



UNIVERSITY OF
PATRAS
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

Σημειώσεις διαλέξεων «Στοιχεία Γεωδαισίας»

Διάλεξη 7
16/05/2023

Λευθεριώτης Γεώργιος
Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
Πανεπιστήμιο Πατρών

Υψομετρία

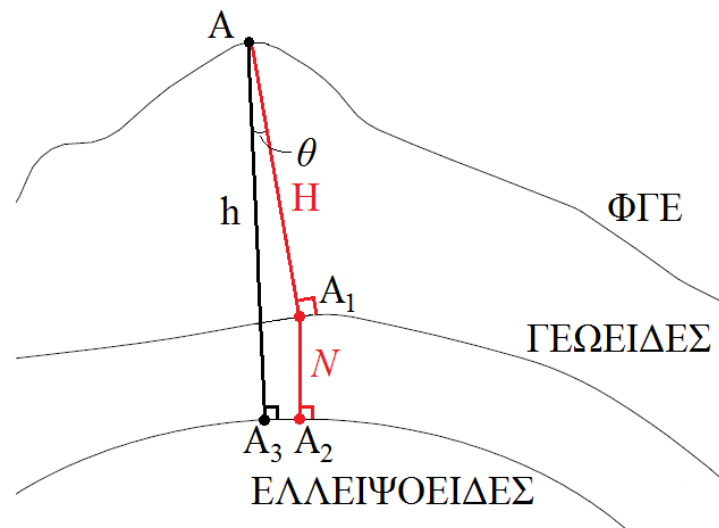
ΓΕΝΙΚΑ

- Η θέση ενός σημείου στο χώρο ορίζεται με βάση τις συντεταγμένες του (X, Y, Z) ως προς ένα καρτεσιανό σύστημα αναφοράς.
- Τις περισσότερες φορές όμως η θέση ενός σημείου στο χώρο ορίζεται με τις συντεταγμένες του πάνω σε μια επιφάνεια αναφοράς (**γεωγραφικές ή γεωδαιτικές συντεταγμένες**) ή στο προβολικό επίπεδο μιας χαρτογραφικής απεικόνισης (**ορθογώνιες συντεταγμένες x, y**) και την απόσταση του σημείου από την επιφάνεια αναφοράς.
- Το σύνολο των εργασιών που αποσκοπούν στον προσδιορισμό των υψομέτρων των σημείων, ονομάζεται **Υψομετρία**.
- Αντικείμενο της **υψομετρίας** αποτελεί ο προσδιορισμός της απόστασης των σημείων της Φυσικής Γήινης Επιφάνειας (ΦΓΕ) ή κάποιων τεχνικών έργων από μια επιφάνεια αναφοράς.

Υψομετρία

Ορισμοί

- **Υψόμετρο** σημείου ονομάζεται η απόστασή του από μια επιφάνεια αναφοράς
- Αν η επιφάνεια αναφοράς είναι το ελλειψοειδές εκ περιστροφής (ΕΕΠ) τότε το υψόμετρο ονομάζεται **γεωμετρικό υψόμετρο (h)** και η απόσταση μετριέται κατά την κάθετη από το σημείο προς το ελλειψοειδές. Σήμερα τα γεωμετρικά υψόμετρα προσδιορίζονται από παρατηρήσεις σε τεχνητούς δορυφόρους (π.χ. συστήματα GPS).
- Αν η επιφάνεια αναφοράς είναι το γεωειδές, τότε το υψόμετρο ονομάζεται **ορθομετρικό υψόμετρο (H)** και η απόσταση μετριέται κατά τη διεύθυνση της βαρύτητας, δηλαδή κατά μήκος της κατακορύφου.
- Το ορθομετρικό υψόμετρο ονομάζεται αλλιώς και **απόλυτο υψόμετρο**.



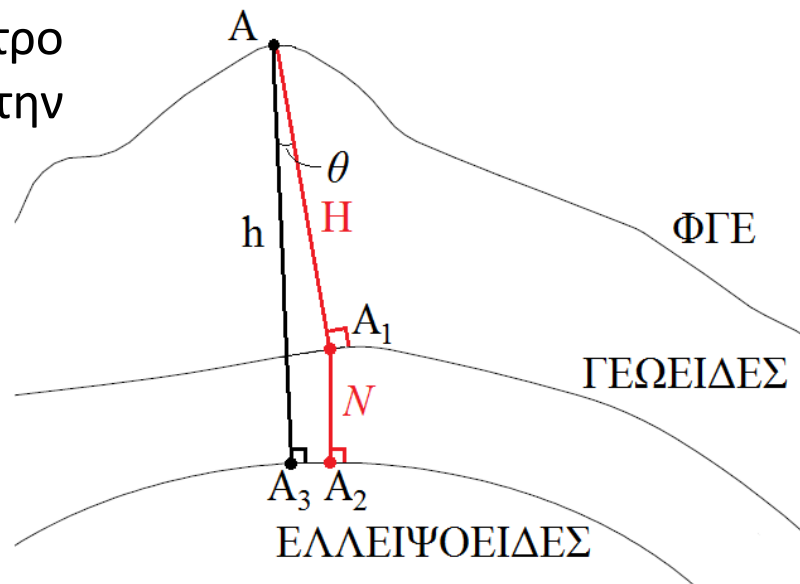
Υψομετρία

Ορισμοί

- Οι δύο επιφάνειες (γεωειδές – ελλειψοειδές) δεν είναι παράλληλες μεταξύ τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην ταυτίζονται η κατακόρυφος και η κάθετη αλλά να σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία ϑ που ονομάζεται **απόκλιση**.
- Η απόκλιση της κατακορύφου είναι διανυσματικό μέγεθος με συνιστώσες (ξ) στη διεύθυνση βορρά – νότου και (η) στη διεύθυνση ανατολής – δύσης.
- Το γεωμετρικό και το ορθομετρικό υψόμετρο ενός σημείου συνδέονται μεταξύ τους με την ακόλουθη σχέση:

$$h = H + N$$

όπου: N είναι το υψόμετρο του γεωειδούς ως προς το ελλειψοειδές αναφοράς.

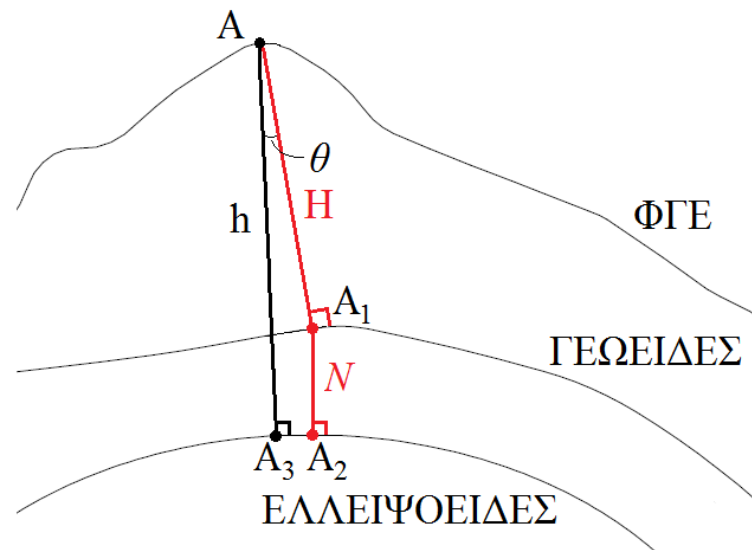


Υψομετρία

Ορισμοί

$$h = H + N$$

- Η παραπάνω σχέση λόγω της απόκλισης (ϑ) δεν ισχύει αυστηρά μαθηματικά.
- Η ϑ όμως είναι πολύ μικρή και μπορεί να θεωρηθεί $\vartheta \approx 0$, οπότε τα h , H , N μπορούν να θεωρηθούν συγγραμμικά, με ασήμαντο λάθος.
- Η απόκλιση της κατακορύφου στον Ελλαδικό χώρο είναι της τάξης των $10''$.
- Σε ολόκληρη τη Γη η γωνία ϑ είναι μικρότερη από $1'$, ενώ τα μεγαλύτερα υψόμετρα του γεωειδούς δεν ξεπερνούν συνήθως τα 100 m.



$$\theta < 1'$$

$$N < 100m$$

Υψομετρία

Ορισμοί

- **Υψομετρική διαφορά** μεταξύ δύο σημείων **A** και **B** ονομάζεται η διαφορά των υψομέτρων τους.
- Η **ορθομετρική υψομετρική διαφορά** (ΔH_{AB}) και η **γεωμετρική υψομετρική διαφορά** (Δh_{AB}) ορίζονται αντίστοιχα:

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A$$

$$\Delta h_{AB} = h_B - h_A$$

Επίσης: $\Delta h_{AB} = h_B - h_A = (H_B + N_B) - (H_A + N_A) = (H_B - H_A) + (N_B - N_A) = \Delta H_{AB} + \Delta N_{AB}$

Από τις παραπάνω σχέσεις διαπιστώνουμε ότι :

- Αν το σημείο B είναι ψηλότερα από το A ($H_B > H_A$), η υψομετρική διαφορά ΔH_{AB} είναι θετική, ενώ στην αντίθετη περίπτωση, ($H_B < H_A$) είναι αρνητική.
- Το υψόμετρο του σημείου B μπορεί να προσδιορισθεί αν είναι γνωστό το υψόμετρο του A και μετρηθεί ή προσδιορισθεί η υψομετρική διαφορά ΔH_{AB} :

$$H_B = H_A + \Delta H_{AB}$$

Υψομετρία

Μέση Στάθμη Θάλασσας (ΜΣΘ)

- Επιφάνεια αναφοράς των ορθομετρικών υψομέτρων είναι το **γεωειδές**. Το γεωειδές είναι μια ανώμαλη επιφάνεια που δεν περιγράφεται με κλειστές αναλυτικές σχέσεις. Στην πράξη υλοποιείται από την **Μέση Στάθμη της Θάλασσας (ΜΣΘ)** με ακρίβεια της τάξης του $\pm 1\text{m}$ για ολόκληρη τη γη.
- Ο προσδιορισμός της **ΜΣΘ** γίνεται αφού ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις των παλιρροιών, των θαλάσσιων ρευμάτων και κυματισμών, των μεταβολών της ατμοσφαιρικής πίεσης, των διαφορών στην πυκνότητα του θαλάσσιου νερού, της τήξης των παγετώνων, των τεκτονικών κινήσεων του φλοιού της γης κ.λπ.
- Ο προσδιορισμός της ΜΣΘ, δηλαδή της χωροσταθμικής επιφάνειας με μηδενικό υψόμετρο, γίνεται μετά από μακροχρόνιες καταγραφές των διακυμάνσεών της (20 ή 30 ετών), με ειδικά όργανα **τους παλιρροιογράφους**.
- Οι μεταβολές της στάθμης της θάλασσας καταγράφονται ψηφιακά ως προς ένα σημείο αναφοράς, το μηδέν του παλιρροιογράφου. Μετά την απαλοιφή των επιδράσεων προσδιορίζεται η ΜΣΘ ως προς το σημείο αναφοράς.

Στοιχεία Γεωδαισίας

8/45

Παλιρροιογράφος

Αίγιο



<https://tempo24.news/eidisi/54367/leitoyrgei-kanonika-o-palirroioγραφος-sto-neo-limani-aigioy>

Σαντορίνη



<https://archive.cretalive.gr/a/view/palirroioγραφος-sth-santorinh/culture/74520>

Υψομετρία

Μέση Στάθμη Θάλασσας (ΜΣΘ)

- Από την ανάλυση των καταγραφών των διάφορων παλιρροιογράφων οι οποίοι είναι εγκαταστημένοι σε διαφορετικά σημεία μιας χώρας, προσδιορίζονται οι μεταβολές της ΜΣΘ ως προς ένα παλιρροιογράφο αναφοράς.
- Η ΜΣΘ μπορεί να προσδιορισθεί με ακρίβεια μερικών δεκάτων του μέτρου με τη χρήση παλιρροιόμετρου. Το **παλιρροιόμετρο** είναι ένας διαιρεμένος πήχης πακτωμένος σε μέρος σταθερό και προστατευμένο από κυματισμούς, ώστε τμήμα των υποδιαιρέσεων του να είναι βυθισμένο μέσα στο νερό. Με την καταγραφή των μεταβολών της στάθμης ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. ανά 1 ώρα) για μερικά 24ωρα προσδιορίζεται η ΜΣΘ για την περιοχή.
- Σήμερα, η ΜΣΘ προσδιορίζεται μέσω της δορυφορικής αλτιμετρίας. Με χρήση δορυφόρων εξοπλισμένων με αλτίμετρα (ειδικά ραντάρ) προσδιορίζεται η απόσταση του δορυφόρου από τη στιγμιαία επιφάνεια της θάλασσας. Με χρήση επαναλαμβανόμενων μετρήσεων εύρους μερικών ετών, προσδιορίζεται η ΜΣΘ ως ο μέσος όρος των μετρήσεων στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα.

Στοιχεία Γεωδαισίας

10/45

Παλιρροιόμετρο

Morehead City (North Carolina, USA)



<https://nckingtides.web.unc.edu/water-level-gauges/>

Υψομετρία

Υψομετρικό Σύστημα Αναφοράς

- Αφού ορισθεί η επιφάνεια αναφοράς των υψομέτρων, ιδρύεται στη συνέχεια το **Υψομετρικό Σύστημα Αναφοράς**.
- Σε μικρή απόσταση από τον παλιρροιογράφο αναφοράς, σε ασφαλή και σταθερή θέση, υλοποιείται ένα βασικό σημείο αναφοράς **R** του οποίου η θέση προσδιορίζεται υψομετρικά ως προς το μηδέν του παλιρροιογράφου, δηλαδή μετράται με ακρίβεια η υψομετρική διαφορά τους $\Delta H_{\text{παλιρροιογρ.-R}}$.
- Προσθέτοντας, αλγεβρικά, τη θέση της ΜΣΘ ($H_{\text{ΜΣΘ}}$) ως προς το μηδέν του παλιρροιογράφου, σε αυτή την υψομετρική διαφορά, προσδιορίζεται το ορθομετρικό υψόμετρο του σημείου αναφοράς R ως προς τη ΜΣΘ.

$$H_R = H_{\text{ΜΣΘ}} + \Delta H_{\text{παλιρροιογρ.-R}}$$

- Με τον τρόπο αυτό ιδρύεται το **Υψομετρικό Σύστημα Αναφοράς** μιας χώρας.

Υψομετρία

Υψομετρικό Σύστημα Αναφοράς

- Το Υψομετρικό Σύστημα Αναφοράς για κάθε χώρα υλοποιείται από ένα σύνολο σταθερών σημείων, ομοιόμορφα κατανεμημένων, ώστε να καλύπτουν όλη την έκταση της χώρας. Τα σημεία αυτά ονομάζονται **Χωροσταθμικές ή Υψομετρικές Αφετηρίες**.
- Υλοποιούνται με ειδικά ορειχάλκινες κατασκευές (μπουλόνια) οι οποίες πακτώνονται λίγο ψηλότερα από την επιφάνεια του εδάφους ή τη στάθμη των πεζοδρομίων, σε ασφαλείς και σταθερές θέσεις, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μονιμότητά τους.
- Οι Υψομετρικές αφετηρίες συνδέονται μεταξύ τους με κλειστά πολύγωνα (βρόχους) και αποτελούν το **Χωροσταθμικό ή Υψομετρικό Δίκτυο** της χώρας.
- Ανάλογα με την πυκνότητα κατανομής των σημείων και την ακρίβεια στον προσδιορισμό των υψομέτρων τους, τα χωροσταθμικά Δίκτυα διακρίνονται σε 1^{ης}, 2^{ης}, 3^{ης} τάξης κλπ.

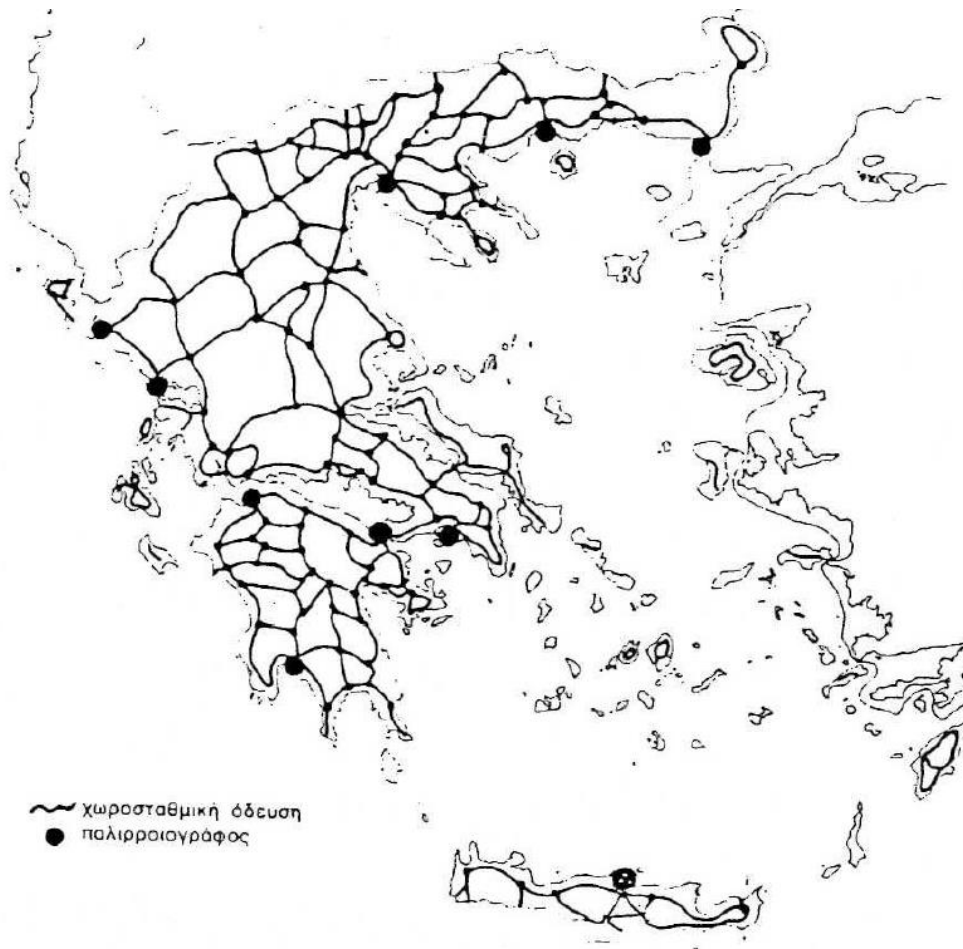
Υψομετρία

Ελληνικό Υψομετρικό Σύστημα Αναφοράς

- Στον Ελληνικό χώρο, ως παλιρροιογράφος αναφοράς χρησιμοποιείται ο **παλιρροιογράφος του Πειραιά**.
- Η ΜΣΘ έχει υπολογισθεί από την Υδρογραφική Υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού, από τις καταγραφές του παλιρροιογράφου το χρονικό διάστημα 1933 – 1978.
- Το βασικό υψομετρικό σημείο αναφοράς είναι η **Χωροσταθμική Αφετηρία R287** η οποία έχει υλοποιηθεί στη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, κοντά στον παλιρροιογράφο του Πειραιά. Το υψόμετρο της ως προς τη ΜΣΘ της περιόδου 1933 – 1978 είναι $HR_{287} = + 14.665m$.
- Το Χωροσταθμικό Δίκτυο της χώρας έχει εξαρτηθεί από αυτή την υψομετρική αφετηρία (R287). Η **Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (ΓΥΣ)** είναι η κρατική υπηρεσία υπεύθυνη για την ίδρυση, τις μετρήσεις και τον προσδιορισμό των υψομέτρων των κορυφών του **Εθνικού Χωροσταθμικού Δικτύου** καθώς και για την αρχειοθέτηση των χωροσταθμικών αφετηριών.

Υψομετρία

Υψομετρικό δίκτυο 1^{ης} και 2^{ης} τάξης της ΓΥ



Υψομετρική Αφετηρία



Υψομετρία

Προσδιορισμός ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών

Ο προσδιορισμός της ορθομετρικής υψομετρικής διαφοράς μεταξύ δύο σημείων γίνεται με μια από τις ακόλουθες μεθόδους:

- **Γεωμετρική χωροστάθμηση:** Είναι η ακριβέστερη μέθοδος προσδιορισμού ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών.

$$\text{Ακρίβεια } \pm 0.3mm/\sqrt{km} \text{ έως } \pm 1mm/\sqrt{km}$$

Με τη μέθοδο γεωμετρικής χωροστάθμησης μετρώνται άμεσα ορθομετρικές υψομετρικές διαφορές, χρησιμοποιώντας ως βασικό όργανο το χωροβάτη και βοηθητικό όργανο ένα διαιρεμένο πήχη (χωροσταθμικός πήχης ή σταδία).

- **Υδραυλική ή υδροστατική χωροστάθμηση:** Μέθοδος αντίστοιχης ακρίβειας με τη γεωμετρική χωροστάθμηση. Με την μέθοδο αυτή μετρώνται άμεσα μικρού μεγέθους ορθομετρικές υψομετρικές διαφορές βάση της αρχής συγκοινωνούντων δοχείων, σύμφωνα με την οποία, οι επιφάνειες του υγρού που ηρεμεί βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο.

Υψομετρία

Προσδιορισμός ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών

- **Τριγωνομετρική υψομετρία:** Με τη συγκεκριμένη μέθοδο προσδιορίζονται ορθομετρικές υψομετρικές διαφορές με ακρίβεια μερικά εκατοστά. Οι διαφορές αυτές προσδιορίζονται έμμεσα από μετρήσεις κατακόρυφων γωνιών και κεκλιμένων μηκών ή οριζόντιων αποστάσεων μεταξύ των σημείων των οποίων ζητείται η υψομετρική διαφορά.
- **Βαρομετρική υψομετρία:** Προσδιορίζονται άμεσα ορθομετρικά υψόμετρα με ακρίβεια της τάξης του $\pm 1\text{m}$. Η μέθοδος βασίζεται στο ότι η ατμοσφαιρική πίεση μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται το υψόμετρο του σημείου. Για τον προσδιορισμό των υψομέτρων χρησιμοποιούνται βαρόμετρα ή αλτίμετρα.

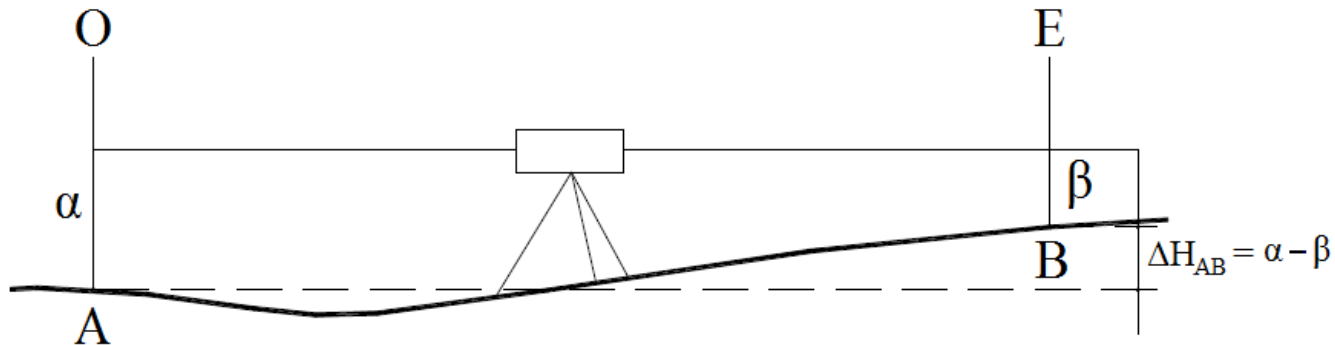
Σημείωση: Στις υψομετρικές ορθομετρικές διαφορές θα πρέπει να γίνει μια ορθομετρική διόρθωση (**OC**) λόγω της μη παραλληλίας των χωροσταθμικών επιφανειών. Η διόρθωση αυτή έχει νόημα σε μεγάλες υψομετρικές διαφορές ή όταν τα σημεία απέχουν πολύ μεταξύ τους.

Υψομετρία

Γεωμετρική Χωροστάθμηση

Αρχή της μεθόδου

- Έστω 2 σημεία **A**, **B** που δεν απέχουν πολύ υψομετρικά και οριζοντιογραφικά.
- Στα σημεία αυτά τοποθετούνται 2 κατακόρυφοι διαιρεμένοι πήχεις (σταδίες). Με το τηλεσκόπιο ενός οργάνου λαμβάνονται οι αναγνώσεις α , β στα A, B.
- Οι αναγνώσεις αυτές αντιστοιχούν στα σημεία που το οριζόντιο επίπεδο του τηλεσκόπιου τέμνει τις σταδίες. Η διαφορά $(\alpha - \beta)$ ισούται με την υψομετρική διαφορά ΔH_{AB} .
- Το όργανο (χωροβάτης) τοποθετείται σε τυχαία θέση ως προς τα A και B.



Υψομετρία

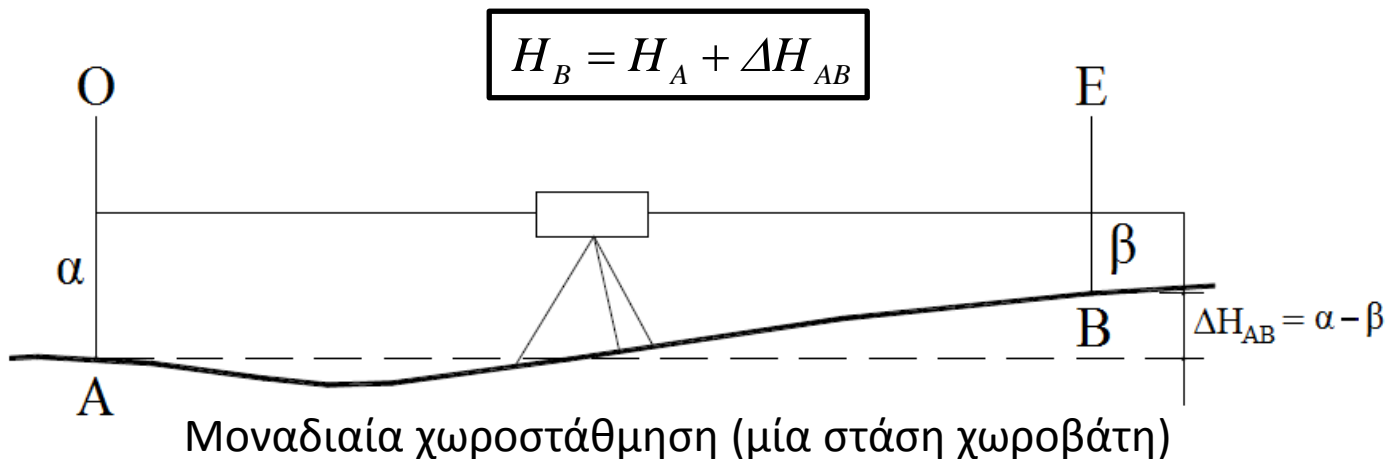
Γεωμετρική Χωροστάθμηση

- Αν από το υψόμετρο του A πρόκειται να προσδιορισθεί το υψόμετρο του B, η ανάγνωση στο σημείο A λαμβάνεται πρώτη και ονομάζεται **Όπισθοσκόπευση** ή **Όπισθεν ανάγνωση (O)**. Αντίστοιχα, η ανάγνωση στο σημείο B ονομάζεται **Εμπροσθοσκόπευση** ή **Έμπροσθεν ανάγνωση (E)**.

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = \alpha - \beta = O - E$$

- Αν είναι γνωστό το υψόμετρο του A τότε το υψόμετρο του B υπολογίζεται από:

$$H_B = H_A + \Delta H_{AB}$$



Υψομετρία

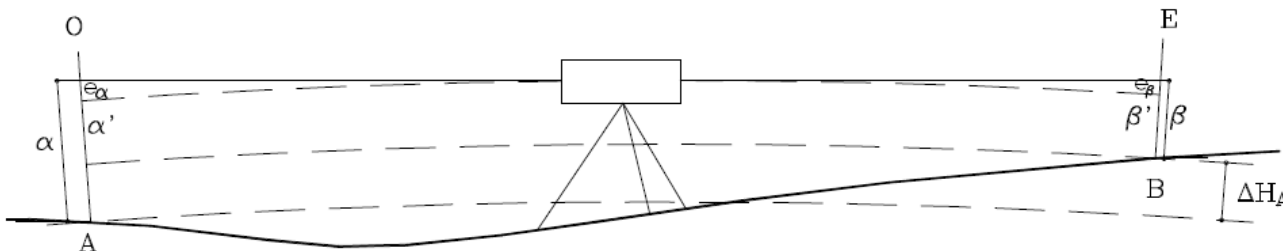
Γεωμετρική Χωροστάθμηση

- Στην πραγματικότητα, από τα σημεία A, B δεν περνά ένα οριζόντιο επίπεδο, αλλά μια χωροσταθμική επιφάνεια. Ωστόσο, το τηλεσκόπιο του χωροβάτη υλοποιεί ένα οριζόντιο επίπεδο, το οποίο εφάπτεται στην χωροσταθμική επιφάνεια η οποία περνά από το σημείο τομής των αξόνων του οργάνου.
- Έτσι, λαμβάνονται οι αναγνώσεις α και β , ενώ οι ορθές αναγνώσεις θα ήταν οι α' και β' , δηλαδή σε κάθε ανάγνωση υπάρχουν συστηματικά σφάλματα:

$$e_a = (\alpha - \alpha') \quad e_\beta = (\beta - \beta')$$

- Για να εξαλειφθούν τα σφάλματα αρκεί ο χωροβάτης να τοποθετείται στη μεσοκάθετη του AB, ώστε τα e_a και e_β να είναι ίσα και να αλληλοαναιρούνται.

$$\Delta H_{AB} = O - E = \alpha' - \beta' = (\alpha - e_a) - (\beta - e_\beta) = \alpha - \beta$$



Υψομετρία

Γεωμετρική Χωροστάθμηση

- Συνήθως, για τον προσδιορισμό της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ 2 σημείων **A, B** γίνονται μετρήσεις από το A προς το B (**μετάβαση** ή **aller**) και από το B προς το A (**επιστροφή** ή **retour**), χωρίς να είναι ίδιες οι στάσεις του χωροβάτη.
- Αυτή η χωροστάθμηση λέγεται **διπλή γεωμετρική χωροστάθμηση** ή αλλιώς **χωροστάθμηση σε μετάβαση και επιστροφή (aller – retour)**.
- Με τη μέθοδο αυτή προσδιορίζονται οι υψομετρικές διαφορές ΔH_{AB} και ΔH_{BA} , οι οποίες έχουν αντίθετα πρόσημα και θεωρητικά την ίδια απόλυτη τιμή.
- Στην πράξη αυτό δεν συμβαίνει εξαιτίας της επίδρασης των σφαλμάτων. Στην περίπτωση που η διαφορά τους είναι **ανεκτή**, η τελική υψομετρική διαφορά είναι ο μέσος όρος των απόλυτων τιμών τους με το πρόσημο της μετάβασης.

$$\Delta H_{AB} = \frac{|\Delta H_{AB}^{aller}| + |\Delta H_{AB}^{retour}|}{2}$$

Σε αντίθετη περίπτωση η χωροστάθμηση πρέπει να επαναληφθεί στο σύνολό της.

Υψομετρία

Γεωμετρική Χωροστάθμηση – Παράδειγμα

Για τον προσδιορισμό του υψομέτρου του σημείου B έγινε διπλή γεωμετρική χωροστάθμηση μεταξύ των σημείων A και B, με τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$\Delta H_{AB}^{aller} = -1.426m \quad \text{και} \quad \Delta H_{AB}^{retour} = +1.424m$$

Αν το υψόμετρο του A είναι $H_A = +14.584 \text{ m}$, να υπολογισθεί το υψόμετρο του B.

Επίλυση

Η τελική υψομετρική διαφορά μεταξύ των A και B υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta H_{AB} = \frac{|\Delta H_{AB}^{aller}| + |\Delta H_{AB}^{retour}|}{2} \Rightarrow \Delta H_{AB} = \frac{|-1.426| + |+1.424|}{2} \Rightarrow \boxed{\Delta H_{AB} = -1.425m}$$

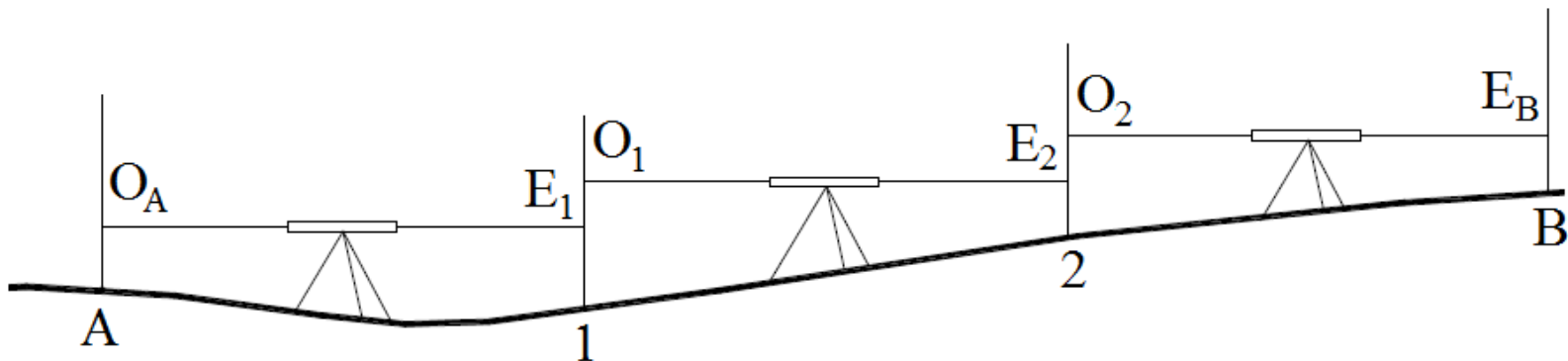
Άρα το υψόμετρο του σημείου B υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H_B = H_A + \Delta H_{AB} = 14.584 - 1.425 \Rightarrow \boxed{H_B = 13.159m}$$

Υψομετρία

Γεωμετρική Χωροστάθμηση – Χωροσταθμικές οδεύσεις

- Αν η απόσταση ή η υψομετρική διαφορά μεταξύ των **A**, **B** είναι μεγάλη, τότε η υψομετρική διαφορά ΔH_{AB} δεν μπορεί να προσδιοριστεί μόνο με μια στάση χωροβάτη.
- Στην περίπτωση αυτή, απαιτούνται περισσότερες στάσεις χωροβάτη, η δε υψομετρική διαφορά προσδιορίζεται από το άθροισμα των επιμέρους υψομετρικών διαφορών.
- Στα ενδιάμεσα σημεία, ανεξάρτητα της φύσης του εδάφους, χρησιμοποιούνται ειδικές χωροσταθμικές βάσεις για να επιτυγχάνεται καλή έδραση των σταδίων.



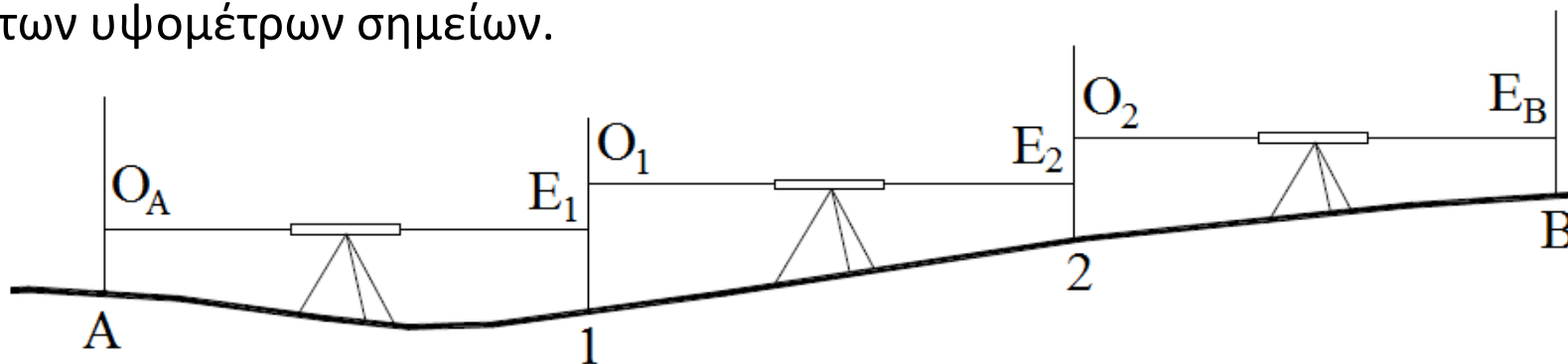
Υψομετρία

Γεωμετρική Χωροστάθμηση – Χωροσταθμικές οδεύσεις

- Για τον προσδιορισμό της υψομετρικής διαφοράς ΔH_{AB} μετρήθηκαν οι επιμέρους υψομετρικές διαφορές ΔH_{A1} , ΔH_{12} , ΔH_{2B} .
- Η υψομετρική διαφορά ΔH_{AB} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta H_{AB} = \Delta H_{A1} + \Delta H_{12} + \Delta H_{2B} = (O_A - E_1) + (O_1 - E_2) + (O_2 - E_B) \Rightarrow \Delta H_{AB} = \sum O - \sum E$$

- Η γεωμετρική χωροστάθμηση που απαιτεί περισσότερες από μια στάσεις για τον προσδιορισμό της υψομετρικής διαφοράς λέγεται **χωροσταθμική όδευση**.
- Οι χωροσταθμικές οδεύσεις χρησιμοποιούνται για τον διαδοχικό προσδιορισμό των υψομέτρων σημείων.



Υψομετρία

Όργανα Γεωμετρικής Χωροστάθμησης – Χωροβάτες

- Το βασικό όργανο για την μέτρηση των υψομετρικών διαφορών είναι ο **χωροβάτης** σε συνδυασμό με τους **χωροσταθμικούς πήχεις (σταδίες)**.
- Ο χωροβάτης αποτελείται από ένα τηλεσκόπιο, το οποίο υλοποιεί ένα σκοπευτικό άξονα και το οποίο μπορεί να περιστρέφεται γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα.
- Ο σκοπευτικός άξονας οριζοντιώνεται με μεγάλη ακρίβεια με τη βοήθεια μιας αεροστάθμης ή ενός ισοσταθμητή. Ο χωροβάτης έχει επίσης κοχλίες εστίασης και οριζόντιων μικροκινήσεων καθώς και μια σφαιρική αεροστάθμη για την χονδρική οριζοντίωσή του. Για τις μετρήσεις τοποθετείται σε τρίποδα.
- Οι χωροβάτες διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο λήψης των αναγνώσεών τους:
 - **Οπτικομηχανικούς** (απευθείας αναγνώσεις στις σταδίες)
 - **Ψηφιακούς** (αναγνώσεις σε ειδικές κωδικοποιημένες σταδίες)

Υψομετρία

Οπτικομηχανικοί Χωροβάτες

- Οι οπτικομηχανικοί χωροβάτες ανάλογα με τον τρόπο οριζοντίωσης του σκοπευτικού άξονα διακρίνονται σε **απλούς** και **αυτόματους**.
- Οι **απλοί χωροβάτες** τείνουν σήμερα να εκλείψουν. Η οριζοντίωση του άξονά τους γίνεται μέσω μιας σωληνωτής αεροστάθμης. Ο άξονας είναι οριζόντιος όταν γίνει παράλληλος προς την κανονική ευθεία της αεροστάθμης.
- Στους **αυτόματους χωροβάτες** ο σκοπευτικός άξονας είναι συνδεδεμένος με τον κατακόρυφο άξονα, και οριζοντιώνεται αυτόματα μετά την χονδρική οριζοντίωσή του με την σφαιρική αεροστάθμη.

Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του ισοσταθμητή, ενός συστήματος αναρτημένων πρισμάτων το οποίο είναι συνδεδεμένο με το τηλεσκόπιο.



Υψομετρία

Ψηφιακοί Χωροβάτες

- Τη δεκαετία του 1980 εμφανίσθηκαν οι **ψηφιακοί χωροβάτες** οι οποίοι τείνουν σήμερα να αντικαταστήσουν τους οπτικομηχανικούς.
- Οι χωροβάτες αυτοί είναι αυτόματοι και έχουν την δυνατότητα αυτοελέγχου και αυτορυθμίσεων. Διαθέτουν ενσωματωμένο μικροϋπολογιστή που υποστηρίζει λογισμικό το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.
- Οι αναγνώσεις γίνονται αυτόματα και αποθηκεύονται στην ενσωματωμένη καταγραφική μονάδα.
- Λόγω της αυτόματης καταγραφής, έχουν εξαλειφθεί τα χονδροειδή σφάλματα στην ανάγνωση/καταγραφή των μετρήσεων.
- Η ακρίβεια των χωροβατών αυτών σε συνδυασμό με τις ειδικές σταδίες είναι της τάξης του $\pm 1mm/\sqrt{km}$ ή και καλύτερη.



Υψομετρία

Χωροβάτες Laser

- Τα όργανα αυτά εμφανίσθηκαν τη δεκαετία του 1980. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην εκπομπή μιας ακτίνας **laser** η οποία προβάλλεται από ένα περιστρεφόμενο πρίσμα έτσι ώστε να υλοποιείται ένα οριζόντιο επίπεδο.
- Μια μονάδα εντοπισμού τοποθετημένη σε αριθμημένη ράβδο ή σταδία παρέχει τη δυνατότητα άμεσης ανάγνωσης των υψομετρικών διαφορών σε σχέση με το υλοποιημένο οριζόντιο επίπεδο.
- Τέλος υπάρχουν ειδικά εξαρτήματα εκπομπής laser τα οποία προσαρμόζονται είτε στο προσοφθάλμιο του τηλεσκοπίου του χωροβάτη, είτε επιβατικά και υλοποιούν τον σκοπευτικό άξονα, υλοποιώντας μια οριζόντια γραμμή.
- Η ακρίβεια των χωροβατών αυτών είναι της τάξης του $\pm 1\text{cm}$.



Υψομετρία

Χωροσταθμικοί πήχεις ή σταδίες

- Οι **χωροσταθμικοί πήχεις ή σταδίες** χρησιμοποιούνται μαζί με το χωροβάτη στη γεωμετρική χωροστάθμηση. Είναι αριθμημένοι κανόνες με υποδιαιρέσεις ανά **cm** και αρίθμηση ανά **10cm**.
- Παλαιότερα κατασκευάζονταν από ξύλο, σήμερα από αλουμίνιο ή fiberglass, είναι πτυσσόμενες ή τηλεσκοπικές, με αποτέλεσμα να είναι ελαφρότερες και εύχρηστες στη μεταφορά.
- Πολλές δίνουν τη δυνατότητα απευθείας ανάγνωσης 1mm. Οι ψηφιακοί χωροβάτες χρησιμοποιούν ειδικές κωδικοποιημένες σταδίες από fiberglass με μικρό συντελεστή γραμμικής διαστολής. Σε αυτές, οι κλασσικές υποδιαιρέσεις έχουν αντικατασταθεί από barcodes (κωδικοποιημένες).
- Οι οπτικομηχανικοί και οι ψηφιακοί χωροβάτες ακριβείας συνδυάζονται με έναν ειδικό τύπο σταδιών, τις **σταδίες invar**.

Υψομετρία

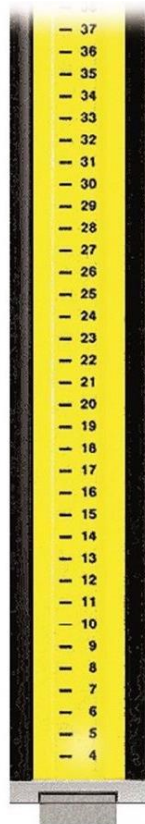
Χωροσταθμικοί πήχεις ή σταδίες

- Οι **σταδίες invar** έχουν ενσωματωμένη σφαιρική αεροστάθμη.
- Χρησιμοποιούνται με ειδικά στηρίγματα και ειδικές βαριές βάσεις για την όσο το δυνατόν καλύτερη σταθερότητά τους.
- Μπορεί να είναι **συμβατικές** ή **κωδικοποιημένες**, είναι μονοκόμματες και έχουν ενσωματωμένη ταινία από μέταλλο invar πάνω στο οποίο είναι χαραγμένες οι υποδιαιρέσεις.
- Οι **συμβατικές** σταδίες invar έχουν δύο σειρές χαραξέων ανά 1cm ή 0.5cm, διπλή αρίθμηση ανά σειρά διαιρέσεων, δεξιά και αριστερά της ταινίας invar.
- Σε κάθε σκόπευση, σε αυτές τις σταδίες, λαμβάνονται δύο αναγνώσεις, μια σε κάθε κλίμακα.
- Η διαφορά αυτών των αναγνώσεων ανά σκόπευση είναι σταθερός αριθμός και αποτελεί τη σταθερά της σταδίας.

Υψομετρία

Χωροσταθμικοί πήχεις ή σταδίες

Συμβατική
σταδία invar



Κωδικοποιημένη
σταδία invar



Υψομετρία

Χωροσταθμικές βάσεις ή χελώνες

- Οι σταδίες πρέπει να είναι κατακόρυφες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, για τη σωστή εκτέλεσή τους. Αυτό εξασφαλίζεται με τη βοήθεια σφαιρικής αεροστάθμης ενσωματωμένης ή μη.
- Η σταθερότητά τους κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στα σημεία αλλαγής επιτυγχάνεται με τη χρήση ειδικών βάσεων, που χρησιμοποιούνται για τη σταθερή έδραση των σταδίων στο έδαφος.
- Οι βάσεις αυτές ονομάζονται
 - **βάσεις χωροστάθμησης ή**
 - **χελώνες χωροστάθμησης**



Υψομετρία

Συνθήκες ορθής λειτουργίας χωροβατών

Τόσο στους οπτικομηχανικούς όσο και στους ψηφιακούς χωροβάτες πρέπει να πληρούνται οι συνθήκες ορθής λειτουργίας.

Οι συνθήκες αυτές αφορούν τους βασικούς άξονες του οργάνου και τη μεταξύ τους σχέση, και είναι οι ακόλουθες:

- Ο σκοπευτικός άξονας του χωροβάτη πρέπει να είναι οριζόντιος όταν η σωληνωτή αεροστάθμη είναι στο κανονικό της σημείο, δηλαδή ο σκοπευτικός άξονας να είναι παράλληλος με την κανονική ευθεία της αεροστάθμης όταν η τελευταία βρίσκεται στο κανονικό της σημείο.
- Η συνθήκη αυτή ονομάζεται **πρωτεύουσα** ή **κύρια συνθήκη** του χωροβάτη δεδομένου ότι, όταν πληρούται, οι σκοπεύσεις που λαμβάνονται είναι ορθές. Στην αντίθετη περίπτωση υπάρχει σφάλμα σκοπευτικού άξονα, και οι αναγνώσεις που λαμβάνονται δεν είναι ορθές, αλλά έχουν ένα συστηματικό σφάλμα.

Υψομετρία

Συνθήκες ορθής λειτουργίας χωροβατών

- Το σφάλμα από τη μη πλήρωση της **πρωτεύουσας** συνθήκης μπορεί να εξαλειφθεί αν ο χωροβάτης τοποθετείται στη μεσοκάθετη της απόστασης μεταξύ των δύο σταδίων.
- Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, η επίδραση από την μη πλήρωση της **πρωτεύουσας** συνθήκης μπορεί να εξαλειφθεί. Παρόλα αυτά είναι σκόπιμο να γίνεται έλεγχος για τη ύπαρξη σφάλματος στον σκοπευτικό άξονα πριν την έναρξη των μετρήσεων.
- Ο έλεγχος αυτός γίνεται στο ύπαιθρο και ακολουθείται η εξής διαδικασία:
 - a. Ο χωροβάτης τοποθετείται στη μεσοκάθετη της απόστασης μεταξύ των δύο σταδίων (A και B) και προσδιορίζεται η υψομετρική διαφορά ΔH_{AB} .
 - b. Ο χωροβάτης τοποθετείται κοντά στο A (σταδία Όπισθεν) ή στο B (σταδία Έμπροσθεν) και προσδιορίζεται η υψομετρική διαφορά $\Delta H'_{AB}$.

Υψομετρία

Συνθήκες ορθής λειτουργίας χωροβατών

- Αν $\Delta H_{AB} = \Delta H'_{AB}$ ο σκοπευτικός άξονας του οργάνου είναι οριζόντιος. Στην αντίθετη περίπτωση ($\Delta H_{AB} \neq \Delta H'_{AB}$) ο σκοπευτικός άξονας παρουσιάζει κλίση ως προς την (οριζόντια) κανονική ευθεία της αεροστάθμης.
- Η γωνία κλίσης εκφρασμένη σε ακτίνια (rad) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega = \frac{\Delta H'_{AB} - \Delta H_{AB}}{D_{AB}}$$

όπου D_{AB} η απόσταση των δύο σταδίων.

- Ο έλεγχος αυτός είναι γνωστός ως **έλεγχος άκρου – μέσου** και ισχύει για όλες τις κατηγορίες των χωροβατών. Η εξάλειψη του σφάλματος γίνεται με το χωροβάτη στη μεσοκάθετη μεταξύ των σταδίων.
- Οι ψηφιακοί χωροβάτες διαθέτουν στο λογισμικό τους υπορουτίνα με την οποία, μέσω ειδικής διαδικασίας, ελέγχεται η πλήρωση της κύριας συνθήκης του οργάνου.

Υψομετρία

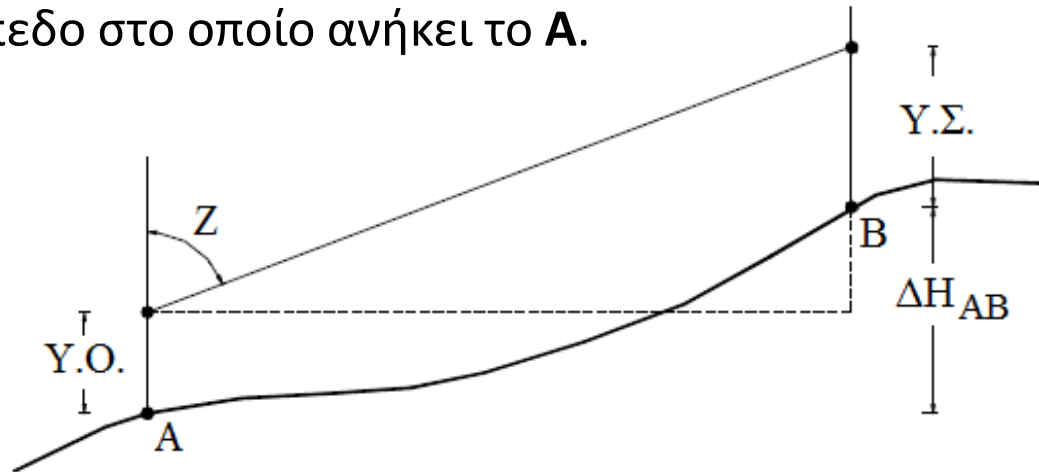
Σφάλματα στις Γεωμετρικές Χωροσταθμήσεις

- Όπως σε όλα τα είδη των μετρήσεων, τα σφάλματα στις χωροσταθμήσεις των μετρήσεων διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:
 - **Χονδροειδή σφάλματα**
 - **Συστηματικά σφάλματα**
 - **Τυχαία σφάλματα**
- Τα **χονδροειδή** σφάλματα αφορούν λάθος αναγνώσεις, λάθος καταγραφή των μετρήσεων, μετακίνηση της σταδίας. Σήμερα, με την χρήση των ψηφιακών χωροβατών έχει ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των χονδροειδών σφαλμάτων, δεδομένου ότι η ανάγνωση και η καταγραφή γίνεται απευθείας από το όργανο.
- Έπειτα εξετάζονται αναλυτικά τα συστηματικά σφάλματα που εμφανίζονται με τη μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμησης. Τα σφάλματα αυτά οφείλονται στη μη ορθή λειτουργία των οργάνων, σε κατασκευαστικές ατέλειες ή σε λάθη στη χρήση τους, στο περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις (καμπυλότητα της γης) και στις συνθήκες μέτρησης (ατμοσφαιρική διάθλαση).

Υψομετρία

Τριγωνομετρική Υψομετρία

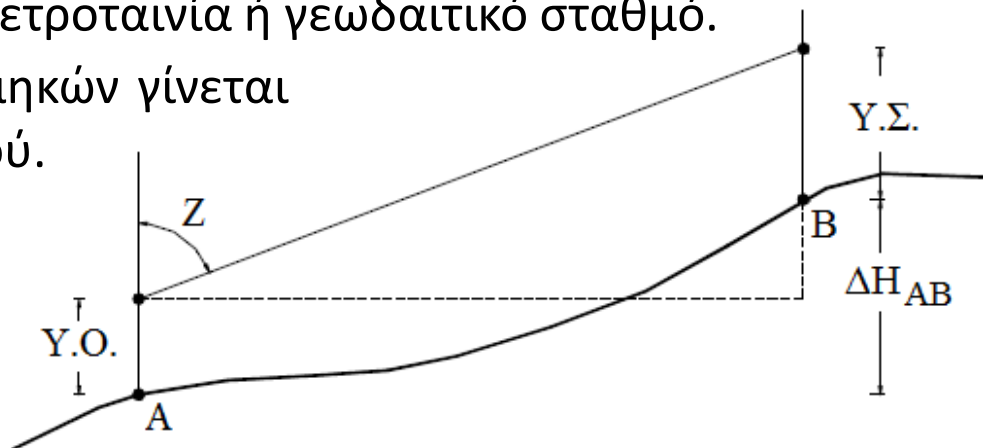
- Η **τριγωνομετρική υψομετρία** είναι μία έμμεση μέθοδος για τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών. Εφαρμόζεται στις περιπτώσεις που είτε η απόσταση μεταξύ των σημείων των οποίων ζητείται η υψομετρική διαφορά είναι μεγάλη, είτε είναι μεγάλη η υψομετρική τους διαφορά καθώς και σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η εφαρμογή της γεωμετρικής χωροστάθμησης.
- Η τριγωνομετρική υψομετρία βασίζεται στην επίλυση ενός ορθογώνιου τριγώνου το οποίο σχηματίζεται από την ευθεία **AB** και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο στο οποίο ανήκει το **A**.



Υψομετρία

Τριγωνομετρική Υψομετρία

- Για τον προσδιορισμό της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ δύο σημείων **A** και **B** (ΔH_{AB}) κεντρώνεται στο **A** και οριζοντιώνεται γωνιομετρικό όργανο ενώ στο **B** τοποθετείται κατάλληλος στόχος ο οποίος σκοπεύεται με το όργανο.
- Αρκεί να μετρηθεί η κατακόρυφη γωνία Z_{AB} , το κεκλιμένο μήκος S_{AB} ή το οριζόντιο μήκος D_{AB} , το Ύψος Οργάνου (**Υ.Ο.**) και το Ύψος Σκόπευσης (**Υ.Σ.**).
- Η μέτρηση της κατακόρυφης γωνίας γίνεται με θεοδόλιχο ή γεωδαιτικό σταθμό σε 2 θέσεις τηλεσκοπίου και, αν η απόσταση είναι μεγάλη, σε 2 περιόδους. Η μέτρηση του μήκους γίνεται με μετροταινία ή γεωδαιτικό σταθμό.
- Σήμερα η μέτρηση γωνιών και μηκών γίνεται με τη χρήση γεωδαιτικού σταθμού.



Υψομετρία

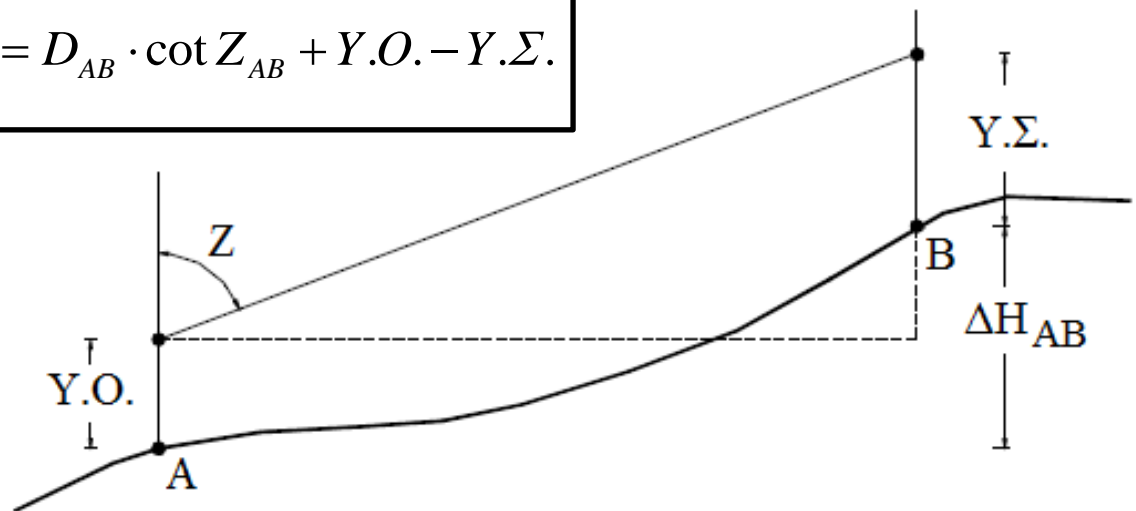
Τριγωνομετρική Υψομετρία

- Στην περίπτωση που μετρηθεί το κεκλιμένο μήκος S_{AB} η υψομετρική διαφορά ΔH_{AB} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta H_{AB} = S_{AB} \cdot \cos Z_{AB} + Y.O. - Y.Σ.$$

- Στην περίπτωση που μετρηθεί το οριζόντιο μήκος D_{AB} , η σχέση υπολογισμού της υψομετρικής διαφοράς ΔH_{AB} είναι:

$$\Delta H_{AB} = \frac{D_{AB}}{\tan Z_{AB}} + Y.O. - Y.Σ. = D_{AB} \cdot \cot Z_{AB} + Y.O. - Y.Σ.$$



Υψομετρία

Τριγωνομετρική Υψομετρία – Παράδειγμα

Για τον υπολογισμό της υψομετρικής διαφοράς ΔH_{AB} μετρήθηκαν τα στοιχεία:

$Z_{AB} = 97.829^{\circ}$ (τελική τιμή), $S_{AB} = 261.152$ m, $Y.O. = 1.38$ m, $Y.Σ. = 1.59$ m.

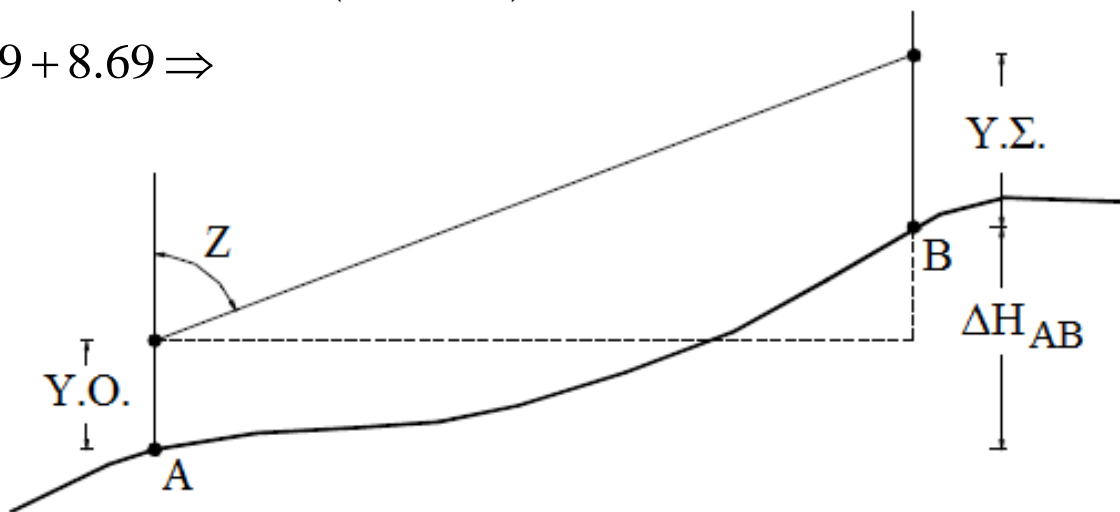
Αν το υψόμετρο του A είναι $H_A = 368.59$ m να υπολογισθεί το υψόμετρο του B.

Επίλυση

$$\Delta H_{AB} = S_{AB} \cdot \cos Z_{AB} + Y.O. - Y.Σ. = 261.152 \cdot \cos(97.829^{\circ}) + 1.38 - 1.59 = 8.69 \text{ m}$$

$$\text{Άρα } H_B = H_A + \Delta H_{AB} = 368.59 + 8.69 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow H_B = 377.28 \text{ m}$$



Υψομετρία

Τριγωνομετρική Υψομετρία – Σφάλματα

- Στον προσδιορισμό μιας υψομετρικής διαφοράς με Τριγωνομετρική Υψομετρία υπεισέρχονται σφάλματα χονδροειδή, συστηματικά και τυχαία.
- Τα **χονδροειδή** σφάλματα αφορούν κυρίως λάθη στην ανάγνωση ή καταγραφή των μετρήσεων των μεγεθών που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της υψομετρικής διαφοράς (κατακόρυφη γωνία, κεκλιμένο μήκος, ύψη οργάνου και στόχου).
- Σήμερα η χρήση των Γεωδαιτικών Σταθμών έχει ελαχιστοποιήσει την επίδραση των χονδροειδών σφαλμάτων που αφορούν τα δύο πρώτα μεγέθη (κατακόρυφες γωνίες και μήκη) δεδομένου ότι τα όργανα αυτά έχουν τη δυνατότητα καταγραφής των μετρήσεων στη μνήμη που διαθέτουν.
- Έτσι, το συνηθέστερο χονδροειδές σφάλμα οφείλεται σε εσφαλμένη μέτρηση ή καταγραφή των υψών οργάνου και στόχου.

Υψομετρία

Τριγωνομετρική Υψομετρία – Σφάλματα

Τα συστηματικά σφάλματα οφείλονται:

- Στη **μη ορθή λειτουργία των οργάνων** εξαιτίας της μη πλήρωσης των βασικών τους συνθηκών.
- Στην **επίδραση της καμπυλότητας της γης**.
- Στην **επίδραση του περιβάλλοντος των μετρήσεων** (ατμοσφαιρική διάθλαση).

Η πρώτη ομάδα συστηματικών σφαλμάτων εξαλείφεται με εργαστηριακούς ελέγχους των οργάνων που εξασφαλίζουν την ορθή λειτουργία τους.

Σε ότι αφορά την **επίδραση της καμπυλότητας της γης**, για μικρές αποστάσεις μεταξύ 2 σημείων A και B, γίνεται παραδοχή ότι αυτά προβάλλονται στο οριζόντιο επίπεδο.

Όσο η απόσταση **AB** μεγαλώνει, στην πραγματικότητα οι κατακόρυφες στα σημεία αυτά δεν είναι μεταξύ τους παράλληλες αλλά συγκλίνουν στο κέντρο της γης. Υπεισέρχεται δηλαδή η επίδραση της καμπυλότητας της γης.

Υψομετρία

Τριγωνομετρική Υψομετρία – Σφάλματα

- Σε ότι αφορά την **επίδραση του περιβάλλοντος** των μετρήσεων (ατμοσφαιρική διάθλαση), η οπτική ακτίνα καθώς διέρχεται μέσα από την ατμόσφαιρα, συναντά στρώματα διαφορετικής πυκνότητας, με αποτέλεσμα να διαθλάται και να καμπυλώνεται.
- Εξαιτίας αυτής της καμπύλωσης και της διάθλασης της οπτικής ακτίνας, ένας παρατηρητής στο σημείο A βλέπει το στόχο σε διαφορετικό σημείο (π.χ. B') αντί για το σημείο B.
- Η **επίδραση της διάθλασης** έχει επομένως σαν αποτέλεσμα τα σημεία τα οποία σκοπεύονται να φαίνονται **ψηλότερα** από την πραγματική τους θέση.
- Στην περίπτωση που ως επιφάνεια αναφοράς θεωρηθεί το ελλειψοειδές αναφοράς και όχι η σφαίρα, τότε η κατακόρυφη γωνία θα πρέπει να διορθωθεί από την επίδραση της απόκλισης της κατακορύφου.

Υψομετρία

Υδραυλική Χωροστάθμηση

- Η μέθοδος αυτή προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών βασίζεται στην αρχή των **συγκοινωνούντων δοχείων**.
- Οι επιφάνειες υγρού το οποίο ηρεμεί μέσα σε δύο συγκοινωνούντα δοχεία βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο, άρα ορίζουν την ίδια χωροσταθμική επιφάνεια.
- Η υδραυλική χωροστάθμηση εφαρμόζεται στην περίπτωση προσδιορισμού μικρών υψομετρικών διαφορών.
- Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή της μεθόδου είναι το αλφαδολάστιχο (διαφανής πλαστικός σωλήνας με νερό), που χρησιμοποιείται στις οικοδομές για τον έλεγχο της οριζοντιότητας (αλφάδιασμα) δομικών στοιχείων, κυρίως πλακών, αλλά και για την χάραξη μικρών κλίσεων.
- Η ακρίβεια του αλφαδολάστιχου είναι της τάξης του 1 έως 2 cm.

Υψομετρία

Υδραυλική Χωροστάθμηση

- Με χρήση ειδικών συσκευών (**συσκευές Meiser**) η ακρίβεια της υδραυλικής χωροστάθμησης μπορεί να φθάσει την ακρίβεια της γεωμετρικής χωροστάθμησης ακριβείας.
- Η μέθοδος της υδραυλικής χωροστάθμησης εφαρμόζεται για:
 - a. Την οριζοντίωση ή την υλοποίηση μικρών κλίσεων δομικών στοιχείων σε οικοδομές,
 - b. Τον προσδιορισμό υψομετρικής διαφοράς σημείων που χωρίζονται από υδάτινη επιφάνεια (κανάλια, ποτάμια, λίμνες κλπ.)
 - c. Τον προσδιορισμό μικρών υψομετρικών διαφορών σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις και συναρμολογήσεις μηχανημάτων.
- Στις Κάτω χώρες (Ολλανδία, Βέλγιο, Λουξεμβούργο) η μέθοδος έχει εφαρμοσθεί για τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών σημείων σε αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων με ακρίβειες της τάξης του $\pm 1\text{mm}$.

Υψομετρία

Βαρομετρική Υψομετρία

- Η μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι η **ατμοσφαιρική πίεση** μεταβάλλεται με την αύξηση του υψομέτρου.
- Στην επιφάνεια της θάλασσας (Μ.Σ.Θ.) η ατμοσφαιρική πίεση, υπό κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, είναι ίση με την πίεση στήλης υδραργύρου ύψους 760mm, **μειώνεται δε όσο αυξάνει το υψόμετρο.**
- Η μεταβολή αυτή δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από το υψόμετρο, τις μετεωρολογικές συνθήκες και το γεωγραφικό πλάτος φ .
- Έτσι, ενώ είναι δύσκολο να μετρηθούν απόλυτα υψόμετρα με τη μέθοδο της βαρομετρικής υψομετρίας, είναι όμως δυνατόν να μετρηθούν οι υψομετρικές διαφορές, μετρώντας τη **μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης με βαρόμετρα.**
- Αν οι μετρήσεις γίνουν σε κατάλληλες ατμοσφαιρικές συνθήκες, με ελεγμένα και βαθμονομημένα όργανα, σωστή μεθοδολογία και κατάλληλες αναγωγές, η ακρίβεια είναι της τάξης του ± 1 m, ενώ με ειδική διαδικασία μετρήσεων η ακρίβεια της μεθόδου μπορεί να φθάσει τα ± 30 cm.

Στοιχεία Γεωδαισίας

Βιβλιογραφία

- Μαθήματα Γεωδαισίας, 2^η Έκδοση, Γ. Γεωργόπουλος, Εκδόσεις Τζιόλα, 2019.
- Στοιχεία Τοπογραφίας, Ε. Στυλιανίδη, Εκδόσεις Δίσιγμα, 2011.
- Εφαρμοσμένη Γεωδαισία, 2^η Έκδοση, Ε. Λάμπρου, Γ. Πανταζής, Εκδόσεις Ζήτη, 2010.