

Ε. ΛΙΒΙΕΡΑΤΟΣ



θεωρία
της ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ

Β' ΕΚΔΟΣΗ

Πρόλογος στην πρώτη έκδοση

Το βιβλίο αυτό γράφτηκε, κυρίως, για να υποβοηθήσει τη διδασκαλία του ομώνυμου υποχρεωτικού μαθήματος, στο Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του ΑΠΘ. Έχει όμως σχεδιαστεί έτσι, ώστε να αποτελέσει, παράλληλα, και ένα είδος γενικής εισαγωγής στη Γεωδαισία, για όσους σχετικούς επιστήμονες (μηχανικούς, γεωφυσικούς, γεωλόγους, γεωγράφους κ.ά.) ενδιαφέρονται για την επιστήμη αυτή.

Η ύλη έχει αναπτυχθεί σε συνδυασμό με τις βασικές γνώσεις, που πρέπει να έχουν ήδη αποκτήσει οι φοιτητές ATM, από άλλα υποχρεωτικά μαθήματα του προγράμματος σπουδών (π.χ., γραμμική άλγεβρα και θεωρία πινάκων, εφαρμογές μαθηματικών σε προβλήματα ATM, τοπογραφία, φωτογραμμετρία, χαρτογραφία, ανάλυση δεδομένων, κ.ά.) ή που αποκτούν παράλληλα (π.χ., αστρονομικοί προσδιορισμοί, συνορθώσεις, κ.ά.) ή που θα αποκτήσουν σε επόμενα εξάμηνα σπουδών (π.χ., ελλειψοειδής γεωδαισία κ.ά.). Επιπλέον, έγινε ιδιαίτερη προσπάθεια να αποτελέσει, το βιβλίο αυτό, και μια εισαγωγή σε άλλα, πολύ σχετικά γεωδαιτικά μαθήματα, τα οποία εξειδικεύουν περισσότερο διάφορα επιμέρους θέματα (π.χ., φυσική γεωδαισία, βαρυτημετρία, υδρογραφία, διαστημική γεωδαισία κ.ά.).

Το βιβλίο υποδιαιρείται σε 7 κεφάλαια. Στο **πρώτο**, δίνεται ο ορισμός της Γεωδαισίας καθώς και ορισμένα χρήσιμα στοιχεία σχετικά με την εσωτερική δομή και σύσταση της Γης, όπως και για τις κινήσεις της στο χώρο. Μια αναδρομή στην πολύ σημαντική ιστορία της Γεωδαισίας, από τον 7ο αιώνα π.Χ μέχρι το 1700, συμπληρώνει το κεφάλαιο αυτό.

Στο **δεύτερο** κεφάλαιο, και στα πλαίσια της συνέχισης της ιστορικής αναδρομής στον 18ο και 19ο αιώνα της Γεωδαισίας, δίνεται το γεωδαιτικό νόημα της Νευτώνειας θεωρίας και οι γεωδαιτικές εφαρμογές των εξισώσεων των Poisson, Laplace και Gauss, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο εξάγονται οι σχέσεις του Bouguer, που είναι κλειδί για τη κατανόηση των ανωμαλιών βαρύτητας, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα όχι μόνο στη Γεωδαισία, αλλά και στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική.

Το **τρίτο** κεφάλαιο αποτελεί, κατά κάποιο τρόπο, την καρδιά του περιεχομένου. Εδώ, επιχειρείται η εξήγηση του ρόλου της Γεωδαισίας στις εφαρμογές, για τη σωστή αναπαράσταση (μέσω αποτυπώσεων και χαρτογραφί-

σεων) του γήινου ανάγλυφου και των αντικειμένων πάνω σ' αυτό, που είναι και ο πρακτικός στόχος του Τοπογράφου Μηχανικού. Αναπτύσσονται οι έννοιες και ο ρόλος των συντεταγμένων, της πυκνότητας προσδιορισμού τους, των γεωμετρικών και φυσικών "εργαλείων" που χρησιμοποιούνται (άξονες, επιφάνειες αναφοράς) και εξηγείται ο ρόλος του γεωδαιτικού Datum στις αποτυπώσεις και, γενικά, στην αναπτυξιακή διαδικασία μιας χώρας.

Το γήινο πεδίο βαρύτητας, που επηρεάζει σημαντικά τις γεωδαιτικές μετρήσεις, εξετάζεται στο **τέταρτο** κεφάλαιο. Δίνεται έμφαση στο ρόλο που παίζει η βαρύτητα σε σημαντικές διαδικασίες όπως, π.χ., η γεωμετρική χωροστάθμιση, και ορίζεται η έννοια της ανωμαλίας βαρύτητας. Η ανάπτυξη του Νευτώνειου δυναμικού της Γης σε σειρά σφαιρικών αρμονικών και η φυσική εξήγηση των συντελεστών της, συνδέει το θέμα του γήινου πεδίου βαρύτητας με τις σύγχρονες διαστημικές (δορυφορικές) γεωδαιτικές εφαρμογές.

Στο **πέμπτο** κεφάλαιο, δίνονται μερικά από τα κυριότερα τρισδιάστατα συστήματα ορθογωνίων καρτεσιανών συντεταγμένων, τα οποία είναι σε ευρύτερη χρήση, και οι σχέσεις μετασχηματισμού μεταξύ τους. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις σχέσεις μεταξύ της μεταβολής των συντεταγμένων και της μεταβολής των, περισσότερο σε χρήση, γεωδαιτικών παρατηρήσεων (μήκη, οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες) καθώς και της μεταβολής της διεύθυνσης της κατακορύφου. Αυτό, παρουσιάζει ξεχωριστό ενδιαφέρον για εφαρμογές ελέγχου της δυναμικής συμπεριφοράς των μεγάλων τεχνικών έργων και του γήινου φλοιού, σε περιοχές με έντονη γεωδυναμική δράση (ενεργά ρήγματα, καθιζήσεις κ.λπ.). Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται, συνοπτικά, η θεωρία των δορυφορικών τροχιών, στα πλαίσια του τροχιακού συστήματος συντεταγμένων, στο οποίο προσδιορίζεται, αρχικά, η θέση των τεχνητών δορυφόρων της Γης.

Η διαστημική γεωδαιτική τεχνολογία αλλά και, γενικότερα, τα νέα συστήματα που χρησιμοποιούνται, όλο και περισσότερο, στη Γεωδαισία σήμερα, εξετάζονται εισαγωγικά στο **έκτο** κεφάλαιο. Με απλό τρόπο δίνονται οι βασικές αρχές των κυριοτέρων συστημάτων της νέας τεχνολογίας όπως, π.χ., το σύστημα Transit, η τηλεμετρία LASER, η δορυφορική αλτιμετρία, το σύστημα GPS, το σύστημα συμβολομετρίας και το σύστημα αδρανείας. Ειδική νύξη γίνεται, ως νέα τεχνολογία, στις σύγχρονες γεωδαιτικές εφαρμογές της αναλυτικής φωτογραμμετρίας και της μετρικής αξιοποίησης των τηλεπισκοπικών εικόνων.

Τέλος, το **έβδομο** κεφάλαιο αναφέρεται σε μερικά από τα πιο ενδιαφέροντα ζητήματα της Γεωδυναμικής, που απασχολούν τη σύγχρονη Γεωδαισία και που, λόγω των υψηλών ακριβειών οι οποίες επιτυγχάνονται με τις σημερινές μετρήσεις, αποκτούν μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον. Παρουσιάζονται

μερικές βασικές αρχές της γεωδυναμικής ερμηνείας του γεωδαιτικού χώρου και χρόνου και το κύριο ενδιαφέρον συγκεντρώνεται αφ' ενός μεν, στην επίδραση της παλιροϋικής έλξης στις γεωδαιτικές εργασίες, όπως, π.χ., στη γεωμετρική χωροστάθμιση, αφ' ετέρου δε, στη χρησιμοποίηση των παρατηρούμενων διαχρονικών μεταβολών των γεωδαιτικών παρατηρήσεων και συντεταγμένων, για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων που υφίσταται ο γήινος φλοιός, αλλά και τα μεγάλα τεχνικά έργα, μνημεία κ.λπ., λόγω γεωδυναμικών δράσεων.

Ελπίζουμε ότι, το βιβλίο αυτό, πέρα από το διδακτικό του χαρακτήρα, θα βοηθήσει, γενικότερα, τους ασχολούμενους με γεωμετρικά και φυσικά προβλήματα στο γήινο χώρο, καθώς και με εφαρμογές που επηρεάζονται, άμεσα ή έμμεσα, από αυτά. Παράλληλα, ίσως προσθέσει και έναν επιπλέον προβληματισμό στους Τοπογράφους Μηχανικούς της χώρας μας, στα πλαίσια της γενικότερης αναβάθμισης του παραγωγικού ρόλου τους, τα τελευταία χρόνια, και των νέων όρων που επιβάλλει ο εκσυγχρονισμός των μέσων που ήδη χρησιμοποιούν ή που σύντομα θα χρησιμοποιήσουν στην εργασία τους.

Για την πραγματοποίηση του βιβλίου αυτού, εκτός από τους φοιτητές ΑΤΜ που παρακολούθησαν με ενδιαφέρον το μάθημα, αυτά τα χρόνια, συνεργάστηκαν οι Κυρίες Νανά Δημοπούλου και Βάσω Δερμάνη καθώς και οι Εκδόσεις Ζήτη, προς τους οποίους οφείλονται θερμές ευχαριστίες.

Θεσσαλονίκη, 1989.

Ε. Λιβιεράτος

Πρόλογος στην δεύτερη έκδοση

Και στη δεύτερη του αυτή έκδοση, το βιβλίο παραμένει μια βασική εισαγωγή στις έννοιες και αρχές της Γεωδαισίας, για τους φοιτητές και τους επιστήμονες εκείνους που κάνουν την πρώτη τους γνωριμία με την επιστήμη αυτή. Εκτός από τις διορθώσεις των παροραμάτων της πρώτης έκδοσης, έχουν γίνει αρκετές επεμβάσεις στα κείμενα, ώστε να διευκολύνουν καλύτερα την ανάγνωση και την εμπέδωση της ύλης, λαμβάνοντας επίσης υπ' όψη την εμπειρία από την διδασκαλία του μαθήματος και ορισμένες χρήσιμες παρατηρήσεις από συναδέλφους μου και φοιτητές που ασχολήθηκαν ιδιαίτερα με το μάθημα. Επιπλέον, έχουν γίνει και σημαντικές προσθήκες σε τρία από τα κεφάλαια του βιβλίου καθώς και προσθήκες σχημάτων και εικόνων.

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο έχει προστεθεί το θέμα των καμπυλοτήτων των χωροσταθμικών επιφανειών, του γήινου πεδίου βαρύτητας, το οποίο συνδέεται άμεσα με τις δεύτερες μερικές παραγώγους του δυναμικού βαρύτητας, ένα από τα πιο σημαντικά κεφάλαια της γεωδαισίας. Το θέμα αυτό, διευκολύνει την κατανόηση ορισμένων ειδικών προβλημάτων σχετικών με την ανάλυση των τροχιών των τεχνητών δορυφόρων, που αναφέρονται στο πέμπτο κεφάλαιο.

Στο **πέμπτο** κεφάλαιο έχουν προστεθεί οι αναλυτικές μορφές των πινάκων μετασχηματισμού των γεωκεντρικών συστημάτων αναφοράς και των πινάκων που εμπλέκονται στις γραμμικοποιημένες σχέσεις μεταξύ των συντεταγμένων και των παρατηρήσεων. Στο υποκεφάλαιο του **τροχιακού συστήματος αναφοράς**, έχουν προστεθεί στοιχεία από την γεωμετρία και δυναμική της δορυφορικής τροχιάς και έχουν επίσης αναπτυχθεί οι βασικές σχέσεις μεταξύ των στοιχείων Kepler και των συντεταγμένων του δορυφόρου.

Στο **έκτο** κεφάλαιο, χωρίς να αλλάζει ο γενικός στόχος της εισαγωγής, που είναι προσανατολισμένος περισσότερο στις αρχές, παρά στις λεπτομέρειες (που άλλωστε δεν θα ήταν στους στόχους ενός βιβλίου σαν κι' αυτό), έχουν προστεθεί αρκετά επιπλέον στοιχεία για το δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού σημειακών και σχετικών θέσεων, GPS, λόγω του όλο και αυξανόμενου ενδιαφέροντος, αλλά και των προοπτικών που έχει η νέα αυτή τεχνολογία στις γεωδαιτικές επιστήμες (γεωδαισία, τοπογραφία, φωτογραμμετρία, χαρτογραφία) και σε άλλες συναφείς. Επιπλέον, έχουν διατυπωθεί εξισώσεις οι οποίες βοηθούν τον φοιτητή στην κατανόηση του γεωμετρικού προβλήματος, που καλείται, τελικά, να επιλύσει το σύστημα GPS.

Και στην έκδοση αυτή του βιβλίου, δίνεται έμφαση στην βιβλιογραφία, σε Ελληνική γλώσσα, ιδιαίτερα πλούσια, μετά το 1980, για την αμεσότερη εμβάθυνση σε επί μέρους θέματα και λεπτομέρειες.

Η τελική εμφάνιση της έκδοσης αυτής οφείλει, και πάλι, πολλά στην επιμέλεια και φροντίδα του εκδοτικού οίκου Ζήτη, στον οποίο οφείλονται θερμές ευχαριστίες.

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	7
CONTENTS.....	11

ΜΕΡΟΣ 1

1.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ.....	17
1.2. ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ.....	19
Τα σεισμικά κύματα.....	34
1.3. ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΓΗΣ.....	35
Περιστροφή γύρω από τον Ήλιο.....	36
Στροφή της Γης γύρω από τον άξονά της.....	38
Κίνηση του Πόλου. Μετάπτωση. Κλόνηση.....	40
1.4. ΙΣΤΟΡΙΚΑ.....	42
Πρώτη περίοδος. (7ος αιώνας π.Χ.-2ος αιώνας π.Χ.).....	43
Δεύτερη περίοδος (2ος αιώνας μ.Χ.-9ος αιώνας μ.Χ.).....	47
Τρίτη περίοδος (10ος αιώνας μ.Χ.-14ος αιώνας μ.Χ.).....	48
Τέταρτη περίοδος (15ος αιώνας μ.Χ.-17ος αιώνας μ.Χ.).....	50

ΜΕΡΟΣ 2

2.1 Η ΝΕΥΤΩΝΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ Η ΓΗ.....	57
18ος και 19ος αιώνας (1700 - 1899).....	59
Οι εξισώσεις των Poisson, Laplace και Gauss στη Γεωδαισία.....	67
2.2 Ο ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΗΙΝΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ.....	73
Η σχέση του Bouguer.....	73

ΜΕΡΟΣ 3

3.1. Η ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΓΗΙΝΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ.....	81
Η πυκνότητα της αναπαράστασης.....	87
Πραγματική, Φυσική και Μαθηματική μορφή της Γης.....	95
3.2. ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ, ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	97
Αξιολόγηση συστήματος αναφοράς και μετρήσεων.....	100
Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς.....	100
Οι χάρτες.....	104
Γεωδαιτική βάση της χαρτογραφικής διαδικασίας.....	106

3.3. ΤΑ ΕΛΛΕΙΨΟΕΙΔΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	109
Το γήινο ΕΕΠ (ΓΕΕΠ).....	109
Το γεωδαιτικό ΕΕΠ (γΕΕΠ).....	109
Προσαρμογή των γΕΕΠ στο ΓΕΕΠ.	110
Τα ΕΕΠ του 20ου αιώνα.....	113
Το γεωδαιτικό Datum	114

ΜΕΡΟΣ 4

4.1. ΠΕΔΙΟ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΓΗΣ.....	119
Δυναμικό βαρύτητας.....	119
Βαρύτητα.....	122
Χωροσταθμικές επιφάνειες, δυναμικές γραμμές.....	124
Δυναμική υψομετρική διαφορά.....	126
Δυναμική διόρθωση υψομέτρου.....	128
Καμπυλότητες χωροσταθμικών επιφανειών	128
4.2. ΤΟ ΚΑΝΟΝΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΓΗΣ	132
Κανονική βαρύτητα.....	134
Διεθνές ελλειψοειδές (1924, 1928, 1930).....	135
4.3. ΑΝΩΜΑΛΙΕΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ	136
4.4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΝΕΥΤΩΝΕΙΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΕ ΣΕΙΡΑ.....	138

ΜΕΡΟΣ 5

5.1. ΤΑ ΓΕΩΚΕΝΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	145
Το Στιγμαίο Αστρικό.....	145
Το Αστρικό.	146
Το Γήινο (μέσο).	147
5.2. ΤΑ ΣΧΕΔΟΝ-ΓΕΩΚΕΝΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	149
5.3. ΤΑ ΤΟΠΟΚΕΝΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	150
Το αστρονομικό	150
Το γεωδαιτικό.....	150
5.4. ΣΧΕΣΗ ΓΗΙΝΟΥ ΚΑΙ ΤΟΠΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	152
Σχέση σ-ΓΣΑ (γεωδαιτικού) και ΤΣΑ.....	155
Σχέση συντεταγμένων και παρατηρήσεων.....	155
5.5. ΤΟ ΤΡΟΧΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	163
Τροχιά Kepler.....	165
Συντεταγμένες δορυφόρου.....	169
Πραγματική τροχιά.....	172
5.6. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	173

ΜΕΡΟΣ 6

6.1. ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ	177
Η αστρομετρική -φωτογραφική- μέθοδος.	179
Το φαινόμενο Doppler.....	179
6.2. ΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	180
Τηλεμετρία Laser.....	180
Το σύστημα Transit.....	185
Το σύστημα GPS.....	188
Δορυφορική αλτιμετρία.....	199
6.3. ΜΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	201
Τα συστήματα συμβολομετρίας.....	201
Το σύστημα αδρανείας.....	203
6.4. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΙΚΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗ- ΣΗ.....	205

ΜΕΡΟΣ 7

7.1. ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ ΚΑΙ ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗ.....	211
Η επίδραση της σεληνο-ηλιακής έλξης στη χωροστάθμιση.....	212
Η κίνηση του Πόλου.....	216
Οι μεταβολές της Μέσης Στάθμης της Θάλασσας.....	216
Κλίμακες γεωδυναμικών φαινομένων.....	218
Μετακινήσεις και παραμορφώσεις του γήινου φλοιού.....	221
7.2. ΤΟΠΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΓΗΙΝΟΥ ΦΛΟΙΟΥ - ΣΥΜ- ΒΟΛΗ ΤΩΝ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	224
Επίπεδη παραμόρφωση.....	225
Η γεωδαιτική πληροφορία.....	229
Επεξεργασία πεδίων παραμόρφωσης.....	237
7.3. ΑΠΟΛΥΤΑ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	239
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	243
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΘΕΜΑΤΩΝ	247

Contents*

THEORY OF GEODESY, E. Livieratos

* This textbook is a first introduction to Geodesy, offered by the Department of Geodesy and Surveying, Faculty of Rural and Surveying Engineering (RSE), School of Technology, The Aristotle University of Thessaloniki, to the fourth semester RSE-students, in the frame of the obligatory course “Theory of Geodesy”. The course is designed to give the basis, or the continuation, for other relevant courses, i.e., surveying (o), astronomic positioning (o), ellipsoidal geodesy and networks (o), adjustment of observations (o), surveying networks and computations (o), physical geodesy (s), gravimetry (s), geodetic astronomy (s), geodetic projections (s), space methods for geodesy and geodynamics (s), hydrography and physical oceanography (s), basis of cartography (o), map use and production (o), introduction to photogrammetry (o), analytical photogrammetry (o), automated cartography (s), physical geography (s).

(o): obligatory, (s): selective.

PART 1

1.1. DEFINITION OF GEODESY	17
1.2. EARTH’S INTERNAL DENSITY AND COMPOSITION.....	29
Seismic waves	34
1.3. MOTION OF THE EARTH.....	35
Rotation around the sun	36
Proper rotation	38
Polar motion, precession, nutation	40
1.4. HISTORICAL BACKGROUND.....	42
First period (7th cent. b.C.-2nd cent b.C.).....	43
Second period (2nd cent. b.C.-9th cent.).....	47
Third period (10th cent. -14th cent.).....	48
Fourth period (15th cent.-17th cent.).....	50

PART 2

2.1. NEWTONIAN THEORY AND THE EARTH.....	57
18th and 19th centuries (1700-1899).....	59
Poisson, Laplace and Gauss equations in geodesy.	67
2.2. DETERMINATION OF EARTH’S DENSITY	73
Bouguer’s equation.....	73

PART 3

3.1. REPRESENTATION OF EARTH’S RELIEF.....	81
The density of representation	87
Actual, physical and mathematical figures of the Earth.....	95

3.2.	REALITY, MODELS AND MEASUREMENTS	97
	Evaluation of the reference system and measurements.....	100
	Geodetic reference system.....	100
	Maps.....	104
	Geodetic basis of cartographic process.....	106
3.3.	REFERENCE ELLIPSOIDS.....	109
	Earth ellipsoid	109
	Geodetic ellipsoid.....	109
	Fitting of geodetic ellipsoids into earth ellipsoid.....	110
	20th century ellipsoids	113
	Geodetic datum	114

PART 4

4.1.	EARTH'S GRAVITY FIELD.....	119
	Gravity potential.....	119
	Gravity	122
	Equipotential surfaces, plumb lines	124
	Dynamic height	126
	Dynamic correction of height	128
	Curvatures of equipotential surfaces	128
4.2.	NORMAL GRAVITY FIELD	132
	Normal gravity	134
	International ellipsoid (1924, 1928, 1930).....	135
4.3.	GRAVITY ANOMALIES.....	136
4.4.	SERIES EXPANSION OF NEWTONIAN POTENTIAL.....	138

PART 5

5.1.	GEOCENTRIC REFERENCE SYSTEMS.....	145
	Sidereal instantaneous.....	145
	Sidereal.....	146
	Terrestrial (mean)	147
5.2.	QUASI-GEOCENTRIC REFERENCE SYSTEMS	149
	Geodetic	149
5.3.	TOPOCENTRIC (LOCAL) REFERENCE SYSTEMS	150
	Astronomic.....	150
	Geodetic	150
5.4.	RELATION OF TERRESTRIAL AND TOPOCENTRIC REFERENCE SYSTEMS.....	152
	Relation of geodetic and topocentric reference frames	155
	Differential relations of coordinates and observations	155
5.5.	ORBITAL REFERENCE SYSTEM.....	163

Kepler orbit	165
Satellite coordinates	169
Real orbit.....	172
5.6. TRANSFORMATIONS REVIEW.....	173

PART 6

6.1. SPACE GEODESY.....	177
Astrometric method	179
Doppler effect.....	179
6.2. SATELLITE SYSTEMS	180
Laser ranging.....	180
Transit system	185
GPS system.....	188
Satellite altimetry.....	199
6.3. NON-SATELLITE SYSTEMS	201
Interferometry system.....	201
Inertial navigation system.....	203
6.4. ANALYTICAL PHOTOGRAMMETRY AND METRIC SATELLITE IMAGERY.....	205

PART 7

7.1. GEODESY AND GEODYNAMICS.....	211
Luni-solar effects on levelling.....	212
Polar motion.....	216
MSL variations.....	216
Time and space scales of geodynamical phenomena.....	218
Displacements and deformation of earth's crust.....	221
7.2. LOCAL DEFORMATION OF EARTH'S CRUST. CONTRIBUTION OF GEODETIC MEASUREMENTS	224
Plane strain.....	225
Geodetic information	229
Processing of strain fields.....	237
7.3. ABSOLUTE AND RELATIVE REFERENCE SYSTEMS.....	239
REFERENCES.....	243
SUBJECT INDEX	247

1. Ορισμοί - Ιστορικά

1.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

1.2. ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ

Τα σεισμικά κύματα.

1.3. ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΓΗΣ

*Περιστροφή γύρω από τον Ήλιο
Στροφή της Γης γύρω από τον άξονά της
Κίνηση του Πόλου. Μετάπτωση. Κλόνηση*

1.4. ΙΣΤΟΡΙΚΑ

*Πρώτη περίοδος
(7ος αιώνας π.Χ.-2ος αιώνας π.Χ.)
Δεύτερη περίοδος
(2ος αιώνας μ.Χ. - 9ος αιώνας μ.Χ.)
Τρίτη περίοδος
(10ος αιώνας μ.Χ. - 14ος αιώνας μ.Χ.)
Τέταρτη περίοδος
(15ος αιώνας μ.Χ. - 17ος αιώνας μ.Χ.)*

1.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

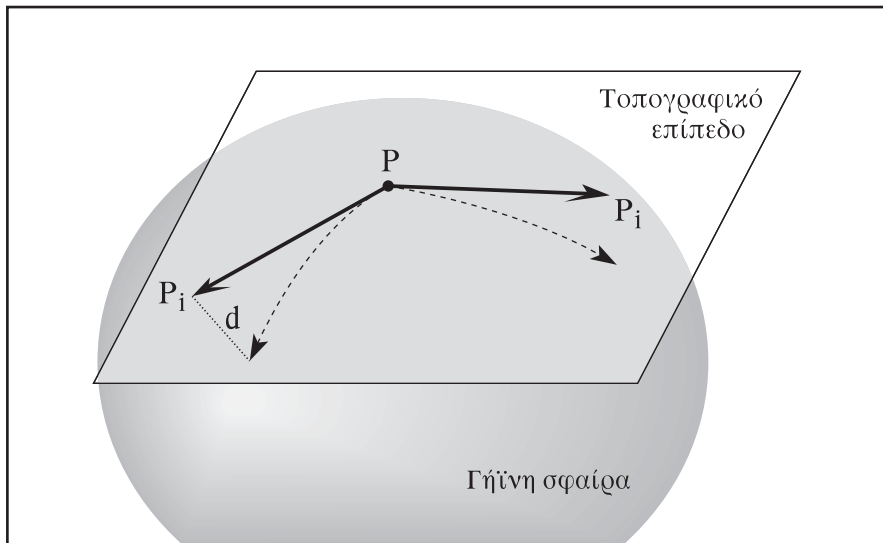
Η λέξη **Γεωδαισία** είναι σύνθεση των λέξεων **Γη** και **δαιώ** (=διαιώ, μοιράζω). Η ακριβής ερμηνεία της λέξης θα σήμαινε *υποδιαίρεση της Γης ή διαμερισμός της Γης*. Σήμερα, η λέξη Γεωδαισία ορίζει μία περιοχή των **Γεωεπιστημών**, δηλαδή των επιστημών (όπως, π.χ., η Γεωλογία, η Γεωφυσική, η Γεωδυναμική κ.ά.), που ασχολούνται με τον Πλανήτη Γη στο σύνολό του ή μερικά. Με τη λέξη Γεωδαισία (χρησιμοποιείται σε όλες τις γλώσσες, π.χ., *Geodesy, Géodesie, Geodäsie, Geodesia*, κ.λπ.) ορίζουμε την επιστημονική περιοχή που μελετάει θεωρητικά και πρακτικά:

Το σχήμα (μορφή), το μέγεθος (διαστάσεις) και το πεδίο βαρύτητας (ελκτικό και φυγόκεντρο πεδίο) της Γης, στην επιφάνειά της και έξω απ' αυτήν, ζητήματα σχετικά με τον προσδιορισμό σημείων αναφοράς και γενικά θέσεων στην φυσική της επιφάνεια, κάτω και πάνω απ'αυτήν. Τις διαχρονικές μεταβολές του σχήματος, του μεγέθους και του πεδίου βαρύτητας, καθώς και τις διαχρονικές μετατοπίσεις των σημείων αναφοράς και θέσεων. Την απεικόνιση όλων των προηγούμενων αντικειμένων της.

Από την έκθεση του αντικειμένου της Γεωδαισίας φαίνεται η πολυπλοκότητα και πολυμορφία του κλάδου αυτού των γεωεπιστημών, που κινείται σε ένα ευρύτατο φάσμα θεμάτων, εκτεινόμενο, από καθαρά επιστημονικές-θεωρητικές περιοχές, μέχρι την αντιμετώπιση εφαρμοσμένων προβλημάτων^[57]. Κύριο χαρακτηριστικό των θεμάτων που συνθέτουν την έννοια της Γεωδαισίας, είναι η στενή διασύνδεση των επιμέρους επιστημονικών περιοχών της. Είναι σχεδόν αδύνατο να απομονώσει κανείς ένα κάποιο συγκεκριμένο μέρος του περιεχομένου της και να το επεξεργαστεί ανεξάρτητα, χωρίς αναφορές σε άλλες γεωδαιτικές περιοχές. Για παράδειγμα, το πρόβλημα του προσδιορισμού σημείων αναφοράς (ή θέσεων) στην επιφάνεια της Γης, συνεπάγεται τη γνώση του σχήματος και του μεγέθους της και αντίστροφα. Η μελέτη του γήινου πεδίου βαρύτητας συνεπάγεται τη γνώση του σχήματος και των διαστάσεών της και αντίστροφα, κ.ο.κ.

Η Γη είναι ένα τεράστιο, σε όγκο, φυσικό σώμα, με σχήμα αρκετά πολύπλοκο, το οποίο, σε πρώτη προσέγγιση, τείνει προς σφαίρα. Οι διαστάσεις της, και τα φυσικά μεγέθη που την αφορούν, είναι αδύνατον να γίνουν αντιληπτές από την απλή δυνατότητα άμεσης εποπτείας που έχει ο άνθρωπος, στο περιβάλλοντα χώρο. Η πρώτη προσέγγιση του σχήματός της, η λεγόμενη **γήινη σφαίρα**, έχει ακτίνα, R , περίπου 6370000 m, μάζα, M , περίπου 6000

τρισεκατομύρια M_{tn} (6×10^{24} kg), μέση πυκνότητα, δ , περίπου $5.5 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$ και περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της με γωνιακή ταχύτητα, ω , περίπου $7 \times 10^{-5} \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$. Η γήινη αυτή σφαίρα, με τις διαστάσεις της, τη μάζα της και την περιστροφή της, δημιουργεί ένα πεδίο βαρύτητας, με δυναμικό, V , περίπου $6.3 \times 10^{14} \frac{\text{cm}^2}{\text{sec}^2}$ και δυνάμεις βαρύτητας, έντασης g , περίπου $980 \frac{\text{cm}}{\text{sec}^2}$, πάνω στην επιφάνειά της.



Η Ελλάδα σε σχέση με τις διαστάσεις της γήινης σφαίρας.

Στη πραγματικότητα, η μορφή της Γης, είναι πολύπλοκότερη από σφαίρα, τείνει στη μορφή ενός ελλειψοειδούς εκ περιστροφής, του **γήινου ελλειψοειδούς**, με μεγάλο ημιάξονα, a , περίπου 6380000 m και μικρό ημιάξονα, b , 6360000 m. Το ελλειψοειδές αυτό είναι λίγο πεπλατυσμένο στους Πόλους, αφού η διαφορά μεγάλου και μικρού ημιάξονα είναι μόλις 20 km, δηλαδή μόλις 3‰ του μεγάλου ημιάξονα.

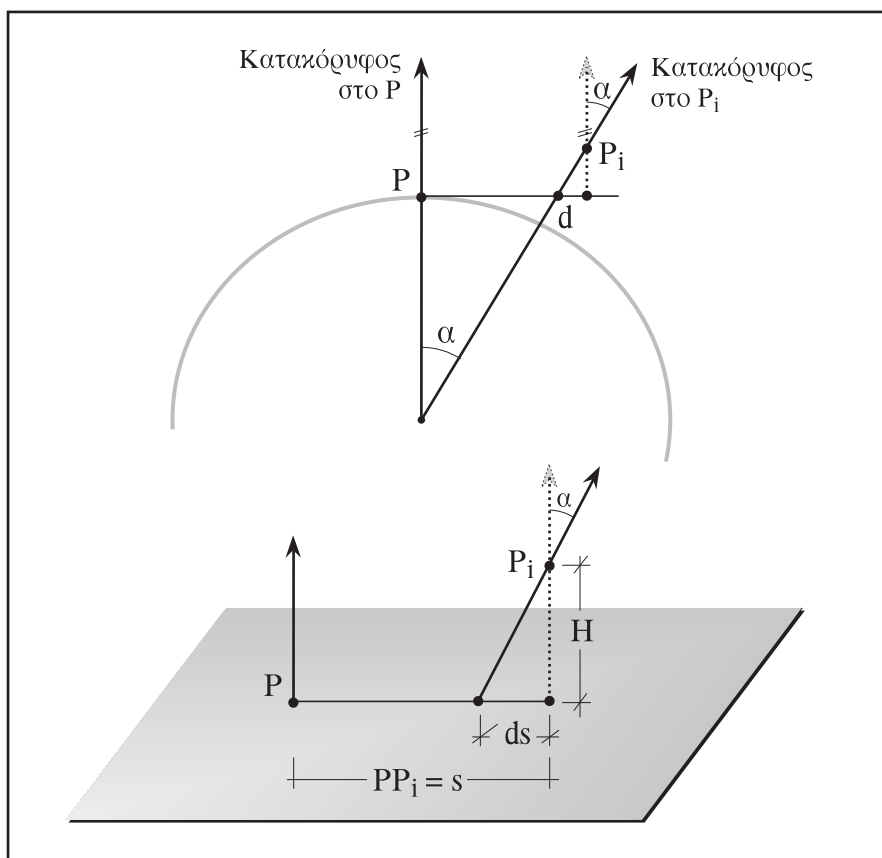
Η πραγματική επιφάνεια της Γης, το λεγόμενο **γήινο ανάγλυφο**, είναι πολύπλοκη και αδύνατον να περιγραφεί άμεσα, χωρίς την “αναφορά” της σε μία άλλη απλούστερη, βοηθητική, μορφή επιφάνειας, η οποία λέγεται **επιφάνεια αναφοράς** και η οποία, ανάλογα με την έκταση των εφαρμογών και την απαιτούμενη ακρίβεια των μετρήσεων και των εφαρμογών, μπορεί να είναι το επίπεδο, η γήινη σφαίρα ή το γήινο ελλειψοειδές. Έτσι, η πραγματική επιφάνεια της Γης, συγκρίνεται με την επιφάνεια αναφοράς και, κατά κά-

ποιο τρόπο, “χαρτογραφείται” σ’αυτή.

Τάξεις μεγέθους γεωδαιτικών ποσοτήτων	
Ακτίνα γήινης σφαίρας:	$R \approx 6370000 \text{ m}$
Γήινη Μάζα:	$M \approx 6 \times 10^{24} \text{ kg}$
Γήινη μέση πυκνότητα:	$\delta \approx 5.5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Μέση πυκνότητα του φλοιού:	$\delta' \approx 2.5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής:	$\omega \approx 7 \times 10^{-5} \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$
Ένταση βαρύτητας στην επιφάνεια:	$g \approx 980 \frac{\text{cm}}{\text{sec}^2} = 980 \text{ Gal}$
Δυναμικό στην επιφάνεια:	$V \approx 6.3 \times 10^{11} \frac{\text{cm}^2}{\text{sec}^2} =$ $= 6.3 \times 10^{11} \text{ Gal cm.}$
Γινόμενο γήινης μάζας και σταθεράς παγκόσμιας έλξης:	$GM \approx 4 \times 10^{14} \frac{\text{m}^3}{\text{sec}^2} =$ $= 4 \times 10^{20} \text{ Gal cm}^2$
Μεγάλος, μικρός ημιάξονας και εκκεντρότητα γήινου ελλειψοειδούς:	$a \approx 6380000 \text{ m}, b \approx 6360000 \text{ m},$ $e^2 \approx 0.0067.$

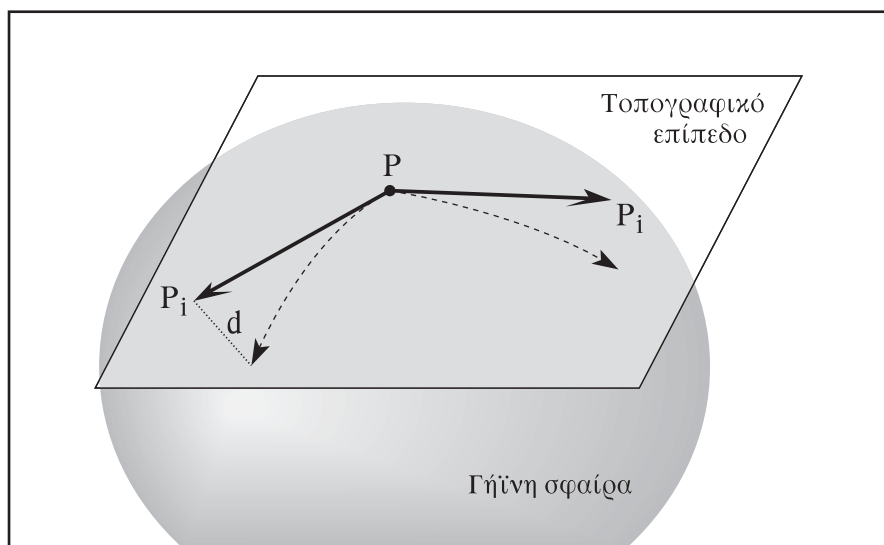
Στην Τοπογραφία^[15], οι διαστάσεις των εκτάσεων της γήινης επιφάνειας, που εμπλέκονται στα τοπογραφικά προβλήματα, είναι περιορισμένες τόσο, ώστε να είναι αμελητέα η καμπυλότητα της Γης. Έτσι, είναι δυνατό να θεωρηθεί (αν και αυτό δεν ισχύει πάντοτε, ιδιαίτερα όταν αναζητούνται υψηλές ακρίβειες και **αξιοπιστία** στα αποτελέσματα^[9]) ότι η επιφάνεια αναφοράς που προσεγγίζει καλύτερα την περιορισμένη, ως προς τη συνολική έκταση της γήινης επιφάνειας, **έκταση των τοπογραφικών εργασιών** είναι ένα επίπεδο, στο οποίο τα διάφορα σημεία της γήινης επιφάνειας, που περιέχονται στην περιορισμένη έκταση, προβάλλονται κατά την κατακόρυφο, η οποία θεωρείται παράλληλη από σημείο σε σημείο στην τοπογραφική περιοχή. Εάν όμως η περιοχή των εργασιών είναι τόσο εκτεταμένη^[32] ώστε να μην ισχύει πια, ως ικανοποιητική προσέγγιση, εκείνη του επίπεδου, τότε εισέρχεται η έννοια της **έκτασης των γεωδαιτικών εργασιών**, με καλύτερη δυνατή προσέγγιση της γήινης επιφάνειας, την επιφάνεια αναφοράς μιας σφαίρας ή ενός ελλειψοειδούς εκ περιστροφής (ΕΕΠ). Τότε τα σημεία της γήινης επιφάνειας

προβάλλονται, στις καμπύλες επιφάνειες της σφαίρας ή του ΕΕΠ, μέσω της ημιευθείας που περνάει απ'το σημείο και είναι κάθετη στην επιφάνεια αναφοράς (σφαίρα ή ΕΕΠ).



Ορισμός της Γεωδαισίας

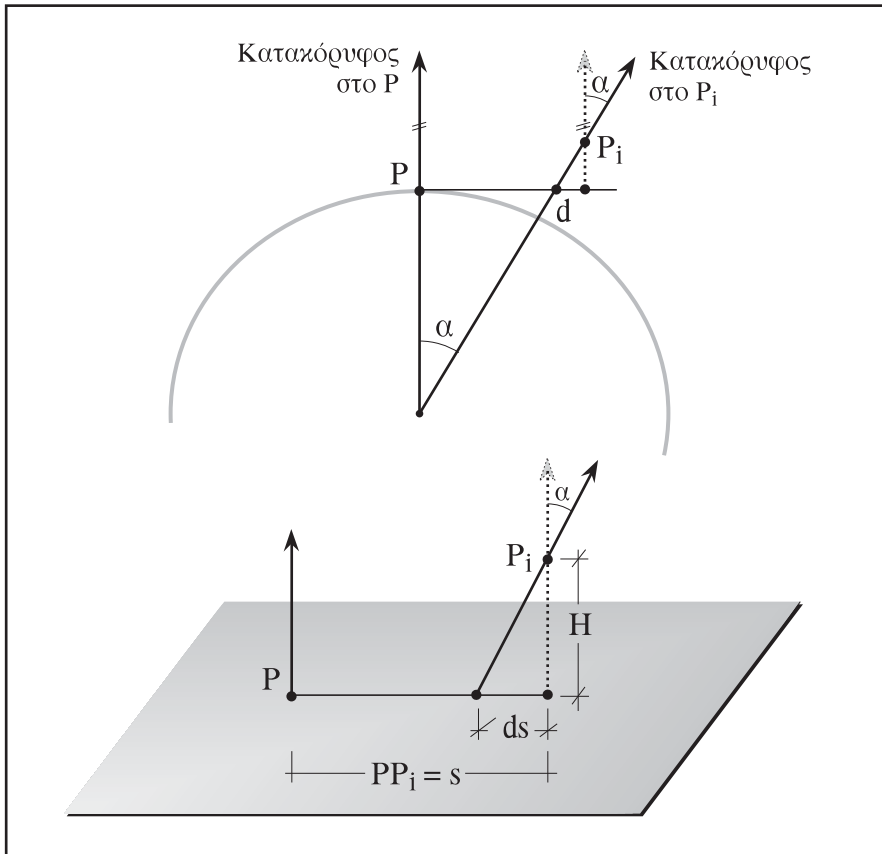
Το σχήμα, το μέγεθος και οι μάζες στο εσωτερικό, της Γης, με διαφορετικές πυκνότητες, δημιουργούν ένα πεδίο ελκτικών δυνάμεων.



Σχ. 1.1.

Απόσταση PP_i	Αποχή d , από τη γήινη σφαίρα
50 m	0.2 mm
100 m	0.8 mm
500 m	2.0 cm
600 m	2.8 cm
700 m	3.8 cm
800 m	5.0 cm
900 m	6.4 cm
1000 m	7.8 cm
1500 m	17.7 cm
2000 m	31.4 cm
2500 m	49.0 cm
3000 m	70.6 cm
3500 m	96.1 cm
3570 m	1 m
4000 m	1.26 m
4500 m	1.59 m
5000 m	1.96 m
5048 m	2 m

Η προσέγγιση της γήινης σφαίρας, από ένα τοπογραφικό επίπεδο, είναι ικανοποιητική, για εργασίες περιορισμένης έκτασης, όταν τα σημεία P_i βρίσκονται κοντά στο σημείο P , γιατί όσο απομακρύνονται από αυτό, τόσο οι αποχές του επιπέδου από τη σφαιρική επιφάνεια, όπως είδαμε παραπάνω, ανατρέπουν τη παραδοχή της παραλληλίας των κατακορύφων, στο χώρο των τοπογραφικών εργασιών (Σχ. 1.2.).



Σχ. 1.2.

Στον επόμενο πίνακα, δίνονται οι τιμές των γωνιών, α , μεταξύ των κατακορύφων στο P και στα P_i , και για όσο αυτά απομακρύνονται από το P , καθώς και οι διαφορές, ds , στις αποστάσεις S , μεταξύ P και P_i , που προκαλεί η **μη-παραλληλία** των κατακορύφων, δηλαδή η **καμπυλότητα** της Γης,

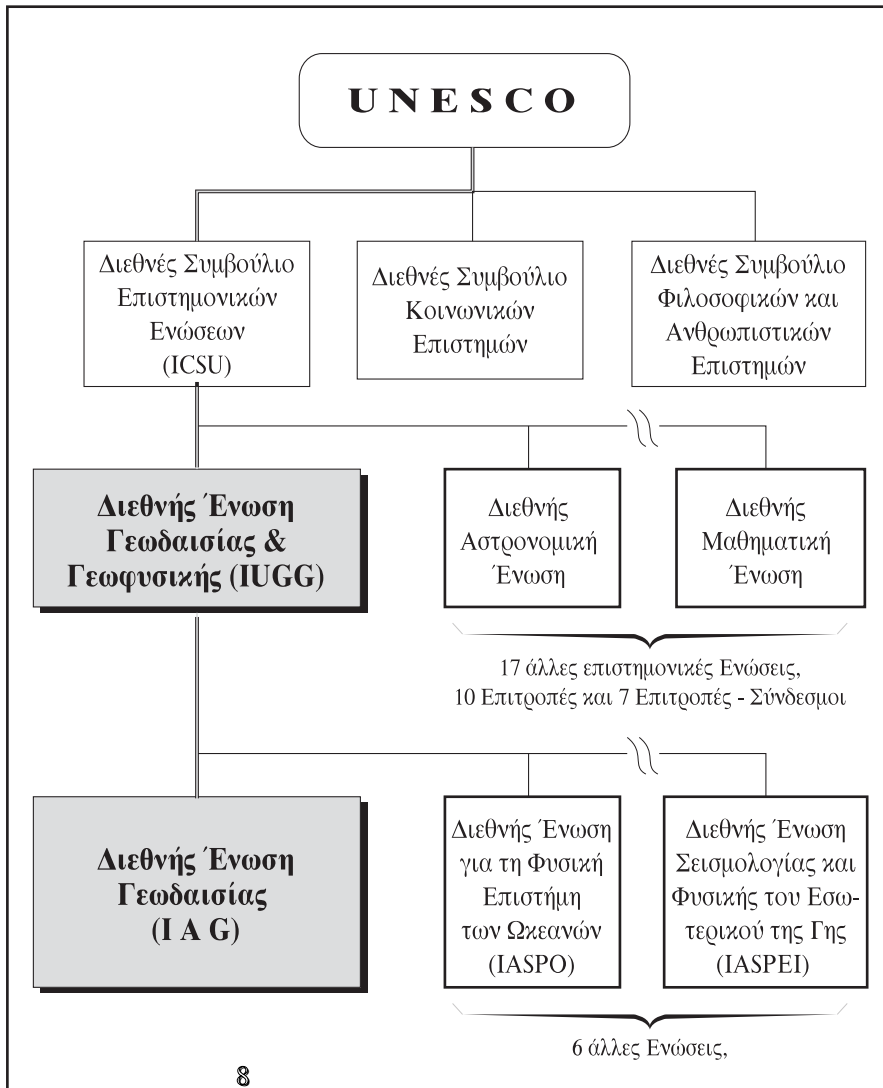
ανάλογα με τις υψομετρικές διαφορές H , μεταξύ των σημείων P_i και του σημείου P .

Απόσταση PP_i	Γωνία α	Υψομετρική διαφορά (σε arc)		
		1 m	10 m	100 m
50 m	1.6''	8 μm	0.1 mm	1 mm
100 m	3.2''	16 μm	0.2 mm	2 mm
500 m	16.2''	0.1 mm	1 mm	1 cm
1000 m	32.4''	0.2 mm	2 mm	2 cm
2000 m	1' 4.7''	0.3 mm	3 mm	3 cm
5000 m	2' 42''	0.8 mm	8 mm	8 cm

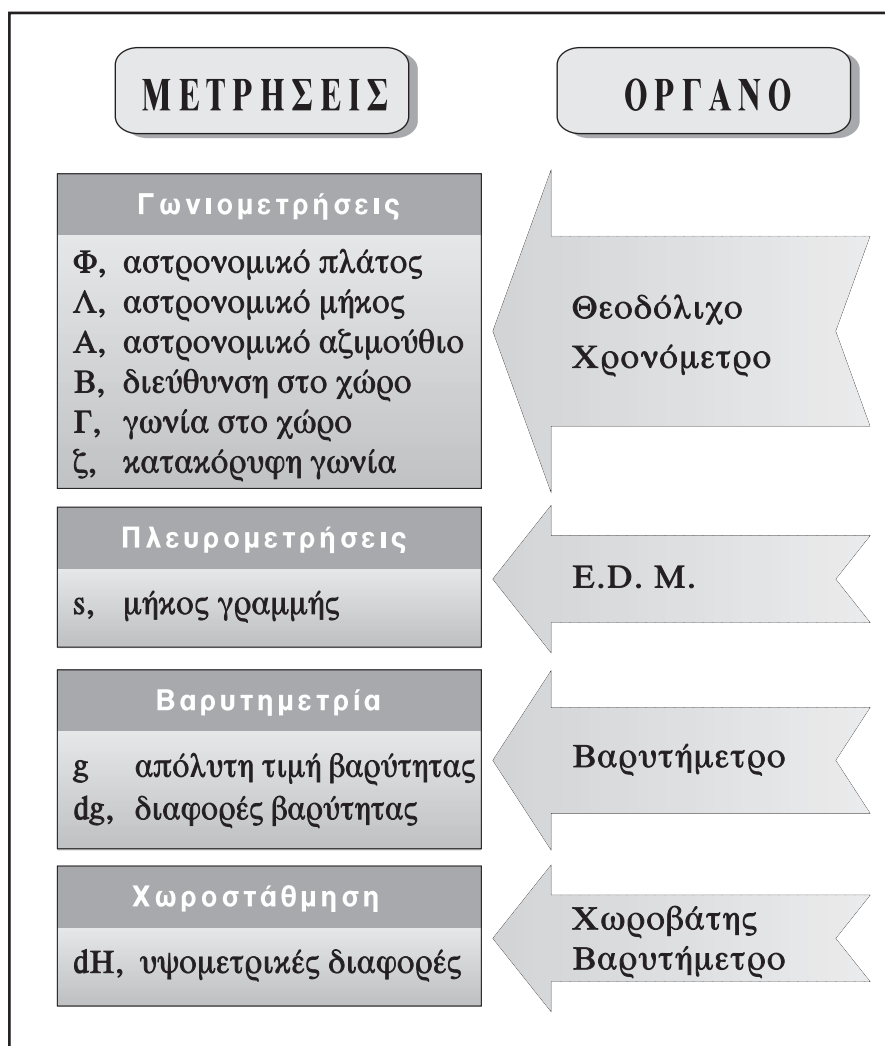
Οι διαστάσεις, της Γης είναι δύσκολο να εκφραστούν άμεσα, γιατί η Γη είναι, σχηματικά, ένα τόσο πολύπλοκο σώμα, ώστε οι διαστάσεις της θα πρέπει, επίσης, να συγκριθούν με διαστάσεις σωμάτων γνωστού και μαθηματικά περιγράψιμου τύπου, που προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα την πραγματική Γη. Αυτά τα σώματα, που η απλότητα της μαθηματικής τους περιγραφής εξαρτάται από το βαθμό προσέγγισης που επιδιώκουμε, λέγονται **μοντέλα** της Γης.

Το απλούστερο μοντέλο, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι η **σφαίρα**, ο προσδιορισμός των διαστάσεων της οποίας (δηλαδή της ακτίνας της) αποτέλεσε ένα από τα σημαντικότερα επιτεύγματα στην Ιστορία της Γεωδαισίας και γενικότερα του Πολιτισμού. Πολυπλοκότερα μοντέλα, που προσεγγίζουν καλύτερα την πραγματική Γη, είναι το **ελλειψοειδές εκ περιστροφής**, το τριαξονικό ελλειψοειδές και συνθετότερα μοντέλα, που περιγράφονται από σειρές, π.χ. σφαιρικών αρμονικών^{[21],[17]}. Στα μοντέλα αυτά αναφέρονται: το πραγματικό σχήμα, μέγεθος και πεδίο βαρύτητας της Γης, καθώς και οι θέσεις (ή τα σημεία αναφοράς) που μας ενδιαφέρει να προσδιορίσουμε.

Για την επίλυση των προβλημάτων της Γεωδαισίας χρησιμοποιούνται μεγάλης ποικιλίας **παρατηρήσεις** γεωμετρικών ή/και φυσικών μεγεθών (γωνίες, μήκη πλευρών, υψόμετρα, βαρύτητα, χρόνος, επιταχύνσεις, κ.ά.), που είναι αποτελέσματα **μετρήσεων** και γίνονται με μεγάλη ποικιλία **οργάνων** ή και **συστημάτων** μετρήσεων. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται, κυρίως, στο ύπαιθρο. Εάν οι παρατηρήσεις γίνονται στη Γη και από τη Γη, λέγονται **επίγειες**. Εάν οι παρατηρήσεις γίνονται από τη Γη στο διάστημα, αντίστροφα, ή στο διάστημα από το διάστημα, λέγονται **διαστημικές**. Οι διαστημικές παρατηρήσεις και τα συστήματα μετρήσεων χρησιμοποιούν, συνήθως, τους τεχνητούς δορυφόρους γεωδαιτικών και γεωδυναμικών εφαρμογών (βλ. Κεφ. 5, Κεφ. 6).



Η θέση της Γεωδαισίας στη παγκόσμια επιστημονική οργάνωση^[57]. Αντίστοιχοι με την IAG, *International Association of Geodesy*, διεθνείς οργανισμοί καλύπτουν τη Τοπογραφία, η *Fed Internationale des Géometres, FIG*, τη Χαρτογραφία, η *International Cartographic Association, ICA*, και τη Φωτογραμμετρία και Τηλεπισκόπηση, η *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS*.



Κυριότερες παρατηρήσεις και όργανα μετρήσεων στην κλασική Γεωδαισία.

Ο προσδιορισμός θέσεων και διευθύνσεων στο χώρο διευκολύνεται και με τη χρησιμοποίηση αστρονομικών μεθόδων (αστρονομία θέσης), όπως, π.χ., η μέθοδος προσδιορισμού αστρονομικού πλάτους, αστρονομικού μήκους (μέσω μετρήσεων χρόνου) και αστρονομικού αξιμούθιου^{[53], [49]}. Και οι μέθοδοι αυτές

αντικαθίστανται σταδιακά από τη νέα τεχνολογία και τις διαστημικές τεχνικές.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα σημαντικό θέμα στη Γεωδαισία είναι η **απεικόνιση** της πραγματικότητας σε κάποια επιφάνεια αναφοράς, έτσι ώστε η πραγματικότητα αυτή να μπορεί να “διαβαστεί” και “χρησιμοποιηθεί” πρακτικά^[32]. Η “μεταφορά” ή “μετάφραση” γεωμετρικών ή φυσικών μεγεθών μιας επιφάνειας πάνω σε μια άλλη επιφάνεια, μέσω μιας **αμφιμονοσήμαντης αντιστοιχίας** σημείων των δύο επιφανειών, χαρακτηρίζει γενικά την απεικόνιση της πρώτης επιφάνειας πάνω στη δεύτερη. Η πρώτη επιφάνεια μπορεί να χαρακτηριστεί ως η αντικειμενική επιφάνεια, η δεύτερη ως επιφάνεια απεικόνισης, και το αποτέλεσμα της αμφιμονοσήμαντης αντιστοιχίας σημείων, των δύο επιφανειών, ως **απεικόνιση**.

Εάν η αντικειμενική επιφάνεια είναι σφαιρική προσέγγιση της Υδρογείας σφαιράς και η επιφάνεια απεικόνισης μια οποιαδήποτε επιφάνεια, τότε η “μεταφορά” ή η “μετάφραση” γεωμετρικών ή/και φυσικών μεγεθών, μέσω της αμφιμονοσήμαντης αντιστοιχίας, υλοποιεί μια **γεωγραφική απεικόνιση**^[29].

Εάν, η αντικειμενική επιφάνεια είναι η ελλειψοειδής προσέγγιση της Γης (που χρησιμοποιείται για γεωδαιτικές μελέτες ή/και εφαρμογές), τότε αντίστοιχα η διαδικασία απεικόνισης που αναφέρθηκε προηγουμένως, υλοποιεί μια **γεωδαιτική απεικόνιση**^{[23],[32],[14],[16]}. Στην ειδική περίπτωση που η επιφάνεια απεικόνισης είναι ένα επίπεδο, τότε στα προηγούμενα, η γεωγραφική απεικόνιση θα παρυστά ένα **γεωγραφικό χάρτη**, ενώ η γεωδαιτική απεικόνιση ένα **γεωδαιτικό χάρτη**.

1.2. ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ

Η εσωτερική δομή της Γης μπορεί να χαρακτηριστεί από τη διάκριση σε τρία γενικά στρώματα, φασματικά διακεκριμένα μεταξύ τους (όρια όχι απόλυτα σαφή), το φλοιό, το μανδύα και τον πυρήνα.

Ο **φλοιός**, που είναι το επιφανειακό στρώμα, έχει βάθος που ορίζεται διαφορετικά, ανάλογα με τους κλάδους των γεωεπιστημών που ασχολούνται μ'αυτόν. Στη σεισμολογία, για παράδειγμα, όπου το κριτήριο για τη μελέτη του εσωτερικού της Γης είναι η διάδοση των σεισμικών κυμάτων, θεωρείται ως φλοιός το επιφανειακό στρώμα της Γης, όπου τα **επιμήκη σεισμικά κύματα P** (βλ. επόμενη παράγραφο) διαδίδονται με ταχύτητα μικρότερη των $8 \frac{\text{km}}{\text{sec}}$.

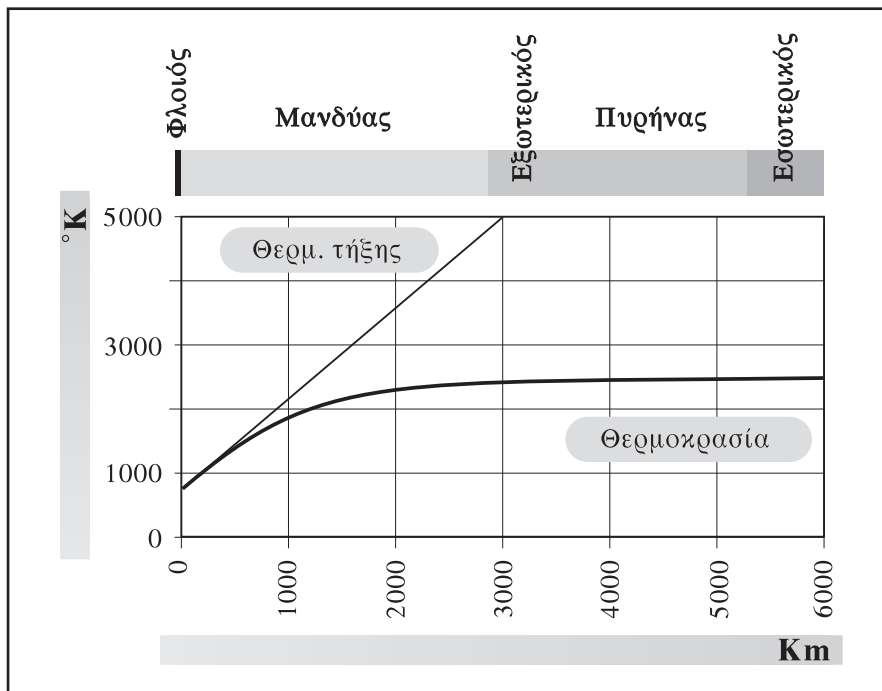
Το βαθύτερο στρώμα του φλοιού, πριν μπούμε στις εξωτερικές περιοχές

του μανδύα, λέγεται **επιφάνεια του Mohorovicic** (ή επιφάνεια Moho). Φαίνεται ότι η επιφάνεια Moho εκτείνεται σε όλη τη Γη και βρίσκεται σε διάφορα βάθη από τη γήινη επιφάνεια, όπως περίπου 10 km βάθος, κατά μέσο όρο, κάτω από τους ωκεανούς, 30-40 km βάθος κάτω από τις πεδιάδες, ενώ σε ορεινές περιοχές το βάθος Moho μπορεί να φθάσει σε αρκετές δεκάδες χιλιόμετρα, όπως, π.χ., τα 60 km στην ορεινή Ασία. Στο Σχ. 1.3, φαίνονται τα βάθη Moho στον Ελλαδικό χώρο^{[33], [56]}. Σύμφωνα με άλλα κριτήρια, όπως π.χ., “μέχρι πιο βάθος εξακριβώνονται τεκτονικές διεργασίες”, ο γήινος φλοιός θεωρείται ότι φθάνει σε βάθη μέχρι 700 km, ενώ σε άλλες αντιμετώπισεις ως κριτήριο βάθους, για το φλοιό, θεωρείται η θερμοκρασία τήξης. Και τα δύο αυτά κριτήρια θεωρούνται σήμερα αδύναμα, λόγω των ανεπαρκών δεδομένων στα οποία στηρίζονται, σε σύγκριση με το πρώτο κριτήριο των σεισμικών κυμάτων.

Το επόμενο γενικό στρώμα, μετά το φλοιό, είναι ο **μανδύας** (σε στερεή κατάσταση), το βάθος του οποίου ορίζεται, με το κριτήριο της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων P, κυμαινόμενο μεταξύ των $8 \frac{\text{km}}{\text{sec}}$ μέχρι περίπου $14 \frac{\text{km}}{\text{sec}}$, σε βάθος περίπου 3000 km, λίγο μικρότερο από το μισό της γήινης ακτίνας.

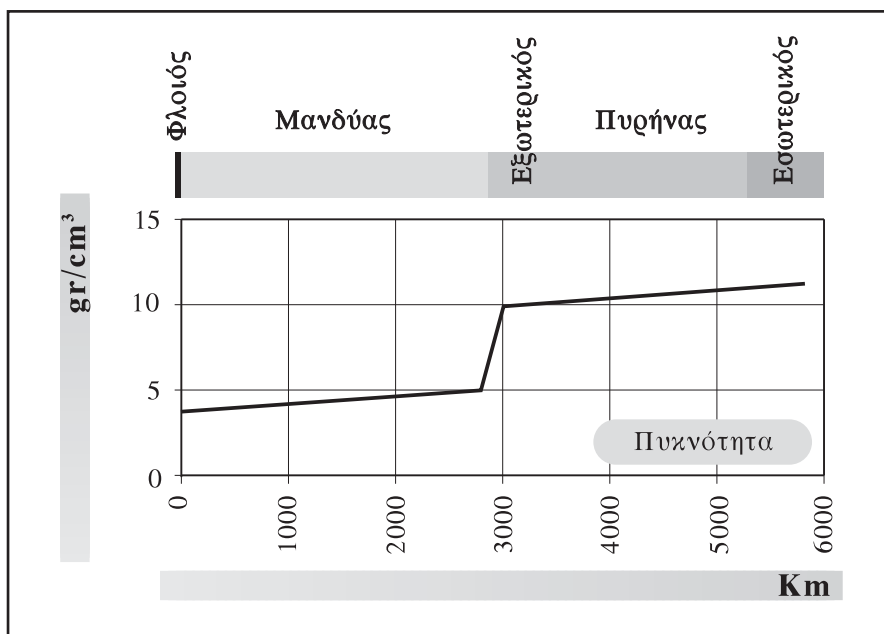
Τέλος, ο **πυρήνας** διακρίνεται σε δύο στρώματα, τον εξωτερικό (σε υγρή κατάσταση) και τον εσωτερικό πυρήνα (σε στερεή κατάσταση), με βάθος, από περίπου 3000 km μέχρι περίπου 5000 km ο εσωτερικός και από 5000 km μέχρι το κέντρο μάζας της Γης, στα 6370 km, περίπου ο εσωτερικός.

Ποσοστιαία εμφάνιση στοιχείων		
	Στο γήινο φλοιό	Στο εσωτερικό της Γης (γενικά)
Οξυγόνο	46%	30%
Πυρίτιο	28%	15%
Αλουμίνιο	8%	1%
Σίδηρο	6%	35%
Μαγνήσιο	4%	13%
Ασβέστιο	2.5%	1%
Ποτάσιο	2.3%	-
Νικέλιο	-	2.5%
Σόδιο	2.1%	-
Άλλα	1%	2%



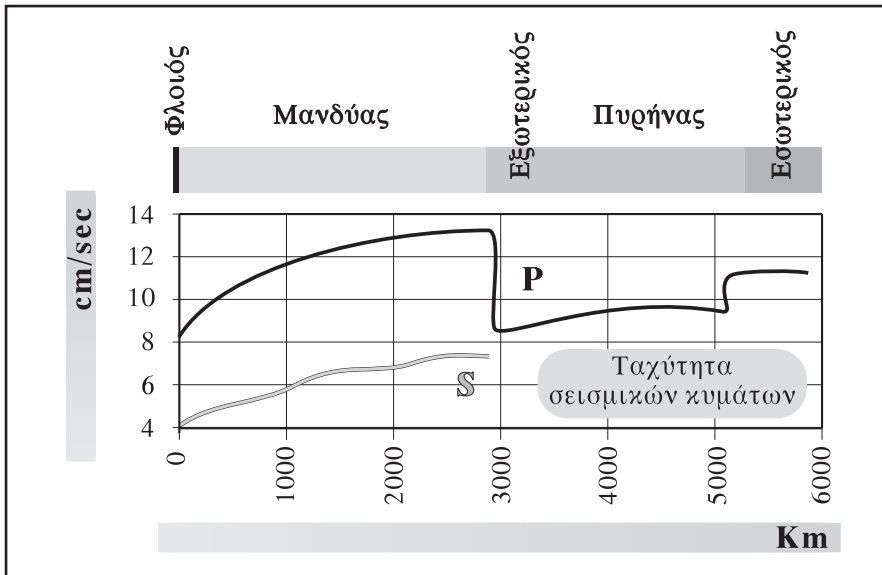
Σχ. 1.4.

Στον παραπάνω πίνακα, φαίνεται η ποσοστιαία παρουσία στοιχείων στο φλοιό της Γης, όπου το οξυγόνο και το πυρίτιο αποτελούν το 80% περίπου, συνολικά για όλα τα γήινα στρώματα. Η παρουσία του σιδήρου, που στο φλοιό είναι 6%, φθάνει συνολικά το 35%, πράγμα που σημαίνει την έντονη παρουσία του στα άλλα στρώματα, ιδίως στον εσωτερικό πυρήνα. Στα Σχ. 1.4, Σχ. 1.5, Σχ. 1.6, Σχ. 1.7, φαίνεται, αντίστοιχα, η μεταβολή διαφόρων φυσικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η πυκνότητα, η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων P και S και η πίεση, στα διάφορα στρώματα του εσωτερικού της Γης.

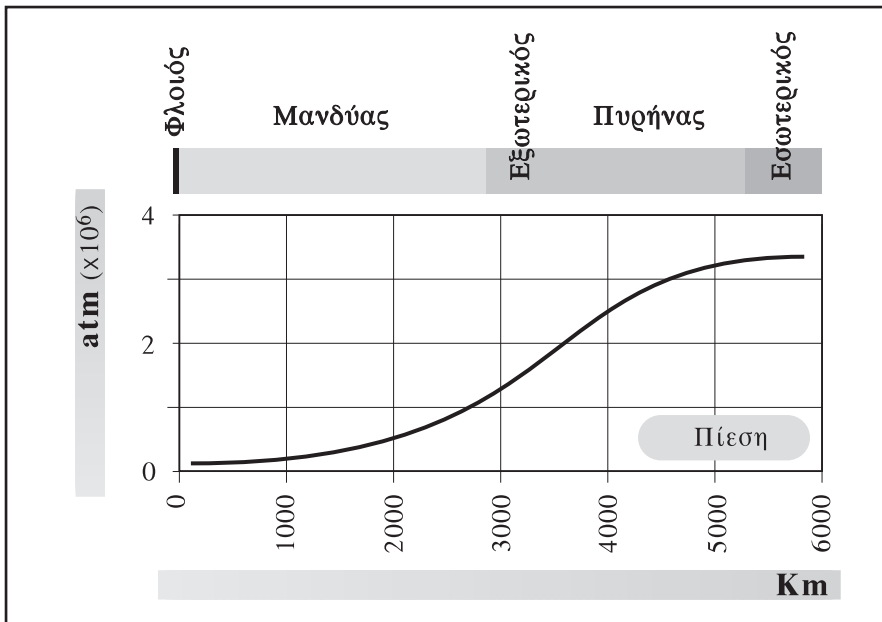


Σχ. 1.5.

Μεγάλο ενδιαφέρον για τη μελέτη των **παραμορφώσεων**^[6] της Γης έχει η γνώση των ελαστικών σταθερών των στρωμάτων του εσωτερικού της, που υπολογίζονται βάσει των πυκνοτήτων και βάσει των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων. Στο Σχ. 1.8, φαίνονται μέσες τιμές του μέτρου εφαπτομενικής ελαστικότητας, που εκφράζει την αντίσταση του υλικού σε παραμόρφωση (μέτρο ανθεκτικότητας), και του μέτρου συμπίεστικότητας, που εκφράζει την αντίσταση του υλικού στις μεταβολές του όγκου. Στο Σχ. 1.9, φαίνεται η μεταβολή της έντασης της βαρύτητας στο εσωτερικό της Γης.



Σχ. 1.6.



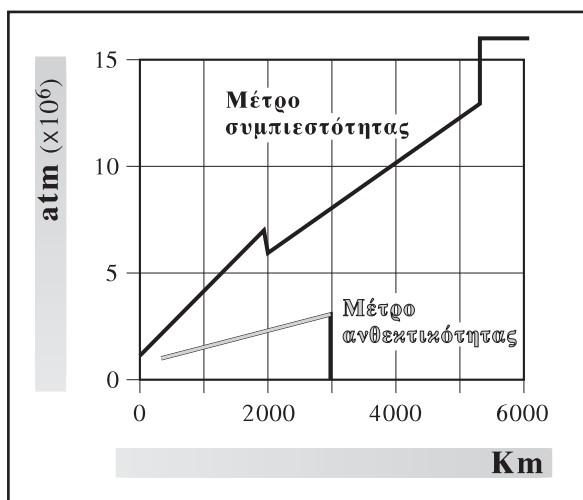
Σχ. 1.7.

Τα σεισμικά κύματα

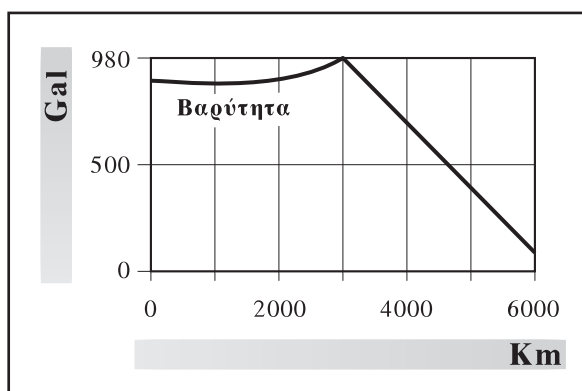
Αναφέρθηκε, προηγουμένα, ότι τα σεισμικά κύματα (Σχ. 1.6) είναι ένα θεμελιώδες κριτήριο για τη μελέτη του εσωτερικού της Γης. Γενικά, τα σεισμικά κύματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: στα επιφανειακά και στα κύματα που μεταδίδονται στο εσωτερικό της Γης. Στα πρώτα υπάγονται τα κύματα L και M, ενώ στα δεύτερα τα κύματα P και S.

Με το σεισμικό συμβάν, σε κάποιο υπόκεντρο στο εσωτερικό της Γης, αρχίζει η διάδοση των κυμάτων συμπίεσης P, που είναι **επιμήκη** κύματα διαδιδόμενα σε κάθε διεύθυνση στο χώρο. Ακολουθούν τα **εγκάρσια** κύματα S, που είναι δυνατόν να είναι είτε κατακόρυφα είτε οριζόντια. Φθάνοντας στην επιφάνεια, τα σεισμικά κύματα μεταδίδονται εγκάρσια, σε μεγάλα μήκη κύματος (χαμηλές συχνότητες), κύματα L ή κύματα Love, για να μεταβληθεί η μετάδοση σε ταλαντώσεις με πολύ μικρότερες περιόδους (υψηλές συχνότητες), κύματα M ή κύματα Rayleigh, που φθάνουν ένα μέγιστο, μικρής περιόδου, συχνά της τάξης των 12 sec – 18 sec.

Τα εγκάρσια κύματα S δεν μεταδίδονται στα υγρά, γι'αυτό (Σχ. 1.6), η μεταβολή τους, συναρτήσει του βάθους, μηδενίζεται στον εξωτερικό πυρήνα, που βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, με αποτέλεσμα να είναι μηδέν, στον πυρήνα, και το μέτρο ανθεκτικότητας. Νεότερες θεωρίες και πειραματικές ενδείξεις οδηγούν στην άποψη ότι ο εσωτερικός πυρήνας είναι δυνατόν να μεο



Σχ. 1.8. Μεταβολή των μέτρων συμπίεστικότητας και ανθεκτικότητας.



Σχ. 1.9. Μεταβολή της βαρύτητας (g) στο εσωτερικό της Γης (βλ. Κεφ. 4)

ταδίδει εγκάρσια κύματα S, αλλά ακόμα τα δεδομένα είναι ανεπαρκή για μια ακριβή θεμελίωση.

Ως στερεό σώμα θεωρείται εκείνο, στο οποίο μεταδίδονται τα εγκάρσια κύματα S. Ο εξωτερικός πυρήνας, από αυτή την άποψη, δεν είναι στερεός, αλλά ούτε και σε αεριώδη κατάσταση, τουλάχιστον ιδανική, γιατί αν συνέβαινε αυτό, τότε το μέτρο συμπίεστικότητας θα ήταν μικρότερο. Στα ίδια συμπεράσματα καταλήγουν οι γεωφυσικοί και από τη μελέτη των γήινων παλιροειών, καθώς και από τις ταλαντώσεις του Πόλου (βλ. Κεφ. 7).

1.3. ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΓΗΣ

Οι κινήσεις της Γης επηρεάζουν και επηρεάζονται από βασικές φυσικές αρχές και φαινόμενα, στα οποία στηρίζονται οι Επιστήμες της Γης, όπως, π.χ., η Γεωδαισία, η Γεωφυσική, η Ωκεανογραφία, κ.λπ. Γενικά, τρία χαρακτηριστικά των κινήσεων της Γης μπορούν να θεωρηθούν ως τα σπουδαιότερα:

- α. Η Γη στρέφεται γύρω απ'τον άξονά της με μία σχεδόν σταθερή ταχύτητα περιστροφής.
- β. Ο άξονάς της έχει μια σχεδόν σταθερή κλίση ως προς το επίπεδο της τροχιάς της Γης (εκλειπτικό επίπεδο), γύρω από τον Ήλιο.
- γ. Ο προσανατολισμός του άξονα της Γης στο διάστημα, ως προς τους αστέρες, είναι σχεδόν σταθερός.

Η γνώση του προσανατολισμού του άξονα περιστροφής της Γης, είναι πολύ σημαντική για τον υπολογισμό των τροχιών των τεχνητών δορυφόρων της Γης (βλ. Κεφ. 5), βάσει ενός αποδεκτού μοντέλου Γης. Οι διαφορές (αποχές) της τροχιάς του δορυφόρου, όπως προκύπτει από παρατηρήσεις ως προς την θεωρητική τροχιά που υπολογίζεται (τροχιά Kepler, βλ. Κεφ. 5), δίνει πληροφορίες σχετικά με τη καταλληλότητα του μοντέλου Γης, που έχει χρησιμοποιηθεί, και ιδιαίτερα για τη σύζευξη μεταξύ πυρήνα και μανδύα της Γης, για την εποχιακή επανακατανομή της ατμοσφαιρικής μάζας στους ωκεανούς και τις ηπείρους και για τις κλιματολογικές μεταβολές^[3].

Οι κινήσεις της Γης είναι δυνατόν να καταταγούν σε δύο βασικές κατηγορίες: την περιστροφή γύρω από τον Ήλιο και τη στροφή γύρω απ'τον άξονά της (Σχ. 1.10).

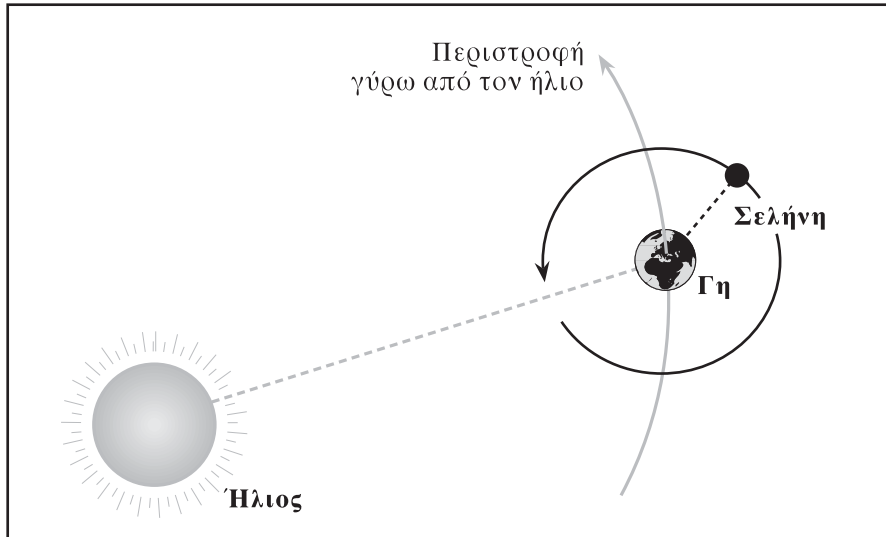
Περιστροφή γύρω απ' τον Ήλιο

Είναι γνωστό, απ'τον πρώτο Νόμο του Kepler (1571-1630), ότι η Γη περιστρέφεται σε ελλειπτική τροχιά γύρω από τον Ήλιο, που βρίσκεται σε μια απ'τις εστίες της έλλειψης. Η ελλειπτική αυτή τροχιά δεν απέχει και πολύ απ'το να είναι κυκλική, αφού η επιπλάτυνσή της είναι μόνον 0.017.

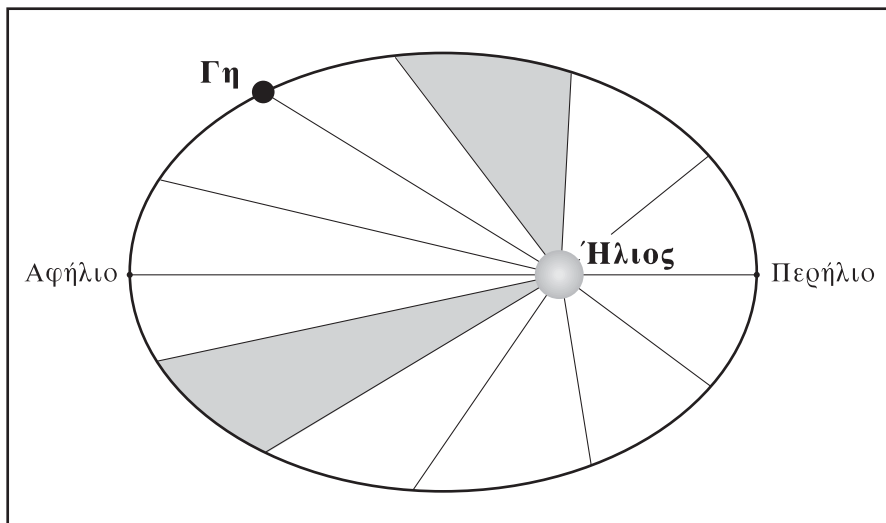
Εάν θεωρήσουμε, σε πρώτη προσέγγιση, την τροχιά ως κυκλική, τότε η ακτίνα της θα ήταν περίπου 150×10^6 km (ή 150000 Mm με $1 \text{ Mm} = 10^3 \text{ km} = 10^6 \text{ m}$), με μια αβεβαιότητα στην τιμή αυτή περίπου $\pm 2.5 \times 10^6$ km, δηλαδή της τάξης του 1% της ακτίνας.

Η Γη βρίσκεται στην πλησιέστερη απόσταση απ'τον Ήλιο στις 3 Ιανουαρίου κάθε χρόνου και η θέση αυτή λέγεται **περιήλιο**, απέχοντας 147×10^6 km από τον Ήλιο, ενώ βρίσκεται στην μεγαλύτερη απόσταση, στο **αφήλιο**, στις 4 Ιουλίου, οπότε και απέχει 152×10^6 km απ'τον Ήλιο (Σχ. 1.11). Από το δεύτερο Νόμο του Kepler προκύπτει ότι η Γη διαγράφει σε ίσους χρόνους ίσες επιφάνειες, ελλειπτικούς τομείς με εστία τον Ήλιο, δηλαδή σε 12 μήνες διαγράφει 12 επιφάνειες ίσου εμβαδού. Επομένως είναι δυνατόν να υπολογιστεί ότι η μέση τροχιακή ταχύτητα περιστροφής της Γης γύρω από τον Ήλιο είναι $107 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$ ή περίπου $30 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$.

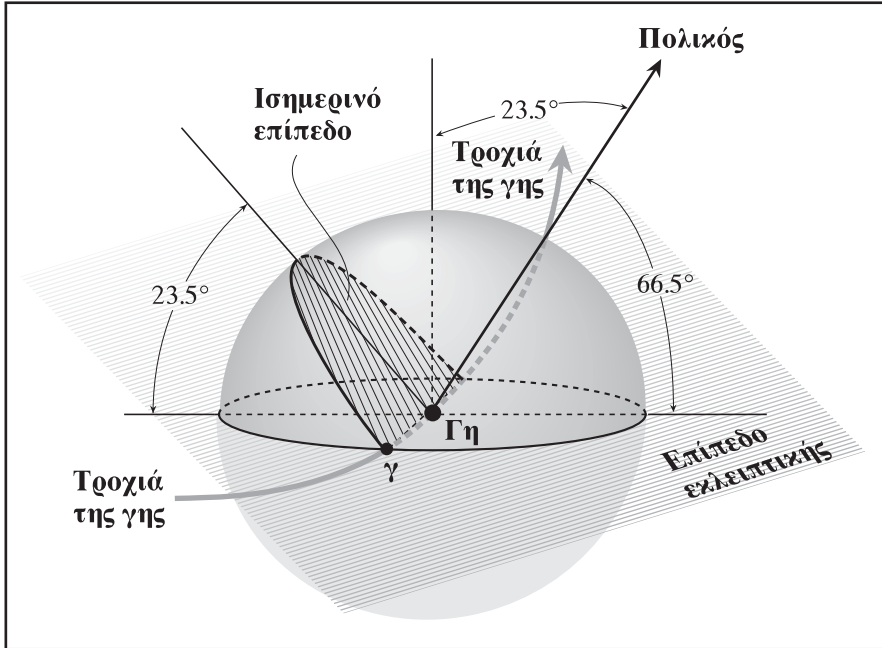
Στο Σχ. 1.12, φαίνεται η όλη γεωμετρία που διασυνδέεται με την τροχιά της Γης, καθώς και η κλίση του ισημερινού ως προς το τροχιακό επίπεδο (ελλειπτική). Το σημείο, γ, στο οποίο τέμνεται η τροχιά της Γης, πάνω στο ελλειπτικό επίπεδο, με τον γήινο ισημερινό, λέγεται **σημείο των εαρινών ισημερινών**.



Σχ. 1.10.



Σχ.1.11.



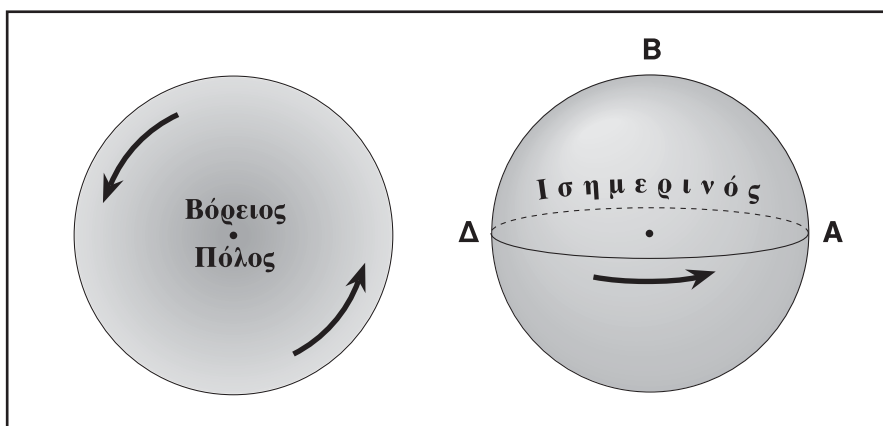
Σχ. 1.12.

Στροφή της Γης γύρω απ' τον άξονά της

Η στροφή της Γης γύρω απ' τον άξονά της μπορεί να περιγραφεί με δύο τρόπους, όπως στο Σχ. 1.13, δηλαδή είτε αντίθετα απ' τη φορά των δεικτών του ρολογιού, είτε προς την ανατολή (από Δ προς Α).

Η περίοδος στροφής της Γης γύρω απ' τον άξονά της είναι, όπως γνωρίζουμε απ' την καθημερινή εμπειρία μας, μία στροφή ανά ημέρα. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στη δυνατότητα εισαγωγής της έννοιας του **χρόνου**, που οι άνθρωποι χρησιμοποίησαν απο τα πολύ παλιά χρόνια. Για τον ορισμό του χρόνου χρειάζεται να έχουμε μια κάποια αναφορά (μια αφετηρία), που σε συνδυασμό με το φυσικό γεγονός της στροφής της Γης γύρω από τον άξονά της, να μας δίνει τις μονάδες χρόνου.

Το πιο φυσικό και απλό, ως αναφορά, είναι ο Ήλιος και τα άστρα. Ετσι, το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών άνω μεσουρανήσεων του Ήλιου στον ίδιο τόπο (στον ίδιο μεσημβρινό), ονομάζεται ηλιακή



Σχ. 1.13.

ημέρα, ενώ το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών άνω μεσουρανήσεων του σημείου των εαρινών ισημεριών, Σχ. 1.12, (βλ. και Κεφ. 5, § 5.1), στον ίδιο τόπο (στον ίδιο μεσημβρινό) ονομάζεται αστρική ημέρα. Οι δύο αυτοί χρόνοι δεν είναι ακριβώς ίσοι μεταξύ τους. Η μέση αστρική ημέρα, π.χ., είναι κατά περίπου 8 min μικρότερη της μέσης ηλιακής, δηλαδή έχει περίπου 23 hr και 56 min, σε μονάδες μέσου ηλιακού χρόνου, ενώ η ηλιακή μέρα έχει περίπου 24 hr και 4 min.

Η γραμμική ταχύτητα στροφής της Γης γύρω απ'τον άξονά της μεταβάλλεται συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους φ , ενώ, όπως είναι φυσικό, η γωνιακή της ταχύτητα παραμένει η ίδια για όλα τα σημεία. Έτσι, στον ισημερινό έχουμε γραμμική ταχύτητα, περίπου, $456 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$, στον πόλο η γραμμική ταχύτητα μηδενίζεται, ενώ στο πλάτος των 40° (περίπου της Ελλάδας) φθάνει τα $357 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$. Η γωνιακή ταχύτητα δίνεται σήμερα με την τιμή της τάξης των $7,3 \times 10^{-5} \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$. Η ταχύτητα στροφής της Γης, δεν είναι στην πραγματικότητα σταθερή. Οι μεταβολές της διακρίνονται:

- α. Σε πολύ **μεγάλης περιόδου**, που οφείλονται σε τριβές λόγω του φαινομένου της παλίρροιας (βλ. Κεφ. 7) και είναι της τάξης των $+2 \frac{\text{msec}}{\text{αιώνα}}$.
- β. Σε **εποχιακές** μεταβολές της τάξης του msec που οφείλονται άμεσα στις παλίρροιας και στους ανέμους με περίοδο γύρω στους 6 μήνες έως 1 χρόνο, και

γ. Σε **μη περιοδικές** μεταβολές (ανώμαλες μεταβολές), αγνώστων μέχρι τώρα αιτιών, (ίσως λόγω γεωδυναμικών φαινομένων, όπως π.χ., οι μεγάλοι σεισμοί), τάξης μεγέθους ακόμη και μερικών $\frac{\text{msec}}{\text{ημέρα}}$.

Η στροφή της Γης, γύρω απ'τον άξονά της, προκαλεί το γνωστό μας, απ'τη Φυσική, φαινόμενο Coriolis, που το έχουμε έντονο στις θαλάσσιες παλίρροιας^[20] και στη βλητική. Κλασσική έχει μείνει στην Ιστορία, η περίπτωση της *Μεγάλης Μπέρθα*, πυροβόλου του Α' Παγκοσμίου Πολέμου, που το βλήμα του, στην απόσταση βεληνεκούς των 113 km απέκλινε απ'τον στόχο του κατά 1.6 km, λόγω του φαινομένου Coriolis. Αποδείξεις του φαινομένου έχουμε πάρα πολλές, με προεξέχουσα περίπτωση το γνωστό **Εκκρεμές του Foucault** (Παρίσι 1851), καθώς και την εμπειρία απ'την κατακόρυφη πτώση των σωμάτων, κατά την οποία σημειώνεται μια συστηματική απόκλιση πτώσης, πάντα, προς ανατολάς.

Κίνηση του Πόλου. Μετάπτωση. Κλόνηση

Το γεγονός ότι η Γη δεν είναι ένα ομογενές, ιδανικά γεωμετρικό σώμα, ούτε απόλυτα στερεό, καθώς και ένα σύνολο δυναμικών δράσεων που εξασκούνται σ'αυτό (από το εσωτερικό και το εξωτερικό του), προκαλούν τη λεγόμενη **κίνηση του Πόλου**, η οποία μπορεί να παρατηρηθεί με αστρονομικές μεθόδους ή με τις σύγχρονες δορυφορικές ή γενικά διαστημικές μεθόδους, π.χ., με τις δορυφορικές μεθόδους Doppler, τηλεμετρίας δορυφόρων, GPS, VLBI (βλ. Κεφ. 6). Η κίνηση αυτή περιγράφεται ως προς ένα **μέσο πόλο αναφοράς**, όπως π.χ. ο Διεθνής Συμβατικός Πόλος, CIO, όπως αυτός ορίζεται από τη Διεθνή Υπηρεσία Κίνησης του Πόλου, IPMS, του Διεθνούς Γραφείου Χρόνου, BIH (Σχ. 1.14). Φαινόμενα που ενδιαφέρουν τη Γεωδυναμική, π.χ. οι σεισμοί, παλίρροιας κ.ά., μελετώνται σήμερα σε συνδυασμό με τη μελέτη της κίνησης του Πόλου^[57].

Η **επιπλάτωση** της Γης είναι η κύρια αιτία και για άλλες, επί μέρους, κινήσεις της Γης, που συνδέονται με τις βασικές κινήσεις της, όπως περιγράφηκαν προηγούμενα, δηλαδή με την περιστροφή γύρω απ'τον ήλιο και τη στροφή γύρω απ'τον άξονά της. Τέτοιες κινήσεις είναι η μετάπτωση και η κλόνηση, όπως φαίνονται στο Σχ. 1.15.

Η **μετάπτωση**, μια πολύ μικρή γωνιακή μεταβολή της κλίσης του άξονα περιστροφής της Γης, οφείλεται στο φυσικό γεγονός ότι η πεπλατυσμένη Γη, περιστρεφόμενη, “αντιστέκεται” σε κάθε δύναμη που προσπαθεί να μεταβάλλει τη γωνία κλίσης του άξονά της, όπως είναι η παλιρροϊκή έλξη που εξασκεί η Σελήνη πάνω στη Γη. Αποτέλεσμα της έλξης αυτής είναι ο “εξανα-