

Γιώργος Πανταζής

# Γεωδαιτικές Μέθοδοι Ελέγχου Μετακινήσεων



ISBN978-960-456-551-1

© Copyright: Σεπτέμβριος 2020, Πανταζής Γιώργος, Εκδόσεις Ζήτη

---

*Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.*

---

**Φωτοστοιχειοθεσία**

**Εκτύπωση**

**Βιβλιοδεσία**

**Π. ΖΗΤΗ & Σια ΙΚΕ**

18<sup>ο</sup> χλμ Θεσσαλονίκης - Περαιάς

Τ.Θ. 4171 • Περαιά Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19

Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: info@ziti.gr



**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:**

Αρμενοπούλου 27 - 546 35 Θεσσαλονίκη • Τηλ.: 2310-203.720 • Fax 2310-211.305

e-mail: sales@ziti.gr

**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ:**

Χαριλάου Τρικούπη 22 - Τ.Κ. 106 79, Αθήνα • Τηλ.-Fax: 210-3816.650

e-mail: athina@ziti.gr

**ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ:** [www.ziti.gr](http://www.ziti.gr)

---

Το βιβλίο αυτό αφιερώνεται εξαιρετικά στον μέντορά του,  
τη συνάδελφο, φίλη και αγαπημένη συνοδοιπόρο

**Λίτσα Λάμπρου,**

που έφυγε τόσο πρόωρα από κοντά μου,  
αφήνοντας ένα δυσαναπλήρωτο  
προσωπικό και επιστημονικό κενό.

---

# Πρόλογος

Η εξέλιξη της τεχνολογίας της μέτρησης αλλά και των συστημάτων υπολογισμού, έχει προσδώσει στον Τοπογράφο Μηχανικό, άλλο ένα σημαντικό πεδίο έρευνας αλλά και επαγγελματικής ενασχόλησης, αυτό του ελέγχου μετακινήσεων.

Γνωρίζοντας τις ιδιαιτερότητες που εμφανίζονται στις μεθοδολογίες μέτρησης και υπολογισμού των μεταβολών της θέσης σημείων και στη διαδικασία με την οποία απαντάται το ερώτημα αν αυτή είναι μετακίνηση ή όχι, καταβάλλεται προσπάθεια μέσα από αυτό το βιβλίο, να καταγραφούν με συστηματικό και ορθό τρόπο και να παρουσιαστούν όλες οι παράμετροι που οδηγούν στον ασφαλή τρόπο ελέγχου μετακινήσεων.

Το βιβλίο αυτό στοχεύει στο να παρουσιάσει τη σύγχρονη αντιμετώπιση των μεθόδων ελέγχου μετακινήσεων – παραμορφώσεων, συνδυάζοντας τη θεωρία με την πράξη.

Τα σχήματα, οι εικόνες και τα αναλυτικά παραδείγματα συνόρθωσης γεωδαιτικών δικτύων και ελέγχου μετακινήσεων που περιλαμβάνονται, έχουν ως σκοπό να βοηθήσουν στην κατανόηση των εφαρμοζόμενων μεθοδολογιών μέτρησης και επεξεργασίας, κάνοντας ταυτόχρονα ευχάριστη την ανάγνωση.

Απευθύνεται κυρίως σε προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές τοπογράφους μηχανικούς αλλά και σε κάθε ενδιαφερόμενο που ασχολείται με θέματα συνόρθωσης δικτύων και προσδιορισμού μετακινήσεων στην επαγγελματική του δραστηριότητα.

Η γεωδαισία, συνεπικουρούμενη από την εξέλιξη της τεχνολογίας, καλύπτει και την επιστημονική περιοχή των μετακινήσεων. Τα τελευταία είκοσι χρόνια, η ραγδαία εξέλιξη των οργάνων μέτρησης αλλά και των υπολογιστικών συστημάτων και λογισμικών επεξεργασίας των μετρήσεων, επηρέασαν θετικά τη δράσης της στο γνωστικό αντικείμενο των μετακινήσεων. Αναπτύχθηκαν νέες μεθοδολογίες οι οποίες διευρύναν τα πεδία παρέμβασης και εφαρμογής της.

Αυτό το στοιχείο αποτέλεσε και το έναυσμα για τον τίτλο του βιβλίου **Γεωδαιτικές μέθοδοι ελέγχου Μετακινήσεων**.

Η ανάπτυξη και χρήση ολοκληρωμένων συστημάτων μέτρησης (γεωδαιτικοί σταθμοί, ψηφιακοί χωροβάτες, δέκτες δορυφορικού εντοπισμού) απλουστεύει και συντομεύει τη συλλογή των μετρήσεων στο πεδίο. Παράλληλα συνδυάζεται με κατάλληλα λογισμικά επεξεργασίας και έτσι οδηγεί σε αξιόπιστα, ακριβέστερα παρά-

γωγα και καθιστά απλούστερη τη διαδικασία ελέγχου μετακινήσεων - παραμορφώσεων.

Στα επιμέρους κεφάλαια του παρόντος βιβλίου παρουσιάζονται τα στοιχεία (θεωρητικά και εφαρμοσμένα) που επιτρέπουν την ορθή γνώση για τη χρήση των γεωδαιτικών μεθόδων, που οδηγούν με ασφάλεια στη συνόρθωση (επίλυση) γεωδαιτικών δικτύου ελέγχου μετακινήσεων.

Το *πρώτο κεφάλαιο* αναλώνεται στην παρουσίαση μιας μικρής ιστορικής αναδρομής και καταγραφής στοιχείων που αφορούν στην εξέλιξη της παρουσίας της γεωδαισίας στην επιστημονική περιοχή του ελέγχου μετακινήσεων. Καταγράφεται με συστηματικό τρόπο η ορολογία που συνήθως χρησιμοποιείται σε αυτές τις περιπτώσεις συνεπικουρούμενη από τους αντίστοιχους ορισμούς. Παρουσιάζονται συγκεκριμένες περιπτώσεις εφαρμογής γεωδαιτικών μεθοδολογιών που αφορούν στον προσδιορισμό μετακινήσεων σε μία, δύο & τρεις διαστάσεις.

Στο *δεύτερο κεφάλαιο* γίνεται παρουσίαση των βασικών παραμέτρων ορισμού γεωδαιτικών δικτύων ελέγχου μετακινήσεων, των συστημάτων συν/νων που χρησιμοποιούνται ώστε να παρουσιάζεται με τρόπο απλό το φαινόμενο των μετακινήσεων ή παραμορφώσεων. Καταγράφεται η διαδικασία που προηγείται της υλοποίησης τέτοιων δικτύων, με την προεκτίμηση της ακρίβειας προσδιορισμού θέσης. Δίνεται ιδιαίτερη σημασία στη διαδικασία της βελτιστοποίησης με την οποία επιλέγεται ο βέλτιστος αριθμός των κορυφών του δικτύου, ο καλύτερος συνδυασμός των μετρήσεων που πρέπει να πραγματοποιηθούν αλλά και ο ιδανικός γεωδαιτικός εξοπλισμός που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή των μετρήσεων.

Το *τρίτο κεφάλαιο* ασχολείται με τη χωροθέτηση και την υλοποίηση γεωδαιτικών δικτύων ελέγχου μετακινήσεων. Παρουσιάζονται εναλλακτικοί τρόποι υλοποίησης των κορυφών τους, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μονιμότητα στο χρόνο και η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων κέντρωσης που συνήθως επιβαρύνουν τις γεωδαιτικές μετρήσεις. Ακολουθεί η παρουσίαση των μεθοδολογιών μέτρησης που χρησιμοποιούνται ανάλογα με το είδος του δικτύου (1D, 2D, 3D) καθώς και των απαραίτητων αναγωγών – διορθώσεων που πρέπει να γίνονται στα μετρούμενα μεγέθη πριν εισαχθούν στη συνόρθωση των μετρήσεων. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στην ανάλυση και στον έλεγχο των μετρούμενων μεγεθών, ώστε να εντοπιστούν πιθανά χονδροειδή ή και συστηματικά σφάλματα. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει ουσιαστικά και η επιλογή των βαρών (σφαλμάτων μέτρησης) για τη συνόρθωση των δικτύων που θα ακολουθήσει.

Το *τέταρτο κεφάλαιο* αφιερώνεται στις μεθόδους συνόρθωσης γεωδαιτικών δικτύων. Καταγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά τους, και αναλύονται θεωρητικά οι δύο βασικές κατηγορίες συνόρθωσης, των εμμέσων παρατηρήσεων και των συμβατικών παρατηρήσεων (με εσωτερικές και εξωτερικές δεσμεύσεις). Παρουσιάζονται

ζεται το μαθηματικό μοντέλο για κάθε μία που χρησιμοποιείται, ώστε να υπολογιστούν τα άγνωστα κάθε φορά μεγέθη.

Στο *πέμπτο κεφάλαιο* γίνεται αναλυτική παρουσίαση των απαραίτητων στατιστικών ελέγχων που πρέπει να γίνονται ώστε να επιβεβαιώνεται η ορθότητα της συνόρθωσης. Παράλληλα παρουσιάζονται όλοι οι δυνατοί τρόποι απεικόνισης των στατιστικών ελέγχων (ελλείψεις ή ελλειψοειδή σφάλματος).

Το *έκτο κεφάλαιο* ασχολείται με τον υπολογισμό των μετακινήσεων, δηλαδή με την απάντηση στο ερώτημα αν η μεταβολή της θέσης ενός σημείου είναι μετακίνηση για ένα συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο για κάθε περίπτωση γεωδαιτικού δικτύου (μονοδιάστατο, δυδιάστατο, τριδιάστατο) με το οποίο είναι δυνατός ο προσδιορισμός της απόλυτης ή σχετικής μετακίνησης μια κορυφής ενός τέτοιου γεωδαιτικού δικτύου.

Στο *έβδομο κεφάλαιο* παρουσιάζονται συγκεκριμένα παραδείγματα συνόρθωσης γεωδαιτικών δικτύων. Τα παραδείγματα αυτά περιλαμβάνουν τόσο την αξιολόγηση των μετρήσεων, τη συνόρθωση του δικτύου αλλά και τον προσδιορισμό των μετακινήσεων. Για την καλύτερη κατανόησή τους συνοδεύονται από αντίστοιχους πίνακες αποτελεσμάτων και σχετικά σχήματα απεικόνισης των μετακινήσεων.

Το *όγδοο κεφάλαιο* ασχολείται με ένα αντικείμενο που τα τελευταία χρόνια έχει βρει πεδίο εφαρμογής και αφορά στην παρακολούθηση της Υγείας των κατασκευών (Structural Health Monitoring). Παρουσιάζονται οι βασικές αρχές ολοκληρωμένων συστημάτων με τη βοήθεια των οποίων είναι δυνατή η παρακολούθηση της συμπεριφοράς μιας κατασκευής (γέφυρας, φράγματος, κτηρίου) συνδυάζοντας γεωδαιτικές και μη γεωδαιτικές μεθόδους συλλογής δεδομένων.

Πιστεύω ότι η μελέτη του βιβλίου αυτού θα βοηθήσει τους αναγνώστες του στην κατανόηση των αντικειμένων που πραγματεύεται.

Επίσης ευελπιστώ ότι θα επιλύσει συνήθεις απορίες τους, που παρουσιάζονται στις περιπτώσεις ελέγχου μετακινήσεων.

Οι παρατηρήσεις αλλά και οποιοδήποτε σχόλιο από τους αναγνώστες είναι ευπρόσδεκτα και σίγουρα θα βοηθήσουν στη βελτίωση του βιβλίου σε επόμενη έκδοση.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

Ο συγγραφέας  
Γιώργος Πανταζής  
Καθηγητής ΕΜΠ

# Περιεχόμενα

## Κεφάλαιο 1

### Περί Ελέγχου Μετακινήσεων

1.1	Γενικά .....	19
1.2	Ιστορικά στοιχεία .....	20
1.3	Ορολογία - Ορισμοί .....	21
1.4	Ιστορικά στοιχεία από δίκτυα ελέγχου στην Ελλάδα .....	24
1.4.1	Δίκτυα παρακολούθησης του Φράγματος Μόρνου .....	25
1.4.2	Δίκτυα ελέγχου της παλαιάς γέφυρας της Άρτας .....	28
1.4.3	Παρακολούθηση παραμορφώσεων φερόντων στοιχείων Σταδίου Ειρήνης και Φιλίας Ν. Φαλήρου .....	30
1.4.4	Δίκτυο παρακολούθησης καθιζήσεων (κατακορύφου ελέγχου) στην περιοχή του Μοσχάτου .....	33
1.4.5	Δίκτυο παρακολούθησης οριζόντιων μετακινήσεων στην περιοχή της Καλαμάτας .....	35
1.4.6	Παρακολούθηση της συμπεριφοράς τεκτονικού ρήγματος του στερεού φλοιού της γης και κατασκευών στην περιοχή Αγία Τριάδα Πατρών .....	35
1.4.7	Παρακολούθηση μετακινήσεων του φέροντα οργανισμού του γηπέδου Καραϊσκάκη .....	38
1.4.8	Παρακολούθηση παραμορφώσεων του φράγματος του Κούρη στην Κύπρο .....	41
1.4.9	Δίκτυο ελέγχου μετακινήσεων του Βυζαντινού ναού της Μεγάλης Παναγίας στην Σαμαρίνα του Ν. Γρεβενών .....	46
1.4.10	Δίκτυο υψηλής ακρίβειας, διαχρονικής παρακολούθησης και μελέτης των επιφανειακών παραμορφώσεων της περιοχής Λαγκαδά - Βόλβης .....	50
1.5	Ιστορικά στοιχεία από δίκτυα ελέγχου στον κόσμο .....	52
1.5.1	Τριδιάστατο γεωδαιτικό δίκτυο παρακολούθησης του Ιερού Κουβου- κλίου του Παναγίου Τάφου στον Πανίερο ναό της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα .....	54

## Κεφάλαιο 2

### Παράμετροι Ορισμού Δικτύων

2.1 Γενικά .....	61
2.2 Τα χαρακτηριστικά των δικτύων – Βασικές προϋποθέσεις.....	62
2.3 Σύστημα αναφοράς .....	62
2.4 Επιλογή – προεκτίμηση βαρών .....	64
2.5 Βελτιστοποίηση – ευαισθησία.....	66

## Κεφάλαιο 3

### Δίκτυα Ελέγχου

3.1 Γενικά .....	71
3.2 Χωροθέτηση δικτύων.....	71
3.3 Υλοποίηση Δικτύων .....	72
3.3.1 Η επίδραση του σφάλματος κέντρωσης οργάνου και στόχων.....	73
3.3.2 Υλοποίηση των σημείων του 1D, 2D, 3D δικτύου με κατασκευές από ορείχαλκο .....	75
3.3.3 Υλοποίηση σημείων ελέγχου μετακινήσεων με κατασκευές από σκυρόδεμα.....	80
3.3.4 Επισημάνσεις .....	82
3.4 Μετρήσεις.....	83
3.4.1 Εξοπλισμός (όργανα) .....	83
3.4.2 Μεθοδολογία.....	84
3.5 Ανάλυση – Έλεγχος μετρήσεων .....	90
3.6 Αξιολόγηση μετρήσεων – Επιλογή βαρών .....	92

## Κεφάλαιο 4

### Συνόρθωση Δικτύων

4.1 Γενικά .....	101
4.2 Τα χαρακτηριστικά των μεθόδων .....	101
4.3 Μέθοδος εμμέσων παρατηρήσεων.....	103
4.3.1 Μονοδιάστατα Δίκτυα – Υψομετρικά .....	104
4.3.2 Δυδιάστατα Δίκτυα – Δίκτυα οριζοντίου ελέγχου.....	106
4.3.3 Τριδιάστατα Δίκτυα.....	111
4.3.4 Δίκτυα GNSS .....	114
4.4 Μέθοδος συμβατικών παρατηρήσεων .....	116



4.4.1	Μονοδιάστατα Δίκτυα – Υψομετρικά .....	117
4.4.2	Δυσδιάστατα Δίκτυα .....	119

## Κεφάλαιο 5

### Αξιολόγηση Συνόρθωσης

5.1	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων .....	129
5.2	Στατιστικοί έλεγχοι.....	129
5.2.1	Ολικός έλεγχος αξιοπιστίας (έλεγχος σ <sub>0</sub> ).....	129
5.2.2	Έλεγχος υπολοίπων, Baarda.....	130
5.2.3	Ισχύς δικτύου.....	131
5.3	Επαναπροσδιορισμός βαρών .....	133
5.4	Έλλειψη και ελλειψοειδές σφάλματος .....	134
5.4.1	Έλλειψη σφάλματος.....	134
5.4.2	Ελλειψοειδές σφάλματος .....	140

## Κεφάλαιο 6

### Υπολογισμός Μετακινήσεων

6.1	Γενικά .....	147
6.2	Επιλογή επιπέδου εμπιστοσύνης.....	147
6.3	Διαδικασία .....	148
6.3.1	Υπολογισμός μετακινήσεων σε Μονοδιάστατα Δίκτυα .....	149
6.3.2	Υπολογισμός μετακινήσεων σε Δυσδιάστατα Δίκτυα.....	152
6.3.3	Υπολογισμός μετακινήσεων σε Τριδιάστατα Δίκτυα.....	155
6.3.4	Υπολογισμός μετακινήσεων σε Δίκτυα GNSS.....	158

## Κεφάλαιο 7

### Παραδείγματα – Εφαρμογές

7.1	Γενικά .....	165
7.2	Υψομετρικός έλεγχος.....	165
7.3	Δυσδιάστατος έλεγχος .....	177
7.3.1	Μετρήσεις & συνόρθωση 1ης φάσης (Σεπτέμβριος 2012).....	178
7.3.2	Μετρήσεις & συνόρθωση 2ης φάσης (Ιούνιος 2015).....	183
7.3.3	Υπολογισμός μετακίνησης .....	185
7.4	Τριδιάστατος έλεγχος.....	190

7.4.1	1ο Παράδειγμα .....	190
7.4.2	2ο Παράδειγμα .....	203
7.5	Έλεγχος μετακινήσεων σε δίκτυα GNSS .....	219
7.5.1	Υπολογισμός απόλυτων μετακινήσεων .....	225
7.5.2	Υπολογισμός σχετικών μετακινήσεων .....	228

## Κεφάλαιο 8

### Παρακολούθηση της “Υγείας” Κατασκευών (Structural Health Monitoring)

8.1	Γενικά .....	233
8.2	Σχεδιασμός και Υλοποίηση Συστήματος (ΠΔΚ) παρακολούθησης της “Υγείας” Κατασκευής .....	235
8.2.1	Όργανα πειραματικής μηχανικής – Γεωτεχνικά Όργανα .....	236
8.2.2	Γεωδαιτικά Όργανα .....	239
8.3	Χωροθέτηση ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων με αλγορίθμους υπολογιστικής γεωμετρίας .....	243
8.4	Πρόβλεψη μεταβολής θέσης (μετακινήσεων) σημείων στο χώρο .....	246
8.5	Παρακολούθηση του στερεού φλοιού της γης .....	251
8.5.1	Το επιστημονικό πρόγραμμα Earthscope .....	251
8.5.2	Ο προσδιορισμός παραμορφώσεων χρησιμοποιώντας το δίκτυο μόνιμων σταθμών στην Ευρώπη - EPN (EUREF Permanent GNSS Network) .....	254
8.5.3	Ο προσδιορισμός παραμορφώσεων χρησιμοποιώντας το δίκτυο μόνιμων σταθμών στην Ελλάδα - Heros .....	257
8.6	Παρακολούθηση της Υγείας τεχνητών κατασκευών .....	260
8.6.1	Λειτουργία Μόνιμου Συστήματος Παρακολούθησης Μετακινήσεων .....	260
8.6.2	Παρακολούθηση ταλαντώσεων γέφυρας με χρήση γεωδαιτικών μεθόδων .....	268
	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>273</b>
	<b>Ευρετήριο .....</b>	<b>278</b>
	<b>Πίνακες Κατανομών .....</b>	<b>281</b>

## 1.1 Γενικά

Η παρουσία του ανθρώπου στη γη συνδέεται με την κατασκευή τεχνικών έργων που είναι απαραίτητα για την επιβίωσή του αλλά και την ανάπτυξη των δραστηριοτήτων του.

Τέτοια έργα είναι φράγματα, γέφυρες ή γεφύρια, μεγάλοι αυτοκινητόδρομοι, σιδηροδρομικές γραμμές, σήραγγες, ψηλά κτήρια, μνημεία, προκατασκευές, στάδια, θέατρα, κ.α.

Παράλληλα υπάρχουν φυσικές κατασκευές, αυτές δηλαδή που δημιουργούνται κυρίως χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση, όπως είναι τα ηφαίστεια, τα πρανή, οι λόφοι, οι οποίες παρουσιάζουν μεταβολή της θέσης τους με το πέρασμα του χρόνου.

Πολλές επιστήμες ασχολούνται σήμερα με τη μελέτη, την κατασκευή και τη λειτουργία αυτών των έργων. Η Γεωδαισία συμβάλλει από τη δική της σκοπιά, με την καταγραφή - τεκμηρίωση της μορφής, του μεγέθους και του σχήματος αυτών των κατασκευών αλλά και με την παρακολούθηση της μεταβολής της θέσης τους και της μορφής τους στο πέρασμα του χρόνου.

Έτσι έχει δημιουργηθεί ένας ξεχωριστός κλάδος της γεωδαισίας που ασχολείται με την ανάπτυξη κατάλληλων μεθοδολογιών για την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς τέτοιων κατασκευών. Η παρακολούθηση εκτελείται τόσο κατά τη διάρκεια των εργασιών κατασκευής όσο και μετά την ολοκλήρωσή τους.

Ο κλάδος αυτός είναι πλέον διεθνώς γνωστός ως **“deformation monitoring”** (παρακολούθηση παραμορφώσεων) ή **“structure monitoring”** (παρακολούθηση κατασκευών).

Έτσι στο πλαίσιο των ελέγχων και της διαχρονικής παρακολούθησης της συμπεριφοράς του στερεού φλοιού της γης (τεκτονική γεωδαισία) και των κατασκευών, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι, με σκοπό την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με τη μεταβολή της θέσης ενός σημείου και την αξιολόγησή της. Οι μέθοδοι αυτές αξιοποιούν στο έπακρο τα σύγχρονα συστήματα μέτρησης και επεξεργασίας.

Η παρακολούθηση κατασκευών αποτελεί σήμερα ένα από τα κύρια αντικείμενα του τοπογράφου μηχανικού, δεδομένου ότι είναι ο μόνος μηχανικός που διαθέτει τόσο την τεχνογνωσία των οργάνων, της διαδικασίας μέτρησης και υπολογισμού όσο και της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων. Η εργασία αυτή είναι ιδιαίτερα δύσκολη, απαιτεί μέγιστη υπευθυνότητα και αξιόπιστα αποτελέσματα – συμπεράσματα, αφού οποιαδήποτε αστοχία μπορεί να επιφέρει μεγάλες υλικές ζημιές και όχι μόνο.

Σήμερα η παρακολούθηση των κατασκευών μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο βασικές διαδικασίες:

- Επαναλαμβανόμενες φάσεις (εποχές) μέτρησης σε τακτά χρονικά διαστήματα και μετεπεξεργασία των μετρήσεων.
- Συνεχής παρακολούθηση σε πολύ σύντομα χρονικά διαστήματα και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο

Η πρώτη διαδικασία εφαρμόζεται συνήθως σε μακροχρόνιες παρακολουθήσεις τεχνικών έργων, ενώ η δεύτερη σε βραχυχρόνιες παρακολουθήσεις, συνήθως κατά τη διάρκεια της κατασκευής είτε σε έντονη δραστηριότητα παραμόρφωσης ή μετακίνησης τμημάτων του έργου.

## 1.2 Ιστορικά στοιχεία

Η Γεωδαισία αναπτύχθηκε ως επιστήμη αρχικά για να καλύψει τις ανάγκες καταμέτρησης ιδιοκτησιών. Με το πέρασμα του χρόνου όμως διευρύνθηκαν τα πεδία δράσης της σε θεωρητικό αλλά και σε πρακτικό επίπεδο. Ιδιαίτερης σημασίας από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα αποτελεί η παρέμβαση των γεωδαιτικών μεθόδων μέτρησης και υπολογισμών στην παρακολούθηση (μεταβολή θέσης) κατασκευών.

Από το 1921 στην Ελβετία αναπτύχθηκαν γεωδαιτικές μέθοδοι από τον H. Zolty, για τον έλεγχο της συμπεριφοράς των φραγμάτων που κατασκευάζονταν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συνδυάζονταν μετρήσεις γωνιών με θεοδόλιχο, υψομετρικών διαφορών με τη μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμησης και μιας μόνο βάσης (μέτρησης απόστασης) μεταξύ των σημείων αναφοράς.

Το 1969 δημιουργείται από τη Διεθνή Ένωση Γεωδαιτών (FIG) η Επιτροπή Working Group 6.1, γνωστή και ως Study Group C of FIG Commission 6 με αντικείμενο “Measurements of Deformations and the Automation of Measurement Process”. (<http://fig.net/organisation/comm/6/index.asp>).

Η Επιτροπή αυτή ιδρύθηκε από τον Καθηγητή του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου της Βαρσοβίας T. Lazzarini, ο οποίος ήταν και ο πρώτος πρόεδρός της.

Από το 1975 έως το 1986 πρόεδρος της επιτροπής ήταν ο Πολωνός Καθηγητής A. Platek. Από το 1986 πρόεδρος της επιτροπής ήταν ο Καθηγητής A. Chrzanowski από το Πανεπιστήμιο του New Brunswick.

Αρχικά, οι κύριοι στόχοι της επιτροπής ήταν να οργανώσει και να επεκτείνει τη διεθνή συνεργασία στον τομέα των μετρήσεων για την παρακολούθηση κατασκευών με γεωδαιτικές μεθόδους. Στη συνέχεια, οι στόχοι επεκτάθηκαν πέρα από τη χρήση των γεωδαιτικών μεθόδων και σε άλλες τεχνικές ελέγχου και στη διεπιστημονική ανάλυση και στην ερμηνεία των παραμορφώσεων.

Από το 1986, οι κύριοι στόχοι της επιτροπής ήταν να διαδώσει τις πληροφορίες γνώσης και ανταλλαγής για τις νέες εξελίξεις στην παρακολούθηση των κατασκευών και την ανάλυση, να υποκινήσει τη διεθνή συνεργασία στην επίλυση των συγκεκριμένων (ειδικών) προβλημάτων σχετικών με τις μελέτες αυτές και να προωθήσει τη διεπιστημονική προσέγγιση στον έλεγχο και στην ερμηνεία της μεταβολής της θέσης φυσικών ή τεχνητών κατασκευών.

Για την επίτευξη του πρώτου στόχου συμπεριλήφθησαν ειδικά Session στα συνέδρια της FIG ή διοργανώθηκαν διεθνή συνέδρια εντοπισμένα στο αντικείμενο των παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα διοργανώθηκαν 15 συνέδρια εστιασμένα στις τεχνικές μέτρησης και στην επεξεργασία τους για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων (International Symposiums on Deformation Measurements). Παράλληλα ειδικές επιτροπές οι οποίες αποτελούνται από επιστήμονες σε επιλεγμένα ερευνητικά κέντρα, επικεντρώνονται στην έρευνα και την επίλυση σχετικών προβλημάτων.

Τέλος με την πρόσκληση των ειδικών από τους διάφορους τομείς της εφαρμοσμένης μηχανικής και των επιστημών της γεωπληροφορικής στις δραστηριότητες της Επιτροπής επιτυγχάνεται η διεπιστημονική προσέγγιση παρακολούθησης των έργων.

### 1.3 Ορολογία - Ορισμοί

Για την πληρέστερη κατανόηση των θεμάτων που αφορούν στην παρακολούθηση κατασκευών δηλαδή παραμορφώσεων και μετακινήσεων, κρίνεται σκόπιμο στο σημείο αυτό να καταγραφεί η βασική ορολογία που συνήθως χρησιμοποιείται.

Η καταγραφή αυτή συνοδεύεται και με τον αντίστοιχο ορισμό των εννοιών, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο.

*Δίκτυο ελέγχου ή παρακολούθησης*, ορίζεται ένα σύνολο μόνιμα εγκατεστημένων σημείων σε μια περιοχή και τα οποία περιγράφουν την κινηματική συμπεριφορά της περιοχής αυτής ή μιας κατασκευής.

*Σημεία ελέγχου*, ή *κορυφές* του δικτύου είναι τα σημεία, που αποτελούν ένα δίκτυο ελέγχου και συνδέονται μεταξύ τους με μετρήσεις.

*Μονοδιάστατα ή υψομετρικά δίκτυα ή δίκτυα κατακορύφου ελέγχου*, ονομάζονται τα δίκτυα τα οποία ελέγχουν τη θέση των σημείων από τα οποία αποτελείται, σε μια διάσταση (υψόμετρο).

*Διδιάστατα ή οριζόντια ή οριζοντογραφικά δίκτυα ή δίκτυα οριζοντίου ελέγχου*, ονομάζονται τα δίκτυα τα οποία ελέγχουν τη θέση των σημείων από τα οποία αποτελούνται σε δύο διαστάσεις ( $x, y$ ).

*Τριδιάστατα δίκτυα*, ονομάζονται τα δίκτυα τα οποία ελέγχουν τη θέση των σημείων από τα οποία αποτελούνται σε τρεις διαστάσεις ( $x, y, H$ ).

*Συνόρθωση δικτύου* ορίζεται η μαθηματική διαδικασία με την οποία, αξιοποιώντας τα μετρούμενα μεγέθη, προσδιορίζεται η θέση των σημείων ελέγχου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή με την αντίστοιχη αβεβαιότητά της.

*Σταθερό σημείο*, ορίζεται το σημείο του δικτύου ως προς το οποίο υπολογίζεται η μεταβολή της θέσης των υπόλοιπων σημείων ελέγχου.

*Άγνωστες παράμετροι*, είναι οι παράμετροι που προσδιορίζονται μετά τη συνόρθωση του δικτύου (π.χ.  $x, y, H$ )

*Παρατήρηση*, είναι η κάθε μέτρηση ενός στοιχείου του δικτύου, που πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας κατάλληλο μετρητικό εξοπλισμό.

*Μετακίνηση ή μετατόπιση* ενός σημείου ελέγχου, ορίζεται η μεταβολή της θέσης του σε σχέση με το σταθερό σημείο. Μαθηματικά εκφράζεται πάντα με ένα διάνυσμα, έχει δηλαδή διεύθυνση, φορά και μέτρο.

Η κατακόρυφη μετακίνηση μπορεί να είναι *καθίζηση*, όταν η φορά του διανύσματος είναι προς το ναδίρ (κέντρο της γης) ή *ανύψωση*, όταν η φορά του διανύσματος είναι προς το ζενίθ.

*Φάση ή σειρά μέτρησης*, ορίζεται το σύνολο των μετρήσεων ενός δικτύου σε ορισμένο χρόνο (χρονική στιγμή) για την ανίχνευση μετακινήσεων.

*Εποχή (epoch) ή χρόνος μέτρησης* ενός δικτύου ορίζεται η χρονική στιγμή διεξαγωγής των μετρήσεων.

*Παραμόρφωση*, ορίζεται η μεταβολή της μορφής της επιφάνειας ενός τεχνικού έργου ή της επιφάνειας μιας φυσικής κατασκευής ή της επιφάνειας του στερεού φλοιού της γης, εξαιτίας της μετακίνησης των σημείων που την ορίζουν.

*Διάνυσμα μετακίνησης*, είναι το διάνυσμα που τα άκρα του ταυτίζονται με τη θέση ενός σημείου στο χώρο σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές.

*Απόλυτη μεταβολή θέσης ή μετακίνηση* ενός σημείου ελέγχου, ορίζεται η μεταβολή της θέσης του ως προς το ορισμένο ως σταθερό σημείο του δικτύου.

*Σχετική μεταβολή θέσης ή μετακίνηση* ενός σημείου ελέγχου, ορίζεται η μεταβολή της θέσης του σε σχέση με κάποιο άλλο σημείο ελέγχου του δικτύου.

*Σύστημα αναφοράς*, ορίζεται το σύστημα συν/νων στο οποίο πραγματοποιείται η συνόρθωση ενός δικτύου ελέγχου και στο οποίο υπολογίζονται τα διανύσματα μεταβολής θέσης.

*Βάρος*, είναι η συμμετοχή της κάθε μέτρησης στη συνόρθωση ενός δικτύου. Όσο πιο ακριβής είναι η μέτρηση, δηλαδή έχει μικρότερο σφάλμα, τόσο μεγαλύτερο είναι το βάρος της.

*a priori σφάλμα* είναι το θεωρητικό σφάλμα που έχει μια μέτρηση, σύμφωνα με το όργανο που χρησιμοποιείται για την εκτέλεσή της.

α *posteriori* σφάλμα είναι το πραγματικό σφάλμα της μέτρησης που επιτεύχθηκε, το οποίο προκύπτει μετά τη συνόρθωση του δικτύου.

*Διάστημα εμπιστοσύνης* (Confidence interval), είναι ένα διάστημα που βασίζεται σε παρατηρήσεις ενός δείγματος και είναι καθορισμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει μια συγκεκριμένη πιθανότητα ότι θα περιέχει την άγνωστη πραγματική τιμή μιας παραμέτρου.

*Επίπεδο Εμπιστοσύνης* (Confidence level), είναι ο συντελεστής που αυξάνει το μέγεθος του σφάλματος προσδιορισμού μιας παραμέτρου, έτσι ώστε να αυξάνεται η πιθανότητα το διάστημα αυτό να περιέχει την πραγματική τιμή της παραμέτρου.

*Ελάχιστες δεσμεύσεις* ορίζονται τα ελάχιστα απαραίτητα γνωστά στοιχεία για να είναι εφικτή η συνόρθωση ενός δικτύου.

*Εναισθησία* ενός δικτύου, είναι το ελάχιστο μέγεθος της μεταβολής θέσης που έχει την ικανότητα να εντοπίζει αξιόπιστα το δίκτυο για συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης.

*Αξιοπιστία* ενός δικτύου, είναι ο όρος που εκφράζει την εμπιστοσύνη στις τελικά εκτιμώμενες συντεταγμένες των σημείων ελέγχου μετά τη συνόρθωση.

*Ακρίβεια* ενός δικτύου, είναι το μέγεθος που εκφράζει την επίδραση των τυχαίων σφαλμάτων των μετρήσεων στις τελικές εκτιμήσεις των συντεταγμένων των σημείων ελέγχου.

*Έλλειψη σφάλματος ενός σημείου ελέγχου*, ονομάζεται ο γεωμετρικός τόπος που εκφράζει την περιοχή εντός της οποίας μπορεί να βρίσκεται το σημείο αυτό στον διδιάστατο χώρο, εξαιτίας των τυχαίων σφαλμάτων των μετρήσεων.

*Απόλυτη έλλειψη σφάλματος*, ονομάζεται ο γεωμετρικός τόπος που μπορεί να βρίσκεται το σημείο, εξαιτίας των τυχαίων σφαλμάτων και σε σχέση με το μαθηματικό μοντέλο της συνόρθωσης (σταθερό σημείο, σύστημα αναφοράς). Χρησιμοποιείται μόνο στα διδιάστατα δίκτυα ελέγχου.

*Σχετική έλλειψη σφάλματος*, ονομάζεται ο γεωμετρικός τόπος που περιγράφει την ακρίβεια εκτίμησης της σχετικής θέσης δύο σημείων του δικτύου ελέγχου σε σχέση με το σύστημα αναφοράς. Χρησιμοποιείται μόνο στα δυσδιάστατα δίκτυα ελέγχου

*Ελλειψοειδές σφάλματος*, ονομάζεται ο γεωμετρικός τόπος που ορίζει το χώρο, εντός του οποίου μπορεί να βρεθεί ένα σημείο εξαιτίας των τυχαίων σφαλμάτων των μετρήσεων στον τριδιάστατο χώρο.

*Ελεύθερο δίκτυο*, ορίζεται ένα δίκτυο ελέγχου χωρίς καμία γνωστή κορυφή ή χωρίς προσανατολισμό ή χωρίς κλίμακα.

*Ορισμένο δίκτυο*, είναι ένα δυσδιάστατο ή τριδιάστατο δίκτυο ελέγχου, αν θεωρούνται γνωστές οι συντεταγμένες μιας κορυφής του (ορίζεται η θέση), θεωρείται γνωστή μια απόσταση ή έχουν μετρηθεί περισσότερες από μια αποστάσεις (ορίζεται

η κλίμακα) και θεωρείται γνωστός ο προσανατολισμός μιας πλευράς του (ορίζεται ο προσανατολισμός).

#### 1.4 Ιστορικά στοιχεία από δίκτυα ελέγχου στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα τα τελευταία 40 χρόνια έχουν διευρυνθεί σημαντικά τα πεδία εφαρμογής των γεωδαιτικών δικτύων ελέγχου. Στο σημείο αυτό θα αναφερθούν ενδεικτικά κάποια δίκτυα ελέγχου παραμορφώσεων, που έχουν αναπτυχθεί από τα δύο τμήματα Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών (ΕΜΠ & ΑΠΘ) και από άλλους φορείς.

Η Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ ξεκίνησε με την εγκατάσταση δικτύων ελέγχου στο φράγμα του Μόρνου (1975) ενώ στη συνέχεια εγκατέστησε δίκτυα για την παρακολούθηση:

- του ρήγματος της Αταλάντης
- του γεφυριού της Άρτας (1984)
- του σταδίου Ειρήνης & Φιλίας και της ευρύτερης περιοχής του Μοσχάτου (1985)
- των μετακινήσεων του στερεού φλοιού της Γης και των κατασκευών στην Καλαμάτα (1986)
- των μετακινήσεων του στερεού φλοιού της Γης και κατασκευών στην Αγία Τριάδα Πατρών (1991)
- του γηπέδου Καραϊσκάκη (2006)
- του φράγματος του Κούρη στην Κύπρο (2006)
- της εκκλησίας της Μεγάλης Παναγίας στην Σαμαρίνα του Ν. Γρεβενών (2009).

Το Τμήμα Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών του ΑΠΘ μετά τους σεισμούς της Θεσσαλονίκης (1980) έχει δημιουργήσει γεωδαιτικό δίκτυο στην ευρύτερη περιοχή της Λίμνης Βόλβης, που επαναμετράται κατά καιρούς, καθώς και διάφορα δίκτυα για τον έλεγχο κτηρίων.

Επίσης γεωδαιτικά δίκτυα ελέγχου έχει αναπτύξει και η ΔΕΗ στις περιοχές των φραγμάτων της, όπως στο φράγμα του Λάδωνα για τον προσδιορισμό κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων, στο φράγμα των Κρεμαστών και αλλού.

Στα επόμενα θα αναφερθούν περιληπτικά στοιχεία για ορισμένα από αυτά τα δίκτυα.



### 1.4.1 Δίκτυα παρακολούθησης του Φράγματος Μόρνου

Το φράγμα του Μόρνου (εικόνα 1.1) είναι ένα μεγάλο γήινο φράγμα, ένα από τα μεγαλύτερα φράγματα της Ευρώπης, με έναν κεντρικό πυρήνα αργίλου μέσου μεγέθους, συνολικού όγκου  $17000000 \text{ m}^3$ .



*Εικόνα 1.1:* Το φράγμα του Μόρνου

Βρίσκεται στην απομονωμένη ορεινή Δωρίδα, 220 Km βορειοδυτικά της Αθήνας. Έχει ύψος 126 m, το μέγιστο πλάτος στη βάση του είναι 595 m, ενώ το πλάτος στέψης είναι 10 m. Το μήκος βάσης του είναι 250 m και το μήκος στέψης 815 m. Η κατασκευή του φράγματος ολοκληρώθηκε στις αρχές του 1977, ενώ η πρώτη πλήρωση της δεξαμενής ολοκληρώθηκε το 1981. Με την ολοκλήρωσή της η λίμνη κάλυπτε έκταση μεγαλύτερη από  $15 \text{ km}^2$ . Η επιφάνειά της στη στάθμη υπερχειλίσσης υπολογίζεται στα  $19 \text{ km}^2$ , ενώ η στάθμη της λίμνης βρίσκεται σε υψόμετρο 446 m.

Για τη δημιουργία της λίμνης χρειάστηκε να εκκενωθεί το χωριό Κάλλιο το οποίο μεταφέρθηκε σε άλλη θέση πάνω από τις όχθες της λίμνης. Όταν η στάθμη της λίμνης κατεβαίνει, σε περιόδους ξηρασίας, αποκαλύπτονται τα σπίτια του παλιού οικισμού.

Το γεωδαιτικό σύστημα ελέγχου αποτελείται από δύο κύρια γεωδαιτικά δίκτυα ελέγχου. Το κύριο δίκτυο εγκαταστάθηκε στις αρχές του 1976 για τον έλεγχο της μεγαλύτερης περιοχής και των αναχωμάτων του φράγματος. Αποτελείται από 15 σημεία ελέγχου οι θέσεις των οποίων επελέγησαν σε συνεργασία με γεωλόγους. Το μήκος των πλευρών του δικτύου κυμαίνεται από 0.3 Km έως 2.5 Km.

Ένα πυκνότερο γεωδαιτικό δίκτυο ελέγχου εγκαταστάθηκε κατά μήκος του λόφου του φράγματος. Συνολικά εγκαταστάθηκαν 53 σημεία ελέγχου (εικόνα 1.2) για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων του σώματος του φράγματος.

### 1.4.2 Δίκτυα ελέγχου της παλαιάς γέφυρας της Άρτας

Η αρχική κατασκευή του γεφυριού της Άρτας τοποθετείται στα χρόνια της αρχαίας Αμβρακίας. Όταν ο βασιλιάς Πύρρος έκανε την Αμβρακία πρωτεύουσα του κράτους, τότε οι αρχαίοι Αμβρακιώτες, κατασκεύασαν στο σημείο αυτό κάποιο πέρασμα για τις μετακινήσεις τους. Τη σημερινή του μορφή (εικόνα 1.3) το Γεφύρι της Άρτας την απέκτησε το 1602 μ.Χ. Τη χρηματοδότηση της κατασκευής του ανέλαβε ένας Αρτινός παντοπώλης, ο οποίος επειδή είχε εμπορικές δραστηριότητες στην περιοχή, ενδιαφερόταν για τη διάβαση του ποταμού από τα ζώα του που μέτεφεραν εμπορεύματα. Το σημερινό μήκος του πέτρινου γεφυριού της Άρτας είναι 145m και το πλάτος περίπου 4 m. Το 1881 μ. Χ, όταν απελευθερώθηκε η Άρτα, το γεφύρι ήταν το σύνορο της ελεύθερης Ελλάδας με τις τουρκοκρατούμενες περιοχές.

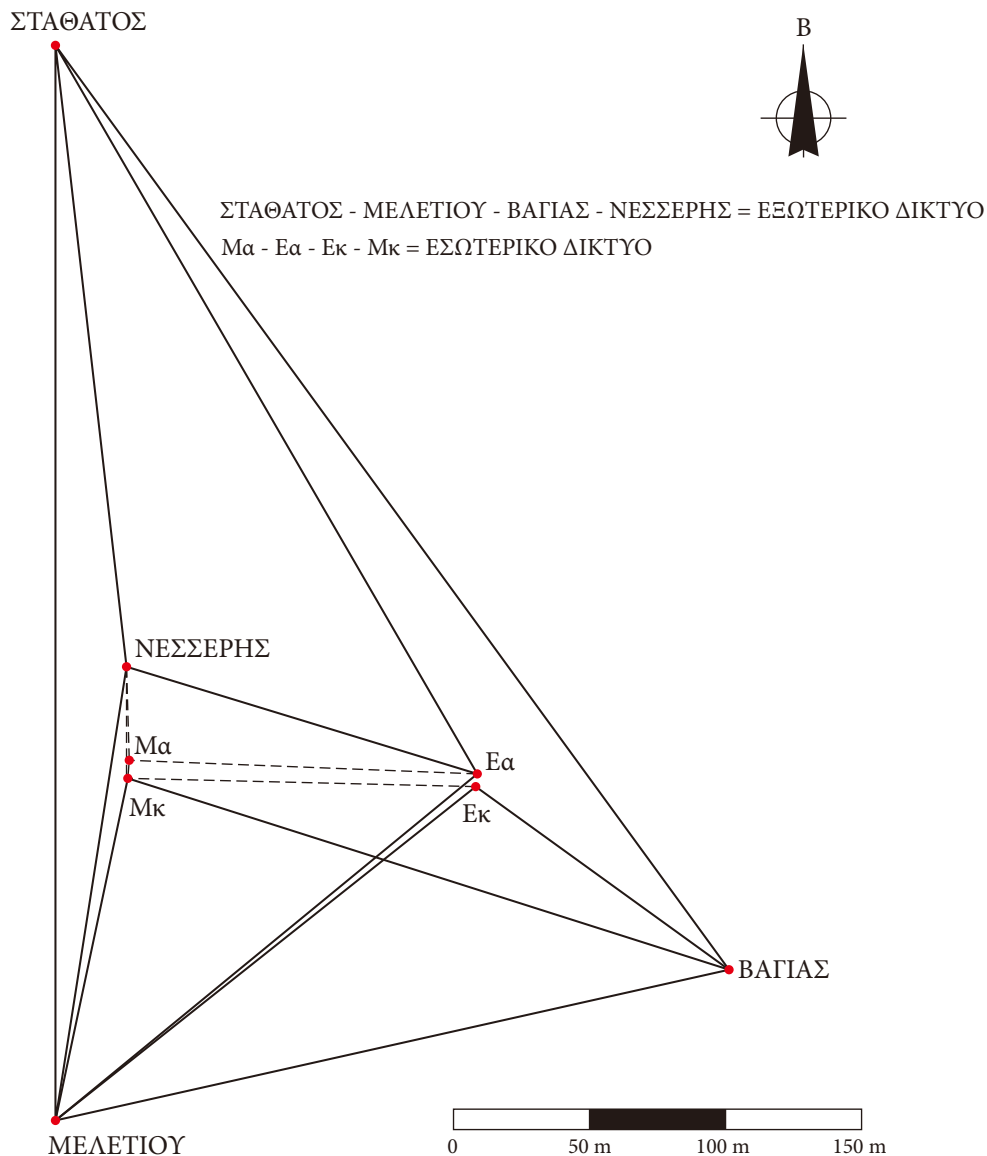
Το 1984, στο πλαίσιο των εργασιών συντήρησης της παλαιάς γέφυρας της Άρτας, για την προστασία και ενίσχυσή της από τον κίνδυνο υποσκαφής της κοίτης του ποταμού Αράχθου, ξεκίνησε η παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς της με γεωδαιτικές μεθόδους.



*Εικόνα 1.3: Η παλαιά γέφυρα της Άρτας*

Για το σκοπό αυτό ιδρύθηκαν δίκτυα οριζοντίου και κατακορύφου ελέγχου, τα οποία σημάνθηκαν με ειδικό τρόπο.

Τοποθετήθηκαν στο σώμα της γέφυρας 14 ειδικές ορειχάλκινες βάσεις (7 ανάντι και 7 κατάντι) αποτελώντας τα σημεία ελέγχου. Ορίστηκαν έτσι δύο ευθυγραμμίες οι οποίες στα άκρα τους υλοποιήθηκαν με τέσσερα βάθρα που εγκαταστάθηκαν



Σχήμα 1.3: Τα δίκτυα οριζοντίου ελέγχου στην παλαιά γέφυρα της Άρτας

κοντά στο σώμα της γέφυρας. Τα τέσσερα αυτά σημεία αποτέλεσαν το μικρό δίκτυο.

Πραγματοποιήθηκαν 17 σειρές μετρήσεων, στο χρονικό διάστημα Απρίλιος 1984 – Δεκέμβριος 1984, ενώ το Νοέμβριο του 1985 επαναλήφθηκε μια ολόκληρη σειρά.

Παράλληλα όμως και για τον έλεγχο της σταθερότητας ή όχι των σημείων του μικρού δικτύου, δημιουργήθηκε και ένα μεγαλύτερο δίκτυο, το οποίο αποτελείται από 4 σημεία (σχήμα 1.3).

Ορίσθηκε ως ικανοποιητική ακρίβεια αυτή του  $\pm 1$  cm για τις οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις.

Η επίλυση του δικτύου οριζοντίου ελέγχου έγινε με τη μέθοδο μεταβολής των συν/νων με τις ελάχιστες δεσμεύσεις. Σε όλες τις φάσεις θεωρήθηκε σταθερή η κορυφή “Μελετίου” και σταθερή η γωνία διεύθυνσης της πλευράς “Μελετίου – Σταθός”.

Διαπιστώθηκε ότι δεν υπήρξε μετακίνηση σε κανένα σημείο της γέφυρας ούτε του μικρού δικτύου.

Ο υψομετρικός έλεγχος των 14 σημείων της γέφυρας έδειξε ότι δεν υπήρξαν κατακόρυφες μετακινήσεις μεγαλύτερες των ορίων που προδιαγράφησαν ( $\pm 1$  cm).

#### **1.4.3 Παρακολούθηση παραμορφώσεων φερόντων στοιχείων Σταδίου Ειρήνης και Φιλίας Ν. Φαλήρου**

Το κλειστό Στάδιο Ειρήνης και Φιλίας (ΣΕΦ), εντάσσεται στο σύνολο των αθλητικών εγκαταστάσεων του Ν. Φαλήρου. Κατασκευάστηκε το 1985 και η κατασκευή του παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον αφού θεμελιώθηκε σε σύστημα πασσαλοεσχάρας, αποτελούμενο από 192 φρεατοπασσάλους οι οποίοι φθάνουν στο μητρικό πέτρωμα σε βάθος περίπου 35m. Η στέγη του είναι αναρτημένη με σύστημα από τον ολόσωμο δακτύλιο (εικόνα 1.4) ο οποίος εδράζεται στους προβόλους μέσω κυλίσεων.

Τα υποστυλώματα που βρίσκονται περιμετρικά της κατασκευής παραλαμβάνουν βάρος του δακτυλίου της στέγης μέσω των προβόλων που βρίσκονται εξωτερικά και το φορτίο των κερκίδων μέσω πριονωτών δοκών εσωτερικά. Το ύψος των υποστυλωμάτων είναι μεταβλητό, ενώ μεταβλητό είναι και το μήκος των προβόλων.

Στο χώρο του Σταδίου αναπτύχθηκαν δίκτυα ελέγχου οριζόντιων και κατακόρυφων μεταβολών για τον έλεγχο μετακινήσεων  $\pm 1$  cm για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Το δίκτυο οριζοντίου ελέγχου αποτελείται από 8 κορυφές που τοποθετήθηκαν



*Εικόνα 1.4: Το Στάδιο Ειρήνης & Φιλίας*

στο επίπεδο πρόσβασης κοινού και από 4 κορυφές που τοποθετήθηκαν στους προβόλους των τεσσάρων εύκαμπτων υποστυλωμάτων.

Το δίκτυο κατακόρυφου ελέγχου αποτελείται από τα 12 προηγούμενα σημεία και από 6 υψομετρικές αφετηρίες που τοποθετήθηκαν στις βάσεις ισάριθμων υποστυλωμάτων.

Πραγματοποιήθηκαν 4 σειρές μετρήσεων (φάσεις) το 1985, το 1988, το 1989 και το 1995. Οι μετρήσεις έγιναν χρησιμοποιώντας γεωδαιτικό εξοπλισμό η ακρίβεια του οποίου υπαγορεύτηκε από τη φάση σχεδιασμού. Συγκεκριμένα οι μετρήσεις γωνιών έγιναν χρησιμοποιώντας το οπτικομηχανικό θεοδόλιχο Wild T2, οι μετρήσεις μηκών με το αποστασιόμετρο Wild DI 3S ακρίβειας  $\pm 5 \text{ mm} \pm 5 \text{ ppm}$  και οι μετρήσεις υψομετρικών διαφορών με τον οπτικομηχανικό χωροβάτη Wild NA2 και ειδικές σταδίες.

Τα δύο δίκτυα επιλύθηκαν και στις τέσσερις φάσεις με τις ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις, το υψομετρικό δίκτυο με σταθερή μια κορυφή, την R1 (βρίσκεται μακριά από το στάδιο) και το δίκτυο οριζοντίου ελέγχου με ένα σταθερό σημείο και μια σταθερή γωνία διεύθυνσης.

Στον πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες μεταβολές οριζοντιογραφικά ( $x, y$ ) και υψομετρικά, θεωρώντας ως αναφορά την 1<sup>η</sup> φάση των μετρήσεων (1985), ενώ στον πίνακα 1.2 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες υψομετρικές μεταβολές για τα σημεία του υψομετρικού δικτύου.

Από το φθινόπωρο του 1985 μέχρι την άνοιξη του 1995 παρατηρήθηκαν κατακόρυφες μετακινήσεις (καθιζήσεις) στα σημεία A, B, Γ, Δ που βρίσκονται στους προβόλους των τεσσάρων εύκαμπτων υποστυλωμάτων. Οι μετακινήσεις είναι της τάξης των 8 cm. Δεν παρατηρήθηκαν κατακόρυφες μετακινήσεις στα υποστυλώματα του σταδίου.



**Εικόνα 3.1:** Βάση Κατασκευής



**Εικόνα 3.2:** Βάση πάκτωσης στο έδαφος

Είναι κατασκευασμένη από υλικό Inox (τύπου 316) ώστε να μην οξειδώνεται, ενώ διαθέτει ειδικό βιομηχανικό κάλυμμα μεγάλης αντοχής (τάπα - etalon) στις στροφές (εικόνα 3.2), ώστε να μην καταστρέφονται όταν η βάση δεν χρησιμοποιείται, ή να σκουριάζουν και να γεμίζουν με ανεπιθύμητα σκουπίδια που θα δυσκολεύουν την εκτέλεση των επόμενων μετρήσεων στο δίκτυο.

Ο στυλαιός (εικόνα 3.3) είναι κατασκευασμένος από χάλυβα βαρέως τύπου ο οποίος είναι επινικελωμένος ώστε να μην διαβρώνεται. Έχει περίπου μήκος 1.16 m, βάρος 8 kg και διάμετρο 5cm, έτσι ώστε να είναι σταθερός και να μην ταλαντώνεται όταν τοποθετείται στη κεφαλή του το όργανο. Το μήκος (ύψος) του στυλαιού αποτελεί σημείο προβληματισμού, καθώς πρέπει να πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Να μην έχει ταλαντώσεις όταν τοποθετείται στη βάση στο έδαφος
- Να είναι εφικτές οι παρατηρήσεις από έναν παρατηρητή μέσου ύψους
- Να εξασφαλίζεται ορατότητα πάνω από συνηθισμένα εμπόδια όπως αυτοκίνητα ή μοτοσυκλέτες στις περισσότερες των περιπτώσεων.



**Εικόνα 3.3:** Στυλαιός

Στο κάτω μέρος του ο στυλαιός φέρει δίσκο διαμέτρου 7 cm και πάχους 1 cm με στροφές (διαμέτρου 4 cm/πάχους 2 cm) για να βιδώνει στις αντίστοιχες στροφές της βάσης και να εφάπτεται αυτής (εικόνα 3.4).





**Εικόνα 3.4:** Τοποθέτηση στυλαιού στη βάση



**Εικόνα 3.5:** Τοποθέτηση τρικόχλιου στην κεφαλή του στυλαιού

Στο επάνω μέρος φέρει κυκλική κεφαλή διαμέτρου 12 cm και πάχους 0.7 cm, με προεξοχική βίδα (σπείρωμα) διαμέτρου 0.95 cm ώστε να βιδώνει εύκολα και μοναδικά το τρικόχλιο οποιουδήποτε γεωδαιτικού σταθμού ή δέκτης GNSS (εικόνα 3.5).

Ο λεπτομερής σχεδιασμός της κατασκευής ολοκληρώνεται και με τη δημιουργία ανοίγματος (δύο αντιδιαμετρικές κυκλικές οπές) κάθετα στο σώμα του στυλαιού και σε απόσταση 15 cm από την κορυφή του, όπου τοποθετείται ειδική μεταλλική λαβή μήκους 14 cm και χρησιμοποιείται κάθε φορά για ευκολία στο ξεβίδωμα του στυλαιού από τη βάση, αλλά και για την προστασία των στροφών της βάσης.

Η κατασκευή σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε έτσι ώστε το κέντρο της βίδας, τόσο στο κάτω όσο και στο επάνω μέρος του στυλαιού, να βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο του σωλήνα με κατασκευαστική ακρίβεια καλύτερη από  $\pm 0.01$  mm. Το μέσο ύψος ενός τέτοιου στυλεού είναι ίσο με 1.15 m και η κατασκευαστική ακρίβειά του  $\pm 0.2$  mm.

Έτσι το ύψος οργάνου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων μετράται από την επιφάνεια της κεφαλής του στυλαιού (εικόνα 3.6).

Για τη σήμανση των σημείων ελέγχου μονοδιάστατων δικτύων (υψομετρικών αφετηριών), που είναι συνήθως μόνιμη, χρησιμοποιούνται ορειχάλκινα μπουλόνια με κεφαλή σχήματος κυλινδρικού ή σφαιρικού (εικόνα 3.7α), τα οποία πακτώνονται κάθετα σε τοίχους (εικόνα 3.7β) με ειδική εποξειδική ρητίνη ή μπετόν. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες κατασκευές όπως ειδικά καρφιά με κυλινδρικές κεφαλές.



**Εικόνα 3.6:** Το ύψος οργάνου μετρούμενο από την επιφάνεια της κεφαλής του στυλαιού



(α)



(β)

**Εικόνα 3.7:** Σήμανση σημείων ελέγχου υψομετρικών δικτύων

Το σημείο τοποθέτησής τους πρέπει να εξασφαλίζει τη δυνατότητα κατακόρυφης τοποθέτησης του μετρητικού πήχυ (σταδίας) πάνω σε αυτά, ενώ το σχήμα τους, τον μοναδικό τρόπο έδρασης της βάσης της σταδίας κατά τη μέτρηση.



#### 4.4.2 Δυσδιάστατα Δίκτυα

Στην περίπτωση αυτή, άγνωστοι θεωρούνται οι καλλίτερες τιμές ( $\hat{l}$ ) των μετρημένων αποστάσεων και οριζόντιων γωνιών. Έτσι αν έχουν μετρηθεί  $n$  μεγέθη και οι ανεξάρτητες καθοριστικές παράμετροι (άγνωστοι) είναι  $m$  σχηματίζονται  $c=r-n-m$  εξισώσεις συνθήκης.

Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου στη συνόρθωση δυσδιάστατων δικτύων, βασίζεται κατά κύριο λόγο στην εύρεση των εξισώσεων συνθήκης. Αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- *Εσωτερικές συνθήκες.* Αυτές είναι εξισώσεις που υπαγορεύονται από τη γεωμετρία του δικτύου και είναι ίδιες ανεξάρτητα με το αν το δίκτυο έχει ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις ή όχι.
- *Εξωτερικές συνθήκες.* Αυτές είναι εξισώσεις που προκύπτουν από τις επιπλέον εξωτερικές δεσμεύσεις.

##### 4.4.2.1 Μεθοδολογία εύρεσης εξισώσεων συνθήκης

Ο καθορισμός του αριθμού και του είδους των εξισώσεων συνθήκης σε δίκτυα οριζοντίου ελέγχου είναι μια σύνθετη διαδικασία.

Αν έχουν γίνει μόνο μετρήσεις οριζόντιων γωνιών στο γεωδαιτικό δίκτυο 2D τότε:

- Αν υπάρχουν λιγότερες από δύο κορυφές με γνωστές συν/νες, τότε ορίζεται η μορφή του δικτύου.
- Αν υπάρχουν ΜΟΝΟ δύο κορυφές με γνωστές συν/νες τότε ορίζεται η θέση, ο προσανατολισμός και η κλίμακα του δικτύου, χωρίς να απαιτείται εξίσωση συνθήκης.
- Αν υπάρχουν περισσότερες από δύο κορυφές με γνωστές συν/νες, τότε προκύπτουν εξωτερικές συνθήκες.

Αν στο γεωδαιτικό δίκτυο 2D έχουν μετρηθεί αποστάσεις και υπάρχουν λιγότερες από δύο κορυφές με γνωστές συν/νες τότε προκύπτουν  $n_s-1$  εξισώσεις συνθήκης (όπου  $n_s$  ο αριθμός των μετρημένων αποστάσεων). Αν υπάρχουν δύο ή περισσότερες κορυφές με γνωστές συν/νες, για κάθε απόσταση που μετράται στο δίκτυο, προστίθεται και μια επιπλέον εξίσωση συνθήκης.

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, ο συνολικός αριθμός των εξισώσεων συνθήκης  $c$  είναι πάντα ίσος με το βαθμό ελευθερίας  $r$  του δικτύου, δηλαδή  $c=r-n-m$ .

Η μεθοδολογία με την οποία καθορίζεται ο συνολικός αριθμός των εξισώσεων συνθήκης (θεωρώντας τις ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις – δύο κορυφές με γνωστές συν/νες) είναι η ακόλουθη.

## 6.1 Γενικά

Οι γεωδαιτικές μέθοδοι μέτρησης και συνόρθωσης δικτύων, που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, έχουν ως σκοπό τον προσδιορισμό της θέσης κάθε κορυφής ενός γεωδαιτικού δικτύου σε 1, 2 ή 3 διαστάσεις με ταυτόχρονο προσδιορισμό των αντίστοιχων αβεβαιοτήτων.

Ο προσδιορισμός αυτός επιτρέπει τον προσδιορισμό της μεταβολής της θέσης μιας κορυφής μεταξύ δύο χρονικών στιγμών  $t_1$ ,  $t_2$ , με το αντίστοιχο σφάλμα της και στη συνέχεια την απάντηση στο κρίσιμο ερώτημα αν η μεταβολή αυτή είναι μετακίνηση, για ένα προκαθορισμένο επίπεδο εμπιστοσύνης.

Η απάντηση στο ερώτημα αυτό είναι καθοριστική για τις αποφάσεις που θα ληφθούν προκειμένου είτε να σταματήσει το φαινόμενο που προκάλεσε τη μετακίνηση είτε να ελαχιστοποιηθεί, έτσι ώστε να προκαλεί τα λιγότερα δυνατά αρνητικά αποτελέσματα σε μια κατασκευή ή και σε μια περιοχή της ΦΓΕ.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί και θα αναλυθεί όλη η διαδικασία με την οποία, προσδιορίζεται η μεταβολή της θέσης μιας κορυφής ενός γεωδαιτικού δικτύου και ελέγχεται αν αυτή είναι μετακίνηση ή όχι.

## 6.2 Επιλογή επιπέδου εμπιστοσύνης

Όπως θα περιγραφεί στα επόμενα, η απάντηση στο ερώτημα αν μια μεταβολή μιας κορυφής ενός δικτύου, είναι μετακίνηση ή όχι, προκύπτει συνδυάζοντας και συσχετίζοντας τη μεταβολή με την αντίστοιχη αβεβαιότητά της. Και αυτό γιατί από τις επιμέρους συνορθώσεις του ίδιου δικτύου για τις δύο χρονικές στιγμές  $t_1$ ,  $t_2$ , τα προσδιοριζόμενα μεγέθη, φέρουν και σφάλματα, τα οποία οφείλονται στα σφάλματα των μετρήσεων.

Πρέπει λοιπόν κατά τον έλεγχο των μετακινήσεων να χρησιμοποιούνται αυτούσιες οι τιμές των μεταβολών ή πρέπει να ενσωματώνονται στη διαδικασία ελέγχου και τα αντίστοιχα σφάλματα?

Η απάντηση στο ερώτημα αυτό αναγκαστικά οδηγεί στην επιλογή του επιπέδου εμπιστοσύνης, δηλαδή του συντελεστή που αυξάνει το μέγεθος του σφάλματος προσδιορισμού της μεταβολής, έτσι ώστε να αυξάνεται η πιθανότητα το διάστημα αυτό να περιέχει την πραγματική τιμή της μεταβολής.

Η επιλογή του κατάλληλου κάθε φορά επιπέδου εμπιστοσύνης εξαρτάται από:

- i. Από τη σοβαρότητα - επικινδυνότητα του φαινομένου που παρακολουθείται
- ii. Από την επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού και της μεθοδολογίας μέτρησης των μεγεθών του γεωδαιτικού δικτύου.

Όσο αυξάνονται οι συνέπειες από τη μεταβολή του φαινομένου που παρακολουθείται, τόσο μικρότερο πρέπει να είναι το επίπεδο εμπιστοσύνης που θα επιλεγεί.

Συνηθίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις ελέγχου μετακινήσεων να χρησιμοποιείται ως επίπεδο εμπιστοσύνης το 95% ή το 99%. Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (ή 99%) ονομάζεται η πιθανότητα  $P$ , ώστε η διαφορά  $\bar{x} - \mu_x$  ( $\bar{x}$  = η εκτίμηση της μεταβλητής,  $\mu_x$  = η ακριβής τιμή) να βρίσκεται εντός του διαστήματος που περιγράφεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} P(-2.576 \cdot \sigma_x \leq \bar{x} - \mu_x \leq +2.576 \cdot \sigma_x) &= 99\% \\ \text{ή} \\ P(-1.96 \cdot \sigma_x \leq \bar{x} - \mu_x \leq +1.96 \cdot \sigma_x) &= 95\% \end{aligned} \quad (6.1)$$

Στις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν, επιλέγοντας ένα από τα δύο επίπεδα εμπιστοσύνης, δίνεται η “δυνατότητα” στα τυχαία ή πιθανά σφάλματα των μετρήσεων να “συμμετέχουν” στο τελικό αποτέλεσμα.

Στην περίπτωση όμως που είναι επιθυμητός ο αποκλεισμός της επίδρασης των τυχαίων - πιθανών σφαλμάτων στον εντοπισμό της μετακίνησης μιας κορυφής ενός δικτύου (π.χ δίκτυα υψηλής ακρίβειας) τότε επιλέγεται ως επίπεδο εμπιστοσύνης το 68.3%.

### 6.3 Διαδικασία

Η διαδικασία προσδιορισμού της μεταβολής της θέσης μιας κορυφής ενός γεωδαιτικού δικτύου (1D, 2D, 3D) και στη συνέχεια η αξιολόγηση για το αν αυτή η μεταβολή είναι μετακίνηση προϋποθέτει:

- τη γνώση των τιμών της/των συν/νης/νων της κορυφής σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές  $t_1$ ,  $t_2$  μεταξύ των οποίων μελετάται το φαινόμενο
- τη γνώση των αντίστοιχων πινάκων μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας  $V_{\bar{X}}^{t_1}$ ,  $V_{\bar{X}}^{t_2}$  για τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές.
- την επιλογή του επιπέδου εμπιστοσύνης

Έτσι μπορούν να υπολογιστούν:

- Το διάνυσμα μεταβολής της κορυφής  $\Delta R_{(t_2-t_1)} = \theta_{\text{θέση}_{t_2}} - \theta_{\text{θέση}_{t_1}}$
- πίνακα μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας μεταβολών  $V_{\Delta R_{(t_2-t_1)}}$  του διανύσματος μεταβολής. Ο πίνακας αυτός προκύπτει αθροίζοντας τους αντίστοιχους πίνακες μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας για τις χρονικές στιγμές  $t_1$ ,  $t_2$

$$V_{\Delta R(t_2-t_1)} = V_x^{t_1} + V_x^{t_2} \quad (6.2)$$

Ακολουθείται μια επεξεργασία που θα αναλυθεί στα επόμενα και τα αποτελέσματα απεικονίζονται κατάλληλα, ώστε να μπορούν να ερμηνευθούν και να συσχετιστούν με το φαινόμενο το οποίο προκάλεσε τη μετακίνηση.

### 6.3.1 Υπολογισμός μετακινήσεων σε Μονοδιάστατα Δίκτυα

#### 6.3.1.1 Υπολογισμός απόλυτης μετακίνησης

Στα μονοδιάστατα δίκτυα η θέση μιας κορυφής τους  $i$  σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές  $t_1, t_2$  προσδιορίζεται αν είναι γνωστά τα υψόμετρα της κορυφής  $H_i^{t_1}$  και  $H_i^{t_2}$ .

Η υψομετρική μεταβολή (ανύψωση ή καθίζηση) της κορυφής προσδιορίζεται τότε από τη σχέση:

$$\delta H_i^{(t_2-t_1)} = H_i^{t_2} - H_i^{t_1} \quad (6.3)$$

Το αντίστοιχο σφάλμα της μεταβολής προκύπτει από απλή εφαρμογή του νόμου μετάδοσης σφαλμάτων στη σχέση 6.3 και είναι ίσο με:

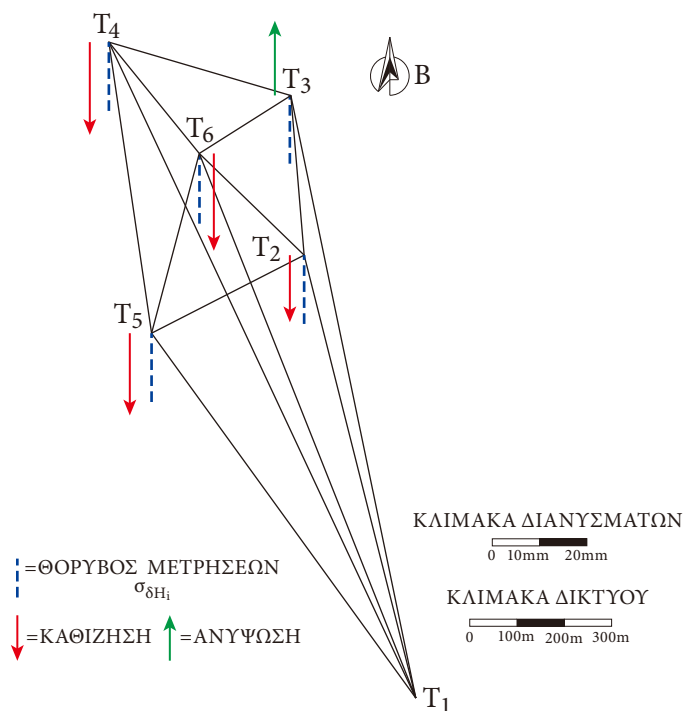
$$\sigma_{\delta H_i^{(t_2-t_1)}} = \pm \sqrt{\sigma_{H_i^{t_1}}^2 + \sigma_{H_i^{t_2}}^2} \quad (6.4)$$

όπου  $\sigma_{H_i^{t_1}}^2, \sigma_{H_i^{t_2}}^2$  οι μεταβλητότητες των δύο υψομέτρων, οι οποίες αντλούνται από τους αντίστοιχους πίνακες μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας των συνωρθώσεων ( $V_H^{t_1}, V_H^{t_2}$ ) τις δύο χρονικές στιγμές.

Συγκρίνεται η μεταβολή  $\delta H_i^{(t_2-t_1)}$  με το αντίστοιχο τυπικό σφάλμα  $\sigma_{\delta H_i^{(t_2-t_1)}}$  πολλαπλασιασμένο με τον συντελεστή  $z$  για το επιλεγμένο επίπεδο εμπιστοσύνης και:

- αν  $\boxed{\delta H_i^{(t_2-t_1)} > \sigma_{\delta H_i^{(t_2-t_1)}} \cdot z}$  τότε η κορυφή  $i$  εμφανίζει απόλυτη κατακόρυφη μετακίνηση.
- αν  $\boxed{\delta H_i^{(t_2-t_1)} \leq \sigma_{\delta H_i^{(t_2-t_1)}} \cdot z}$  τότε η κορυφή  $i$  δεν εμφανίζει απόλυτη κατακόρυφη μετακίνηση.

Η απεικόνιση της απόλυτης κατακόρυφης μετακίνησης κορυφών ενός υψομετρικού δικτύου, γίνεται χρησιμοποιώντας αντίστοιχα διαγράμματα, στα οποία με τη μορφή διανύσματος απεικονίζεται το μέγεθος και το είδος της μετακίνησης (σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1: Απεικόνιση διανυσμάτων απόλυτης κατακόρυφης μετακίνησης

### 6.3.1.2 Υπολογισμός σχετικής μετακίνησης

Ο έλεγχος της κατακόρυφης μετακίνησης των κορυφών ενός μονοδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου (υψομετρικού) ολοκληρώνεται όταν ελεγχθεί και η σχετική μετακίνηση, δηλαδή η σχετική υψομετρική μεταβολή μεταξύ δύο κορυφών του δικτύου.

Ο έλεγχος αυτός είναι σημαντικός κυρίως στην ερμηνεία του φαινομένου που προκαλεί κατακόρυφες μετακινήσεις. Μπορεί για παράδειγμα δύο κορυφές του δικτύου να εμφανίζουν απόλυτη κατακόρυφη ανύψωση, αλλά να μην εμφανίζουν σχετική κατακόρυφη μεταβολή ή και αντίστροφα.

Για το σκοπό αυτό υπολογίζεται αρχικά η μεταβολή της υψομετρικής διαφοράς  $\delta H_{ij}^{(t_2-t_1)}$  μεταξύ των κορυφών  $i, j$  για τις δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές  $t_1, t_2$

$$\delta H_{ij}^{(t_2-t_1)} = \delta(H_j - H_i) = (H_j - H_i)^{t_2} - (H_j - H_i)^{t_1} \quad (6.5)$$

Από τον υποπίνακα μεταβλητότητας συμμεταβλητότητας της μεταβολής των κορυφών  $i, j$   $V_{\delta H_{ij}^{(t_2-t_1)}}$   $= \begin{bmatrix} \sigma_{\delta H_i}^2 & \sigma_{\delta H_i \delta H_j} \\ \sigma_{\delta H_i \delta H_j} & \sigma_{\delta H_j}^2 \end{bmatrix}$ , αντλούνται τα στοιχεία για τον υπο-

## 7.1 Γενικά

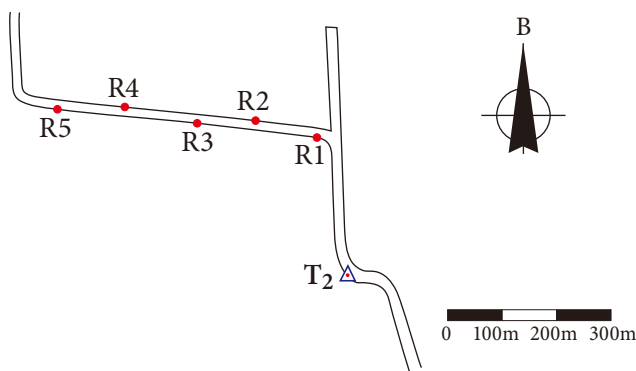
Για την καλύτερη κατανόηση όλων όσων αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, κρίθηκε σκόπιμο, σε αυτό το κεφάλαιο να παρουσιαστούν συγκεκριμένα παραδείγματα συνόρθωσης δικτύων και ελέγχου μετακινήσεων. Τα παραδείγματα αυτά έχουν προκύψει από πραγματικές εργασίες παρακολούθησης μετακινήσεων και αφορούν σε:

- Υψομετρικό έλεγχο (δίκτυο κατακόρυφου ελέγχου)
- Δυσδιάστατο έλεγχο (δίκτυο οριζοντίου ελέγχου)
- Τριδιάστατο έλεγχο
- Έλεγχο μετακινήσεων σε δίκτυα GNSS.

## 7.2 Υψομετρικός έλεγχος

Για τις ανάγκες του ελέγχου των κατακόρυφων μετακινήσεων της στέψης του φράγματος του Κούρη στην Κύπρο, εγκαταστάθηκε **το 2006** ένα υψομετρικό δίκτυο. Το δίκτυο αποτελείται από 6 κορυφές, από τις οποίες οι 5 τοποθετήθηκαν κατά μήκος της στέψης του φράγματος ανά εκατό (100)m εκατέρωθεν του δρόμου (σχήμα 7.1), χρησιμοποιώντας ειδικές ορειχάλκινες κατασκευές, ενώ το 6<sup>ο</sup> σημείο ( $T_2$ ), που αποτελεί και τη σταθερή κορυφή του δικτύου, τοποθετήθηκε έτσι ώστε να βρίσκεται εκτός της ζώνης επιρροής των μετακινήσεων της στέψης του φράγματος.

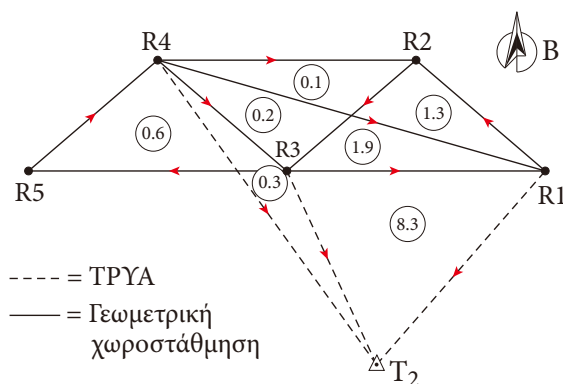
Οι μετρήσεις των υψομετρικών διαφορών μεταξύ των υψομετρικών αφετηριών που βρίσκονται στη στέψη του φράγματος έγιναν με τη μέθοδο της ψηφιακής γεω-



Σχήμα 7.1: Το γεωδαιτικό δίκτυο κατακόρυφου ελέγχου

μετρικής χωροστάθμησης σε μετάβαση και επιστροφή, ενώ για τον προσδιορισμό των υψομετρικών διαφορών μεταξύ των υψομετρικών αφετηριών με το σταθερό σημείο  $T_2$ , χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της Τριγωνομετρικής Υψομετρίας Ακριβείας (ΤΡΥΑ). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες παρουσιάζονται στον πίνακα 7.1, ενώ στο σχήμα 7.2 απεικονίζονται τα κλεισίματα των μοναδιαίων υψομετρικών βρόγχων σε mm.

Το ορθομετρικό υψόμετρο της σταθερής κορυφής θεωρήθηκε ίσο με  $T_2 = 252.8$  m.



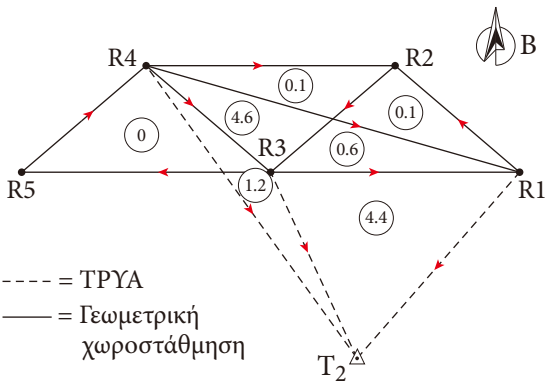
Σχήμα 7.2: Κλεισίματα βρόγχων (2006)

Πίνακας 7.1: Υψομετρικές διαφορές μεταξύ των κορυφών του δικτύου

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΙΣΗ	R1-R2 = 0.4919 m	±1 mm
	R3-R4 = 0.2097 m	
	R4-R5 = -0.3455 m	
	R1-R3 = 0.8357 m	
	R1-R4 = 1.0435 m	
	R2-R3 = 0.3434 m	
	R2-R4 = 0.5529 m	
	R3-R5 = -0.1352 m	
ΤΡΥΑ	T2-R4 = 24.115 m	±1.5 mm
	T2-R3 = 23.905 m	
	T2-R1 = 23.061 m	

Επίλυση δικτύου το 2012

Το ίδιο δίκτυο μετρήθηκε με τις ίδιες ακριβώς μεθόδους το 2012. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες παρουσιάζονται στον πίνακα 7.3, ενώ στο σχήμα 7.3 απεικονίζονται τα κλεισίματα των μοναδιαίων υψομετρικών βρόγχων σε mm.



Σχήμα 7.3: Κλεισίματα βρόγχων (2012)

Πίνακας 7.3: Υψομετρικές διαφορές μεταξύ των κορυφών του δικτύου

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΙΣΗ	R1-R2 = 0.4664 m	±0.5 mm
	R3-R4 = 0.2071 m	
	R4-R5 = -0.3276 m	
	R1-R3 = 0.7889 m	
	R1-R4 = 0.9966 m	
	R2-R3 = 0.3224 m	
	R2-R4 = 0.5301 m	
	R3-R5 = -0.1205 m	
ΤΡΥΑ	T2-R4 = 24.0428 m	±2.5 mm
	T2-R3 = 23.8369 m	
	T2-R1 = 23.0524 m	

Για τον προσδιορισμό των καλλίτερων τιμών των υψομέτρων Η των κορυφών R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>, R<sub>5</sub> με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες τους, έγινε η συνόρθωση του δικτύου με την ίδια μέθοδο (έμμεσες παρατηρήσεις, ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις), με την ίδια σταθερή κορυφή (T<sub>2</sub>).



### 7.3.1 Μετρήσεις & συνόρθωση 1<sup>ης</sup> φάσης (Σεπτέμβριος 2012)

Τον Σεπτέμβριο του 2012, μετρήθηκαν όλα τα στοιχεία του δικτύου οριζοντίου ελέγχου, δηλαδή 8 οριζόντιες γωνίες και 6 αποστάσεις (ουσιαστικά μετρήθηκαν τα μήκη και οι αντίστοιχες κατακόρυφες γωνίες και υπολογίσθηκαν οι αποστάσεις). Στον πίνακα 7.7, παρουσιάζονται οι τιμές των μετρημένων μεγεθών και τα αντίστοιχα σφάλματα.

**Πίνακας 7.7:** Μετρημένες τιμές μεγεθών δικτύου

Οριζόντιες γωνίες (grad)	Οριζόντιες αποστάσεις (m)
$\widehat{314} = 25.4805 \pm 5^{cc}$	1-2 = $839.903 \pm 2$ mm
$\widehat{213} = 42.9663 \pm 5^{cc}$	1-3 = $771.085 \pm 2$ mm
$\widehat{324} = 32.0825 \pm 5^{cc}$	1-4 = $483.002 \pm 2$ mm
$\widehat{421} = 38.7226 \pm 5^{cc}$	2-4 = $743.549 \pm 2$ mm
$\widehat{431} = 33.3090 \pm 5^{cc}$	2-3 = $537.321 \pm 2$ mm
$\widehat{132} = 86.2297 \pm 5^{cc}$	3-4 = $376.649 \pm 2$ mm
$\widehat{142} = 92.8315 \pm 5^{cc}$	
$\widehat{243} = 48.3796 \pm 5^{cc}$	

**Πίνακας 7.8:** Προσωρινές τιμές συν/νων κορυφών

κορυφή	$x_o(m)$	$y_o(m)$
1	5000.000	5000.000
2	5125.487	4169.523
3	4613.556	4332.742
4	4614.206	4709.390

Χρησιμοποιώντας του τύπο του Ferrero (σχέση 2.8) προσδιορίστηκε η μέση αβεβαιότητα μέτρησης των οριζόντιων γωνιών ίση με  $\pm 5^{cc}$  (στο σχήμα 7.6β, εμφανίζονται τα γωνιακά κλεισίματα των μοναδιαίων τριγώνων).

Το δίκτυο συνορθώνεται με τη μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων με τις ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις, θεωρώντας **σταθερή** την κορυφή **1** με συν/νες ( $x=5000$  m,  $y=5000$  m) και σταθερή τη γωνία διεύθυνσης  $\alpha_{12}=190.4528^g$ . Το δίκτυο έχει  $n_u=4$  κορυφές και  $d=3$  ατέλειες (δύο θέσης & μία προσανατολισμού) οπότε οι ανεξάρτητες καθοριστικές παράμετροι είναι  $m=2 \cdot n_u - 3 = 2 \cdot 4 - 3 = 5$ .

Αρχικά προσδιορίζονται προσωρινές τιμές συν/νων για τις κορυφές 2, 3, 4 (πίνακας 7.8) και μέσω αυτών προσωρινές τιμές των αποστάσεων και των γωνιών διεύθυνσης.

Θεωρώντας ως a-priori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους  $\sigma_0=1$ , σχηματίζεται ο

πίνακας βαρών  $P$ , χρησιμοποιώντας τα σφάλματα μέτρησης αποστάσεων και οριζοντίων γωνιών (πίνακας 7.7).

$$P = \begin{bmatrix} 500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2000 \end{bmatrix}$$

Εφόσον είναι σταθερή η κορυφή **1** και γνωστή η γωνία διεύθυνσης  $\alpha_{12}$ , οι άγνωστοι είναι:

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} \delta S_{12} \\ \delta x_3 \\ \delta y_3 \\ \delta x_4 \\ \delta y_4 \end{bmatrix}$$

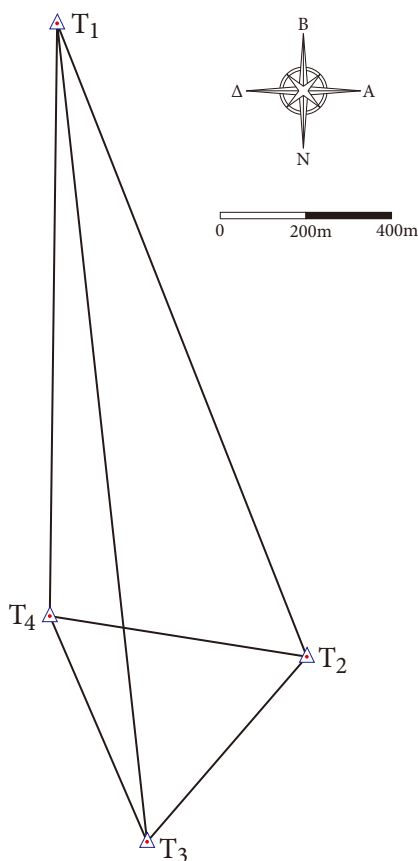
Υπολογίζονται ο πίνακας  $A \cdot \sqrt{P}$  και το διάνυσμα  $\delta l \cdot \sqrt{P}$ .

$$A \cdot \sqrt{P} = \begin{bmatrix} 500 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 500 & -250.58 & -432.67 & 0 & 0 \\ 500 & -250.58 & -432.67 & -399.37 & -300.84 \\ 221.35 & -476.37 & 151.88 & -399.37 & -300.84 \\ 410.33 & -476.37 & 151.88 & -343.81 & 363.03 \\ 410.33 & -0.86 & -500 & -0.86 & 500 \\ 410.33 & 142.89 & -82.75 & -158.61 & 210.56 \\ 0 & -142.89 & 82.75 & -158.61 & 210.56 \\ -114.62 & -71.98 & -225.76 & 124.33 & 117.75 \\ -97.85 & -71.98 & -225.76 & -124.33 & -117.75 \\ -97.85 & 195.15 & 82.17 & -338.04 & 0.58 \\ 212.48 & 214.87 & 143.01 & -338.04 & 0.58 \\ 97.85 & 214.87 & 143.01 & 282.94 & -92.81 \\ -97.85 & -338.04 & 0.58 & 213.71 & -118.33 \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} \text{Αποστάσεις} \\ \text{Οριζόντιες} \\ \text{γωνίες} \end{array} \right.$$

## 7.4 Τριδιάστατος έλεγχος

### 7.4.1 1<sup>ο</sup> Παράδειγμα

Στην περιοχή των Οινουσσών εγκαταστάθηκε 3D δίκτυο παρακολούθησης μετακινήσεων (σχήμα 7.11). Το δίκτυο υλοποιήθηκε με ειδικές σημάνσεις ώστε να ελαχιστοποιούνται σφάλματα κέντρωσης. Το δίκτυο μετρήθηκε & συνορθώθηκε τον Ιούνιο του έτους 2001 (I φάση μετρήσεων) και του Ιούνιο του έτους 2003 (II) φάση.



Σχήμα 7.11: 3D δίκτυο στις Οινούσσες

#### 7.4.1.1 Μετρήσεις & συνόρθωση 1<sup>ης</sup> φάσης (Ιούνιος 2001)

Τον Ιούνιο του 2001, μετρήθηκαν όλα τα στοιχεία του δικτύου, δηλαδή 8 οριζόντιες γωνίες, 6 μήκη και 6 κατακόρυφες γωνίες. Στον πίνακα 7.16, παρουσιάζονται οι

τιμές των μετρημένων μεγεθών και τα αντίστοιχα σφάλματα. Τα μήκη που αναφέρονται στον πίνακα 7.16, έχουν προκύψει μετά την αναγωγή των μετρούμενων στα προσημασμένα σημεία του δικτύου (σχέση 3.12, §3.4.2.1).

**Πίνακας 7.16:** Μετρημένες τιμές μεγεθών δικτύου

Οριζόντιες γωνίες (grad)		Μήκη (m)		Κατακόρυφες γωνίες (grad)	
$\widehat{T2-T1-T3}=16.9449$	$\pm 5^{\text{cc}}$	$T2-T1=1594.709$	$\pm 3 \text{ mm}$	$T2-T1=94.2990$	$\pm 5^{\text{cc}}$
$\widehat{T3-T1-T4}=7.7598$		$T3-T2=570.470$		$T3-T1=95.0487$	
$\widehat{T3-T2-T4}=64.6270$		$T4-T3=573.452$		$T4-T1=92.6347$	
$\widehat{T4-T2-T1}=66.1126$		$T4-T1=1392.262$		$T3-T2=99.2057$	
$\widehat{T4-T3-T1}=18.9485$		$T3-T1=1926.601$		$T4-T2=98.1101$	
$\widehat{T1-T3-T2}=52.3163$		$T4-T2=607.549$		$T4-T3=98.7917$	
$\widehat{T1-T4-T2}=109.1828$					
$\widehat{T2-T4-T3}=64.1082$					

Το δίκτυο συνորθώνεται με τη μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων με τις ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις, θεωρώντας **σταθερή** την κορυφή **T1** με συν/νες ( $x=5000 \text{ m}$ ,  $y=5000 \text{ m}$ ,  $H=178.730 \text{ m}$ ) και σταθερή τη γωνία διεύθυνσης  $\alpha_{T1-T2}=176.0818^{\text{g}}$ . Το δίκτυο έχει  $n_u=4$  κορυφές και  $d=4$  ατέλειες (τρεις θέσης & μία προσανατολισμού) οπότε οι ανεξάρτητες καθοριστικές παράμετροι είναι  $m=3 \cdot n_u - 3 = 3 \cdot 4 - 4 = 8$

Αρχικά προσδιορίζονται προσωρινές τιμές συν/νων για τις κορυφές T2, T3, T4 (πίνακας 7.17) και μέσω αυτών προσωρινές τιμές των μηκών, των γωνιών διεύθυνσης και των ζενιθίων γωνιών.

**Πίνακας 7.17:** Προσωρινές τιμές συν/νων κορυφών

κορυφή	$x_o \text{ (m)}$	$y_o \text{ (m)}$	$H_o \text{ (m)}$
T1	5000.000	5000.000	178.730
T2	5582.792	3522.492	34.807
T3	5209.980	3090.712	27.871
T4	4982.906	3617.212	16.768

## 8.6 Παρακολούθηση της Υγείας τεχνητών κατασκευών

### 8.6.1 Λειτουργία Μόνιμου Συστήματος Παρακολούθησης Μετακινήσεων

Για τις ανάγκες της μόνιμης παρακολούθησης της κινηματικής συμπεριφοράς του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα, εγκαταστάθηκε στο χώρο του μνημείου ένα μόνιμο γεωδαιτικό σύστημα παρακολούθησης (monitoring). Σκοπός ήταν να παρακολουθείται η κινηματική συμπεριφορά, κατά τη διάρκεια των εργασιών αποκατάστασης και να ενημερώνονται οι εκτελούντες τις εργασίες για οποιαδήποτε αστοχία, ώστε να παρεμβαίνουν άμεσα και να την αποκαθιστούν.

Το σύστημα υλοποιήθηκε με τη χρήση του ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού Trimble S9, ο οποίος τοποθετήθηκε μόνιμα στην κορυφή 2 του τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου (σχήμα 8.7), αφού από τη θέση αυτή είναι ορατό σχεδόν το σύνολο των σημείων που έχουν τοποθετηθεί στην οροφή του Ιερού Κουβουκλίου. Ωστόσο, παρατηρώντας και το σχήμα του δικτύου, τα σημεία 4 και 5 δεν είναι ορατά, για αυτό και δεν υπάρχουν δεδομένα monitoring για τα σημεία αυτά από το σύστημα. Έτσι πληροφορία υπάρχει μόνο για 9 κορυφές του δικτύου.



Σχήμα 8.7: Σημεία παρακολούθησης της κινηματικής συμπεριφοράς του Ιερού Κουβουκλίου



*Εικόνα 8.17: Το σύστημα παρακολούθησης σε λειτουργία.*

## Ευρετήριο Όρων

- ATR, 241
- Baarda, 130
- baselines, 115
- CERN, 53
- DOP, 241
- Earthscope, 251
- EUREF Permanent GNSS Network, 254
- Ferrero, 95
- GIS, 244
- Hepos, 257
- monitoring, 260
- point cloud, 243
- Structural Health Monitoring, 233
- Taylor, 108, 109
- Voronoi, 243
- αβεβαιότητα, 75
- Αγία Τριάδα Πατρών, 35
- αισθητήρες, 234
  - οπτικών ινών, 238
- ακρίβεια, 23
- ακτίνα ανίχνευσης, 245
- αλγόριθμος εκπαίδευσης, 249
- αναγωγές, 88
- αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο, 249
- ανακλαστικότητα, 243
- ανεξάρτητες καθοριστικές παράμετροι, 102
- ανισοβαρείς, 64
- ανύψωση, 71
- αξιολόγηση, 129
- αξιοπιστία, 23
- απόλυτη έλλειψη σφάλματος, 23
  - κατακόρυφη μετακίνηση, 149
  - μεταβολή θέσης, 22
  - οριζοντιογραφική μετακίνηση, 153
  - τριδιάστατη μετακίνηση, 157
- απόσταση, 107
- ατέλειες, 64
- βαθμός ελευθερίας, 102
- βάρος, 22
- βάσεις, 97
- βελτιστοποίηση, 66
- Βόλβη, 50
- γέφυρα της Άρτας, 28
- γέφυρες, 238
- γεωδαισία, 19
- γεωδαιτικές μέθοδοι, 234
- γεωδαιτικός σταθμός, 84
- γεωκεντρικό τριδιάστατο σύστημα, 159
- γεωτεχνικά όργανα, 236
- γήπεδο Καραϊσκάκη, 38
- δέκτες GNSS, 84
- διαγράμματα βελτιστοποίησης, 68
- διάμεσος, 245
- διάνυσμα μεταβολής, 148
  - μετακίνησης, 22
- διάστημα εμπιστοσύνης, 23
- διδιάστατα δίκτυα, 21
- διεπιστημονική ομάδα, 61
- δίκτυο ελέγχου, 21
  - παρακολούθησης, 21
- δομική ταυτοποίηση, 235
- δορυφορικές εικόνες, 253
- δυναμικά μοντέλα, 249
- δυσδιάστατο γραμμικό μοντέλο παραμόρφωσης, 247
- ελάχιστες δεσμεύσεις, 23
  - εξωτερικές δεσμεύσεις, 104
- έλεγχος μέσου-άκρου, 85
  - μετρήσεων, 90
  - υπολοίπων, 130
- ελεύθερο δίκτυο, 23

- έλλειψη σφάλματος, 23
- ελλειψοειδές σφάλματος, 23
- εξισώσεις παρατήρησης, 103
  - συνθήκης, 116
- εξοπλισμός, 83
- επίγεια συστήματα radar, 242
- επίγειοι σαρωτές laser, 242
- επιλογή βαρών, 92
- επιμηκυνσιόμετρα, 237
- επίπεδο εμπιστοσύνης, 23
- επιταχυνσιόμετρα, 234, 236
- εποχή, 22
- εσωτερικές δεσμεύσεις, 105
- ευαισθησία, 23
- Ζάκυνθος, 219
- ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, 240
- ημιτονική συνθήκη, 122
- ηφαιστειακές εκρήξεις, 251
- θερμοκρασία, 234
- Ιακωβιανός πίνακας, 160
- ιδιοτιμή, 143
- Ιερό Κουβούκλιο, 203, 260
- ιστόγραμμα συχνοτήτων, 245
- καθίζηση, 149
- Καλαμάτα, 35
- καλύτερες τιμές, 101
- κανονικές εξισώσεις, 103
- κανονικοποίηση, 249
- κατακόρυφη γωνία, 66
- κατολισθήσεις, 251
- κεντροειδής διαμέριση, 244
- κινηματικά μοντέλα, 248
- κλινόμετρα, 234
- κλισίμετρα, 238
- Κούρη, 41
- κρυφοί νευρώνες, 249
- λήψη αποφάσεων, 235
- μαγνητικοί στόχοι, 81
- μαθηματικό μοντέλο, 101
- μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων, 97
  - εμμέσων παρατηρήσεων, 103
  - συμβατικών παρατηρήσεων, 116
- μέσο σφάλμα αποστάσεων, 132
  - - γωνιών διεύθυνσης, 132
  - - θέσης, 132
  - - σχετικών θέσεων, 132
  - τετραγωνικό σφάλμα, 67
- μετακίνηση, 22
- μεταλλική βάση, 76
- μετρήσεις, 83
- μετρική, 245
- μήκος, 65
- μνημείο, 61
- μονοδιάστατα δίκτυα, 21
- μοντέλα αιτίας - αποτελέσματος, 249
  - παραμόρφωσης, 246
  - συνταύτισης, 248
- Μεγάλη Παναγιά, 46
- οικονομία, 62
- ολικός έλεγχος αξιοπιστίας, 129
- οριζόντια γωνία, 66
- ορισμένο δίκτυο, 23
- ορισμός θέσης, 63
  - κλίμακας, 63
  - προσανατολισμού, 63
- παρακολούθηση κατασκευών, 19
  - παραμορφώσεων, 19
  - της “υγείας” κατασκευών, 233
- παραμόρφωση, 22
- παρατήρηση, 22
- πειραματική μηχανική, 235
- περιγραφικά μοντέλα, 248
- περιοδική μέτρηση, 235
- περιοδόγραμμα Lomb, 272
- πίεση, 234
- πιεσόμετρα, 253
- πίνακας βαρών, 168
- πίνακας μεταβλητότητας, 66
- ποδική καμπύλη, 137
- πρόβλεψη μεταβολής θέσης, 246
- προσβασιμότητα, 72
- προσωρινές τιμές, 103
- σειсмоγράφοι, 253
- σεισμός, 251



- σημεία ελέγχου, 21
- σταθερό σημείο, 22
- στατικά μοντέλα, 235, 249
- συνθήκη γωνιών, 120
  - κέντρου, 120
  - πλευρών, 120
- συνόρθωση δικτύου, 22
- σύστημα αναφοράς, 22, 62
- σφάλμα κέντρωσης, 73
- σχετική έλλειψη σφάλματος, 23
  - μεταβολή θέσης, 22
- ταλαντώσεις, 268
- ταχύτητες μετακίνησης, 259
- τεκτονική παραμόρφωση, 251
- Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, 249
- τριγωνισμός Delaunay, 245
- Τριγωνομετρική Ύψομετρία Ακριβείας, 65
- τριδιάστατα δίκτυα, 22
- τρικόχλιο, 75
- τρίποδας, 84
- τυπικό σφάλμα, 65
- υγρασία αέρα, 234
- υπολογιστική γεωμετρία, 244
- υποπίνακας μεταβλητότητας συμμεταβλητότητας, 134
- υψομετρικά δίκτυα, 21
- υψομετρικός βρόγχος, 118
- ύψος κεραίας δέκτη GNSS, 88
- φάση, 22
- φράγμα Μόρνου, 25
- φράγματα, 238
- χαρακτηριστικά διανύσματα, 142
- χαρακτηριστική εξίσωση, 140
- χωροβάτης ψηφιακός, 84
- χωροθέτηση, 71
  - ασύρματων δικτύων, 243