



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ



**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΠΛΑΣΤΗΡΑ
ΜΕ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΒΑΣΙΛΗΣ ΣΤΟΥΡΝΑΡΑΣ

ΑΘΗΝΑ ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2012

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Τελειώνη Ελισάβετ, Λέκτορας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Εξεταστική Επιτροπή

Γεωργόπουλος Γεώργιος, Λέκτορας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σταθός Δημοσθένης, Καθηγητής της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Τελειώνη Ελισάβετ, Λέκτορας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσης διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν τόσο με τη συμβολή τους στην ολοκλήρωση αυτής όσο και συνολικότερα το προηγούμενο διάστημα.

Ευχαριστώ θερμά τους επιβλέποντες καθηγητές κ. Γεωργόπουλο Γιώργο, Λέκτορα στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ και την κα. Τελειώνη Ελισάβετ, Λέκτορα στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ για την εμπιστοσύνη, τη βοήθεια και τη στήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ την Αχτίδα ΑΕΙ – ΤΕΙ και Έρευνας της Κομματικής Οργάνωσης Αττικής του τιμημένου Κομμουνιστικού Κόμματος Ελλάδας και την Νομαρχιακή Οργάνωση ΑΕΙ της Κομμουνιστικής Νεολαίας Ελλάδας, που σε μία περίοδο με πολυσύνθετα καθήκοντα στην ταξική πάλη από τη μεριά τους, μου δώσανε όλη την απαραίτητη στήριξη και βοήθεια για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας, των σπουδών συνολικότερα και κυρίως για την από εδώ και πέρα πορεία μου.

Ευχαριστώ επίσης τους υπαλλήλους της ΔΕΗ και ειδικότερα τους κ.Κουντούρη, κ.Λαζινό και κ.Σβετζούρη για τη βοήθεια που μας παρείχαν στη συγκέντρωση των απαραίτητων στοιχείων και στην ολοκλήρωση ορισμένων εργασιών.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τη συνάδελφο και φίλη Νταλούκα Κρυσταλία για την καθοριστική συμβολή της και την άριστη συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου για τη στήριξη της όλα αυτά τα χρόνια και τη βοήθεια της στην εκπόνηση της εργασίας.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	5
Κεφάλαιο 1	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1.1. ΓΕΝΙΚΑ	9
1.2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	9
1.3. ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	9
Κεφάλαιο 2	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΦΡΑΓΜΑΤΑ	13
2.1. ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ	13
2.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ	14
2.3. ΤΥΠΟΙ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ.....	14
2.4. ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΑΙ ΤΑΣΕΩΝ	18
2.5. ΑΣΤΟΧΙΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ – ΑΙΤΙΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	20
2.6. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ	22
Κεφάλαιο 3	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΤΑΥΡΩΠΟΥ.....	27
3.1. ΓΕΝΙΚΑ	27
3.2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	28
3.3. ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ – ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	29
3.4. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ – ΔΟΜΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ.....	30
3.4.1. Το σώμα του φράγματος	30
3.4.2. Οι υπερχειλιστές	31
3.4.3. Οι εκκενωτές πυθμένα	32
3.4.4. Η σήραγγα εκτροπής	33
Κεφάλαιο 4	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ	37
4.1. ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ.....	37
4.2. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ.....	38
4.3. ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ	38
4.3.1. Επίγειες μέθοδοι	38
4.3.2. Δορυφορικές μέθοδοι GNSS.....	39
4.4. ΜΗ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ	40
4.4.1. Γεωτεχνικές μέθοδοι	40

4.4.2. Σύρματα από χάλυβα και εκκρεμή.....	40
4.4.3. Δίκτυο αισθητήρων με οπτικές ίνες.....	42
Κεφάλαιο 5.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΤΟ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΑΥΡΩΠΟΥ	45
5.1. ΓΕΝΙΚΑ	45
5.2. ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΙΔΡΥΣΗ ΚΟΡΥΦΩΝ.....	45
5.3. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ	46
5.4. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	47
5.5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ.	48
5.6. ΟΡΓΑΝΑ - ΠΑΡΕΛΚΟΜΕΝΑ.....	49
Κεφάλαιο 6.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ	53
6.1. ΓΕΝΙΚΑ	53
6.2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ GPS.....	54
6.2.1. Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό Trimble Business Center.....	54
6.2.2. Επίλυση βάσεων.....	56
6.2.3. Έλεγχος κλεισίματος βρόχων	57
6.3. ΣΥΝΟΡΘΩΣΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ	58
6.3.1. Συνόρθωση με το λογισμικό Trimble Business Center (TBC)	58
6.3.2. Συνόρθωση δικτύου με χρήση κώδικα	61
Κεφάλαιο 7	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΚΟΡΥΦΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	67
7.1. ΑΠΟΛΥΤΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ.....	67
7.2. ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	72
Κεφάλαιο 8.....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΧΡΟΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΡΓΑΣΙΩΝ.....	77
Κεφάλαιο 9.....	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	81
9.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	81
9.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	82
Βιβλιογραφία	85
Ιστογραφία	86
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	87

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ

A/A	Τίτλος	Σελίδα
1	Κατανομή εργασιών	77
2	Κατανομή εργασιών πεδίου	78
3	Κατανομή εργασιών γραφείου	78

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

A/A	Τίτλος	Σελίδα
1	Ταξινόμηση φραγμάτων	15
2	Τιμές DOP για τις 23/5/2012 στην περιοχή του φράγματος Ταυρωπού	48
3	Ορατότητα δορυφόρων στην περιοχή του φράγματος Ταυρωπού στις 22/11/2011	48
4	Υπόλοιπα μετρήσεων του δορυφόρου G25 στις 25/7/2011	56

ΕΙΚΟΝΕΣ

A/A	Τίτλος	Σελίδα
1	Φράγμα βαρύτητας από σκυρόδεμα στην επαρχία Παλαιχώρι – Καμπί, Λευκωσία Κύπρου	16
2	Αντηριδωτό φράγμα στο Wimbledon, Σουηδία	16
3	Τοξωτό φράγμα, Λίμνη Ταυρωπού, Καρδίτσα	17
4	Χωμάτινο φράγμα, Λίμνη Μόρνου	17
5	Λιθόρριπτο φράγμα με επένδυση από σκυρόδεμα, Ραμπεντώσα	18
6	Το φράγμα Malpasset μετά την καταστροφή του	21
7	ΥΗΣ Ταυρωπού	28
8	Οι δύο υπερχειλιστές ανάντη και κατόντη (σε λειτουργία)	32
9	Οι δύο εκκενωτές από κατόντη	33
10	Κορυφές δικτύου - Θέση τριγωνωμετρικού σημείου (Νεοχώρι)	46
11	Γεωμετρία δικτύου	47
12	Εισαγωγή δεδομένων στα αρχεία των δεκτών	55
13	Επεξεργασία διαστημάτων παρατηρήσεων για τη βάση KM-B στις 25/7/2011	57

ΠΙΝΑΚΕΣ

A/A	Τίτλος	Σελίδα
1	Πλήθος μετρημένων και συμμετεχόντων στη συνόρθωση βάσεων	58

2	Προβολικές συντεταγμένες ΕΓΣΑ 87 της κορυφής AGN	58
3	Τρισδιάστατες Καρτεσιανές συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου και οι αβεβαιότητές τους στο WGS84 για τις τρεις φάσεις μέτρησης (επίλυση TBC)	59
4	Συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου και οι αβεβαιότητές τους στην προβολή του ΕΓΣΑ 87 για τις 3 φάσεις μέτρησης (επίλυση TBC)	60
5	Στατιστικά στοιχεία επιλύσεων δικτύου	61
6	Τρισδιάστατες Καρτεσιανές συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου και οι αβεβαιότητές τους στο WGS84 για τις τρεις φάσεις μέτρησης (επίλυση σε κώδικα)	62
7	Συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου και οι αβεβαιότητές τους στην προβολή του ΕΓΣΑ 87 για τις 3 φάσεις μέτρησης (επίλυση σε κώδικα)	63
8	Οριζόντιες μετακινήσεις των κορυφών του δικτύου για τις 3 φάσεις μέτρησης – Έλεγχος της στατιστικής σημαντικότητάς τους	68
9	Σχετικές Οριζόντιες μετακινήσεις για τις 3 φάσεις μέτρησης – Έλεγχος της στατιστικής σημαντικότητάς τους	73

ΣΧΗΜΑΤΑ

A/A	Τίτλος	Σελίδα
1	Απεικόνιση ασκούμενων δυνάμεων σε φράγμα	19
2	Απεικόνιση ασκούμενων δυνάμεων σε φράγμα από σκυρόδεμα	19
3	Απεικόνιση δυνάμεων σε αντηριδωτό φράγμα	20
4	Απεικόνιση κατανομής φορτίων σε τοξωτό φράγμα	20
5	Πάχη φράγματος Ταυρωπού σε διάφορα ύψη	31
6	Θέση εκκρεμών στο φράγμα Ταυρωπού	41
7	Θέσεις και υψόμετρα των σημείων εξάρτησης και μετρήσεων στο φράγμα Ταυρωπού	42
8	Μέτρηση ύψους κεραίας σε τρίποδα και βάθρο	49
9	Διανύσματα μετακίνησης, με τις αντίστοιχες ελλείψεις σφάλματος για πιθανότητα 39,4% για το χρονικό διάστημα Αύγουστος - Νοέμβρης 2011	69
10	Διανύσματα μετακίνησης, με τις αντίστοιχες ελλείψεις σφάλματος για πιθανότητα 39,4% για το χρονικό διάστημα Αύγουστος - Νοέμβρης 2011 (χωρίς T3)	70
11	Διανύσματα μετακίνησης, με τις αντίστοιχες ελλείψεις σφάλματος για πιθανότητα 39,4% για το χρονικό διάστημα Νοέμβρης 2011 - Μάιος 2012 (χωρίς T3)	70
12	Διανύσματα μετακίνησης, με τις αντίστοιχες ελλείψεις σφάλματος για πιθανότητα 39,4% για το χρονικό διάστημα Αύγουστος 2011 - Μάιος 2012 (χωρίς T3)	71
13	Τροχιές μετακίνησης για το χρονικό διάστημα Αύγουστος 2011-Νοέμβριος 2011-Μάιος 2012	71

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα φράγματα αποτελούν μεγάλα τεχνικά έργα με πολλαπλή σκοπιμότητα σε ότι αφορά την κάλυψη ενεργειακών αναγκών, αναγκών ύδρευσης – άρδευσης, κλπ. Ταυτόχρονα αποτελούν μεγάλης έκτασης παρέμβαση στο περιβάλλον με σημαντικές επιπτώσεις στη τεκτονική, στο μικροκλίμα, την οικολογία και άλλους παράγοντες των περιοχών όπου κατασκευάζονται.

Οι ειδικές προδιαγραφές κατά την κατασκευή και κατά την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς των φραγμάτων, τόσο κατά την φάση πλήρωσης όσο και κατά την φάση λειτουργίας, είναι πολύ μεγάλης σημασίας, αφού συνδέονται άμεσα με την αποφυγή δυσμενών καταστάσεων σε περίπτωση αστοχίας τους. Η παρακολούθηση της τήρησης των προδιαγραφών είναι αντικείμενο της Γεωδαιτικής Μεθοδολογίας, η οποία εφαρμόζεται με επίγειες ή δορυφορικές μεθόδους. Η Γεωδαιτική Μεθοδολογία, με την εξέλιξη των οργάνων, δίνει την δυνατότητα ανίχνευσης μετακινήσεων λίγων χιλιοστών, με πιθανότητα συμβατή με εκείνη της πιθανοτικής αντιμετώπισης της ασφάλειας των κατασκευών. Ειδικότερα για τις δορυφορικές μεθόδους μπορεί να πει κανείς με σιγουριά, ότι «ανταγωνίζονται» τις επίγειες, αφού οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται μπορούν να φτάσουν τα λίγα mm, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα να ανιχνευθούν μετακινήσεις της τάξης των 5 mm.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς του φράγματος Ταυρωπού - γνωστού και ως φράγμα της λίμνης Πλαστήρα, του νομού Καρδίτσας. Το φράγμα Ταυρωπού είναι το μοναδικό τοξωτό φράγμα από οπλισμένο σκυρόδεμα, με διπλή καμπυλότητα, στην Ελλάδα. Το φράγμα κατασκευάστηκε από τη ΔΕΗ το 1960 με σκοπό τη συμβολή στον εξηλεκτισμό της χώρας, την άρδευση και ύδρευση μεγάλου μέρους του Θεσσαλικού κάμπου.

Στο φράγμα Ταυρωπού, η παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς του γίνεται από ειδικευμένο προσωπικό της ΔΕΗ που έχει την ευθύνη της λειτουργίας του. Οι οριζόντιες μετακινήσεις προσδιορίζονται με τη χρήση εκκρεμών κάθε μήνα και οι κατακόρυφες μετακινήσεις με τη μέθοδο της Γεωμετρικής Χωροστάθμησης ανά εξάμηνο. Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας η παρακολούθηση των οριζόντιων μετακινήσεων του φράγματος έγινε με την χρήση της Γεωδαιτικής Μεθοδολογίας και την εφαρμογή της δορυφορικής μεθόδου.

Συγκεκριμένα ανιχνεύθηκαν και προσδιορίσθηκαν οι οριζόντιες μετακινήσεις κατά τα χρονικά διαστήματα Αύγουστος 2011 ÷ Νοέμβριος 2011 ÷ Μάιος 2012 και το συνολικό διάστημα Αύγουστος 2011 ÷ Μάιος 2012. Για την παρακολούθηση ιδρύθηκε δορυφορικό δίκτυο 9 κορυφών, 3 από αυτές είναι υλοποιημένες στη στέψη του φράγματος. Οι βάσεις μεταξύ των κορυφών μετρήθηκαν με τη μέθοδο του στατικού εντοπισμού με δυο δέκτες διπλής συχνότητας. Μετά την επεξεργασία των βάσεων, τη συνόρθωση των παρατηρήσεων και την επίλυση του δικτύου για κάθε φάση μέτρησης, εκτιμήθηκαν οι συντεταγμένες των κορυφών του και οι αβεβαιότητές τους. Από την σύγκριση των συντεταγμένων προσδιορίσθηκαν τα διανύσματα μεταβολής θέσης των κορυφών, ανάμεσα στις τρεις φάσεις μέτρησης. Τέλος, έγινε έλεγχος της στατιστικής σημαντικότητας των μεταβολών για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και προέκυψαν τα διανύσματα μετακίνησης.

ABSTRACT

Dams are large structures with multiple feasibility concerning energy needs, water needs, - irrigation, etc. At the same time they cause large-scale interventions in the environment with significant impact on tectonics, microclimate, ecology and other factors of the areas where they are constructed.

The specific requirements for the construction and monitoring of the kinematic behavior of dams, during the filling phase as well as during the operational phase, are of great importance, since they are directly related to the avoidance of adverse conditions in case of their failure. The kinematic behavior of the dams can be monitored through the application of the geodetic methodology using terrestrial or satellite methods. Nowadays, the Geodetic Methodology, together with the development of instruments, permits movement detection of a few millimeters magnitude for a confidence level compatible with that of the probabilistic treatment of the structures safety. More especially satellite geodetic methods, are compatible to the terrestrial ones, since the a few mm accuracies achieved gives the possibility to detect movements of the order of 5 mm.

This thesis deals with the monitoring of the kinematic behavior of the Tavropos dam – also known as Plastiras Lake dam in the area of Karditsa. The Tavropos dam is the only concrete arched dam with double curvature in Greece. The dam was constructed by the Greek Electricity Public Company (P.P.C.) in 1960 in order to contribute to the country's electrification, as well as to the irrigation of the Thessaly plain.

The kinematic behavior of Tavropos Dam is monitored by trained P.P.C. personnel, that is responsible for its operation. The dam's horizontal displacements are determined through monthly measurements at the 3 pendulums established in the dam's body while the vertical displacements are estimated through geometric leveling every six months. In this thesis, the horizontal displacements of the dam were estimated for the time interval (August 2011 – May 2012) through the establishment of a Geodetic control network that was measured using GNSS receivers.

The network established consists of 9 points 3 of which are established on the dam's crest. The network's elements (baselines) were measured using dual frequency receivers, with the static positioning method, during three measuring epochs (August 2011, November 2011 and May 2012). After the baseline processing, the coordinates of the network's points together with their standard deviations were estimated for each measuring epoch through the network's adjustment. Finally the absolute as well as the relative displacement vectors for the corresponding time intervals were determined and their statistical significance was tested for confidence level 95%.

Κεφάλαιο 1
Εισαγωγή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η παρακολούθηση μετακινήσεων των μεγάλων τεχνικών έργων, όπως είναι τα φράγματα, αποτελεί αντικείμενο μελέτης της επιστήμης της Γεωδαισίας. Πάνω σε αυτό το αντικείμενο έχουν αναπτυχθεί – με την καθοριστική συμβολή της τεχνολογίας – μέθοδοι τόσο επίγειες όσο και δορυφορικές. Η Γεωδαιτική μεθοδολογία δεν είναι η μόνη μεθοδολογία για την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς των φραγμάτων, ωστόσο έχει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων.

Τα φράγματα αποτελούν έργα πολλαπλής σκοπιμότητας με καθοριστική συμβολή στην κάλυψη ενεργειακών, αρδευτικών – υδρευτικών και άλλων ζωτικών αναγκών της περιοχής, που βρίσκονται. Οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον της περιοχής είναι σημαντικές. Πιθανή αστοχία τους επιφέρει μεγάλες καταστροφές με τεράστιο κοινωνικό, οικονομικό, οικολογικό κόστος. Η κινηματική τους συμπεριφορά είναι άμεσα συνδεδεμένη με την πιθανότητα αστοχίας τους, γι' αυτό το λόγο η παρακολούθηση της αποκτά ιδιαίτερη σημασία.

Στο πλαίσιο της γεωδαιτικής μεθοδολογίας, για την παρακολούθηση των μετακινήσεων, χρησιμοποιείται το γεωδαιτικό δίκτυο ελέγχου (οριζόντιο, κατακόρυφο, τρισδιάστατο). Οι θέσεις των κορυφών του δικτύου επιλέγονται μετά από λεπτομερή αναγνώριση και υλοποιούνται με διάφορους τρόπους στο ύπαιθρο. Μεταξύ των κορυφών γίνονται μετρήσεις, με επίγειες ή δορυφορικές μεθόδους, κατά φάσεις και προσδιορίζονται οι συντεταγμένες τους. Η μεταβολή των συντεταγμένων των κορυφών κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ των δυο διαδοχικών φάσεων, μετά από κατάλληλη στατιστική επεξεργασία, προσδιορίζει τα διανύσματα μετακίνησης για επιλεγμένο επίπεδο εμπιστοσύνης.

1.2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η δυνατότητα παρακολούθησης των οριζόντιων μετακινήσεων του φράγματος Ταυρωπού με δορυφορικές μεθόδους. Για το σκοπό αυτόν ιδρύθηκε γεωδαιτικό δίκτυο οριζοντίου ελέγχου, με κορυφές πάνω στη στέψη του φράγματος, στην εγγύτερη περιοχή και σε μεγάλη απόσταση.

Το δίκτυο μετρήθηκε σε τρεις φάσεις Αύγουστος 2011 – Νοέμβρης 2011 – Μάιος 2012. Οι μετρήσεις έγιναν με τη μέθοδο του στατικού εντοπισμού. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν δυο δορυφορικοί δέκτες διπλής συχνότητας. Η συνόρθωση των παρατηρήσεων του δικτύου έγινε κατά φάση με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων (Μ.Ε.Τ.). Το δίκτυο επιλύθηκε με τις ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις και τις ίδιες αρχικές συνθήκες, σε κάθε φάση. Μετά τις επιλύσεις έγινε ο έλεγχος για την ύπαρξη χονδροειδών σφαλμάτων σε κάθε μια παρατήρηση (έλεγχος κατά Baarda). Στη συνέχεια τα αποτελέσματα κάθε μιας επίλυσης αξιολογήθηκαν με το test χ^2 (ολικός έλεγχος) για επίπεδο εμπιστοσύνης 95 %. Τέλος, προσδιορίστηκαν τα διανύσματα απόλυτης και σχετικής μετακίνησης, στα χρονικά διαστήματα μεταξύ των φάσεων και για το συνολικό χρονικό διάστημα, με πιθανότητα 95%.

1.3. ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 9 κεφάλαια και 1 παράρτημα.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στην Γεωδαιτική Μεθοδολογία για την παρακολούθηση των μετακινήσεων, αναλύεται ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας και δίνεται η δομή της.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** αναλύεται η αναγκαιότητα κατασκευής φραγμάτων,

αναφέρονται οι σκοποί που εξυπηρετούν, δίνονται οι διάφοροι τύποι φραγμάτων, η κατανομή των δυνάμεων και τάσεων, που ασκούνται σε αυτά, και οι επιπτώσεις από την κατασκευή και την αστοχία τους. Επίσης γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή στην κατασκευή τους.

Το **τρίτο κεφάλαιο** εστιάζει πιο συγκεκριμένα στο φράγμα της λίμνης Ταυρωπού. Ειδικότερα, δίνονται ιστορικά στοιχεία για την κατασκευή του φράγματος και την ευρύτερη περιοχή, αναφέρονται στοιχεία για το γεωλογικό υπόβαθρό της και παρουσιάζονται τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Τέλος αναλύεται η δομή του φράγματος και η λειτουργία του.

Το **τέταρτο κεφάλαιο** αφορά στην παρακολούθηση των φραγμάτων γενικά. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται η αναγκαιότητα παρακολούθησης των φραγμάτων, οι προδιαγραφές ακρίβειας και όλες οι μέθοδοι για το σκοπό αυτό. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ανάλυση της δορυφορικής μεθόδου, που είναι και η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** περιγράφεται το δορυφορικό δίκτυο ελέγχου, που ιδρύθηκε στην περιοχή του φράγματος. Ξεκινώντας από το στάδιο της αναγνώρισης της περιοχής μελέτης, δίνονται αναλυτικά στοιχεία για τη γεωμετρία του δικτύου, το πλήθος των βάσεων που μετρήθηκαν, την προεργασία των μετρήσεων καθώς επίσης και την μέθοδο που ακολουθήθηκε. Τέλος περιγράφονται τα όργανα και τα παρελκόμενα τους.

Το **έκτο κεφάλαιο** αφορά στην επεξεργασία των δεδομένων. Αρχικά αναλύεται βήμα – βήμα η διαδικασία επίλυσης των διανυσμάτων στο χώρο με βάση τα στοιχεία, που συλλέχθηκαν από τους δέκτες. Ακολουθεί η διαδικασία επιλογής των παρατηρήσεων, που θα συμμετάσχουν στη συνόρθωση, με βάση την εξασφάλιση της εσωτερικής του ακρίβειας. Τέλος περιγράφεται η διαδικασία της συνόρθωσης των παρατηρήσεων για κάθε φάση μέτρησης και δίνονται τα αποτελέσματα των επιλύσεων του δικτύου ελέγχου.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** γίνεται, μετά από στατιστική επεξεργασία, η εκτίμηση των απόλυτων και σχετικών μετακινήσεων κατά τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των φάσεων και για το συνολικό χρονικό διάστημα.

Το **όγδοο κεφάλαιο** περιλαμβάνει το χρονοδιάγραμμα των εργασιών που απαιτήθηκαν για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και τα διαγράμματα, που αφορούν τις επιμέρους εργασίες.

Τέλος, το **ένατο κεφάλαιο** περιλαμβάνει τα συμπεράσματα και τις προτάσεις που προέκυψαν από την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Τα φράγματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΦΡΑΓΜΑΤΑ

2.1. ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Το φράγμα είναι τεχνικό έργο που κατασκευάζεται κάθετα στην κοίτη ενός φυσικού υδατορεύματος για να ανακόψει τη συνέχεια της ροής με σκοπό την αποθήκευση του νερού για μελλοντική χρησιμοποίησή του.

Σκοπός της κατασκευής ενός φράγματος μπορεί να είναι :

- η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- η άρδευση καλλιεργούμενων εδαφών
- η ύδρευση πόλεων, οικισμών ή βιομηχανικών μονάδων
- η διαμόρφωση πλωτών διωρύγων
- η ρύθμιση της παροχής φυσικών ρευμάτων

Συχνά τα φράγματα εξυπηρετούν περισσότερους από έναν σκοπούς (φράγματα πολλαπλής σκοπιμότητας) [11]. Το φράγμα, που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία, για παράδειγμα, εξυπηρετεί τόσο ανάγκες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όσο και ανάγκες ύδρευσης και άρδευσης. Στον ελληνικό χώρο, τα γνωστότερα φράγματα είναι αυτά που σχετίζονται:

- Με υδροηλεκτρική χρήση, όπως του Λούρου (1954), του Λάδωνα (1955), του Ταυρωπού (1959), των Κρεμαστών (1965), του Καστρακίου (1969), του Πολυφύτου (1974), του Πουρναρίου (1981), της Σφηκιάς και των Ασωμάτων (1985), του Στράτου (1988) κ.ά..
- Με υδρευτική χρήση, όπως του Μαραθώνα που ξεκίνησε το έτος 1926 και ολοκληρώθηκε το 1931, του Μόρνου που ολοκληρώθηκε το έτος 1979 κ.ά..
- Με αρδευτική χρήση, όπως της Λευκόγειας Δράμας (1972), της Απολακκιάς Ρόδου (1978), του Λειβαδιού Αστυπάλαιας (1978), της Φανερωμένης και της Πλακιώτισσας στην περιοχή Μεσαράς Ηρακλείου (1980), του Δοξά στην περιοχή του Φενεού Κορινθίας (1982), της Φωλιάς Καβάλας (1983), του Κατάφυτου Δράμας (1984) κ.ά..

Στη σύγχρονη εποχή η πλειονότητα των φραγμάτων χρησιμοποιείται για πολλαπλούς σκοπούς. Συγκεκριμένα παγκοσμίως τα φράγματα χρησιμοποιούνται για αρδευτικούς σκοπούς (37%), για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (16%), για παροχή πόσιμου νερού (12%), για αντιπλημμυρικό έλεγχο (6%), για σκοπούς αναψυχής (3%) και για λοιπούς σκοπούς (4%). Τα οφέλη από τη λειτουργία αυτών των φραγμάτων υπήρξαν πολλαπλά, όμως έχουν σε πολλές περιπτώσεις σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις [12].

Η ΔΕΗ ΑΕ, από τα μέσα της δεκαετίας του '50 μέχρι σήμερα, εκμεταλλεύομενη το έντονο φυσικό ανάγλυφο της χώρας μας, έχει κατασκευάσει 15 μεγάλα και 9 μικρά (με εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη των 15MW) υδροηλεκτρικά έργα (ΥΗΕ), τα οποία βρίσκονται ήδη σε λειτουργία. Μέχρι το 2013 αναμένεται να λειτουργήσουν ακόμα 6 μεγάλα ΥΗΕ (Μεσοχώρα, Συκιά, Πευκόφυτο, Μετσοβίτικο, Ιλαρίωνας και Τέμενος) συνολικής ισχύος 653.30MW. Τα ΥΗΕ της ΔΕΗ, είναι έργα αιχμής, αφού είναι δυνατό να τίθενται αμέσως σε λειτουργία και να διασφαλίζουν την ετοιμότητα και ισορροπία του συστήματος.

Με τα μεγάλα ΥΗΕ που λειτουργούν σήμερα, αξιοποιείται το 30-35% περίπου του τεχνικά εκμεταλλεύσιμου υδροδυναμικού της χώρας, καλύπτοντας το 10% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και διαθέτοντας το 30% περίπου της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος του διασυνδεδεμένου συστήματος. Δεδομένου δε, ότι οι απαιτήσεις σε νερό (δυνάμει ανανεούμενο αγαθό) συνεχώς αυξάνονται, η

αποθήκευση αυτού του αγαθού γίνεται πλέον επιτακτική ανάγκη [7].

2.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Η κατασκευή φραγμάτων ξεκίνησε πολύ παλιά, πριν από 6000 χρόνια περίπου, όταν ο άνθρωπος στην προσπάθειά του να καλύψει τις ανάγκες του για νερό κατασκεύασε τα πρώτα χωμάτινα φράγματα. Το αρχαιότερο γνωστό χωμάτινο φράγμα στον κόσμο χτίστηκε το 4000 π.Χ. περίπου στην πόλη Jawa της Ιορδανίας (Kerisel, 1985). Από τα αρχαιότερα θεωρείται επίσης το φράγμα Sadd el-Kafara που κατασκευάστηκε στην Αίγυπτο την περίοδο 2950-2750π.Χ (Singh and Varshney, 1995). Στην Ελλάδα το αρχαιότερο γνωστό φράγμα είναι στην Μυκηναϊκή Αργολίδα (Balcer, 1974; Zangger, 1993).

Με την πάροδο του χρόνου οι διαστάσεις των φραγμάτων γίνονταν μεγαλύτερες και οι τεχνικές κατασκευής τους συνεχώς βελτιώνονταν κυρίως λόγω της καλύτερης κατανόησης των ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής. Η συμβολή της γεωλογίας στο σχεδιασμό φραγμάτων είναι εξαιρετικά σημαντική, το ίδιο και η ανάπτυξη της γεωτεχνικής μηχανικής. Η συμβολή του Terzaghi (1925) ειδικότερα αποδείχθηκε σταθμός στην κατανόηση της συμπεριφοράς αυτής της κατηγορίας φραγμάτων [8].

2.3. ΤΥΠΟΙ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Τα φράγματα είναι έργα δαπανηρά, παρουσιάζουν όμως μακροπρόθεσμα μεγάλα οικονομικά οφέλη και για τον λόγο αυτό επιδιώκεται η κατασκευή τους. Ανάλογα με τον σκοπό που πρόκειται να εξυπηρετήσει η κατασκευή ενός φράγματος, μελετάται και βρίσκεται τόσο ο καλύτερος τύπος όσο και οι απαιτούμενες διαστάσεις του. Είναι έργα ιδιόμορφα που δεν είναι δυνατόν να τυποποιηθούν εφ' όσον το καθένα έχει τη δική του λειτουργία, τους δικούς του φυσικούς παράγοντες και το δικό του φυσικό περιβάλλον, παράμετροι που παίζουν σπουδαίο ρόλο για την θεμελίωση του. Μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες όπως παρουσιάζονται παρακάτω :

Ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν :

- Φράγματα συγκέντρωσης νερού (επιφανειακοί ταμιευτήρες)
- Φράγματα εκτροπής. Εκτρέπουν προσωρινά ή μόνιμα τη ροή του νερού για εργασίες εν ξηρώ ή για διευθέτηση
- Φράγματα ανάσχεσης της ορμής είτε για περιορισμό της διάβρωσης είτε για τεχνητό εμπλουτισμό
- Φράγματα ρύθμισης για τον έλεγχο και την πρόληψη πλημμυρών

Ανάλογα με το σκοπό εκμετάλλευσης :

- Υδροηλεκτρικά
- Αρδευτικά
- Υδρευτικά
- Αντιπλημμυρικά
- Εμπλουτισμού υδροφόρων

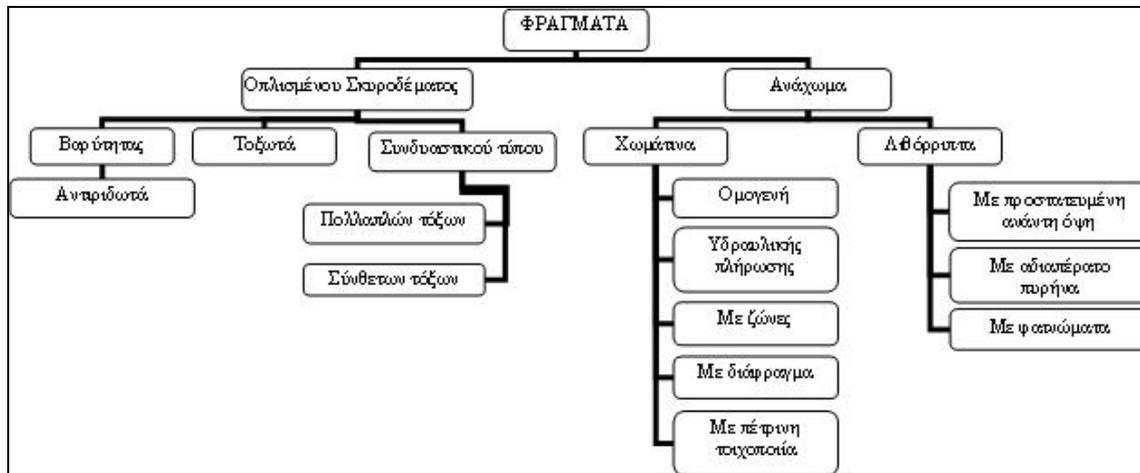
Να σημειωθεί ότι τα φράγματα μπορεί να είναι διπλής ή και πολλαπλής σκοπιμότητας με συνδυασμό των παραπάνω κατηγοριοποιήσεων ανά δύο ή περισσότερων.

Ανάλογα με το ύψος :

- Μικρά φράγματα ύψους <15m
- Μεγάλα φράγματα ύψους >15m ή $5 < \text{Ύψος} < 15$ και χωρητικότητα νερού $>3.000.000 \text{ m}^3$
- Πολύ μεγάλα φράγματα ύψους >150m

Βασικές κατηγορίες ανάλογα με την κατασκευή και τη γεωμετρία τους :

- i. Ακαμπτα
 - Φράγματα βαρύτητας
 - Αντηριδωτά φράγματα
 - Θολωτά φράγματα
- ii. Εύκαμπτα
 - Χωμάτινα φράγματα
 - Λιθόρριπτα φράγματα

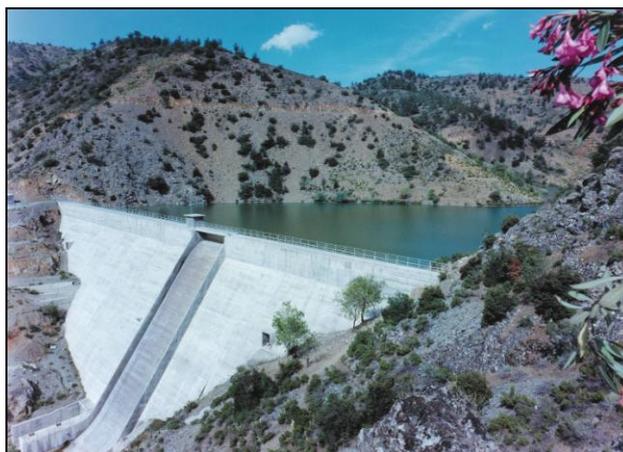


Διάγραμμα 1. Ταξινόμηση φραγμάτων

Diagram 1. Classification of dams

Πιο αναλυτικά για τις κατηγορίες φραγμάτων ανάλογα με την κατασκευή και τη γεωμετρία τους :

1. Στα φράγματα βαρύτητας (Εικόνα 1) σκυροδέματος το ίδιο το βάρος του φράγματος εξασφαλίζει την παραλαβή των δυνάμεων ολίσθησης και ανατροπής που εξασκεί σ' αυτά το νερό. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι κυρίως οι υδροστατικές, στην ανάντη και ενδεχόμενα στην κατάντη πλευρά, η δύναμη της άνωσης, το ίδιο βάρος του φράγματος και η δύναμη της τριβής με το έδαφος. Η χάραξη του φράγματος σε οριζοντιογραφία μπορεί να είναι ευθεία γραμμή ή καμπύλη, ανάλογα με την τοπογραφική διαμόρφωση της περιοχής και τις λειτουργικές ανάγκες που το φράγμα εξυπηρετεί.



Εικόνα 1. Φράγμα βαρύτητας από σκυρόδεμα στην επαρχία Παλαιχώρι – Καμπί, Λευκωσία Κύπρου

Picture 1. Gravity concrete dam at Palechori – Kampi province. Lefkosia, Cyprus

2. Τα αντηριδωτά φράγματα (Εικόνα 2) είναι διάκενα φράγματα βαρύτητας με αυξημένα κενά και είναι, όπως φαίνεται και από το όνομά τους, στην πραγματικότητα κούφια φράγματα βαρύτητας. Παρουσιάζουν οικονομία όγκου σε σχέση με τα φράγματα βαρύτητας, που μπορεί να φτάσει και 1/6 αυτού, και αποτελούνται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι ένα λεπτό τοίχωμα (καλύπτρα), επίπεδο ή καμπύλο με μικρό σχετικά βάρος, κάθετα στον άξονα του ρεύματος και κεκλιμένο ως προς την κατακόρυφο, που παραλαμβάνει την υδροστατική πίεση και τη μεταβιβάζει στις αντηρίδες. Το δεύτερο μέρος είναι οι αντηρίδες, με διεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα του ρεύματος, που παραλαμβάνουν τις δυνάμεις από το τοίχωμα και τις μεταφέρουν στο έδαφος.



Εικόνα 2. Αντηριδωτό φράγμα στο Wimbleball, Σουηδία

Picture 2. Wimbleball dam, Sweden

3. Τα τοξωτά φράγματα (Εικόνα 3) έχουν σε κάτοψη τοξοειδή μορφή και εργάζονται σαν αμφίπακτα τόξα. Η πίεση του νερού εφαρμόζεται στην κυρτή επιφάνεια του φράγματος και μεταβιβάζεται στα πλευρά της κοιλάδας με μορφή κυρίως οριζόντιων δυνάμεων. Λόγω του μικρού του πάχους ένα τοξωτό φράγμα επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και ιδιαίτερα από το γεγονός ότι η ανάντη επιφάνειά του είναι στο μεγαλύτερο μέρος της βυθισμένη στο νερό, ενώ η κατάντη είναι εκτεθειμένη στην ατμόσφαιρα. Το γεγονός αυτό δημιουργεί μια διαφοροποίηση στη συστοδιαστολή των δύο επιφανειών που αναπτύσσει σοβαρές τάσεις στη μάζα του σκυροδέματος. Τέτοιου τύπου φράγμα είναι και το φράγμα Ταυρωπού και μάλιστα διπλής καμπυλότητας.



Εικόνα 3. Τοξωτό φράγμα, Λίμνη Ταυρωπού, Καρδίτσα

Picture 3. Tavropos arch dam, Karditsa, Greece

4. Τα χωμάτινα φράγματα (Εικόνα 4) κατασκευάζονται με γαιώδη υλικά που διατηρούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, τοποθετούνται κατά επάλληλες στρώσεις και συμπυκνώνονται με μηχανικά μέσα. Αντλούν την αντοχή τους από την τοποθέτηση, το συντελεστή εσωτερικής τριβής και τη συνάφειά τους. Παρά τη συμπύκνωση αφήνουν κενά ανάμεσα στους κόκκους, που οδηγεί στη δημιουργία μιας εύπλαστης και εύκαμπτης μάζας που μπορεί να παρακολουθήσει ελαφρές υποχωρήσεις του εδάφους, στο οποίο θεμελιώνεται, χωρίς να δημιουργήσει κίνδυνο καταστροφής. Ο τραπεζοειδής όγκος του φράγματος με το βάρος του ισορροπεί την υδροστατική πίεση των υδάτων. Έχουμε έτσι στατική λειτουργία παρόμοια με τα φράγματα βαρύτητας. Στο εσωτερικό της διατομής του φράγματος και κατά μήκος του άξονά του κατασκευάζεται ένα στρώμα αδιαπέρατο, αποτελούμενο από συμπυκνωμένη, υψηλής πλαστιμότητας άργιλο, που αποτελεί τον λεγόμενο πυρήνα της διατομής. Από τον πυρήνα και μέχρι ορισμένο βάθος κατασκευάζεται διάφραγμα για την ανακοπή της υπόγειας ροής του νερού. Γύρω από τον πυρήνα τοποθετούνται υλικά όχι απαραίτητα αδιαπέρατα, που διαμορφώνουν το σώμα του φράγματος. Τα χωμάτινα φράγματα προτιμούνται από τα φράγματα από σκυρόδεμα γιατί δεν απαιτούν άριστη ποιότητα του εδάφους.



Εικόνα 4. Χωμάτινο φράγμα, Λίμνη Μόρνου,

Picture 4. Earthen dam, Mornos Lake, Greece

5. Ένα λιθόρριπτο φράγμα (Εικόνα 5) κατασκευάζεται ως ένα ανάχωμα με λίθους διαφόρων μεγεθών που εξασφαλίζουν την σταθερότητα της ανάντη αδιαπέρατης

ζώνης. Στην ίδια κατηγορία κατατάσσονται και τα φράγματα με κεντρικό χωμάτινο αδιαπέρατο πυρήνα με την κύρια διαφορά ότι η κύρια μάζα της επιχωμάτωσης αποτελείται από λίθους. Οι λίθοι που απαρτίζουν το σώμα στήριξης του φράγματος πρέπει να έχουν γωνίες (ακανόνιστο σχήμα), δηλ. να προέρχονται από λατομείο. Στην ιδανική περίπτωση οι λίθοι πρέπει να είναι ομοιόμορφου μεγέθους και να μη περιέχονται χαλίκια ή λεπτότεροι κόκκοι γιατί τα υλικά αυτά θα υποχωρήσουν μεταξύ των λίθων μεγαλύτερου μεγέθους με αποτέλεσμα την αστάθεια όλης της κατασκευής. Συνήθως η λιθορριπή τοποθετείται κατά στρώσεις, κάθε μία πάχους της τάξεως του 1m, και κάθε μία συμπιέζεται με δονητή [9].



Εικόνα 5. Λιθόρριπτο φράγμα με επένδυση από σκυρόδεμα, Ραμπεντώσα
Picture 5. Rockfill dam with concrete lining, Rapentosa

2.4. ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΑΙ ΤΑΣΕΩΝ

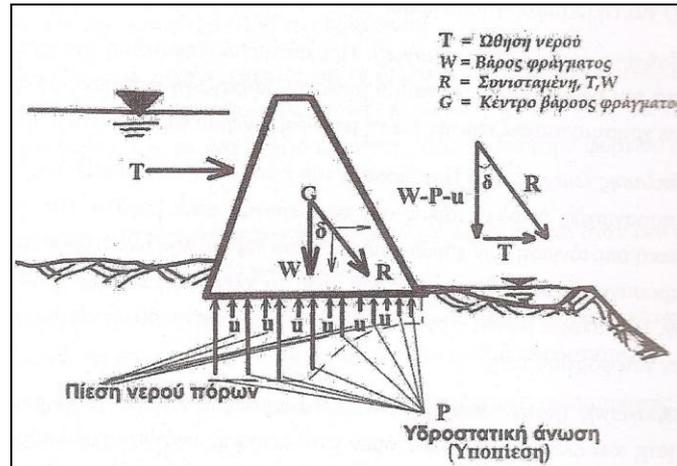
Οι δυνάμεις που δρουν σε ένα φράγμα είναι οι ακόλουθες:

- Το βάρος του σώματος του φράγματος (W), που δρα στο κέντρο βάρους του σώματος του φράγματος.
- Οι ανυψωτικές δυνάμεις (u). Οι δυνάμεις αυτές (πίεση του νερού των πόρων) μειώνουν το βάρος του φράγματος, καθώς ενεργούν αντίθετα από αυτό στο βυθισμένο τμήμα του σώματος του φράγματος.
- Οι υδροστατικές πιέσεις (P). Αυτές οι δυνάμεις είναι διαφορετικές λόγω διαφοράς του φορτίου. Έτσι, έχουν αυξημένη τιμή στο εσωτερικό τμήμα της βάσης του φράγματος (πτέρνα), που μειώνεται συνεχώς όσο προχωρούμε προς το εξωτερικό τμήμα της βάσης του φράγματος (πόδας του φράγματος).
- Η ώθηση της μάζας του νερού (T), που αρχίζει να εφαρμόζεται μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα και προκύπτει από την πλευρική ώθηση της μάζας του νερού. Η χειρότερη περίπτωση από πλευράς αυτών των ωθήσεων είναι όταν ασκούνται με οριζόντια διεύθυνση.
- Η συνισταμένη δύναμη (R). Η δύναμη αυτή θα πρέπει να έχει τέτοια κλίση που να την περιορίζει μέσα στη βάση του σώματος του φράγματος (η γωνία δ πρέπει να έχει μικρή τιμή). Σε αντίθετη περίπτωση η συνιστώσα της δύναμης αυτής που ωθεί το φράγμα προς τα κατόντη θα είναι μεγάλη και συνεπώς το φράγμα θα οδηγηθεί σε αστοχία. Συνεπώς, το κύριο ζητούμενο είναι το διάνυσμα της δύναμης R να διατηρηθεί μέσα στη βάση του φράγματος με τον μικρότερο συντελεστή ασφαλείας.
- Η ροπή ανατροπής. Η ροπή αυτή προκαλεί την ολίσθηση του φράγματος προς

τα κατάντη και προκύπτει από το φαινόμενο ανατροπής (ανύψωση στην πτέρνα και πίεση προς τα κάτω στο δάκτυλο του φράγματος) που είναι συνέπεια της μικρής κλίσης του διανύσματος της δύναμης R , δηλαδή της μεγάλης γωνίας δ .

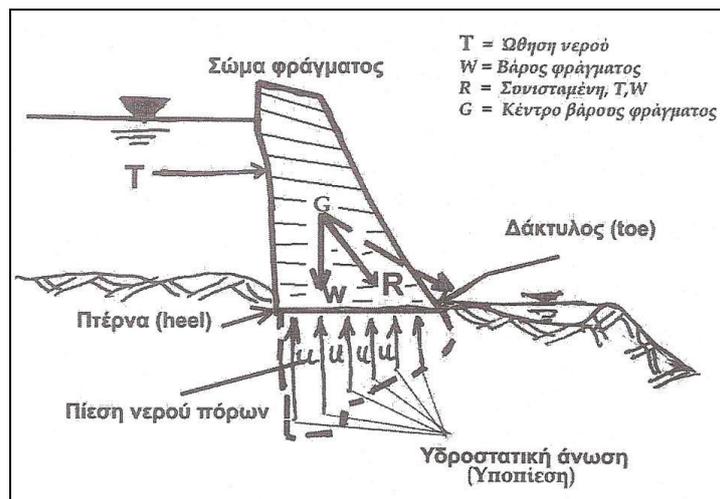
- Δυναμικές φορτίσεις. Εκτός από τις στατικές φορτίσεις υπάρχουν και οι δυναμικές που επίσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό ενός τόσο σημαντικού έργου. Οι δυνάμεις αυτές προκύπτουν από δονήσεις, όπως π.χ. από το νερό του ταμιευτήρα, ή από σεισμική δράση [9].

Στα σχήματα 1, 2, 3 και 4 δίνονται γραφικά οι ασκούμενες δυνάμεις.



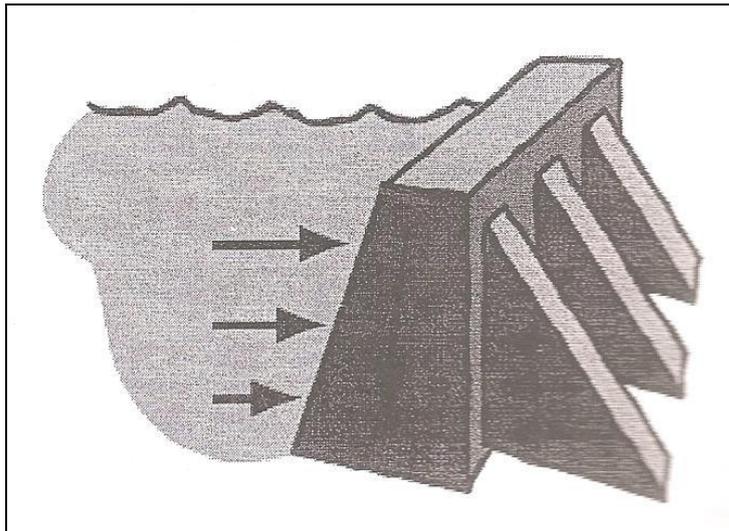
Σχήμα 1. Απεικόνιση ασκούμενων δυνάμεων σε φράγμα

Figure 1. Representation of forces acting on a dam

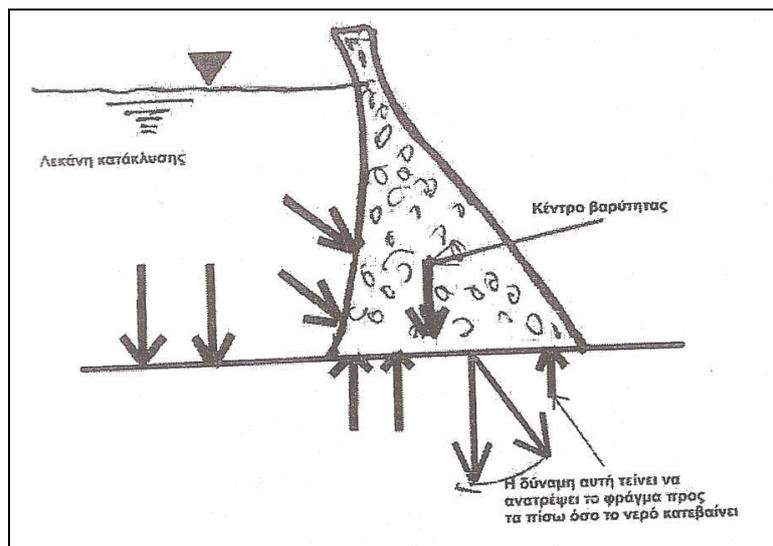


Σχήμα 2. Απεικόνιση ασκούμενων δυνάμεων σε φράγμα από σκυρόδεμα

Figure 2. Representation of forces acting on a concrete dam



Σχήμα 3. Απεικόνιση δυνάμεων σε αντηριδωτό φράγμα
Figure 3. Representation of acting forces on a brace strut dam



Σχήμα 4. Απεικόνιση κατανομής φορτίων σε τοξωτό φράγμα
Figure 4. Representation of forces acting on an arch dam

2.5. ΑΣΤΟΧΙΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ – ΑΙΤΙΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η γνώση που απαιτείται για την κατασκευή φραγμάτων σε αρκετές περιπτώσεις ήταν απόρροια μεγάλων καταστροφών. Οι μηχανισμοί που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των φραγμάτων έγιναν περισσότερο κατανοητοί μέσω της αστοχίας μερικών από αυτά. Κάποιες αστοχίες είχαν τεράστιες συνέπειες κυρίως επειδή προκάλεσαν το θάνατο χιλιάδων ανθρώπων. Αστοχίες φραγμάτων έχουν καταγραφεί ήδη από το 1219 και συνεχίζουν να καταγράφονται μέχρι και σήμερα. Μεταξύ των σύγχρονων, πολύνεκρων αστοχιών φραγμάτων συμπεριλαμβάνονται εκείνες των South Fork (1889, ΗΠΑ), Malpasset (1959, Γαλλία) (Εικόνα 6), Vaiont (1963, Ιταλία) και Banqiao Dam (1975, Κίνα) [8].



Εικόνα 6. Το φράγμα Malpasset μετά την καταστροφή του

Picture 6. Malpasset dam after its disaster

Το φράγμα South Fork στην Πενσυλβανία (Η.Π.Α.) ήταν ένα χωμάτινο φράγμα ύψους 21.9m και μήκους στέψης 284m. Το Μάιο 1889 μετά από εκτεταμένες πλημμύρες και αδυναμία του υπερχειλιστή να αποφορτίσει τον ταμιευτήρα, ένα κύμα ύψους 0.5m πέρασε πάνω από τη στέψη του φράγματος προκαλώντας την αστοχία του. Το νερό που απελευθερώθηκε έφτανε σε όγκο τους 20 εκατομμύρια τόνους και κατέληξε στην πόλη Johnstown 23km κατάντη του φράγματος καταστρέφοντάς την σχεδόν ολοκληρωτικά. Το αποτέλεσμα ήταν ο θάνατος 2209 ανθρώπων και ανυπολόγιστες υλικές ζημιές. Η αστοχία του φράγματος South Fork έκανε φανερή την ανάγκη για παρακολούθηση, συντήρηση και διασφάλιση της σωστής λειτουργίας στο μέλλον όχι μόνο του ίδιου του φράγματος αλλά και των δευτερευόντων κατασκευών του όπως π.χ. οι υπερχειλιστές.

Η πρώτη μεγάλη καταστροφή εξαιτίας αστοχίας φράγματος στον 20^ο αιώνα ήταν εκείνη του φράγματος Malpasset στη Γαλλία το 1959. Πρόκειται για ένα τοξωτό φράγμα από σκυρόδεμα ύψους 60m και μήκους στέψης 223m. Δυστυχώς ρωγμές που είχαν εμφανιστεί κοντά στο πόδι της κατάντη πλευράς δεν έτυχαν της απαιτούμενης προσοχής και εβδομάδες αργότερα μετά την εμφάνισή τους το φράγμα αστόχησε. Έρευνες έδειξαν ότι η αστοχία οφειλόταν στην παρουσία ενός ρήγματος που δεν είχε εντοπιστεί κατά τη διάρκεια μελέτης του φράγματος. Το νερό συγκεντρώνονταν κάτω από το φράγμα χωρίς να έχει δυνατότητα διαφυγής μέσα από το βράχο με αποτέλεσμα την παρουσία ασυνήθιστα μεγάλων πιέσεων κάτω από την κατασκευή. Τελικά ολόκληρος ο τοίχος του φράγματος κατέρρευσε, απελευθερώνοντας ένα κύμα νερού ύψους 40m που κατέστρεψε τα χωριά Malpasset και Bozon, προκάλεσε το θάνατο 421 ανθρώπων και υλικές καταστροφές κόστους 68 εκατομμυρίων δολαρίων. Η περίπτωση του φράγματος Malpasset αποτέλεσε μια από τις αιτίες που οδήγησαν τελικά στην καθιέρωση της συνεχούς και συστηματικής παρακολούθησης των ήδη υπαρχόντων φραγμάτων και στη λεπτομερή μελέτη της γεωλογίας της περιοχής όπου πρόκειται να κατασκευαστεί ένα φράγμα.

Παρόλα αυτά η καταστροφή δεν έρχεται πάντα μόνο με την αστοχία του ίδιου του φράγματος. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του φράγματος Vaiont (Ιταλία), ενός τοξωτού φράγματος από σκυρόδεμα, ύψους 262m και μήκους στέψης 190m. Την αστοχία του τον Οκτώβριο 1963 προκάλεσε μια κατολίσθηση συνολικού όγκου $260 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ανάντη του φράγματος. Η κατολίσθηση ενεργοποιήθηκε κατά την διάρκεια της πρώτης πλήρωσης του ταμιευτήρα, μετά από δύο εβδομάδες συνεχούς βροχόπτωσης και παρά τα μέτρα ελέγχου που είχαν ληφθεί. Το νερό που εκτοπίστηκε πέρασε πάνω από τη στέψη του φράγματος στην κοιλάδα κατάντη με ένα κύμα ύψους 250m προκαλώντας το θάνατο 1909 ανθρώπων και ανυπολόγιστες υλικές

ζημιές καταστρέφοντας ολοκληρωτικά τα χωριά Longarone, Pirago, Rivalta, Villanova και Faè. Παρά την καταστροφή το φράγμα δεν υπέστη σημαντικές φθορές. Ακόμη και σήμερα διατηρείται στη θέση του ακέραιο [8].

Η μεγαλύτερη καταστροφή από αστοχία φράγματος που έχει καταγραφεί μέχρι και σήμερα κυρίως ως προς τον αριθμό των απωλειών ανθρωπίνων ζώων είναι εκείνη που προκλήθηκε από την αστοχία του φράγματος Banqiao, ενός χωμάτινου φράγματος ύψους 118m, στην Κίνα το 1975. Ο απολογισμός ήταν 231000 άνθρωποι νεκροί εκ των οποίων οι 145000 πέθαναν εξαιτίας των επιδημιών που ακολούθησαν τις πλημμύρες. Η αστοχία του φράγματος αποδόθηκε στη ραγδαία αύξηση της στάθμης στον ταμιευτήρα του λόγω ισχυρών και μεγάλης διάρκειας βροχοπτώσεων. Το ύψος της βροχής έφτασε το ένα μέτρο μέσα σε τρεις ημέρες. Η βροχή κατέστρεψε το σύστημα τηλεπικοινωνιών με αποτέλεσμα οι υπεύθυνοι του φράγματος να μην ενημερώνονται για τις καιρικές συνθήκες και τη στάθμη του νερού στα ανάντη. Αυτό σε συνδυασμό με τη μειωμένη δυνατότητα των υπερχειλιστών να διοχετεύσουν τα πλημμυρικά νερά εξαιτίας κακής συντήρησης οδήγησε στην αστοχία του φράγματος.

Οι πλέον πρόσφατες σημαντικές αστοχίες φραγμάτων είναι εκείνες του φράγματος Zeyzoun στη Συρία (2002) και των φραγμάτων Campos Novos στη Βραζιλία (2006) και Gusau στη Νιγηρία (2006). Η αστοχία του πρώτου είχε ως αποτέλεσμα το θάνατο 10 ανθρώπων και τεράστιες υλικές ζημιές. Η αστοχία του δεύτερου μπορεί να μην είχε απώλειες ανθρωπίνων ζώων αλλά προκάλεσε σημαντικές υλικές ζημιές καθώς 3000 άνθρωποι αναγκάστηκαν να εγκαταλείψουν τα σπίτια τους. Η αστοχία του φράγματος στη Νιγηρία προκάλεσε το θάνατο 40 ατόμων και 1000 ακόμη οικογένειες έχασαν τις περιουσίες τους [8].

2.6. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Η κατασκευή ενός φράγματος σε ένα ποταμό και η δημιουργία τεχνητής λίμνης (ταμιευτήρας), μετατρέπει το φυσικό ποτάμιο σύστημα σε λιμναίο. Η ανθρώπινη αυτή επέμβαση επιφέρει κάποιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι κυριότερες από αυτές, προέρχονται από τη δημιουργία της τεχνητής λίμνης που έχει ως συνέπεια της κατάκλιση μεγάλων εκτάσεων, τη διακοπή της ροής του ποτάμιου συστήματος και τη διακοπή της τροφοδοσίας των κατάντη εκτάσεων με φερτές ύλες. Όλα τα παραπάνω, επιδρούν ως ένα βαθμό στην αλλαγή της χλωρίδας και πανίδας της περιοχής, καθώς επίσης και στο τοπικό κλίμα.

Από την άλλη πλευρά, τα θετικά χαρακτηριστικά της υδροηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με την περιβαλλοντική ευαισθησία και την κατάρτιση άρθρων Μελετών Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων, όπου καταγράφονται οι προτεραιότητες προστασίας και ανάδειξης της περιοχής, καταδεικνύουν τη συνολικά θετική συνεισφορά των ΥΗΕ στο περιβάλλον [10].

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί καθαρή ανανεώσιμη ενέργεια με μηδενικό κόστος καυσίμου και μηδενικές εκπομπές ρύπων, ενώ η ευελιξία των μονάδων επιτρέπει τη χρήση της για την κάλυψη των αιχμών ζήτησης.

Η κατασκευή των ΥΗΕ, ως έργα πολλαπλής σκοπιμότητας, εκτός από την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, καλύπτει ζωτικές ανάγκες ευρύτερης εθνικής σημασίας, όπως ύδρευση, άρδευση, αντιπλημμυρική προστασία και διατήρηση οικοσυστημάτων ενώ παράλληλα συμβάλλει σημαντικά και στη διαχείριση των υδατικών πόρων της χώρας.

Όλα τα παραπάνω, γίνονται αντιληπτά στον επισκέπτη της περιοχής όπου βρίσκονται τα ΥΗΕ, μέσω της ποικιλίας των μορφών ζωής, των ειδών της χλωρίδας και της πανίδας, που περιγράφεται ικανοποιητικά με τον όρο βιοποικιλότητα. Η βιοποικιλότητα της ευρύτερης περιοχής των ΥΗΕ συνδέεται άμεσα ή έμμεσα με αυτά,

προσδίδοντάς τους επίσης τουριστικό και επιστημονικό ενδιαφέρον.

Οι νέοι οικότοποι, με λιμναίες πλέον οικολογικές συνθήκες, ευνοούν την ανάπτυξη αρκετών υδρόβιων οργανισμών (ψαριών και αμφίβιων), που προσφέρουν τροφή και καταφύγιο σε μεγάλο αριθμό αποδημητικών ή μη πουλιών, με τα πρώτα να χρησιμοποιούν τους ταμειυτήρες ως ενδιάμεσους σταθμούς στο μακρύ τους ταξίδι [10].

Κεφάλαιο 3
Το φράγμα της
λίμνης Ταυρωπού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΤΑΥΡΩΠΟΥ

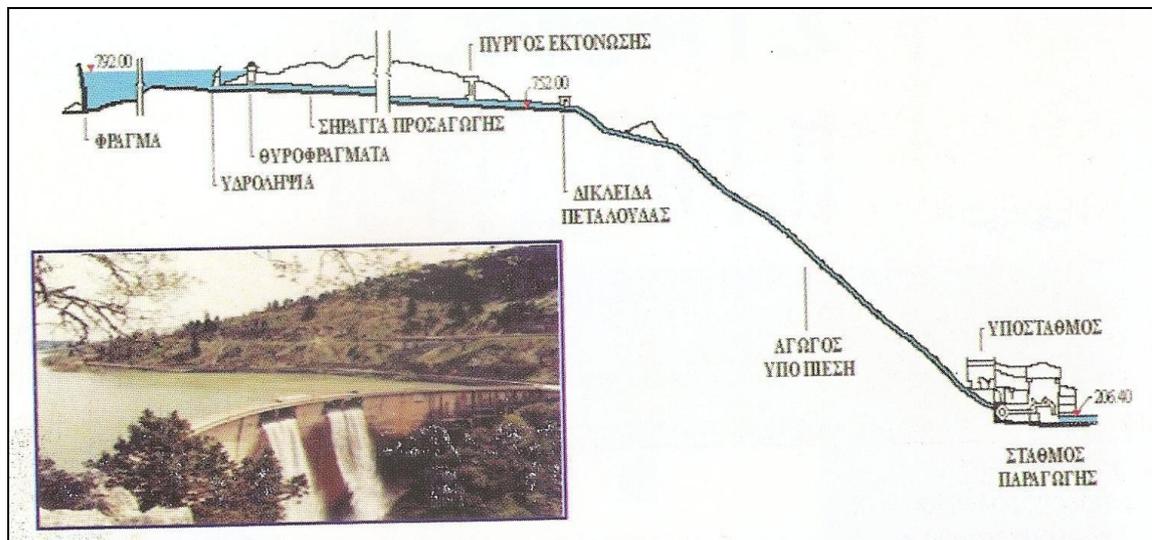
3.1. ΓΕΝΙΚΑ

Το φράγμα βρίσκεται στη θέση του άλλοτε οροπεδίου της Νεβρόπολης, συνδέοντας τα βουνά Ίταμο και Νιάλα, 25 χιλιόμετρα δυτικά της Καρδίτσας και ανήκει διοικητικά στον δήμο Ιτάμου.

Σκοπός της κατασκευής αποτέλεσε η εν μέρει λύση του προβλήματος του εξηλεκτισμού της χώρας, αλλά και η διαχείριση του υδάτινου δυναμικού της περιοχής. Με την κατασκευή του φράγματος το νερό του ποταμού Ταυρωπού ή Μέγδοβα – όπως ήταν η σλάβικης προέλευσης ονομασία του – εκτρέπεται από τη φυσική ροή του, που είναι προς τον ποταμό Αχελώο και προς τη Θεσσαλία, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του Υδροηλεκτρικού Σταθμού (ΥΗΣ) Ταυρωπού, που βρίσκεται στο χωριό Μητρόπολη του Νομού Καρδίτσας και είναι στην ευθύνη της ΔΕΗ ΑΕ. Ταυτόχρονα αρδεύονται 150.000 περίπου στρέμματα του κάμπου της Καρδίτσας και άλλων 35 γύρω κοινοτήτων, ενώ για την ίδια περιοχή εξασφαλίζεται η ύδρευση του πληθυσμού [7].

Το φράγμα βρίσκεται σε υψόμετρο 800 μέτρα από τη θάλασσα. Το ύψος του είναι 83 μ, το πλάτος στη βάση 19 μ. και στη κορυφή 3,50 μ., το ανάπτγμα του τόξου της στέψης είναι μήκους 220 μ. Η λίμνη έχει μήκος 14 χιλιόμετρα, μέγιστο βάθος 60 μ. και χωρητικότητα 400 εκατομμύρια κυβικά μέτρα. Με μια υπόγεια σήραγγα μήκους 3.750 μ., και σε βάθος 40 μ. τα νερά της λίμνης φτάνουν στον αγωγό καταπτώσεως που έχει μήκος 3.500 μ.

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός Πλαστήρα (Εικόνα 7) διαθέτει σύστημα υδροληψίας, παροχής $26,40 \text{ m}^3/\text{sec}$, που αποτελείται από 2 θύρες υδροληψίας, 2 σχάρες σκουπιδιών και 2 συρταρωτά θυροφράγματα διατάσεων $2,80 \times 3,50 \text{ m}$. Τα νερά της λίμνης, από την υδροληψία, με μια υπόγεια σήραγγα μήκους 3.750 m και σε βάθος 40 m, οδηγούνται στον αγωγό καταπτώσεως που έχει μήκος 3.500 m. Το νερό του αγωγού καταλήγει στο υδροηλεκτρικό εργοστάσιο ισχύος 400 MW στο χωριό Μητρόπολη, στην περιοχή του Μοσχάτου πέφτοντας από ύψος 575 m. Εκεί μέσω ρυθμιστικών βαλβίδων το νερό πέφτει πάνω στους υδροστρόβιλους και τους αναγκάζει σε περιστροφική κίνηση. Οι στρόβιλοι είναι συνδεδεμένοι με τη γεννήτρια η οποία μετατρέπει την κινητική τους ενέργεια σε ηλεκτρική. Ο σταθμός παραγωγής είναι υπαίθριος και διαθέτει 3 γεννήτριες ίδιας ισχύος κάθε μια από τις οποίες είναι συνδεδεμένη με 2 υδροστρόβιλους, τύπου PELTON με 2 ακροφύσια, τοποθετημένους εκατέρωθεν αυτής. Στρόβιλοι και γεννήτρια είναι συνδεδεμένα πάνω στον ίδιο άξονα και σε οριζόντια διάταξη. Η γεννήτρια ισχύος 43,3 MW περιστρέφεται με ταχύτητα 500 στρ/λεπτό παράγοντας ρεύμα συχνότητας 50 Hz και τάσεως 15 KV. Το παραγόμενο ρεύμα μετασχηματίζεται σε 150KV μεταφέρεται στον υποσταθμό και από εκεί διοχετεύεται στις γραμμές μεταφοράς και διασυνδεδεμένου δικτύου της Δ.Ε.Η. [7].



Εικόνα 7. ΥΗΣ Ταυρωπού

Picture 7. Tavrōpos hydroelectric station

Λέγεται ότι την ιδέα κατασκευής του φράγματος συνέλαβε το 1925 ο Στρατηγός Νικόλαος Πλαστήρας λόγω των καταστροφικών πλημμύρων που είχαν σημειωθεί στην περιοχή καθώς και στη Μακεδονία από συνεχείς βροχοπτώσεις. Έπειτα από μακρές διαπραγματεύσεις η εκτέλεση του έργου ανατέθηκε στη Γαλλική εταιρεία OMNIUM LYONNAIS- COTECI (OL-CO) , με σύμβαση που υπογράφηκε το 1955. Η εταιρεία αυτή άλλαξε τη μελέτη που είχε προηγηθεί από τη εταιρεία KNAPPEN και αντί για χωμάτινο φράγμα προκρίθηκε η κατασκευή φράγματος από σπλισμένο σκυρόδεμα στην αρχικά επιλεγμένη θέση «Κακαβάκια». Τον έλεγχο και την επίβλεψη του έργου είχε η ΔΕΗ , με τεχνικό Σύμβουλο την εταιρεία EBASCO. Το έργο σε ποσοστό 40% χρηματοδοτήθηκε από τις Γαλλικές πιστώσεις. Στις 14 Δεκεμβρίου 1955 έγινε η θεμελίωση του από τον τότε Πρωθυπουργό της Ελλάδας Κων/νο Καραμανλή. Στις 30 Οκτωβρίου 1960 ολοκληρώθηκε η κατασκευή του, το συνολικό κόστος του οποίου έφθασε τα 30 εκατ. Δολάρια [7].

Στην περιοχή, που κάλυψε η λίμνη με την κατασκευή του φράγματος, υπήρχαν αγροτεμάχια, με καλλιέργειες, των κατοίκων της περιοχής καθώς και βοσκοτόπια, τα οποία απαλλοτριώθηκαν από το ελληνικό κράτος. Αξίζει να αναφέρουμε ότι κάτω από την επιφάνεια της λίμνης κρύβεται επίσης ένα κομμάτι της ιστορίας της ηρωικής εθνικής αντίστασης, των ανταρτών του ΕΑΜ-ΕΛΑΣ. Συγκεκριμένα στην περιοχή είχε κατασκευαστεί το αεροδρόμιο των ανταρτών, προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα της επικοινωνίας με το στρατηγείο της Μέσης Ανατολής. Με αυτοθυσία των μαχητών της εθνικής αντίστασης κατασκευάστηκε ένας αεροδιάδρομος, ο οποίος κατά την διάρκεια της ημέρας ήταν πλήρως παραλλαγμένος με δέντρα και άχυρα, με συνέπεια να είναι αόρατος από τα εχθρικά αεροσκάφη. Κατά τη λειτουργία του, τις νυχτερινές ώρες, φωτίζονταν κατά μήκος των οριογραμμών του με φανάρια που κρατούσαν στο χέρι τους παρατεταγμένοι σε σειρά αντάρτες.

3.2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Ο νομός Καρδίτσας στον οποίο ανήκει η περιοχή μελέτης, βρίσκεται στην επαφή μεταξύ υποπελαγονικής και της ζώνης Ολονού Πίνδου και αποτελούν την δυτική ζώνη

των οφειλιθών της Ελλάδας. Πιο συγκεκριμένα πιστεύεται ότι οι δύο ζώνες αντιπροσωπεύουν μια παλιά ωκεάνια περιοχή με ιζήματα αβυσσικά -πετρολογικά και η υποπελαγονική αποτελούσε το χώρο της κατωφέρειας της πελαγονικής προς τον ωκεανό. Έτσι στην περιοχή έχουμε την πλήρη ανάπτυξη της οφειλιθικής ακολουθίας και τα ασβεστολιθικά (νηριτικά ή πελαγικά) ιζήματα ενώ πάνω σε αυτά επικάθεται ο φλύσχος που είναι και το τελευταίο ίζημα της αλπικής ορογένεσης που έπληξε τον ελληνικό χώρο.

Πιο ειδικά το νοτιοδυτικό τμήμα του νομού, που αφορά και στην περιοχή του φράγματος Ταυρωπού και καταλαμβάνει το 50,4% της έκτασης, απαρτίζεται από την οροσειρά της Πίνδου και τις απολήξεις της. Η έντονη φύση του αναγλύφου της οφείλεται στις τριτογενείς αλπικές πτυχώσεις των σχηματισμών που καταλαμβάνουν τους παλαιογεωγραφικούς χώρους της ζώνης της Πίνδου και της ενότητας της Δυτικής Θεσσαλίας. Οι πτυχώσεις αυτές μαζί με τα λοιπά τεκτονικά γεγονότα που ακολούθησαν είχαν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία των οροσειρών που στην περιοχή έχουν κυρίως βόρεια έως βορειοδυτική κατεύθυνση [7].

Στην περιοχή υπάρχουν μικρά κοιτάσματα χρωμίτη τα οποία φιλοξενούνται σε περιδοσιτεδουνίτες, σερπεντινίτες και τα οποία είναι μη εκμεταλλεύσιμα με τα σημερινά δεδομένα. Επίσης στην περιοχή συναντώνται μικρά μη εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα μαγγανίου τα οποία φιλοξενούνται μέσα σε διαβάσεις και δολερίτες. Στο δυτικό ορεινό τμήμα επικρατούν οι ασβεστόλιθοι και οι ραδιολαρίτες.

Τέλος είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι στην περιοχή επικρατεί εφελκυστικό πεδίο τάσεων με αποτέλεσμα την δημιουργία και εμφάνιση κανονικών ρηγμάτων με κατεύθυνση κυρίως ΒΔ -ΝΑ τα οποία είναι μικρά και μικρού εστιακού βάθους και τα οποία εμφανίζουν μικρή συσσώρευση ενέργειας και σεισμούς οι οποίοι συνήθως δεν ξεπερνούν τα 5 Κ. Τα σημαντικότερα ρήγματα της περιοχής είναι αυτό του Μουζακίου και αυτό των Σοφάδων τα οποία στο παρελθόν έχουν δώσει σεισμούς έως και 5,5 Κ [7].

3.3. ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ – ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η λεκάνη απορροής του φράγματος υπάγεται διοικητικά στο νομό Καρδίτσας, προέρχεται υδρολογικά από τη λεκάνη του Αχελώου (Ταυρωπός ή Μένδοβας).

Τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής είναι [7]:

- Έκταση: 167 km²
- Μέγιστο υψόμετρο: +2140m
- Μέσο υψόμετρο: +1459 m
- Ελάχιστο υψόμετρο: +800 m
- Μέση παροχή: 6,4 m³/sec

Η λίμνη-ταμιευτήρας σχηματίστηκε όταν τα νερά του ποταμού Μένδοβα κατέκλυσαν το οροπέδιο, με την ολοκλήρωση της κατασκευής του φράγματος.

Τα χαρακτηριστικά της λίμνης - ταμιευτήρα είναι:

- Συνολικός όγκος - Χωρητικότητα: 400 x 10⁶ m³
- Ωφέλιμος όγκος: 300 x 10⁶ m³
- Συνολική επιφάνεια: 25,20 km²
- Μέγιστο μήκος: 12 km

- Μέγιστο πλάτος: 4 km
- Μέγιστο βάθος: 60 m
- Ανώτατο υψόμετρο πυθμένα: 750 m
- Ανώτατη στάθμη: 792 m
- Κατώτατη στάθμη: 776,00 m

3.4. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ – ΔΟΜΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

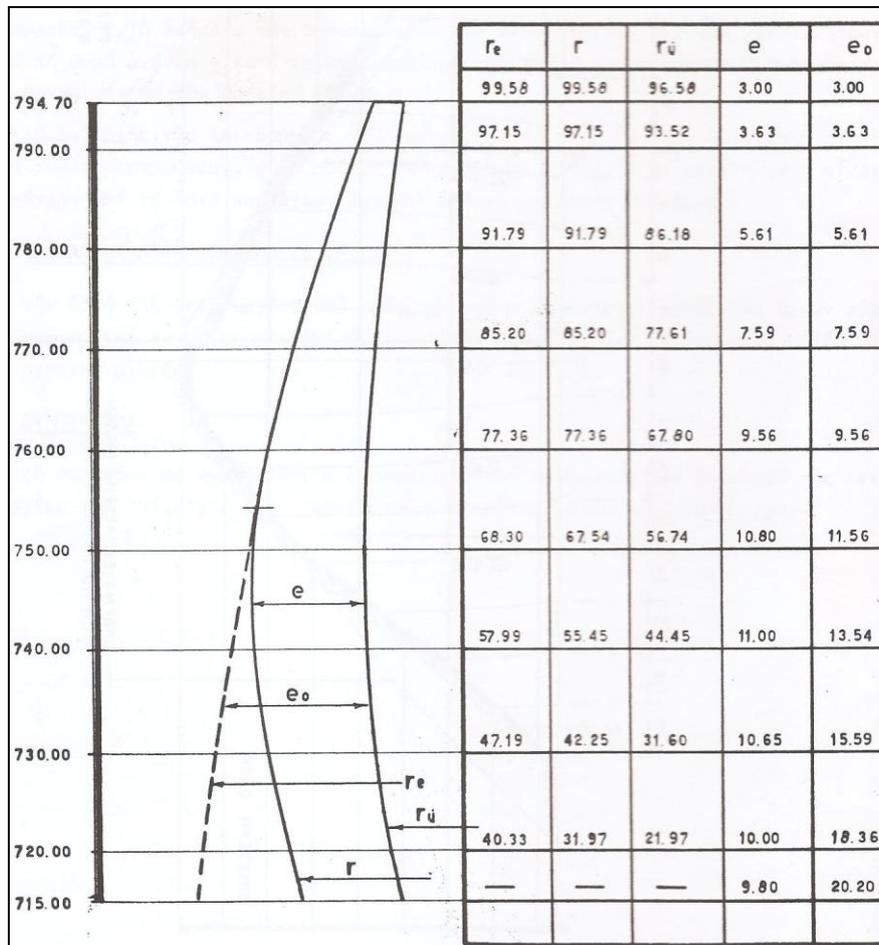
3.4.1. Το σώμα του φράγματος

Το φράγμα Ταυρωπού θεμελιώθηκε σε στρώμα συμπαγών ασβεστόλιθων λίγο διαπερατών σε βάθος 4-5 m κάτω από την κοίτη του ποταμού. Κατασκευάστηκαν διαφραγματικές κουρτίνες σε βάθος 40 m και 24 m αντίστοιχα. Για το σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκαν αδρανή της περιοχής. Τσιμέντο με 10% πρόσμιξη θηραϊκής γης στο κλίνκερ και σε ποσότητα 250 kg/m³. Χρησιμοποιήθηκε αερακτικό FRO-8. Σε προκαταρκτική μελέτη στο ΕΜΠ επιτεύχθηκαν εκείνη την εποχή αντοχές της τάξεως των 300-400 kg/cm² με απαιτούμενη αντοχή γύρω στα 250 kg/cm².

Το φράγμα του Ταυρωπού είναι το μοναδικό τοξωτό φράγμα με διπλή καμπυλότητα στην Ελλάδα. Είναι κατασκευασμένο από σκυρόδεμα και βρίσκεται σε υψόμετρο 795 m περίπου από τη μέση στάθμη της θάλασσας (μ.σ.θ.). Η στέψη του είναι καμπυλωτό τόξο, μήκους 220.00 m (Υψομ. 795,20 m). Το ύψος του φράγματος είναι 83 m, το πλάτος στη βάση 19 m ενώ στην κορυφή 3,50 m. Ο όγκος του φράγματος υπολογίζεται να είναι 100 x 103 m³ [7].

Από στατικής άποψης είναι δυνατό να θεωρηθεί ότι το φράγμα αποτελείται από δύο μέρη (Σχήμα 5):

- Πραγματικός θόλος
- Πρόσθετη ζώνη σκυροδέματος, ανάντη του φράγματος, που χρησιμεύει ως αντισεισμικό έρεισμα.

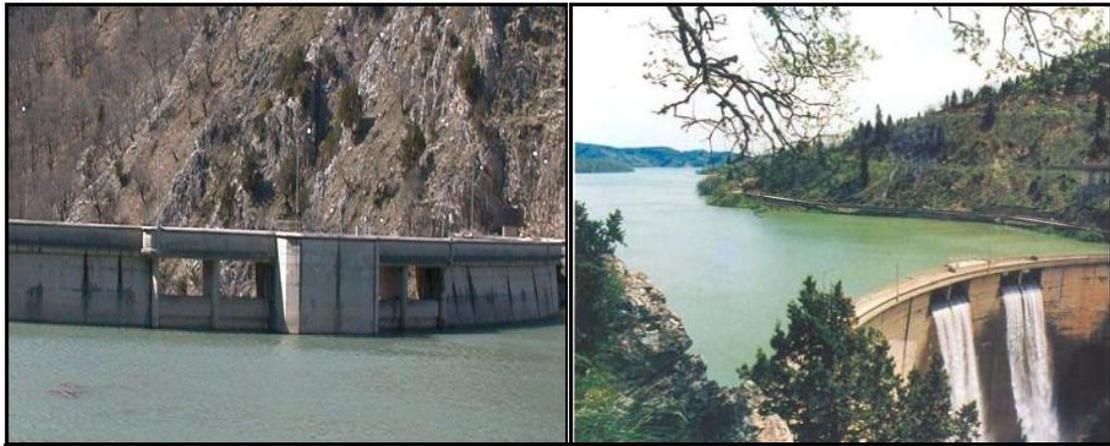


Σχήμα 5. Πάχη φράγματος Ταυρωπού σε διάφορα ύψη

Figure 5. Tavorpos dam's thickness at different levels

3.4.2. Οι υπερχειλιστές

Το φράγμα Ταυρωπού είναι το μοναδικό στην Ελλάδα το οποίο διαθέτει ανοικτούς υπερχειλιστές ελεύθερης πτώσης. Οι υπερχειλιστές του αποτελούνται από δύο ζεύγη ελευθέρων στομιών περίπου στο μέσο της στέψης, σε υψόμετρο +792 m, που οδηγούν το νερό στον κατόντη πόδα του φράγματος ύστερα από πτώση 70 m. Κάθε ανοικτό στόμιο έχει διαστάσεις 3.50 x 2.50 m. Συνολικά, το άνοιγμα των υπερχειλιστών είναι 14.00 x 2.50 m ενώ η μέγιστη παροχή τους φθάνει τα 460 m³/s στην ανώτατη στάθμη της λίμνης (+794.30 m) (Εικόνα 8). Ο συγκεκριμένος τύπος υπερχειλιστή είναι ο ιδανικός για τοξωτό φράγμα καθώς δεν αποτελεί ξεχωριστό έργο ενώ μειώνει τις δαπάνες κατασκευής του στο ελάχιστο [7].



Εικόνα 8. Οι δύο υπερχειλιστές ανάντη και κατόντη (σε λειτουργία)

Picture 8. The two spillways upstream and downstream (running)

Η κινητική ενέργεια του νερού υποβαθμίζεται σε πρώτο στάδιο κατά τη διάρκεια της πτώσης και σε δεύτερο στάδιο κατά την πρόσκρουση του νερού στον πόδα του φράγματος, όπου κατάλληλα διαμορφωμένα διώρυγα με ενισχυμένο σκυρόδεμα και κλίση προς τα κατόντη οδηγεί το νερό στην παλαιά κοίτη του ποταμού.

Η ρύθμιση της στάθμης του ταμιευτήρα γίνεται και με τη βοήθεια της σήραγγας προσαγωγής η οποία παρέχει $26.40 \text{ m}^3/\text{s}$ όταν λειτουργεί ο σταθμός. Αυτό σημαίνει ότι η υπερχειλίση από το φράγμα μπορεί να υποβοηθηθεί και από ένα έργο το οποίο έχει άλλη λειτουργία και συνολικά ανέρχεται στα $486.40 \text{ m}^3/\text{s}$. Η εμπειρία από τη λειτουργία του έργου έδειξε ότι αφενός η ρυθμιστική ικανότητα του ταμιευτήρα και αφετέρου η προληπτική ταπείνωση της στάθμης του σε περίπτωση πλημμύρας από τον αγωγό προσαγωγής, δημιουργούν συνθήκες που κάνουν σπάνια την υπερχειλίση από τα ελεύθερα στόμια [7].

Παρά τη σπανιότητα του φαινομένου, λόγω του μεγάλου ύψους πτώσης (70 m περίπου) το έργο υποβάθμισης ενέργειας στον κατόντη πόδα του φράγματος φθείρεται έντονα κατά τη λειτουργία του υπερχειλιστή αφού το νερό της πλημμύρας συμπαρασύρει στερεά αντικείμενα, τα οποία ορισμένες φορές πέφτουν πάνω στο σκυρόδεμα στη βάση του φράγματος και το τραυματίζουν. Η ίδια η δύναμη του νερού άλλωστε προκαλεί αρκετές ζημιές στο σκυρόδεμα. Για να αποφευχθεί μεγάλης έκτασης ζημιά που θα έχει ως αποτέλεσμα δαπανηρή επισκευή, το σημείο στο οποίο καταλήγει το νερό ελέγχεται σε ετήσια βάση και συμπληρώνεται με νέες στρώσεις σκυροδέματος, ενώ γίνεται επιδιόρθωση παλαιότερων φθορών όποτε χρειάζεται.

Ωστόσο ένα φράγμα με τόσο μικρό όγκο σκυροδέματος θα ήταν δυνατόν εκτός από αναπάντεχα και απρόβλεπτα φυσικά φαινόμενα, να καταστραφεί και από ανθρώπινη δραστηριότητα, π.χ. από έκρηξη στο κέντρο της ανάντη πλευράς. Για να αποφευχθούν οι καταστροφές, έστω και την τελευταία στιγμή, στο έργο προστέθηκαν δύο ακόμα κατασκευές ασφαλείας, οι εκκενωτές πυθμένα και η διάταξη ανατίναξης της φραγής στη σήραγγα εκτροπής [7].

3.4.3. Οι εκκενωτές πυθμένα

Οι εκκενωτές πυθμένα αποτελούνται από δύο δίδυμους αγωγούς εσωτερικής διαμέτρου 2.20 m ο καθένας. Στην ανάντη πλευρά η είσοδος των αγωγών είναι κατασκευασμένη με ειδικές εσχάρες από σκυρόδεμα οι οποίες εμποδίζουν τη διέλευση μεγάλων αντικειμένων όπως κορμοί δέντρων και κατακρημνίσματα τα οποία θα μπορούσαν να τους φράξουν. Αμέσως μετά την είσοδο, ένα κατακόρυφο θυρόφραγμα μπορεί να απομονώσει τον αγωγό για επισκευές και συντήρηση. Ο χειρισμός αυτού του θυροφράγματος ελέγχεται από δωμάτιο στο μέσο του φράγματος και σε υψόμετρο +789.95 m.

Το έργο εξόδου του κάθε εκκενωτή είναι και το πιο ενδιαφέρον. Πρόκειται για μία βαλβίδα κοίλης φλέβας σχεδιασμένη έτσι ώστε να αποτονώνει την ενέργεια του νερού διασπείροντας τη ροή (Εικόνα 9). Οι εκκενωτές ανοίγουν με ένα μηχανικό σύστημα από δύο ηλεκτρικούς κινητήρες συνδεδεμένους σε σειρά, που μετακινούν προς τα πίσω το κυλινδρικό κάλυμμα της βαλβίδας επιτρέποντας έτσι τη ροή του νερού [7].

Οι δύο εκκενωτές μπορούν να ανοίξουν και χειροκίνητα. Ελέγχονται από δωμάτιο στο οποίο έχει τοποθετηθεί και ο υδραυλικός μηχανισμός ανοίγματος των βαλβίδων τους, το οποίο βρίσκεται στη χαμηλότερη προσβάσιμη στοά στο σώμα του φράγματος σε υψόμετρο +725 m. Αυτός ο σχεδιασμός είναι από τη φύση του προβληματικός καθώς σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης και ενώ το έργο κινδυνεύει, η πρόσβαση σε ένα τόσο χαμηλό και δύσκολο σημείο είναι εξαιρετικά επικίνδυνη. Ο σχεδιασμός κάθε εκκενωτή απαιτεί τη λειτουργία του σε τακτά χρονικά διαστήματα έτσι ώστε να απομακρύνονται τα φερτά που καθιζάνουν στην είσοδό του.



Εικόνα 9. Οι δύο εκκενωτές από κατάντη

Picture 9. The two bottom evacuators, downstream view

3.4.4. Η σήραγγα εκτροπής

Η σήραγγα εκτροπής μήκους 145 m και εσωτερικής διαμέτρου 5.26 m είναι επενδυμένη με σκυρόδεμα ενώ το τελευταίο τμήμα της (μήκους περίπου 60 m) είναι σκαμμένο σε βράχο χωρίς επένδυση.

Περίπου 10 m πριν το τέλος του σκυροδέματος (70 m από το τέλος της σήραγγας) τοποθετήθηκε το 1959 ειδικό μεταλλικό πώμα έτσι ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία πλήρωσης του ταμιευτήρα. Το μεταλλικό πώμα προστατεύεται με δύο μεταλλικές θύρες.

Η σήραγγα εκτροπής στο φράγμα του Ταυρωπού έχει - εξαιτίας της κακής κατάστασης των εκκενωτών - σημαντικό πλέον ρόλο για τη λειτουργία του έργου. Σε περίπτωση που απαιτηθεί το άμεσο άδειασμα του ταμιευτήρα και αφού η πιθανότητα να μη λειτουργήσουν οι εκκενωτές είναι μεγάλη, έχει καταστρωθεί ειδικό σχέδιο ανατίναξης του πώματος με το οποίο έχει φραγεί η εκτροπή με την τοποθέτηση εκρηκτικών στις ειδικές εσοχές που διαθέτει στην επιφάνειά του. Προφανώς μετά την ανατίναξη της φραγής αυτής, το νερό δεν μπορεί να σταματήσει παρά μόνο όταν ο ταμιευτήρας αδειάσει.

Η ίδια η σήραγγα διατηρείται σε άριστη κατάσταση με μόνο ορισμένες μικρές κατακρημνίσεις βράχων από την οροφή της, χωρίς όμως καμία επικίνδυνη συνέπεια. Σε αντίθεση με τον εκκενωτή, η εκτροπή δεν διαθέτει έργο καταστροφής ενέργειας κατάντη, ακριβώς γιατί δεν έχει σχεδιαστεί να λειτουργήσει παρά μόνο ως έκτακτη λύση [7].

Κεφάλαιο 4
Παρακολούθηση
παραμορφώσεων
φραγμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

4.1. ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Είναι γεγονός ότι τα μεγάλα σε μέγεθος και έκταση τεχνικά και βιομηχανικά έργα έχουν ειδικές απαιτήσεις χάραξης στη φάση της κατασκευής τους, αλλά και παρακολούθησης της συμπεριφοράς τους κατά τη φάση λειτουργίας τους. Στα φράγματα, όπως και σε κάθε είδους έργα υποδομής οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες μετακινήσεις μπορούν να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα, έως και αστοχία αυτών [7].

Η μέχρι τώρα εμπειρία έχει δείξει ότι η αστοχία των φραγμάτων ακολουθεί τη συσσώρευση φαινομένων τα οποία μπορούν να εντοπιστούν και να ποσοτικοποιηθούν (πχ διαρροές, παραμόρφωση) σε πρώιμο στάδιο. Τα φαινόμενα αυτά είναι δυνατό να παρακολουθηθούν και να αντιμετωπιστούν. Συνεπώς, η σωστή λειτουργία των φραγμάτων εξασφαλίζεται με τη σωστή συντήρηση και τη συστηματική παρακολούθησή τους. Δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι κυρίως μετά τις αστοχίες των φραγμάτων Malpasset και Vaiont εντάθηκε η παρακολούθηση (monitoring) των φραγμάτων με την εγκατάσταση οργάνων και την ανάπτυξη νέων μεθόδων και συστημάτων παρακολούθησης [8].

Η παρακολούθηση των φραγμάτων ξεκινά ήδη από την περίοδο της κατασκευής. Στη φάση αυτή πρωταρχικός ρόλος της παρακολούθησης είναι η ασφάλεια και στη συνέχεια η επιβεβαίωση των παραδοχών που έγιναν κατά το σχεδιασμό. Μετά το πέρας της κατασκευής η παρακολούθηση εφαρμόζεται με στόχο τον έλεγχο της σταθερότητας του φράγματος κυρίως κατά τη διάρκεια της πρώτης πλήρωσης αλλά και μετέπειτα, μακροχρόνια, για τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας του. Η παρακολούθηση γίνεται με τη χρήση ειδικού εξοπλισμού [8].

Τα χωμάτινα φράγματα χρήζουν μεγαλύτερης ανάγκης για παρακολούθηση σε σύγκριση με τα φράγματα από σκυρόδεμα. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι δεν επηρεάζονται από θερμοκρασιακές μεταβολές και γενικά δεν ακολουθούν την ελαστική συμπεριφορά των φραγμάτων από σκυρόδεμα [8].

Μεταξύ των παραμέτρων που μετρώνται από το σύστημα παρακολούθησης (μετακινήσεις, υδροστατικές πιέσεις, κτλ.), οι μετακινήσεις αποτελούν τη μόνη παράμετρο που επηρεάζεται από το σύνολο των φορτίων αλλά και από θερμοκρασιακές μεταβολές που δρουν πάνω στην κατασκευή. Η παρακολούθηση της χρονικής εξέλιξης των μετακινήσεων είναι πολύ σημαντική και εξυπηρετεί δύο βασικούς σκοπούς [8]:

- πρόβλεψη των μελλοντικών μετακινήσεων για την αποφυγή πιθανής αστοχίας και
- συγκέντρωση πληροφοριών για τον καθορισμό της σχέσης αιτίας – αιτιατού.

Ωστόσο, επειδή τα φράγματα είναι σύνθετες κατασκευές και οι μετακινήσεις τους είναι αποτέλεσμα διαφόρων παραγόντων, ο πλήρης καθορισμός των αιτιών που τις προκαλούν είναι πολύ δύσκολος.

Για τη μέτρηση των μετακινήσεων χρησιμοποιούνται γεωτεχνικά όργανα π.χ. κλισιόμετρα, μηκυσιόμετρα κτλ. (μέτρηση πιθανής κλίσης της κατασκευής και μετακίνησης της θεμελίωσης) καθώς επίσης γεωδαιτικά όργανα (GPS, ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί, χωροβάτες κτλ.) για τη μέτρηση οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων σημείων σε επιλεγμένες θέσεις στην επιφάνεια του φράγματος ως προς σημεία αναφοράς (τα οποία θεωρούνται a priori σταθερά) εγκατεστημένα σε σταθερό έδαφος, καθώς επίσης και εκκρεμή [7].

4.2. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Οι προδιαγραφές ακριβείας στην παρακολούθηση φραγμάτων ακολουθούν το βασικό διαχωρισμό τους σε χωμάτινα και φράγματα από σκυρόδεμα.

Έχει διαπιστωθεί ότι τα χωμάτινα φράγματα παρουσιάζουν μετακινήσεις της τάξεως αρκετών εκατοστών. Οι μετακινήσεις αυτές είναι στην πλειοψηφία τους μόνιμες, με κάποιες μικρές διακυμάνσεις που σχετίζονται κυρίως με τις μεταβολές της στάθμης του ταμιευτήρα.

Τα φράγματα από σκυρόδεμα επηρεάζονται κυρίως από θερμοκρασιακές μεταβολές, καθώς επίσης μεταβολές στη στάθμη του ταμιευτήρα και εμφανίζουν μια ελαστική συμπεριφορά. Το μέγεθος των μετακινήσεών τους (μερικά χιλιοστά) είναι κατά μία τάξη μικρότερο από εκείνο των χωμάτινων φραγμάτων.

Για την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού παραμόρφωσης των φραγμάτων σε αρκετές περιπτώσεις η ανάλυση περιελάμβανε συνδυασμό γεωτεχνικών και γεωδαιτικών δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, οι γεωδαιτικές παρατηρήσεις χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα, ορίζοντας τις αρχικές ή συνοριακές συνθήκες, στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Άλλοτε πάλι τα αποτελέσματα της ανάλυσης με γεωτεχνικά και εκείνης με γεωδαιτικά δεδομένα συγκρίνονται μεταξύ τους.

Ένα ιδιαίτερο κεφάλαιο στις εφαρμογές της παρακολούθησης παραμορφώσεων έχει εισάγει η χρήση του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού θέσης. Χρησιμοποιώντας δέκτες του συστήματος GPS με τη μέθοδο του σχετικού στατικού εντοπισμού επιτυγχάνεται ικανοποιητική ακρίβεια μερικών mm, γεγονός που καθιστά το σύστημα αυτό κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

4.3. ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Οι γεωδαιτικές (επίγειες και δορυφορικές) μέθοδοι παρακολούθησης των παραμορφώσεων φραγμάτων παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των μη γεωδαιτικών. Τα κυριότερα από αυτά είναι: ο στατιστικός έλεγχος των παρατηρήσεων, ο έλεγχος της ποιότητας των τελικών αποτελεσμάτων, που είναι οι συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου, ο προσδιορισμός των στατιστικά σημαντικών μετακινήσεων τους κατά φάση μέτρησης, σε ενιαίο σύστημα αναφοράς, με συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης και η δυνατότητα συσχέτισης τους κατά τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των φάσεων μέτρησης. Έτσι, ο προσδιορισμός της κινηματικής συμπεριφοράς του φράγματος γίνεται με αξιόπιστη μεθοδολογία αυστηρά ελεγχόμενη σε όλα τα στάδια της.

4.3.1. Επίγειες μέθοδοι

Στο πλαίσιο των επίγειων μεθόδων μπορεί να γίνει [7]:

- Ίδρυση τρισδιάστατων δικτύων, δικτύων οριζόντιου και κατακόρυφου ελέγχου στο σώμα του φράγματος ή και στην ευρύτερη περιοχή. Τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς του φράγματος στις δύο ή και στις τρεις διαστάσεις. Πραγματοποιούνται μετρήσεις μηκών, γωνιών ή διευθύνσεων με σύγχρονους ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς καθώς και υπομετρικών διαφορών με ψηφιακούς χωροβάτες. Μετά από συνόρθωση των παρατηρήσεων και επίλυση των δικτύων εκτιμώνται οι συντεταγμένες των κορυφών τους και οι αβεβαιότητες τους. Τέλος, μετά από στατιστική επεξεργασία, προσδιορίζονται οι μετακινήσεις των κορυφών για επιλεγμένο επίπεδο εμπιστοσύνης (συνήθως 95%) [7].
- Παρακολούθηση, σε τακτά χρονικά διαστήματα, με σύγχρονους ρομποτικούς γεωδαιτικούς σταθμούς, μόνιμα τοποθετημένων στόχων στο σώμα του φράγματος.

Οι σύγχρονοι ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί παρέχουν τη δυνατότητα προγραμματισμού ώστε να ανιχνεύουν, να σκοπεύουν αυτούς τους στόχους και να μετρούν μήκη και γωνίες σε συγκεκριμένες προκαθορισμένες χρονικές στιγμές. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναλαμβάνεται με εκ των προτέρων προγραμματισμό της συχνότητας μέτρησης ή με εντολή μέσω Η/Υ από το γραφείο [7]. Έτσι έχουμε γωνιακά και γραμμικά μεγέθη από άμεσες μετρήσεις, που συσχετίζονται με αντίστοιχα προγενέστερα στοιχεία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό απρόβλεπτων μετακινήσεων μεγάλης κλίμακας, τα οποία μπορούν να συμβούν στο πλαίσιο έκτακτων περιστατικών, όπως π.χ. εκτεταμένες κατολισθήσεις πρηνών του φράγματος κ.λπ.

- Σάρωση της επιφάνειας του φράγματος με χρήση εικονο–γεωδαιτικών σταθμών που μετρούν μήκη και γωνίες χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα (reflectorless) ή με χρήση επίγειων σαρωτών (laser scanners). Η μέτρηση των μηκών με τους εικονο–γεωδαιτικούς σταθμούς χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα, με ακρίβεια που φθάνει τα $\pm 2\text{mm}$, δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας του τρισδιάστατου μοντέλου του φράγματος. Όμοια και οι μετρήσεις με σαρωτές, η ακρίβεια των οποίων είναι της τάξης των $\pm 5\text{mm}$, οδηγούν σε μοντελοποίηση του σώματος του φράγματος σε τρεις διαστάσεις. Από την διαχρονική σύγκριση των χωρικών μοντέλων του φράγματος είναι προς διερεύνηση η δυνατότητα προσδιορισμού των μετακινήσεων του.[7]

4.3.2. Δορυφορικές μέθοδοι GNSS

Οι δορυφορικές γεωδαιτικές μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας δέκτες του συστήματος δορυφορικού εντοπισμού θέσης, αποβλέπουν στον προσδιορισμό των βάσεων στο χώρο, μεταξύ των κορυφών του τρισδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου. Για τις δορυφορικές μετρήσεις δεν απαιτείται αμοιβαία ορατότητα μεταξύ των κορυφών του δικτύου. Στα δίκτυα αυτά, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην επιλογή της θέσης των κορυφών τους, ώστε να βρίσκονται σε χώρο με, όσο το δυνατόν, ανοικτό ορίζοντα, για να φαίνεται μεγαλύτερο τμήμα της ουράνια σφαίρας. Γι' αυτό τον λόγο δεν πρέπει να επιλέγονται οι θέσεις των κορυφών του δικτύου κοντά σε φυσικά εμπόδια, κατασκευές, δέντρα, κ.λπ..

Στις δορυφορικές μεθόδους, ιδιαίτερη σημασία έχει ο σωστός προγραμματισμός των μετρήσεων από την άποψη τόσο της ορατότητας, όσο και της κατάλληλης γεωμετρίας των δορυφόρων στον ουράνιο θόλο. Τα σύγχρονα λογισμικά επεξεργασίας δορυφορικών δεδομένων δίνουν τη δυνατότητα ελέγχου εκ των προτέρων του πλήθους των δορυφόρων, που είναι ορατοί από μια κορυφή, συγκεκριμένη μέρα και ώρα, που ορίζεται από το χρήστη, αφού οι τροχιές των δορυφόρων είναι δυνατό να προβλεφθούν. Γι' αυτό τον λόγο, η ποιότητα της γεωμετρίας των δορυφόρων ποσοτικοποιείται μέσω του δείκτη DOP (Dilution Of Precision), ο οποίος πρέπει να λαμβάνει τιμές μέσα σε κατάλληλο εύρος ανάλογα με την επιδιωκόμενη ακρίβεια εντοπισμού θέσης.

Για τις τοπογραφικές και γεωδαιτικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας – όπως η παρακολούθηση μετακινήσεων – ενδείκνυται η μέθοδος του στατικού εντοπισμού. Στο σχετικό στατικό εντοπισμό λαμβάνουν ταυτόχρονα δεδομένα δυο δέκτες από τουλάχιστον τέσσερις κοινούς δορυφόρους, για τον προσδιορισμό μιας βάσης (διάνυσμα στο χώρο) με ακρίβεια της τάξης των $\pm 5\text{mm} \pm (0,5 \div 1\text{ppm})$ οριζοντιογραφικά. Οι μετρήσεις διαρκούν από μερικά λεπτά έως και αρκετές ώρες, ανάλογα με το μήκος της βάσης και το σκοπό της εργασίας. Χρησιμοποιούνται δέκτες διπλής συχνότητας κυρίως για την αντιμετώπιση του ιονοσφαιρικού σφάλματος. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι με τη μέθοδο του στατικού εντοπισμού τείνει να εξλειφθεί το σφάλμα της πολυανάκλασης λόγω της συνεχούς μετακίνησης των δορυφόρων ως προς τον δέκτη [13].

Η σχετική ακρίβεια για την κατακόρυφη θέση (υψομετρική ακρίβεια) είναι γενικά μία έως δύο φορές χειρότερη, σε σχέση με τη σχετική ακρίβεια κατά την οριζοντιογραφία.

Η διαφορά αυτή οφείλεται στη γεωμετρία του δορυφορικού σχηματισμού ο οποίος δεν είναι ο βέλτιστος κατά την κατακόρυφη συνιστώσα, καθώς θα έπρεπε να λαμβάνονται και δορυφόροι στον ορίζοντα ή και χαμηλότερα.

Οι συνιστώσες των διανυσμάτων, που μετρώνται στο χώρο, δίνουν τη θέση μιας άγνωστης κορυφής σε σχέση με τη γνωστή, που θεωρείται από το χρήστη. Έτσι προσδιορίζονται μετά από επίλυση με τη MET κάθε φάσης μέτρησης, η θέση των κορυφών του δικτύου (X,Y,Z) με ακρίβεια της τάξης των μερικών mm. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται αρχικά στο παγκόσμιο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς WGS84 και εισάγοντας τις κατάλληλες παραμέτρους μετασχηματισμού ανάγονται σε τοπικό σύστημα αναφοράς. Τελικά υπολογίζονται οι διαφορές ΔN, ΔE, ΔUp μεταξύ των κορυφών του δικτύου. Στη συνέχεια προσδιορίζονται οι μετακινήσεις των κορυφών του δικτύου οι οποίες αξιολογούνται για τη σημαντικότητά τους μέσω στατιστικών ελέγχων.

4.4. ΜΗ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Οι μη γεωδαιτικές μέθοδοι παρακολούθησης μετακινήσεων περιλαμβάνουν γεωτεχνικές οργανομετρήσεις, άμεσες μετρήσεις σε εκκρεμή ή σε οριζόντια σύρματα από χάλυβα και, τελευταία, μετρήσεις μέσω δικτύου οπτικών ινών. Με αυτές τις μεθόδους μπορούν να επιτευχθούν σημαντικά αυξημένες ακρίβειες (της τάξης του 0.1mm ή και καλύτερες), σε σχέση με τις γεωδαιτικές. Η χρήση τους στα υπό παρακολούθηση φράγματα, ή κάποια άλλη κατασκευή, παρέχει τη δυνατότητα μετρήσεων και σε συνεχή βάση. Από την άλλη πλευρά, οι μετακινήσεις που εντοπίζονται με αυτές τις μεθόδους, σε αντίθεση με εκείνες που εκτιμώνται από τις γεωδαιτικές μεθόδους, δεν εντάσσονται σε ενιαίο σύστημα αναφοράς και είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους [3].

Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις, οι μετρήσεις που γίνονται στο πλαίσιο των μη γεωδαιτικών μεθόδων, μπορούν να συνδυαστούν με τις γεωδαιτικές μετρήσεις. Έτσι, η ένταξη των θέσεων, όπου τοποθετούνται τα όργανα μέτρησης των μη γεωδαιτικών μεθόδων, στο γεωδαιτικό δίκτυο ελέγχου, μπορεί να δώσει την δυνατότητα πιο ολοκληρωμένου προσδιορισμού του πεδίου των μετακινήσεων [3].

4.4.1. Γεωτεχνικές μέθοδοι

Οι γεωτεχνικές μέθοδοι χρησιμοποιούν γεωτεχνικές οργανομετρήσεις προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την κινηματική συμπεριφορά του φράγματος που μελετάται.

Ορισμένα γεωτεχνικά όργανα και μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι:

- Το πιεζόμετρο για τη μέτρηση της πίεσης του νερού.
- Το κλισιόμετρο για την καταγραφή των κλίσεων.
- Το κλινόμετρο για τη μέτρηση των στροφών της κατασκευής.
- Το μηκυσιόμετρο για την άμεση μέτρηση των μεταβολών του μήκους μεταξύ δύο σημείων, στα οποία αγκυρώνεται.

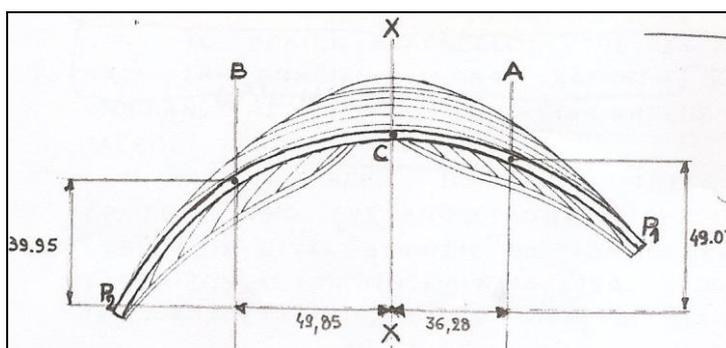
Οι κυριότερες παράμετροι που μετρώνται με τέτοιου είδους όργανα είναι οι μετακινήσεις των σημείων ελέγχου, η πίεση του νερού στη θεμελίωση, οι διαρροές στη θεμελίωση και στα αντερείσματα και η παρουσία ρωγμών.

4.4.2. Σύρματα από χάλυβα και εκκρεμή

Τα σύρματα από χάλυβα τοποθετούνται κατά μήκος των οριζόντιων σπράγγων στο σώμα του φράγματος ή στη στέψη του. Με βάση την ευθυγραμμία που υλοποιείται με

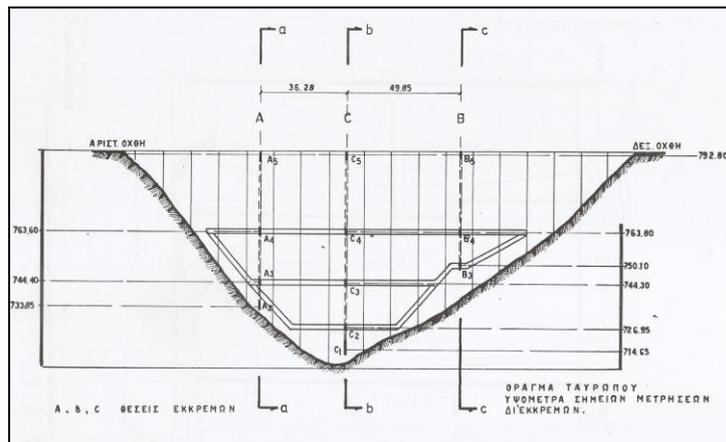
αυτά προσδιορίζονται οι σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις.

Μια βασική μέθοδος παρακολούθησης των σχετικών οριζόντιων μετατοπίσεων φραγμάτων ως προς τη βάση τους γίνεται μέσω της εγκατάστασης σε κατακόρυφα τμήματα του φράγματος, διατάξεων εκκρεμών, αριθμού ανάλογου με το μήκος της στέψης. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται και στο φράγμα Ταυρωπού, που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία (Σχήμα 6 και 7). Συνήθως κάθε εκκρεμές αποτελείται από ένα νήμα από ανοξειδωτο χάλυβα, ένα βαρίδι τάσης, μία συσκευή εξάρτησης του νήματος και ένα δοχείο απόσβεσης των ταλαντώσεων. Τα σημεία εξάρτησης των εκκρεμών εκλέγονται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στη στάθμη της στέψης. Τα κατώτατα άκρα φθάνουν όσο το δυνατόν πλησιέστερα στη βάση του φράγματος. Τα νήματα των εκκρεμών διέρχονται μέσα από κατακόρυφους σωλήνες ενσωματωμένους στο σώμα του φράγματος, με διαμέτρους 30-40 cm, ενώ μόνο τα άκρα τους και τα γειτονικά τμήματα των σταθμών ανάγνωσης είναι προσιτά. Σταθμοί ανάγνωσης τοποθετούνται στη στάθμη των οριζόντιων στοών που διατρέχουν το σώμα του φράγματος σε διάφορα ύψη. Τα κατώτατα άκρα των εκκρεμών, που βρίσκονται κάτω από τη στάθμη της χαμηλότερης στοάς επισκέψεως καταλήγουν σε φρεάτια διαμέτρου 1m, ώστε να δίνεται η δυνατότητα να λαμβάνεται μέτρηση στα κατώτατα άκρα των εκκρεμών. Εκεί τα βαρίδια τάσης είναι εμβαπτισμένα σε δοχείο με υγρό (νερό, έλαιο, ή γλυκερίνη) για την απόσβεση των ταλαντώσεων. Τα όργανα των μετρήσεων είναι τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπουν τον προσδιορισμό των μετακινήσεων μετατοπίσεων σε δύο διευθύνσεις, συνήθως κατά τη διεύθυνση ανάντη-κατάντη και κατά την κάθετη στην πρώτη διεύθυνση. Για τις μετρήσεις, χρησιμοποιείται μια συσκευή ανάγνωσης που μεταφέρεται από σταθμό σε σταθμό ανάγνωσης, όπου τοποθετείται σε κατάλληλες υποδοχές. Η διάταξη των εκκρεμών πρέπει να είναι τέτοια ώστε σε περίπτωση που χρειαστεί αντικατάσταση ενός νήματος να τοποθετείται ακριβώς στην ίδια με την προηγούμενη θέση. Οι μετρήσεις των μετακινήσεων του φράγματος με τη χρήση εκκρεμών, άρα και η τοποθέτησή τους, πρέπει να αρχίσουν πριν την πλήρωση του ταμιευτήρα του φράγματος και να συνεχίζονται πάντα σε τακτά χρονικά διαστήματα. Παράλληλα με τις μετρήσεις των εκκρεμών η μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα, του νερού και του σκυροδέματος δίνει την δυνατότητα ελέγχου της κινηματικής συμπεριφοράς του φράγματος καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.



Σχήμα 6. Θέση εκκρεμών στο φράγμα Ταυρωπού

Figure 6. Position of pendulums at Tavropos dam



Σχήμα 7. Θέσεις και υψόμετρα των σημείων εξάρτησης και μετρήσεων στο φράγμα Ταυρωπού

Figure 7. Positions of suspension and measurement points at Tavropos dam

4.4.3. Δίκτυο αισθητήρων με οπτικές ίνες

Μια άλλη σύγχρονη μέθοδος εφαρμόζεται με την εγκατάσταση κατάλληλου δικτύου αισθητήρων με οπτικές ίνες. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις.

Στην πρώτη περίπτωση γίνεται εγκατάσταση ενός εκτεταμένου, με χωρικές οπτικές ίνες, δικτύου αισθητήρων για την ανίχνευση της σχετικής μετακίνησης ολόκληρου του σώματος του φράγματος.

Στην δεύτερη περίπτωση γίνεται εγκατάσταση δύο μακρινών αισθητήρων οπτικών ινών (30 m και 40 m) αγκυρωμένων σε βράχο, για την παρακολούθηση της μετακίνησης του φράγματος σε σχέση με το υπέδαφός του. Αυτού του είδους οι αισθητήρες έχουν εγκατασταθεί στο φράγμα Emosson [7].

Κεφάλαιο 5
Το δορυφορικό δίκτυο
παρακολούθησης
των μετακινήσεων
του φράγματος Ταυρωπού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΤΟ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΑΥΡΩΠΟΥ

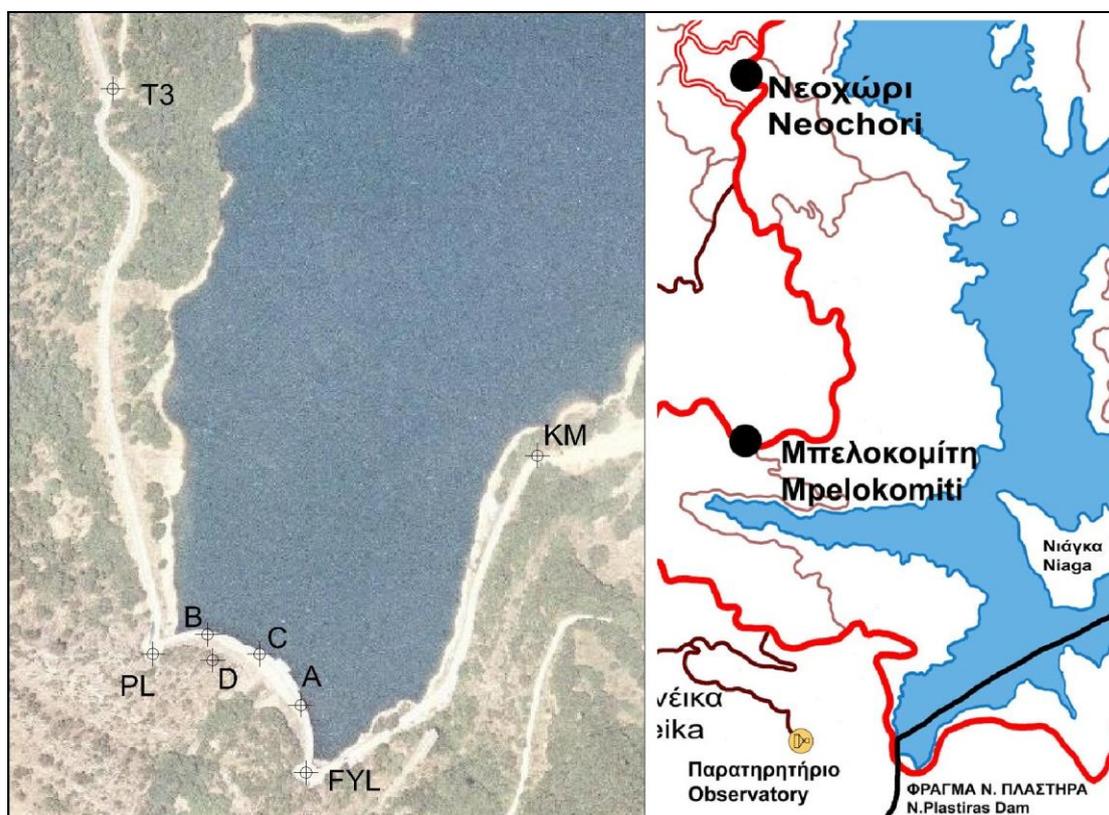
5.1. ΓΕΝΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται η διαδικασία για τη ίδρυση του δορυφορικού δικτύου παρακολούθησης των οριζόντιων μετακινήσεων του φράγματος Ταυρωπού. Παρουσιάζεται η γεωμετρία του δικτύου ελέγχου, γίνεται αναφορά στην οργάνωση των μετρήσεων και στην μέθοδο του σχετικού στατικού εντοπισμού που εφαρμόστηκε. Τέλος αναφέρονται τα όργανα και τα παρελκόμενα που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις.

5.2. ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΙΔΡΥΣΗ ΚΟΡΥΦΩΝ

Κατά την αναγνώριση εντοπίστηκαν 4 βάθρα από σπλισμένο σκυρόδεμα που κατασκευάστηκαν κατά τη δημιουργία του φράγματος, τα οποία και αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθούν ως κορυφές του δικτύου ελέγχου. Η θέση τους φαίνεται στην εικόνα 10 και η περιγραφή τους δίνεται αναλυτικά στο Παράρτημα. Από αυτά, το βάθρο με κωδικό C βρίσκεται στη στέψη του φράγματος πάνω από το κεντρικό εκκρεμές, τα βάθρα με κωδικούς KM και T3 είναι υλοποιημένα ανάντη του φράγματος στο ανατολικό και δυτικό πρανές αντίστοιχα, ενώ το βάθρο με κωδικό D βρίσκεται κατάντη του φράγματος στο δυτικό πρανές. Όλα τα βάθρα φέρουν σύστημα εξαναγκασμένης κέντρωσης. Ως κορυφές του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν επίσης οι κορυφές FYL, A, B και PL (Εικόνα 10) του Δικτύου Οριζοντίου Ελέγχου το οποίο ιδρύθηκε στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας «Προσδιορισμός των οριζόντιων μετακινήσεων του φράγματος της λίμνης Πλαστήρα με επίγειες γεωδαιτικές μεθόδους» [7]. Οι κορυφές αυτές είναι υλοποιημένες στο έδαφος με καρφιά. Τέλος εντοπίστηκε τριγωνομετρικό σημείο της Γ.Υ.Σ., υλοποιημένο με βάθρο από σπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο βρίσκεται εκτός της περιοχής επιρροής του φράγματος (σε απόσταση περίπου 5km από το φράγμα) στο χωριό Νεοχώρι, στο περίβολο του ξενοδοχείου ΑΓΝΑΝΤΙ. Το σημείο αυτό επιλέχθηκε ως η σταθερή κορυφή του δικτύου και φέρει τον κωδικό ΑΓΝ. (Εικόνα 10). Έτσι τελικά το δίκτυο ελέγχου αποτελείται από 9 κορυφές (C, KM, T3, D, FYL, A, B, PL, ΑΓΝ). Η τεκμηρίωση των κορυφών δίνεται στο παράρτημα

Πρέπει να αναφερθεί ότι κατά την ίδρυση των κορυφών του δικτύου, που υλοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην ύπαρξη όσο το δυνατόν μεγάλου τμήματος ελεύθερου ορίζοντα για να είναι δυνατή η απρόσκοπτη λήψη του δορυφορικού σήματος κατά την διάρκεια των μετρήσεων των δεκτών.



Εικόνα 10. Κορυφές δικτύου - Θέση τριγωνωμετρικού σημείου (Νεοχώρι)

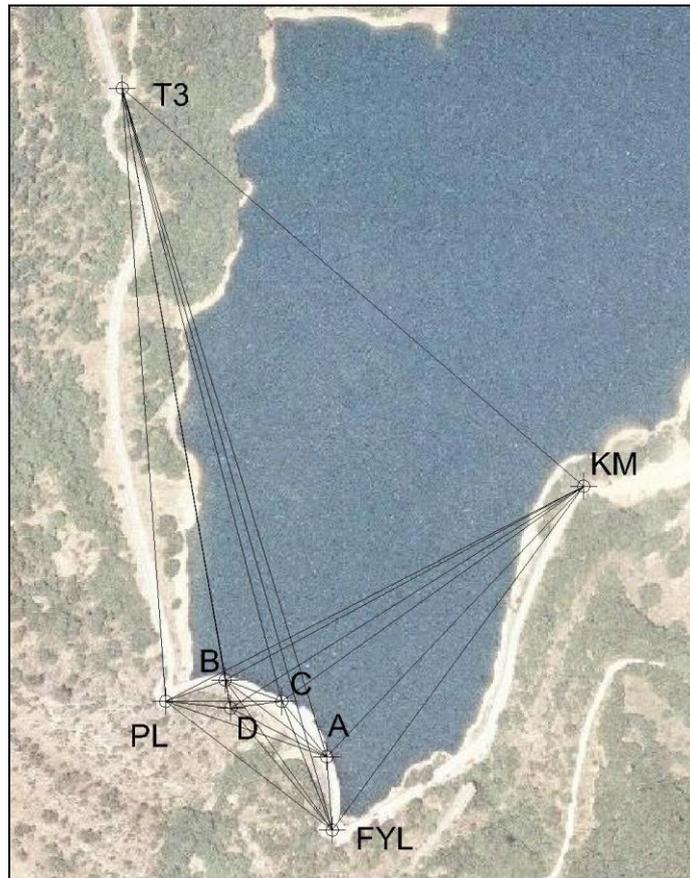
Picture 10. Network points – Position of trigonometric point (Neochori)

Η τεκμηρίωση των κορυφών δίνεται στο παράρτημα.

5.3. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ

Όπως αναφέρθηκε, οι κορυφές του δικτύου (C, A, B) εγκαταστάθηκαν πάνω στο φράγμα, οι κορυφές (KM, T3, D, FYL, PL) στην εγγύτερη περιοχή του και η σταθερή σε απομακρυσμένη θέση (AGN). Εκτός της τελευταίας, που θεωρείται σημείο αναφοράς, οι υπόλοιπες αποτελούν τα σημεία ελέγχου των μετακινήσεων για το σώμα του φράγματος και των πρηνών γύρω από αυτό. Έτσι, η γεωμετρία του δικτύου διαμορφώθηκε τελικά όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 11.

Οι βάσεις που αρχικά σχηματίστηκαν μεταξύ των κορυφών του δικτύου ήταν 34 με μήκη που κυμαίνονται από 45 m μέχρι και 5 km (Εικόνα 11). Οι βάσεις μετρήθηκαν όλες κατά τις 2 πρώτες φάσεις μέτρησης του δικτύου, τον Αύγουστο και το Νοέμβριο 2011. Στο χειμώνα που μεσολάβησε μέχρι την τρίτη φάση, τον Μάιο 2012, καταστράφηκε η κορυφή T3 από εκχιονιστικό μηχάνημα. Έτσι τελικά, κατά την τρίτη φάση, έμειναν 26 βάσεις, που και πάλι μετρήθηκαν όλες.



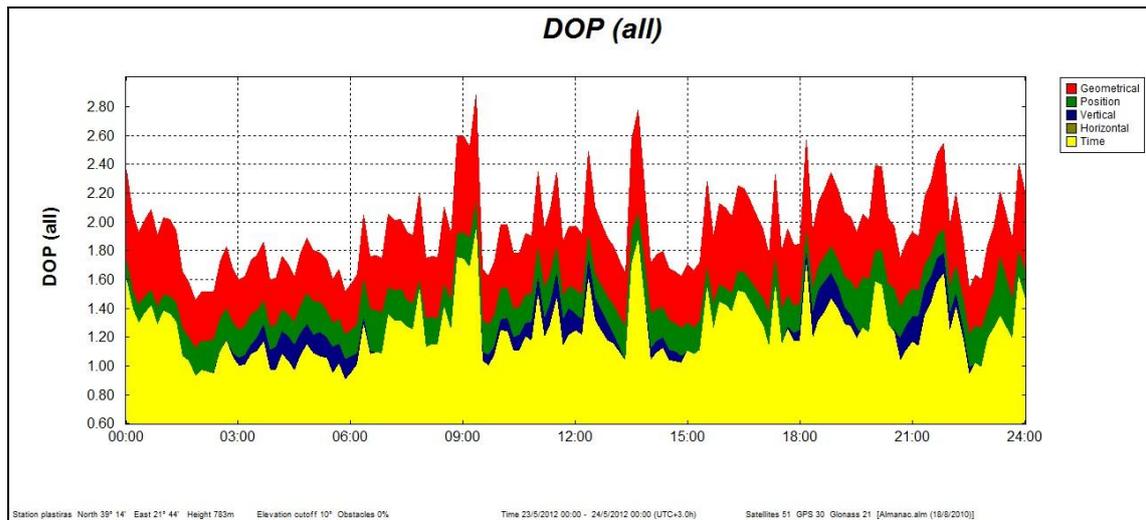
Εικόνα 11. Γεωμετρία δικτύου

Picture 11. Network geometry

5.4. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στο επίπεδο του προγραμματισμού, πριν από τις μετρήσεις, πρέπει να καθορίζεται η καλύτερη ημέρα και ώρα, κατά τις οποίες θα πρέπει να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις, δηλαδή, η χρονική περίοδος όπου μπορεί να παρατηρηθεί ο μέγιστος αριθμός δορυφόρων στον ουράνιο θόλο.

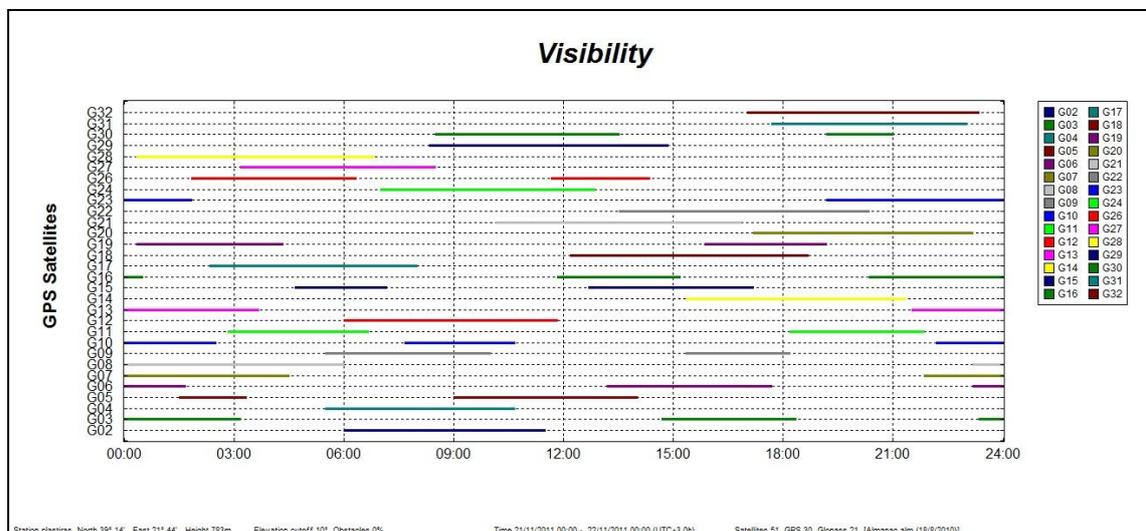
Θέτοντας προσεγγιστικές συντεταγμένες (φ , λ) για τη θέση του δέκτη, παρέχεται η δυνατότητα, μέσω του λογισμικού που συνοδεύει τους δέκτες και με βάση τις τροχιές των δορυφόρων, που είναι γνωστές από τις εκπεμπόμενες εφημερίδες, να γίνει προεκτίμηση της τιμής του δείκτη ποιότητας των παρατηρήσεων DOP και πιο συγκεκριμένα του δείκτη GDOP (Geometric Dilution Of Precision), για επιλεγμένη ημερομηνία και συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του δείκτη GDOP, τόσο καλύτερη θεωρείται ότι είναι η ακρίβεια των μετρήσεων. Η οριακή τιμή του δείκτη GDOP είναι 1, για τιμές του δείκτη $1 \div 2$ οι παρατηρήσεις θεωρούνται άριστες, ενώ για τιμές $2 \div 5$ θεωρούνται καλές. Στην περίπτωση του δικτύου ελέγχου στο φράγμα Ταυρωπού, και κατά το στάδιο του προγραμματισμού, οι τιμές του δείκτη GDOP δεν ξεπέρασαν το 3,75.



Διάγραμμα 2. Τιμές DOP για τις 23/5/2012 στην περιοχή του φράγματος Ταυρωπού

Diagram 2. DOP values on 23/5/2012 at Tavropos dam's territory

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει επίσης να δίνεται και στο συνολικό αριθμό των παρατηρούμενων δορυφόρων. Κατά τις μετρήσεις που γίνονται από τους δορυφορικούς δέκτες στις δυο κορυφές κάθε βάσης, θα πρέπει να γίνονται μετρήσεις από τουλάχιστον τέσσερις κοινούς δορυφόρους για να προσδιοριστεί η θέση της βάσης στο χώρο. Οι τροχιές των δορυφόρων είναι έτσι σχεδιασμένες, ώστε τουλάχιστον έξι δορυφόροι κατά μέσο όρο να είναι πάντα ορατοί από σχεδόν κάθε σημείο της γήινης επιφάνειας. Στην προκειμένη περίπτωση, το πλήθος των ορατών δορυφόρων κυμαινόταν από 7 έως 11.



Διάγραμμα 3. Ορατότητα δορυφόρων στην περιοχή του φράγματος Ταυρωπού στις 22/11/2011

Diagram 3. Satellite visibility on 22/11/2011 at Tavropos dam's territory

5.5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ

Οι μετρήσεις έγιναν σε τρεις χρονικές φάσεις. Στην πρώτη φάση μετρήσεων, οι εργασίες πεδίου ξεκίνησαν την τελευταία εβδομάδα του Ιουλίου 2011 και ολοκληρώθηκαν την πρώτη εβδομάδα του Αυγούστου 2011 (25/7÷6/8/11, μέση θερμοκρασία αέρα 22°C), στη δεύτερη φάση οι μετρήσεις ολοκληρώθηκαν μέσα στο τελευταίο δεκάημερο του Νοέμβρη 2011 (20÷26/11/2011, μέση θερμοκρασία αέρα

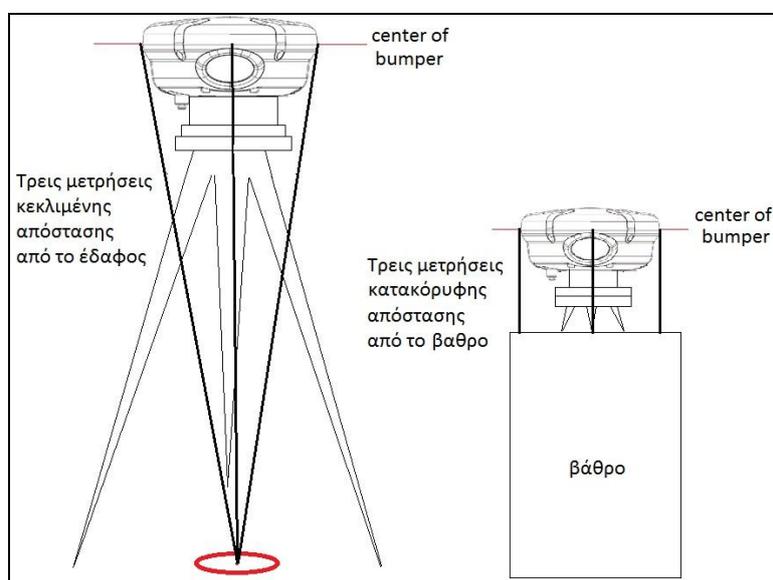
6°C) ενώ στην τρίτη φάση μέσα στο τελευταίο δεκαήμερο του Μαΐου 2012 (20÷25/5/2012, μέση θερμοκρασία αέρα 15°C). Κατά τις ίδιες χρονικές περιόδους η ΔΕΗ πραγματοποίησε μετρήσεις στα εκκρεμή του φράγματος, που όμως δεν συσχετίστηκαν με τα αποτελέσματα της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Αυτή η σύγκριση κρίθηκε ότι πρέπει να αποτελέσει αντικείμενο ιδιαίτερης έρευνας, που θα περιλάβει τα αποτελέσματα του δορυφορικού και του επίγειου δικτύου ελέγχου του φράγματος Ταυρωπού.

Οι μετρήσεις των βάσεων του δικτύου, έγιναν με την μέθοδο του σχετικού στατικού εντοπισμού. Χρησιμοποιήθηκαν δύο γεωδαιτικοί δέκτες εντοπισμού θέσης της εταιρίας Trimble (5000 series). Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις έγιναν με τους δέκτες 5800 μαζί με τα αντίστοιχα παρελκόμενα που τους συνοδεύουν.

Κατά τις 2 πρώτες φάσεις μέτρησης του δικτύου, οι βάσεις μετρήθηκαν με εναλλαγή των δεκτών (base και rover) για να αυξηθούν οι βαθμοί ελευθερίας του δικτύου. Κατά την τρίτη φάση θεωρήθηκε προτιμότερο να μετρηθούν οι μεγαλύτερες σε μήκος βάσεις, που είναι αυτές από τη σταθερή κορυφή AGN, καθώς και οι περιμετρικές βάσεις του δικτύου με διπλάσια διάρκεια μετρήσεων χωρίς εναλλαγή των δεκτών. Οι υπόλοιπες βάσεις μετρήθηκαν και πάλι με εναλλαγή δεκτών. Για τις μεγαλύτερες και τις περιμετρικές βάσεις του δικτύου οι παρατηρήσεις διαρκούσαν από 45 μέχρι 90 λεπτά (45' κατά τις 2 πρώτες φάσεις με εναλλαγή δεκτών και 90' κατά την τρίτη φάση χωρίς εναλλαγή). Για τις υπόλοιπες βάσεις οι παρατηρήσεις διαρκούσαν 30 λεπτά.

Στις κορυφές που είχαν υλοποιηθεί με καρφιά, οι δέκτες τοποθετούνταν σε τρίποδες με τρικόχλιο, ενώ στις κορυφές που υπήρχαν βάθρα εξαναγκασμένης κέντρωσης, τοποθετούνταν πάνω σε ειδικές βάσεις με τρικόχλιο. Το ύψος της κεραίας προέκυψε για κάθε κορυφή από το μέσο όρο τριών μετρήσεων κεκλιμένης απόστασης από την υλοποιημένη κορυφή μέχρι την αντίστοιχη χαραγή του δέκτη με μεταλλική μετροταινία (Σχήμα 8). Στις κορυφές με βάθρο η απόσταση μετρήθηκε κατακόρυφα (Σχήμα 8).

Τέλος όλες οι εργασίες υπαίθρου έγιναν από συνεργείο 2 ατόμων.



Σχήμα 8. Μέτρηση ύψους κεραίας σε τρίποδα και βάθρο
Figure 8. Antenna height measurement on tripod and riser

5.6. ΟΡΓΑΝΑ - ΠΑΡΕΛΚΟΜΕΝΑ

Όπως αναφέρθηκε, για τις μετρήσεις των βάσεων επιλέχθηκαν οι γεωδαιτικοί δέκτες Trimble 5800. Οι συγκεκριμένοι δέκτες έχουν τη δυνατότητα μέτρησης στις

συχνότητες L1 και L2 του συστήματος GPS. Επίσης έχουν ενσωματωμένο σύστημα ασύρματης επικοινωνίας καθώς και κεραία σε μία συμπαγή και ελαφριά συσκευή. Ανάλογα με τις ανάγκες των εργασιών υπαίθρου, το σύστημα Trimble 5800 μπορεί να διαμορφωθεί ως σταθερός (base) ή ως κινητός (rover) δέκτης GPS. Κάθε δέκτης διαθέτει εσωτερική μνήμη 2 MB, παρέχοντας εύκολη και επαρκή συλλογή δεδομένων τόσο στο σχετικό όσο και στον κινηματικό εντοπισμό. Επίσης, διαθέτει συνολικά 24 ηλεκτρονικά κυκλώματα (κανάλια) διπλής συχνότητας, που το καθένα μπορεί να παρακολουθεί αδιάλειπτα το σήμα από ένα συγκεκριμένο δορυφόρο, και υποστηρίζει τη δυνατότητα επικοινωνίας μέσω UHF, GSM και GPRS για την λήψη διορθώσεων Κινηματικού Εντοπισμού Πραγματικού Χρόνου (RTK). Τέλος, παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου του σχετικού στατικού εντοπισμού με τις αντίστοιχες ακρίβειες:

- Οριζοντιογραφική ακρίβεια: $\pm (5 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}) \text{ RMS}$
- Υψομετρική ακρίβεια: $\pm (5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}) \text{ RMS}$

Οι δέκτες συνοδεύονται με το αντίστοιχο λογισμικό (Trimble Business Center), και χρησιμοποιήθηκαν με τα παρακάτω παρελκόμενα:

1. Τέσσερις τρίποδες με επίπεδη κεφαλή
2. Δύο βάσεις με μικρό στυλαίο εξαναγκασμένης κέντρωσης
3. Τέσσερα τρικόχλια με οπτική κέντρωση
4. Δύο σύνδεσμοι (adaptors) για τοποθέτηση του δέκτη στο τρικόχλιο
5. Δύο μεταλλικές μετροταινίες, μέγιστου μήκους 2 m
6. Δύο μπαταρίες (Li-Ion) και ένας φορτιστής για κάθε δέκτη.

Οι δέκτες Trimble 5800 έχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης λήψης σημάτων και από το σύστημα εντοπισμού θέσης GLONASS. Έτσι, υπάρχει πλεονασμός μετρήσεων, αφού ο συνολικός αριθμός των δορυφόρων από τα δύο συστήματα (GPS και GLONASS), που είναι ορατοί από τις κορυφές του δικτύου, είναι μεγαλύτερος από ότι αν παρατηρούσε μόνο GPS δορυφόρους, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία στην τελική λύση.

Κεφάλαιο 6
Επεξεργασία μετρήσεων -
Επίλυση δικτύου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ

6.1. ΓΕΝΙΚΑ

Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών υπαίθρου ακολουθούν οι εργασίες γραφείου που αφορούν στην επεξεργασία των δεδομένων, όπως αυτά προέκυψαν από τις μετρήσεις.

Όπως αναφέρθηκε, οι μετρήσεις έγιναν με 2 μόνο δέκτες και γι' αυτό τον λόγο όλες οι βάσεις θεωρούνται ότι είναι ανεξάρτητες και ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Η συνόρθωση γίνεται με παρατηρήσεις τις συνιστώσες των ανεξάρτητων βάσεων και πίνακα μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας για κάθε διάνυσμα βάσης τον πίνακα 3x3, που προέκυψε από την επίλυση της κάθε βάσης χωριστά. Η πλεονάζουσα πληροφορία για να γίνει η συνόρθωση των παρατηρήσεων του δικτύου και ο έλεγχος της αξιοπιστίας του, προέρχεται από το γεγονός ότι όλες οι κορυφές του δικτύου είναι κοινές σε τουλάχιστον 2 βάσεις.

Ανεξάρτητα από τον τύπο των δεκτών GPS και τη μέθοδο εντοπισμού, όλα τα προγράμματα επίλυσης εκτελούν συγκεκριμένες διαδικασίες, που περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

- Αρχικά, η επεξεργασία των δεδομένων GPS για κάθε βάση ξεκινά με έναν Κώδικα Επίλυσης (CODE), απ' όπου προκύπτει μία προσεγγιστική τιμή της κορυφής και διορθώνεται κατά ένα μέρος το σφάλμα του χρονομέτρου του παρατηρητή, δηλαδή η ασάφεια φάσης των χρονομέτρων των δεκτών. Η επεξεργασία των μετρήσεων φάσης, απαιτεί και τον προσδιορισμό των ακεραίων ασαφειών ως επιπλέον αγνώστων, προκειμένου να προσδιοριστούν, με ικανοποιητική ακρίβεια για τοπογραφικές ή γεωδαιτικές εργασίες, τα διανύσματα μεταξύ των δεκτών, οι οποίοι παρατηρούν ταυτόχρονα. Ο τρόπος, με τον οποίο αυτό το είδος της μέτρησης μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα είναι με χρήση γραμμικών συνδυασμών ή εικονικών (μαθηματικών) παρατηρήσεων, που έχουν προέλθει ως αριθμητικό αποτέλεσμα (διαφορές) μεταξύ των πρωτογενών μετρήσεων.

- Κατόπιν, το πρόγραμμα εκτελεί μία απλή διαφορά φάσης μεταξύ δεκτών και μεταξύ δορυφόρων. Στην πρώτη περίπτωση, το σφάλμα του χρονομέτρου του παρατηρητή έχει εξαλειφθεί ενώ και οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις επίσης, μειώνονται. Στο στάδιο αυτό, μειώνεται εξίσου πάρα πολύ το σφάλμα της ασάφειας του κέντρου της βάσης μεταξύ των δύο κεραιών. Στη δεύτερη περίπτωση, εξαλείφονται τα σφάλματα των χρονομέτρων των δορυφόρων ενώ μειώνονται και τα υπόλοιπα σφάλματα τα σχετιζόμενα με το δορυφόρο, δηλαδή της τροχιάς και της ατμόσφαιρας, τόσο περισσότερο όσο μικρότερη είναι η βάση μεταξύ των δεκτών, συγκρινόμενη με το ύψος των 20.000 km της τροχιάς των δορυφόρων.

Ο Κώδικας Επίλυσης ακολουθείται από μία τριπλή διαφορά, μεταξύ δεκτών, δορυφόρων και χρόνου, και αρκετές διπλές διαφορές φάσης. Το πρόγραμμα επίλυσης εκτελεί πρώτα τριπλές διαφορές και κατόπιν, διπλές διαφορές φάσης, προκειμένου να εξαλειφθεί το σφάλμα του χρονομέτρου.

- Η διαφορά μεταξύ μίας απλής διαφοράς ως προς δέκτες και μίας απλής διαφοράς ως προς δορυφόρους ονομάζεται διπλή διαφορά φάσης μεταξύ δεκτών και δορυφόρων. Στο στάδιο αυτό, το πρόγραμμα επιλύει τις δεκαδικές ασάφειες φάσης προσπαθώντας να τις προσαρμόσει σε ακέραιες. Τα σφάλματα που εξαλείφονται ή μειώνονται στις διπλές διαφορές ως προς δέκτες και δορυφόρους είναι τα σφάλματα των χρονομέτρων των δορυφόρων και των δεκτών καθώς και τα σφάλματα της τροχιάς των δορυφόρων και της ατμόσφαιρας.

- Ως τριπλή διαφορά μεταξύ δεκτών, δορυφόρων και χρόνου ορίζεται η διαφορά δύο διπλών διαφορών ως προς δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές. Τα σφάλματα που

εξαλείφονται ή μειώνονται στις διπλές διαφορές, εξαλείφονται ή μειώνονται και στις τριπλές διαφορές και στην περίπτωση των τριπλών διαφορών δεν περιέχονται ως επιπλέον άγνωστοι οι ασάφειες φάσης. Επίσης, στο σημείο αυτό, εντοπίζονται οι απώλειες κύκλων (cycle slip) για τις μετρήσεις φάσεων φέροντος κύματος, δηλαδή τα διαστήματα όπου διακόπτεται το σήμα μεταξύ δορυφόρου και δέκτη, π.χ. παρεμβολή ενός εμποδίου στη διαδρομή του σήματος από το δορυφόρο στο δέκτη, και παρεμβάλλεται ένας ψευδοκώδικας σε αυτά τα κενά των παρατηρήσεων. Πιο αναλυτικά, αναγνωρίζονται οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες συνέβησαν απώλειες κύκλων, ώστε σε κάθε ξεχωριστό διάστημα απρόσκοπτης παρακολούθησης του δορυφόρου να αντιστοιχεί και ένας διαφορετικός ακέραιος κύκλος. Τέλος, προκύπτουν καινούριες προσεγγιστικές συντεταγμένες των σημείων εκτελώντας συνεχώς, το πρόγραμμα διπλές διαφορές.

- Τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων GPS είναι ο προσδιορισμός των τελικών τρισδιάστατων συντεταγμένων της κορυφής, που μετράται. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας μία κορυφή του δικτύου ως σημείο αναφοράς, το πρόγραμμα επίλυσης προσδιορίζει το διάνυσμα της βάσης (ΔX , ΔY , ΔZ) της άγνωστης κορυφής ως προς τη σταθερή και δίνονται τελικά οι τρισδιάστατες συντεταγμένες της άγνωστης κορυφής. Για την επίλυση του δικτύου ελέγχου, χρησιμοποιείται η μέθοδος των διαφορών τόσο με τη χρήση του κώδικα όσο και με χρήση της συχνότητας ή και συνδυασμό των δύο.

Για να επιτευχθεί λύση ακριβείας της τάξης του 1 cm ή των μερικών mm, η οποία είναι και η καλύτερη (fixed solution), πρέπει να επιλυθούν οι ασάφειες φάσης, δηλαδή να προσδιοριστούν οι ορθοί ακέραιοι αριθμοί. Στην περίπτωση όμως, που δεν επιλυθούν οι ασάφειες φάσης, είτε επειδή δεν είναι δυνατόν είτε δεν ενδιαφέρει άμεσα, η λύση αυτή είναι μειωμένης ακρίβειας (float solution) της τάξης των 2 - 3 cm, η οποία πιθανώς, να είναι επαρκής για αρκετές τρέχουσες εφαρμογές.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η επίλυση των ασαφειών φάσης, και πιο συγκεκριμένα, ο προσδιορισμός των ακέραιων αβεβαιοτήτων φάσης γίνεται με επεξεργασία των παρατηρήσεων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή σε δύο βήματα. Αρχικά, πραγματοποιείται ένας συνδυασμένος προσδιορισμός συντεταγμένων, παραμέτρων των χρονομέτρων και ασαφειών, χρησιμοποιώντας κάποια από τις γνωστές μεθόδους συνόρθωσης (Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων, φίλτρο Kalman). Τα αποτελέσματα είναι δεκαδικές τιμές των ασαφειών και μία βελτιωμένη εκτίμηση της θέσης των δεκτών ως προς ένα σημείο αναφοράς. Το δεύτερο βήμα αφορά την προσπάθεια μετατροπής των δεκαδικών τιμών των ασαφειών σε ακέραιες τιμές. Στην περίπτωση που η προσπάθεια είναι επιτυχής, οι ακέραιες τιμές εισάγονται ως γνωστές σε μία ακόμη συνόρθωση με αγνώστους μόνο τις συντεταγμένες, η οποία δίνει και τις τελικές συντεταγμένες υψηλής ακρίβειας.

6.2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ GPS

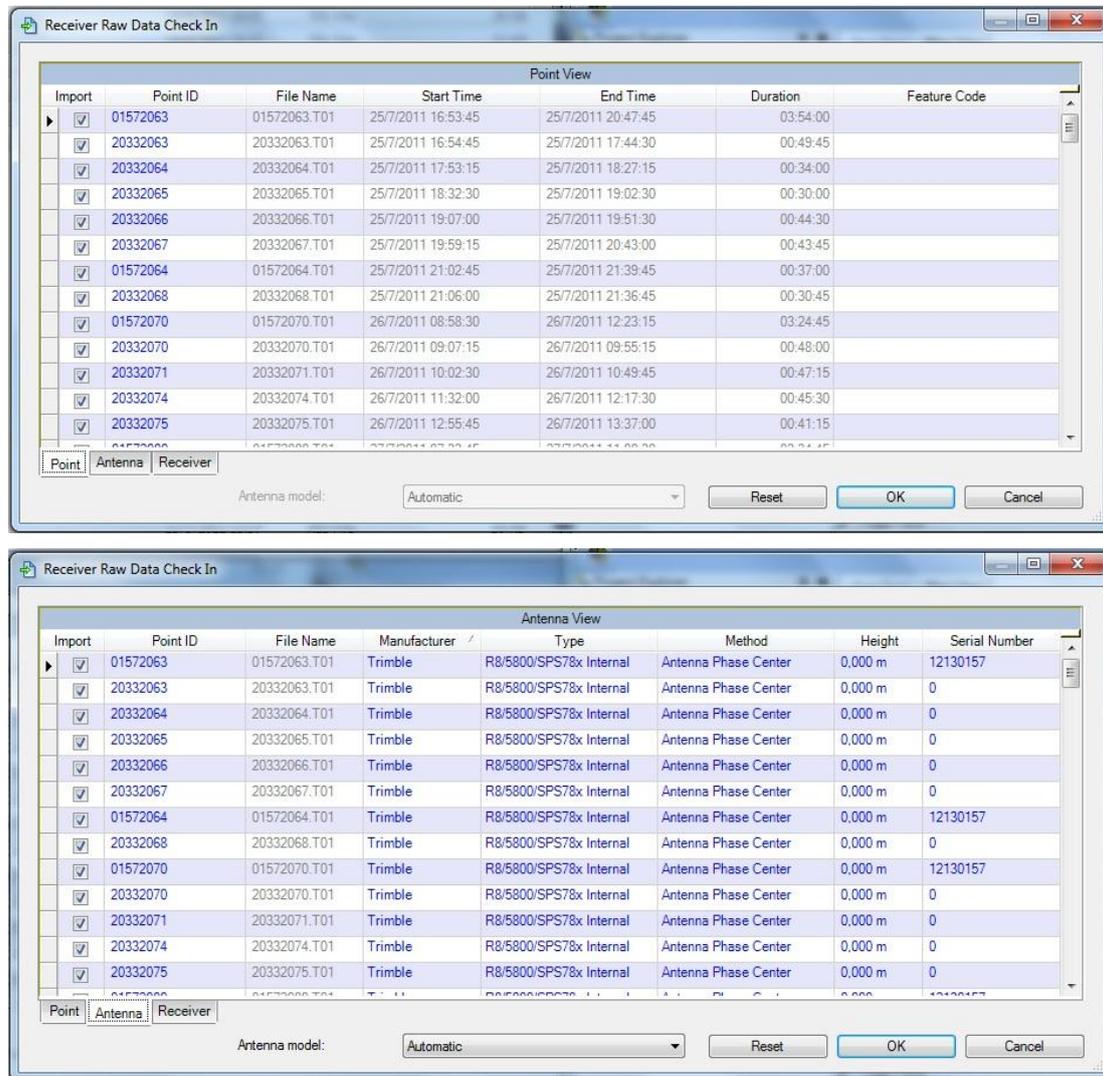
6.2.1. Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό Trimble Business Center

Πρώτο στάδιο για την επεξεργασία των δεδομένων υπαίθρου με το λογισμικό της κατασκευάστριας εταιρίας είναι η μεταφορά των αρχείων των δεκτών από την εσωτερική μνήμη τους στον υπολογιστή. Τα αρχεία αντιγράφονται από τους δέκτες σε έναν φάκελο στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή σε μορφή .T01, που είναι format της Trimble.

Πριν την εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό επεξεργασίας ορίστηκε από το χρήστη το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα (ΕΓΣΑ '87) με την εισαγωγή των παραμέτρων μετασχηματισμού από το WGS84, που γίνονται οι μετρήσεις GPS, στο ελλειψοειδές αναφοράς του ΕΓΣΑ '87. Ακολούθως ορίστηκαν οι παράμετροι του λογισμικού, σχετικές με την επίλυση των βάσεων και του δικτύου,

όπως ο τύπος επίλυσης (fixed solution), η τιμή της γωνίας ύψους ως προς τον ορίζοντα (elevation mask), κλπ.

Κατά την εισαγωγή των αρχείων .T01 στο λογισμικό εμφανίζεται ένα παράθυρο, όπου για κάθε αρχείο που εισάγεται αναγράφονται πληροφορίες για την ημερομηνία μέτρησης, η κωδικοποιημένη ονομασία του αρχείου, ο τύπος της κεραίας, το ύψος της κεραίας και η μέθοδος μέτρησης του, κλπ. Ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα να γίνουν οι απαιτούμενες αλλαγές σε κάποια από αυτά τα στοιχεία (π.χ. ύψη κεραίας και μέθοδος μέτρησης τους) (Εικόνα 12).



Εικόνα 12. Εισαγωγή δεδομένων στα αρχεία των δεκτών

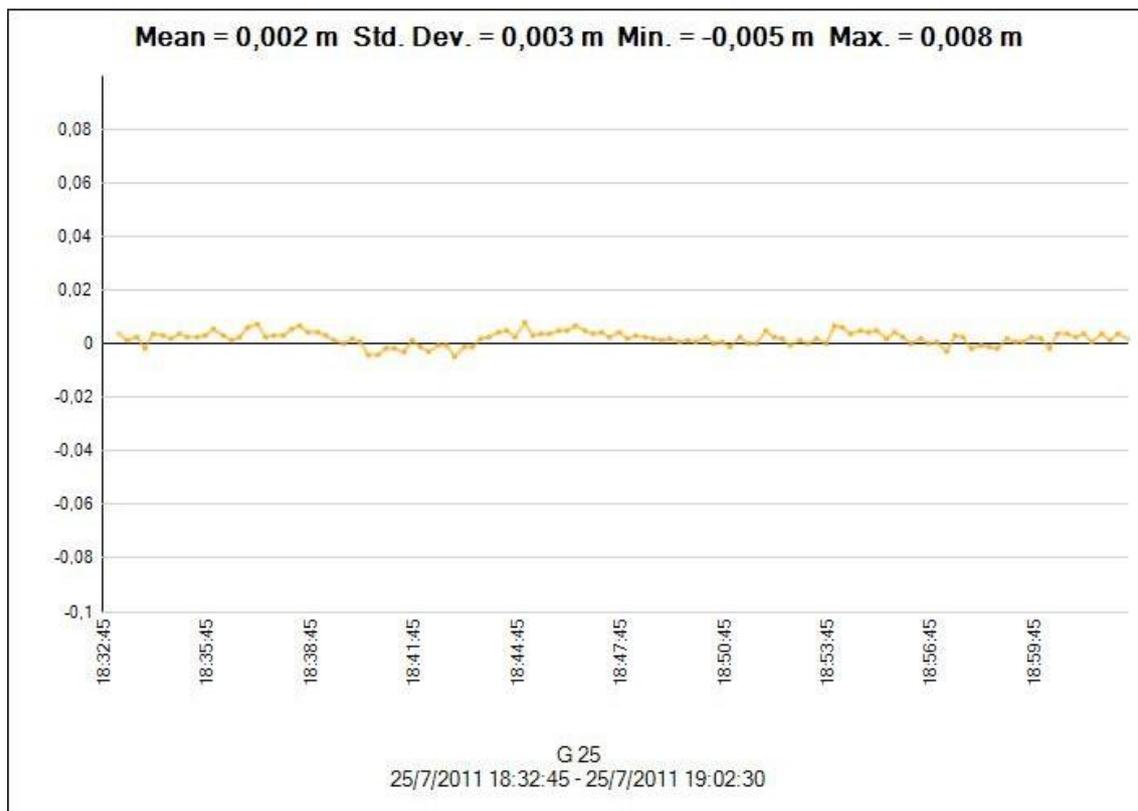
Picture 12. Data input for receivers' files

Ξεχωριστή αναφορά αξίζει να γίνει στον τύπο των εφημερίδων, που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση των βάσεων. Είναι γνωστό και έχει ήδη αναφερθεί ότι κατά τη μέτρηση μιας βάσης αποστέλλονται οι εφημερίδες προβλεπόμενης τροχιάς των δορυφόρων στους δέκτες. Οι εφημερίδες πραγματικής τροχιάς δημοσιεύονται κάποιες μέρες μετά σε ειδικές ιστοσελίδες και σε αρχεία της μορφής .sp3. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν αυτές οι εφημερίδες. Τα αποτελέσματα στην επίλυση του δικτύου με τις εφημερίδες προβλεπόμενης και πραγματικής τροχιάς δεν διαφέρουν σημαντικά, παρ' όλα αυτά η επίλυση με τις πραγματικές τροχιές είναι πιο αξιόπιστη γι' αυτό και τελικά επιλέχθηκε. Η δυνατότητα επιλογής τους στο λογισμικό δίνεται στο χρήστη από τις ρυθμίσεις εργασίας (project

settings), αφού προηγουμένως βρεθούν στο διαδίκτυο εισάγοντας την ημερομηνία της μέτρησης.

6.2.2. Επίλυση βάσεων

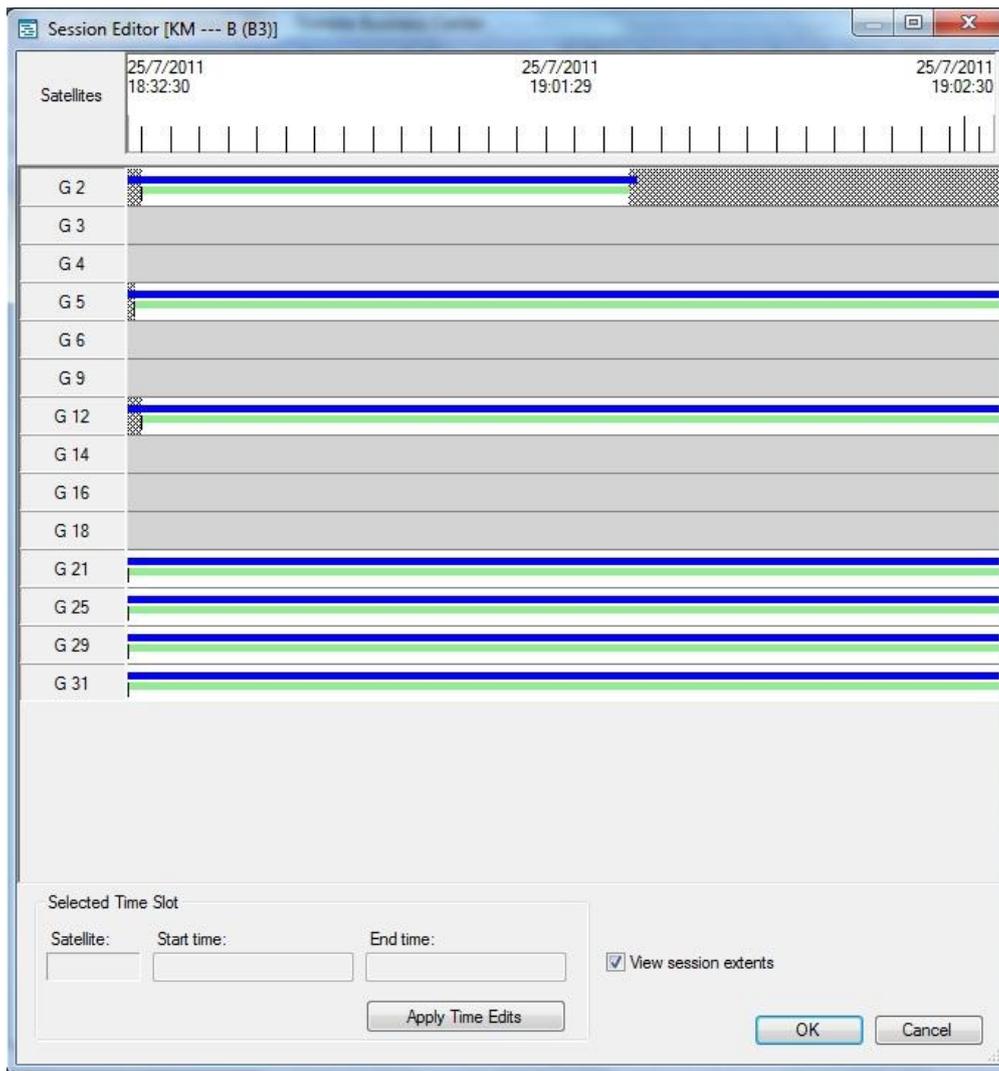
Επόμενο στάδιο είναι η επίλυση των βάσεων, που γίνεται ξεχωριστά για κάθε μια βάση ακολουθώντας κάθε φορά μία συγκεκριμένη διαδικασία. Από την αναφορά της επεξεργασίας μίας βάσης (Baselines Processing Report) εξετάζεται η ποιότητα των παρατηρήσεων μέσω των υπολοίπων των μετρήσεων (residuals) για κάθε δορυφόρο που παρατηρείται στον ουράνιο θόλο κατά τη διάρκεια της συλλογής των δεδομένων (Διάγραμμα 4). Κάθε υπόλοιπο εκφράζει τη διαφορά της τιμής μεταξύ της παρατηρούμενης ποσότητας και της υπολογισμένης ποσότητας, η οποία, στην προκειμένη περίπτωση, είναι αυτή της φάσης (carrier phase). Οι τιμές των υπολοίπων αναλύονται για να προσδιορίσουν τις συνέπειες των πολλαπλών διαδρομών του σήματος (multipath error) που εμφανίζονται στη μέτρηση φάσης.



Διάγραμμα 4. Υπόλοιπα μετρήσεων του δορυφόρου G25 στις 25/7/2011

Diagram 4. Measurements' residuals of G25 satellite on 25/7/2011

Στο στάδιο της επεξεργασίας, αφαιρούνται διαστήματα παρατηρήσεων ή ακόμη και ολόκληροι δορυφόροι (Εικόνα 13) που μπορεί να επηρεάζουν αρνητικά την οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια. Αυτά τα συγκεκριμένα διαστήματα εντοπίζονται κυρίως, από το διάγραμμα των υπολοίπων και επιτυγχάνεται η καλύτερη επίλυση με διαδοχικές, πολλαπλές δοκιμές.



Εικόνα 13. Επεξεργασία διαστημάτων παρατηρήσεων για τη βάση KM-B στις 25/7/2011

Picture 13. KM-B Session editor

6.2.3. Έλεγχος κλεισίματος βρόχων

Επόμενο στάδιο στην επεξεργασία των δεδομένων είναι ο έλεγχος κλεισίματος βρόχων (Loop Closure). Στην προκειμένη περίπτωση οι βρόχοι είναι τρίγωνα. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη, μέσα από τη συγκεκριμένη εντολή, να ελέγξει εύκολα και άμεσα την εσωτερική ακρίβεια του δικτύου. Εισάγονται τα κριτήρια αποδοχής ή όχι του αθροίσματος των διανυσμάτων στο χώρο, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται τα διανύσματα, που δημιουργούν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις από τα καθορισμένα όρια. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε όριο 30 mm οριζόντια και κατακόρυφα (Δ Horizontal - Δ Vertical). Η βέλτιστη εσωτερική ακρίβεια του δικτύου επιτυγχάνεται όταν το σύνολο των βρόχων ικανοποιούν τα κριτήρια, που έχουν καθοριστεί. Τελικά, ο έλεγχος κλεισίματος βρόχων αποτελεί και έναν τρόπο επιλογής του πλήθους των βάσεων που πρέπει τελικά να συμπεριληφθούν στη συνόρθωση των παρατηρήσεων του δικτύου. Παρακάτω δίνεται ο πίνακας 1, στον οποίο παρουσιάζεται για τις 3 φάσεις μέτρησης του δικτύου το πλήθος των μετρημένων βάσεων και το πλήθος αυτών που τελικά επιλέχθηκαν για τη συνόρθωση του δικτύου με βάση τα παραπάνω κριτήρια.

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011			
ΜΕ Τ3		ΧΩΡΙΣ Τ3	
ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ	ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΝ	ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ	ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΝ
68	43	52	31
ΝΟΕΜΒΡΗΣ 2011			
ΜΕ Τ3		ΧΩΡΙΣ Τ3	
ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ	ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΝ	ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ	ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΝ
68	53	52	38
ΜΑΙΟΣ 2012			
ΜΕ Τ3		ΧΩΡΙΣ Τ3	
ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ	ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΝ	ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ	ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΝ
---	---	44	35

Πίνακας 1. Πλήθος μετρημένων και συμμετεχόντων στη συνόρθωση βάσεων

Table 1. Number of bases measured and used for the adjustment

6.3. ΣΥΝΟΡΘΩΣΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ

6.3.1. Συνόρθωση με το λογισμικό Trimble Business Center (TBC)

Μετά την επεξεργασία των βάσεων και την επιλογή αυτών που συμμετέχουν στη συνόρθωση ακολουθεί η επίλυση του δικτύου για κάθε μια φάση μέτρησης. Η επίλυση έγινε και στις τρεις φάσεις με τις ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις (μια σταθερή κορυφή η κορυφή AGN) και τις ίδιες αρχικές συνθήκες (ίδια σταθερή κορυφή). Οι προβολικές συντεταγμένες στο ΕΓΣΑ 87 της κορυφής AGN είναι (στο υψόμετρο περιλαμβάνεται και το ύψος του βάθρου 1,08 m) :

	E (m)	N (m)	Up (m)
AGN	304517,737	4349517,429	970,907

Πίνακας 2. Προβολικές συντεταγμένες ΕΓΣΑ 87 της κορυφής AGN

Table 2. Grid coordinates (GRS 87) of AGN point

Το λογισμικό εκτελεί τη συνόρθωση μέσω της αντίστοιχης εντολής (adjust network) και δίνει ως τελικό αποτέλεσμα τις καρτεσιανές συντεταγμένες των κορυφών στο WGS84 με τις αβεβαιότητες τους, τις γεωδαιτικές συντεταγμένες στο ελλειψοειδές του ΕΓΣΑ 87 και τις προβολικές συντεταγμένες στο ΕΓΣΑ 87 με τις αβεβαιότητες τους. Δίνει επίσης τα στοιχεία των απόλυτων ελλείψεων σφάλματος καθώς επίσης και τις συνορθωμένες τιμές των παρατηρήσεων με τις αβεβαιότητες τους. Παράλληλα με την επίλυση γίνεται και ο ολικός έλεγχος (test χ^2) για επίπεδο εμπιστοσύνης 95 %. Όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στην αναφορά της συνόρθωσης (Network Adjustment Report).

Ο πίνακας των βαρών για τις παρατηρήσεις σχηματίζεται αυτόματα από το λογισμικό. Οι παρατηρήσεις θεωρούνται ανισοβαρείς και το βάρος της καθεμιάς προσδιορίζεται με βάση τα στατιστικά στοιχεία, το μήκος της βάσης και την ποιότητα των παρατηρήσεων.

Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται οι καρτεσιανές συντεταγμένες (X, Y, Z) των κορυφών του δικτύου στο WGS84 με τις αβεβαιότητές τους και για τις 3 φάσεις μέτρησης του δικτύου. Αντίστοιχα στον πίνακα 4 δίνονται οι προβολικές συντεταγμένες (E, N) των κορυφών στην προβολή του ΕΓΣΑ 87 με τις αβεβαιότητές τους και για τις 3 φάσεις μέτρησης

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011						
	X (m)	σ_x (mm)	Y (m)	σ_y (mm)	Z (m)	σ_z (mm)
AGN	4593233,807	0	1831169,279	0	4016683,502	0
A	4595359,981	±12	1833030,678	±7	4013144,183	±11
B	4595352,287	±12	1832955,277	±7	4013187,164	±11
C	4595349,728	±12	1832999,554	±7	4013173,377	±11
FYL	4595403,973	±14	1833040,360	±9	4013094,339	±14
KM	4595155,984	±12	1833170,794	±7	4013323,319	±11
PL	4595388,970	±12	1832902,510	±7	4013170,017	±10
T3	4595134,788	±12	1832758,198	±7	4013584,026	±10
D	4595364,448	±14	1832922,492	±8	4013133,607	±11
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2011						
	X (m)	σ_x (mm)	Y (m)	σ_y (mm)	Z (m)	σ_z (mm)
AGN	4593233,807	0	1831169,279	0	4016683,502	0
A	4595359,975	±8	1833030,669	±5	4013144,170	±7
B	4595352,285	±8	1832955,278	±5	4013187,152	±7
C	4595349,724	±8	1832999,549	±5	4013173,360	±7
FYL	4595403,959	±8	1833040,337	±5	4013094,305	±7
KM	4595155,978	±8	1833170,792	±5	4013323,311	±7
PL	4595388,960	±8	1832902,507	±5	4013170,007	±7
T3	4595134,777	±8	1832758,200	±5	4013584,019	±7
D	4595364,436	±8	1832922,491	±5	4013133,598	±7
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011 (χωρίς T3)						
	X (m)	σ_x (mm)	Y (m)	σ_y (mm)	Z (m)	σ_z (mm)
AGN	4593233,807	0	1831169,279	0	4016683,502	0
A	4595359,976	±12	1833030,677	±8	4013144,178	±10
B	4595352,282	±12	1832955,276	±7	4013187,160	±10
C	4595349,723	±11	1832999,553	±7	4013173,372	±10
FYL	4595403,973	±13	1833040,363	±9	4013094,340	±13
KM	4595155,979	±12	1833170,791	±8	4013323,312	±10
PL	4595388,967	±12	1832902,510	±7	4013170,014	±10
D	4595364,441	±14	1832922,491	±9	4013133,606	±11
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2011 (χωρίς T3)						
	X (m)	σ_x (mm)	Y (m)	σ_y (mm)	Z (m)	σ_z (mm)
AGN	4593233,807	0	1831169,279	0	4016683,502	0
A	4595359,975	±10	1833030,668	±7	4013144,168	±9
B	4595352,284	±10	1832955,277	±6	4013187,150	±9
C	4595349,725	±10	1832999,549	±6	4013173,360	±8
FYL	4595403,958	±10	1833040,337	±7	4013094,304	±9
KM	4595155,977	±10	1833170,792	±7	4013323,310	±9
PL	4595388,960	±10	1832902,507	±7	4013170,006	±9
D	4595364,435	±10	1832922,490	±7	4013133,596	±8
ΜΑΙΟΣ 2012 (χωρίς T3)						
	X (m)	σ_x (mm)	Y (m)	σ_y (mm)	Z (m)	σ_z (mm)
AGN	4593233,807	0	1831169,279	0	4016683,502	0
A	4595359,969	±24	1833030,662	±10	4013144,166	±22
B	4595352,277	±24	1832955,265	±10	4013187,148	±22
C	4595349,717	±24	1832999,538	±10	4013173,355	±22
FYL	4595403,948	±24	1833040,330	±10	4013094,293	±22
KM	4595155,971	±24	1833170,785	±10	4013323,304	±22
PL	4595388,956	±24	1832902,501	±10	4013170,003	±22
D	4595364,429	±24	1832922,477	±10	4013133,590	±22

Πίνακας 3. Τρισδιάστατες Καρτεσιανές συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου και οι αβεβαιότητές τους στο WGS84 για τις τρεις φάσεις μέτρησης επίλυση TBC)

Table 3. 3D coordinates of the network's points in WGS84 and together with their standard deviations for the 3 measuring epochs

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011				
	E (m)	σ_E (mm)	N (m)	σ_N (mm)
AGN	304517,737	0	4349517,429	0
A	305348,361	±5	4345069,024	±6
B	305282,582	±5	4345126,156	±5
C	305324,154	±5	4345105,565	±5
FYL	305339,397	±6	4345002,510	±7
KM	305559,627	±5	4345289,584	±6
PL	305219,443	±5	4345105,255	±5
T3	305192,127	±5	4345609,881	±5
D	305246,617	±6	4345086,095	±6
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2011				
	E (m)	σ_E (mm)	N (m)	σ_N (mm)
AGN	304517,737	0	4349517,429	0
A	305348,354	±4	4345069,019	±5
B	305282,583	±4	4345126,147	±5
C	305324,150	±4	4345105,550	±4
FYL	305339,381	±4	4345002,497	±5
KM	305559,628	±4	4345289,582	±5
PL	305219,440	±4	4345105,254	±5
T3	305192,133	±4	4345609,882	±4
D	305246,620	±4	4345086,095	±5
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011 (χωρίς T3)				
	E (m)	σ_E (mm)	N (m)	σ_N (mm)
AGN	304517,737	0	4349517,429	0
A	305348,362	±6	4345069,023	±7
B	305282,582	±6	4345126,156	±7
C	305324,154	±6	4345105,564	±7
FYL	305339,400	±7	4345002,509	±9
KM	305559,626	±6	4345289,582	±7
PL	3035219,444	±6	4345105,254	±7
D	305246,619	±7	4345086,099	±9
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2011 (χωρίς T3)				
	E (m)	σ_E (mm)	N (m)	σ_N (mm)
AGN	304517,737	0	4349517,429	0
A	305348,354	±5	4345069,018	±6
B	305282,582	±5	4345126,147	±6
C	305324,150	±5	4345105,554	±6
FYL	305339,381	±5	4345002,497	±6
KM	305559,628	±5	4345287,582	±6
PL	305219,444	±5	4345105,253	±6
D	305246,620	±5	4345086,095	±6
ΜΑΙΟΣ 2012 (χωρίς T3)				
	E (m)	σ_E (mm)	N (m)	σ_N (mm)
AGN	304517,737	0	4349517,429	0
A	305348,350	±8	4345069,021	±8
B	305282,574	±8	4345126,152	±8
C	305324,143	±8	4345105,558	±8
FYL	305339,379	±8	4345002,496	±8
KM	305559,625	±8	4345289,582	±8
PL	305219,440	±8	4345105,255	±8
D	305246,610	±8	4345086,097	±8

Πίνακας 4. Συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου και οι αβεβαιότητές τους στην προβολή του ΕΓΣΑ 87 για τις 3 φάσεις μέτρησης (επίλυση TBC)

Table 4. Coordinates of the network's points together with their standard deviations in the projection of the Greek Reference System

6.3.2. Συνόρθωση δικτύου με χρήση κώδικα

Επειδή το λογισμικό TBC δεν δίνει τους πλήρεις πίνακες μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας των συντεταγμένων των κορυφών του δικτύου παρά μόνο τις αβεβαιότητες κρίθηκε σκόπιμο να γίνει, με χρήση κώδικα, επίλυση του δικτύου για τις 3 φάσεις προκειμένου να υπολογιστούν οι πίνακες αυτοί. Επισημαίνεται ότι οι πίνακες είναι απαραίτητοι για την ανίχνευση των στατιστικά σημαντικών μετακινήσεων των κορυφών του δικτύου.

Οι εξισώσεις παρατήρησης προκύπτουν από τις συνιστώσες ΔN και ΔE των βάσεων, που μετρήθηκαν, οι οποίες δίνονται από το λογισμικό TBC κατά την επεξεργασία των βάσεων. Για κάθε μια βάση σχηματίζονται 2 εξισώσεις παρατήρησης της μορφής των σχέσεων (1) και (2) :

$$N_j - N_i = \Delta N_{ij} + v_N \quad (1)$$

$$E_j - E_i = \Delta E_{ij} + v_E \quad (2)$$

Δημιουργούνται συνολικά n εξισώσεις παρατήρησης με αγνώστους m τις συντεταγμένες E, N των κορυφών του δικτύου στην προβολή του ΕΓΣΑ 87 ενώ ο πίνακας L των παρατηρήσεων σχηματίζεται από τις συνιστώσες ΔN, ΔE των βάσεων που συμμετέχουν στη συνόρθωση.

Ο πίνακας των βαρών P σχηματίζεται από τους 2x2 υποπίνακες μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας των βάσεων, οι οποίοι επίσης δίνονται από το λογισμικό TBC.

Η επίλυση και για τις 3 φάσεις έγινε χρησιμοποιώντας τις ίδιες αρχικές συνθήκες με αυτές του προηγούμενου κεφαλαίου 6.3.1.

Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία των επιλύσεων για τις 3 φάσεις μέτρησης του δικτύου.

Φάση μέτρησης	Πλήθος παρατηρήσεων n	Πλήθος αγνωστων παραμέτρων m	Βαθμοί ελευθερίας $r = n - m$
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011	86	16	70
ΝΟΕΜΒΡΗΣ 2011	106	16	90
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011 (χωρίς T3)	62	14	48
ΝΟΕΜΒΡΗΣ 2011 (χωρίς T3)	76	14	62
ΜΑΙΟΣ 2012 (χωρίς T3)	70	14	56

Πίνακας 5. Στατιστικά στοιχεία επιλύσεων δικτύου για τις 3 φάσεις μέτρησης

Table 5. Statistics of network adjustments for the 3 measuring epochs

Στον πίνακα 6 παρουσιάζονται οι καρτεσιανές συντεταγμένες (X, Y, Z) των κορυφών του δικτύου στο WGS84 με τις αβεβαιότητές τους και για τις 3 φάσεις μέτρησης του δικτύου. Αντίστοιχα στον πίνακα 7 δίνονται οι προβολικές συντεταγμένες (E, N) των κορυφών στην προβολή του ΕΓΣΑ 87 με τις αβεβαιότητές τους και για τις 3 φάσεις μέτρησης.

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011						
	X (m)	σ_x (mm)	Y (m)	σ_y (mm)	Z (m)	σ_z (mm)
AGN	4593233,807	0	1831169,279	0	4016683,502	0
A	4595359,981	±6	1833030,678	±4	4013144,183	±5
B	4595352,287	±6	1832955,277	±4	4013187,164	±5
C	4595349,728	±6	1832999,554	±4	4013173,377	±5
FYL	4595403,973	±7	1833040,360	±5	4013094,339	±7
KM	4595155,984	±6	1833170,794	±4	4013323,319	±6
PL	4595388,970	±6	1832902,510	±4	4013170,017	±5
T3	4595134,789	±6	1832758,197	±4	4013584,026	±5
D	4595364,449	±7	1832922,492	±4	4013133,608	±6
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2011						
	X (m)	σ_x (mm)	Y (m)	σ_y (mm)	Z (m)	σ_z (mm)
AGN	4593233,807	0	1831169,279	0	4016683,502	0
A	4595359,976	±4	1833030,668	±3	4013144,169	±4
B	4595352,285	±4	1832955,277	±3	4013187,152	±4
C	4595349,724	±4	1832999,548	±3	4013173,360	±4
FYL	4595403,959	±4	1833040,337	±3	4013094,305	±4
KM	4595155,978	±4	1833170,792	±3	4013323,312	±4
PL	4595388,960	±4	1832902,506	±3	4013170,007	±4
T3	4595134,778	±4	1832758,199	±3	4013584,019	±4
D	4595364,437	±4	1832922,490	±3	4013133,598	±4
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011 (χωρίς T3)						
	X (m)	σ_x (mm)	Y (m)	σ_y (mm)	Z (m)	σ_z (mm)
AGN	4593233,807	0	1831169,279	0	4016683,502	0
A	4595359,976	±6	1833030,677	±4	4013144,180	±5
B	4595352,282	±5	1832955,276	±3	4013187,160	±5
C	4595349,724	±5	1832999,553	±3	4013173,372	±5
FYL	4595403,973	±6	1833040,362	±4	4013094,340	±6
KM	4595155,979	±6	1833170,791	±4	4013323,312	±5
PL	4595388,967	±5	1832902,509	±3	4013170,014	±5
D	4595364,441	±6	1832922,491	±4	4013133,606	±5
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2011 (χωρίς T3)						
	X (m)	σ_x (mm)	Y (m)	σ_y (mm)	Z (m)	σ_z (mm)
AGN	4593233,807	0	1831169,279	0	4016683,502	0
A	4595359,975	±5	1833030,668	±3	4013144,168	±4
B	4595352,284	±5	1832955,277	±3	4013187,151	±4
C	4595349,725	±5	1832999,549	±3	4013173,360	±4
FYL	4595403,958	±5	1833040,336	±3	4013094,305	±5
KM	4595155,977	±5	1833170,791	±3	4013323,310	±5
PL	4595388,960	±5	1832902,507	±3	4013170,006	±4
D	4595364,436	±5	1832922,49	±3	4013133,597	±4
ΜΑΙΟΣ 2012 (χωρίς T3)						
	X (m)	σ_x (mm)	Y (m)	σ_y (mm)	Z (m)	σ_z (mm)
AGN	4593233,807	0	1831169,279	0	4016683,502	0
A	4595359,969	±24	1833030,662	±10	4013144,166	±22
B	4595352,277	±24	1832955,265	±10	4013187,148	±22
C	4595349,717	±24	1832999,538	±10	4013173,355	±22
FYL	4595403,948	±24	1833040,33	±10	4013094,293	±22
KM	4595155,971	±24	1833170,785	±10	4013323,304	±22
PL	4595388,956	±24	1832902,501	±10	4013170,003	±22
D	4595364,429	±24	1832922,477	±10	4013133,590	±22

Πίνακας 6. . Τρισδιάστατες Καρτεσιανές συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου και οι αβεβαιότητες τους στο WGS84 για τις τρεις φάσεις μέτρησης (επίλυση με κώδικα)

Table 6. 3D coordinates of the network's points in WGS84 and together with their standard deviations for the 3 measuring epochs

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011				
	E (m)	σ_E (mm)	N (m)	σ_N (mm)
AGN	304517,737	0	4349517,429	0
A	305348,361	±5	4345069,021	±4
B	305282,581	±5	4345126,153	±4
C	305324,154	±5	4345106,562	±4
FYL	305339,396	±6	4345003,509	±5
KM	305559,629	±5	4345290,586	±4
PL	305219,443	±5	4345105,252	±4
T3	305192,129	±5	4345610,881	±4
D	305246,616	±6	4345086,092	±4
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2011				
	E (m)	σ_E (mm)	N (m)	σ_N (mm)
AGN	304517,737	0	4349517,429	0
A	305348,353	±3	4345069,015	±2
B	305282,582	±3	4345126,144	±2
C	305324,149	±3	4345106,552	±2
FYL	305339,380	±3	4345002,494	±2
KM	305559,628	±3	4345290,578	±2
PL	305219,443	±3	4345105,251	±2
T3	305192,133	±3	4345610,879	±2
D	305246,619	±3	4345086,092	±2
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011 (χωρίς T3)				
	E (m)	σ_E (mm)	N (m)	σ_N (mm)
AGN	304517,737	0	4349517,429	0
A	305348,364	±5	4345069,022	±4
B	305282,585	±5	4345126,165	±4
C	305324,157	±5	4345106,563	±4
FYL	305339,400	±6	4345003,507	±5
KM	305559,628	±6	4345290,583	±4
PL	305219,447	±5	4345105,253	±4
D	305246,624	±7	4345086,099	±5
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2011 (χωρίς T3)				
	E (m)	σ_E (mm)	N (m)	σ_N (mm)
AGN	304517,737	0	4349517,429	0
A	305348,355	±4	4345069,020	±3
B	305282,583	±4	4345126,149	±3
C	305324,151	±4	4345106,556	±3
FYL	305339,381	±4	4345002,498	±3
KM	305559,629	±4	4345290,582	±3
PL	305219,445	±4	4345105,255	±3
D	305246,620	±4	4345086,096	±3
ΜΑΙΟΣ 2012 (χωρίς T3)				
	E (m)	σ_E (mm)	N (m)	σ_N (mm)
AGN	304517,737	0	4349517,429	0
A	305348,349	±6	4345069,022	±5
B	305282,574	±6	4345126,154	±5
C	305324,143	±6	4345106,561	±5
FYL	305339,379	±6	4345002,499	±5
KM	305559,623	±6	4345290,583	±5
PL	305219,440	±6	4345105,257	±5
D	305246,608	±6	4345086,098	±5

Πίνακας 7. Συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου και οι αβεβαιότητές τους στην προβολή του ΕΓΣΑ 87 για τις 3 φάσεις μέτρησης (επίλυση σε κώδικα)

Table 7. Coordinates of the network's points together with their standard deviations in the projection of the Greek Reference System

Κεφάλαιο 7
Προσδιορισμός των οριζόντιων
μετακινήσεων των κορυφών
του δικτύου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΚΟΡΥΦΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

7.1. ΑΠΟΛΥΤΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ

Από τις διαφορές των συντεταγμένων των κορυφών του δικτύου, προσδιορίσθηκε το διάνυσμα της μεταβολής της θέσης τους (δr), για τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα μεταξύ των φάσεων (Αύγουστος .11 ÷ Νοέμβρης .11 και Νοέμβρης .11 ÷ Μάιος .12) καθώς και για το συνολικό χρονικό διάστημα (Αύγουστος .11 ÷ Μάιος .12). Στη συνέχεια προσδιορίσθηκε ο πίνακας μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας του διανύσματος μεταβολής της θέσης των κορυφών σύμφωνα με τη σχέση (3) :

$$V_{\Delta x} = V_x^1 + V_x^2 \quad (3)$$

όπου

$V_{\Delta x}$: ο πίνακας μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας των διαφορών των συντεταγμένων

V_x^1 : ο πίνακας μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας των συντεταγμένων της πρώτης φάσης

V_x^2 : ο πίνακας μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας των συντεταγμένων της δεύτερης φάσης

Με βάση τον πίνακα $V_{\Delta x}$ και το διάνυσμα (δr) έγινε, κατά τα γνωστά, ο έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας της μετακίνησης. Η στατιστική σημαντικότητα ελέγχθηκε με μονοδιάστατο έλεγχο για πιθανότητα 95%. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε για τα χρονικά διαστήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω τόσο για το δίκτυο, που συμπεριλαμβάνει την κορυφή T3, όσο και για το δίκτυο, χωρίς αυτή.

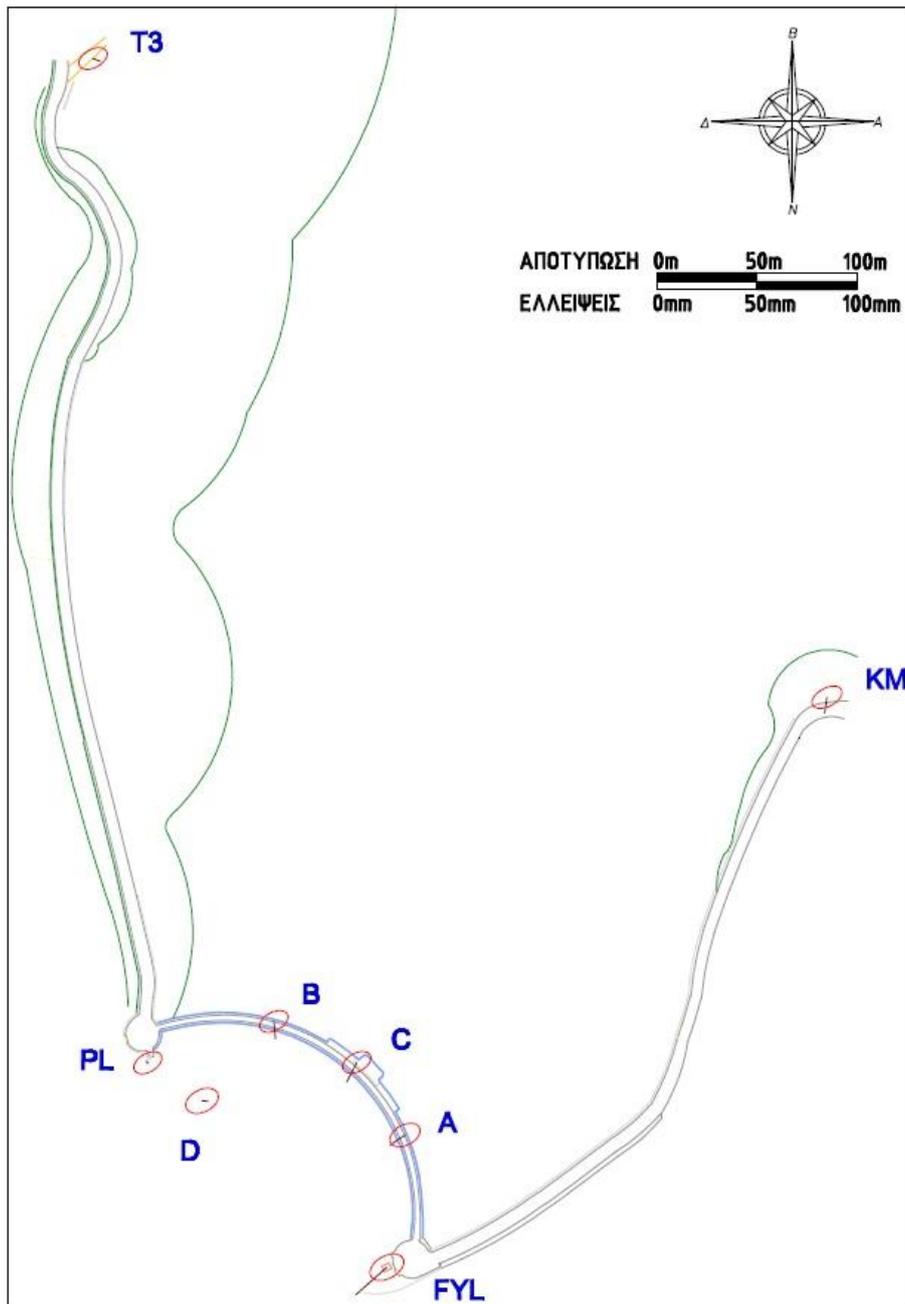
Στον πίνακα 8. δίνονται τα στοιχεία των απόλυτων ελλείψεων σφάλματος των κορυφών του δικτύου (σ_u , σ_v και θ^g), τα διανύσματα μεταβολής της θέσης τους και τα αζιμούθια τους (δr , $\alpha_{\delta r}^g$), καθώς επίσης και τα αποτελέσματα του μονοδιάστατου ελέγχου για πιθανότητα 95%.

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011 - ΝΟΕΜΒΡΗΣ 2011							
ΚΩΔ.	δr (mm)	$\alpha_{\delta r}$ (°)	σ_u (mm)	σ_v (mm)	α (°)	$\sigma_u * z_{95}$ (mm)	ΑΠΟΛΥΤΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ
A	9	262	±6	±4	68,2	12	ΟΧΙ
B	9	194,1	±6	±4	68,3	12	ΟΧΙ
C	11	229,3	±6	±4	68,2	12	ΟΧΙ
FYL	21	253,6	±8	±4	67,1	15	ΝΑΙ
KM	8	208,9	±6	±4	68,7	12	ΟΧΙ
PL	1	140,3	±6	±4	67,6	12	ΟΧΙ
T3	4	124,4	±6	±4	68,4	12	ΟΧΙ
D	3	103,9	±7	±4	70,3	14	ΟΧΙ
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011 - ΝΟΕΜΒΡΗΣ 2011 (χωρίς T3)							
ΚΩΔ.	δr (mm)	$\alpha_{\delta r}$ (°)	σ_u (mm)	σ_v (mm)	α (°)	$\sigma_u * z_{95}$ (mm)	ΑΠΟΛΥΤΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ
A	9	289,4	±7	±4	70,5	14	ΟΧΙ
B	6	211,6	±7	±4	70,5	14	ΟΧΙ
C	9	248,1	±7	±4	70,8	14	ΟΧΙ
FYL	21	272	±8	±4	68,8	15	ΝΑΙ
KM	1	120,7	±7	±4	70,6	14	ΟΧΙ
PL	3	342,3	±7	±4	70,1	14	ΟΧΙ
D	5	264,5	±8	±4	71,7	16	ΟΧΙ
ΝΟΕΜΒΡΗΣ 2011 - ΜΑΙΟΣ 2012 (χωρίς T3)							
ΚΩΔ.	δr (mm)	$\alpha_{\delta r}$ (°)	σ_u (mm)	σ_v (mm)	α (°)	$\sigma_u * z_{95}$ (mm)	ΑΠΟΛΥΤΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ
A	6	326,4	±8	±5	71,2	15	ΟΧΙ
B	11	328,4	±8	±5	71,5	15	ΟΧΙ
C	9	332,8	±7	±5	71,5	14	ΟΧΙ
FYL	2	337,7	±8	±5	72,1	15	ΟΧΙ
KM	6	308,4	±8	±5	71	15	ΟΧΙ
PL	5	322,8	±7	±5	71	15	ΟΧΙ
D	12	308,1	±8	±5	68,9	15	ΟΧΙ
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011 - ΜΑΙΟΣ 2012 (χωρίς T3)							
ΚΩΔ.	δr (mm)	$\alpha_{\delta r}$ (°)	σ_u (mm)	σ_v (mm)	α (°)	$\sigma_u * z_{95}$ (mm)	ΑΠΟΛΥΤΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ
A	15	303,8	±9	±5	71,8	17	ΟΧΙ
B	11	291,2	±9	±5	71,8	17	ΟΧΙ
C	15	209,9	±8	±5	71,9	17	ΟΧΙ
FYL	22	277,1	±9	±6	70,7	19	ΝΑΙ
KM	5	306,2	±9	±5	71,6	17	ΟΧΙ
PL	8	329,1	±9	±5	71,3	17	ΟΧΙ
D	16	296	±10	±6	71,2	19	ΟΧΙ

Πίνακας 8. Οριζόντιες μετακινήσεις των κορυφών του δικτύου για τις 3 φάσεις μέτρησης – Έλεγχος της στατιστικής σημαντικότητάς τους

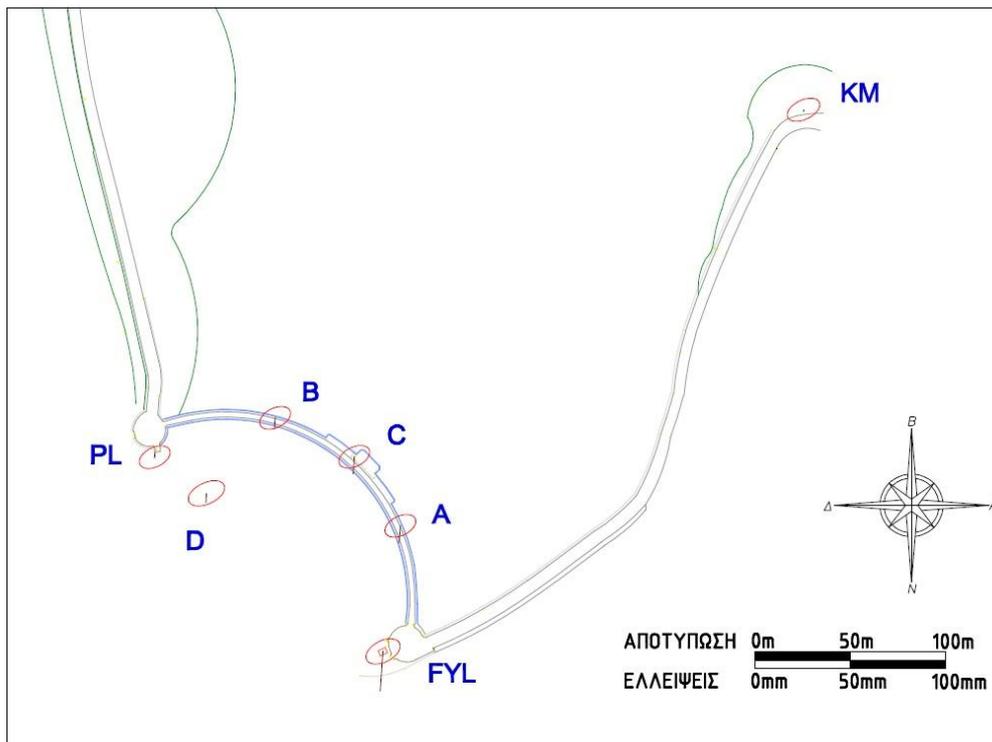
Table 8. Horizontal displacements of the network's points – Test of their statistical significance

Στα σχήματα 9, 10, 11 και 12 παρακάτω, παρουσιάζονται τα διανύσματα μεταβολής θέσης και τα διανύσματα μετακίνησης, με τις αντίστοιχες ελλείψεις σφάλματος για πιθανότητα 39,4%, σε κάθε μια κορυφή του δικτύου ελέγχου. Επίσης στο σχήμα 13 παρουσιάζονται οι τροχιές των μετακινήσεων κατά τις περιόδους Αύγουστος 2011 ÷ Νοέμβρης 2011 ÷ Μάιος 2012.



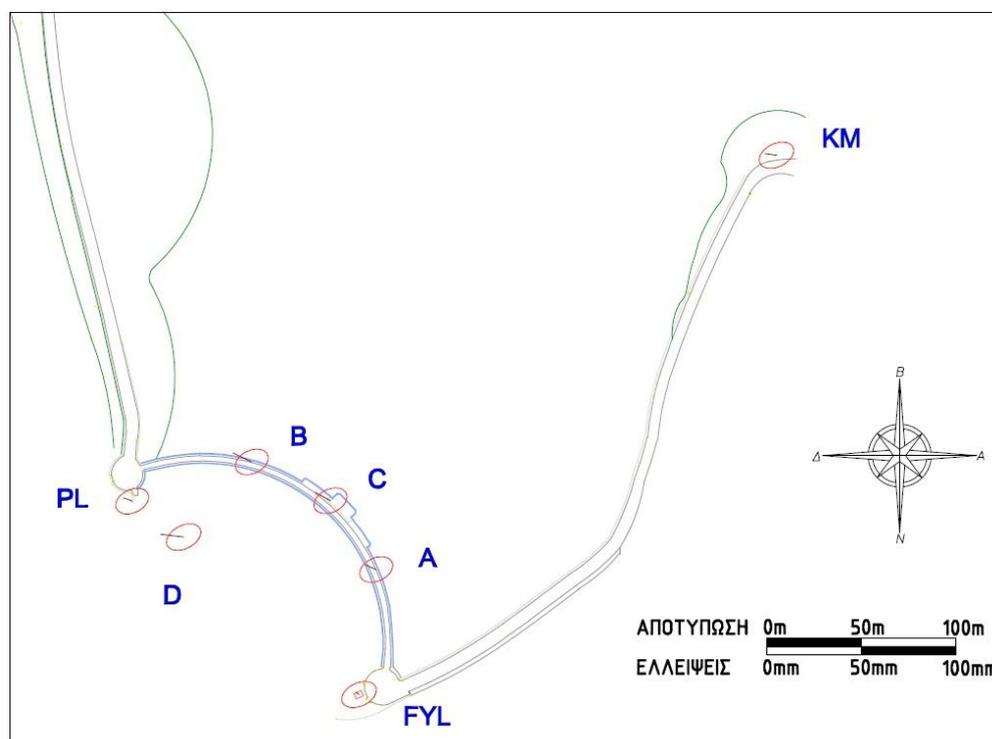
Σχήμα 9. Διανύσματα μετακίνησης, με τις αντίστοιχες ελλείψεις σφάλματος για πιθανότητα 39,4% για το χρονικό διάστημα Αύγουστος - Νοέμβρης 2011

Figure 9. Displacement vectors together with the corresponding error ellipses (confidence level 39,4%) for the time interval August - November 2011



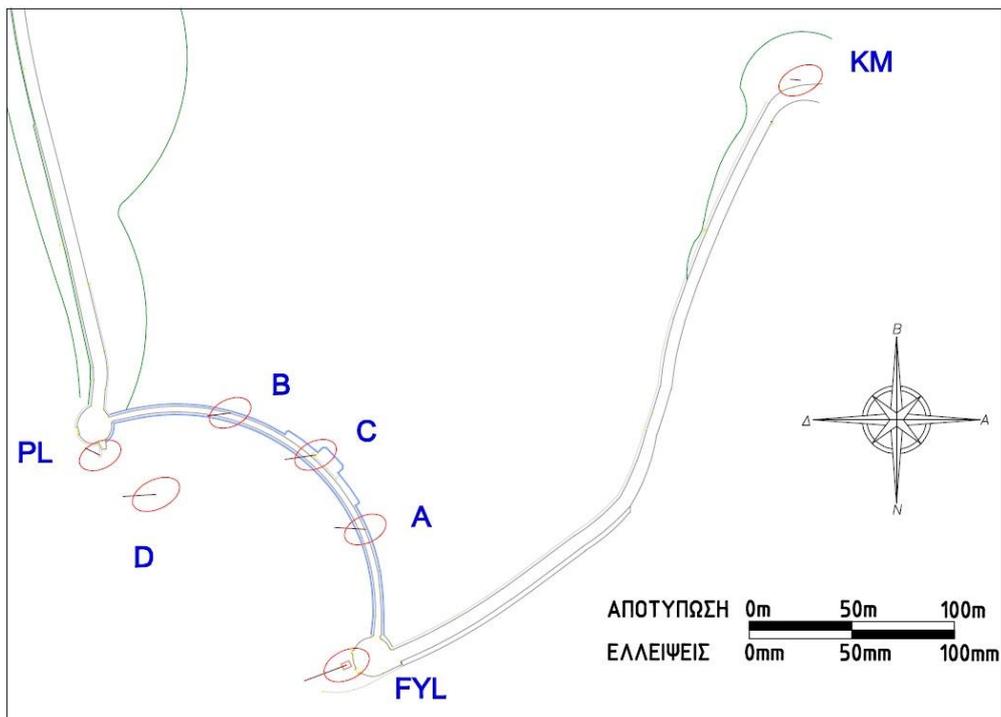
Σχήμα 10. Διανύσματα μετακίνησης, με τις αντίστοιχες ελλείψεις σφάλματος για πιθανότητα 39,4% για το χρονικό διάστημα Αύγουστος - Νοέμβρης 2011 (χωρίς T3)

Figure 10. Displacement vectors together with the corresponding error ellipses (confidence level 39,4%) for the time interval August -November 2011 (without point T3)



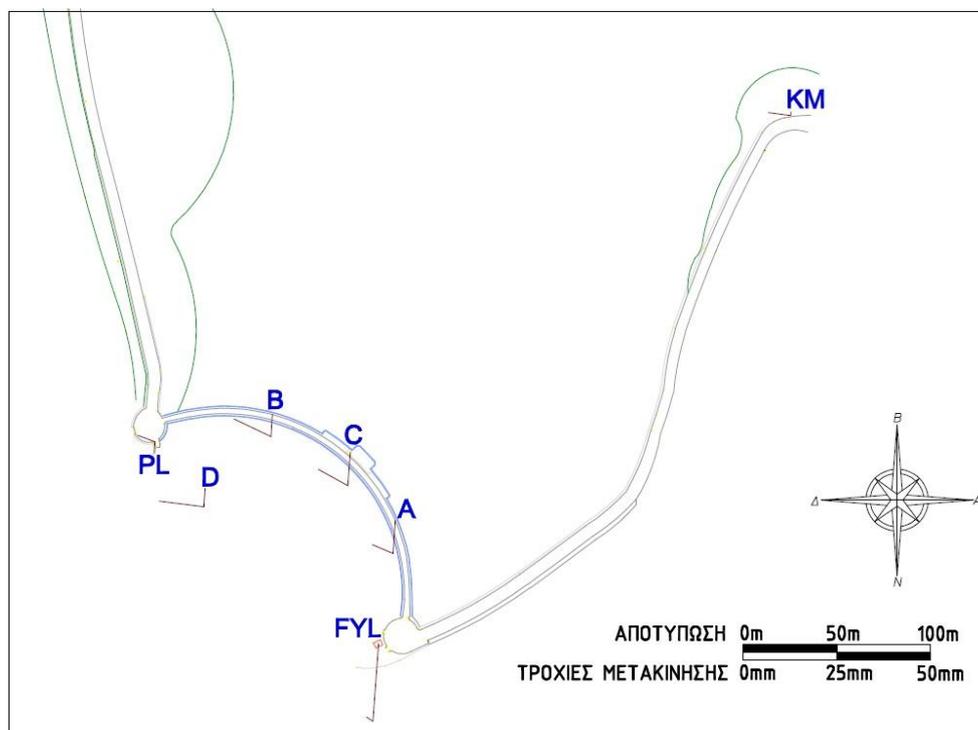
Σχήμα 11. Διανύσματα μετακίνησης, με τις αντίστοιχες ελλείψεις σφάλματος για πιθανότητα 39,4% για το χρονικό διάστημα Νοέμβρης 2011- Μάιος 2012 (χωρίς T3)

Figure 11. Displacement vectors together with the corresponding error ellipses (confidence level 39,4%) for the time interval November 2011-May 2012 (without point T3)



Σχήμα 12. Διανύσματα μετακίνησης, με τις αντίστοιχες ελλείψεις σφάλματος για πιθανότητα 39,4% για το χρονικό διάστημα Αύγουστος 2011- Μάιος 2012 (χωρίς T3)

Figure 12. Displacement vectors together with the corresponding error ellipses (confidence level 39,4%) for the time interval August 2011-May 2012 (without point T3)



Σχημα 13. Τροχιές μετακίνησης για το συνολικό διάστημα παρακολούθησης (Αύγουστος 2011 ÷ Μάιος 2012).

Figure 13. Trajectories of the displacements orbit for the whole time monitoring (August 2011- May 2012)

7.2. ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ

Από τις διαφορές των συντεταγμένων των κορυφών του δικτύου, προσδιορίστηκε το διάνυσμα της σχετικής μεταβολής (δr) των κορυφών των βάσεων που παρουσιάζονται στον πίνακα 9, για τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα μεταξύ των φάσεων μέτρησης (Αύγουστος .11 ÷ Νοέμβρης .11 και Νοέμβρης .11 ÷ Μάιος .12) καθώς και για το συνολικό χρονικό διάστημα (Αύγουστος .11 ÷ Μάιος .12). Στη συνέχεια προσδιορίστηκε ο πίνακας μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας του διανύσματος της σχετικής μεταβολής των κορυφών των βάσεων σύμφωνα με τη σχέση :

$$V_{\delta X} = J * V_{\Delta X} * J^T \quad (4)$$

όπου

$V_{\delta X}$: ο πίνακας μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας της διαφοράς ΔX και ΔY

$V_{\Delta X}$: ο πίνακας μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας των διαφορών των συντεταγμένων

$$J = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Με βάση τον πίνακα $V_{\delta X}$ και το διάνυσμα (δr) έγινε, κατά τα γνωστά, ο έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας της σχετικής μετακίνησης. Η στατιστική σημαντικότητα ελέγχθηκε με μονοδιάστατο έλεγχο για πιθανότητα 95 %. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε μεταξύ όλων των φάσεων μετρήσεων τόσο για το δίκτυο, που συμπεριλαμβάνει την κορυφή T3, όσο και για το δίκτυο, χωρίς αυτή.

Στον πίνακα 9 δίνονται επίσης τα στοιχεία των σχετικών ελλείψεων σφάλματος των βάσεων του δικτύου (σ_u , σ_v και θ^g), τα διανύσματα της σχετικής μεταβολής της θέσης των κορυφών των βάσεων και τα αζιμούθια τους (δr , $\alpha_{\delta r}^g$), καθώς επίσης και τα αποτελέσματα του μονοδιάστατου ελέγχου για πιθανότητα 95%.

Κεφάλαιο 7. Προσδιορισμός των οριζόντιων μετακινήσεων των κορυφών του δικτύου

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011 - ΝΟΕΜΒΡΗΣ 2011							
ΠΛΕΥΡΑ	δr (mm)	$\alpha_{\delta r}$ (°)	σ_u (mm)	σ_v (mm)	α (°)	$\sigma_u * z_{95}$ (mm)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ
T3 A	12	281	3	2	78,6	5	ΝΑΙ
T3 B	8	227,7	3	2	81,4	5	ΝΑΙ
T3 C	12	252,1	3	2	78,4	5	ΝΑΙ
T3 FYL	24	264,2	5	3	65,1	10	ΝΑΙ
T3 KM	8	243,5	3	2	80,6	6	ΝΑΙ
T3 PL	4	322,2	3	2	75,4	5	ΟΧΙ
T3 D	2	357,2	4	2	78,5	8	ΟΧΙ
A B	9	123,8	3	2	81,4	5	ΝΑΙ
A C	6	167	3	2	78,4	5	ΝΑΙ
A FYL	12	247,1	5	3	65,1	10	ΝΑΙ
A KM	7	124,7	3	2	80,6	6	ΝΑΙ
A PL	10	65,4	3	2	75,4	5	ΝΑΙ
A D	12	71,6	4	2	78,5	8	ΝΑΙ
B C	6	284,3	2	1	74,4	4	ΝΑΙ
B FYL	18	279,6	5	3	62,8	10	ΝΑΙ
B KM	2	320,9	3	2	78,5	5	ΟΧΙ
B PL	8	2,8	2	1	71,9	5	ΝΑΙ
B D	9	15,5	4	2	77,7	8	ΝΑΙ
C FYL	12	277,1	5	3	63,3	10	ΝΑΙ
C KM	4	68,2	3	2	75,6	6	ΟΧΙ
C PL	11	32,3	2	1	70,7	5	ΝΑΙ
C D	13	42,8	4	2	77	8	ΝΑΙ
FYL KM	16	74,7	6	3	65,4	11	ΝΑΙ
FYL PL	22	55,2	5	3	63,2	10	ΝΑΙ
FYL D	24	59,2	6	3	67,1	12	ΝΑΙ
KM PL	8	12,7	3	2	75,6	6	ΝΑΙ
KM D	9	30,2	4	2	74,1	8	ΝΑΙ
PL D	2	96,5	4	2	74,1	8	ΟΧΙ
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011 - ΝΟΕΜΒΡΗΣ 2011 (χωρίς T3)							
ΠΛΕΥΡΑ	δr (mm)	$\alpha_{\delta r}$ (°)	σ_u (mm)	σ_v (mm)	α (°)	$\sigma_u * z_{95}$ (mm)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ
D A	5	310,7	6	3	78,3	11	ΟΧΙ
D B	5	159,4	5	3	79,5	10	ΟΧΙ
D C	5	232,6	5	3	79,2	11	ΟΧΙ
D FYL	16	274,1	7	4	70,8	14	ΝΑΙ
D KM	5	72,6	6	3	78,3	11	ΟΧΙ
D PL	5	28,2	6	3	78	11	ΟΧΙ
A B	9	133,3	8	4	71,7	16	ΟΧΙ
A C	6	167,4	5	3	79,5	10	ΟΧΙ
A FYL	12	258,4	5	3	79,2	11	ΝΑΙ
A KM	10	92	7	4	70,8	14	ΟΧΙ
A PL	8	74	6	3	78,3	11	ΟΧΙ
B C	5	293,8	6	3	78	11	ΟΧΙ
B FYL	18	290,6	8	4	71,7	16	ΝΑΙ
B KM	6	20,2	2	1	74,3	4	ΝΑΙ
B PL	8	392,9	5	2	61,7	10	ΟΧΙ
C FYL	13	289,2	3	2	75,2	6	ΝΑΙ
C KM	10	53,2	2	1	72,2	5	ΝΑΙ
C PL	9	30,5	7	4	70,5	14	ΟΧΙ
FYL KM	22	73,7	5	2	62,8	10	ΝΑΙ
FYL PL	20	64,6	3	2	74,4	6	ΝΑΙ
KM PL	3	337	2	1	72,3	5	ΟΧΙ
ΝΟΕΜΒΡΗΣ 2011 - ΜΑΙΟΣ 2012 (χωρίς T3)							
ΠΛΕΥΡΑ	δr (mm)	$\alpha_{\delta r}$ (°)	σ_u (mm)	σ_v (mm)	α (°)	$\sigma_u * z_{95}$ (mm)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ
D A	6	90,1	3	2	58,7	7	ΟΧΙ
D B	4	33,5	3	2	58,8	6	ΟΧΙ
D C	5	53,3	3	2	61,2	7	ΟΧΙ
D FYL	10	102,2	4	2	65,5	8	ΝΑΙ
D KM	6	107,8	4	2	60,6	7	ΟΧΙ

Μελέτη της κινηματικής συμπεριφοράς του φράγματος
της λίμνης Πλαστήρα με δορυφορικές μεθόδους

D PL	7	96,1	4	2	59,6	7	OXI
A B	5	331	8	5	68,9	15	OXI
A C	3	344,3	3	2	58,8	6	OXI
A FYL	4	120,8	3	2	61,2	7	OXI
A KM	2	197,6	4	2	65,5	8	OXI
A PL	1	153,3	4	2	60,6	7	OXI
B C	2	102,5	4	2	59,6	7	OXI
B FYL	9	126,3	8	5	68,9	15	OXI
B KM	6	147,4	2	1	75,7	4	NAI
B PL	6	134	3	2	75,2	6	OXI
C FYL	7	131,5	3	2	71,7	5	NAI
C KM	5	161,7	2	1	69,8	5	OXI
C PL	4	145,9	8	5	71,5	15	OXI
FYL KM	4	493,2	3	2	76,3	6	OXI
FYL PL	3	314	3	2	72,3	5	OXI
KM PL	1	23,1	3	2	71,8	5	OXI
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2011 - ΜΑΙΟΣ 2012 (χωρίς T3)							
ΠΛΕΥΡΑ	δr (mm)	α_r (°)	σ_u (mm)	σ_v (mm)	α (°)	σ_u * z₉₅ (mm)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ
D A	2	25,5	6	3	74,5	12	OXI
D B	5	107,6	6	3	75,4	11	OXI
D C	2	151,2	6	3	75,1	12	OXI
D FYL	8	239,9	8	4	70	15	OXI
D KM	11	91,7	6	3	74,4	12	OXI
D PL	10	69,4	6	3	74,7	12	OXI
A B	5	135,7	10	6	71,2	19	OXI
A C	3	193,7	6	3	75,4	11	OXI
A FYL	10	237,1	6	3	75,1	12	OXI
A KM	10	203,8	8	4	70	15	OXI
A PL	8	79,6	6	3	74,4	12	OXI
B C	4	289,9	6	3	74,7	12	OXI
B FYL	11	263,4	10	6	71,2	19	OXI
B KM	7	80,5	3	1	76,3	5	NAI
B PL	6	42	5	3	64,5	11	OXI
C FYL	8	251,9	3	2	71,4	6	NAI
C KM	10	83,8	3	2	70,5	5	NAI
C PL	9	59,1	9	5	71,8	17	OXI
FYL KM	18	69,6	5	3	65,6	11	NAI
FYL PL	18	55,7	3	2	71,6	6	NAI
KM PL	4	357,4	3	2	71,5	6	OXI

Πίνακας 9. Σχετικές Οριζόντιες μετακινήσεις για τις 3 φάσεις μέτρησης – Έλεγχος της στατιστικής σημαντικότητάς τους

Table 9. Relative Horizontal displacements – Test of their statistical significance

Κεφάλαιο 8
Χρονοδιάγραμμα
εργασιών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΧΡΟΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΡΓΑΣΙΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά το χρονοδιάγραμμα των εργασιών πεδίου και γραφείου που απαιτήθηκαν για την ολοκλήρωση της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

Πρώτο στάδιο ήταν η αναζήτηση στοιχείων για το φράγμα, προγενέστερες γεωδαιτικές μετρήσεις και άλλα στοιχεία, που θα μπορούσαν να είναι χρήσιμα καθώς επίσης και η αναγνώριση της περιοχής μελέτης για την ίδρυση του δικτύου. Για το σκοπό αυτό αναζητήθηκαν τα αρχεία κατασκευής και παρακολούθησης του φράγματος από τις αρμόδιες υπηρεσίες της ΔΕΗ τόσο στην πόλη της Αθήνας όσο και στις εγκαταστάσεις του υδροηλεκτρικού εργοστασίου στην περιοχή της Καρδίτσας. Ακολούθως επιλέχθηκαν ήδη υπάρχοντα ή υλοποιήθηκαν νέα σημεία για την ίδρυση του δικτύου με τα κριτήρια, που αναφέρονται στο κεφάλαιο 5, αφού προηγήθηκε η αναγνώριση της περιοχής μελέτης. Συνολικά οι εργασίες αυτές διήρκησαν **πέντε μέρες**.

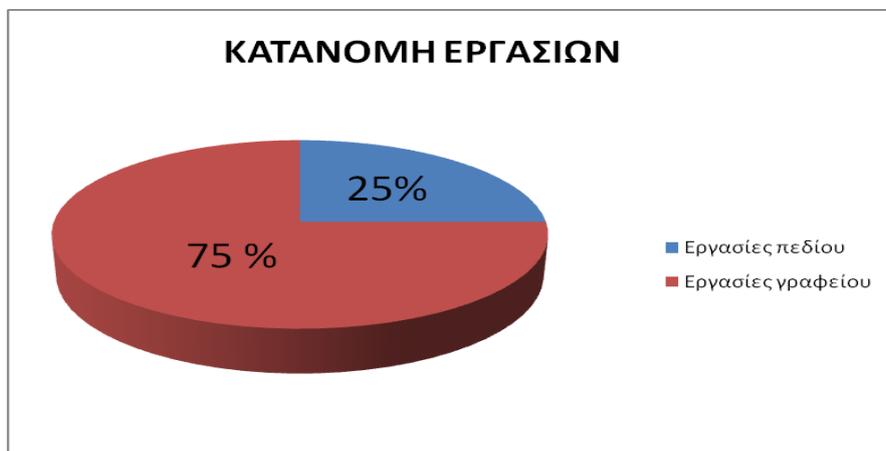
Επόμενο στάδιο είναι η προεργασία και η μέτρηση του δικτύου. Ο έλεγχος της ορατότητας και γεωμετρίας των δορυφόρων, που προηγείται των μετρήσεων με τη βοήθεια του λογισμικού που συνοδεύει τους δέκτες, διήρκησε μία μέρα για κάθε φάση μέτρησης. Ακολούθησε η μέτρηση του δικτύου, που ολοκληρώθηκε σε επτά ημέρες για τις δύο πρώτες φάσεις και σε έξι για την Τρίτη. Συνολικά οι εργασίες πεδίου διήρκεσαν **είκοσι ημέρες** με μέσο όρο εργασιών υπαίθρου 8-9 ώρες ανά ημέρα.

Ακολούθησε το στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων όλων των φάσεων των μετρήσεων. Στο διάστημα αυτό ολοκληρώθηκε η επεξεργασία των βάσεων, η συνόρθωση των παρατηρήσεων, η επίλυση του δικτύου με τον αντίστοιχο στατιστικό έλεγχο τόσο με το λογισμικό Trimble Business Center όσο και σε κώδικα, κατά φάση μέτρησης. Αυτό το στάδιο ολοκληρώθηκε με τον προσδιορισμό των απόλυτων και σχετικών μετακινήσεων των κορυφών του δικτύου. Συνολικά αυτό το στάδιο διήρκεσε **δώδεκα ημέρες**.

Τέλος για τη συγγραφή του παρόντος τεύχους, με το οποίο ολοκληρώθηκαν οι εργασίες γραφείου, απαιτήθηκαν συνολικά περίπου **δύο μήνες**.

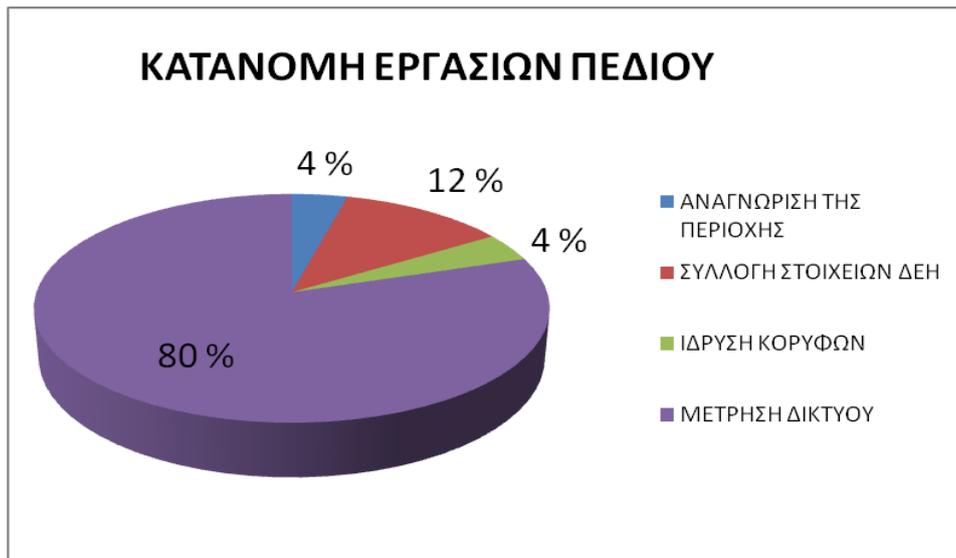
Συνολικά απαιτήθηκαν **25 μέρες εργασιών πεδίου** και **75 μέρες εργασιών γραφείου**. Παρακάτω φαίνεται η κατανομή των εργασιών σε γραφήματα.

Στα επόμενα γραφήματα 1, 2 και 3, δίνεται η κατανομή των εργασιών πεδίου και γραφείου, καθώς επίσης και η κατανομή των επιμέρους εργασιών για κάθε μια από αυτές



Γράφημα 1. Κατανομή εργασιών

Graph 1. Work distribution



Γράφημα 2. Κατανομή εργασιών πεδίου
Graph 2. Field Work Distribution



Γράφημα 3. Κατανομή εργασιών γραφείου
Graph 3. Office Work Distribution

Κεφάλαιο 9
Συμπεράσματα -
Προτάσεις

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

9.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Σε σχέση με το σχεδιασμό του δικτύου, τον προγραμματισμό και τις μετρήσεις :
 - ❖ Οι κορυφές του δικτύου, που βρίσκονται στη στέψη του φράγματος έχουν ικανοποιητικά ανοιχτό ορίζοντα ώστε να εξασφαλίζεται η παρακολούθησή τους με δορυφορικό δέκτη. Από την άλλη, οι κορυφές, που βρίσκονται στα πρηνή και κοντά στο οδικό δίκτυο, που οδηγεί στο φράγμα, έχουν περιορισμένο πεδίο από τη μεριά των πρηνών. Το γεγονός αυτό «ακυρώνει» κατά ένα μέρος την καλή γεωμετρία των δορυφόρων στον ουράνιο θόλο.
 - ❖ Η επιλογή σημείων ελέγχου περιμετρικά και εκτός του σώματος του φράγματος δίνει τη δυνατότητα για αξιόπιστα συμπεράσματα, όχι μόνο της κινηματικής συμπεριφοράς του φράγματος αλλά και των εδαφικών τμημάτων της εγγύς περιοχής του. (ευστάθεια πρηνών)
 - ❖ Η αλλαγή της γεωμετρίας του δικτύου ελέγχου όπως διαπιστώθηκε από την απώλεια της κορυφής T3, επιδρά, έστω και οριακά στην ποιότητα των τελικών αποτελεσμάτων και επομένως και στην ευαισθησία του δικτύου.
 - ❖ Από την ποιότητα των τελικών αποτελεσμάτων διαπιστώνεται ότι η επιλογή της ημέρας και της ώρας των μετρήσεων επιδρούν καθοριστικά στην τελική ευαισθησία του δικτύου.
 - ❖ Από τον έλεγχο κλεισίματος βρόχων φάνηκε ότι στις μετρήσεις δικτύου με δύο δέκτες είναι σημαντικό οι βάσεις με κοινή τη μία κορυφή να μετρώνται κρατώντας ακίνητο το δέκτη σε αυτή την κορυφή και μετακινώντας τον άλλον. Έτσι ελαχιστοποιείται η επίδραση των σφαλμάτων κέντρωσης. Τα όρια ανοχής για το σφάλμα κλεισίματος των βρόχων, που ορίζονται από το χρήστη είτε σε ppm είτε σε mm στο WGS84 ή στην οριζοντιογραφία αντίστοιχα, πρέπει να λαμβάνουν υπ' όψη τις ακρίβειες προσδιορισμού των βάσεων και φυσικά το σκοπό της εργασίας. Με βάση αυτά, το όριο των 30 mm που επιλέχθηκε κρίνεται ρεαλιστικό για τη συγκεκριμένη εργασία.
- Σε σχέση με τις μετακινήσεις που ανιχνεύονται:
 - ❖ Η ελάχιστη στατιστικά σημαντική μετακίνηση που ανιχνεύεται στο συγκεκριμένο δορυφορικό δίκτυο, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, είναι της τάξης των 15 mm όπως προκύπτει και από τον πίνακα 8.
 - ❖ Στο χρονικό διάστημα **Αύγουστος 2011 - Νοέμβρης 2011** ανιχνεύεται στατιστικά σημαντική μετακίνηση της τάξης των 20mm στην κορυφή FYL του δικτύου. Στο διάστημα **Νοέμβριος 2011 – Μάιος 2012** δεν ανιχνεύονται στατιστικά σημαντικές μετακινήσεις σε καμία από τις κορυφές του δικτύου. Τέλος, στο συνολικό διάστημα παρακολούθησης του φράγματος **Αύγουστος 2011 – Μάιος 2012**, ανιχνεύεται στατιστικά σημαντική μετακίνηση της τάξης των 20mm στην κορυφή FYL του δικτύου..
 - ❖ Στο χρονικό διάστημα **Αύγουστος 2011 - Νοέμβρης 2011** (Σχήμα 9 και 10), παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας κατά 16°C ενώ η στάθμη της λίμνης παρουσιάζει ταπείνωση κατά τρία μέτρα. Στο ίδιο χρονικό διάστημα η τάση της μετακίνησης παρατηρείται προς τα κατόντη του φράγματος. και μάλιστα τα διανύσματα μεταβολής θέσης των κορυφών της στέψης συγκλίνουν προς το κέντρο του τόξου του φράγματος (Σχήμα 9). Έτσι προκύπτει το συμπέρασμα ότι το δεσπόζον αίτιο της μετακίνησης είναι η θερμοκρασιακή μεταβολή.

- ❖ Στο χρονικό διάστημα **Νοέμβρης 2011 - Μάιος 2012**, παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10 °C και παράλληλα η στάθμη ανεβαίνει. Σε αυτό το διάστημα τα διανύσματα μετακίνησης έχουν βορειοδυτική κατεύθυνση, σχεδόν παράλληλα με την εφαπτομένη στο τόξο του φράγματος (Κεφ. 7, Σχήμα 11)
 - ❖ Από την εξέταση του προσανατολισμού των διανυσμάτων μεταβολής θέσης των κορυφών (Κεφ. 7, Πίνακας 8, Σχήμα 9, 10, 11 και 12) φαίνεται ότι, εκτός από τις υδροστατικές πιέσεις, επιδρούν σημαντικά οι θερμοκρασιακές μεταβολές. Πιο συγκεκριμένα, στο χρονικό διάστημα **Αύγουστος 2011 - Νοέμβρης 2011**, η πτώση της στάθμης του ταμιευτήρα δημιουργεί τάσεις για μετακίνηση προς τα ανάντη. Ωστόσο η τάση μετακίνησης, που παρατηρείται, είναι προς τα κατόντη. Αυτό πιθανότατα συμβαίνει λόγω της συστολής του σκυροδέματος υπό την επίδραση της πτώσης της θερμοκρασίας (κατά 16°C) σε συνδυασμό με την καμπυλότητα του φράγματος. Στο χρονικό διάστημα **Νοέμβρης 2011 - Μάιος 2012** η στάθμη του νερού ανεβαίνει και η μέση θερμοκρασία αέρα αυξάνεται (κατά 10 °C). Πιθανόν η θερμοκρασία του νερού, για την οποία δεν υπάρχουν συγκεκριμένα στοιχεία, να επιδρά - σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία του αέρα - στο σκυρόδεμα έτσι ώστε να προκύπτει αυτή η μετακίνηση.
 - Σε σχέση με την παρακολούθηση των μετακινήσεων του φράγματος :
 - ❖ Η εξέλιξη των γεωδαιτικών οργάνων και μεθόδων στις επίγειες μεθόδους δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού οριζοντιογραφικών συντεταγμένων με ακρίβεια της τάξης του $\pm 1-2$ mm και έχει μειώσει σημαντικά το χρόνο εργασιών τόσο υπαίθρου όσο και γραφείου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, αντίστοιχο δίκτυο μετρήθηκε με επίγεια μέθοδο ταυτόχρονα με τη δορυφορική τις περιόδους Αύγουστος 2011 και Νοέμβρη 2011. Οι μετρήσεις διήρκεσαν δύο μέρες για κάθε φάση έναντι έξι έως επτά με τη δορυφορική μέθοδο, που όμως με βέλτιστο προγραμματισμό μετρήσεων μπορεί να μειωθεί σημαντικά.
 - ❖ Με βάση τη σύγκριση με τα αποτελέσματα διπλωματικής εργασίας, που εκπονήθηκε ταυτόχρονα με την παρούσα [Νταλούκα Κρυσταλία, Αθήνα, Ιούνιος 2012] και αφορά στην παρακολούθηση του φράγματος με επίγειες μεθόδους, προκύπτουν τα εξής:
 - (α) Στο επίγειο δίκτυο οι αβεβαιότητες προσδιορισμού των κορυφών είναι σαφώς μικρότερες ($\pm 1 \div 2$ mm). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ευαισθησία του δικτύου να είναι μεγαλύτερη (± 6 mm για επίπεδο εμπιστοσύνης 95 %), που είναι και το επιθυμητό.
 - (β) Η επιλογή της κορυφής FYL ως ημισταθερή (α_{PL-FYL} σταθερή διεύθυνση) του επίγειου δικτύου είχε ως αποτέλεσμα τη μη ανίχνευση της μετακίνησης της, που είναι σημαντική, της τάξης των 20 mm, όπως προκύπτει από την παρούσα διπλωματική εργασία.
 - (γ) Στο δορυφορικό δίκτυο δίνεται η δυνατότητα επιλογής σταθερής κορυφής εκτός της περιοχής του φράγματος, αφού δεν απαιτείται η αμοιβαία ορατότητα των κορυφών ελέγχου.
- Σύμφωνα με τα παραπάνω κρίνεται αναγκαίος ο συνδυασμός επίγειων και δορυφορικών μεθόδων, επίγειες για τον έλεγχο της εγγύς περιοχής και του σώματος του φράγματος και δορυφορικές για τον έλεγχο της ευρύτερης περιοχής και των σημείων αναφοράς του επίγειου δικτύου.

9.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα προκύπτουν οι ακόλουθες προτάσεις :

- Προτείνεται η πύκνωση του δορυφορικού δικτύου ελέγχου, με σημεία ελέγχου

πάνω στο σώμα του φράγματος από την κατάντη πλευρά για την πιο ολοκληρωμένη παρακολούθηση του. Η θέση των σημείων αυτών μπορεί να συσχετισθεί με την θέση των εγκατεστημένων εκκρεμών καθ' όλο το ύψος του φράγματος.

- Οι μετρήσεις για την παρακολούθηση του φράγματος προτείνεται να γίνονται τουλάχιστον δύο φορές το χρόνο, μία την περίοδο προς το τέλος της άνοιξης, όπου οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 5 έως 15 βαθμούς Κελσίου και ο ταμιευτήρας είναι στη μέγιστη στάθμη (μέγιστη τροφοδοσία της λεκάνης απορροής από επιφανειακά και υπόγεια ύδατα), και μία στο τέλος του καλοκαιριού που οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 20 έως 25 βαθμούς Κελσίου και ο ταμιευτήρας είναι στην ελάχιστη στάθμη (τέλος περιόδου ξηρασίας και μεγάλης παροχής για άρδευση του Θεσσαλικού κάμπου). Αν επιλεγεί και τρίτη φάση μέτρησης, προτείνεται οι μετρήσεις να γίνουν στο μέσο του χειμώνα οπότε η θερμοκρασία του περιβάλλοντος βρίσκεται στους - 5°C
- Ταυτόχρονα με τη μέτρηση του δικτύου οριζοντίου ελέγχου, προτείνεται να πραγματοποιείται και έλεγχος της κινηματικής συμπεριφοράς του φράγματος κατά την κατακόρυφη έννοια με ίδρυση και μέτρηση δικτύου κατακόρυφου ελέγχου, που θα περιλαμβάνει και κάποιες από τις κορυφές του δικτύου οριζοντίου ελέγχου. Η μέτρηση του δικτύου κατακόρυφου ελέγχου μπορεί να γίνει με συνδυασμό διπλής γεωμετρικής χωροστάθμησης και τριγωνομετρικής υψομετρίας όπου κρίνεται απαραίτητο
- Στην περίπτωση των δορυφορικών παρατηρήσεων, προτείνεται η επέκταση του δικτύου με ίδρυση κορυφών ελέγχου στην ευρύτερη περιοχή του φράγματος και πάνω από το επίπεδο του οδικού άξονα, όπου η μορφολογία των πρηνών επιτρέπει πιο ανοιχτό οριζοντα για τους δέκτες. Με αυτόν τον τρόπο θα υπάρχει καλύτερη παρακολούθηση της ευστάθειας των πρηνών. Για το σκοπό αυτό μπορούν να αξιοποιηθούν βάθρα με σύστημα εξαναγκασμένης κέντρωσης, που υπάρχουν στην περιοχή από την κατασκευή του φράγματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επέκταση του δικτύου έχει μεγαλύτερη σημασία στα ανάντη του φράγματος, αφού η περίπτωση έντονων κατολισθητικών φαινομένων προς τον ταμιευτήρα μπορεί να επιφέρει δυσμενείς καταστάσεις για το φράγμα, ακόμα και την αστοχία του.
- Τέλος, προτείνεται να διερευνηθεί η παρακολούθηση της πλέον κρίσιμης περιοχής του σώματος του φράγματος, που είναι η κεντρική ζώνη πλάτους όσο είναι το πλάτος των υπερχειλιστών, με σάρωση αυτής της περιοχής είτε με εικονογεωδαιτικό σταθμό είτε με laser scanner. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στην επιλογή του σημείου ή των σημείων, από τα οποία θα γίνεται η σάρωση προκειμένου να αποφευχθούν πολύ πλάγιες σκοπεύσεις, που επιδρούν αρνητικά στο αποτέλεσμα. Για αυτό τον λόγο, η θέση της κορυφής D του δικτύου ελέγχου ενδείκνυται καθώς προσεγγίζει τον άξονα συμμετρίας του φράγματος. Έτσι, θα είναι δυνατή η ένταξη των παρατηρούμενων μετακινήσεων στο ίδιο σύστημα αναφοράς με εκείνο του δικτύου ελέγχου.

Βιβλιογραφία

1. Αγατζά - Μπαλοδήμου Α.Μ. (2005), Θεωρία Σφαλμάτων και Συνορθώσεις Ι, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα.
2. Αγατζά - Μπαλοδήμου Α.Μ. (2005), Θεωρία Σφαλμάτων και Συνορθώσεις ΙΙ, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα.
3. Γεωργόπουλος Γ., Δογγούρης Σ., Λάμπρου Ε., Μπαλοδήμος Δ., Πανταζής Γ., (2005), Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας, Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα.
4. Δημόπουλος Δ., Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., Στεφανάκος Ι.Π., Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Λέκτορας Ε.Μ.Π., «Υπερχειλιστές και εκκενωτές πυθμένα στα τέσσερα παλαιότερα φράγματα της ΔΕΗ από σκυρόδεμα» .
5. Καραθανάση Φλώρα, (2009), «Επέκταση δικτύου GPS για τον έλεγχο μετακινήσεων στις περιοχές Νέο Φάληρο – Μοσχάτο - Καλλιθέα», Διπλωματική εργασία, Τομέας Τοπογραφίας, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα.
6. Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ., Παρακολούθηση παραμορφώσεων φραγμάτων με γεωδαιτικές μεθόδους , Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα.
7. Νταλούκα Κρυσταλία, (2012), «Προσδιορισμός των οριζόντιων μετακινήσεων του φράγματος της Λίμνης Πλαστήρα με επίγειες γεωδαιτικές μεθόδους», Διπλωματική εργασία, Τομέας Τοπογραφίας, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα.
8. Πυθαρούλη Σ., (2007), Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Πατρών., «Μελέτη της Μακροχρόνιας Παραμόρφωσης του Φράγματος Κρεμαστών με βάση ανάλυση Γεωδαιτικών Δεδομένων και Μεταβολών Στάθμης Ταμιευτήρα».
9. Ρόζος Δημ., (2007), Τεχνική Γεωλογία ΙΙ, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων - Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
10. Τζιτζή Σ. Π., Μηχανολόγος Μηχανικός, ΔΕΗ ΑΕ, Διεύθυνση Περιβάλλοντος Παραγωγής/Τομέας ΥΗΣ., «Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οφέλη από την κατασκευή των μεγάλων φραγμάτων της Δ.Ε.Η. Α.Ε.».
11. Τσόγκας Χρήστος, Τσόγκα Ελισσάβετ, (1990), «Υδροδυναμικά Έργα - Φράγματα», Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
12. Φιλίντας Αγ.Θ, Υ.Δ., Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου. - Καθηγητής Εφ./Ε.Σ., Τμήμα Γεωργικών Μηχανών & Αρδεύσεων, ΤΕΙ Λάρισας., Πολύζος Σερ. Θ., Λέκτορας, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφ. Ανάπτυξης, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. «Φράγματα, λειτουργίες οικοσυστήματος και περιβαλλοντικές επιπτώσεις».
13. Φωτίου Α., Πικριδάς Χ., (2006), «GPS και γεωδαιτικές εφαρμογές», Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
14. Αρχείο Δ.Ε.Η., Δ.Ε.Η. Υ.Ε.Κ.Ε.Τ., Φράγμα Κακαβακίων 1962, Συμπεριφορά Φράγματος Ταυρωπού Ιούνιος 1982, ΥΗΣ ΤΑΥΡΩΠΟΥ.
15. 1^ο Πανελλήνιο συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων (ΤΕΕ, ΤΕΕ – Τμ. Κεντρ. & Δυτικής Θεσσαλίας, 13 – 15 Νοεμβρίου 2008, Λάρισα)
16. Κοντογιάννη Βάια, (2005), «Η γεωδαιτική μέθοδος παρακολούθησης σηράγγων, τεκμηρίωση της μεθόδου και ανάλυση παρατηρήσεων», Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
17. Alba M., et al. (2010), «Structural monitoring of a large dam by terrestrial

laser scanner»

18. Rueger J. (1986) «Overview of geodetic deformation measurements of dams»

19. Yamaguchi Y. et al. (2009) «Utilization of GPS for exterior deformation measurement of embankment dams»

Ιστογραφία

20. portal.tee.gr

21. ecourses.dbnet.ntua.gr

22. el.wikipedia.org

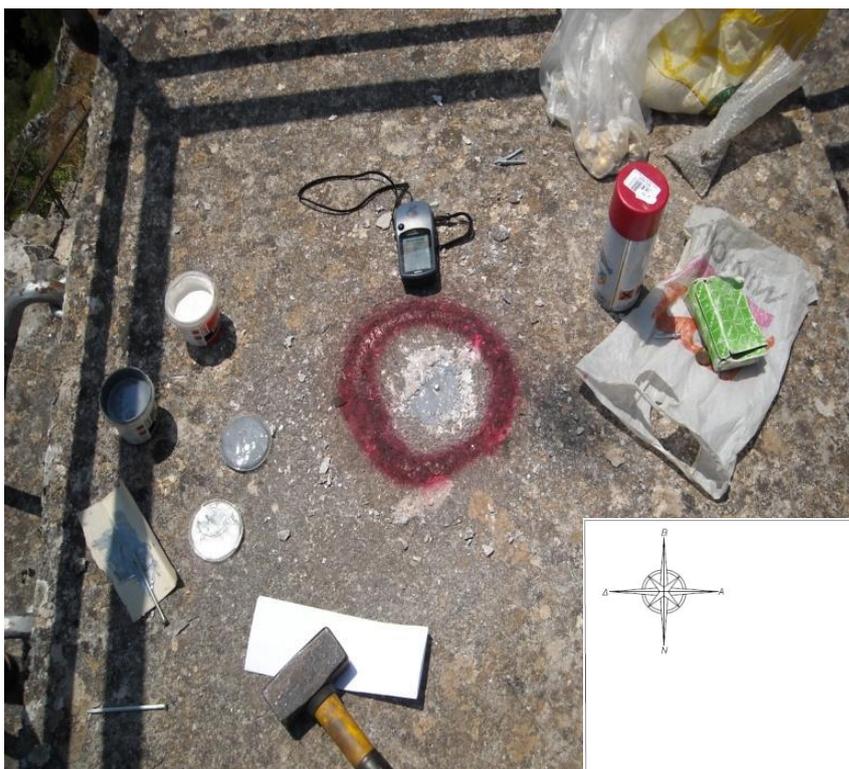
23. www.ktimatologio.gr

24. Εικόνες google για «φράγματα»

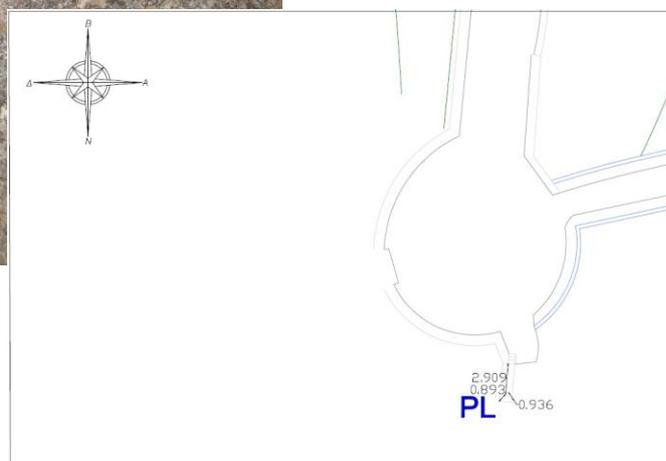
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι
Τεκμηρίωση κορυφών δικτύου

1. PL

X (m)	Y (m)	Z (m)
4595388,97	1832902,510	4013170,017
E (m)	N (m)	H (m)
305219,443	4345105,252	795,030



ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ



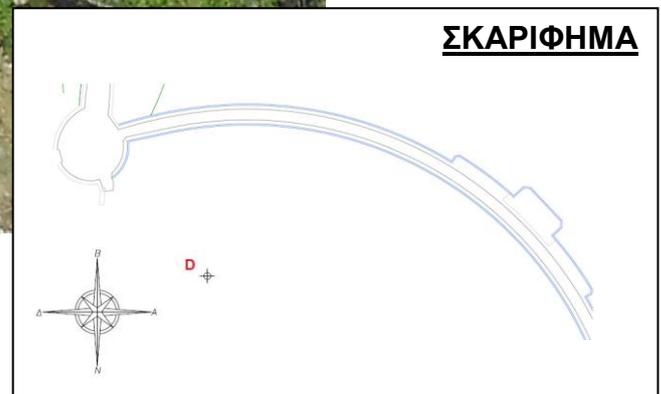
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Η κορυφή PL υλοποιήθηκε με καρφί, ενισχυμένο με εποξειδική ρητίνη πάνω σε κεφαλόσκαλο.

Βρίσκεται αριστερά της στέψης του φράγματος από καπάντη και σε απόσταση 14m από το μνημείο «Πλαστήρα».

2. D

X (m)	Y (m)	Z (m)
4595364,449	1832922,492	4013133,608
E (m)	N (m)	H (m)
305246,616	4345086,092	760,091



ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

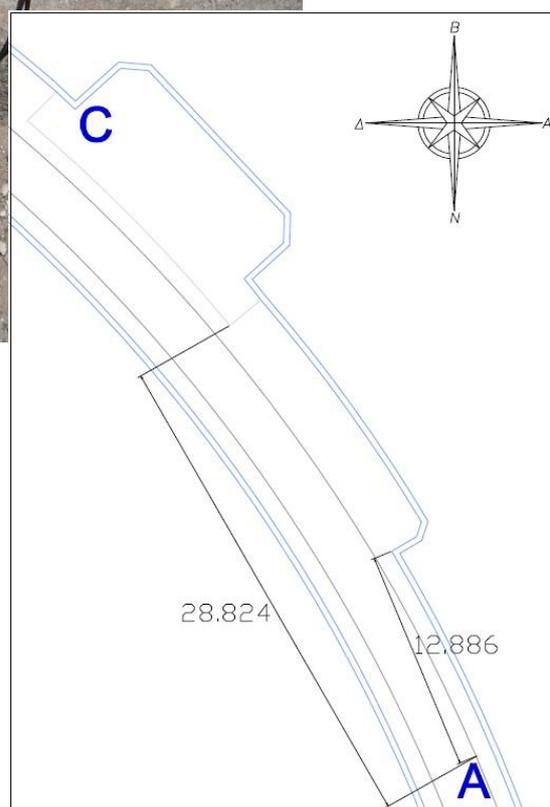
Το βάθρο (ύψους 1,5 m) βρίσκεται στα κατάντη του φράγματος, στο μέσο περίπου της σκάλας πρόσβασης στη βάση του, στο δυτικό πρηνές του φράγματος. Το βάθρο φέρει σύστημα εξαναγκασμένης κέντρωσης.

3. A

X (m)	Y (m)	Z (m)
4595359,981	1833030,678	4013144,183
E (m)	N (m)	H (m)
305348,361	4345069,021	794,605



ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ



ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Η κορυφή A υλοποιήθηκε με καρφί, ενισχυμένο με εποξειδική ρητίνη, στο ρείθρο του πεζοδρομίου της στέψης του φράγματος.

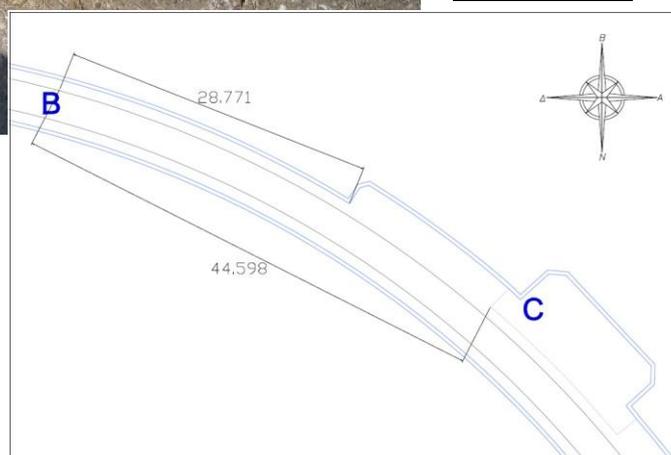
Βρίσκεται στην ανατολική μεριά της στέψης, και σε απόσταση 67m από το Φυλάκιο.

4. Β

X (m)	Y (m)	Z (m)
4595352,287	1832955,277	4013187,164
E (m)	N (m)	H (m)
305282,581	4345126,153	794,622



ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ



ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

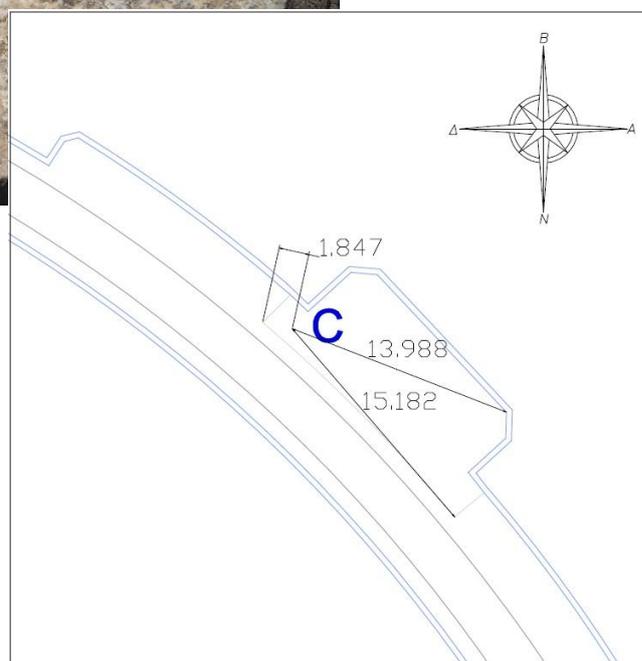
Η κορυφή Β υλοποιήθηκε με καρφί, ενισχυμένο με εποξειδική ρητίνη, στο ρήθρο του πεζοδρομίου της στέψης του φράγματος. Βρίσκεται στη δυτική μεριά της στέψης και σε απόσταση 74m από το μνημείο «Πλαστήρα».

5. C

X (m)	Y (m)	Z (m)
4595349,728	1832999,554	4013173,377
E (m)	N (m)	H (m)
305324,154	4345105,562	796,761



ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ



ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Το βάθρο βρίσκεται στο μέσο περίπου της στέψης του φράγματος. Στην κεφαλή του φέρει σύστημα εξαναγκασμένης κέντρωσης.

6. FYL

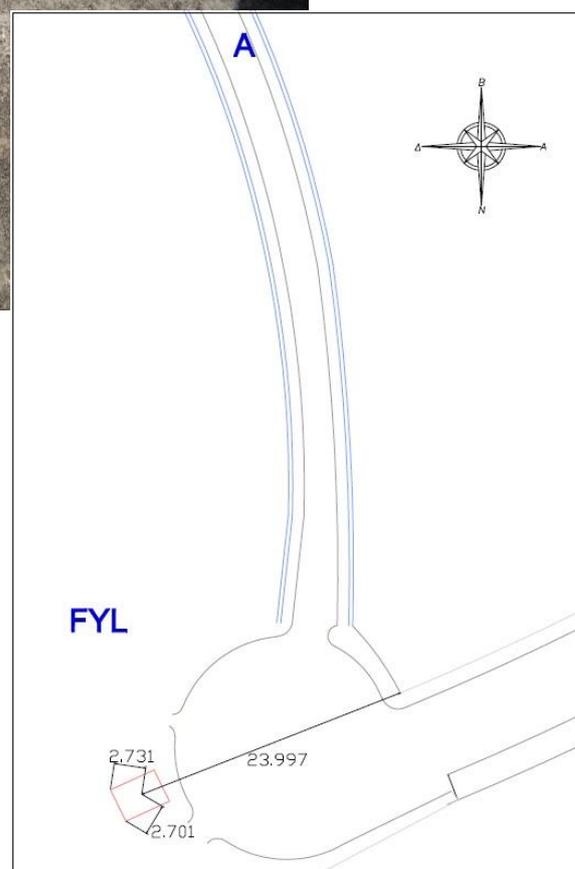
X (m)	Y (m)	Z (m)
4595403,973	1833040,360	4013094,339
E (m)	N(m)	H (m)
305339,396	4345002,509	794,470



ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ

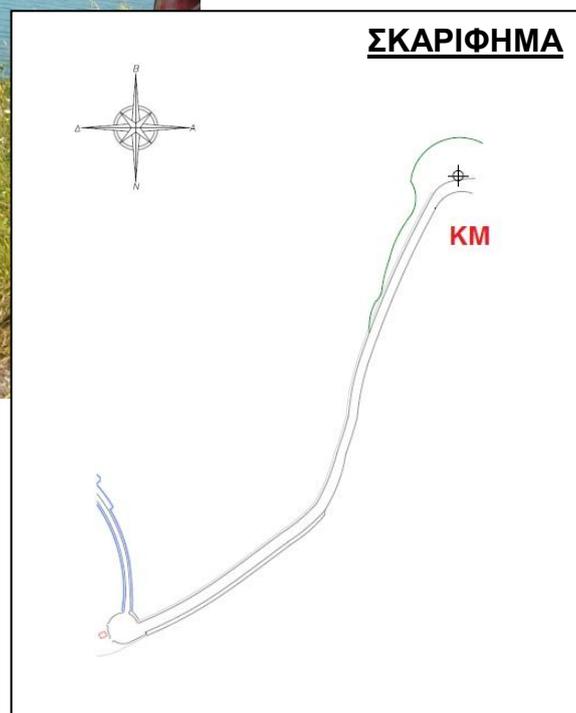
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Η κορυφή FYL υλοποιήθηκε με καρφί, ενισχυμένο με εποξειδική ρητίνη, στη σκεπή του φυλακίου του φράγματος.



7. ΚΜ

X (m)	Y (m)	Z (m)
4595155,984	1833170,794	4013323,319
E (m)	N (m)	H (m)
305559,629	4345289,586	801,347



ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Υλοποιείται με ορειχάλκινη κατασκευή (μπουλόνη) με πόντα στο κέντρο σιδερένιας κατασκευής τοποθετημένης πάνω σε βάθρο από οπλισμένο σκυρόδεμα. Βρίσκεται βορειοανατολικά, στα ανάντη του φράγματος δίπλα στον κύριο οδικό άξονα της περιοχής.

8. AGN

X (m)	Y (m)	Z (m)
4593233,807	1831169,279	4016683,502
E (m)	N (m)	H (m)
304517,737	4349517,429	970,907



ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Τριγωνομετρικό σημείο της ΓΥΣ στην περιοχή Προφήτης Ηλίας στο χωριό Νεοχώρι με το χαρακτηριστικό μπρούτζινο ορειχάλκινο σήμα της ΓΥΣ πάνω σε βάθρο ύψους 1,08 m. Το βάθρο βρίσκεται στον περίβολο του ξενοδοχείου ΑΓΝΑΝΤΙ.

