

# Ανάπτυξη συστήματος παρακολούθησης της αστάθειας κλιτύων για την πρόληψη κατολισθήσεων: Προκαταρκτικά αποτελέσματα

Δρακάτος Γ.<sup>1</sup>, Παραδείσης Δ.<sup>2</sup>, Αναστασίου Δ.<sup>2</sup>, Ηλίας Π.<sup>1</sup>,  
Μαρίνου Α.<sup>2</sup>, Χουσιανίτης Κ.<sup>1</sup>, Παπανικολάου Ξ.<sup>2</sup>, Ζαχαρής Ε.<sup>2</sup>,  
Αργυράκης Π.<sup>1</sup>, Παπαζήση Κ.<sup>2</sup>, Μήλας Π.<sup>2</sup>

1. Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών
2. Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου – Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ.

**Σύνοψη:** Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα προκαταρκτικά αποτελέσματα από την ανάπτυξη, για πρώτη φορά στην Ελλάδα, συστήματος παρακολούθησης της αστάθειας των κλιτύων σε δύο περιοχές της Πελοποννήσου που παρουσιάζουν έντονα κατολισθητικά προβλήματα. Πρόκειται συγκεκριμένα για τις περιοχές Σελλά Μεσσηνίας και Χαλκείου Κορινθίας. Και στις δύο περιοχές εγκαταστάθηκε γεωδαιτικό δίκτυο μη μόνιμων σταθμών GPS, μόνιμων σταθμών GPS καθώς και δίκτυο τεχνητών γωνιακών ανακλαστήρων για τη διεξαγωγή μελέτης Δορυφορική Συμβολομετρία SAR. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται λεπτομερώς όλες οι σχετικές ενέργειες και μετρήσεις καθώς και τα πρώτα (προκαταρκτικά) αποτελέσματα.

## 1. Εισαγωγή

Οι κατολισθήσεις, ως απόρροια της αστάθειας των κλιτύων, αποτελούν φυσική καταστροφή οφειλόμενη σε γεωλογικά και άλλα αίτια με σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον. Τα αίτια των κατολισθήσεων μπορεί να είναι αμιγώς γεωλογικά, απόρροια άλλων φυσικών καταστροφών, απόρροια της οικιστικής εξάπλωσης σε συνδυασμό με την τουριστική ανάπτυξη σε ακατάλληλες από γεωλογική άποψη περιοχές, ή συνδυασμός των παραπάνω αιτίων (Παυλόπουλος, Κ., 2008). Οι επιπτώσεις των κατολισθήσεων συμπεριλαμβάνουν καταστροφές μεγάλων οδικών αξόνων και τεχνικών έργων, καταστροφές σε οικισμούς, αλλοιώσεις στο περιβάλλον, κλπ. Η μέχρι σήμερα εμπειρία έχει δείξει ότι η πρόληψη για τέτοιου είδους καταστροφές ευρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα, ο δε βαθμός αντιμετώπισης είναι ανεπαρκής, επειδή αφενός δεν υφίσταται συστηματική παρακολούθηση των προβληματικών περιοχών, αφετέρου οι κλασσικές τεχνικές περισσότερο “θεραπεύουν” παρά προλαμβάνουν.

Αντίθετα, στο πεδίο της Δορυφορικής Γεωδαισίας, τα Παγκόσμια Δορυφορικά

Συστήματα Πλοήγησης (GNSS) καθώς επίσης και η Δορυφορική SAR Συμβολομετρία (DInSAR) βρίσκονται πλέον σε ένα ώριμο στάδιο από πλευράς επιστήμης και μηχανικής, έτσι ώστε να είναι πλήρως λειτουργικά ως αυτόνομες τεχνικές ή ως μέρος ενός ολοκληρωμένου συστήματος για την έγκαιρη προειδοποίηση, πρόβλεψη και αντιμετώπιση τέτοιων κινδύνων (Ferretti et al., 1999; Kimura and Yamaguchi, 2000; Baldi et al., 2008; Berardino et al., 2002, 2003, Malet et al., 2002, Brunner et al., 2003; Colesanti et al., 2003, Noferini et al., 2006, Rott and Nagler, 2006, Zhou et al., 2009). Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η διερεύνησης της δυνατότητας παρακολούθησης της σταθερότητας των κλιτύων και της εκτίμησης του κινδύνου για κατολισθήσεις, με το συνδυασμό διαφορετικών δορυφορικών τεχνολογιών αιχμής.

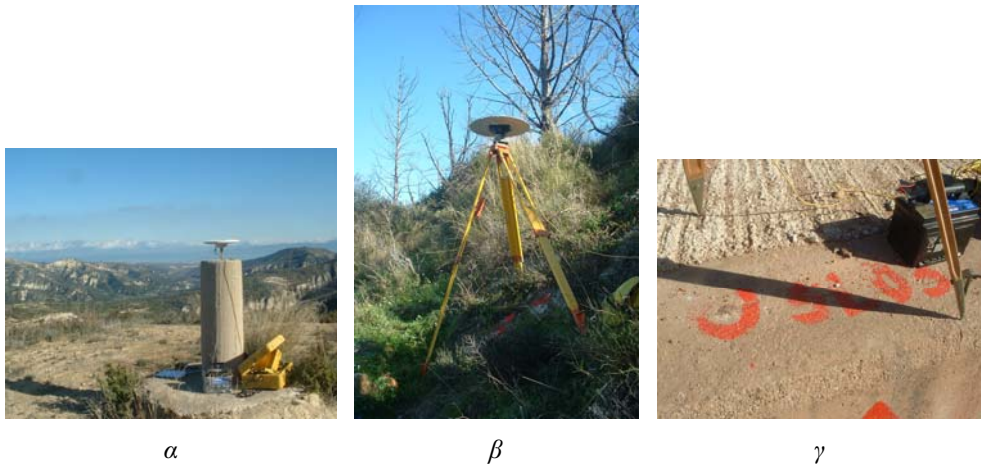
*Περιοχή Εφαρμογής:* Στην Ελλάδα, και ειδικά σε πολλές περιοχές της Περιφέρειας Πελοποννήσου, έχουν συμβεί τα τελευταία χρόνια μεγάλες κατολισθήσεις, που προκάλεσαν εκτεταμένες καταστροφές σε μεγάλους οδικούς άξονες. Ως κύριες περιπτώσεις αναφέρονται οι καθιζήσεις – κατολισθήσεις το Φεβρουάριο 2003 στο τμήμα της Εθνικής οδού Κορίνθου – Τρίπολης (στην περιοχή μεταξύ της διασταύρωσης της Νεμέας και του κόμβου Στέρνας), όπου γίνονται αλληπάλληλες καταπτώσεις βράχων, και στη Νέα Εθνική Οδό Μεγαλόπολης – Καλαμάτας (τμήμα Παραδείσια – Τσακώνα). Ο συνδυασμός του γεωλογικού υποβάθρου της Πελοποννήσου (Λέκας, 1978; Μουντράκης, 1985; Παπανικολάου, 1986, 1990) και της δημιουργίας μεγάλων αποψιλωμένων εκτάσεων λόγω των φονικών πυρκαγιών του καλοκαιριού του 2007, αυξάνει δραματικά τον κίνδυνο εμφάνισης κατολισθητικών φαινομένων καθώς και φαινομένων παραμόρφωσης του εδάφους. Μετά από επανειλημμένες επισκέψεις σε προβληματικές περιοχές, επελέγησαν οι περιοχές Χαλκείου (Ν. Κορινθίας) και Σελλά (Ν. Μεσσηνίας). Η επιλογή των τελικών θέσεων παρακολούθησης βασίστηκε στα εξής κριτήρια: Μέγεθος και ένταση κατολισθητικών φαινομένων, “χώρος” εκδήλωσης των φαινομένων, κάλυψη της περιοχής από τις τροχιές των δορυφόρων SAR, ευκολία πρόσβασης, δυνατότητα ασφαλούς εγκατάστασης μη μόνιμων γεωδαιτικών σταθμών, δυνατότητα ασφαλούς εγκατάστασης μόνιμων γεωδαιτικών σταθμών, δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Και στις δύο περιοχές υλοποιήθηκε δίκτυο μη μόνιμων σταθμών GPS, εγκαταστάθηκε μόνιμος σταθμός GPS και εγκαταστάθηκαν γωνιακοί ανακλαστήρες.

## **2. Γεωδαιτικά δίκτυα μη μόνιμων σταθμών GPS**

Τα γεωδαιτικά δίκτυα μη μόνιμων σταθμών GPS υλοποιούνται σε σημεία που κατά το δυνατόν δεν έχουν ανεξάρτητη κίνηση από αυτήν που προκύπτει από την γεωλογική δυναμική της περιοχής, π.χ. Τεχνικά έργα, βράχοι (μητρικό πέτρωμα), και τριγωνομετρικά σημεία του κρατικού τριγωνισμού. Στα σημεία αυτά πραγματοποιούνται μετρήσεις GPS σε διαφορετικές περιόδους, ώστε να γίνει εφικτή η

παρακολούθηση της μετατόπισης των σημείων. Στα δίκτυα παρακολούθησης κατολισθήσεων το μεγαλύτερο μέρος του δικτύου υλοποιείται εντός της περιοχής που παρατηρείται το φαινόμενο. Ωστόσο επιλέγονται και σημεία εκτός της περιοχής που δεν επηρεάζονται άμεσα από την κατολίσθηση έτσι ώστε να συσχετισθεί και η δυνατόν να διαχωριστεί η μετακίνηση που προέρχεται από την κατολίσθηση και από την ευρύτερη τεκτονική μετακίνηση στην περιοχή.

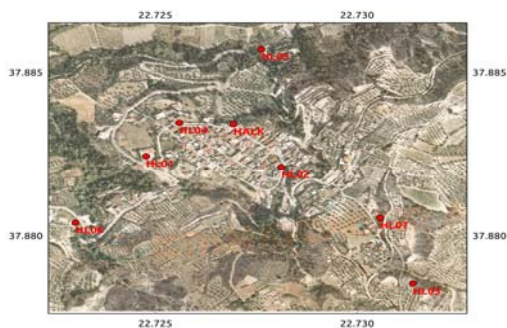
Στις δύο περιοχές, Χαλκείου και Σελλά, εγκαταστάθηκαν δύο δίκτυα μη μόνιμων σταθμών GPS που αποτελούνται από 7 και 9 σημεία αντίστοιχα. Σε κάθε δίκτυο περιλαμβάνεται ένα τριγωνομετρικό σημείο του δικτύου της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ), στο οποίο έχει εγκατασταθεί ειδική μόνιμη βάση ώστε να εξαιρεθούν τα σφάλματα κέντρωσης (εικόνα 1α). Τα τριγωνομετρικά σημεία βρίσκονται εκτός των περιοχών των κατολισθήσεων. Τα υπόλοιπα σημεία είναι υλοποιημένα με ατσαλόκαρφο σε βράχους (εικόνα 1β) ή τεχνικά έργα (εικόνα 1γ) μέσα στις περιοχές των κατολισθήσεων.



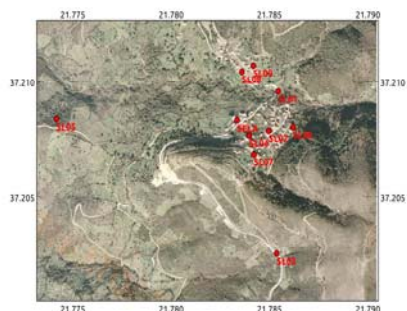
**Εικόνα 1.** Υλοποίηση σημείων  
α) σε τριγωνομετρικό σημείο, β) σε βράχο, γ) σε τεχνικό έργο.

Στο χάρτη 1 παρουσιάζονται τα σημεία του Γεωδαιτικού Δικτύου στην περιοχή Χαλκείου Κορινθίας και στον Χάρτη 2 τα αντίστοιχα σημεία για την περιοχή Σελλά Μεσσηνίας.

Από την ίδρυση των δικτύων πραγματοποιήθηκαν μέχρι την ώρα που συγγράφεται η παρούσα εργασία δύο σειρές μετρήσεων. Η πρώτη σειρά πραγματοποιήθηκε το Γενάρη του 2011 ενώ η δεύτερη πραγματοποιήθηκε τον Απρίλη του 2011. Ο σχεδιασμός των μετρήσεων, έγινε έτσι ώστε να εξασφαλιστούν κατ' ελάχιστον 3 ώρες παρατηρήσεων για κάθε σημείο, με ρυθμό καταγραφής 15 sec, με γωνία αποκοπής δορυφόρων από τον ορίζοντα  $10^\circ$ .



**Χάρτης 1:** Γεωδαιτικό δίκτυο στο Χαλκείο Κορινθίας.



**Χάρτης 2:** Γεωδαιτικό δίκτυο στο Σελλά Μεσσηνίας.

## 2.1 Επίλυση των δεδομένων

Η επίλυση των δεδομένων των μετρήσεων έγινε με το επιστημονικό πακέτο επεξεργασίας Bernese GPS Software v.5.0. Για την επίλυση χρησιμοποιήθηκαν τα τελικά προϊόντα που παράγονται από την International GNSS Service (IGS) και περιλαμβάνουν τις τροχιές ακριβείας των δορυφόρων καθώς και τις πληροφορίες του πόλου. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν τα αρχεία διαφορικών διορθώσεων Κώδικα (Code Differential Bias, DCB) όπως αυτά παράγονται από τη CODE (Schaer, 2008).

Τοπικά μοντέλα ιονόσφαιρας υπολογίστηκαν ως ανάπτυγμα σφαιρικών αρμονικών για κάθε βάση μεγαλύτερη των 400 km. Επίσης, υπολογίστηκαν και εκτιμήθηκαν για κάθε σταθμό και ανά δύο ώρες, διορθώσεις για την επίδραση της τροπόσφαιρας σύμφωνα με το μοντέλο του Niell (Niell, 1996).

Η επίλυση των ασαφειών φάσης έγινε με τη χρήση δύο αλγορίθμων. Για τις βάσεις με μήκος μεγαλύτερο των 10 km χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Quasi-Ionosphere-Free (QIF) με τον οποίο λύθηκε το μεγαλύτερο μέρος των βάσεων. Για τις βάσεις με μήκος μικρότερο των 10 km χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SIGMA (Dach, 2007). Το αποδεκτό ποσοστό επιλυμένων ασαφειών φάσης για τις βάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην επίλυση είναι 70%.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν κανονικές εξισώσεις για κάθε μέρα επίλυσης οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των τελικών συντεταγμένων των σημείων.

## 2.2 Υλοποίηση του Συστήματος Αναφοράς

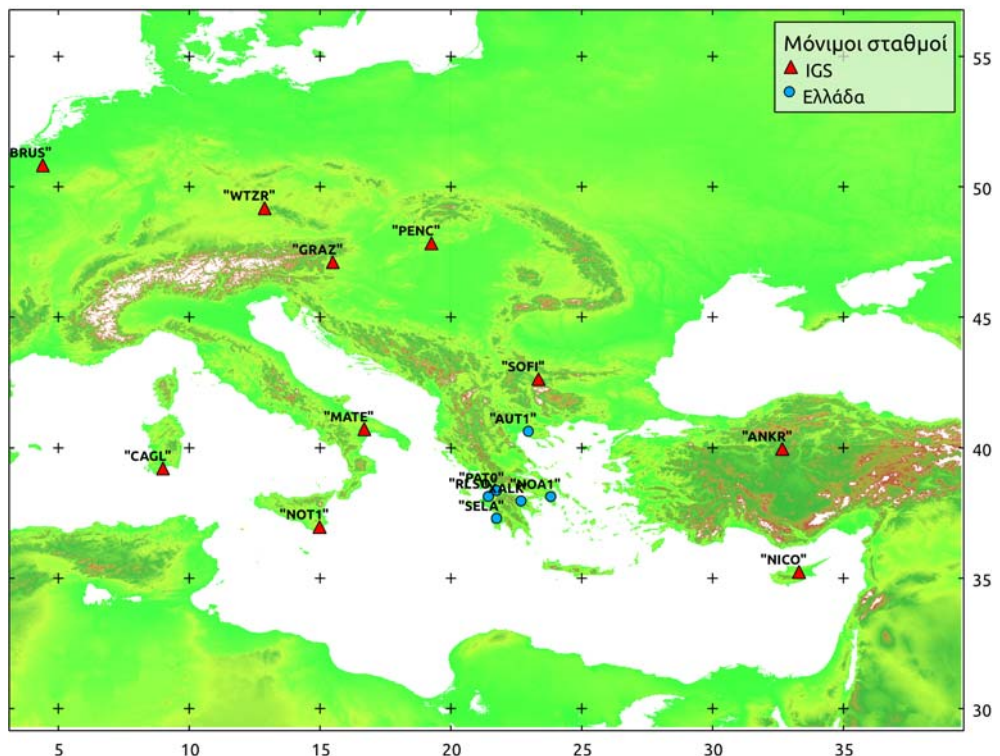
Στην επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν 10 σταθμοί της IGS από το εξωτερικό (Ευρώπη), 7 μόνιμοι σταθμοί στην Ελλάδα, οι οποίοι είναι μέρος του μόνιμου δικτύου που επιλύεται σε συνεχή βάση στο Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας και Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου (Paranikolaou et al., 2010), καθώς και

οι μετρήσεις των σημείων των δικτύων. Στον πίνακα 1 και στον χάρτη 3 παρουσιάζονται όλοι οι μόνιμοι σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση των δικτύων.

Η υλοποίηση του συστήματος αναφοράς ITRF2005 έγινε με τη χρήση των 10 σταθμών IGS από το εξωτερικό των οποίων οι συντεταγμένες σταθεροποιήθηκαν

**Πίνακας 1.** Μόνιμοι σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν στην επίλυση του δικτύου.

Σταθμοί IGS		Ελλάδα
ANKR	NICO	AUT1 (Θεσ/νίκη)
BRUS	NOT1	NOA1 (Αθήνα)
CAGL	PENC	PAT0 (Πάτρα)
GRAZ	SOFI	RLSO (Ριόλος)
MATE	WTZR	SELA (Σελλάς)
		VASS (Βάσσης)
		XALK (Χαλκείο)



**Χάρτης 3.** Οι μόνιμοι σταθμοί IGS και στην Ελλάδα που χρησιμοποιήθηκαν στην επίλυση.

στην εποχή επίλυσης και χρησιμοποιώντας τους μόνιμους σταθμούς στην Ελλάδα για την εξάρτηση των τοπικών δικτύων.

Οι σταθμοί AUT1, NOA1 και PAT0 αποτελούν μέρος του ευρωπαϊκού δικτύου EUREF και επιλύθηκαν με στόχο τον έλεγχο των αποτελεσμάτων.

Για κάθε σειρά μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχοι σταθμοί στην Ελλάδα για την εξάρτηση των δικτύων ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων των σταθμών. Όλοι οι μη μόνιμοι σταθμοί των τοπικών δικτύων επιλύθηκαν από τους αντίστοιχους μόνιμους σταθμούς που χρησιμοποιήθηκαν κάθε φορά.

### 2.3 Αρχικά αποτελέσματα

Το διάστημα των 4 μηνών που μεσολαβεί μεταξύ των 2 περιόδων των μετρήσεων δεν επαρκεί για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Επίκειται η επαναμέτρηση του μη μόνιμου δικτύου, τουλάχιστο 2 φορές το χρόνο για την εκτίμηση και των μετακινήσεων που συνδέονται με τις εποχιακές μεταβολές. Οι μεταβολές κατά ΔΝ και ΔΕ κυμαίνονται από 1.2 mm έως 9.7 mm και από 0.6 mm έως 7.6 mm αντίστοιχα.

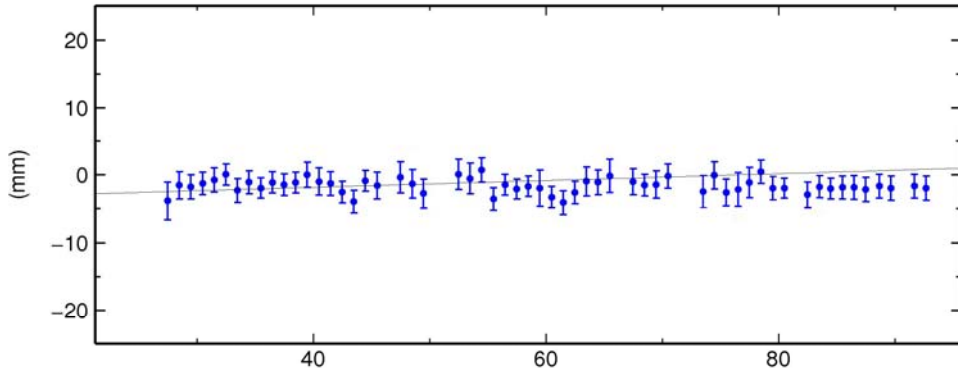
### 3. Μόνιμοι σταθμοί GPS

Η εγκατάσταση μόνιμων σταθμών GPS σε σημεία ενδιαφέροντος δίνει την δυνατότητα παρακολούθησης της μεταβολής της θέσης τους σε συνάρτηση με τον χρόνο καθώς και τον υπολογισμό του ρυθμού μεταβολής αυτής της θέσης με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης. Το σημαντικό πλεονέκτημα των σταθμών αυτών είναι η υψηλή χρονική διακριτική ικανότητά τους, η οποία σε συνδυασμό με τις ακρίβειες που μπορεί να επιτευχθούν και οι οποίες είναι της τάξης του  $\pm 1$  mm/yr (πχ. *Davis et al., 2003; Khan et al., 2005; Χουσιανίτης 2009*), τους καθιστούν ικανούς να καταγράφουν εδαφικές κινήσεις και παραμόρφωση προερχόμενη από διάφορα αίτια (πχ. σεισμοί, κατολισθήσεις) με μεγάλη αξιοπιστία.

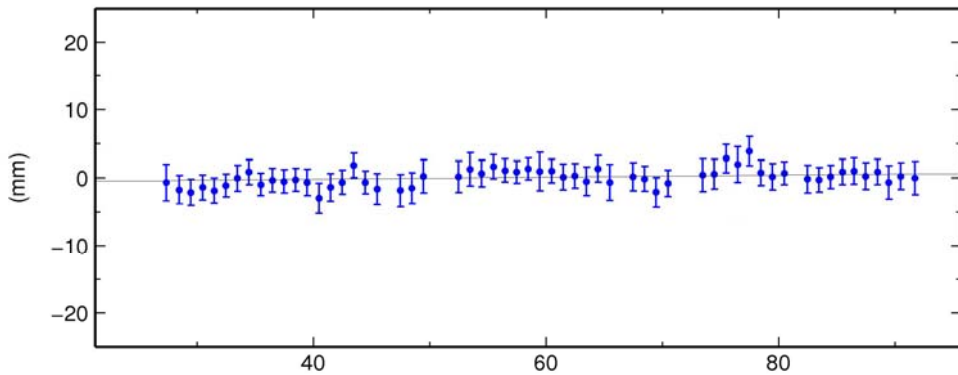
Στην παρούσα μελέτη εγκαταστάθηκαν δύο μόνιμοι σταθμοί GPS στις περιοχές Χαλκειού (Ν. Κορινθίας) και Σελλά (Ν. Μεσσηνίας) με σκοπό τη συνεχή και απρόσκοπτη καταγραφή της χρονικής συμπεριφοράς των κατολισθητικών φαινομένων που εντοπίστηκαν σε αυτές τις δύο περιοχές. Οι κεραιές εγκαταστάθηκαν στις ταράτσες κτιρίων τα οποία εντοπίζονται μέσα στην περιοχή που κατολισθαίνει. Τα δεδομένα και από τους δύο σταθμούς καταγράφονται με δύο διαφορετικούς ρυθμούς καταγραφής (1 sec και 30 sec).

Στο σύνολό τους, τα δεδομένα GPS και από τους δύο μόνιμους σταθμούς παρακολούθησης αναλύθηκαν με χρήση του επιστημονικού πακέτου επεξεργασίας Bernese GPS Software v.5.0. Η διαδικασία επίλυσης των μετρήσεων που ακολούθηθηκε είναι αντίστοιχη της επίλυσης των μη μόνιμων σταθμών όπως αυτή ανα-

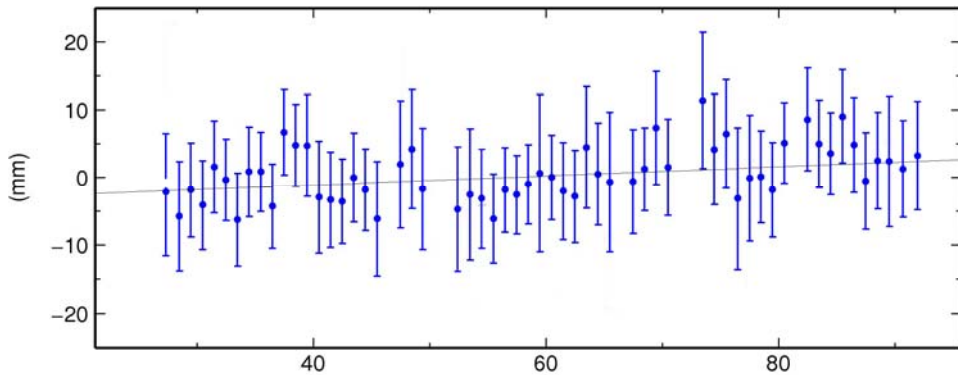
SELA North Offset 4142031.358 m



SELA East Offset 1931313.792 m



SELA Up Offset 526.123 m



**Διάγραμμα 1.** Τεκτονική Μετατόπιση του σταθμού SELA κατά Βορρά, Ανατολή και Υψόμετρο.



φέρθηκε στη παράγραφο 2.1. Τα ποσοστά επίλυσης των ασαφειών φάσης κυμάνθηκαν κατά μέσο όρο στο 90% για όλες τις ημερήσιες παρατηρήσεις. Το σύστημα αναφοράς υλοποιήθηκε με χρήση συντεταγμένων και ταχυτήτων των 10 διεθνών μόνιμων σταθμών της IGS, οι οποίοι αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.2 (Πίνακας 1), όπως αυτές διανέμονται από την υπηρεσία International Earth Rotation and Reference System Service (IERS). Οι σταθμοί αυτοί παρουσιάζουν ομαλή συμπεριφορά όπως αυτό φάνηκε από τις δημοσιευμένες χρονοσειρές τους, με αποτέλεσμα την αξιόπιστη υλοποίηση του πλαισίου αναφοράς. Στη συνέχεια, στο διάγραμμα 1 παρουσιάζεται ενδεικτικά η χρονοσειρά του σταθμού SELA στο χωριό Σελλά Μεσσηνίας. Παρατηρείται ότι η μορφή της είναι αρκετά ομαλή και συνεχής, χωρίς ιδιαίτερα κενά δεδομένων και μεγάλες αποκλίσεις. Το διάστημα παρατήρησης είναι πολύ μικρό, καθώς δεν ξεπερνάει τους τέσσερις μήνες. Οι εκτιμώμενες ταχύτητες του σταθμού με την μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής κατά Βορρά-Νότο, Ανατολή-Δύση και Υψόμετρο είναι 0.0174, 0.0037 και 0.0159 m/yr, με τις αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις να κυμαίνονται στα 0.007, 0.006 και 0.009 m/yr. Οι ταχύτητες αυτές μπορούν να κριθούν μεγαλύτερες των αναμενόμενων, αλλά στην παρούσα φάση προκύπτουν κυρίως λόγω του μικρού αριθμού μετρήσεων παρά λόγω τοπικών συνθηκών (κίνηση σταθμού ή κατολίσθηση). Αντίστοιχες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και για τον μόνιμο σταθμό στο Χαλκείο Κορινθίας, όπου και εκεί λόγω του μικρού αριθμού μετρήσεων εμφανίζονται μεγάλες τιμές στις ταχύτητες, με την αντίστοιχη χρονοσειρά βέβαια να παρουσιάζεται και εδώ ιδιαιτέρως ομαλή.

#### **4. Δορυφορική Συμβολομετρία SAR (DInSAR και PSI/SBAS)**

Στην τεχνική της συμβολομετρίας υπολογίζεται η συμβολή μεταξύ σημάτων ληφθέντων από δυο διαφορετικές χρονικές στιγμές, έχοντας εξαλειφθεί η επίδραση του ανάγλυφου (διαφορική συμβολομετρία). Τα παραχθέντα προϊόντα ονομάζονται διαφορικά συμβολογραφήματα και χαρακτηρίζονται από χαμηλή σχέση σήματος προς θόρυβο SNR λόγω των διαφορετικών συνθηκών κατά την λήψη των σκηνών, οι οποίες σχετίζονται με μετεωρολογικές παραμέτρους στην ανώτερη και χαμηλότερη ατμόσφαιρα (υγρασία, άνεμος, βροχόπτωση κα.), κάλυψη του εδάφους (βλάστηση), υγρασία του εδάφους, τοπογραφία καθώς και ιονοσφαιρικές διαταραχές. Η ακρίβεια του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (ΨΜΕ) καθώς και τα σφάλματα των τροχιών συμβάλουν επίσης στον θόρυβο του σήματος. Σύμφωνα με τον (Singhroy V. et al., 2004) η τεχνική συμβολομετρικού SAR μπορεί να μετρήσει μετακινήσεις μέτριων και μεγάλων κατολισθήσεων. Εξέλιξη της κλασσικής διαφορικής συμβολομετρίας αποτελεί η μεθοδολογία των Σταθερών Σκεδαστών (Permanent Scatterers - PS) και υποομάδων μικρών γραμμών βάσης (Small baselines Subset-SBAS). Βασίζεται στην αναγνώριση στόχων-σκεδαστών με χρονικά σταθερή ραδιομετρική συμπεριφορά. Με αυτές τις μεθόδους είναι δυνατή η ελαχιστοποίηση



του θορύβου και η μέτρηση γραμμικών ή μη παραμορφώσεων κατά τη διεύθυνση δορυφόρου-στόχου με ακρίβεια χιλιοστού ανά έτος (Colesanti et al., 2003, Bernardino et al, 2002, Ferretti et al, 2001). Η παρακολούθηση των κατολισθητικών φαινομένων από δορυφορικούς δέκτες SAR παρουσιάζει κάποιες ιδιαιτερότητες σε σχέση με παραμορφώσεις που έχουν προκληθεί από άλλες γεωφυσικές διαδικασίες ή ανθρώπινες παρεμβάσεις. Επί παραδείγματι α) λόγω της μικρής χωρικής ανάλυσης κυρίως των παλιών δεκτών SAR (ERS, ASAR) πολλές φορές οι ολισθαίνουσες επιφάνειες δεν καλύπτουν αρκετή χωρική έκταση, έτσι ώστε να είναι ανιχνεύσιμες και β) ο προσανατολισμός της επιφάνειας της κατολίστησης έχει να κάνει με το αν είναι ανιχνεύσιμη από ανοδικό ή καθοδικό ή και από τα δύο περάσματα του δορυφόρου. Όπως αναφέρθηκε, η μέτρηση των παραμορφώσεων γίνεται μόνο κατά τη διεύθυνση του δορυφόρου-στόχου. Κατά συνέπεια για να εκτιμηθεί το διάνυσμα της μετατόπισης χρειάζονται και άλλες μετρήσεις σε διαφορετικές διευθύνσεις. Αυτό το κενό καλύπτεται με τη χρήση πολλών δορυφορικών λήψεων SAR από διαφορετικές πλευρές, γωνίες και δέκτες καθώς και με τη χρήση μετρήσεων διαφορικών GPS.

#### 4.1 Τεχνητοί Ανακλαστήρες

Λόγω του πλήθους των θέσεων που έπρεπε να καλυφθούν δεν υπήρχε η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ανακλαστήρες προσανατολισμένοι και για τα δύο περάσματα για όλες τις θέσεις. Αποτέλεσμα του περιορισμένου διαθέσιμου πλήθους ανακλαστήρων και λόγω του προσανατολισμού των χωριών προτιμήθηκαν οι ανακλαστήρες καθοδικού περάσματος. Τα κτίσματα με στέγη χωρίς κεραμίδια ήταν πολύ περιορισμένα και χρησιμοποιήθηκαν όλα, εκτός αυτών που βρισκόταν πλησίον των επιλεγμένων. Η γωνία μεταξύ της οριζόντιας πλευράς του τριέδρου του ανακλαστήρα και του ορίζοντα για τον μεν Χαλκείο ορίστηκε στις  $21^\circ$ , για το δε Σελλά στις  $32^\circ$ .

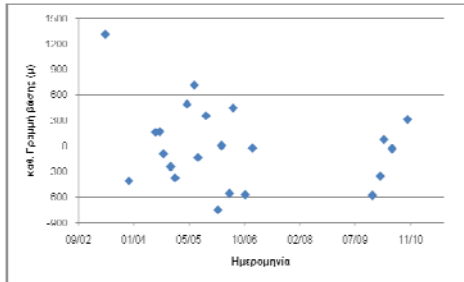
Τρεις τεχνητοί ανακλαστήρες με προσανατολισμό στα καθοδικά και δύο στα ανοδικά περάσματα εγκαταστάθηκαν στο χωριό Χαλκείο Κορινθίας (χάρτης 4). Επιπλέον τέσσερις τεχνητοί ανακλαστήρες με προσανατολισμό στα καθοδικά και ένα στα ανοδικά περάσματα εγκαταστάθηκαν στο χωριό Σελλά Μεσσηνίας.

#### 4.2 Δεδομένα

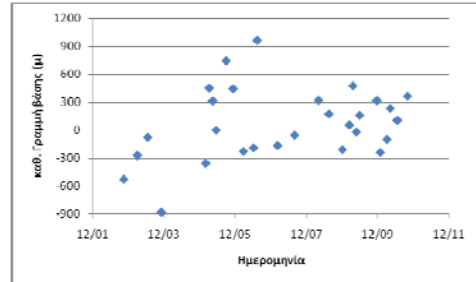
Για το παρόν έργο χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του πίνακα 2. Οι λήψεις mode I2, Track 7 και mode I2, Track 279 χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή χαρτών παραμόρφωσης με την τεχνική PSI/SBAS και καλύπτουν, για το μεν Track 7 και την περιοχή του Χαλκείου τη χρονική διάρκεια από 29/4/03 έως 19/10/10 και για το δε Track 279 και την περιοχή του Σελλά από 9/3/03 έως 3/10/10. Τα διαγράμματα καθέτων γραμμών βάσης vs. ημερομηνιών λήψεων για τα δυο Track παρουσιάζονται στο διάγραμμα 2.

**Πίνακας 2.** Τα σετ δορυφορικών δεδομένων SAR που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια του έργου.

Φορέας	ESA				CSA		
Έργο	CAT1-7936				SOAR-EU-6751		
Δέκτης	ASAR/ ENVISAT				RADARSAT 2		
Mode	I2	I2	I4	I2	U7	U2	U1
Γωνία (°)	23	23	34	23	35	31	30
Κατεύθ.	Asc	Desc	Desc	Desc	Desc	Desc	Asc
Αρχείο/Νέα	αρχείο	αρχείο	νέα	νέα	νέα	νέα	νέα
Track/Beam	7	279	7	280	812	800	802
Πλήθ	22	32	2	2	2	2	2
Περιοχή	Χαλκείο	Σελλάς	Σελλάς	Χαλκείο	Σελλάς	Χαλκείο	Χαλκείο



α



β

**Διάγραμμα 2.** Κάθετες γραμμές βάσης vs ημερομηνίες λήψης για το: (α) track 7 (Χαλκείο) και (β) track 279 (Σελλά).

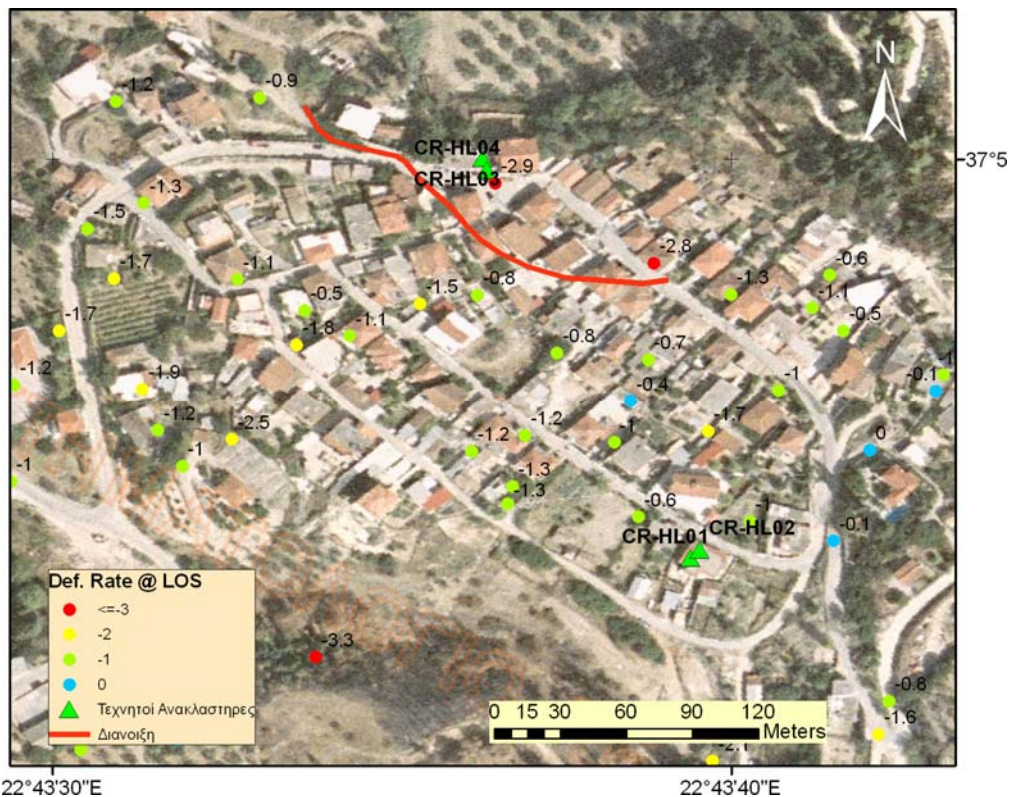
## 4.3 Αποτελέσματα

### 4.3.1 PSI/SBAS

Στο χάρτη 4 και την εικόνα 5 παρουσιάζονται οι περιοχές Χαλκείου και Σελλά αντίστοιχα. Οι τιμές των ρυθμών παραμόρφωσης (ταχύτητα) είναι σχετικές και αναφέρονται κατά τη διεύθυνση δορυφόρου – στόχου (LOS). Στους χάρτες παρουσιάζονται οι γραμμικές συνιστώσες των παραμορφώσεων, οι αριθμητικές τιμές των ρυθμών παραμόρφωσης και οι θέσεις των τεχνητών ανακλαστήρων.

Στο χάρτη 4 παρουσιάζεται με κόκκινη γραμμή η παρατηρούμενη διάνοιξη η οποία χαρτογραφήθηκε κατόπιν αυτοψίας. Εκατέρωθεν της διάνοιξης παρατηρείται μια διαφοροποίηση των ταχυτήτων κατά 1-2 mm/year. Επίσης παρατηρούνται και κάποιες άλλες διαφοροποιήσεις οι οποίες αποτιμούνται κοντά στα όρια της ακρίβειας το οποίο εκτιμάται περί το  $\pm 1$  mm/year.

Αντίστοιχος χάρτης παραμορφώσεων παράχθηκε για την περιοχή του Σελλά Μεσσηνίας. Σε αυτόν παρατηρήθηκαν κάποιες μικρές διαφοροποιήσεις των ταχυτήτων κατά 1mm/year (κοντά στα όρια της ακρίβειας το οποίο εκτιμάται περί το  $\pm 1$  mm/year) και υφίσταται στην περιοχή η οποία σύμφωνα με την επιτόπια αυτοψία (μαρτυρίες κατοίκων και ευρήματα στις οικίες και στο έδαφος είναι η κατολισθαίνουσα περιοχή).



**Χάρτης 4.** Ο χάρτης γραμμικών παραμορφώσεων κατά τη Διεύθυνση Δορυφόρου-Στόχου του Χαλκείου Κορινθίας που παρήχθει με τη μεθοδολογία PSI/SBAS σε υπόβαθρο αεροφωτογραφιών της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.

### 4.3.2 DINSAR με τεχνητούς ανακλαστήρες.

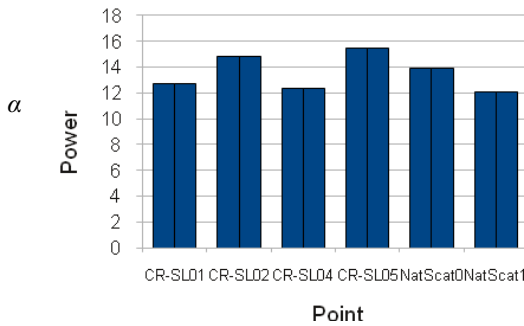
#### 4.3.2.1 RADARSAT-2. Τρία συμβολογραφήματα που παρήχθησαν (πίνακας 3).

Σε κάθε ένα από τα τρία modes δημιουργήθηκε η εικόνα οπισθοσκέδασης για να ανιχνευθούν ισχυροί σκεδαστές οι οποίοι μπορεί να είναι είτε φυσικοί είτε οι τεχνητοί ανακλαστήρες. Η ανίχνευση έγινε με σάρωση των εν λόγω εικόνων και παράλληλη δημιουργία των οριζόντιων profile. Ενδεικτικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα του mode U2 από το Σελλά. Στην περιοχή του Σελλά αναγνωρίστη-

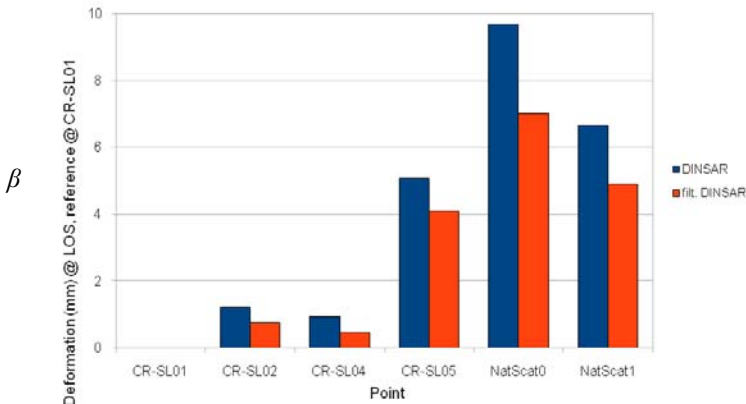
**Πίνακας 3:** Τα παραχθέντα συμβολογραφήματα από τον δέκτη RADARSAT-2, ληφθέντα μετά την εγκατάσταση των ανακλαστήρων.

Mode	Γωνία (°)	Κατεύθ.	master	slave	Χωρική γραμμή βάσης (m)	Χρονική γραμμή βάσης (ημέρες)	Χωριό	Γωνία τοποθ. Ανακλ. (°)
U1	30	Asc	6/3/11	23/4/11	41	24	Χαλκείο	33.7
U2	31	Desc	7/3/11	24/4/11	41	24	Σελλά	22.7
U7	35	Desc	7/3/11	24/4/11	52	24	Χαλκείο	33.7

RADARSAT-2, U7, Sella  
7/3/11



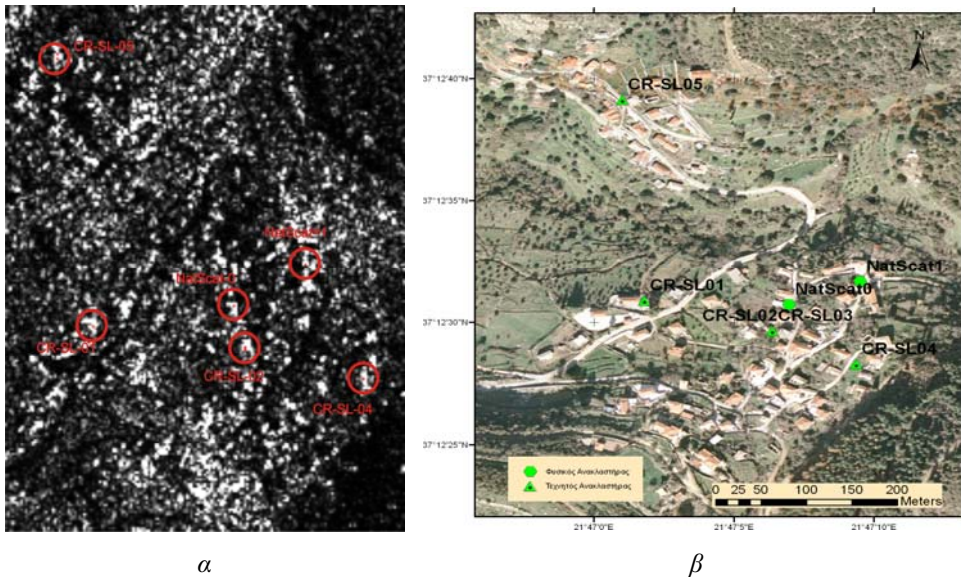
RADARSAT-2, Sella, U7, Desc, 7/3/11 - 24/4/11



**Διάγραμμα 3.** Για το καθοδικό mode U7:

- α) Τιμές οπισθοσκέδασης.
- β) Οι τιμές της διαφορικής φάσης και της αντίστοιχης φιλτραρισμένης σε χιλιοστά κατά την LOS.

καν οι τεχνητοί ανακλαστήρες που ήταν προσανατολισμένοι στο καθοδικό πέρασμα, ήτοι στην Δύση και δύο φυσικοί. Η τιμές της οπισθοσκέδασης τους αναπαρίστανται στο διάγραμμα 3α. Στο διάγραμμα 3β αναπαρίστανται οι τιμές της διαφορικής φάσης και της αντίστοιχης φίλτραρισμένης (με φίλτρο Goldstein με μέγεθος παραθύρου 64) σε χιλιοστά κατά την LOS για το διάστημα των 24 ημερών. Στην εικόνα 2α φαίνεται η εικόνα οπισθοσκέδασης. Με κύκλο δεικνύονται οι ανακλαστήρες.



**Εικόνα 2.** Για την περιοχή του Σελλά για το καθοδικό mode U7:

- α) Η εικόνα ισχύος της, με κύκλο επιδεικνύονται τα σημεία με τιμή πάνω από 12, τα οποία μαρκάρονται με κόκκινο χρώμα, με NatScat 0 και 1 ονομάζονται δυο ισχυροί φυσικοί ανακλαστήρες.
- β) Οι θέσεις των φυσικών και τεχνητών σκεδαστών προερχόμενων από την αντίστοιχη εικόνα οπισθοσκέδασης.

Η απόκλιση της διαφορικής φάσης μεταξύ των ανακλαστήρων CR-SL01, 03 και 04 είναι πολύ μικρή (~1 mm). Αντιθέτως η απόκλιση με τον CR-SL-05 είναι μεγαλύτερη (~4 mm – ~5mm). Ας σημειωθεί ότι όσο μακρύτερα και σε διαφορετικό υψόμετρο βρίσκονται οι ανακλαστήρες τόσο μεγαλύτερη τυπική απόκλιση αναμένεται. Ο CR-SL-05 τοποθετήθηκε μακρύτερα από τους υπόλοιπους. Για να εξαχθεί ένα ασφαλές συμπέρασμα χρειάζεται να ληφθεί ένα παρατηρήσεων ώστε να αποτελεί στατιστικό δείγμα.

#### 4.3.2.2 ASAR/ENVISAT.

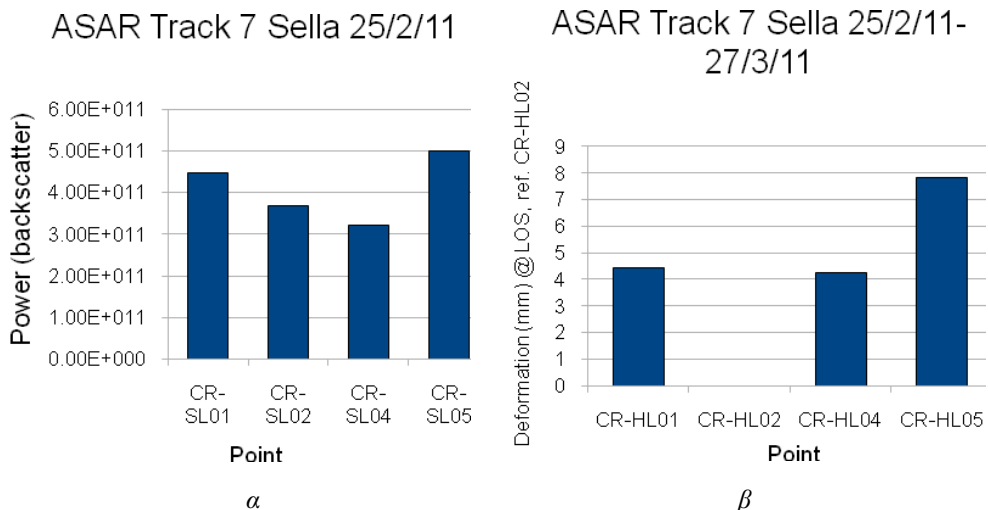
Δύο συμβολογραφήματα χρησιμοποιήθηκαν (πίνακας 4).

**Πίνακας 4.** Τα συμβολογραφήματα με αποδεκτή χωρική γραμμή βάσης που χρησιμοποιήθηκαν από τον δέκτη ASAR/ENVISAT, χρονολογούμενα μετά την εγκατάσταση των ανακλαστήρων.

Mode	Γωνία λήψης (°)	Track	Κατεύθ.	master	slave	Χωρική γραμμή βάσης (m)	Χρονική γραμμή βάσης (ημέρες)	Χωριό	Γωνία τοποθ. Ανακλ. (°)
I4	34	7	Desc	25/2/11	27/3/11	168	30	Σελλά	33.7
I2	23	280	Desc	14/2/11	16/3/11	-298	30	Χαλκείο	22.7

Σε κάθε από τα τρία modes δημιουργήθηκε η εικόνα οπισθοσκέδασης για να ανιχνευθούν ισχυροί σκεδαστές οι οποίοι μπορεί να είναι, είτε φυσικοί, είτε οι τεχνητοί ανακλαστήρες. Η ανίχνευση έγινε με σάρωση των εν λόγω εικόνων και παράλληλη δημιουργία των οριζόντιων profile. Ενδεικτικά θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα του mode I4 από το Σελλά.

Στο διάγραμμα 4α φαίνονται οι τιμές ισχύος ή οπισθοσκέδασης στις θέσεις των ανακλαστήρων στο χωριό Σελλά για τη λήψη ASAR/ENVISAT, Track 7 της 25ης Φεβρουαρίου 2011. Στην εικόνα 3 φαίνεται η εικόνα οπισθοσκέδασης της περιοχής του Σελλά. Παρατηρούμε τους ανακλαστήρες να έχουν φέρει σε κορεσμό και γειτονικά εικονοστοιχεία. Στο διάγραμμα 4β φαίνεται η διαφορική φάση (αφού έχει μετατραπεί σε μετακίνηση κατά την LOS) των ανακλαστήρων.



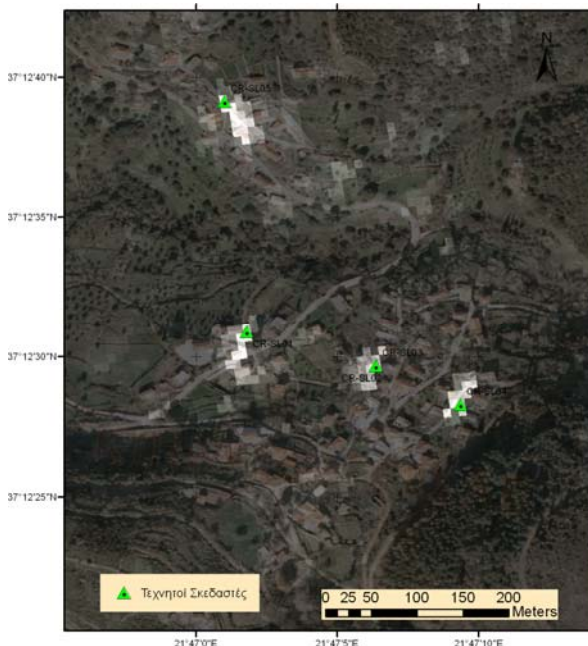
**Διάγραμμα 4.** α) Τιμές οπισθοσκέδασης στις θέσεις των ανακλαστήρων.  
β) Τιμές διαφορικής φάσης στις θέσεις των ανακλαστήρων, αναφορικά με το CR-SL2.



### 4.3.3 Συμπεράσματα από την μελέτη DINSAR-PSI/SBAS

Οι παρατηρήσεις από καθοδικά περάσματα, δηλαδή από τα δυτικά της κατολισθήσεως απεικονίζαν καλύτερα και τα δύο χωριά. Παρότι στην περίπτωση του RADARSAT-2, mode U2 η διαφορά της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με το εστιακό σημείο του τεχνητού ανακλαστήρα, για την περιοχή του Σελλά ήταν  $\sim 8^\circ$  ( $\sim 2.5$  dB απώλεια), οι ανακλαστήρες αναγνωρίστηκαν επιτυχώς και αποτελούν σημεία αξιόπιστης μέτρησης σε σχέση με το υπόβαθρο. Επιπλέον φυσικοί σκεδαστές με μεγάλη οπισθοσκέδαση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διεξαγωγή μετρήσεων παράλληλά με τους τεχνητούς, εφ' όσον η περιοχή μελέτης αποτελεί αστικό ή ημιαστικό περιβάλλον. Ο δέκτης RADARSAT-2 (με την μεγαλύτερη χωρική ανάλυση) ανέδειξε τους τεχνητούς ανακλαστήρες λιγότερο από το δέκτη ASAR/ENVISAT.

Η μεθοδολογία της διαφορικής συμβολομετρίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση κατολισθήσεων, αλλά απαιτείται κατάλληλη επεξεργασία και ένα πλήθος δεδομένων SAR διαφορετικών χαρακτηριστικών ανά περίπτωση. Να σημειωθεί ότι πριν την εφαρμογή μιας τέτοιας μεθόδου σε μια περιοχή παρακολούθησης απαιτείται μελέτη η οποία θα λαβαίνει υπόψη το προσανατολισμό της περιοχής, την κατολισθαίνουσα έκταση, την κάλυψη και χρήση γης, την παρουσία και πυκνότητα οικιστικού ιστού, το ρυθμό εδαφικών παραμορφώσεων και τη διαθεσιμότητα των δορυφορικών συστημάτων σε λειτουργία, παράλληλα με την επιτόπια αυτοψία.



**Εικόνα 3.** Η εικόνας ισχύος (οπισθοσκέδασης) του δέκτη ASAR/ENVISAT του Σελλά.



## 5. Συμπεράσματα του έργου

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει τα πρώτα (προκαταρκτικά) αποτελέσματα της ανάπτυξης συστήματος παρακολούθησης της αστάθειας κλιτύων για την πρόληψη κατολισθήσεων, που πραγματοποιήθηκε από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του ΕΑΑ και το Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, σε δύο επιλεγμένες περιοχές της Πελοποννήσου.

Όπως τονίστηκε προηγουμένως, το χρονικό διάστημα των νέων παρατηρήσεων (μέσα στο 2011) με την μεθοδολογία GPS είναι πολύ μικρό και δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Η χρήση τεχνητών ανακλαστήρων επικουρεί στην παρατήρηση με την χρήση διαφορικής συμβολομετρίας. Πρέπει όμως να υφίσταται σε βάθος χρόνου, έτσι ώστε να δημιουργηθούν κατάλληλα στατιστικά δείγματα. Η έλευση των νέων δορυφόρων με χαρακτηριστικό τους την πιο πυκνή δειγματοληψία, μπορούν να συμβάλουν στο σκοπό αυτό.

Παρά ταύτα, είναι η πρώτη φορά που εφαρμόζεται στην Ελλάδα παρόμοια συνδυασμένη μεθοδολογία. Επειδή δε οι μετρήσεις συνεχίζονται τουλάχιστον για μια πενταετία, αναμένεται να πραγματοποιηθεί λεπτομερής καταγραφή των κατολισθητικών φαινομένων.

## Βιβλιογραφία

- Baldi, P., Cenni, N., Fabris, M., Zanutta, A. (2008). Kinematics of a landslide derived from archival photogrammetry and GPS data, *Geomorphology*, Volume 102, 435-444.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and 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, 2375-2383.
- Brunner, F.K., Zobl, F., Gassner, G. (2003). On the capability of GPS for landslide monitoring, *Felsbau (Rock and Soil Engineering)* 21, 51-54.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2003). Monitoring landslides and tectonic motions using the permanent scatterer technique, *Eng. Geol.* 86, 3-14.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., Meindl, M., 2007. Bernese GPS Software Version 5.0. AIUB.
- Davis, J. L., R. A. Bennett, and B. P. Wernicke, 2003. Assessment of GPS velocity accuracy for the Basin and Range Geodetic Network (BARGEN), *Geophys. Res. Lett.*, 30(7), 1411, doi:10.1029/2003GL016961.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (1999). Monitoring Terrain Deformation using Multitemporal SAR Images, *Proc. of FRINGE'1999*.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39 (1), 8-20.
- Khan, Shfaqat Abbas, Per Knudsen and Carl Christian Tscherning, 2005. Crustal deforma-

- tions at permanent GPS sites in Denmark. In: A Window on the Future of Geodesy - Proceedings of the International Association of Geodesy IAG General Assembly Sapporo, Japan June 30 – July 11, 2003. ISSN: 0939-9585, Volume 128, Springer Berlin Heidelberg, DOI 10.1007/b139065.
- Kimura, H., Yamaguchi, Y. (2000). Detection of landslide areas using satellite radar interferometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66, 337–344.
- Λέκκας Σ., 1978. Συμβολή στη γεωλογική δομή της περιοχής νοτιοανατολικώς της Τριπόλεως (κεντρική Πελοπόννησος). Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο.
- Malet, J.-P., Maquaire, O., Calais, E. (2002). The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides - application to the Super-Sauze earth flow (Alpes de Haute-Provence, France), *Geomorphology* 43, 33–54.
- Μουντράκης Δημοσθένης, 1985. Γεωλογία της Ελλάδας.
- Noferini, L., Pieraccini, M., Mecatti, D., Macaluso, G., Luzi, G. and Atzeni, C. (2006). Long term landslide monitoring by ground-based synthetic aperture radar interferometer, *International Journal of Remote Sensing*, 27, 1893–1905.
- Παπανικολάου Δ., 1986. Γεωλογία της Ελλάδος. Εκδόσεις Επτάλοφος, Αθήνα.
- Παπανικολάου Δ., 1990. Παρουσία εμφανίσεων τύπου Άρβης, Δυτικής Θεσσαλίας και Όρλιακα στην Αργολίδα, Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας.
- Papanikolaou X., Marinou A., Mitsakaki C., Papazissi K., Paradissis D., Zacharis V., Anastasiou D., (2010). An automated processing scheme designed for all available permanent GPS stations in Greece. 15th General Assembly of WEGENER, Istanbul Turkey, 14-17 Sept 2010.
- Παυλόπουλος, Κ., 2008, Σημειώσεις Γεωμορφολογίας, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.
- Rott, H., Nagler, T. (2006). The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards, *Adv. Space Res.*, 37, 710–719.
- Schaer, S., 2008. Differential Code Biases (DCB) in GNSS Analysis, in: IGS. Workshop, Miami Beach, Florida, USA.
- Singhroy V. and Molch K., “Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques”, *Advances in Space Research*, vol. 33, 2004, p. 290-295.
- Zhou, X., Chang, N.B. and Li, S. (2009). Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research, *Sensors*, 9, 1876-1912.
- Niell, A. E. (1996), Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths, *Journal of Geophysical Research*, 101(B2), pp. 3227–3246.