ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Τμήμα Γεωγραφίας

Αντικείμενο Μελέτης:

«Διαφορική Συμβολομετρία Ραντάρ για εκτίμηση ρυθμών παραμόρφωσης εδάφους στην Αλεξάνδρεια της Αιγύπτου και συσχέτιση με τις χρήσεις-κάλυψη γης στην ευρύτερη περιοχή»

Πτυχιακή εργασία του Βύρωνα Στεργιόπουλου,

Επιβλέπων καθηγητής: Κ. Ισαάκ Παρχαρίδης

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

Περιεχόμενα

Πρόλογος ……σελ:4

Περίληψη…….σελ:5

Abstract……...σελ:6

Κεφάλαιο 1: Περιοχή μελέτης - Γεωγραφικά στοιχεία…….σελ:7-19

1.1 Φυσικό-γεωγραφικά Στοιχεία……..σελ:8-15

1.1.1 Γεωμορφολογικό Υπόβαθρο…….σελ:8-11

1.1.2 Γεωλογικό Υπόβαθρο…….....σελ:11-14

1.1.3 Κλιματικά Δεδομένα…….σελ:15

1.2 Ανθρωπογεωγραφικά Στοιχεία……..σελ:15-19

1.2.1 Δημογραφικά Δεδομένα……..σελ:15-18

1.2.2 Οικονομικά Στοιχεία πόλης και επιχειρηματικότητα……..σελ:18-19

Κεφάλαιο 2: Ιστορική εξέλιξη του αστικού ιστού της Αλεξάνδρειας και χρήσεις/κάλυψη γης…….σελ:20-32

Κεφάλαιο 3: Δορυφορικά Συστήματα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος……σελ:33-63

3.1 Γενικά…….σελ:33-38

3.1.1 Γεωμετρία εικονοληψίας συστημάτων SAR……..σελ:39-44

3.1.2 Χαρακτηριστικά SAR απεικονίσεων……σελ:45-47

3.2 Τεχνικές Παρατήρησης της Παραμόρφωσης Εδάφους….σελ:48-52

3.2.1 Συμβολομετρία Ραντάρ-Εισαγωγικά……...σελ: 48

3.2.2 Βασικές Αρχές της Συμβολομετρίας Ραντάρ…..σελ:49-52

3.3 Διαφορικά Συμβολομετρία Ραντάρ……σελ:53-55

3.4 Συμβολομετρία Σταθερών Ανακλαστήρων……...σελ:56-63

3.4.1 Πλεονεκτήματα-Περιορισμοί……..σελ:58-60

3.4.2 Εφαρμογές της Συμβολομετρίας των σταθερών ανακλαστήρων…….σελ:61-63

Κεφάλαιο 4: Δεδομένα και Προτεινόμενη μεθοδολογία επξεργασίας……σελ:64-87

4.1 Δεδομένα SAR απεικονίσεων……σελ:64-67

4.2 Στάδια επεξεργασίας διαφορικών συμβολογραφημάτων..σελ:67-69

4.3 Συμπροσαρμογή SAR απεικονίσεων…….σελ:70-71

4.4 Φιλτράρισμα SAR απεικονίσεων……...σελ: 71

4.5 Παραγωγή συμβολογραφήματος…….σελ:71

4.6 Παραγωγή διαφορικού συμβολογραφήματος…….σελ:72

4.7 Φιλτράρισμα διαφορικού συμβολογραφήματος……σελ:72-73

4.8 «Εκτύλιξη» συμβολομετρικής φάσης……σελ:73-74

4.9 Βελτίωση τροχιακών δεδομένων……σελ:74

4.10 Μετατροπή φάσης…….σελ:75

4.11 Γεω-κωδικοποίηση……..σελ:75-76

4.12 Σώρευση Διαφορικών Συμβολογραφημάτων…….σελ: 76-78

4.13 Μεθοδολογία των σταθερών ανακλαστήρων (αλγόριθμος IPTA-Interferometric Point Target Analysis)……σελ:79-87

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα Τεχνικής Σταθερών Ανακλαστήρων-Εξαγωγή Χαρτών Εδαφικής παραμόρφωσης…….σελ: 88-105

5.1 Ανάλυση σε κλίμακα ευρύτερης αστικής και περί-αστικής ζώνης της Αλεξάνδρειας – Συσχέτιση με χρήσεις και κάλυψη γης..σελ:88-100

5.2 Ανάλυση με εστίαση σε περιοχές ενδιαφέροντος…….σελ: 101-105

Επίλογος……..σελ:106

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στην εκπόνηση μελέτης η οποία βασίζεται στις τεχνικές της διαφορικής συμβολομετρίας: σώρευση συμβολογραφημάτων (stacking) και τεχνικής σταθερών οπισθοσκεδαστών/ανακλαστήρων (**I**nterferometric **P**oint **T**arget **A**nalysis). Οι συγκεκριμένες τεχνικές παρουσιάζουν ραγδαία ανάπτυξη την τελευταία εικοσαετία και καλύπτουν ένα αρκετά ευρύ φάσμα εφαρμογών της Τηλεπισκόπησης. Για την επιλογή του συγκεκριμένου θέματος, καθώς επίσης και στην εκπόνηση της εργασίας, συνέβαλε σε σημαντικό βαθμό ο επιβλέπων καθηγητής, ο Κ. Ισαάκ Παρχαρίδης, ο οποίος στήριζε την όλη προσπάθεια με τις συμβουλές του και την καθοδήγησή του, για αυτό και τον ευχαριστώ. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Κα Πηνελόπη Κουρκούλη και τον Κο Μιχάλη Φουμέλη για την σημαντική βοήθεια πάνω στα ζητήματα της συμβολομετρίας καθώς επίσης και για την παροχή ερευνητικού υλικού, με ιδιαίτερη εστίαση στο τεχνικό κομμάτι της συμβολομετρίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο – Γεωγράφο, Γιώργο Μπενέκο, που με στήριζε και με βοηθούσε όπου ηδύνατο και κυρίως τον ευχαριστώ για την ψυχολογική του υποστήριξη, ως φίλος. Συμπληρωματικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος για τη διάθεση των εικόνων Ραντάρ, και τους θύνοντες για τη στήριξη του προγράμματος στα πλαίσια του οποίου αποκτήθηκαν οι εικόνες.

Περίληψη

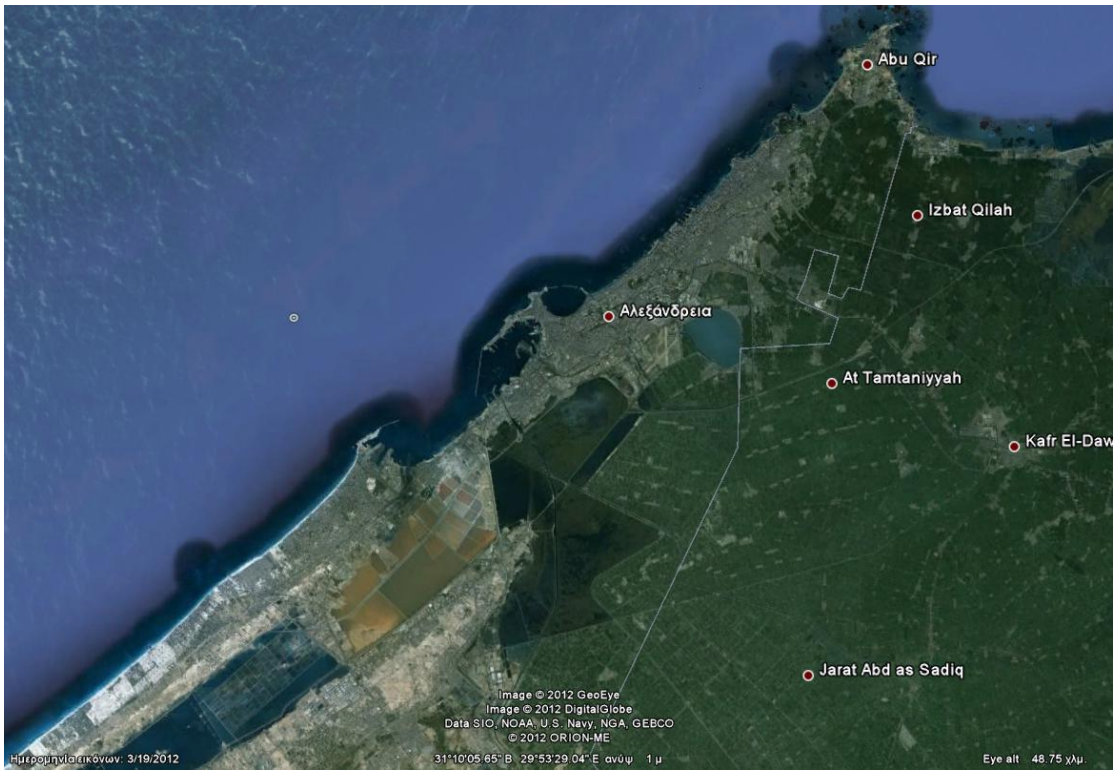
Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την παρατήρηση της εδαφικής παραμόρφωσης στον αστικό ιστό της Πόλης της Αλεξάνδρειας, με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Ραντάρ και την εφαρμογή της μεθόδου της συμβολομετρίας των σταθερών ανακλαστήρων, για την εξαγωγή των χαρτών εδαφικής παραμόρφωσης και την προσπάθεια συσχέτισης των αποτελεσμάτων της παραπάνω τεχνικής με την κάλυψη και τις χρήσεις γης στην ευρύτερη περιοχή. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, στα πλαίσια της εκπόνησης της μελέτης αυτής, ήταν: α) εικόνες ραντάρ του δορυφόρου ENVISAT, που καλύπτουν τη χρονική περίοδο 2003-2010 και οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του παραμορφωτικού προφίλ της ευρύτερης περιοχής της Αλεξάνδρειας, β) εικόνες ASTER στις οποίες βασιστήκαμε για να δημιουργήσουμε το χαρτογραφικό υπόβαθρο της κάλυψης γης, και γ) ψηφιακά δεδομένα και χάρτες για την ερμηνεία και την εξαγωγή των συμπερασμάτων. Επιμέρους στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη της τεχνικής συμβολομετρίας των ανακλαστήρων, ως ενός πολύ σημαντικού εργαλείου παραγωγής χαρτών εδαφικής παραμόρφωσης, χωρίς τη χρήση κάποιου επίγειου μέσου, καθώς με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η χρονοβόρα και πιθανόν υψηλού 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.

Abstract

This thesis deals with the observation of soil deformation in the urban fabric of the City of Alexandria, using satellite radar images and the method of interferometry of Persistent Scatterers, for extracting soil deformation maps and trying to relate the results of the above technique, with cover and land use in the region. The data used in the context of this study were: a) images of radar satellite ENVISAT, covering the period 2003-2010, that were used to estimate the profile of the deforming region of Alexandria, b) ASTER images that we used to create the background-land cover mapping, and c) digital data and maps for the interpretation and conclusions. Sub objective of this thesis is to highlight the interferometry techniques, as very important tool for territorial map production strain, without using a ground-based instrument, as this avoids the time-consuming and potentially costly fieldwork. For this procedure, the software GAMMA was used, by means of which the maps of soil deformation were generated, as well as software ERDAS Imagine and ArcGIS to processing of the extracted maps.

Κεφάλαιο 1: Περιοχή μελέτης - Γεωγραφικά στοιχεία

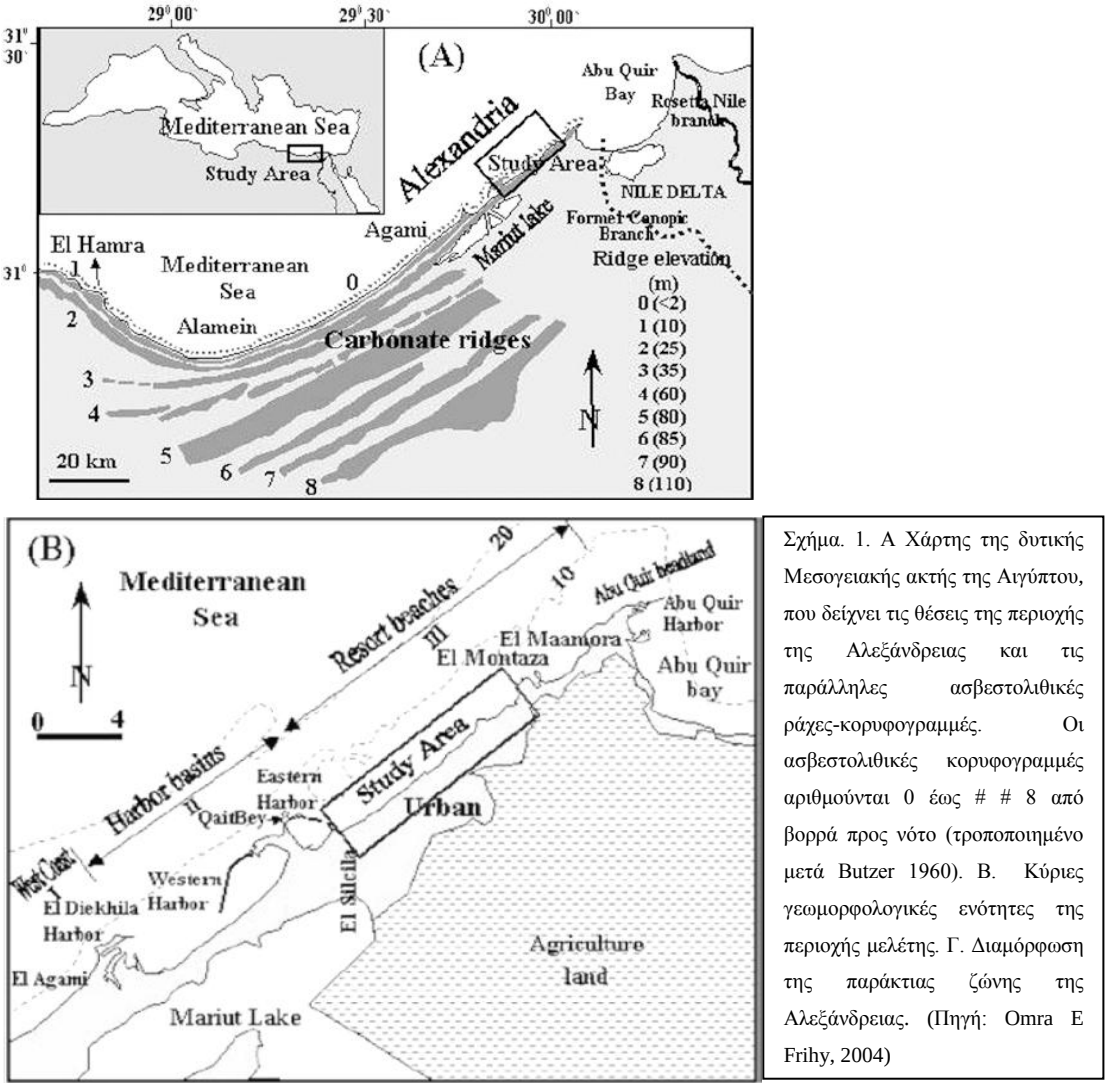
Στην παρούσα εργασία, η έρευνα υλοποιήθηκε στα πλαίσια μελέτης της πόλης της Αλεξάνδρειας της Αιγύπτου. Η πόλη της Αλεξάνδρειας εντοπίζεται στο παγκόσμιο χάρτη ως προς την ακριβή της θέση, στο στίγμα με γεωγραφικές συντεταγμένες (σε δεκαδικά μοιρών) φ: 31,2156 και λ: 29,9553 και έχει έκταση περίπου ίση με 2.300 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Επίσης, ως προς την σχετική της θέση χωροθετείται 180 χιλιόμετρα (Ευκλείδια απόσταση) Βόρειο Βορειο-δυτικά του Καΐρου και περίπου 215 χιλιόμετρα απόσταση βάσει οδικού δικτύου, και αποτελεί μια παραθαλάσσια μεσογειακή πόλη, η οποία «ανήκει», χωρικά, στην δυτική ζώνη του Δέλτα του Νείλου και ιδρύθηκε από τον Μέγα Αλέξανδρο το 332-331 π.Χ. Επιπλέον, η εβδομήντα χιλιομέτρων μήκους, ακτογραμμή της έχει διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και οριοθετείται από την γνωστή οδό Corniche.



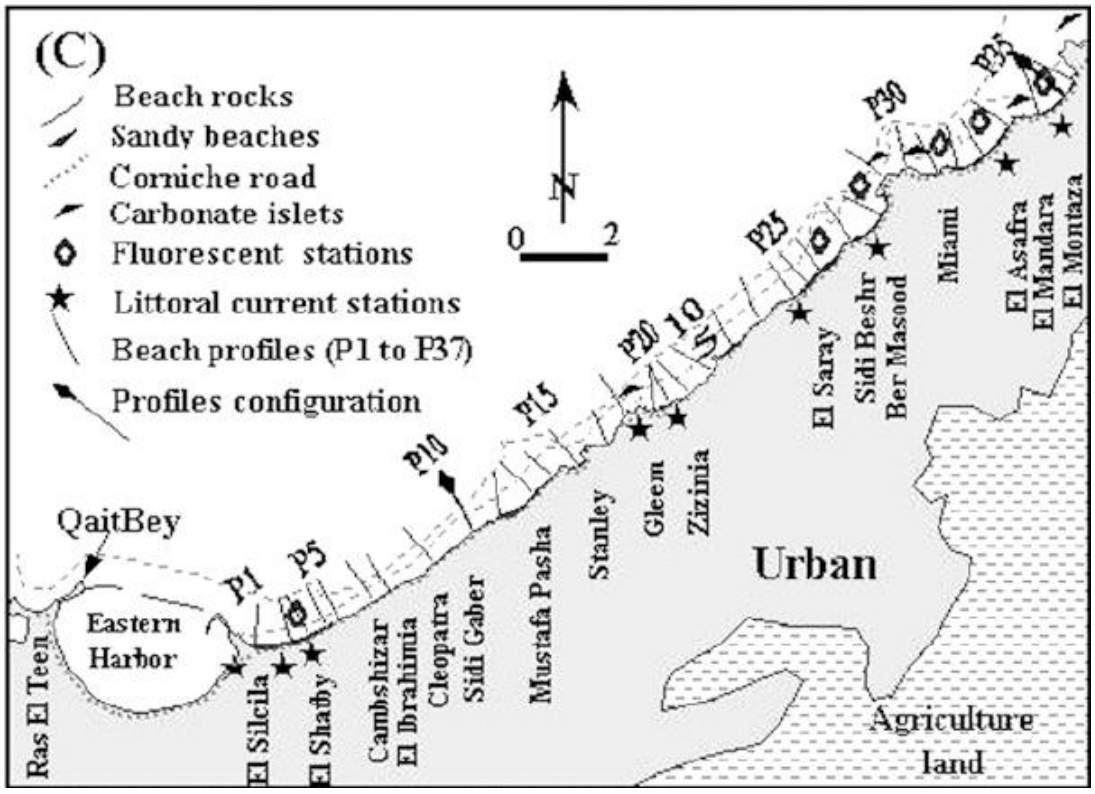
Εικόνα 1:Δορυφορική εικόνα της Αλεξάνδρειας (Πηγή Google Earth)

Συνεχίζοντας, η Αλεξάνδρεια θεωρείται, ένα από τα παλαιότερα αστικά κέντρα του κόσμου, που συνεχίζει να υπάρχει μέχρι και σήμερα. Είναι η δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της Αιγύπτου και ένα από τα σημαντικότερα λιμάνια της Μεσογείου, συν του

γεγονότος ότι είναι ένα σημαντικό εμπορικό, επιχειρηματικό, βιομηχανικό και πολιτιστικό κέντρο. Πληροφοριακά, αξίζει να αναφερθεί ότι της έχει αποδοθεί ο τίτλος «Μαργαριτάρι της Μεσογείου», λόγω των πολυάριθμων τουριστικών αξιοθέατων (Omra E Frihy, 2004). Συγκεκριμένα, κατέχει θέση στην παγκόσμια κατάταξη των πλέον επισκέψιμων τουριστικών θερέτρων, καθώς στο τουριστικό της προϊόν περιλαμβάνει ένα μεγάλο πλήθος αρχαίων μνημείων και χώρων, εκ των οποίων, τα πιο φημισμένα είναι ο Φάρος και η βιβλιοθήκη της Αλεξάνδρειας. Επίσης, ο αριθμός των βυθισμένων αρχαιολογικών χώρων, που πρόσφατα έχουν ανακαλυφθεί, πλησίον της παράκτιας ζώνης, αποτελούν τουριστικά αξιοθέατα, στα οποία οφείλεται, μερικώς, και η εισροή περίπου δύο εκατομμύριων επισκεπτών κάθε καλοκαίρι (Omran et al, 2002). Συμπληρωματικά, η πόλη φιλοξενεί τέσσερα λιμάνια που είναι τα εξής: το λιμάνι Ελ Diekhila, το Δυτικό και το Ανατολικό λιμάνι και το λιμάνι Abu Quir (Σχήμα. 1Β).



Σχήμα. 1. Α Χάρτης της δυτικής Μεσογειακής ακτής της Αιγύπτου, που δείχνει τις θέσεις της περιοχής της Αλεξάνδρειας και τις παράλληλες ασβεστολιθικές ράχες-κορυφογραμμές. Οι ασβεστολιθικές κορυφογραμμές αριθμούνται 0 έως # # 8 από βορρά προς νότο (τροποποιημένο μετά Butzer 1960). Β. Κύριες γεωμορφολογικές ενότητες της περιοχής μελέτης. Γ. Διαμόρφωση της παράκτιας ζώνης της Αλεξάνδρειας. (Πηγή: Omra E Frihy, 2004)

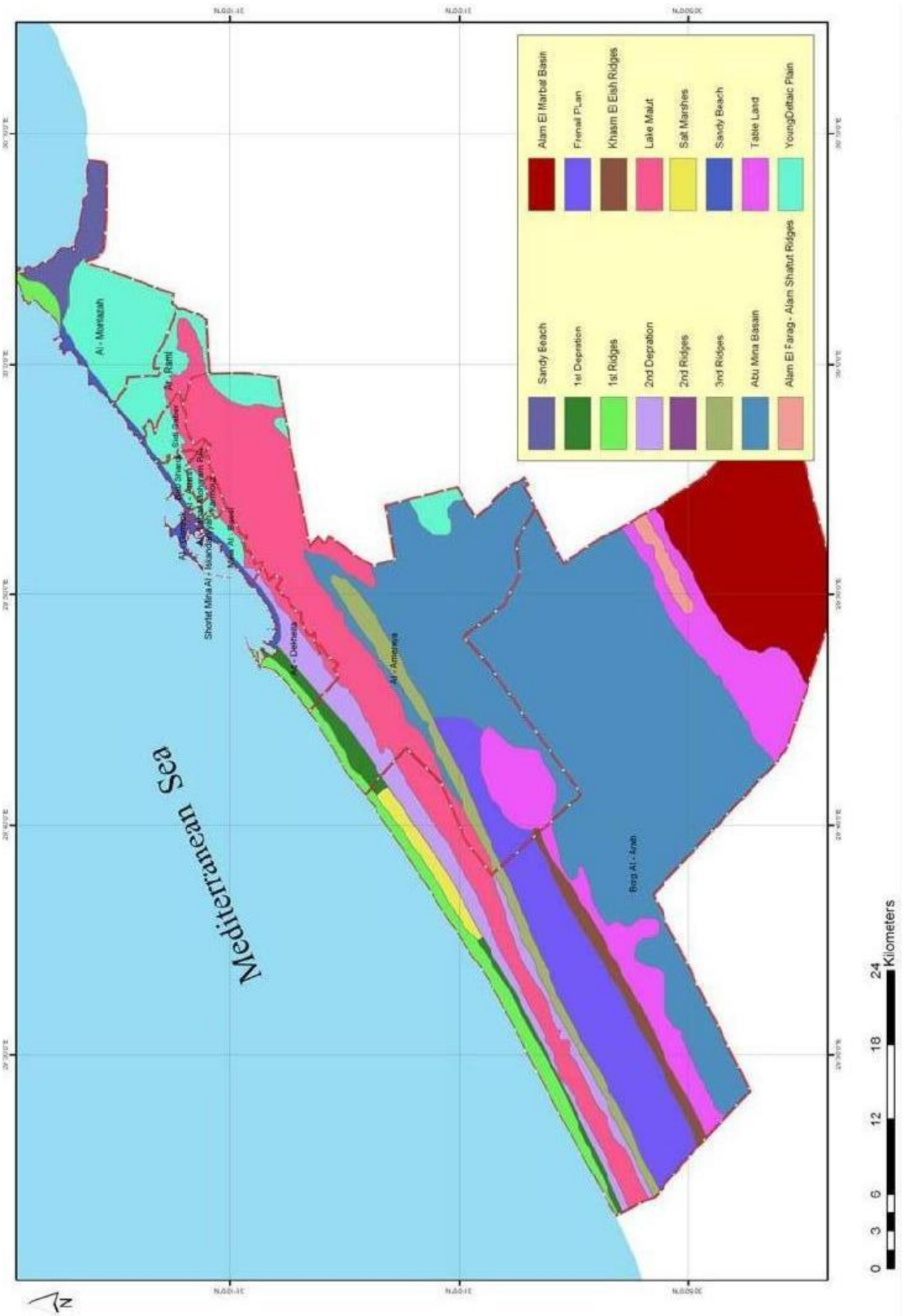


1.1 Φυσικό-γεωγραφικά Στοιχεία

1.1.1: Γεωμορφολογικό Υπόβαθρο

Από γεωμορφολογικής πλευράς, η Αλεξάνδρεια είναι χτισμένη σε μια στενή παράκτια πεδιάδα, εντός της οποίας συναντάμε συγκεκριμένου τύπου γεωμορφές τις λεγόμενες «ράχες», οι οποίες και συντίθενται από Πλειστοκαινικές αποθέσεις ανθρακικής άμμου (Σχήμα 1Α). Επίσης, η παράκτια αυτή πεδιάδα αποτελεί το πιο ανατολικό τμήμα της «ράχης» Abu Sir. Η ακτογραμμή της μπορεί να χωριστεί σε τρεις τομείς με βάση το μορφολογικό της χαρακτήρα: τις παραλίες-θέρετρα στα δυτικά της Αλεξάνδρειας οι οποίες ξεκινούν στο El Agami, τις λεκάνες απορροής στη περιοχή του Δυτικού λιμανιού και τις παραλίες από το θέρετρο El Silcila έως το ακρωτήρι Abu Quir (Σχήμα 1Β). Οι τομείς αυτοί χωρίζονται από μεγάλα αγροτεμάχια που βρίσκονται El Agami. Αναλυτικότερα, οι κύριες κατηγορίες, από γεωμορφολογικής απόψεως, που καταγράφονται στην ευρύτερη περιοχή της

Αλεξάνδρειας εμφανίζονται στο χάρτη Χάρτη 1 και είναι οι παρακάτω(Abu-Zeid,2009):



Χάρτης 1: Γεωμορφολογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής Αλεξάνδρειας.
(Πηγή Abu-Zeid,2009)

1 Παράκτια Πεδιάδα: η οποία διακρίνεται στην σύγχρονη παράκτια πεδιάδα (Ολοκαινική-Τεταρτογενές) και στην Πλειστοκαινική. Στη σύγχρονη παράκτια πεδιάδα, η παράκτια ζώνη είναι μια πολύ στενή λωρίδα, η οποία περιορίζεται στην παλιρροιακή ζώνη. Χαρακτηρίζεται, κυρίως, από την παρουσία πολλών γεωμορφών, οι οποίες είναι είτε γεωμορφές απόθεσης είτε διαβρωσιγενής. Τώρα όσον αφορά στην Πλειστοκαινική, η παράκτια πεδιάδα εκτείνεται από την ακτογραμμή μέχρι και τα δυτικά του Abu Qir και χαρακτηρίζεται από την παρουσία τριών εμφανών κορυφογραμμές, που εναλλάσσονται με σειρές λιμνοθαλάσσιων υποβυθίσεων, που αποτελούνται, κυρίως, από αργιλώδεις ασβεστολιθικές αποθέσεις.

2 Πεδεμόδια Πεδιάδα – Πεδιάδα στους πρόποδες των ορεινών όγκων: καταλαμβάνει την περιοχή μεταξύ της νότιας παράκτιας κορυφογραμμής και του οροπεδίου. Χωρίζεται από το τελευταίο με έναν ευδιάκριτο χαμηλού υψομέτρου κρημνό, ο οποίος έχει διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Η πεδιάδα ποικίλλει στο πλάτος μεταξύ 3-6 χιλιομέτρων και με κυμαινόμενο υψόμετρο 10 - 20 μέτρα πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας. Επιπλέον, η επιφάνεια της πεδιάδας καλύπτεται με αλλουβιακές αποθέσεις, που κατέληξαν, εκεί, μέσω της απορροής του νερού από το γειτονικό οροπέδιο.

3 Οροπέδιο: βρίσκεται νότια της παράκτιας πεδιάδας και εκτείνεται νοτιοδυτικά για να αναδυθεί σταδιακά στο οροπέδιο της Λιβύης. Έχει μέσο πλάτος 4 χιλιόμετρα και μέγιστο ύψος περίπου 110 μέτρα πάνω από την μέση στάθμη της θάλασσας. Η επιφάνεια του οροπεδίου υψώνεται νότια και κλίνει ανατολικά προς το Δέλτα του Νείλου, ενώ δύο κορυφογραμμές κάνουν εμφανή άνοδο στην επιφάνεια του οροπεδίου.

4 Λεκάνες Απόθεσης: Υπάρχουν ουσιαστικά δύο λεκάνες απόθεσης η Abu Mina Basin και η Allam El Marbat Basin. Η πρώτη βρίσκεται νότια της παράκτιας πεδιάδας και ανατολικά του οροπεδίου. Πρόκειται για μια κοιλάδα απόθεσης στην οποία αποστραγγίζεται η περιοχή του οροπεδίου. Η κοιλάδα αυτή καταλαμβάνει μια έκταση περίπου 500 km και η επιφάνεια της καλύπτεται από Ολοκαινικές αλλουβιακές αποθέσεις (κυρίως ασβεστολιθικές μάργες) που προέρχονται από το γειτονικό οροπέδιο. Η δεύτερη πρόκειται για μια μορφο-τεκτονική υποβύθιση και αντιπροσωπεύει μια φυσική ανασκαφή που αναπτύχθηκε από την διάβρωση κατά μήκος ορισμένων «γραμμών εξασθένισης». Όσον αφορά στη θέση αυτή εντοπίζεται στη βορειοανατολική

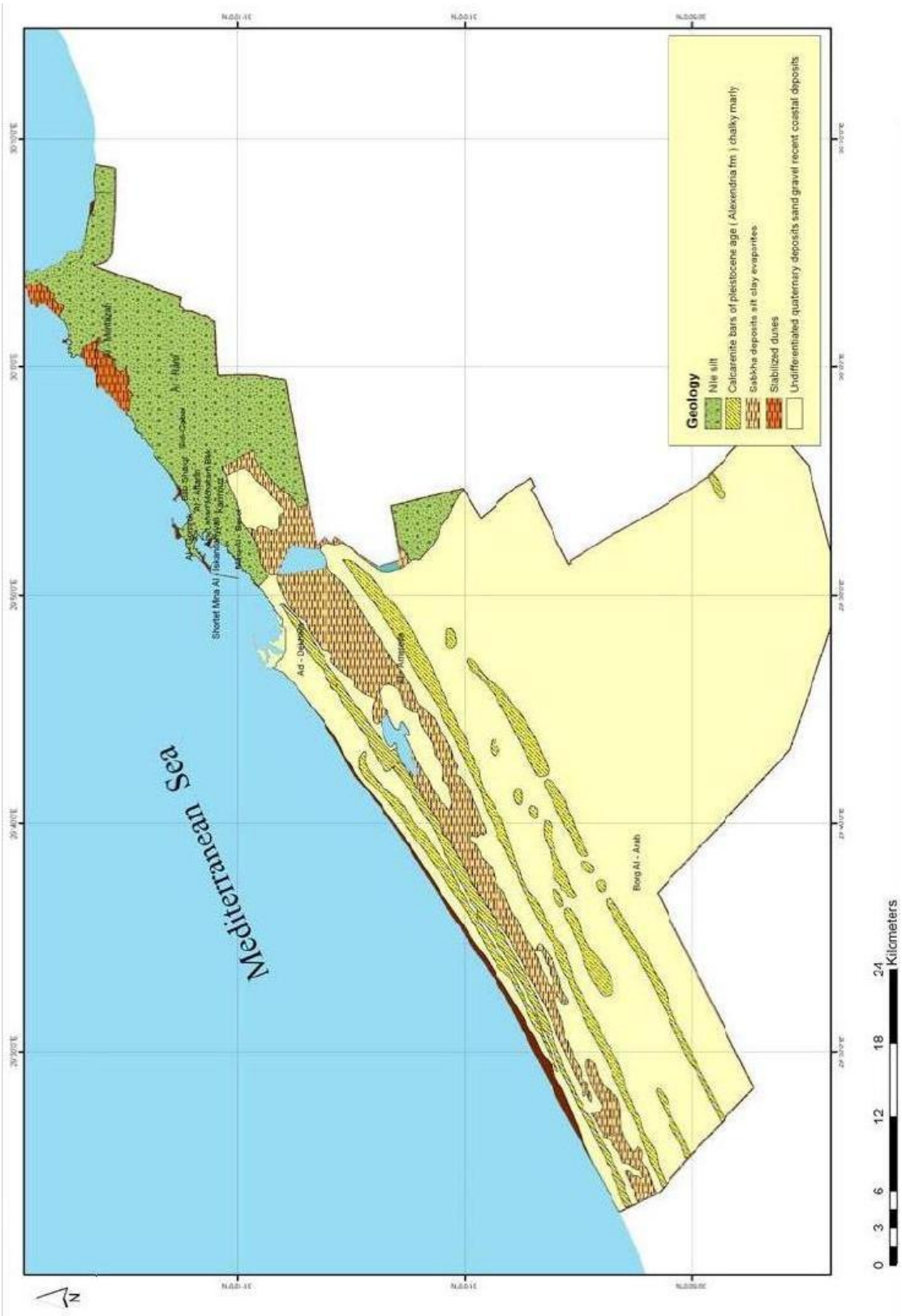
κορυφογραμμή του οροπεδίου και δυτικά της δελταϊκής πεδιάδας. Η επιφάνεια καλύπτεται ως επί το πλείστον από παρασυρόμενη άμμο, που κρύβεται κάτω από ένα λεπτό στρώμα αργιλωδών αποθέσεων. Τέλος, το υψόμετρό της κυμαίνεται από 35 έως λιγότερο από 10 μέτρα πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας.

5 Δελταϊκή πεδιάδα: Η σύγχρονη δέλτα πεδιάδα βρίσκεται ανάμεσα στην Abu Mina στα δυτικά και στον παρακλάδι του Νείλου (Rozetta branch) στα ανατολικά. Αποτελεί το πιο σημαντικό καλλιεργούμενη έκταση στην περιοχή μελέτης και η επιφάνειά του είναι γενικά επίπεδη, με μια ελαφριά κλίση προς βορρά (0,1 m / km). Το υψόμετρο επιφανείας της πεδιάδας κυμαίνεται από 20 μέτρα πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας, στα νότια, έως 3 μέτρα κάτω από το επίπεδο της θάλασσας ,προς τα βόρεια, όπου συχνά κατακλύζεται από θαλασσινό νερό, σχηματίζοντας αλυκές-βαλτώδεις εκτάσεις αλμυρού νερού. Η σύγχρονη δελταϊκή πεδιάδα είναι σχετικά πυκνοκατοικημένη. Οι γεωργικές εκτάσεις, «φιλοξενούν» κυρίως καλλιέργειες με σπαρτά και λαχανικά. Πληροφοριακά, αναφέρεται ότι η παλιά δελταϊκή πεδιάδα εντοπίζεται νότια της σύγχρονης, χωρίς να έχει κάποια επιφανειακή έκθεση.

6 Υφάλμυρες Λιμνοθάλασσες: βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της κύριας πόλης της Αλεξάνδρειας. Καλύπτει περίπου 67 τετραγωνικά χιλιόμετρα περιέχοντας υφάλμυρο νερό. Το βάθος του νερού κυμαίνεται από 0,9 -1,5 μέτρα. Δεν υπάρχει καμία σχέση μεταξύ αυτής της λιμνοθάλασσας και της Μεσογείου θάλασσας. Το επίπεδο της λιμνοθάλασσας διατηρείται σε περίπου 2,8 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας (Saad 1985).

1.1.2: Γεωλογικό Υπόβαθρο

Συνεχίζοντας ως προς το γεωλογικό της υπόβαθρο οι αποθέσεις της επιφάνειας της περιοχής μελέτης χρονολογούνται, ουσιαστικά, στο Τεταρτογενές .Οι Πλειοκαινικές αποθέσεις θαλάσσιας και ποτάμιας προέλευσης εκπροσωπούνται από ασβεστόλιθους, άμμους και γυψοειδείς αργίλους, σε αντίθεση με τους βράχους που εντοπίζονται και χρονολογούνται από το Ολόκαινο, το Πλειστόκαινο και το Μειόκαινο. Στη συνέχεια θα γίνει μια λεπτομερέστερη επισκόπηση των γεωλογικών σχηματισμών, η γραφική αναπαράσταση των οποίων πραγματώνεται στο Χάρτη 2.



Χάρτης 2: Γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής Αλεξάνδρειας.
(Πηγή Abu-Zeid,2009)

Ξεκινώντας, λοιπόν, σε ότι αφορά στο Τεταρτογενές, οι Ολοκαινικές αποθέσεις συνοψίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

a) Πρόσφατες Παραθαλάσσιες αποθέσεις: Οι παράκτιες αποθέσεις, που χωροθετούνται κατά μήκος της μεσογειακής ακτής, αποτελούνται, κυρίως, από λευκή ανθρακική άμμο, σε ωοειδή μορφή με θραύσματα κελυφών. Είναι θαλάσσιας προέλευσης και έχουν εξαιρετικά χαμηλή ποσότητα οργανικής ύλης, ορισμένων βαρέων μετάλλων και σπάνια χαλαζιακή άμμο. Επίσης, οι παραλίμνιες αποθέσεις είναι αυτές, που εκπροσωπούνται στις λιμνοθαλάσσιες υποβυθίσεις, που βρίσκονται μεταξύ του El-Max Abu Sir κορυφογραμμή και της κορυφογραμμής Gabal, και τα παραδείγματα από αλμυρά έλη και sabkhas της Ολόκαινου εποχής. Σε γενικές γραμμές, λιμνοθάλασσα λαμβάνει νερό από τέσσερις κύριες πηγές: το θαλασσινό νερό από το βορρά, το υφάλμυρο νερό από τη λίμνη προς τα δυτικά, από τη λίμνη Idko στα ανατολικά και διαρροή νερού από το Δέλτα του Νείλου. Λόγω των πρόσφατων ξηρών κλιματικών συνθηκών των τελευταίων χρόνων, παρατηρήθηκε έντονη εξάτμιση που οδήγησε σε εναπόθεση άλατος. Αυτές οι αποθέσεις αποτελούνται από ορυκτό αλάτι, κρυσταλλική γύψο και άλλους εβαπορίτες αναμειγμένους με άμμο και άργιλο.

b) Πρόσφατες χερσαίες αποθέσεις: τον πρώτο βασικό γεωλογικό σχηματισμό αποτελούν οι παράκτιες αμμοθίνες, που βρίσκονται στο βόρειο τμήμα της Αλεξάνδρειας και την παρακείμενη περιοχή με τη μορφή επιμήκων αμμόλοφων, παράλληλων, με την ακτή της Μεσογείου. Δυτικά της Αλεξάνδρειας, αυτοί οι αμμόλοφοι αποτελούνται, κυρίως, από ασβεστολιθικούς, ωοειδούς μορφής, κόκκους άμμου, που σχετίζονται με θραύσματα κέλυφος. Ωστόσο, στα ανατολικά κοντά στο παρακλάδι της Ροζέτας, οι ασβεστολιθικοί κόκκοι άμμου, που αποτελούν τις αμμοθίνες αντικαθίστανται, σταδιακά, από πολύ λεπτή χαλαζιακή άμμο, η περιεκτικότητα, των οποίων, σε ανόργανα άλατα αυξάνεται, σημαντικά. Ο δεύτερος, εξίσου σημαντικός, προς αναφορά, γεωλογικός σχηματισμός είναι ενδοχώριες αποθέσεις θινών: αυτοί οι αμμόλοφοι είναι, ιδιαίτερα, ανεπτυγμένοι και εντοπίζονται, κατά μήκος του δρόμου, που συνδέει το Κάιρο με την Αλεξάνδρεια, ο οποίος διασχίζει ερημικές περιοχές. Είναι

γενικά τοποθετημένοι έτσι ώστε να «ακολουθούν» την κατεύθυνση του ανέμου, που επικρατεί (ΒΔ-ΝΑ). Ως προς τη σύστασή τους, οι αμμόλοφοι αυτοί αποτελούνται, κυρίως, από υποκίτρινες, στρογγυλεμένες κόκκους χαλαρής χαλαζιακής άμμου και βαρέων μετάλλων με θραύσματα κελυφών. Αυτές οι αμμοθίνες και οι δύο, τόσο της ηπειρωτικής και θαλάσσιας προέλευσης προέρχονται από τα ιζήματα του Νείλου και τις παράκτιες αποθέσεις.

Προχωρώντας στις Πλειστοκαινικές αποθέσεις, υπάρχουν τρεις κύριες ομάδες αποθέσεων:

a) Ενδοχώριες λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις: οι λιμνοθαλάσσιες αργίλοι και άμμοι εμφανίζονται μέσα στην πρόσχωση που χωρίζει τις κορυφογραμμές-ράχες. Στην περιοχή burg El Arab, τρεις φάσεις της ενδοχώριας λιμνοθαλάσσιας ανάπτυξης συσχετίζονται, με τρία στάδια παλινδρόμησης της θάλασσας, που μπορεί να αναγνωριστεί, σαφώς, από τη σχετική ποικιλία σε λιθολογικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά της υφής, καθώς και στις επιφανειακές αλλαγές των λιμνοθαλάσσιων αποθέσεων.
b) Οι ασβεστόλιθοι: Οι συγκεκριμένοι ασβεστόλιθοι αναμειγνύονται, τοπικά, με λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις στα νότια της Gabal. Το πάχος τους ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό από μερικά εκατοστά στην περιοχή Burg El Arab μέχρι 3 μέτρα στην περιοχή El Daba'a και ακόμη περισσότερο μέχρι 5 μέτρα αυτοί που εκτίθενται στην περιοχή Marsha Matruh. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν ενδείξεις ότι αυτοί οι ασβεστόλιθοι θεωρείται πως είναι αντιπροσωπευτικοί Πλειο-Πλειστοκαινικών αποθέσεων κοντά σε παραθαλάσσιες ακτές.
c) Αποθέσεις παλαιού αιγιαλού (Ωοειδείς ασβεστόλιθοι κορυφογραμμές από ασβεστολιθικό ψαμμίτη): Οι ωοειδείς ασβεστόλιθοι συναντούνται αρκετά συχνά στην Αλεξάνδρεια και στις παρακείμενες περιοχές. Αναγνωρίζονται και στην παράκτια πεδιάδα, καθώς και στην περιοχή του οροπεδίου. Αποτελούνται από λευκό ασβεστόλιθο, «μαλακό» έως μέτρια σκληρό. Επίσης, τοπικά, είναι επικαλυμμένοι από αργιλώδη αποθέσεις προσχωσιγενούς προέλευσης και από συσσώρευση θινών. Οι ωοειδείς ασβεστόλιθοι εμφανίζονται σε μορφή επιμηκών ραχών που διασχίζουν μεγάλες αποστάσεις, ούσες, σχεδόν, παράλληλες με την παρούσα ακτή.

1.1.3 Κλιματικά δεδομένα

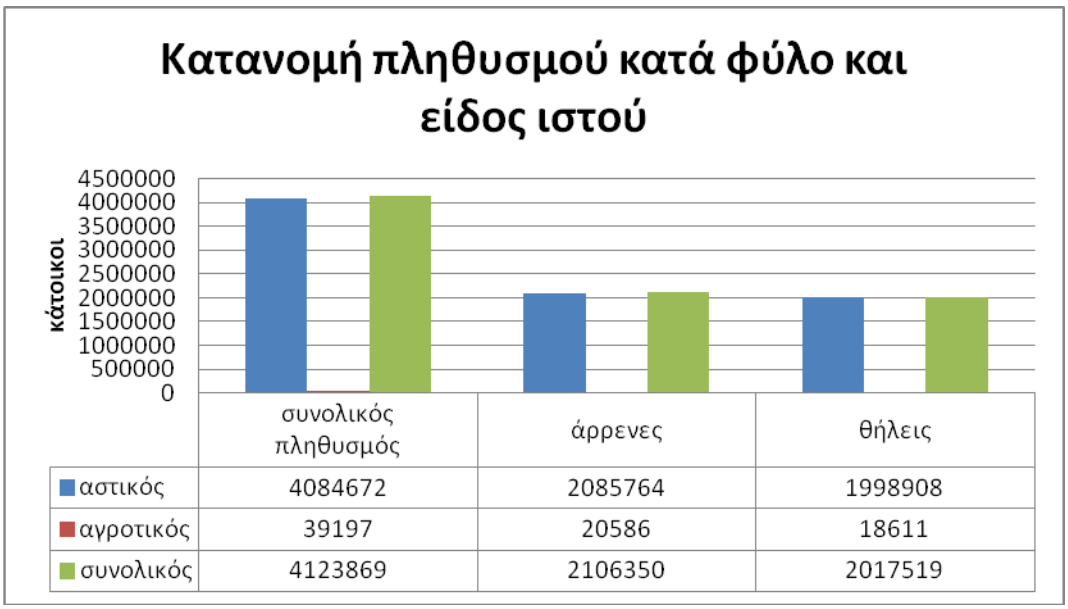
Τέλος, το κλίμα της Αλεξάνδρειας ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή. Ξεκινώντας από το Βόρειο τμήμα που συναντάμε ένα σχετικά ήπιο κλίμα, λόγω εγγύτητας με την Μεσόγειο θάλασσα και καταλήγοντας στο Νότιο τμήμα όπου το κλίμα χαρακτηρίζεται ως ξηρό-ημίξηρο, λόγω εγγύτητας με πιο ερημικά περιβάλλοντα. Επίσης, η μέση ετήσια βροχόπτωση κυμαίνεται μεταξύ 100 και 150 χιλιοστών το χρόνο, εμφανίζοντας έντονη ανισοκατανομή μεταξύ βόρειου και νότιου τμήματος, καθώς οι βροχοπτώσεις και η ποσότητα νερού, που πέφτει είναι περισσότερες στο παράκτιο τμήμα, ενώ προχωρώντας προς τα νότια μειώνονται, απότομα. Συμπληρωματικά, η υγρασία στην ευρύτερη αστική περιοχή είναι υψηλή, παρόλα αυτά η θαλάσσια αύρα καταλύει το πρόβλημα αυτό, διατηρώντας την υγρασία σε «ανεκτά» , για τους κατοίκους της πόλης, επίπεδα (Abu-Zeid,2009).

1.2 Ανθρωπογεωγραφικά στοιχεία

1.2.1 Δημογραφικά Δεδομένα

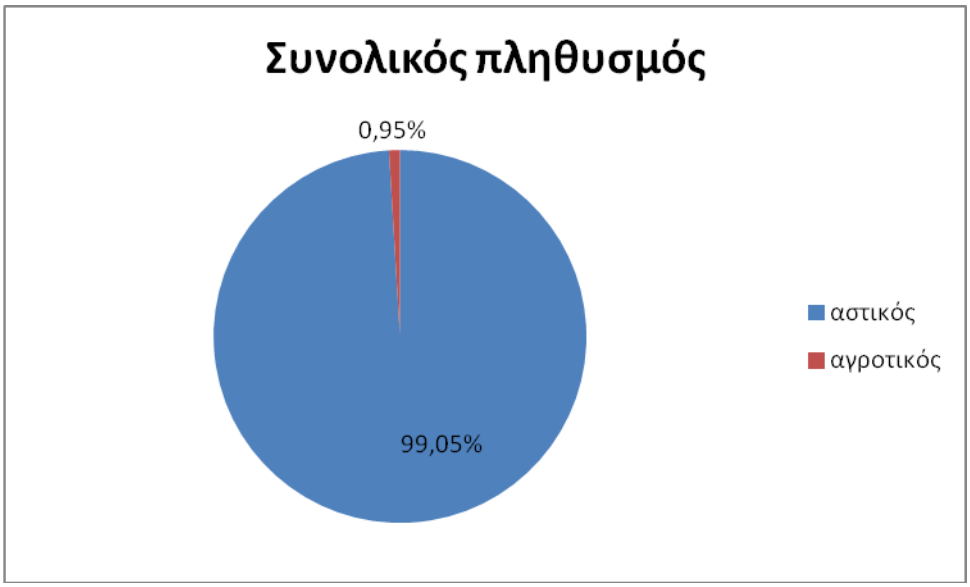
Η πόλη της Αλεξάνδρειας έχει συνολικό πληθυσμό 4.123.869 κατοίκους με βάση τα στοιχεία της Αιγυπτιακής Στατιστικής Υπηρεσίας (CAPMS) για το απογραφικό έτος 2006. Η κατανομή του πληθυσμού με βάση το φύλο έχει ως εξής:

Διάγραμμα 1

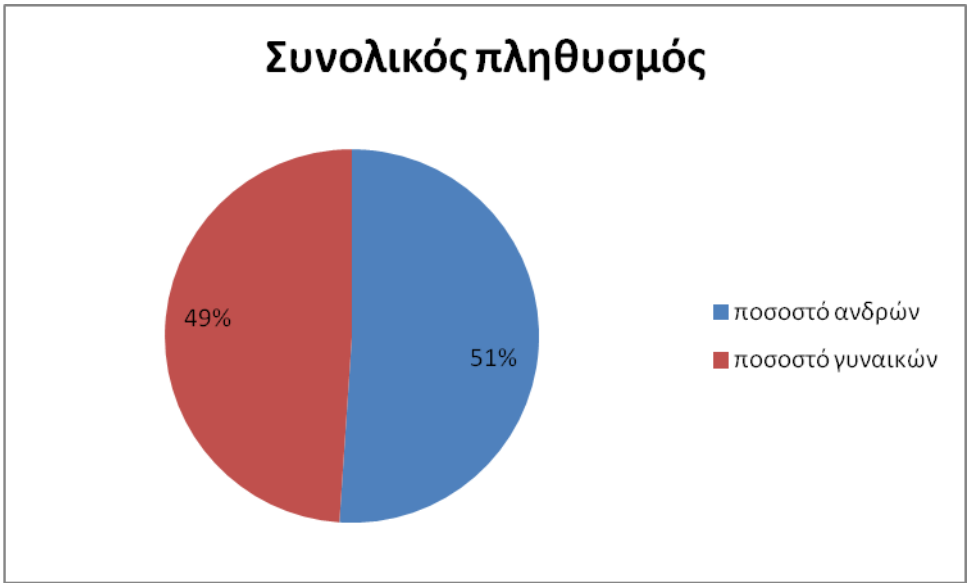


	συνολικός πληθυσμός	άρρενες	θήλεις
αστικός	4084672	2085764	1998908
αγροτικός	39197	20586	18611
συνολικός	4123869	2106350	2017519

Διάγραμμα 2

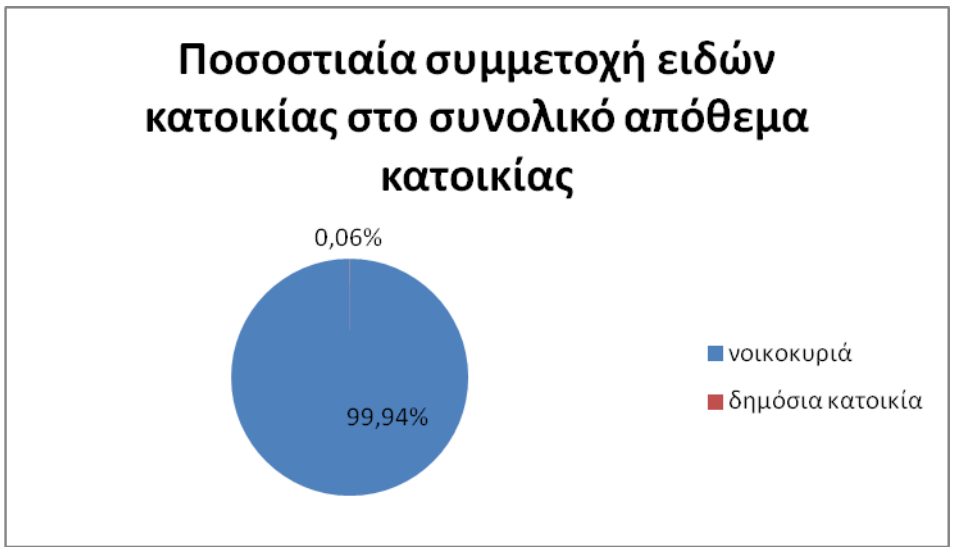


Διάγραμμα 3



Όπως παρατηρούμε στα παραπάνω διαγράμματα το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού της Αλεξάνδρειας κατοικεί στον αστικό της ιστό και η επιμέρους διάκριση βάσει του φύλου δείχνει ότι ο πληθυσμός (συνολικός, αστικός και αγροτικός) αναλογικά εμφανίζει την ίδια συμπεριφορά, με τον αντρικό πληθυσμό να προηγείται σταθερά κατά μία σχετικά μικρή ομάδα πληθυσμού. Συμπληρωματικά, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια σύντομη αναφορά στο κτιριακό απόθεμα της Αλεξάνδρειας με εστίαση στην επιμέρους διάκριση της κατοικίας σε ιδιωτικά νοικοκυριά και δημόσιες οικίες.

Διάγραμμα 4



Προχωρώντας, λοιπόν, σύμφωνα με τα στοιχεία του διαγράμματος 4 τα ιδιωτικά νοικοκυριά, καταλαμβάνουν σχεδόν εξ'ολοκλήρου το σύνολο του οικιακού αποθέματος, ενώ επίσης στον πίνακα 1 διαφαίνεται το πόσα νοικοκυριά αντιστοιχούν κατά μέσο όρο σε μία κατοικία, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι μία κατοικία μπορεί να στεγάζει πολλά νοικοκυριά, εφόσον πρόκειται για πολυώροφο κτίσμα και αποδεχόμενη την υπόθεση ότι όλες οι κατοικίες είναι όμοιες καταλήγουμε ότι στον αστικό ιστό της Αλεξάνδρειας για κάθε μία κατοικία αντιστοιχούν περίπου 5 νοικοκυριά. Επιπλέον, συσχετίζοντας τον πληθυσμό με τις κατοικίες και τα νοικοκυριά, καταλήξαμε στα στοιχεία που περιέχονται στους πίνακες 2 και 3, οι οποίοι αναφέρονται, αντιστοίχως, στις αναλογία ατόμων ανά κατοικία και ανά νοικοκυριό. Σε περαιτέρω ανάλυση, συνυπολογίζοντας και δεδομένα ακριβούς καταγραφής της οικιστικής διάταξης και της οικιστικής δόμησης, ως προς την κατανομή της, να συμπεριληφθεί στον σχεδιασμό πόλης για την καλύτερη διαμόρφωση του αστικού τοπίου της Αλεξάνδρειας.

Πίνακας 1

	συνολικός αριθμός ιδιωτικών νοικοκυριών	συνολικός αριθμός κατοικιών	αναλογία νοικοκυριών προς κατοικίες
αστικός ιστός	1064002	204505	5,202816557

Πίνακας 2

Συνολικός αστικός πληθυσμός	Σύνολο κατοικιών	άτομα ανά κατοικία
4084672	204505	20

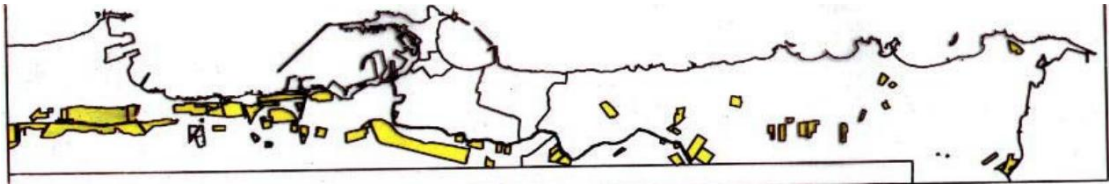
Πίνακας 3

Συνολικός αστικός πληθυσμός	συνολικός αριθμός νοικοκυριών	άτομα ανά νοικοκυριό
4084672	1064002	4

1.2.2 Οικονομικά στοιχεία και επιχειρηματικότητα

Η Αλεξάνδρεια ούσα μια από τις μεγάλες πόλεις στην Μεσόγειο Θάλασσα διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στην αιγυπτιακή οικονομία και πολιτιστική της ζωή. Οι βασικοί επιχειρηματικοί τομείς της αναφέρονται σχεδόν αποκλειστικά στην βιομηχανία της πόλης και στο διαμετακομιστικό της χαρακτήρα. Επιγραμματικά τονίζεται ότι οι κύριες δραστηριότητες αφορούν στις εμπορευματικές υποδομές της πόλης, καθώς έχει 4 λιμάνια, η χωρητικότητα των οποίων αντιστοιχεί σε ποσοστό της τάξης του 75% της συνολικής χωρητικότητας των μεσογειακών λιμένων ολόκληρης της Αιγύπτου (The Cities Alliance, 2007). Επίσης σημαντική θέση στην επιχειρηματική βάση της Αλεξάνδρειας παίζει ρόλο η βιομηχανική της βάση καθώς θεωρείται αρκούντως ισχυρή ειδικευόμενη σε κλάδους όπως αυτοί της κλωστοϋφαντουργίας, των χημικών, της παραγωγής καυσίμων, εξόρυξης πρωτογενών μετάλλων, παραγωγής τροφίμων και εμπορίου τους, και της βιομηχανίας καπνού. Η

χωρική κατανομή των βιομηχανιών στο αστικό ιστό της Αλεξάνδρειας έχει σχετικά συγκεκριμένο πρότυπο χωροθέτησης, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.



Εικόνα 2:Χωροθέτηση βιομηχανικών εγκαταστάσεων εντός του αστικού ιστού (Πηγή Mohamed El Raey,2007)

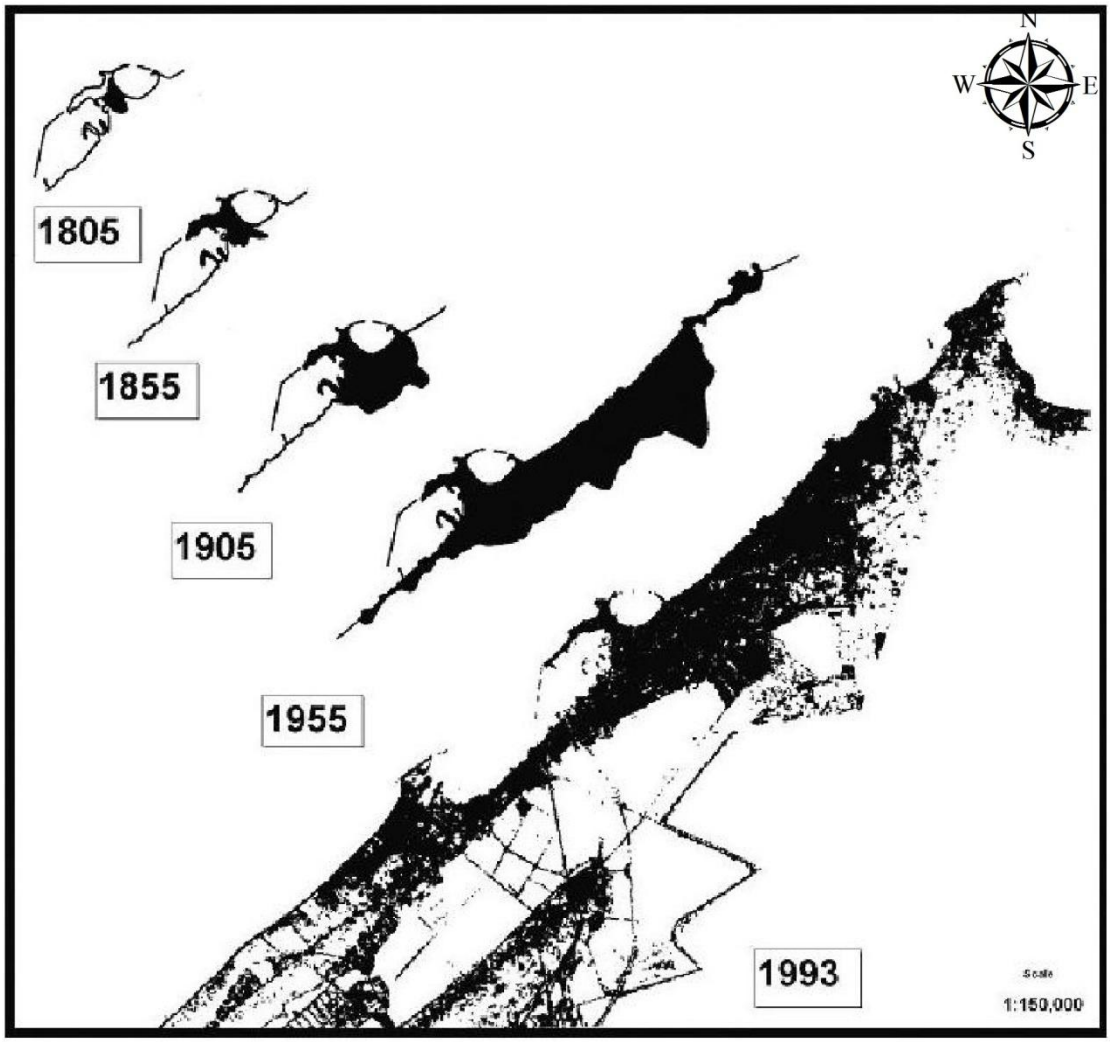
Στην Αλεξάνδρεια, εκτιμάται ότι υπάρχουν πάνω από 4.500 βιομηχανικές επιχειρήσεις και το εργατικό της δυναμικό 201.000 κάτοικοι, το οποίο και αντιπροσωπεύει το 17,3% του συνολικού εργατικού δυναμικού της Αιγύπτου, το οποίο με τη σειρά του αντιστοιχεί στο 40% του συνολικού πληθυσμού της. Όπως συμπεραίνουμε λοιπόν και από πλευράς θέσεων εργασίας και εργατικής κινητικότητας και συμβολής στην εθνική οικονομία η Αλεξάνδρεια κατατάσσεται ανάμεσα στις πρώτες πόλεις για την επιχειρησιακή της δραστηριότητα και το δυναμικό της. Συμπληρωματικά αναφέρεται ότι το Ακαθάριστο Εθνικό Εισόδημα ανά κεφαλήν είναι περίπου 1,570 δολαρίων ΗΠΑ (2005).

Κεφάλαιο 2: Ιστορική εξέλιξη του αστικού ιστού της Αλεξάνδρειας και χρήσεις/κάλυψη γης.

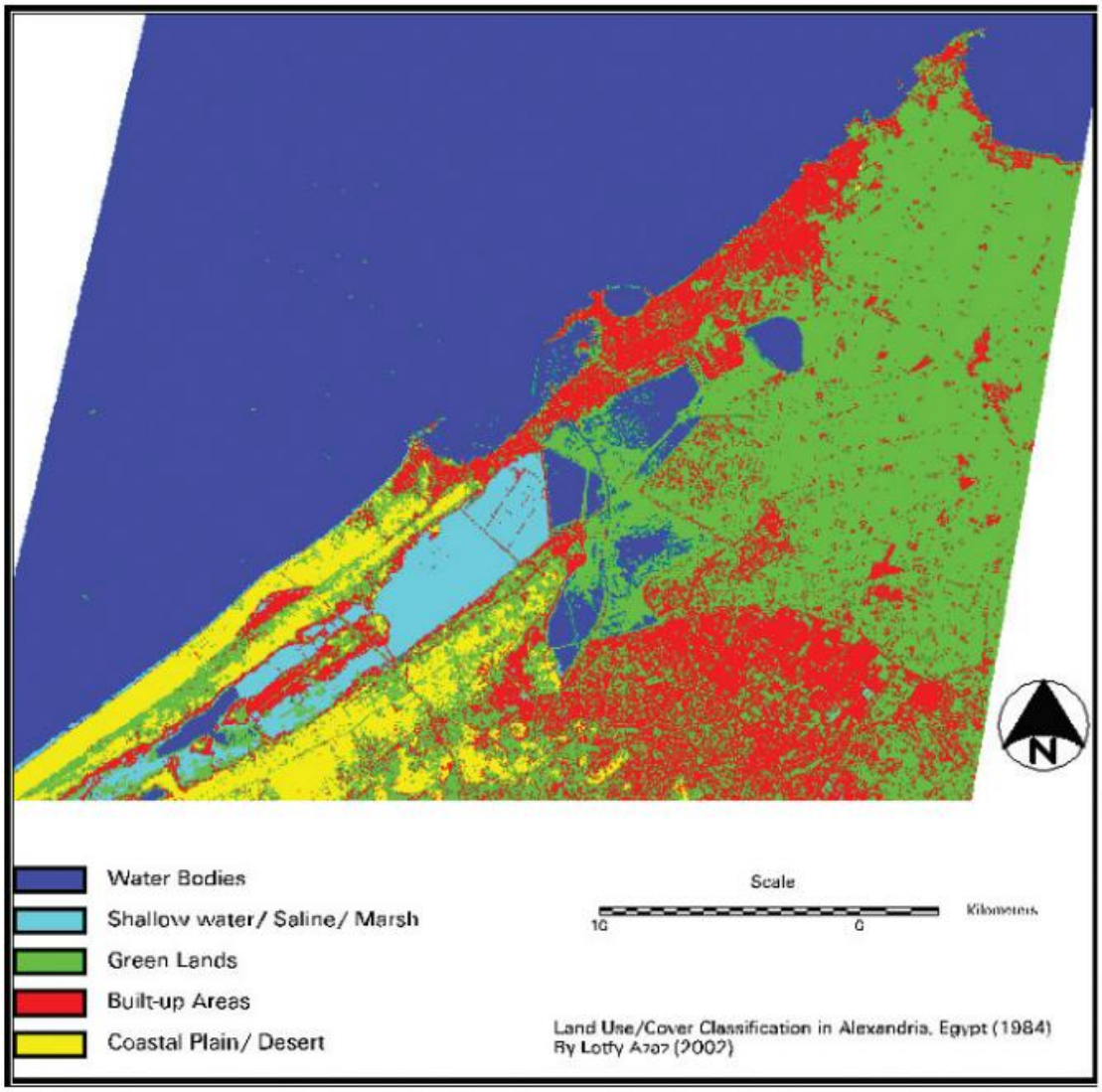
Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης κρίθηκε αναγκαία η παρατήρηση και η καταγραφή της φυσικής εξέλιξης του αστικού ιστού της Αλεξάνδρειας, καθώς επίσης και της διαχρονική μεταβολής του καθεστώτος της κάλυψης/χρήσης γης, με εστίαση σε τυχούσα αλλαγή κάλυψης/χρήσης γης. Για το συγκεκριμένο σκοπό, προβήκαμε στη δημιουργία και ανάλυση ψηφιακών χαρτών κάλυψης και χρήσης γης.

Τώρα, σχετικά με τους χάρτες, που χρησιμοποιήθηκαν, αυτοί διακρίνονται σε δυο κατηγορίες, βάση της προέλευσής τους. Η πρώτη αφορά σε ψηφιακά δεδομένα τα οποία αποκτήθηκαν ύστερα από αναζήτηση στο διαδίκτυο, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει χαρτογραφικά προϊόντα που δημιουργήθηκαν, κατά την εκπόνηση της μελέτης, από δορυφορικά ψηφιακά δεδομένα. Εκτενέστερα, κατά την αναζήτηση στον «παγκόσμιο ιστό» βρήκαμε ψηφιακούς χάρτες, που αναπαριστούν, χρονολογικά παλαιότερα, την εξέλιξη του αστικού ιστού της πόλης της Αλεξάνδρειας, όπως φαίνεται στο χάρτη 3, καθώς και τη διαχρονική σύγκριση και εντοπισμό των διαφορών που παρατηρούνται στην κάλυψη γης ανάμεσα σε σχετικά μεγάλα χρονικά διαστήματα. Για παράδειγμα, στους χάρτες 4 και 5 καθώς, επίσης, και στην εικόνα 3 παρατίθενται συγκριτικά οι χρήσεις γης, για το χρονικό διάστημα 1984/1993 αντίστοιχα. Αυτό που παρατηρούμε, γενικά, είναι το πόσο έχει επεκταθεί ο δομημένος αστικός ιστός, εις βάρος του ανοιχτού αίθριου χώρου, των καλλιεργήσιμων εκτάσεων και των περιοχών φυσικής βλάστησης. Συγκεντρωτικά, το σύνολο των αλλαγών συνοψίζονται επιγραμματικά στον πίνακα 4 που παρατίθεται πιο κάτω και αναπαρίστανται, γραφικώς, στο χάρτη 6. Επίσης, αλλαγές παρατηρούνται στην έκταση, που καλύπτουν οι υδάτινες μάζες και βάση των στοιχείων της εικόνας υφίστανται, επιπλέον, αλλαγές και ως προς την ποιότητα του νερού και του υδάτινου περιβάλλοντος των επιφανειών αυτών. Παραδειγματικά, τέτοιες αλλαγές σχετικά μεγάλης κλίμακας εντοπίζονται νοτιοδυτικά του αστικού κέντρου της Αλεξάνδρειας, όπου, κατά το έτος 1984, η μεγαλύτερη έκταση χαρακτηριζόταν ως παράκτιο ερημικό περιβάλλον και ένα κομμάτι ξηράς που εντοπίζεται εντός της λίμνης Μάριουτ, χαρακτηρίζεται, κυρίως, ως δομημένη

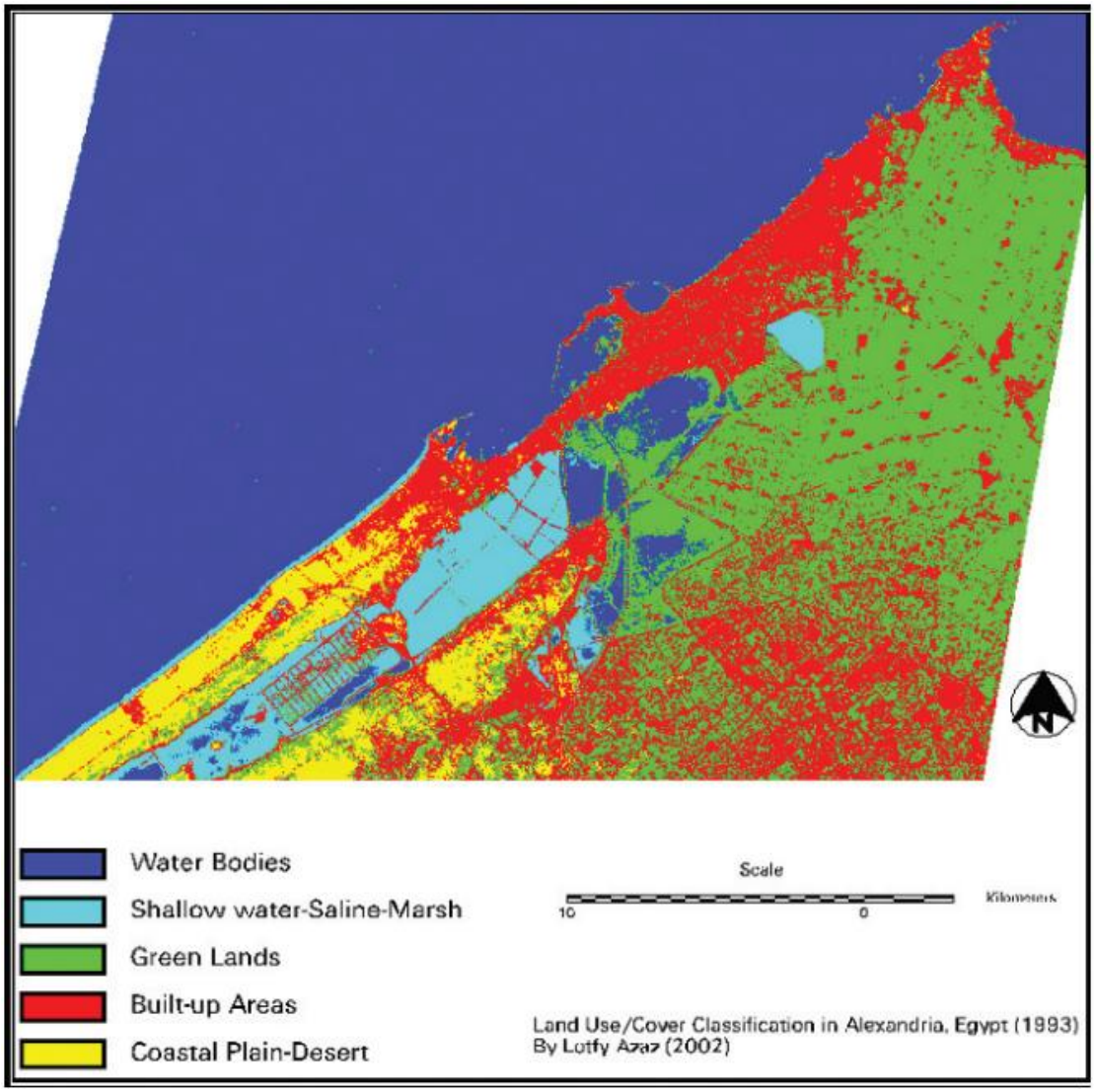
περιοχή, ενώ, κατά το έτος 1993, στις αντίστοιχες θέσεις, η κάλυψη/χρήση γης έχει αλλάξει, όπου στην πρώτη περίπτωση το ερημικό εντάσσεται στο δομημένο αστικό περιβάλλον και στη θέση του χωρίου εντός της λίμνης, δεν υπάρχουν πλέον παρά μόνο κάποια υπολείμματα της συγκεκριμένης έκτασης, ενώ η "χαμένη" έκταση φαίνεται, πλέον, να κατακλύζεται από ύδατα. Επίσης, στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, χαρακτηριστικό παράδειγμα αλλαγής χρήσης αποτελεί η μικρή, σχετικά, υδάτινη επιφάνεια, σχεδόν ωοειδούς σχήματος, η οποία το 1984, κατηγοριοποιείται ως αμιγώς υδάτινη επιφάνεια, ενώ το 1993 εντάσσεται στην κατηγορία των ελωδών περιοχών υφάλμυρων υδάτων/βάλτων.



Χάρτης 3: Ιστορική εξέλιξη του αστικού ιστού της Αλεξάνδρειας
(Πηγή: L. K. ABDOU AZAZ,2008)

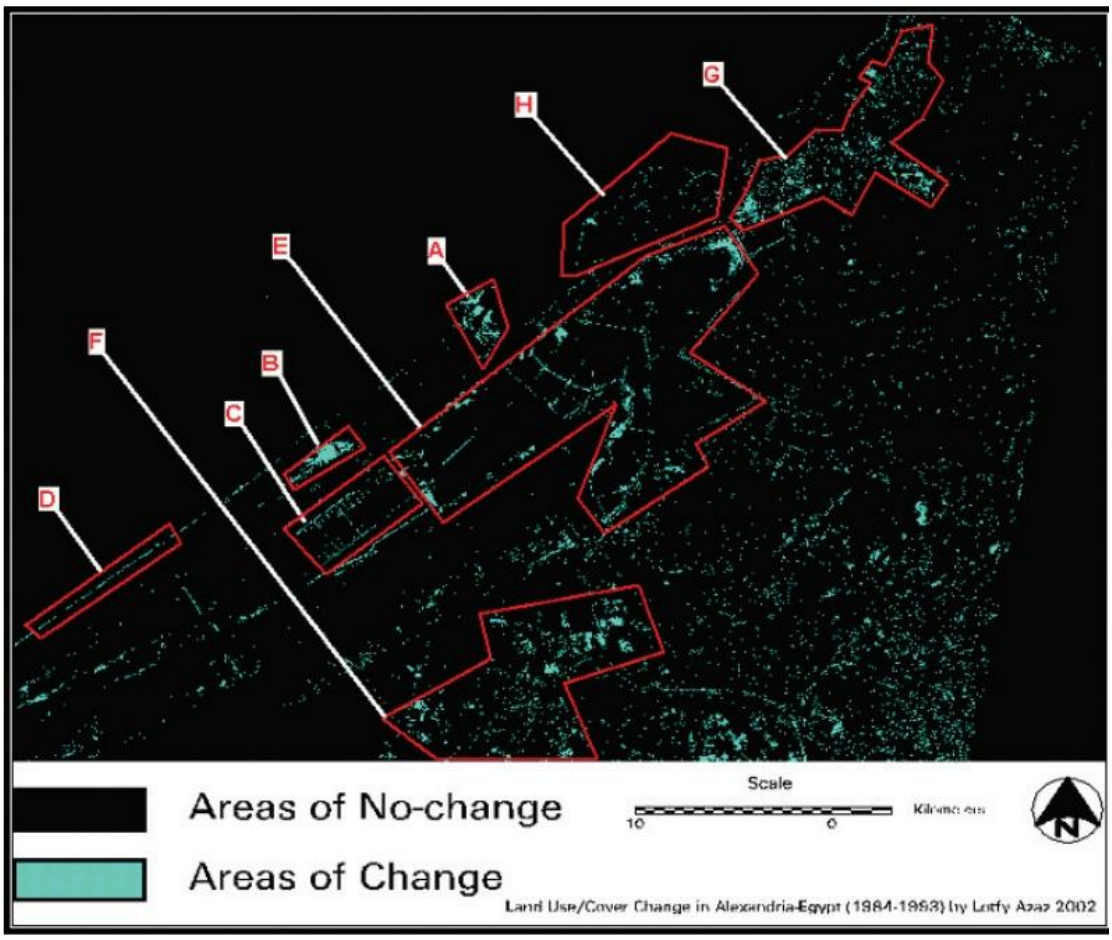


Χάρτης 4: Χρήσεις/καλυψη γης στην Αλεξάνδρεια της Αιγύπτου για το έτος 1984 (Πηγή: L. K.l Abdou Azaz,2008)



Χάρτης 5 Χρήσεις/καλυψη γης στην Αλεξάνδρεια της Αιγύπτου για το έτος 1993 (Πηγή: L. K.l Abdou Azaz,2008)

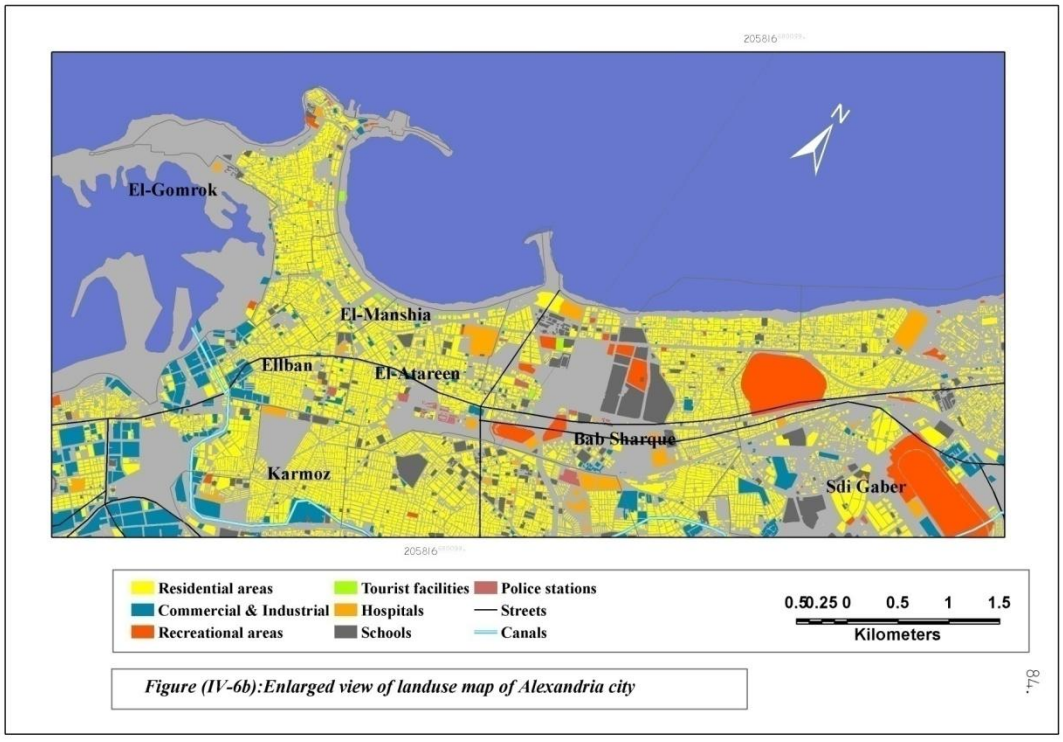
Χάρτης 6 και Πίνακας 4: Κυριότερες αλλαγές χρήσεων/κάλυψης γης στην Αλεξάνδρεια (1984-1993)



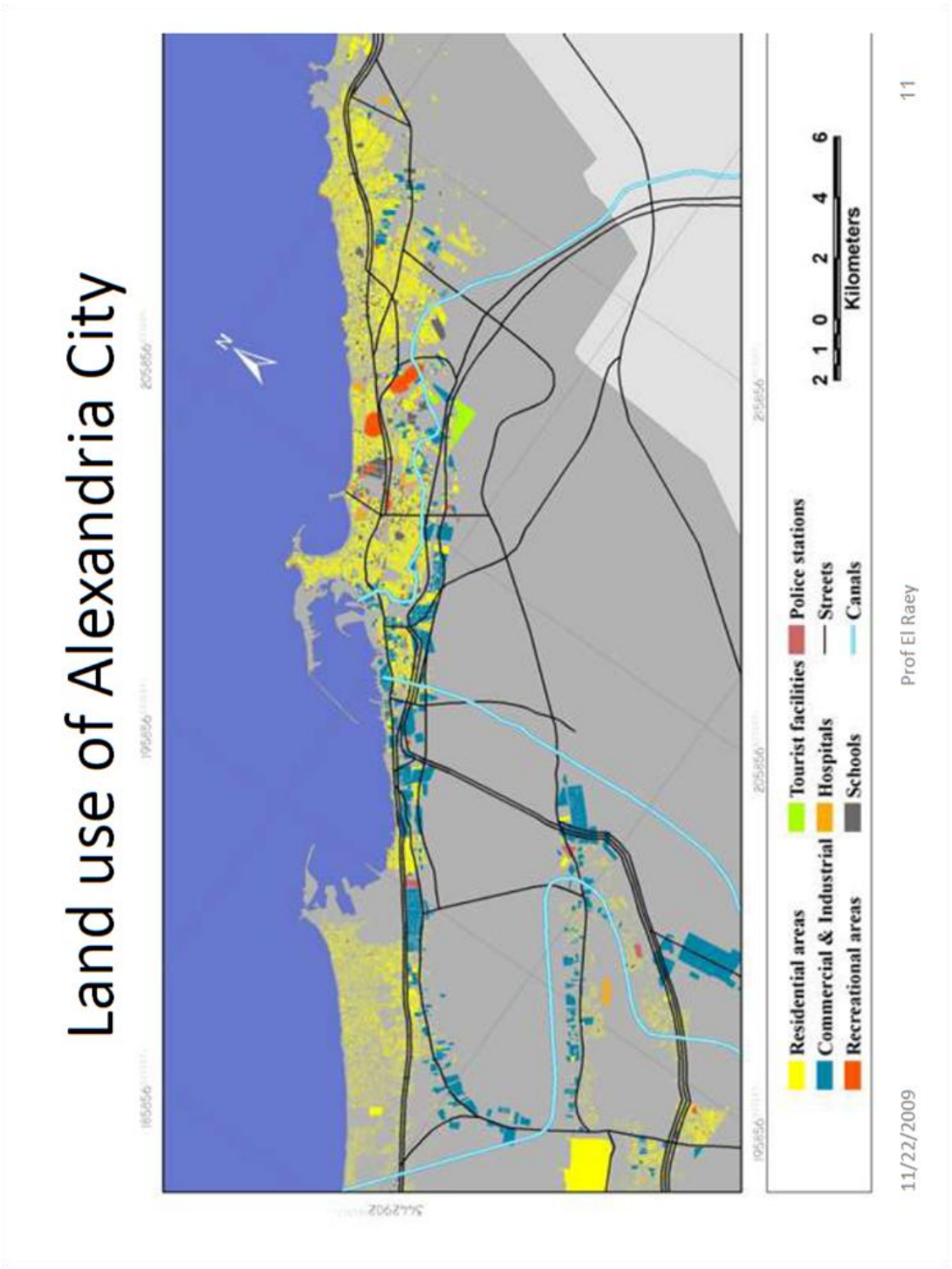
Κωδικός	Παλαιά χρήση/κάλυψη	Νέα χρήση/κάλυψη
A	Έρημος	Νέο Λιμάνι- Dekhila
B	Έρημος	Ενεργειακός σταθμός Sidi Krir
C	Λίμνη	Ιχθυοτροφεία
D	Έρημος	Δυτική ακτή
E	Λίμνη	Αλλαγές στη Λίμνη Μάριουτ
F	Έρημος	Προγράμματα ανάπλασης
G	Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	Αστική επέκταση στις Ανατολικές περιοχές

Η	Κέντρο επιχειρηματικής δραστηριότητας	Κέντρο επιχειρηματικής δραστηριότητας

Συμπληρωματικά, κατά την αναζήτηση χαρτογραφικών προϊόντων για την Αλεξάνδρεια, εντοπίσαμε δύο χάρτες, που αφορούν στις χρήσεις γης της περιοχής μελέτης και οι οποίοι παράχθηκαν και παρατέθηκαν στα πλαίσια μιας έρευνας που διεξήγαγε ο καθηγητής Mohamed El Raey, του Πανεπιστημίου της Αλεξάνδρειας. Το κομβικό σημείο, στη ερμηνευτική συμβολή αυτών των χαρτών, αποτελεί η πληρέστερη εικόνα που μας παρέχεται για την κάλυψη και χρήση γης της Αλεξάνδρειας και η μετέπειτα συμβολή και περίληψη αυτής της γνώσης για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το κεντρικό αντικείμενο της μελέτης αυτής.



Χάρτης 7: Χρήσεις γης στο κέντρο της πόλη της Αλεξάνδρειας.
(Πηγή: Mohamed El Raey, 2009)



Χάρτης 8: Χρήσεις γης στην Αλεξάνδρεια της Αιγύπτου (Πηγή: Mohamed El Raey, 2009)

Προχωρώντας, αναφερόμενοι στα χαρτογραφικά προϊόντα, που συνθέσαμε κατά την εκπόνηση της μελέτης, αυτά αφορούν αποκλειστικά σε δύο εξαγόμενους χάρτες, όπου και οι δύο αφορούν στην κάλυψη/χρήση γης για τα έτη 2001 και 2010. Η λογική ακολουθία, για τον προσδιορισμό των χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης,αποκρυσταλλώνεται στους εξής δύο γενικούς μεθοδολογικούς σκοπούς:

- Προσδιορισμός των τύπων κάλυψης του εδάφους με εφαρμογή της μεθόδου επιβλεπόμενης ταξινόμησης δορυφορικών δεδομένων του ραδιομέτρου ASTER του δορυφόρου Terra.
- Ημιαυτόματη εξαγωγή των χρήσεων γης με βάση τον τύπο κάλυψης του εδάφους και φωτοερμηνεία της εικόνας ASTER με την υποστήριξη δεδομένων άλλων πηγών, όπως εκ παραλλήλου παρατήρηση των δορυφορικών δεδομένων στην πλατφόρμα του Google Earth, και χρήση θεματικών χαρτών.

Πριν συνεχίσουμε όμως στην ανάλυση του πρακτικού μέρους διαδικασιών πραγμάτωσης της μεθοδολογίας θα πρέπει να γίνει συνοπτική αναφορά/περιγραφή των δεδομένων, που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό. Ξεκινώντας, λοιπόν, το όργανο καταγραφής ASTER παρέχει πολυφασματική κάλυψη σε 14 φασματικές περιοχές από την ορατή έως τη θερμική-υπέρυθρη περιοχή του ηλεκρομαγνητικού φάσματος (The Yale Center for Earth Observation, 2011). Διαθέτει τρία ξεχωριστά οπτικά συστήματα το καθένα από τα οποία καταγράφει την εισερχόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε διαφορετική φασματική περιοχή: Το VNIR (Visible and Near Infrared) με 4 κανάλια, το SWIR (Shrotwave Infrared) με 6 κανάλια και TIR (thermal Infrared) με 5 κανάλια. Η χωρική διακριτική του ικανότητα είναι 15 m, 30 m και 90 m για τα VNIR, SWIR και TIR, αντίστοιχα. Το σύστημα VNIR αποτελείται από δύο ανιχνευτές, ο πρώτος εκ των οποίων κατευθύνεται προς το ναδίρ (nadir) καταγράφοντας σε τρεις φασματικές περιοχές (κανάλια 1, 2 και 3N), ενώ ο δεύτερος κατευθύνεται προς τα πίσω (backward) με γωνία 27.7° καταγράφοντας σε μία φασματική περιοχή (κανάλι 3B). Με τον τρόπο αυτό το ASTER παρέχει στερεοσκοπική κάλυψη στο εγγύς υπέρυθρο, δίνοντας τη δυνατότητα κάθε επιφάνεια να παρατηρείται από δύο διαφορετικές γωνίες λήψης. Συνεπώς, υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) για κάθε σκηνή ASTER (Abrams and Hook, 2002). Έχοντας σαν στόχο, στη

συγκεκριμένη μελέτη, την εξαγωγή των τύπων κάλυψης του εδάφους και στη συνέχεια την αποτύπωση των χρήσεων γης, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα λήψεις του συστήματος VNIR, λόγω της χωρικής διακριτικής ικανότητας των 15 m. Αναλυτικότερα, εισάγαμε τα πολυφασματικά δεδομένα στο περιβάλλον εργασίας του προγράμματος Erdas Imagine, όπου και εκτελέστηκαν οι ακόλουθες διαδικασίες επεξεργασίας των δεδομένων, κατά σειρά:

1. Μετατροπή των εικόνων-λήψεων από μορφή κατάληξη .tiff σε μορφή τύπου .img , που επεξεργάζεται κυρίως το πρόγραμμα.
2. Εφαρμογή αλγορίθμου υπέρθεσης των διαφόρων εικόνων (layer stacking), ώστε να εξάγουμε ένα προϊόν-εικόνα που θα περιέχει τιμές για καθένα από τα κανάλια του VNIR.
3. Εφαρμογή ρουτίνας ελεγχόμενης ταξινόμησης στο προϊόν της υπέρθεσης, με χρήση του αλγορίθμου ταξινόμησης μεγίστης πιθανοφάνειας. Σε γενικές γραμμές, ο αλγόριθμος αυτός, για ένα προκαθορισμένο σύνολο δεδομένων και του υποκείμενου στατιστικού μοντέλου, επιλέγει τιμές των παραμέτρων, του στατιστικού μοντέλου των εικόνων, που παράγουν μια κατανομή που δίνει στα παρατηρούμενα δεδομένα τη μεγαλύτερη πιθανότητα (δηλαδή, παραμέτρους που μεγιστοποιούν τη συνάρτηση πιθανοφάνειας).
4. Εφαρμογή φίλτρου γενίκευσης: Αλγόριθμος θεματικής συγκέντρωσης (Thematic Aggregation).

Μεθοδολογικά βήματα-Ελεγχόμενη ή Ημιαυτόματη Ταξινόμηση.

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία ταξινόμησης της εικόνας εντοπίσαμε συγκεκριμένες περιοχές, αντιπροσωπευτικές των κατηγοριών κάλυψης εδάφους που θέλαμε να φτιάξουμε (π.χ. καλλιέργειες, δομημένος ιστός κλπ.), για τις οποίες και δημιουργήθηκαν περιοχές ενδιαφέροντος με χρήση πολυγωνικών οντοτήτων. Ακολούθως, με βάση τα πολύγωνα που προέκυψαν, προχωρήσαμε στην εξαγωγή ψηφιακών «υπογραφών» για καθεμία από τις κατηγορίες, οι οποίες και συμπεριλήφθηκαν στην ρουτίνα εφαρμογής της ελεγχόμενης ταξινόμησης. Λεπτομερέστερα, οι ψηφιακές υπογραφές, που δημιουργήθηκαν, έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν τις θεμιτές κατηγορίες κάλυψης γης, απετέλεσαν και τη βάση της ταξινόμησης, καθώς παρείχαν ουσιαστικά τις πληροφορίες για την φασματική ταυτότητα των ομάδων/κατηγοριών, βάσει των φασματικών αποκρίσεων(ποσοστό

ανακλαστικότητας της ακτινοβολίας-ποσότητα ληφθείσας/ανακλώμενης ακτινοβολίας) των φυσικών τους εκφάνσεων. Κατά συνέπεια ο αλγόριθμος της ταξινόμησης στηρίχθηκε στις διαφορές, που εμφάνιζαν οι διαφορετικές ομάδες-δείγματα, ώστε να εντοπίσει και να κατηγοριοποιήσει και τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία βάσει της δικής τους φασματικής ταυτότητας (ψηφιακές τιμές για κάθε κανάλι) σε καθεμία από τις προαποφασισμένες και προσδιορισμένες ομάδες κάλυψης γης.

Στην πράξη, οι ομάδες που ορίστηκαν εξαρχής είναι εφτά σε αριθμό και είναι οι παρακάτω:

1. Αστικός ιστός, υψηλής ρυμοτομικής ποιότητας και υψηλής πυκνότητας δόμησης.
2. Αστικός ιστός, υψηλής ρυμοτομικής ποιότητας και χαμηλής πυκνότητας δόμησης.
3. Αστικός ιστός, χαμηλής ρυμοτομικής ποιότητας και υψηλής πυκνότητας δόμησης.
4. Αγροτικές περιοχές: σε αυτή τη κατηγορία συμπεριλαμβάνονται οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις και οι εκτάσεις φυσικής βλάστησης.
5. Ερημικές περιοχές: Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως σε αυτή τη κατηγορία εντάσσονται και οι περιοχές βιομηχανικής ζώνης, που καλύπτονται από μεγάλες επιφάνειες μπετού, και οι οποίες εμφανίζουν παρόμοια φασματική απόκριση.
6. Εσωτερικά ύδατα: περιοχές σχετικά μικρού βάθους
7. Θαλάσσια ύδατα: περιοχές σχετικά μεγάλου βάθους.

Στο σημείο αυτό κρίνεται αναγκαίο να γίνουν κάποιες διευκρινίσεις σχετικά τις κατηγορίες κάλυψης γης και ειδικότερα με τις ομάδες που αφορούν στις υδάτινες μάζες. Η πρωταρχική λογική στόχευε στον προσδιορισμό δύο ομάδων υδάτινων επιφανειών, που θα εμφανίζουν διακριτά χαρακτηριστικά ως προς την συνολική ανακλαστικότητα της ακτινοβολίας και κατά συνέπεια διαφορετική ποσότητα ανακλώμενης ακτινοβολίας, στόχος που επιτεύχθηκε. Όμως η επιτυχία στη δημιουργία των κατηγοριών έγκειται και στον ακριβή προσδιορισμό της ομάδας και τη γνώση ότι μία κατηγορία δεν επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Αυτό, εν μέρει ισχύει για όλες τις ομάδες, που δύναται να συνθέσει ο ερευνητής, παρόλα αυτά

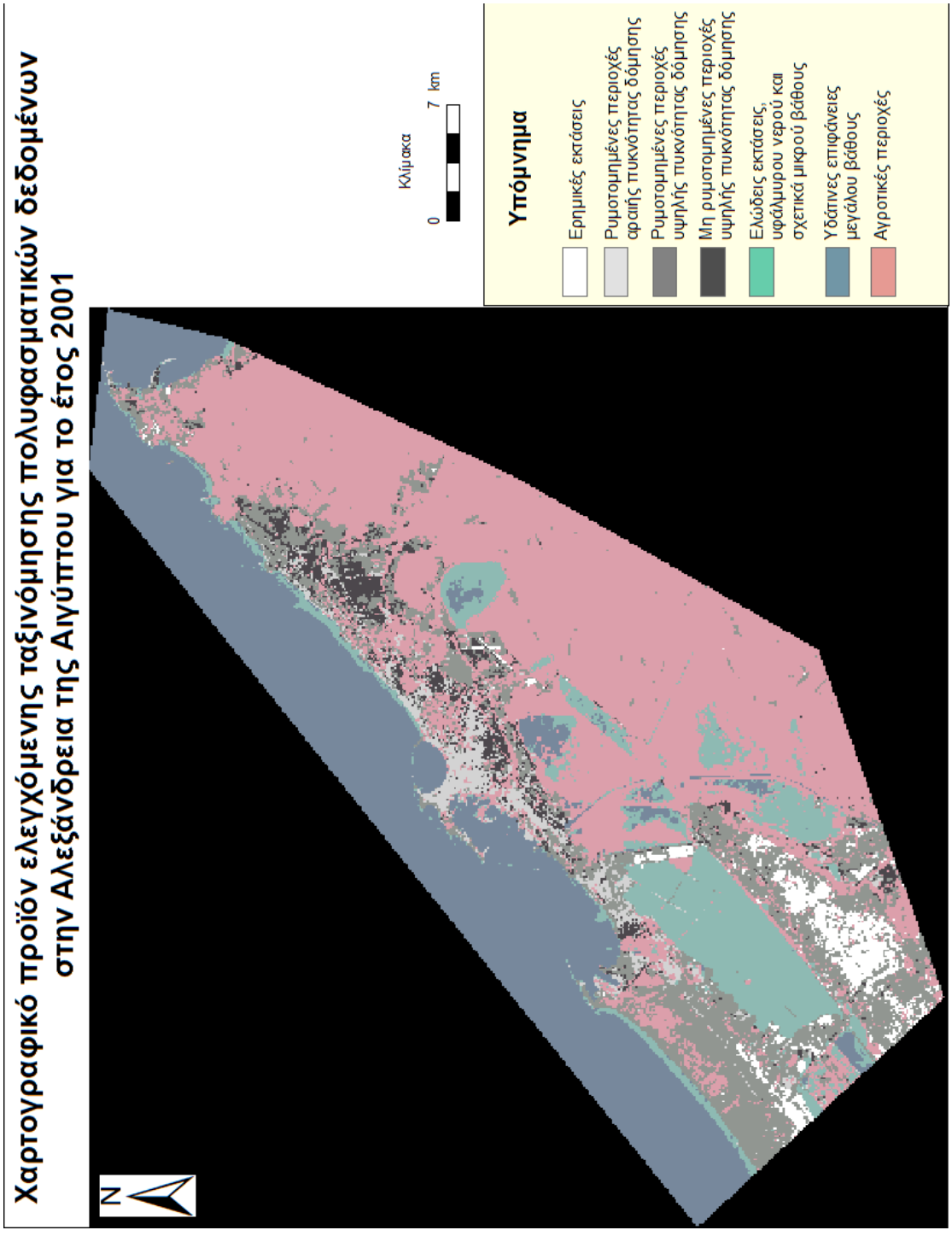
όταν αναφερόμαστε σε υδάτινες μάζες οι παράγοντες επιρροής και μεταβολής της φασματικής απόκρισής τους είναι σημαντικοί. Επεξηγηματικά, οι 2 βασικοί παράγοντες που επιδρούν στη μεταβολή της ανακλαστικότητας των υδάτινων επιφανειών είναι:

- Η αυξημένη περιεκτικότητα του νερού σε φυτικούς μικροοργανισμούς, όπως το φυτοπλαγκτόν.
- Το βάθος του πυθμένα της εκάστοτε υδάτινης επιφάνειας.

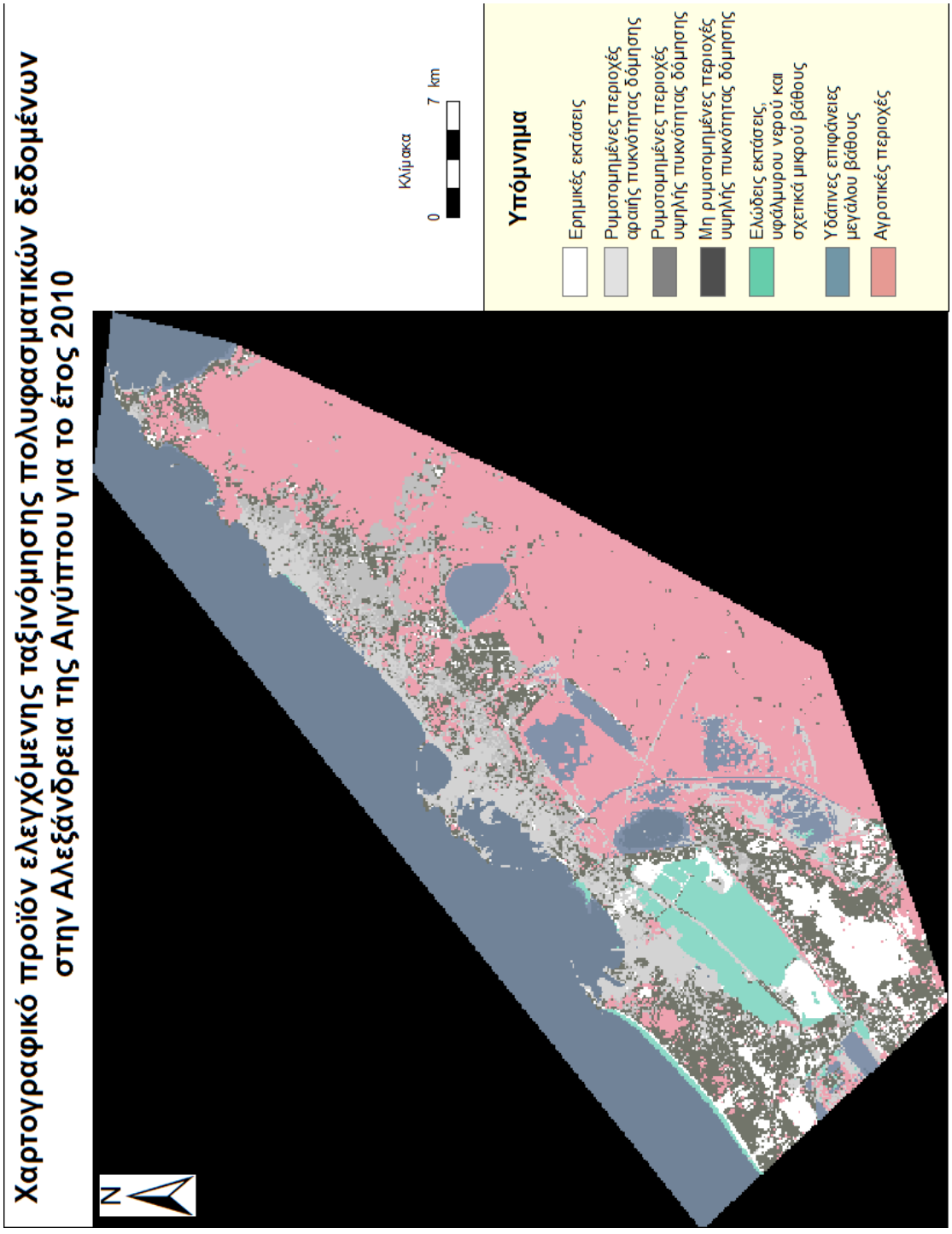
Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης αναπαρίστανται στους χάρτες 9 και 10 από τους οποίους, συγκριτικά, παρατηρούμε ότι μεγαλύτερες αλλαγές υπέστησαν το Νότιο-Δυτικό και Βόρειο-Ανατολικό τμήμα του αστικού ιστού. Στο ΝΔ τμήμα οι μεγαλύτερες αλλαγές, βάσει δεδομένων ανακλαστικότητας αντιστοιχούν στην μετατροπή ορισμένων υδάτινων επιφανειών, κάποιων εκτάσεων βλάστησης και κομμάτι του δομημένου ιστού σε ερημικές εκτάσεις, που ανακλούν μεγάλο ποσοστό της ακτινοβολίας. Εκ παραλλήλου, όσον αφορά στο ΒΑ τμήμα, η σημαντικότερη αλλαγή υφίστατο στις περιοχές υψηλής πυκνότητας δόμησης και χαμηλής ρυμοτομικής ποιότητας, που για το έτος 2010, χαρακτηρίζονται ως περιοχές υψηλής πυκνότητας δόμησης αλλά και υψηλής ρυμοτομικής ποιότητας. Επιπρόσθετα, η τελευταία παρατήρηση ισχύει για αρκετές περιοχές του ιστού, και στην προσπάθειά μας να δούμε καθολικά την περιοχή, μπορούμε να διακρίνουμε το εξής: εντοπίζοντας προσεκτικά και με συστηματικό τρόπο τη μεταβολή της κάλυψης μεταξύ των ετών 2001 και 2010, και συσχετίζοντας τη χωρική κατανομή των αλλαγών, διαφαίνεται μία τάση των περιοχών με υψηλή πυκνότητα δόμησης και χαμηλή ρυμοτομική ποιότητα να μετατοπίζονται όλο και μακρύτερα από το κεντρικό αστικό ιστό, γεγονός που συνάδει και οριοθετεί, εμμέσως, την αστική επέκταση του ιστού και δίνει ενδείξεις για τη λογική επέκτασης και, πιθανώς, της δημιουργίας αστικών ζωνών σε μετέπειτα στάδιο, για το χρονικό διάστημα 2001-2010.

Τέλος, όσον αφορά στο φίλτρο γενίκευσης, που χρησιμοποιήθηκε στην μεθοδολογία, βασικός του στόχος είναι η ομαδοποίηση ψηφίδων και η απόδοση τιμής βάσει προτεραιότητας, που έχει οριστεί στις ομάδες της ταξινόμησης. Αυτό με τη σειρά του έχει ως πρακτική έκφανση την αύξηση του μεγέθους των ψηφίδων της εικόνας και κατ'επέκταση τη μείωση του συνολικού τους πλήθους λόγω ομαδοποίησης των ψηφίδων. Επιπροσθέτως, η λογική λειτουργίας του φίλτρου συνοψίζεται στο εξής: Η εικόνα εισόδου διαιρείται σε παράθυρα, που παράγουν ένα

μόνο εικονοστοιχείο, στην εικόνα εξόδου, το οποίο και αντανακλά την τιμή πλειοψηφίας του παραθύρου. Η προτεραιότητα τάξης-ομάδας δίνει τη δυνατότητα να διατηρήσουμε, εμμέσως, ορισμένα χαρακτηριστικά στην εικόνα εξόδου, σχετικά με τις εμφανιζόμενες κατηγορίες χρήσεων/κάλυψης γης.



Χάρτης 9 (Πηγή: Χαρτογραφική Επιμέλεια ερευνητή 2012)



Χάρτης 10 (Πηγή: Χαρτογραφική Επιμέλεια ερευνητή 2012)

Κεφάλαιο 3. Συστήματα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος

3.1.1 Γενικά

Ένα σύστημα Ραντάρ (Radio Detection and Ranging) λειτουργεί στο τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που εντοπίζονται τα φασματικά κανάλια των ραδιοφωνικών κυμάτων και των μικροκυμάτων (220 MHz – 40 GHz) και ανιχνεύει την ανακλώμενη και εκπεμπόμενη ακτινοβολία από την επιφάνεια της Γης. Γενικά τα συστήματα Ραντάρ αποτελούν τα ενεργά δορυφορικά συστήματα χρησιμοποιούν τη μικροκυματική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που εκπέμπεται από μια κεραία μεταφερόμενη είτε από αεροσκάφος είτε από δορυφόρο, για να ακτινοβολούν την επιφάνεια της γης και να μετρούν το μέγεθος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Επομένως η θέση των χαρακτηριστικών πάνω στην εικόνα καταγράφεται με βάση τον χρόνο μεταβίβασης και επιστροφής της ακτινοβολίας. Λόγω όλης αυτής της διαδικασίας τους καταναλώνουν πολύ ενέργεια και για αυτό τον λόγο η λειτουργία τους δεν είναι συνεχής. Σε αντίθεση, τα παθητικά συστήματα απλά καταγράφουν την ενέργεια που εκπέμπεται από τη γήινη επιφάνεια σε διαφορετικά μήκη κύματος.

Επίσης, 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 (Π. Κουρκούλη, 2010). Αξιοσημείωτη είναι και η ύπαρξη των εικονοληπτικών συστημάτων Ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar, SAR) τα οποία συνθέτουν, τεχνητά, κεραίες ιδιαίτερα μεγάλου μήκους εκμεταλλευόμενα την κίνηση του δορυφόρου και στηριζόμενα στην αρχή του φαινομένου Doppler, με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας στην διεύθυνση των αζιμούθιων (C.Wiley, 1985) .

Συνήθως η παρατήρηση της επιφάνειας πραγματοποιείται από αεροσκάφος (airborne) ή δορυφόρο (spaceborne) (Π. Κουρκούλη, 2010). Το πρώτο διαστημικό σύστημα SAR που τέθηκε σε τροχιά είχε εγκατασταθεί από την NASA στον γεωστατικό δορυφόρο SEASAT το 1978 και λειτούργησε με διάρκεια περίπου έξι εβδομάδων (Lame & Born, 1982). Παρά την σύντομη διάρκεια της αποστολής, συλλέχθηκαν σημαντικά στοιχεία και τέθηκαν οι βάσεις για την κατασκευή εξελιγμένων εικονοληπτικών συστημάτων SAR κατά τη δεκαετία του 1980 και

ιδιαίτερα στα πλαίσια του διαστημικού προγράμματος 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, ERS-2, JERS-1 και RADARSAT-1 παρατηρείται ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την περιοχή των μικροκυματικών αισθητήρων (Π. Κουρκούλη, 2010).

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αποστολή SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (Werner, 2001), αποτέλεσμα 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° B και 56° N (Rodriguez et al. 2005).

Την επιτυχία των προηγούμενων αποστολών ακολούθησε η ανάπτυξη και η θέση σε τροχιά εξελιγμένων δορυφορικών συστημάτων εικονοληπτικών SAR, πρώτα με τους δορυφόρους ENVISAT (Ευρώπη) και ALOS (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 5 παρατίθενται τα χρονικά διαστήματα λειτουργίας των σημαντικότερων δορυφορικών συστημάτων SAR.

Πίνακας 5

Δορυφόρος	Αισθητήρας	Φασματικό κανάλι	Επαναληψιμότητα (ημέρες)	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
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	PALSAR	L	46																			
RADARSAT-2	SAR	C	24																			
TerraSAR-X	SAR	X	11																			
Cosmo-SkyMed‡	SAR	X	16																			

Δεν συμπεριλαμβάνονται σύντομες αποστολές του διαστημικού λεωφορείου της NASA (Space Shuttle Missions).
* Από το 1996 λειτούργησε επιλεκτικά ως βοηθητικό σύστημα κυρίως για εφαρμογές συμβολομετρίας.
† Ύστερα από μερική αστοχία του συστήματος πλοήγησης, αδυναμία χρήσης SAR δεδομένων για εφαρμογές συμβολομετρίας το διάστημα 2000-2002.
‡ Σχηματισμός τεσσάρων δορυφόρων εκ των οποίων έχουν τεθεί σε τροχιά συνολικά τρεις (Ιούνιος 2007, Δεκέμβριος 2007 και Οκτώβριος 2008), με τον τελευταίο να έχει προγραμματισθεί για το 2010.

Πληροφοριακά, τα τελευταία χρόνια σημειώνεται ραγδαία ανάπτυξη στον τομέα των συστημάτων SAR. Συγκεκριμένα, οι έρευνες έχουν αρχίσει να προσανατολίζονται στη σχεδίαση συστημάτων SAR υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας και περίοδο επαναληπτικότητας, έτσι ώστε να εξυπηρετούν τους εκάστοτε επιχειρησιακούς σκοπούς, και λειτουργώντας σχεδόν σε ολόκληρο το εύρος του μικροκυματικού φάσματος, ώστε να καλύπτουν μεγάλη «γκάμα» εφαρμογών. Κατ'επέκταση πρόκληση αποτελεί η δυνατότητα επεξεργασίας των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (real time data).

Δορυφορικό σύστημα ENVISAT:

Το πρόγραμμα ERS αντικαταστάθηκε από το δορυφόρο ENVISAT. Την 1η Μαρτίου του 2002, η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος εκτόξευσε τον ENVISAT, έναν εξελιγμένο δορυφόρο πολικής τροχιάς. Ο δορυφόρος ENVISAT κόστισε στην ESA περίπου 2.3 δισεκατομμύρια δολάρια Αποτελώντας ουσιαστικά συνέχεια των παλαιότερων αποστολών, διαθέτει παρόμοια τεχνικά χαρακτηριστικά με τους προκατόχους του ERS (ESA, 2001). Το βασικότερο πλεονέκτημα αφορά στην δυνατότητα μεταβολής του εύρους της λωρίδας κάλυψης, της χωρικής ανάλυσης καθώς και τις γωνίες παρατήρησης αναλόγως του επιλεγμένου τρόπου λήψης (acquisition mode). Το σύστημα του δορυφόρου ENVISAT εκτός της συμβατικής πόλωσης (VV και HH) (single polarization mode), επιτρέπει και επί πλέον συνδυασμούς (VV/HH, VV/VH και HH/HV) (dual-polarization mode). Στους ακόλουθους πίνακες καταγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου.

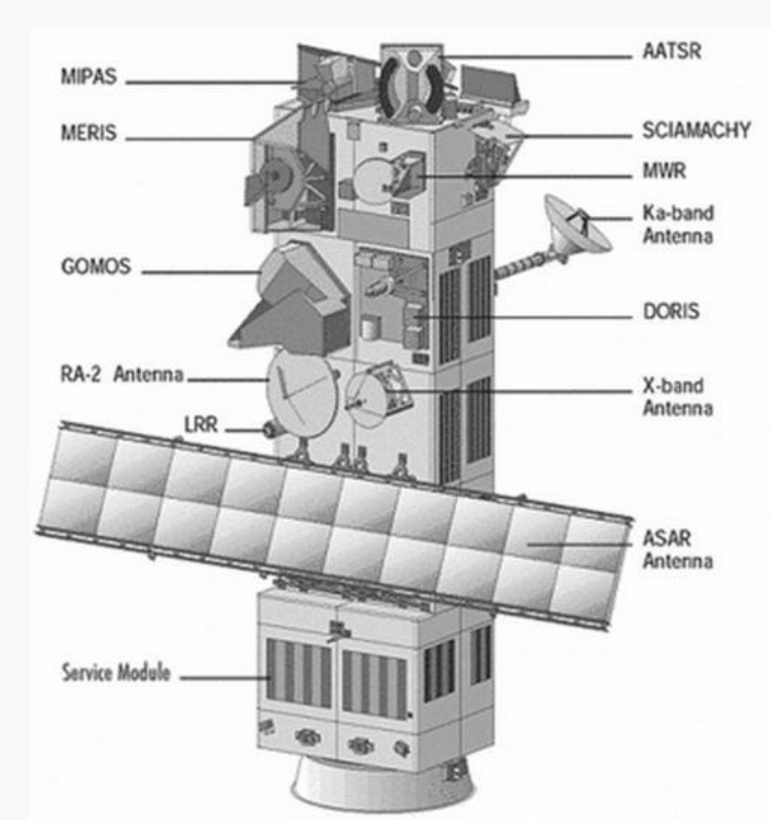
Πίνακας 6

Sponsor:	European Space Agency
Primary SLR Applications:	POD
COSPAR ID:	0200901
NORAD SSC Code:	27386
Ημερομηνία Εκτόξευσης:	1 Μαρτίου 2002
NP Bin Size:	15 sec.
RRA Διάμετρος:	20 cm
Ανακλαστήρες:	9 corner cubes
Τροχιά:	κυκλική, ηλιοσύγχρονη, πολική

Κλίση:	98.54 μοίρες
Perigee:	796 km
Περίοδος:	100 min.
Βάρος:	8211 kg

Πίνακας 7

Έτος Κατασκευής	2002
Μέσο Ύψος Τροχιάς (km)	800
Αισθητήρας	ASAR
Φασματικό Κανάλι	C
Συχνότητα Φέροντος (GHz)	5,331
Μήκος Κύματος(cm)	5,7
Εύρος Γωνίας Παρατήρησης (°)	15,0 - 45,2
Πόλωση	HH, VV, HV, VH
Πλάτος λωρίδας κάλυψης (km)	100-500
Διακριτική Ικανότητα Αποστάσεων Εδάφους (m)	~20
Διακριτική Ικανότητα Κεκλιμένων Αποστάσεων (m)	7,80
Διακριτική Ικανότητα Αζιμούθιου (m)	4,04
Επαναληπτικότητα (ημέρες)	35



Εικόνα 4: Δομή Δορυφόρου ENVISAT

Τα όργανα καταγραφής με τα οποία είναι εξοπλισμένος ο δορυφόρος ENVISAT είναι τα ακόλουθα:

- Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR). Το όργανο αυτό παράγει της υψηλής ποιότητας εικόνες στο μικροκυματικό τμήμα του φάσματος, για τη μελέτη και τη παρακολούθηση της Γης σε θέματα φυσικών καταστροφών, αλλαγής στης χρήσεις γης, τοπογραφικών χαρτογραφήσεων, γεωλογίας. Επίσης, λειτουργεί στην φασματική ζώνη C και εξασφαλίζει τη συνέχεια του ERS - 1/2

- Advanced Along-Track Scanning Radiometer (AATSR). Αποτελεί συνέχεια του οργάνου ATSR των ERS για την καταγραφή των θερμοκρασιών στην επιφάνεια της θάλασσας.

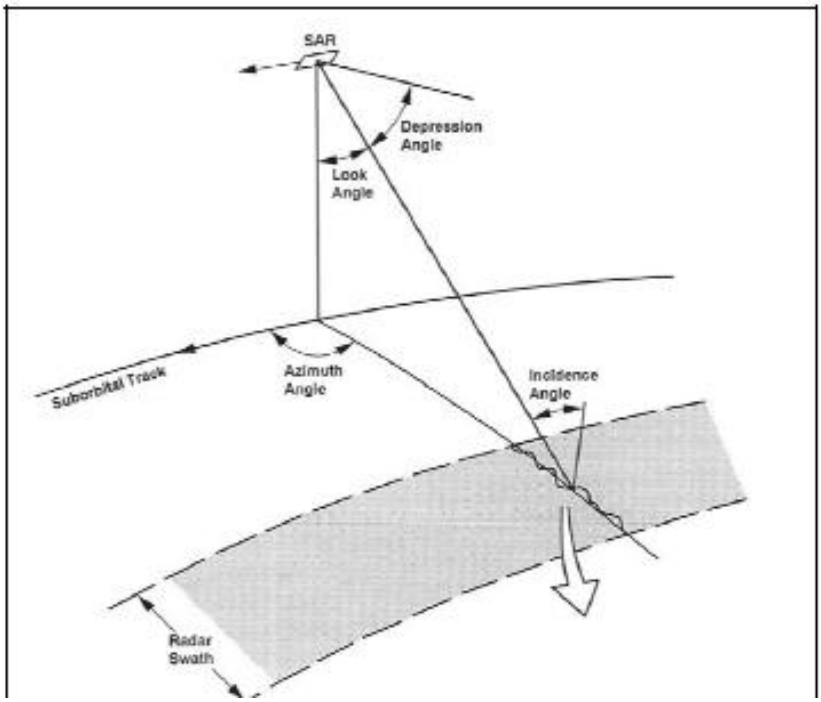
- Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite (DORIS). Χρησιμεύει για τον εντοπισμό του δορυφόρου στο διάστημα επιτρέποντας τη ρύθμιση της θέσης του.

- Global Ozone monitoring by Occultation of Stars (GOMOS). Το συγκεκριμένο όργανο κάνει μετρήσεις του όζοντος και άλλων αερίων της ατμόσφαιρας σε υψόμετρα 20-100 km πάνω από την επιφάνεια της Γης.
- Laser Retro-Reflector (LRR) Προσδιορίζει τον ακριβή καθορισμό της τροχιάς του δορυφόρου.
- Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS): το όργανο αυτό καταγράφει την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και την εκπεμπόμενη ακτινοβολία της γης και τα σύννεφα στο ορατό και υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Επιπλέον, ειδικεύεται σε εφαρμογές καταγραφής της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης στους ωκεανούς και στα παράκτια ύδατα.
- Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS). παρέχει τα προφίλ της ατμοσφαιρικής πίεσης και θερμοκρασίας.
- Radar Altimeter (RA-2). Το συγκεκριμένο όργανο καταγραφεί το ύψος των κυμάτων, την ταχύτητα των ανέμων, την αποτύπωση της τοπογραφίας της γης, της θάλασσας και των πάγων.
- Microwave Radiometer (MWR). Αποτυπώνει την περιεκτικότητα των νεφών σε υγρασία και την ποσότητα των ατμοσφαιρικών υδρατμών.
- Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography (SCIAMACHY). Αποτυπώνει την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε αέρια και αερολύματα μέσω της ανακλώμενης και της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Αποτελεί μία βελτιωμένη εκδοχή του οργάνου GOME του ERS-2. (https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat, 22/3/12)

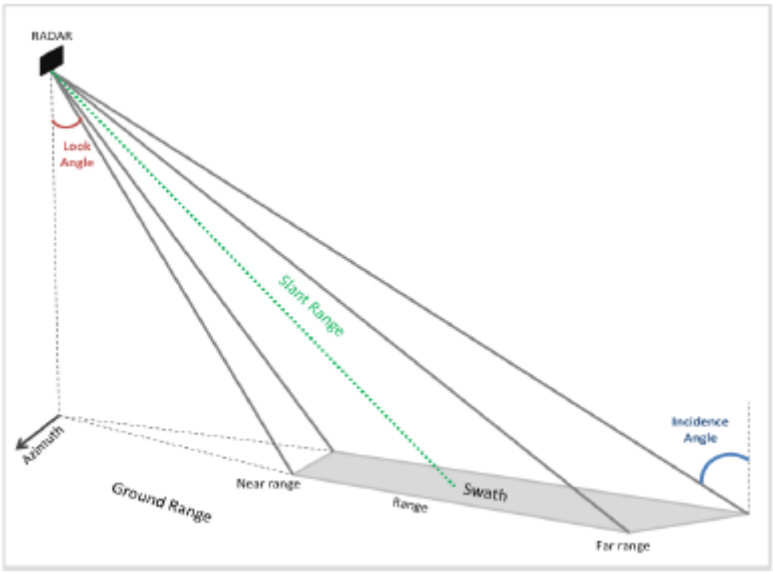
3.1.2 Γεωμετρία εικονοληψίας συστημάτων SAR

Τα Ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (**S**ynthetic **A**perture **R**adar), 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), είτε κατά την ανοδική (Νότο προς Βορρά). Η διεύθυνση κατά την οποία ένα εικονοληπτικό 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 διεύθυνση στο έδαφος καλείται γωνία παρατήρησης (look angle). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η γωνία παρατήρησης, επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ένταση της οπισθοσκέδασης από τους «στόχους» που βρίσκονται στην γήινη επιφάνεια για αυτό και θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την λήψη των στιγμιοτύπων από το όργανο καταγραφής (Π. Κουρκούλη, 2010).

Επίσης, όσον αφορά στα συστήματα Ραντάρ, κάθε "στιγμή" σαρώνεται μια περιοχή της επιφάνειας της Γης η οποία και καλείται «ίχνος κεραίας» (antenna footprint) και η οποία έχει συγκεκριμένο πλάτος (swath). 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 & Σχήμα 3).



Σχήμα 2: Γεωμετρία εικονοληπτικού συστήματος SAR



Σχήμα 3: Γεωμετρία εικονοληπτικού συστήματος SAR (Τροποποιημένο από Μερτίκας 1999; Fletcher,2007 PartA)

Οι παλμοί εκπέμπονται με μια σταθερή ταχύτητα και με σταθερή συχνότητα επανάληψης (PRF), σε εύρος συχνοτήτων MHz-GHz, ώστε να μπορούν να φτάσουν τους στόχους-αντικείμενα που βρίσκονται στην επιφάνεια της Γης. Η συχνότητα εξαρτάται από την πλατφόρμα που χρησιμοποιεί το Ραντάρ, καθώς, επίσης, και από

τις εφαρμογές για τις οποίες είναι κατασκευασμένος ο εκάστοτε δορυφόρος. Οι διάφορες συχνότητες τυπικά αναφέρονται στην συχνότητα την οποία έχει κάθε φασματικό κανάλι.

Πίνακας 8

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, που απαιτείται για να διανύσει το σήμα του ραντάρ την απόσταση από το δορυφόρο στη γη και αντιστρόφως, 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 οπισθοσκεδαζόμενο σήμα είναι σύνθετο. Ένα σύστημα Ραντάρ λειτουργεί συνεκτικά όταν καταγράφεται τόσο το πραγματικό (real) όσο και το φανταστικό (imaginary) κανάλι της ηχούς (Π.Κουρκούλη, 2010). Τα δεδομένα μπορούν να αναπαρασταθούν είτε ως IQ (μιγαδικός αριθμός) ή ως πραγματικός αριθμός.

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

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

Η λαμβανόμενη ακτινοβολία *Pr* εξαρτάται από την εκπεμπόμενη *Pt* και διαβαθμίζεται από την α) απόσταση μεταξύ του Ραντάρ και του στόχου *R*, το κέρδος της κεραίας *G*, την ενεργή επιφάνεια της κεραίας *Ae* και την ενεργή διατομή ραντάρ

(RCS) του αντικειμένου (*σ)*, η οποία είναι η μετρούμενη ποσότητα του στόχου και ορίζεται, θεωρητικά, μόνο για σημειακά 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. Ο υπολογισμός της φάσης προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$\varphi = (4\pi/\lambda)R + \Phi_{sc}$$

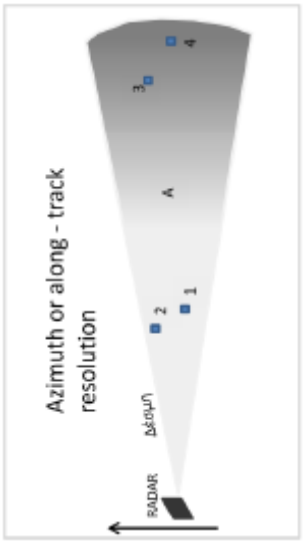
όπου λ το μήκος κύματος, R η απόσταση μεταξύ του Ραντάρ και του στόχου και Φsc η παράμετρος που περιλαμβάνει τον όρο της φάσης, ο οποίος εισάγεται από το αντικείμενο – στόχο. Η πόλωση του εκπεμπόμενου παλμού επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της οπισθοσκέδασης ενός στόχου. Η λήψη εικόνων παράλληλης πόλωσης, 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. Επιπλέον, ως διαχωριστική ικανότητα ή χωρική ανάλυση ενός συστήματος SAR ορίζεται η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο φυσικών αντικειμένων ίσης ανακλαστικότητας, που δύναται να εμφανισθούν μεμονωμένα σε απεικονίσεις Ραντάρ, και εξαρτάται:

i. από την γεωμετρία του αισθητήρα,
i. τις ιδιότητές της μικροκυματικής ακτινοβολίας, καθώς επίσης και
ii. 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, πρόβλημα το οποίο ενδέχεται να προκύψει, εάν ο αισθητήρας λάμβανε και ανακλούσε ακτινοβολία στη διεύθυνση του ναδίρ. 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 ειδών, 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 αζιμουθίου ενός συστήματος Ραντάρ είναι ανάλογη με το μήκος κύματος και με την απόσταση των κεκλιμένων αποστάσεων, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη στην διεύθυνση της κίνησης του δορυφόρου. Θεωρώντας ότι η κεραία δεν μπορεί να είναι αρκετά μεγάλου μήκους, έτσι και η διακριτική ικανότητα στο αζιμούθιο είναι πολύ μικρή. Με αυτό τον τρόπο συντίθεται μία κεραία Ραντάρ και αυτή είναι η αρχή στην οποία στηρίζεται ένα εικονοληπτικό συνθετικό σύστημα Ραντάρ (GAMMA Documentation, 2006).



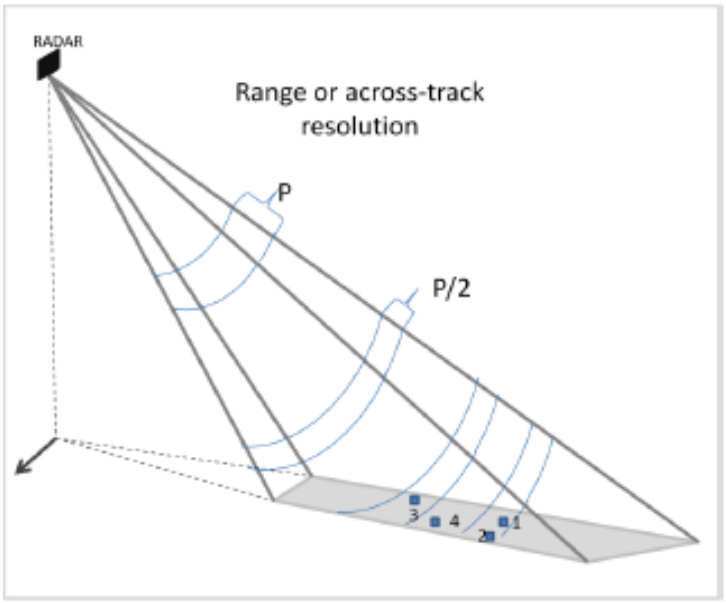
Εικόνα 5: Χωρική ανάλυση εικονοληπτικού συστήματος SAR- Κατά μήκος
(Τροποποιημένο από Γ. Μπενέκος, 2012)

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 οπισθοσκέδασής 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 πληρείται η επόμενη συνθήκη:

$$R > \tau\, c / 2$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός και τ 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).



Εικόνα 6:Χωρική ανάλυση εικονοληπτικού συστήματος SAR- Κατά πλάτος
(Τροποποιημένο από Γ. Μπενέκος, 2012)

3.1.3 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.

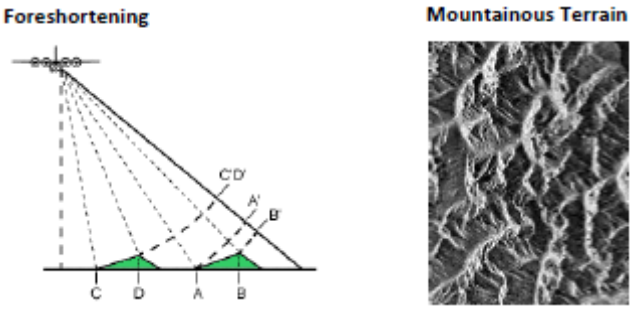
Τα δεδομένα μιας SAR απεικόνισης είναι ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων, οι οποίες καθορίζονται από την ισχύ του σήματος οπισθοσκέδασης ενός αντικειμένου. Η ισχύς του σήματος και κατά συνέπεια η ψηφιακή τιμή ενός εικονοστοιχείου εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας (τοπογραφία, 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 στην περίπτωση της λεγόμενης «αναστροφής» (layover), τη σμίκρυνση (foreshortening), την επιμήκυνση (lengthening) και τη σκίαση (shadow).



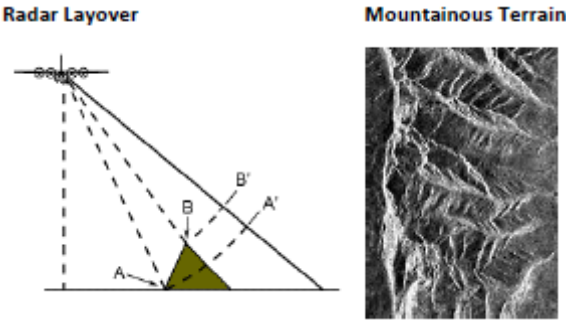
Εικόνα 7: Παραδείγματα γεωμετρικής παραμόρφωσης, σκίασης και αναστροφής αντίστοιχα

Το φαινόμενο της σμίκρυνσης (foreshortening): προκαλεί τη συμπίεση της εικόνας σε διεύθυνση εγκάρσια στο ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου και έχει ως αποτέλεσμα οι ίσες επιφάνειες να απεικονίζονται, οπτικά, ως άνισες κατά την αποτύπωσή τους στο επίπεδο των κεκλιμένων αποφάσεων.



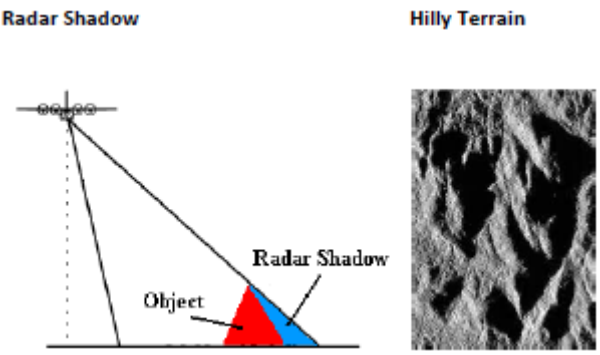
Εικόνα 8: γραφική αναπαράσταση του φαινομένου της σμίκρυνσης (αριστερά) και οπτικοποίηση του φαινομένου σμίκρυνσης των επιφανειακών χαρακτηριστικών σε περιοχή έντονου αναγλύφου (δεξιά) (Γ. Μπενέκος, 2012)

Το φαινόμενο της αναστροφής (layover): αποτελεί μια ακραία περίπτωση του φαινομένου της σμίκρυνσης (foreshortening). Λόγω μεγάλων και απότομων κλίσεων το σήμα σε κάποιες περιπτώσεις φθάνει, πρώτα, στα σημεία της επιφανείας με μεγαλύτερο υψόμετρο(τα οποία αντιστοιχούν σε κορυφές ή κορυφογραμμές). Ως εκ τούτου το σήμα από αυτά τα σημεία οπισθοσκεδάζεται, πρώτα, και φθάνει νωρίτερα, πίσω στον αισθητήρα, ενώ το σήμα που οπισθοσκεδάζεται από τα χαμηλότερα υψομετρικά σημεία, τα οποία αντιστοιχούν στους πρόποδες των ορεινών όγκων, φτάνει, αργότερα, στο δορυφόρο.



Εικόνα 9: γραφική αναπαράσταση του φαινομένου της αναστροφής (αριστερά) και οπτικοποίηση των επιφανειακών χαρακτηριστικών σε περιοχή έντονου αναγλύφου (δεξιά) (Γ. Μπενέκος, 2012)

Το φαινόμενο της σκίασης: παρατηρείται, επί το πλείστον, στις πλαγιές των βουνών, με μεγάλες κλίσεις, οι οποίες δεν είναι «ορατές» στο δορυφόρο και έχουν αντίθετο προσανατολισμό από τη κατεύθυνση λήψης του δορυφόρου, οπότε και δεν αποτυπώνονται στην εικόνα κατά τη διαδικασία λήψης από το αισθητήριο όργανο του δορυφόρου.



Εικόνα 10: γραφική αναπαράσταση του φαινομένου της σκίασης (αριστερά) και οπτικοποίηση των επιφανειακών χαρακτηριστικών σε περιοχή έντονου αναγλύφου (δεξιά) (Τροποποιημένο από Fletcher,2007)

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.

3.2 Τεχνικές παρατήρησης της παραμόρφωσης του εδάφους

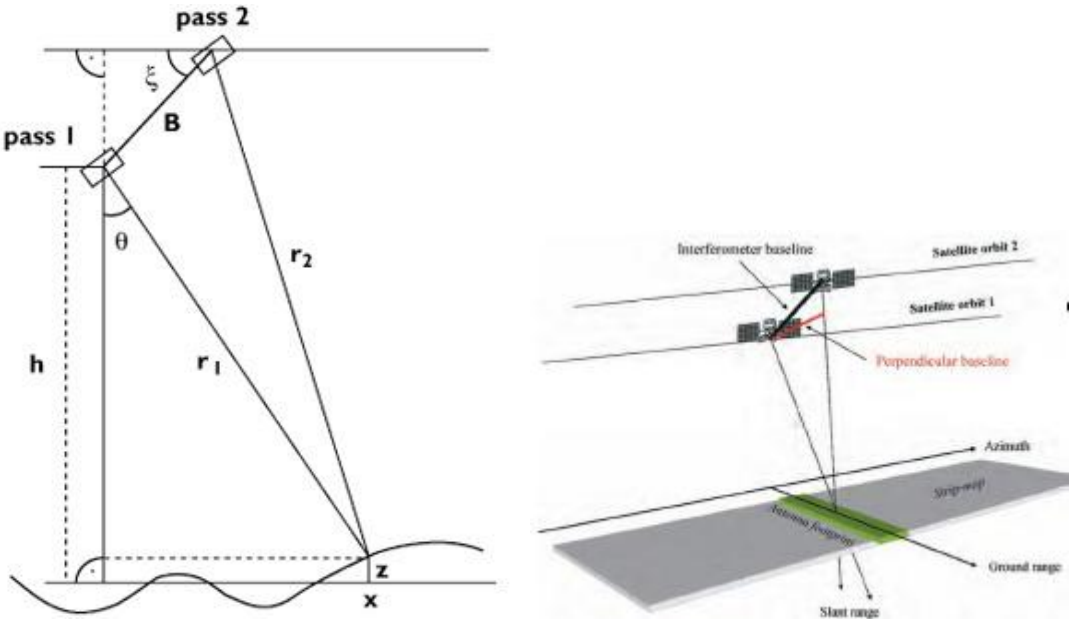
3.2.1 Συμβολομετρία Ραντάρ-Εισαγωγικά

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 συστηματική καταγραφή της παραμόρφωσης του εδάφους (Berardino 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, για παράδειγμα, με γεωτρήσεις υδάτων και πετρελαίου, μεταλλεία και άλλες πολλές ανθρωπογενείς δραστηριότητες.

Η συμβολομετρία Ραντάρ διακρίνεται σε διάφορα είδη τα οποία διαφοροποιούνται από την διάταξη των κεραιών και την μέθοδο λήψης των απεικονίσεων. Συγκεκριμένα, έχουμε α) την 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 (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, εστιάζοντας στην δυνατότητα να παράγουμε υψηλής ανάλυσης ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου (DEM) μέσω της συμβολομετρίας InSAR (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.

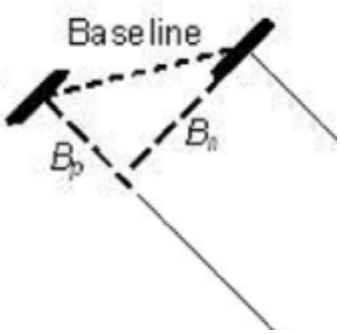
3.2.2 Βασικές αρχές της Συμβολομετρίας Ραντάρ

Στα πλαίσια της ανάλυσης γύρω από τα συστήματα SAR έχουν ορισθεί κάποιες βασικές έννοιες οι οποίες και αναφέρονται σε χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών. Αρχικά, βασικός παράγοντας σε ένα σύστημα SAR αποτελεί η απόσταση μεταξύ των δύο αισθητήρων οι οποίοι παρατηρούν την ίδια περιοχή μελέτης από δύο ελαφρώς διαφορετικές θέσεις στο διάστημα και η οποία, βιβλιογραφικώς, αναφέρεται ως άνυσμα βάσης (baseline) και συμβολίζεται συνήθως με B, όπως και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4).



Σχήμα 4: Δυσδιάσταση απεικόνιση της γεωμετρίας SAR (Τροποποιημένο από Fletcher, 2007)

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 Bn) και στην εγκάρσια συνιστώσα (Perpendicular Baseline ή Bp) πράγμα το οποίο βλέπουμε και στην ακόλουθη εικόνα 10.



Εικόνα 10

Πολύ βασικό και σημαντικό ρόλο στην καταλληλότητα ενός ζεύγους συμβολομετρίας SAR διαδραματίζει η εγκάρσια συνιστώσα του ανύσματος βάσης (GAMMA Documentation, 2006) η οποία ουσιαστικά αποτελεί την προβολή της δεύτερης τροχιάς πάνω στην πρώτη.

Συνεχίζοντας, 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 διπλής κατεύθυνσης διαδρομή του σήματος μεταξύ του Ραντάρ και του στόχου. Η φάση φ του σήματος ενός Ραντάρ εκφράζεται μαθηματικά ως:

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

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 R1 και R2 αντίστοιχα, τότε η διαφορά φάσης είναι:

$$\phi = \Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda}(R_2 - R_1) + \Delta\varphi_{scatter} + \Delta\varphi_{delay}$$

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. Αναλυτικότερα, το συμβολογράφημα είναι μία σύνθετη εικόνα η οποία έχει προέλθει από την εγγραφή δύο ή περισσοτέρων SAR απεικονίσεων (Π.Κουρκούλη, 2010). Επιπλέον, όσον αφοράς στην ποιότητα της συμβολομετρικής φάσης, που αναπαριστά το εκάστοτε συμβολογράφημα, αυτή εξαρτάται από την συνάφεια (coherence), δηλαδή το βαθμό συσχετισμού 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 1 y , 2 y τα εικονοστοιχεία των δύο SAR απεικονίσεων και $E\{.\}$ ο χωρικός μέσος όρος. Η ισχύς και η φάση του συμβολογραφήματος αναφέρονται γενικά στο βαθμό συνάφειας και στη συμβολομετρική φάση (InSAR) αντίστοιχα. Επίσης, 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.

Τώρα σχετικά με την συμβολομετρική φάση οι τιμές που μπορεί να πάρει κυμαίνονται μεταξύ 0 και 2π, οπότε και 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, παραθέτεται η παρακάτω μαθηματική εξίσωση :

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

όπου φ_{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

$n*2\pi$: παράγοντας του «ξετυλίγματος» της φάσης (phase unwrapping)

Ο όρος «επίπεδη Γη» εκφράζει τη φάση εξαιτίας της καμπυλότητας της Γης, η οποία προκαλεί μεταβολές της γωνίας παρατήρησης κατά μήκος της διεύθυνσης των αποστάσεων. Ο όρος της τοπογραφίας σχετίζεται άμεσα με το μήκος της κάθετης συνιστώσας Bp, αφού η αύξησή της οδηγεί, συνήθως, στην παρουσία υπολειμματικής τοπογραφικής φάσης στα διαφορικά συμβολογραφήματα, (Φαινόμενο στερεοπαρατήρησης) Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο υπολογισμός της φάσης λόγω τοπογραφίας πραγματοποιείται, είτε με προσομοίωση της φάσης βάσει ενός υπάρχοντος DEM και των τροχιακών δεδομένων, είτε από, κατάλληλα, επιλεγμένες ανεξάρτητες SAR απεικονίσεις. Ο όρος της φάσης των ατμοσφαιρικών επιδράσεων, 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 (Π.Κουρκούλη, 2010). 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 ακέραιης ασάφειας αντιστοιχεί στο ακέραιο 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).

3.3 Διαφορική Συμβολομετρία Ραντάρ

Η κίνηση του εδάφους, και κατ' επέκταση των υπερκείμενων κατασκευών, είναι το αποτέλεσμα είτε φυσικών διεργασιών ή της ανθρώπινης δραστηριότητας. Τέτοια συνήθη φαινόμενα μετατοπίσεων μπορούν να αποτελέσουν παράγοντες κινδύνου με άμεσες ή έμμεσες επιπτώσεις στις βασικές υποδομές του αστικού ιστού. Βέβαια επειδή υπάρχει μερική συσχέτιση και με το γεωλογικό υπόβαθρο της εκάστοτε περιοχής μελέτης τα φαινόμενα μετατόπισης μπορούν να εμφανιστούν και σε αστικό και σε αγροτικό περιβάλλον. Πολλές από τις διεργασίες που ευθύνονται για την παρουσία εδαφικών μετακινήσεων/μετατοπίσεων 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 αποφυγής 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. Αναλυτικότερα η φάση ή ουσιαστικότερα 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 αιτίων. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι τέτοιου είδους δορυφορικά συστήματα εστιάζουν κυρίως στην αναγνώριση/καταγραφή των κατακόρυφων μετακινήσεων 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). Πληροφοριακά, αναφέρεται ότι ο αριθμός που 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 την παρουσία σφαλμάτων της αποκατεστημένης φάσης (phase unwrapping), τα οποία προκύπτουν λόγω της τραχύτητας του αναγλύφου.

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 (Π.Κουρκούλη, 2010,). Από τη μια, 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.

Από την άλλη, 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). Αναλυτικότερα, η μεθοδολογία αυτού του είδους συμβολομετρίας χαρακτηρίζεται από το γεγονός 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.Ββάση τιν προηγούμενη συνθήκη η 4-pass μεθοδολογία είναι σχεδόν όμοια με την 3-pass, παρόλα αυτά η βασική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στην επεξεργασία χρησιμοποιούνται διαφορετικές γεωμετρίες (όχι εικόνα αναφοράς). Κατά συνέπεια, τα συμβολομετρικά προϊόντα του ενός συμβολομετρικού ζεύγους, χρειάζεται να αποκτήσουν την ίδια γεωμετρία του δεύτερου συμβολομετρικού ζεύγους. Επίσης, η αποκατάσταση της φάσης είναι απαραίτητη για την εξαγωγή έγκυρων αποτελεσμάτων.

Συνεχίζοντας, όσον αφορά στη χρηστικότητα της τεχνικής, το σχετικά χαμηλό κόστος στην εφαρμογή της έχει επιτρέψει μέχρι σήμερα την συμβολή σε ένα μεγάλο

αριθμό επιστημονικών αντικειμένων ένα από τα οποία είναι ο τομέας των οι φυσικών κινδύνων 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, 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 ανυσμάτα βάσης

• ατμοσφαιρικές επιδράσεις λόγω των υδρατμών που υπάρχουν στην τροπόσφαιρα και της πυκνότητας των ηλεκτρονίων που υπάρχουν στην ιονόσφαιρα.

3.4 Συμβολομετρία Σταθερών Ανακλαστήρων

Οι τεχνικές της Διαφορικής Συμβολομετρίας Ραντάρ εφαρμόζονται κυρίως για την ανίχνευση εδαφικών παραμορφώσεων μεγάλης έντασης εδαφικές οι οποίες σχετίζονται, συνήθως, με φαινόμενα, όπως οι σεισμοί, οι ηφαιστειακές εκρήξεις και γενικότερα με το σύνολο των φυσικών διεργασιών που δύναται να προκαλέσουν τέτοιας κλίμακας παραμορφώσεις (Π.Κουρκούλη, 2010). Σε ευρύτερο πλαίσιο, μετακινήσεις μικρότερες των 28 mm, για συστήματα SAR που λειτουργούν στο κανάλι-C της μικροκυματικής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (όπως εκείνα των ERS και ENVISAT), δύσκολα εντοπίζονται λόγω της αδυναμίας διαχωρισμού τους από τις επιμέρους επιδράσεις στις ιδιότητες του σκεδαζόμενου/συλλεγόμενο σήμα. Συγκεκριμένα, οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις αποτελούν τον σημαντικότερο ίσως περιοριστικό παράγοντα στην αναγνώριση μικρότερης κλίμακας μετακινήσεων βάσει των τεχνικών της συμβατικής Διαφορικής Συμβολομετρίας Ραντάρ. Το ίδιο αποτέλεσμα προκύπτει και από το φαινόμενο της χωρικής και χρονικής αποσυσχέτισης που εκφράζονται όπως εξηγήθηκε και παραπάνω με την παράμετρο της συνάφειας δύο ή περισσοτέρων λήψεων. Παρόλα αυτά, 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 παραμορφώσεων, με πολύ μεγάλη ακρίβεια, της τάξης των μερικών χιλιοστών[1], σε μεμονωμένα εδαφικά ή δομικά σημεία και για εκτεταμένες περιοχές, που καλύπτουν κυρίως αστικά ή ημιαστικά περιβάλλοντα (Π. Κουρκούλη, 2010). Επιπλέον όσον αφορά στην ονομασία της τεχνικής αυτής, έχει προσδοθεί, ακριβώς, λόγω της φύσης της συγκεκριμένης τεχνικής, όπου η ανάλυση των δεδομένων και η εκτίμηση των παραμορφώσεων λαμβάνει χώρα, αποκλειστικά, σε συγκεκριμένα σημεία των οποίων τα χαρακτηριστικά οπισθοσκέδασης του σήματος Ραντάρ παραμένουν σταθερά, για αυτό και καλείται τεχνική σταθερών ανακλαστήρων/οπισθοσκεδαστών. Η τεχνική των σταθερών ανακλαστήρων (Persistent 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

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

(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 (Zhao et al., 2009).

Επίσης, η τεχνική χρησιμοποιεί μία ποικίλη βάση δεδομένων, που περιέχει δεδομένα δορυφορικών εικόνων Ραντάρ , τα οποία ανταποκρίνονται σε λήψεις από το 1992 μέχρι και σήμερα, και έχει σκοπό να αναγνωρίσει δίκτυα, από επιφανειακά χαρακτηριστικά, τα οποία σκεδάζουν σταθερά το σήμα του Ραντάρ στο σύνολο όλων των εικόνων (Π.Κουρκούλη, 2010). Οι σταθεροί ανακλαστήρες αντιστοιχούν, κυρίως, σε ανθρωπογενή χαρακτηριστικά, όπως, κτίρια, γέφυρες, φράγματα, υδάτινοι αγωγοί, κεραίες κτλ., καθώς, επίσης και σε φυσικά επιφανειακά χαρακτηριστικά που λειτουργούν ως οπισθοσκεδαστές, όπως τα διάφορα πετρώματα. 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 ετήσιου ρυθμού 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 (Parcharidis et al. 2009).

3.4.1 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 ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 9

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1. Αναδρομική ανάλυση χρησιμοποιώντας το αρχείο δεδομένων του δορυφόρου ERS, από το το 1992	1. Το απότομο ανάγλυφο εμποδίζει το σήμα του Ραντάρ να φτάσει σε περιοχές, οι οποίες χαρακτηρίζονται από "σκίαση" στην διεύθυνση του δορυφόρου (LOS).
2. Ανάλυση πάνω σε μεγάλες εκτάσεις χιλιάδων τετρ.χλμ. σε γρήγορο χρονικό διάστημα	2. Η επαναληψημότητα των δορυφόρων παραμένει αρκετά μικρή για ορισμένες εφαρμογές.
3. Σε μερικές περιοχές μπορεί να υπολογιστεί ταχύτητα παραμόρφωσης με πολύ μεγάλη ακρίβεια (+/- 0.1 χιλιοστά ετησίως)	3. 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.
4. Μετρήσεις στην κατακόρυφη διεύθυνση είναι πολύ πιο ακριβείς από εκείνες των GPS	4. Μεγάλος αριθμός απεικονίσεων SAR (>20 εικόνες)
5. Η πυκνότητα των ανακλαστήρων είναι σαφώς πιο ικανοποιητική σε σχέση με άλλες συμβατικές μεθόδους (>300 σημεία ανά τετρ.χλμ. σε αστικό περιβάλλον)	5. Δεν είναι αναγνωρίσιμες στην SAR εικόνα όλες οι κατασκευές (π.χ. μία γέφυρα ή ένα φράγμα).
6. Ικανότητα εξαγωγής ιστορικής παραμόρφωσης (χρονοσειρά) ενός σημείου-ανακλαστήρα με πολύ μεγάλη ακρίβεια	
7. Η γεωκωδικοποίηση είναι συνήθως καλύτερη από 4-5 μέτρα	

8. Τεχνητοί ανακλαστήρες μπορούν να τοποθετηθούν σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν ανακλαστήρες	

Συνεχίζοντας, θα γίνει μια εκτενέστερη αναφορά στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της τεχνικής. Όσον αφορά στα πλεονεκτήματα, 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, σημαντικό προτέρημα αποτελεί 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 μέτρησης 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, προσδιορίζοντας εκατομμύρια ανακλαστήρες και υπολογίζοντας την εδαφική τους παραμόρφωση, δαπανώντας μόνο ένα μικρό ποσοστό του ποσού που θα απαιτούσαν άλλες τεχνικές όπως διαφορικό GPS, optical 22 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 (Π. Κουρκούλη, 2010). 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, τα μειονεκτήματα και οι περιορισμοί της τεχνικής συνοψίζονται στα εξής: 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 20 απεικονίσεις SAR για πιο ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης, έχει αποδειχθεί 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 (Π.Κουρκούλη, 2010). 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.), ενώ 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).

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, μεγαλύτερη. Τρίτον, ένας άλλος περιορισμός είναι η δυνατότητα μετρήσεων, κυρίως, στη διεύθυνση όρασης του αισθητήρα (LOS – Line Of Sight), όταν το φαινόμενο που θέλουμε να παρακολουθήσουμε έχει εξελίσσεται σε διεύθυνση ίδια με αυτή του δορυφόρου. Τέταρτο μειονέκτημα, είναι η αδυναμία της τεχνικής να υπολογίσει και να καταγράψει ταχείες κινήσεις. Επιπλέον, η διαθεσιμότητα των C-band δορυφόρων, οδηγεί στην αδυναμία της τεχνικής να υπολογίσει τιμές παραμόρφωσης πάνω από 4-5 εκατοστά ετησίως (Π.Κουρκούλη, 2010). 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.

3.4.2. Εφαρμογές της συμβολομετρίας των σταθερών ανακλαστήρων

Η τεχνική των PS εξαρτάται από τις εφαρμογές στις οποίες προτίθεται να εφαρμοστεί. Σε γενικές γραμμές, η επιτυχία της τεχνικής των σταθερών ανακλαστήρων εξαρτάται, πρώτον, από τον αριθμό των εικόνων ραντάρ και την χρονική διασπορά τους, δεύτερον, από την πυκνότητα των σταθερών ανακλαστήρων στην εκάστοτε περιοχή μελέτης, τρίτον, την κίνηση των ανακλαστήρων, πάντα προς την διεύθυνση του δορυφόρου (LOS) και, τέταρτον, στην κάλυψη ή μη της περιοχής από χιόνι, το οποίο επηρεάζει τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους και κατά συνέπεια την ανακλαστικότητα των επιφανειακών χαρακτηριστικών ως προς τη μικροκυματική ακτινοβολία. 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 και η χωρική διακριτική ικανότητα των δεδομένων ραντάρ καθιστούν 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 και μπορούν να παρατηρηθούν σε μηνιαία βάση (Ferretti et al., 2000). Επιπλέον, μπορεί να ανιχνευθεί η παραμόρφωση σε περιαστικές 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 et al., 2005).
- ***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 πρανών και κατολισθήσεων (Colesanti

et al, 2005). Παρόλο που οι περιορισμοί της τεχνικής όσον αφορά τις εφαρμογές των κατολισθήσεων είναι ακόμη αυστηροί, η πιθανότητα δημιουργίας πληροφορίας μετακινήσεων πολύ γρήγορα και με μεγάλη ακρίβεια στην ταχύτητα της παραμόρφωσης, χρησιμοποιώντας ιστορικά αρχεία δεδομένων, ανοίγει νέους ορίζοντες στην δημιουργία θεματικών χαρτών με εστίαση στην παραμόρφωση που οφείλεται σε φαινόμενα κατολισθήσεων (Farina et al., 2006). Η τεχνική των PS μπορεί να διαχωρίσει μια περιοχή σε ασταθή και σταθερά πρανή. 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 αποδεικτικό στοιχείο σε δίκες.

- ***Ρήγματα και ηφαίστεια*** – 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 (Π. Κουρκούλη, 2010). 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 et al., 2004).

- ***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. Δεδομένα και Προτεινόμενη μεθοδολογία επεξεργασίας

4.1 Δεδομένα SAR απεικονίσεων

Η επιτυχία της συμβολομετρικής επεξεργασίας εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την ποιότητα των SAR δεδομένων, όπως αυτή ορίζεται κυρίως από την σταθερότητα της συχνότητας Doppler μεταξύ των λήψεων. Εξαιρετικά κρίσιμη θεωρείται η επιλογή των καταλληλότερων SAR απεικονίσεων για την συγκεκριμένη πάντα εφαρμογή. Τα κριτήρια επιλογής αφορούν κατά κύριο λόγω τον τύπο του SAR αισθητήρα, την διαθεσιμότητα των δεδομένων, την χωρική και χρονική κατανομή του ανύσματος βάσης, τα χαρακτηριστικά του αναγλύφου καθώς και την κατάσταση της ατμόσφαιρας κατά την λήψη (Hanssen, 2001).

Στα πλαίσια της συγκεκριμένη μελέτης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ASAR του δορυφόρου ENVISAT. Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν, αποτελούν εικόνες αρχείου οι οποίες παρέχονται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (European Space Agency- ESA) . Η αναζήτηση και η απόκτηση των εικόνων, πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού EOLi (http://earth.esa.int/EOLi/EOLi.html) και καλύπτουν, μερικώς, τη δυτική περιοχή του Δέλτα του Νείλου (Σχήμα 5.1), και την ευρύτερη περιοχή της πόλης της Αλεξάνδρειας. Συνολικά, επιλέχθηκαν 40 SAR εικόνες από τον δορυφόρο ENVISAT (Πίνακας 10), καλύπτοντας αντίστοιχα το χρονικό διάστημα 2003- 2010 και αποκτήθηκαν μέσω ερευνητικής πρότασης CAT-1.

Πίνακας 10

Α/Α	*ΗΜ/ΝΙΑ*	*ΚΩΔΙΚΟΣ ΛΗΨΗΣ*	*ΤΡΟΧΙΑ*	*ΠΛΑΙΣΙΟ*	*ΠΟΛΩΣΗ*	*ΦΟΡΑ ΛΗΨΗΣ*
1	10/08/2003	07547	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
2	28/12/2003	09551	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
3	01/02/2004	10052	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
4	11/04/2004	11054	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
5	16/05/2004	11555	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
6	20/06/2004	12056	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ

7	25/07/2004	12557	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
8	29/08/2004	13058	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
9	03/10/2004	13559	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
10	12/12/2004	14561	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
11	16/01/2005	15062	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
12	27/03/2005	16064	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
13	01/05/2005	16565	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
14	05/06/2005	17066	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
15	14/08/2005	18068	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
16	18/09/2005	18569	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
17	27/11/2005	19571	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
18	12/03/2006	21074	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
19	16/04/2006	21575	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
20	30/07/2006	23078	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
21	03/09/2006	23579	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
22	08/10/2006	24080	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
23	25/02/2007	26084	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
24	02/12/07	30092	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
25	16/03/2008	31595	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
26	20/04/2008	32096	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
27	25/05/2008	32597	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
28	12/10/2008	34601	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ

29	01/03/2009	36605	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
30	05/04/2009	37106	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
31	19/07/2009	38609	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
32	23/08/2009	39110	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
33	06/12/2009	40613	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
34	10/01/2010	41114	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
35	21/03/2010	42116	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
36	25/04/2010	42617	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
37	04/07/2010	43619	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
38	08/08/2010	44120	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
39	12/09/2010	44621	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ
40	17/10/2010	45122	479	2979	VV	ΚΑΘΟΔΙΚΗ

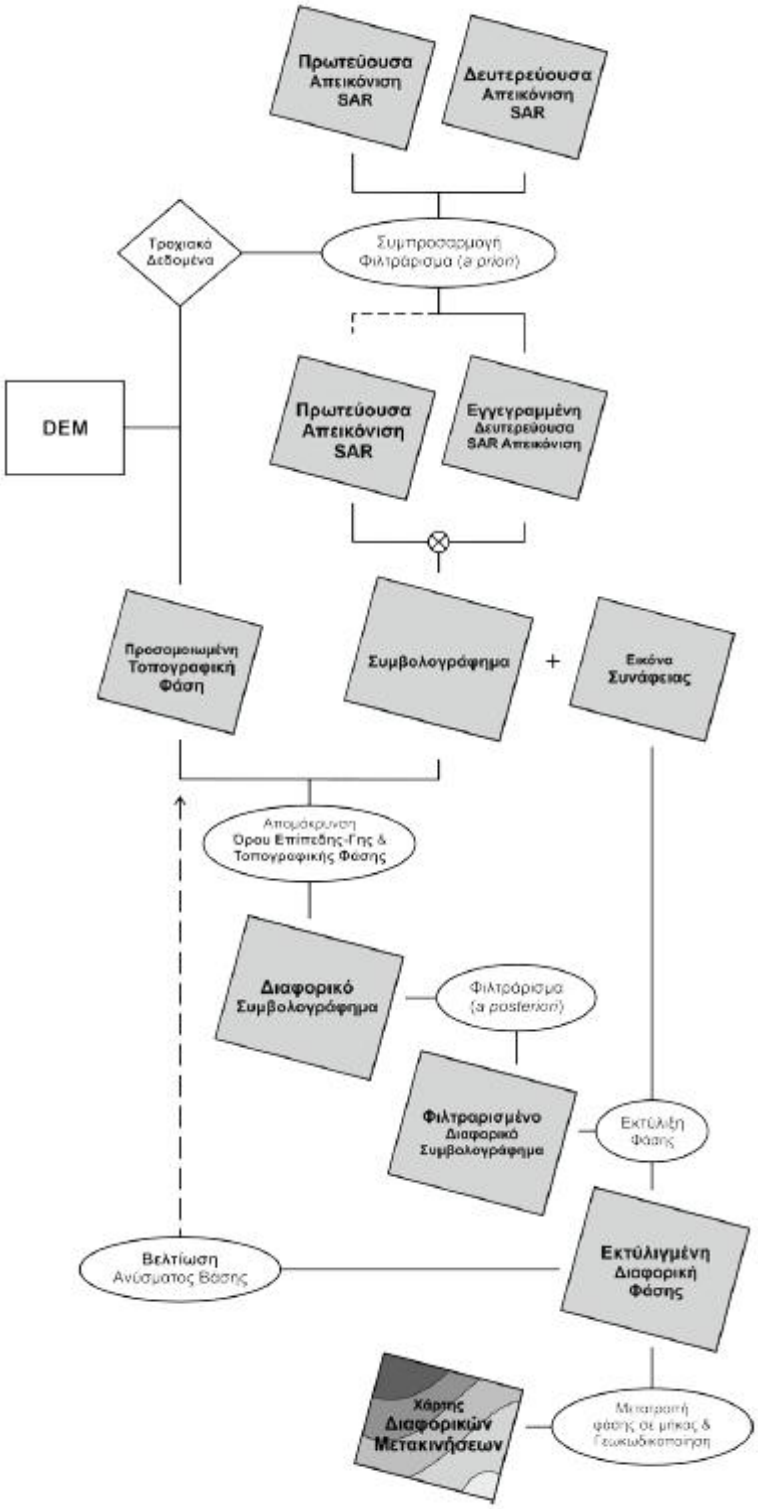
Στο σημείο αυτό κρίνεται θεμιτό, να αναφερθεί, ότι τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη μεθοδολογία ανταποκρίνονται σε SLC (Single Look Complex) απεικονίσεις (πλάτος και φάση σήματος οπισθοσκέδασης), καθοδικής τροχιάς, πρωϊνής λήψης (περίπου στις 09:00 π.μ.), κάθετης VV πόλωσης και πλάτους κάλυψης 100 km. Πληροφοριακά, καλό είναι να αναφερθεί ότι οι SLC απεικονίσεις συντίθενται από δυο αρχεία: ένα αρχείο, που περιέχει την πληροφορία της λήψης, δηλαδή τη χωρική κατανομή της ποσότητας της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας, και ένα παραμετρικό αρχείο το οποίο περιέχει τα μετα-δεδομένα (metadata) της εικόνας, καθώς και τις περιγραφικές πληροφορίες για τις συνθήκες της εκάστοτε λήψης. 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). Επίσης, απαραίτητα δεδομένα για την επεξεργασία των δεδομένων Ραντάρ, είναι η τοπογραφία και το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης, τα οποία περιέχονται στο ψηφιακό μοντέλου ανάγλυφου (DEM) 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).

Προχωρώντας, λοιπόν, στο αρχικό στάδιο της επεξεργασίας των εικόνων, πραγματοποιήθηκε η μετατροπή των αρχικών δεδομένων (raw data- SLC) σε εικόνες τύπου SLC και η εισαγωγή των τροχιακών δεδομένων (DORIS) στα παραμετρικά αρχεία των εικόνων, ώστε να ενημερωθούν τα περιγραφικά στοιχεία των εικόνων. 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 (Π.Κουρκούλη, 2010)

4.2 Στάδια Επεξεργασίας Διαφορικής Συμβολομετρίας Ραντάρ

Αρχικά, κρίνεται σκόπιμο, να αναφερθεί ότι η επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων SAR πραγματοποιήθηκε υπό χρήση του λογισμικού GAMMA. Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι μια συλλογή από προγράμματα, που επιτρέπει την επεξεργασία των SAR απεικονίσεων, με απλή συμβολομετρία (InSAR) και διαφορική συμβολομετρία (DInSAR). Το λογισμικό υποστηρίζει το σύνολο της επεξεργασίας από τα αρχικά δεδομένα (raw data) σε προϊόντα προχωρημένης επεξεργασίας, όπως ψηφιακά μοντέλα εδάφους, χάρτες μετατόπισης και χάρτες χρήσεων γης (Gamma Remote Sensing,2011). Επίσης, θα πρέπει να τονισθεί, πως η αξιοπιστία των τελικών αποτελεσμάτων έγκειται αποκλειστικά στην εμπειρία του εκάστοτε ερευνητή καθώς δεν υπάρχει κάποια πρότυπη μεθοδολογία, που να εγγυάται βέλτιστα αποτελέσματα, αντίθετα υπάρχει μόνο ένας γενικός οδηγός, που προσαρμόζεται, κατά περίπτωση, στους στόχους της εκάστοτε μελέτης. Ως εκ τούτου, οι εντολές και η ακολουθία τους, στην οποία στηρίχθηκε η εκπόνηση της επεξεργασίας, έγκειται σχεδόν εξολοκλήρου στην κρίση και την επιλογή του μελετητή. Ακολουθεί γενική περιγραφή των βασικότερων σταδίων επεξεργασίας της Διαφορικής Συμβολομετρίας Ραντάρ καθώς και των κρισιμότερων παραμέτρων που καθορίζουν εν τέλει την ποιότητα και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 5: Στάδια επεξεργασίας της δορυφορικής συμβολομετρίας Ραντάρ (Μ.Φουμέλης, 2009)

4.3 Συμπροσαρμογή SAR Απεικονίσεων

Το κρισιμότερο, ίσως, στάδιο επεξεργασίας της Συμβολομετρίας Ραντάρ αφορά στην συμπροσαρμογή (coregistration) των επί μέρους SAR απεικονίσεων. Η ακρίβεια της συμπροσαρμογής επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία του συνόλου των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας. Κατά τη διαδικασία της συμπροσαρμογής πραγματοποιείται εγγραφή μιας SAR απεικόνισης (δευτερεύουσα απεικόνιση, slave image) σε μία άλλη, που λαμβάνεται, ως αναφορά (κύρια ή πρωτεύουσα απεικόνιση, master image).

Η διαδικασία περιλαμβάνει ουσιαστικά δύο στάδια, πρώτα, την μεταβολή της θέσης κάθε εικονοστοιχείου της δευτερεύουσας εικόνας, βάσει της πρωτεύουσας εικόνας, και ο επαναϋπολογισμός του πλάτους και της φάσης του σήματος για το σύνολο των εικονοστοιχείων στις νέες θέσεις μέσω παρεμβολής (Μ.Φουμέλης, 2009). Στην πράξη, το πρώτο στάδιο της συμπροσαρμογής μπορεί να αναλυθεί σε δύο επί μέρους φάσεις, την κατά προσέγγιση εκτίμηση της μετατόπισης μεταξύ των δύο απεικονίσεων (coarse co-registration) με ακρίβεια της τάξεως μερικών εικονοστοιχείων και την ακριβή συμπροσαρμογή (fine co-registration) σε επίπεδο υπο-εικονοστοιχείου. Ο κατά προσέγγιση προσδιορισμός της μετατόπισης μεταξύ των απεικονίσεων πραγματοποιείται, συνήθως, βάσει των τροχιακών δεδομένων, ενώ είναι, επίσης, εφικτή η εκτίμησή της από τις ίδιες τις απεικονίσεις (Small et al., 1993).

Η ακριβής συμπροσαρμογή υλοποιείται λαμβάνοντας υπ' όψιν, ως κριτήρια, ορισμένες παραμέτρους, όπως η συνάφεια, ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio) και οι τοπικές διακυμάνσεις της φάσης. Στην πρώτη περίπτωση, ως βέλτιστη μετατόπιση, καθορίζεται εκείνη που οδηγεί σε υψηλότερα επίπεδα συνάφειας μεταξύ των απεικονίσεων. Εναλλακτικά, εκτιμάται το επίπεδο θορύβου, αποκλειστικά, από τις διακυμάνσεις των τιμών της συμβολομετρικής φάσης (Lin et al., 1992). Η βέλτιστη μετατόπιση, της δευτερεύουσας απεικόνισης, προσδιορίζεται όταν η μέση διακύμανση της συμβολομετρικής φάσης προσεγγίσει την ελάχιστη τιμή της. Στο σύνολο των προσεγγίσεων η εκτίμηση των μετατοπίσεων πραγματοποιείται εντός ενός επιλεγμένου αριθμού παραθύρων κανονικά διατεταγμένων, σε όλο το εύρος των απεικονίσεων (Μ.Φουμέλης, 2009). Κατά την διαδικασία της συμπροσαρμογής υπάρχει αντιστάθμιση μεταξύ του απαιτούμενου χρόνου επεξεργασίας και της ακρίβειας της εφαρμοζόμενης τεχνικής, καθώς αποτελεί το πλέον χρονοβόρο στάδιο της συμβολομετρικής επεξεργασίας. Η ακρίβεια της

συμπροσαρμογής σχετίζεται με τα αναμενόμενα σφάλματα στις τιμές των φάσεων, λόγω της λανθασμένης εγγραφής μεταξύ των απεικονίσεων (Μ.Φουμέλης, 2009). Οι Just & Bamler (1994) απέδειξαν ότι σφάλματα στην διαδικασία συμπροσαρμογής δεν επιφέρουν, απλώς, μετατόπιση της συμβολομετρικής φάσης, αλλά οδηγούν σε τυχαίες διακυμάνσεις της. Σύμφωνα με την παραπάνω μελέτη, ακρίβειες μεγαλύτερες του 1/8 του εικονοστοιχείου δεν επιφέρουν περαιτέρω βελτίωση των αποτελεσμάτων. Τονίζεται παρ' όλα αυτά ότι ακρίβειες καλύτερες του 0,2 του εικονοστοιχείου είναι απαραίτητες προκειμένου να αποτραπεί μείωση της συμβολομετρικής συνάφειας πέραν του 5%.

4.4 Φιλτράρισμα SAR Απεικονίσεων

Είναι ευρέως γνωστό πως η παρουσία θορύβου στην συμβολομετρική φάση οδηγεί σε προβλήματα κατά την εκτύλιξής της, με άμεσες συνέπειες πολλές φορές στην εγκυρότητα και την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Παρόλο που τα διάφορα είδη θορύβου έχουν την ίδια έκφραση στα συμβολογραφήματα, η γενεσιουργός αιτία μπορεί να είναι τελείως διαφορετική, με αποτέλεσμα την ανάγκη προσαρμοσμένης αντιμετώπισής τους (Μ.Φουμέλης, 2009). Λαμβάνοντας υπ' όψιν το παραπάνω γεγονός το φιλτράρισμα των δεδομένων SAR πραγματοποιείται με διαφορετικές τεχνικές στα επί μέρους στάδια της επεξεργασίας. Σημαντικό μέρος της προσπάθειας, λαμβάνει χώρα, στα αρχικά στάδια επεξεργασίας και επικεντρώνεται στο διαχωρισμό μεταξύ σήματος και θορύβου στο πεδίο των συχνοτήτων. Ο μιγαδικός πολλαπλασιασμός των απεικονίσεων κατά την παραγωγή ενός συμβολογραφήματος, αντιστοιχεί ουσιαστικά σε συνέλιξη (convolution) μεταξύ δύο φασμάτων. Κατά την συνέλιξη, το μη επικαλυπτόμενο μέρος του φάσματος μεταξύ των απεικονίσεων, που αντιστοιχούν ουσιαστικά σε θόρυβο, επιδρά σε όλες τις συχνότητες του συμβολογραφήματος (Just & Bamler, 1994). Το εκ των υστέρων φιλτράρισμα των συμβολογραφημάτων για την απομάκρυνση τέτοιου είδους θορύβου δεν είναι πλέον αποτελεσματικό. Κατά αυτή την έννοια το φιλτράρισμα των πρωτογενών SAR απεικονίσεων, πριν την παραγωγή του συμβολογραφήματος, εκ των προτέρων (*a priori*) φιλτράρισμα, αποτελεί την καταλληλότερη προσέγγιση. Το φιλτράρισμα πραγματοποιείται χωριστά στις δύο διευθύνσεις μιας απεικόνισης (Gatelli et al., 1994) για τη διατήρηση του κοινού μέρους του φάσματος των απεικονίσεων (common band filtering).

4.5 Παραγωγή Συμβολογραφήματος

Το συμβολογράφημα προκύπτει από τον μιγαδικό πολλαπλασιασμό έκαστου εικονοστοιχείου της πρωτεύουσας απεικόνισης με το συζυγές εικονοστοιχείο της εγγεγραμμένης δευτερεύουσας απεικόνισης. Παρά το γεγονός, ότι το κύριο ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην τιμή της συμβολομετρικής φάσης (διαφορά φάσης μεταξύ των απεικονίσεων), η τιμή του πλάτους στο μιγαδικό συμβολογράφημα (complex interferogram) περιέχει σημαντική πληροφορία για τον λόγο σήματος προς θόρυβο των παρατηρήσεων (Μ.Φουμέλης, 2009). Στο συγκεκριμένο στάδιο επεξεργασίας υπολογίζεται και απομακρύνεται συνήθως και ο όρος επίπεδης Γης (Geudtner, 1996), με αποτέλεσμα την εξομαλυμένη συμβολομετρική φάση (flattened interferometric phase).

4.6 Παραγωγή Διαφορικού Συμβολογραφήματος

Το συμβολογράφημα που περιλαμβάνει αποκλειστικά την τοπογραφική φάση, προσομοιωμένο βάσει της εκάστοτε συμβολομετρικής γεωμετρίας, με την τελευταία να ορίζεται από τα τροχιακά δεδομένα και το άνυσμα βάσης, αφαιρείται στο συγκεκριμένο στάδιο επεξεργασίας από το εξομαλυμένο συμβολογράφημα. Κατά αυτόν τον τρόπο προκύπτει το διαφορικό συμβολογράφημα με την τιμή της διαφορικής φάσης να εκφράζει τις μεταβολές της απόστασης δορυφόρου-στόχου μεταξύ των λήψεων, συμπεριλαμβανομένων, των όποιων επιδράσεων, από παράγοντες αποσυσχέτισης, αυτών της ατμόσφαιρας και της αβεβαιότητας των τροχιακών δεδομένων (Μ.Φουμέλης, 2009).

4.7 Φιλτράρισμα Διαφορικού Συμβολογραφήματος

Προκειμένου να διευκολυνθεί η μετέπειτα διαδικασία εκτύλιξης της φάσης, εφαρμόζονται φίλτρα για την μείωση του θορύβου, λόγω των φαινομένων αποσυσχέτισης, αλλά και της παρουσίας στιγμάτων στα διαφορικά συμβολογραφήματα. Η μείωση της τυπικής απόκλισης της φάσης επιτυγχάνεται, μέσω εφαρμογής ενός χωρικού φιλτραρίσματος των διαφορικών συμβολογραφημάτων (Li & Goldstein, 1990). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, πιο

αποτελεσματική θεωρείται η εφαρμογή φίλτρων στο πεδίο συχνοτήτων. Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές. Ως επί το πλείστον, αποτελούν φίλτρα μέσου όρου, που επιδρούν στην μιγαδική απεικόνιση και όχι μόνο στο μέτρο. Πληροφοριακά, αναφέρεται ότι η πλέον χρησιμοποιούμενη τεχνική είναι εκείνη του φιλτραρίσματος κατά συχνότητα σε χωρική βάση, που πρότειναν οι Goldstein & Werner (1998). Τέτοιου είδους φίλτρα χαρακτηρίζονται ως προσαρμοσμένα (adaptive), καθώς η συνάρτηση μεταφοράς τους είναι προσαρμοσμένη προς το φάσμα του σήματος. Η ιδέα του προσαρμοσμένου φίλτρου έγκειται στην δυνατότητα μεγιστοποίησης της ισχύος του σήματος προς αυτή του θορύβου, που το συνοδεύει, ανεξάρτητα της μορφής του σήματος, γεγονός που αποτελεί και το βασικό πλεονέκτημα των συγκεκριμένων τεχνικών φιλτραρίσματος (Μ.Φουμέλης, 2009). Η προσαρμογή στην τοπική βαθμίδα της φάσης (local phase gradient) αποτρέπει την εκτεταμένη ομαλοποίηση της φάσης σε περιοχές με υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης, ενώ διατηρεί ταυτόχρονα αναλλοίωτες (περιορισμένο φιλτράρισμα) περιοχές χαμηλής συνάφειας.

4.8 «Εκτύλιξη» Συμβολομετρικής Φάσης

Η εκτύλιξη της φάσης ενός συμβολογραφήματος (phase unwrapping) αποτελεί το πλέον δύσκολο και απαιτητικό στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας. Χαρακτηριστικό πρόβλημα, όσον αφορά στην περάτωση της διαδικασίας, αποτελεί η τραχύτητα του αναγλύφου, καθώς σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο, οι γεωμετρικές παραμορφώσεις των απεικονίσεων καθιστούν τη διαδικασία εκτύλιξης αρκετά περίπλοκη (Μ.Φουμέλης, 2009). Σκοπός της εκτύλιξης της φάσης είναι η ανάκτηση της πληροφορίας των ακέραιων κύκλων (Goldstein et al., 1988), έτσι ώστε η τιμή της φάσης να λαμβάνει τις πραγματικές της τιμές πέρα από το όριο [0,2π). Δεδομένου ότι η φάση του σήματος Ραντάρ δεν είναι συνεχής, για να επιτευχθεί μια αλληλουχία της τιμής της στο σύνολο του συμβολογραφήματος προστίθεται σε κάθε εικονοστοιχείο ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π, ώστε να επανακτηθεί από το παρατηρούμενο μέρος της φάσης η πραγματική τιμή της. Επιπλέον, γνωρίζοντας τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι, με τελείως διαφορετικές προσεγγίσεις, που επιδιώκουν την βέλτιστη επίλυση της ασάφειας της συμβολομετρικής φάσης. Η βασική υπόθεση της πλειονότητας των αλγορίθμων είναι ότι η διαφορά της

εκτυλιγμένης φάσης μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων οφείλει να μην υπερβαίνει τον μισό κύκλο.

Έτσι, η διαδικασία εκτύλιξης απαιτεί την ολοκλήρωση των διαφορών της φάσης λαμβάνοντας υπ' όψιν τους περιορισμούς των μεταβολών της. Ενώ, λοιπόν, αναμένεται η ολοκλήρωση, κατά μήκος της ελάχιστης κυκλικής διαδρομής, να είναι μηδέν, άλματα φάσης (phase jumps) μεγαλύτερά του, λόγω των φαινομένων αναστροφής και σκίασης, οδηγούν σε παρουσία υπολείμματος φάσης (phase residue), δηλαδή σε σφάλμα. Τα αποτελέσματα της ολοκλήρωσης εξαρτώνται, επομένως, από την επιλογή της διαδρομής στα παραπάνω κρίσιμα σημεία (Μ.Φουμέλης, 2009). Τυχαίες διαδρομές ολοκλήρωσης των διαφορών φάσης έχουν συνήθως ως αποτέλεσμα την λανθασμένη εκτύλιξη και κατ' επέκταση την μετάδοση σφαλμάτων στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η έκταση του σφάλματος, αν δηλαδή λαμβάνει τοπικό χαρακτήρα ή διαδίδεται στο σύνολο της επίλυσης, εξαρτάται από τον εκάστοτε αλγόριθμο εκτύλιξης (Ghiglia & Pritt, 1998).

4.9 Βελτίωση Τροχιακών Δεδομένων

Οι αβεβαιότητες στα τροχιακά δεδομένα και η ανάγκη για τον ακριβή υπολογισμό της συμβολομετρικής γεωμετρίας, οδηγούν συχνά σε επανεκτίμηση, βάσει την ίδιων των SAR δεδομένων, του ανύσματος βάσης, με σκοπό την βελτίωση της αρχικής εκτίμησης. Σύμφωνα με τους Small et al. (1996), υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για την βελτίωση της ακρίβειας εκτίμησης του ανύσματος βάσης (baseline refinement). Σε σχεδόν επίπεδες εκτάσεις, η εκτίμηση της εγκάρσιας συνιστώσας του ανύσματος βάσης πραγματοποιείται υπολογίζοντας την τοπική συχνότητα των κροσσών (local fringe frequency) στο συμβολογράφημα (Μ.Φουμέλης, 2009). Μια επαναληπτική, μη γραμμική, μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων διόρθωσης του ανύσματος βάσης, όπως επίσης και του όρου επίπεδης Γης, προτάθηκε από τους Small et al. (1993). Την χρήση τριγωνισμού, ως προς ένα σημείο αναφοράς, στο ελλειψοειδές, σε συνδυασμό με τις ήδη υπολογισμένες, στο στάδιο της συμπροσαρμογής, μετατοπίσεις μεταξύ των απεικονίσεων στη διεύθυνση των αποστάσεων, πρότεινε ο Pasquali (1995).

4.10 Μετατροπή Φάσης

Η εκτυλιγμένη διαφορική συμβολομετρική φάση εκφράζει τις μετακινήσεις κατά μήκος της διεύθυνσης LOS σε ακτίνια. Επίσης, η διαδικασία μετατροπής της φάσης σε μήκος προσδιορίζει, ακριβώς, τη σχέση μεταξύ των παραπάνω ποσοτήτων και αποτελεί μια σχετικά περίπλοκη διαδικασία, λόγω των γεωμετρικών παραμορφώσεων των SAR απεικονίσεων και των μεταβολών του ανύσματος βάσης κατά την διάρκεια των λήψεων. Βάση των παραπάνω, η εξέταση της τιμής του εγκάρσιου ανύσματος βάσης σε κάθε εικονοστοιχείο αποτελεί κρίσιμο σημείο της μετατροπής, όχι μόνο λόγω της εξάρτησης των παρατηρήσεων από το υψόμετρο, αλλά, επίσης, λόγω πιθανής μη παραλληλίας μεταξύ των τροχιών (Μ.Φουμέλης, 2009).

Για την επίτευξη του στόχου αυτού, χρησιμοποιείται κατά κόρον η τεχνική μετατροπής της συμβολομετρικής φάσης (εκτυλιγμένης φάσης),που προτάθηκε από τους Small et al. (1995). Ειδικότερα, η συγκεκριμένη τεχνική προϋποθέτει την βελτίωση της εκτίμησης των τροχιακών παραμέτρων και κατ' επέκταση την γεωμετρία της λήψης, δεδομένα, ωστόσο, τα οποία δύναται να χρησιμοποιηθούν, στη συνέχεια, και για την γεωκωδικοποίηση των αποτελεσμάτων. Με κατάλληλο αριθμό σημείων αναφοράς προσδιορίζεται η μεταβολή της θέσης και του προσανατολισμού του ανύσματος βάσης εντός του συμβολογραφήματος (Μ.Φουμέλης, 2009).

4.11 Γεω-κωδικοποίηση

Κατά την διαδικασία γεω-κωδικοποίησης (geocoding) προσδιορίζονται οι παράμετροι του μετασχηματισμού μεταξύ της γεωμετρίας Ραντάρ και ενός επιλεγμένου γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς. Στο μετασχηματισμό λαμβάνονται υπ' όψιν και οι γεωμετρικές παραμορφώσεις των SAR απεικονίσεων. Για πρακτικούς λόγους χρησιμοποιείται ένα ενδιάμεσο γεωκεντρικό καρτεσιανό σύστημα αναφοράς, στο οποίο ανάγονται οι τροχιές των δορυφόρων, καθώς και το επιλεγμένο ελλειψοειδές. Αξίζει να τονισθεί ότι για την γεω-κωδικοποίηση των αποτελεσμάτων της συμβολομετρίας ακολουθούνται δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις, αναλόγως της διαθεσιμότητας ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου (DEM). Στην περίπτωση που υπάρχει κατάλληλης ακριβείας DEM, όπως και στην περίπτωση της παρούσας μελέτης, ο προσδιορισμός της πραγματικής θέσης καθενός από τα εικονοστοιχεία

στην επιφάνεια, πραγματοποιείται βάσει των τιμών της συχνότητας Doppler και των κεκλιμένων αποστάσεων (Μ.Φουμέλης, 2009). Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας χωρίς τη βοήθεια DEM, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η βελτίωση της εκτίμησης του μήκους του ανύσματος βάσης. Με δεδομένες τις θέσεις των δορυφόρων και την θέση του εκάστοτε εικονοστοιχείου στο διαφορικό συμβολογράφημα (αζιμούθιο και κεκλιμένη απόσταση), υπολογίζεται με άμ εση γεω-κωδικοποίηση η πραγματική θέση στην επιφάνεια, με την πρόσθεση του ανύσματος παρατήρησης στο άνυσμα θέσης του δορυφόρου (Small et al., 1995). Συνήθως για την επακόλουθη παρεμβολή των δεδομένων σε κανονικό κάνναβο χρησιμοποιείται τριγωνισμός ακολουθούμενος από γραμμική παρεμβολή (Delaunay, 1934).

4.12 Σώρευση Διαφορικών Συμβολογραφημάτων (Stacking)

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, η επιτυχία εφαρμογής της διαφορικής συμβολομετρίας καθορίζεται, εκτός των άλλων, και από συγκεκριμένα φυσικά όρια του εκάστοτε συστήματος SAR. Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις χαμηλού ρυθμού παραμορφωτικών κινήσεων, η ανάγκη διεύρυνσης του χρονικού παράθυρου παρατήρησης, ώστε να είναι εφικτή η αναγνώριση του σήματος, οδηγεί, συνήθως, σε ανεπιτυχή αποτελέσματα, λόγω της έκτασης του φαινομένου της χρονικής αποσυσχέτισης. Επίσης, οι ατμοσφαιρικές επιρροές στο σήμα παραμένουν, ωστόσο, ο σημαντικότερος περιοριστικός παράγοντας, είναι λόγω της πρακτικής δυσκολίας αναγνώρισης και απομάκρυνσή τους, από τις παρατηρήσεις. Προκειμένου να ξεπερασθούν τέτοιου είδους ανεπιθύμητες επιδράσεις έχει προταθεί η τεχνική της Σώρευσης (Stacking) Διαφορικών Συμβολογραφημάτων, που στηρίζεται στον υπολογισμό του μέσου όρου της φάσης ενός συνόλου ανεξάρτητων συμβολογραφημάτων στην χρονική διάσταση, για τον περιορισμό ασυσχέτιστων χρονικών διακυμάνσεων της φάσης (Μ.Φουμέλης, 2009) .

Βασική υπόθεση της τεχνικής Σώρευσης Διαφορικών Συμβολογραφημάτων είναι η υψηλή συσχέτιση του μέρους της φάσης, που σχετίζεται με συνεχή παραμορφωτικά φαινόμενα, έναντι των παραγόντων δημιουργίας σφάλματος (ατμοσφαιρική καθυστέρηση, θόρυβος κλπ.), που αποτελούν ουσιαστικά ασυσχέτιστες ποσότητες, μεταξύ των επί μέρους συμβολογραφημάτων. Παρ’ όλο που υπό ορισμένες συνθήκες η εγκυρότητα της παραπάνω υπόθεσης δύναται να αμφισβητηθεί, όπου για παράδειγμα παρατηρείται εξάρτηση των ατμοσφαιρικών

επιδράσεων από το υψόμετρο, παραμένει μια λογική παραδοχή για την πλειοψηφία των περιπτώσεων. Καθώς, λοιπόν, το «πραγματικό» μέρος του σήματος αθροίζεται γραμμικά, οι όροι σφάλματος αυξάνονται με αρκετά χαμηλότερους ρυθμούς, λόγω του ασυσχέτιστου χαρακτήρα τους, με αποτέλεσμα την μειωμένη επίδρασή τους στο σωρευμένο διαφορικό συμβολογράφημα. Κατά συνέπεια, εφόσον, συνδυαστεί επαρκές πλήθος παρατηρήσεων, περιορίζονται σημαντικά οι όροι εισαγωγής σφάλματος, οπότε και είναι πλέον εφικτή η επίτευξη ακριβειών της τάξεως των μερικών χιλιοστών ανά έτος (Zebker et al. 1997), ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα υψηλής συνάφειας, όπως εκείνα των αστικών περιοχών (Tosi et al., 2002).

Στη συνέχεια, κρίνεται αναγκαίο να τονισθεί ότι οι σχετικές παρατηρήσεις μεταβολής φάσης θα πρέπει να εκφράζονται, ως προς ένα κοινό επιλεγμένο σημείο αναφοράς. Τώρα, όσον αφορά στην επιλογή του σημείου αναφοράς, αυτή πραγματοποιείται με αυστηρά κριτήρια, που ορίζονται, τόσο από τις απαιτήσεις ακρίβειας της ίδιας της επεξεργασίας και τα υψηλά επίπεδα συνάφειας, όσο και βάσει των γεωδυναμικών συνθηκών της περιοχής, για το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα, αλλά και των στόχων της εκάστοτε μελέτης (Μ.Φουμέλης, 2009). Θεωρώντας ότι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες στο χρονικό διάστημα μεταξύ των λήψεων παραμένουν σταθερές, η τυπική απόκλιση του ρυθμού μεταβολής της φάση (phase rate) ενός συμβολογραφήματος εκφράζεται ως:

$$\sigma(\dot{\phi}_i) = \sigma(\phi) / dT_i$$

όπου 'φι ο ρυθμός μεταβολής της φάσης ανά εικονοστοιχείο, για το χρονικό διάστημα i dT μεταξύ των λήψεων και φι η τιμή της εκτυλιγμένης φάσης του διαφορικού συμβολογραφήματος.

Αναλυτικότερα, καθώς αυξάνεται το χρονικό διάστημα παρατήρησης, μειώνεται η αβεβαιότητα του εκτιμώμενου ρυθμού για το συγκεκριμένο συμβολογράφημα. Δηλαδή, αυξάνοντας το χρονικό διάστημα παρατήρησης (χρονικό εύρος του συμβολογραφήματος), το τμήμα του σήματος που οφείλεται σε διαφορικές μικρο-μετακινήσεις αυξάνεται αναλογικά των υπόλοιπων επιδράσεων στο σήμα (Μ.Φουμέλης, 2009). Η φάση καθενός από τα διαφορικά συμβολογραφήματα σταθμίζεται (weighted), σύμφωνα με την εξεταζόμενη διάρκεια της παρατήρησης. Ο μέσος γραμμικός ρυθμός μεταβολής της διαφορικής φάσης και κατ'επέκταση της

ταχύτητας μετακίνησης ενός εικονοστοιχείου από το σύνολο των συμβολογραφημάτων δίνεται από την σχέση:

$$\dot{\phi}_i = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \frac{\sum w_i \cdot \phi_i}{\sum w_i} \qquad (\text{σε rad/yr}),$$

όπου w_i , το βάρος έκαστου συμβολογραφήματος στην διαδικασία στάθμισης.

Συνήθως τα βάρη προέρχονται από τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα των συμβολογραφημάτων:

$$w_i = \Delta T_i^2$$

Η τυπική απόκλιση σ(φ) του εκτιμώμενου ρυθμού μεταβολής υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση,

$$\sigma(\dot{\phi}) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N} (w_i^2 \cdot (\phi_i / \Delta T_i - \dot{\phi})^2)}{\sum_{i=1}^{N} w_i^2}}$$

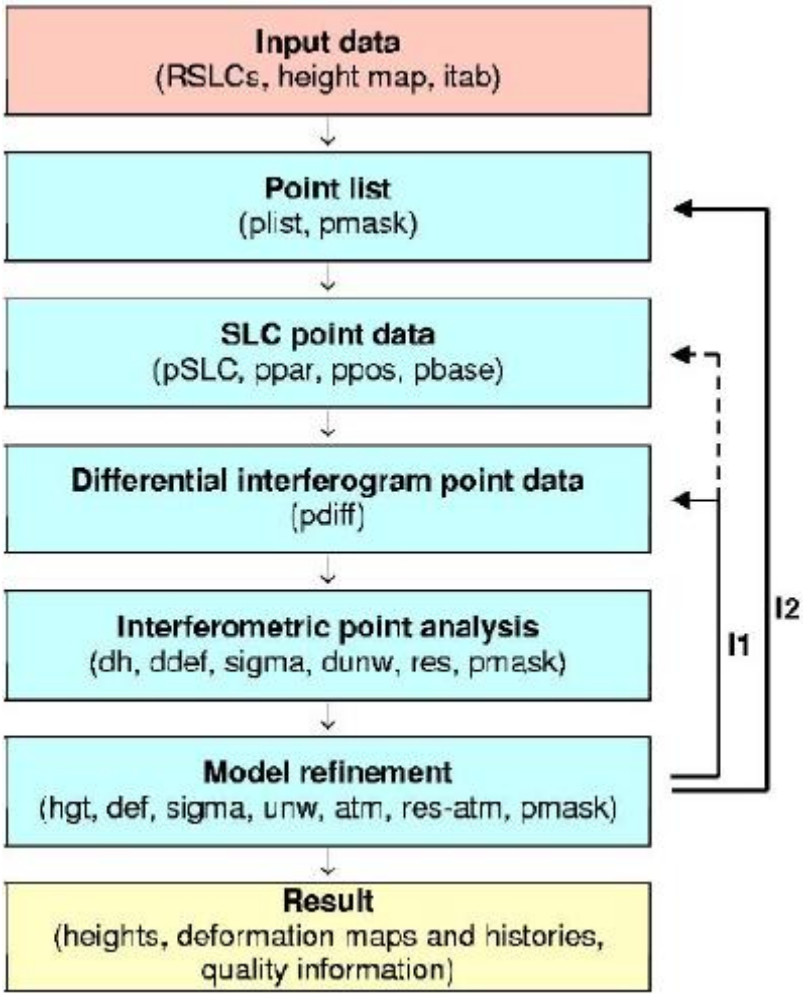
ενώ η αβεβαιότητα της φάσης καθορίζεται απομακρύνοντας την συνεισφορά από τον εκτιμώμενο ρυθμό μεταβολής:

$$\sigma(\phi) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} (\phi_i - \dot{\phi} \cdot \Delta T_i)^2}$$

Βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας είναι η αδυναμία αναγνώρισης μεταβολών της γραμμικής ταχύτητας μετακίνησης και η ανάγκη εκτύλιξης της φάσης των χρησιμοποιούμενων διαφορικών συμβολογραφημάτων, γεγονός, που δεν πραγματοποιείται, πάντα, με επιτυχία. Άρα, η καταλληλότητα της τεχνικής αφορά στην παρακολούθηση φαινομένων, όπου η παραμόρφωση λαμβάνει χώρα με σχετικά σταθερούς ρυθμούς, ώστε να έχει πρακτική αξία η εκτίμηση ενός μέσου ρυθμού μεταβολής στο επιλεγμένο χρονικό διάστημα παρατήρησης (Μ.Φουμέλης, 2009). Τα τελευταία χρόνια οι προσπάθειες της επιστημονικής κοινότητας επικεντρώνονται στην ανάλυση χρονοσειρών διαφορικών παρατηρήσεων DInSAR, μέσω των διαφόρων τεχνικών Συμβολομετρίας Σταθερών Ανακλαστήρων (Permanent Scatterers ή αλλιώς Persistent Scatterers Interferometric techniques).

4.13 Μεθοδολογία των Σταθερών Ανακλαστήρων (αλγόριθμος IPTA - Interferometric Point Target Analysis)

Η συγκεκριμένη μέθοδος αξιοποιεί τα χωρικά και χρονικά χαρακτηριστικά των «υπογραφών», που έχουν συλλεχθεί από οπισθοσκεδαστές, οι οποίοι παρουσιάζουν υψηλές τιμές συνάφειας για μεγάλη χρονική περίοδο, με σκοπό την παραγωγή χαρτών παραμόρφωσης και διαγραμμάτων ιστορικής παραμόρφωσης (Π.Κουρκούλη, 2010). Η χρήση της συμβολομετρικής φάσης από χρονοσειρές των δεδομένων μεγάλης διάρκειας, προϋποθέτει ότι η συσχέτιση παραμένει υψηλή κατά τη διάρκεια της περιόδου παρατήρησης. 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 πιθανότητα μερικοί ανακλαστήρες να βρεθούν σε μη αστικά περιβάλλοντα, κάτι που επιτρέπει την επέκταση της χωρικής κάλυψης. (Werner et al., 2003).



Σχήμα 6: Βασικό σχήμα της επεξεργασίας IPTA (Πηγή: Werner et al.,2003)

Στη συνέχεια αναλύονται τα βασικά στάδια της επεξεργασίας της μεθόδου IPTA. Η βασική μεθοδολογική ακολουθία της επεξεργασίας φαίνεται στο σχήμα 6. Η όλη διαδικασία ξεκινά με τις εικόνες, που εξάχθηκαν από το στάδιο της συμπροσαρμογής των οποίο αναλύθηκε πιο πάνω, οι οποίες έχουν κοινή γεωμετρία. Συγκεκριμένα για κάθε εικόνα SLC, δημιουργήθηκε η αντίστοιχη multi-look εικόνα (1μ. στις πλάγιες αποστάσεις x 5μ. στο αζιμούθιο). Έπειτα, δημιουργήθηκε μία εικόνα multilook της περιοχής μελέτης, 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 ελάχιστο δυνατό 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, τις οποίες μπορούμε να διακρίνουμε και από τα παραγόμενα συμβολογραφήματα και να επαναλάβουμε τη διαδικασία μέχρι να επιλέξουμε μία εικόνα αναφοράς που να πληρεί τα παραπάνω κριτήρια.

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 από χαμηλή φασματική πολυμορφία στη φάση (low spectral phase diversity) (Π.Κουρκούλη, 2010). Ενώ, η δεύτερη μέθοδος, βασίζεται στην ταυτοποίηση των ανακλαστήρων, η οποία βασίζεται στην χαμηλή μεταβλητότητα της έντασης της ακτινοβολίας.

Πίνακας 11 : Συμβολομετρικά ζεύγη από δεδομένα του δορυφόρου ENVISAT που χρησιμοποιήθηκαν.

Α/Α	Πρωτεύουσα εικόνα (HM/NIA)	Δευτερεύουσα εικόνα (HM/NIA)	Άνυσμα Βάσης (σε Μέτρα)	Χρονικό Διάστημα (σε ημέρες)
1	27/11/2005	10/08/2003	-537.56	-840
2	27/11/2005	28/12/2003	907.33	-700
3	27/11/2005	01/02/2004	814.87	-665
4	27/11/2005	11/04/2004	930.37	-595
5	27/11/2005	16/05/2004	-57.81	-560

6	27/11/2005	20/06/2004	89.29	-525
7	27/11/2005	25/07/2004	442.27	-490
8	27/11/2005	29/08/2004	235.34	-455
9	27/11/2005	03/10/2004	106.09	-420
10	27/11/2005	12/12/2004	-56.21	-350
11	27/11/2005	16/01/2005	-79.40	-315
12	27/11/2005	27/03/2005	-561.08	-245
13	27/11/2005	01/05/2005	812.31	-210
14	27/11/2005	05/06/2005	-246.04	-175
15	27/11/2005	14/08/2005	-74.82	-105
16	27/11/2005	18/09/2005	253.04	-70
17	**27/11/2005**	**27/11/2005**	**0.00**	**0**
18	27/11/2005	12/03/2006	67.18	105
19	27/11/2005	16/04/2006	69.73	140
20	27/11/2005	30/07/2006	1118.25	245
21	27/11/2005	03/09/2006	575.23	280
22	27/11/2005	08/10/2006	-365.24	315
23	27/11/2005	25/02/2007	248.45	455
24	27/11/2005	02/12/2007	422.63	735
25	27/11/2005	16/03/2008	2.07	840
26	27/11/2005	20/04/2008	398.78	875
27	27/11/2005	25/05/2008	107.43	910

28	27/11/2005	12/10/2008	105.16	1050
29	27/11/2005	01/03/2009	395.46	1190
30	27/11/2005	05/04/2009	610.98	1225
31	27/11/2005	19/07/2009	241.89	1330
32	27/11/2005	23/08/2009	178.67	1365
33	27/11/2005	06/12/2009	330.31	1470
34	27/11/2005	10/01/2010	50.89	1505
35	27/11/2005	21/03/2010	271.57	1575
36	27/11/2005	25/04/2010	363.95	1610
37	27/11/2005	04/07/2010	293.49	1680
38	27/11/2005	08/08/2010	-78.22	1715
39	27/11/2005	12/09/2010	248.31	1750
40	27/11/2005	17/10/2010	460.66	1785

Εκτός αυτού, ως πρόσθετο κριτήριο για την καλύτερη και πιο αξιόπιστη επιλογή των σημείων, χρησιμοποιήθηκε η οπισθοσκέδαση των ανακλαστήρων (στην προκειμένη περίπτωση, κατώφλι >=1.4). 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 (Π.Κουρκούλη, 2010). Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί, ότι ο αρχικός αριθμός των σημείων θα μειωθεί, καθώς θα εφαρμοστούν αρκετοί κριτήρια εκλογής των ποιοτικά καλύτερων, με σκοπό 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 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. 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. Αντίθετα, για ζεύγη με μεγάλο άνυσμα βάσης, οι μεταβάσεις αυτές είναι περισσότερο τυχαίες.

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. Η επιλογή ενός σημείου αναφοράς στο σύνολο της απεικόνισης, χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την αποφυγή σφαλμάτων τα οποία μπορεί να δημιουργήθηκαν λόγω του «patching» 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 στα δεδομένα του ENVISAT αφαιρέθηκαν 4. Στη συνέχεια, εφόσον αφαιρέθηκαν οι παραπάνω απεικονίσεις, εφαρμόστηκε η ανάλυση παλινδρόμησης αλλά αυτή την φορά χρησιμοποιώντας μόνο τις απεικονίσεις που δεν εμπεριείχαν σφάλματα. 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 δυσδιάστατο 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. 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:

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

όπου a0 : το αντιστάθμισμα της φάσης, a1 : η κλίση του ανύσματος βάσης (μπορεί να μετατραπεί σε διόρθωση του υψομέτρου των σημείων), a2 : κλίση του χρόνου (μπορεί να μετατραπεί σε γραμμικό ρυθμό παραμόρφωσης), bperp : το κάθετο άνυσμα βάσης των συμβολογραφημάτων και delta_t : 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 Φunw εκφράζεται ως το άθροισμα της φάσης λόγω τοπογραφίας Φtopo, της φάσης λόγω παραμόρφωσης Φdef, της φάσης καθυστέρησης λόγω ατμόσφαιρας Φatm και της φάσης λόγω θορύβου Φnoise:

$$\Phi_{unw} = \Phi_{topo} + \Phi_{def} + \Phi_{atm} + \Phi_{noise}$$ (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. 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 ασυσχέτιστα 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 γεωμετρία Doppler σε γεωγραφικές συντεταγμένες, έπειτα δημιουργήθηκε ένα ASCII αρχείο, το οποίο περιλαμβάνει την ιστορική παραμόρφωση κάθε ανακλαστήρα. Στο επόμενο κεφάλαιο, θα αναλυθούν τα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα Τεχνικής Σταθερών Ανακλαστήρων-Εξαγωγή Χαρτών Εδαφικής Παραμόρφωσης.

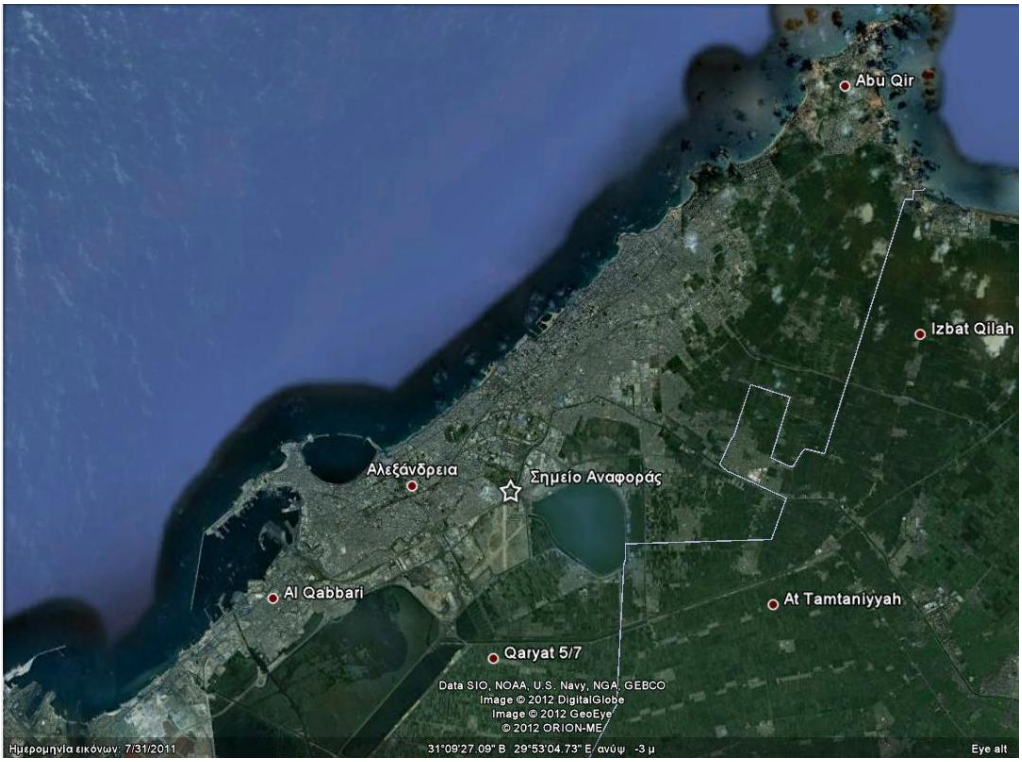
5.1: Ανάλυση σε κλίμακα ευρύτερης αστικής και περί-αστικής ζώνης της Αλεξάνδρειας – Συσχέτιση με χρήσεις και κάλυψη γης.

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται τα τελικά αποτελέσματα της τεχνικής συμβολομετρίας σταθερών ανακλαστήρων. Πριν αρχίσει όμως η κύρια ανάλυση αξίζει να τονισθεί ότι τα δεδομένα-αποτελέσματα μετατράπηκαν από την γεωμετρία του Ραντάρ σε γεωγραφικές συντεταγμένες και έπειτα οι σημειακές παρατηρήσεις εισήχθησαν σε ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), όπου και πραγματοποιήθηκαν οι κατάλληλες τεχνικές επεξεργασίας, σε περιβάλλον Arc GIS, για την εξαγωγή των τελικών μας χαρτογραφικών προϊόντων, με τη χρήση του προγράμματος Arc Map. Επίσης, στην οπτικοποίηση των παραγόμενων σημείων χρησιμοποιήσαμε και το περιβάλλον Google Earth, ως γεωγραφική βάση, για την απεικόνιση των παρατηρήσεων και την ταυτοποίηση των αποτελεσμάτων.

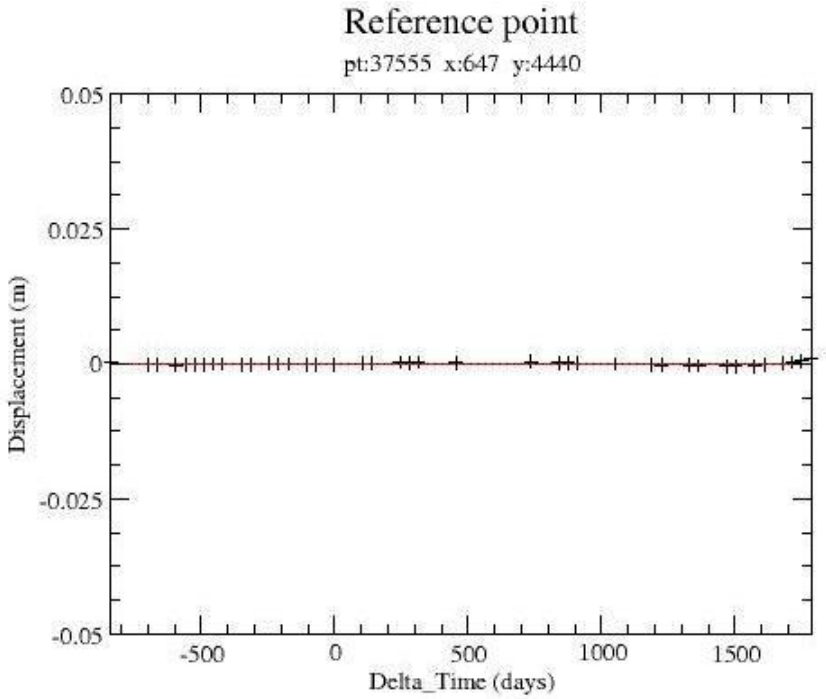
Συμπληρωματικά, και πριν προχωρήσουμε στην ανάλυσή μας, κρίνεται σκόπιμο να τονισθεί πως το σημείο αναφοράς, που επιλέχθηκε, ώστε να γίνουν όλες οι μεθοδολογικές διαδικασίες, εκλαμβάνεται ότι βρίσκεται σε σταθερή περιοχή, παρόλα αυτά το σημείο αυτά δεν είναι απολύτως σταθερό. Αυτό συνεπάγεται, ότι οι ρυθμοί παραμόρφωσης που προκύπτουν αποτελούν σχετικές μετρήσεις, ως προς το σημείο αναφοράς, και σε οριακές τιμές μπορεί να σημαίνει ότι αρνητικές τιμές παραμόρφωσης δεν αντιπροσωπεύουν, αναγκαστικά, καθίζηση, αλλά μία πιθανόν μικρότερη ανύψωση του εκάστοτε σημείου σε σχέση πάντα με το σημείο αναφοράς, και αντιστρόφως. Συνεπώς, να τονίσουμε ότι από εδώ και πέρα όταν χρησιμοποιείται, στην ανάλυση, ο όρος καθίζηση ή ανύψωση, αναφέρεται πάντα σε σχετικές τιμές ανάλογα με το σημείο αναφοράς.

Το σημείο αναφοράς, όπως αναφέρθηκε ήδη, θεωρείται σταθερό. Συγκεκριμένα, το σημείο αναφοράς που επιλέχθηκε για τα δεδομένα της περιόδου 2003-2010, εντοπίζεται περίπου 3 χλμ. από την ακτογραμμή, και 3 περίπου χιλιόμετρα από το αστικό κέντρο της Αλεξάνδρειας Εικόνα 11. Επίσης, όπως φαίνεται και στην εικόνα

12, το διάγραμμα της ιστορικής παραμόρφωσης του σημείου αναφοράς είναι σταθερό.

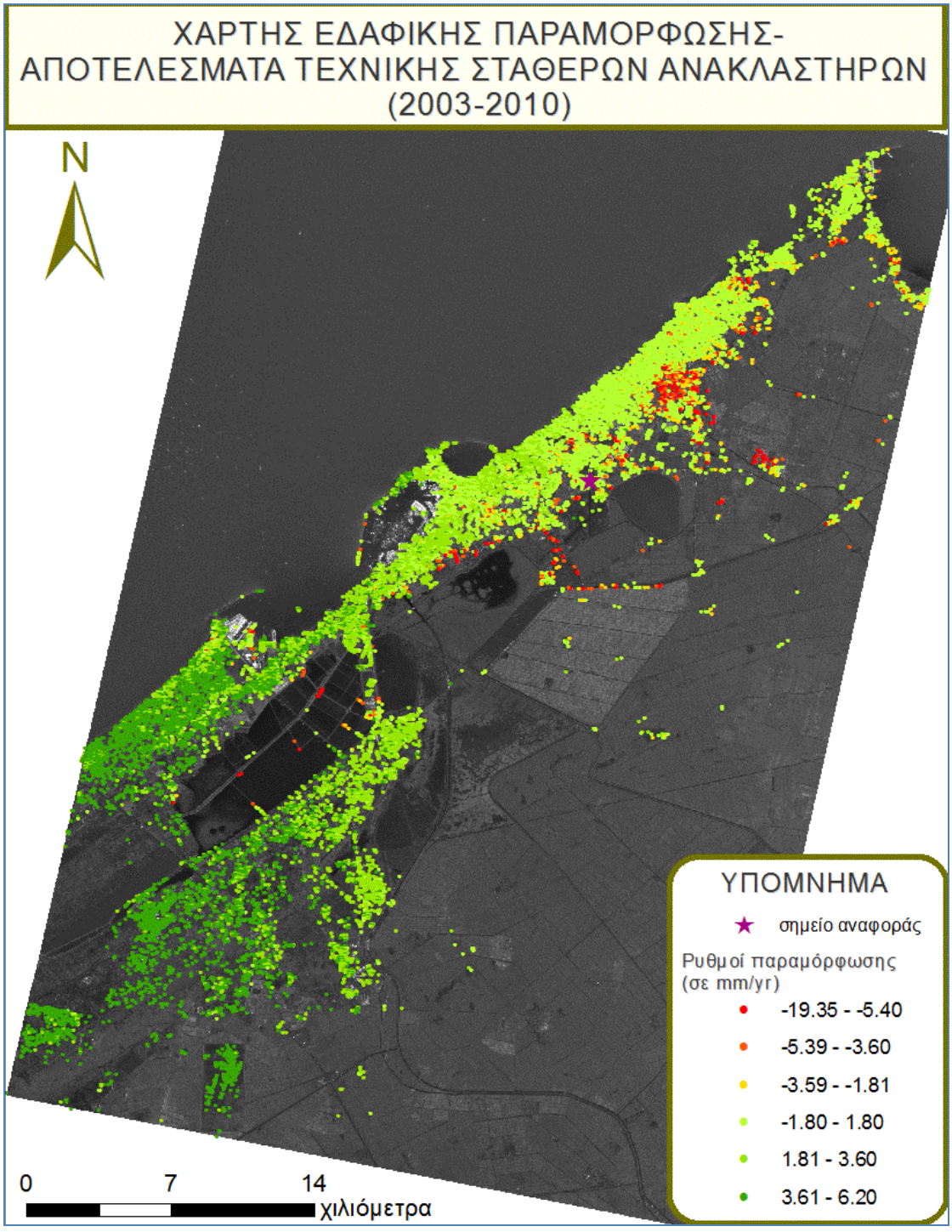


Εικόνα 11: Εντοπισμός θέσης σημείου αναφοράς. (Περιβάλλον Google Earth)



Εικόνα 12: Διάγραμμα ιστορικής παραμόρφωσης σημείου αναφοράς (Πηγή Gamma software)

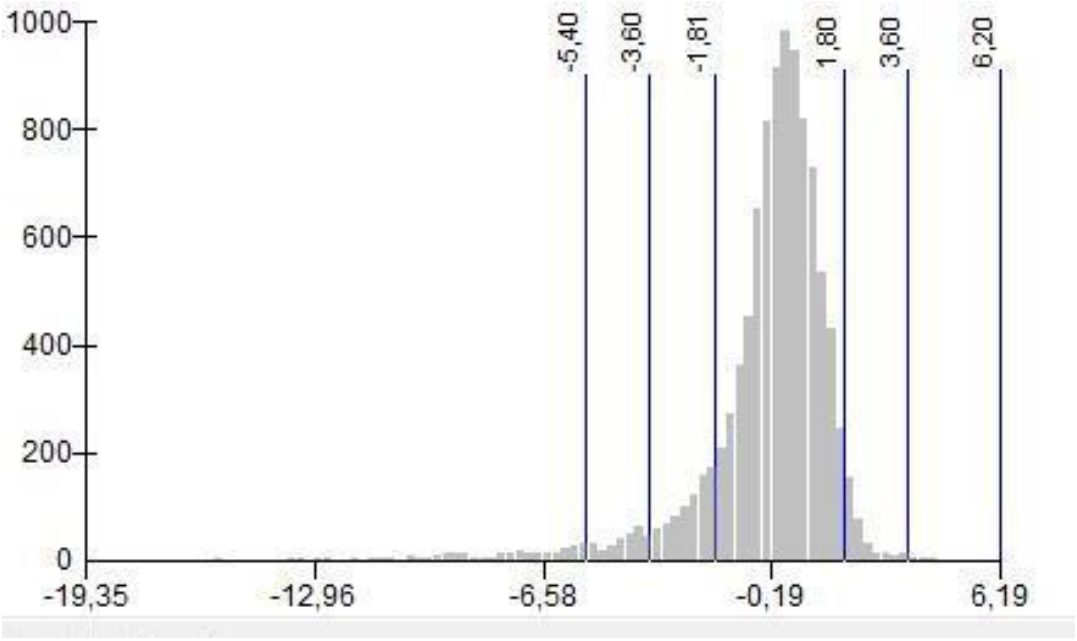
Ξεκινώντας, λοιπόν, την ανάλυση και περιγραφή των αποτελεσμάτων, το πρώτο χαρτογραφικό προϊόν, προς ανάλυση, είναι ο χάρτης των εδαφικών παραμορφώσεων για την Αλεξάνδρεια (Χάρτης).



Χάρτης 11: (Πηγή: Επεξεργασία δεδομένων από τον αναλυτή)

Όπως βλέπουμε στο παραπάνω χάρτη αναπαρίσταται η χωρική κατανομή των σημειακών παρατηρήσεων και καταγράφονται οι τιμές των κατηγοριών εδαφικής παραμόρφωσης. Εκτενέστερα, στο χάρτη παρουσιάζονται έξι ομάδες τιμών, οι οποίες προέκυψαν ύστερα από ομαδοποίηση των τιμών. Συγκεκριμένα, οι τρεις από τις έξι ομάδες αφορούν, αποκλειστικά, στις παρατηρήσεις εκείνες που δηλώνουν ότι υφίσταται καθίζηση στην περιοχή, όπου συναντώνται. Επίσης, υπάρχει μία κατηγορία, που περιλαμβάνει τις μικρότερες τιμές παραμόρφωσης (είτε αρνητικές, είτε θετικές) και που ουσιαστικά υποδεικνύει τις περιοχές σχετικής σταθερότητας. Συμπληρωματικά, έχουμε τις δύο τελευταίες κατηγορίες, που περιλαμβάνουν τις παρατηρήσεις, που αφορούν στο σύνολό τους, σημεία τα οποία υφίστανται ανύψωση και εμφανίζουν κατά μέσο όρο θετικούς ρυθμούς παραμόρφωσης.

Τώρα όσον αφορά στην χωρική τους κατανομή, παρατηρούμε ότι, μιλώντας σε γενικές τάσεις, και πάντα με βάση το σημείο αναφοράς, το νοτιοδυτικό κομμάτι της Αλεξάνδρειας δείχνει, ως επί το πλείστον, να ανυψώνεται, ενώ στον αντίποδα βρίσκεται το βορειοανατολικό τμήμα του αστικού ιστού, το οποίο στο μεγαλύτερο ποσοστό δίνει ρυθμούς παραμόρφωσης σχετικά μικρούς, οπότε και θεωρείται σταθερό, με ορισμένες περιοχές και σημεία εστίασης, το οποία δείχνουν ότι καθιζάνουν εμφανίζοντας υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης. Αξίζει να τονισθεί στο σημείο αυτό, ότι περιοχές πολύ μικρής κλίμακας, οι οποίες εμφανίζουν αρνητικούς ρυθμούς παραμόρφωσης, συναντώνται σε όλη τη έκταση του αστικού ιστού, οπότε και χρίζουν περαιτέρω ανάλυσης, για την δικαιολόγηση αυτών των περιπτώσεων. Επίσης, για την πληρέστερη εικόνα του προφίλ παραμόρφωσης στην Αλεξάνδρεια κρίνεται χρήσιμο να ληφθεί υπόψη και η συχνότητα εμφάνισης σημειακών παρατηρήσεων σε κάθε κατηγορίας παραμόρφωσης, ώστε να δούμε εμμέσως και το πλήθος το σημείων, που υφίστανται σημαντικές παραμορφώσεις (Εικόνα 13) καθώς επίσης και να συσχετίσουμε τον χάρτη των παραμορφώσεων με τους χάρτες χρήσεων και κάλυψης γης που παρατέθηκαν στο κεφάλαιο 2.



Εικόνα 13: Διάγραμμα συχνοτήτων εμφάνισης παρατηρήσεων ανά κατηγορία παραμόρφωσης (Πηγή: Επεξεργασία δεδομένων από τον αναλυτή με τη χρήση του προγράμματος Arc Map)

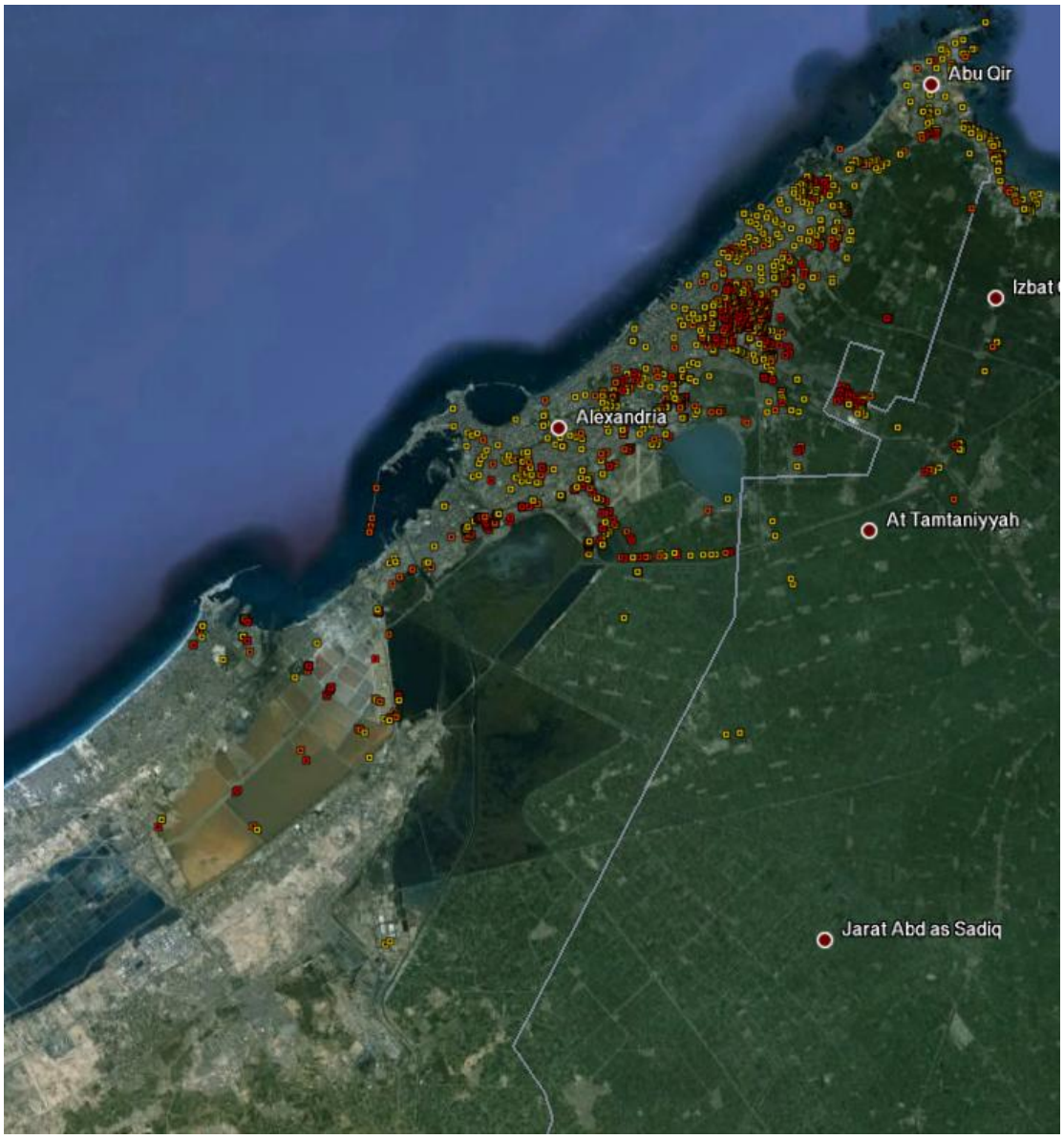
Συνεχίζοντας και έχοντας ως στόχο μια ευκρινέστερη και πιο λεπτομερή ανάγνωση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το μοτίβο παραμόρφωσης της πόλης της Αλεξάνδρειας, προβήκαμε στην δημιουργία εικόνων για κάποιες ομάδες ρυθμών παραμόρφωσης, τις οποίες και εξάγαμε με τη βοήθεια του Google Earth.



Εικόνα 14: Σημειακές παρατηρήσεις ακραίων ρυθμών καθίζησης (κόκκινα) και ανύψωσης (πράσινα).



Εικόνα 15: Σημειακές παρατηρήσεις μικρών ρυθμών καθίζησης και ανύψωσης (κατηγορία «σταθερότητας»).

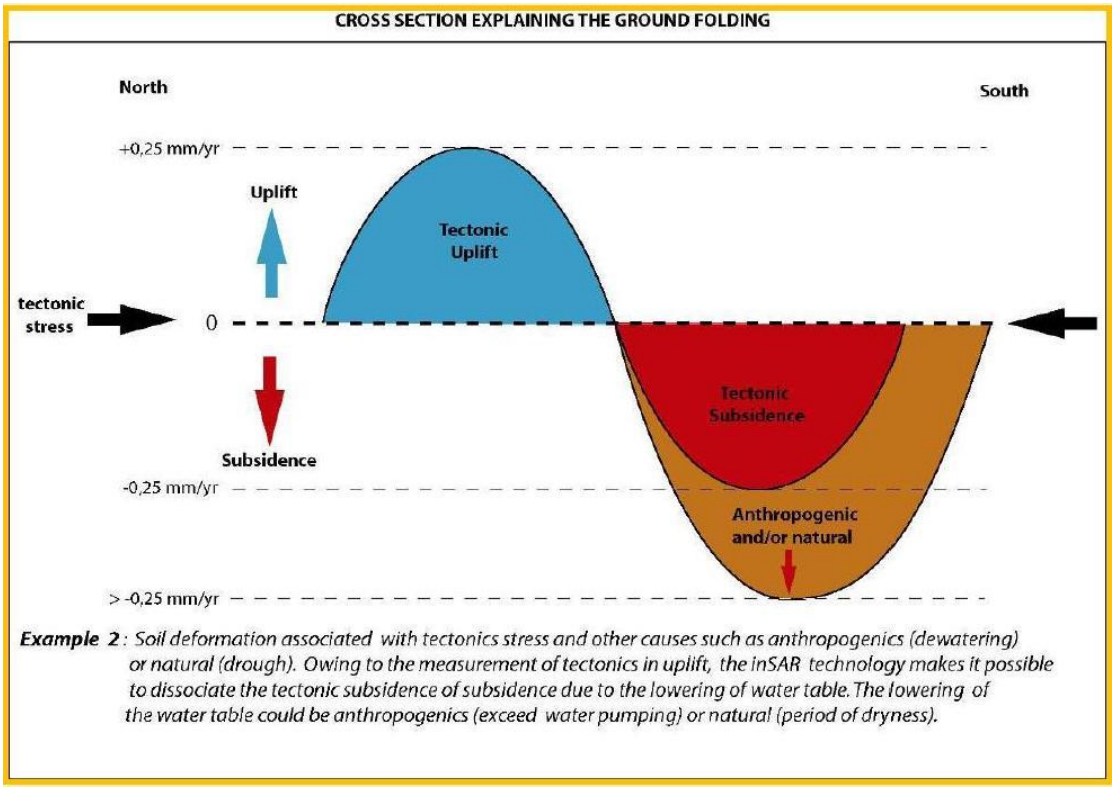


Εικόνα 16: Σημειακές παρατηρήσεις ρυθμών καθίζησης (δύο μεσαίες κατηγορίες-ομάδες τιμών).

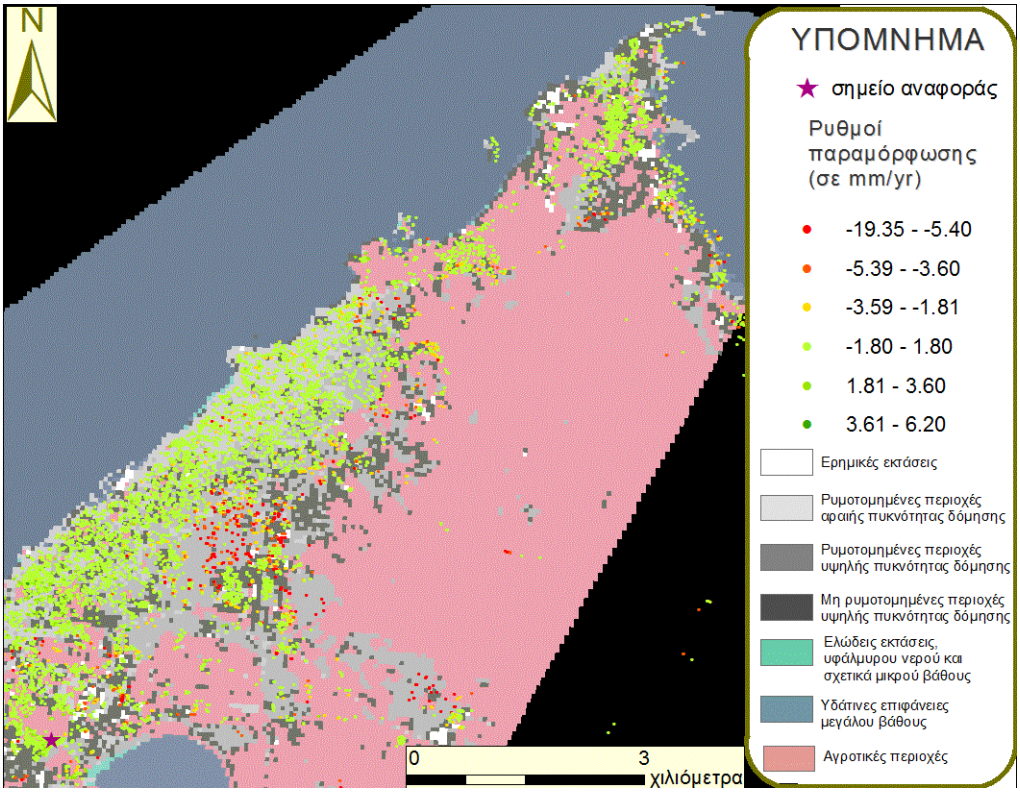
Στην παρούσα φάση, κομβικό σημείο στη μελέτη και ανάλυση των αποτελεσμάτων αποτελεί η θεώρηση, που διατυπώνεται στα πλαίσια παρόμοιας έρευνας, που διεξήγαγε η Ισπανική εταιρεία Altamira Information, για τον υπολογισμό των ρυθμών εδαφικής παραμόρφωσης στην Αλεξάνδρεια της Αιγύπτου, και η οποία αποκρυσταλλώνει την εξής άποψη:

> *«Όταν η τεκτονική της περιοχής μελέτης συνδέεται με άλλους παράγοντες, μπορούμε να «αποσυνδέσουμε» την τεκτονική καθίζηση, από άλλες ανθρωπογενείς και φυσικές καθιζήσεις. Σε σπάνιες περιπτώσεις, η προσαύξηση μπορεί να συνδέεται μόνο με την ανθρώπινη δραστηριότητα. Μία μέση τιμή αυτών των δύο συναφών παραγόντων μπορεί να ληφθεί στις περιοχές με ισχυρή καθίζηση. Αν η μέση ανύψωση είναι ίση με την καθίζηση, τότε μόνο τεκτονικοί παράγοντες είναι παρόντες. Αν η μέση υποχώρηση είναι μεγαλύτερη από ό,τι η μέση ανύψωση, τότε ανιχνεύονται και ανθρωπογενείς παράγοντες ως αίτια της καθίζησης (άντληση νερού, κλπ.)»* (ALTAMIRA INFORMATION,2010) .

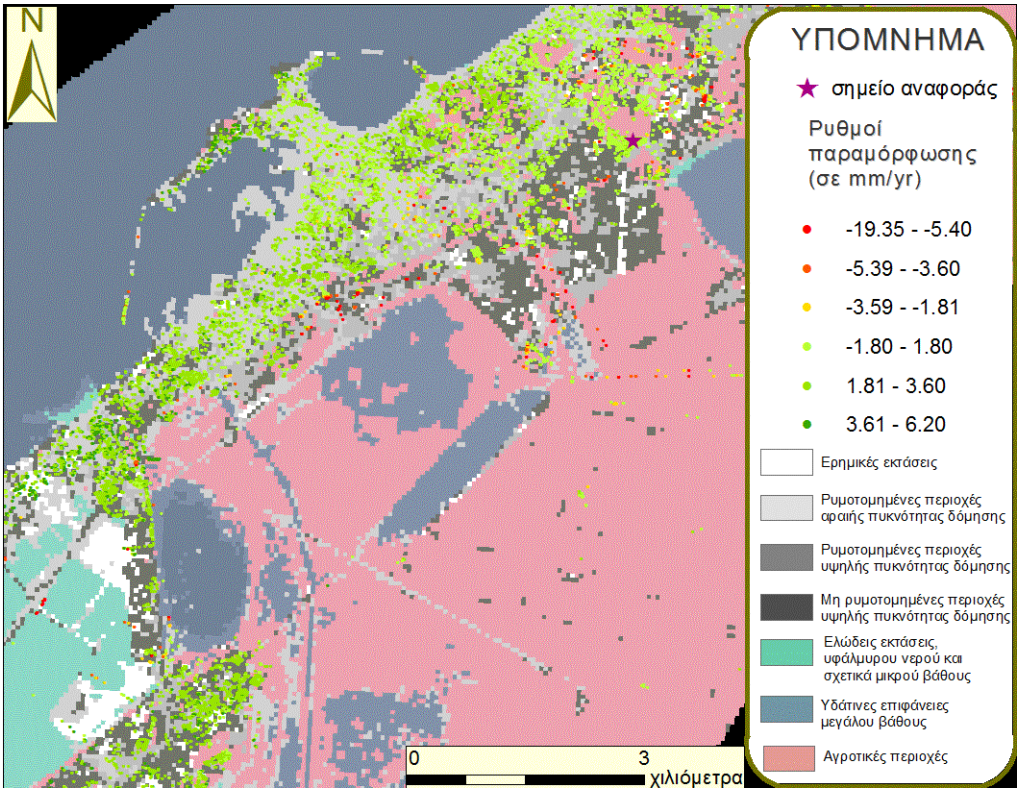
Ακολούθως παρατίθεται ένα παραδειγματικό σχεδιάγραμμα της λογικής που διέπει τη θεώρηση που διατυπώθηκε πιο πάνω.



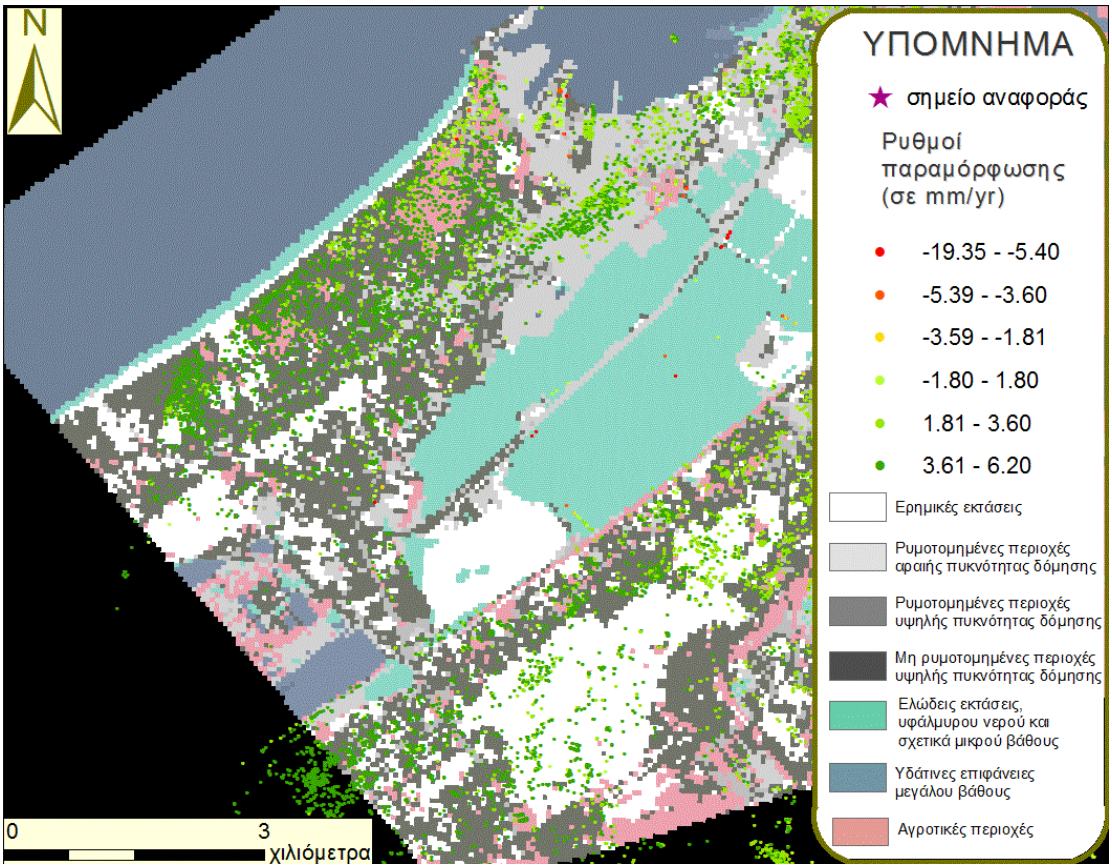
Εικόνα 17 (Πηγή: ALTAMIRA INFORMATION,2010)



Χάρτης 12: Υπέρθεση παρατηρήσεων εδαφικής παραμόρφωσης και κάλυψη γης στο Βόρειο-Ανατολικό τμήμα της Αλεξάνδρειας.



Χάρτης 13: Υπέρθεση παρατηρήσεων εδαφικής παραμόρφωσης και κάλυψη γης στο Κεντρικό τμήμα της Αλεξάνδρειας.



Χάρτης 14: Υπέρθεση παρατηρήσεων εδαφικής παραμόρφωσης και κάλυψη γης στο Νότιο-Δυτικό τμήμα της Αλεξάνδρειας.

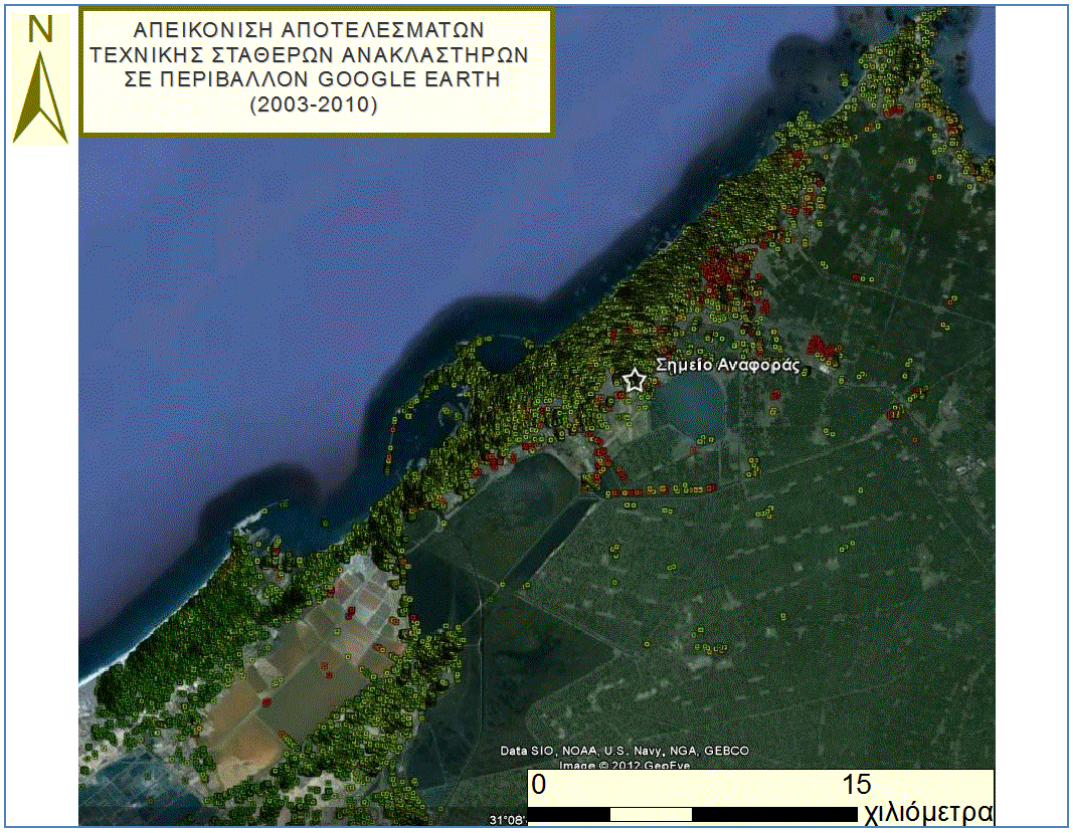
Οι παραπάνω χάρτες, αποτελούν τις βασικές πηγές συσχέτισης των διαφόρων ομάδων κάλυψης γης με τις σημειακές παρατηρήσεις των ρυθμών εδαφικής παραμόρφωσης με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων με το που εντοπίζονται οι ακραίες τιμές παραμόρφωσης και αν αυτό οφείλεται ή σχετίζεται με την εκάστοτε κάλυψη γης. Επιπλέον για την πληρέστερη ερμηνεία της συσχέτισης αυτής λαμβάνουμε υπόψη και τα στοιχεία του χάρτη χρήσεων γης ώστε να δούμε ποιες δραστηριότητες και ποιες υποδομές εκτίθενται στους κινδύνους που προκαλεί μια ραγδαία μεταβολή του υψομέτρου, λόγω εδαφικής παραμόρφωσης, και πως αυτό επηρεάζει τη λειτουργία της πόλης, είτε βραχυχρόνια είτε μακροχρόνια.

Γενικά, από το χάρτη 12 παρατηρούμε ότι στο Βόρειο-Ανατολικό τμήμα της πόλης οι βασικές ομάδες κάλυψης, που συναντώνται είναι οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις, και οι τρεις κατηγορίες της οικιστικής ζώνης, για τις οποίες οι ρυθμοί παραμόρφωσης εδάφους σε όλη τους την έκταση, ως επί το πλείστον, δείχνουν

σχετική σταθερότητα, με εξαίρεση, μόνο ορισμένες μικρές ομάδες σημείων, που εμφανίζουν υψηλούς ρυθμούς καθίζησης. Αυτές οι ομάδες εντοπίζονται στο, κυρίως νότιο-δυτικό τμήμα της εικόνας, μέσα στις περιοχές πυκνής δόμησης, με υψηλής ποιότητας ρυμοτόμηση. Σποραδικά εμφανίζονται και στο υπόλοιπο μέρος του χάρτη, σε αντίστοιχες περιοχές κάλυψης γης. Η παρατήρηση αυτή αποτελεί σημαντική πληροφορία για το σχεδιασμό της πόλης, καθώς μπορούν με τη γνώση αυτή να αποτραπούν βραχυχρόνια προβλήματα, που θα αφορούν στην κατοίκηση των περιοχών αυτών και να ενταχθούν στον αστικό σχεδιασμό μέτρα αντιμετώπισης του προβλήματος.

Συνεχίζοντας, στο χάρτη 13, τα αποτελέσματα της συσχέτισης, είναι παρόμοια με αυτά του χάρτη 12, μόνο που εδώ εντοπίζουμε και σημεία που δείχνουν ανυψωτική τάση. Επίσης, όσον αφορά στις σημειακές παρατηρήσεις του ρυθμού καθίζησης στο συγκεκριμένο χάρτη εντοπίζονται και πάλι, κατά κόρον, σε περιοχές πυκνής δόμησης. Όμως, στη περίπτωση αυτού του τμήματος της πόλης, εντοπίζονται δύο ζώνες χρήσεων γης, η οικιστική και η βιομηχανική, όπου στη βιομηχανική ζώνη σημειώνονται και οι μεγαλύτερες τιμές ρυθμών καθίζησης. Συμπληρωματικά, αξιοσημείωτη είναι η γραμμικότητα που εμφανίζουν ορισμένες ομάδες σημείων έντονης καθίζησης, γεγονός που οφείλεται στο ότι τα σημεία αυτά ανήκουν στο οδικό δίκτυο του ιστού της Αλεξάνδρειας, και μάλιστα σε δρόμους εγγύς στις ελώδεις εκτάσεις, οπότε και μπορούμε και να συσχετίσουμε αυτή την εγγύτητα με την αιτία που προκαλεί πιθανότατα στο μεγαλύτερο ποσοστό την παρατηρούμενη καθίζηση.

Τέλος, στο χάρτη 14 παρατηρούμε ότι τα περισσότερα σημεία εμφανίζουν σημαντική ανυψωτική τάση, με ελάχιστες εξαιρέσεις σημείων εντός των παράκτιων περιοχών και των περιοχών εγγύς των ελών. Εν συνόψει, το παραμορφωτικό προφίλ της Αλεξάνδρειας, έχει δύο βασικούς άξονες: α) προχωρώντας από το Νότιο-Δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης προς το Βόρειο-Ανατολικό, δηλαδή όσο περισσότερο πλησιάζουμε το Δέλτα του Νείλου, περνάμε από ρυθμούς ανύψωσης σε χαμηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης και υψηλούς ρυθμούς καθίζησης, και β) σε περιοχές υψηλής οικοδομικής πυκνότητας πλησιέστερες στο Δέλτα του Νείλου παρατηρούνται καθιζήσεις, όπως επίσης καθίζηση παρατηρείται σε σημεία ζωνών, που εντοπίζονται πλησίον παράκτιων και παραλίμνιων περιοχών.


N
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ
ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΩΝ
ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GOOGLE EARTH
(2003-2010)
Σημείο Αναφοράς
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO
0
15
χιλιόμετρα

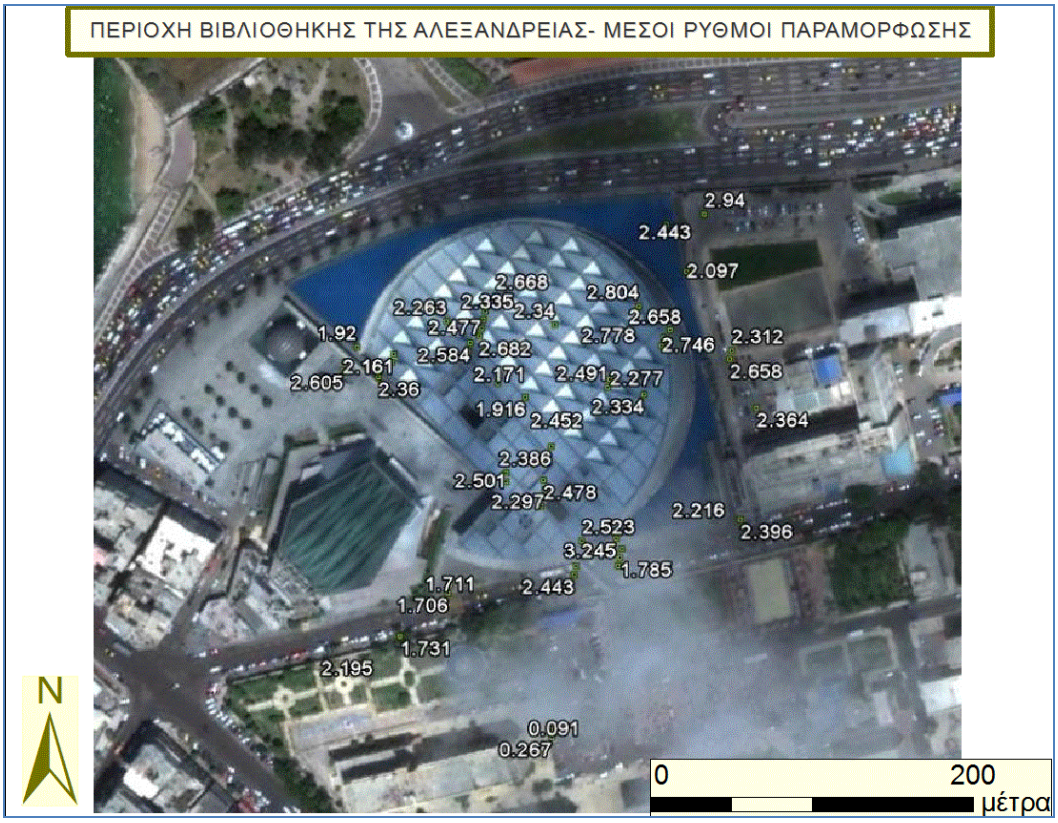
Χάρτης 15

5.2 Ανάλυση με εστίαση σε περιοχές ενδιαφέροντος

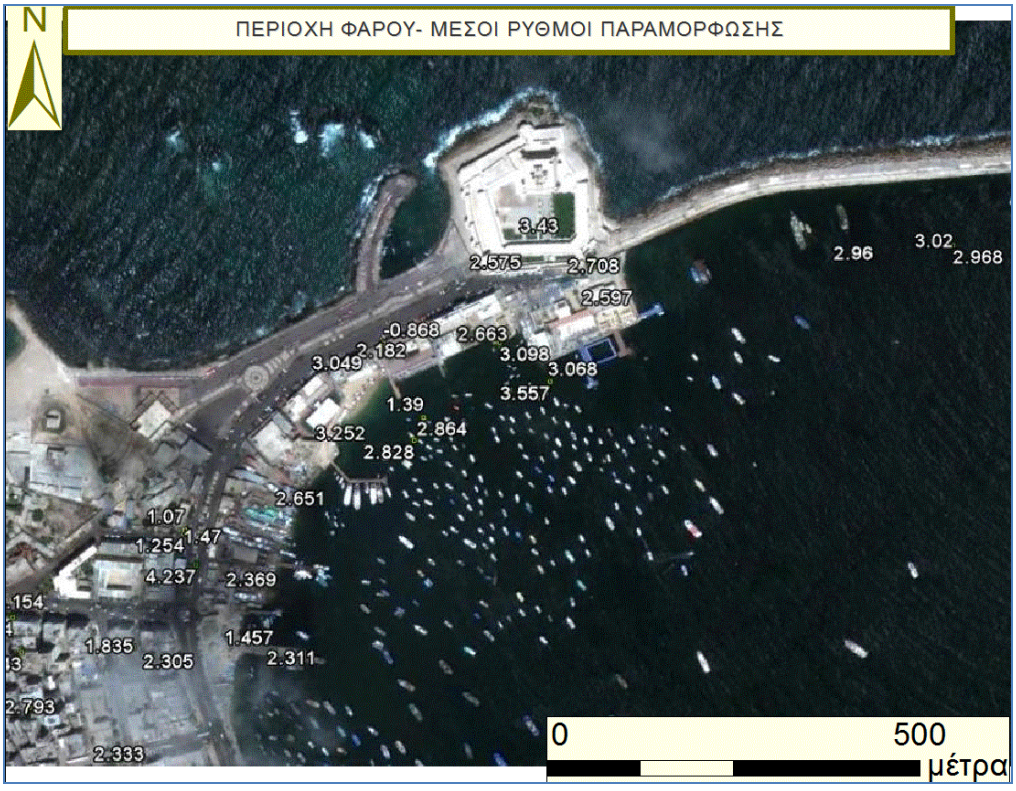
Στο κεφάλαιο αυτό αναλύουμε περιπτωσιολογικές μελέτες σε περιοχές εστίασης, οι οποίες, ουσιαστικά, ανταποκρίνονται και σε περιοχές, που χρίζουν προσοχής και ενδιαφέροντος, από πλευράς τρωτότητας και αστικού σχεδιασμού. Στην προσπάθειά μας να δομήσουμε ορισμένα σενάρια για την εξακρίβωση των παραγόντων, που επηρεάζουν τις παραμορφωτικές τάσεις, προβήκαμε στην συσχέτιση των ρυθμών παραμόρφωσης εδάφους με τις χρήσεις και την κάλυψη γης, στην Αλεξάνδρεια. Θα πρέπει όμως να τονισθεί ότι τα συγκεκριμένα παραδείγματα επιλέχθηκαν από τον αναλυτή βάσει σημαντικότητας υποδομών του αστικού ιστού και τις χρήσεις γης που φιλοξενούν. Από τις παραπάνω διαδικασίες καταλήξαμε στη δημιουργία μιας σειράς εικόνων που οπτικοποιούν τις περιοχές εστίασης. Παρακάτω στην εικόνα της περιοχής μελέτης, όπου εμφανίζονται και οι τέσσερις περιοχές εστίασης.



Εικόνα 17: Ευρύτερη περιοχή μελέτης-Περιοχές εστίασης (κόκκινα ορθογώνια).



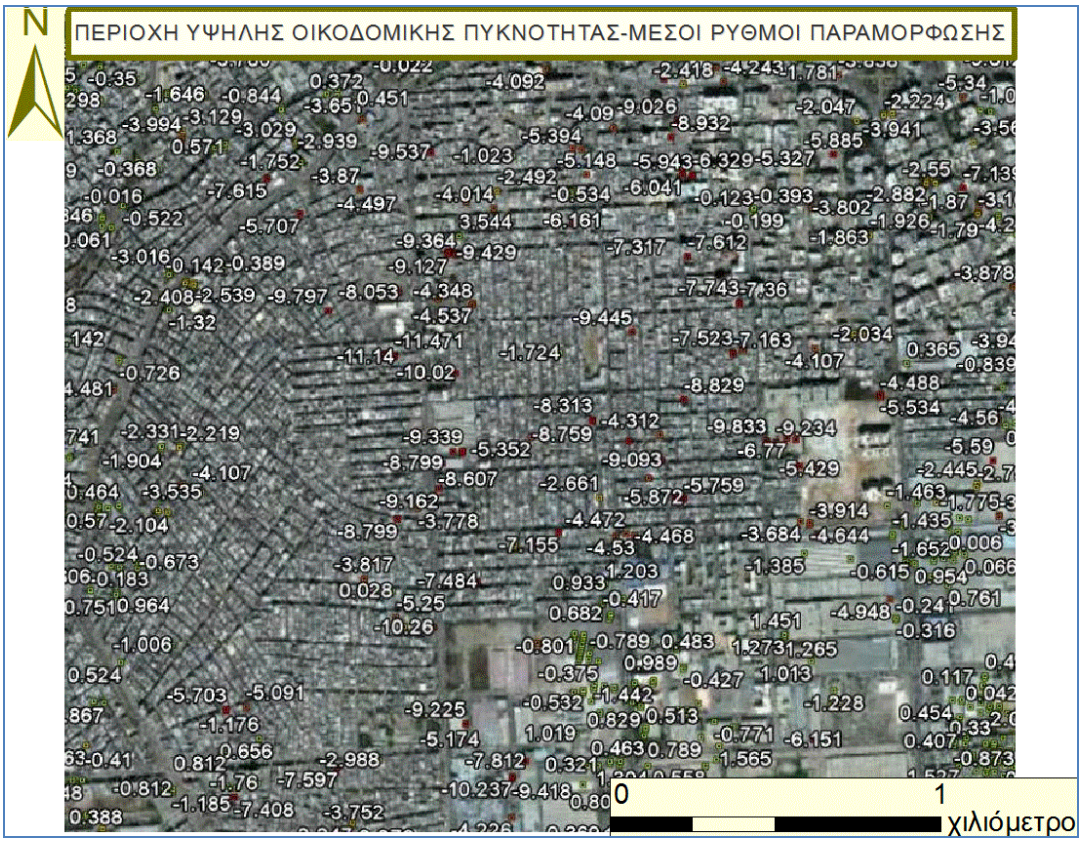
Εικόνα 18: Περιοχή εστίασης 1 (Πηγή: Google Earth)



Εικόνα 19: Περιοχή εστίασης 2. (Πηγή: Google Earth)



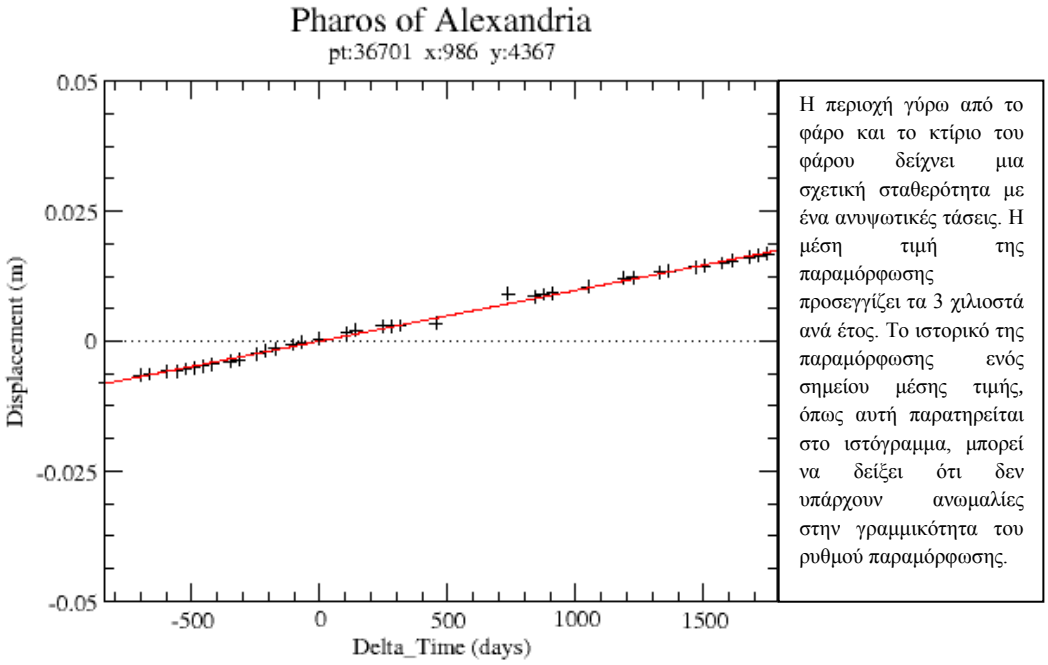
Εικόνα 20: Περιοχή εστίασης 3 (Πηγή: Google Earth)



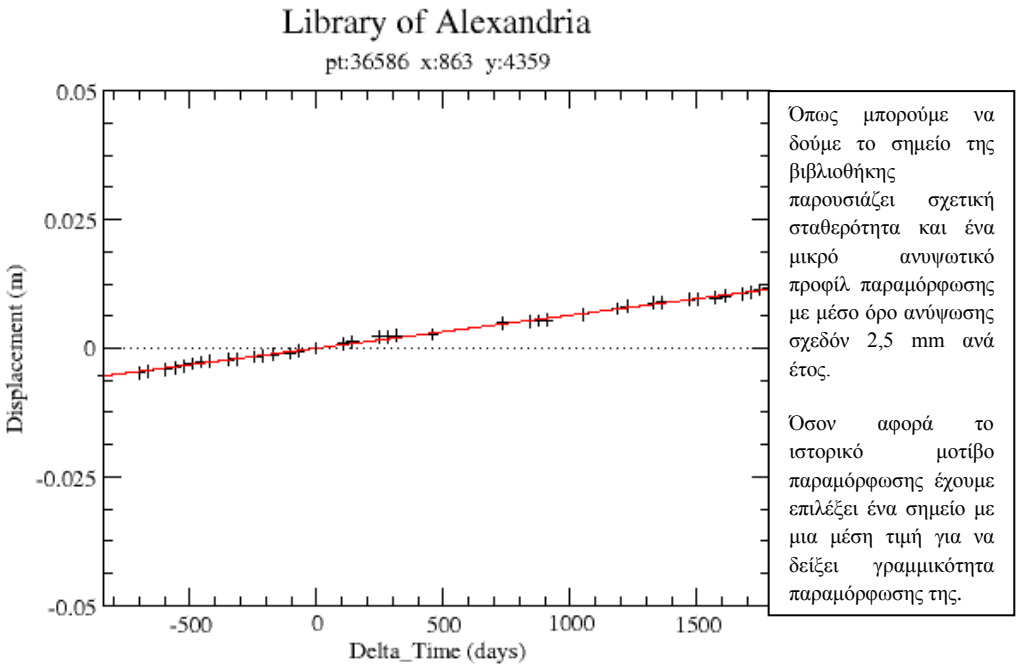
Εικόνα 21: περιοχή εστίασης 4 (Πηγή: Google Earth)

Όπως μπορούμε να δούμε στις παραπάνω εικόνες, αναπαρίστανται δύο από τα πλέον σημαντικότερα κτίρια-μνημεία της πόλεις της Αλεξάνδρειας, και δύο περιοχές αντιπροσωπευτικές, των χρήσεων γης που φιλοξενούν, και οι οποίες παρουσιάζουν αρκετά υψηλούς αρνητικούς ρυθμούς παραμόρφωσης, οπότε και αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα «προβληματικών» περιοχών, που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στον αστικό σχεδιασμό για την αποφυγή μελλοντικών λαθών και για την μείωση της τρωτότητας και της έκθεσης ανθρώπων και δραστηριοτήτων στους κινδύνους, που μπορεί να προξενήσει μια σχετικά έντονη καθίζηση, αναφερόμενοι στη ταχύτητα παραμόρφωσης.

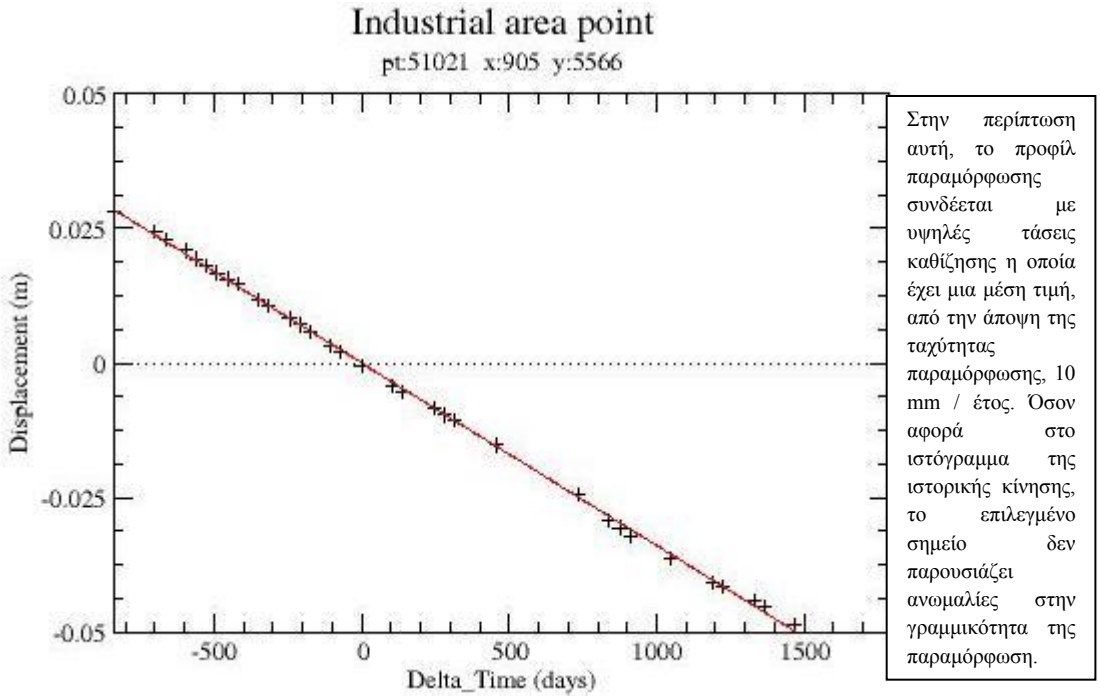
Συνοψίζοντας τα στοιχεία των ανωτέρω εικόνων για τις περιοχές εστίασης, βλέπουμε ότι οι περιοχές του Φάρου και της Βιβλιοθήκης εντοπίζονται στις κατηγορίες τιμών σταθερότητας και πιθανώς μικρής ανύψωσης περίπου (3 χιλιοστά το χρόνο, κατά μέσο όρο), ενώ οι επιλεγμένες περιοχές της βιομηχανικής και της οικιστικής ζώνης, εμφανίζουν πολύ υψηλούς ρυθμούς καθίζησης (περίπου 11 χιλιοστά κατά μέσο χρόνο, ετησίως). Ακολούθως, παρατίθενται τα διαγράμματα ιστορικής παραμόρφωσης κάθε υποπεριοχής, ώστε να καταστεί πλήρης η εικόνα των παραμορφωτικών τάσεων, των περιοχών ενδιαφέροντος και της ιστορικής συμπεριφοράς τους.



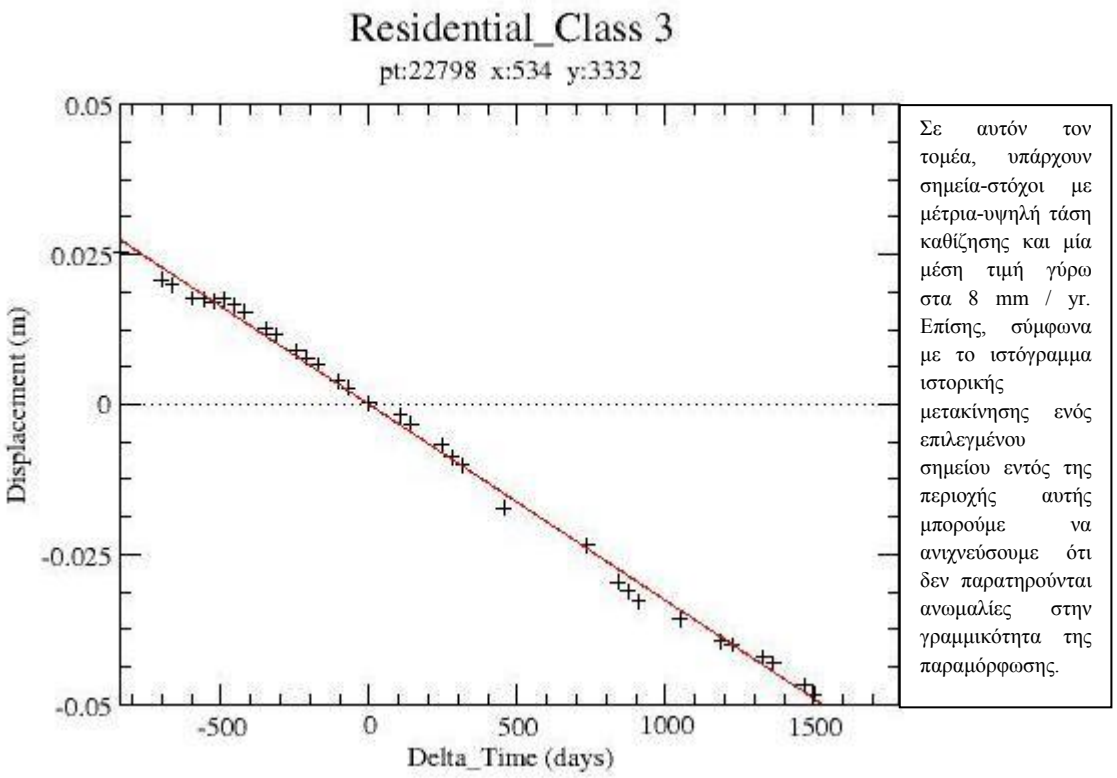
Σχήμα 7: Ιστορική παραμόρφωση-σημεία Φάρου Αλεξάνδρειας.



Σχήμα 8: Ιστορική παραμόρφωση-σημεία βιβλιοθήκης Αλεξάνδρειας



Σχήμα 9:Ιστορική παραμόρφωση-σημεία Βιομηχανικής περιοχής εστίασης



Σχήμα 10: Ιστορική παραμόρφωση–σημεία οικιστικής περιοχής εστίασης.

Επίλογος:

Εν συνόψει, το κεντρικό συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάγνωση της συγκεκριμένης μελέτης είναι η σημαντικότητα της Γεωπληροφορικής στην επιστήμη της παρακολούθησης και της ανάλυσης των χωρικών φαινομένων, ανεξαρτήτως από τα αίτια που τα προκαλούν. Όπως μπορεί να συμπεράνει κάποιος, σε όλα τα στάδια της μεθοδολογίας και, αναφορικά, στην επεξεργασία των δεδομένων και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων, υπήρχαν τα κατάλληλα εργαλεία για την εξυπηρέτηση αυτού του σκοπού. Συγκεκριμένα, η Διαφορική συμβολομετρία και, ειδικότερα, η τεχνική των σταθερών ανακλαστήρων μπορεί να θεωρηθεί και να χαρακτηριστεί ως μία 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 στην περιοχή μελέτης, οι προκείμενες εδαφικές παραμορφώσεις, είναι πιθανό να οφείλονται σε αρκετές παραμέτρους. Συνοπτικά, μπορεί να οφείλονται:

- στο γεωμορφολογικό και γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής, το οποίο επηρεάζεται από την εγγύτητα στη Δελταϊκή πεδιάδα του Νείλου.
- στην άντληση υδάτων (γεωτρήσεις)
- στην επέκταση του αστικού ιστού εντός παραλίμνιων περιοχών.
- στην αύξηση της πυκνότητας δόμησης
- και τέλος στον συνδυασμό των παραπάνω.

Εν τέλει, η μελετητική συνεισφορά της εργασίας μπορεί μεν να περιορίζεται στον επιστημονικό κλάδο της συμβολομετρίας, μα σε συνδυασμό με το κομμάτι περί αστικής επέκτασης και αστικού σχεδιασμού υπεισέρχεται και σε άλλους κλάδους δίνοντας έναν διεπιστημονικό χαρακτήρα και νέες προοπτικές συνέχισης της συγκεκριμένης μελέτης. Πληροφοριακά, αναφέρεται ότι πρώτη σκέψη για συνέχιση της παρούσας έρευνας αποτελεί η εκτενέστερη ανάλυση του αστικού σχεδιασμού στην πόλη της Αλεξάνδρειας, η πιθανή μοντελοποίηση του παραμορφωτικού προφίλ, και ο επανασχεδιασμός της αστικής επέκτασης, στηριζόμενος σε ζώνες τρωτότητας.

Βιβλιογραφία:

Ελληνική:

- ✓ Καρτάλης, Κ. και Χ. Φείδας,. «Αρχές και εφαρμογές της δορυφορικής τηλεπισκόπησης». Β. Γκιούδας Εκδοτική, Αθήνα 2006.
- ✓ Κουρκούλη Π., *«Παρατήρηση της εδαφικής Παραμόρφωσης του Δέλτα του Μόρνου ,με τη χρήση της συμβολομετρίας των σταθερών ανακλαστήρων»,* Μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα 2010 - Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- ✓ Μερτίκας Στ. «Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας.» Παρίκου Σ. & ΣΙΑ ΟΕ, Αθήνα 1999.
- ✓ Μπενέκος Γ., «*Διαφορική Συμβολομετρία Ραντάρ για την ανίχνευση εδαφικής Παραμόρφωσης στην Ευρύτερη περιοχή της Λίμνης Τριχωνίδας για την περίοδο για 2003-2010»,* Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2012 - Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.
- ✓ Φουμέλης Μ., «*Μελέτη επιφανειακής παραμόρφωσης ευρύτερης περιοχής Αθηνών βάσει Διαφορικών μετρήσεων GPS και Συμβολομετρίας Ραντάρ»*, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2009 - Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών/Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος Τμήμα Γεωλογίας/ Τομέας Γεωφυσικής και Γεωθερμίας.

Ξενόγλωσση:

- ✓ Abu Zeid,2009. Assessment of Groundwater Potential in Alexandria Governorate. CEDARE
- ✓ ALTAMIRA INFORMATION Monitoring of Historical Land Movement in Alexandria (Egypt) 2010
- ✓ 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.

- ✓ Born, M. and Wolf, E., 1980. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. 6th edition, Pergamon Press, Oxford
- ✓ Cities Alliance, Liveable Cities The benefits of Urban environmental Planning, Washington, D.C. 20433, U.S.A., 2007
- ✓ 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.
- ✓ 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).
- ✓ Delaunay, B. N., 1934. Sur la sphere vide. Izvestia Akademia Nauk SSSR, VII Seria, Okdelenie Matematicheskii I Estestvennyka Nauk, 7, 793-800.
- ✓ 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 COSMOSkyMed 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 auomatic DEM reconstruction. 3rd ERS Workshop, Florence, Italy.

- ✓ Ferretti, A., Novalo, 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.
- ✓ Fletcher Karen, (2007),InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, ESA Publications ESTEC Postbus 299 2200 AGNoordwijk The Netherlands *Copyright:* © 2007 European Space Agency
- ✓ Frihy, O**.** 2003: The Nile Delta-Alexandria coast: vulnerability to sealevelrise, consequences and adaptation. *Mitigation and Adaptation Studies for Global Change* 8, 115–38.
- ✓ Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. and Zebker, H. A., 1989. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94(B7), 9183-9191.
- ✓ Gamma Remote Sensing. GAMMA Software Documentation, 2006.
- ✓ Gatelli, F., Monti Guarnieri, A., Parizzi, F., Pasquali, P., Prati, C. and Rocca, F., 1994. The wavenumber shift in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32, 855-864.
- ✓ Ghiglia, D. and Pritt, M., 1998. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software. John Wiley & Sons Inc., New York.
- ✓ Goldstein, R. M., Zebker, H. A. and Werner, C. L., 1988. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radion Science*, 23(4), 713-720.
- ✓ Hanssen, R. F., 2001. Radar Interferometry: Data interpretation and error analysis. Kluwer Academic Press, Dordrecht, The Netherlands, 298p.
- ✓ Jarvis A, Reuter H, Nelson A, Guevara E., 2006. Hole-filled seamless SRTM data V3, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT).
- ✓ Lame, D. B. and Born, G. H., 1982. SEASAT measurement system evaluation: Achievement and limitations. *Journal of Geophysical Research*, 87(C5), 3175-3178.
- ✓ Loutfy Kamal Abdou Azaz,2008. Monitoring Urban Growth In Alexandria-Egypt Using Satellite Images.
- ✓ Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. and Rabaute, T., 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364, 138-142.

- ✓ Mohamed El Raey, 2007, 2009. Impacts and Adaptation to Climate Change on the Mediterranean Coastal zone of Egypt.University of Alexandria.
- ✓ 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.
- ✓ Parcharidis, I., Foumelis, M., Kourkouli, P., Wegmuller, U., 2009. Persistent catterers 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.
- ✓ Pasquali, P., 1995. Generazione di Mappe Altimetriche con Interferometria SAR. Doctoral thesis, Politecnico di Milano, Italy.
- ✓ Rodriguez, E., Morris, C. S., Belz, J. E., Chapin, E. C., Martin, J. M., Daffer, W. and Hensley, S., 2005. An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 143p.
- ✓ 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.
- ✓ Small, D., Werner, C. L. and Nüesch, D., 1993. Baseline modelling for ERS-1 SAR interferometry.Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Tokyo, Japan, 18-21 August, 1204-1206.
- ✓ Stramondo, S., Bozzano, F., Marra, F., Wegmuller, U., Cinti, F. R., Moro, M. and Saroli, M., 2008. Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3160–3172.
- ✓ Small, D., Pasquali, P. and Füglistaler, S., 1996. A comparison of phase to height conversion methods for SAR interferometry. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Lincoln, Nebraska, 342-344.
- ✓ 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.

- ✓ Tosi, L., Carbognin, L., Teatini, P., Strozzi, T. and Wegmüller, U., 2002. Evidence of the present relative stability of Venice, Italy, from land, sea and space observations. *Geophysical Research Letters*, 29(12), 1562, doi:10.1029/2001GL013211.
- ✓ Werner, M., 2001. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Mission overview. Journal of Telecommunication (Frequenz), 55, 75-79.
- ✓ Werner, C., Wegmüller, U., Strozzi, T. and Weismann, A., 2003. Interferometric Point Target Analysis for deformation mapping. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Toulouse, France, 4362-4364.
- ✓ 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.
- ✓ Yale Center for Earth Observation,2011.Aster Images.
- ✓ Zebker, H. A., Rosen, P. A., and Hensley, S., 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic mapping. *Journal of Geophysical Research*, 102(B10), 7547-7563.
- ✓ 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.

Διαδικτυακή:

- ✓ CAPMAS – Central Agency for Public Mobilization and Statistical Data.2006(http://www.capmas.gov.eg/).
- ✓ European Space Agency - ESA (http://www.esa.int/esaCP/index.html,)
- ✓ Telespazio (http://www.telespazio.it/cosmo.html,).
- ✓ NASA(http://southport.jpl.nasa.gov/cdrom/sirced03/cdrom/ROADMAP/IMAGERAD/IMGRADV3.HTM)
- ✓ International Center of Tropical Agriculture (CIAT) http://srtm.csi.cgiar.org/
- ✓ Department of Earth Observation and Space Systems(http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs,)
- ✓ Gamma Remote Sensing, 2011 (http://www.gamma-rs.ch/ & http://www.gamma-rs.ch/no_cache/software.html)