

Υδραυλικές Κατασκευές – Φράγματα

8ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

Φράγματα βαρύτητας

Μέρος Α: Φράγματα σκυροδέματος (CVC, RCC)

Ανδρέας Ευστρατιάδης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2022-23

Στις διαφάνειες έχει χρησιμοποιηθεί φωτογραφικό και άλλο υλικό από εκπαιδευτικές σημειώσεις και διαλέξεις των Ν. Μουτάφη και Π. Παπανικολάου

Λιθόκτιστα φράγματα της αρχαιότητας

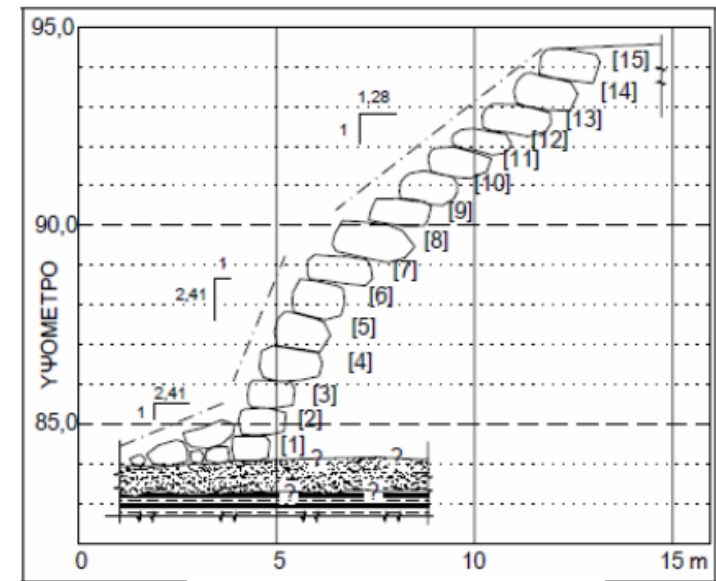


Φράγμα Ασύριου βασιλιά Sennacherib (700 πΧ) στον ποταμό Komai, στο Ιρακ, και σύστημα καναλιών που υδροδοτούσαν την πόλη της Νινευή, σε απόσταση 50 km



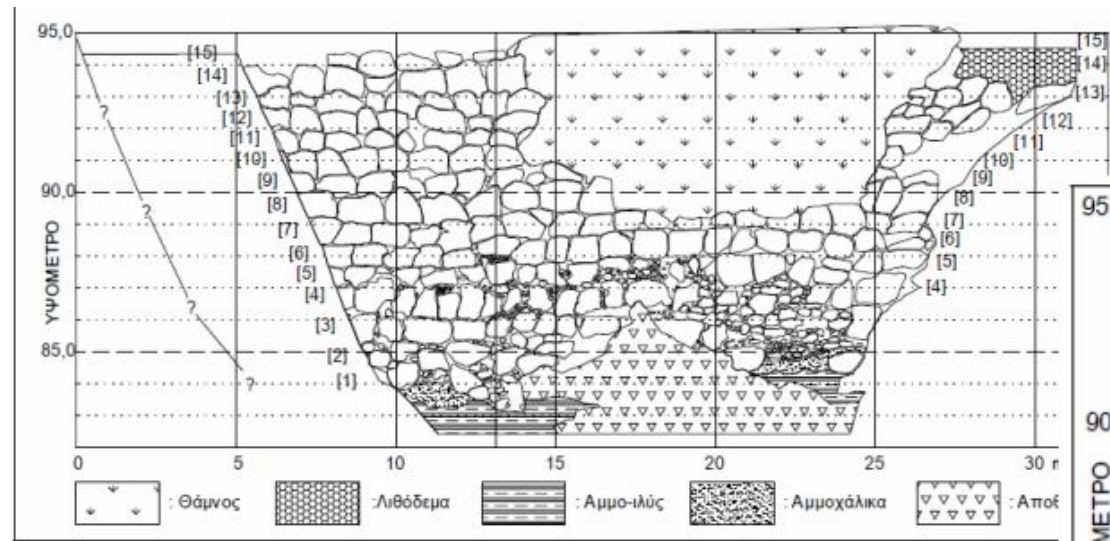
Ρωμαϊκό φράγμα Proserpina (1^{ος} αιώνας μΧ), κοντά στην πόλη Εξτραμαδούρα – έργο σε λειτουργία

Το αρχαίο φράγμα της Αλυζίας (Αιτωλοακαρνανία)



Τυπική διατομή

- Λιθόθετο, με 15 στρώσεις λίθων, μήκους στέψης 25 m και μέγιστου ύψους 11 m.
- Άριστα διατηρημένο για πάνω από 2000 χρόνια, λόγω της διαμόρφωσης υπερχειλιστή στην ασβεστολιθική μάζα του αριστερού αντερείσματος
- Πιθανόν κατασκευάστηκε για τη συγκράτηση φερτών



Φωτογραμμετρική αποτύπωση κατόπτη παρειάς

Ιστορικό των διαφόρων τύπων φραγμάτων

- ❑ Η εφεύρεση του τσιμέντου τύπου Portland (1892) άλλαξε τις πρακτικές κατασκευής φραγμάτων και άρχισε η χρήση σκυροδέματος.
- ❑ Το πρώτο ήμισυ 20ου αιώνα τα φράγματα από συμβατικά συμπυκνούμενο σκυρόδεμα αντικατέστησαν τα λιθόκτιστα στο δυτικό κόσμο, ενώ συνεχίστηκε η κατασκευή κτιστών φραγμάτων στις χώρες με φτηνά εργατικά.
- ❑ Μέχρι το 1930, περίπου 50% των φραγμάτων εξακολουθούσαν να είναι λιθόκτιστα.
- ❑ Η αλματώδης ανάπτυξη των χωματουργικών μηχανημάτων μετά το 1940 επέφερε σταδιακή μείωση των νέων φραγμάτων βαρύτητας και σταδιακή κυριαρχία των γεωφραγμάτων.
- ❑ Από τη δεκαετία του 1980 ξεκίνησε η εκτεταμένη χρήση χωματουργικών μηχανημάτων σε φράγματα βαρύτητας, με εφαρμογή της τεχνολογίας του κυλινδρούμενου σκυροδέματος (RCC), και ταχεία εκτόπιση του συμβατικά συμπυκνούμενου σκυροδέματος.
- ❑ Σήμερα, πρακτικά όλα τα φράγματα βαρύτητας κατασκευάζονται από RCC ή από σκληρό επίχωμα.



Φράγμα Καμάρες (Σίφνος), εν μέρει λιθόκτιστο

Και λίγη ακόμα ιστορία ...

THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF DAMS

INCLUDING
MASONRY, EARTH, ROCK-FILL, TIMBER,
AND STEEL STRUCTURES

ALSO
THE PRINCIPAL TYPES OF MOVABLE DAMS

BY
EDWARD WEGMANN, C.E.

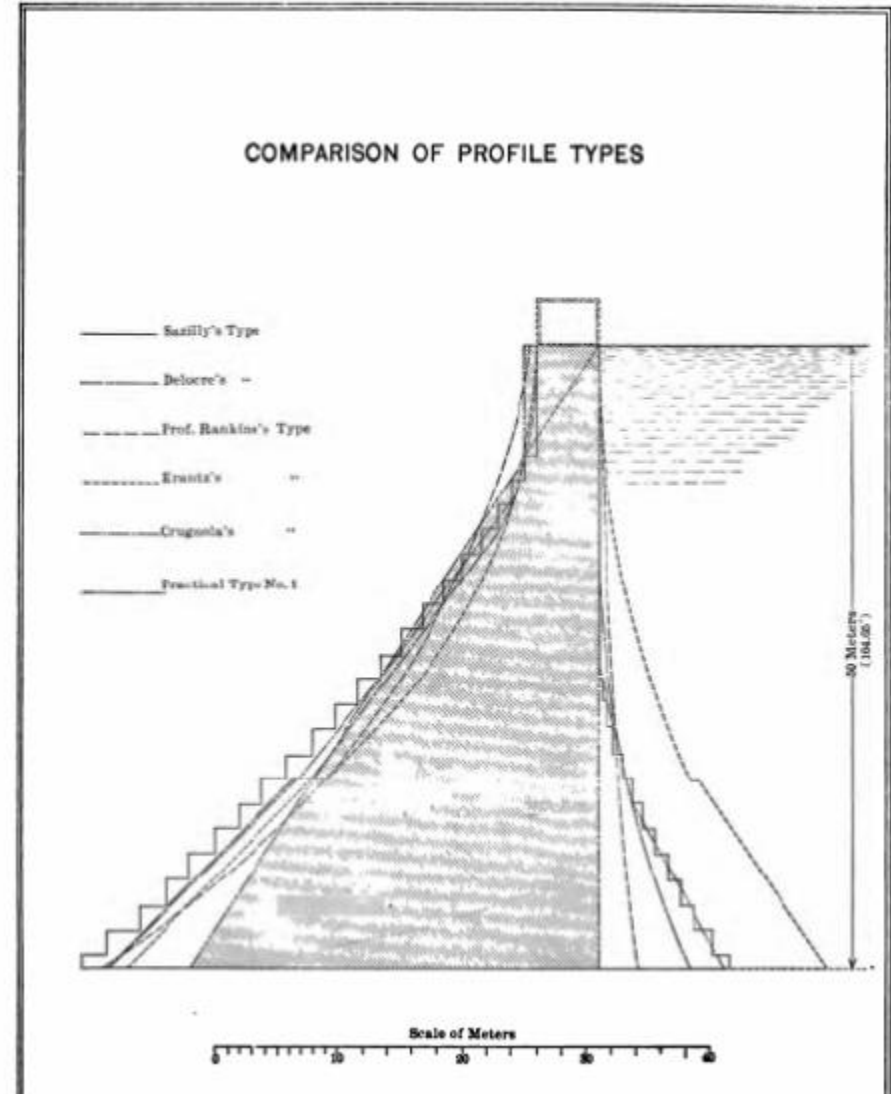
M. AM. SOC. C. E.

Author of "The Water-Supply of the City of New York, 1658-1895"

FIFTH EDITION, REVISED AND ENLARGED
FIRST THOUSAND

NEW YORK
JOHN WILEY & SONS
LONDON: CHAPMAN & HALL, LIMITED
1908

PLATE A.

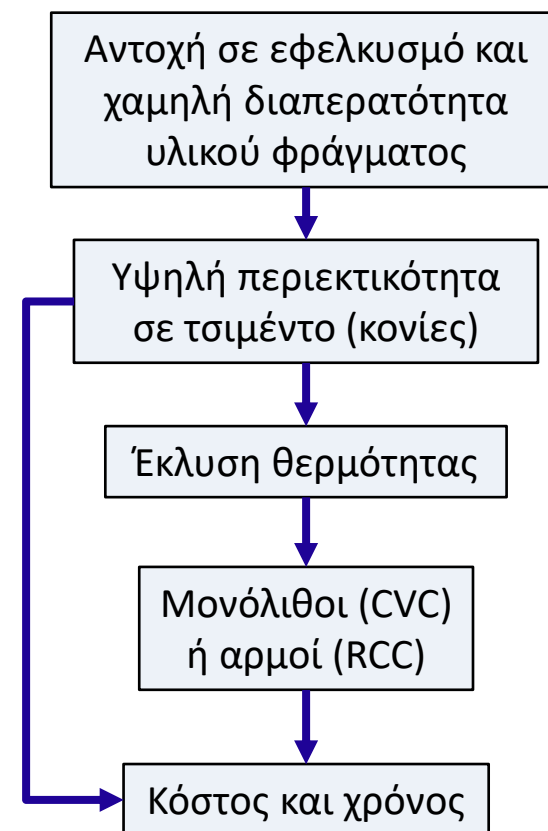


Φράγματα βαρύτητας

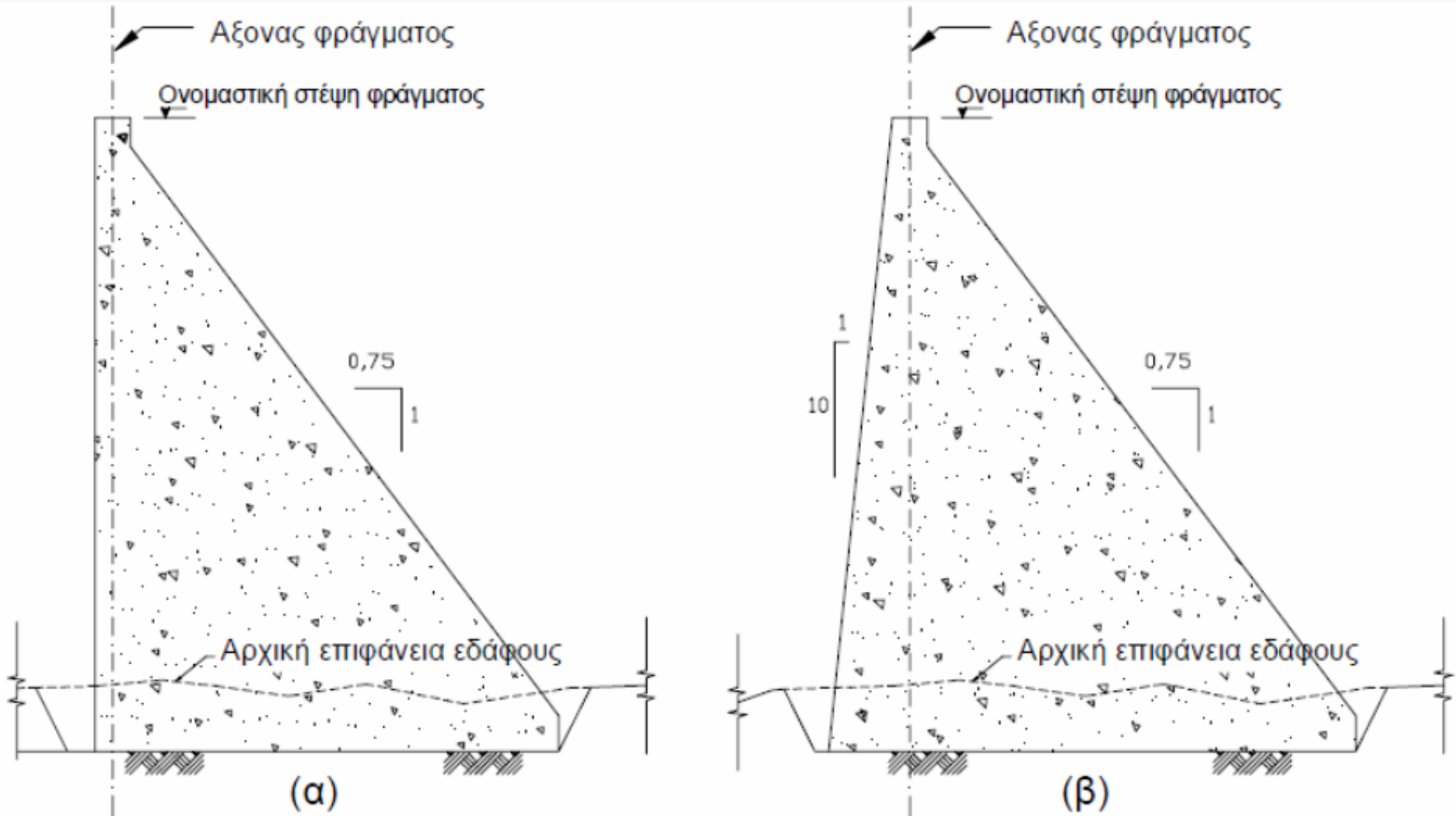
- Ονομάζονται έτσι λόγω του καθοριστικού ρόλου που παίζει το **ίδιο βάρος του φράγματος** στη λειτουργία τους. Ειδικότερα:
 - Αντιστέκονται στην **ολίσθηση**, λόγω της ανάπτυξης δυνάμεων τριβής στο σώμα, καθώς και συνάφειας του υλικού του φράγματος με τη θεμελίωση του (οι τριβές αναπτύσσονται από την κατακόρυφη συνιστώσα του βάρους του φράγματος).
 - Αντιστέκονται στην **ανατροπή**, λόγω των σταθεροποιητικών ροπών που αναπτύσσονται από το βάρος του.
- Τύποι φραγμάτων βαρύτητας:
 - Συμπαγή
 - Λιθόκτιστα (masonry)
 - Συμβατικού δονούμενου σκυροδέματος (Conventional Vibrated Concrete, CVC)
 - Κυλινδρούμενου σκυροδέματος (Roller Compacted Concrete, RCC)
 - Υψηλής περιεκτικότητας σε κονίες (High paste)
 - Ισχνού σκυροδέματος (Lean Concrete)
 - Αξονοσυμμετρικά Κυλινδρούμενου Σκληρού Επιχώματος, ΑΚΣΕ (Hardfill)
 - Αντηρηδωτά (buttress dams)
- Τοξωτά φράγματα (arch dams)
 - Μεταφορά φορτίων νερού στα αντερείσματα, όχι στο έδαφος

Φράγματα βαρύτητας: Βασικές αρχές σχεδιασμού

- Ελαχιστοποίηση όγκου → μείωση κόστους → απότομες παρειές φράγματος.
- Τυπικές διατομές φραγμάτων βαρύτητας:
 - Φράγματα από λιθόδεμα, σκυρόδεμα, RCC και ισχνό RCC:
 - Ανάντη παρειά: κατακόρυφη ή παρακατακόρυφη (ενδεικτική κλίση 1:10)
 - Κατάντη παρειά: τυπική κλίση 0.75 ή 0.80:1 (οριζόντιο/κατακόρυφο)
 - Φράγματα σκληρού επιχώματος: συνήθως αξονοσυμμετρικά, με τυπική κλίση 0.70:1
- Βελτίωση ευστάθειας, με τη διαμόρφωση σύνθετων κλίσεων στην ανάντη ή/και κατάντη παρειά.
- Έλεγχοι:
 - Έλεγχος ανατροπής
 - Έλεγχος ολίσθησης
 - Έλεγχος τάσεων
- Απαίτηση **αντοχής υλικού** σε θλίψη και εφελκυσμό υψηλότερη από τις αναπτυσσόμενες τάσεις.
- Απαιτήσεις **στεγανότητας**:
 - Υλικά χαμηλής διαπερατότητας
 - Απουσία ρωγμών
 - Ελεγχόμενη αποστράγγιση (στοές)

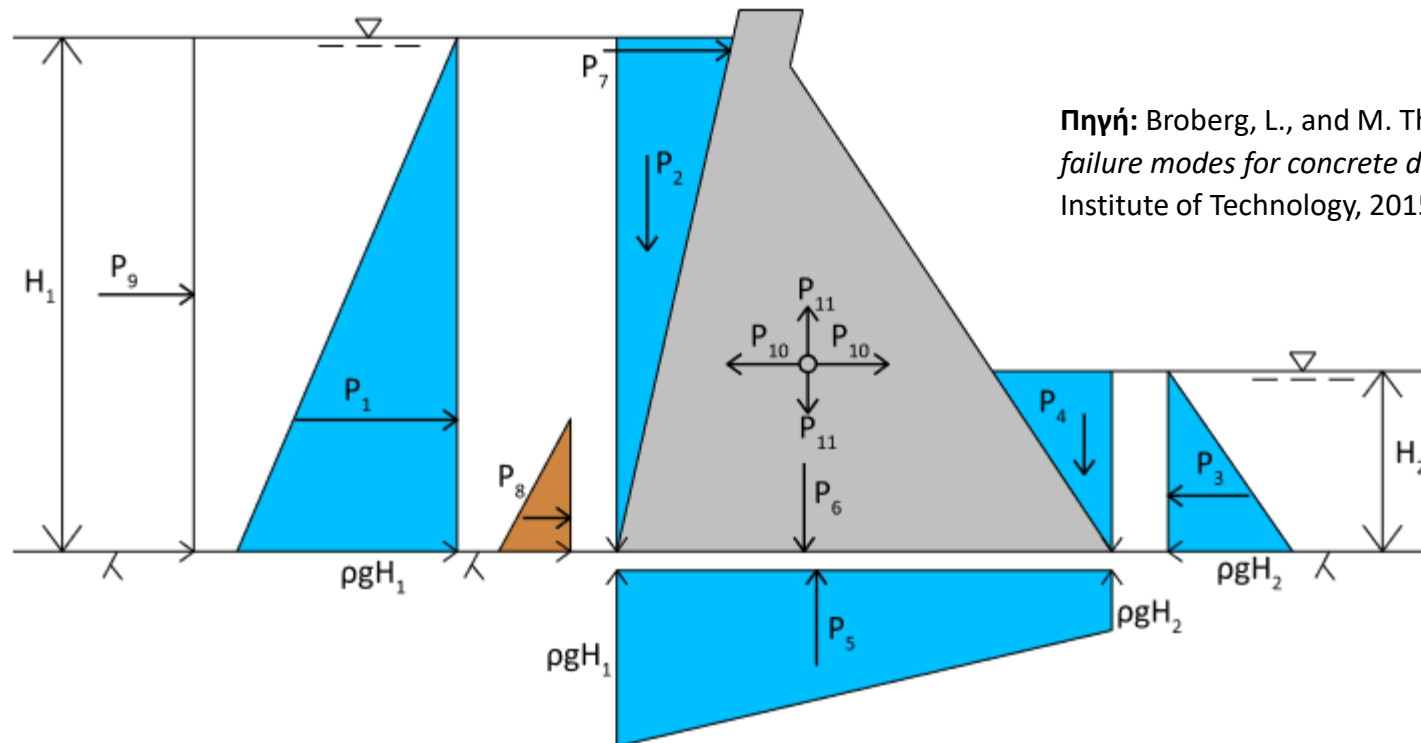


Τυπική διατομή φράγματος βαρύτητας από σκυρόδεμα, λιθόδεμα ή RCC



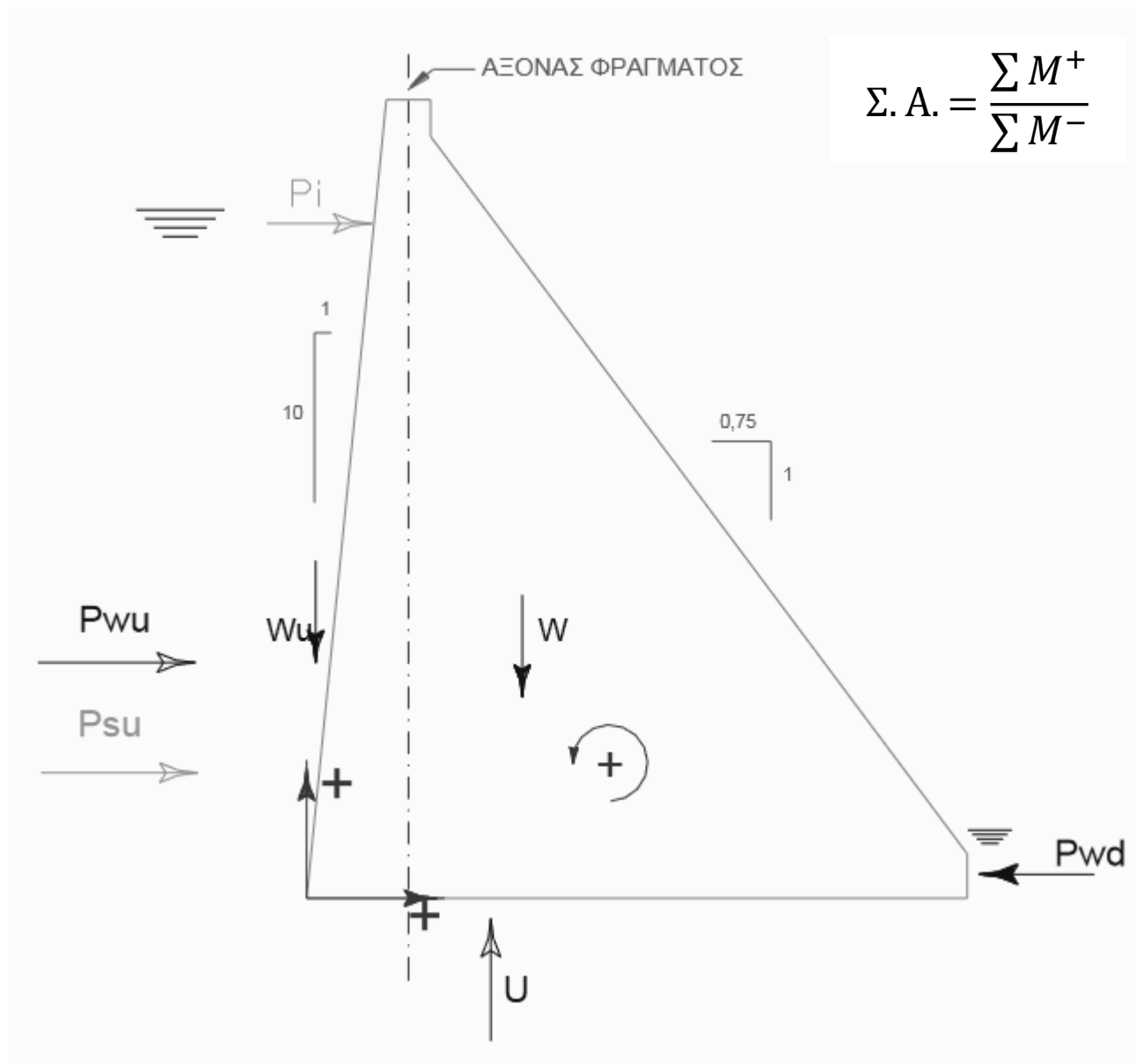
Ανάλυση δυνάμεων σε φράγματα βαρύτητας

- Υδροστατικές πιέσεις ανάντη (P_1) και κατόντη (P_3) → εξαρτώνται από τη στάθμη του νερού
- Ίδια βάρη νερού (P_3-P_4) και φράγματος (P_6) → βελτίωση ευστάθειας με εφαρμογή κλίσεων
- Ανωστικές πιέσεις (P_5) → διαμόρφωση στεγανώσεων και αποστραγγίσεων
- Πιέσεις λόγω πάγου ή επιπλεόντων υλικών (P_7)
- Πιέσεις λόγω αποθέσεων φερτών (P_8)
- Υδροδυναμικά φορτία λόγω σεισμού (P_9)
- Οριζόντια και κατακόρυφα σεισμικά φορτία ($P_{10}-P_{11}$)

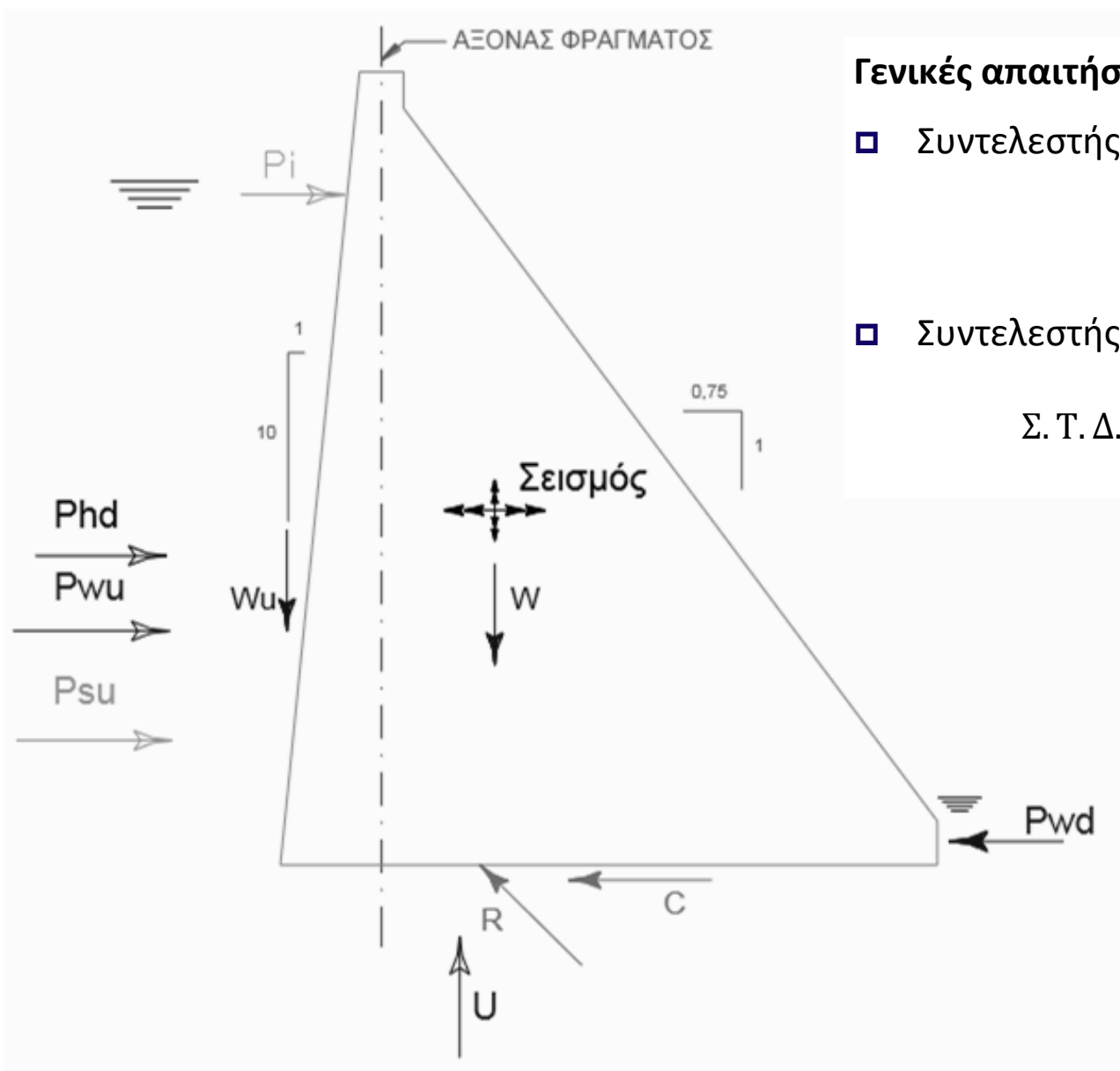


Πηγή: Broberg, L., and M. Thorwid, *Evaluation of failure modes for concrete dams*, KTH Royal Institute of Technology, 2015.

Έλεγχος ανατροπής



Έλεγχος ολίσθησης



Γενικές απαιτήσεις:

- Συντελεστής ολίσθησης < 0.75

$$\Sigma. O. = \frac{\Sigma H}{\Sigma V}$$

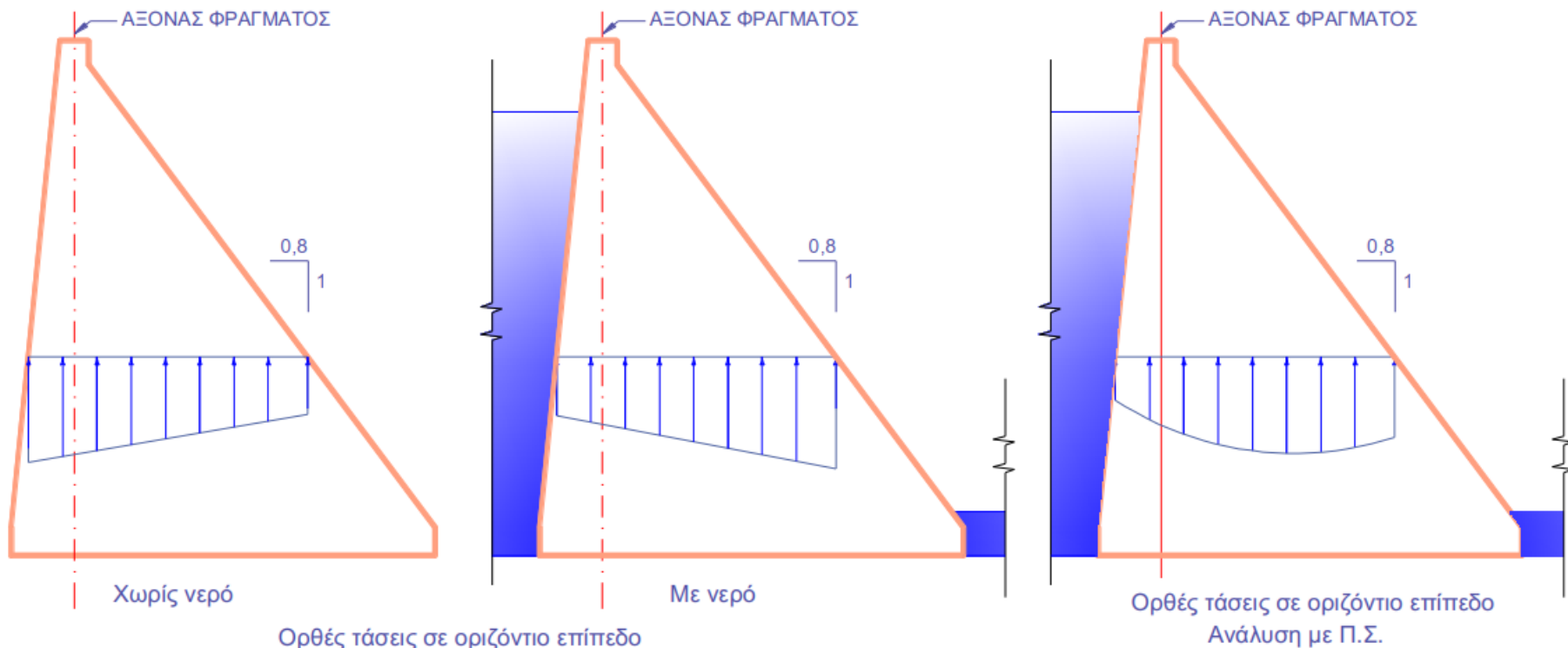
- Συντελεστής τριβής διάτμησης > 3 ως 4

$$\Sigma. T. \Delta. = \frac{c A + \Sigma V \tan \varphi}{\Sigma H}$$

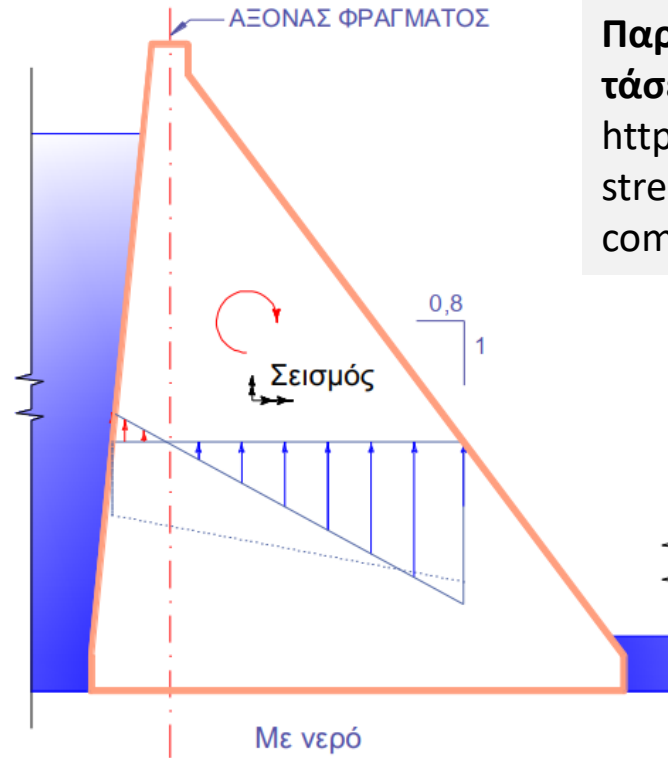
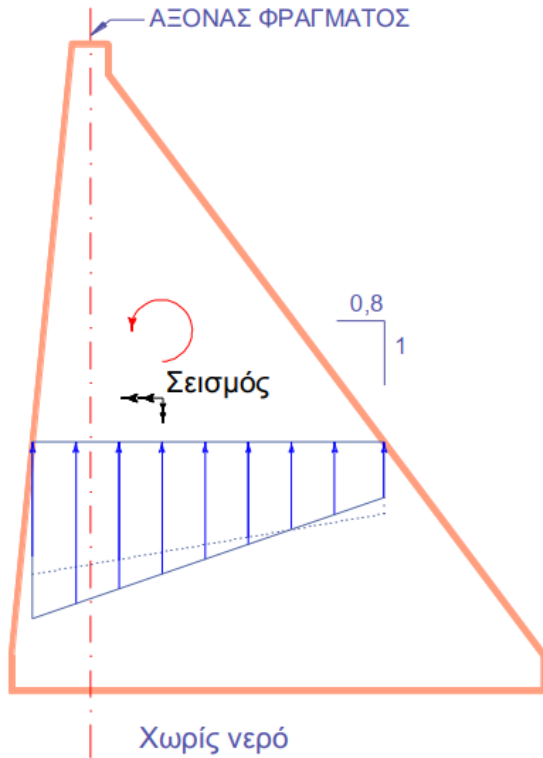
Έλεγχος ορθών τάσεων σε οποιοδήποτε οριζόντιο επίπεδο φράγματος βαρύτητας (χωρίς σεισμό)

- Για όλα τα φράγματα βαρύτητας συμβατικού ή κυλινδρούμενου σκυροδέματος:
 - Εφελκυστικές τάσεις μη επιτρεπτές
 - Θλιπτικές τάσεις κατά πολύ μικρότερες από τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

$$\sigma_z = \frac{\sum V}{A} \pm \frac{\sum M y'}{I}$$

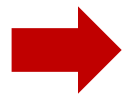


Έλεγχος ορθών τάσεων σε οποιοδήποτε οριζόντιο επίπεδο φράγματος βαρύτητας (με σεισμό)



Παράδειγμα υπολογισμού τάσεων σε φράγμα βαρύτητας:
<https://mathalino.com/reviewer/strength-materials/problem-911-combined-axial-and-bending>

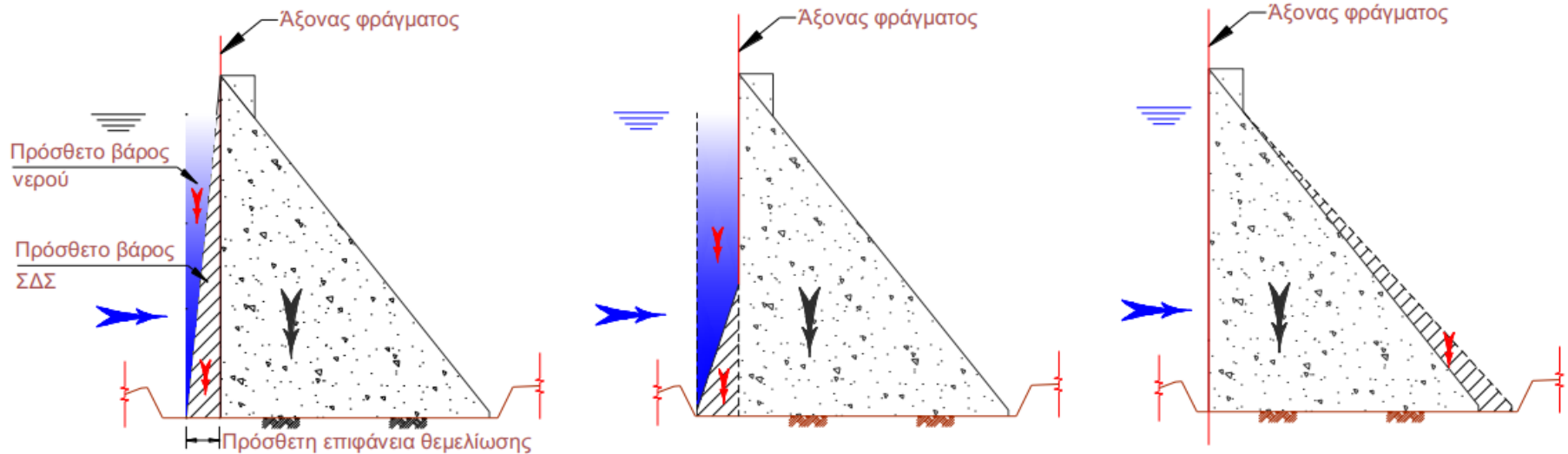
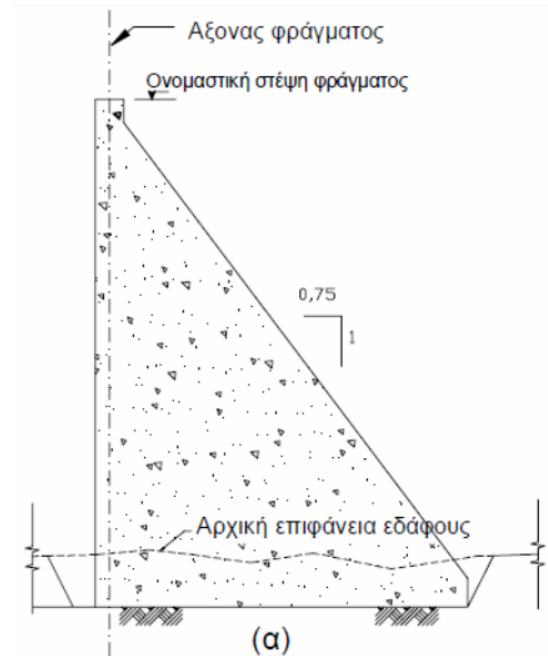
Ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας (ΣΑ) ως προς τις θλιπτικές τάσεις



Συνδυασμοί φόρτισης	ΣΑ σκυροδέματος	ΣΑ βράχου
Συνήθεις	3.0	4.0
Σπάνιοι	2.0	2.7
Ακραίοι	1.0	1.3

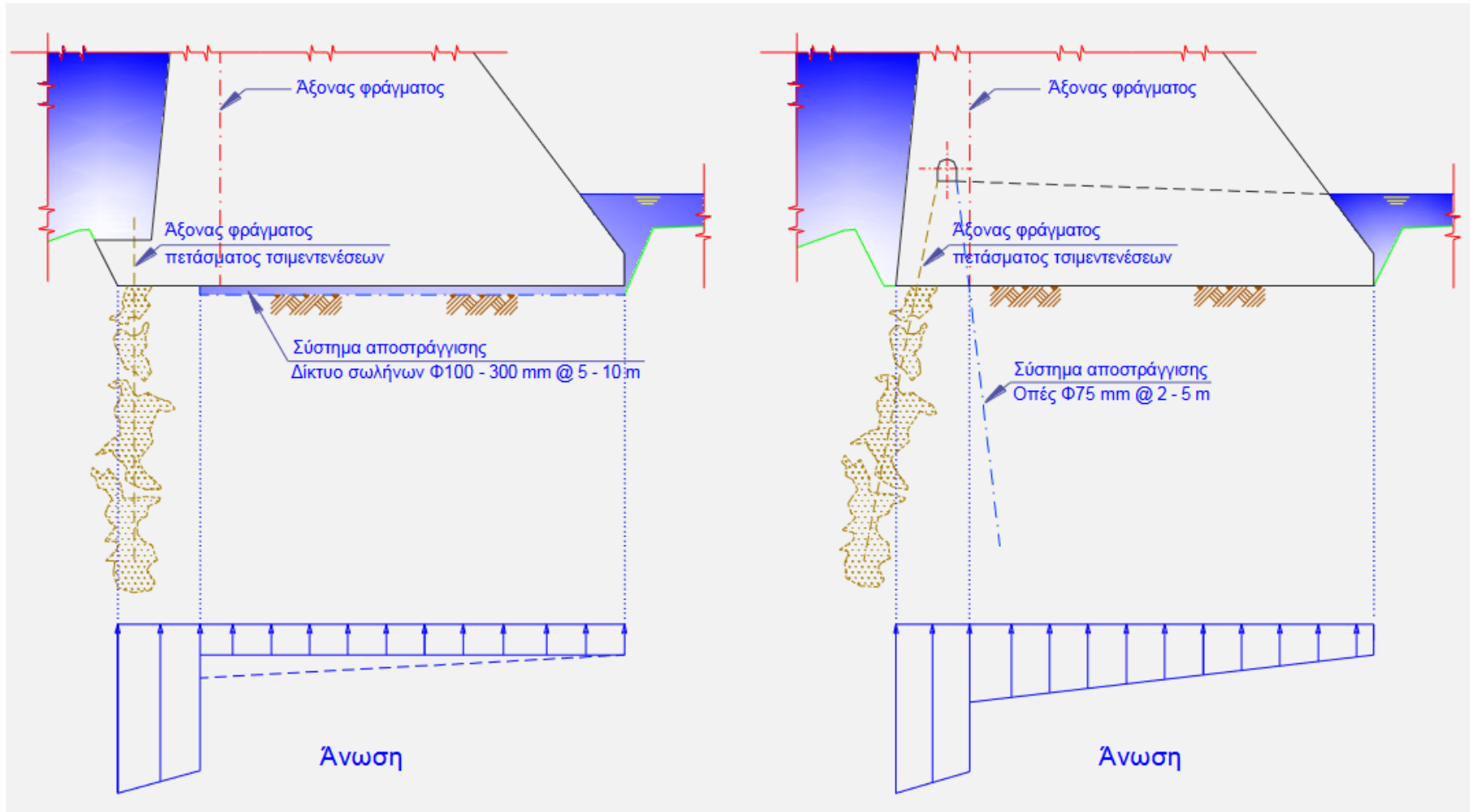
Βελτίωση συνθηκών ευστάθειας φραγμάτων βαρύτητας

- Αρχική διαμόρφωση: κατακόρυφη ανάντη παρειά
- Βελτιωμένη διαμόρφωση:
 - Πρόσθετη επιφάνεια θεμελίωσης
 - Διαμόρφωση ανάντη παρειάς με μικρή κλίση (σε όλο το ύψος ή το κάτω τμήμα του)
 - Πρόσθετο βάρος νερού
 - Πρόσθετο βάρος σώματος φράγματος
 - Διαμόρφωση κατάντη παρειάς με λίγο πιο ήπια κλίση (πρόσθετο βάρος φράγματος)



Αποστράγγιση φραγμάτων βαρύτητας

- ❑ Πετάσματα τσιμεντέσεων, κοντά στην ανάντη παρειά
- ❑ Αποστραγγιστικές στοές
- ❑ Δίκτυο σωληνώσεων στον πυθμένα



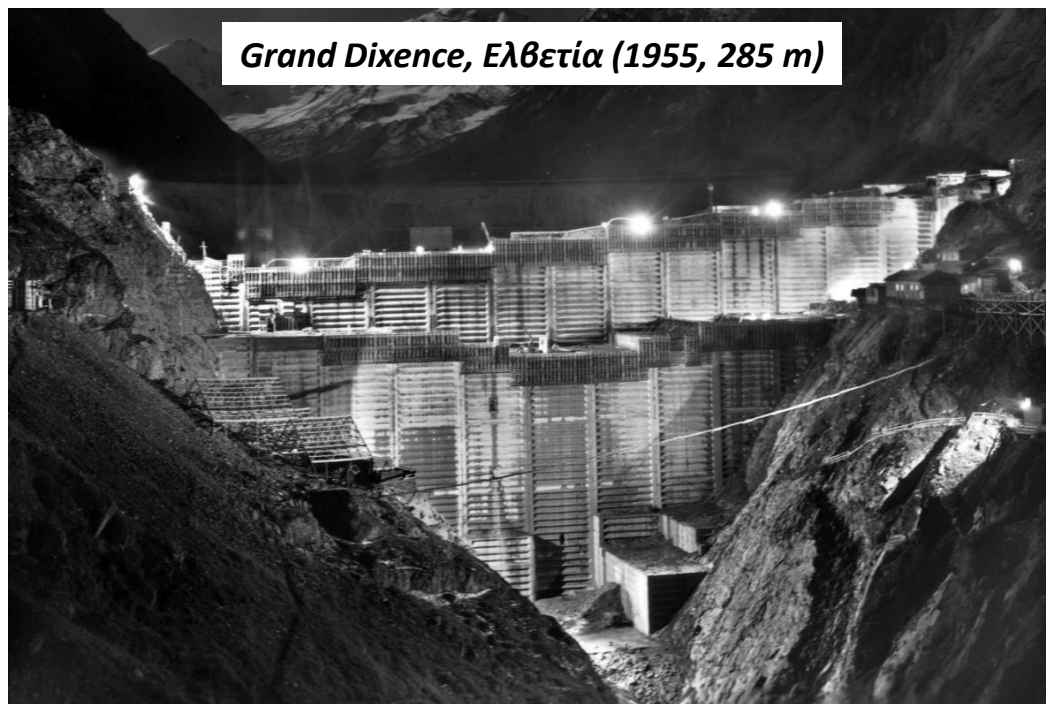
Τοποθέτηση υπερχειλιστών σε φράγματα βαρύτητας

- Φράγματα βαρύτητας/σκυροδέματος: **υπερχειλιστής πάνω στο σώμα του φράγματος**
- Πλεονεκτήματα:
 - Μεγαλύτερο διαθέσιμο μήκος για τη στέψη του υπερχειλιστή → μικρότερο υδραυλικό φορτίο → χαμηλότερη ανώτατη στάθμη πλημμύρας → μικρότερο ύψος φράγματος
 - Αποφεύγονται πρόσθετες εκσκαφές και σκυροδέματα για την κατασκευή των υπερχειλιστών στα αντερείσματα → δραστική μείωση κόστους
 - Ευνοϊκός προσανατολισμός των έργων υπερχείλισης και αποτόνωσης της ενέργειας, ως προς την κοίτη του ποταμού
 - Δυνατότητα αποτόνωσης σημαντικού ποσοστού της ενέργειας της πλημμύρας, πάνω στο κατάντη πρανές του φράγματος (βαθμιδωτή κατασκευή)
- Μειονεκτήματα:
 - Αποτόνωση ενέργειας πλημμύρας κοντά στον κατάντη πόδα θεμελίωσης του φράγματος → κίνδυνος υποσκαφής
 - Χρονική εξάρτηση κατασκευής φράγματος και υπερχειλιστή
 - Περιορισμοί στη θέση τοποθέτησης του σταθμού παραγωγής (υδροηλεκτρικά φράγματα)



Φράγματα συμβατικά δονούμενου σκυροδέματος (Conventional Vibrated Concrete, CVC)

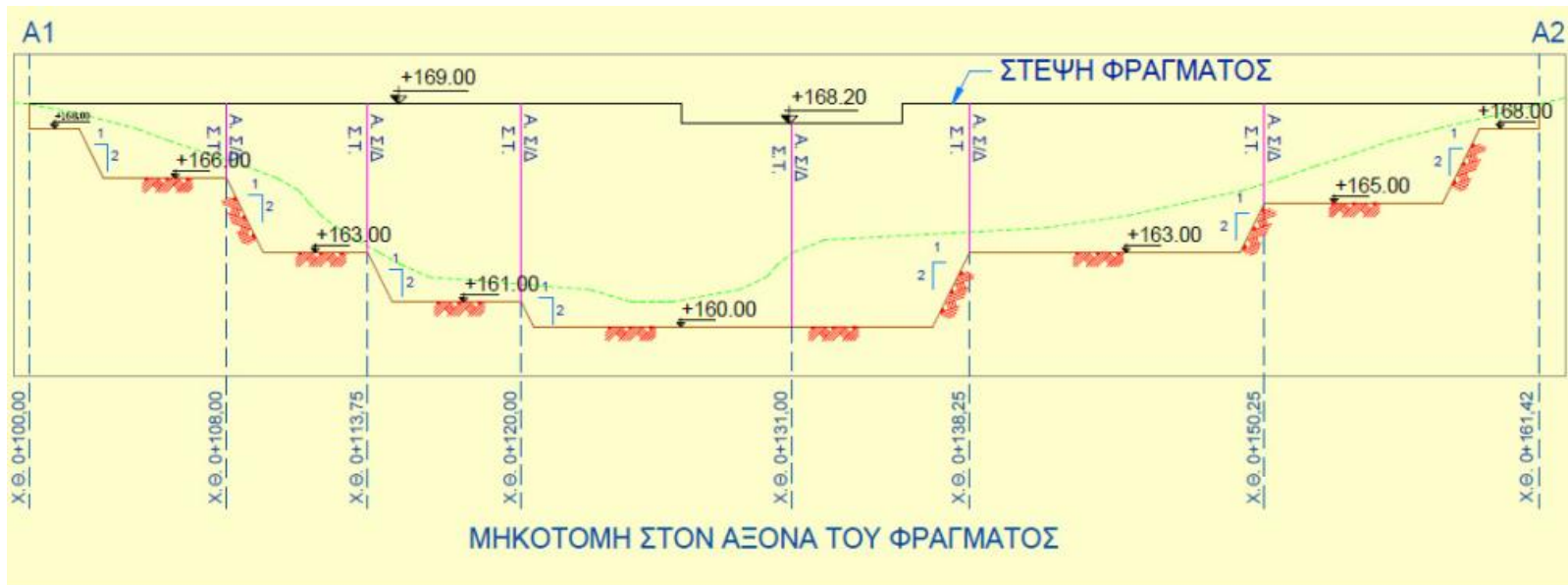
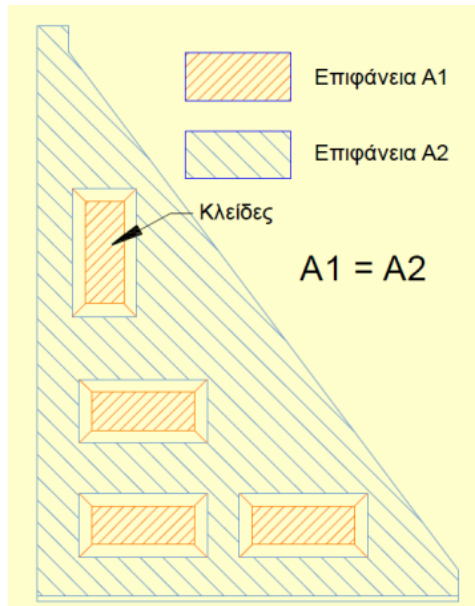
- ❑ Υλικό: **άοπλο σκυρόδεμα**, μεγάλου όγκου χονδρόκοκκων αδρανών (ειδική περίπτωση: κυκλώπειο σκυρόδεμα), σχετικά μικρής περιεκτικότητας σε τσιμέντο.
- ❑ Επίτευξη **χαμηλής υδατοδιαπερατότητας** (συντελεστής διαπερατότητας $\sim 10^{-8}$ cm/sec) με κατάλληλο σχεδιασμό και συντήρηση του σκυροδέματος.
- ❑ Διαμόρφωση **ανεξάρτητων μονόλιθων**, που συνδέονται με **κλείδες**, και διαχωρίζονται με **κατακόρυφους αρμούς**, ενώ ανάλογα με την τεχνική κατασκευής δημιουργούνται αναπόφευκτα και **διαμήκεις αρμοί**.
- ❑ Οι κατακόρυφοι και διαμήκεις αρμοί αποτελούν τις **ασθενείς περιοχές** στο σώμα του φράγματος.
- ❑ **Βαθμιδωτή εκσκαφή**: μονόλιθοι, αρμοί συστολο-διαστολής (Σ/Δ).
- ❑ Βασικός έλεγχος: επιπτώσεις **εξωθερμικής αντίδρασης τσιμέντου**
- ❑ Η εφαρμογή φραγμάτων CVC έχει πρακτικά διακοπεί λόγω κόστους, χρόνου κατασκευής και των απαιτήσεων σε εξειδικευμένο εξοπλισμό και εργατικό δυναμικό.



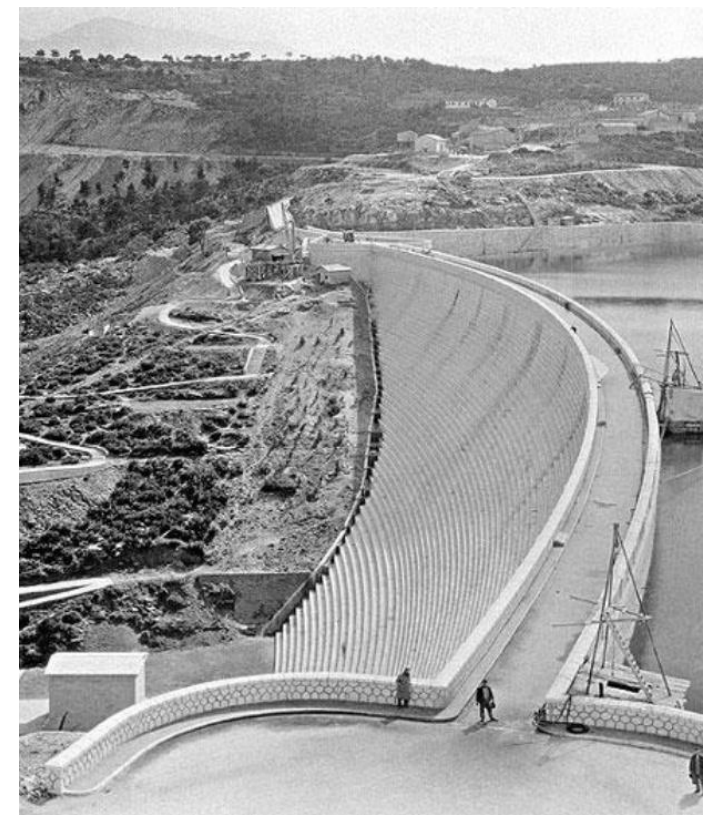
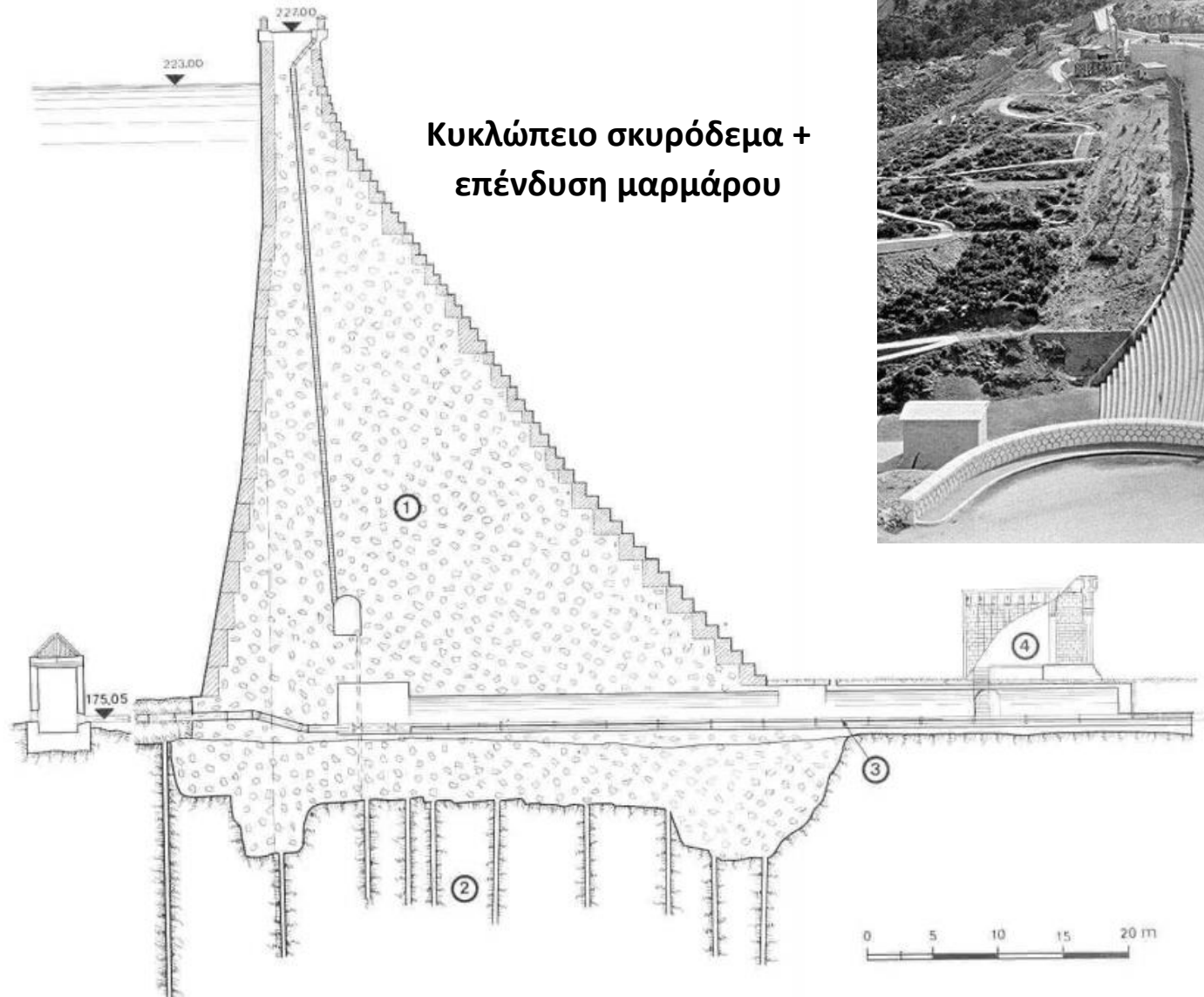
Grand Dixence, Ελβετία (1955, 285 m)

Πηγή: <https://www.atlasofplaces.com/architecture/barrage-de-la-grande-dixence/>

Κατασκευαστικά στοιχεία: μονόλιθοι, αρμοί, κλείδες



Φράγμα Μαραθώνα (1931)



Φράγματα σκυροδέματος χαμηλού ύψους

- ❑ Έργα ορεινής υδρονομίας, για αντιπλημμυρική προστασία και συγκράτηση φερτών.
- ❑ Μικρά έργα ταμίευσης, για εξυπηρέτηση τοπικών χρήσεων νερού.



Φράγμα Ιωαν. Μουτάφη, Στύψη, Λέσβος



Αστοχίες μικρών φραγμάτων από σκυρόδεμα



- ❑ Επιλογή όχι του πλέον ενδεδειγμένου τύπου φράγματος και υπεκτίμηση της αντοχής του
- ❑ Εκτεταμένες ζώνες υλικού εδαφικής δομής στην κοίτη και τα αντερείσματα
- ❑ Θεμελίωση φράγματος βαρύτητας σε υλικά εδαφικής δομής, άρα και μειωμένης αντοχής
- ❑ Ανεπαρκής αντοχή υλικών φράγματος (διαμόρφωση τμημάτων του φράγματος με λιθορριπή και όχι λιθόκτιστο)
- ❑ Λανθασμένοι χειρισμοί (έμφραξη αγωγού εκτροπής πριν από την ολοκλήρωση του φράγματος και ιδιαίτερως κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου).

Πηγή: Μουτάφης, Ν. Ι., Αστοχίες και ατυχή συμβάντα Ελληνικών φραγμάτων, 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων με Διεθνή Συμμετοχή και Έκθεση Υλικών, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Λάρισα, 2008.

Από το συμβατικό στο κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (Roller Compacted Concrete, RCC)

- ❑ Υλικά: αδρανή, νερό και υδραυλικές κονίες (τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα, ποζολάνη, σκωρίες)
- ❑ Βασική κατασκευαστική λογική:
 - Χρήση εξοπλισμού και μεθόδων που εφαρμόζονται σε χωματοουργικές εργασίες
 - Συνεχής μεταφορά υλικών (π.χ. μεταφορικές ταινίες)
 - Διάστρωση σε παρα-οριζόντιες στρώσεις, πάχους 30 cm
 - Συμπύκνωση με διελεύσεις δονητικού κυλινδρο-συμπυκνωτή
 - Έλεγχος συμπύκνωσης
- ❑ Τύποι ποζολάνης:
 - Ιπτάμενη τέφρα υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο (Class C)
 - Ιπτάμενη τέφρα χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο (Class F)
 - Φυσικές ποζολάνες (Class N)
- ❑ Πλεονεκτήματα:
 - Πολύ υψηλή ταχύτητα κατασκευής
 - Αποφυγή χρήσης ξυλοτύπων και οπλισμού
 - Ελαχιστοποίηση απαιτήσεων ψύξης και δόνησης συμβατικού σκυροδέματος
 - Δυνατότητες χρήσης παραπροϊόντων της βιομηχανίας, όπως ιπτάμενες τέφρες, σκωρίες ή φυσικές ποζολάνες, με παράλληλη μείωση της χρήσης τσιμέντου

Φράγματα RCC: Ιστορικό



Alpe Gera, Ιταλία (1964, ύψος 174 m, θεωρείται ως ο πρόδρομος των φραγμάτων RCC)



Saco Nova Olinda, Βραζιλία (1985, ύψος 56 m, το πρώτο τοξωτό φράγμα RCC στον κόσμο)



Willow Creek, Όρεγκον (52 m, κατασκευάστηκε σε <5 μήνες, το πρώτο μεγάλο φράγμα εξ ολοκλήρου με RCC)



Κατηγοριοποίηση φραγμάτων RCC

Table 18.1 Classification of RCC for dams.

Type of the mixture	Low-cementitious	High-cementitious	Medium-cementitious	RCD (used in Japan)
Cementitious content (cement + pozzolan [kg/m^3])	<99	>150	100–149	120–130
Pozzolan content [% mass of cementitious material]	0–40	30–80	20–60	20–35
Compressive strength [MPa]	5–15	17.5–31.5	11–21	

Table 18.2 Average mixture proportions of the different design philosophies of RCC, based on data of constructed dams up to 2010 (after Dunstan, 2012).

Material Type of the mixture	Cement (c) [kg/m^3]	Pozzolan (p) [kg/m^3]	Total (c+p) [kg/m^3]	Water (w) [kg/m^3]	w/(c+p) [ratio]
Low-cementitious	68	11	79	123	1.55
High-cementitious	88	108	196	110	0.56
Medium-cementitious	77	40	117	116	0.99
RCD (used in Japan)	86	36	122	94	0.77
Hard-fill	60	13	73	135	1.86

Πηγή: Tanchev, L, *Dams and Appurtenant Hydraulic Structures*, 2nd edition, Taylor & Francis, doi:10.1201/b16672, 2014.

Στοιχεία σχεδιασμού φραγμάτων RCC υψηλής περιεκτικότητας σε κονίες (High-paste)

- ❑ Διαμόρφωση κατακόρυφης ή τεθλασμένης ανάντη παρειάς.
- ❑ Δεν απαιτείται στεγάνωση, καθώς το σώμα του φράγματος είναι αδιαπέρατο.
- ❑ Η διάστρωση και συμπύκνωση γίνεται χωρίς διακοπή, σε στρώσεις των 30 cm.
- ❑ Αντέχουν ισχυρές σεισμικές καταπονήσεις, γιατί έχουν τη δυνατότητα ανάληψης και εφελκυστικών τάσεων.
- ❑ Απαιτείται αυστηρός ποιοτικός έλεγχος των υλικών και των μεθόδων κατασκευής.
- ❑ Απαιτείται λεπτομερής θερμική μελέτη για τον καθορισμό του αριθμού των αρμών συστολής-διαστολής (π.χ., με τοποθέτηση μεταλλικών πλακών, βλ. φωτογραφία)
- ❑ Επιβάλλονται περιορισμοί στη θερμοκρασία του μίγματος (π.χ., Πλατανόβρυση: $T_{max} = 13^{\circ}C$, $T_{min} = 5^{\circ}C$, με χρήση πάγου).

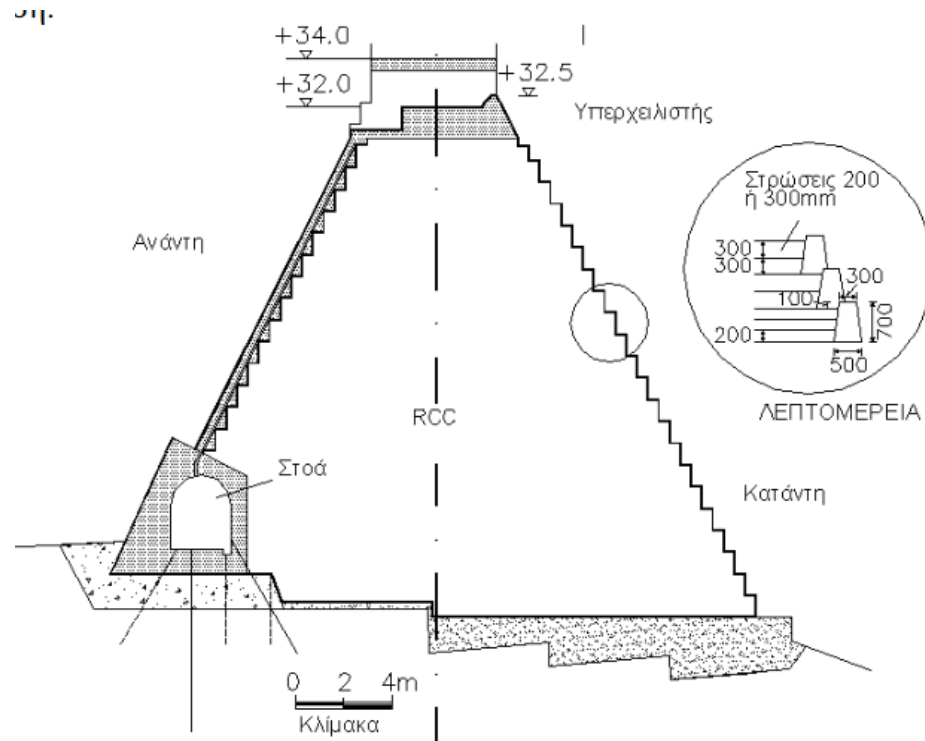
Είδη και συνθέσεις σκυροδεμάτων φραγμάτων High-paste RCC

Τύπος	Νερό	Τσιμέντο Portland I-45	Ποζολάνη ή τέφρα	Λεπτόκοκκα αδρανή	Χονδρόκοκκα αδρανή
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
RCC	128	50	225	607	1350
Leveling	187	100	225	676	1057
Facing	173	140	175	753	957



Φράγματα ισχνού RCC

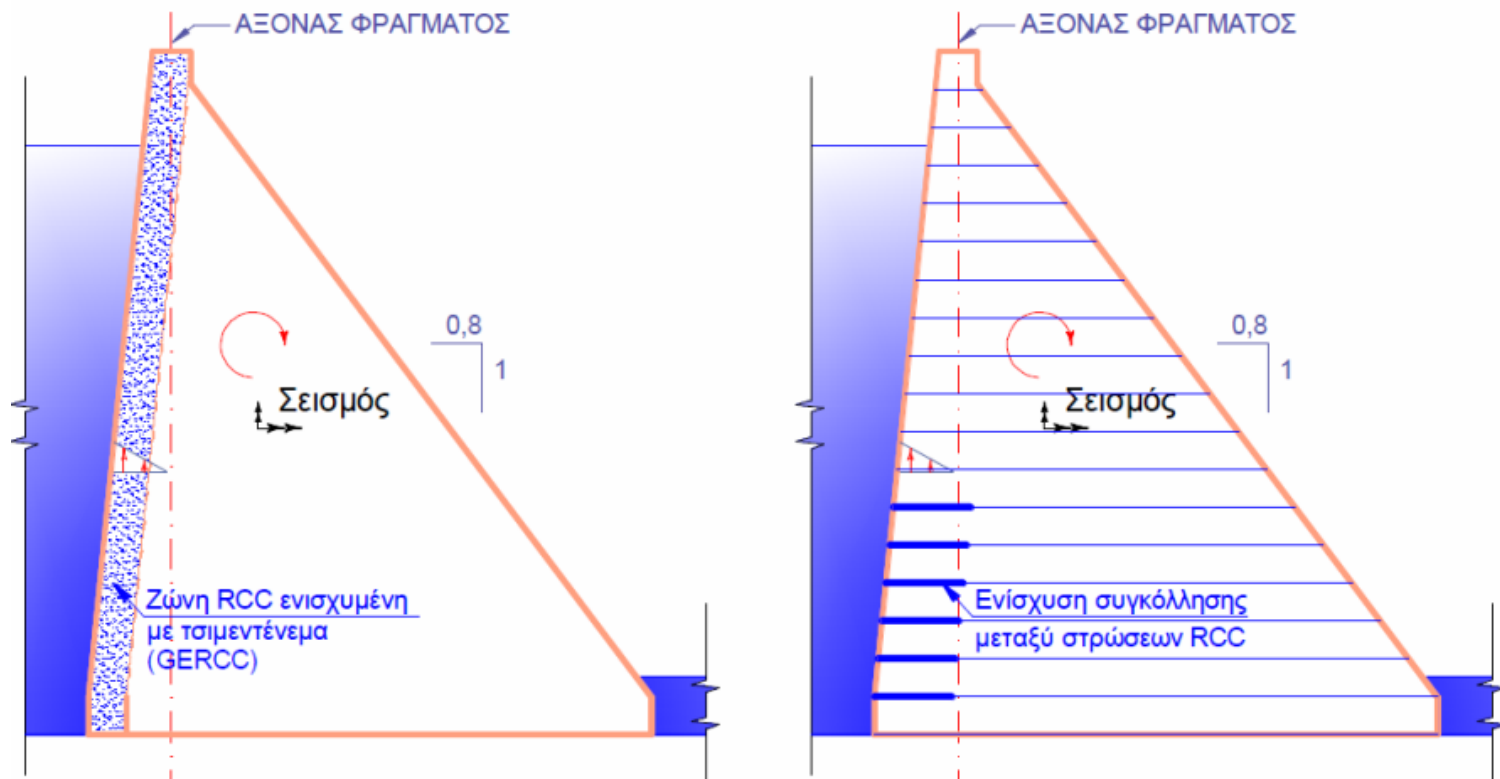
- ❑ Συχνά διαμορφώνονται με **συμμετρική διατομή**, και απαιτούν την τοποθέτηση **στεγανωτικού στοιχείου** ανάντη (π.χ. πλάκα σκυροδέματος).
- ❑ Οι κατακόρυφες τάσεις στο σώμα του φράγματος και στη θεμελίωσή του είναι μικρές και σχεδόν ομοιόμορφες για οποιοδήποτε ύψος νερού.
- ❑ Δεν απαιτείται αντοχή του RCC σε εφελκυσμό, γιατί δεν αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις στο σώμα του φράγματος, ακόμα και σε ισχυρό σεισμό.
- ❑ Οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις είναι μικρές.
- ❑ Δεν απαιτείται δαπανηρή προετοιμασία της επιφάνειας του RCC πριν την τοποθέτηση της επόμενης στρώσης, σε περίπτωση που δημιουργηθεί «ψυχρός αρμός» λόγω παρατεταμένης διακοπής των διάστρωσης και συμπύκνωσης του RCC.
- ❑ Λόγω της μικρής περιεκτικότητας του RCC σε τσιμέντο, οι αναπτυσσόμενες τάσεις λόγω θερμοκρασίας είναι σημαντικά μικρότερες σε σχέση με τα High-paste RCC.
- ❑ Το ισχνό RCC είναι υλικό λιγότερο ψαθυρό, περιορίζοντας τον κίνδυνο ρηγματώσης.



Τυπική διατομή φράγματος Μαραθιάς Μυκόνου (1991, ύψος 28 m)

Αντιμετώπιση εφελκυστικών τάσεων σε σεισμό

- Υψηλής περιεκτικότητας σε υδραυλικές κονίες (**high paste**): μπορούν να παραλάβουν σημαντικές εφελκυστικές τάσεις, άρα να αντέξουν σε ισχυρές σεισμικές καταπονήσεις.
- Χαμηλής περιεκτικότητας σε υδραυλικές κονίες (**lean ή FSHD**): έχουν πιο μεγάλη διατομή και μεγάλη επιφάνεια θεμελίωσης, άρα δεν αναπτύσσουν εφελκυστικές τάσεις, ενώ μπορούν να θεμελιωθούν και σε μέτριας ποιότητας βράχους.
- Βελτίωση ελκυστικής αντοχής: (α) διαμόρφωση ανάντη παρειάς με τσιμεντένεμα, (β) ενίσχυση συγκόλλησης μεταξύ στρώσεων RCC



Διαμόρφωση ανάντη παρειάς

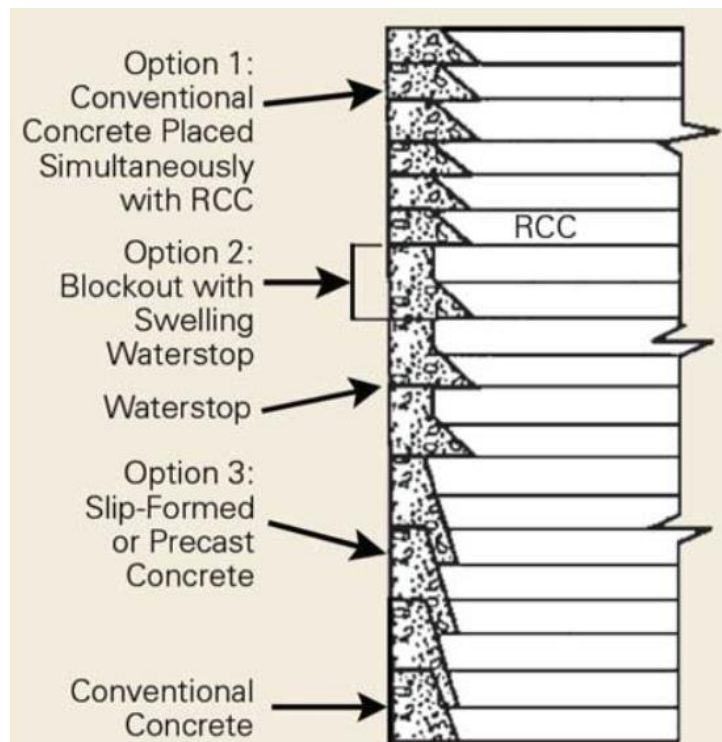
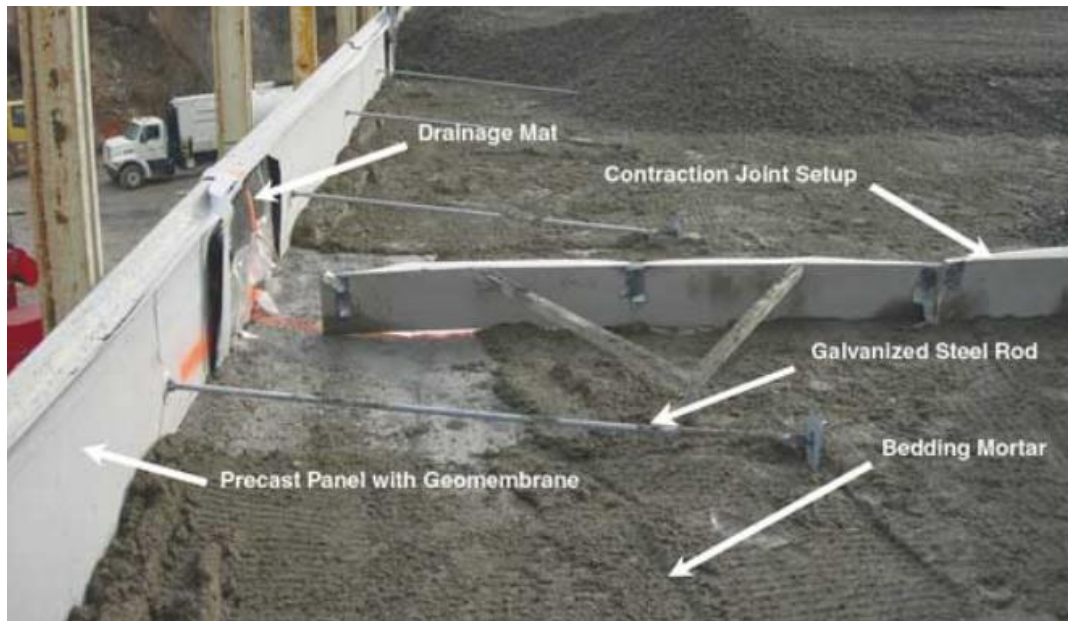
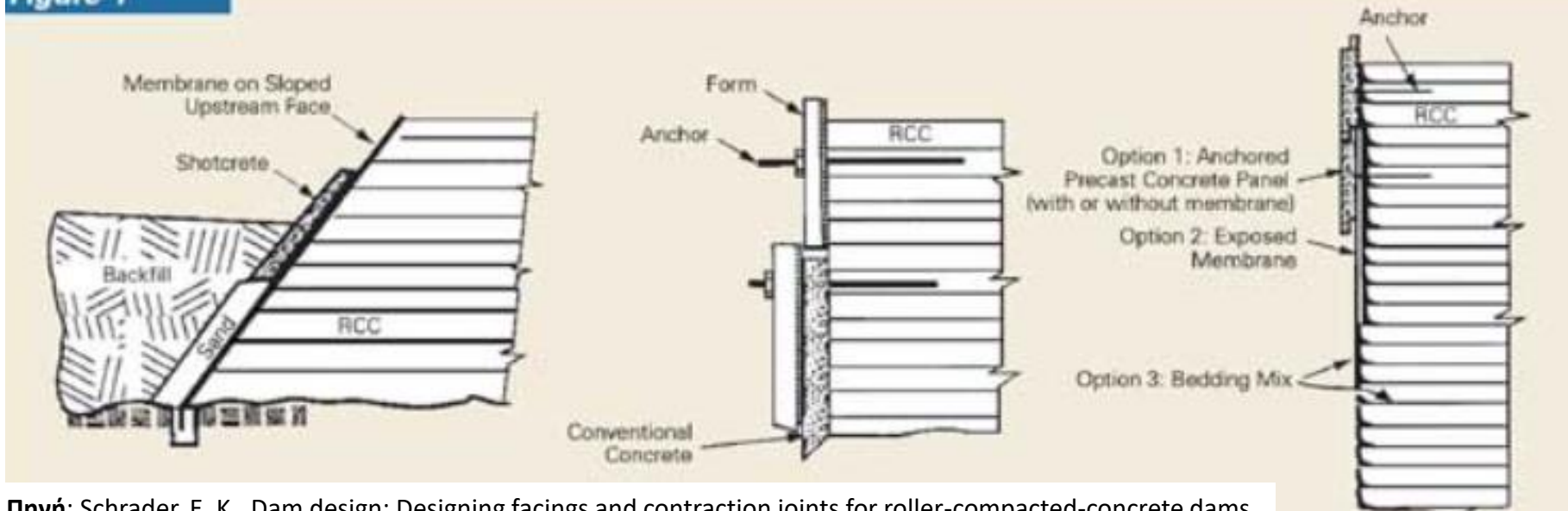
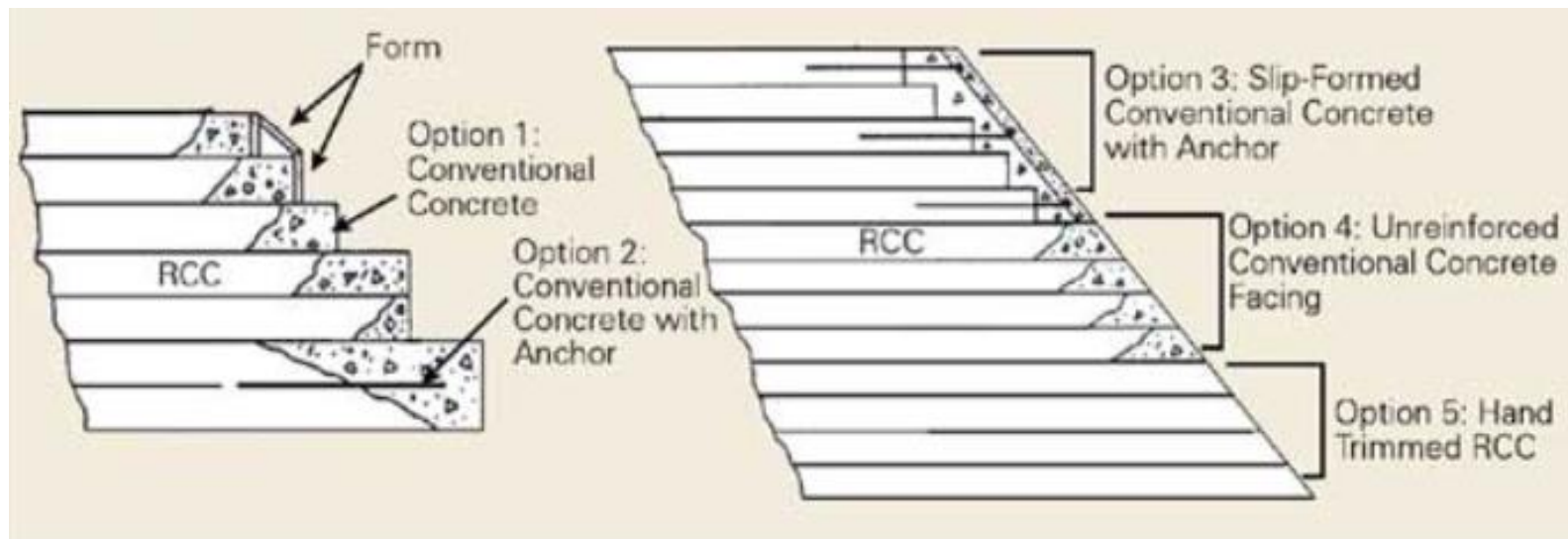


Figure 1



Διαμόρφωση κατάντη παρειάς



Φράγματα RCC: μερικά παγκόσμια ρεκόρ

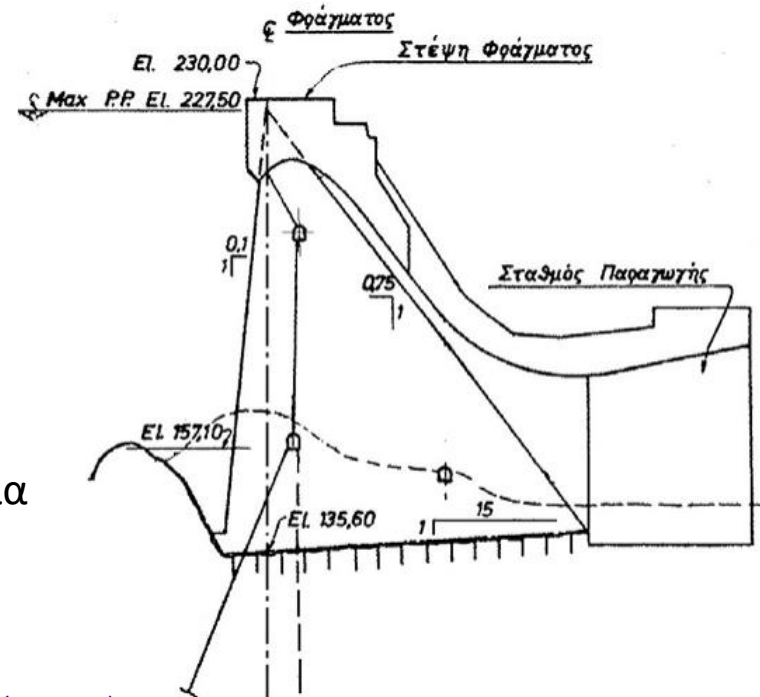
- Longtan, Κίνα: Το υψηλότερο του κόσμου (μέγιστο ύψος 216.5 m, μήκος στέψης 832 m, συνολικός όγκος σκυροδέματος 7.36 hm³)
- Grand Ethiopian Renaissance Dam (GERD): Ρυθμός διάστρωσης 23 200 m³ ανά ημέρα



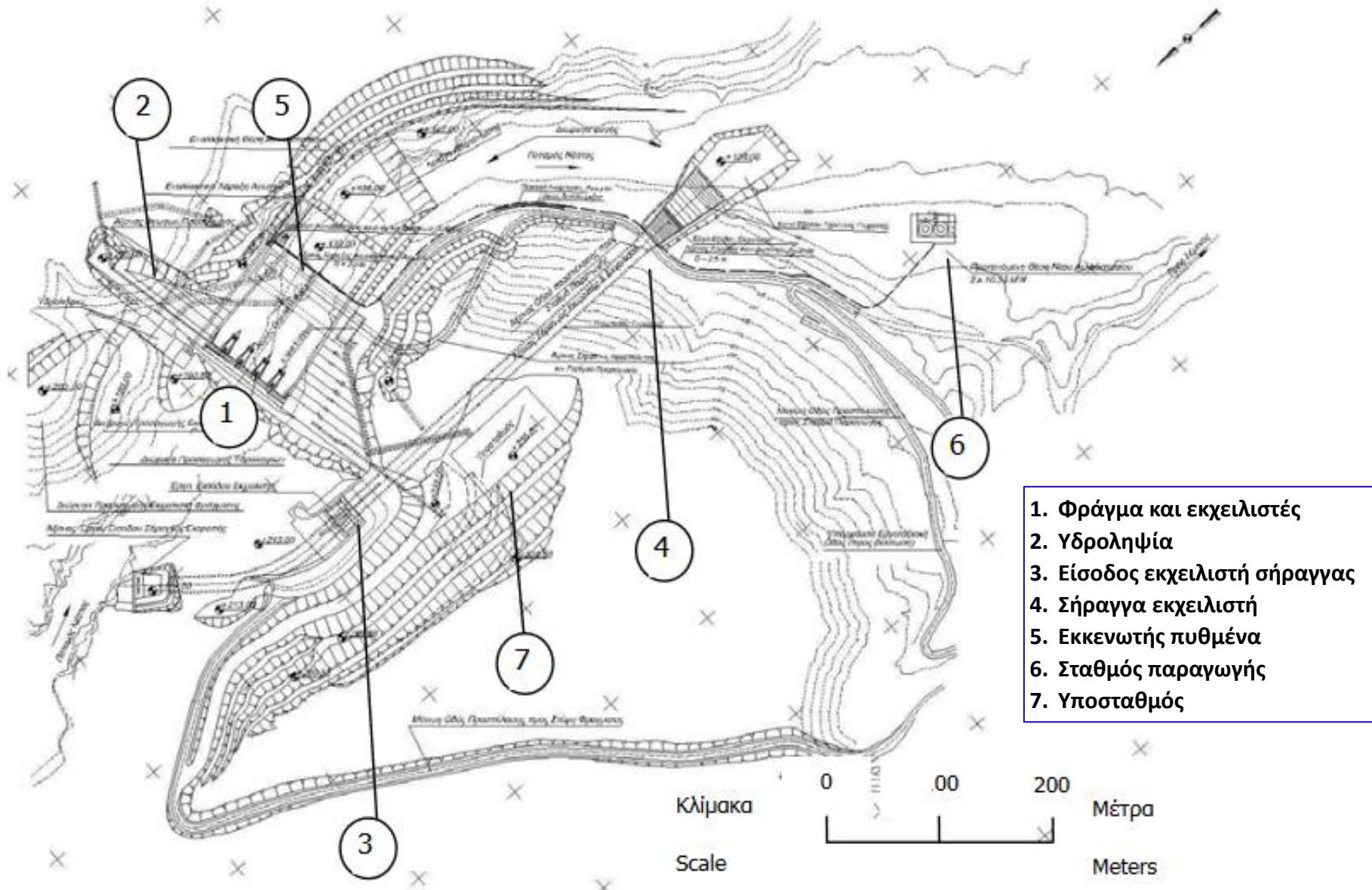
Dam	Country	Height (m)	RCC volume (m ³ x10 ³)	Placing time (months)	Monthly placement (m ³)		Max. day (m ³)
					Average	Peak	
Longtan	China	217	4623	32.4	142758	400755	18475
U. Stillwater	U.S.A.	91	1125	9	125324	204430	8415
Tha Dan	Thailand	95	4900	40.1	122266	201490	13280
Olivenhain	U.S.A.	97	1070	8.8	121895	224675	12250
Beydag	Turkey	96	2350	20.9	112566	165000	
Beni Haroun	Algeria	118	1690	16.4	102860	175000	9100
Taum Sauk	U.S.A.	49	2448	25.7	95253	189470	11330
Son La	Vietnam	139	2677	31.5	84984	200075	9980
M. Vaitarna	India	103	1217	15.8	77300	134125	7536
Ralco	Chile	155	1596	20.9	76449	147600	6860
Al Wehdah	Jordan/Syria	94	1426	19	75172	123860	6185
Yeywa	Myanmar	134	2473	34.3	72247	147320	7555

Φράγμα Πλατανόβρυσης

- Ύψος 95 m, μήκος στέψης 270 m, από τα υψηλότερα έργα RCC της Ευρώπης, που είναι κατασκευασμένα με **κυλινδρούμενο τεφροσκυρόδεμα** και με τόσο υψηλό ποσοστό ιπτάμενης τέφρας στο μίγμα (50 kg τσιμέντο και 225 kg ιπτάμενη τέφρα ανά m^3 , class C)
- Περίοδος κατασκευής: Οκτώβριος 1995 – Μάρτιος 1997 (**18 μήνες**, με διακοπές 4 μηνών)
- Συνολικός κύριος όγκος RCC, μαζί με τον τοίχο αντιστήριξης: $450\,000\ m^3$
- Όγκος RCC στοιχείων όψεως: $11330\ m^3$ (με χρήση $175\ kg/m^3$ ιπτάμενης τέφρας)
- Χρησιμοποιήθηκαν $\sim 110\,000\ t$ **κατεργασμένης ιπτάμενης τέφρας**, που μεταφέρθηκε από τη **μονάδα επεξεργασίας τέφρας στην Πτολεμαΐδα**, με ειδικά σιλοφόρα αυτοκίνητα, σε απόσταση 400 km (μέση ημερήσια παραγωγή $\sim 260\ t$).
- Ανήκει στο σύστημα Υ/Η έργων Νέστου, που περιλαμβάνει επίσης το φράγμα Θησαυρού (σύστημα **αντλησιοταμίευσης**) και το αναρρυθμιστικό έργο Τεμένους (δεν έχει ακόμη κατασκευαστεί).



Φράγμα Πλατανόβρυσης: Οριζοντιογραφία



Πηγή: Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων, *Τα φράγματα της Ελλάδας*, 2013.

Φράγμα Πλατανόβρυσης: Κατασκευαστικές εργασίες



Καθαρισμός θεμελίωσης με νερό και πεπιεσμένο αέρα



Κατασκευή στρώσης RCC

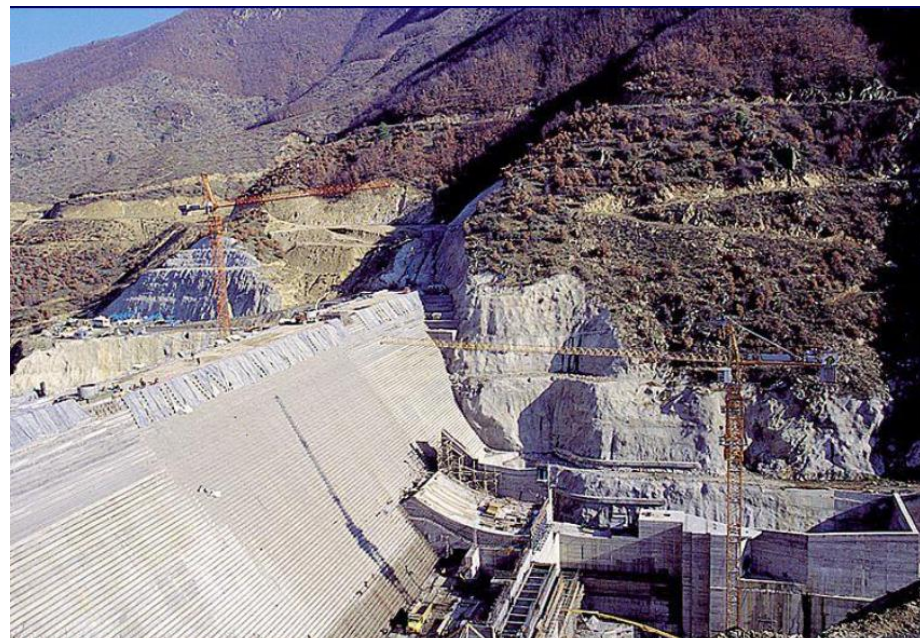
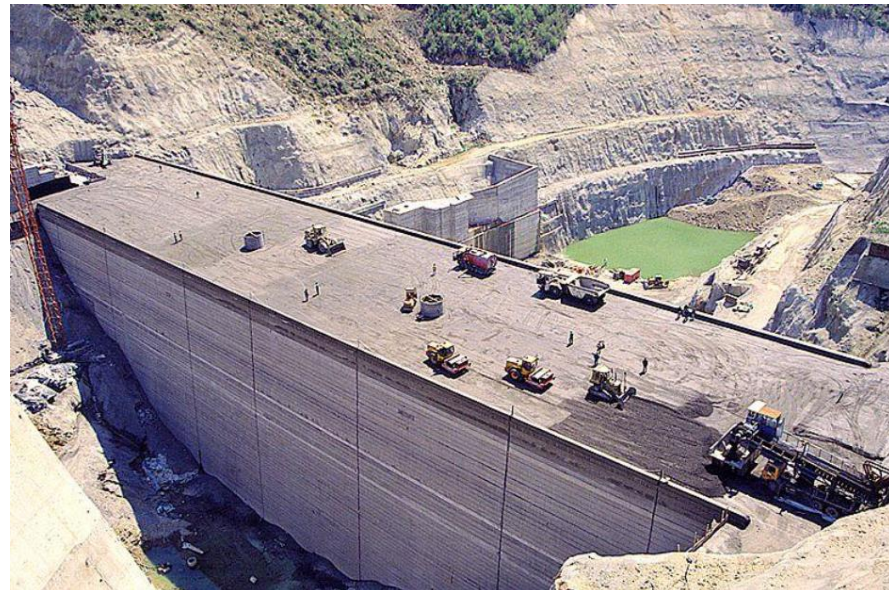


Σκυροδέτηση στρώσης θεμελίωσης

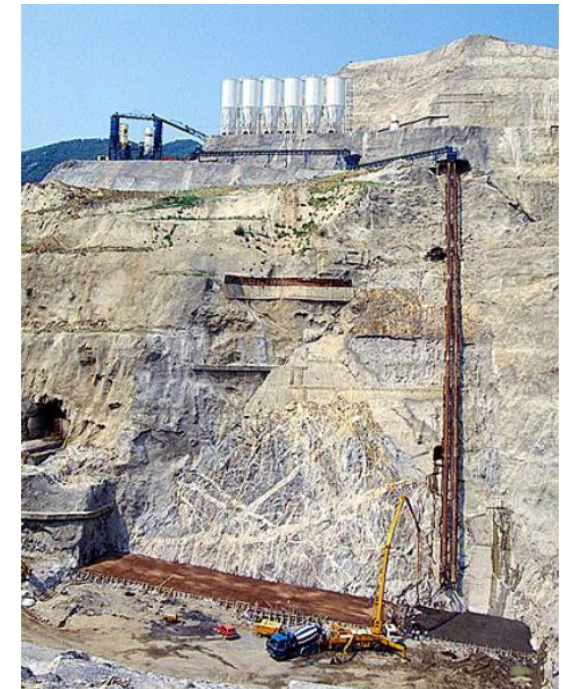
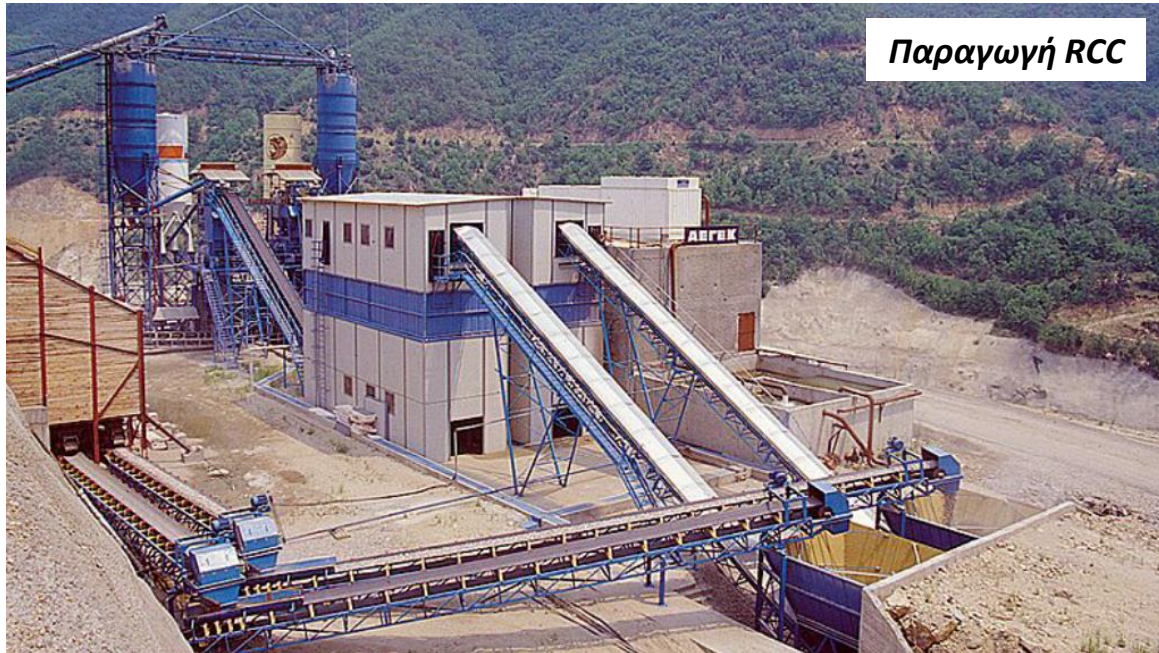


Διάστρωση RCC

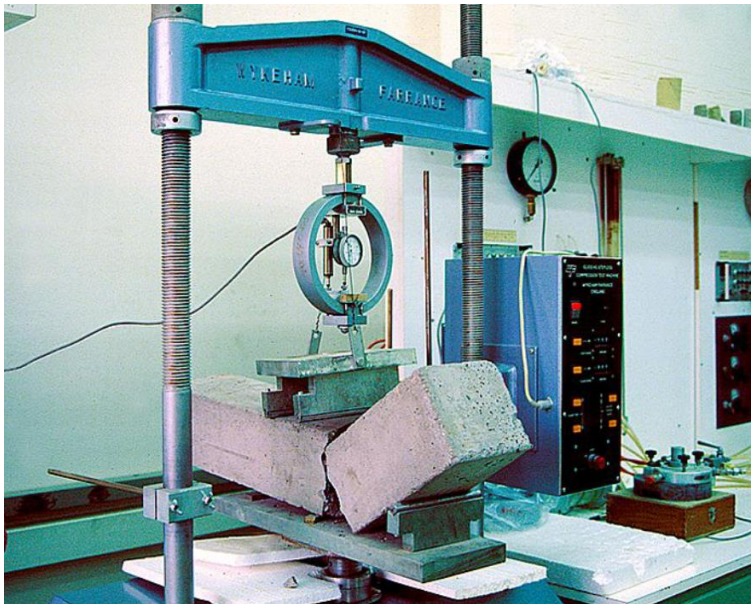
Φράγμα Πλατανόβρυσης: Κατασκευαστικές εργασίες



Φράγμα Πλατανόβρυσης: Παραγωγή υλικών



Φράγμα Πλατανόβρυσης: Ποιοτικοί έλεγχοι RCC



Αντηριδωτά φράγματα

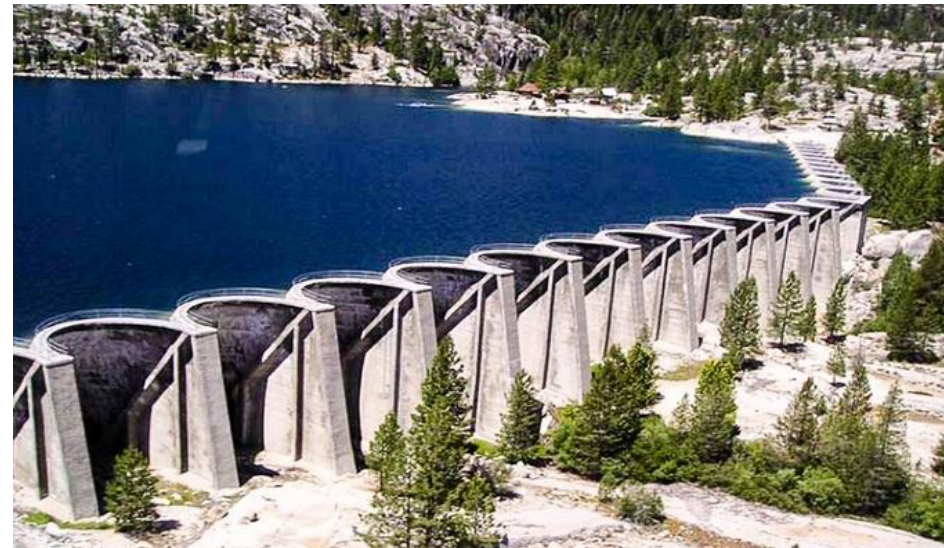
- ❑ Όγκος σκυροδέματος 1/3 έως 1/2 σε σχέση με τα συμβατικά φράγματα σκυροδέματος
- ❑ Μικρότερες απαιτήσεις ως προς τη θεμελίωση
- ❑ Μικρότερες ανωστικές πιέσεις
- ❑ Μικρότερες απαιτήσεις σε έργα αποστράγγισης της θεμελίωσης
- ❑ Δυνατότητα τοποθέτησης του σταθμού παραγωγής μεταξύ των αντηρίδων
- ❑ Υψηλό κόστος εργατικών (και απαιτήσεων εξειδίκευσης) και συντήρησης



Coolidge, Arizona (1928, ύψος 76 m)



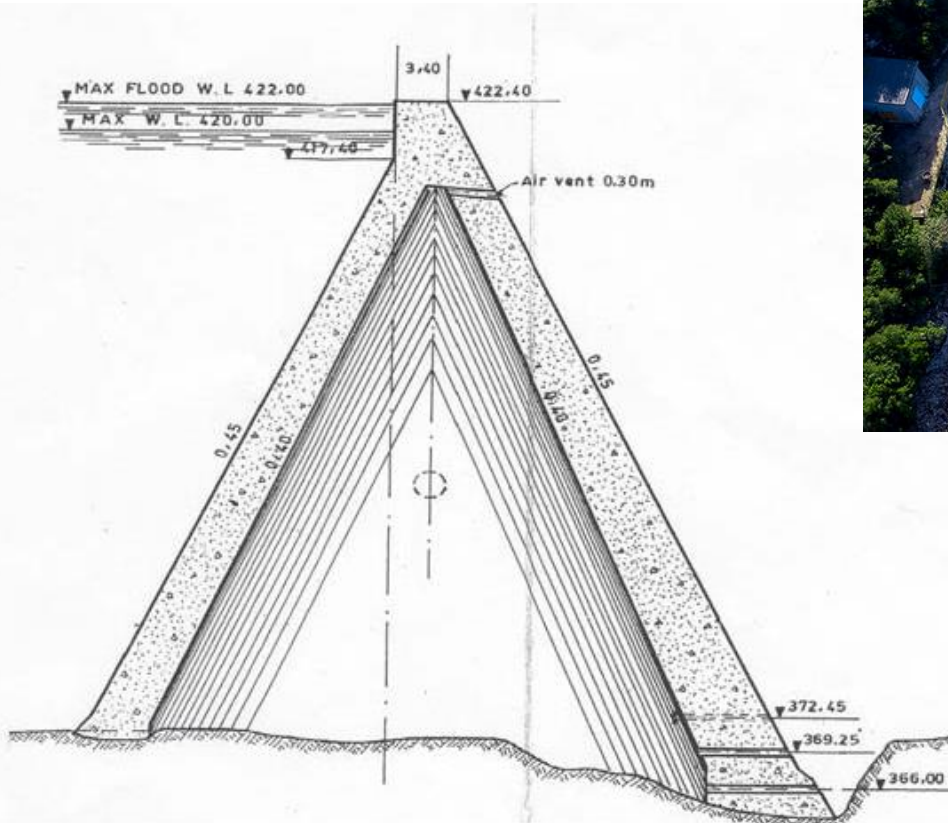
Roselend, Γαλλία (1955, ύψος 150 m, μήκος 804 m)



Florence Lake, Καλιφόρνια (1926, ύψος 46 m, μήκος 962 m)

Φράγμα Λάδωνα (1955)

- Ύψος φράγματος: 56 m
- Μήκος στέψης: 101.5 m



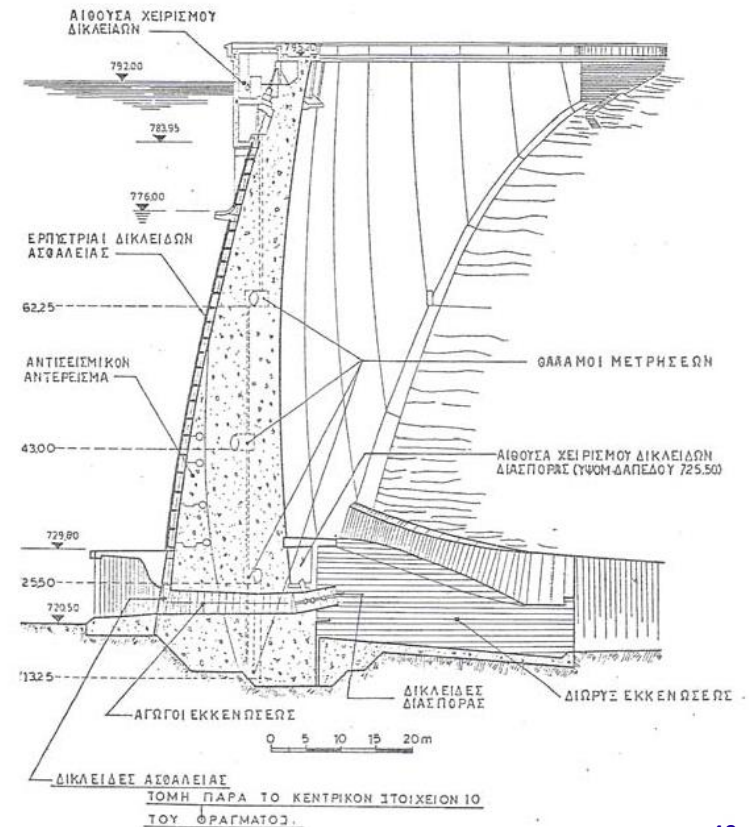
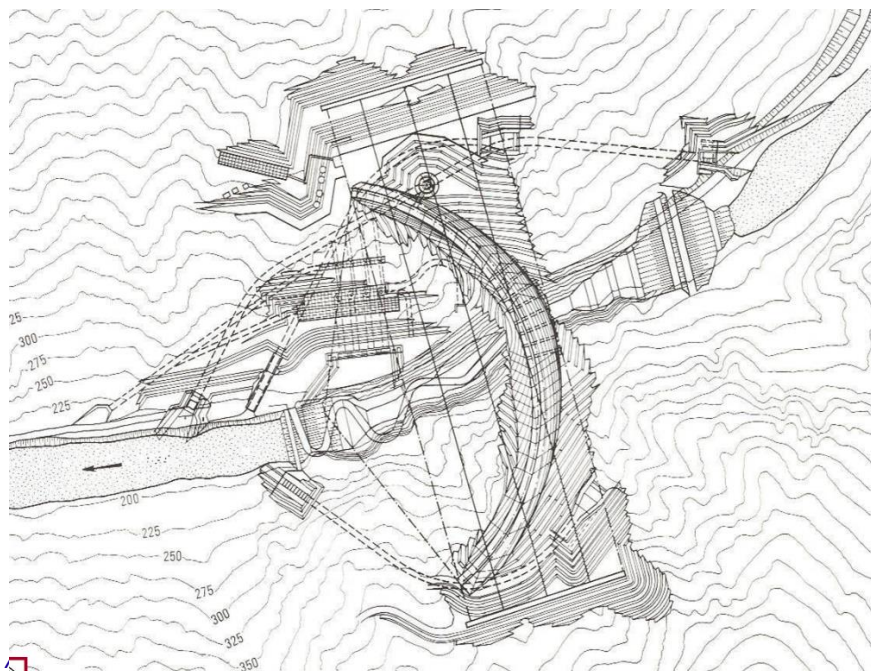
Πηγή: Παπαγιάννη, Ι., Ι. Στεφανάκος, Ν. Μητσιγιώργης, Α. Ουζουνίδου, και Α. Παλιοκώστα, Επισκόπηση παλιών φραγμάτων από σκυρόδεμα, 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων με Διεθνή Συμμετοχή και Έκθεση Υλικών, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Λάρισα, 2008.



Τοξωτά φράγματα

- ❑ Φράγματα καμπύλου άξονα που μεταφέρουν τις φορτίσεις που δέχονται στα αντερείσματα και στη θεμελίωση, ως **τόξο** και ως **πρόβολος**, αντίστοιχα, ενώ το ίδιο βάρος δεν συνεισφέρει ουσιαστικά στη ανάληψη φορτίων.
- ❑ Ενδείκνυνται για **κοιλάδες τύπου V** με απότομα πρηνή και **συμπαγή βραχώδη πετρώματα**.
- ❑ Μορφές τοξωτών φραγμάτων:
 - Μονής καμπυλότητας, με σταθερή ή μεταβλητή ακτίνα
 - Διπλής καμπυλότητας:
 - ❑ Καμπύλωση στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο
 - ❑ Διόγκωση προς τα ανάντη των κατακόρυφων διατομών → κατακόρυφο θλιπτικό φορτίο προβόλου λόγω ιδίου βάρους, το οποίο αντιμετωπίζει τις εφελκυστικές τάσεις προβόλου λόγω του φορτίου του νερού
- ❑ Λειτουργία μόνο ως τόξο:
 - Μεταφορά φορτίων νερού οριζόντια στα αντερείσματα
 - Μεταφορά ίδιου βάρους (φορτίου νερού) ως πρόβολος στη θεμελίωση
 - Ανάλυση ελαστικών τάσεων στο φορέα
 - Αδυναμία αγνόησης λειτουργίας προβόλου
- ❑ Λειτουργία ως τόξο και πρόβολος:
 - Ανάλυση φορέων τόξου και προβόλου ώστε να συμπίπτουν οι παραμορφώσεις
 - Συμμετοχή θεμελίωσης στις παραμορφώσεις του φορέα

Φράγμα Πλαστήρα (1960)



Κατασκευή τοξωτών φραγμάτων

