



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ  
ΙΔΡΥΜΑ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΣΕΙΣΜΟΙ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΟΙ ΑΠΟ ΠΛΗΡΩΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ – ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΡΕΜΑΣΤΩΝ



**ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΧΑΝΤΖΟΠΟΥΛΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ**

**ΕΠΟΠΤΕΥΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΒΓΕΝΟΠΟΥΛΟΥ ΕΙΡΗΝΗ**

**ΠΑΤΡΑ 2017**

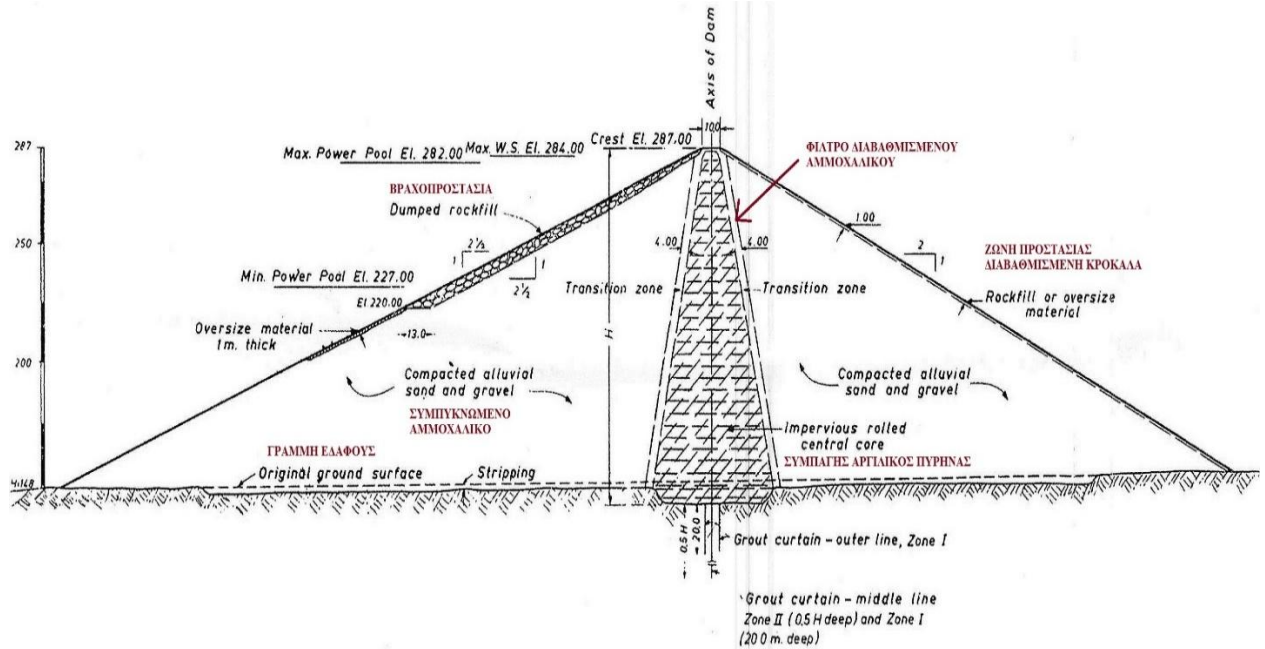
## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	2
ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΩΝ ΚΡΕΜΑΣΤΩΝ .....	4
ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ .....	7
ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ.....	8
ΠΟΤΑΜΙΑ ΠΟΥ ΑΠΟΡΕΟΥΝ ΣΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ .....	8
ΑΧΕΛΩΟΣ.....	8
ΤΑΥΡΩΠΟΣ (ΜΕΓΔΟΒΑΣ) .....	9
ΑΓΡΑΦΙΩΤΗΣ.....	10
ΣΗΡΑΓΓΑ ΕΚΤΡΟΠΗΣ .....	11
ΑΓΩΓΟΙ ΠΤΩΣΗΣ .....	12
ΥΠΕΡΧΕΙΛΙΣΤΗΣ.....	14
ΥΔΡΟΛΗΨΙΑ .....	15
ΛΟΙΠΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΣΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	16
ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....	19
ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ .....	21
ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΣΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ.....	22
ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ.....	23
ΡΗΓΜΑΤΑ.....	24
ΔΙΑΡΡΟΕΣ .....	25
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΕΨΗΣ.....	28
ΆΛΛΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ .....	28
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ .....	29
ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΗ ΑΠΟ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΣ .....	30
ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ.....	30
ΚΟΥΝΑ (ΙΝΔΙΑ).....	34
ASWAN (ΑΙΓΥΠΤΟΣ).....	34
SRINAGARIND (ΤΑΪΛΑΝΔΗ) .....	36
OROVILLE (ΚΑΛΙΦΟΡΝΙΑ) .....	37
ΚΟΙΝΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΕΙΣΜΩΝ ΠΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ .....	37
Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΙ ΤΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ .....	38
ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕΙΣΜΩΝ ΑΠΟ ΠΛΗΡΩΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ .....	39
ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ .....	41

Η ΡΟΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΟΙ ΦΥΣΙΚΟΙ ΣΕΙΣΜΟΙ.....	41
ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΜΟΝΤΕΛΑ .....	42
ΑΛΛΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ.....	42
ΡΗΓΜΑΤΑ.....	43
ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΜΟΗΡ .....	43
ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ANDERSON .....	45
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΥΣΑ ΘΡΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΘΡΑΥΣΗΣ.....	48
ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΡΕΜΑΣΤΩΝ .....	53
ΕΝΕΡΓΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΝ .....	55
ΚΑΝΟΝΙΚΑ ΡΗΓΜΑΤΑ .....	56
ΑΝΑΣΤΡΟΦΑ ΡΗΓΜΑΤΑ.....	56
ΡΗΓΜΑΤΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ.....	56
ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ.....	58
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ.....	59
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	61
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	61

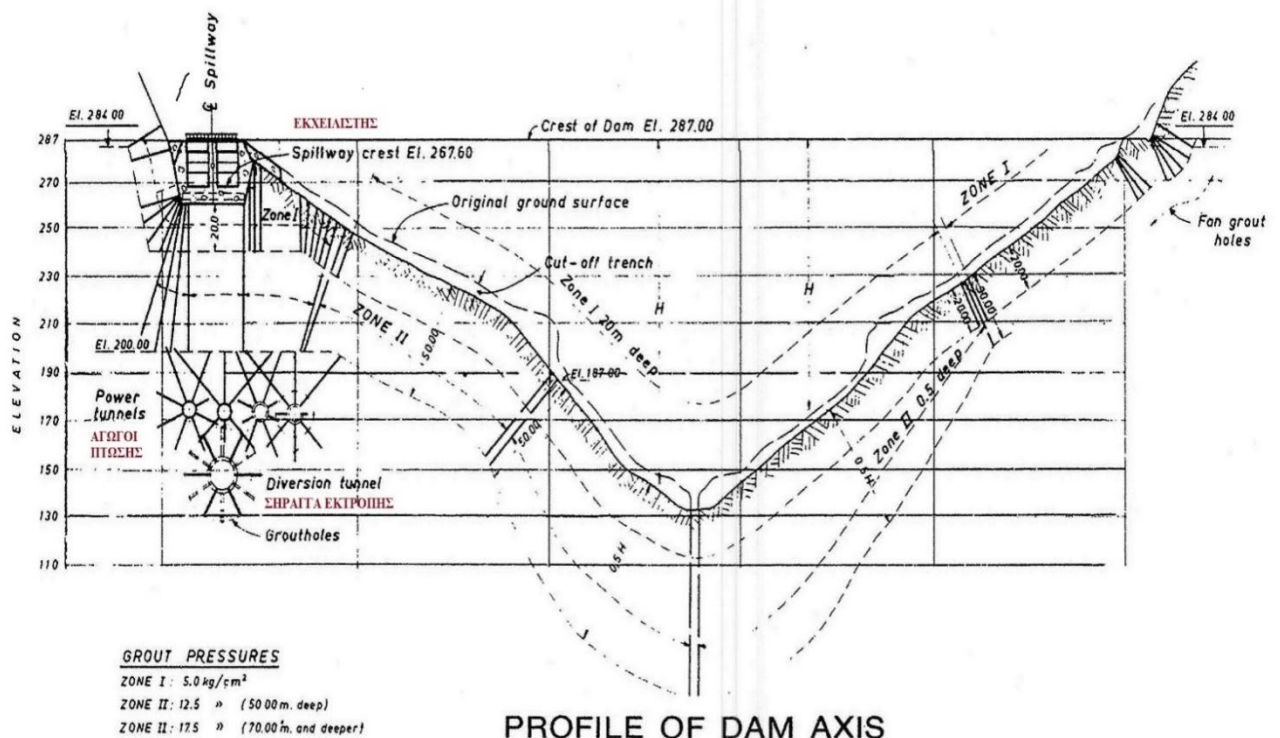
## ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΩΝ ΚΡΕΜΑΣΤΩΝ

Το φράγμα είναι χωμάτινο από αμμοχάλικο με αργλικό πυρήνα. Το μέγιστο ύψος είναι 160,3m ενώ το υψόμετρο της στέγης είναι 287m. Το πλάτος της στέγης είναι 10m και το μήκος της 456m. Το μέγιστο πλάτος της βάσης φτάνει τα 670m με τον συνολικό όγκο του φράγματος να υπολογίζεται 8.131.200m<sup>3</sup>.



MAXIMUM CROSS SECTION

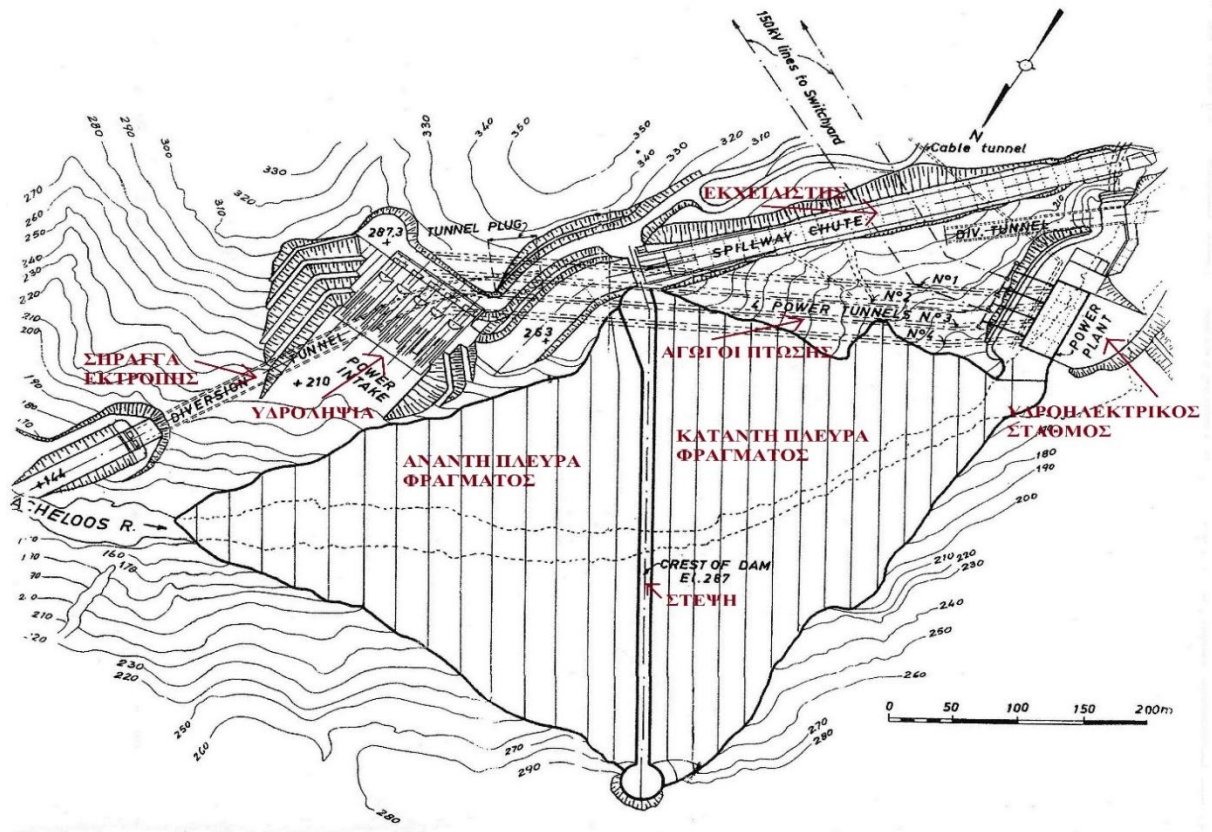
Εγκάρσια τομή φράγματος



PROFILE OF DAM AXIS

Αξονική τομή φράγματος

## SITE PLAN OF KREMASTA DAM



Κάτοψη φράγματος



Αεροφωτογραφία του φράγματος



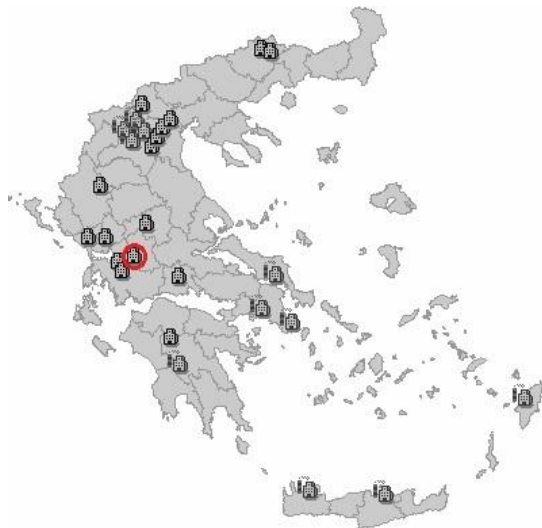
*Ανάντη πλευρά φράγματος από στέψη*



*Κατάντη πλευρά φράγματος*

## ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Το φράγμα των Κρεμαστών, βρίσκεται 55 χιλιόμετρα βορειοανατολικά του Αγρινίου, στα σύνορα του νομού Αιτωλοακαρνανίας και Ευρυτανίας. Είναι ένα από τα υψηλότερα χωμάτινα φράγματα στην Ευρώπη και δημιούργησε την μεγαλύτερη μέχρι σήμερα τεχνητή λίμνη της Ελλάδας. Κατασκευάστηκε στο στενότερο σημείο της κοίτης του ποταμού Αχελώου στην ιστορική θέση «Πήδημα του Κατσαντώνη».



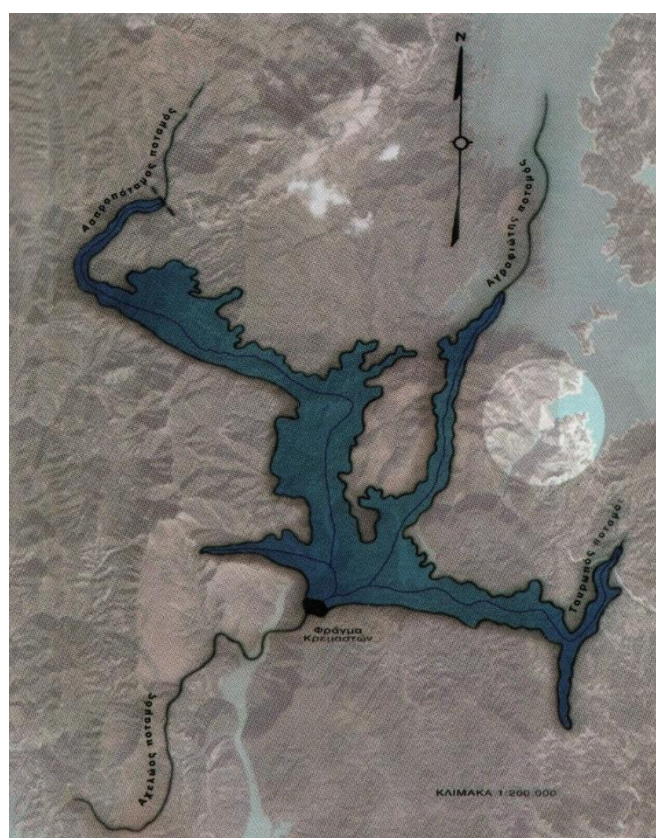
Τοποθεσία του φράγματος

Την εποχή μάλιστα που κατασκευάστηκε ήταν το υψηλότερο χωμάτινο φράγμα στην Ευρώπη. Η οριστική μελέτη ξεκίνησε τον Αύγουστο του 1960. Για την μελέτη καθώς και για την επίβλεψη του έργου υπεύθυνη ήταν η Αμερικανική εταιρία Engineering Consultants Inc. με έδρα το Ντένβερ. Η κατασκευή του φράγματος ξεκίνησε το Νοέμβριο του 1961 από την κατασκευάστρια εταιρία Kaiser Engineers & Constructors Inc. για λογαριασμό της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.) και ολοκληρώθηκε τον Ιανουάριο του 1966. Η ίδια εταιρία ήταν υπεύθυνη και για την εγκατάσταση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Για την προμήθεια του εξοπλισμού και την επίβλεψη της εγκατάστασης του συνεργάστηκαν οι Αμερικανικές βιομηχανίες Allis Chalmers, General Electric, Westinghouse, Chicago Bridge & Iron Co., Yuba Consolidated Industries, Pacific Coast Engineering Co., Harnischfeger Corp., καθώς και οι Ελληνικές Achilles S. Couppas και Dexion Hellas.

<b>FINAL DESIGN - SUPERVISION</b>	
Engineering Consultants Inc., Denver Colorado	U.S.A
<b>CONSTRUCTION OF CIVIL WORKS — INSTALLATION OF MAIN ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT</b>	
Kaiser Engineers & Constructors Inc.	U.S.A
<b>MANUFACTURING &amp; SUPERVISION OF ERECTION</b>	
Turbines	Allis Chalmers U.S.A
Generators & power transformers	General Electric U.S.A
Auxiliary electrical equipment	Westinghouse U.S.A
Penstocks	Chicago Bridge & Iron Co. U.S.A
Intake gates & Hoists	Yuba Consolidated Industries U.S.A
Spillway gates & Hoists	Pacific Coast Engineering Co. U.S.A
350 Ton gantry crane	Harnischfeger Corp. U.S.A
Stoplogs & guides	Achilles S. Couppas Greece
Trashracks	Dexion Hellas Greece

## ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ

Η λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα έχει έκταση 3570 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Η μέση ετήσια ροή είναι  $151,75\text{m}^3/\text{sec}$  ενώ η μέγιστη τιμή σε καταστάσεις πλημμύρας είναι  $9800\text{m}^3/\text{sec}$ . Ο μέγιστος όγκος νερού σε κατάσταση πλημμύρας είναι  $1.950.000.000\text{m}^3$  (1,95 δισεκατομμύρια κυβικά). Η μέγιστη στάθμη που μπορεί να φτάσει το νερό στο φράγμα είναι 284m το οποίο συνεπάγεται με όγκο νερού  $4.750.000.000\text{m}^3$  (4,75 δισεκατομμύρια κυβικά). Ωστόσο η στάθμη του νερού που απαιτείται ώστε το φράγμα να έχει τη μέγιστη απόδοση είναι 282m το οποίο αντίστοιχα αναλογεί σε όγκο  $4.495.000.000\text{m}^3$  (4,495 δισεκατομμύρια κυβικά). Για αυτή τη στάθμη νερού ο ταμιευτήρας έχει έκταση  $80,6\text{km}^2$ . Η ελάχιστη στάθμη νερού που απαιτείται για να λειτουργεί η υδροηλεκτρική μονάδα του φράγματος είναι 227m.



Ταμιευτήρας του φράγματος

## ΠΟΤΑΜΙΑ ΠΟΥ ΑΠΟΡΕΟΥΝ ΣΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

### ΑΧΕΛΩΟΣ

Ο Αχελώος, γνωστός κι ως Ασπροπόταμος, είναι ο δεύτερος σε μήκος ποταμός της Ελλάδας. Πηγάζει από την οροσειρά της Πίνδου και συγκεκριμένα από το όρος Λάκμος (Περιστερί), νότια νοτιοδυτικά του Μετσόβου και μετά από μια διαδρομή 220 χιλιομέτρων εκβάλλει στο Ιόνιο πέλαγος, έχοντας σχηματίσει με τις προσχώσεις του τα νησιά Εχινάδες. Κατά τη διαδρομή του διέρχεται από τους νομούς Τρικάλων, από τα όρια των νομών Καρδίτσας και Άρτας και στη συνέχεια από τα όρια των



νομών Ευρυτανίας και Αιτωλοακαρνανίας. Διαχωρίζει με την πορεία του την Ακαρνανία από την Αιτωλία, διασχίζοντας διαδοχικά τις τεχνητές λίμνες των Κρεμαστών, του Καστρακίου και του Στράτου και αρδεύει την πεδιάδα του Αγρινίου. Στη ροή του προς το Ιόνιο δέχεται τα νερά των παραποτάμων του Αγραφιώτη, Ταυρωπού, Τρικεριώτη και Ινάχου. Σήμερα οι τρεις πρώτοι χύνονται στην τεχνητή λίμνη των Κρεμαστών και ο τέταρτος στην τεχνητή λίμνη του Καστρακίου. Θεωρείται ο πλουσιότερος σε νερά γηγενής ποταμός της Ελλάδας. Ο Αχελώος, με γεωγραφικά στοιχεία E 21 17 και N 37 38, εμπίπτει στην απόφαση της Ευρωπαϊκής επιτροπής 2006/613/EK και αποτελεί έναν από τους τόπους κοινοτικής σημασίας στη μεσογειακή γεωγραφική περιοχή.



*Αχελώος Ποταμός*

### **ΤΑΥΡΩΠΟΣ (ΜΕΓΔΟΒΑΣ)**

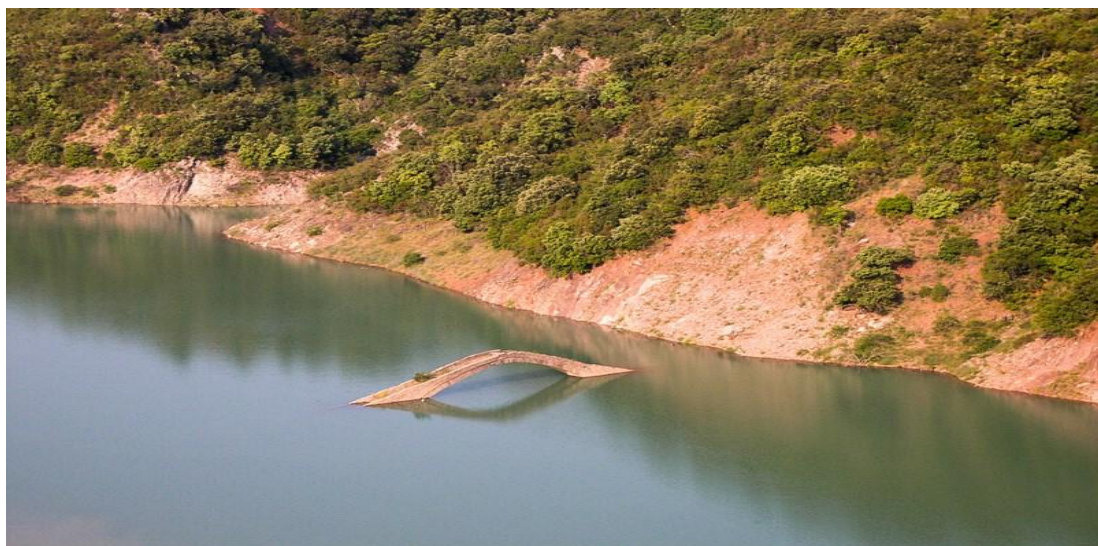
Ο Ταυρωπός ή Μέγδοβας είναι ποταμός που ρέει στους νομούς Καρδίτσας και Ευρυτανίας. Ο ποταμός πηγάζει από τα βουνά στο δυτικό τμήμα του νομού Καρδίτσας και έχει μήκος 78 περίπου χιλιόμετρα. Κατά τη δεκαετία του 1950 η ροή του διεκόπη με την κατασκευή του υδροηλεκτρικού φράγματος και τη δημιουργία της Λίμνης Πλαστήρα, που παρέχει ηλεκτροδότηση, ύδρευση και άρδευση στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας. Στη συνέχεια ο ποταμός περνάει στο νομό Ευρυτανίας και κατά μήκος της κοιλάδας του υπάρχουν λιγιστές καλλιεργήσιμες εκτάσεις, πευκοδάση και δάση Ελάτης καθώς και μερικά πέτρινα γεφύρια. Από το 1967 ο ποταμός χύνεται στη λίμνη Κρεμαστών, ενώ πριν από τη δημιουργία της ενωνόταν με τον ποταμό Αχελώο.



*Ταυρωπός ποταμός Γέφυρα Βίνιανης*

### **ΑΓΡΑΦΙΩΤΗΣ**

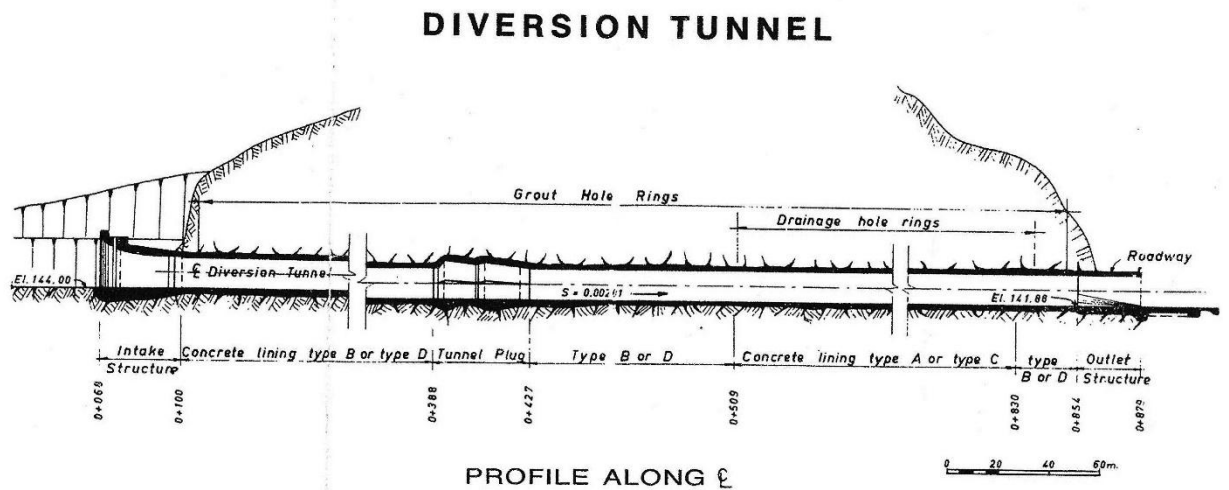
Ο Αγραφιώτης είναι ποταμός που ρέει στον νομό Ευρυτανίας. Ο ποταμός πήρε το όνομά του από τα βουνά Άγραφα και τον ομώνυμο οικισμό. Έχει μήκος 50 περίπου χιλιόμετρα και πηγάζει από τα Άγραφα στα βόρεια του νομού (Βραγγιανά και Τροβάτο, διασχίζει μία κοιλάδα με λιγιστές καλλιεργήσιμες εκτάσεις, πευκοδάση και δάση Ελάτης και μερικά πέτρινα γεφύρια, περνάει δυτικά από τα Άγραφα και στη συνέχεια από το Τριπόταμο, όπου και ενώνεται σήμερα με τη λίμνη Κρεμαστών. Μέχρι το 1967, πριν τη δημιουργία της λίμνης των Κρεμαστών, ο Αγραφιώτης ήταν κατά δύο χιλιόμετρα μεγαλύτερος και ενώνονταν με τους ποταμούς Αχελώο και Μέγδοβα.



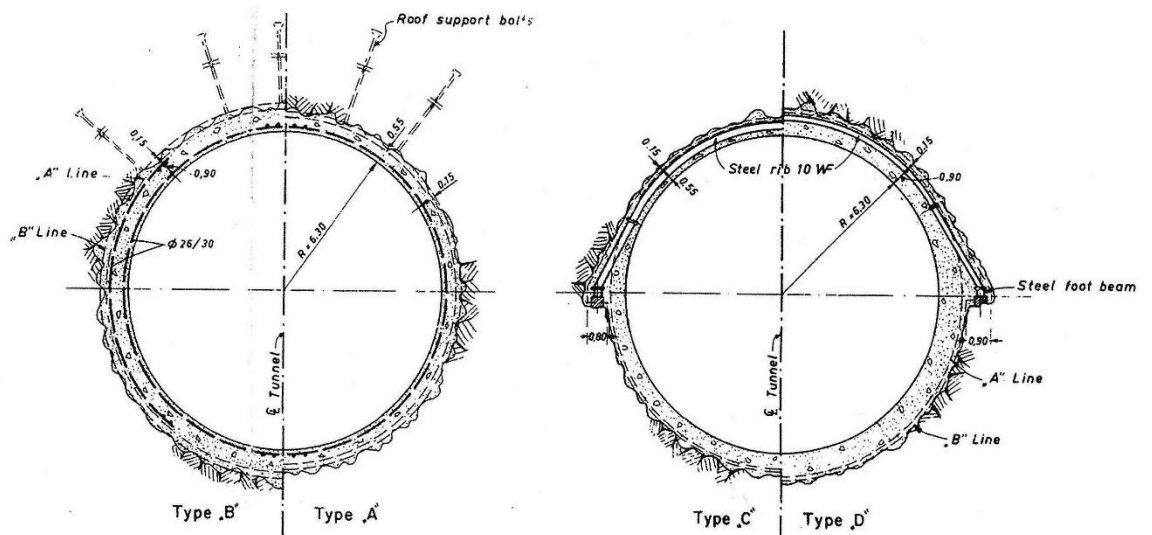
*Αγραφιώτης ποταμός γεφύρι του Μανώλη*

## ΣΗΡΑΓΓΑ ΕΚΤΡΟΠΗΣ

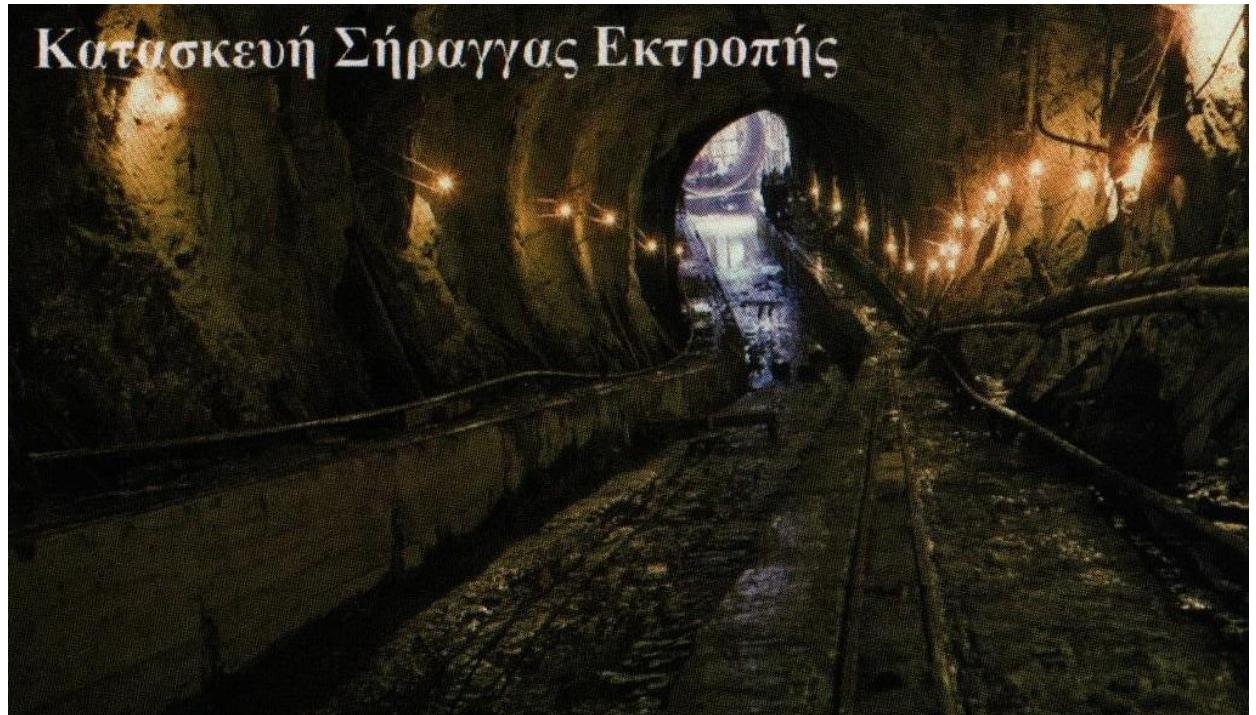
Η σήραγγα εκτροπής κατασκευασμένη και αυτή από την εταιρία Kaiser Engineering & Constructors Inc. έχει μήκος 760m και είναι κυκλικής διατομής με διάμετρο 12,6m. Η συνολική παροχτευτική ικανότητα της είναι 2500m<sup>3</sup>/sec. Έχει 2 πόρτες εξόδου διαστάσεων 4,80m x 15,46m. Η μόνιμη έμφραξη της έγινε με πώμα από σκυρόδεμα.



Μηκτομή σήραγγας εκτροπής



Εγκάρσια τομή σήραγγας εκτροπής

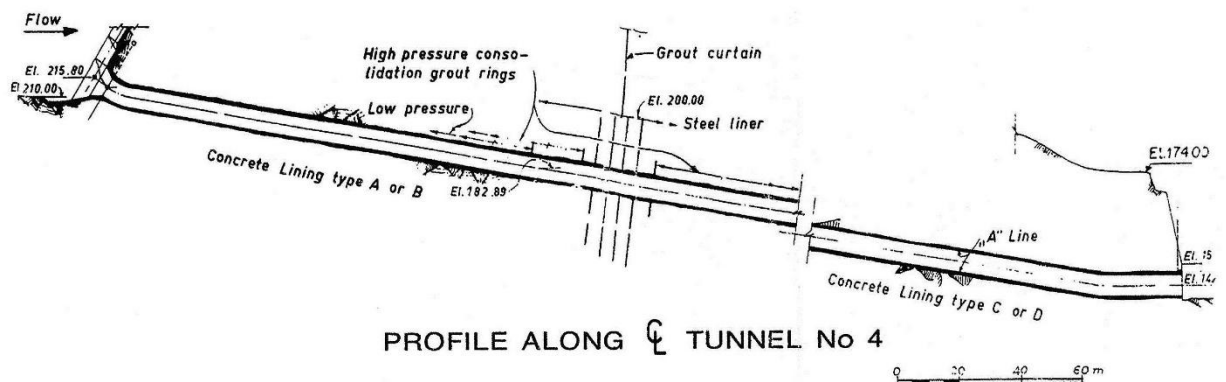


Κατασκευή σήραγγας εκτροπής

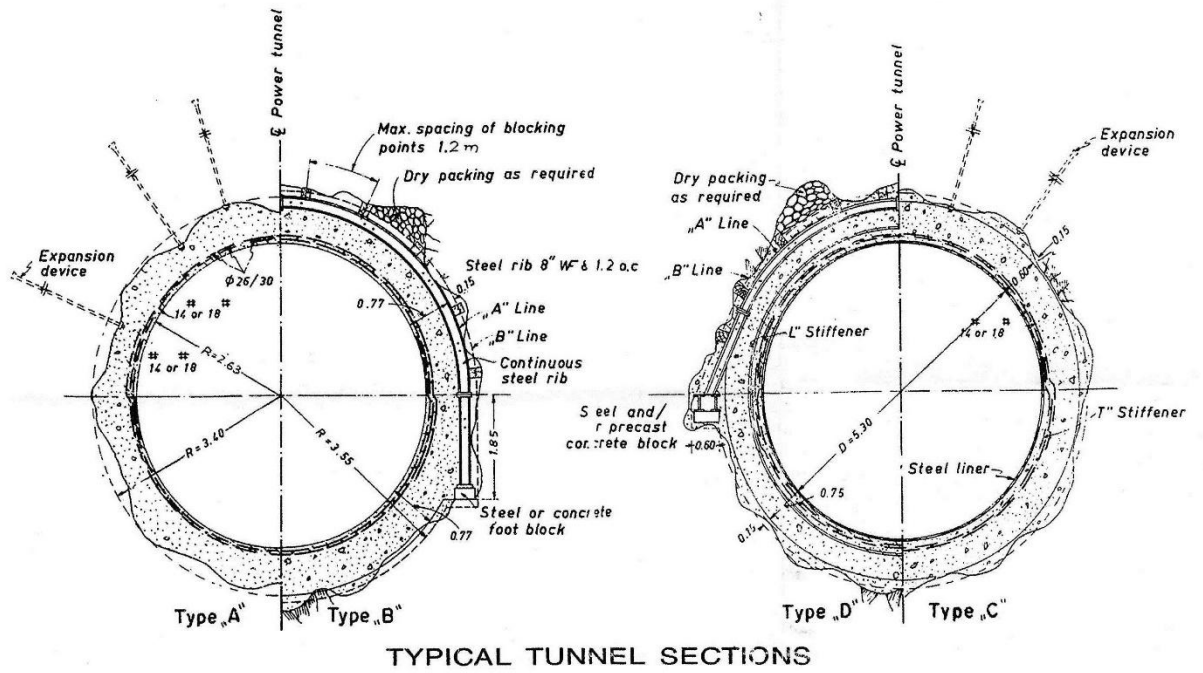
## ΑΓΩΓΟΙ ΠΤΩΣΗΣ

Οι αγωγοί πτώσης μεταφέρουν το νερό από την υδροληψία στον σταθμό. Είναι κατασκευής της εταιρίας Chicago Bridge & Iron Co. Είναι 4 στον αριθμό, μεταλλικοί μεταβλητής διαμέτρου. Η μέγιστη διάμετρος είναι 5,26m ενώ η ελάχιστη 4,22m. Από τα 215,8m που είναι το υψόμετρο της υδροληψίας το νερό 'πέφτει' στα 141,1m, το υψόμετρο του σταθμού σε μια υψομετρική διαφορά 74,7m.

## POWER TUNNELS



Μηκοτομή αγωγών πτώσης



Εγκάρσια τομή αγωγών πτώσης



Αγωγός πτώσης

## ΥΠΕΡΧΕΙΛΙΣΤΗΣ

Ο υπερχειλιστής είναι τύπου ανοικτού με θυροφράγματα. Έχει 2 τοξωτές θύρες διαστάσεων 11m πλάτους x 14,6m ύψους. Η μέγιστη εκφόρτωση νερού είναι 3000m<sup>3</sup>/sec.



*Υπερχειλιστής σε λειτουργία*



*Κατασκευή υπερχειλιστή*

## ΥΔΡΟΛΗΨΙΑ

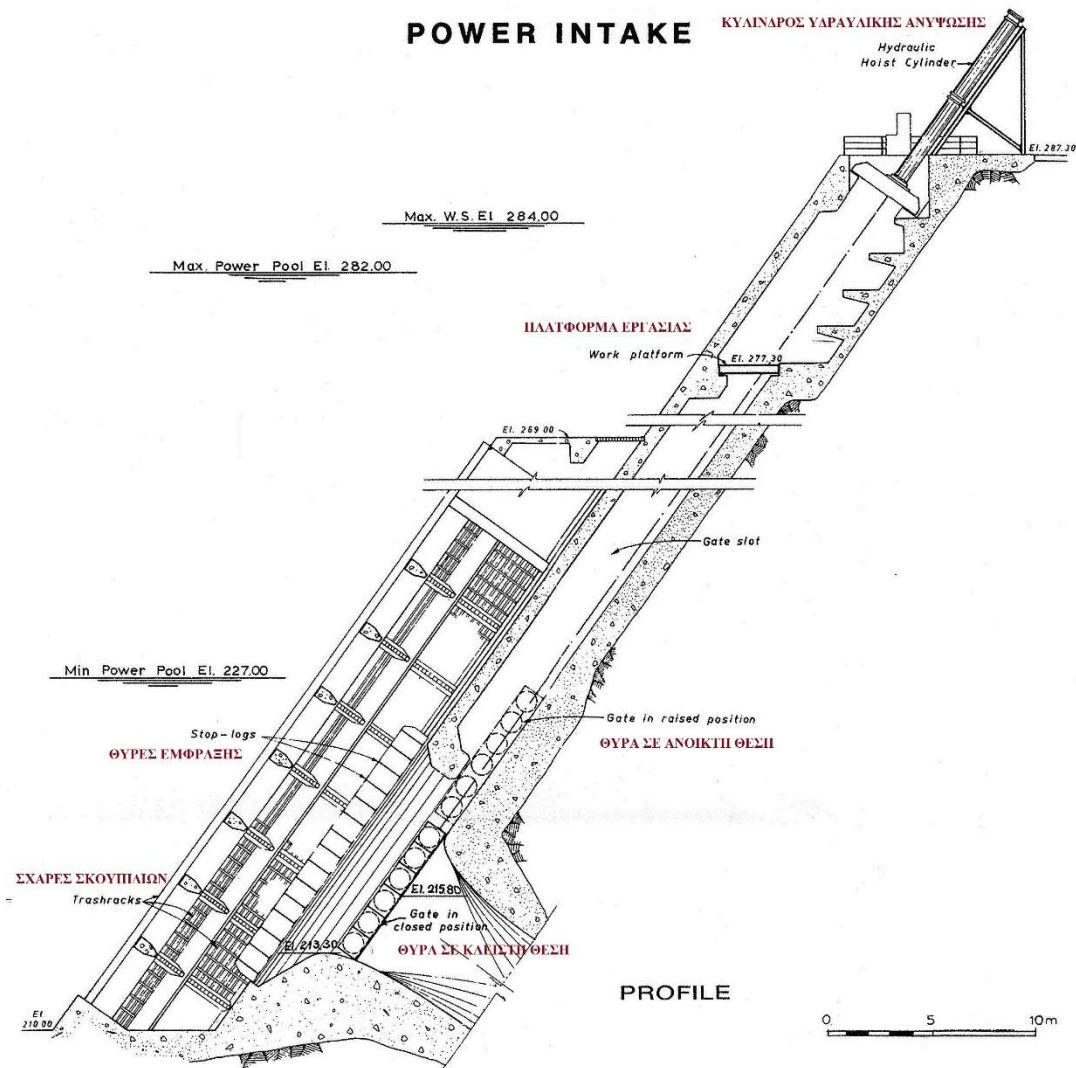
Η υδροληψία κατασκευασμένη από την εταιρία Yuba Consolidated Industries είναι επικλινή τύπου με 5 θύρες διαστάσεων 6,50m x 7,70m. Ο έλεγχος λειτουργίας των θυρών γίνεται τόσο επί τόπου όσο και από αίθουσα ελέγχου στο σταθμό παραγωγής. Η προστασία των θυρών γίνεται με ημικυκλικές χαλύβδινες σχάρες ενώ η ανύψωση του νερού γίνεται με υδραυλικό τρόπο.



Υδροληψία



Κατασκευή Υδροληψίας

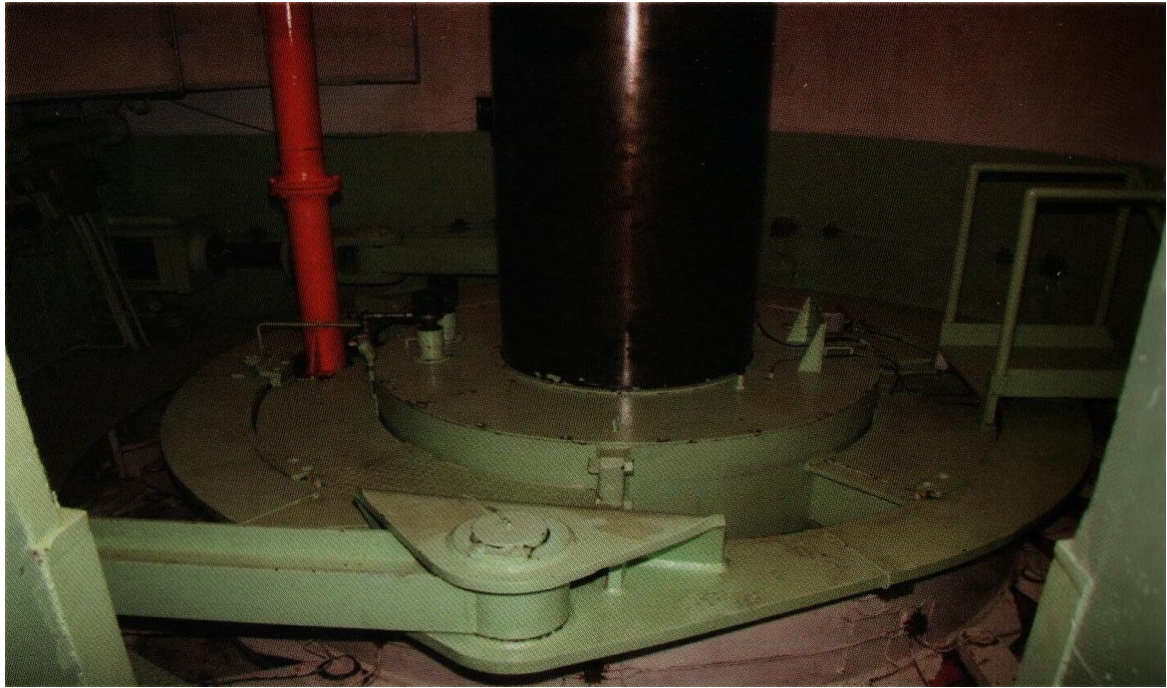


Σχέδιο υδροληψίας

### ΛΟΙΠΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΣΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Οι στρόβιλοι κατασκευασμένη από την εταιρία Allis Chalmers είναι τύπου Francis με κατακόρυφο άξονα. Είναι 4 στον αριθμό και έχουν σχεδιασθέν καθαρό μανομετρικό 124mστο οποίο παράγουν και την μέγιστη ισχύ των 115MW. Περιστρέφονται με συχνότητα 166,6RPM και η παροχή για μέγιστη στάθμη λειτουργίας είναι 92m<sup>3</sup>/sec.





*Στρόβιλος*

Οι γεννήτριες κατασκευής της εταιρίας General Electric, 4 στον αριθμό είναι τύπου ομπρέλας κατακόρυφου άξονα με μέγιστο αριθμό στροφών 166,6RPM. Κάθε γεννήτρια έχει ισχύς 115.000KVA.



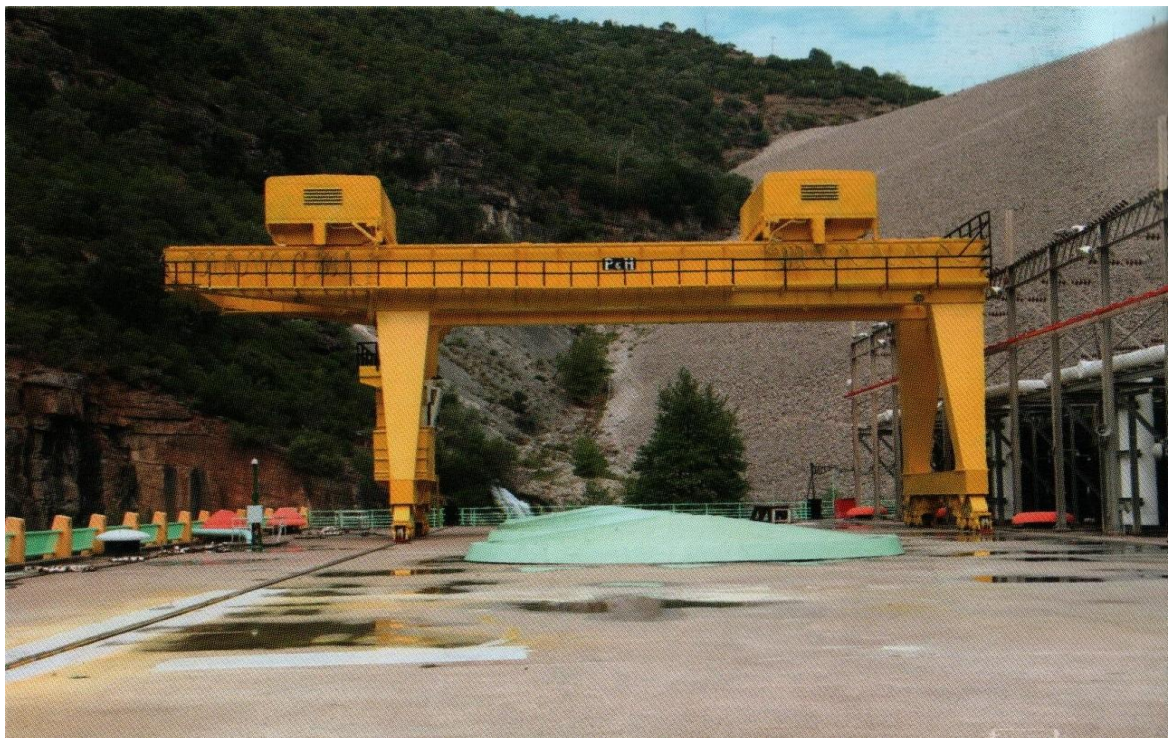
*Γεννήτριες*

Υπάρχουν επίσης 12 μετασχηματιστές ισχύος, εξωτερικού τύπου μίας φάσης, ισχύος 40.000KVA και τάσης 161,25/15,75KV.



*Μετασχηματιστές Ισχύος*

Στο ‘κατάστρωμα’ του σταθμού παραγωγής βρίσκετε και μια γερανογέφυρα εξωτερικού τύπου με μετακινούμενο φορέα σε ράγες. Η κύρια ικανότητα ανύψωσης της γερανογέφυρας είναι 2 x 175 τόνοι ενώ η βοηθητική ικανότητα ανύψωσης είναι 2 x 20 τόνοι.



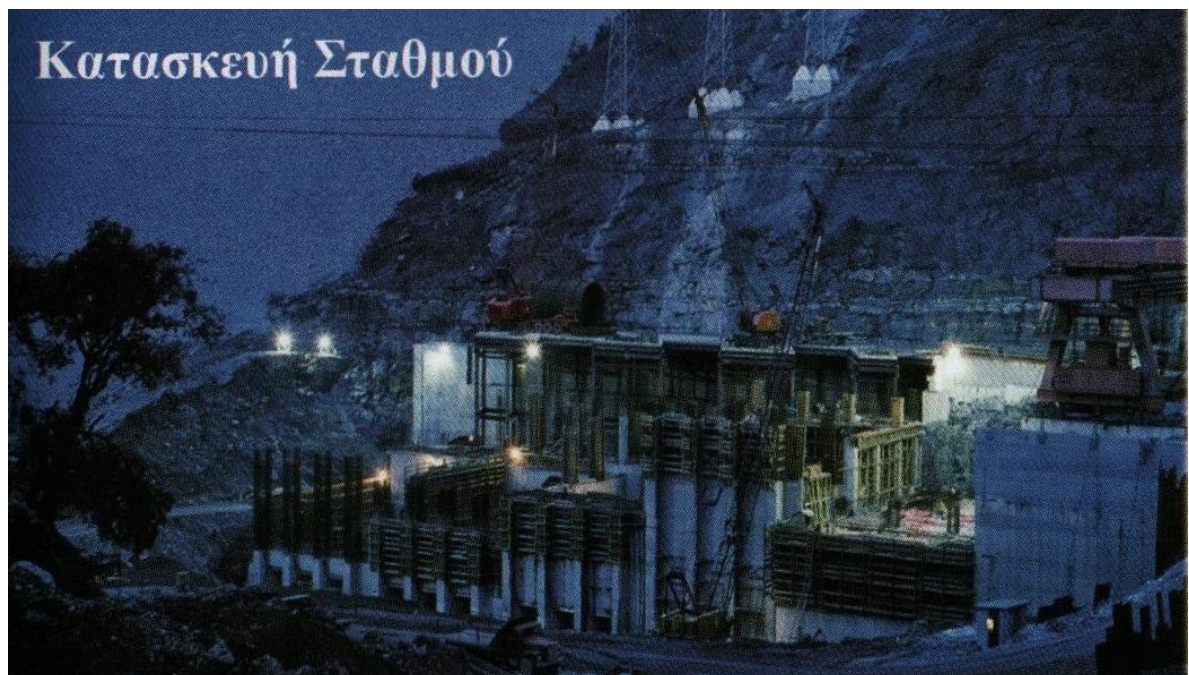
*Γερανογέφυρα*

## ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

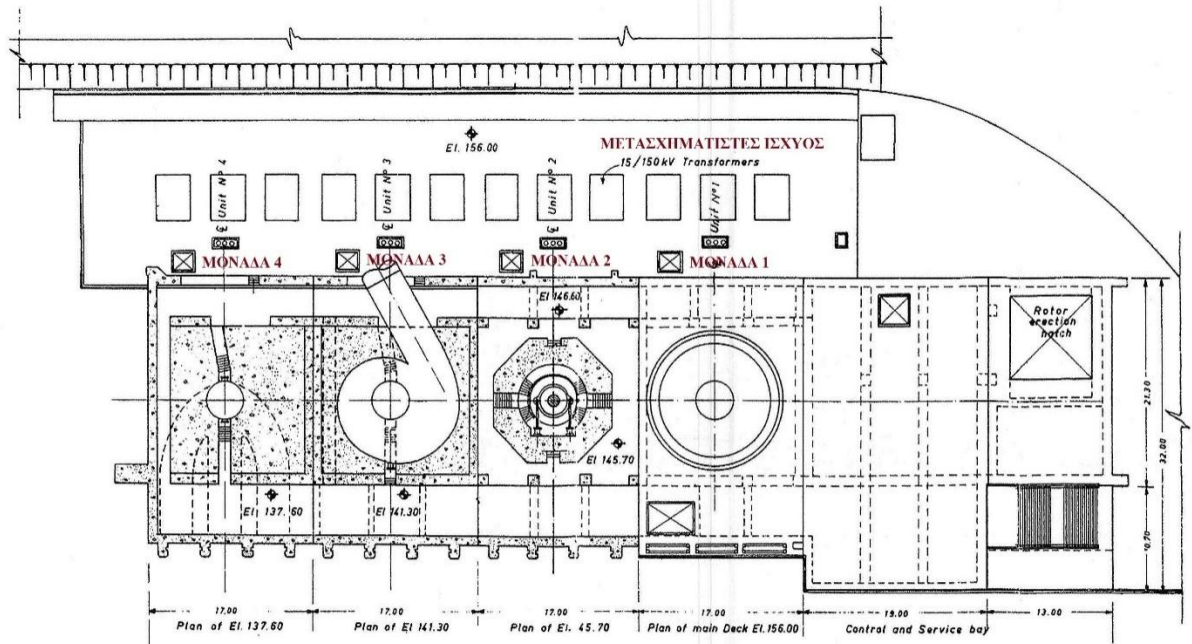
Η μέγιστη ισχύς του υδροηλεκτρικού σταθμού είναι 440MW (4x110 Μεγαβάτ) ενώ στην ελάχιστη στάθμη, 235MW (235 Μεγαβάτ). Η πρωτεύουσα ετήσια ενέργεια που παράγει είναι 1045 GWH (1045 Γιγοβατόρες) με την δευτερεύουσα να ανέρχεται στις 385GWH (385 Γιγοβατόρες) φτάνοντας συνολικά τις 1430 GWH.



*Σταθμός παραγωγής*

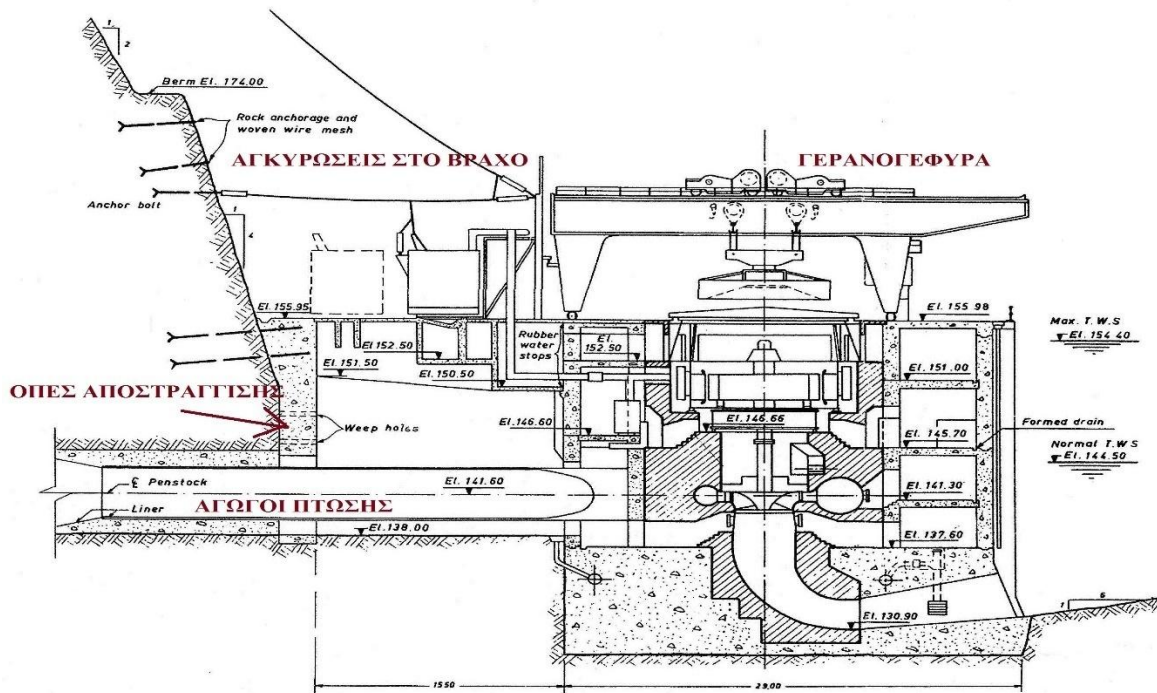


*Κατασκευή σταθμού παραγωγής*



PLAN

Κάτοψη σταθμού παραγωγής



CROSS SECTIONS

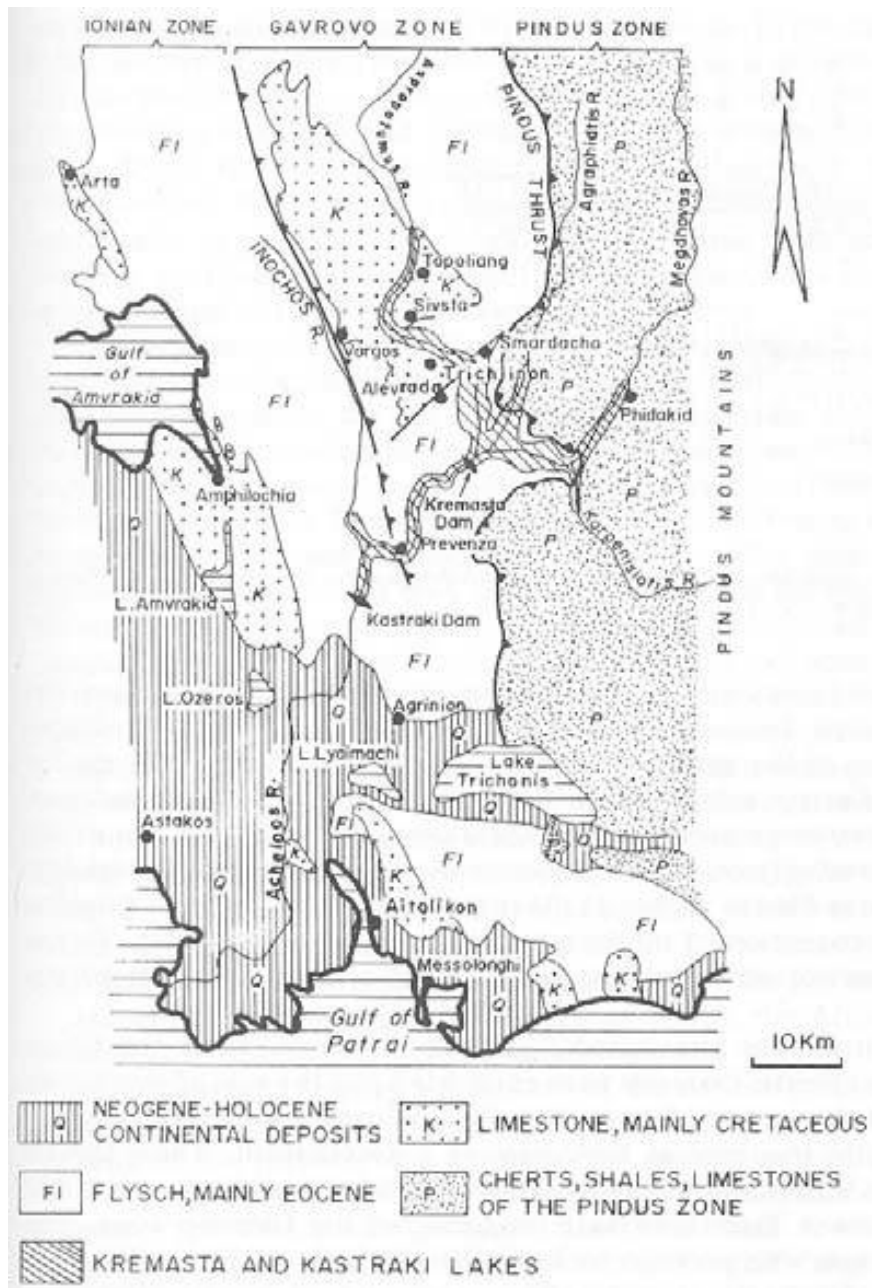
Εγκάρσια τομή σταθμού παραγωγής



Σχέδιο επεξήγησης λειτουργίας στροβίλου-γεννήτριας

## ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

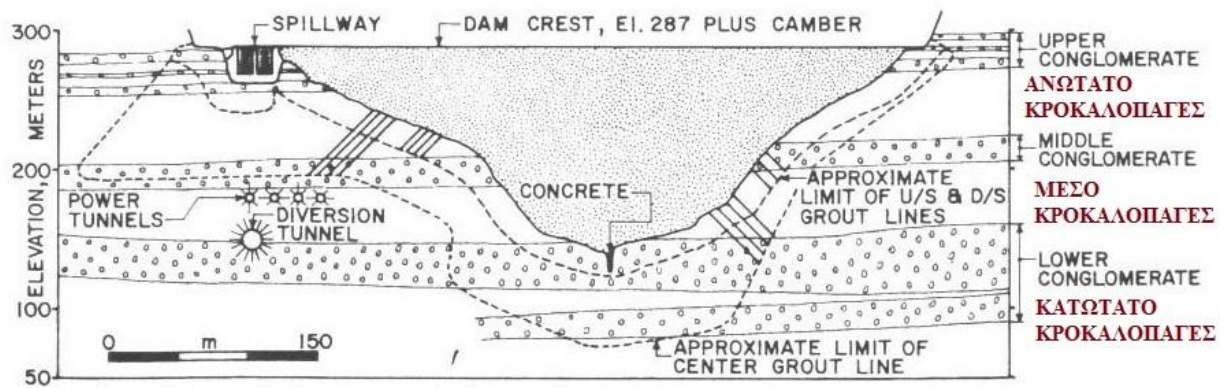
Η περιγραφή της γεωλογίας της περιοχής του φράγματος των Κρεμαστών παρουσιάζεται εκτενώς από τους Gurta και Rastogi (1967). Η περιοχή χαρακτηρίζεται από επωθήσεις και διαιρείται σε τρεις ζώνες: (1) Πίνδου, (2) Γαβρόβου και (3) Ιόνια. Στη ζώνη της Πίνδου, ανατολικά των Κρεμαστών υπάρχουν κυρίως ασβεστόλιθοι Ιουρασικής και Κρητιδικής περιόδου, μαζί με οφιόλιθους και σχιστόλιθους. Η ζώνη Γαβρόβου στην οποία ανήκει το φράγμα των Κρεμαστών χαρακτηρίζεται κυρίως από συμπαγείς ασβεστόλιθους. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη γεωλογία στη θέση ακριβώς του φράγματος δίνονται σε επόμενη παράγραφο. Οι ασβεστόλιθοι απαντώνται και δυτικότερα στην Ιόνια ζώνη.



Γεωλογικός χάρτης

### ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΣΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Η περιοχή του φράγματος και του ταμιευτήρα δομείται από ιζηματογενείς σχηματισμούς του φλύσχη γαβρόβου. Η θέση του φράγματος είναι μια στενωπός, που έχει διανοίγει μέσα σε πάγκους κροκαλοπαγών που εναλλάσσονται με αλληπάλλληλα στρώματα ιλυόλιθων όπως φαίνεται και από τη γεωλογική τομή του παρακάτω σχήματος.



Γεωλογική τομή φράγματος

Τα κροκαλοπαγή ταξινομήθηκαν σε τρεις βασικούς ορίζοντες. Τον ορίζοντα μεταξύ των υψομέτρων 270-285m (ανώτατο κροκαλοπαγές), τον ορίζοντα μεταξύ 185-210m (μέσο κροκαλοπαγές) και το κατώτερο κροκαλοπαγές κάτω των 170m. Το τεκτονικό καθεστώς της περιοχής χαρακτηρίζεται από μια σειρά σχεδόν παράλληλων ρηγμάτων που τέμνουν τα στρώματα του φλύσχη κατά διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ.

Η περιοχή του ταμιευτήρα δομείται επίσης από γεωλογικούς σχηματισμούς της διάπλασης του φλύσχη με επικράτηση κατά περιοχές, άλλοτε κροκαλοπαγών, άλλοτε ψαμμιτών, κυρίως όμως των ιλυόλιθων, χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα στεγανότητας. Στην θέση του φράγματος η υδροπερατότητα των σχηματισμών και ιδιαίτερα των κροκαλοπαγών ήταν υψηλή και οφειλόταν στην κίνηση του νερού μέσα από τις τεκτονικές ασυνέχειες (ρήγματα, διακλάσεις). Κατά την πλήρωση του ταμιευτήρα σημαντικές διαρροές εμφανιστήκαν στα κατάντη αντερείσματα του φράγματος με την εκδήλωση πολυάριθμων πηγών σημαντικών παροχών. Οι ιλυόλιθοι αντίθετα ήταν στεγανοί και μόνο κατά μήκος ορισμένων ρηγμάτων επέτρεπαν την κίνηση των υπογείων υδάτων. Κατά μήκος ορισμένων ρηγμάτων μάλιστα ανέβλυζαν θερμές θειούχες πηγές, οι οποίες πρόχειρα αξιοποιημένες αποτέλεσαν ιαματικούς χώρους, τα γνωστά 'Λουτρά Κρεμαστών'.

## ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ

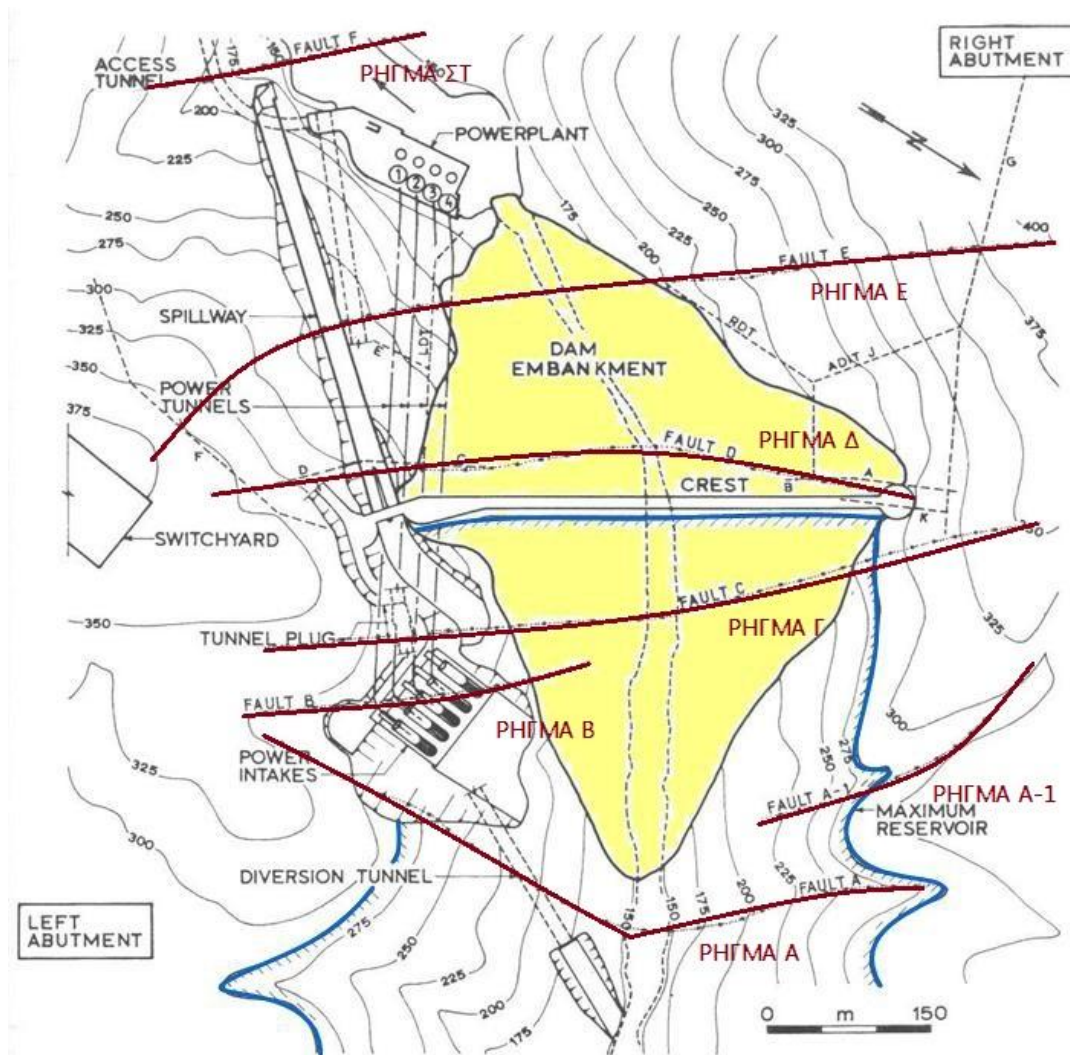
Από τις γεωλογικές έρευνες και κατασκευές που πραγματοποιήθηκαν προέκυψαν ορισμένες διαπιστώσεις σχετικά με την συμπεριφορά των πετρωμάτων. Οι ιλυόλιθοι σε υγιή μορφή παρουσίασαν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στην διάβρωση από εκείνη των ιλυόλιθων της γειτονικής Ιονίου ζώνης. Πετρογραφική ανάλυση έδειξε την παρουσία ιλλίτη και άλλων αργιλικών στοιχείων. Το ποσοστό πυρηνοληψίας κυμάνθηκε από 90-100% όπως και το RQD, όπου ήταν αρκετά ψηλό και σχεδόν στο σύνολο των γεωτρήσεων μεγαλύτερο του 70%. Μακρά έκθεση των ιλυόλιθων (ακόμη και πυρήνων γεωτρήσεων) στην επίδραση των ατμοσφαιρικών παραγόντων είχε ως αποτέλεσμα την μερική ή ολική καταστροφή της δομής τους και την προοδευτική μετατροπή τους από υγιές πέτρωμα προς ένα εντελώς χαλαρωμένο, με χαρακτηριστικά εδάφους. Οι ιλυόλιθοι συνήθως δεν παρουσιάζονται αμιγείς, αλλά περιέχουν στην μάζα τους διάσπαρτες κροκάλες ποικίλου μεγέθους ασβεστολιθικής ή πυριτικής σύστασης. Πολλές φορές περιέχουν και ενδιαστρώσεις ψαμμιτών. Η υδροπερατότητα αυτών, εκπεφρασμένη με τον συντελεστή υδροπερατότητας 'K', θεωρείται περιορισμένη και μόνο κατά μήκος ορισμένων ρηγμάτων διαπιστώθηκε

αυξημένη. Από αξιολόγηση αποτελεσμάτων μεγάλου πλήθους δοκιμών εισπίεσεων που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε, ότι μέχρι βάθος 10-30m η τιμή του 'K' κυμάνθηκε από  $K=1*10^{-4} - 1*10^{-5}$  cm/sec, από βάθος 40-80m  $K=1*10^{-5} - 1*10^{-6}$  cm/sec και από βάθος 80-120m  $K=1*10^{-6} - 1*10^{-7}$  cm/sec. Τα κροκαλοπαγή σε υγιή κατάσταση παρουσίασαν ικανοποιητικές τιμές αντοχής και υψηλό μέτρο ελαστικότητας το δε ποσοστό πυρηνοληψίας καθώς και το RQD κυμάνθηκαν μεταξύ 90-100%. Ιδιαίτερο γνώρισμα των κροκαλοπαγών είναι η εσωτερική διάβρωση που έχουν υποστεί και η οποία έχει συντελέσει στην διεύρυνση των ρωγμών των τεκτονικών ασυνεχειών, με αποτέλεσμα την δημιουργία κενών χώρων (εγκοίλων), διαστάσεων λίγων εκατοστών έως και μερικών μέτρων ενίοτε. Τα μεγαλύτερα από τα εγκοίλα αυτά κατά το 1/3 περίπου του όγκου περιέχουν υδαρές ιλυοαμμώδες υλικό, το οποίο κατά τη διάνοιξη των σηράγγων και την διάτρηση του εγκοίλου 'έρρει' προς το δάπεδο αυτών. Στα κροκαλοπαγή ο συντελεστής υδροπερατότητας 'K', μέχρι το βάθος των 80-90m περίπου κυμαίνεται σταθερά από  $K=1*10^{-3} - 1*10^{-4}$  cm/sec, ενώ κάτω από το βάθος αυτό οι τιμές του 'K' φαίνεται ότι ελαφρά μετατοπίζονται προς τιμές μικρότερης υδροπερατότητας. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η υδροπερατότητα των κροκαλοπαγών παρουσιάζει τάσεις μείωσης της τιμής της, όσο οι αποστάσεις των δοκιμών μεγαλώνουν από τα ελεύθερα πρηνή και εκτελούνται προς τα ανοικτά αυτών ή όσο χαμηλότερα βρίσκονται από την κύτη του ποταμού. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι επιβάλλεται ιδιαίτερη προσοχή στην κατασκευή της διαφραγματικής κουρτίνας και την διάνοιξη των σηράγγων τσιμεντενέσεων – αποστραγγίσεων όταν το φράγμα κατασκευαστεί σε σχηματισμούς του φλύσχη Γαβρόβου που συμμετέχουν και τα κροκαλοπαγή.

## **ΡΗΓΜΑΤΑ**

Στη θέση του φράγματος έχει εντοπιστεί μια σειρά ρηγμάτων, σχεδόν κατακόρυφων σε διάταξη παράλληλη με τον άξονα του φράγματος. Το ρήγμα Α, στο ανάντη όριο του φράγματος, το ρήγμα Α-1 μικρότερο ρήγμα που υπάγεται στο ρήγμα Α, το ρήγμα Β, ανάντη του άξονα του φράγματος στην περιοχή υδροληψίας, το ρήγμα Γ, ανάντη του άξονα του φράγματος, ρήγμα Δ, κατάντη του άξονα του φράγματος, ρήγμα Ε, στο μέσο της απόστασης μεταξύ του άξονα και του κατάντη πόδα του φράγματος, ρήγμα ΣΤ, κατάντη του φράγματος. Το πάχος των ρηγμάτων κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά έως μερικά μέτρα και είναι γεμάτα με ίλη, άμμο, θραύσματα βράχου κλπ. Τα αποτελέσματα των δοκιμών διαπερατότητας έδειξαν ότι τα ρήγματα είναι αδιαπέραστα στις περιοχές όπου υπάρχουν ιλύολιθοι, αλλά διαπερατά εκεί όπου υπάρχουν κροκάλες. Τα ρήγματα Δ και Ε είναι τα πιο σημαντικά από άποψη διαρροών. Το ρήγμα Δ απέχει μόλις 5.30m από τον άξονα του φράγματος στην κατάντη πλευρά. Το ρήγμα Ε βρίσκεται περίπου στο μέσο της απόστασης ανάμεσα στον άξονα και το κατάντη πόδι του φράγματος. Η ζώνη επιρροής του είναι ευρεία και εκτείνεται βαθιά και στα δύο αντερείσματα.



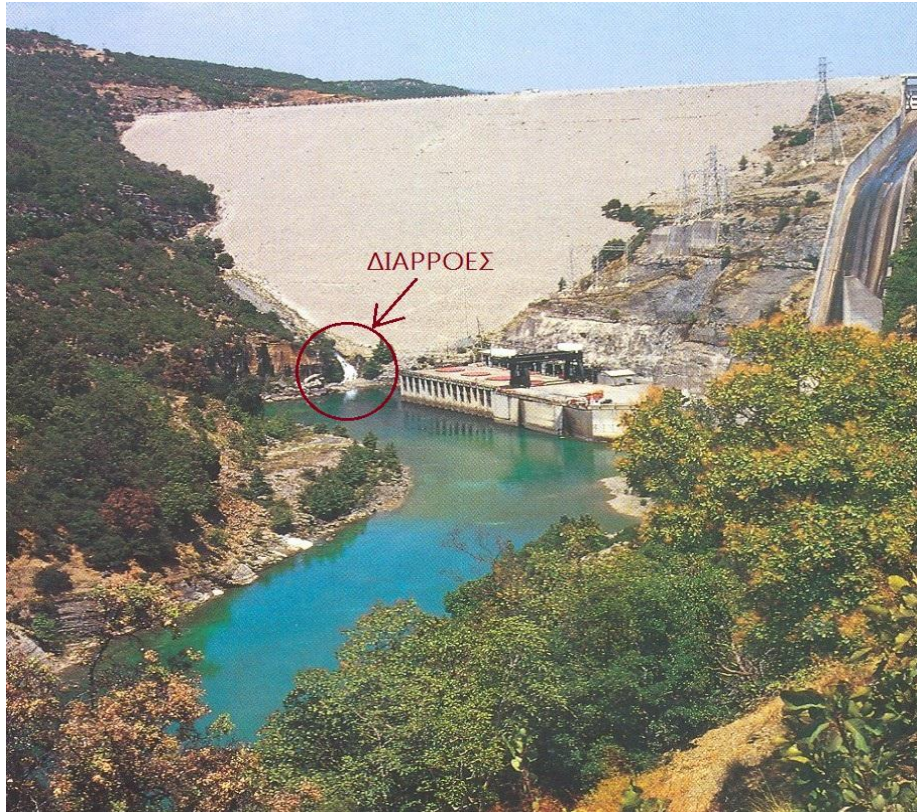


Χάρτης ρηγμάτων

## ΔΙΑΡΡΟΕΣ

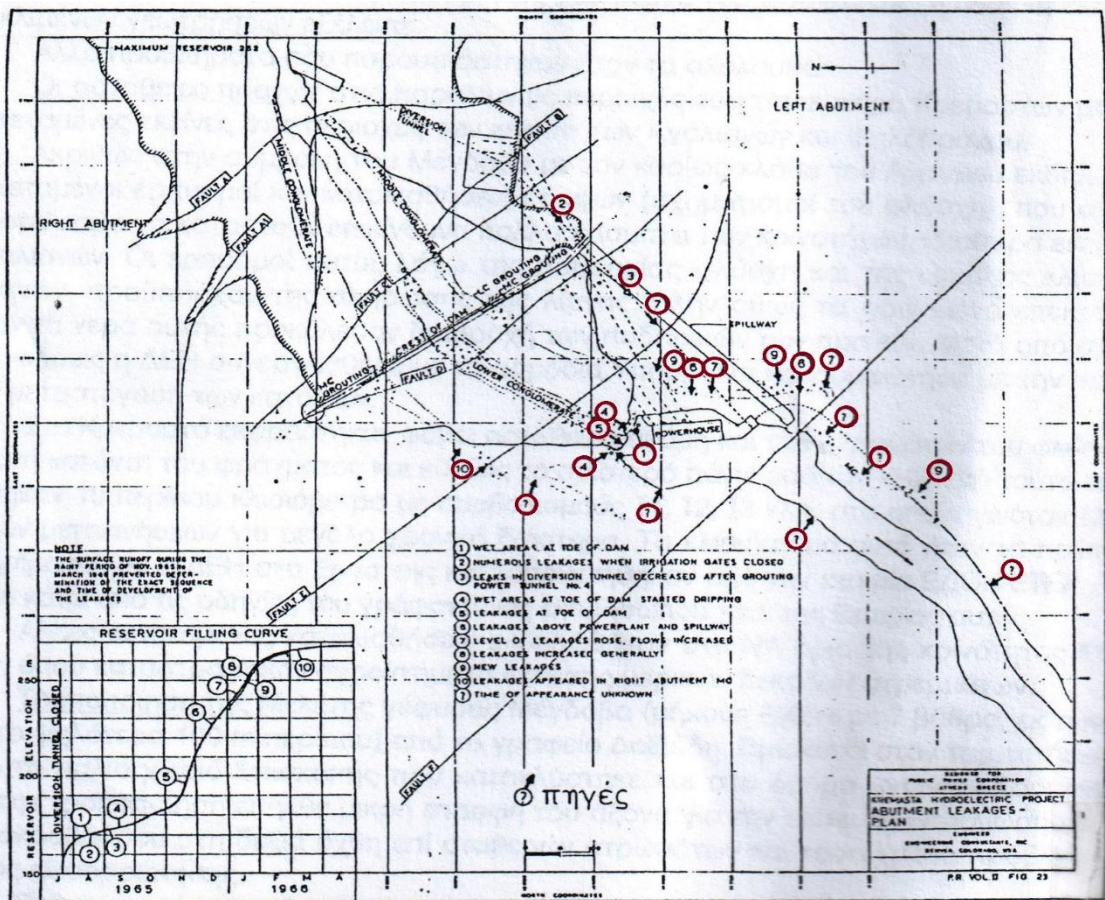
Τον Ιούλιο 1965 ολοκληρώθηκε η κατασκευή του φράγματος και στις 21 Ιουλίου του ίδιου χρόνου έκλεισε η σήραγγα εκτροπής. Μέσα στον Αύγουστο 1965 παρατηρήθηκαν στα κατάντη, περιοχές με υγρασία σε μικρή απόσταση από τον πόδα του φράγματος και στα δύο αντερείσματα. Καθώς η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα συνέχιζε να αυξάνει, διαρροές, ο όγκος των οποίων αυξήθηκε σταδιακά, εμφανίστηκαν πάνω στις επιφάνειες των αντερεισμάτων. Οι μεγάλες διαρροές εμφανίστηκαν σε μέτωπα του ανώτερου και κυρίως του μέσου κροκαλοπαγούς, ενώ στο κατώτερο κροκαλοπαγές διαπιστώθηκαν περιοχές υψηλών διαπερατοτήτων μόνο κοντά στα ρήγματα Γ και Δ. Μέχρι την άνοιξη του 1966 οι διαρροές αυτές είχαν αναπτυχθεί πλήρως ενώ η στάθμη του ταμιευτήρα είχε φτάσει ήδη τα 142m. Για την αντιμετώπισή τους οργανώθηκε μια σειρά εργασιών επιπρόσθετων τσιμεντενέσεων ήδη από τις αρχές του 1966. Τα μέτρα προέβλεπαν την επέκταση της κουρτίνας τσιμεντενέσεων κάτω από το φράγμα μέχρι τα αντερείσματα και την τοποθέτηση τσιμεντοκονιάματος σε ένα από τα ρήγματα (ρήγμα Δ). Αργότερα μέσα στο 1966 ως επιπρόσθετη προστασία, διανοίχτηκαν τρεις στοές σε κάθε αντερείσμα με στόχο την

αποστράγγιση του νερού και την επιπλέον έγχυση τσιμεντοκονιάματος στις περιοχές των αντερεισμάτων κατάντη της κουρτίνας τσιμεντενέσεων. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής των στοών στο αριστερό αντέρεισμα εντοπίστηκαν μεγάλες ποσότητες νερού στην περιοχή γύρω από τη ρήγμα Δ. Με την ολοκλήρωση του προγράμματος των επιπρόσθετων μέτρων αποστράγγισης παρατηρήθηκε μείωση των διαρροών αλλά όχι σε ικανοποιητικό επίπεδο. Τον Αύγουστο 1967, με τη στάθμη του ταμιευτήρα να έχει πέσει στα 109m, διανοίχτηκε μια μικρή παράπλευρη στοά στη στοά αποστράγγισης του αριστερού αντερείσματος. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής της εντοπίστηκαν μεγάλες ποσότητες νερού. Τον Ιανουάριο 1968 ενώ η στάθμη του ταμιευτήρα βρισκόταν στα 120m, μετά από ένα χρόνο παρατηρήσεων των διαρροών και την περιορισμένη αποτελεσματικότητα των μέχρι τότε μέτρων αντιμετώπισής τους η εταιρεία Engineering Consultants Inc. κατέθεσε μία αναφορά που περιείχε προτάσεις για ένα πρόγραμμα εργασιών μακροπρόθεσμου ελέγχου. Οι εργασίες κρίθηκαν απαραίτητες για τη μείωση των υδροστατικών πιέσεων στα αντερείσματα οι οποίες βρέθηκαν να είναι σε υψηλότερα των κανονικών επίπεδα. Η απόδοση των έργων που είχαν γίνει ένα χρόνο νωρίτερα ήταν περιορισμένη καθώς μπορεί μεν να μείωσαν τις διαρροές σε κάποιες από τις περιοχές των αντερεισμάτων και του κατάντη κελύφους του φράγματος αλλά όχι σε ικανοποιητικό βαθμό. Από το μέσο κροκαλοπαγές διοχετεύονταν μεγάλες ποσότητες νερού υπό πίεση στην περιοχή του αντερείσματος πάνω από το σταθμό παραγωγής ενέργειας, το δεξί αντέρεισμα και το κατάντη κέλυφος του φράγματος. Από το κατώτερο κροκαλοπαγές διοχετεύονταν νερό στη σήραγγα εκτροπής και στο κατάντη κέλυφος του φράγματος. Επιπλέον υπήρχε ένδειξη υπόγειας διάβρωσης των αντερεισμάτων. Ο όγκος των διαρροών και των υδροστατικών πιέσεων ήταν τέτοιος ώστε κάτω από ορισμένες συνθήκες θα μπορούσε να προκαλέσει προβλήματα αστάθειας στην κατασκευή. Πριν την έναρξη οποιωνδήποτε επιπλέον εργασιών τσιμεντενέσεων και αποστράγγισης σχεδιάστηκε και εγκαταστάθηκε ένα σύστημα από πιεζόμετρα. Οι εργασίες αποστράγγισης ξεκίνησαν μέσα στο 1968 και ολοκληρώθηκαν τον Απρίλιο 1973 με την στάθμη ταμιευτήρα να βρίσκεται στα 240m. Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών ο ρυθμός των διαρροών από παροχές στο μέσο κροκαλοπαγές για το αριστερό αντέρεισμα μειώθηκε από 1.75 lit/sec σε 0.65 lit/sec για κάθε μέτρο μεταβολής της στάθμης του ταμιευτήρα. Στο δεξί αντέρεισμα πριν τις εργασίες αποστράγγισης διαρροές παρατηρούνταν σε περιόδους όπου η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα ήταν πάνω από 247m περίπου. Μετά το πέρας των εργασιών το δεξί αντέρεισμα παρέμεινε στεγνό μέχρι και τα 257m στάθμης νερού. Οι παροχές από το κατώτερο κροκαλοπαγές στο αριστερό αντέρεισμα μειώθηκαν σε 65 lit/sec για επίπεδο στάθμης ταμιευτήρα 250 – 270m. Σήμερα και μέσω των έργων αποστράγγισης οι ποσότητες του νερού διοχετεύονται με ασφάλεια εκτός του φράγματος μέσω στοάς κοντά στον πόδα του φράγματος. Η ροή είναι περίπου 170 lit/sec, ωστόσο για υψηλές τιμές της στάθμης του ταμιευτήρα οι τιμές των διαρροών μπορεί να φτάσουν και τα 400 lit/sec. Όπως προκύπτει από τις μετρήσεις στα πιεζόμετρα και στα υδατοφράγματα οι διαρροές και οι υδροστατικές πιέσεις στα αντερείσματα ακολουθούν την διακύμανση της λίμνης.



ΔΙΑΡΡΟΕΣ

Διαρροές



Χάρτης διαρροών

## **ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΕΨΗΣ**

Εκτός από τις διαρροές το φράγμα εμφανίζει καθιζήσεις σε σημεία της στέψης, ωστόσο το μέγεθός τους μέχρι σήμερα είναι εντός των ορίων που έχουν οριστεί στη μελέτη. Για την αποφυγή προβλημάτων υπερπήδησης του νερού της λίμνης σε περίπτωση υπερβολικής καθίζησης η μελέτη σχεδιασμού του φράγματος όριζε την κατασκευή της στέψης με κύρτωση μέγιστου ύψους 1.5m όση ήταν και η αναμενόμενη καθίζηση. Η μέγιστη καθίζηση της στέψης που είχε καταγραφεί μέχρι το 2002 ήταν 77cm δηλαδή περίπου το μισό της αναμενόμενης. Το μέγεθος αυτό της καθίζησης ήταν μικρότερο από την καθίζηση που είχε υποστεί στην πραγματικότητα η στέψη, καθώς η παραμόρφωση του φράγματος για περίπου ένα χρόνο μετά το κλείσιμο της σήραγγας εκτροπής δεν έχει καταγραφεί ή τουλάχιστον δεν ήταν διαθέσιμη. Εκτός από τις καθιζήσεις είχαν εντοπιστεί με οπτική παρακολούθηση και επιφανειακές διαρρήξεις στη στέψη παράλληλα στον άξονα του φράγματος. Η παρουσία διαμηκών ρωγμών στη στέψη αποτελεί πιθανότατα ένδειξη διαφορικής καθίζησης της στέψης. Επιπλέον, στην περιοχή του δεξιού αντερείσματος είχε παρατηρηθεί σιγμοειδής παραμόρφωση ως προς οριζόντιο επίπεδο με αποτέλεσμα το τμήμα αυτό της στέψης να κινηθεί προς τα ανάντη. Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων είχαν πραγματοποιηθεί κατά διαστήματα εργασίες αποκατάστασης των τμημάτων της στέψης που είχαν υποστεί καθίζηση και αντικατάστασης τμημάτων του ασφαλτικού τάπητα που είχαν υποστεί ζημιές.

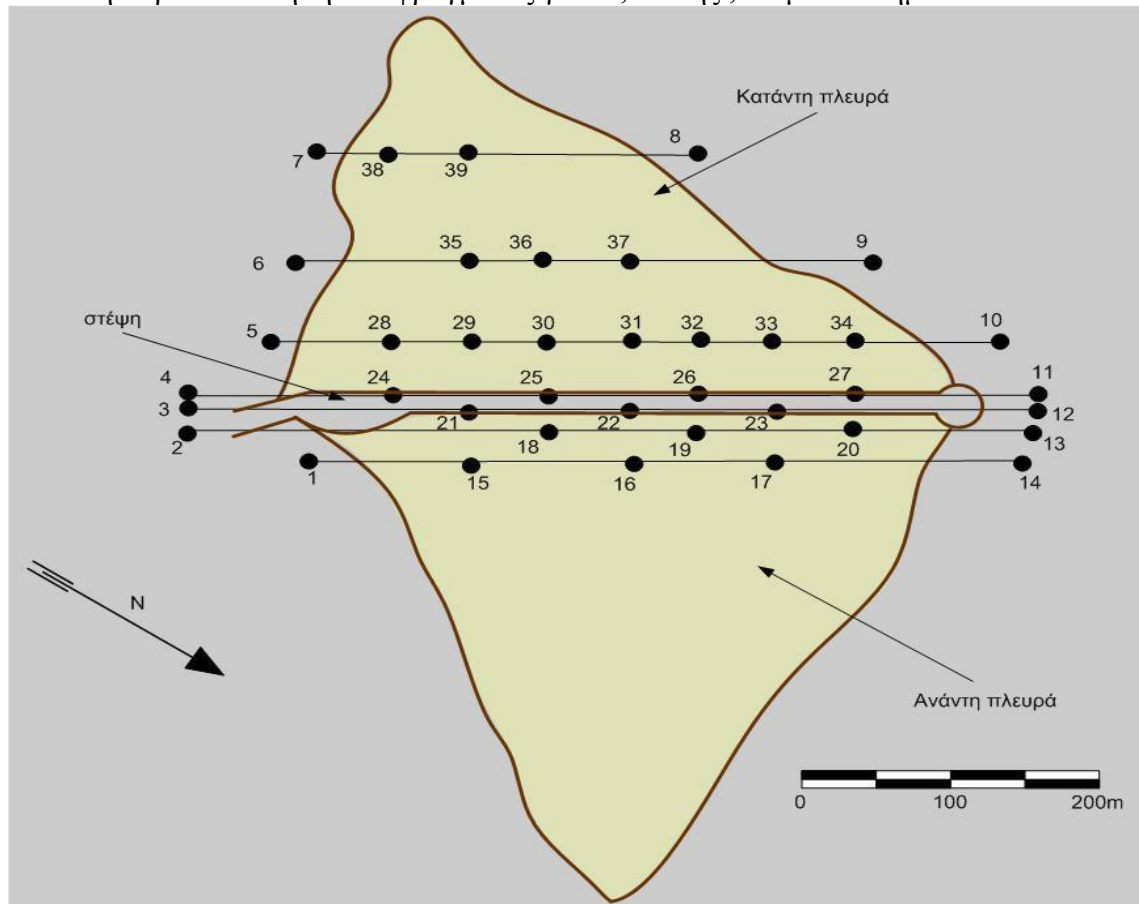
## **ΆΛΛΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ**

Οι αστάθειες των πρανών στις παραλίμνιες περιοχές του ταμιευτήρα των Κρεμαστών με πλέον εκτεταμένες εκείνες στις περιοχές των κοινοτήτων Αγαλιανών και Ψηλοβράχου. Ακριβώς στη συμβολή του Μέγδοβα με τον κυρίως κλάδο του Αχελώου εκδηλώθηκαν εκτεταμένοι ερπυσμοί και κατολισθήσεις εδαφών (σχηματισμοί του φλύσχη), που είχαν ως αποτέλεσμα να καταστούν επικίνδυνα πολλά κτίσματα των κοινοτήτων, ιδιαίτερα εκείνα των Αγαλιανών. Οι ερπυσμοί αυτοί, λόγω της παρουσίας φλύσχη και της μεγάλης κλίσης των πρανών, προϋπήρχαν της πλήρωσης της λίμνης, πλην όμως τα φαινόμενα επεκτάθηκαν όταν τα νερά αυτής προκάλεσαν διαβροχή των ποδαρικών των πρανών. Μετά από σχετικές αποφάσεις η ΔΕΗ συνεργάστηκε με τα αρμόδια Υπουργεία και συμφώνησε με την πρόταση για μεταστέγαση των κατοίκων. Στα Κρεμαστά εκφράστηκαν φόβοι αστάθειας ακόμη και των στρωμάτων του φλύσχη στα πρανή κατάντη του φράγματος και κυρίως το αριστερό πάνω από τον ΥΗΣ. Δια τούτο τοποθετήθηκαν 10 περίπου κλισίμετρα με συμβολισμούς I1, I2, I3 κλπ. στα οποία γινόταν έλεγχος τυχόν μετακινήσεων για μεγάλο χρονικό διάστημα. Τα κλισίμετρα αυτά ήταν τα πρώτα που χρησιμοποίησε η ΔΕΗ στα Έργα της και τοποθετήθηκαν από την εταιρία ΕΔΟΚ – ΕΤΕΡ Α.Ε. το 1966 κάτω από τις οδηγίες του πολιτικού μηχανικού κ. Λιάκουρη Δημητρίου ως εκπροσώπου τότε της Εταιρίας αυτής. Άλλες εκτεταμένες κατολισθήσεις εκδηλώθηκαν στο ΝΑ όριο της κοινότητας Επισκοπής, όπου καταστράφηκαν αγροκτήματα έκτασης μερικών δεκάδων στρεμμάτων. Τροποποίηση της Μελέτης γέφυρας Μέγδοβα (μήκους 602 m με 7 βάθρα, εκ των οποίων το υψηλότερο 100 m περίπου) από το γραφείο Δοξιάδη. Βρίσκεται στον ταμιευτήρα πάνω από το παλιό χωριό Επισκοπής που κατακλύστηκε και στο δρόμο Αγγινίου – Καρπενησίου. Με την τροποποίηση επήλθε μικρή στροφή του άξονα για την επίτευξη θεμελίωσης βάθρου και ακροβάθρου στη δεξιά όχθη επί σταθερών στρωμάτων και ταυτόχρονα πρόβλεψη βαθμίδας εξισορρόπησης. Προσαρμογή της αλλαγής της στατικής διάταξης στη γέφυρα Τατάρνας, όπως έχει σημειωθεί, διότι λόγω ολίσθησης (φλύσχη) δεν ήταν

δυνατή η θεμελίωση άλλου μεσόβαθρου. Επίδραση των μεταλλικών επιφανειών των θειούχων υδάτων των πηγών που έφθαναν μέχρι το εσωτερικό του χώρου του υδροηλεκτρικού σταθμού. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με την εκτέλεση τσιμεντενέσεων και την κατασκευή σκυροδετημένων τοίχων πάχους μεγαλύτερου του απαιτούμενου σε στεγανά πετρώματα.

### ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Το γεωδαιτικό σύστημα παρακολούθησης του φράγματος των Κρεμαστών αποτελείται από 25 σημεία ελέγχου εγκατεστημένα στη στέψη και τα πρηνή του φράγματος καθώς επίσης 14 σημεία αναφοράς εγκατεστημένα στην ευρύτερη περιοχή του φράγματος. Για τη διασφάλιση της σταθερότητας των σημείων αναφοράς είχε προβλεφθεί να γίνεται τριγωνισμός, συμπεριλαμβάνοντας έτσι στο δίκτυο ελέγχου των μετακινήσεων του φράγματος τριγωνομετρικά σημεία. Τα 14 σημεία αναφοράς χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των μετακινήσεων των υπολοίπων 25 σημείων ελέγχου του συστήματος παρακολούθησης είτε ως θέσεις για την τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης είτε για την υλοποίηση της ευθυγραμμίας κατά τη μέτρηση των οριζόντιων αποκλίσεων. Επίσης έχουν εγκατασταθεί δύο επιμηκησιόμετρα κοντά στο σταθμό παραγωγής ενέργειας και ένα ανεστραμμένο εκκρεμές περίπου 100m από το σταθμό στην κατάντη πλευρά του φράγματος. Για την εξασφάλιση της σταθερότητας των σημείων αναφοράς είχε προβλεφθεί να γίνεται και τριγωνισμός ως προς σημεία που ανήκουν στο Εθνικό τριγωνομετρικό δίκτυο. Από το 2003 και έπειτα η παρακολούθηση του φράγματος γίνεται, επίσης, και με συστήματα GPS.



Σημεία μετρήσεων

## ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΗ ΑΠΟ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΣ

Τεράστιες τεχνητές δεξαμενές νερού δημιουργήθηκαν σε όλο τον κόσμο για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, των έλεγχω των πλημμυρών και την άρδευση. Την πυροδότηση των σεισμών από τεχνητές δεξαμενές νερού για πρώτη φορά τόνισε ο Carder (1945) στη λίμνη Mead στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Καταστροφικοί σεισμοί που υπερβαίνουν τα 6 ρίχτερ συνέβησαν στο Hsinfengkiang στην Κίνα το 1962, στην Καρίμπα στα σύνορα Ζάμπια-Ζιμπάμπουε το 1963, στα Κρεμαστά στην Ελλάδα το 1966 και στην Κουνα στην Ινδία το 1967. Την 10η Δεκεμβρίου 1967 στην Κουνα ο σεισμός των 6,3 ρίχτερ είναι μέχρι στιγμής ο μεγαλύτερος και πιο καταστροφικός σεισμός που προκλήθηκε από φράγμα. Ο απολογισμός ήταν περίπου 200 ανθρώπινες ζωές, 1500 τραυματίες και χιλιάδες άστεγοι. Τα έργα υποδομής της πόλης Κουνα υπέστησαν μεγάλες βλάβες. Οι σεισμοί σε Hsinfengkiang και Κουνα προκάλεσαν μεγάλες ζημιές στα ίδια τα φράγματα. Άλλοι σεισμοί όπως αυτοί της Καρίμπα (Ζάμπια), των Κρεμαστών (Ελλάδα), Orville (Καλιφόρνια), Ασουάν (Αίγυπτος) και Srinagarind (Ταϊλάνδη) προκάλεσαν ζημιές σε γειτονικές πόλεις και χωριά. Όπως επεσήμαναν οι Allen (1982) και Simpson (1986) υπάρχει μια γενική απροθυμία από την πλευρά της επιτροπής μηχανικών, σε παγκόσμιο επίπεδο, να αποδεχθεί τη σημασία ή ακόμα και την ύπαρξη του φαινομένου σεισμικότητας που προκαλείται από τα φράγματα. Ωστόσο, υπήρξε κάποια αλλαγή στη στάση αυτή. Σε μια έκθεση της Επιτροπής των ΗΠΑ για τα μεγάλα Φράγματα (USCOLD, 1997), συνάγεται το συμπέρασμα ότι μπορεί να υπάρξει μια αύξηση στην σεισμικότητα κατά τη διάρκεια της περιόδου που παρουσιάζονται αλλαγές στην στάθμη του ταμιευτήρα και θα πρέπει να υπάρχει προσοχή για κάθε φράγμα με ύψος πάνω από 80-100 μ.

### ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Όσο για σήμερα, υπάρχουν 95 τοποθεσίες παγκοσμίως όπου έχει αναφερθεί σεισμικότητα λόγω φραγμάτων. Αυτές μπορούν να ομαδοποιηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- (1) Σεισμοί μεγέθους > 6 Ρίχτερ (4 περιπτώσεις)
- (2) Σεισμοί μεγέθους 5-5,9 Ρίχτερ (10 περιπτώσεις)
- (3) Σεισμοί μεγέθους 4-4,9 Ρίχτερ (28 περιπτώσεις)
- (4) Σεισμοί μεγέθους < 4 Ρίχτερ (53 περιπτώσεις)

Εκτός από την παραπάνω λίστα, μείωση σε μικροσεισμική δραστηριότητα έχει αναφερθεί ως συνέπεια των φραγμάτων σε 8 περιοχές, και υπάρχουν άλλες 16 περιοχές ύποπτες για σεισμούς λόγω φραγμάτων. Τοποθεσίες όπου ενεργοποίησαν σεισμούς μεγέθους μικρότερους των 4 ρίχτερ είναι πάρα πολλές, και ως εκ τούτου όλα αυτά δεν περιλαμβάνονται στον παρακάτω πίνακα.

Table 1  
Reported cases of reservoir-associated changes in seismicity

Name of the dam/reservoir	Country	Height of dam (m)	Reservoir volume ( $10^6 \text{ m}^3$ )	Year of impounding	Year of largest earthquake	Magnitude/intensity
<i>Sites where earthquakes having magnitude <math>\geq 6.0</math> were triggered</i>						
Hsin fengkiang	China (PRC)	105	13,896	1959	1962	6.1
Kariba	Zambia – Zimbabwe	128	175,000	1958	1963	6.2
Koyna	India	103	2780	1962	1967	6.3
Kremasta	Greece	160	4750	1965	1966	6.2
<i>Sites where earthquakes having magnitude between 5.0 and 5.9 were triggered</i>						
Aswan	Egypt	111	164,000	1964	1981	5.6
Benmore	New Zealand	110	2040	1964	1966	5.0
Charvak	Uzbekistan	148	2000	1971	1977	5.3
Eucumbene	Australia	116	4761	1957	1959	5.0
Geheyan	China	151	3400	1993	1997	VI
Hoover	USA	221	36,703	1935	1939	5.0
Marathon	Greece	67	41	1929	1938	5.7
Oroville	USA	236	4400	1967	1975	5.7
Srinagarind	Thailand	140	11,750	1977	1983	5.9
Wama	India	80	1260	1987	1993	5.0
<i>Sites where earthquakes having magnitude between 4.0 and 4.9 were triggered</i>						
Aksombo Main	Ghana	134	148,000	1964	1964	V
Bajina Basta	Yugoslavia	90	340	1966	1967	4.5–5.0
Bhatsa	India	88	947	1981	1983	4.9
Bratsk	Russia	100	169		1996	4.2
Camarillas	Spain	49	37	1960	1964	4.1
Canelles	Spain	150	678	1960	1962	4.7
Capivari–Cachoeira	Brazil	58	180	1970	1971	VI
Clark Hill	USA	60	3517	1952	1974	4.3
Dahua	China (PRC)	74.5	420	1982	1993	4.5
Danjiangkou	China (PRC)	97	16,000	1967	1973	4.7
Foziling	China (PRC)	74	470	1954	1973	4.5
Grandval	France	88	292	1959	1963	V
Ho Binh	Vietnam	125		1988	1989	4.9
Kastraki	Greece	96	1000	1968	1969	4.6
Kerr	USA	60	1505	1958	1971	4.9
Komani	Albania	130	1600	1985	1986	4.2
Kurobe	Japan	186	149	1960	1961	4.9
Lake Baikal	Russia					4–4.8
Lake Pukaki	New Zealand	106	9000	1976	1978	4.6
Manicouagan 3	Canada	108	10,423	1975	1975	4.1
Marimondo	Brazil	94	6150	1975	1975	IV
Monteynard	France	155	275	1962	1963	4.9
Nurek	Tadjikistan	317	1000	1972	1972	4.6
P. Colombia/V. Grande	Brazil	40/56	1500/2300	1973–1974	1974	4.2
Piastra	Italy	93	13	1965	1966	4.4
Pieve de Cadore	Italy	116	69	1949	1950	V
Shenwo	China (PRC)	50	540	1972	1974	4.8
Vouglans	France	130	605	1968	1971	4.4
<i>Sites where earthquakes having magnitude <math>&lt; 4.0</math> were triggered</i>						
Acu	Brazil	31	2400	1983	1994	2.8
Blowering	Australia	112	1628	1968	1973	3.5

Table 1 (continued)

Name of the dam/reservoir	Country	Height of dam (m)	Reservoir volume ( $10^6 \text{ m}^3$ )	Year of impounding	Year of largest earthquake	Magnitude/intensity
<i>Sites where earthquakes having magnitude &lt; 4.0 were triggered</i>						
Capivara	Brazil	59	10,500	1976	1976	3.7
Carmo do Cajuru	Brazil	22	192	1954	1972	3.7
Contra	Switzerland	220	86	1963	1965	3.0
Dhamni	India	59	285	1983	1994	3.8
Donjiang	China (PRC)	157	81	1986	1990	3.2
Emborcacao	Brazil	158	17,600	1981	1984	~ 2.0
Emmosson	Switzerland	180	225	1973	1973	3.0
Fierza	Albania	167	2800	1978	1981	2.6
Gandipet	India	36	117	1920	1982	3.5
Grancarevo	Yugoslavia	123	1280	1967	1967	3.0
Hendrik Verwoerd	South Africa	66	5000	1970	1971	2.0
Huangshi	China (PRC)	40	610	1970	1974	2.3
Hunanzhen	China (PRC)	129	2060	1979	1979	2.8
Idukki	India	169	1996	1975	1977	3.5
Itezhtezhi	Zambia	65	5000	1976	1978	3.8
Jocasse	USA	107	1431	1971	1975	3.2
Kamafusa	Japan	47	45	1970	1970	3.0
Katse	Lesotho	185	1950	1995	1996	3.1
Keban	Turkey	212	31,000	1973	1973	3.5
Kouris	Cyprus				1994–1995	3.0
Kurupsai	USSR	~ 100	500	1981	1983	Microearthquakes
Lake Gordon–Lake Peddar	Australia	140	13,500	1974	1978	Microearthquakes
LG 3	Canada	80		1981	1983	3.7
Lubuge	China (PRC)	103	110	1988	1988	3.4
Makio	Japan	105	75	1961	1978	Earthquake swarm
Monticello	USA	129	500	1977	1979	2.8
Mula	India	56	1017	1972	1972	1.0
Nagawado	Japan	155	123	1969	1969	Earthquake swarm
Nanchong	China (PRC)	45	15	1969	1974	2.8
Nanshui	China (PRC)	81	1220	1969	1970	2.3
Novo Ponte	Brazil		128		1995	3.7
Oued Fodda	Algeria	101	225	1932	1933	3.0
Paraibuna–Paraitinga	Brazil	94/105	4700	1975–1976	1977	3.0
Qianjin	China (PRC)	50	20	1970	1971	3.0
Ridracoli	Italy	103	33	1981	1988	3.5
Salanfe	Switzerland				1995	2.5
Schlegeis	Austria	117	128	1970	1971	2.0
Shasta	USA	183	5615	1944	1944	3.0
Shengjiaxia	China (PRC)	35	4	1980	1984	3.6
Shuikou	China (PRC)	101	2350	1993	1994	3.2
Sobradinho	Brazil	43	34,100	1977	1979	~ 2.0
Sriramsagar	India	43	32,000	1983	1984	3.2
Talbingo	Australia	162	935	1971	1973	3.5
Thomson	Australia			1983	1990	3.0
Toktogul	Kirghizia	215	19,500	1977		2.5
Tongjiezi	China (PRC)	74	30	1992	1992	2.9
Tucuruí	Brazil	100	45,800	1984	1985	3.4
Vajont	Italy	262	150	1960	1960	
Zhelin	China (PRC)	62	7170	1972	1972	3.2



Table 1 (continued)

Name of the dam/reservoir	Country	Height of dam (m)	Reservoir volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Year of impounding	Year of largest earthquake	Magnitude/intensity
<i>Sites where earthquakes having magnitude &lt; 4.0 were triggered</i>						
Wujiangdu	China (PRC)	165	2140	1979	1985	2.8
Yantan	China (PRC)	110	2430	1992	1994	3.5
<i>Decrease in microearthquake activity</i>						
Anderson	USA	72	110	1950		
Bhakranangal	India	226	9868	1958		
Flaming Gorge	USA	153	4674	1962		
Glen Canyon	USA	216	33,305	1963		
Ikawa	Japan	104	151	1957		
Mangla	Pakistan	116	7250	1967		
Tarbela	Pakistan	143	13,960	1974		
Tsengwen Reservoir	Taiwan	128	708	1973		
<i>Other possible cases</i>						
Cabin Creek	USA	49				
Clark Canyon	USA	40				
Coyote Valley	USA	50				
Disposal Wells, northeastern Ohio	USA				1986	5.0
El Grado	Spain	130				
Ghimi	India	16				
Kinnersani	India	61				
Palisades	USA	82				
Parambikkulam	India	73				
Rockey Reach	USA					
San Luis	USA	116				
Sefid Rud	Iran	106				
Sleepy Hollow Oil field	Canada					
Ukai	India	69				
Waragamba	Australia	137				

Οι προσπάθειες για να κατανοήσουμε την συσχέτιση μεταξύ των σεισμών που προκαλούνται, των χαρακτηριστικών της δεξαμενής και των γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν, συνεχίζονται. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η συσχέτιση με την αλλαγή του επιπέδου του νερού της δεξαμενής είναι πολύ πειστικές και δραματικές ενώ σε άλλες περιπτώσεις, μπορεί να είναι λιγότερο διακριτές. Έχει επίσης σημειωθεί ότι πολλοί μεγάλοι ταμιευτήρες δεν έχουν προκαλέσει κανένα σεισμό ενώ παράλληλα πολλοί μικροί έχουν οδηγήσει σε αξιοσημείωτη σεισμική δραστηριότητα. Ενώ η γεωλογικοί και τεκτονικοί παράγοντες μπορεί να είναι σημαντικοί για τον προσδιορισμό του δυναμικού μιας περιοχής, τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα είναι εξίσου σημαντικά. Το βάθος του νερού και ο όγκος της δεξαμενής είναι δύο σημαντικοί παράγοντες που παίζουν ρόλο στο μέγεθος των σεισμών (Baecher και Keeney, 1982). Μια ανασκόπηση από παραδείγματα δίνει περαιτέρω αξιοπιστία στην παρατήρηση ότι το βάθος του νερού διαδραματίζει το σημαντικότερο ρόλο στην εκδήλωση των σεισμών.

### **ΚΟΥΝΑ (ΙΝΔΙΑ)**

Σε παγκόσμιο επίπεδο, το φράγμα Κουνα στην Ινδία εξακολουθεί να είναι η πιο σημαντική περίπτωση σεισμού προκαλούμενος από φράγμα. Οι σεισμοί άρχισαν να εμφανίζονται αμέσως μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα της λίμνης Shivaji Sagar που δημιουργήθηκε από το φράγμα Κουνα στη Δυτική Ινδία το 1962. Κατά τα τελευταία 38 χρόνια, πάνω από 10 σεισμοί μεγαλύτεροι των 5 ρίχτερ, πάνω από 150 σεισμοί μεγαλύτεροι των 4 ρίχτερ και πάνω από 100.000 σεισμοί έως 4 ρίχτερ έχουν συμβεί στην περιοχή. Η περιοχή έχει επίσης τη διάκριση του μεγαλύτερου σεισμού προκαλούμενου από φράγμα στον κόσμο 6.3 βαθμών της κλίμακας ρίχτερ τις 10 Δεκεμβρίου του 1967. Σημαντικές εκρήξεις σεισμικής δραστηριότητας που σχετίζονται με το φράγμα στην περιοχή Κουνα, με σεισμούς άνω των 5 ρίχτερ συνέβησαν το 1967, 1973, 1980 και 1993 - 1994. Παράγοντες όπως το ποσοστό αύξησης της στάθμης του νερού στη δεξαμενή, η μέγιστη στάθμη του νερού και η διάρκεια στην οποία υψηλά επίπεδα νερού διατηρούνταν στον ταμιευτήρα υπήρξαν στις περιόδους αυτές υπογραμμίζεται από Gupta et al. (1972a, b).



*Το φράγμα Κουνα σήμερα*

### **ASWAN (ΑΙΓΥΠΤΟΣ)**

Κατά τα τελευταία 10 χρόνια περίπου, μια σειρά από έρευνες έχουν εμφανιστεί που έχουν σχέση με τους σεισμούς που προκάλεσε το Φράγμα του Ασουάν, όπου ένας σεισμός του μεγέθους των 5.6 ρίχτερ συνέβη στις 14 Νοεμβρίου του 1981. Ιδιαίτερα, υπάρχουν περίπου δώδεκα εργασίες της Εφημερίδας Γεωδυναμικού, που εκδόθηκε από τους Vyskočil και Jacoby (1991), τα οποία ασχολούνται με διαφορετικές πτυχές

του γεωδυναμικού της περιοχής και προκάλεσε το σεισμό στο Φράγμα του Ασουάν. Ο Kebeasy et al. (1991) σχεδίασε τη δομή του φλοιού για το βόρειο τμήμα της περιοχής της λίμνης Ασουάν χρησιμοποιώντας τα σεισμικά κύματα που παράγονται από τους τοπικούς σεισμούς. Η περιοχή φαίνεται να βρίσκεται κάτω από ένα κανονικό ηπειρωτικό φλοιό πάχους  $28 \pm 2$  km και έναν κανονικό μανδύα με μια ταχύτητα κύματος 8.1 km/s. Σε ολόκληρη την περιοχή, υπάρχει ένα σεισμικό όριο σε βάθος περίπου 16 χιλιομέτρων, που χωρίζει το ανώτερο φλοιό από τον κατώτατο φλοιό με ταχύτητες 5,1 και 6,2 km/s, αντίστοιχα. Σε μια πιο πρόσφατη δημοσίευση, οι Awad και Mizoue (1995α) ανέλυσαν τα δεδομένα των σεισμών στην περιοχή του Ασουάν και υπέδειξαν ότι η σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή θα μπορούσε να ομαδοποιηθεί σε δύο κατηγορίες. Η περιοχή Ασουάν χαρακτηρίζεται από ετερογενή φλοιό με την ύπαρξη χαμηλών και υψηλών ζωνών ταχύτητας σε ρηχά και βαθιά τμήματα του φλοιού. Με βάση την ανάλυση των δεδομένων από τους σεισμούς κατά την περίοδο από τον Ιούνιο του 1982 μέχρι τα τέλη του 1991, απέδειξαν αρκετά χαρακτηριστικά. Η ομάδα σεισμών σε βάθος μικρότερο των 10 χιλιομέτρων, χαρακτηρίζεται από ένα πλήθος παρόμοιων σεισμών σε μία μικρή περιοχή, ενώ η σεισμικότητα σε μεγαλύτερο βάθος χαρακτηρίζεται από μια τυπική ακολουθία πρωτεύων σεισμός, κύριος σεισμός και μετασεισμός. Η σεισμικότητα στα ρηχά συσχετίζεται καλά με τις διακυμάνσεις της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει αντίστοιχα για την δραστηριότητα στα βαθύτερα. Τα ερωτήματα που προκύπτουν για την σχέση μεταξύ των σεισμών στα ρηχά και τα βαθιά δεν μπορούν να επιλυθούν λόγω και της έλλειψης επαρκών στοιχείων. Πάντως η σεισμικότητα στην περιοχή Ασουάν αποκλίνει από τις άλλες περιπτώσεις σεισμών που προκαλούνται από φράγματα τόσο λόγω της παρουσίας της βαθύτερης σεισμικής ζώνης, καθώς και εξαιτίας της μακράς χρονικής καθυστέρησης μεταξύ της κύριας σεισμικής δραστηριότητας και της πλήρωσης του ταμιευτήρα η οποία έγινε το 1964 με την εμφάνιση του κύριου σεισμού το 1981, 17 χρόνια αργότερα όταν κατά μέσο όρο η διάρκεια αυτή για τις άλλες περιπτώσεις είναι 5 έως 7 χρόνια.



*Το φράγμα Aswan σήμερα*

## **SRINAGARIND (ΤΑΪΛΑΝΔΗ)**

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, μία σημαντική ακολουθία σεισμών αναφέρθηκε κοντά στο φράγμα Srinagarind που βρίσκεται περίπου 90 χιλιόμετρα βορειοδυτικά της Μπανγκόκ. Στις 22 Απριλίου 1983, μια μεγάλη περιοχή της Ταϊλάνδης και το παρακείμενο Μυανμάρ, συγκλονίστηκαν από ένα σεισμό του μεγέθους 5.9 της κλίμακας ρίχτερ. Η περιοχή είναι σχετικά σταθερή και είχε βιώσει ελάχιστους σεισμούς κατά το παρελθόν. Οι Chung και Liu (1992) ανέφεραν ότι ο κύριος σεισμός προήλθε μετά από αρκετούς μικρότερους και ακολούθησαν πολυάριθμοι μετασεισμοί. Ο μεγαλύτερος σεισμός πριν τον κύριο ήταν 5.2 ρίχτερ και συνέβη περίπου 1 εβδομάδα πριν τον κύριο σεισμό και ο μεγαλύτερος μετασεισμός ήταν 5,3 ρίχτερ και έγινε περίπου 3 ώρες μετά τον κύριο σεισμό. Οι Chung και Liu (1992) επισημαίνουν ότι αυτά τα γεγονότα συσχετίζονται καλά με την μείωση της στάθμης του νερού του ταμιευτήρα Srinagarind και η κίνηση του ρήγματος κατά τη διάρκεια του κύριου σεισμού είναι του τύπου ώσης, ενώ ο μεγαλύτερος μετασεισμός είχε μια μεγάλη κίνηση ολίσθησης. Επίσης, η διαφορά του μεγέθους του κύριου σεισμού με τον μεγαλύτερο μετασεισμό είναι μικρή. Αυτά τα χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με το ότι το διάστημα των γεγονότων συνδέεται με αλλαγές στο βάθος του νερού στον ταμιευτήρα αλλά και την έλλειψη σεισμικότητας στην περιοχή έως εκείνη την περίοδο, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι οι σεισμοί προκλήθηκαν από το φράγμα. Στις 22 Απριλίου του 1983 ο σεισμός των 5,9 ρίχτερ είναι μεταξύ των έξι μεγαλύτερων που προκάλεσε φράγμα στον κόσμο. Επίσης η εμφάνιση του σεισμού μετά από 68 μήνες από την πλήρωση του ταμιευτήρα, μπορεί να συσχετιστεί καλά με την σχετικά χαμηλής διαπερατότητας κρυσταλλικά μεταμορφωμένα πετρώματα της περιοχής του φράγματος.



*Το φράγμα Srinagarind σήμερα*

## **OROVILLE (ΚΑΛΙΦΟΡΝΙΑ)**

Μεταξύ των περιπτώσεων σεισμών που σχετίζονται με τεχνητές δεξαμενές νερού, η ακολουθία των σεισμών στο φράγμα Oroville στην Καλιφόρνια με τον κύριο σεισμό μεγέθους 5,7 ρίχτερ την 1 Αυγούστου του 1975 είναι ίσως ένα από της πιο μελετημένες περιπτώσεις στον κόσμο. Πρέπει να σημειωθεί ότι το φράγμα έχει προκαλέσει μόνο μία συνέχεια σεισμών η οποία όμως ήταν σημαντική. Από το 1975, η περιοχή αυτή δεν ήταν ιδιαίτερα ενεργή. Η ενεργοποίηση σεισμικότητας στο Oroville έχει σημειωθεί ως περίπτωση «καθυστερημένης» αντίδρασης (Simpson et al., 1988) και η σεισμικότητα αποδίδεται σε διάχυση της πίεσης των πόρων σε μεγάλα σειсмоγενή βάθη. Ένας άλλος παράγοντας που διακρίνει το Oroville από άλλες περιπτώσεις είναι η απόσταση από το επίκεντρο (περίπου 11 km) από τον ταμιευτήρα και το βάθος (8 km) του κύριου σεισμού. Ο ρόλος της πίεσης πόρων στην αποδυνάμωση των ζωνών ρηγμάτων έχει συζητηθεί για καιρό (π.χ. Scholz, 1990). Οι ανωμαλίες που έχουν αναφερθεί σε πολλά τμήματα του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα, θεωρείται ότι έχουν ως αιτία την αυξημένη πίεση των υγρών πόρων (Michael and Eberhart-Phillips, 1991).



*Το φράγμα Oroville σήμερα*

## **ΚΟΙΝΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΕΙΣΜΩΝ ΠΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ**

Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970, πάνω από μια ντουζίνα περιπτώσεις σεισμών που προκλήθηκαν από φράγματα ήταν γνωστοί. Ο Gurta et al. (1972a, b) διέκρινε διάφορα χαρακτηριστικά στις ακολουθίες αυτών των σεισμών τα οποία ήταν κοινά αλλά διέφεραν από τους φυσικούς σεισμούς που συνέβαιναν στην ίδια περιοχή. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι:

(1) Η ένταση του σεισμού που προηγείται του κύριου σεισμού είναι υψηλότερη από την ένταση του μετασεισμού, ενώ αμφοτέρως, είναι υψηλότερες από την ένταση των φυσικών σεισμών στην εν λόγω περιοχή.

(2) Εκτός από την υψηλή ένταση του μετασεισμού, η αναλογία μεγέθους με τον κύριο σεισμό είναι επίσης μεγάλη.

(3) Οι μετασεισμοί έχουν ένα συγκριτικά χαμηλό ρυθμό εξασθένησης.

### **Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΙ ΤΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ**

Ο ρόλος του φορτίου του ταμιευτήρα στην πρόκληση σεισμών μπορεί να έχει μελετηθεί προηγουμένως από πολλούς, αλλά η πρώτη αποφασιστική ανάλυση έγινε από τους Gough and Gough (1970a,b) στη λίμνη Καρίμπα στη Ζάμπια. Οι Bell και Nur (1978) και ο Roeloffs (1988) εξέτασε επίσης το ρόλο του φορτίου ταμιευτήρα που προκαλεί σεισμούς και τόνισε ότι το φορτίο της δεξαμενής προκαλεί πιέσεις σε σεισμογενή βάθη, οι οποίες όμως είναι πολύ μικρές και μπορεί να διαταράξει μόνο το πεδίο των πιέσεων του περιβάλλοντος. Ο Gupta et al. (1972a, b) προσδιόρισε το ποσοστό αύξησης της στάθμης της δεξαμενής, τη διάρκεια της φόρτωσης, το ανώτατο επίπεδο της στάθμης και τη διάρκεια της διατήρησης των υψηλών επιπέδων μεταξύ των σημαντικών παραγόντων που επηρεάζουν τη συχνότητα και το μέγεθος των σεισμών κοντά στις τεχνητές λίμνες. Ο Snow (1972) ερεύνησε την επίδραση της πίεσης του νερού των πόρων σε πολύ απλουστευμένα μοντέλα με δεξαμενές πεπερασμένου βάθους, αλλά απείρου πλάτους. Η τόσο αναγκαία επαλήθευση αυτών των θεωριών και τον μοντέλων δόθηκε για πρώτη φορά, από επί τόπου μετρήσεις των ιδιοτήτων των υλικών και την εξέταση των φυσικών μηχανισμών, στον ταμιευτήρα του Monticello, στη Νότια Καρολίνα από τους (Zoback και Hickman,1982). Η επίδραση των μεταβολών της στάθμης του ταμιευτήρα και των συναφών αυτών παραμέτρων αναφέρθηκαν στο φράγμα Nurek, στο Τατζικιστάν από τους (Simpson και Negmatullaev,1981) και στο φράγμα Koyna, από τον (Gupta, 1983). Το κομμάτι σχετικά με την πρόκληση σεισμών από την διάχυση της πίεσης του των πόρων ερευνήθηκε περαιτέρω από τους Talwani και Acree (1984/1985). Οι αλλαγές στη σταθερότητα των ρηγμάτων που προκαλείται από την διακύμανση της στάθμης του νερού κάτω από μια δεξαμενή έχουν αναφερθεί από τον Roeloffs (1988). Η ταχεία αντίδραση και η καθυστερημένη αντίδραση ενεργοποίησης της σεισμικότητας προσδιορίστηκε από τον Simpson et al. (1988) και η επίδραση των ανομοιογενειών των ιδιοτήτων των βράχων αντιμετωπίστηκε από τους Simpson και Narasimhan (1990).

Με βάση τις παραπάνω έρευνες και μελέτες, οι Bell και Nur μαζί με αρκετούς από τους προαναφερθέντες ερευνητές, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι κύριες επιδράσεις που έχει η πλήρωση ταμιευτήρων και προκαλεί σεισμικότητα είναι τρεις.

1. Η αύξηση της ελαστικής πίεσης που ακολουθεί την πλήρωση του ταμιευτήρα
2. Η αύξηση της πίεσης των πόρων σε κορεσμένα πετρώματα (λόγω της μείωσης του όγκου των πόρων που προκαλείται από συμπίεση) σε απόκριση της αύξησης της ελαστικής πίεσης

3. Οι μεταβολές της πίεσης των πόρων σχετίζονται με τη ‘μετανάστευση’ του νερού. Σε περιοχές όπου ο υδροφόρος ορίζοντας είναι χαμηλός πριν από την πλήρωση του ταμιευτήρα, η ροή του νερού που γίνεται από τον ταμιευτήρα στα ακόρεστα στρώματα αυξάνοντας έτσι την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα γίνεται άλλος ένας σημαντικός παράγοντας.

Αυτά τα συμπεράσματα προέκυψαν από τις έρευνες, διατυπώθηκαν το 1990 και θεωρούνται αποδεκτά μέχρι και σήμερα. Από το 1990 και μετά οι έρευνες συνεχίζονται και υπάρχουν περαιτέρω κατηγοριοποίηση όπως θα δούμε παρακάτω.

### **ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕΙΣΜΩΝ ΑΠΟ ΠΛΗΡΩΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ**

Ο Simpson et al. (1988) είχε ομαδοποιήσει τους σεισμούς που προκαλούνται από τεχνητούς ταμιευτήρες σε δύο κατηγορίες. Στην κατηγορία «ταχείας αντίδρασης» (Rapid Response), με άμεση αύξηση της σεισμικότητας από την πρώτη στιγμή της πλήρωσης του ταμιευτήρα, ή με μια απότομη αλλαγή στη σεισμικότητα προκλήθηκε από μια μεγάλη και γρήγορη αλλαγή της στάθμης του νερού. Κλασικά παραδείγματα για αυτή την κατηγορία είναι το φράγμα Nurek και το φράγμα Καρίμπα για περιπτώσεις μεγάλων ταμιευτήρων, και τα φράγματα Monticello και Manic-3 για σχετικά πιο μικρούς ταμιευτήρες. Στην κατηγορία «καθυστερημένης αντίδρασης» (Delayed Response), τα σεισμικά γεγονότα συμβαίνουν σχετικά αργά μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα. Τα φράγματα Aswan, Koyna και Oroville είναι κλασικά παραδείγματα της κατηγορίας αυτής, καθώς οι ταμιευτήρες έχουν υποστεί έναν μεγάλο αριθμό μεταβολών της στάθμης του νερού πριν από τα κύρια σεισμικά συμβάντα. Ο Simpson et al. (1988) παρατήρησε ότι σε μερικά φράγματα όπως της Koyna και της λίμνης Mead, εμφανίστηκαν και τα δύο είδη κατηγοριών. Μια άλλη σημαντική παρατήρηση που έγινε είναι ότι σε όλες τις περιπτώσεις καθυστερημένης αντίδρασης, η έκρηξη της σεισμικότητας φαίνεται να εμφανίστηκε, βραχυπρόθεσμα αλλά την εποχή που η στάθμη του νερού ήταν κοντά στο μέγιστο. Μικρού μεγέθους και με μικρό εστιακό βάθος σεισμοί που συμβαίνουν κάτω ή κοντά στον ταμιευτήρα είναι τα χαρακτηριστικά των σεισμών ταχείας αντίδρασης, ενώ στους σεισμούς καθυστερημένης αντίδρασης τα χαρακτηριστικά αυτά είναι συνήθως λίγο διαφορετικά. Πιο συγκεκριμένα η απόσταση από το επίκεντρο του σεισμού ως τον ταμιευτήρα είναι αρκετά μεγαλύτερη και μπορεί να ξεπεράσει και τα 10 χιλιόμετρα, η ένταση του σεισμού είναι επίσης αρκετά μεγαλύτερη ενώ παράλληλα εμφανίζονται σε μεγαλύτερα εστιακά βάθη. Υπάρχουν στοιχεία ότι η ρηξιγενής ζώνη που συνδέεται με τους σεισμούς καθυστερημένης αντίδρασης είναι καλά συνδεδεμένη με τον ταμιευτήρα. Οι σεισμοί καθυστερημένης αντίδρασης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την διάχυση της πίεσης των πόρων από τη δεξαμενή προς την κεντρική ζώνη κάτω από το επίκεντρο ενώ η ταχείας αντίδρασης σεισμικότητα σχετίζεται με τις αλλαγές της ελαστικής πίεσης και των σχετικών μεταβολών της πίεσης των πόρων και δεν εξαρτάται από την διάχυση του νερού από τον ταμιευτήρα.

Ο Talwani (1997b) έχει κατατάξει την σεισμική αντίδραση ενός ταμιευτήρα σε δύο χρονικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία, αυτή της «αρχικής σεισμικότητας» (Initial Seismicity), η οποία είναι και η πιο διαδεδομένη, συνδέεται με το αρχικό γέμισμα του

ταμιευτήρα, τις μεγάλες μεταβολές της στάθμης της λίμνης, καθώς και με την αύξηση του επιπέδου του νερού πάνω από το υψηλότερο επίπεδο που έχει επιτευχθεί στο παρελθόν. Η δεύτερη κατηγορία, η οποία είναι πιο σπάνια, εξακολουθεί να παράγει σεισμούς για πολλά χρόνια, χωρίς μια μείωση στην συχνότητα ή το μέγεθος τους έχει ονομαστεί ως «παρατεταμένη σεισμικότητα» (Protracted Seismicity). Ο Talwani (1997b) πραγματοποίησε δύο διαστάσεων υπολογισμούς, παρόμοια με τον Roeloffs (1988), και συνήγαγε ότι η «παρατεταμένη σεισμικότητα» εξαρτάται από τη συχνότητα και το μέγεθος των μεταβολών της στάθμης, τις διαστάσεις του ταμιευτήρα και τις υδρομηχανικές ιδιότητες του υπεδάφους. Οι αλλαγές στο επίπεδο του νερού που διαρκούν περισσότερο, ας πούμε της τάξης του 1 έτους, αναμένεται να προκαλέσουν μεγαλύτερους και βαθύτερους σεισμούς σε σύγκριση με μεταβολές της στάθμης του νερού μικρότερων περιόδων. Επίσης, η σεισμικότητα είναι πιθανό να είναι πιο εκτεταμένη και πιο βαθιά για έναν μεγάλο ταμιευτήρα απ' ό,τι για ένα μικρότερο. Σύμφωνα με τον Talwani (1997b), η ταξινόμηση του Simpson et al. (1988) σε «Ταχείας αντίδρασης» και «καθυστερημένης αντίδρασης» αποτελούν και οι δύο αναπόσπαστο συστατικό της «αρχικής σεισμικότητας». Ο ίδιος ανέφερε ότι η σεισμικότητα στο φράγμα Κογνα είναι ένα κλασικό παράδειγμα της «παρατεταμένης σεισμικότητας». Παρόλα αυτά προτιμήθηκε να γίνει ταξινόμηση σε τρεις κατηγορίες:

1. «Σεισμικότητα ταχείας αντίδρασης» - (Rapid Response)
2. «Σεισμικότητα καθυστερημένης αντίδρασης» - (Delayed Response)
3. «Συνεχής σεισμικότητα» - (Continued Seismicity)

Υπάρχουν ταμιευτήρες φραγμάτων, που έχουν ένα συνδυασμό δύο ή ακόμη και των τριών παραπάνω κατηγοριών αντιδράσεων. Αντικαταστάθηκε η «παρατεταμένη σεισμικότητα» όπως αναφέρθηκε από τον Talwani με την «Συνεχή σεισμικότητα», καθώς η σεισμικότητα σε ένα φράγμα μπορεί να συνεχίζει χρόνο με το χρόνο, ενώ σε κάποια άλλα φράγματα αρχίζει, σταματάει, και συνεχίζει μετά από ένα κενό λίγων ετών, ανάλογα με την κατάσταση της πίεσης που ασκείται στα σειсмоγενή ρήγματα και το επίπεδο του ερεθίσματος που προκαλεί σε αυτά. Ο όρος «παρατεταμένη σεισμικότητα» υποδηλώνει ότι από τη στιγμή που ενεργοποιούνται οι σεισμοί, συνεχίζουν, πράγμα που δεν συμβαίνει σε αυτή την περίπτωση. Πίσω στο 1970, οι Gupta και Combs (1976) παρατήρησαν πρώτη φορά τα αποτελέσματα της «Συνεχούς σεισμικότητας» στο φράγμα Κογνα, το οποίο πιστεύουμε ότι είναι η καλύτερη απόδειξη για την ταυτόχρονη ύπαρξη της «ταχείας», «καθυστερημένης» και «συνεχούς» σεισμικότητας. Ένα άλλο παράδειγμα είναι το φράγμα Nurek, το οποίο θεωρούμε ότι είναι ένα ακόμα παράδειγμα συνεχούς σεισμικότητας. Η ακόλουθη παρατήρηση έγινε από τους Simpson και Negmatullaev (1981). Η Σεισμικότητα στο Nurek δεν εξαρτάται άμεσα από τις αυξομειώσεις στα επίπεδα του νερού. Ωστόσο, η σεισμικότητα περιορίζεται στις περιπτώσεις που η στάθμη του νερού ξεπερνά το προηγούμενο μέγιστο. Οι εκρήξεις στη σεισμική δραστηριότητα εμφανίστηκαν το 1972, 1973, 1976 και 1977, όλες αφότου η στάθμη του νερού έφθασε σε νέο μέγιστο. Η λίμνη Mead είναι άλλο ένα κλασικό παράδειγμα «Συνεχούς σεισμικότητας». Ο (Carder, 1945) σύγκρινε τις διακυμάνσεις της στάθμης των υδάτων της λίμνης Mead με την συχνότητα των σεισμικών δονήσεων. Η μέγιστη σεισμική δραστηριότητα,



συμπεριλαμβανομένου του ισχυρότερου σεισμού μεγέθους 5 ρίχτερ συνέβη τον Μαΐου του 1939, όταν η στάθμη της λίμνης αυξήθηκε. Οι δύο άλλες σημαντικές αυξήσεις της στάθμης του νερού κατά τη διάρκεια του 1941 και του 1942 ακολουθήθηκαν από σημαντική σεισμική δραστηριότητα μέσα σε ένα διάστημα λίγων εβδομάδων.

### **ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ**

Η διάχυση της πίεσης στους πόρους διαδραματίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στην πρόκληση σεισμών. Ωστόσο, η σημασία της υδραυλικής ικανότητας διάχυσης, μέχρι στιγμής, ως επί το πλείστον υποτίθεται ή συμπεραίνεται από τη μετατόπιση της σεισμικότητας. Σε μια ενδιαφέρουσα έρευνα, ο Talwani et al. (1999) μας παρέχει τα αποτελέσματα των επί τόπου μετρήσεων της υδραυλικής διαχυσιμότητας και του συντελεστή Skempton στο φράγμα Bad Creek στη Νότια Καρολίνα. Σε ένα φρεάτιο παρατήρησης, που βρίσκεται 250 μέτρα μακριά από τον ταμιευτήρα, παρακολουθούνται τα επίπεδα του νερού. Ο πυθμένας του φρεατίου συνδέεται με το κάτω μέρος του ταμιευτήρα με μια ρηχή και πλάτους 1 μέτρου, ζώνη διάτμησης. Η αναλογία της μεταβολής της στάθμης του νερού στο φρεάτιο παρατήρησης με την αλλαγή της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα είναι μια μέτρηση της μετάδοσης της πίεσης στους πόρους. Αρχικά, το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ της μεταβολής της στάθμης του νερού στο φρεάτιο παρατήρησης σε σχέση με εκείνη στον ταμιευτήρα ήταν 98 ώρες, το οποίο στη συνέχεια μειώθηκε και σταθεροποιήθηκε στις 72 ώρες. Αυτό οφείλεται στην κατάκλιση της ζώνης διάτμησης. Η διαχυτικότητα υπολογίστηκε στα 0,076 m<sup>2</sup>/s για τη ζώνη διάτμησης, και ο συντελεστής Skempton υπολογίστηκε σε 0,66 για αστράγγιστες συνθήκες αντίδρασης του ταμιευτήρα. Αυτές οι παρατηρήσεις έχουν μεγάλη σημασία για την κατανόηση της διάχυσης της πίεσης στους πόρους ως παράγοντας πρόκλησης σεισμών.

### **Η ΡΟΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΟΙ ΦΥΣΙΚΟΙ ΣΕΙΣΜΟΙ**

Αρκετά χρόνια πριν, οι Nour και Booker (1972) είχαν επισημάνει πως οι μεγάλοι ρηχοί σεισμοί μπορούν να παράγουν μεταβολές στην πίεση του ρευστού στους πόρους και παράλληλα στην πίεση που ασκείται στα ρήγματα. Η ανακατανομή της πίεσης στους πόρους, ως αποτέλεσμα της ροής του υγρού μειώνει αργά την αντοχή του πετρώματος και μπορεί να οδηγήσει μετά από καιρό σε θραύση του. Αυτή ήταν μια ελκυστική εξήγηση για να δικαιολογήσει τους μετασεισμούς μετά από ρηχούς σεισμούς. Οι Nur και Booker (1972) υπογράμμισαν ότι οι μετρήσεις της πίεσης των πόρων σε γεωτρήσεις, σε σεισμικά ενεργές περιοχές, θα αποδείκνυαν την παραπάνω θεωρία. Πρόσφατα, ο Noir et al. (1997) ανέφερε μια ακολουθία σεισμών που ενεργοποιήθηκε από την ροή του νερού στο φράγμα Tendaho στην Αιθιοπία, όπου ο κύριος σεισμός, συμπεριλαμβανομένων και των 10 μετασεισμών όλοι τους μεγέθους μεγαλύτερου των 5.5 ρίχτερ, είχαν όλοι επίκεντρο, όχι κοντά στο φράγμα αλλά 50 χιλιόμετρα βορειοδυτικά και συνέβησαν με μια καθυστέρηση 50 ωρών. Ο Roeloffs (1998) ανέφερε συνεχές αλλαγές στη στάθμη του νερού σε μια γεώτρηση κοντά στο Parkfield στην Καλιφόρνια, λόγω των τοπικών και των πιο μακρινών σεισμών. Πιστεύουμε ότι τα αποτελέσματα αυτά αναφέρθηκε μαζί με τα πειράματα που διεξάγονται ακόμα και σήμερα στην Κογνα από τον Gupta θα βοηθήσουν

περισσότερο στην κατανόηση του ρόλου που διαδραματίζει και η ροή του νερού στην πρόκληση σεισμών.

### **ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΜΟΝΤΕΛΑ**

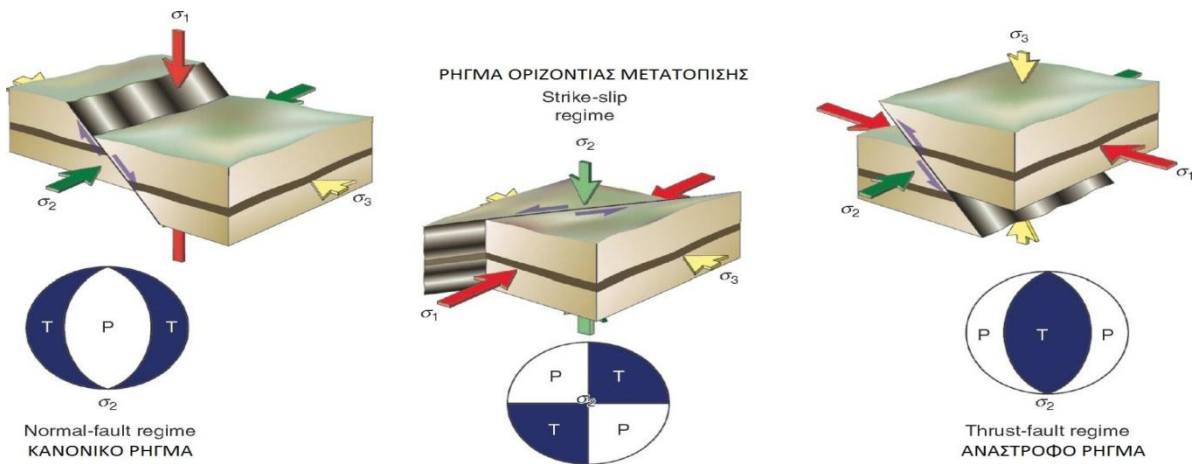
Τα περισσότερα από τα θεωρητικά μοντέλα που έχουμε αναφέρει μέχρι στιγμής για να εξετάσουμε την επίδραση της πίεσης του νερού στους πόρους στην ενεργοποίηση σεισμών, είναι για ισοτροπικά πετρώματα. Οι Chen και Nur (1992) έχουν ερευνήσει την επίδραση της πίεσης του υγρού στους πόρους σε ανισότροπα πετρώματα και τις συνέπειές της, στην πρόκληση σεισμικότητας. Εξήγαγαν ένα νόμο για την πίεση στα ανισότροπα πετρώματα και συντελεστές για τα ισότροπα και τα ορθοτροπικά πετρώματα. Μέσω αριθμητικών μοντέλων και ανάλυσης διαγραμμάτων Mohr, απέδειξαν ότι η πίεση των ρευστών στους πόρους, σε ανισότροπα πετρώματα, προκαλεί πολύ μεγαλύτερες μεταβολές στη διατμητική τάση, σε σύγκριση με ισοτροπικά πετρώματα. Οι Chen και Nur (1992) επισημαίνουν ότι τα διαφορετικά αποτελέσματα που είχαν στα ανισότροπα πετρώματα έχουν ευρεία εφαρμογή, στην καλύτερη κατανόηση της ενεργοποίησης της σεισμικότητας, των προσεισμικών και των μετασεισμικών δραστηριοτήτων. Δείχνουν ότι παροδικές αυξήσεις της πίεσης στους πόρους προκαλούν παροδικά υψηλές διατμητικές τάσεις, οι οποίες μειώνουν την αντοχή σε διάτμηση, προκαλώντας έτσι αστοχία του πετρώματος, πολύ πιο εύκολα σε σύγκριση τα ισοτροπικά πετρώματα.

### **ΆΛΛΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ**

Εδώ, θα αναφέρουμε εν συντομία μερικές σημαντικές μελέτες που εκδόθηκαν κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών. Οι Chander και Kalpna (1997) τόνισαν ότι η πλήρωση του ταμιευτήρα μπορεί να σταθεροποιήσει κάποια μέρη και να αποσταθεροποιήσει άλλα μέρη του ίδιου ρήγματος. Οι Kalpna και Chander (2000) ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο για την προσομοίωση των τάσεων και της πίεσης των πόρων, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του Green, για πιο ρεαλιστικά τρισδιάστατα μοντέλα ταμιευτήρων. Μια πολύ σημαντική πτυχή του έργου αυτού, είναι η παροχή λύσεων για τις εξομοιώσεις ανομοιογενούς διάχυσης. Οι Lee και Wolf (1998) ανέπτυξαν μαθηματικά μοντέλα, για να μελετήσουν την διάδοση της πίεσης των πόρων, στα ετερογενή και στα θρυμματισμένα πετρώματα. Ο χρόνος που απαιτείται για το "μέτωπο" της πίεσης να μεταναστεύσει προς τα κάτω είναι ευθέως ανάλογο με το τετράγωνο του βάθους και αντιστρόφως ανάλογο με την διαπερατότητα του πετρώματος. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των εστιακών βαθών, της σεισμικότητας που παρατηρήθηκε κοντά στο όρος Ogden στα σύνορα της Αλάσκας με την Βρετανική Κολομβία. Οι Lee και Wolf (1998) παρατήρησαν ότι ο χρόνος που μεσολάβησε μεταξύ της πλήρωσης του ταμιευτήρα και των σεισμών ήταν λίγες ημέρες έως εβδομάδες, υποδεικνύοντας ταχεία αντίδραση. Επίσης επισήμαναν πως εάν η κάθετη συνδεσιμότητα των θραυσμάτων του πετρώματος είναι μεγάλη, οι σεισμοί μπορούν να προκληθούν σε βάθη πολλών χιλιομέτρων.

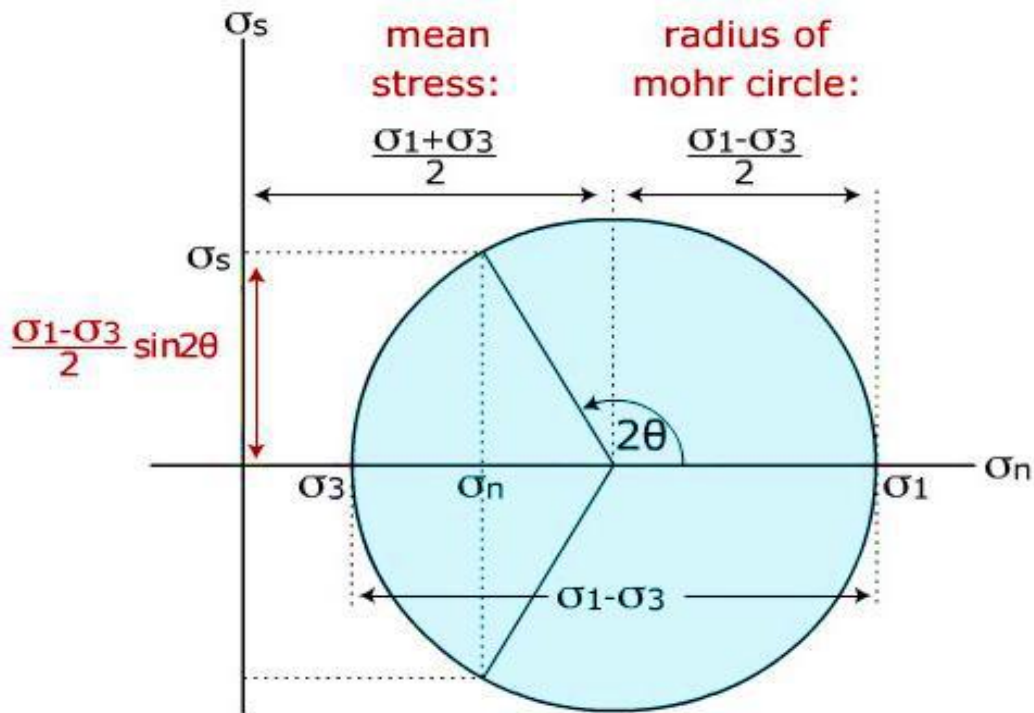
## ΡΗΓΜΑΤΑ

Ρήγμα (fault) είναι η απότομη διακοπή της συνέχειας των πετρωμάτων, λόγω θραύσης κατά μήκος μιας επιφάνειας διάρρηξης και η οποία συνοδεύεται από σχετική μετατόπιση των δύο «πλευρών» εκατέρωθεν της επιφάνειας αυτής. Η μετατόπιση γίνεται πάνω στην επιφάνεια διάρρηξης, οι δε δύο «πλευρές» ονομάζονται ρηξιτεμάχη (fault blocks) ή απλά τεμάχη (blocks). Με δεδομένο ότι στην επιφάνεια της Γης δεν υφίστανται διατμητικές τάσεις, μία από τις κύριες τάσεις πρέπει να είναι κατακόρυφη, άρα οι άλλες δύο οριζόντιες. Ανάλογα με το ποια είναι κατακόρυφη, τα τεκτονικά καθεστώτα ταξινομούνται όπως στο σχήμα:

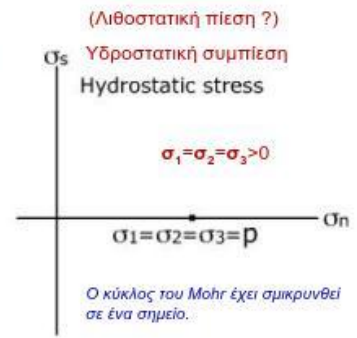
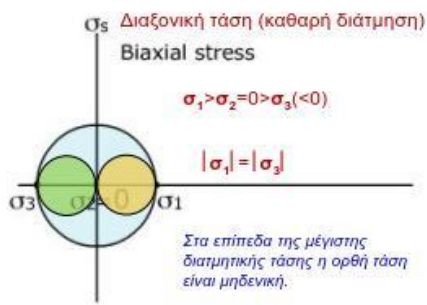
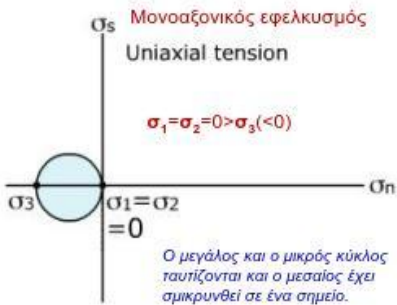
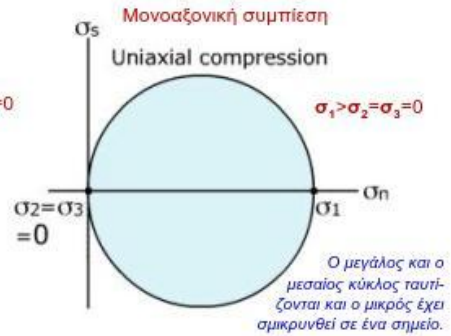
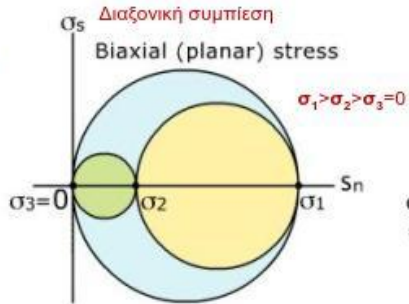
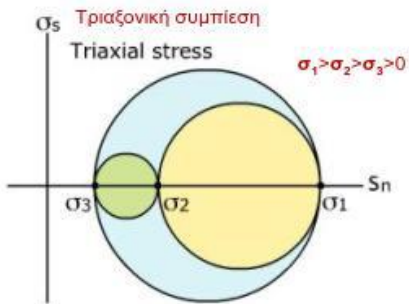


## ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ MOHR

Το διάγραμμα του κύκλου του Mohr απεικονίζει τις ορθές και διατμητικές τάσεις που δρουν σε όλα τα επίπεδα που διέρχονται από τον  $\sigma_2$ . Στον οριζώντιο άξονα προβάλλονται οι ορθές τάσεις και στον κατακόρυφο οι διατμητικές. Ο μέγιστος και ο ελάχιστος άξονας των κυρίων τάσεων ( $\sigma_1$  &  $\sigma_3$ ) προβάλλονται στον οριζώντιο άξονα και η διαφορά τους (η απόσταση ανάμεσα στην προβολή του  $\sigma_1$  &  $\sigma_3$ ) αποτελεί τη διάμετρο του κύκλου του Mohr. Το κέντρο του κύκλου έχει συντεταγμένες  $[(\sigma_1 + \sigma_3)/2, 0]$ . Οποιοδήποτε σημείο της περιφέρειας του κύκλου μας δίνει μια ορθή και μια διατμητική τάση που δρουν στο επίπεδο που η κάθετος σε αυτό σχηματίζει γωνία  $\theta$  με τον  $\sigma_1$  (η γωνία ανάμεσα στην ακτίνα του κύκλου -που ενώνει το κέντρο του κύκλου με το σημείο στην περιφέρεια- και τον οριζώντιο άξονα είναι  $2\theta$ ). Αν ο  $\sigma_1$  είναι κατακόρυφος, τότε η γωνία  $\theta$  αντιστοιχεί και στην κλίση του επιπέδου (βλ. το μικρό σχήμα). Δύο αντιδιαμετρικά σημεία στην περιφέρεια του κύκλου αντιπροσωπεύουν επίπεδα με γωνιακή σχέση  $90^\circ$ . Η μέγιστη τιμή για την διατμητική τάση προκύπτει όταν η γωνία  $2\theta = 90^\circ$ , δηλαδή όταν η γωνία  $\theta$  που σχηματίζει ο  $\sigma_1$  με το επίπεδο είναι  $45^\circ$ . Η διαφορά ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) αποκαλείται διαφορική τάση (differential stress) και έχει μεγάλη σημασία στη μηχανική των διαρρήξεων. Στις γεωλογικές εφαρμογές, όπως έχει αναφερθεί) το διάγραμμα του Mohr κατασκευάζεται έτσι ώστε οι συμπιεστικές τάσεις να θεωρούνται θετικές και οι εφελκυστικές αρνητικές. Το αντίθετο χρησιμοποιείται από τους γεωτεχνικούς μηχανικούς.



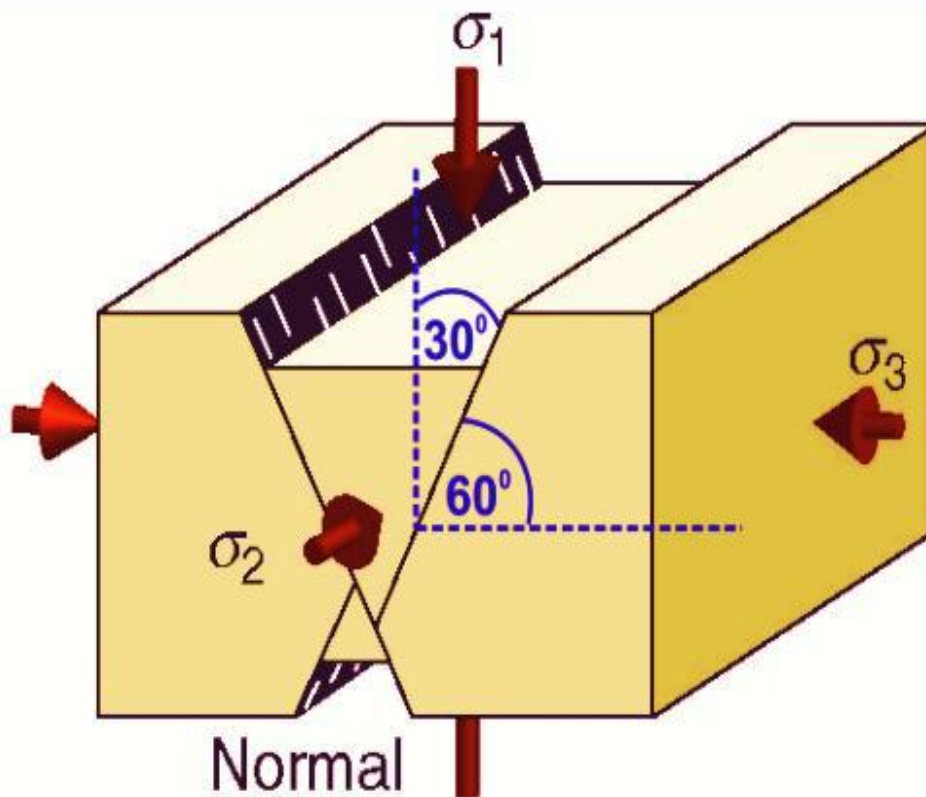
Καθεστώτα τάσης (states of stress)

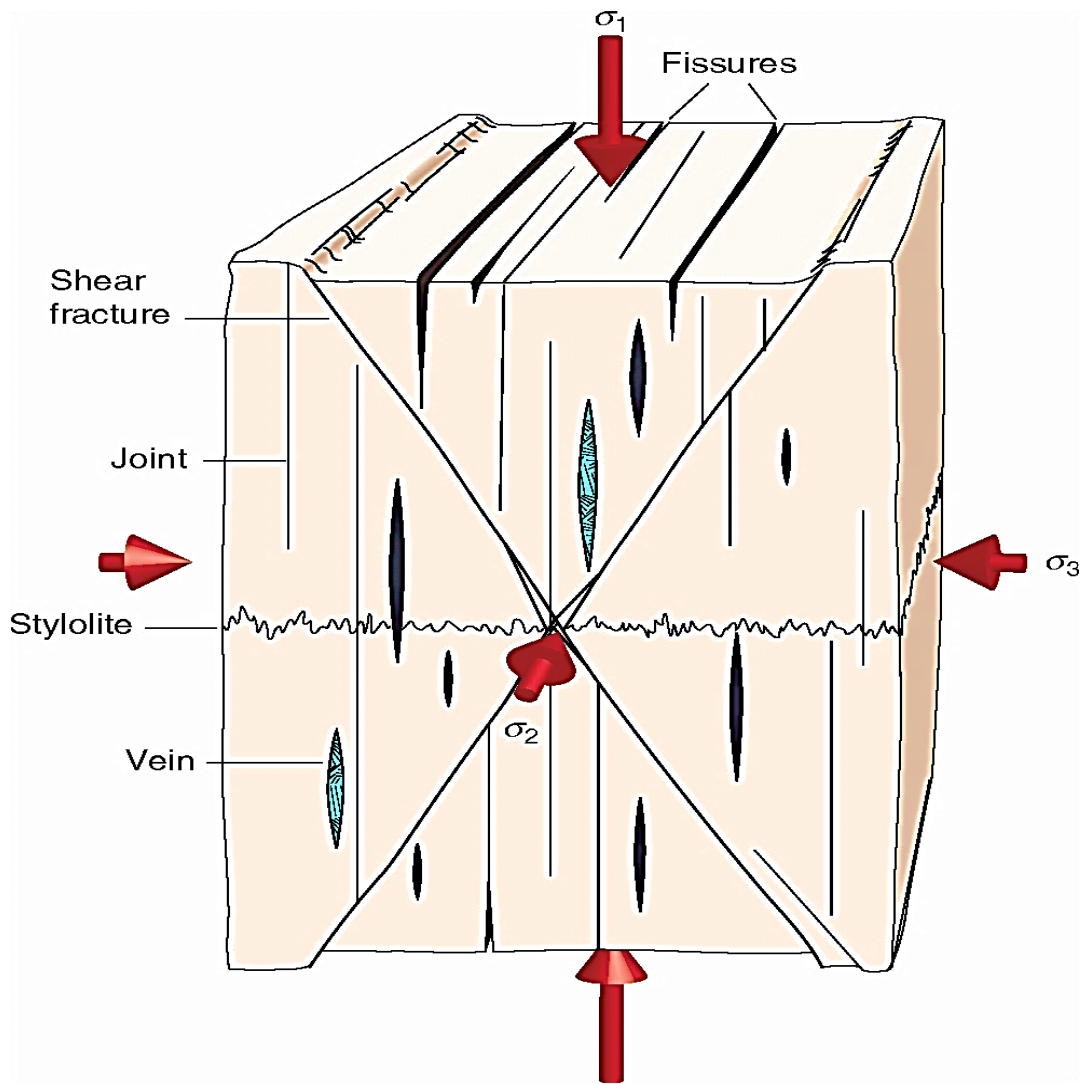


Το διάγραμμα του Mohr, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις τρεις διαστάσεις, όπου όλοι οι κύριοι άξονες τάσεων προβάλλονται στον οριζόντιο άξονα. Σχηματίζουμε έτσι άλλους δύο κύκλους, έναν με διάμετρο τη διαφορά ανάμεσα στους  $\sigma_1$  &  $\sigma_2$  (που είναι και ο μεσαίος σε μέγεθος) και έναν με διάμετρο τη διαφορά ανάμεσα στους  $\sigma_2$  &  $\sigma_3$  (που είναι και ο μικρότερος σε μέγεθος). Όπως αναφέρθηκε ο μεγάλος κύκλος, που αντιστοιχεί στη διαφορά  $\sigma_1$  &  $\sigma_3$  μας δίνει τις τάσεις (ορθές και διατμητικές) που ασκούνται σε επίπεδα που περιλαμβάνουν τον  $\sigma_2$ , δηλαδή είναι κάθετα στο επίπεδο  $\sigma_1\sigma_3$ . Αντίστοιχα ο μεσαίος, που αντιστοιχεί στη διαφορά  $\sigma_1$  &  $\sigma_2$  μας δίνει τις τάσεις (ορθές και διατμητικές) που ασκούνται σε επίπεδα που περιλαμβάνουν τον  $\sigma_3$ , δηλαδή είναι κάθετα στο επίπεδο  $\sigma_1\sigma_2$  και ο μικρός αυτές που ασκούνται σε επίπεδα που περιλαμβάνουν τον  $\sigma_1$ , δηλαδή είναι κάθετα στο επίπεδο  $\sigma_2\sigma_3$ .

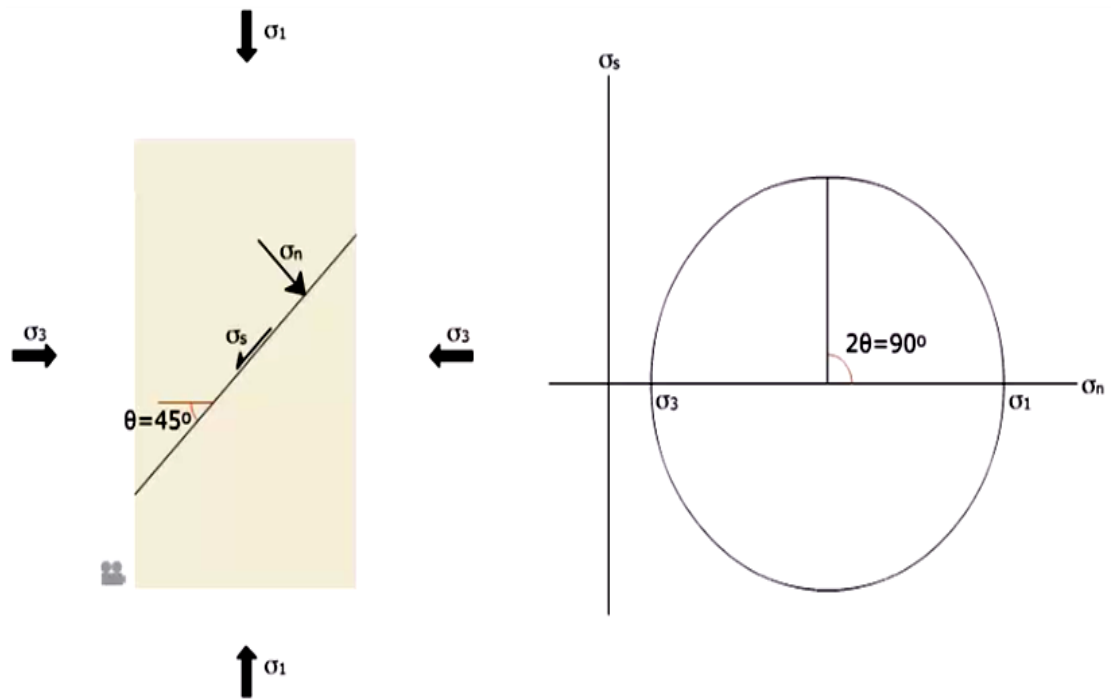
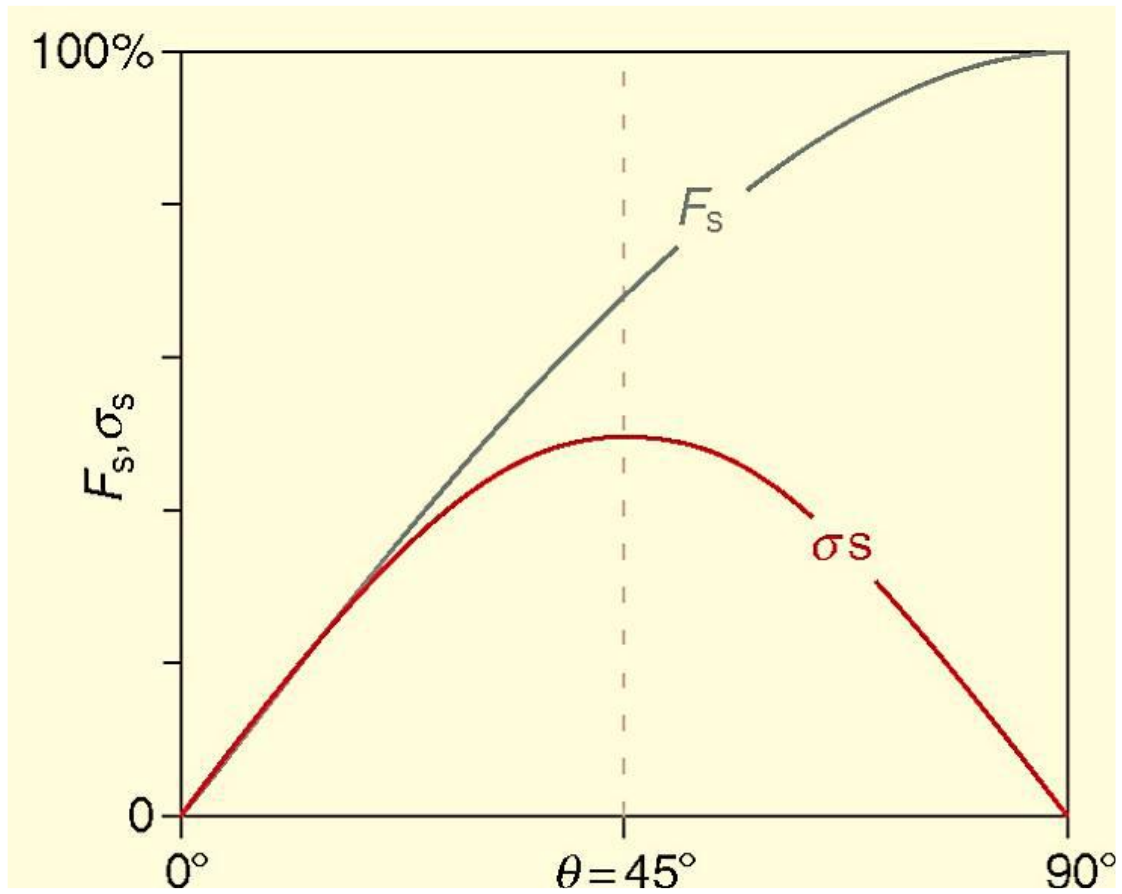
### ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ANDERSON

Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση καθιέρωσε τη γεωμετρική σχέση ανάμεσα στους άξονες των κυρίων τάσεων και τη γεωμετρία των διαρρήξεων τύπου I και τύπου II (mode I & mode II fractures). Οι εκτατικές (ή εφελκυστικές) διαρρήξεις (τύπου I), π.χ. διακλάσεις (joints), ρωγμές (fissures), φλέβες (veins), αναπτύσσονται παράλληλά με τον  $\sigma_1$  και κάθετα στον  $\sigma_3$ . Οι διατμητικές διαρρήξεις (shear fractures) σχηματίζουν γωνία  $\varphi=30^\circ$  με τον  $\sigma_1$  και είναι παράλληλες με τον  $\sigma_2$ . Στη διπλανή και κάτω εικόνα φαίνεται η σχέση αυτή για καθεστώς κανονικών ρηγμάτων.





Ο Anderson ενσωμάτωσε στη θεωρία του την εργασία των Navier και Coulomb, οι οποίοι διαπίστωσαν ότι η γωνία με την οποία σχηματίζεται η διατμητική διάρρηξη δεν είναι  $45^{\circ}$  όπου, όπως αναφέρθηκε, η διατμητική τάση γίνεται max, αλλά ελέγχεται από το λόγο ανάμεσα στην ορθή και διατμητική τάση. Ο βέλτιστος λόγος  $\sigma_1/\sigma_3$  εξαρτάται από τη γωνία εσωτερικής τριβής  $\Phi$ , και για τα περισσότερα πετρώματα εξασφαλίζεται όταν το επίπεδο της διάρρηξης έχει κλίση γύρω στις  $60^{\circ}$ . Στη γωνία αυτή η  $\sigma_1$  έχει μειωθεί αρκετά σε σχέση με τη γωνία των  $45^{\circ}$ , ενώ η  $\sigma_3$  έχει μειωθεί πολύ λιγότερο και παραμένει κοντά στη max τιμή. Η γωνία εξαρτάται επίσης από την ολόπλευρη πίεση (confining pressure, που είναι άμεσα εξαρτώμενη από το βάθος που βρίσκεται "ενταφιασμένο" το πέτρωμα – burial depth) τη θερμοκρασία και την ύπαρξη ρευστών των πόρων.



## ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΥΣΑ ΘΡΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΘΡΑΥΣΗΣ

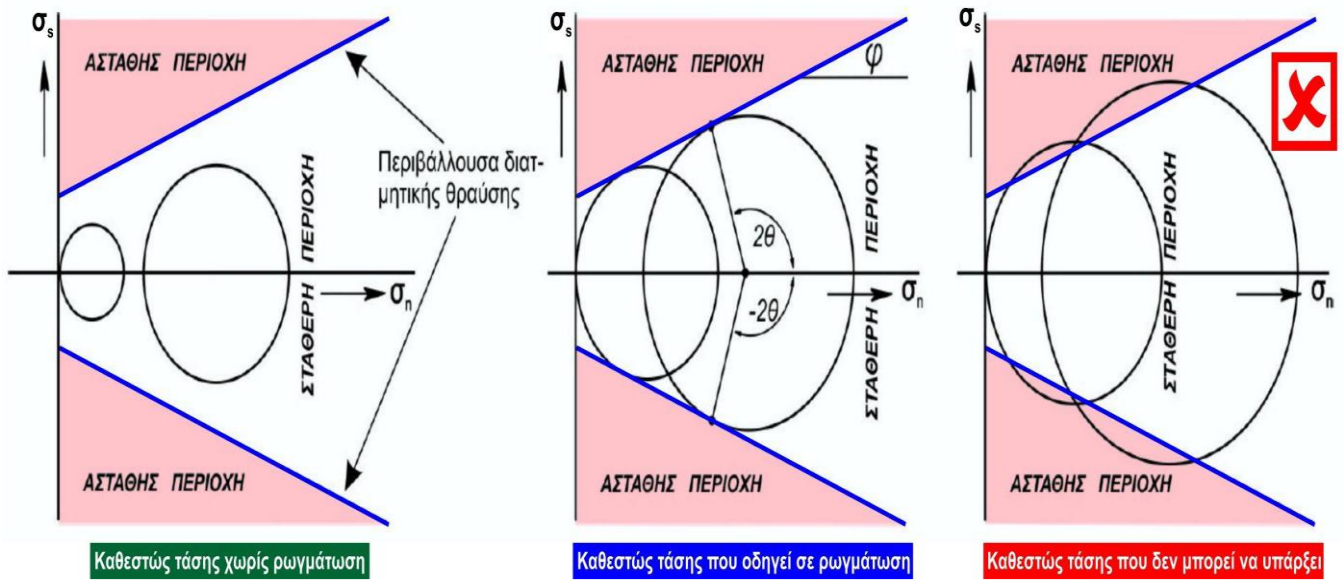
Για ένα συγκεκριμένο πέτρωμα κάτω από σταθερή θερμοκρασία και θετική (συμπιεστική) ολόπλευρη πίεση (συγκεκριμένο βάθος ενταφιασμού), η δημιουργία διάρρηξης εξαρτάται από τη διαφορική τάση ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) καθώς και τη μέση τάση  $[(\sigma_1 + \sigma_3) / 2]$ . Αν δεν υφίσταται διαφορική τάση (differential stress), τότε το καθεστώς τάσεων είναι λιθοστατικό, στην ουσία δηλαδή δεν υφίσταται καμία δύναμη που να ωθεί ή να έλκει τον όγκο του πετρώματος σε οποιαδήποτε διεύθυνση, δεδομένου ότι αυτό δέχεται "ολόπλευρα" την ίδια πίεση. Η διατμητική αντοχή του πετρώματος εξαρτάται από την ολόπλευρη πίεση, δηλαδή από το βάθος που βρίσκεται, και συγκεκριμένα αυξάνει με αυτό. Δηλαδή όσο μεγαλώνει το βάθος χρειάζεται μεγαλύτερη διαφορική τάση για να προκληθεί διατμητική ρωγμή στο πέτρωμα. Πειραματικά δεδομένα έχουν επιβεβαιώσει ότι σε δείγματα του ίδιου πετρώματος για την έναρξη της διάρρηξης απαιτείται μια συγκεκριμένη διαφορική τάση  $\sigma_1 - \sigma_3$  και ότι το μέγεθος της απαιτούμενης διαφορικής τάσης μεγαλώνει όσο μεγαλώνει η ολόπλευρη πίεση  $\sigma_3$ . Πειραματικά δεδομένα δείχνουν επίσης ότι στο διάγραμμα Mohr μπορούμε να φτιάξουμε μια περιβάλλουσα διατμητικής θραύσης, που αντιπροσωπεύεται από δύο συμμετρικές γραμμές εκατέρωθεν του οριζόντιου άξονα. Κάθε κύκλος Mohr που περιέχεται μεταξύ των δύο αυτών γραμμών, αντιπροσωπεύει ένα σταθερό καθεστώς τάσης που δεν οδηγεί το πέτρωμα σε θραύση. Κάθε κύκλος που εφάπτεται στις δύο αυτές γραμμές αντιπροσωπεύει ένα κρίσιμο καθεστώς τάσης που προκαλεί αστοχία στο πέτρωμα (διατμητική διάρρηξη). Κάθε κύκλος που τέμνει τις δύο αυτές γραμμές αντιπροσωπεύει ένα ασταθές καθεστώς (που δεν μπορεί να υπάρξει), δεδομένου ότι θα έχει προηγηθεί η θραύση.

## ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ COULOMB

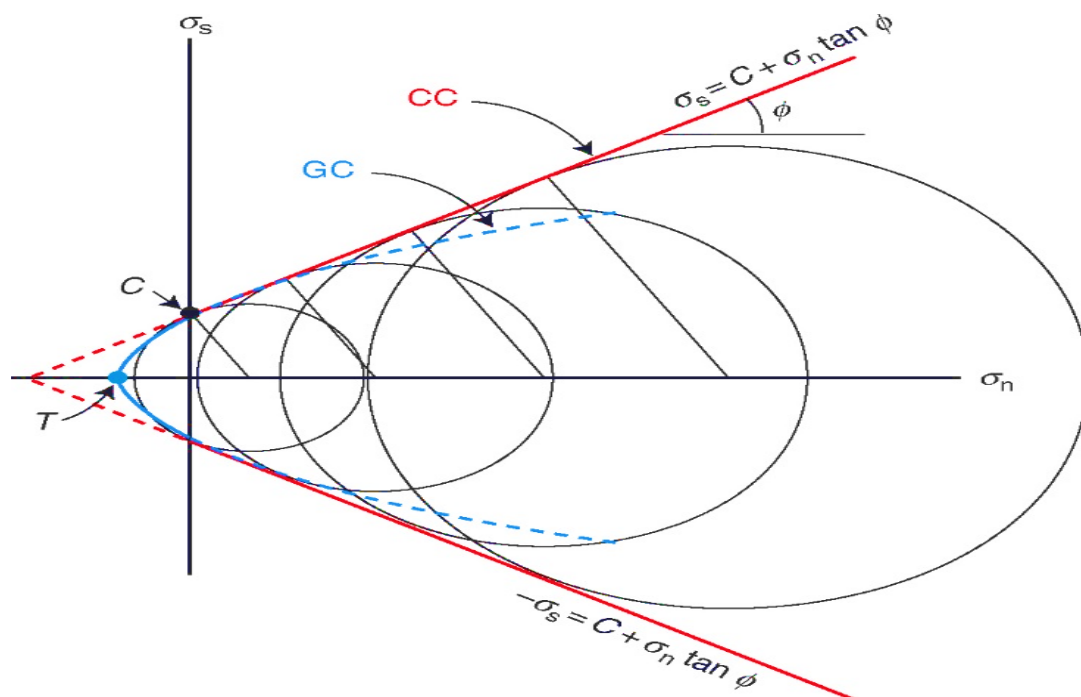
Οι κατά προσέγγιση ευθείες γραμμές της περιβάλλουσας θραύσης περιγράφονται από τη σχέση:

1.  $\Sigma_s = C + \sigma_n \tan \phi$
2.  $\sigma_s$  η κρίσιμη διατμητική τάση πάνω στη διάρρηξη την ώρα της θραύσης,
3.  $\sigma_n$  η ορθή τάση στη διάρρηξη,
4. C η συνοχή του πετρώματος, δηλ. η διατμητική αντοχή του κατά μήκος επιπέδου όπου  $\sigma_n = 0$ ,
5.  $\phi$  η γωνία εσωτερικής τριβής.





Η  $\varphi$  καλείται και συντελεστής εσωτερικής τριβής και συμβολίζεται με το γράμμα  $\varphi$ . Για την άμμο κυμαίνεται γύρω στο  $0,58$  ( $\varphi=30^\circ$ ). Για τα συμπαγή πετρώματα κυμαίνεται από  $0,47 - 0,7$ . Σε γενικούς υπολογισμούς χρησιμοποιείται το  $0,6$ . Το  $C$  αντιπροσωπεύει τη διατομή της περιβάλλουσας με τον κατακόρυφο άξονα (όπου  $\sigma_n=0$ ). Στο σημείο  $T_a$  που αντιπροσωπεύει τη διατομή με τον οριζόντιο άξονα  $\sigma_s=0$ . Έχω μόνο ορθή εφελκυστική τάση (άρα εφελκυστικές διαρρήξεις κάθετα στη  $\sigma_3$ ). Γενικά οι παράμετροι  $C$ ,  $T$  &  $\varphi$  μεταβάλλονται ανάλογα με το πέτρωμα. Π.χ. για τους ψαμμίτες, αυξάνουν όσο αυξάνει ο βαθμός λιθοποίησης του πετρώματος. Για κάθε κρίσιμο καθεστώς τάσης το κριτήριο θραύσης του Coulomb ικανοποιείται στα δύο αντιδιαμετρικά σημεία που ο κύκλος εφάπτεται στην περιβάλλουσα θραύσης. Τα σημεία αυτά ορίζουν τις κρίσιμες ορθές και διατμητικές τάσεις που ασκούνται σε δύο συμμετρικά επίπεδα με διαφορετικό προσανατολισμό που θα εκδηλωθεί η αστοχία (διατμητική διάρρηξη) και καλούνται συζυγή διατμητικά επίπεδα (conjugate shear planes). Με την παραδοχή ότι η περιβάλλουσα είναι ευθείες γραμμές, τότε οι γωνίες  $2\theta$ , όλων των κρίσιμων σημείων θα είναι ίσες.



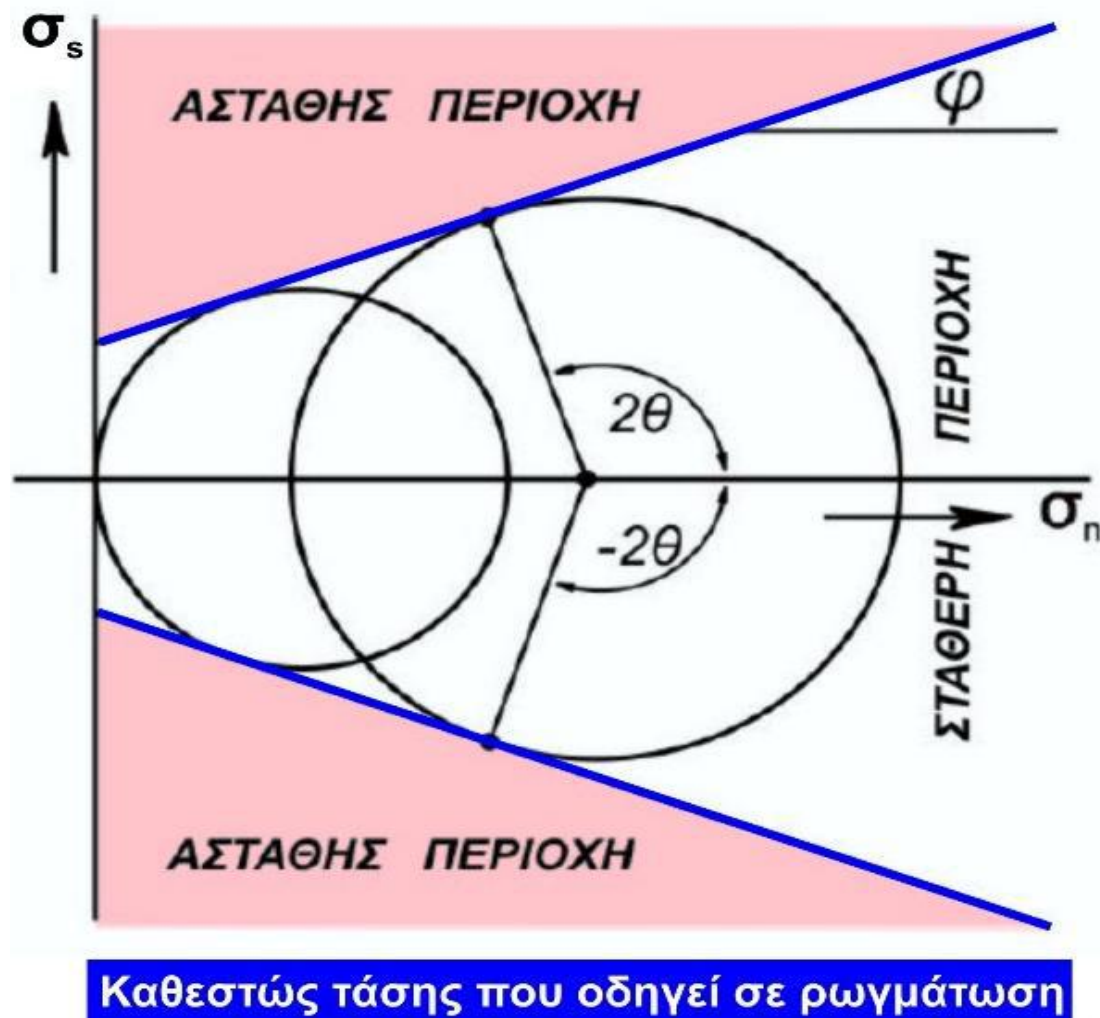
Το κριτήριο του Coulomb δεν μπορεί να υπολογίσει τον προσανατολισμό των διατμητικών επιπέδων, σε σχέση με τους κύριους άξονες  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , που θα εκδηλωθεί η διάρρηξη. Αυτό όμως μπορεί να γίνει από το διάγραμμα του κύκλου του Mohr και την περιβάλλουσα θραύσης. Στο διπλανό σχήμα δίνεται ένα παράδειγμα με την προϋπόθεση ότι ο  $\sigma_1$  είναι κατακόρυφος (και οι  $\sigma_2, \sigma_3$  οριζόντιοι). Οι τύποι όμως που αναφέρονται ισχύουν για κάθε προσανατολισμό του  $\sigma_1$ . Αποδεικνύεται ότι:

$$2\theta = 90^\circ + \varphi$$

και αν  $\alpha$  είναι η γωνία που σχηματίζει το επίπεδο με τον  $\sigma_1$ , και με δεδομένο ότι  $\alpha = 90^\circ - \theta$ , τότε:

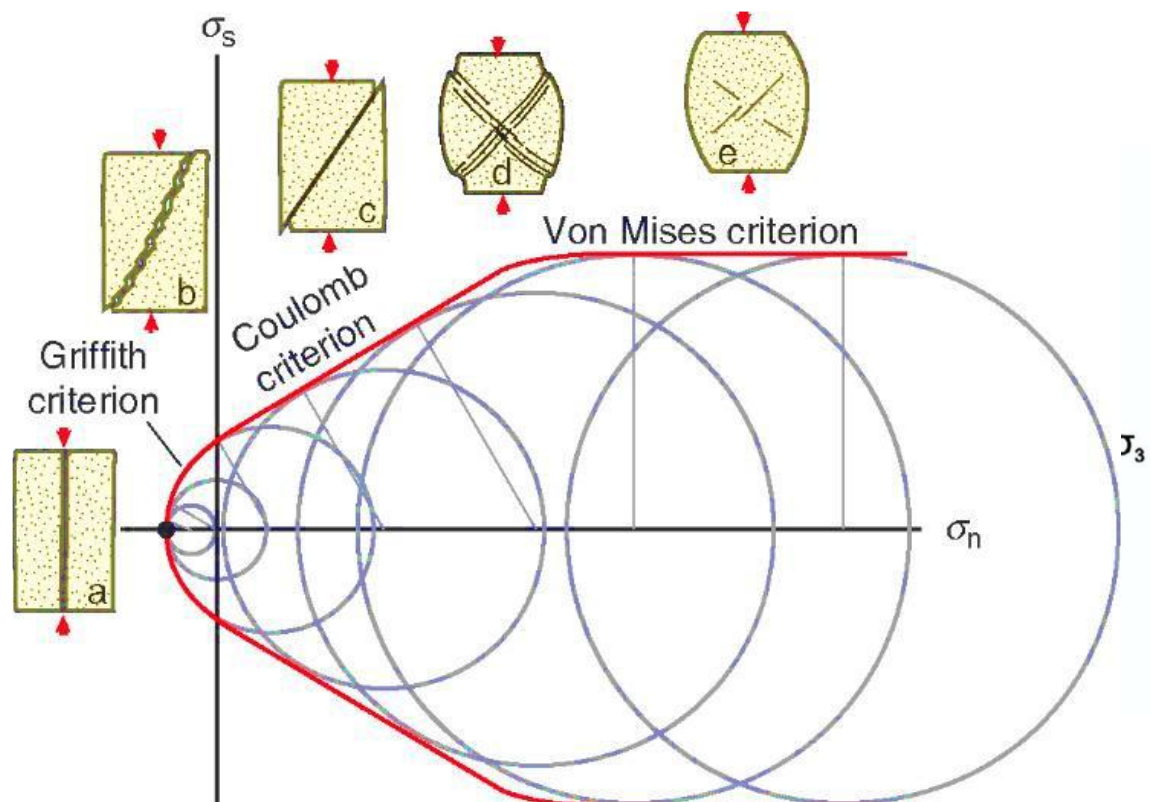
$$\alpha = (90^\circ - \varphi) / 2$$

Έτσι λοιπόν η περιβάλλουσα θραύσης προσδιορίζει, εκτός από τα κρίσιμα καθεστάτα τάσης που οδηγούν σε θραύση, και τον προσανατολισμό των διαρρήξεων που θα δημιουργηθούν, σε σχέση με τον  $\sigma_1$ . Υπενθυμίζεται ότι στην περίπτωση που ο  $\sigma_1$  είναι κατακόρυφος η γωνία  $\theta$  αντιπροσωπεύει και την κλίση του επιπέδου. Για τα περισσότερα πετρώματα η γωνία εσωτερικής τριβής, έχει τιμές που δίνουν:  $\theta = \pm 60^\circ$  &  $\alpha = \pm 30^\circ$ .



Το κριτήριο του Coulomb δεν μπορεί να καλύψει το σύνολο των περιπτώσεων. Για παράδειγμα δίνει μεγάλες αποκλίσεις στο εφελκυστικό πεδίο (εκτατική, δηλ. αρνητική, ορθή τάση, μικρές τιμές ολόπλευρης πίεσης), όπου προτιμάται το κριτήριο του Griffith. Σημαντικές αποκλίσεις παρουσιάζονται και στην περίπτωση που περνάμε στο πεδίο της όλκιμης (ductile) και πλαστικής παραμόρφωσης σε μεγαλύτερα βάθη. Τα πεδία αυτά προσεγγίζονται με το κριτήριο της σταθερής διατμητικής τάσης(η περιβάλλουσα είναι οριζόντιες γραμμές), γνωστό και ως κριτήριο Von Mises. Οι διάφοροι τύποι διαρρήξεων που δημιουργούνται σε κάθε περίπτωση είναι:

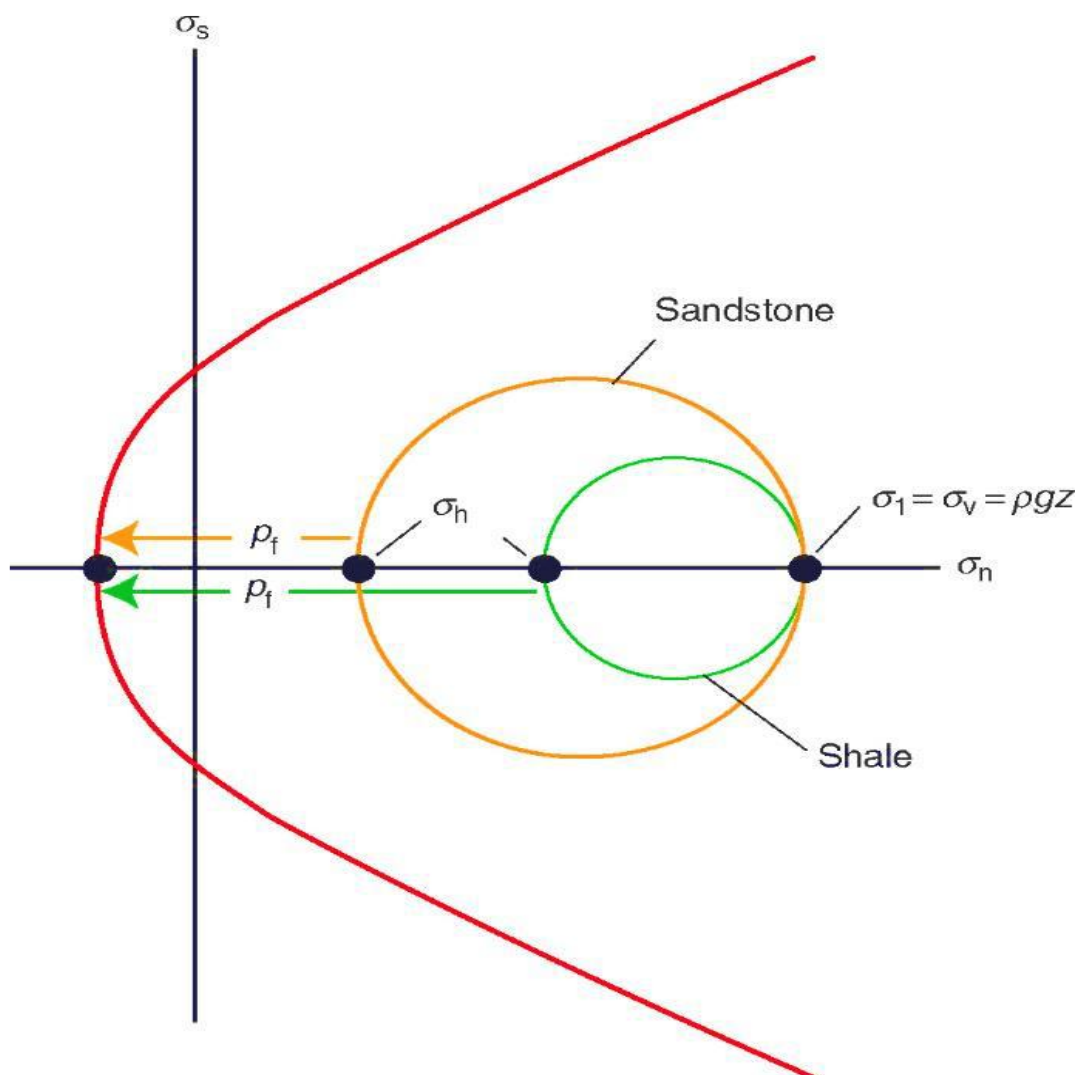
1. εφελκυστικές διαρρήξεις( tensile fractures),
2. υβριδικές διαρρήξεις (hybrid or mixed-mode fractures), συνδυασμός mode I & mode II διαρρήξεων,
3. διατμητικές διαρρήξεις (shearfractures)
4. semi-ductile shear-bands
5. πλαστική παραμόρφωση.



Τα πετρώματα συχνά έχουν πορώδες και αυτό είναι γεμάτο με υγρά (νερό, πετρέλαιο...). Η πίεση των ρευστών των πόρων  $P$  δρα ανταγωνιστικά με τη συνολική τάση που ασκείται στο πέτρωμα ( $\sigma_{tot}$ ) και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο όρος ενεργή τάση (effective stress) που δίνεται από τη σχέση:

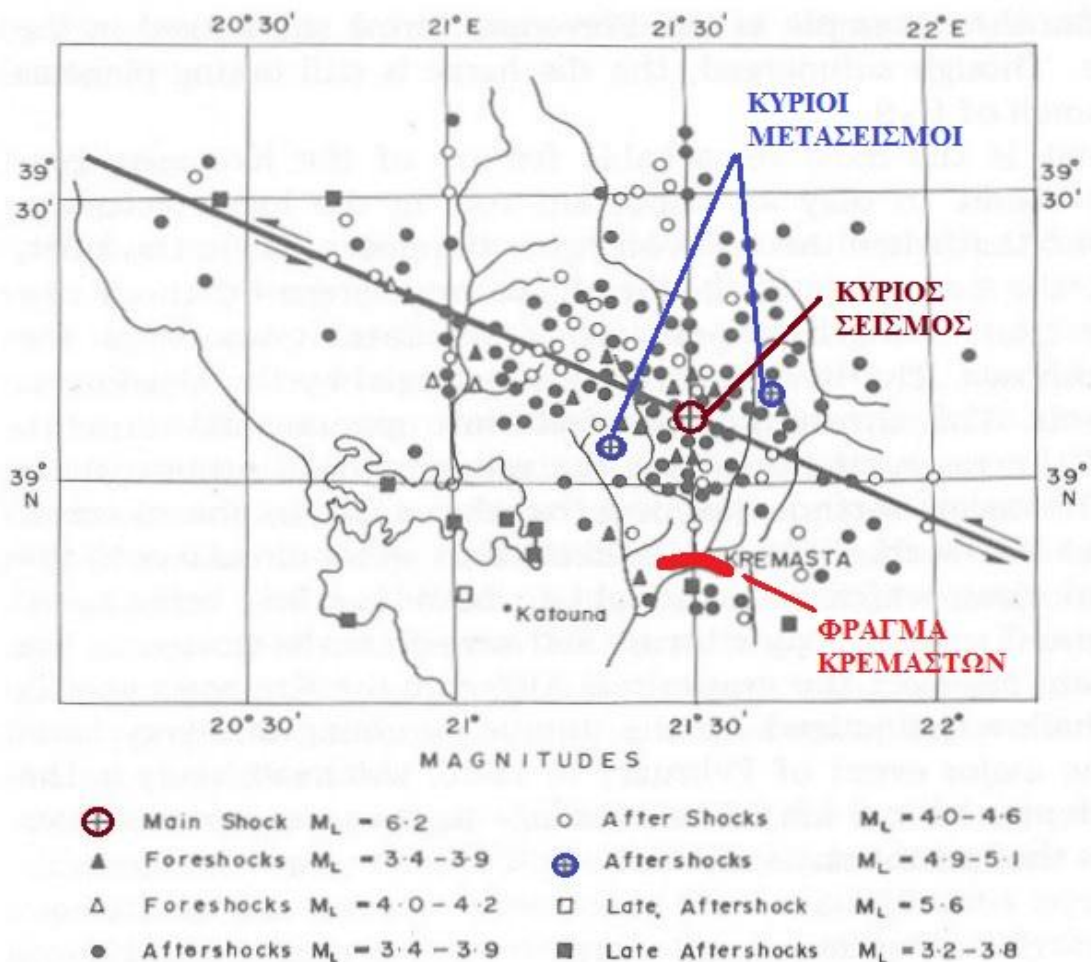
$$\sigma_{eff} = \sigma_{tot} - P$$

Υπενθυμίζεται ότι η σtot περιγράφεται από το ελλειψοειδές τάσεων ή τον τανυστή τάσεων. Όταν η πίεση των ρευστών των πόρων είναι 0, τότε  $\sigma_{eff} = \sigma_{tot}$ . Συμβαίνει κυρίως σε πετρώματα με ελάχιστο ή καθόλου πορώδες (π.χ. τα κρυσταλλικά πετρώματα όπως γνεύσιοι, γρανίτες κλπ.). Η αύξηση της πίεσης των πόρων μετακινεί τον κύκλο του Mohr προς τα αριστερά στο διάγραμμα. Το μέγεθος του κύκλου δεν αλλάζει, δεδομένου ότι η πίεση των ρευστών ενεργεί ισόποσα προς όλες τις διευθύνσεις και άρα η πίεση των πόρων μειώνει τις κύριες τάσεις κατά αντίστοιχα ποσά. Αστοχία (θραύση) θα πραγματοποιηθεί όταν ο κύκλος αγγίζει την περιβάλλουσα θραύσης. Αν αυτό γίνει στο συμπιεστικό πεδίο θα δημιουργηθούν διατμητικές διαρρήξεις, ενώ αν γίνει στο εφελκυστικό ανοικτές (εφελκυστικές) διαρρήξεις. Ένας ψαμμίτης π.χ. μπορεί να "αντέξει" μεγαλύτερες διαφορικές τάσεις από έναν αργιλικό σχίστη. Άρα χρειάζεται πολύ μικρότερη αύξηση της πίεσης των πόρων (απ' ότι ο αργιλικός σχίστης), ώστε μετακινούμενος ο κύκλος Mohr προς τα αριστερά, να "αγγίξει" την περιβάλλουσα θραύσης, στο εφελκυστικό πεδίο στην περίπτωση του διπλανού σχήματος, ώστε να δημιουργηθούν διακλάσεις (ανοικτές διαρρήξεις).



## ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΡΕΜΑΣΤΩΝ

Το μεγαλύτερο ωστόσο πρόβλημα που προέκυψε από την κατασκευή του φράγματος κατά πολλούς ήταν η σεισμικότητα που προκάλεσε στην ευρύτερη περιοχή. Ορισμένοι ερευνητές (Comninakis et al., 1968, Gupta et al., 1972, Stein et al. 1982, Saxena et al. 1988) θεωρούν ότι το φράγμα των Κρεμαστών αποτέλεσε την πιθανότερη αιτία πρόκλησης μιας σεισμικής ακολουθίας την περίοδο 1965 - 1966 με αποκορύφωμα το σεισμό μεγέθους 6.2 της κλίμακας ρίχτερ στις 5 Φεβρουαρίου 1966. Σύμφωνα με τους Gupta και Rastogi (1967) η περιοχή της δυτικής Ελλάδας χαρακτηρίζεται από έντονη σεισμικότητα. Χαρακτηριστικά αναφέρουν ότι την περίοδο 1953 - 1965 έγιναν 49 σεισμοί μεγέθους έως και 5.3 ρίχτερ και 28 σεισμοί μεγέθους έως 7.1 βαθμών της κλίμακας ρίχτερ, σε μια περιοχή έκτασης 87000km<sup>2</sup> γύρω από τα Κρεμαστά. Ωστόσο, στην περιοχή του ποταμού Αχελώου πιο συγκεκριμένα δεν είχε καταγραφεί σεισμός μεγέθους άνω των 6 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ μέχρι την αρχή πλήρωσης του ταμιευτήρα. Η πλήρωση του ταμιευτήρα ξεκίνησε στις 21 Ιουλίου 1965 και ήδη από τον Αύγουστο άρχισαν να γίνονται αισθητοί σεισμοί.



Γράφημα σεισμικής δραστηριότητας

Το παραπάνω γράφημα δείχνει την σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα με τα 740 σεισμικά γεγονότα που έλαβαν χώρα σε μια περιοχή διαστάσεων 100 τετραγωνικών χιλιομέτρων γύρω από τον ταμιευτήρα, μεταξύ Αυγούστου 1965 και Φεβρουαρίου 1966 (Gupta and Rastogi, 1967). Ο σεισμός του Φεβρουαρίου 1966 μεγέθους 6.2 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ, που προκάλεσε το θάνατο ενός ανθρώπου, τον τραυματισμό 60, αρκετές κατολισθήσεις και ζημιές σε πάνω από 1500 σπίτια ήταν και ο πιο καταστροφικός. Τα σεισμικά αυτά γεγονότα συνδέθηκαν από ορισμένους ερευνητές με την αύξηση του νερού στον ταμιευτήρα (Gupta and Rastogi, 1967, Galanopoulos 1967). Ο ταχύς ρυθμός αύξησης του νερού από το Νοέμβριο 1965 μέχρι τον Ιανουάριο 1966 ακολουθήθηκε σχεδόν αμέσως από αύξηση της σεισμικής δραστηριότητας το Νοέμβριο 1965 φτάνοντας σε μεγάλο αριθμό γεγονότων την περίοδο Ιανουαρίου – Φεβρουαρίου 1966 όπως βλέπουμε στο παρακάτω γράφημα.

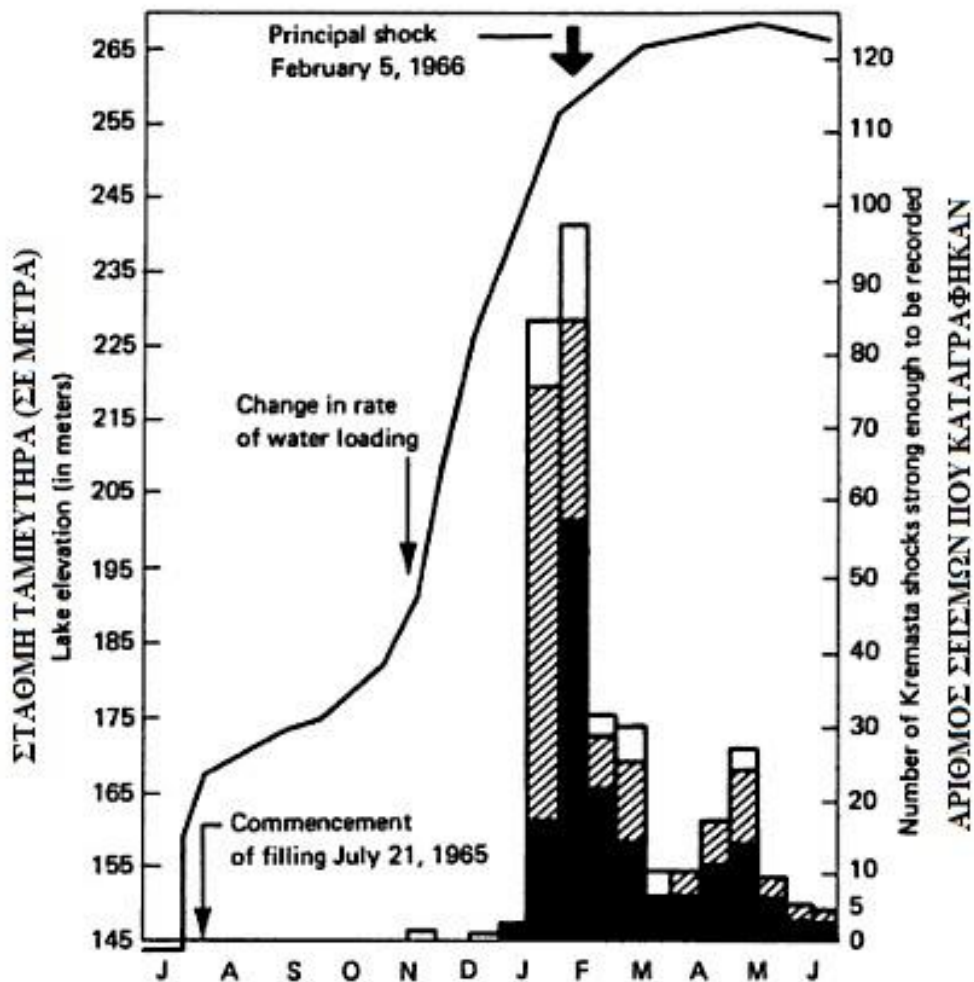


FIGURE 3 Comparison of filling of Kremasta Lake with local earthquake activity (after Galanopoulos, 1967).

Γράφημα σεισμών - στάθμης ταμιευτήρα

Ο Papazachos et. Al. (1968) αποδίδει τον κύριο σεισμό της 5<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου σε αστοχία των προεντεταμένων πετρωμάτων από το βάρος του ταμιευτήρα (10<sup>9</sup> τόνοι), το οποίο δρα κάθετα στο τμήμα του φλοιού μόνο στην μία πλευρά του ρήγματος. Ωστόσο αυτή η θεωρία αποκλείστηκε από τον Snow (1972), καθώς επακόλουθο του γεμίσματος του ταμιευτήρα, είναι πως κατά την μεταβατική περίοδο πριν η πίεση των πόρων φτάσει σε υποκεντρικά βάθη, το βάρος του νερού που εγκλείεται στον ταμιευτήρα δεν μπορεί από μόνο του να επιφέρει αρκετές αλλαγές στην ενεργή τάση ώστε να προκαλέσει αστοχία. Με βάση της γεωλογικές και υδρολογικές εκτιμήσεις, ο Snow (1972) συμπέρανε ότι η αύξηση του υδραυλικού δυναμικού σε μεγαλύτερα βάθη (υποκεντρικά) ήταν επακόλουθο της αύξησης της στάθμης του ταμιευτήρα. Επίσης εξέτασε το ιστορικό της περιοχής από τα διαθέσιμα γεωμορφολογικά στοιχεία, και τα ερμήνευσε βάση της αλλαγής της ενεργής τάσης. Με βάση αυτή την έρευνα υπαινίχθηκε, ότι η ευρύτερη περιοχή πριν την πλήρωση του ταμιευτήρα, ήταν σε κατάσταση μηδενικής σεισμικής επικινδυνότητας και η διακύμανση των τάσεων στη διάρκεια του παρελθόντος ήταν μικρότερου μεγέθους σε σχέση με την διακύμανση που επιβλήθηκε από την κατάσχεση του ταμιευτήρα το 1965. Η αύξηση της στάθμης του ταμιευτήρα από το μικρότερο υψόμετρο των 140m στα 245m δημιούργησε ένα νέο χαμηλό στο ιστορικό της ενεργής τάσης, στα ανάστροφα ρήγματα της περιοχής. Οι σεισμοί μπορεί να ενεργοποιούνται από την μείωση της ενεργής τάσης μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα όπως φαίνεται από τα διαγράμματα πιο κάτω. Ο Snow (1972) επίσης διαπίστωσε πως ο καταγισμός των ισχυρών προσεισμών πήρε μέρος όταν το υψόμετρο της στάθμης του νερού υπερέβη το προηγούμενο μέγιστο το 1966. Αφού είδαμε τα είδη των ρηγμάτων και τις τάσεις που υφίστανται σε αυτά ποιο πάνω ας δούμε πως οι ενεργές τάσεις επηρεάζουν την σταθερότητα των ρηγμάτων σύμφωνα με τους Snow και Howells.

### ΕΝΕΡΓΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΝ

Ο Snow (1972) εξέτασε αναλυτικά την επίδραση του γεμίσματος ενός θεωρητικού απέραντου ταμιευτήρα όπως και της αύξηση του υδροφόρου ορίζοντα σε περιβάλλοντα κανονικών, ανάστροφων και ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης. Κατέληξε στους παρακάτω τύπους υπολογισμού του K για κάθε μια περίπτωση.

$$\bar{K} = \frac{\nu}{(E/CD) + 1 - \nu} \text{ during the transient period in an infinite reservoir (1)}$$

$$= \frac{2\nu - 1}{(E/CD) + 1 - \nu} \text{ ultimate in an infinite reservoir (2)}$$

$$= \frac{\nu - 1}{(E/CD) + 1 - \nu} \text{ due to the raising of the water table (3)}$$

ΟΙ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ K:

- (1) ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΣΕ ΕΝΑ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΑΠΕΡΑΝΤΟ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ
- (2) ΣΤΗΝ ΤΕΛΙΚΗ ΦΑΣΗ ΣΕ ΑΠΕΡΑΝΤΟ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ
- (3) ΛΟΓΩ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ

1<sup>η</sup> περίπτωση. Σε ρηγά, διαβρωμένα πετρώματα με πολλά σημεία θραύσης, C=45 bars/cm, D=25cm έτσι E/CD=300. Με αυτά τα δεδομένα οι τιμές του K υπολογίζονται ποιο κάτω. Οι παραπάνω υπολογισμοί δείχνουν ότι οι αλλαγές στις οριζόντιες ενεργές τάσεις είναι αμελητέες σε διαβρωμένα πετρώματα (τιμές περίπου της τάξης του 10<sup>-3</sup> ρgh)

2<sup>η</sup> περίπτωση. Σε βάθος, σε σκληρά πετρώματα με λίγα σημεία θραύσης, η πειραματικές τιμές του C=10<sup>4</sup> με 10<sup>5</sup> bars/cm, D=500cm έτσι E/CD=2\*10<sup>-3</sup> με 2\*10<sup>-2</sup>. Συνεπώς οι αλλαγές στις ενεργές τάσεις υπολογίζονται στον κάτω πίνακα.

Values of  $\bar{K}$  in the relation  $d\sigma_{ex} = \bar{K}\rho gh$  (after Snow, 1972)

Filling of an infinite reservoir		Raising of the water table
transient	ultimate	
<i>1st case</i>		
$\frac{0.3}{(E/CD) + 0.7} = 10^{-3}$	$\frac{-0.4}{(E/CD) + 0.7} = -1.3 \times 10^{-3}$	$\frac{-0.7}{(E/CD) + 0.7} = -2.3 \times 10^{-3}$
<i>2nd case</i>		
= 0.43	= -0.57	= -1.0

ΟΙ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ Κ ΑΠΟ ΤΗΝ ΣΧΕΣΗ  $d\sigma_{ex} = K\rho gh$  ΚΑΤΑ ΤΟΝ SNOW (1972) ΓΙΑ ΓΕΜΙΣΜΑ ΑΠΕΡΑΝΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΚΑΙ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ

### ΚΑΝΟΝΙΚΑ ΡΗΓΜΑΤΑ

Σε μια περιοχή κανονικών ρηγμάτων, η μέγιστη ενεργή τάση  $\sigma_1$  είναι κάθετη, και έτσι παραμένει ανεπηρέαστη από το γέμισμα ενός θεωρητικού απέραντου ταμειυτήρα (ύψους h), ωστόσο η οριζόντια ενεργή τάση μειώνετε κατά 0.57 ρgh, οδηγώντας έτσι τον κύκλο του Mohr προς την περιβάλλουσα αστοχίας (Πίνακας 1 a). Στην περίπτωση ενός περιορισμένου ταμειυτήρα, η αύξηση της στάθμης, αυξάνει τον υδροφόρο ορίζοντα προκαλώντας μείωση τόσο στις οριζόντιες όσο και στις κάθετες ενεργές τάσεις κατά ρgh, οδηγώντας έτσι τον κύκλο του Mohr σε αστοχία (Πίνακας 1 b).

### ΑΝΑΣΤΡΟΦΑ ΡΗΓΜΑΤΑ

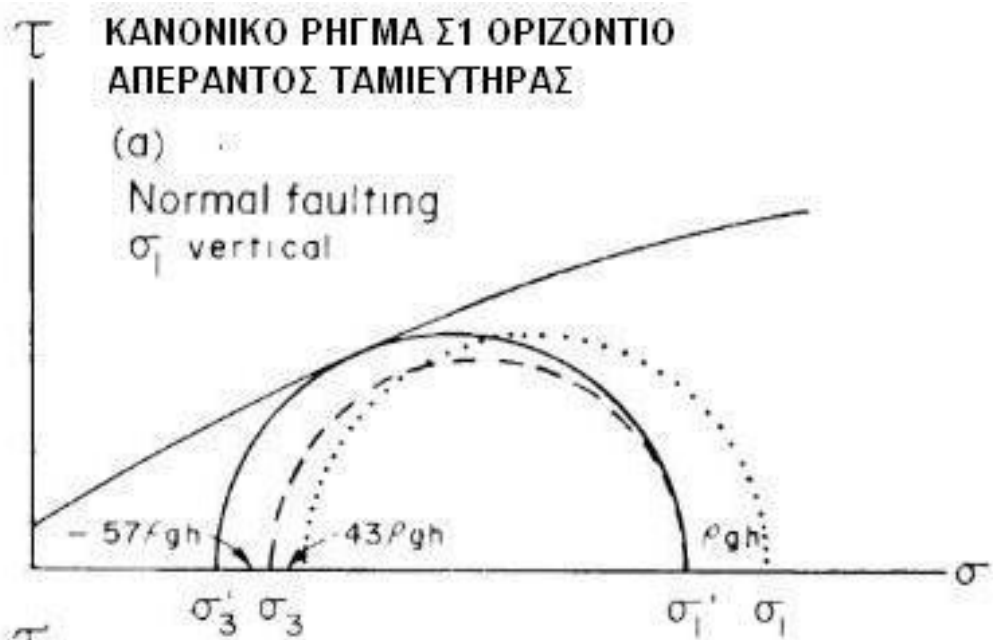
Οι τάσεις  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$  είναι στο οριζόντιο επίπεδο και ως εκ τούτου και οι δύο μειώνονται κατά 0,57 ρgh όταν ένας θεωρητικός απέραντος ταμειυτήρας γεμίζει, το οποίο σπρώχνει τον κύκλο του Mohr προς τη περιβάλλουσα αστοχίας. Παρόμοια όταν ένας πραγματικός ταμειυτήρας γεμίζει έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του υδροφόρου ορίζοντα μειώνοντας έτσι τις ενεργές τάσεις  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$  κατά ρgh, και οδηγώντας έτσι τον κύκλο του Mohr σε αστοχία.

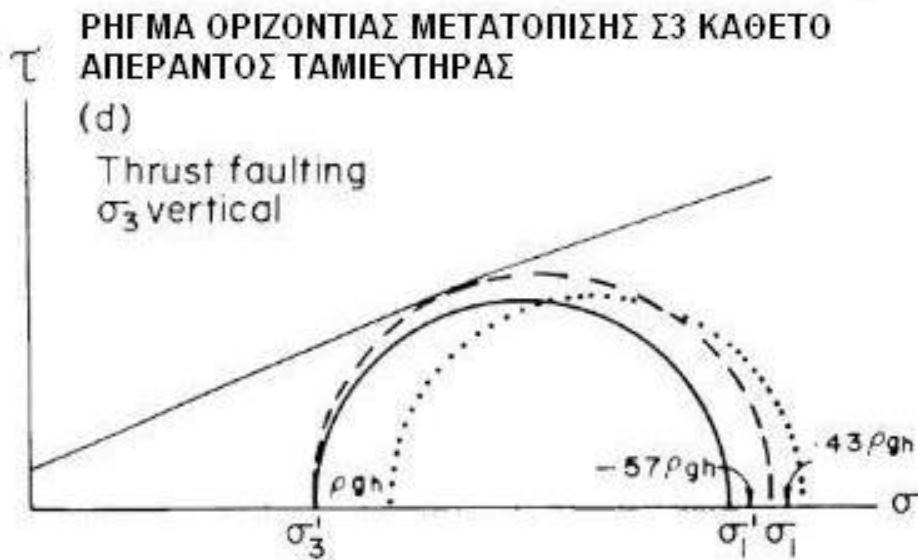
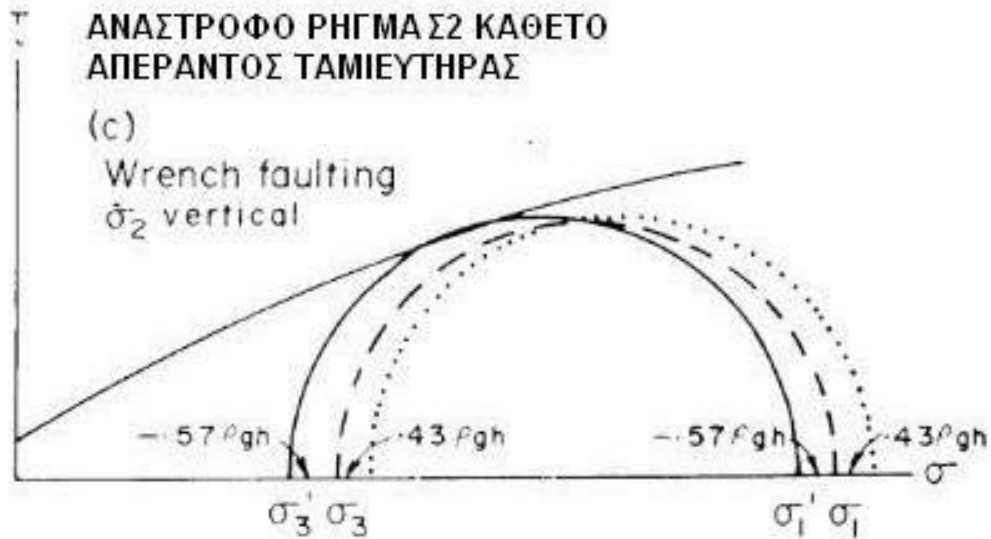
### ΡΗΓΜΑΤΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ

Σε ένα περιβάλλον ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης η ενεργή τάση  $\sigma_1$  είναι στο οριζόντιο επίπεδο. Συνεπώς το γέμισμα ενός απέραντου ταμειυτήρα, προκαλεί μείωση του  $\sigma_1$  κατά 0.57 ρgh ενώ το  $\sigma_3$  δεν αλλάζει, ελαττώνοντας έτσι την διάμετρο



του κύκλου Mohr και κατά συνέπεια απομακρύνοντας τον από την περιβάλλουσα αστοχίας. Ωστόσο, αν ένας απέραντος ταμειυτήρας, πάνω από ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης στραγγιστεί, θα παρουσιαστεί αστάθεια. Όταν ένας περιορισμένος ταμειυτήρας γεμίζει, ο υδροφόρος ορίζοντας αυξάνεται και δημιουργείται αστάθεια καθώς μειώνονται τόσο το  $\sigma_1$  όσο και το  $\sigma_3$  κατά  $\rho gh$ .





**ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΣΚΛΗΡΑ ΑΔΙΑΒΑΘΜΗΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΜΕ ΑΡΑΙΑ ΡΗΓΜΑΤΑ**

- — — ΑΡΧΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ
- ..... ΚΥΚΛΟΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ
- ΤΕΛΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

**ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ**

Η διακύμανση της πίεσης που προκαλείται στην επιφάνεια, σαν αποτέλεσμα της αλλαγής της στάθμης του νερού, επηρεάζει την πίεση των πόρων σε βάθος, με κάποια χρονική καθυστέρηση. Αυτό προκαλείται εξαιτίας της χωρητικότητας των πορώδη μέσων. Ο Howells (1973) υπολόγισε ότι κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες κοντά σε αυτές που παρατηρήθηκαν στο πεδίο, οι στιγμιαίες μεταβολές της πίεσης στην

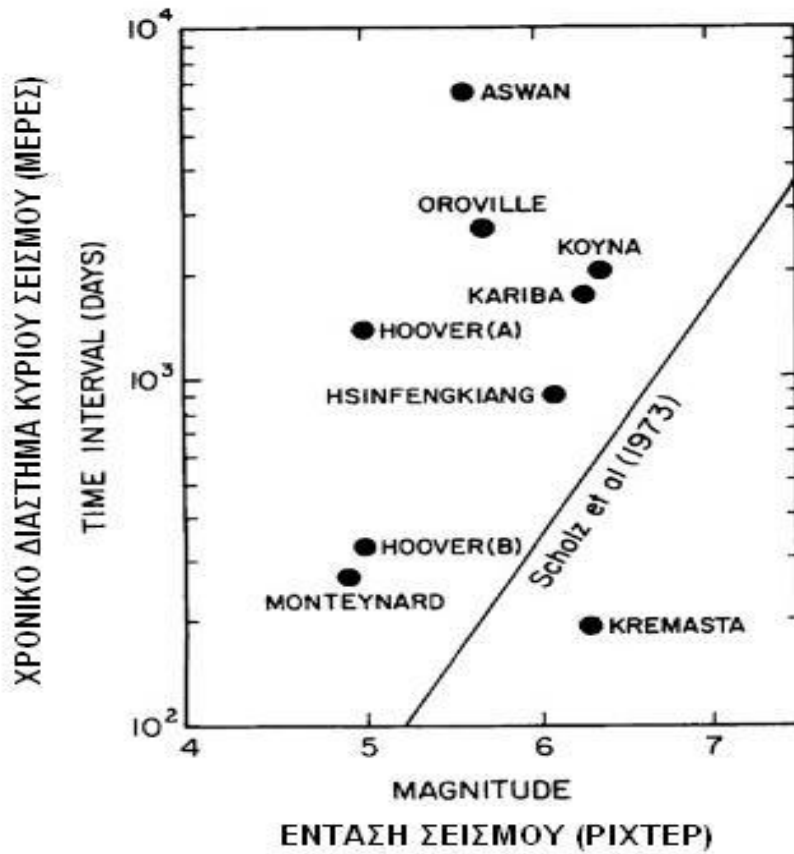
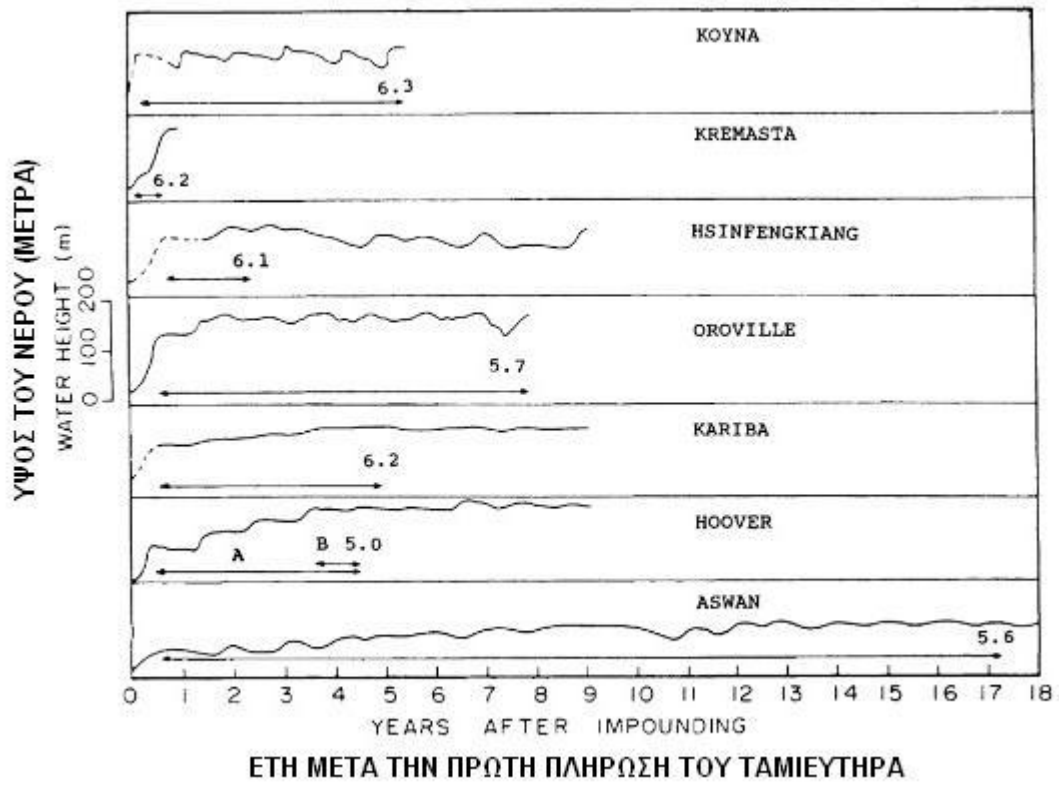
επιφάνεια θα έχουν σημαντική επίδραση στην πίεση των πόρων σε βάθος από 2,5-7,5 χιλιομέτρων με το πέρασ κάποιων εκατοντάδων ημερών. Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως σε περιπτώσεις σεισμών που προκαλούνται από ταμιευτήρες, έχει όντως παρατηρηθεί ότι η έξαρση της σεισμικότητας εμφανίζεται με κάποια χρονική καθυστέρηση, που ακολουθείται της αύξησης της στάθμης του νερού σε μεγάλες τιμές, σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Πριν η αύξηση της πίεσης των πόρων επέλθει, και το συνολικό βάρος του υπερκείμενου φορτίου του ταμιευτήρα γίνει αισθητό μια αύξηση των ενεργών τάσεων τόσο κάθετα όσο και οριζόντια παρουσιάζονται σύμφωνα και με τον νόμο του Poisson. Σε ένα περιβάλλον κανονικών ρηγμάτων αυτό δίνει μεγαλύτερη σταθερότητα (όπως φαίνεται στον πίνακα 1), αλλά και αντιστρόφως, μια μείωση της στάθμης του νερού του ταμιευτήρα μπορεί να προκαλέσει αστοχία. Λαμβάνοντας υπόψη την σχέση:  $\frac{d\sigma_3}{d\sigma_1} = \frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi}$  η οποία επαληθεύει την κίνηση του κύκλου Mohr παράλληλα προς την περιβάλλουσα αστοχίας, γωνίας  $\varphi$ , η διάδοση θα μας δώσει (σύμφωνα με τον πίνακα 1):

$$\frac{d\sigma_3}{d\sigma_1} = \frac{0.43\rho gh}{\rho gh} = 0.43 = \frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi}$$

Άρα  $\varphi=23,3$ . Καθώς τα περισσότερα ρήγματα έχουν γωνία τριβής κοντά στις 30 μοίρες, η αστοχία θα προκύψει κατά την μείωση των ενεργών τάσεων. Στην περίπτωση των υπόγειων πετρωμάτων με τάσεις κατάλληλες να προκαλούν ανάστροφα ρήγματα, μια θετική περίοδος διάδοσης θα αύξανε επίσης και τις οριζόντιες ενεργές τάσεις κατά  $0,43 \rho gh$ , και έτσι θα σταθεροποιούσε την κατάσταση. Το αντίστροφο θα ισχύει όταν η στάθμη του ταμιευτήρα χαμηλώνει. Παρομοίως, η περίοδος διάδοσης σε περιβάλλον ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης θα αύξανε το  $\sigma_3$  κατά  $\rho gh$  και το  $\sigma_1$  κατά  $0,43 \rho gh$  έτσι ένα φαινόμενο σταθεροποίησης (Πίνακας 1 d). Η περίοδος μετάδοσης δεν γίνεται αισθητή σε μεγάλα βάθη τα οποία παραμένουν ανεπηρέαστα από τις αλλαγές της πίεσης των πόρων σε όλες τις περιπτώσεις αύξησης του υδροφόρου ορίζοντα σε πετρώματα χαμηλού πορώδους και έτσι δεν υπάρχουν μεταβολές στις κατανομές των τάσεων στα υποκεντρικά βάθη.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Λαμβάνοντας όλα τα παραπάνω υπόψη όλα δείχνουν η σεισμικότητα στη περιοχή των Κρεμαστών προκλήθηκε από την κατασκευή του φράγματος. Η μη ύπαρξη έντονης σεισμικότητας στην περιοχή πριν την ολοκλήρωση της πλήρωσης του ταμιευτήρα, και η έξαρση αυτής μετέπειτα με την ταυτόχρονη παύση των γεγονότων όταν η στάθμη του νερού έφτασε στο μέγιστο οδηγούν στο συμπέρασμα ότι είναι άλλη μια περίπτωση σεισμών προκαλούμενη από φράγματα. Με όλα τα παραπάνω δεδομένα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα αίτια που προκάλεσαν την σεισμικότητα ήταν η αύξηση του υδροφόρου ορίζοντα και η μείωση των ενεργών τάσεων στα ανάστροφα ρήγματα της περιοχής. Όσο για την κατηγοριοποίηση ως προς είδος τα παρακάτω διαγράμματα μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για «Σεισμικότητα ταχείας αντίδρασης» - (Rapid Response).



## **ΕΠΙΛΟΓΟΣ**

Η πρόγνωση των σεισμών είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους στόχους των σεισμολόγων, και όχι μόνο για περισσότερα από 120 χρόνια. Ωστόσο, οι έρευνες για την πρόβλεψη των σεισμών είναι στάσιμες εδώ και αρκετά χρόνια λόγω υπερβολικών αξιώσεων και υπερβολικής κριτικής. Δεν μπορεί να αγνοηθεί ότι λίγοι σεισμοί έχουν προβλεφθεί σωστά. Αυτό που επιδιώκεται να γίνει για την καλύτερη κατανόηση και πρόβλεψη των σεισμών, είναι να διεξάγονται περισσότερα πειράματα και μελέτες στα κατάλληλα φράγματα, τα οποία είναι αυτά που προκαλούν αρκετούς σεισμούς αλλά ταυτόχρονα βρίσκονται και σε περιοχές σχετικά απομονωμένες. Στόχος λοιπόν δεν είναι μόνο η κατασκευή φραγμάτων που δεν θα προκαλούν σεισμούς, κάτι το οποίο δεν είναι απόλυτα εφικτό ακόμα, αλλά η ανεύρεση των ασφαλέστερων περιοχών για την κατασκευή τους. Αυτό σε συνεργασία με την βαθύτερη γνώση των μηχανικών πάνω στους μηχανισμούς και τα χαρακτηριστικά των σεισμών και με την διεξαγωγή ερευνών και πειραμάτων πάνω στα φράγματα αυτά, θα βοηθήσει με τον καιρό σε καλύτερη πρόγνωση των σεισμών που θα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη ευελιξία και ασφάλεια στην κατασκευή φραγμάτων.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

A Review of Recent Studies of Triggered Earthquakes by Artificial Water Reservoirs with Special Emphasis on Earthquakes in Koyna, India by Harsh K. Gupta (2002)

Dams and Earthquakes (Developments in Geotechnical Engineering Book 11) by B. K. Rastogi , H. K. Gupta

Study of the Long-Term Behavior of Kremasta Dam Based on the Analysis of Geodetic Data and Reservoir Level Fluctuations by Stella I. Pytharouli

Earthquakes Related to Reservoir Filling (National Academy Of Sciences January 1972)

Reservoir Induced Earthquakes, Volume 64 by H.K. Gupta

Case Histories of Induced and Triggered Seismicity by A. McGarr, David Simpson, L. Seeber

Earthquakes and Reservoir Loadings by J.P. Rothe (I)