

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ ΧΩΜΑΤΙΝΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ. ΦΡΑΓΜΑ Υ.Η.Σ. ΣΦΗΚΙΑΣ, ΒΕΡΟΙΑ

Λουπασάκης Κ.¹, Χρηστάρας Β.¹, Δημόπουλος Γ.¹ και Χατζηγώγος Θ.²

¹ Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., 54124
Θεσσαλονίκη, clouras@geo.auth.gr, christar@geo.auth.gr, gdimop@geo.auth.gr

² Εργαστήριο Εδαφομηχανικής & Θεμελιώσεων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., 54124
Θεσσαλονίκη, hatz@geo.civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας δημοσίευσης παρουσιάζεται η διαδικασία και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε προκειμένου να διερευνηθεί η απόκριση του φράγματος της Σφηκιάς στην επιβολή των στατικών φορτίσεων. Οι επιβαλλόμενες στατικές φορτίσεις που εξετάζονται είναι αυτές που προκαλούνται κατά την κατασκευή του φράγματος από τα υπερκείμενα υλικά επίχωσης, καθώς επίσης και αυτές που ασκούνται από τον υδάτινο όγκο κατά την πλήρωση της λεκάνης κατάκλισης. Η ύπαρξη δεδομένων από ειδικές εργαστηριακές δοκιμές για τα υλικά όλων των ζωνών, καθώς και η ύπαρξη μετρήσεων από τα όργανα επιτόπιας παρακολούθησης του φράγματος, κατέστησαν εφικτή τη διεξαγωγή πληθώρας παραμετρικών αναλύσεων με ελεγχόμενα αποτελέσματα. Οι αναλύσεις αυτές οδήγησαν στη σχεδίαση μιας τεκμηριωμένης διαδικασίας προσομοίωσης, τα αποτελέσματα της οποίας συσχετίστηκαν και αξιολογήθηκαν με τη χρήση των μετρήσεων των οργάνων επιτόπιας παρακολούθησης.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη της εντατικής και κινηματικής κατάστασης ενός φράγματος κατά τη διάρκεια κατασκευής του σώματος και πλήρωσης της λεκάνης κατάκλισης αποτελεί ένα ιδιαίτερα σύνθετο πρόβλημα για το οποίο δε διαθέτονται αναλυτικές λύσεις. Η πολυσταδιακή κατασκευή του αναχώματος, η μονόπλευρη φόρτίσή του από τον υδάτινο όγκο του ταμιευτήρα, η μη γραμμική απόκριση των υλικών και η σύζευξη των μηχανικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών των σωμάτων στήριξης και του πυρήνα συνθέτουν ένα πρόβλημα του οποίου η προσέγγιση μπορεί να γίνει μόνο με τη χρήση των μεθόδων της Υπολογιστικής Γεωτεχνικής Μηχανικής.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή των μεθόδων της υπολογιστικής γεωτεχνικής μηχανικής είναι η λεπτομερής γνώση των καταστατικών νόμων που αναπαράγουν τις πραγματικές σχέσεις τάσεων - παραμορφώσεων των υλικών που δομούν τις επιμέρους ζώνες του φράγματος. Αντίστοιχα, για την επιλογή των βέλτιστων καταστατικών νόμων απαιτείται η γνώση των μηχανικών παραμέτρων αλλά και των πραγματικών σχέσεων τάσεων - παραμορφώσεων των υλικών.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζεται κατά την προσομοίωση των χωμάτων φραγμάτων είναι η ελλιπή γνώση των μηχανικών παραμέτρων των αδρόκοκκων υλικών που δομούν τις ζώνες του σώματος στήριξης. Η πραγματοποίηση εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού της αντοχής και των παραμορφώσεων στα συγκεκριμένα υλικά παρουσιάζει πολλές δυσκολίες, κυρίως λόγω του μεγέθους των δειγμάτων που απαιτούνται για τη διεξαγωγή τους. Η απουσία των συγκεκριμένων εργαστηριακών δεδομένων καθιστά πολύ δύσκολη την ακριβή προσομοίωση της συμπεριφοράς των ζωνών του σώματος στήριξης και κατ' επέκταση της συμπεριφοράς του συνόλου του σώματος.

Στα πλαίσια της παρούσας δημοσίευσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη μελέτη της απόκρισης του σώματος του φράγματος της Σφηκιάς στην επιβολή των στατικών φορτίσεων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια κατασκευής του σώματος και πλήρωσης της λεκάνης κατάκλισης. Το συγκεκριμένο φράγμα επιλέχθηκε ως το πλέον κατάλληλο λόγω της ύπαρξης ειδικών εργαστηριακών δοκιμών για τα υλικά όλων των ζωνών. Με τη χρήση των εργαστηριακών δεδομένων κατέ-

στη δυνατόν να προσδιοριστούν οι καταστατικοί νόμοι και οι μηχανικές ιδιότητες όλων των υλικών που δομούν τις επιμέρους ζώνες του φράγματος. Ο ακριβής προσδιορισμός των στοιχείων αυτών, σε συνδυασμό με τις υπολογιστικές δυνατότητες του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Plaxis, κατέστησαν εφικτή τη διεξαγωγή πρωτότυπων διερευνήσεων, οι οποίες τελικά οδήγησαν στη σχεδίαση μιας τεκμηριωμένης διαδικασίας προσομοίωσης. Στο σημείο αυτό συνέβαλαν και τα δεδομένα των οργάνων που είναι εγκατεστημένα στο εσωτερικό του σώματος. Τα συγκεκριμένα πραγματικά δεδομένα προσέφεραν τη δυνατότητα ελέγχου αλλά και βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΥΗΕ ΣΦΗΚΙΑΣ

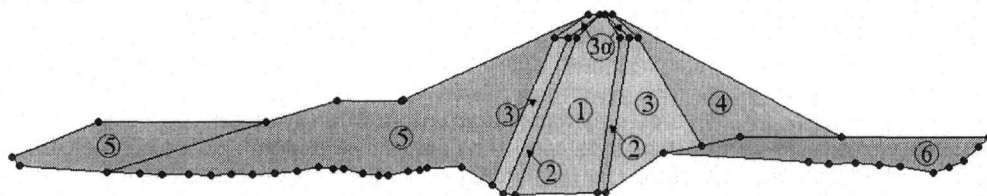
Το φράγμα του υδροηλεκτρικού εργοστασίου (ΥΗΕ) Σφηκιάς αποτελεί τη δεύτερη από τα κάτωτι βαθμίδα των υδροηλεκτρικών εργοστασίων του Αλιάκμονα ποταμού και τέθηκε σε λειτουργία το 1985. Το συγκεκριμένο φράγμα ανήκει στην κατηγορία των λιθόρριπτων φραγμάτων με κεκλιμένο κεντρικό αργιλικό πυρήνα. Το μέγιστο ύψος του σώματος είναι 82 m και η στέψη του έχει μήκος 220 m. Το απόλυτο υψόμετρο της στέψης του βρίσκεται στα 151 m, ο ταμιευτήρας του φράγματος είναι σχεδιασμένος με ανώτατη στάθμη πλημμύρας στα 147 m, ενώ η μέση στάθμη λειτουργίας του βρίσκεται στα 144,5 m (Δ. Λιάκουρης, 1995).

Το σύνολο των επιφανειακών και υπόγειων έργων του ΥΗΕ είναι θεμελιωμένα σε βραχώδες υπόβαθρο. Πιο συγκεκριμένα είναι θεμελιωμένα στους αμφιβολιτικούς γενέσιους, τους μεταανδεσίτες και τους μαζώδεις αμφιβολίτες της ζώνης της Αλμωπίας.

Όπως φαίνεται και στην τομή της εικόνας 1 στο σώμα του φράγματος διακρίνονται έξι διαφορετικής σύστασης ζώνες. Από τις ζώνες αυτές, η ζώνη 1 αποτελεί τον αδιαπέρατο αργιλικό πυρήνα, η ζώνη 2 το φίλτρο που περιβάλλει τον πυρήνα και οι υπόλοιπες το σώμα στήριξης του πυρήνα.

Ο αδιαπέρατος αργιλικός πυρήνας (Ζώνη 1) κατασκευάστηκε από αμμώδεις αργίλους στις οποίες περιέχονται κροκάλες σε ποσοστό που δεν υπερβαίνει το 15%. Οι ζώνες που δομούν το σώμα στήριξης αποτελούνται από άμμους με κροκάλες στις οποίες το ποσοστό της άμμου μειώνεται ανάλογα με την απόσταση της ζώνης από τον πυρήνα. Πιο συγκεκριμένα, στα φίλτρα (ζώνη 2) τα ποσοστά της άμμου φτάνουν μέχρι και το 55%, στις μεταβατικές ζώνες 3 και 3^α τα ποσοστά της άμμου φτάνουν το 35% και το 22% αντίστοιχα, ενώ στη ζώνη 5 τα ποσοστά αυτά δεν υπερβαίνουν το 27%. Εκτός από άμμους και κροκάλες στα υλικά των ζωνών αυτών περιέχεται και άργιλος σε ποσοστά που κυμαίνονται γύρω από το 10%.

Στο σώμα του φράγματος έχουν εγκατασταθεί όργανα για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων και της πιεζομετρίας. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι: το δίκτυο των τριγωνομετρικών σημείων ελέγχου επιφανειακής καθίζησης (S-1 έως S-31), οι οριζόντιες συσκευές Idel (HI-1 έως HI-5), τα κατακόρυφα Idel (L+IS-1 έως L+IS-2), τα φρεάτια παρατήρησης (PW-1 έως PW-11) και τα πιεζομετρικά κύτταρα σώματος και θεμελίωσης (Pz-1 έως Pz-46 και Pzf-1 έως Pzf-4). Εκτός από το δίκτυο των τριγωνομετρικών σημείων που είναι κατανεμημένο στην επιφάνεια του σώματος, τα υπόλοιπα όργανα είναι διατεταγμένα στο εσωτερικό του φράγματος, κατά μήκος εγκάρσιων τομών. Οι τομές αυτές είναι η A-A (εικόνα 1) και η F-F (εικόνα 3).



Εικόνα 1. Εγκάρσια τομή στο υψηλότερο κεντρικό τμήμα του φράγματος (τομή A-A).

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Η μελέτη της απόκρισης του σώματος του φράγματος της Σφηκιάς στην επιβολή στατικών φορτίσεων πραγματοποιείται με την προσομοίωση των δύο εγκάρσιων τομών του σώματος στις οποίες

έχουν τοποθετηθεί τα όργανα επιτόπια παρακολούθησης των μετακινήσεων και της πιεζομετρίας. Η προσομοίωση διεξάγεται, σε καθεστώς επίπεδης παραμόρφωσης, με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Plaxis (Brinkgreve et al, 1998).

Η ψηφιοποίηση της γεωμετρίας των τομών, A-A και F-F, πραγματοποιήθηκε με κύριο γνώμονα την ακριβή απεικόνιση των πραγματικών γεωμετρικών στοιχείων του σώματος. Το βραχύδες υπόβαθρο θεμελίωσης του φράγματος δε συμπεριλήφθηκε στη γεωμετρία των τομών καθώς η μεγάλη διαφορά της δυσκαμψίας του από αυτή των υλικών του φράγματος επέτρεψε τον ορισμό οριακών συνθηκών που εξασφάλιζαν πλήρη αμεταθετότητα κατά μήκος όλης της επιφάνειας θεμελίωσης. Για την αυτόματη διακριτοποίηση των τομών επιλέχθηκε ο λεπτός κάναβος. Με την επιλογή αυτή τα στοιχεία που δημιουργούνται στα κεντρικά τμήματα δε διαφέρουν πολύ από τα μικρού μεγέθους στοιχεία που προκύπτουν στην περιοχή αποσφήνωσης των ζωνών.

Για την προσομοίωση της τομής F-F, ορίστηκαν τρεις υπολογιστικές φάσεις για την κατασκευή του σώματος και δύο φάσεις για την άνοδο της στάθμης της λίμνης. Ενώ, για την τομή A-A, ορίστηκαν τέσσερις φάσεις για την κατασκευή του σώματος και τρεις για την πλήρωση της λίμνης. Επιπλέον των φάσεων αυτών, για κάθε τομή, ορίστηκαν δύο υπολογιστικές φάσεις μηδενικής φόρτισης, “πλαστικά μηδενικά βήματα” (Plastic Nil - Steps), προκειμένου να διασφαλιστεί η ισορροπία των πεδίων των τάσεων (Brinkgreve et al, 1998). Τα πλαστικά μηδενικά βήματα ορίστηκαν έτσι ώστε, το πρώτο να εξισορροπεί το πεδίο των τάσεων που προκύπτει μετά το τέλος της κατασκευής, και το δεύτερο, το πεδίο που παράγεται από την πλήρωση της λεκάνης κατάκλυσης. Οι επιλογές που έγιναν σχετικά με τον αριθμό των φάσεων, με το εύρος των τμημάτων που κατασκευάστηκαν σε κάθε φάση καθώς και με τη σκοπιμότητα ύπαρξης των πλαστικών μηδενικών βημάτων είναι αποτελέσματα αναλυτικών και τεκμηριωμένων διερευνήσεων (Λουπασάκης, 2002).

Οι παραμορφώσεις που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της κατασκευής του φράγματος, αλλά και κατά τη διάρκεια της σταδιακής διεύθυνσης του νερού, ήταν κατά αποκλειστικότητα ελαστοπλαστικές και δε θεωρήθηκαν συνθήκες που να επιτρέπουν την ανάπτυξη φαινομένων στερεοποίησης. Για το λόγο αυτό σε όλες τις υπολογιστικές φάσεις της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ο “πλαστικός υπολογισμός” (Plastic Calculation).

Από τη σύγκριση των πειραματικών καμπυλών τάσεων – παραμορφώσεων με τις αντίστοιχες καμπύλες που παράγονται από τους επιμέρους καταστατικούς νόμους προέκυψε ότι η συμπεριφορά των υλικών του πυρήνα αναπαράγεται από το ισότροπα κρατυνόμο μοντέλο τύπου CAP με επιφάνεια αστοχίας Mohr – Coulomb (Hardening Soil Model) (Schanz, 1998), ενώ η απόκριση των υλικών των υπόλοιπων ζωνών περιγράφεται από το ελαστικό – τέλεια πλαστικό μοντέλο Mohr – Coulomb.

Οι τιμές των μηχανικών παραμέτρων που προτάθηκαν, μέσω της αξιοποίησης των εργαστηριακών δεδομένων, για την προσομοίωση του φράγματος αναφέρονται στον πίνακα 1. Από το σύνολο των τιμών αυτών ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στις τιμές του μέτρου ελαστικότητας. Στο κρατυνόμο μοντέλο (Schanz, 1998) οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας προσαρμόζονται στις μεταβολές του σ_3' , τροποποιώντας παράλληλα και τη σχέση τάσεων – παραμορφώσεων. Επομένως, για τον ορισμό του καταστατικού νόμου αρκεί να υπολογιστεί μια αρχική τιμή του μέτρου ελαστικότητας η οποία να αντιστοιχεί σε μια ελάχιστη τάση αναφοράς P^{ref} . Αντίθετα, στο τέλεια ελαστοπλαστικό μοντέλο οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας παραμένουν σταθερές ανεξάρτητα από τις μεταβολές που συμβαίνουν στο πεδίο των τάσεων. Προκειμένου να εξαλειφθούν τα σφάλματα που υπεισέρχονται στη διαδικασία εξαιτίας του γεγονότος αυτού, οι τιμές της παραμέτρου που χρησιμοποιούνται στις καταστατικές εξισώσεις (Smith & Griffith, 1982, Vermeer & de Borst, 1984) πρέπει να επιλέγονται και να εναλλάσσονται έτσι ώστε να αντιστοιχούν στο πραγματικό πεδίο των τάσεων, όπως αυτό διαμορφώνεται κατά την εξέλιξη του έργου. Για την αντιμετώπιση του ζητήματος αυτού εφαρμόστηκε μια πρωτότυπη διαδικασία (Λουπασάκης, 2002) με την οποία, για κάθε υπολογιστική φάση, προσδιορίστηκε η κατανομή των τιμών των πλευρικών τάσεων, σ_3' . Με βάση την κατανομή των σ_3' , οι ζώνες των τομών διαιρέθηκαν σε τμήματα έτσι ώστε σε κάθε ένα από αυτά να είναι δυνατός ο ορισμός των κατάλληλων μέσων τιμών του μέτρου ελαστικότητας που αντιστοιχούν σε κάθε φάση της διαδικασίας προσομοίωσης. Επισημαίνεται ότι, οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας που υπολογίστηκαν για τα υλικά των ζωνών του σώματος στήριξης και των φίλτρων του φράγματος προέρχονται από τριαξονικές δοκιμές CD που πραγματοποιήθηκαν με $\sigma_3' = 200, 400, 600$ και 800 KN/m^2 .

Από την εφαρμογή της προαναφερόμενης διαδικασίας στην τομή A-A προέκυψε, ότι κατά τις τρεις πρώτες φάσεις της κατασκευής δε βρέθηκαν σημεία στα οποία η τιμή της τάσης σ_3' να υπερ-

βαίνει τα 300 KN/m². Επομένως κατά την προσομοίωση των συγκεκριμένων φάσεων χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας που υπολογίστηκαν από τα δεδομένα των τριαξονικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν με $\sigma_3' = 200$ KN/m². Αντίθετα, μετά την ολοκλήρωση της τελευταίας φάσης της κατασκευής στα κατώτερα τμήματα των ζωνών 2, 3 και 5 εντοπίστηκαν αρκετά σημεία, στα οποία οι τιμές της τάσης σ_3' κυμαίνονται μεταξύ των 300 και των 450 KN/m². Στις συγκεκριμένες περιοχές, πριν από τον υπολογισμό της τέταρτης κατασκευαστικής φάσης, αντικαταστάθηκαν οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας με αυτές που υπολογίστηκαν για $\sigma_3' = 400$ KN/m². Αντίστοιχα, από την εφαρμογή της διαδικασίας στην τομή F-F δε βρέθηκαν σημεία στα οποία η τιμή της τάσης σ_3' να υπερβαίνει τα 300 KN/m². Επομένως για την προσομοίωσή της χρησιμοποιήθηκαν οι ελάχιστες διαθέσιμες τιμές του μέτρου ελαστικότητας που υπολογίστηκαν για $\sigma_3' = 200$ KN/m².

Πίνακας 1. Μηχανικές ιδιότητες των υλικών του πυρήνα και των ζωνών του σώματος στήριξης.

Ζώνη	γ_{dry} (KN/m ³)	γ_{wet} (KN/m ³)	E_{50}^{ref} (KN/m ²)	E_{oed}^{ref} (KN/m ²)	Power (m)	C_{ref} (KN/m ²)	Φ (°)	ψ (°)	P^{ref} (KN/m ²)	R_f
1	19,3	22,23	14000	9200	0,5	33	28,1	0	300	0,9
Ζώνη	γ_{dry} (KN/m ³)	γ_{wet} (KN/m ³)	E_{ref}^{200} (KN/m ²)	E_{ref}^{400} (KN/m ²)	ν	C_{ref} (KN/m ²)	Φ (°)	ψ (°)		
2	20	22,5	10000	18000	0,3	0 (0,2)	34	4		
3	19,9	22,3	16000	22000	0,3	0 (0,2)	36,5	6,5		
3 ^a	19,9	22,3	16000	22000	0,3	0 (0,2)	36,5	6,5		
4	18,65	21,35	36000	-	0,3	0 (0,2)	39,6	9,6		
5	19	21,5	26000	39000	0,3	0 (0,2)	38	8		

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα δεδομένα των οργάνων επιτόπιας παρακολούθησης, κατά την ψηφιοποίηση της γεωμετρίας των τομών, λήφθηκε ιδιαίτερη μέριμνα προκειμένου να κατασκευαστούν κόμβοι στις θέσεις τοποθέτησης των οργάνων. Η ύπαρξη κόμβων στα συγκεκριμένα σημεία εξασφάλισε τον ακριβή υπολογισμό των σχέσεων τάσεων – παραμορφώσεων, ενώ ταυτόχρονα έδωσε και τη δυνατότητα απεικόνισής τους σε γραφικές παραστάσεις.

4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΕΝΟΡΓΑΝΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης επιλέχθηκε η τομή F-F. Η συγκεκριμένη τομή, λόγω της μικρότερης έκτασής της, απαιτεί την παράθεση μικρότερου όγκου δεδομένων, ικανών να αναφερθούν μέσα στα πλαίσια του παρόντος κειμένου. Επισημαίνεται ότι, η ομοιότητα που παρατηρήθηκε μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης των δύο τομών καθιστά επαρκή την παρουσίαση της απόκρισης του σώματος μέσω της τομής F-F.

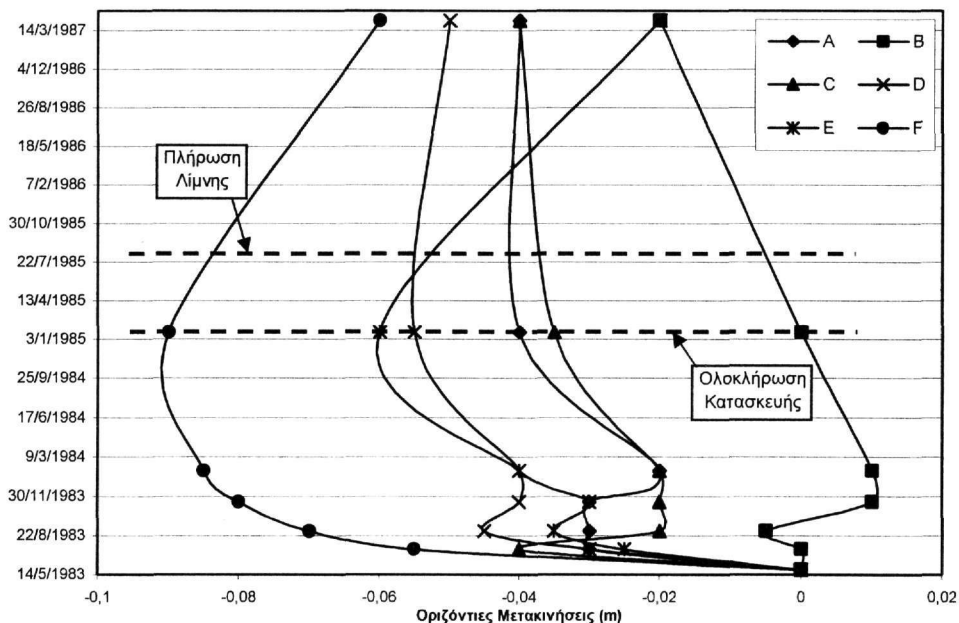
Πριν από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, και προκειμένου να καταστεί δυνατή η άμεση αξιολόγησή τους, πραγματοποιείται επιγραμματική αναφορά στα δεδομένα των οργάνων.

Από την αξιολόγηση των μετρήσεων που προέρχονται από τα δύο οριζόντια *ideal*, HI-4 και HI-5, που είναι τοποθετημένα στο κατόντι πρηνές του φράγματος επί της τομής F-F προέκυψε ότι, κατά τη διάρκεια κατασκευής του σώματος, οι κατόντι ζώνες του σώματος στήριξης κινήθηκαν προς τα ανάντι συμπιέζοντας τον πυρήνα. Μάλιστα, οι μετακινήσεις των μαγνητικών πλακών των *ideal* ήταν αντιστρόφως ανάλογες της απόστασής τους από τον πυρήνα. Η κατεύθυνση κίνησης των μαγνητικών πλακών αναστράφηκε σχεδόν ταυτόχρονα με την ολοκλήρωση της κατασκευής, ενώ η προς τα κατόντι κίνησή τους συνεχίστηκε και κατά τη διάρκεια πλήρωσης της λεκάνης κατάκλυσης (εικόνα 2). Οι τιμές των προς τα ανάντι μετακινήσεων κυμαίνονται, ανάλογα με τη μαγνητική πλάκα, από τα 3,5 έως τα 9 cm. Ενώ, για τις μετακινήσεις που εκτελέστηκαν μετά την αναστροφή της κίνησης δεν υπάρχουν επαρκή και αξιόπιστα δεδομένα καθώς τα όργανα τέθηκαν εκτός λειτουργίας.

Οι οριζόντιες μετακινήσεις μετρήθηκαν και στα γεωδαιτικά σημεία ελέγχου S-3 και S-10, που είναι κατασκευασμένα στη στέψη του φράγματος, κατά μήκος της τομής F-F. Η μέτρηση των σημείων αυτών άρχισε μετά από την έναρξη της πρώτης φάσης πλήρωσης της λεκάνης κατάκλυσης. Από την αξιολόγηση των μετρήσεων προέκυψε ότι από την έναρξη των μετρήσεων (στάθμη λεκάνης κα-

τάκλυσης στα 110 m) έως την πλήρωση της λεκάνης κατάκλυσης αλλά και μετέπειτα κατά τη λειτουργία του φράγματος η περιοχή της στέψης κινήθηκε προς τα κατόντι. Οι προς τα κατόντι μετακινήσεις που μετρήθηκαν κατά την πλήρωση της λίμνης έφτασαν, στο σημείο S-10 τα 7,5 mm και στο σημείο S-3 τα 5,5 mm.

Σε αντίθεση με τις τιμές των οριζόντιων μετακινήσεων οι καταγραφές των κατακόρυφων μετακινήσεων δεν κρίθηκαν αξιοποιήσιμες. Τα κατακόρυφα *idel* που εγκαταστάθηκαν στις δύο τομές του φράγματος αστόχησαν σε σύντομο χρονικό διάστημα παρέχοντας περιορισμένα δεδομένα μικρής αξιοπιστίας.



Εικόνα 2. Οι οριζόντιες μετακινήσεις που μετρήθηκαν στο οριζόντιο *idel* HI-4.

Για την αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης παραθέτονται οι εικόνες 3 και 4. Στην εικόνα 3 παρουσιάζονται οι κατανομές των οριζόντιων μετακινήσεων όπως διαμορφώνονται μετά την ολοκλήρωση του κάθε υπολογιστικού σταδίου της κατασκευής, καθώς και οι ισότιμες των κατακόρυφων μετακινήσεων μετά από την ολοκλήρωση του φράγματος. Στην εικόνα 4 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες κατανομές των οριζόντιων και των κατακόρυφων μετακινήσεων όπως αυτές διαμορφώνονται κατά την πλήρωση της λεκάνης κατάκλυσης.

Από την παρατήρηση της εικόνας 3 προκύπτει ότι κατά τη διάρκεια της κατασκευής, εκτός από τις κατακόρυφες μετακινήσεις λαμβάνουν χώρα και οριζόντιες μετακινήσεις οι οποίες οφείλονται στην πλευρική συμπύκνωση των υλικών του πυρήνα. Η σύγκλιση των ανώτερων τμημάτων των ζωνών προς το μέσο της τομής σε συνδυασμό με τις κατακόρυφες μετακινήσεις έχουν σαν αποτέλεσμα, σε κάθε κατασκευαστική φάση, τα ανώτερα τμήματα του φράγματος να διεισδύουν στο κέντρο του σώματος και να εξαναγκάζουν τα κατώτερα τμήματα των σωμάτων στήριξης να απομακρυνθούν από το μέσο της τομής. Με την ολοκλήρωση της κατασκευής οι συγκλίνουσες μετακινήσεις περιορίζονται στην περιοχή της στέψης. Ενώ, τα τμήματα του κατόντι σώματος στήριξης που στις δύο πρώτες φάσεις της κατασκευής συνέκλιναν προς το κέντρο, εντάσσονται στα τμήματα που εκτελούν τις προς τα κατόντι αποκλίνουσες μετακινήσεις. Οι μετακινήσεις λόγω της ασυμμετρίας της τομής, της κλίσης του πυρήνα αλλά και της κλίσης της επιφάνειας θεμελίωσης παρουσιάζουν ανομοιόμορφη κατανομή εκατέρωθεν του πυρήνα. Τα όρια μέσα στα οποία κυμαίνονται οι μέγιστες τιμές των οριζόντιων και των κατακόρυφων μετακινήσεων αναγράφονται στις εικόνες 3α, 3β, 3γ και 3δ, ενώ η φορά τους επισημαίνεται με βέλη. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, οι μέγιστες τιμές των οριζόντιων μετακινήσεων παρατηρούνται στα ανώτερα τμήματα των ζωνών του ανάντι σώματος στήριξης, έχουν φορά προς τα κατόντι, και φτά-

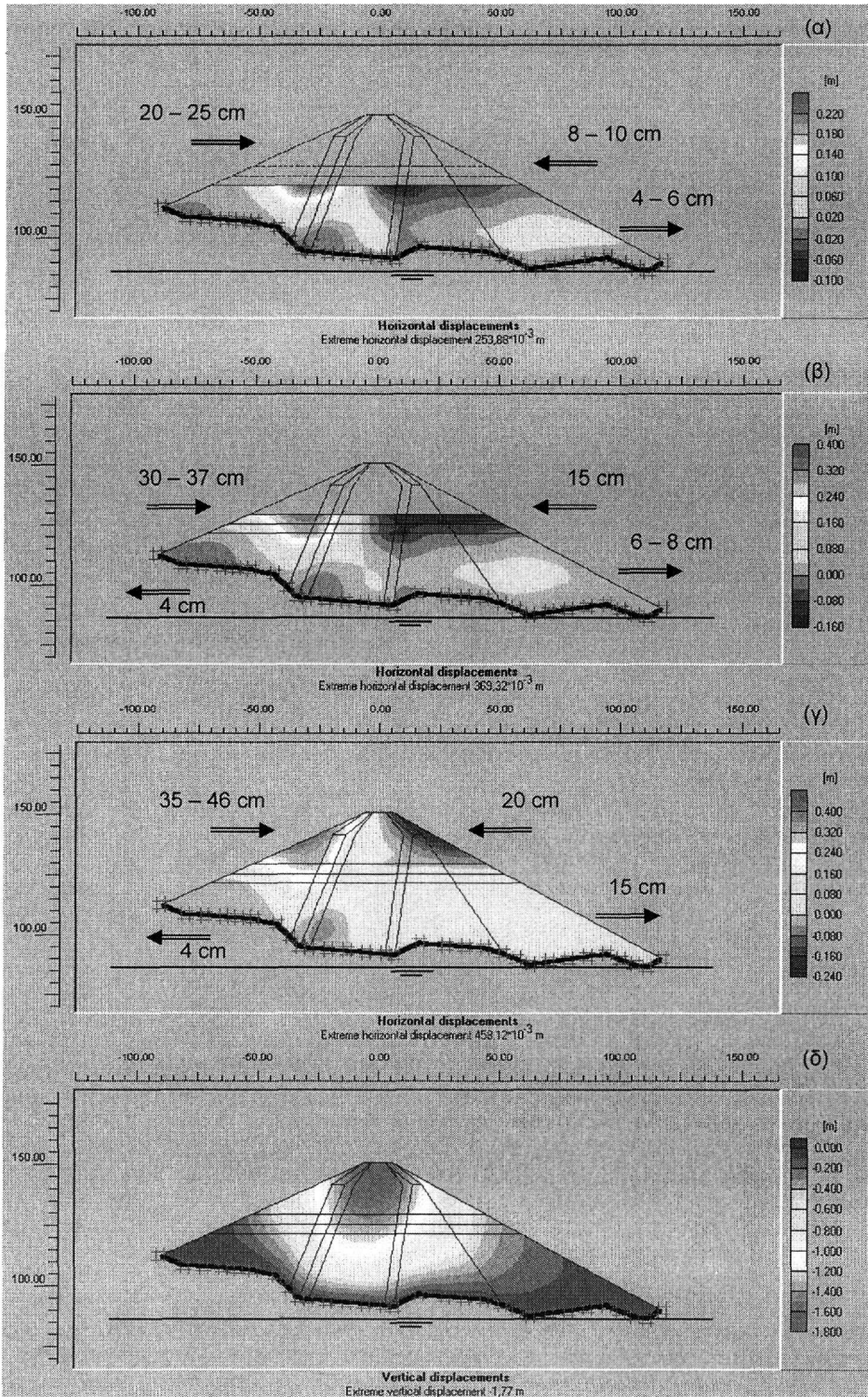
νουν τα 46 cm, ενώ οι μέγιστες τιμές των κατακόρυφων μετακινήσεων καταγράφονται στα ανώτερα τμήματα του πυρήνα και ανέρχονται στα 1,77 m (παραμόρφωση 3%). Επισημαίνεται ότι κατά την προσομοίωση της κατασκευής οι κατακόρυφες παραμορφώσεις υπολογίζονται αθροιστικά. Δηλαδή, δεν υπάρχει κάποια διαδικασία μηδενισμού των παραμορφώσεων αντίστοιχη με τη διαρκή επανεπίκωση που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της κατασκευής του σώματος.

Από την προσομοίωση της διαδικασίας πλήρωσης της λεκάνης κατάκλισης προκύπτει ότι οι ωθήσεις που ασκούνται από τον υδάτινο όγκο προκαλούν την προς τα κατόπι μετακίνηση του συνόλου του φράγματος. Από τη σύγκριση των εικόνων 3γ και 4β εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι μετακινήσεις που κατά τη διάρκεια της κατασκευής εξελίσσονταν προς τα κατόπι ενισχύονται κατά 10 έως 20 cm. Ενώ, οι μετακινήσεις που εξελίσσονταν προς τα ανάντι υπόκεινται σε μείωση που ανέρχεται μέχρι και τα 27 cm. Τα όρια μέσα στα οποία κυμαίνονται οι μέγιστες τιμές των μετακινήσεων που προέκυψαν μετά την πλήρωση της λίμνης αναγράφονται στις εικόνες (4α, 4β και 4γ), ενώ η φορά τους επισημαίνεται με βέλη. Σε αναλογία με τις ενδεικτικές τιμές των μετακινήσεων που προαναφέρθηκαν για την προσομοίωση της κατασκευής, οι μέγιστες τιμές των οριζόντιων μετακινήσεων εξακολουθούν να παρατηρούνται στα ανώτερα τμήματα των ζωνών του ανάντι σώματος στήριξης, έχουν φορά προς τα κατόπι, και φτάνουν τα 55,7 cm, ενώ οι μέγιστες τιμές των αθροιστικών κατακόρυφων μετακινήσεων καταγράφονται στην περιοχή του πυρήνα και ανέρχονται στα 1,74 m (παραμόρφωση 2,9 %).

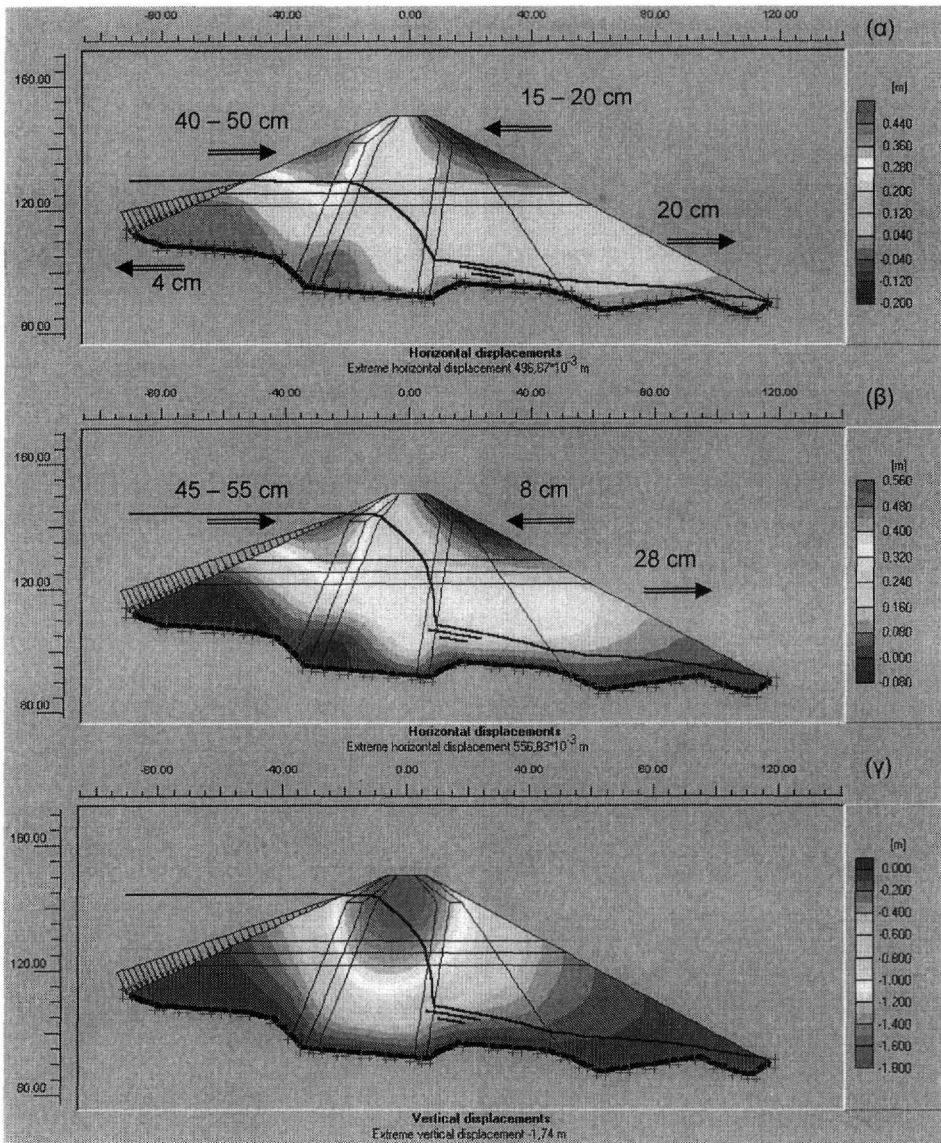
Από τα προαναφερόμενα προκύπτει, ότι κατά την προσομοίωση οι παραμορφώσεις που προκαλούνται από τις επιμέρους στατικές φορτίσεις υπολογίζονται ανεξάρτητα. Στην πραγματικότητα, οι μετακινήσεις που προκαλούνται από τη δράση του νερού δεν πρέπει να ξετάζονται, σε όλες τις υπολογιστικές φάσεις, ανεξάρτητα από αυτές που οφείλονται στο ίδιο βάρος της κατασκευής. Στα τελευταία στάδια της κατασκευής η στάθμη της λίμνης είχε αφεθεί να υπερβεί τη στάθμη της στέψης του ανάντι προφράγματος (εικόνα 1) και είχε φτάσει μέχρι το υψόμετρο των 110 m. Επομένως, στην πραγματικότητα οι προς τα ανάντι μετακινήσεις που προκαλούνται από το ίδιο βάρος της κατασκευής παρεμποδίζονται από τη δράση του νερού, ενώ οι προς τα κατόπι μετακινήσεις ενισχύονται. Επίσης, οι δυνάμεις άνωσης που ασκούνται από το νερό δρουν ανασταλικά και στις κατακόρυφες μετακινήσεις. Το φαινόμενο αυτό περιορίζεται στις μετακινήσεις που έλαβαν χώρα στα κατώτερα τμήματα του σώματος και μόνο κατά την τελευταία φάση προσομοίωσης της κατασκευής.

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τις ενόργανες παρατηρήσεις, στην εικόνα 5, παρουσιάζεται η γραφική παράσταση των οριζόντιων μετακινήσεων των σημείων που αντιπροσωπεύουν τις θέσεις παρατήρησης του idel HI-4 σε συνάρτηση με τα βήματα της προσομοίωσης. Όπως φαίνεται στη συγκεκριμένη γραφική παράσταση, η μέγιστη προς τα ανάντι οριζόντια μετακίνηση (βήμα 17) που υπολογίζεται για το πλησιέστερο στον πυρήνα σημείο φτάνει τα 8,8 cm, ενώ οι αντίστοιχες μετακινήσεις των υπόλοιπων σημείων κυμαίνονται από τα 6,5 έως και τα 8 cm. Οι τιμές αυτές προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις ενόργανες μετρήσεις οι οποίες όπως προαναφέρθηκε κυμαίνονται από 3,5 έως 9 cm. Επιπλέον, στη γραφική παράσταση φαίνεται ότι οι προς τα ανάντι οριζόντιες μετακινήσεις ολοκληρώθηκαν κατά τη διάρκεια της τρίτης κατασκευαστικής φάσης (βήματα 18° – 25°). Το γεγονός αυτό βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με τις ενόργανες μετρήσεις οι οποίες έδειξαν ότι οι προς τα ανάντι μετακινήσεις ολοκληρώθηκαν με το πέρας της κατασκευής. Από την εικόνα 5 προκύπτει ότι εφόσον το οριζόντιο idel θα εξακολουθούσε να λειτουργεί και μετά την πλήρωση της λεκάνης κατάκλισης θα έπρεπε να καταγράψει προς τα κατόπι μετακινήσεις οι οποίες θα κυμαίνονταν από τα 12 έως τα 18 cm.

Για τη μελέτη των μετακινήσεων στην περιοχή της στέψης επιλέχθηκαν δύο σημεία που να αντιπροσωπεύουν τις θέσεις των γεωδαιτικών σημείων S-3 και S-10. Από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης προέκυψε ότι, ενώ στο μεγαλύτερο μέρος του κατόπι σώματος στήριξης, με την ολοκλήρωση της κατασκευής, αναστρέφεται η φορά εκδήλωσης των οριζόντιων μετακινήσεων, στην περιοχή της στέψης δεν παρατηρείται καμία αναστροφή. Δηλαδή, κατά την ολοκλήρωση της κατασκευής τα εκατέρωθεν τμήματα των σωμάτων στήριξης συγκλίνουν και παύουν να μετακινούνται οριζόντια όταν συμπυκνωθεί πλήρως ο πυρήνας. Η προς τα κατόπι αναστροφή των μετακινήσεων λαμβάνει χώρα μόνο κατά τη διάρκεια πλήρωσης της λεκάνης κατάκλισης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης οι προς τα κατόπι μετακινήσεις μετά την πλήρωση της λίμνης έφτασαν στο σημείο S-10 τα 14,8 cm και στο σημείο S-3 τα 13,9 cm.



Εικόνα 3. Χαρακτηριστικές ισότιμες των οριζόντιων (α),(β) και (γ), και των κατακόρυφων μετακινήσεων (δ) όπως διαμορφώθηκαν στα επιμέρους στάδια προσομοίωσης της κατασκευής.

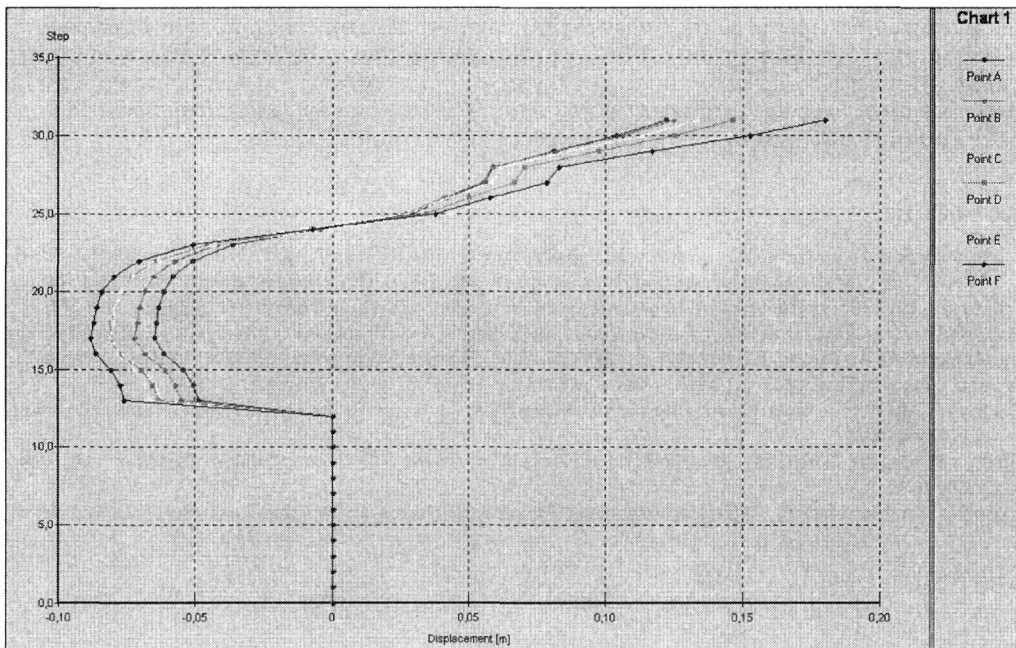


Εικόνα 4. Χαρακτηριστικές ισότιμες των οριζόντιων (α) και (β), και των κατακόρυφων μετακινήσεων (γ) όπως διαμορφώθηκαν στα επιμέρους στάδια πλήρωσης της λεκάνης κατάκλυσης.

Μέρος της προαναφερόμενης αλληλουχίας των μετακινήσεων είναι διακριτή και στις πραγματικές γεωδαιτικές μετρήσεις των σημείων S-3 και S-10. Όπως προαναφέρθηκε τα γεωδαιτικά σημεία κατά τη διάρκεια πλήρωσης της λεκάνης κατάκλυσης κινήθηκαν προς τα κατόντι. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η εγκατάσταση των γεωδαιτικών σημείων και η έναρξη λήψης των μετρήσεων δεν ταυτίζεται απόλυτα με την έναρξη των ελαστοπλαστικών παραμορφώσεων που οφείλονται στα φορτία του υδάτινου όγκου της λεκάνης κατάκλυσης, οι θεωρητικές και οι πραγματικές τιμές των οριζόντιων μετακινήσεων δεν παρουσιάζουν ταύτιση. Επομένως τα στοιχεία που προκύπτουν από τη σύγκριση των μετακινήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για τη λήψη ποιοτικών συμπερασμάτων.

Η διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των πραγματικών και των θεωρητικών τιμών των οριζόντιων μετακινήσεων οφείλεται και στις απλοποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την ψηφιοποίηση της στέφης. Σε όλο το μήκος της στέφης του φράγματος έχει κατασκευαστεί ένα στρώμα από

διαβαθμισμένα χαλίκια το οποίο αποτελεί το κάλυμμα του πυρήνα αλλά και την υπόβαση του δρόμου που διασχίζει το φράγμα. Η ύπαρξη της συγκεκριμένης στρώσης παραβλέφτηκε, γιατί το μικρό πάχος της κατέστησε αδύνατη την διακριτοποίησή της. Η τροποποίηση αυτή ουσιαστικά δεν επηρέασε καθόλου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, γιατί τα φορτία που ασκούνται από το βάρος των υλικών της είναι αμελητέα σε σχέση με το ίδιο βάρος της κατασκευής. Τα γεωδαιτικά σημεία S-3 και S-10 είναι κατασκευασμένα εκατέρωθεν της ζώνης αυτής. Επομένως, ενδέχεται η δυσκαμψία της να αλλοίωσε τις μετακινήσεις και να συνέβαλε στην απόκλιση των πραγματικών από τις θεωρητικές τιμές των μετακινήσεων.



Εικόνα 5. Γραφική παράσταση των μετακινήσεων των κόμβων που αντιστοιχούν στις θέσεις των μαγνητικών πλάκων του οριζόντιου ideal HI – 4 σε συνάρτηση με τα υπολογιστικά βήματα της διαδικασίας προσομοίωσης.

Οι κατακόρυφες μετακινήσεις που προκύπτουν από τη διαδικασία προσομοίωσης δεν είναι δυνατόν να συγκριθούν με τις αντίστοιχες πραγματικές. Αιτία του γεγονότος αυτού είναι ο διαφορετικός τρόπος υπολογισμού τους. Εξαιτίας της σταδιακής εγκατάστασης των μαγνητικών πλάκων παρατηρείται δυσαρμονία μεταξύ των μετακινήσεων που προκύπτουν από τις μετρήσεις και των πραγματικών μετακινήσεων που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του φράγματος. Δηλαδή, μέχρι την εγκατάσταση της εκάστοτε πλάκας, οι παραμορφώσεις των υποκείμενων υλικών διαφεύγουν των μετρήσεων. Αντιθέτως, κατά την προσομοίωση της κατασκευής οι κατακόρυφες παραμορφώσεις υπολογίζονται αθροιστικά. Δηλαδή, όπως προαναφέρθηκε, δεν υπάρχει κάποια διαδικασία μηδενισμού των παραμορφώσεων αντίστοιχη με αυτή που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της σταδιακής κατασκευής.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την αξιολόγηση του συνόλου των στοιχείων που αντλήθηκαν από τη συγκεκριμένη διαδικασία προέκυψε ότι, όταν η προσομοίωση ακολουθεί συγκεκριμένους κανόνες και όταν βασίζεται σε ακριβή εργαστηριακά δεδομένα, τότε μπορεί να αναπαράγει την πραγματική συμπεριφορά του φράγματος με μεγάλη πιστότητα. Μάλιστα, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να αξιοποιηθούν για την εξαγωγή ποιοτικών αλλά και ποσοτικών συμπερασμάτων.

Από τη σύγκριση των ενόργανων μετρήσεων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προέκυψε ότι τα ποιοτικά συμπεράσματα που σχετίζονται με τον τρόπο εκδήλωσης των πραγματικών ορι-

ζόντιων μετακινήσεων αναπαράγονται με μεγάλη πιστότητα από τη διαδικασία προσομοίωσης. Δηλαδή, η αρχική φορά των μετακινήσεων και οι μετέπειτα αλλαγές τους, όπως αυτές καταγράφονται στις θέσεις των οριζοντίων *idei* και στα γεωδαιτικά σημεία της στέψης, ταυτίζονται απόλυτα με τις κατανομές των μετακινήσεων που προκύπτουν στα επιμέρους στάδια της διαδικασίας προσομοίωσης.

Παρόλη την ταύτιση που παρατηρείται μεταξύ των πραγματικών και των θεωρητικών χωρικών κατανομών των μετακινήσεων, η συσχέτιση μεταξύ των τιμών τους παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες. Οι διαφορές μεταξύ του χρόνου έναρξης των παραμορφώσεων και του χρόνου έναρξης των πραγματικών μετρήσεων, η αδυναμία πρόβλεψης των αλλοιώσεων που υπεισέρχονται στις πραγματικές τιμές των μετακινήσεων λόγω της διαρκούς επανεπίχωσης αλλά και οι αστοχίες των οργάνων είναι οι βασικότεροι λόγοι για τους οποίους δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες οι θεωρητικές και οι πραγματικές τιμές των μετακινήσεων. Παρόλα αυτά, από την μελέτη της απόκρισης του φράγματος της Σφηκιάς προέκυψε ότι οι τιμές των μετακινήσεων που υπολογίζονται μέσω της διαδικασίας προσομοίωσης δίνουν μια πολύ σαφή εικόνα για την τάξη μεγέθους των πραγματικών τιμών.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Brinkgreve, R.B.J., Vermeer, P.A., Bakker, K.J., Bonnier, P.G., Brand, P.J.W., Burd, H.J., Termaat, R.J., 1998. *Plaxis, Fine Element Code for Soil and Rock Analyses*, Ver. 7, A.A. Balkema/ Rotterdam/ Brookfield, 468pp.
- Λιάκουρης, Δ., 1995. Η γεωλογία και τα φράγματα της ΔΕΗ, Αθήνα, ΔΕΗ, Διεύθυνση Εκπαίδευσης, σελ.350.
- Λουπασάκης, Κ., 2002, Μελέτη της Συμπεριφοράς του Σώματος Χωμάτινων Φραγμάτων με τη Χρήση Μεθόδων Αριθμητικής Ανάλυσης, Διδακτορική Διατριβή, αριθμός 59 του παραρτήματος της επιστημονικής επιτηρίδας του Τμήματος Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 334.
- Schanz, T., 1998, *Zur Modellierung des Mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien*, Habilitation, Stuttgart Universität.
- Smith, I.M., Griffith, D.V., 1982, *Programming the Finite Element Method*, Second Edition. Chisester, U.K., John Wiley & Sons.
- Vermeer, P.A., de Borst, R., 1984, *Non-Associated Plasticity for Soils, Concrete and Rock*. Heron, Vol 29, No 3.

ABSTRACT

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE DEFORMATIONS OF EARTH DAMS' BODIES. DAM OF THE H.P.P. OF SFIKIA, VERIA

Loupasakis C.¹, Christaras B.¹, Dimopoulos G.¹ and Hatzigogos Th.²

¹ *Department of Engineering Geology and Hydrogeology, School of Geology, A.U.TH., 54124 Thessaloniki, cloupas@geo.auth.gr, christar@geo.auth.gr, gdimop@geo.auth.gr*

² *Department of Soil Mechanics and Foundation Engineering, School of Civil Engineering, A.U.TH., 54124 Thessaloniki, hatz@geo.civil.auth.gr*

This paper presents the numerical analysis procedure and the results arising from the simulation of the earth dam's body of the hydroelectric power plan of Sfikia. This dam was simulated for its response during the staged construction of the body and during the gradual filling of the lake. This dam was selected because of the availability of specialized laboratory tests data coming from the materials of every zone. This selection was also enhanced by the availability of displacement and piezometric recordings coming from in situ instruments. Those data gave us the opportunity to control and to improve the numerical analysis procedure by means of numerous parametric analyses.