

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΥΠΟ  
ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΥ**

**ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΣΑΜΑΡΕΝΤΣΗΣ**

**ΙΑΣΩΝ ΣΟΥΡΛΑΣ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2017



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 16054/1  
Ημερ. Εισ.: 08-09-2017  
Δωρεά: Συγγραφείς  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ  
2017  
ΣΑΜ

© 2017 Αναστάσιος Σαμαρέντσης , Ιάσων Σούρλας

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Παναγιώτης Ντακούλας  
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Εφραιμίδης  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Πολυξένη Καλλιόγλου  
Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Παναγιώτη Ντακούλα, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μας. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Γεώργιο Εφραιμίδη και Πολυξένη Καλλιόγλου για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. . Τέλος, ευχαριστούμε τους φίλους μας και τους γονείς μας για την στήριξή τους.

Αναστάσιος Σαμαρέντσης -Ιάσων Σούρλας

# ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΚΡΙΣΙΜΕΣ

## ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΥ

Αναστάσιος Σαμαρέντσης, Ιάσων Σούρλας

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2017

Επιβλέπων Καθηγητής: Παναγιώτης Ντακούλας, Καθηγητής

### Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την προσομοίωση της συμπεριφοράς φράγματος υπό κρίσιμες καταστάσεις ροής και σεισμού με τη χρήση των προγραμμάτων H/Y FLAC 7.0 και SLIDE. Κύριος στόχος είναι η μελέτη του συγκεκριμένου φράγματος με τα 2 αυτά προγράμματα τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα. Αρχικά παρουσιάζονται κάποια εισαγωγικά στοιχεία για τα φράγματα όπως είναι οι αρχικές μελέτες σχεδιασμού, οι αστοχίες φραγμάτων και τεχνικό-οικονομικοί σχεδιασμοί γεωφραγμάτων. Στη συνέχεια περιγράφονται οι τύποι των φραγμάτων καθώς και τα γενικά χαρακτηριστικά τους. Έπειτα γίνεται εκτενέστερη αναφορά στα γεωφράγματα, περιγράφοντας τους βασικούς στόχους σχεδιασμού, τα πλεονεκτήματα τους καθώς και τις επιμέρους κατηγορίες τους. Ακολούθως αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά των ζωνών διαζωνισμένων γεωφραγμάτων όπως είναι ενδεικτικά ο πυρήνας, τα φίλτρα, τα στραγγιστήρια, τα κελύφη. Στην παρούσα εργασία ο έλεγχος της ευστάθειας φραγμάτων αποτελεί σημαντικό τμήμα της μελέτης και για αυτό το λόγο αναφέρονται τα κυριότερα στάδια που απαιτείται καθώς και οι ελάχιστες τιμές των αποδεκτών συντελεστών ασφαλείας. Εν γένει, τα φράγματα αρχίζουν να παραμορφώνονται από τη στιγμή της διάστρωσης των υλικών στο ανάχωμα και συνεχίζουν να παραμορφώνονται για αρκετό χρονικό διάστημα, μετά την ανάπτυξη των φορτίων που τα καταπονούν. Για το λόγο αυτό περιγράφονται εν συντομία οι παραμορφώσεις αυτές όπως είναι οι παραμορφώσεις λόγω ιδίου βάρους υλικών αναχώματος, οι παραμορφώσεις λόγω φορτίων νερού ταμιευτήρα και οι παραμορφώσεις λόγω σεισμικής διέγερσης.

Στο κυρίως μέρος παρουσιάζεται η προσομοίωση της συμπεριφοράς του φράγματος με χρήση των προγραμμάτων FLAC 7.0 και SLIDE. Αρχικά περιγράφεται η γεωμετρία του υπό μελέτη φράγματος καθώς και οι ιδιότητες των επιμέρους ζωνών του. Ύστερα από μια σύντομη περιγραφή των 2 προγραμμάτων και του εύρους χρησιμότητας τους σε προβλήματα γεωτεχνικής μηχανικής περιγράφονται αναλυτικά οι διαφορετικοί μέθοδοι που χρησιμοποιούν τα 2 προγράμματα. Ακόμη παρουσιάζονται διεξοδικά τα βασικά στοιχεία και οι παράμετροι της προσομοίωσης των αναλύσεων όπως είναι η δημιουργία καννάβου, οι συνοριακές συνθήκες, και η στρωματογραφία. Στη συνέχεια περιγράφονται λεπτομερώς τα στάδια που υιοθετήθηκαν για την προσομοίωση των αναλύσεων. Τα στάδια αυτά είναι η σταδιακή κατασκευή του φράγματος, η ανάπτυξη δικτύου ροής, ο απότομος καταβιβασμός της στάθμης του νερού και η σεισμική διέγερση. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων, από το FLAC 7.0 και το SLIDE. Τα μεγέθη που εξετάζονται είναι οι πιέσεις πόρων, οι συντελεστές ασφαλείας και οι μετατοπίσεις. Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις και τις συγκρίσεις που διεξήχθησαν.

# **SIMULATION OF THE BEHAVIOUR OF AN EARTH DAM UNDER CRITICAL FLOW CONDITIONS AND SEISMIC ACTIVITY**

Anastasios Samarentsis, Jason Sourlas

University of Thessaly, Civil Engineering department, 2017

SUPERVISOR: Dakoulas Panagiotis

## **SUMMARY**

This diploma thesis presents the simulation of the behavior of an earth dam under critical flow conditions and seismic activity using FLAC 7.0 and SLIDE. The main objective is the study of the dam with two programs that use different methods to compare the final results. Initially some input are described such as the initial design studies, dam failures and technical-economic designs of a dam. Moreover the different types of dams as well as their general characteristics are described. After that, there is a reference of the basic goals of the design of soil dams, their benefit as well as their categories. Moreover the different characteristics of the layers of a dam such as the core, the filters and the shells. In this thesis the analysis of dams stability is an important part of the study therefore the most important stages are described in which this analysis is needed and the minimum values of the safety factor. In general, dams begin to deform from the time of paving materials in embankment and continue to deform for some time, after the development of the loads the strain. . Therefore these deformations such as distortion due to self weight embankment materials, the deformations due to the reservoir water loads and deformations due to seismic excitation are outlined..In the main part of the thesis the simulation of dam behavior using FLAC 7.0 and SLIDE programs is presented. Originally the geometry of the barrier design and the properties of the individual zones of the dam are described. After a brief description of the two programs and their utility range in geotechnical



engineering problems the methods the 2 programs use for the analysis are described with full detail. Next the main elements and parameters of the simulation are presented such as, the grid, the boundary conditions. Then the steps adopted for the simulation are described. These steps are the progressive construction of the dam, the flow network development, the rapid lowering of the water level and the seismic stimulation. In the following chapters the analytical results from FLAC 7.0 and SLIDE are presented and compared. The figures that are calculated are pore pressures, safety factors and displacement. Finally the conclusions drawn from the analysis and comparisons performed are presented.

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>Κεφάλαιο 1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1	Γενικά.....	1
1.2	Αρχικές μελέτες σχεδιασμού .....	1
1.3	Αστοχίες φραγμάτων.....	3
1.4	Τεχνικό-Οικονομικός Σχεδιασμός Γεωφράγματος.....	5
<b>Κεφάλαιο 2</b>	<b>Τύποι Φραγμάτων .....</b>	<b>6</b>
2.1	Γενικά.....	6
	Φράγματα από σκυρόδεμα (δύσκαμπτα).....	6
	Φράγματα από γεωλικά (εύκαμπτα).....	6
2.2	Φράγματα βαρύτητας .....	6
2.3	Φράγματα αντηριδωτά .....	8
2.4	Φράγματα τοξωτά .....	8
<b>Κεφάλαιο 3</b>	<b>Γεωφράγματα .....</b>	<b>10</b>
3.1	Βασικός στόχος σχεδιασμού .....	10
3.2	Ομοιογενή γεωφράγματα.....	11
3.3	Διαζωνισμένα γεωφράγματα .....	12
3.3.1	Ζώνες γεωφράγματος με πυρήνα .....	14
3.3.2	Πυρήνες Γεωφράγματος .....	16
3.3.3	Φίλτρα-Στραγγιστήρια .....	17
3.3.4	Κελύφη.....	18
<b>Κεφάλαιο 4</b>	<b>Ευστάθεια.....</b>	<b>20</b>
4.1	Γενικά.....	20
4.2	Σεισμική επικινδυνότητα περιοχής.....	20
4.3	Σεισμική καταπόνηση.....	21
4.4	Συντελεστής Ασφαλείας .....	21
<b>Κεφάλαιο 5</b>	<b>Παραμορφώσεις αναχώματος.....</b>	<b>23</b>
5.1	Γενικά.....	23
5.2	Παραμορφώσεις Λόγω Ιδίου Βάρους Υλικών Αναχώματος.....	23

5.2.1	Γενικά.....	23
5.2.2	Άμεσες Παραμορφώσεις.....	23
5.2.3	Παραμορφώσεις Λόγω Στερεοποίησης.....	24
<b>5.3</b>	<b>Παραμορφώσεις λόγω φορτίων νερού ταμιευτήρα .....</b>	<b>25</b>
<b>Κεφάλαιο 6 Προσομοίωση συμπεριφοράς φράγματος με τα υπολογιστικά προγράμματα</b>		
	<b>FLAC 7 και SLIDE .....</b>	<b>26</b>
<b>6.1</b>	<b>Στόχος της παρούσας διπλωματικής .....</b>	<b>26</b>
<b>6.2</b>	<b>Γεωμετρία και ιδιότητες φράγματος.....</b>	<b>26</b>
<b>6.3</b>	<b>Γενικά για το FLAC 7 .....</b>	<b>28</b>
6.3.1	Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών.....	28
6.3.2	Μέθοδος ελέγχου ευστάθειας στο πρόγραμμα FLAC 7.0.....	29
6.3.3	Κριτήριο αστοχίας.....	30
<b>6.4</b>	<b>Γενικά για το SLIDE.....</b>	<b>30</b>
6.4.1	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.....	31
6.4.2	Μέθοδος ελέγχου ευστάθειας στο πρόγραμμα SLIDE .....	32
<b>6.5</b>	<b>Βασικά στοιχεία και παράμετροι προσομοίωσης .....</b>	<b>33</b>
<b>6.6</b>	<b>Στάδια προσομοίωσης αναλύσεων με τα προγράμματα FLAC και SLIDE .....</b>	<b>34</b>
<b>Κεφάλαιο 7 Παρουσίαση αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα FLAC 7.0 .....</b>		
<b>7.1</b>	<b>Πέρασ κατασκευής .....</b>	<b>36</b>
7.1.1	Μετατοπίσεις .....	37
7.1.2	Συντελεστής ασφαλείας .....	38
<b>7.2</b>	<b>Ολοκλήρωση του δικτύου ροής .....</b>	<b>39</b>
7.2.1	Μετατοπίσεις .....	40
7.2.2	Συντελεστής ασφαλείας .....	41
<b>7.3</b>	<b>Απότομος καταβιβασμός στάθμης .....</b>	<b>42</b>
7.3.1	Εξέλιξη πιέσεων πόρων .....	43
7.3.2	Συντελεστής ασφαλείας .....	48
<b>7.4</b>	<b>Σεισμική διέγερση.....</b>	<b>50</b>
7.4.1	Σεισμός σχεδιασμού.....	50
7.4.2	Σεισμική διέγερση διάρκειας 10 sec .....	52
7.4.3	Σεισμική διέγερση διάρκειας 30 sec .....	56
<b>Κεφάλαιο 8 Παρουσίαση αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα SLIDE.....</b>		
<b>8.1</b>	<b>Πέρασ της κατασκευής .....</b>	<b>63</b>
<b>8.2</b>	<b>Ολοκλήρωση του δικτύου ροής .....</b>	<b>64</b>
8.2.1	Πίεση πόρων .....	64
8.2.2	Συντελεστής ασφαλείας .....	65
<b>8.3</b>	<b>Απότομος καταβιβασμός στάθμης .....</b>	<b>66</b>
8.3.1	Εξέλιξη πιέσεων πόρων .....	66

8.3.2	Συντελεστής ασφαλείας .....	70
<b>Κεφάλαιο 9</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>72</b>
9.1	Σύγκριση των αποτελεσμάτων FLAC και SLIDE .....	72
9.2	Γενικά συμπεράσματα .....	73
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>75</b>

## **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 1 Ελάχιστοι αποδεκτοί συντελεστές ασφαλείας (ΣΑ)

Πίνακας 2 Ιδιότητες ζωνών φράγματος

## Κατάλογος Σχημάτων

- Σχήμα. 1 Τυπική διατομή φράγματος βαρύτητας από σκυρόδεμα, λιθόδεμα ή RCC
- Σχήμα. 2. Τυπική διατομή Φράγματος ΑΚΣΕ
- Σχήμα. 3 Τυπική τομή 'ομοιογενούς' φράγματος, με ζώνες προστασίας
- Σχήμα.4 Τυπική διατομή γεωφράγματος με κεντρικό πυρήνα
- Σχήμα. 5 Τυπική διατομή γεωφράγματος με κεκλιμένο πυρήνα
- Σχήμα. 6 Τυπική διατομή γεωφράγματος με κεκλιμένο πυρήνα και κεκλιμένες αμφοτέρες τις παρειές του
- Σχήμα 7. Αρχική γεωμετρία και ζώνες υλικών
- Σχήμα 8. Κατακόρυφες μετατοπίσεις μετά το πέρας της κατασκευής του φράγματος
- Σχήμα 9 Απεικόνιση ζώνης μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης και θεώρηση συντελεστή ασφαλείας  $F=2,32$
- Σχήμα 10. Πιέσεις πόρων υπό συνθήκες ροής σταθερής κατάστασης
- Σχήμα 11. Κατακόρυφες μετατοπίσεις μετά το πέρας της κατασκευής του φράγματος
- Σχήμα 12. Απεικόνιση ζώνης μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης και θεώρηση συντελεστή ασφαλείας  $F=1,88$
- Σχήμα 13. Πιέσεις πόρων μετά τον καταβιβασμό της στάθμης του νερού από τα 70 στα 20 μέτρα.
- Σχήμα 14. Πιέσεις πόρων 1 μέρα μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού
- Σχήμα 15. Πιέσεις πόρων 2 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού
- Σχήμα 16. Πιέσεις πόρων 5 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού
- Σχήμα 17. Πιέσεις πόρων 10 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού
- Σχήμα 18. Πιέσεις πόρων 20 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού
- Σχήμα 19. Σημεία στα οποία μελετήθηκε η εξέλιξη της πίεσης πόρων
- Σχήμα 20. Εξέλιξη της πίεσης πόρων στα 4 σημεία του ανάντη κελύφους από την αρχή της πτώσης της στάθμης του νερού.
- Σχήμα 21. Απεικόνιση ζώνης μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης και θεώρηση συντελεστή ασφαλείας  $F=1,19$  μετά την πτώση της στάθμης.
- Σχήμα 22. Η εξέλιξη του συντελεστή ασφαλείας για διάρκεια 20 ημερών μετά την πτώση της στάθμης του νερού.
- Σχήμα 23. Επιτάχυνση της σεισμικής διέγερσης
- Σχήμα 24. Φάσμα επιτάχυνσης της σεισμικής διέγερσης για κρίσιμη απόσβεση  $\xi=3\%$

- Σχήμα 25.Οριζόντιες μετατοπίσεις για διάρκεια σεισμού 10 sec
- Σχήμα 26. Κατακόρυφες μετατοπίσεις για διάρκεια σεισμού 10 sec.
- Σχήμα 27. Πιέσεις πόρων μετά τη σεισμική διέγερση διάρκειας 10 sec
- Σχήμα 28. Απεικόνιση ζώνης μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης και θεώρηση συντελεστή ασφαλείας  $F=1,76$  μετά τη σεισμική διέγερση διάρκειας 10 δευτερολέπτων
- Σχήμα 29.Οριζόντιες μετατοπίσεις για διάρκεια σεισμού 30 sec
- Σχήμα 30.Κατακόρυφες μετατοπίσεις για διάρκεια σεισμού 30 sec
- Σχήμα 31.Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης στο μέσο της στέψης για σεισμό διάρκειας 30 sec.
- Σχήμα 32.Οριζόντιες μετακινήσεις στο μέσο της στέψης για σεισμό διάρκεια 30 sec.
- Σχήμα 33. Χρονοϊστορία κατακόρυφης επιτάχυνσης στο μέσο της στέψης για σεισμό διάρκειας 30 sec.
- Σχήμα 34.Κατακόρυφες μετακινήσεις στο μέσο της στέψης για σεισμό διάρκεια 30 sec.
- Σχήμα 35.Μέγιστες επιταχύνσεις σημείων του πυρήνα συναρτήσει του ύψους.
- Σχήμα 36.Σχετικές μετατοπίσεις των σημείων του πυρήνα συναρτήσει του ύψους.
- Σχήμα 37. Πιέσεις πόρων μετά τη σεισμική διέγερση διάρκειας 30 sec
- Σχήμα 38. Απεικόνιση ζώνης μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης και θεώρηση συντελεστή ασφαλείας  $F=2,16$  μετά τη σεισμική διέγερση διάρκειας 30 δευτερολέπτων.
- Σχήμα 39.Απεικόνιση επιφάνειας ολίσθησης και θεώρηση συντελεστή ασφαλείας  $F=2.702$  μετά το πέρας της κατασκευής.
- Σχήμα 40.Πιέσεις πόρων υπό συνθήκες ροής σταθερής κατάστασης.
- Σχήμα 41. .Απεικόνιση επιφάνειας ολίσθησης και θεώρηση συντελεστή ασφαλείας  $F=2.478$  μετά την ολοκλήρωση του δικτύου ροής.
- Σχήμα 42. Πιέσεις πόρων μετά τον καταβιβασμό της στάθμης του νερού από τα 70 στα 20 μέτρα.
- Σχήμα 43. Πιέσεις πόρων 1 μέρα μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού
- Σχήμα 44. Πιέσεις πόρων 2 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού
- Σχήμα 45. Πιέσεις πόρων 5 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού
- Σχήμα 46. Πιέσεις πόρων 10 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού
- Σχήμα 47. Πιέσεις πόρων 20 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού.
- Σχήμα 48. .Απεικόνιση επιφάνειας ολίσθησης και θεώρηση συντελεστή ασφαλείας  $F=1,209$  μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του ταμιευτήρα

Σχήμα 49. Η εξέλιξη του συντελεστή ασφαλείας για διάρκεια 20 ημερών μετά την πτώση της στάθμης του νερού.



# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Ο ρόλος των φραγμάτων είναι η αναρρύθμιση της ροής των ποταμών και η χρησιμοποίηση των πολύτιμων υδάτινων πόρων κατά τρόπο οικονομικά αποδοτικότερο και περισσότερο ωφέλιμο. Η κατασκευή τους ξεκίνησε πριν από πολλούς αιώνες πριν ακόμα δημιουργηθούν ερωτήματα κι ανησυχίες για τις περιβαλλοντικές μεταβολές που προκαλούν και τις αντιρρήσεις για τη ωφελιμιστική σκοπιμότητά τους. Τα πρώτα φράγματα που κατασκευάστηκαν αποσκοπούσαν κυρίως στην παροχή αντιπλημμυρικής προστασίας και την αποθήκευση νερού για αρδευτικούς και υδρευτικούς σκοπούς, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, για ιχθυοκαλλιέργειες, για τουρισμό και αναψυχή. Σήμερα, τα φράγματα έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις άλλες κατασκευές πολιτικού μηχανικού, έχουν πολύ μεγαλύτερο μέγεθος σε σχέση με το παρελθόν, αξιοποιούν τις γνώσεις της υδρολογίας και της υδρομηχανικής και το μέγεθος των επιπτώσεων άμεσων ή έμμεσων, οικονομικών ή μη οικονομικών έχει αυξηθεί. Το παλαιότερο φράγμα που αναφέρεται στην Ιστορία (4η χιλιετία π.Χ.) βρίσκονταν στη Γιαβά της σημερινής Ιορδανίας και χρησίμευε για τη συλλογή πόσιμου νερού.

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση νερού για ύδρευση, άρδευση, βιομηχανική χρήση, παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, τοποθετεί το νερό σαν το πολυτιμότερο αγαθό για τη ζωή, αλλά και την οικονομική ανάπτυξη μιας χώρας. Επομένως καταβάλλονται προσπάθειες να βρεθούν τρόποι που να επηρεάζουν κατάλληλα τον υδρολογικό κύκλο, ώστε όχι μόνο να μην βλάπτει τον άνθρωπο, αλλά να εξυπηρετεί καλύτερα τα συμφέροντα του. Η αξιοποίηση επομένως των νερών και ιδιαίτερα των επιφανειακών, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη συγκέντρωσή τους σε υδατοδεξαμενές (ταμιευτήρες), οι οποίες δημιουργούνται με την κατασκευή φραγμάτων στις κοίτες ποταμών, χειμαρροποτάμων και χειμαρρικών ρευμάτων. Με τον τρόπο αυτό, συγκεντρώνεται το νερό των πηγών ή της βροχής την περίοδο των βροχοπτώσεων και παρέχεται για χρήση κατά την ξηρή περίοδο.

Συγκεκριμένα παγκοσμίως τα φράγματα χρησιμοποιούνται για αρδευτικούς σκοπούς (37%), για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (16%), για παροχή πόσιμου νερού (12%), για αντιπλημμυρικό έλεγχο (6%), για σκοπούς αναψυχής (3%) και για λοιπούς σκοπούς (4%).

## 1.2 Αρχικές μελέτες σχεδιασμού

Προτού ξεκινήσει η κατασκευή ενός φράγματος πρέπει αρχικά να γίνει η μελέτη και η αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων που υπάρχουν στην περιοχή αυτή. Είναι χαρακτηριστικό ότι από μελέτες σε φράγματα που έχουν υποστεί κάποια μορφής βλάβες οι κυριότερες αιτίες αστοχίας ήταν οι παρακάτω:

- θραύση θεμελίωσης,
- υποπίεσεις, διαβρώσεις και υδραυλικές υποσκαφές,
- μετακινήσεις ρηγμάτων λόγω σεισμού,
- κατολισθήσεις αντρεισμάτων,
- μεγάλες παραμορφώσεις τόσο στη θεμελίωση όσο και στο σώμα του φράγματος.

Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός φράγματος απαιτεί μεγάλη προσοχή για να μην υπάρξουν προϋποθέσεις αστοχίας, ειδικά σε προβληματικές από γεωτεχνικής σκοπιάς περιοχές.

Γενικά, είναι η αναγκαία η επίλυση και η μελέτη των ακόλουθων τεχνικών γεωλογικών προβλημάτων:

- ποιότητα θεμελίωσης του φράγματος,
- στεγανότητα κάτω και γύρω από το φράγμα,
- στεγανότητα λίμνης,
- ευστάθεια αντρεισμάτων γύρω από το φράγμα,
- κίνδυνοι κατολίπησης στη λίμνη,
- συνθήκες συνδρόμων έργων-σήραγγες, υπερχειλιστές, κλπ.
- υλικά κατασκευής.

Πριν την κατασκευή του έργου χρειάζεται να γίνει και μία σεισμοτεκτονική μελέτη της ευρύτερης περιοχής. Δηλαδή, να γίνει καταγραφή κατά πόσο συχνά επηρεάζεται η περιοχή εγκατάστασης του έργου από σεισμούς και σε ποια ζώνη επικινδυνότητας ανήκει, καθώς αυτές οι συνθήκες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τον σχεδιασμό και τη λειτουργία ενός φράγματος.

Επίσης, προτού γίνει η κατασκευή ενός φράγματος εξετάζονται θέματα που σχετίζονται με τις υδραυλικές-υδρολογικές συνθήκες στην περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται δύο ή περισσότερες εναλλακτικές θέσεις κατά μήκος της κοίτης ενός ποταμού για την πραγματοποίηση του έργου. Για κάθε θέση μελετάται ποια είναι η ανώτερη στάθμη νερού του ταμιευτήρα, που μπορεί να φτάσει από τις βροχοπτώσεις και τα υλικά που παρασύρει ο ποταμός επηρεάζοντας έτσι το ύψος του φράγματος.

Εν συνεχεία, γίνεται μελέτη των γεωλογικών συνθηκών στην ευρύτερη περιοχή. Αναλυτικότερα, εξετάζονται τα παρακάτω:

- Οι λιθολογικοί τύποι πετρωμάτων.
- Η ύπαρξη υπόγειων υδροφόρων οριζόντων, οι πιθανές πηγές επαφής ή υπερπλήρωσης και οι τυχόν απώλειες νερού, δηλαδή όλα τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά.
- Η γεωμετρία των υδατοπερατών σχηματισμών και η επικοινωνία αυτών με χαμηλά σημεία εκτός ταμιευτήρα και οι συνθήκες στεγανότητας της λίμνης.

- Η αστάθεια των πρανών και οι κίνδυνοι κατολισθήσεων με την άνοδο της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα λόγω του ταμιευτήρα.

Έπειτα, γίνεται μελέτη των γεωλογικών συνθηκών στη θέση του φράγματος όπου διεξάγονται οι ακόλουθες μελέτες:

- Εξέταση της φύσης, του πάχους και της έκτασης του μανδύα αποσάθρωσης των πετρωμάτων.
- Εξέταση του βάθους αποσάθρωσης, των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων.
- Τεκτονική καταπόνηση.
- Περατότητα κάτω και γύρω από το φράγμα.
- Γεωμετρία περατών σχηματισμών και επικοινωνία αυτών με χαμηλά σημεία εκτός φράγματος.
- Ευστάθεια αντρευσμάτων φράγματος.

Τέλος, σε πολλές περιπτώσεις κατά την κατασκευή των φραγμάτων δημιουργείται ένα υπόγειο διάφραγμα κάτω και γύρω από αυτά, με σκοπό την αύξηση της αντοχής του πετρώματος θεμελίωσης και τη στεγανοποίηση του πετρώματος για να μην υπάρξουν εσωτερικές διαβρώσεις ή ρωγμές. Όλα όσα προαναφέρθηκαν αποτελούν τις μελέτες που πρέπει να γίνουν (γεωλογικές, υδρολογικές, κ.α.) καθώς και να ληφθούν υπόψη τα τεχνικά-γεωλογικά προβλήματα για στην ευρύτερη περιοχή που θα κατασκευαστεί το φράγμα για τον ορθό και πλήρη σχεδιασμό του και για να μην υπάρξουν τυχόν απρόοπτες καταστάσεις και αστοχίες.

Συμπερασματικά, μπορούμε να αναφέρουμε ότι ο σχεδιασμός και η συμπεριφορά του φράγματος εξαρτάται από τα:

1. Από τις γεωλογικές και υδρολογικές συνθήκες της περιοχής, που επηρεάζουν τις μηχανικές και υδραυλικές ιδιότητες του φράγματος.
2. Από τον όγκο του νερού του ταμιευτήρα που ασκεί ισχυρές υδροστατικές πιέσεις στο φράγμα και στη γύρω περιοχή.

### **1.3 Αστοχίες φραγμάτων**

Τα φράγματα αποτελούν μεγάλα τεχνικά έργα και όπως συμβαίνει σε όλα τα τεχνικά έργα πάντα υπάρχει πιθανότητα αστοχίας την οποία οι μηχανικοί προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν. Από σχετική διερεύνηση προέκυψε ότι έχουν παρουσιάσει κάποια μορφής αστοχίας για διάφορους λόγους. Τα κυριότερα αίτια που τις προκάλεσαν ήταν: α) θραύση θεμελίωσης, β) υποπίεσεις, διαβρώσεις και υδραυλικές υποσκαφές, γ) μετακινήσεις ρηγμάτων λόγω σεισμού, δ) κατολισθήσεις αντρευσμάτων, ε) μεγάλες παραμορφώσεις τόσο στη θεμελίωση όσο και στο σώμα του φράγματος.

Είναι απαραίτητο στο σημείο αυτό να δοθεί ο ορθός ορισμός του όρου της αστοχίας, σύμφωνα με τη Διεθνή Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (ICOLD). Η αστοχία φραγμάτων είναι η «κατάρρευση ή μετακίνηση μέρους του φράγματος ή της θεμελίωσης του με αποτέλεσμα το φράγμα να αδυνατεί να συγκρατήσει το νερό, οδηγώντας έτσι στην απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων νερού με αποτέλεσμα να υπάρξει κίνδυνος για τις ανθρώπινες ζωές αλλά και για τις περιουσίες και γενικότερα για ότι βρίσκεται στα κατάντη του φράγματος». Επομένως, οποιαδήποτε άλλη αδυναμία συγκράτησης του νερού που δεν οφείλεται στην κατάρρευση ή τη μετακίνηση του φράγματος δεν μπορεί να θεωρηθεί αστοχία σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό. Βέβαια, σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό πρέπει να έχουμε απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων νερού για να έχουμε αστοχία, όμως αυτό δεν είναι αναγκαστικό για να αστοχήσει ένα φράγμα, αλλά είναι επακόλουθο αν δεν αντιμετωπιστεί και επιλυθεί άμεσα μία αστοχία.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι υπάρχει πιθανότητα κάποιο φράγμα με βάση τον ορισμό να εμφανίσει κάποια τρωτότητα και να αστοχήσει. Ειδικότερα, η έννοια της αστοχίας περιλαμβάνει τυχόν παραμορφώσεις στο φράγμα ή καθιζήσεις του φράγματος ή θραύσεις ή ρωγμές και άλλες συνθήκες που οδηγούν ή θα οδηγήσουν στην απελευθέρωση ποσοτήτων νερού σύμφωνα με τον ανώτερο ορισμό. Σύμφωνα με τη μελέτη της Διεθνούς Επιτροπής Μεγάλων Φραγμάτων (ICOLD) με τίτλο «Στατιστική ανάλυση αστοχιών φραγμάτων», που εκδόθηκε το 1995 προκύπτουν τα παρακάτω στατιστικά ευρήματα:

- Το ποσοστό των μεγάλων φραγμάτων που αστόχησαν ως προς το σύνολο τους μειώνεται συνεχώς. Πιο συγκεκριμένα, από το 2,2% σε φράγματα που κατασκευάστηκαν πριν το 1950, σε λιγότερο από 0,5% στα φράγματα που κατασκευάστηκαν μετά το 1950.
- Οι μελέτες σε φράγματα που αστόχησαν έδειξαν ότι τα φράγματα μικρού ύψους παρουσίασαν πιο συχνά αστοχίες, βέβαια τέτοιου είδους φράγματα αριθμητικά είναι πολύ περισσότερα απ' ό,τι τα μεγαλύτερου ύψους φράγματα. Επομένως, οι αστοχίες δεν πρέπει να σχετίζονται μόνο με το ύψος των φραγμάτων.
- Οι περισσότερες αστοχίες εμφανίστηκαν σε φράγματα στην αρχική φάση λειτουργίας τους. Ενδεικτικά, το 70% των αστοχιών εμφανίστηκαν τα πρώτα δέκα χρόνια από την πρώτη πλήρωση και κυρίως τον πρώτο χρόνο.
- Στα γεωφράγματα η πιο συχνή αιτία αστοχίας είναι: α) διάβρωση λόγω υπερπήδησης (31% ως πρωτογενής και 18% ως δευτερογενής αιτία), β) διάβρωση λόγω διασώληνωσης (15% ως πρωτογενής και 13% ως δευτερογενής αιτία) και γ) διάβρωση της θεμελίωσης (12% ως πρωτογενής και 5% ως δευτερογενής αιτία).

- Στα φράγματα βαρύτητας η κυριότερη αιτία αστοχίας οφείλεται σε προβλήματα θεμελίωσης λόγω: α) διάβρωσης (21%) και β) ανεπαρκούς διατμητικής αντοχής (21%).
- Σε συμπληρωματικά έργα οι αστοχίες οφείλονται κυρίως σε ανεπαρκή διαστασιολόγηση του συστήματος υπερχειλίσσης (22% ως πρωτογενής και 39% ως δευτερογενής αιτία)

#### 1.4 Τεχνικό-Οικονομικός Σχεδιασμός Γεωφράγματος

Ο τεχνικό-οικονομικός σχεδιασμός ενός φράγματος απαιτεί λεπτομερή γνώση του κόστους κατασκευής όλων των επιμέρους ζωνών του φράγματος. Το κόστος των χωματουργικών εργασιών για την κατασκευή γεωφράγματος είναι το άθροισμα του κόστους :

- Ανάπτυξης του δανειοθαλάμου ή/και λατομείου (στο οποίο περιλαμβάνεται το κόστος για απομάκρυνση των επιφανειακών ακατάλληλων υλικών, τον έλεγχο των νερών και τις αποστραγγίσεις)
- Εκσκαφής και επεξεργασίας (πλύσιμο, κοσκίνισμα, ανάμιξη) των υλικών
- Φόρτω-εκφόρτωσης και μεταφοράς
- Ενδεχόμενης αποθήκευσης και πρόσθετης φορτω-εκφόρτωσης
- Διάστρωσης στο φράγμα
- Διαβροχής ή ξήρανσης
- Συμπύκνωσης
- Ποιοτικού ελέγχου (εργαστηριακές δοκιμές και τεχνικές εκθέσεις)
- Αποκατάστασης ατελειών

Η δαπάνη για τη μεταφορά των υλικών βασίζεται στο κυβο-χιλιόμετρο υλικού (δηλαδή μεταφορά ενός κυβικού μέτρου υλικού σε απόσταση ενός χιλιομέτρου. Το κόστος είναι ανάλογο με την απόσταση μεταφοράς.

Η πληρωμή για την κατασκευή αναχώματος φράγματος γίνεται, κατά κανόνα, με βάση τον όγκο των υλικών που έχουν τοποθετηθεί στο φράγμα, όπως αυτός προκύπτει από τα σχέδια του έργου. Ο όγκος αυτός διαφέρει από τον όγκο υλικών που σκάφτηκαν στο δανειοθάλαμο ή το λατομείο (λόγω διαφοράς στην πυκνότητα), αλλά κυρίως διαφέρει από τον όγκο των υλικών που διακινήθηκαν (λόγω επιπλύματος). Κατά την κοστολόγηση των σχετικών εργασιών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι άλλος όγκος σκάβεται, άλλος όγκος διακινείται, άλλος όγκος συμπυκνώνεται και άλλος όγκος 'πληρώνεται' με τα κονδύλια του Τιμολογίου.

## Κεφάλαιο 2 Τύποι Φραγμάτων

### 2.1 Γενικά

Τα φράγματα μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες, με βάση το κύριο υλικό κατασκευής τους :

#### Φράγματα από σκυρόδεμα (δύσκαμπα)

- Βαρύτητας
- Αντηριδωτό
- Τοξωτό
- Σύνθετο αντηριδωτό – τοξωτό

#### Φράγματα από γεωυλικά (εύκαμπα)

- Χωμάτινο
- Λιθόρριπτο με πυρήνα
- Λιθόρριπτο με Ανάντη Πλάκα Σκυροδέματος (Λ.Α.Π.Σ.)
- Λιθόρριπτο με ανάντη ασφαλικό τάπητα
- Λιθόρριπτο με κεντρικό ασφαλικό διάφραγμα

Βασικά στοιχεία για την επιλογή τύπου φράγματος είναι η μορφολογία της κοιλάδας, η γεωλογία και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων της περιοχής κατασκευής του έργου, η διαθεσιμότητα κατάλληλων υλικών, η διάταξη των επιμέρους κατασκευών του έργου και οι περιορισμοί της μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

### 2.2 Φράγματα βαρύτητας

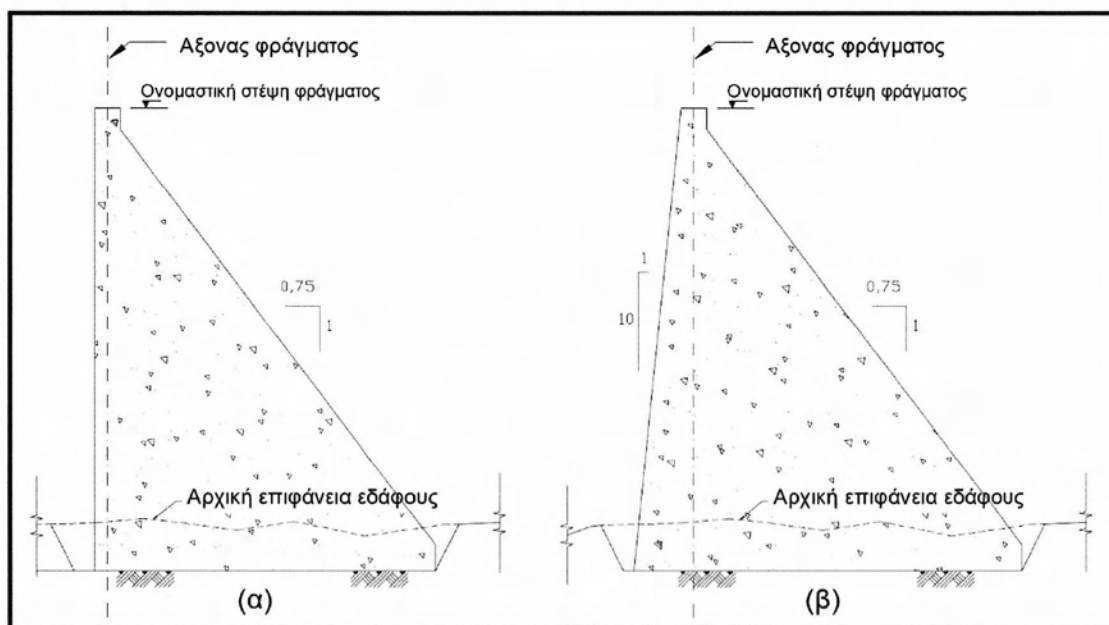
Τα φράγματα βαρύτητας αντιστέκονται στα φορτία που τα καταπονούν και που τείνουν να τα μετακινήσουν και να τα ανατρέψουν, με το ίδιο τους βάρος, είτε άμεσα είτε έμμεσα.

Το φράγμα αντιστέκεται στην ολίσθηση λόγω ανάπτυξης δυνάμεων τριβής και συνάφειας του υλικού του φράγματος με τη θεμελίωση του. Οι τριβές αναπτύσσονται από την κατακόρυφη συνιστώσα του βάρους του φράγματος.

Το φράγμα αντιστέκεται στην ανατροπή λόγω των σταθεροποιητικών ροπών που αναπτύσσονται από το βάρος του.

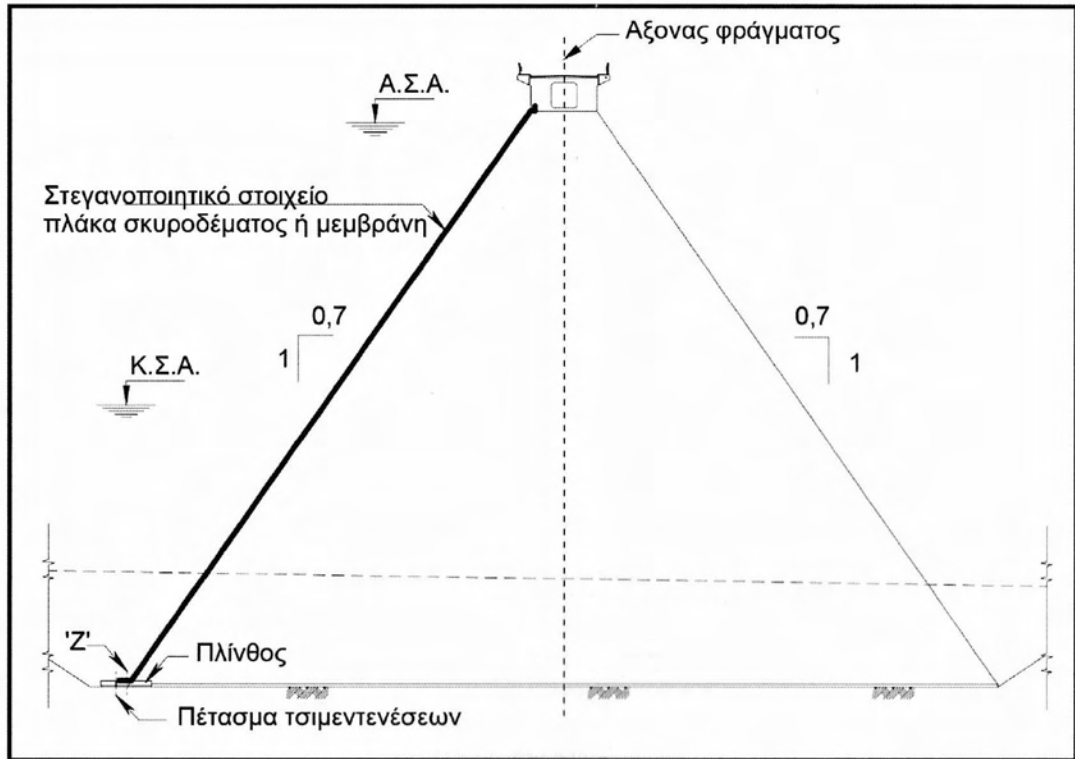
Λόγω του καθοριστικού ρόλου που παίζει το ίδιο βάρος του φράγματος στη λειτουργία του, ονομάζονται φράγματα βαρύτητας. Τα φράγματα αυτά μπορεί να είναι λιθόκτιστα είτε από σκυρόδεμα. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν εξελιχθεί και άλλοι τύποι φραγμάτων βαρύτητας: τα κυλινδρούμενου σκυροδέματος (γνωστά διεθνώς ως φράγματα RCC), τα ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος (lean RCC) και τα σκληρού επιχώματος (hardfill).

Τα φράγματα βαρύτητας από λιθόδεμα, σκυρόδεμά, RCC και ισχνό RCC, σχεδιάζονται με κατακόρυφη (βλ. Σχ. 1.α) ή παρακατακόρυφη την ανάντη παρειά (βλ. Σχ.1.β.) , ενώ η κατάντη παρειά σχηματίζεται με κλίση περί την 0.75:1 (Ο:Κ). Τυπική διατομή δείχνεται στο Σχ. 1.



Σχ. 1 Τυπική διατομή φράγματος βαρύτητας από σκυρόδεμα, λιθόδεμα ή RCC

Τα φράγματα σκληρού επιχώματος σχεδιάζονται με συμμετρικές τις παρειές του φράγματος ως προς τον άξονα του και το υλικό του φράγματος (αδρανή χαμηλής ποσότητας τσιμέντου) συμπυκνώνεται με δονητικό κυλινδροσυμπυκνωτή και συνήθως αναφέρονται ως «Άξονοσυμμετρικά Κυλινδρούμενου Σκληρού Επιχώματος» (ΑΚΣΕ). Τυπική διατομή φράγματος δείχνεται στο Σχ. 2



Σχ. 2. Τυπική διατομή Φράγματος ΑΚΣΕ

### 2.3 Φράγματα αντηριδωτά

Τα αντηριδωτά φράγματα (buttress dams) λειτουργούν με τις ίδιες αρχές όπως και τα φράγματα βαρύτητας, δηλαδή στέκονται στη θέση τους λόγω του βάρους τους. Διαφέρουν στο ότι μειώνεται ο όγκος του σκυροδέματος του φορέα (με τη δημιουργία των αντηρίδων), αλλά αυξάνεται παράλληλα το μήκος θεμελίωσης κατά μήκος της κοίτης του ποταμού, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο μοχλοβραχίονας εφαρμογής του βάρους.

### 2.4 Φράγματα τοξωτά

Τα τοξωτά φράγματα λειτουργούν με 'μεταφορά' του φορτίου του νερού στα αντερείσματα λόγω καμπυλότητας φορέα. Τα πρώτα τοξωτά φράγματα είναι του Pontalto στην Αυστρία, που κατασκευάστηκε το 1611 και του Bear Valley στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, που κατασκευάστηκε το 1883.

Αρχικά σχεδιάζονταν ως κύλινδροι σταθερής ακτίνας καμπυλότητας και δεν λαμβάνονταν υπόψη στο σχεδιασμό η λειτουργία του φορέα ως πρόβολος, με αποτέλεσμα



να εμφανίζονται ρωγμές μεταξύ των τόξων. Ο σχεδιασμός βελτιώθηκε σταδιακά με την εφαρμογή τόξων σταθερής γωνίας, με σταδιακά μειούμενη ακτίνα καμπυλότητας από τη στέψη προς τη βάση, που είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της δράσης του τόξου. Αποτέλεσμα αυτού του σχεδιασμού ήταν η ελαφρά κατακόρυφη καμπύλωση του φορέα.

Τέλος εμφανίστηκαν τα τοξωτά φράγματα διπλής καμπυλότητας, με καμπύλωση του φορέα στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο. Η επακόλουθη διόγκωση των κατακόρυφων διατομών του φορέα προς τα ανάντη είχε ως αποτέλεσμα το κατακόρυφο θλιπτικό φορτίο του προβόλου λόγω ιδίου βάρους να αντιμετωπίζει τις εφελκυστικές τάσεις στο φορέα λόγω του φορτίου νερού.

Τα τοξωτά φράγματα κατασκευάζονται σε στενές κοιλάδες τυπικού σχήματος V, ώστε να είναι οικονομικά εφικτή η προσαρμογή των τόξων του φράγματος στα πρανή της κοιλάδας. Επί πλέον απαιτείται τα πετρώματα στη θεμελίωση του φράγματος να είναι υψηλής αντοχής ώστε να μπορούν να παραλάβουν με μικρές μόνο μετακινήσεις τα συγκεντρωμένα φορτία από τον φορέα του φράγματος.

Επί πλέον απαιτείται να υπάρχει ευνοϊκή διάταξη των ασυνεχειών των πετρωμάτων ως προς τη διάταξη του φορέα φράγματος στα αντερείσματα, ώστε να προκύπτει ικανοποιητικός συντελεστής ασφάλειας έναντι ολίσθησης ή/και ανατροπής.

## Κεφάλαιο 3 Γεωφράγματα

### 3.1 Βασικός στόχος σχεδιασμού

Ο βασικός στόχος σχεδιασμού είναι να χρησιμοποιηθούν κατά τον καλύτερο τρόπο τα υλικά που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή και πλησίον του έργου. Το ανάχωμα του φράγματος θα πρέπει να σχεδιάζεται και να μελετάται αξιοποιώντας τα διαθέσιμα υλικά στην ευρύτερη περιοχή του έργου και όχι προδιαγράφοντας επιθυμητές ιδιότητες και τα αντίστοιχα υλικά να πρέπει να μεταφερθούν από μεγάλες αποστάσεις στον τόπο κατασκευής του φράγματος. Ορθός σχεδιασμός είναι ο τεχνικό-οικονομικός σχεδιασμός. Επομένως, σχεδιασμός φραγμάτων με χρήση υλικών εκτός περιοχής έργου είναι κατά κανόνα λανθασμένος σχεδιασμός, λόγω αύξησης του κόστους κατασκευής με τη μεταφορά υλικών σε μεγάλες αποστάσεις.

Η διαζώνηση των γεωφραγμάτων επιτρέπει την χρήση διαφόρων υλικών, ώστε να βελτιστοποιηθούν οι ιδιότητες τους και παράλληλα να καλυφθούν οι αδυναμίες τους. Ένα γεώφραγμα μπορεί να κατασκευαστεί με εδαφικά ή/και βραχώδη υλικά που βρίσκονται κατά κανόνα στη γειτονία του έργου. Ο σχεδιασμός του αναχώματος θα γίνει με βάση τις ιδιότητες που έχουν τα υλικά αυτά, ώστε να αξιοποιηθούν κατά τον καλύτερο (τεχνικά και οικονομικά) τρόπο.

Εδαφικά υλικά που μπορεί να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή φράγματος είναι αποθέσεις λεπτόκοκκων υλικών ή έντονα αποσαθρωμένος βράχος (για την κατασκευή του πυρήνα), ποτάμιες και ποταμοχειμάρριες αποθέσεις, πλευρικά κορήματα και αποσαθρωμένος ή/και υγιής βράχος (για την κατασκευή των κελυφών). Τα βραχώδη υλικά μπορεί να είναι προϊόντα απαιτούμενων εκσκαφών του έργου ή προϊόντα εκσκαφών λατομείου. Τα υλικά αυτά θα πρέπει να διατηρούν τη βραχώδη δομή τους μετά τις καταπονήσεις από τις φορτωεκφορτώσεις, τη μεταφορά, τη διάστρωση και συμπύκνωσή τους στο ανάχωμα του φράγματος.

#### Πλεονεκτήματα

- Λόγω κατασκευής με επιτόπου διαθέσιμα υλικά έχουν σχετικά χαμηλό κόστος
- Λόγω μεγάλου εύρους βάσης μπορούν να κατασκευαστούν σε εδάφη θεμελίωσης και αντρεισμάτων χαμηλών απαιτήσεων αντοχής και παραμορφωσιμότητας.
- Ως εύκαμπτες κατασκευές έχουν μεγάλες ανοχές καθιζήσεων (και διαφορικών καθιζήσεων), ιδίως αν κατασκευαστούν με ευρύ αργιλικό πυρήνα συμπυκνωμένο με σχετικά υψηλή υγρασία και εάν έχουν επαρκή φίλτρα.

## Ταξινόμηση

- Ταξινόμηση των γεωφραγμάτων με βάση:

α) το κύριο υλικό κατασκευής :

- Χωμάτινα : εδαφικά υλικά, αμμοχάλικα ποταμών, πλευρικά κορήματα.
- Λιθόρριπτα : Προϊόντα εκσκαφής λατομείου, προϊόντα εκσκαφών βράχου. (Σημειώνεται ότι η διαφοροποίηση μεταξύ προϊόντων εκσκαφής 'λατομείου' και εκσκαφής 'βράχου', αφορά τον τρόπο πληρωμής τους και όχι τα υλικά)

β) τη διαζώνησή τους :

- Ομοιογενή
- Διαζωνισμένα

γ) το στεγανοποιητικό τους στοιχείο

- Πυρήνας από υλικά χαμηλής διαπερατότητας
- Ανάντη Πλάκα Σκυροδέματος
- Ανάντη ασφαλτικός τάπητας
- Κεντρικό ασφαλτικό διάφραγμα

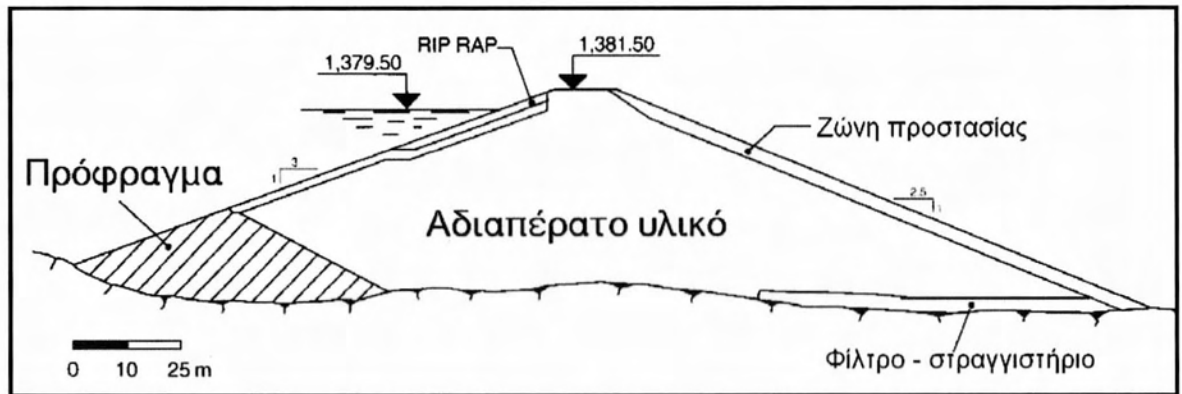
δ) Τη χρήση τους :

- Εκταμίευσης νερού (ιδιότητα του φράγματος η στεγανότητα)
- Αντιπλημμυρικά (ιδιότητα του φράγματος η διαπερατότητα)

### 3.2 Ομοιογενή γεωφράγματα

Ομοιογενή ονομάζονται τα γεωφράγματα που κατασκευάζονται από ένα μόνο υλικό, εδαφικής σύστασης και χαμηλής διαπερατότητας. Η διήθηση του νερού μέσα σε ομοιογενές φράγμα αναπτύσσει αυξημένη υδραυλική κλίση καθώς και αυξημένη ταχύτητα ροής στην περιοχή του ποδός του κατάντη πρανούς, γεγονός που εγκυμονεί κινδύνους σταδιακής διάπλυσης του υλικού. Κατά συνέπεια τα ομοιογενή φράγματα είναι περιορισμένου χρόνου λειτουργίας και κατά κανόνα μικρού ύψους. Σημαντική βελτίωση

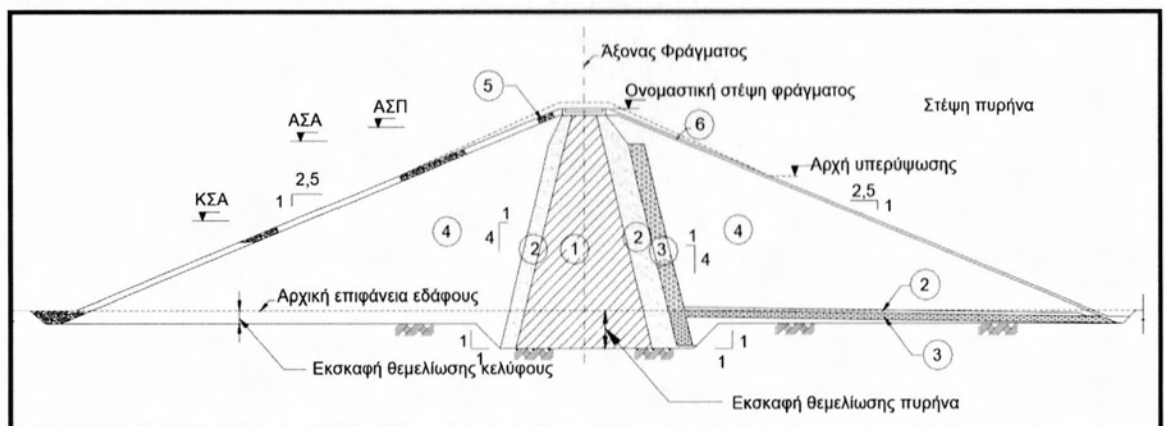
μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη ζώνης φίλτρου-στραγγιστηρίου στο κατάντη κέλυφος, (βλ. Σχ. 3)



Σχ. 3 Τυπική τομή 'ομοιογενούς' φράγματος, με ζώνες προστασίας

### 3.3 Διαζωνισμένα γεωφράγματα

Τα φράγματα με διαζώνηση του αναχώματος σχεδιάζονται με χρήση διαφόρων υλικών κατά θέσεις (ζώνες) του αναχώματος, ώστε κάθε επιμέρους ζώνη να εκπληρώνει ένα συγκεκριμένο σκοπό. Με τη διαζώνηση επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων των υλικών ενώ παράλληλα καλύπτονται τα μειονεκτήματά τους. Τυπική διαζώνηση γεωφράγματος με κεντρικό πυρήνα, δείχνεται στο Σχ.4

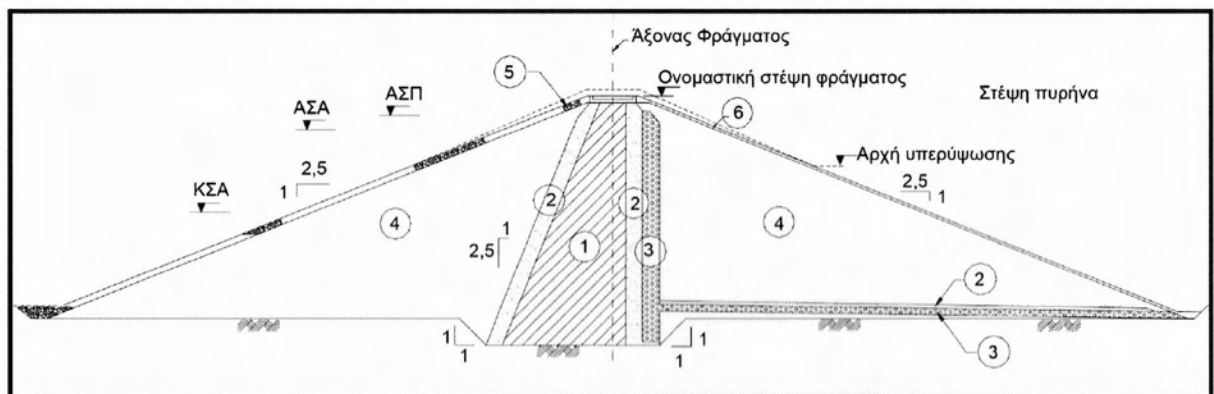


Σχ.4 Τυπική διατομή γεωφράγματος με κεντρικό πυρήνα

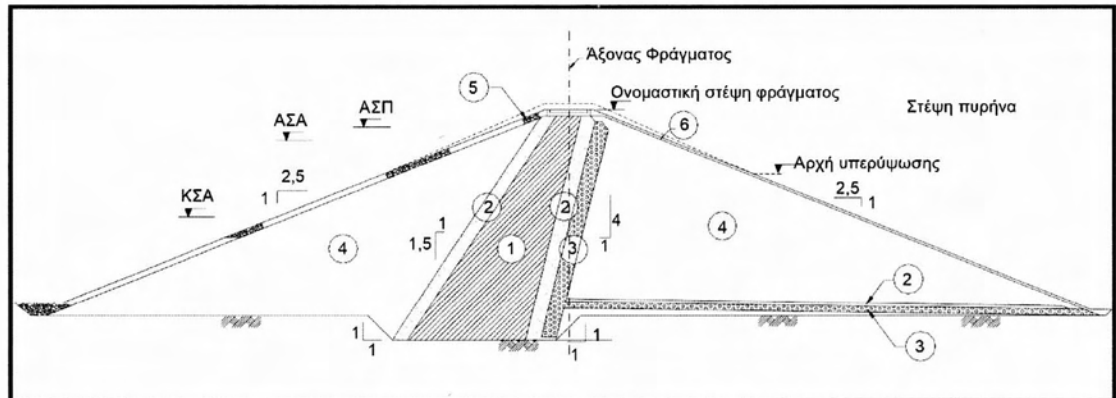
Οι κύριες ζώνες γεωφράγματος με κεντρικό (ή κεκλιμένο) πυρήνα είναι:

- Ζώνη 1 : Πυρήνας
- Ζώνη 2 : Φίλτρο
- Ζώνη 3 : Στραγγιστήριο ή μεταβατική ζώνη
- Ζώνη 4 : Κελύφη (σώματα στήριξης ή αντιπυρήνες)
- Ζώνη 5 : Λιθορριπή κυματοπροστασίας ανάντη πρανούς
- Ζώνη 6 : Ζώνη προστασίας κατάντη πρανούς
- Ζώνη 7, κοκ : Διάφορες ζώνες, π.χ. οδοποιίας, σταθεροποιητικοί αναβαθμοί, τυχαία υλικά, κλπ

Ο πυρήνας μπορεί να είναι κεντρικός με ίδια κλίση της ανάντη και της κατάντη παρειάς του, όπως δείχνεται στο Σχ. 4, ή κεκλιμένος με κατακόρυφη την κατάντη παρειά του όπως δείχνεται στο Σχ. 5, ή κεκλιμένος με κεκλιμένες αμφότερες τις παρειές του, όπως δείχνεται στο Σχ. 6.



Σχ. 5 Τυπική διατομή γεωφράγματος με κεκλιμένο πυρήνα και κατακόρυφη την κατάντη παρειά



Σχ. 6 Τυπική διατομή γεωφράγματος με κεκλιμένο πυρήνα και κεκλιμένες αμφοτέρως τις παρειές του

### 3.3.1 Ζώνες γεωφράγματος με πυρήνα

- **Ζώνη 1 - Πυρήνας**

Ζώνη εδαφικού υλικού χαμηλής διαπερατότητας ( $< 5 \cdot 10^{-8}$  m/s), με υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκου κλάσματος (ποσοστό διερχόμενο στο πρότυπο κόσκινο Νο. 200  $> 25\%$ ), που να εξασφαλίζει τη στεγανότητα του φράγματος.

Λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής της ζώνης πυρήνα (υψηλές απαιτήσεις συμπύκνωσης του υλικού σε στρώσεις μικρού πάχους, που είναι χρονοβόρος εργασία) επιδιώκεται μείωση του όγκου της ζώνης στο ελάχιστο απαραίτητο, εκτός φυσικά αν υπάρχει υπερεπάρκεια υλικού πυρήνα και έλλειψη υλικών για τα κελύφη.

- **Ζώνη 2 - Φίλτρα**

Ζώνες προστασίας του πυρήνα του φράγματος, από διάπλυση του υλικού λόγω διήθησης νερού. Υλικά αμμόδη, διαβαθμισμένα (δηλαδή κοκκομετρικής διαβάθμισης μέσα σε σαφώς καθορισμένα όρια), ώστε να μπορούν να συγκρατούν το υλικό του πυρήνα και παράλληλα να παροχετεύουν τα διηθούμενα νερά με ασφάλεια.

- **Ζώνη 3 - Στραγγιστήρια ή μεταβατικές ζώνες**

Ζώνες υψηλής διαπερατότητας, από καθαρά χαλίκια και κροκάλες, που έχουν την δυνατότητα να απομακρύνουν από το ανάχωμα του φράγματος τα διηθούμενα νερά μέσα από τον πυρήνα, τη θεμελίωση και το κατάντη κέλυφος, ώστε να περιορίζεται ο κίνδυνος ανάπτυξης πιέσεων.

- **Ζώνη 4 – Κελύφη**

Ζώνες στήριξης της κεντρικής ζώνης πυρήνα. Υλικά με αντοχή υψηλότερη από τα υλικά του πυρήνα, π.χ. αμμοχάλικα ποταμών, πλευρικά κορήματα, προϊόντα εκσκαφών, προϊόντα ανάπτυξης λατομείων (λιθορριπές).

- **Ζώνη 5 - Λιθορριπή κυματοπροστασίας ανάντη πρανούς**

Ζώνη προστασίας του ανάντη πρανούς του αναχώματος από την διαβρωτική καταπόνηση των κυματισμών που αναπτύσσονται στο ταμιευτήρα. Απαιτήσεις μέγιστης, μέσης και ελάχιστης διάστασης λίθων, ώστε να μη μετακινούνται από τις ωθήσεις των κυματισμών.

- **Ζώνη 6 - Ζώνη προστασίας κατάντη πρανούς**

Ζώνη προστασίας του κατάντη πρανούς του αναχώματος από την διαβρωτική ενέργεια του νερού της βροχής και κυρίως των ρυακιών που σχηματίζονται. Κροκάλες ή λίθοι με απαιτήσεις μέγιστης, μέσης και ελάχιστης διάστασης.

- **Ζώνες οδοποιίας**

Στη στέψη του φράγματος προβλέπεται συνήθως η κατασκευή δρόμου αποκατάστασης της επικοινωνίας μεταξύ των οχθών του ποταμού, που έχει διακοπεί με την δημιουργία του ταμιευτήρα. Ως προδιαγραφές για τις ζώνες οδοποιίας λαμβάνονται οι σχετικές προδιαγραφές του ΥΠΕΧΩΔΕ για τα δημόσια έργα οδοποιίας.

- **Ζώνες τυχαίων υλικών**

Ζώνες του αναχώματος όπου μπορούν να ενσωματωθούν τυχαία υλικά (δηλαδή χωρίς απαιτήσεις ως προς τη σύσταση, την κοκκομετρία, την αντοχή ή την υγρασία τους) και συνήθως χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις ως προς τη συμπίκνωση τους. Αποτελούν ζώνες που συνεισφέρουν στην ευστάθεια του αναχώματος (σταθεροποιητικοί αναβαθμοί) λόγω του βάρους τους και όχι λόγω της αντοχής τους.

### 3.3.2 Πυρήνες Γεωφράγματος

- **Υλικά**

Ο πυρήνας ενός γεωφράγματος είναι το πρακτικά αδιαπέρατο στοιχείο του αναχώματος (ή το υλικό με τη χαμηλή διαπερατότητα), που εξασφαλίζει τη στεγανότητα του φράγματος. Τονίζεται ότι οι πυρήνες φραγμάτων δεν είναι αδιαπέρατοι και για το λόγο αυτό αναπτύσσεται με την πάροδο του χρόνου διήθηση νερού και τελικά κανονικό δίκτυο ροής

Για την κατασκευή πυρήνα φράγματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν εδαφικά υλικά που περιέχουν ποσοστό λεπτόκοκκου κλάσματος (δηλαδή το υλικό το διερχόμενο στο Πρότυπο κόσκινο ASTM Νο 200, που έχει άνοιγμα βρόχου 0,075 mm) μεγαλύτερο από 20 %. Εδαφικά υλικά με διαστάσεις κόκκων μικρότερες από 0,075 mm, έχουν τις ιδιότητες αδιαπέρατου υλικού. Όταν δε υπάρχουν σε ποσοστό μεγαλύτερο από 20% στο σύνολο του υλικού, προσδίδουν στο σύνολο την ιδιότητα της χαμηλής διαπερατότητας. Το ποσοστό των λεπτόκοκκων μπορεί να ξεπεράσει και το 90%.

- **Υψόμετρο στέψης πυρήνα**

Το υψόμετρο της στέψης του πυρήνα αντιστοιχεί οπωσδήποτε στην Ανώτατη Στάθμη Αποθήκευσης (ΑΣΑ) του ταμιευτήρα και σε πολλές περιπτώσεις φραγμάτων, στην ΑΣΠ. Στα περισσότερα φράγματα η στέψη του πυρήνα βρίσκεται 1 - 2 m κάτω από τη στέψη του φράγματος, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος υπερπήδησης του πυρήνα ακόμη και για τα ακραία πλημμυρικά γεγονότα, π.χ. συνθήκες PMF με παράλληλη δυσλειτουργία θυροφραγμάτων υπερχειλιστή. Σημειώνεται ότι στα γεωφράγματα δεν είναι επιτρεπτή η υπερπήδηση του φράγματος υπό οποιεσδήποτε συνθήκες, εκτός αν υπάρχει ειδική πρόβλεψη προστασία του κατάντη κελύφους και αυτό περιορίζεται κατά κανόνα σε φράγματα μικρού ύψους.

- **Πλάτος πυρήνα**

Επιθυμητό είναι το πλάτος του πυρήνα, σε οποιοδήποτε βάθος από τη στέψή του, να εξασφαλίζει υδραυλική κλίση (κατά πλάτος) του πυρήνα, μικρότερη από 2, δηλαδή το πλάτος του πυρήνα σε οποιοδήποτε βάθος να είναι μεγαλύτερο από το μισό του αντίστοιχου υδροστατικού φορτίου. Η απαίτηση αυτή επιβάλλει την εφαρμογή πυρήνων αυξανόμενου πλάτους με αυξανόμενο βάθος από τη στέψη προς τη θεμελίωση.

- **Πλάτος στέψης πυρήνα**

Θεωρητικά απαιτείται μηδενικό πλάτος στη στέψη του πυρήνα, αφού η υδραυλική κλίση στην ανώτατη στάθμη αποθήκευσης είναι μηδενική. Κατασκευαστικοί λόγοι αλλά και λόγοι αντιμετώπισης μετακινήσεων της στέψης του φράγματος ως αποτέλεσμα σεισμικών καταπονήσεων, κάθισης, κ.α. επιβάλλουν την κατασκευή του πυρήνα με πλάτος



στέψης της τάξης των 4 - 6 m. Σε περιοχές με σοβαρό πρόβλημα σεισμικών καταπονήσεων, είναι σκόπιμο να εφαρμόζονται μεγαλύτερα πλάτη πυρήνα στη στέψη, π.χ. >6 m, ώστε σε περίπτωση κατολίσθησης της στέψης του φράγματος, να υπάρχει επαρκές πλάτος ώστε η κατολίσθηση να περιοριστεί σε τμήμα μόνο της στέψης.

### 3.3.3 Φίλτρα-Στραγγιστήρια

Το υλικό των πυρήνων γεωφραγμάτων περιέχει κατά κανόνα υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών (διερχόμενων στο κόσκινο Νο. 200), που του προσδίδει και την ιδιότητα της ιδιαίτερα χαμηλής διαπερατότητας. Η μικρή διάσταση των κόκκων – πλακιδίων του υλικού, κάνει τον πυρήνα ευάλωτο σε διάπλυση όταν :

- βρεθεί υπό υδραυλική κλίση,
- αναπτυχθούν υψηλές ταχύτητες ροής
- υπάρχει η δυνατότητα μετακίνησης του λεπτόκοκκου κλάσματος του υλικού προς τα κατάντη.

Μία λύση θα ήταν να διατηρείται η υδραυλική κλίση αρκετά χαμηλή, σε όλες τις περιοχές του πυρήνα, π.χ. με αποφυγή έντονων διαφοροποιήσεων της διαπερατότητας της θεμελίωσης (διαφράγματα ή πετάσματα τσιμεντενέσεων που τοπικά αυξάνουν την υδραυλική κλίση), ή με αύξηση του πλάτους του πυρήνα, ώστε με τη μείωση της υδραυλικής κλίσης να μειώνεται και ο κίνδυνος διάπλυσης. Δυστυχώς σε όλα τα φράγματα αναπτύσσονται ρωγμές στον πυρήνα, κυρίως εγκάρσιες στον άξονα τους, λόγω παραμορφώσεων υπό το ίδιο βάρος του υλικού και προσαρμογής του στην μορφολογία της θεμελίωσης (π.χ. στο σχήμα της κοιλιάδας). Επομένως δεν είναι δυνατόν να εξασφαλιστεί η διατήρηση χαμηλών υδραυλικών κλίσεων στον πυρήνα. Υπάρχουν μάλιστα παρατηρήσεις εμφάνισης πλήρους υδροστατικής πίεσης ταμιευτήρα μέσα στον πυρήνα και σε μικρή απόσταση από την κατάντη παρειά του.

Επομένως, για λόγους ασφαλούς σχεδιασμού του φράγματος, θεωρείται ότι ο πυρήνας μπορεί να βρεθεί υπό συνθήκες υψηλής υδραυλικής κλίσης και υψηλών ταχυτήτων ροής και κατά συνέπεια επιβάλλεται η πρόβλεψη προστασίας του από διάπλυση του υλικού και διάβρωση.

Η προστασία αυτή παρέχεται με την παρεμβολή υλικού κατάλληλης διαβάθμισης (υλικό φίλτρου) μεταξύ του πυρήνα και του κατάντη κελύφους. Η ζώνη του φίλτρου, λόγω της διαβάθμισής της, μπορεί να συγκρατεί τους κόκκους του πυρήνα και να εμποδίζει την μετακίνησή τους με τη ροή του νερού. Εάν λόγω της κοκκομετρίας του κατάντη κελύφους (π.χ. παρουσία πολλών και μεγάλων κενών μεταξύ των κόκκων, όπως σε περιπτώσεις λιθορριπής) δεν είναι δυνατόν να εξασφαλιστεί η διάπλυση του υλικού με μία ζώνη φίλτρου (γιατί και το ίδιο υλικό φίλτρου μπορεί να κινδυνεύει με διάπλυση προς το

κατάντη κέλυφος), προβλέπεται η κατασκευή και άλλων πρόσθετων ζωνών, ώστε κάθε ζώνη να είναι ασφαλής από τον κίνδυνο διάπλυσης.

Σε κάθε περίπτωση η κοκκομετρία του υλικού φίλτρου θα εξαρτάται από την κοκκομετρία του προς συγκράτηση υλικού.

Το υλικό φίλτρου πρέπει να έχει πέντε βασικές ιδιότητες, ώστε να ανταποκρίνεται επιτυχώς στο ρόλο του για προστασία του πυρήνα :

1. Να συγκρατεί το υλικό του πυρήνα ώστε να μην είναι δυνατή η μετακίνηση κόκκων υλικού από τον πυρήνα προς τα κατάντη.
2. Να παροχετεύει άμεσα το διηθούμενο νερό (από τον πυρήνα, τη θεμελίωση, τη βροχή), ώστε να μην αναπτύσσονται πιέσεις νερού στο κατάντη του πυρήνα ανάχωμα φράγματος
3. Να μην διαχωρίζει, ώστε κατά τις μετακινήσεις, την εκφόρτωση και τη διάστρωση του υλικού, ώστε να μη μεταβάλλεται η κοκκομετρική του διαβάθμιση από τη μία θέση στην άλλη.
4. Να καταρρέει όταν βυθίζεται σε νερό, ώστε να μην διατηρούνται ανοικτές οι ρωγμές που ενδεχομένως να αναπτυχθούν στον πυρήνα και προωθηθούν μέχρι τα φίλτρα.
5. Να μην μεταβάλλεται διαχρονικά η κοκκομετρική του διαβάθμιση, είτε λόγω σταδιακής συγκόλλησης των κόκκων (φαινόμενο διαγένεσις) κάτω από ευνοϊκές προς τούτο συνθήκες, είτε λόγω θραύσης των κόκκων του υλικού λόγω υψηλών φορτίων ή χημικής αλλοίωσης.

### 3.3.4 Κελύφη

Τα «κελύφη» ή «σώματα στήριξης» ή «αντιπυρήνες» είναι το τμήμα του αναχώματος που συγκρατεί τον πυρήνα στη θέση του και παρέχει στο ανάχωμα την απαιτούμενη ευστάθεια, ώστε να αντιμετωπίσει, με τους απαιτούμενους συντελεστές ασφαλείας, τα φορτία από το ίδιο βάρος των υλικών, τις πιέσεις νερού (εσωτερικές και εξωτερικές), τους σεισμούς κλπ. Τα κελύφη συνήθως αναφέρονται ως Ζώνη 4 του αναχώματος.

Στόχος του σχεδιασμού του φράγματος είναι να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή των κελυφών του αναχώματος, από τα διαθέσιμα στην περιοχή υλικά, εκείνα με την υψηλότερη διατμητική αντοχή, ώστε τα πρηνή του αναχώματος να μορφωθούν με τις πλέον απότομες κλίσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου και κατά συνέπεια του κόστους κατασκευής του αναχώματος.

Προκειμένου να αναπτυχθεί η μεγαλύτερη δυνατή αντοχή των υλικών στα κελύφη, τα υλικά θα πρέπει να συμπυκνωθούν κατά τον πλέον αποτελεσματικό τρόπο,

λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη και το κόστος επίτευξης της επιθυμητής υψηλής πυκνότητας.

Τα κελύφη γεωφράγματος μπορούν να κατασκευαστούν από γαιώδη ή από βραχώδη υλικά.

Στα γαιώδη υλικά περιλαμβάνονται :

- τα αμμοχάλικα ποταμοχειμάρριων αποθέσεων,
- υλικά παλαιών αναβαθμίδων ποταμών
- πλευρικά κορήματα
- προϊόντα εκσκαφής αποσαθρωμένου βράχου

Στα βραχώδη υλικά περιλαμβάνονται :

- προϊόντα ανάπτυξης λατομείου
- προϊόντα απαιτούμενων εκσκαφών σε βραχώδεις σχηματισμούς

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται γαιώδη υλικά, το φράγμα χαρακτηρίζεται ως «χωμάτινο» (earthfill dam), ενώ αν χρησιμοποιηθούν βραχώδη υλικά, το φράγμα χαρακτηρίζεται ως «λιθόρριπτο» (rockfill dam).

Κατά κανόνα, τα βραχώδη υλικά είναι υψηλότερης αντοχής από τα γαιώδη και για τον λόγο αυτό οι κλίσεις των λιθόρριπτων φραγμάτων είναι συνήθως πιο απότομες από αυτές των χωμάτινων (εάν φυσικά δεν παρεμβαίνει ο παράγων 'αντοχή των υλικών θεμελίωσης' του αναχώματος).

Λόγω του μεγάλου όγκου των κελυφών σε σύγκριση με τις άλλες ζώνες του αναχώματος του φράγματος, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, θα πρέπει να τοποθετούνται στο ανάχωμα, με τη μικρότερη δυνατή επεξεργασία και αν είναι δυνατόν όπως προκύπτουν μετά την εκσκαφή τους. Διαλογή υλικών, απομάκρυνση μεγάλων τεμαχίων, αφαίρεση λεπτόκοκκου κλάσματος με πλύσιμο ή κοσκίνισμα, επιβαρύνει σημαντικά το κόστος της κατασκευής, αφενός λόγω κόστους εργασίας και αφετέρου λόγω της χρονικής καθυστέρησης.

## Κεφάλαιο 4 Ευστάθεια

### 4.1 Γενικά

Η ευστάθεια του φράγματος ελέγχεται με τη μελέτη ευστάθειας των πρηνών του:

- Κατά τη φάση κατασκευής του αναχώματος και
- κατά τη φάση πρώτης πλήρωσης και λειτουργίας του ταμιευτήρα, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές συνθήκες καταπόνησης, από το ίδιο βάρος των υλικών, τα εξωτερικά φορτία νερού, τις εσωτερικές πιέσεις πόρων και τέλος από τα δυναμικά φορτία πιθανής σεισμικής δραστηριότητας, στην ευρύτερη περιοχή του έργου.

Στις αναλύσεις ευστάθειας περιλαμβάνονται κατά κανόνα μόνο οι κύριες ζώνες του αναχώματος και αγνοούνται οι ζώνες μικρών διαστάσεων, εκτός από τις ζώνες που λόγω χαμηλών παραμέτρων αντοχής, μπορεί να επηρεάζουν δυσμενώς την ευστάθεια των πρηνών.

Η διερεύνηση της ευστάθειας του φράγματος καλύπτει τις ακόλουθες συνθήκες καταπόνησης :

- Πέρασ κατασκευής αναχώματος,
- Σταθερή ροή διήθησης νερού στον πυρήνα του φράγματος,
- Απότομο καταβιβασμό στάθμης ταμιευτήρα

### 4.2 Σεισμική επικινδυνότητα περιοχής

Στοιχεία για τη σεισμική επικινδυνότητα της ευρύτερης περιοχής του έργου λαμβάνονται από ειδικές Μελέτες Σεισμικότητας και Σεισμικής Επικινδυνότητας, που έχουν εκπονηθεί για την ευρύτερη περιοχή του έργου

Η υπόψη μελέτη εκτιμά, με διάφορες μεθόδους ανάλυσης, τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών επιτάχυνσης ( $\gamma$ ), ταχύτητας ( $v$ ) και μετατόπισης ( $d$ ) από αναμενόμενους σεισμούς, για διαφορετικές περιόδους επαναφοράς. Μετά την σύγκριση και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των διαφόρων μεθόδων, η μελέτη καταλήγει σε χάρτες, με καμπύλες ίσης επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης.

Από του χάρτες αυτούς επιλέγονται οι τιμές των παραμέτρων επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης για τη συγκεκριμένη θέση του υπό μελέτη φράγματος.

Η επιλογή της περιόδου επαναφοράς και επομένως της ισχύος καταπόνησης του φράγματος, βασίζεται στην βαρύτητα των επιπτώσεων που θα προξενηθούν στα κατάντη του φράγματος, σε περίπτωση ολικής αστοχίας του.

Σπουδαιότερος παράγων είναι προφανώς η ύπαρξη ή μη κατοικημένων περιοχών κατάντη του φράγματος, που θα επηρεαστούν από τα νερά του ταμιευτήρα, σε περίπτωση μερικής ή ολικής αστοχίας. Σημειώνεται ότι η μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας προσδιορίζει τη μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση εδάφους, η οποία διαφέρει από την εφαρμοζόμενη επιτάχυνση στο ανάχωμα κατά τις αναλύσεις ευστάθειας, υπό μορφή ψευδοστατικών φορτίων.

### 4.3 Σεισμική καταπόνηση

Η καταπόνηση του φράγματος από σεισμούς, λαμβάνεται συνήθως υπόψη στις αναλύσεις ευστάθειας με τη μορφή "ψευδοστατικών" φορτίων. Σε περιπτώσεις ανάλυσης με μεθόδους "οριακής ισορροπίας", τα ψευδοστατικά φορτία εφαρμόζονται ως οριζόντιες (και κατακόρυφες) δυνάμεις (S) που ισούνται με το βάρος του σώματος (W) που μελετάται, πολλαπλασιασμένο με ένα σεισμικό συντελεστή ( $\varepsilon$ ).

$$S = W * \varepsilon$$

Η μέθοδος εφαρμογής ψευδοστατικών φορτίων λόγω σεισμού, θεωρεί την οριζόντια επιτάχυνση είτε ως σταθερή καθ' όλο το ύψος του αναχώματος, είτε ως μεταβαλλόμενη με το ύψος του αναχώματος. Συνήθως θεωρείται ότι η οριζόντια επιτάχυνση λόγω σεισμού, είναι σταθερή καθ' όλο το ύψος του αναχώματος.

Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η μέση οριζόντια και σταθερή καθ' ύψος επιτάχυνση για ψευδοστατικές αναλύσεις ευστάθειας, μπορεί να λαμβάνεται με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ του 33% και του 50% της τιμής της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, ενώ αλλού αναφέρεται και η παράλληλη μείωση των τιμών της αντοχής των υλικών σε περίπτωση παρουσίας νερού κατά 10-20%, λόγω αύξησης της πίεσης πόρων κατά τη διάρκεια του σεισμού.

### 4.4 Συντελεστής Ασφαλείας

Ο συντελεστής ασφάλειας πρανούς έναντι ολίσθησης, για μία συγκεκριμένη επιφάνεια ολίσθησης, ορίζεται ως το πηλίκον της "διαθέσιμης" προς την "ενεργοποιημένη" διατμητική αντοχή του υλικού, κατά μήκος της υπόψη επιφάνειας. Η επιφάνεια που δίνει το χαμηλότερο συντελεστή ασφάλειας, θεωρείται ως η κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης.

Ο συντελεστής ασφάλειας θεωρείται ότι παρέχει τα απαραίτητα περιθώρια ασφάλειας για πιθανές ανακρίβειες των υπολογισμών ευστάθειας, του προσδιορισμού της

κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης, καθώς και των εκτιμήσεων για την αντοχή των υλικών του πρανούς και της θεμελίωσης.

Η σεισμική καταπόνηση για τη συνθήκη πέρατος κατασκευής είναι μικρότερη από την αντίστοιχη καταπόνηση για τη σταθερή ροή διήθησης, λόγω του σαφώς μικρότερου χρόνου ισχύος της συνθήκης πέρατος κατασκευής.

Οι ελάχιστες τιμές των αποδεκτών συντελεστών ασφαλείας, για κάθε μία από τις συνθήκες λειτουργίας, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίν. 1

<b>a/a</b>	<b>Συνθήκη</b>	<b>Ελάχιστος αποδεκτός ΣΑ χωρίς σεισμό</b>	<b>Ελάχιστος αποδεκτός ΣΑ με σεισμό</b>
1	Πέρας κατασκευής	1,30	1,00
2	Σταθερή ροή διήθησης	1,50	1,00
3	Απότομος καταβασμός στάθμης	1,20	-

Πίν. 1 Ελάχιστοι αποδεκτοί συντελεστές ασφαλείας (ΣΑ)

## Κεφάλαιο 5 Παραμορφώσεις αναχώματος

### 5.1 Γενικά

Το ανάχωμα φράγματος αρχίζει να παραμορφώνεται από τη στιγμή της διάστρωσης των υλικών και συνεχίζει να παραμορφώνεται για αρκετό χρονικό διάστημα, μετά την ανάπτυξη των φορτίων που το καταπονούν. Τα φορτία που καταπονούν το ανάχωμα φράγματος μπορεί να είναι μόνιμα, μεταβαλλόμενα ή περιστασιακά :

- μόνιμο φορτίο είναι το ίδιο βάρος των υλικών του αναχώματος,
- μεταβαλλόμενο φορτίο είναι οι υδροστατικές πιέσεις νερού από τη στάθμη νερού στον ταμιευτήρα και οι τάσεις που αναπτύσσονται,
- περιστασιακό φορτίο είναι η καταπόνηση από σεισμικά γεγονότα ή ανθρωπογενείς επιβαρύνσεις (π.χ. ανατινάξεις, φορτία οδοποιίας).

### 5.2 Παραμορφώσεις Λόγω Ιδίου Βάρους Υλικών Αναχώματος

#### 5.2.1 Γενικά

Οι παραμορφώσεις του αναχώματος που οφείλονται στο ίδιο βάρος των υλικών, μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες :

- σε αυτές που συντελούνται σε μικρό χρονικό διάστημα μετά την επιβολή του φορτίου (συνήθως στο χρόνο κατασκευής του φράγματος) και είναι αποτέλεσμα της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς των υλικών του αναχώματος. Οι παραμορφώσεις αυτές συνήθως αναφέρονται ως «άμεσες».
- σε αυτές που εξελίσσονται για μεγάλο χρονικό διάστημα (πέρα από τον χρόνο κατασκευής του φράγματος) και είναι αποτέλεσμα στερεοποίησης των αδιαπέρατων ζωνών του αναχώματος (κατά κανόνα του πυρήνα).

#### 5.2.2 Άμεσες Παραμορφώσεις

Το ανάχωμα του φράγματος κατασκευάζεται, στο εκάστοτε υψόμετρο διάστρωσης (δάπεδο εργασίας), στις γραμμές και κλίσεις που ορίζονται από τη μελέτη του έργου και δείχνονται στα σχέδια. Λόγω όμως του φορτίου των υπερκειμένων υλικών, το ανάχωμα παραμορφώνεται, με αποτέλεσμα οι τελικές εξωτερικές γραμμές του αναχώματος καθώς και οι γραμμές των επιμέρους εσωτερικών ζωνών, να διαφέρουν ελαφρά από αυτές των σχεδίων.

Το μέγεθος των παραμορφώσεων και η κατεύθυνση των μετακινήσεων είναι συνάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών του αναχώματος, καθώς και της μορφολογίας (του σχήματος) της κοιλάδας στην θέση που κατασκευάζεται το ανάχωμα. Οι παραμορφώσεις αυτές συνοδεύονται, κατά κανόνα, με μείωση του όγκου του υλικού.

Κατά την κατασκευή του αναχώματος, οι «άμεσες» παραμορφώσεις των υποκειμένων υλικών (και η αντίστοιχη μείωση του όγκου τους), 'συμπληρώνονται' με υλικά φράγματος, ώστε στο εκάστοτε δάπεδο εργασίας, το ανάχωμα να μορφώνεται στις γραμμές και κλίσεις των σχεδίων της μελέτης. Απαιτείται επομένως η ενσωμάτωση στο φράγμα πρόσθετου υλικού αναχώματος, που θα καλύψει την μείωση του όγκου και την παραμόρφωση των υποκειμένων υλικών.

Η εκτίμηση του όγκου του πρόσθετου αυτού υλικού, που δεν προκύπτει άμεσα από την προμέτρηση του όγκου του αναχώματος, αφορά αφενός τις απαιτούμενες ποσότητες υλικών προς διακίνηση (επάρκεια υλικών, χρόνος διακίνησης κλπ) και αφετέρου το κόστος ενσωμάτωσης των υλικών στο ανάχωμα, το οποίο ως μη άμεσα επιμετρούμενο, πρέπει να κατανεμηθεί στα προς πληρωμή κονδύλια του τιμολογίου.

### **5.2.3 Παραμορφώσεις Λόγω Στερεοποίησης**

Η παραμόρφωση (κάθιση) του αναχώματος λόγω στερεοποίησης του υλικού του πυρήνα, συνεχίζεται (πιθανόν για μεγάλο χρονικό διάστημα) και μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής. Επομένως είναι απαραίτητο να γίνει σχετική πρόβλεψη για την αντιμετώπιση αυτών των παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια της κατασκευής του αναχώματος

Η στέψη του φράγματος κατασκευάζεται λίγο υψηλότερα από την ονομαστική, ώστε με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη των παραμορφώσεων, η στέψη να πλησιάζει σταδιακά το ονομαστικό υψόμετρο. Δηλαδή το ανάχωμα κατασκευάζεται με 'υπερύψωση' της στέψης του.

Οι ζώνες του αναχώματος που παραμορφώνονται λόγω στερεοποίησης είναι οι ζώνες μικρής διαπερατότητας, δηλαδή ο πυρήνας στα διαζωνισμένα φράγματα και όλο το ανάχωμα στα ομοιογενή φράγματα.



### 5.3 Παραμορφώσεις λόγω φορτίων νερού ταμιευτήρα

Η ανύψωση της στάθμης του ταμιευτήρα έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη υδροστατικών πιέσεων και την εφαρμογή ωθήσεων στο ανάχωμα του φράγματος. Διακρίνονται τρεις περιπτώσεις:

- Στις περιπτώσεις φραγμάτων τύπου Λ.Α.Π.Σ. (Λιθόρριπτα με Ανάντη Πλάκα Σκυροδέματος), λόγω της παρουσίας του στεγανού στοιχείου της πλάκας, οι υδροστατικές πιέσεις ασκούνται στην επιφάνεια της και τα φορτία μεταφέρονται ως τάσεις στο ανάχωμα και τελικά στη θεμελίωση.
- Σε περιπτώσεις φραγμάτων με υλικά υψηλής διαπερατότητας στο ανάντη κέλυφος, οι υδροστατικές πιέσεις ασκούνται ουσιαστικά στην ανάντη παρειά του πυρήνα.
- Σε περιπτώσεις φραγμάτων με υλικά μέτριας έως χαμηλής διαπερατότητας στο ανάντη κέλυφος, οι πιέσεις ασκούνται λόγω διήθησης νερού, σε όλο το ανάχωμα.

Είναι ευνόητο ότι οι παραμορφώσεις του αναχώματος του φράγματος διαφοροποιούνται σημαντικά μεταξύ των τριών παραπάνω περιπτώσεων.

Στα φράγματα τύπου Λ.Α.Π.Σ. οι παραμορφώσεις του αναχώματος με την ανύψωση της στάθμης του ταμιευτήρα, έχουν ως αποτέλεσμα αφενός την μετακίνηση της πλάκας σε σχέση με την πλίνθο και αφετέρου την ανάπτυξη ρωγμών στην πλάκα. Οι μετακινήσεις της πλάκας σε σχέση με την πλίνθο διευρύνει τον περιμετρικό αρμό και ενδέχεται να καταλήξει σε θραύση των στεγανωτικών ταινιών.

Στα γεωφράγματα με πυρήνα, οι παραμορφώσεις του αναχώματος έχουν ως αποτέλεσμα την κάθιση της στέψης του φράγματος και την ανάπτυξη εφελκυστικών ή διατμητικών ρωγμών στο εσωτερικό του φράγματος. Η κάθιση της στέψης μειώνει το ελεύθερο ύψος του φράγματος, ενώ οι εσωτερικές ρωγμές ενδέχεται να σχηματίσουν διαδρομή διήθησης του νερού, εάν αναπτυχθούν σε ζώνες μειωμένης διαπερατότητας.

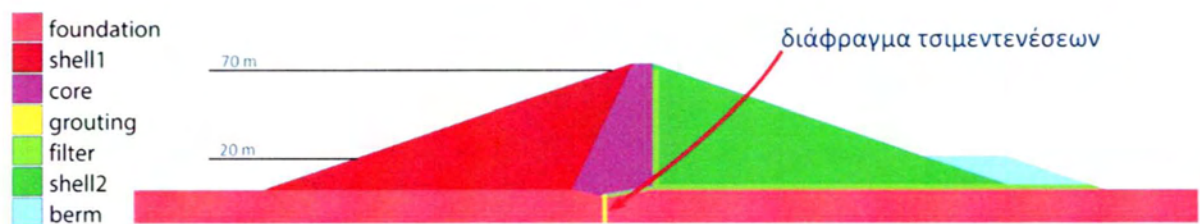
# Κεφάλαιο 6 Προσομοίωση συμπεριφοράς φράγματος με τα υπολογιστικά προγράμματα FLAC 7 και SLIDE

## 6.1 Στόχος της παρούσας διπλωματικής

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η πραγματοποίηση της ανάλυσης του υπό μελέτη φράγματος με τα προγράμματα SLIDE και FLAC τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης αναφορικά με τη ροή και την ευστάθεια καθώς και η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια περιγράφονται λεπτομερώς τα προγράμματα αυτά καθώς και οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν.

## 6.2 Γεωμετρία και ιδιότητες φράγματος

Η παρούσα διπλωματική ασχολείται με την μελέτη χωμάτινου φράγματος με αργιλικό πυρήνα. Το συνολικό πλάτος της διατομής στην βάση του φράγματος είναι 506 μέτρα και το ύψος του 74 μέτρα. Παρακάτω παρουσιάζεται το φράγμα με τις επιμέρους ζώνες του και οι ιδιότητες αυτών.



Σχήμα 7. Αρχική γεωμετρία και ζώνες υλικών

- Γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού

Οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων των υλικών των ζωνών του αναχώματος, που λαμβάνονται υπόψη στις αναλύσεις ευστάθειας, πρέπει να λαμβάνονται από τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε δείγματα υλικών. Οι έλεγχοι των υλικών πραγματοποιούνται συνήθως στα πλαίσια γεωερευνητικών προγραμμάτων ελέγχου καταλληλότητας και επάρκειας υλικών.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι ιδιότητες των ζωνών του φράγματος.

Ζώνη	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	n	c, kPa	$\phi$	B, MPa	G, MPa	k, m/s
άργιλος	2100	0.3	80	10	33	15	$5 \cdot 10^{-7}$
κέλυφος 1	2100	0.3	0.	42	66	30	$5 \cdot 10^{-4}$
κέλυφος 2	2100	0.3	0.	42	66	30	$5 \cdot 10^{-4}$
στραγγιστήριο	2100	0.3	0.	42	66	30	$5 \cdot 10^{-4}$
κατάντη αναβαθμός	2100	0.3	0.	42	66	30	$5 \cdot 10^{-4}$
τσιμεντένεση	2400	0.2	200	0	66	30	$1 \cdot 10^{-8}$
αποσαθρωμένος βράχος	2400	0.2	200	30	66	30	$5 \cdot 10^{-6}$

Πίνακας 2 Ιδιότητες ζωνών φράγματος



### 6.3 Γενικά για το FLAC 7

Το FLAC 7.0 είναι ένα δισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών ιδανικό για αριθμητική προσομοίωση προβλημάτων γεωτεχνικής μηχανικής. Έχει την δυνατότητα να προσομοιώσει την ελαστο-πλαστική συμπεριφορά εδαφικών υλικών, πετρωμάτων ή άλλων υλικών. Τα υλικά προσομοιώνονται ως στοιχεία ή ζώνες που μορφώνουν ένα κάναβο ο οποίος μπορεί να τροποποιηθεί ανάλογα τις ανάγκες του προβλήματος.

Το FLAC 7.0 είναι κατάλληλο για (Itasca, 2016)

- την επίλυση προβλημάτων επίπεδης παραμόρφωσης,
- ελαστοπλαστική συμπεριφορά υλικών,
- εκσκαφή σε φάσεις,
- προσομοίωση των μέτρων υποστήριξης και υπολογισμό της καταπόνησης τους,
- μεταβαλλόμενες τάσεις πεδίου,
- στατική ανάλυση,
- ανάλυση ευστάθειας (εύρεση συντελεστή ασφαλείας)
- δυναμική ανάλυση (προσομοίωση σεισμού),
- παραμετρική ανάλυση λόγω πρόσβασης στον κώδικα του προγράμματος.

#### 6.3.1 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών υπήρξε η πρώτη αριθμητική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση προβλημάτων αντοχής κατασκευών. Η σημασία της μεθόδου είχε αναγνωρισθεί από τότε αλλά μόνο με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών κατά την μεταπολεμική περίοδο άρχισε να βρίσκει ευρεία εφαρμογή. Οι λύσεις που αποκτώνται δεν έχουν την απόλυτη ακρίβεια των αναλυτικών λύσεων καθώς σύμφωνα με την βασική παραδοχή της μεθόδου η κατασκευή που είναι ένα συνεχές μέσο αντικαθίσταται από ένα αντίστοιχο διακριτό, στους κόμβους του οποίου επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας. Η ακρίβεια της αριθμητικής λύσης εξαρτάται λοιπόν από το κατά πόσο η προσομοίωση προσεγγίζει τις αναλυτικές εξισώσεις ισορροπίας. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια της μεθόδου είναι η συμπεριφορά του υλικού και η πυκνωση των κόμβων. Όταν χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι οι παράγωγοι εκφράζονται με σχέσεις διαφορών των συναρτήσεων σε καθορισμένα διαστήματα (στο χώρο ή και στο χρόνο). Σε κάθε κόμβο η εξίσωση ισορροπίας εκφράζεται σε μορφή πεπερασμένων διαφορών. Σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες, ορίζεται σύστημα εξισώσεων για τις επί μέρους λύσεις της εξίσωσης ισορροπίας στους κόμβους.

### 6.3.2 Μέθοδος ελέγχου ευστάθειας στο πρόγραμμα FLAC 7.0

Στο πρόγραμμα FLAC 7.0 ο έλεγχος της ευστάθειας πραγματοποιήθηκε με τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας με χρήση αριθμητικής μεθόδου. Πλεονέκτημα των αριθμητικών μεθόδων αποτελεί η δυνατότητα πρόβλεψης του αναμενόμενου εντατικού και κινηματικού πεδίου. Με τον τρόπο αυτόν είναι δυνατός ο προσδιορισμός ευπαθών περιοχών τόσο κατά τη φάση κατασκευής όσο και κατά τη φάση λειτουργίας. Συγκεκριμένα, η ανάλυση του προσδιορισμού του συντελεστή ασφαλείας στο FLAC 7.0 πραγματοποιείται με επαναληπτική διαδικασία μειώνοντας τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής των υλικών μέχρι να προκληθεί αριθμητική αστάθεια του προβλήματος συνοδευόμενη βέβαια και από μεγάλες παραμορφώσεις και πλαστικοποίηση μεγάλης εδαφικής ζώνης. Η διαδικασία αυτή συνήθως εφαρμόζεται παράλληλα με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Ο συντελεστής ασφαλείας προκύπτει από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$C^{\text{trial}} = (1 / F^{\text{trial}}) \cdot C \quad (6.1)$$

$$\Phi^{\text{trial}} = \arctan(1/F^{\text{trial}}) \cdot \tan\Phi \quad (6.2)$$

Συγκεκριμένα πραγματοποιείται μια σειρά προσομοιώσεων με δοκιμαστικές τιμές του συντελεστή ασφαλείας για τη μείωση της συνοχής  $C$  και της γωνίας τριβής  $\Phi$  έως ότου επέλθει η αστοχία. Με αυτή τη διαδικασία, αρχικά, υπολογίζεται η διαφορά των λύσεων σε σταθερή και ασταθή κατάσταση. Στη συνέχεια η διαφορά αυτή μειώνεται συνεχώς έως ότου φτάσει σε μία προκαθορισμένη τιμή απόκλισης.

### 6.3.3 Κριτήριο αστοχίας

Το κριτήριο αστοχίας που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της αντοχής των υλικών του φράγματος για τις αναλύσεις στα 2 προγράμματα είναι το κριτήριο Mohr-Coulomb. Το κριτήριο αυτό μελετά τις τάσεις σε πιθανά επίπεδα αστοχίας μέσα στο φράγμα. Η αστοχία των υλικών του φράγματος καθορίζεται ως εξής: αν η διατμητική τάση  $\tau$  σε κάποιο επίπεδο μέσα στο φράγμα ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή:

$$\tau = \pm(c' + \sigma' \tan \varphi) \quad (1)$$

Έτσι καθορίζεται ένα ζεύγος από γραμμές στο επίπεδο  $(\sigma', \tau)$  των τάσεων οι οποίες ονομάζονται περιβάλλουσες αστοχίας. Αν ο ενεργός κύκλος του Mohr, για ένα υπολογιζόμενο στοιχείο, τμήσει τις γραμμές αυτές, τότε ξεπερνιέται η μέγιστη διατμητική αντοχή του υλικού και παρατηρείται αστοχία. Δηλαδή για να υπάρξει ολίσθηση στο επίπεδο της αστοχίας πρέπει να η διατμητική τάση να ξεπεράσει την αντίσταση της εσωτερικής τριβής  $\sigma' \tan \varphi$  και της συνοχής  $c'$  του εδάφους, που εξαρτώνται από την τιμή της ενεργούς τάσης  $\sigma'$ . Η συνοχή  $c'$  αντιπροσωπεύεται ως μια μετατόπιση της περιβάλλουσας αστοχίας στο επίπεδο  $(\sigma', \tau)$  (Muirwood, 1990)

## 6.4 Γενικά για το SLIDE

Το SLIDE είναι το πιο απλουστευμένο λογισμικό ανάλυσης ευστάθειας πρηνών. Πραγματοποιεί:

- αναλύσεις διαρροής των υπογείων υδάτων με πεπερασμένα στοιχεία,
- ανάλυση με απότομη πτώση νερού,
- πιθανολογική ανάλυση
- και έχει ένα αρκετά εύκολο σχεδιαστικό περιβάλλον

Όλα τα είδη των χωμάτινων φραγμάτων, των τοίχων αντιστήριξης, των αναχωμάτων και των πρηνών μπορούν να αναλυθούν με τη βοήθεια του SLIDE. Έχει ενσωματωμένο σύστημα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για σταθερές και παροδικές

συνθήκες. Ροές, πιέσεις και κλίσεις υπολογίζονται με βάση τις εξωτερικές συνθήκες που ορίζει ο χρήστης.

Η ανάλυση ροής είναι ενσωματωμένη με την ανάλυση ευστάθειας πρανών ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αυτόνομη μέτρηση. Το SLIDE έχει εκτεταμένες δυνατότητες πιθανολογικής ανάλυσης. Υπάρχει δυνατότητα να οριστούν στατιστικές κατανομές σε όλες σχεδόν τις παραμέτρους, όπως τις ιδιότητες των υλικών, τις ιδιότητες των στηρίξεων, τα φορτία και τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα. Υπολογίζει και παρέχει μια αντικειμενική μέτρηση για την πιθανότητα αστοχίας. Η ανάλυση ευαισθησίας επιτρέπει να προσδιοριστεί η επίδραση των μεμονωμένων μεταβλητών επί του συντελεστή ασφάλειας της πλαγιάς.

#### **6.4.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων**

Σύμφωνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η κατασκευή χωρίζεται διακριτοποιείται σε μικρότερα τμήματα-στοιχεία που συνδέονται μεταξύ τους με κόμβους, η μέθοδος αυτή (fine element method ή FEM) είναι μία αριθμητική τεχνική, η οποία τα τελευταία χρόνια έχει γνωρίσει ιδιαίτερη ανάπτυξη και ευρεία εφαρμογή. Η εν λόγω μέθοδος βασίζεται σε αναπτυγμένες μαθηματικές σχέσεις και αποτελεί την πιο βασική μέθοδο αριθμητικής ανάλυσης για την επίλυση μεγάλου εύρους προβλημάτων. Βέβαια, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μία προσεγγιστική μέθοδο, η οποία πριν από μερικές δεκαετίες εφαρμοζόταν κυρίως για επιστημονική έρευνα. Η ταχεία ανάπτυξη της χρήσης των υπολογιστών και κατάλληλου λογισμικού συντέλεσε στην εφαρμογή της μεθόδου σε πολλούς κλάδους της μηχανικής και στην πράξη.

Όπως προαναφέρθηκε, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία προσεγγιστική μέθοδος, συνεπώς τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση της ενδέχεται να έχουν κάποιο σφάλμα. Συνήθως, το σφάλμα αυτό μειώνεται όσο αυξάνεται (σε λογικά βέβαια πλαίσια) ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για τη διακριτοποίηση της κατασκευής. Με την αύξηση των στοιχείων όμως έχουμε και σημαντική αύξηση του όγκου των δεδομένων και των υπολογισμών, με αποτέλεσμα την απαίτηση μεγαλύτερου χώρου στη μνήμη του υπολογιστή και στην αύξηση του υπολογιστικού χρόνου για την επίλυση ενός προβλήματος, ειδικά σε δυναμικές αναλύσεις. Για την καλύτερη εφαρμογή της μεθόδου συνήθως γίνεται μία πύκνωση των στοιχείων στις περιοχές, όπου παρουσιάζουν έντονες μεταβολές των τάσεων.

Τα πεπερασμένα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους σε ένα αριθμό σημείων, τους κόμβους. Σε κάθε κόμβο αντιστοιχεί ένας αριθμός κομβικών παραμέτρων των ενομαζόμενων βαθμών ελευθερίας. Με τον όρο κομβικοί παράμετροι εννοούνται οι γενικευμένες μετατοπίσεις, δηλαδή οι μετατοπίσεις και οι παράγωγοί τους. Οι παραμορφώσεις σε κάποιο σημείο συνδέονται με τις μετατοπίσεις, οι μετατοπίσεις σε κάθε σημείο ενός στοιχείου εκφράζονται συναρτήσει των μετατοπίσεων των κόμβων με βοήθεια κάποιων πολυωνύμων. Ο βαθμός του πολυωνύμου που επιλέγεται για την προσεγγιστική έκφραση των μετατοπίσεων αντικατοπτρίζει την κατάσταση του

προβλήματος, δηλαδή όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός τόσο πιο ακριβή λύση επιτυγχάνεται, αυξάνοντας όμως και τις υπολογιστικές απαιτήσεις της επίλυσης.

Για να γίνει πιο κατανοητή η μέθοδος θα αναλυθεί περαιτέρω ο όρος διακριτοποίηση της κατασκευής. Η διακριτοποίηση γενικά ενός σώματος ουσιαστικά είναι η υποδιαίρεση του σώματος σε πεπερασμένα στοιχεία, όπου αποφασίζεται ο αριθμός, το σχήμα, το μέγεθος και η διάταξη των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν με σκοπό την καλύτερη και όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση του προβλήματος. Η διαδικασία της διακριτοποίησης περιλαμβάνει την τοποθέτηση συστήματος συντεταγμένων καθώς και ομαδοποίηση των κόμβων στα στοιχεία. Αρχικά, γίνεται περιγραφή του τύπου (ή των τύπων) στοιχείου, εισάγεται ο αριθμός των στοιχείων, ο τύπος των στοιχείων καθώς και ο αριθμός των κόμβων των στοιχείων και στη συνέχεια εισάγονται οι φυσικές συντεταγμένες των κόμβων. Ουσιαστικά μία διακριτοποίηση είναι ένα πλέγμα κόμβων και στοιχείων. Γενικά, η διακριτοποίηση πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το η κατασκευή να διαιρείται σε αρκετά μικρά στοιχεία, ώστε να προσεγγίζει το φυσικό πρόβλημα καλύτερα και να είναι όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερη ώστε να μειώνει το υπολογιστικό κόστος.

#### **6.4.2 Μέθοδος ελέγχου ευστάθειας στο πρόγραμμα SLIDE**

Στο πρόγραμμα SLIDE ο προσδιορισμός της ευστάθειας υφιστάμενων πρανών πραγματοποιείται με χρήση συμβατικών μεθοδολογιών βασισμένων στην αρχή της οριακής ισορροπίας. Η αναζήτηση των κρισιμότερων επιφανειών ολίσθησης με χρήση των μεθόδων Ordinary/Fellenius, Spencer και Bishop simplified και ο προσδιορισμός των αντίστοιχων συντελεστών ασφαλείας μπορεί να δώσει σαφή εικόνα της επικρατούσας ευστάθειας ενός πρανούς. Η θεμελιώδης αρχή των ανωτέρων μεθοδολογιών συνίσταται στην υποδιαίρεση της εξεταζόμενης μάζας σε συμπαγή τμήματα (λωρίδες) και εξετάζεται η συνεισφορά της κάθε μίας στο σύνολο των δυνάμεων (ή ροπών) ευστάθειας και στο σύνολο των αντίστοιχων μεγεθών ανατροπής. Οι επιμέρους μέθοδοι διαφοροποιούνται ως προς την δυνατότητα εξέτασης κυκλικών επιφανειών, τον προσδιορισμό των συνιστωσών δυνάμεων και εξισώσεων ισορροπίας σε γενικό ή τοπικό σύστημα, την αλληλεπίδραση των συμπαγών τμημάτων μεταξύ τους. Πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών αποτελεί η αποκτηθείσα εμπειρία και η αναγωγή του γενικού συντελεστή ασφαλείας σε όρους μηχανικής.



## 6.5 Βασικά στοιχεία και παράμετροι προσομοίωσης

- Διακριτοποίηση : Στο FLAC ο κάνναβος δημιουργήθηκε χωρίζοντας το φράγμα σε 320 γραμμές ( $i=321$ ) και σε 47 στήλες ( $j=48$ ). Η πυκνωση του καννάβου είναι ομοιόμορφη και το πλήθος των στοιχείων δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η επιλογή της συγκεκριμένης διακριτοποίησης έγινε για μια όσο το δυνατόν καλύτερη προσομοίωση αλλά και για εξοικονόμηση χρόνου και υπολογιστικής ισχύος, διότι με πυκνότερη διακριτοποίηση αυξάνεται κατά πολύ ο χρόνος υπολογισμού χωρίς κάποια ουσιαστική αλλαγή στα αποτελέσματα. Στο SLIDE ο κάνναβος χωρίστηκε σε περίπου 1500 στοιχεία ακολουθώντας παρόμοια λογική με το FLAC.
- Συνοριακές συνθήκες : Τοποθετήθηκαν κυλίσεις δεξιά και αριστερά του βράχου οριζόντια στον άξονα  $x$  ώστε να επιτρέπονται μόνο κατακόρυφες κινήσεις. Κάτω από τον βράχο τοποθετήθηκαν πακτώσεις ώστε να μην επιτρέπεται καμία μετατόπιση.
- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φράγματος: Το πλάτος του φράγματος είναι 504 m και το ύψος είναι 74 m. Η βάση στην οποία εδράζεται το φράγμα εκτείνεται σε βάθος 20 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το συνολικό πλάτος του υπό μελέτη συστήματος φράγματος-εδάφους θεμελιώσεως είναι 640 m.
- Στρωματογραφία : Για την μηχανική συμπεριφορά χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Mohr-Coulomb το οποίο προσομοιώνει καταλλήλως την ελαστοπλαστική συμπεριφορά των εδαφικών σχηματισμών. Οι ιδιότητες που χαρακτηρίζουν την μηχανική συμπεριφορά είναι:
  - Πυκνότητα (Mass–Density) [ $\text{kg/m}^3$ ]
  - Μέτρο Ελαστικότητας (  $E$  ) [Pa]
  - Δείκτης Poisson
  - Συνοχή (  $c$  ) [Pa]
  - Γωνία τριβής ( $\Phi$ ) [ °]

## 6.6 Στάδια προσομοίωσης αναλύσεων με τα προγράμματα FLAC και SLIDE

- Σταδιακή κατασκευή του φράγματος.

Αρχικά δημιουργήθηκε η βάση και η τσιμεντένεση. Για την προσομοίωση του προβλήματος, χρησιμοποιήθηκαν ως συνοριακές συνθήκες κυλίσεις στα κατακόρυφα άκρα του καννάβου ώστε να επιτρέπονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων και πάκτωση στη βάση για περιορισμό των κατά x και y μετακινήσεών τους. Αυτές οι μετακινήσεις ανταποκρίνονται στους πραγματικούς βαθμούς ελευθερίας του εδάφους. Για το πεδίο των τάσεων λόγω ιδίου βάρους χρησιμοποιήθηκε η επιτάχυνση της βαρύτητας  $g=9,81\text{m/s}^2$  και έγινε επίλυση θεωρώντας ότι το υλικό θεμελίωσης συμπεριφέρεται ελαστικά. Οι καθιζήσεις της στρώσης θεμελίωσης λόγω ιδίου βάρους έχουν προηγηθεί της κατασκευής του φράγματος και δεν πρέπει να συνυπολογιστούν. Για τον λόγο αυτό μηδενίστηκαν. Στην συνέχεια προσομοιώθηκε η διαδικασία της σταδιακής κατασκευής του φράγματος χρησιμοποιώντας 19 στρώσεις. Στο τέλος της σταδιακής κατασκευής υπολογίζονται οι καθιζήσεις καθώς και ο συντελεστής ασφαλείας.

- Ανάπτυξη δικτύου ροής

Αρχικά προσδιορίστηκαν οι ιδιότητες των ζωνών του φράγματος. Στην συνέχεια έγινε η ανύψωση της στάθμης του νερού στα 70 m. Η πίεση του νερού σε κάθε βάθος h δίδεται από τον τύπο :

$$P=\gamma_w * h$$

$$\gamma_w=\rho_w * g$$

P=μέγιστη πίεση που ασκούμε

$\gamma_w$  = ειδικό βάρος νερού

$\rho_w$ = πυκνότητα νερού

g= επιτάχυνση βαρύτητας

h= βάθος

Μετά την ανάπτυξη δικτύου ροής υπολογίστηκαν η παροχή μέσω ενός υποπρογράμματος (qratio fish), οι καθιζήσεις και ο συντελεστής ασφαλείας.

- Απότομος καταβιβασμός στάθμης

Στο στάδιο αυτό έγινε πτώση της στάθμης του νερού από τα 70 στα 20m σε διάστημα 5 ημερών. Στο FLAC αρχικά έγινε η αντιστοιχία του συνολικού χρόνου ροής με τα βήματα επίλυσης, ώστε να βρεθεί ο αριθμός των βημάτων που αντιστοιχούν σε διάστημα 5 ημερών. Τέλος έγινε η νέα κατανομή της πίεσης του νερού και υπολογίστηκαν η εξέλιξη του συντελεστή ασφαλείας και της πίεσης των πόρων για τις επόμενες 20 μέρες.

- Σεισμική διέγερση

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά των εδαφών προσομοιώθηκαν με ένα ολικό συντελεστή κρίσιμης απόσβεσης κατά Rayleigh ίσο προς 3% για λόγους αριθμητικής ευστάθειας. Παράλληλα χρησιμοποιήθηκε ο λόγος κρίσιμης απόσβεσης με το μη γραμμικό υστερητικό μοντέλο sig3 του FLAC για τα υλικά του φράγματος. Ο βράχος και το σκυρόδεμα δεν χρειάστηκαν υστερητική απόσβεση γιατί καλύπτονταν από την απόσβεση κατά Rayleigh. Η σεισμική ανάλυση έγινε με την επίδραση μόνο της οριζόντιας συνιστώσας της επιτάχυνσης που καταγράφηκε κατά τον σεισμό της Λευκάδας 2003. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν αποτελούνται από χρονοιστορίες της επιτάχυνσης, της μετατόπισης και της πίεσης πόρων σε διάφορα σημεία, καθώς και τις κατανομές μετατοπίσεων και πίεσης πόρων για τις χρονικές στιγμές 10 και 30 sec.

## Κεφάλαιο 7

## Παρουσίαση αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα

### FLAC 7.0

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις παρακάτω φάσεις λειτουργίας:

- Πέρασ της κατασκευής
- Ολοκλήρωση του δικτύου ροής
- Απότομος καταβιβασμός στάθμης
- Σεισμική διέγερση

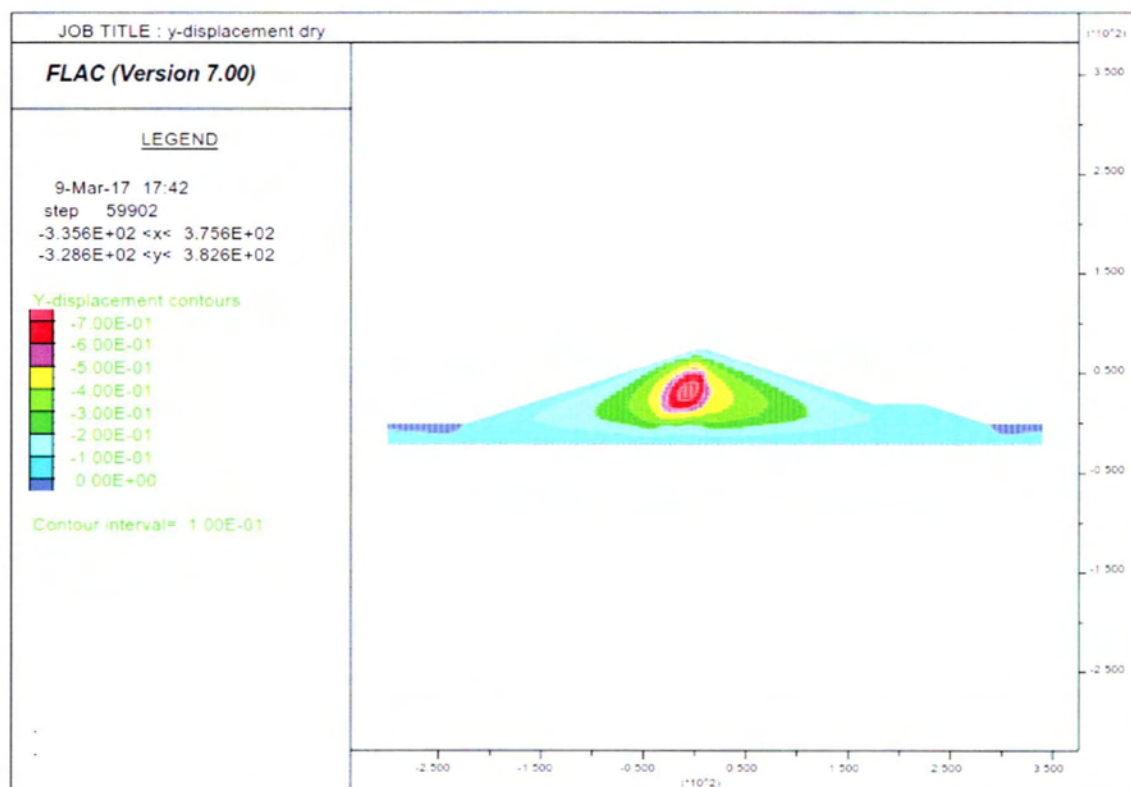
Σε αυτά τα στάδια λειτουργίας υπολογίστηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Κατανομή πίεσης πόρων
- Συντελεστής ασφαλείας
- Μετακινήσεις

#### 7.1 Πέρασ κατασκευής

Σε αυτό το υποκεφάλαιο περιγράφεται η μελέτη της συμπεριφοράς του φράγματος μετά την ολοκλήρωση της σταδιακής κατασκευής του. Αυτό το στάδιο βρίσκεται πριν την ανύψωση της στάθμης του νερού και για αυτό το λόγο δεν υπήρξε κατανομή πιέσεων πόρων. Αποτελεί σημαντικό στάδιο όμως της μελέτης διότι η κατασκευή αρχίζει να παραμορφώνεται από τη στιγμή της διάστρωσης των υλικών στο ανάχωμα και συνεχίζει να παραμορφώνεται για αρκετό χρονικό διάστημα, μετά την ανάπτυξη των φορτίων που το καταπονούν. Για αυτό το λόγο είναι σημαντικός ο έλεγχος τόσο των συνολικών μετατοπίσεων, όσο και ο έλεγχος ευστάθειας. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών αυτών.

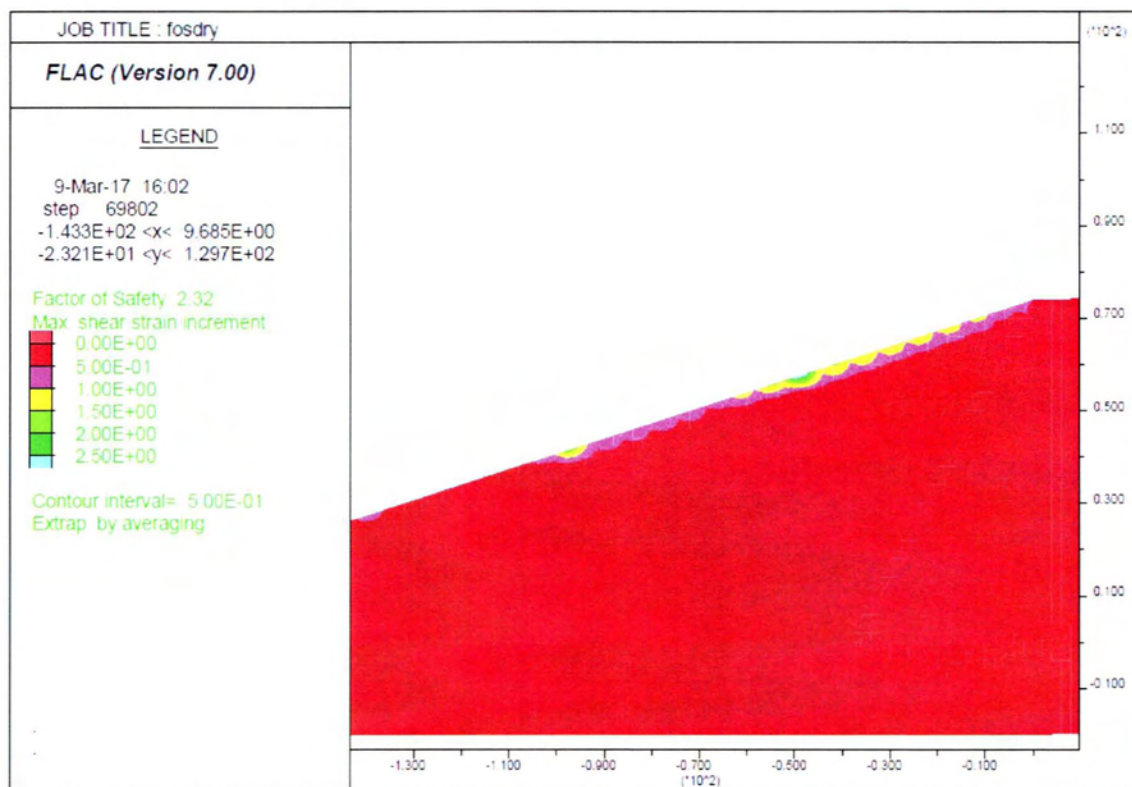
### 7.1.1 Μετατοπίσεις



Σχήμα 8. Κατακόρυφες μετατοπίσεις μετά το πέρας της κατασκευής του φράγματος

Στο σχήμα 8 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις του φράγματος μετά το πέρας της κατασκευής. Η μέγιστη βύθιση είναι της τάξης των 70 cm και εντοπίζεται στον πυρήνα και συγκεκριμένα στην περιοχή μεταξύ των υψομέτρων +20 m έως +50 m. Στο επίπεδο έδρασης του φράγματος η βύθιση ανέρχεται σε 25 cm στο κέντρο. Επίσης παρατηρείται πως οι καθιζήσεις μειώνονται καθώς απομακρυνόμαστε από τον πυρήνα.

## 7.1.2 Συντελεστής ασφαλείας



Σχήμα 9 Απεικόνιση ζώνης μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης και θεώρηση συντελεστή ασφαλείας  $F=2,32$

Στο σχήμα 9 δίνεται ο συντελεστής ασφαλείας μετά την κατασκευή του φράγματος  $F=2,32$ . Από τον πίνακα 1 με τις ελάχιστες αποδεκτές τιμές του συντελεστή ασφαλείας προκύπτει πως το φράγμα σε αυτό το στάδιο έχει επαρκή ευστάθεια. Επίσης απεικονίζεται η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση η οποία εμφανίζεται στην επιφάνεια του ανάντη πρανούς.

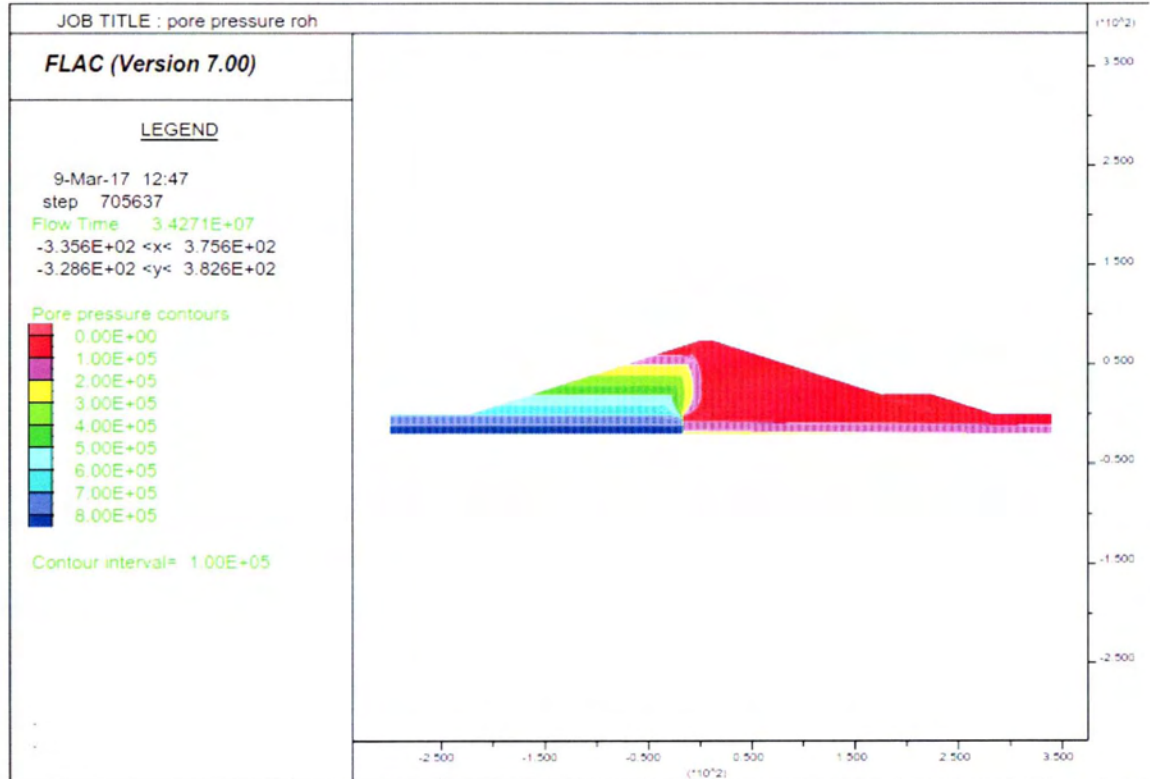
## 7.2 Ολοκλήρωση του δικτύου ροής

Στα υλικά των διαφόρων ζωνών των γεωφραγμάτων, καθώς και στη θεμελίωσή τους, μπορούν να αναπτυχθούν πιέσεις πόρων, λόγω της ροής νερού από μία περιοχή του αναχώματος προς άλλη. Η ανάπτυξη πίεσης πόρων λόγω σεισμικών καταπονήσεων του αναχώματος, αποτελεί ένα ξεχωριστό θέμα και δεν περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο.

Συνθήκες ροής διήθησης στο ανάχωμα του φράγματος και δίκτυο ροής αρχίζουν να αναπτύσσονται μετά την ανύψωση της στάθμης του ταμιευτήρα. Η ταχύτητα ανάπτυξης του δικτύου σταθερής ροής εξαρτάται από τη διαπερατότητα του υλικού.

Η ανάπτυξη πλήρους δικτύου ροής στον πυρήνα, λόγω της χαμηλής του διαπερατότητας, μπορεί να επιτευχθεί σε μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα. Σημειώνεται ότι οι πιθανές διακυμάνσεις της στάθμης του ταμιευτήρα, λόγω λειτουργίας του έργου, ενδέχεται να μην αφήνουν επαρκές χρονικό διάστημα για την ανάπτυξη δικτύου ροής, που να αντιστοιχεί σε ορισμένη στάθμη ταμιευτήρα.

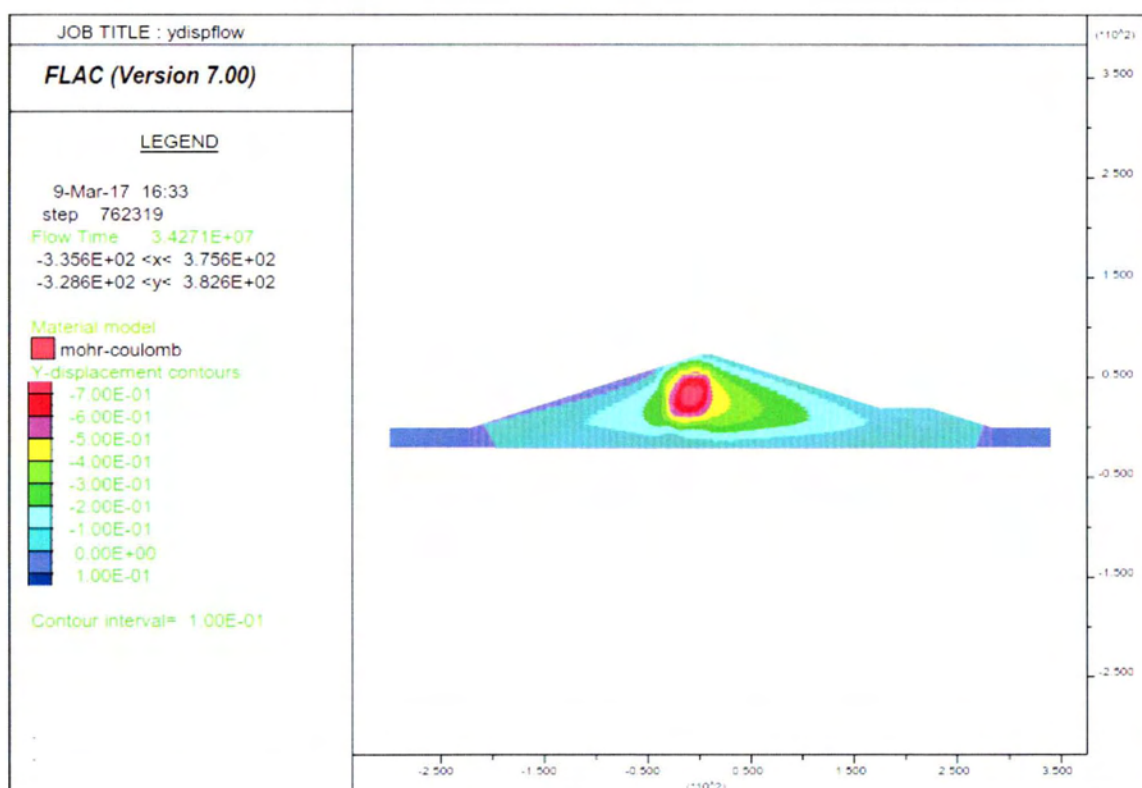
Μετά την ανάπτυξη σταθερής ροής μέσα στο ανάχωμα του φράγματος (δίκτυο ροής), οι πιέσεις πόρων εξαρτώνται αποκλειστικά από το δίκτυο ροής.



Σχήμα 10. Πιέσεις πόρων υπό συνθήκες ροής σταθερής κατάστασης

Στο σχήμα 10 παρουσιάζεται η κατανομή των πιέσεων των πόρων μετά την ολοκλήρωση της ροής. Όπως φαίνεται στο σχήμα οι θετικές τιμές της πίεσης των πόρων ξεκινάνε από υψόμετρο +70 m, δηλαδή στη στάθμη του νερού, και αυξάνονται με το βάθος. Οι μέγιστες τιμές παρουσιάζονται στη βάση της θεμελίωσης και ανέρχονται στα 800 kPa αριστερά της τσιμεντένεσης. Επίσης παρατηρείται πως το νερό ακολουθεί τη διαδρομή των φίλτρων ώστε να μην διεισδύσει νερό στο κατάντη κέλυφος.

### 7.2.1 Μετατοπίσεις



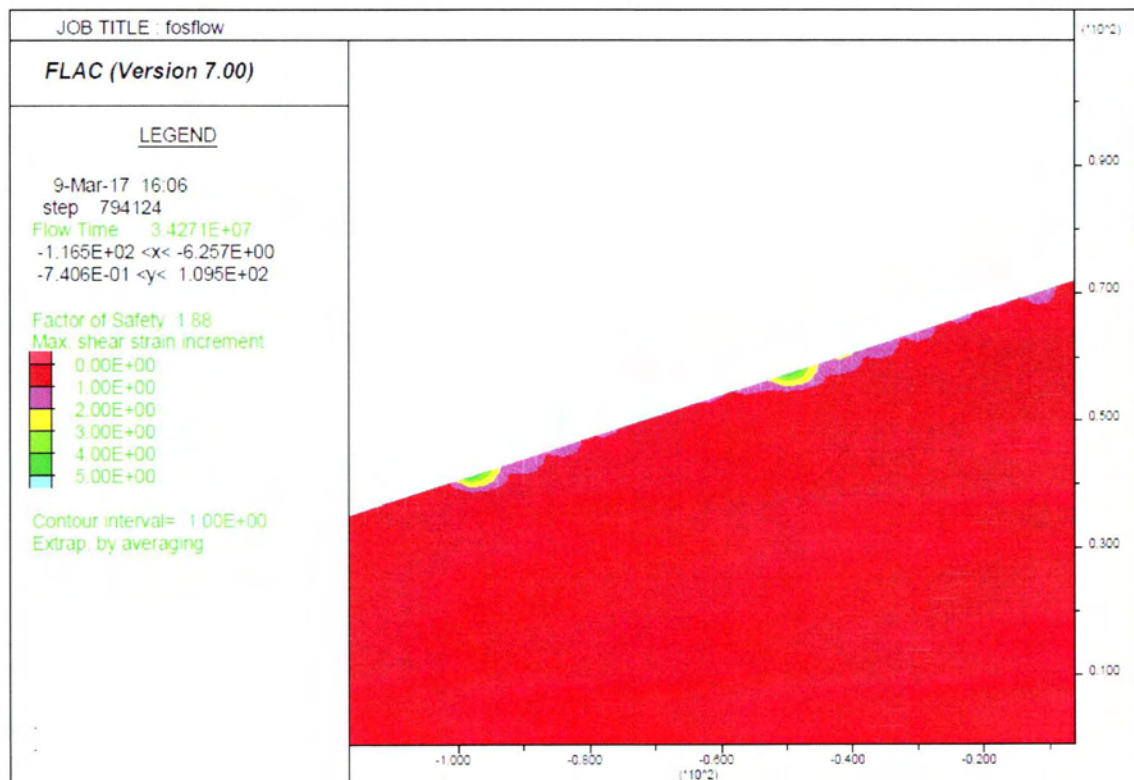
Σχήμα 11. Κατακόρυφες μετατοπίσεις μετά το πέρας της κατασκευής του φράγματος

Τα φράγματα γενικώς παρουσιάζουν πολύ μεγάλες μετατοπίσεις μετά το πέρας της κατασκευής λόγω ιδίου βάρους. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 11 όπου οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μετά την ολοκλήρωση της ροής δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές σε σχέση με τις αντίστοιχες του σχήματος 8. Πάλι ο πυρήνας εμφανίζει τις μέγιστες βυθίσεις



της τάξης των 70 cm. Παρατηρούνται όμως αυξημένες βυθίσεις στα άκρα της θεμελίωσης καθώς και στην επιφάνεια του ανάντη κελύφους της τάξης των 10 cm.

### 7.2.2 Συντελεστής ασφαλείας



Σχήμα 12. Απεικόνιση ζώνης μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης και θεώρηση συντελεστή ασφαλείας  $F=1,88$

Μετά την ολοκλήρωση της ροής παρατηρείται μία αναμενόμενη μείωση του συντελεστή ασφαλείας λόγω της ανάπτυξης πιέσεων πόρων μέσα στο φράγμα. Το σχήμα 12 παρουσιάζει το συντελεστή ασφαλείας ίσο με  $F=1,88$ . Πάλι το φράγμα παρουσιάζει επαρκή ευστάθεια καθώς ο συντελεστής βρίσκεται πάνω από τα όρια που αναφέρει ο πίνακας 1. Επίσης η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση εμφανίζεται στην επιφάνεια του ανάντη κελύφους.

### 7.3 Απότομος καταβιβασμός στάθμης

Η συνθήκη απότομου καταβιβασμού στάθμης αναφέρεται στην κατάσταση κατά την οποία η στάθμη του ταμιευτήρα καταβιβάζεται απότομα από τη μέγιστη στην ελάχιστη ή σε κάποια ενδιάμεση, λόγω συνήθους λειτουργίας του έργου σε φράγματα αποθήκευσης ενέργειας ή λόγω λειτουργίας του εκκενωτή πυθμένα.

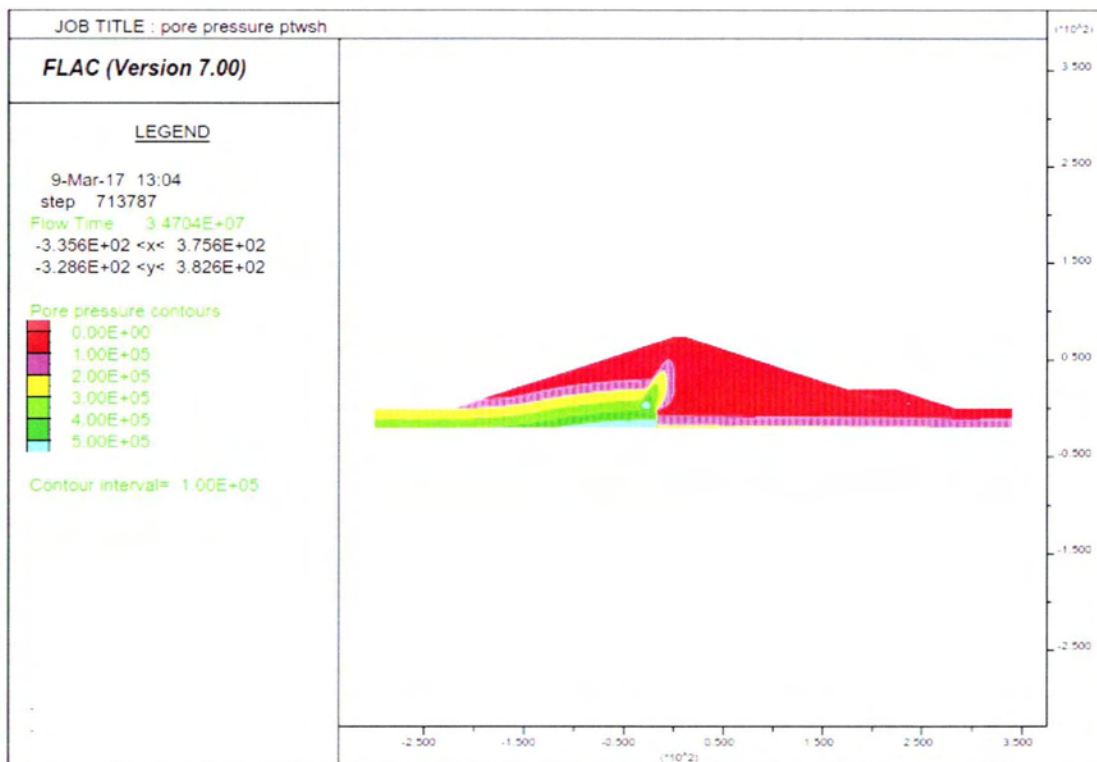
Η ταχύτητα πτώσης της στάθμης του ταμιευτήρα εξαρτάται από την παροχρεωτικότητα του συστήματος και το διάγραμμα στάθμης χωρητικότητας του ταμιευτήρα. Η ταχύτητα πτώσης μπορεί να είναι σημαντική (πχ 30 cm/ημέρα). Αν και η πτώση της στάθμης του ταμιευτήρα είναι συνήθως αργή, στις αναλύσεις ευστάθειας θεωρείται ότι η πτώση της στάθμης πραγματοποιείται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Στη συγκεκριμένη μελέτη η ανάλυση του απότομου καταβιβασμού της στάθμης του νερού έγινε με μια αρκετά μεγάλη ταχύτητα πτώσης ίση με 10 m/ημέρα. Συγκεκριμένα η στάθμη του ταμιευτήρα από τα 70 m καταβιβάστηκε στα 20 m σε περίοδο 5 ημερών.

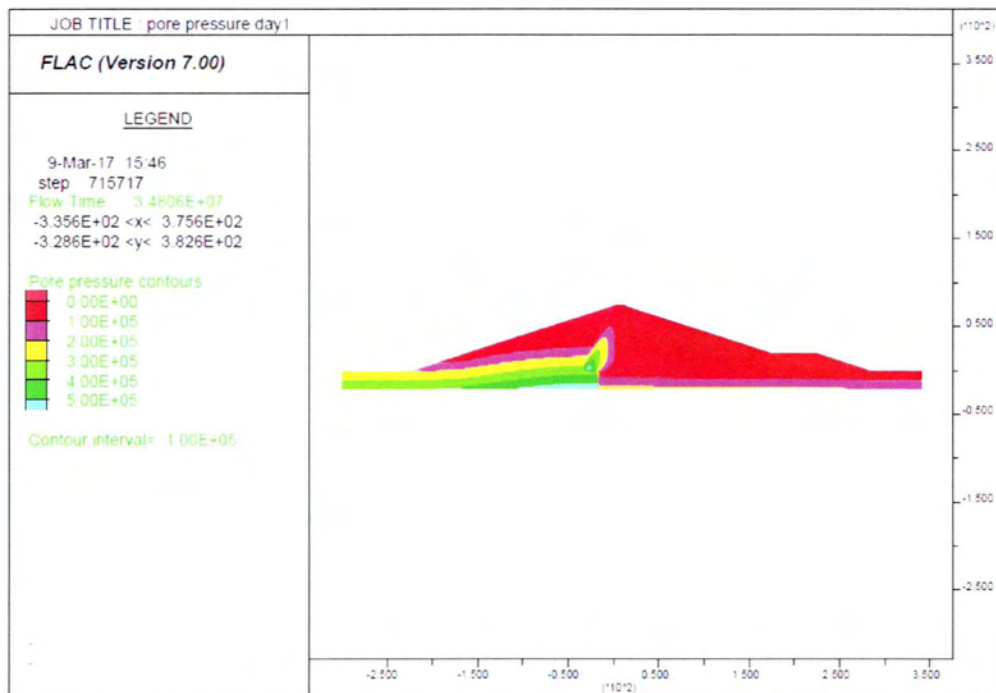
Γενικώς αυτό το φαινόμενο μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις και για αυτό το λόγο πρέπει να εξετάζονται τόσο οι ανακατανομές των πιέσεων πόρων όσο και συντελεστές ασφαλείας.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιέσεις πόρων και ο συντελεστής ασφαλείας μετά τον απότομο καταβιβασμό του ταμιευτήρα καθώς και οι εξελίξεις των μεγεθών αυτών για 20 ημέρες μετά.

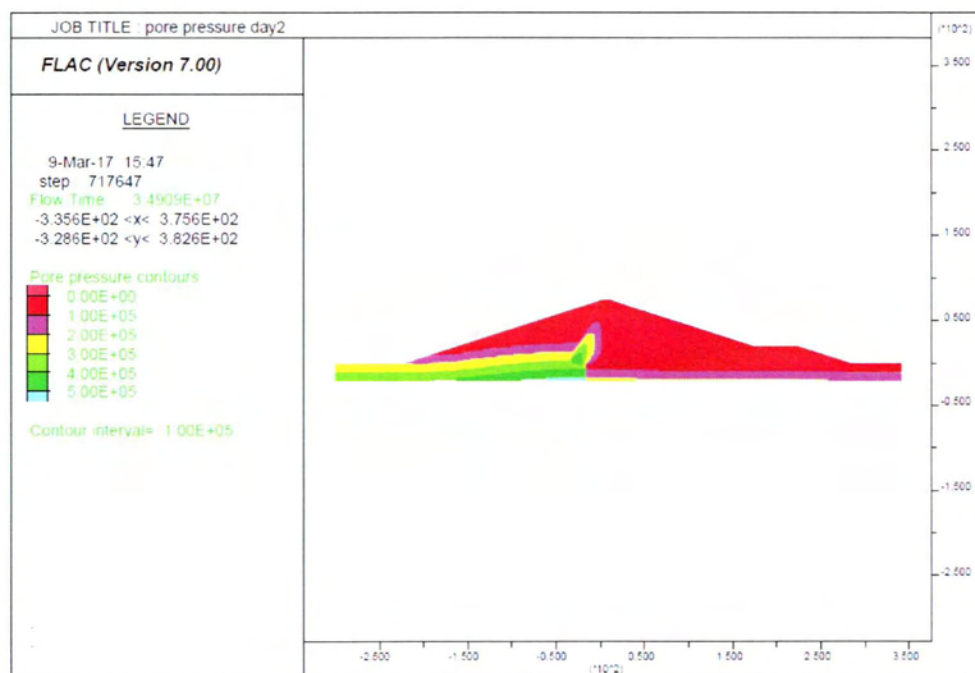
### 7.3.1 Εξέλιξη πιέσεων πόρων



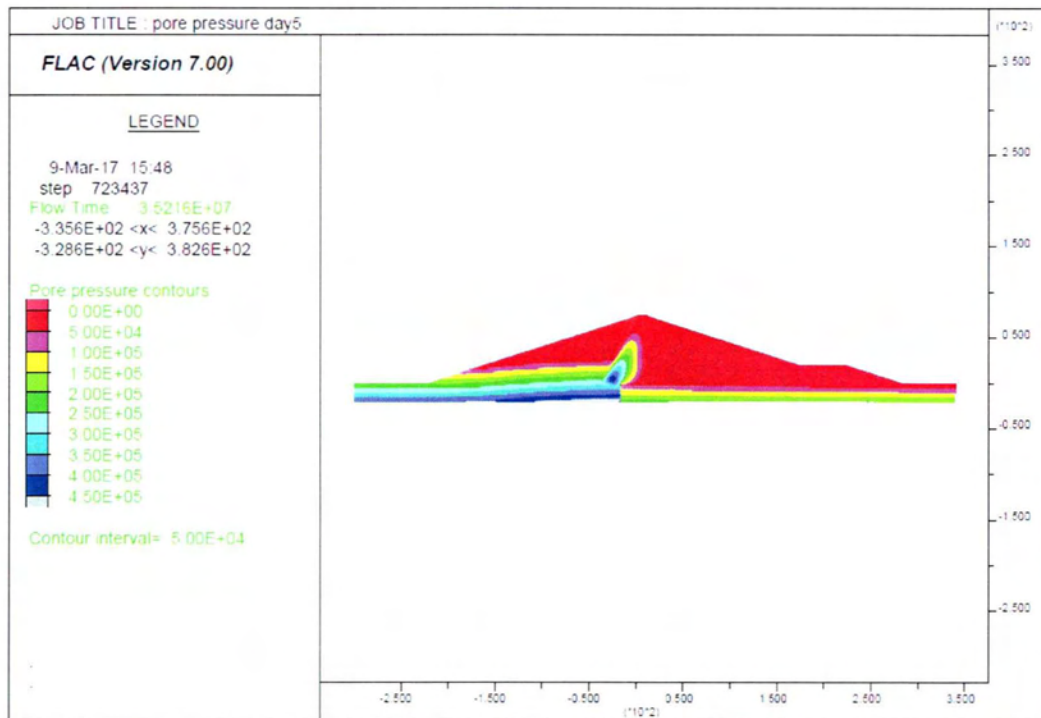
Σχήμα 13. Πιέσεις πόρων μετά τον καταβιβασμό της στάθμης του νερού από τα 70 στα 20 μέτρα.



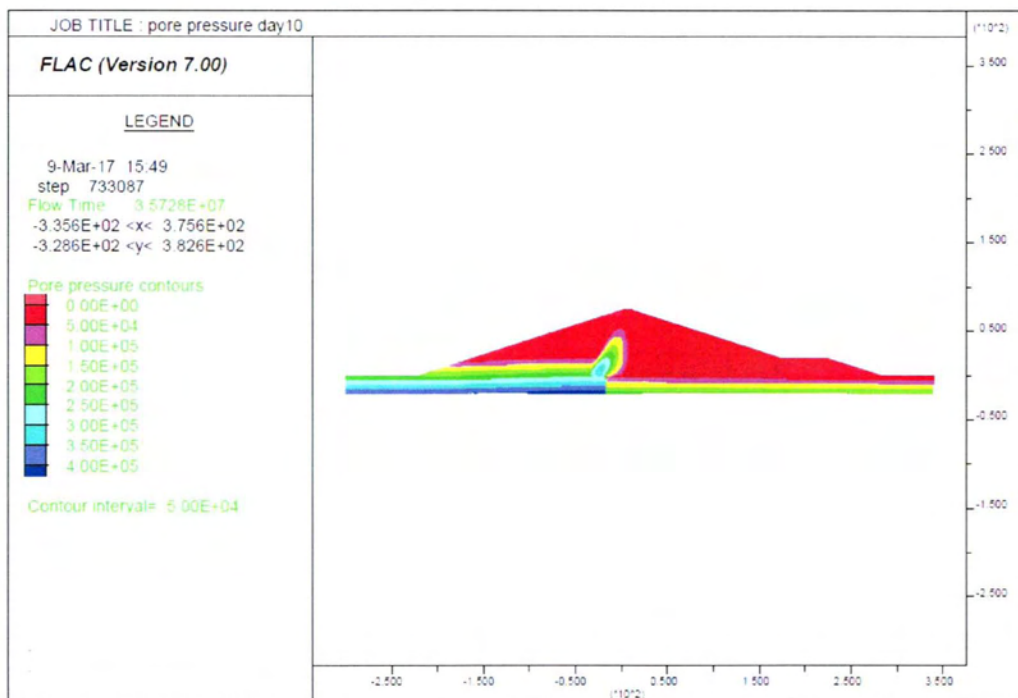
Σχήμα 14. Πιέσεις πόρων 1 μέρα μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού



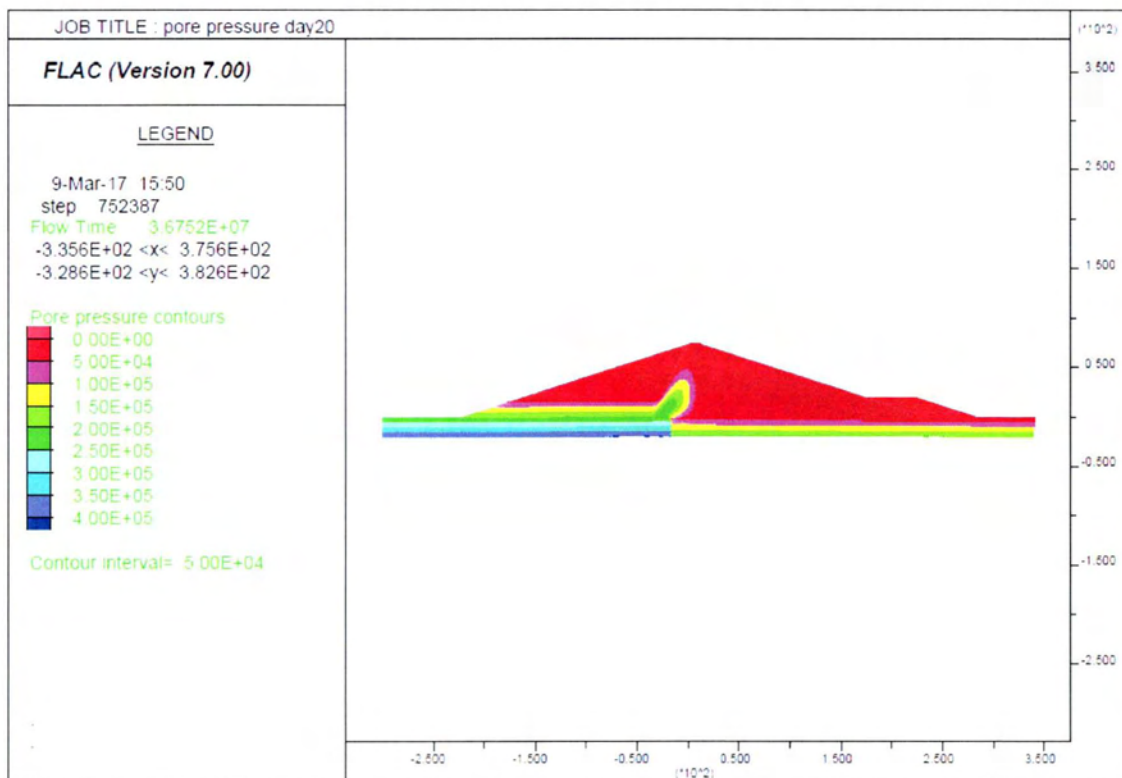
Σχήμα 15. Πιέσεις πόρων 2 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού



Σχήμα 16. Πιέσεις πόρων 5 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού



Σχήμα 17. Πιέσεις πόρων 10 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού

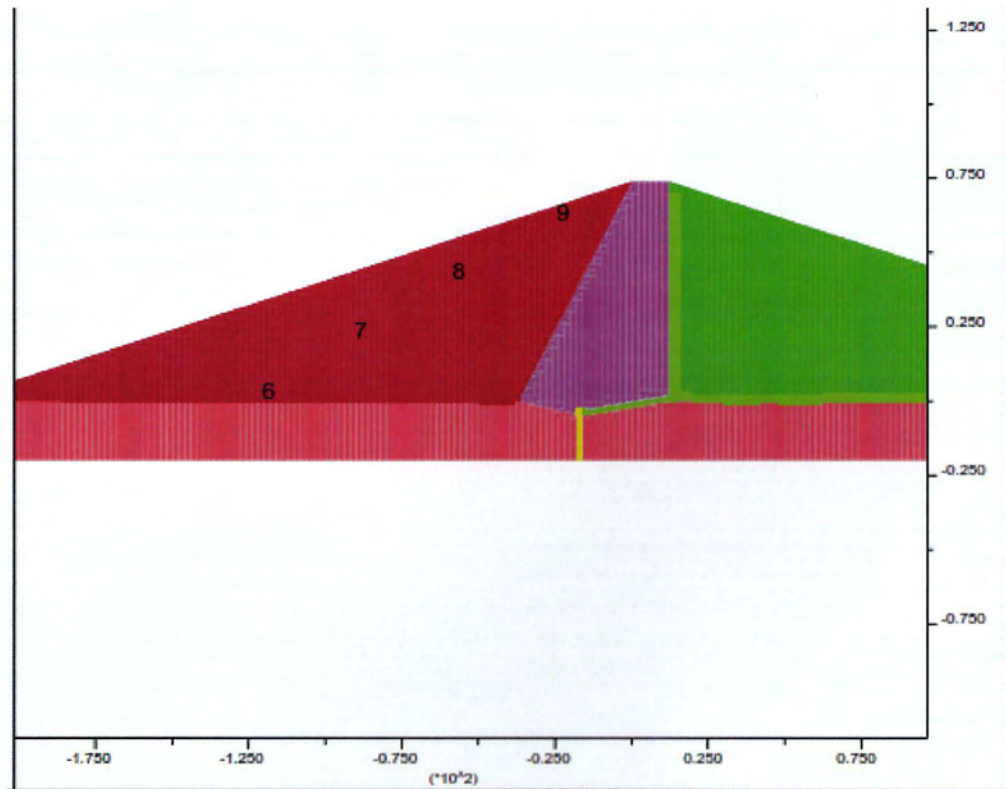


Σχήμα 18. Πιέσεις πόρων 20 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού

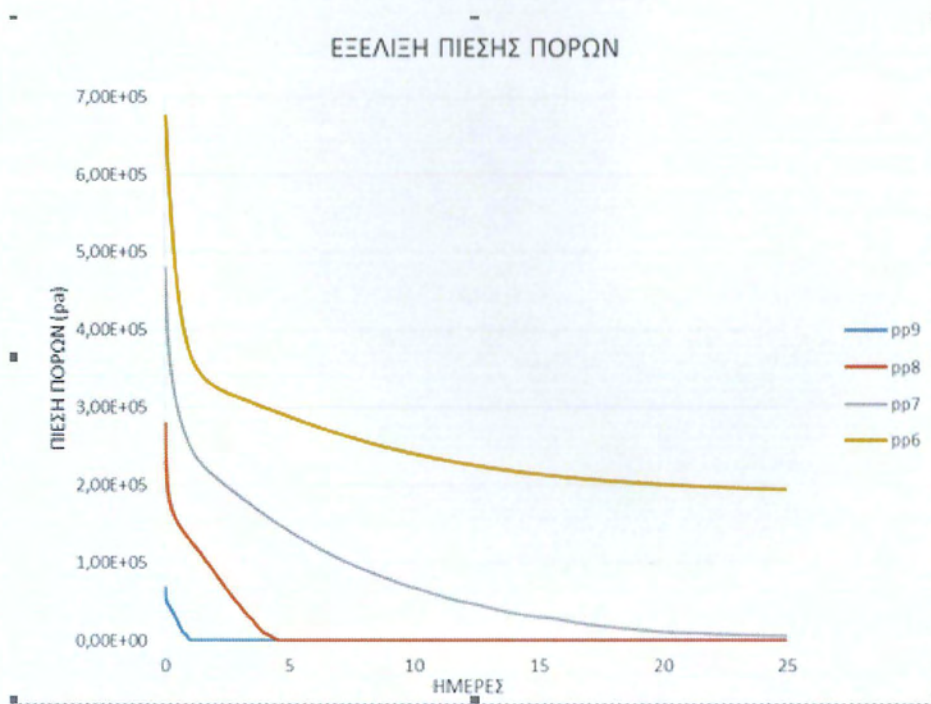
Στο σχήμα 13 παρουσιάζεται η κατανομή της πίεσης πόρων μετά τον καταβιβασμό της στάθμης του ταμιευτήρα από τα 70 m στα 20 m . Παρατηρείται μία μεγάλη μείωση των τιμών σε σχέση με την κατάσταση σταθερής ροής. Συγκεκριμένα η μέγιστη τιμή της πίεσης των πόρων μειώθηκε στα 500 kPa και παράλληλα μειώθηκαν οι τιμές των πιέσεων του ανάντη κελύφους. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν αναμενόμενα γιατί μειώθηκε ο συνολικός όγκος νερού.

Τις επόμενες 20 μέρες, όπως φαίνεται στα σχήματα 14-18, οι τιμές της πίεσης των πόρων συνεχίζουν να μειώνονται σταδιακά και να αποκτούν μια πιο ομαλή συμπεριφορά. Η τελική μέγιστη τιμή της πίεσης είναι της τάξεως των 400 kPa και στο ανάντη κέλυφος σε υψόμετρο άνω των 20 m οι τιμές της πίεσης είναι μηδενικές.

Για την καλύτερη επισκόπηση του φαινομένου μελετήθηκαν οι εξελίξεις της πίεσης πόρων 4 σημείων του ανάντη κελύφους που φαίνονται στο σχήμα 19. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



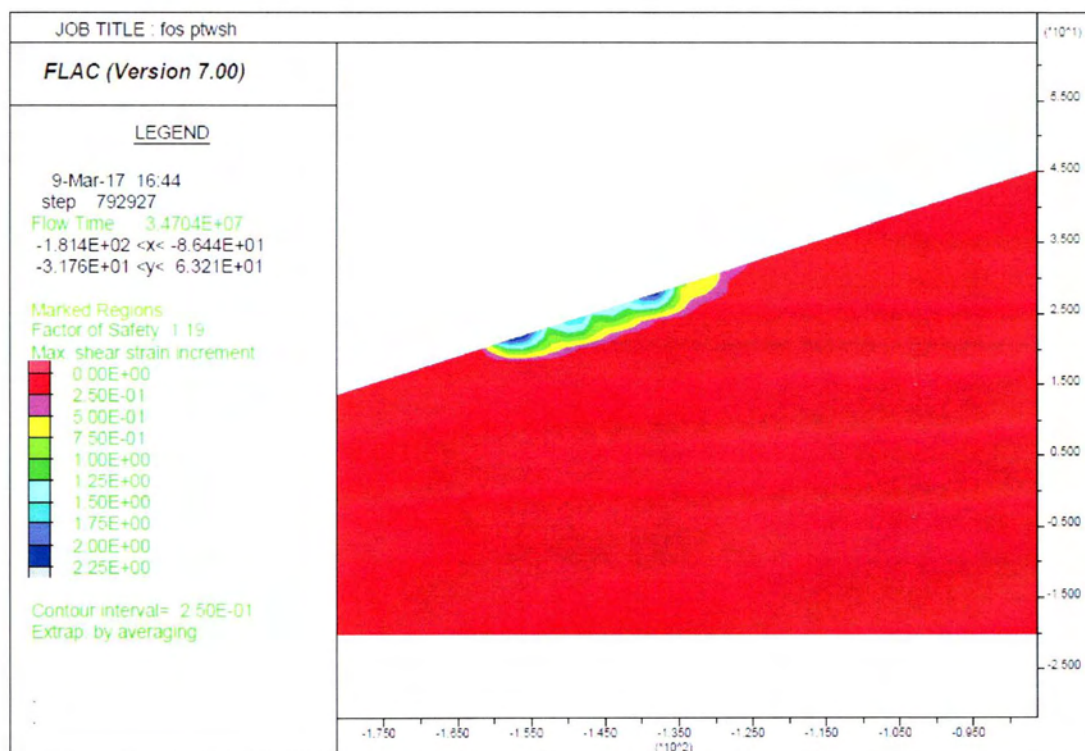
Σχήμα 19. Σημεία στα οποία μελετήθηκε η εξέλιξη της πίεσης πόρων



Σχήμα 20. Εξέλιξη της πίεσης πόρων στα 4 σημεία του ανάντη κελύφους από την αρχή της πτώσης της στάθμης του νερού.

Στο σχήμα 20 παρουσιάζεται η εξέλιξη της πίεσης των πόρων για τα 4 σημεία του ανάντη κελύφους σε διάρκεια 25 ημερών από την αρχή της πτώσης. Συγκεκριμένα στο σημείο 9 που βρίσκεται σε υψόμετρο +60 m, η αρχική τιμή της πίεσης είναι 68kPa και μηδενίζεται σε διάρκεια μίας ημέρας. Στο σημείο 8 που βρίσκεται σε υψόμετρο +40m, η αρχική τιμή της πίεσης είναι 280kPa και μηδενίζεται σε διάστημα 5 ημερών. Τα αποτελέσματα αυτά είναι αναμενόμενα καθώς τα σημεία αυτά βρίσκονται πάνω από την νέα στάθμη του νερού. Ακόμα το σημείο 7 που βρίσκεται σε υψόμετρο +20 , έχει αρχική τιμή πίεσης 480 kPa και φτάνει στα 6kPa μετά από 25 ημέρες. Τέλος το σημείο 6 που βρίσκεται σε υψόμετρο +0m , έχει αρχική τιμή πίεσης 680kPa και καταλήγει στην τιμή 194 kPa μετά από 25 μέρες. Οι τιμές αυτές συμφωνούν με τις τιμές της πίεσης πόρων των σχημάτων 10 και 14-18.

### 7.3.2 Συντελεστής ασφαλείας

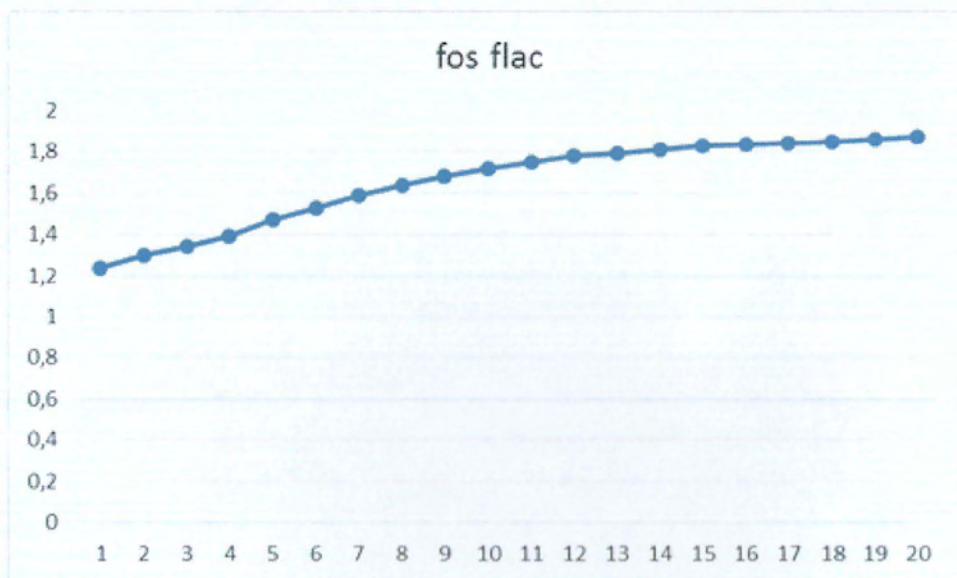


Σχήμα 21. Απεικόνιση ζώνης μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης και θεώρηση συντελεστή ασφαλείας  $F=1,19$  μετά την πτώση της στάθμης.



Στο στάδιο αυτό λόγω της δυσμενούς συνθήκης(μεγάλη ταχύτητα πτώσης)του απότομου καταβιβασμού ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται αρκετά και φτάνει σε τιμή  $F=1.19$  σύμφωνα με το σχήμα 22. Ο συγκεκριμένος συντελεστής είναι ελάχιστα μικρότερος από το όριο ( $F=1.2$ ) που αναφέρει ο Πίνακας 1.Επομένως δεν παρουσιάζει επαρκή ευστάθεια. Η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση εμφανίζεται στην επιφάνεια του ανάντη κελύφους.

Στο ίδιο στάδιο για την καλύτερη διερεύνηση της ευστάθειας του φράγματος υπολογίστηκαν οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας για διάστημα 20 ημερών μετά την πτώση. Η εξέλιξη του συντελεστή ασφαλείας παρουσιάζεται στο σχήμα 22. Σύμφωνα με αυτό, ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται σταδιακά με την πάροδο των ημερών. Ήδη από την πρώτη μέρα έχει μια τιμή  $F=1.24$  οριακά αποδεκτή ,και μετά το πέρας των 20 η τιμή είναι αρκετά μεγαλύτερη  $F=1.87$ .



Σχήμα 22.Η εξέλιξη του συντελεστή ασφαλείας για διάρκεια 20 ημερών μετά την πτώση της στάθμης του νερού.

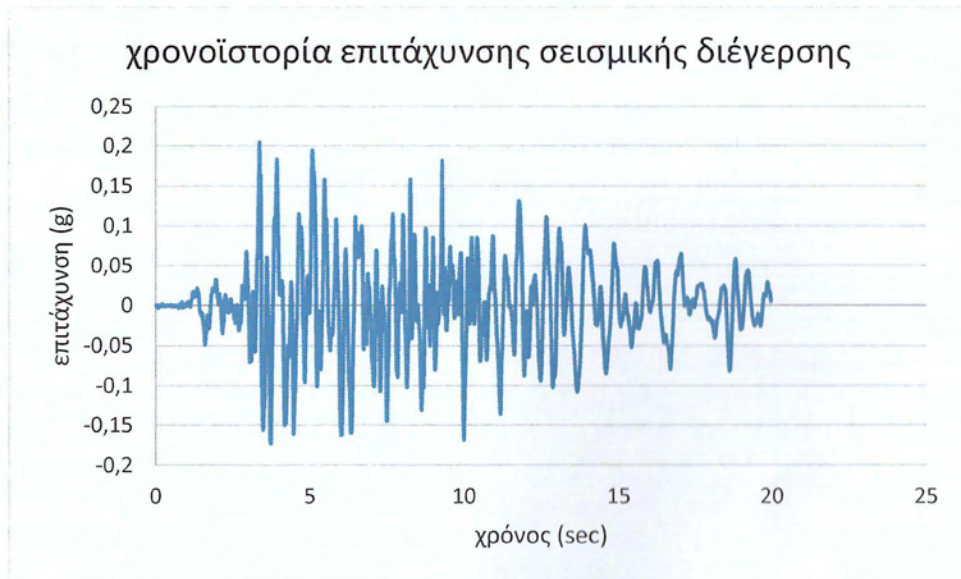
## 7.4 Σεισμική διέγερση

Γενικά είναι παραδεκτό ότι οι σεισμοί μπορούν να προκαλέσουν μικρές η μεγάλες ζημιές στα φράγματα με μικρές όμως πιθανότητες ολοκληρωτικής καταστροφής. Ένας σεισμός μπορεί να προκαλέσει ρηγματώσεις, καθιζήσεις, μετακινήσεις η και ρευστοποιήσεις στα υλικά ενός φράγματος. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις συνήθως δημιουργούνται στις επιφάνειες επαφής διαφορετικών υλικών, η σε απότομες αλλαγές στις διατομές. Το μέγεθος των μετακινήσεων που μπορεί να υπάρξουν πριν αυτές γίνουν επικίνδυνες εξαρτάται από τα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί και από την λεπτομέρεια της εσωτερικής διατομής του φράγματος.

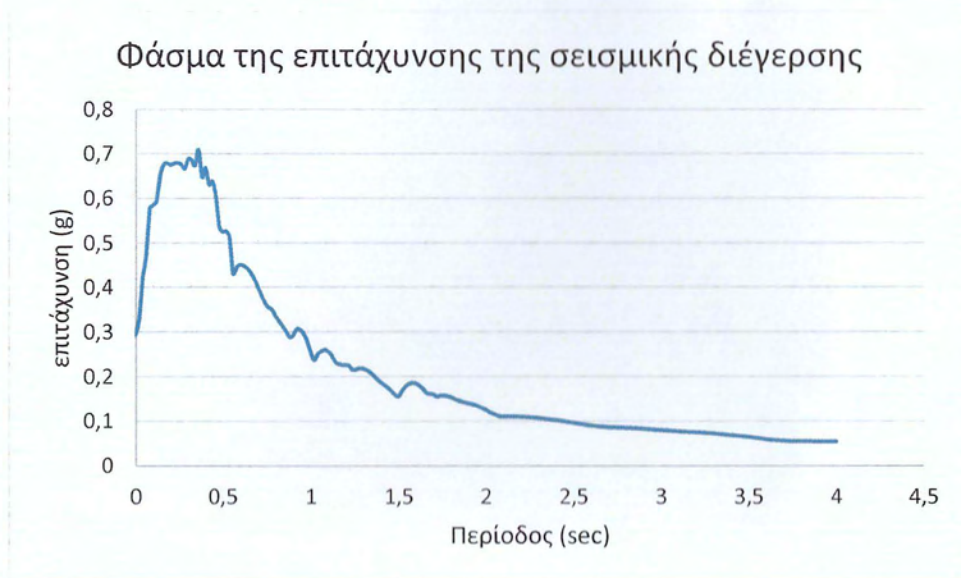
Οι αυξήσεις των πιέσεων των νερών των πόρων είναι άλλο ένα φαινόμενο που παρατηρείται σε ένα σεισμό. Τέτοιες αυξήσεις έχουν σαν αποτέλεσμα την μείωση των ενεργών τάσεων στα υλικά και την ταυτόχρονη μείωση του συντελεστή ασφάλειας. Η ρευστοποίηση είναι ίσως ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα που μπορεί να προκληθούν από ένα σεισμό. Ρευστοποίηση είναι η μεγάλη μείωση της αντοχής των υλικών κατά την διάρκεια σεισμικών δονήσεων. Αυτό προκαλείται κυρίως από αυξήσεις των πιέσεων του νερού των πόρων και ταυτόχρονη μείωση των αντοχών. Συνέπεια της ρευστοποίησης μπορεί να είναι μια αστοχία του ανάντη κυρίως πρανούς που μπορεί να οδηγήσει και σε πλήρη κατάρρευση του φράγματος.

### 7.4.1 Σεισμός σχεδιασμού

Η σεισμική ανάλυση έγινε με την επίδραση μόνο της οριζόντιας συνιστώσας της επιτάχυνσης που καταγράφηκε κατά τον σεισμό της Λευκάδας 2003. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν αποτελούνται από χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης, της μετατόπισης και της πίεσης πόρων σε διάφορα σημεία, , μετατοπίσεων και πίεσης πόρων για τις χρονικές στιγμές 10 και 30 sec. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης της σεισμικής διέγερσης καθώς και το φάσμα της επιτάχυνσης. Το φάσμα επιτάχυνσης αποτελεί πολύ σημαντικό εργαλείο για τη αντισεισμική μελέτη φραγμάτων καθώς περιγράφει απλά και επαρκώς τη μέγιστη απόκριση μιας κατασκευής, όταν δεχθεί έναν σεισμικό κραδασμό διαμέσου του εδάφους. Το διάγραμμα επιτάχυνσης περιγράφει πιο άμεσα το συγκεκριμένο σεισμό και παρουσιάζει (σχ.23) μέγιστη τιμή επιτάχυνσης 0,23g. (σχ.23)



Σχήμα 23. Επιτάχυνση της σεισμικής διέγερσης

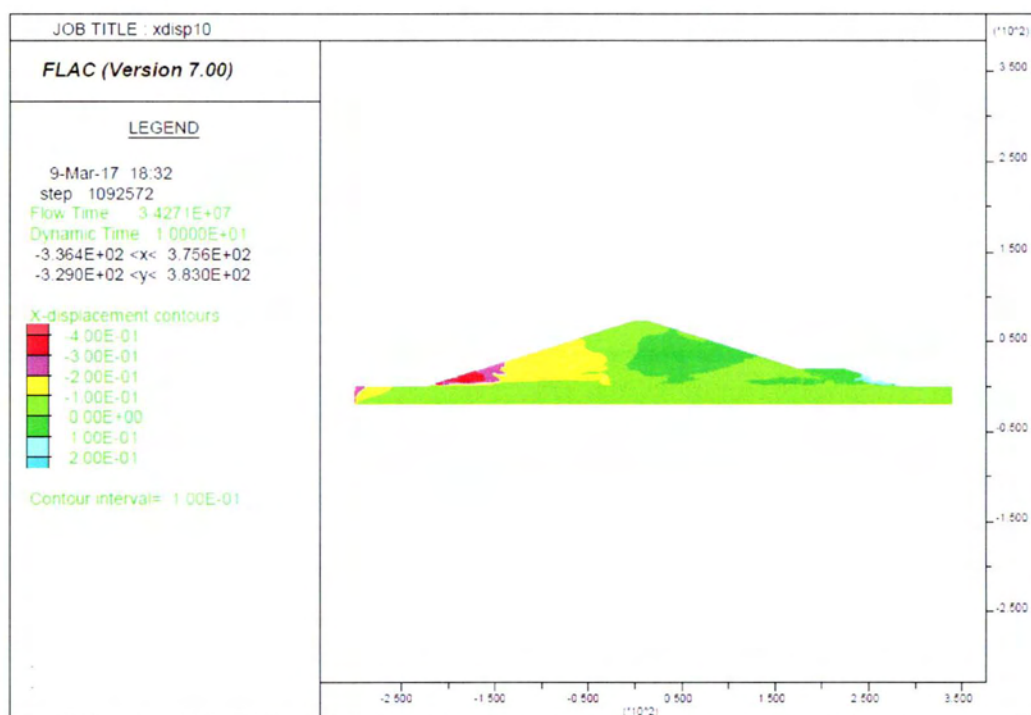


Σχήμα 24. Φάσμα επιτάχυνσης της σεισμικής διέγερσης για κρίσιμη απόσβεση  $\xi=3\%$

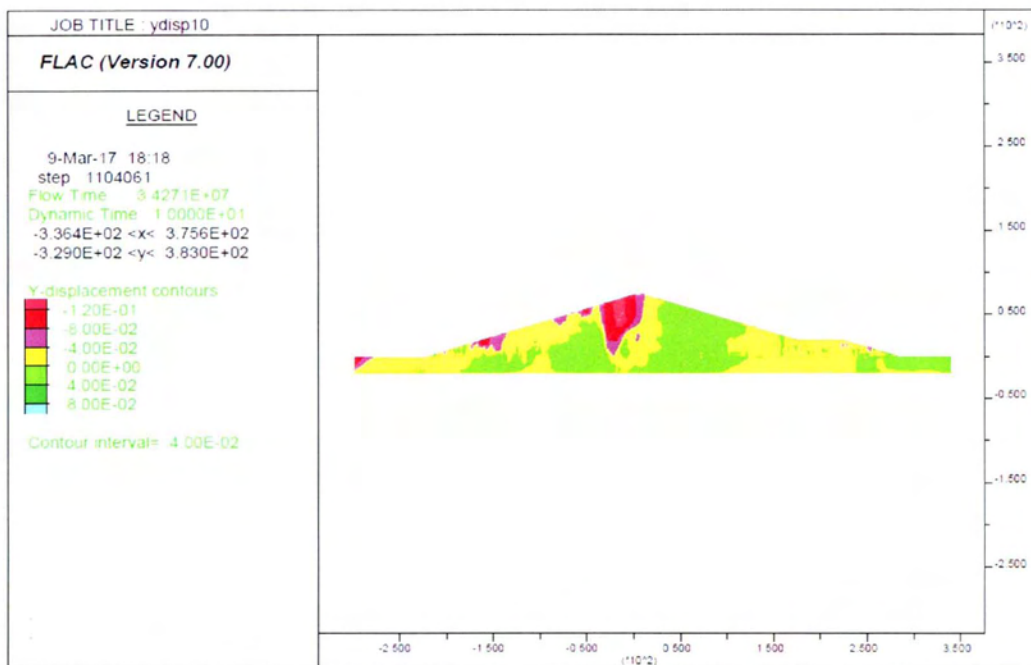
Από το σχήμα 23 προκύπτει πως η σεισμική διέγερση είχε διάρκεια 20 δευτερολέπτων αλλά μεγάλη ένταση παρουσιάζει στα πρώτα 10 δευτερόλεπτα. Υπό αυτές τις συνθήκες μελετήθηκε η συμπεριφορά του φράγματος υπό την επίδραση της σεισμικής διέγερσης μετά τη διάρκεια των 10 δευτερολέπτων καθώς και μετά τη διάρκεια 30 δευτερολέπτων για την εύρεση των τελικών μετατοπίσεων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πρώτα για διάρκεια σεισμικής διέγερση 10 δευτερολέπτων και στη συνέχεια για διάρκεια 30 δευτερολέπτων.

## 7.4.2 Σεισμική διέγερση διάρκειας 10 sec

### 7.4.2.1 Μετατοπίσεις



Σχήμα 25.Οριζόντιες μετατοπίσεις για διάρκεια σεισμού 10 sec

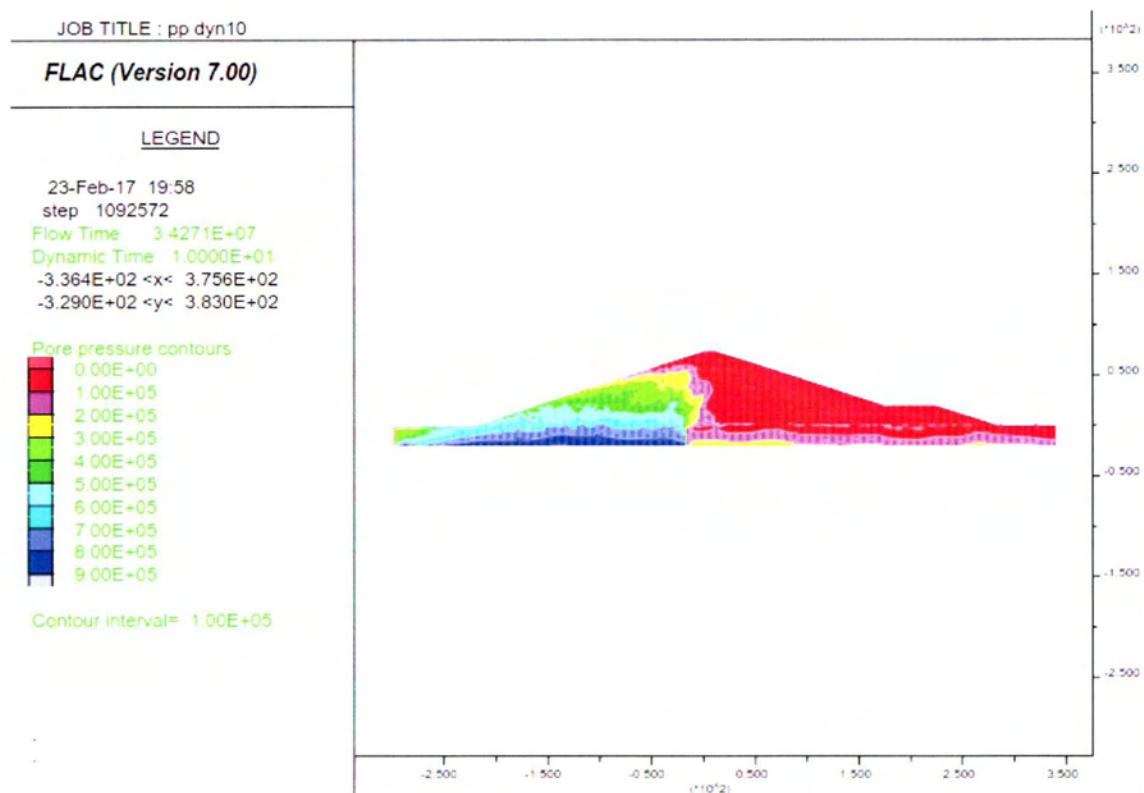


Σχήμα 26. Κατακόρυφες μετατοπίσεις για διάρκεια σεισμού 10 sec.

Όπως παρατηρείται στα σχήματα 25 και 26 οι μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις εμφανίζονται στην περιοχή του ανάντη κελύφους και παρουσιάζει μέγιστη μετατόπιση στο αριστερό άκρο του στην περιοχή έδρασης στη θεμελίωση και είναι της τάξης των 40 cm. Στο υπόλοιπο φράγμα όπως και στον πυρήνα οι οριζόντιες μετατοπίσεις είναι μικρότερες της τάξης των 10 cm.

Αντίστοιχα οι μέγιστες βυθίσεις που προκύπτουν από τη σεισμική διέγερση εμφανίζονται στον πυρήνα και συγκεκριμένα στην διεπιφάνεια με το ανάντη κέλυφος καθώς και στην υπόλοιπη επιφάνεια του κελύφους αυτού και είναι της τάξης των 12 cm. Παρόμοιας τάξης βύθιση εμφανίζει και η αριστερή άκρη της θεμελίωσης. Στο υπόλοιπο φράγμα δεν παρατηρούνται μεγάλες κατακόρυφες μετατοπίσεις, κυρίως της τάξης των 4 cm, Τέλος, εμφανίζεται μικρή ανύψωση κυρίως στο κατάντη κέλυφος και στο δεξιό άκρο της θεμελίωσης της τάξης των 4 cm.

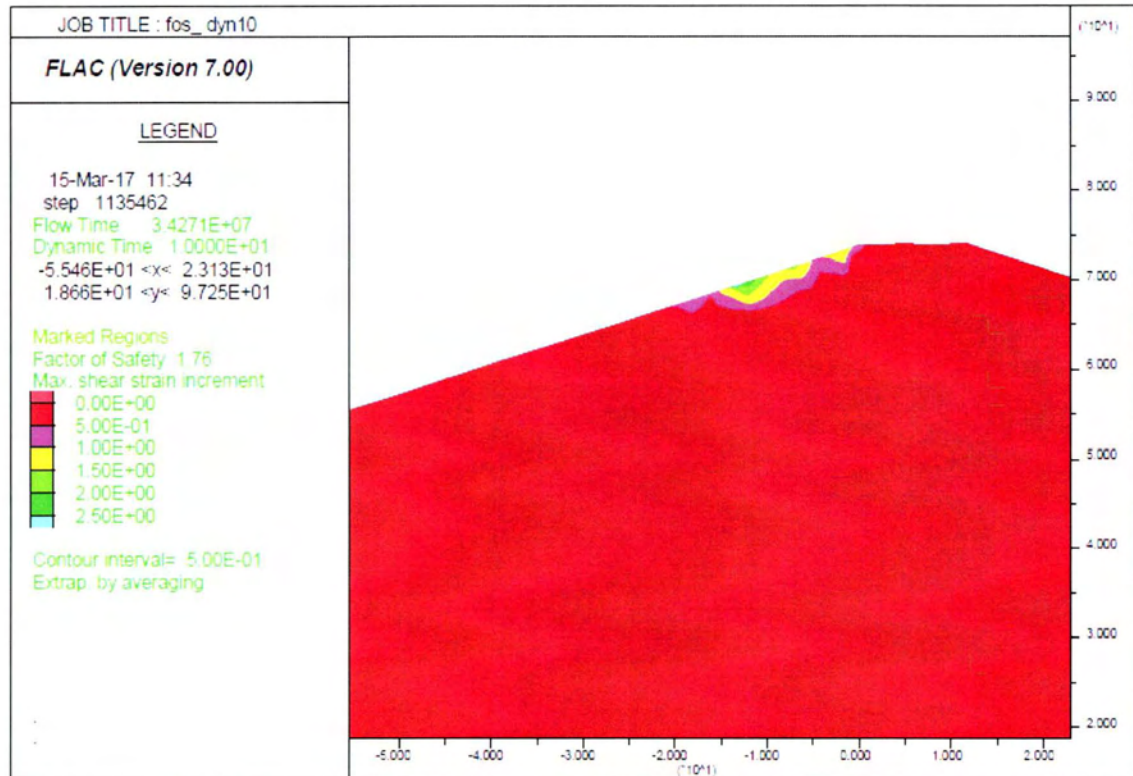
### 7.4.2.2 Πιέσεις πόρων



Σχήμα 27. Πιέσεις πόρων μετά τη σεισμική διέγερση διάρκειας 10 sec

Ένας σεισμός μπορεί να προκαλέσει αρκετά δυσμενείς επιπτώσεις στο φράγμα για αυτό το λόγο είναι σημαντική η μελέτη των πιέσεων πόρων όταν υποβληθεί σε μία σεισμική διέγερση κυρίως για τον υπολογισμό της ευστάθειας του. Στο υπό μελέτη φράγμα δεν παρατηρούνται μεγάλες ουσιαστικές αλλαγές στην κατανομή της πίεσης πόρων μετά το σεισμό διάρκειας 10 sec όπως φαίνεται στο σχήμα 27. Υπάρχουν σαφώς κάποιες μικρές μεταβολές στη διακύμανση αλλά οι τιμές δεν αλλάζουν ουσιαστικά σε σχέση με την προ σεισμού κατάσταση (βλέπε Σχήμα 10). Παρουσιάζεται όμως μία αύξηση στη μέγιστη τιμή της τάξεως των 100 kPa η οποία δικαιολογεί και την μείωση του συντελεστή ασφαλείας όπως φαίνεται στο σχήμα 28.

### 7.4.2.3 Συντελεστής ασφαλείας



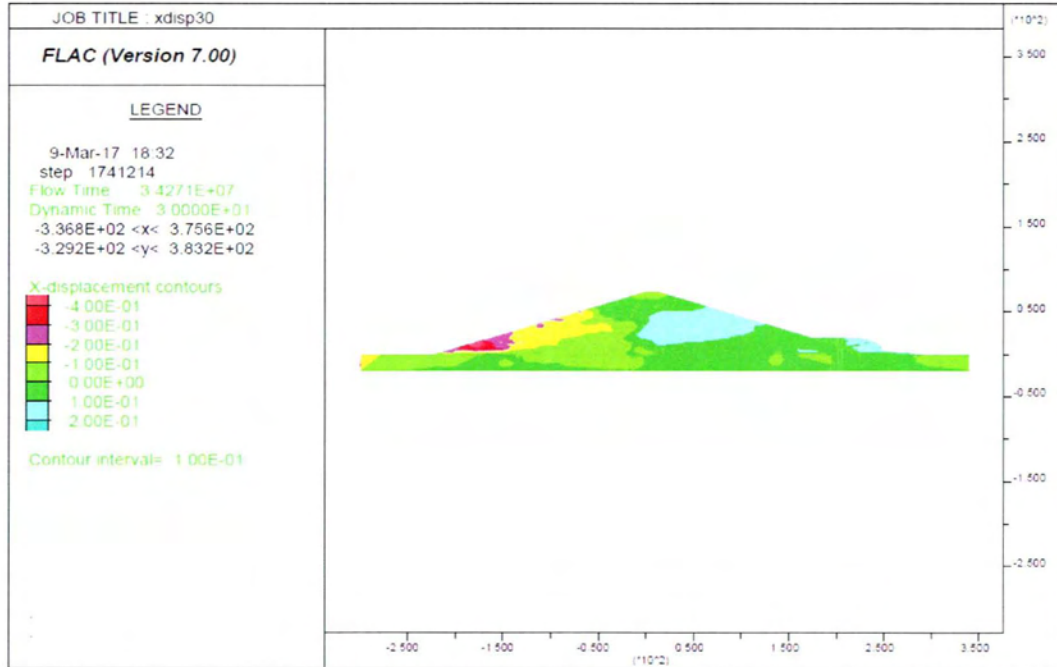
Σχήμα 28. Απεικόνιση ζώνης μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης και θεώρηση συντελεστή ασφαλείας  $F=1,76$  μετά τη σεισμική διέγερση διάρκειας 10 δευτερολέπτων

Η ευστάθεια του υπό μελέτη φράγματος είναι για άλλη μια φορά ικανοποιητική παρόλο που παρουσιάζει μια μικρή μείωση του συντελεστή ασφαλείας έναντι της κατάστασης λειτουργίας με γεμάτο ταμιευτήρα (βλέπε Σχήμα 12). Ο νέος συντελεστής ασφαλείας προκύπτει  $F=1,76$ . Αύτη ήταν μια αναμενόμενη μείωση διότι όπως βλέπουμε στο σχήμα 27 η πίεση πόρων των ζωνών του φράγματος μετά το σεισμό διάρκειας 10 sec αυξάνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειωθούν οι ενεργές τάσεις και κατά συνέπεια να μειωθεί και ο συντελεστής ασφαλείας.

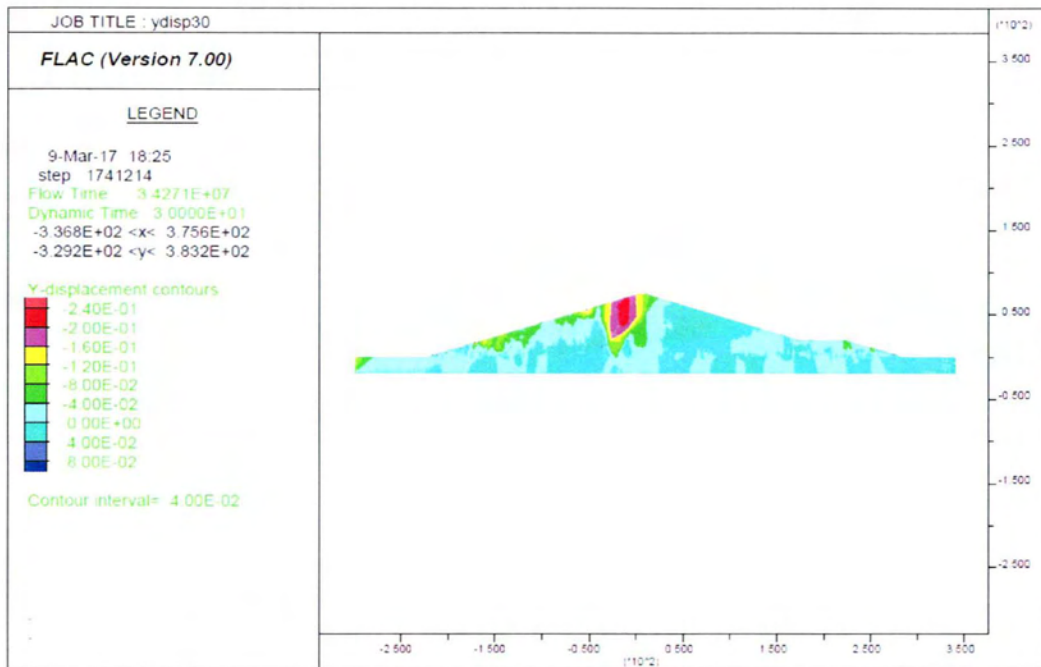
Γενικώς μετά τη μελέτη του φράγματος υπό σεισμική διέγερση διάρκειας 10 δευτερολέπτων προέκυψαν αναμενόμενα αποτελέσματα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης για διάρκεια σεισμού 30 sec.

### 7.4.3 Σεισμική διέγερση διάρκειας 30 sec

#### 7.4.3.1 Μετατοπίσεις



Σχήμα 29.Οριζόντιες μετατοπίσεις για διάρκεια σεισμού 30 sec



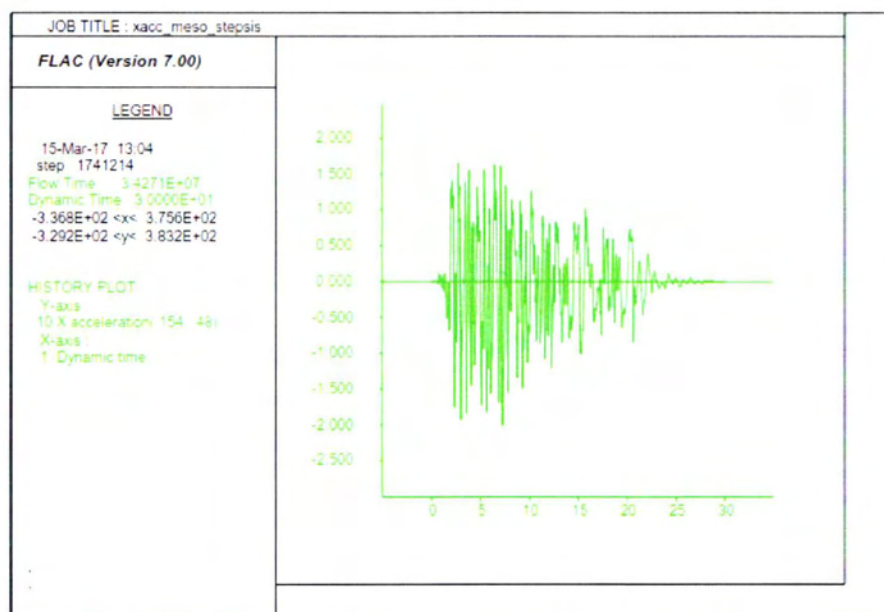
Σχήμα 30.Κατακόρυφες μετατοπίσεις για διάρκεια σεισμού 30 sec



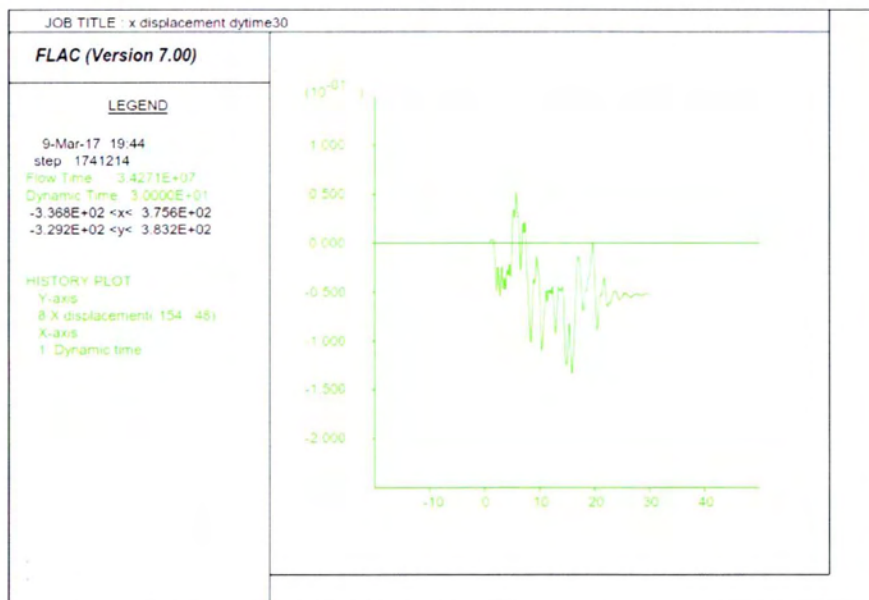
Τα σχήματα 29 και 30 παρουσιάζουν μία αναμενόμενη συμπεριφορά του φράγματος αναφορικά με τις μετατοπίσεις. Αρχικά στο σχήμα 29 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις του φράγματος οι οποίες δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες αλλαγές σε σχέση με τις οριζόντιες μετατοπίσεις για σεισμό διάρκειας 10 sec (βλέπε σχήμα 25). Οι μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις εμφανίζονται στην περιοχή του ανάντη κελύφους το οποίο παρουσιάζει μέγιστη μετατόπιση στο αριστερό άκρο του στην περιοχή έδρασης στη θεμελίωση και είναι της τάξης των 50 cm. Στο υπόλοιπο φράγμα όπως και στον πυρήνα οι οριζόντιες μετατοπίσεις είναι μικρότερες, συγκεκριμένα είναι της τάξης των 20 cm. Ένα μεγάλο μέρος του κατάντη κελύφους και του κατάντη αναβαθμού παρουσιάζουν οριζόντιες μετατοπίσεις προς τα δεξιά ενώ η ανάντη πλευρά του φράγματος παρουσιάζει οριζόντιες μετατοπίσεις προς τα αριστερά.

Ακόμα, όπως παρατηρείται στο σχήμα 30 οι βυθίσεις έχουν αυξηθεί σε σχέση με τις αντίστοιχες για το σεισμό διάρκειας 10 δευτερολέπτων (βλέπε σχήμα 26). Πάλι οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται στην περιοχή της διεπιφάνεια ανάμεσα στο ανάντη κέλυφος και τον πυρήνα και είναι της τάξης των 24 cm. Η επιφάνεια του ανάντη κελύφους παρουσιάζει βυθίσεις της τάξης των 12 cm. Τέλος εμφανίστηκαν πάλι περιοχές ανύψωσης κυρίως στη θεμελίωση και στο κατάντη κέλυφος της τάξης των 4 cm.

Για ακριβέστερη κατανόηση της συμπεριφοράς του φράγματος, υπολογίστηκαν οι μετατοπίσεις στο μέσο της στέψης καθώς και οι επιταχύνσεις του. Παρακάτω παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των μετατοπίσεων και των επιταχύνσεων.

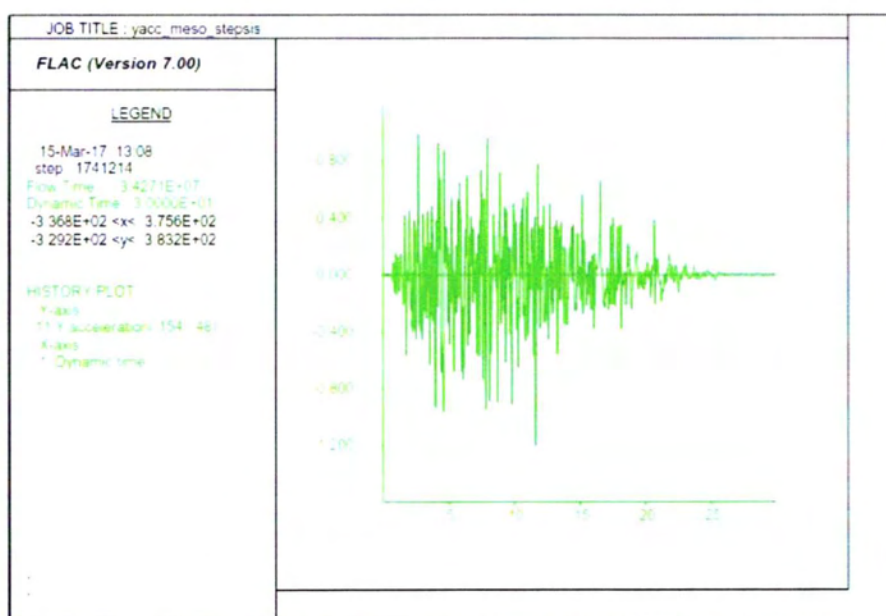


Σχήμα 31.Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης στο μέσο της στέψης για σεισμό διάρκειας 30 sec.

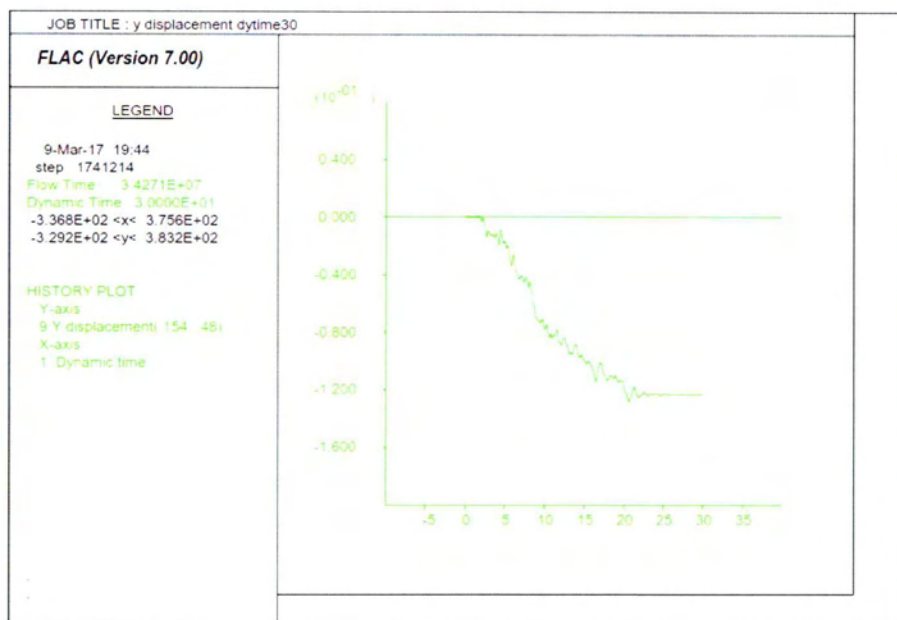


Σχήμα 32.Οριζόντιες μετακινήσεις στο μέσο της στέψης για σεισμό διάρκεια 30 sec.

Στο σχήμα 31 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της οριζόντιας επιτάχυνσης του μέσου της στέψης η οποία εμφανίζει μέγιστη τιμή  $2,01 \text{ m/s}^2$  κατά το όγδοο δευτερόλεπτο. Μετά τα 20sec παρατηρείται μεγάλη μείωση της επιτάχυνσης . Η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση είναι της τάξεως των 13 cm ενώ η τελική της τάξεως των 5 cm.Οι μετατοπίσεις αυτές έρχονται σε πλήρη ταύτιση με τις συνολικές οριζόντιες μετατοπίσεις του φράγματος(βλέπε σχήμα 29).



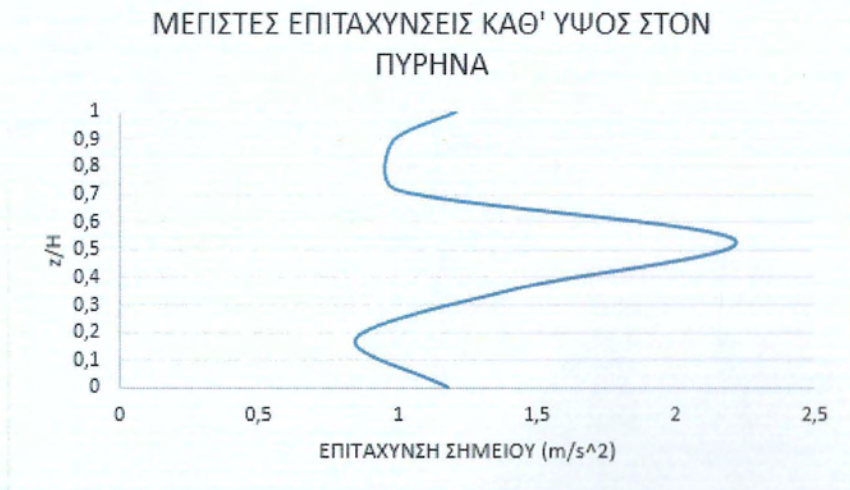
Σχήμα 33. Χρονοϊστορία κατακόρυφης επιτάχυνσης στο μέσο της στέψης για σεισμό διάρκειας 30 sec.



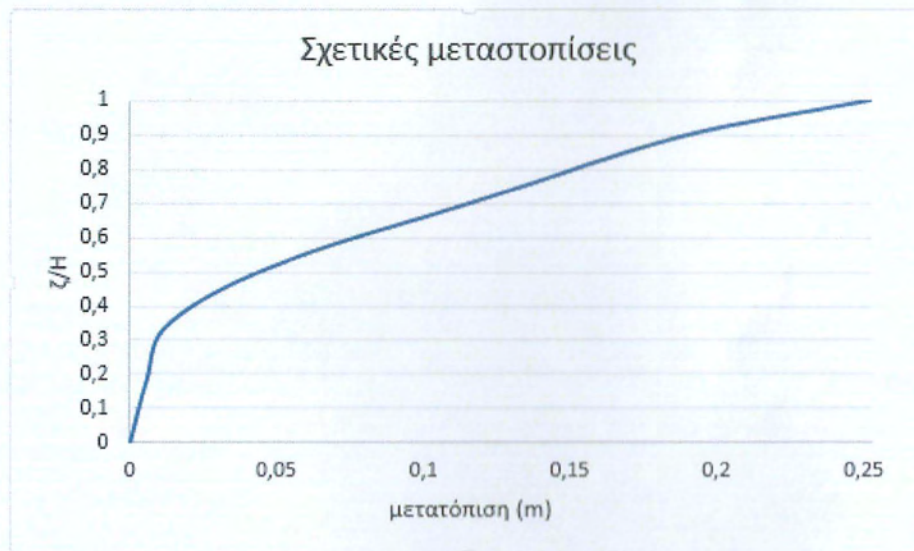
Σχήμα 34. Κατακόρυφες μετακινήσεις στο μέσο της στέψης για σεισμό διάρκεια 30 sec.

Η μέγιστη τιμή της κατακόρυφης επιτάχυνσης στο μέσο της στέψης, σύμφωνα με το σχήμα 33, είναι  $1,21\text{m/s}^2$  και εμφανίστηκε στο δωδέκατο δευτερόλεπτο. Η μέγιστη βύθιση του σημείο αυτού είναι 12cm κατά την διάρκεια του εικοστού πρώτου δευτερολέπτου και παραμένει της ίδιας τάξης μέχρι το τέλος της μελέτης. .Οι μετατοπίσεις αυτές έρχονται σε πλήρη ταύτιση με τις συνολικές κατακόρυφες μετατοπίσεις του φράγματος(βλέπε σχήμα 30).

Λόγω της εμφάνισης μέγιστων βυθίσεων στον πυρήνα, παρουσιάζονται παρακάτω τα διαγράμματα σχετικών μετακινήσεων και μέγιστων επιταχύνσεων, στο μέσο του πυρήνα συναρτήσει του ύψους .

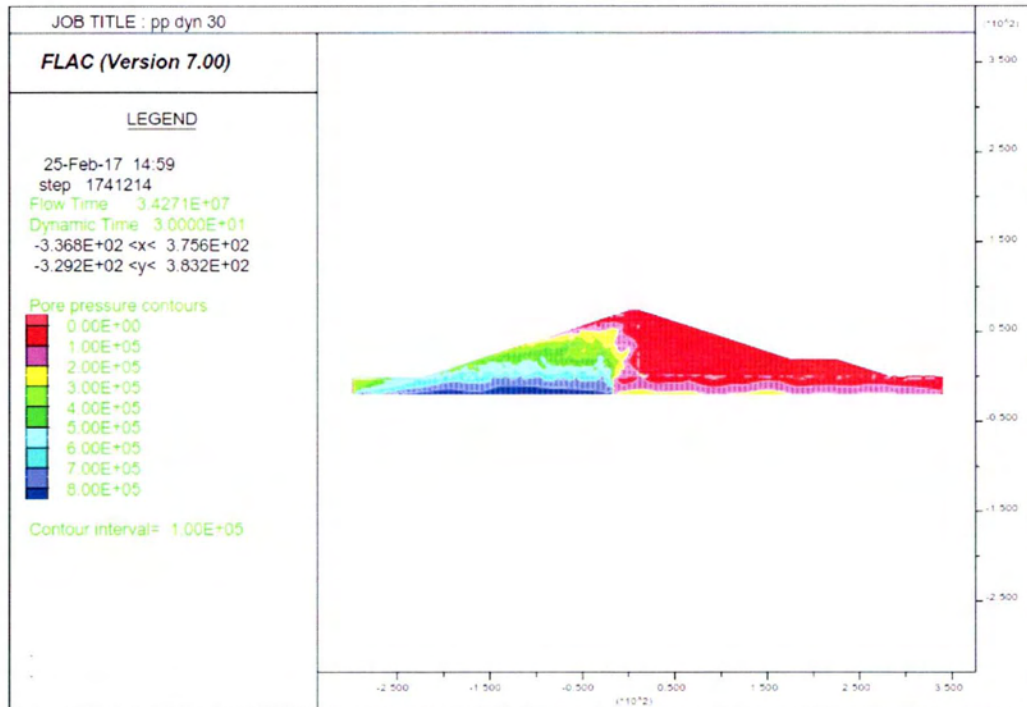


Σχήμα 35.Μέγιστες επιταχύνσεις σημείων του πυρήνα συναρτήσει του ύψους.



Σχήμα 36.Σχετικές μετατοπίσεις των σημείων του πυρήνα συναρτήσει του ύψους.

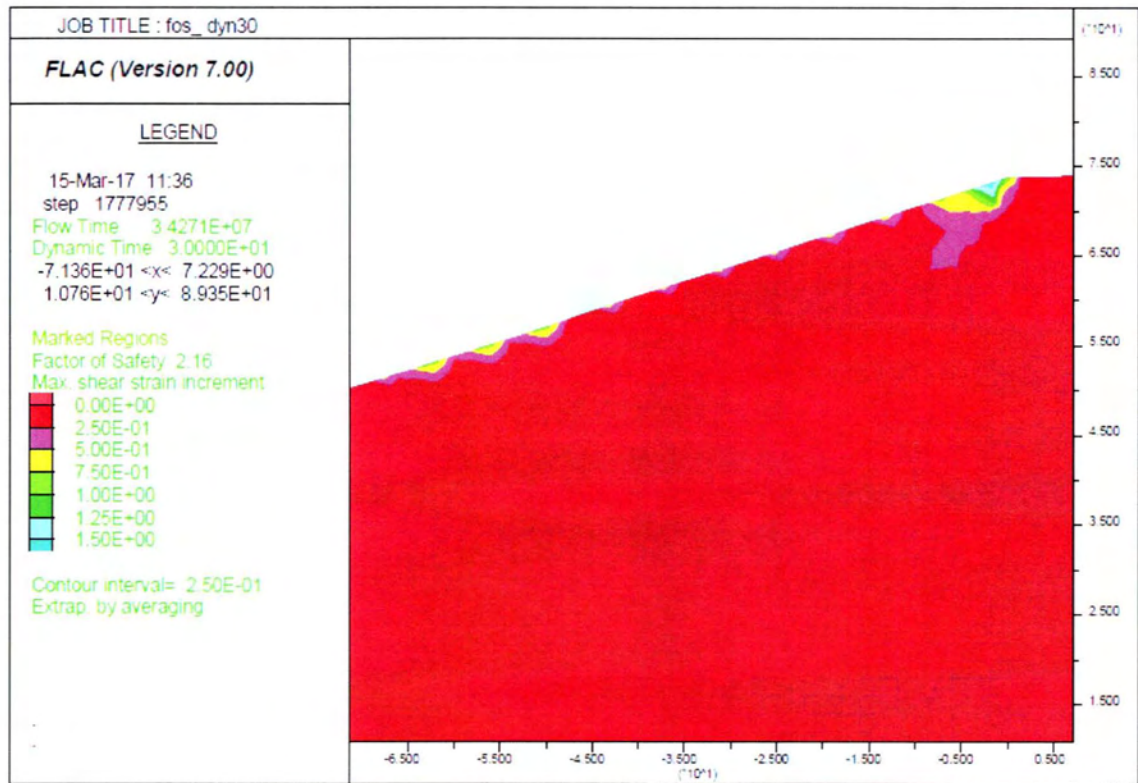
### 7.4.3.2 Πιέσεις πόρων



Σχήμα 37. Πιέσεις πόρων μετά τη σεισμική διέγερση διάρκειας 30 sec

Όπως φαίνεται στο σχήμα 37 οι πιέσεις πόρων μετά από σεισμό 30 δευτερολέπτων δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές με τις αντίστοιχες προ του σεισμού (βλέπε σχήμα 10). Όμως παρατηρείται μια μείωση των πιέσεων πόρων που δικαιολογούν το νέο συντελεστή ασφαλείας που φαίνεται.

### 7.4.3.3 Συντελεστής ασφαλείας



Σχήμα 38. Απεικόνιση ζώνης μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης και θεώρηση συντελεστή ασφαλείας  $F=2,16$  μετά τη σεισμική διέγερση διάρκειας 30 δευτερολέπτων.

Λόγω της μείωσης των πιέσεων των πόρων μετά το σεισμό διάρκειας 30 δευτερολέπτων αυξήθηκαν οι ενεργές τάσεις με αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή ασφαλείας. Στο σχήμα 38 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης η οποία οδηγεί σε συντελεστή ασφαλείας  $F=2,16$  ενώ οι ισοτιμές των διατμητικών παραμορφώσεων προσδιορίζουν την επιφάνεια αστοχίας που βρίσκεται πάλι στο ανάντη κέλυφος.

## Κεφάλαιο 8 Παρουσίαση αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα SLIDE.

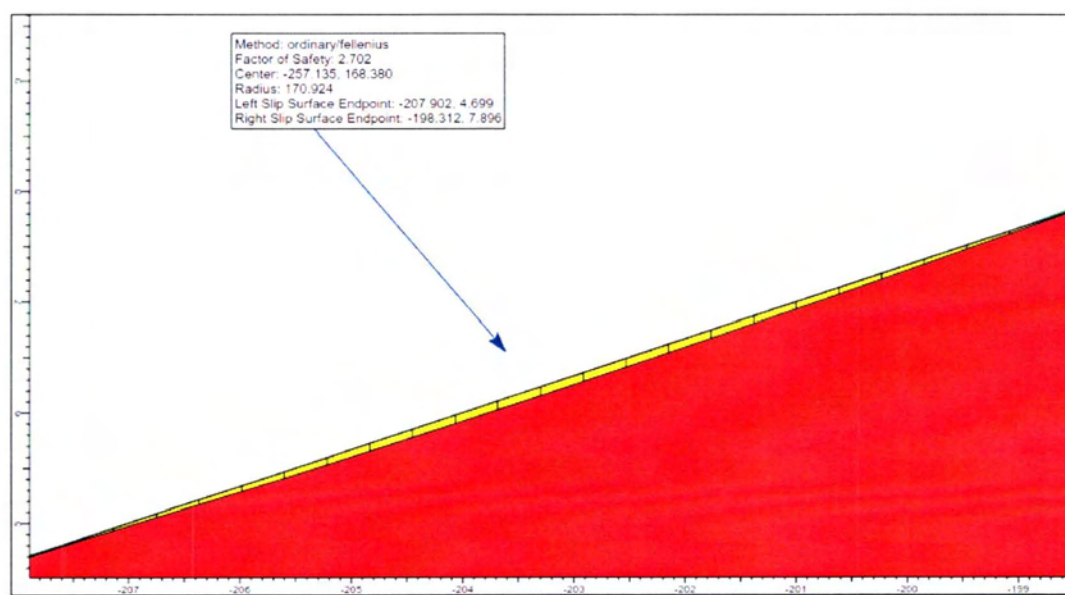
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις παρακάτω φάσεις κατασκευής:

- Πέρασ της κατασκευής
- Ολοκλήρωση του δικτύου ροής
- Απότομος καταβιβασμός στάθμης

Σε αυτά τα στάδια λειτουργίας υπολογίστηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Κατανομή πίεσης πόρων
- Συντελεστής ασφαλείας
- Μετακινήσεις

### 8.1 Πέρασ της κατασκευής



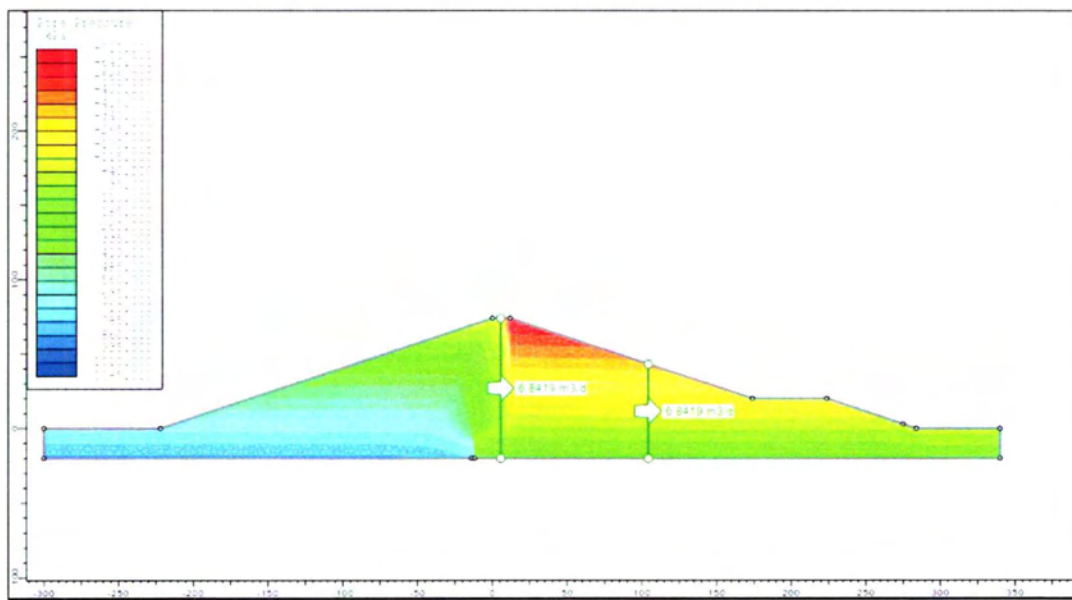
Σχήμα 39. Απεικόνιση επιφάνειας ολίσθησης και θεώρηση συντελεστή ασφαλείας  $F=2.702$  μετά το πέρασ της κατασκευής.

Στο σχήμα 39 δίνεται ο συντελεστής ασφαλείας μετά την κατασκευή του φράγματος  $F=2,702$ . Από τον πίνακα 1 με τις ελάχιστα αποδεκτές τιμές του συντελεστή ασφαλείας προκύπτει πως το φράγμα σε αυτό το στάδιο έχει επαρκή ευστάθεια. Επίσης απεικονίζεται η επιφάνεια ολίσθησης η οποία εμφανίζεται στην επιφάνεια του ανάντη πρανούς.

## 8.2 Ολοκλήρωση του δικτύου ροής

### 8.2.1 Πίεση πόρων

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 7 ,συνθήκες ροής διήθησης στο ανάχωμα του φράγματος και δίκτυο ροής αρχίζουν να αναπτύσσονται μετά την ανύψωση της στάθμης του ταμιευτήρα. Η ταχύτητα ανάπτυξης του δικτύου σταθερής ροής εξαρτάται από τη διαπερατότητα του υλικού. Η ανάπτυξη πλήρους δικτύου ροής στον πυρήνα, λόγω της χαμηλής του διαπερατότητας, μπορεί να επιτευχθεί σε μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα. Μετά την ανάπτυξη σταθερής ροής μέσα στο ανάχωμα του φράγματος (δίκτυο ροής), οι πιέσεις πόρων εξαρτώνται αποκλειστικά από το δίκτυο ροής.



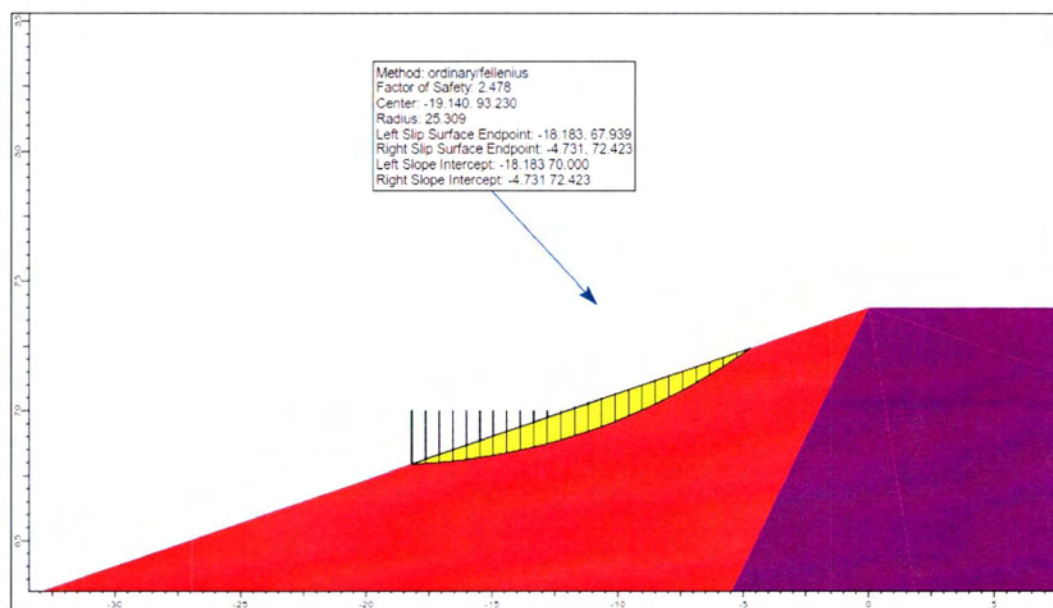
Σχήμα 40.Πιέσεις πόρων υπό συνθήκες ροής σταθερής κατάστασης.



Στο σχήμα 40 παρουσιάζεται η κατανομή της πίεση πόρων μετά την ολοκλήρωση της ροής. Στο ανάντη κέλυφος οι θετικές τιμές ξεκινούν από το υψόμετρο 70m και αυξάνονται συναρτήσει του βάθους ,φτάνοντας σε τιμή πίεσης της τάξης των 700 kPa. Δεξιά του πυρήνα η πίεση μειώνεται σε μεγάλο βαθμό φτάνοντας σε κάποια σημεία και σε αρνητικές τιμές. Η μέγιστη τιμή της πίεσης πόρων είναι της τάξεως των 800kPa και εμφανίζεται στη βάση του φράγματος αριστερά της τσιμεντένεσης.

Η παροχή υπολογίστηκε μέσω υποπρογράμματος FISH ελέγχοντας τις περιοχές εισροής και εκροής νερού. Η παροχή που υπολογίστηκε είναι  $Q=12 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ .

### 8.2.2 Συντελεστής ασφαλείας



Σχήμα 41. .Απεικόνιση επιφάνειας ολίσθησης και θεώρηση συντελεστή ασφαλείας  $F=2.478$  μετά την ολοκλήρωση του δικτύου ροής.

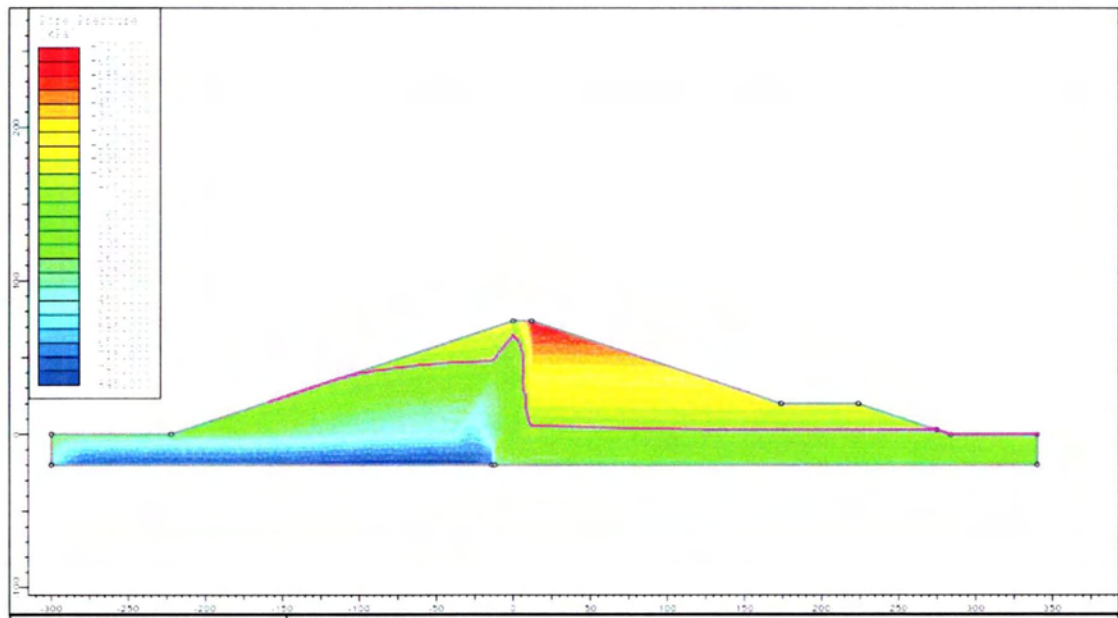
Στο σχήμα 41 δίνεται ο συντελεστής ασφαλείας μετά την ολοκλήρωση του δικτύου ροής  $F=2,478$ . Από τον πίνακα 1 με τις ελάχιστα αποδεκτές τιμές του συντελεστή ασφαλείας προκύπτει πως το φράγμα σε αυτό το στάδιο έχει επαρκή ευστάθεια. Επίσης απεικονίζεται η επιφάνεια ολίσθησης η οποία εμφανίζεται στην επιφάνεια του ανάντη

πρανούς. Παρατηρείται μια αναμενόμενη μείωση στην τιμή του συντελεστή σε σχέση με το στάδιο της κατασκευής(βλέπε Σχήμα 39).

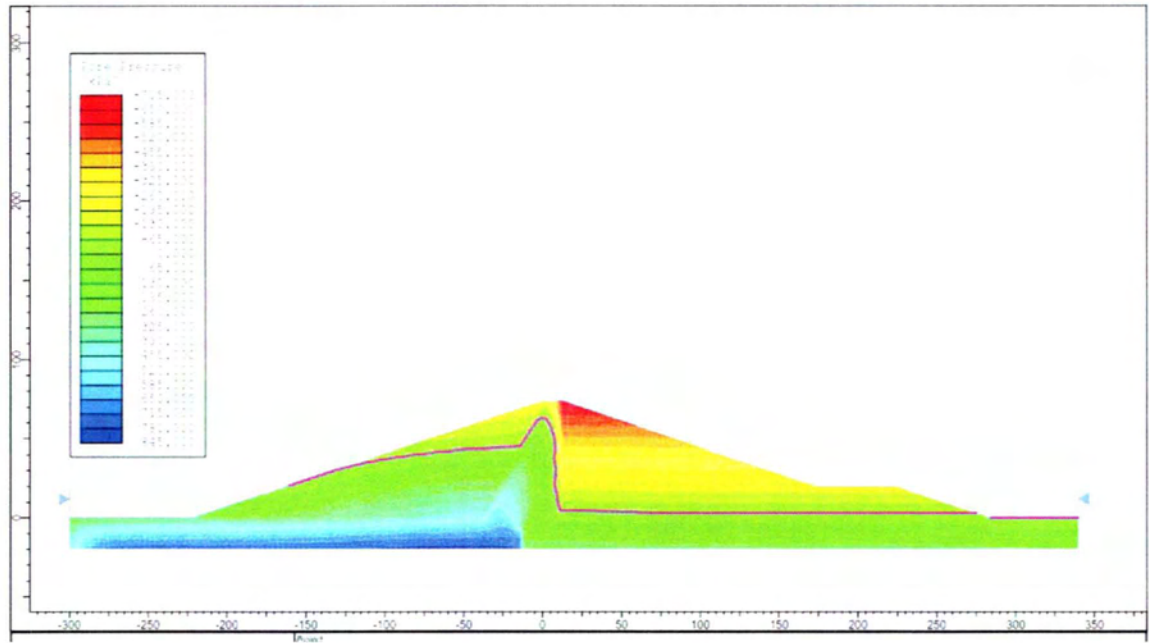
### 8.3 Απότομος καταβιβασμός στάθμης

Η συνθήκη απότομου καταβιβασμού στάθμης αναφέρεται στην κατάσταση κατά την οποία η στάθμη του ταμιευτήρα καταβιβάζεται απότομα από τη μέγιστη στην ελάχιστη ή σε κάποια ενδιάμεση, λόγω συνήθους λειτουργίας του έργου σε φράγματα αποθήκευσης ενέργειας ή λόγω λειτουργίας του εκκενωτή πυθμένα. Συνήθως η πτώση της στάθμης του ταμιευτήρα είναι αργή. Στη συγκεκριμένη μελέτη η ταχύτητα της πτώσης ήταν 10 m/ ημέρα. Συγκεκριμένα η στάθμη του ταμιευτήρα μειώθηκε από τα 70 m στα 20 m σε διάρκεια 5 ημερών. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιέσεις πόρων και ο συντελεστής ασφαλείας μετά τον απότομο καταβιβασμό καθώς και η εξέλιξη των μεγεθών αυτών για 20 μέρες μετά.

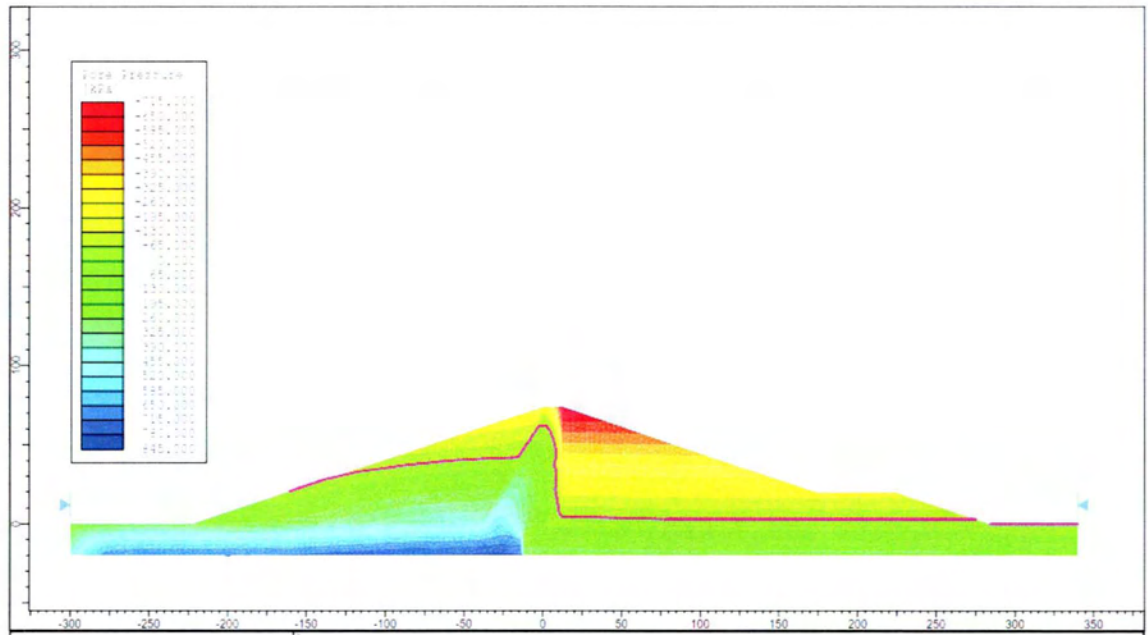
#### 8.3.1 Εξέλιξη πιέσεων πόρων



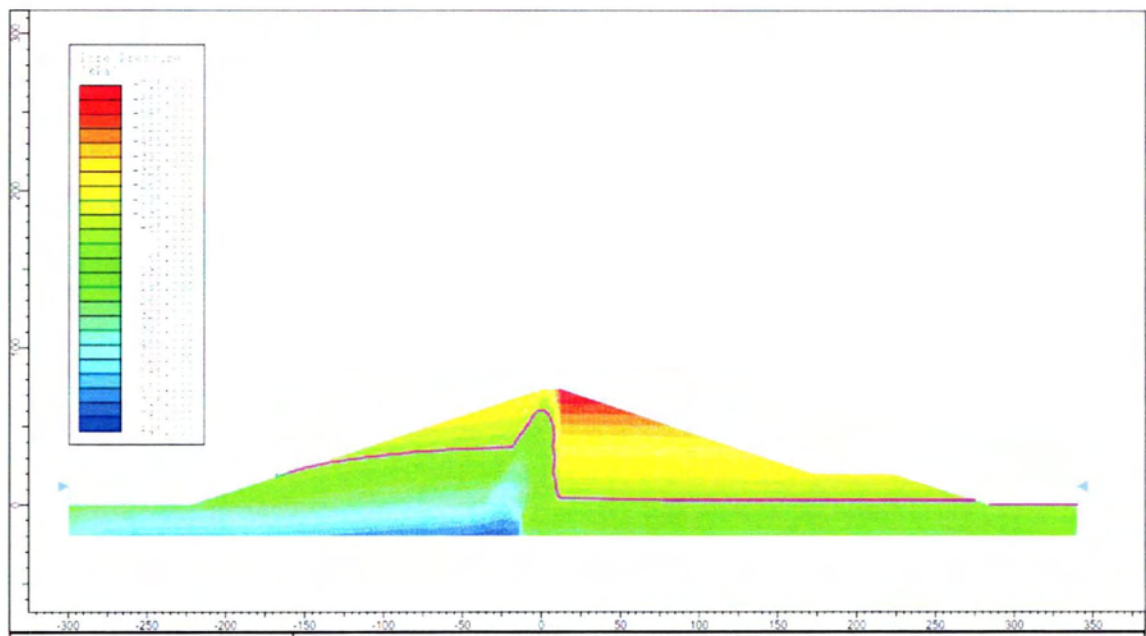
Σχήμα 42. Πιέσεις πόρων μετά τον καταβιβασμό της στάθμης του νερού από τα 70 στα 20 μέτρα.



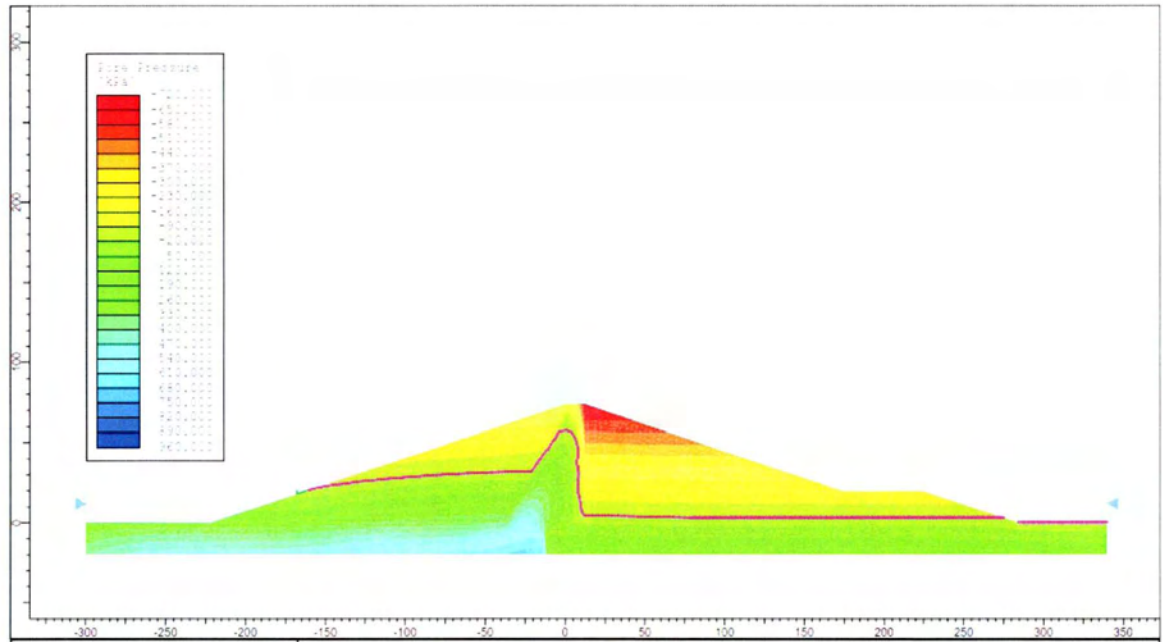
Σχήμα 43. Πίεσεις πόρων 1 μέρα μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού



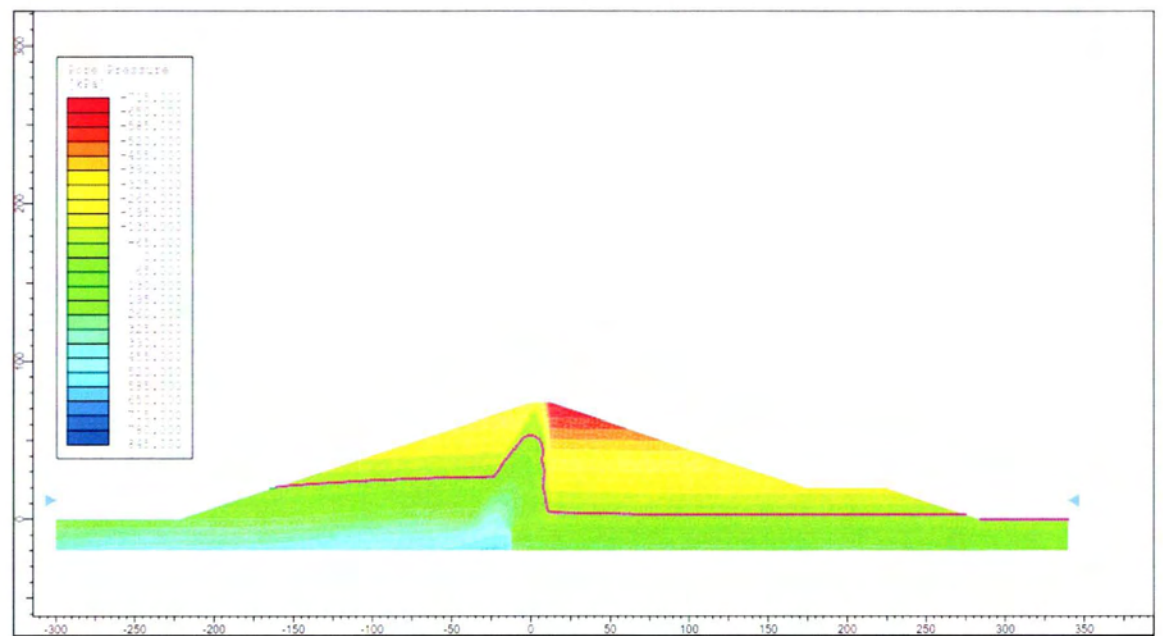
Σχήμα 44. Πιέσεις πόρων 2 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού



Σχήμα 45. Πιέσεις πόρων 5 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού



Σχήμα 46. Πιέσεις πόρων 10 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού



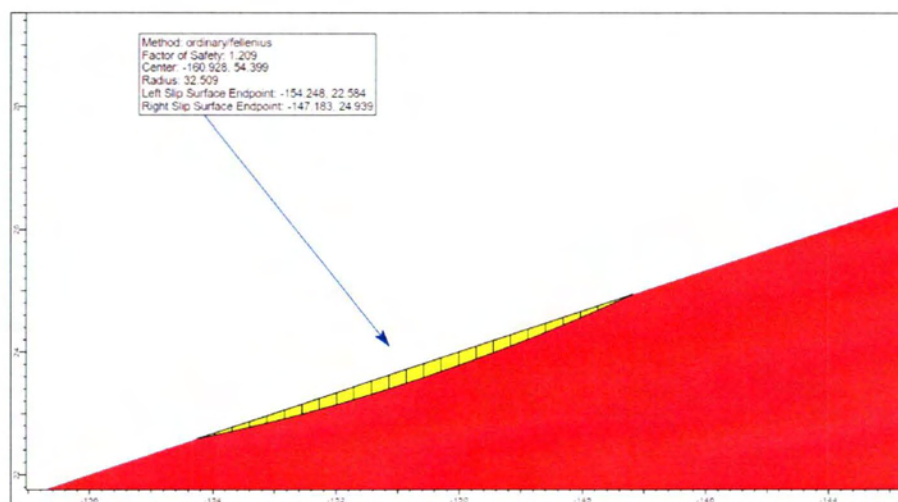
Σχήμα 47. Πιέσεις πόρων 20 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του νερού.

Στο σχήμα 42 παρουσιάζεται η κατανομή της πίεσης πόρων μετά τον καταβιβασμό της στάθμης του ταμιευτήρα από τα 70 m στα 20 m . Παρατηρείται μια μικρή μείωση των τιμών στο ανάντη κέλυφος σε σχέση με την κατάσταση σταθερής ροής. Η μέγιστη τιμή

εμφανίζεται πάλι στη βάση του φράγματος αριστερά της τσιμεντένεσης και είναι 800 kPa όπως και στην κατάσταση σταθερής ροής (βλέπε Σχήμα 40).

Τις επόμενες 20 μέρες, όπως φαίνεται στα σχήματα 43-47, οι τιμές της πίεσης των πόρων συνεχίζουν να μειώνονται σταδιακά και να αποκτούν μια πιο ομαλή συμπεριφορά. Η τελική μέγιστη τιμή της πίεσης είναι της τάξεως των 400 kPa και στο ανάντη κέλυφος σε υψόμετρο άνω των 20 m οι τιμές της πίεσης είναι μηδενικές.

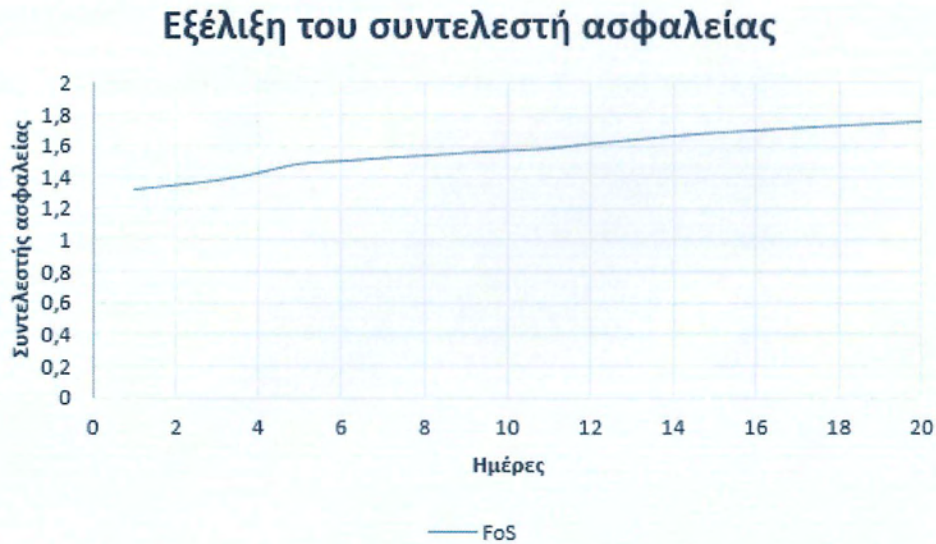
### 8.3.2 Συντελεστής ασφαλείας



Σχήμα 48. Απεικόνιση επιφάνειας ολίσθησης και θεώρηση συντελεστή ασφαλείας  $F=1,209$  μετά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του ταμιευτήρα

Στο σχήμα 48 δίνεται ο συντελεστής ασφαλείας μετά την κατασκευή του φράγματος  $F=1,209$ . Από τον πίνακα 1 με τις ελάχιστες αποδεκτές τιμές του συντελεστή ασφαλείας προκύπτει πως ο συντελεστής αυτός είναι οριακά αποδεκτός. Επίσης απεικονίζεται η επιφάνεια ολίσθησης η οποία εμφανίζεται στην επιφάνεια του ανάντη πρανούς.

Στο ίδιο στάδιο υπολογίστηκαν οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας για διάστημα 20 ημερών μετά την πτώση. Η εξέλιξη του συντελεστή ασφαλείας παρουσιάζεται στο σχήμα 49. Σύμφωνα με αυτό, ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται σταδιακά με την πάροδο των ημερών. Την πρώτη μέρα έχει μια τιμή  $F=1.318$  οριακά αποδεκτή, και μετά το πέρας των 20 η τιμή είναι αρκετά μεγαλύτερη  $F=1.758$ .



Σχήμα 49. Η εξέλιξη του συντελεστή ασφαλείας για διάρκεια 20 ημερών μετά την πτώση της στάθμης του νερού.

## Κεφάλαιο 9 Συμπεράσματα

### 9.1 Σύγκριση των αποτελεσμάτων FLAC και SLIDE

Με τις αναλύσεις που προηγήθηκαν παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των 2 προγραμμάτων παρουσιάζουν διαφορές σε κάποια στάδια ενώ σε άλλα συγκλίνουν. Τα μεγέθη για τα οποία γίνεται η σύγκριση είναι οι πιέσεις πόρων και οι συντελεστές ασφαλείας. Συγκεκριμένα:

- Οι πιέσεις πόρων γενικώς παρουσιάζουν όμοια μεταβολή τόσο στην κατάσταση σταθερής ροής όσο και στον απότομο καταβιβασμό της στάθμης του ταμιευτήρα. Στην κατάσταση σταθερής ροής οι μέγιστες τιμές της πίεσης των πόρων είναι ίδιες και ίσες με 800 kPa και στα 2 προγράμματα. Ωστόσο, στο στάδιο του απότομου καταβιβασμού οι τιμές της πίεσης πόρων παρουσιάζουν διαφορές για τις 10 πρώτες μέρες ενώ μετά συγκλίνουν αρκετά φτάνοντας τελικά στην τιμή 400 kPa. Συγκεκριμένα στο FLAC η μέγιστη τιμή της πίεσης των πόρων από την πρώτη μέρα μειώνεται στα 500 kPa ενώ στο SLIDE η τιμή αυτή εμφανίζεται 9 μέρες μετά.
- Αναφορικά με την μελέτη της ευστάθειας του φράγματος τα αποτελέσματα των 2 προγραμμάτων παρουσιάζουν κάποιες σημαντικές διαφορές κυρίως στις τιμές των συντελεστών ασφαλείας αλλά και στις επιφάνειες αστοχίας. Μετά το πέρας της κατασκευής ο συντελεστής ασφαλείας στο SLIDE είναι  $F= 2,702$  ενώ στο FLAC είναι  $F=2,32$ . Η επιφάνεια αστοχίας στο FLAC εμφανίζεται στην επιφάνεια του ανάντη κελύφους κοντά στη στέψη ενώ στο SLIDE σε χαμηλότερο υψόμετρο. Στο στάδιο μετά την ολοκλήρωση της ροής οι συντελεστές ασφαλείας παρουσιάζουν πάλι μεγάλη απόκλιση. Συγκεκριμένα στο FLAC η τιμή του συντελεστή είναι  $F=1,88$  ενώ στο SLIDE είναι  $F=2,478$ . Όμως οι επιφάνειες αστοχίας εμφανίζονται και στα 2 προγράμματα στην επιφάνεια του ανάντη κελύφους στο υψόμετρο της στάθμης του νερού. Την μεγαλύτερη σύγκλιση την παρουσιάζουν στα αποτελέσματα του σταδίου του απότομου καταβιβασμού. Συγκεκριμένα ο συντελεστής ασφαλείας στο FLAC είναι  $F=1,19$  ενώ στο SLIDE  $F=1.209$  και οι επιφάνειες αστοχίας δημιουργούνται σε υψόμετρο 20 m δηλαδή στη καινούργια στάθμη του νερού μετά τον απότομο καταβιβασμό. Όμοια είναι και η εξέλιξη του συντελεστή ασφαλείας για 20 μέρες μετά τον απότομο καταβιβασμό όπου και στα 2 προγράμματα παρουσιάζει συνεχή αύξηση έως ότου αποκτήσει τιμή  $F=1,758$  στο SLIDE και  $F=1,87$  στο FLAC.



## 9.2 Γενικά συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την προσομοίωση της συμπεριφοράς χωμάτινου φράγματος υπό κρίσιμες συνθήκες ροής και σεισμική φόρτιση. Στόχος είναι η ανάλυση του υπό μελέτη φράγματος με τα προγράμματα FLAC 7.0 και SLIDE που χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους επίλυσης και να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Το υπό μελέτη φράγμα έχει πλάτος 506 m και ύψος 74 m. Εδράζεται πάνω σε αργιλική βάση πλάτους 640 m και ύψους 20 m στη μέση της οποίας τοποθετήθηκε διάφραγμα τιμμεντενέσεων. Αποτελείται από 5 επιμέρους ζώνες οι οποίες είναι : ο αργιλικός πυρήνας, 2 κελύφη δεξιά και αριστερά του πυρήνα, φίλτρο και επίχωμα στην ανάντη πλευρά του. Το πλάτος της στέψης είναι 12 m.

Η προσομοίωση της κατασκευής και της λειτουργίας του φράγματος καθώς και οι αναλύσεις της συμπεριφοράς του έγιναν στα προγράμματα FLAC 7.0 και SLIDE. Το SLIDE έχει ενσωματωμένο σύστημα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για σταθερές και παροδικές συνθήκες ροής. Για τον έλεγχο της ευστάθειας κάνει χρήση συμβατικών μεθοδολογιών και συγκεκριμένα της μεθοδολογίας των λωρίδων. Το FLAC αντίθετα είναι ένα δισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών ιδανικό για αριθμητική προσομοίωση προβλημάτων γεωτεχνικής μηχανικής. Για τον έλεγχο ευστάθειας κάνει χρήση αριθμητικών μεθόδων. Για αυτό το λόγο παρουσιάζει ενδιαφέρον η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Σαν βασικούς άξονες έχουν τον υπολογισμό πιέσεων πόρων, συντελεστών ασφαλείας και καθιζήσεων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με τα δύο προγράμματα παρουσιάζουν κάποιες σημαντικές διαφορές αλλά υπάρχουν και υπάρχουν και τιμές που συγκλίνουν αρκετά.

Από την προσομοίωση της συμπεριφοράς του φράγματος προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Μετά το πέρας της κατασκευής οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις παρατηρούνται στον πυρήνα και είναι της τάξης των 70 εκ. λόγω άμεσων καθιζήσεων και καθιζήσεων στερεοποίησης.
- Στο ίδιο στάδιο ο συντελεστής ασφαλείας στο FLAC είναι  $F=2.32$  ενώ στο SLIDE είναι  $F=2.701$ . Και οι 2 είναι αποδεκτοί από τον κανονισμό αν και παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση. Επίσης οι επιφάνειες αστοχίας σε αυτό το στάδιο δημιουργούνται σε διαφορετικά υψόμετρα του ανάντη κελύφους.
- Στο στάδιο της λειτουργίας ο συντελεστής μειώνεται στο FLAC στο  $F=1.88$  ενώ στο SLIDE στο  $F=2.478$ . Και οι 2 είναι αποδεκτοί από τον κανονισμό αλλά παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση. Στο στάδιο αυτό οι επιφάνειες αστοχίας δημιουργούνται στο ίδιο μέρος του ανάντη κελύφους

- Παράλληλα δημιουργείται δίκτυο ροής και οι πιέσεις πόρων αυξάνονται με το βάθος φτάνοντας σε μέγιστη τιμή 800 KPa.
- Οι καθιζήσεις σε αυτό το στάδιο παρουσιάζουν αμελητέες διαφορές σε σχέση με τις αντίστοιχες με άδειο ταμιευτήρα.
- Στο στάδιο του απότομου καταβιβασμού της στάθμης του νερού παρατηρείται μείωση των συντελεστών ασφαλείας. Συγκεκριμένα στο FLAC ο συντελεστής είναι  $F=1.19$  μικρότερος του ορίου ενώ στο SLIDE είναι  $F=1.209$ , οριακά πάνω από το όριο.
- Στη διάρκεια 20 ημερών μετά την πτώση της στάθμης του νερού τα αποτελέσματα των 2 προγραμμάτων παρουσιάζουν ίδια αναμενόμενη συμπεριφορά όπου οι πιέσεις πόρων μειώνονται σταδιακά με τελική μέγιστη τιμή 400 KPa. Αντιστοίχως ο συντελεστής ασφαλείας παρουσιάζει μία σταδιακή αύξηση έως ότου φτάσει στην τιμή  $F=1,87$  στο FLAC και  $F=1,758$  στο SLIDE.
- Κατά τη διάρκεια 10 δευτερολέπτων υπό σεισμική διέγερση παρατηρείται ελάχιστη αύξηση των πιέσεων των πόρων με αναμενόμενη μείωση του συντελεστή ασφαλείας στο 1.74.
- Στο ίδιο στάδιο οι μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις εμφανίζονται στο αριστερό άκρο του κελύφους 1 και είναι της τάξεως των 40εκ. Ενώ οι μέγιστες κατακόρυφες μετατοπίσεις εμφανίζονται στον πυρήνα και είναι της τάξης των 12 εκ.
- Κατά τη διάρκεια 30 δευτερολέπτων υπό σεισμική διέγερση παρατηρείται μείωση της πίεσης των πόρων με ανάλογη αύξηση του συντελεστή ασφαλείας στο  $F=2.16$ .
- Στο ίδιο στάδιο οι μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις εμφανίζονται στο αριστερό άκρο του κελύφους 1 και είναι της τάξεως των 40εκ. Ενώ οι μέγιστες κατακόρυφες μετατοπίσεις εμφανίζονται στον πυρήνα και είναι της τάξης των 24 εκ.

## Αναφορές-Βιβλιογραφία

- [1] Ν. Ι. Μουτάφης. (2009) “ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΓΕΩΦΡΑΓΜΑΤΩΝ”
- [2] ITASCA Consulting Group (2016), Inc. FLAC Fast Lagrangian Analysis of Continua : FLAC Version 7.0 ,Online Manual Table of Contents
- [3] Αχιλλέας Γ. Πααδημητρίου (2015) ‘Ειδικά Γεωτεχνικά Έργα:Σημειώσεις’
- [4] Κυριαζής Δ. Πιτιλάκης (2010) ‘Γεωτεχνική Σεισμική μηχανική’
- [5] Αιμίλιος Μ. Κωμοδρόμος ‘Υπολογιστική γεωτεχνική μηχανική’
- [6] Μπουκοβάλας Γ. Γεωτεχνική σεισμική μηχανική. Μεταπτυχιακές Σημειώσεις. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών-Τομέας Γεωτεχνικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθηνών 2010
- [7] Terzaghi K. Mechanisms of landslides. Engineering Geology (Berkey) Volume. Geological Society of America (1950)
- [8] Gazetas, G. Seismic response of earth dams: some recent developments. Soil dynamics and earthquake engineering, 6 (1):3-47 (1987)
- [9] Μουτάφης Ν. Ι. Αστοχίες και ατυχή συμβάντα ελληνικών φραγμάτων. 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων. Λάρισα 2008
- [10] Andrianopoulos K., Papadimitriou A., Bouckovalas G. & Karamitros D. Insight into seismic response of earth dams with an emphasis on seismic coefficient. Computers and geotechnics (2014)
- [11] Wieland M., 2009. Seismic aspects of large dams - The many features of the seismic hazard in large dam projects, Keynote-Presentation, Workshop ANCOLD-2009
- [12] <http://users.ntua.gr>

[13] <http://www.moa.gov.cy>

[14] <https://www.roscience.com>

[15] <http://portal.tcc.gr>





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000125592