Σύγχρονες δορυφορικές αποστολές μελέτης του πεδίου βαρύτητας της Γης και συμβολή στις γεωεπιστήμες

Γεώργιος Σ. Βέργος
Λέκτορας, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών,
Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Παν. Θυρίδα 440, ΤΚ 54 124, Θεσσαλονίκη
Τηλ.: 2310994366, Φαξ: 2310995948, E-mail: vergos@topo.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαπέντε χρόνων τέθηκε σε τροχιά από την ESA και τη NASA ένας σημαντικός αριθμός δορυφόρων με αποκλειστικό σκοπό την παρατήρηση του πεδίου βαρύτητας της Γης με πρωτόγνωρη ακρίβεια και διακριτική ικανότητα. Οι αποστολές των CHAMP και GRACE βοήθησαν να παρατηρηθούν και κατανοηθούν οι παροδικές μεταβολές του πεδίου βαρύτητας της Γης με χωρική διακριτική ικανότητα ~200 km σε περιόδους 10-30 ημερών. Η πρόσφατη αποστολή του GOCE, που αποτελεί την πρώτη αποστολή δορυφορικής βαθμιδομετρίας, θα δώσει στατικά μοντέλα του πεδίου βαρύτητας της Γης και του γεωειδούς χωρικής διακριτικής ικανότητας 50 km (μισό μήκος κύματος) και ακρίβειας ±1 cm. Τα δεδομένα των δορυφόρων αυτών προσφέρουν επομένως την ευκαιρία μελέτης των παροδικών μεταβολών του πεδίου βαρύτητας της Γης σε παγκόσμια κλίμακα, οι οποίες σχετίζονται με το ισοζύγιο μάζας και τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό και στην επιφάνεια του πλανήτη μας. Επομένως, μπορούν να προσφέρουν συνεχείς χρονοσειρές δεδομένων για τον κύκλο του νερού, το λιώσιμο των πάγων, τις εποχικές και ετήσιες μεταβολές της στάθμης της θάλασσας, τις απότομες αλλαγές στον φλοιό της Γης εξαιτίας σεισμών, τις επιδράσεις ωκεάνιων φαινομένων μεγάλης κλίμακας, την ωκεάνια κυκλοφορία, κ.λπ.. Η παρούσα εργασία έχει σκοπό να παρουσιάσει τις γενικές αρχές μέτρησης και τις εφαρμογές των αποστολών αυτών στην παρατήρηση του συστήματος Γη, καθώς και να αναδείξει τις δυνατότητες συνεργασίας μεταξύ των διάφορων γεωεπιστημών.

Λέξεις Κλειδιά: δορυφορικές αποστολές πεδίου βαρύτητας, Γη, παροδικές μεταβολές, γεωειδές, στάθμη θάλασσας

ABSTRACT: During the last fifteen years, a number of revolutionary satellite missions have been set to orbit by ESA and NASA, aiming to measure directly and/or indirectly the Earth's gravity field at an unprecedented detail. The missions of CHAMP and GRACE have helped to understand the temporal variations of the Earth's gravity field with a spatial resolution of ~200 km and a temporal resolution of 10-30 days. The recent mission of GOCE, which is the first one using satellite gravity gradiometry, carries the promise to determine Earth's gravity field with an accuracy of ±1cm to 50 km half wavelength. Their data offer the opportunity to study the temporal variations of the gravity field, which are associated with mass transport and redistributions within and on the Earth's surface. Therefore they can provide a continuous series of the water cycle, polar ice melt, seasonal and annual sea level change, abrupt changes in the Earth's crust due to earthquakes, effects of large scale ocean circulation events, direction and magnitude of the ocean currents, etc. The present work aims to provide an outline of the concepts, measurement principles, and applications of the recent satellite missions in monitoring system Earth, as well as the opportunity for synergy between various branches of geosciences

Keywords: gravity field dedicated satellite missions, earth, temporal changes, geoid, sea level.

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

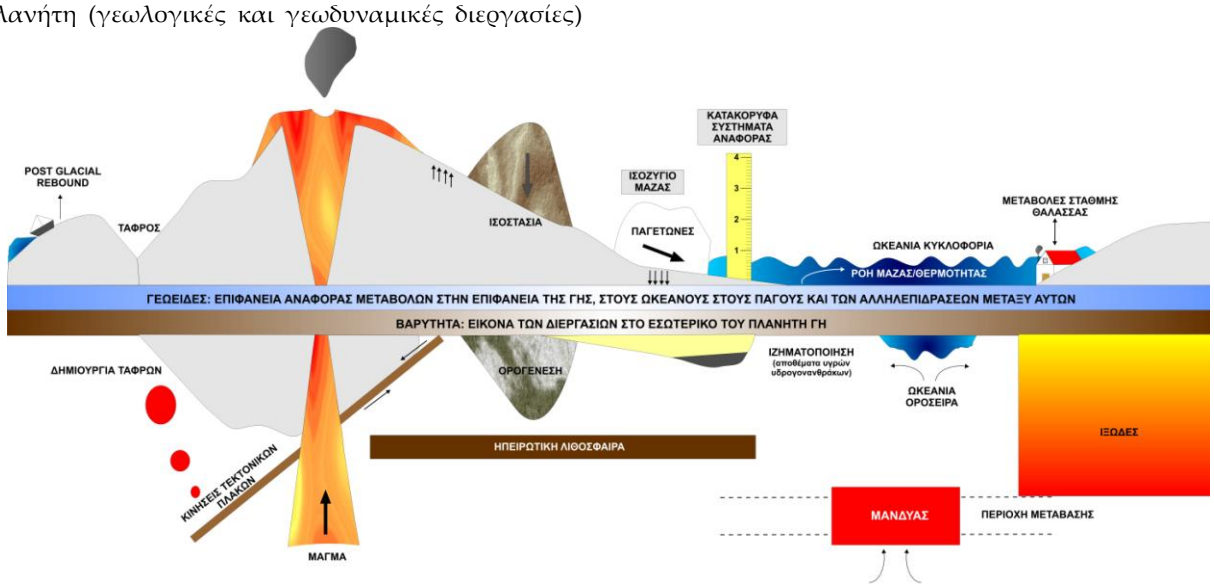
Η γνώση που διαθέταμε μέχρι τις αρχές του 21ου αιώνα για το πεδίο βαρύτητας της Γης σε παγκόσμια κλίμακα, μέσα από τις διάφορες διαθέσιμες τεχνικές παρατήρησης, μπορούσε να χαρακτηριστεί ελλιπής. Βασιζόταν, για πολλές δεκαετίες, στον συνδυασμό των παραδοσιακών μεθόδων μέτρησης της βαρύτητας (σχετικές και απόλυτες μετρήσεις σε ηπειρωτικές και θαλάσσιες περιοχές καθώς και από αέρα), των παρατηρήσεων των δορυφορικών τροχιών και της μέτρησης των στιγμιαίων υψών της επιφάνειας της θάλασσας με δεδομένα τοπογραφίας/βαθυμετρίας και μοντέλα πυκνοτήτων για την ανώτερη λιθόσφαιρα της Γης [20]. Τα δεδομένα και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνταν, και συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται, είχαν συμβάλλει στην προσέγγιση του πεδίου βαρύτητας της Γης σε παγκόσμια κλίμακα με ακρίβεια ±46 cm για μήκη κύματος της τάξης των ~100 km [11]. Το πεδίο βαρύτητας της Γης και κατ' επέκταση οι ανωμαλίες βαρύτητας είναι ιδιαίτερα σημαντικές για το σύνολο των γεωεπιστημών. Οι ανάγκες όμως της γεωδαισίας, της ωκεανογραφίας, της γεωφυσικής, της γεωλογίας και των γεωεπιστημών γενικότερα απαιτούν τον προσδιορισμό του πεδίου βαρύτητας της Γης και του γεωειδούς με ακρίβειες της τάξης του ±1 cm για μήκη κύματος ~10 km [4]. Αυτή η ακρίβεια είναι επιβεβλημένη προκειμένου να αντιληφθούμε τις φυσικές διεργασίες στο εσωτερικό της Γης, την δυναμική μεταβολή των ωκεανών, την αλληλεπίδραση των τεκτονικών πλακών, καθώς επίσης και για τη μελέτη του ισοζυγίου πάγου στους ωκεανούς, τις μεταβολές της στάθμης της θάλασσας, το ισοζύγιο μάζας της Γης σε μικρές χρονικές κλίμακες, και τα συστήματα υψών σε περιφερειακή και παγκόσμια κλίμακα.

Προκειμένου να επιτευχθούν οι ακρίβειες που απαιτούνται για τις παραπάνω εργασίες σε παγκόσμια κλίμακα και με επίγειες μεθόδους, θα ήταν απαραίτητες μετρήσεις βαρύτητας σε πολύ μεγάλες εκτάσεις, κάτι που συνεπάγεται πολύ μεγάλο κόστος και απαγορευτικό χρονικό ορίζοντα υλοποίησης. Η *μόνη* μέθοδος που θα μπορούσε να εγγυηθεί ομογένεια στα δεδομένα, στα ποιοτικά χαρακτηριστικά, τόσο ως προς την ακρίβεια όσο και προς και την αξιοπιστία, και ταυτόχρονα παγκόσμια κάλυψη, είναι η συλλογή παρατηρήσεων σχετικών με το πεδίο βαρύτητας της Γης από το διάστημα. Το σημαντικότερο πρόβλημα στην παρατήρηση του πεδίου βαρύτητας από το διάστημα είναι η ομαλοποίηση του σήματος εξαιτίας του ύψους πτήσης

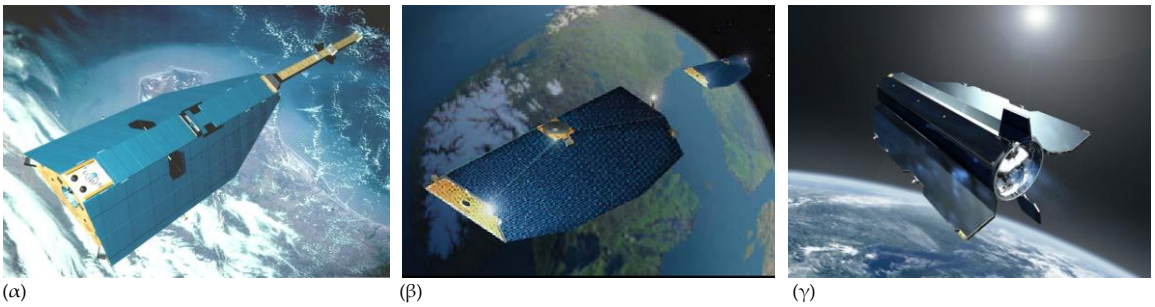
των δορυφόρων. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που το ύψος πτήσης των δορυφορικών αποστολών για το πεδίο βαρύτητας της Γης είναι πολύ χαμηλό (454 km για τον CHAMP, 485-500 km για τους GRACE και μόλις 250 km για τον GOCE) σε σύγκριση με τους αλτιμετρικούς δορυφόρους (~1360 km) και τους δορυφόρους GPS (~20000 km).

Η βελτίωση επομένως των μοντέλων του πεδίου βαρύτητας της Γης τόσο ως προς την ακρίβεια όσο και ως προς τη διακριτική ικανότητα που προσφέρουν είναι κοινή απαίτηση σήμερα όλων των γεω-εφαρμογών. Στην κατεύθυνση αυτή συμβάλλουν ήδη, και θα προσφέρουν περισσότερα στο μέλλον, οι δορυφορικές αποστολές οι σχετικές με το πεδίο βαρύτητας της Γης. Οι υψηλής ακρίβειας προσεγγίσεις για το γεωειδές και το πεδίο βαρύτητας εν γένει, θα συνεισφέρουν χρήσιμα στοιχεία στη μελέτη δυναμικών φαινομένων που αφορούν τόσο τις ηπειρωτικές όσο και τις ωκεάνιες εκτάσεις. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η συσχέτιση του πεδίου βαρύτητας της Γης με άλλες γεωεπιστήμες. Από το Σχήμα αυτό προκύπτει αβίαστα ότι όλες οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα τόσο στο εσωτερικό του πλανήτη (γεωλογικές και γεωδυναμικές διεργασίες) όσο και στην επιφάνειά του (μεταβολές ωκεανών και αλλαγές στο ισοζύγιο νερού), αλλά και οι σύγχρονες απαιτήσεις της γεωδαισίας και τοπογραφίας (π.χ., σύνδεση κατακόρυφων συστημάτων αναφοράς) μπορούν να μελετηθούν και μοντελοποιηθούν μέσω παραμέτρων του πεδίου βαρύτητας.

Στο πλαίσιο αυτό, και προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μέτρηση και παρακολούθηση του πεδίου βαρύτητας της Γης από το διάστημα αναπτύχθηκαν τρείς βασικές τεχνικές: α) η τεχνική της υψηλής-χαμηλής παρακολούθησης δορυφόρου προς δορυφόρο (hi-low satellite to satellite tracking – SST-hl), β) η τεχνική της χαμηλής-χαμηλής παρακολούθησης δορυφόρου προς δορυφόρο (low-low satellite to satellite tracking – SST-ll), και γ) η τεχνική της δορυφορικής βαθμιδομετρίας (satellite gravity gradiometry– SGG). Οι διαθέσιμες δορυφορικές αποστολές για την παρακολούθηση του πεδίου βαρύτητας της Γης είναι αυτές του CHAMP, που χρησιμοποιεί την τεχνική SST-hl, του ζεύγους δορυφόρων GRACE, που χρησιμοποιεί την τεχνική SST-ll, και η αποστολή του δορυφόρου GOCE, που χρησιμοποιεί την τεχνική SGG [19].



Σχήμα 1 – Συνεισφορά του πεδίου βαρύτητας στις Γεωεπιστήμες.



(α) (β) (γ)

Σχήμα 2 – Οι δορυφόροι παρακολούθησης του πεδίου βαρύτητας (α) CHAMP, (β) GRACE και (γ) GOCE.

II. ΟΙ ΑΠΟΣΤΟΛΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ

Η αποστολή του δορυφόρου CHAMP (Challenging Mini-satellite Payload) (βλ. Σχήμα 2α) αποτελεί την πρώτη προσπάθεια για παρατήρηση του πεδίου βαρύτητας από το διάστημα και βρισκόταν υπό την εποπτεία και διαχείριση του Γερμανικού Ινστιτούτου γεωφυσικών ερευνών GFZ (GeoForschungsZentrum), που εδρεύει στο Potsdam. Ο δορυφόρος εκτοξεύθηκε στις 15 Ιουλίου του 2000 και ακολουθούσε μια σχεδόν κυκλική ($e=0.004001$) και σχεδόν πολική τροχιά

(*i=87.3°*) με αρχικό τροχιακό ύψος 454 km. Βάσει του σχεδιασμού του δορυφόρου ο αναμενόμενος χρόνος ζωής και καλής λειτουργίας του ήταν 5 χρόνια. Αυτή η πρόβλεψη για τον χρόνο ζωής του δορυφόρου CHAMP όχι μόνο επιβεβαιώθηκε αλλά ξεπεράστηκε κατά πολύ, αφού ο δορυφόρος ολοκλήρωσε την αποστολή του στις 19 Σεπτεμβρίου 2010, μετά από περισσότερα από 10 χρόνια επιτυχούς λειτουργίας. Προκειμένου να εξασφαλισθεί αυτό, και εξαιτίας του ότι ο δορυφόρος πέρασε από το μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας το 2001, ήταν αναγκαία η πραγματοποίηση δύο διορθωτικών παρεμβάσεων στην τροχιά του (Μάρτιος και Σεπτέμβριος 2002, Ιανουάριος 2006) ώστε να ανακτήσει ύψος και να μπορέσει έτσι να προσφέρει δεδομένα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Στην κατεύθυνση αυτή συνέβαλλε και η πολύ μικρή ηλιακή δραστηριότητα καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής του. Στο τέλος της αποστολής του ο δορυφόρος βρισκόταν σε ένα μέσο τροχιακό ύψος 137 km από το οποίο και εισήλθε στην ατμόσφαιρα της Γης. Ο δορυφόρος CHAMP χρησιμοποίησε την τεχνική της υψηλής-χαμηλής παρακολούθησης δορυφόρου προς δορυφόρο (SST-hl) για την παρακολούθηση του πεδίου βαρύτητας της Γης και είχε σαν κύριο στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας των αρμονικών μεγάλου μήκους κύματος (χαμηλές συχνότητες) [15], [16], [17].

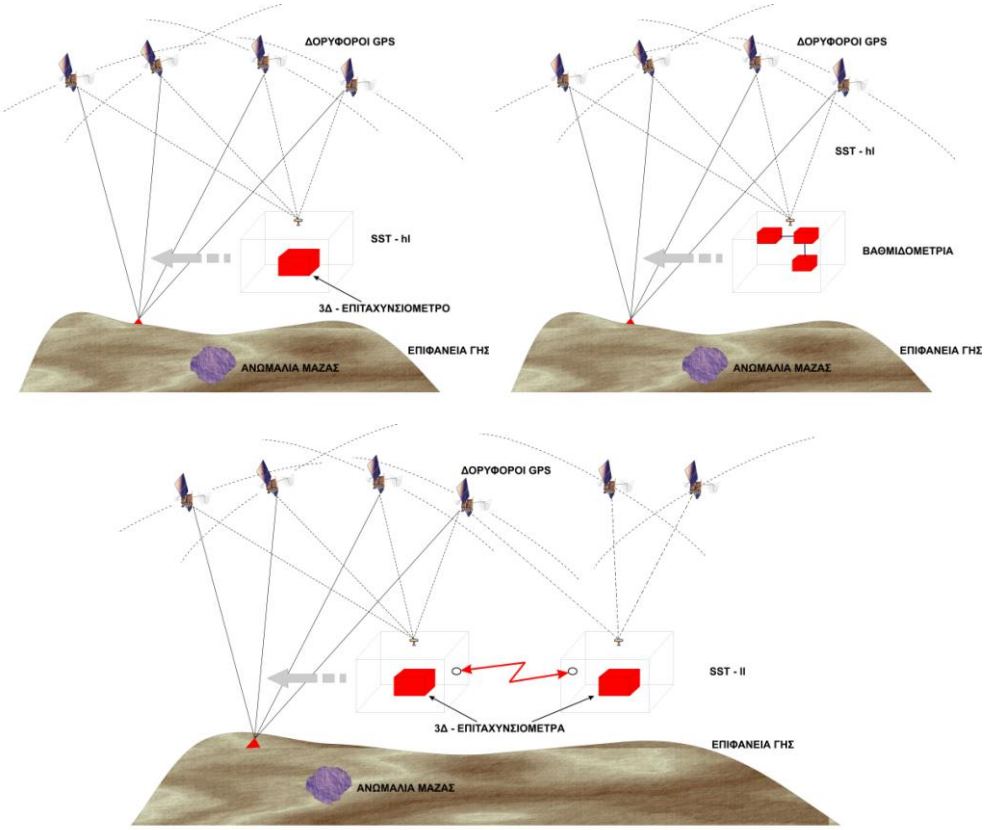
Η αποστολή των δορυφόρων GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) (βλ. Σχήμα 2β) μπορεί να θεωρηθεί σαν η φυσική συνέχεια της αποστολής του δορυφόρου CHAMP, αφού έχει σαν κύριο στόχο την βελτίωση της ακρίβεια των αρμονικών μικρής και μεσαίας τάξης αλλά και την παρακολούθηση των διαχρονικών μεταβολών του πεδίου βαρύτητας της Γης. Αποτελεί μια κοινή προσπάθεια των υπηρεσιών διαστήματος των ΗΠΑ (National Aeronautics and Space Administration – NASA) και της Γερμανίας (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR) ενώ τα ερευνητικά ινστιτούτα που είναι υπεύθυνα για την συλλογή, αξιολόγηση και επεξεργασία των δεδομένων είναι το Κέντρο Διαστημικής Έρευνας (Center for Space Research – CSR) στο πανεπιστήμιο του Τέξας και το GFZ. Η δορυφορική αποστολή των GRACE αποτελείται από ένα ζεύγος πανομοιότυπων δορυφόρων τους GRACE-A και GRACE-B οι οποίοι πραγματοποιούν παρατηρήσεις του πεδίου βαρύτητας της Γης με την τεχνική χαμηλής-χαμηλής παρακολούθησης δορυφόρου προς δορυφόρο (SST-ll), δηλαδή βασίζονται στην μέτρηση των διαφορών της μεταξύ τους απόστασης [9]. Οι δορυφόροι εκτοξεύθηκαν στις 17 Μαρτίου του 2002 και ακολουθούν μια σχεδόν κυκλική (*e=0.0019994*) και σχεδόν πολική τροχιά (*i=89.03°*) με αρχικό τροχιακό ύψος 475 km ενώ η αρχική απόσταση μεταξύ τους ήταν 211.4687 km. Από τον σχεδιασμό του συστήματος, ο αναμενόμενος χρόνος ζωής και καλής λειτουργίας τους ήταν 5 χρόνια, κάτι που έχει ήδη ξεπεραστεί. Στην παρούσα φάση (Φεβρουάριος 2011) οι δορυφόροι παραμένουν σε ικανοποιητικό υψόμετρο (~466 km), ενώ βάσει των προβλέψεων για την ηλιακή δραστηριότητα, την κατάσταση των μετρητικών συσκευών και τη χωρητικότητα των μπαταριών αναμένεται να ολοκληρωθεί η λειτουργία τους στα τέλη του 2014 ή στις αρχές του 2015, αν και εξετάζονται διάφορες δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας από το διαθέσιμο των μπαταριών των δορυφόρων, ώστε η αποστολή να συνεχιστεί για αρκετά ακόμη χρόνια χωρίς συνεχή όμως χρονοσειρά δεδομένων. Τον Δεκέμβριο του 2005 πραγματοποιήθηκε αλλαγή της θέσης των δορυφόρων, ώστε ο προπορευμένος δορυφόρος να είναι ο GRACE-B και όχι ο GRACE-A. Αυτή η αλλαγή θέσης πραγματοποιήθηκε επειδή η κεραία μικροκυμάτων του GRACE-B ήταν στην πρώτη φάση της αποστολής εκτεθειμένη στις επιδράσεις του ατομικού οξυγόνου εξαιτίας της προς τα εμπρός κίνησης του δορυφόρου. Αντίθετα η κεραία Ku-band του GRACE-A ήταν προφυλαγμένη επειδή «έβλεπε» προς τον δορυφόρο GRACE-B [18], [19]. Η αποστολή GRACE έχει προσφέρει μοναδικά δεδομένα τόσο για το μέσο/στατικό πεδίο βαρύτητας της Γης, βελτιώνοντας τα μεσαία μήκη κύματος, όσο και για τις παροδικές μεταβολές της βαρύτητας και του γεωειδούς που σχετίζονται με τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στον πλανήτη μας, μέσω των μηνιαίων μοντέλων που προσφέρει .

Η αποστολή του δορυφόρου GOCE (βλ. Σχήμα 2γ), είναι η τελευταία στην σειρά των αποστολών για την παρατήρηση του πεδίου βαρύτητας από το διάστημα και τέθηκε σε τροχιά στις 17 Μαρτίου 2009 υπό την ευθύνη της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (European Space Agency – ESA). Ο GOCE είναι ο πρώτος δορυφόρος που εφαρμόζει την τεχνική της δορυφορικής βαθμιδομετρίας (SGG) και τα πρώτα δεδομένα που έχει συλλέξει, προσφέρουν καινούριες πληροφορίες για τις υψηλές συχνότητες του πεδίου βαρύτητας της Γης με ακρίβεια καλύτερη του ±1 cm μέχρι και το βαθμό ανάπτυξης των σχετικών μοντέλων *n=250* (~80 km μισό μήκος κύματος) [8], [18], [21]. Ο δορυφόρος τοποθετήθηκε σε ηλιοσύγχρονη τροχιά (sun-synchronous orbit) αυγής-σκότους (dawn-dusk) που είναι σχεδόν κυκλική (*e≤0.0045*) και με κλίση *i=96.5°*. Το αρχικό του ύψος τροχιάς ήταν πολύ χαμηλό, σε σχέση με τους υπόλοιπους δορυφόρους, και μόλις 250 km ενώ η αποστολή είχε μια προγραμματιζόμενη διάρκεια περίπου δύο χρόνων. Αντί για το προσδοκώμενο πέρας της αποστολής του τον Απρίλιο του 2011, δόθηκε παράταση στον GOCE μέχρι το τέλος του 2012 προκειμένου να συνεχίσει να συλλέγει τα πολύτιμα δεδομένα υψηλής ακρίβειας για το πεδίο βαρύτητας της Γης. Οι παρατηρήσεις του δορυφόρου GOCE αναμένεται να αυξήσουν την ακρίβεια προσδιορισμού των μεσαίων και υψηλών αρμονικών (n>50-60) καθώς και να συμβάλλουν αποφασιστικά στην αύξηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας με την οποία παρατηρούμε το πεδίο βαρύτητας. 'Ηδη τα πρώτα μοντέλα για το πεδίο βαρύτητας της Γης που προέκυψαν στο τέλος του 2010, από δεδομένα ενός έως δύο μηνών του GOCE, συνηγορούν σε αυτό και δείχνουν ότι επιτυγχάνεται καλύτερη ακρίβεια σε

αρμονικές >120-130 σε σχέση με την GRACE [2], [13], [14]. Το αθροιστικό σφάλμα στα υψόμετρα του γεωειδούς που θα προκύψει τελικά από τα δεδομένα του GOCE (όταν χρησιμοποιηθούν όσα δεδομένα έχουν ήδη συλλεγθεί και όσα θα συλλεχθούν στο μέλλον) αναμένεται να είναι της τάξης του ±1 cm για βαθμούς ανάπτυξης μέχρι n=250-260 που μεταφράζεται σε ~80-76 km (μισό μήκος κύματος) [3], [4]. Πρέπει να τονιστεί ότι οι απαιτήσεις από την αποστολή του GOCE είναι να αυξήσει την ακρίβεια προσδιορισμού των μεσαίων και υψηλών αρμονικών καθώς και την διακριτική ικανότητα των μοντέλων ενώ δεν αναμένεται να αυξήσει την ακρίβεια των αρμονικών μικρής και μεσαίας τάξης (τουλάχιστον μέχρι n~50). Ένα συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι τρεις αποστολές και ιδιαίτερα αυτές των GRACE και GOCE είναι αλληλοσυμπληρούμενες και μόνο ο συνδυασμός των δεδομένων τους μπορεί να οδηγήσει σε γεωδυναμικά μοντέλα που θα δίνουν αθροιστικά σφάλματα στα υψόμετρα του γεωειδούς καλύτερα από ±1 cm [14], [15].

III. ΟΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ

Και οι τρεις τεχνικές παρατήρησης του πεδίου βαρύτητας από το διάστημα, δηλαδή οι SST-hl, SST-ll και SGG, βασίζονται στον συνδυασμό ενός ή περισσοτέρων επιταχυνσιομέτρων και στην παρακολούθηση δορυφόρου προς δορυφόρο, είτε μεταξύ των δορυφόρων αυτών καθ αυτών είτε προς τους δορυφόρους GPS. Οι τρεις βασικές προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούν όλες οι αποστολές παρατήρησης του πεδίου βαρύτητας της Γης από το διάστημα είναι *α) να υπάρχει δυνατότητα συνεχούς και αδιάκοπης παρατήρησης των δορυφόρων αυτών στον τρισδιάστατο χώρο, β) να υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης ή μείωσης της επίδρασης των μη-βαρυτικών δυνάμεων ώστε να μπορεί να απομονωθεί το βαρυτικό σήμα, και γ) το ύψος πτήσης να είναι όσο πιο χαμηλό και πιο κοντά στις ελκτικές μάζες προκειμένου η ομαλοποίηση του σήματος λόγω ύψους να είναι η μικρότερη δυνατή* [4], [9], [21], [26].



Σχήμα 3 – Οι τεχνικές παρατήρησης του πεδίου βαρύτητας από το διάστημα SST-hl (επάνω αριστερά), SGG (κάτω) και SST-ll (επάνω δεξιά).

Και τα τρία αυτά κριτήρια εκπληρώνονται με την τεχνική SST-hl που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3. Σύμφωνα με την μεθοδολογία αυτή, ένας δορυφόρος που βρίσκεται σε χαμηλό ύψος τροχιάς (Low Earth Orbiter – LEO) είναι εξοπλισμένος με δέκτη που μπορεί να λαμβάνει σήμα από το σύστημα GPS (Global Positioning System) και το GLONASS (Global Navigation Satellite System) και με ένα επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων. Ο δέκτης παρακολουθεί σε κάθε χρονική στιγμή τουλάχιστον δώδεκα δορυφόρους GPS και GLONASS και βάσει των εφημερίδων τους, που προσδιορίζονται με πολύ μεγάλη ακρίβεια από το εκτεταμένο δίκτυο παρακολούθησης της Διεθνούς Υπηρεσίας GNSS (International GNSS Service), και τις παρατηρήσεις φέροντος κύματος και φάσεων που πραγματοποιεί, μπορεί να προσδιορίζει συνεχώς το τρισδιάστατο διάνυσμα της θέσης του με ακρίβεια ±1 cm. Επιπρόσθετα, το επιταχυνσιόμετρο που είναι εγκατεστημένο στο κέντρο μάζας του δορυφόρου μετρά τις μη-βαρυτικές δυνάμεις (όπως η ατμοσφαιρική έλξη, η γήινη ακτινοβολία Albedo και η

ηλιακή ακτινοβολία), η επίδραση των οποίων μπορεί να υπολογιστεί εκ των υστέρων ή να αντισταθμιστεί με έναν μηχανισμό ελέγχου και απομάκρυνσης μεταθέσεων και γωνιακών μεταβολών (drag-free and angular-free controls). Ένας τέτοιος δορυφόρος, χωρίς τον μηχανισμό ελέγχου μεταθέσεων είναι και ο δορυφόρος CHAMP [15].

Με την τεχνική αυτή προσδιορίζονται με μεγάλη ακρίβεια τα μεγάλη μήκη κύματος του πεδίου βαρύτητας αλλά δεν είναι δυνατή η συλλογή δεδομένων υψηλής διακριτικής ικανότητας (υψηλές συχνότητες), εξαιτίας της ομαλοποίησης του σήματος ακόμη και σε αυτό το πολύ χαμηλό, σε σύγκριση με άλλα δορυφορικά συστήματα, ύψος πτήσης (π.χ., 454 km για τον CHAMP). Έτσι, υπεισέρχεται μια τέταρτη προϋπόθεση, δηλαδή η *δυνατότητα εξουδετέρωσης ή μείωσης της ομαλοποίησης του βαρυτικού σήματος λόγω του ύψους πτήσης του δορυφόρου*. Η κλασσική προσέγγιση σε όλες τις γεωεπιστήμες για την ανάδειξη και εντοπισμό χαρακτηριστικών κάποιου μεγέθους μικρού μήκους κύματος είναι η μέτρηση διαφορών ή βαθμίδων του υπό εξέταση μεγέθους. Προκύπτουν έτσι δυο διαφορετικές δυνατότητες για την εξουδετέρωση της ομαλοποίησης του βαρυτικού σήματος με το υψόμετρο, η τεχνική SST-ll και η δορυφορική βαθμιδομετρία SGG, οι οποίες συνδυάζονται πάντα με την τεχνική SST-hl.

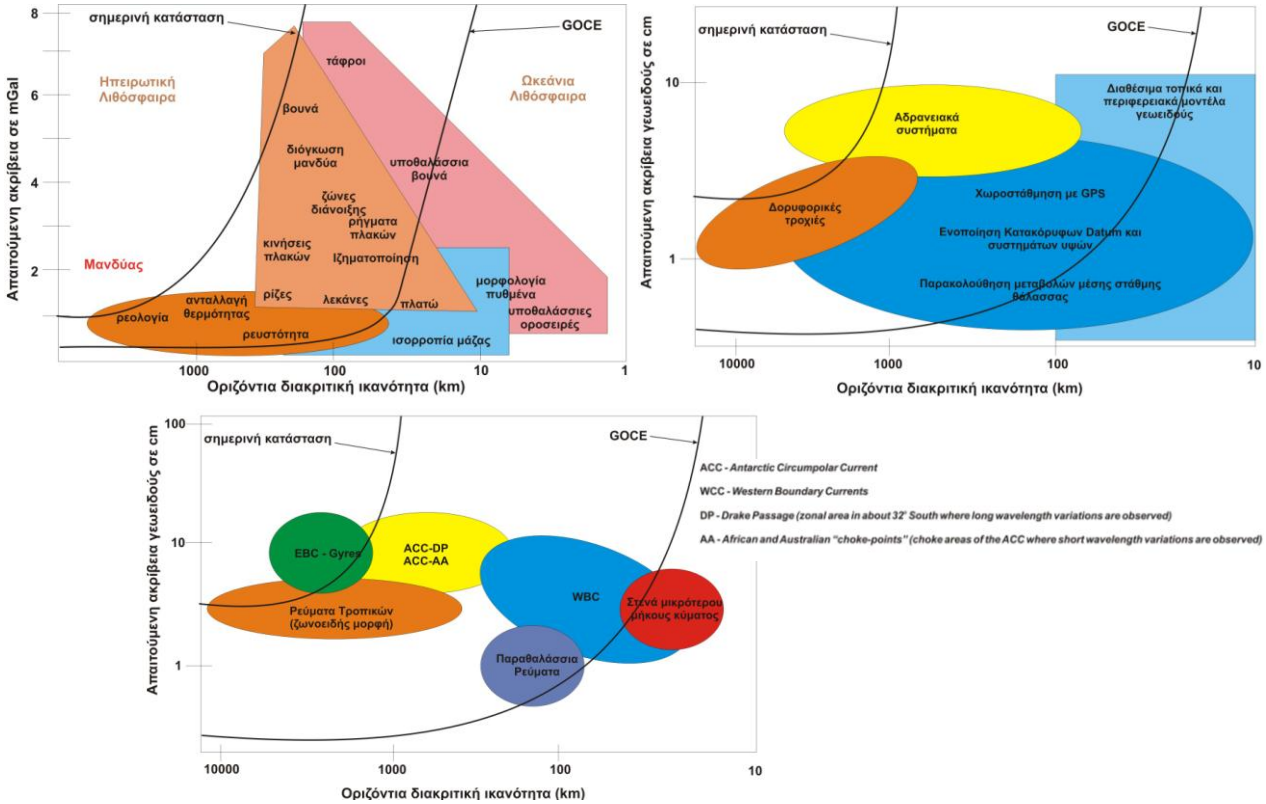
Στην περίπτωση της τεχνικής SST-ll (βλ. Σχήμα 3) δύο δορυφόροι βρίσκονται ουσιαστικά στην ίδια τροχιά και σε απόσταση της τάξης των 100 έως 400 km μεταξύ τους. Αυτό το ιδιότυπο «κυνηγητό» ανάμεσα στους δύο δορυφόρους μεταφράζεται σε αυξομείωση της σχετικής τους θέσης η οποία μετράται με πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια. Και σε αυτή την περίπτωση η επίδραση των μη-βαρυτικών δυνάμεων στα δύο οχήματα μπορεί είτε να αντισταθμιστεί είτε να μετρηθεί και να απομακρυνθεί. Η κύρια ποσότητα που ενδιαφέρει στην περίπτωση της τεχνικής SST-ll είναι η σχετική απόσταση μεταξύ των δύο σκαφών που ουσιαστικά αποτελεί την απόσταση των κέντρων μάζας τους. Η απόσταση αυτή μετράται από μία σύνδεση μικροκυμάτων, που υπάρχει ανάμεσα στους δύο δορυφόρους, και ταυτόχρονα συλλέγονται μετρήσεις επιταχύνσεων στις τρεις διαστάσεις με τα διαθέσιμα επιταχυνσιόμετρα και παρατηρήσεις ύψους και θέσης από τους δέκτες παρακολούθησης των δορυφόρων GPS και GLONASS. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι δορυφόροι GRACE.

Η εναλλακτική προοπτική στην τεχνική SST-ll είναι η SGG την οποία χρησιμοποιεί ο δορυφόρος GOCE. Η μέθοδος της δορυφορικής βαθμιδομετρίας αναφέρεται στην μέτρηση διαφορών επιταχύνσεων και στις τρεις χωρικές διευθύνσεις ανάμεσα στις μάζες ελέγχου και στο σύνολο των επιταχυνσιομέτρων που υπάρχουν μέσα στο σώμα του δορυφόρου (βλ. Σχήμα 3). Η παρατήρηση είναι η διαφορά των βαρυτημετρικών επιταχύνσεων στις θέσεις των μαζών ελέγχου μέσα στον δορυφόρο, οι οποίες προέρχονται από όλες τις ελκτικές μάζες της Γης (ορατή τοπογραφία, υποθαλάσσιες τάφροι και όρη, ζώνες διάρρηξης τεκτονικών πλακών, ανομοιογενείς κατανομές κάτω από τη λιθόσφαιρα, κ.λπ.). Οι μετρήσεις ανταποκρίνονται στις βαθμίδες της επιτάχυνσης της βαρύτητας δηλαδή ουσιαστικά στις δεύτερες παραγώγους του δυναμικού έλξης. Οι μη-βαρυτικές επιδράσεις στο διαστημικό όχημα, όπως για παράδειγμα η ώθηση του αέρα, επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο όλα τα επιταχυνσιόμετρα και σε μια ιδεατή κατάσταση απομακρύνονται όταν σχηματίζονται οι διαφορές των επιταχύνσεων. Επειδή οι αποστάστεις ανάμεσα στα επιταχυνσιόμετρα του GOCE και στις μάζες ελέγχου είναι πολύ μικρές επιτυγχάνεται η παρατήρηση πολύ υψηλών (σε σχέση με άλλους δορυφόρους) συχνοτήτων του πεδίου βαρύτητας [6], [9], [15], [21].

IV. ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΑΠΟΣΤΟΛΩΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΓΕΩΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΦΑΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από την παραπάνω περιγραφή των αποστολών παρακολούθησης του πεδίου βαρύτητας της Γης, των μετρητικών τους διατάξεων, των αρχών μέτρησης που ακολουθούν και των στόχων τους, προκύπτει εύκολα η σημασία που έχουν για το σύνολο των γεωεπιστημών. Οι κύριες ωφέλειες προκύπτουν για τις επιστήμες τις γεωλογίας και γεωφυσικής, της ωκεανογραφίας και της γεωδαισίας με προφανείς θετικές επιπτώσεις και σε όλες τις υπόλοιπες γεωεπιστήμες που χρησιμοποιούν άμεσα ή έμμεσα τα δεδομένα των παραπάνω.

Σε ότι αφορά τις επιστήμες της γεωλογίας, της γεωφυσικής και της σεισμολογίας, αυτές θα έχουν σημαντικό όφελος από τις αποστολές των CHAMP και GRACE, αλλά ειδικά από την αποστολή GOCE. Αν και φαινομενικά το πεδίο βαρύτητας της Γης αποτελεί για τις επιστήμες αυτές μια περιφερειακή ποσότητα, εντούτοις δίνει μια τρισδιάστατη εικόνα της κατανομής των μαζών και μεταβολών της πυκνότητας στην λιθόσφαιρα και στον ανώτερο μανδύα οπότε μπορεί να συνδυαστεί με δεδομένα σεισμικής τομογραφίας, κατανομής και ανωμαλιών πυκνοτήτων, και γεωφυσικής διασκόπησης προκειμένου να προκύψει μια πληρέστερη εικόνα του εσωτερικού της Γης. Οι μεταβολές στην πυκνότητα σχετίζονται άμεσα με το πεδίο βαρύτητας αφού οι ανωμαλίες βαρύτητας προκύπτουν από διαφορές στην κατανομή των μαζών και των πυκνοτήτων. Η γνώση των ανωμαλιών των πυκνοτήτων μπορεί με τον τρόπο αυτό να δώσει νέα ώθηση στην μελέτη και τον προσδιορισμό των ζωνών διάρρηξης των τεκτονικών πλακών, της μορφολογίας του πυθμένα των θαλασσών, των υποθαλάσσιων οροσειρών και λεκανών και της κίνησης των πλακών. Ακόμη αναμένεται συνεισφορά στην κατανόηση των μηχανισμών γένεσης των σεισμών, που αποτελεί



Σχήμα 4 – Η επίδραση των αποστολών CHAMP, GRACE και GOCE στη γεωδυναμική (επάνω αριστερά), γεωδαισία (επάνω δεξιά) και ωκεανογραφία (κάτω).

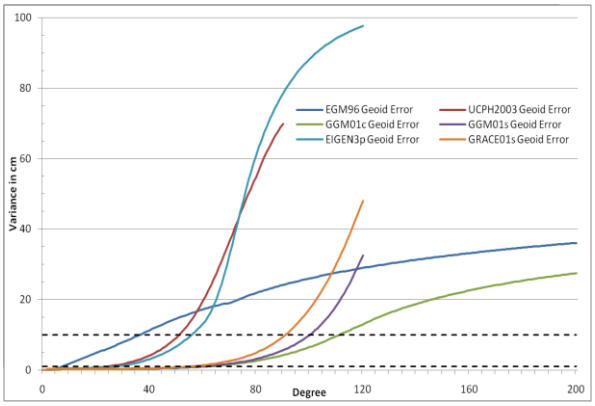
βασική επιδίωξη της γεωφυσικής. Όλες αυτές οι εφαρμογές και οι απαιτήσεις τους σε ακρίβεια και διακριτική ικανότητα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4 σε σχέση με τα αναμενόμενα αποτελέσματα του GOCE.

Στην επιστήμη της ωκεανογραφίας ο δορυφόρος GOCE θα έχει ίσως ανάλογη συνεισφορά με τις αλτιμετρικές αποστολές των δορυφόρων GEOSAT, ERS1/2, T/P, JASON-1, JASON-2, GFO και ENVISAT [7], [25]. Αυτό προκύπτει εύκολα από τη σχέση γεωδαισίας και ωκεανογραφίας στις θαλάσσιες περιοχές, καθώς η γεωδαισία χρειάζεται μοντέλα του σχεδόν στάσιμου μέρους της θαλάσσιας τοπογραφίας για τον προσδιορισμό υψομέτρων του γεωειδούς από αλτιμετρικές παρατηρήσεις ενώ η ωκεανογραφία απαιτεί μοντέλα θαλάσσιου γεωειδούς με ακρίβεια ±1 cm ώστε να προσδιοριστούν μοντέλα της θαλάσσιας τοπογραφίας και από αυτά η ωκεάνια κυκλοφορία [27], [28], [29], [30]. Με δεδομένο λοιπόν ότι τα μοντέλα του γεωειδούς που θα προκύψουν από τον δορυφόρο GOCE θα έχουν ακρίβεια καλύτερη του ±1 cm για μήκη κύματος της τάξης των 150-160 km (πλήρες μήκος κύματος) προκύπτει ότι ο συνδυασμός τους με αλτιμετρικές παρατηρήσεις θα οδηγήσει στην αποτύπωση του μεγέθους και της διεύθυνσης όλων των ωκεάνιων ρευμάτων, από το πιο μεγάλα και ισχυρά όπως το Kuroshio, το Gulf Stream (ρεύμα του κόλπου), και το Παραπόλειο Ρεύμα της Ανταρκτικής (Antarctic Circumpolar Current), έως τα πιο ασθενή παραθαλάσσια ρεύματα και τα ρεύματα μεγάλου βάθους. Τέλος, τα δεδομένα του GOCE θα αποτελέσουν ένα ακόμη σήμα εισόδου σε μοντέλα αφομοίωσης (assimilation) με προφανείς εφαρμογές στην φυσική ωκεανογραφία. Όλες αυτές οι εφαρμογές και οι απαιτήσεις τους σε ακρίβεια και διακριτική ικανότητα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4 σε σχέση με τα αναμενόμενα αποτελέσματα του GOCE. Ειδικά σε ότι σε ότι αφορά τον συνδυασμό των δεδομένων του δορυφόρου GOCE με δεδομένα ανωμαλιών βαρύτητας, παρατηρήσεις του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας, δεδομένα της στάσιμης και χρονικά μεταβαλλόμενης τοπογραφίας της επιφάνειας της θάλασσας και ατμοσφαιρικά δεδομένα με στόχο την παρακολούθηση των ωκεανών, έχουν προκύψει ήδη θεωρητικά μοντέλα και πρακτικά παραδείγματα που δείχνουν την σημαντική συμβολή που θα έχει ο δορυφόρος GOCE [1], [29], [30]. Τέλος, η παρακολούθηση των μεταβολών της στάθμης της θάλασσας, η μελέτη του ισοζυγίου του νερού ανάμεσα στους παγετώνες, τους ωκεανούς και τους ηπειρωτικούς υδάτινους ταμιευτήρες και η πρόγνωση και παρακολούθηση κλιματικών φαινομένων όπως το El Niño και η La Niña, θα μπορούν πλέον να γίνονται με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια και χωρική διακριτική ικανότητα [1], [8], [30]. Όλες αυτές οι εφαρμογές και οι απαιτήσεις τους σε ακρίβεια και διακριτική ικανότητα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4 σε σχέση με τα αναμενόμενα αποτελέσματα του GOCE.

Για την επιστήμη της γεωδαισίας, η αποστολή του GOCE μπορεί να χαρακτηριστεί ως η απαρχή μιας νέας εποχής, καθώς επιστημονικές επιδιώξεις δεκαετιών θα μπορούν πλέον να πραγματοποιηθούν. Κατ' αρχήν σε περιοχές όπως στην Βόρειο Αμερική,

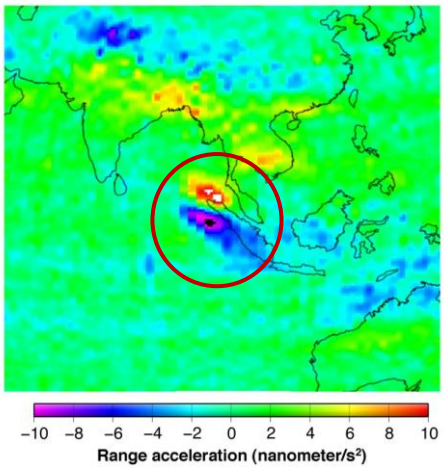
την Ευρώπη, την Αυστραλία και την Ιαπωνία όπου υπάρχουν ήδη τοπικά ή/και περιφερειακά μοντέλα γεωειδούς υψηλής ακρίβειας και διακριτικής ικανότητας τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τον GOCE θα καταστήσουν εφικτή την χωροστάθμηση με GPS, την ενοποίηση των κατακόρυφων συστημάτων αναφοράς και την πλοήγηση με αδρανειακά συστήματα. Στις περιοχές όπου δεν υπάρχουν μοντέλα γεωειδούς ή όπου οι υφιστάμενες λύσεις παρουσιάζουν χονδροειδή σφάλματα και μεγάλες διαφορές στάθμης, τα δεδομένα από την αποστολή του GOCE θα συμβάλλουν στην απομάκρυνση μεγάλου μέρους των σφαλμάτων αυτών και στην βελτιστοποίηση των μοντέλων γεωειδούς. Επίσης, συνεισφορά θα υπάρχει και στον προσδιορισμό των δορυφορικών τροχιών, οι οποίες πλέον θα υπολογίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια αφού οι επιδράσεις της βαρυτικής έλξης και τα σφάλματα που αυτή εισάγει θα είναι στο μεγαλύτερο ποσοστό τους προσδιορίσημα.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ένα από τα σημαντικότερα πεδία στα οποία θα έχουν σημαντική συμβολή οι δορυφορικές αποστολές παρακολούθησης του πεδίου βαρύτητας είναι αυτό του προσδιορισμού μοντέλων του γεωειδούς αυξημένης ακρίβειας. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται το αθροιστικό σφάλμα των υψομέτρων του γεωειδούς από διάφορα γεωδυναμικά μοντέλα σαν συνάρτηση του βαθμού ανάπτυξης. Από το Σχήμα αυτό προκύπτει ότι το μοντέλο που βασίζεται σε δεδομένα των CHAMP και GRACE (πράσινη γραμμή) προσφέρει καλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τα υπόλοιπα κατά περίπου δέκα φορές [29]. Θα πρέπει να τονιστεί ότι το μοντέλο αυτό δεν περιλαμβάνει δεδομένα της αποστολής GOCE, οπότε προκύπτει ότι σε περίπτωση που περιληφθούν και δεδομένα από την αποστολή αυτή, τότε η βελτίωση της ακρίβειας θα είναι ακόμη μεγαλύτερη.



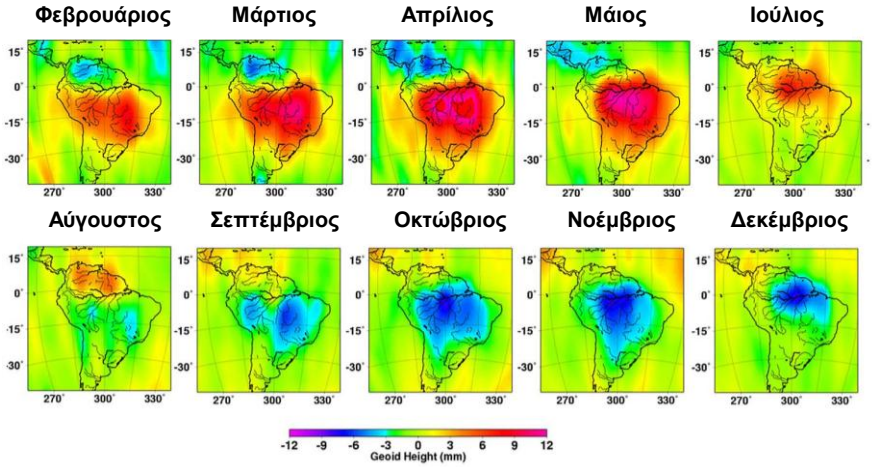
Σχήμα 5 – Αύξηση της ακρίβειας προσδιορισμού του γεωειδούς με τη χρήση δεδομένων των αποστολών CHAMP και GRACE [29].

Σε ότι αφορά τη γεωφυσική και τη γεωδυναμική, η συνεισφορά ειδικά της αποστολής GRACE φάνηκε από το πρώτα κιόλας αποτελέσματα, αφού δεδομένα της αποστολής οδήγησαν στον εντοπισμό του σεισμού M9.3 της Σουμάτρας που έλαβε χώρα το 2004. Το Σχήμα 6 δείχνει τη μεταβολή του πεδίου βαρύτητας που προκλήθηκε από τον σεισμό αυτό και εντοπίστηκε από τα δεδομένα των δορυφόρων GRACE. Παρά το ότι η μεταβολή στο πεδίο βαρύτητας ήταν μόλις της τάξης των μερικών nanometres/s², που είναι ένα δισεκατομμυριοστό της επιτάχυνσης της βαρύτητας που αισθανόμαστε καθημερινά στον πλανήτη, τα δεδομένα των GRACE κατάφεραν με την τεχνική SST-ll να την εντοπίσουν.



Σχήμα 6 – Ο εντοπισμός του σεισμού της Σουμάτρας το 2007 από δεδομένα της αποστολής GRACE [*Εικόνα από NASA/JPL/University of Texas-CSR*]

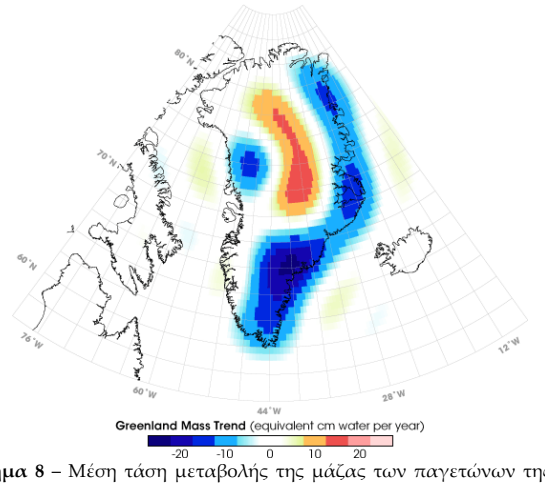
Σημαντική είναι και η συνεισφορά των δορυφόρων GRACE στην παρακολούθηση των διαχρονικών μεταβολών μάζας στον πλανήτη και στο ισοζύγιο νερού μεταξύ ηπειρωτικών εκτάσεων, ωκεανών και της ατμόσφαιρας. Από τα δεδομένα της αποστολής GRACE υπολογίζονται μηνιαίες λύσεις για το πεδίο βαρύτητας της Γης με αθροιστικό σφάλμα στα υψόμετρα του γεωειδούς της τάξης των ±2-3 mm για μήκη κύματος ~400 km. Επομένως, από τα μοντέλα αυτά είναι δυνατός ο προσδιορισμός ετήσιων και εποχικών μεταβολών στα υψόμετρα του γεωειδούς της τάξης των 10 mm. Ειδικά σε μεγάλες υδρολογικές λεκάνες, οι χρονικές μεταβολές του γεωειδούς μπορούν να συσχετισθούν (στο μεγαλύτερο ποσοστό τους) με μεταβολές στην ποσότητα ύδατος των λεκανών αυτών. Ένα τέτοιο παράδειγμα δίνεται στο Σχήμα 7, όπου παρουσιάζεται η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης του Αμαζονίου στη Νότιο Αμερική και αποτυπώνονται οι μηνιαίες διακυμάνσεις του γεωειδούς μέσα σε ένα έτος (2004), όπως προέκυψαν από τα μηνιαία μοντέλα του πεδίου βαρύτητας των δορυφόρων GRACE. Αυτός ο ετήσιος κύκλος των μεταβολών στο υψόμετρο του γεωειδούς αποτυπώνει ξεκάθαρα τις μεταβολές στο ισοζύγιο νερού μέσα σε ένα χρόνο στη λεκάνη του Αμαζονίου, δεδομένου ότι μεταβολή 1 mm στα υψόμετρα του γεωειδούς μεταφράζεται σε μεταβολή ~2 mm στην στήλη ύδατος [22], [23]. Στο Σχήμα 7 αποτυπώνεται η περίοδος βροχοπτώσεων στον Αμαζόνιο μεταξύ Φεβρουαρίου και Μαΐου με αυξημένα υψόμετρα γεωειδούς και κατά συνέπεια επίπεδα νερού, καθώς και η εποχή της ξηρασίας μεταξύ Ιουλίου και Δεκεμβρίου με μειωμένα υψόμετρα γεωειδούς και κατά συνέπεια μειωμένα επίπεδα νερού. Επιπλέον, στο Σχήμα αυτό



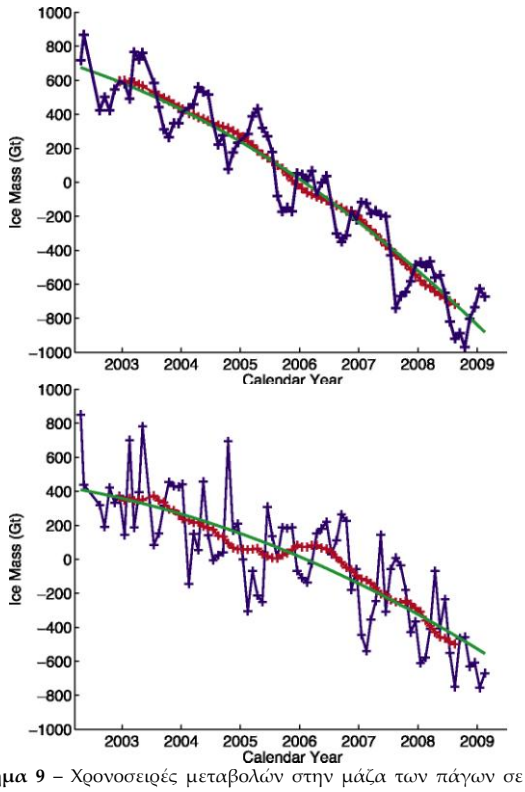
Σχήμα 7 – Ετήσιες (2004) μεταβολές των υψομέτρων του γεωειδούς στην κοιλάδα του Αμαζονίου από τις μηνιαίες λύσεις για το πεδίο βαρύτητας του δορυφόρου GRACE *[Εικόνα από [22]].*

φαίνεται και ο διαχωρισμός της λεκάνης του Αμαζονίου από τις μικρότερες λεκάνες στα βόρεια, όπως είναι για παράδειγμα η λεκάνη του Ορινόκο. Αξίζει να σημειωθεί ότι επειδή λεκάνη του Ορινόκο βρίσκεται βόρεια του ισημερινού, ακολουθεί τον ακριβώς αντίθετο κύκλο από τη λεκάνη του Αμαζονίου που βρίσκεται σε νότιο γεωγραφικό πλάτος. Έτσι η περίοδος των βροχών λεκάνη του Ορινόκο όπως αποτυπώνεται από τα δεδομένα των δορυφόρων GRACE είναι μεταξύ Ιουλίου και Δεκεμβρίου, με αυξημένα υψόμετρα γεωειδούς και κατά συνέπεια επίπεδα νερού, ενώ η περίοδος ξηρασίας είναι μεταξύ Φεβρουαρίου και Μαΐου, με μειωμένα υψόμετρα γεωειδούς και κατά συνέπεια μειωμένα επίπεδα νερού. [22]. [23].

Τα δεδομένα των δορυφόρων GRACE έχουν συμβάλει επίσης και στην παρακολούθηση των πάγων τόσο στην περιοχή της Αρκτικής όσο και στην Ανταρκτική. Ειδικά για την Γροιλανδία, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα των δορυφόρων GRACE για την περίοδο 2003-2005 και υπολογίστηκε ότι λαμβάνει χώρα μια εκτεταμένη συρρίκνωση της μάζας του καλύμματος πάγου σχεδόν στο σύνολό της [22]. Έτσι, οι παράκτιες περιοχές των δυτικών και νότιων παραλίων της Γροιλανδίας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8, έχασαν σε ετήσια βάση 155 Gt (γιγατόνους) πάγου μεταξύ 2003 και 2005 εξαιτίας της αύξησης στο λιώσιμο των πάγων και τον σχηματισμό παγόβουνων, ενώ στις εσωτερικές ηπειρωτικές περιοχές υπήρξε αύξηση των πάγων κατά 54 Gt εξαιτίας της αυξημένη χιονόπτωσης. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8, αυτό προέκυψε από τα δεδομένα GRACE μέσω της καταγραφής μείωσης στα υψόμετρα του γεωειδούς κατά -10 cm έως -25 cm στα νότιο-δυτικά παράλια της Γροιλανδίας. Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώνονται και από νεότερες μελέτες που βασίστηκαν σε μεγαλύτερες χρονοσειρές των GRACE (2002-2009), από τις οποίες προκύπτει, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 9, ότι υπάρχει η μάζα των παγοκαλυμμάτων τόσο στη Γροιλανδία όσο και στην Ανταρκτική μειώνονται συνεχώς [26]. Από τα δεδομένα αυτά προέκυψε ότι η μείωση της μάζας των πάγων στην Γροιλανδία ανέρχεται σε 230 Gt/yr



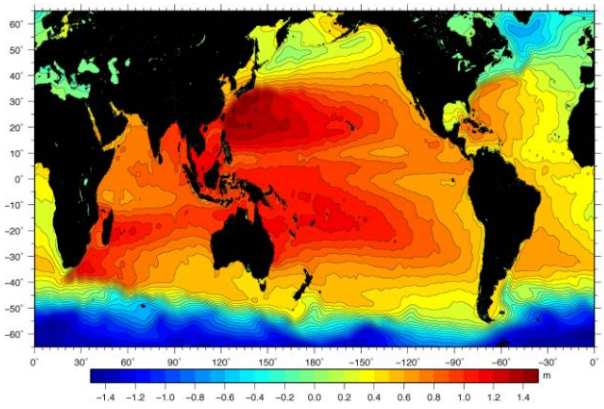
Σχήμα 8 – Μέση τάση μεταβολής της μάζας των παγετώνων της Γροιλανδίας από δεδομένα του δορυφόρου GRACE για την περίοδο 2003-2005 *[Εικόνα από [12]].*



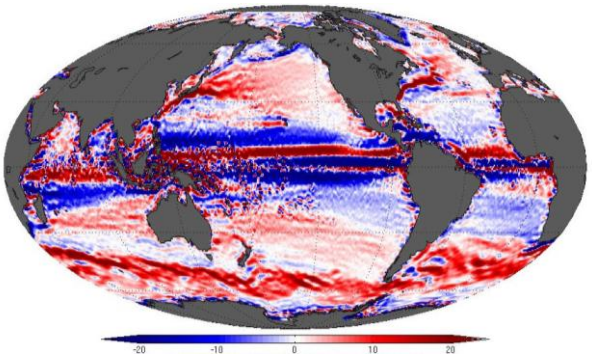
Σχήμα 9 – Χρονοσειρές μεταβολών στην μάζα των πάγων σε Gt στο παγοκάλυμμα της Γροιλανδίας (επάνω) και της Ανταρκτικής (κάτω) από δεδομένα του δορυφόρου GRACE για την περίοδο 2002-2009 *[Εικόνα από [26]].*

ενώ στην περιοχή της Ανταρκτικής στους 143 Gt/yr. Οι εκτιμήσεις αυτές συνοδεύονται με σφάλματα της τάξης των ±33 Gt και ±73 Gt αντίστοιχα, και δείχνουν το σημαντικό ποσοστό μείωσης που υφίστανται τα παγοκαλύμματα των πόλων του πλανήτη μας [26]. Πέρα από τις γενικές αυτές τάσεις, προέκυψε από τα δεδομένα των GRACE για τις μεταβολές του πεδίου βαρύτητας, ότι η μείωση των παγοκαλυμμάτων τόσο στη Γροιλανδία όσο και στην Ανταρκτική έχει επιταχυνθεί και φτάνει τους -30±11 Gt/yr² και -26±14 Gt/yr² αντίστοιχα. Οι επιτάχυνση αυτή στο λιώσιμο των πάγων μεταφράζεται σε μια επιτάχυνση της ανόδου της στάθμης ίση με 0.09 ±0.03 mm/yr² και 0.08 ±0.04 mm/yr² από τη Γροιλανδία και την Ανταρκτική αντίστοιχα. Προέκυψε επομένως ότι η συνδυασμένη συνεισφορά της Γροιλανδίας και της Ανταρκτικής στην επιτάχυνση της ανόδου της στάθμης της θάλασσας είναι 56±17Gt/yr² που αντιστοιχεί σε 0.17 ±0.05 mm/yr² επιτάχυνση της ανόδου στην στάθμη της θάλασσας για την περίοδο 2002-2009 [26].

Τέλος, και σε ότι αφορά την αποστολή του δορυφόρου GOCE, τα πρώτα αποτελέσματα και οι πρώτες μετρήσεις έγιναν διαθέσιμες περίπου στις αρχές του 2010. Έτσι υπολογίστηκαν τα πρώτα μοντέλα σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων που αναπαριστούν το διαταρακτικό δυναμικό της βαρύτητας, και κατά συνέπεια όλα τα παράγωγα μεγέθη όπως ανωμαλίες βαρύτητας και το γεωειδές, σε παγκόσμια κλίμακα [2], [13], [14]. Από τα μοντέλα αυτά, προέκυψε και το πρώτο μοντέλο για την σχεδόν-στάσιμη τοπογραφία της επιφάνειας (ΣΣΤΕΘ) της θάλασσας, που βασίζεται αποκλειστικά σε δεδομένα του δορυφόρου GOCE (βλ. Σχήμα 10) καθώς και το πρώτο μοντέλο των γεωστροφικών ρευμάτων σε παγκόσμια κλίμακα (βλ. Σχήμα 11). Το μοντέλο της ΣΣΤΕΘ που προέκυψε από δεδομένα μόνο δύο μηνών του GOCE, παρουσιάζει ουσιαστικά την διαχρονική μέση τιμή της ισχύος των θαλάσσιων ρευμάτων, επομένως δίνει μια εικόνα της θαλάσσιας κυκλοφορίας. Από το μοντέλα της ΣΣΤΕΘ και μέσω της θεωρίας των γεωστροφικών ρευμάτων προκύπτει και η διεύθυνση, η φορά και η ταχύτητα των ωκεάνιων ρευμάτων που αναπαριστούν την κυκλοφορία των θαλασσών. Ένα τέτοιο μοντέλο που αναπαριστά τα θαλάσσια ρεύματα σε παγκόσμια κλίμακα, φαίνεται στο Σχήμα 11, και προέρχεται από δεδομένα της αποστολής GRACE για την περίοδο 1993-2006.



Σχήμα 10 – Η σχεδόν-στάσιμη τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας από δεδομένα του GOCE *[Εικόνα από ESA/GOCE].*



Σχήμα 11 – Σχεδόν-στάσιμη ζωνοειδής (ανατολική-δυτική) συνιστώσα της ταχύτητας των θαλάσσιων ρευμάτων από δεδομένα της αποστολής GRACE για την περίοδο 1993-2006 σε cm/s *[Εικόνα από GRACE/JPL, [11]].*

V. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παραπάνω περιγραφή των αποστολών παρακολούθησης του πεδίου βαρύτητας της Γης, των αρχών και της μεθοδολογίας μέτρησης καθώς και των εφαρμογών και αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν, γίνεται αντιληπτό ότι ο αντίκτυπος που έχουν στο σύνολο των γεωεπιστημών είναι σημαντικός. Τα χαρακτηριστικά των μετρητικών τους διατάξεων και των μεθοδολογιών που ακολουθούν, προσφέρουν μια μοναδική ευκαιρία ώστε να πραγματοποιηθεί μια άνευ προηγουμένου «ενδοσκόπηση» στο εσωτερικό του πλανήτη μας. Μας δίνουν τη δυνατότητα να μελετήσουμε για πρώτη φορά τόσο την ανακατανομή των μαζών στο σύστημα Γη όσο και τις επιπτώσεις που έχει αυτή η ανακατανομή στο πεδίο βαρύτητας, τον υδρολογικό κύκλο, την στάθμη των θαλασσών, κ.λπ.

Τα μοντέλα για το πεδίο βαρύτητας της Γης που προέκυψαν και θα προκύψουν από δεδομένα των αποστολών CHAMP, GRACE και GOCE αλλά και από το συνδυασμό τόσο μεταξύ τους όσο και με επίγεια δεδομένα βαρύτητας και αλτιμετρίας, δίνουν την ευκαιρία για συνεργασία ανάμεσα στις διάφορες γεωεπιστήμες. Αυτό το πεδίο κοινής έρευνας μπορεί να αφορά α) στην παρακολούθηση της στάθμης της θάλασσας και της ωκεάνιας κυκλοφορίας σε ότι αφορά τη συνεργασία της γεωδαισίας με τη ωκεανογραφία, β) στις μεταβολές μάζας που μετρώνται σαν μεταβολές του γεωειδούς και συσχετίζονται με μεταβολές στο ισοζύγιο μεγάλων υδρολογικών λεκανών σε ότι αφορά τη συνεργασία της γεωδαισίας με την υδρολογία και τις επιστήμες της ατμόσφαιρας, γ) στις μεταβολές της μάζας των πάγων στα παγοκαλύμματα του πλανήτη στην Αρκτική και στην Ανταρκτική και στη συσχέτισή τους με την άνοδο της στάθμης της θάλασσας και το φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς και σε πολλά άλλα κοινά πεδία έρευνας.

Σε κάθε περίπτωση, τα δεδομένα των αποστολών αυτών έχουν δώσει και θα συνεχίσουν να

προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες που σχετίζονται με την παρακολούθηση της μεταβολής του κλίματος και την πρόγνωση φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό και στην επιφάνεια του πλανήτη μας. Ειδικά ο βέλτιστος συνδυασμός τους με επίγεια, από αέρα και άλλα δορυφορικά δεδομένα μέσω μοντέλων αφομοίωσης, μπορεί να οδηγήσει στην καλύτερη κατανόηση του διαρκώς μεταβαλλόμενου πλανήτη μας και στην ανάπτυξη ισχυρών εργαλείων για την αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών στο πλαίσιο της προστασίας του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος καθώς και της οικονομικής ζωής και της κοινωνίας.

Τέλος, η επιστήμη που αναμένεται να έχει και ήδη δέχεται τον μεγαλύτερο (θετικό) αντίκτυπο από τις νέες αποστολές παρακολούθησης του πεδίου βαρύτητας της Γης είναι αυτή της γεωδαισία. Οι δορυφορικές αποστολές των CHAMP, GRACE και GOCE έχουν προσφέρει ήδη μια εικόνα του πεδίου βαρύτητας και του γεωειδούς σε παγκόσμια κλίμακα με απαράμιλλη ακρίβεια και διακριτική ικανότητα, ενώ έδωσαν για πρώτη φορά την ευκαιρία να παρατηρηθούν οι διαχρονικές μεταβολές της βαρύτητας. Αναμένεται, ότι ο βέλτιστος συνδυασμός των δεδομένων τους, ειδικά όταν γίνουν διαθέσιμα και περισσότερα δεδομένα της αποστολής GOCE, θα επιτρέψει τον προσδιορισμό του γεωειδούς με ακρίβεια μερικών cm σε παγκόσμια κλίμακα, ώστε να καταστεί δυνατή η σύνδεση των υπαρχόντων κατακόρυφων συστημάτων αναφοράς, η δημιουργία ενός παγκόσμιου κατακόρυφου συστήματος αναφοράς και ο προσδιορισμός ορθομετρικών υψομέτρων μεγάλης ακρίβειας αποκλειστικά με μετρήσεις GPS.

VI. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο συγγραφέας θα ήθελε να ευχαριστήσει τους δύο κριτές, τον Δρ. Βασίλειο Ανδριτσάνο και τον Δρ. Συμεών Κατσουγιαννόπουλο, για τις διορθώσεις και υποδείξεις τους που οδήγησαν στην βελτίωση της τελικής μορφής της εργασίας. Μέρος της εργασίας αυτής βασίστηκε σε παρουσίαση του συγγραφέα στο πλαίσιο της ημερίδας «*Δορυφορική γεωδαισία: Σύγχρονα συστήματα και εφαρμογές*» του Τμήματος Τοπογραφίας του ΤΕΙ Αθηνών τον Μάιο του 2010.

VII. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] Barzaghi, R., Maggi, A., Tselfes, N., Tsoulis, D., Tziavos, I.N., Vergos, G.S. (2007) Combination of Gravimetry, Altimetry and GOCE Data for Geoid Determination in the Mediterranean: Evaluation and Simulation. In: Sideris, M.G. (ed), *Observing our Changing Earth*, International Association of Geodesy Symposia Vol. 133, Springer Berlin Heidelberg New York, 2009, pp. 195-202.

[2] Bruinsma, S.L., Marty, J.C., Balmino, G., Biancale, R., Foerste, C., Abrikosov, O. and Neumayer, H. (2010) GOCE Gravity Field Recovery by Means of the Direct Numerical Method. Presented at the ESA Living Planet Symposium, 27th June - 2nd July 2010, Bergen, Norway.

[3] Drinkwater, M.R., Floberghagen, R., Haagmans, R., Muzi, D., Popescu, A. (2003) GOCE: ESA's first Earth Explorer Core mission, in Beutler, G.B., Drinkwater, M.R., Rummel, R., Steiger, R. von. (eds.), *Earth Gravity Field from Space - from Sensors to Earth Sciences*. In the Space Sciences Series of ISSI, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 18, pp. 419-432.

[4] European Space Agency (1999) *The four Candidate Earth Explorer Core Missions, Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Mission*. Reports for Mission Selection, ESA, SP-1233(1).

[5] European Space Agency (2011) *Internet resources*, http://www.esa.int/ esaLP/SEMCJOSRJHG_LPgoce_1.html.

[6] Förste, Ch., Flechtner., F., Schmidt, R., König, R., Meyer, U., Stubenvoll, R., Rothacher, M., Barthelmes, F., Neumayer, H., Biancale, R., Bruinsma, S., Lemoine, J.M. & Loyer, S. (2007) Global mean gravity field models from combination of satellite mission and altimetry/gravimetry surface data, in *Proc. of the 3rd international GOCE user workshop*, 6-8 November 2006, Frascati, Italy.

[7] Fu, L.L. and Cazenave, A. (2001) *Satellite Altimetry and Earth Sciences A Handbook of Techniques and Applications*. International Geophysics Series 69, Academic Press, San Diego, California.

[8] Gruber, T. and Steigenberger, P. (2003) Impact of new gravity field missions for sea surface topography determination, in *Proc. of the 3rd Meeting of the International Gravity and Geoid Commission, Gravity and Geoid 2002*, ed. Tziavos, I.N., pp. 320-325, Ziti editions, Thessaloniki, Greece.

[9] Jekeli, C. (1999) The determination of gravitational potential differences from satellite-to-satellite tracking, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 75(2), pp. 85-101.

[10] Jet Propulsion Laboratory (2011) *Internet resources*, http://grace.jpl.nasa.gov/data/dot/.

[11] Lemoine, F.G., Kenyon, S.C., Factor, J.K., Trimmer, R.G., Pavlis, N.K., Chinn, D.S., Cox, C.M., Klosko, S.M., Luthcke, S.B., Torrence, M.H., Wang, Y.M., Williamson, R.G., Pavlis, E.C., Rapp, R.H. & Olson T.R. (1998) *The development of the joint NASA GSFC and NIMA geopotential model EGM96*, NASA/TP-1998-206861, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.

[12] Luthcke, S.B., Zwally, H. J., Abdalati, W., Rowlands, D.D., Ray, R.D., Nerem, R.S., Lemoine, F.G., McCarthy, J.J., and Chinn D.S. (2006). Recent Greenland Ice Mass Loss by Drainage System from Satellite Gravity Observations. Science 314(5803), 1286–1289.

[13] Migliaccio, F., Reguzzoni, M., Sanso F., Tscherning C.C., Veicherts, M. (2010) GOCE data analysis: the space-wise approach and the first space-wise gravity field model. Presented at the ESA Living Planet Symposium, 27th June - 2nd July 2010, Bergen, Norway.

[14] Pail, R., Goiginger, H., Schuh, W.-D., Höck, E., Brockmann, J.M., Fecher, T., Gruber, T., Mayer-Gürr, T., Kusche, J., Jäggi, A., Rieser, D. (2010) Combined satellite gravity field model GOCO01S derived from GOCE and GRACE. Geophys. Res. Lett., 37, L20314, doi:10.1029/2010GL044906.

[15] Reigber, Ch., Bock, R., Förste, Ch., Grunwaldt, L., Jakowski, N., Lühr, H., Schwintzer, P., Tilgner, C. (1996) CHAMP Phase-B Executive Summary, GFZ, STR96/13.

[16] Reigber, Ch., Jochmann, H., Wünsch, J., Petrovic, S., Schwintzer, P., Barthelmes, F., Neumayer, K.-H., König, R., Förste, Ch., Balmino, G., Biancale, R., Lemoine, J.-M., Loyer, S., Perosanz, F. (2005a) Earth Gravity Field and Seasonal Variability from CHAMP, in Reigber, C., Luhr, H., Schwintzer, P., Wickert, J. (eds.), *Earth Observation with CHAMP: Results from Three Years in Orbit*, Springer–Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 25-30.

[17] Reigber, C., Luhr, H., Schwintzer, P., Wickert, J. (2005b) *Earth Observation with CHAMP: Results from Three Years in Orbit*, Springer–Verlag, Berlin, Heidelberg.

[18] Rummel, R., Müller, J., Oberndorfer, H., Sneeuw, N. (2000) Satellite Gravity Gradiometry with GOCE, in Rummel, R., Drewes, H., Bosch, W., Hornik, H. (eds.), *Towards an Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS)*, International Association of Geodesy Symposia, vol. 120, Springer–Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 66-72.

[19] Rummel, R., Balmino, G., Johannessen, J., Visser, P., Woodworth, P. (2002) Dedicated Gravity Field Missions - Principles and Aims, *Journal of Geodynamics*, 33, pp. 3-20.

[20] Sansò F. & Sideris M.G. (1997) On the similarities and differences between systems theory and least-squares collocation in physical geodesy, *Boll. di Geod. e Scie. Aff.*, 2, 174-206.

[21] Schrama, E.J.O. (1990) *Gravity Field Error Analyses: Applications of GPS Receivers and Gradiometers on Low Orbiting Platforms*, NASA Tech Memorandum, 100769.

[22] Tapley, B.D., Bettadpur, S., Ries, S.C., Thompson, P.F., Watkins, M.M. (2004a) GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System, *Science* 305(5683), pp. 503-505.

[23] Tapley, B.D., Bettadpur, S., Watkins, M.M., Reigber, Ch. (2004b) The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission Overview and Early Results, *Geophysical Research Letters*, 31, L09607, doi:10.1029/2004GL019920.

[24] Tapley, B.D., Chambers, D.P., Bettadpur, S., Ries, J.C. (2003) Large Scale Ocean Circulation from the GRACE GGM01 Geoid, *Geophysical Research Letters*, 30(22), 2163, doi:10.1029/2003GL018622.

[25] Tziavos, I.N., Vergos, G.S., Kotzev, V., Pashova, L. (2004) *Mean sea level and sea surface topography studies in the Black Sea and the Aegean*. International Association of Geodesy Symposia, Vol. 129, Jekeli C, Bastos L, Fernandes J (eds.), Gravity Geoid and Space Missions 2004, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, pp. 254-259.

[26] Velicogna, I. (2009). *Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE*. Geophys. Res. Lett., 36, L19503, doi:10.1029/2009GL040222.

[27] Vergos, G.S. (2006) *Study of the Earth's Gravity Field and Sea Surface Topography in Greece by combining surface data and data from the new satellite missions of CHAMP and GRACE*, Ph.D. Thesis, Department of Geodesy and Surveying, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, January 2006.

[28] Vergos, G.S., Tziavos, I.N. (2007) *Determination of the quasi-stationary sea surface topography from a common adjustment of a geodetic and an oceanographic model*. In: Forsberg R, Kiliçoğlu A (eds) 1st International Symposium of the International Gravity Field Service, Gravity Field of the Earth, General Command of Mapping, Special Issue 18, pp. 235-241.

[29] Vergos, G.S., Tziavos, I.N. and Sideris, M.G. (2006) *On the validation of CHAMP- and GRACE-type EGMs and the construction of a combined model*. *Geodesy and Cartography* 55(3), pp. 115-131.

[30] Vergos, G.S., Tziavos, I.N. and Sideris, M.G. (2010) *On the determination of sea level changes by combining altimetric, tide gauge, satellite gravity and atmospheric observations*. Presented at the 2009 Scientific Assembly of the IAG, *Geodesy for Planet Earth*, August 31 – September 4, Buenos Aires, Argentina (accepted for publication to the conference proceedings).

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

Γεώργιος Σ. Βέργος
Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Πολυτεχνική Σχολή
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Παν. Θυρίδα 440
54124 Θεσσαλονίκη - ΕΛΛΑΣ

Τηλ.: +30 2310 994366 / Fax: +30 2310 995948
e-mail: vergos@topo.auth.gr

Χωρογραφίες/ Τεύχος 2/ Αρ 1/ 2011 – σελ 1-11