

# Κρίσιμες παράμετροι της παραμόρφωσης του φράγματος Κρεμαστών

Σ.Ι. Πυθαρούλη

*Μεταδιδακτορικός Ερευνητής. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πανεπιστήμιο Strathclyde, Μ. Βρετανία.*

Σ.Κ. Στείρος

*Αναπληρωτής Καθηγητής. Εργαστήριο Γεωδαισίας, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.*

*Λέξεις κλειδιά:* Κρεμαστά, φράγμα, χωμάτινο, καθιζήσεις, στέψη, ταμιευτήρας, βροχόπτωση, συσχέτιση, ψηφιακό φίλτρο

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Αναλύθηκαν οι καθιζήσεις της στέψης του φράγματος Κρεμαστών σε συνδυασμό με τις μεταβολές στη στάθμη του ταμιευτήρα και τη βροχόπτωση για την περίοδο 1966 – 2003. Η ανάλυση βασίστηκε στη βελτιστοποίηση του συντελεστή συσχέτισης με τη χρήση ανωπερατού φίλτρου, μεταξύ του ρυθμού μεταβολής των καθιζήσεων της στέψης και (1) της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα, (2) του ρυθμού μεταβολής της στάθμης ταμιευτήρα και (3) του ρυθμού μεταβολής της βροχόπτωσης και προσδιορίστηκαν έτσι τιμές – όρια για κάθε μία παράμετρο. Διαπιστώθηκε ότι μόνο στην περίπτωση που τα όρια αυτά ξεπεραστούν ταυτόχρονα ο ρυθμός των καθιζήσεων της στέψης αυξάνεται σημαντικά.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υπερβολική καθίζηση της στέψης ενός χωμάτινου φράγματος μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες αν δεν αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της χωρητικότητας του ταμιευτήρα αλλά και αστοχία του φράγματος λόγω υπερπήδησης του νερού πάνω από τη στέψη, φαινόμενο που αποτελεί και την πιο κοινή αιτία αστοχίας αυτού του τύπου φραγμάτων (Committee on Safety of Existing Dams, 1983). Ο καλύτερος τρόπος αντιμετώπισης τέτοιου είδους προβλημάτων είναι η κατανόηση των μηχανισμών που επηρεάζουν τις καθιζήσεις της στέψης (η αστάθεια των πρανών, η εσωτερική διάβρωση, η συμπύκνωση των στρωμάτων θεμελίωσης, η μεταβολή του όγκου του αργιλικού πυρήνα λόγω μεταβολών στην υγρασία, η συμπύκνωση του υλικού των πρανών και οι μεταβολές της στάθμης ταμιευτήρα) και ο καθορισμός των κρίσιμων τιμών των παραμέτρων που τις ελέγχουν (Tedd et al., 1997).

Η καθίζηση της στέψης των χωμάτινων φραγμάτων έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών οι οποίοι έχουν μελετήσει τη συμβολή καθεμιάς από τις παραπάνω παραμέτρους χωριστά. Μια από τις πιο σοβαρές περιπτώσεις που αναφέρεται στη βιβλιογραφία είναι αυτή του φράγματος Ataturk (Τουρκία), του 4<sup>ου</sup> μεγαλύτερου λιθόρριπτου φράγματος στον κόσμο (Goltz, 1990). Οι Cetin et al. (2000) αναφέρουν ότι οι καθιζήσεις στη στέψη του έφτασαν έως και τα 7m ενώ το φαινόμενο αποδόθηκε στη μη σωστή συμπύκνωση του αργιλικού πυρήνα.

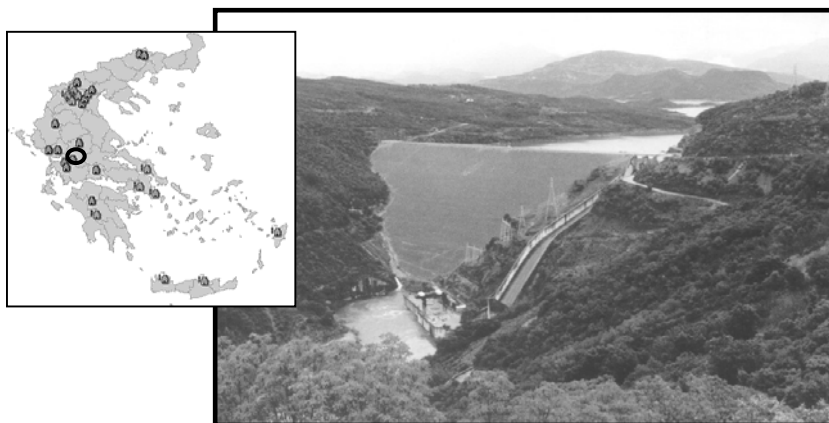
Ωστόσο, η αλληλεπίδραση κάποιων από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω και η επίδρασή τους στις καθιζήσεις της στέψης δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς μέχρι σήμερα. Η σχέση μεταξύ δύο από αυτές τις παραμέτρους (στάθμης ταμιευτήρα και βροχόπτωσης) και των παραμορφώσεων του φράγματος περιγράφεται από τους Alonso et al. (2005) για το φράγμα Beliche στην Πορτογαλία. Παρόλα αυτά μέχρι σήμερα δεν έχει προταθεί κάποια ποσοτική σχέση γι' αυτή την αλληλεπίδραση.

Στην παρούσα εργασία προσπαθούμε να μελετήσουμε το πρόβλημα της σημαντικής αύξησης στο ρυθμό των καθιζήσεων που καταγράφηκαν στη στέψη του φράγματος Κρεμαστών, ενός από τα ψηλότερα χωμάτινα φράγματα στην Ευρώπη (Σχ. 1). Η μελέτη αυτή αποτελεί μια πρώτη προσπάθεια ποσοτικοποίησης της επίδρασης της βροχόπτωσης και των μεταβολών της στάθμης του ταμιευτήρα στις καθιζήσεις αυτού του χωμάτινου φράγματος μέσω του προσδιορισμού άνω ορίων για τις δύο αυτές παραμέτρους, πέρα από τα οποία ο ρυθμός των καθιζήσεων της στέψης αυξάνεται σημαντικά. Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση στις προσπάθειες αύξησης της στάθμης του ταμιευτήρα στο επίπεδο που όριζε η μελέτη σχεδιασμού. Κάτι τέτοιο δεν έχει γίνει δυνατό μέχρι και σήμερα > 40 χρόνια από την ολοκλήρωση του φράγματος παρά τη μεγάλη σημασία του (οικονομική, κοινωνική κτλ.). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για υψηλά επίπεδα του νερού στον ταμιευτήρα, η ποσότητα των διαρροών που μετράται στην έξοδο της σήραγγας αποστράγγισης αυξάνεται σημαντικά και μερικές φορές φτάνει τα όρια ασφαλείας, με τους αντίστοιχους κινδύνους.

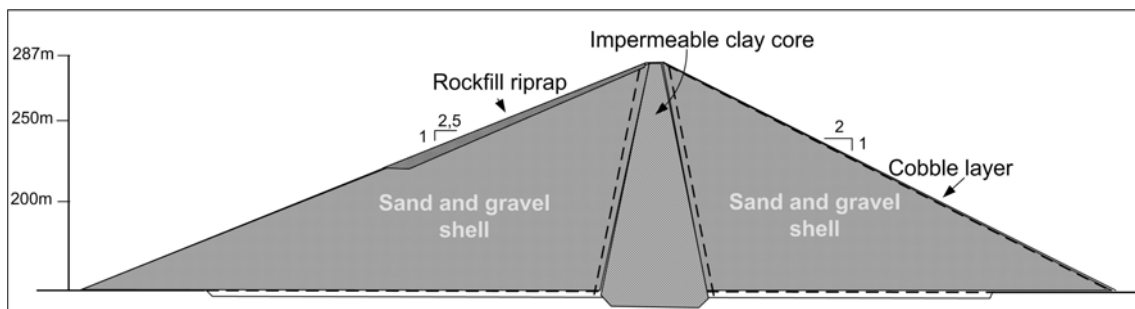
## 2 ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΚΡΕΜΑΣΤΩΝ

Το φράγμα των Κρεμαστών (Κεντρική Ελλάδα) αποτελεί ιδιοκτησία της Δ.Ε.Η., έχει ύψος 160.3m, μήκος στέψης 456m και κεντρικό αργιλικό πυρήνα (Σχ. 2). Η τεχνητή λίμνη που σχηματίστηκε καλύπτει μια περιοχή 81km<sup>2</sup> και μπορεί να αποθηκεύσει έως και 4.75\*10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> νερού που χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το φράγμα έχει κατασκευαστεί από υλικό που προέρχεται από την κοίτη του ποταμού Αχελώου. Ο πυρήνας του φράγματος προστατεύεται από ημιπερατά υλικά. Με βάση τη μελέτη σχεδιασμού η μέγιστη αναμενόμενη καθίζηση της στέψης είναι 1.5m (ECI, 1974). Το φράγμα Κρεμαστών έγινε γνωστό ως η πιθανή αιτία πρόκλησης μιας σεισμικής ακολουθίας κατά τη διάρκεια πλήρωσης του ταμιευτήρα.

Το φράγμα αντιμετωπίζει δυο βασικά προβλήματα: (1) διαρροές και (2) τοπικές παραμορφώσεις στη στέψη και το σώμα του. Τα προβλήματα αυτά δεν αποτελούν άμεση απειλή για το φράγμα, απαιτούν ωστόσο συστηματική παρακολούθηση.



Σχήμα 1. Άποψη του φράγματος Κρεμαστών από τα κατάντη. Διακρίνονται ο υπερχειλίστας στα δεξιά του φράγματος και ο υδροηλεκτρικός σταθμός (στον πόδα της κατάντη πλευράς).



Σχήμα 2. Απλοποιημένη κάθετη διατομή του φράγματος Κρεμαστών.

Το σύστημα γεωδαιτικής παρακολούθησης του φράγματος Κρεμαστών αποτελείται από 14 σημεία αναφοράς εγκατεστημένα μόνιμα σε σταθερό έδαφος και 25 σημεία ελέγχου εγκατεστημένα στο σώμα και τη στέψη του φράγματος (ανάντη και κατάντη). Μετρήσεις (1) των οριζόντιων αποκλίσεων και (2) των κατακόρυφων μετακινήσεων των 25 σημείων ελέγχου ως προς τα σημεία αναφοράς πραγματοποιούνται με συχνότητα 2 μετρήσεις/έτος περίπου (Pytharouli et al., 2007)

### 3 ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Τα διαθέσιμα δεδομένα αποτελούνται από τις κατακόρυφες μετακινήσεις όλων των σημείων ελέγχου της στέψης καθώς επίσης τις καταγραφές της στάθμης του ταμιευτήρα και του ύψους βροχής στην περιοχή του φράγματος. Τα δεδομένα καλύπτουν χρονική περίοδο > 35 ετών από το 1966, λίγο μετά την έναρξη της διαδικασίας πλήρωσης του ταμιευτήρα, έως το 2003.

Το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων δεν ήταν σταθερό, παρόλα αυτά η συχνότητα των μετρήσεων ήταν κατά μέσο όρο 2 μετρήσεις/έτος. Οι καταγραφές της στάθμης ταμιευτήρα και της βροχόπτωσης αντίθετα γινόντουσαν σε ημερήσια βάση, με ελάχιστες ελλείπουσες μετρήσεις. Η διαδικασία των μετρήσεων ήταν σχεδόν ομοιόμορφη (παρόμοιες τεχνικές, χρήση των ίδιων οργάνων κτλ.) με αποτέλεσμα τα δεδομένα να είναι ομοιογενή και να έχουν την ίδια ακρίβεια. Τυχόν χονδροειδή σφάλματα εντοπίστηκαν και απομακρύνθηκαν.

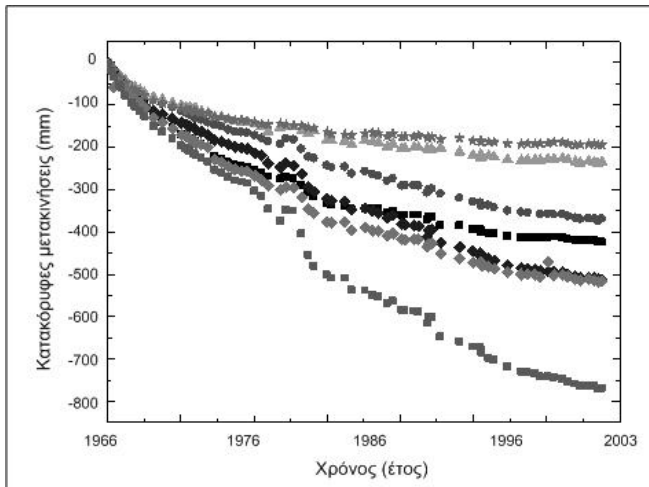
Από την προκαταρκτική μελέτη των διαθέσιμων τιμών οι καθιζήσεις βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές και διαπιστώθηκε σταδιακή καθίζηση της στέψης με τάση προς σταθεροποίηση. Η μέγιστη καθίζηση ίση με 764mm παρατηρήθηκε σε σημείο ελέγχου εγκατεστημένο στο μέσο της στέψης (βλ. Σχ. 3).

Οι καθιζήσεις που εξετάστηκαν σε αυτή την εργασία ήταν εντός των ορίων ασφαλείας που προτείνονται στη μελέτη σχεδιασμού (< 1.5μ : ECI, 1974) και με μια πρώτη ματιά δε φάνηκε να απειλούν την ασφάλεια του φράγματος. Ωστόσο, επειδή το φράγμα είναι ηλικίας > 40 ετών βρίσκεται σε περίοδο σχετικά υψηλής επικινδυνότητας και για το λόγο αυτό απαιτείται περαιτέρω ανάλυση των μετακινήσεών του.

### 4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η Πυθαρούλη (2007) είχε εντοπίσει τρεις πιθανούς μηχανισμούς που επηρεάζουν τις καθιζήσεις της στέψης του φράγματος Κρεμαστών: (1) ερπυσμός ή/και δευτερεύουσα συμπύκνωση του αργιλικού πυρήνα, (2) μεταβολές της στάθμης ταμιευτήρα και (3) βροχόπτωση. Μεταξύ αυτών των μηχανισμών ο πρωτεύων είναι ο ερπυσμός ενώ οι άλλοι δύο συμβάλλουν στην αύξηση των καθιζήσεων σε μικρότερο ποσοστό και υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Οι μηχανισμοί αυτοί

περιγράφονται από παραμέτρους όπως ο ρυθμός των καθιζήσεων της στέψης, ο ρυθμός αύξησης της στάθμης του ταμιευτήρα και του ύψους της βροχόπτωσης.



Σχήμα 3. Κατακόρυφες μετακινήσεις των επτά σημείων ελέγχου στη στέψη του φράγματος Κρεμαστών μεταξύ 1966 και 2003. Η μέγιστη μετακίνηση (~764mm) παρατηρήθηκε σε σημείο ελέγχου εγκατεστημένο στο μέσο της στέψης.

Η συνήθης προσέγγιση είναι να εξετάσει κανείς τη συσχέτιση μεταξύ του μεγέθους των καθιζήσεων της στέψης και των παραμέτρων που περιγράφουν καθένα από τους τρεις μηχανισμούς που αναφέρθηκαν χωριστά. Ωστόσο, η διερεύνηση των δεδομένων από το φράγμα των Κρεμαστών έδειξε ότι οι καθιζήσεις της στέψης δεν φαίνεται να επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις της τιμής των τριών κρίσιμων παραμέτρων αν το μέγεθός τους διατηρείται κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο. Αυτό μας οδήγησε να εξετάσουμε τις συσχετίσεις μόνο για τις τιμές των παραμέτρων που ξεπερνούν κάποια όρια (κατώφλια, thresholds).

Ωστόσο αυτά τα κατώφλια ήταν άγνωστα. Για τον προσδιορισμό τους χρησιμοποιήθηκε μια τεχνική με στόχο τη βελτιστοποίηση του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ της καθίζησης της στέψης και κάθε μιας από τις τρεις παραπάνω παραμέτρους με χρήση ενός ανωπερατού φίλτρου βαθμιαία αυξανόμενου εύρους. Η τιμή εκείνη του φίλτρου που θα έδινε τη μέγιστη συσχέτιση θα ήταν ενδεικτική της τιμής της παραμέτρου (στάθμη ταμιευτήρα κτλ.) που είναι κρίσιμη για την αύξηση των καθιζήσεων της στέψης.

Το επόμενο βήμα ήταν ο προσδιορισμός των παραμέτρων που θα συσχετιστούν. Θα έπρεπε δηλαδή να προσδιοριστούν οι παράμετροι που καθορίζουν κάθε φαινόμενο (π.χ. καθίζηση της στέψης) και που αντιστοιχούν σε χρονοσειρές με ίδια διαστήματα δειγματοληψίας. Καθώς οι μετρήσεις μας δεν ήταν ισαπέχουσες δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιήσουμε τα δεδομένα στην αρχική τους μορφή. Από την άλλη μεριά η χρήση παρεμβολής θα όξυνε το πρόβλημα με την εισαγωγή θορύβου (αβεβαιότητων).

Για το λόγο αυτό, αντί των καθιζήσεων της στέψης χρησιμοποιήθηκε ο Δείκτης Καθίζησης. Πρόκειται για μια αδιάστατη παράμετρο που δίνεται από την εξίσωση

$$S_I = \frac{s}{1000 \times H \times \log(t_2 / t_1)} \quad (1)$$

όπου  $s$  είναι η καθίζηση της στέψης σε mm μεταξύ των χρονικών στιγμών  $t_1$  και  $t_2$  από την ολοκλήρωση του φράγματος σε διατομή όπου το ύψος του φράγματος είναι  $H$  σε m (Charles,

1986). Τιμές του  $S_i > 0.02$  είναι ενδεικτικές της παρουσίας άλλων μηχανισμών εκτός του ερπυσμού ή/και της δευτερογενούς συμπύκνωσης του αργλικού πυρήνα που επηρεάζουν τις καθιζήσεις του φράγματος και συνεπώς ενδεικτικές φαινομένων που μπορεί να οδηγήσουν σε κάποια μορφή αστοχίας (Tedd et al., 1997).

Ο δείκτης καθίζησης που αντιστοιχούσε σε κάθε περίοδο μετρήσεων υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση (1). Σχηματίστηκαν έτσι επτά χρονοσειρές που περιείχαν τις τιμές του δείκτη καθίζησης για κάθε ένα από τα επτά σημεία ελέγχου της στέψης. Με στόχο να απλοποιηθεί η όλη διαδικασία στην ανάλυση αργότερα χρησιμοποιήθηκε μία και μόνη χρονοσειρά που αποτελούνταν από τις μέγιστες τιμές του δείκτη καθίζησης για κάθε διάστημα δειγματοληψίας μεταξύ των επτά χρονοσειρών δηλ. μια χρονοσειρά που αποτελεί την περιβάλλουσα όλων των χρονοσειρών που περιγράφουν το δείκτη καθίζησης όλων των σημείων ελέγχου της στέψης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι διαθέσιμες χρονοσειρές της στάθμης ταμιευτήρα και της βροχόπτωσης αποτελούνταν από ημερήσιες τιμές και έτσι δεν ήταν άμεσα συγκρίσιμες με τη χρονοσειρά του δείκτη καθίζησης. Για να είναι συγκρίσιμες θα έπρεπε (1) να έχουν το ίδιο μήκος  $l$  με τη χρονοσειρά του δείκτη καθίζησης και (2) οι τιμές τους να αντιστοιχούν στα ίδια διαστήματα δειγματοληψίας με εκείνα του δείκτη καθίζησης.

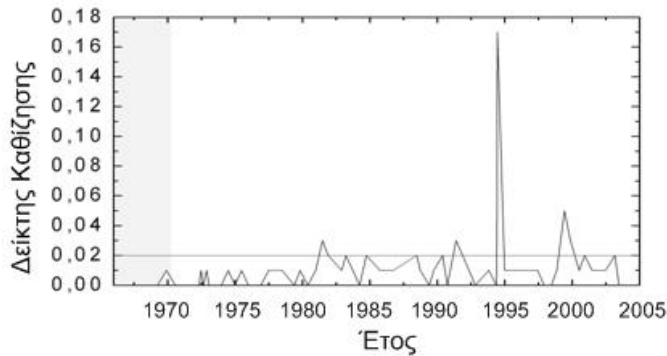
Για το λόγο αυτό, αντί των αρχικών χρονοσειρών της στάθμης ταμιευτήρα και της βροχόπτωσης (1) χρησιμοποιήθηκαν οι μέγιστες τιμές της στάθμης ταμιευτήρα σε κάθε ένα από τα διαστήματα στα οποία αντιστοιχούσαν οι τιμές του δείκτη καθίζησης, (2) χρησιμοποιώντας τους ημερήσιους ρυθμούς μεταβολής της στάθμης ταμιευτήρα υπολογίστηκε ένας μέσος ρυθμός μεταβολής της στάθμης για κάθε αντίστοιχο διάστημα και (3) χρησιμοποιώντας τους ημερήσιους ρυθμούς βροχόπτωσης υπολογίστηκε επίσης ένας μέσος ρυθμός βροχόπτωσης για κάθε αντίστοιχο διάστημα.

Με τον τρόπο αυτό σχηματίστηκαν άμεσα συγκρίσιμες χρονοσειρές. Στη συνέχεια, εφαρμόσαμε την τεχνική της συσχέτισης με χρήση κατωφλίων που αναλυθηκε πιο πάνω σε αυτές τις χρονοσειρές, συσχετίζοντας το δείκτη καθίζησης με μια από τις τρεις παραμέτρους κάθε φορά και χρησιμοποιώντας ένα ανωπερατό φίλτρο μεταβλητού εύρους. Στόχος ήταν ο εντοπισμός εκείνου του κατωφλίου το οποίο οδηγούσε στο μέγιστο συντελεστή συσχέτισης. Αυτό προϋπέθετε επαναλαμβανόμενους υπολογισμούς με την τιμή του κατωφλίου να μεταβάλλεται σταδιακά και το μήκος των συσχετιζόμενων χρονοσειρών να μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μήκος των χρονοσειρών που συσχετίζονται εξαρτάται από την τιμή του κατωφλίου και τα δεδομένα με τιμές κάτω από αυτό το κατώφλι παραλείπονταν.

Η παραπάνω διαδικασία αυτοματοποιήθηκε με την ανάπτυξη του πρωτότυπου κώδικα PICKUP σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran που δημιουργήθηκε (Πυθαρούλη, 2007).

## 5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ο δείκτης καθίζησης υπολογίστηκε για όλα τα σημεία ελέγχου της στέψης με χρήση της εξ. (1). Στη συνέχεια δημιουργήθηκε η χρονοσειρά της περιβάλλουσας του δείκτη καθίζησης (Σχ. 4) με τις μέγιστες τιμές του δείκτη που υπολογίστηκαν σε κάθε περίοδο μετρήσεων.



Σχήμα 4. Μεταβολή του Δείκτη Καθίζησης της στέψης του Φράγματος Κρεμαστών ως προς το χρόνο. Στα διαστήματα Δεκέμβριος 1980 – Μάιος 1981, Σεπτέμβριος 1990 – Μάιος 1991, Μάιος 1994, Οκτώβριος 1998 – Μάιος 1999 ο δείκτης καθίζησης ήταν  $\gg 0.02$  (οριζόντια γραμμή). Η σκιασμένη περιοχή αντιστοιχεί σε περίοδο εκτεταμένων διαρροών πριν την ολοκλήρωση των έργων αποστράγγισης.

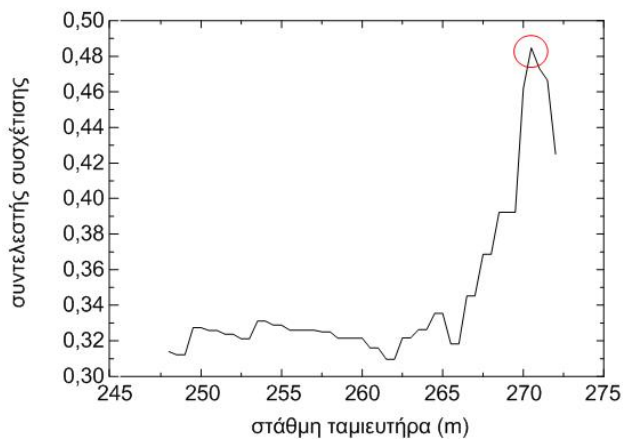
Το Σχήμα 4 δείχνει ότι ενώ οι καθιζήσεις της στέψης παρέμειναν γενικά εντός των ορίων ασφαλείας (βλ. Σχ. 3) υπήρξαν τέσσερις χρονικές περιόδους (Δεκέμβριος 1980 – Μάιος 1981, Σεπτέμβριος 1990 – Μάιος 1991, Μάιος 1994, Οκτώβριος 1998 – Μάιος 1999) κατά τη διάρκεια των οποίων ο ρυθμός των καθιζήσεων αυξήθηκε σημαντικά (έως και τέσσερις φορές) πέρα από την αναμενόμενη «κρίσιμη» τιμή ίση με 0.02 γεγονός που υποδηλώνει ότι και άλλα φαινόμενα πλέον του αναμενόμενου ερπυσμού επηρέασαν τις καθιζήσεις.

Ακολουθώντας τα βήματα που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα (Μεθοδολογία) προσδιορίστηκε ένα ανώτατο όριο για το ύψος του νερού στον ταμιευτήρα πέρα από το οποίο ο δείκτης καθίζησης ξεπερνά την κρίσιμη τιμή του 0.02 που έχει προσδιοριστεί από τη βιβλιογραφία. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ του δείκτη καθίζησης και της στάθμης ταμιευτήρα για τις διάφορες τιμές του ύψους του νερού. Είναι φανερό ότι η μέγιστη συσχέτιση εμφανίζεται όταν η στάθμη του ταμιευτήρα ξεπερνά τα 270m.

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για τις άλλες δύο παραμέτρους, το ρυθμό μεταβολής της στάθμης ταμιευτήρα και της βροχόπτωσης. Βρέθηκε ότι τα κατώφλια σε αυτές τις περιπτώσεις ήταν 1.3m/μήνα και 120mm/μήνα αντίστοιχα.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6 υπάρχουν διάφορες χρονικές περιόδους κατά τη διάρκεια των οποίων η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα, ο ρυθμός μεταβολής της στάθμης και ο ρυθμός μεταβολής της βροχόπτωσης είχαν τιμές πάνω από τα υπολογισμένα κατώφλια, ωστόσο ο δείκτης καθίζησης δεν ξεπέρασε πάντα την κρίσιμη τιμή του (0.02). Το ερώτημα που γεννάται είναι κάτω από ποιες συνθήκες ξεπερνά ο δείκτης καθίζησης την κρίσιμη τιμή του;

Από το Σχήμα 6 μπορεί να διεξαχθεί ότι οι τέσσερις χρονικές περιόδους Δεκέμβριος 1980 – Μάιος 1981, Σεπτέμβριος 1990 – Μάιος 1991, Μάιος 1994, Οκτώβριος 1998 – Μάιος 1999 κατά τη διάρκεια των οποίων ο δείκτης καθίζησης είναι  $> 0.02$  αντιστοιχούν σε περιόδους κατά τη διάρκεια των οποίων και οι τρεις παράμετροι που εξετάστηκαν ξεπερνούν τις κρίσιμες τιμές τους ταυτόχρονα. Και οι τέσσερις αυτές περιόδους ήταν οι μόνες περιόδους κατά τη διάρκεια των οποίων εντοπίστηκαν τιμές του δείκτη καθίζησης  $> 0.02$ .



Σχήμα 5. Μεταβολή του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ του δείκτη καθίζησης και της στάθμης ταμιευτήρα. Ο συντελεστής συσχέτισης εμφανίζει απότομη αύξηση για στάθμη ταμιευτήρα περίπου ίση με 270m.

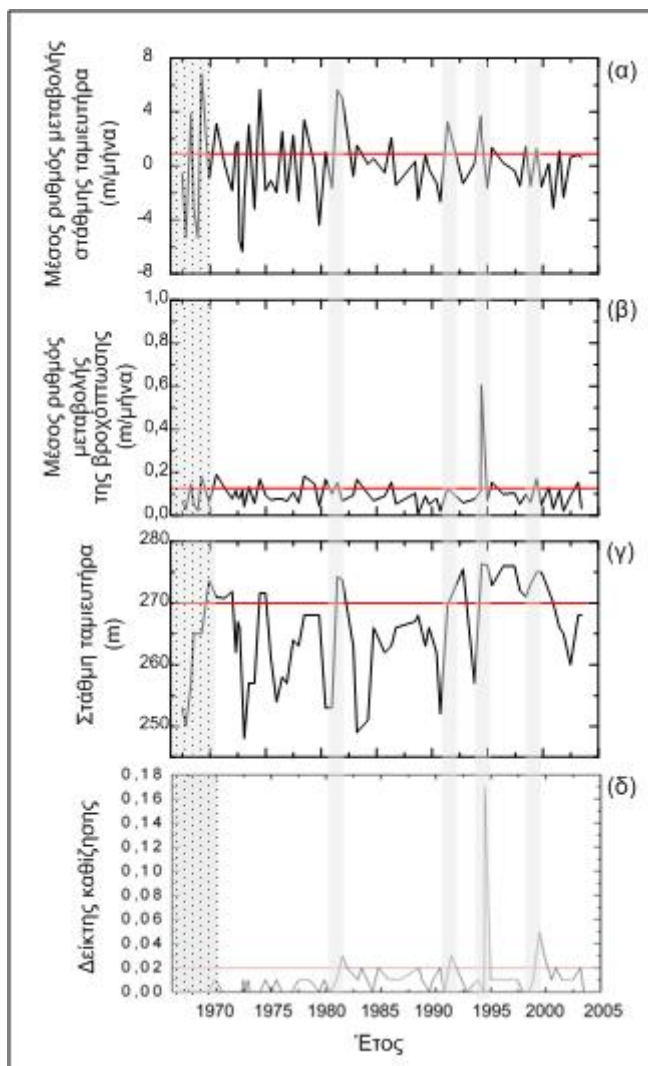
## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία αποτελούν τμήμα των γεωδαιτικών μετρήσεων παρακολούθησης του φράγματος των Κρεμαστών και καλύπτουν μια περίοδο > 35 ετών. Πρόκειται για ένα σχεδόν μοναδικό αρχείο δεδομένων που επέτρεψε τη μελέτη των μακροχρόνιων παραμορφώσεων της στέψης ενός χωμάτινου φράγματος καθώς επίσης των μηχανισμών που τις επηρεάζουν.

Η ανάλυση βασίστηκε σε μια νέα στατιστική τεχνική, στην βελτιστοποίηση του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ χρονοσειρών που περιγράφουν τη διακύμανση των τιμών συγκεκριμένων παραμέτρων του φράγματος και περιβαλλοντικών παραγόντων με χρήση ενός ανωπερατού φίλτρου μεταβλητού εύρους.

Το πρώτο βήμα της ανάλυσης ήταν η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων για μελέτη, ιδιαίτερα στην περίπτωση του ρυθμού των καθιζήσεων. Η επεξεργασία των δεδομένων αποκάλυψε ότι η αύξηση στο ρυθμό των καθιζήσεων της στέψης του φράγματος Κρεμαστών σχετίζεται με τη συνδυασμένη επίδραση τριών παραμέτρων όταν αυτές ξεπερνούν τις κρίσιμες τιμές τους ταυτόχρονα: στάθμη ταμιευτήρα (270m), ρυθμός μεταβολής στάθμης ταμιευτήρα (1.30m/μήνα) και ρυθμός μεταβολής βροχόπτωσης (100mm/μήνα).

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι τα πρώτα στο πλαίσιο μιας προσπάθειας για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης φαινομένων εκτός του ερπυσμού και της δευτερογενούς συμπύκνωσης του αργλικού πυρήνα στις καθιζήσεις της στέψης του φράγματος Κρεμαστών. Το αν τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε άλλα χωμάτινα φράγματα δεν μπορεί να απαντηθεί με σιγουριά χωρίς τις απαραίτητες ενδείξεις, ωστόσο δεν υπάρχει λόγος το φράγμα των Κρεμαστών να θεωρηθεί ως μια ιδιόζουσα περίπτωση.



Σχήμα 6. Διαγράμματα (α) του ρυθμού μεταβολής της στάθμης ταμειυτήρα, (β) του ρυθμού μεταβολής της βροχοπτώσεως, (γ) της στάθμης ταμειυτήρα και (δ) του δείκτη καθίζησης ως προς το χρόνο. Οι οριζόντιες γραμμές στα (α), (β) και (γ) αντιστοιχούν στις κρίσιμες τιμές που προέκυψαν από την στατιστική ανάλυση, ενώ στο (δ) στην κρίσιμη τιμή 0.02 του δείκτη καθίζησης που αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Οι τέσσερις λεπτές σκιασμένες περιοχές αντιστοιχούν στις χρονικές περιόδους όπου ο δείκτης καθίζησης είχε τιμές > 0.02. Η περίοδος 1966 – 1970 δεν συμπεριλήφθηκε στην ανάλυση καθώς τότε έλαβαν χώρα έργα για τη μείωση των διαρροών που κατά συνέπεια επηρέασαν τη συμπεριφορά του φράγματος.

## 7 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού για τη διάθεση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη και ιδιαίτερα τους κ.κ. Γ. Λέρη, Κ. Σκούρτη, Α. Κουντούρη και Φ. Στρεμμένο για τη συνεργασία και βοήθειά τους.



## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Alonso, E.E, Olivella, S. and Pinyol, N.M. 2005. A review of Beliche Dam. *Geotechnique*, 55(4): 267-285.
- Cetin, H., Laman, M. & Ertunc, A. 2000. Settlement and slaking problems in the world's fourth largest rock-fill dam, the Ataturk Dam in Turkey. *Engineering Geology*, 56: 225-242.
- Charles, J.A. 1986. The significance of problems and remedial works at British earth dams. In *Reservoirs: Proceedings of BNCOLD-IWES Conference*: 123-141.
- Committee on Safety of existing dams. 1983. *Safety of existing dams*. Washington: National Academy Press.
- ECI-Engineering Consultants INC. 1974. *Kremasta Project Report, Volume II*. Αδημοσίευτη μελέτη Μη δημοσιευμένη αναφορά για λογαριασμό της ΔΕΗ.
- Goltz, T. 1990. Program with 22 dams suffering. *Engineering News-Record (ENR)*: 40-41.
- Papazachos, V. & Papazachou, K. 1989. *Earthquakes of Greece*. Athens: Ziti Publications.
- Public Power Corporation. 2000. *The Kremasta dam project*. Athens. Unpublished Report.
- Pytharouli, S., Kontogianni, V., Psimoulis, P., Nickitopoulou, A., Stiros, S., Skourtis, C., Stremmenos, F. and Kountouris, A. 2007. Geodetic Monitoring of Earthfill and Concrete Dams in Greece. *Hydropower and Dams*, 2:82-85.
- Tedd, P., Charles, J.A., Holton, I.R. & Robertshaw, A.C. 1997. The effect of reservoir drawdown and long-term consolidation on the deformation of old embankment dams. *Geotechnique*, 47(1): 33-48.
- 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.

# Crucial parameters in the deformation of the Kremasta dam.

S.I. Pytharouli

*Post-doc Research Associate. Dept. of Civil Engineering. Strathclyde University, UK.*

S.C. Stiros

*Associate Professor. Geodesy Lab., Dept. of Civil Engineering, University of Patras.*

*Keywords:* Kremasta, dam, earthfill, settlements, crest, reservoir, precipitation, correlation, digital filter

**ABSTRACT:** The crest settlements of the Kremasta Dam (Greece) were analysed in combination with the elevation of the reservoir level and the rainfall height for the period 1966 – 2003. Using an analytical approach based on the optimization of the correlation coefficient between some critical parameters (reservoir level, rate of increase of the reservoir level and rainfall) in which a high-pass filter was applied, we determined critical values of these parameters. The significance of these thresholds is that if all of them are at the same time exceeded, the rate of the settlements of the crest is significantly increased.