

Έλεγχος παραμορφώσεων φραγμάτων Δ.Ε.Η

Σ. Στείρος, Σ. Πυθαρούλη¹, Β. Κοντογιάννη², Π. Ψιμούλης
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών

Α. Κουντούρης, Φ. Στρεμμένος, Κ. Σκούρτης³ Γ. Λέρης
ΔΕΥ – ΔΕΗ

Σημερινές διευθύνσεις: ¹Strathclyde University, ²IGME, ³Συντ/χος

Λέξεις κλειδιά: Λάδωνας, Κρεμαστά, γεωδαιτική παρακολούθηση, μακροχρόνιες παραμορφώσεις, GPS

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στα πλαίσια ενός πιλοτικού προγράμματος συνεργασίας της ΔΕΗ με το Πανεπιστήμιο Πατρών χρηματοδοτημένο από την ΓΓΕΤ έγινε (1) ανάλυση της σταθερότητας φραγμάτων της ΔΕΗ με βάση υπάρχοντα γεωδαιτικά στοιχεία (περίοδου 30 ετών) και (2) εκτίμηση της δυνατότητας αντικατάστασης/συμπλήρωσης των επίγειων γεωδαιτικών μετρήσεων με δορυφορικές μετρήσεις GPS. Μερικά βασικά συμπεράσματα είναι τα εξής. Το φράγμα Λάδωνας εμφανίζει σημαντική ακαμψία, αλλά και ελαστική απόκριση στο υδραυλικό φορτίο. Το φράγμα Κρεμαστών εμφανίζει αποσβενόμενη αλλά ελαφρά αυξανόμενη παραμόρφωση, με τοπικές μικρής κλίμακας κινήσεις εντός των προβλεπόμενων ορίων, ενώ το φράγμα Καστρακίου εμφανίζει αντίστοιχες, μικρότερης κλίμακας παραμορφώσεις. Στα πλαίσια της έρευνας προσδιορίστηκαν οι δυνατότητες και προϋποθέσεις εγκατάστασης συστήματος GPS με βάση πειράματα.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σωστή και ασφαλής λειτουργία των φραγμάτων εξαρτάται από τη σωστή συντήρησή τους. Η αστοχία των φραγμάτων Campos Novos (Βραζιλία 2006) και Gusau (Νιγηρία 2006) αλλά και παλαιότερες αστοχίες που προκάλεσαν μεγάλες καταστροφές (φράγμα Malpasset, {1}; φράγμα Vaiont, {2}) απέδειξαν το πόσο απαραίτητος είναι ο έλεγχος της αποδοτικότητας των συστημάτων παρακολούθησης και η ανάλυση των διαθέσιμων μέχρι σήμερα καταγραφών.

Σήμερα στην Ελλάδα υπάρχουν περίπου 15 μεγάλα φράγματα που κυρίως χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (www.dei.gr). Στην πλειοψηφία τους έχουν κατασκευαστεί μεταξύ των ετών 1954 και 1985. Υπάρχει επίσης ένας αριθμός μικρότερων φραγμάτων σε όλη τη χώρα που χρησιμοποιείται κυρίως για άρδευση. Καθώς τα περισσότερα φράγματα στην Ελλάδα είναι > 25 ετών η παρακολούθηση της συμπεριφοράς τους είναι απαραίτητη για την πρόβλεψη και την αποφυγή μιας πιθανής αστοχίας. Στην Ελλάδα η μακροχρόνια συστηματική παρακολούθηση των περισσότερων μεγάλων φραγμάτων είναι αρμοδιότητα της ΔΕΗ (αυτά που είναι στην δικαιοδοσία της ΔΕΗ).

Η παρακολούθηση των φραγμάτων περιλαμβάνει μετρήσεις τόσο στο εξωτερικό όσο και στο εσωτερικό της κατασκευής. Το σύστημα παρακολούθησης αποτελείται συνήθως από σημεία ελέγχου (ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από το μέγεθος και τον τύπο του φράγματος) που εγκαθίστανται γύρω από την περιοχή του φράγματος και σημεία αναφοράς που βρίσκονται εκτός της ζώνης επιρροής του φράγματος και του ταμιευτήρα {3}. Οι μετρήσεις των μετακινήσεων των σημείων ελέγχου λαμβάνουν χώρα σε διάφορες περιόδους (με μεγαλύτερη συχνότητα στα πρώτα χρόνια ζωής του φράγματος και λιγότερο συχνά με την πάροδο του χρόνου). Τα όργανα που

χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση είναι κυρίως γεωδαιτικά (γεωδαιτικοί σταθμοί) και γεωτεχνικά (εκκρεμή, εξτενσιόμετρα, κλισιόμετρα κτλ.). Οι κυριότερες παράμετροι που μετρώνται είναι οι μετακινήσεις των σημείων ελέγχου, η πίεση του νερού στη θεμελίωση, οι διαρροές στη θεμελίωση και στα αντερείσματα και η παρουσία ρωγμών. Ωστόσο, η ασφάλεια των φραγμάτων δεν είναι μόνο θέμα παρακολούθησης. Τα δεδομένα που συλλέγονται θα πρέπει να αναλύονται έτσι ώστε οι μετακινήσεις λόγω εποχικών φαινομένων να διαφοροποιούνται από τις μετακινήσεις που μπορεί να αποτελούν ένδειξη πιθανών προβλημάτων {3}.

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζουμε (1) την αξιολόγηση των σημερινών γεωδαιτικών συστημάτων παρακολούθησης και την ανάλυση των μακροχρόνιων καταγραφών (> 35 ετών) για τρία μεγάλα φράγματα στην Ελλάδα: δύο χωμάτινα (Κρεμαστά και Καστράκι) και ένα οπλισμένου σκυροδέματος (Λάδωνα) και (2) τα αποτελέσματα ενός πιλοτικού προγράμματος για τη διερεύνηση της ακρίβειας και των περιορισμών στην παρακολούθηση των φραγμάτων της χρήσης δεκτών GPS με στόχο επαναλαμβανόμενες και συνεχείς μετρήσεις.

Παρά το γεγονός ότι τα γεωδαιτικά δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν ιδρυθεί πριν το 1970, βρέθηκαν να είναι επαρκή και η ακρίβεια των δεδομένων που έχουν καταγραφεί ικανοποιητική. Η φασματική ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων αποκάλυψε ότι οι μετακινήσεις εξαρτώνται από τις διακυμάνσεις της στάθμης του ταμιευτήρα.

Μια σειρά από πειράματα έδειξε ότι η παραμόρφωση σε αυτά τα φράγματα μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια μερικών χιλιοστών με τη χρήση μόνιμων σταθμών GPS.

2 ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΛΑΔΩΝΑ

Το φράγμα του Λάδωνα (ΝΔ Ελλάδα) είναι ένα φράγμα από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσου μέγεθος (101.5m μήκος στέψης και ύψος 56m). Η κατασκευή του, μεταξύ 1950 και 1955, οδήγησε στη δημιουργία μιας τεχνητής λίμνης με έκταση 4km². Στόχος του γεωδαιτικού συστήματος παρακολούθησης του φράγματος του Λάδωνα είναι ο έλεγχος των πιθανών οριζόντιων αποκλίσεων από τον άξονα του φράγματος και των κατακόρυφων μετακινήσεων της στέψης του. Όλες οι μετρήσεις αφορούν έξι σημεία ελέγχου εγκατεστημένα στη στέψη του φράγματος ως προς σημεία αναφοράς εγκατεστημένα σε σταθερό έδαφος κοντά στα αντερείσματα.

2.1 Οριζόντιες Αποκλίσεις

Δύο σταθμοί αναφοράς κοντά στα αντερείσματα του φράγματος ορίζουν ένα άξονα, κατά μήκος του οποίου εγκαταστάθηκαν έξι σημεία ελέγχου (C1 – C6 στο Σχήμα 1α). Κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου μετρήσεων, ένας θεοδόλιχος υψηλής ακρίβειας (Wild T2) τοποθετείται στον ένα από τους δύο σταθμούς αναφοράς και προσανατολίζεται στο δεύτερο ορίζοντας έτσι ένα σταθερό άξονα αναφοράς.

Ένας βαθμονομημένος κανόνας τοποθετείται σε κάθε σημείο ελέγχου κάθετα στον άξονα του φράγματος και καταγράφεται η ανάγνωση από τον άξονα του θεοδόλιχου πάνω στον κανόνα. Η απόκλιση κάθε σημείου υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της ανάγνωσης στη συγκεκριμένη περίοδο και στην αρχική περίοδο,

$$d_{ik} = R_{ik} - R_{0k} \quad (1)$$

όπου d_{ik} η οριζόντια απόκλιση την περίοδο i στο σημείο ελέγχου k , R_{ik} η ανάγνωση την περίοδο i στο σημείο ελέγχου k και R_{0k} η αρχική ανάγνωση στο σημείο ελέγχου k .

Αποκλίσεις προς την κατεύθυνση της λίμνης σημειώνονται με αρνητικό πρόσημο.



Σχήμα 1. Σχέδιο της αρχής μέτρησης των (α) οριζόντιων και (β) κατακόρυφων αποκλίσεων της στέγης του φράγματος του Λάδωνα από μια ευθεία γραμμή {4}.

2.2 Κατακόρυφες μετακινήσεις

Οι κατακόρυφες σχετικές μετακινήσεις των σημείων ελέγχου στη στέγη του φράγματος μετρήθηκαν με χρήση υψηλής ακρίβειας χωροβάτη (Wild N3) ως προς μια χωροσταθμική αφητηρία κοντά στο αριστερό αντέρεισμα του φράγματος (βλ. Σχήμα 1β). Για κάθε περίοδο μετρήθηκαν οι σχετικές κατακόρυφες μετακινήσεις κάθε σημείου ελέγχου ως προς τη χωροσταθμική αφητηρία. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις (με αρνητικό πρόσημο για ανύψωση) υπολογίστηκαν ως η διαφορά μεταξύ των τιμών σε συγκεκριμένη περίοδο και στην αρχική,

$$dH_{ik} = H_{ik} - H_{0k} \quad (2)$$

όπου dH_{ik} η κατακόρυφη μετακίνηση την περίοδο μέτρησης i στο σημείο ελέγχου k , H_{ik} η ανάγνωση την περίοδο μέτρησης i στο σημείο ελέγχου k και H_{0k} η αρχική ανάγνωση στο σημείο ελέγχου k .

2.3 Ακρίβεια των μετρήσεων

Η ακρίβεια των μετρήσεων των οριζόντιων αποκλίσεων και των κατακόρυφων μετακινήσεων εξαρτάται από την ακρίβεια των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν. Η ακρίβεια των οριζόντιων αποκλίσεων βρέθηκε ίση με $\pm 0.68\text{mm}$ {5}. Αυτό σημαίνει ότι οι υπολογιζόμενες οριζόντιες αποκλίσεις που είναι πάνω από αυτή την τιμή είναι στατιστικά σημαντικές. Η ακρίβεια των κατακόρυφων αποκλίσεων είναι ίση με την ακρίβεια της χωροστάθμισης περίπου 0.5mm/km {6}. Στην παρούσα εργασία η ακρίβεια των καταγεγραμμένων κατακόρυφων μετακινήσεων είναι 0.07mm .

2.4 Ανάλυση των γεωδαιτικών παρατηρήσεων παρακολούθησης του φράγματος του Λάδωνα

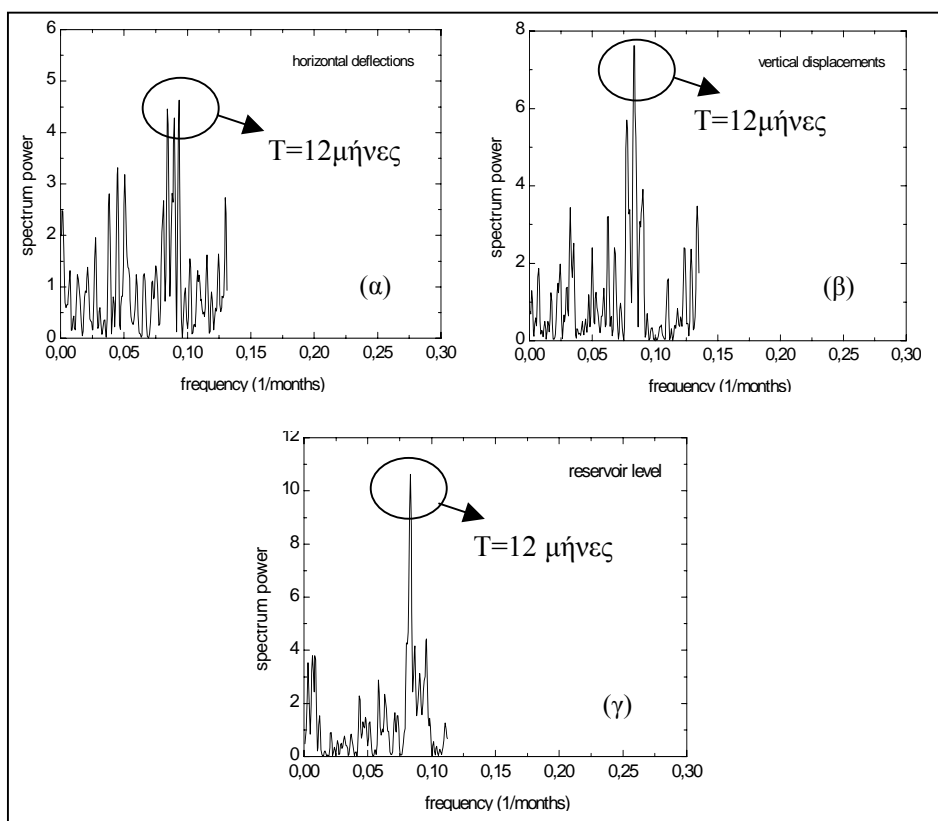
Οι γεωδαιτικές παρατηρήσεις παρακολούθησης του φράγματος του Λάδωνα αποτελούνται από τις οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις έξι σημείων ελέγχου εγκατεστημένων στη στέγη του φράγματος ως προς δύο σημεία αναφοράς σε σταθερό έδαφος. Οι διαθέσιμες μετρήσεις καλύπτουν μια περίοδο > 30 ετών (1968 – 2001) δείχνοντας σχετικά μικρή κίνηση ($< 7\text{mm}$) αν λάβει κανείς υπόψη το μέγεθος του φράγματος.

Παρά το γεγονός ότι το φράγμα είναι ηλικίας 50 ετών, μέχρι σήμερα δεν έχουν αναφερθεί προβλήματα αστάθειας ή εκτεταμένων διαρροών. Η ανάλυση των Pytharouli and Stiros {7} με χρήση ενός γραμμικού μοντέλου που συσχέτιζε τις μετακινήσεις με το χρόνο και τις μεταβολές της

στάθμης ταμιευτήρα αποκάλυψε ότι παρά την ηλικία του η ακαμψία του φράγματος του Λάδωνα είναι σημαντική.

Με στόχο την διερεύνηση ύπαρξης μιας πιο σύνθετης σχέσης μεταξύ των παραμορφώσεων του φράγματος και των μεταβολών στη στάθμη ταμιευτήρα εφαρμόσαμε στα δεδομένα φασματική ανάλυση. Οι διαθέσιμες τιμές δεν ήταν ισαπέχουσες, ωστόσο το πρόβλημα αυτό ξεπεράστηκε με χρήση τεχνικών φασματικής ανάλυσης που βασίζονται στη φασματική ανάλυση με ελάχιστα τετράγωνα {8} και στο περιοδόγραμμα Lomb {9}. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίστηκε μια άμεση απόκριση του φράγματος στις αλλαγές του υδραυλικού φορτίου {7}.

Πιο συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι τόσο οι οριζόντιες όσο και οι κατακόρυφες μετακινήσεις των σημείων ελέγχου καθώς επίσης οι μεταβολές της στάθμης ταμιευτήρα έχουν δεσπόζουσα περίοδο ίση με 12 μήνες (Σχήμα 2). Το αποτέλεσμα αυτό ήταν κοινό για τις μετακινήσεις όλων των σημείων ελέγχου. Το γεγονός ότι οι μέθοδοι μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή των δεδομένων ήταν ανεξάρτητες, ελαχιστοποιεί, αν όχι μηδενίζει, την πιθανότητα τα αποτελέσματά μας να είναι τυχαία.

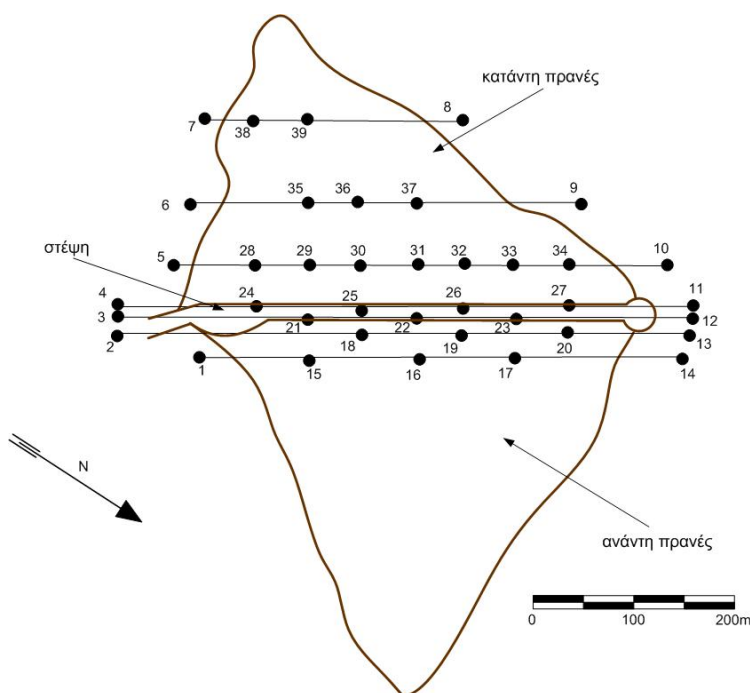


Σχήμα 2. Φάσματα των οριζόντιων αποκλίσεων (α) και των κατακόρυφων μετακινήσεων (β) ενός σημείου ελέγχου στο μέσο της στέψης του φράγματος του Λάδωνα και των μεταβολών στη στάθμη του ταμιευτήρα (γ). Η περίοδος των 12 μηνών είναι εμφανής και στα τρία φάσματα (τροποποιημένο από {7}).

3 ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΡΕΜΑΣΤΩΝ

Το φράγμα Κρεμαστών (Δ. Ελλάδα) είναι ένα από τα ψηλότερα χωμάτινα φράγματα στην Ευρώπη (160.3m ύψος και 456m μήκος στέψης). Η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 1965 και η τεχνητή λίμνη που σχηματίστηκε έχει χωρητικότητα έως και $4.75 \cdot 10^9 \text{ m}^3$.

Το γεωδαιτικό σύστημα παρακολούθησης του φράγματος Κρεμαστών αποτελείται από 25 σημεία ελέγχου εγκατεστημένα μόνιμα στη στέψη και το σώμα του φράγματος και από 14 σημεία αναφοράς εγκατεστημένα σε σταθερό έδαφος (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Το γεωδαιτικό σύστημα παρακολούθησης του φράγματος Κρεμαστών {10}.

3.1 Οριζόντιες Αποκλίσεις

Η αρχή των μετρήσεων των οριζόντιων αποκλίσεων είναι ίδια με εκείνη του φράγματος του Λάδωνα που περιγράφηκε στην παραγρ. 2.1. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε υψηλής ακρίβειας θεοδόλιχος (Wild T3) και σε κάθε περίοδο μετρήθηκαν οι αποκλίσεις κάθε σημείου ελέγχου ως προς την ευθεία που όριζαν τα σημεία αναφοράς 1 – 14 (βλ. Σχήμα 3).

3.2 Κατακόρυφες Μετακινήσεις

Η αρχή μέτρησης των κατακόρυφων μετακινήσεων του φράγματος Κρεμαστών είναι ίδια με εκείνη του φράγματος του Λάδωνα. Η μέτρηση των κατακόρυφων μετακινήσεων των σημείων ελέγχου έγινε με χρήση χωροβάτη υψηλής ακριβείας (Wild N3 ή N2) ως προς χωροσταθμική αφετηρία εγκατεστημένη σε βράχο περίπου 100m από το φράγμα.

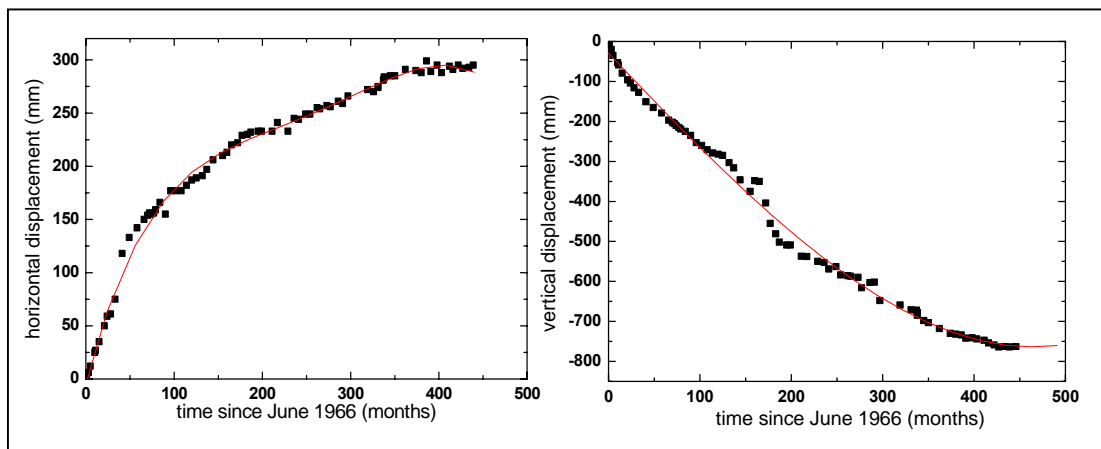
3.3 Ακρίβεια των μετρήσεων

Η ακρίβεια των μετρήσεων των οριζόντιων και των κατακόρυφων μετακινήσεων εξαρτάται από τα όργανα και τη μέθοδο που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Η ακρίβεια των οριζόντιων αποκλίσεων ήταν ίση με μερικά χιλιοστά, ενώ η ακρίβεια των κατακόρυφων μετακινήσεων ήταν ίση με $\pm 2\text{mm}$ (προφ. επικοινωνία με Φ. Στρεμμένο).

3.4 Ανάλυση των γεωδαιτικών παρατηρήσεων παρακολούθησης του φράγματος Κρεμαστών

Η προκαταρκτική ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων έδειξε ότι οι μέγιστες μετακινήσεις καταγράφηκαν στο μέσο της στέγης του φράγματος όπως ήταν αναμενόμενο. Οι οριζόντιες και κατακόρυφες αποκλίσεις των σημείων ελέγχου 19 και 22 (βλ. Σχήμα 3) αντίστοιχα στα οποία οι μετακινήσεις ήταν οι μέγιστες παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.

Οι οριζόντιες αποκλίσεις του σημείου ελέγχου 19, το σημείο στο οποίο παρατηρήθηκε η μέγιστη οριζόντια απόκλιση, προσομοιώθηκαν με τη χρήση ενός πολυωνύμου 4^{ου} βαθμού και της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων. Η αθροιστική μετακίνηση προς τα κατόντη ήταν της τάξεως των 30cm με τάση για σταθεροποίηση (Σχήμα 4α). Στα δεδομένα του σημείου ελέγχου 22 προσαρμόστηκε μια πολυωνμική καμπύλη 3^{ου} βαθμού. Η προσαρμογή ήταν πολύ ικανοποιητική καθώς η τιμή του συντελεστή συσχέτισης ήταν πολύ μεγάλη ($R > 0.99$). Το Σχήμα 4β δείχνει ότι οι κατακόρυφες μετακινήσεις του σημείου ελέγχου 22 στο μέσο της στέγης του φράγματος αυξάνονται με το χρόνο αλλά παρουσιάζουν τάση προς σταθεροποίηση. Η συνολική καθίζηση έως το 2003 ήταν περίπου 75cm, η μισή από την τιμή που είχε προβλεφθεί από τη μελέτη σχεδιασμού (1.5m).



Σχήμα 4. Οριζόντια απόκλιση του σημείου ελέγχου 19 ως προς το χρόνο. Η συνεχής γραμμή αντιπροσωπεύει την προσαρμογή ενός 4^{ου} βαθμού πολυωνύμου, (β) Μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων του σημείου ελέγχου 22. Η συνεχής γραμμή αντιπροσωπεύει την προσαρμογή ενός 3^{ου} βαθμού πολυωνύμου.

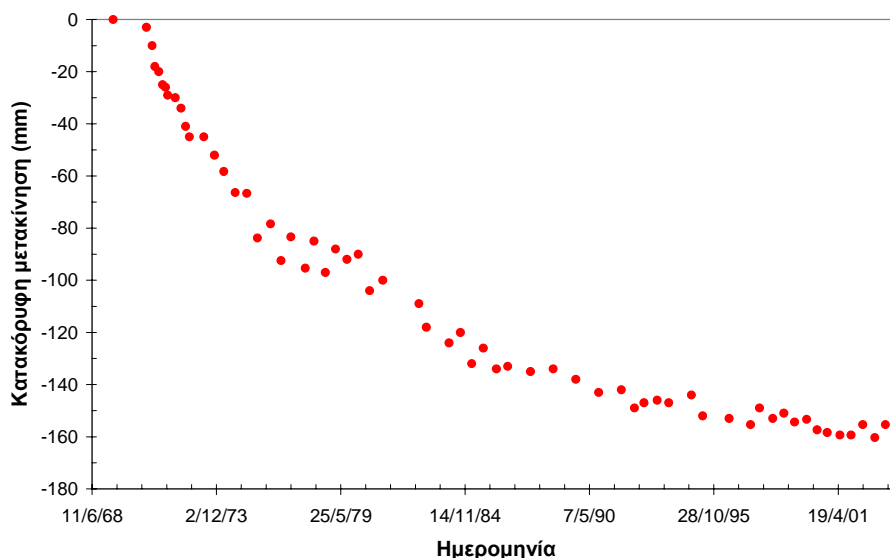
4 ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ

Το φράγμα Καστρακίου είναι το δεύτερο από τα τρία φράγματα (Κρεμαστά, Καστράκι, Στράτος) που αποτελούν το συγκρότημα του Αχελώου. Είναι ένα χωμάτινο φράγμα με κεντρικό αργιλικό πυρήνα. Έχει ύψος 95.7m και μήκος στέγης 547m. Βρίσκεται κατόντη του φράγματος των Κρεμαστών και ο ρόλος του όπως και του φράγματος των Κρεμαστών είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους υψηλής ζήτησης για την αντιμετώπιση κινδύνου black-out.

Τα διαθέσιμα δεδομένα στην περίπτωση του φράγματος Καστρακίου αποτελούνται από τις οριζόντιες αποκλίσεις και τις κατακόρυφες μετακινήσεις 19 σημείων ελέγχου τοποθετημένων στη στέγη και το σώμα του φράγματος. Οι μετρήσεις καλύπτουν μια χρονική περίοδο > 34 ετών από το 1969 έως το 2003). Η αρχή μέτρησης των οριζόντιων αποκλίσεων και των κατακόρυφων μετακινήσεων είναι ίδια με εκείνη του φράγματος των Κρεμαστών.

4.1 Ανάλυση των γεωδαιτικών παρατηρήσεων παρακολούθησης του φράγματος Καστρακίου

Τα μέχρι τώρα στάδια της μελέτης του φράγματος Καστρακίου έδειξαν ότι τόσο οι καθιζήσεις όσο και οι οριζόντιες αποκλίσεις δεν είναι σημαντικές. Η μέγιστη καταγεγραμμένη καθίζηση ήταν 16cm (Σχήμα 5), ενώ οι οριζόντιες αποκλίσεις δεν ξεπερνούν τα 7cm {10}. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι κάποια από τα σημεία ελέγχου του φράγματος παρουσιάζουν οριζόντιες αποκλίσεις προς τα ανάντη (αδημοσίευτα αποτελέσματα).



Σχήμα 5. Μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων σημείου ελέγχου εγκατεστημένου στη στέψη του φράγματος. Αυτές είναι και οι μέγιστες μετακινήσεις (~16cm) που έχουν καταγραφεί στο φράγμα κατά τη διάρκεια της περιόδου που εξετάστηκε.

5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ GPS ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ – ΠΙΛΟΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Στα πλαίσια ενός πιλοτικού προγράμματος συνεργασίας του Πανεπιστημίου Πατρών με τη ΔΕΗ που χρηματοδοτήθηκε από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας Τεχνολογίας εξετάσαμε τις προοπτικές και τους περιορισμούς του GPS στη αυτοματοποιημένη παρακολούθηση των φραγμάτων. Πιο συγκεκριμένα, ο σκοπός αυτού του προγράμματος ήταν η διερεύνηση της ακρίβειας και των περιορισμών στην παρακολούθηση των φραγμάτων της εφαρμογής επαναλαμβανόμενων και συνεχών μετρήσεων μέσω της εφαρμογής GPS.

Το GPS (Global Positioning System, Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης) αποτελεί τη σημερινή απάντηση σε αρχαίες φιλοσοφικές ερωτήσεις του τύπου πού βρίσκομαι ή πού πηγαίνω. Ένας δέκτης GPS μετράει την απόσταση μεταξύ αυτού και ενός δορυφόρου με χρήση ραδιοσημάτων. Η απόσταση υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το χρόνο που χρειάστηκε το σήμα να φτάσει από το δορυφόρο στο δέκτη με την ταχύτητα του φωτός. Για τον περιορισμό της πιθανότητας αποτελεσμάτων μειωμένης ακρίβειας ο δέκτης θα πρέπει να βλέπει τουλάχιστον πέντε ή έξι δορυφόρους.

- Δυστυχώς οι μετρήσεις με GPS δεν είναι πάντα απόλυτα σωστές. Βασικές πηγές σφαλμάτων είναι η επίδραση της ιονόσφαιρας: καθώς το σήμα περνά διαμέσου των φορτισμένων

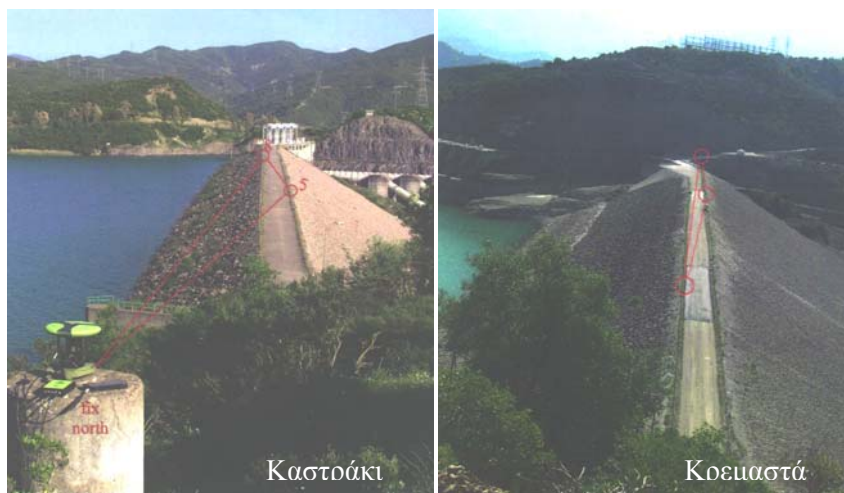
σωματιδίων της ιονόσφαιρας και μετά διαμέσου των υδρατμών στην τροπόσφαιρα επιβραδύνεται με αποτέλεσμα η ταχύτητα που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς και κατ' επέκταση η απόσταση που υπολογίζεται να μην είναι ακριβείς,

- η γεωμετρία των δορυφόρων: Συνήθως υπάρχουν περισσότεροι δορυφόροι από όσους χρειάζεται ο δέκτης για τον προσδιορισμό μιας θέσης. Έτσι ο δέκτης χρησιμοποιεί κάποιους και αγνοεί τους υπόλοιπους. Η γεωμετρία των δορυφόρων (πόσο κοντά ή μακριά είναι μεταξύ τους) επηρεάζει την ακρίβεια του GPS και
- το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών (multipath effect): το σήμα ανακλάται σε διάφορα τοπικά εμπόδια όπως η επιφάνεια του νερού ή οι ορεινοί όγκοι στην περιοχή του φράγματος πριν φτάσει στο δέκτη {11}.

Ευτυχώς τέτοιου είδους σφάλματα μπορεί να ξεπεραστούν με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών και επομένως το GPS χρησιμοποιείται ήδη με μεγάλη επιτυχία για την παρακολούθηση φραγμάτων σε όλο τον κόσμο {12}, {13}. Με στόχο την τεκμηρίωση της αποτελεσματικότητας του GPS στην παρακολούθηση των ελληνικών φραγμάτων διεξάγαμε ένα αριθμό επαναλαμβανόμενων μετρήσεων και πειραμάτων σε συγκεκριμένα φράγματα στην Ελλάδα. Κυρίως εστίασαμε

- στις συνθήκες για το GPS που χαρακτηρίζουν την περιοχή γύρω από το φράγμα (αριθμός δορυφόρων ορατών από τους δέκτες, ποιότητα σήματος GPS κτλ.) και
- στο σχεδιασμό ενός αυτοματοποιημένου και συνεχούς συστήματος παρακολούθησης με GPS.

Για την παρακολούθηση του φράγματος Κρεμαστών και Καστρακίου επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε τέσσερα σημεία ελέγχου. Τα σημεία αυτά επιλέχθηκαν μεταξύ ενός αριθμού σημείων που εξετάστηκαν κατά τη διάρκεια των αρχικών πειραμάτων γιατί η θέση τους ήταν ιδανική για τις μετρήσεις (εύκολη πρόσβαση, καλή ορατότητα δορυφόρων κτλ.). Έτσι επιλέχθηκαν τέσσερα σημεία για κάθε φράγμα. Δύο από αυτά ήταν τοποθετημένα στη στέγη του φράγματος, ένα στο μέσο και ένα κοντά στα αντερείσματα και τα υπόλοιπα δύο βρίσκονταν σε σταθερό έδαφος (Σχήμα 6).



Σχήμα 6. Σύστημα παρακολούθησης GPS για την παρακολούθηση των φραγμάτων Καστρακίου (αριστερά) και Κρεμαστών (δεξιά) που ιδρύθηκε στα πλαίσια ενός πιλοτικού προγράμματος για την ακρίβεια και τους περιορισμούς του συστήματος GPS στην παρακολούθηση φραγμάτων. Παρουσιάζονται τα επιλεγμένα σημεία αναφοράς και τα σημεία ελέγχου.

Η έρευνα αποκάλυψε ότι το GPS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση των παραμορφώσεων φραγμάτων με απόδοση μερικών χιλιοστών. Βρέθηκε επίσης ότι για μεγαλύτερης διάρκειας καταγραφές (> 2 ωρών) μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια δέκτες GPS μονής συχνότητας οι οποίοι είναι χαμηλού κόστους. Το GPS μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην προσπάθειά μας να κατανοήσουμε τη μακροχρόνια συμπεριφορά ενός φράγματος καθώς επίσης τις μετακινήσεις που οφείλονται σε περιοδικά φαινόμενα όπως οι μετακινήσεις του φράγματος Rascoima {12}.

6 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού για τη διάθεση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Londe P. 1976. The Malpasset dam failure. *Engineering Geology*, 23:295-329.
2. Kiersch G. 1964. Vajont reservoir disaster. *Civil Engineering*, 34:32-39.
3. Committee on Safety of Existing Dams. 1983. *Safety of existing dams, Evaluation and Improvement*. National Academy Press.
4. Pytharouli S. and Stiros S. 2004. Reservoir level fluctuations and deformation of Ladon Dam. *Hydropower and Dams*, 3:82-84.
5. Pitharouli S., Tsitsos V., Skourtis C., Kontogianni V. and Stiros S. 2003. Rigidity control of a thin reinforced concrete dam. *Proceedings*, eds. S. Stiros and S. Pytharouli, 11th International Symposium on Deformation Measurements, International Federation of Surveyors (FIG), Santorini, Greece: 629-634.
6. Bonford G. 1971. *Geodesy*. Oxford University Press.
7. Pytharouli S. and Stiros S. 2005. Ladon dam (Greece) deformation and reservoir level fluctuations: evidence for a causative relationship from the spectral analysis of a geodetic monitoring record. *Engineering Structures*, 27: 361 - 370.
8. Vanicek P. 1969. Approximate spectral analysis by least-squares fit. *Astrophysics and Space Science*, 4: 387-391.
9. Lomb N.R. 1976. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and Space Science*, 39:447-462.
10. Πυθαρούλη Σ. 2007. *Μελέτη της μακροχρόνιας παραμόρφωσης του φράγματος Κρεμαστών με βάση ανάλυση γεωδαιτικών δεδομένων και μεταβολών στάθμης ταμιευτήρα*. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πανεπιστήμιο Πατρών.
11. Nickitopoulou A., Protopsalti K. and Stiros S. 2006. Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracies, limitations and promises. *Engineering Structures*, 28:1471-1482.
12. Behr A.J., Hudnut W.K. and King E.N. 1998. Monitoring structural deformation at Pacoima dam, California using continuous GPS", *Seismological Research Letters*, 69:299-308.
13. Szostak-Chrzanowski A. and Massiera M. 2006. Relation between monitoring and design aspects of large earth dams. *Proceedings*, eds. H. Kahmen and A. Chrzanowski, 12th International Symposium on Deformation Measurements, International Federation of Surveyors (FIG), Baden, Austria.

Geodetic monitoring of dams of Public Power Corporation of Greece

S. Stiros, S. Pytharouli¹, V. Kontogianni², P. Psimoulis
Dpet. Of Civil Engineering, University of Patras

A. Kountouris, F. Stremmenos, K. Skourtis³, G. Leris
Public Power Corporation of Greece

Current addresses: ¹Strathclyde University, ²I.G.M.E., ³Retired

Λέξεις κλειδιά: Ladon dam, Kremasta dam, geodetic monitoring, long-term deformation, GPS

ABSTRACT: In the framework of a project of the Public Power Corporation of Greece and Patras University sponsored by the Greek General Secretariat for Research and Technology we analyzed the stability of certain representative dams based on geodetic data covering a period of 30 years, and we investigated the possibility of replacing conventional geodetic monitoring by GPS. Some of the basic conclusions of this study are that the Ladon dam, made of concrete, is very rigid, though elastically responding to the hydraulic load, while at the earthfill Kremasta and Kastraki dams an attenuating increase of crest settlements is observed. The potential of using GPS for dam monitoring was also assessed based on various experiments.