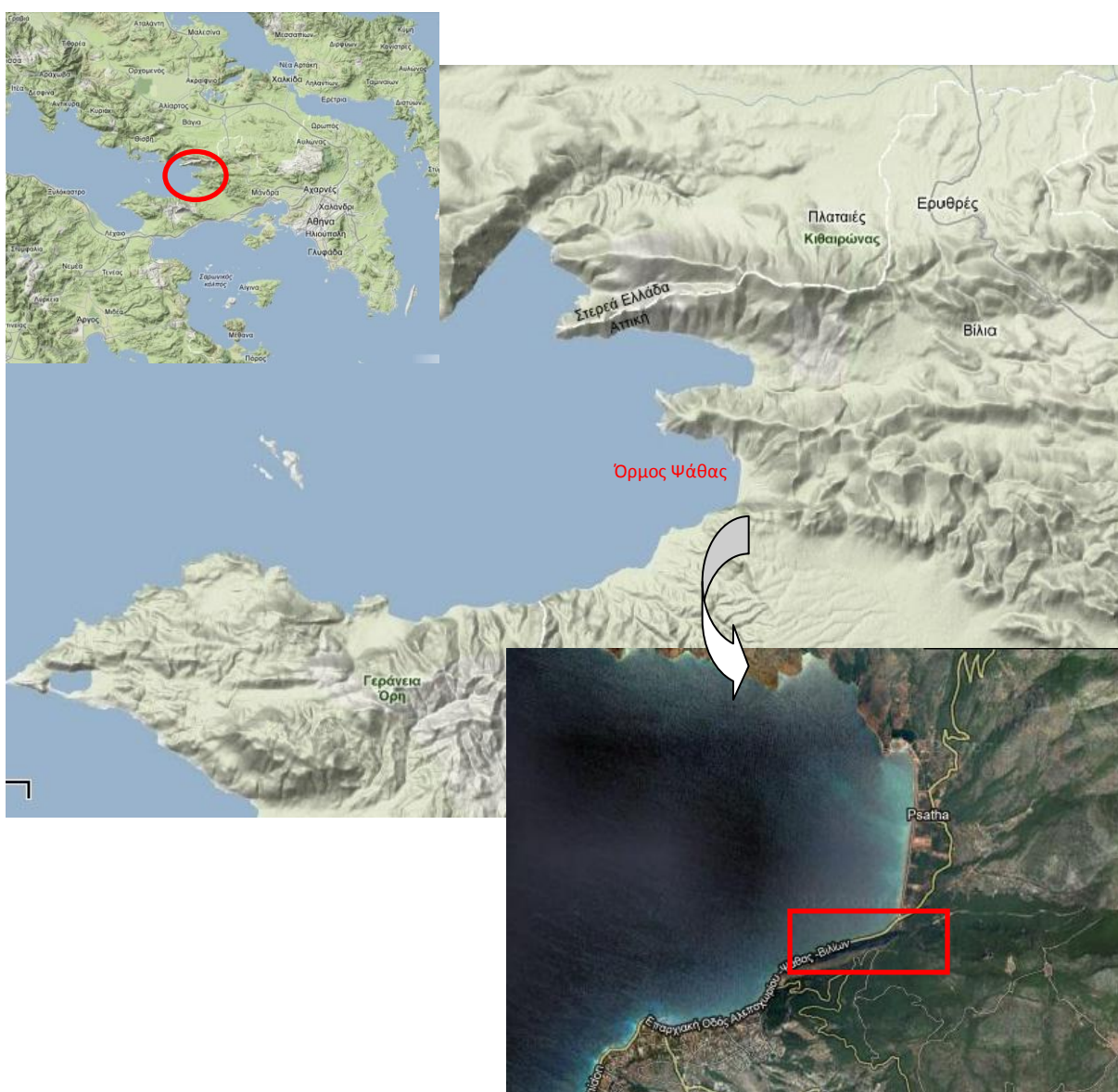
1. Ύψος πρανούς
2. Αποτελεσματικότητα ρείθρων για την αποστράγγιση
3. Μέσος όρος τροχαίων ατυχημάτων
4. Ορατότητα
5. Πλάτος οδοστρώματος
6. Στατικές συνθήκες
7. Τριβή
8. Στατικές – Δομικές συνθήκες ενός διαβρωμένου πρανούς
9. Διαφορές στους συντελεστές διάβρωσης
10. Συνολικός όγκος αποκολλημένων υλικών για κάθε συμβάν
11. Στοιχεία για το κλίμα και την παρουσία νερού στο πρανές
12. Ιστορία – Εξέλιξη του φαινομένου (*GROUND-BASED LiDAR Rock Slope Mapping and Assessment*, 2008).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ II

Μεθοδολογία – Εργασίες Πεδίου

2.1 Γεωλογικά στοιχεία

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα του Λεκανοπεδίου Αττικής και πολύ κοντά στα όρια του Νομού Βοιωτίας. Διοικητικά ανήκει στην Περιφέρεια Αττικής και πιο συγκεκριμένα στη Δημοτική Ενότητα Βιλίων του Δήμου Μάνδρας – Ειδυλλίας. Η Ψάθα αποτελεί παραθεριστικό οικισμό των ανατολικών ακτών του Κορινθιακού κόλπου καθώς διαθέτει μία από τις μεγαλύτερες σε μήκος, περίπου 2.5 Km και πιο δημοφιλείς παραλίες της Δυτικής Αττικής, με εύκολη πρόσβαση αφού διασχίζεται από την κύρια επαρχιακή οδό Αλεποχωρίου – Ψάθας – Βιλίων (βλ. Εικ. 2.1).



Εικόνα 2.1 Περιοχή Μελέτης (Πηγή: Google Maps)

Το αντικείμενο μελέτης αφορά στο ενεργό ρήγμα της Ψάθας, και πιο συγκεκριμένα στο τμήμα που διέρχεται από το ρήγμα με μεγάλο ορατό άλμα, της τάξης των 185m, κατά μήκος της κύριας αυτής επαρχιακής - παραλιακής οδού Αλεποχωρίου - Ψάθας – Βιλίων,

όπου σύμφωνα με την έκθεση γεωτεχνικής μελέτης που διεξήχθη από το Ι.Γ.Μ.Ε. τον Φεβρουάριο 2002 (Μπέλλας, 2002), εκδηλώθηκαν καταπτώσεις συνολικού όγκου περί τα 40m³.

Γενικότερα, το ανατολικό άκρο αλλά και η ευρύτερη περιοχή του Κορινθιακού κόλπου είναι ένα κομμάτι της Αττικοβοιωτίας που έχει μελετηθεί εκτενώς, λόγω των έντονων τεκτονικών παραμορφώσεων, καθώς αποτελεί ρηξιγενή μεταβατική ζώνη.

2.1.1 Τεκτονική και Νεοτεκτονική δομή – Το ρήγμα της Ψάθας

Στον Ανατολικό Κορινθιακό διακρίνονται (Φουντούλης Ι., 2006) οι ακόλουθες 1^{ης} τάξης μορφονεοτεκτονικές δομές:

- το κέρας Περαχώρας - Γερανίων
- το βύθισμα (κόλπος) των Αλκυονίδων στα βόρεια και
- τη λεκάνη Κορίνθου - Νεμέας - Λέχαιου στα νότια

Οι δομές αυτές οριοθετούνται μεταξύ τους με ρηξιγενείς ζώνες Α-Δ διεύθυνσης. Πιο ανατολικά και στην ξηρά διακρίνονται οι ακόλουθες 1^{ης} τάξης νεοτεκτονικές δομές:

- το κέρας των Γερανίων
- το βύθισμα των Μεγάρων
- το κέρας του Πατέρα
- τη λεκάνη της Οινόης και
- το κέρας του Κιθαιρώνα

Το βόρειο περιθώριο των Γερανίων, τα Μέγαρα και το νότιο περιθώριο του Πατέρα παρουσιάζουν μία ανάπτυξη σε διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, οριοθετούνται δε μεταξύ τους με ρηξιγενείς ζώνες διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ που δομούνται όμως από ρήγματα με κλιμακωτή διάταξη Α-Δ διεύθυνσης (Φουντούλης Ι., 2006).

Οι Moretti *et al.*, 2003, αναφέρουν ότι ο Κορινθιακός κόλπος οριοθετείται τόσο βόρεια όσο και νότια από ενεργά ρήγματα Α-Δ διεύθυνσης. Επίσης ένα πλήθος από τα ρήγματα που κόβουν τα ιζήματα του βυθίσματος έχουν την ίδια γεωμετρία με τα περιθωριακά και είναι ενεργά. Διακρίνουν δύο κύριες φάσεις ανοίγματος του Κορινθιακού. Κατά την 1^η φάση η περιοχή συγκέντρωσης των ιζημάτων βρισκόταν κοντά στη βόρεια ακτή, ενώ κατά τη 2^η φάση (την πιο πρόσφατη) και μόνο στα κεντρικό και ανατολικό τμήμα, η περιοχή συγκέντρωσης των ιζημάτων έχει μεταναστεύσει προς τις νότιες ακτές.

Οι Sakellariou *et al.*, 2004, αναφέρουν ότι οι πλειο-πλειστοκαινικής ηλικίας αποθέσεις που απαντούν στον ευρύτερο χώρο της Νεμέας επεκτείνονται προς τα βόρεια κάτω από τον πυθμένα του Κόλπου του Λέχαιο. Πρόκειται για μία ασύμμετρη λεκάνη της οποίας η εξέλιξη ελέγχεται από τη ρηξιγενή ζώνη του Λουτρακίου που κλίνει προς νότο. Κατά τους ερευνητές, το τεκτονικό κέρας της Περαχώρας αποτελεί μία δομή που ανυψώνεται και η

οποία χωρίζει δύο αντίθετα ασύμμετρες λεκάνες, του Λέχαιου νότια και των Αλκυονίδων βόρεια.

Σύμφωνα με τους *Mariolakos & Fountoulis*, 1998, η περιοχή της Ψάθας βρίσκεται μεταξύ των ακόλουθων μορφοτεκτονικών δομών (βλ. Χάρτη 2.1):

- i. Το ανατολικό περιθώριο του Κορινθιακού κόλπου (κόλπος Αλκυονίδων), που είναι μία θαλάσσια λεκάνη με διεύθυνση Α-Δ και οριοθετείται στα νότια από την ενεργή ρηξιγενή ζώνη του Σχίνου. Η λεκάνη από την ξηρά μεταβαίνει απότομα στα 400m κάτω από τη στάθμη της θάλασσας.
- ii. Το δυτικό περιθώριο του όρους Πατέρας, που αποτελεί και το νότιο όριο του όρμου της Ψάθας.
- iii. Τη λεκάνη των Μεγάρων στα νότια, η οποία βρίσκεται μεταξύ των Γερανίων στα νότια και του Πατέρα στα βόρεια και έχει διεύθυνση ανάπτυξης ΒΔ-ΝΑ. Τα υψόμετρα της λεκάνης είναι γενικώς χαμηλά (<300m), ενώ τα όρη (τεκτονικά κέρατα) έχουν υψόμετρα 1350m τα Γεράνια και 1132m ο Πατέρας.

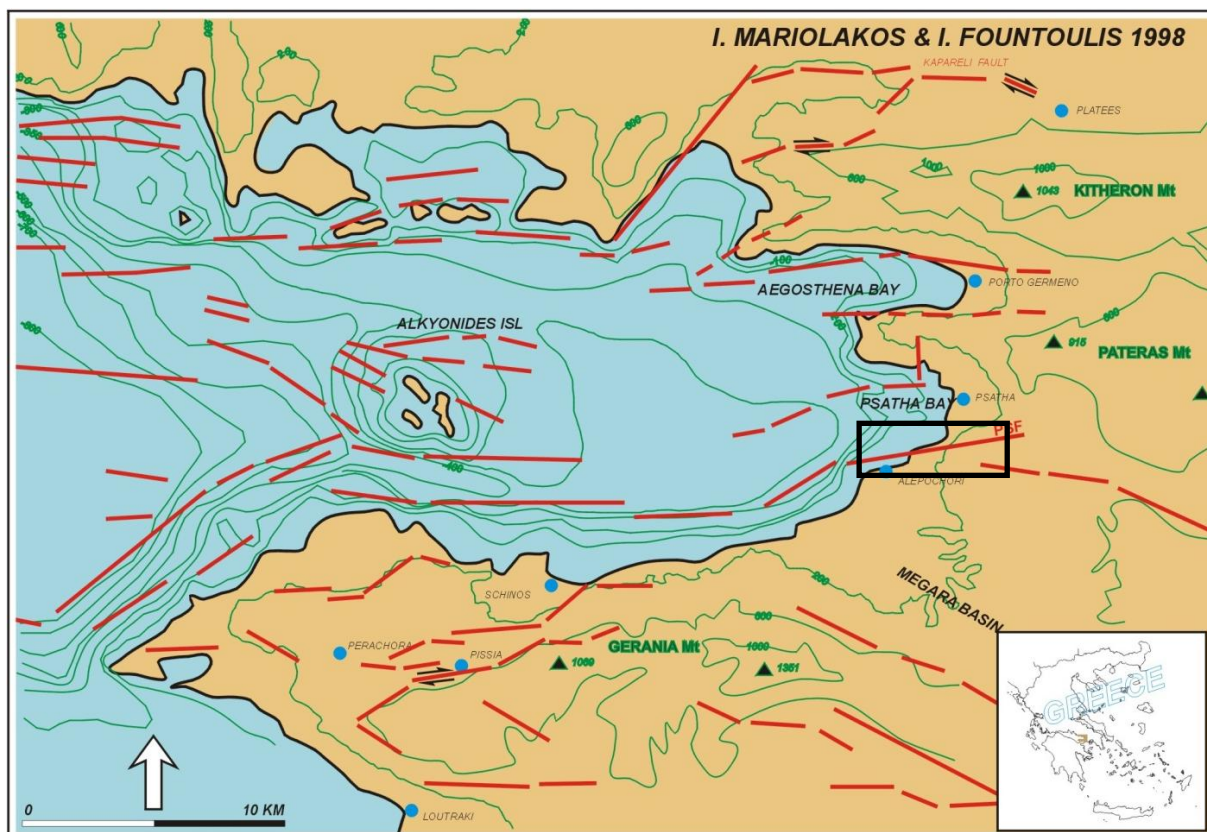
Η νεοτεκτονική δομή της περιοχής που περιβάλλει τον κόλπο των Αλκυονίδων (Αν. Κορινθιακός) χαρακτηρίζεται από παρουσία μεγάλων βυθισμάτων και κεράτων που οριοθετούνται μεταξύ τους με ρηξιγενείς ζώνες.

Στην ευρύτερη περιοχή μπορούν να διακριθούν οι ακόλουθες νεοτεκτονικές μακροδομές:

- i. Το τεκτονικό κέρας του Πατέρα
- ii. Το τεκτονικό βύθισμα των Μεγάρων
- iii. Το τεκτονικό κέρας των Γερανίων
- iv. Το τεκτονικό βύθισμα των Αλκυονίδων

Το τεκτονικό κέρας του Πατέρα οριοθετείται με ρηξιγενείς ζώνες, που έχουν διεύθυνση Α-Δ η βόρεια και ΒΔ-ΝΑ η νότια. Το τεκτονικό βύθισμα των Μεγάρων οριοθετείται από ρηξιγενείς ζώνες που έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Το τεκτονικό βύθισμα των Αλκυονίδων οριοθετείται από ρηξιγενείς ζώνες Α-Δ διεύθυνσης που παρουσιάζουν κλιμακωτή διάταξη. Από κινηματική άποψη τα τεκτονικά κέρατα του Πατέρα και των Γερανίων και τεκτονικό βύθισμα των Μεγάρων περιστρέφονται γύρω από οριζόντιο άξονα διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ προς τα ΒΑ (*Mariolakos & Paranikolaou*, 1981). Ταυτόχρονα οι ίδιες νεοτεκτονικές μακροδομές περιστρέφονται γύρω από οριζόντιο άξονα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ προς τα ΝΑ (*Mariolakos & Paranikolaou*, 1981, *Leeder et al.*, 1991).

Το **ρήγμα της Ψάθας** αποτελεί μία πολύ ενδιαφέρουσα περίπτωση, καθώς πολλές επαναδραστηριοποιήσεις κατά το Τεταρτογενές έχουν αποτυπωθεί πάνω στην επιφάνεια του. Αποτελεί το τεκτονικό όριο μεταξύ των πλειστοκαινικών αποθέσεων και των νηριτικών ασβεστόλιθων της Υποπελαγονικής ενότητας.



Χάρτης 2.1 Οι κύριες ρηξιγενείς ζώνες και τα ρήγματα του Ανατολικού Κορινθιακού, με την περιοχή μελέτης (Mariolakos & I. Fountoulis, 1998, τα υποθαλάσσια ρήγματα από Sakellariou et al., 1998)

Στην περιοχή του όρμου της Ψάθας απαντούν κυρίως κώννοι κορημάτων και αλλουβιακά ριπίδια που θεωρούνται ότι είναι πλειστοκαινικής ηλικίας. Αποτελούνται από γωνιώδη θραύσματα ασβεστόλιθων που έχουν αποθεθεί παρουσιάζοντας μία υποτυπώδη στρώση. Στα ανώτερα τμήματα είναι ελαφρώς συγκολλημένα ενώ στα κατώτερα είναι πιο συνεκτικά. Πολύ συχνά, μέσα σε αυτές τις αποθέσεις απαντούν και μεγάλα τεμάχια από ασβεστόλιθους. Το πάχος αυτών των αποθέσεων υπολογίστηκε περίπου 60m, ενώ η ηλικία τους πιθανά είναι Βούρμια (Theodoropoulos D., 1968).

Το ρήγμα της Ψάθας απαντά στο ανατολικό άκρο του Κορινθιακού και στο δυτικό περιθώριο του όρους Πατέρας, αποτελώντας το νότιο όριο του όρμου της Ψάθας, που με τη σειρά του αποτελεί μία μεγαλύτερης τάξης (μικρότερου μεγέθους) τεκτονική δομή (βύθισμα). Το ρήγμα έχει διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και κόβει την νότια περιθωριακή ζώνη του όρους Πατέρας που έχει διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ αποτελώντας το όριο μεταξύ του τεκτονικού κέρατος του Πατέρα και του τεκτονικού βυθίσματος των Μεγάρων. Από νεοτεκτονική άποψη, η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην μεταβατική ζώνη μεταξύ ενός κέρατος που αποτελείται από νηριτικούς ασβεστόλιθους της Υποπελαγονικής ενότητας και ενός βυθίσματος που έχει πληρωθεί με Πλείο-Τεταρτογενείς αποθέσεις.

Μια πρόσφατη απομάκρυνση υλικού από αυτές τις αποθέσεις σε τμήμα του ρήγματος που δεν έχει διαβρωθεί, έδωσε τη δυνατότητα να παρατηρηθούν και να μελετηθούν οι

διαδοχικές επαναδραστηριοποιήσεις του ρήγματος. Πιο συγκεκριμένα, η μορφή της επιφάνειας του ρήγματος δεν είναι επίπεδη αλλά καμπύλη.

Τα τεκτονικά λατυποπαγή που παρατηρήθηκαν στη ρηξιγενή ζώνη μπορούν να διακριθούν τουλάχιστον σε δύο διαφορετικές κατηγορίες, λαμβάνοντας υπόψη τη λιθολογία των θραυσμάτων από τα οποία αποτελούνται, το συγκολλητικό υλικό και τη σχετική τους ηλικία. Τα πιο παλαιά τεκτονικά λατυποπαγή είναι συνεκτικά και μονόμικτα και αποτελούνται από μικρά θραύσματα που προέρχονται από νηριτικούς ασβεστόλιθους. Γενικά αυτό το λατυποπαγές μπορεί να παρατηρηθεί στο μεγαλύτερο τμήμα του ρήγματος άσχετα από το εάν η επιφάνεια του είναι διαβρωμένη ή όχι. Αυτό το τεκτονικό λατυποπαγές καλύπτεται από ένα λεπτό ασβεστιτικό υμένιο πάχους περίπου 5mm.

Η δομή που υποδεικνύει διαδοχικές επαναδραστηριοποιήσεις του ρήγματος είναι η παρουσία γραμμών προστριβής διαφόρων διευθύνσεων. Μπορούν να παρατηρηθούν σε όλη την επιφάνεια του ρήγματος που δεν είναι διαβρωμένη, ανεξάρτητα από το εάν η επιφάνεια πάνω στην οποία παρατηρούνται είναι πάνω σε ασβεστόλιθους, σε παλαιότερα ή νεότερα τεκτονικά λατυποπαγή. Η παλαιότερη ομάδα γραμμών προστριβής παρουσιάζει βύθιση 65/300. Απαντούν πάντα πάνω σε επιφάνεια που έχει δημιουργηθεί πάνω στα μονόμικτα λατυποπαγή με μεγάλη συχνότητα.

2.1.2 Γεωλογικό καθεστώς περιοχής μελέτης

Σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε., Φ.Χ. Καπαρέλλιον, κλίμακας 1:50.000 (βλ. Χάρτη 2.2), για τον οποίο η γεωλογική χαρτογράφηση των προνεογενών σχηματισμών πραγματοποιήθηκε από τους γεωλόγους του Ι.Γ.Μ.Ε. Ι. Μπορνόβα, Α. Ελευθερίου και Π. Γαϊτανάκη μεταξύ των ετών 1970-1980, η περιοχή μελέτης υπάγεται στην Υποελαγονική γεωτεκτονική ζώνη και ειδικότερα στην περιοχή εμφανίζονται οι σχηματισμοί της λεγόμενης “Βοιωτικής Ζώνης”.

Στη περιοχή έρευνας εμφανίζονται οι ασβεστόλιθοι και δολομίτες του μέσου Τριαδικού έως κατώτερου Ιουρασικού (T-Ji.k,d). Πρόκειται για τεφρούς, λευκότεφρους, λευκοκίτρινους, ερυθρόλευκους παχυστρωματώδεις έως άστρωτους βιομικρίτες και δολοσπαρίτες με μέγιστο φαινόμενο πάχος της τάξης των 600m.

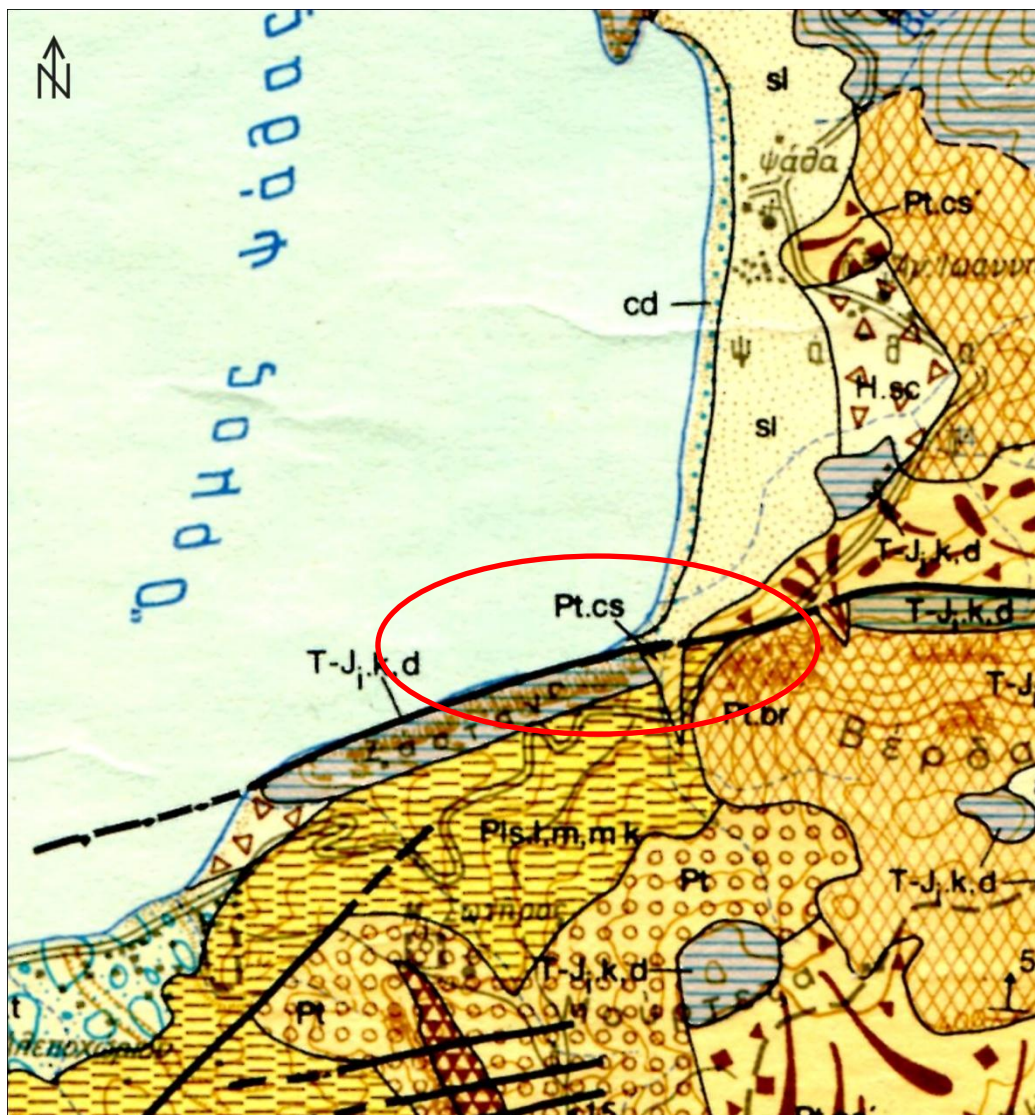
Την γεωλογική εικόνα της περιοχής συμπληρώνουν τόσο νεογενείς αποθέσεις πλειοκαινικής ηλικίας, όσο και τεταρτογενείς αποθέσεις κυρίως πλειστοκαινικής αλλά και ολοκαινικής ηλικίας.

Οι νεογενείς αποθέσεις αποτελούνται από πλειοκαινικά ιζήματα (Pls,l,m,mk), τα οποία περιλαμβάνουν αργίλους και μάργες που εναλλάσσονται με αμμούχες αργίλους, ενστρώσεις μαργαϊκών ασβεστολίθων μικρού πάχους και χαλαρών κροκαλοψαμμιτών καστανού χρώματος.

Οι τεταρτογενείς πλειστοκαινικές αποθέσεις αποτελούνται από:

- I. συνεκτικά λατυποπαγή (Pt, br), που αποτελούν τη βάση των ποταμοχερσαίων αποθέσεων και είναι κυρίως ασβεστολιθικά, διατεταγμένα σε παχιές τράπεζες με παρεμβολές λεπτών ασβεστομαργαϊκών ενστρώσεων και
- II. κώνους κορημάτων που αποτελούνται από λατύπες διατεταγμένες σε λεπτές στρώσεις, ελαφρά συγκολλημένες στα ανώτερα μέλη τους και ισχυρά στα κατώτερα. Το συνδετικό υλικό είναι ασβεστιτικό και μερικές φορές αργιλικό στα κατώτερα μέλη (Pt.cs).

Οι τεταρτογενείς ολοκαινικές αποθέσεις αποτελούνται από ιλύες τεναγών (sl).

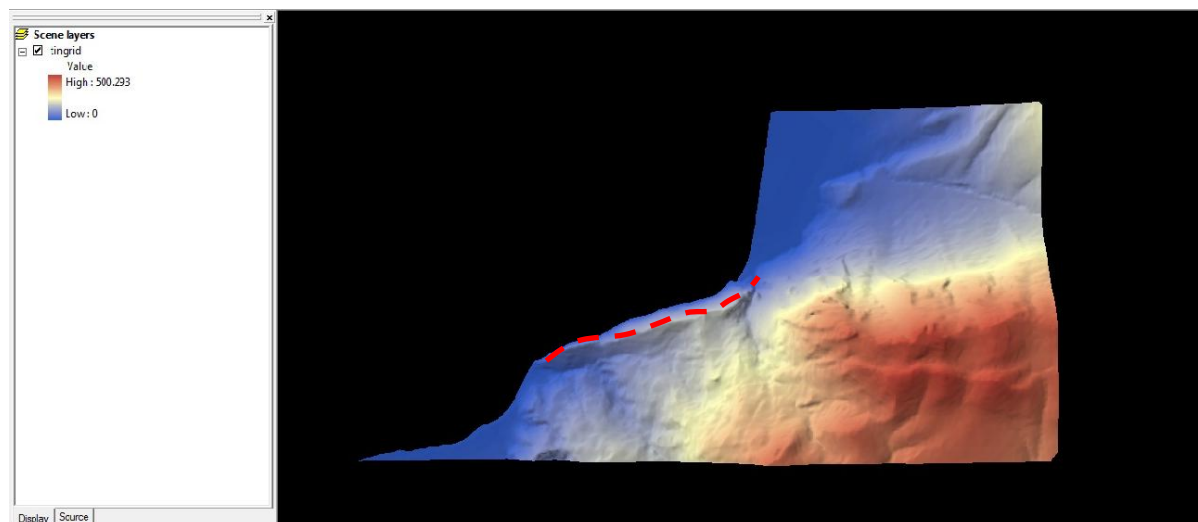


Χάρτης 2.2 Απόσπασμα του Γεωλογικού Χάρτη Ι.Γ.Μ.Ε. Φ.Χ. Καπαρέλλιον (1984), κλίμακας 1:50.000, με την περιοχή μελέτης

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, το αντικείμενο μελέτης αφορά στο ενεργό ρήγμα της Ψάθας, κατά μήκος της κύριας επαρχιακής οδού Αλεποχωρίου - Ψάθας -Βιλίων (βλ. Εικ. 2.1). Σημεία ενδιαφέροντος ορίζουν από την μία, η επιφάνεια του ρήγματος για την οποία εφαρμόζεται η μέθοδος της τρισδιάστατης σάρωσης, και από την άλλη η εγγύς περιοχή των

κορημάτων πλησίον της σχεδόν κάθετης επιφάνειας, όπου παρατηρήθηκαν εδαφικές μεταβολές.

Πρόκειται για μία περιοχή με έντονο μορφολογικό ανάγλυφο, καθώς έχουμε τη μετάβαση από το τεκτονικό βύθισμα της λεκάνης των Μεγάρων στο τεκτονικό κέρασ των Γερανίων. Το ορατό άλμα του ρήγματος φτάνει τα 185m δίπλα στην παράκτια ζώνη, ενώ τα υψόμετρα για την περιοχή που δημιουργήθηκε το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου φτάνουν έως και 500m (βλ. Εικ.2.2).



Εικόνα 2.2 Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου(DEM) ευρύτερης περιοχής του ρήγματος

Σύμφωνα με την έκθεση γεωτεχνικής μελέτης του Μπέλλα (2002), η περιοχή όπου εκδηλώθηκαν καταπτώσεις τον Φεβρουάριο του 2002, εντοπίζεται στον παραλιακό δρόμο Αλεποχωρίου – Ψάθας, στο τμήμα που διέρχεται από το ρήγμα με μεγάλο ορατό άλμα της τάξης των 185m. Το τμήμα του παραλιακού δρόμου που έχει κατασκευαστεί κατά μήκος του ρήγματος είναι περίπου 1300m. Η προέκταση του ρήγματος συνεχίζει ΔΒΔ και συναντάει την ορεινή παλαιά οδική χάραξη, δημιουργώντας στην θέση της τομής τους προβλήματα στη βατότητα του δρόμου, που ήταν μία από τις αιτίες για την εγκατάλειψη του παλιού δρόμου και την κατασκευή της νέας παραλιακής οδού.

Το ρήγμα αυτό έχει επηρεάσει τους τριαδικούς ασβεστόλιθους. Βορειότερα από την θέση των καταπτώσεων το ρήγμα έχει φέρει σε επαφή, συμφώνως προς τον σχετικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (1984), τους προαναφερθέντες ασβεστόλιθους με συνεκτικά λατυποπαγή του κατώτερου Πλειστοκαίνου (βλ. Χάρτη. 2.2).

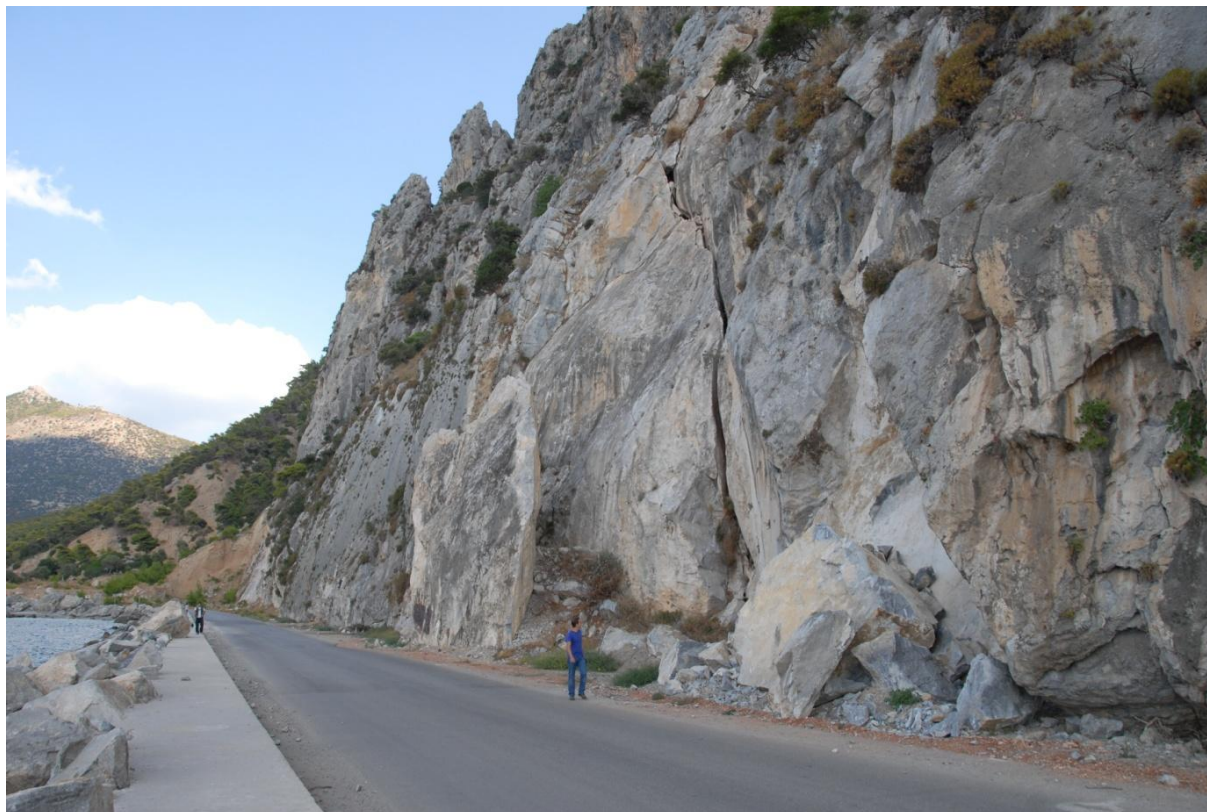


Εικόνα 2.3 Καταπτώσεις τεμαχών κατά μήκος του οδικού άξονα κατά τη διάρκεια εκπόνησης των εργασιών της παρούσας μελέτης

Η θέση των καταπτώσεων του Φεβρουαρίου 2002, εντοπίζεται στα τελευταία μέτρα διέλευσης του παραλιακού δρόμου, θεωρώντας σαν αφετηρία την αρχή του ρήγματος από το Αλεποχώρι (βλ. Εικ. 2.3). Πρόκειται για κατάπτωση υγείων ασβεστολιθικών τεμαχών συνολικού όγκου περί τα 40m^3 . Ο μεγαλύτερος ογκόλιθος είχε όγκο περί τα 10m^3 και είχε σφηνωθεί κατακορύφως εντός της ασφάλτου του οδοστρώματος, ενώ οι υπόλοιποι μικροί βράχοι είχαν διασπαρθεί στην γύρω περιοχή. Είχε ήδη αποκολληθεί και ένα μεγαλύτερο συμπαγές ασβεστολιθικό τέμαχος με κατακόρυφη ρωγμή, με άνοιγμα της τάξης των $0,25\text{m}$, το οποίο βρίσκεται πλέον σε ασταθή ισορροπία και μετά την απομάκρυνση των ήδη κυλισθέντων ογκολίθων είναι πολύ πιθανό να ανατραπεί και να καταπέσει στο οδόστρωμα.

Πάντως, όπως είναι αναμενόμενο η παρουσία καταπτώσεων μικρών τεμαχών συνεχίζεται με αποτέλεσμα να δημιουργούνται επικίνδυνες καταστάσεις κατά την διέλευση των οχημάτων από το δρόμο, καθώς μέχρι σήμερα κανένα μέτρο προστασίας δεν έχει ληφθεί.

Θα πρέπει να τονισθεί ότι στην ευρύτερη περιοχή του ρήγματος λόγω των ισχυρών τεκτονικών δυνάμεων που το δημιούργησαν, έχουν δημιουργηθεί κατά θέσεις παχιά στρώματα μυλωνίτη, τα οποία λόγω της παλιότερης δράσης των κυμάτων, έχουν υποστεί υποσκαφή και γενικότερα λόγω της χαμηλής τους συνεκτικότητας, έχουν εκδηλώσει στο πρόσφατο παρελθόν καταπτώσεις ολόκληρων τεμαχών μυλωνίτη (βλ. Εικ. 2.4).



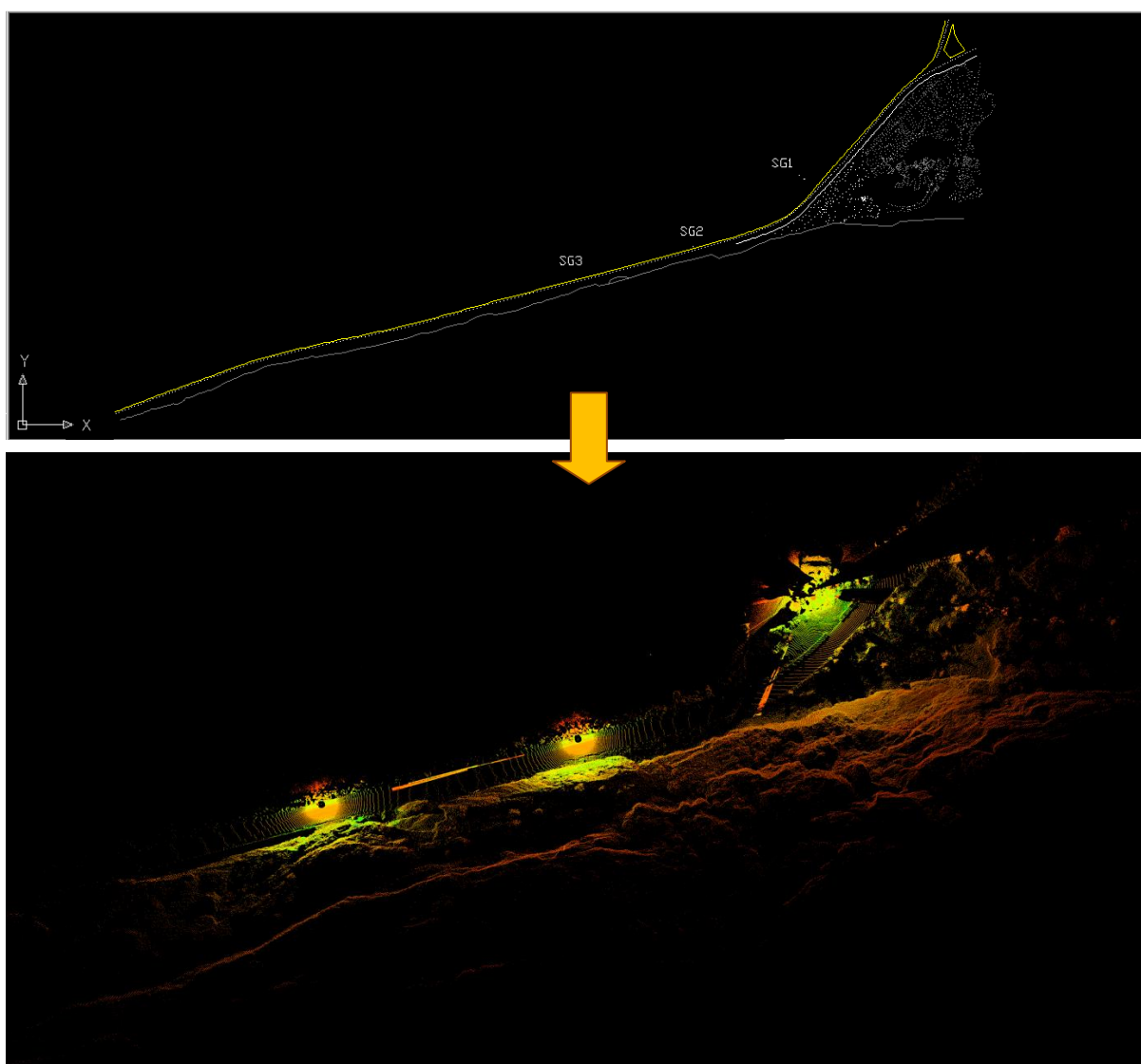
Εικόνα 2.4 Άποψη του ρήγματος με εμφανείς διαρρήξεις κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας μελέτης

Κατά μήκος της επιφάνειας του ρήγματος συναντώνται 3 διαρρήξεις με στοιχεία κλίσης B140 – 170 A /50 – 70. Οι διαρρήξεις αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα τον περαιτέρω κερματισμό των πετρωμάτων με συνέπεια την δημιουργία αποκολλημένων ογκολίθων διαφόρων μεγεθών, οι οποίοι βρίσκονται σε ασταθή ισορροπία, έτοιμοι να κυλίσουν προς τα κατάντι, ιδιαίτερα στα ψηλότερα σημεία του πρανούς. Επίσης, αυτές οι ασυνέχειες λόγω του επιφανειακού και υπόγειου ύδατος που τις διαρρέει, καθώς και του στρώματος του μυλωνίτη που έχουν διατηρήσει πάνω τους, το οποίο μπορεί να συγκρατεί μικροποσότητες νερού, είναι τα μοναδικά σημεία στα οποία αναπτύσσονται θάμνοι με αποτέλεσμα την περαιτέρω αποσάθρωση του πετρώματος.

2.2 Τοπογραφική Αποτύπωση

Προϋπόθεση για την αποτύπωση του ρήγματος αλλά και της ευρύτερης περιοχής αποτέλεσε η ίδρυση ενός δικτύου ελέγχου των εργασιών, το οποίο συνθέτει και το βασικό σκελετό αναφοράς των επιμέρους προσδιορισμών. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από τρεις κορυφές (SG1, SG2, SG3) και βασικό κριτήριο για την επιλογή της θέσης των κορυφών του, αποτέλεσε η ορατότητα προς το σύνολο της επιφάνειας του ρήγματος και κυρίως στο σημείο όπου συναντούμε την απόθεση των κορημάτων, καθώς οι ίδιες κορυφές χρησιμοποιήθηκαν σαν στάσεις για την τοποθέτηση του σαρωτή (βλ. Εικ. 2.5).

Η μέτρηση του δικτύου ελέγχου έγινε με δορυφορικές μεθόδους και ο δέκτης GPS που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο VIVA GS15 GNSS της Leica, με ακρίβεια προσδιορισμού θέσης 5mm+ 0.5ppm οριζοντιογραφικά και 10mm+0.5ppm υψομετρικά για τη μέθοδο του στατικού εντοπισμού.



Εικόνα 2.5 Κορυφές δικτύου ελέγχου και εκάστοτε σάρωσης

Το δίκτυο ελέγχου εξαρτήθηκε από το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987, αφού η επίλυση έγινε βάσει των σταθμών αναφοράς που ανήκουν στο ιδιόκτητο δίκτυο (MetricaNet), ενταγμένο στο Ε.Γ.Σ.Α. 87, της εταιρείας METRICA και η οποία μας παρείχε τις συντεταγμένες των σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν. Δεδομένου πως η περιοχή μελέτης βρίσκεται γεωγραφικά ενδιάμεσα των δύο σταθμών του συνολικού δικτύου, αυτόν της Θήβας και αυτόν της Αθήνας, χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο με σκοπό να μοιραστεί το σφάλμα στις δύο βάσεις. Οι τελικές συντεταγμένες των κορυφών φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 2.1

Συντεταγμένες κορυφών δικτύου

Point Id	Easting	Northing	Orth. Height	Std. deviation E	Std. deviation N	Std. deviation H
SG1	430981.3153	4216770.35	4.9027	0.0056	0.0009	0.0189
SG2	430877.1675	4216699.924	2.2422	0.0021	0.0036	0.0036
SG3	430761.9691	4216668.875	2.1442	0.0008	0.0056	0.0214

Η SG1 τοποθετήθηκε πάνω σ' ένα μεγάλο βράχο στην παραλία (βλ. Εικ. 2.6), ώστε να υπάρχει ικανοποιητική ορατότητα στην περιοχή των κορημάτων, ενώ οι άλλες δύο τοποθετήθηκαν πάνω στο πεζοδρόμιο κατά μήκος της οριογραμμής του δρόμου, απέναντι από την επιφάνεια του ρήγματος ώστε να σαρωθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο κομμάτι αυτού.



Εικόνα 2.6 Προσδιορισμός θέσης στάσης SG1 με στατικό εντοπισμό

Για την σήμανση των στάσεων χρησιμοποιήθηκαν ορειχάλκινα μπουλόνια τύπου Reper (βλ. Εικ. 2.8), τα οποία πακτώθηκαν με ειδική οξειδωτική κόλλα μόνιμης παραμονής, στον βράχο και στο μπετό αντίστοιχα για τις στάσεις SG2 και SG3.



Εικόνα 2.7 Στατικός εντοπισμός στη στάση SG2

Ο στατικός εντοπισμός στην SG2 και SG3 έγινε ταυτόχρονα με τη σάρωση χάρη στην ειδική βάση για δέκτη GPS που μπορεί να προσαρμοστεί στο συγκεκριμένο σαρωτή, ως τε να ελαττώνεται ο χρόνος παραμονής στο πεδίο (βλ. Εικ. 2.10).



Εικόνα 2.8 Ορειχάλκινο μπουλόνι τύπου Reper

Για την τοπογραφική αποτύπωση της περιοχής εφαρμόστηκε η μέθοδος του κινηματικού προσδιορισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο (RTK). Ως βάση χρησιμοποιήθηκε η στάση SG1, και έτσι έχοντας τις συντεταγμένες της SG1 ως σταθερές, λύνονται και προσδιορίζονται οι επιμέρους βάσεις που σχηματίζονται για κάθε σημείο μεταξύ σταθερού και κινητού δέκτη (βλ. Εικ. 2.9).

Για τις μετρήσεις της τοπογραφικής αποτύπωσης χρησιμοποιήθηκε ζεύγος διπλόσυχων δεκτών GPS Hiper Pro της TopCon, με ακρίβεια προσδιορισμού θέσης 10mm+ 1.0ppm οριζοντιογραφικά και 15mm+ 1.0ppm υψομετρικά.



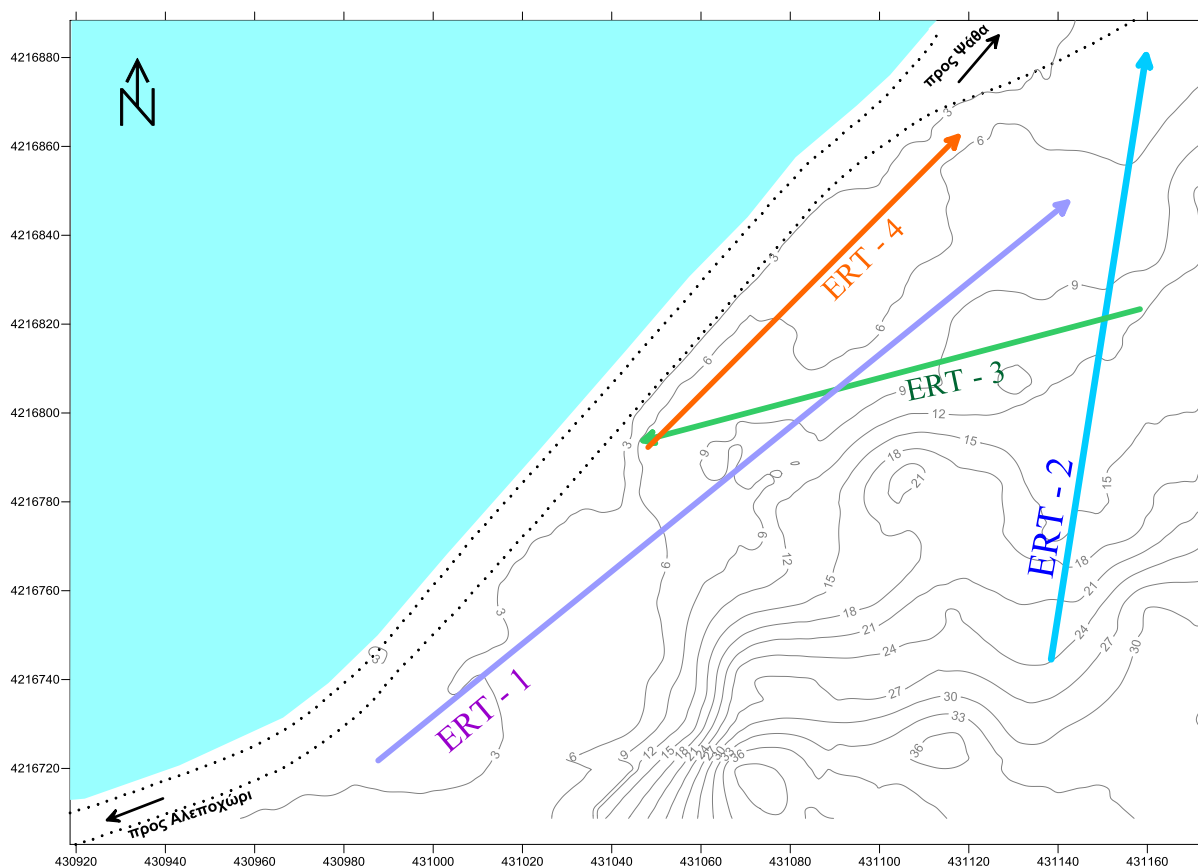
Εικόνα 2.9 Τοπογραφική Αποτύπωση με τη μέθοδο Real Time Kinematic

Οι τοπογραφικές μετρήσεις που έλαβαν χώρα στην περιοχή μελέτης είχαν σκοπό, τόσο την εξάρτηση όλων των υπόλοιπων εργασιών που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο και την ένταξή τους στο κρατικό σύστημα αναφοράς, όσο και την σύγκριση των μεθοδολογιών μεταξύ κλασικών και σύγχρονων τεχνικών. Επιπλέον, η ένταξη όλων αυτών των εργασιών στο Ε.Γ.Σ.Α. 87, μπορεί να συντελέσει σημαντικά στην ενδεχόμενη μελλοντική μελέτη και έρευνα της περιοχής, ώστε να είναι δυνατή μία αξιολόγηση διαχρονικής παρακολούθησης αλλά και εφαρμογής άλλων τεχνικών που μπορεί να συνδυαστούν είτε με προηγούμενα είτε με επόμενα δεδομένα.

2.3 Γεωφυσικές διασκοπήσεις

Κατά την διάρκεια των εργασιών πεδίου, εκτός από την ίδρυση δικτύου και την τοπογραφική αποτύπωση, στην ευρύτερη περιοχή των κορημάτων, δηλαδή βορειοανατολικά του ρήγματος, πραγματοποιήθηκαν και γεωφυσικές διασκοπήσεις με στόχο τη διερεύνηση της υπεδαφικής δομής.

Ακολουθήθηκε η τεχνική της γεωηλεκτρικής τομογραφίας (Electrical Resistivity Tomography), με την εκτέλεση τεσσάρων (4) συνολικά γεωηλεκτρικών τομών καλύπτοντας όλη την προσβάσιμη έκταση των κορημάτων στην εγγύς της ρηξιγενούς ζώνης περιοχής (βλ. Χάρτη 2.3).



Χάρτης 2.3 Εκτέλεση γεωφυσικών διασκοπήσεων (γεωηλεκτρικά τομογράμματα)

Οι υψηλής διακριτικότητας εργασίες υπαίθρου για τη γεωφυσική έρευνα, ολοκληρώθηκαν σε δύο φάσεις. Η μία διεξήχθη τον Νοέμβριο του 2011 όπου πραγματοποιήθηκε η γεωηλεκτρική τομή ERT-1 συνολικού μήκους 200m, ενώ η δεύτερη τον Ιούνιο του 2012 οι ERT-2, ERT-3 και ERT-4, συνολικού μήκους 360m (βλ. Πίνακα 2.2).

Χρησιμοποιήθηκε το σύστημα Lund του οίκου ABEM με 41 ηλεκτρόδια και η γεωηλεκτρική συσκευή Terrameter SAS 300B του ιδίου οίκου. Συνολικά ελήφθησαν 810 μετρήσεις της υπεδαφικής ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, με την τεχνική Wenner.

Ταυτόχρονα με τις γεωφυσικές μετρήσεις, όπως απαιτείται από τις προδιαγραφές της μεθοδολογίας, πραγματοποιηθήκαν ακριβείς τοπογραφικές αποτυπώσεις των θέσεων και των υψομέτρων των ηλεκτροδίων με την τεχνική RTK-GPS.

Πίνακας 2.2

Γεωηλεκτρικά Τομογράμματα

Γεωηλεκτρικό Τομόγραμμα	Μήκος (m)	Απόσταση ηλεκτροδίων (m)	Πλήθος θέσεων μέτρησης ρ_a
ERT-1	200	4,0	264
ERT-2	140	3,5	189
ERT-3	120	3,0	169
ERT-4	100	2,5	188

Στις εργασίες υπαίθρου συμμετείχαν 11 προ/μεταπτυχιακοί φοιτητές του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος (βλ. Εικ. 2.10).



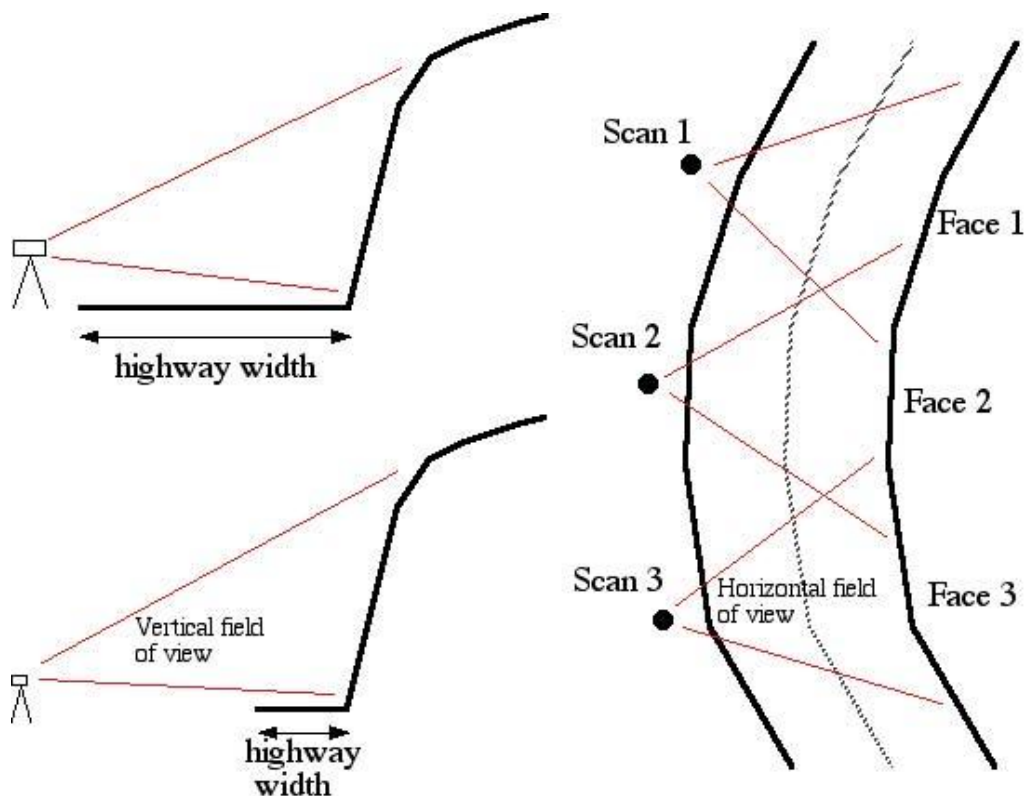
Εικόνα 2.10 Εκτέλεση γεωφυσικών εργασιών

2.4 Επίγεια Τρισδιάστατη Σάρωση LiDaR

Όπως σε όλες σχεδόν τις ενόργανες μετρήσεις, έτσι και σε μία αποτύπωση εφαρμόζοντας την τεχνική της επίγειας τρισδιάστατης σάρωσης LiDaR, υπάρχει το στάδιο της προεργασίας, η εφαρμογή και το στάδιο επεξεργασίας των δεδομένων.

2.4.1 Προεργασία σαρώσεων

Δεδομένου πως για μεγάλες επιφάνειες απαιτούνται περισσότερες από μία σαρώσεις προκειμένου να υπάρχει πλήρης κάλυψη της επιφάνειας που σαρώνεται, οι οποίες στην συνέχεια ενώνονται, το πρώτο και πολύ βασικό στάδιο για την πληρότητα και ακρίβεια μιας τέτοιας εφαρμογής αποτελεί ο σχεδιασμός και προγραμματισμός των λήψεων που πρόκειται να πραγματοποιηθούν στο πεδίο, ώστε να υπάρχει η απαιτούμενη επικάλυψη μεταξύ τους (βλ. Σχημ. 2.1).



Σχήμα 2.1 Καθορισμός των θέσεων λήψης του σαρωτή αναλόγως του ύψους του πρανούς και της οριζόντιας επικάλυψης μεταξύ των σαρώσεων (*GROUND-BASED LiDAR Rock Slope Mapping and Assessment*, 2008)

Συνήθως σε εφαρμογές αποτύπωσης μεγάλων επιφανειών σε έκταση και ύψος, όπου απαιτείται σχετικά μεγάλο οπτικό πεδίο, ο σαρωτής τοποθετείται απέναντι και όσο το δυνατό πιο μακριά, όχι όμως σε απόσταση μεγαλύτερη των 100m γιατί όσο μεγαλώνει η απόσταση μειώνεται η ακρίβεια.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, η έκταση και η γεωμετρία του ρήγματος αλλά και η τοποθεσία ήταν τα στοιχεία που καθόρισαν τη διαδικασία αυτή. Η επιλογή των θέσεων λήψης υπήρξε περιορισμένη καθώς απέναντι από την επιφάνεια του αντικείμενου προς

σάρωση συναντάμε ένα κομμάτι στεριάς πλάτους 10-15m και ο μόνος διαθέσιμος χώρος ήταν αυτός του πεζοδρομίου (βλ. Εικ. 2.11) καθώς η κυκλοφορία του δρόμου δεν διακόπηκε.



Εικόνα 2.11 Επιλογή στάσεων σαρωτή

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, επιλέχθηκαν τρεις συνολικά θέσεις από τις οποίες έγιναν οι λήψεις, ώστε να σαρωθεί όλο το αντικείμενο χωρίς να υπάρχουν κενά και ασυνέχειες.

Επόμενο βήμα πριν τη διαδικασία της σάρωσης αποτελεί η τοποθέτηση κάποιων στόχων σε συγκεκριμένα σημεία, ορατά και από τις δύο διαδοχικές στάσεις, οι οποίοι χρησιμεύουν κατά την διαδικασία της σύνδεσης των σαρώσεων (registration), ως ομόλογα σημεία.

Τέτοιοι στόχοι μπορεί να είναι, είτε ειδικού προτύπου *ανακλαστικοί στόχοι*, είτε οποιοδήποτε άλλο αντικείμενο υψηλής ανακλαστικότητας που μπορεί να παραμείνει σε σταθερή θέση κατά την διάρκεια των διαδοχικών σαρώσεων.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί πως κατά την τοποθέτησή των στόχων στο πεδίο τηρούνται ορισμένοι κανόνες. Επιδιώκεται σε κάθε σάρωση να υπάρχουν τουλάχιστον τρεις στόχοι κοινοί με την παρακείμενη σάρωση, οι οποίοι θα πρέπει να είναι όμοια κατανομημένοι στον χώρο και να μην βρίσκονται σε ευθεία.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, αυτό ήταν ανέφικτο καθώς μιλάμε για μία σχεδόν κάθετη επιφάνεια μεγάλου ύψους, όπου οι περισσότεροι στόχοι τοποθετήθηκαν κατά μήκος του

ρήγματος και του δρόμου, περίπου συννευθιακά και σε ύψος όχι μεγαλύτερο των 10m, όταν το ύψος του αντικειμένου προς αποτύπωση φτάνει τα 185m.

Βάσει όλων των παραπάνω, απαραίτητη ήταν η χρήση περισσότερων των τριών (3) στόχων μεταξύ των σαρώσεων. Έτσι, τοποθετήθηκαν τρεις ειδικοί *ανακλαστικοί στόχοι* μεταξύ των διαδοχικών σαρώσεων στον ευρύτερο χώρο καθώς και επτά (7) συνολικά μεταλλικά μπουλόνια, τα οποία πακτώθηκαν στο βράχο. Λόγω μικρής διαμέτρου και προκειμένου αυτά να είναι διακριτά μέσα στο «νέφος σημείων», μαζί με κάθε μπουλόνι τοποθετήθηκε και ένας επίπεδος δίσκος CD (βλ. Εικ. 2.12).



Εικόνα 2.12 Τοποθέτηση ανακλαστικών στόχων

Συνήθως, για τους στόχους, αφού αυτοί προσδιοριστούν στο πεδίο, εκτελείται μία πιο ακριβής (μεγαλύτερης ανάλυσης) σάρωση, το ονομαζόμενο *fine scan*, κατά το οποίο κάθε στόχος χαρακτηρίζεται - ονομάζεται ως CSP (Control Sphere Point) στο πεδίο, μέσω της μονάδας ελέγχου, ώστε να εντοπίζεται αμέσως κατά την ένωση.

2.4.2 Διαδικασία σάρωσης

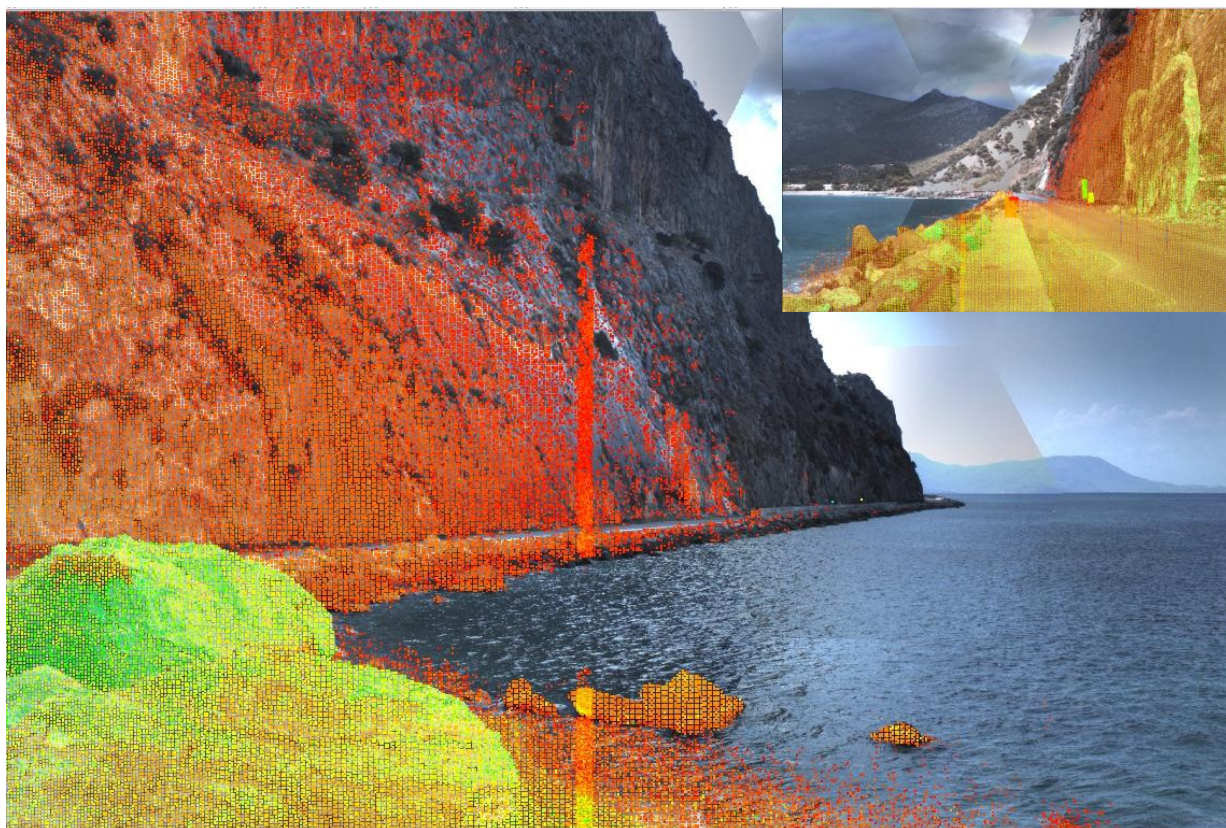
Η διαδικασία της σάρωσης αποτελεί το πιο εύκολο στάδιο των εργασιών που απαιτούνται. Ουσιαστικά, η διαδικασία αυτή μπορεί να διεξαχθεί από ένα άτομο, αφού το μόνο που χρειάζεται είναι η τοποθέτηση του σαρωτή στη στάση που έχει επιλεγεί και οι ρυθμίσεις του.

Οι σημερινοί επίγειοι σαρωτές έχουν εξελιχτεί τόσο, που όλο το σύστημα τους είναι ενσωματωμένο στην κεντρική μονάδα χωρίς να χρειάζεται εξωτερική μονάδα ελέγχου για την διαχείριση της διαδικασίας ή εξωτερική μπαταρία, πράγμα που διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό την μετακίνησή τους, όταν πριν μία δεκαετία η μπαταρία των πρώτων σαρωτών ζύγιζε 10Kg και οι ρυθμίσεις γινόνταν από εξωτερικό υπολογιστή που έπρεπε να συνδέεται κάθε φορά με το σαρωτή. Επίσης, είναι τοπογραφικά όργανα αναβαθμίσιμα και συμβατά σχεδόν με όλα τα παρελκόμενα των γεωδαιτικών σταθμών.



Εικόνα 2.13 Διαδικασία σάρωσης

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει το εύρος σάρωσης καθώς και την ανάλυση που επιθυμεί να έχει η κάθε σάρωση. Δεδομένου πως υπάρχει η δυνατότητα να δοθεί μια εικόνα των αντικειμένων που βρίσκονται εντός της εμβέλειά του, μέσω της κάμερα που διαθέτει, αλλά και της απεικόνισης της τρισδιάστατης πληροφορίας κατά την συλλογή των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (βλ. Εικ. 2.14), μπορεί κανείς να κρίνει αν το αποτέλεσμα είναι το επιθυμητό και να κάνει οποιαδήποτε αλλαγή κατά την ώρα εργασίας του στο πεδίο.



Εικόνα 2.14 Απεικόνιση τρισδιάστατης πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο

Με σκοπό τον εντοπισμό τυχόν μεταβολών σε χρονικό διάστημα περίπου επτά (7) μηνών, πραγματοποιήθηκαν δύο σετ σαρώσεων από την κάθε στάση και στην συνέχεια δημιουργήθηκε ένα ενιαίο τρισδιάστατο μοντέλο των διαφορετικών περιόδων.

Η τρισδιάστατη σάρωση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του σαρωτή **Leica ScanStation C10** (βλ. Εικ. 2.13), με ακρίβεια προσδιορισμού θέσης $\pm 6\text{mm}$. Η ανάλυση της σάρωσης στην SG1, που η απόσταση μεταξύ σαρωτή και αντικειμένων έφτασε τη μέγιστη που δίνει ο κατασκευαστής, σχεδόν 300m, επιλέχθηκε 5cm@100m. Από τις στάσεις SG2 και SG3, θέσεις ακριβώς απέναντι και σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια του ρήγματος έχουμε ανάλυση 2cm@50m.

Η συνολική διάρκεια των σαρώσεων ήταν περίπου 6 ώρες κατά την 1^η επίσκεψη τον Οκτώβριο του 2011 και 4 ώρες κατά την 2^η που πραγματοποιήθηκε τον Ιούνιο του 2012, ενώ η κάθε σάρωση δεν απαιτούσε πάνω από 20-30 λεπτά της ώρας.

2.4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά Leica ScanStation C10

Ο σαρωτής που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ο **Leica ScanStation C10**, το οποίο συγκεντρώνει χαρακτηριστικά που το καθιστούν τόσο παραγωγικό και ακριβές όσο λειτουργικό και φιλικό προς το χρήστη. Η υψηλή παραγωγικότητά του οφείλεται σε χαρακτηριστικά όπως το σύστημα καθρεπτών Smart X-Mirror™, που επιτρέπει στο χρήστη να εκτελεί full-dome scans σε μερικά μόνο λεπτά (λιγότερο από 2 λεπτά για ένα

τυπικό δωμάτιο) με τη τεχνική του spinning mirror. Ο κάθε χρήστης μπορεί να επωφεληθεί από το φιλικό προς τους τοπογράφους περιβάλλον, το on board total station-like control ή τη χρήση ενός laptop για την οπτικοποίηση των δεδομένων και την επεξεργασία τους.

Ο σαρωτής ScanStation C10 συνδυάζει την όλα-σε-ένα φορητότητα με την δυνατότητα για όδευση, οπισθοτομία ή χρήση των σκαναρισμένων στόχων για μέγιστη ευελιξία. Το πλήρες field-of-view 360 x 270, η υψηλή ακρίβεια, το μεγάλο εύρος σάρωσης (300m@90% ανακλαστικότητα), και η μεγάλη ταχύτητα σάρωσης (50k pts/sec) κάνουν το ScanStation C10 το πιο ευέλικτο scanner στις εφαρμογές πεδίου και στη βιομηχανία. Η δυνατότητα προσαρμογής, στον αντάπτορα υποδοχής, δέκτη GPS ή πρίσμα καθιστά εφικτό τον άμεσο προσδιορισμό θέσης του κάθε σημείου λήψης ανεξάρτητα, χωρίς να απαιτείται από πριν η ίδρυση γεωδαιτικού δικτύου για την ένταξη των μετρήσεων σε κάποιο σύστημα αναφοράς. Επίσης, η ενσωματωμένη κέντρωση laser και η υποδοχή του τριχοχλίου παρέχουν επιπρόσθετη συμβατότητα με όλα τα διαθέσιμα παρελκόμενα της Leica.



Εικόνα 2.15 Ο σαρωτής Leica ScanStation C10



Το σύστημα καθρεπτών περιστρέφεται αυτόματα εκτελώντας κινήσεις 360° x 270° για αποτελεσματικές σαρώσεις όλης της επιφάνειας του αντικειμένου. Η ίδια λειτουργία Smart X-Mirror αυτόματα ευθυγραμμίζει και την εσωτερική κάμερα για γρήγορο και ακριβές texture mapping των point clouds.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ III

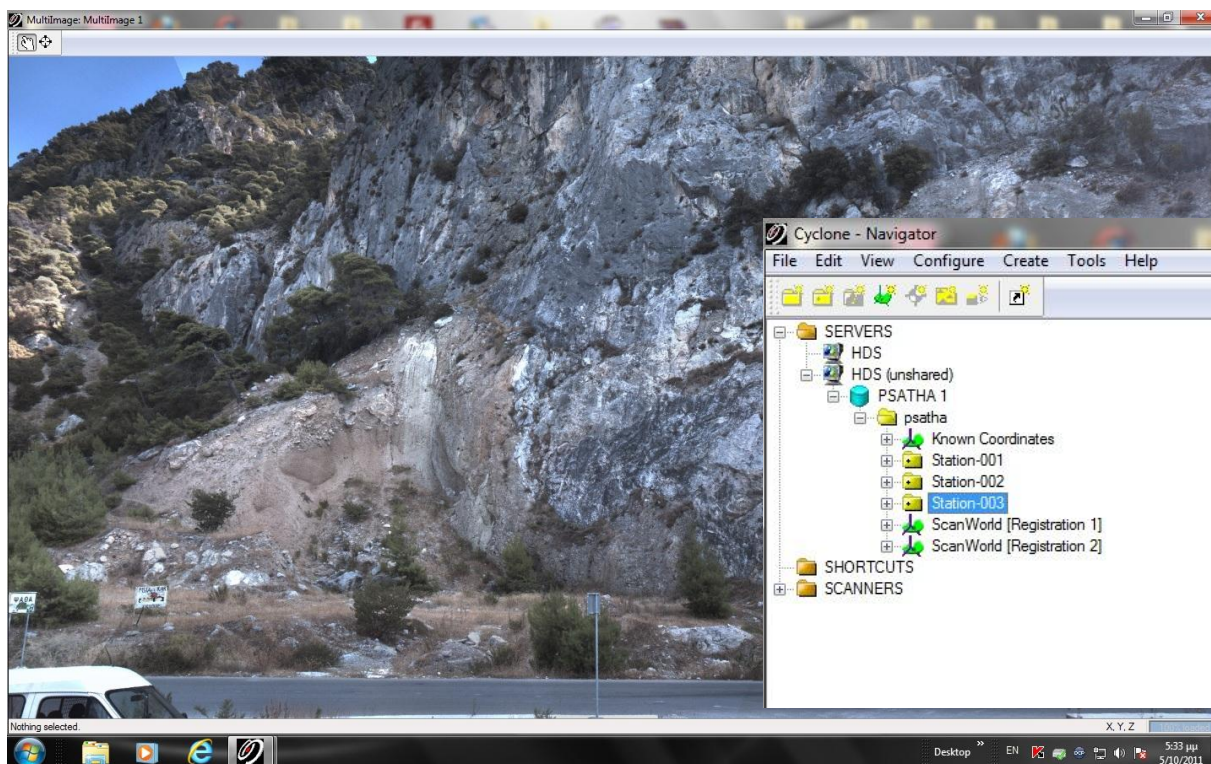
Επεξεργασία δεδομένων και στοιχείων

3.1 Επεξεργασία δεδομένων σαρώσεων LiDaR

Η επεξεργασία των δεδομένων των σαρώσεων πραγματοποιήθηκε με μία σειρά εξειδικευμένων λογισμικών.

- i. Το **Leica Cyclone**, είναι το λογισμικό με το οποίο συνεργάζονται όλα τα Laser Scanner της Leica Geosystems και χρησιμοποιήθηκε για (α) την συλλογή της πληροφορίας και την εξαγωγή των πρωτογενών .IMP αρχείων και εικόνων από την κάμερα του σαρωτή σε άλλα είδη αρχείων συμβατά με τα υπόλοιπα λογισμικά, (β) την ένωση των διαδοχικών σαρώσεων, καθώς και (γ) τη γεωαναφορά του ενιαίου μοντέλου.
- ii. Το **3D Cloud Compare** χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του TIN (Triangular Interface Network), δηλαδή για την μετατροπή του νέφους σημείων σε επιφάνεια.
- iii. Το **Geon Points to Grid**, που αποτελεί ένα εργαλείο με το οποίο μπορεί κανείς να μετατρέψει τα αναλογικά .ascii αρχεία σε ψηφιακά, χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την δυνατότητα εισαγωγής αυτών στο ArcMap 9.3, για την δημιουργία και περαιτέρω επεξεργασία των DEM (Digital Elevation Model).
- iv. Με το **Split-FX** τέλος, έγινε η αφαίρεση των δύο διαφορετικών «point cloud».

Για το κάθε σετ σαρώσεων, δημιουργήθηκε αντίστοιχα μία βάση δεδομένων στο πεδίο με το όνομα Psatha1 και Psatha2, όπου για την κάθε στάση λήψης αποθηκεύονταν η κάθε σάρωση ως ScanWorld (βλ. Εικ. 3.1) και οι εικόνες της επιφάνειας μέσω της κάμερας από την συγκεκριμένη θέση.



Εικόνα 3.1 Λήψη μέσω της κάμερας και περιήγηση σε περιβάλλον Leica Cyclone

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί, πως πριν προχωρήσει κάποιος στη διαδικασία της ένωσης των σαρώσεων, υπάρχει και ένα στάδιο προεπεξεργασίας, εάν αυτό κρίνεται απαραίτητο, κατά το οποίο δίνεται η δυνατότητα αντιμετώπισης του «θορύβου». «Θόρυβος» καλείται κάθε περιττή πληροφορία που έχει συλλεχθεί μεταξύ του σαρωτή και του αντικειμένου, η οποία μπορεί να στρεβλώνει το αποτέλεσμα μας. Η διαδικασία απαλλαγής του «θορύβου» πραγματοποιείται αυτόματα, όταν πρόκειται για σάρωση επίπεδης επιφάνειας, μ' ένα εργαλείο του λογισμικού *Cyclone Smooth Surface*, επιλέγοντας την επιφάνεια πάνω από την οποία δεν θέλουμε να έχουμε καθόλου πληροφορία. Σε διαφορετική περίπτωση το λογισμικό παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα χειροκίνητης διαδικασίας απαλλαγής του «θορύβου».

Στη συγκεκριμένη αποτύπωση, ενώ δημιουργήθηκε «θορύβος» εξαιτίας της κατά περίπτωση φυτοκάλυψης (δέντρα και θαμνώδης βλάστηση) που δημιούργησε σκιές πίσω από την όψη τους δημιουργώντας «τρύπες», δηλαδή σημεία χωρίς καθόλου πληροφορία μέσα στο μοντέλο, δεν εφαρμόστηκε το *Smooth Surface*. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε αναλύεται στην παράγραφο 3.2.2.

3.1.1 Σύνδεση σαρώσεων (Registration)

Οι συντεταγμένες των αποτυπωμένων σημείων αναφέρονται σε ένα σύστημα συντεταγμένων του σαρωτή, που εξαρτάται από τον προσανατολισμό και την θέση του ίδιου τη στιγμή της σάρωσης (*I. Lee, Y. Choi, 2004*). Ουσιαστικά, η κάθε λήψη αποτελεί ένα νέο σύστημα συντεταγμένων, αρχή της οποίας είναι η θέση του σαρωτή.

Η σύνδεση των σαρώσεων είναι η διαδικασία κατά την οποία οι λήψεις μιας βάσης δεδομένων εντάσσονται σ' ένα ενιαίο σύστημα συντεταγμένων και παράγεται ένα ενιαίο προσανατολισμένο μοντέλο. Στην πραγματικότητα, γίνεται ο καθορισμός ενός απόλυτου συστήματος για όλες τις σαρώσεις. Για κάθε σύνδεση (Registration) που δημιουργείται χρησιμοποιείται ως αναφορά το σύστημα μίας από τις επιλεγμένες λήψεις, ενώ τα άλλα συστήματα δέχονται στροφή και μετακίνηση ως προς αυτό.

Η επιλογή του τρόπου με τον οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί η ένωση των σαρώσεων εξαρτάται από:

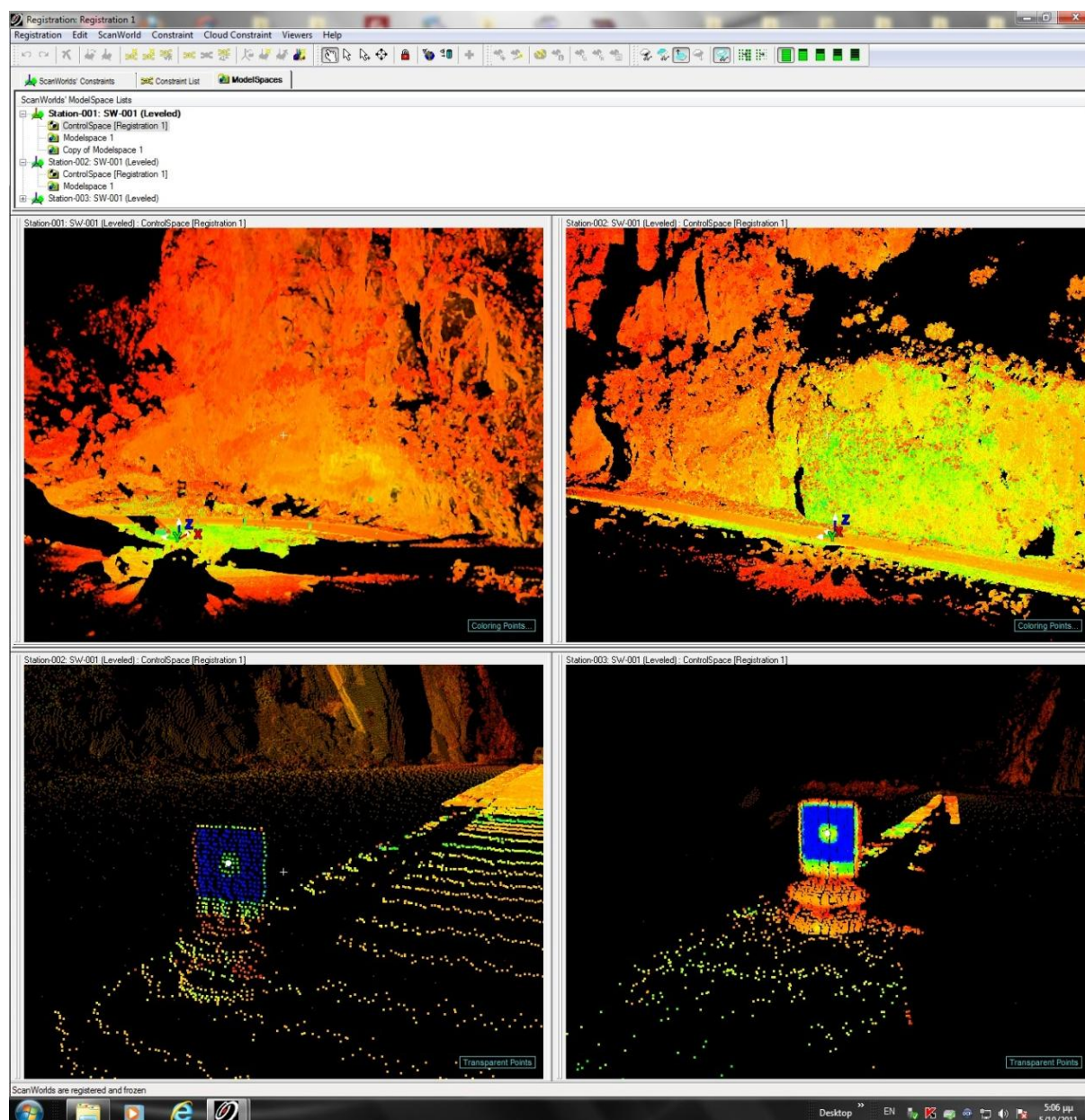
- τις δυνατότητες του σαρωτή,
- το λογισμικό που τον συνοδεύει και
- τις απαιτήσεις ακρίβειας του τελικού προϊόντος.

Εκτός από τη χρήση των ανακλαστικών στόχων (βλ. παράγραφο 2.4.1) ένας εναλλακτικός τρόπος ένωσης των λήψεων, είναι η χρήση κοινών - ομόλογων σημείων. Έτσι, οποιαδήποτε κοινά και ευκρινώς αναγνωρίσιμα σημεία μπορούν να πάρουν τον ρόλο στόχου, κατάλληλου για registration. Στην παρούσα μελέτη, η ένωση πραγματοποιήθηκε με την χρήση τόσο ειδικών ανακλαστικών στόχων, όσο και κοινών-ομόλογων σημείων μέσα στο μοντέλο.

Και στις δύο τεχνικές, αρχικά δημιουργείται ένα νέο Registration μέσα στο project και στη συνέχεια επιλέγονται δύο ScanWorlds ή ένα ScanWorld και ένα ήδη υπάρχον Registration με επικαλυπτόμενο τμήμα.

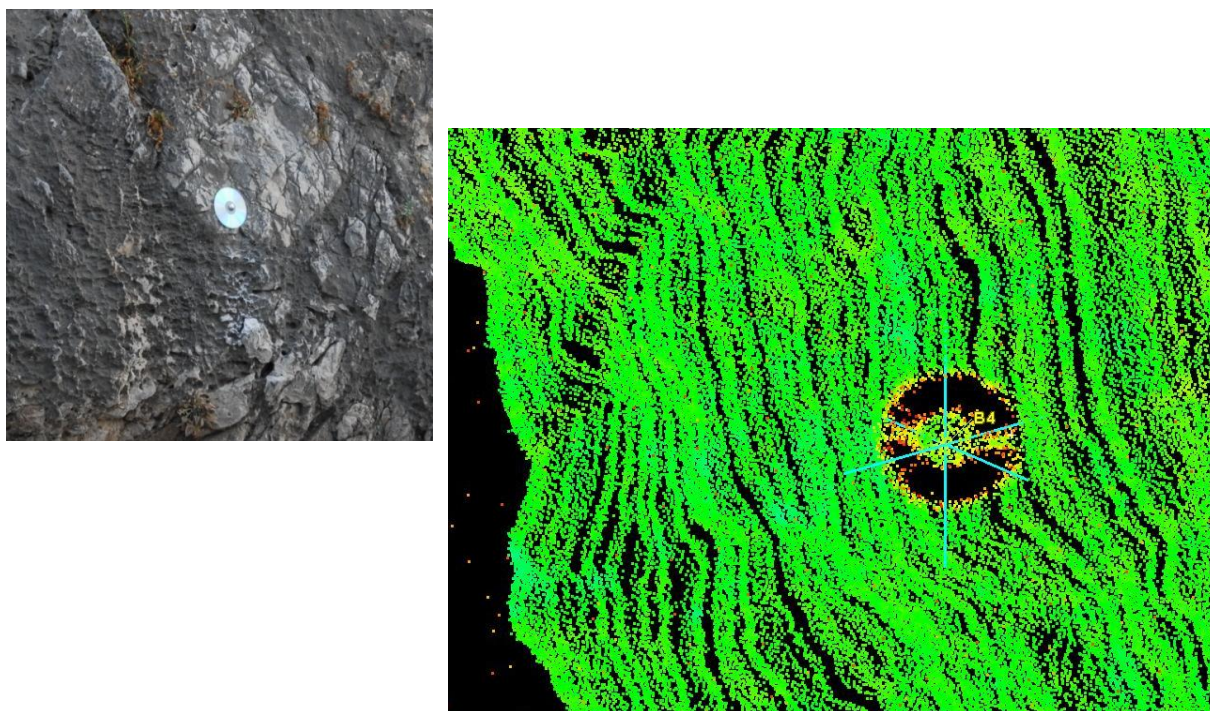
Η ένωση των σαρώσεων με τη χρήση των ανακλαστικών στόχων γίνεται,

- είτε αυτόματα από το λογισμικό *Leica Cyclone*, με την εντολή *Auto Add Constraints*, εφόσον αυτοί έχουν χαρακτηριστεί στο πεδίο με συγκεκριμένο όνομα και μπορεί να τους αναγνωρίσει με βάση την ονομασία τους (βλ. παράγραφο 2.4.1)
- είτε με την χειροκίνητη επιλογή μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού στα δύο ScanWorlds αντίστοιχα (βλ. Εικ. 3.2).



Εικόνα 3.2 Χρήση ανακλαστικών στόχων

Όπως ήδη έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, εκτός από τους ανακλαστικούς στόχους, σταθερά σημεία για την ένωση αποτέλεσαν μεταλλικά μπουλόνια (βλ. Εικ. 3.3), που τοποθετήθηκαν επί της επιφάνειας του ρήγματος.



Εικόνα 3.3 Χρήση μεταλλικού μπουλονιού ως σταθερό σημείο

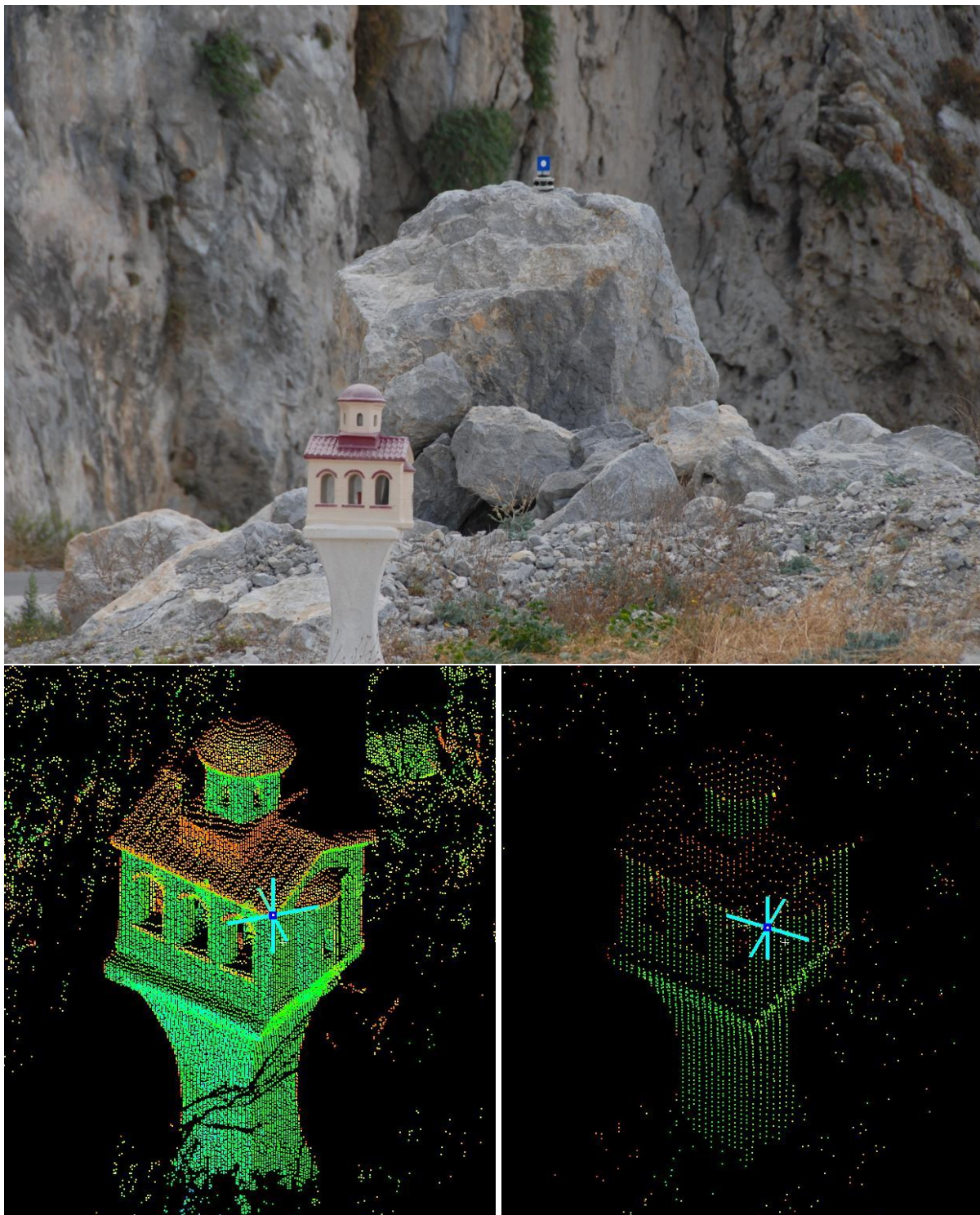
Η ένωση αντίστοιχα με τη μέθοδο των κοινών - ομόλογων σημείων γίνεται με την επιλογή τριών κοινών σημείων στα δύο αυτά «point cloud». Ο λόγος που επιλέγονται τρία ομόλογα σημεία είναι επειδή κατά την ένωση δύο ή περισσότερων λήψεων, εκτελείται από το λογισμικό ένας τρισδιάστατος μετασχηματισμός ομοιότητας, αφού τα συστήματα συντεταγμένων των σαρώσεων είναι πάντα ορθογώνια με ίσες κλίμακες στους άξονές τους (1:1).

Ο μετασχηματισμός ομοιότητας απαιτεί 7 παραμέτρους (Πατιάς, 1991):

- 3 γωνίες στροφής (ω , ϕ , κ) γύρω από τους τρεις άξονες,
- 3 μεταθέσεις (ΔX , ΔY , ΔZ) κατά μήκος των τριών αξόνων και
- συντελεστή κλίμακας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, δύο σαρώσεις μπορούν να ενωθούν με δύο σημεία καθώς οι άγνωστοι είναι 6 (3 στροφές και 3 μεταθέσεις) και κάθε σημείο στον χώρο, δημιουργεί τρεις εξισώσεις μετασχηματισμού. Από τα λογισμικά όμως των σαρωτών, κατώτερο επιτρεπτό όριο σημείων θεωρούνται τα τρία κοινά-ομόλογα σημεία. Ο λόγος είναι ότι με δύο σημεία εναπομένει ένας αδέσμευτος βαθμός ελευθερίας: η στροφή περί την ευθεία που ορίζουν τα δύο σημεία. Συνηθίζεται έτσι να λέγεται ότι «αρκούν δύο σημεία και μία συντεταγμένη ενός τρίτου» (Καρράς Γ., 1995).

Έχοντας τη δυνατότητα περιήγησης μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού *Cyclone*, επιλέγουμε τρία ή περισσότερα κοινά-ομόλογα σημεία σε κάθε ScanWorld (βλ. Εικ. 3.4).



Εικόνα 3.4 Χρήση κοινών - ομόλογων σημείων

Με βάση λοιπόν τα τρία τουλάχιστον επιλεγμένα σημεία, αυτόματα το λογισμικό *Leica Cyclone* διερευνά τη δυνατότητα ένωσης των δύο «point cloud». Εάν αυτά έχουν επιλεγεί σωστά, το επόμενο βήμα είναι να οριστούν οι παράμετροι (Edit Parameters) που αφορούν την ακτίνα της έρευνας του κοινού-ομόλογου σημείου, το ποσοστό δείγματος του νέφους σημείων που θα μελετηθεί και τον αριθμό των επαναλήψεων που πρόκειται να πραγματοποιηθούν (βλ. Εικ. 3.6).

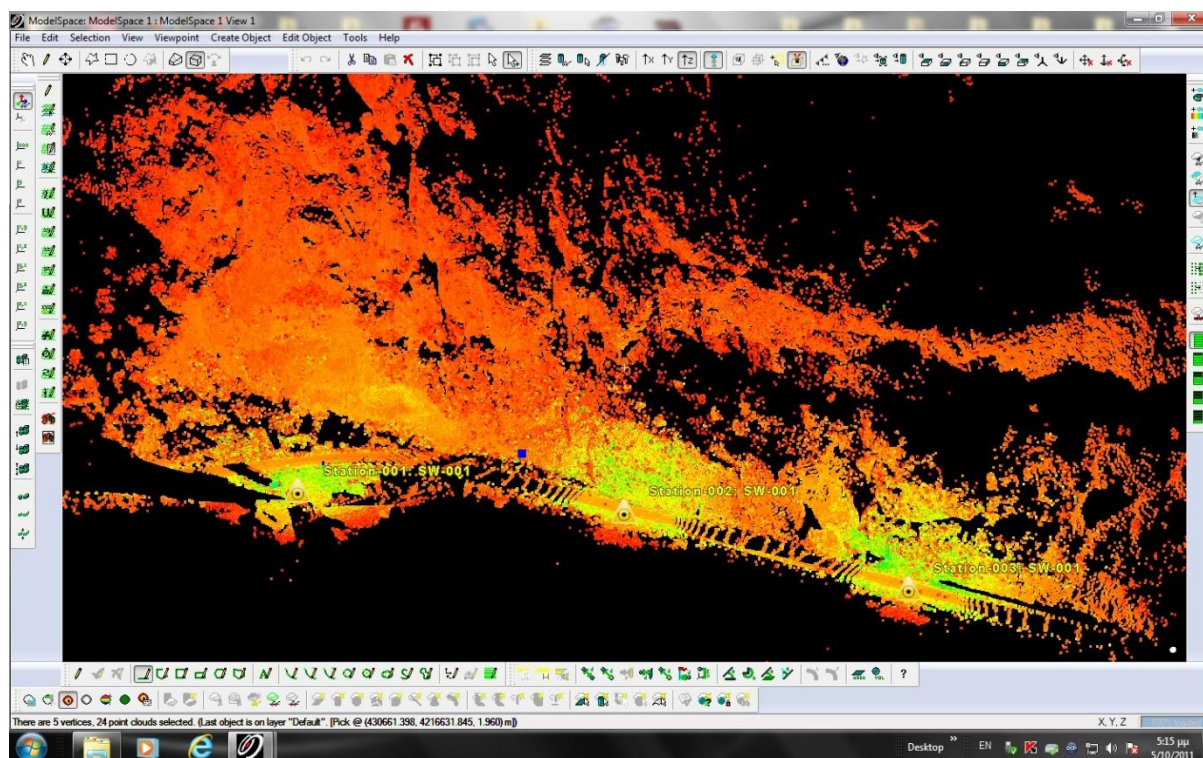
Στη συνέχεια, εκτελώντας την εντολή *Optimize Cloud Alignment*, εμφανίζεται το ιστόγραμμα κατανομής του σφάλματος, ανάμεσα σε κάθε σημείο και της κοντινότερης επικαλυπτόμενης επιφάνειας. Με την εντολή αυτή ουσιαστικά ερευνάται η βέλτιστη ένωση των λήψεων, και αφού ολοκληρωθεί εμφανίζονται σε πίνακα τα στατιστικά αποτελέσματα και τα σφάλματα της ένωσης.

Πίνακας 3.1

Σφάλματα ένωσης ενιαίου μοντέλου 1ης σάρωσης (Οκτώβριος 2011)

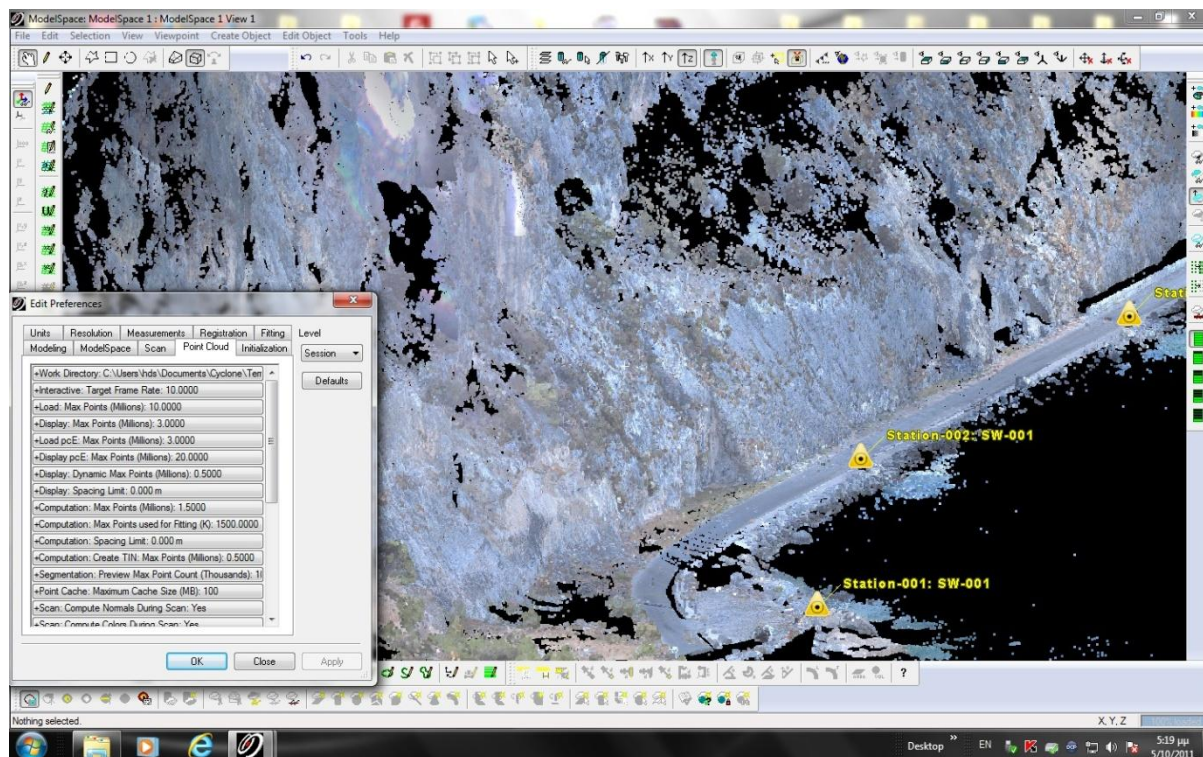
Overlap Error Statistics	
RMS	0.00772716(m)
AVG	0.0039737(m)
MIN	2.9437e-008(m)
MAX	0.0488812(m)

Εφόσον η προσωρινή ένωση έχει ολοκληρωθεί και η τιμή της τυπικής απόκλισης είναι αποδεκτή πραγματοποιείται το *Register*, υπολογίζοντας με βάση τα σφάλματα τη βέλτιστη μετακίνηση για το ScanWorld, ώστε η ένωση να γίνει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Μετά από ένα πετυχημένο Registration η εκτέλεση της εντολής *Create ScanWorld/Freeze Registration* απαιτείται για να «κλειδώσει» την ένωση και να μη δέχεται επιπλέον αλλαγή μεταξύ των ScanWorlds.



Εικόνα 3.5 Ενιαίο τρισδιάστατο μοντέλο με χρωματική διαβάθμιση yellow->red

Ενώνοντας με αυτό τον τρόπο όλες τις σαρώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί, προέκυψε το τρισδιάστατο μοντέλο όπου απεικονίζεται ολόκληρη η περιοχή του ρήγματος που μας ενδιαφέρει. Στην Εικόνα 3.5 το «point cloud» φαίνεται με χρωματική διαβάθμιση yellow->red, ενώ στην Εικ. 3.6 έχει επιλεγεί να απεικονίζεται με βάση τις τιμές του RGB που έχει ως πληροφορία από τις εικόνες τις κάμερας. Επίσης, δίνονται διάφορες άλλες επιλογές για τον τρόπο που θέλει κάποιος να εμφανίζονται τα δεδομένα κατά την διαχείρισή τους.



Εικόνα 3.6 Ενιαίο τρισδιάστατο μοντέλο με πραγματική χρωματική υφή (RGB)

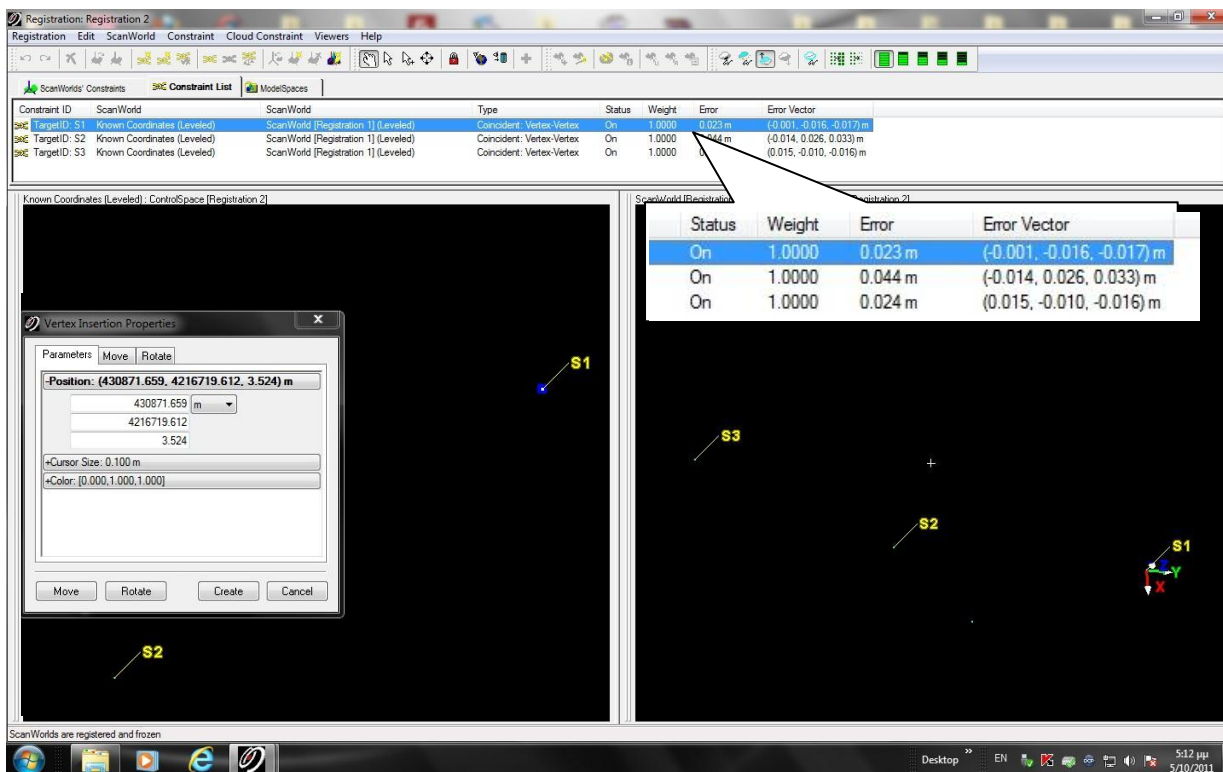
Οι σκοτεινές περιοχές μέσα στο μοντέλο, αποτελούν τις επονομαζόμενες «τρύπες», καθώς σε αυτά τα σημεία είτε δημιουργούνται σκιές από διάφορα εμπόδια, είτε λόγω μεγάλης αλλαγής κλίσης της επιφάνειας δεν είναι ορατά από την συγκεκριμένη θέση του σαρωτή, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει καθόλου πληροφορία για εκεί.

3.1.2 Γεωαναφορά μοντέλου

Η ένταξη του τελικού «point cloud» σε παγκόσμιο ή εθνικό (Ε.Γ.Σ.Α. 87) σύστημα αναφοράς γίνεται με τον καθορισμό συντεταγμένων στα σημεία ελέγχου. Στην παρούσα μελέτη, σημεία ελέγχου αποτελούν οι τρεις θέσεις (στάσεις) του σαρωτή SG1, SG2 και SG3 (βλ. Εικ. 2.8) από όπου πραγματοποιήθηκαν οι λήψεις, οι συντεταγμένες των οποίων προσδιορίστηκαν με στατικό εντοπισμό, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 2.2.

Στην πραγματικότητα η γεωαναφορά ακολουθεί την αρχή μιας ένωσης (Registration) με τη μόνη διαφορά ότι εδώ αντί να οριστούν οι κοινοί ανακλαστικοί στόχοι ή κοινά - ομόλογα σημεία, εισάγονται απευθείας οι συντεταγμένες των τριών στάσεων. Έτσι, το τελικό

μοντέλο δέχεται μια στροφή και μια μετακίνηση ως προς το σύστημα που ορίζουν αυτές οι συντεταγμένες και τα σφάλματα δίνονται για κάθε σημείο που έχει εισαχθεί.



Εικόνες 3.7 Εισαγωγή συντεταγμένων Ε.Γ.Σ.Α. 87

Ο συνολικός χρόνος που απαιτήθηκε για

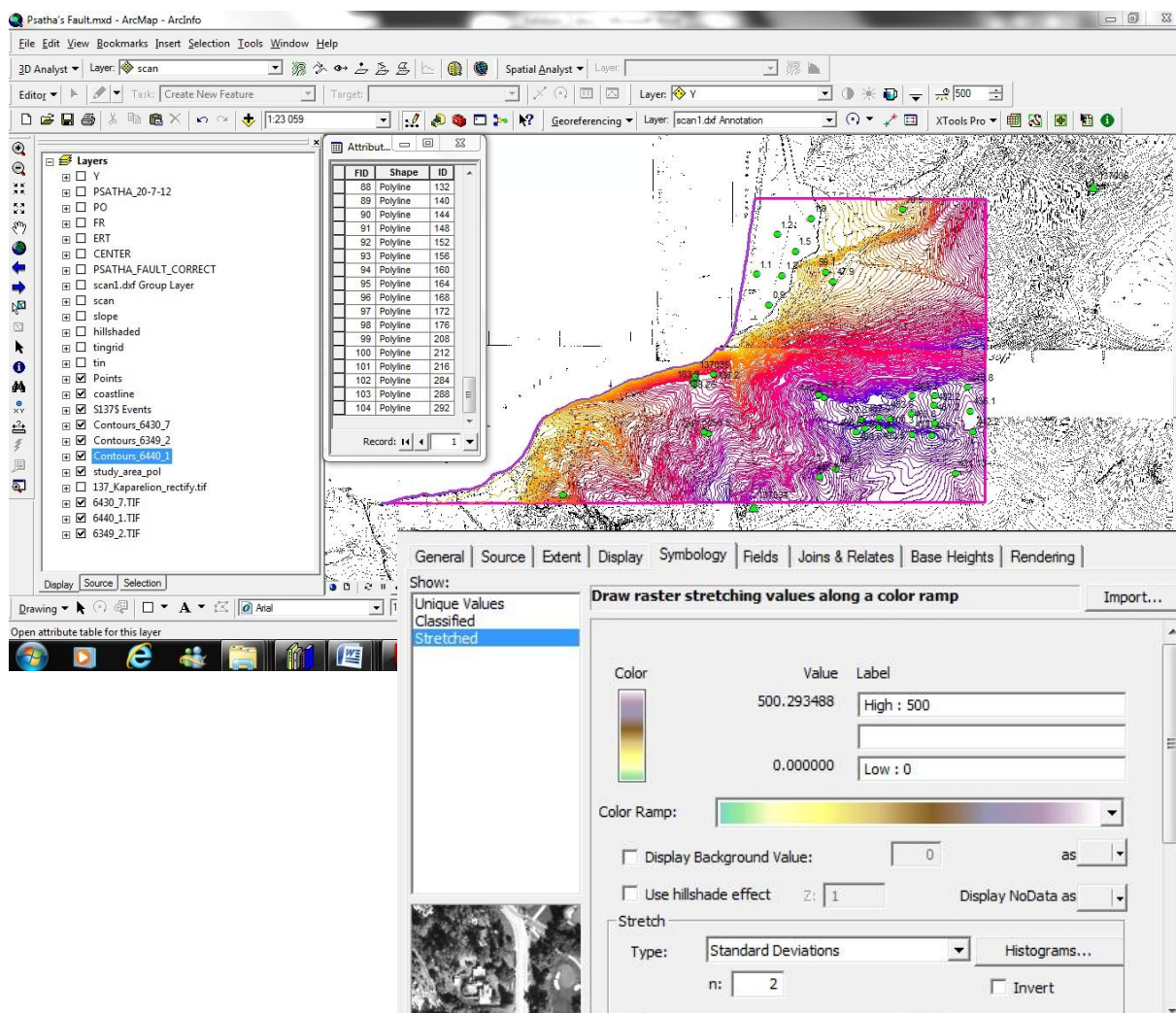
- ✓ την επεξεργασία των σαρώσεων για την ένωση,
- ✓ την γεωαναφορά του μοντέλου καθώς και
- ✓ την εξαγωγή όλων αυτών των δεδομένων σε διάφορα format συμβατά με τα προγράμματα που επρόκειτο να επεξεργαστούν, **ήταν περίπου 4 ημέρες.**

Ο **όγκος** των αρχείων που προέκυψαν από το συνολικό μοντέλο με όλη την πληροφορία ήταν για τη **1^η σάρωση 2,4GB** και για τη **2^η σάρωση 4,3GB**.

3.2 Δημιουργία ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου (DEM)

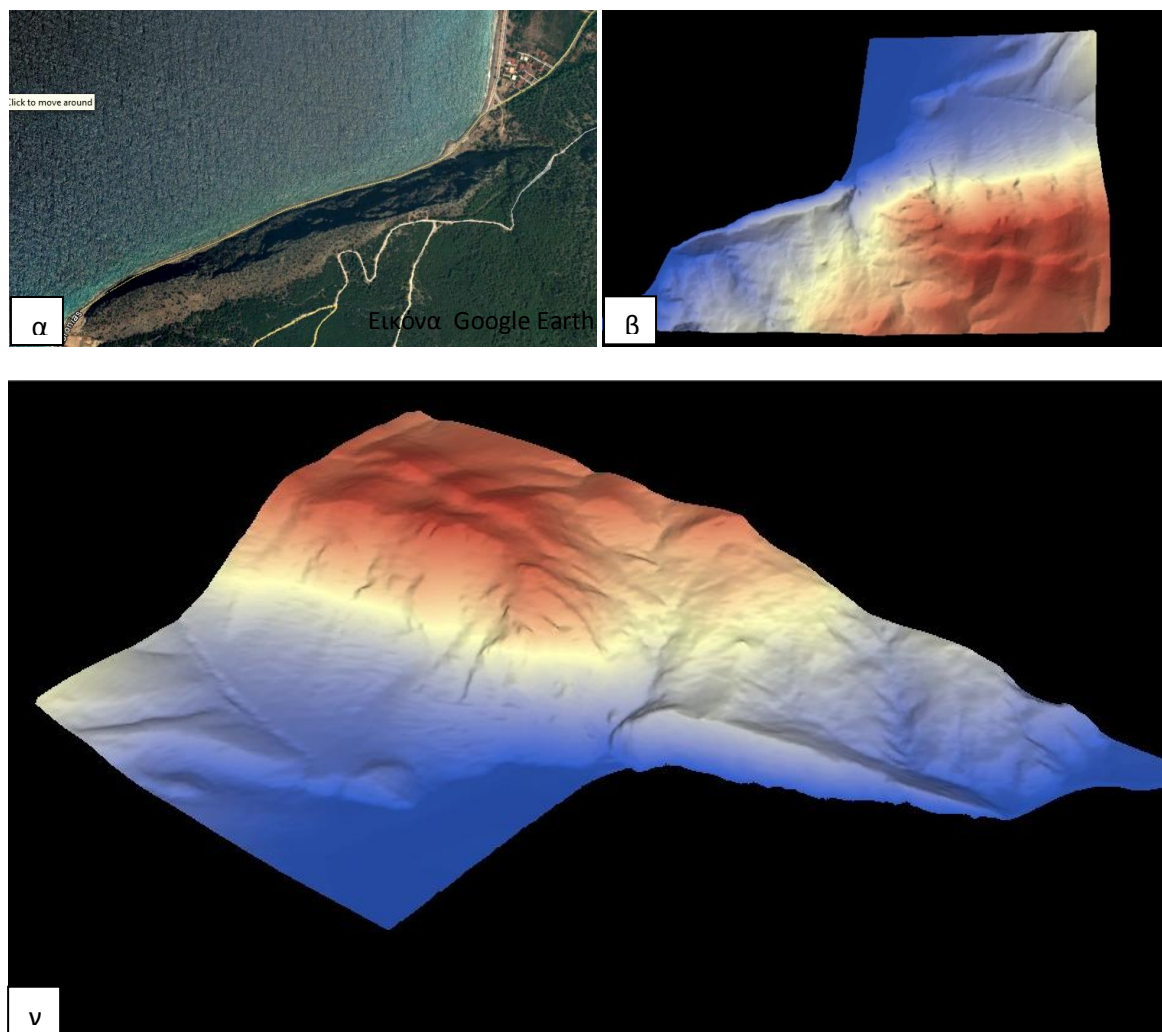
3.2.1 Βάσει ισοϋψών καμπύλων από Τ.Δ. κλίμακας 1:5.000

Με σκοπό την δημιουργία του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναγλύφου (DEM) της περιοχής μελέτης, ώστε να αναδειχτεί αρχικά η μορφολογία της ευρύτερης περιοχής του ρήγματος αλλά και να συγκριθούν στη συνέχεια τα μοντέλα που προκύπτουν από τα σημερινά δεδομένα, ψηφιοποιήθηκαν οι ισοϋψείς καμπύλες με ισοδιάσταση 4m, των τοπογραφικών διαγραμμάτων της Γ.Υ.Σ., κλίμακας 1:5.000 (βλ. Εικ. 3.8). Πρωτογενή δεδομένα αποτελούν τα φύλλα χάρτη 6349/2, 6430/7 και 6440/1, εκδοθέντα το 1972.



Εικόνα 3.8 Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου

Η περιοχή παρουσιάζει έντονο ανάγλυφο, ενώ το ορατό άλμα του ρήγματος φτάνει τα 185m μόλις δίπλα στην παράκτια ζώνη καθώς τα υψόμετρα για την περιοχή που δημιουργήθηκε το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου φτάνουν έως και 500m. Η ανάλυση (grid) του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου είναι 0,25m.

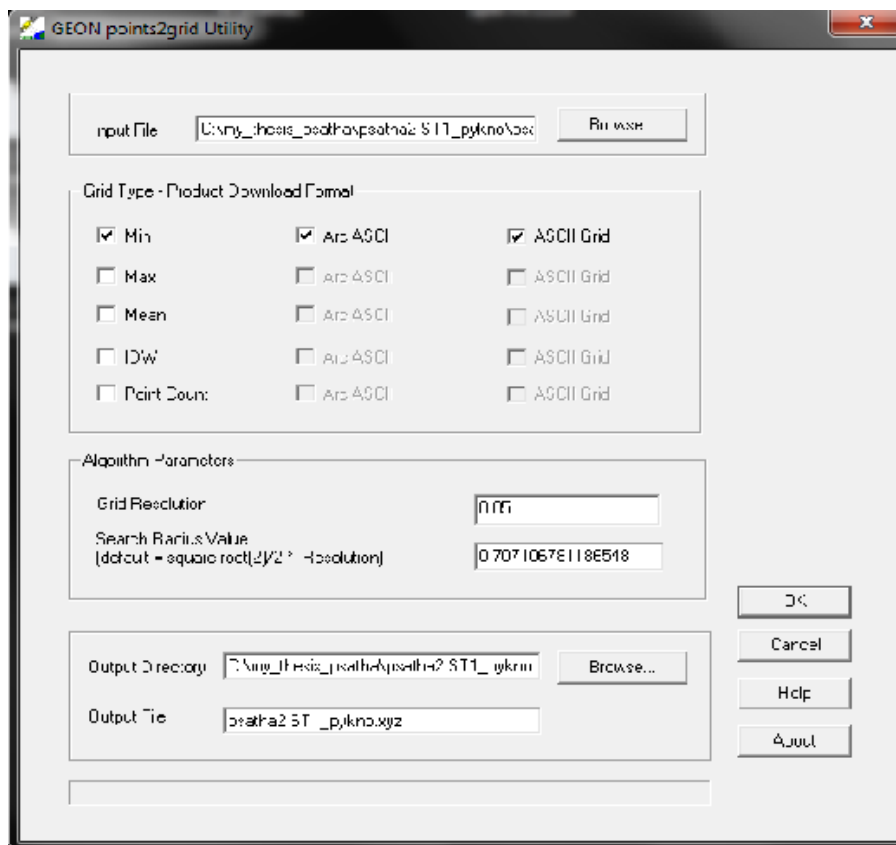


Εικόνα 3.9 (α) Δορυφορική εικόνα Google Earth (β) & (γ) Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου ευρύτερης περιοχής

3.2.2 Δεδομένα LiDaR 1ης σάρωσης

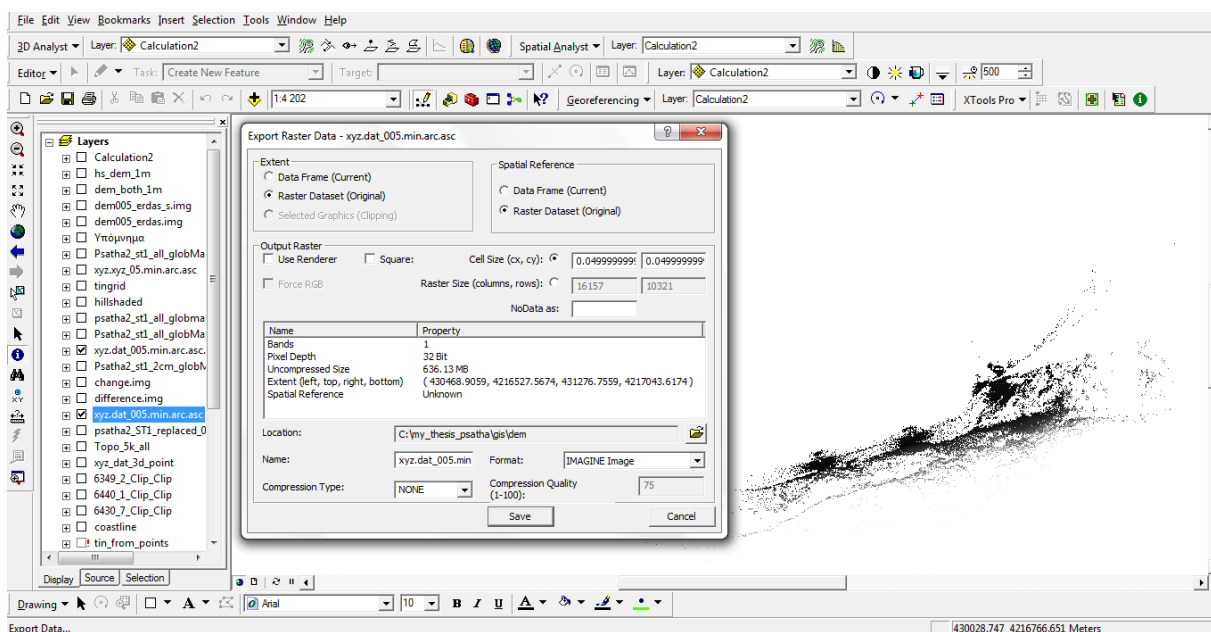
Για την εισαγωγή .ascii αρχείων σ' ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ArcGIS), απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η μετατροπή τους σε ψηφιακά, δηλαδή σε arcascii format. Το λογισμικό **Geon Points to Grid** χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη εφαρμογή δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τη μεθοδολογία για τον υπολογισμό του υψομέτρου του κάθε σημείου (βλ. Εικ. 3.10).

Ακολουθήθηκε ο τρόπος υπολογισμού υψομέτρου με την μικρότερη τιμή (Minimum), καθώς αυτός μπορεί να θεωρηθεί ένα χονδρικό «φιλτράρισμα» κρατώντας το υψόμετρο με τη χαμηλότερη τιμή για κάθε σημείο. Έτσι έχουμε ένα μοναδικό υψόμετρο για κάθε θέση Χ, Υ, το οποίο εν τέλει μας δημιουργεί την επιφάνεια του αναγλύφου αφαιρώντας κάθε περιττή πληροφορία που μπορεί να έχει συλλεχθεί πάνω από αυτό το επίπεδο με τις χαμηλότερες τιμές.



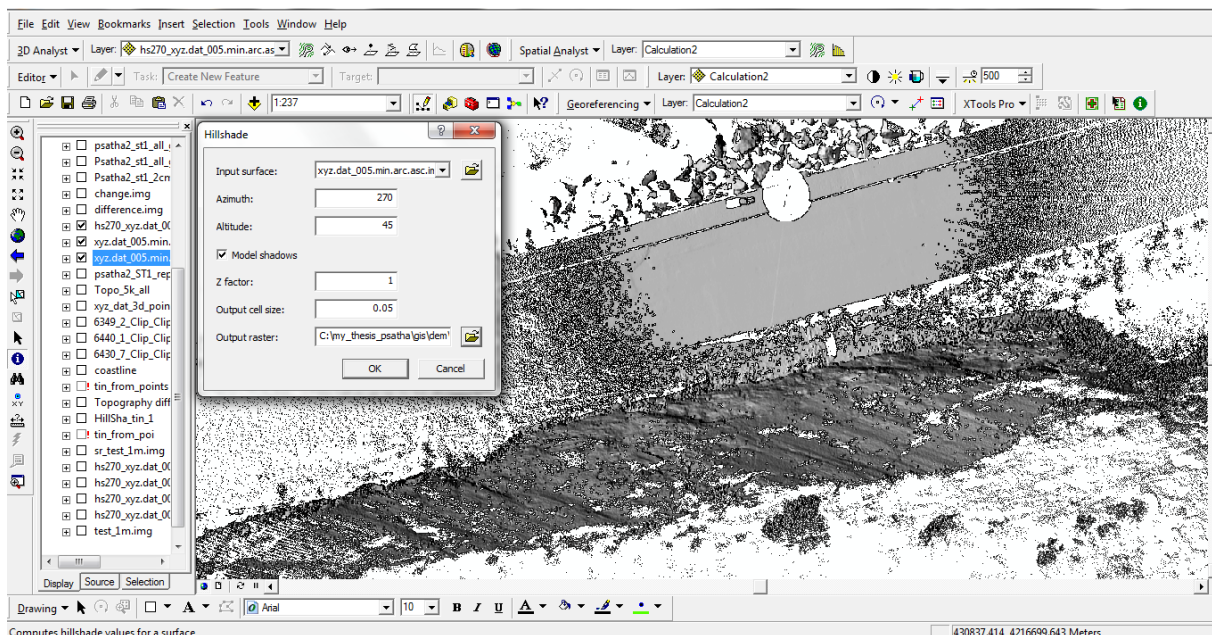
Εικόνα 3.10 Μετατροπή .ascii αρχείου σε .arcascii

Η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου από τα δεδομένα των σαρώσεων με LiDaR έγινε για την περιοχή της επιφάνειας του ρήγματος με ανάλυση (grid) 0,05m (βλ. Εικ. 3.11).



Εικόνα 3.11 Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου (κάτοψη)

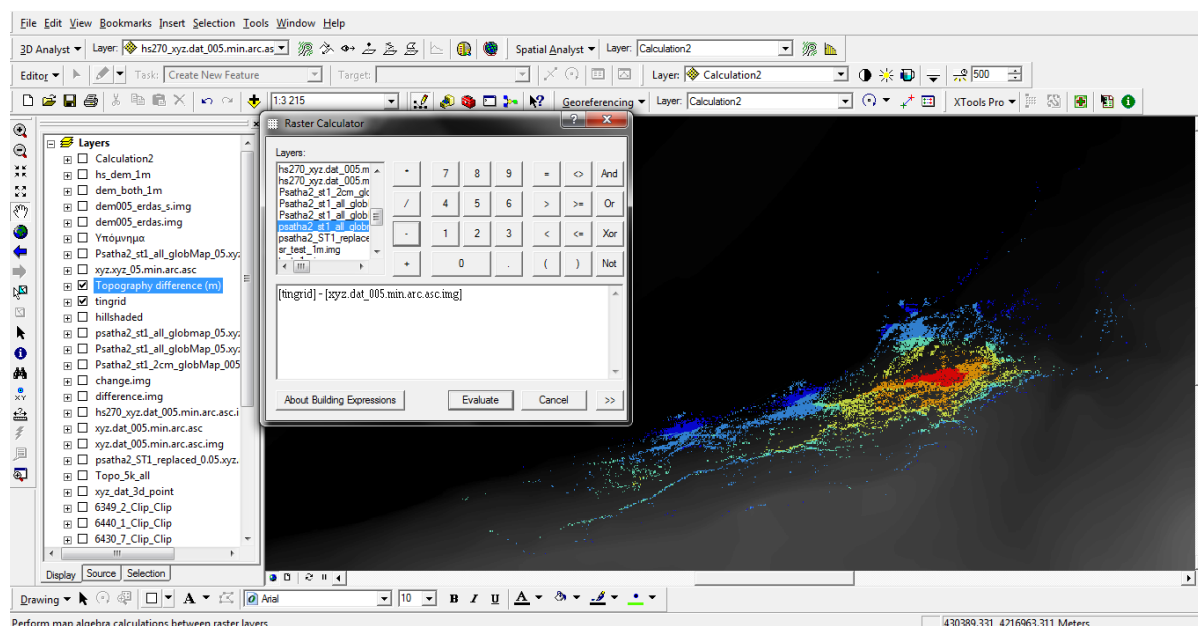
Στην εικόνα 3.12 παρουσιάζεται σε κάτοψη και σε μεγαλύτερη κλίμακα η μορφολογία του κατόπτρου από τη στάση SG2. Το χαρακτηριστικό που μπορεί να αναδειχτεί εξαιρετικά δύσκολα με άλλη μεθοδολογία σε τέτοια ανάλυση, είναι η καμπύλη μορφή της επιφάνειας του ρήγματος.



Εικόνα 3.12 Δημιουργία σκιασμένου αναγλύφου ανάλυσης 0,05m (κάτοψη)

3.3 Αφαίρεση μεταξύ ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου από Τ.Δ. κλίμακας 1:5.000 και δεδομένα 1^{ης} σάρωσης

Για την ανάδειξη των εδαφικών διαφορών στην περιοχή της επιφάνειας του ρήγματος, για την οποία υπήρχε πληροφορία και τις δύο χρονικές περιόδους, αυτή του 1972 και της 1^{ης} σάρωσης (Οκτώβριος 2011), πραγματοποιήθηκε μία αφαίρεση των δύο ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων (DEM) που παρήχθησαν, εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο Raster Calculator από το Spatial Analyst στο ArcMap (βλ. Εικ. 3.13).



Εικόνα 3.13 Αφαίρεση ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου 1972-2011

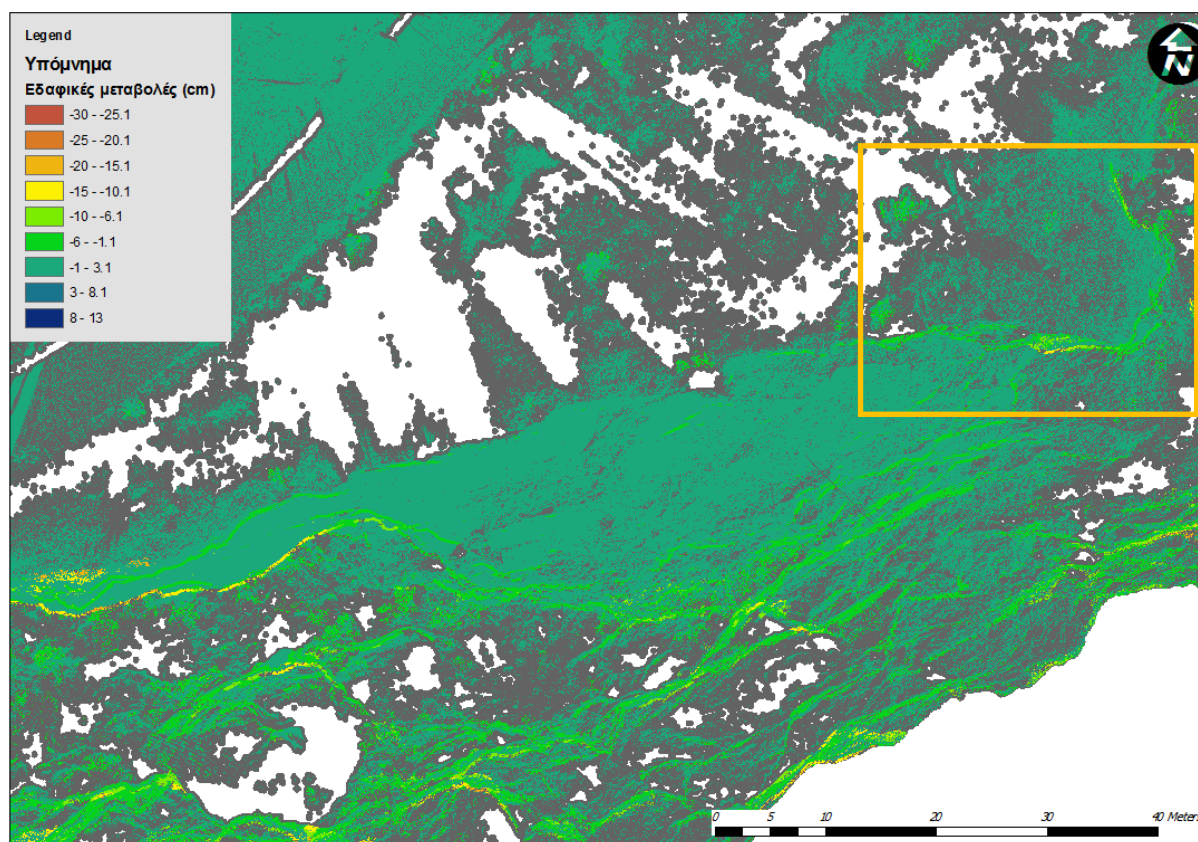
Αν και τα δύο μοντέλα που συγκρίνονται με αυτό τον τρόπο, αποτελούνται από ανομοιογενή δεδομένα, καθώς το υψομετρικό μοντέλο του 1972 έχει παραχθεί από ισοϋψείς καμπύλες με ανάλυση (grid) 0,25m και το υψομετρικό μοντέλο του 2011 έχει προκύψει από «νέφος σημείων» με ανάλυση 0,05m, τα αποτελέσματα φαίνεται να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα και να μας δίνουν μία ορθή εικόνα του μεσοδιαστήματος.

Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.13, η περιοχή με τις εντονότερες αλλαγές μέσα στη 40ετία, είναι αυτή βορειοανατολικά της επιφάνειας του ρήγματος, όπου απαντούν κώνοι κορημάτων (κόκκινες περιοχές). Οι μεγάλες εδαφικές μεταβολές σε αυτή τη θέση είναι ένα φαινόμενο που αναμένουμε να συναντήσουμε σε γεωλογικούς σχηματισμούς όπως χαλαρά ιζήματα.

Έτσι λοιπόν, μετά το πέρας του 2^{ου} σετ σαρώσεων, ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία με τα δύο χρονικά διαδοχικά υψομετρικά μοντέλα αναγλύφου, αυτό του Οκτωβρίου 2011 και του Μαΐου 2012, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της οποίας επαληθεύεται η θέση των έντονων υψομετρικών διαφορών, όπως θα δούμε στο επόμενο υποκεφάλαιο.

3.4 Αφαίρεση ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου (DEM) δεδομένων LiDaR

Η σύγκριση των DEM των δεδομένων LiDaR από τις δύο φάσεις σαρώσεων, περιορίστηκε στην περιοχή όπου αναδείχτηκαν οι μεγαλύτερες μεταβολές μέσα στο διάστημα αυτό της 40ετίας. Χρησιμοποιήθηκε δηλαδή η πληροφορία που συλλέχθηκε με LiDaR και από τις τρεις στάσεις για την περιοχή των κορημάτων. Οι διαφορές που προκύψανε σε χρονικό διάστημα έξι περίπου μηνών, Οκτώβριος 2011 - Μάιος 2012, ήταν της τάξης των εκατοστών. Στην εικόνα 3.14 βλέπουμε πως οι μεγαλύτερες μεταβολές εμφανίζονται κύρια στα σημεία μεγάλων κλίσεων, καθώς και στο περίγραμμα που ορίζει την περιοχή όπου αποθέτονται τα κορήματα από τα ανάντη (κίτρινο περίγραμμα).



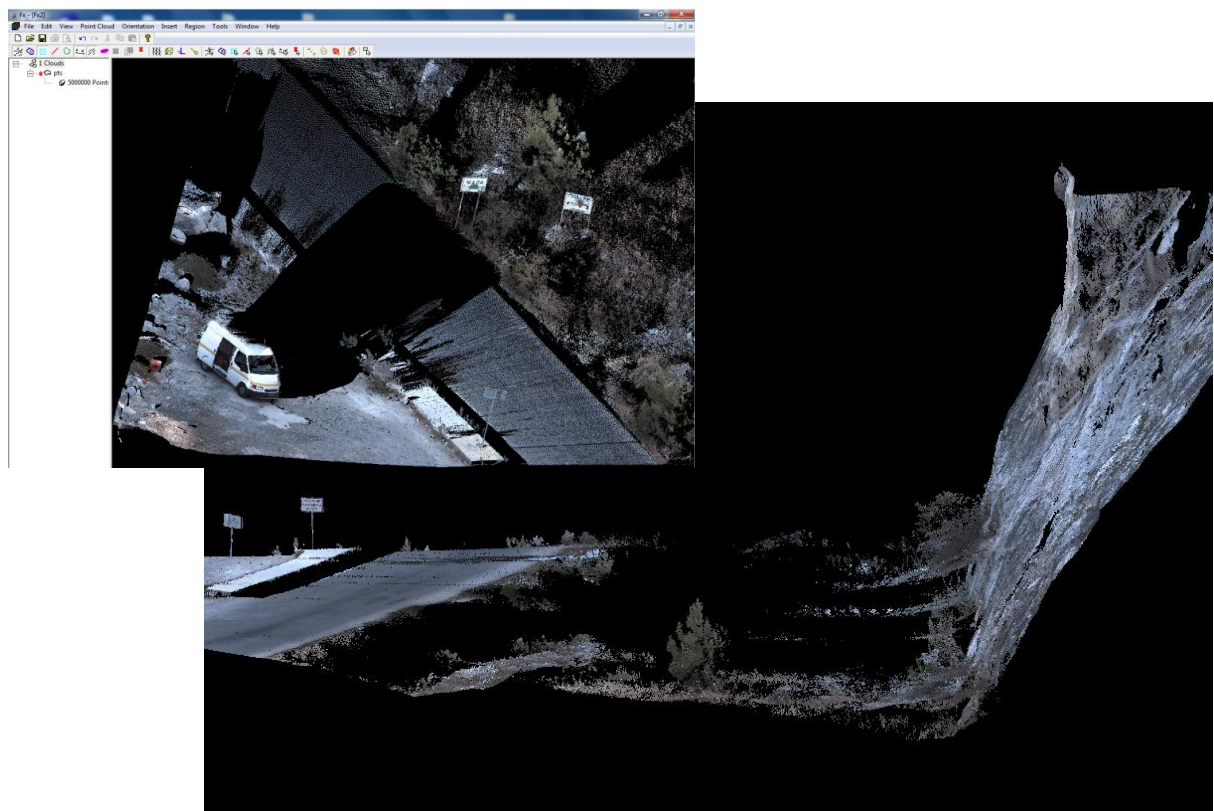
Εικόνα 3.14 Αφαίρεση 1^{ης} και 2^{ης} σάρωσης

3.5 Αφαίρεση «point cloud» 1^{ης} και 2^{ης} σάρωσης στα κορήματα

Για αυτήν ακριβώς την περιοχή λοιπόν, που ορίζει το περίγραμμα (βλ. Εικ. 3.14 - κίτρινο πολύγωνο), όπου γίνεται η απόθεση κορημάτων, για την οποία σύμφωνα με τα παραπάνω, παρατηρείται έντονη δραστηριότητα, έγινε η αφαίρεση των δύο διαφορετικών χρονικά «point cloud» μέσω του λογισμικού **Split-Fx** με την εφαρμογή που διαθέτει (change detection) για τον εντοπισμό εδαφικών μεταβολών.

Το **Split-Fx**, είναι ένα λογισμικό επεξεργασίας τέτοιων δεδομένων, με δυνατότητα περιορισμένης χρονικά διαθεσιμότητας από τον κατασκευαστή, αποτελεί ίσως το καταλληλότερο για εφαρμογές τέτοιου είδους καθώς διαθέτει εργαλεία ιδιαίτερα χρήσιμα για την έρευνα τόσο γεωτεχνικού όσο και γεωλογικού ενδιαφέροντος.

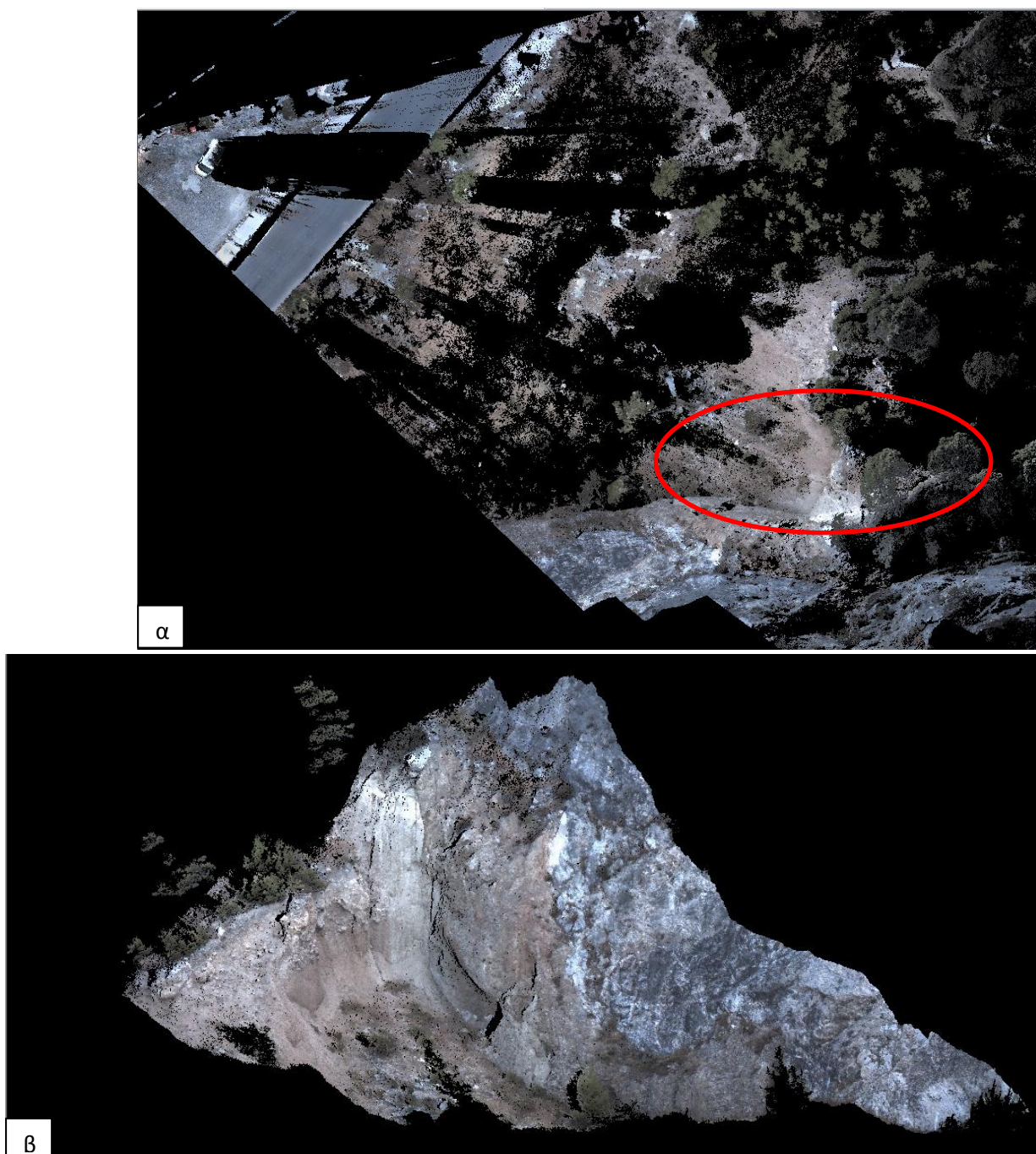
Στο τρισδιάστατο περιβάλλον του προγράμματος μπορεί ο χρήστης να εισάγει αρχεία τύπου .ascii και να επιλέξει όποια πληροφορία θέλει να διαχειριστεί, να περιηγηθεί σε όλο το μοντέλο εστιάζοντας σε όποιο σημείο επιθυμεί (βλ. Εικ. 3.15) καθώς και να επεξεργαστεί τα δεδομένα εφαρμόζοντας τους κατάλληλους αλγορίθμους αναλόγως των ζητούμενων αποτελεσμάτων.



Εικόνα 3.15 Στιγμιότυπα σε περιβάλλον Split-Fx από διαφορετικές οπτικές γωνίες

Το συγκεκριμένο λογισμικό, όπως και τα περισσότερα συμβατικά που διαχειρίζονται δεδομένα LiDaR προσφέρουν δυνατότητα επεξεργασίας περιορισμένου όγκου αρχείων της τάξης των 500MB έως και 1GB, δεδομένου πως υπάρχουν οι υψηλές απαιτήσεις του

συστήματος υπολογιστή όπου επεξεργάζονται. Αυτό αποτελεί το μεγαλύτερο ίσως πρόβλημα της μεθοδολογίας, όπως αναφέρεται και στη διεθνή βιβλιογραφία με αποτέλεσμα μεγάλα αντικείμενα, επιφάνειες ή περιοχές να αντιμετωπίζονται ως μικρότερα κομμάτια του συνολικού μοντέλου αφού είναι εφικτό να απομονωθούν συγκεκριμένα τμήματα.

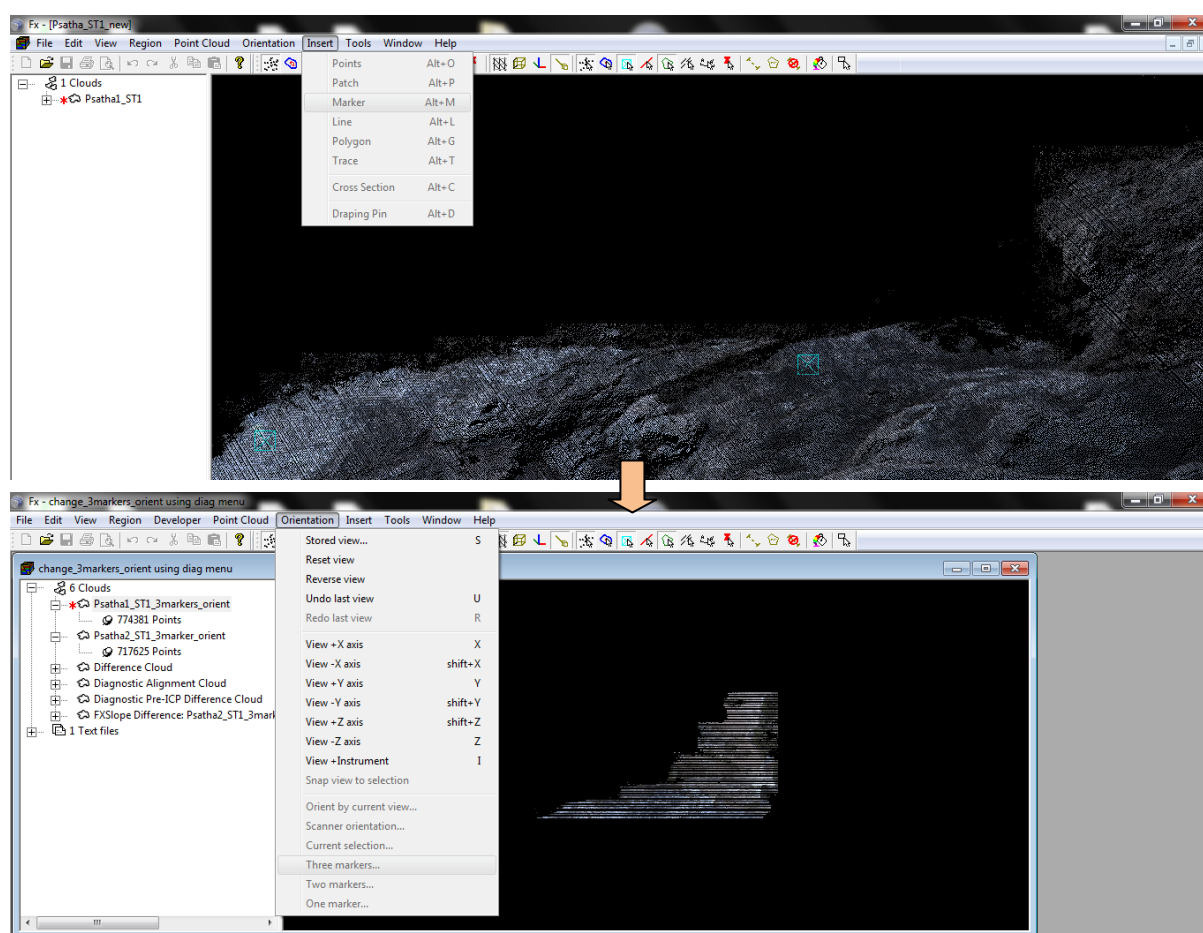


Εικόνα 3.16 Περιοχή κορημάτων σε α) κάτοψη και β) όψη

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, για την αφαίρεση των δύο διαφορετικών σαρώσεων απομονώθηκε το τμήμα της περιοχής των κορημάτων από τη στάση SG1 (βλ. Εικ. 3.16), για

το οποίο έγινε ένας χειροκίνητος καθαρισμός-αφαίρεση, της περιττής πληροφορίας του δρόμου κ.ά.

Για να επιτευχθεί αυτός ο υπολογισμός και να προκύψει το «point cloud» των μεταβολών απαιτείται αρχικά μία ευθυγράμμιση (Alignment) των δύο αρχείων που έχουν φορτωθεί και στην συνέχεια ο ορισμός του 1^{ης} και 2^{ης} σάρωσης αντίστοιχα. Στη διαδικασία αυτή ο προσανατολισμός του «point cloud» πραγματοποιήθηκε με την εισαγωγή σταθερών σημείων (marker) επί της επιφάνειας του ρήγματος κατά την επεξεργασία αυτού στο λογισμικό (βλ. Εικ. 3.17). Ως markers χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις (3) από τους εφτά (7), που ορίζουν τα μπουλόνια επί της επιφάνειας.

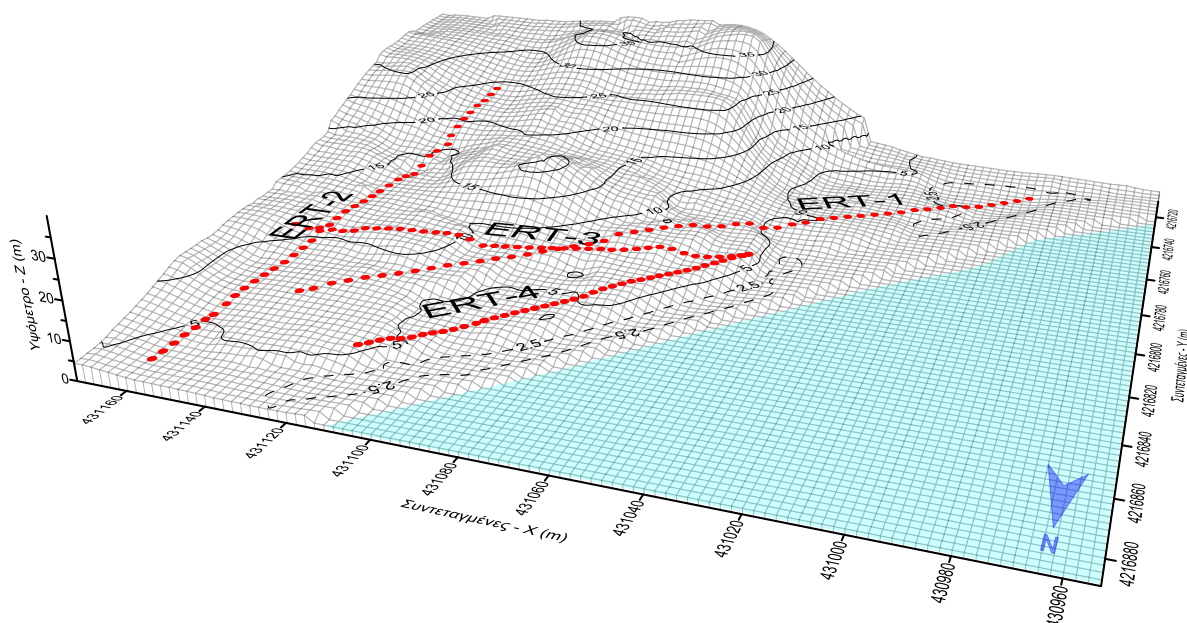


Εικόνα 3.17 Βήματα για αφαίρεση «point cloud»

Εφαρμόζοντας το “Change Detection” προκύπτουν πράγματι κάποιες εδαφικές μεταβολές, αποθέσεις αλλά και απώλειες, όπως αυτές παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.4.

3.6 Γεωφυσικά αποτελέσματα – Γεωηλεκτρικά Τομογράμματα

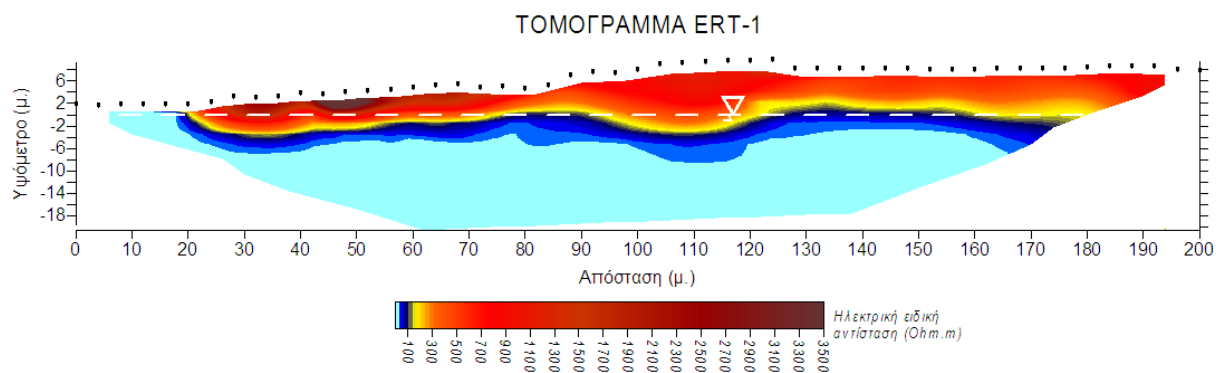
Όπως έχει αναφερθεί στο δεύτερο κεφάλαιο, όπου περιγράφονται οι εργασίες υπαίθρου που έλαβαν χώρα στην παρούσα εργασία, στο επιστημονικό πεδίο της υπεδαφικής έρευνας στην περιοχή μελέτης, διεξήχθη γεωφυσική έρευνα με την εφαρμογή γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν τέσσερις (4) γεωηλεκτρικές τομές, με την τεχνική της ηλεκτρικής τομογραφίας ERT (βλ. Εικ. 3.18).



Εικόνα 3.18 Τρισδιάστατη απεικόνιση των θέσεων των γεωηλεκτρικών τομών

Η επεξεργασία των μετρήσεων υπαίθρου πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό RES2DINV της GeoTomo (Loke, 1999). Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα της 2D αντιστροφής ομογενοποιήθηκαν σε κοινή κλίμακα κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης και κατασκευάστηκαν, με το λογισμικό Surfer, τα τέσσερα (4) τομογράμματα, όπου και παρουσιάζονται παρακάτω.

Το γεωηλεκτρικό Τομόγραμμα ERT-1 (βλ. Εικ. 3.19), το οποίο είναι και το μεγαλύτερο σε μήκος (200 m) και με απόσταση ηλεκτροδίων 4m, αναπτύχθηκε σε διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ, σχεδόν παράλληλα στην ακτογραμμή και στο παραλιακό επαρχιακό δρόμο Ψάθας-Αλεποχωρίου (βλ. Εικόνα 3.18). Στην περιοχή περίπου της στάθμης της θάλασσας (απεικονίζεται με τη λευκή διακεκομμένη γραμμή) διερευνήθηκε ένας επιφανειακός, σχεδόν ομοιογενής, οριζόντιος αντιστατικός γεωηλεκτρικός σχηματισμός (200-3500 Ohm.m) και ένας υποκείμενος αγώγιμος γεωηλεκτρικός σχηματισμός (5-200 Ohm.m) μέχρι το βάθος των -18m (απολύτου υψόμετρου).



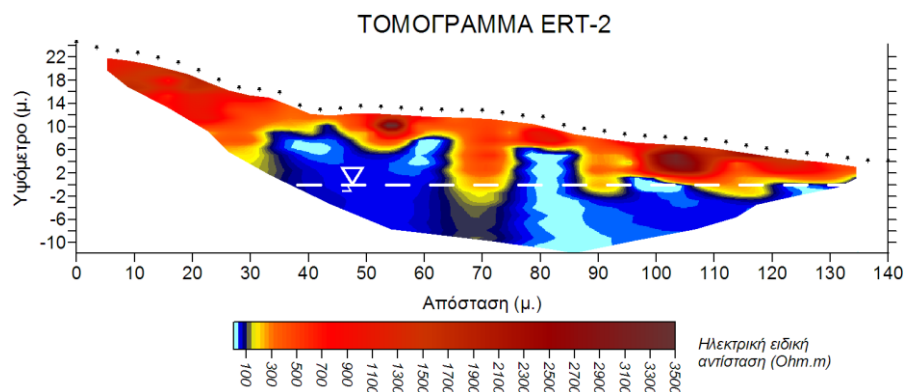
Εικόνα 3.19 Ηλεκτρικό Τομόγραμμα ERT-1

Το γεωηλεκτρικό Τομόγραμμα ERT-2 (βλ. Εικ. 3.21), συνολικού μήκους 140m και με απόσταση ηλεκτροδίων 3,5m, αναπτύχθηκε σε διεύθυνση N-B, στην ανατολική προσπελάσιμη περιοχή των κορημάτων (βλ. Εικ. 3.18).



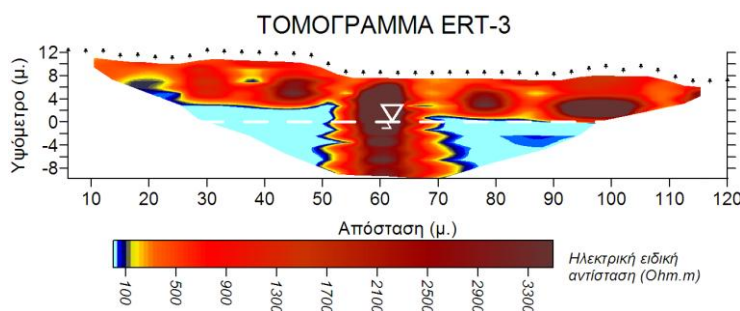
Εικόνα 3.20 Ανάπτυξη του ηλεκτρικού Τομογράμματος ERT-2

Η τομή χαρακτηρίζεται από το έντονο μορφολογικό της ανάγλυφο (βλ. Εικ. 3.20), με τα υψηλότερα υψόμετρα (~24m) στην αρχή της (νότιο τμήμα). Τοποθετώντας τη στάθμη της θάλασσας (απεικονίζεται με τη λευκή διακεκομμένη γραμμή) διαπιστώνεται ότι στις περιοχές μεταξύ των 40-60m και 80-90m διερευνήθηκε ένας υποκείμενος αγώγιμος γεωηλεκτρικός σχηματισμός (5-200 Ohm.m) σε υψόμετρο 8-10m (βλ. Εικ. 3.21). Αντίθετα στην περιοχή των 70m ο επιφανειακός αντιστατικός γεωηλεκτρικός σχηματισμός (200-3500 Ohm.m) φαίνεται να διερευνάται ακόμα και κάτω από τη στάθμη της θάλασσας σε αρνητικά απόλυτα υψόμετρα.



Εικόνα 3.21 Ηλεκτρικό Τομόγραμμα ERT-2

Στο γεωηλεκτρικό Τομόγραμμα ERT-3 (βλ. Εικ. 3.22), το μήκος του οποίου είναι 120m, η απόσταση των ηλεκτροδίων είναι 3m, αναπτύχθηκε σε διεύθυνση περίπου Α-Δ. Στην τομή αυτή επικρατεί ο επιφανειακός ο περίπου οριζόντιος αντιστατικός γεωηλεκτρικός σχηματισμός (>200 Ohm.m). Στο μέσον όμως της τομής (στα 60m) και για ένα εύρος περίπου 20m, ο σχηματισμός αυτός φαίνεται να συνεχίζεται και κάτω από την στάθμη της θάλασσας.

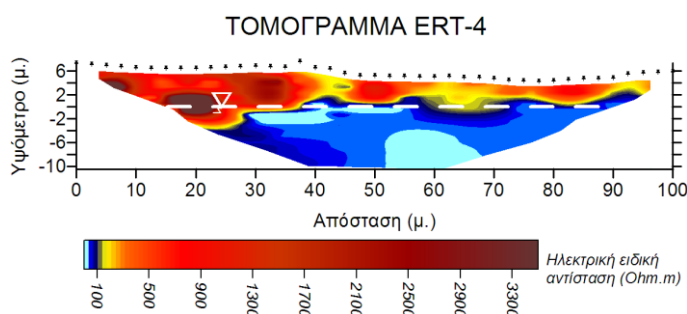


Εικόνα 3.22 Ηλεκτρικό Τομόγραμμα ERT-3

Το γεωηλεκτρικό Τομόγραμμα ERT-4 (βλ. Εικ. 3.24), είναι το μικρότερο σε μήκος (100 m), με απόσταση ηλεκτροδίων 2,5m, αναπτύχθηκε σε διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ, σχεδόν παράλληλα στην ακτογραμμή και στο παραλιακό επαρχιακό δρόμο Ψάθας-Αλεποχωρίου (βλ. Εικ. 3.18 & 3.23). Στην περιοχή περίπου της στάθμης της θάλασσας (απεικονίζεται με τη λευκή διακεκομμένη γραμμή) διερευνήθηκε ένας επιφανειακός οριζόντιος αντιστατικός γεωηλεκτρικός σχηματισμός (200-3500 Ohm.m) και ένας υποκείμενος αγωγίμος γεωηλεκτρικός σχηματισμός (5-200 Ohm.m) μέχρι το βάθος των -10m (απολύτου υψομέτρου).



Εικόνα 3.23 Ανάπτυξη του ηλεκτρικού Τομόγραμματος ERT-4

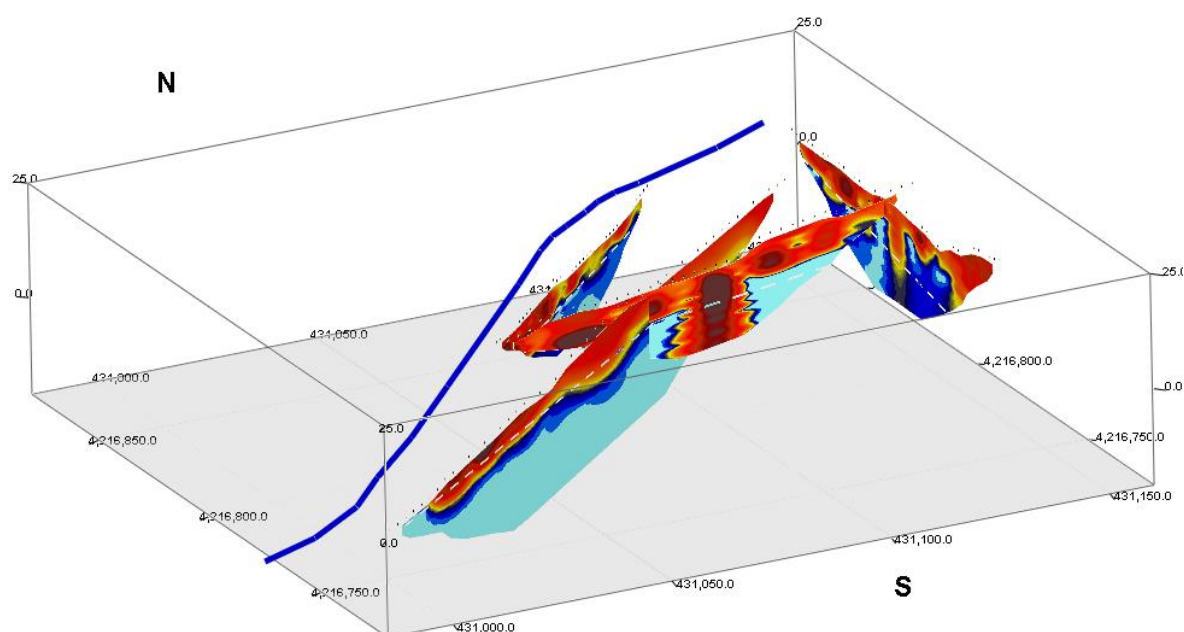


Εικόνα 3.24 Ηλεκτρικό Τομόγραμμα ERT-4

Τέλος, για την καλύτερη απεικόνιση των γεωφυσικών αποτελεσμάτων σε πραγματικές συντεταγμένες και την αποτύπωση της κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, κατασκευάστηκε η τρισδιάστατη απεικόνιση της εικόνας 3.25.

Από την εικόνα αυτή αναδεικνύονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- i. Διερευνήθηκε ένας επιφανειακός, περίπου οριζόντιος (με αναφορά τη στάθμη της θάλασσας) αντιστατικός γεωηλεκτρικός σχηματισμός με ηλεκτρικές ειδικές αντιστάσεις να κυμαίνονται στα 200-3500 Ohm.m,
- ii. Διερευνήθηκε ένας υποκείμενος αγώγιμος γεωηλεκτρικός σχηματισμός με ηλεκτρικές ειδικές αντιστάσεις <200 Ohm.m,
- iii. Στο Τομόγραμμα ERT-2, διαπιστώνεται ότι στις περιοχές μεταξύ των 40-60m και 80-90m διερευνήθηκε ένας υποκείμενος αγώγιμος γεωηλεκτρικός σχηματισμός (5-200 Ohm.m) σε υψόμετρο +8-10m και
- iv. Στο μέσον του Τομογραμμάτος ERT-3, ο επιφανειακός αντιστατικός σχηματισμός φαίνεται να συνεχίζεται και κάτω από την στάθμη της θάλασσας.



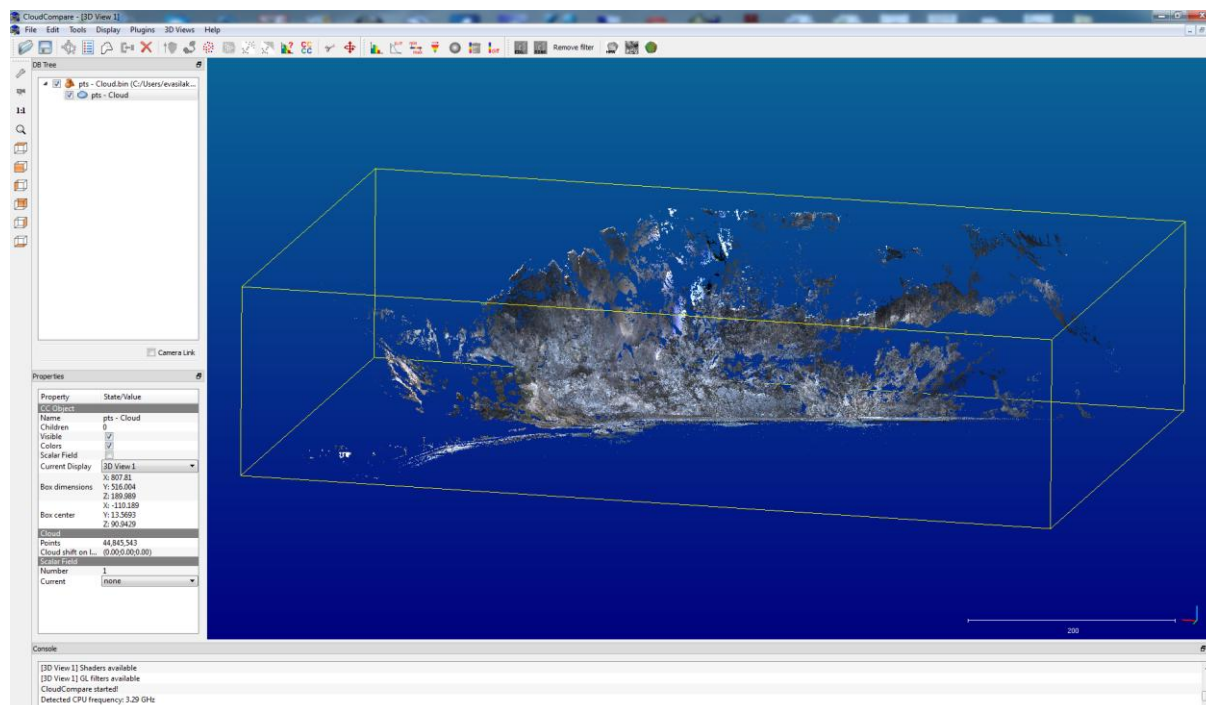
Εικόνα 3.25 Τρισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής έρευνας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV

Αποτελέσματα - Αξιολόγηση - Συμπεράσματα

4.1 Παραγωγή ενιαίου τρισδιάστατου μοντέλου «point cloud» με χρωματική υφή

Μετά την επεξεργασία των δεδομένων, δηλαδή την ένωση των επιμέρους σαρώσεων και έπειτα την γεωαναφορά του ενιαίου μοντέλου, προέκυψε ενοποιημένη όλη η επιφάνεια που σαρώθηκε. Παίρνοντας δε και την πληροφορία της χρωματικής υφής (RGB) του «point cloud», από τις φωτογραφίες της κάμερας του σαρωτή, έχουμε ολόκληρη την επιφάνεια του ρήγματος απεικονιζόμενη σε πραγματικές διαστάσεις και ορισμένη θέση στο Ε.Γ.Σ.Α. 87, καθώς και φυσικό χρωματισμό των δομών της.



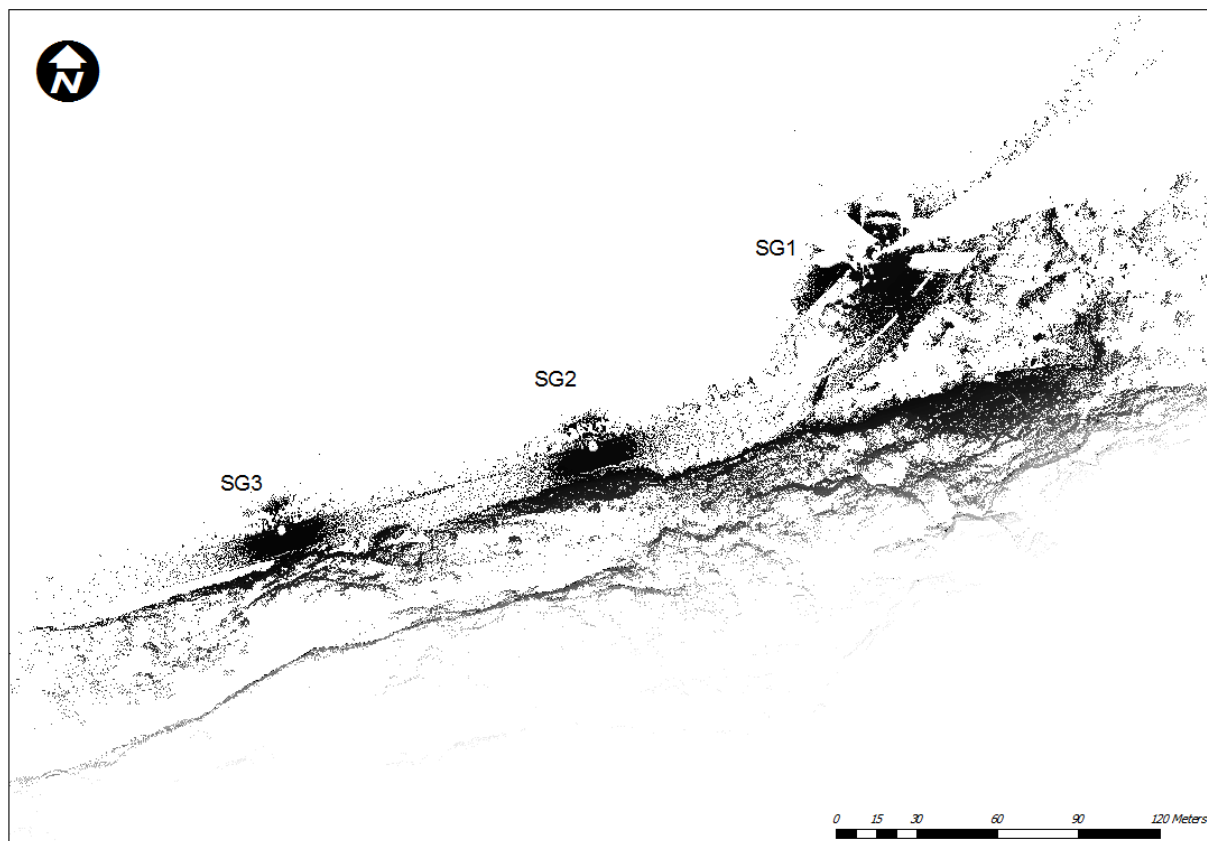
Εικόνα 4.1 Ενιαίο τρισδιάστατο μοντέλο επιφάνειας ρήγματος

Η εικόνα 4.1 αποτελεί ένα στιγμιότυπο μέσα στο τρισδιάστατο περιβάλλον του λογισμικού *Cloud Compare*, το μοναδικό από τα λογισμικά που είχαμε στην διάθεσή μας, με το οποίο κατέστη δυνατό να επεξεργαστεί το συνολικό αρχείο .ascii.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί πως, αναλόγως με το ενδιαφέρον για το τι τελικά εξετάζει ο καθένας, οι περαιτέρω εφαρμογές διαφέρουν. Η συγκεκριμένη εργασία αφορά στην αφαίρεση-σύγκριση δύο διαφορετικών χρονικών περιόδων μοντέλα. Παρόλα αυτά, με τα ίδια δεδομένα κάποιος γεωτεχνικός θα μπορούσε να μελετήσει κάποιες τομές κατά μήκος της επιφάνειας, που αποτελεί την μία οριογραμμή του οδικού άξονα και να εξετάσει τις διατομές ανά κάποια μέτρα. Επίσης, ένας γεωλόγος θα μπορούσε ενδεχομένως να εξετάσει τις δομές της επιφάνειας από τη χρωματική υφή και διαβάθμιση, ή ακόμα να βγάλει κάποια συμπεράσματα σχετικά με την τεκτονική με βάση την διεύθυνση των γραμμών προστριβής ή τις κλίσεις της επιφάνειας.

4.2 Διαχρονικές εδαφικές μεταβολές 1972-2011

Για τον εντοπισμό εδαφικών μεταβολών στην ευρύτερη περιοχή του ρήγματος δημιουργήθηκε, όπως αυτό περιγράφεται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 3.2, το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου από τα δεδομένα LiDaR της 1^{ης} σάρωσης.



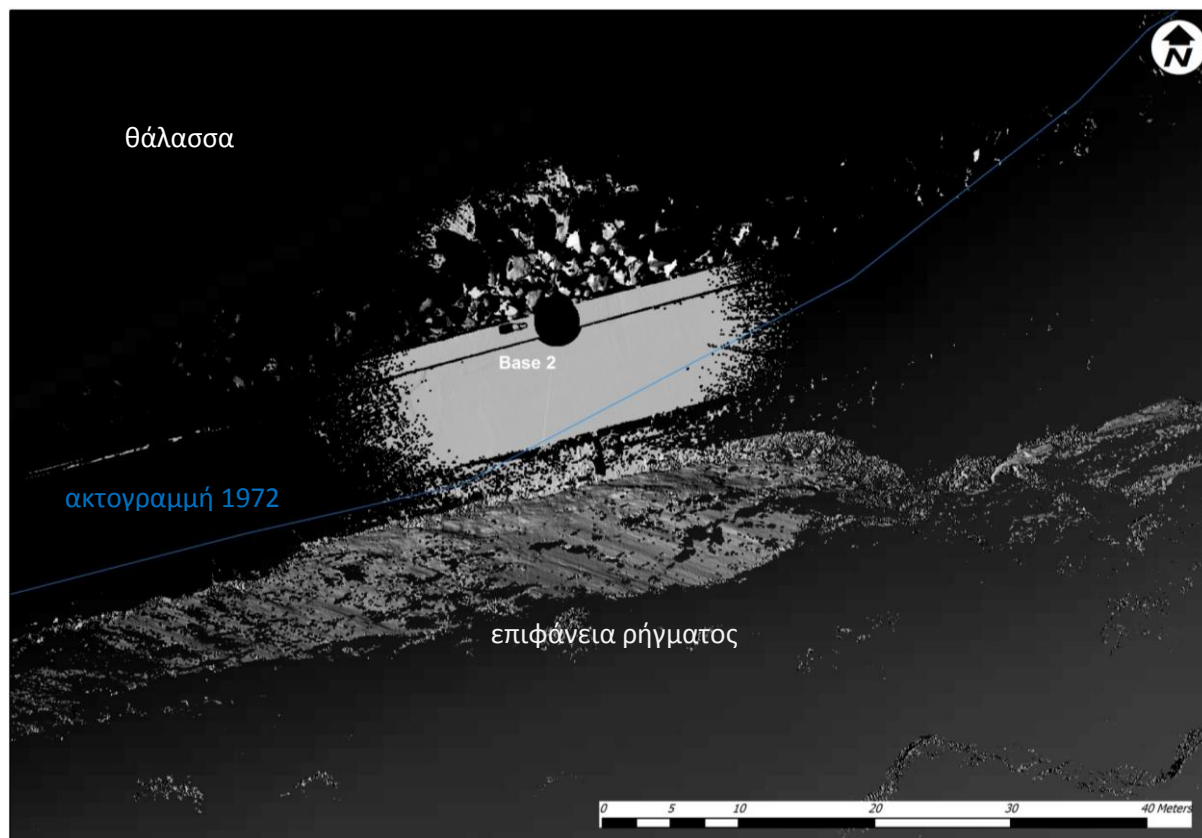
Χάρτης 4.1 Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου επιφάνειας ρήγματος ανάλυσης 0,05m (κάτοψη)

Η ανάλυση του μοντέλου αναγλύφου και σκιασμένου αναγλύφου είναι 0,05m. Η λεπτομερής αποτύπωση μας δίνει ένα αρκετά διαφορετικό αποτέλεσμα από τα κοινά DEM λόγω του «νέφους σημείων» (βλ. Χάρτη 4.1) και όχι της παρεμβολής που ακολουθείται για τον υπολογισμό των υψομέτρων, όταν τα πρωτογενή στοιχεία προέρχονται από τοπογραφικούς χάρτες, αεροφωτογραφίες ή δορυφορικές εικόνες.

Στο Χάρτη 4.2, μεγαλύτερης κλίμακας, έχουμε το σκιασμένο ανάγλυφο (shaded relief) του υψομετρικού μοντέλου, για το κομμάτι της επιφάνειας που βρίσκεται απέναντι από τη 2^η θέση λήψης του LiDaR. Σε αυτό το σημείο, όπου ο σαρωτής έχει στηθεί ακριβώς απέναντι από την επιφάνεια του ρήγματος, άρα η δέσμη προσπίπτει κάθετα και σε πολύ μικρή απόσταση, μπορεί να διακριθεί ακόμα και η διεύθυνση γραμμών προστριβής του τεμάχους.

Επιπλέον, έχει προστεθεί η ακτογραμμή όπως αυτή προκύπτει από τους τοπογραφικούς χάρτες του 1972, όπου παρατηρούμε πως η υπάρχουσα κατάσταση έχει τροποποιηθεί

ριζικά από τη διάνοιξη του παραλιακού δρόμου στη δεκαετία του 80. Εκ των πραγμάτων λοιπόν μιλάμε για μία περιοχή με έντονη ανθρώπινη παρέμβαση, καθώς σε χρονικό διάστημα περίπου 40 ετών, έχουμε σημαντική αλλαγή της ακτογραμμής.

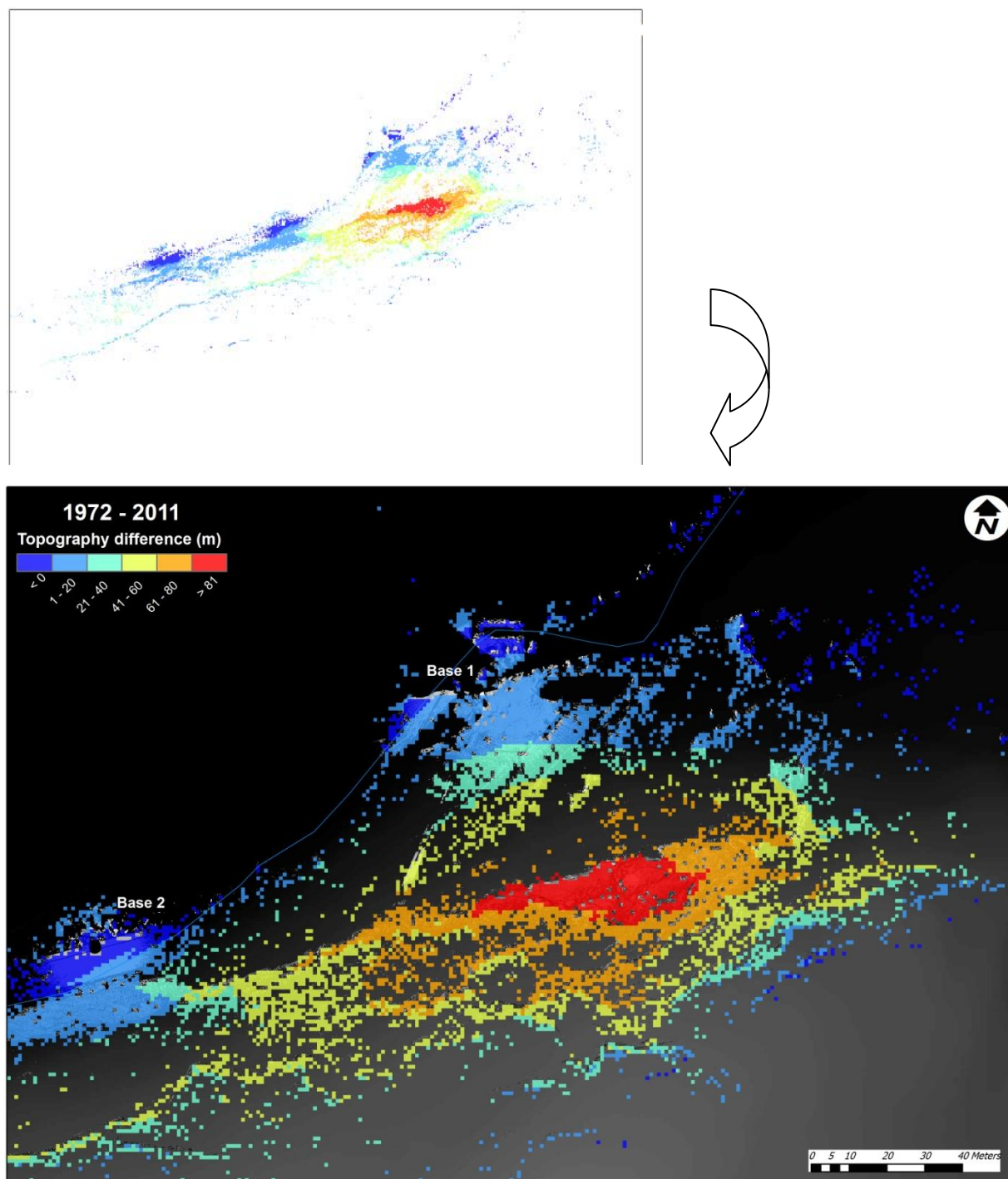


Χάρτης 4.2 Σκιασμένο ανάγλυφο ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από τη 2^η θέση λήψης

Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε και με τα αποτελέσματα της αφαίρεσης των μοντέλων καθώς οι ποσοτικές διαφορές που προκύπτουν είναι πολύ μεγάλες για να στηρίζονται σε φυσικές διεργασίες.

Στο Χάρτη 4.3 βλέπουμε πως η περιοχή με τις εντονότερες μεταβολές, που εντοπίζεται κύρια στη θέση των κορημάτων, και με μία διαβάθμιση λιγότερων μέτρων γύρω από αυτή, φτάνει μέχρι και τα 81m υψομετρική διαφορά από το 1972 μέχρι το 2011.

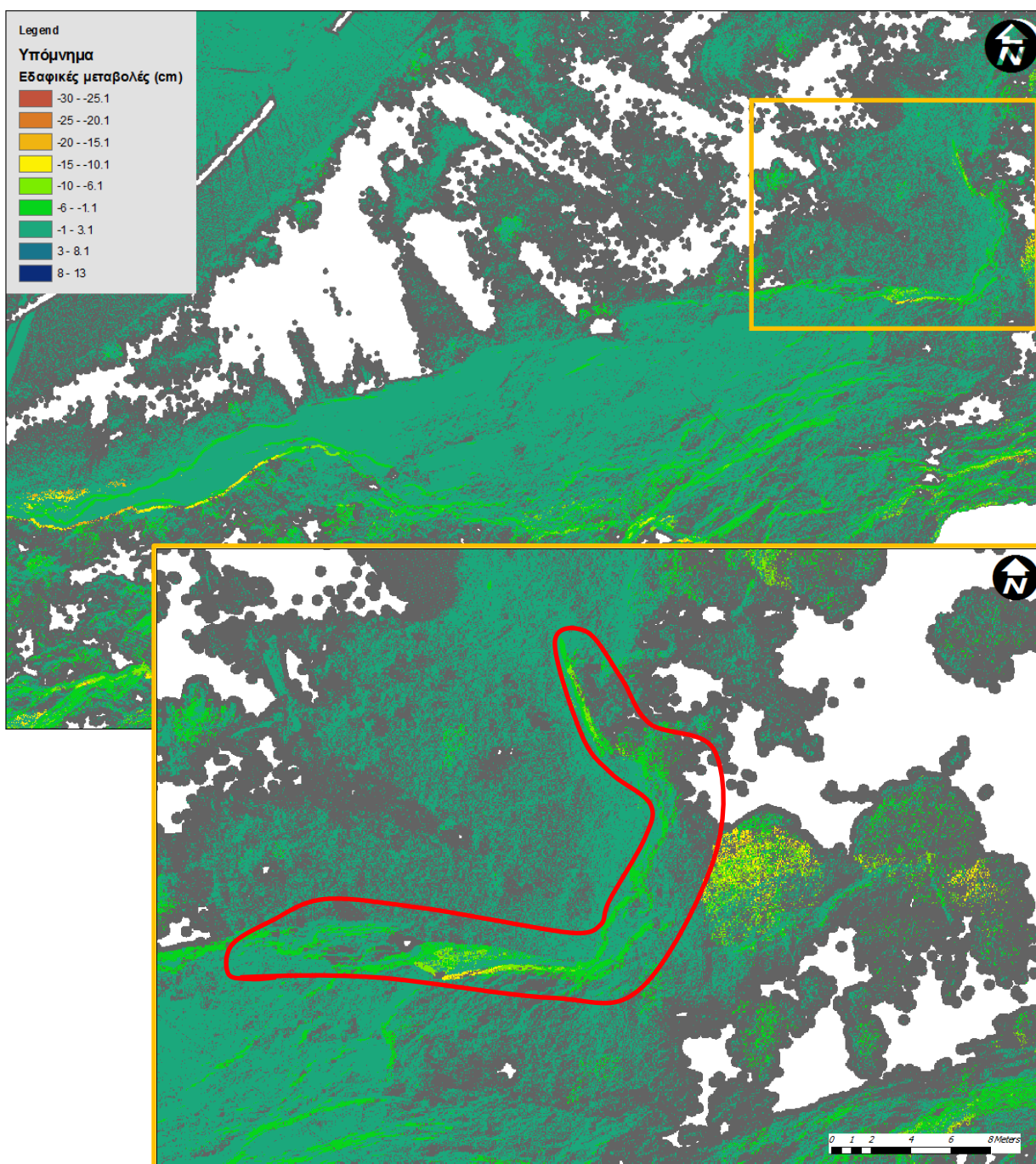
Φυσικά η απώλεια όλου αυτού του όγκου υλικού δεν μπορεί να αποδοθεί στη διάβρωση και την αποσάθρωση, καθώς η αλλαγή της μορφολογίας τα τελευταία χρόνια ήταν εμφανής από μέρα σε μέρα. Ο ανθρώπινος παράγοντας που επέμβει χρησιμοποιώντας υλικό για τις απαιτούμενες χωματουργικές εργασίες, των οποίων η μεταφορά έχει υψηλό κόστος και προφανώς ο εφοδιασμός από εκεί αποτέλεσε μία βολική και συμφέρουσα επιλογή, των τεχνικών έργων για την κατασκευή του δρόμου και την επιχωμάτωση της.



Χάρτης 4.3 Εδαφικών μεταβολών 1972-2011

4.3 Εδαφικές μεταβολές από δεδομένα LiDaR 1^{ης} και 2^{ης} σάρωσης

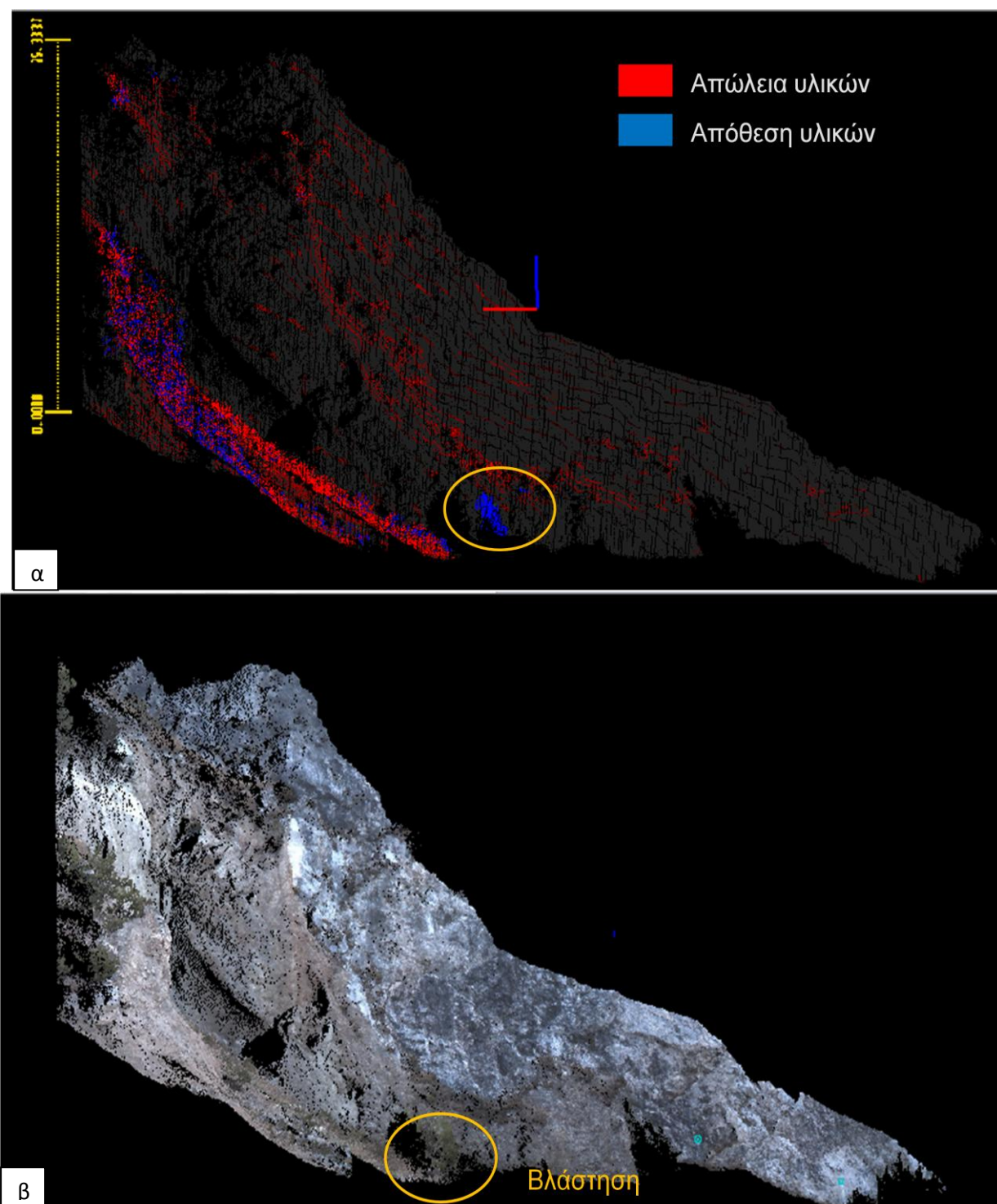
Η σύγκριση των DEM των δεδομένων LiDaR από τις δύο φάσεις σαρώσεων, περιορίστηκε στην περιοχή όπου αναδείχτηκαν οι μεγαλύτερες μεταβολές μέσα στο διάστημα αυτό της 40ετίας (βλ. Χάρτη 4.4). Οι διαφορές που προκύψανε σε χρονικό διάστημα έξι περίπου μηνών, Οκτώβριος 2011 - Μάιος 2012, ήταν της τάξης των 6-10 cm. Παρατηρούμε πως οι μεγαλύτερες μεταβολές εμφανίζονται κύρια στα σημεία μεγάλων κλίσεων, καθώς και στο περίγραμμα που ορίζει την περιοχή όπου αποθέτονται τα κορήματα από τα ανάντη (κόκκινο περίγραμμα).



Χάρτης 4.4 Εδαφικές μεταβολές 1^{ης} και 2^{ης} σάρωσης (κάτοψη)

4.4 «Point Cloud» μεταβολών στην περιοχή των κορημάτων από δεδομένα LiDaR

Η απεικόνιση του «point cloud» των μεταβολών επιλέχθηκε να γίνει σε πλάγια όψη της περιοχής των κορημάτων με σκοπό να είναι περισσότερο εμφανές το αποτέλεσμα στον παρατηρητή, καθώς πρόκειται για υψομετρικές διαφορές.



Εικόνα 4.2 Πλάγια όψη της επαφής κορημάτων - ανθρακικών
α) «point cloud» μεταβολών και β) «point cloud» με φυσική χρωματική υφή(RGB) (πλάγια όψη)

Στην εικόνα 4.2α, με την απόχρωση του κόκκινου παρουσιάζονται τα σημεία των οποίων το υψόμετρο έχει μειωθεί, δηλαδή εκεί όπου χάνουμε υλικό και υπάρχουν απώλειες, και με μπλε απόχρωση εμφανίζονται τα σημεία των οποίων το υψόμετρο έχει αυξηθεί αντίστοιχα και έχουμε απόθεση υλικού.

Η στενή περιοχή χαμηλότερα που εμφανίζεται με μπλε απόχρωση (βλ. Εικ. 4.2β) και έχει επισημανθεί με κίτρινο κύκλο αποδίδεται στην ύπαρξη βλάστησης λόγω καλοκαιρινής ανθοφορίας και αποτελεί παράδειγμα τόσο για την επιτυχία της εφαρμογής, όσο και για το πώς δημιουργούνται οι σκιές ή “τρύπες” μέσα στο «point cloud».

Φαίνεται ξεκάθαρα πως αποθέσεις συναντάμε σε μία συγκεκριμένη θέση, στο ανώτερο υψομετρικά κομμάτι.

Όσον αφορά στις θέσεις των απωλειών φαίνεται πως εκτείνονται σε όλο σχεδόν το εύρος της επιφάνειας, με μεγαλύτερη

παρουσία στην επαφή του ασβεστόλιθου με τα κορήματα, καθώς όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3 ακολουθούν την ρηξιγενή ζώνη.

Επίσης, παρουσιάζονται απώλειες στα ψηλότερα σημεία της επιφάνειας του ασβεστόλιθου, όπου λόγω μεγάλων κλίσεων πιθανόν ποσότητες υπολειμμάτων ασταθών υλικών κατολισθαίνουν από το πάνω μέρος.

Η ποσοτικοποίηση των μεταβολών αυτών δεν κατέστη δυνατή λόγω περιορισμένου χρόνου διαθεσιμότητας του λογισμικού *Split-Fx* από τον κατασκευαστή.

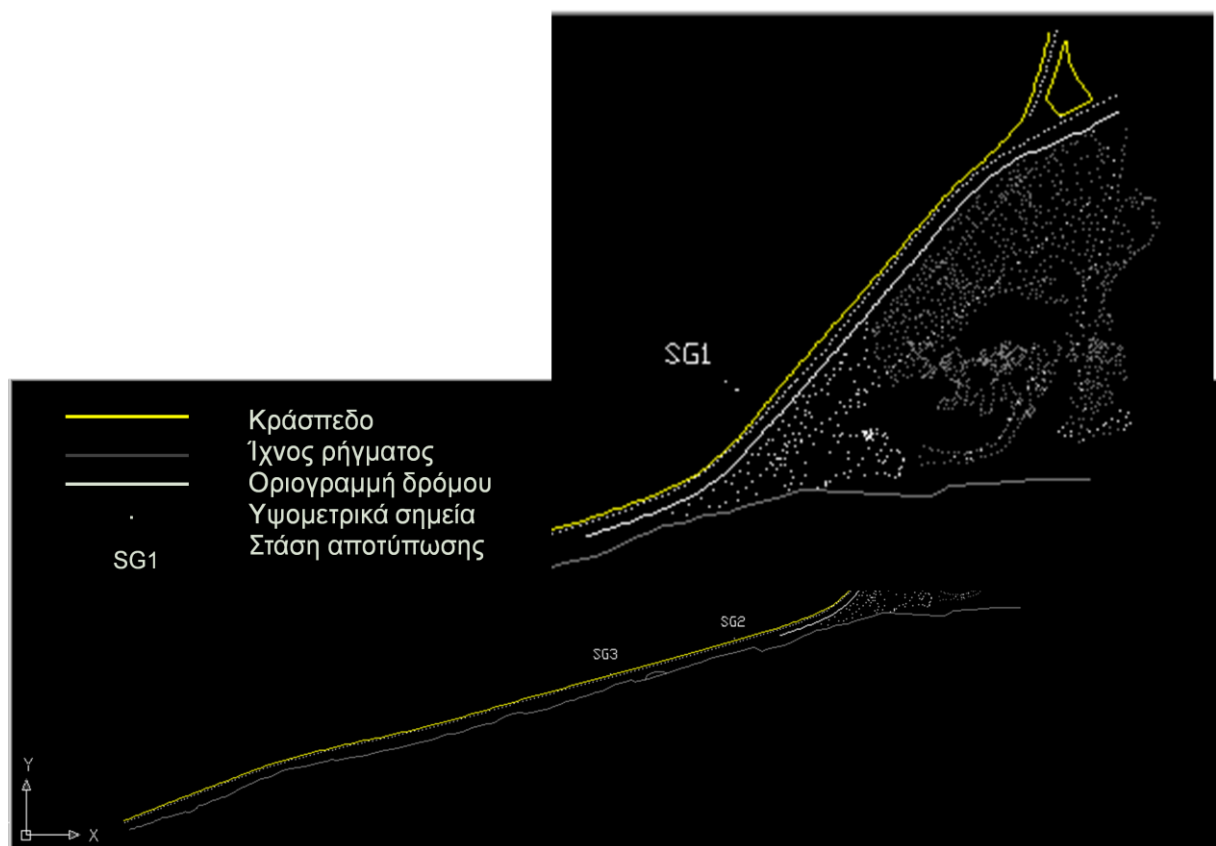


Εικόνα 4.3 Επαφή ασβεστόλιθου-κορημάτων

4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων σύγχρονων τεχνικών λεπτομερούς αποτύπωσης σε σχέση με την κλασική τοπογραφία

Μία τοπογραφική αποτύπωση με την μέθοδο της κλασικής τοπογραφίας, μπορεί να μας παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα πολύ υψηλής ακρίβειας προσδιορισμού θέσης και υψομέτρου αλλά η σημειακή πληροφορία δεν μπορεί να αποδώσει ορθώς και λεπτομερώς την γεωμετρία-μορφολογία μιας σύνθετης φυσικής επιφάνειας, όπως αυτή ενός ρήγματος.

Η απεικόνιση της επιφάνειας του ρήγματος σ' ένα τοπογραφικό διάγραμμα αποδίδεται ως γραμμική χωρική πληροφορία, η οποία αντιστοιχεί στο ίχνος του ρήγματος, αφού αποτυπώνονται μόνο τα σημεία που βρίσκονται στην επαφή με το έδαφος.



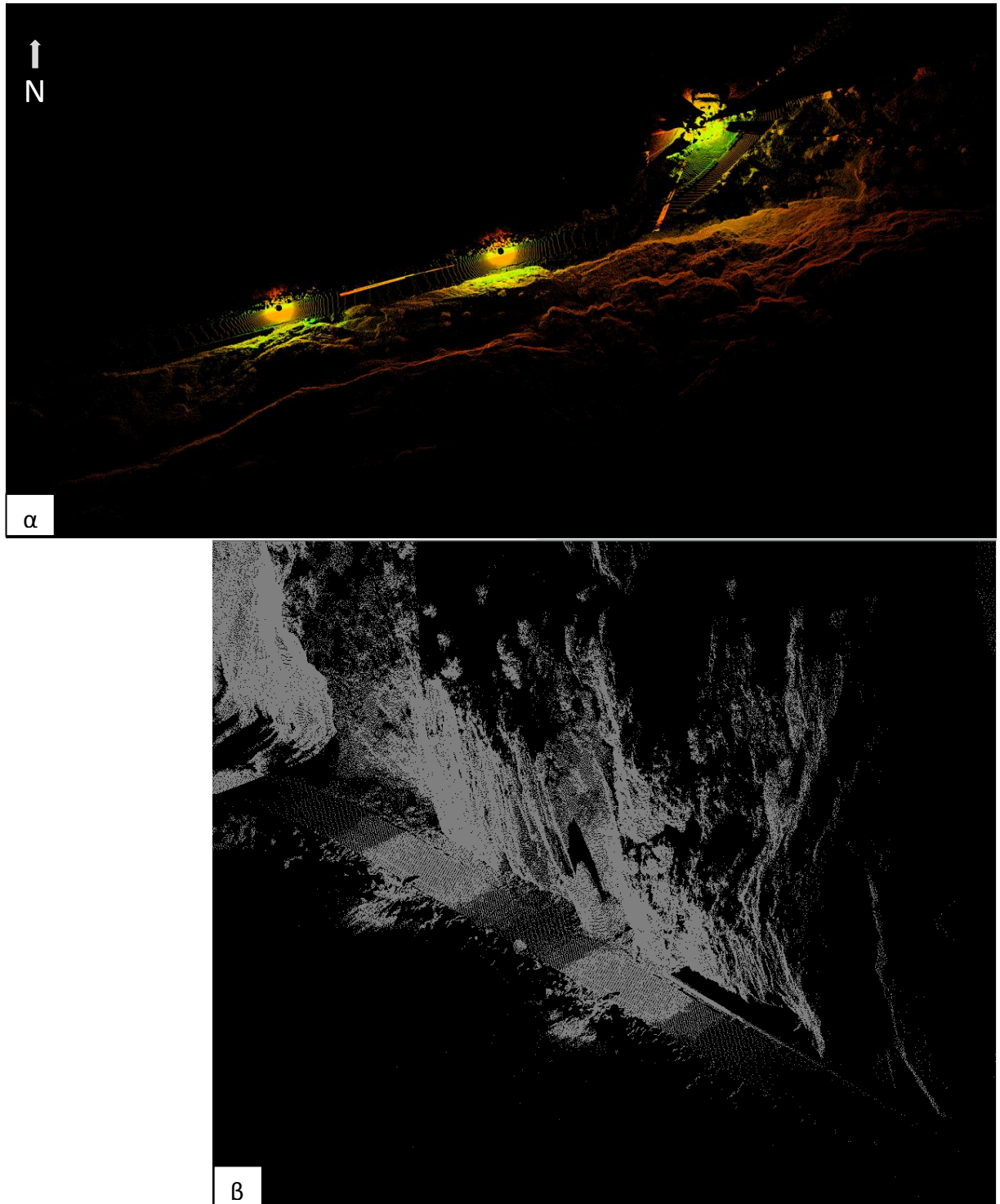
Εικόνα 4.4 Απόδοση τοπογραφικών μετρήσεων

Αντίθετα στην απόδοση της αποτύπωσης με την μεθοδολογία της τρισδιάστατης σάρωσης δεν υπάρχουν κενά στα απρόσιτα σημεία καθώς η λήψη γίνεται από απόσταση και το εύρος σάρωσης καλύπτει μεγάλο μέρος της επιφάνειας αλλά και της ευρύτερης περιοχής.

Πέραν όμως του λεπτομερούς υποβάθρου τεκμηρίωσης της γεωμετρίας και της μορφής που απαιτείται για γεωτεχνικές και γεωλογικές έρευνες, εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός πως σε τέτοιες περιπτώσεις που ενδεχομένως το φαινόμενο να βρίσκεται σε εξέλιξη και εγκυμονεί κίνδυνος, όπως μία κατολίσθηση, η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί παρέχοντας

ασφάλεια μιας και μιλάμε για απομακρυσμένη συλλογή της πληροφορίας από το αντικείμενο.

Στην εικόνα 4.5 φαίνεται πως αναδεικνύεται η καμπύλη μορφή του ρήγματος και γενικότερα η γεωμορφολογία του, αφού η ανάλυση φτάνει τα 2,5cm σε απόσταση 50m.



Εικόνα 4.5 Απόδοση τρισδιάστατης σάρωσης LiDaR
α) Ορθοεικόνα «point cloud» σε κάτοψη με ένταση i, β) Πλάγια όψη «point cloud»

4.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου τρισδιάστατης σάρωσης LiDaR

Η επίγεια τρισδιάστατη σάρωση LiDaR αποτελεί μια σύγχρονη μέθοδο μέτρησης στο χώρο των αποτυπώσεων και η χρήση της τα τελευταία χρόνια έχει εισαχθεί σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς τα οφέλη που προσφέρει αφενός απλοποιούν την όποια εργασία για την απόκτηση των δεδομένων και αφετέρου τα ίδια αυτά δεδομένα μπορούν να επεξεργαστούν με τρόπους τέτοιους κάθε φορά, αναλόγως του αντικειμένου μελέτης και του ζητούμενου της έρευνας.

Συγκεκριμένα για την εφαρμογή που ακολουθήθηκε εδώ, η μεθοδολογία αυτή προσέφερε λεπτομερή απεικόνιση της γεωμετρίας και μορφολογίας του ρήγματος χωρίς κενά και ανακρίβειες μέσω των δεδομένων υψηλής ανάλυσης σε απρόσιτα σημεία. Δυνατότητα βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων με εφαρμογή φίλτρων, καθώς και συνδυασμό άλλων δεδομένων διευκολύνοντας την ερμηνεία. Επιπλέον, ταυτόχρονη αποτύπωση περιβάλλοντα χώρου, παρέχοντας “as-build” πληροφορίες για εκτίμηση παραμέτρων οδικού άξονα.

Γενικότερα με τη μέθοδο αυτή, εκτός από την υψηλή ακρίβεια, επιτυγχάνονται:

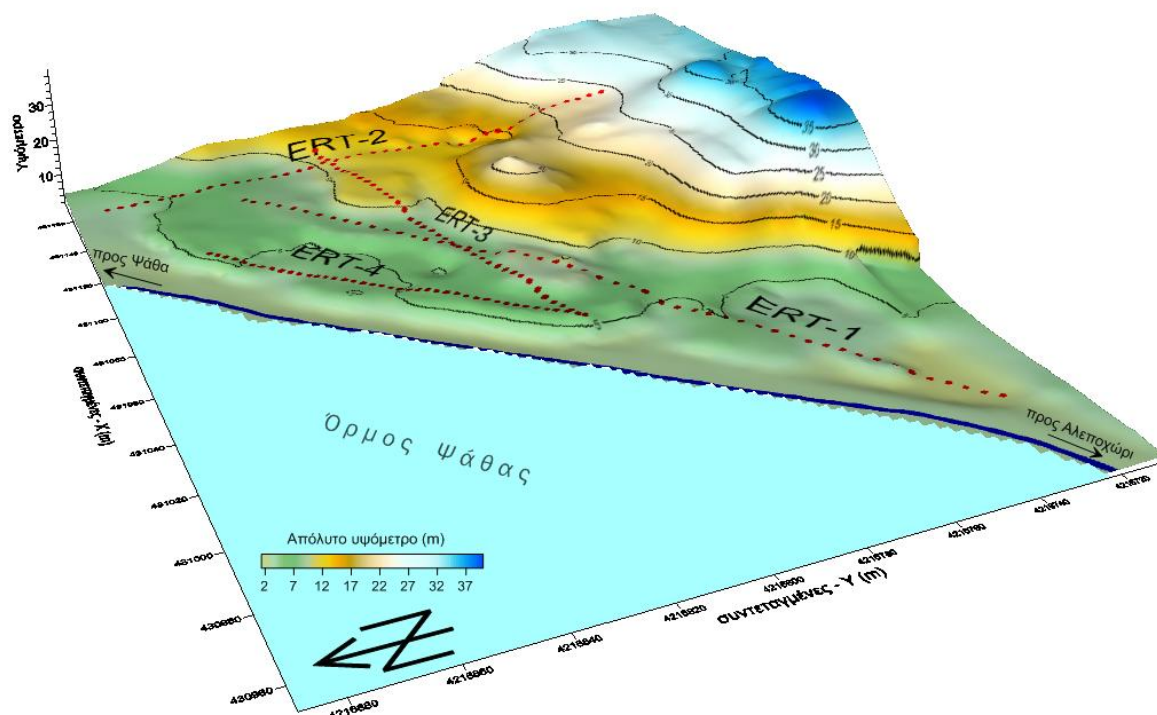
- Ταχύτητα κατά την συλλογή των δεδομένων
- Υψηλή παραγωγικότητα σε σχέση με άλλες μεθόδους
- Χαμηλό κόστος παραγωγής τρισδιάστατης πληροφορίας
- Απόκτηση τρισδιάστατης πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο
- Δυνατότητα περιήγησης κατά τη διάρκεια της σάρωσης και άμεσης παρέμβασης στα δεδομένα σε περίπτωση που το αποτέλεσμα δεν είναι ικανοποιητικό
- Μείωση προσωπικού, αφού οι εργασίες πεδίου μπορούν να γίνουν ακόμα και από ένα άτομο, ανεξαρτήτου έκτασης του αντικειμένου
- Δυνατότητα συνδυασμού με άλλες κλασικές μεθόδους αποτύπωσης
- Δυνατότητα σάρωσης με διαφορετική ανάλυση σε τμήματα με ιδιαίτερες λεπτομέρειες
- Δυνατότητα εισαγωγής δεδομένων σε σχεδιαστικά προγράμματα
- Πληροφορία υψής των αντικειμένων λόγω της ανακλαστικότητας των επιφανειών

Σαφώς η μέθοδος αυτή παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα, όπως:

- Υψηλό κόστος απόκτησης του εξοπλισμού
- Μεγάλος όγκος αρχείων με δυσκολία στην επεξεργασία και διαχείρισή τους
- Απαιτήση υψηλών δυνατοτήτων του συστήματος του υπολογιστή στον οποίο επεξεργάζονται τα δεδομένα
- Συμβατότητα τύπων αρχείων με περιορισμένα λογισμικά
- Μεταβολή ακρίβειας σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 50m
- Δημιουργία θορύβου λόγω συλλογής ανεπιθύμητης πληροφορίας

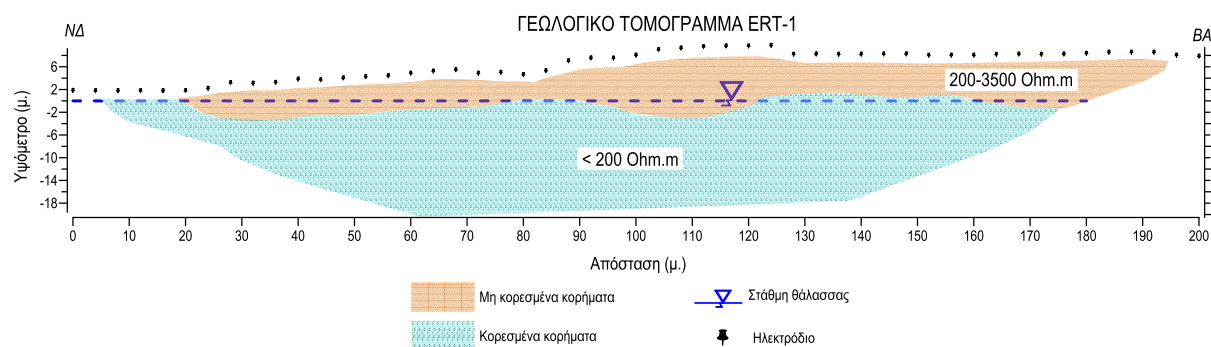
4.7 Υπεδαφική δομή

Στον χάρτη 4.5 απεικονίζονται οι θέσεις των τεσσάρων (4) γεωηλεκτρικών τομών, με την τεχνική της ηλεκτρικής τομογραφίας ERT, που πραγματοποιήθηκαν στις πλειστοκαινικές αποθέσεις των κώνων κορημάτων στην εγγύς του ρήγματος περιοχή.



Χάρτης 4.5 Θέσεις γεωηλεκτρικών τομών

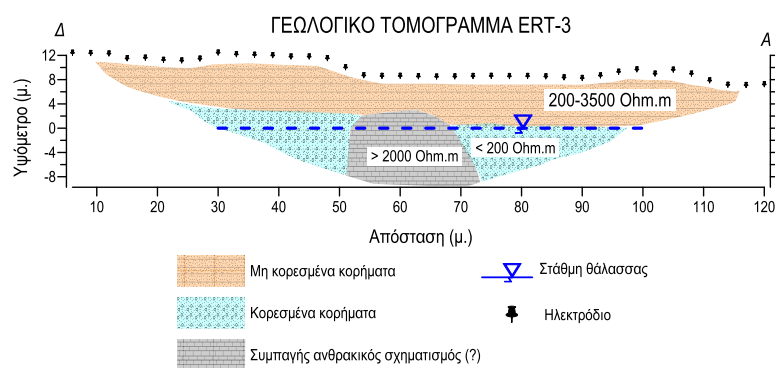
Λαμβάνοντας υπόψη τα (α) γεωλογικά στοιχεία, όπως αυτά περιγράφονται εκτενώς στο Κεφάλαιο 2 (§2.1.2) και (β) τα γεωφυσικά αποτελέσματα στο Κεφάλαιο 3 (§3.5), κατασκευάστηκαν οι γεωλογικο-γεωφυσικές τομές των εικόνων 4.6, 4.7, 4.8 και 4.10. Σε όλα τα γεωλογικά τομογράμματα έχει απεικονιστεί, με μπλε διακεκομμένη γραμμή, η στάθμη της θάλασσας.



Εικόνα 4.6 Γεωλογικό Τομόγραμμα ERT-1

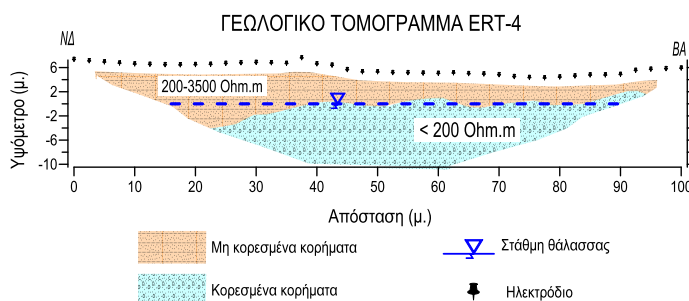
Στα Γεωλογικά Τομογράμματα ERT-1 (βλ. Εικ. 4.6) και ERT-3 (βλ. Εικ. 4.7), τα οποία αναπτύχθηκαν παράλληλα στην ακτογραμμή του όρμου της Ψάθας (βλ. Χάρτη 4.5) και μέχρι περίπου το υψόμετρο της θάλασσας, ο επιφανειακός και περίπου οριζόντιος αντιστατικός γεωηλεκτρικός σχηματισμός των 200-3500 Ohm.m αντιστοιχεί σε μη κορεσμένα και ελαφρά συγκολλημένα κορήματα, ενώ ο υποκείμενος αγώγιμος γεωηλεκτρικός σχηματισμός των 5-200 Ohm.m σε κορεσμένα.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό στο Γεωλογικό Τομογράμματα ERT-3 (βλ. Εικ. 4.7) είναι ότι, στο μέσον της τομής (στα 60m) και για ένα εύρος περίπου 20m, διερευνάται μία αντιστατική (>2000 Ohm.m) δομή, η οποία φαίνεται να συνεχίζεται και κάτω από την στάθμη της θάλασσας. Ο γεωηλεκτρικός αυτός σχηματισμός αποδίδεται στην ύπαρξη είτε στην ύπαρξη ενός 'θαμμένου' ανθρακικού ολισθόλιθου από το ανερχόμενο ρηξιτέμαχος, είτε μιας διάστρωσης κορήματων ισχυρά συγκολλημένων με ασβεστιτικό ανθρακικό υλικό.



Εικόνα 4.7 Γεωλογικό Τομογράμμα ERT-3

Παρόμοια υπεδαφική γενική κατάσταση των ERT-1 και ERT-3, φαίνεται να επικρατεί και στο Γεωλογικό Τομογράμμα ERT-4 (βλ. Εικ. 4.8). Η δομή αυτή που αποδίδεται φαίνεται να υποστηρίζεται από την τομή του τεχνικού πρανούς της φωτογραφίας της εικόνας 4.9, κατάντη της περιοχής ανάπτυξης του ERT-4 (λήψη από τον επαρχιακό δρόμο Αλεποχωρίου – Ψάθας).

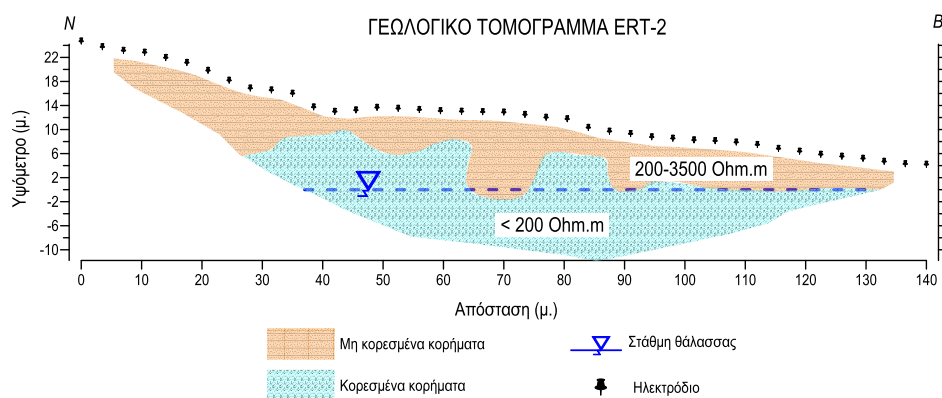


Εικόνα 4.8 Γεωλογικό Τομογράμμα ERT-4



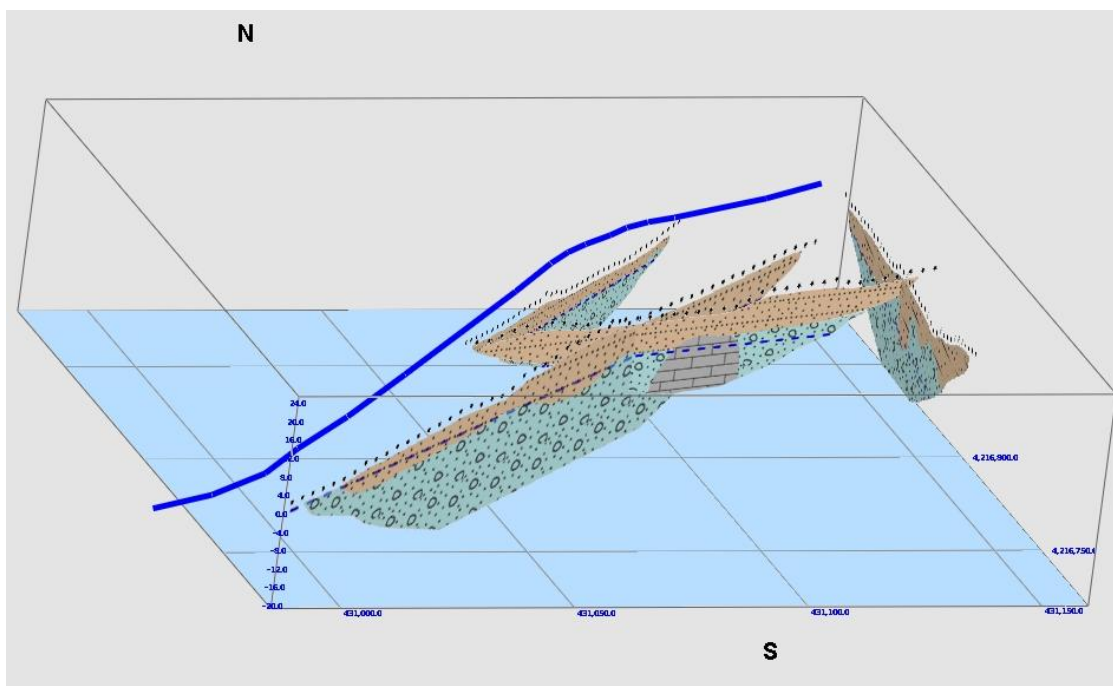
Εικόνα 4.9 Φωτογραφία των κορημάτων από τομή τεχνικού πρανούς, κατάντη από την περιοχή ανάπτυξης του Ηλεκτρικού Τομογράμματος ERT-4 (λήψη από τον επαρχιακό δρόμο Αλεποχωρίου – Ψάθας)

Το Ηλεκτρικό Τομόγραμμα ERT-2 αναπτύχθηκε (βλ. Χάρτη 4.5) σε διεύθυνση N-B, στην ανατολικότερη προσπελάσιμη περιοχή των κορημάτων. Ο υποκείμενος αγώγιμος γεωηλεκτρικός σχηματισμός (<200 Ohm.m) που διερευνήθηκε σε υψόμετρο 8-10m, αποδίδεται σε υπόγεια υδροφορία, η ύπαρξη της οποίας φαίνεται να συνδέεται με υπόγεια διακριτή ροή υδάτων από τις ανάντη παρακείμενες νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις.



Εικόνα 4.10 Γεωλογικό τομόγραμμα ERT-2

Τέλος, για την καλύτερη απεικόνιση της αξιολόγησης των γεωφυσικών αποτελεσμάτων σε πραγματικές συντεταγμένες και την αποτύπωση της αποτύπωση της υπεδαφικής δομής, κατασκευάστηκε η τρισδιάστατη απεικόνιση της εικόνας 4.11.



Εικόνα 4.11 Τρισδιάστατη απεικόνιση της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής έρευνας

Βιβλιογραφία

Καρράς, Γ. (1995). *Γραμμικοί μετασχηματισμοί συντεταγμένων στην φωτογραμμετρία*, Αθήνα.

Λέκκας, Ε. (2000): *Φυσικές και τεχνολογικές καταστροφές*, Τομέας Τεκτονικής Δυναμικής Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Ε.Κ.Π.Α., Β' Έκδοση, Αθήνα.

Μπέλλας, Μ., (2002): *Έκθεση γεωτεχνικής εξέτασης κατολισθητικών φαινομένων στον δρόμο Αλεποχωρίου – Ψάθας*, Ι.Γ.Μ.Ε., Αθήνα.

Παπανικολάου, Δ. & Σίδερης, Χ. (2005): *Γεωλογία, η επιστήμη της γης*, εκδόσεις Πατάκη, Αθήνα.

Πατιάς, Π. (1991). *Εισαγωγή στην Φωτογραμμετρία*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Φουντούλης, Ι. (2006): *Η παραμόρφωση της περιοχής του Ανατολικού Κορινθιακού και η σεισμική δραστηριότητα Φεβρουαρίου – Μαρτίου 1981*, Οδηγός εκδρομής, Περιβάλλον – Φυσικές και Τεχνολογικές καταστροφές, Π.Μ.Σ. Πρόληψη και Διαχείριση Φυσικών καταστροφών, Ε.Κ.Π.Α., Αθήνα.

Abellán, A., J. M. Vilaplana, and J. Martínez (2006), Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain), *Engineering Geology*, 88(3–4), 136-148.

Bornaz, L., and F. Rinaudo (2004). Terrestrial Laser Scanner data processing, Politecnico di Torino Dipartimento di Georisorse e Territorio.

Buckley, S. J., J. A. Howell, H. D. Enge, and T. H. Kurz (2008), Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations, *Journal of the Geological Society*, 165(3), 625-638.

Lato, M., M. Diederichs, D. Hutchinson, and R. Harrap (2012), Evaluating roadside rockmasses for rockfall hazards using LiDAR data: optimizing data collection and processing protocols, *Natural Hazards*, 60(3), 831-864.

Lee, I., Y. Choi (2004): *Fusion of Terrestrial Laser Scanner data and images or building reconstruction*, Departure of Geoinformatics University of Seoul.

Leeder M.R., Seger M.J., Stack C.P. (1991): Sedimentation and tectonic geomorphology adjacent to major active and inactive normal faults, southern Greece. *Journal Geol. Soc. London*, 148, 331-343.

Loke, M.H., 1999. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies – A practical guide to 2D and 3D surveys*, Malaysia, 57p.

Mariolakos, I. & Papanikolaou, D., (1981): - The neogene basins of the Aegean Arc from the Paleogeographic and the Geodynamic point of view. *Proceedings, Int. Symp. Hell. Arc and Trench (HEAT)*, I, p. 383-399, Athens.

Mariolakos, I. & Fountoulis, I., (1998): Quaternary repeated activity of the Psatha fault (Gulf of Corinth, Greece). In abstracts of *XVI Congress of Carpathian-Balkan Association, Vienna, 30/8 - 2/9/1998*. Abstract, p. 366.

Ono, N., N. Tonoko, and K. Sato (2000), A case study on the landslide by the 3D laser mirror scanner, paper presented at ISPRS, Amsterdam.

Prokop, A., and H. Panholzer (2009), Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9(6), 1921-1928.

Sakellariou D., Lykousis V. & Papanikolaou D. (1998): Neotectonic structure and evolution of the Gulf of Alkyonides, Central Greece. *Bull. Geol. Soc. Greece*, XXXII/1, 241-250

Sakellariou, D., Fountoulis I. & Lykousis V., (2004): - Lechaion Gulf: the last descendant of the Proto-Gulf-of-Corinth basin. In *Proc 5th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology, Thessaloniki, Greece, 14-20 April 2004*, Volume 2, 881-884.

Theodoropoulos, D. (1968): Stratigraphie und Tectonik des Isthmus von Megara (Griechenland). *Erlanger Geologische Abhandlungen*, 73.

Travelletti, J., T. Oppikofer, C. Delacourt, J. Malet, and M. Jaboyedoff (2008), Monitoring landslide displacements during a controlled rain experiment using a long-range terrestrial laser scanning, paper presented at ISPRS, Beijing.

U.S. Department of Transportation, 2008. GROUND-BASED LiDAR Rock Slope Mapping and Assessment, Publication No. FHWA-CFL/TD-08-006, Federal Highway Administration.