

Μη γραμμική 3Δ προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής και πλήρωσης του Φράγματος Μεσοχώρας

Π. Ντακούλας

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Γ. Θανόπουλος

Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, ΔΑΥΕ

Κ. Αναστασόπουλος

Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, ΔΑΥΕ

Λέξεις κλειδιά: Προσομοίωση κατασκευής, 3Δ γεωμετρία, μη-γραμμική ανάλυση, CFRD

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Παρουσιάζεται μία μη-γραμμική τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής και πλήρωσης της λεκάνης ενός φράγματος λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος κατασκευασμένου σε στενή κοιλάδα. Η μη-γραμμική σχέση τάσης-παραμόρφωσης των υλικών του φράγματος βασίζεται στο προσομοίωμα των Duncan et al. (1980), το οποίο λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση των μέτρων ελαστικότητας από την περιβάλλουσα τάση. Η προβλεπόμενη συμπεριφορά είναι γενικά σε συμφωνία με τη συμπεριφορά που παρατηρήθηκε σε αρκετά παρόμοια φράγματα. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται στη μελέτη της συμπεριφοράς του φράγματος Μεσοχώρας.

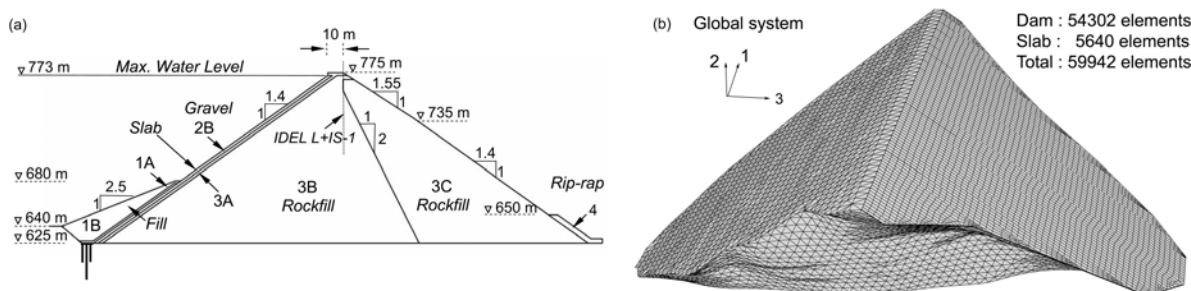
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φράγμα της Μεσοχώρας είναι κατασκευασμένο σε μία στενή κοιλάδα του ποταμού Αχελώου στην βόριο-δυτική Ελλάδα. Έχει ύψος 150 m στη μέγιστη διατομή, μήκος στέψης 350 m, μήκος σήραγγας 7.5 km και ηλεκτρική ισχύ 160 MW. Η λεκάνη αποταμίευσης έχει συνολικό όγκο $358 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ και όγκο αποθήκευσης $228 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Το φράγμα ολοκληρώθηκε το 1995, αλλά ο επαναπροσδιορισμός των περιβαλλοντικών όρων οδήγησε σε σημαντική καθυστέρηση της πρώτης πλήρωσης της λεκάνης. Το Σχ. 1 δίδει μία άποψη του φράγματος και της ανάντη πλάκας σκυροδέματος. Η γεωμετρία της μέγιστης διατομής και οι ζώνες των υλικών δίδονται στο Σχ. 2α. Η ανάντη κλίση είναι 1:1.4, ενώ η κατάντη 1:1.4 στα κάτω 110 m και 1:1.55 στα άνω 40 m. Οι ζώνες 3B και 3C αποτελούνται από λιθορριπή λατομείου ή αναγκαστικές εκσκαφές, χρησιμοποιώντας υγιή ή ελαφρά αποσθρωμένο ασβεστόλιθο. Το υλικό έχει συμπυκνωθεί με 4 διελεύσεις δονητικού συμπυκνωτή 12 τόνων, χρησιμοποιώντας στρώσεις πάχους 1 m στη ζώνη 3B και 1.5 m στη ζώνη 3C. Επομένως η ζώνη 3B είναι σχετικά πιο δύσκαμπτη από την ζώνη 2C. Η μέση τιμή του λόγου κενών είναι 0.38. Η πλάκα σκυροδέματος έχει τοποθετηθεί πάνω σε μία στρώση καλά διαβαθμισμένου χαλικιού πάχους 4 m (ζώνη 2B). Λόγω της κοκκομετρικής διαβάθμισης και καλύτερης συμπίκνωσης, η ζώνη 2B είναι αρκετά πιο δύσκαμπτη από την ζώνη 3B. Μετά την ολοκλήρωση της πλάκας σκυροδέματος, στο κάτω μέρος της κατασκευάσθηκε ένα επίχωμα με μέγιστο ύψος 55 m για επιπλέον προστασία ενάντια στη διείσδυση ύδατος (Σχ. 2α).

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό να μελετήσει την συμπεριφορά της πλάκας σκυροδέματος και την επίδραση διαφόρων παραγόντων στην εντατική κατάσταση και πιθανή ρηγμάτωση της πλάκας. Μελέτες της συμπεριφοράς φραγμάτων λιθορριπής έχουν αναδείξει ότι πολλά φράγματα ανέπτυξαν μικρές ή μεγάλες ρωγμές στην πλάκα σκυροδέματος. Μερικές από τις πιο συχνές αιτίες είναι: (α) συνολικά μικρή δυσκαμψία της λιθορριπής στην ανάντη και κατάντη ζώνη (β) σημαντικά μικρότερη δυσκαμψία της κατάντη ζώνης σχετικά με εκείνη της ανάντη ζώνης με απο-



Σχήμα 1. Το φράγμα λιθορριπής Μεσοχώρας.



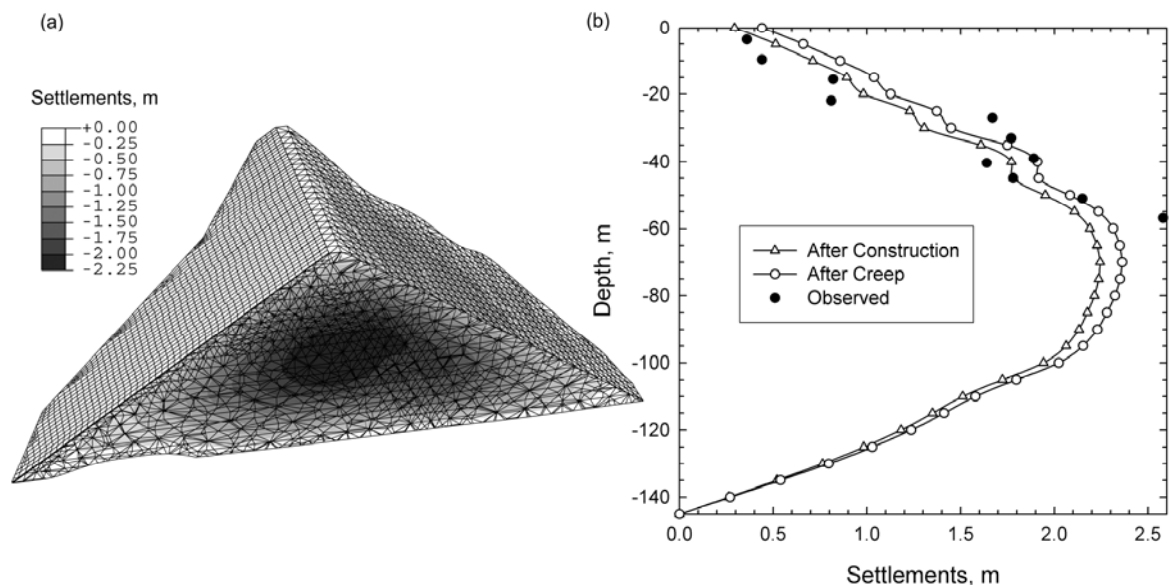
Σχήμα 2. (α) Μέγιστη διατομή και ζώνες υλικών (β) Γεωμετρία του αριθμητικού προσομοιώματος

τέλεσμα σημαντικές βυθίσεις της πλάκας κοντά στην στέψη (γ) παρουσία τοπικά απότομων κλίσεων της πλίνθου και ανώμαλη επιφάνεια του βράχου στα αντερείσματα, που δημιουργούν συγκέντρωση τάσεων στην πλάκα (δ) ταυτόχρονη κατασκευή και μερική πλήρωση της λεκάνης που επιβάλλει σημαντικές καθιζήσεις στην πλάκα. Αξίζει να αναφερθεί η συμπεριφορά τριών παραδειγμάτων τέτοιων φραγμάτων με χαμηλή δυσκαμψία (Marques Filho et al. 2005):

(α) Φράγμα Xingó, ύψους 150 m (Βραζιλία). Κατά την κατασκευή το μέτρο ελαστικότητας ήταν $E_{3B}=32$ MPa στη ζώνη 3B και $E_{3C}=20-24$ MPa στη ζώνη 3C ($E_{3B}/E_{3C} \approx 1.5$). Το φράγμα ανέπτυξε ρωγμές στο ενδιάμεσο υλικό παράλληλα με την πλίνθο του αριστερού αντερείσματος. Μετά την πλήρωση παρατηρήθηκαν ρωγμές στην πλάκα σκυροδέματος στην ίδια περιοχή. Επίσης εμφανίστηκε μία θραύση και διαφορική καθίζηση 30 cm σε δύο γειτονικές πλάκες. Οι ρωγμές αποδόθηκαν στη χαμηλή δυσκαμψία της λιθορριπής και στις απότομες τοπικές αλλαγές της κλίσης της πλίνθου, που δημιουργούν ισχυρές συγκεντρώσεις τάσεων, καθώς επίσης στην μεγαλύτερη συμπίεστικότητα της λιθορριπής στην κατάντη ζώνη 3C.

(β) Φράγμα Itá, ύψους 125 m (Βραζιλία). Κατά την κατασκευή το μέτρο ελαστικότητας ήταν $E_{3B}=28-39$ MPa στην ζώνη 3B και $E_{3C}=19-25$ MPa στην ζώνη 3C ($E_{3B}/E_{3C} \approx 1.5$). Το φράγμα ανέπτυξε ρωγμές εξαιτίας εφελκυστικών τάσεων σε μία απόσταση περίπου 10-15 m παράλληλα με την πλίνθο. Οι ρωγμές δημιουργήθηκαν εξαιτίας της σημαντικής παραμόρφωσης της λιθορριπής μετά από σημαντική εισροή ύδατος. Η μεγαλύτερη συμπίεστικότητα και σημαντική έκταση της ζώνης λιθορριπής στην κατάντη ζώνη 3C συνέβαλε στην περεταίρω αύξηση της ρηγμάτωσης.

(γ) Φράγμα Itapebí, ύψους 100 m (Βραζιλία). Κατά την κατασκευή το μέτρο ελαστικότητας ήταν $E_{3B}=60$ MPa στη ζώνη 3B και $E_{3C}=20-25$ MPa στη ζώνη 3C ($E_{3B}/E_{3C} = 2.4$). Το φράγμα ανέπτυξε ρωγμές εξαιτίας εφελκυστικών τάσεων σε μία ζώνη που εκτείνεται 10-15 m παράλληλα με την πλίνθο. Οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν αποδόθηκαν σε διαφορικές καθιζήσεις της λιθορ-



Σχήμα 3. (α) Καθιζήσεις εντός του επιχώματος κατά το τέλος της κατασκευής (β) Σύγκριση προβλεπόμενων καθιζήσεων καθ' ύψος του φράγματος μετά την κατασκευή και μετά το στάδιο ερπυσμού με τις μετρήσεις καθιζήσεων στην κεντρική διατομή

ριπής εξαιτίας της ανώμαλης επιφάνειας του δεξιού αντερείσματος. Η μεγαλύτερη συμπίεστικότητα και μεγάλη έκταση της ζώνης 3C οδήγησε σε σημαντικές βυθίσεις της πλάκας κοντά στην στέψη.

Το κοινό χαρακτηριστικό στα ανωτέρω φράγματα είναι η χαμηλή δυσκαμψία της λιθορριπής. Στο φράγμα της Μεσοχώρας, η δυσκαμψία της λιθορριπής είναι επίσης χαμηλή, αλλά σχετικά μεγαλύτερη από εκείνη των ανωτέρω φραγμάτων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του φράγματος Μεσοχώρας συγκρίνονται κατωτέρω ποιοτικά με την συμπεριφορά των τριών φραγμάτων.

Για την διερεύνηση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων στην συμπεριφορά της πλάκας, έγινε μία εκτεταμένη παραμετρική ανάλυση με λεπτομερή 3D μη-γραμμική προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής και εν συνεχεία πλήρωσης της λεκάνης. Μεταξύ των παραμέτρων που εξετάστηκαν είναι: η δυσκαμψία της λιθορριπής στην ανάντη και στην κατάντη ζώνη, η δυσκαμψία κατά την αποφόρτιση, η 3D γεωμετρία της κοιλάδας, ο συντελεστής τριβής στην διεπιφάνεια σκυροδέματος-χαλικιού, κλπ. Το παρόν άρθρο επικεντρώνεται κυρίως στην παρουσίαση και αξιολόγηση της συμπεριφοράς της πλάκας σκυροδέματος λαμβάνοντας υπόψη την εμπειρία από άλλα παρόμοια φράγματα στα οποία παρουσιάστηκαν ρηγματώσεις.

2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η αριθμητική προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής και πλήρωσης της λεκάνης πραγματοποιείται στα εξής 7 στάδια:

Στάδιο 1: Το επίχωμα κατασκευάζεται σταδιακά με 20 στρώσεις.

Στάδιο 2: Κατασκευάζεται η πλάκα σκυροδέματος στην ανάντη πλευρά.

Στάδιο 3: Κατασκευάζεται επίχωμα στο κάτω μέρος της πλάκας από υψόμετρο 625 m ως 680 m.

Στάδιο 4: Πραγματοποιούνται καθιζήσεις λόγω ερπυσμού της λιθορριπής.

Στάδιο 5: Η στάθμη του νερού ανέρχεται σε υψόμετρο 680 m.

Στάδιο 6: Η στάθμη του νερού ανέρχεται σε υψόμετρο 725 m.

Στάδιο 7: Η στάθμη του νερού ανέρχεται σε υψόμετρο 773 m.

Πίνακας 1. Ιδιότητες και παράμετροι των υλικών του φράγματος της βασικής ανάλυσης

	Ζώνη 3B	Ζώνη 3C	Ζώνη 2B
Πυκνότητα ρ , kg/m ³	2150	2150	2150
K	600	450	1200
K_{ur}	1500	1125	3000
K_b	150	112.5	300
n	0.45	0.45	0.45
m	0.22	0.22	0.22
R_f	0.59	0.59	0.59
ϕ_0	51°	51°	51°
$\Delta\phi$	9°	9°	9°
Συντελεστής τριβής σκυροδέματος-χαλίκων, μ		0.7	

Πίνακας 2. Ιδιότητες σκυροδέματος

Πυκνότητα ρ , kg/m ³	2350
Μέτρο ελαστικότητας Young, E , GPa	21
Λόγος Poisson, ν	0.2
Συντελεστής τριβής σκυροδέματος-σκυροδέματος, μ_c	0.5

2.1 Υλικά

Για την ρεαλιστική πρόβλεψη της συμπεριφοράς της λιθορριπής και των χαλίκων χρησιμοποιείται το καταστατικό προσομοίωμα Duncan et al. (1970). Το προσομοίωμα θεωρεί μία υπερβολική σχέση τάσης-παραμόρφωσης, στην οποία το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας Young δίδεται από την σχέση

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \phi)}{2\sigma_3 \sin \phi + 2c \cos \phi} \right]^2 \quad (1)$$

όπου σ_1, σ_3 = κύριες τάσεις, K , R_f , n = σταθερές του υλικού, ϕ = γωνία διατμητικής αντοχής, c = συνοχή, και p_a = ατμοσφαιρική πίεση. Η γωνία διατμητικής αντοχής εξαρτάται από την περιβάλλουσα τάση ως εξής

$$\phi = \phi_0 - \Delta\phi \log \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right) \quad (2)$$

όπου ϕ_0 και $\Delta\phi$ = σταθερές του υλικού. Το μέτρο Young κατά την αποφόρτιση δίδεται από την σχέση

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (3)$$

όπου K_{ur} = σταθερά η οποία λαμβάνει τιμές μεταξύ $1.2K \leq K_{ur} \leq 3K$. Επίσης το μέτρο διόγκωσης δίδεται από την σχέση

$$B = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (4)$$

όπου K_b , m = σταθερές. Τα όρια της τιμής του B καθορίζονται από την σχέση $B = E_t / 3(1 - 2\nu)$, όπου ν είναι ο λόγος Poisson. Η μέγιστη τιμή είναι $B_{max} = 17E_t$ ($\nu = 0.49$), ενώ η ελάχιστη τιμή

αντιστοιχεί σε γεωστατικές συνθήκες

$$B_{\min} = \frac{E_t}{3} \left(\frac{2 - \sin \phi}{\sin \phi} \right) \quad (5)$$

Το κριτήριο φόρτισης/αποφόρτισης καθορίζεται από την σχέση (Clough 1984, Ebeling et al. 1992)

$$S = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}} \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{1/4} \quad (6)$$

όπου σ_{1f}, σ_{3f} = κύριες τάσεις στην αστοχία. Αν $S \geq S_{\max}$ τότε χρησιμοποιούνται τα μέτρα φόρτισης, ενώ διαφορετικά τα μέτρα αποφόρτισης. Το καταστατικό προσομοίωμα ενσωματώθηκε στο κώδικα ABAQUS (2006) και επιβεβαιώθηκε εκτενώς (Dakoulas 2007)

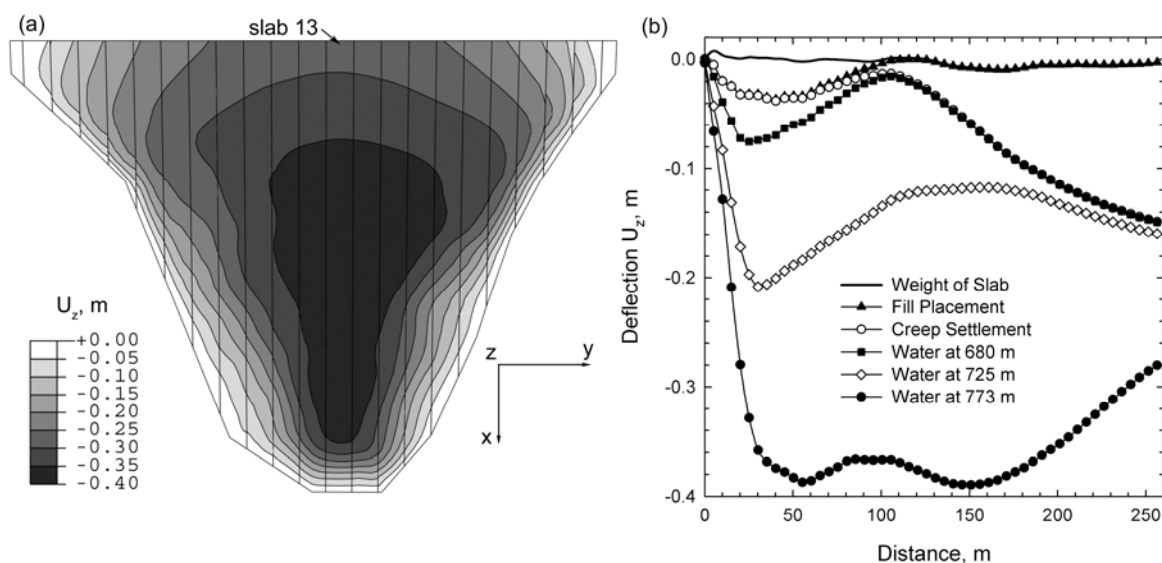
2.2 Σταδιακή κατασκευή και πλήρωση της λεκάνης

Στάδιο 1: Η σταδιακή κατασκευή του επιχώματος προσομοιώνεται θεωρώντας 20 στρώσεις πάχους 7.5 m. Το αριθμητικό προσομοίωμα διακριτοποιεί με ακρίβεια την 3Δ γεωμετρία του επιχώματος και της επιφάνειας των αντερεισμάτων της κοιλάδας, χρησιμοποιώντας 54302 πεπερασμένα στοιχεία (Σχ. 2β). Εκτός των 20 οριζοντίων στρώσεων της κατασκευής, η διατομή υποδιαιρείται σε τρεις βασικές ζώνες: την ανάντη ζώνη 3B, την κατάντη ζώνη 3C, και την ζώνη χαλικιού 2B (Σχ. 2α). Έτσι, η μέγιστη διατομή του φράγματος χωρίζεται συνολικά σε 60 ζώνες, κάθε μία από τις οποίες διακριτοποιείται χωριστά με μέγιστη διάσταση στοιχείων μεταξύ 4 m και 6 m.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν απευθείας μετρήσεις της δυσκαμψίας της λιθορριπής, οι αρχικές τιμές των παραμέτρων του προσομοιώματος πάρθηκαν από δημοσιευμένα δεδομένα για παρόμοια υλικά σε παρόμοια φράγματα (Duncan et al. 1980), και στην συνέχεια βαθμονομήθηκαν οι σταθερές K , K_{ur} και K_b με χρήση των καθιζήσεων που μετρήθηκαν στην μέγιστη διατομή κατά την διάρκεια της κατασκευής. Οι τιμές όλων των παραμέτρων του προσομοιώματος της βασικής ανάλυσης δίδονται στον Πίνακα 1. Για την προσεγγιστική προσομοίωση των καθιζήσεων ερπυσμού που μετρήθηκαν μετά την κατασκευή του επιχώματος και την επιβολή της αντίστοιχης παραμόρφωσης στην πλάκα σκυροδέματος, στο Στάδιο 1 επιβλήθηκε το 94% της βαρύτητας, ενώ το υπόλοιπο 6% μετά την κατασκευή της πλάκας και του επιχώματος (Στάδιο 4). Στο Σχ. 3α δίδονται ισοτιμές καθιζήσεων εντός του επιχώματος μετά το τέλος κατασκευής του επιχώματος. Στο Σχ. 3β συγκρίνονται οι υπολογισμένες καθιζήσεις στην κεντρική διατομή του φράγματος στα Στάδια 1 και 4 με τις καθιζήσεις που μετρήθηκαν από το όργανο IDEL L+IS-1 (Σχ. 2α). Στο τέλος του Σταδίου 1 η μέγιστη καθίζηση είναι 2.25 m και ευρίσκεται περίπου στο μέσο του ύψους. Μετά την κατασκευή της πλάκας και του ανάντη επιχώματος, καθώς και την υλοποίηση των καθιζήσεων ερπυσμού (Στάδιο 4) η μέγιστη καθίζηση είναι 2.37 m.

Η προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής επαναλαμβάνεται αρκετές φορές και μετά από κάθε ανάλυση η αρχική γεωμετρία του φράγματος τροποποιείται έτσι ώστε μετά την επιβολή του 94% της βαρύτητας η επιφάνεια του ανάντη πρανούς να αποτελεί ένα τέλειο επίπεδο επάνω στο οποίο τοποθετείται η πλάκα στο Στάδιο 2.

Στάδιο 2: Η πλάκα σκυροδέματος αποτελείται από 23 ανεξάρτητες πλάκες και διακριτοποιείται με συνολικά 5640 στοιχεία. Η γεωμετρία του προσομοιώματος της πλάκας είναι ταυτόσημη με την πραγματική γεωμετρία. Το πλάτος κάθε επιμέρους πλάκας είναι 15 m (εκτός από τις δύο πλάκες στα άκρα όπου είναι 6.8 m και 7.7 m αντίστοιχα). Το πάχος της πλάκας είναι 0.3 m στην στέψη, ενώ μεταβάλλεται σαν συνάρτηση της κατακόρυφης απόστασης h από το μέγιστο ύψος του νερού σύμφωνα με την σχέση $w = 0.30 + 0.003h$. Για $h = 148$ m, το πάχος στη βάση της μέγιστης διατομής είναι 0.74 m. Το πάχος της πλάκας διακριτοποιείται με δύο λεπτά πεπερασμένα στοιχεία



Σχήμα 4. (α) Βύθιση της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης στην στάθμη 773 m. (β) Βύθιση της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα για διάφορα στάδια φόρτισης

ενώ οι άλλες διαστάσεις των στοιχείων κυμαίνονται μεταξύ 2 m και 3.75 m, ώστε ο λόγος των διαστάσεων σε σχέση με το πάχος να είναι αποδεκτός. Το σκυρόδεμα προσομοιώνεται σαν ελαστικό υλικό με ιδιότητες που δίδονται στον Πίνακα 2.

Η διεπιφάνεια στη βάση της κάθε πλάκας αναπτύσσει τριβή με την υποκείμενη στρώση χαλικιού και έχει τη δυνατότητα αποχωρισμού. Το ίδιο συμβαίνει με τη διεπιφάνεια μεταξύ των κατακόρυφων τοιχωμάτων γειτονικών πλακών. Στο βασικό σενάριο ανάλυσης, ο συντελεστής τριβής μεταξύ σκυροδέματος και χαλικιού λαμβάνεται 0.7, ενώ μεταξύ επιφανειών σκυροδέματος 0.5. Στο Στάδιο 2 η πλάκα φορτίζεται από το ίδιο βάρος, και επειδή η τριβή δεν επαρκεί, υποστηρίζεται στο κάτω μέρος της από την πλίνθο.

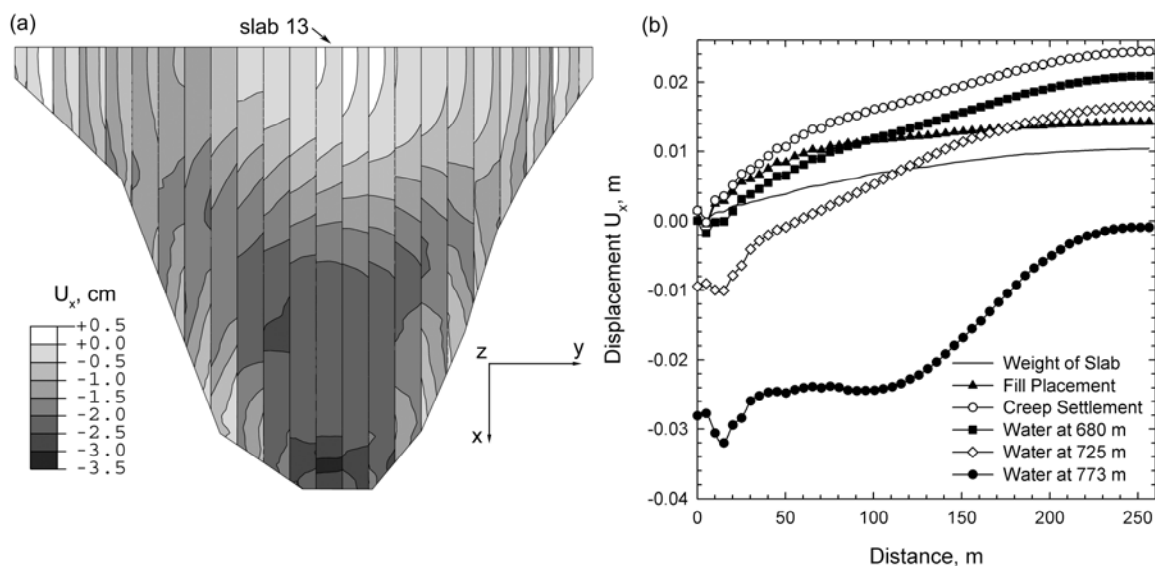
Στάδιο 3: Κατασκευάζεται επίχωμα στην επιφάνεια της πλάκας από υψόμετρο 625 m έως 680 m με μέγιστο πάχος 25 m στον πόδα της πλάκας (Σχ. 2α). Η κατασκευή του επιχώματος προσομοιώνεται επιβάλλοντας γραμμικά κατανεμημένες ορθές και διατμητικές τάσεις στην κεκλιμένη επιφάνεια κάθε πλάκας.

Στάδιο 4: Η βαρύτητα στο σώμα του φράγματος αυξάνεται από 94% στο 100% σε 10 βήματα με αποτέλεσμα την αύξηση των καθιζήσεων στην στέψη κατά 13.5 cm. Η καθίζηση αυτή είναι ίση με την καθίζηση που μετρήθηκε στη στέψη του φράγματος λόγω ερπυσμού της λιθορριπής.

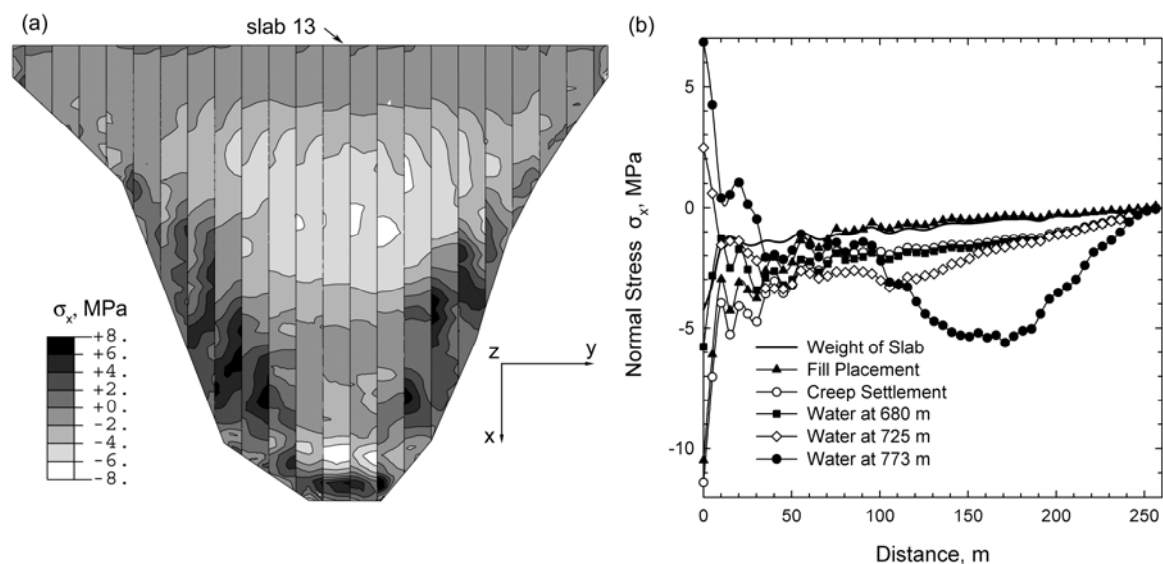
Στάδιο 5: Η στάθμη του ύδατος ανέρχεται στο υψόμετρο 680 m σε 10 βήματα. Ταυτόχρονα οι τάσεις που ασκεί το βάρος του επιχώματος στο Στάδιο 4 μειώνονται λόγω ανώσεως.

Στάδιο 6: Η στάθμη του ύδατος ανέρχεται στο υψόμετρο 725 m σε 10 βήματα. Κατά μήκος των διεπιφανειών πλακών-πλίνθου, οι συνοριακές συνθήκες επιτρέπουν την μετακίνηση των πλακών προς το κέντρο του φράγματος, ενώ εμποδίζουν τη μετακίνηση πέραν της πλίνθου.

Στάδιο 7: Η στάθμη του ύδατος ανέρχεται στο υψόμετρο 773 m σε 10 βήματα.



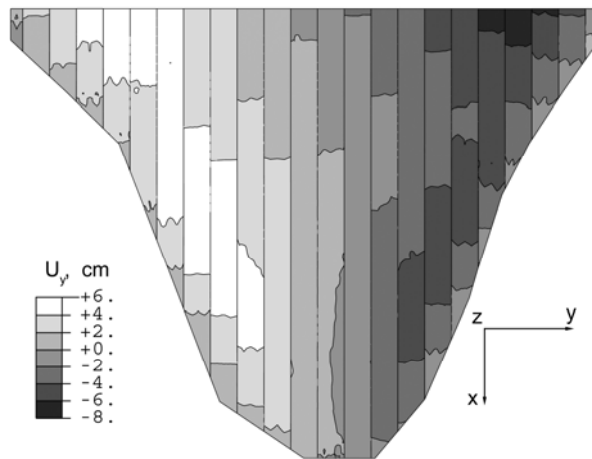
Σχήμα 5 (α) Μετατόπιση της πλάκας στην κατεύθυνση X μετά την πλήρωση της λεκάνης στη στάθμη 773 m. (β) Μετατόπιση της πλάκας 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα για διάφορα στάδια φόρτισης



Σχήμα 6 (α) Ορθή τάση στην κατεύθυνση X στην άνω επιφάνεια της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης στη στάθμη 773 m (β) Ορθή τάση στην κατ. X στην κάτω επιφάνεια πλάκας 13 για διάφορα στάδια φόρτισης

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το Σχ. 4α παρουσιάζει την αθροιστική βύθιση της πλάκας U_z μετά την πλήρωση της λεκάνης στη μέγιστη στάθμη (773 m). Η μέγιστη βύθιση είναι περίπου 39 cm και παρουσιάζεται σε μία ζώνη μήκους περίπου 100 m. Το Σχ. 4β παρουσιάζει την κατανομή της βύθισης στην πλάκα 13 ως προς την απόσταση από τον πόδα της πλάκας για τα Στάδια 2 έως 7. Η μέγιστη τιμή της U_z είναι 4 cm μετά την κατασκευή του επιχώματος (Στάδιο 3) και παρουσιάζεται σε απόσταση 40 m από τον πόδα της πλάκας. Οι καθιζήσεις ερπυσμού (Στάδιο 4) αυξάνουν την τιμή της U_z σε 15 cm στη στέψη. Κατά την άνοδο του ύδατος στο Στάδιο 6 η μέγιστη καθίζηση είναι 21 cm και εντοπίζεται περίπου 30 m από τον πόδα. Τέλος στη τελική στάθμη πλήρωσης (Στάδιο 7) η μέγιστη τιμή βύθισης είναι 39 cm και διατηρείται περίπου ομοιόμορφη σε μία απόσταση από 50 m έως 150 m από τον πόδα.



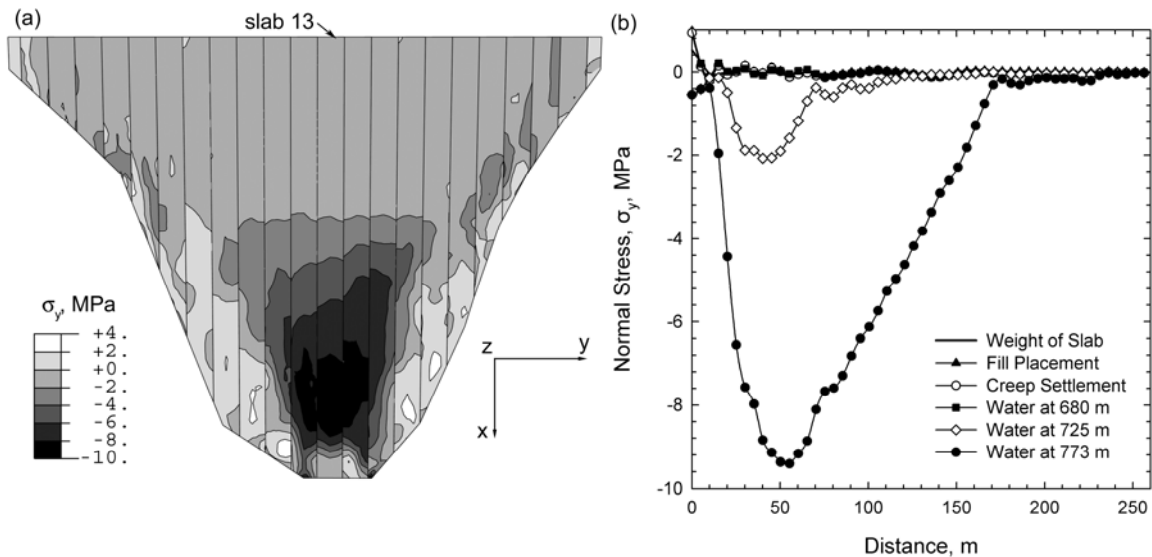
Σχήμα 7 Μετατόπιση της πλάκας στην κατεύθυνση Y μετά την πλήρωση της λεκάνης στη στάθμη 773 m

Το Σχ. 5α παρουσιάζει την μετακίνηση των πλακών στην κατεύθυνση X, στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων XYZ. Η μέγιστη μετατόπιση παρουσιάζεται στον πόδα και είναι 3.2 cm προς τη στέψη. Η διάνοιξη του αρμού μεταξύ πλίνθου και πλάκας κατά 3.2 cm δεν δημιουργεί πρόβλημα, καθόσον ο αρμός έχει σχεδιασθεί να παραμένει στεγανός για μέγιστη διάνοιξη ίση προς 10 cm. Σημειώνεται ότι η πλάκα υφίσταται σημαντικές εφελκυστικές παραμορφώσεις και τάσεις στην κατεύθυνση X, λόγω της καθίζησης του υποκείμενου υλικού. Το Σχ. 5β παρουσιάζει την μετατόπιση U_x στην πλάκα 13. Κατά τα Στάδια 2 έως 5, ο πόδας της πλάκας δεν μετακινείται. Πράγματι, καθόσον ο συντελεστής τριβής (0.7) έχει μικρότερη τιμή από αυτή που απαιτείται για ευστάθεια (0.714), η ολίσθηση της πλάκας εμποδίζεται από την πλίνθο. Κατά την πλήρωση της λεκάνης (κυρίως Στάδια 6 και 7), η πλάκα τείνει να μετατοπισθεί προς την στέψη του φράγματος λόγω της σημαντικής παραμόρφωσης του υποκείμενου υλικού. Στο Στάδιο 7 η μέση εφελκυστική παραμόρφωση του σκυροδέματος είναι περίπου 0.01%.

Το Σχ. 6α παρουσιάζει την κατανομή της ορθής τάσης σ_x στην επιφάνεια της πλάκας. Σημειώνεται ότι σε μία ζώνη πλάτους περίπου 30 m κατά μήκος της πλίνθου στο κάτω μισό της πλάκας αναπτύσσονται σημαντικές εφελκυστικές τάσεις με μέγιστη τιμή περίπου 8 MPa. Κατ' εξαίρεση, σε μία πολύ περιορισμένη περιοχή 11 m από τον πόδα της πλάκας 15, η μέγιστη εφελκυστική τάση είναι 16 MPa. Αυτή η αυξημένη τιμή της σ_x αποδίδεται σε τοπική ανωμαλία της επιφάνειας του υποκείμενου βράχου που προκαλεί αυξημένη κάμψη της πλάκας. Οι αυξημένες εφελκυστικές τάσεις στην άνω επιφάνεια της πλάκας θα προκαλέσουν ρηγμάτωση (ενώ οι τάσεις στην βάση είναι σημαντικά μικρότερες). Για αντίστοιχες περιπτώσεις ανώμαλης γεωμετρίας του βράχου θεμελιώσεως, συνιστάται η τοπική εκσκαφή του βράχου ή αλλαγές στο υλικό της ζώνης μεταξύ πλάκας και βράχου θεμελιώσεως με στόχο τη μείωση της τοπικής κύρτωσης της πλάκας (Marques Filho et al. 2005).

Το Σχ. 6β παρουσιάζει την κατανομή της ορθής τάσης σ_x στην κάτω επιφάνεια της πλάκας 13. Σημειώνεται ότι η μέγιστη θλιπτική τάση σ_x είναι -11.5 MPa και παρουσιάζεται στον πόδα μετά την επιβολή των καθιζήσεων ερπυσμού (Στάδιο 4). Στην περίπτωση αυτή, η σημαντική παραμόρφωση της λιθορριπής μεταφέρει σημαντικές θλιπτικές τάσεις στην πλάκα μέσω της τριβής μεταξύ σκυροδέματος και χαλίκων ιδιαίτερα στο κάτω μισό της πλάκας. Η μέγιστη εφελκυστική τάση σ_x είναι ίση προς 7 MPa και παρουσιάζεται επίσης στον πόδα κατά στο Στάδιο 7.

Το Σχ. 7 παρουσιάζει την μετατόπιση της πλάκας στην κατεύθυνση Y. Λόγω της παραμόρφωσης του υποκείμενου υλικού, οι πλάκες μετατοπίζονται προς την κεντρική διατομή του φράγματος, με μέγιστη μετατόπιση ίση προς 7.2 cm. Αυτή η μετατόπιση προκαλεί σημαντική θλίψη στα κατακόρυφα τοιχώματα, ιδιαίτερα στο κάτω μισό της πλάκας. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 8α που δίδει την κατανομή της σ_y . Σε μία ζώνη με κέντρο περίπου 50 m από τον πόδα και διάμετρο περίπου 50 m, δημιουργείται μία σημαντική συμπίεση μεταξύ γειτονικών πλακών με μέ-



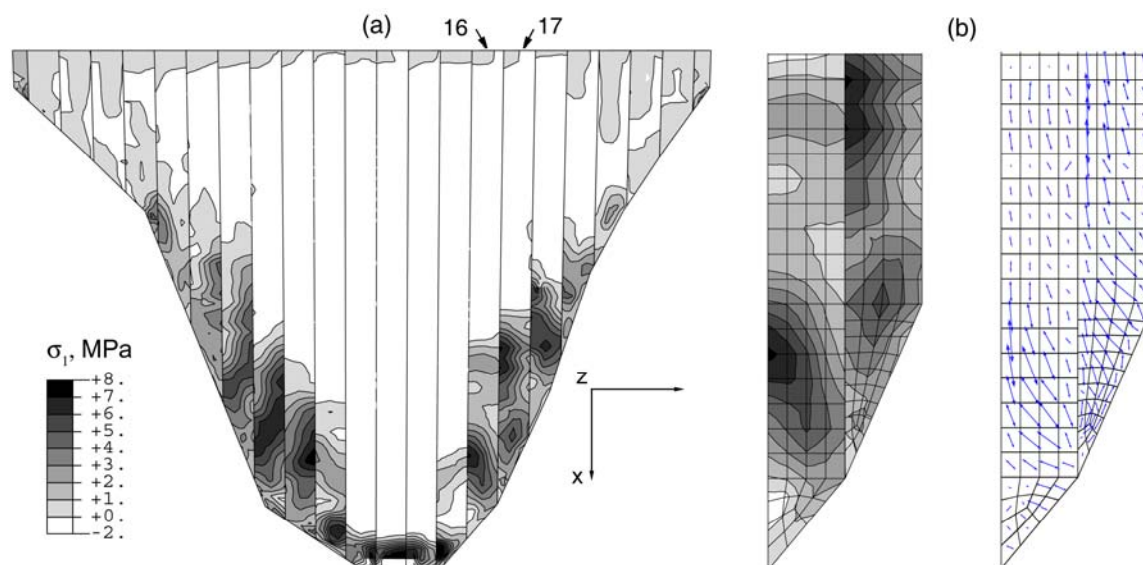
Σχήμα 8 (α) Ορθή τάση στην κατεύθυνση Y στην άνω επιφάνεια της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης στη στάθμη 773 m. (β) Ορθή τάση στην κατ. Y στην άνω επιφάνεια πλάκας 13 για διάφορα στάδια φόρτισης

γιστη τιμή -10 MPa. Στο Σχήμα 8β δίδεται η κατανομή της σ_y στην πλάκα 13 για τα Στάδια 2 έως 7. Στο Στάδιο 7 η μέγιστη συμπίεση είναι -9.5 MPa περίπου 50 m από τον πόδα.

Τα Σχήματα 6 και 8 καταδεικνύουν τις σημαντικές εφελκυστικές τάσεις (σ_x και σ_y) που αναπτύσσονται σε μία ζώνη πλάτους περίπου 30 m κατά μήκος της πλίνθου στο κάτω μισό της πλάκας. Το Σχήμα 9α παρουσιάζει την κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 η οποία μεγιστοποιείται στην ζώνη αυτή, ενώ το Σχ. 9β παρουσιάζεται μία λεπτομέρεια στο κάτω μέρος των πλακών 16 και 17, όπου δίδεται η σ_1 και η κατεύθυνσή της. Οι εφελκυστικές ρωγμές αναπτύσσονται κάθετα στην κατεύθυνση της σ_1 , σε συμφωνία με την διεύθυνση των ρωγμών που παρατηρήθηκαν σε φράγματα όπως τα Xingó, Itá και Itaipu. Επίσης, η παρουσία της ζώνης εφελκυσμού συμφωνεί με την ζώνη ρηγμάτωσης πλάτους 10 m έως 20 m στα τρία φράγματα. Στην περίπτωση αυτή, ο κοινός παράγοντας είναι η μικρή συνολική δυσκαμψία της λιθορριπής και η τοπικά απότομη αλλαγή δυσκαμψίας στην εν λόγω ζώνη παράλληλα με την πλίνθο.

Σημειώνεται ότι η σχετικά μικρότερη δυσκαμψία της ζώνης 3C σε σχέση με την ζώνη 3B ($E_{3B}/E_{3C}=1.33$) έχει πολύ μικρή επίδραση στην συμπεριφορά του φράγματος και της πλάκας. Πράγματι, προσομοίωση της κατασκευής με $E_{3B}/E_{3C} = 1$ έδωσε πρακτικά τα ίδια αποτελέσματα. Αντίθετα, για λόγους $E_{3B}/E_{3C} = 2$ και 4 τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διαφέρουν σημαντικά με τα προηγούμενα, γεγονός το οποίο ευρίσκεται σε ποιοτική συμφωνία με δημοσιευμένες παρατηρήσεις πραγματικής συμπεριφοράς σε φράγματα λιθορριπής.

Τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης (δεν παρουσιάζονται εδώ) καταδεικνύουν ότι η δυσκαμψία της ανάντη ζώνης (3B) έχει δραματική επίδραση στην συμπεριφορά της πλάκας. Τέλος, συστηματικές συγκρίσεις αποτελεσμάτων από 2Δ και 3Δ αναλύσεις έχουν καταδείξει ότι η 3Δ γεωμετρία μίας στενής κοιλάδας έχει ουσιαστική επίδραση στην μείωση των καθιζήσεων της λιθορριπής και στην βελτίωση της συμπεριφοράς της πλάκας. Για τα φράγματα Xingó, Itá και Itaipu που εξετάστηκαν προηγουμένως, η επίδραση της στενής κοιλάδας είναι πολύ μικρή καθώς ο λόγος του εμβαδού της πλάκας προς το τετράγωνο του ύψους A/H^2 είναι 6.2, 7, και 4.65 αντίστοιχα. Για το φράγμα της Μεσοχώρας ο λόγος A/H^2 είναι 2.3, και συνεπώς η στενή κοιλάδα έχει σημαντικά ευνοϊκή επίδραση στην μείωση των καθιζήσεων της λιθορριπής. Στο Σχ. 10 παρουσιάζονται οι καθιζήσεις από την προσομοίωση της κατασκευής του φράγματος (α) με 2Δ και (β) με 3Δ ανάλυση, θεωρώντας για απλούστευση γραμμικά ελαστική συμπεριφορά του υλικού, όπου τα μέτρα ελαστικότητας βαθμονομούνται με βάση τις μετρήσεις των καθιζήσεων στην κεντρική διατομή. Τα μέτρα ελαστικότητας που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή είναι $E =$



Σχήμα 9 (α) Μέγιστη κύρια τάση στην άνω επιφάνεια της πλάκας μετά την πλήρωση της λεκάνης στη στάση 773 m. (β) Λεπτομέρεια: ισοτιμές και κατεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης στο κάτω μέρος των πλακών 16 και 17, όπου εμφανίζονται σημαντικές εφελκυστικές τάσεις.

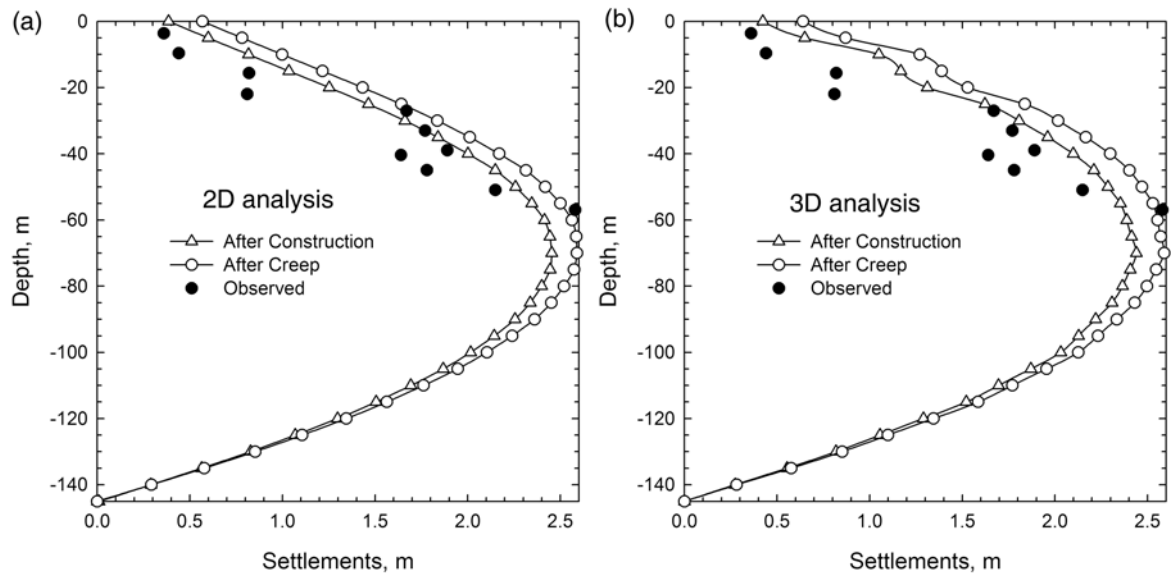
30 MPa και $E = 25$ MPa για 2Δ και 3Δ, ενώ για την φόρτιση $E = 90$ MPa και 75 MPa αντίστοιχα. Στο Σχήματα 11α και 11β παρουσιάζονται οι βυθίσεις της πλάκας 13 για διάφορα στάδια της φόρτισης για 2Δ και 3Δ αναλύσεις, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι παρουσία της δύσκαμπτης επιφάνειας του υποκείμενου βράχου στην περίπτωση της στενής κοιλάδας αυξάνει την συνολική δυσκαμψία του φράγματος και οδηγεί σε μείωση της βύθισης της πλάκας από 88 cm στη 2Δ ανάλυση σε 25 cm στην 3Δ ανάλυση.

Παρά την σημαντική αύξηση της δυσκαμψίας λόγω της στενότητας της κοιλάδας, το μεταβαλλόμενο πάχος της υποκείμενης λιθορριπής κοντά στην πλίνθο και οι ανωμαλίες στην επιφάνεια του βράχου της κοιλάδας είναι δυνατόν να δημιουργήσουν συνθήκες απότομης μεταβολής της δυσκαμψίας του υποκείμενου υλικού, η οποία οδηγεί σε κάμψη της πλάκας και ανάπτυξη εφελκυστικών ρωγμών σε μία ζώνη πλάτους περίπου 30 m παράλληλα με την πλίνθο στο κάτω μισό της πλάκας.

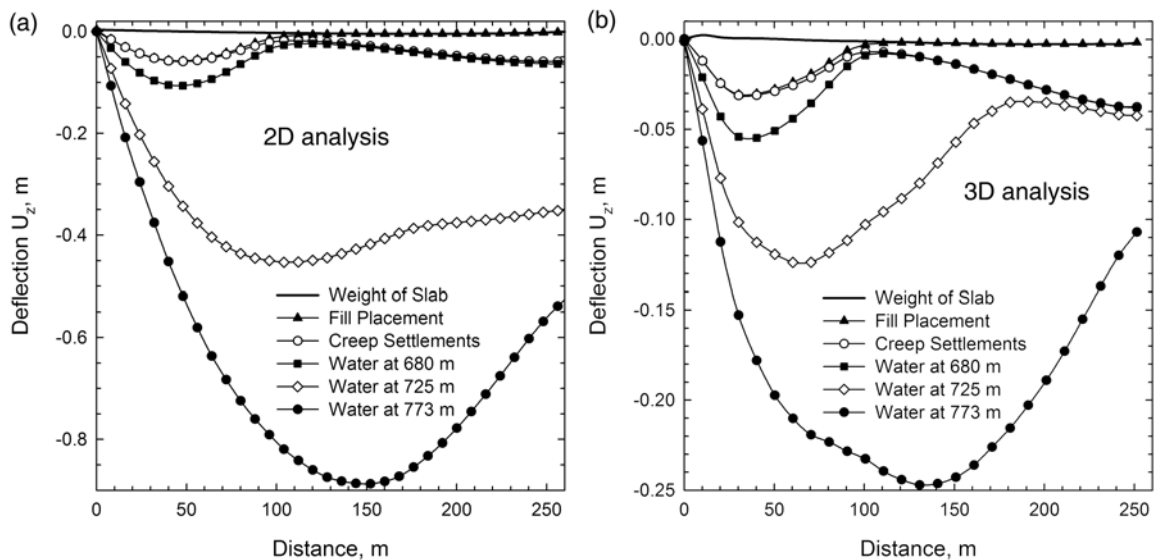
4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παραμετρική ανάλυση της σταδιακής κατασκευής και πλήρωσης της λεκάνης αποταμιεύσεως του φράγματος Μεσοχώρας οδηγεί στα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η γενική μεθοδολογία για την προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής και πλήρωσης της λεκάνης αποταμιεύσεως με χρήση μιας προχωρημένης 3Δ μη-γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα σχετικά με την συνολική συμπεριφορά του φράγματος και της πλάκας, σε ποιοτική συμφωνία με δημοσιευμένες παρατηρήσεις από υπάρχοντα φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.
2. Η προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής του φράγματος Μεσοχώρας προβλέπει με επιτυχία τις καθιζήσεις που μετρήθηκαν καθ' ύψος του φράγματος στην κεντρική διατομή κατά την κατασκευή και εν συνεχεία τις καθιζήσεις στην στέψη λόγω ερυσμού.



Σχήμα 10 Σύγκριση προβλεπόμενων καθιζήσεων καθ' ύψος του φράγματος μετά την κατασκευή και μετά το στάδιο ερπυσμού με τις μετρήσεις καθιζήσεων στην κεντρική διατομή: (α) 2Δ ανάλυση (β) 3Δ ανάλυση.



Σχήμα 11 Επίδραση της τρισδιάστατης γεωμετρίας της στενής κοιλάδας στην αύξηση της συνολικής δυσκαμψίας του φράγματος: βύθιση της πλάκας 13 για διάφορα στάδια φόρτισης (α) 2Δ ανάλυση και (β) 3Δ ανάλυση.

3. Η χρήση της υπερβολικής σχέσης τάσης-παραμόρφωσης και η διαφοροποίηση της δυσκαμψίας κατά την φόρτιση και αποφόρτιση είναι σημαντικά στοιχεία για την συμφωνία των προβλέψεων με παρατηρήσεις από την συμπεριφορά υπαρχόντων φραγμάτων.
4. Στην πλάκα του φράγματος της Μεσοχώρας αναπτύσσεται μία εφελκυστική ζώνη πλάτους περίπου 30 m παράλληλα με την πλίνθο στο κάτω μισό της πλάκας. Παρόμοια εφελκυστική ζώνη φαίνεται να αναπτύσσεται σε φράγματα τα οποία έχουν συνολικά μικρή δυσκαμψία, σε συνδυασμό με ανώμαλη γεωμετρία στην επιφάνεια του βράχου (π.χ. φράγματα Xingó, Itá και Itaprebi). Η μέγιστη εφελκυστική τάση που αναπτύχθηκε στην ζώνη αυτή είναι 8 MPa, δηλαδή υπερβαίνει την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος.

5. Η πλευρική οριζόντια μετατόπιση των πλακών σκυροδέματος δημιουργεί σημαντική θλίψη στα κατακόρυφα τοιχώματα μεταξύ γειτονικών πλακών σε μία περιοχή με κέντρο σε απόσταση περίπου 50 m από τον πόδα και διάμετρο περίπου 50 m. Η μέγιστη τιμή της θλιπτικής τάσης στην ζώνη αυτή είναι -10 MPa, ενώ στο ανώτερο τμήμα των πλακών οι θλιπτικές τάσεις είναι πολύ μικρότερες.
6. Παραμετρικές αναλύσεις με ένα λεπτομερές προσομοίωμα αποτελούμενο από 59942 στοιχεία και ένα πιο αδρό προσομοίωμα αποτελούμενο από 16158 στοιχεία, κατέδειξαν ότι η χρήση λεπτομερούς προσομοιώματος βελτιώνει αρκετά τα αποτελέσματα της ανάλυσης της σταδιακής κατασκευής και της φόρτισης του φράγματος κατά την πλήρωση της λεκάνης.
7. Συστηματικές συγκρίσεις αποτελεσμάτων που προέκυψαν από 2Δ αναλύσεις της κεντρικής διατομής και 3Δ αναλύσεις που λαμβάνουν υπόψη την πραγματική γεωμετρία της κοιλάδας, κατέδειξαν ότι, για στενή κοιλάδα, οι 2Δ αναλύσεις προβλέπουν πολύ μεγαλύτερες καθιζήσεις και τάσεις στην πλάκα σκυροδέματος σε σχέση με εκείνες που προκύπτουν από 3Δ αναλύσεις. Συνεπώς, σε στενές κοιλάδες, η χρήση 2Δ ανάλυσης είναι άνευ αξίας ή ακόμη και παραπλανητική.
8. Τέλος, η τιμή του συντελεστή τριβής μ μεταξύ σκυροδέματος και χαλίκων στην βάση της πλάκας δεν έχει σημαντική επίδραση στο μέγεθος των τάσεων που αναπτύσσονται στην πλάκα (για εύρος διακύμανσης από 0.4 ως 0.8).

5 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο πρώτος συγγραφέας ευχαριστεί την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού για την χρηματοδότηση της έρευνας στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Επίσης ευχαριστεί τον υποψ. διδάκτορα Βασ. Ευαγγέλου για την συμβολή του στο αρχικό στάδιο της μελέτης.

6 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ABAQUS (2008): *Users' Manual, Version 6.7*, Simulia, Providence, RI, USA.
- Clough, G. W., (1984). *Users' Manual for Program SOILSTRUCT*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blackburg, Virginia.
- Dakoulas, P., (2007). *Messochora CFR Dam: slab and dam performance during reservoir filling based on 3D nonlinear analysis*, Research Report, Dept. of Civil Engineering, University of Thessaly, Volos, Greece.
- Duncan J. M. and C. Y. Chang, 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soils, *J. of Soil Mech. And Found. Engineering*, ASCE, 96(5), 1629-1653.
- Duncan J. M. and Byrne, P, Wong, K. and Mabry P. (1980). *Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses*, Report UCB/GT/80-01, University of California, Berkeley, CA, USA.
- Ebeling, R. M., Peters, R. F. and Clough G. (1992). *User's guide for the incremental construction soil-structure interaction program SOILSTRUCT*, Waterways Experiment Station, US Corps of Engineers, Technical Report ITL-90-6, 1992.
- Marques Filho, F. and Pinto N. de S., (2005). CFRD dam characteristics learned from experience, *Hydropower & Dams*, Issue 1, 72-78.

Nonlinear 3D simulation of the phased construction and reservoir impoundment of Messochora Dam

Dakoulas, P.

Associate Professor, University of Thessaly, Volos, Greece

Thanopoulos, Y.

Public Power Corporation, Greece

Anastassopoulos, K.

Public Power Corporation, Greece

ABSTRACT: A nonlinear 3D numerical simulation of the phased construction and reservoir impoundment of a concrete face rockfill dam built in a narrow canyon is presented. The nonlinear stress-strain relationship of the dam material is based on the constitutive model by Duncan et al. (1970), which accounts for the dependence of the elastic moduli on the confining stress. The predicted response is in general agreement with the response observed in many actual similar dams. The presented methodology is applied for the study of the behavior of Messochora dam.