

ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορική»

***«Παρατήρηση της εδαφικής παραμόρφωσης του
δέλτα του Μόρνου με τη χρήση της συμβολομετρίας
των σταθερών ανακλαστήρων»***

Μεταπτυχιακή εργασία της Πηνελόπης Κουρκούλη
Επιβλέπουσα : Καραθανάση Βασιλεία

Αθήνα, Νοέμβριος 2010

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
1. Εισαγωγή	4
2. Εικονοληπτικά Συστήματα Ραντάρ.....	5
2.1 Συστήματα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος.....	5
2.1.1 Γενικά.....	5
2.1.2 Γεωμετρία εικονοληψίας συστημάτων SAR.....	7
2.1.2 Χαρακτηριστικά SAR απεικονίσεων.....	11
3. Τεχνικές παρατήρησης της παραμόρφωσης του εδάφους	12
3.1 Συμβολομετρία Ραντάρ	12
3.1.1 Γενικά.....	12
3.1.2 Βασικές αρχές της συμβολομετρίας Ραντάρ.....	13
3.2 Διαφορική Συμβολομετρία από δορυφόρους Ραντάρ	16
3.3 Συμβολομετρία Σταθερών Ανακλαστήρων.....	19
3.3.1 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της τεχνικής των σταθερών ανακλαστήρων	21
3.3.2 Εφαρμογές της συμβολομετρίας των σταθερών ανακλαστήρων	23
4. Περιοχή μελέτης.....	26
4.1 Το δέλτα του ποταμού Μόρνου.....	26
4.1.1 Γενικά.....	26
4.1.2 Γεωμορφολογία του δέλτα.....	28
4.1.3 Γεωλογικό υπόβαθρο του δέλτα	30
4.1.4 Τεκτονική του δέλτα.....	30
4.1.4 Σεισμικότητα του δέλτα και της ευρύτερης περιοχής.....	31
4.1.6 Στρωματογραφία.....	33
5. Προτεινόμενη μεθοδολογία και εφαρμογή της.....	36
5.1 Δεδομένα SAR απεικονίσεων	36
5.2 Επεξεργασία των SAR απεικονίσεων	39

5.3 Μεθοδολογία των Σταθερών Ανακλαστήρων (αλγόριθμος IPTA – Interferometric Point Target Analysis)	40
6. Αποτελέσματα	53
7. Συμπεράσματα	73
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	75

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στην εκπόνηση μελέτης η οποία βασίζεται στην τεχνική της συμβολομετρίας των σταθερών ανακλαστήρων. Ο λόγος για τον οποίο ασχολήθηκα με το παρών θέμα οφείλεται στην παρούσα τεχνική, η οποία παρουσιάζει ραγδαία ανάπτυξη την τελευταία δεκαετία και καλύπτει ένα αρκετά ευρύ φάσμα εφαρμογών της Τηλεπισκόπησης. Για την επιλογή του συγκεκριμένου θέματος, καθώς επίσης και στην εκπόνηση της εργασίας, βοήθησε σημαντικά η επιβλέπουσα καθηγήτρια μου κυρία Βασιλεία Καραθανάση, Επιπλέον, σημαντικές ήταν οι συμβουλές του κ. Ισαάκ Παρχαρίδη, τον οποίο και ευχαριστώ καθώς ήταν εκείνος που με παρότρυνε να ασχοληθώ με την συγκεκριμένη τεχνική, καθώς επίσης και η βοήθεια του κ. Ευθύμιου Καρύμπαλη.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία Διαστήματος για την διάθεση των εικόνων Ραντάρ.

1. Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την παρατήρηση της εδαφικής παραμόρφωσης του δέλτα του Μόρνου, με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Ραντάρ και συγκεκριμένα την εφαρμογή της μεθόδου της συμβολομετρίας των σταθερών ανακλαστήρων. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν εικόνες ραντάρ των δορυφόρων ERS-1,2 και ENVISAT, οι οποίες καλύπτουν τις χρονικές περιόδους 1992-2000 και 2002-2009 αντίστοιχα.

Βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη της τεχνικής συμβολομετρίας των ανακλαστήρων, ως ενός πολύ σημαντικού εργαλείου παραγωγής χαρτών εδαφικής παραμορφώσης χωρίς τη χρήση κάποιου επίγειου μέσου. Όπως είναι αντιληπτό, αυτό είναι αρκετά σημαντικό καθώς με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η χρονοβόρα και πιθανόν η μεγάλη κόστους έρευνα πεδίου.

Για την διαδικασία αυτή, χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά GAMMA, με τη χρήση του οποίου παράχθηκαν οι χάρτες εδαφικής παραμόρφωσης, καθώς επίσης τα λογισμικά ERDAS Imagine και ArcGIS με σκοπό την τελειοποίηση των τελικών χαρτών.

2. Εικονοληπτικά Συστήματα Ραντάρ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν συνοπτικά οι βασικές έννοιες των εικονοληπτικών συστημάτων Ραντάρ, όπως επίσης θα δωθούν οι ορισμοί που χρησιμοποιήθηκαν και στους οποίους γίνεται αναφορά κατά την διάρκεια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

2.1 Συστήματα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος

2.1.1 Γενικά

Ένα σύστημα Ραντάρ (Radio Detection and Ranging) λειτουργεί στα φασματικά κανάλια των ραδιοφωνικών και των μικροκυμάτων (220 MHz – 40 GHz) και ανιχνεύει την ανακλώμενη και εκπεμπόμενη ακτινοβολία από την επιφάνεια της Γης.

Ένα ενεργό σύστημα Ραντάρ εκπέμπει παλμούς ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και καταγράφει την επιστροφή τους, δηλαδή με άλλα λόγια το ποσό της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, από τους στόχους της επιφάνειας της Γης. Καλούνται ενεργά συστήματα διότι παρέχουν την δική τους ακτινοβολία και κατά αυτό τον τρόπο λειτουργούν ανεξάρτητα από το ηλιακό φως. Επιπλέον, σημαντικό χαρακτηριστικό των συστημάτων Ραντάρ είναι η ικανότητά τους να καταγράφουν την ακτινοβολία ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών και της νεφοκάλυψης που επικρατούν στην ατμόσφαιρα, γι' αυτό και ονομάζονται παντός καιρού. Αυτό συμβαίνει διότι η ατμοσφαιρική απορρόφηση και σκέδαση είναι ελάχιστες στην ζώνη των μικροκυμάτων.

Τα συστήματα εικονοληπτικών Ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar, SAR) προτάθηκαν από τον Carl Wiley το 1951 (Wiley, 1985). Τα συστήματα SAR συνθέτουν τεχνητά κεραίες ιδιαίτερα μεγάλου μήκους εκμεταλλευόμενα την κίνηση του δορυφόρου και την αρχή του φαινομένου Doppler, με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας στην διεύθυνση των αζιμούθιων. Συνήθως η παρατήρηση της επιφάνειας πραγματοποιείται από αεροσκάφος (airborne) ή δορυφόρο (spaceborne).

Το πρώτο διαστημικό σύστημα SAR που τέθηκε σε τροχιά εγκαταστάθηκε από την NASA στον γεωστατικό δορυφόρο SEASAT το 1978 και λειτούργησε για περίπου έξι εβδομάδες (Lame & Born, 1982). Παρά την σύντομη διάρκεια της αποστολής, τέθηκαν οι βάσεις για την κατασκευή εξελιγμένων εικονοληπτικών συστημάτων SAR στη δεκαετία του 1980 και ιδιαίτερα στο πλαίσιο του διαστημικού προγράμματος του διαστημικού λεωφορείου της NASA (SIR-A και SIR-B) (Elachi et al., 1986). Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, με τη

διαθεσιμότητα στο ευρύ επιστημονικό κοινό δεδομένων από τους δορυφόρους ERS-1 (ESA, 1991,), ERS-2 (ESA, 1995), JERS-1 (Nemoto et al., 1991, Nishidai et al., 1994) και RADARSAT-1 (Raney et al., 1991) παρατηρείται ιδιαίτερο ενδιαφέρον για στην περιοχή των μικροκυματικών αισθητήρων.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αποστολή SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (Werner, 2001), αποτέλεσμα σύμπραξης/συνεργασίας της National Aeronautics and Space Administration (NASA), της National Image and Mapping Agency (NIMA), της Italian Space Agency (ASI) και της German AeroSpace Agency (DARA) δεδομένα της οποίας χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου (DEM) χωρικής ανάλυσης ~90 m (στο z) για το 80% των χερσαίων εκτάσεων της Γης μεταξύ γεωγραφικού πλάτους 60° Β και 56° Ν (Rodríguez et al. 2005).

Την επιτυχία των προηγούμενων αποστολών ακολούθησε η κατασκευή και εκτόξευση εξελιγμένων δορυφορικών συστημάτων εικονοληπτικών SAR, αρχικά με τους ENVISAT ASAR (Ευρώπη) και ALOS PALSAR (Ιαπωνία) και στη συνέχεια με τους RADARSAT-2 (Καναδάς) (Thompson et al., 2008), TerraSAR-X (Γερμανία) (Eineder et al., 2005) και Cosmo-SkyMed (Ιταλία) (De Luca et al., 2007). Στον Πίνακα 2.1 παρατίθενται τα χρονικά διαστήματα λειτουργίας των σημαντικότερων δορυφορικών συστημάτων SAR.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1. Χρονικές περίοδοι λειτουργίας των δορυφορικών συστημάτων SAR (Stevens & Wadge, 2004)

Δορυφόρος	Αισθητήρας	Φασματικό κανάλι	Επαναληψιμότητα (ημέρες)	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09
ERS-1	AMI	C	35	■	■	■	■	■	■	■	■	■										
JERS-1	SAR	L	44		■	■	■	■	■	■	■											
RADARSAT-1	SAR	C	24					■	■	■	■	■	■	■	■	■						
ERS-2	AMI	C	35					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ENVISAT	ASAR	C	35											■	■	■	■	■	■	■	■	■
ALOS	PALSA	L	46													■	■	■	■	■	■	■
RADARSAT-2	SAR	C	24																	■	■	■
TerraSAR-X	SAR	X	11																		■	■
Cosmo-SkyMed	SAR	X	16																		■	■

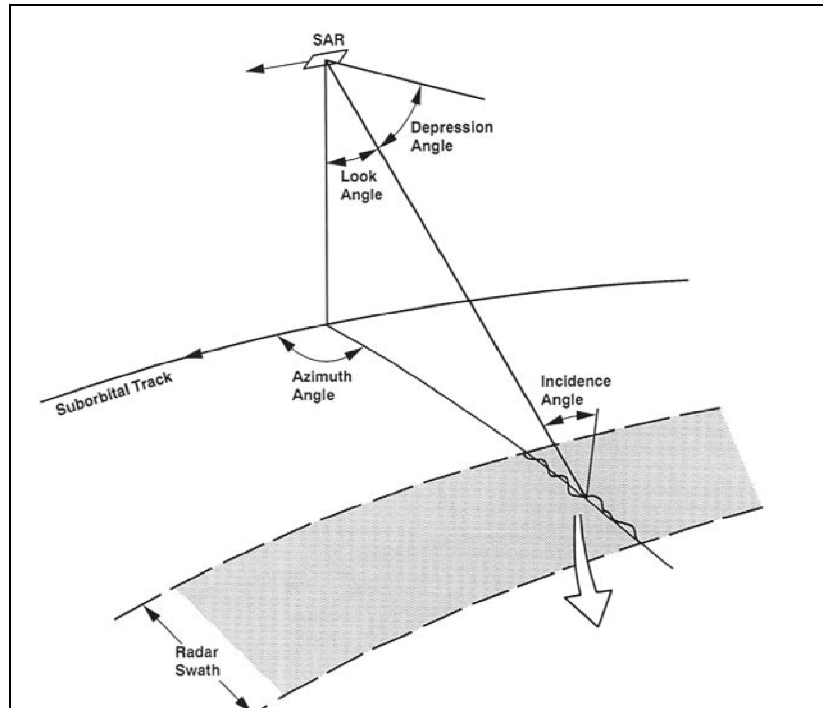
Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ραγδαία ανάπτυξη στο χώρο των Ραντάρ συνθετικής απεικόνισης. Πλέον οι έρευνες προσανατολίζονται στη σχεδίαση συστημάτων SAR υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας και περίοδο επαναληπτικότητας κατάλληλη για

επιχειρησιακούς σκοπούς, λειτουργώντας σχεδόν σε ολόκληρο το εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Πρόκληση αποτελεί η δυνατότητα επεξεργασίας των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (real time data).

2.1.2 Γεωμετρία εικονοληψίας συστημάτων SAR

Τα Ραντάρ συνθετικής απεικόνισης, σε αντίθεση με τους οπτικούς σαρωτές, εκπέμπουν και λαμβάνουν την ακτινοβολία με πλάγια προοπτική (υπό δεξιά γωνία της κίνησης του δορυφόρου) και εγκάρσια της τροχιάς του δορυφόρου. Η λήψη των απεικονίσεων πραγματοποιείται είτε κατά την καθοδική τροχιά (Βορρά προς Νότο), ή κατά την ανοδική (Νότο προς Βορρά). Η διεύθυνση κατά την οποία ένα εικονηπτικό σύστημα SAR εκπέμπει και λαμβάνει την ακτινοβολία καλείται διεύθυνση παρατήρησης (look direction ή Line Of Sight - LOS). Η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση παρατήρησης με την κάθετη στο έδαφος καλείται γωνία παρατήρησης (look angle). Σε αυτό το σημείο, αξίζει να τονιστεί η σημαντικότητα της γωνίας παρατήρησης, καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ένταση της οπισθοσκέδασης (backscattering) των στόχων της γήινης επιφάνειας.

Ένα σύστημα Ραντάρ σε κάθε “στιγμή” σαρώνει μια περιοχή της επιφάνειας της Γης η οποία καλείται ίχνος της κεραίας (antenna footprint). Η διεύθυνση της κίνησης του δορυφόρου καλείται διεύθυνση αζιμουθίου της απεικόνισης (azimuth direction ή along track direction) ενώ η κάθετη προς την διεύθυνση του αζιμουθίου της απεικόνισης καλείται διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων της απεικόνισης (range direction ή across-track direction) (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1. Γεωμετρία εικονοληπτικού συστήματος SAR.

Οι παλμοί εκπέμπονται με μια σταθερή ταχύτητα, τη σταθερή συχνότητα επανάληψης (PRF), σε εύρος συχνοτήτων MHz-GHz, με σκοπό να φτάσουν τους στόχους-αντικείμενα που βρίσκονται στην επιφάνεια της Γης. Η συχνότητα εξαρτάται από την πλατφόρμα που χρησιμοποιεί το Ραντάρ, καθώς επίσης από τις εφαρμογές για τις οποίες είναι κατασκευασμένος ο εκάστοτε δορυφόρος. Οι συγκεκριμένες συχνότητες τυπικά αναφέρονται στην συχνότητα την οποία έχει κάθε φασματικό κανάλι (Πίνακας 2.2).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2. Εύρη Συχνοτήτων και Μηκών Κύματος SAR

Κανάλι	Συχνότητα (GHz)	Μήκος κύματος (cm)
Ka	26,5 – 40	0,75 – 1,18
K	18 – 26,5	1,18 – 1,67
Ku	12,5 – 18	1,67 – 2,40
X	8 – 12,5	2,40 – 3,75
C	4 – 8	3,75 – 7,5
S	2 – 4	7,5 – 15
L	1 – 2	15 – 30
UHF	0,3 – 1	30 - 100
P	0,28 – 0,39	77 – 107
VHF	0,03 – 0,30	100 - 10000

Η μέτρηση του χρόνου ο οποίος απαιτείται για να διανύσει το σήμα του ραντάρ την απόσταση δορυφόρου-γης-δορυφόρου, επιτρέπει τον καθορισμό και υπολογισμό της απόστασης μεταξύ του Ραντάρ και των αντικειμένων που βρίσκονται στη γήινη επιφάνεια.

Από τη στιγμή που το εκπεμπόμενο σήμα είναι μία σύνθετη ποσότητα, έτσι και το ανακλώμενο σήμα είναι σύνθετο. Ένα σύστημα Ραντάρ λειτουργεί συνεκτικά όταν καταγράφεται τόσο το πραγματικό (real) όσο και το φανταστικό (imaginary) κανάλι της ηχούς.

Τα δεδομένα μπορούν να αναπαρασταθούν είτε ως IQ (μιγαδικός αριθμός) ή ως πραγματικός. Όταν μόνο η ισχύς του σήματος καταγράφεται τότε το Ραντάρ λειτουργεί ως ένα όργανο το οποίο δεν έχει συνοχή.

Η κλίμακα σχετίζεται με την ακτινοβολία η οποία οπισθοσκεδάζεται στον αισθητήρα από τον εκάστοτε στόχο που βρίσκεται στην γήινη επιφάνεια και το οποίο εκφράζεται μαθηματικά με την παρακάτω εξίσωση (εξίσωση ραντάρ) :

$$P_r = \frac{P_t G A_e}{(4\pi R^2)^2} \sigma$$

Η λαμβανόμενη ακτινοβολία P_r εξαρτάται από την εκπεμπόμενη P_t και διαβαθμίζεται από την απόσταση μεταξύ του Ραντάρ και του στόχου R , το κέρδος της κεραίας G , την ενεργή επιφάνεια της κεραίας A_e και την ενεργή διατομή ραντάρ (RCS) του αντικειμένου (σ), η οποία είναι η μετρούμενη ποσότητα του στόχου και ορίζεται θεωρητικά για σημειακά μόνο αντικείμενα. Αντίθετα, όταν οι στόχοι-αντικείμενα είναι διασκορπισμένοι, τότε η εγκάρσια τομή αντικαθιστάται από τον συντελεστή οπισθοσκέδασης σ_{Ao} , ο οποίος ορίζεται ως η εγκάρσια τομή ανά μοναδιαία επιφάνεια. Η τιμή της φάσης εκφράζεται με τη διπλή απόσταση μεταξύ του αισθητήρα του Ραντάρ και του στόχου, καθώς επίσης και με τις ιδιότητες σκέδασης του στόχου.

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} R + \varphi_{scatter}$$

όπου λ το μήκος κύματος και $\varphi_{scatter}$ περιλαμβάνει τον όρο της φάσης ο οποίος εισάγεται από το αντικείμενο - στόχο.

Η πόλωση του εκπεμπόμενου παλμού επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της οπισθοσκέδασης ενός στόχου. Η λήψη εικόνων παράλληλης πόλωσης, HH (οριζόντια εκπομπή, οριζόντια

λήψη) ή VV (κατακόρυφη εκπομπή, κατακόρυφη λήψη), συνήθως προτιμάται καθώς παρέχουν πιο ισχυρά σήματα επιστροφής. Δεδομένου ότι οι μεταβολές του επιπέδου πόλωσης είναι εντονότερες σε επιφάνειες με βλάστηση, τεχνικές που αξιοποιούν τη δυνατότητα πολλαπλής πόλωσης μερικών εικονοληπτικών SAR, έχουν περιορισμένες εφαρμογές στη μελέτη των εδαφικών παραμορφώσεων.

Η χωρική διακριτική ικανότητα (και στις δύο διευθύνσεις) ενός συστήματος Ραντάρ εξαρτάται από την γεωμετρία του αισθητήρα, τις ιδιότητες της μικροκυματικής ακτινοβολίας, καθώς επίσης και από τα χαρακτηριστικά των εκπεμπόμενων παλμών. Για τον λόγο ότι ένα σύστημα Ραντάρ λαμβάνει και εκπέμπει την ακτινοβολία με εγκάρσια προοπτική, με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται ο κορεσμός του σήματος, το οποίο ενδέχεται να προκύψει εάν ο αισθητήρας λάμβανε και ανακλούσε ακτινοβολία στη διεύθυνση του ναδύρ. Επιπλέον, για τον ίδιο λόγο αυξάνει θεαματικά η χωρική διακριτική ικανότητα. Η χωρική διακριτική ικανότητα ενός συστήματος Ραντάρ εξαρτάται από το μήκος του παλμού (pulse length), το οποίο ορίζεται ως το διάστημα που διανύει το σήμα του Ραντάρ κατά τη χρονική διάρκεια ενός παλμού. Επιπλέον, η χωρική διακριτική ικανότητα χωρίζεται σε δύο, εκείνη της απόστασης (range or across-track resolution) και του αζιμούθιου (azimuth or along-track resolution), οι οποίες αναφέρονται σε κάθετη και παράλληλη αντίστοιχα διεύθυνση ως προς την διεύθυνση του δορυφόρου (Καρτάλης, 2006).

Η χωρική διακριτική ικανότητα του αζιμούθιου ενός συστήματος Ραντάρ είναι ανάλογη με το μήκος κύματος και με την απόσταση των κεκλιμένων αποστάσεων, αντιστρόφως ανάλογη στην διεύθυνση της κίνησης του δορυφόρου. Θεωρώντας ότι η κεραία δεν μπορεί να είναι αρκετά μεγάλου μήκους, κατά συνέπεια η διακριτική ικανότητα στο αζιμούθιο είναι πολύ μικρή. Με αυτό τον τρόπο συνθέεται μία κεραία Ραντάρ και αυτή είναι η αρχή στην οποία στηρίζεται ένα εικονοληπτικό συνθετικό σύστημα Ραντάρ (GAMMA Documentation, 2006).

Η χωρική διακριτική ικανότητα στη πλάγια απόσταση καθορίζεται από το μήκος του παλμού. Η διάκριση δύο αντικειμένων-στόχων σε διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση κίνησης του δορυφόρου είναι δυνατή όταν τα σήματα της οπισθοσκεδάσής τους φτάνουν στον δορυφόρο σε διαφορετικούς χρόνους. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει τα δύο αντικείμενα να απέχουν απόσταση μεγαλύτερη από το μισό μήκος κύματος του παλμού στη διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων. Εκφράζοντας μαθηματικά τη συγκεκριμένη πρόταση, για να διαχωριστούν δύο αντικείμενα – στόχοι, τα οποία απέχουν απόσταση R στη διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων, θα πρέπει η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία από αυτά να είναι τέτοια ώστε να πληροίται η επόμενη συνθήκη:

$$R > \tau c / 2$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός και t είναι η χρονική διάρκεια του εκπεμπόμενου παλμού του ραντάρ. Η βελτίωση της χωρικής διακριτικής ικανότητας της πλάγιας απόστασης μπορεί να επέλθει με τη μείωση του μήκους παλμού, λαμβάνοντας όμως υπόψη ότι αυτή η μείωση δεν μπορεί να είναι απεριόριστη λόγω της ύπαρξης τεχνικών περιορισμών (Καρτάλης, 2006).

2.1.2 Χαρακτηριστικά SAR απεικονίσεων

Μια SAR απεικόνιση αποτελεί την μονοδιάστατη προβολή στην διεύθυνση των κεκλιμένων αποστάσεων, της τρισδιάστατης οπισθοσκέδασης μιας επιφάνειας. Η απεικόνιση έχει ως φυσικές συντεταγμένες τις πλάγιες αποστάσεις και το αζιμούθιο, παράμετροι που ορίζουν την γεωμετρία της συνθετικής απεικόνισης. Η προβολή της απεικόνισης στην επιφάνεια, ο μετασχηματισμός δηλαδή των πλάγιων αποστάσεων σε αποστάσεις εδάφους, πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη την τοπική γωνία πρόσπτωσης στο επιλεγμένο ελλειψοειδές αναφοράς.

Τα δεδομένα μιας SAR απεικόνισης είναι ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων οι οποίες καθορίζονται από την ισχύ του σήματος οπισθοσκέδασης ενός αντικειμένου. Η ισχύς του σήματος και συνεπώς η ψηφιακή τιμή ενός εικονοστοιχείου της εικόνας εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας (τοπογραφία, τραχύτητα του εδάφους), τις διηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών (π.χ υγρασία, ξηρασία) και τα χαρακτηριστικά της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (συχνότητα, πόλωση, γωνία πρόσπτωσης) (Καρτάλης, 2006).

Λόγω της γεωμετρίας παρατήρησης, οι SAR απεικονίσεις εμφανίζουν διάφορες γεωμετρικές παραμορφώσεις, όπως αναστροφή (layover), σμίκρυνση (foreshortening), επιμήκυνση (lengthening) και σκίαση (shadow) (Σχήμα 2.3). Τέτοιου είδους γεωμετρικές παραμορφώσεις σχετίζονται κυρίως με την παρουσία αναγλύφου-τοπογραφίας (Μερτίκας, 1999) και αφαιρούνται εύκολα από τις απεικονίσεις, εφόσον είναι διαθέσιμα ψηφιακά μοντέλου εδάφους της εκάστοτε περιοχής μελέτης.



Σχήμα 2.3. Παραδείγματα γεωμετρικής παραμόρφωσης, σκίασης και αναστροφής αντίστοιχα.

3. Τεχνικές παρατήρησης της παραμόρφωσης του εδάφους

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν μεθοδολογίες που βασίζονται στα εικονοληπτικά συστήματα Ραντάρ και οι οποίες υπολογίζουν και καταγράφουν την παραμόρφωση του εδάφους. Συγκεκριμένα θα γίνει συνοπτική αναφορά της τεχνικής η οποία εφαρμόστηκε πρώτη, εκείνη της συμβολομετρίας Ραντάρ και τέλος γίνεται ανάλυση και περιγραφή της πιο εξελιγμένης μεθοδολογίας, της συμβολομετρίας των σταθερών ανακλαστήρων.

3.1 Συμβολομετρία Ραντάρ

3.1.1 Γενικά

Οι εφαρμογές διαστημικών τεχνικών, για την παρακολούθηση εδαφικών παραμορφώσεων, έχουν να παρουσιάσουν τα τελευταία χρόνια πολύ σημαντικά και χρήσιμα αποτελέσματα. Τα τελευταία 20 χρόνια η συμβολομετρία Ραντάρ αναπτύχθηκε ως ένα από τα πλέον σημαντικά εργαλεία της Τηλεπισκόπησης, καθώς χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για τον ακριβή υπολογισμό και την καταγραφή της παραμόρφωσης του εδάφους (Berardino et al., 2002 ; Colesanti et al., 2001; Ferretti et al., 2000,2001; Galloway et al., 1998). Η παραμόρφωση του εδάφους οφείλεται τόσο σε φυσικά φαινόμενα, γεωλογικά και γεωφυσικά, όπως σεισμικά γεγονότα, καθίζηση, κατολισθήσεις και ηφαιστειακές εκρήξεις, όσο και σε ανθρωπογενή αίτια που σχετίζονται με γεωτρήσεις υδάτων και πετρελαίου, μεταλλεία κτλ.

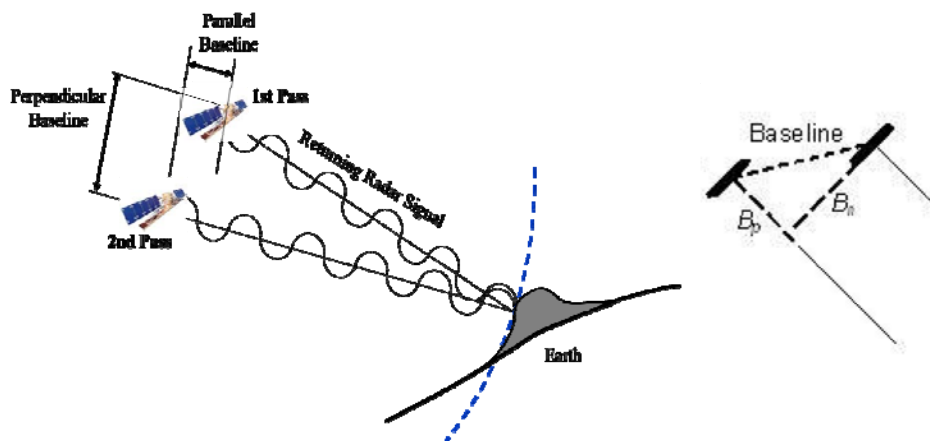
Η συμβολομετρία διακρίνεται σε διάφορα είδη τα οποία εξαρτώνται από την διάταξη των κεραιών και της μεθόδου λήψης των απεικονίσεων, την (α) κατά πλάτος συμβολομετρία (across-track interferometry), (β) την κατά μήκος συμβολομετρία (along-track interferometry), (γ) την επαναληπτική συμβολομετρία και τέλος την (δ) διαφορική συμβολομετρία (differential interferometry).

Η συμβολομετρία Ραντάρ -InSAR (Gabriel et al., 1989; Massonnet and Feigl, 1998; Hanssen, 2001) είναι η τεχνική η οποία εξάγει πληροφορία που σχετίζεται με την τοπογραφία της Γης (Goldstein et al., 1988). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί τη διαφορά φάσης μεταξύ δύο λήψεων εικόνων Ραντάρ οι οποίες έχουν αποκτηθεί από ελαφρώς διαφορετικές θέσεις στο χώρο ή στο χρόνο. Οι πρώτες μελέτες που αφορούν στη συμβολομετρία εστίαζαν στην εξαγωγή της τοπογραφίας, παρουσιάζοντας την δυνατότητα της συμβολομετρίας InSAR στην παραγωγή υψηλής ανάλυσης ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου (DEM) (Ferretti et al., 1997). Στην συνέχεια, εκτός από την

παραγωγή χαρτών ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου, αναπτύχθηκε η τεχνική της διαφορικής συμβολομετρίας (DInSAR), η οποία χρησιμοποιείται για τη χαρτογράφηση των παραμορφώσεων του εδάφους με μεγάλη ακρίβεια, αξιοποιώντας τη διαφορά φάσης μεταξύ δύο διαφορετικών λήψεων που καλύπτουν την ίδια περιοχή.

3.1.2 Βασικές αρχές της συμβολομετρίας Ραντάρ

Σε ένα συμβολομετρικό σύστημα SAR η απόσταση μεταξύ των δύο αισθητήρων οι οποίοι παρατηρούν την ίδια περιοχή μελέτης από δύο ελαφρώς διαφορετικές θέσεις στο διάστημα αναφέρεται ως άνυσμα βάσης (baseline) (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1. Γεωμετρία ενός συμβολομετρικού συστήματος SAR.

Το άνυσμα βάσης είναι μια βασική παράμετρος της συμβολομετρικής γεωμετρίας το οποίο μπορεί να αναλυθεί στην παράλληλη στη διεύθυνση των αποστάσεων της απεικόνισης συνιστώσα (Parallel Baseline ή B_n) και στην εγκάρσια συνιστώσα (Perpendicular Baseline ή B_p) (Σχήμα 3.1). Πολύ βασικό και σημαντικό ρόλο στην καταλληλότητα ενός ζεύγους SAR απεικονίσεων διαδραματίζει η εγκάρσια συνιστώσα του ανύσματος βάσης (GAMMA Documentation, 2006).

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως βασική αρχή της συμβολομετρίας Ραντάρ είναι ότι συνδυάζει δύο ή περισσότερες SAR απεικονίσεις, βάσει των οποίων εξάγονται πληροφορίες σχετικά με τη διαφορά φάσης.

Το σήμα που σκεδάζεται από ένα στόχο στην επιφάνεια της Γης και λαμβάνεται από ένα σύστημα Ραντάρ σε μία απόσταση R , έχει πλάτος (amplitude) A , το οποίο σχετίζεται με την ένταση της σκέδασης του στόχου και φάση ϕ , η οποία σχετίζεται με την διπλή κατεύθυνση διαδρομή του σήματος μεταξύ του Ραντάρ και του στόχου.

Η φάση ϕ του σήματος ενός Ραντάρ εκφράζεται μαθηματικά ως:

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} R + \phi_{scatter} + \phi_{delay}$$

όπου ο πρώτος παράγοντας εκφράζει την συμβολή της φάσης της διπλής κατεύθυνσης διαδρομής μεταξύ του στόχου και του Ραντάρ. Ο δεύτερος παράγοντας εκφράζει την καθυστέρηση της φάσης λόγω οπισθοσκέδασης και ο τρίτος παράγοντας εκφράζει την καθυστέρηση της φάσης η οποία οφείλεται σε ατμοσφαιρικές επιδράσεις.

Εάν τώρα υπολογιστεί η διαφορά μεταξύ των φάσεων ενός στόχου της επιφάνειας της Γης, από δύο ελαφρώς διαφορετικές θέσεις στο διάστημα, έχοντας αποστάσεις R_1 και R_2 αντίστοιχα, τότε η διαφορά φάσης είναι:

$$\phi = \Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_1) + \Delta\phi_{scatter} + \Delta\phi_{delay}$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος και το αρνητικό πρόσημο εκφράζει την καθυστέρηση της φάσης του σήματος επιστροφής.

Το αποτέλεσμα αυτής της διαφοράς φάσης καλείται συμβολογράφημα. Το συμβολογράφημα είναι μία σύνθετη εικόνα η οποία έχει προέλθει από την εγγραφή δύο ή περισσότερων SAR απεικονίσεων.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι η ποιότητα της συμβολομετρικής φάσης εξαρτάται από την συνάφεια των SAR απεικονίσεων και εκφράζεται μαθηματικά ως εξής (Born et al, 1980) :

$$\gamma = \frac{E\{y_1 y_2^*\}}{\sqrt{E\{|y_1|^2\} \cdot E\{|y_2|^2\}}}$$

όπου y_1, y_2 τα εικονοστοιχεία των δύο SAR απεικονίσεων και $E\{\cdot\}$ ο χωρικός μέσος όρος.

Η ισχύς και η φάση του συμβολογραφήματος αναφέρονται γενικά στο βαθμό συνάφειας και στη συμβολομετρική φάση (InSAR) αντίστοιχα.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι η ποιότητα της συμβολομετρικής φάσης εξαρτάται από την συνάφεια η οποία μετρά ουσιαστικά το βαθμό συσχετισμού μεταξύ δύο SAR απεικονίσεων. Το εύρος των τιμών που μπορεί να πάρει η συνάφεια είναι από 0 έως 1. Όταν η τιμή της συνάφειας πλησιάζει τη μηδενική τιμή, τότε υπάρχει πλήρης αποσυσχέτιση μεταξύ των απεικονίσεων, ενώ αντίθετα όταν η τιμή πλησιάζει την μονάδα, τότε υπάρχει πλήρης συσχέτιση των εικόνων.

Επιπλέον, η συμβολομετρική φάση μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ 0 και 2π και επομένως αναπαριστάται ως ένα σύνολο από κροσσούς. Δύο συνεχόμενοι κροσσοί αναπαριστούν διαφορά φάσης 2π . Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, η συνάφεια αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει τη συμβολομετρική φάση. Με άλλα λόγια, η συνάφεια είναι ένα μέτρο χαρακτηρισμού της ποιότητας της φάσης. Έτσι, περιοχές που χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές συνάφειας, εμφανίζουν πολύ ευκρινείς κροσσούς (GAMMA Documentation, 2006).

Επιπλέον, οι ιδιότητες της συμβολομετρικής φάσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας. Από τη στιγμή που η συμβολομετρική φάση σχετίζεται με τη διαφορά της διπλής απόστασης του σήματος μεταξύ του ραντάρ και του στόχου-αντικειμένου στις δύο λήψεις αντίστοιχα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σκοπό την παρατήρηση ενός σημείου που βρίσκεται στην επιφάνεια της Γης και να ανιχνευθεί εάν αυτό το σημείο υπέστη κάποια μετακίνηση μεταξύ δύο διαφορετικών λήψεων.

Για να τονιστούν οι κύριες ιδιότητες της συμβολομετρικής φάσης η οποία αποτελεί το άθροισμα επιμέρους συνιστωσών, παραθέεται η παρακάτω μαθηματική εξίσωση :

$$\varphi = \varphi_{\text{flat_earth}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{disp}} + \varphi_{\text{path}} + \varphi_{\text{noise}} + n \cdot 2\pi$$

όπου

$\varphi_{\text{flat_earth}}$: φάση λόγω της επίπεδης Γης

φ_{topo} : φάση λόγω της τοπογραφίας

φ_{disp} : φάση λόγω της εδαφικής παραμόρφωσης

φ_{path} : φάση λόγω της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης του σήματος

φ_{noise} : φάση λόγω του θορύβου

$n \cdot 2\pi$: παράγοντας του ξετυλίγματος της φάσης (phase unwrapping)

Ο όρος επίπεδης Γης εκφράζει τη φάση εξαιτίας της καμπυλότητας της Γης, η οποία προκαλεί μεταβολές της γωνίας παρατήρησης κατά μήκος της διεύθυνσης των αποστάσεων. Ο όρος τοπογραφίας σχετίζεται άμεσα με το μήκος της κάθετης συνιστώσας B_{\perp} , εφόσον η αύξησή της οδηγεί συνήθως στην παρουσία υπολειμματικής τοπογραφικής φάσης στα διαφορικά συμβολογραφήματα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο

υπολογισμός του πραγματοποιείται είτε με προσομοίωση της φάσης βάσει ενός υπάρχοντος DEM και των τροχιακών δεδομένων, ή από κατάλληλα επιλεγμένες ανεξάρτητες SAR απεικονίσεις. Ο όρος των ατμοσφαιρικών επιδράσεων, λόγω του στοχαστικού του χαρακτήρα, εισάγει μη συστηματικό σφάλμα στις παρατηρήσεις της συμβολομετρίας Ραντάρ. Η απομάκρυνση τέτοιων επιδράσεων από το σήμα αποτελεί αρκετά επίπονη διαδικασία, ενώ πολλές φορές είναι απαραίτητη η διάθεση συμπληρωματικών δεδομένων από άλλες πηγές παρατήρησης. Το μη επικαλυπτόμενο μέρος του φάσματος συχνοτήτων των δύο SAR απεικονίσεων σε συνδυασμό με την παρουσία στιγμάτων οδηγούν στην εμφάνιση θορύβου στα συμβολογραφήματα, γεγονός που εκφράζεται με την εισαγωγή συστηματικού σφάλματος στις παρατηρήσεις. Μερική απομάκρυνση του θορύβου επιτυγχάνεται στη μεν πρώτη περίπτωση με την εφαρμογή φίλτρων στο πεδίο των συχνοτήτων, στη δε δεύτερη περίπτωση με χωρικά φίλτρα μέσης τιμής.

Τέλος ο όρος της αέρας ασάφειας αντιστοιχεί στο αέρας πολλαπλάσιο του 2π που οφείλει να προστεθεί στη μετρούμενη τιμή της φάσης, προκειμένου να ανακτηθεί η πραγματική τιμή της, διαδικασία η οποία καλείται ξετύλιγμα της φάσης (phase unwrapping).

3.2 Διαφορική Συμβολομετρία από δορυφόρους Ραντάρ

Η κίνηση του εδάφους, και κατ' επέκταση των υπερκείμενων κατασκευών, είναι το αποτέλεσμα είτε φυσικών διεργασιών ή της ανθρώπινης δραστηριότητας. Τέτοιες μετατοπίσεις δύνανται να αποτελέσουν παράγοντες κινδύνου με άμεσες επιπτώσεις στις κτιριακές υποδομές. Επειδή συσχετίζονται, εν μέρει, με το γεωλογικό υπόβαθρο μπορούν να εμφανιστούν και σε αστικό και σε αγροτικό περιβάλλον. Πολλές από τις διεργασίες που ευθύνονται για την παρουσία εδαφικών μετακινήσεων μπορούν να επεκταθούν σε μεγάλες περιοχές αυξάνοντας έτσι το βαθμό κινδύνου στο κτιριακό απόθεμα. Ο έλεγχος και η παρακολούθηση των εδαφικών μετατοπίσεων σε περιοχές υψηλού κινδύνου δίνει την δυνατότητα μετριασμού ακόμα και αποτροπής των επιπτώσεων.

Η βασική ιδέα της διαφορικής επεξεργασίας του σήματος (Διαφορική Συμβολομετρία Ραντάρ – DInSAR) είναι η απομάκρυνση του όρου της τοπογραφίας από την παρατηρούμενη συμβολομετρική φάση, επιτρέποντας την απομόνωση της φάσης που σχετίζεται με διαφορικές κινήσεις που έλαβαν χώρα στο χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο λήψεων (Gabriel et al., 1989). Με άλλα λόγια η διαφορική συμβολομετρία από

δορυφόρους Ραντάρ είναι η τεχνική κατά την οποία η φάση του σκεδαζόμενου σήματος Ραντάρ από δύο ή περισσότερες εικόνες της ίδιας περιοχής επεξεργάζεται με σκοπό την ανίχνευση εδαφικών κινήσεων. Η φάση, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται ώστε το σήμα να ταξιδέψει από τον δορυφόρο στην γήινη επιφάνεια και να επιστρέψει σ' αυτόν, αλλάζει όταν η απόσταση δορυφόρου-γης μεταβληθεί λόγω φυσικών ή ανθρωπογενών αιτιών. Τέτοιου είδους δορυφορικές διατάξεις προσανατολίζονται κυρίως στην αναγνώριση κατακόρυφων κινήσεων της επιφάνειας, ενώ στερούνται ευαισθησίας στην οριζόντια διάσταση (Ferretti et al., 2004)).

Η φάση η οποία σχετίζεται με την τοπογραφία, μπορεί να υπολογιστεί είτε χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου-DEM (2-pass διαφορική συμβολομετρία) ή χρησιμοποιώντας ένα ανεξάρτητο συμβολογράφημα, χωρίς να περιέχει τον παράγοντα της φάσης που οφείλεται σε διαφορική παραμόρφωση (3- και 4-pass διαφορική συμβολομετρία). Ο αριθμός ο οποίος χαρακτηρίζει την κάθε τεχνική, δείχνει τον αριθμό των απεικονίσεων SAR που απαιτούνται, έτσι ώστε να παραχθεί ένα διαφορικό συμβολογράφημα. Στην πράξη, η επιλογή μίας εκ των παραπάνω μεθοδολογιών, εξαρτάται από την διαθεσιμότητα των δεδομένων και στην παρουσία σφαλμάτων της αποκατεστημένης φάσης (phase unwrapping), τα οποία προκύπτουν από απότομα εδάφη.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της 3-pass μεθοδολογίας έναντι της 2-pass, είναι ότι δεν απαιτείται DEM. Ωστόσο, η χρησιμοποίηση DEM, με σκοπό την εξαγωγή της τοπογραφικής φάσης, βοηθά στην αποφυγή σφαλμάτων της αποκατεστημένης φάσης, καθώς επίσης και την αποφυγή σφαλμάτων της τοπογραφικής φάσης που οφείλονται στην ατμόσφαιρα και την ιονόσφαιρα.

Πιο αναλυτικά, η 2-pass διαφορική συμβολομετρία, απαιτεί την χρησιμοποίηση ενός συμβολομετρικού ζεύγους και ένα DEM. Η βασική ιδέα είναι ότι ένα συμβολογράφημα (έχει φάση η οποία αντιστοιχεί στην τοπογραφία του αναγλύφου) προσομοιώνεται βάσει του DEM. Στην συνέχεια, η φάση που οφείλεται στην τοπογραφία, αφαιρείται από το αρχικό συμβολογράφημα.

Η 3-pass διαφορική συμβολομετρία, βασίζεται στη χρησιμοποίηση 3 SAR απεικονίσεων. Η γεωμετρία της μίας εκ των οποίων επιλέγεται ως αναφορά. Στη συνέχεια, παράγονται δύο συμβολογραφήματα μεταξύ της εικόνας αναφοράς και των υπολοίπων δύο. Η βασική ιδέα είναι ότι μόνο το ένα από τα δύο συμβολογραφήματα περιέχει την διαφορική συμβολομετρική φάση, ενώ το άλλο συμβολογράφημα χρησιμοποιείται ως αναφορά με

σκοπό την αφαίρεση της φάσης λόγω τοπογραφίας. Επιπλέον, η αποκατάσταση της φάσης είναι απαραίτητη.

Τέλος, η 4-pass διαφορική συμβολομετρία, βασίζεται σε δύο ανεξάρτητα συμβολομετρικά ζεύγη (4 SAR απεικονίσεις). Η ιδέα είναι ότι μόνο το ένα από τα δύο ζεύγη, περιλαμβάνει την διαφορική φάση, ενώ το άλλο χρησιμοποιείται ως αναφορά, με σκοπό την αφαίρεση της φάσης που αντιστοιχεί στην τοπογραφία. Η 4-pass μεθοδολογία είναι σχεδόν όμοια με την 3-pass, με την διαφορά ότι στην επεξεργασία χρησιμοποιούνται διαφορετικές γεωμετρίες (όχι εικόνα αναφοράς). Συνεπώς, τα συμβολομετρικά προϊόντα του ενός συμβολομετρικού ζεύγους, χρειάζεται να αποκτήσουν την ίδια γεωμετρία του δεύτερου συμβολομετρικού ζεύγους. Επιπλέον, η αποκατάσταση της φάσης είναι απαραίτητη.

Το σχετικά χαμηλό κόστος στην εφαρμογή της τεχνικής έχει επιτρέψει μέχρι σήμερα την εφαρμογή της σε ένα μεγάλο αριθμό επιστημονικών αντικειμένων ένα από τα οποία είναι οι φυσικοί κίνδυνοι και ειδικότερα οι κίνδυνοι λόγω εδαφικής παραμόρφωσης. Ήδη από το 1992 η συμβατική Διαφορική Συμβολομετρία χρησιμοποιείται για τη μελέτη και την κατανόηση συγκεκριμένων φυσικών φαινομένων-διεργασιών που προκαλούν εδαφική παραμόρφωση, όπως σεισμοί, ηφαίστεια, κατολισθήσεις και καθιζήσεις, με άμεσες οικονομικές, περιβαλλοντικές και ανθρώπινες επιπτώσεις (Massonnet et al. 1993, Zebker et al. 1994, Fielding et al. 1998, Galloway et al. 1998, Wright & Stow 1999, Carnec & Fabriol 1999, Avallone et al. 1999, Carnec & Delacourt 2000, Strozzi et al. 2001, Stramondo et al., 2008).

Παρόλα αυτά η τεχνική της διαφορικής συμβολομετρίας παρουσιάζει κάποιους σημαντικούς περιορισμούς όπως (Parcharidis et al., 2009):

- μεγάλα ανύσματα βάσης τα οποία οδηγούν σε χαμηλή συσχέτιση λόγω της φασματικής μετατόπισης των στόχων.
- χαμηλή συνάφεια λόγω του μεγάλου χρονικού διαστήματος μεταξύ των λήψεων των απεικονίσεων
- προβλήματα στο ξετύλιγμα (unwrapping) των συμβολογραφημάτων με μεγάλα ανύσματα βάσης
- ατμοσφαιρικές επιδράσεις λόγω των υδρατμών που υπάρχουν στην τροπόσφαιρα και της πυκνότητας των ηλεκτρονίων που υπάρχουν στην ιονόσφαιρα

Για τους λόγους αυτούς αναπτύχθηκε μία περισσότερο εξελιγμένη μέθοδος, εκείνη των

σταθερών ανακλαστήρων, η οποία αναλύεται στο επόμενο υποκεφάλαιο.

3.3 Συμβολομετρία Σταθερών Ανακλαστήρων

Οι τεχνικές της Διαφορικής Συμβολομετρίας Ραντάρ εφαρμόζονται κυρίως για την ανίχνευση εδαφικών παραμορφώσεων. Τέτοιας έντασης εδαφικές παραμορφώσεις σχετίζονται με φαινόμενα, όπως οι σεισμοί, οι ηφαιστειακές εκρήξεις και γενικότερα το σύνολο των φυσικών διεργασιών που έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλης έντασης παραμορφώσεων στην επιφάνεια της Γης. Κατά βάση μετακινήσεις μικρότερες των 28 mm, για συστήματα SAR που λειτουργούν στο κανάλι-C της μικροκυματικής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (όπως εκείνα των ERS και ENVISAT), δύσκολα διαχωρίζονται από τις επιμέρους επιδράσεις στο σήμα. Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις αποτελούν τον σημαντικότερο ίσως περιοριστικό παράγοντα στην αναγνώριση μικρότερης κλίμακας μετακινήσεων βάσει των τεχνικών της συμβατικής Διαφορικής Συμβολομετρίας Ραντάρ. Προς την ίδια κατεύθυνση οδηγούν και τα φαινόμενα της χωρικής και χρονικής αποσυσχέτισης.

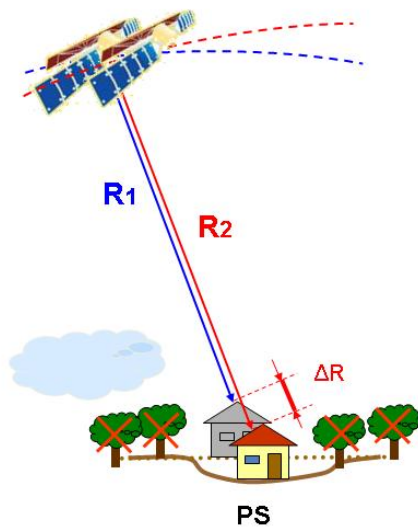
Τα τελευταία χρόνια προκειμένου να ξεπεραστούν οι παραπάνω περιορισμοί έχουν αναπτυχθεί πιο εξελιγμένες τεχνικές επεξεργασίας των δεδομένων SAR. Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό κινήσεων με πολύ μεγάλη ακρίβεια της τάξης των μερικών χιλιοστών* σε μεμονωμένα εδαφικά ή δομικά σημεία και για εκτεταμένες περιοχές, που καλύπτουν κυρίως αστικά ή ημιαστικά περιβάλλοντα. Λόγω ακριβώς της φύσης των συγκεκριμένων τεχνικών, όπου η ανάλυση λαμβάνει χώρα αποκλειστικά σε συγκεκριμένα σημεία των οποίων τα χαρακτηριστικά ανάκλασης του σήματος Ραντάρ παραμένουν σταθερά, καλούνται τεχνικές σταθερών ανακλαστήρων.

Η τεχνική των σταθερών ανακλαστήρων (Permanent Scatterers ή PS) αναπτύχθηκε για πρώτη φορά το 2000 από μια ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου του Μιλάνο (POLIMI) (Ferretti et al., 2000&2001). Ο βασικός στόχος της ανάπτυξης της συγκεκριμένης τεχνικής ήταν να ξεπεράσει τους περιορισμούς της χρονικής και χωρικής αποσυσχέτισης της συμβολομετρίας Ραντάρ (InSAR). Ταυτόχρονα, αυτή η νέα τεχνική αντιμετωπίζει επιτυχώς προβλήματα όπως οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις, οι οποίες μπορούν να μετριάσουν σε αρκετά μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία και ακρίβεια των αποτελεσμάτων (Ferretti et al., 2000&2001, Zhao et al., 2009).

* Μπορούν να μετρηθούν ακόμη και οι μετακινήσεις 0,1 χιλιοστών ετησίως

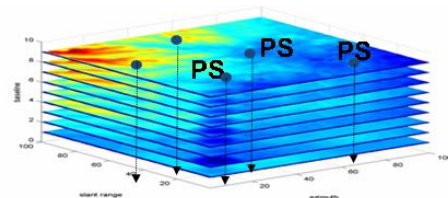
Η τεχνική χρησιμοποιεί ένα πλούσιο αρχείο δορυφορικών εικόνων Ραντάρ (με εκκίνηση το 1992) με σκοπό να αναγνωρίσει δίκτυα από επιφανειακά χαρακτηριστικά τα οποία σκεδάζουν σταθερά το σήμα του Ραντάρ στο σύνολο όλων των εικόνων (Σχήμα XXX). Οι σταθεροί ανακλαστήρες αντιστοιχούν κυρίως σε χαρακτηριστικά τα οποία έχουν κατασκευαστεί από τον ανθρώπινο παράγοντα όπως κτίρια, γέφυρες, φράγματα, υδάτινοι αγωγοί, κεραιές κτλ. , καθώς επίσης και σε φυσικούς ανακλαστήρες όπως πετρώματα.

Για τα παραπάνω σημεία-στόχους πραγματοποιούνται ακριβείς υπολογισμοί των μικρο-μετακινήσεων, σε επίπεδο μικρότερου του χιλιοστού, για την περίοδο που καλύπτουν οι εικόνες Ραντάρ.



DInSAR περιοριστικοί παράγοντες:

- Μεταβολές της οπισθοσκέδασης
- Ατμοσφαιρικές επιδράσεις



Με τη χρήση:

- Μεγάλου αριθμού εικόνων SAR αναγνώριση:
- Υψηλής συνάφειας στόχοι: Σταθεροί Ανακλαστήρες (PS)

Εκτίμηση και στη συνέχεια αφαίρεση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων

1

Σχήμα 3.2. Σχήμα της τεχνικής των σταθερών ανακλαστήρων (τροποποιημένο από TRE).

Με άλλα λόγια, οι σταθεροί ανακλαστήρες συνθέτουν ένα “φυσικό γεωδαιτικό δίκτυο” με σκοπό την παρατήρηση της παραμόρφωσης της γήινης επιφάνειας με ακρίβεια χιλιοστού (αφορά κυρίως στην γραμμική παραμόρφωση), καθώς επίσης και της σταθερότητας των μεμονομένων κατασκευών. Επιπλέον, να σημειωθεί ότι οι σταθεροί ανακλαστήρες είναι χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας τα οποία διατηρούν πάντα την ίδια συμπεριφορά στις εικόνες ραντάρ που λαμβάνονται σε διαφορετικές χρονικά λήψεις.

Ο ακριβής εντοπισμός των σταθερών αυτών ανακλαστήρων δεν μπορεί να προβλεφθεί πριν την επεξεργασία αλλά γενικά πάνω από αστικές περιοχές η πυκνότητά τους κυμαίνεται μεταξύ 300-600 σημείων ανά τετρ. χλμ (Ferretti et al., 2006).

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της τεχνικής των σταθερών ανακλαστήρων είναι η δυνατότητα εξαγωγής χαρτών ταχύτητας της ετήσιας εδαφικής μετατόπισης για ένα διάστημα που μπορεί να φτάσει έως και τα 20 χρόνια. Επιπλέον παρέχει την δυνατότητα διερεύνησης των διακυμάνσεων της εδαφικής μετατόπισης με το χρόνο (χρονοσειρά) για κάθε ανακλαστήρα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η αναγνώριση τυχών μεταβολών του ρυθμού παραμόρφωσης, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την αντιμετώπισή τους (Ferretti et al. 2004; Colesanti et al. 2003, Werner et al., 2003, Parcharidis et al. 2009).

3.3.1 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της τεχνικής των σταθερών ανακλαστήρων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναλυθούν τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί της τεχνικής των σταθερών ανακλαστήρων (Crosetto et al., 2008, Ferretti et al., 2006, Perski et al., 2009, TRE) εκ των οποίων τα βασικότερα συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

Αρχικά, θα γίνει αναφορά στα πλεονεκτήματα της τεχνικής. Πρώτον, η τεχνική προσφέρει ευρεία περιοχή κάλυψης (π.χ οι απεικονίσεις του ERS και του ENVISAT, καλύπτουν μια περιοχή 100 επί 100 χλμ.) και με σχετικά υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα. Αυτό επιτρέπει την σφαιρική οπτική μιας ευρείας σε έκταση περιοχής, στην οποία λαμβάνουν χώρα φαινόμενα τα οποία επιφέρουν εδαφική παραμόρφωση και ταυτόχρονα διατηρεί την ικανότητα να παρατηρεί μεμονομένα χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας, όπως κατασκευές και κτίρια. Δεύτερο σημαντικό πλεονέκτημα όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως είναι η ευαισθησία της μεθόδου σε μικρές παραμορφώσεις, με ταχύτητες της τάξης του 1 χιλιοστού ετησίως. Τρίτον, ένα σημαντικό προτέρημα είναι η περιοδικότητα των λήψεων που παρέχονται από τους δορυφόρους Ραντάρ. Τέταρτον, η διαθεσιμότητα ενός πολύ μεγάλου ιστορικού αρχείου από δορυφορικές εικόνες Ραντάρ, όπου στην περίπτωση του ERS αρχίζει από το 1991. Αυτό σημαίνει ότι είναι εφικτή και ταυτοχρόνως πολύ σημαντική η ικανότητα μετρήσης και παρατήρησης παραμορφώσεων οι οποίες έχουν λάβει χώρα κατά το παρελθόν. Πέμπτο πλεονέκτημα είναι το χαμηλό κόστος σε σχέση με άλλες τεχνικές. Συγκεκριμένα, μπορούν να επεξεργαστούν πολλές δορυφορικές εικόνες Ραντάρ για περιοχές που καλύπτουν χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα, ταυτοποιώντας εκατομμύρια ανακλαστήρες και υπολογίζοντας την εδαφική τους παραμόρφωση, δαπανώντας μόνο ένα μικρό ποσοστό του ποσού που θα απαιτούσαν άλλες τεχνικές όπως διαφορικό GPS, optical

levelling κτλ.). Έκτον, θεωρείται συμπληρωματική τεχνική με το διαφορικό GPS. Τα δεδομένα των GPS είναι πολύ ακριβή στην οριζόντια διεύθυνση, ενώ τα δεδομένα της τεχνικής των σταθερών ανακλαστήρων είναι περισσότερο ακριβή από τις μετρήσεις των GPS στην κατακόρυφη διεύθυνση. Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο η συμπληρωματικότητα των δύο αυτών μεθόδων είναι πολύ σημαντική. Τέλος, η εξαγωγή των παραμορφώσεων με μεγάλη ακρίβεια πάνω από ένα δίκτυο ανακλαστήρων είναι αρκετά γρήγορη, καθώς δεν χρειάζεται η αναμονή μηνών ή και ετών.

Από την άλλη πλευρά, όπως κάθε τεχνική διέπεται από μειονεκτήματα και περιορισμούς, έτσι και η μέθοδος των σταθερών ανακλαστήρων). Πρώτον, η δυνατότητα παρακολούθησης της παραμόρφωσης του εδάφους, εξαρτάται κυρίως από τον χρόνο επισκεψιμότητας του δορυφόρου (π.χ. 35 ημέρες για τους ERS και ENVISAT, 11 ημέρες για τον TerraSAR-X) καθώς επίσης και ο αριθμός των δεδομένων πρέπει να ξεπερνά τις

Πίνακας 3.1. Βασικά πλεονεκτήματα και περιορισμοί των σταθερών ανακλαστήρων (PS).

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<ul style="list-style-type: none"> • Αναδρομική ανάλυση χρησιμοποιώντας το αρχείο δεδομένων του δορυφόρου ERS, από το 1992 • Ανάλυση πάνω σε μεγάλες εκτάσεις χιλιάδων τετρ.χλμ. σε γρήγορο χρονικό διάστημα • Σε μερικές περιοχές μπορεί να υπολογιστεί ταχύτητα παραμόρφωσης με πολύ μεγάλη ακρίβεια (+/- 0.1 χιλιοστά ετησίως) • Μετρήσεις στην κατακόρυφη διεύθυνση είναι πολύ πιο ακριβείς από εκείνες των GPS • Η πυκνότητα των ανακλαστήρων είναι σαφώς πιο ικανοποιητική σε σχέση με άλλες συμβατικές μεθόδους (>300 σημεία ανά τετρ.χλμ. σε αστικό περιβάλλον) • Ικανότητα εξαγωγής ιστορικής παραμόρφωσης (χρονοσειρά) ενός σημείου-ανακλαστήρα με πολύ μεγάλη ακρίβεια • Η γεωκωδικοποίηση είναι συνήθως καλύτερη από 4-5 μέτρα • Τεχνητοί ανακλαστήρες μπορούν να τοποθετηθούν σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν ανακλαστήρες 	<ul style="list-style-type: none"> • Το απότομο ανάγλυφο εμποδίζει το σήμα του Ραντάρ να φτάσει σε περιοχές, οι οποίες χαρακτηρίζονται από “σκίαση” στην διεύθυνση του δορυφόρου (LOS). • Η επαναληψιμότητα των δορυφόρων παραμένει αρκετά μικρή για ορισμένες εφαρμογές. • Παρόλο που ο συνδυασμός δεδομένων τόσο καθοδικής όσο και ανοδικής τροχιάς είναι πλέον εφικτός και μπορεί να βοηθήσει στην διάκριση κατακόρυφης και οριζόντιας παραμόρφωσης, μία πλήρης τρισδιάστατη (3D) παραμόρφωση δεν είναι εφικτή. • Μεγάλος αριθμός απεικονίσεων SAR (>20 εικόνες) • Δεν είναι αναγνωρίσιμες στην SAR εικόνα όλες οι κατασκευές (π.χ. μία γέφυρα ή ένα φράγμα).

20 απεικονίσεις SAR για πιο ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα. Έχει αποδειχθεί επίσης ότι χρησιμοποιώντας έναν μεγάλο αριθμό εικόνων είναι ένας τρόπος για να μειωθούν οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις (Bamler et al., 2005). Δεύτερον, η μέθοδος των PS μπορεί να υπολογίσει και να καταγράψει την παραμόρφωση μόνο των διαθέσιμων ανακλαστήρων που υπάρχουν στην εκάστοτε περιοχή μελέτης, ανακλαστήρες οι οποίοι χαρακτηρίζονται από σημεία-στόχους τα οποία έχουν συμβολομετρική φάση χωρίς θόρυβο έτσι ώστε το αποτέλεσμα της παραμόρφωσης να είναι αρκετά αξιόπιστο. Επιπρόσθετα, η πυκνότητα των ανακλαστήρων είναι αρκετά υψηλή μέσα σε αστικά περιβάλλοντα (για παράδειγμα για δεδομένα του ERS και του ENVISAT, η πυκνότητα είναι της τάξης των 1000 ανακλαστήρων ανά τετρ. χλμ.). Αντίθετα, η πυκνότητα είναι χαμηλή σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από βλάστηση και δάση γεγονός που οφείλεται στην χαμηλή συνάφεια και επίσης πάνω από χαμηλής οπισθοσκέδασης περιοχές (πολύ ομαλή τοπογραφία). Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι ο ακριβής εντοπισμός των ανακλαστήρων δεν μπορεί να προβλεφθεί από την αρχή, δηλαδή πριν από την επεξεργασία των δεδομένων. Η χωρική πυκνότητα είναι χαμηλή για τους δορυφόρους ERS, ENVISAT και RADARSAT, ενώ για υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας αισθητήρες όπως TerraSAR-X η πυκνότητα των ανακλαστήρων είναι σαφώς βελτιωμένη. Τρίτον, ένας άλλος περιορισμός είναι η δυνατότητα μετρήσεων κυρίως στη διεύθυνση όρασης του αισθητήρα (LOS – Line Of Sight). Τέταρτο μειονέκτημα, είναι η αδυναμία της τεχνικής να υπολογίσει και να καταγράψει γρήγορες κινήσεις. Επιπλέον, η διαθεσιμότητα των C-band δορυφόρων, οδηγεί στην αδυναμία της τεχνικής να υπολογίσει τιμές παραμόρφωσης πάνω από 4-5 εκατοστά ετησίως. Πέμπτον, το μοντέλο που υιοθετεί η μεθοδολογία αποτελεί ένα γραμμικό μοντέλο, γεγονός που έχει ως συνέπεια να μην λαμβάνονται υπόψη στην τελική επεξεργασία περιοχές μη-γραμμικών μετακινήσεων.

3.3.2. Εφαρμογές της συμβολομετρίας των σταθερών ανακλαστήρων

Η τεχνική των PS εξαρτάται από τις εφαρμογές στις οποίες προτίθεται να εφαρμοστεί. Σε γενικές γραμμές, η πιθανότητα επιτυχίας της εφαρμογής των σταθερών ανακλαστήρων εξαρτάται από : α) τον αριθμό των εικόνων ραντάρ και την χρονική διασπορά τους, β) την πυκνότητα των σταθερών ανακλαστήρων στην εκάστοτε περιοχή μελέτης, γ) την κίνηση των ανακλαστήρων πάντα προς την διεύθυνση του δορυφόρου (LOS) και δ) στην κάλυψη ή μη της περιοχής από χιόνι. Στην συνέχεια, γίνεται μία μικρή αναφορά των

διαφορετικών εφαρμογών στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνική (Ferretti et al., 2006, TRE).

- **Καθίζηση εδάφους** – Η χρονική όσο και η χωρική διακριτική ικανότητα των δεδομένων ραντάρ καθιστά δυνατή την παρατήρηση της καθίζησης που λαμβάνει χώρα σε αστικές περιοχές. Η πυκνότητα των ανακλαστήρων είναι συνήθως μεγαλύτερη από 100 ανακλαστήρες ανά τετρ. χλμ. και χιλιάδες τετρ. χλμ. μπορούν να παρατηρηθούν σε μηνιαία βάση (Ferretti et al., 2000). Επιπλέον, μπορεί να ανιχνευθεί η παραμόρφωση σε περιστατικές περιοχές ή και ακόμη μεμονωμένα κτίρια τα οποία έχουν υποστεί καθίζηση (Ferretti et al., 2000), καθώς επίσης και οι πιθανές εποχιακές μετακινήσεις οι οποίες προήλθαν από διακυμάνσεις του υδάτινου ορίζοντα (Colesanti et al., 2003a). Επιπρόσθετα, εταιρείες στον τομέα του πετρελαίου και του φυσικού αερίου είναι οι κύριοι χρήστες των δεδομένων των σταθερών ανακλαστήρων. Επίσης, η παραμόρφωση η οποία έχει προέλθει από δραστηριότητες ορυχείων μπορεί να ανιχνευθεί με την τεχνική των PS (Colesanti, Le Mouelic & Bennani et al., 2005).
- **Ρήγματα και ηφαιστεια** – Για την παρατήρηση των ρηγμάτων μιας περιοχής απαιτούνται μετρήσεις πολύ μεγάλης ακρίβειας, διότι η μετακίνηση του εδάφους μπορεί να είναι εξαιρετικά αργή (Massonnet & Feigl, 1998). Επιπροσθέτως, υψηλότερη ακρίβεια σημαίνει καλύτερη εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου. Τα δεδομένα των σταθερών ανακλαστήρων παίζουν σημαντικό ρόλο για δύο ρόλους: α) η πυκνότητα των ανακλαστήρων είναι σαφώς μεγαλύτερη απ ότι εκείνη των σταθμών GPS και β) η ακρίβεια των μετρήσεων στην κατακόρυφη διεύθυνση είναι μεγαλύτερη από εκείνη των GPS. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα τελευταία χρόνια έχει γίνει πλέον αποδεκτό από την επιστημονική κοινότητα ότι οι δύο τεχνικές των σταθερών ανακλαστήρων και των GPS είναι συμπληρωματικές και θα πρέπει να αξιοποιούνται παράλληλα για την παρατήρηση περιοχών οι οποίες βρίσκονται σε κίνδυνο. Είναι πλέον φανερό, ότι η ευρεία περιοχή που καλύπτουν οι ανακλαστήρες, οδηγεί σε μία καλύτερη ταυτοποίηση των πιθανών περιοχών για σταθμούς GPS, τονίζοντας περιοχές οι οποίες έχουν υποστεί παραμορφώσεις προκαλούμενες από ανθρωπογενείς πηγές παρά από τεκτονικές ή ηφαιστειακές κινήσεις (Salvi, Atzore & Tolomei et al., 2004).
- **Κατολισθήσεις** – Μετρήσεις που έχουν παραχθεί από την τεχνική των PS συνδυαζόμενες με πληροφορίες σχετικά με τον μηχανισμό της μετακίνησης οι οποίες έχουν προέλθει από in-situ δεδομένα, αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο

εργαλείο παρακολούθησης περιοχών που χαρακτηρίζονται από αστάθεια πρηνών και κατολισθήσεων (Colesanti et al., 2003; Colesanti & Wasowski, 2006; Farina et al., 2006; Hilley et al., 2004; Ferretti et al., 2005). Παρόλο που οι περιορισμοί της τεχνικής όσον αφορά τις εφαρμογές των κατολισθήσεων είναι ακόμη αυστηροί (Πίνακας 3.1), η πιθανότητα δημιουργίας πληροφορίας μετακινήσεων πολύ γρήγορα και με μεγάλη ακρίβεια στην ταχύτητα της παραμόρφωσης, χρησιμοποιώντας ιστορικά αρχεία δεδομένων, ανοίγει νέους ορίζοντες στην δημιουργία χαρτών παραμόρφωσης που οφείλονται σε κατολισθητικά φαινόμενα (Farina et al., 2006). Η τεχνική των PS μπορεί να διαχωρίσει μια περιοχή σε ασταθή και σταθερά πρηνή. Η ταχύτητα παραμόρφωσης μπορεί να εκτιμηθεί, καθώς δεν ξεπερνά τα 5-6 εκατοστά ετησίως. Τέλος, η πιθανότητα συνεχούς ανανέωσης των δεδομένων μιας περιοχής και συνεπώς της ανανέωσης των αποτελεσμάτων, καθώς επίσης και η ικανότητα εισαγωγής των αποτελεσμάτων της τεχνικής σε ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), έχουν αυξήσει θεαματικά την έρευνα για κατολισθήσεις.

- **Μεμονωμένες κατασκευές/κτίρια** – Μετρήσεις των κινήσεων της γήινης επιφάνειας με ακρίβεια χιλιοστού απαιτούνται για την εκτίμηση της σταθερότητας των κατασκευών. Είναι πολύ σημαντικό ότι με την τεχνική αυτή περισσότεροι από ένας ανακλαστήρες μπορούν να βρεθούν σε ένα κτίριο. Αυτό μπορεί να συμβεί σε αρκετά μεγάλες σε έκταση κατασκευές (π.χ. φράγματα, γέφυρες, μεγάλα κτίρια) (Parcharidis et al., 2009). Επιπλέον, πολλά υποσχόμενη για μελλοντικές έρευνες που στηρίζονται στην τεχνική των PS, είναι η δυνατότητα δημιουργίας ενός γεωδαιτικού δικτύου αποτελούμενου από κτίρια, πάνω στα οποία έχουν τοποθετηθεί τεχνητοί ανακλαστήρες. Βέβαια, ένα ιστορικό αρχείο δεδομένων ραντάρ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επαλήθευση της σύνδεσης μεταξύ αιτίας-αποτελέσματος. Για παράδειγμα, η κατασκευή ενός τούνελ και οι ζημιές οι οποίες έχουν προέλθει εξαιτίας του. Τέλος, τα αποτελέσματα των PS έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί ως απόδεικτικό στοιχείο σε δίκες.
- **Σχεδιασμός χρήσεων γης** – Η τεχνική των σταθερών ανακλαστήρων διευκολύνει την σχεδίαση κύριων κατασκευαστικών έργων όπως αγωγοί, γραμμές μεταβιβάσεων, αυτοκινητόδρομοι και γραμμές τρένου, προσδιορίζοντας σταθερούς διαδρόμους για αυτές τις εγκαταστάσεις.

4. Περιοχή μελέτης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί η περιοχή μελέτης στην οποία εφαρμόστηκε η τεχνική των σταθερών ανακλαστήρων. Συγκεκριμένα, θα αναλυθεί η γεωμορφολογία του Δέλτα, η γεωλογία και τεκτονική του, καθώς επίσης και η σεισμικότητα της περιοχής.

4.1 Το δέλτα του ποταμού Μόρνου

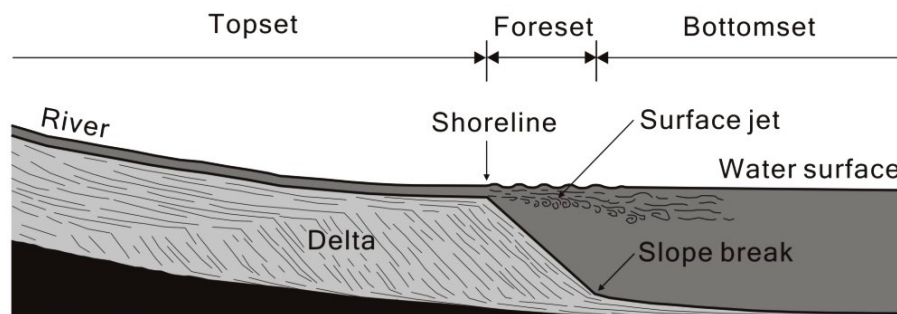
4.1.1 Γενικά

Τα ποτάμια δέλτα θεωρούνται από τα πιο πολύπλοκα και δυναμικά μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα της παράκτιας ζώνης, κάτι που οφείλεται στην ύπαρξη πολλών φυσικών παραγόντων οι οποίοι συμβάλουν στην διαμόρφωση και εξέλιξή τους. Η Ελλάδα χαρακτηρίζεται κυρίως ως ορεινή χώρα και οι κατάλληλες για καλλιέργεια πεδινές εκτάσεις είναι περιορισμένες. Αυτός ο λόγος, καθιστά τα ποτάμια δέλτα μεγάλης κοινωνικοοικονομικής σημασίας, καθώς συγκεντρώνουν αγροτογεωργικές, αλιευτικές και τουριστικές δραστηριότητες. Επιπλέον, ο ανθρώπινος παράγοντας είναι εξίσου σημαντικός όσον αφορά στην εξέλιξη των δέλτα, διότι τόσο οι άμεσες όσο και οι έμμεσες επεμβάσεις διαταράσσουν την ισορροπία φυσικών διεργασιών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αναστολή της ανάπτυξης και φυσικής εξέλιξης των δελταϊκών σχηματισμών (Karymbalis et al., 2007).



Σχήμα 4.1. Χάρτης της περιοχής μελέτης του δέλτα του Μόρνου

Το δέλτα του ποταμού Μόρνου βρίσκεται στις βόρειες ακτές του δυτικού Κορινθιακού κόλπου και περίπου 2 χλμ. ανατολικά της Ναυπάκτου (Σχήμα 4.1). Χαρακτηρίζεται ως δελταϊκό ριπίδιο τύπου Gilbert τοξοειδούς μορφής (Gilbert-type fan deltas), έχει έκταση 28 τετρ. χλμ. και μέσο όρο κλίσεων των πρηνών περίπου 0.004% (0.2°) (Piper et al., 1990, Louis et al., 2004, Karymbalis et al., 2007). Ονομάζεται τύπου Gilbert, διότι παρουσιάζει τη στρωματογραφική διάρθρωση η οποία για πρώτη φορά περιγράφηκε από τον Gilbert (1885). Η στρωματογραφική αυτή ακολουθία περιλαμβάνει τρεις ιζηματολογικές ενότητες. Τα πρόσθια στρώματα ιζημάτων (foreset), τα κορυφαία στρώματα ιζημάτων (topset) και τα στρώματα πυθμένα (bottomset). Τα δελταϊκά ριπίδια αυτού του τύπου είναι κεκλιμένα με απότομη κλίση σε όλο το μήκος τους από τη δελταϊκή πεδιάδα έως το προδέλτα και μπορούν να αναπτυχθούν τόσο σε βαθιά όσο και σε ρηχά νερά. Σε αυτού του τύπου τα δελταϊκά ριπίδια, η κλίση των υποθαλάσσιων κλιτύων μπορεί να φθάσει τις 35° και είναι αρκετά συχνά τα φαινόμενα διεργασιών κίνησης υλικών λόγω βαρύτητας.



Σχήμα 4.2. Δομή δελταϊκού ριπίδιου τύπου Gilbert (National Taiwan University)

Σύμφωνα με την ταξινόμηση των δέλτα που προτάθηκε από τον Galloway (1975), με κριτήριο τις κυρίαρχες διεργασίες διαμόρφωσής τους, τα δέλτα τοποθετούνται μεταξύ εκείνων των οποίων η ανάπτυξη επηρεάζεται τόσο από την ποτάμια τροφοδοσία όσο και τον κυματισμό (Karymbalis et al., 2001).

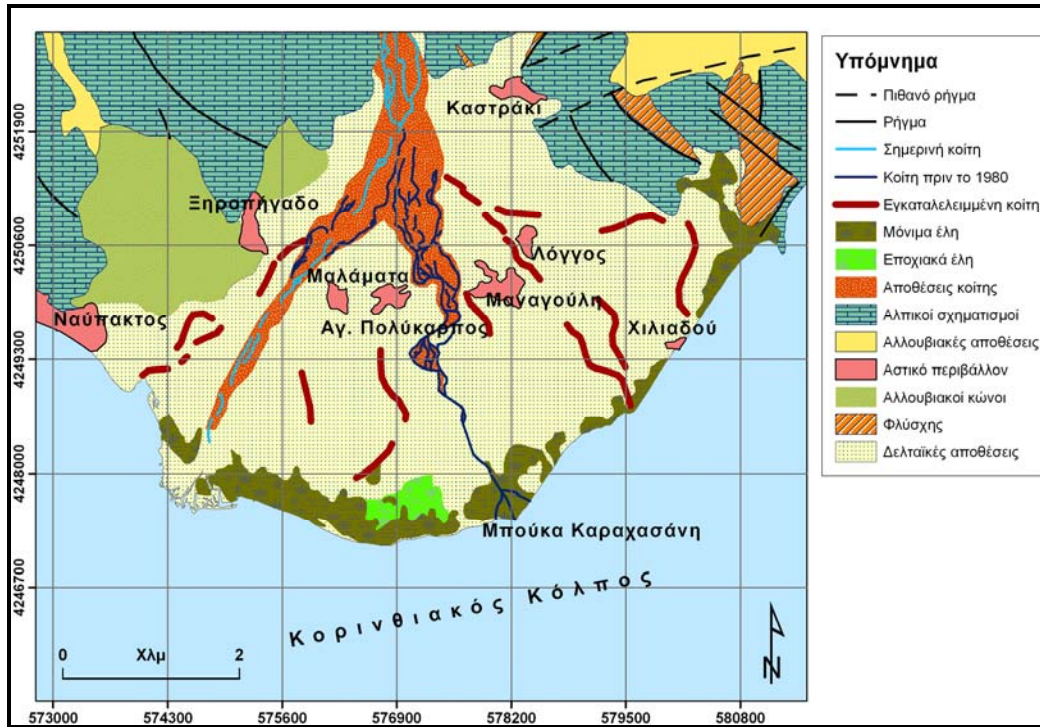
Η ανάπτυξη του δέλτα άρχισε από το Ανώτερο Ολόκαινο με μια σχετική σταθεροποίηση της στάθμης της θάλασσας. Ο σχηματισμός του δέλτα είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης κατάλληλων προϋποθέσεων κατά την διάρκεια του Ανώτερου Ολόκαινου. Ακραία καιρικά φαινόμενα καθώς και το φαινόμενο της διάβρωσης πάνω από την περιοχή του ποταμού Μόρνου, είχαν ως αποτέλεσμα την μεταφορά ιζημάτων μεγάλων ποσοτήτων. Αυτή η διαδικασία ενισχύθηκε από την λιθολογία και τις κλιματικές συνθήκες της λεκάνης απορροής καθώς επίσης και από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης του Κορινθιακού κόλπου. Μεγάλο μέρος της λεκάνης απορροής (54.4% της συνολικής περιοχής)

αποτελείται από ιζηματογενή πετρώματα των οποίων ο κύριος γεωλογικός σχηματισμός είναι φλύσχος που χαρακτηρίζεται από μεγάλη διάβρωση. Επιπλέον, η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι αρκετά υψηλή και κυμαίνεται μεταξύ 600 χιλιοστών κοντά στην περιοχή του δέλτα και μεγαλύτερης από 1200 χιλιοστών βορειότερα της περιοχής του δέλτα, κυρίως κατά τους μήνες Νοέμβριο-Φεβρουάριο. Η ετήσια εκροή του ποταμού είναι 40 κυβ. μ. ανά δευτερόλεπτο και ακολουθεί την τάση των ατμοσφαιρικών κατακριμνήσεων, με τη μεγαλύτερη ροή να καταγράφεται κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών. Η ροή του ποταμού ρυθμίζεται από το 1980, από ένα φράγμα το οποίο κατασκευάστηκε με σκοπό την προμήθεια της Αθήνας με πόσιμο νερό. Η ποσότητα του ιζηματογενούς φορτίου του ποταμού πριν την κατασκευή του φράγματος είχε υπολογιστεί σε 0.5 -0.8 τόνους ανά τετρ. χλμ. ετησίως (Piper et al., 1990).

4.1.2 Γεωμορφολογία του δέλτα

Ο Μόρνος ποταμός έχει ένα διακλαδιζόμενο κανάλι το οποίο είναι ευθυγραμμισμένο και περιφραγμένο από προσχώσεις κατά μήκος της τωρινής κοίτης του στο δυτικό μέρος του δέλτα. Αεροφωτογραφίες του 1945 δείχνουν την ύπαρξη δύο ενεργών καναλιών, με το κύριο κανάλι να τοποθετείται στο κεντρικό νοτιοδυτικό μέρος της δελταϊκής πεδιάδας, ενώ το τωρινό κανάλι του ποταμού είναι μικρότερο. Η ανατολική πλευρά της ροής του ποταμού χαρακτηρίζεται περισσότερο από μαιανδρισμούς και διέσχισε την κεντρική δελταϊκή πεδιάδα εκβάλλοντας στην Μπούκα Καραχασάνη, 3.7 χλμ. ανατολικά των σημερινών εκβολών (Σχήμα 4.2). Το κανάλι εν μέρει εγκαταλήφθηκε μετά την τεχνητή διευθέτηση της σημερινής κοίτης η οποία έλαβε χώρα το 1961. Έπειτα, ακολούθησε η κατασκευή του φράγματος το 1980 και αυτό το κανάλι εγκαταλήφθηκε πλήρως.

Οι Karymbalis et al., (2007) χαρτογράφησαν τις παλαιότερες εγκαταλελειμμένες κοίτες, οι οποίες ομαδοποιήθηκαν σε τέσσερις κατηγορίες που ξεκινούν από την έξοδο του ποταμού από τους ορεινούς όγκους (κορυφή του δέλτα) και καταλήγουν στην σημερινή ακτογραμμή. Παλαιότεροι χάρτες του 1852 και 1885 απεικόνιζαν ότι υπήρχε ένα ενεργό κανάλι, το οποίο τοποθετείται στο δυτικό τμήμα του δέλτα κατά την διάρκεια εκείνης της περιόδου. Σήμερα, η εγκαταλελειμμένη κοίτη βρίσκεται περίπου 0.6 χλμ. δυτικά της σημερινής κοίτης. Επιπρόσθετα, μία άλλη εγκαταλελειμμένη κοίτη ξεκινά από την κορυφή του δέλτα και καταλήγει νοτιοανατολικά του χωριού Μαναγούλη, περίπου 1.9 χλμ. βορειοανατολικά της Μπούκας Καραχασάνη και φαίνεται να είναι η παλαιότερη κοίτη.



Σχήμα 4.2. Γεωμορφολογία του Δέλτα του Μόρνου (τροποποιημένο από Karymbalis et al., 2007)

Το ανατολικότερο κανάλι έχει διεύθυνση δυτική-βορειοδυτική – ανατολική-νοτιοανατολική, βόρεια του χωριού Λόγγος, καταλήγοντας 0.5 χλμ. βόρεια της Χιλιαδούς που βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της δελταϊκής πεδιάδας (Σχήμα 4.2). Αυτή η κοίτη παραμένει μαιανδρική για τα τελευταία 1.4 χλμ. πριν καταλήξει στην ακτογραμμή. Αυτά τα ίχνη δείχνουν να είναι οι παλαιότερες ορατές κοίτες του δέλτα του ποταμού Μόρνου. Το σχήμα του δελταϊκού ριπιδίου, οι εγκαταλελειμμένες κοίτες και η υπεροχή των χαλικιών, υποδηλώνει ότι η ανάπτυξη του δέλτα έλαβε μέρος με βαθμιαία μετατόπιση των διακλαδώσεων.

Σήμερα, η παράκτια διάβρωση είναι η κύρια γεωμορφολογική διαδικασία, η οποία λαμβάνει χώρα κατά μήκος της ακτογραμμής του δέλτα, λόγω της κατασκευής του φράγματος, το οποίο μείωσε δραστικά την ροή των ιζημάτων. Η ανατολική παράκτια ζώνη, βορειοανατολικά της Μπούκας Καραχασάνη, υποχώρησε περίπου 86 μ. μεταξύ του 1945 και του 1986, πράγμα του αντιστοιχεί σε ταχύτητα 2.14 μέτρα ετησίως. Ο ρυθμός υποχώρησης αυξήθηκε σε 3.25 μ. ετησίως για την περίοδο 1986 και 1998. Προέλαση παρατηρήθηκε μεταξύ των σημερινών εκβολών και των εκβολών του 1961 (Μπούκα Καραχασάνη) με μέσο ρυθμό 3.4 μ. ετησίως για τα έτη μεταξύ 1945 και 1998. Η προέλαση πιθανόν οφείλεται στην επεξεργασία και αναδιανομή ιζημάτων των

εγκαταλελειμμένων εκβολών της Μπούκας Καραχασάνη. Αξίζει να σημειωθεί ότι η περιοχή των εκβολών της ενεργού κοίτης από το 1945 έως το 1986 προήλανε με ρυθμό 4 μ. ετησίως, αντίθετα, στα επόμενα 12 έτη άρχισε η διάβρωση με ρυθμό 11.4 μ. ετησίως. Αυτή η υποχώρηση μπορεί να οφείλεται στην κατασκευή του φράγματος, το οποίο μπορεί να απέφερε μείωση της τροφοδοσίας της παράκτιας ζώνης λόγω του αντίστοιχου περιορισμού της στερεοπαροχής του ποταμού (Καρύμπαλης και Παπαναστασίου, 2007).

4.1.3 Γεωλογικό υπόβαθρο του δέλτα

Το ανατολικό μέρος του δέλτα διακατέχεται από το στεγαστήρα φλύσχη της ζώνης Πίνδου, ενώ το δυτικό μέρος κυριαρχείται κατά βάση από ασβεστολιθικούς σχηματισμούς της ίδιας ζώνης.

Η προσχωματική πεδινή ζώνη Ναύπακτος- Καστράκι- Μοναστηράκι (εκτός χάρτη), διακατέχει τη δελταϊκή περιοχή του Μόρνου, η οποία σχηματίστηκε από την στερεοπαροχή του ποταμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να επικρατούν υλικά αποθέσεως με ταξινόμηση στοιχείων κατ' όγκο και βάρος. Με άλλα λόγια, επικρατούν αδρομερή στοιχεία ασβεστολιθικών-κερατολιθικών κροκάλων στην βάση των προσχωμάτων και στην κορυφή του δέλτα, ενώ λεπτομερή υλικά σε μορφή αργίλων, terrarossa, μάργας, χαλίκων, άμμων, στοιχείων φλύσχη κτλ. στους ανώτερους ορίζοντες των προσχωμάτων και την παράκτια ζώνη.

Το πάχος των αποθεμάτων της προσχωματικής πεδινής ζώνης, κυμαίνεται κατά μέσο όρο, περίπου στα 60 – 150 μ. Αυτό μειώνεται στην κορυφή του δέλτα, ενώ αντίθετα αυξάνεται αισθητά κοντά στην ακτογραμμή. Υπόβαθρο των προσχώσεων είναι ο φλύσχη της ζώνης Γαβρόβου, όπου η υποτεταρτογενής του οροφή παρουσιάζει ελαφρά πτύχωση (κατάλοιπα αρχικής διάβρωσης), υπό μορφή τριών μικροσυγκλίνων, σχεδόν παράλληλων και με άξονες Β-Ν. Επιπλέον, εντός της περιοχής μελέτης υπάρχουν τρεις υδροφόροι ορίζοντες, οι οποίοι μπορούν να διακριθούν σε τεταρτογενές, φλύσχη και καρστικούς ασβεστόλιθους (Μελέτη ΓΑΜΜΑ ΕΠΕ, 1982, Louis et al., 2004, Karymbalis et al, 2007).

4.1.4 Τεκτονική του δέλτα

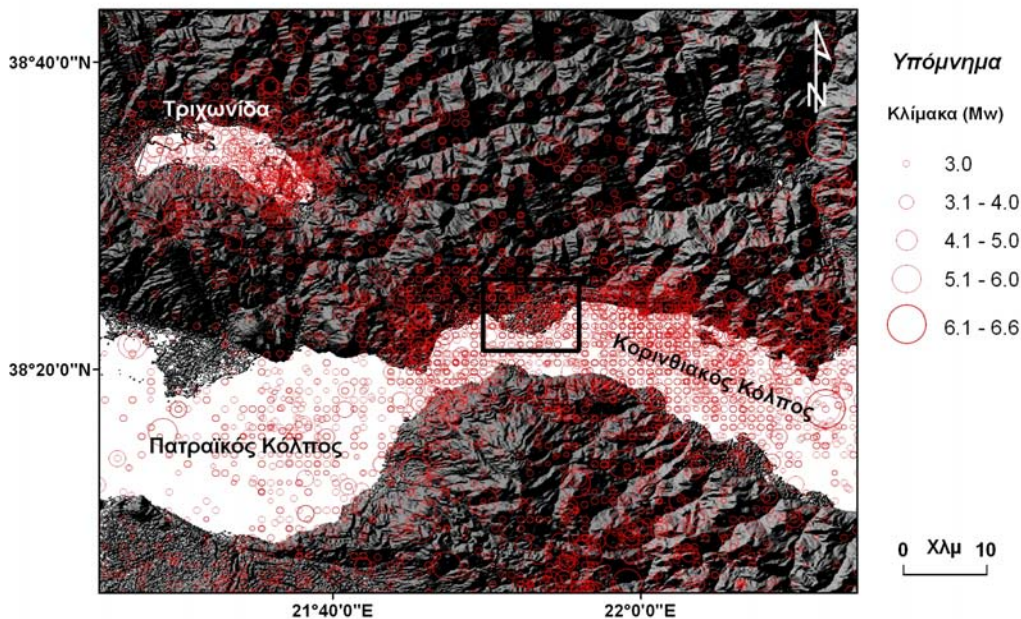
Η περιοχή μελέτης αναπτύσσεται στην περιοχή όπου υπάρχει το διαχωριστικό όριο μεταξύ των γεωτεκτονικών ζωνών Πίνδου και Γραβόβου, όπου η πρώτη ζώνη απωθεί την δεύτερη (Μελέτη ΓΑΜΜΑ ΕΠΕ, 1982, Louis et al., 2004,).

Κύριο χαρακτηριστικό του γεωτεκτονικού καθεστώτος που επικρατεί στην περιοχή, είναι η προειρημένη επώθηση, όπου η φέρουσα ανθρακικά ιζήματα με επικάλυψη φλύσχη ζώνη της Πίνδου, βρίσκεται λόγω οριζόντιου από ανατολικά προωθήσεως, επί του φλύσχη της ζώνης Γαβρόβου. Τα ασβεστολιθικά πετρώματα της ζώνης Πίνδου, λεπτοπλακώση και εύπλαστα, είναι έντονα πτυχωμένα και στολιδωμένα σε μορφές κατακεκλιμένων ή ανεστραμμένων πτυχών.

Οι επικρατούσες πτυχές είναι ΒΔ-ΝΑ διευθύνσεως, ενώ κατά περίπτωση παρουσιάζονται και πολλές εφιπεύσεις. Κατά περιοχές εμφανίζεται έντονη ρηγματογόνος τεκτονική με διευθύνσης ρηγμάτων ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ (Σχήμα 4.2). Εκτός από τα παραπάνω ρήγματα, κυριαρχούν και ρήγματα Α-Δ διευθύνσεως τα οποία καθόρισαν τα ενδοχωρικά τεκτονικά βυθίσματα (λεκάνη Ευπαλίου), αλλά και τις κύριες ακτογραμμές του ευρύτερου χώρου (Κορινθιακός-Πατραϊκός κόλπος). Η κυριαρχούσα γραμμή επωθήσεως, έχει εμφανή καθοριστική εκδήλωση δυτικά της πόλης της Ναυπάκτου(Μελέτη ΓΑΜΜΑ ΕΠΕ, 1982).

4.1.4 Σεισμικότητα του δέλτα και της ευρύτερης περιοχής

Ο Κορινθιακός Κόλπος είναι μία από τις πλέον ενεργές νεοτεκτονικά και σεισμικά περιοχές της Μεσογείου. Η περιοχή του Κορινθιακού Κόλπου και κατ επέκταση της περιοχής του δέλτα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζει έντονη σεισμικότητα (Papanikolaou et al., 1987, Παπαζάχος & Παπαζάχου, 1989). Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από το Ινστιτούτο Incorporated Research Institutions for Seismology, και καλύπτουν την χρονική περίοδο 1930-2010, με $M_w \geq 3$ Ρίχτερ. Σύμφωνα με τον McKenzie (1972), από τη μελέτη των μηχανισμών γένεσης των σεισμών, προκύπτει ότι κατά μήκος του Κόλπου επικρατούν εφελκυστικές τάσεις διεύθυνσης Β-Ν. Αυτό επιβεβαιώνεται με τις γεωδαιτικές μετρήσεις (Billiris et al., 1991, Tselentis & Makropoulos 1986), οι οποίες καταδεικνύουν της απομάκρυνση κατά 1 cm/χρόνο μεταξύ της βόρειας και της νότιας ακτής του Κόλπου και την κατά 1 mm/χρόνο βύθιση της βόρειας ακτής ως προς τη νότια. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τους Valkaniotis et al. (2008), ο Κορινθιακός Κόλπος είναι ένα ενεργό τεκτονικά τέμαχος με υψηλό ρυθμό ολίσθησης (6-20 mm/yr). Τα περισσότερα ρήγματα της περιοχής συνδέονται στενά με τα σεισμικά γεγονότα που έλαβαν χώρα. Στην ευρύτερη περιοχή ιστορικά έχουν καταγραφεί 46 σεισμικά γεγονότα μεγάλης έντασης ($M_w > 6.0$), τα οποία προκάλεσαν μεγάλες και σοβαρές ζημιές.



Σχήμα 4.3. Σεισμικότητα της περιοχής του δέλτα και της ευρύτερης περιοχής κατά την χρονική περίοδο 1930-2010, με $M_w \geq 3$ Ρίχτερ.

Μπορούν να αναφερθούν ως παραδείγματα, αυτό του σεισμού της Ελίκης το 373 π.Χ. που κατέστρεψε την πόλη ολοσχερώς, καθώς και αυτό του σεισμού το 1817 που επέφερε μεγάλη καταστροφή στην πόλη του Αιγίου. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι τα επίκεντρα των κυριότερων σεισμών τον τελευταίο αιώνα προσδιορίζονται στην περιοχή του βυθιζόμενου τεμαχίου της τάφρου. Γενικότερα η σεισμικότητα μπορεί να χωριστεί σε δύο κύριες περιόδους: την ιστορική και αυτή του παρόντα αιώνα. Ο διαχωρισμός γίνεται με βασικό κριτήριο την ύπαρξη ενόργανων καταγραφών, οι οποίες είναι διαθέσιμες μόνο για τον αιώνα που διανύουμε. Αντίθετα την περίοδο πριν το 1900, για την περιοχή του Αιγίου υπάρχουν μόνο ιστορικές μαρτυρίες και ειδικότερα μακροσεισμικές παρατηρήσεις, που περιγράφουν τις επιπτώσεις των σεισμών στην περιοχή. Από αυτές γίνεται εκτίμηση του επικέντρου και του μεγέθους των σεισμών (Αγγελόπουλος&Μέλης, 2000).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως το τελευταίο χρονικό διάστημα, πλησίον της περιοχής του δέλτα και συγκεκριμένα στην περιοχή του Ευπαλίου, έχουν σημειωθεί αρκετά σεισμικά γεγονότα. Συγκεκριμένα, ένας ισχυρός σεισμός με κλίμακα $M_w = 5.1$ Ρίχτερ συνέβη στις 18 Ιανουαρίου του 2010 και στις 22 Ιανουαρίου στην ίδια περιοχή, έλαβε χώρα ένα δεύτερο σεισμικό γεγονός με κλίμακα $M_w = 5.1$ Ρίχτερ. Η μετασεισμική δραστηριότητα ήταν πολύ έντονη (περισσότεροι από 500 μετασεισμοί) και μέχρι σήμερα

η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονη σεισμική δραστηριότητα (Department of Geophysics-Geothermics, Seismological Laboratory).

4.1.6 Στρωματογραφία

Η στρωματογραφία των δελταϊκών ιζημάτων βασίστηκε στα δεδομένα των γεωτρήσεων, οι οποίες συλλέχθηκαν από το Υπουργείο Γεωργίας στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Οι γεωτρήσεις αντλήθηκαν με σκοπό την εκμετάλλευση του νερού, εντός του δελταϊκού χώρου, λόγω της αναταραχής των υδρογεωλογικών καταστάσεων του δέλτα, οι οποίες προήλθαν από την κατασκευή του φράγματος.

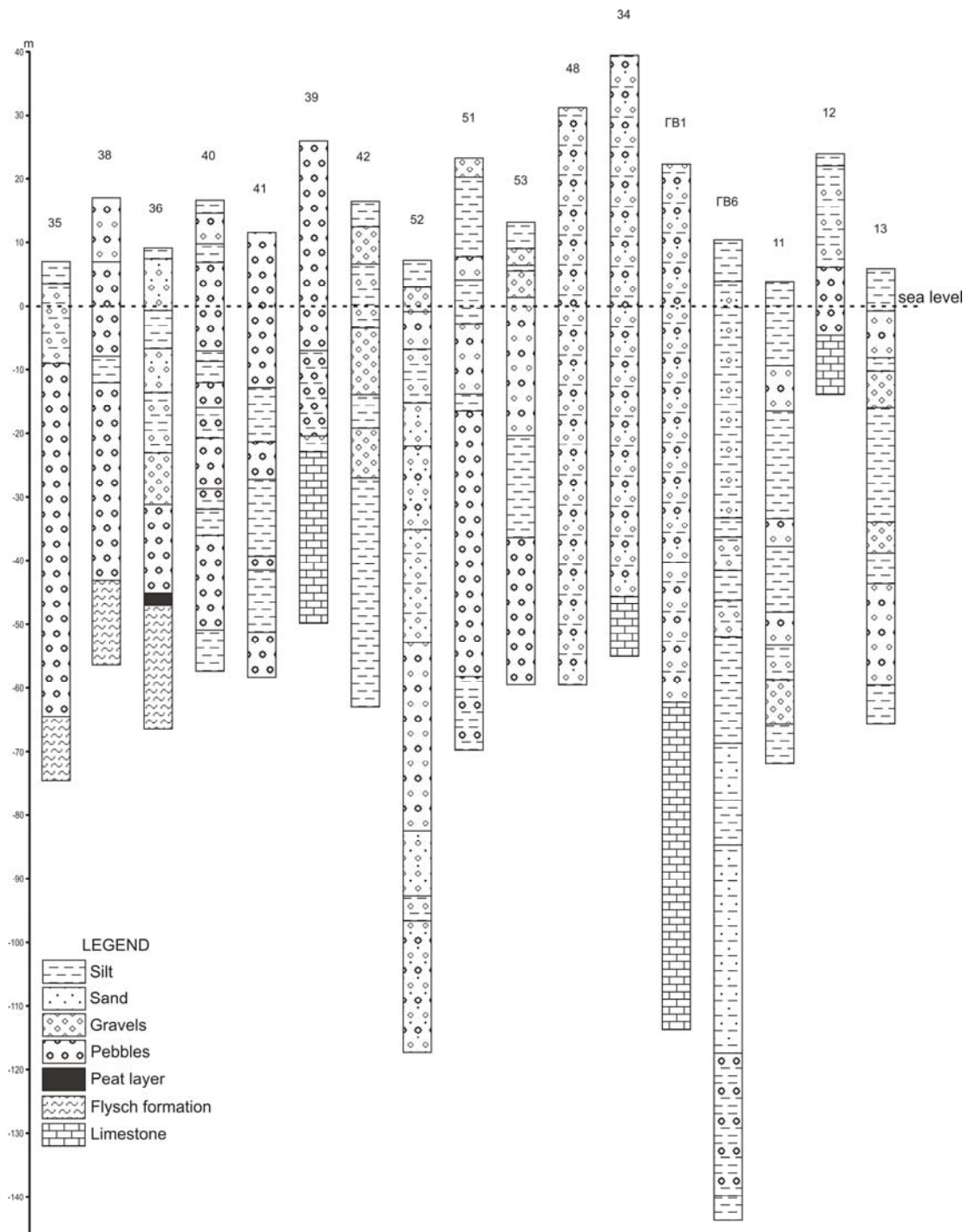
Η εξέταση των γεωτρήσεων σε συνδυασμό με την γεωφυσική διερεύνηση της περιοχής, είχε ως αποτέλεσμα την ανίχνευση τριών πτυσσόμενων πετρωμάτων, τα οποία διαμορφώνουν τα δελταϊκά ιζήματα του υποβάθρου (basement). Οι άξονες αυτών των σχηματισμών έχουν διεύθυνση Β-Ν και χωρίζουν τα υπόγεια ύδατα σε τρία μέρη. Η σύνθεση των γεωτρήσεων υποδεικνύει ότι το δελταϊκό αλλουβιακό τμήμα του ποταμού Μόρνου, αποτελείται από μια σειρά από ποτάμια δελταϊκά ιζήματα με πάχος από 60 – 150 μ. Η γεώτρηση με το μέγιστο βάθος, βρίσκεται στην περιοχή του Αγίου Πολύκαρπου (GB6)(Σχήμα 4.4), και φτάνει τα 150 μ. κάτω από την στάθμη της θάλασσας.



Σχήμα 4.4. Χάρτης των γεωτρήσεων της περιοχής του δέλτα

Η στρωματογραφία των σημερινών δελταϊκών ιζημάτων δεν είναι ομοιόμορφη. Χαρακτηρίζεται από εναλλαγές των αδρομερών ιζημάτων (αμμοχάλικα και χαλίκια), λεπτόκοκκων στρωμάτων (φερτή ιλύς και άμμος) και ανάμεικτα υλικά (αμμοχάλικα, χαλίκια και φερτή ιλύς). Η ιζηματοπόθεση/πρόσχωση είναι χαρακτηριστικό ενός δελταϊκού ριπίδιου.

Η δομή της στρωματογραφίας των γεωτρήσεων (Σχήμα 4.5) οι οποίες εντοπίζονται στην κορυφή του δέλτα, καθώς επίσης και στα όριά του, χαρακτηρίζονται από αφθονία αδρομερών υλικών. Αντίθετα, η νοτιότερη γεώτρηση αποτελείται από λεπτόκοκκα υλικά, τα οποία διακόπτονται από αδρομερή υλικά. Τέλος, αμμοχάλικα και χαλίκια αντιστοιχούν σε ιζήματα τα οποία είχαν αποθεθεί από παλαιότερες κοίτες, οι οποίες σήμερα είναι θαμμένες (Piper et al., 1990, Stournaras, 1999, Karymbalis et al., 2007).



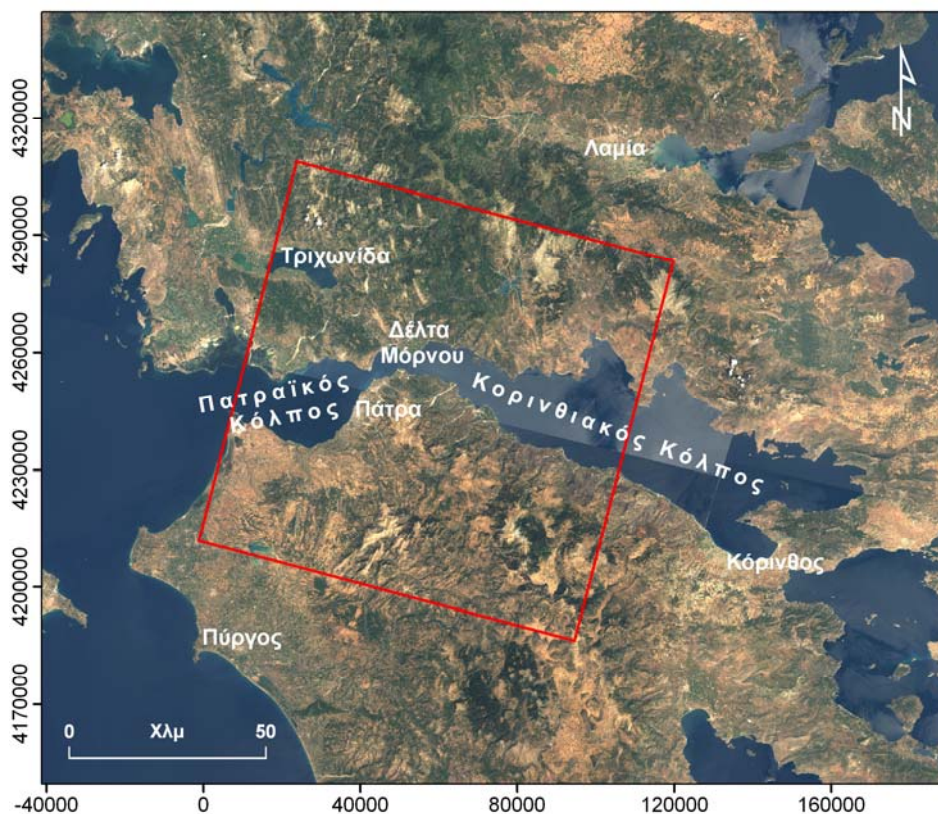
4.5. Στρωματογραφία των γεωτρήσεων του δέλτα από Μελέτη ΓΑΜΜΑ ΕΠΕ, 1982

5. Προτεινόμενη μεθοδολογία και εφαρμογή της

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση της εφαρμογής, καθώς επίσης και τα βήματα της μεθοδολογίας της συμβολομετρίας των σταθερών ανακλαστήρων τα οποία ακολουθήθηκαν.

5.1 Δεδομένα SAR απεικονίσεων

Για την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα SAR και ASAR των δορυφόρων Ραντάρ ERS-1,2 και ENVISAT αντίστοιχα.



Σχήμα 5.1. Το πλαίσιο της εικόνας Ραντάρ που καλύπτει την περιοχή μελέτης

Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν, αποτελούν εικόνες αρχείου οι οποίες παρέχονται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος. Η επιλογή τους, πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού EOLi (<http://earth.esa.int/EOLi/EOLi.html>) και καλύπτουν την περιοχή του Δέλτα του Μόρνου και της ευρύτερης περιοχής (Σχήμα 5.1). Συνολικά, επιλέχθηκαν 71 SAR απεικονίσεις, εκ των οποίων οι 42 προέρχονται από τον δορυφόρο

ERS-1,2 (Πίνακας 5.1), καλύπτοντας το χρονικό διάστημα 1992-2000 και οι 29 από τον δορυφόρο ENVISAT (Πίνακας 5.2), καλύπτοντας αντίστοιχα το χρονικό διάστημα 2002-2009.

Τα δεδομένα ήταν SLC (Single Look Complex) απεικονίσεις (πλάτος και φάση σήματος οπισθοσκέδασης), καθοδικής τροχιάς, πρωινής λήψης (περίπου στις 09:00 π.μ.), κάθετης VV πόλωσης και πλάτους κάλυψης 100 km. Επιπλέον, για την διασφάλιση της συμβατότητας των δεδομένων, οι λήψεις των απεικονίσεων προέρχονται από το ίδιο κέντρο επεξεργασίας, το Ιταλικό κέντρο επεξεργασίας I-PAF (Italian Processing and Archiving Facility).

Πίνακας 5.1. Δεδομένα του δορυφόρου ERS-1,2

A/A	ΗΜ/ΝΙΑ	ΔΟΥΡΥΦΟΡΟΣ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΛΗΨΗΣ	ΤΡΟΧΙΑ	ΠΛΑΙΣΙΟ	ΠΟΛΩΣΗ	ΦΟΡΑ ΛΗΨΗΣ
1	12/11/1992	ERS-1	6937	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
2	10/06/1993	ERS-1	9943	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
3	19/08/1993	ERS-1	10945	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
4	28/10/1993	ERS-1	11947	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
5	25/03/1995	ERS-1	19305	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
6	29/04/1995	ERS-1	19806	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
7	03/06/1995	ERS-1	20307	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
8	08/07/1995	ERS-1	20808	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
9	13/08/1995	ERS-2	1636	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
10	17/09/1995	ERS-2	2137	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
11	21/10/1995	ERS-1	22311	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
12	31/12/1995	ERS-2	3640	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
13	19/05/1996	ERS-2	5644	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
14	23/06/1996	ERS-2	6145	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
15	01/09/1996	ERS-2	7147	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
16	06/10/1996	ERS-2	7648	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
17	10/11/1996	ERS-2	8149	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
18	15/12/1996	ERS-2	8650	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
19	19/01/1997	ERS-2	9151	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
20	23/02/1997	ERS-2	9652	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
21	04/05/1997	ERS-2	10654	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
22	08/06/1997	ERS-2	11155	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
23	13/07/1997	ERS-2	11656	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
24	17/08/1997	ERS-2	12157	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
25	21/09/1997	ERS-2	12658	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
26	30/11/1997	ERS-2	13660	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
27	04/01/1998	ERS-2	14161	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
28	19/04/1998	ERS-2	15664	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
29	24/05/1998	ERS-2	16165	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
30	28/06/1998	ERS-2	16666	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
31	02/08/1998	ERS-2	17167	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
32	06/09/1998	ERS-2	17668	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ

33	28/02/1999	ERS-2	20173	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
34	13/06/1999	ERS-2	21676	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
35	18/07/1999	ERS-2	22177	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
36	22/08/1999	ERS-2	22678	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
37	26/09/1999	ERS-2	23179	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
38	31/10/1999	ERS-2	23680	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
39	05/12/1999	ERS-2	24181	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
40	09/01/2000	ERS-2	24682	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
41	23/04/2000	ERS-2	26185	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
42	28/05/2000	ERS-2	26686	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ

Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκαν τροχιακά δεδομένα ακριβείας με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας της τροχιάς του δορυφόρου. Συγκεκριμένα, για τους δορυφόρους ERS-1,2, ελήφθησαν τροχιακά δεδομένα από το DEOS (<http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbbs>), με επέκταση .ODR. Τα αρχεία αυτά διαθέτουν μεγάλη ακρίβεια θέσης και ταχύτητας του δορυφόρου, της τάξης των 5-6 εκατοστών (Scharoo & Visser, 1998). Από την άλλη πλευρά, για το δορυφόρο ENVISAT, ελήφθησαν τροχιακά δεδομένα DORIS. Το DORIS είναι ένα όργανο, το οποίο είναι εγκατεστημένο πάνω στον δορυφόρο, κάτι που σαφώς ευνοεί και επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια στα δεδομένα των τροχιών.

Επίσης, απαραίτητα δεδομένα για την επεξεργασία των δεδομένων Ραντάρ, είναι η τοπογραφία και το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε, ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου χωρικής ανάλυσης (~90 m), από δεδομένα της αποστολής SRTM (Werner, 2001), το οποίο είναι διαθέσιμο στο διαδίκτυο από το International Centre of Tropical Agriculture (CIAT) (<http://srtm.csi.cgiar.org>). Η έκδοση η οποία χρησιμοποιήθηκε είναι η STRM v3 (τρίτη έκδοση), στην οποία έχουν καλυφθεί τα κενά των πρωτογενών υψομετρικών δεδομένων, ενώ ταυτόχρονα έχει βελτιωθεί η γεωαναφορά τους καθώς και η ανάλυση της ακτογραμμής (Jarvis et al., 2006). Η πληρότητά τους τα συνιστά κατάλληλα για εφαρμογές Συμβολομετρίας Ραντάρ των σταθερών ανακλαστήρων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου δεν είναι διαθέσιμα υψομετρικά δεδομένα υψηλότερης χωρικής ανάλυσης.

Πίνακας 5.2. Δεδομένα του δορυφόρου ENVISAT

A/A	ΗΜ/ΝΙΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΛΗΨΗΣ	ΤΡΟΧΙΑ	ΠΛΑΙΣΙΟ	ΠΟΛΩΣΗ	ΦΟΡΑ ΛΗΨΗΣ
1	20/10/2002	3339	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
2	09/03/2003	5343	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
3	22/06/2003	6846	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
4	09/11/2003	8850	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
5	28/03/2004	10854	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
6	11/07/2004	12357	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ

7	19/09/2004	13359	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
8	06/02/2005	15363	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
9	13/03/2005	15864	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
10	17/04/2005	16365	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
11	22/05/2005	16866	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
12	04/09/2005	18369	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
13	13/11/2005	19371	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
14	26/02/2006	20874	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
15	11/06/2006	22377	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
16	16/07/2006	22878	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
17	29/10/2006	24381	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
18	11/02/2007	25884	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
19	05/08/2007	28389	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
20	27/01/2008	30894	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
21	06/04/2008	31896	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
22	11/05/2008	32397	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
23	15/06/2008	32898	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
24	20/07/2008	33399	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
25	24/08/2008	33900	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
26	28/09/2008	34401	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
27	07/12/2008	35403	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
28	15/02/2009	36405	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
29	22/03/2009	36906	279	2835	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ

5.2 Επεξεργασία των SAR απεικονίσεων

Στην προκειμένη περίπτωση για την επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων SAR χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GAMMA. Παρά το γεγονός ότι τα επιμέρους στάδια επεξεργασίας έχουν μελετηθεί διεξοδικά, δεν υπάρχει κάποια πρότυπη μεθοδολογία που να εγγυάται βέλτιστα αποτελέσματα, παρά μόνο ένα γενικός οδηγός που προσαρμόζεται κατά περίπτωση στους στόχους της εκάστοτε μελέτης. Η εμπειρία επομένως του εκάστοτε αναλυτή διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αξιοπιστία των τελικών αποτελεσμάτων.

Αρχικό στάδιο της επεξεργασίας των εικόνων ήταν η εισαγωγή των τροχιακών δεδομένων (DELTA και DORIS) στις εικόνες SLC. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι έγιναν δύο διαφορετικές επεξεργασίες: ERS-1,2 και ENVISAT, που καλύπτουν τις χρονικές περιόδους 1992-2000 και 2002-2009 αντίστοιχα. Για το έτος 2001 δεν ελήφθησαν απεικονίσεις λόγω ενός τεχνικού προβλήματος του δορυφόρου ERS.

Στη συνέχεια, έχοντας έναν αριθμό εικόνων SLC, με τα ανανεωμένα πλέον ανύσματα των τροχιών, εφαρμόστηκε η εγγραφή των εικόνων, στάδιο που αφορά στην συμπροσαρμογή των εικόνων. Η ακρίβεια της συμπροσαρμογής επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία του συνόλου των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας. Κατά τη

συμπροσαρμογή πραγματοποιείται γεωμετρική προσαρμογή μίας SAR απεικόνισης (δευτερεύουσα απεικόνιση) σε μία άλλη που λαμβάνεται ως αναφορά (πρωτεύουσα απεικόνιση). Με τους σύγχρονους αλγόριθμους επεξεργασίας επιτυγχάνεται συμπροσαρμογή μεταξύ του συνόλου των SAR εικόνων με ακρίβεια μεγαλύτερης του 1/8 του εικονοστοιχείου. Να σημειωθεί πως τα προβλήματα συμπροσαρμογής των εικόνων 11/07/2004 και 22/03/2009 του δορυφόρου ENVISAT, είχαν ως αποτέλεσμα την αφαίρεσή αυτών των εικόνων από τα υπόλοιπα στάδια της επεξεργασίας.

5.3 Μεθοδολογία των Σταθερών Ανακλαστήρων (αλγόριθμος IPTA – Interferometric Point Target Analysis)

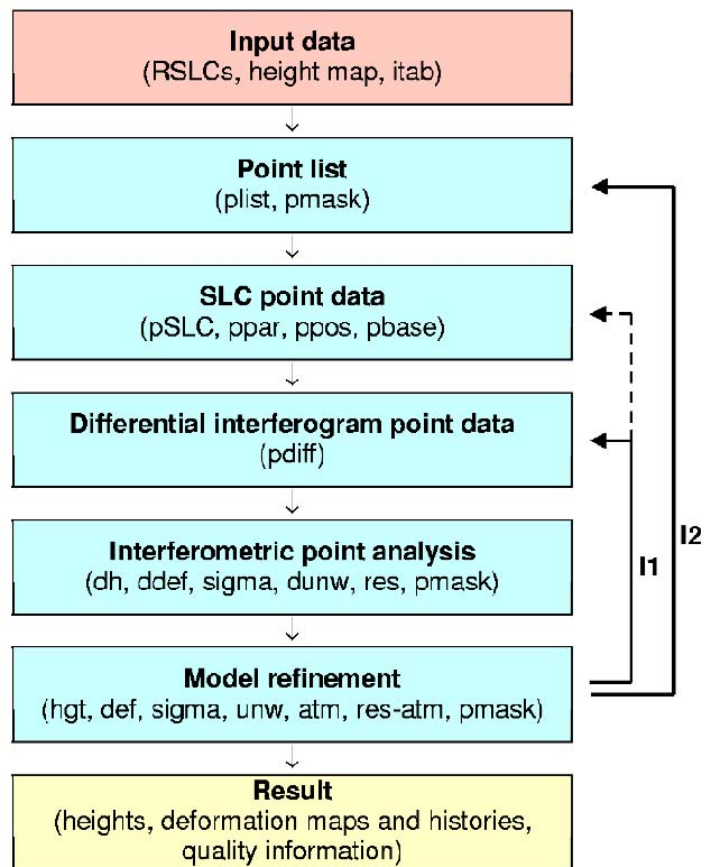
Η ανάλυση IPTA, είναι μία μέθοδος η οποία αξιοποιεί τα χωρικά και χρονικά χαρακτηριστικά των υπογραφών που έχουν συλλεχθεί από ανακλαστήρες, οι οποίοι παρουσιάζουν υψηλές τιμές συνάφειας για μεγάλη χρονική περίοδο, με σκοπό την παραγωγή χαρτών παραμόρφωσης και διαγραμμάτων ιστορικής παραμόρφωσης. Η χρήση της συμβολομετρικής φάσης από χρονοσειρές των δεδομένων μεγάλης διάρκειας, προϋποθέτει ότι η συσχέτιση παραμένει υψηλή κατά τη διάρκεια της περιόδου παρατήρησης.



Σχήμα 5.2. Μέση εικόνα multi-look (1x5) της περιοχής μελέτης του δορυφόρου ENVISAT

Οι Ferretti et al. πρότειναν την εξέταση των συμβολομετρικών φάσεων από σταθερούς ανακλαστήρες και κατέδειξε ότι μεγάλος αριθμός αυτών των ανακλαστήρων μπορούν να

εντοπιστούν σε δεδομένα του δορυφόρου ERS, ειδικά σε αστικό περιβάλλον. Για τα σημεία-στόχους δεν υπάρχει χωρική αποσυσχέτιση, με αποτέλεσμα αυτό το γεγονός να επιτρέπει την ερμηνεία της συμβολομετρικής φάσης των ζευγαριών με μεγάλα ανύσματα βάσης. Επομένως, είναι διαθέσιμες περισσότερες παρατηρήσεις, οι οποίες επιτρέπουν τη μείωση των σφαλμάτων που προκύπτουν από την ατμοσφαιρική καθυστέρηση και οδηγεί σε καλύτερη χρονική κάλυψη. Προφανώς ο ίδιος ανακλαστήρας πρέπει να παραμείνει σταθερός κατά την περίοδο του χρόνου, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ανάλυση του ιστορικού της φάσης στο χρόνο. Όσον αφορά στη χωρική κάλυψη, υπάρχει η προσδοκία ότι μερικοί ανακλαστήρες μπορεί να βρεθούν σε μη αστικά περιβάλλοντα, κάτι που επιτρέπει την επέκταση της χωρικής κάλυψης. (Werner et al., 2003, Werner et al., 2003).



Σχήμα 5.3. Βασικό σχήμα της επεξεργασίας IPTA από Werner et al., 2003.

Στη συνέχεια αναλύονται τα βασικά στάδια της επεξεργασίας της μεθόδου IPTA. Το βασικό σχήμα της επεξεργασίας το οποίο ακολουθήθηκε φαίνεται στο σχήμα 5.3. Έχοντας ήδη από προηγούμενο στάδιο τις εγγραφόμενες εικόνες, οι οποίες έχουν κοινή

γεωμετρία, για κάθε εικόνα SLC, δημιουργήθηκε η αντίστοιχη multi-look εικόνα (1μ. στις πλάγιες αποστάσεις x 5μ. στο αζιμούθιο). Έπειτα, δημιουργήθηκε η “μέση” εικόνα multi-look της περιοχής μελέτης (Σχήμα 5.4), η οποία αντιπροσωπεύει τον μέσο όρο των multi-look εικόνων.

Στη συνέχεια, λόγω του μεγάλου αριθμού των εικόνων, επιλέχθηκε μία εικόνα ως αναφορά, με σκοπό τον συνδυασμό αυτής με τις υπόλοιπες εικόνες SAR για την παραγωγή των αντίστοιχων συμβολογραφημάτων. Τα κριτήρια βάση των οποίων επιλέχθηκε αυτή η εικόνα αναφοράς ήταν α) το όσο δυνατόν ελάχιστο μέσο άνυσμα βάσης με τα υπόλοιπα, β) η λήψη της εικόνας να βρίσκεται περίπου στο μέσο της χρονικής περιόδου που καλύπτουν οι απεικονίσεις SAR και τέλος γ) η εικόνα αυτή να μην παρουσιάζει ατμοσφαιρικές επιδράσεις.

Συγκεκριμένα, για τα δεδομένα του δορυφόρου ERS-1,2, χρησιμοποιήθηκε η εικόνα 03/06/1995 (Πίνακας 5.3, Σχήμα 5.5) με μέσο όρο ανύσματος βάσης (λαμβάνοντας υπόψιν και τις απόλυτες τιμές) τα 379 μ. και για τον ENVISAT χρησιμοποιήθηκε η εικόνα 22/05/2005 (Πίνακας 5.4, Σχήμα 5.6) με μέσο όρο ανύσματος βάσης τα 78 μ. αντίστοιχα. Ένα βασικό στοιχείο της μεθοδολογίας IPTA είναι ότι η συμβολομετρική ανάλυση γίνεται μόνο για επιλεγμένα σημεία. Κάθε σημείο ορίζεται από την πλάγια απόσταση και το αζιμούθιο. Αυτές οι συντεταγμένες είναι ακέραιος αριθμός εικονοστοιχείων τα οποία είναι σχετικά με τη γεωμετρία της εικόνας αναφοράς. Ένας σημαντικός λόγος για την επιλογή των σημείων είναι η χαμηλή χωρική αποσυσχέτιση αυτών των σημείων-στόχων, κάτι που επιτρέπει να περιλαμβάνονται ακόμη και συμβολομετρικά ζεύγη με αρκετά μεγάλα ανύσματα βάσης.

Για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης, εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις με σκοπό την επιλογή των υποψήφιων σημείων προς ανάλυση και επεξεργασία. Η πρώτη προσέγγιση βασίζεται στα φασματικά χαρακτηριστικά της κάθε εικόνας SLC. Αυτό επιτυγχάνεται με την ταυτοποίηση ανακλαστήρων, οι οποίοι χαρακτηρίζονται

Πίνακας 5.3. Δεδομένα του δορυφόρου ERS-1,2 που χρησιμοποιήθηκαν (με έντονο χρώμα η πρωτεύουσα απεικόνιση)

A/A	Πρωτεύουσα εικόνα (ημ/νια)	Δευτερεύουσα εικόνα (ημ/νια)	Άνυσμα βάσης (μέτρα)	Χρονικό διάστημα (ημέρες)
1	06/03/1995	05/04/1997	-360,3	701
2	06/03/1995	08/19/1993	-323,7	-653
3	06/03/1995	06/08/1997	-166,9	736
4	06/03/1995	07/13/1997	-124,8	771
5	06/03/1995	10/28/1993	569,7	-583

6	06/03/1995	08/17/1997	111,4	806
7	06/03/1995	09/21/1997	-263,2	841
8	06/03/1995	11/30/1997	177,4	911
9	06/03/1995	01/04/1998	116,4	946
10	06/03/1995	04/19/1998	193,0	1051
11	06/03/1995	05/24/1998	-160,6	1086
12	06/03/1995	08/13/1995	82,8	71
13	06/03/1995	06/28/1998	-834,8	1121
14	06/03/1995	08/02/1998	56,7	1156
15	06/03/1995	09/06/1998	47,0	1191
16	06/03/1995	03/25/1995	-1169,9	-70
17	06/03/1995	04/29/1995	-518,4	-35
18	06/03/1995	02/28/1999	302,9	1366
19	06/03/1995	06/03/1995	0,0	0
20	06/03/1995	07/08/1995	-583,3	35
21	06/03/1995	09/17/1995	-360,0	106
22	06/03/1995	06/13/1999	-559,7	106
23	06/03/1995	07/18/1999	455,9	1506
24	06/03/1995	10/21/1995	761,2	140
25	06/03/1995	08/22/1999	1012,1	1541
26	06/03/1995	09/26/1999	448,5	1576
27	06/03/1995	10/31/1999	357,3	1611
28	06/03/1995	12/05/1999	-121,9	1646
29	06/03/1995	01/09/2000	-140,1	1681
30	06/03/1995	04/23/2000	953,6	1786
31	06/03/1995	05/28/2000	806,6	1821
32	06/03/1995	12/31/1995	186,2	211
33	06/03/1995	05/19/1996	71,0	351
34	06/03/1995	06/23/1996	-83,8	386
35	06/03/1995	11/12/1992	73,9	-933
36	06/03/1995	09/01/1996	-514,6	456
37	06/03/1995	10/06/1996	-392,6	491
38	06/03/1995	11/10/1996	1064,8	526
39	06/03/1995	12/15/1996	-309,1	561
40	06/03/1995	01/19/1997	-28,6	596
41	06/03/1995	02/23/1997	-182,2	631
42	06/03/1995	06/10/1993	-477,3	-723

από χαμηλή φασματική πολυμορφία στη φάση (low spectral phase diversity). Ενώ, η δεύτερη μέθοδος, βασίζεται στην ταυτοποίηση των ανακλαστών, η οποία βασίζεται στην χαμηλή μεταβλητότητα της έντασης της ακτινοβολίας.

Πίνακας 5.4. Δεδομένα του δορυφόρου ENVISAT που χρησιμοποιήθηκαν (με έντονο χρώμα η πρωτεύουσα απεικόνιση)

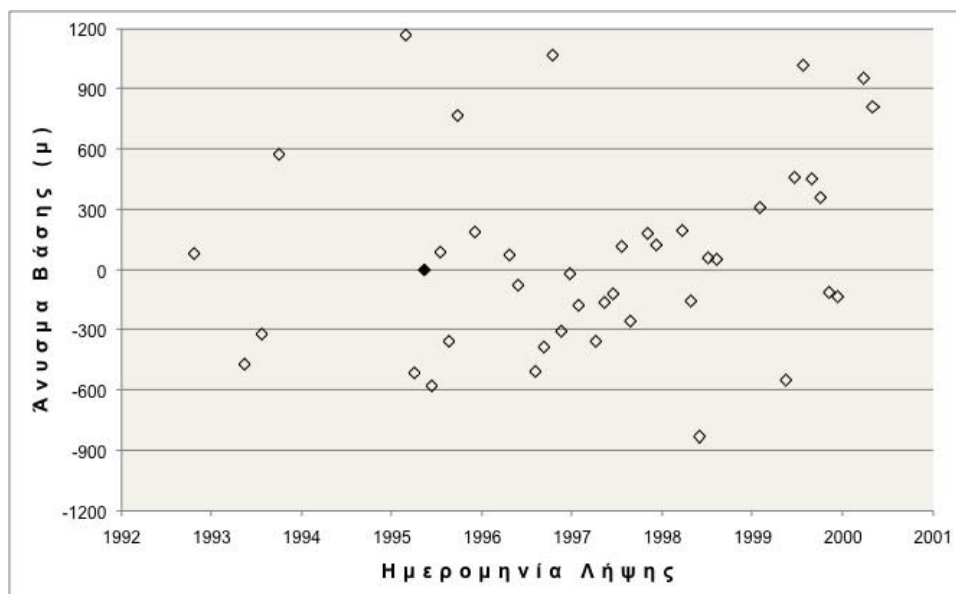
A/A	Πρωτεύουσα εικόνα (ημ/νια)	Δευτερεύουσα εικόνα (ημ/νια)	Άνυσμα βάσης (μέτρα)	Χρονικό διάστημα (ημέρες)
1	22/05/2005	20/10/2002	-511.0	-945
2	22/05/2005	09/03/2003	-264.9	-805
3	22/05/2005	22/06/2003	-76.4	-700
4	22/05/2005	09/11/2003	-864.3	-560
5	22/05/2005	28/03/2004	1059.7	-420
6	22/05/2005	19/09/2004	657.8	-245
7	22/05/2005	06/02/2005	-344.0	-105
8	22/05/2005	13/03/2005	461.8	-70
9	22/05/2005	17/04/2005	297.6	-35
10	22/05/2005	22/05/2005	0.0	0
11	22/05/2005	04/09/2005	741.3	105
12	22/05/2005	13/11/2005	439.7	175
13	22/05/2005	26/02/2006	-210.8	280
14	22/05/2005	11/06/2006	-186.5	385
15	22/05/2005	16/07/2006	937.3	420
16	22/05/2005	29/10/2006	-357.5	525
17	22/05/2005	11/02/2007	-160.5	630
18	22/05/2005	05/08/2007	-44.1	805
19	22/05/2005	27/01/2008	134.5	980
20	22/05/2005	06/04/2008	324.5	1050
21	22/05/2005	11/05/1008	3.0	1085
22	22/05/2005	15/06/2008	137.8	1120
23	22/05/2005	20/07/2008	171.8	1155
24	22/05/2005	24/08/2008	167.9	1190
25	22/05/2005	28/09/2008	-239.4	1225
26	22/05/2005	07/12/2008	-206.6	1295
27	22/05/2005	15/02/2009	56.8	1365

Εκτός αυτού, ως πρόσθετο κριτήριο για την καλύτερη και πιο αξιόπιστη επιλογή των σημείων, χρησιμοποιήθηκε η δεσπόζουσα οπισθοσκέδαση των ανακλαστήρων (στην προκειμένη περίπτωση, κατώφλι ≥ 1.5). Στη συνέχεια, τα σημεία που εξάχθηκαν από τις δύο παραπάνω μεθόδους, ενώθηκαν σε ένα αρχείο, το οποίο αποτέλεσε την τελική εικόνα των υποψήφιων σταθερών ανακλαστήρων (Σχήμα 5.7). Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί, ότι ο αρχικός αριθμός των σημείων θα μειωθεί, καθώς θα εφαρμοστούν αρκετοί περιορισμοί, που σκοπό έχουν την καλύτερη και πλέον αξιόπιστη ανάλυση των τελικών σημείων. Επόμενο στάδιο είναι η εισαγωγή του DEM, που περιέχει τις τιμές των υψομέτρων των υποψήφιων σταθερών ανακλαστήρων (Σχήμα 5.8) και στη συνέχεια η παραγωγή των συμβολογραφημάτων.

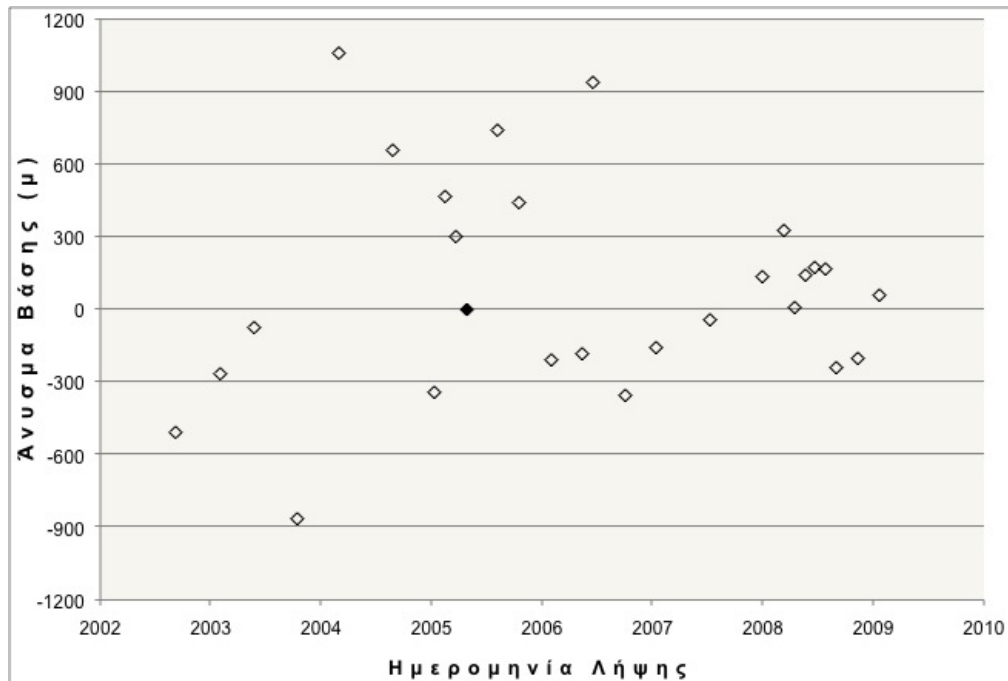
Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί, πως πολύ σημαντικό βήμα της επεξεργασίας είναι η επιλογή ενός σημείου αναφοράς. Για την συγκεκριμένη περιοχή μελέτης, επιλέχθηκαν δύο διαφορετικά σημεία αναφοράς (ένα για κάθε dataset), τα οποία όμως βρίσκονται στο ίδιο γεωλογικό υπόβαθρο και έτσι τα αποτελέσματα τους μπορούν να συγκριθούν. Επιπλέον, ως σημεία αναφοράς επιλέχθηκαν οι ανακλαστήρες οι οποίοι ήταν πολύ υψηλής ποιότητας (με υψηλή τιμή συνάφειας), βρίσκονται σε σχετικά σταθερές περιοχές και δεν απέχουν πολύ μακριά από την περιοχή ενδιαφέροντος (Σχήμα 6.1 και 6.2, Βλέπε Κεφ. 6).

Τα διαφορικά συμβολογραφήματα υπολογίζονται αφαιρώντας τις αποκατεστημένες φάσεις από κάθε συμβολογράφημα, καθώς επίσης και από κάθε ανακλαστήρα.

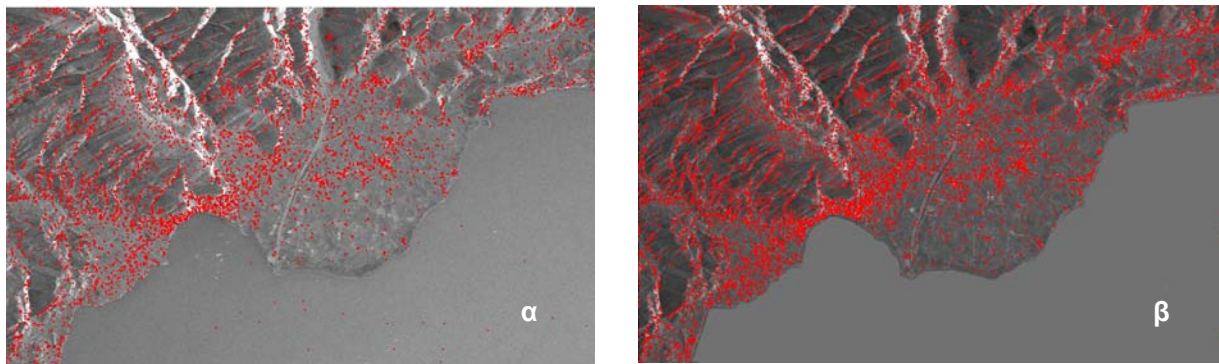
Η αποκατεστημένη φάση εξαρτάται από τις διαθέσιμες πληροφορίες του αισθητήρα (π.χ. άνυσμα βάσης), την τοπογραφία της περιοχής, τη γραμμική παραμόρφωση και την ετερογένεια στην καθυστέρηση της διαδρομής του σήματος λόγω της ατμόσφαιρας. Για ζεύγη τα οποία χαρακτηρίζονται από μικρό άνυσμα βάσης, επειδή συμβάλλει αρκετά η τοπογραφία αλλά κυρίως ο όρος της επίπεδης γης και η ατμόσφαιρα, η διαφορική συμβολομετρική φάση έχει ομαλές μεταβάσεις στην κλίμακα των τιμών της φάσης (Σχήμα 5.9). Αντίθετα, για ζεύγη με μεγάλο άνυσμα βάσης, οι μεταβάσεις αυτές είναι περισσότερο τυχαίες (Σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.5. Διάγραμμα συσχετισμού ημερομηνίας λήψης και ανύσματος βάσης για το χρονικό διάστημα 1992-2000 (με έντονο χρώμα η εικόνα αναφοράς)

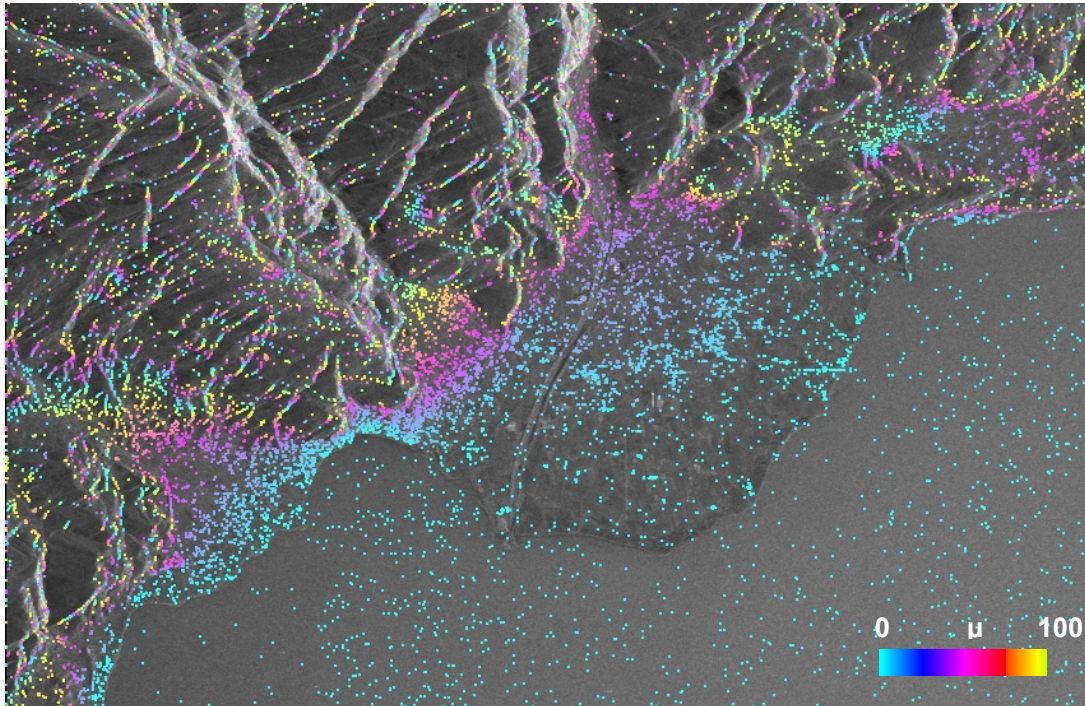


Σχήμα 5.6. Διάγραμμα συσχετισμού ημερομηνίας λήψης και ανύσματος βάσης για το χρονικό διάστημα 2002-2009 (με έντονο χρώμα η εικόνα αναφοράς)

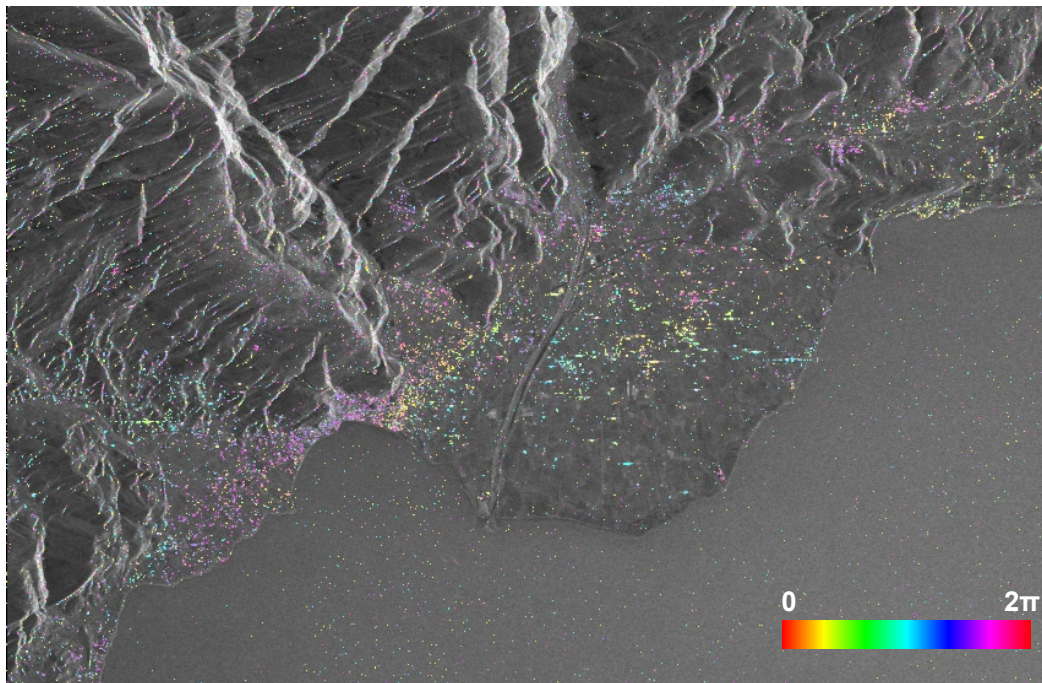


Σχήμα 5.7. Τελικές εικόνες των υποψήφιων ανακλαστήρων α) 1992-2000 και β) 2002-2010

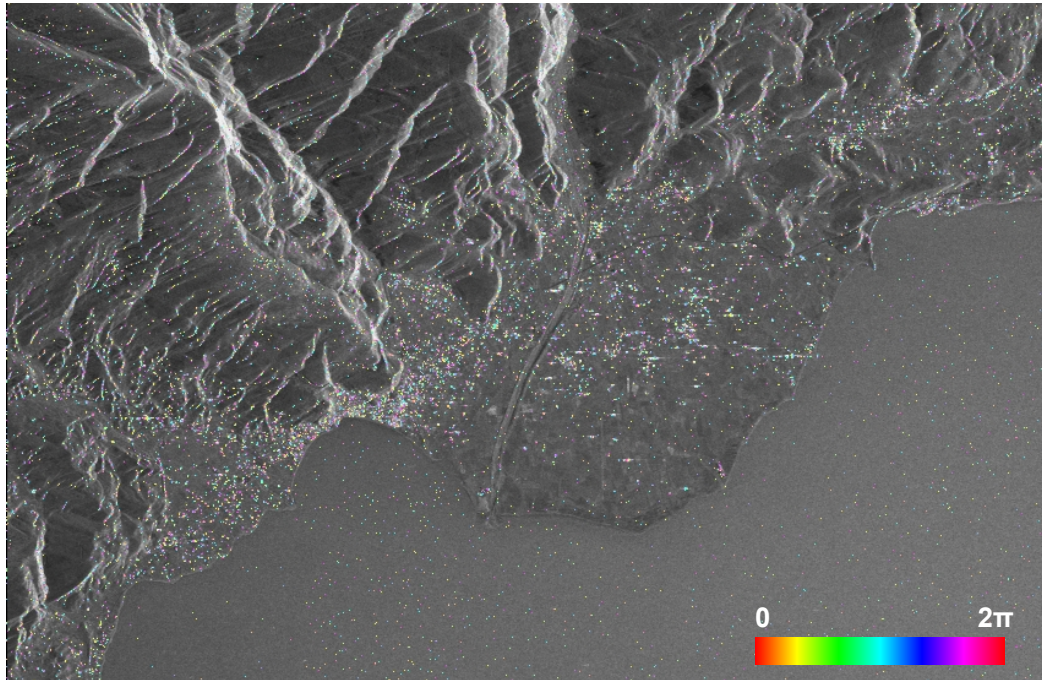
Η ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων με σκοπό την εκτίμηση της γραμμικής παραμόρφωσης για κάθε ανακλαστήρα, τη διόρθωση του υψομέτρου και της υπολειπόμενης φάσης η οποία αντιστοιχεί στο άθροισμα της μη γραμμικής παραμόρφωσης, των σφαλμάτων λόγω της ατμόσφαιρας και σφάλματα στον υπολογισμό του κάθετου άνυσματος βάσης. Αρχικά έγινε χωρίζοντας την κάθε απεικόνιση σε “τομείς” (patching), όπου στον κάθε τομέα καθορίζεται ένα σημείο αναφοράς και έπειτα χρησιμοποιήθηκε ένα σημείο αναφοράς για το σύνολο της απεικόνισης.



Σχήμα 5.8. Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου που περιέχει τις τιμές των υψομέτρων των υποψήφιων σταθερών ανακλαστήρων (1 κύκλος χρωμάτων αντιστοιχεί σε υψόμετρο 100μ.)



Σχήμα 5.9. Συμβολομετρικό ζεύγος (ENVISAT) 22/05/2005-11/05/2008, με $B.L = 3.0 \mu$., όπου ένας κύκλος χρωμάτων αντιστοιχεί σε φάση 2π .



Σχήμα 5.10. Συμβολομετρικό ζεύγος (ENVISAT) 22/05/2005-28/03/2004, με $B_{\perp} = 1059.7 \mu.$, όπου ένας κύκλος χρωμάτων ανιστοιχεί σε φάση 2π .

Η επιλογή του τοπικού σημείου αναφοράς σε κάθε τομέα εφαρμόστηκε έτσι ώστε να αποφευχθούν η μεγάλης κλίμακας επιδράσεις στη φάση, ενώ η επιλογή ενός σημείου αναφοράς στο σύνολο της απεικόνισης, χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την αποφυγή σφαλμάτων τα οποία μπορεί να δημιουργήθηκαν λόγω του «patching». Να σημειωθεί ότι το «patching» έχει ως πλεονέκτημα την ικανότητα να ανιχνεύει τις διακυμάνσεις στη φάση λόγω των ατμοσφαιρικών επιδράσεων και των σφαλμάτων που οφείλονται στο άνυσμα βάσης. Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της χρονικής απόστασης μεταξύ των δύο ζευγών, καθώς οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις, τα σφάλματα στο άνυσμα βάσης και ο σχετικά υψηλότερος ρυθμός παραμόρφωσης, έχει ως αποτέλεσμα τις υψηλότερες αποκλίσεις των επιμέρους σημείων από την καμπύλη της παλινδρόμησης βάσει της οποίας υπολογίζονται τα υψόμετρα και οι παραμορφώσεις όπως θα δούμε παρακάτω.

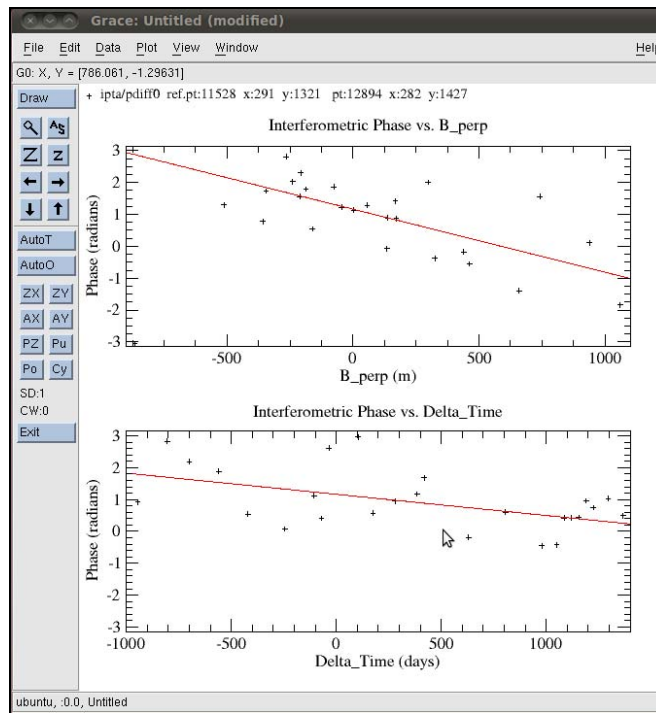
Στην συνέχεια, ένα πολύ σημαντικό σημείο της επεξεργασίας είναι ο εντοπισμός σφαλμάτων τα οποία σχετίζονται με την αποκατάσταση της φάσης. Σε αυτό το στάδιο η πραγματική τιμή της φάσης μπορεί να αποκλίνει σημαντικά από την αποκατεστημένη φάση επειδή μπορεί να υπάρχουν ισχυρές ατμοσφαιρικές επιδράσεις και επιπτώσεις σφαλμάτων του ανύσματος βάσης. Κατά συνέπεια, δεν μπορεί να αναμένεται ότι η

αποκατεστημένη φάση θα είναι σωστή για όλα τα σημεία και για όλες τις απεικονίσεις. Επομένως, αφού πρώτα ελέγχθηκαν όλες οι απεικονίσεις για τυχόν σφάλματα, αφαιρέθηκαν εκείνες οι οποίες παρουσίαζαν σφάλματα στην αποκατεστημένη φάση (εικόνες με απότομες μεταβάσεις στην φάση). Συγκεκριμένα, όσον αφορά τα δεδομένα του ERS-1,2 αφαιρέθηκαν συνολικά 9 εικόνες, ενώ για στα δεδομένα του ENVISAT αφαιρέθηκαν 6 εικόνες αντίστοιχα. Στη συνέχεια, εφόσον αφαιρέθηκαν οι παραπάνω απεικονίσεις, εφαρμόστηκε η ανάλυση παλινδρόμησης αλλά αυτή την φορά χρησιμοποιώντας μόνο τις απεικονίσεις που δεν εμπεριείχαν σφάλματα. Και στις 2 περιπτώσεις, ανακλαστήρες με τυπική απόκλιση αποκατεστημένης φάσης μεγαλύτερη από το υποδηλωμένο κατώφλι (σε αυτή την περίπτωση 1.0) απορρίφθηκαν και έτσι όπως ήταν αναμενόμενο μειώθηκε ο αρχικός αριθμός των σταθερών ανακλαστήρων. Τα σημεία που απορρίφθηκαν εντοπίζονται κυρίως στις ορεινές περιοχές και γενικά σε μη αστικό περιβάλλον.

Η ανάλυση των διαφορικών συμβολομετρικών φάσεων στο χρόνο είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την ανάλυση IPTA. Παρακάτω, αναλύονται οι χωρικές και χρονικές διαφορές των συμβολομετρικών φάσεων.

Για ένα ζεύγος σημείων (εκ των οποίων το ένα είναι το σημείο αναφοράς), υπολογίζονται οι διαφορές στην φάση και εφαρμόζεται η ανάλυση παλινδρόμησης δύο φορές σε σχέση με το κάθετο άνυσμα και την χρονική διαφορά των συμβολογραφημάτων αντίστοιχα. Δηλαδή, για έναν αριθμό N σημείων, υπολογίζονται $2N$ παλινδρομήσεις. Έτσι, εφαρμόστηκε ένα δυοδιάστατο 2D μοντέλο φάσης που χρησιμοποιείται για ένα ζεύγος σημείων. Το μοντέλο δηλώνει τη γραμμική εξάρτηση της φάσης από το κάθετο άνυσμα βάσης και η κλίση της παλινδρόμησης δείχνει μια σχετική διόρθωση του υψομέτρου του κάθε ανακλαστήρα, σε σχέση πάντα με το σημείο αναφοράς. Αυτή η διόρθωση του υψομέτρου γίνεται βάσει του σημείου αναφοράς, και είναι ουσιαστικά το υψόμετρο το οποίο χρειάζεται να προστεθεί σε κάθε δεύτερο σημείο έτσι ώστε η διαφορά φάσης να σε σχέση με το σημείο αναφοράς να είναι σταθερή. Επιπλέον, το μοντέλο της φάσης δείχνει την γραμμική εξάρτηση της παραμόρφωσης με τον χρόνο. Με άλλα λόγια, για ένα ζεύγος σημείων εκ των οποίων το ένα είναι το σημείο αναφοράς, υπολογίζονται οι διαφορές στη φάση, εφαρμόζοντας μια εξίσωση παλινδρόμησης σε σχέση με τον χρόνο. Αυτό έχει τον υπολογισμό της γραμμικής παραμόρφωσης (κλίση της φάσης σε σχέση με

τον χρόνο) του κάθε ανακλαστήρα στο χρόνο (Σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.11. Ανάλυση δυσδιάστατου μοντέλου παλινδρόμησης ενός ζεύγους ανακλαστήρων. Το πρώτο διάγραμμα δείχνει την εξάρτηση της φάσης με το άνυσμα βάσης, ενώ το δεύτερο δείχνει την εξάρτηση της φάσης με τον χρόνο.

Η παλινδρόμηση μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω και να γίνει πιο ισχυρή, εξετάζοντας επίσης τη γραμμική εξάρτηση της φάσης με το χρόνο, η οποία ισοδυναμεί με ένα σταθερό ρυθμό σχετικής παραμόρφωσης.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μία δυσδιάστατη ανάλυση παλινδρόμησης γίνεται με τις διαστάσεις που αντιστοιχούν στο κάθετο άνυσμα βάσης (των συμβολομετρικών ζευγών) και της χρονικής διαφοράς (μεταξύ των δύο SLC απεικονίσεων των ζευγών). Οι σχετικές κλίσεις αντιστοιχούν στις σχετικές διορθώσεις του υψομέτρου του εδάφους και στη σχετική γραμμική παραμόρφωση, το οποίο εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

$$a_0 + a_1 \times b_{\text{perp}} [i] + a_2 \times \text{delta_t} [i]$$

όπου a_0 : το αντιστάθμισμα της φάσης, a_1 : η κλίση του ανύσματος βάσης (μπορεί να μετατραπεί σε διόρθωση του υψομέτρου των σημείων), a_2 : κλίση του χρόνου (μπορεί να

μετατραπεί σε γραμμικό ρυθμό παραμόρφωσης), b_{perp} : το κάθετο άνυσμα βάσης των συμβολογραφημάτων και Δt : η χρονική διαφορά μεταξύ των συμβολογραφημάτων.

Επιπρόσθετα, θα πρέπει να επισημανθεί ότι το γενικό μοντέλο φάσης για τον αλγόριθμο IPTA το οποίο χρησιμοποιήθηκε, είναι το ίδιο με εκείνο της συμβατικής συμβολομετρίας. Η αποκατεστημένη συμβολομετρική φάση Φ_{unw} εκφράζεται ως το άθροισμα της φάσης λόγω τοπογραφίας Φ_{topo} , της φάσης λόγω παραμόρφωσης Φ_{def} , της φάσης καθυστέρησης λόγω ατμόσφαιρας Φ_{atm} και της φάσης λόγω θορύβου Φ_{noise} :

$$\Phi_{\text{unw}} = \Phi_{\text{topo}} + \Phi_{\text{def}} + \Phi_{\text{atm}} + \Phi_{\text{noise}} \quad (\text{Werner et al., 2003})$$

Έτσι, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση της παλινδρόμησης είναι διορθώσεις των υψομέτρων, διορθώσεις στο γραμμικό ρυθμό παραμόρφωσης, επιλογή καλύτερης σημείων ποιότητας μετρήσεις και υπολείμματα-σφάλματα της φάσης για κάθε συμβολογράφημα και κάθε σημείο. Αυτές οι παράμετροι χρησιμοποιούνται με σκοπό τη βελτίωση του μοντέλου. Για παράδειγμα, οι διορθώσεις των υψομέτρων προστίθενται στα υψόμετρα του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου (DEM).

Η φάση που περιέχει σφάλματα, περιλαμβάνει την ατμοσφαιρική φάση, η οποία σχετίζεται με την ετερογένεια που υπάρχει στην καθυστέρηση της απόστασης γη-δορυφόρος-γη, στη μη-γραμμική παραμόρφωση και άλλες παραμέτρους σφαλμάτων. Τα σφάλματα λόγω ατμοσφαιρικών επιδράσεων είναι χαμηλής διέλευσης (low-pass) στη χωρική διάσταση, αλλά ασυσχέιστα από συμβολομετρικό ζεύγος σε ζεύγος. Η μη γραμμική παραμόρφωση είναι γενικά χαμηλής διέλευσης στη χωρική και χρονική διάσταση, αλλά μπορεί να υπάρχουν περιπτώσεις όπου αυτό σαφώς δεν συμβαίνει. Σφάλματα που σχετίζονται με το άνυσμα βάσης είναι χαμηλής διέλευσης στη χωρική διάσταση και ασυσχέιστα από ζεύγος σε ζεύγος. Τέλος, ο θόρυβος της φάσης είναι τυχαίος τόσο στη χωρική όσο και στη χρονική διάσταση.

Σημαντικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου IPTA είναι η δυνατότητα σταδιακής και επαναληπτικής βελτίωσης των διαφορετικών παραμέτρων. Κύριες βελτιώσεις υφίστανται η περαιτέρω διόρθωση του υψομέτρου, του ρυθμού παραμόρφωσης, του ανύσματος βάσης και των παραμέτρων της ατμόσφαιρας. Όπως περιγράφηκε και προηγουμένως, η παραγωγή των υψομετρικών διορθώσεων και του ρυθμού παραμόρφωσης, έγινε κατά την 2D ανάλυση παλινδρόμησης.

Στην συνέχεια, για την περαιτέρω βελτίωση των ανυσμάτων βάσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, η οποία βασίστηκε στις αποκατεστημένες φάσεις

και στα αντίστοιχα υψόμετρα. Ουσιαστικά, η βελτίωση αφορά κυρίως στις ανακρίβειες των τροχιακών δεδομένων.

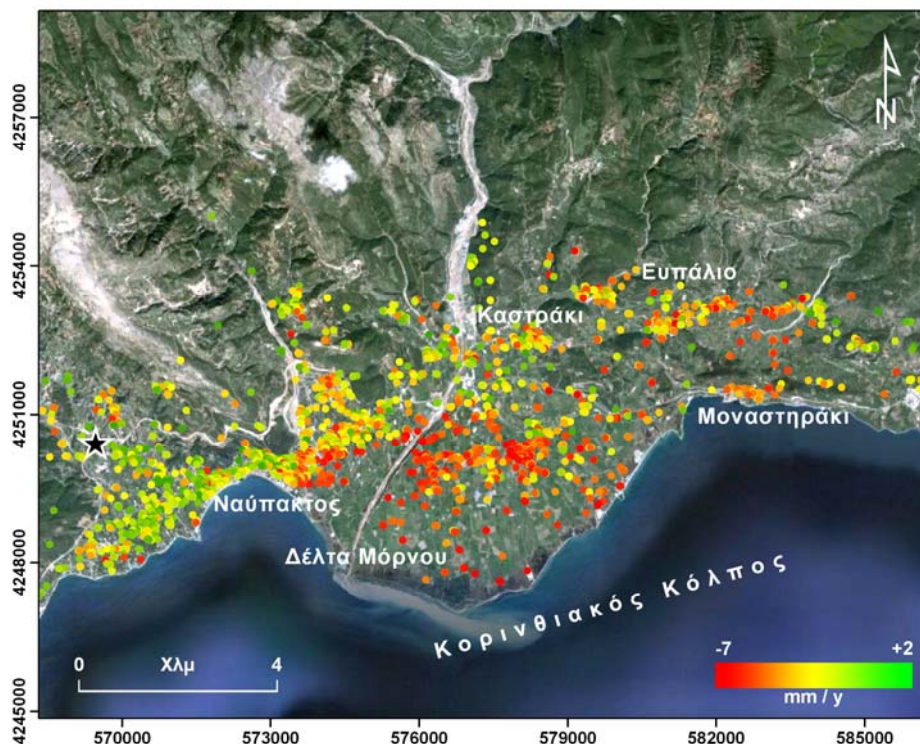
Οι παράμετροι της ατμοσφαιρικής φάσης υπολογίζονται από το υπόλοιπο των φάσεων (residual phases). Η διάκριση του θορύβου της φάσης από τις μη γραμμικές παραμορφώσεις, γίνεται λαμβάνοντας υπόψη μόνο φασματικές παραμέτρους, που έχουν χαμηλή συχνότητα στη χωρική διάσταση και υψηλή συχνότητα στη χρονική διάσταση. Αυτό γίνεται μετά τη βελτίωση και διόρθωση των ανυσμάτων βάσης, διότι τα σφάλματα που οφείλονται στα ανύσματα βάσης υπάγονται επίσης στην παρούσα φασματική κατηγορία. Ο σωστός διαχωρισμός της ατμοσφαιρικής φάσης, της μη-γραμμικής παραμόρφωσης και του θορύβου δεν είναι πλήρως εφικτός και οι παραδοχές που χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό αυτό μπορεί να μην είναι απολύτως έγκυρες.

Τέλος, εφόσον έγιναν οι παραπάνω βελτιώσεις στις παραμέτρους, η επεξεργασία κατέληξε σε έναν τελικό αριθμό ανακλαστήρων εκ των οποίων οι εδαφικές παραμορφώσεις και το ιστορικό παραμόρφωσής τους είναι γνωστά. Αφού αρχικά έγινε η μετατροπή των συντεταγμένων από Doppler γεωμετρία σε γεωγραφικές συντεταγμένες, έπειτα δημιουργήθηκε ένα ASCII αρχείο το οποίο περιλαμβάνει την ιστορική παραμόρφωση κάθε ανακλαστήρα. Στο επόμενο κεφάλαιο, θα αναλυθούν τα αποτελέσματα.

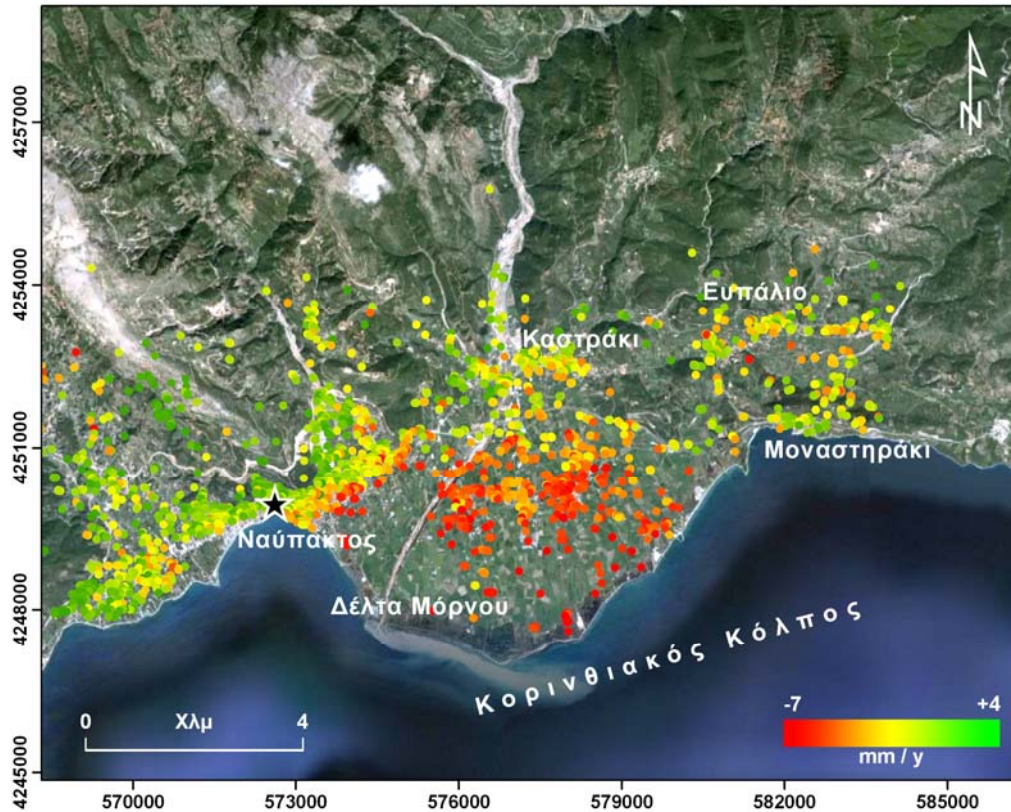
6. Αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν τα τελικά αποτελέσματα της τεχνικής των σταθερών ανακλαστήρων. Αφού πρώτα, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα δεδομένα μετατράπηκαν από την γεωμετρία του Ραντάρ σε γεωγραφικές συντεταγμένες, έπειτα τα σημεία-ανακλαστήρες εισήχθησαν σε ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), χρησιμοποιώντας ως υπόβαθρο μία εικόνα υψηλής ανάλυσης του δορυφόρου QuickBird (Σχήμα 6.1, Σχήμα 6.2). Με αυτό τον τρόπο, ήταν πιο εύκολη και πιο ευκρινής η ταυτοποίηση των σημείων.

Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να τονιστεί ότι - όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο - τα σημεία αναφοράς θεωρούνται ότι βρίσκονται σε σταθερές περιοχές, παρόλα αυτά τα σημεία αυτά δεν είναι απολύτως σταθερά. Αυτό συνεπάγεται, ότι οι αρνητικές ταχύτητες παραμόρφωσης δεν σημαίνει ότι αντιπροσωπεύουν καθίζηση αλλά μία πιθανόν μικρότερη ανύψωση του εκάστοτε σημείου σε σχέση πάντα με το σημείο αναφοράς. Συνεπώς, όταν από εδώ και στο εξής χρησιμοποιείται ο όρος καθίζηση ή ανύψωση, αναφέρεται πάντα σε σχετικές τιμές ανάλογα με το σημείο αναφοράς.



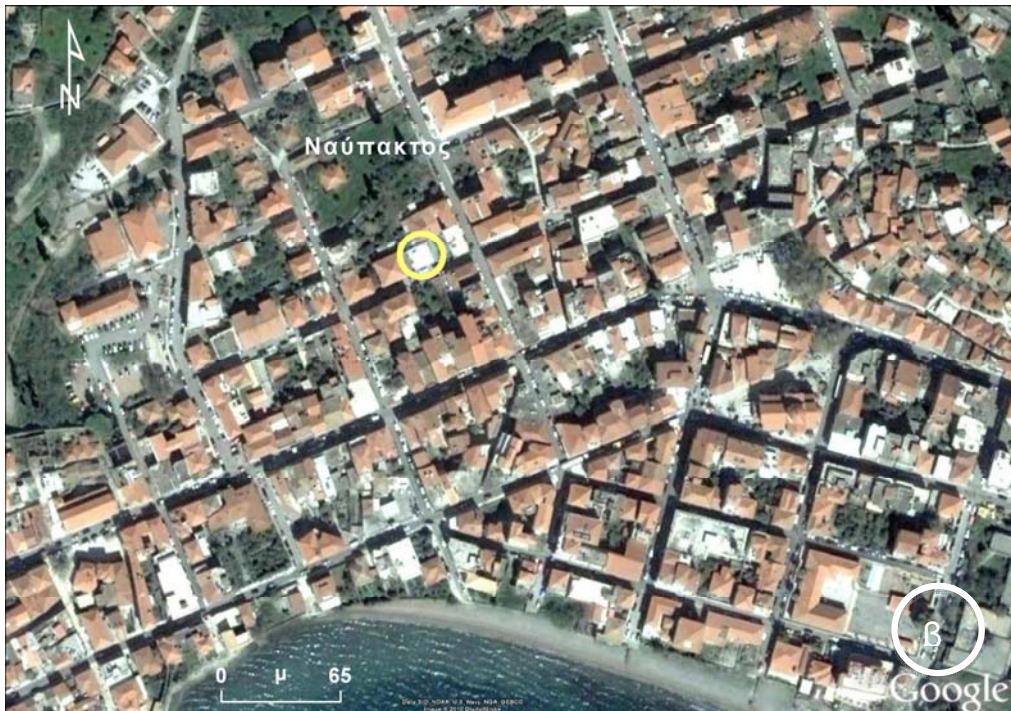
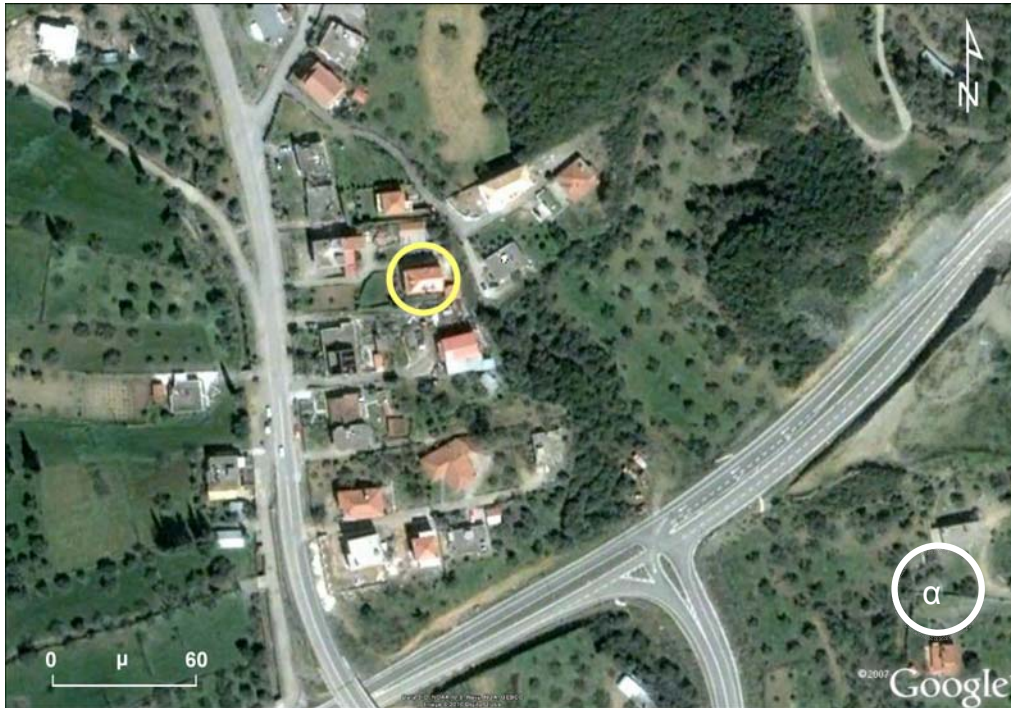
Σχήμα 6.1. Γραμμική εδαφική παραμόρφωση πάνω από το δέλτα του Μόρνου αλλά και της ευρύτερης περιοχής, για την περίοδο 1992-2000 . Το υπόβαθρο που χρησιμοποιείται είναι μια εικόνα υψηλής ανάλυσης QuickBird. Ο αστερίσκος υποδεικνύει το σημείο αναφοράς.



Σχήμα 6.2. Γραμμική εδαφική παραμόρφωση πάνω από το Δέλτα του Μόρνου αλλά και της ευρύτερης περιοχής, για την περίοδο 2002-2009. Το υπόβαθρο που χρησιμοποιείται είναι μια εικόνα υψηλής ανάλυσης QuickBird. Ο αστερίσκος υποδεικνύει το σημείο αναφοράς.

Τα σημεία αναφοράς και στις δύο περιπτώσεις, όπως αναφέρθηκε ήδη, θεωρούνται σταθερά. Συγκεκριμένα, το σημείο αναφοράς που επιλέχθηκε για τα δεδομένα της περιόδου 1992-2000, βρίσκεται περίπου 6 χλμ. δυτικά του δέλτα και 3 χλμ. ΒΔ της Ναυπάκτου (Σχήμα 6.3 -α). Το σημείο αναφοράς της περιόδου 2002-2009, βρίσκεται 3 χλμ. δυτικά του δέλτα (Σχήμα 6.3 -β). Όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.4., τα διαγράμματα της ιστορικής παραμόρφωσης των σημείων αναφοράς είναι σταθερά.

Παρατηρώντας εκ πρώτης όψεως τα αποτελέσματα και των δύο χρονικών περιόδων, είναι ολοφάνερο ότι οι τιμές των ανακλαστήρων οι οποίοι εντοπίζονται στο δέλτα του Μόρνου, είναι στην πλειοψηφία τους αρνητικές. Αντίθετα, ανακλαστήρες που έχουν εντοπιστεί σε ορεινές περιοχές, καθώς επίσης και στο μεγαλύτερο μέρος της Ναυπάκτου και δυτικότερα αυτής, παρουσιάζουν σταθερότητα και μικρή ανύψωση. Χαρακτηριστικό είναι ότι και για τις δύο χρονικές περιόδους υπάρχει η ίδια συμπεριφορά όσον αφορά τη μετάβαση από την περιοχή της Ναυπάκτου προς της περιοχή του δέλτα. Δηλαδή, οι τιμές παραμόρφωσης των σημείων από θετικές ή

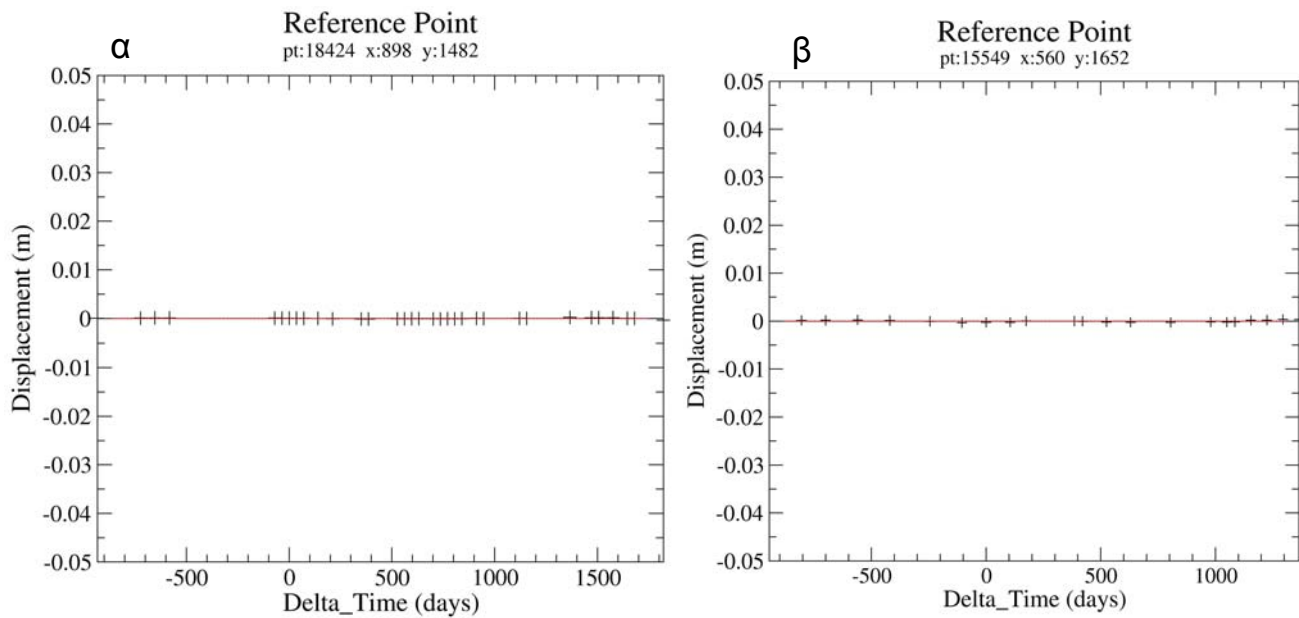


Σχήμα 6.3. Ταυτοποίηση και εντοπισμός των σημείων αναφοράς α) της χρονικής περιόδου 1992-2000 και β) της χρονικής περιόδου 2002-2009, χρησιμοποιώντας το περιβάλλον του Google Earth.

μηδενικές αρχίζουν να γίνονται αρνητικές, μεταβαίνοντας από την πόλη της Ναυπάκτου προς το δέλτα. Αυτό είναι πιθανόν να οφείλεται στην διαφοροποίηση των

σχηματισμών (Σχήμα 6.8,6.9) (από αλπικούς σχηματισμούς σε δελταϊκές αποθέσεις) ή στην πιθανή ύπαρξη ενός ενεργού ρήγματος (Σχήμα 6.6). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.5, δημιουργήθηκε μια τόμη κάθετη στο χαρτογραφημένο ρήγμα. Αυτό έγινε έτσι ώστε να εξαχθεί κάποιο πρώτο συμπέρασμα σχετικά με το αν η αιτία της συγκεκριμένης διαφοροποίησης στις τιμές της παραμόρφωσης, οφείλεται στο ρήγμα. Όπως είναι φανερό, μπορεί να ισχυριστεί κανείς πως το ρήγμα επηρεάζει την παραμόρφωση (ασεισμική), καθώς από την περιοχή οριοθέτησης του ρήγματος και μετά παρατηρείται αυξανόμενος ρυθμός καθίζησης.

Όσον αφορά την περίοδο 1992-2000, η μέγιστη παρατηρούμενη καθίζηση είναι της τάξης των -7.2 mm/y , ενώ η μέγιστη παρατηρούμενη ανύψωση της τάξης των $+2.2 \text{ mm/y}$. Επιπλέον, για την περίοδο 2002-2009, οι αντίστοιχες παρατηρούμενες ταχύτητες παραμόρφωσης είναι παρόμοιες με εκείνες της περιόδου 1992-2000.

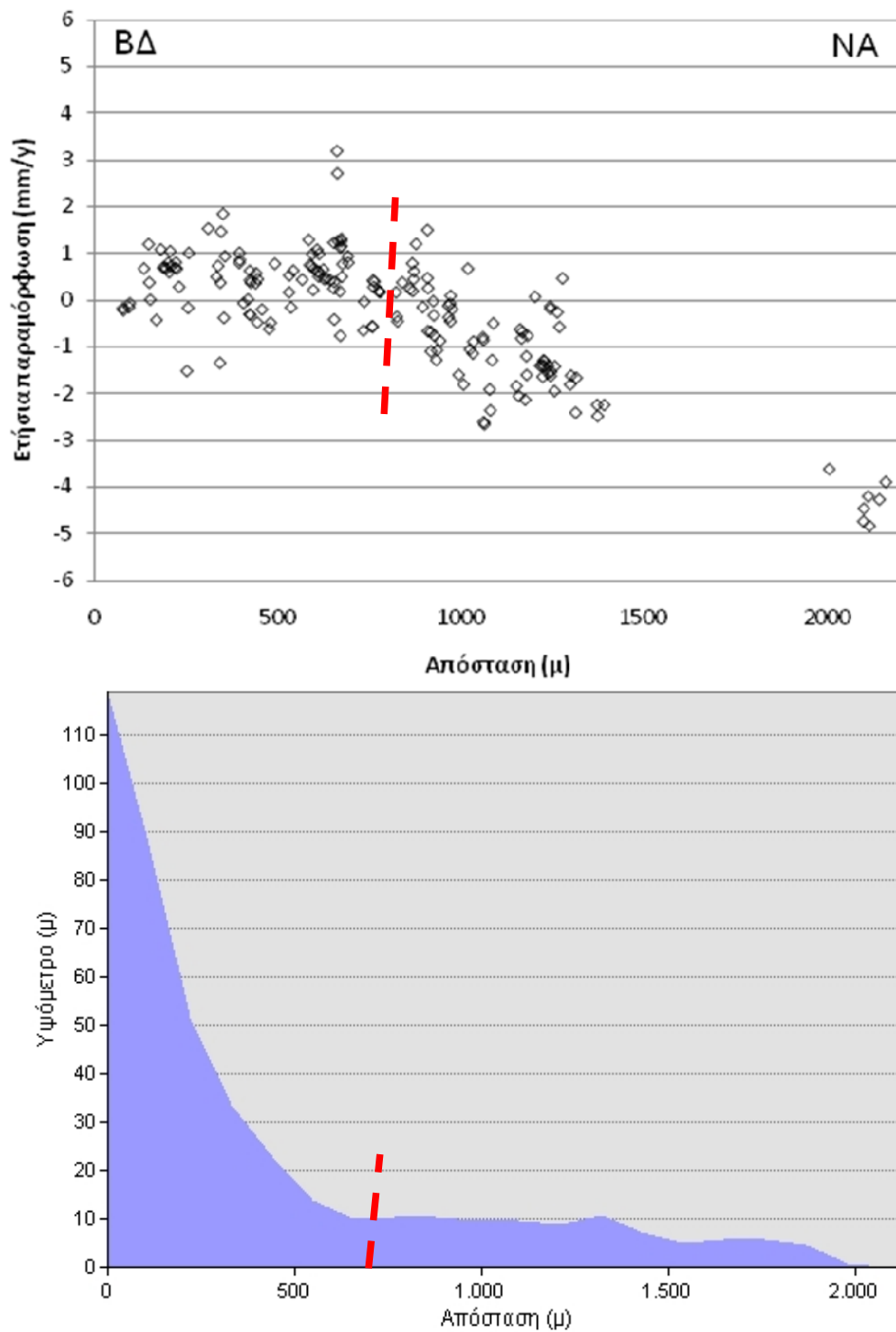


Σχήμα 6.4. Διαγράμματα ιστορικής παραμόρφωσης των σημείων αναφοράς για την χρονική περίοδο α)1992-2000 και β) 2002-2009.

Δηλαδή, η μέγιστη παρατηρούμενη καθίζηση είναι της τάξης των -6.8 mm/y , ενώ η αντίστοιχη μέγιστη ανύψωση είναι ελαφρώς πιο υψηλή από εκείνη της προηγούμενης περιόδου, περίπου $+4.1 \text{ mm/y}$.

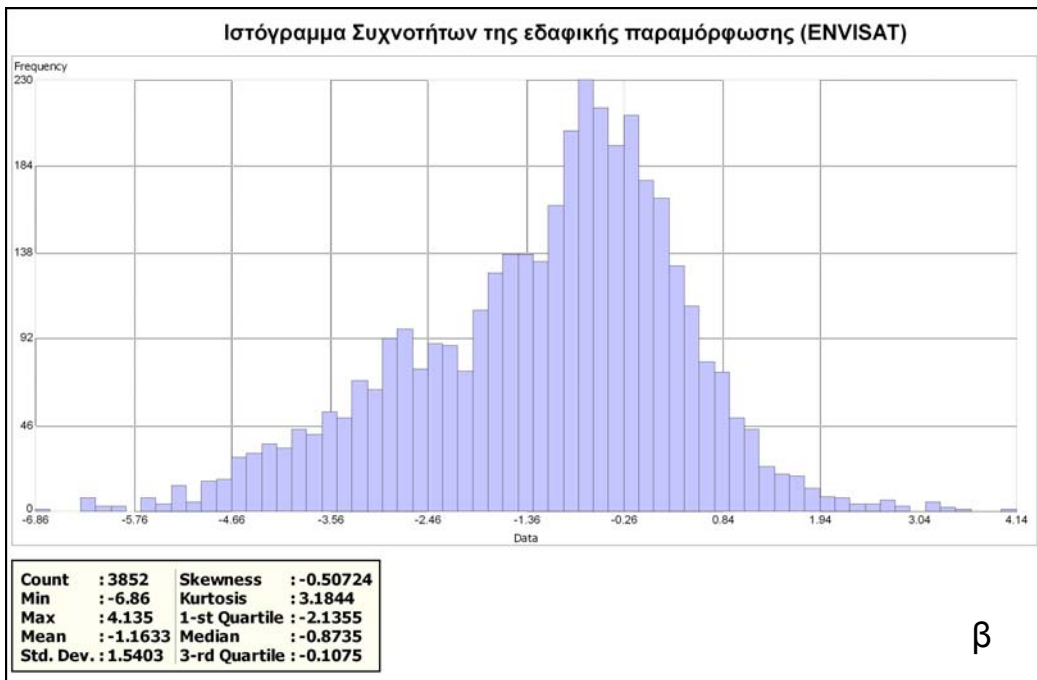
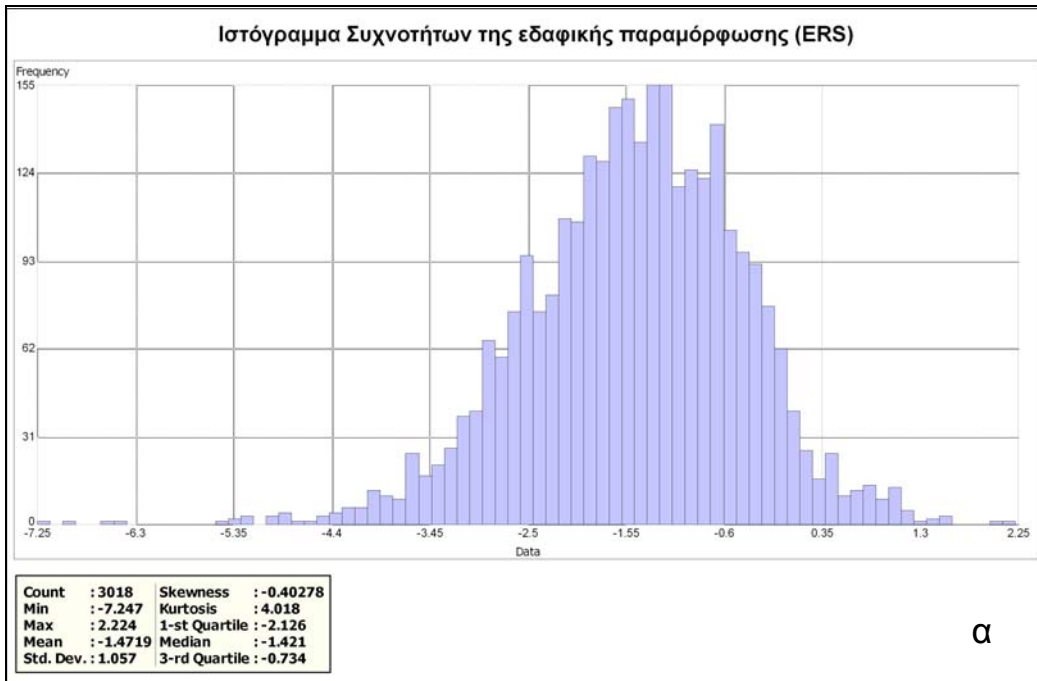
Με τη στατιστική ανάλυση και δημιουργία των ιστογραμμάτων συχνότητας της εδαφικής παραμόρφωσης των σημείων (Σχήμα 6.6), παρατηρείται ότι για τη μεν

περίπτωση των αποτελεσμάτων του δορυφόρου ERS, η μεγαλύτερη συγκέντρωση

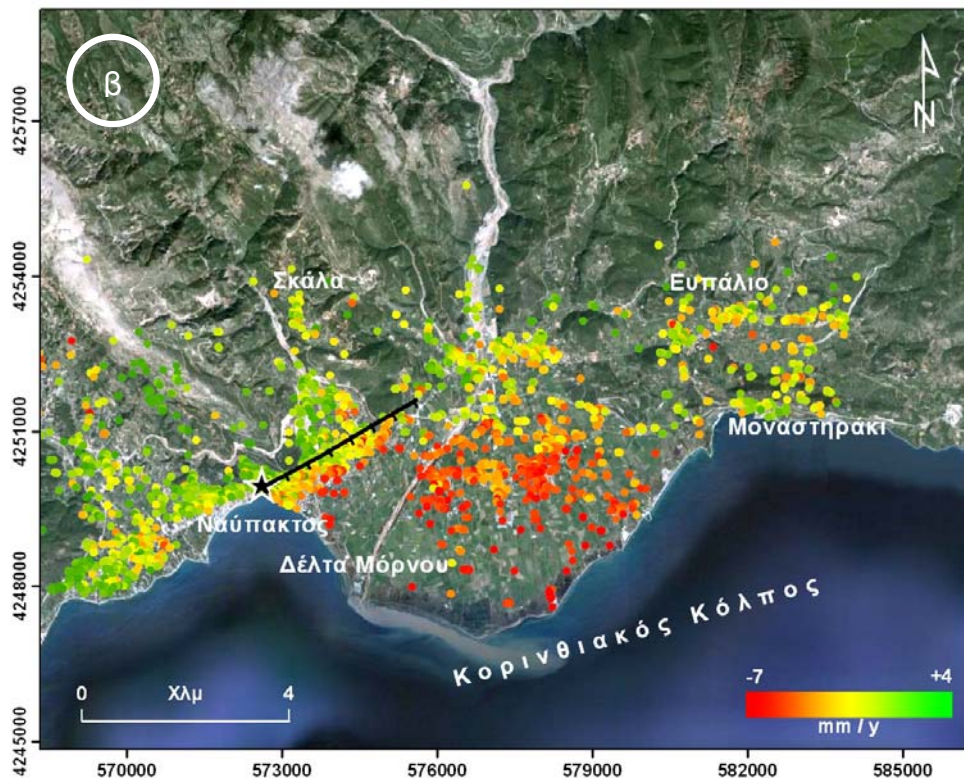
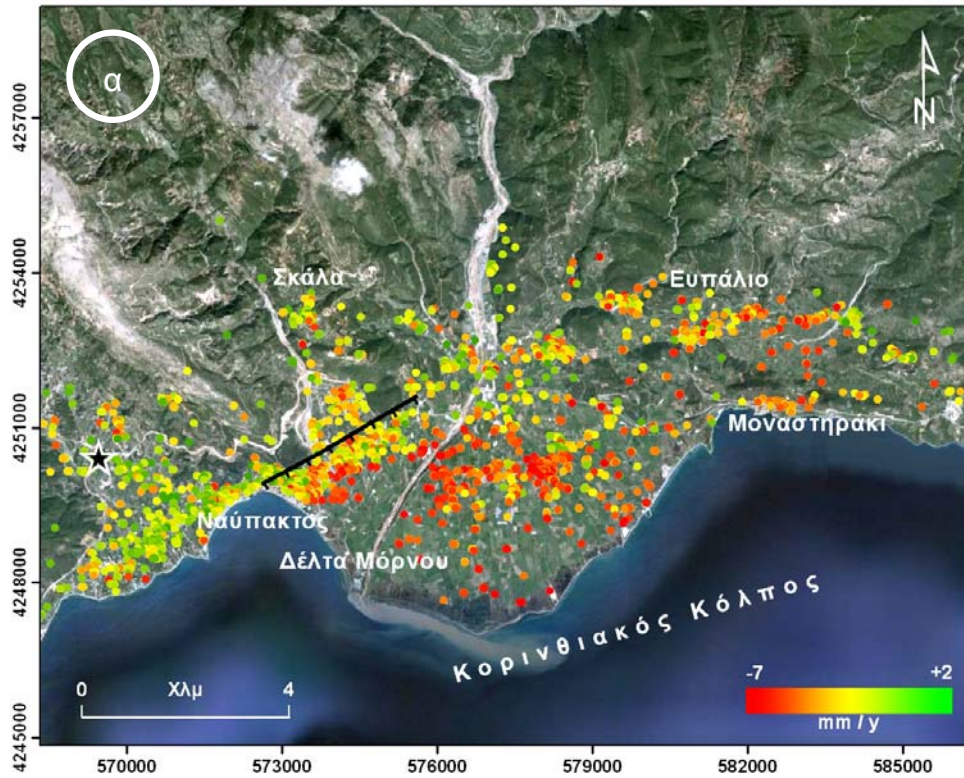


Σχήμα 6.5. Χωρική τομή η οποία δείχνει τις τιμές της παραμόρφωσης με επίθεση των ανακλαστήρων σε απόσταση 150 μ , και από τις δύο πλευρές της τομής (πάνω διάγραμμα) και η αντίστοιχη τοπογραφία της τομής (κάτω διάγραμμα). Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο ρήγμα.

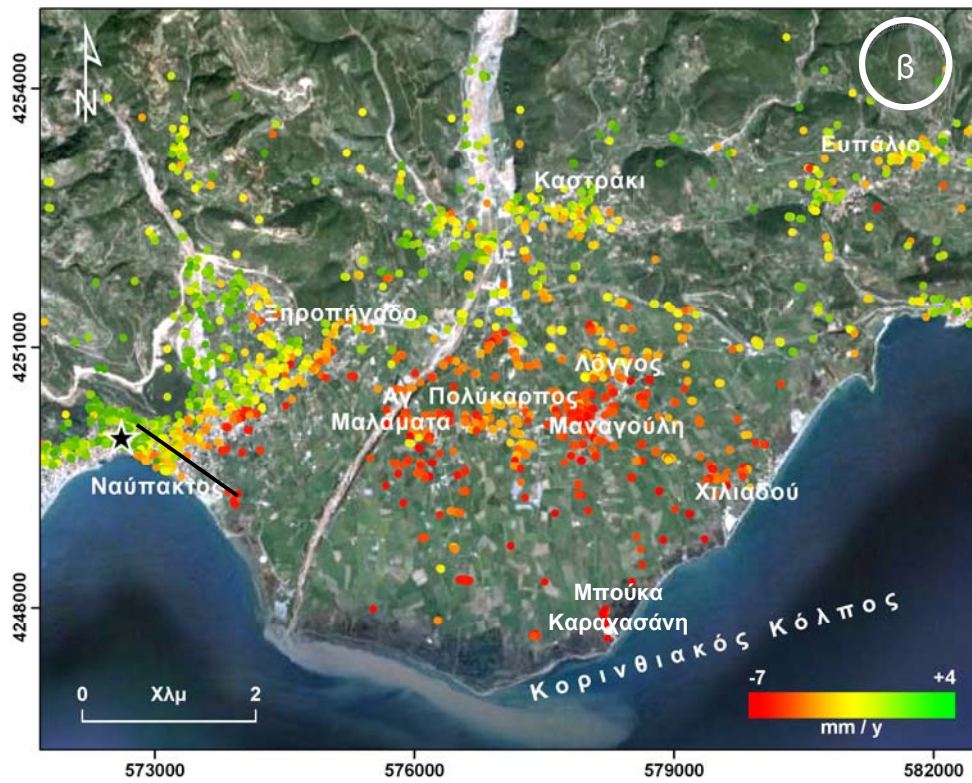
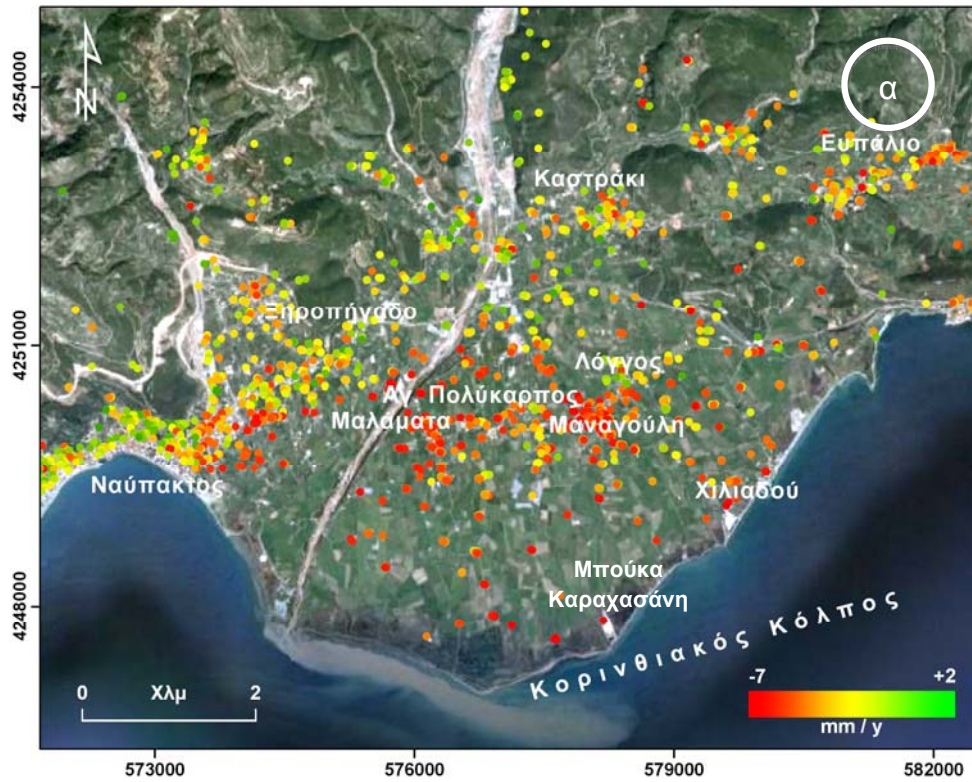
σημείων κυμαίνεται μεταξύ -2 mm/y και -0.6 mm/y, ενώ για τη δε περίπτωση του δορυφόρου ENVISAT, η μεγαλύτερη συγκέντρωση παρατηρείται για παραμορφώσεις μεταξύ -1.5 mm/y και +0.5 mm/y.



Σχήμα 6.6. Ιστογράμματα συχνοτήτων της εδαφικής παραμόρφωσης α) για την περίοδο 1992-2000 (ERS) και β) για την περίοδο 2002-2009(ENVISAT).



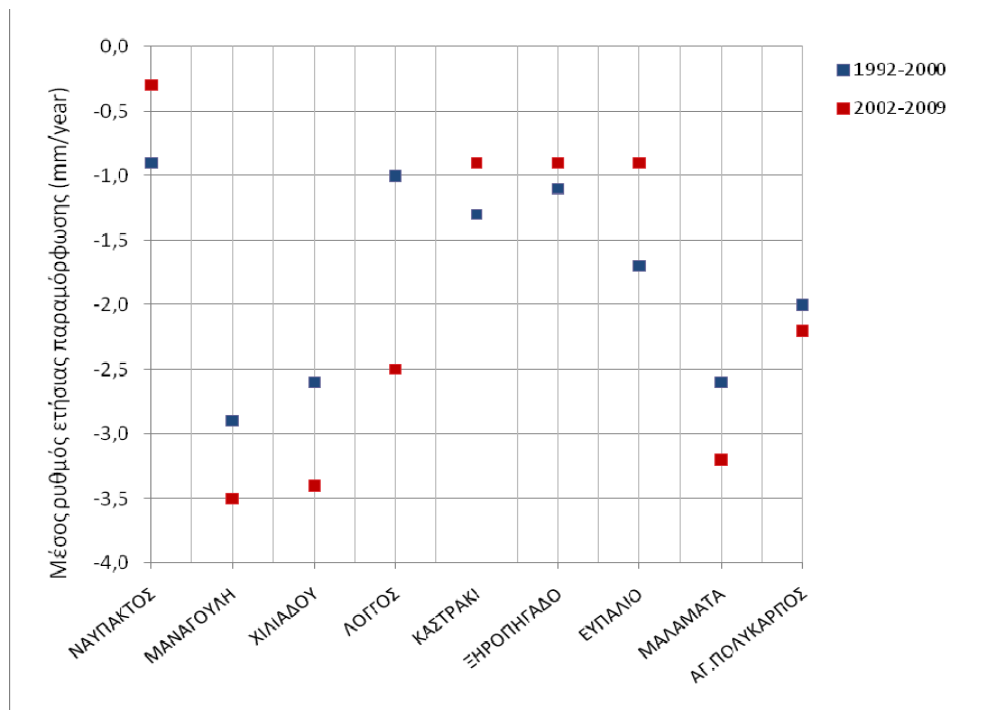
Σχήμα 6.7. Χάρτες εδαφικής παραμόρφωσης των σταθερών ανακλαστήρων με υπέρθεση ενός ρήγματος από Palyvos et al., για τις περιόδους α) 1992-2000 και β) 2002-2009



Σχήμα 6.8. Γραμμική εδαφική παραμόρφωση πάνω από το δέλτα του Μόρνου, για τις περιόδους α) 1992-2000 και β) 2002-2009. Το υπόβαθρο που χρησιμοποιείται είναι μια εικόνα υψηλής ανάλυσης QuickBird. Η μαύρη γραμμή αντιστοιχεί στο Σχήμα XX.

Επιπρόσθετα, αξίζει να τονιστεί πως ο μέσος ετήσιος ρυθμός παραμόρφωσης που επικρατεί σε ολόκληρη την περιοχή για το χρονικό διάστημα 1992-2000, ανέρχεται στα -1.4 mm/y , ενώ κατά την περίοδο 2002-2009, ο μέσος ρυθμός μειώνεται ελαφρώς στα -1.1 mm/y . Όπως διαπιστώνεται και από τα ιστογράμματα συχνοτήτων, ο αριθμός των σημείων που χαρακτηρίζονται από μέγιστες και ελάχιστες παραμορφώσεις είναι πολύ μικρός. Τέλος, τα σφάλματα που υπολογίστηκαν για τις παραμορφώσεις είναι κατά μέσο όρο $\pm 0.2 \text{ mm/y}$.

Στη συνέχεια, επικεντρώνοντας και εστιάζοντας στην περιοχή του δέλτα του Μόρνου, παρατηρήθηκε εκτενέστερα η συμπεριφορά του δέλτα (Σχήμα 6.8). Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι μέσοι ρυθμοί ετήσιας παραμόρφωσης για κάθε χωριό που βρίσκεται στο δέλτα (Μαναγούλη, Χιλιαδού, Λόγγος, Καστράκι, Ξηροπήγαδο, Μαλάματα, Αγ. Πολύκαρπος), καθώς επίσης και μερικών εκ των γύρω χωριών-πόλεων (Ναύπακτος, Ευπάλιο), στα οποία υπήρχαν αρκετοί ανακλαστήρες, έτσι ώστε να εξαχθούν πιο αξιόπιστα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά τους (Σχήμα 6.9). Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι όλα τα χωριά πλην της Ναυπάκτου και του Ευπαλίου βρίσκονται πάνω σε δελταϊκές αποθέσεις. Αντίθετα, το μεγαλύτερο μέρος της Ναυπάκτου βρίσκεται πάνω σε αλπικούς σχηματισμούς, ενώ το Ευπάλιο πάνω σε αλλουβιακές αποθέσεις (Σχήματα 6.11, 6.12).

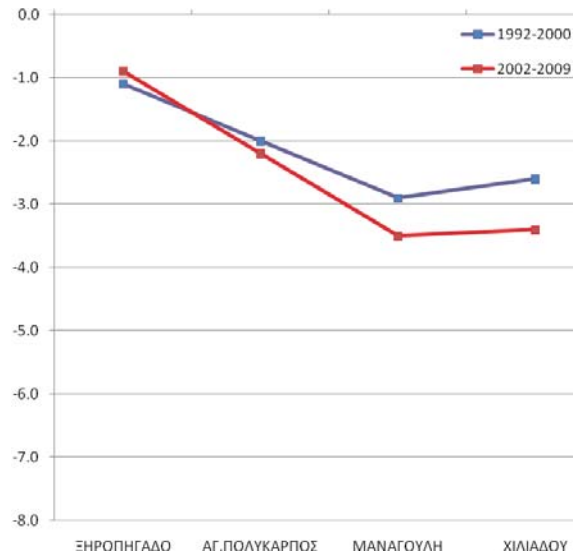


Σχήμα 6.9. Μέσος ρυθμός ετήσιας παραμόρφωσης των χωριών του δέλτα.

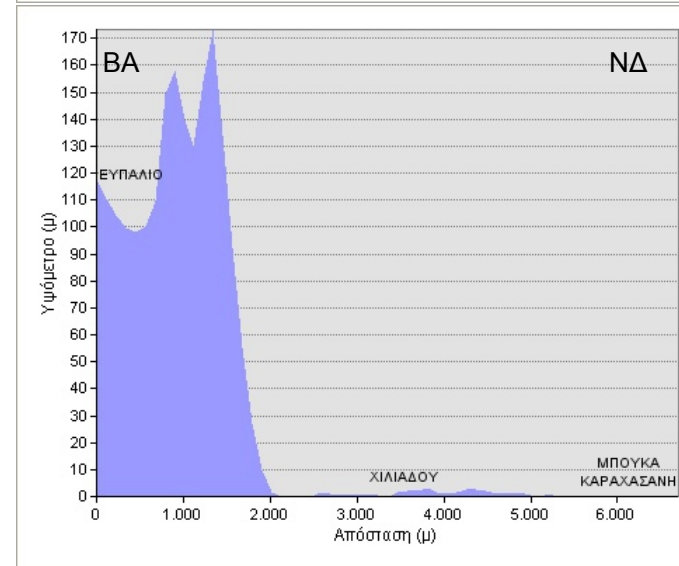
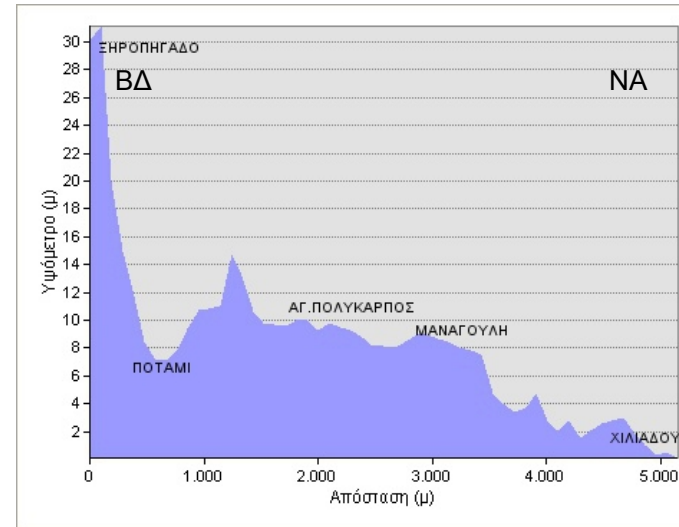
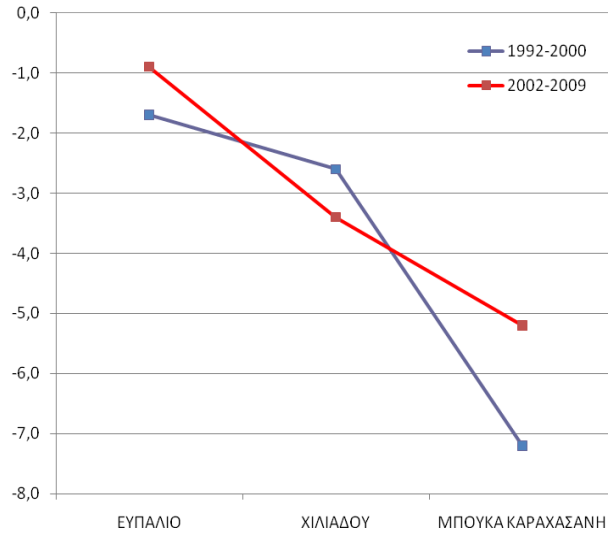
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.9, τα χωριά ακολουθούν σχεδόν την ίδια συμπεριφορά και στις δύο χρονικές περιόδους. Συγκεκριμένα, η πλειοψηφία των χωριών κατά την περίοδο 2002-2009, καθιζάνει με γρηγορότερους ρυθμούς απ' ότι κατά την περίοδο 1992-2000. Εξαιρέση αποτελούν τα χωριά Καστράκι, Ξηροπήγαδο και Ευπάλιο, τα οποία καθιζάνουν με αργότερους ρυθμούς κατά την περίοδο 2002-2009 απ' ότι κατά την περίοδο 1992-2000. Επιπλέον, ο μεγαλύτερος ρυθμός καθίζησης παρατηρείται στα χωριά Μαναγούλη με ταχύτητες -2.9 και -3.5 mm/y, Χιλιαδού με ταχύτητες -2.6 και -3.4 mm/y και Μαλάματα με ταχύτητες -2.6 και -3.2 mm/y, για τις περιόδους 1992-2000 και 2002-2009 αντίστοιχα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το χωριό Λόγγος, καθώς ο ρυθμός με τον οποίο καθιζάνει τα τελευταία χρόνια αυξήθηκε από -2.6 mm/y σε -3.4 mm/y. Αντίθετα, η πόλη της Ναυπάκτου χαρακτηρίζεται από πολύ αργούς ρυθμούς καθίζησης που τείνουν στο μηδέν (σταθερότητα). Συγκεκριμένα, οι ρυθμοί είναι -0.9 και -0.3 mm/y για τις χρονικές περιόδους 1992-2000 και 2002-2009 αντίστοιχα.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν κάποιες τομές με σκοπό την παρατήρηση της τάσης της παραμόρφωσης, που ακολουθούν τα χωριά, κατά την διάρκεια των δύο χρονικών περιόδων (Σχήμα 6.10). Αρχικά, παρατηρείται ότι καθώς μειώνονται οι τιμές των υψομέτρων, δηλαδή όσο τα χωριά πλησιάζουν προς την ακτογραμμή, οι τιμές της παραμόρφωσης μειώνονται. Στο Σχήμα 6.10-α, η τάση του ρυθμού παραμόρφωσης είναι παρόμοια και στις δύο χρονικές περιόδους. Συγκεκριμένα, η τομή Ξηροπήγαδο-Χιλιαδού (ΒΔ-ΝΑ), υποδεικνύει ότι καθώς μειώνονται οι τιμές των υψομέτρων, αυξάνεται ο ρυθμός καθίζησης των χωριών. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται στην διάβρωση της ακτογραμμής από τον κυματισμό. Επιπλέον, αξιοσημείωτο είναι η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς της παραμόρφωσης, με την αλλαγή των σχηματισμών της περιοχής του δέλτα. Το χωριό Ξηροπήγαδο βρίσκεται πάνω σε αλλουβιακούς κώνους και η παραμόρφωση που εμφανίζει είναι σχετικά μικρή, ~ -1mm/y. Αντίθετα τα χωριά (Μαναγούλη, Χιλιαδού) που βρίσκονται πάνω σε δελταϊκές αποθέσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη ταχύτητα καθίζησης (~ -3.5mm/y).

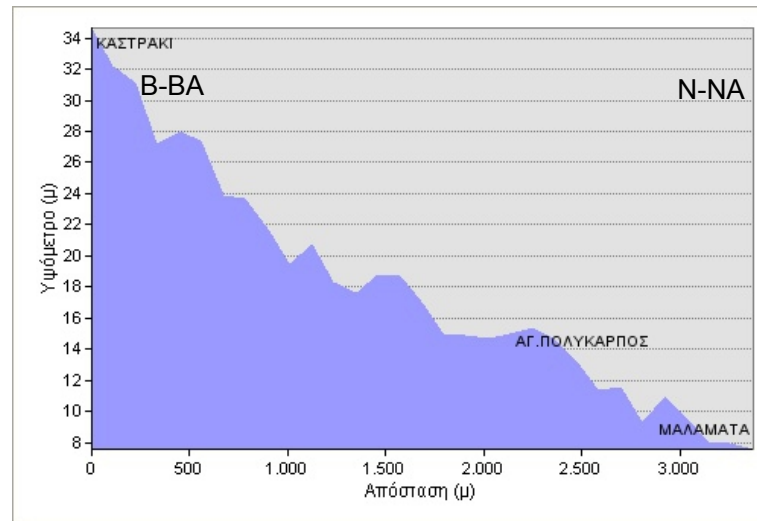
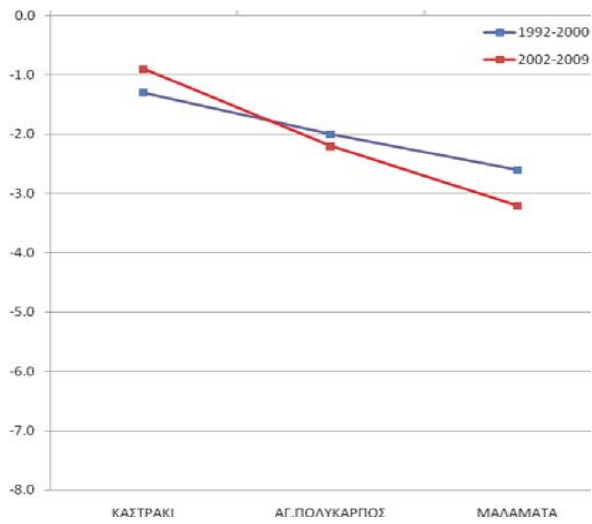
α



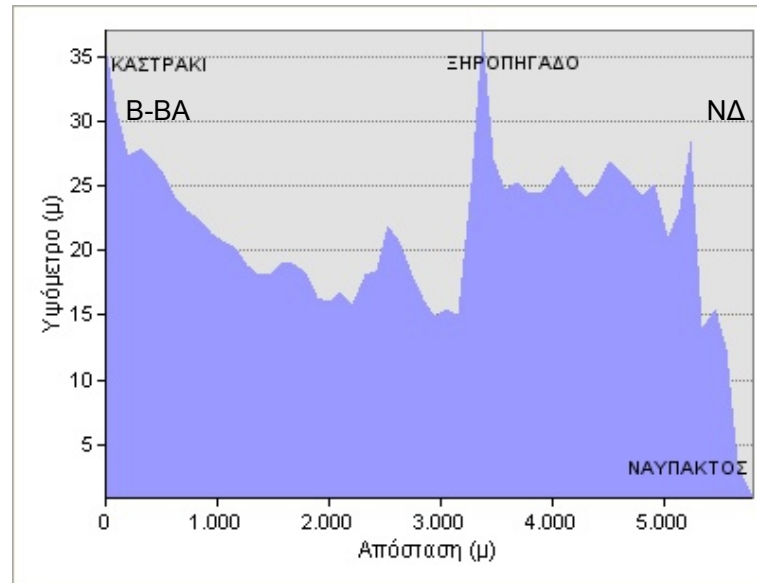
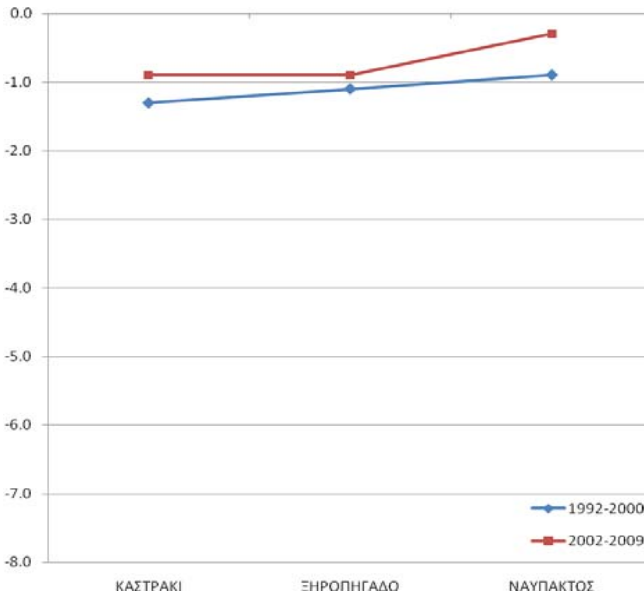
β



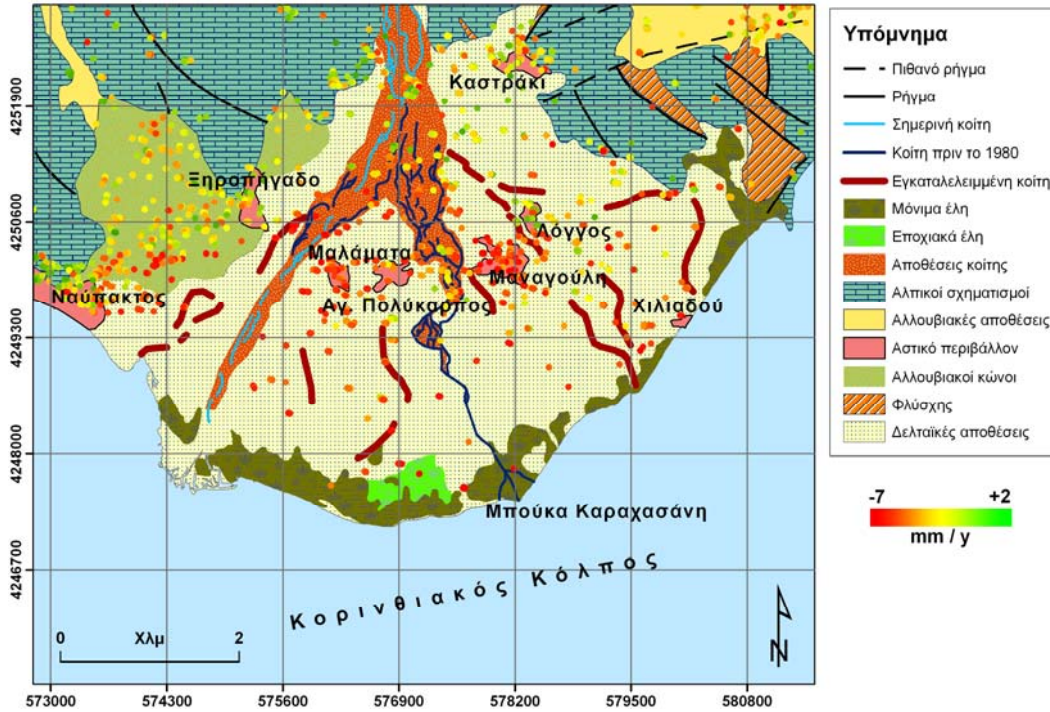
γ



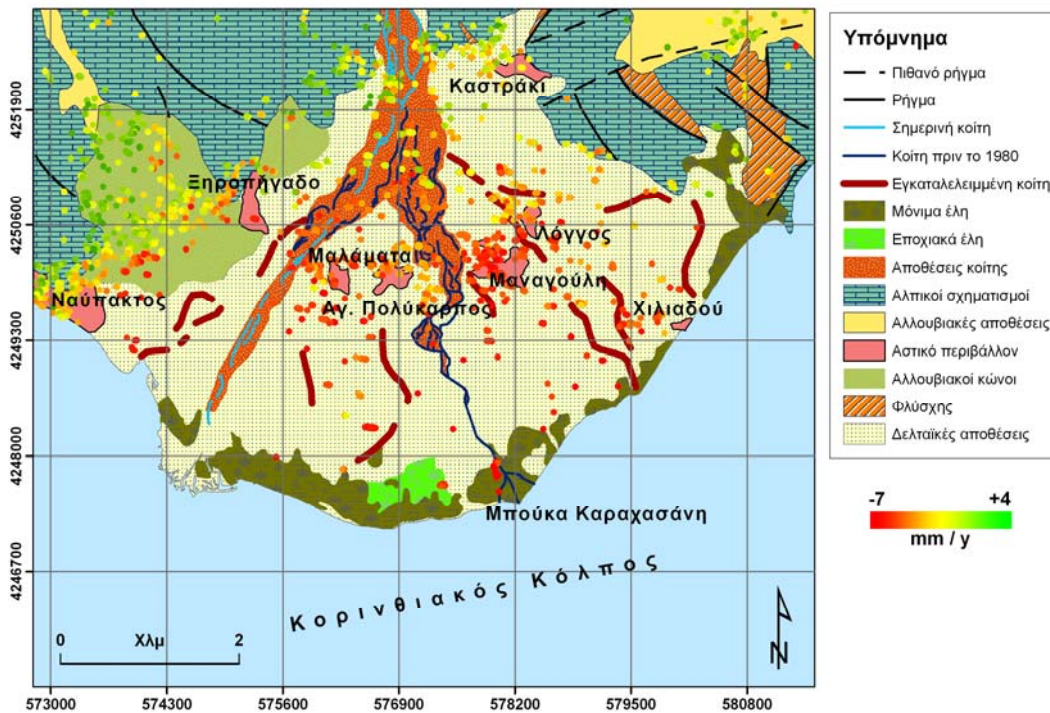
δ



Σχήμα 6.10 α,β,γ,δ. Δημιουργία χωρικών τομών με σκοπό την παρατήρηση της τάσης της παραμόρφωσης που ακολουθούν τα χωριά κατά την διάρκεια των δύο χρονικών περιόδων



Σχήμα 6.11. Γεωμορφολογικός χάρτης του δέλτα με υπέρθεση των ανακλαστήρων (1992-2000)

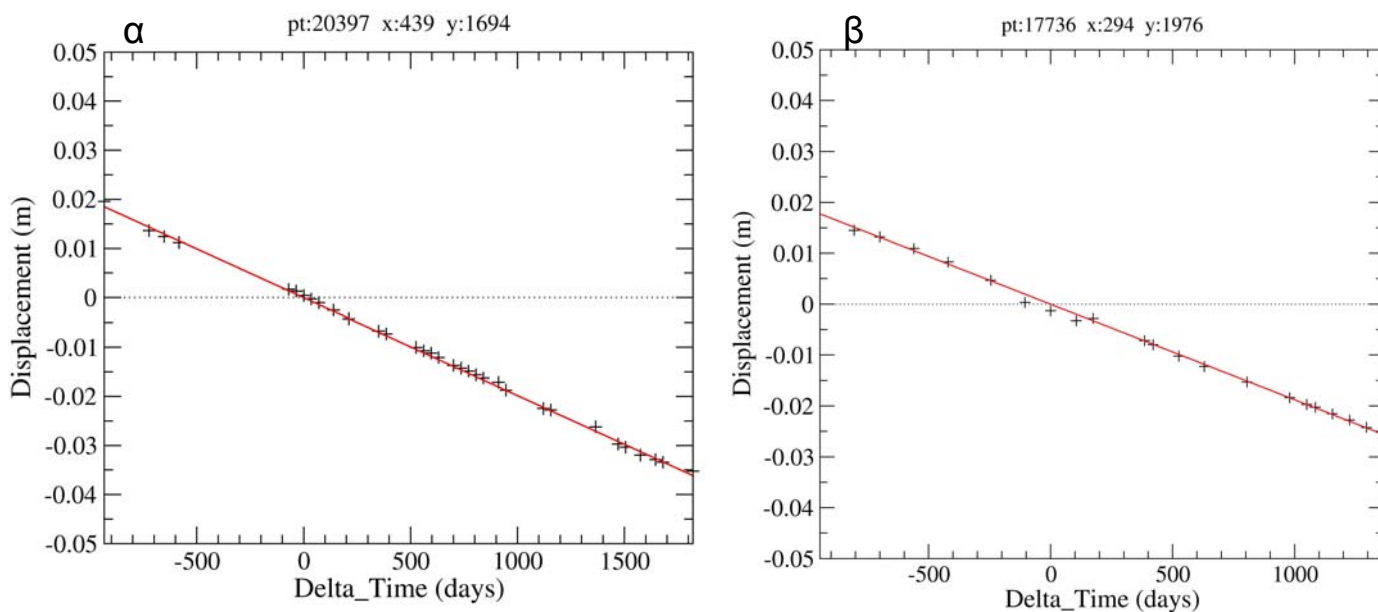


Σχήμα 6.12. Γεωμορφολογικός χάρτης του δέλτα με υπέρθεση των ανακλαστήρων (2002-2009)



Σχήμα 6.13. Μέγιστος ρυθμός ετήσιας καθίζησης της περιοχής Μπούκα Καραχασάνη για την περίοδο α) 1992-2000 και β) 2002-2009

Επιπρόσθετα, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι και για τις δύο χρονικές περιόδους, ο μεγαλύτερος ρυθμός καθίζησης παρατηρείται στην περιοχή Μπούκα Καραχασάνη, δηλαδή στις παλιές εκβολές του δέλτα (Σχήματα 6.11, 6.12). Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης το γεγονός, ότι η συγκεκριμένη περιοχή κυριαρχείται από μόνιμα έλη (Σχήματα 6.11,6.12), γεγονός που ίσως συνδράμει στον μεγάλο ρυθμό καθίζησης. Συγκεκριμένα, για την χρονική περίοδο 1992-2000 ο μέγιστος ετήσιος ρυθμός καθίζησης ήταν -7.2 mm/y , κάτι που σημαίνει ότι για το χρονικό διάστημα των 8 ετών, το συγκεκριμένο σημείο υπέστη καθίζηση 5.7 εκατοστών (Σχήμα 6.13 -α, Σχήμα 6.14 - α). Από την άλλη, κατά την περίοδο 2002-2009, ο ετήσιος ρυθμός καθίζησης ήταν -6.8 mm/y , πράγμα που σημαίνει ότι το συγκεκριμένο σημείο για το χρονικό διάστημα των 7 ετών υπέστη καθίζηση των 4.7 εκατοστών (Σχήμα 6.13 – β, Σχήμα 6.14 - β).



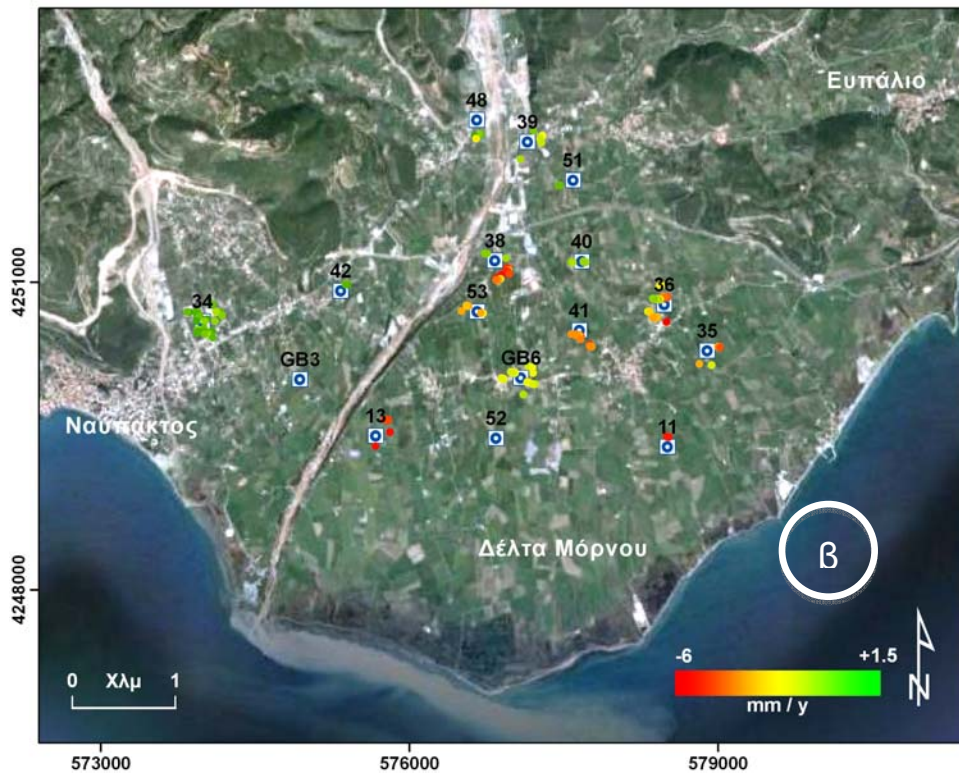
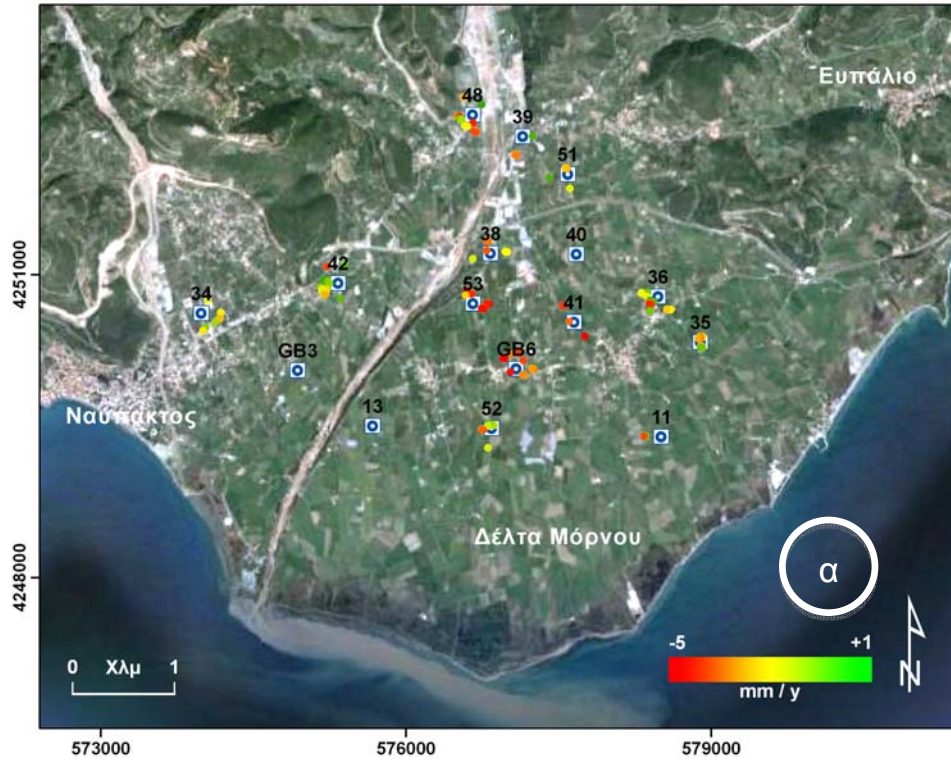
Σχήμα 6.14. Διαγράμματα ιστορικής παραμόρφωσης της μέγιστης αρνητικής παραμόρφωσης για την περιοχή Μπούκα Καραχασάνη, α) 1992-2000 και β) 2002-2009

Στην συνέχεια έγινε προσπάθεια συσχέτισης των αποτελεσμάτων της εδαφικής παραμόρφωσης με τις θέσεις των γεωτρήσεων. Η άντληση των υδάτων των γεωτρήσεων σύμφωνα με στοιχεία του Υπουργείου Γεωργίας είναι αρκετά μικρή. Αρχικά, δημιουργήθηκαν οι χάρτες των γεωτρήσεων που υπάρχουν στο δέλτα (13 στο σύνολο), με υπέρθεση των ανακλαστών εδαφικής παραμόρφωσης. Εκ πρώτης όψεως παρατηρείται ότι οι γεωτρήσεις που βρίσκονται στο βόρειο τμήμα του δέλτα χαρακτηρίζονται από μικρές καθιζήσεις ή σταθερότητα ενώ οι γεωτρήσεις που βρίσκονται στα νοτιότερα τμήματα του δέλτα χαρακτηρίζονται από

μεγαλύτερους ρυθμούς καθίζησης (Σχήμα 6.15). Έπειτα, εφαρμόστηκε μία ζώνη 200 μ. γύρω από τις γεωτρήσεις, με σκοπό τον εντοπισμό των ανακλαστήρων και υπολογισμού του μέσου όρου ετήσιας παραμόρφωσης της κάθε γεώτρησης, οι οποίοι βρίσκονται εντός αυτής της ζώνης (Σχήμα 6.16).



Σχήμα 6.15. Χάρτης των γεωτρήσεων με υπέρθεση των ανακλαστήρων εδαφικής παραμόρφωσης για τις χρονικές περιόδους α) 1992-2000 και β) 2002-2009



Σχήμα 6.16. Χάρτης γεωτρήσεων με υπέρθεση των ανακλαστήρων που προήλθαν από την εφαρμογή της ζώνης (buffer) των 200 μ. για τις περιόδους α) 1992-2000 και β) 2002-2009

Πίνακας 6.1. Μέσος όρος εδαφικής παραμόρφωσης (mm/yr) για κάθε γεώτρηση

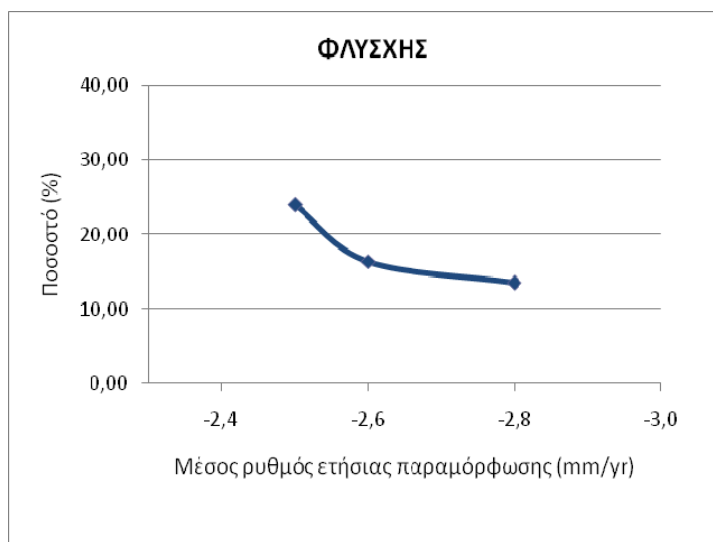
Χρονική περίοδος / Γεωτρήσεις	1992-2000	2002-2009
34	-1.3	-0.3
42	-1	-0.7
11	-1	-4.3
GB6	-2.2	-1.9
53	-2.6	-2.6
38	-1.4	-2.6
41	-3.1	-2.7
35	-1.4	-2.8
36	-1.2	-2.5
51	-1.5	-0.3
39	-1	-1.5
48	-1.4	-0.7

Πίνακας 6.2. Ποσοτικοποίηση (επί τις %) των ιζημάτων και σχηματισμών των γεωτρήσεων με βάση την εδαφική παραμόρφωση

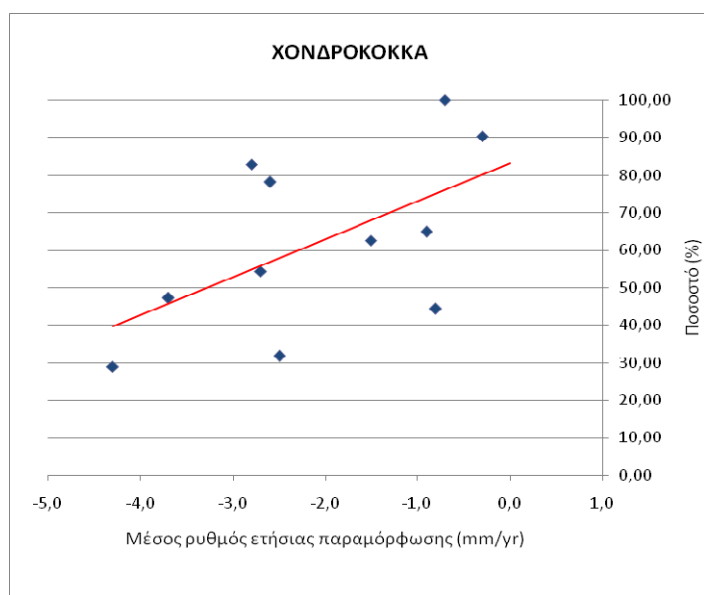
Μέσος ετήσιος ρυθμός παραμόρφωσης (mm/yr)	ΦΛΥΣΧΗΣ	ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΑ	ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ
-2.8	13.50 %	82.80 %	37.00 %
-2.6	16.40 %	78.10 %	5.50 %
-2.5	24.00 %	31.80 %	10.80 %
-4.3	-	29.00 %	65.90 %
-1.9	-	-	54.60 %
-0.3	-	90.40 %	-
-0.7	-	100.00 %	-
-3.7	-	47.20 %	52.80 %
-0.8	-	44.30 %	55.70 %
-1.5	-	62.60 %	1.40 %
-2.7	-	54.30 %	45.70 %
-0.9	-	64.80 %	23.00 %

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την στρωματογραφία των γεωτρήσεων (Σχήμα 4.5), έγινε ποσοτικοποίηση των ιζημάτων, διαχωρίζοντάς τα σε χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα, καθώς επίσης και ποσοτικοποίηση του σχηματισμού του φλύσχη, με σκοπό την πιθανή συσχέτιση μεταξύ των ιζημάτων-σχηματισμών και παραμόρφωσης του εδάφους. Όπως είναι φανερό στο

σχήμα 6.17, καθώς αυξάνεται το ποσοστό του σχηματισμού του φλύσχη, μειώνεται ο μέσος ρυθμός καθίζησης. Λόγω αυτού μπορεί να εξαχθεί ως συμπέρασμα ότι ο σχηματισμός του φλύσχη θεωρείται σταθερό υπόβαθρο. Όσον αφορά, τη συμπεριφορά των χονδρόκοκκων ιζημάτων (Σχήμα 6.18), παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται το ποσοστό των χονδρόκοκκων ιζημάτων, ο μέσος ρυθμός ετήσιας παραμόρφωσης μειώνεται και τείνει προς το μηδέν, δηλαδή σε πιο σταθερά σημεία. Η συγκεκριμένη τάση θεωρείται



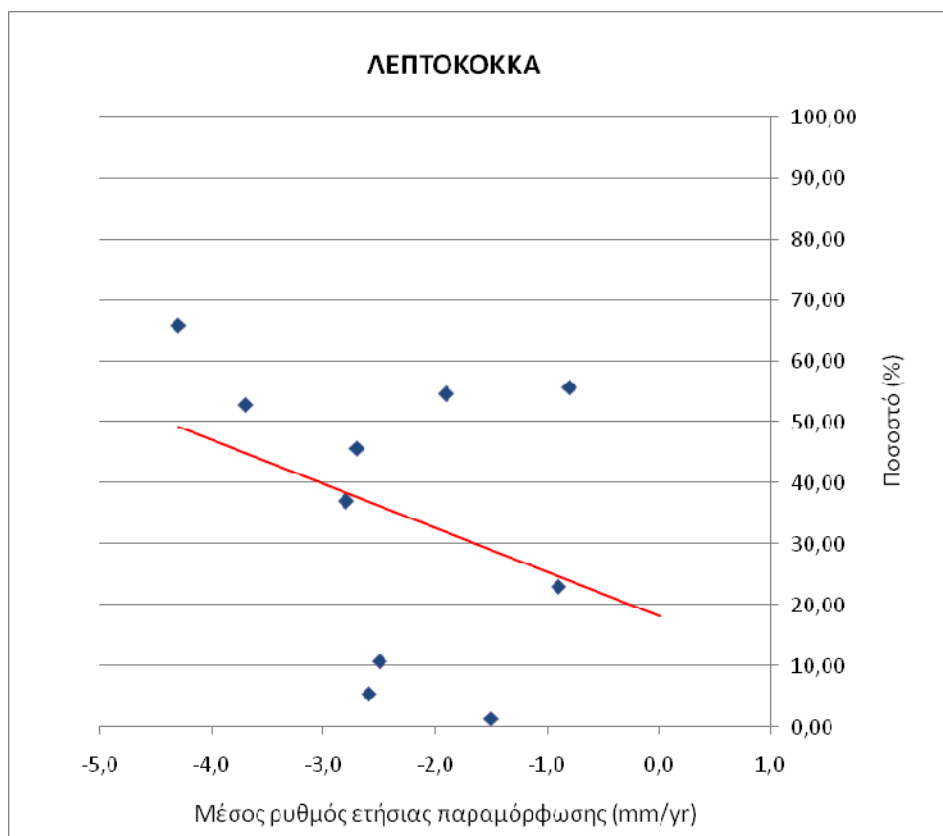
Σχήμα 6.17. Διάγραμμα ποσοστών και μέσου ρυθμού ετήσιας παραμόρφωσης για τον σχηματισμό του φλύσχη



Σχήμα 6.18. Διάγραμμα ποσοστών και μέσου ρυθμού ετήσιας παραμόρφωσης για τα χονδρόκοκκα ιζήματα

πως έχει λογική εξήγηση, καθώς τα χονδρόκοκκα ιζήματα αποτελούνται από αρκετά μεγάλα σωματίδια και έχουν σχετικά μεγάλα κενά μεταξύ τους. Συνεπώς, όταν λαμβάνει χώρα μια βροχόπτωση ή η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ανεβαίνει, τότε τα σωματίδια περικυκλώνονται από νερό. Αυτό σημαίνει πως τα χονδρόκοκκα ιζήματα με τα σημαντικά μεγαλύτερα σωματίδιά τους και τα μεγάλα διάκενα αποστραγγίζονται πιο γρήγορα σε σχέση με τα λεπτόκοκκα ιζήματα και κατά συνέπεια ξεραίνονται πολύ πιο γρήγορα από τα λεπτόκοκκα (Jensen, 2000).

Από την άλλη πλευρά, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.19, η εικόνα συμπεριφοράς των λεπτόκοκκων ιζημάτων όσον αφορά την παραμόρφωση δεν είναι τόσο ξεκάθαρη όσο με εκείνη των χονδρόκοκκων ιζημάτων. Ωστόσο, παρατηρείται μια μικρή τάση αύξησης της μέσης ετήσιας καθίζησης καθώς αυξάνεται το ποσοστό των λεπτόκοκκων ιζημάτων.



Σχήμα 6.19. Διάγραμμα ποσοστών και μέσου ρυθμού ετήσιας παραμόρφωσης για τα λεπτόκοκκα ιζήματα

7. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, η τεχνική των σταθερών ανακλαστήρων μπορεί να θεωρηθεί και να χαρακτηριστεί ως μία νέα καινοτόμος μέθοδος παρατήρησης και υπολογισμού της εδαφικής παραμόρφωσης, η οποία έχει σκοπό την λήψη μέτρων πρόληψης σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από υψηλή επικινδυνότητα.

Όσον αφορά την περιοχή μελέτης, οι προκείμενες εδαφικές παραμορφώσεις, είναι πιθανό να οφείλονται σε αρκετές παραμέτρους. Συνοπτικά, μπορεί να οφείλονται:

- στη σεισμικότητα της περιοχής
- στην ενδεχομένως πιθανή ύπαρξη ενός ενεργού ρήγματος
- στο γεωμορφολογικό υπόβαθρο της περιοχής
- στην άντληση υδάτων (γεωτρήσεις)
- και τέλος στον συνδυασμό των παραπάνω

Συγκεκριμένα, όσον αφορά την περιοχή μελέτης, παρατηρείται ότι τα τελευταία 17 έτη, το δέλτα του Μόρνου – σε σχέση πάντα με το σημείο αναφοράς – καθιζάνει με μέση ετήσια ταχύτητα παραμόρφωσης 2.3 mm/yr. Αυτό σημαίνει, ότι τα τελευταία 17 έτη, το δέλτα έχει υποστεί καθίζηση της τάξης των 4 cm. Αντίθετα, η περιοχή της Ναυπάκτου παρουσιάζει μία σχετική σταθερότητα ή πολύ μικρή άνοδο, της τάξης των 0.6 mm/yr. Αυτή η διαφορετική συμπεριφορά που παρουσιάζει η περιοχή του δέλτα σε σχέση με την περιοχή της Ναυπάκτου, μπορεί να οφείλεται είτε στους διαφορετικούς σχηματισμούς που απαντώνται στην περιοχή, ή λόγω της ύπαρξης πιθανού ενεργού ρήγματος. Όπως αποδείχτηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο τελευταίος παράγοντας φαίνεται ότι συμβάλλει σημαντικά σε αυτή τη διαφορετική συμπεριφορά του ρυθμού παραμόρφωσης των ανακλαστήρων.

Επιπλέον, αξιοσημείωτο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή Μπούκα Καραχασάνη, όπου στην περιοχή αυτή υπήρχαν οι παλιές εκβολές του ποταμού. Σε αυτή την περιοχή εντοπίζεται η μέγιστη αρνητική εδαφική παραμόρφωση κατά την διάρκεια και των δύο χρονικών περιόδων, με μέση ετήσια ταχύτητα -7.2 mm/yr για το χρονικό διάστημα 1992-2000 και -6.8 mm/yr για το χρονικό

διάστημα 2002-2009. Αυτό, σημαίνει ότι κατά την διάρκεια των τελευταίων 17 ετών, η συνολική καθίζηση είναι περίπου 11.9 cm.

Όσον αφορά τα ιζήματα, διαχωρίζοντάς τα σε χονδροκόκκα και λεπτόκοκκα, παρατηρήθηκε ότι καθώς αυξάνεται το ποσοστό των χονδροκόκκων ιζημάτων, ο μέσος ρυθμός ετήσιας παραμόρφωσης μειώνεται και τείνει προς το μηδέν, δηλαδή σε πιο σταθερά σημεία. Αντίθετα, παρατηρήθηκε ότι το ποσοστό των λεπτόκοκκων ιζημάτων είναι ανάλογος με τον μέσο ρυθμό ετήσιας παραμόρφωσης, διότι καθώς αυξάνεται το ποσοστό των λεπτόκοκκων ιζημάτων, αυξάνεται ο μέσος ρυθμός ετήσιας καθίζησης.

Τέλος, εξάγεται το συμπέρασμα πως καθώς μειώνονται οι τιμές του υψομέτρου, δηλαδή όσα χωριά βρίσκονται εντός του δέλτα και πολύ κοντά στην ακτογραμμή, παρουσιάζουν μεγαλύτερους ρυθμούς καθίζησης (π.χ. Μπούκα Καραχασάνη, Χιλιαδού).

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αγγελόπουλος, Ν., και Μελής Ν., 2000. Σεισμός: Φυσικό φαινόμενο

Καρτάλης, Κ. και Χ. Φεΐδας, 2006. Αρχές και εφαρμογές της δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Β. Γκιούδας Εκδοτική, Αθήνα.

Καρύμπαλης, Ε. και Γάκη-Παπαναστασίου, Κ., 2007. Γεωμορφολογική μελέτη των δέλτα των ποταμών Πηνειού, Καλαμά, Εύηνου και Μόρνου.

Μερτίκας Στ. 1999. Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας. Παρίκου Σ. & ΣΙΑ ΟΕ, Αθήνα.

Παπαζάχος, Β. & Παπαζάχου, Κ., 1989. Οι σεισμοί της Ελλάδας. Εκδ. Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 356 σ.

Μελέτη ΓΑΜΜΑ ΕΠΕ, 1982

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Avallone, A., Zollo, A., Briole, P., Delacourt, C., Beauducel, F., 1999. Subsidence of Campi Flegrei (Italy) detected by SAR interferometry. *Geophysical Research Letters* 26 (15), art. no. 1999GL900497, pp. 2303-2306.

Bamler, R., Kampes, B., Adam, N., Suchandt, S., 2005. Assessment of Slow Deformations and Rapid Motions by Radar Interferometry. *Photogrammetric Week 05'*, 111-122.

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40 (11), 2375-2383.

Billiris H., Paradissis D., Veis G., England P., Featherstone W., Parsons B., Cross P., Rands P., Rayson M., Sellers P., Ashkenazi V., Daavison M., Jackson J. & Ambraseys N. (1991): Geodetic determination of tectonic deformation in Central Greece from 1900 to 1988. *Nature* 350, 124-129.

Born, M., Wol, E., 1980. *Principles of Optics*, 6 ed: Pergamon Press.

- Carnec, C., Fabriol, H., 1999. Monitoring and modeling land subsidence at the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, using SAR interferometry. *Geophysical Research Letters* 26 (9), pp. 1211-1214.
- Carnec, C., Delacourt, C., 2000. Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gardanne, France. *Journal of Applied Geophysics* 43 (1), pp. 43-54.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Comparing GPS, optical leveling and Permanent Scatterers. *Proceeding of IGARSS 2001*. Sydney, 9-13 July 2001, IEEE International, vol. 6, p. 2622-2624.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., 2003a. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers Technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(7): 1685-1701.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2003. Monitoring Landslides and Tectonic Motion with the Permanent Scatterers Technique. *Eng. Geology*, Vol. 68/1-2.
- Colesanti, C., Le Mouelic, S., Bennani, M., Raucoules, D., Carnec, C., Ferretti, A., 2005. Detection of mining related ground instabilities using the permanent scatterers technique - A case study in the east of France. *International Journal of Remote Sensing* 26 (1), pp. 201-207.
- Colesanti, C., & Wasowski, J., 2006. Investigating landslides with spaceborn Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry. *Engineering Geology*, 88, 173-199.
- Crosetto, M., Agudo, M., Monserrat, O., Pucci, B., 2008. Inter-comparison of persistent scatterer interferometry results. European Space Agency, (Special Publication) ESA SP (649 SP).
- De Luca, G.F., Marano, G., Piemontese, M., Versini, B., Caltagirone, F., Casonato, G., Coletta, A. and De Carlo, M., 2007. Interoperability, expandability and multi mission-sensor COSMO-SkyMed capabilities. In: *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2007)*, Barcelona, Spain.
- Eineder, M., Breit, H., Fritz, T., Schuettler, B. and Roth, A., 2005. TerraSAR-X SAR products and processing algorithms. In: *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2005)*, Seoul, Korea.
- Elachi, C., Cimino, J. B. and Settle, M., 1986. Overview of the Shuttle Imaging Radar-B Preliminary Scientific Results. *Science*, Vol. 232, pp. 1511-1516.
- Farina, Colombo D., Fumagalli, A., Marks, F., & Moretti, S., 2006. Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA_SLAM project. *Engineering Geology*, 88, 200-217.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. and Monti Guarnieri, A., 1997. Multibaseline SAR interferometry for automatic DEM reconstruction. 3rd ERS Workshop, Florence, Italy.

- Ferretti, C. Prati, F. Rocca, 2000. Non-linear subsidence rate estimation using permanent scatterers in Differential SAR Interferometry. IEEE TGARS, Vol. 38, no. 5.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. IEEE TGARS, Vol. 39, no. 1.
- Ferretti, A., Novali, F., Burgmann, R., Hilley, G. & Prati, C., 2004. InSAR Permanent Scatterer Analysis Reveals Ups and Downs in San Francisco Bay Area. EOS, 85(34), 1-3.
- Ferretti, A., Bianchi, M., Prati, C., Rocca, F., 2005. Higher-order permanent scatterers analysis. Eurasip Journal on Applied Signal Processing 2005 (20), pp. 3231-3242.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. & Wasowski, J., 2006. Satellite interferometry for monitoring ground deformations in the urban environment. IAEG, 284, 1-9.
- Fielding, E.J., Blom, R.G., Goldstein, R.M., 1998. Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry. Geophysical Research Letters 25 (17), pp. 3215-3218.
- Gabriel, A.K., R.M. Goldstein, and H.A. Zebker, 1989. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry, Journal of Geophysical Research, Vol. 94:9183–9191.
- Galloway, W.E., 1975. Process framework for describing the morphological and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. M.L. Broussard (ed.), Deltas, Models for Exploration. 87-98, Houston Geol.Soc., Houston.
- Galloway, D.L., K.W. Hudnut, and S.E. Ingebritsen, 1998. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California, Water Resources Research, Vol. 34:2573–2585.
- Gamma Remote Sensing. GAMMA Software Documentation, 2006.
- Goldstein, R.M., H.A. Zebker, and C.L. Werner, 1988. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping, Radio Science, Vol. 23:713–720.
- Hanssen, R.F., 2001. Radar Interferometry: Data interpretation and Error Analysis. (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht), 308 pp.
- Hilley, G., Burgmann, R., Ferretti, A., Novali, F., & Rocca, F., 2004. Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis. Science 2004-304, 1952-1955.
- Jarvis A, Reuter H, Nelson A, Guevara E., 2006. Hole-filled seamless SRTM data V3, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT).
- Jensen, J.R., 2000. Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. Prentice-Hall, Inc., USA.

Karymbalis, E., Tegou, M., and Tsalkisti, O., 2001. Study of delta formation factors at central Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece* vol. XXXIV/1, 381-388.

Karymbalis, E., Gaki-Papanastasiou, K., and Maroukian, H., 2007. Recent geomorphic evolution of the fan delta of the Mornos river, Greece: natural processes and human impacts. *Bulletin of the Geological Society of Greece* vol. XXXVII, 1538-1551.

Lame, D. B., and Born, G. H., 1982. SEASAT Measurement System Evaluation: Achievements and Limitations, *J. Geophys. Res.*, 87(C5), 3175–3178.

Louis I.F., Karantonis, G.A., Voulgaris, N.S., and Louis F.I., 2004. The contribution of geophysical methods in the determination of aquifer parameters: the case of Mornos River delta, Greece. *Research Journal of Chemistry and Environment*, Vol. 8(4), pp 41-49.

Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl., K., et al., 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364, 138-142.

Massonnet D. and Feigl K, 1998. Radar Interferometry and its application to changes in the earth surface. *Reviews of Geophysics*, 36, 4, 441-500.

McKenzie D.P. (1972): Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 30, 109-182.

Nemoto, Y., H. Nishimo, M. Ono, H. Mizutamari, K. Nishikawa, and K. Tanaka, 1991. Japanese Earth Resources Satellite-1 Synthetic Aperture Radar. *Proc. IEEE*, 79, 800-809.

Nishidai, T., Yoshie, T., and Tsu, H., 1994, Overall results of the Earth Resources Satellite 'Fuyo-T' data evaluation. *Proceedings of the Result Reporting Meeting of JERS-I System Verification Program*. Tokyo. Japan. November 1994 (Tokyo: NASDA), pp,31-39.

Palyvos, N., Lemeille, F., Sorel, D., Pantosti, D., and Pavlopoulos, K., 2008. Geomorphic and biological indicators of paleoseismicity and Holocene uplift rate at a coastal normal fault footwall (western Corinth Gulf, Greece). *Geomorphology* 96, 16-38.

Parcharidis, I., Fomelis, M., Kourkouli, P., Wegmuller, U., 2009. Persistent Scatterers InSAR to detect ground deformation over Rio-Antirio area (Western Greece) for the period 1992-2000. *Journal of Applied Geophysics* 68 (3), pp. 348-355.

Papanikolaou D., Chronis G., Lykousis V. & Pavlakis P., 1987. Active tectonics in the Rion-Antirion Strait, Western Greece. *MEGS-5, Dubrovnik*, p. 72-73.

Perski, Z., Hanssen, R., Wojcik, A., Wojciechowski, T., 2009. InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine, Poland. *Engineering Geology* 106, 58-67.

Piper, D.J.W, Kontopoulos, N., Anagnostou, C., Chronis, G., and Panagos, A.G., 1990. Modern Fan Deltas in the Western Gulf of Corinth, Greece. *Geo-Marine Letters*, 10:5-12.

Raney, R.K., A. P. Luscombe, E. J. Langham, and S. Ahmed, 1991. RADARSAT. *Proceedings of the IEEE*. 79, pp. 839-849.

Rodriguez, E., Morris, C.S., Belz, J.E., Chapin, E.C., Martin, J.M., Daffer, W., Hensley, S., 2005. An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 143pp.

Salvi, S., Atzori, S., Tolomei, C., Allievi, J., Ferretti, A., & Rocca, F., et al., 2004. Inflation rate of the Colli Albani volcanic complex retrieved by the permanent scatterers SAR interferometry technique, *Geophysical Research Letters*, 31.

Scharoo, R., Visser, P.N.M.A.M., 1998. Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites. *J. Geophys. Res.*, 103, 8113-8127.

Stevens, N.F. and Wadge, G., 2004. Towards operational repeat-pass SAR interferometry at active volcanoes. *Natural Hazards*33: 47–76, doi:10.1023/B:NHAZ.0000035005.45346.2b

Stournaras, G., 1999. Assessment of morphometric parameters of Greek Rhone-type deltas. Hydrogeologic and environmental aspects.

Stramondo, S., Bozzano, F., Marra, F., Wegmuller, U., Cinti, F.R., Moro, M., Saroli, M., 2008. Subsidence induced by urbanization in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3160-3172.

Strozzi, T., Tosi, L., Teatini, P., Wegmuller, U., Carbognin, L., Werner, C., Wiesmann, A., 2001. SAR interferometry confirms the present land stability of Venice. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* 3, pp. 1321-1323.

Thompson, A.A., Luscombe, A., James, K., and Fox, P., 2008, RADARSAT-2 mission status: capabilities demonstrated and image quality achieved. In: *Proc. 7th European Conference on SAR (EUSAR 2008)*, Friedrichshafen, Germany.

Tselentis G.-A. & Makropoulos K. (1986): Rates of crustal deformation in the Gulf of Corinth (Central Greece) as determined from seismicity. *Tectonophysics* 124, p. 55-66.

Valkaniotis, S., Koravos, G., Papadopoulos, G., Pavlides, S., and Tsapanos, T., 2008. A seismotectonic study for the broader area of the Corinthiakos Gulf. 31st General Assembly of the European Seismological Commission ESC, 7-12 September.

Wiley, C. A., 1985. *Synthetic Aperture Radars: A Paradigm for Technology Evolution*. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v. AES-21, n. 3, pp 440-443.

Werner, C., 2001. Status of the SRTM data processing: when will the world-wide 30m DTM data be available? *Geo-Informationssysteme* 12/2001. Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG. Heidelberg, pp. 6-10.

Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T., and Wiesmann, A., 2003. Interferometric point target analysis for deformation mapping. IGARSS'03, Toulouse, France, 21-25 July.

Werner, M. (2001). Shuttle radar topography mission (SRTM), mission overview. *Journal of Telecommunication (Frequenz)*, 55, 75-79.

Wright, P., Stow, R., 1999. Detecting mining subsidence from space. *International Journal of Remote Sensing* 20 (6), pp. 1183-1188.

Zebker, H.A., Rosen, P.A, Goldstein, R.M., Gabriel., A., Werner, C.L.,1994. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry. The Landers earthquake. *J. Geophys. Res.*, 99, 19617-19634.

Zhao J-L., Chen, J-P., Guo, X-F., Fan, J-H, 2009. Application of PSInSAR for monitoring urban subsidence in Beijing. *Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Russia*, 739-743.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Department of Geophysics-Geothermics, Seismological Laboratory, <http://dggsl.geol.uoa.gr/>

National Taiwan University, <http://www.ce.ntu.edu.tw/eng/index-e.htm>

Tele-Rilevamento Europa T.R.E., www.treuropa.com