Παρακολούθηση παραμορφώσεων φραγμάτων με γεωδαιτικές μεθόδους

Ε. ΛΑΜΠΡΟΥ

Δρ Αγρ.- Τοπογράφος Μηχ. Ε.Μ.Π., Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Γ. ΠΑΝΤΑΖΗΣ

Δρ Αγρ.- Τοπογράφος Μηχ. Ε.Μ.Π., Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Λέζεις κλειδιά: γεωδαισία, παραμορφώσεις, υψομετρικό δίκτυο, τρισδιάστατο δίκτυο, GPS

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχρονική παρακολούθηση και ο έλεγχος της κινηματικής συμπεριφοράς ενός φράγματος αποτελεί ένα από τα πεδία εφαρμογής της γεωδαισίας. Η ανάπτυξη και ο εκσυγχρονισμός των γεωδαιτικών μεθόδων και των οργάνων παρακολούθησης των παραμορφώσεων τα τελευταία χρόνια, με τη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, παρέχει ακρίβεια της τάξης των λίγων χιλιοστών. Στην εργασία αυτή γίνεται παρουσίαση διάφορων μεθόδων, που εφαρμόζονται για την παρακολούθηση φραγμάτων και των τρόπων σήμανσης των σημείων ελέγχου ώστε να εξασφαλίζεται η μονιμότητα στο χρόνο και η ακρίβεια των μετρήσεων. Παρουσιάζεται επίσης η εφαρμογή γεωδαιτικών μεθόδων στην παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς του φράγματος του Κούρη στη Κύπρο. Αναλύεται η ίδρυση, μέτρηση και επίλυση ενός δικτύου κατακορύφου ελέγχου και ενός δικτύου τριδιάστατου ελέγχου σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές μέτρησης. Προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα τόσο για την αποτελεσματικότητα των εφαρμοζόμενων μεθόδων όσο και για την κινηματική συμπεριφορά του φράγματος.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας σε όλους τους τομείς κατά το δεύτερο μισό του εικοστού αιώνα οδήγησε στην κατασκευή μεγάλων τεχνικών και βιομηχανικών έργων με υψηλές απαιτήσεις σε ακρίβεια σχεδιασμού και εκτέλεσης. Μεγάλα σε μέγεθος και έκταση τεχνικά έργα (π.χ. μεγάλες γέφυρες, σιλό, φράγματα) με ειδικές απαιτήσεις χάραξης στη φάση της κατασκευής, αλλά και παρακολούθησης της συμπεριφοράς τους κατά τη φάση λειτουργίας απαιτούν βελτιωμένες μεθοδολογίες γεωδαιτικών μετρήσεων. Επίσης η εξέλιξη της τεχνολογίας οδήγησε στη βελτίωση των γεωδαιτικών οργάνων μέτρησης, με αποτέλεσμα η επιστήμη της γεωδαισίας να μπορεί πλέον να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις ακριβείας των έργων αυτών.

Ένα ιδιαίτερο κεφάλαιο στις εφαρμογές της παρακολούθησης παραμορφώσεων έχει εισάγει η χρήση του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού. 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.

Οι γεωδαιτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων σε τεχνικά έργα περιλαμβάνουν κατά περίπτωση την ίδρυση και μέτρηση οριζόντιων, κατακόρυφων ή τριδιάστατων τοπικών γεωδαιτικών δικτύων ελέγχου. Είναι δυνατός ο προσδιορισμός της μεταβολής των συντεταγμένων στο χώρο, σημείων ελέγχου στο έδαφος ή σε τεχνικά έργα με επίγειες ή δορυφορικές γεωδαιτικές μεθόδους. Οι γεωδαιτικές μετρήσεις έχουν ακρίβεια της τάξης των λίγων mm, απαιτούν επεξεργασία για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, ελέγχου δίνεται η ποιότητα των αποτελεσμάτων, η πληροφορία σχετικά με τις μετακινήσεις των σημείων ελέγχου δίνεται για συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης και μπορούν να συνδυαστούν και με γεωτεχνικές οργανομετρήσεις σε ενιαία επίλυση {10}.

2. ΓΕΩΛΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Οι γεωδαιτικές μέθοδοι για την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς φραγμάτων διακρίνονται σε επίγειες και δορυφορικές. Όσον αφορά στις επίγειες μεθόδους μπορεί να γίνει:

- Τδρυση τριδιάστατων, οριζοντιογραφικών ή κατακορύφου ελέγχου δικτύων στο σώμα του φράγματος ή και στην ευρύτερη περιοχή.
- Συνεχής παρακολούθηση με σύγχρονους ρομποτικούς γεωδαιτικούς σταθμούς, μόνιμα τοποθετημένων σημείων στο κυρίως σώμα του φράγματος.
- Σάρωση της επιφάνειας του φράγματος με γεωδαιτικούς σταθμούς που μετρούν μήκη χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα (reflectorless) ή σαρωτές (laser scanner).

Στις δορυφορικές μεθόδους γίνεται ίδρυση ενός δικτύου σημείων αντίστοιχου των τριδιάστατων επίγειων δικτύων ελέγχου για την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς ταυτόχρονα και στις τρεις διαστάσεις.

2.1 Επίγεια γεωδαιτικά δίκτυα

Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και επιμέλεια στην επιλογή της θέσης των κορυφών των επίγειων γεωδαιτικών δικτύων. Τα κυριότερα κριτήρια επιλογής τους για την παρακολούθηση παραμορφώσεων σε φράγματα είναι:

- Χαρακτηριστικές κατάλληλες θέσεις ώστε να καλύπτουν και να εξασφαλίζουν την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς των φραγμάτων και της ευρύτερης περιοχής τους.
- Εύκολη πρόσβαση, ώστε να μπορεί να μεταφερθεί ο κατάλληλος γεωδαιτικός εξοπλισμός.
- Αμοιβαία ορατότητα μεταξύ τους ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες σκοπεύσεις (οριζοντιογραφικά και τριδιάστατα δίκτυα).
- Το σταθερό σημείο του δικτύου να επιλέγεται σε τέτοια θέση, ώστε να εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία της κινηματικής συμπεριφοράς του, σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία στο φράγμα.

2.1.1 Δίκτυα κατακορύφου ελέγχου

Τα δίκτυα κατακορύφου ελέγχου (υψομετρικά δίκτυα) χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της κινηματικής συμπεριφοράς ενός φράγματος σε κατακόρυφη μόνο διεύθυνση (ανύψωση ή καθίζηση). Για την υλοποίησή τους χρησιμοποιούνται ειδικές ορειχάλκινες κατασκευές (μπουλόνια) διαφόρων μεγεθών στις οποίες εδράζεται ο χωροσταθμικός πήχυς (σταδία) με μοναδικό τρόπο.

Στα δίκτυα αυτά οι μετρήσεις αποβλέπουν στον προσδιορισμό των υψομετρικών διαφορών μεταξύ των σημείων ελέγχου και στην επίλυση ενός δικτύου με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων {1}, {2}. Έτσι υπολογίζονται τα υψόμετρά τους και η ακρίβεια του προσδιορισμού τους, που σήμερα μπορεί να είναι της τάξης του ±1mm.

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με τη μέθοδο της ψηφιακής γεωμετρικής χωροστάθμησης χρησιμοποιώντας ψηφιακό χωροβάτη και κωδικοποιημένες σταδίες. Όταν οι αποστάσεις είναι μεγάλες ή έντονο το τοπογραφικό ανάγλυφο εφαρμόζεται η μέθοδος της Τριγωνομετρικής Υψομετρίας Ακριβείας { 7} χρησιμοποιώντας ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό και παρελκόμενα ή η μέθοδος της Ειδικής Τριγωνομετρικής Υψομετρίας {9}.

Η επιλογή των υψομετρικών συνδέσεων μεταξύ των σημείων ελέγχου προϋποθέτει τη διαδικασία της βελτιστοποίησης με τη βοήθεια της οποίας επιλέγεται ο συνδυασμός των συνδέσεων που πρέπει να πραγματοποιηθούν ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια με τη μικρότερη χρονική επιβάρυνση. Η μέτρηση του δικτύου επαναλαμβάνεται σε διάφορες χρονικές στιγμές (φάσεις). Ακολουθεί ο υπολογισμός της μεταβολής της υψομετρικής θέσης των κορυφών του δικτύου μεταξύ δύο διαδοχικών φάσεων και ο έλεγχος της απόλυτης και σχετικής μεταβολής της θέσης τους, για ένα συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης.

Με τα δίκτυα αυτά είναι δυνατός ο προσδιορισμός κατακόρυφων μεταβολών από λίγα mm έως

1cm, ανάλογα με τη μορφή του δικτύου, την εφαρμοζόμενη μέθοδο μέτρησης και την παρεχόμενη ακρίβεια των οργάνων που θα χρησιμοποιηθούν.

2.1.2 Δίκτυα οριζοντίου και τριδιάστατου ελέγχου

Τα γεωδαιτικά δίκτυα οριζοντίου ελέγχου χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς ενός φράγματος στις δύο διαστάσεις (επίπεδο). Η εξέλιξη των γεωδαιτικών σταθμών στην ευχρηστία και η αύξηση της ακρίβειας μέτρησης των κατακόρυφων γωνιών και μηκών επιτρέπουν σήμερα την εξέλιξη των δικτύων αυτών σε τριδιάστατα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση των παραμορφώσεων ενός φράγματος και στις τρεις διαστάσεις. Η απόσταση μεταξύ των κορυφών του τριδιάστατου τοπικού δικτύου είναι συνήθως μερικές εκατοντάδες μέτρα. Η σήμανση των σημείων ελέγχου γίνεται με ειδικές κατασκευές. Έτσι διευκολύνεται η τοποθέτηση του κατάλληλου γεωδαιτικού εξοπλισμού για την πραγματοποίηση των μετρήσεων, εξασφαλίζεται η μονιμότητα και σταθερότητα των σημείων στο χώρο και στο χρόνο καθώς και ο μοναδικός ορισμός του σημείου ελέγχου σε όλες τις φάσεις των μετρήσεων. Συνήθως χρησιμοποιούνται:

- ειδικά βάθρα (εικ. 1α) τα οποία φέρουν στην κεφαλή τους κατάλληλο κοχλία στον οποίο προσαρμόζεται κάθε φορά ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός.
- Πλακέτες με προεξοχικό κοχλία, οι οποίες πακτώνονται στο σώμα του φράγματος (εικ. 1β) ή σε άλλη σταθερή θέση (τοίχος αντιστήριξης, κ.λ.π)
- Ειδικές βάσεις πάκτωσης στο έδαφος και φορητοί στυλεοί στήριξης των οργάνων (εικ. 1γ).



Εικόνα 1. Σήμανση σημείου τριδιάστατου δικτύου

Πραγματοποιούνται μετρήσεις μηκών, οριζόντιων γωνιών ή διευθύνσεων και κατακόρυφων γωνιών μεταξύ των σημείων του δικτύου, χρησιμοποιώντας σύγχρονους ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς.

Μετά από κατάλληλη επεξεργασία με τη ΜΕΤ (περίπτωση μεταβολής συντεταγμένων) {1}, {2} προσδιορίζονται τόσο οι συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου όσο και οι αβεβαιότητές τους για κάθε φάση μέτρησης. Η επίλυση γίνεται σε αυθαίρετο τοπικό σύστημα αναφοράς θεωρώντας σταθερό ένα σημείο και μια διεύθυνση (ελάχιστες δεσμεύσεις). Ακολουθεί ο υπολογισμός της μεταβολής της θέσης (οριζοντιογραφικά και υψομετρικά) των κορυφών του δικτύου και ο έλεγχος της απόλυτης και σχετικής μεταβολής της θέσης τους, για ένα συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Έτσι είναι δυνατός ο ταυτόχρονος προσδιορισμός της μεταβολής της θέσης κάθε σημείου και στις τρεις διαστάσεις για τιμές που κυμαίνονται από μερικά mm έως 1cm.

2.1.3 Αυτόματη παρακολούθηση

Οι σύγχρονοι γεωδαιτικοί σταθμοί παρέχουν δυνατότητα προγραμματισμού ώστε να ανιχνεύουν και να μετρούν συγκεκριμένους στόχους (ανακλαστήρες) σε τακτά χρονικά διαστήματα, που είτε ορίζονται εκ των προτέρων είτε ελέγχονται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή από το γραφείο. Έτσι μπορεί να γίνει εγκατάσταση ειδικών φορέων στόχων ή ανακλαστήρων οι οποίοι πακτώνονται στο σώμα του φράγματος (εικόνα 2).



Εικόνα 2. Αυτόματη παρακολούθηση δικτύου στόχων

Τα σημεία αυτά μετρούνται από δύο ή τρία τέτοια όργανα ταυτόχρονα με την ίδια πάντα σειρά μια και οι σταθμοί αυτοί έχουν τη δυνατότητα αναγνώρισης κάθε στόχου με κωδικό ώστε να γνωρίζει ο χρήστης ποιος στόχος μετράται κάθε στιγμή. Η διαδικασία μπορεί να επαναλαμβάνεται με εκ των προτέρων προγραμματισμό της συχνότητας μέτρησης ή με την εντολή μέσω ενός Η/Υ από το γραφείο. Οι μετρήσεις μεταφέρονται αυτόματα από το σταθμό σε Η/Υ και σε πρόγραμμα επίλυσης υπολογίζοντας τις συντεταγμένες των σημείων καθώς και τις αβεβαιότητές τους για κάθε φάση μέτρησης και ακολουθεί η επεξεργασία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων όπως προηγούμενα (§2.1.2).

2.2 Σάρωση επιφάνειας

Η δυνατότητα των ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών να μετρούν μήκη χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα με ακρίβεια που σήμερα φθάνει τα ±2mm, επιτρέπει τη σάρωση της επιφάνειας του φράγματος με συγκεκριμένο βήμα (σε οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση). Έτσι μπορεί να δημιουργηθεί το τριδιάστατο μοντέλο της επιφάνειάς του για κάθε διαφορετική χρονική στιγμή. Είναι λοιπόν δυνατός ο υπολογισμός της μεταβολής της μορφής της επιφάνειάς του για συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης.

Επίσης σάρωση της επιφάνειας μπορεί να γίνει με τους σύγχρονους σαρωτές laser και την άμεση δημιουργία του τριδιάστατου μοντέλου του σώματος του φράγματος. Η ακρίβεια μέτρησης είναι της τάξης των λίγων cm.

Πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι η ακρίβεια και η ορθότητα της μέτρησης μήκους πάνω σε μια επιφάνεια χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα, εξαρτάται από πλήθος παραμέτρων, όπως την υφή της επιφάνειας, το χρώμα, την απόσταση, το μέγεθος της επιφάνειας πρόσπτωσης αλλά και το μέγεθος της προσπίπτουσας δέσμης laser, τη γωνία πρόσπτωσης, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και χρειάζεται ιδιαίτερη επιφύλαξη ως προς την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος.

2.3. Δορυφορικά γεωδαιτικά δίκτυα

Οι δορυφορικές γεωδαιτικές μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας δέκτες του συστήματος GPS, αποβλέπουν στον προσδιορισμό των διανυσμάτων στο χώρο, μεταξύ των κορυφών του τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου και φυσικά είναι ανεξάρτητες από την αμοιβαία ορατότητα μεταξύ των κορυφών του δικτύου.

Η σήμανση των σημείων αυτών μπορεί να γίνει με κατασκευές αντίστοιχες με τα επίγεια τριδιάστατα δίκτυα ή και με πιο μικρά – χαμηλά βάθρα και στυλεούς στήριξης των κεραιών του συστήματος (εικόνα 2δ) {4}.

Στα δίκτυα αυτά, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην επιλογή της θέσης των κορυφών τους, ώστε να βρίσκονται σε χώρο με ανοικτό ορίζοντα γύρω τους, να φαίνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερο τμήμα της ουράνια σφαίρας και να μην επιλέγονται θέσεις κοντά σε φυσικά εμπόδια, τεχνητές κατασκευές, δέντρα και μεταλλικές κατασκευές. Έτσι προσδιορίζονται μετά από επίλυση κάθε φάσης μέτρησης, οι μεταβολές της θέσης των κορυφών του με ακρίβεια της τάξης των μερικών mm.

Οι διαφορές των συντεταγμένων των σημείων του δικτύου προσδιορίζονται αρχικά στο παγκόσμιο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς WGS '84 και μετατρέπονται κατόπιν στο τοπικό σύστημα του φράγματος (τεχνικού έργου) χρησιμοποιώντας έναν πίνακα στροφής A (σχέση 1), που εξαρτάται από τη θέση του φράγματος πάνω στη γή (φ, λ είναι οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του κέντρου βάρους του δικτύου).

$$A = \begin{bmatrix} -\sin\varphi \cdot \cos\lambda & -\sin\varphi \cdot \sin\lambda & \cos\varphi \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\varphi \cdot \cos\lambda & \cos\varphi \cdot \sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix}$$
(1)

Έτσι τελικά υπολογίζονται οι μεταβολές ΔΝ, ΔΕ, ΔUp σε τοπικό τριδιάστατο σύστημα στην περιοχή του φράγματος. Μ' αυτό τον τρόπο τα διανύσματα των μεταβολών των συντεταγμένων και οι διευθύνσεις τους είναι άμεσα αντιληπτά και μπορούν να συσχετιστούν {11}, {12}.

3. ЕФАРМОГН

Η εφαρμογή αφορά στην παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς του φράγματος του Κούρη στην Κύπρο. Παρουσιάζεται ο έλεγχος της μεταβολής της θέσης σημείων δύο γεωδαιτικών δικτύων, ενός επίγειου δικτύου κατακορύφου ελέγχου και ενός δορυφορικού τριδιάστατου δικτύου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Τον Ιούλιο του 2006 όταν η πληρότητα του φράγματος ήταν στο 36% με αποθηκευμένη ποσότητα νερού 29,156 εκατομμύρια m³ και τον Δεκέμβριο του ίδιου έτους όταν η πληρότητα του φράγματος ήταν στο 18.4% με αποθηκευμένη ποσότητα νερού 21,156 εκατομμύρια m³ {13}.

3.1 Το φράγμα του Κούρη

Το φράγμα του Κούρη (εικόνα 3) είναι το μεγαλύτερο φράγμα που κατασκευάστηκε μέχρι σήμερα στην Κύπρο και αποτελεί τον πυρήνα του έργου του Νοτίου Αγωγού. Το φράγμα έχει χωρητικότητα 115 εκατομμυρίων m³, είναι χωμάτινης κατασκευής με κεντρικό αργιλικό πυρήνα και έχει ύψος 110 m. Το μήκος του αναχώματος είναι 550 m και ο όγκος κατασκευής του 9.400.000 m³. Η λίμνη του φράγματος βρίσκεται σε υψόμετρο 247 m από τη μέση στάθμη της θάλασσας, έχει επιφάνεια 3.6 Km², εκτείνεται 5 Km βόρεια και η λεκάνη απορροής έχει έκταση 308 Km². Ο υπερχειλιστής του φράγματος έχει μέγιστη παροχή 1.925 m³/sec. Το φράγμα υπερχείλισε για πρώτη φορά στις 4 Μαρτίου 2004, 15 χρόνια μετά την ολοκλήρωση του. Η αυξημένη πίεση από τον ταμιευτήρα προκάλεσε σημαντικές διαρροές στο δεξί αντέρεισμα (στη πλευρά του υπερχειλιστή) που έφτασαν τα 205 l/sec.{5}

3.2 Γεωδαιτικό δίκτυο κατακορύφου ελέγχου

Για την παρακολούθηση των κατακόρυφων μετακινήσεων του φράγματος του Κούρη, ιδρύθηκε και μετρήθηκε ένα δίκτυο κατακορύφου ελέγχου που αποτελείται από 7 σημεία ελέγχου. Από αυτά, τα έξι (6) είναι υψομετρικές αφετηρίες (repers) οι οποίες τοποθετήθηκαν κατά μήκος της στέψης του φράγματος ανά 100m εκατέρωθεν του δρόμου (εικόνα 3).

Οι υψομετρικές αφετηρίες υλοποιούνται με ορειχάλκινα μπουλόνια τα οποία είναι πακτωμένα στο μαντρότοιχο κατά μήκος του δρόμου στη στέψη του φράγματος σε ύψος περίπου 30 – 40cm.

Το έβδομο σημείο που είναι η σταθερή κορυφή, υλοποιείται από το τσιμεντένιο βάθρο T_2 το οποίο ανήκει στο ευρύτερο τριδιάστατο γεωδαιτικό δίκτυο έλεγχου. Το σημείο T_2 επιλέχθηκε ως το σταθερό σημείο του δικτύου διότι βρίσκεται μακριά από το κυρίως σώμα του φράγματος, περίπου 600m και δεν επηρεάζεται από τυχόν κατακόρυφες μετατοπίσεις του, καθώς και για τη δυνατότητα σύνδεσης του δικτύου με το αντίστοιχο τριδιάστατο.

Οι μετρήσεις των υψομετρικών διαφορών μεταξύ των κορυφών του δικτύου πραγματοποιήθηκαν:

- με τη μέθοδο της ψηφιακής γεωμετρικής χωροστάθμησης χρησιμοποιώντας τον ψηφιακό χωροβάτη NA2002 της εταιρείας Leica και απλές ψηφιακές σταδίες
- με τη μέθοδο της Τριγωνομετρικής Υψομετρίας Ακριβείας, όπου χρησιμοποιήθηκε ο

ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός TCR303 της εταιρείας Leica ακρίβειας ±10^{cc} στις γωνιομετρήσεις και ±2mm±2ppm στις μετρήσεις μηκών με ανακλαστήρα, ενώ στη μέτρηση του μήκους χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα ±3mm±2ppm. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν ειδικοί ανακλαστήρες.



Εικόνα 3. Τα σημεία του δικτύου κατακορύφου ελέγχου στο φράγμα του Κούρη

Μετρήθηκαν 15 υψομετρικές διαφορές σε χρονικό διάστημα περίπου 5 ωρών. Ακολούθησε η επίλυση του δικτύου και ο προσδιορισμός των υψομέτρων των κορυφών με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες για τις δύο χρονικές στιγμές (πίν. 1).

Ο έλεγχος των κατακόρυφων μετακινήσεων του φράγματος του Κούρη, έγινε σε απόλυτη και σχετική θέση. Η μεταβολή $\delta \hat{H}_{i}^{I,\Pi}$ της κορυφής i του δικτύου κατακορύφου ελέγχου μεταξύ των δύο φάσεων μέτρησης (I και II), δίνεται ως η διαφορά των υψομέτρων $\hat{H}_{i}^{I}, \hat{H}_{i}^{\Pi}$ του σημείου i στις αντίστοιχες φάσεις μέτρησης από τη σχέση 2.

Πίνακας 1.	Υψόμετοα και	αβεβαιότητες κ	τορυφών του δικτύου	κατακορύφου ελένχου
III watas I.	ι φυμυτρά και	apopulo inflog i	τοροφων του σικτοσο	

	ΦΑΣΗ Ι		ΦΑΣΗ ΙΙ		δH (mm)
ΣΗΜΕΙΟ	H (m)	$\sigma_{\rm H}(\rm mm)$	H (m)	$\sigma_{\rm H}(mm)$	UII (IIIII)
T2	252.800	-	252.800	-	-
R1	275.865	± 1.7	275.870	± 2.7	5
R2	276.361	± 1.7	276.362	± 2.8	1
R3	276.707	± 1.7	276.705	± 2.7	-2
R4	276.917	± 1.7	276.915	± 2.7	-2
R5	276.570	± 1.7	276.570	± 2.8	0
R6	276.182	± 1.7	276.188	± 2.7	+6

$$\delta H_{i}^{I,II} = H_{i}^{II} - H_{i}^{I}$$

(2)

Ελέγχθηκαν αν οι μεταβολές των υψομέτρων συνιστούν μετακίνηση για επίπεδο εμπιστοσύνης

95 % ($z_{95\%}$ = 1.96). Για κάθε κορυφή συγκρίνεται η μεταβολή δ $\hat{H}_{:}^{III}$ με το αντίστοιχο τυπικό σφάλμα (σ_{δHi}) πολλαπλασιασμένο με z_{95%} και εξετάζεται αν ισχύει - σ_{δHi} · z_{95%} ≤ δH^{I,II}_i ≤ +σ_{δHi} · z_{95%}, οπότε δεν υπάρχει μετακίνηση αλλά η μεταβολή βρίσκεται μέσα στο "θόρυβο - σφάλμα" των μετρήσεων. Στην αντίθετη περίπτωση είναι μετακίνηση. Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται τα διανύσματα της απόλυτης μεταβολής της θέσης των κορυφών για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.



Σχήμα 1. Διανύσματα απόλυτης μεταβολής της θέσης των κορυφών του δικτύου κατακορύφου ελέγχου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Αντίστοιχα έγινε έλεγχος της σχετικής μετακίνησης μεταξύ των κορυφών του δικτύου. Η σχετική μεταβολή $\delta \Delta \hat{H}_{i,j}^{\text{III}}$ των κορυφών i, j μεταξύ δύο φάσεων μέτρησης (I και II) δίνεται από την σχέση:



$$\delta\Delta H_{ij}^{i,n} = \delta(H_j - H_i)^n - \delta(H_j - H_i)^n$$
⁽²⁾

Σχήμα 2. Διανύσματα σχετικής μεταβολής της θέσης των κορυφών του δικτύου κατακορύφου ελέγχου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

$$\begin{split} & \mathsf{Exetazetai} \ \text{an iscuse} \ - \sigma_{\mathrm{dl}_{ij}} \cdot z_{95\%} \leq \delta \Delta H_{ij}^{\mathrm{I,II}} \leq \sigma_{\mathrm{dl}_{ij}} \cdot z_{95\%} \ \text{graves emission} \\ & \sigma_{\mathrm{dl}_{i,j}} = \sqrt{\sigma_{\mathrm{dl}_{i}}^2 + \sigma_{\mathrm{dl}_{j}}^2 - 2\sigma_{\mathrm{dl}_{i}\mathrm{dl}_{j}}} \\ \end{split}$$

Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται τα διανύσματα σχετικής μεταβολής της θέσης μεταξύ των κορυφών του δικτύου κατακορύφου ελέγχου. Διαπιστώνεται ότι απόλυτη μετακίνηση στατιστικά σημαντική δεν παρατηρείται σε καμία κορυφή του δικτύου. Ανύψωση παρατηρείται στο άκρο του δικτύου και συγκεκριμένα στο σημείο R6, που βρίσκεται κοντά στον υπερχειλιστή, στην ασταθέστερη γεωλογικά περιοχή που εδράζεται το φράγμα. Σχετικές μετακινήσεις παρατηρούνται σε όλες τις συνδέσεις μεταξύ των ακραίων σημείων του δικτύου (R1 και R6) με τα υπόλοιπα σημεία. Στο δυτικό τμήμα του φράγματος παρατηρούνται σχετικές ανυψώσεις ενώ στο ανατολικό τμήμα σχετικές καθιζήσεις.

3.3 Τριδιάστατο δορυφορικό γεωδαιτικό δίκτυο ελέγχου

Για την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς του φράγματος και στις τρεις διαστάσεις (X,Y,Z), ιδρύθηκε και μετρήθηκε ένα γεωδαιτικό τριδιάστατο δορυφορικό δίκτυο που αποτελείται από έξι (6) σημεία ελέγχου (σχήμα 3). Τα πέντε (5) από τα σημεία είναι τσιμεντένια βάθρα (εικόνα 4α) εκ των οποίων τα τέσσερα (4) τοποθετήθηκαν περιμετρικά του φράγματος σε αποστάσεις 300m – 500m από αυτό και το πέμπτο έξω από την περιοχή σε απόσταση περίπου 1700 m από το φράγμα.







Σχήμα 3. Το γεωδαιτικό δίκτυο τρισδιάστατου ελέγχου

Εικόνα 4. Το σημείο Τ1 και το σημείο Τ6

Το έκτο σημείο (T6) υλοποιείται από ορειχάλκινη βάση, πάνω σε τσιμεντένια κατασκευή (εικόνα 4β), στο μέσο περίπου της στέψης του φράγματος (σχήμα 3).

Oi μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τους δέκτες του συστήματος GPS Scorpio 6502 SP της εταιρείας Thales Navigation με τη μέθοδο του σχετικού στατικού εντοπισμού. Είναι δέκτες διπλής συχνότητας (L1/L2), βάρους 2.42 Kg {14}. Μετρήθηκαν και οι 13 βάσεις που σχηματίζονται από τα έξι σημεία του δικτύου. Ο μέσος χρόνος μέτρησης κάθε βάσης ήταν περίπου 1 ώρα. Από την επίλυση του δικτύου στις δύο φάσεις υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες X, Y, Z στο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς και οι αβεβαιότητές τους οι οποίες στην πρώτη φάση ήταν σ_X^I = σ_Y^I = σ_Z^I ≈ ±2.5mm, ενώ στη δεύτερη φάση ήταν ίσες με ±1mm. Υπολογίστηκαν έτσι οι τιμές της απόλυτης και σχετικής μεταβολής της θέσης των κορυφών του

Υπολογίστηκαν έτσι οι τιμές της απόλυτης και σχετικής μεταβολής της θέσης των κορυφών του τριδιάστατου δικτύου καθώς και η αβεβαιότητά τους που βρέθηκε ίση με $\sigma_{\delta X}^{I,II} = \sigma_{\delta Y}^{I,II} = \sigma_{\delta Z}^{I,II} \approx \pm 3 \text{mm}$. Με στροφή των ΔX, ΔY, ΔZ υπολογίστηκαν τα ΔN, ΔE, ΔUp και τα

αντίστοιχα $\sigma_{\delta E} = \sigma_{\delta N} = \pm 0.5$ mm και $\sigma_{\delta U p} = \pm 5$ mm. Οι μεταβολές ΔN, ΔΕ κυμαίνονται από -0.2mm έως και 4.4mm ενώ τα ΔUp από -0.9mm έως 7.9mm.



Σχήμα 4. Απόλυτες οριζόντιες μεταβολές της θέσης των κορυφών του τριδιάστατου δικτύου.



Σχήμα 6. Απόλυτες κατακόρυφες μεταβολές της θέσης των κορυφών του τρισδιάστατου δικτύου.



Σχήμα 5. Σχετικές οριζόντιες μεταβολές της θέσης των κορυφών του τρισδιάστατου δικτύου.



Σχήμα 7. Σχετικές κατακόρυφες μεταβολές της θέσης των κορυφών του τριδιάστατου δικτύου.

Ελέγχθηκε σε σχέση με την αβεβαιότητα προσδιορισμού των συντεταγμένων των σημείων αν αυτές οι μεταβολές αποτελούν απόλυτη ή σχετική μετακίνηση για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Στα σχήματα 4, 5, 6 και 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτού του ελέγχου.

Το σημείο T2 δεν παρουσιάζει οριζόντια μετακίνηση. Τα υπόλοιπα σημεία T3, T4, T5 παρουσιάζουν οριζόντια μετακίνηση της τάξης των 4mm, ενώ το σημείο T6 εμφανίζει μετακίνηση 5mm με κατεύθυνση βόρεια – βορειοδυτικά. Σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις της τάξης των 6mm παρουσιάζονται στις διευθύνσεις που συνδέουν τις κορυφές T5 και T6 με τις υπόλοιπες κορυφές του δικτύου, με κατεύθυνση νότια – νοτιοδυτικά.

Κανένα σημείο του δικτύου δεν παρουσιάζει απόλυτη κατακόρυφη μετακίνηση ενώ σχετική καθίζηση εμφανίζεται στη σύνδεση T3 – T4, ανάντη του φράγματος και σχετική ανύψωση στη σύνδεση T4 – T6.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑ

Οι γεωδαιτικές μέθοδοι παρακολούθησης φραγμάτων χρησιμοποιούνται στη μελέτη της κινηματικής συμπεριφοράς τόσο για το ίδιο το σώμα του φράγματος όσο και για την ευρύτερη περιοχή, έτσι ώστε να εκτιμούνται συνολικά οι γεωλογικές και τεκτονικές μεταβολές. Οι μέθοδοι αυτές είναι αξιόπιστες, γρήγορες και ακριβείς.

Με τις γεωδαιτικές μεθόδους δεν καταγράφεται μόνο το μέγεθος της μετακίνησης ενός σημείου αλλά και η διεύθυνση της κίνησής του τόσο σε σχέση με το σταθερό σημείο (απόλυτη) όσο και σε σχέση με κάθε άλλο σημείο του δικτύου (σχετική). Έτσι ύστερα από ορισμένες σειρές μετρήσεων είναι δυνατός ο υπολογισμός της ταχύτητας μετακίνησης ή η πρόβλεψη για τη θέση του στο μέλλον.

Το δίκτυο κατακορύφου ελέγχου συνήθως μπορεί να δώσει λεπτομερή πληροφορία για το κυρίως σώμα του φράγματος, ενώ με το τριδιάστατο δίκτυο ελέγχεται και η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης του.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η επιλογή της σήμανσης των σημείων των τριδιάστατων γεωδαιτικών δικτύων. Τα ειδικά βάθρα ή κατασκευές με εξαναγκασμένη κέντρωση είναι η καταλληλότερη λύση διότι εξασφαλίζεται η μοναδικότητα του σημείου τοποθέτησης των οργάνων σε κάθε φάση μέτρησης και το τελικό αποτέλεσμα είναι απαλλαγμένο από το σφάλμα κέντρωσης.

Η μέτρηση του τριδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου με δορυφορικές μεθόδους απαλλάσσει από την απαίτηση της αμοιβαίας ορατότητας μεταξύ των κορυφών του και επιταχύνει τη διαδικασία μέτρησης σε κάθε φάση.

Οι σύγχρονες μέθοδοι παρακολούθησης με ρομποτικούς γεωδαιτικούς σταθμούς απαιτούν μόνιμη εγκατάσταση στόχων και σταθμών. Έχουν το πλεονέκτημα του ελέγχου λειτουργίας τους από μακριά και της αυτόματης μετάδοσης – μεταφοράς των στοιχείων των μετρήσεων σε λογισμικά υπολογισμών. Επίσης στα πλεονεκτήματα καταγράφεται η δυνατότητα επίλυσης και υπολογισμός αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο, αμέσως μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων. Μειονέκτημα αποτελεί το υψηλό κόστος και ο ιδιαίτερος τρόπος και χώρος εγκατάστασης.

Η αποτύπωση του σώματος του φράγματος με τη χρήση σαρωτών και η δημιουργία ψηφιακών μοντέλων, απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και επιφύλαξη καθώς αφενός η τοποθέτησή τους σε κατάλληλες για σάρωση θέσεις είναι αρκετά δύσκολη και επίπονη (μεγάλο βάρος και όγκος), ενώ το υψηλό κόστος καταγράφεται στα μειονεκτήματά τους. Τέλος η σύνδεση των ανεξάρτητων σαρώσεων έχει μεγάλη αβεβαιότητα και η ακρίβεια της μέτρησης κάθε σημείου είναι ονομαστικά της τάξης των μερικών εκατοστών του μέτρου.

Με το συγκεκριμένο γεωδαιτικό δίκτυο κατακορύφου ελέγχου, που εγκαταστάθηκε στο φράγμα του Κούρη και μετρήθηκε είναι δυνατό να ανιχνευθούν μετακινήσεις μεγαλύτερες από ±6mm για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Η ακρίβεια μέτρησης του δικτύου μπορεί να βελτιωθεί, αν κριθεί σκόπιμο, χρησιμοποιώντας όργανα μεγαλύτερης ακρίβειας και εκτιμάται ότι μπορεί να φθάσει να ανιχνεύει κατακόρυφες μετακινήσεις της τάξης των ±2mm για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επίλυση του τριδιάστατου δικτύου με τις δορυφορικές μετρήσεις κρίθηκε επιτυχής. Διαπιστώθηκε ότι είναι μια διαδικασία πολυσύνθετη, με παραδοχές, αλλά μας οδηγεί σε αξιόπιστα αποτελέσματα.

Στο τριδιάστατο δίκτυο που ιδρύθηκε στην περιοχή του φράγματος του Κούρη η ακρίβεια προσδιορισμού των συνιστωσών ΔΧ, ΔΥ, ΔΖ των διανυσμάτων ήταν ±3mm και το δίκτυο μπορεί να ανιχνεύει μετακινήσεις μεγαλύτερες από ±3mm οριζοντιογραφικά και μεγαλύτερες από ±13mm υψομετρικά για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Η διαφορά στην ακρίβεια μεταξύ του οριζοντιογραφικού και υψομετρικού προσδιορισμού στο τριδιάστατο δίκτυο με τη χρήση δορυφορικών μεθόδων, αναδεικνύει την ανάγκη γρήσης ανεξάρτητου υψομετρικού δικτύου παρακολούθησης παραμορφώσεων σε φράγματα.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. Αγατζά Μπαλοδήμου Α.Μ.2004. Θεωρία Σφαλμάτων & Συνορθώσεις Ι, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.
- Αγατζά Μπαλοδήμου Α.Μ. 2005. Θεωρία Σφαλμάτων & Συνορθώσεις ΙΙ, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.
- 3. Constantinou G. 1981. Annual report of the geological survey department for the year 1980 Ministry of Agriculture and Natural Resources.
- 4. Gil A., DE Lacy M, Ruiz A., Galindo-Zaldívar J, Ayarza P, Teixell A., Alvarez-Lobato F, Arboleya M., Kchikach A., Amrhar M, Charroud M., Carbonell R and E. Tesón. 2008. GPS network for local deformation monitoring in the atlas mountains of Morocco, 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis, 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering.
 Kyrou K. – Kridiotis C. – Yziquel A. 2006. Remedial grouting on the right abutment of
- the Kouris dam, Commission Internationale des Grands Barrages.
- 6. Λάμπρου Ε. Πανταζής Γ. 1990. Παρακολούθηση παραμορφώσεων των φερόντων στοιχείων του σταδίου Ειρήνης και Φιλίας. Ίδρυση δικτύου κατακορύφου ελέγχου στην ευρύτερη περιοχή του σταδίου, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ. Διπλωματική εργασία.
- Λάμπρου Ε. 2007. Ακριβής προσδιορισμός υψομετρικών διαφορών με χρήση ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών, Τεχνικά χρονικά, Τεύχος 1-2.
- 8. Μαυράκης Σ. 2007. Έλεγχο της ακρίβειας μέτρησης του μήκους χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα με γεωδαιτικούς σταθμούς, ΔΠΜΣ Γεωπληροφορική, ΕΜΠ. Πτυχιακή εργασία.
- Μπαλοδήμος Δ. Δ. 1979. Ανάπτυξη μεθόδου τριγωνομετρικής υψομετρίας για εργασίες υψηλής ακρίβειας, Τεχνικά Χρονικά, Ιουλ. – Αυγ. – Σεπτ. 1979.
- 10. Μπαλοδήμος Δ.-Δ. Λάμπρου Ε. Πανταζής Γ. Γεωργόπουλος Γ. Δογγούρης Σ. 2005. Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.
- 11. Μπισμπιλής Κ. 2007. Παρακολούθηση μετακινήσεων των φερόντων στοιχείων του νέου γηπέδου Καραϊσκάκη. Ίδρυση δικτύου κατακορύφου ελέγχου στο χώρο του γηπέδου, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ. Διπλωματική εργασία.
- 12. Πανόπουλος Δ. 2007. Παρακολούθηση μετακινήσεων στην κατολίσθηση τμήματος της NEO Τρίπολης – Καλαμάτας στην περιοχή της Τσακώνας με χρήση GPS, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ. Διπλωματική εργασία.
- 13. Τέμενος Κ. 2007. Παρακολούθηση παραμορφώσεων του φράγματος του Κούρη στην Κύπρο, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ. Διπλωματική εργασία.
- 14. Thales Navigation. 2001. 6500 & 6300 Series Reference Manual, Nantes, France.

Monitoring the deformations of dams, using geodetic methods.

E. LAMBROU Dr Eng., Lecturer of N.T.U.A

G. PANTAZIS Dr Eng., Lecturer of N.T.U.A

ABSTRACT

The continuous monitoring and control of the kinematic behavior of a dam may be carried out successfully by using geodetic methods. The recent evolution of the modern digital instruments and the development of advanced processing software offers today precision of the order of few millimeters in the results. In this paper a short presentation of different geodetic methods applied few the monitoring of the dams is made. Also different marking of the control points in order to ensure their permanence and the measurement accuracy registered. Mainly the total application of the monitoring of the Kouri's dam, the biggest one in Cyprus, is described in detail. The establishment, measuring and processing of a vertical control network and a 3D control network are being analyzed. The measurements are carried out in two faces with a time interval of about six months. The vertical control network is measured by using the GPS. Useful conclusions are drawn for the time needed for the measurements (which is about 6 hours for the leveling and 2 days for the GPS) and the achieved precision, which fluctuates from ± 1 mm to ± 3 mm.In this application, deformations or displacements of the order of ± 4 mm can be detected.