

# Απόκριση χωμάτινου φράγματος κατά την κατασκευή και πλήρωση του: Επιπτώσεις από τη μεταβολή της δυσκαμψίας του σώματος στήριξης

Α.Μ. Κωμοδρόμος  
*Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΠΘ*

Κ.Χ. Αναστασόπουλος  
*M.Sc. Πολιτικός Μηχανικός ΔΕΗ / ΔΑΥΕ*

Ν.Σ. Κλήμης  
*Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ*

Μ.Κ. Παπαδοπούλου  
*Υποψήφια Διδάκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΠΘ*

Κ.Δ. Κουκαλιάρη  
*Υποψήφιος Διδάκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΠΘ*

*Λέξεις κλειδιά:* χωμάτινα φράγματα, πλήρωση φράγματος, εντατική και κινηματική κατάσταση φράγματος

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Αντικείμενο του παρόντος άρθρου αποτελεί η αριθμητική διερεύνηση των επιπτώσεων στην εντατική και κινηματική κατάσταση του φράγματος Ιλαρίωνα λόγω μεταβολής της δυσκαμψίας του σώματος στήριξης. Για την αποτίμηση των επιπτώσεων πραγματοποιούνται, πέραν της κύριας επίλυσης, τέσσερις πρόσθετες μη γραμμικές πολυσταδιακές επιλύσεις. Από τη σύγκριση των καθιζήσεων μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του φράγματος προκύπτει ότι η μεταβολή της δυσκαμψίας του σώματος του φράγματος επηρεάζει τις καθιζήσεις του πυρήνα. Οι μεταβολές είναι εντούτοις μικρές και δεν αντιστοιχούν στο ποσοστό μείωσης της δυσκαμψίας του σώματος του φράγματος. Ακόμη μικρότερες είναι οι επιπτώσεις στις οριζόντιες μετακινήσεις κατά την πλήρωση του ταμιευτήρα, ενώ περιορισμένη έως αμελητέα είναι επίσης και η μεταβολή των διατμητικών παραμορφώσεων στον πυρήνα του φράγματος.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο του παρόντος άρθρου αποτελεί η αριθμητική διερεύνηση των επιπτώσεων στην εντατική και κινηματική κατάσταση του φράγματος Ιλαρίωνα, λόγω μεταβολής της δυσκαμψίας του σώματος στήριξης. Αποτελεί ουσιαστικά ερευνητική επέκταση των εργασιών [1, 2] στις οποίες διερευνάται η απόκριση του φράγματος κατά την κατασκευή και πλήρωση του ταμιευτήρα του. Η διερεύνηση πραγματοποιείται στη θέση της κεντρικής εγκάρσιας διατομής του φράγματος, όπου το φράγμα εμφανίζει το μέγιστο του ύψος και οι υδροστατικές πιέσεις είναι οι δυσμενέστερες κατά τη φάση της πλήρωσης του ταμιευτήρα του.

Η διακριτοποίηση του φράγματος και της έδρασής του πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια ως προς τη γεωμετρία του φράγματος. Επιπρόσθετα λήφθηκε υπόψη η κάλυψη της περιοχής έδρασης με γεωμετρικά όρια και αποστάσεις ικανού εύρους ώστε να περιορισθούν σε αμελητέο μέγεθος οι επιπτώσεις των οριακών συνθηκών του προβλήματος. Το πλέγμα ανάλυσης στην κεντρική διατομή καλύπτει σε ικανοποιητικό βάθος το βραχώδες υπόβαθρο, εκτείνεται δε σε απόσταση 500 m ανάντη και 420 m κατόντη του άξονα του φράγματος. Η προσομοίωση της κατασκευής του φράγματος πραγματοποιείται σε δεκατέσσερα στάδια. Το πρώτο στάδιο αντιστοιχεί στην εκσκαφή του εδάφους μέχρι την προβλεπόμενη στάθμη

έδρασης του φράγματος. Κατά τα υπόλοιπα στάδια προσομοιώνεται η συνεχής κατασκευή του φράγματος. Επιπρόσθετο στάδιο επίλυσης αποτελεί η προσομοίωση της πλήρωσης του ταμιευτήρα και η διερεύνηση της επιρροής της στο εντατικό πεδίο του φράγματος.

Για την αποτίμηση των επιπτώσεων στην απόκριση του φράγματος λόγω μεταβολής της δυσκαμψίας του σώματος στήριξης πραγματοποιούνται τέσσερις πρόσθετες επιλύσεις. Κατά τις πρώτες δύο, η δυσκαμψία θεωρείται μεταβλητή συναρτήσεως της ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης  $\sigma_3'$ , ενώ κατά τις υπόλοιπες δύο θεωρείται αμετάβλητη. Τα εντατικά και κινηματικά μεγέθη όλων των αποτελεσμάτων συγκρίνονται μεταξύ τους καθώς και με τα αντίστοιχα της κύριας ανάλυσης (Κωμοδρόμος 2003).

## 2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΡΓΟΥ

Η θέση του φράγματος βρίσκεται ανάντη της Ι. Μ. Ιλαρίωνα επί του ποταμού Αλιάκμονα, στον νομό Κοζάνης. Το φράγμα είναι χωμάτινο (σώματα στήριξης από αμμοχάλικα), με κεντρικό αργιλικό πυρήνα. Το μήκος της στέγης του φράγματος είναι 565m περίπου και το μέγιστο ύψος του 130m από την θεμελίωση. Η στέγη του φράγματος έχει τοποθετηθεί στο απόλυτο υψόμετρο +410,0 m και η Α.Σ.Λ. (Ανώτατη Στάθμη Λίμνης) στο υψόμετρο +403,0 m, ενώ ο πυρήνας σταματά στο υψόμετρο +406,5m. Η κλίση των πρανών του φράγματος είναι στο μεν ανάντη πρανές 1:2,25 (κατακόρυφη:οριζόντια, υ:β), στο κατάντη 1:2 (υ:β), ενώ η κλίση των πρανών του πυρήνα είναι 5:1(υ:β). Η έδραση του φράγματος γίνεται κατά το μεγαλύτερο τμήμα του σε φυλλίτες, και κατά ένα μικρότερο τμήμα του στο ανάντη σώμα επί ασβεστολίθων. Ενδιάμεσα των δύο παραπάνω βραχωδών σχηματισμών υφίσταται μικρού σχετικά πλάτους μεταβατική ζώνη (εναλλαγές φυλλιτών - ασβεστολίθων). Στην κεντρική διατομή του φράγματος στην κοίτη του ποταμού μικρό τμήμα του ανάντη σώματος του φράγματος εδράζεται επί αλλουβιακών αποθέσεων. Για την έδραση του φράγματος στα αντερείσματα πραγματοποιήθηκαν γενικές εκσκαφές σε βάθος της τάξης των 10 m περίπου, ενώ τοπικά το βάθος των εκσκαφών φθάνει έως και τα 20 m, ώστε να απομακρυνθούν πλήρως χαλαρές μάζες, προϊόντα αποσάθρωσης του φυλλιτικού υποβάθρου, στις οποίες είχαν εκδηλωθεί κατολισθητικά φαινόμενα.

## 3 ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ - ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Η διακριτοποίηση του φράγματος καθώς και του υποβάθρου επί του οποίου εδράζεται πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Επιπρόσθετα λήφθηκε υπόψη η κάλυψη της περιοχής έδρασης με γεωμετρικά όρια και αποστάσεις ικανού εύρους ώστε να περιορισθούν σε αμελητέο πρακτικά βαθμό οι επιπτώσεις από τις οριακές συνθήκες του προβλήματος.

Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιούνται σε καθεστώς επίπεδης παραμόρφωσης, με χρήση του προγράμματος FLAC ver. 5 [3]. Ο κάνναβος ανάλυσης περιλαμβάνει 6366 στοιχεία και 6615 κόμβους, καλύπτει σε βάθος το βραχώδες υπόβαθρο μέχρι τη στάθμη +200,0 m, εκτείνεται δε σε απόσταση 500 m ανάντη και 420 m κατάντη του άξονα του φράγματος. Ο αυξημένος αριθμός στοιχείων κρίθηκε αναγκαίος προκειμένου να εξασφαλισθεί πυκνότητα διακριτοποίησης ικανή να επιτρέψει τον διαχωρισμό των διαφόρων συστατικών υλικών και κυρίως των φίλτρων εκατέρωθεν του πυρήνα. Στον Πίνακα 1 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων αντοχής, παραμορφωσιμότητας και διαπερατότητας των ανωτέρω στρώσεων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διερεύνηση της απόκρισης του φράγματος κατά την κατασκευή του και την πλήρωση του ταμιευτήρα. Στο Σχήμα 1 δίνεται το πλέγμα των στοιχείων της διατομής ανάλυσης, ενώ στο Σχήμα 2 οι επιμέρους συστατικές ζώνες. Για την προσομοίωση των εδαφικών ζωνών χρησιμοποιείται μη συζευγμένος καταστατικός νόμος Mohr-Coulomb. Σημειώνεται ότι για τη ζώνη του πυρήνα, των φίλτρων και του σώματος του φράγματος τα μέτρα παραμορφωσιμότητας ελήφθησαν μεταβαλλόμενα συναρτήσεως της ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης  $\sigma_3'$ . Η μεταβολή των μέτρων ελαστικότητας πραγματοποιείται καθ' όλη τη διάρκεια της επίλυσης ανά 200 κύκλους επίλυσης.

Πίνακας 1. Παράμετροι εδαφικών ζωνών φράγματος και υπεδάφους θεμελίωσης

Ζώνη	Χαρακτηρισμός	C (kPa)	Ten (kPa)	Φ	E (MPa)	ν	K (MPa)	G (MPa)	γ(KN/m <sup>3</sup> )	k (cm/sec)
1	Πυρήνας Φράγματος	30	0	20	*	0,35			20,9	1.0e-6
2, 2A	Φίλτρα	0	0	35	*	0,3			21,0	1.0e-2
3	Σώμα Στήριξης	0	0	40	*	0,3			22,0	1.0e-2, 1.0e-3
3A	Αμμοχάλικα Επιλεγμένα Crest zone	βλ. 4								
4	Ασβεστολιθικά βραχώδη υλικά λατομείου	0	0	45	50	0,3	46	21	22,0	1.0e-1, 1.0e-2
5	Τυχαία Υλικά Εκκαφών	5	0	25	30	0,35	38	13	19,5	1.0e-4, 1.0e-5
6	Αλλούβια	0	0	35	80	0,3	73	34	21,0	1.0e-2, 1.0e-3
7	Βραχώδες Υπόβαθρο Φυλλίτη	250	50	35	1000	0,25	711	427	25,0	1.0e-5
8	Ενδιάμεση Ζώνη Υποβάθρου	350	50	35	4000	0,23	2607	1717	25,0	1.0e-3, 1.0e-4
9	Βραχώδες Υπόβαθρο Ασβεστολίθου	500	100	40	10000	0,2	5787	4340	26,0	1.0e-3, 1.0e-4

\* Μεταβλητό E συναρτῆσει της τιμῆς της  $\sigma_3'$

**Συμβολισμοί**

C : Συνοχή

E : Μέτρο ελαστικότητας (Μέτρο του Young)

K : Μέτρο Μεταβολῆς Όγκου (Bulk Modulus)

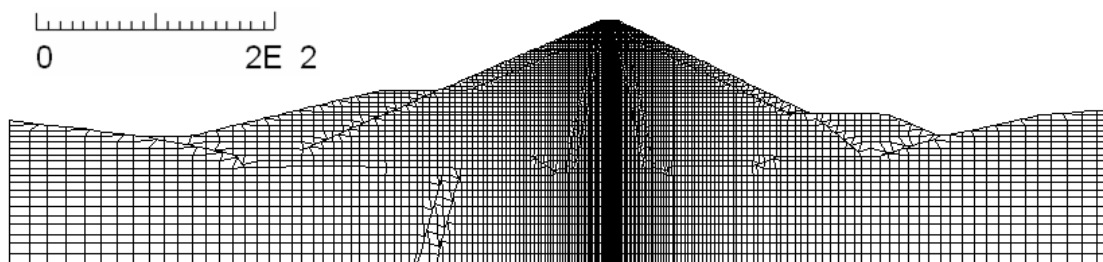
k : Διαπερατότητα

Φ : Γωνία Εσωτερικής Τριβῆς

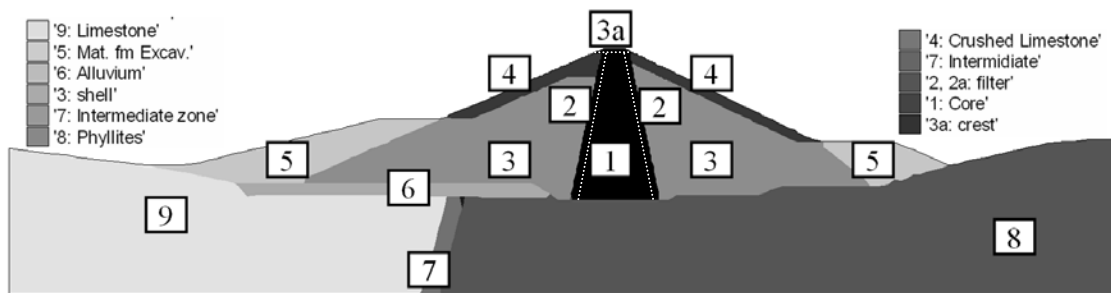
ν : Λόγος Poisson

G : Μέτρο Διάτμησης (Shear Modulus)

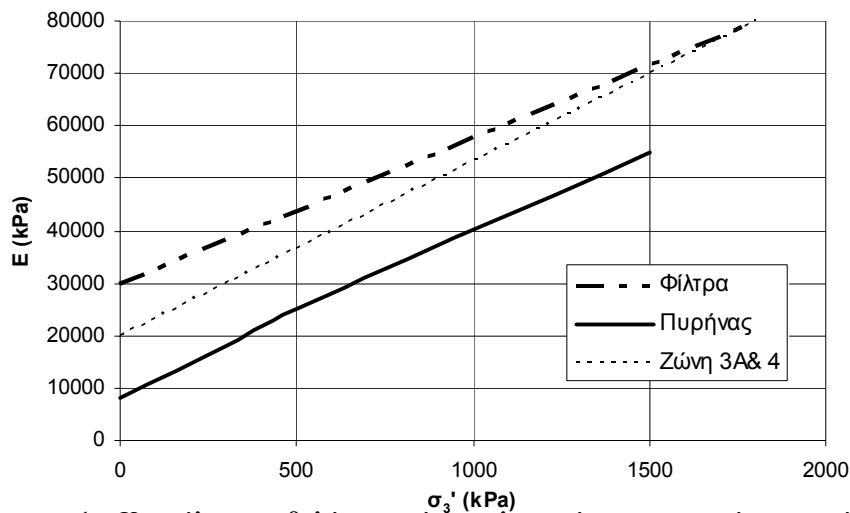
Ten : Εφελκυστική αντοχή



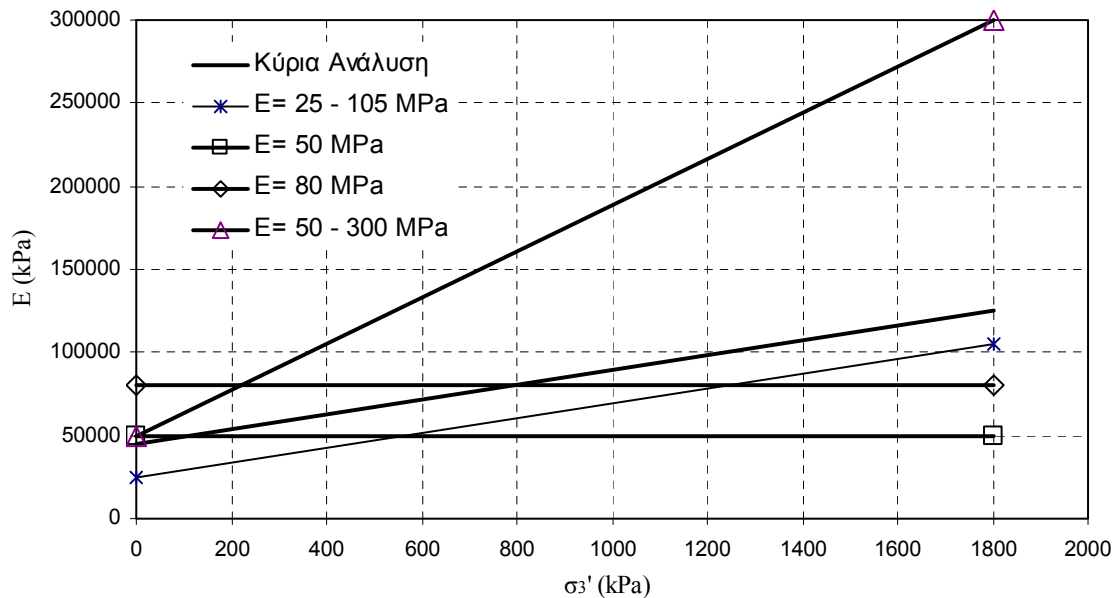
Σχήμα 1. Διακριτοποίηση περιοχῆς φράγματος σε πλέγμα πεπερασμένων διαφορών



Σχήμα 2. Απεικόνιση ζωνών με διαφορετικά χαρακτηριστικά και παραμέτρους



Διάγραμμα 1. Καμπύλες μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της τάσης  $\sigma_3'$  για τα υλικά του πυρήνα, των φίλτρων και των υλικών των ζωνών 3A και 4



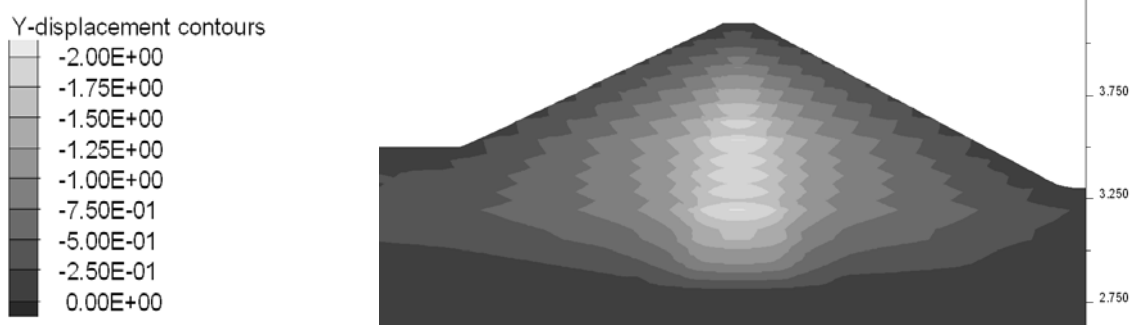
Διάγραμμα 2. Καμπύλες μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του σώματος του φράγματος συναρτήσει της τάσης  $\sigma_3'$  για την κύρια και τις πρόσθετες αναλύσεις

#### 4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

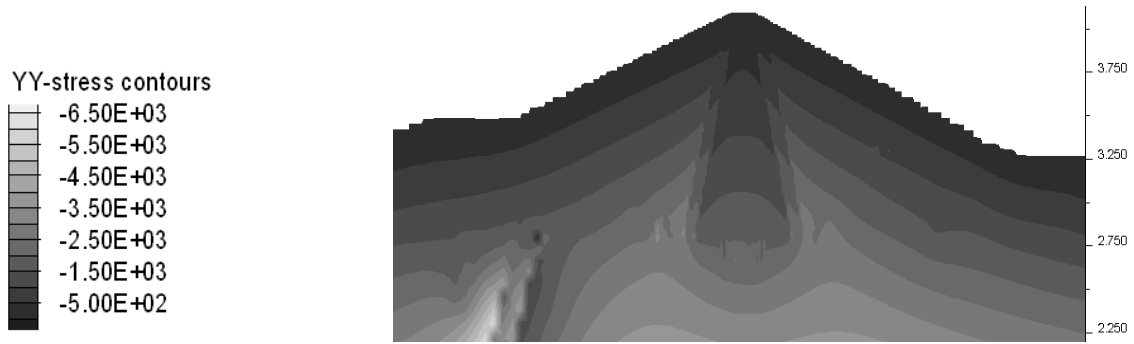
##### 4.1 Ολοκλήρωση κατασκευής φράγματος

Στα Σχήματα 3 και 4 απεικονίζονται οι ισοτιμές των κατακορύφων μετακινήσεων και κατακορύφων τάσεων κατά την ολοκλήρωση της κατασκευής του φράγματος σύμφωνα με τις παραδοχές και τις αρχές προσομοίωσης που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν στην κύρια επίλυση. Στο Διάγραμμα 3 δίνεται σύγκριση των κατακορύφων μετακινήσεων στο επίπεδο έδρασης του φράγματος. Η βύθιση στο κέντρο του πυρήνα ανέρχεται σε 0,12m, ενώ στα άκρα του πυρήνα, όπου οι ασκούμενες τάσεις είναι κάπως μεγαλύτερες, οι βυθίσεις ανέρχονται σε 0,14m περίπου. Η διαφοροποίηση αποδίδεται στην ανάρτηση του πυρήνα επί των φίλτρων και του σώματος, των οποίων τα μέτρα παραμορφωσιμότητας είναι μεγαλύτερα, είναι δε επίσης αναμενόμενη δράση, η οποία παρατηρείται σε φράγματα παρομοίου τύπου [4]. Μέγιστη διαφοροποίηση παρατηρείται στην περίπτωση της ανάλυσης  $E=80$  MPa, όπου λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας του σώματος στήριξης η ανάρτηση του πυρήνα είναι εντονότερη. Τη μικρότερη διαφοροποίηση εμφανίζει η ανάλυση με μέτρο ελαστικότητας του σώματος κυμαινόμενο από 25 έως 105 MPa. Στο Διάγραμμα 4 δίνεται σύγκριση των κατακορύφων μετακινήσεων στη θέση του άξονα του φράγματος. Η κύρια ανάλυση βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με τις καταγραφές μέχρι το υψόμετρο +320 (η τελευταία καταγραφή πραγματοποιήθηκε κατά την ολοκλήρωση του φράγματος στις 4-9-2007). Από το σημείο αυτό και μέχρι τη στέψη οι καταγραφές δίνουν μικρότερες τιμές από τη πρόβλεψη της κύριας επίλυσης. Θα πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι η ολοκλήρωση του φαινομένου της συνίζησης δεν έχει ολοκληρωθεί και υπό την έννοια αυτή αναμένεται αύξηση των καθιζήσεων. Η επίλυση με θεώρηση αυξημένου μέτρου ελαστικότητας για το σώμα του φράγματος ( $E=50\div 300$  MPa) προσεγγίζει καλύτερα την καμπύλη των καταγραφών. Αντίθετα η υιοθέτηση μικρότερων μέτρων ελαστικότητας για το σώμα του φράγματος οδηγεί σε μεγαλύτερη απόκλιση προβλέψεων και καταγραφών.

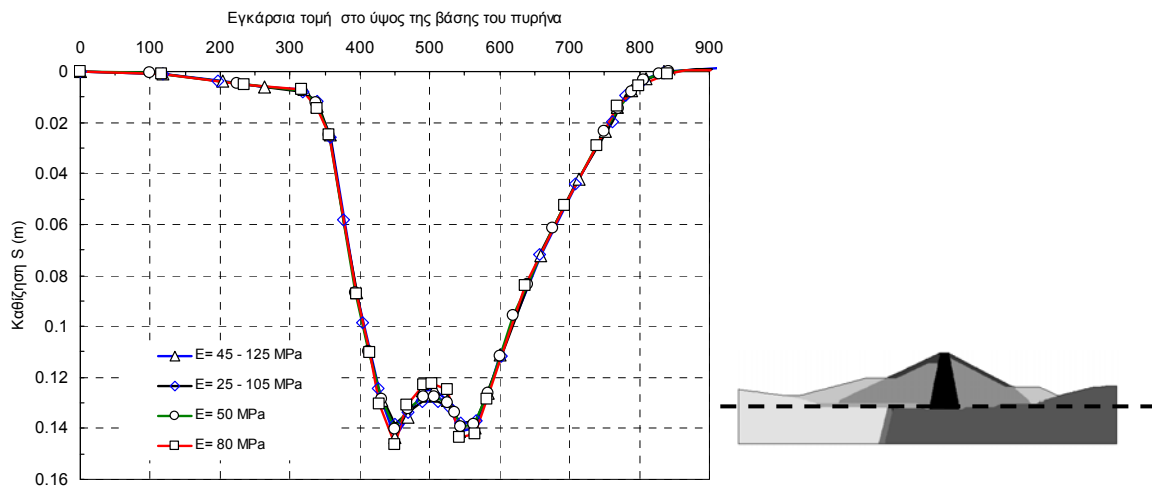
Από τις συγκρίσεις των καθιζήσεων από όλες τις επιλύσεις προκύπτει ότι η μεταβολή της δυσκαμψίας του σώματος του φράγματος επηρεάζει τις καθιζήσεις του πυρήνα. Οι μεταβολές είναι εντούτοις μικρές και δεν αντιστοιχούν στο ποσοστό μείωσης της δυσκαμψίας του σώματος του φράγματος. Τούτο είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι η αλληλεπίδραση σώματος και πυρήνα περιορίζεται στην ανάρτηση του πυρήνα μέσω των φίλτρων, με επιπτώσεις στην περιοχή της γειτνίασης. Στο επίπεδο της έδρασης του πυρήνα η μεταβολή είναι πρακτικά αμελητέα. Η ποιοτική σύγκριση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι όσο μειώνεται η δυσκαμψία τόσο μειώνεται και η διαφοροποίηση της καθιζήσης στη μέση και στην άκρη του πυρήνα ως αποτέλεσμα της μείωσης του φαινομένου της ανάρτησης του πυρήνα από τα φίλτρα και το σώμα του φράγματος.



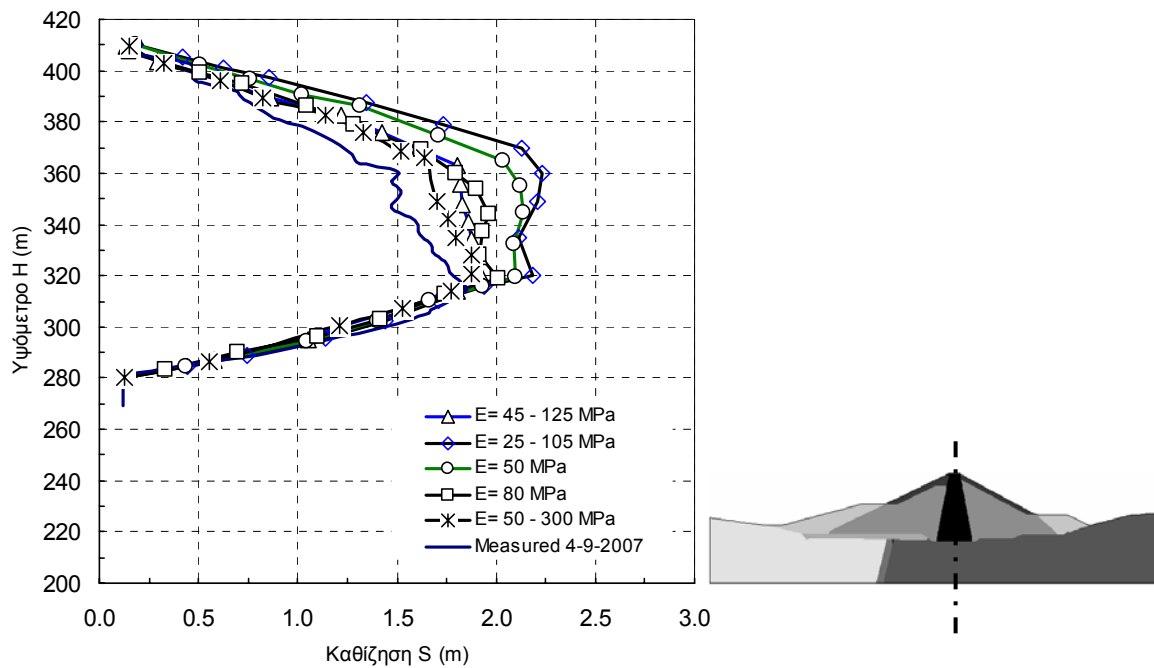
Σχήμα 3. Ισοτιμές κατακορύφων μετακινήσεων στην κεντρική διατομή, κύρια επίλυση



Σχήμα 4. Ισοτιμές κατακορύφων τάσεων στην κεντρική διατομή, κύρια επίλυση



Διάγραμμα 3. Σύγκριση των κατακορύφων μετακινήσεων στο επίπεδο έδρασης του φράγματος

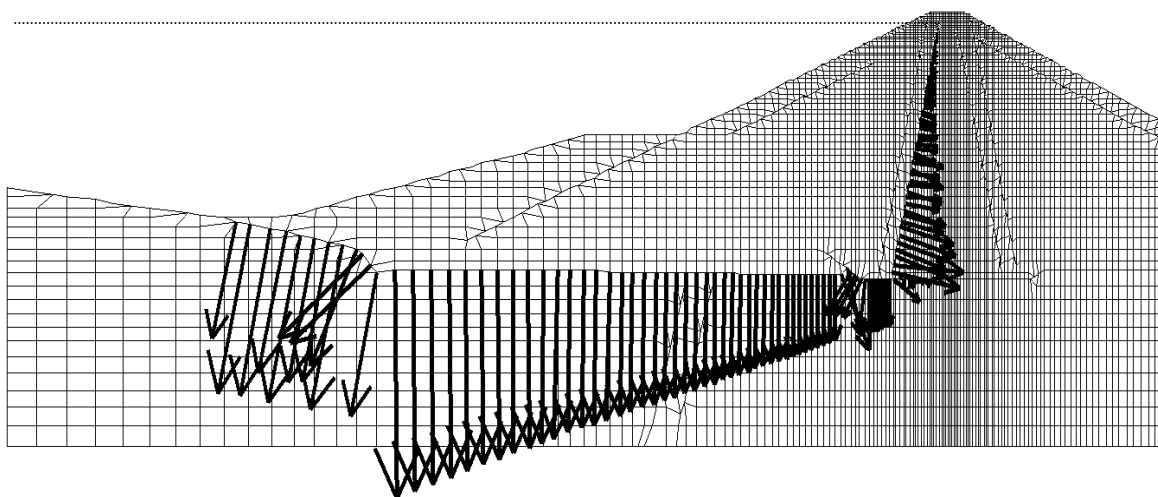


Διάγραμμα 4. Σύγκριση των κατακορύφων μετακινήσεων στη θέση του άξονα του φράγματος

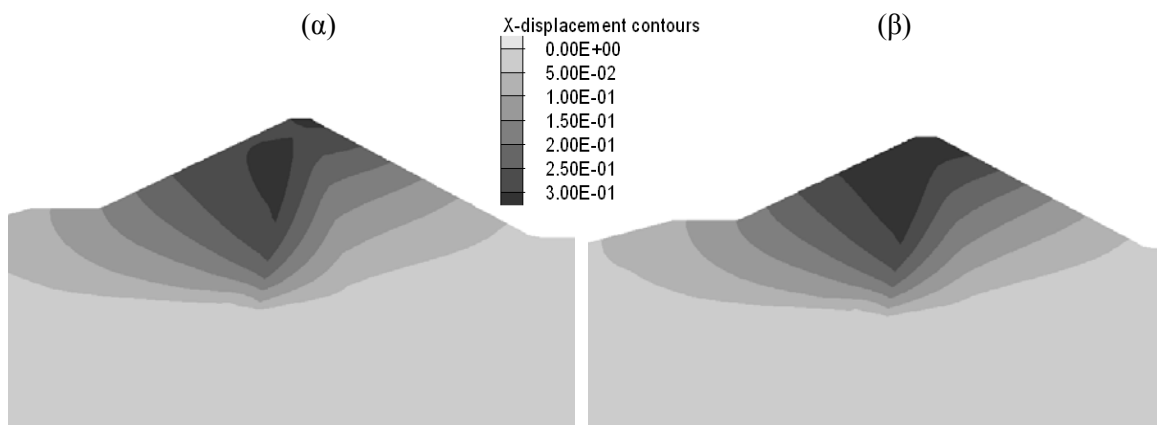
Το σύνολο της καθίζησης του φράγματος στην κεντρική διατομή, λαμβανομένης υπόψη και της συνίζησης, είναι μέχρι στιγμής ίση με 5,28 m, σύμφωνα με τις καταγραφές. Ας σημειωθεί ότι στην τιμή αυτή περιλαμβάνεται και η καθίζηση του βραχώδους υποβάθρου η οποία σύμφωνα με τις εκτιμήσεις της αριθμητικής ανάλυσης ανέρχεται σε 0,12 m (βλ. Διάγρ. 3). Η αντίστοιχη τιμή η οποία προκύπτει για την ίδια θέση από την κύρια ανάλυση είναι ίση με 5,15 m. Οι ανωτέρω τιμές είναι συμβατές με τις διεθνώς προτεινόμενες εμπειρικές προβλέψεις (Fell et al. 1992) για ύψος φράγματος 130 μέτρων και τα υιοθετηθέντα μέτρα ελαστικότητας του πυρήνα του φράγματος.

#### 4.2 Πλήρωση ταμιευτήρα φράγματος

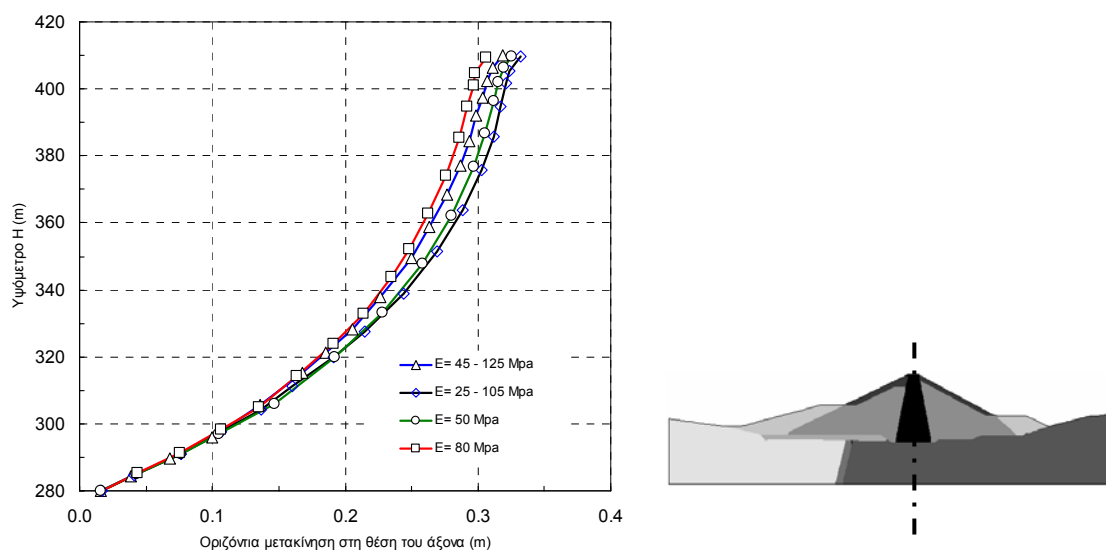
Για την προσομοίωση της άμεσης πλήρωσης του ταμιευτήρα θεωρείται ότι το υψηλής περατότητας ανάντη σώμα στήριξης ευρίσκεται υπό άνωση, ενώ στη διεπιφάνεια της ζώνης αυτής με το μικρής διαπερατότητας υπέδαφος και τον πυρήνα του φράγματος αναπτύσσονται τα υδροστατικά φορτία με το πλήρες μέγεθός τους. Για τη προσομοίωση της δράσης αυτής υπολογίζονται τα επικόμβια φορτία που αντιστοιχούν στα υδροστατικά φορτία για τη μέγιστη στάθμη πλήρωσης +403, τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 5. Επιπρόσθετα οι λιθορριπές τίθενται υπό άνωση και συνεπώς το φαινόμενο βάρος τους μειώνεται στο αντίστοιχο υπό άνωση. Δεδομένου επίσης ότι η πλήρωση για τα στοιχεία αυτά συνιστά καθεστώς αποφόρτισης, το μέτρο ελαστικότητας τόσο του ανάντη σώματος στήριξης όσο και των φίλτρων – στραγγιστηρίων των φίλτρων αυξάνεται, και εν προκειμένω ελήφθη 150 MPa και 120 MPa αντίστοιχα. Στα Σχήματα 6α και 6β απεικονίζονται οι ισοτιμές των οριζοντίων μετακινήσεων μετά την πλήρωση του φράγματος με θεώρηση μηδενικού κινηματικού πεδίου προ της πλήρωσης. Το Σχήμα 6α αντιστοιχεί στην κύρια επίλυση ( $E=45\div 125$  MPa), ενώ στο Σχήμα 6β στην επίλυση  $E=25\div 105$  MPa. Παρατηρείται ουσιαστικά ίδια εικόνα μετακινήσεων. Ακριβέστερη σύγκριση των μετακινήσεων δίνεται στο Διάγραμμα 5 όπου δίνεται η μεταβολή των οριζοντίων μετακινήσεων στη θέση του άξονα του φράγματος. Παρατηρείται ότι η διαφοροποίηση των μετακινήσεων είναι ιδιαίτερα μικρή. Η μικρότερη τιμή αντιστοιχεί στην ανάλυση  $E=80$  MPa γεγονός που επεξηγείται από τη θεώρηση υψηλότερης, σε σχέση με τις λοιπές αναλύσεις, τιμής μέτρου ελαστικότητας για τις ανώτερες στρώσεις του σώματος του φράγματος. Η μεγαλύτερη τιμή οριζόντιας μετακίνησης αντιστοιχεί στην ανάλυση  $E=25\div 105$  MPa, γεγονός που αποδίδεται στην ανωτέρω επίσης εξήγηση.



Σχήμα 5. Απεικόνιση υδροστατικών δυνάμεων σε εσωτερικούς κόμβους



Σχήμα 6. Ισοτιμές οριζοντίων μετακινήσεων μετά την πλήρωση του φράγματος, α) κύρια επίλυση, β) επίλυση  $E=25\pm 105$  MPa



Διάγραμμα 5. Σύγκριση των οριζοντίων μετακινήσεων στη θέση του άξονα του φράγματος

Συμπερασματικά εκτιμάται ότι η μεταβολή του μέτρου παραμορφωσιμότητας κατά την πλήρωση του ταμιευτήρα δεν επιφέρει ουσιαστική μεταβολή στις οριζόντιες μετακινήσεις οι οποίες είναι της τάξης των 0,30 m στον πυρήνα. Περιορισμένη έως αμελητέα είναι επίσης και η μεταβολή των διατμητικών παραμορφώσεων στον πυρήνα του φράγματος, οι τιμές των οποίων παραμένουν πάντοτε εντός των ορίων σχεδιασμού με τη μέγιστη διατμητική παραμόρφωση να μην υπερβαίνει την τιμή του 2%.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο του παρόντος άρθρου απετέλεσε η αριθμητική διερεύνηση των επιπτώσεων στην εντατική και κινηματική κατάσταση του φράγματος Ιλαρίωνα λόγω μεταβολής της δυσκαμψίας του σώματος στήριξης. Για την αποτίμηση των επιπτώσεων στην απόκριση του φράγματος λόγω μεταβολής της δυσκαμψίας του σώματος στήριξης πραγματοποιούνται τέσσερις πρόσθετες επιλύσεις. Κατά τις δύο η δυσκαμψία θεωρείται μεταβλητή συναρτήσει της ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης  $\sigma_3'$ , όπως και στην κύρια ανάλυση, ενώ κατά τις υπόλοιπες δύο θεωρείται αμετάβλητη.



Η κύρια ανάλυση βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με τις καταγραφές μέχρι το υψόμετρο +320. Από το σημείο αυτό και μέχρι τη στέψη οι καταγραφές δίνουν μικρότερες τιμές από την πρόβλεψη της κύριας επίλυσης. Θα πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι η ολοκλήρωση του φαινομένου της συνίζησης δεν έχει ολοκληρωθεί και υπό την έννοια αυτή αναμένεται αύξηση των καθιζήσεων. Η επίλυση με θεώρηση αυξημένου μέτρου ελαστικότητας για το σώμα του φράγματος ( $E=50\div 300$  MPa) προσεγγίζει καλύτερα την καμπύλη των καταγραφών. Αντίθετα η υιοθέτηση μικρότερων μέτρων ελαστικότητας για το σώμα του φράγματος οδηγεί σε μεγαλύτερη απόκλιση προβλέψεων και καταγραφών. Από τις συγκρίσεις των καθιζήσεων από όλες τις επιλύσεις μέχρι και την ολοκλήρωση του φράγματος προκύπτει ότι η μεταβολή της δυσκαμψίας του σώματος του φράγματος επηρεάζει τις καθιζήσεις του πυρήνα. Οι μεταβολές είναι εντούτοις μικρές και δεν αντιστοιχούν στο ποσοστό μείωσης της δυσκαμψίας του σώματος του φράγματος. Τούτο είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι η αλληλεπίδραση σώματος και πυρήνα περιορίζεται στην ανάρτηση του πυρήνα μέσω των φίλτρων, με επιπτώσεις στην περιοχή της γειννίας. Στο επίπεδο της έδρασης του πυρήνα η μεταβολή είναι πρακτικά αμελητέα. Η ποιοτική σύγκριση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι όσο μειώνεται η δυσκαμψία τόσο μειώνεται και η διαφοροποίηση της καθίζησης στη μέση και στην άκρη του πυρήνα ως αποτέλεσμα της μείωσης του φαινομένου της ανάρτησης του πυρήνα από τα φίλτρα και το σώμα του φράγματος.

Το σύνολο της καθίζησης του φράγματος στην κεντρική διατομή, λαμβανομένης υπόψη και της συνίζησης, είναι αθροιστικά από την έναρξη κατασκευής του ίση με 5,28 m, σύμφωνα με τις καταγραφές. Ας σημειωθεί ότι στην τιμή αυτή περιλαμβάνεται και η καθίζηση του βραχώδους υποβάθρου η οποία σύμφωνα με τις εκτιμήσεις της αριθμητικής ανάλυσης ανέρχεται σε 0,12 m. Η αντίστοιχη τιμή η οποία προκύπτει για την ίδια θέση από την κύρια ανάλυση είναι ίση με 5,15 m. Οι ανωτέρω τιμές είναι συμβατές με τις διεθνώς προτεινόμενες εμπειρικές προβλέψεις (Fell et al. 1992) για ύψος φράγματος 130 μέτρων και τα υιοθετηθέντα μέτρα ελαστικότητας του πυρήνα του φράγματος.

Κατά την πλήρωση του ταμειυτήρα αντίστοιχα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μεταβολή του μέτρου παραμορφωσιμότητας δεν επιφέρει ουσιαστική μεταβολή στις αναμενόμενες οριζόντιες μετακινήσεις οι οποίες είναι της τάξης των 0,30 m στην περιοχή της στέψης, σε κεντρική διατομή του φράγματος. Περιορισμένη έως αμελητέα είναι επίσης και η μεταβολή των διατμητικών παραμορφώσεων στον πυρήνα του φράγματος, οι τιμές των οποίων παραμένουν πάντοτε εντός των ορίων σχεδιασμού και η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση δεν υπερβαίνει την τιμή του 2%.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι ειδικά στην περίπτωση της πλήρωσης οι περιορισμένες επιπτώσεις, από τις διάφορες πρόσθετες αναλύσεις, θα πρέπει να αποδοθούν στο σχεδιασμό του φράγματος, και ειδικότερα την ήπια κλίση του κατάντη πρανούς του, και δεν θα πρέπει να αποτελέσουν γενικό συμπέρασμα για όλα τα φράγματα με αργιλικό πυρήνα και σώμα στήριξης από βραχώδη υλικά.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς επιθυμούν να εκφράσουν τις θερμές ευχαριστίες τους προς τη ΔΑΥΕ – ΔΕΗ για τη χρηματοδότηση του σχετικού ερευνητικού προγράμματος και την άδεια δημοσίευσης των κυριότερων συμπερασμάτων. Ευχαριστίες εκφράζονται επίσης προς τους καθηγητές Γ. Αθανασόπουλο και Γ. Μπουκοβάλα για τις γόνιμες συζητήσεις και τις χρήσιμες συμβουλές τους καθ' όλη τη διάρκεια υλοποίησης του ερευνητικού έργου.

#### ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Κωμοδρόμος, Α. 2003. Διερεύνηση της εντατικής και κινηματικής κατάστασης του φράγματος Ίλαρίωνα κατά τη φάση κατασκευής και πλήρωσης του ταμειυτήρα του. Ερευνητικό Πρόγραμμα [2760], Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
2. Κωμοδρόμος, Α., Κλήμης, Ν., Αναστασιάδης, Α. & Αναστασόπουλος, Κ. 2006. Πρόβλεψη απόκρισης χωμάτινου φράγματος κατά την κατασκευή και την πλήρωση του

- ταμιευτήρα του. 5<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη, τόμος ΙΙΙ, σελ. 335-342.
3. Itasca Consulting Group Inc. 2005. FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua. User's Manuals version 5.0
  4. Κωμοδρόμος, Α., Κλήμης, Ν., Αναστασιάδης, Α. & Αναστασόπουλος, Κ. 2001. Πολυσταδιακή μη γραμμική ανάλυση προσομοίωσης της κατασκευής και πλήρωσης του φράγματος Παπαδιά. 4<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, σελ. 505-512, Αθήνα.
  5. Fell, R., MacGregor, P. & Stapledon, D. 1992. Geotechnical engineering of embankments dams, Rotterdam, Balkema.

# Response prediction of a rock-fill dam during construction and the impoundment of the reservoir: Effects from the variation of rock stiffness

E.M. Comodromos

*Associate Professor, University of Thessaly*

K. C. Anastasopoulos

*M.Sc. Civil Engineer PPC*

N.S. Klimis

*Associate Professor, University of Democritus*

M.K. Papadopoulou

*Ph.D. Student, University of Thessaly*

K.D. Koukaliaroglou

*Ph.D. Student, University of Thessaly*

**ABSTRACT:** The objective of this paper is the numerical estimation of the effect of rock stiffness variation to the stress and kinematic field of Ilarionas' rock-fill dam. To achieve this target four non linear multistage analyses have been carried out in addition to the main analysis. From the comparison of settlements corresponding to the end of construction arises that stiffness variation affects the core settlements. However it should be mentioned that the level of variation is generally small. The effect to the horizontal displacements during impoundment is even smaller while the variation of shear strains at the core of the dam is almost negligible.