



## Τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας & Γεωπληροφορικής

*Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Γεωχωρικές Τεχνολογίες»*

# Υψομετρία και GNSS

Γ' Εξάμηνο

5<sup>η</sup> παρουσίαση

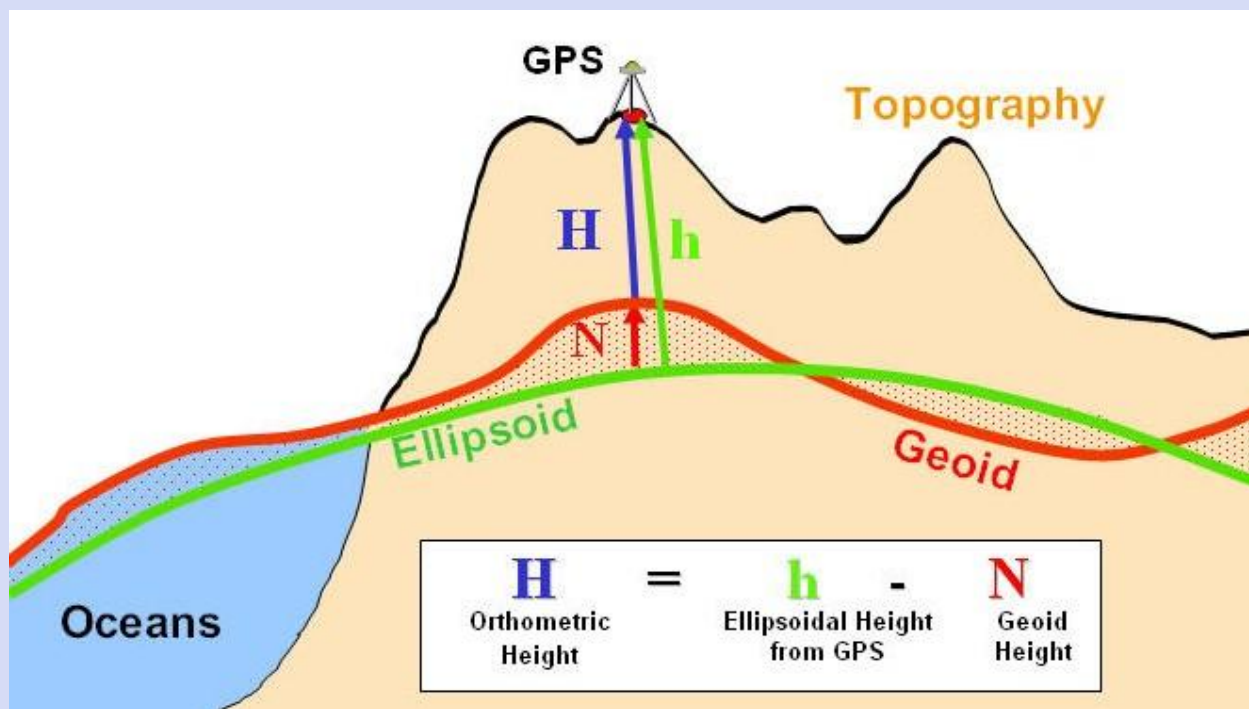
Μιχάλης Γιαννίου - Αναπλ. Καθηγητής ΤΕΙ-Α

# Αντικείμενα 5<sup>ου</sup> Μαθήματος

1. **Ορθομετρικά-Γεωμετρικά υψόμετρα**
2. **Γεωμετρικά υψόμετρα και GNSS**
3. **Ακρίβεια γεωμετρικών υψομέτρων από GPS/GNSS**
4. **GNSS leveling**
5. **Ελληνικό Κατακόρυφο ΣΑ και GNSS leveling**
6. **GNSS leveling με το Ελληνικό Σύστημα Εντοπισμού HEPOS**

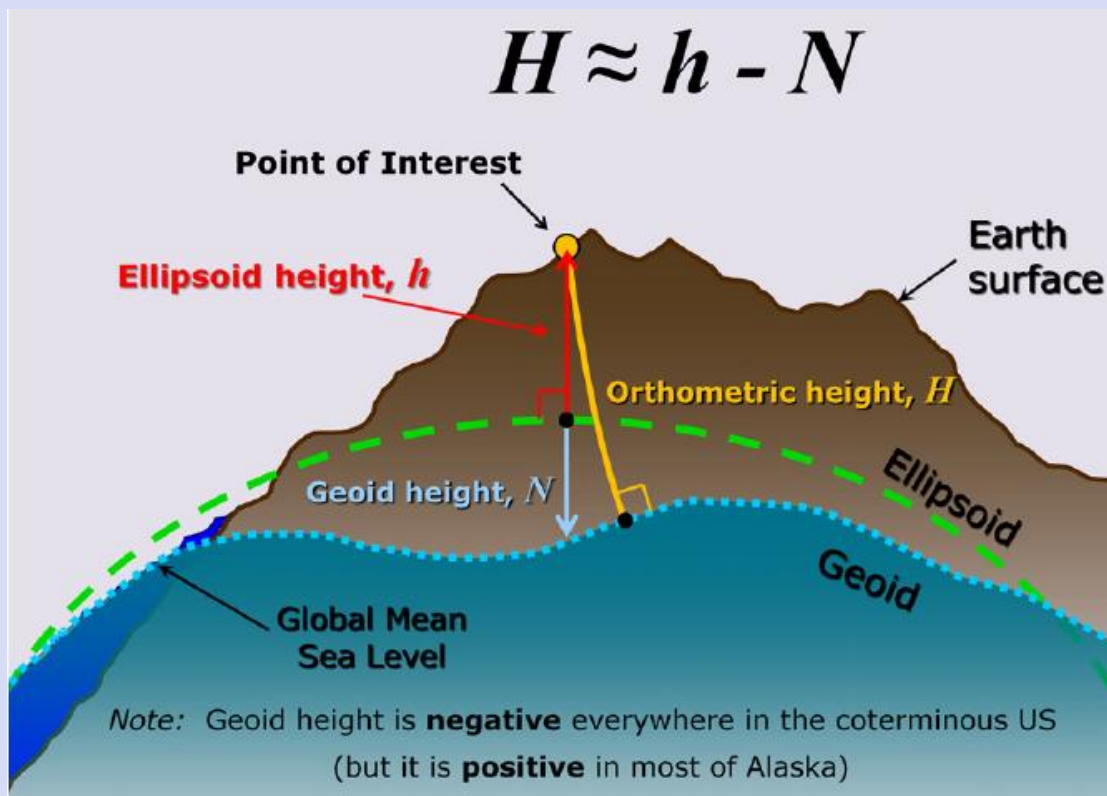
# 1. Ορθομετρικά-Γεωμετρικά υψόμετρα

## Βασική σχέση μεταξύ γεωμετρικού & ορθομετρικού υψομέτρου



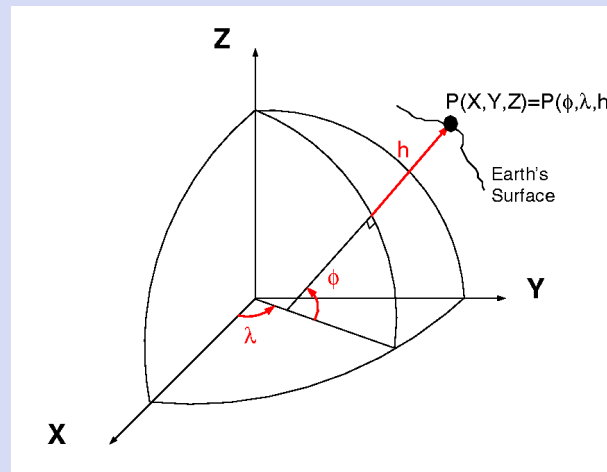
# 1. Ορθομετρικά-Γεωμετρικά υψόμετρα

## Βασική σχέση μεταξύ γεωμετρικού & ορθομετρικού υψομέτρου (ακριβέστερη θεώρηση)



## 2. Γεωμετρικά υψόμετρα και GNSS

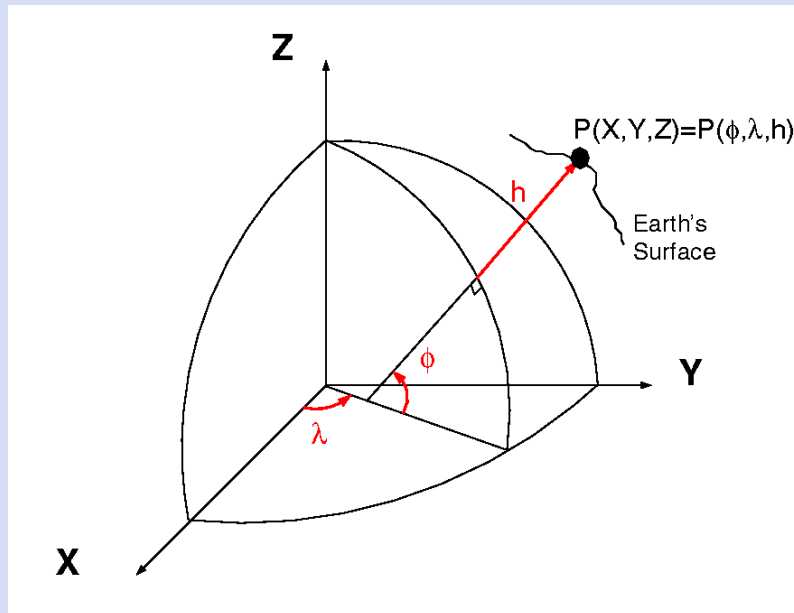
- Λόγω του ότι η επιφάνεια αναφοράς των γεωμετρικών υψομέτρων (το ΕΕΠ) δεν είναι άμεσα υλοποιήσιμη στο χώρο, τα γεωμετρικά υψόμετρα δεν είναι άμεσα μετρήσιμα με συμβατικές (κλασσικές) γεωδαιτικές μεθόδους.
- Αντίθετα, τα GNSS επιτρέπουν με μεγάλη ευκολία τον προσδιορισμό γεωμετρικών υψομέτρων.



## 2. Γεωμετρικά υψόμετρα και GNSS

### Υπολογισμός $\varphi$ $h$ από XYZ

Οι γεωκεντρικές καρτεσιανές συντεταγμένες (ECEF: Earth Centered Earth Fixed) αντιστοιχίζονται μονοσήμαντα στις γεωδαιτικές συντεταγμένες  $\varphi$  $h$ .



$$\lambda = \arctan \frac{Y}{X}$$

$$\varphi = \arctan \left( \frac{Z + e^2 N \sin \varphi}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right)$$

$$h = \frac{Z}{\sin \varphi} - (1 - e^2) N$$

όπου:

$N$ : η ακτίνα καμπυλότητας της πρώτης καθέτου τομής

$e$ : η εκκεντρότητα του ΕΕΠ

Σημείωση: το  $\varphi$  υπολογίζεται με επαναληπτική διαδικασία

### 3. Ακρίβεια γεωμετρικών υψομέτρων από GPS/GNSS

#### Ακρίβεια οριζόντιας/κατακόρυφης θέσης

Όπως είναι γνωστό από τη θεωρία των GNSS, η ακρίβεια προσδιορισμού του υψομέτρου είναι σημαντικά χειρότερη (~2 φορές) από την ακρίβεια της οριζόντιας θέσης.

Αυτό οφείλεται στη γεωμετρία του προβλήματος και αποτελεί κανόνα στο δορυφορικό εντοπισμό.

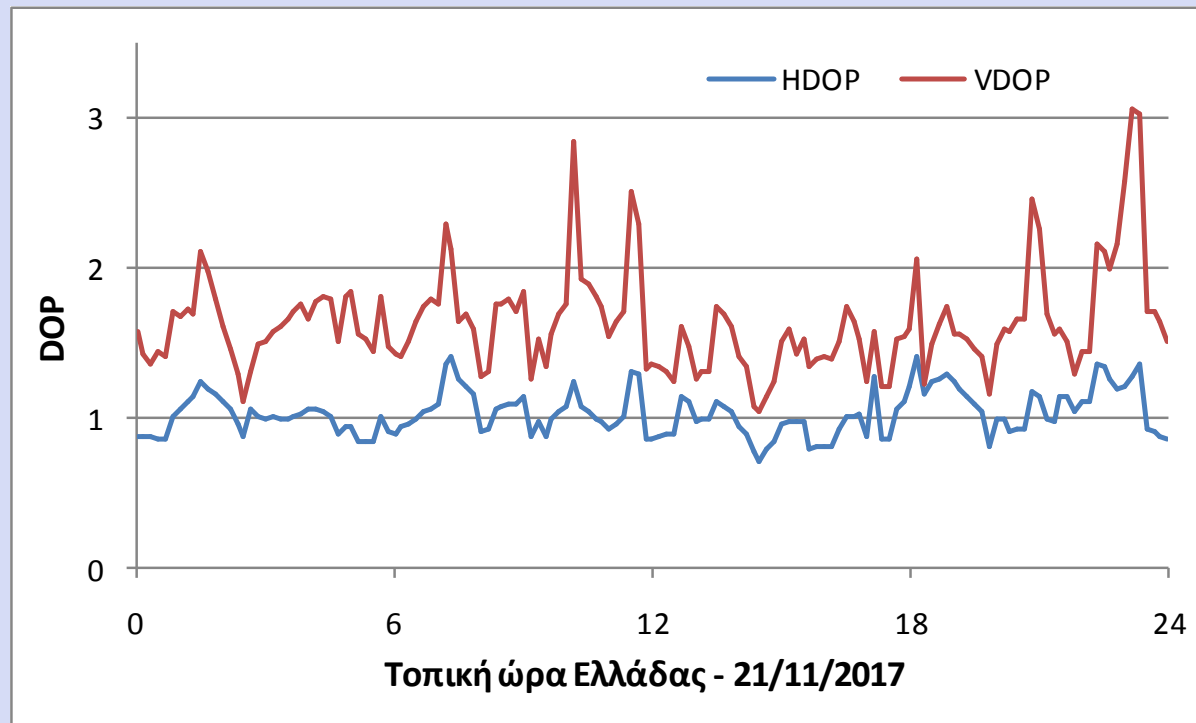
Τονίζεται ότι ο κανόνας αυτός αφορά το γεωμετρικό υψόμετρο  $h$ .

Το ορθομετρικό υψόμετρο προσδιορίζεται συνήθως με ακόμα χαμηλότερη ακρίβεια, γιατί στην αβεβαιότητα προσδιορισμού του  $h$  προστίθεται και η αβεβαιότητα γνώσης της αποχής του γεωειδούς  $N$  που απαιτείται για το μετασχηματισμό του  $h$  σε  $H$ .

### 3. Ακρίβεια γεωμετρικών υψομέτρων από GPS/GNSS

## Ακρίβεια οριζόντιας/κατακόρυφης θέσης

### Σύγκριση HDOP – VDOP

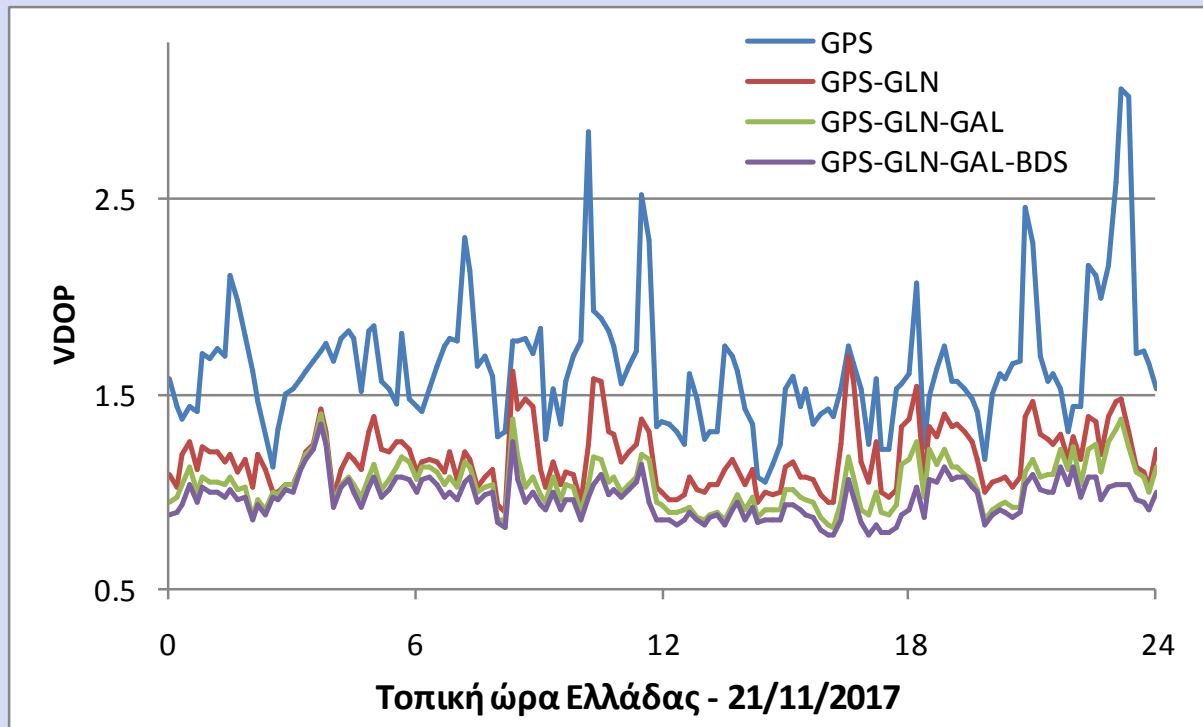


Elev. mask: 10° Number of svcs: 31 GPS

### 3. Ακρίβεια γεωμετρικών υψομέτρων από GPS/GNSS

## Ακρίβεια προσδιορισμού h από multi-GNSS

### Βελτίωση VDOP με χρήση multi-GNSS



Elev. mask: 10° Number of svcs: 31 GPS, 24 GLN, 16 GAL, 14 BDS

### 3. Ακρίβεια γεωμετρικών υψομέτρων από GPS/GNSS

#### Ακρίβεια προσδιορισμού h από multi-GNSS

Όπως φάνηκε από την προηγούμενη διαφάνεια, το multi-GNSS βελτιώνει τη γεωμετρία των παρατηρούμενων δορυφόρων ευνοώντας την ακρίβεια προσδιορισμού του h (όπως και της οριζόντιας θέσης).

Παράλληλα όμως το multi-GNSS ενδέχεται να εισάγει κάποια επιπλέον σφάλματα εξαιτίας των διαφορετικών συστημάτων αναφοράς των GNSS, όπως αναλύεται στις επόμενες τρεις διαφάνειες.

GNSS	GPS	GLONASS	GALILEO	BEIDOU
Σύστημα αναφοράς	WGS84	PZ90	GTRF	CGCS2000

### 3. Ακρίβεια γεωμετρικών υψομέτρων από GPS/GNSS

#### Ακρίβεια προσδιορισμού h από multi-GNSS

Τα διάφορα συστήματα αναφοράς των GNSS δεν παραμένουν αμετάβλητα αλλά αναπροσαρμόζονται στο πλαίσιο των διαχρονικών υλοποιήσεών τους.

#### Υλοποιήσεις Συστημάτων Αναφοράς GPS, GALILEO, GLONASS

WGS84		GTRF		PZ-90	
Υλοποίηση	Έτος	Υλοποίηση	Έτος	Υλοποίηση	Έτος
WGS84	1984	GTRF07v00	2007	PZ-90	1990
WGS84(730)	1994	GTRF07v01	2007	PZ-90.02	2002
WGS84(873)	1996	GTRF08v01	2008	PZ-90.11	2011
WGS84(1150)	2002	GTRF09v01	2009		
WGS84(1674)	2012	GTRF13v01	2013		
WGS84(1762)	2013	GTRF14v01	2014		

### 3. Ακρίβεια γεωμετρικών υψομέτρων από GPS/GNSS

## Ακρίβεια προσδιορισμού h από multi-GNSS

Μέχρι πριν κάποια χρόνια τα Συστ. Αναφ. των GNSS είχαν διαφορές έως μερικά dm. Πλέον η γενική επιδίωξη είναι η ταύτιση με το ITRS (σε εκάστοτε πρόσφατο ITRF).

### Παράδειγμα: Σταδιακή προσαρμογή του WGS84 στο ITRS

From	To	Epoch	T1 m	T2 m	T3 m	D ppb	R1 mas	R2 mas	R3 mas	Accuracy m
WGS84 (G1674)	WGS84 (G1762)	2005.0	-0.004	+0.003	+0.004	-6.9	-0.27	+0.27	-0.38	0.0052
WGS84 (G1150)	WGS84 (G1762)	2001.0	-0.006	+0.005	+0.020	-4.5	0	0	0	0.0047
WGS84 (G1150)	WGS84 (G1674)	2001.0	-0.0047	+0.0119	+0.0156	+4.72	+0.52	+0.01	+0.19	0.0059
ITRF2008	WGS84 (G1762)	2005.0	0	0	0	0	0	0	0	0.10
ITRF2008	WGS84 (G1674)	2005.0	0	0	0	0	0	0	0	0.10
ITRF2000	WGS84 (G1150)	2001.0	0	0	0	0	0	0	0	0.10
ITRF94	WGS84 (G873)	1997.0	0	0	0	0	0	0	0	0.10
ITRF91	WGS84 (G730)	1994.0	0	0	0	0	0	0	0	0.10
ITRF90	WGS84 (original)	1984.0	+0.060	-0.517	-0.223	-11.0	+18.3	-0.3	+7.0	0.01

### 3. Ακρίβεια γεωμετρικών υψομέτρων από GPS/GNSS

## Ακρίβεια προσδιορισμού h από multi-GNSS

Παράδειγμα: Σταδιακή προσαρμογή του PZ-90 στο ITRS

#	From	To	$\Delta X$ (m)	$\Delta Y$ (m)	$\Delta Z$ (m)	$\omega_x$ (mas)	$\omega_y$ (mas)	$\omega_z$ (mas)	$m$ ( $10^{-6}$ )	Epoch
1	PZ-90	PZ-90.02	-1.07 $\pm 0.10$	-0.03 $\pm 0.10$	+0.02 $\pm 0.10$	0	0	-130 $\pm 10$	-0.220 $\pm 0.020$	2002.0
2	WGS 84 (G1150)	PZ-90.02	+0.36 $\pm 0.10$	-0.08 $\pm 0.10$	-0.18 $\pm 0.10$	0	0	0	0	2002.0
3	PZ-90.11	ITRF2008	-0.003 $\pm 0.002$	-0.001 $\pm 0.002$	+0.000 $\pm 0.002$	+0.019 $\pm 0.072$	-0.042 $\pm 0.073$	+0.002 $\pm 0.090$	-0.000 $\pm 0.0003$	2010.0

### 3. Ακρίβεια γεωμετρικών υψομέτρων από GPS/GNSS

## Ακρίβεια προσδιορισμού h από multi-GNSS

### Παραδείγματα σταδιακής προσαρμογής στο ITRS

#### WGS84 (G1674)

Reference Frame (reference frame epoch)	Tx (mm) (sigma)	Ty (mm) (sigma)	Tz (mm) (sigma)	D (ppb) (sigma)	Rx (mas) (sigma)	Ry (mas) (sigma)	Rz (mas) (sigma)
WGS 84 (G1150)# (2001.0)	-4.7 5.9	11.9 5.9	15.6 5.9	4.72 0.92	-0.52 0.24	-0.01 0.24	-0.19 0.22
ITRF2008* (2005.0)	0	0	0	0	0	0	0

#### GTRF

Transformation parameters from GTRF09v01 to other frames. "ppb" refers to parts per billion (or  $10^{-9}$ ). The units for rate are understood to be "per year."

ITRF Solution	Tx (mm)	Ty (mm)	Tz (mm)	D (ppb)	Rx (mas)	Ry (mas)	Rz (mas)	Epoch
ITRF2005	(ZEROS BY CONSTRUCTION)							
ITRF2008 rates	2.0 -0.3	0.9 0.0	4.7 0.0	-0.94 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00	2000.0

## 3. Ακρίβεια γεωμετρικών υψομέτρων από GPS/GNSS

### Ακρίβεια προσδιορισμού h από multi-GNSS

#### Συμπερασματικά:

Μέχρι πριν από κάποια χρόνια οι αισθητές διαφορές μεταξύ των Συστημάτων Αναφοράς των GNSS και η πεπερασμένη ακρίβεια γνώσης των παραμέτρων μετασχηματισμού μπορούσαν να εισάγουν υπολογίσιμα σφάλματα σε εφαρμογές με απαιτήσεις ακρίβειας λίγων cm ως λίγων mm.

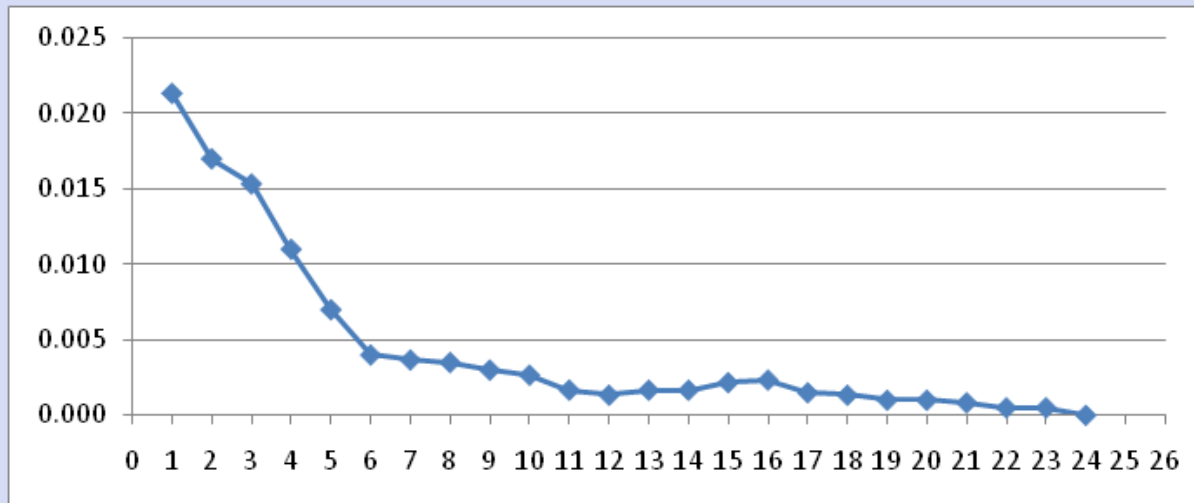
Σήμερα οι διαφορές μεταξύ των Συστημάτων Αναφοράς των GNSS έχουν περιοριστεί δραστικά, όμως η επίδρασή τους δεν είναι μηδενική όταν επιδιώκουμε να προσεγγίσουμε ακρίβειες γεωμετρικής χωροστάθμησης.

### 3. Ακρίβεια γεωμετρικών υψομέτρων από GPS/GNSS

## Διάρκεια μέτρησης βάσης GPS και ακρίβεια υψομέτρου

Για τον προσδιορισμό (γεωμετρικών) υψομέτρων με ακρίβεια καλύτερη του 1cm απαιτούνται μετρήσεις μεγάλης διάρκειας.

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει πως μειώνεται το σφάλμα του υψομέτρου με την αύξηση του χρόνου μέτρησης, ενδεικτικά για την περίπτωση μίας βάσης μήκους 23 Km.



## 4. GNSS leveling

### Τι είναι το GNSS leveling;

Με τον όρο GNSS leveling εννοούμε τον προσδιορισμό ορθομετρικών βάσει της σχέσης  $H = h - N$  χρησιμοποιώντας:

i) Γεωμετρικά υψόμετρα ( $h$ ) από μετρήσεις GNSS

και

ii) Αποχές του γεωειδούς ( $N$ ) από κάποιο μοντέλο γεωειδούς

Για το λόγο αυτό το GNSS leveling αναφέρεται και ως GNSS/geoid leveling.

## 4. GNSS leveling

### Corrector surfaces

Στη γενική περίπτωση:

- i) Η στάθμη μηδενικού υψομέτρου του κατακόρυφου συστήματος αναφοράς δεν ταυτίζεται με το γεωειδές που διαθέτουμε
- ii) Το μοντέλο γεωειδούς δεν αναφέρεται στο ίδιο Datum με αυτό στο οποίο αναφέρονται τα γεωμετρικά υψόμετρα από το GNSS

Σε τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιούμε τις λεγόμενες corrector surfaces.

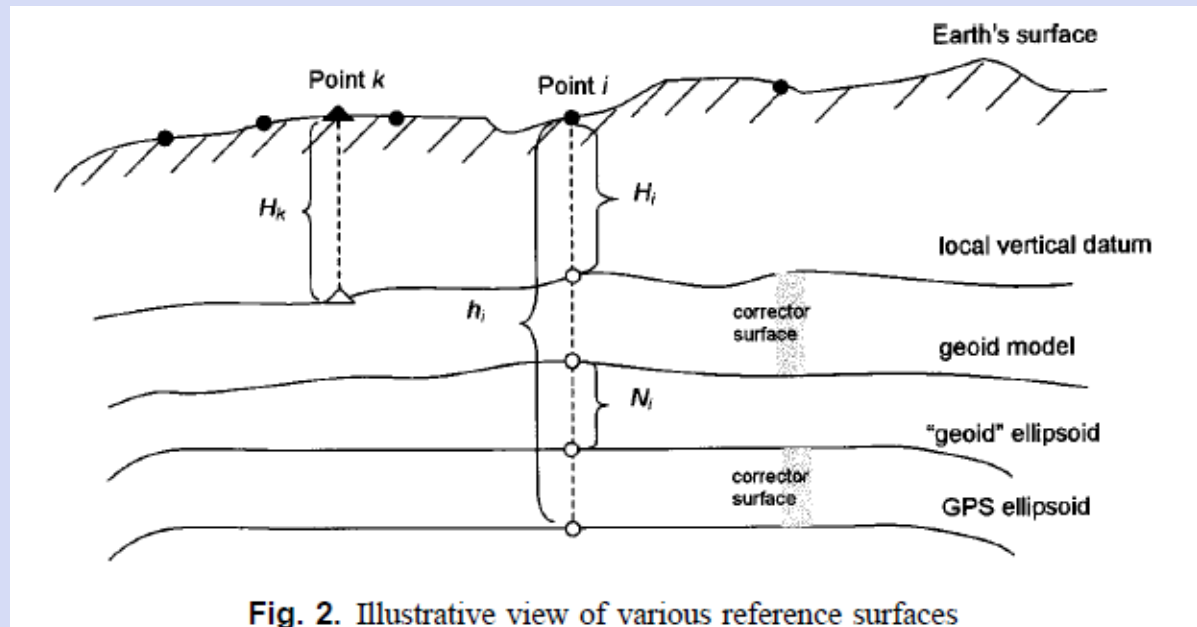


Fig. 2. Illustrative view of various reference surfaces

Fotopoulos et al, 2003, JSE

## 4. GNSS leveling

### Corrector surfaces

Παραδείγματα διαφορετικών σταθμών αναφοράς:

i) Η στάθμη μηδενικού υψομέτρου του κατακόρυφου συστήματος αναφοράς δεν ταυτίζεται με το γεωειδές που διαθέτουμε.

Π.χ. η επιφάνεια του γεωειδούς των παγκόσμιων μοντέλων γεωειδούς (π.χ. EGM96 και EGM2008) δεν ταυτίζεται με τη μηδενική στάθμη του Ελληνικού κατακόρυφου συστήματος αναφοράς

Χωροσταθμική επιφάνεια διαό τὰ ὕψη ἐλήφθη ἡ μέση στάθμη τῆς θαλάσσης ἢ διδομένη ὑπὸ τοῦ παλιρροιογράφου τοῦ λιμένος Πειραιῶς.  
Vertical DATUM: Piraeus tidal gauge in Piraeus harbor.

ii) Το μοντέλο γεωειδούς δεν αναφέρεται στο ίδιο ΕΕΠ με το ΕΕΠ στο οποίο αναφέρονται τα γεωμετρικά υψόμετρα από το GNSS.

Π.χ. τα γεωμετρικά υψόμετρα από GNSS μέσω των Ευρωπαϊκών δικτύων ΣΑ αναφέρονται στο ETRS89, ενώ τα παγκόσμια μοντέλα γεωειδούς (π.χ. EGM96 και EGM2008) αναφέρονται στο WGS84.

## 4. GNSS leveling

### GNSS leveling - Γεωμετρική Χωροστάθμηση

		Γεωμετρική Χωροστάθμηση	GNSS leveling
Ακρίβεια *	μικρές αποστάσεις	+	-
	μεγάλες αποστάσεις	-	+
Ταχύτητα μέτρησης	μικρές αποστάσεις	+	-
	μεγάλες αποστάσεις	-	+
Ευκολία-κόστος μέτρησης		-	+
Απαιτήσεις σε υποδομή		Πυκνό δίκτυο Reperes	Δίκτυο GNSS, γεωειδές

\* Ενδεικτικές ακρίβειες:

- Χωροστάθμηση: 1-2 mm/km

-  $h_{GNSS}$  : 5mm+1ppm

## 5. Ελληνικό Κατακόρυφο ΣΑ και GNSS leveling

### Γενικές επισημάνσεις

Θεωρητικά τα ορθομετρικά υψομετρικά συστήματα έχουν ως αναφορά μία ενιαία επιφάνεια: το γεωειδές.

Για διάφορους πρακτικούς λόγους, όπως η ύπαρξη νησιωτικών περιοχών κλπ, στην υλοποίηση του Ελληνικού Κατακόρυφου Συστήματος Αναφοράς εμπλέκονται περισσότερες από μία 'μηδενικές στάθμες'.

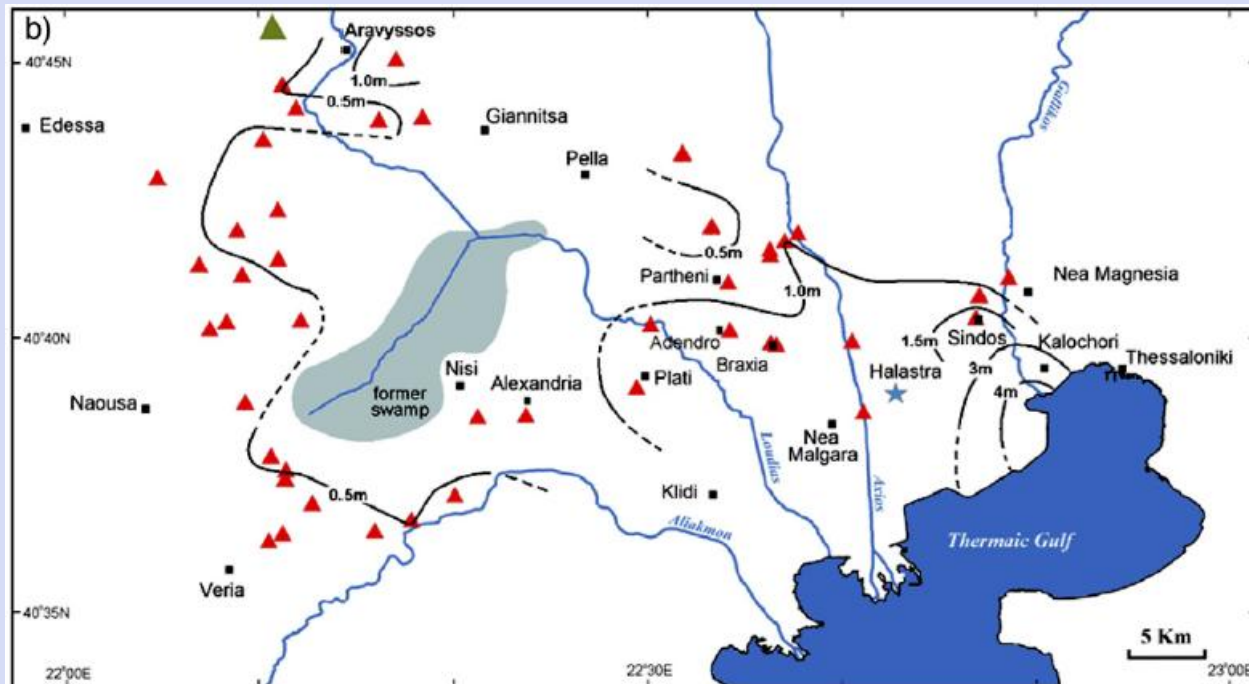
Οι μετρήσεις για την υλοποίηση του Ελληνικού Κατακόρυφου ΣΑ έγιναν πριν από ~ 4 δεκαετίες, και από τότε δεν έχει γίνει συστηματική επαναμέτρηση και επαναυπολογισμός του δικτύου. Συνεπώς σε περιοχές με κατακόρυφες μετατοπίσεις το Κρατικό δίκτυο δεν ανταποκρίνεται στη σημερινή κατάσταση.

Για τους παραπάνω λόγους η χρήση ενός βαρυτημετρικού μοντέλου γεωειδούς για GNSS leveling θα απαιτούσε σύνθετα corrector surfaces.

## 5. Ελληνικό Κατακόρυφο ΣΑ και GNSS leveling

### Παραδείγματα περιοχών καθιζήσεων

Καθιζήσεις στην περιοχή Καλοχωρίου με ρυθμούς ως 10cm/y.

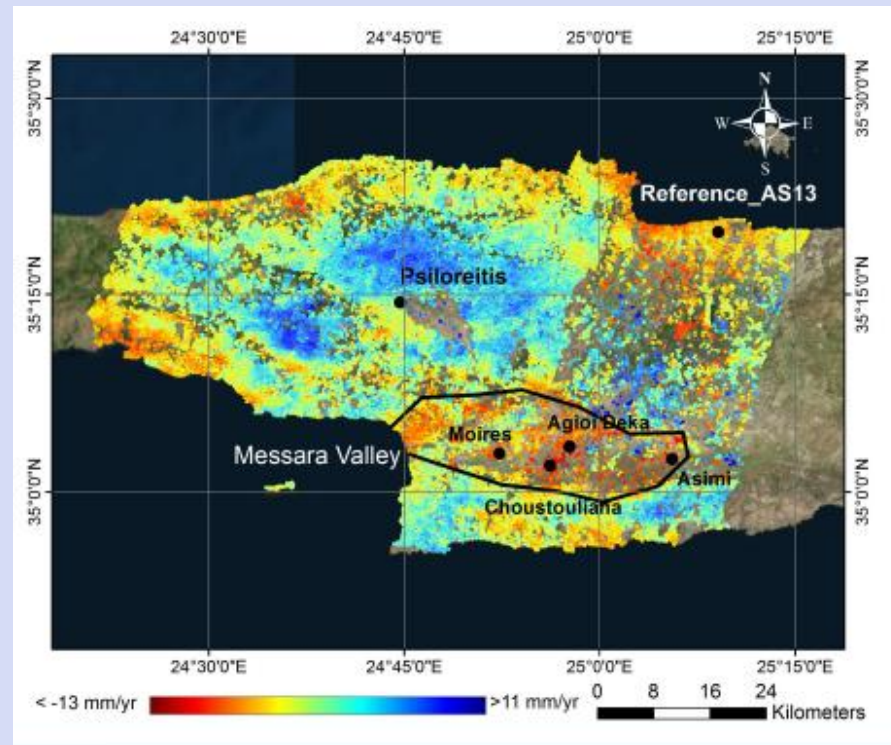


*Psimoulis et al. (2007)*

## 5. Ελληνικό Κατακόρυφο ΣΑ και GNSS leveling

### Παραδείγματα περιοχών καθιζήσεων

Καθιζήσεις στην κοιλάδα Μεσσαράς με ρυθμούς  $\sim 7\text{mm/y}$ .



*Kaskara et al. (2015)*

## 6. GNSS leveling με το HEPOS

### Εισαγωγή

**Βασικός στόχος του Ελληνικού Συστήματος Εντοπισμού HEPOS ήταν να εκμοντερνίσει τη γεωδαιτική υποδομή της χώρας χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες της δορυφορικής τεχνολογίας του GPS.**

**Το HEPOS αναπτύχθηκε για να αποτελέσει τη γεωδαιτική υποδομή του Εθνικού Κτηματολογίου και γενικότερα της χώρας.**

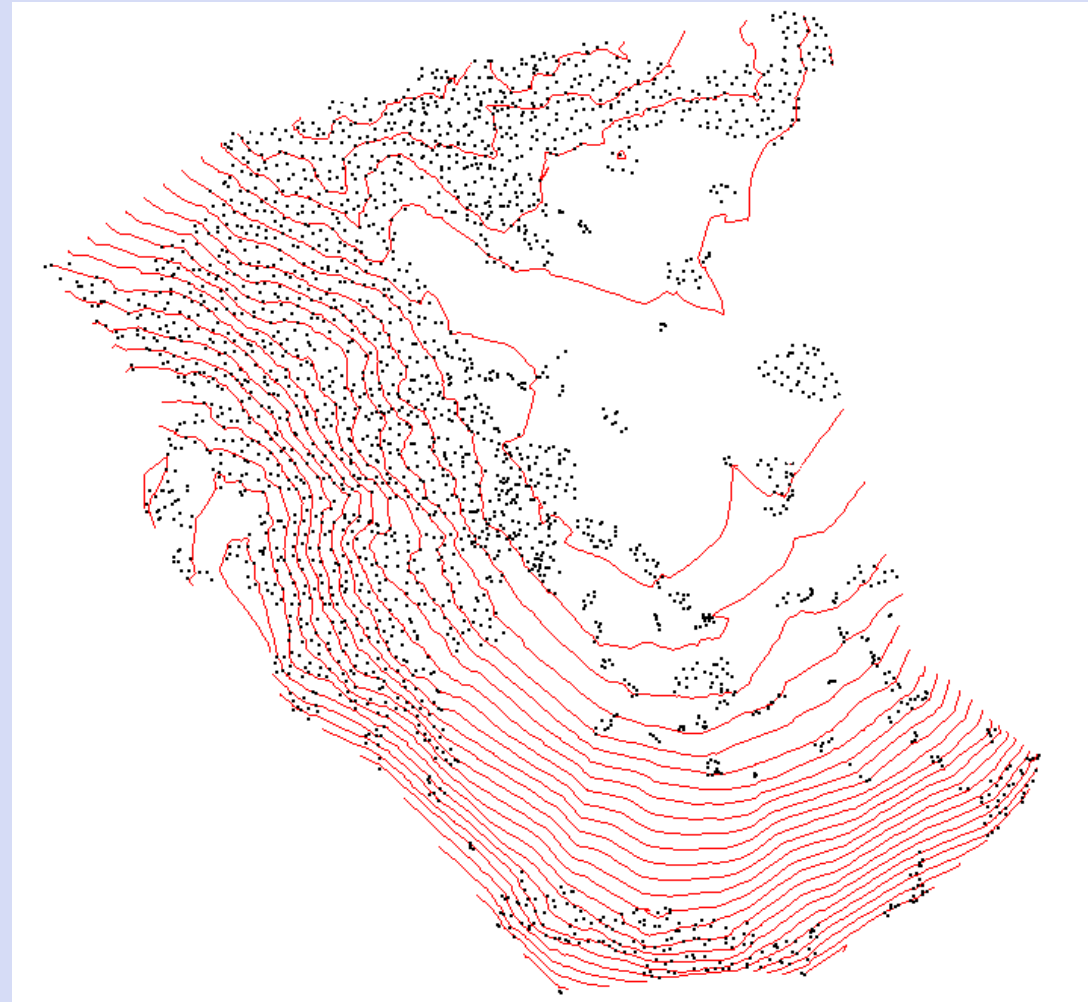
**Πέρα από τον προσδιορισμό οριζόντιων συντεταγμένων, η ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. προχώρησε το 2011 στην ανάπτυξη ενός μοντέλου γεωειδούς για τον προσδιορισμό γεωμετρικών υψομέτρων μέσω του HEPOS.**

## 6. GNSS leveling με το HEPOS

### Υπολογισμός γεωειδούς του HEPOS

Στηρίχθηκε σε ~2700 σημεία της ΓΥΣ (κυρίως τριγωνομετρικά) με:

- γνωστά ορθομετρικά υψόμετρα
- γνωστές HTRS07 συντεταγμένες ( $\varphi, \lambda, h$ )



Gianniou (2011)

## 6. GNSS leveling με το HEPOS

### Διάθεση γεωειδούς του HEPOS

Το μοντέλο γεωειδούς έχει ενσωματωθεί στο λογισμικό HEPOS TRANSFORMATION TOOL που ανέπτυξε η ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. και το οποίο υλοποιεί το επίσημο μοντέλο μετασχηματισμού HTRS07-ΕΓΣΑ87.

Το λογισμικό διατίθεται ελεύθερα μέσω του ιστοχώρου [www.hepos.gr](http://www.hepos.gr), από το Μάιο του 2011.

## 6. GNSS leveling με το HEPOS

### Το λογισμικό HEPOS TRANSFORMATION TOOL

HEPOS Transformation Tool

Αρχείο Επεξεργασία Εργαλεία Βοήθεια

Λειτουργία με πληκτρολόγηση Λειτουργία αρχείου Καταγραφή συμβάντων

**Αφετηρία**

Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς: HTRS07 / TM07

Τύπος συντεταγμένων: Γεωκεντρικές Καρτεσιανές (X, Y, Z)

Μορφή συντεταγμένων:

Υψόμετρο:

X [m]: 4600650.854

Y [m]: 2048341.731

Z [m]: 3900892.053

**Προορισμός**

Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς: ΕΓΣΑ87 / TM87

Τύπος συντεταγμένων: Προβολικές (E, N)

Μορφή συντεταγμένων:

Υψόμετρο: Ορθομετρικό υψόμετρο (H)

Easting [m]: 499850.772

Northing [m]: 4199721.005

Ορθομετρικό Υψόμετρο [m]: 6.150

**Διαδικασία**

Μετασχηματισμός

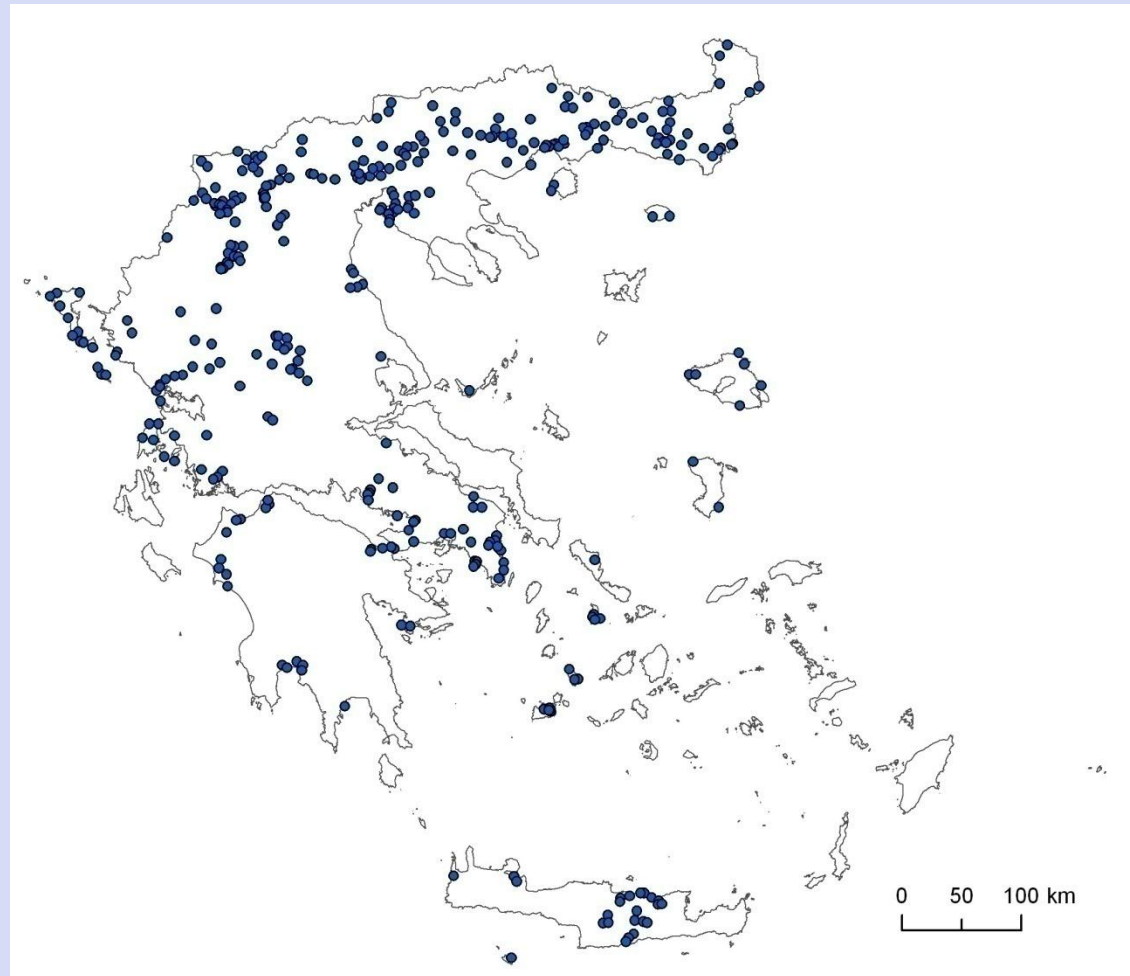
δE [m]: +0.279

δN [m]: +0.561

## 6. GNSS leveling με το HEPOS

### Αξιολόγηση ακρίβειας γεωειδούς του HEPOS

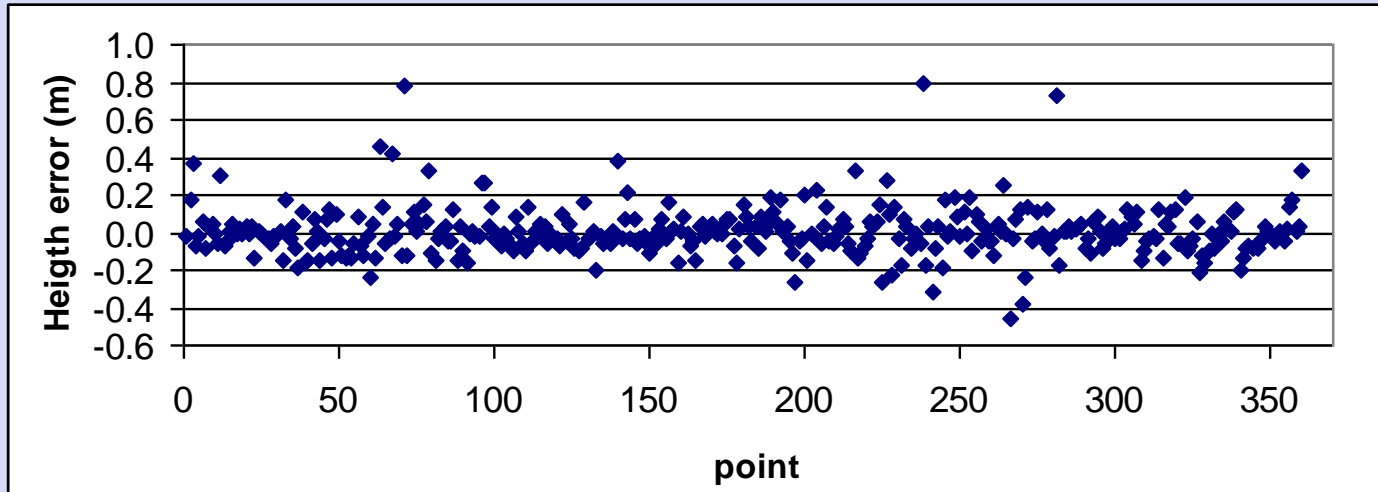
- ~ 360 σημεία της ΓΥΣ με γνωστό  $H$  (κυρίως τριγωνομετρικά)
- $h$  στο HTRS07 μέσω του HEPOS (διάρκεια μέτρησης  $\geq 1$  ώρα)
- Υπολογισμός  $H$  μέσω του γεωειδούς του HEPOS



Gianniou and Mastoris (2013)

## 6. GNSS leveling με το HEPOS

### Αξιολόγηση ακρίβειας γεωειδούς του HEPOS



Στατιστικά σφάλματος dH (m) *					
Min	Max	Percentiles			
		50th	90th	95th	99th
0.000	0.793	0.056	0.176	0.260	0.455

(\*) Τα υψηλότερα σφάλματα οφείλονται κατά κύριο λόγο σε προβληματικά σημεία

## Εκφώνηση

Βάσει του γεωειδούς του HEPOS να προσδιοριστεί:

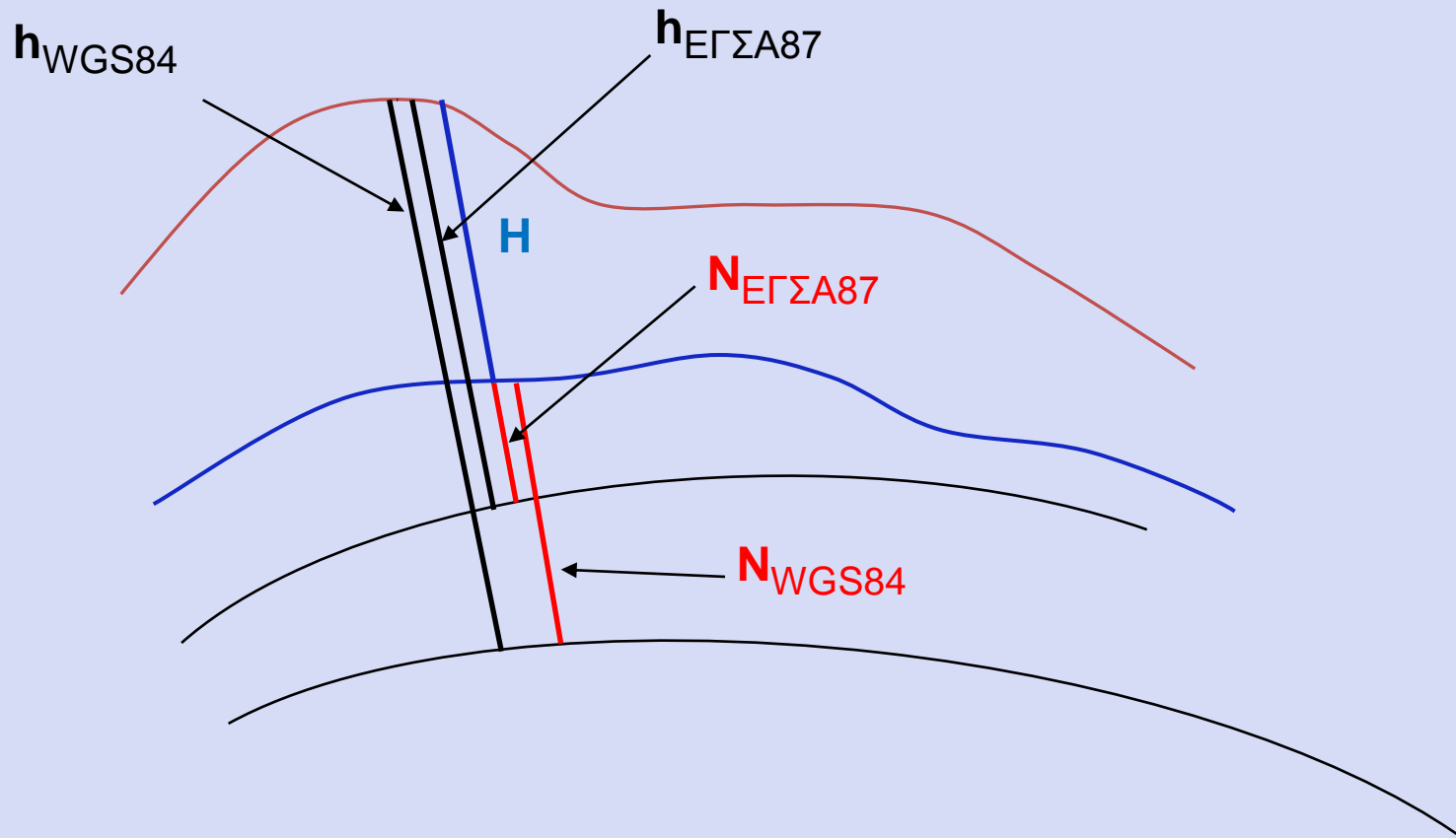
- η αποχή του γεωειδούς στο HTRS07
- η αποχή του γεωειδούς στο ΕΓΣΑ87

για ένα σημείο στο Ποσειδί Χαλκιδικής και ένα σημείο στον Κίσσαμο Χανίων και οι τιμές που βρέθηκαν να συγκριθούν με τις τιμές από τους χάρτες γεωειδούς του slide 32.

Να αξιολογηθούν και να ερμηνευτούν οι διαφορές που προέκυψαν.

# Άσκηση

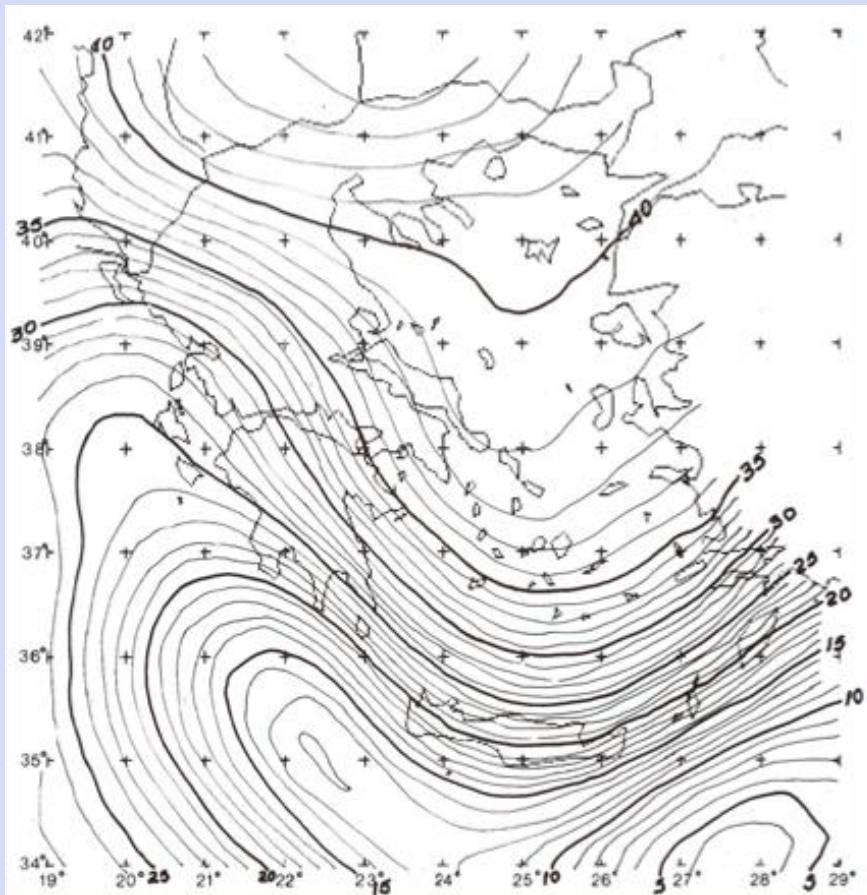
## Βοηθητικό υλικό άσκησης



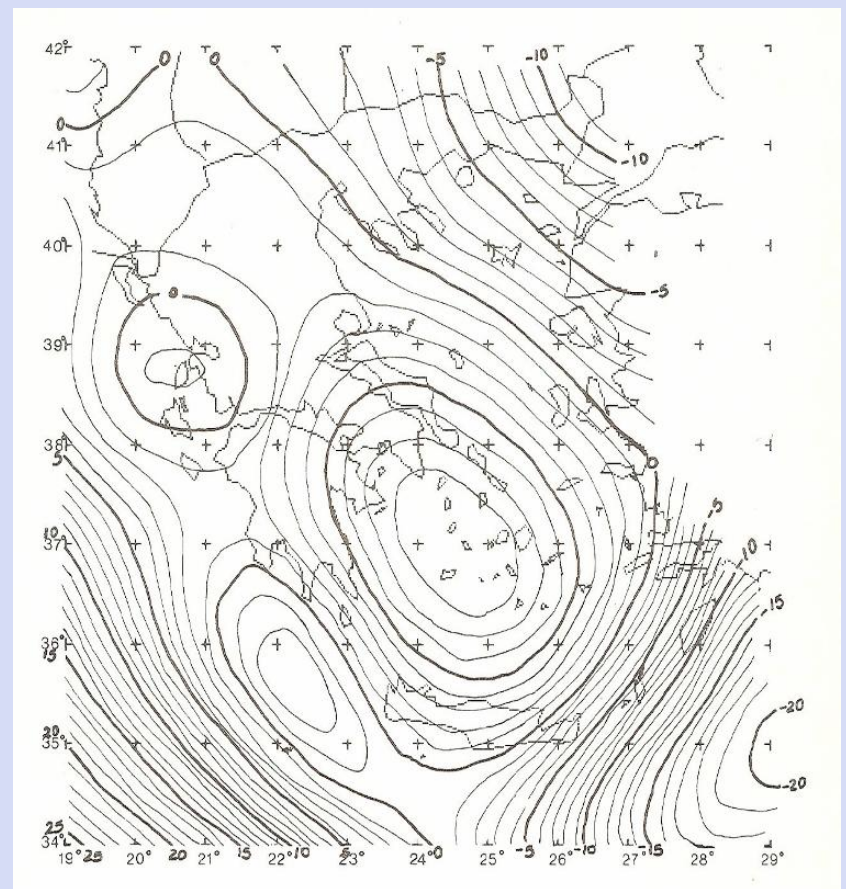
# Άσκηση

## Βοηθητικό υλικό άσκησης

### Προσεγγιστικό γεωειδές στο WGS'84



### Προσεγγιστικό γεωειδές στο ΕΓΣΑ'87



# Άσκηση

## Βοηθητικό υλικό άσκησης

### WGS84 - ΕΓΣΑ87

- $\Delta X = 199.723 \text{ m}$
- $\Delta Y = -74.03 \text{ m}$
- $\Delta Z = -246.018 \text{ m}$

### HTRS07 - ΕΓΣΑ87

$$\begin{array}{lll} t_x = 203.437 \text{ m} & \varepsilon_x = -0.170 \text{ arcsec} & \delta s = -0.294 \text{ ppm} \\ t_y = -73.461 \text{ m} & \varepsilon_y = -0.060 \text{ arcsec} & \\ t_z = -243.594 \text{ m} & \varepsilon_z = -0.151 \text{ arcsec} & \end{array}$$

και κάρναβοι διορθώσεων για E και N.