

6. Γεωδυναμικά Μοντέλα και GPS

6.1 Εισαγωγή.

Για την περίπτωση του υψομετρικού προσδιορισμού θέσης, οι μετρήσεις GPS δίνουν μια ακρίβεια της τάξης των 2-3 ppm για αποστάσεις σημείων από 10 - 70 km (Λιβιεράτος και Φωτίου, 1993). Από την άλλη, οι μετρήσεις GPS παρέχουν πληροφορία για το *γεωμετρικό υψόμετρο* σημείων, δηλαδή για την απόσταση από την επιφάνεια του *ελλειψοειδούς εκ περιστροφής (ΕΕΠ)*, το οποίο αποτελεί την μαθηματική προσέγγιση του σχήματος της Γης. Αυτό, όμως, που ενδιαφέρει την επιστήμη του Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού, όπως και πολλές άλλες φυσικές επιστήμες, είναι ο προσδιορισμός υψομέτρων από μια επιφάνεια, η οποία να αποτελεί τη φυσική προσέγγιση του σχήματος της Γης. Μια τέτοια επιφάνεια είναι η επιφάνεια του *γεωειδούς* και το υψόμετρο των σημείων μετρήσεων από την επιφάνεια αυτή ονομάζεται *ορθομετρικό υψόμετρο*. Η σύνδεση γεωειδούς και ΕΕΠ πραγματοποιείται μέσω της απόστασης των δύο παραπάνω σταθμικών επιφανειών, η οποία ονομάζεται *αποχή του γεωειδούς (N)*, καθώς επίσης και από τις συνιστώσες της γωνίας μεταξύ *καθέτου* στο ΕΕΠ και *κατακορύφου* στο γεωειδές. Οι συνιστώσες αυτές ονομάζονται *συνιστώσες της απόκλισης της κατακορύφου* (ξ , η). Τα στοιχεία σύνδεσης γεωειδούς με το ΕΕΠ (N , ξ , η) προκύπτουν κυρίως από βαρυτημετρικές μεθόδους (*μέθοδοι προσδιορισμού του γεωειδούς*). Οι βαρυτημετρικές μέθοδοι προσδιορίζουν την επιφάνεια του γεωειδούς από μετρήσεις βαρύτητας ανηγμένες στο γεωειδές (Κατσάμπαλος - Τζιαβός, 1991, κεφ. 3). Οι προαναφερθείσες μέθοδοι απαιτούν μετρήσεις βαρύτητας κατανεμημένες σε ολόκληρη την επιφάνεια της Γης, η οποία, όμως, καλύπτεται μόνο από ένα ποσοστό μετρήσεων. Τα κενά καλύπτονται με την εισαγωγή γεωδυναμικών μοντέλων.

6.2 Η εφαρμογή του G.P.S. στη γεωδυναμική.

Μέχρι πρόσφατα οι μετακινήσεις του γήινου φλοιού αναλύονταν κυρίως με μετρήσεις V.L.B.I. (Very Long Baseline Interferometry) και S.L.R. (Satellite Laser Ranging). Μετρώντας με το σύστημα V.L.B.I. βάσεις (baselines) μεγάλου μήκους (μήκη βάσης πάνω από 1000 Km) μπορούν να επιτευχθούν υψηλές ακρίβειες της τάξης των λίγων εκατοστών. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου V.L.B.I. είναι το υψηλό κόστος και η δυσκολία μετακίνησης των συστημάτων της (σήμερα σε παγκόσμια κλίμακα είναι διαθέσιμα πολύ λίγα κινητά συστήματα V.L.B.I.). Με τα όργανα του συστήματος S.L.R., που χρησιμοποιούνται εδώ και αρκετά χρόνια, έχουν επιτευχθεί επίσης αρκετά υψηλές ακρίβειες. Όμως και αυτά υπόκεινται στις απαιτήσεις

του κόστους και στη δυσκολία της μεταφοράς τους. Αντίθετα χρησιμοποιώντας δέκτες G.P.S έχουμε πολύ μικρότερο κόστος σε σχέση με τις άλλες μεθόδους και μπορούμε ταυτόχρονα να έχουμε μετρήσεις σε πολλά σημεία τα οποία προσφέρουν πιο ομοιογενή και καλύτερη κάλυψη της περιοχής που μας ενδιαφέρει. Επίσης, σε ότι αφορά την ακρίβεια στον προσδιορισμό θέσης, αυτή προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό την ακρίβεια των προηγούμενων συστημάτων.

Ένα σημαντικό στοιχείο κατά τον σχεδιασμό μιας καμπάνιας με σκοπό τη μελέτη των μικρομετακινήσεων του γήινου φλοιού με τη βοήθεια του συστήματος G.P.S. είναι ότι η σχετική ακρίβεια¹ πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 1×10^{-6} μέχρι 0.1×10^{-6} (1 ppm έως 0.1 ppm). **Αυτό σημαίνει ότι για μία βάση (baseline) 100 km η σχετική ακρίβεια πρέπει να κυμαίνεται από 10 μέχρι 1 cm και για μια βάση 1000 km από 100 μέχρι 10 cm.**

Γνωρίζοντας ότι οι μετακινήσεις του γήινου φλοιού είναι της τάξης των λίγων εκατοστών ανά έτος (cm/year) ή λίγων χιλιοστών ανά έτος (mm/year) οι αποστάσεις των βάσεων (baselines) δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν τα 100 km. Για μεγαλύτερες αποστάσεις γίνονται περίπλοκες παρατηρήσεις με σκοπό να επιτευχθεί σχετική ακρίβεια 10^{-8} . Οι πιο σημαντικοί παράγοντες εισαγωγής λαθών είναι η ακρίβεια της τροχιάς των δορυφόρων και τα μοντέλα προσέγγισης της ατμοσφαιρικής επίδρασης. Για να πετύχουμε σχετικές ακρίβειες της τάξης του 1×10^{-7} , οι τροχιές των δορυφόρων πρέπει να είναι γνωστές με ακρίβεια της τάξης των ± 2 m. Οι εκπεμπόμενες εφημερίδες (broadcast ephemerides) έχουν ακρίβεια χειρότερη κατά 10 ή περισσότερες φορές από την προαναφερθείσα. Γι' αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιούμε κατά την επίλυση τις ακριβείς εφημερίδες (precise ephemerides).

6.3 Τα γεωδυναμικά μοντέλα.

Τα γεωδυναμικά μοντέλα είναι στην ουσία αναπτύξεις δεδομένων σε σφαιρικές αρμονικές. Με την ίδια ευκολία, με την οποία μπορεί να αναπτυχθεί μια πολυωνυμική συνάρτηση από δεδομένα πάνω σε ένα επίπεδο, μπορούν να αναπτυχθούν και δεδομένα στη σφαίρα σε σφαιρικές αρμονικές. Με αυτόν τον τρόπο, τα γεωδυναμικά μοντέλα δίνουν μια παγκόσμια εικόνα του πεδίου βαρύτητας, χαμηλής βέβαια διακριτικής ικανότητας, καλύπτοντας έτσι τα κενά από την έλλειψη πραγματικών δεδομένων βαρύτητας.

Τα γεωδυναμικά μοντέλα προκύπτουν από αναπτύξεις σε σειρά. Ο υπολογισμός τους γίνεται από διάφορα ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια (π.χ., NASA, OSU - Ohio State University,

¹ Η σχετική ακρίβεια μίας μέτρησης υπολογίζεται ως ο λόγος της ακρίβειας που επιθυμούμε προς την απόσταση, π.χ. για μία βάση 100 km και ακρίβεια 10 cm είναι: $\text{σχ.ακρ.} = 0.1 \text{ (m)} / 100000 \text{ (m)} = 10^{-6}$. Προσοχή: Η σχετική ακρίβεια είναι αδιάστατο μέγεθος όταν εκφράζεται σαν 10^{-6} , 10^{-7} , κ.ο.κ. ενώ μπορεί να εκφραστεί και σαν μέρη στο εκατομύριο π.χ. 1 ppm, 0.1 ppm κ.ο.κ.

κ.α.). Οι υπηρεσίες αυτές δημοσιεύουν λίστες συντελεστών (*συντελεστές δυναμικού*), οι οποίοι, εφαρμοζόμενοι στους τύπους των αναπτυγμάτων, δίνουν πληροφορίες για τα δεδομένα βαρύτητας και την αποχή του γεωειδούς σε παγκόσμια κλίμακα (Κατσάμπαλος - Τζιαβός, 1991, σελ. 106). Τα αναπτύγματα περιορίζονται μέχρι ένα μέγιστο βαθμό, ο οποίος διαφέρει ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο μοντέλο των συντελεστών του δυναμικού. Ο μέγιστος αυτός βαθμός εξαρτάται κυρίως από τη μέθοδο υπολογισμού των συντελεστών και από το πλήθος των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του μοντέλου. Τα παραπάνω σφάλματα, λόγω του περιορισμένου βαθμού ανάπτυξης του γεωδυναμικού μοντέλου, ονομάζονται σφάλματα αποκοπής και αντιμετωπίζονται, όπως θα εξηγήσουμε παρακάτω, με τη βοήθεια μετρήσεων GPS. Εκτός από τα σφάλματα αποκοπής, στον υπολογισμό των αναπτυγμάτων υπεισέρχονται και σφάλματα από τους ίδιους τους συντελεστές, τα οποία με τη σειρά τους οφείλονται στα σφάλματα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου.

Ο υπολογισμός των συντελεστών του δυναμικού, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την πλήρη ανάπτυξη του γεωδυναμικού μοντέλου, επιτυγχάνεται με τρεις κυρίως διαδικασίες (Κατσάμπαλος - Τζιαβός, 1991, σελ. 107-111):

1. Από την ανάλυση των μετρήσεων των τροχιών τεχνητών δορυφόρων, δεδομένου ότι αυτές επηρεάζονται άμεσα από το γήινο πεδίο έλξης. Οι άγνωστες ποσότητες στην προκειμένη περίπτωση είναι οι συντεταγμένες των σταθμών παρακολούθησης, τα τροχιακά στοιχεία των δορυφόρων, οι συντεταγμένες του δυναμικού και ορισμένες ακόμη παράμετροι φυσικών φαινομένων που επηρεάζουν την κίνηση του δορυφόρου. Σ' αυτές τις λύσεις (που ονομάζονται και δυναμικές λύσεις) προσδιορισμού των συντελεστών του δυναμικού έλξης, το πλήθος των αγνώστων παραμέτρων είναι εξαιρετικά μεγάλο. Για το λόγο αυτό οι παραπάνω λύσεις δεν είναι δυνατό να δώσουν αξιόπιστες τιμές για τους συντελεστές υψηλού βαθμού και τάξης. Επιπλέον, στο μεγάλο ύψος της δορυφορικής τροχιάς, το πεδίο έλξης έχει εξομαλυνθεί αρκετά, γεγονός που επιτρέπει τον προσδιορισμό μόνο των συντελεστών χαμηλού βαθμού και τάξης.
2. Ο υπολογισμός των συντελεστών του δυναμικού έλξης μπορεί να επιτευχθεί και από δεδομένα βαρύτητας (*ανωμαλίες βαρύτητας*), επειδή αυτά παρουσιάζονται διαθέσιμα σε παγκόσμια κλίμακα. Αξιόπιστα μοντέλα συντελεστών του δυναμικού που υπολογίστηκαν μ' αυτή τη μέθοδο υπάρχουν αυτή τη στιγμή μέχρι ένα μέγιστο βαθμό και τάξη (180 έως 360). Ο μέγιστος βαθμός εξαρτάται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, εξαρτάται από το πλήθος των δεδομένων βαρύτητας σε παγκόσμια κλίμακα.
3. Μια τρίτη τεχνική κατασκευής ενός μοντέλου συντελεστών του δυναμικού έλξης βασίζεται στο συνδυασμό των δύο προηγούμενων μεθόδων. Χρησιμοποιεί, δηλαδή, διαφόρους

συνδυασμούς δεδομένων (π.χ., δεδομένα βαρύτητας, δορυφορικά, αλτιμετρικά, κ.λ.π.), καθώς επίσης και συντελεστές άλλων μοντέλων, της πρώτης κυρίως κατηγορίας.

4. Αυτή η τεχνική έχει το πλεονέκτημα να παρέχει ακριβείς συντελεστές χαμηλού βαθμού από τα δορυφορικά τροχιακά δεδομένα και ακριβείς συντελεστές υψηλού βαθμού από τα επίγεια δεδομένα βαρύτητας. Είναι, όμως, πιο απαιτητική σε υπολογιστική ισχύ, γιατί όλη η λύση ακολουθεί τη διαδικασία της συνόρθωσης εκατοντάδων χιλιάδων παρατηρήσεων με δεκάδες χιλιάδες αγνώστους.

Στη συνέχεια θα αναφερθούν ορισμένα μοντέλα συντελεστών του πεδίου βαρύτητας, τα οποία προέκυψαν με την εφαρμογή κάποιων εκ των παραπάνω μεθοδολογιών. Τυπικά τα πρώτα μοντέλα της πρώτης μορφής είναι τα μοντέλα GEM (Goddard Earth Model) της NASA (όπως είναι, π.χ., το GEM-9, πλήρες μέχρι βαθμό και τάξη 20 και με ορισμένους επιλεγμένους συντελεστές μεγαλύτερου βαθμού), τα SSE (Smithsonian Standard Earth), τα GRIM (από το γεωδαιτικό ινστιτούτο του Μονάχου), το GEM-L2 (Lerch et al. 1983) πλήρες σε βαθμό και τάξη 20 (υπολογίστηκε από 2,5 χρόνια παρατηρήσεων laser προς τον γεωδαιτικό δορυφόρο LAGEOS και άλλους 30 δορυφόρους χρησιμοποιώντας και τα προγενέστερα δεδομένα για το μοντέλο GEM-9), όπως και το GEM-T1 και GEM-T2 (Marsh et al. 1989). Μοντέλα συντελεστών της τρίτης κατηγορίας είναι τα RAPP81 (180×180, Rapp 1981), GPM2 (200×200, Wenzel 1985), OSU86 (250×250, Rapp and Cruz, 1986). Ένα από τα τελευταία γεωδυναμικά μοντέλα συνδυασμού ετερογενών δεδομένων είναι το OSU91A, πλήρες σε βαθμό και τάξη 360x360 (Rapp et al., 1991). Για την κατασκευή του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν, τόσο επίγεια (OSU October 1990 Gravity Database), όσο και δορυφορικά (αλτιμετρικά) δεδομένα (μοντέλο GEM-T2, προερχόμενο από τις τροχιές της γεωδαιτικής αποστολής του δορυφόρου Geosat). Τέλος, μόλις πρόσφατα, η πρώην Χαρτογραφική Υπηρεσία Άμυνας των Η.Π.Α. (Defense Mapping Agency - D.M.A.) και τωρινή Εθνική Υπηρεσία Απεικόνισης και Χαρτογράφησης (National Imagery and Mapping Agency - N.I.M.A.) κοινοποίησε τους συντελεστές ενός νέου μοντέλου συνδυασμού που ονομάζεται EGM96 (Earth Gravity Model 1996) (Pavlis et al., 1996 - Pavlis, 1997). Το μοντέλο αυτό είναι το προϊόν βελτιωμένου συνδυασμού επίγειων, από αέρα, καθώς και δορυφορικών μετρήσεων. Ιδιαίτερη μέριμνα δόθηκε στην αναγωγή όλων των μετρήσεων στο γεωκεντρικό σύστημα WGS-84, το σύστημα του δορυφορικού συστήματος GPS.

6.4 Γενικά για τον συνδυασμό γεωδυναμικών μοντέλων και GPS.

Η βασική σχέση, με την οποία συνδέονται η αποχή του γεωειδούς N , το γεωμετρικό υψόμετρο h και το ορθομετρικό υψόμετρο H είναι (Κατσάμπαλος - Τζιαβός, 1991)

$$h = H + N \quad (6.1)$$

Η αποχή του γεωειδούς N προσδιορίζεται με τη χρησιμοποίηση στοιχείων βαρύτητας και υψομέτρου, μέσα από σχέσεις της φυσικής γεωδαισίας, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή. Τιμές ορθομετρικών υψομέτρων παρέχονται σε περιορισμένα σημεία υψομετρικών αφετηριών (Repers) από τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ.) και μεταφέρονται σε οποιοδήποτε άλλο σημείο με τη βοήθεια γεωμετρικής χωροστάθμησης. Τέλος, τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη και εξέλιξη του Παγκοσμίου Συστήματος Προσδιορισμού Θέσης GPS, δίνεται η δυνατότητα προσδιορισμού του γεωμετρικού υψομέτρου h . Βασικό πρόβλημα στο συνδυασμό των παραπάνω στοιχείων αποτελεί η ανομοιογενής και χαμηλή απόλυτη ακρίβεια προσδιορισμού τους.

Για τον λόγο αυτό προτιμότερη είναι η χρησιμοποίηση των σχετικών μεγεθών στη βασική σχέση, η οποία και καταλήγει στη μορφή

$$\Delta h = \Delta H + \Delta N \Rightarrow \Delta H = \Delta h - \Delta N \quad (6.2)$$

Το Δh προσδιορίζεται με τη βοήθεια του GPS με ακρίβεια 1 - 2 ppm. Για να πετύχουμε εξίσου ακριβείς τιμές στα ΔN απαραίτητη είναι η χρήση γεωδυναμικού μοντέλου υψηλής ανάπτυξης, σε συνδυασμό με τοπικά δεδομένα βαρύτητας και υψομετρίας. Ο περιορισμένος βαθμός ανάπτυξης του μοντέλου εισάγει στον υπολογισμό των ΔN κάποια σφάλματα. Επίσης, από τη θεωρία είναι γνωστό, ότι το κανονικό ελλειψοειδές που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ανωμαλιών βαρύτητας πρέπει να είναι το ίδιο με το ελλειψοειδές αναφοράς που χρησιμοποιεί το GPS και, ακόμα, η επιφάνεια αναφοράς των υψομέτρων να συμπίπτει με το βαρυτημετρικό γεωειδές. Στην πράξη, οι παραπάνω απαιτήσεις δεν πληρούνται ολοκληρωτικά, με αποτέλεσμα μια μετάθεση (datum shift) ανάμεσα στο βαρυτημετρικό γεωειδές και σ' αυτό που προκύπτει από το συνδυασμό δεδομένων GPS και χωροστάθμησης. Το σύνολο των παραπάνω σφαλμάτων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί προσαρμόζοντας τις βαρυτημετρικές αποχές του γεωειδούς στις αποχές, οι οποίες προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια GPS και γεωμετρικής χωροστάθμησης, μέσω ενός παραμετρικού μοντέλου μετασχηματισμού, όπως π.χ. το ακόλουθο μοντέλο τεσσάρων παραμέτρων (Mainville et al., 1992, §(9))

$$N' = N + b_0 + b_1 \cos \varphi \cos \lambda + b_2 \cos \varphi \sin \lambda + b_3 \sin \varphi \quad (6.3)$$

Ανακεφαλαιώνοντας, με το συνδυασμό γεωδυναμικών μοντέλων και GPS, απαλείφοντας τα σφάλματα, τα οποία εμφανίζονται, από τη μια, λόγω της αδυναμίας πολύ μεγάλης ανάπτυξης των γεωδυναμικών μοντέλων, και, από την άλλη, λόγω της μη απόλυτης ταύτισης στα συστήματα αναφοράς (GPS και σύστημα αναφοράς των ανωμαλιών της βαρύτητας), μπορούμε να προσδιορίσουμε εύκολα και γρήγορα ακριβή σχετικά ορθομετρικά υψόμετρα (μερικά cm στα 15 km), τα οποία είναι απαραίτητα στις τοπικές, αλλά και σε ευρύτερης κλίμακας, εφαρμογές ενός Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού (Ανδρισάνος και

Κεχαΐδου, 1996). Για περισσότερες πληροφορίες πάνω στα διάφορα μοντέλα γεωειδούς καθώς και στις μεθόδους υπολογισμού τους βλ. τις αναφορές από τους Vergos και Vergos et. al.