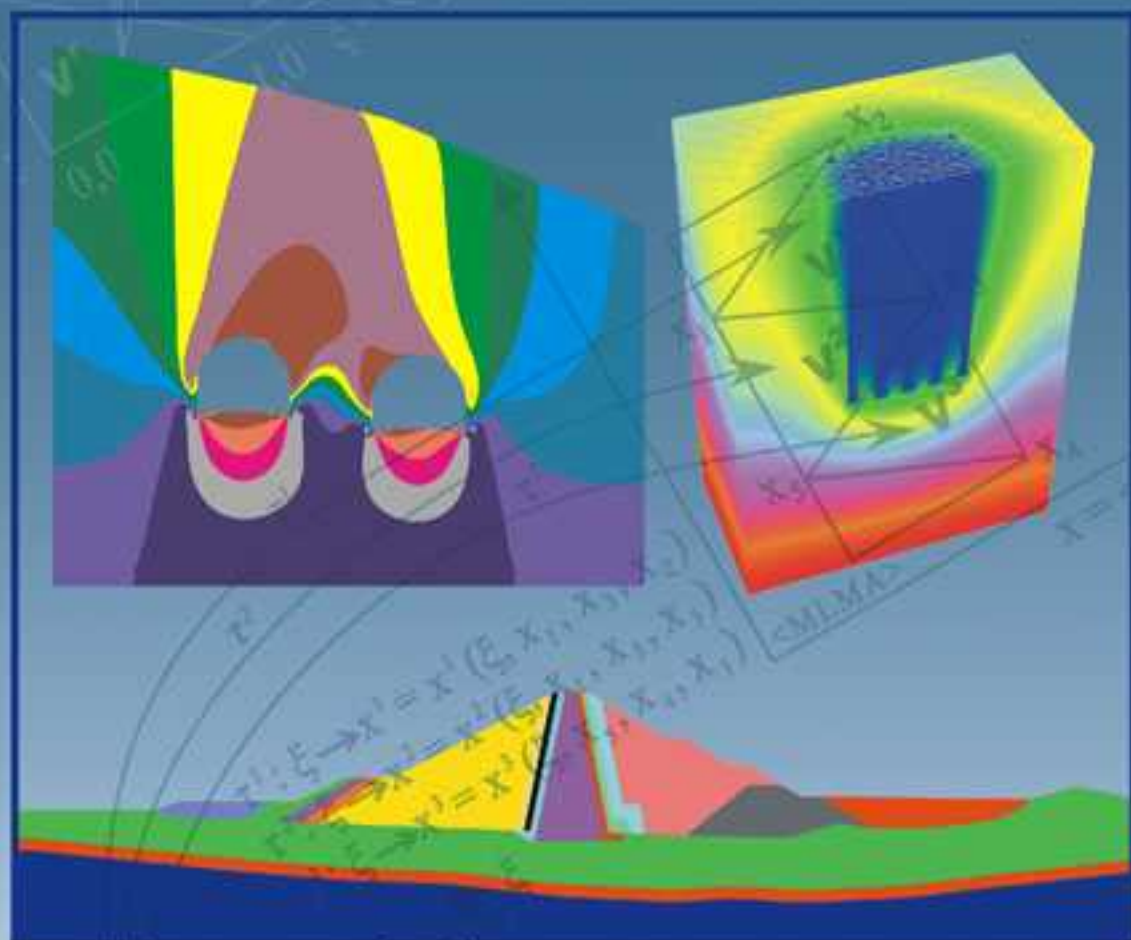


Αιρίλιος Μ. Κωροδρόμος
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευών



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πρόλογος	15
Πίνακας Κυριοτέρων Συμβόλων	19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων..... 23

1.1 Εισαγωγή	23
1.2 Προσέγγιση συνεχούς προβλήματος	24
1.3 Προσέγγιση με πεπερασμένα στοιχεία	27
1.4 Στοιχεία αναφοράς πεπερασμένων στοιχείων	31
1.5 Κατάστρωση συναρτήσεων παρεμβολής.....	34
1.6 Κώδικας υπολογισμού συναρτήσεων μορφής και των παραγώγων τους	42
1.7 Σύνοψη.....	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Αναγωγή μέσω της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων σε Μητρικές Εξισώσεις..... 49

2.1 Εισαγωγή	49
2.2 Προσδιορισμός μητρώου δυσκαμψίας ομογενούς στοιχείου	50
2.3 Ολοκλήρωση κατά Gauss – Σημεία ολοκλήρωσης	52
2.4 Αναγωγή γενικών φορτίσεων σε επικόμβια φορτία	78
2.5 Κανόνες διακριτοποίησης.....	88
2.6 Συναρμολόγηση μητρώου δυσκαμψίας	92
2.7 Υπολογισμός μητρώου δυσκαμψίας μονοδιάστατου στοιχείου	104
2.8 Σύνοψη	108

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Γραμμική Ελαστική Συμπεριφορά..... 109

3.1	Εισαγωγή	109
3.2	Καταστατικές εξισώσεις ελαστικού ισότροπου μέσου	112
3.3	Εφαρμογή της γραμμικής ελαστικής ανάλυσης στη Γεωτεχνική Μηχανική	120
3.3.1	Επιφανειακές θεμελιώσεις	122
3.3.2	Ευστάθεια πρανών – Επιφανειακές εκσκαφές	130
3.3.3	Τοίχοι αντιστήριξης	137
3.3.4	Επιχώματα	140
3.3.5	Σήραγγες – Υπόγεια έργα	143
3.3.6	Δίκτυα υπόγειας ροής	147
3.4	Σύνοψη	153

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εισαγωγή στη Μη Γραμμική Συμπεριφορά..... 155

4.1	Εισαγωγή	155
4.2	Κριτήρια και επιφάνειες θραύσης	160
4.2.1	Κριτήριο Von Mises	163
4.2.2	Κριτήριο Tresca	164
4.2.3	Κριτήριο Mohr-Coulomb	165
4.2.4	Κριτήριο Drucker-Prager	167
4.2.5	Κριτήριο Lade-Duncan	169
4.3	Τέλεια ελαστοπλαστική συμπεριφορά	169
4.3.1	Πλαστικές παραμορφώσεις	172
4.3.2	Συνθήκες ροής και καθετότητας για μοναδικότητα λύσης	173
4.3.3	Καταστατικές εξισώσεις μέσου με τέλεια πλαστική συμπεριφορά	174
4.3.4	Παραδείγματα κατάστρωσης καταστατικών εξισώσεων	178
4.3.4.1	Υλικό μέσο Prandtl-Reuss	178
4.3.4.2	Υλικό μέσο Drucker-Prager	180
4.4	Κρατυνόμενη ελαστοπλαστική συμπεριφορά	182
4.4.1	Καταστατικές εξισώσεις μέσου με κρατυνόμενη συμπεριφορά	185
4.4.2	Παραδείγματα κατάστρωσης καταστατικών εξισώσεων	187
4.4.2.1	Καταστατικοί νόμοι τύπου CAP – Γενικές εξισώσεις	189
4.4.2.2	Καταστατικός νόμος Cam-Clay	225
4.5	Σύνοψη	238

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αλληλεπίδραση Εδάφους – Κατασκευών 239

5.1	Εισαγωγή	239
5.2.	Τροποποιημένες γενικές εξισώσεις για προσομοίωση προβλημάτων με μεταβλητά όρια και διαστάσεις.....	243
5.3	Απόκριση μεμονωμένου πάσσалу και ομάδας πάσσάλων	247
5.3.1	Εισαγωγή	247
5.3.2	Πάσσαλοι υπό κατακόρυφη φόρτιση	249
5.3.2.1	Γενικά	249
5.3.2.2	Μεμονωμένος πάσσαλος υπό κατακόρυφη φόρτιση	250
5.3.2.3	Ομάδα πάσσάλων υπό κατακόρυφη φόρτιση	253
5.3.2.3.1	Απόκριση ομάδας πάσσάλων.....	253
5.3.2.3.2	Πρόβλεψη απόκριση ομάδας πάσσάλων	254
5.3.2.3.3	Κατανομή φορτίου στους χαρακτηριστικούς πάσσάλους	256
5.3.3	Πάσσαλοι υπό οριζόντια φόρτιση.....	260
5.3.3.1	Γενικά	260
5.3.3.2	Μεμονωμένος πάσσαλος υπό οριζόντια φόρτιση	261
5.3.3.3	Ομάδα πάσσάλων υπό οριζόντια φόρτιση	268
5.3.3.3.1	Απόκριση ομάδας πάσσάλων.....	268
5.3.3.3.2	Πρόβλεψη απόκριση ομάδας πάσσάλων	273
5.3.3.3.3	Κατανομή φορτίου στους χαρακτηριστικούς πάσσάλους	277
5.3.4	Εφαρμογή στη διαδικασία σχεδιασμού.....	281
5.4	Αποτίμηση επιπτώσεων αρνητικών τριβών σε ομάδες πάσσάλων	287
5.4.1	Γενικά	287
5.4.2	Ανάλυση μηχανισμού ανάπτυξης αρνητικών τριβών	288
5.4.3	Επιπτώσεις αρνητικών τριβών σε ομάδες πάσσάλων	293
5.4.4	Συμπεράσματα	296
5.5	Θεμελίωση Γεφυρών με Φρέατα	297
5.5.1	Γενικά	299
5.5.2	Στοιχεία έργου.....	298
5.5.3	Προσωρινά έργα Αντιστήριξης Φρεάτων	298
5.5.4	Προσομοίωση Απόκρισης Φρεάτων	303
5.5.4.1	Κατακόρυφα φορτία – Ελατήρια προσομοίωσης.....	303
5.5.4.2	Ελατήρια προσομοίωσης σε οριζόντια φόρτιση και στροφή	304
5.5.5	Αριθμητική ανάλυση.....	305
5.5.6	Συμπεράσματα ανάλυσης.....	308

5.6	Αντιστηρίξεις.....	309
5.6.1	Αντιστήριξης οδικού έργου με διάφραγμα πασσάλων.....	309
5.6.2	Αντιστήριξη σε αστικό περιβάλλον με διαφραγματικό τοίχο.....	314
5.6.2.1	Γενικά.....	314
5.6.2.2	Αριθμητική επίλυση	315
5.7	Αντιστήριξη αντλιοστασίου με πασσαλοσανίδες	322
5.7.1	Εισαγωγή – Στοιχεία Έργου.....	322
5.7.2	Μεθοδολογία κατασκευής – Επιλύσεις	323
5.7.3	Ταπείνωση υπόγειου ορίζοντα – Επιλύσεις.....	329
5.8	Μη γραμμική πολυσταδιακή ανάλυση σηράγγων	330
5.8.1	Εισαγωγή	330
5.8.2	Προσομοίωση φάσεων με μείωση δυσκαμψίας βραχομάζας.....	333
5.8.3	Επίλυση δίδυμης σήραγγας	335

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Πρανή – Επιχώματα – Φράγματα..... 341

6.1	Εισαγωγή	341
6.2	Ευστάθεια πρανών	343
6.2.1	Γενικά.....	343
6.2.2	Αντίστροφη ανάλυση – Σχεδιασμός έργου	344
6.2.2.1	Ιστορικό – Γεωτεχνικά δεδομένα.....	344
6.2.2.2	Επιλογή βέλτιστης λύσης.....	347
6.2.2.3	Παραδοχές – Πλαίσιο ανάλυσης.....	348
6.2.2.4	Παρουσίαση αποτελεσμάτων αριθμητικής ανάλυσης.....	349
6.2.2.5	Συμπεράσματα	354
6.3	Αποκατάσταση αστοχίας επιχώματος	355
6.3.1	Γενικά.....	355
6.3.2	Γεωτεχνικά δεδομένα	356
6.3.3	Παθολογία	358
6.3.4	Πλαίσιο προσομοίωσης – Αριθμητική ανάλυση.....	359
6.3.5	Διαστασιολόγηση.....	368
6.4	Σχεδιασμός οπλισμένων επιχωμάτων	369
6.4.1	Γενικά.....	369
6.4.2	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προβλήματος	371
6.4.3	Επίλυση με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας	371
6.4.4	Χρήση αριθμητικών μεθόδων	377
6.2.5	Σύγκριση αποτελεσμάτων επιλύσεων – Συμπεράσματα	382

6.5	Προσομοίωσης κατασκευής και πλήρωσης χωμάτινου φράγματος	386
6.5.1	Εισαγωγή – Στοιχεία έργου	386
6.5.2	Πλαίσιο αριθμητικής ανάλυσης – Παράμετροι - Παραδοχές	388
6.4.3	Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης – Συμπεράσματα	391
6.6	Σύνοψη	398

ΕΠΙΛΟΓΟΣ		399
-----------------	--------------	------------

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	412
--------------------------	------------

6.5. Προσομοίωσης κατασκευής και πλήρωσης χωμάτινου φράγματος

6.5.1 Εισαγωγή – Στοιχεία έργου

Η διερεύνηση της εντατικής και κινηματικής κατάστασης ενός φράγματος κατά τη φάση κατασκευής και την πρώτη πλήρωσή του αποτελεί αντικείμενο ιδιαίτερα σύνθετο. Η προσομοίωση των ανωτέρω φάσεων απαιτεί την εφαρμογή πολυσταδιακής μη γραμμικής ανάλυσης. Φαινόμενα όπως η ανάρτηση του πυρήνα από την κατά πολύ πιο δύσκαμπτη λιθορριπή, η ανάπτυξη αισθητά μεγαλύτερων τάσεων στις άκρες έδρασης του πυρήνα, καθώς και η ανάπτυξη σημαντικών πλευρικών ωθήσεων επί του πυρήνα μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα απαιτούν επιπρόσθετο βαθμό ακρίβειας στην προσομοίωση και ανάλυση του προβλήματος. Τα ανωτέρω σημεία απέτέλεσαν το πλαίσιο προσομοίωσης και ανάλυσης της απόκρισης του φράγματος Ιλαρίωνα κατά τη φάση κατασκευής και της άμεσης πλήρωσής 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. 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.

Η θέση του φράγματος είναι ανάντη της Ι. Μ. Ιλαρίωνα επί του ποταμού Αλιάκμονα, στο νομό Κοζάνης. Το φράγμα είναι χωμάτινο (σώματα στήριξης από αμμοχάλικα), με κεντρικό αργιλικό πυρήνα. Το μήκος της στέψης του φράγματος είναι 565 m περίπου και το μέγιστο ύψος του 130 m από τη θεμελίωση. Η στέψη 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 ασβεστόλιθων. Ενδιάμεσα των δύο παραπάνω βραχωδών σχηματισμών υφίσταται μικρού σχετικά πλάτους μεταβατική ζώνη (εναλλαγές φυλλιτών – ασβεστόλιθων). 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 10.0 m περίπου, ενώ τοπικά το βάθος των εκσκαφών φτάνει έως και τα 20.0 m, ώστε να απομακρυνθούν πλήρως χαλαρές μάζες, προϊόντα αποσάθρωσης του φυλλιτικού υποβάθρου, στις οποίες είχαν εκδηλωθεί κατολισθητικά φαινόμενα.

Στο Σχήμα 6.39 απεικονίζεται το φράγμα κατά τη φάση κατασκευής του με θέα προς την ανάντη πλευρά, στο Σχήμα 6.40 παρουσιάζεται η αρχική φάση διάστρωσης του αργιλικού πυρήνα, ενώ στο Σχήμα 6.41 φαίνονται τα όργανα καταγραφών και παρακολούθησης των μετακινήσεων και των πιέσεων πόρων στη θέση του αργιλικού πυρήνα.



Σχήμα 6.39. Κατασκευή φράγματος από θέση κατάντη και θέα προς την ανάντη πλευρά



Σχήμα 6.40. Κατασκευή φράγματος με θέα προς την πλευρά κατά την αρχική φάση διάστρωσης του αργιλικού πυρήνα



Σχήμα 6.41. Διάστρωση αργιλικού πυρήνα, φίλτρων και τοποθέτηση οργάνων

6.5.2 Πλαίσιο αριθμητικής ανάλυσης – Παράμετροι – Παραδοχές

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 όρο οι επιπτώσεις των οριακών συνθηκών του προβλήματος.

Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιούνται σε καθεστώς επίπεδης παραμόρφωσης, με χρήση του προγράμματος FLAC ver. 4.0. Το πλέγμα πεπερασμένων διαφορών για την ανάλυση της κεντρικής διατομής 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 το διαχωρισμό των διαφόρων συστατικών υλικών και κυρίως των φίλτρων εκατέρωθεν του πυρήνα. Στον Πίνακα 6.7 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων αντοχής, παραμορφωσιμότητας και διαπερατότητας των ανωτέρω στρώσεων, όπως αυτές προέκυψαν μετά και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πληθώρας εργαστηριακών δοκιμών.

Ζώνη	Χαρακτηρισμός	C (kPa)	Ten (kPa)	Φ	E (MPa)	ν	K (MPa)	G (MPa)	γ(KN/m ³)	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 Εκακαφών	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 συναρτήσει της τιμής της σ_3

Συμβολισμοί

C: Συνοχή

E: Μέτρο ελαστικότητας (Μέτρο του Young)

K: Μέτρο Μεταβολής Ογκου (Bulk Modulus)

k: Διαπερατότητα

Φ: Γωνία Εσωτερικής Τριβής

ν: Λόγος Poisson

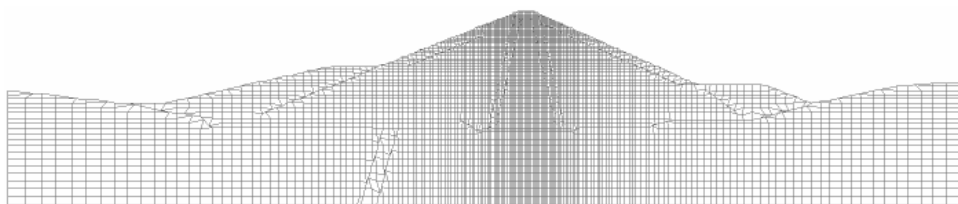
G: Μέτρο Διάτμησης (Shear Modulus)

Ten: Εφελκυστική αντοχή

Πίνακας 6.7. Παράμετροι εδαφικών ζωνών φράγματος και υπεδάφους θεμελίωσης

Στο Σχήμα 6.42 δίνεται ο κάνναβος ανάλυσης, ενώ στο Σχήμα 6.43 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 συναρτήσει της ελάχιστης ενεργού κύριας τάσης σ_3' . Η μεταβολή των μέτρων ελαστικότητας πραγματοποιείται καθ' όλη τη διάρκεια της επίλυσης ανά 200 κύκλους επίλυσης. Η δυνατότητα μεταβλητότητας ανά κύκλο επίλυσης είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα στην υπολογιστική διαδικασία, χωρίς πρακτικά να διαφοροποιεί τα τελικά αποτελέσματα, για τα οποία απαιτήθηκαν 68000 κύκλοι επίλυσης και κατά συνέπεια έλεγχος και μεταβολή των μέτρων παραμορφωσιμότητας κατά 340 φορές.

Για τον προσδιορισμό των σχέσεων μεταβολής των παραμέτρων παραμορφωσιμότητας των υλικών του πυρήνα, των φίλτρων και του σώματος στήριξης του φράγματος συναρτήσει της σ_3' χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεστότητας. Λαμβάνοντας υπόψη τις οριακές συνθήκες της δοκιμής ($\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$ και $\varepsilon_{\kappa\kappa} = \varepsilon_1$) και $\nu = 0.3$ προσδιορίζεται το μέτρο ελαστικότητας από το εξαναγκασμένο μέτρο ελαστικότητας.



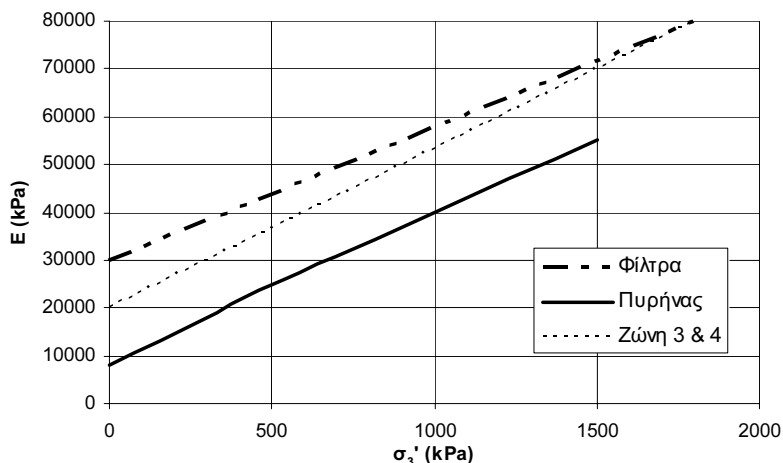
Σχήμα 6.42. Πλέγμα πεπερασμένων διαφορών διακριτοποίησης κεντρικής διατομής φράγματος



Σχήμα 6.43. Απεικόνιση ζωνών με διαφορετικά χαρακτηριστικά και παραμέτρους

Ο συντελεστής K_0 για την περίπτωση αυτή προκύπτει ίσος με 0.4287, ο οποίος εφαρμόζεται και για την περίπτωση των αποτελεσμάτων τριαξονικών δοκιμών. Στο Σχήμα 6.44 δίνονται οι καμπύλες του μέτρου παραμορφωσιμότητας E συναρτήσει της σ_3' , όπως υπολογίστηκαν, καθώς και η προτεινόμενη καμπύλη εφαρμογής. Η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της σ_3' είναι γραμμική και για το υλικό του πυρήνα δίνεται από τη σχέση:

$$E = 8000 + 32 \sigma_3' \quad (\text{kPa}) \quad (6.1)$$



Σχήμα 6.44. Καμπύλες μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της τάσης σ_3' για τα υλικά του πυρήνα, των φίλτρων και των υλικών των ζωνών 3 και 4

Αντίστοιχες γραμμικές σχέσεις προκύπτουν και για τα υλικά των φίλτρων και των ζωνών 3 και 4. Η ανωτέρω τροποποίηση εισάγεται στον κώδικα με ειδική υπορουτίνα και χρήση των ειδικών εντολών της ενσωματωμένης γλώσσας FISH εξωτερικού προγραμματισμού του προγράμματος FLAC.

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. Κατά την προσομοίωση αναπροσαρμόζεται η στάθμη κάθε στρώσης κατά την επιβολή της επομένης, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η συμπλήρωση εδαφικού υλικού το οποίο καλύπτει τις ήδη εκδηλωθείσες καθιζήσεις. Η αναπροσαρμογή κρίνεται απαραίτητη δεδομένου ότι κατά τη φάση κατασκευής εκδηλώνονται καθιζήσεις, η δε υποχώρηση της διαστρώμενης στρώσης συμπληρώνεται κατά τη φάση κατασκευής με πρόσθετο εδαφικό υλικό. Επιπρόσθετο στάδιο επίλυσης αποτελεί η προσομοίωση της πλήρωσης του ταμιευτήρα. Κατά τη φάση αυτή εφαρμόζεται πλήρες υδροστατικό φορτίο τόσο στο ανάντη πρανές του πυρήνα του φράγματος όσο και στην επιφάνεια θεμελίωσης του ανάντη σώματος στήριξης, ενώ αντίστοιχα η λιθορριπή του ανάντη σώματος του φράγματος θεωρείται υπό άνωση.

6.5.3 Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης – Συμπεράσματα

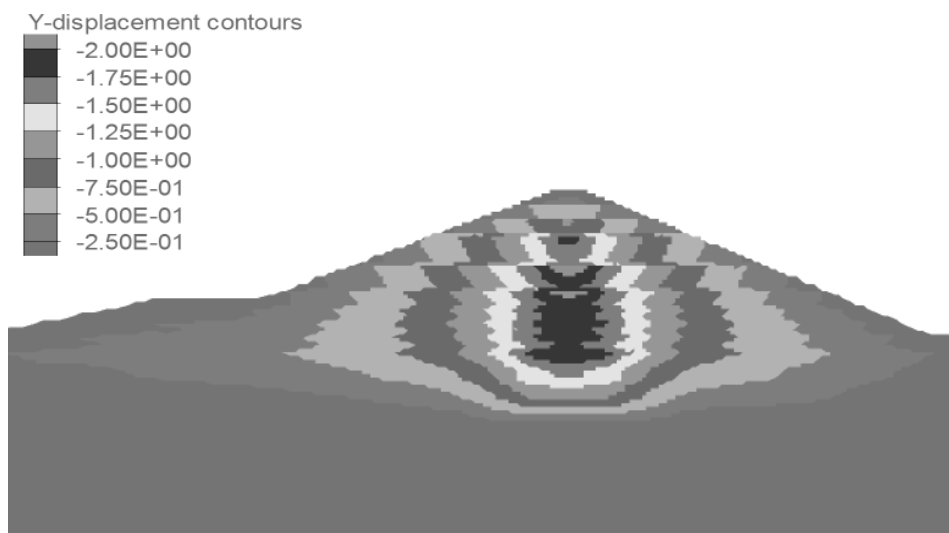
Τα αποτελέσματα των επιλύσεων κατά το τελευταίο στάδιο κατασκευής του φράγματος, σύμφωνα με τις παραδοχές και τις αρχές προσομοίωσης που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, απεικονίζονται στα Σχήματα 6.45 έως 6.48, ενώ στα Σχήματα 6.49 έως 6.52 δίνονται τα αποτελέσματα της επίλυσης που αντιστοιχεί στην άμεση πλήρωση του ταμιευτήρα.

Ειδικότερα, στο Σχήμα 6.45 δίνονται οι ισοτιμές των κατακόρυφων μετακινήσεων μετά το στάδιο ολοκλήρωσης της κατασκευής του φράγματος και στο Σχήμα 6.46 το διάγραμμα των κατακόρυφων μετακινήσεων στο επίπεδο έδρασης του φράγματος. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 6.47 δίνεται το διάγραμμα κατακόρυφων μετακινήσεων στη θέση του άξονα του φράγματος. Η μέγιστη βύθιση είναι της τάξης των 2.0 m, και εντοπίζεται στον πυρήνα, και συγκεκριμένα στην περιοχή μεταξύ απολύτων υψομέτρων +300.0 έως + 350.0 m. Στο επίπεδο έδρασης του φράγματος η βύθιση ανέρχεται σε 0.12m στο κέντρο, λόγω της σχετικής ανάρτησης του πυρήνα από τα φίλτρα και τα σώματα στήριξης, ενώ στα άκρα του πυρήνα, όπου οι ασκούμενες τάσεις είναι κάπως μεγαλύτερες, οι βυθίσεις ανέρχονται σε 0.14m περίπου.

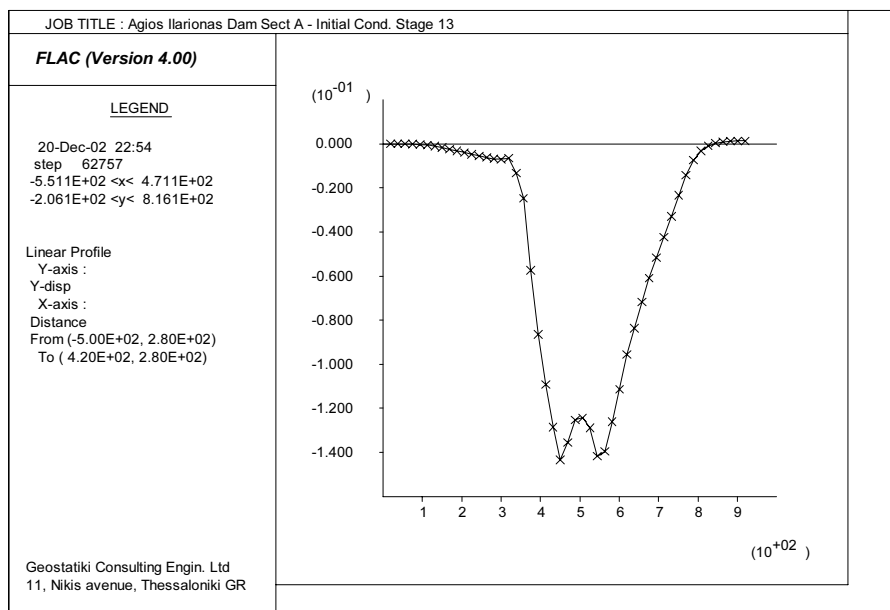
Η φόρτιση που προκαλεί η κατασκευή του φράγματος στον υποκείμενο σχηματισμό και ειδικά στη θέση του άξονα του φράγματος είναι πρακτικά παρεμποδιζόμενη αξονική σύνθλιψη. Στο Σχήμα 6.48 απεικονίζονται οι ισοτιμές των ολικών κατακόρυφων τάσεων στην ευρύτερη περιοχή ανάλυσης μετά την ολοκλήρωση της κατά-

σκευής. Είναι εμφανής η ανάρτηση του πυρήνα του φράγματος από τις εκατέρωθεν αυτού ζώνες του φίλτρου και του στραγγιστηρίου, όπως αναμένεται άλλωστε λόγω των μεγαλύτερων μέτρων παραμορφωσιμότητας που έχουν αποδοθεί στα υλικά αυτά σε σχέση με το υλικό του πυρήνα. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού κρίθηκε σκόπιμο να προδιαγραφεί ελαφρά μόνον συμπύκνωση των ζωνών φίλτρου – στραγγιστηρίου κατά την κατασκευή (δύο απλές διελεύσεις του εξοπλισμού συμπύκνωσης, χωρίς χρήση δόνησης). Με τον τρόπο αυτό αναμένεται να επιτευχθεί βαθμιαία μεταβολή της δυσκαμψίας, από τον πλέον εύκαμπτο πυρήνα προς τα πλέον δύσκαμπτα σώματα στήριξης, με συνέπεια τη μείωση της έντασης των φαινομένων ανάρτησης. Στα άκρα της έδρασης του πυρήνα επί του υποβάθρου θεμελίωσης παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τάσεων.

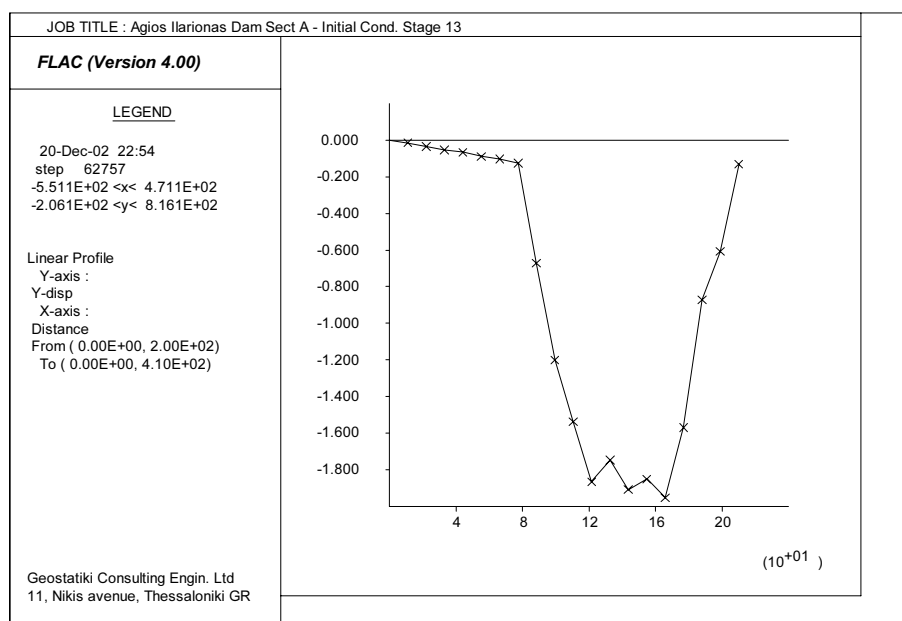
Υψηλή συγκέντρωση τάσεων, προϋπάρχουσα βεβαίως της κατασκευής του φράγματος, εμφανίζεται και στο όριο της διεπιφάνειας ανάμεσα στο σχηματισμό των ασβεστόλιθων και των φυλλιτών, οφειλόμενη στην κατά μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη δυσκαμψία του ασβεστολιθικού σχηματισμού.



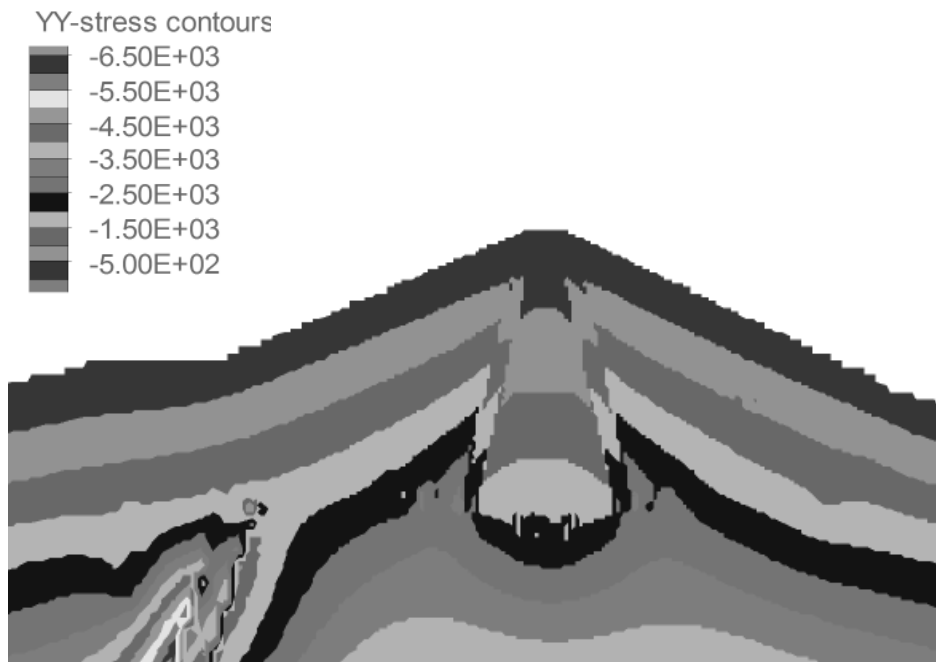
Σχήμα 6.45. Ισοτιμές κατακόρυφων μετακινήσεων κατά το τελευταίο στάδιο κατασκευής του φράγματος



Σχήμα 6.46. Διάγραμμα κατακόρυφων μετακινήσεων στη στάθμη έδρασης του πυρήνα κατά το τελευταίο στάδιο κατασκευής του φράγματος

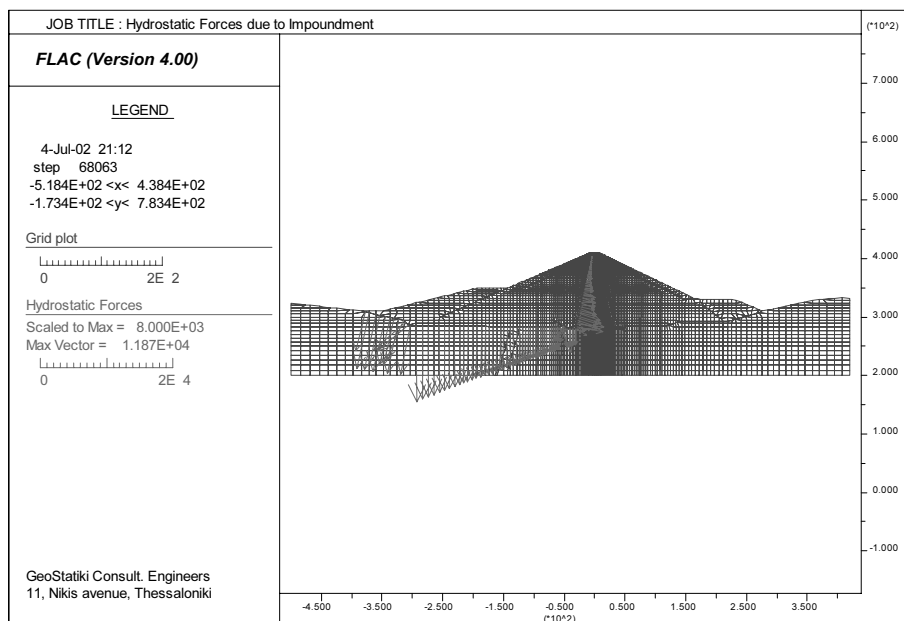


Σχήμα 6.47. Διάγραμμα κατακόρυφων μετακινήσεων στο κατακόρυφο επίπεδο του άξονα κατά το τελευταίο στάδιο κατασκευής του φράγματος

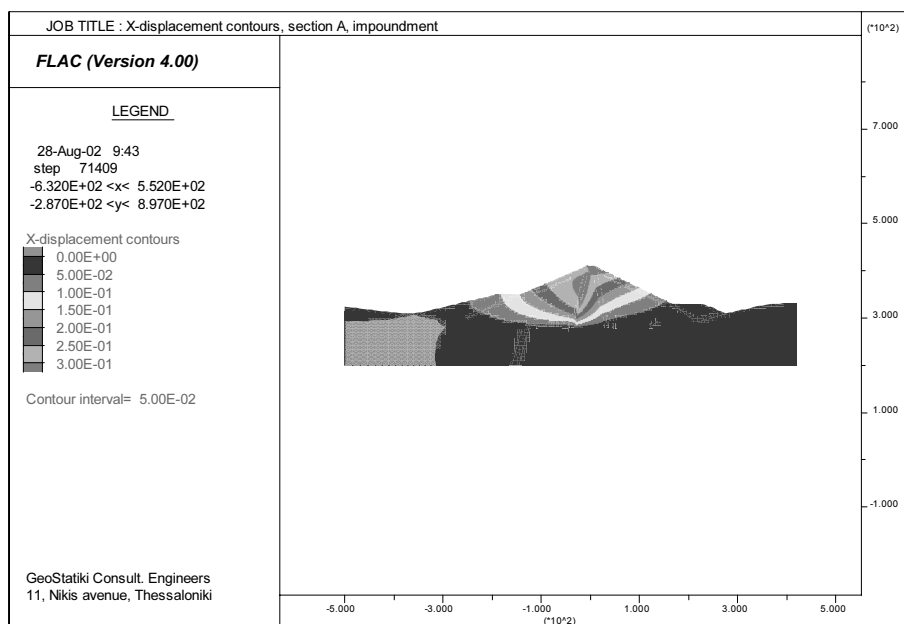


Σχήμα 6.48. Ισοτιμές κατακόρυφων ολικών τάσεων κατά το τελευταίο στάδιο κατασκευής του φράγματος

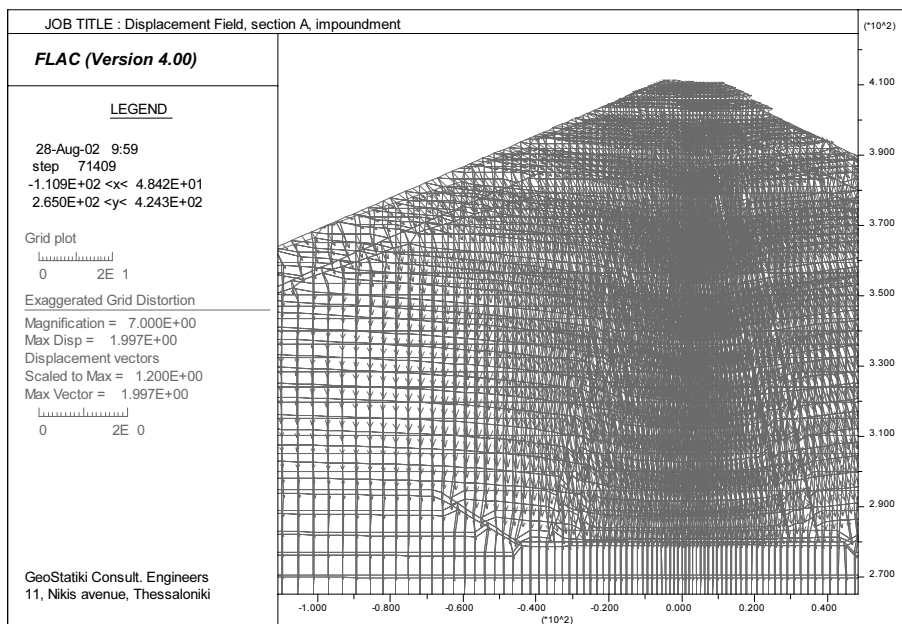
Για την προσομοίωση της άμεσης πλήρωσης του ταμιευτήρα θεωρείται ότι το υψηλής περατότητας ανάντη σώμα στήριξης ευρίσκεται υπό άνωση, ενώ στη διεπιφάνεια της ζώνης αυτής με το μικρής διαπερατότητας υπέδαφος και τον πυρήνα του φράγματος αναπτύσσονται τα υδροστατικά φορτία με το πλήρες μέγεθός τους. Για την προσομοίωση της δράσης αυτής υπολογίζονται τα επικόμβια φορτία που αντιστοιχούν στα υδροστατικά φορτία για στάθμη πλήρωσης $+403.0$ m, τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 6.49. 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. Στο Σχήμα 6.50 απεικονίζονται οι ισοτιμές των οριζοντίων μετακινήσεων μετά την πλήρωση του φράγματος θεωρώντας μηδενικό κινηματικό πεδίο κατά τη πλήρωση, ενώ στο Σχήμα 6.51 δίνεται ταυτόχρονα ο αρχικός κάρναβος, ο παραμορφωμένος κάρναβος καθώς και τα διανύσματα μετακινήσεων μετά την πλήρωση του φράγματος. Από τον παραμορφωμένο φορέα διακρίνεται ότι οι μέγιστες μετακινήσεις εντοπίζονται στο κατώτερο τρίτο του ύψους του πυρήνα, με μέγιστη τιμή τα 2.0 m περίπου, και έχουν διεύθυνση σχεδόν κατακόρυφη. Σημειώνεται ότι στην προηγούμενη τιμή συμπεριλαμβάνονται και οι μετακινήσεις – συνιζήσεις



Σχήμα 6.49. Απεικόνιση υδροστατικών δυνάμεων σε εσωτερικούς κόμβους



Σχήμα 6.50. Ισοτιμές οριζοντίων μετακινήσεων μετά την πλήρωση του φράγματος

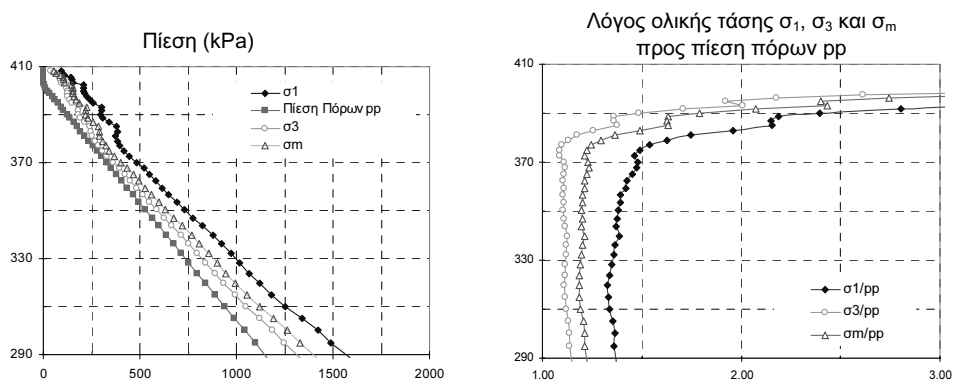


Σχήμα 6.51. Παραμορφωμένος κάναβος και διανύσματα μετακινήσεων

όλων των προηγούμενων σταδίων της ανάλυσης. Από το Σχήμα 6.51 διαφαίνεται ότι οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις εμφανίζονται στην ίδια θέση, εκτεινόμενες μέχρι το ύψος των δύο τρίτων του φράγματος, με μέγιστη τιμή τα 0.30 m περίπου.

Συμπερασματικά εκτιμάται ότι η πλήρωση του ταμιευτήρα δε θα επιφέρει ουσιαστική μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων στον πυρήνα του φράγματος. Αντίθετα, θα επιφέρει σχετικά υπολογίσιμες οριζόντιες μετακινήσεις της τάξης των 0.30 m στον πυρήνα και σε τμήματα των κατόντη σωμάτων στήριξης, οι οποίες πάντως σε κάθε περίπτωση είναι εντός του αναμενομένου μεγέθους για φράγματα αυτού του ύψους.

Τέλος στο Σχήμα 6.52 δίνεται το διάγραμμα μεταβολής ολικών τάσεων (κυρίων τάσεων σ_1 και σ_3 και μέσης τάσης σ_m) και πίεσης πόρων στη θέση του άξονα του φράγματος. Στο ίδιο σχήμα δίνεται επίσης και η μεταβολή του λόγου ολικής τάσης προς πίεση πόρων. Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό της πίεσης πόρων θεωρήθηκε το δυσμενέστερο σενάριο πλήρους ανάπτυξης υδροστατικών πιέσεων στον πυρήνα μέχρι τη μέγιστη στάθμη λειτουργίας +403.0 m.



Σχήμα 6.52. Διάγραμμα μεταβολής τάσεων και πίεσης πόρων στη θέση του άξονα του φράγματος

Συμπερασματικά μπορεί να αναφερθεί ότι οι προβλεπόμενες από την ανάλυση τιμές καθιζήσεων κρίνονται, σύμφωνα με τη διαθέσιμη εμπειρία, εντός των αναμενόμενων ορίων. Η ανάρτηση επίσης του πυρήνα επί των φίλτρων, των οποίων τα μέτρα παραμορφωσιμότητας είναι μεγαλύτερα, είναι επίσης αναμενόμενη δράση, η οποία παρατηρείται σε φράγματα παρομοίου τύπου (Κωμοδρόμος κ.ά., 2001).

Η πλήρωση του ταμιευτήρα προκαλεί την ανάπτυξη σημαντικών πλευρικών ωθήσεων επί του πυρήνα, με αποτέλεσμα την εκδήλωση σχετικά υψηλών διατμητικών τάσεων στην περιοχή έδρασής του. Οι τιμές αυτές παραμένουν πάντοτε εντός των ορίων σχεδιασμού και η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση δεν υπερβαίνει την τιμή του 2%.

Από το διάγραμμα μεταβολής ολικών τάσεων και πίεσης πόρων στον άξονα του φράγματος προκύπτει ότι οι πιέσεις πόρων είναι σε όλες τις θέσεις μικρότερες της ελάχιστης κύριας τάσης της σ_3 , και μάλιστα για το δυσμενέστερο σενάριο ανάπτυξης υδροστατικών πιέσεων στον πυρήνα μέχρι τη μέγιστη στάθμη λειτουργίας +403.0.

Τέλος, αναφέρεται ότι οι διαδρομές τάσεων που επιφέρει τόσο η κατασκευή του φράγματος όσο και η πλήρωσή του βρίσκονται, σχεδόν εξ ολοκλήρου, κάτω από τις επιφάνειες θραύσης και διαρροής των συστατικών υλικών.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευών

Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας των υπολογιστικών συστημάτων και των υπολογιστικών μεθόδων επιτρέπει πλέον την ανάλυση σύνθετων προβλημάτων ακόμη και σε επίπεδο προσωπικού υπολογιστή. Η χρήση των αριθμητικών μεθόδων στη Γεωτεχνική Μηχανική μπορεί να οδηγήσει σε επιλύσεις υψηλής ακρίβειας, να προσδιορίσει τις ευπαθείς περιοχές ενός προβλήματος, και να αυξήσει την ασφάλεια ενός έργου προσδιορίζοντας τις θέσεις που χρήζουν ενίσχυσης — εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο τη μέγιστη δυνατή οικονομία. Συνέπεια αυτής της δυνατότητας είναι η ενσωμάτωση της μη γραμμικής ανάλυσης στο σχεδιασμό τεχνικών έργων.

Κύριος στόχος του βιβλίου, ο οποίος προσδιορίζει και τη δομή του, είναι η κατανόηση και η εφαρμογή από τον αναγνώστη των αριθμητικών μεθόδων στο πεδίο της Γεωτεχνικής Μηχανικής. Η εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και τη μεθοδολογία αναγωγής σε μητρικές εξισώσεις θα του δώσει τη δυνατότητα να προσεγγίσει τη Μηχανική με μαθηματική σκέψη. Η μόρφωση των καταστατικών εξισώσεων για την απλή περίπτωση της γραμμικής ελαστικότητας και της μη γραμμικής ανάλυσης καταδεικνύει τη χρησιμότητα της κατανόησης και της προσέγγισης των φυσικών προβλημάτων, και την αναγωγή τους στη συνέχεια σε επιλύσιμα μαθηματικά προβλήματα μετά από κατάλληλες απλουστευτικές παραδοχές.

Σημαντικό μέρος του βιβλίου αφιερώνεται σε εφαρμογές, οι οποίες καλύπτουν το ευρύτερο πεδίο της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευών. Η παράθεση των θεωριών προσέγγισης των εφαρμογών, η χρήση συμβατικών μεθόδων οριακής ισορροπίας, και η — σε αντίστιξη — χρήση των αριθμητικών μεθόδων για κάθε εφαρμογή επιτρέπουν στον αναγνώστη την εμβάθυνση σε ειδικά ερευνητικά πεδία και εφαρμογές. Η παράθεση, τέλος, εκτεταμένης βιβλιογραφίας καθοδηγεί τον αναγνώστη, τον ερευνητή, ή το μηχανικό εφαρμογών, σε περαιτέρω διερεύνηση ειδικών θεμάτων.

Ο συγγραφέας

Ο Αριόλιος Κωμοδρόμος είναι Αναπληρωτής Καθηγητής και Διευθυντής του Εργαστηρίου Υπολογιστικής Γεωτεχνικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Πραγματοποίησε τις Γυμνασιακές του σπουδές στο Παγκύπριο Γυμνάσιο Λευκωσίας και στη συνέχεια φοίτησε ως προπτυχιακός και μεταπτυχιακός φοιτητής στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. και στην Ecole Centrale de Paris. Ασχολήθηκε επί σειρά ετών με το σχεδιασμό έργων πολιτικού μηχανικού και ειδικότερα με ειδικές θεμελιώσεις, αντιστηρίξεις, σήραγγες, γέφυρες, και φράγματα. Στα ερευνητικά του ενδιαφέροντα εντάσσονται οι αριθμητικές μέθοδοι και η εφαρμογή τους στη Γεωτεχνική Μηχανική, οι καταστατικοί νόμοι συμπεριφοράς, και η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευών.



ΕΚΔΟΣΕΙΣ
ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ

Λομνικοί 4, Στάθμος Αρπίνης, 10440 ΑΘΗΝΑ, Τηλ. 210-5237635

Επισκεφθείτε μας στο Internet:
www.klidarithmos.gr

ISBN 978-960-461-201-7



9 789604 612017