

Τρισδιάστατη Αποτύπωση του Ανατολικού Πρανούς της Κοιλιάδας των Τεμπών

Πέτρος Πατιάς¹, Χαράλαμπος Γεωργιάδης², Χρήστος Πικριδάς¹, Φώτης Πατώνης¹

¹ Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών

² Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Περίληψη

Στην Ε.Ο. Αθηνών – Θεσσαλονίκης και ειδικότερα στην θέση των Τεμπών, στις 17-12-2009 συνέβη κατολίσθηση του πρανούς με αποτέλεσμα το κλείσιμο της οδού. Για τις ανάγκες διερεύνησης και επίλυσης του προβλήματος απαιτείται η τρισδιάστατη αποτύπωση της ευρύτερης περιοχής. Για αυτό το σκοπό έγινε εφαρμογή φωτογραμμετρικών μεθόδων, χρήση laser scanner, κλασικών τοπογραφικών μεθόδων καθώς και χρήση GPS για την εγκατάσταση τοπογραφικού δικτύου. Η αποτύπωση είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους με συνδυαστική χρήση φωτογραμμετρικών μεθόδων (ανάλυση 30 cm) και μετρήσεων laser scanner (ανάλυση 11 cm), παραγωγή ορθοφωτοχάρτη με χωρική ανάλυση (μέγεθος pixel) 10 cm και παραγωγή τομών σε 26 επιλεγμένες θέσεις.

1. Εισαγωγή

Στην Ε.Ο. Αθηνών – Θεσσαλονίκης και ειδικότερα στην θέση των Τεμπών, στις 17-12-2009 συνέβη κατολίσθηση του πρανούς με αποτέλεσμα το κλείσιμο της οδού (φωτογραφία 1). Πρόκειται για ένα υψηλό, σχεδόν κατακόρυφο πρανές αποτελούμενο από διερρηγμένο βράχο, στη βάση του οποίου διέρχεται η Εθνική Οδός. Το συνολικό ύψος της πτώσης του ογκόλιθου είναι περί τα 70 m. Για τις ανάγκες διερεύνησης του περιστατικού πρωταρχικό βήμα αποτελεί η τρισδιάστατη αποτύπωση της ευρύτερης περιοχής του ατυχήματος.

Η περιοχή μελέτης εκτείνεται σε μήκος 4,5 km στην ανατολική πλευρά του πρανού της κοιλάδας των Τεμπών από χιλιομετρική θέση 385+800 ως 390+400 (χιλιόμετρα από Αθήνα). Στην περιοχή μελέτης μας ενδιαφέρει η αποτύπωση του πρανού μέχρι ύψους 120-150 m πάνω από το οδόστρωμα της Ε.Ο. Αθηνών-Θεσσαλονίκης. Στόχος είναι η αποτύπωση του πρανού με ακρίβεια 50 cm. Για την αποτύπωση της περιοχής χρησιμοποιήθηκαν φωτογραμμετρικές μέθοδοι, GPS για την ίδρυση τοπογραφικού δικτύου, κλασικές τοπογραφικές μετρήσεις φωτοσταθερών, καθώς και laser scanner.



Εικόνα 1: Περιοχή κατολίθησης

2. Ο Σχεδιασμός της Τρισδιάστατης Αποτύπωσης

Για την αποτύπωση του πρανούς η καλύτερη λύση θα ήταν η χρήση laser scanner (Bitelli et al 2004, Guissiani and Scaioni, 2004, Young et al., 2010), αλλά λόγω των ιδιαιτεροτήτων της περιοχής δεν μπορεί να καλυφθεί ολόκληρη η περιοχή αποκλειστικά με τη χρήση laser scanner. Η παρουσία του ποταμού Πηγειού καθώς και η απότομη κλίση του δυτικού πρανούς δεν προσφέρουν πολλές θέσεις με ορατότητα στην απέναντι πλευρά για να χρησιμοποιηθούν για σημεία στάσης. Επίσης η πυκνή βλάστηση (ψηλά δέντρα) δεν αφήνει πολλά σημεία με καλή ορατότητα για την διενέργεια μετρήσεων. Ακόμα όμως και στα σημεία με καλή ορατότητα το πρανές μπορεί να αποτυπωθεί μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος, καθώς το ψηλότερα σημεία δεν είναι ορατά. Για αυτούς τους λόγους η αποτύπωση έγινε χρησιμοποιώντας επικουρικά και φωτογραμμετρικές μεθόδους (Patias et al, 2008,2009). Με τη χρήση φωτογραμμετρίας είμαστε σε θέση να ξεπεράσουμε τα προβλήματα ορατότητας και να μπορέσουμε να αποτυπώσουμε τις περιοχές που δεν είχαμε τη δυνατότητα να αποτυπώσουμε με τη χρήση Laser Scanner. Για την υλοποίηση της μελέτης ακολουθήθηκαν τα παρακάτω στάδια.

Εργασίες Πεδίου:

1. Αεροφωτογράφιση της περιοχής μελέτης με τη χρήση ελικοπτερου.
2. Ίδρυση τοπογραφικού δικτύου με χρήση GPS και μέτρηση φωτοσταθερών.
3. Λήψη νεφών σημείων με laser scanner.

Επεξεργασία Δεδομένων:

1. Επιλογή Αεροφωτογραφιών
2. Επίλυση Δικτύου GPS
3. Επίλυση μετρήσεων φωτοσταθερών
4. Φωτογραμμετρική Επεξεργασία δεδομένων
5. Επεξεργασία δεδομένων Laser scanner
6. Συγχώνευση φωτογραμμετρικών δεδομένων και δεδομένων laser scanner

7. Παραγωγή τελικού τρισδιάστατου μοντέλου, ορθοφωτοχαρτών και τομών σε επιλεγμένα σημεία.

Για την εκπλήρωση της αποτύπωση χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τεχνικός εξοπλισμός (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Τεχνικός Εξοπλισμός

Hardware	Software
Ελικόπτερο Robinson R44	InnovMetric PolyWorks™
Optec ILRIS 3D Laser scanner	Leica Geosystems LeicaGeoOffice™
Leica Geosystems System 1200 GPS receiver	Topografos
Leica Flex Line TC09 Total station	Photometrix iWitness™ Pro
Camera Nikon D80 φακός Nikkor 20mm	ShapeQuest Shape Capture™, ShapeScan™, ShapeTexture™, ShapePattern™
	Leica Photogrammetric Suite LPS™
	ERDAS Imagine™

3. Αεροφωτογράφιση

Η αεροφωτογράφιση έγινε με ελικόπτερο Robinson R44, με μηχανή Nikon D80, φακό Nikkor 20 mm και πραγματοποιήθηκε στις 9-1-2010. Κατά τη διάρκεια της λήφθηκαν 3 λωρίδες αεροφωτογραφιών (Λωρίδα 1 : 117 Α/Φ, Λωρίδα 2 : 128 Α/Φ, Λωρίδα 3 : 100 Α/Φ) με ένα σύνολο 345 εικόνων. Η μέση απόσταση των φωτογραφιών από το πρηνές ήταν 100 m. Χρησιμοποιώντας φακό εστιακής απόστασης 20 mm και με δεδομένο μέγεθος pixel 6 μm προκύπτει ότι η μέση κλίμακα των Α/Φ είναι 1:5000 και η χωρική τους ανάλυση 3 cm. Στις εικόνες 2, 3, 4 μπο-



Εικόνα 2: Το χρησιμοποιηθέν ελικόπτερο μοντέλο Robinson R44



Εικόνα 3: Laser Scanner Optech ILRIS 3D



Εικόνα 4: Η χρησιμοποιηθείσα ψηφιακή camera Nikon D80, και ο φακός Nikkor 20mm

Τεχνικά χαρακτηριστικά

Camera Nikon D80

Διαστάσεις εικόνας = 3872×2592 pixels

Διαστάσεις pixel = 6,09 μm

Διαστάσεις δέκτη CCD = $23,7 \times 15,8$ mm

Εστιακή απόσταση φακού = 20 mm



Δείγμα Α/Φ λωρίδας 1



Δείγμα Α/Φ λωρίδας 1

Εικόνα 5: Ενδεικτικές αεροφωτογραφίες

ρούμε να δούμε το εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της αεροφωτογράφισης. Στην εικόνα 5 παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες Α/Φ της περιοχής μελέτης. Από το σύνολο των 345 αεροφωτογραφιών επιλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν 93 Α/Φ.

4. Υλοποίηση Τοπογραφικού Δικτύου και Προσδιορισμός Φωτοσταθερών σημείων

4.1 Γενική Περιγραφή Εργασιών

Για τις ανάγκες των τοπογραφικών/φωτογραμμετρικών εργασιών υλοποιήθηκαν 17 κορυφές όδευσης (εικόνα 6) με σκοπό την στόχευση και προσδιορισμό συντεταγμένων τόσο για τα φωτοσταθερά σημεία (στα πρηνή των βράχων) όσο και για τον προσδιορισμό του σημείων στάσης του Laser σαρωτή. Οι μετρήσεις έγιναν με δέκτες του παγκόσμιου συστήματος προσδιορισμού θέσης (GPS). Οι κορυφές της όδευσης εγκαταστάθηκαν από την περιοχή περίπου του παλιού σιδηροδρομικού σταθμού των Τεμπών (κυρίως κατά μήκος της παλιάς γραμμής) μέχρι σχεδόν τη γέφυρα του Πηνειού ποταμού που βρίσκεται στην παράκαμψη προς Ομόλιο, Στόμιο, Καρίτσα κλπ. Με σκοπό την ένταξη των 17 νέων σημείων (τόσο οριζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά) στο Datum του ΕΓΣΑ87 παραχωρήθηκαν από τον ανάδοχο οι συντεταγμένες μαζί με τις αντίστοιχες πληροφορίες του δικτύου που έχει εγκατασταθεί σε όλη την ευρύτερη περιοχή για τις Γεωδαιτικές ανάγκες των διαφόρων έργων.

Τα σημεία που επιλέχθηκαν και τα οποία καλύπτουν την περιοχή μελέτης είναι τα: TC9, TC13, TC14, TC17, TC18, TC19, TC20, TC22, TC23, TC24.



Εικόνα 6: Κροκί όδευσης

Όλα τα νέα σημεία μετρήθηκαν με την μέθοδο του στατικού προσδιορισμού (static positioning) με διάστημα καταγραφής των παρατηρήσεων ίσο με 15 sec και γωνία αποκοπής των δορυφορικών σημάτων ίση με 15° . Ο ελάχιστος χρόνος παραμονής σε κάθε σημείο του δικτύου ορίστηκε (ανάλογα με το μήκος της μετρούμενης βάσης) ίσος με 30 – 40 min οπότε το ελάχιστο πλήθος εποχών (epochs), όπως ονομάζονται, για κάθε κορυφή του δικτύου ήταν 120-160 epochs. Ο χρόνος παρατήρησης ανάλογα με την γεωμετρία του δορυφορικού σχηματισμού (δείκτης GDOP), το μήκος της βάσης αλλά και το επίπεδο του θορύβου (τιμή λόγου SNR) εξαιτίας της δυσκολίας λήψης μέσα στην κοιλάδα των Τεμπών, για ορισμένες βάσεις, αυξήθηκε και σε περισσότερο από 60 min. Το μεγαλύτερο μήκος των βάσεων που μετρήθηκαν μεταξύ όλων των κορυφών δεν ξεπερνούσε τα 9 Km. Γενικά, δηλαδή μετρήθηκαν βάσεις μικρού μήκους για τις δυνατότητες του συστήματος.

Για τη μέτρηση των σημείων των κορυφών της όδευσης χρησιμοποιήθηκαν 2 δέκτες διπλής συχνότητας του μοντέλου System 1200 της Leica Geosystems, με δυνατότητα λήψης 12 καναλιών στην L_1 και L_2 συχνότητα από αντίστοιχο πλήθος δορυφόρων και με σχετική (μεταξύ reference-rover) ακρίβεια προσδιορισμού οριζόντιας θέσης για τη στατική μέθοδο (σύμφωνα με τον κατασκευαστή) της τάξης των 5 mm + 0,5 ppm και για την κατακόρυφη συνιστώσα της τάξης των 10 mm + 0,5 ppm. Οι μετρήσεις GPS εκτελέστηκαν στις 15/1 16/1, 19/1 και 23/1 του 2010. Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με το λογισμικό LeicaGeoOffice v5.0 (LGO) της Leica Geosystems.

4.2 Επίλυση Δικτύου GPS

Η επίλυση των βάσεων GPS ξεκίνησε από ένα σημείο αναφοράς το οποίο επιλέχθηκε σύμφωνα με το μέγιστο αριθμό παρατηρήσεων (περίπου 10 ώρες) και συγκεκριμένα από το τριγωνομετρικό σημείο της υπάρχουσας μελέτης με κωδικό αριθμό TCB1. Το σημείο αυτό προσδιορίστηκε αρχικά, από το μόνιμο σταθμό AUT1 του ΑΠΘ ο οποίος ανήκει στο Ευρωπαϊκό δίκτυο EPN-EUREF (βλέπε σχετικό σύνδεσμο:

http://www.epncb.oma.be/_trackingnetwork/siteinfo4onestation.php?station=AUT1_12619M002

με σκοπό την βελτίωση των συντεταγμένων του στο σύστημα ITRF τεχνική που βοηθά αλγοριθμικά στην επίλυση των βάσεων. Στη συνέχεια κρατήθηκαν σταθερές οι συντεταγμένες που προέκυψαν και ακολούθησε η επίλυση των βάσεων. Όλες οι ασάφειες φάσεις επιλύθηκαν στους σωστούς ακεραίους αριθμούς σύμφωνα με τα στατιστικά κριτήρια και τους ελέγχους που εφαρμόζει το λογισμικό επεξεργασίας. Η λύση αυτή κρίνεται ποιοτική αφού επιτυγχάνονται οι ζητούμενες ακρίβειες περνώντας όλους τους στατιστικούς ελέγχους (πχ. σάρωσης δεδομένων, t-test).

Στη συνέχεια προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες των 17 νέων κορυφών (ένταξη), με χρήση του μετασχηματισμού ομοιότητας (2DHelmert) στο ΕΓΣΑ87, οι παράμετροι του οποίου προσδιορίστηκαν από τα 10 γνωστά τριγωνομετρικά σημεία του υπάρχοντος δικτύου, οι διαφορές (κατά την ταύτιση) των οποίων φαίνονται από τις τιμές των εκτιμήσεων των σφαλμάτων. Το *a-posteriori* σφάλμα του μετασχηματισμού είναι της τάξης των **2 cm**.

Το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας αφορά το μετασχηματισμό των ελλειψοειδών υψομέτρων των νέων κορυφών σε ορθομετρικά υψόμετρα, επίσης με τη βοήθεια του λογισμικού LGO στο χωροσταθμικό σύστημα αναφοράς έτσι όπως αυτό ορίζεται από τα γνωστά ορθομετρικά υψόμετρα των τριγωνομετρικών σημείων (TC9, TC13, TC14, TC17, TC18, TC19, TC20, TC22, TC23, TC24) που περιλαμβάνονται στις μετρήσεις GPS.

Στην περίπτωση αυτή, η μόνη δυνατή επιλογή είναι να γίνει ένας μετασχηματισμός, στην ουσία μία παρεμβολή, μεταξύ των γεωμετρικών υψομέτρων που προέρχονται από το GPS και των αντιστοίχων ορθομετρικών που γνωρίζουμε σε κάποια (κοινά) σημεία. Η παρεμβολή αυτή μπορεί να γίνει προσαρμόζοντας ένα επίπεδο στις γνωστές διαφορές ($h-H$) των κοινών σημείων, για μικρή όμως έκταση (ενδεικτικά 10×10 km), όπως ισχύει στην περίπτωσή μας. Ακόμα καλύτερα αποτελέσματα μπορεί να έχουμε εάν στη μέθοδο της αναλυτικής παρεμβολής χρησιμοποιηθεί και μία κατάλληλη συνάρτηση συμμεταβλητότητας. Δηλαδή, αφού αρχικά προσδιοριστούν οι παράμετροι του επιπέδου, οι διαφορές που απομένουν στα κοινά σημεία χρησιμοποιούνται για να γίνει πρόγνωση των ορθομετρικών υψομέτρων στα υπόλοιπα μη κοινά σημεία.

Λόγω κυρίως του σχετικά δύσκολου ανάγλυφου της υπό μελέτη περιοχής στη συγκεκριμένη περίπτωση αξιοποιήθηκε και (ως επιπλέον) η πληροφορία που δίνεται από τα διάφορα παγκόσμια μοντέλα.

Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε ως αρχική πληροφορία, για τις τιμές του γεωειδούς στην περιοχή, οι τιμές που προκύπτουν από το Παγκόσμιο Βαρυτημετρικό μοντέλο EGM08 το οποίο φτάνει μέχρι το βαθμό ανάπτυξης σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων της τάξης των 2190 και υψομετρίας της τάξης των 2160. Το πρόσφατα ανακοινωθέν μοντέλο είναι προϊόν συνδυασμού

Πίνακας 2: Τελικές Γεωδαιτικές συντεταγμένες των κορυφών της όδευσης (προβολή TM87, Datum ΕΓΣΑ87, Υψόμετρα Ορθομετρικά)

Σημείο	$X(m)$	$Y(m)$	$H(m)$	$\sigma_E(cm)$	$\sigma_N(cm)$	$\sigma_H(cm)$
S1	375.697,390	4.414.446,180	23.230,000	1,2	0,8	3,9
S2	377.500,200	4.414.764,560	19.773,000	1,6	1,2	2,0
S3	377.496,870	4.414.766,160	19.564,000	1,6	1,6	2,5
S4	377.963,680	4.414.730,300	20.669,000	1,2	2,0	4,2
S5	377.973,180	4.414.731,380	20.657,000	1,2	1,2	2,3
S6	378.174,820	4.414.796,780	32.470,000	1,2	1,2	2,3
S7	378.178,030	4.414.796,990	32.501,000	1,6	1,2	2,5
S8	379.008,310	4.415.235,810	19.133,000	2,0	1,6	4,1
S9	378.988,580	4.415.219,260	19.255,000	2,0	2,0	3,1
S10	379.769,330	4.415.621,810	19.284,000	1,2	1,2	2,0
S11	379.756,850	4.415.606,110	19.313,000	1,2	1,2	2,3
S12	380.496,530	4.416.328,850	71.788,000	0,8	0,8	1,1
S13	380.501,630	4.416.317,370	69.809,000	1,2	1,2	1,7
S14	376.833,100	4.414.835,580	34.883,000	0,6	0,6	1,1
S15	376.847,790	4.414.833,920	35.878,000	0,6	0,9	1,6
S16	377.090,570	4.414.868,940	19.023,000	0,9	1,5	2,2
S17	377.086,090	4.414.863,970	19.023,000	0,9	0,9	1,9

πολλών ετερογενών δεδομένων (επίγειων και δορυφορικών) και αναπτύχθηκε από την National Geospatial - Intelligence Agency (NGA) των ΗΠΑ (για περισσότερες πληροφορίες βλέπε στην ακόλουθη URL

<http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/index.html>).

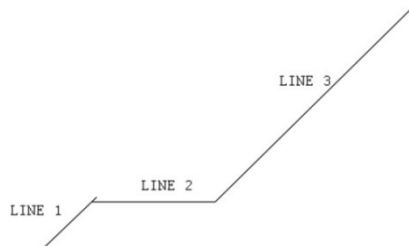
Τελικά δημιουργήθηκε ένα τοπικό γεωειδές (στην περιοχή μελέτης) που προήλθε από το συνδυασμό όλων των δεδομένων που προαναφέρθηκαν (υπάρχον δίκτυο, παγκόσμιο μοντέλο κλπ.). Το α-posteriori σφάλμα του μετασχηματισμού είναι της τάξης των **2,8 cm** Αποτέλεσμα που κρίνεται πάρα πολύ ικανοποιητικό για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης. Τα συνολικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

4.3 Επίλυση Φωτοσταθερών Σημείων

Για την εκτέλεση των τοπογραφικών παρατηρήσεων προκειμένου να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες των Φ/Σ σημείων χρησιμοποιήθηκε ο γεωδαιτικός σταθμός Leica Flex Line TC09, ενώ τα γενικά βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

- Μετατροπή των γεωδαιτικών συντεταγμένων των κορυφών της όδευσης σε τοπικό σύστημα (Hatt)
- Υπολογισμός των συντεταγμένων των Φ/Σ σημείων στο τοπικό σύστημα

- Στροφή του συστήματος των Φ/Σ σημείων ως προς τρία ευθύγραμμα τμήματα (εικόνα 7), έτσι ώστε ο άξονας X να συμπίπτει κατά το δυνατόν με τον κατά μήκος άξονα της οδού.



Εικόνα 7:

Τα τρία ευθύγραμμα τμήματα ως προς τα οποία ταυτίστηκαν τα συστήματα συντεταγμένων

Συνολικά μετρήθηκαν 68 Φ/Σ σημεία με ακρίβεια 30 cm. Η μικρή ακρίβεια στην μέτρηση των Φ/Σ οφείλεται στην μεγάλη απόσταση παρατήρησης των σημείων (200 - 500 m), στην ανακλαστικότητα και το υλικό των επιφανειών που επηρεάζει της μετρήσεις με reflectorless laser και στο προβλήματα αναγνώρισης των Φ/Σ στην φωτογραφία και το πεδίο. Από τα συνολικά 68 Φ/Σ που μετρήθηκαν χρησιμοποιήθηκαν τελικά 36. Η στροφή του συστήματος συντεταγμένων των Φ/Σ σημείων έγινε για λειτουργικούς λόγους. Για την αυτόματη παράγωγή σημείων στο λογισμικό LPS ως άξονας των Z πρέπει να οριστεί ο άξονας φωτογράφισης. Οπότε το τελικό σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκε έχει τον άξονα τον X να συμπίπτει με τον άξονα της οδού, τον άξονα των Y να είναι το υψόμετρο ενώ ο άξονας των Z είναι η απόσταση των σημείων από τον άξονα φωτογράφισης (βάθος). Για την επίλυση των Φ/Σ χρησιμοποιήθηκε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων (Hatt) γιατί διατηρεί αναλλοίωτες τις αποστάσεις.

5. Φωτογραμμετρική Αποτύπωση

Οι φωτογραμμετρικές εργασίες αφορούν στην

- βαθμονόμηση της κάμερας,
- επίλυση του εσωτερικού και σχετικού προσανατολισμού των αερολήψεων,
- επίλυση και έλεγχο του αεροτριγωνισμού,
- υπολογισμό συντεταγμένων σημείων σύνδεσης των πολύ-εικονικών λήψεων,
- αυτόματη συσχέτιση των εικόνων,
- υπολογισμό του Ψηφιακού Μοντέλου Επιφάνειας (ΨΜΕ) εν είδη νέφους σημείων και
- συνένωση των επιμέρους ΨΜΕ του πρανούς.

Η φωτογραμμετρική επεξεργασία έγινε σε τρία επί μέρους projects, τα οποία αντιστοιχούν στις τρεις λωρίδες λήψεων και αντίστοιχα στα τρία ευθύγραμμα τμήματα LINE 1 - 3.

5.1 Βαθμονόμηση φωτογραφικής μηχανής

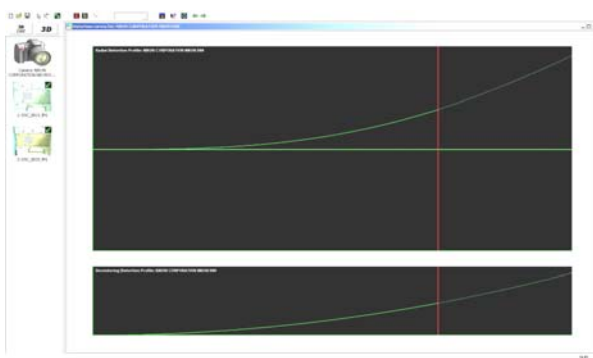
Για τη βαθμονόμηση της φωτογραφικής μηχανής Nikon D80 με φακό Nikkor 20mm χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Shape Capture. Το πεδίο ελέγχου του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης του ΤΑΤΜ/ΑΠΘ αποτελείται από 12 φωτοσταθερά (Εικόνα 8) και χρησιμοποιήθηκαν 2 φωτογραφίες. Στον πίνακα 3 φαίνονται τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού της φωτογραφικής μηχανής,

Πίνακας 3: Στοιχεία βαθμονόμησης φακού

Στοιχείο	Βαθμονομημένη τιμή	Ακρίβεια (σ)
x_0	11,588 mm	0,0001 mm
y_0	7,94 mm	0,0000 mm
c	20,141 mm	0,0001 mm
A	9,56E-01	3,60E-07
B	-1,20E-05	3,08E-07
K_1	2,43E-04	3,21E-08
K_2	-2,77E-07	2,43E-10
P_1	2,24E-05	3,98E-08
P_2	5,16E-05	2,63E-08



Εικόνα 8: Πεδίο Ελέγχου



Εικόνα 9: Διάγραμμα Ακτινικής και Εγκάρσιας παραμόρφωσης του φακού

ενώ στην εικόνα 9 φαίνεται το σύνολο των παραμορφώσεων. Μπορούμε να δούμε ότι οι ακτινικές παραμορφώσεις (K_1 , K_2) είναι πολύ μικρές ενώ η ακρίβεια προσδιορισμού τους είναι τουλάχιστον 3 τάξεις μεγέθους μικρότερη. Το ίδιο ισχύει και για τις άλλες παραμέτρους (f , x_0 , y_0 , A , B , P_1 , P_2). Από το διάγραμμα των παραμορφώσεων του φακού προκύπτει ότι μεγάλες παραμορφώσεις υπάρχουν μόνο στις άκρες της φωτογραφίας. Το Μοντέλο βαθμονόμησης το οποίο χρησιμοποιήθηκε δίνεται παρακάτω εξισώσεις 1, 2:

$$\Delta x = A(y_p - y_0) + k_1 r^2 x + k_2 r^4 x + P_1 (r^2 + 2(x_p - x_0)^2) + 2P_2 (x_p - x_0)(y_p - y_0) \quad (1)$$

$$\Delta y = B(y_p - y_0) + k_1 r^2 x + k_2 r^4 x + P_2 (r^2 + 2(x_p - x_0)^2) + 2P_1 (x_p - x_0)(y_p - y_0) \quad (2)$$

5.2 Προσανατολισμοί και Αεροτριγωνισμοί

Για την επίλυση του αεροτριγωνισμού χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Iwitness. Οι ακρίβειες επίλυσης του αεροτριγωνισμού κυμαίνονται μεταξύ 20-50 cm. Πιο συγκεκριμένα για τον αεροτριγωνισμό της Λωρίδας 1 χρησιμοποιήθηκαν 8 Φ/Σ και 53 σημεία σύνδεσης σε 8 Α/Φ. Η επίλυση του δικτύου ως ελεύθερο μας δίνει μια ακρίβεια 0,73 pixel που μεταφράζεται σε ακρίβεια 2,1 cm, ενώ το τελικό RMS των μετρήσεων ήταν 20, 10, και 31 cm στους άξονες X, Y, Z αντίστοιχα. Στην Λωρίδα 2 χρησιμοποιήθηκαν 12 Φ/Σ, 294 σημεία σύνδεσης και 45 Α/Φ. Η ελεύθερη επίλυση του δικτύου μας δίνει μια ακρίβεια 0,95 pixel (2,85 cm) και τελικό RMS 25, 20, 45 cm στους άξονες X, Y, Z αντίστοιχα. Τελικά στην Λωρίδα 3 χρησιμοποιήθηκαν 8 Φ/Σ, 342 σημεία σύνδεσης και 59 Α/Φ. Η επίλυση ως ελεύθερο δίκτυο έδωσε ακρίβεια 0,86 pixel (2.58 cm) και τελικό RMS 20, 16, 59 cm στους άξονες X, Y, Z αντίστοιχα. Για την αυτόματη παραγωγή Ψηφιακού μοντέλου εδάφους χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Leica Photogrammetry Suite(LPS) χρησιμοποιώντας τον εξωτερικό προσανατολισμό που υπολογίστηκε από το λογισμικό Iwitness. Τα αποτελέσματα της φωτογραμμετρικής διαδικασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Συγκεντρωτικά γενικά στοιχεία της φωτογραμμετρικής διαδικασίας

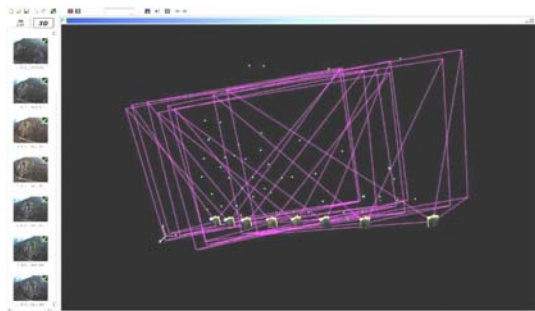
Λωρίδα	1	2	3
Αρ. Α/Φ	8	45	59
Αρ. σημείων σύνδεσης	51	294	342
Αρ. Φ/Σ	8	17	11
σ ₀ (cm) Α/Τ	20	50	30
Χωρική ανάλυση ΨΜΕ (cm)	30	30	30
Αρ. σημείων ΨΜΕ από αυτόματη συσχέτιση	796.276	1.246.604	653.547
Αρ. σημείων ΨΜΕ που τελικά χρησιμοποιήθηκαν	433.387	810.223	545.081

Α/Φ: Αεροφωτογραφίες, Φ/Σ: Φωτοσταθερά Σημεία, Α/Τ: Αεροτριγωνισμός, ΨΜΕ: Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας

Γενικές παρατηρήσεις είναι οι ακόλουθες :

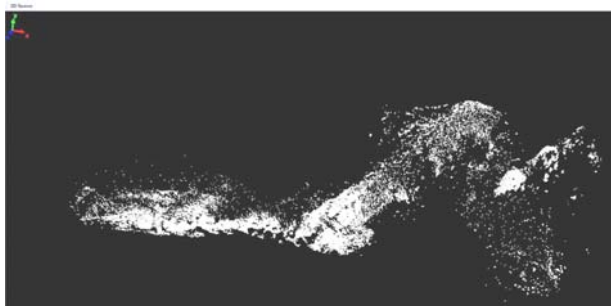
1. Η επικαλύψεις των Α/Φ ήταν πολύ μεγάλες (πάνω από 85%) εικόνα 10, γεγονός στο οποίο οφείλεται η ισχυρή εσωτερική γεωμετρία των δικτύων καθώς και

η δυνατότητα του συστήματος να εντοπίζει και να απαλείφει χονδροειδή σφάλματα.



Εικόνα 10: Διάγραμμα πτήσης και επικαλύψεων Λωρίδας 1

2. Ο μεγάλος αριθμός των σημείων σύνδεσης ανάμεσα στα μοντέλα (κατά μέσο όρο πάνω από 40 σημεία ανά Α/Φ) συντέινει επίσης στην ισχυρή εσωτερική γεωμετρία των δικτύων.
3. Η επίλυση των δικτύων ως ελεύθερα δίκτυα έδωσε τιμές σ_0 a-posteriori καλύτερες από 3 pixels (δηλ. περίπου 10 cm).
4. Η ποιότητα των Φ/Σ παρουσίασε μεγάλη διακύμανση, εξ αιτίας του γεγονότος της μεγάλης απόστασης μέτρησης με reflectorless Laser Total Station, αλλά και της κατά τόπους βλάστησης, η οποία προκαλούσε σκέδαση του σήματος. Ως αποτέλεσμα, από τα συνολικά 68 μετρηθέντα Φ/Σ χρησιμοποιήθηκαν τελικά τα 36.
5. Η αυτόματη συσχέτιση των Α/Φ λειτούργησε σχετικά καλά και παρείχε μεγάλο αριθμό σημείων του Ψηφιακού Μοντέλου Επιφάνειας (ΨΜΕ). Από αυτά επιλέχθηκαν και διατηρήθηκαν τα καλύτερα μόνο (Excellent + Good) τα οποία ήταν κατά μέσο όρο το 68% των συνολικών σημείων (Εικόνα 11).
6. Ως βέλτιστη χωρική ανάλυση του ΨΜΕ επιλέχθηκαν τα 30 cm, έχοντας υπόψη τις ακρίβειες που επιτεύχθηκαν στο στάδιο των αεροτριγωνισμών.

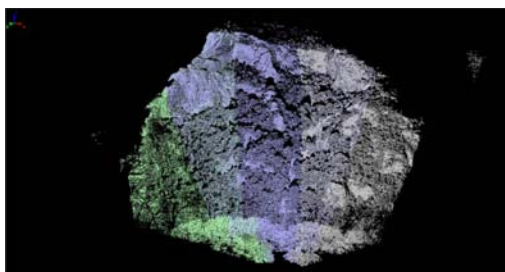


Εικόνα 11: Ενδεικτικό νέφος σημείων που προέκυψε από φωτογραμμετρική επεξεργασία (αυτόματη συσχέτιση ψηφιακών εικόνων)

6. Αποτύπωση με Σαρωτή Laser

Τα Ψηφιακά Μοντέλα της Επιφάνειας του πρανούς, τα οποία προέκυψαν από τις φωτογραμμετρικές μετρήσεις, στη συνέχεια συνδυάστηκαν με επίγειες σαρώσεις με τον laser scanner Ortec ILRIS 3D, για την κάλυψη των κενών περιοχών.

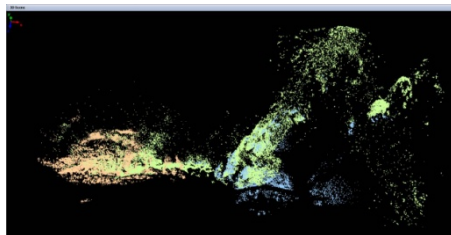
Συγκεκριμένα η προσβασιμότητα, η ορατότητα και το ανάγλυφο του εδάφους επέτρεψαν τη διεξαγωγή 31 συνολικά σαρώσεων από 7 στάσεις του laser scanner. Οι σαρώσεις συνενώθηκαν ανά στάση (εικόνα 12) και δημιουργήθηκαν, με τον τρόπο αυτό, 7 συνολικά ομάδες νεφών σημείων, τα οποία παρέχουν ένα συνολικό αριθμό 27 περίπου εκατομμυρίων σημείων, με μια μέση χωρική ανάλυση περίπου **11 cm** στο έδαφος.



Εικόνα 12: Ενδεικτικό νέφος σημείων που προέκυψε από laser scanning και συνένωση 3 επί μέρους επικαλυπτόμενων σαρώσεων (φαίνονται σε διαφορετικά χρώματα)

6.1 Συνένωση νεφών σημείων

Στη φάση αυτή συνενώθηκαν όλα τα επί μέρους σύννεφα σημείων, τα οποία σε προηγούμενα στάδια είχαν δημιουργηθεί είτε με φωτογραμμετρικές μεθόδους είτε με laser scanning. Σκοπός είναι η δημιουργία ενός πλήρους Ψηφιακού Μοντέλου Επιφάνειας του πρανούς. Το τελικό ΨΜΕ του πρανούς προέρχεται από τη συνένωση όλων των επί μέρους παραχθέντων ΨΜΕ (εικόνα 13). Συγκεκριμένα, με φωτογραμμετρική επεξεργασία των 3 λωρίδων Α/Φ έχουν παραχθεί συνολικά **1.788.691** σημεία ΨΜΕ με χωρική ανάλυση **30 cm**. Αφ' ετέρου με επεξεργασία των συνολι-



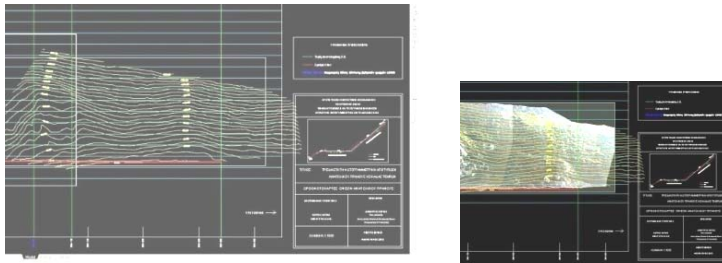
Εικόνα 13: Ενδεικτικό νέφος σημείων που προέκυψε από laser scanning και φωτογραμμετρικά (Φωτογραμμετρικό (πράσινο) + Laser scanning (μπλέ και κίτρινο))

κά 31 επίγειων laser σαρώσεων έχουν παραχθεί συνολικά **26.863.331** σημεία ΨΜΕ με μέση χωρική ανάλυση **11 cm**. Η συνένωση των επί μέρους νεφών έχει ως σκοπό όχι μόνο τη δημιουργία ενός πλήρους ΨΜΕ, αλλά επιπλέον και τη διόρθωση μικρών κατά τόπους εναπομεινάντων σφαλμάτων. Αυτό καθιστά δυνατόν εξ αιτίας της μεγάλης σχετικά επικάλυψης ανάμεσα στα επί μέρους νέφη, ανεξάρτητα από τον τρόπο παραγωγής τους.

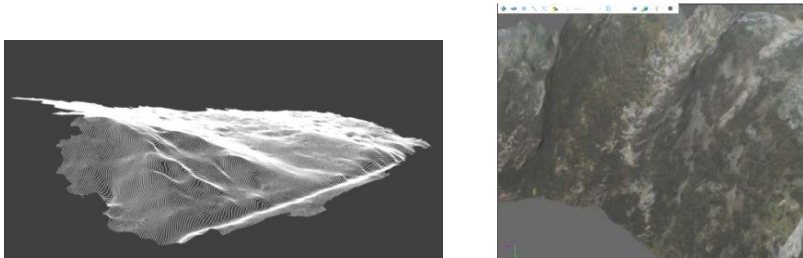
Ο ποιοτικός έλεγχος της συνένωσης των νεφών έδειξε ότι οι χωρικές τους διαφορές είναι μικρές και σε μικρό αριθμό σημείων. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκαν διαφορές μικρότερες των 50 cm και μάλιστα σε σημεία με έντονη βλάστηση, τα οποία είναι προβληματικά τόσο στην ανάκλαση της ακτίνας laser όσο και στις φωτογραμμετρικές παρατηρήσεις.

6.2 Δημιουργία όρθο

Το επόμενο στάδιο συνίσταται στη δημιουργία ορθοφωτοχάρτη του πρανούς, ο οποίος δημιουργείται με γνωστό το ΨΜΕ και τον εξωτερικό προσανατολισμό των Α/Φ. Ο ορθοφωτοχάρτης ουσιαστικά αποτελεί και την όψη του πρανούς σε ορθή προβολή, ενώ είναι δυνατόν να επικάθηνται και ισούψεις κατάλληλης ισοδιάστασης. Ο ορθοφωτοχάρτης δημιουργήθηκε με φωτογραμμετρικές μεθόδους και με χρήση του συνολικού ΨΜΕ. Η χωρική ανάλυση (μέγεθος pixel) του ορθοφωτοχάρτη επιλέχθηκε στα 10 cm (εικόνα 14).

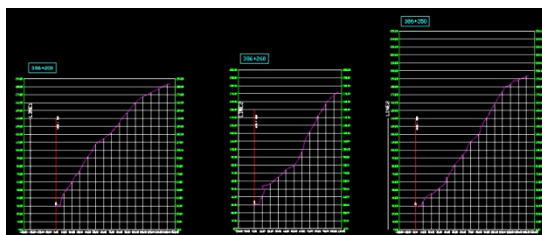


Εικόνα 14: Ενδεικτικό απόσπασμα της όψης του πρανούς (ορθοφωτοχάρτης)



Εικόνα 15: Ενδεικτικό απόσπασμα 3D μοντέλου

Παράλληλα, η δημιουργία πραγματικού τρισδιάστατου μοντέλου δημιουργείται από το γνωστό ΨΜΕ και τον παραχθέντα ορθοφωτοχάρτη. Με τη μέθοδο του drapping δημιουργήθηκε τέλος και πραγματικό 3D (εικόνα 15) μοντέλο του πρανούς, το οποίο μετατράπηκε σε αρχείο μορφής PDF προκειμένου να είναι προσβάσιμο χωρίς την ανάγκη εξειδικευμένου λογισμικού. Ενδεικτικές τομές του πρανούς έγιναν σε 26 συνολικά υποδειχθείσες θέσεις (εικόνα 16).



Εικόνα 16: Ενδεικτικές τομές του πρανούς

7. Συμπεράσματα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το τελικό ψηφιακό μοντέλο εδάφους που παράχθηκε αποτελείται από περίπου 28.500.000 σημεία, το μεγαλύτερο σύνολο του οποίου μετρήθηκε χρησιμοποιώντας laser scanner. Παράλληλα για την κάλυψη των κενών μετρήθηκαν σημεία χρησιμοποιώντας αυτοματοποιημένες φωτογραμμετρικές μεθόδους με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός πλήρους ΨΜΕ και τριών ορθοφωτοχαρτών που καλύπτουν όλη την περιοχή μελέτης. Κατά την διάρκεια των εργασιών αντιμετωπίστηκαν διάφορα προβλήματα κυρίως λόγω της ιδιαιτερότητας της περιοχής και την φύση της αποτύπωσης. Για την εγκατάσταση και την μέτρηση του τοπογραφικού δικτύου με χρήση GPS υπήρχαν προβλήματα ορατότητας δορυφόρων τα οποία λύθηκαν με μεγαλύτερη παραμονή σε κάθε σταθμό. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα ήταν η μέτρηση των Φ/Σ σημείων. Τα προβλήματα προέκυψαν από δυο κυρίως παράγοντες. Ο ένας ήταν η μεγάλη διαφορά ανάμεσα στο σημείο λήψης των φωτογραφιών και το σημείο λήψης των μετρήσεων, δημιουργώντας προβλήματα αναγνώρισης των Φ/Σ. Το πρόβλημα δημιουργήθηκε γιατί υπήρχε μεγάλη υψομετρική διαφορά καθώς και απόσταση από το αντικείμενο ανάμεσα στις λήψεις. Το μέσο ύψος λήψης των φωτογραφιών ήταν περίπου 50 m πάνω από το επίπεδο της οδού και σε μια απόσταση 50-60 m από το πρανές, ενώ οι μετρήσεις τις περισσότερες φορές έγιναν περίπου 10 m κάτω από το επίπεδο της οδού και σε απόσταση 200-500 m από το πρανές. Ο δεύτερος παράγοντας είναι ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από μεγάλη απόσταση από την περιοχή μελέτης 200-500 m και σε υλικό που δεν ευνοεί της χρήση reflector-less laser. Τα παραπάνω είχαν σαν αποτέλεσμα την παρουσία μεγάλης διακύμανσης στην ποιότητα των φωτοσταθερών και την χρήση μόνο 36 από τα συνολικά 68 μετρηθέντα. Κατά την διάρκεια της φωτογραμμετρικής παράγωγης παρατηρήθηκαν προβλήματα στην

αυτόματη συσχέτιση σημείων κυρίως λόγω της πυκνής βλάστησης σε ορισμένες περιοχές, για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα καλύτερα σημεία (Excellent + Good) που ήταν κατά μέσο όρο το 68% των συνολικών σημείων. Το τελικό ΨΜΕ προέκυψε από την ένωση των δυο νεφών σημείων (φωτογραμμετρικού και laser scanner) χωρίς μεγάλα προβλήματα στην συνένωση των νεφών. Τα τελικά προϊόντα παρέχουν την πληρότητα και την ακρίβεια για την μελέτη της περιοχής τόσο ποσοτικά (τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής) όσο και ποιοτικά με τον ορθοφωτοχάρτη της περιοχής που παρουσιάζει με ανάλυση 10 cm την υφή της περιοχής. Η δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου παρέχει επίσης πολλές δυνατότητες για την παραγωγή επιπλέον προϊόντων εκτός των 26 τομών που δημιουργήθηκαν. Παράλληλα η χρήση του τρισδιάστατου φωτορεαλιστικού μοντέλου σε μορφή παρέχει τη δυνατότητα παρακολούθησης και επίβλεψης ολόκληρης της περιοχής χωρίς τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι με τη χρήση διαφορετικών τεχνολογιών και μεθόδων (φωτογραμμετρία και laser scanning), είναι δυνατή η παραγωγή ενός πλήρους και ακριβούς ΨΜΕ με χωρική ανάλυση 30 cm, σε μια περιοχή μήκους 4,5 km. Παράλληλα με τη χρήση των παραπάνω τεχνολογιών αντιμετωπίζονται οι ιδιαίτερες περιβαλλοντολογικές συνθήκες κυρίως λόγω βλάστησης και προσβασιμότητας, παρέχοντας ένα προϊόν που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μια πληθώρα επιστημόνων για περαιτέρω μελέτη του προβλήματος.

Βιβλιογραφία

- Bitelli, G., Dubbini, M. and Zanutta, A. (2004) Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. Proceedings of XX ISPRS Congress, pp. 246-251.
- Giussani, A., Scaioni, M (2004) Applications of TLS to Support Landslides Study: Survey Planning, Operational Issues and Data Processing. Proceedings of the ISPRS working group VIII/2. VOLUME XXXVI, PART 8/W2 pp 318-323.
- Patias, P., Georgoula, O., Kaimaris, D., Georgiadis Ch., Stylianidis, S., Stamnas, A. 2008. 3D Mapping Using Model Helicopter and laser scanning: Case study activities of the laboratory of Photogrammetry and Remote Sensing, AUT. VSMM 2008 Conference on Virtual Systems and Multimedia Dedicated to Digital Heritage, Limassol, Cyprus, October 20-25, 2008 (short papers) pp 1-5.
- P. Patias, Georgoula O , Georgiadis C , Stamnas A , Tassopoulou M, Photogrammetric documentation and digital representation of excavations at keros island in the Cyclades, 22th Cipa Symposium, Kyoto, Japan 2009.
- Young Adam P., M.J. Olsen, N. Driscoll, R.E. Flick, R. Gutierrez, R.T Guza, E. Johnstone, and F. Kuester, Comparison of Airborne and Terrestrial Lidar Estimates of Seacliff Erosion in Southern California. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 76, no. 4, April 2010, pp 421-427.