

## ΚΕΦΑΛΑΙΟΝ ΙV

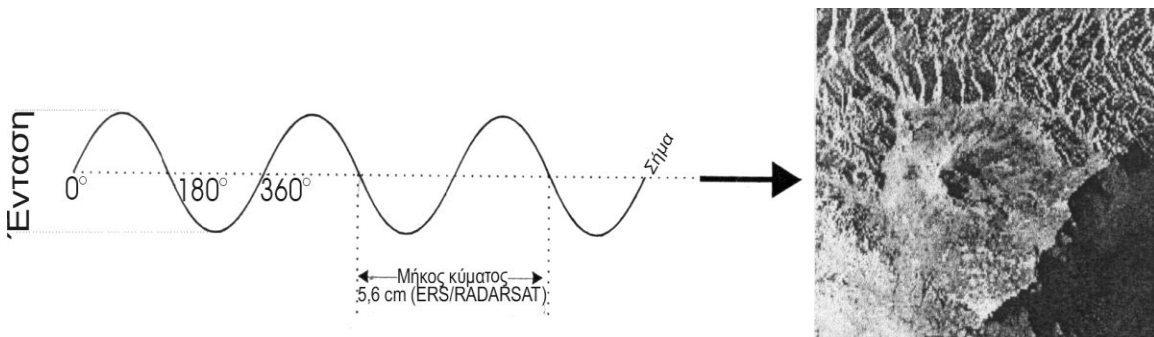
### ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ ΡΑΝΤΑΡ

#### 1. Εισαγωγή

Η μεθοδολογία της Διαφορικής Συμβολομετρίας Ραντάρ (DInSAR) εφηρμόσθη στην Κεφαλληνία προκειμένου να μελετηθεί η ευρύτερη παραμόρφωση της περιοχής και όχι σημειακά, όπως προκύπτει από τις Διαφορικές Μετρήσεις GPS.

#### 2. Αρχή Μεθόδου Συμβολομετρίας Ραντάρ

Τα όργανα απεικόνισης του τύπου συνθετικού ανοίγματος ραντάρ (SAR), παράγουν εικόνες της επιφάνειας της Γης, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες, ημέρα και νύχτα, με υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα, προσφέροντας πληροφορία σχετικά με τα φυσικά χαρακτηριστικά της. Τα συστήματα συνθετικού ανοίγματος ραντάρ καταγράφουν την ένταση και την φάση του σήματος οπισθοσκέδασης. Η ένταση του σήματος δημιουργεί εικόνες με την μορφή αποχρώσεων του γκρι, σύμφωνα με τις τιμές της έντασης (Εικ. 1).

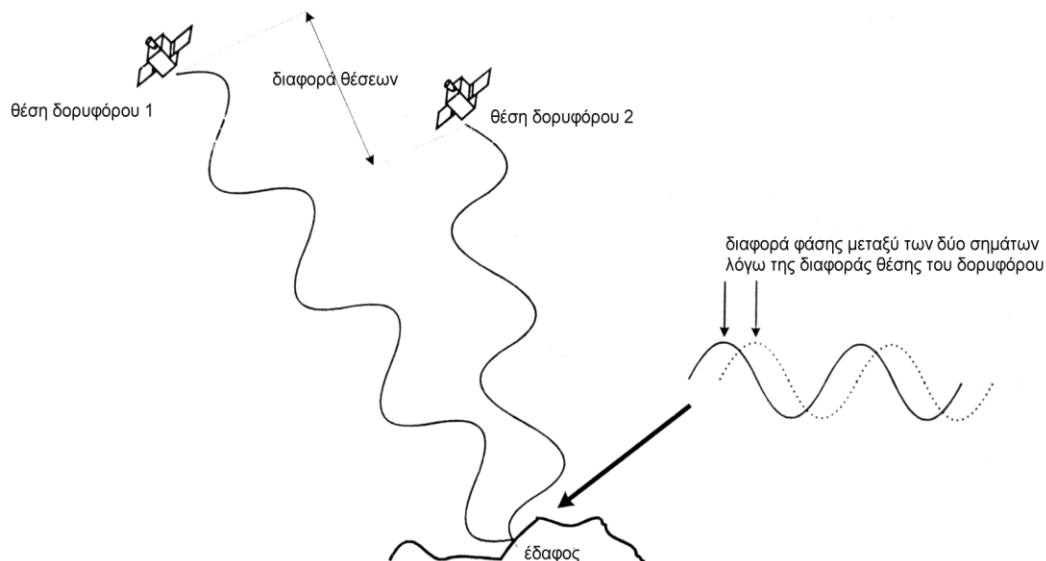


**Εικόνα 1.** ΗΜ κύμα (Ραντάρ) προσπίπτον επί της επιφάνειας του εδάφους.

Κάθε κυψελίδα σε μία εικόνα συνθετικού ανοίγματος ραντάρ, περιέχει πληροφορίες που αντιστοιχούν σε τρεις διαφορετικές παραμέτρους:

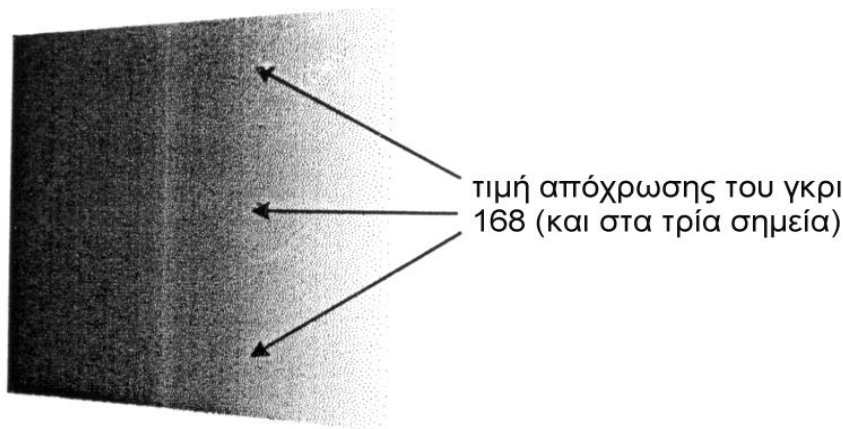
- Την διαδρομή από τον απεικονιστή προς την επιφάνεια της Γης και αντίθετα προς το όργανο, διαιρούμενο από το μήκος κύματος του σήματος που αντιστοιχεί σε εκατομμύρια κύκλους φάσεων.
- Την αλληλεπίδραση μεταξύ του προσπίπτοντος κύματος και των ανακλαστήρων, εντός της κυψελίδας εδαφικής διακριτικής ικανότητας.
- Την διαφορά φάσης που προκαλείται από το σύστημα επεξεργασίας που χρησιμοποιείται για την εστίαση της εικόνας.

Η **Συμβολομετρία ραντάρ** είναι μία τεχνική επεξεργασίας των εικόνων ραντάρ για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικών με το ανάγλυφο της Γήινης επιφάνειας. Χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις της φάσης του λαμβανόμενου σήματος οπισθοσκέδασης, ως μία επιπρόσθετη πληροφορία από τα δεδομένα του ραντάρ και ειδικότερα οι μετρήσεις της διαφοράς φάσης από δύο διαδοχικές απεικονίσεις της ίδιας περιοχής. Η θέση, από την οποία ο δορυφόρος καταγράφει μία περιοχή, μεταβάλλεται από λήψη σε λήψη (Εικ. 2) και η αντίστοιχη διαφορά στην απόσταση δορυφόρου - Γης προκαλεί διαφορά στην φάση των σημάτων των διαφόρων λήψεων. Η διαφορά στην απόσταση μπορεί να εκφραστεί με έναν ακέραιο αριθμό μηκών κύματος συν ένα κλάσμα ενός μήκους κύματος.



**Εικόνα 2.** Διαφορά φάσης από ανάκλαση σημείου από διαφορετικές Δορυφορικές θέσεις

Ένα συγκεκριμένο εδαφικό σημείο θα εμφανίζει διαφορετική τιμή φάσης, που εξαρτάται άμεσα από την αλλαγή στην απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και του συγκεκριμένου σημείου της επιφάνειας της Γης. Η διαφορά φάσης για κάθε επιφανειακό σημείο λαμβάνει μία τιμή μεταξύ των  $0^\circ$  και των  $360^\circ$ . Για μία σειρά σημείων σε μία δεδομένη περιοχή, οι 360 πιθανές τιμές διαφοράς φάσης μπορούν να αποδοθούν ποσοτικά με τις 256 αποχρώσεις του γκρι και να απεικονιστούν ως κροσσοί αποχρώσεων διαφορετικής έντασης (Εικ. 3).

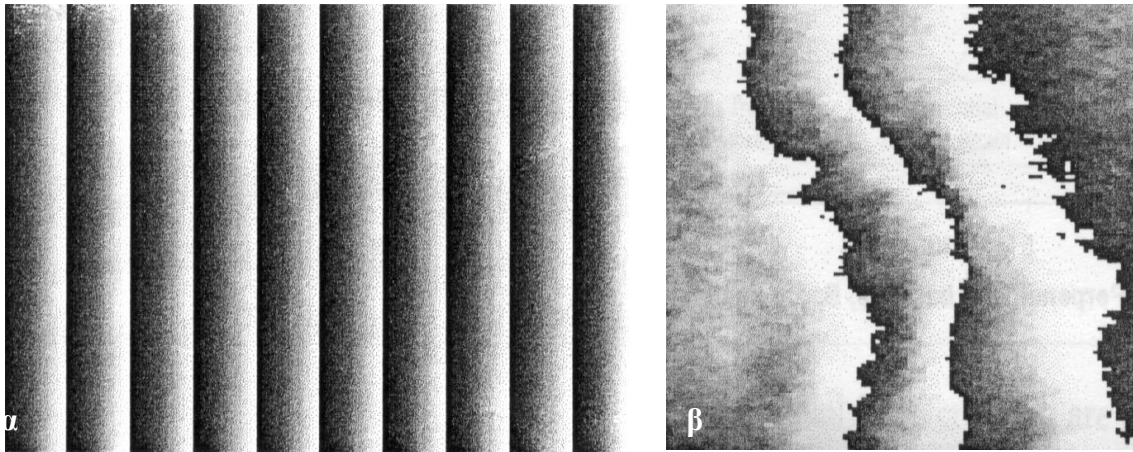


**Εικόνα 3.** Αποχρώσεις του γκρι για απόδοση Διαφορών Φάσεως.

Η εικόνα Συμβολομετρίας δημιουργείται από τους κροσσούς συμβολής που προκύπτουν στο σύνολο της περιοχής. Ένας κροσσός συμβολής μπορεί να θεωρηθεί ως μία σειρά από ισοδιαστάσεις στις οποίες κάθε ξεχωριστή απόχρωση του γκρι εντός και κατά μήκος του κροσσού αντιστοιχεί στην ίδια διαφορά φάσης. Η σταθερή διαφορά φάσης εντός ενός κροσσού συμβολής σχετίζεται άμεσα με την σταθερή διαφορά της διαδρομής από τον απεικονιστή προς την επιφάνεια της Γης και ξανά πίσω και συνεπώς σχετίζεται έμμεσα με το μορφολογικό ανάγλυφο της επιφάνειας που απεικονίζεται.

Επομένως, η διαφορά στην απόσταση δορυφόρου - Γης είναι συνάρτηση του αναγλύφου. Για το λόγο αυτό, σταθερή διαφορά στην απόσταση μεταξύ των κροσσών συμβολής συσχετίζεται με ένα επίπεδο ανάγλυφο. Καθώς ο δορυφόρος καλύπτει μία μεγάλη

έκταση (περίπου 100X100 km), δημιουργείται μία σειρά από διαδοχικούς κροσσούς συμβολής, που στο εσωτερικό του καθ' ενός η διαφορά φάσης εκφράζεται με τις 256 αποχρώσεις του γκρι (αντίστοιχα, γωνία φάσης  $0^\circ$  -  $360^\circ$ ). Η έκταση και το σχήμα των κροσσών συμβολής εξαρτώνται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου, από το μήκος κύματος του σήματος και φυσικά από την τοπογραφία (Εικ. 4).

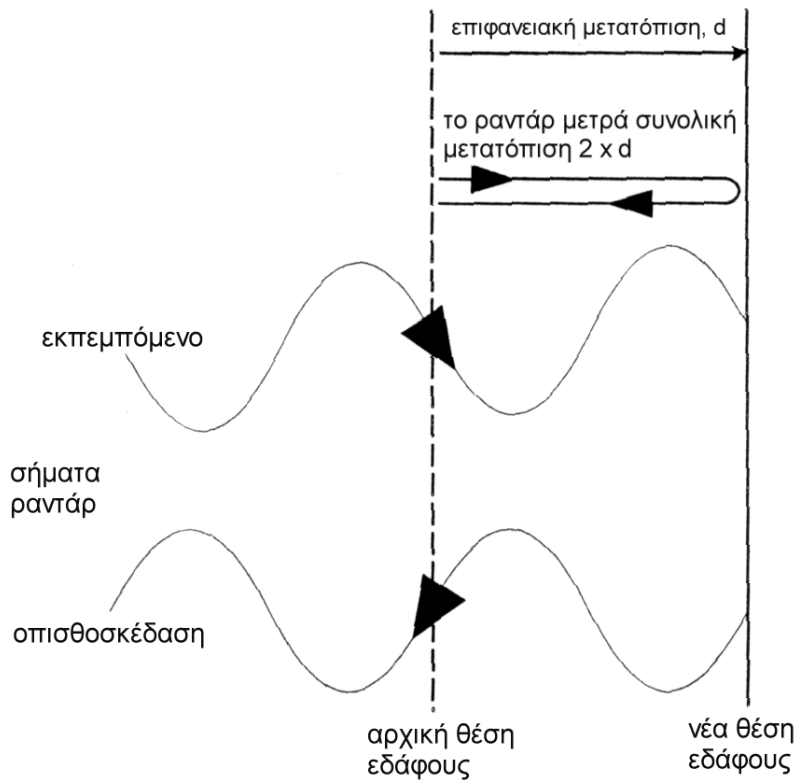


**Εικόνα 4.** Κροσσοί συμβολής με διαφορά φάσης σε μια επίπεδη επιφάνεια (α) και σε μια τοπογραφική ανωμαλία (β).

Ως επέκταση της παραπάνω τεχνικής θεωρείται η **Διαφορική Συμβολομετρία Ραντάρ**. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανίχνευση επιφανειακών μετατοπίσεων που οφείλονται σε διάφορα αίτια, όπως σεισμούς, κατολισθήσεις, καταβυθίσεις κλπ. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή με το όνομα Διαφορική Συμβολομετρία και χρησιμοποιεί εικόνες SAR, διαφορετικών ημερομηνιών, στη διάρκεια των οποίων εκδηλώθηκε το φαινόμενο.

Σε μία εικόνα Διαφορικής Συμβολομετρίας η μετατόπιση μπορεί να υπολογιστεί εφ' όσον είναι γνωστό το μήκος κύματος του δορυφορικού συστήματος (στην περίπτωση του ERS είναι 5,6 εκατοστά). Λόγω του ότι το σήμα εκτελεί την διαδρομή από τον δορυφόρο προς την επιφάνεια και μέσω της οπισθοσκέδασης πάλι στον δορυφόρο, η μετατόπιση μετράται δύο φορές, επομένως, η πραγματική μετατόπιση είναι η μισή της μετρηθείσης.

Αυτό το γεγονός καθορίζει ότι κάθε κροσσός συμβολής αντιπροσωπεύει **2,8** ( $=5,6/2$ ) cm εδαφικής μετατόπισης, κατά μήκος της γραμμής μετάδοσης του σήματος ραντάρ (Εικ. 5).



**Εικόνα 5.** Προσδιορισμός Εδαφικής Μετατόπισης σημείου από κύμα Ραντάρ.

Το **σημαντικότερο πλεονέκτημα** του υπολογισμού της επιφανειακής μετατόπισης με την μέθοδο της Διαφορικής Συμβολομετρίας, είναι η αυξημένη χωρική διακριτική ικανότητα (διακριτικότητα) σε σχέση με άλλες μεθόδους (π.χ. GPS). Η χωρική διακριτική ικανότητα της μετατόπισης, στην Διαφορική Συμβολομετρία, είναι η ελάχιστη μετατόπιση (διαφορά φάσης), που μπορεί να αντιπροσωπευθεί από μια κυψελίδα κατά την επεξεργασία μίας εικόνας Διαφορικής Συμβολομετρίας. Η διακριτική ικανότητα της μετατόπισης ποικίλλει, διότι η επιτυχής μέτρηση της διαφοράς φάσης σε μία εικόνα Διαφορικής Συμβολομετρίας καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την συμβατότητα των εικόνων που χρησιμοποιούνται.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη **συμβατότητα** μεταξύ δύο εικόνων είναι:

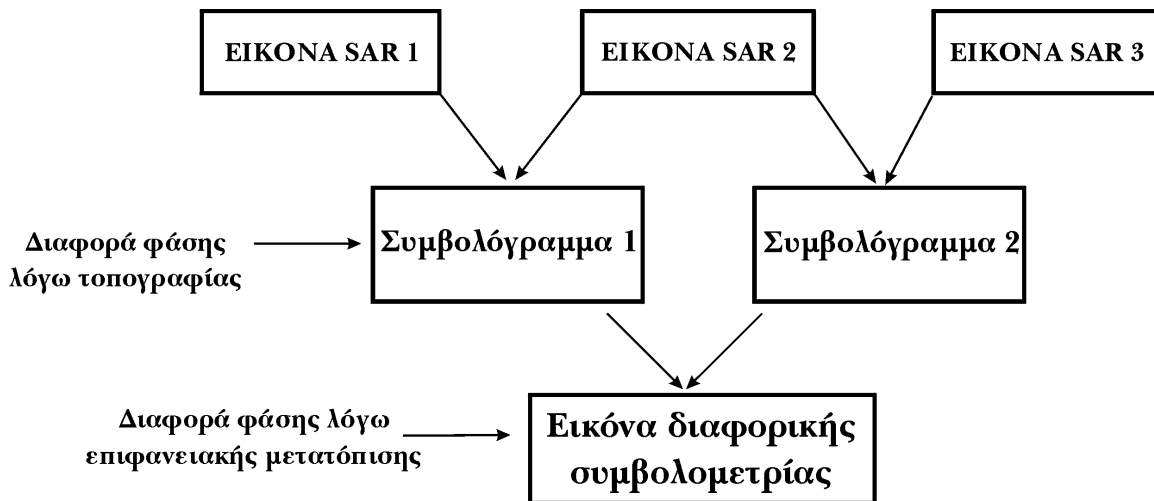
- Παράμετροι σχετικοί με την επεξεργασία μίας εικόνας
- Η κάθετη γραμμή βάσης των θέσεων του δορυφόρου κατά τις δύο λήψεις
- Χωρικές αλλαγές (όχι εδαφικές παραμορφώσεις) που προκαλούνται από διαφορετικά χαρακτηριστικά σκέδασης στις δύο εικόνες για το ίδιο χωρικό σημείο. Τέτοιες είναι οι αλλαγές στην κάλυψη Γης και κυρίως εποχιακές (φυτοκάλυψη, επιφανειακή ροή υδάτων). Επομένως είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθούν εικόνες που έχουν ημερομηνίες ίδιας εποχής (θέρος).

Για την εκτίμηση της συμβατότητας των εικόνων δημιουργείται αρχικά μια εικόνα συμβατότητας, η οποία διευκολύνει την εκτίμηση του βαθμού συσχέτισης των δύο εικόνων και κατά συνέπεια την χωρική διακριτική ικανότητα που μπορεί να επιτευχθεί.

### **3. Μεθοδολογία και Δεδομένα**

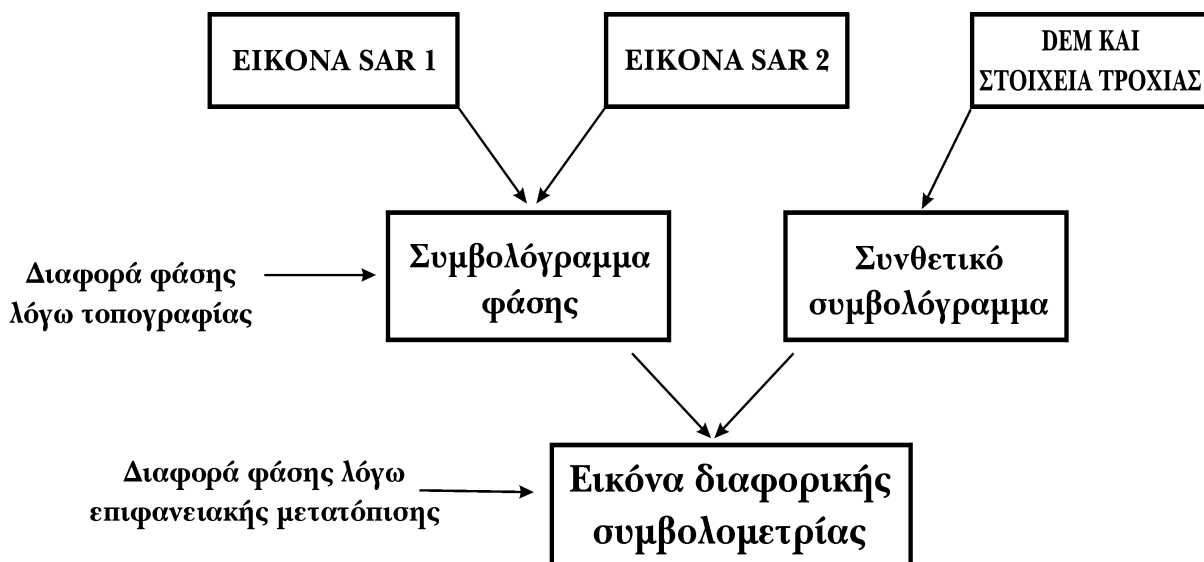
Επί της παρούσης, υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι εκτέλεσης της τεχνικής της Διαφορικής Συμβολομετρίας:

**Συμβολομετρία διπλής διαφοράς κροσσών συμβολής (Εικ. 6).** Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, λαμβάνονται τρεις εικόνες συνθετικού ανοίγματος ραντάρ διαφορετικής ημερομηνίας και διαφορετικών γωνιών λήψεως. Δημιουργούνται δύο εικόνες Συμβολομετρίας εκμεταλλευόμενοι την διαφορά φάσης μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης εικόνας και την διαφορά φάσης μεταξύ της δεύτερης και της τρίτης. Τέλος, η πρώτη εικόνα Συμβολομετρίας αφαιρείται από την δεύτερη και προκύπτει μία τρίτη, την οποία ονομάζουμε εικόνα Συμβολομετρίας διπλής διαφοράς κροσσών.



**Εικόνα 6.** Σχηματική παρουσία της μεθόδου διπλής διαφοράς ή των τριών περασμάτων

**Μέθοδος δύο λήψεων + ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου (Εικ. 7).** Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί δύο εικόνες για να δημιουργήσει μία εικόνα Συμβολομετρίας, ενώ η δεύτερη δημιουργείται με τρόπο «ανάστροφο», με την δημιουργία μίας συνθετικής εικόνας Συμβολομετρίας από το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου της περιοχής. Τέλος, αφαιρείται το «συνθετικό» συμβολόγραμμα από την «γνήσια» εικόνα Συμβολομετρίας και προκύπτει η εικόνα Διαφορικής Συμβολομετρίας



**Εικόνα 7.** Σχηματική παρουσίαση της μεθόδου των δύο λήψεων και χρήση DEM.

Για το συγκεκριμένο ερευνητικό πρόγραμμα επιλέχθηκε η δεύτερη μέθοδος, που είναι και μέθοδος που χρησιμοποιείται από την ερευνητική ομάδα, καθώς δίνει τα καλλίτερα αποτελέσματα όταν συνδυάζεται με την χρήση ενός DEM με υψηλή ανάλυση και ποιότητα. Το DEM που χρησιμοποιήθηκε δημιουργήθηκε από την ψηφιοποίηση των ισοϋψών ανα 20 μέτρα από τους τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1:50000 της ΓΥΣ που καλύπτουν την Κεφαλληνία.

Μετά από έρευνα στην βάση δεδομένων EOLI της ESA/ESRIN για τα κατάλληλα ζεύγη συμβολομετρίας εδημιουργήθη πίνακας με τα χαρακτηριστικά των ζευγών ( Bp, χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο λήψεων κλπ). Επίσης για τα ζεύγη που πληρούσαν τις προϋποθέσεις επιλογής εξητήθησαν από την EMY οι μετεωρολογικές συνθήκες της ημέρας καταγραφής καθώς και της προηγούμενης. Μετά από μελέτη όλων των στοιχείων καθώς και της σεισμικότητας στην ευρύτερη περιοχή από το 1992 έως το 2000, απεφασίσθη η επιλογή ζεύγους με πολύ χαμηλή Bp, αλλά μεγάλη χρονική απόσταση μεταξύ των δύο λήψεων του ζεύγους. Σκοπός ήταν η πιθανότητα καταγραφής της παραμόρφωσης σε βάθος χρόνου από την στιγμή που δεν υπήρχε κάποιο ισχυρό σεισμικό γεγονός, ώστε να γίνει η κατάλληλη επιλογή για την καταγραφή της προ- και συν-σεισμικής παραμόρφωσης. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εικόνων του αποτελούν το ζεύγος που επελέχθη είναι τα παρακάτω:

Satellite	Frame	Orbit	Date	Bp (ESA)
ERS-1	0765	21989	28 SEP 1995	12m
ERS-2	0765	17346	14 AUG 1998	

#### **4. Αποτελέσματα Συμβολομετρίας Ραντάρ**

Κάθε πλήρης κύκλος κροσσού 360<sup>0</sup> αντιπροσωπεύει ένα συγκεκριμένο υψομετρικό διάστημα για όλους τους κροσσούς σε ένα συμβολογράφημα. Το διάστημα αυτό είναι



γνωστό ως  $\Delta z$  (altitude of ambiguity) και υπολογίζεται σε συνάρτηση με το μήκος κύματος του ραντάρ, το ύψος τροχιάς του Δορυφόρου, την προσπίπτουσα γωνία και την Bperp (την κάθετη απόσταση μεταξύ των δύο τροχιών). Για το συγκεκριμένο ζεύγος συμβολομετρίας το  $\Delta z$  είναι περίπου 495 μέτρα. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι κάθε κροσσός στο συμβολογράφημα αντιπροσωπεύει 495 μέτρα διαφορά στο υψόμετρο, συν την επί πλέον πιθανή μετατόπιση που έχει συμβεί. Επιπλέον το  $\Delta z$  είναι και μία παράμετρος αξιολόγησης της ποιότητας του ζεύγους των εικόνων SAR που επελέγησαν.

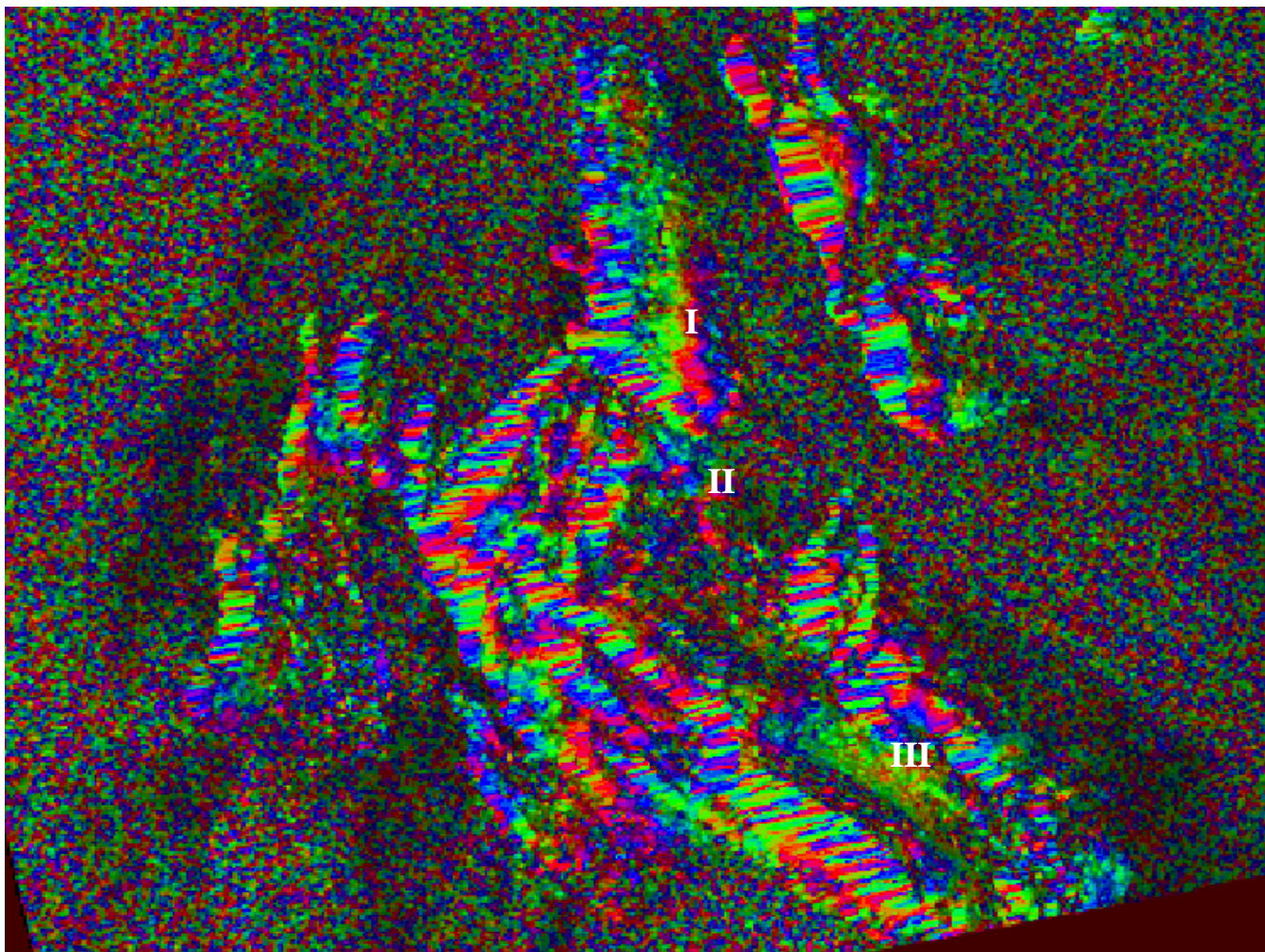
Από την εικόνα συνοχής για το συγκεκριμένο ζεύγος προκύπτει ότι ο βαθμός συνοχής είναι χαμηλός έως πολύ χαμηλός για το μεγαλύτερο τμήμα της Κεφαλληνίας και μόνο κατά τόπους υπάρχει καλή συνοχή. Αυτό οφείλετο βασικά στη μεγάλη χρονική διαφορά μεταξύ των δύο λήψεων (temporal separation) και την κάλυψη γης στο νησί, που σε μεγάλο μέρος καλύπτεται από πυκνή ή σχετικά πυκνή βλάστηση. Στην περιοχή Ληξουρίου και νοτιότερα, όπου η βλάστηση είναι αραιή, η χαμηλή συνοχή πιθανότατα οφείλεται στην παρουσία χαλαρών σχηματισμών υποκείμενοι σε διαβρωτικά φαινόμενα. Οι περιοχές όπου η συνοχή είναι σε αποδεκτά επίπεδα για την ερμηνεία στην συνέχεια του συμβολογραφήματος είναι (i) στο βορειοανατολικό τμήμα στην ευρύτερη περιοχή του χωριού Νεοχώρι, (ii) νοτιότερα και σε μικρή απόσταση από το χωριό Αγία Ευφημία και (iii) στην περιοχή Κόκκινη Ράχη, ΒΑ του χωριού Διγαλέτο.

Παρατηρούντες την εικόνα διαφορικής συμβολομετρίας (Εικ. 8), στις αντίστοιχες περιοχές με υψηλή συνοχή εμφανίζονται κροσσοί συμβολής αντίθετα με το υπόλοιπο της εικόνας, όπου λόγω της χαμηλής συνοχής εμφανίζεται ένα μωσαϊκό από εικονοστοιχεία, που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως θόρυβος, όπου δεν μπορεί να γίνει καμία εκτίμηση της παραμόρφωσης. Οι ερμηνεία των κροσσών αυτών απαιτεί προσοχή για την αποφυγή εσφαλμένων συμπερασμάτων. Αναλύοντας την κάθε περίπτωση ξεχωριστά παρατηρούμε ότι:

- (i) Στην περίπτωση της περιοχής Νεοχώρι αναγνωρίζεται ένας κροσσός, ο οποίος αναπτύσσεται σύμφωνα με την τοπογραφία. Η διαφορά του υψομέτρου της περιοχής που καταλαμβάνει ο κροσσός είναι περίπου 500 μέτρα, που αντιστοιχεί

στο Δz, γεγονός που σε συνδυασμό με την τεκτονική της περιοχής και τα σύγχρονα δεδομένα GPS μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο κροσσός αυτό πιθανότατα να εκφράζει απλά την τοπογραφία στη περιοχή.

- (ii) Ένας μικρός σχεδόν κυκλικός κροσσός αναγνωρίζεται και στην περιοχή της Αγίας Ευφημίας. Η χωρική κατανομή δεν σχετίζεται με την τοπογραφία, αλλά το ενδιαφέρον εστιάζεται στο γεγονός ότι ευρίσκεται επάνω σε ρήγμα με διεύθυνση BBΔ-NNA. Είναι δύσκολο να εξαχθούν συμπεράσματα για τον συγκεκριμένο κροσσό, κυρίως λόγω της πολύ μικρής του έκτασης. Είναι πιθανόν η παραμόρφωση στο συγκεκριμένο σημείο να οφείλεται σε άλλα αίτια, όπως για παράδειγμα κατακόρυφες κινήσεις λόγω καθίζησης.
- (iii) Η περίπτωση της παραμόρφωσης στη περιοχή του οικισμού Διγαλέτου παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Αυτό διότι εκτός του γεγονότος ότι στην περιοχή έχουμε ένα σχετικά υψηλό επίπεδο συνοχής (εικόνα συνοχής), εμφανίζονται στην εικόνα διαφορικής συμβολομετρίας σχεδόν δύο κροσσοί συμβολής ενώ η αντίστοιχη υψομετρική διαφορά είναι μόλις 350 μέτρα. Η περιοχή όπου παρατηρείται η παραμόρφωση αποτελείται από Αλπικούς σχηματισμούς της Ιόνιας Ζώνης και συγκεκριμένα λεπτοπλακώδεις ανθρακικοί σχηματισμοί Κρητιδικής ηλικίας, σχηματισμοί Ammonitico rosso και σχιστόλιθοι Μέσο-Ανω Ιουρασικής ηλικίας και τέλος Εβαπορίτες και Λατυποπαγή κάτω Τριαδικής ηλικίας. Επί πλέον η ζώνη παραμόρφωση οριοθετείται από δύο ρήγματα με διεύθυνση Α-Δ και ΒΑ-ΝΔ.



**Εικόνα 8.** Διαφορικό Συμβολογράφημα της Νήσου Κεφαλληνίας για το χρονικό διάστημα: Σεπτέμβριος 1995 – Αύγουστος 1998, I (περιοχή Νεοχώρι), II (περιοχή Ευφημίας) και III (περιοχή Διγαλέτου)