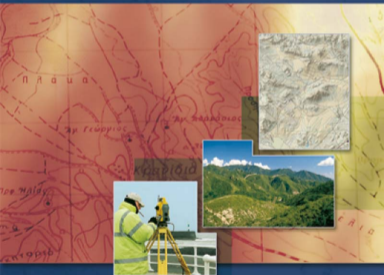


Δημήτριος Τσούλης

# Εισαγωγή στην Τοπογραφία



# Πρόλογος

Το παρόν σύγγραμμα απευθύνεται σε προπτυχιακούς φοιτητές Τμημάτων Πολυτεχνικών Σχολών και Τεχνολογικών Εκπαιδευτικών Ιδρυμάτων στα οποία διδάσκονται εισαγωγικά τοπογραφικά μαθήματα. Επιπλέον απευθύνεται σε επαγγελματίες Μηχανικούς όλων των ειδικοτήτων που επιθυμούν μια παρουσίαση των αρχών λειτουργίας των βασικών τοπογραφικών οργάνων μέτρησης και μεθόδων υπολογισμού, καθώς και σε επιστήμονες συγγενών γνωστικών περιοχών που αναζητούν μια πρώτη εισαγωγή στην επιστήμη και το αντικείμενο της Τοπογραφίας.

Προερχόμενος από μια διαφορετική ερευνητική περιοχή, όταν πριν από τέσσερα χρόνια ανέλαβα διδακτικά καθήκοντα στο Πολυτεχνείο του Βερολίνου με αντικείμενο την Τοπογραφία, ήρθα αντιμέτωπος, κατά τη διαδικασία προετοιμασίας του διδακτικού υλικού των σχετικών προπτυχιακών μαθημάτων, με κάποια βασικά ερωτήματα. Ορισμένα από αυτά, που αποτέλεσαν και σημείο εκκίνησης του παρόντος βιβλίου, ήταν τα εξής: *Ποια είναι η μαθηματική διατύπωση των βασικών τοπογραφικών προβλημάτων; Ποια η σχέση των τοπογραφικών οργάνων μέτρησης με το φυσικό περιβάλλον των μετρήσεων και ποιο ρόλο παίζουν βασικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των οργάνων στη σχέση αυτή; Πώς συνδέονται οι τοπογραφικές μετρήσεις πεδίου με το τελικό προϊόν μιας τοπογραφικής εργασίας, δηλαδή τη σύνταξη ενός τοπογραφικού χάρτη ή ενός τοπογραφικού διαγράμματος;*

Προσπαθώντας να διατυπώσω κάποιες απαντήσεις στα παραπάνω ερωτήματα και έχοντας ως οδηγό το υλικό που είχε συγκεντρωθεί από τις σχετικές παραδόσεις στο Βερολίνο και στη Θεσσαλονίκη ξεκίνησα τη συγγραφή του παρόντος. Η φιλοσοφία που διέπει το γράψιμο των κεφαλαίων και τον τρόπο παρουσίασης είναι να δοθεί έμφαση στις αρχές λειτουργίας των τοπογραφικών οργάνων μέτρησης και στη σύνδεσή τους με το φυσικό περιβάλλον των μετρήσεων. Για την κατανόηση του είδους της πληροφορίας που δίνεται από ένα τοπογραφικό διάγραμμα παρουσιάζονται επίσης κάποιιοι βασικοί ορισμοί συστημάτων αναφοράς και συστημάτων συντεταγμένων καθώς και οι σχέσεις μετασχηματισμού που συνδέουν διαφορετικά συστήματα στο επίπεδο. Βασική έννοια που αποτελεί το συνδετικό κρίκο μεταξύ των επί μέρους κεφαλαίων είναι αυτή του *οριζοντίου επιπέδου*. Το οριζόντιο επίπεδο αποτελεί το επίπεδο αναφοράς για όλες τις μετρήσεις που λαμβάνονται από τα επί μέρους μετρητικά συστήματα στο πεδίο, ενώ ταυτόχρονα είναι και η επιφάνεια στην οποία αναφέρονται όλοι οι

μαθηματικοί υπολογισμοί.

Το βιβλίο μπορεί να χωριστεί θεματικά σε τρεις ενότητες. Την πρώτη ενότητα αποτελούν τα πρώτα τέσσερα κεφάλαια, στα οποία συγκεντρώνονται όλες εκείνες οι θεωρητικές έννοιες και οι ορισμοί που διέπουν το σύνολο των πρακτικών τοπογραφικών εργασιών. Η παρουσίαση γίνεται μεν συνοπτικά, έχει όμως καταβληθεί προσπάθεια να γίνει με όσο το δυνατόν πιο αυτόνομο τρόπο. Στη δεύτερη ενότητα, στην οποία ανήκουν το 5ο και το 6ο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα κύρια όργανα και οι μέθοδοι μέτρησης των βασικών τοπογραφικών παρατηρήσεων, δηλαδή των γωνιών και των αποστάσεων. Στο σημείο αυτό έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην αρχή λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρομαγνητικού οργάνου μέτρησης αποστάσεων, που αποτελεί πλέον αναπόσπαστο μέρος των σύγχρονων γεωδαιτικών σταθμών. Τέλος, στην τρίτη θεματική ενότητα, που απαρτίζουν τα κεφάλαια 7 και 8, δίνονται οι βασικές μέθοδοι υπολογισμού της θέσης χαρακτηριστικών σημείων του εδάφους στο επίπεδο ενός τοπογραφικού διαγράμματος. Ο οριζοντιογραφικός προσδιορισμός εξετάζεται στο 7ο κεφάλαιο και ο προσδιορισμός υψομέτρων και υψομετρικών διαφορών στο 8ο κεφάλαιο. Από τα τρία παραρτήματα που παρατίθενται στο τέλος του κειμένου αξίζει εδώ να αναφερθεί το πρώτο από αυτά, στο οποίο έχουν συγκεντρωθεί όλες οι βασικές μονάδες μέτρησης με ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την Τοπογραφία. Το συγκεκριμένο παράρτημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτόνομα ως ένας χρήσιμος οδηγός (rocket guide) για τυπικούς αριθμητικούς υπολογισμούς, όπως π.χ. για την αλλαγή του συστήματος μονάδων μέτρησης μιας γωνίας.

Στο σημείο αυτό μου δίνεται η ευκαιρία να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν με έμμεσο ή άμεσο τρόπο στην ολοκλήρωση αυτού του βιβλίου. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν σίγουρα όλοι οι πρώην καθηγητές μου και νυν συνάδελφοι στο Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Οι εμπνευσμένες διαλέξεις τους και ο ενθουσιασμός τους κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών μου δημιούργησαν για πρώτη φορά την ιδέα μιας ακαδημαϊκής καριέρας. Κατά τη διάρκεια της μετέπειτα εργασίας μου στο Μόναχο και στο Βερολίνο της Γερμανίας είχα επίσης την τύχη να συνεργαστώ με άριστους συναδέλφους καθηγητές και επιστημονικούς συνεργάτες. Ιδιαίτερες ευχαριστίες ανήκουν στον πρώην συνάδελφο στο Πολυτεχνείο του Βερολίνου Dr. Svetozar Petrović για τις απολαυστικές και συνήθως ατελείωτες συζητήσεις μας γύρω από διάφορα γεωδαιτικά ζητήματα. Πέρα όμως από όλους τους παραπάνω στις σελίδες αυτού του βιβλίου καταγράφονται τόσο στο κείμενο όσο και σε αρκετά από τα σχήματα πολλές εύστοχες παρατηρήσεις φοιτητών από το Βερολίνο και τη Θεσσαλονίκη, που προέκυψαν κυρίως κατά την πραγματοποίηση των αντίστοιχων εργαστηρίων

και την πρώτη τους επαφή με τα τοπογραφικά όργανα μετρήσεων.

Το αίνιγμα της χρήσης ελληνικών χαρακτήρων από το σύστημα τυπογραφίας L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, με το οποίο γράφτηκε αυτό το βιβλίο, μου έλυσαν με τον πλέον διδακτικό τρόπο οι κύριοι Βασίλειος Ανδριτσάνος, Δημήτριος Αραμπέλος και Απόστολος Συρόπουλος. Για την υπομονή τους κατά την εξήγηση διάφορων τεχνικών ζητημάτων με τέτοιο τρόπο, ώστε ακόμα και εγώ ως μη ειδικός να μπορώ να καταλάβω, τους ευχαριστώ πολύ. Η κυρία Ιουλία Καρρίντη διάβασε το κείμενο και πρότεινε αρκετές συντακτικές και γλωσσικές διορθώσεις. Της αξίζουν ιδιαίτερες ευχαριστίες, τονίζοντας ότι οι όποιες ασάφειες έχουν απομείνει βαρύνουν αποκλειστικά και μόνον το συγγραφέα. Θα ήθελα τέλος να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Άρη Σύρμο και τις Εκδόσεις Ζήτη για τη βοήθεια που μου προσέφεραν στο τελικό στάδιο της προετοιμασίας του βιβλίου, καθώς και για την έμπρακτη συμβολή τους στη βελτίωση της ποιότητας ορισμένων σχημάτων.

Θεσσαλονίκη, Αύγουστος 2005

Δημήτριος Τσούλης

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Basic definitions of reference frames and coordinate systems</b>	<b>11</b>
2.1	Introduction . . . . .	11
2.2	Local coordinate systems and fundamental transformations on the plane . . . . .	14
2.3	Projection on the map plane . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Basic definitions of the gravity field</b>	<b>43</b>
3.1	Introduction . . . . .	43
3.2	Potential, gravity and acceleration . . . . .	45
3.3	Equipotential surfaces and geoid . . . . .	56
3.4	Global coordinate systems . . . . .	68
3.5	Gravity field approximations . . . . .	71
3.5.1	The ellipsoidal approximation . . . . .	72
3.5.2	The spherical approximation . . . . .	73
3.5.3	The planar approximation . . . . .	74
<b>4</b>	<b>Definition of height and height difference</b>	<b>81</b>
4.1	Introduction . . . . .	81
4.2	Definition of the different height systems . . . . .	85
<b>5</b>	<b>Instruments and methods for angle measurements</b>	<b>99</b>

5.1	Introduction . . . . .	99
5.2	Optical Prisms . . . . .	105
5.3	Theodolite . . . . .	111
5.3.1	Connection of the Theodolite with the field of measurements	123
5.3.2	Levelling and centering . . . . .	131
5.3.3	Measurement of horizontal and vertical angles . . . . .	133
<b>6</b>	<b>Instruments and measurement methods of distances</b>	<b>137</b>
6.1	Introduction . . . . .	137
6.2	Measuring tape . . . . .	138
6.3	Basis of known length . . . . .	142
6.4	The electromagnetic method . . . . .	146
6.4.1	Carrier and measuring signal . . . . .	153
6.4.2	Pulse method . . . . .	160
6.4.3	Phase comparison method . . . . .	163
6.4.4	Range and accuracy of EDMs . . . . .	169
6.4.5	Internal error sources . . . . .	173
6.4.6	External error sources . . . . .	177
6.5	Calibration of distance measurement instruments . . . . .	188
6.5.1	Measuring tape calibration . . . . .	189
6.5.2	EDM calibration . . . . .	191
<b>7</b>	<b>Methods of computing the horizontal position of field points</b>	<b>205</b>
7.1	Introduction . . . . .	205
7.2	The cartesian coordinates method . . . . .	206
7.3	The polar coordinates method . . . . .	210
7.3.1	Polygonal traverse . . . . .	215
7.3.2	The intersection problem . . . . .	229
7.3.3	The three-point resection problem . . . . .	236

---

7.3.4	The remote base problem . . . . .	240
7.3.5	Line intersection . . . . .	242
7.3.6	Circle center computation . . . . .	245
7.3.7	Eccentric station . . . . .	248
7.4	Indirect computation of inclined distances . . . . .	254
<b>8</b>	<b>Instruments and methods for the computation of heights and height differences</b>	<b>257</b>
8.1	Introduction . . . . .	257
8.2	Geometric levelling . . . . .	259
8.2.1	Line of sight error . . . . .	278
8.2.2	Accuracy of geometric levelling . . . . .	295
8.3	Trigonometric levelling . . . . .	302
8.3.1	Effect of the gravity field . . . . .	306
8.3.2	Effect of the atmospheric refraction . . . . .	311
8.3.3	Computation of the refraction coefficient from the mutual and simultaneous observation of zenith angles . . . . .	318
8.4	Barometric levelling . . . . .	327
8.5	Gravimetric levelling . . . . .	335
8.6	Algorithm for the computation of heights and height differences . . . . .	337
	<b>Appendix A: Measurement units</b>	<b>343</b>
	<b>Appendix B: Basic definitions in adjustment theory</b>	<b>355</b>
	<b>Appendix C: Similarity transform on the plane</b>	<b>363</b>
	<b>Literature</b>	<b>375</b>
	<b>Index</b>	<b>377</b>

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

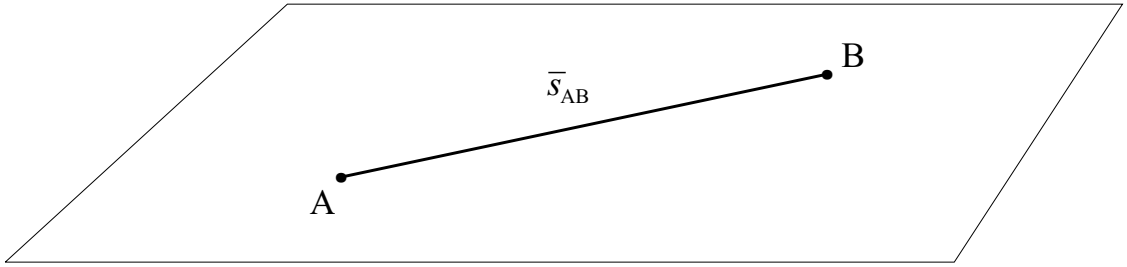
Παρόλο που η πρώτη ιστορική αναφορά στη Γεωδαισία ως ανεξάρτητης επιστημονικής περιοχής γίνεται από τον Αριστοτέλη στα Μεταφυσικά τον 5ο αιώνα π.Χ., η σύγχρονη αντίληψη για την επιστήμη της Γεωδαισίας ακολουθεί τον ορισμό που της έδωσε ο γερμανός γεωδαίτης Friedrich Robert Helmert (1843-1917) το 1880 στη μονογραφία του *“Die mathematischen und physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie”*. Στην πρώτη παράγραφο του ιστορικού αυτού έργου αναφέρεται ως Γεωδαισία *“... η επιστήμη της μέτρησης και απεικόνισης της γήινης επιφάνειας”*, ορισμός που στις μέρες μας θα πρέπει για λόγους πληρότητας να επεκταθεί με την προσθήκη *“... και των χρονικών μεταβολών της”*. Ο σύντομος και περιεκτικός αυτός ορισμός περιλαμβάνει το σύνολο των θεωρητικών και πρακτικών ασχολιών του σύγχρονου γεωδαίτη, του σύγχρονου Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού. Είτε πρόκειται για την ανάλυση δορυφορικών εικόνων με μεθόδους Τηλεπισκόπησης, είτε για τη συλλογή των απαραίτητων μετρήσεων πεδίου και το μετέπειτα σχεδιασμό ενός τοπογραφικού διαγράμματος στα πλαίσια μιας τυπικής τοπογραφικής αποτύπωσης, ο ορισμός του Helmert αποδεικνύεται τόσο πετυχημένος όσο και διαχρονικός. Η επιστήμη της Γεωδαισίας, όπως αυτή ορίζεται από τον Helmert, καλύπτει όλες τις δυνατές κλίμακες απεικόνισης περιοχών της γης και φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνειά της. Εάν περιορίσουμε τη συνολική έκταση της περιοχής μελέτης τόσο, ώστε για την αναπαράσταση του καμπυλόμορφου σχήματος της γήινης επιφάνειας να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα επίπεδο, καταλήγουμε σε μία εξειδικευμένη γνωστική περιοχή της Γεωδαισίας, την Τοπογραφία. Ένας γενικά αποδεκτός ορισμός της επιστήμης της Τοπογραφίας δίνεται από το Δημήτριο Βλάχο (1987) ως εξής: *Η Τοπογραφία είναι η επιστήμη που διδάσκει τις μεθόδους με τη βοήθεια των οποίων απεικονίζεται υπό κλίμακα η επιφάνεια του εδάφους επάνω σε ένα επίπεδο*. Ο διαχωρισμός είναι σαφής. Ενώ στον ορισμό του Helmert συμπεριλαμβάνονται φαινόμενα και παρατηρήσεις



που περιγράφουν τη γη στο σύνολό της, η επιστήμη της Τοπογραφίας περιορίζεται σε πολύ μικρότερες εκτάσεις, αφού το τελικό προϊόν μιας τοπογραφικής μελέτης - το τοπογραφικό διάγραμμα ή ο τοπογραφικός χάρτης - αποτελεί μια απεικόνιση του υπό μελέτη κομματιού της γήινης επιφάνειας στο επίπεδο του χάρτη με μορφή σχεδίου υπό κλίμακα. Η Τοπογραφία περιορίζεται λοιπόν σε μελέτες μικρής έκτασης, όπου η έννοια του επιπέδου είναι κυρίαρχη αλλά και επιτρεπτή. Η πολυπλοκότητα της πραγματικής τοπογραφικής επιφάνειας και ο χαρακτήρας των οργάνων και των μεθόδων μέτρησης που χρησιμοποιούνται για τις τοπογραφικές εφαρμογές είναι τέτοια, που δεν επιτρέπουν τη γενίκευση της χρήσης του επιπέδου παρά μόνον κάτω από κάποιες προϋποθέσεις, που υπεισέρχονται μάλιστα και στο μοντέλο παρατήρησης ως αναγκαίες παραδοχές και προσεγγίσεις που θα αναλύσουμε με λεπτομέρεια στα επόμενα κεφάλαια.

Το βασικό μαθηματικό αντικείμενο της Τοπογραφίας είναι ο προσδιορισμός χαρακτηριστικών σημείων του χώρου με τη μορφή συντεταγμένων σε κάποιο τοπικό σύστημα αναφοράς. Η γνώση αυτών των συντεταγμένων επιτρέπει στη συνέχεια την απεικόνιση των σημείων στο οριζόντιο επίπεδο του τοπογραφικού διαγράμματος περιγράφοντας με αυτόν τον τρόπο κατασκευές, κτίσματα, όρια ιδιοκτησιών και γενικά το σύνολο των ανθρώπινων παρεμβάσεων στην περιοχή που έχει αποτυπωθεί. Ο ζητούμενος προσδιορισμός έχει από μαθηματική άποψη καθαρά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί πλήρως με τα υπολογιστικά εργαλεία της κλασικής αναλυτικής γεωμετρίας. Ωστόσο, καθώς πραγματοποιείται μέσα στο φυσικό περιβάλλον των μετρήσεων με τη βοήθεια κάποιου τοπογραφικού μετρητικού συστήματος, αδυνατεί να παρέχει ένα μονοσήμαντο αποτέλεσμα. Αυτό σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος των μετρήσεων, όπως η επίδραση της διάθλασης της ατμόσφαιρας και η χρονική μεταβολή της κατά τη διάρκεια της ημέρας, η διαφορά στη διεύθυνση της κατακορύφου ανάμεσα σε δύο οποιαδήποτε σημεία του χώρου, οι μεταβαλλόμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της ημέρας που επιδρούν σε διάφορες μετρούμενες παραμέτρους, επηρεάζουν την ακρίβεια του προσδιορισμού της θέσης των επιλεγμένων σημείων του πεδίου. Κυρίως όμως η ακρίβεια του προσδιορισμού των εν λόγω σημείων είναι άμεσα εξαρτημένη από την κατασκευαστική τελειότητα των τοπογραφικών οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιούνται ή που είναι διαθέσιμα για το σκοπό αυτό.

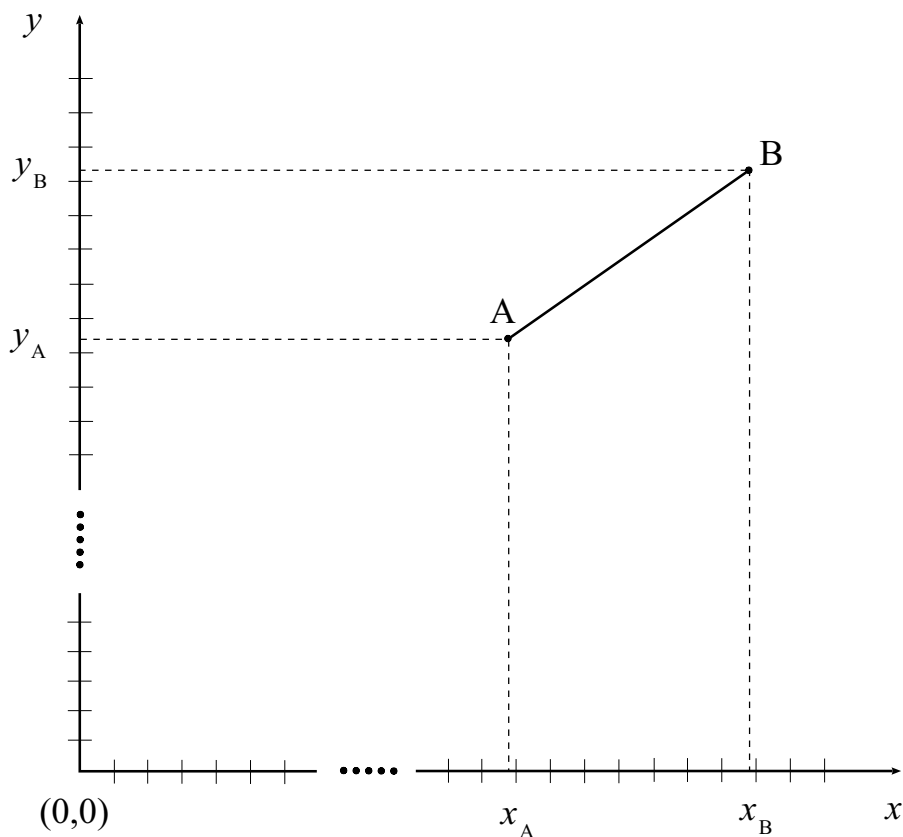
Ας εξετάσουμε για παράδειγμα, το θεμελιώδες πρόβλημα του υπολογισμού της απόστασης μεταξύ δύο σημείων Α και Β που ανήκουν σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο. Για τη μαθηματική επίλυση του προβλήματος είναι απαραίτητος ο ορισμός κάποιου κοινού συστήματος συντεταγμένων στο ίδιο επίπεδο και ο προσδιορισμός των συντε-



Σχήμα 1.1: Γεωμετρική περιγραφή του προβλήματος υπολογισμού της απόστασης μεταξύ δύο σημείων A και B που ανήκουν σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο

ταγμένων  $(x_A, y_A)$  και  $(x_B, y_B)$  των δύο σημείων A και B αντίστοιχα ως προς αυτό το σύστημα. Γνωρίζοντας την αριθμητική τιμή των συντεταγμένων ο υπολογισμός της ζητούμενης απόστασης αποτελεί μία απλή άσκηση της ευκλείδειας γεωμετρίας με το μονοσήμαντο αποτέλεσμα  $\bar{s}_{AB} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}$ . Ωστόσο, αυτός ο υπολογισμός μπορεί να χαρακτηριστεί ως μονοσήμαντος με τη βασική προϋπόθεση ότι οι τιμές  $x_A, x_B, y_A$  και  $y_B$  αποτελούν κατά απόλυτο τρόπο γνωστές αριθμητικές τιμές, δεν είναι με άλλα λόγια επηρεασμένες από κανενός είδους αβεβαιότητες ή σφάλματα. Στα πλαίσια αφηρημένων προβλημάτων της αναλυτικής γεωμετρίας μία τέτοια παραδοχή είναι επιτρεπτή. Ορίζεται ένα τρίτο σημείο στο εν λόγω επίπεδο ως η αφετηρία του κοινού συστήματος συντεταγμένων και δύο κάθετοι μεταξύ τους άξονες που τέμνονται στην αφετηρία. Η αφετηρία του συστήματος αποκτά εξ ορισμού τις συντεταγμένες  $(0, 0)$ , ενώ οι συντεταγμένες  $x_A, x_B, y_A$  και  $y_B$  προκύπτουν μετρώντας την απόσταση των δύο σημείων A και B από τους αντίστοιχους άξονες. Καθώς η απόσταση ενός σημείου από ευθεία ορίζεται στην αναλυτική γεωμετρία ως το μέτρο του κάθετου ευθύγραμμου τμήματος από το σημείο προς την ευθεία, μια ισοδύναμη έκφραση για τις παραπάνω συντεταγμένες προκύπτει ως το μέτρο της παράλληλης μετατόπισης των αξόνων από την αφετηρία του συστήματος μέχρι τα σημεία A και B.

Για τον τρόπο ορισμού των συστημάτων αναφοράς και των συστημάτων συντεταγμένων θα αναφερθούμε αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Είναι όμως προφανές ότι στη διαμόρφωση των τελικών αριθμητικών τιμών των συντεταγμένων σημαντικό ρόλο παίζει ο τρόπος ορισμού των αξόνων καθώς και ο τρόπος υποδιαίρεσής τους στα στοιχειώδη τμήματα ίσου μήκους, τα οποία αποτελούν και τη βάση για τον πρακτικό υπολογισμό των  $x_A, x_B, y_A$  και  $y_B$ . Εάν για παράδειγμα εξετάσουμε το συγκεκριμένο πρόβλημα στο επίπεδο του χαρτιού, τότε τα στοιχειώδη τμήματα που μόλις αναφέρθηκαν ταυτίζονται με τις μικρότερες υποδιαίρεσεις του χάρακα που χρησιμοποιούμε για τη μέτρηση της απόστασης των σημείων από τους αντίστοιχους άξονες. Εάν



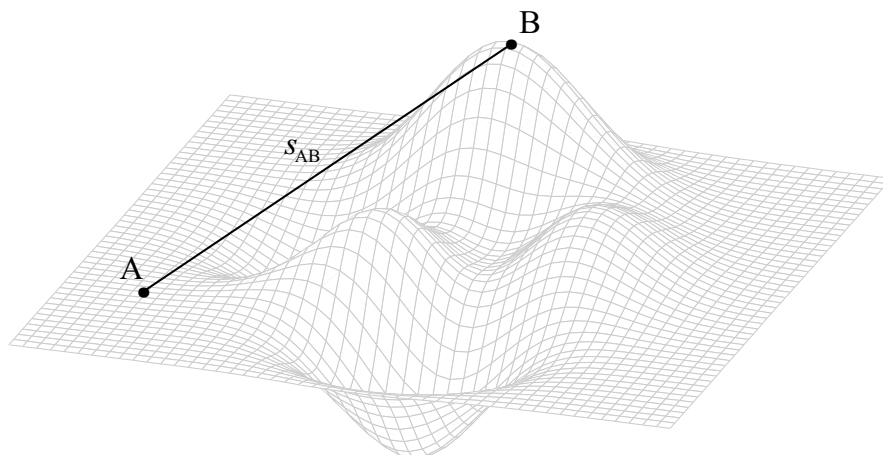
Σχήμα 1.2: Ο υπολογισμός της οριζόντιας απόστασης απαιτεί τον ορισμό συντεταγμένων για τα δύο συνεπίπεδα σημεία

υποθέσουμε ότι (1) η καθετότητα των αξόνων των συντεταγμένων έχει επιτευχθεί με απόλυτο τρόπο, (2) τα τμήματα που περιγράφουν την απόσταση των σημείων A και B από τους άξονες είναι απόλυτα κάθετα σε αυτούς, (3) η μέτρηση με το χάρακα του μήκους των τμημάτων δε συνοδεύεται από καμία πηγή σφάλματος (π.χ. σφάλμα ανάγνωσης της αληθούς τιμής υποδιαίρεσης του χάρακα ή αδυναμία ταύτισης της συγκεκριμένης υποδιαίρεσης με το αντίστοιχο σημείο στο χαρτί) και (4) ο χάρακας που χρησιμοποιούμε δε φέρει κάποιο συστηματικό σφάλμα, όπως σφάλμα υποδιαίρεσης ή σφάλμα κλίμακας, τότε μπορούμε να πούμε ότι ο υπολογισμός της απόστασης  $\bar{s}_{AB}$  με το μαθηματικό τύπο που αναφέρθηκε παραπάνω είναι και μονοσήμαντος και απαλλαγμένος από σφάλματα τόσο του μοντέλου περιγραφής του προβλήματος όσο και του μετρητικού συστήματος (χάρακας) που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

Εάν όμως το προηγούμενο θεωρητικό πρόβλημα έχει μονοσήμαντη λύση μόνο κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις τα πράγματα γίνονται ακόμη πιο πολύπλοκα τόσο

από πλευράς μοντέλου όσο και από πλευράς απαιτήσεων για ακρίβεια των χρησιμοποιούμενων μετρητικών συστημάτων, όταν αναφερόμαστε στον προσδιορισμό της θέσης χαρακτηριστικών σημείων του χώρου κατά τη διεξαγωγή τυπικών τοπογραφικών εργασιών. Σε αυτήν την περίπτωση οι συντεταγμένες ενός σημείου δεν είναι ποτέ ποσότητες γνωστές κατά μία απόλυτη έννοια, αλλά είναι το αποτέλεσμα της επεξεργασίας κάποιων πρωτογενών δεδομένων που έχουν συλλεχθεί στο πεδίο με κάποιο από τα διαθέσιμα τοπογραφικά όργανα μετρήσεων. Ανάλογα με την ορθότητα των γεωμετρικών σχέσεων και των χαρακτηριστικών των μηχανικών μερών που συνθέτουν το εσωτερικό των τοπογραφικών οργάνων που θα χρησιμοποιηθούν για τις αναγκαίες μετρήσεις πεδίου και ανάλογα με το κατά πόσο τα χαρακτηριστικά αυτά παραμένουν σταθερά με το πέρασμα του χρόνου ή τις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες εμφανίζονται συγκεκριμένα σφάλματα στις μετρήσεις. Έτσι παρατηρείται το γεγονός οι αριθμητικές τιμές του ίδιου γεωμετρικού μεγέθους στο πεδίο με το ίδιο μετρητικό σύστημα να διαφέρουν μεταξύ τους όταν η μέτρηση έχει επαναληφθεί σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Στην ουσία η αληθινή τιμή οποιουδήποτε γεωμετρικού ή φυσικού μεγέθους που παρατηρείται στα πλαίσια μιας τοπογραφικής εφαρμογής αποτελεί πάντοτε μία άγνωστη παράμετρο. Το γεγονός αυτό μάλιστα δεν αλλάζει ακόμα και με την επαναλαμβανόμενη μέτρηση του ίδιου μεγέθους με το ίδιο μετρητικό σύστημα. Αυτό που επιχειρούμε κάθε φορά είναι, εκμεταλλευόμενοι την τεχνολογική εξέλιξη που μας προσφέρει για όλο το φάσμα των εφαρμοσμένων επιστημών κατασκευαστικά όλο και τελειότερα βασικά όργανα μέτρησης και βοηθητικές μετρητικές διατάξεις, να μετρήσουμε ένα συγκεκριμένο γεωμετρικό (ή φυσικό σε ορισμένες περιπτώσεις) μέγεθος στον τρισδιάστατο χώρο με όλο και μεγαλύτερη ακρίβεια. Η διαφορά μεταξύ του θεωρητικά αγνώστου παρατηρούμενου μεγέθους και μίας μεμονωμένης παρατήρησης εκφράζει το σφάλμα της μέτρησης, για το οποίο ειδικά στην Τοπογραφία διακρίνουμε συνολικά τρεις συνιστώσες, το συστηματικό, το τυχαίο και το χονδροειδές σφάλμα. Η θεωρία σφαλμάτων και ανάλυσης των δεδομένων, που αποτελεί μία άλλη βασική συνιστώσα της εκπαίδευσης του Τοπογράφου Μηχανικού, αναλύει σε λεπτομέρεια τις έννοιες αυτές και τις συνδέει στην περίπτωση της Τοπογραφίας με τις πρακτικές τοπογραφικές μετρήσεις (διευθύνσεις, γωνίες και αποστάσεις) που συλλέγονται από τα αντίστοιχα όργανα μετρήσεων στο πεδίο.

Πέρα όμως από τον κατασκευαστικό παράγοντα που υπεισέρχεται στην ποιότητα των τοπογραφικών μετρήσεων (μία έννοια που συνδυάζει την ακρίβεια και την αξιοπιστία), εξίσου σημαντικός είναι και ο ορισμός του μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει το συγκεκριμένο πρόβλημα όταν αναφερόμαστε σε πραγματικές τοπογραφικές εφαρμογές. Πόσο ορθή είναι η μαθηματική περιγραφή του μοντέλου και πόσο ρεαλιστικά περιγράφει το ζητούμενο πρόβλημα στο πλαίσιο του φυσικού περιβάλλοντος των με-



Σχήμα 1.3: Το πρόβλημα του προσδιορισμού της κεκλιμένης απόστασης  $s_{AB}$  μεταξύ δύο σημείων A και B στο χώρο

τήσεων; Χαρακτηριστική είναι και πάλι η περίπτωση του υπολογισμού της απόστασης που ορίζουν δύο σημεία A και B όταν αυτά αναφέρονται στον πραγματικό τρισδιάστατο χώρο. Σε αντίθεση με την τελευταία περίπτωση όπου το επίπεδο στο οποίο ορίζονται τα δύο σημεία ταυτίζεται με το επίπεδο υπολογισμού όλων των σχετικών γεωμετρικών ποσοτήτων (επίπεδο του χαρτιού) στο νέο πρόβλημα απαιτείται προσεκτικός ορισμός ενός επιπέδου αναφοράς επάνω στο οποίο θα εφαρμοστούν οι βασικές αρχές της επίπεδης αναλυτικής γεωμετρίας που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ο λόγος είναι ότι η ευθεία AB τέμνεται στο χώρο με έναν άπειρο αριθμό διαφορετικών επιπέδων. Θεωρητικά κάθε ένα από αυτά τα επίπεδα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως το επίπεδο υπολογισμού της απόστασης  $\bar{s}_{AB}$  με τον τρόπο που περιγράψαμε προηγουμένως. Καθώς ο υπολογισμός της συγκεκριμένης απόστασης εντάσσεται στην τοπογραφική αποτύπωση μιας ευρύτερης περιοχής, εισάγεται η έννοια του *οριζοντίου επιπέδου*. Πρόκειται για μία γεωμετρική ποσότητα με ξεχωριστή φυσική ερμηνεία, που περιγράφει με ενιαίο τρόπο την περιοχή μελέτης και θα εξεταστεί αναλυτικά στη συνέχεια.

Έτσι, το ζητούμενο του υπολογισμού της οριζόντιας απόστασης μεταξύ δύο σημείων A και B στο χώρο ανάγεται σε ένα πρόβλημα που απαιτεί δύο ξεχωριστά βήματα. Στο πρώτο βήμα πραγματοποιείται η μέτρηση της *κεκλιμένης απόστασης* που ορίζουν τα δύο φυσικά σημεία A και B στο χώρο χρησιμοποιώντας κάποιο από τα διαθέσιμα για το σκοπό αυτό *όργανα μέτρησης αποστάσεων*, ενώ στο δεύτερο βήμα πραγματοποιείται η αναγωγή της κεκλιμένης απόστασης στο οριζόντιο επίπεδο. Σε κάποιες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στον υπολογισμό υψομετρικών διαφορών μέσω μιας

τριγωνομετρικής χωροστάθμησης, ζητούμενο είναι το μέτρο της κεκλιμένης απόστασης  $s_{AB}$ . Σε κάθε περίπτωση όμως απαιτούνται κάποια διακριτά βήματα στο πεδίο που επιτρέπουν την πρακτική μέτρηση της απόστασης μεταξύ δύο σημείων. Αρχικά απαιτείται η υλοποίηση των σημείων με κάποιον ευδιάκριτο τρόπο επάνω στην τοπογραφική επιφάνεια. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται διάφορα βοηθητικά εξαρτήματα όπως καρφιά ή πάσσαλοι, που επιτρέπουν, ανάλογα με την εφαρμογή, μία προσωρινή ή πιο μακροπρόθεσμη σήμανση του σημείου στο πεδίο. Το ευθύγραμμο τμήμα που νοητά συνδέει τα δύο σημεία (κορυφή των καρφιών ή πασσάλων που έχουν πακτωθεί κατάλληλα στο έδαφος) μας δίνει την κεκλιμένη τους απόσταση στις τρεις διαστάσεις. Με την εμπλοκή μιας σειράς μετρητικών οργάνων και βοηθητικών κατασκευών που θα περιγράψουμε στη συνέχεια, προσπαθούμε να υπολογίσουμε την καλύτερη δυνατή εκτίμηση για το μέτρο της κεκλιμένης αυτής απόστασης καθώς και της προβολής της στο οριζόντιο επίπεδο που έχει οριστεί ενιαία για την περιοχή. Η ακρίβεια των τοπογραφικών οργάνων, η πιστότητα του μαθηματικού μοντέλου και το γεγονός ότι όλες οι μετρήσεις πραγματοποιούνται στο ιδιαίτερα πολύπλοκο περιβάλλον των κατώτερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας δίνουν ένα μέτρο της πολυπλοκότητας του απλού αυτού εγχειρήματος ενός πρακτικού υπολογισμού της απόστασης μεταξύ δύο σημείων στο χώρο. Εάν στο σημείο αυτό συνυπολογίσουμε το γεγονός ότι υπάρχει γενικά μια απαίτηση των αποδεκτών μιας τοπογραφικής εργασίας για αυξημένη ακρίβεια και αξιοπιστία του τελικού προϊόντος, τότε καταδεικνύεται με τον καλύτερο τρόπο η ιδιαίτερα αυξημένη απαίτηση της Τοπογραφίας για *ακρίβεια* σε όλα τα επίπεδα: (α) στη μαθηματική διατύπωση του μοντέλου παρατήρησης, (β) στη συλλογή των δεδομένων από τα τοπογραφικά όργανα μέτρησης, (γ) στη διαδικασία ανάλυσης και επεξεργασίας των μετρήσεων πεδίου για τον υπολογισμό των ζητούμενων παράγωγων γεωμετρικών ποσοτήτων και τέλος (δ) στον υπολογισμό της ακρίβειας των τελικών αποτελεσμάτων.

Εάν κάποιος επιθυμούσε να περιγράψει το ρόλο της Τοπογραφίας, αλλά και της Γεωδαισίας γενικότερα, θα μπορούσε να πει ότι πρόκειται για εκείνες τις επιστήμες που επιχειρούν να υλοποιήσουν στην πράξη αφηρημένες μαθηματικές και φυσικές έννοιες, όπως αυτές των συντεταγμένων, των συστημάτων αναφοράς και των συστημάτων συντεταγμένων ή του υψομέτρου και των υψομετρικών διαφορών. Για παράδειγμα, επιστήμες όπως η Φυσική ή τα Μαθηματικά χρησιμοποιούν για τις δικές τους εφαρμογές κατά κόρον γεωδαιτικές έννοιες, όπως το ύψος, τη γεωδαισιακή γραμμή ή το χάρτη, χωρίς συνήθως να αναφέρονται στις συγκεκριμένες μεθόδους υλοποίησης ή μέτρησης αυτών των μεγεθών. Από τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω μπορεί κανείς να φανταστεί τις ιδιαίτερες απαιτήσεις και τον ιδιαίτερο χαρακτήρα της Τοπογραφίας σε σχέση με άλλες επιστήμες, ή το γιατί έχει αποκτήσει τον επιθετικό προσδιορισμό

της επιστήμης των πολλών δεκαδικών. Ακριβώς λόγω της φύσης του αντικειμένου της η Τοπογραφία δεν μπορεί να ισχυριστεί την απόλυτη ορθότητα των αποτελεσμάτων της, πάντα από μία αυστηρή μαθηματική σκοπιά. Μπορεί όμως να ισχυριστεί ότι, με βάση το μαθηματικό μοντέλο που υιοθετήθηκε και κάτω από τις δεδομένες εξωτερικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη χρονική στιγμή των μετρήσεων, οι αριθμητικές τιμές των τελικών αποτελεσμάτων βρίσκονται μέσα στα όρια ακρίβειας και αξιοπιστίας που καθορίζονται από τα αντίστοιχα στατιστικά εργαλεία των μεθόδων ανάλυσης των δεδομένων και συνόρθωσης των παρατηρήσεων που έχουν συλλεχθεί στο πεδίο. Έτσι, ενώ δεν φιλοδοξούν να παράγουν αποτελέσματα που να είναι απαλλαγμένα από κάθε ίχνος σφάλματος ή αβεβαιότητας, οι τεχνικές μέτρησης και οι μέθοδοι υπολογισμού της Τοπογραφίας είναι σε θέση να μας παρέχουν την καλύτερη δυνατή εκτίμηση για το μέτρο συγκεκριμένων γεωμετρικών μεγεθών που περιγράφουν τη σχετική θέση χαρακτηριστικών σημείων επάνω στην επιφάνεια της γης καθώς και να εκφράσουν ποσοτικά την ακρίβεια της τελικής απόδοσης αυτής της πληροφορίας επάνω στο επίπεδο του τοπογραφικού διαγράμματος. Η εκτίμηση της ακρίβειας των τελικών αποτελεσμάτων προέρχεται από την εφαρμογή αναλυτικών στατιστικών κανόνων και αντικατοπτρίζει αφενός τις μετρητικές ικανότητες ή ισοδύναμα τα επίπεδα ακρίβειας των τοπογραφικών οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις πεδίου, αφετέρου δε την ποιότητα των μετρήσεων και την εμπειρία της ομάδας που τις πραγματοποίησε.

Ο σκοπός των αρχών και μεθόδων που περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια είναι πρωτίστως να αναλυθούν οι αρχές λειτουργίας των οργάνων μέτρησης και οι μέθοδοι προσδιορισμού της θέσης σημείων της γήινης επιφάνειας επάνω στο επίπεδο ενός τοπογραφικού διαγράμματος. Ωστόσο, το τελικό προϊόν αυτής της διαδικασίας, που είναι ένας κατάλογος συντεταγμένων χαρακτηριστικών σημείων του εδάφους ως προς κάποιο κατάλληλα ορισμένο τοπικό ή υπερκείμενο σύστημα συντεταγμένων, πρέπει να εξετάζεται στο πλαίσιο της μελλοντικής αξιοποίησης αυτής της πληροφορίας από μία ευρύτερη ομάδα χρηστών. Καθώς τα σημεία του χώρου που προσδιορίζονται μέσα από μία κλασική τοπογραφική αποτύπωση περιγράφουν την κατάσταση ενός κτίσματος ή μιας κατασκευής τη δεδομένη χρονική στιγμή, θα πρέπει, στα πλαίσια ενός σωστά οργανωμένου τοπογραφικού σχεδιασμού, τόσο οι τοπογραφικές μετρήσεις όσο και οι αντίστοιχοι υπολογισμοί να αποθηκεύονται κατάλληλα σε ένα *Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών* και να είναι προσβάσιμα για μελλοντικές εφαρμογές. Σε αυτήν την κατάλληλα διαμορφωμένη ηλεκτρονική βάση δεδομένων θα πρέπει να καταχωρούνται όλα εκείνα τα στοιχεία, που θα επιτρέπουν την παρακολούθηση και την τεκμηρίωση των οποιωνδήποτε μεταβολών της φυσικής επιφάνειας της γης, είτε λόγω φυσικών φαινομένων (σεισμοί, πλημμύρες, φυσικές καταστροφές), είτε εξαιτίας της

ανάγκης εφαρμογής διαφόρων δικαστικών αποφάσεων (αλλαγή ορίων ιδιοκτησιών, πράξεις εφαρμογής κ.λπ.). Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι, ενώ η έννοια του γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών πρέπει να αποτελεί ένα αναπόσπαστο τμήμα ενός σωστά οργανωμένου *Εθνικού Κτηματολογίου*, η εφαρμογή ηλεκτρονικών βάσεων δεδομένων για την καταγραφή μετρήσεων και υπολογισμών σε διαφορετικές χρονικές περιόδους αποτελεί βασική αρχή υλοποίησης μιας μεγάλης κατηγορίας εφαρμογών με υψηλές απαιτήσεις σε ακρίβεια όπως βιομηχανικές εφαρμογές, διανοίξεις σηράγγων και τούνελ, παρακολούθηση παραμορφώσεων τεχνικών έργων κ.λπ.