



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ, ΤΜΗΜΑ
ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

Καταγραφή της εδαφικής παραμόρφωσης λόγω της σεισμικής ακολουθίας του 1953 στην νήσο Κεφαλληνία

Πτυχιακή εργασία του Γεώργιου Χαρβαλή

Επιβλέπων καθηγητής : Παρχαρίδης Ισαάκ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ τα άτομα που ενδιαφέρθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας αυτής, αρχικά τον επιβλέπων αναπληρωτή καθηγητή, Ισαακ Παρχαρίδη για τις συμβουλές πάνω στον τρόπο δουλειάς, και τον Pierre Briole που έκανε εύστοχες παρατηρήσεις και σχόλια πάνω στην διαδικασία επεξεργασίας των αρχικών δεδομένων.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ στον κύριο Δημήτρη Παρώνη από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών για το ενδιαφέρον του και την αμέριστη βοήθεια του, όπως και στον Παναγιώτη Ηλία για τα χρήσιμα σχόλιά του.

Ακόμα ευχαριστίες οφείλονται στους, Βαγγέλη Παπαδιά, Εύη Τριπολίτη, Εβελίνα Μωραϊτίνη, Δημήτρη Βαίου, Κωσταντίνο Πανούση όπως και στις Ξένη και Γεωργία Τάραμα.

Ευχαριστώ όλους όσους με βοήθησαν το διάστημα της φοίτησής μου στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο κάνοντας την φοίτηση εφικτή και δημιουργώντας ένα ευχάριστο περιβάλλον όπου θα το θυμάμαι για πολύ καιρό ακόμα.

Τέλος ευχαριστώ τον αναγνώστη, μην διστάζοντας να ρωτήσει για οποιαδήποτε απορία του δημιουργηθεί κατά την ανάγνωση της παρούσας εργασίας.

Αφιερώνω το παρόν κείμενο και την προσπάθειά μου στην Π.Ι.Τ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ABSTRACT	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΤΟΥ 1953	6
ΔΕΔΟΜΕΝΑ	10
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	15
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	24
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	32
ΣΥΖΗΤΗΣΗ	39
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	42
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	43

ABSTRACT

The activity of the crust of the earth is a dynamically changing phenomenon. Either volcanic activity, earthquakes, or landslides, there is always immediate or implicit impact on people's lives. A variety of methods including geodesy, seismology, optical or radar remote sensing or gps field observations can be used to extract useful information. Such information, has high level of importance for understanding and interpreting earth surface changes.

Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation (Cosi-Corr) is a procedure described from Leprince et al., 2007 in order to accurately estimate displacements of a satellite or aerial image pair in sub-pixel level. The same Sub-pixel Correlation Technique is used for Synthetic Aperture Radar satellite images, in specifically the SAR amplitude images for measuring coseismic ground displacement (R. Michel, Avouac, 1999). Applications of the Sub-pixel Correlation Technique include horizontal deformation from earthquake (van Puymbroeck et al., 2000), (Goudarzi, 2010), monitoring motion of mountain glaciers (Berthier et al., 2005), sand dune migration (Crippen and Blom, 1991) and landslide movement measurements over time (C. Delacourt et al., 2004). My general research objective is to reveal such horizontal surface displacements, with the use of airborne historic imagery for the great seismic event of Cephalonia in 12/8/1953. Also to evaluate the processes of cosi-corr and its results, giving additional information on a catastrophic seismic event that continues to be a "black box".

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η δραστηριότητα του φλοιού της γης είναι ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο φαινόμενο. Είτε από την σεισμική, είτε από ηφαιστειακή δραστηριότητα, είτε από κατολισθήσεις, υπάρχει πάντα άμεση ή έμμεση επίπτωση στον τρόπο ζωής των ανθρώπων. Ένα μεγάλο εύρος επιστημών και εργαλείων όπως γεωδαισία, σεισμολογία, τηλεπισκόπηση, μετρήσεις gps χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών. Πληροφοριών ύψιστης σημασίας για την κατανόηση και ερμηνεία των εδαφικών αλλαγών.

Το *cosi-corr* (εργαλείο συμπροσαρμογής οπτικών εικόνων και χωρικής διασυσχέτισης) είναι μια διαδικασία που περιγράφεται από Leprieux et al., 2007 για την εκτίμηση και καταγραφή εδαφικών μετατοπίσεων σε επίπεδο υπο-εικονοστοιχείου με την χρήση δορυφορικών εικόνων ή αεροφωτογραφιών. Η ίδια τεχνική χρησιμοποιείται σε εικόνες SAR (ραντάρ συνθετικού ανοίγματος) για την μέτρηση συν-σεισμικών μετατοπίσεων (R. Michel, Anouas, 1999). Εφαρμογές αυτής της τεχνικής έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για εύρεση οριζόντιας μετατόπισης από σεισμό (van Ruymbroeck et al., 2000), (Goudarzi, 2010), παρακολούθηση παγετωνικών ροών (Berthier et al., 2005), μετανάστευση αμμοθινών (Crippen and Blom, 1991) και διαχρονική παρακολούθηση αργών κατολισθήσεων (C. Delacourt et al., 2004). Το γενικό ερευνητικό αντικείμενο αυτής της μελέτης είναι η καταγραφή των εδαφικών μετατοπίσεων του σεισμού της Κεφαλλονιάς στις 12/8/1953 με την χρήση ιστορικών αεροφωτογραφιών. Επίσης η αξιολόγηση της μεθόδου του *cosi-corr* και των αποτελεσμάτων, προσφέροντας επιπρόσθετη γνώση για ένα καταστροφικό σεισμικό γεγονός που μέχρι και σήμερα θεωρείται “μαύρο κουτί”.

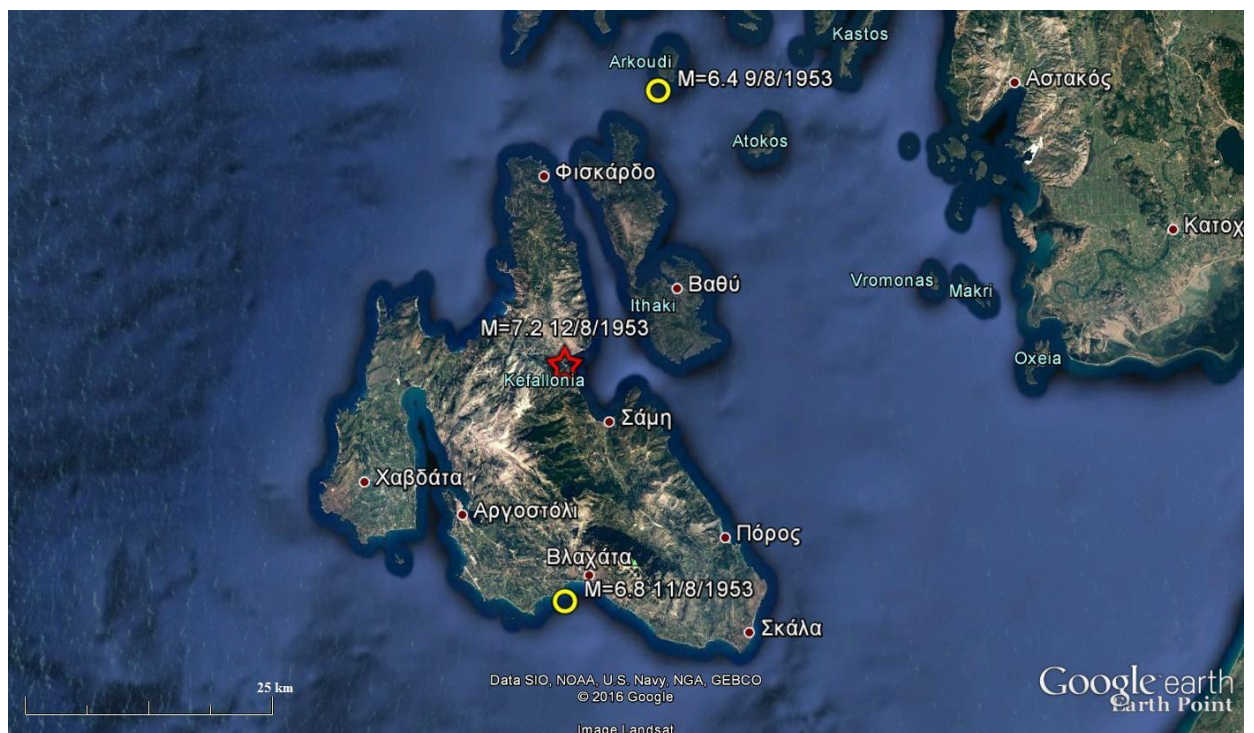
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις 12/8/1953 κύριος σεισμός έντασης 7.2 ρίχτερ έπληξε τα Ιόνια νησιά προκαλώντας σχεδόν την ολοσχερή καταστροφή τεχνικής και κοινωνικής υποδομής. Τα θύματα ανήλθαν σε 455 νεκρούς και 2.412 τραυματίες. Κεφαλληνία, Ιθάκη, και Ζάκυνθος υπέστησαν πρωτοφανή καταστροφή. Η εδαφική παραμόρφωση που προκλήθηκε από αυτό τον σεισμό, το ρήγμα που τον προκάλεσε, το ακριβές επίκεντρο καθώς και ο μηχανισμός γένεσης (McKenzie, 1972) που θα βοηθούσαν στην κατανόηση του συμβάντος δεν έχουν επαρκώς μελετηθεί. Η προσπάθεια που γίνεται στην παρούσα εργασία έχει σκοπό να συμβάλει προστιθέμενα στις ήδη υπάρχουσες μελέτες διαφωτίζοντας μια πλευρά που έως τώρα δεν είχε θιγεί. Η εύρεση της περιοχής όπου υπέστη τις μεγαλύτερες οριζόντιες μετατοπίσεις αλλά και ενδείξεις για το ποια είναι η πιθανή περιοχή του ρήγματος είναι σημαντικές παράμετροι, όπου σε συνδυασμό με παλαιότερα δεδομένα ενδεχομένως να βοηθήσουν στην περαιτέρω κατανόηση του σεισμού του 1953. Επιχειρείτε ο εντοπισμός και η μέτρηση οριζόντιων εδαφικών παραμορφώσεων σαν αποτέλεσμα της εκτόνωσης από την ακολουθία των σεισμικών γεγονότων του 1953. Παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία και διαδικασία επεξεργασίας αεροφωτογραφιών και τα ενδιάμεσα παράγωγά τους με την μέθοδο της χωρικής διασυσχέτισης σε επίπεδο υπο-εικονοστοιχείου ή sub-pixel correlation technique (Sébastien Leprince et. al 2007). Κύριος στόχος είναι η προσπάθεια ερμηνείας και αξιολόγησης της μεθόδου, των αποτελεσμάτων και των περιορισμών που υπάρχουν για την συγκεκριμένη εργασία.

Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΤΟΥ 1953

Την Κυριακή 9-8-1953 9.41 σημειώθηκε σεισμική δόνηση έντασης $M=6.4$ με επίκεντρο το Σταυρό Ιθάκης προκαλώντας μεγάλες ζημιές στην περιοχή της Ιθάκης, Σάμης και Πύλαρο Κεφαλληνίας. Η δεύτερη στις 11 Αυγούστου 03:32 έντασης $M=6.8$ προκάλεσε μεγάλες ζημιές στην περιοχή του Αργοστολίου, στο Ληξούρι όπως και Ζάκυνθο. Στις 12 Αυγούστου συνέβη ο κύριος και καταστροφικότερος σεισμός $M=7.2$ με επίκεντρο την Αγία Ευφημία (Εικόνα 1). Την ίδια και αρκετές μέρες αργότερα, μετασεισμοί εντάσεων μέχρι και 6 τις κλίμακας ρίχτερ ακολουθούν.

Τα θύματα ανήλθαν σε 455 νεκρούς και 2.412 τραυματίες. Κεφαλληνία, Ιθάκη, και Ζάκυνθος υπέστησαν πρωτοφανή καταστροφή. Από τις συνολικά 33.300 κατοικίες των τριών νήσων καταστράφηκαν περίπου οι 29.000. Στην συνέχεια ακολουθούν και άλλα φαινόμενα όπως πυρκαγιά στην πόλη της Ζάκυνθου και κατολισθήσεις στην Κεφαλληνία και στην Ιθάκη ενώ το μεγαλύτερο μέρος του οδικού δικτύου της Κεφαλλονιάς είχε καταστραφεί. Η περίπτωση των Ιονίων νήσων υπήρξε μία άνευ προηγουμένου –σε κλίμακα και έκταση- καταστροφή που εκτός από ανθρώπινα θύματα, προκάλεσε δραματικές για τα δεδομένα των νησιών πληθυσμιακές και δημογραφικές ανακατατάξεις, δραστική αλλοίωση της οικονομικής δομής των πληγεισών περιοχών και ολοσχερή απώλεια ενός πλούσιου κτιριακού και πολιτισμικού αποθέματος (Ηλίας Μπεριάτος, 2010).



Εικόνα 1. Τα επίκεντρα των τριών συμβάντων της σεισμικής ακολουθίας του 1953 (Parazachos, Παραϊοαννου, 1997).

Αναλυτικότερα, από τα 33.300 σπίτια των νησιών αυτών καταστράφηκαν εντελώς, τα 27659, 2780 υπέστησαν σοβαρές καταστροφές, 2394 επλήγησαν ελαφρά και μόνο 467 σώθηκαν. Σκοτώθηκαν 455 άνθρωποι, εξαφανίσθηκαν 21 και τραυματίστηκαν 2412. Στην Λευκάδα βλάφτηκαν σοβαρά 122 σπίτια και 341 ελαφρά. Οι ζημιές επεκτάθηκαν στην Αιτωλία όπου επλήγησαν 18 οικισμοί ενώ στην Ηλεία 46 οικισμοί. Στην Αιτωλία 60 σπίτια καταστράφηκαν και 293 έπαθαν ζημιές, ενώ στην Ηλεία καταστράφηκαν 50 σπίτια και με ελαφρές ζημιές 1546. Σε πολλά σημεία στην περιοχή της ανατολικής και νότιας ακτής της Κεφαλλονιάς παρατηρήθηκαν σαφή ίχνη έξαρσης της νοτιοανατολικής ακτής μέχρι και 70 εκατοστά (S.C.Stiros, P.A. Pirazzoli et al., 1994), Εικόνα 50.

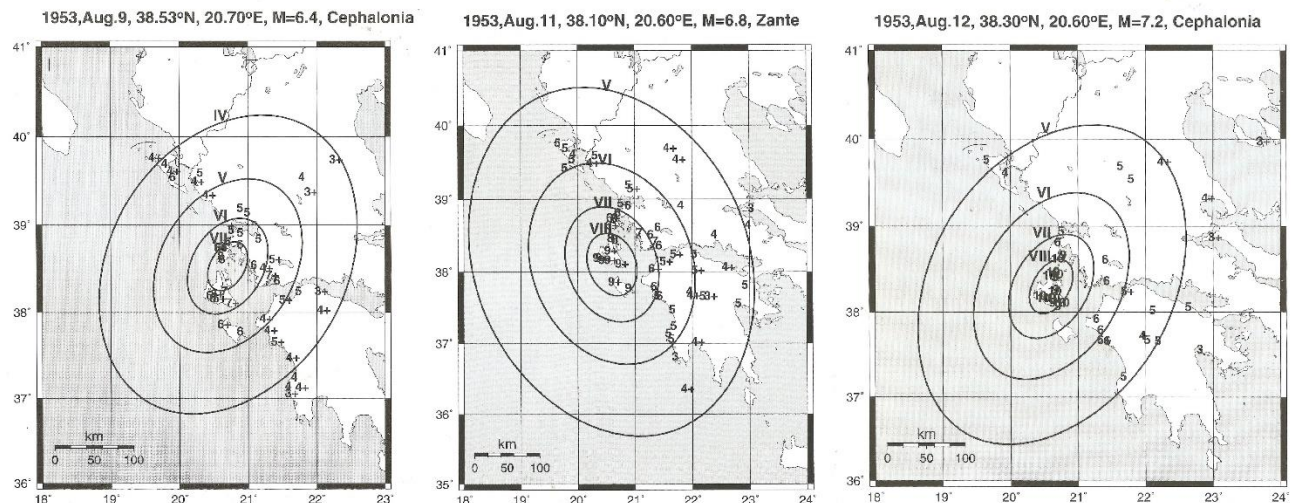
Οι μεγαλύτερες εντάσεις (IX-X) στην κλίμακα Modified Mercalli (MM) παρατηρήθηκαν στο Αργοστόλι, Ληξούρι, Βαλσαμάτα, Ασπρογέρακα, Χάβδατα και Αγία Ευθυμία και τις Βολιμες Ζακύνθου καθώς και στην πόλη της Ζακύνθου IX. Ο κύριος σεισμός έγινε αισθητός και στην κάτω Ιταλία.

Σύμφωνα με τον ορισμό των εντάσεων από την USGS το X στην κλίμακα MM σημαίνει 'εξαιρετικά καταστροφικός': τα περισσότερα κτίρια καταστρέφονται. Πτώση μερικών καλών κατασκευών, ανθεκτικών ξύλινων κτιρίων και γεφυρών. Σχεδόν όλες οι κατασκευές τοιχοποιίας και τα προκατασκευασμένα κτίσματα καταρρέουν μέχρι θεμελίων. Σοβαρές ζημιές στο οδικό δίκτυο και σε φράγματα, υδροφράκτες και αναχώματα. Οι σιδηροτροχιές κάμπτονται. Μεγάλες κατολισθήσεις.

Date	φ°_N	λ°_E	h(km)	M	I_0	e	ξ	N	RMS	Area
1932, Sep. 26	40.45	23.76	5	7.0	9.9	0.66	110	45	1.2	Hierissos
1932, Sep. 29	40.97	23.23	5	6.2	9.5	0.60	80	34	0.5	Sohos
1933, May 11	40.62	23.53	4	6.3	9.6	0.72	113	56	0.6	Volvi
1938, July 20	38.29	23.79	11	6.0	8.3	0.74	87	22	0.6	Oropos
1941, Mar. 1	39.67	22.54	11	6.3	8.4	0.75	143	36	0.4	Larisa
1947, Oct. 6	36.96	21.68	30	7.0	8.1	0.76	126	25	0.8	Pylia
1953, Jan. 7	41.29	20.60	(7)	5.6	7.2	0.90	176	14	1.0	Yugoslavia
1953, Mar. 18	40.02	27.53	7	7.4	9.9	0.82	79	113	1.1	NW. Turkey
1953, June 13	38.08	22.63	6	5.5	7.2	0.83	114	31	0.8	Xylokastro
1953, Aug. 9	38.53	20.70	11	6.4	8.2	0.74	30	47	0.9	Cephalonia
1953, Aug. 11	38.10	20.60	6	6.8	10.6	0.70	159	59	0.7	Zante
1953, Aug. 12	38.30	20.60	10	7.2	9.4	0.78	30	43	1.1	Cephalonia
1953, Sep. 5	37.90	23.00	4	5.8	7.9	0.79	80	62	0.8	Isthmia

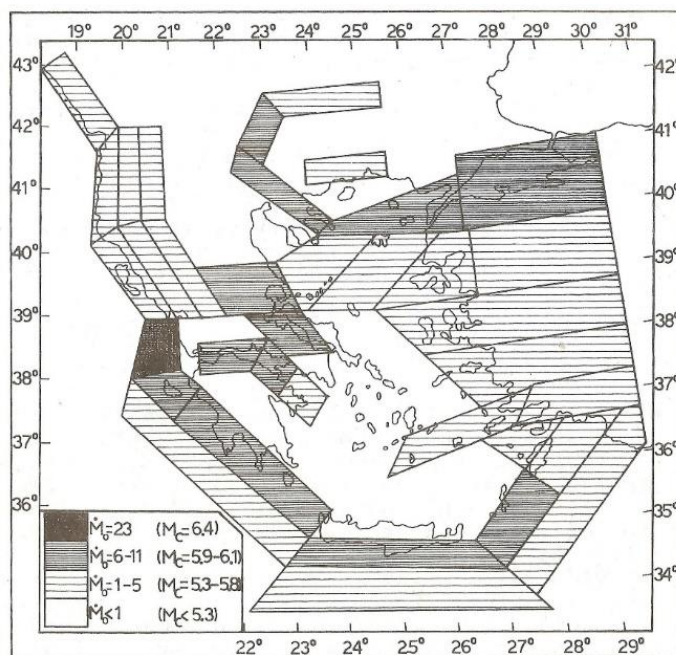
Εικόνα 2. Τα επίκεντρα όπως και ισόσειστες των τριών μεγαλύτερων συμβάντων της ακολουθίας (Παπαζάχος, 1999)

Ισόσειστες των δύο μεγαλύτερων προσεισμών και του κύριου σεισμού παρατίθενται στον Άτλαντα του εργαστηρίου γεωφυσικής του ΑΠΘ parazachos et al. 1982 (Εικόνα 3). Τα επίκεντρα των τριών μεγαλύτερων συμβάντων της ακολουθίας εντοπίζονται στις Εικόνα 1 βάση της Εικόνα 2 (Παπαζάχος, 1999).

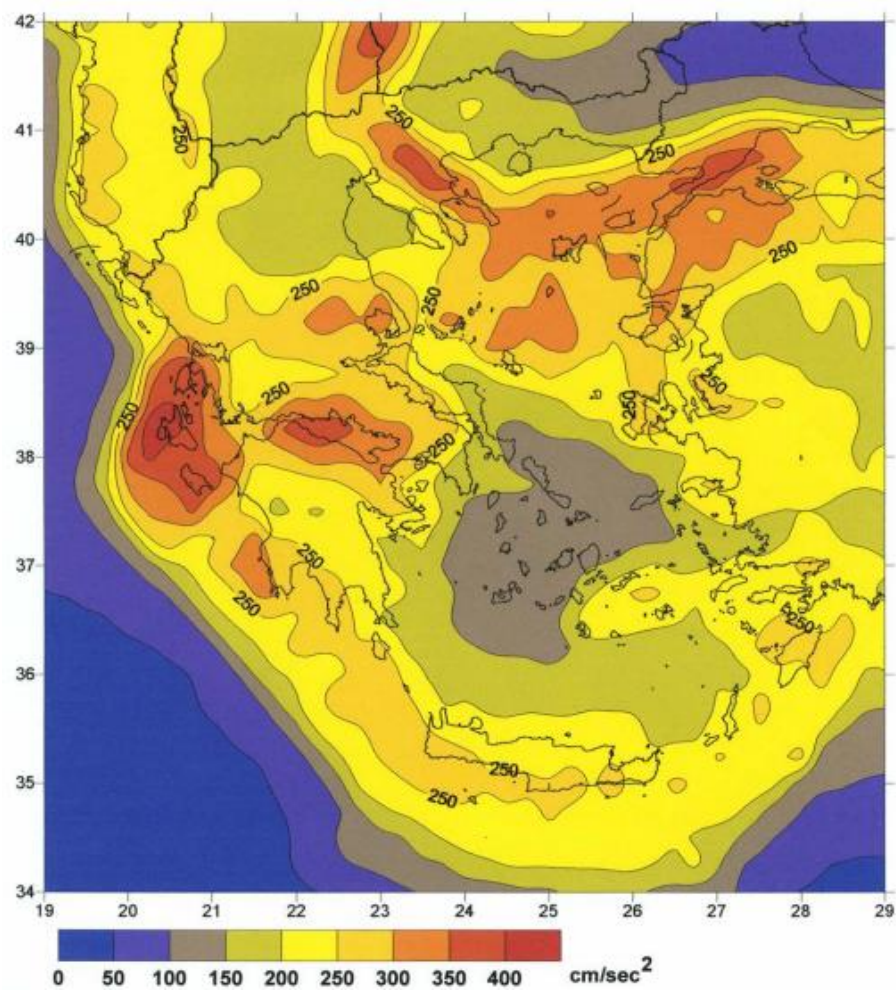


Εικόνα 3. Ισόσειστες των δύο μεγαλύτερων προσεισμών και του κύριου σεισμού στην κλίμακα Modified Mercalli (Παπαζάχος, 1999)

Αυτό το συμβάν υπήρξε το έναυσμα για τον Ελληνικό αντισεισμικό σχεδιασμό ο οποίος είναι αυστηρότερος στα Ιόνια νησιά σε σχέση με την υπόλοιπη Ελλάδα (Ε. Sokos et al. 2014). Στην Εικόνα 5 Κεφαλλονιά, Ζάκυνθος και Λευκάδα βρίσκονται στην περιοχή των μέγιστων οριζοντίων επιταχύνσεων που παρατηρούμε στον Ελλαδικό χώρο. Επίσης η ίδια περιοχή έχει την μεγαλύτερη έκλυση σεισμικής ροπής ανά μονάδα επιφανείας στον Ελλαδικό και ευρύτερο χώρο (Παπαζάχος, 1999) (Εικόνα 4).



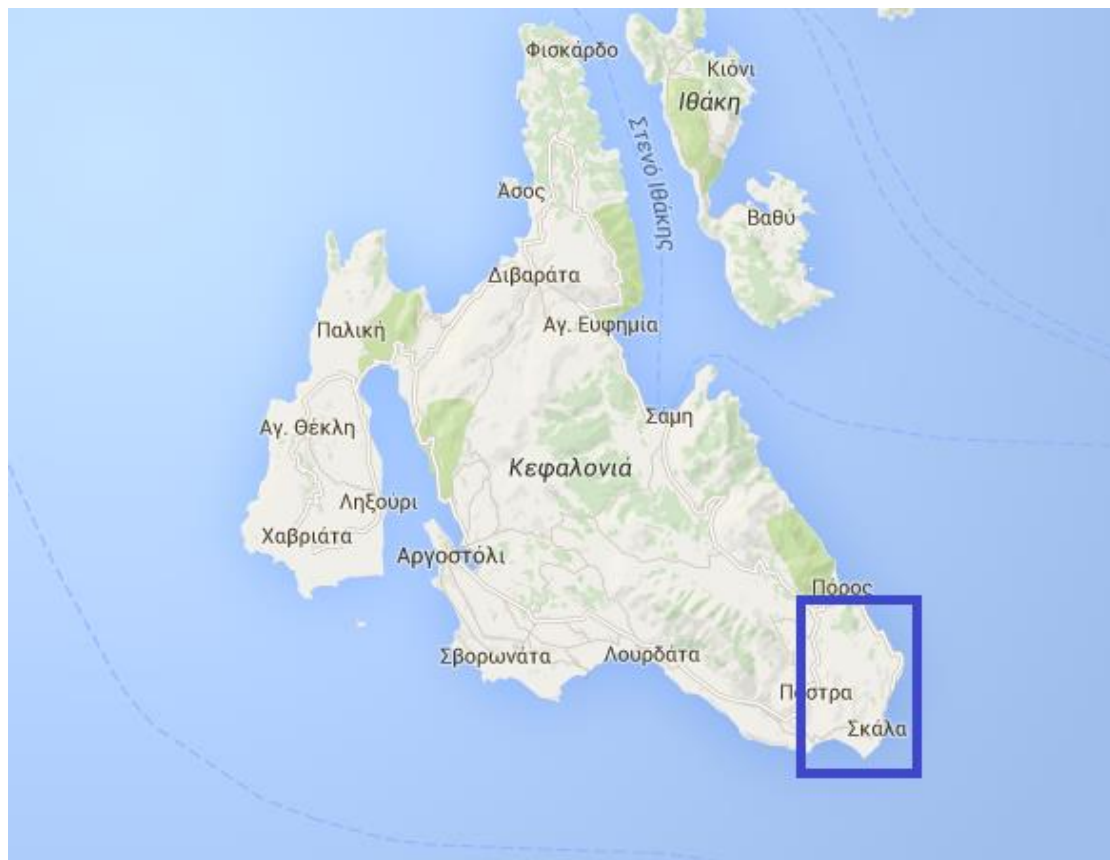
Εικόνα 4. Σεισμικότητα των διάφορων σεισμικών ζωνών επιφανειακών σεισμών του ελληνικού χώρου και των γύρω περιοχών, όπως αυτή εκφράζεται με την ετήσια έκλυση της σεισμικής ροπής ανά επιφάνεια 10.000 km² (Παπαζάχος, 1999)



Εικόνα 5. Γεωγραφική κατανομή του μέσου όρου των μέγιστων οριζοντίων επιταχύνσεων σε(cm/sec^2) στην Ελλάδα και στις γύρω περιοχές (πηγή: <http://www.oasp.gr/>)

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

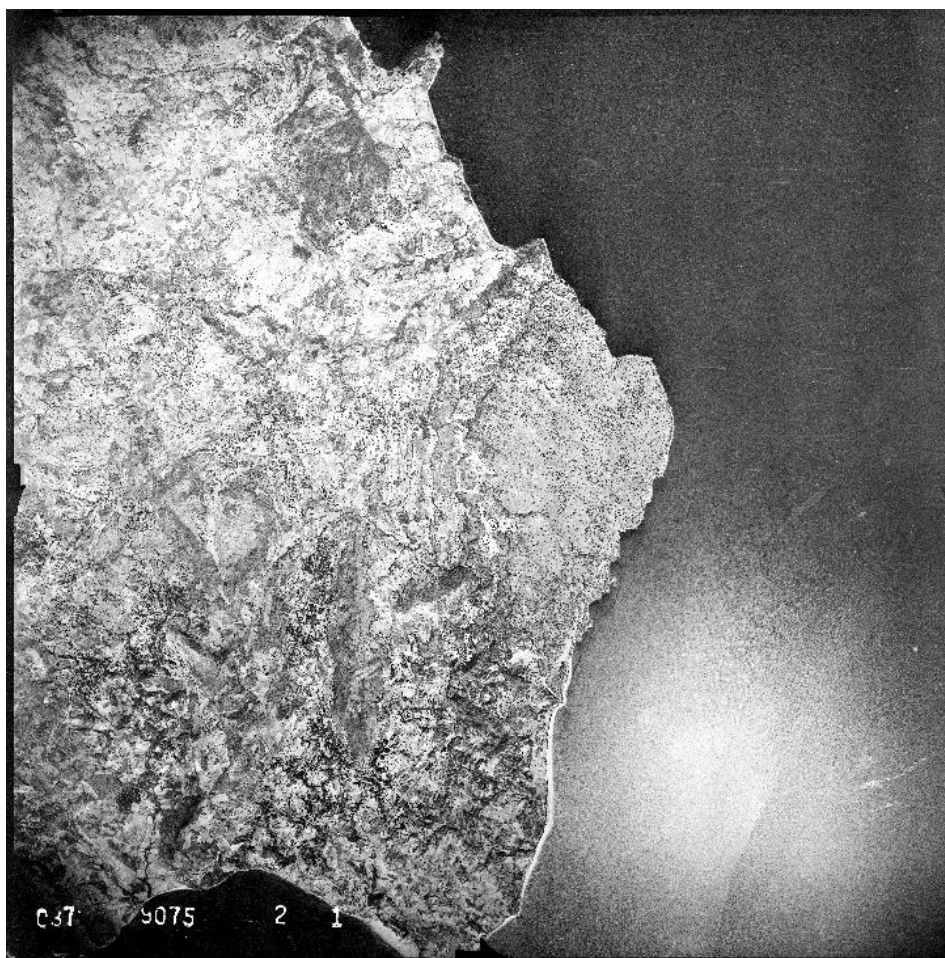
Η περιοχή μελέτης εντοπίζεται στην νοτιοανατολική Κεφαλλονιά όπως φαίνεται στην Εικόνα 6 . Η επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής νότια της πόλης του Πόρου έγινε με βάση αναφορές και μετρήσεις από τους Stiros, Pirazzoli, Laborel σε μεγάλο μέρος του νησιού με σκοπό να καταγράψουν τις περιοχές μέγιστης εδαφικής ανύψωσης. Καθοριστικό ρόλο όμως στην επιλογή της περιοχής ήταν η ύπαρξη αεροφωτογραφιών πριν και μετά την σεισμική ακολουθία του 1953, παρόμοιας κλίμακας, με μεγάλη αλληλοεπικάλυψη, σε χρονολογίες κοντά στην ημερομηνία της σεισμικής ακολουθίας και με δυνατότητα ψηφιοποίησής τους από την εκάστοτε υπηρεσία που διαθέτει τα δεδομένα .



Εικόνα 6. Περιοχή μελέτης (πηγή: Google Maps)

Μετά από έρευνα στην Γ.Υ.Σ. και σε άλλες υπηρεσίες για την διαθεσιμότητα των δεδομένων εκείνης της περιόδου επιλέχθηκαν δύο λήψεις που πληρούσαν τα παραπάνω κριτήρια. Οι οποίες είναι η Εικόνα 7 για το έτος 1945 και η Εικόνα 9 για το έτος 1960.

f170_9075_2_1_037_1945_42000
Έτος λήψης: 1945
Κλίμακα: 1/42000
Μέγεθος: 14487 x 14581 (Byte)



Εικόνα 7. Σκαναρισμένη αεροφωτογραφία της Γεωγραφικής υπηρεσίας στρατού f170_9075_2_1_037_1945_42000 της νοτιοανατολικής Κεφαλλονιάς

Θυρίδα 3. Φωτοταινία 170

1ον Τμήμα

(19 RS -41 -9075/2-1) (28 ANG 45) (GMT-0831 -0841)
(152.6-22,000) (28° 13' B-20 20 A/38 13 N-20 49 A) (913 A)
Αριθ. φωτογρ. 001 - 012 9075 2 - 1

2ον Τμήμα

(19 RS -41 -9075/2-1) (28 ANG 45) (GMT-0858 - 0907')
(152.6-22,000) (28° 10' B- 22' 20 A/38 10 B-20 49 A) (913 A)
Αριθ. φωτογρ. 013 - 025 9075 2 - 1

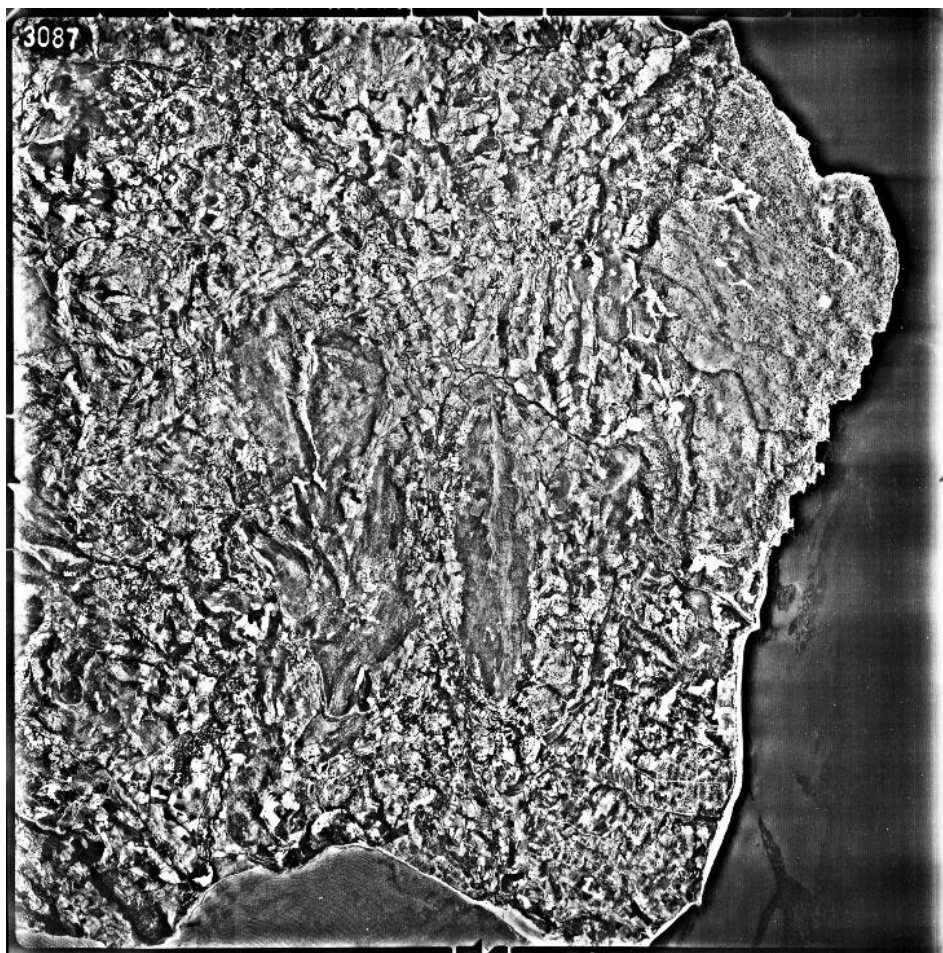
3ον Τμήμα

(19 RS- 41 -9075/2-1) (28 ANG 45) (GMT-0911- 0919)
(152.6-22,000) (28° 07 B-20 19 A/38 07 B-20 49 A) (913 A)
Αριθ. φωτογρ. 026 - 038 9075 2 - 1

./.

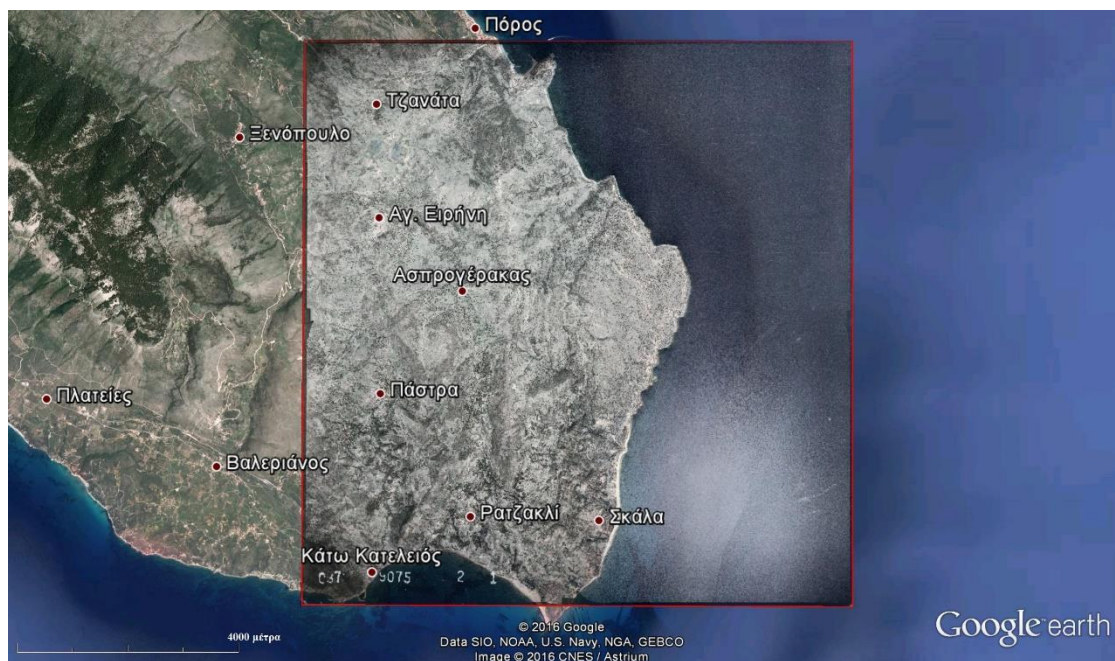
Εικόνα 8. Δεδομένα πτήσης και μετρικών χαρακτηριστικών της κάμερας για την στιγμή της λήψης f170_9075_2_1_037_1945_42000 (πηγή: Γεωγραφική υπηρεσία στρατού)

3087_1960_30000
Έτος λήψης: 1960
Κλίμακα: 1/30000
Μέγεθος: 14659 x 14675 (Byte)



Εικόνα 9. Σκαναρισμένη αεροφωτογραφία της Γεωγραφικής υπηρεσίας στρατού 3087_1960_30000 της νοτιοανατολικής Κεφαλλονιάς

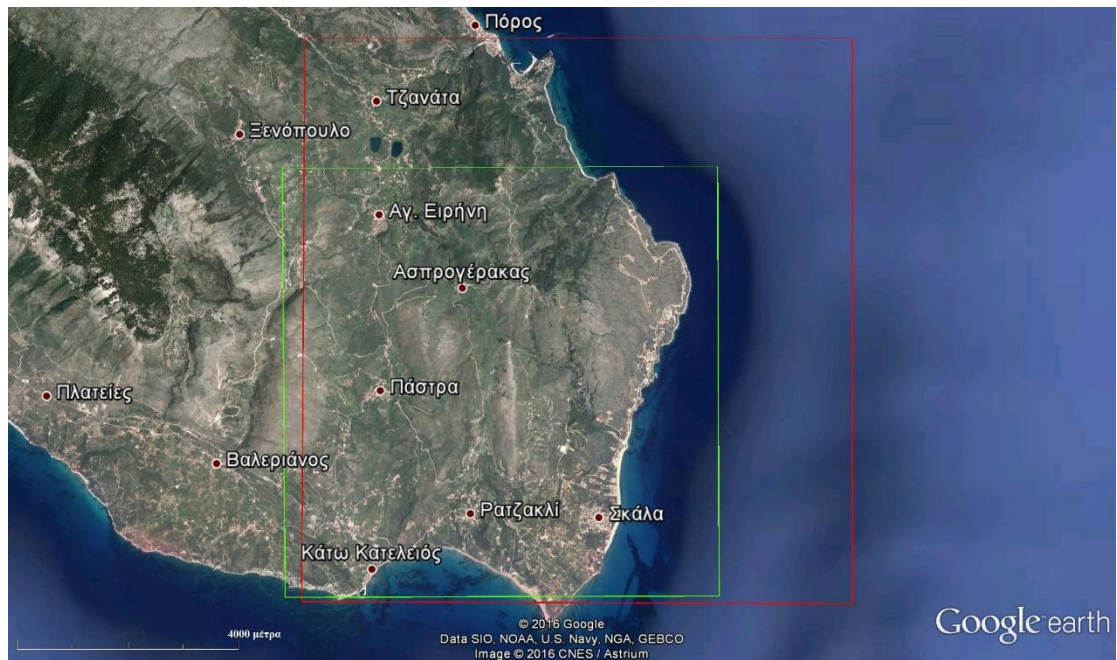
Κατά την παραγγελία των αεροφωτογραφιών από την Γ.Υ.Σ. ζητήθηκαν τα δεδομένα βαθμονόμησης των λήψεων καθώς και οποιαδήποτε πληροφορία κατά την διαδικασία σάρωσής τους που θα βοηθούσε σημαντικά στην επεξεργασία τους. Υπήρχαν διαθέσιμα η φωτοταινία της λήψης του 1945 (Εικόνα 8) με δεδομένα όπως η ώρα, το ύψος πτήσης, και η εστιακή απόσταση της κάμερας. Δυστυχώς και στις δυο λήψεις τα δεδομένα από τα όργανα του αεροπλάνου την στιγμή της λήψης έχουν κοπεί από το φίλμ και δεν είναι πάντα διαθέσιμα. Όμως μετά από έρευνα και με την βοήθεια της Γ.Υ.Σ. στις λήψεις που έγιναν την ίδια μέρα με την ίδια μετρική κάμερα στις λήψεις του 1960 βρέθηκε πως η εστιακή απόσταση της λήψης 3087_1960_30000 είναι 153.035 millimetre. Το αποτύπωμα των λήψεων φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 10. Η λήψη f170_9075_2_1_037_1945_42000 προσαρμοσμένη πάνω σε χάρτη (πηγή:google earth)

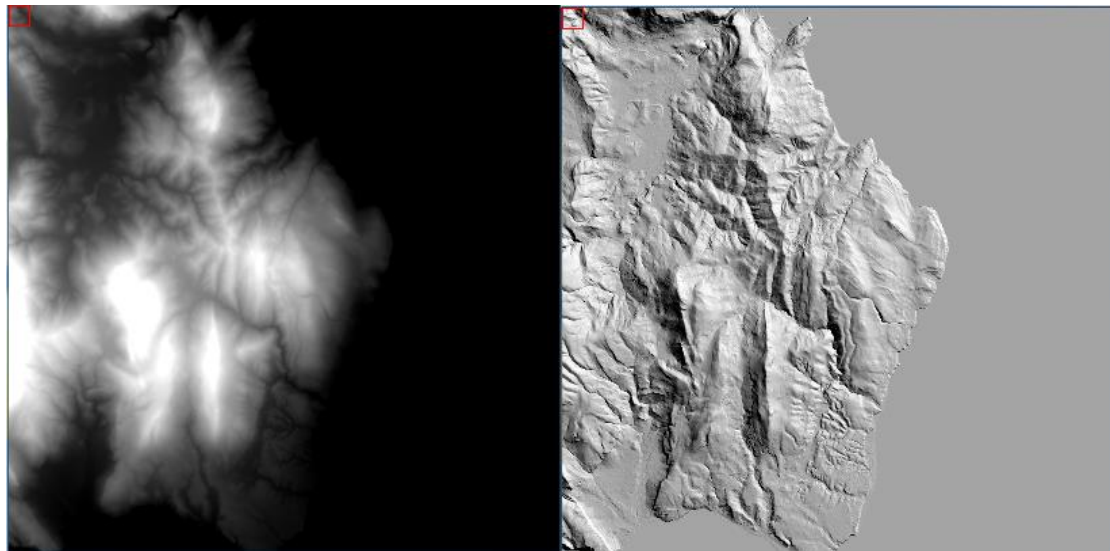


Εικόνα 11. Η λήψη 3087_1960_30000 προσαρμοσμένη πάνω σε χάρτη (πηγή:google earth)



Εικόνα 12. Το αποτύπωμα των περιοχών που καταλαμβάνουν οι δυο αεροφωτογραφίες (πηγή:google earth)

Στα δεδομένα περιλαμβάνεται και ψηφιακό μοντέλο ανάγλυφου υψηλής ανάλυσης της Κεφαλλονιάς μεγέθους ψηφίδας 5 μέτρων σε σύστημα συντεταγμένων UTM WGS-84 όπου περιορίστηκε στην περιοχή μελέτης (Εικόνα 13). Παραχωρήθηκε από τον επιβλέποντα της παρούσας εργασίας.

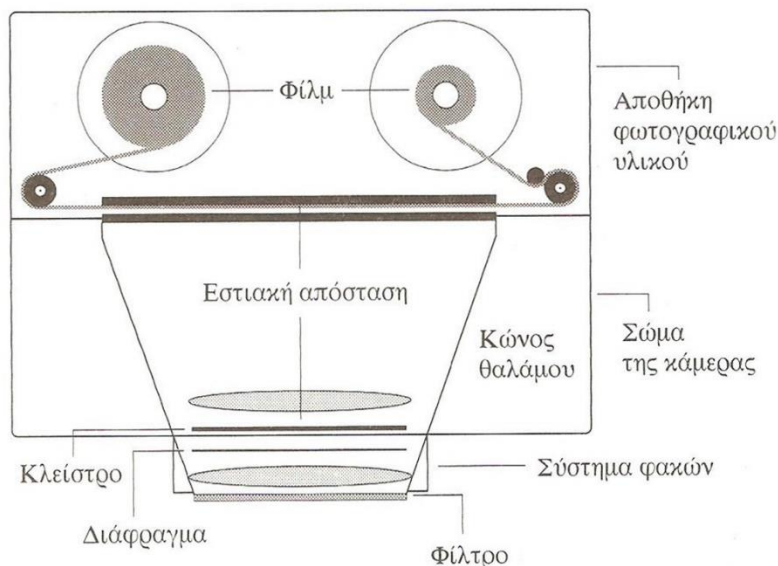


Εικόνα 13. Ψηφιακό μοντέλου ανάγλυφου της περιοχής μελέτης (αριστερά) και σκιασμένο (δεξιά)

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

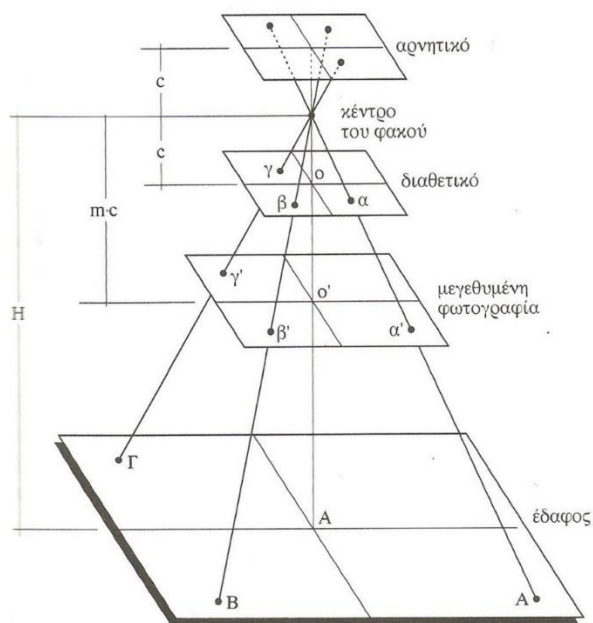
Για την εξοικείωση του αναγνώστη με την ορολογία και τις λειτουργίες της μεθόδου, στις παρακάτω ενότητες εξηγούνται βασικές φωτογραφμετρικές τεχνικές, λειτουργίες και έννοιες τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ευρύτατα στην μεθοδολογία και στην επεξεργασία των δεδομένων.

Χαρακτηριστικά μετρικής φωτομηχανής εναέριων λήψεων



Εικόνα 14. Φωτομηχανή εναέριων λήψεων (Πηγή: Πατιάς, 1991)

Στην Εικόνα 14 παρουσιάζονται τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μια μετρική κάμερα εναέριων λήψεων. Το κέντρο O του φακού ονομάζεται κέντρο προβολής, η απόσταση του επιπέδου σχηματισμού ευκρινούς ειδώλου από τον φακό είναι ίση με την εστιακή απόσταση της φωτογραφικής μηχανής (Εικόνα 15). Η κάθετη από το O στο επίπεδο σχηματισμού του αρνητικού ορίζει την πρωτεύουσα ευθεία, η τομή της με το αρνητικό συμπίπτει με το πρωτεύων σημείο.

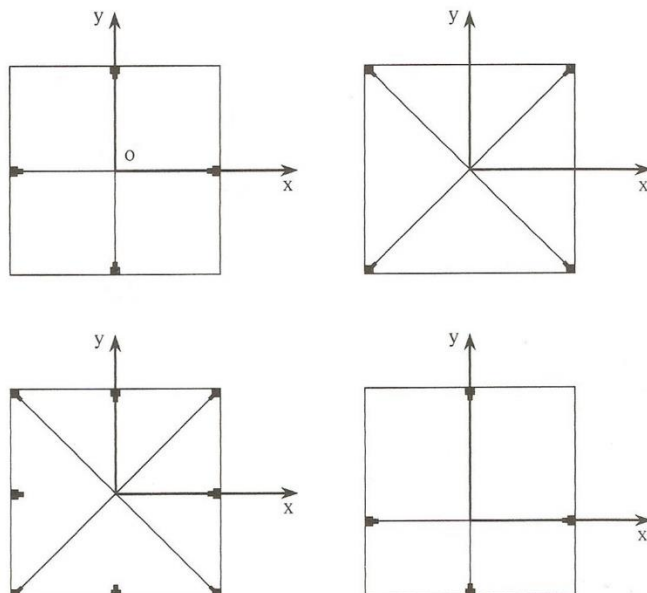


Εικόνα 15. Κλίμακα αυστηρά κατακόρυφης φωτογραφίας (Πηγή: Πατιάς, 1991)

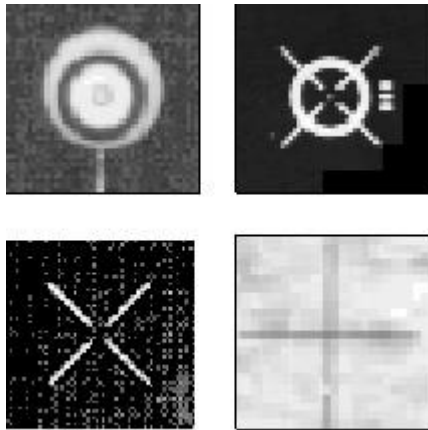
Εικονοσήματα και πρωτεύον σημείο

Με την βοήθεια των εικονοσημάτων ορίζεται στο επίπεδο της φωτογραφίας ένα ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων. Αρχή του συστήματος είναι η τομή των ευθειών που ορίζουν αντιδιαμετρικά εικονοσήματα και ονομάζεται πρωτεύον σημείο.

Τα εικονοσήματα είναι σημεία με σταθερή σήμανση στο εσωτερικό του σώματος της μηχανής μεταξύ του φακού και του αρνητικού και απεικονίζονται στο αρνητικό σε κάθε λήψη (Πατιάς, 1991). Σκοπός τους είναι να προσδιορίζουν τη θέση του πρωτεύοντος σημείου και είναι συνήθως 4 ενώ μερικές μηχανές χρησιμοποιούν μέχρι 8 (Εικόνα 16, Εικόνα 17).



Εικόνα 16. Θέσεις των εικονοσημάτων (Πατιάς, 1991)



Εικόνα 17. Παράδειγματα εικονοσημάτων (πηγή: <http://vision-cdc.csiro.au/changs/fiducial/node1.html>)

Η θέση του πρωτεύοντος σημείου και η εστιακή απόσταση καθορίζουν την εσωτερική γεωμετρία της μηχανής. Η μετρική κάμερα σε αντίθεση με τις κοινές, έχει γνωστή και σταθερή εσωτερική γεωμετρία η γνώση της οποίας είναι απαραίτητη για την εξαγωγή μετρικής πληροφορίας από μια φωτογραφία.

Βαθμονόμηση Μετρικής Κάμερας

Βαθμονόμηση ονομάζεται η διαδικασία προσδιορισμού των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της κάμερας. Σκοπός της είναι να προσδιορίσει γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά της φωτομηχανής. Αυτά είναι τα παρακάτω:

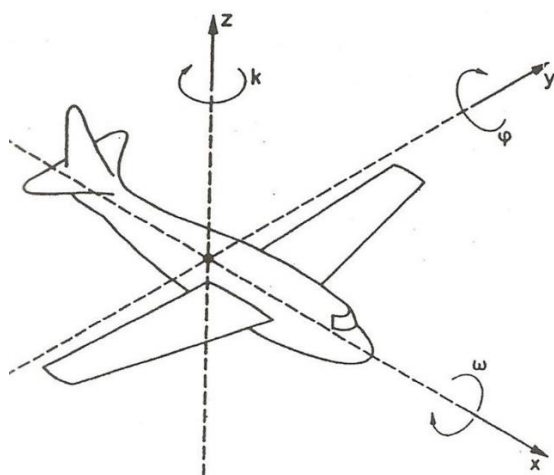
- Εστιακή απόσταση του συστήματος των φακών
- Θέση του πρωτεύοντος σημείου σε σχέση με τα εικονοσήματα
- Παραμόρφωση των φακών
- Η σχετική θέση των εικονοσημάτων μεταξύ τους
- Διακριτική ικανότητα των φακών
- Επιπεδότητα εστιακού επιπέδου

Εσωτερικός και εξωτερικός προσανατολισμός

Εσωτερικός προσανατολισμός ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία αποκαθίσταται η πορεία της φωτεινής ακτίνας μέσα στην φωτομηχανή όπως αυτή υπήρχε κατά την στιγμή της λήψης (Πατιάς, 1991). Αυτό επιτυγχάνεται με την βαθμονόμηση της μηχανής και τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού τα οποία είναι :

- Η βαθμονομημένη εστιακή απόσταση (σταθερά φωτομηχανής)
- Συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου
- Συντεταγμένες των εικονοσημάτων στο σύστημα του φωτογραφικού επιπέδου
- Η ακτινική παραμόρφωση των φακών

Ο εξωτερικός προσανατολισμός μιας φωτογραφίας κατά την διάρκεια μιας λήψης ορίζεται από την θέση του σημείου λήψης στο χώρο και από τον προσανατολισμό του οπτικού άξονα. Η θέση του σημείου λήψης ορίζεται από τις συντεταγμένες x, y, z στο επίγειο σύστημα αναφοράς ενώ ο προσανατολισμός του οπτικού άξονα από τρεις γωνίες ω, ϕ, κ (Πατιάς, 1991). (Εικόνα 18)



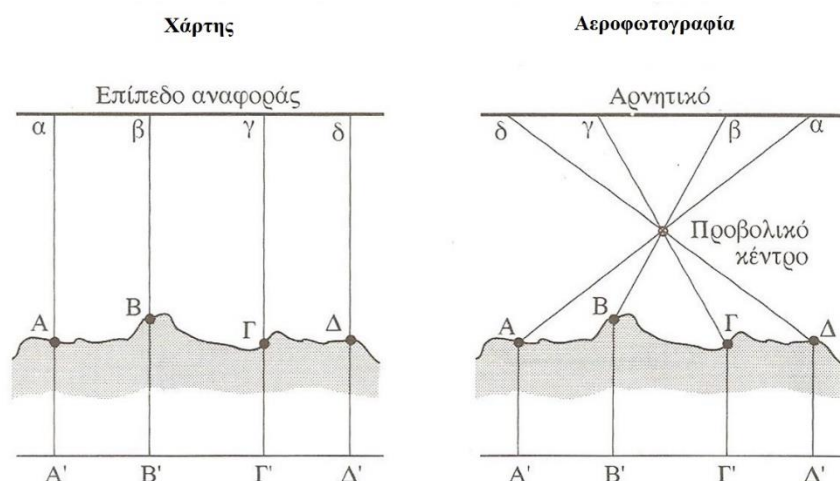
Εικόνα 18. Οι γωνίες στροφής ω, ϕ, κ για το αεροπλάνο (Πηγή : Πατιάς, 1991)

Ο τρόπος για να υπολογιστεί βασίζεται στη μαθηματική σχέση που ονομάζεται συνθήκη συγγραμμικότητας και είναι η σχέση που συνδέει τα σημεία πάνω στην φωτογραφία με τα αντίστοιχα πάνω στο έδαφος.

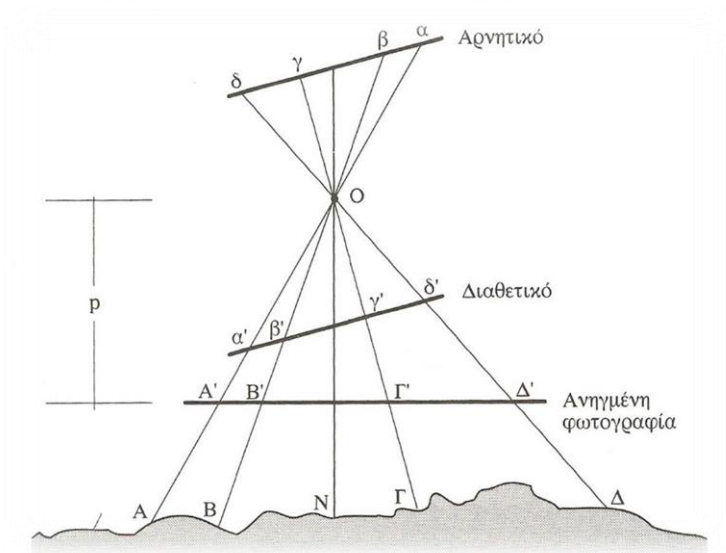
Ο μεν εσωτερικός προσανατολισμός αναφέρεται στην εσωτερική γεωμετρία της μηχανής κατά την στιγμή της λήψης της κάθε φωτογραφίας, ο εξωτερικός αναφέρεται στη σχέση που υπάρχει ανάμεσα στο σύστημα συντεταγμένων της φωτογραφίας και σε ένα αυθαίρετο επίγειο σύστημα αναφοράς.

Αναγωγή εικόνας και επανασύσταση

Η αναγωγή της εικόνας γίνεται με σκοπό τον μετασχηματισμό των συντεταγμένων της εικόνας είτε στο επίγειο σύστημα συντεταγμένων είτε στο σύστημα συντεταγμένων άλλης εικόνας. Ουσιαστικά προσδίδει ιδιότητες χάρτη σε μία αεροφωτογραφία (Εικόνα 19). Η αναγωγή αυτή έχει σκοπό να απαλείψει γεωμετρικά σφάλματα που οφείλονται στον τρόπο που έχουν συλλεχθεί τα δεδομένα και στην γεωμετρία του δέκτη (Εικόνα 20). Συνήθως χρησιμοποιούνται γεωγραφικά μοντέλα όπως αυτό του αφινικού ή κάποιου πολυωνυμικού μετασχηματισμού.



Εικόνα 19. Σχέση χάρτη και αεροφωτογραφίας (πηγή: Πατιάς, 1991)



Εικόνα 20. Κεκλιμένη και κατακόρυφη λήψη (πηγή: Πατιάς, 1991)

Στο στάδιο αυτό διορθώνονται σφάλματα εξαιτίας της κλίσης του μηχανισμού του δέκτη και σφάλματα εξαιτίας του ανάγλυφου, αν υπάρχει υψομετρική πληροφορία. Στο τέλος της διαδικασίας ακολουθεί η επανασύσταση της εικόνας (resampling) με παρεμβολή των καινούργιων τιμών του τόνου σε τετραγωνικό κάνναβο και επιλογή της κατάλληλης κλίμακας.

COSI-CORR

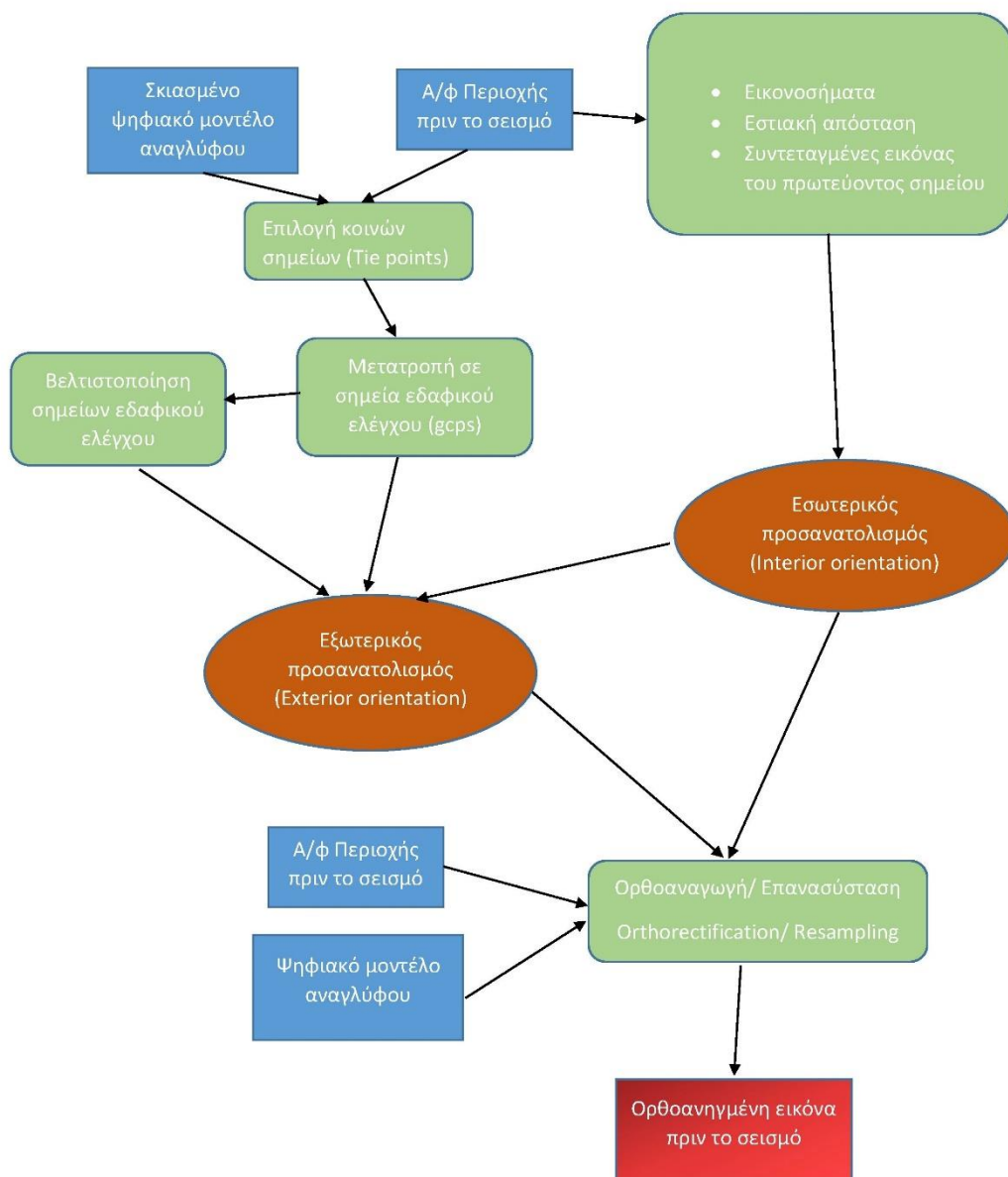
Το πρόγραμμα το οποίο υποστηρίζει τα παραπάνω και στο οποίο γίνεται η επεξεργασία των αεροφωτογραφιών είναι το COSI-CORR.

Το COSI-CORR είναι μια ενότητα λογισμικού ενσωματωμένη στο ENVI Exelis. Παρέχει τα εργαλεία για ορθοαναγωγή, εγγραφή και διασυσχέτιση οπτικών εικόνων (εναέριων και δορυφορικών) με απώτερο στόχο την ανάκτηση πληροφορίας για την διαχρονική εδαφική παραμόρφωση. Τα δικαιώματα ανήκουν στο California Institute of Technology.
(http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/spot_coseis/download_software.html)

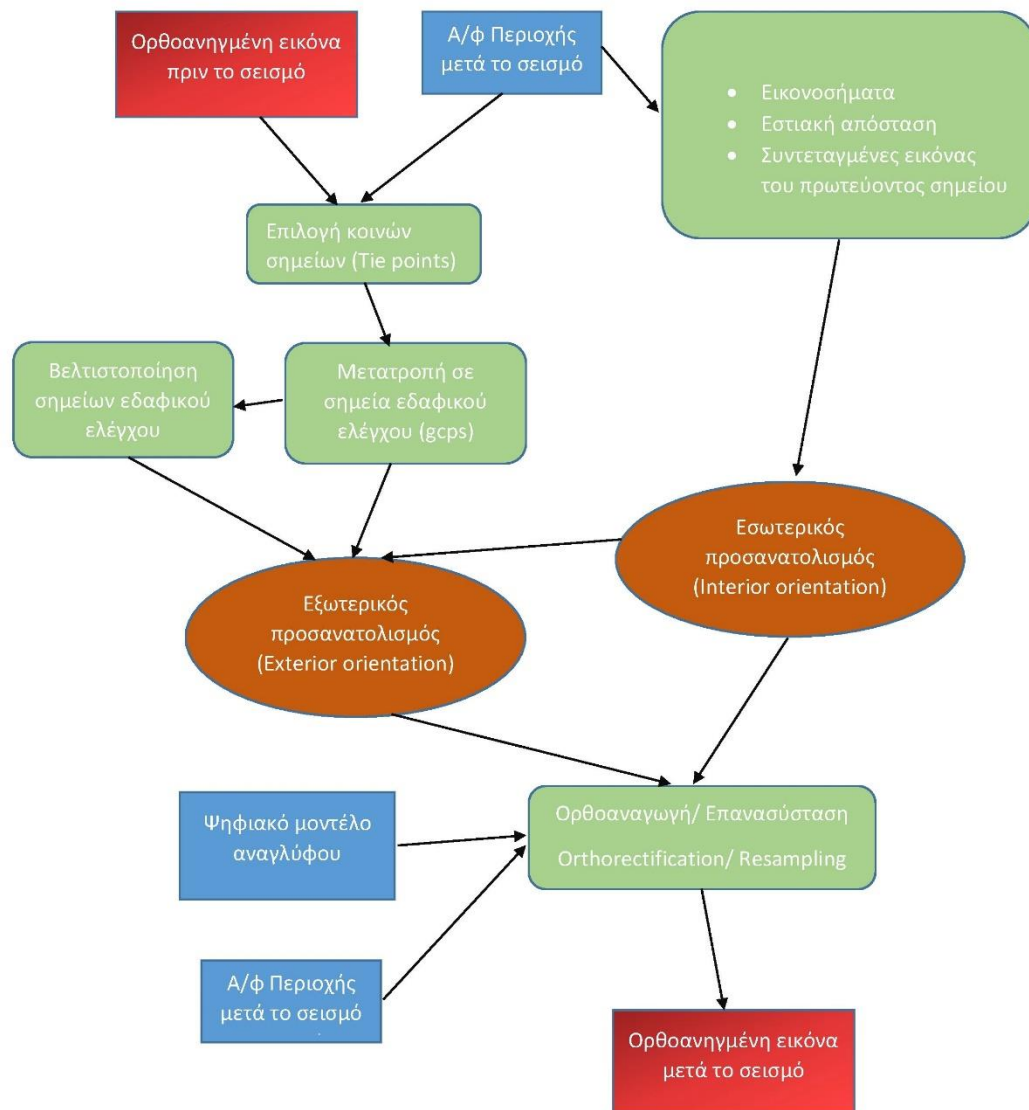
Οι τρεις κύριες λειτουργίες του είναι η ακριβής ορθοαναγωγή, η εγγραφή εικόνας και η χωρική διασυσχέτιση ζεύγους εικόνων. Το εργαλείο χωρικής διασυσχέτισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεξάρτητα, ακόμα και με μη τηλεπισκοπικές εικόνες. Παράλληλα υπάρχουν εργαλεία όπως η επιλογή σημείων εδαφικού ελέγχου, το εργαλείο αφαίρεσης θορύβου, το εργαλείο απεικόνισης διανυσμάτων κ.α. Περιοριστικοί παράγοντες αφορούν τον θόρυβο των αρχικών εικόνων, την ανάλυσή τους, την άγνωστη τοπογραφία της περιοχής μελέτης αλλά και το ότι οι γεωαναφερμένες εικόνες που εισάγονται πρέπει να βρίσκονται σε προβολή UTM WGS-84.

Το λογισμικό είναι προσαρμοσμένο έτσι ώστε να εντοπίζει σεισμικές παραμορφώσεις, κίνηση παγετωνικών ροών, μετανάστευση θινών, κατολισθήσεις, κ.α. Υπάρχει η δυνατότητα ανίχνευσης αλλαγών σε επίπεδο υπο-εικονοστοιχείων, αναλόγως την ποιότητα και το επίπεδο θορύβου των αρχικών δεδομένων (Leprince et al. 2007), (Ayoub et al. 2007).

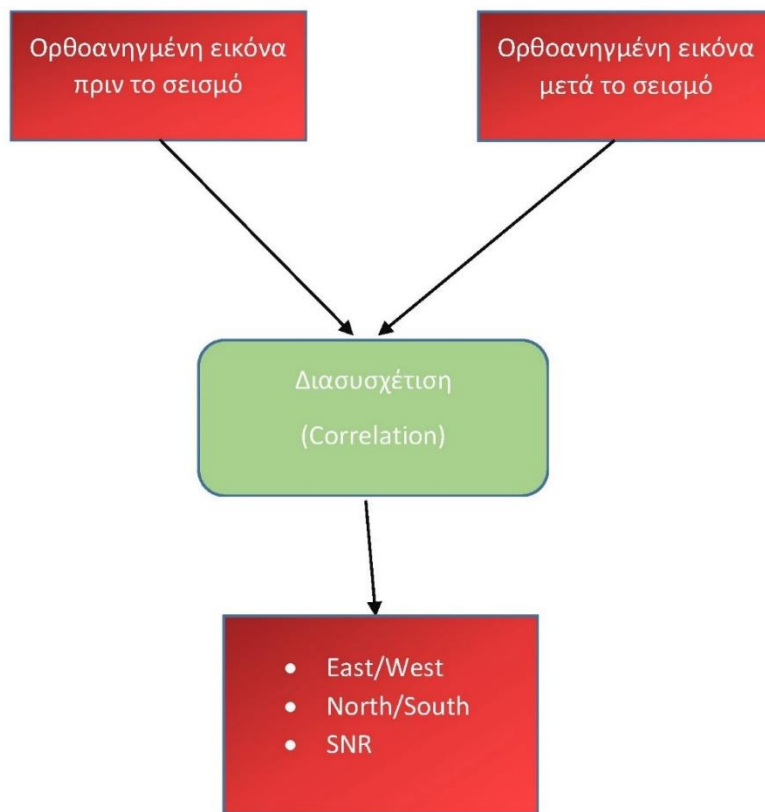
Η τυπική διαδικασία επεξεργασίας που ακολουθήθηκε με τις λειτουργίες και τα εργαλεία του COSI-CORR παρουσιάζεται αναλυτικά στα παρακάτω διαγράμματα ροής (Εικόνα 21, Εικόνα 22, Εικόνα 23)



Εικόνα 21. Διάγραμμα ροής εργασιών για την δημιουργία της ορθοανηγμένης εικόνας του 1945 (f170_9075_2_1_037_1945_42000)



Εικόνα 22. Διάγραμμα ροής εργασιών για την δημιουργία της ορθοανηγμένης εικόνας του 1960 (3087_1960_30000)



Εικόνα 23. Διαγραμμα ροής για την δημιουργία των παράγωγων επιπέδων της λειτουργίας της χωρικής διασυσχέτισης

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Ακολουθούν αναλυτικά τα στάδια επεξεργασίας των εικόνων και των ενδιάμεσων παραγώγων.

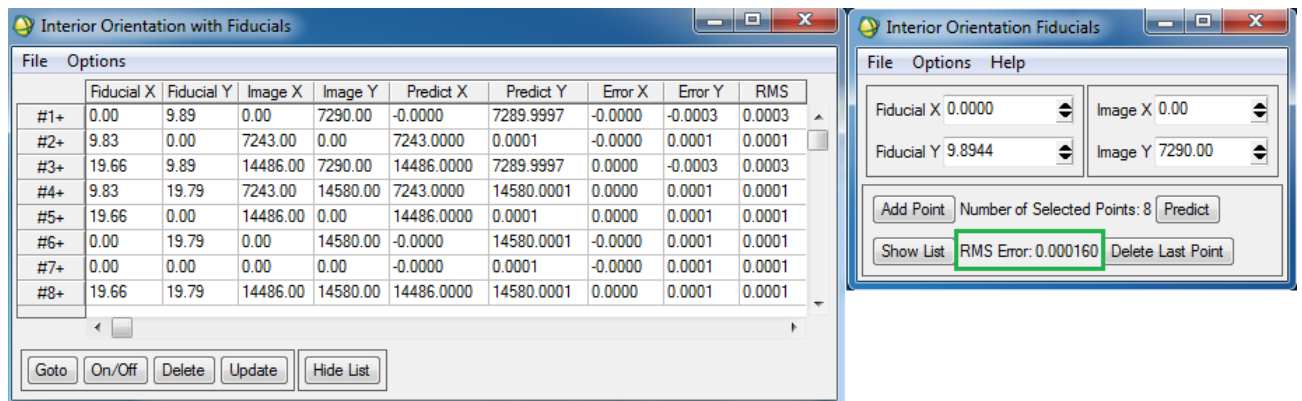
Εσωτερικός προσανατολισμός (interior orientation)

Ο εσωτερικός προσανατολισμός της κάμερας προσφέρει μια μαθηματική αναπαράσταση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και των αλλοιώσεων που επιφέρουν αυτά. Για αυτό τον λόγο χρειάζεται το αρχείο βαθμονόμησης (calibration report) της κάμερας υπακούοντας στις κλασσικές φωτογραμμετρικές τεχνικές (Wolf & Dewitt (2000)). Τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού των δυο λήψεων φαίνονται στην Εικόνα 24, Εικόνα 26. Τα δεδομένα και τα RMS των εικονοσημάτων στην Εικόνα 25, Εικόνα 27. Για τον υπολογισμό του αρχείου εσωτερικού προσανατολισμού χρειάστηκαν:

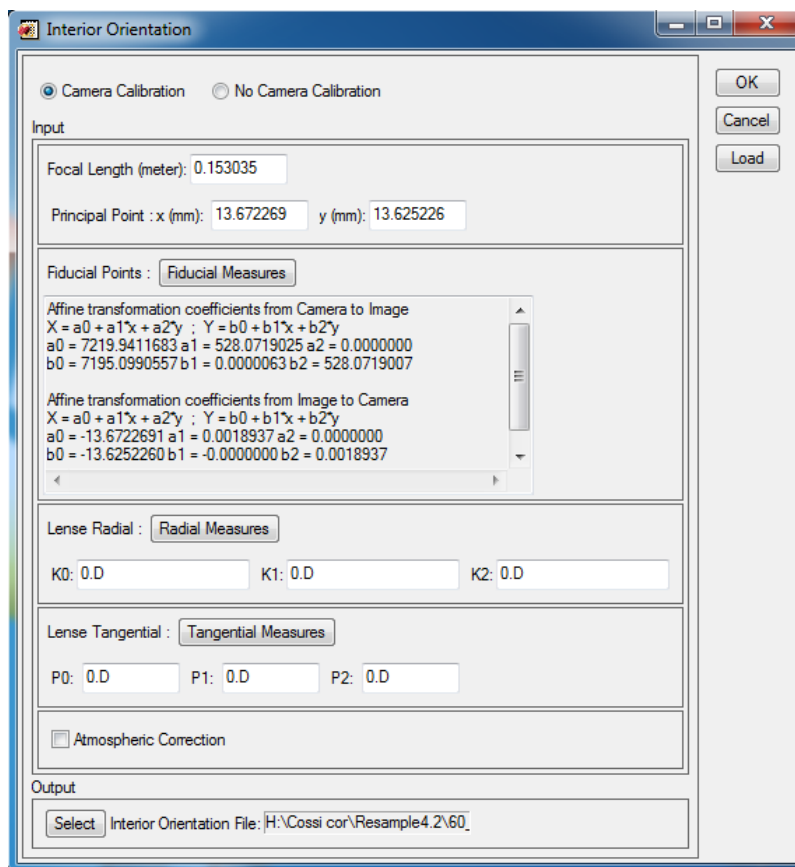
- Βαθμονομημένη εστιακή απόσταση σε μέτρα
- Το πρωτεύον σημείο της λήψης σε χιλιοστόμετρα
- Συντεταγμένες οκτώ εικονοσημάτων (fiducial marks). Στην συνέχεια υπολογίζεται αυτόματα με την χρήση του δισδιάστατου αφινικού μετασχηματισμού το σύστημα αναφοράς μεταξύ της εικόνας και της κάμερας. Λόγω έλλειψης αρχείου εικονοσημάτων δημιουργήθηκαν θεωρώντας πως το κέντρο της λήψης είναι το πρωτεύων σημείο.

Οι συντελεστές διόρθωσης των αλλοιώσεων του φακού (Radial & Tangential) καθώς και η ατμοσφαιρική διόρθωση περίθλασης δεν υπολογίστηκαν λόγω έλλειψης δεδομένων.

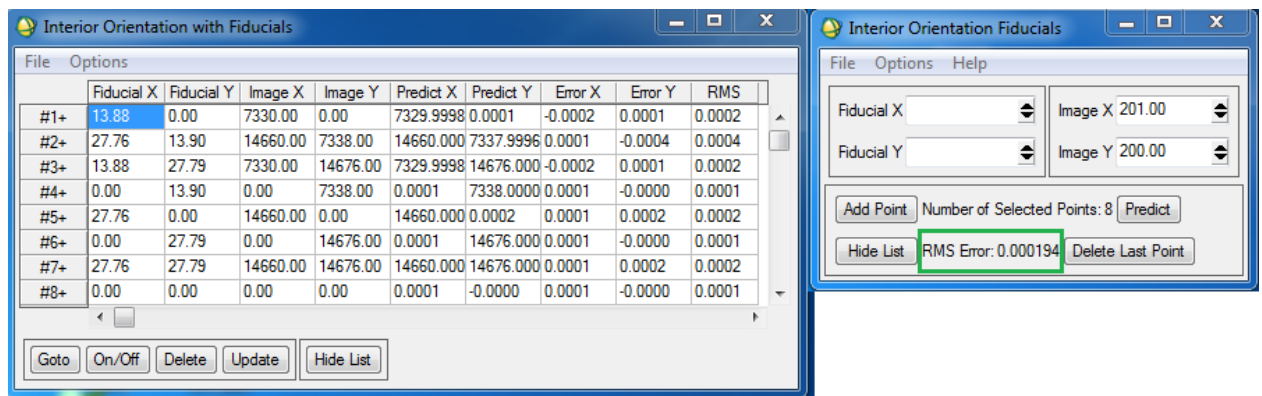
Εικόνα 24. Τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού της προ-σεισμικής αεροφωτογραφίας (f170_9075_2_1_037_1945_42000)



Εικόνα 25. Ο πίνακας εικονοσημάτων της προ-σεισμικής αεροφωτογραφίας (f170_9075_2_1_037_1945_42000)



Εικόνα 26. Τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού της μετα-σεισμικής αεροφωτογραφίας (3087_1960_30000)



Εικόνα 27. Ο πίνακας εικονοσημάτων της μετα-σεισμικής αεροφωτογραφίας (3087_1960_30000)

Εξωτερικός προσανατολισμός (exterior orientation)

Ο εξωτερικός προσανατολισμός της κάμερας περιγράφει την θέση και τον γωνιακό προσανατολισμό της κάμερας σε συντεταγμένες εδάφους την στιγμή της λήψης.

- Εσωτερικός προσανατολισμός
- Αρχείο εδαφικών σημείων ελέγχου

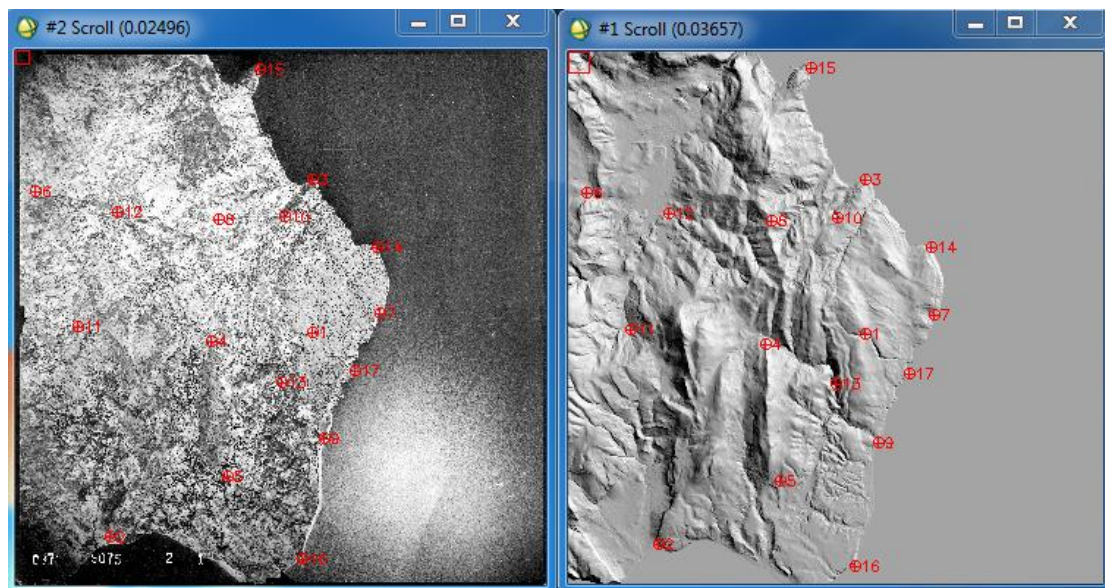
Σε αυτή τη λειτουργία υπολογίζονται οι μεταβλητές Omega(radian), Phi(radian), Kappa(radian) όπου αντιστοιχούν σε αυτές της Εικόνα 18.

Κοινά σημεία (tie points)

Με την διαδικασία επιλογής κοινών σημείων ταυτοποιούνται κοινά σημεία σε συντεταγμένες εικόνας μεταξύ δύο εικόνων. Αυτή η διαδικασία γίνεται μεταξύ μιας γεωαναφερμένης και μιας μη γεωαναφερμένης εικόνας. Τυπικά, μεταξύ μιας κύριας εικόνας που έχει υποστεί ορθοαναγωγή και μιας ανεπεξέργαστης εικόνας. Αρχικά, επιλέχθηκαν κοινά σημεία μεταξύ της ανεπεξέργαστης προ-σεισμικής αεροφωτογραφίας με το σκιασμένο ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (Εικόνα 28, Εικόνα 29).

Αν η ανεπεξέργαστη εικόνα επιλεγεί να εγγραφεί με ένα σκιασμένο ψηφιακό μοντέλο εδάφους, τότε χρειάζεται ένας μεγάλος αριθμός κοινών σημείων (συνιστάται τουλάχιστον 15), έτσι ώστε να μετριάσει τα σφάλματα συσχέτισης λόγω των διαφορών στη φύση και το περιεχόμενο των εικόνων. Μετά από σειρά δοκιμών επιλέχθηκαν 17 σημεία σε τρίτου βαθμού πολυωνυμικό μετασχηματισμό με RMS=0,76 (Εικόνα 29).

Τα σημεία πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανομημένα αλλά όχι κοντά στην περιοχή όπου αναμένουμε μεγάλες μετατοπίσεις. Επίσης δεν ενδείκνυται τα σημεία να βρίσκονται πολύ κοντά στα όρια της ανεπεξέργαστης εικόνας. (Ayoub F., Leprince S., Keene L., 2009)



Εικόνα 28. Κατανομή κοινών σημείων μεταξύ της ανεπεξέργαστης προ-σεισμικής αεροφωτογραφίας με το σκιασμένο ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου

Image to Image GCP List

	Base X	Base Y	Warp X	Warp Y	Predict X	Predict Y	Error X	Error Y	RMS
#1+	5543.00	5238.00	8099.00	7666.00	8097.0022	7666.6762	-1.9978	0.6762	2.1092
#2+	1691.00	9139.00	2582.00	13233.00	2582.0028	13232.998	0.0028	-0.0011	0.0030
#3+	5544.00	2360.00	8109.25	3500.75	8108.7055	3500.9341	-0.5445	0.1841	0.5747
#4+	3672.50	5429.75	5356.00	7908.00	5355.6511	7908.1179	-0.3489	0.1179	0.3683
#5+	3957.00	7972.00	5795.00	11579.00	5794.9285	11579.024	-0.0715	0.0246	0.0756
#6+	354.00	2624.00	547.00	3836.00	547.0131	3835.9954	0.0131	-0.0046	0.0139
#7+	6821.00	4889.25	9939.00	7137.00	9938.7178	7137.0959	-0.2822	0.0959	0.2980
#8+	3798.00	3133.00	5544.00	4586.00	5543.8459	4586.0518	-0.1541	0.0518	0.1626
#9+	5791.00	7261.00	8447.00	10563.00	8446.6828	10563.108	-0.3172	0.1083	0.3352
#10+	5026.00	3083.00	7346.00	4526.00	7347.2103	4525.5902	1.2103	-0.4098	1.2778
#11+	1153.00	5145.00	1714.00	7493.00	1714.0342	7492.9880	0.0342	-0.0120	0.0363
#12+	1887.00	2984.00	2802.00	4378.00	2801.9677	4378.0106	-0.0323	0.0106	0.0339
#13+	4981.00	6176.00	7277.00	9029.00	7278.5133	9028.4881	1.5133	-0.5119	1.5975
#14+	6770.00	3638.00	9867.75	5339.00	9868.0589	5338.8956	0.3089	-0.1044	0.3261
#15+	4528.50	277.25	6657.00	519.00	6656.9753	519.0084	-0.0247	0.0084	0.0261
#16+	5340.00	9561.00	7818.00	13856.00	7817.9793	13856.009	-0.0207	0.0090	0.0226
#17+	6363.00	5978.00	9279.00	8719.00	9279.7150	8718.7587	0.7150	-0.2413	0.7546

Ground Control Points Selection

Base X: 201.00, Y: 200.00, Degree: 3
Warp X: 200.00, Y: 199.00

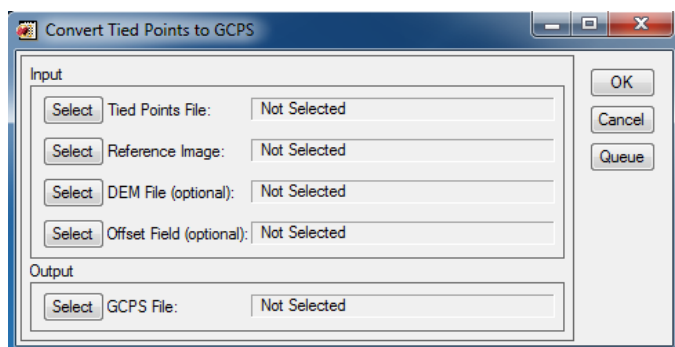
Add Point, Number of Selected Points: 17, Predict
Hide List, RMS Error: 0.767432, Delete Last Point

Εικόνα 29. Πίνακας συντεταγμένων κοινών σημείων μεταξύ της ανεπεξέργαστης προ-σεισμικής αεροφωτογραφίας με το σκιασμένο ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου

Μετατροπή κοινών σημείων (tie points) σε εδαφικά σημεία ελέγχου (gcps)

Στην συνέχεια για την απόδοση πραγματικών συντεταγμένων εδάφους στο αρχείο κοινών σημείων εκτελούμε την παρακάτω λειτουργία.

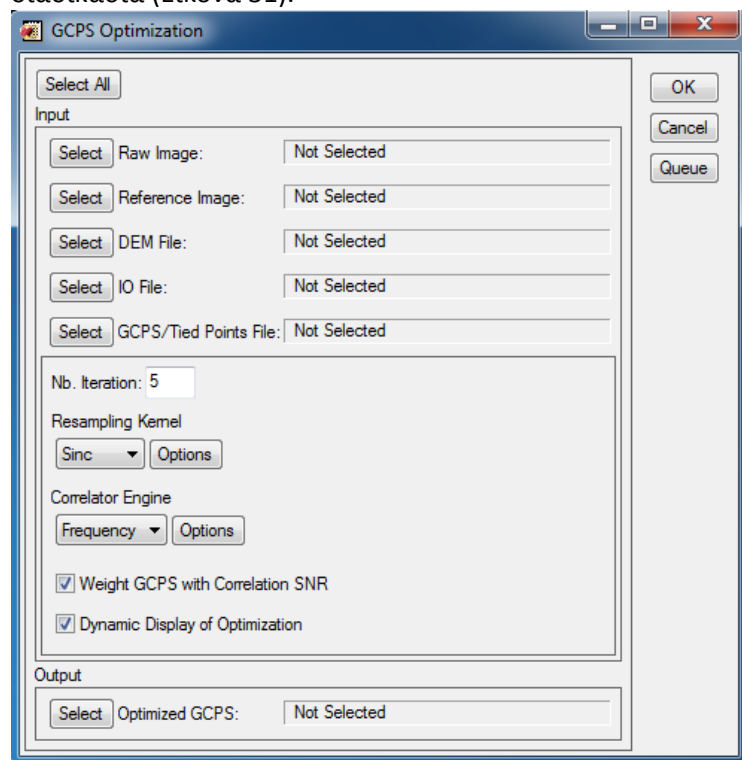
- Το αρχείο κοινών σημείων
- Η κύρια εικόνα. (Οι γεωγραφικές συντεταγμένες θα ανακτηθούν από τις πληροφορίες αυτής της εικόνας)
- Αρχείο ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου. (Από αυτό θα ανακτηθούν τα υψόμετρα του κάθε εδαφικού σημείου ελέγχου)



Εικόνα 30. Λειτουργία μετατροπής κοινών σημείων σε εδαφικά σημεία ελέγχου

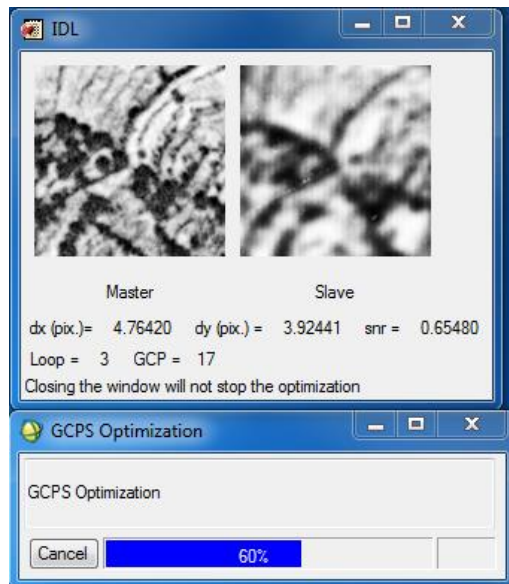
Βελτιστοποίηση εδαφικών σημείων ελέγχου

Όση προσοχή και αν αφιερώσει κάποιος στην επιλογή των κοινών σημείων (όπου αργότερα μετατρέπονται σε εδαφικά σημεία ελέγχου), συνήθως θα υπάρχει απόκλιση της ανεπεξέργαστης, με την κύρια εικόνα. Για την καλύτερη εγγραφή της ανεπεξέργαστης εικόνας, τα εδαφικά σημεία ελέγχου μπορούν να βελτιστοποιηθούν με την παρακάτω διαδικασία (Εικόνα 31).



Εικόνα 31. Λειτουργία βελτιστοποίησης εδαφικών σημείων ελέγχου

Η βελτιστοποίηση των σημείων γίνεται μετά από επαναληπτική διαδικασία προσδίδοντας μεγαλύτερη σημασία σε σημεία που έχει επιλέξει ο χρήστης ή συσχετίζοντας κάθε σημείο με τα υπόλοιπα και αποδίδοντάς τους αυτόματα διαφορετικά βάρη (Εικόνα 31, Εικόνα 32).



Εικόνα 32. Παράθυρο βελτιστοποίησης των σημείων εδαφικού ελέγχου

Ορθοαναγωγή και επαναδειγματοληψία εικόνας

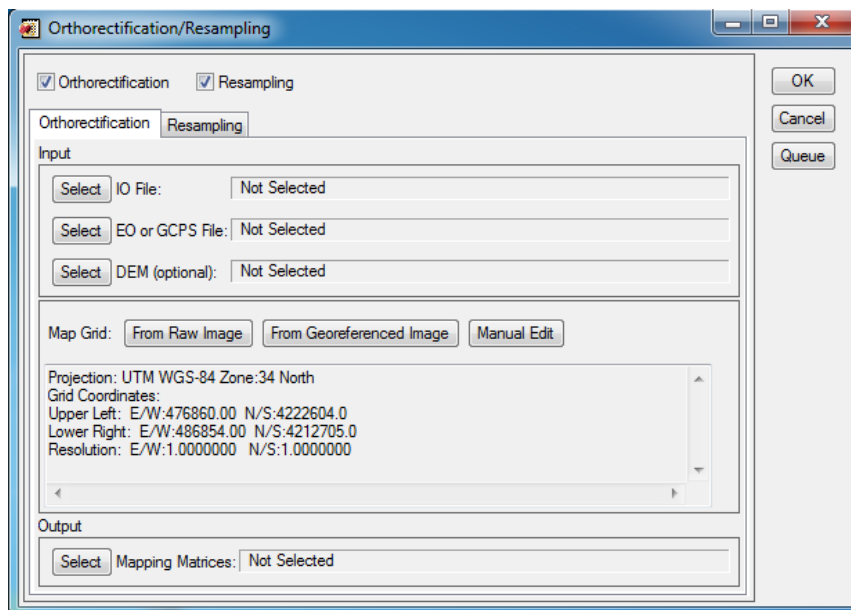
Ορθοαναγωγή και επαναδειγματοληψία βρίσκονται στην ίδια ενότητα επειδή ουσιαστικά είναι μια διαδικασία αντί για δύο. Αυτό επιτυγχάνεται με την 'χαρτογράφηση' των εικονοστοιχείων της ανεπεξέργαστης εικόνας μέσω του αρχείου mapping matrices (Εικόνα 33). Για την δημιουργία του αρχείου 'χαρτογράφησης' (mapping matrices) χρησιμοποιούνται:

- Το αρχείο εσωτερικού προσανατολισμού
- Το αρχείο εξωτερικού προσανατολισμού
- Ψηφιακό μοντέλο ανάγλυφου
- Αρχείο από το οποίο θα υπολογιστούν οι πληροφορίες εικόνας όπως το μέγεθος ψηφίδας, το προβολικό σύστημα και οι συντεταγμένες των γωνιών του πλέγματος. Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου για την συγκρισιμότητα των διαφόρων παραγόμενων μεταξύ τους. Ιδιότητες όπως το προβολικό σύστημα, οι συντεταγμένες των γωνιών της εικόνας και το μέγεθος ψηφίδας θα είναι κοινά μεταξύ των παραγόμενων ορθοαναηγμένων εικόνων (Εικόνα 34).

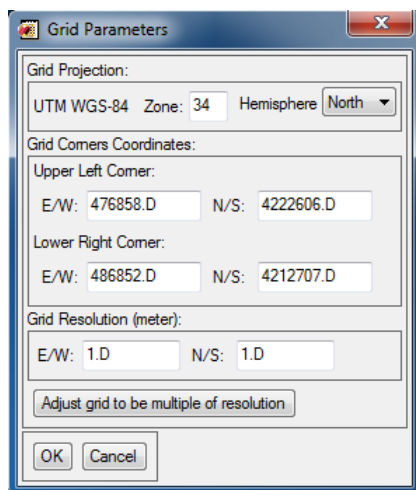
Στην συνέχεια γίνεται επαναδειγματοληψία της ανεπεξέργαστης εικόνας σύμφωνα με αυτό το αρχείο (Εικόνα 35), όπου χρησιμοποιούνται:

- Η ανεπεξέργαστη εικόνα
- Το αρχείο 'χαρτογράφησης' (mapping matrices)

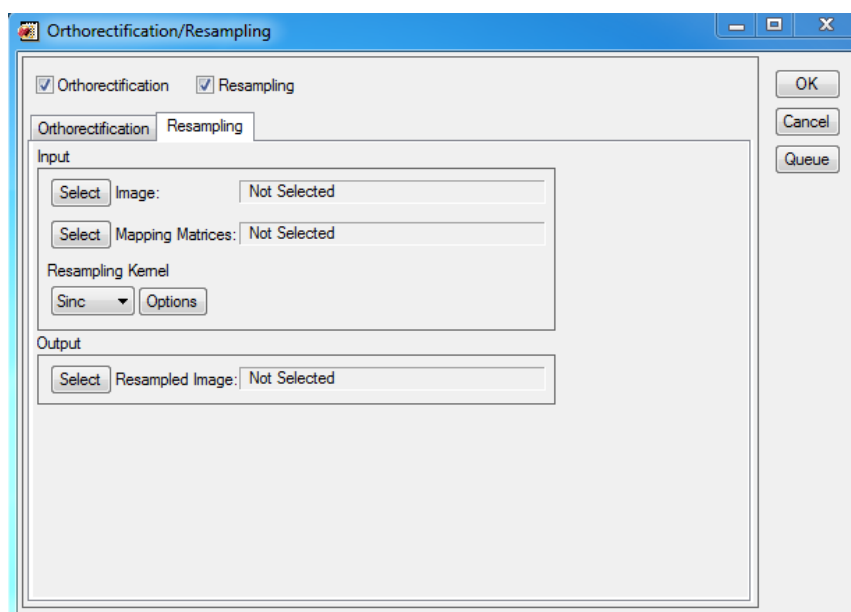
Η ανακατασκευή της εικόνας αποδίδει τις ιδιότητες χάρτη του αρχείου που έχει εισαχθεί σαν map grid (σε όλες τις περιπτώσεις έχει επιλεγεί το ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου).



Εικόνα 33. Λειτουργία δημιουργίας αρχείου mapping matrices



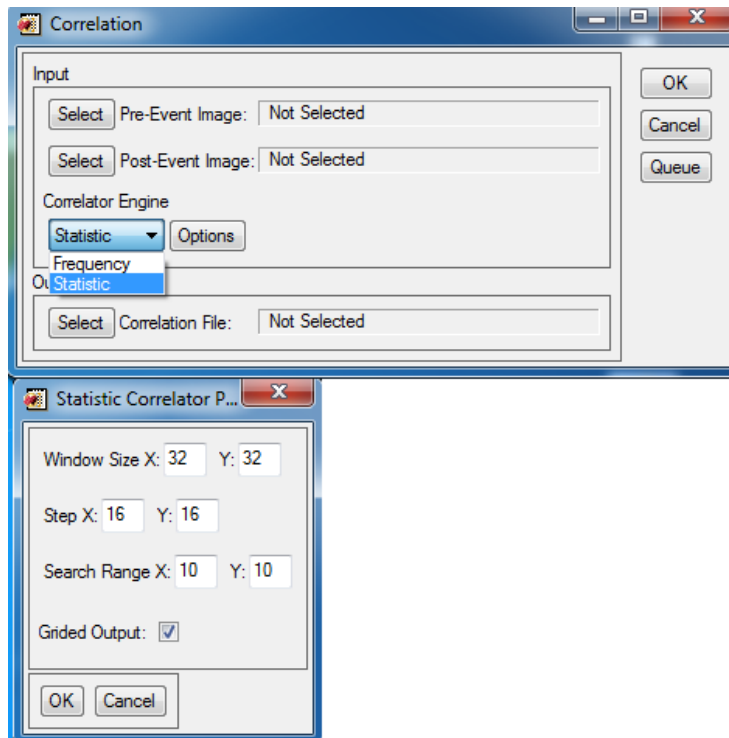
Εικόνα 34. Το προβολικό σύστημα, οι συντεταγμένες των γωνιών της εικόνας και το μέγεθος ψηφίδας



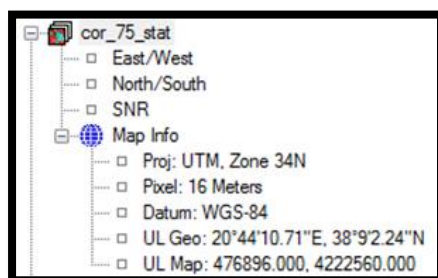
Εικόνα 35. Λειτουργία δημιουργίας ανακατασκευασμένης εικόνας

Χωρική διασυσχέτιση εικόνων (correlation)

Σύμφωνα με τον οδηγό χρήσης του προγράμματος, συνίσταται να επιλεγεί το statistic correlator engine εάν έχει χρησιμοποιηθεί σαν κύρια εικόνα επιλογής κοινών σημείων (reference image) σκιασμένο μοντέλο αναγλύφου, πράγμα το οποίο ισχύει. Όπως φαίνεται στο διαγραμμα ροής στην Εικόνα 23 η διαδικασία παράγει τρία επίπεδα. Το επίπεδο οριζόντιων μετατοπίσεων Ανατολή/Δύσης, το επίπεδο σε Βορρά/Νότο και το επίπεδο SNR δηλαδή signal to noise ratio που 'αξιολογεί' την ποιότητα του σήματος (Εικόνα 37).



Εικόνα 36. Λειτουργία χωρικής διασυσχέτισης και επιλογές διασυσχέτισης



Εικόνα 37. Παράγωγα επίπεδα της λειτουργίας χωρικής διασυσχέτισης μαζί με τις πληροφορίες του αρχείου

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μετά από δοκιμές διάφορων σετ κοινών σημείων μεταξύ της ανεπεξέργαστης αεροφωτογραφίας του 60 και της ανακατασκευασμένης εικόνας του 1945 παρατηρήθηκαν αλλαγές στις περιοχές και στα μεγέθη των μετατοπίσεων. Η μόνη διαφορά που υπήρξε στην διαδικασία παραγωγής των τελικών χαρτών μετατοπίσεων ήταν η επιλογή διαφορετικών κοινών σημείων πριν το στάδιο της ορθοαναγωγής/επανασύστασης της αεροφωτογραφίας του 60.

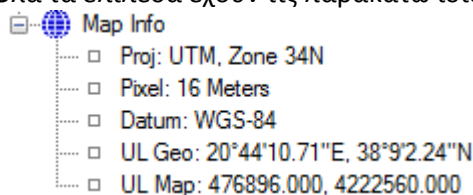
Δηλαδή το σήμα που ανιχνεύθηκε στην διαδικασία της χωρικής διασυσχέτισης είναι εξαρτημένο από το σετ κοινών σημείων από το οποίο έχει παραχθεί η μετα-σεισμική εικόνα. Αυτό φυσικά αναμένεται, αλλά προκαλεί έκπληξη το σε πόσο μεγάλο βαθμό.

Για αυτό τον λόγο επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν συνδυαστικά τρία διαφορετικά τελικά παραγόμενα της διαδικασίας της χωρικής διασυσχέτισης. Δηλαδή τρεις διαφορετικοί χάρτες μετατοπίσεων που έχουν σαν pre-earthquake image την ίδια προ-σεισμική εικόνα (έχει κοινά σημεία με το σκιασμένο ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου, Εικόνα 28). Αλλά χρησιμοποιώντας σαν post-earthquake image τρεις διαφορετικές μετα-σεισμικές εικόνες (έχουν διαφορετικά σετ κοινών σημείων με την προ-σεισμική εικόνα). Οπότε εκτελώντας την εντολή διασυσχέτισης παράγουμε τρία διαφορετικά αποτελέσματα μετατοπίσεων.

Αυτά τα τρία αποτελέσματα είναι:

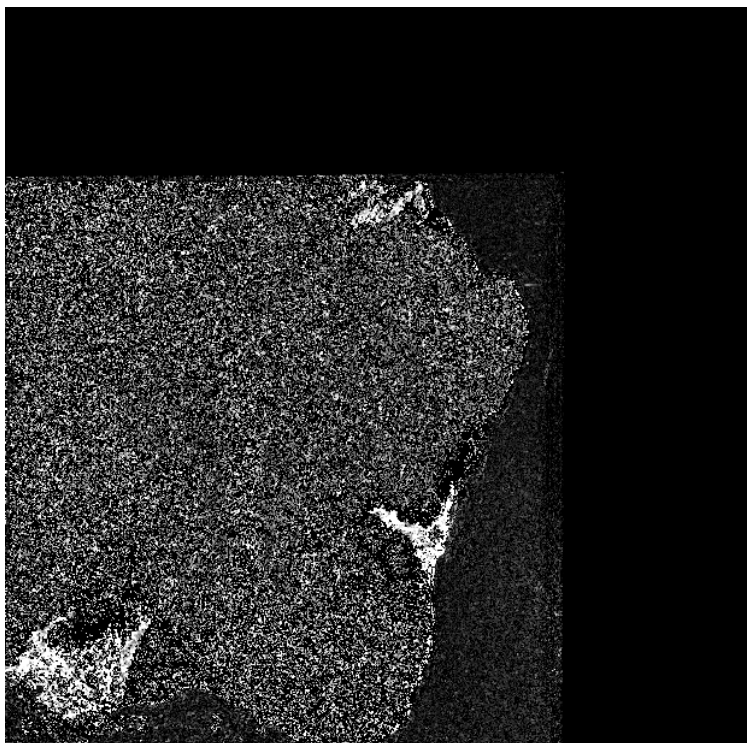
- Cor_61_stat (Εικόνα 38, Εικόνα 39, Εικόνα 40)
- Cor_75_stat (Εικόνα 41, Εικόνα 42, Εικόνα 43)
- Cor_73_stat (Εικόνα 44, Εικόνα 45, Εικόνα 46)

Όλα τα επίπεδα έχουν τις παρακάτω ιδιότητες για να είναι συγκρίσιμα.

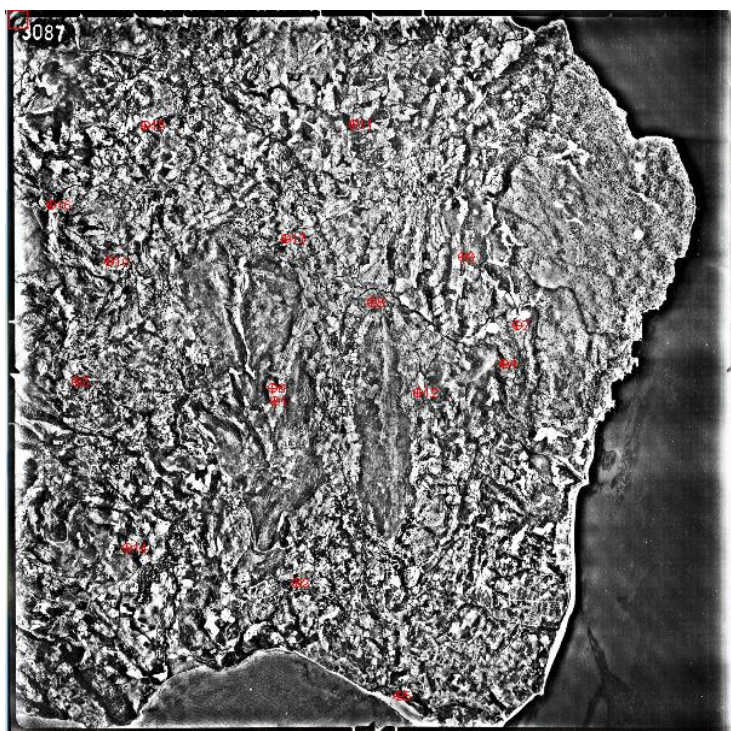


Ο συνδυασμός των SNR (αναλογία σήματος προς θόρυβο) δείχνει το ποιες περιοχές έχουν επιστροφή ισχυρού σήματος για κάθε εικονοστοιχείο, και το χρώμα σε ποιο επίπεδο ανήκει (Εικόνα 47).

Τέλος, γίνεται η εξαγωγή των διανυσμάτων μετατοπίσεων από τα τρία αρχεία διασυσχετίσεων και παρουσιάζονται στην Εικόνα 48 με υπόβαθρο το σκιασμένο ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου.



Εικόνα 38. Το επίπεδο SNR διασυσχέτισης της μετα-σεισμικής ανακατασκευασμένης εικόνας με την προ-σεισμική ανακατασκευασμένη εικόνα (cor_61_stat)



Εικόνα 39. Τα κοινά σημεία της ανεπεξέργαστης μετα-σεισμικής αεροφωτογραφίας με την προ-σεισμική ανακατασκευασμένη εικόνα στο χάρτη (cor_61_stat)

Image to Image GCP List

	Base X	Base Y	Warp X	Warp Y	Predict X	Predict Y	Error X	Error Y	RMS
#1+	3672.50	5429.75	5356.00	7908.00	5355.9816	7907.9823	-0.0184	-0.0177	0.0255
#2+	3957.00	7972.00	5795.00	11579.00	5794.8930	11578.891	-0.1070	-0.1089	0.1526
#3+	917.00	5155.00	1358.00	7516.00	1358.0099	7516.0150	0.0099	0.0150	0.0180
#4+	6821.00	4889.25	9939.00	7137.00	9939.0286	7137.0425	0.0286	0.0425	0.0513
#5+	5341.00	9557.00	7820.00	13862.00	7819.7609	13861.765	-0.2391	-0.2342	0.3347
#6+	3626.00	5225.00	5293.00	7627.00	5292.9856	7626.9858	-0.0144	-0.0142	0.0202
#7+	7010.50	4344.75	10209.25	6356.75	10209.292	6356.8046	0.0429	0.0546	0.0695
#8+	4992.00	4033.00	7282.00	5904.00	7282.0132	5904.0148	0.0132	0.0148	0.0198
#9+	6269.50	3384.75	9126.00	4982.00	9126.0371	4982.0400	0.0371	0.0400	0.0545
#10+	1333.50	3457.00	2004.50	5070.50	2004.5084	5070.5108	0.0084	0.0108	0.0137
#11+	4732.00	1519.00	6922.00	2290.00	6922.0195	2290.0176	0.0195	0.0176	0.0263
#12+	5636.00	5280.00	8225.00	7725.00	8224.9964	7725.0032	-0.0036	0.0032	0.0048
#13+	3803.00	3143.00	5568.00	4618.00	5568.0125	4618.0123	0.0125	0.0123	0.0175
#14+	1634.00	7468.00	2370.00	10867.00	2369.9753	10866.978	-0.0247	-0.0217	0.0329
#15+	1819.00	1577.00	2748.00	2337.00	2748.0080	2337.0086	0.0080	0.0086	0.0117
#16+	533.00	2681.00	852.00	3933.00	852.0095	3933.0124	0.0095	0.0124	0.0156

Goto On/Off Delete Update Hide List

Ground Control Points Selection

File Options Help

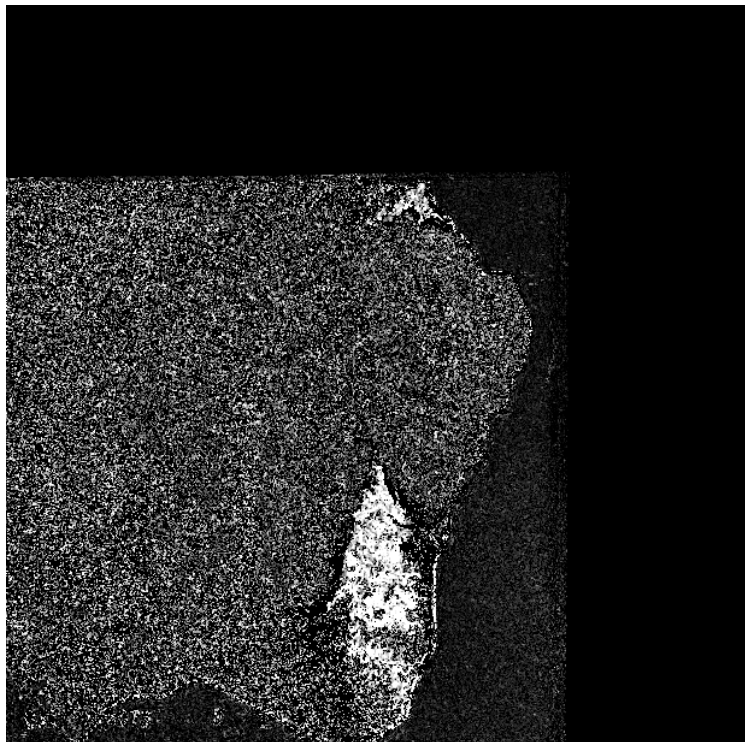
Base X 6774.50 Y 3631.50 Degree 3

Warp X 380.00 Y 137.00

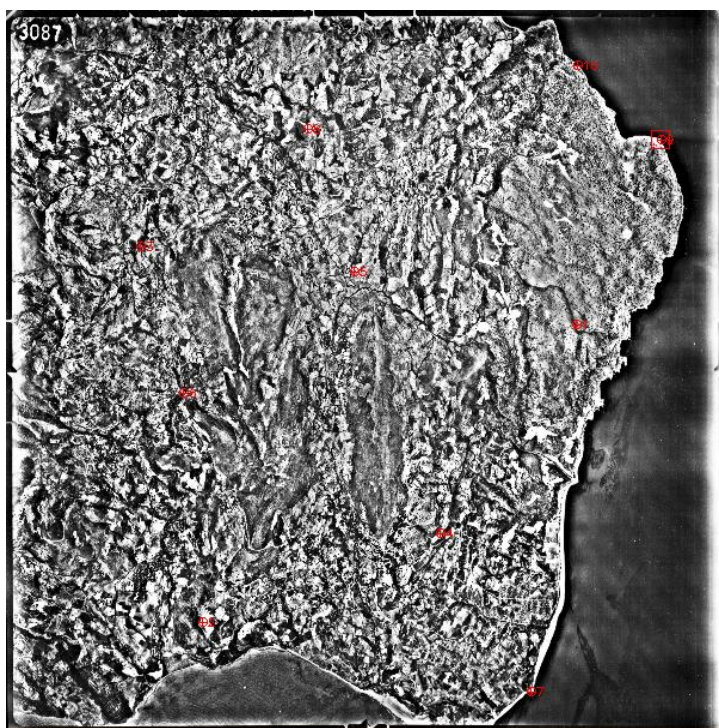
Add Point Number of Selected Points: 16 Predict

Hide List RMS Error: 0.096894 Delete Last Point

Εικόνα 40. Οι συντεταγμένες των κοινών σημείων της ανεπεξέργαστης μετα-σεισμικής αεροφωτογραφίας με την προ-σεισμική ανακατασκευασμένη εικόνα (cor_61_stat)



Εικόνα 41. Το επίπεδο SNR διασυσχέτισης της μετα-σεισμικής ανακατασκευασμένης εικόνας με την προ-σεισμική ανακατασκευασμένη εικόνα (cor_75_stat)



Εικόνα 42. Τα κοινά σημεία της ανεπεξέργαστης μετα-σεισμικής αεροφωτογραφίας με την προ-σεισμική ανακατασκευασμένη εικόνα στο χάρτη (cor_75_stat)

Image to Image GCP List

	Base X	Base Y	Warp X	Warp Y	Predict X	Predict Y	Error X	Error Y	RMS
#9+	6774.50	3631.50	13358.25	2628.75	13359.694	2635.4371	1.4443	6.6871	6.8413
#8+	2962.50	3580.00	6139.75	2390.75	6141.1929	2397.4307	1.4429	6.6807	6.8347
#10+	5888.50	2833.00	11660.25	1100.75	11658.832	1094.1871	-1.4175	-6.5629	6.7142
#3+	1210.25	4819.00	2749.00	4796.50	2747.6026	4790.0300	-1.3974	-6.4700	6.6192
#6+	1662.25	6358.25	3624.75	7755.25	3626.0985	7761.4935	1.3485	6.2435	6.3875
#1+	5819.00	5637.00	11640.00	6379.00	11639.099	6374.8312	-0.9004	-4.1688	4.2650
#5+	3458.00	5094.00	7109.75	5288.00	7109.4349	5286.5412	-0.3151	-1.4588	1.4925
#2+	1870.00	8754.00	4009.00	12400.50	4008.6935	12399.080	-0.3065	-1.4191	1.4519
#7+	5349.50	9517.25	10701.00	13825.00	10701.200	13825.929	0.2007	0.9293	0.9507
#4+	4361.25	7849.00	8841.00	10612.75	8840.9005	10612.289	-0.0995	-0.4608	0.4714

Goto On/Off Delete Update Hide List

Ground Control Points Selection

File Options Help

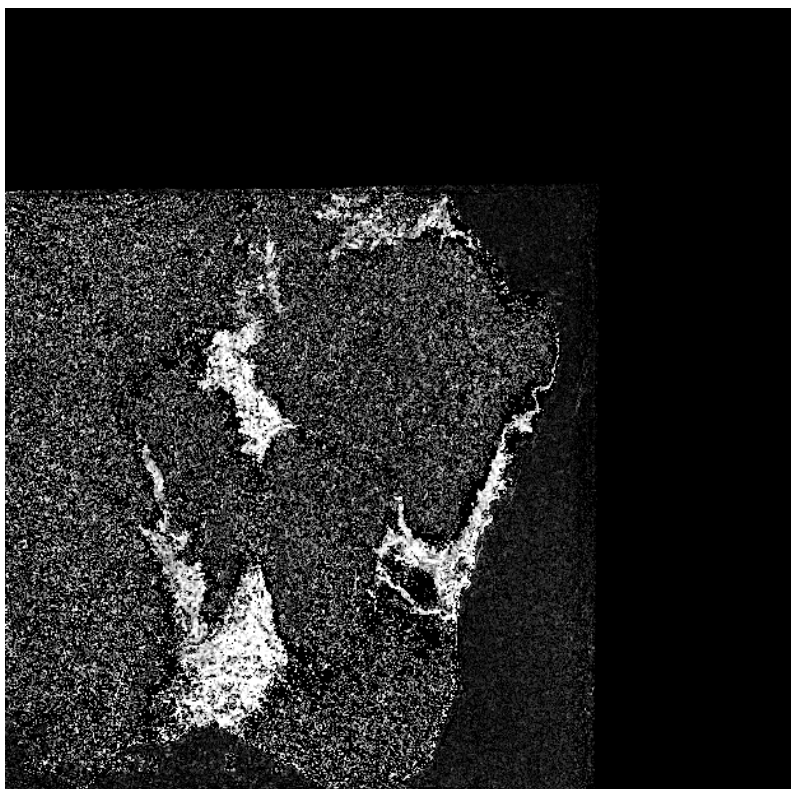
Base X 6774.50 Y 3631.50 Degree 2

Warp X 13358.25 Y 2628.75

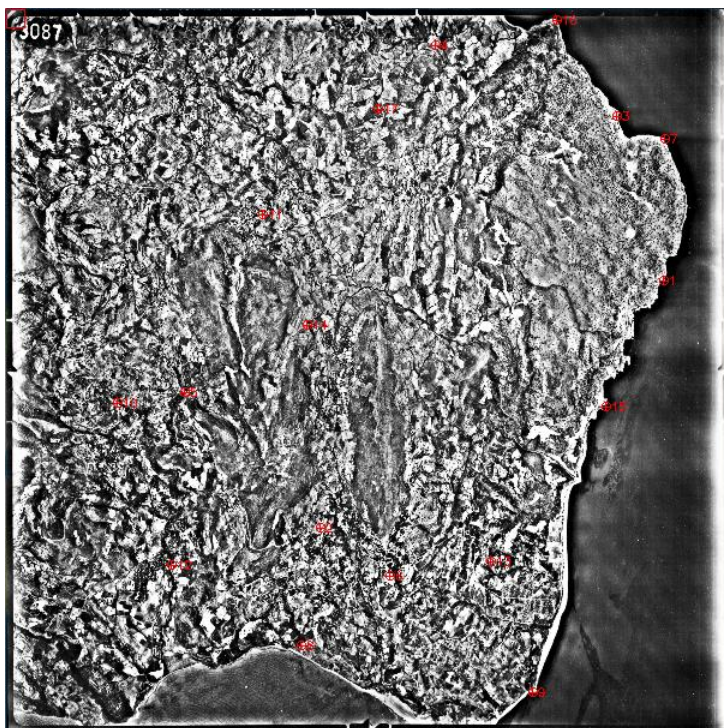
Add Point Number of Selected Points: 10 Predict

Hide List RMS Error: 4.968524 Delete Last Point

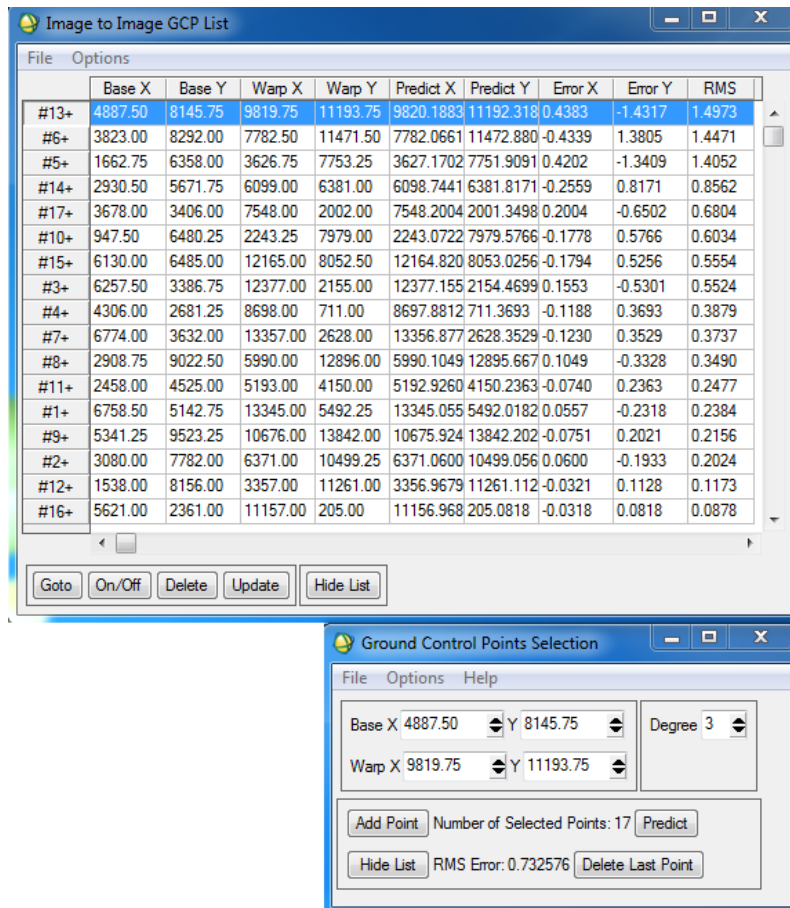
Εικόνα 43. Οι συντεταγμένες των κοινών σημείων της ανεπεξέργαστης μετα-σεισμικής αεροφωτογραφίας με την προ-σεισμική ανακατασκευασμένη εικόνα (cor_75_stat)



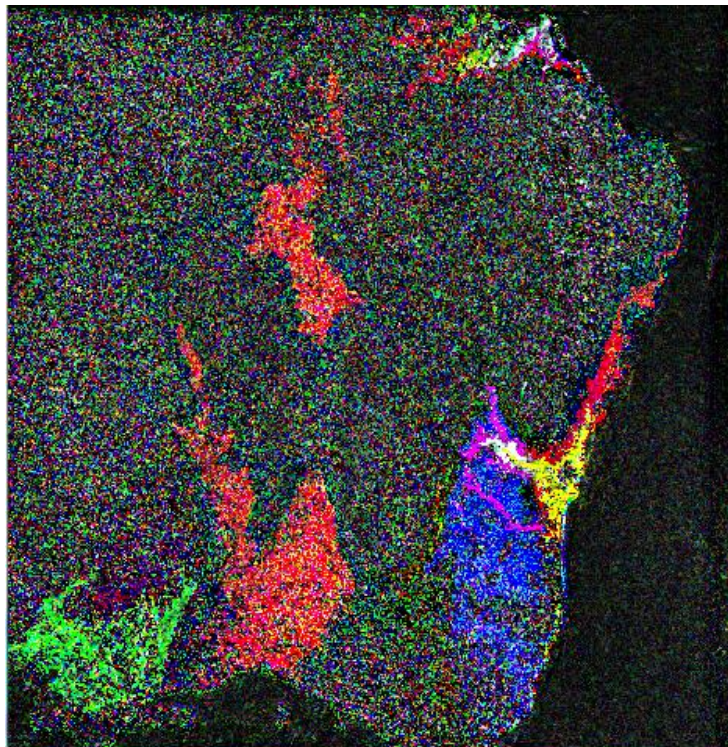
Εικόνα 44. Το επίπεδο SNR διασυσχέτισης της μετα-σεισμικής ανακατασκευασμένης εικόνας με την προ-σεισμική ανακατασκευασμένη εικόνα (cor_73_stat)



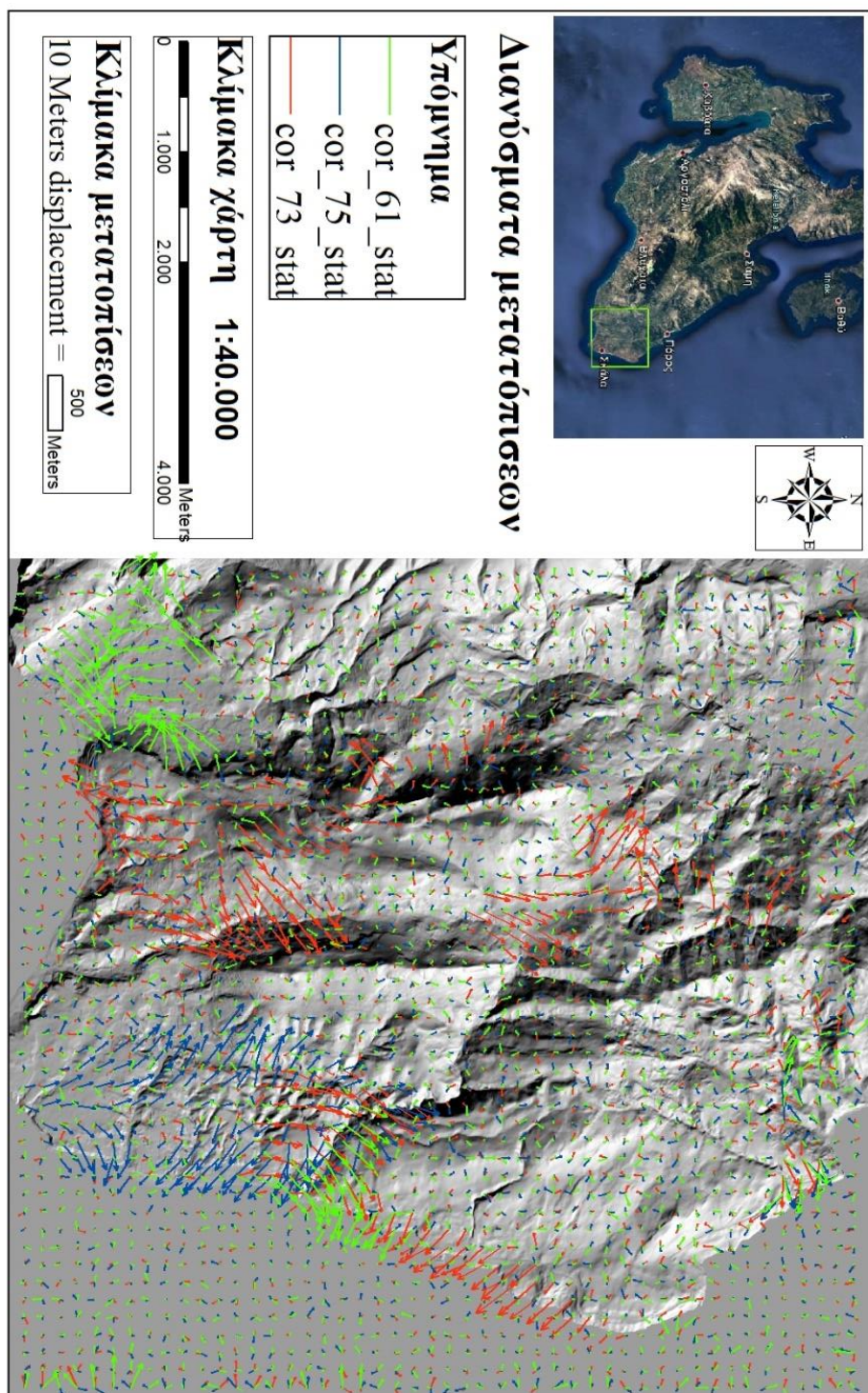
Εικόνα 45. Τα κοινά σημεία της ανεπεξέργαστης μετα-σεισμικής αεροφωτογραφίας με την προ-σεισμική ανακατασκευασμένη εικόνα στο χάρτη (cor_73_stat)



Εικόνα 46. Οι συντεταγμένες των κοινών σημείων της ανεπεξέργαστης μετα-σεισμικής αεροφωτογραφίας με την προ-σεισμική ανακατασκευασμένη εικόνα (cor_73_stat)



Εικόνα 47. Ψευδέχρωμη εικόνα των τριών επιπέδων SNR ($R=cor_073_stat$, $G=cor_61_stat$, $B=cor_75_stat$)



Εικόνα 48. Διανύσματα μετατοπίσεων των τριών παράγωγων διασυσχετίσεων *cor_073_stat*, *cor_61_stat*, *cor_75_stat* σε υπόβαθρο σκιασμένου ψηφιακού μοντέλου ανάγλυφου

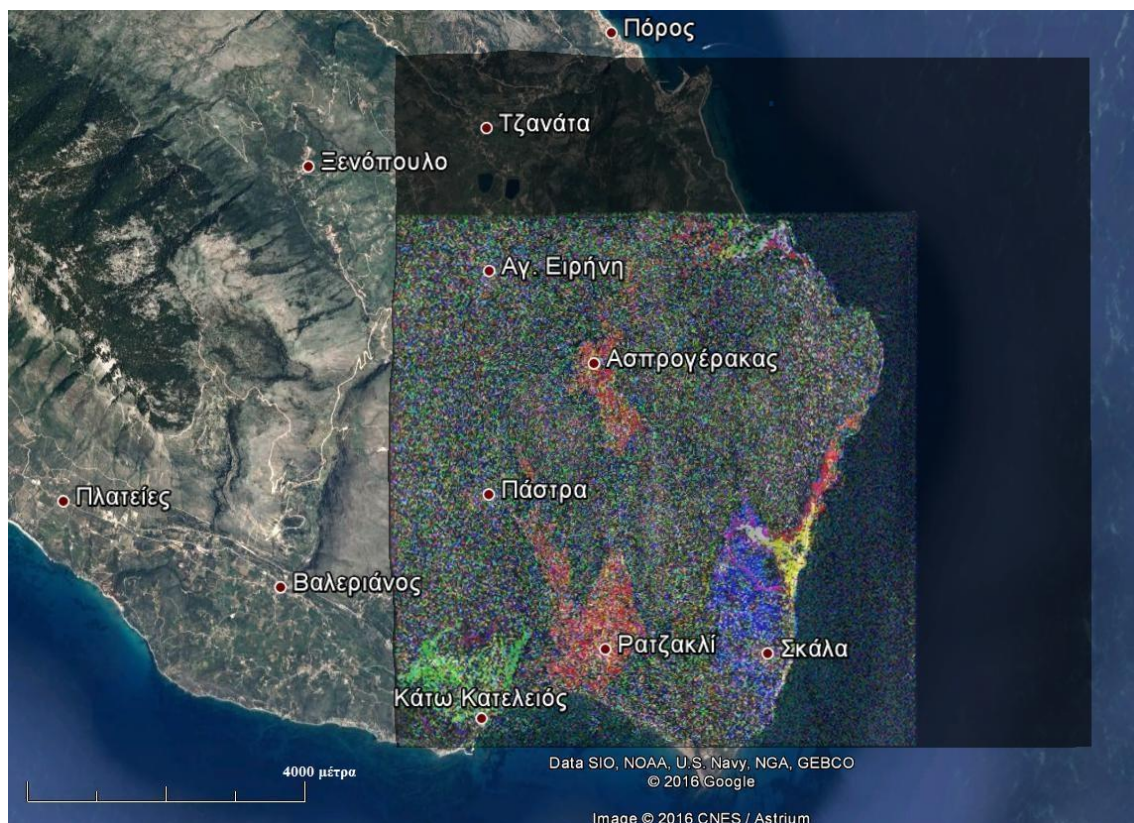
ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα ποσοτικά χαρακτηριστικά και των τριών διανυσμάτων μετατοπίσεων (Εικόνα 48) συνάδουν με σεισμικό γεγονός μεγαλύτερης έντασης από αυτή που καταγράφηκε, καθώς οι μέγιστες τιμές εδαφικής μετατόπισης που καταγράφονται είναι περίπου 9 μέτρα.

Ποιοτικά, τρία παράγωγα της διαδικασίας διασυσχέτισης (cor_073_stat , cor_61_stat , cor_75_stat) έχουν κοινές περιοχές που φαίνονται με λευκό στην Εικόνα 47 και με κοινά μοτίβα παράλληλων εδαφικών μετατοπίσεων που φαίνονται στην Εικόνα 48. Παρατηρούμε πως, σχεδόν σε όλη η ανατολική ακτή που έχουμε διαθέσιμα δεδομένα, μεγάλες μετατοπίσεις περίπου 10 μέτρων προς τα ανατολικά.

Οι περιοχές αυτές εντοπίζονται βόρεια της περιοχής μελέτης, ανατολικά του οικισμού Αγία Ειρήνη και εντονότερα στο κέντρο της περιοχής μελέτης βόρεια του οικισμού Σκάλα (Εικόνα 49).

Επίσης παρατηρούμε έντονα μοτίβα διανυσμάτων όπου εμφανίζονται σε ένα μόνο από τα τρία διανυσματικά επίπεδα.π.χ. το ισχυρό σήμα από το cor_61_stat (πράσινα διανύσματα) στην περιοχή του κάτω Κατελειού (Εικόνα 49).



Εικόνα 49. Ψευδέχρωμη εικόνα των τριών επιπέδων SNR ($R=cor_073_stat$, $G=cor_61_stat$, $B=cor_75_stat$) εισαγμένη σαν επίπεδο στο google earth

Οι παραδοχές που έχουν γίνει προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι όσο το δυνατόν πιο έγκυρα αφορούν:

- Η εδαφική παραμόρφωση της περιοχής μελέτης κατά το διάστημα 1945-1960 οφείλεται κατά κύριο λόγο στην σεισμική ακολουθία του 1953
- Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των δυο αεροφωτογραφιών όπως ο θόρυβος και οι παραμορφώσεις του φυσικού μέσου λόγω σφαλμάτων δεν αλλοιώνουν τα παραγόμενα
- Τα δεδομένα βαθμονόμησης είναι σωστά
- Η διαδικασία ψηφιοποίησης (σκαναρίσματος) των αρνητικών των αεροφωτογραφιών έγινε με προσοχή και με ακρίβεια τουλάχιστον 1800 DPI
- Το σήμα και οι μετατοπίσεις που ανιχνεύονται στο στάδιο της χωρικής διασυσχέτισης δεν επηρεάζεται λόγω της έντονης τοπογραφίας της περιοχής και της ύπαρξης ενός μόνο ψηφιακού επιπέδου υψομέτρων.
- Τα σφάλματα επιλογής κοινών σημείων είναι στα αποδεκτά όρια
- Οι αλλαγές στην κάλυψη γης μεταξύ των δυο λήψεων είναι οι ελάχιστες
- Ύπαρξη περιοχών σκίασης είναι όσο το δυνατόν μικρότερες

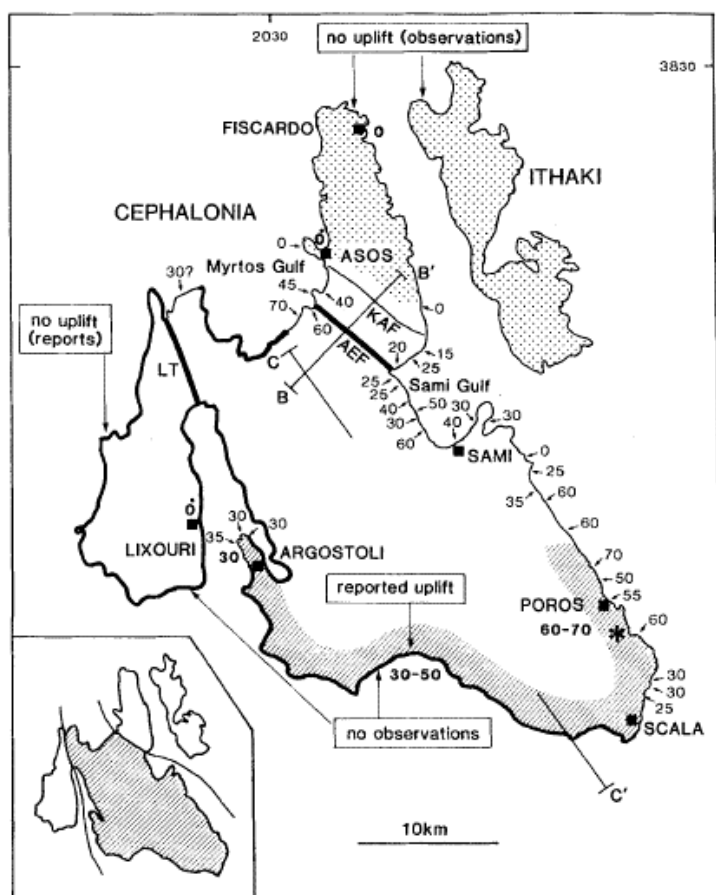
Όλα τα παραπάνω μπορεί να μεταφράζονται σε 'φαινόμενες' μετακινήσεις και θεωρούμε πως δεν αλλοιώνουν το σήμα σε μεγάλο ποσοτικό βαθμό και όχι τουλάχιστον ποιοτικά.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία η ακριβής ορθοαναγωγή των εικόνων είναι το κρισιμότερο στάδιο επεξεργασίας και συχνά αποτελεί το σημαντικότερο περιοριστικό παράγοντα (Townshend et al., 1992; Delacourt et al., 2007). Η μία προσέγγιση χρησιμοποιεί την εικόνα πριν από το υπό μελέτη γεωλογικό/τεκτονικό φαινόμενο ως εικόνα αναφοράς. Η γεωμετρία της εικόνας αναφοράς καθορίζει το κοινό προβολικό σύστημα και όλες οι υπόλοιπες εικόνες προβάλλονται και επαναδειγματοληπτούνται σε αυτό το κοινό σύστημα. Η δεύτερη μέθοδος που είναι και η πιο αξιόπιστη και τελικώς χρησιμοποιήθηκε, συνίσταται στη δημιουργία ορθο-εικόνων που προκύπτουν από την προβολή και επαναδειγματοληψία κάθε εικόνας σε κοινό οριζοντιογραφικό γεωγραφικό σύστημα αναφοράς, ανεξάρτητο από εκείνο του δέκτη με τη βοήθεια κατάλληλου ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

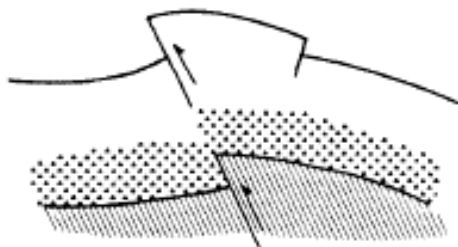
Επίσης από τα τρία παραγόμενα μπορούμε να παρατηρήσουμε, επιβεβαιώνοντας το παραπάνω, πως η μεταβλητή επιλογής κοινών σημείων (το πρώτο στάδιο της διαδικασίας ορθοαναγωγής), διαμορφώνει και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα. Αυτό μπορεί να οφείλεται ο τρόπος σάρωσης των φιλμ (η αεροφωτογραφία του 60 έχει πιο αλλοιωμένη εικόνα από αυτή του 45) καθώς και η διαφορά στις μεταξύ τους άγνωστες γωνίες λήψης.

Η ποσοτική ανάλυση των δεδομένων δεν συμφωνεί με το σεισμικό γεγονός έντασης $M=7.2$.

Σε αυτό καταλήγουμε από τον Stiros S.C., Pirazzoli P.A. et al., 1994 αφού αναλύεται πως λόγω της τεράστιας εδαφικής ανύψωσης (30-70 εκατοστά) και της ύπαρξης εβαπορίτων στη κατώτερη γεωλογική διαστρωμάτωση αναμένεται μεγαλύτερο διάνυσμα κατακόρυφης παρά οριζόντιας μετατόπισης.



Εικόνα 50. Παρατηρήσεις ανυψωμένης ακτογραμμής μετά τον σεισμό του 1953 (πηγή: Stiros S.C., Pirazzoli P.A. et al., 1994)



Εικόνα 51. Το στρώμα των εβαποριτών με τελείες δρα σαν ενισχυτής της κάθετης μετατόπισης (πηγή: Stiros S.C., Pirazzoli P.A. et al., 1994)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ποσοτική ανάλυση των δεδομένων δεν συμφωνεί με το σεισμικό γεγονός έντασης $M=7.2$. Παρατηρώντας ποιοτικά τα δεδομένα SNR (Εικόνα 49), και διανυσμάτων μετατοπίσεων (Εικόνα 48), μπορούμε να εντοπίσουμε περιοχές ενδιαφέροντος όπου συνδυαστικά με γεωλογικά, σεισμολογικά και γεωφυσικά δεδομένα μπορεί να γίνει μια ερμηνεία των μετατοπίσεων ως προς την ορθότητά τους. Αυτή βέβαια δεν μπορεί να γίνει ακόμα εις βάθος καθώς είναι έξω από το αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Αυτό που επιτυγχάνεται είναι η ποιοτική ερμηνεία των ποσοτικών μετρήσεων μετατόπισης λόγω της φύσης των αρχικών δεδομένων και λόγω των περιορισμών της μεθόδου που περιεγράφηκαν στο κεφάλαιο συζήτησης. Επίσης, μέσω αυτής της εργασίας γίνεται μια αξιολόγηση των μεθόδων και των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση των εδαφικών μετατοπίσεων σε επίπεδο υπο-εικονοστοιχείου με την χρήση αεροφωτογραφιών. Ήταν μία δοκιμασία για το *cosi-corr*, αφού ακόμα και οι δημιουργοί του ήταν λίγο απαισιόδοξοι αρχικά, για την εύρεση αποτελεσμάτων με την δεδομένη μέτρια προς κακή ποιότητα των αεροφωτογραφιών.

Η όλη διαδικασία για την ανίχνευση αυτών των περιοχών ήταν μια προσωπική πρόκληση λόγω της ιδιαιτερότητας των δεδομένων και της πολυπλοκότητας του αντικειμένου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

Μπιεράτος Η., Δελλαδέτσικας Π.-Μ. (επιμέλεια), (2010). Σεισμοί και οικιστική ανάπτυξη. Ο ρόλος του αρχιτεκτονικού, πολεοδομικού και χωροταξικού σχεδιασμού, εκδόσεις Κριτική ΑΕ.

Παπαζάχος Β., (1999). Οι σεισμοί τις Ελλάδας, εκδόσεις Ζήτη

Πατιάς Π., (1991). Εισαγωγή στη φωτογραμμετρία, εκδόσεις Ζήτη

Ξενόγλωσση

Ambraseys N.N and Jackson J.A. (1998). Faulting associated with historical and recent earthquakes in the eastern mediterranean region, *Geophys.J.Int.* 133, 390-406

Ayoub, F., LePrince, S., and Keene, L., (2009). User's Guide to COSI-CORR Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation, California Institute of Technology, USA.

Ayoub, F., LePrince, S., Avouac J.F. (2009). Co-registration and correlation of aerial photographs for ground deformation measurements, California Institute of Technology, USA

Crippen, R. E., & Blom, R. G. (1991). Measurement of subresolution terrain displacements using spot panchromatic imagery. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1991. IGARSS '91. Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management., International (pp. 1667–1670)

Delacourt, C., Allemand, P., Casson, B., & Vadon, H. (2004). Velocity field of the “La Clapière” landslide measured by the correlation of aerial and QuickBird satellite images. *Geophysical Research Letters*, 31, 15–19.

Goudarzi M., (2010). Detection and measurement of land deformations caused by seismic events using InSAR, Sub-pixel correlation, and Inversion techniques, ITC Enschede, The Netherlands

McKenzie D. (1972). Active Tectonics of the Mediterranean, *Geophys. J.R.str. Soc.*(1972), 109-185

- Papazachos B.C., Papaioannou Ch.A., Papazachos C.B., Savvaidis A.S. (1997). Atlas of isoseismal maps for strong shallow earthquakes in Greece and surrounding area (426BC-1995), University of Thessaloniki
- Stiros S.C., Pirazzoli P.A., Laborel J. and Laborel-Deguen F. (1994). The 1953 earthquake in Cephalonia (Western Hellenic Arc: coastal uplift and halotectonic faulting), *Geophys. J. Int.* , 117, 834-849
- Sokos, Kiratzi E., Gallovič A., Zahradník F., Serpetsidaki J., Plicka A., Janský V., Kostecký J., Tselentis J., G.-A. (2015). Rupture process of the 2014 Cephalonia, Greece, earthquake doublet (Mw6) as inferred from regional and local seismic data. *Tectonophysics* 656 (2015), 131-141
- Townshend J., Justice C., Gurney C., McManus J. (1992). The impact of misregistration on change detection," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 5, pp. 1054–1060.
- Wolf P., DeWitt B., Wilkinson B., (2000). *Elements of Photogrammetry with Application in GIS*, McGraw-Hill Education

Ιστοσελίδες

- <https://www.usgs.gov/>
- <http://www.oasp.gr/>