

Πρόσφατες μετρήσεις για τον προσδιορισμό του συστηματικού σφάλματος στα αλτίμετρα των δορυφόρων Jason-1 και Jason-2, με τον μόνιμο δορυφορικό σταθμό βαθμονόμησης του Πολυτεχνείου Κρήτης στη Γαύδο.

Στέλιος Μερτίκας, Ρ. Ιωαννίδης, Ξ. Φραντζής, Α. Τριπολιτσιώτης, Π. Παρτσινέβελος  
Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχ. Ορυκτών Πόρων, Εργ. Γεωδαισίας & Γεωπληροφορικής, Χανιά.

Ι. Τζιαβός, Γ. Βέργος

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, Θεσσαλονίκη.

Walter Hausleitner

Ακαδημία Επιστημών της Αυστρίας, Ινστιτούτο Διαστημικών Ερευνών, Graz, Αυστρία.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μόνιμη εγκατάσταση για τη βαθμονόμηση των δορυφόρων αλτιμετρίας στη Γαύδο, νότια της Κρήτης, βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία από το 2004. Η θέση της Γαύδου τυγχάνει να είναι ακριβώς στην διασταύρωση των τροχιών δορυφόρων αλτιμετρίας, όπως της σειράς Jason (ανιούσα τροχιά Νο. 109 και κατιούσα τροχιά Νο 18), και γειτονικά του ίχνους της τροχιάς του δορυφόρου Envisat. Στόχος μιας τέτοιας μόνιμης εγκατάστασης είναι η βαθμονόμηση των μετρήσεων του αλτιμέτρου, καθώς και άλλων βοηθητικών μετρήσεων, την στιγμή που ο δορυφόρος βρίσκεται πάνω από την Γαύδο. Για την βαθμονόμηση και τον έλεγχο των επιστημονικών μετρήσεων χρησιμοποιούνται παρατηρήσεις από παλιρροιογράφους, από σταθμούς γεωδαιτικού εντοπισμού ακριβείας, όπως GPS, DORIS, καθώς και άλλοι αισθητήρες.

Η εκτόξευση του δορυφόρου Jason-2 πραγματοποιήθηκε με επιτυχία στις 20 Ιουνίου 2008 και σήμανε την έναρξη των μετρήσεων καθώς και τη βαθμονόμηση και σύγκριση των επιστημονικών του μετρήσεων με τον προγενέστερο Jason-1. Τούτο διευκολύνθηκε με την ταυτόχρονη πτήση των δορυφόρων Jason-1 και Jason-2, στην ίδια τροχιά και χρονική περίοδο αλλά με μια μικρή μετατόπιση της τάξης του ενός λεπτού. Έτσι, χρησιμοποιώντας τον σταθμό βαθμονόμησης δορυφόρων αλτιμετρίας της Γαύδου

προσδιορίστηκαν τα ακόλουθα: (1) Το απόλυτο συστηματικό σφάλμα στο αλτίμετρο του δορυφόρου Jason-1 για τους κύκλους 209-259, (2) Το απόλυτο αλτιμετρικό σφάλμα του δορυφόρου Jason-2 για τους κύκλους 2-28, (3) Το συστηματικό σφάλμα των δύο δορυφορικών αποστολών για το κοινό διάστημα πτήσης (Ιούλιος 2008 – Ιανουάριος 2009).

Η επέκταση των δυνατοτήτων του σταθμού βαθμονόμησης δορυφόρων της Γαύδου με την εγκατάσταση ενός νέου σταθμού στην νότια Κρήτη παρουσιάζεται, επίσης, στο συγκεκριμένο άρθρο.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη του κλίματος της Γης, στην οποία οι μεταβολές στην θαλάσσια στάθμη παίζουν σημαντικό ρόλο, απαιτεί υψηλή αξιοπιστία, ακρίβεια και μεγάλη χρονική διάρκεια των μετρήσεων που λαμβάνονται από δορυφόρους αλτιμετρίας. Οι δορυφορικές αποστολές αλτιμετρίας όμως έχουν μικρή διάρκεια ζωής, που κυμαίνεται από 3–7 έτη. Σήμερα, διάφορες αλτιμετρικές αποστολές είναι σε τροχιά, όπως οι δορυφόροι Jason 1&2, ERS και Envisat, καθώς και προγραμματίζονται νέες μελλοντικές αποστολές, όπως οι Cryosat-2, Sentinel-3, SARAL/Altiica, HY-2.

Τα επιστημονικά αποτελέσματα κάθε αποστολής, όπως το υψόμετρο της επιφάνειας της θαλάσσης και τα πεδία ανωμαλιών αυτού, πρέπει να συνδέονται και να βαθμονομούνται συνεχώς σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς, ανεξαρτήτως δορυφορικής αποστολής με συστηματικό και αξιόπιστο τρόπο.

Βαθμονόμηση δορυφόρων αλτιμετρίας είναι η διαδικασία προσδιορισμού και ελέγχου των μετρήσεων των οργάνων του δορυφόρου (υψόμετρο επιφανείας της θαλάσσης, καθυστερήσεις των σημάτων στην ατμόσφαιρα, γεωειδές, παλίρροιες, κλπ.) χρησιμοποιώντας ανεξάρτητες μετρήσεις από την ξηρά. Τούτο επιτυγχάνεται με την ίδρυση ειδικών σταθμών βαθμονόμησης εφοδιασμένους με όργανα, οι οποίοι θα προσδιορίζουν με αξιοπιστία (1) το απόλυτο αλτιμετρικό και συστηματικό σφάλμα για κάθε μία από τις αποστολές και (2) τα σχετικά συστηματικά σφάλματα μεταξύ των διαφόρων δορυφορικών αποστολών.

Μια άλλη προσέγγιση για την βαθμονόμηση δορυφόρων αλτιμετρίας είναι η χρήση ενός εκτεταμένου δικτύου παλιρροιογράφων, ανά την υφήλιο, εξοπλισμένων με γεωδαιτικούς δέκτες GPS. Έτσι προσδιορίζονται, ταυτόχρονα με τον δορυφόρο και στο ίδιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, τα υψόμετρα της θαλάσσιας στάθμης και στη συνέχεια διορθώνονται οι μετρήσεις του δορυφόρου. Ενώ οι αποκλειστικού προορισμού σταθμοί βαθμονόμησης, όπως της Γαύδος, προσδιορίζουν μόνο το απόλυτο αλτιμετρικό σφάλμα, με τα παγκόσμια δίκτυα παλιρροιογράφων είναι δυνατή η εκτίμηση της διαχρονικής μετατόπισης του συστηματικού σφάλματος του δορυφόρου.

Παρόλα αυτά, πολλοί λίγοι σταθμοί από το παγκόσμιο δίκτυο παλιρροιογράφων βρίσκονται στο ίχνος τροχιών δορυφόρων αλτιμετρίας και ακόμα λιγότεροι είναι εφοδιασμένοι με γεωδαιτικούς δέκτες GPS ή DORIS. Ο γεωδαιτικός έλεγχος με την χρήση GPS ή DORIS είναι απαραίτητος για την αποφυγή σφαλμάτων στον προσδιορισμό του υψόμετρου της επιφάνειας της θαλάσσης, λόγω τεκτονικών κινήσεων του παλιρροιογράφου.

Η βαθμονόμηση σε αποκλειστικού προορισμού σταθμούς, Calibration/Validation (Cal/Val),

επιτυγχάνεται συνδυάζοντας τις μετρήσεις radar από τους δορυφόρους με τις δορυφορικές εφημερίδες, τις γεωδαιτικές συντεταγμένες του σταθμού Cal/Val, καθώς και τις γεωδαιτικές εξασφαλίσεις και τις θαλάσσιες παραμέτρους μεταξύ των σημείων αναφοράς των διαφόρων αισθητήρων του σταθμού. Ο πρωταρχικός στόχος είναι η βαθμονόμηση των μετρήσεων του υψόμετρου της επιφάνειας της θαλάσσης, καθώς και των βοηθητικών μετρήσεων που λαμβάνονται από το αλτίμετρο την στιγμή που ο δορυφόρος βρίσκεται πάνω από τον σταθμό βαθμονόμησης.

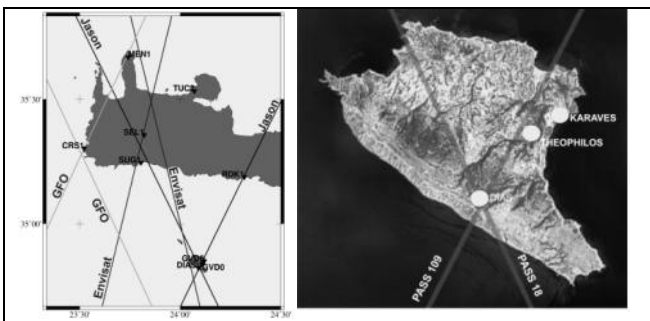
Πέντε σταθμοί απόλυτης βαθμονόμησης δορυφόρων αλτιμετρίας βρίσκονται στον κόσμο. Τρεις βρίσκονται στην Ευρώπη (Γαύδος, Κορσική στη Γαλλία και Ίμπιζα στην Ισπανία) ένας στις ΗΠΑ (Πλατφόρμα πετρελαίου Harvest – Καλιφόρνια) και ένας στην Αυστραλία (Bass Strait – Τασμανία). Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης που παρέχονται από τους παραπάνω σταθμούς εξαρτώνται από τις τοπικές συνθήκες, την μεθοδολογία που ακολουθείται, την διάρκεια των μετρήσεων και τη γεωγραφική θέση του κάθε σταθμού.

Οι σταθμοί βαθμονόμησης βρίσκονται στα ίχνη επαναλαμβανόμενων τροχιών των δορυφόρων αλτιμετρίας και επιπλέον όπου το επίγειο ίχνος των εκπεμπόμενων σημάτων από το αλτίμετρο και το ραδιόμετρο δεν επηρεάζεται από την ξηρά. Νησίδες όπως οι Γαύδος είναι ιδανικές γι' αυτόν τον σκοπό. Ο σταθμός της Γαύδος βρίσκεται πάνω στη διασταύρωση των ιχνών δύο επαναλαμβανόμενων τροχιών της δορυφορικής αποστολής Jason και γειτονικά στο ίχνος τροχιάς του δορυφόρου Envisat (Εικ. 1).

Αυτή η ευτυχής συγκυρία καθιστά την Γαύδο στρατηγική θέση για την βαθμονόμηση δορυφόρων αλτιμετρίας διότι (1) Η Γαύδος βρίσκεται σε αρκετή απόσταση από άλλη την ηπειρωτική μάζα (Κρήτη), (2) Έχει μικρό τοπογραφικό ανάγλυφο και σχετικά απλή κυκλοφορία θαλάσσιων ρευμάτων, (3) Το γεωειδές της περιοχής έχει προσδιοριστεί με ακρίβεια με προηγούμενες μετρήσεις βαρυτημετρίας και οι τοπικές παλίρροιες είναι μικρές, (4) Λόγω της διασταύρωσης των τροχιών, βαθμονόμηση μπορεί να γίνει δύο φορές κάθε 10 ημέρες και όχι μία,

στην καθοδική και την ανοδική τροχιά, και (5) Σφάλματα εξαρτώμενα από τη ανοδική ή καθοδική κίνηση του δορυφόρου μπορούν να προσδιοριστούν και να εξαλειφθούν.

Ο δορυφόρος Jason-1 εκτοξεύτηκε στις 7 Δεκεμβρίου 2001, ενώ ο Jason-2 στις 20 Ιουνίου 2008. Ο δορυφόρος Jason-1 λειτούργησε επιτυχώς μέχρι τα τέλη του Ιανουαρίου 2008 όπου δόθηκε τελικά εντολή για μετακίνηση του δορυφόρου σε νέα τροχιά.



Σχήμα 1. (α) Οι θέσεις των μόνιμων σταθμών GPS στη δυτική Κρήτη σε συνδυασμό με τα ίχνη των τροχιών δορυφ. Αλτιμετρίας, και (β) Ο σταθμός βαθμονόμησης της Γαύδου και τα ίχνη των τροχιών του δορυφόρου Jason.

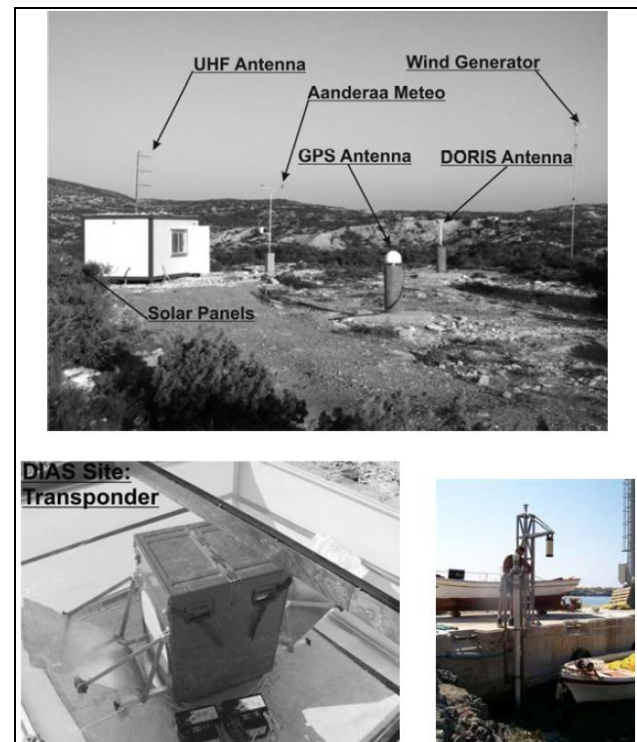
Ο δορυφόρος Jason-2 τοποθετήθηκε στην παλιά τροχιά του Jason-1, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η συνέχεια των μετρήσεων και η βαθμονόμηση από τους σταθμούς Cal/Val. Κατά την περίοδο μεταξύ Ιουνίου 2008 και Ιανουαρίου 2009, οι δύο δορυφόροι χρησιμοποιούσαν την ίδια τροχιά με μια χρονική καθυστέρηση 55 δευτερολέπτων του ενός δορυφόρου σε σχέση με τον άλλον. Αυτό το διάστημα ήταν η περίοδος βαθμονόμησης του δορυφόρου Jason-2, καθώς ήταν δυνατή η λήψη ταυτόχρονων παρατηρήσεων και από τους δύο δορυφόρους.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε χρησιμοποιώντας τον σταθμό Cal/Val της Γαύδου αναπτύχθηκε σε συνεργασία με τα ινστιτούτα CNES της Γαλλίας και Jet Propulsion Laboratory, των ΗΠΑ με αποτέλεσμα τον προσδιορισμό για: (1) το απόλυτο αλτιμετρικό σφάλμα του δορυφόρου Jason-1 για τους κύκλους 209–259 χρησιμοποιώντας δεδομένα GDR-C, (2) το απόλυτο αλτιμετρικό και συστηματικό σφάλμα του δορυφόρου Jason-2 για τους κύκλους 2–28 χρησιμοποιώντας δεδομένα GDR-A, (3) Το συστηματικό σφάλμα κατά την διάρκεια της κοινής πτή-

σης των δύο δορυφόρων (inter-mission bias) μεταξύ Ιουνίου 2008 και Ιανουαρίου 2009 .

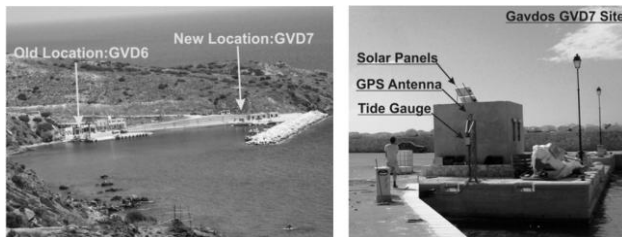
## 2.ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΥΠΟΔΟΜΗ

Ο σταθμός βαθμονόμησης της Γαύδου περιλαμβάνει παλιρροιογράφους, μόνιμους σταθμούς GPS, μετεωρολογικούς και ωκεανογραφικούς αισθητήρες, έναν δορυφορικό σταθμό DORIS και έναν ηλεκτρονικό μικροκυματικό ανακλαστήρα (transponder) (Σχ. 2)



Σχήμα 2. Ο σταθμός βαθμονόμησης της Γαύδου και τα εγκατεστημένα όργανα.

Η βασική υποδομή είχε εγκατασταθεί αρχικά στο λιμάνι «Καραβέ», τον Αύγουστο του 2002. Το 2004, ξεκίνησε η κατασκευή της νέας προβλήτας στο λιμάνι από το Λιμενικό Ταμείο. Στα πλαίσια της κατασκευής της προβλήτας ήταν και η κατασκευή ενός οικίσκου για την στέγαση των οργάνων του σταθμού βαθμονόμησης της Γαύδου. Η μεταφορά των οργάνων στη νέα θέση πραγματοποιήθηκε τον Μάιο του 2009 (Σχ. 3). Ταυτόχρονα έγινε χωροστάθμηση μεταξύ των παλαιών και των νέων θέσεων των οργάνων καθώς και ίδρυση νέων χωροσταθμικών σημείων για την ασφαλή υψομετρική σύνδεση των οργάνων.



Σχήμα 3. Η παλιά και η νέα θέση των οργάνων στο λιμάνι της Γαύδου (αριστερή εικόνα), τα εγκατεστημένα όργανα στη νέα θέση (δεξιά εικόνα).

Η επέκταση του σταθμού βαθμονόμησης της Γαύδου περιλαμβάνει παρόμοιες εγκαταστάσεις στην Χρυσοσκαλίτισσα (CRS1) και το Ροδάκινο (RDK1) στην ηπειρωτική Κρήτη. Σ' αυτούς τους σταθμούς έχουν εγκατασταθεί παλιρροιογράφοι και μόνιμοι σταθμοί GPS. Το δίκτυο σταθμών GPS αποτελείται από άλλους δύο σταθμούς εγκατεστημένους στο Πολυτεχνείο Κρήτης (TUC1, TUC2), τους σταθμούς της Γαύδου (GVD0, GVD6, GVD7) καθώς και τρεις άλλους σταθμούς που βρίσκονται στην φάση εγκατάστασης στην ηπειρωτική Κρήτη (στον άξονα Βορράς - Νότος) σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο North Carolina State University, ΗΠΑ.



Σχήμα 4. Οι νέες εγκαταστάσεις στη Χρυσοσκαλίτισσα (αριστερή εικόνα), και Ροδάκινο (δεξιά εικόνα).

### 3. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΛΤΙΜΕΤΡΩΝ

Τα όργανα των δορυφόρων της αποστολής Jason λαμβάνουν τις παρακάτω μετρήσεις: απόσταση από την θάλασσα (altimeter range), ουσιαστικό ύψος κύματος (significant wave height), διατομή οπισθοσκέδασης στην επιφάνεια της θαλάσσης, ποσότητα ηλεκτρονίων στην ιονόσφαιρα κατά την διεύθυνση του ναδύρ, ποσότητα υγρασίας στην τροπόσφαιρα, και ακριβείς γεωδαιτικές συντεταγμένες. Επίσης ένα σύστημα εντοπισμού DORIS, εγκατεστημένο στους δορυφόρους, σε συνεργασία με επίγειους σταθμο-

ύς βάσης παρέχει την ακριβή θέση και ταχύτητα του δορυφόρου, καθώς εκείνος μετράει το υψόμετρο της θαλάσσιας στάθμης. Οι μετρούμενες αποστάσεις του δορυφόρου από την θάλασσα λαμβάνονται στη φασματική ζώνη Ku και C του Radar, παρόλο που μόνον ο δίαυλος Ku θεωρείται περισσότερο ακριβής στην μέτρηση αποστάσεων. Τα υψόμετρα με τον δορυφόρο διορθώνονται για τα διάφορα συστηματικά σφάλματα των οργάνων, τις ατμοσφαιρικές καθυστερήσεις κατά την διεύθυνση της διαδρομής του σήματος καθώς και για την φύση της ανακλώμενης επιφάνειας (θαλάσσιος κυματισμός) χρησιμοποιώντας την σχέση που ακολουθεί:

$$\text{Corrected Range} = \text{Range} + \text{Wet Troposphere Correction} + \text{Dry Troposphere Correction} + \text{Ionosphere Correction} + \text{Sea State Bias} \quad (1)$$

Τελικά, προσδιορίζεται το ύψος της θαλάσσιας επιφάνειας (SSH) σε σχέση με το ελλειψοειδές αναφοράς, αφαιρώντας την διορθωμένη απόσταση (corrected range) από το ύψος του δορυφόρου:

$$\text{SSH} = \text{altitude} - \text{Corrected Range} \quad (2)$$

Ο προσδιορισμός του απόλυτου συστηματικού σφάλματος για τους δορυφόρους Jason υπολογίζεται ως εξής:

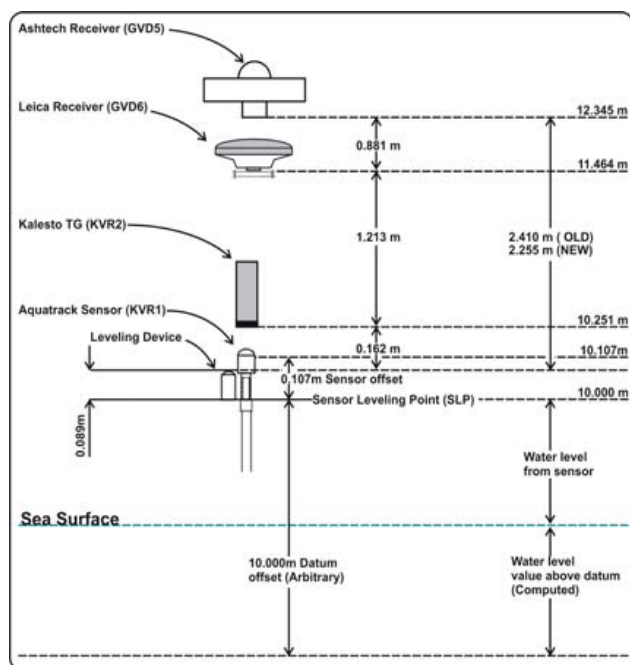
$$\text{Bias} = \text{Measurement} - \text{Truth} = \text{SLA}_{\text{sat}} - \text{SLA}_{\text{TG}} \quad (3)$$

Όπου  $\text{SLA}_{\text{sat}}$  είναι η ανωμαλία της θαλάσσιας στάθμης (sea level anomaly), όπως μετρήθηκε από τον δορυφόρο, και  $\text{SLA}_{\text{TG}}$  είναι η ανωμαλία της θαλάσσιας στάθμης στη θέση του παλιρροιογράφου. Η ανωμαλία της θαλάσσιας στάθμης ορίζεται ως το ύψος της επιφάνειας της θαλάσσιας στάθμης (SSH) πάνω από το ελλειψοειδές αναφοράς μείον την μέση στάθμη της θάλασσας. Επιπλέον, άλλοι γεωφυσικοί παράγοντες στον υπολογισμό περιλαμβάνουν τα ύψη που προκύπτουν από την παλίρροια της στερεάς γης (Solid Earth tide), τη θαλάσσια παλίρροια (geocentric ocean tide) καθώς και την επίδραση του ανεστραμμένου βαρόμετρου (inverted barometer effects). Για περισσότερες λεπτομέρειες στο OSTN/Jason-2 Products Handbook (2008).



### 3.1 Προσδιορισμός θέσης με GPS και το γεωειδές αναφοράς στην περιοχή βαθμονόμησης

Τρεις θέσεις εγκατάστασης εξοπλισμού έχουν επιλεγεί στη Γαύδο για τις ανάγκες του μόνιμου σταθμού βαθμονόμησης. Η κύρια εγκατάσταση, με την ονομασία «Θεόφιλος», βρίσκεται σε απόσταση τριών χιλιομέτρων περίπου από το λιμάνι της Γαύδου. Στο σημείο αυτό έχουν εγκαταστασθεί ο μόνιμος σταθμός GPS (GVD0, ημερομηνία εγκατάστασης 6 Οκτωβρίου 2002), το δορυφορικό σύστημα DORIS (DORIS beacon), ο κύριος μετεωρολογικός σταθμός και οι εγκαταστάσεις ελέγχου και επικοινωνιών.



Σχήμα 5. Υψομετρικές διαφορές όπως αυτές καθορίστηκαν μεταξύ των οργάνων GPS και παλιρροιογράφου στην μόνιμη εγκατάσταση στο λιμάνι της Γαύδου.

Η δεύτερη θέση βρίσκεται στο λιμάνι Καραβέ της Γαύδου. Ένας παλιρροιογράφος radar (KVR3) εγκαταστάθηκε τον Σεπτέμβριο του 2007 εκεί, σε συνδυασμό με έναν μόνιμο δέκτη GPS/GLONASS (GVD6: Leica GRX1200PRO με κεραία Leica 1202GG). Στην περιοχή του λιμανιού έχει γίνει γεωμετρική χωροστάθμηση υψηλής ακρίβειας, για να επιτευχθεί η υψομετρική σύνδεση των σημείων αναφοράς του παλιρροιογράφου και του GPS. Οι προκύπτουσες υψομετρικές διαφορές παρουσιάζονται στο Σχ. 5.

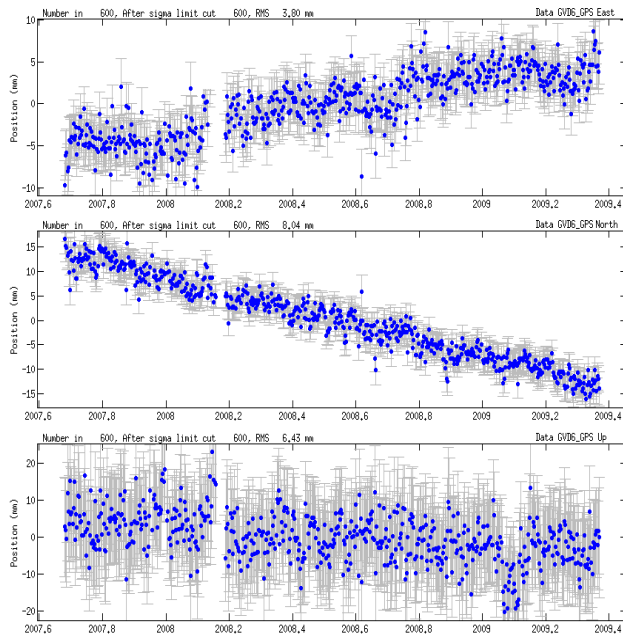
Η επεξεργασία των μετρήσεων GPS πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας διπλές διαφορές των μετρούμενων τιμών φάσεων, μεταξύ των τριών σταθμών της Γαύδου και μια επιλεγμένη ομάδα σταθμών του δικτύου IGS (International GNSS Service) που εκτείνονται από το Μπαχρέν έως την Ιταλία, Πολωνία, Σουηδία, Φινλανδία, Ισπανία κ.α. Τα αποτελέσματα για τον σταθμό GVD6 παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 και στο Σχ. 6 (χρονοσειρά) και καλύπτουν την χρονική περίοδο από τον Σεπτέμβριο του 2007 έως τον Μάιο του 2009.

Πίνακας 1. Διάγραμμα θέσης του σταθμού GVD6 υπολογισμένο μετά από επεξεργασία δεδομένων GPS με το λογισμικό GAMIT, για την χρονική περίοδο 2009.0.

GVD6 Position vector at 2009.0	
<u>Geocentric Cartesian coordinates</u>	
X(m)	4782622.81490
Y(m)	2141233.15995
Z(m)	3624087.86088
<u>Geodetic Coordinates</u>	
Latitude (DMS)	N 34 50 54.198506
Longitude(DMS)	E 24 7 6.926257
Ellipsoidal Height (m)	20.22701
<u>Velocities</u>	
Ve (mm/year)	6.1
Vn (mm/year)	-15.9
Vup (mm/year)	-5.8

Το τοπικό γεωειδές καθορίστηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα αεροσκάφους, δορυφορικής αλτιμετρίας και δεδομένα βαρύτητας, καθώς επίσης και ψηφιακά μοντέλα τοπογραφίας και βαθυμετρίας για τον ακριβή προσδιορισμό των επιδράσεων του εδαφικού αναγλύφου στα δεδομένα βαρύτητας και τα ύψη της θάλασσας επιφάνειας.

Η Γαύδος, με μέσο υψόμετρο περίπου 250μ πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, βρίσκεται πάνω στην Ευρασιατική-Αφρικανική ζώνη υποβύθισης, μετακινούμενη μαζί με την μικροπλάκα του Αιγαίου σε ταχύτητα 36 mm/έτος (Reilinger et al., 2006).



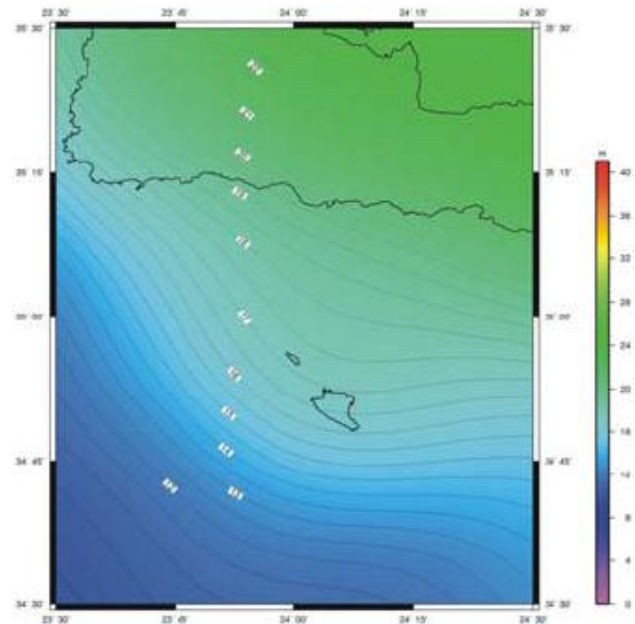
Σχήμα 6. Η χρονοσειρά GPS για τον σταθμό GVD6 στην Γαύδο.

Επομένως, το τοπικό γεωειδές είναι σχετικά τραχύ και με έντονα μεταβαλλόμενες κλίσεις. Κατ' επέκταση συνδυαστικές μέθοδοι των χωρικών πεδίων και πεδίων συχνότητας (least squares collocation and the multiple-input multiple-output system theory) εφαρμόστηκαν για την βέλτιστη εκτίμηση του γεωειδούς στην περιοχή μελέτης (Vergos, et al., 2005).

Ένας τελικός χάρτης του γεωειδούς στην ευρύτερη περιοχή της Γαύδου δίδεται στο Σχ. 7 (Adritsanos et al., 2001). Επίσης, η Μέση Δυναμική Τοπογραφία (Mean Dynamic Topography) είναι σχετικά μικρή με μέση τιμή  $MDT = -14$  cm (Rio, et al., 2005).

### 3.2 Η μεθοδολογία της βαθμονόμησης και αποτελέσματα

Η βαθμονόμηση απαιτεί την εφαρμογή των διορθώσεων στις μετρήσεις του δορυφόρου αλτιμετρίας σε περιοχές όπου γίνονται οι μετρήσεις στη θάλασσα και δεν υπάρχει επίδραση στις μετρήσεις από ηπειρωτικές μάζες. Για παράδειγμα, το ίχνος του αλτιμέτρου στην επιφάνεια της Γης έχει διάμετρο περίπου 1,5 km, όταν το ουσιαστικό ύψος κύματος είναι περίπου  $SWH = 2$  m στην περιοχή της Γαύδου.



Σχήμα 7. Το μοντέλο γεωειδούς στην ευρύτερη περιοχή της Γαύδου με ανάλυση  $1arcmin \times 1arcmin$  ( Adritsanos et al., 2001).

Σ' αυτήν την περίπτωση, πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν οι μετρήσεις του δορυφόρου που απέχουν τουλάχιστον 3 km από την ακτή, για να εξαχθούν λογικά αποτελέσματα. Τέλος, η περιοχή βαθμονόμησης πρέπει να βρίσκεται είτε στην ανιούσα είτε στην κατιούσα τροχιά του δορυφόρου μεταξύ 10 και 30 km πριν ή μετά το σημείο εγγύτερης προσέγγισης (Point Of Closest Approach, PCA), (Σχ. 8). Το σημείο PCA είναι το εκείνο του ίχνους της δορυφορικής τροχιάς που βρίσκεται εγγύτερα στη θέση του παλιρροιογράφου. Η αντίστοιχη χρονική στιγμή ονομάζεται χρόνος εγγύτερης προσέγγισης (Time Of Closest Approach, TCA).

Το ορθομετρικό υψόμετρο του παλιρροιογράφου KVR2 έχει προσδιοριστεί ως προς το ελλειψοειδές αναφοράς GRS80 και είναι  $N_{KVR2} = 16,7187$  m. Οι παρατηρήσεις του παλιρροιογράφου που αντιστοιχούν στον χρόνο TCA, προσδιορίζονται με την εφαρμογή ενός γραμμικού μοντέλου στις αρχικές παρατηρήσεις του παλιρροιογράφου και στη συνέχεια η προκύπτουσα τιμή αντιστοιχείται στο TCA.

Ο δορυφόρος αλτιμετρίας προσεγγίζει το PCA στη Γαύδο με ταχύτητα περίπου 6 km/s. Επομένως 1 δευτερόλεπτο αντιστοιχεί σε περίπου 6 km μετακίνησης του δορυφόρου στην

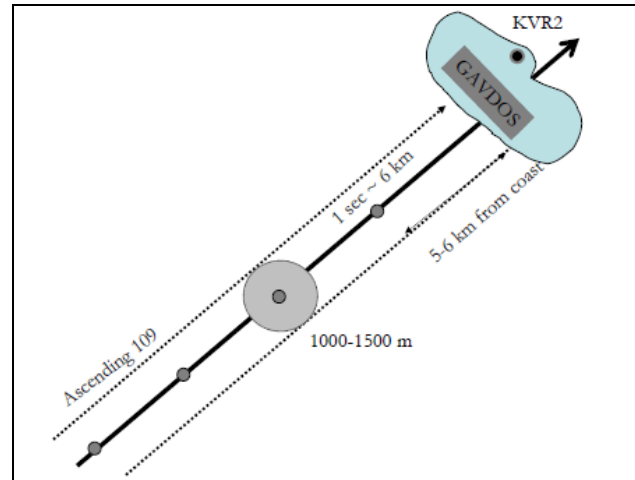
τροχιά. Βασιζόμενοι σ' αυτό το γεγονός, μπορούν να σχεδιαστούν τα μοντέλα και οι διορθώσεις για τις καθυστερήσεις των σημάτων στην τροπόσφαιρα και την ιονόσφαιρα καθώς και για παραμέτρους για την κατάσταση της θαλάσσιας επιφάνειας (Sea State Bias, SSB).

Η διόρθωση της ιονόσφαιρας για τη βαθμονόμηση προκύπτει ως η μέση τιμή των δεδομένων του δορυφόρου (Geophysical Data Records, GDR) για την καθυστέρηση που αντιστοιχεί στον χρόνο από  $t_1 = -21$  s πριν το TCA, μέχρι  $t_2 = -1$  s πριν το TCA (Σχ. 8). Η διόρθωση για τη ξηρή συνιστώσα της τροπόσφαιρας, στο TCA, προκύπτει με την εφαρμογή ενός γραμμικού μοντέλου στους χρόνους από  $t_1 = -5$  s μέχρι  $t_2 = +2$  s. Για να αποφευχθεί η επίδραση του εδάφους στις μετρήσεις του δορυφορικού ραδιόμετρου (ίχνος στην επιφάνεια της Γης περίπου 25–30km για τον Jason-1) εφαρμόζεται ένα γραμμικό φίλτρο στις τιμές του δορυφόρου για την υγρή συνιστώσα της τροπόσφαιρας, προκειμένου να εκτιμηθεί η τιμή στο TCA, σε μια περιοχή από  $t_1 = -15$  s μέχρι  $t_2 = -5$  s. Τα παραπάνω γραμμικά μοντέλα και τα όρια εφαρμογής τους, προέκυψαν λαμβάνοντας υπόψιν την συμπεριφορά των δορυφορικών αισθητήρων, καθώς επίσης και την φύση των δεδομένων (π.χ. ιονόσφαιρα, τροπόσφαιρα, άνεμοι κλπ.). Προφανώς όλα τα εφαρμοζόμενα μοντέλα βρίσκονται υπό διαρκή έλεγχο και βελτιώσεις.

Τέλος, για την κατάσταση της θαλάσσιας επιφάνειας (SSB) εφαρμόζεται ένα μοντέλο τρίτου βαθμού, σε μια περιοχή από  $t_1 = -10$  s μέχρι  $t_2 = -1$  s. Όλοι οι παραπάνω χρόνοι αναφέρονται στο TCA, όπου θέτουμε  $t_{TCA} = 0$ . Οι υπόλοιπες διορθώσεις που έχουν εφαρμοστεί για την διόρθωση της μετρούμενης απόστασης από τον δορυφόρο λαμβάνουν υπόψιν την παλίρροια της στερεάς γης (Solid Earth tide), την γεωκεντρική θαλάσσια παλίρροια (geocentric ocean tide), την παλίρροια του πόλου (pole tide) και την επίδραση του ανεστραμμένου βαρόμετρου (inverted barometer effect).

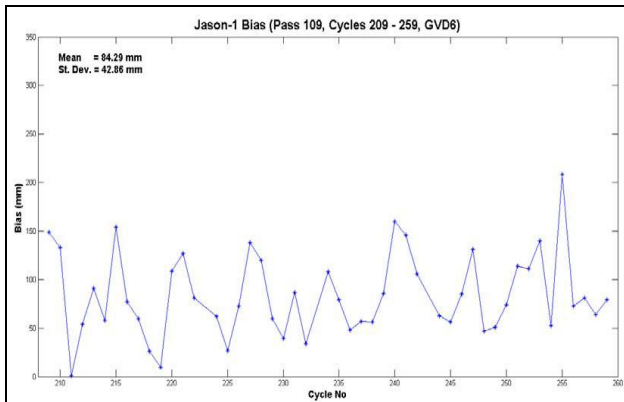
Η προαναφερθείσα μεθοδολογία για τη βαθμονόμηση των δορυφόρων αλτιμετρίας Jason-1&2 έχει αναπτυχθεί, τυποποιηθεί και εναρμονιστεί από τους σταθμούς βαθμονόμησης της

Γαύδου, της Γαλλίας στην Κορσική και των ΗΠΑ στην πλατφόρμα Harvest στο Los Angeles (ΝΑΣΑ). Το Εργαστήριο Γεωδαισίας & Γεωπληροφορικής έχει αναπτύξει ειδικό λογισμικό (TUCalibrit, Ioannides et al., 2009) για την αυτοματοποιημένη παραγωγή τιμών βαθμονόμησης των δορυφορικών αλτιμέτρων χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του σταθμού της Γαύδου. Το συγκεκριμένο λογισμικό θα χρησιμοποιηθεί επίσης για τη βελτίωση της ακρίβειας των εκτιμώμενων παραμέτρων, οι οποίοι παίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της θαλάσσιας επιφάνειας, όπως μετρείται από τον δορυφόρο.

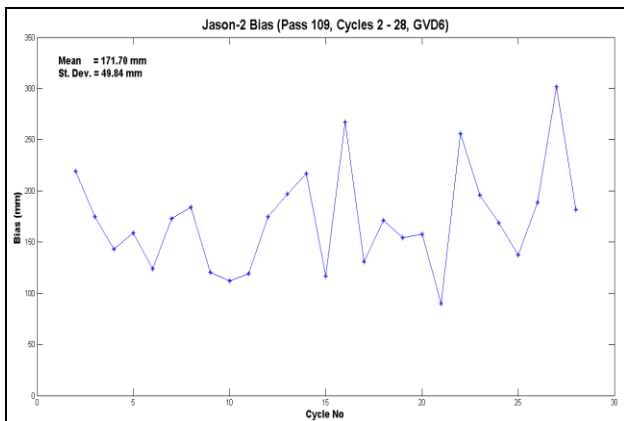


Σχήμα 8. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα την ανιούσα τροχιά 109.

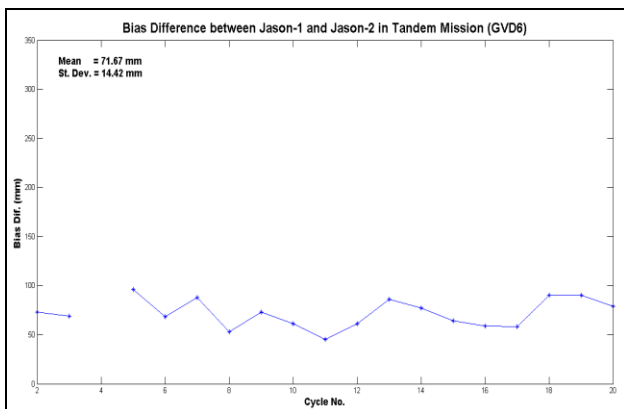
Στο Σχ. 9 παρουσιάζονται τα προσδιορισμένα συστηματικά σφάλματα στον υπολογισμό της θαλάσσιας στάθμης για τον δορυφόρο Jason-1 για την χρονική περίοδο Σεπτέμβριος 2007–Ιανουάριος 2009, πριν πραγματοποιηθεί η αλλαγή της τροχιάς του δορυφόρου. Στο Σχ. 10 παρουσιάζεται το προσδιορισμένο συστηματικό σφάλμα του δορυφόρου Jason-2 (Ιούλιος 2008 – Απρίλιος 2009), ενώ στο Σχ. 11 παρουσιάζεται το σφάλμα μεταξύ των δύο δορυφορικών αποστολών κατά τη διάρκεια της κοινής πτήσης (περίοδος βαθμονόμησης του δορυφόρου Jason-2).



Εικόνα 9. Το αλτιμετρικό σφάλμα του δορυφόρου Jason-1 χρησιμοποιώντας δεδομένα GDR-C για τους κύκλους 209-259.



Εικόνα 10. Το αλτιμετρικό σφάλμα του δορυφόρου Jason-2 χρησιμοποιώντας δεδομένα GDR για τους κύκλους 2-28.



Εικόνα 11. Η διαφορά των σφαλμάτων των δορυφόρων Jason-1&2 κατά την διάρκεια της κοινής πτήσης.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το συστηματικό σφάλμα στο αλτίμετρο του δορυφόρου Jason-1 έχει προσδιοριστεί ως +84,29 mm (με αβεβαιότητα  $\pm 42,4$  mm) χρησιμοποιώ-

ντας δεδομένα GDR-C (Geophysical Data Records-C) για 50 περίπου κύκλους της τροχιάς. Το αλτιμετρικό σφάλμα του δορυφόρου Jason-2 έχει προσδιοριστεί ως +171,70 mm (με αβεβαιότητα  $\pm 49,0$  mm) χρησιμοποιώντας δεδομένα GDR δειγματοληψίας 20 Hz. Η διαφορά των σφαλμάτων μεταξύ των δύο δορυφόρων είναι 71,67 mm με αβεβαιότητα  $\pm 14,42$  mm.

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα που δημοσιεύτηκαν από άλλους σταθμούς βαθμονόμησης, όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 2. Σύγκριση των αποτελεσμάτων βαθμονόμησης των σταθμών της Γαύδου, της Κορσικής και της πλατφόρμας Harvest, στο Los Angeles, στις ΗΠΑ.

Cal/Val site	Jason 1 Bias	Jason-2 bias	Bias difference(J2-J1)
Gavdos	+84.29mm $\pm$ 42.40mm (50 cycles)	+171.70 $\pm$ 49.00mm (20 cycles)	71.67mm $\pm$ 14 mm
Corsica	102.00mm $\pm$ 9.00mm (259 cycles)	+189 $\pm$ 9.00mm (20 cycles)	87.00mm $\pm$ 8 mm
Harvest platform	+94 $\pm$ 2.00mm (208 cycles)	+174 $\pm$ 27.00mm (27 cycles)	80.00mm $\pm$ 4.00mm

#### 5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η συγκεκριμένη έρευνα χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, στα πλαίσια του ερευνητικού έργου FP7-REGPOT-2008-1, Project No. 229885 (SOFIA). Ευχαριστούμε τους Dr. Bruce Haines, Jet Propulsion Laboratory, NASA, USA και Dr. Pascal Bonnefond, Geosciences, Observatoire de la Cote d'Azur - Geosciences Azur, France για την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξη τους.

#### 6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Andrissanos V. D., Vergos, G. S. , Tziavos, I. N., Pavlis E. C., Mertikas, S. P. "A High-Resolution Geoid for the Establishment of the Gavdos Multi-Satellite Calibration Site", International Association of Geodesy Symposia, Vol. 123, Sideris (ed.), Gravity, Geoid and Geodynamics, Springer-Verlag, Berlin, pp. 347-354 (2001).
- Mertikas S. P. E. C. Pavlis, I. N. Tziavos, E. Koutroulis, K. Palamartchoul, T. Papadopoulos and G. S. Vergos, "Permanent facility for calibration/Validation of satellite altimetry: GAVDOS", Proc. SPIE, 5569, 14-25 (2004).
- OST, Ocean Surface Topography Constellation, A Strategic Workshop, Organized by the Committee on Earth Observing Satellites, Assmannshausen, Rudesheim, Germany, 29-31 January (2008).
- OSTM/Jason-2 Products Handbook, CNES: SALP-MU-M-OP-15815-CN, 1 rev1, July 31 (2008).



Pavlis C. E., S. P. Mertikas and the GAVDOS Team, "The GAVDOS Mean Sea Level and Altimeter Calibration Facility: Results for Jason-1", *Marine Geodesy*, 27, 631-655 (2004).

Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Evren, E., Dmitrova, A., Filikov, S. V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R. & Karam, G., "GPS Constraints on Continental Deformation in the Africa-Arabia-Eurasia Continental Collision Zone and Implications for the Dynamics of Plate Interactions". *J. geophys. Res.*, 111, doi:10.1029/2005JB004051. (2006).

Rio, M.-H., Schaeffer, P. Lemoine, J.-M, F. Hernandez F. "Estimation of the ocean Mean Dynamic Topography through the combination of altimetric data, in-situ measurements and GRACE geoid: From global to Regional studies", *Proc. GOCINA (Geoid and Ocean Circulation in the North Atlantic) International Workshop*, April, 13-15 Kirchberg, Luxemburg (2005).

Vergos, G.S., Tziavos, I.N., Andritsanos, V.D. On the Determination of Marine Geoid Models by Least-Squares Collocation and Spectral Methods Using Heterogeneous Data. *International Association of Geodesy Symposia*, Vol. 128 F. Sansó (ed.), *A Window on the Future of Geodesy*, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, pp. 332-337 (2005).

Ioannides, R. T., S. P. Mertikas, X. Frantzis, Ach. Tripolitsiotis. "Estimation of the altimetry Bias for the Jason satellites using Gavdos", *Ocean Surface Topography Science Team Meeting 2009, Observing and Forecasting the Ocean Conference*, Seattle, Washington, USA, 22-24 June (2009).