



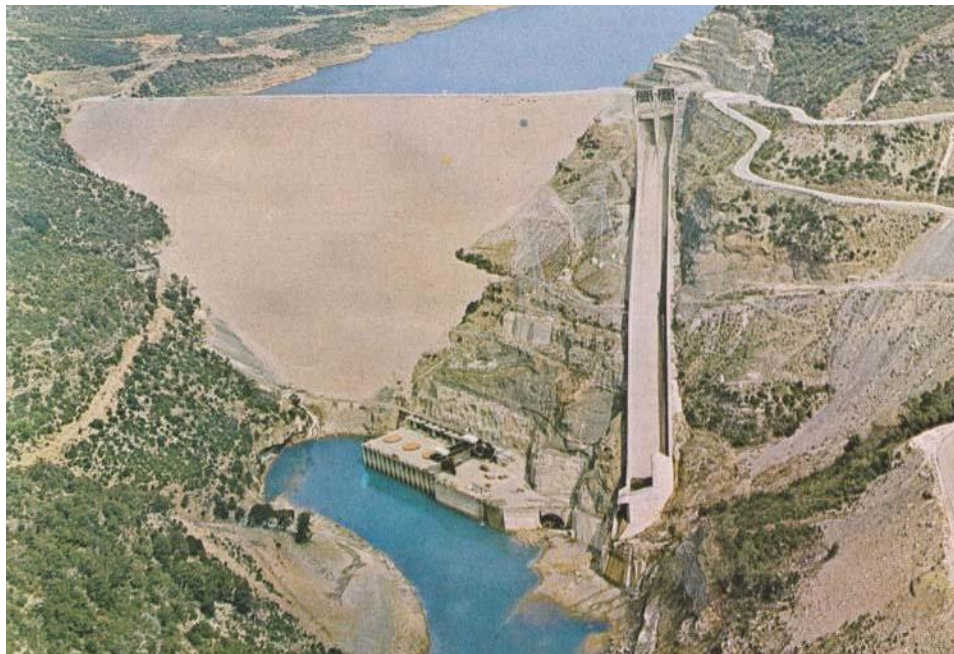
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΤΣΙΑΚΙΡΗ

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ.
Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΚΑΙ ΤΟΝ ΑΣΦΑΛΗ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2021





ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΤΣΙΑΚΙΡΗ
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5564

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ.
Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΚΑΙ ΤΟΝ ΑΣΦΑΛΗ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας,
Τομέα Τεκτονικής Ιστορικής & Εφαρμοσμένης Γεωλογίας,
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας

Επιβλέπων

Δρ. Θωμάς Μακεδόν Ε.ΔΙ.Π.

©Ευαγγελία Τσιακίρη, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωλογίας, 2021
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.



ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ.
Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΚΑΙ ΤΟΝ ΑΣΦΑΛΗ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥΣ – *Πτυχιακή Εργασία*

© Evangelia Tsiakiri, School of Geology, Dept. of Geology, 2021

All rights reserved.

ENGINEERING GEOLOGY PROBLEMS OF DAMS IN GREECE. THE
SIGNIFICANCE OF GEOLOGY IN PREDICTION AND SAFE DESIGN – *Bachelor
Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

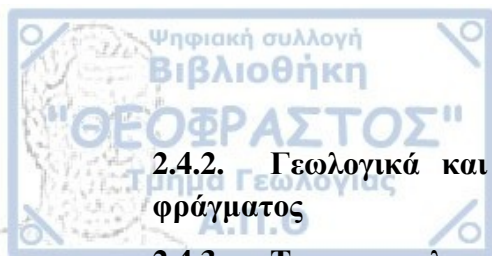
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων, 2013

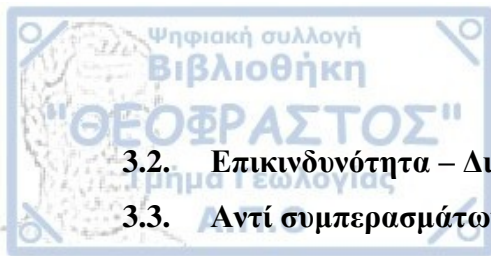


ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	9
1.1. Εισαγωγή	9
1.2. Τύποι φραγμάτων	9
1.3. Συνοδά – Συναφή έργα	14
1.4. Συχνότερες – Πιθανότερες αστοχίες φραγμάτων	16
2. ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ	18
2.1. Φράγμα Κρεμαστών	18
2.1.1. Γενικά	18
2.1.2. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος	19
2.1.3. Τεχνικογεωλογικά προβλήματα	21
2.1.4. Αντιμετώπιση προβλημάτων	25
2.2. Φράγμα Στράτου	28
2.2.1. Γενικά	28
2.2.2. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος	29
2.2.3. Τεχνικογεωλογικά προβλήματα	30
2.2.4. Τρόπος κατασκευής - αντιμετώπιση προβλημάτων	31
2.3. Φράγμα Ασωμάτων	34
2.3.1. Γενικά	34
2.3.2. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος	35
2.3.3. Τεχνικογεωλογικά προβλήματα	37
2.3.4. Αντιμετώπιση προβλημάτων	38
2.4. Φράγμα Ιλαρίωνα	40
2.4.1. Γενικά	40



2.4.2. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος	41
2.4.3. Τεχνικογεωλογικά προβλήματα	43
2.4.4. Αντιμετώπιση προβλημάτων	46
2.5. Φράγμα Θησαυρού	51
2.5.1. Γενικά	51
2.5.2. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος	52
2.5.3. Τεχνικογεωλογικά προβλήματα	53
2.5.4. Αντιμετώπιση προβλημάτων	57
2.6. Φράγμα Μόρνου	60
2.6.1. Γενικά	60
2.6.2. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος	61
2.6.3. Τεχνικογεωλογικά προβλήματα	63
2.6.4. Αντιμετώπιση προβλημάτων	64
2.7. Φράγμα Περδίκκα	66
2.7.1. Γενικά	66
2.7.2. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος	67
2.7.3. Τεχνικογεωλογικά προβλήματα	68
2.7.4. Αντιμετώπιση προβλημάτων	69
2.8. Φράγμα Αποσελέμη	70
2.8.1. Γενικά	70
2.8.2. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος	71
2.8.3. Τεχνικογεωλογικά προβλήματα	73
2.8.4. Αντιμετώπιση προβλημάτων	74
3. ΣΥΖΗΤΗΣΗ	75
3.1. Η σημασία του γεωλογικού μοντέλου	75



- 3.2. **Επικινδυνότητα – Διακινδύνευση**
- 3.3. **Αντί συμπερασμάτων**

76

77

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

79



Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Μακεδών Θωμά, για την πολύτιμη υποστήριξη και καθοδήγηση κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας, καθώς και το οικογενειακό και φιλικό μου περίγυρο που συνέβαλαν με τον δικό τους τρόπο στην υλοποίησή της.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα πτυχιακή στοχεύει στην ανάδειξη της σημασίας του γεωλογικού μοντέλου στο σχεδιασμό και την κατασκευή ενός φράγματος, μέσω της ανάλυσης των τεχνικογεωλογικών προβλημάτων που προέκυψαν σε ποικίλες περιπτώσεις φραγμάτων ανά τον Ελλαδικό χώρο. Επιπλέον, επιχειρεί την κριτική αξιολόγηση των τρόπων που αντιμετωπίστηκαν τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν, καταλήγοντας σε συμπεράσματα για τα κρισιμότερα σημεία που θα είναι χρήσιμο να δίνεται έμφαση σε μελλοντικά έργα, προς αποφυγή παρόμοιων προβλημάτων.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της έρευνας αυτής, βασίζεται σε βιβλιογραφικά στοιχεία και άρθρα καθώς και σε προσωπική αξιολόγηση και σύγκριση αυτών για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Η εργασία αποτελείται από 3 κεφάλαια. Αναλυτικότερα:

- Κεφάλαιο 1: Περιγράφονται γενικά οι τύποι φραγμάτων, τα συνοδά – συναφή τους έργα και τα πιθανότερα τεχνικογεωλογικά προβλήματα που δύνανται να συμβούν κατά την κατασκευή και λειτουργία ενός φράγματος.
- Κεφάλαιο 2: Εξετάζονται 8 περιπτώσεις φραγμάτων της Ελληνικής Ενδοχώρας, με προβλήματα που ήταν αποτέλεσμα γεωλογικών παραγόντων. Για κάθε φράγμα δίνονται λεπτομερή στοιχεία για το γεωλογικό υπόβαθρο, τη θεμελίωση, την ευστάθεια των αντερεισμάτων, τη στεγανότητα και άλλους γεωλογικούς κινδύνους που ενδέχεται να υπάρχουν.
- Κεφάλαιο 3: Συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας, αναφέρονται οι επιπτώσεις των τεχνικογεωλογικών προβλημάτων σε φράγματα και υπογραμμίζεται η σημασία της πρόληψης αυτών, μέσω της γεωλογικής μελέτης. Επιπλέον, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των μηχανισμών αστοχίας κάθε περίπτωσης και αξιολογείται η αντιμετώπισή τους.



1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1. Εισαγωγή

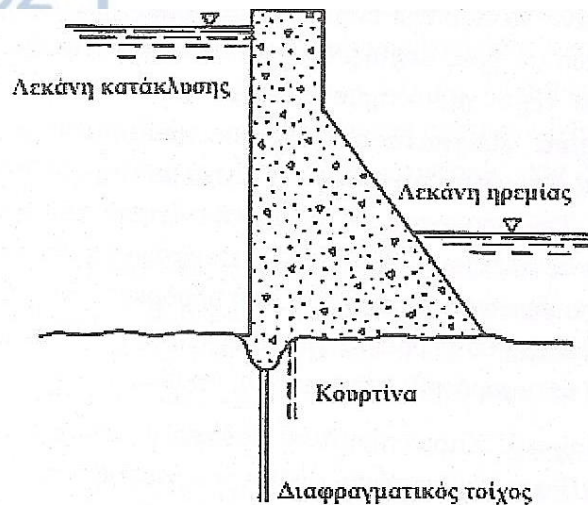
Τα φράγματα είναι έργα που κατασκευάζονται σε κοίτες ποταμών με στόχο την συλλογή νερού σε μια τεχνητή λίμνη για διάφορες χρήσεις. Αποτελούν κατασκευές με μεγάλη σημασία καθώς εξυπηρετούν πολλαπλούς σκοπούς, όπως παραγωγή ενέργειας, ύδρευση, άρδευση, βιομηχανική χρήση και αντιπλημμυρική προστασία. Όταν κατασκευάζεται ένα φράγμα, είναι εξαιρετικά σημαντική η αποφυγή αστοχιών, οι οποίες ενώ δε συμβαίνουν συχνά, εντούτοις μπορούν να έχουν εξαιρετικά σοβαρές συνέπειες και καταστροφικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιούνται εκτενείς γεωλογικές μελέτες πριν από την έναρξη εργασιών κατασκευής ενός φράγματος, καθώς και συστηματική παρακολούθηση για τυχόν μεταβολές με το χρόνο που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε κάποια πιθανή αστοχία.

1.2. Τύποι φραγμάτων

Ο τύπος και ο σχεδιασμός ενός φράγματος σε μια περιοχή εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, οι οποίες αφορούν την τοπογραφία, τη γεωλογική ιστορία της, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών, την υδρολογία, αλλά και το σκοπό και τη χρήση του ίδιου του φράγματος. Επιπλέον, κατά την επιλογή του κατάλληλου τύπου φράγματος, έχουν μεγάλη σημασία οι διαθέσιμες ποσότητες καθώς και η προσβασιμότητα στα απαραίτητα υλικά κατασκευής του έργου. Ανάλογα με τη γεωμετρία και τα υλικά κατασκευής τους, τα φράγματα ταξινομούνται ως εξής:

- **Βαρύτητας από σκυρόδεμα**

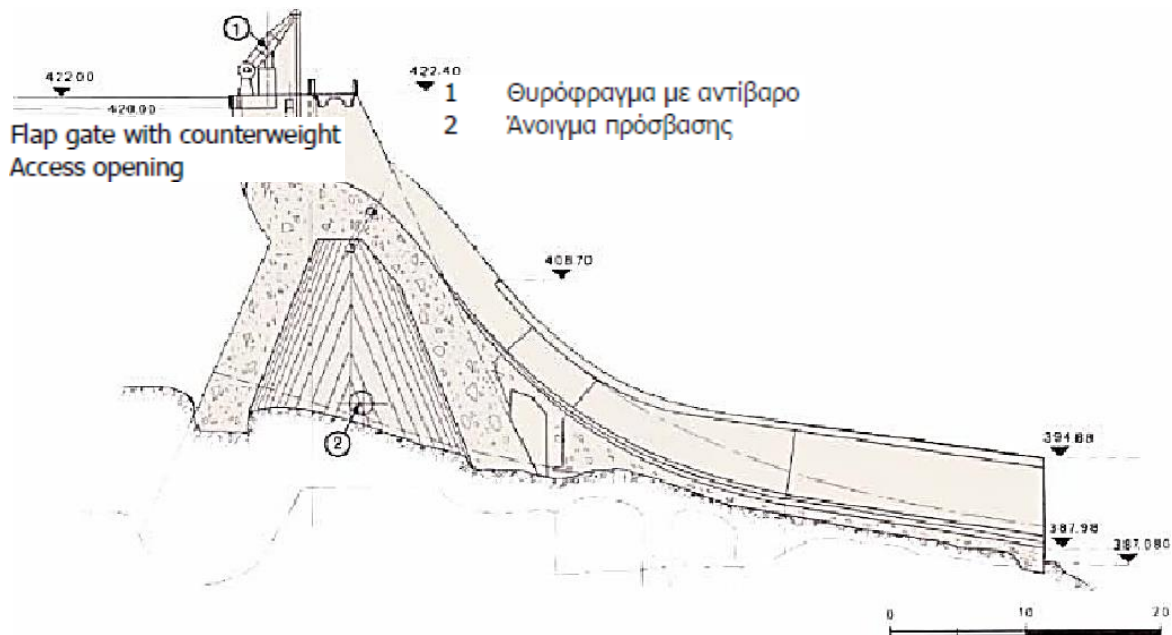
Η λειτουργία τους βασίζεται στο βάρος τους με το οποίο επιτυγχάνεται η αντιστάθμιση των υδροστατικών δυνάμεων, δυνάμεων ανατροπής και σεισμικών φορτίσεων που ενδέχεται να προκαλέσουν αστάθεια. Με βάση δεδομένα αστοχιών που έχουν καταγραφεί, αναφέρονται ως τα πιο ασφαλή φράγματα.



Εικ.1. Σχηματική τομή φράγματος βαρύτητας, P.D. Krynine et al. (1957)

- Αντηριδωτά

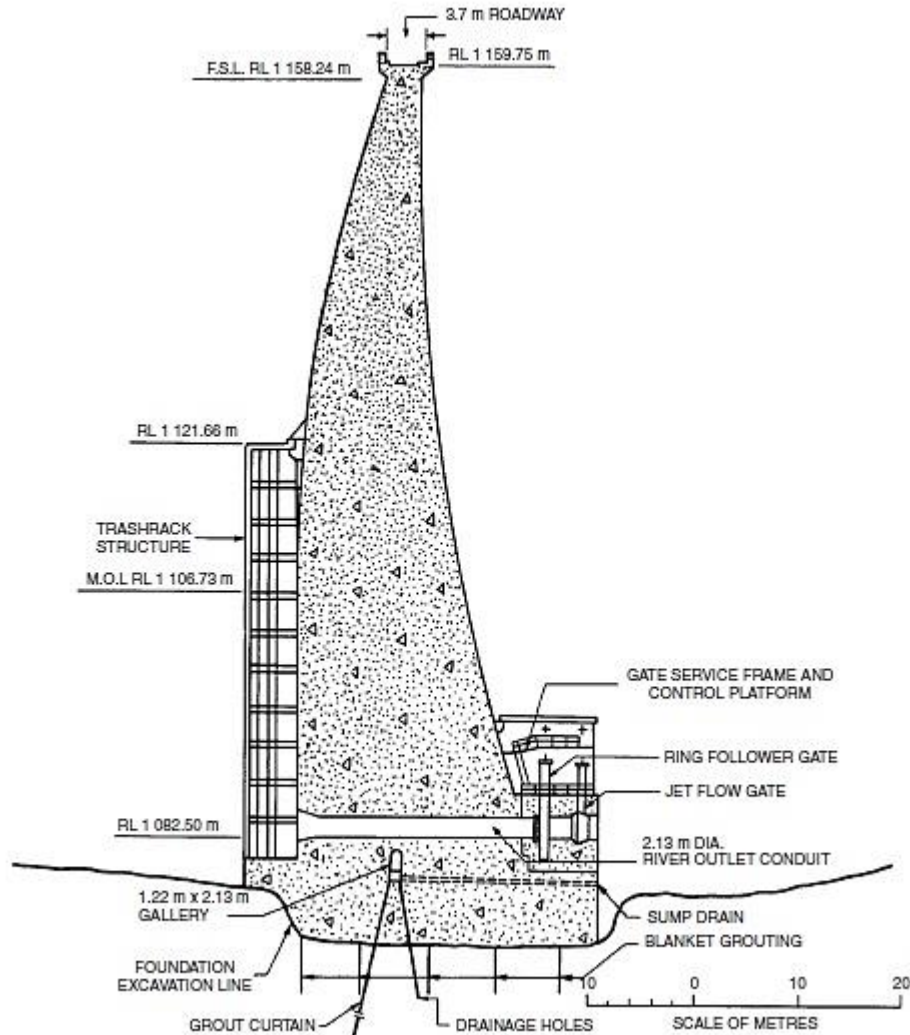
Κατασκευάζονται από πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος στην ανάντη πλευρά, οι οποίες στηρίζονται σε μια σειρά από όρθιες αντηρίδες μεταβλητού πλάτους. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ανάπτυξη πλευρικής συνιστώσας, η οποία κατανέμει το συνολικό φορτίο στα θεμέλια και αντιτίθεται στην υδροστατική πίεση.



Εικ.2. Γεωμετρία της μέγιστης διατομής αντηριδωτού φράγματος από σκυρόδεμα, Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (2013)

• Τοξωτά

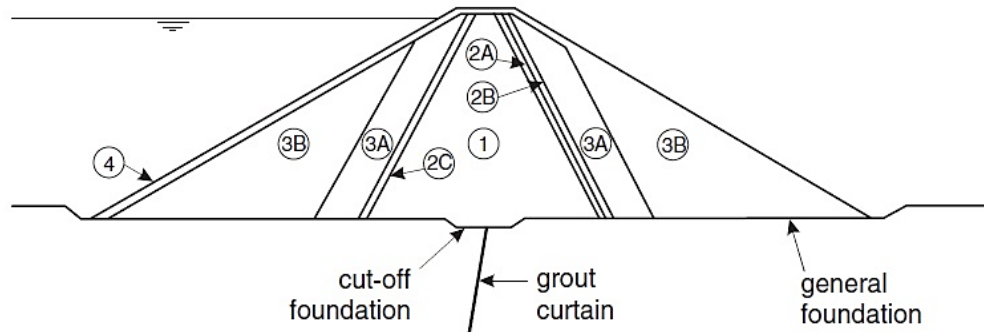
Κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα, με καμπύλη στο σχεδιασμό τους (κοίλη επιφάνεια προς κατάντη). Η λειτουργία τους εξαρτάται αποκλειστικά από την ποιότητα του υποβάθρου των αντερείσμάτων, καθώς οι τάσεις που δημιουργούνται μεταφέρονται απευθείας στα αντερείσματα του φράγματος, με τη δράση του τόξου.



Εικ.3. Γεωμετρία της μέγιστης διατομής τοξωτού φράγματος, R. Fell et al. (2005).

• Χωμάτινα με ζωνώδη δομή

Κατασκευάζονται από εδαφικά υλικά, με στεγανό πυρήνα αργίλου. Ο πυρήνας πλαισιώνεται από φίλτρα και σώματα στήριξης – λιθορριπές προστασίας, από αδρανή υλικά διαφορετικής προέλευσης (ποτάμια, λατομείων κλπ.). Αποτελούν εύκαμπτες κατασκευές και προτιμώνται όταν το έδαφος θεμελίωσης δεν είναι κατάλληλο για οποιοδήποτε τύπο φράγματος από σκυρόδεμα λόγω φτωχών μηχανικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων στην περιοχή θέσης φράγματος.



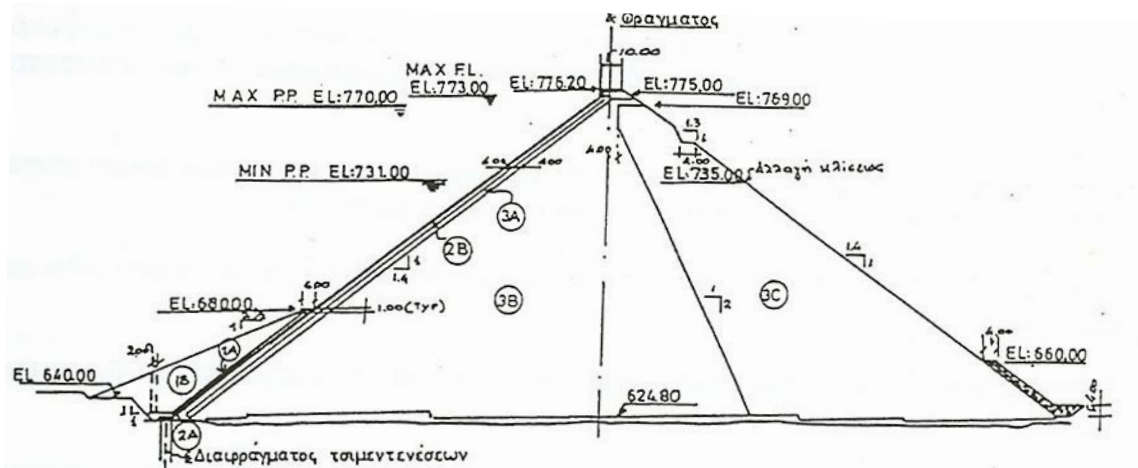
EARTH AND ROCKFILL – CENTRAL CORE – SCALE B

Zone	Description	Function
1	Earthfill ("core")	Controls seepage through the dam
2A	Fine filter (or filter drain)	(a) Controls erosion of Zone 1 by seepage water, (b) Controls erosion of the dam foundation (where used as horizontal drain), (c) Controls buildup of pore pressure in downstream face when used as vertical drain
2B	Coarse filter (or filter drain)	(a) Controls erosion of Zone 2A into rockfill, (b) Discharge seepage water collected in vertical or horizontal drain
2C	(i) Upstream filter	Controls erosion of Zone 1 into rockfill upstream of dam core
	(ii) Filter under rip rap	Controls erosion of Zone 1 through rip rap
2D	Fine cushion layer	Provides uniform support for concrete face; limit leakage in the event of the concrete face cracking or joints opening
2E	Coarse cushion layer	Provides uniform layer support for concrete face. Prevents erosion of Zone 2D into rockfill in the event of leakage in the face
1-3	Earth-rockfill	Provides stability and has some ability to control erosion
3A	Rockfill	Provides stability, commonly free draining to allow discharge of seepage through and under the dam. Prevents erosion of Zone 2B into coarse rockfill
3B	Coarse rockfill	Provides stability, commonly free draining to allow discharge of seepage through and under the dam
4	Rip rap	Controls erosion of the upstream face by wave action, and may be used to control erosion of the downstream toe from backwater flows from spillways

Εικ.4. Γεωμετρία της μέγιστης διατομής τυπικού χωμάτινου φράγματος (R. Fell, P. MacGregor, D. Stapledon, G. Bell, 2005).

- **Λιθόρριπτα (ομογενή)**

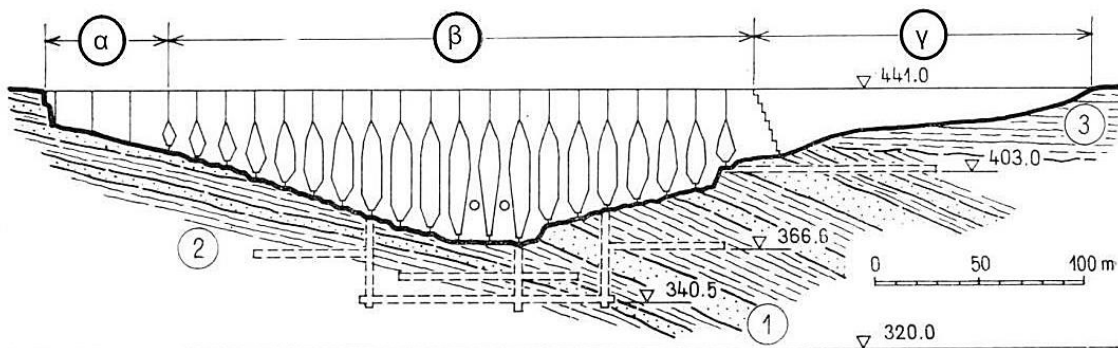
Πρόκειται για ομογενή φράγματα πιο απλής μορφής, χωρίς αργλικό πυρήνα. Κατασκευάζονται από χονδροκλαστικά υλικά ποτάμιας προέλευσης, ή/και βραχώδη υλικά δανειοθαλάμων, που εντοπίζονται στη γύρω περιοχή. Το αδιαπέρατο στοιχείο του φράγματος μπορεί να είναι ανάντη πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα ή ασφαλτικός τάπητας.



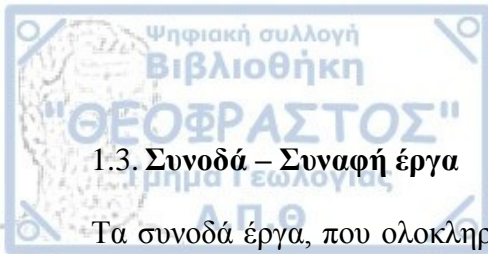
Εικ.5. Γεωμετρία της μέγιστης διατομής τυπικού λιθόρριπτου ομογενούς φράγματος, Δ.Ε. Λιάκουρης (1995)

- **Μικτά**

Συνδυάζονται πάνω από ένας τύπος φράγματος όταν η μορφολογία και η γεωλογία κάποιας κοιλάδας το απαιτεί, αν περιλαμβάνει πετρώματα διαφορετικών γεωτεχνικών ιδιοτήτων ή παρουσιάζει ποικιλομορφία τοπογραφίας.



Εικ.6. Μικτό φράγμα: α) βαρύτητας, β) αντηριδωτό, γ) λιθόρριπτο, Q. Zaruba & V. Mencl (1976).



1.3. Συνοδά – Συναφή έργα

Τα συνοδά έργα, που ολοκληρώνουν την κατασκευή ενός φράγματος, είναι απαραίτητα για την επίτευξη της λειτουργικότητας και της μέγιστης ασφάλειας. Βελτιώνουν τη λειτουργία του φράγματος και την πολλαπλή σκοπιμότητα του έργου και του ταμιευτήρα που διαμορφώνει. Για την κατασκευή των έργων, απαιτούνται αναλυτικές έρευνες αναφορικά με την υδρολογία, τις τοπογραφικές και υπεδαφικές συνθήκες. Τα κυριότερα από τα συναφή έργα αναλύονται σύντομα παρακάτω.

- **Σήραγγες**

Υπάρχουν διάφοροι τύποι σηράγγων, κάθε μια από τις οποίες έχει μια ξεχωριστή χρησιμότητα στην κατασκευή ενός φράγματος.

Σήραγγα εκτροπής: Κατασκευάζεται στα πρηνή της θέσης του φράγματος, για την εκτροπή του ποταμού προς τα κατάντη, ώστε να πραγματοποιούνται με μεγαλύτερη ευκολία οι εργασίες κατασκευής.

Σήραγγα τσιμεντενέσεων ή/και αποστράγγισης: Κατασκευάζεται κατά μήκος του άξονα του έργου και έχει διπλή χρησιμότητα: την εκτέλεση τσιμεντενέσεων στεγανοποίησης διαμέσου αυτής καθώς και τη λειτουργία αποστράγγισης της βραχομάζας.

Σήραγγα προσαγωγής: Αποτελεί μέσο μεταφοράς του νερού, από τον ταμιευτήρα προς τους υδροστροβίλους των γεννητριών.

Σήραγγα φυγής: Σκοπεύει στην απομάκρυνση του νερού από τον υδροηλεκτρικό σταθμό, αφού χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, μεταφέρει νερό για ύδρευση ή άρδευση, όταν χρειάζεται.

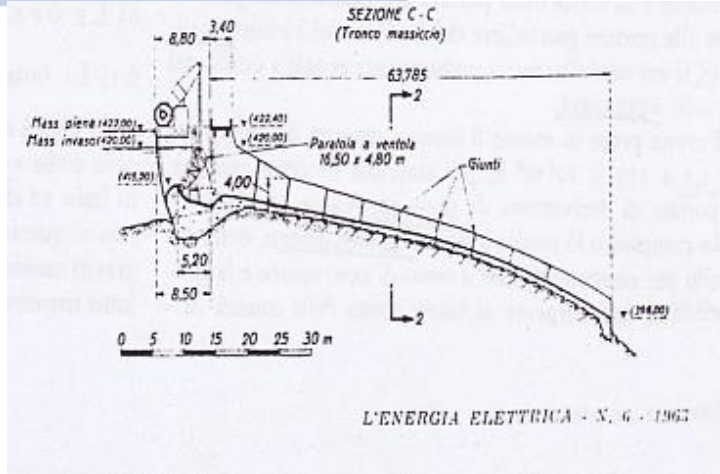
- **Πρόφραγμα**

Αποτελεί προσωρινή κατασκευή ανάντη του κυρίως φράγματος όπου συγκεντρώνεται το νερό και προκαλείται η ελεγχόμενη ροή του προς τα κατάντη, μέσω της σήραγγας εκτροπής. Μετά το πέρας των εργασιών κατασκευής του κυρίου φράγματος, εφόσον το φράγμα είναι χωμάτινο, ενσωματώνεται σε αυτό.

- **Εκχειλιστής/ Υπερχειλιστής**

Ο εκχειλιστής είναι εξαιρετικά χρήσιμος για ελεγχόμενη απορροή της περίσσειας νερού του ταμιευτήρα, που είναι αποτέλεσμα πλημμυρικών παροχών ή αυξημένων ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων προς τα κατάντη, μέσω της λειτουργίας θυροφραγμάτων. Ο υπερχειλιστής διοχετεύει το νερό προς τα κατάντη αυτόματα, χωρίς τη

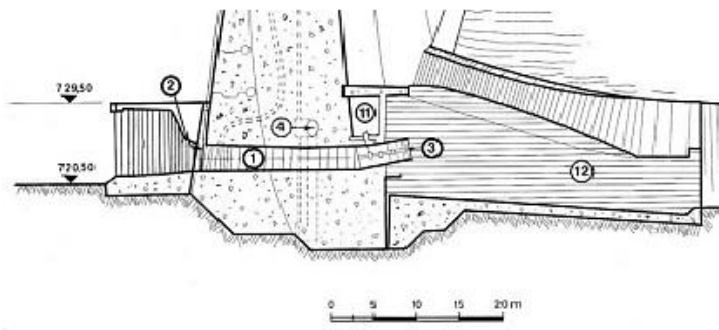
χρήση θυροφραγμάτων σε περίπτωση που το νερό υπερβεί την ανώτατη στάθμη λειτουργίας.



Εικ.7. Κατά μήκος τομή του μεγάλου υπερχειλιστή του φράγματος Λάδωνα και μερική λειτουργία του, Δ. Δημόπουλος & Ι.Π. Στεφανάκος (2008).

- Εκκενωτής πυθμένα

Πρόκειται για αγωγό ή σήραγγα μικρής διαμέτρου, η οποία συμβάλει στην ταπείνωση ή στην πλήρη εκκένωση της στάθμης του ταμιευτήρα αν παρουσιασθεί κάποιο σοβαρό πρόβλημα στο έργο.



1. Εκκενωτής πυθμένα, 2. Ανάντη θυροφραγμα, 3. Βαλβίδα κοίλης φλέβας, 4. Στοά πρόσβασης, 11. Δωμάτιο χειρισμού, 12. Διώρυγα από σκυρόδεμα.

Εικ.8. Κατά μήκος τομή των εκκενωτών πυθμένα στη βάση του φράγματος Ταυρωπού, Δ. Δημόπουλος & Ι.Π. Στεφανάκος (2008).

- **Διαφράγματα – Τάπητες τσιμεντενέσεων**

Όταν ένα φράγμα θεμελιώνεται σε βραχώδες υπόβαθρο, η παρουσία ζωνών διάρρηξης και η αυξημένη υδροπερατότητα αντιμετωπίζονται με την κατασκευή κουρτίνας τσιμεντενέσεων κατά μήκος του άξονα του φράγματος. Η διαφραγματική αυτή κουρτίνα φτάνει συνήθως μέχρι βάθος όπου συναντάται αδιαπέρατο πέτρωμα. Ο τάπητας τσιμεντενέσεων, ο οποίος σε αντίθεση με την κουρτίνα, κατασκευάζεται σε μικρό βάθος στη ζώνη θεμελίωσης του πυρήνα του φράγματος, συμβάλλει στην καλύτερη στεγανοποίηση και τη σταθεροποίηση της ζώνης θεμελίωσης.

1.4. Συχνότερες – Πιθανότερες αστοχίες φραγμάτων

Σύμφωνα με στοιχεία της Διεθνούς Επιτροπής Μεγάλων Φραγμάτων (1973), τα τεχνικογεωλογικά προβλήματα σε ένα φράγμα εξαρτώνται τόσο από τον τύπο του, όσο και από το χρόνο λειτουργίας του. Στα φράγματα από σκυρόδεμα, εμφανίζονται συνηθέστερα προβλήματα στη θεμελίωση. Για τα χωμάτινα ή λιθόρριπτα, οι διαρροές είναι αυτές που δημιουργούν τα κυριότερα προβλήματα. Αναφορικά με το χρόνο, οι χρονικές περίοδοι που χαρακτηρίζονται ως υψηλής επικινδυνότητας, είναι κατά την πρώτη πλήρωση του ταμιευτήρα και, στη συνέχεια, η περίοδος γήρανσης, η οποία όμως επέρχεται αρκετά χρόνια μετά την κατασκευή του έργου. Γενικότερα, η ευστάθεια ενός φράγματος επηρεάζεται από διάφορους φυσικούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα η τοπογραφία και η μορφολογία της περιοχής θέσης του έργου, αλλά και από τεχνικούς παράγοντες, όπως η ποιότητα των υλικών και ο σχεδιασμός του έργου. Σύμφωνα με τον Bell (1980), ο κρισιμότερος παράγοντας είναι ο γεωλογικός διότι ελέγχει τόσο τις συνθήκες θεμελίωσης όσο και τα υλικά κατασκευής του. Επίσης, περιέχει τα απρόβλεπτα προβλήματα που ενδέχεται να εμφανιστούν, ακόμα και χρόνια μετά την αρχική κατασκευή του φράγματος, τα οποία συνήθως σχετίζονται με τη γεωλογία. Επομένως, τα συχνότερα τεχνικογεωλογικά προβλήματα, που ίσως παρουσιαστούν σε ένα φράγμα κατά την κατασκευή ή τη λειτουργία του, σχετίζονται με τους γεωλογικούς παράγοντες που παρατίθενται παρακάτω:

Γεωλογικοί -Τεχνικογεωλογικοί παράγοντες: Περιλαμβάνουν τις επιπτώσεις του γεωλογικού περιβάλλοντος και τον τρόπο που επηρεάζει τα χαρακτηριστικά των σχηματισμών. Για παράδειγμα την αντοχή και παραμορφωσιμότητα, την υδροπερατότητα το βαθμό τεκτονισμού (πιθανά ρήγματα, διακλάσεις, ζώνες διάρρηξης) και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών. Οδηγούν σε πιθανές διαφυγές, δυνητικές ολισθήσεις, καθώς και αστοχίες που μπορεί να οφείλονται σε δυσμενείς συνθήκες εδάφους θεμελίωσης π.χ. χαμηλής αντοχής εδάφη ή ανομοιομορφία πρανών.



Δομικοί και κατασκευαστικοί παράγοντες: Έχουν άμεση σχέση με αστοχίες που είναι πιθανόν να προκληθούν από λανθασμένο σχεδιασμό, κατασκευαστικά λάθη, ακόμα και ακατάλληλα υλικά. Μπορούν να οδηγήσουν σε διάβρωση του σώματος μέσω διήθησης-διασωλήνωσης ή σε διαφυγές λόγω πλημμελούς στεγανοποίησης

Υδρολογικοί και υδραυλικοί παράγοντες: Αφορούν, κυρίως, τη συχνότητα πλημμύρας και τον κυματισμό στον ταμιευτήρα του φράγματος, που οδηγούν σε πιθανή υπερχειλίση του αν δεν έχει υλοποιηθεί ο κατάλληλος σχεδιασμός. Περιλαμβάνονται επίσης, οι διαρροές και η εσωτερική διάβρωση μέσω του σώματος ή/και της θεμελίωσης, σαν αποτέλεσμα των υδροστατικών πιέσεων.

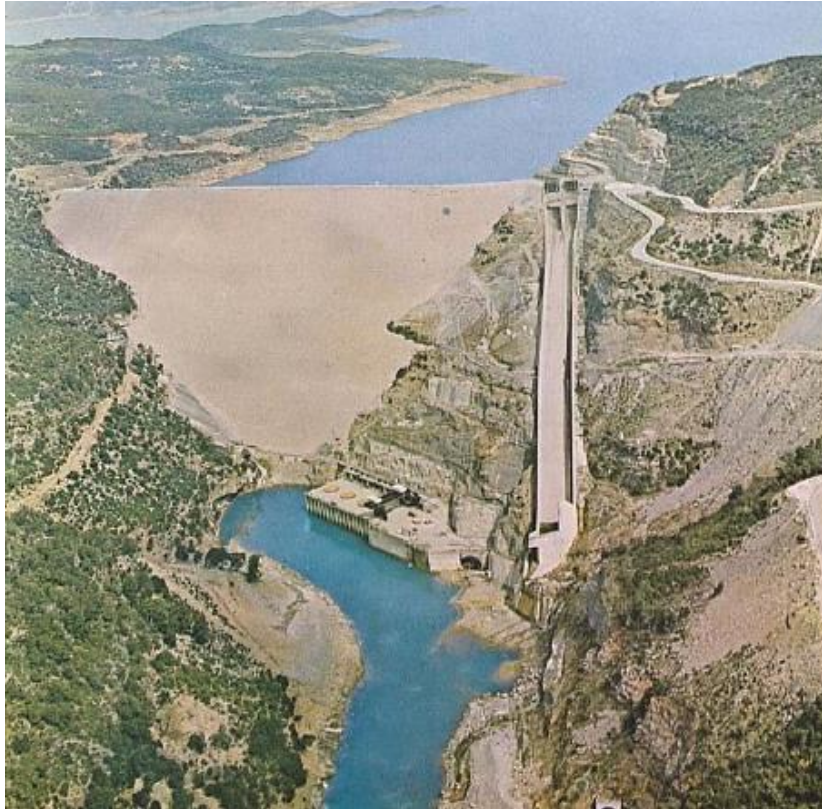
Σεισμικότητα: Τα φράγματα που θεμελιώνονται πάνω σε βραχώδεις σχηματισμούς είναι πιθανόν να επηρεαστούν, αλλά σε μικρότερη κλίμακα από ότι αν ήταν πάνω σε εδαφικά ή χαλαρά υλικά. Αναφορικά με τον τύπο ενός φράγματος, τα σεισμικά κύματα επηρεάζουν περισσότερο τα χωμάτινα και τα λιθόρριπτα, τα οποία όμως είναι ικανά να δεχθούν μικρές μετατοπίσεις χωρίς να επέλθει θραύση, στην περίπτωση που τα υλικά θεμελίωσής τους δεν είναι πολύ ασθενή και εφόσον δεν έχουν μετατοπιστεί στο παρελθόν από άλλες κινήσεις. Στον αντίποδα, τα φράγματα από σκυρόδεμα που έχουν κατασκευαστεί πάνω σε υγιή πετρώματα, έχουν συνήθως μεγαλύτερη αντοχή στις σεισμικές δονήσεις.

Λειτουργικοί παράγοντες: Σχετίζονται με την παράλειψη παρακολούθησης και πρόληψης προβλημάτων που ενδέχεται να εμφανιστούν με την πάροδο του χρόνου, κυρίως λόγω ανεπαρκούς συντήρησης.

2. ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

2.1. Φράγμα Κρεμαστών

2.1.1. Γενικά



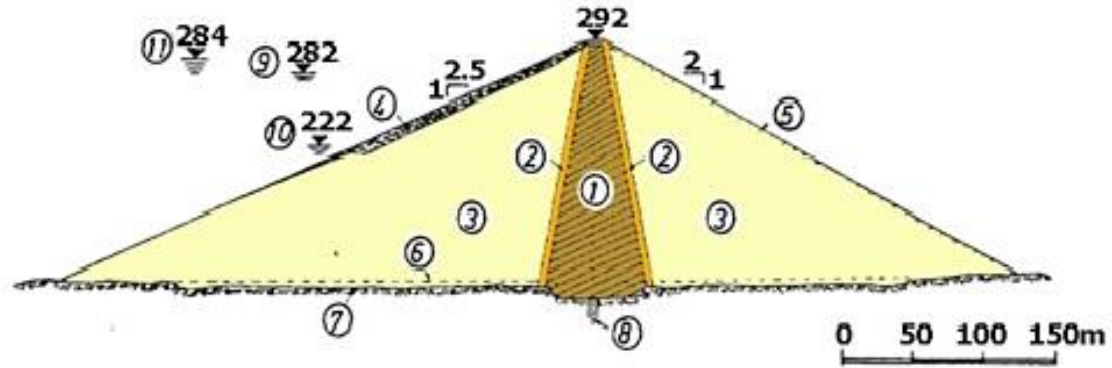
38°53'09.16" N
21°29'48.05" E

Νομός: Ευρυτανία-
Αιτωλοακαρνανία
Prefecture: Evritania-
Aetoloakarnania

Ποταμός: Αχελώος
River: Acheloos

Εικ.9. Γεωγραφική θέση φράγματος Κρεμαστών, Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (2013).

Το φράγμα Κρεμαστών είναι από τα μεγαλύτερα χωμάτινα φράγματα που υπάρχει στην Ευρώπη. Αποτελεί ιδιοκτησία της ΔΕΗ Α.Ε., βρίσκεται στον ποταμό Αχελώο, είναι χωμάτινο με κατακόρυφο αργιλικό πυρήνα, ύψος 160m και μήκος στέγης 456m. Η τεχνητή λίμνη που σχηματίστηκε καλύπτει μια περιοχή σχεδόν 81 km² και μπορεί να αποθηκεύσει έως και 4.75*10⁹m³ νερού. Σκοπός του φράγματος είναι η ρύθμιση της ροής του ποταμού και η αποθήκευση νερού για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εργασίες κατασκευής του έργου πραγματοποιήθηκαν την περίοδο 1962-1966. Το 1966, το φράγμα άρχισε να λειτουργεί επίσημα.



<u>ΥΠΟΜΝΗΜΑ</u>			
①	Αδιαπέρατος πυρήνας	⑥	Φυσικό έδαφος
②	Φίλτρο	⑦	Όρια εκσκαφής
③	Σώμα του φράγματος	⑧	Διαφραγματική κουρτίνα
④	Rip - rap	⑨	Μέγιστη στάθμη
⑤	Λιθορριπή	⑩	Ελάχιστη στάθμη
		⑪	Στάθμη εκροής

Εικ.10. Τυπική διατομή φράγματος Κρεμαστών, Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (2013).

2.1.2. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος

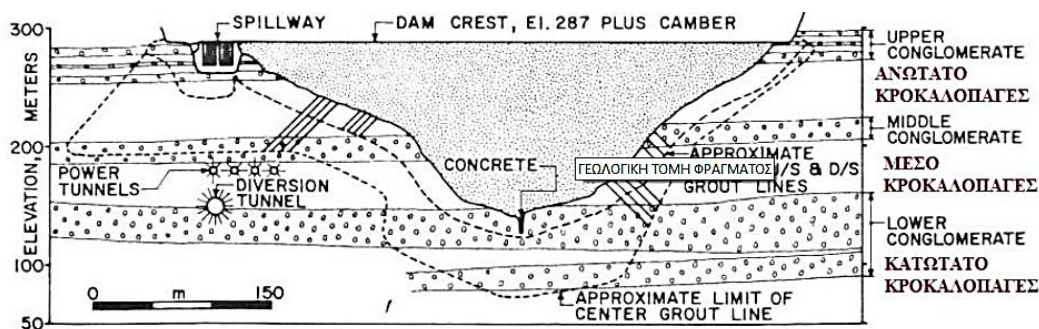
Η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής τοποθεσίας του φράγματος των Κρεμαστών χαρακτηρίζεται από πολλαπλές επωθήσεις και υποδιαιρείται σε 3 ζώνες, οι οποίες παρατίθενται παρακάτω:

- Η ζώνη Πίνδου, από την οποία, στην περιοχή του φράγματος, απαντώνται κυρίως οι ασβεστόλιθοι του Μεσοζωικού, μαζί με οφειόλιθους, σχιστόλιθους και φλύσχη.
- Η ζώνη Γαβρόβου – Τριπόλεως, η οποία παρουσιάζεται κυρίως με τους συμπαγείς ασβεστόλιθους και το φλύσχη Γαβρόβου.
- Η Αδριατικοϊόνιος ζώνη, την οποία, δυτικότερα στην περιοχή αντιπροσωπεύει η εμφάνιση ασβεστολίθων.

Τα πετρώματα κάτω και γειτονικά του φράγματος αποτελούνται από οριζόντια στρώματα φλύσχη (κροκαλοπαγή, ιλυόλιθοι, ψαμμίτες) με γενικά χαμηλή υδροπερατότητα ακόμα και στην περίπτωση που η βραχομάζα είναι σε σημαντικό βαθμό εξασθενημένη (Marinos & Hoek, 2001; Christoulas et al., 1988). Οι ψαμμίτες του σχηματισμού διακόπτονται από ασυνέχειες, ενώ τα κροκαλοπαγή είναι περισσότερο ανθεκτικά στη διάβρωση σε σύγκριση με τα υπόλοιπα πετρώματα (ECI, 1974). Τα κροκαλοπαγή έχουν υποστεί χαρακτηριστική

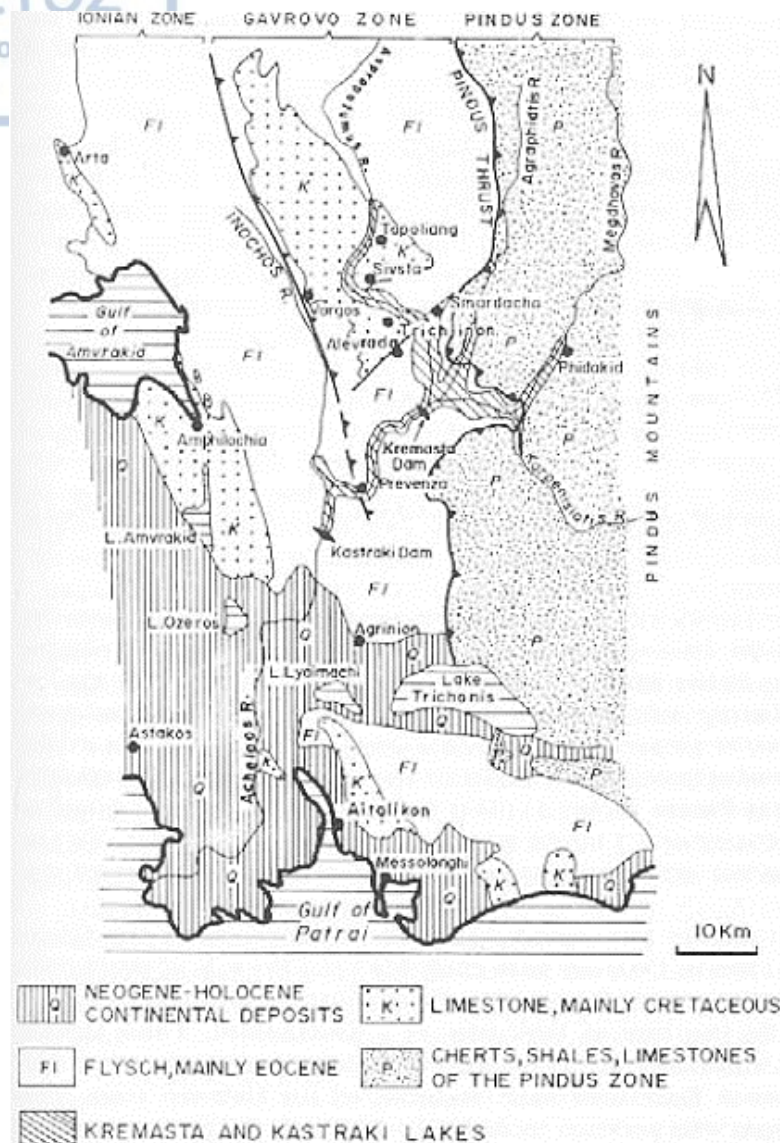
εσωτερική διάβρωση, η οποία έχει διευρύνει προϋπάρχουσες ρωγμές και τεκτονικές ασυνέχειες. Ως αποτέλεσμα, έχουν δημιουργηθεί κενοί χώροι (έγκοιλα), με διαστάσεις που ξεκινούν από λίγα εκατοστά και φτάνουν, κάποιες φορές, μέχρι μερικά μέτρα.

Στην περιοχή των αντρεϊσμάτων, παρατηρούνται τρία κύρια στρώματα κροκαλοπαγών. Το κατώτερο από αυτά περιέχει φακούς ιλυολίθων και ψαμμίτη και το πάχος του μεταβάλλεται στα δύο αντρεϊσματα. Το μεσαίο στρώμα του κροκαλοπαγούς βρίσκεται περίπου στη μέση της απόστασης που χωρίζει τη θεμελίωση από τη στέψη του φράγματος. Το ανώτερο στρώμα του κροκαλοπαγούς βρίσκεται κοντά στη στέψη του φράγματος και δομείται από μια σειρά σχετικά λεπτών κροκαλοπαγών στρώσεων, που διαχωρίζονται από ιλυολιθικά μέλη (ECI, 1974).



Εικ.11. Γεωλογική τομή στη θέση της μέγιστης διατομής του φράγματος, ECI (1974).

Στη θέση του φράγματος, εντοπίζονται διαδοχικά, σχεδόν κατακόρυφα ρήγματα, που διατάσσονται παράλληλα με τον άξονα του φράγματος (Μαρίνος & Καζίλης, 1991). Οι δοκιμές διαπερατότητας που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι τα ρήγματα δεν εμφανίζουν περατότητα στις περιοχές όπου υπάρχουν ιλυολίθοι, αλλά εκεί όπου υπάρχουν κροκαλοπαγή, η περατότητα είναι αυξημένη. Γενικά, η υδροπερατότητα των ιλυολίθων θεωρείται περιορισμένη, εκτός από περιοχές ορισμένων ρηγμάτων. Αντίθετα, τα κροκαλοπαγή παρουσιάζουν αυξημένη περατότητα στη μεγαλύτερη έκταση της μάζας τους, αν και παρατηρείται να μειώνεται όσο πιο χαμηλά βρίσκονται από την κοίτη του ποταμού.



Εικ.12. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής της λίμνης των Κρεμαστών, Η.Κ. Gurta & Β.Κ. Rastogi (1967).

2.1.3. Τεχνικογεωλογικά προβλήματα

Θεμελίωση

Όταν ξεκίνησαν οι εργασίες προετοιμασίας του εδάφους θεμελίωσης του έργου, ανακαλύφθηκε ένα μεγάλο διαβρωσιγενές άνοιγμα κάτω από την κοίτη του Αχελώου. Με την απομάκρυνση των ποτάμιων αποθέσεων διαπιστώθηκε ότι το μέγεθος του ανοίγματος, με πλάτος 4-5m και βάθος 8-10m, μετέβαλε όλη την εικόνα της μορφολογικής τομής που είχε σχεδιαστεί με βάση τα αποτελέσματα των ερευνητικών γεωτρήσεων. Καμία από τις



ερευνητικές γεωτρήσεις στον άξονα του φράγματος δεν είχε εντοπίσει το διαβρωμένο τμήμα, με αποτέλεσμα να προκύψουν σοβαρές οικονομικές και χρονικές επιπτώσεις στην κατασκευή του έργου.

Ευστάθεια

Το φράγμα Κρεμαστών εδράζεται, όπως αναφέρθηκε, κυρίως μέσα στη γεωτεκτονική ζώνη της Πίνδου, η οποία διακατέχεται από εντονότατο ανάγλυφο, καθώς δομείται, σχεδόν εξ ολοκλήρου, από στρωσιγενή πετρώματα, με έντονη τεκτονική καταπόνηση και σημαντική ανάπτυξη φλύσχη. Επομένως, είναι φυσικό να παρουσιάζει έντονα φαινόμενα αστάθειας πρανάων με επιπτώσεις γενικά στα τεχνικά έργα της περιοχής.

Κατά τη φάση της γεωλογικής μελέτης, πριν την έναρξη των εργασιών κατασκευής του φράγματος, εκφράστηκαν φόβοι αστάθειας των στρωμάτων του φλύσχη στα αντερείσματα κατάντη του φράγματος και περισσότερο για το αριστερό, πάνω από τον υδροηλεκτρικό σταθμό.

Οι κατολισθήσεις που καταγράφηκαν στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών, αφορούσαν εκτεταμένους ερπυσμούς υλικών κλιτύων, αλλουβιακών καλυμμάτων και βραχομαζών κοντά σε μέτωπα ανάστροφων ρηγμάτων (επωθήσεις, επιπτεύσεις, λεπιώσεις) και κατολισθήσεις κατά τα επίπεδα στρώσεων ή ρηξιγενών γραμμών του βραχώδους υποβάθρου. Τα αίτιά τους, περιλαμβάνουν τη διάβρωση, τη μεγάλη κλίση των πρανάων, τις ανθρώπινες επεμβάσεις, τη δράση του ποταμού Μέγδοβα στη συμβολή του με τον Αχελώο και, γενικότερα, παράγοντες που μεταβάλλουν τη συνοχή ή τη γωνία τριβής των υλικών και διαταράσσουν την ισορροπία των σχηματισμών. Οι ερπυσμοί υπήρχαν πριν την πλήρωση του ταμιευτήρα, αλλά επιδεινώθηκαν με τη διαβροχή τους από τα νερά της λίμνης.

Στεγανότητα

Η ευρύτερη περιοχή του έργου δομείται από γεωλογικούς σχηματισμούς της διάπλασης του φλύσχη, οι οποίοι συνολικά δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα στεγανότητας. Στη θέση θεμελίωσης του φράγματος, όμως, οι υποκείμενοι πάγκοι των κροκαλοπαγών έχουν αυξημένη υδροπερατότητα, λόγω της κίνησης νερού μέσω των ασυνεχειών και του ψευδοκάρστ που αναπτύσσουν.

Η κατασκευή του φράγματος ολοκληρώθηκε το καλοκαίρι του 1965, με το κλείσιμο της σήραγγας εκτροπής. Αργότερα το ίδιο έτος, εντοπίστηκαν στα κατάντη σε μικρή απόσταση



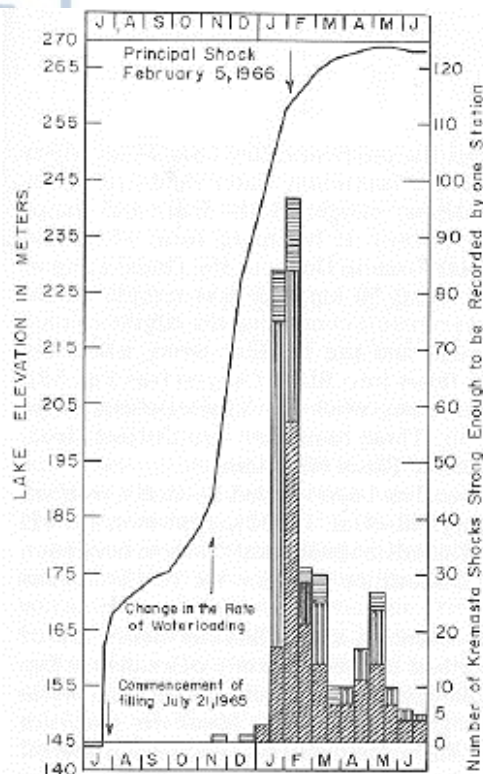
από τον πόδα του φράγματος και τα δύο αντερείσματα, περιοχές με υγρασία. Με τη συνεχή αύξηση της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα, πάνω στις επιφάνειες των αντερεισμάτων εμφανίστηκαν διαρροές, ο όγκος των οποίων αυξήθηκε σταδιακά (ECI, 1974). Οι μεγαλύτερες από αυτές εντοπίστηκαν σε μέτωπα του ανώτερου και κυρίως του μέσου κροκαλοπαγούς, ενώ στο κατώτερο κροκαλοπαγές, που ήταν εγκλωβισμένο σε στεγανούς οριζόντες ιλυολίθων, διαπιστώθηκαν περιοχές υψηλής περατότητας μόνο κοντά σε κάποια ρήγματα. Μέχρι τα μέσα του 1966, οι διαρροές είχαν εκδηλωθεί πλήρως όταν η στάθμη του ταμιευτήρα άγγιζε τα 142m.

Άλλοι γεωλογικοί κίνδυνοι

Σεισμικότητα

Η άποψη ότι το φράγμα των Κρεμαστών αποτέλεσε τον πιθανότερο παράγοντα πρόκλησης μιας σεισμικής ακολουθίας την περίοδο 1965-1966, υιοθετήθηκε από αρκετούς ερευνητές (Comninakis et al., 1968; Gupta et al., 1972; Stein et al., 1982; Saxena et al., 1988). Τα σεισμικά γεγονότα κορυφώθηκαν το Φεβρουάριο του 1966 με έναν σεισμό μεγέθους 6.2 της κλίμακας ρίχτερ (Παπαζάχος & Παπαζάχου, 1989), που προκάλεσε το θάνατο ενός ανθρώπου, τον τραυματισμό 60, αρκετές κατολισθήσεις και ζημιές σε σπίτια.

Με την αύξηση της στάθμης του νερού, παρατηρήθηκε σχεδόν άμεσα ανάλογη αύξηση της σεισμικής δραστηριότητας και ο αριθμός σεισμικών γεγονότων που σημειώθηκε για την περίοδο Ιανουαρίου – Φεβρουαρίου 1966, ήταν μεγάλος. Σύμφωνα με τους H.K. Gupta και B.K. Rastogi (1967), η περιοχή γύρω από το φράγμα των Κρεμαστών χαρακτηρίζεται σε γενικές γραμμές από έντονη σεισμικότητα. Ωστόσο, μέχρι την έναρξη της πλήρωσης του ταμιευτήρα, στις 21 Ιουλίου 1965, δεν είχε καταγραφεί σεισμός μεγέθους άνω των 6 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ (ECI, 1974). Ήδη από τον Αύγουστο είχαν αρχίσει να γίνονται αισθητοί σεισμοί, οδηγώντας στην άμεση συσχέτιση των δύο γεγονότων.



Εικ.13. Διάγραμμα μεταβολών στη στάθμη του ταμιευτήρα των Κρεμαστών και αριθμός σεισμικών γεγονότων που καταγράφηκαν στην περιοχή την ίδια περίοδο, H.K. Gupta & B.K. Rastogi (1967).

Παραμορφώσεις στέψης

Το φράγμα εμφανίζει καθιζήσεις σε κάποια σημεία της στέψης, παραμένοντας, μέχρι σήμερα σε αποδεκτά όρια, που αποφασίστηκαν κατά την προκαταρκτική γεωλογική μελέτη. Μέχρι το 2002, η μέγιστη καθίζηση της στέψης που είχε καταγραφεί ήταν περίπου η μισή της αναμενόμενης (Πυθαρούλη, 2013). Όμως, για περίπου ένα χρόνο μετά το κλείσιμο της σήραγγας εκτροπής δεν υπάρχει διαθέσιμη καταγραφή της παραμόρφωσης, επομένως το μέγεθος της καθίζησης είναι στην πραγματικότητα μικρότερο από αυτό που έχει υποστεί η στέψη.

Εκτός από τις καθιζήσεις, με οπτική παρακολούθηση στη στέψη, εντοπίστηκαν επίσης επιφανειακές ρωγματώσεις, παράλληλα στον άξονα του φράγματος, που υποδεικνύουν πιθανή διαφορική καθίζηση της στέψης (Dascal, 1987). Επιπλέον, στο δεξιό αντέρεισμα εντοπίστηκε σιγμοειδής παραμόρφωση που προκάλεσε την κίνηση μέρους της στέψης προς τα ανάντη.



2.1.4. Αντιμετώπιση προβλημάτων

Θεμελίωση

Η αντιμετώπιση των προβλημάτων ξεκίνησε από το διαβρωμένο τμήμα, στη θέση του άξονα του φράγματος, με την απομάκρυνση των ποτάμιων αποθέσεων και την πλήρωση, στη συνέχεια, του κενού με σκυρόδεμα. Παρά την εξυγίανση της θεμελίωσης, το γεγονός ότι καμία από τις ερευνητικές γεωτρήσεις που εκτελέστηκαν δεν είχε εντοπίσει το πρόβλημα νωρίτερα, προκάλεσε σοβαρές οικονομικές και χρονικές επιπτώσεις στην κατασκευή του έργου.

Ευστάθεια

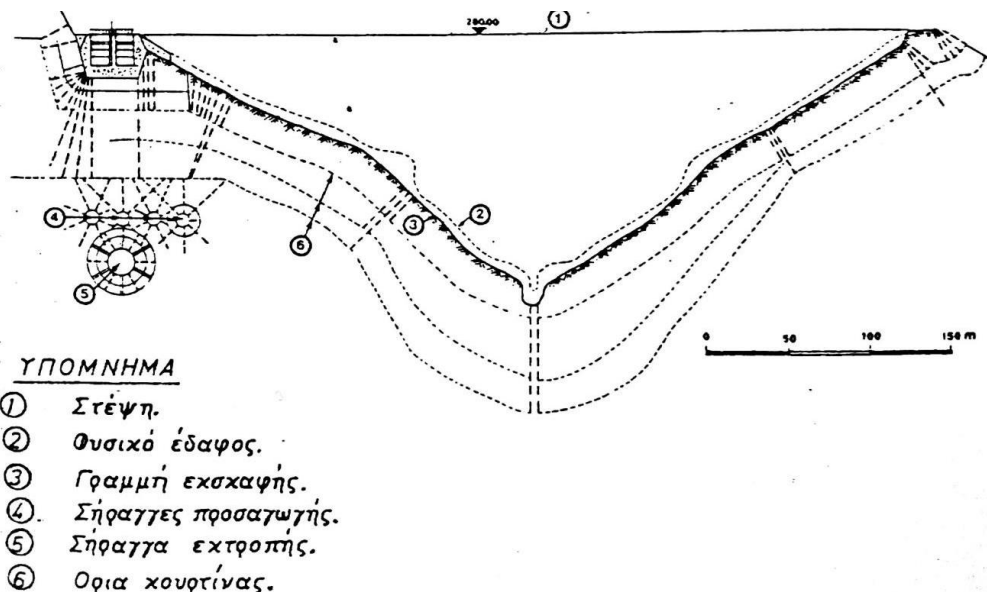
Αναφορικά με την ευστάθεια της κατασκευής, λήφθηκαν μέτρα πρόληψης, που ξεκίνησαν με την απομάκρυνση των υλικών των κατολισθήσεων. Συμπληρωματικά, εγκαταστάθηκαν κλισιόμετρα κοντά στο σταθμό παραγωγής ενέργειας αλλά και στην κατάντη πλευρά του φράγματος, για τη συνεχή παρακολούθηση υφιστάμενων ή καινούριων μετακινήσεων. Τα συγκεκριμένα όργανα τοποθετήθηκαν το 1966 και ήταν τα πρώτα που χρησιμοποίησε η ΔΕΗ στα έργα της, με οδηγίες του πολιτικού μηχανικού Δ. Λιάκουρη.

Επίσης, μετά τους ερπυσμούς που σημειώθηκαν στον ταμιευτήρα και ιδιαίτερα στις περιοχές των Αγαλιανών και Ψηλόβραχου, οι αρμόδιοι έκριναν ότι είναι απαραίτητη η μετεγκατάσταση των κατοίκων.

Στεγανότητα

Τα σημαντικότερα προβλήματα του φράγματος των Κρεμαστών, αφορούσαν τη στεγανότητα. Με τη συνεχή άνοδο της στάθμης του νερού της λίμνης, εμφανίστηκαν πάνω στις επιφάνειες των αντρευσμάτων διαρροές, ο όγκος των οποίων αυξήθηκε σταδιακά. Για την αντιμετώπισή τους, εκτελέστηκε μια σειρά επιπρόσθετων τσιμεντενέσεων στεγανοποίησης, με σκοπό να ενισχυθεί η αρχική κατασκευή της συμβατικού τύπου κουρτίνας. Τα μέτρα προέβλεπαν την επέκτασή της στα αντρείσματα και την τοποθέτηση τσιμεντοκονιάματος στο ρήγμα με τη μεγαλύτερη επιρροή. Αργότερα, για επιπλέον προστασία, διανοίχτηκαν τρεις στοές σε κάθε αντέρισμα, στοχεύοντας στην αποστράγγιση του νερού και στην έγχυση πρόσθετου τσιμεντοκονιάματος στις περιοχές κατάντη της κουρτίνας τσιμεντενέσεων. Όταν ολοκληρώθηκαν τα έργα αποστράγγισης, παρατηρήθηκε μείωση των διαφυγών, που δεν κρίθηκε επαρκής.

Στις αρχές του 1968, μετά από ένα έτος εκτενούς παρατήρησης των διαφυγών και τη στάθμη του ταμιευτήρα να φτάνει περίπου τα 120m, η περιορισμένη αποτελεσματικότητα των μέχρι τότε μέτρων αντιμετώπισής τους, οδήγησε την εταιρεία Engineering Consultants Inc. στην κατάθεση αναφοράς με προτάσεις για εργασίες μακροπρόθεσμου ελέγχου. Η υλοποίησή τους κρίθηκε απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση των υδροστατικών πιέσεων στα αντερείσματα, που βρέθηκαν να είναι σε επίπεδα υψηλότερα των αποδεκτών τιμών. Το μέσο και το κατώτερο κροκαλοπαγές διοχέτευαν υψηλές ποσότητες νερού υπό πίεση, σε διάφορα σημεία όπως στην περιοχή του αντερείσματος πάνω από το σταθμό παραγωγής ενέργειας, στο δεξί αντερείσμα, στο κάτω κέλυφος του φράγματος και στη σήραγγα εκτροπής. Επιπλέον, υπήρχαν ενδείξεις υπόγειας διάβρωσης των αντερεισμάτων. Κάτω από ειδικές συνθήκες, ο όγκος των διαφυγών και των υδροστατικών πιέσεων θα μπορούσε να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα αστάθειας στο έργο. Μετά τη λήψη πρόσθετων μέτρων, οι ποσότητες του νερού στο δεξί αντερείσμα αποστραγγίζονται πλέον με ασφάλεια εκτός του φράγματος, μέσω στοάς κοντά στον πόδα του έργου. Μετρήσεις στα πιεζόμετρα και στα υδατοφράγματα, αποδεικνύουν ότι η διακύμανση της στάθμης της λίμνης επηρεάζει άμεσα τις διαρροές και τις υδροστατικές πιέσεις στα αντερείσματα.



Εικ.14. Τελική μορφή διαφραγματικής κουρτίνας του φράγματος με το πέρας των εργασιών, Δ.Ε. Λιάκουρης (1995).



Αλλά

Για να αποφευχθεί η υπερπήδηση του φράγματος, σε περίπτωση υπερβολικής καθίζησης της στέψης, η μελέτη σχεδιασμού του φράγματος όριζε την κατασκευή της με κύρτωση μέγιστου ύψους 1,5m, όση και η μέγιστη αναμενόμενη καθίζηση (ECI, 1974).

Επιπλέον, για την αντιμετώπιση των παραμορφώσεων και των επιφανειακών διαρρήξεων που παρατηρήθηκαν στη στέψη, πραγματοποιήθηκαν κατά διαστήματα εργασίες αποκατάστασης των τμημάτων της στέψης που είχαν υποστεί καθίζηση και εργασίες αντικατάστασης τμημάτων του ασφαλτικού τάπητα, που είχαν υποστεί ζημιές.

Τέλος, στο φράγμα έχουν εγκατασταθεί μόνιμα σημεία ελέγχου γεωδαιτικών μεθόδων, που αφορούν την καταγραφή των μετακινήσεων για την ανίχνευση παραμορφώσεων (αλλαγή της γεωμετρίας) στο σώμα του φράγματος ή το επίπεδο θεμελίωσης.



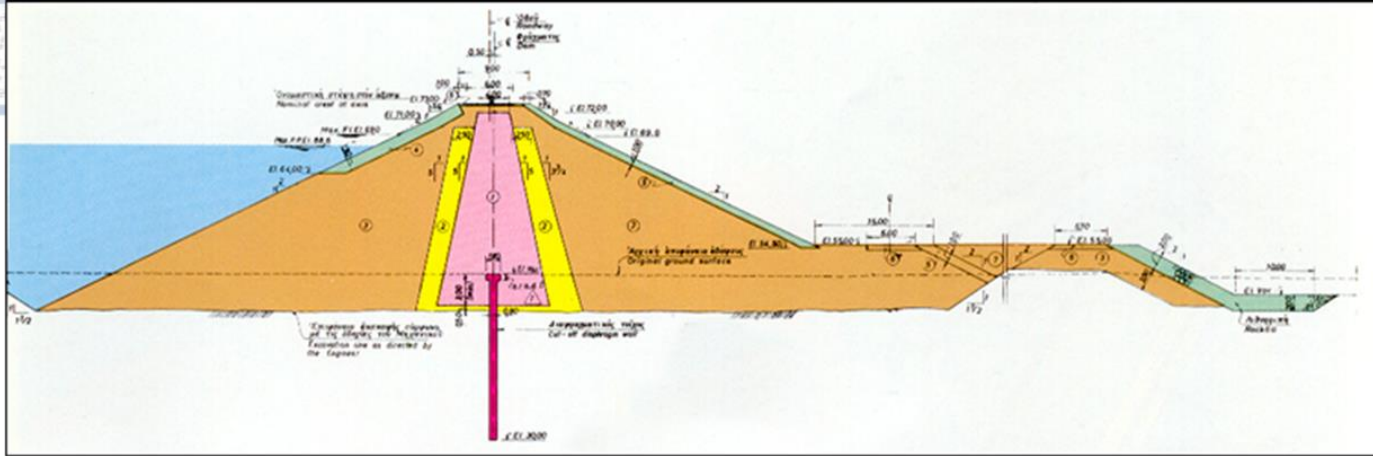
38°40'36.09" N
21°20'05.17" E

Νομός:
Αιτωλοακαρνανίας
Prefecture:
Aetoloakarnania

Ποταμός: **Αχελώος**
River: **Achelooos**

Εικ.15. Γεωγραφική θέση φράγματος Στράτου, Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (2013).

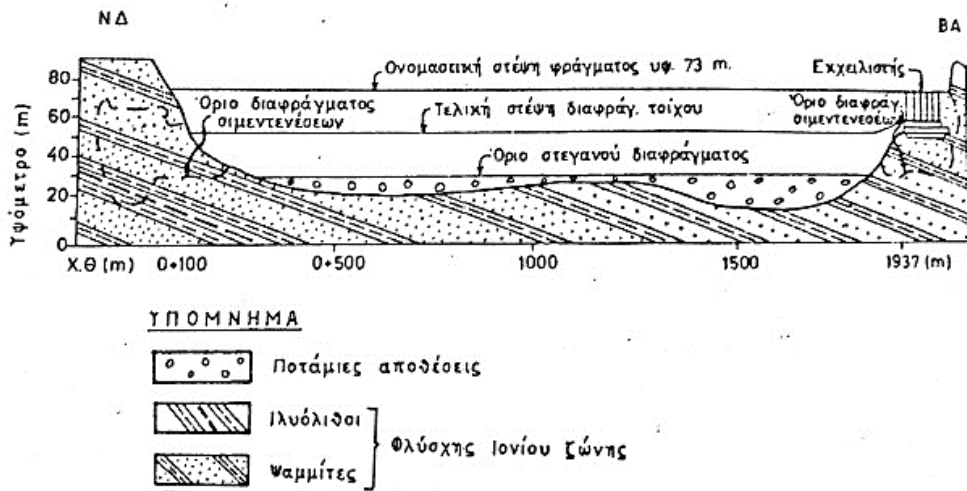
Το φράγμα Στράτου τοποθετείται γεωγραφικά στο νομό Αιτωλοακαρνανίας, στον κάτω ρου του ποταμού Αχελώου, 8 km κατάντη του φράγματος Κρεμαστών και είναι ένα έργο με πολλές και σημαντικές ιδιαιτερότητες που θα εκτεθούν στη συνέχεια. Οι εργασίες κατασκευής έγιναν μεταξύ 1981-1989 και αποτελεί έργο διπλής σκοπιμότητας, τόσο για άρδευση όσο και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι χωμάτινο φράγμα με κατακόρυφο αργιλικό πυρήνα και ύψος μόλις 26m, αλλά με μήκος στέψης που φτάνει τα 1900m και πλάτος βάσης τα 100m. Η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα είναι $11 \cdot 10^9 \text{m}^3$ νερού, με ανώτατη και κατώτατη στάθμη λειτουργίας τα 69m και 67m (απόλυτο υψόμετρο) αντίστοιχα.



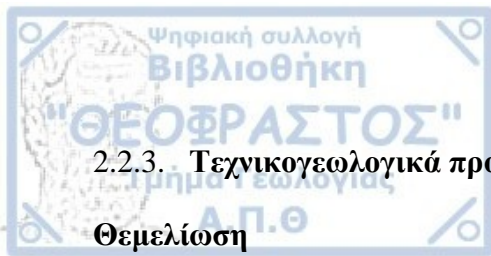
Εικ.16. Εγκάρσια διατομή φράγματος Στράτου, Δ.Ε. Λιάκουρης (1995).

2.2.2. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος

Η θέση θεμελίωσης και ταμιευτήρα του φράγματος περιλαμβάνει ποτάμιες αποθέσεις με μεγάλη ανάπτυξη και μορφή δύο αναβαθμίδων που διαχωρίζονται σε παλαιότερες και νεότερες. Τα αντερείσματα του έργου δομούνται από φλύσχη της Ιονίου ζώνης με εμφάνιση τυπικών εναλλαγών ψαμμιτών και ιλυολίθων και επικρατέστερη την παρουσία του ψαμμίτη. Ο φλύσχος εμφανίζεται γενικά υγής και στεγανός, αντίθετα οι ποτάμιες αποθέσεις, ειδικότερα οι αμμοχαλικώδεις, έχουν αυξημένη υδροπερατότητα. Αυτό, σε συνδυασμό με τον υδροφόρο ορίζοντα που εντοπίζεται αρκετά υψηλά, δημιούργησε προβλήματα εισροών, κυρίως κατά τη διάνοιξη της διώρυγας φυγής.



Εικ.17. Γεωλογική τομή κατά μήκος του άξονα του φράγματος, Δ.Ε. Λιάκουρης (1995).



2.2.3. Τεχνικογεωλογικά προβλήματα

Θεμελίωση

Το φράγμα Στράτου, όπως προαναφέρθηκε, έχει πολλές ιδιαιτερότητες η κυριότερη των οποίων είναι ότι θεμελιώνεται πάνω σε εξαιρετικά διαπερατές ποτάμιες αποθέσεις, επομένως υπήρχε μεγάλη ανάγκη λήψης εκτεταμένων μέτρων στεγανοποίησης.

Ευστάθεια

Το φράγμα Στράτου, εδράζεται πάνω σε τυπικούς σχηματισμούς του Ιονίου φλύσχη. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι γενικά υγιείς, επομένως δεν αναμένονταν ιδιαίτερα προβλήματα αντοχής κατά την κατασκευή των έργων του φράγματος. Παρ' όλα αυτά, οι κλίσεις του δεξιού αντερείσματος είναι ομόρροπες με εκείνες του φλύσχη, ενώ επίσης εντοπίστηκε μια επιφανειακή χαλάρωση της βραχομάζας στο αριστερό αντέρεισμα. Η χαλάρωση εκδηλώνεται με περιστασιακές αποκολλήσεις τεμαχών ψαμμιτών, αποτέλεσμα της διάβρωσης των ιλυολιθικών στρώσεων και του κατακόρυφου συστήματος διακλάσεων. Γενικά όμως δεν προέκυψαν σοβαρά προβλήματα αναφορικά με την ευστάθεια των αντερεισμάτων.

Στεγανότητα

Τα προβλήματα στεγανότητας του έργου εμφανίστηκαν κατά τις εργασίες κατασκευής της διώρυγας φυγής, η οποία διανοίχτηκε κατά μήκος αμμοχαλίκων με λίγη άργιλο και αργιλο-ίλυωδών αποθέσεων. Κατά το στάδιο διαμόρφωσης της τάφρου της διώρυγας, στα τμήματα με επικράτηση των αμμοχαλίκων, σημειώθηκαν ιδιαίτερα αυξημένες εισροές νερού, αποτέλεσμα της υψηλής στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και της αυξημένης υδροπερατότητας των ποτάμιων αποθέσεων.

Άλλοι γεωλογικοί κίνδυνοι

Η στάθμη του νερού στη λίμνη του φράγματος των Κρεμαστών καθορίζει και ελέγχει τη στάθμη και στους δύο κατάντη ταμιευτήρες, του Καστρακίου και του Στράτου και κατά συνέπεια και τον όγκο του νερού στην κοίτη του Αχελώου κατάντη αυτών. Επομένως, πιθανή αστοχία του φράγματος Κρεμαστών, συνεπάγεται άμεσα την αστοχία και των δύο



αυτών μικρότερων φραγμάτων, καθώς θα είναι αδύνατο να ελέγξουν τον όγκο του νερού που θα ελευθερωθεί.

2.2.4. Τρόπος κατασκευής - αντιμετώπιση προβλημάτων

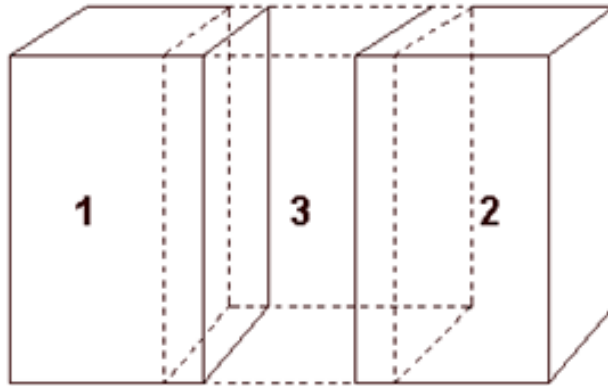
Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του φράγματος παρουσιάζει ενδιαφέρον, κυρίως λόγω των κατασκευαστικών λύσεων που εφαρμόστηκαν. Αρχικά η εκτροπή του ποταμού έγινε μέσα από τη φυσική κοίτη και όχι τα αντερείσματα, αλλά σε στενότερο, ενώ λόγω του μεγάλου μήκους του φράγματος η κατασκευή του σώματος του ξεκίνησε από τα δύο αντερείσματα. Αφού είχε ολοκληρωθεί ένα μεγάλο τμήμα του φράγματος και του υπερχειλιστή, κατασκευάστηκε πρόφραγμα κάτοψης που ένωσε τα δύο τμήματα του επιχώματος και η εκτροπή συνεχίστηκε μέσω του υπερχειλιστή.

Έτσι, αφού το μέτωπο του έργου έμεινε ανέπαφο από το νερό, οι εργασίες του φράγματος ολοκληρώθηκαν με την ένωση των δύο τμημάτων. Η κατασκευή του προφράγματος διατηρήθηκε και με επιπλέον επιχώσεις ενοποιήθηκε με το κυρίως φράγμα, σχηματίζοντας ένα ισχυρό αντίβαρο. Ο επίπεδος χώρος που φαίνεται κατάντη του φράγματος στην εικόνα 16 αποτελεί έως σήμερα χώρο πρασίνου και αναψυχής.

Η θεμελίωση του φράγματος, εκτός από τη συνήθη κατασκευή κουρτίνας τσιμεντενέσεων περιέλαβε και διαφραγματικό τοίχο από τσιμεντομπετονίτη κάτω από τον αργιλικό πυρήνα.

Την κατασκευή του στεγανού αυτού διαφράγματος επέβαλαν τόσο η περατότητα αλλά και η μικρή φέρουσα ικανότητα στη βάση θεμελίωσης και μέχρι βάθους 23m, που διαπιστώθηκε από εκτεταμένη δειγματοληψία. Το διάφραγμα αποτελείται από φατνώματα (panels) διαστάσεων 0,80x3x23m, τα οποία γέμισαν με ένεμα τσιμεντομπετονίτη.

Τα φατνώματα κατασκευάστηκαν εναλλάξ, αφήνοντας κενό το ενδιάμεσο, που κατασκευάστηκε στη συνέχεια, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 18). Έτσι εξασφαλίστηκε η πλήρης επικάλυψη και η έλλειψη διάκενων στο διαφραγματικό τοίχο. Το διάφραγμα επεκτάθηκε μέχρι τα 23m βάθος, γιατί μετά από αυτό και μέχρι τα 40m, που ήταν το όριο των αποθέσεων του ποταμού, η υδροπερατότητα ήταν περιορισμένη. Επιπλέον η επέκταση του διαφράγματος μέχρι τα 40m, θα παρεμπόδιζε τον εμπλουτισμό του υδροφόρου κατάντη του φράγματος με καταστροφικές περιβαλλοντικές συνέπειες.

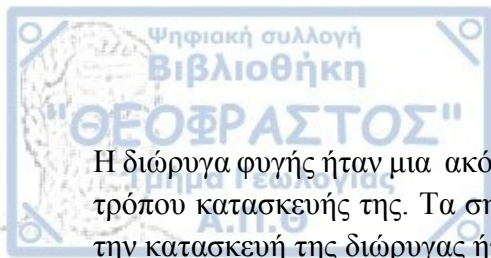


Εικ.18. Σχηματική απεικόνιση τμήματος του διαφραγματικού τοίχου.

Οι εργασίες στεγανοποίησης του έργου επεκτάθηκαν και στα δύο αντερείσματα, κυρίως στο αριστερό πρηνές αφού, όπως αναφέρθηκε, παρατηρήθηκε επιφανειακή χαλάρωση της βραχομάζας και ένα κατακόρυφο σύστημα διακλάσεων. Εφαρμόστηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (gunite) πάχους 5cm, σε συνδυασμό με αποστραγγιστικές οπές και διαφράγματα αποστράγγισης που διατάσσονται μέσα στα αντερείσματα όπως φαίνεται στην Εικόνα 19.



Εικ.19. Οπές αποστράγγισης και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο αριστερό αντέρεισμα του φράγματος.



Η διώρυγα φυγής ήταν μια ακόμη ιδιαιτερότητα του φράγματος του Στράτου, εξαιτίας του τρόπου κατασκευής της. Τα σημαντικά προβλήματα που έπρεπε να αντιμετωπιστούν για την κατασκευή της διώρυγας ήταν:

Η εκσκαφή αλλά και η επένδυση της διώρυγας έπρεπε να γίνουν με υποβιβασμό της υπόγειας στάθμης του ποταμού, η οποία τοποθετείται 3-4m πάνω από το δάπεδο της διώρυγας. Εξαιτίας αυτού, ο υδροφόρος ορίζοντα ο οποίος είναι υπό πίεση, θα ασκεί άνοση στο δάπεδο της διώρυγας (υδροστατικές πιέσεις), που θα έπρεπε να εξισορροπούνται με τη μόνιμη παρουσία στήλης νερού στη διώρυγα, ύψους 1-4m.

Επιπλέον, κατά την εκσκαφή της τάφρου της διώρυγας, αντιμετωπίστηκαν έντονα προβλήματα εισροών λόγω της υψηλής υδροπερατότητας των ποτάμιων αποθέσεων. Για να αντιμετωπιστούν, έγινε πυκνός κάρναβος υδρογεωτρήσεων και κατακόρυφων φρεάτων στα σημεία των αυξημένων εισροών, ενώ προβλέφθηκαν και αποστραγγιστικές διατάξεις στην επένδυση της διώρυγας. Αυτές οι διατάξεις διατηρήθηκαν και χρησιμοποιούνται, όταν η στάθμη του νερού στη διώρυγα μειωθεί πολύ, ώστε με άνοιγμά τους να πληρώνεται η διώρυγα και να αντισταθμίζονται οι υποπίεσεις που δημιουργούνται.

Ένα επιπλέον πρόβλημα ήταν ότι μεγάλο τμήμα της διώρυγας έπρεπε να κατασκευασθεί επάνω σε αμμοχαλικώδη υλικά με λίγη άργιλο κι ένα μικρότερο πάνω σε αργιλοϊλύδεις αποθέσεις. Η κακή ποιότητα αυτών των σχηματισμών επηρέασε τη διαμόρφωση των πρανών και την επιλογή της επένδυσης της διώρυγας.

2.3. Φράγμα Ασωμάτων

2.3.1. Γενικά



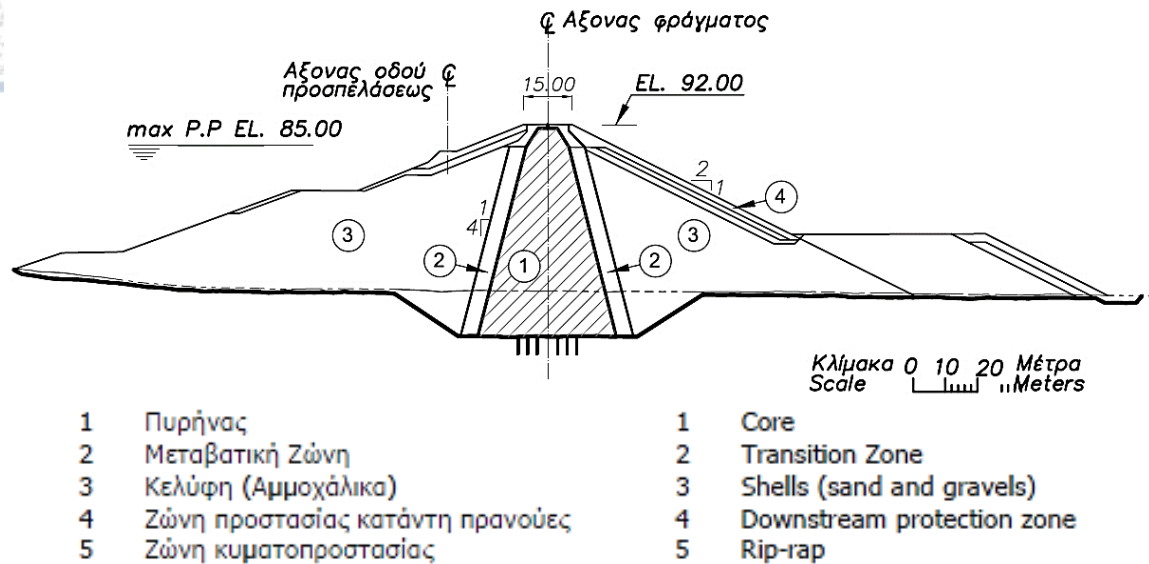
40°28'25.31" N
22°14'33.76" E

Νομός: **Ημαθίας**
Prefecture: **Imathia**

Ποταμός: **Αλιάκμονας**
River: **Aliakmonas**

Εικ.20. Γεωγραφική θέση φράγματος Ασωμάτων, Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (2013).

Το φράγμα Ασωμάτων εντοπίζεται στον ποταμό Αλιάκμονα, στο Δήμο Βέροιας, της περιφερειακής ενότητας Ημαθίας. Πρόκειται για χωμάτινο φράγμα με κατακόρυφο αργιλικό πυρήνα και εξωτερικές ζώνες από αμμοχάλικο ποταμού. Ο ταμιευτήρας των Ασωμάτων είναι ημερήσιας ρύθμισης, με χωρητικότητα $53 \cdot 10^9 \text{m}^3$ νερού, ενώ τα 10 από αυτά αποτελούν τον ωφέλιμο όγκο. Έχει ύψος 66m και μήκος στέψης 205m. Το έργο ολοκληρώθηκε το 1985 και αποσκοπεί στην υδροηλεκτρική παραγωγή και άρδευση των γειτονικών περιοχών.



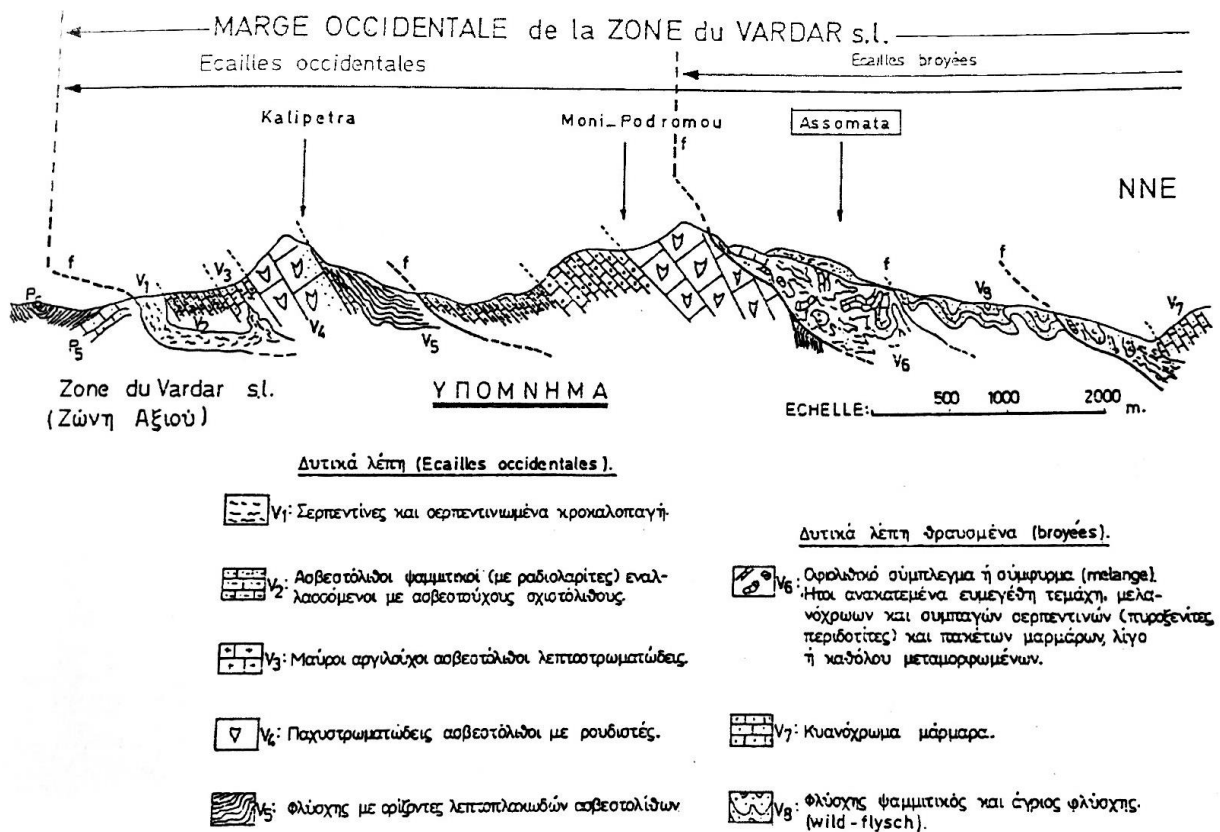
Εικ.21. Τυπική διατομή φράγματος Ασωμάτων, Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (2013).

2.3.2. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος

Η κοιλάδα του Αξιού έχει δημιουργηθεί από διάβρωση, μετά την ανάδυση της Ζώνης Αξιού και της Πελαγονικής Ζώνης στην περιοχή. Ο ταμιευτήρας των Ασωμάτων περιλαμβάνεται στη Ζώνη Αξιού και ειδικότερα στην υποζώνη της Αλμωπίας. Μεγάλες οφειολιθικές μάζες χαρακτηρίζουν τη Ζώνη Αξιού, παρουσιάζοντας εξάπλωση σε όλη της την έκταση και συνιστώντας στο σύνολό τους την «εσωτερική οφειολιθική λωρίδα» της Ελλάδας. Η υποζώνη της Αλμωπίας περιέχει κυρίως οφειόλιθους και συνοδά ιζήματα βαθιάς θάλασσας, από τα επικλυσιογενή ιζήματα Άνω Κρητιδικού, αλλά και από μεταμορφωμένα πετρώματα (μάρμαρα) που αποτελούσαν πετρώματα του Πελαγονικού ηπειρωτικού περιθωρίου.

Το υδροηλεκτρικό έργο των Ασωμάτων εδράζεται πάνω σε σερπεντινίτες, ενώ στα κατώτερα επίπεδα των αντρεισμάτων εντοπίζονται λέπια παχυστρωματωδών κρυσταλλικών ασβεστολίθων, εγκλωβισμένα μέσα στην οφειολιθική μάζα. Η στρωματογραφία συνεχίζεται ανώτερα με υγιή έως ελαφρά αποσαθρωμένο σερπεντινίτη με κροκάλες. Εντός της μάζας του σερπεντινίτη διακρίνονται ορίζοντες από νεότερα ηφαιστειακά τοφφικά πετρώματα, με το αριστερό πρηνές να εμφανίζει επίσης εναλλαγές με σερπεντινωμένα ηφαιστειακά λατυποπαγή, τα οποία αντικαθίστανται στα ανώτερα στρώματα από ένα παχύ ορίζοντα σερπεντινίτη.

Βασικό χαρακτηριστικό της τεκτονικής δομής της ζώνης Αξιού είναι η παρουσία συνεχών τεκτονικών λεπίων, τα οποία προσανατολίζονται με παράταξη ΒΔ-ΝΑ, με κλίση προς ΒΑ, επιπεδώντας το ένα το άλλο προς τα Δυτικά. Στην υποζώνη της Αλμωπίας, ειδικότερα, παρατηρείται η τεκτονική τοποθέτηση των οφειολίθων και των συνοδών ιζημάτων πάνω στο ανατολικό ηπειρωτικό περιθώριο του Πελαγονικού ηπειρωτικού τεμάχου, που έλαβε χώρα κατά το Άνω Ιουρασικό.



Εικ.22. Γεωλογική διατομή φράγματος, Δ.Ε. Λιάκουρης (1995).

Τα πετρώματα της περιοχής θεμελιώσης χαρακτηρίζονται συνολικά από μικρή υδροπερατότητα, επομένως με την εφαρμογή των συνηθισμένων εργασιών στεγανοποίησης, οι διαρροές θα βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων. Ειδικότερα, η οφειολιθική μάζα παρουσιάζει μειωμένη περατότητα, εκτός από δύο ανοιχτά ρήγματα που εντοπίζονται, όπου αυξάνεται ως φυσικό αποτέλεσμα. Οι ηφαιστειακοί τόφφοι που υπάρχουν στην περιοχή είναι οι σχηματισμοί με την πιο αυξημένη υδροπερατότητα, ενώ την πιο μειωμένη παρουσιάζουν οι λατυποπαγείς σερπεντινίτες. Τέλος, οι ασβεστόλιθοι, που περιβάλλονται από τη μάζα των οφειολίθων, δεν είναι καρστικοποιημένοι και παρουσιάζουν μικρή υδροφορία με ασθενείς υδροφόρους ορίζοντες υπό πίεση. Γενικά, οι



γεωλογικοί σχηματισμοί στη θέση του φράγματος θεωρούνται στεγανοί, αν εξαιρεθούν τοπικά φαινόμενα εκδήλωσης ροής νερού, τα οποία είναι αποτέλεσμα κυρίως των ρωγμών, των ρηγμάτων (κανονικών και ανάστροφων) και των διακλάσεων, που χαρακτηρίζουν το τεκτονικό καθεστώς της ευρύτερης περιοχής.

2.3.3. Τεχνικογεωλογικά προβλήματα

Θεμελίωση

Η έντονη κατάτμηση της οφειολιθικής μάζας μαζί με την επίδραση πολλών – τόσο ανάστροφων όσο και κανονικών – ρηγμάτων, ζωνών διάτμησης και διακλάσεων, είχε ως αποτέλεσμα τη διήθηση νερού μέσα στη βραχομάζα. Το γεγονός αυτό, οδήγησε στη δημιουργία σημαντικών ζωνών αποσαθρωμένου ή εξαλλοιωμένου υλικού, με πάχη από λίγα εκατοστά μέχρι και 3m. Τέτοιες ζώνες εντοπίστηκαν και στην περιοχή θέσης φράγματος, αλλά η υδροπερατότητα ήταν ικανοποιητική στο σύνολο, δηλαδή μειωνόταν όσο αύξανε το βάθος και κυμαίνονταν μέσα σε αποδεκτά όρια, σε ασυνέχειες και ανοίγματα στη βραχομάζα. Γενικά όμως, παρά τη μέτρια ποιότητα των πετρωμάτων της περιοχής θέσης του φράγματος, δεν παρουσιάστηκαν σοβαρά προβλήματα κατά την κατασκευή του φράγματος.

Ευστάθεια

Κατά τη φάση της προκαταρκτικής γεωλογικής μελέτης της περιοχής θέσης φράγματος που πραγματοποιήθηκε, έγινε συλλογή στοιχείων αναφορικά με τη γεωλογία των αντρεισμάτων.

Στο δεξιό αντέρεισμα εντοπίζεται συμπαγής, υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος σερπεντινίτης με κροκάλες. Σε υψόμετρο +70 έως +80 μέτρα διακρίνεται ένας ορίζοντας από νεότερα ηφαιστειακά τοφφικά πετρώματα. Κατά το στάδιο κατασκευής, εντοπίστηκε ένα μέτωπο κατολίσθησης, ενώ έγινε φανερό ότι δεν υπάρχει εκτεταμένη παρουσία ρηγμάτων και διακλάσεων.

Στο αριστερό αντέρεισμα παρατηρούνται εναλλαγές σερπεντινωμένων ηφαιστειακών λατυποπαγών και σερπεντινών, οι οποίες στα ανώτερα στρώματα μεταβαίνουν σε σερπεντινίτη. Εντοπίζονται δύο οικογένειες ασυνεχειών, μία σχεδόν κάθετα προς το πρανές και η άλλη κατά τη διεύθυνση των ρηγμάτων εφίπλευσης της περιοχής, καθώς και πολλαπλές ζώνες διάρρηξης. Στο ίδιο αντέρεισμα παρατηρήθηκαν επίσης κατολισθήσεις,



μια σχετικά κρίσιμη και δύο άλλες μικρότερες, ενώ κατά την εκσκαφή του πρανούς, αποκαλύφθηκαν ανοιχτές ρωγμές και κενά.

Στεγανότητα

Γενικά, οι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής του φράγματος θεωρούνται μικρής υδροπερατότητας, αν εξαιρεθούν τοπικά φαινόμενα εκδήλωσης ροής νερού, μέσω ρωγμών, ρηγμάτων και διακλάσεων, χαρακτηριστικά των λεπίων της ευρύτερης περιοχής. Τα λέπια περιέχουν όπως αναφέρθηκε παχυστρωματώδεις κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, οι οποίοι όμως είναι εγκλωβισμένοι μέσα στην οφειολιθική μάζα, χωρίς υδραυλική επικοινωνία και διέξοδο προς τα κατάντη. Τοπικά αυξημένη υδροπερατότητα εμφανίστηκε σε ζώνες αποσαθρωμένου και εξαλλοιωμένου οφειολιθικού υλικού καθώς και σε ρηξιγενείς ζώνες. Επομένως, στο έργο δεν προέκυψαν σημαντικά προβλήματα στεγανότητας.

2.3.4. Αντιμετώπιση προβλημάτων

Θεμελίωση

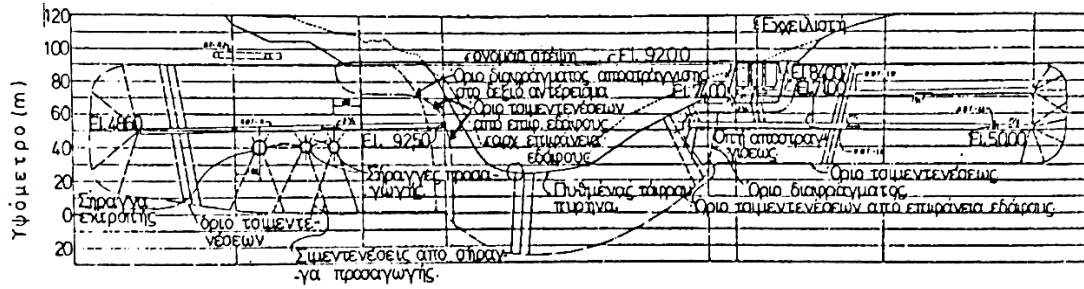
Οι ζώνες αποσαθρωμένου και εξαλλοιωμένου υλικού στην περιοχή θέσης φράγματος, με αυξημένη υδροπερατότητα, αντιμετωπίστηκαν επαρκώς με κατασκευή συμβατικής κουρτίνας τσιμεντενέσεων. Γύρω από τις ζώνες, η υδροπερατότητα μειωνόταν όσο αύξανε το βάθος, με διακυμάνσεις, αλλά σε αποδεκτά όρια, μέσα από ασυνέχειες και ανοίγματα στη βραχομάζα, χωρίς να απαιτούνται περαιτέρω μέτρα στεγανοποίησης.

Ευστάθεια

Για τη διασφάλιση κάποιων ζωνών κατολίσθησης στα αντερείσματα, πραγματοποιήθηκαν εκτενείς εκσκαφές. Στο αριστερό αντερείσμα, λήφθηκαν επιπλέον μέτρα για την αποφυγή αστάθειας εξαιτίας της παρουσίας ανοιχτών ρωγμών και κενών, που αποκαλύφθηκαν κατά την εκσκαφή του πρανούς.

Στεγανότητα

Τα προβλήματα στεγανότητας ήταν μικρής έκτασης, καθώς η περατότητα φαίνεται να μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος, όπως απалаίφεται στα βαθύτερα υγρή και συμπαγή στρώματα. Όμως, προκειμένου να επιτευχθούν οι ελάχιστες δυνατές εισροές νερού, κατασκευάστηκε κουρτίνα τσιμεντενέσεων, μέχρι βάθους ~50m.



Εικ.23. Κατάντη όψη διαφραγματικής κουρτίνας φράγματος, Δ.Ε. Λιάκουρης (1995).



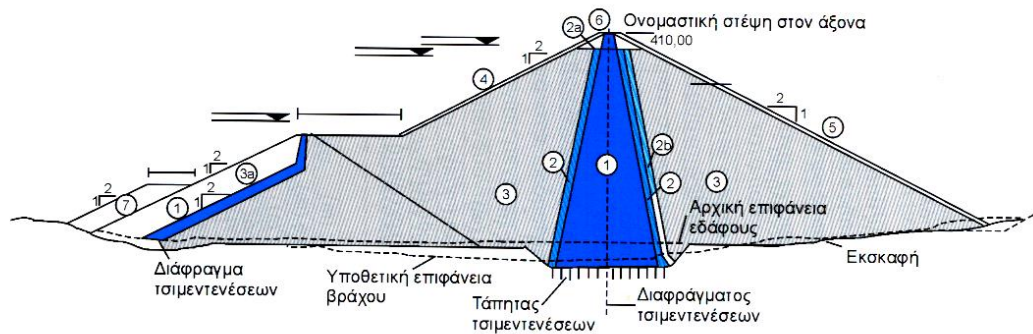
40°05'51.20" N
21°48'24.60" E

Νομός: Κοζάνης
Prefecture: Kozani

Ποταμός: Αλιάκμονας
River: Aliakmonas

Εικ.24. Γεωγραφική θέση φράγματος Ιλαρίωνα, Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (2013).

Το φράγμα Ιλαρίωνα τοποθετείται γεωγραφικά στον ποταμό Αλιάκμονα, στα όρια των Δήμων Κοζάνης και Σερβίων-Βελεβεντού της περιφερειακής ενότητας Κοζάνης. Είναι χωμάτινο φράγμα με κεντρικό αργιλικό πυρήνα και σώματα στήριξης από αμμοχάλικα κοίτης. Ο ταμιευτήρας του έχει χωρητικότητα $520 \cdot 10^9 \text{m}^3$ νερού, ύψος 140m και μήκος στέψης 525m. Το υδροηλεκτρικό έργο του Ιλαρίωνα περατώθηκε το 2012 και είναι ένα έργο ανάπτυξης της περιοχής με πολλαπλούς σκοπούς. Εκτός από την παραγωγή ενέργειας, βοηθάει τη διευθέτηση της ετήσιας απορροής του ποταμού, καλύπτει ανάγκες υδροδότησης της Θεσσαλονίκης και αρδευτικές ανάγκες των γειτονικών περιοχών.



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- (1) Αδιαπέρατος πυρήνας
- (2) Λεπτόκοκκο φίλτρο. Αμμοχάλικα ποταμού επεξεργασμένα. Μέγιστη διάσταση 19mm
- (2a) Μεταβατική ζώνη. Αμμοχάλικα μέγιστης διάστασης 20cm
- (2b) Χονδρόκοκκο φίλτρο. Αμμοχάλικα επεξεργασμένα. Μέγιστη διάσταση 75mm
- (3) Σώμα στήριξης. Αμμοχάλικα ποταμού. Μέγιστη διάσταση 30cm
- (3a) Εξωτερική ζώνη κυρίως ανάντη προφράγματος (λιθορριπή). Μέγιστο μέγεθος 90cm
- (4) Προστασία ανάντη πρσανούς. (Λιθορριπή από προϊόντα λατομείων)
- (5) Προστασία κατάντη πρσανούς. (Επεξεργασμένες κροκάλες ποταμού). Μέγεθος 60cm
- (6) Βάση δρόμου στέψης. (Θραυστός βράχος)
- (7) Υλικά εκκαφών τυχαίας διαβάθμισης

Εικ.25. Εγκάρσια διατομή φράγματος Ιλαρίωνα, Θ. Μακεδόν (2021)

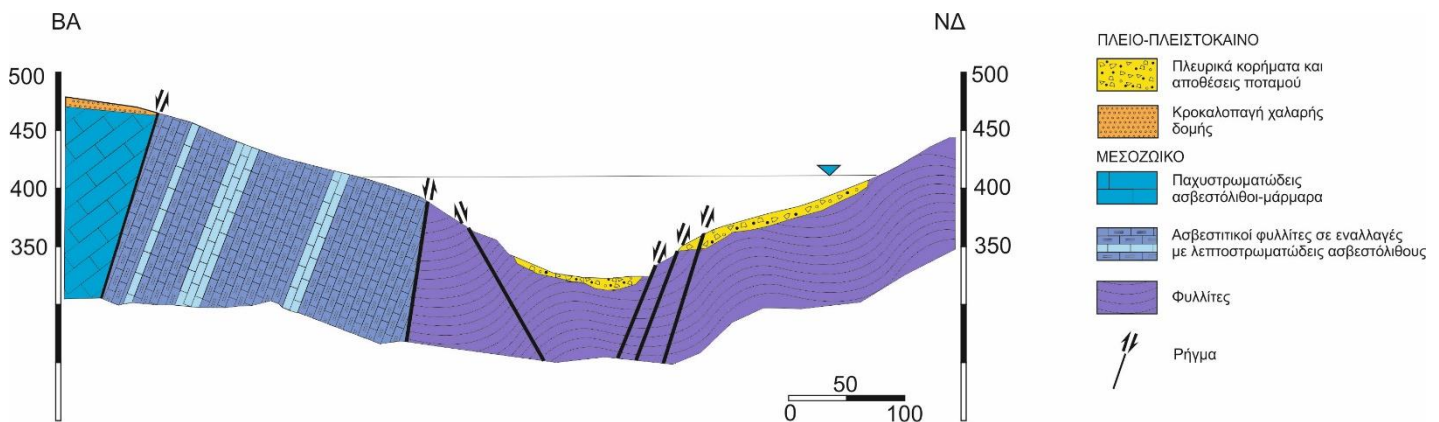
2.4.2. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος

Το φράγμα του Ιλαρίωνα τοποθετείται στην Πελαγονική ζώνη, στην οποία περιλαμβάνονται οι εξής σχηματισμοί:

- Το Προαλπικό μεταμορφωμένο υπόβαθρό της, που εκπροσωπείται με Παλαιοζωικούς γενεσιοσχιστόλιθους και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους
- Τα Τριαδικά μάρμαρα Βουνάσας-Γρανοβάλτου
- Οι φυλλίτες του κάτω Ιουρασικού
- Οι οφειόλιθοι του μέσου και άνω Ιουρασικού
- Οι ασβεστόλιθοι του άνω Ιουρασικού-Κρητιδικού
- Κάποιοι νεότεροι μεταλικοί σχηματισμοί, στους οποίους περιλαμβάνονται πλειο-πλειστοκαινικές αποθέσεις, πλευρικά κορήματα, ποτάμιες αποθέσεις και οι μολάσσειες της Μεσοελληνικής Αύλακας, που εμφανίζονται αποσπασματικά στις όχθες του ποταμού.

Ειδικότερα το φράγμα θεμελιώνεται κυρίως πάνω σε σχηματισμούς φυλλιτών, ενώ ένα μικρότερο μέρος του σε κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους. Ανάμεσα στους δύο αυτούς ορίζοντες, αναπτύσσεται μια μεταβατική ζώνη, μικρού σχετικά πλάτους, με εναλλαγές φυλλιτών-ασβεστολίθων, η οποία οφείλεται στην επώθηση των ασβεστολίθων επί των φυλλιτών. Τέλος, ένα μικρό τμήμα της κατασκευής βρίσκεται πάνω σε αλλουβιακές αποθέσεις (Κλήμης et al., 2006). Οι αποθέσεις αυτές, αποτελούνται κυρίως από κροκαλοπαγή χαλαρής δομής, με αυξημένη υδροπερατότητα. Σε σημαντικά μικρότερο ποσοστό, υπάρχουν ιλυόλιθοι, ψαμμίτες και μάργες, που αποτελούν το στεγανό στοιχείο του συνόλου και δημιουργούν επικρεμάμενους υδροφόρους ορίζοντες.

Τα αντερείσματα δομούνται από φυλλίτες έως ασβεστιτικούς φυλλίτες, ενώ στα ανώτερα τμήματα του αριστερού αντερείσματος εντοπίζονται ορίζοντες της μεταβατικής ζώνης. Οι φυλλίτες είναι συνολικά μέτριας ποιότητας, που όμως θεωρούνται πρακτικά στεγανοί σχηματισμοί. Αντίθετα, οι ασβεστόλιθοι, αν και καλύτερης ποιότητας, παρουσιάζουν αυξημένη υδροπερατότητα λόγω καρστικοποίησης η οποία επιπλέον υποβαθμίζει την ποιότητά τους.



Εικ.26. Γεωλογική διατομή φράγματος, Δ. Ε. Λιάκουρης, 1995 (τροποποιημένο από Θ. Μακεδών).

Όλη η βραχομάζα, πάνω στην οποία εδράζεται το έργο, διατέμνεται από δύο οικογένειες κανονικών ρηγμάτων κατακόρυφων ή κεκλιμένων, με σημαντικότερο το ρήγμα Ιλαρίωνα, το οποίο διέρχεται κατά μήκος της επαφής της ασβεστολιθικής μάζας και της μεταβατικής ζώνης εναλλαγών, με διεύθυνση σχεδόν παράλληλη προς τον άξονα του φράγματος. Ο συνδυασμός των δύο οικογενειών ρηγμάτων της περιοχής προκάλεσε τη βύθιση του βραχώδους υποβάθρου των μαρμάρων, 140m χαμηλότερα από τη σημερινή κοίτη του Αλιάκμονα, δημιουργώντας ένα τεκτονικό βύθισμα. Το βύθισμα αυτό αποτελείται από

λιμναίες, ποταμολιμναίες αποθέσεις, με πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 60-154m και είναι το πεδινό, κεντρικό τμήμα της λεκάνης της Ελάτης. Η συγκέντρωση των επιφανειακών απορροών της περιοχής εντός του βυθίσματος δημιούργησε ποταμολιμναίο περιβάλλον και προκάλεσε την έναρξη ενός δεύτερου κύκλου διάβρωσης των υποκείμενων, καρστικοποιημένων μαρμάρων, κατά μήκος των ρηγμάτων και των υπολοίπων ασυνεχειών της βραχομάζας.

Γενικά, η μορφολογία της περιοχής καθώς και όλος ο μηχανισμός γένεσης και διάβρωσης του τεκτονικού βυθίσματος, επιτρέπουν να χαρακτηριστεί ως δολίνη. Η δολίνη αυτή καταλαμβάνει όλο το πλάτος της ζώνης των μαρμάρων της Πελαγονικής (μάρμαρα Βουνάσας), που παρεμβάλλεται μεταξύ των υποκείμενων γενεσιο-σχιστόλιθων και του υπερκείμενου φυλλίτη. Η εκροή του νερού που συγκεντρωνόταν στη δολίνη είναι πιθανόν να κατέληγε στην περιοχή των πηγών Ρυμνίου, μέσω καρστικών αγωγών των μαρμάρων.

2.4.3. Τεχνικογεωλογικά προβλήματα

Θεμελίωση

Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των εκτεταμένων εκσκαφών, του ασταθούς δεξιού αντερείσματος, ήταν ένα από τα πιο σημαντικά γεωλογικά και γεωτεχνικά προβλήματα του υδροηλεκτρικού έργου του Ιλαρίωνα. Ανάντη του ρήγματος όπου θεμελιώνεται το κύριο τμήμα του ανάντη σώματος του φράγματος Ιλαρίωνα, το ανάγλυφο είναι ιδιαίτερα έντονο (υψηλά, απόκρημνα πρανή). Αντίθετα, η μορφολογία κατάντη του ρήγματος είναι σχετικά ήπια στα ανώτερα υψόμετρα του αντερείσματος και γίνεται ελαφρά πιο απότομη χαμηλότερα, αμέσως πάνω από την κοίτη του ποταμού. Εκεί θεμελιώνεται το κυρίως μέρος του φράγματος.

Ευστάθεια

Τα αντερείσματα του φράγματος Ιλαρίωνα δομούνται από φυλλίτες έως ασβεστιτικούς φυλλίτες, ενώ στα ανώτερα τμήματα του αριστερού αντερείσματος εντοπίζονται ορίζοντες της μεταβατικής ζώνης (εναλλαγές ασβεστολίθων-φυλλιτών).

Στο αριστερό αντερείσμα ο προσανατολισμός της σχιστότητας απεδείχθη γενικά ευνοϊκός για την ευστάθεια. Κατά το στάδιο κατασκευής, εντοπίστηκε σημείο με ασβεστολιθικής σύστασης υλικά καταπτώσεων, μέσου πάχους 15m, τα οποία παρουσίαζαν οριακή



ευστάθεια, σε ευρύτερη κλίμακα όμως, τα φυσικά πρηνή ήταν σταθερά χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα.

Στο δεξιό αντέρεισμα, πραγματοποιήθηκαν διεξοδικές έρευνες κατά την προκαταρκτική γεωλογική μελέτη, με εκτέλεση λεπτομερούς γεωλογικής χαρτογράφησης, ερευνητικών γεωτρήσεων, διάνοιξη ερευνητικών στοών και εκτέλεση γεωφυσικών διασκοπήσεων. Οι παραπάνω ενέργειες έδωσαν σημαντικές πληροφορίες για τον προσανατολισμό της σχιστότητας, ο οποίος εκτός από την υδροπερατότητα, επηρεάζει σημαντικά την ευστάθεια και τη γενικότερη συμπεριφορά της φυλλιτικής βραχομάζας στα φυσικά και τεχνητά πρηνή. Στο δεξιό αντέρεισμα είναι ελαφρά δυσμενής με φαινόμενες κλίσεις ομόρροπες στα φυσικά πρηνή, οι οποίες μπορούσαν να οδηγήσουν σε δημιουργία κατολισθητικών φαινομένων.

Επιπλέον στοιχεία υπέδειξαν ότι, η γενικευμένη αστάθεια των φυσικών πρηνών οφείλεται κυρίως στο κανονικό ρήγμα Ιλαρίωνα, που διατέμνει σχεδόν κάθετα την κοιλάδα του Αλιάκμονα και αποτελεί την τεκτονική επαφή των φυλλιτών με τους Ιουρασικούς παχυστρωματώδεις ασβεστολίθους.

Το 2004, μόλις ξεκίνησαν οι εργασίες κατασκευής του φράγματος, διαπιστώθηκαν κάποιες διαφορές στην τοπογραφία με τα ψηλά και απότομα ασβεστολιθικά αντερείσματα, στα ανάντη του ρήγματος Ιλαρίωνα. Για την αποφυγή κατασκευαστικών δυσχερειών οι εκσκαφές έπρεπε να τροποποιηθούν.

Όταν η εκσκαφή έφτασε σε ύψος περίπου +355m, εμφανίστηκαν ρωγμές στο ανάντη μέρος των αντερειμάτων, στην επαφή της φυλλιτικής με την ασβεστολιθική βραχομάζα, που έφταναν περίπου έως το υψόμετρο +470. Ταυτόχρονα, σημειώθηκε αργά εξελισσόμενη ολίσθηση της βραχομάζας πάνω σε διακριτή επιφάνεια, στο κατάντη τμήμα, που ακολουθούσε σχεδόν κατά μήκος την ζώνη διάτμησης με γεωμετρία που προσέγγιζε αυτή της σχιστότητας της περιοχής, ($\pm 15^\circ - 20^\circ$ ως προς τη διεύθυνση κλίσης), που έκανε δυσμενέστερες τις συνθήκες ευστάθειας.

Στις αρχές του 2006, μετά από έντονες βροχοπτώσεις μερικών ημερών, εκδηλώθηκε ολίσθηση στα τελικά πρηνή εκσκαφής, περίπου 100 μέτρα κατώτερα από εκείνα που είχαν διαμορφωθεί για να αντιμετωπιστεί η κατολίσθηση του 2004. Τα πρώτα ενδεικτικά στοιχεία ήταν η διόγκωση του πρηνούς εκσκαφής από τον αναβαθμό στο υψόμετρο +410 έως το υψόμετρο +395 περίπου, με παρουσία επιφάνειας ολίσθησης. Τα στοιχεία επαληθεύτηκαν από τις ενδείξεις των εγκατεστημένων οργάνων και οδήγησαν σε μετακίνηση των εδαφικών υλικών και εμφανείς ρωγμές και παραμορφώσεις σε διάφορες κατασκευές, όπως στον τοίχο προστασίας στην αναβαθμίδα +430. Στο ίδιο ύψος, διευρύνθηκε σημαντικά η μικρή προϋπάρχουσα ρωγμή στην πλάκα επένδυσης της



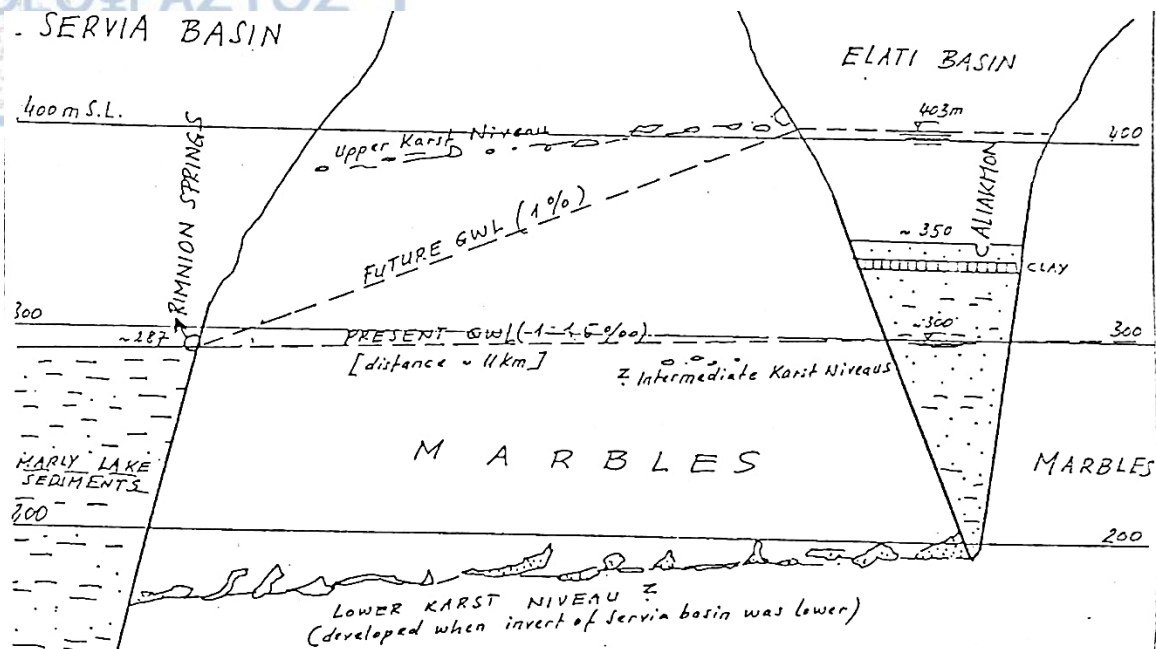
αναβαθμίδας. Μετά την πρώτη εβδομάδα έντονης μετακίνησης (έως και μερικά cm/ημέρα), η ταχύτητα της κατολίσθησης ελαττώθηκε κατά μία τάξη μεγέθους και περισσότερο.

Στεγανότητα

Το φράγμα του Ιλαρίωνα εδράζεται πάνω στο μεταμορφωμένο υπόβαθρο της Πελαγονικής, το οποίο αποτελείται από γνευσιοσχιστόλιθους, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους και φυλλίτες. Στο σύνολό τους, θεωρούνται πρακτικά στεγανοί σχηματισμοί, γεγονός που αποτέλεσε το κύριο κριτήριο για την επιλογή της θέσης του έργου. Παρ' όλα αυτά, η ανομοιογένεια της φυλλιτικής βραχομάζας παρέχει ικανοποιητική στεγανότητα σε διευθύνσεις εγκάρσιες προς τη σχιστότητα, ενώ σε διευθύνσεις παράλληλες σε αυτήν και κυρίως στους ασβεστιτικούς φυλλίτες, η υδροπερατότητα είναι σημαντική. Η τελική μελέτη, σύμφωνα με την οποία σχεδιάστηκαν τα μέτρα στεγανοποίησης, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η πιθανότητα σημαντικών διαφυγών μέσω των ρηγμάτων, σε διευθύνσεις εγκάρσιες προς τη σχιστότητα, είναι πολύ μικρή, αλλά υπάρχει σοβαρός κίνδυνος διαφυγών νερού παράλληλα προς αυτήν μέσω των ασβεστιτικών φυλλιτών και των ασβεστολιθικών ενστρώσεων της βραχομάζας. Η υδροπερατότητα των ζωνών αυτών, είναι αποτέλεσμα ανοιχτών ασυνεχειών σε βάθη που φτάνουν ή και ξεπερνούν τα 100m, και του σημαντικού βαθμού καρστικοποίησης των ασβεστολίθων.

Στο αριστερό αντέρεισμα οι δυνητικές διαρροές θα μπορούσαν να εκδηλωθούν μέσω πλευρικών διαφυγών προς τα πλειοκαινικά ιζήματα της παλαιάς κοίτης του Αλιάκμονα, λόγω της υψηλής τους διαπερατότητας και της επαφής τους με καρστικοποιημένους ασβεστόλιθους. Επειδή το πάχος των αυτών των ιζημάτων μεταβάλλεται διαρκώς, η μελέτη κατέληξε στο ότι η κίνηση νερού μπορεί να γίνει μόνο σε περιορισμένες αποστάσεις.

Οι πιθανές διαφυγές νερού του ταμιευτήρα μέσα από τη ζώνη των καρστικοποιημένων μαρμάρων, από τη λεκάνη της Ελάτης προς τις πηγές Ρυμνίου, ήταν το μεγαλύτερο γεωλογικό πρόβλημα που αντιμετώπισε η μελέτη και κατασκευή του φράγματος Ιλαρίωνα, και ο λόγος για τον οποίο πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένα έργα στεγανοποίησης σε όλο το μήκος του θεμελίου του.



Εικ.27. Υδρολιθολογική τομή μεταξύ λεκάνης Ελάτης και πηγών Ρυμνίου, Δ.Ε. Λιάκουρης (1995).

2.4.4. Αντιμετώπιση προβλημάτων

Θεμελίωση

Αρχικά στη θέση θεμελίωσης, κρίθηκε αναγκαία η απομάκρυνση των επιφανειακών χαλαρών υλικών κατολίσθησης, πάχους 5-15m που κάλυπταν τη θέση, ώστε να εξασφαλιστεί μια όσο το δυνατόν πιο ομαλή μορφολογία της επιφάνειας θεμελίωσης και να αποκαλυφθεί υγιής βραχομάζα. Λόγω της χαμηλής ποιότητας της φυλλιτικής βραχομάζας, ήταν αναγκαία η διαμόρφωση μόνιμων πρανών με κατάλληλες κλίσεις στο τμήμα της εκσκαφής πάνω από την στέψη του φράγματος. Τα πρανή διαμορφώθηκαν σχεδόν παράλληλα με τη διεύθυνση των ισοϋψών του φυσικού εδάφους, με σχετικά ήπιες κλίσεις, για την αποφυγή υλοποίησης άλλων μέτρων ευστάθειας πλην της εφαρμογής φυτοκάλυψης, ώστε να μειωθεί η επιφανειακή διάβρωση και να επιταχυνθεί η περιβαλλοντική αποκατάσταση του χώρου.



Στο αριστερό αντέρεισμα, εντοπίστηκε κατάπτωση ασβεστολίθων μέσου πάχους 15m, που απομακρύνθηκε για την αποφυγή αστοχιών.

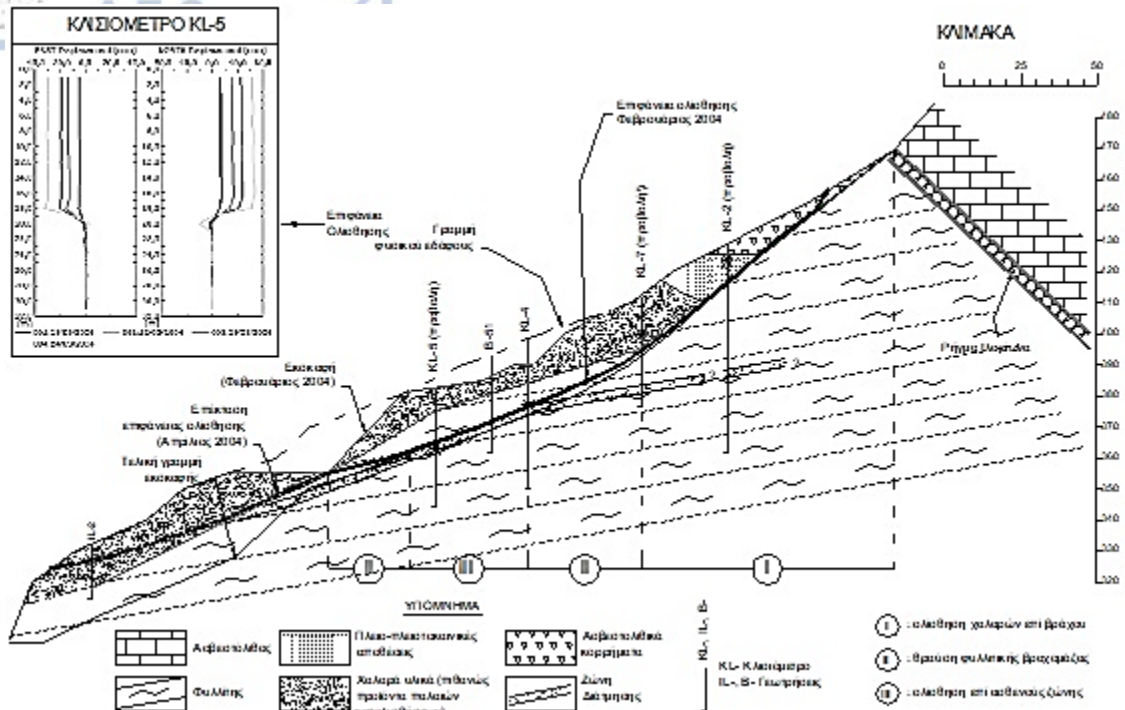
Στο δεξιό αντέρεισμα, η παρουσία υλικών ασταθούς μάζας, οδήγησε τους σύμβουλους της Δ.Ε.Η. στην πρόταση εκσκαφής των υλικών αυτών και την πλήρη απομάκρυνση τους, καθώς και την κατασκευή έργων αντιστήριξης.

Στο ανάντη τμήμα της εκσκαφής, στην επαφή με τα ψηλά και απότομα ασβεστολιθικά πρανή, χρειάστηκε να τροποποιηθούν οι κλίσεις των γραμμών εκσκαφής για αποφυγή κατασκευαστικών δυσχερειών και καθυστερήσεων, που θα προέκυπταν σε τέτοιου είδους πρανή. Οι κλίσεις που εφαρμόστηκαν στα προσωρινά πρανή, ήταν αρκετά απότομες (έως 45°), εφόσον σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία, η φυλλιτική βραχομάζα στην περιοχή είχε σχετικά ικανοποιητικά διατμητικά χαρακτηριστικά.

Όταν η εκσκαφή έφτασε στο υψόμετρο +355, εμφανίστηκαν ρωγμές, αλλά και ταυτόχρονη μετακίνηση βραχομάζας πάνω σε διακριτή επιφάνεια ολίσθησης, στο κατάντη τμήμα. Για την εκτίμηση του μεγέθους του προβλήματος, εγκαταστάθηκαν άμεσα γεωτεχνικά όργανα παρακολούθησης της ολισθαίνουσας μάζας (κλισιόμετρα – φρέατα παρακολούθησης υπόγειου ορίζοντα). Η εξέλιξη της μετακίνησης ήταν αργή (~10 mm/ημέρα) και η εγκατάσταση και αξιολόγηση των μετρήσεων ολοκληρώθηκε ταχύτατα, εντός 20 ημερών.

Συνδυάζοντας όλα τα διαθέσιμα στοιχεία που προέκυψαν από τις νέες μετρήσεις (επιφανειακές μετακινήσεις, ρωγματώσεις, βάθη διατμήσεων στα εγκατεστημένα κλισιόμετρα, κλπ), προσδιορίστηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μετακινούμενης μάζας και εκτιμήθηκε ότι το μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης από την εκσκαφή ήταν ίσο με 20m περίπου.

Ο μηχανισμός της αστάθειας περιλάμβανε ολίσθηση της μάζας επί διακριτών ασθενών επιφανειών στο ανώτερο και στο κατώτερο τμήμα της (διεπιφάνεια χαλαρών υλικών φυλλιτικού υποβάθρου και προϋπάρχουσα ζώνη διάτμησης) καθώς και θραύση της εξασθενημένης φυλλιτικής βραχομάζας στο άνω μέρος της. Με ανάστροφη ανάλυση (back-analysis) εκτιμήθηκαν οι μέσες τιμές των διατμητικών παραμέτρων στην επιφάνεια ολίσθησης, στην κεντρική Διατομή I-I (Εικ.28), η διεύθυνση της οποίας προσέγγιζε την μέση διεύθυνση της κατολισθητικής κίνησης. Υπολογίστηκαν οι συντελεστές ασφαλείας για διάφορες στάθμες αποφόρτισης καθώς και για πλήρη απομάκρυνση της κατολισθαίνουσας μάζας πάνω από τις στάθμες αυτές. Δεν λήφθηκε υπόψιν η επιρροή του υπόγειου νερού, καθώς με βάση τα εγκατεστημένα πιεζόμετρα το επίπεδο του υπόγειου ορίζοντα ήταν πολύ χαμηλότερα από την επιφάνεια ολίσθησης.



Εικ.28. Κατολίσθηση Φεβρουαρίου 2004, Τομή I-I, Κ. Αναστασόπουλος et al. (2008)

Η λύση θα έπρεπε να υλοποιηθεί ώστε να μην επηρεάζει τις εκσκαφές της τάφρου πυρήνα, που ήταν σε εξέλιξη. Έτσι κρίθηκε απαραίτητη η πλήρης εκσκαφή του ανώτερου τμήματος της κατολίσθησης και οι κλίσεις ακολούθησαν την απότομη μορφολογία των ασβεστολιθικών πρανών προς τα ανάντη.

Οι εργασίες αποφόρτισης ξεκίνησαν την άνοιξη του 2004 και τα υλικά εκσκαφής των υπερκείμενων πρανών προωθούνταν προσωρινά επί της ολισθαίνουσας μάζας, φορτίζοντας το άνω μέρος της. Αυτό προκάλεσε σημαντική επιτάχυνση της μετακίνησης (έως τα 20 cm/ημέρα), και εμφάνιση ρωγμών και μετακινήσεων χαμηλότερα. Κατόπιν αυτού, αποφασίστηκε να απομακρυνθεί και το κατώτερο τμήμα της κατολίσθησης.

Η φυλλίτις βραχομάζα που αποκαλύφθηκε μετά την εκσκαφή των πρανών, στην υποκείμενη περιοχή ήταν καλής ποιότητας και τα νέα πρανά που διαμορφώθηκαν δεν εμφάνισαν προσωρινά άλλα προβλήματα ευστάθειας.

Στις αρχές του 2006 όμως, εκδηλώθηκε νέα κατολίσθηση παρόλο που μέχρι τότε και παρά τους συνεχείς ελέγχους, δεν είχαν προκύψει σαφείς ενδείξεις αστάθειας. Η νέα κατολίσθηση αποδόθηκε στην περίοδο έντονων βροχοπτώσεων που προηγήθηκε, οι οποίες πιθανόν να την ενεργοποίησαν, λόγω της αύξησης του βάρους της βραχομαζάς ή των

υδροστατικών πιέσεων σε κάποιες προϋπάρχουσες ρωγμές μικρού ανοίγματος. Εκ των υστέρων, προέκυψε ότι η συμβολή τους ήταν σχετικά περιορισμένη, καθώς εντοπίστηκε ρωγή στον αναβαθμό +430, που προϋπήρχε της κατολίσθησης και έδειξε ότι οι συνθήκες ευστάθειας ήταν ήδη οριακές.

Μετά από εκτενείς ελέγχους, τα μέτρα προστασίας που εφαρμόστηκαν ήταν τα εξής :

- Αποφόρτιση της κατολίσθησης με εκσκαφή του ανώτερου τμήματος, έως το υψόμετρο +440.
- Κατασκευή οπλισμένων πασσάλων και προεντεταμένων αγκυρώσεων.
- Κατασκευή σταθεροποιητικής αναβαθμίδας ύψους 10m στον πόδα της κατολίσθησης επί της στέψης του φράγματος, ώστε να αυξηθεί η αντιστήριξη που προσφέρει το κύριο σώμα του φράγματος στα κατώτερα 15m της κατολίσθησης.

Με τις νέες εκσκαφές και τα μέτρα προστασίας, δεν έχουν εκδηλωθεί νέα προβλήματα ευστάθειας στις περιοχές των προηγούμενων κατολισθήσεων. Η συνολική ποσότητα εκσκαφών για την αντιμετώπιση των κατολισθητικών φαινομένων στο δεξιό αντέρεισμα έφτασε τα 105.000 m³ περίπου.

Στεγανότητα

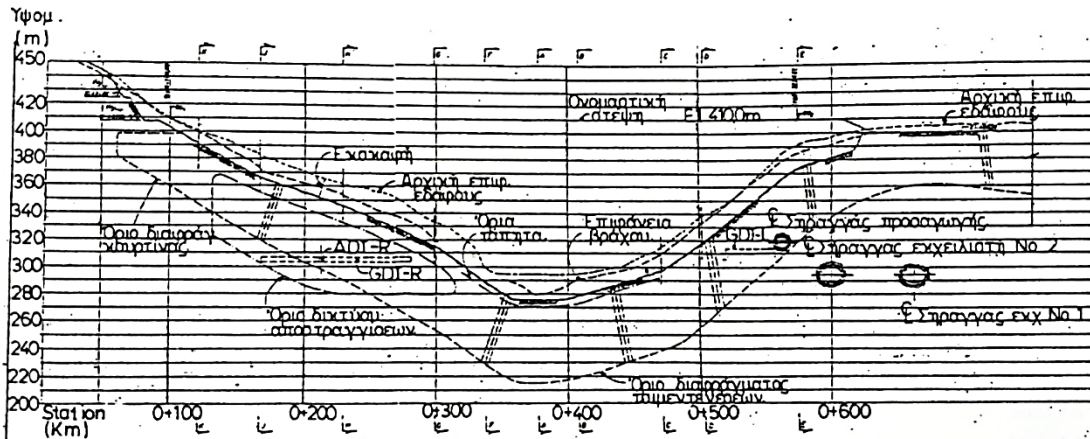
Η κουρτίνα τσιμεντενέσεων που κατασκευάστηκε στη θέση θεμελίωσης σχεδιάστηκε με πολύ μεγαλύτερο μήκος από αυτό που τελικά χρειαζόταν.

Στο αριστερό αντέρεισμα αποφασίστηκε να μην πραγματοποιηθούν τσιμεντενέσεις στεγανοποίησης μέσω της ήδη κατασκευασμένης σήραγγας, παρά μόνο εάν μετά την πλήρωση παρατηρηθούν σημαντικές διαρροές.

Οι πιθανές διαφυγές νερού του ταμιευτήρα διαμέσου των καρστικοποιημένων μαρμάρων, από τη λεκάνη της Ελάτης προς τις πηγές Ρυμνίου, ήταν το μεγαλύτερο γεωλογικό πρόβλημα της μελέτης και κατασκευής του φράγματος του Ιλαρίωνα. Για την αντιμετώπισή του πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένα έργα στεγανοποίησης σε όλο το μήκος του θεμελίου του φράγματος.

Η κουρτίνα τσιμεντενέσεων για τη στεγανοποίηση του φράγματος κρίθηκε απαραίτητο να επεκταθεί και στο αριστερό αντέρεισμα, σε συνολικό τελικό μήκος εντός του αντερείσματος 200m. Στην περιοχή της Ελάτης, κατασκευάστηκαν επίσης δύο διαδοχικές

σήραγγες τσιμεντενέσεων με μήκος περίπου 470m η κάθε μία μαζί με σήραγγες προσπέλασης, συνολικού μήκους 358m.



Εικ.29. Κατάντη όψη τομής κατά μήκος του διαφράγματος τσιμεντενέσεων στο φράγμα, Δ.Ε. Λιάκουρης (1995).

Η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα η οποία κατά τη φάση της προκαταρκτικής γεωλογικής μελέτης, είχε βρεθεί πολύ χαμηλά, κρίθηκε ότι δεν αποτελεί πρόβλημα και δεν έγινε συστηματική αποστράγγιση των πρανών, παρά μόνο σε θέσεις παρουσίας υγρασίας.



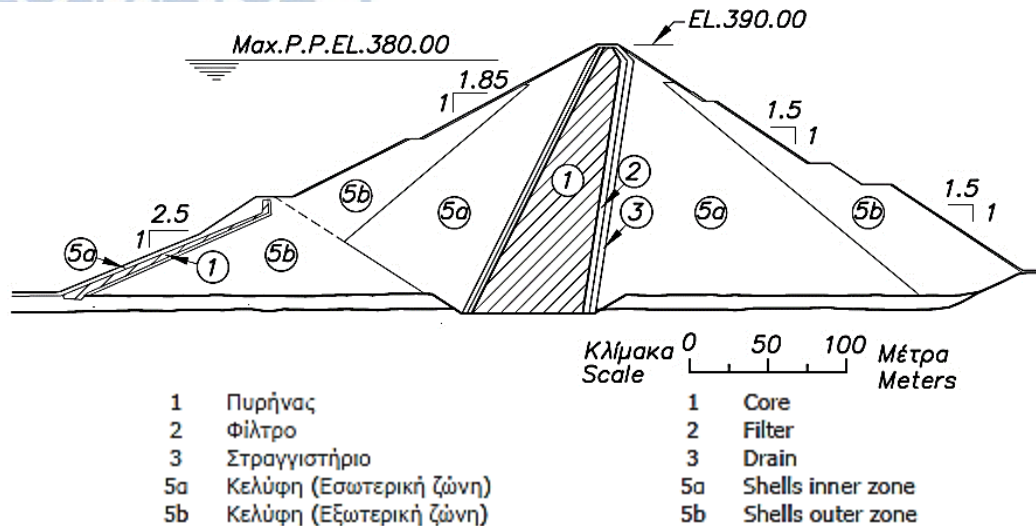
41°35'45" N
24°36'70" E

Νομός: Δράμας
Prefecture: Drama

Ποταμός: Νέστος
River: Nestos

Εικ.30. Γεωγραφική θέση φράγματος Θησαυρού, Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (2013).

Το φράγμα Θησαυρού βρίσκεται στην περιφερειακή ενότητα Δράμας, 21km βορειοανατολικά της πόλης της Δράμας. Είναι το ψηλότερο φράγμα της Ελλάδας (ύψος 172m), χωμάτινο φράγμα με κεκλιμένο αργιλικό πυρήνα, συνολικό όγκο $11 \cdot 10^9 \text{m}^3$, που συγκεντρώνει τα νερά της ανάντη Ελληνικής και Βουλγαρικής υδρολογικής λεκάνης του Νέστου. Η θεμελίωσή του ξεκίνησε το 1986 και αποτελεί το μεγαλύτερο υδροηλεκτρικό ταμιευτήρα στο ελληνικό τμήμα του Νέστου, με ικανότητα αποθήκευσης $705 \cdot 10^9 \text{m}^3$. Μερικά χιλιόμετρα κατάντη του, βρίσκεται το φράγμα της Πλατανόβρυσης, ενώ του φράγμα Τεμένους δεν έχει ακόμη κατασκευαστεί. Τα τρία φράγματα του Νέστου είναι υδροηλεκτρικά για την παραγωγή ρεύματος και αρδευτικά για τις πεδιάδες Δράμας, Ξάνθης και Κομοτηνής. Επιπλέον, έχουν αντιπλημμυρικό ρόλο και βοηθούν στη σταθεροποίηση της ροής του νερού σε όλη τη διάρκεια του χρόνου.



Εικ.31. Τυπική διατομή φράγματος Θησαυρού, Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (2013).

2.5.2. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος

Η περιοχή του φράγματος εντάσσεται στη γεωτεκτονική ζώνη της Ροδόπης, χαρακτηριστικό της οποίας είναι η έλλειψη σαφούς στρωματογραφίας που αποτελείται αποκλειστικά από κρυσταλλοσχιστώδη και πυριγενή πετρώματα.

Οι κυριότεροι σχηματισμοί της θέσης του φράγματος του Θησαυρού, από τα κατώτερα, προς τα υπερκείμενα είναι:

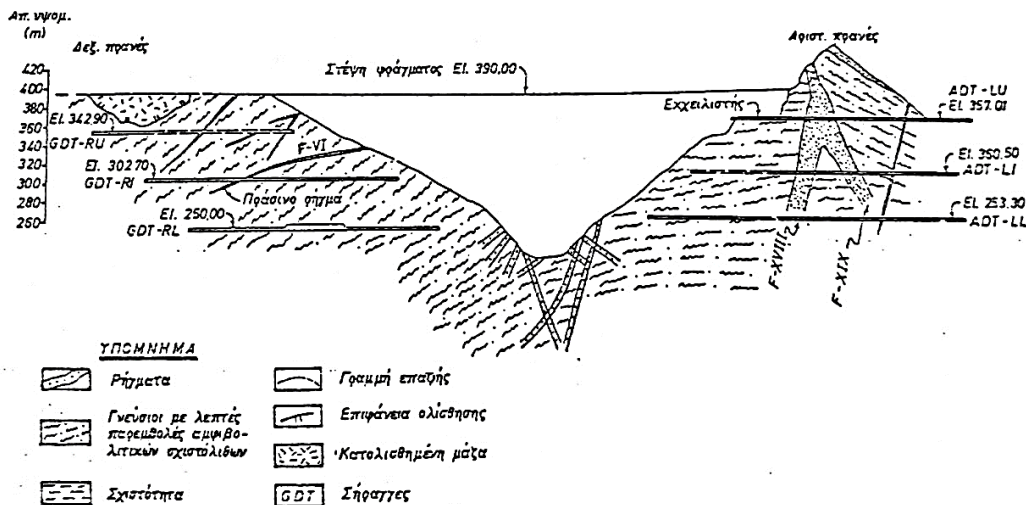
- Η αυτόχθονη Ενότητα Παγγαίου, η οποία αποτελείται από ορθογνεύσιους, σχιστόλιθους και αμφιβολίτες στα κατώτερα στρώματα, έναν μέσο ορίζοντα μεγάλου πάχους μαρμάρων και έναν ανώτερο με εναλλαγές σχιστολίθων-μαρμάρων. Θεωρείται η νεότερη ενότητα σχηματισμών της περιοχής.
- Η αυτόχθονη Ενότητα Κεχρίου, η οποία περιέχει ορθογνεύσιους, πηλιτικούς γνεύσιους, μεταπηλίτες, μιγματίτες, εκλογίτες-αμφιβολίτες, όπως επίσης υπερβασικά σώματα που παρεμβάλλονται τεκτονικά. Η Ενότητα αυτή, αποτελεί τμήμα της Ενότητας Σιδηρόνερου, που όμως θεωρείται διακριτή, λόγω λεπτομερών ερευνών με βάση πετρολογικά-μεταμορφικά κριτήρια.
- Η αυτόχθονη Ενότητα Σιδηρόνερου, η οποία περιλαμβάνει μιγματίτες, ορθογνεύσιους, αμφιβολίτες, μαρμαρυγικούς σχιστόλιθους και λεπτές ενστρώσεις μαρμάρων. Η Ενότητα Σιδηρόνερου που είναι η ανώτερη τεκτονική

ενότητα της περιοχής λόγω της επώθησής της πάνω στην Ενότητα Παγγαίου, είναι η παλαιότερη ενότητα της μάζας της Ροδόπης.

Στην περιοχή θεμελίωσης του φράγματος, εμφανίζονται, κυρίως, γνεύσιοι και γρανιτογνεύσιοι, με παρεμβολές μαρμαρυγιακών – αμφιβολιτικών σχιστολίθων. Οι σχηματισμοί αυτοί διασχίζονται συχνά από ακανόνιστες απλιτοπηγματιτικές φλέβες.

Η ευρύτερη περιοχή του ταμιευτήρα κυρίως αποτελείται από νεότερες αλλουβιακές αποθέσεις, γνεύσιους, μάρμαρα, γρανίτες και απλίτες-πηγματίτες.

Στα κρυσταλλοσχιτώδη πετρώματα της περιοχής φράγματος παρατηρούνται κανονικά και ανάστροφα ρήγματα, με επικρατούσα διεύθυνση σχεδόν παράλληλη με τη σχιστότητα των πετρωμάτων. Οι ομάδες των ρηγμάτων στη θέση του φράγματος που αντιπροσωπεύουν τις κύριες φάσεις πτύχωσης της ενότητας Σιδηρόνερου, επιβεβαιώνουν την άποψη ότι η μάζα της Ροδόπης επηρεάστηκε από την Αλπική ορογένεση. Τα ρήγματα αυτά σχηματίζουν δύο οικογένειες, μία παράλληλα προς τη γραμμή ροής του ποταμού και μία δεύτερη που φαίνεται να είναι κάθετη στην πρώτη.



Εικ.32. Γεωλογική τομή κατά μήκος του άξονα φράγματος, Δ.Ε. Λιάκουρης (1995).

2.5.3. Τεχνικογεωλογικά προβλήματα

Θεμελίωση

Το έργο του Θησαυρού εδράζεται πάνω σε μεταμορφωμένα πετρώματα που διατέμνονται από τουλάχιστον δέκα κύρια ρήγματα, κανονικά και ανάστροφα. Τη μεγαλύτερη ανησυχία προκάλεσε ένα ρήγμα της πρώτης οικογένειας, αντίρροπο προς το δεξιό αντέρεισμα, που

ήταν πιθανό να δημιουργήσει διακλάσεις ανάντη της βάσης του φράγματος, λόγω εφελκυστικών τάσεων με ταυτόχρονη αύξηση της υδροπερατότητας. Στη συνέχεια, η συμπίεση στα κατάντη και η αύξηση των υδροστατικών υποπίεσεων στο δίδρο που δημιουργείται σε συνδυασμό με τη σχιστότητα κάτω από το φράγμα, θα μπορούσε να οδηγήσει σε εκτίναξη του θεμελίου, όπως συνέβη στο φράγμα Malpasset, της Γαλλίας, με τις γνωστές καταστροφικές συνέπειες.

Ευστάθεια

Τα περισσότερα προβλήματα κατασκευής του φράγματος Θησαυρού είχαν σχέση με την αστάθεια των αντερεισμάτων, καθώς σημαντικά τμήματά τους βρίσκονταν υπό καθεστώς οριακής ισορροπίας, λόγω της έντονης ρωγμάτωσης από ρήγματα και ζώνες διάτμησης. Η ισορροπία διαταράχθηκε από τη φυσική επίδραση του ποταμού (παλιές κατολισθήσεις) και τις εκσκαφές που εκτελέστηκαν για τη διαμόρφωση πρανών και χώρων κατασκευής των συνοδών έργων (νέες κατολισθήσεις).

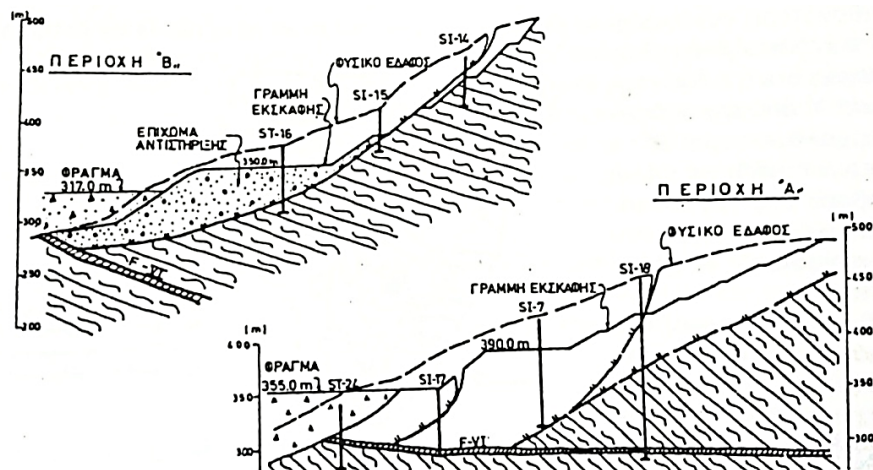
Στο δεξιό αντέρεισμα, σημειώθηκε μια κατολίσθηση μεγάλου όγκου, κατά το στάδιο θεμελίωσης του έργου. Αρχικά εκδηλώθηκε με μορφή τοπικών κατολισθήσεων, μετά από μια περίοδο έντονων βροχοπτώσεων το 1986. Το 1987 παρατηρήθηκαν νέα φαινόμενα κατολισθήσεων και μετά από εκτενέστερη μελέτη στην περιοχή, αλλά και τις εκσκαφές που είχαν ήδη γίνει για τα έργα της οδοποιίας, χαρτογραφήθηκε ένα αντίρροπο – προς το αντέρεισμα – ρήγμα, το επονομαζόμενο «πράσινο ρήγμα». Σε αυτό το ανάστροφο ρήγμα μετρήθηκαν οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις της βραχομάζας, της τάξεως του 1m περίπου, με ρυθμό μετακίνησης από 2-9mm/ημέρα.

Στην περιοχή πάνω από το πράσινο ρήγμα διαμορφώνονται βραχώδη κατατμητικά σώματα (περιοχή Α και Β), από τα συστήματα των διακλάσεων, που έδιναν μια συνισταμένη ερπυστική κίνηση προς την τάφρο εκσκαφής του πυρήνα. Στην περιοχή Α σημειώθηκε μειωμένος βαθμός και βάθος αποσάθρωσης σε σχέση με την περιοχή Β, αλλά με μεγαλύτερο πάχος χαλαρωμένης βραχομάζας. Ο μηχανισμός κίνησης στην περιοχή Α χαρακτηρίστηκε σύνθετος διότι εκδηλώνεται κατά μήκος πολλαπλών επιφανειών. Στην περιοχή Β αντιθέτως, έγινε κατά μήκος προκαθορισμένης επιφάνειας, επομένως θεωρήθηκε απλός. Και στις δύο περιοχές παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες ταχύτητες μετακινήσεων στα ανάντη τμήματα και στη συμβολή των δύο.



Εικ.33. Κατολίσθηση δεξιού αντερείσματος φράγματος, Δ.Ε. Λιάκουρης (1995).

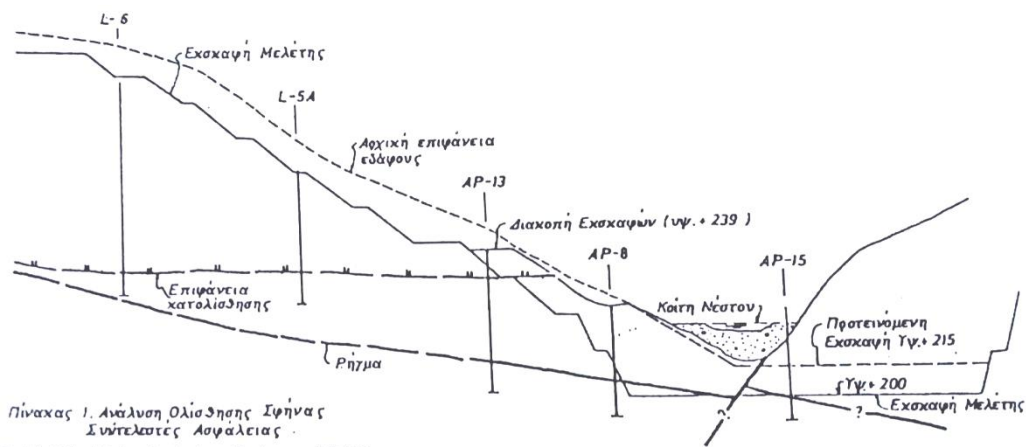
Πιθανότερο αίτιο των κατολισθητικών κινήσεων θεωρείται η υπέρβαση της διατμητικής αντοχής της ασθενούς και χαλαρής βραχομάζας Β η οποία στη συνέχεια ώθησε σε ολίσθηση και τη βραχομάζα Α. Οι διαφορετικές ερπυστικές κινήσεις και οι βροχοπτώσεις που συνέβαλαν στην επιτάχυνσή τους, οδήγησαν στη μεγάλη χαλάρωση του δεξιού αντερείσματος, οπότε κρίθηκε απαραίτητη η λήψη μέτρων.



Εικ.34. Χαρακτηριστικές τομές των περιοχών Α και Β της κατολίσθησης του δεξιού αντερείσματος, Δ.Ε. Λιάκουρης (1995).

Ενώ στο αριστερό αντερείσμα, επικρατούν καλύτερες συνθήκες ευστάθειας σε σύγκριση με το δεξιό, στο κατώτερο τμήμα του υπάρχει παλαιά κατολίσθηση, που διαχωρίζεται με ένα ρήγμα από το ανώτερο τμήμα, το οποίο συνίσταται από βραχώδη υλικά, γνευσιακής

σύστασης. Η κατολίσθηση έχει σημαντικό πάχος και συνίσταται από κερματισμένο και αποσαθρωμένο γνευσιακό υλικό (λατύπες, μέχρι ιλυώδεις άμμους ή αμμώδεις ιλείς) που περιέχει και τεμάχια υγιών γνευσιακών βράχων. Η επιφάνεια ολίσθησης είναι επίπεδη έως ελαφρά κυματοειδής και οι συντελεστές ασφαλείας που προέκυψαν ήταν πολύ μικροί. Η κατολίσθηση, λόγω και της ύπαρξης του ρήγματος, επηρέασε καθοριστικά το σχεδιασμό των έργων και για να επιτευχθεί η μέγιστη ασφάλεια και προστασία, ήταν απαραίτητη η αναδιάταξη και ο ανασχεδιασμός τους, αφού πολλά από αυτά τοποθετούνταν επάνω στην κατολίσθηση.



Πίνακας 1. Ανάλυση Ολίσθησης Σφήνας Συντελεστές Ασφαλείας
Table 1. Wedge Analysis - Factors of Safety

ΔΙΑΤΟΜΗ	b=0, ε=0.00			b=0, ε=0.15		
	11°	20°	30°	11°	20°	30°
1-1	0.45	0.88	1.31	0.32	0.66	0.92
2-2	0.68	1.06	1.50	0.42	0.75	1.05
3-3	0.62	1.09	1.56	0.41	0.72	1.09
4-4	0.60	0.99	1.38	0.40	0.68	1.00
5-5	0.60	1.00	1.35	0.40	0.68	0.98
6-6	0.67	1.10	1.38	0.46	0.71	0.99
7-7	0.73	1.12	1.50	0.48	0.79	1.08

ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΟ	0.91	1.13	1.19	1.21	1.22	1.20	1.14
50% ΣΤΡΑΓΓΙΣΜ.	0.92	1.23	1.26	1.29	1.29	1.28	1.23
100% ΣΤΡΑΓΓΙΣΤ.	0.97	1.32	1.34	1.37	1.36	1.26	1.31

Πίνακας 2. Μέθοδος SHARMA, με μη κατακόρυφες λωφίδες, Συντελεστές Ασφαλείας (Ε. ΗΟΕΚ, Οκτ. '91 ΔΕΗ/ΔΑΥΕ)

Table 2. SHARMA methode, non vertical slices, Factor of Safety (E, HOEK, Oct.'91, PPC/DAVE)

Εικ.35. Τομή κατολίσθησης στο αριστερό αντέρεισμα του φράγματος, Δ.Ε. Λιάκουρης (1995).

Στεγανότητα

Τα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα πάνω στα οποία θεμελιώνεται το φράγμα, παρουσιάζουν γενικά μειωμένη υδροπερατότητα που όμως, λόγω του έντονου τεκτονισμού και της παρουσίας πολλαπλών ρηγμάτων στην περιοχή του έργου, αυξάνεται σημαντικά. Τα μάρμαρα της Ενότητας Παγγαίου και της Ενότητας Σιδηρόνερου είναι εγκλωβισμένα εντός γνευσιο-σχιστόλιθων ή εμφανίζονται μόνο τοπικά, επομένως δεν παρουσιάζουν προβλήματα περατότητας.



2.5.4. Αντιμετώπιση προβλημάτων

Θεμελίωση

Αρχικά, υπήρξε ανησυχία για εκτίναξη του θεμελίου λόγω της ύπαρξης ρήγματος στη θέση της θεμελίωσης. Τελικά, κρίθηκε ότι η παρουσία συμπιεστού μωλωνιτοποιημένου υλικού εντός των περισσότερων ρηγμάτων και ασυνεχειών, θα απέτρεπε παρόμοια γεγονότα με εκείνα του φράγματος Malpasset, στη Γαλλία.

Ευστάθεια

Στην κατολίσθηση του δεξιού αντέρεισματος, λήφθηκαν τα εξής μέτρα προστασίας:

- Αποφόρτιση της κατολίσθησης με απομάκρυνση γεωυλικών από το ανώτερό της τμήμα. Αποφορτίστηκε πλήρως η περιοχή Β και το μεγαλύτερο τμήμα της Α.
- Αντιστήριξη του κατώτερου τμήματος της κατολίσθησης με κατασκευή αναχώματος από λιθορριπή.
- Αποστράγγιση της ολισθαίνουσας μάζας μέσω αποστραγγιστικών στοών και δίκτυο αποστραγγιστικών οπών.
- Εκτέλεση εκτεταμένου προγράμματος τσιμεντενέσεων για την αποτελεσματική στεγανοποίηση και έλεγχο των διηθούμενων στην περιοχή νερών κατά την πλήρωση του ταμιευτήρα.
- Παρακολούθηση της συμπεριφοράς της περιοχής, σε μακροχρόνια κλίμακα, με δίκτυο οργάνων μετρήσεων (πιεζόμετρα, κλισιόμετρα, κλπ.)
- Τα προβλήματα που εμφανίστηκαν στο δεξιό αντέρεισμα επέβαλαν την τροποποίηση σε βάθος του σχεδιασμού της υδροληψίας, διότι σύμφωνα με τα αρχικά σχέδια θεμελιωνόταν στην περιοχή της πρώτης κατολίσθησης. Η αλλαγή αυτή οδήγησε σε μια σειρά τροποποιήσεων στις θέσεις και διαστάσεις των συνοδών της έργων, ώστε να είναι λειτουργική και να αποφευχθούν περαιτέρω αστοχίες.

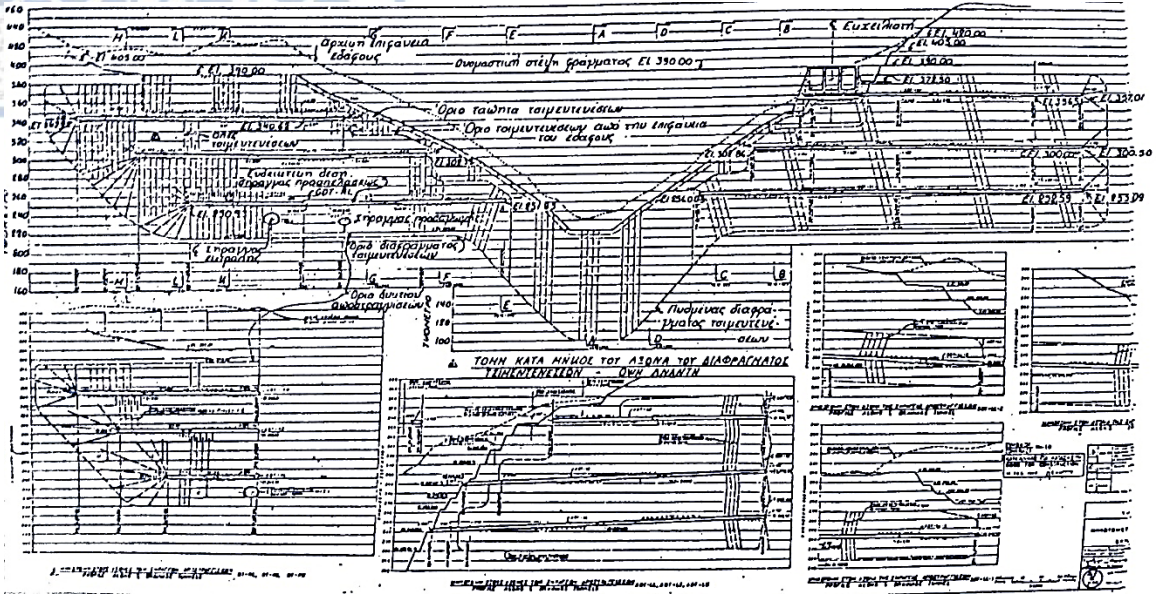


Τα μέτρα θεραπείας που προτάθηκαν για το αριστερό αντέρεισμα συνοψίζονται παρακάτω:

- Μετατόπιση του σταθμού παραγωγής προς το εσωτερικό μέρος του δεξιού αντερείσματος.
- Τροποποίηση των εκσκαφών στο αριστερό αντέρεισμα ώστε να μην αποκαλυφθεί το ρήγμα.
- Αποστράγγιση της βραχομάζας με τη διάνοιξη τριών αποστραγγιστικών σηράγγων εντός της μάζας της κατολίσθησης.
- Κατασκευή ψηλού τοίχου αντιστήριξης στον πόδα της κατολίσθησης, καθώς και επιχωμάτωση ανάντη ως προστασία ενάντια σε ενδεχόμενη αστοχία.
- Συμπληρωματικές εκσκαφές και εξυγίανση των δευτερευόντων κατολισθήσεων που προκλήθηκαν από τις προσπάθειες διαμόρφωσης της τάφρου του πυρήνα. Κατά τη διαδικασία αυτή διαμορφώθηκαν απότομες κλίσεις στα πρανή που μαζί με τις δονήσεις από τις συνεχείς ανατινάξεις και τα φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας, οδήγησαν στην εκδήλωση νέας κατολίσθησης. Σε αυτή την εξέλιξη συνέβαλαν η ύπαρξη και διάταξη των ζωνών διάτμησης, των επιπέδων σχιστότητας και η παρουσία ενός κανονικού ρήγματος.

Στεγανότητα

Λόγω του ότι τα κρυσταλλοσχιτώδη πετρώματα θεωρήθηκαν αρχικά στεγανά, η διαφραγματική κουρτίνα είχε πολύ μικρό βάθος, ενώ παράλληλα καταργήθηκε και ένα τμήμα της σήραγγας τσιμεντενέσεων κάτω από τον πυρήνα του φράγματος. Επειδή όμως κάποιες γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν υπέδειξαν την παρουσία ζώνης αυξημένης υδροπερατότητας μεταξύ 60-90m, η κουρτίνα κατασκευάστηκε τελικά με βάθος διπλάσιο από το αρχικό.



Εικ.36. Διαφραγματική κουρτίνα φράγματος, Δ.Ε. Λιάκουρης (1995).



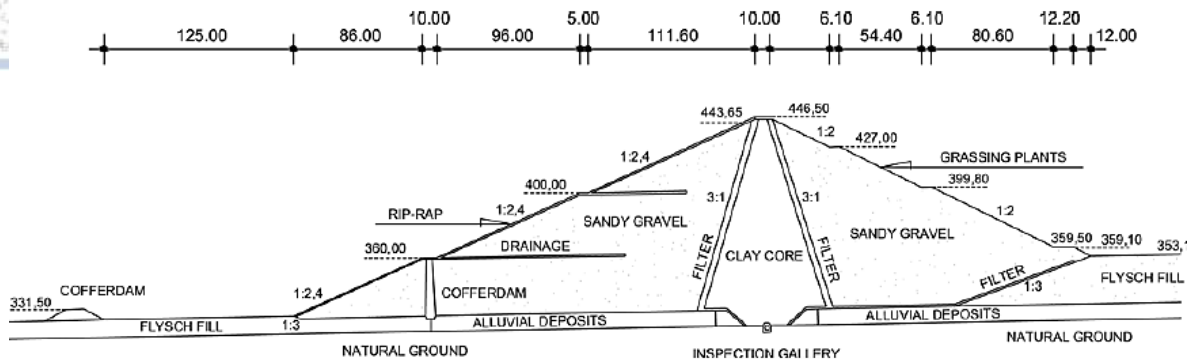
38°31'29.03" N
22°07'17.39" E

Νομός: **Φωκίδα**
Prefecture: **Fokida**

Ποταμός: **Μόρνος**
River: **Mornos**

Εικ.37. Γεωγραφική θέση φράγματος Μόρνου, Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (2013).

Το φράγμα του Μόρνου βρίσκεται στη Δυτική Ελλάδα, στο νομό Φωκίδας, σε απόσταση 7km από το Λιδωρίκι. Πρόκειται για χωμάτινο φράγμα, ύψους 126m, μήκους στέψης 820m, με κατακόρυφο αργιλικό πυρήνα, σώματα στήριξης και προστατευτική λιθορριπή ανάντη πρανούς από συμπυκνωμένο αμμοχάλικο. Ο ταμιευτήρας έχει μέγιστη χωρητικότητα περίπου $800 \cdot 10^9 \text{m}^3$ νερού. Οι εργασίες κατασκευής του έργου ξεκίνησαν το 1972 και ολοκληρώθηκαν το 1976. Σκοπός του φράγματος ήταν η ύδρευση του λεκανοπεδίου της Αττικής.



Εικ.38. Διατομή του χωμάτινου φράγματος του Μόρνου στη θέση του μέγιστου ύψους του, Β. Γκίκας & Μ. Σακελλαρίου (2008).

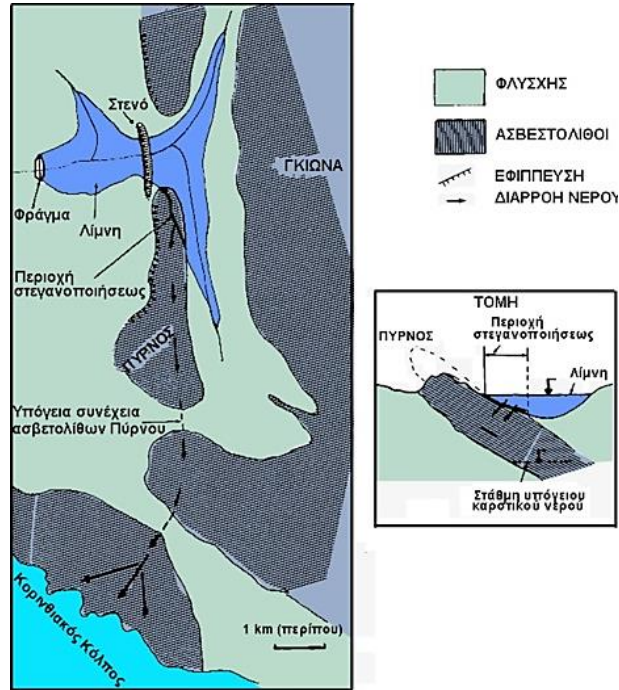
2.6.2. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος

Οι κυριότερες γεωτεκτονικές ενότητες που δομούν την περιοχή θέσης του φράγματος Μόρνου από τις στρωματογραφικά κατώτερες προς τις ανώτερες, είναι:

- Η ζώνη Πίνδου, η οποία περιέχει διαδοχικά από κάτω προς τα πάνω: δολομίτες, αργιλοσαμμίτες, τη σχιστοκερατολιθική διάπλαση από ηφαιστειοϊζηματογενή υλικά και κερατόλιθους, τον πρώτο φλύσχη, ανωκρητιδικούς πελαγικούς πλακώδεις ασβεστόλιθους και το δεύτερο φλύσχη. Ο φλύσχης αυτός παρουσιάζεται κατά θέσεις με τη μορφή ενός «χαοτικού μίγματος», σαν αποτέλεσμα τεκτονικής παραμόρφωσης, που αναφέρεται διεθνώς ως «άγριος φλύσχης».
- Η ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας, η οποία χαρακτηρίζεται από τρεις διαδοχικούς ορίζοντες βωξιτών ανάμεσα στους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς. Διαδοχικά αναπτύσσεται η εξής στρωματογραφία: δολομίτες, ασβεστόλιθοι με βωξιτικούς ορίζοντες (Μεσοζωικοί σχηματισμοί), φλύσχης (Παλαιοκαίνου – Μέσου Ηωκαίνου).

Η περιοχή στην οποία εδράζεται το φράγμα του Μόρνου βρίσκεται κυρίως στην γεωτεκτονική ζώνη της Πίνδου. Ο δεύτερος φλύσχη καλύπτεται επιφανειακά, κατά θέσεις, από Τεταρτογενείς σχηματισμούς (πλευρικά κορήματα σε ανάμιξη με αποσαθρωμένα ιζήματα του φλύσχη και υλικά του μανδύα αποσάθρωσής του). Οι ασβεστόλιθοι της ζώνης Παρνασσού – Γκιώνας, εμφανίζονται επωθημένοι από τα ανατολικά, στους δυτικότερους σχηματισμούς της ζώνης Πίνδου. Το όριο της επώθησης, που έχει διεύθυνση σχεδόν Β-Ν, αναπτύσσεται κατά μήκος της ανατολικής πλευράς της λεκάνης κατάκλισης του Μόρνου

(περιοχή Λιδωρικού). Στην κεντρική περιοχή του χώρου έδρασης του φράγματος, κάτω από τις πρόσφατες αποθέσεις, τα στρώματα του φλύσχη εμφανίζονται πτυχωμένα και διαρρηγμένα. Γενικά, στην αργιλική φάση του φλύσχη, παρατηρείται έντονη επίδραση αποσαθρωτικών και διαβρωτικών παραγόντων.



Εικ.39. Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του φράγματος, Παρουσιάσεις μαθήματος «Γεωλογικές Μελέτες Τεχνικών Έργων», Θ. Μακεδών (2021).

Στο αριστερό αντέρεισμα επικρατεί κυρίως η ψαμμιτική φάση του φλύσχη, ο οποίος είναι μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης κατά θέσεις, με λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων και εμφανίζει γενικά πτύχωση. Ο βαθμός αποσάθρωσης του φλύσχη μειώνεται σταδιακά με το βάθος και καταλήγει να είναι γενικώς υγιής κάτω από τα 60m.

Οι σχηματισμοί του δεξιού αντερείσματος έχουν χαρακτηριστική χαμηλή ποιότητα, λόγω της έντονης τεκτονικής τους. Εντοπίζεται κυρίως η αργιλική φάση του φλύσχη, με εναλλαγές ψαμμιτών – ιλυολίθων, κατά τόπους πηλιτών – ιλυολίθων και παρεμβολές κροκαλοπαγών μικρής έκτασης. Οι ψαμμιτικοί ορίζοντες είναι συνεκτικοί έως μέτρια συνεκτικοί – λόγω παρουσίας αργιλομαργαϊκής συνδετικής ύλης – και συχνά κατακερματισμένοι. Στα ανώτερα στρώματα του φλύσχη παρατηρούνται αρκετά ρήγματα και ζώνες διάτμησης ενώ εκείνα που φτάνουν μέχρι την κοιλάδα, εμφανίζουν έντονη διάτμηση και συμπίεση. Ανάμεσα στις δύο αυτές ζώνες παρεμβάλλεται με επώθηση, μια σχεδόν οριζόντια ζώνη με λεπτό μυλωνίτη ή αργιλο – λατυποπαγές.



2.6.3. Τεχνικογεωλογικά προβλήματα

Θεμελίωση

Στις αρχικές εργασίες κατασκευής, περιλαμβάνεται πρόφραγμα, με στεγανό αργιλικό πυρήνα, στα ανάντη του φράγματος, για την προσωρινή εκτροπή του ποταμού. Το φράγμα και η ευρύτερη περιοχή του ταμιευτήρα εδράζονται σε σχηματισμούς από φλύσχη, χωρίς καθόλου υδροπερατότητα, κάτω από ένα ορισμένο βάθος. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στη θεμελίωση διότι ο πυρήνας του φράγματος δεν συνεχίζεται κάτω από την επιφάνεια του φυσικού εδάφους μέχρι να συναντήσει το βραχώδες υπόβαθρο, αλλά διακόπτεται από αλλουβιακές αποθέσεις του ποταμού και συνεχίζεται, από εκεί και κάτω, με μορφή όνυχα.

Ευστάθεια

Τα δύο αντερείσματα, και κυρίως το αριστερό, καλύπτονται επιφανειακά από μανδύα αποσάθρωσης, ενώ στην κεντρική περιοχή αναπτύσσονται ποτάμιες αποθέσεις.

Στο αριστερό αντέρεισμα επικρατεί η ψαμμιτική φάση του φλύσχη, με εμφανή πτύχωση, αλλά με ευνοϊκές κλίσεις για την ευστάθεια του αντερείσματος. Ο βαθμός αποσάθρωσης του μειώνεται σταδιακά με το βάθος και καταλήγει να είναι γενικώς υγιής κάτω από τα 60m, χωρίς να δημιουργεί αστάθειες.

Το υλικό της ζώνης επώθησης και το υλικό πληρώσεως των ζωνών διάτμησης που εντοπίζονται στο δεξί αντέρεισμα, κρίθηκε ότι, εάν δημιουργηθούν συνθήκες έντονης ροής μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα, μπορεί να διαβρωθούν και γι' αυτό προβλέφθηκαν έργα στεγανοποίησης. Τα ρήγματα με διεύθυνση ABA – ΔΝΔ αλλά και η φύση του γεωλογικού υλικού, έχουν συνέπειες στην ευστάθεια και σχετίζονται άμεσα με τις κατολισθήσεις που παρατηρούνται στο δεξιό αντέρεισμα του φράγματος.

Στην κεντρική περιοχή του χώρου έδρασης του φράγματος, κάτω από τις πρόσφατες αποθέσεις, τα στρώματα του φλύσχη εμφανίζονται πτυχωμένα και διαρρηγμένα. Γενικά, η αργιλική φάση του φλύσχη, λόγω της έντονης επίδρασης αποσάθρωσης – διάβρωσης, διευκόλυνε τη δημιουργία επιφανειών "αδυναμίας" προκαλώντας εκδήλωση κατολισθητικών κινήσεων, που όμως περιορίστηκαν στα υλικά του μανδύα αποσάθρωσης και στα ανώτερα στρώματα (ζώνη κερματισμού).



Η γεωλογία της λεκάνης είναι αρκετά πολύπλοκη, αλλά δύο είναι οι κύριοι σχηματισμοί που επικρατούν στη δομή της, ασβεστόλιθοι και φλύσχη. Οι σχηματισμοί αυτοί καλύπτονται κατά τόπους από πρόσφατες τεταρτογενείς αποθέσεις.

Στην περιοχή θεμελίωσης του φράγματος, ο φλύσχη θεωρείται αδιαπέρατος, αφού απουσιάζει σαφής υδροφόρος ορίζοντας. Όμως, η παρουσία του νερού μέσω της αύξησης των πιέσεων πόρων που δεν έχουν επαρκή εκτόνωση, υποβαθμίζει την ποιότητα και αντοχή του υλικού.

Η λεκάνη κατάκλυσης δομείται από φλύσχη και Κρητιδικούς ασβεστόλιθους στο ανάντη και ανατολικό τμήμα της. Οι εμφανίσεις των ασβεστολίθων μέσα στον ταμιευτήρα, όπου επικρατεί ο φλύσχη, συνεχίζονται προς τα Νότια μέχρι των Κορινθιακό κόλπο, με σημαντικές παράκτιες και υποθαλάσσιες πηγές στην Ιτέα και στο Γαλαξίδι. Λόγω των πηγών και επομένως του κινδύνου διαφυγών προς τη θάλασσα, αλλά και της φυσικής υδροπερατότητας των ασβεστολίθων, κρίθηκε απαραίτητη η λήψη μέτρων στεγανοποίησης.

Άλλοι γεωλογικοί κίνδυνοι

Η ευρύτερη περιοχή γύρω από το φράγμα του Μόρνου, όπως αποδεικνύεται από ενόργανες σεισμικές καταγραφές και από τη βιβλιογραφία, χαρακτηρίζεται από έντονη σεισμικότητα. Η σύγχρονη σεισμικότητα, φαίνεται να είναι εξίσου έντονη και καταστροφική, αφού κατά τη διάρκεια των τελευταίων 40 χρόνων έχουν καταγραφεί πέντε σεισμικά γεγονότα με μέγιστο σεισμικό μέγεθος μεγαλύτερο από 5.8 (Parazachos & Parazachou, 1997). Τα περισσότερα από τα γεγονότα σχετίζονται με σεισμική ζώνη μικρού βάθους, με βόρεια κλίση με εστιακό βάθος 6-12km. Τα σεισμικά γεγονότα εντοπίζονται κυρίως στις περιοχές μεταξύ Αιγίου και Ακράτας και μεταξύ Κορίνθου – Αλκυονίδων.

2.6.4. Αντιμετώπιση προβλημάτων

Θεμελίωση

Στη θέση θεμελίωσης του έργου δεν εμφανίστηκαν σημαντικά προβλήματα περατότητας, επομένως κατασκευάστηκε κουρτίνα τσιμεντενέσεων για προληπτικούς λόγους. Στο

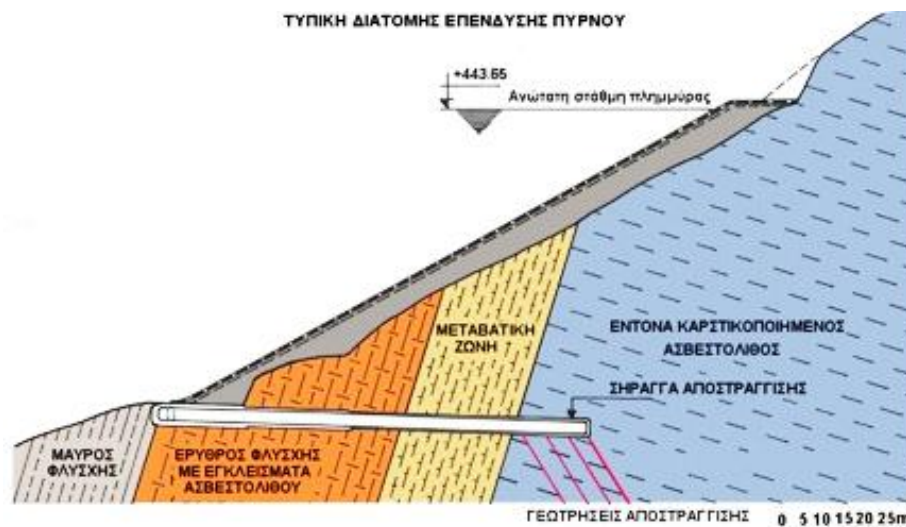
κέντρο του θεμελίου του πυρήνα και κατά μήκος όλου του φράγματος είχε κατασκευαστεί στοά επίσκεψης – τσιμεντενέσεων, σε όρυγμα cut and cover. Ο αρχικός σκοπός της ήταν ο έλεγχος του φράγματος, η διέλευση των καλωδίων των οργάνων παρακολούθησης και η δυνατότητα εκτέλεσης συμπληρωματικών τσιμεντενέσεων. Τελικά, προκειμένου να επιταχυνθεί η κατασκευή του φράγματος, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η στοά και για την εκτέλεση των κύριων τσιμεντενέσεων. Η κουρτίνα εφαρμόστηκε σε βάθος 45-50m στην κοίτη του ποταμού, 90m στο αριστερό αντέρεισμα και σε 120m στο δεξί αντέρεισμα.

Ευστάθεια

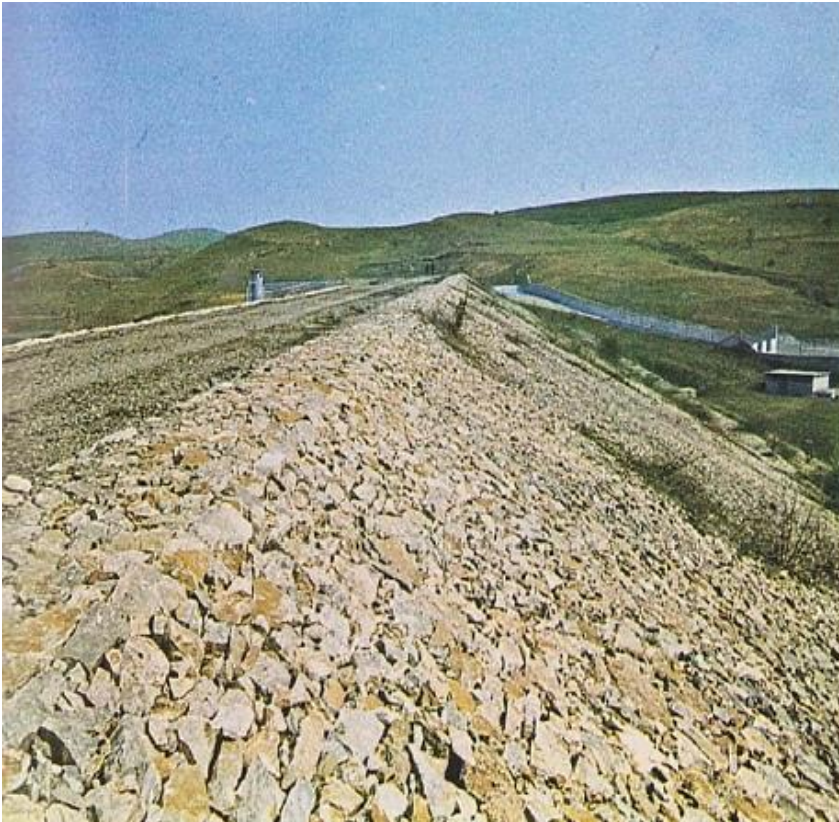
Οι κατολισθητικές κινήσεις που εκδηλώθηκαν στο χώρο έδρασης του φράγματος, περιορίστηκαν στα υλικά του μανδύα αποσάθρωσης και στα ανώτερα στρώματα (ζώνη κερματισμού), χωρίς να χρειαστεί κάποια επιπλέον παρέμβαση για την εξυγίανσή τους.

Στεγανότητα

Όπως προαναφέρθηκε οι εμφανίσεις των ασβεστολίθων μέσα στον ταμιευτήρα, ενέχουν κίνδυνο διαφυγών προς τη θάλασσα και για αυτό ελήφθησαν μέτρα στεγανοποίησης. Για την αποφυγή διηθήσεων από τον ταμιευτήρα, κατασκευάστηκε ασφαλτικός τάπητας και μικρού βάθους διάφραγμα τσιμεντενέσεων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικ.40. Τυπική διατομή ασφαλτικού τάπητα φράγματος, (Παρουσιάσεις μαθήματος «Γεωλογικές Μελέτες Τεχνικών Έργων», Θ. Μακεδών 2021).



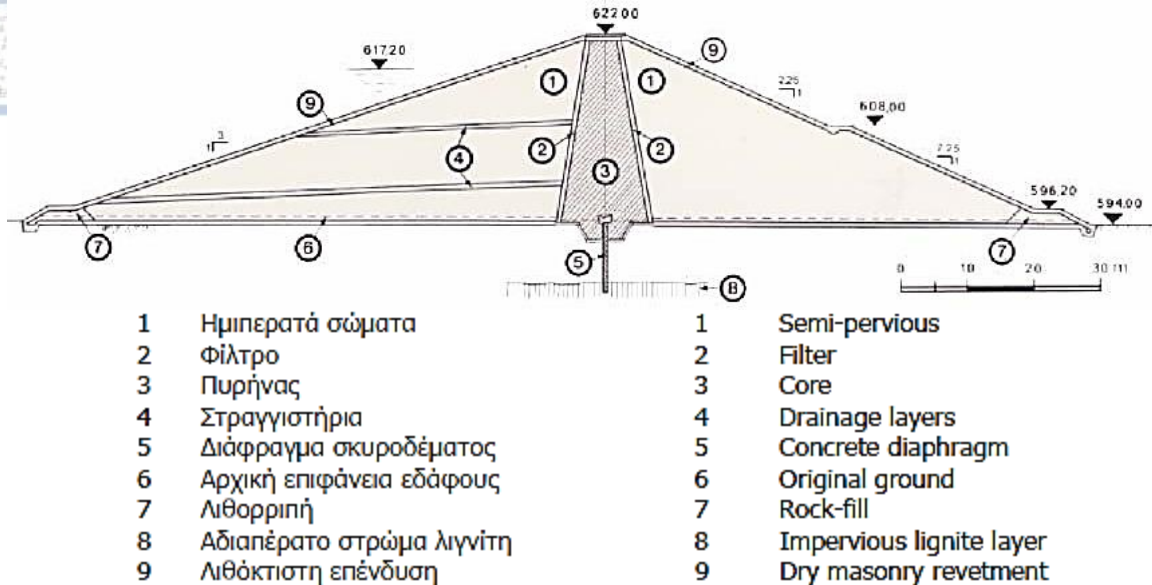
40°33'54.80"N
21°40'31.16"E

Νομός: Κοζάνης
Prefecture: Kozani

Ποταμός: Περδίκας
River: Perdikas

Εικ.41. Γεωγραφική θέση φράγματος Περδίκκα, Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (2013).

Το φράγμα Περδίκκα βρίσκεται στο δήμο Εορδαίας, στην Περιφερειακή Ενότητα Κοζάνης, σε απόσταση 6km βόρεια της Πτολεμαΐδας. Είναι χωμάτινο φράγμα με κατακόρυφο αργιλικό πυρήνα, ύψος 28m και μήκος στέψης 352m. Ολοκληρώθηκε το 1962, από γερμανικές εταιρείες, στο πλαίσιο των πολεμικών αποζημιώσεων της Γερμανίας προς την Ελλάδα και είχε σαν σκοπό την τροφοδοσία της βιομηχανικής ζώνης της περιοχής της Πτολεμαΐδας. Είναι το μόνο φράγμα στην Ελλάδα που έχει υποστεί αστοχία και δεν λειτούργησε καθόλου.



Εικ.42. Τυπική διατομή φράγματος Περδίκκα, Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (2013).

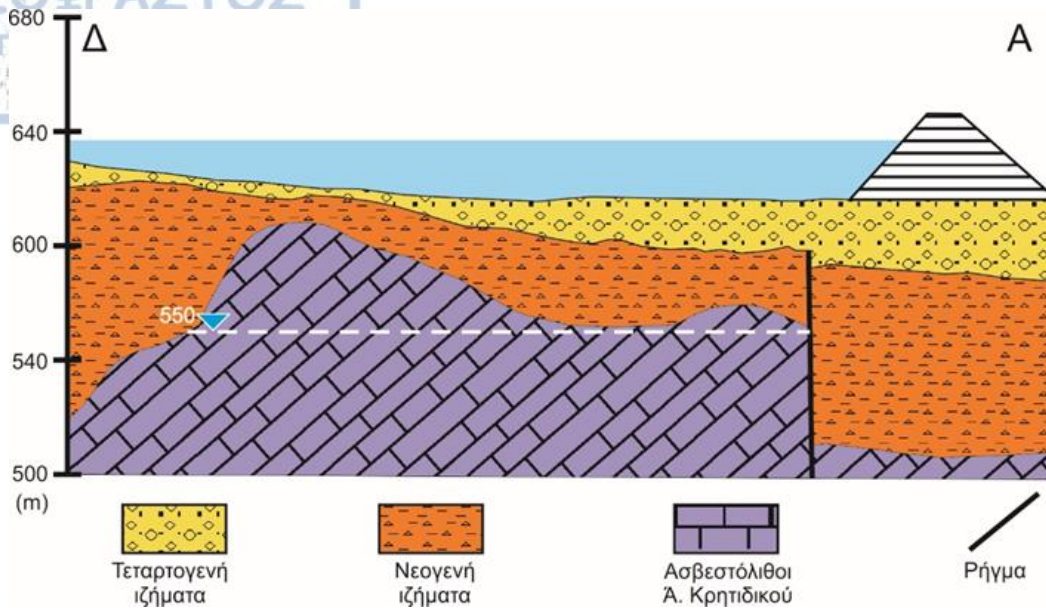
2.7.2. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος

Η περιοχή του φράγματος τοποθετείται μεν στην Πελαγονική ζώνη, όμως η θέση του έργου δομείται από πρόσφατες Πλειο-Πλειστοκαινικές αποθέσεις, κυρίως μάργες και αμμούχες αργίλους, με σχεδόν οριζόντιες στρώσεις. Υπάρχουν επίσης Πλειστοκαινικοί λιγνιτοφόροι σχηματισμοί που επικάθονται στους έντονα καρστικοποιημένους ασβεστόλιθους του Μεσοζωικού υποβάθρου.

Οι τεταρτογενείς αποθέσεις παρουσιάζουν μεγάλη εξάπλωση στην ευρύτερη περιοχή της Πτολεμαΐδας, με πολύ μεγάλο πάχος. Το μεγαλύτερο πάχος εντοπίζεται ακριβώς στη θέση του άξονα του φράγματος, όπου το βραχώδες υπόβαθρο έχει βυθιστεί εξαιτίας της παρουσίας ενός κανονικού ρήγματος.

Το έργο είναι θεμελιωμένο στις αλλουβιακές αποθέσεις του χειμάρρου Περδίκκα, αλλά ο αργιλικός πυρήνας επεκτείνεται και εισχωρεί σε στρώμα λιγνίτη κατά 1,5m περίπου. Επιπλέον, κατά το στάδιο κατασκευής του πυρήνα, συναντήθηκαν τοπικά μέσα στα αλλούβια, πάγκοι κροκαλοπαγών.

Τα αντερείσματα δομούνται από αργιλικές μάργες επιφανειακά, ενώ υποκείμενα βρίσκεται υπόβαθρο από καρστικοποιημένους ασβεστολίθους.



Εικ.43. Γεωλογική τομή κάτω από τη λίμνη του φράγματος, Θ. Μακεδόν (2021).

2.7.3. Τεχνικογεωλογικά προβλήματα

Θεμελίωση και ευστάθεια

Το φράγμα του Περδίκκα δεν παρουσίασε κάποιο σημαντικό πρόβλημα στα θεμέλια ή στα αντρείσματα, κατά το στάδιο κατασκευής του. Όμως, για την τελική ευστάθεια και αντοχή, εφόσον ο ταμιευτήρας δεν πληρώθηκε ποτέ, δεν είναι δυνατόν να γίνουν εκτιμήσεις. Επιπλέον, η αστοχία της γεωλογικής μελέτης οδήγησε στην παράλειψη μέτρων περιορισμού της υδροπερατότητας και τελικώς ο ταμιευτήρας αποστραγγίστηκε εντελώς μέσω καρστικών αγωγών.

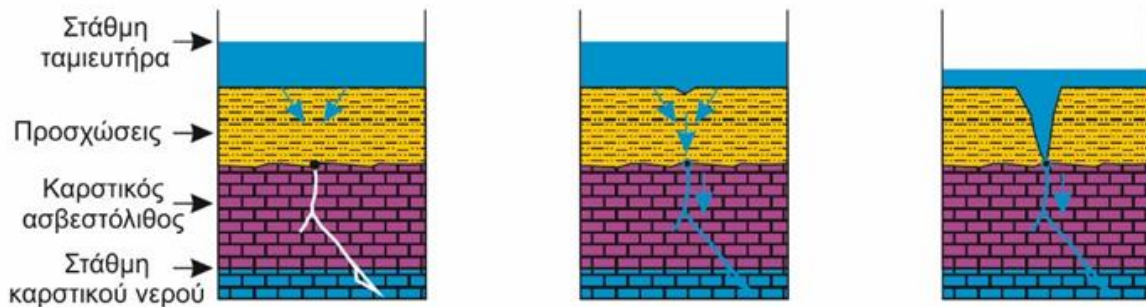
Στεγανότητα

Η γεωλογική μελέτη του φράγματος, φαίνεται να τοποθετεί το έργο εξ ολοκλήρου πάνω στις τεταρτογενείς αργιλομαργαϊκές αποθέσεις, οι οποίες θεωρήθηκαν πρακτικά στεγανοί σχηματισμοί, όταν εμφανίζονται σε μεγάλο πάχος. Αντίθετα, οι ασβεστόλιθοι του υποβάθρου, με ανώμαλο μορφολογικό ανάγλυφο και ιδιαίτερα καρστικοποιημένοι, παρουσιάζουν εξαιρετικά αυξημένη υδροπερατότητα.

Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών κατασκευής του φράγματος, ξεκίνησε η πλήρωση του ταμιευτήρα. Ενώ αρχικά το εγχείρημα φαινόταν να εξελίσσεται ομαλά, όταν η στάθμη του νερού ανέβηκε περίπου στα 20m από τον πυθμένα, η άνοδος της σταμάτησε και άρχισε να μειώνεται με αυξανόμενο ρυθμό, μέχρι που ο ταμιευτήρας σχεδόν εκκενώθηκε.

Το γεγονός αυτό προέκυψε από διαφυγές από τις επιφανειακές αποθέσεις προς τα υποκείμενα στρώματα, μια και η περατότητά τους δεν ήταν όσο μικρή εκτιμήθηκε, ώστε σε συνδυασμό με το πάχος τους να αποτραπεί η διήθηση του νερού. Με την επίδραση της συνεχώς αυξανόμενης υδροστατικής πίεσης, προκλήθηκε εσωτερική διάβρωση των αργιλομαργαϊκών σχηματισμών, επιτρέποντας στο νερό να φτάσει στα καρστικά ανοίγματα των ασβεστολίθων του υποβάθρου, με αποτέλεσμα την τελική αποστράγγιση μέσω του καρστ.

Η παρουσία του κανονικού ρήγματος, εξαιτίας του οποίου είχε βυθιστεί το ασβεστολιθικό υπόβαθρο οδηγώντας στο μεγάλο πάχος των τεταρτογενών αποθέσεων κοντά στη θέση του φράγματος, αποδείχθηκε εκ των υστέρων ότι δεν ήταν αντιπροσωπευτικό για την ευρύτερη περιοχή του ταμιευτήρα. Αντίθετα, εντός της λεκάνης κατάκλυσης, το υπόβαθρο βρισκόταν σε πολύ ανώτερο υψόμετρο από ότι είχε εκτιμηθεί.



Εικ.44. Μηχανισμός διαβρώσεως και δημιουργία καταβοθρών, Δ.Ε. Λιάκουρης, 1995 (τροποποιημένο από Θ. Μακεδών, 2021).

2.7.4. Αντιμετώπιση προβλημάτων

Η εκτέλεση περισσότερων ερευνητικών γεωτρήσεων, θα είχε εντοπίσει την παρουσία των ασβεστολίθων, με αποτέλεσμα να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα στεγανοποίησης του ταμιευτήρα (κατάλληλη διαφραγματική κουρτίνα τσιμεντενέσεων) και να αποφευχθεί η αστοχία του φράγματος. Επιπλέον, η λανθασμένη ερμηνεία της πιεζομετρίας των γεωτρήσεων που διανοίχθηκαν οδήγησε τελικά στην αστοχία του έργου, για την οποία μέχρι σήμερα δεν έχει δοθεί κάποια εφικτή λύση.



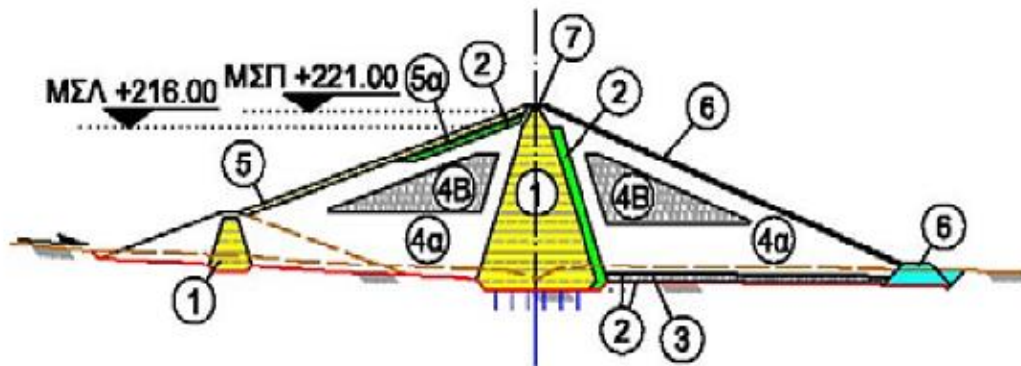
35°14'56.69"B
25°24'0.91"A

Νομός: **Ηρακλείου**
Prefecture: **Heraklion**

Ποταμός: **Αποσελέμης**
River: **Aposselemis**

Εικ.45. Γεωγραφική θέση φράγματος Αποσελέμη, Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (2013).

Το φράγμα Αποσελέμη βρίσκεται στον νομό του Ηρακλείου, μεταξύ των χωριών Μοχός, Ποταμές, και Αβδού. Είναι χωμάτινο φράγμα, με κατακόρυφο αδιαπέρατο πυρήνα. Διαθέτει σώματα στήριξης από γαιώδη – βραχώδη υλικά, μεταβατικές ζώνες από ασβεστολιθικά υλικά λατομείου με διαβάθμιση και εξωτερικές ζώνες προστασίας με λιθορριπή, ανάντη και κατόντη. Λειτουργεί από το 2012 ενισχύοντας την ύδρευση του Ηρακλείου, καθώς και περιοχών του Αγίου Νικολάου. Έχει ύψος 55m, χωρητικότητα ταμιευτήρα $27 \cdot 10^9 \text{m}^3$ νερού, ενώ διοχετεύει σημαντικές ποσότητες νερού από το Οροπέδιο Λασιθίου, μέσω αγωγών και σηράγγων, για να επεξεργαστούν από ειδικά διυλιστήρια. Ο μέσος ετήσιος όγκος που χρησιμοποιείται για ύδρευση είναι περίπου $17 \cdot 10^9 \text{m}^3$ νερού.



Ζώνη	Περιγραφή
1	Αδιαπέρατος πυρήνας
2	Φίλτρο (επεξεργασμένα, διαβαθμισμένα θραυστά υλικά λατομείου)
3	Στραγγιστήριο (επεξεργασμένα, θραυστά υλικά λατομείου)
4α	Σώματα στήριξης (αποσαθρωμένος φυλλίτης)
4β	Σώματα στήριξης (βραχώδη προϊόντα φυλλίτη)
5	Λιθορριπή προστασίας ανάντη πρσανούς (βραχώδη υλικά λατομείου)
5α	Μεταβατική ζώνη (θραυστός βράχος λατομείου)
6	Λιθορριπή προστασίας κατόντη πρσανούς (θραυστός βράχος λατομείου)
7	Στέψη (βάση και ασφαλτικές στρώσεις)

Εικ.46. Τυπική διατομή και περιγραφή ζωνών του φράγματος Αποσελέμη, (Karapanagiotis et al., 2017).

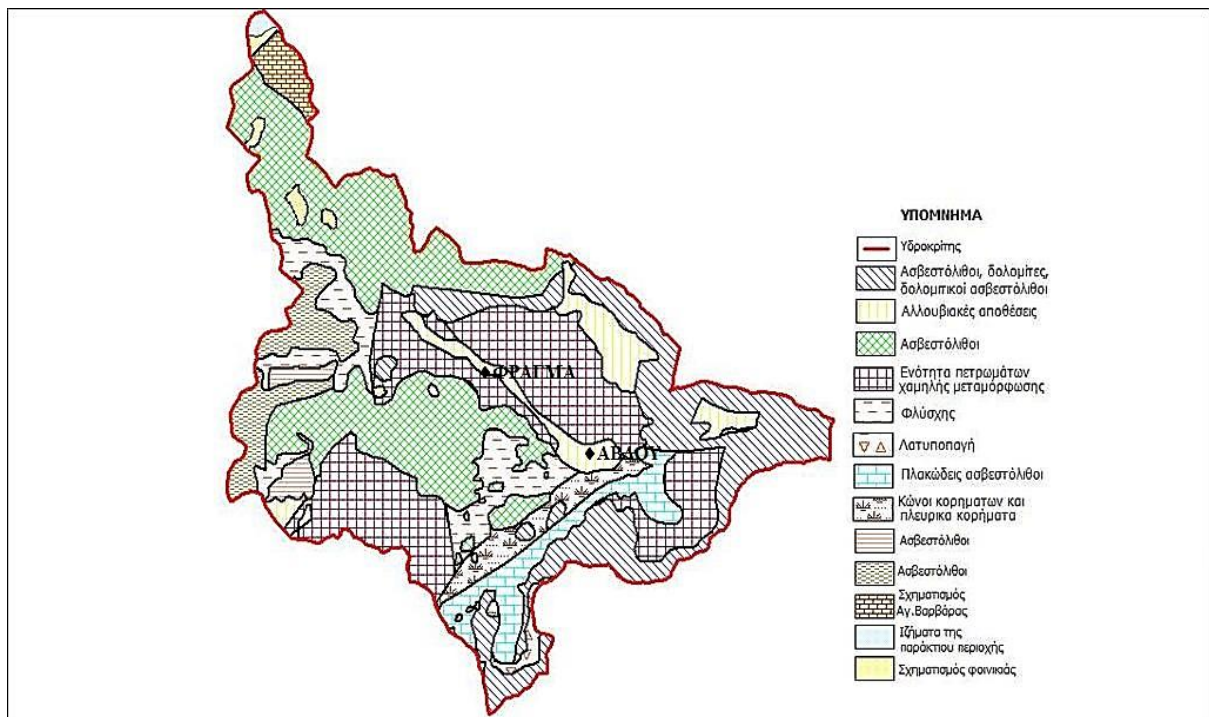
2.8.2. Γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος

Χαρακτηριστικό γνώρισμα της γεωλογίας της Κρήτης αποτελούν τα αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα των Ελληνίδων ζωνών. Η διάταξη αυτή είναι αποτέλεσμα λεπιδοειδούς τεκτονικής, από δράση συμπιεστικών τάσεων, άμεσα συνδεδεμένων με την υποβύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από της Ευρασίας.

Οι κυριότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής θέσης του φράγματος του Αποσελέμη από τα στρωματογραφικά κατώτερα, προς τα υπερκείμενά τους είναι:

- Η αυτόχθονη Ενότητα Πλακωδών Ασβεστολίθων, η οποία περιέχει τυπικούς πλακώδεις ασβεστόλιθους με ενστρώσεις κερατολίθων και κονδύλους. Περιλαμβάνει επίσης μαζώδεις ασβεστόλιθους, δολομίτες, ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή και παρεμβολές φυλλίτη, κατά θέσεις.
- Η αλλόχθονη Ενότητα «Φυλλιτών – Χαλαζιτών», η οποία συγκροτείται από φυλλίτες, χαλαζίτες, μετά – ψαμμίτες, μετά – κροκαλοπαγή, μεταβασίτες, μεταανδρείτες καθώς και ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, αποτέλεσμα γλαυκοφανιτικής μεταμόρφωσης.

- Η ζώνη Γαβρόβου – Τριπόλης, με νηριτικούς ασβεστόλιθους που βρίσκονται επωθημένοι πάνω στην Ενότητα «Φυλλιτών – Χαλαζιτών», καθώς και παρουσία του φλύσχη της ίδιας ζώνης στην ευρύτερη περιοχή.
- Αλλόχθονα τεκτονικά λείπια των Εσωτερικών Ελληνίδων, τα οποία περιέχουν κυρίως οφειολιθικές εμφανίσεις και κρυσταλλοσχιτώδη πετρώματα.
- Ιζήματα Νεογενούς και Τεταρτογενούς, κυρίως κλαστικά θαλάσσια ιζήματα που παρουσιάζουν μεγάλη εξάπλωση στις παραλιακές περιοχές της Κρήτης.



Εικ.47. Γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής του φράγματος, Α. Τσιούνια (2012).

Η ευρύτερη περιοχή του χειμάρρου Αποσελέμη αποτελείται από σύγχρονες και παλαιότερες αποθέσεις του. Οι υποκείμενοι σχιστο – φυλλιτικοί σχηματισμοί ανήκουν στο κάλυμμα της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς. Ο φυλλίτης είναι κατά θέσεις διατμημένος και, λόγω επώθησής του επάνω στην ενότητα Πλακωδών ασβεστολίθων ή της υπερκείμενης ενότητας Γαβρόβου – Τριπόλεως, εμφανίζει μειωμένες μηχανικές ιδιότητες. Στη θέση του άξονα, το έργο θεμελιώνεται πάνω σε υγιή φυλλίτη.

Τα πρανή του ταμιευτήρα του ποταμού Αποσελέμη παρουσιάζουν ήπιο έως μέτριο ανάγλυφο και καλύπτονται, επιφανειακά, από εδαφικό μανδύα. Υποκείμενα υπάρχουν καστανοί, κατακερματισμένοι σχιστο – φυλλιτικοί σχηματισμοί, με μέτρια έως υψηλή αποσάθρωση. Βαθύτερα, η αποσάθρωση και ο κερματισμός τους αυξάνεται, καταλήγοντας τελικά σε γκρίζα, υγιή αλλά κερματισμένη βραχομάζα φυλλίτη. Οι σχιστο – φυλλιτικοί σχηματισμοί είναι μικρής περατότητας, ενώ στην περιοχή του αριστερού αντερείσματος εμφανίζονται έντονα καρστικοποιημένοι και διαπερατοί ασβεστόλιθοι.

2.8.3. Τεχνικογεωλογικά προβλήματα

Θεμελίωση

Η τάφος πυρήνα του φράγματος θεμελιώθηκε πάνω σε υγιή φυλλίτη, χωρίς τεχνικογεωλογικά προβλήματα, μέχρι βάθος 6-8m στην κοίτη του ποταμού και 8-10m στα αντερείσματα. Τα σώματα στήριξης θεμελιώθηκαν σε βάθη της τάξεως των 3-5m στα αντερείσματα και περίπου 3m στην κοίτη του χειμάρρου.

Ευστάθεια

Οι φυλλίτες στη θέση του φράγματος δεν παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα ευστάθειας. Στα πρανή του ταμιευτήρα εντοπίζονται περιορισμένα φαινόμενα αστάθειας, που χρειάζεται να εξεταστούν προσεκτικά για την αποφυγή σημαντικών προβλημάτων.

Στεγανότητα

Το υπόβαθρο της θέσης θεμελίωσης του φράγματος περιέχει καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο, ο οποίος, λόγω της υδροπερατότητάς του, πρέπει να αξιολογηθεί σε σχέση με τις ενδεχόμενες διαφυγές. Στην περιοχή υπάρχει επίσης φυλλίτης, ο οποίος παρουσιάζει ποικίλη συμπεριφορά υδροπερατότητας και κλαστικά ιζήματα, τα οποία φαίνεται να μην εμφανίζουν περατότητα. Με βάση μετρήσεις παροχών στη λεκάνη του Οροπεδίου Λασιθίου και αντίστοιχες της λεκάνης Αποσελέμη προέκυψε ότι υπάρχει υδραυλική επικοινωνία των δύο λεκανών, πραγματοποιείται όμως μόνο κατά τη διάρκεια έντονων πλημμυρικών επεισοδίων, μέσω του καρστικού συστήματος που ξεκινά από τις καταβόθρες του Οροπεδίου και φτάνει στις καρστικές πηγές υπερχειλίσης που βρίσκονται μέσα στη λεκάνη του Αποσελέμη. Επομένως, η υδραυλική επικοινωνία των δύο λεκανών δεν δημιουργεί πρόβλημα διαφυγών ενώ επηρεάζει ελάχιστα και το απολήψιμο δυναμικό του ταμιευτήρα.

Άλλοι γεωλογικοί κίνδυνοι

Η περιοχή του έργου ανήκει στη Ζώνη II κατά τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (Ε.Α.Κ.), οπότε είναι αναγκαία η χρήση κατάλληλων υλικών για την ελάττωση προβλημάτων στο φράγμα, σε περίπτωση σεισμού. Πριν την κατασκευή του έργου, πραγματοποιήθηκαν επίσης μελέτες, οι οποίες εξέταζαν την επικινδυνότητα υπερπήδησης του φράγματος, καθώς και τις επιπτώσεις που θα ακολουθούσαν ένα τέτοιο ενδεχόμενο, που συνοψίζονται στον κίνδυνο κατάκλισης του οικισμού των Ποταμιών. Λύση έπρεπε να δοθεί και για τον οικισμό του Σφεντυλίου, που βρίσκεται μέσα στα όρια της τεχνητής λίμνης του φράγματος και θα κατακλυζόταν, κατά την πλήρωσή του.

2.8.4. Αντιμετώπιση προβλημάτων

Ευστάθεια

Η εκτεταμένη διερεύνηση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των υλικών κατασκευής του πυρήνα και των σωμάτων στήριξης, εξασφάλισε την επάρκεια του αρχικού σχεδιασμού αναφορικά με την ευστάθεια του σώματος του φράγματος.

Στεγανότητα

Στη βάση της τάφρου θεμελίωσης του πυρήνα, πραγματοποιήθηκαν τσιμεντενέσεις τάπητα. Κατά μήκος του άξονα του φράγματος, κατασκευάστηκε διάφραγμα τσιμεντενέσεων, που ολοκληρώθηκε με διάνοιξη πρωτευουσών και δευτερευουσών οπών, καθώς και κεκλιμένων οπών ελέγχου. Η αποτελεσματικότητα του διαφράγματος μέσω των κεκλιμένων οπών ελέγχου όπου εκτελέστηκαν δοκιμές διαπερατότητας Lugeon, έδειξε ότι το διάφραγμα είχε δημιουργήσει επαρκή χαρακτηριστικά διαπερατότητας σε όλη τη μάζα του πετρώματος.

Στα αντερείσματα, προκειμένου να αποτραπούν πιθανές διαρροές μέσω των καρστικοποιημένων, ασβεστολιθικών σχηματισμών, κατασκευάστηκαν δύο βοηθητικά αναχώματα με στεγανό πυρήνα.

Άλλα

Το φράγμα σχεδιάστηκε έτσι ώστε ο κίνδυνος κατάκλισης του οικισμού των Ποταμιών να είναι σχεδόν απίθανος, ακόμα και με την εκδήλωση ενός εξαιρετικά έντονου πλημμυρικού φαινομένου. Για τον οικισμό του Σφεντυλίου αποφασίστηκε μετεγκατάστασή του σε υψηλότερα υψόμετρα, πριν την έναρξη των εργασιών του έργου.



3. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Η σημασία του γεωλογικού μοντέλου

Συνοψίζοντας τις παραπάνω περιπτώσεις σχεδιασμού και κατασκευής φραγμάτων, διαπιστώνεται η σημασία του ρόλου του γεωλογικού παράγοντα, τόσο στην πρόληψη όσο και στην άμβλυνση των αποτελεσμάτων των αστοχιών που προέκυψαν.

Το γεωλογικό μοντέλο αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή ενός τεχνικού έργου καθώς συμπεριλαμβάνει τις συνιστώσες που βοηθούν στην εκτίμηση των πραγματικών συνθηκών στην κλίμακα του έργου. Προβλέπεται η συμπεριφορά του εδάφους - υπεδάφους θεμελίωσης και οι γενετικές και επιγενετικές διεργασίες που έχει υποστεί στο παρελθόν, αλλά και η ποιότητα των δομικών υλικών. Επιπλέον, κατά την τεχνικογεωλογική μελέτη, εντοπίζονται οι πιθανοί κίνδυνοι για το έργο από την εκτίμηση της συμπεριφοράς της βραχομάζας.

Ο συνδυασμός στοιχείων από άλλους κλάδους της γεωλογίας, διευκολύνει τόσο τον εντοπισμό των προβλημάτων όσο και την εύρεση λύσεων, προσφέροντας μια σφαιρικότερη εικόνα των συνθηκών της περιοχής ενός έργου. Στο σχεδιασμό τεχνικών έργων όπως τα φράγματα, έχει μεγάλη σημασία η συνδρομή της Πετρολογίας (είδος, χαρακτηριστικά πετρωμάτων), της Τεκτονικής (παραμόρφωση, τάσεις, καταπόνηση), της Στρωματογραφίας (δομή, σειρά πετρωμάτων), της Παλαιογεωγραφίας (εξέλιξη, αποσάθρωση) της Υδρογεωλογίας (επιφανειακά και υπόγεια νερά, περατότητα σχηματισμών) και της Σεισμολογίας (σεισμικές επιταχύνσεις).

Στην πορεία της μελέτης μπορούν επίσης να πραγματοποιηθούν μια σειρά από μεθόδους γεωφυσικών διασκοπήσεων, ειδικών προσομοιώσεων και αναλύσεων ενεργότητας τεκτονικών δομών. Χωρίς τη συλλογή των συνολικών γεωλογικών πληροφοριών, προκύπτουν αβεβαιότητες αναφορικά με τις γεωτεχνικές συνθήκες, που ενδέχεται να οδηγήσουν σε κακή εκτίμηση των ιδιοτήτων του εδάφους κατασκευής του τεχνικού έργου.

3.2. Επικινδυνότητα - Διακινδύνευση

Η ανάλυση του γεωλογικού μοντέλου μιας περιοχής μελέτης περιλαμβάνει και την ανάλυση της επικινδυνότητας από την εκδήλωση φυσικών κινδύνων που σχετίζονται με τη γεωλογία. Τέτοιοι κίνδυνοι όπως η εκδήλωση σεισμών, πλημμυρών, κατολισθήσεων αλλά και όσων προκύπτουν από ενδεχόμενη αστοχία του φράγματος, απαιτούν κατάλληλο σχεδιασμό ώστε να περιοριστεί το μέγεθος των συνεπειών τους. Τέτοιες γεωλογικές διεργασίες μπορούν να προκαλέσουν δυσμενείς συνθήκες στην κοινωνία και το περιβάλλον, με καταστροφή περιουσίας, θανάτους, ή περιβαλλοντική υποβάθμιση. Για τους λόγους αυτούς, είναι σημαντικό να συλλέγονται πληροφορίες και να αξιολογείται η διακινδύνευση, ώστε να ληφθούν μέτρα για την ελαχιστοποίηση των συνεπειών-βλαβών. Για τη βέλτιστη πρόληψη και πρόβλεψη φυσικών κινδύνων είναι απαραίτητος ο υπολογισμός στοιχείων όπως η επικινδυνότητα, η έκθεση ενός στοιχείου αλλά και η τρωτότητά του σε πιθανή εκδήλωση του κινδύνου (συγκεκριμένου μεγέθους και δριμύτητας), έτσι ώστε τελικά να μπορέσουν να εκτιμηθούν οι συνολικές απώλειες και να ληφθούν μέτρα πρόληψης ή/και πρόβλεψης (συστήματα προειδοποίησης, σχέδια εκκένωσης).

Παράδειγμα έγκαιρης αντιμετώπισης φαινομένων πλημμύρας, αποτελούν οι ενέργειες της ΔΕΗ Α.Ε. κατά την εκδήλωση τέτοιων γεγονότων, το έτος 2005. Από τις 28.12.2005 μέχρι τις 7.1.2006 υπήρξαν πρωτοφανείς σε ένταση και διάρκεια βροχοπτώσεις που προκάλεσαν μεγάλες εισροές νερού στους ταμιευτήρες των υδροηλεκτρικών σταθμών των ποταμών Αχελώου (Κρεμαστών, Καστρακίου, Στράτου) Αράχθου (Πουρναρίου I, II) και Νέστου (Θησαυρού, Πλατανόβρυσης). Το προσωπικό των παραπάνω σταθμών αντιμετώπισε με επιτυχία την έκτακτη αυτή κατάσταση με σωστές εκτιμήσεις, κατά τις πρωτοφανείς συνθήκες λειτουργίας των εγκαταστάσεων, αποφεύγοντας ατυχήματα και καταστροφές στις εγκαταστάσεις της ΔΕΗ Α.Ε. Επιπλέον, οι μεγάλοι ταμιευτήρες των Κρεμαστών, Πουρναρίου I και Θησαυρού, αναχαίτισαν τις πλημμύρες παρέχοντας πλήρη αντιπλημμυρική προστασία στις περιοχές κατόντη των φραγμάτων. Δεν προκλήθηκε καμία σημαντική καταστροφή και κυρίως δεν καταγράφηκε απώλεια ανθρώπινης ζωής. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί λειτούργησαν χωρίς προβλήματα και παρήγαγαν τα καθημερινά ποσά ενέργειας, χωρίς απώλειες και υπερχειλίσεις νερών.

3.3. Αντί συμπερασμάτων

Σε όλη τη διάρκεια της παρούσας εργασίας έγινε προσπάθεια, μέσω της παρουσίας περιπτώσεων φραγμάτων του Ελληνικού χώρου, να τονιστεί η σημασία που έχει η γεωλογία στον ασφαλή σχεδιασμό τέτοιων έργων.

Από το πρώτο φράγμα που κατασκευάστηκε στην Ελλάδα, το φράγμα του Περδίκκα (1962), έγινε φανερό τόσο η αναγκαιότητα της εκτεταμένης γεωλογικής μελέτης όσο και οι δραματικές συνέπειες από την έλλειψή της. Το φράγμα αυτό, που δεν λειτούργησε καθόλου, αποτελεί εξαιρετικό παράδειγμα των επιπτώσεων μιας γεωλογικής μελέτης που δεν παρουσιάζει πληρότητα και αρτιότητα λόγω άγνοιας των ή λανθασμένης ερμηνείας των γεωλογικών συνθηκών μιας περιοχής.

Το φράγμα των Κρεμαστών (1962) είναι λειτουργικό μέχρι σήμερα, παρά τις δυσκολίες που αντιμετώπισε κατά την κατασκευή του. Ο μη έγκαιρος εντοπισμός ενός μεγάλου διαβρωμένου ανοίγματος κάτω από την κοίτη του ποταμού από τις ερευνητικές γεωτρήσεις στον άξονα του φράγματος οδήγησε σε σημαντικές καθυστερήσεις με ανάλογες οικονομικές επιπτώσεις. Παρόλο που τελικώς το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε επιτυχώς, αποτέλεσε αφορμή για την καθιέρωση κεκλιμένων γεωτρήσεων ελέγχου, έως ότου άρχισαν να χρησιμοποιούνται οι γεωφυσικές διασκοπήσεις, που έλυσαν ικανοποιητικά τέτοια προβλήματα. Επιπλέον οι διαρροές που εμφανίστηκαν κατά την πλήρωση του ταμιευτήρα, οδήγησαν στον επανασχεδιασμό της αρχικής κουρτίνας τσιμεντενέσεων, εγχείρημα που αποδείχθηκε αρκετά περίπλοκο, εξαιτίας του μεγάλου όγκου των διαφυγών. Τελικά, με την υλοποίηση έργων αποστράγγισης, οι ποσότητες του νερού στο δεξί αντέρεισμα κατευθύνονται με ασφάλεια εκτός του φράγματος.

Στο φράγμα του Μόρνου (1976), στα προβλήματα που έθεσε η γεωλογία στο ζήτημα των διαφυγών, δόθηκε λύση μέσω έργων στεγανοποίησης.

Στο φράγμα του Στράτου (1981), οι ιδιαίτερες γεωλογικές συνθήκες απαιτήσαν ειδικές λύσεις στη θεμελίωση, τη στεγανοποίηση και την κατασκευή των συνοδών έργων.

Στο φράγμα των Ασωμάτων (1985), τα προβλήματα ευστάθειας και κατολισθήσεων αντιμετωπίστηκαν με λύσεις που περιλάμβαναν εκσκαφές για τη μείωση της κλίσης των πρανών και απομάκρυνση των ασταθών υλικών για την αποφόρτιση της ολισθαίνουσας μάζας.

Στο φράγμα του Θησαυρού (1986), μετά την εκδήλωση δύο περιοχών κατολισθήσεων στο δεξιό αντέρεισμα, απαιτήθηκε η τροποποίηση του αρχικού σχεδιασμού του έργου και όλων των συνοδών έργων του φράγματος, ενώ στο αριστερό αντέρεισμα, τα έργα στα αρχικά σχέδια είχαν τοποθετηθεί επάνω σε μάζα κατολίσθησης. Εκτελέστηκαν έργα

προστασίας, όπως απομάκρυνση υλικών, κατασκευή αναχώματος αντιστήριξης, στεγανοποίηση των περιοχών κατολίσθησης, εγκατάσταση συστημάτων παρακολούθησης, κατασκευή τοίχου αντιστήριξης και επιχωμάτων. Η παρουσία και η δράση ρηγμάτων που αυξάνουν σημαντικά την υδροπερατότητα, ανέτρεψε τη θεώρηση της στεγανότητας των σχηματισμών, μέσω της ανόρυξης ερευνητικών γεωτρήσεων που εντόπισαν ζώνη αυξημένης περατότητας, οπότε επανασχεδιάστηκε εγκαίρως η κουρτίνα, αποφεύγοντας περαιτέρω προβλήματα στεγανότητας.

Στο φράγμα Ιλαρίωνα (2004), παρουσιάστηκαν σημαντικές επιπλοκές σχετικά με την ευστάθεια του δεξιού αντερείσματος και προβλήματα διαφυγών λόγω των γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στη λεκάνη της Ελάτης. Αντιμετωπίστηκαν με σχεδιασμό εκτεταμένων μέτρων αντιστήριξης και προστασίας, αλλά και πρόσθετων έργων στεγανοποίησης με διαφραγματικές κουρτίνες τσιμεντενέσεων.

Τέλος, στο έργο του Αποσελέμη (2012), διεξήχθη προληπτικός έλεγχος της αποτελεσματικότητας του διαφράγματος, με δοκιμές διαπερατότητας Lugeon, με άμεσο εντοπισμό και επίλυση των πιθανών προβλημάτων.

Η γεωλογία είναι μια επιστήμη, σημαντικό μέρος της οποίας αποτελεί η εμπειρική γνώση, καθώς σταδιακά βελτιώνεται η ερμηνεία της γεωλογικής πληροφορίας. Αυτό μεταφράζεται σε σωστότερη αξιολόγηση και ποσοτικοποίησή της, που είναι παράγοντας υψίστης σημασίας στην κατασκευή τεχνικών έργων.



Λιάκουρης, Δ.Ε. (1995). *Η Γεωλογία και τα Φράγματα της ΔΕΗ*. Αθήνα: Διεύθυνση Εκπαίδευσης Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού.

Bell, F.G., Cripps, J.C., Culshaw, M.G. (1995). *The significance of engineering geology to construction*. London: Geological Society, Engineering Geology Special Publications. (Access through: <http://egsp.lyellcollection.org/>)

Bell, F.G. (2007). *Introduction: environmental and engineering geology*. Blyth, Nottinghamshire, United Kingdom: Whittles Publishing, Sample Chapters: ©Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)

Bell, F.G. (1999). *Geological Hazards: Their Assessment, Avoidance and Mitigation*. London: Spon Press (Access through: Google Books)

Dounias, G. (2013). *Embankments and dams. Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Geotechnics of Hard Soils – Weak Soils (Part 4)*. A. Anagnostopoulos et.al.

Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G. (2005) *Geotechnical Engineering of dams*. London: CRC Press

Gikas, V., Sakellariou, M. (2008). *Settlement analysis of the Mornos earth dam (Greece): Evidence from numerical modeling and geodetic monitoring*.

Papageorgiou, S.A. (1983). *Engineering geology of dam foundations in north - Western Greece*. Durham University: Durham theses.

Αλμπανάκης, Κ., Ψιλοβίκος, Α., Βουβαλίδης, Κ. (2001). *Ορισμένα χαρακτηριστικά του νέου ταμιευτήρα της Πλατανόβρυσης που επηρεάζουν το ποτάμιο σύστημα του Νέστου*. Αθήνα: Πρακτικά 9ου Διεθνούς Συνεδρίου Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας (Δελτίο ΕΓΕ: Τομ. XXXIV/2, 691-697).

Αναστασόπουλος, Κ., Αντωνακόπουλος, Κ., Παπαχατζάκη, Χ. (2008). *Αντιμετώπιση κατολισθητικών φαινομένων κατά την κατασκευή του Φράγματος Ιλαρίωνα*. Λάρισα: 1^ο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων.

Αργυράκης, Ι. *Εκμετάλλευση των υδροηλεκτρικών σταθμών ως έργων πολλαπλού σκοπού*. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (ΤΕΕ).

Διαθέσιμο στο: https://www.ypethe.gr/sites/default/files/archivefiles/yie_horas_dei.pdf



Γραικιώτης, Π. (1966). *Οι σεισμοί Βάλτου-Ευρυτανίας-Τριχωνίδος και η τεχνητή λίμνη Κρεμαστών*. ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ, 5.

Δημόπουλος, Δ., Στεφανάκος, Ι.Π. (2008). *Υπερχειλιστές και εκκενωτές πυθμένα στα τέσσερα παλαιότερα φράγματα της ΔΕΗ από σκυρόδεμα*. Λάρισα: 1^ο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων.

Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (ICOLD). (2013). *Τα φράγματα της Ελλάδας*. Αθήνα: 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Φραγμάτων και Ταμιευτήρων.

Ιστοσελίδα: <https://www.dei.gr/documents/imeranerou.pdf>

Καββαδάς, Μ., Κοτσώνης, Α., Σωμάκος, Λ., Γκιόλας, Α., Λαζαρίδου, Σ. (2008). *Γεωτεχνικά θέματα του φράγματος Αποσελέμη Κρήτης – Τεχνικά στοιχεία του έργου*. Λάρισα: 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων.

Καλφούντζος, Κ. (2013). *Γεωλογική έρευνα στην περιοχή της Αλευράδας Αιτωλοακαρνανίας – υδροηλεκτρικού σταθμού φράγματος Κρεμαστών*. Πάτρα: Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας Πανεπιστημίου Πατρών.

Καραγιαννάκη, Β., Καραπαντελάκης, Κ., Εμμανουηλίδης, Γ., Μινόπετρος, Χ. (2008). *ΥΗΕ - Ιλαρίωνα: Τα σημαντικότερα γεωλογικά και γεωτεχνικά προβλήματα που αντιμετώπισε η μελέτη και η κατασκευή μέχρι τώρα*. Λάρισα: 1^ο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων.

Καραπαναγιώτης, Ι., Λαζαρίδου, Σ., Σωμάκος, Λ. (2017). *Υδρευση Ηρακλείου και Αγ. Νικολάου από το φράγμα Αποσελέμη. Κατασκευή φράγματος Αποσελέμη. Λεπτόκοκκο φίλτρο από θραυστά υλικά ασβεστολιθικού λατομείου*. Αθήνα: 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Φραγμάτων και Ταμιευτήρων.

Καρασαββίδης, Π.Ι. (2016). *Διαχείριση υδατικών πόρων σε περιβάλλον ασαφούς λογικής*. Θεσσαλονίκη: Πολυτεχνική Σχολή ΑΠΘ, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Κατσανού, Ε.Α. (2016). *Σεισμική Απόκριση και Αποτίμηση Οριακής Αντοχής Χωμάτων Φραγμάτων*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.

Κουτσογιάννης, Δ, Ευστρατιάδης, Α., Μαμάσης, Ν., Ναλμπάντης, Ι. και Λαζαρίδης, Λ. (2001). *Υδρολογική μελέτη λειτουργίας του ταμιευτήρα, Τεχνικός Σύμβουλος για το έργο "Υδρευση Ηρακλείου και Αγίου Νικολάου από το φράγμα Αποσελέμη"*, Ανάθεση: Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων, Ανάδοχος: Κοινοπραξία Αποσελέμη, Αθήνα, Οκτώβριος 2001.



Κροκίδης, Σ.Γ. (2013). *Ευστάθεια υψηλών πρανών στο φλύσχη: Η περίπτωση του δυτικού (βορείου) αντερείσματος του φράγματος Μόρνου*. Πάτρα: Τμήμα Γεωλογίας Πανεπιστήμιο Πατρών.

Λέρης, Γ. (2008). *Αντιμετώπιση πλημμυρών στα φράγματα της ΔΕΗ Α.Ε. στους ποταμούς Αχελώο, Αραχθό και Νέστο*. Λάρισα: 1^ο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων.

Λιάκουρης, Δ.Ε. (1990). *Τεχνικογεωλογικές συνθήκες των πετρωμάτων της ζώνης Πίνδου στις περιοχές κατασκευής των έργων εκτροπής Αχελώου στη Θεσσαλία*. Θεσσαλονίκη: Πρακτικά 5^{ου} Επιστημονικού Συνεδρίου ΕΓΕ.

Μάλλη, Ε.Ε. (2017). *Μηχανική διάνοιξη μέσα σε καρστικούς σχηματισμούς, της σήραγγας Αποσελέμη*. Αθήνα: Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών Μηχανικών ΕΜΠ.

Μακεδών, Θ. (2021). *Φράγματα*. Θεσσαλονίκη: Παρουσιάσεις Π.Π.Σ. μαθήματος «Γεωλογικές Μελέτες Τεχνικών Έργων» και Π.Μ.Σ. «Τεχνικά έργα-Φράγματα».

Μουτάφης, Ν.Ι. (2008). *Αστοχίες και ατυχή συμβάντα ελληνικών φραγμάτων*. (σσ. τ. 2, σ. 159-170). Λάρισα: 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων.

Μπλάνα, Μ.Χ. (2013). *Ευστάθεια υψηλών πρανών στο φλύσχη: Η περίπτωση του αριστερού (νοτίου) αντερείσματος του φράγματος Μόρνου*. Πάτρα: Τμήμα Γεωλογίας Πανεπιστήμιο Πατρών.

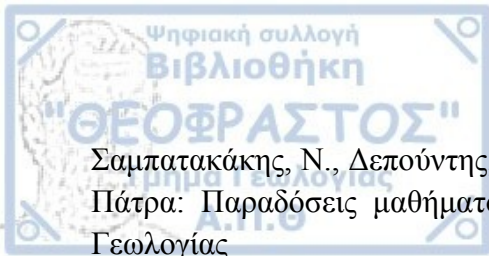
Ντόας, Ε. (2018). *Είδη και τρόποι εφαρμογής τσιμεντενέσεων στα φράγματα*. Πάτρα: ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

Παπαδοσπυριδάκης, Ε. (2010). *Διαχείριση υδατικών πόρων*. Αθήνα: Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ.

Πηλιχός, Α. (2015). *Παραμετρικές αναλύσεις επί των συνθηκών ευστάθειας του σώματος χωμάτινων φραγμάτων. Το παράδειγμα του φράγματος του ΥΗΣ Ιλαρίωνα*. Αθήνα: Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών Μηχανικών ΕΜΠ.

Πυθαρούλη, Ι.Σ., Στείρος, Σ.Κ. (2008). *Κρίσιμες παράμετροι της παραμόρφωσης του φράγματος Κρεμαστών*. Λάρισα: 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων.

Πυθαρούλη, Ι.Σ. (2007). *Μελέτη της μακροχρόνιας παραμόρφωσης του φράγματος κρεμαστών με βάση ανάλυση γεωδαιτικών δεδομένων και μεταβολών στάθμης ταμιευτήρα*. Πάτρα: Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.



Σαμπατακάκης, Ν., Δεπούνη, Ν. *Φράγματα: Ταξινόμηση – κατασκευαστικές απαιτήσεις*. Πάτρα: Παραδόσεις μαθήματος «Τεχνική Γεωλογία», Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας

Σαμπατακάκης, Σ.Ν., Κούκης, Χ.Γ. (2007). *Γεωλογία Τεχνικών Έργων*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου..

Στείρος, Σ., Πυθαρούλη, Σ., Κοντογιάννη, Β., Ψιμούλης, Π., Κουντούρης, Α., Στρεμμένος, Φ., Σκούρτης, Κ., Λέρης, Γ. (2008). *Έλεγχος παραμορφώσεων φραγμάτων Δ.Ε.Η.* Λάρισα: 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων (τ. 2, σ. 206-214 : σχ.).

Τσιούνια, Α. (2012). *Εκτίμηση των παραμέτρων του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής του ποταμού Αποσελέμη*. Αθήνα.

Υ.ΠΕ.ΘΕ. (1966). *ΥΗΣ Κρεμαστών*.

Υ.ΠΕ.ΘΕ. (1966). *ΥΗΣ Στράτου*.

Φώτη, Σ.Γ. (2004). *Τεχνικογεωλογικά προβλήματα σε περιοχές υπό μελέτη φραγμάτων στο μέσο και άνω Αλιάκμονα*. Αθήνα: Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών Μηχανικών ΕΜΠ.

Χαντζόπουλος, Χ. (2017). *Σεισμοί προκαλούμενοι από πλήρωση ταμιευτήρων – Περίπτωση Φράγματος Κρεμαστών*. Πάτρα: ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.