

Υδραυλικές Κατασκευές – Φράγματα

8ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

Τεχνολογία συστημάτων υπερχείλισης

Ανδρέας Ευστρατιάδης & Χριστίνα Ντεμίρογλου

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

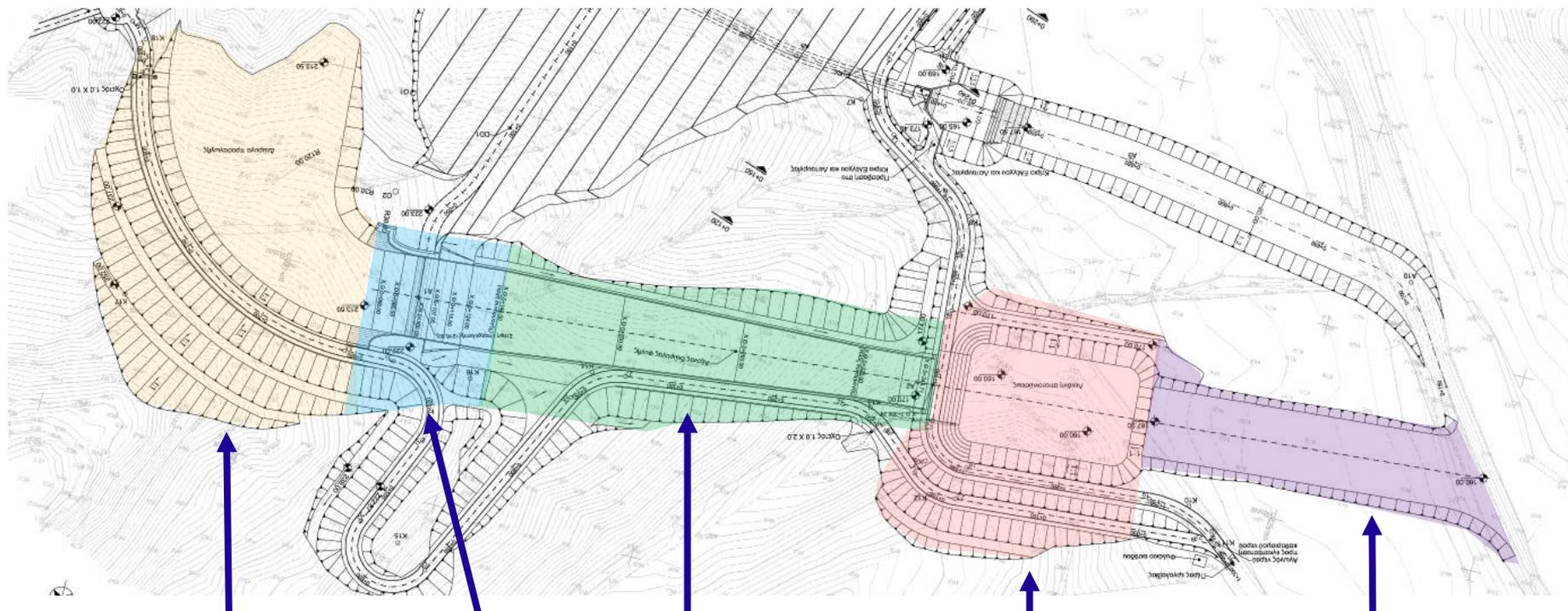
Ακαδημαϊκό έτος 2022-23

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

Βασικά στοιχεία έργων υπερχείλισης

- Σύστημα κατασκευαστικών διατάξεων που αποσκοπούν:
 - στην ανάσχεση της πλημμύρας εντός της λεκάνης κατάκλυσης (ταμιευτήρας)
 - στην προστασία του ιδίου του σώματος του φράγματος και των συνοδών του έργων, κατά τη διόδευση μεγάλων πλημμυρών
 - στην ομαλή προσαγωγή του πλημμυρικού όγκου στο κατάντη υδατόρευμα
- Συνιστώσες τυπικού συστήματος υπερχείλισης:
 - Έργα (διώρυγα) προσαγωγής, ανάντη της θέσης ελέγχου (π.χ. καθοδηγητικοί τοίχοι)
 - Υπερχειλιστής: η κατασκευή με τη θέση ελέγχου (π.χ. ogee)
 - Έργα ασφαλούς προσαγωγή ροής κατάντη της θέσης ελέγχου (π.χ. διώρυγα πτώσης)
 - Έργα καταστροφής ενέργειας: σύστημα που παραλαμβάνει την ενέργεια από την πτώση, προκειμένου να μπορεί να διοχετευθεί κατάντη.
 - Έργα προσαγωγής στην κατάντη κοίτη: έργα για την ασφαλή μεταφορά των υδάτων υπερχείλισης στον τελικό αποδέκτη.
- Οικονομοτεχνική βελτιστοποίηση:
 - Διαστάσεις υπερχειλιστή
 - Διώρυγα φυγής
 - Λεκάνη καταστροφής ενέργειας
 - Ανώτατη στάθμη πλημμύρας φράγματος

Συνιστώσες συστημάτων υπερχείλισης



Διώρυγα προσαγωγής
– Καθοδηγητικοί τοίχοι

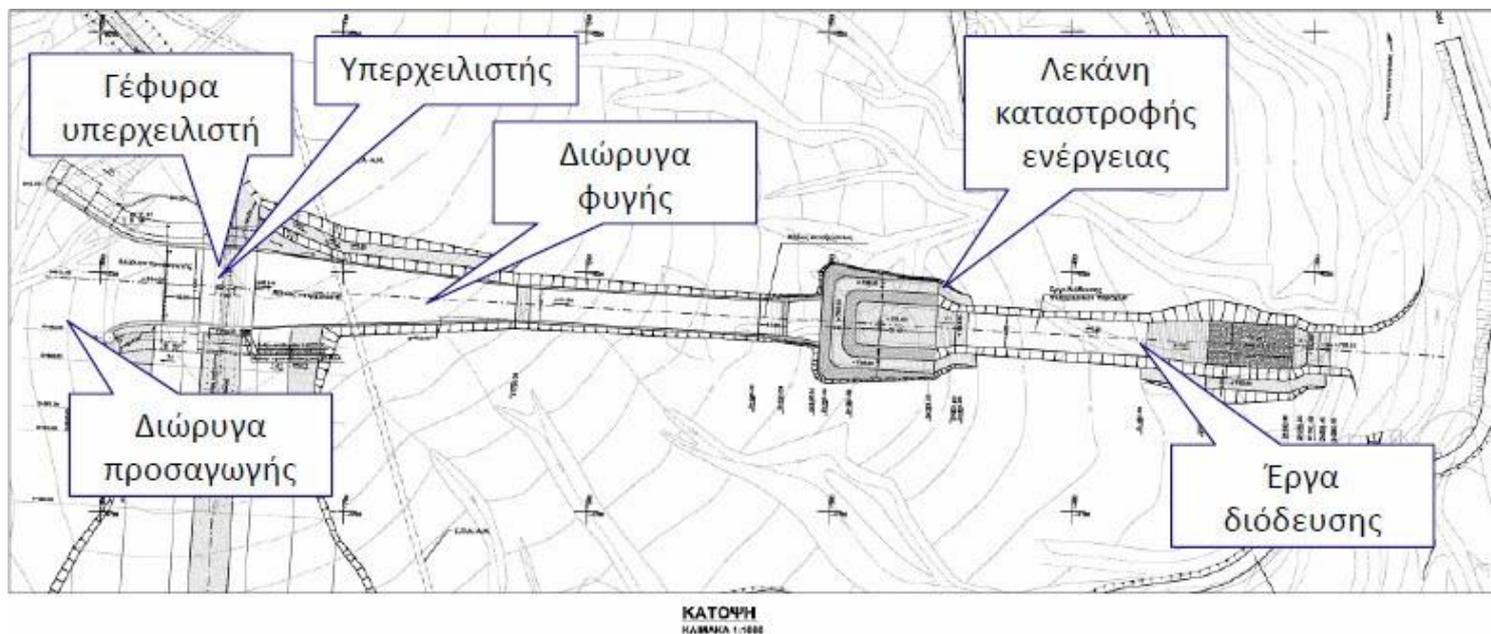
Έργο ελέγχου
(υπερχειλιστής)

Διώρυγα
πτώσης

Λεκάνη
καταστροφής
ενέργειας

Έργα προσαρμογής
στον αποδέκτη

Εισαγωγικό παράδειγμα: Φράγμα Τριανταφυλλιάς



Φράγμα Τριανταφυλλιάς: Γενική διάταξη συστήματος



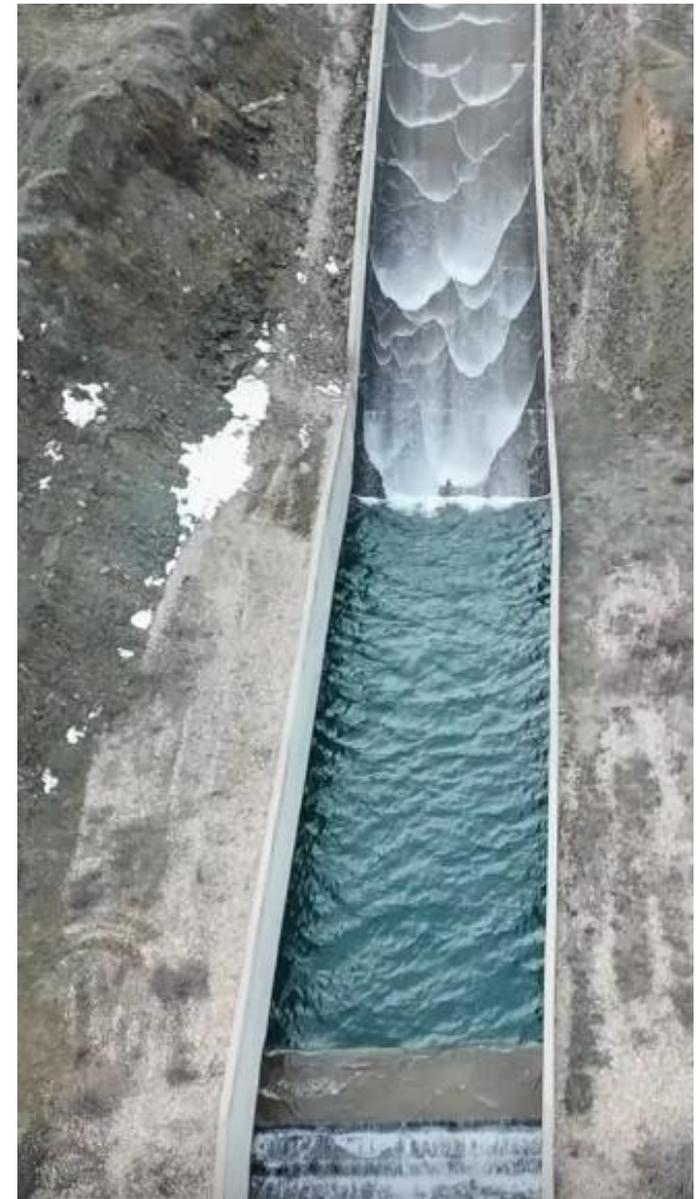
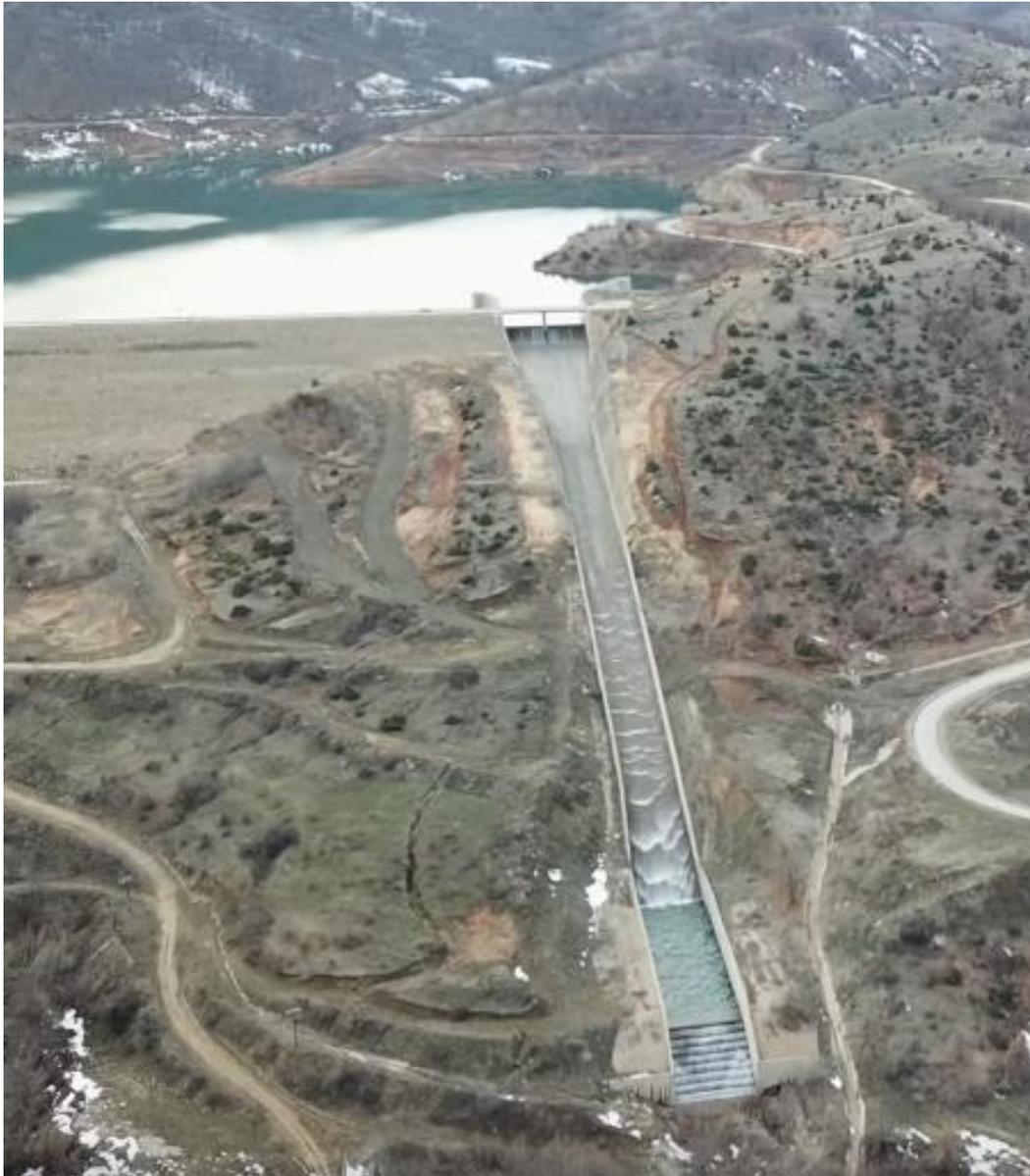
Φράγμα Τριανταφυλλιάς: Διώρυγα προσαγωγής



Φράγμα Τριανταφυλλιάς: Γέφυρα & οgee



Φράγμα Τριανταφυλλιάς: Διώρυγα φυγής & ΛΚΕ



Φράγμα Τριανταφυλλιάς: Λεκάνη καταστροφής ενέργειας & έργα διόδευσης στον κατάντη αποδέκτη



Πηγή: <https://www.youtube.com/watch?v=9uwPAinkVn0>

Τυποποίηση υπερχειλιστών

- Συνήθης διάκριση, με βάση την κατηγοριοποίηση του US Bureau of Reclamation:
 - Μετωπικοί κατακόρυφοι (free overfall or straight drop spillways)
 - Ελεύθερης πτώσης μορφής «S» (ogee or overfall spillways)
 - Πλευρικοί (side channel spillways)
 - Ανοιχτής διώρυγας (chute or open channel or trough spillways)
 - Σηραγγοειδείς (conduit or tunnel spillways)
 - Φρεατοειδείς/χοανοειδείς (drop inlet or shaft or morning glory spillways)
 - Σιφωνοειδείς (siphon spillways)
- Περαιτέρω διάκριση, με βάση:
 - τη θέση του έργου υπερχείλισης
 - τη μορφή του έργου υπερχείλισης σε σχέση με τη ροή
 - τη μορφή του έργου φυγής/πτώσης
- Διάκριση με βάση την ύπαρξη ή όχι έργων ρύθμισης της διερχόμενης παροχής:
 - Ελεγχόμενοι υπερχειλιστές με θυροφράγματα → εκχειλιστές
- Γενική αρχή:
 - Φράγματα βαρύτητας-σκυροδέματος: υπερχειλιστής επί του σώματος του φράγματος
 - Γεωφράγματα: υπερχειλιστής εκτός του σώματος (εξαίρεση: γεωφράγματα μικρού ύψους, στα οποία επιτρέπεται η τοποθέτηση εύκαμπτων υπερχειλιστών)

Τυποποίηση υπερχειλιστών με κριτήριο θέση του έργου

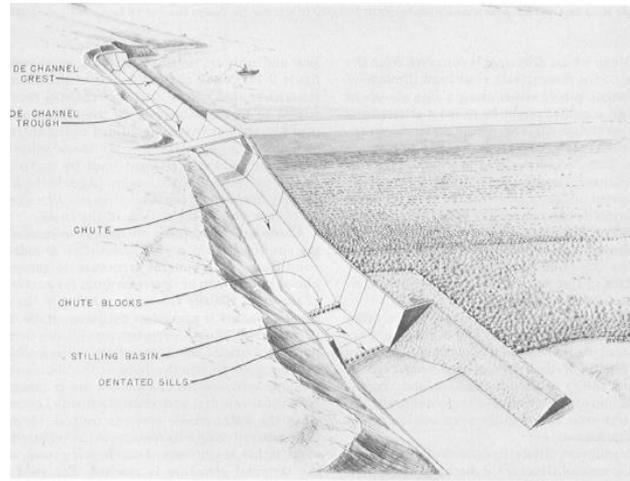
- ❑ Εγκάρσια στην κοίτη του ποταμού (μόνο υπερχειλιστής, χωρίς φράγμα)
- ❑ Επάνω στο σώμα του φράγματος → συμβατή παραμορφωσιμότητα μεταξύ των έργων του υπερχειλιστή και του φράγματος
- ❑ Δίπλα στο φράγμα
- ❑ Σε αντέρισμα φράγματος
- ❑ Μέσα στον ταμιευτήρα
- ❑ Σε φυσικό αυχένα



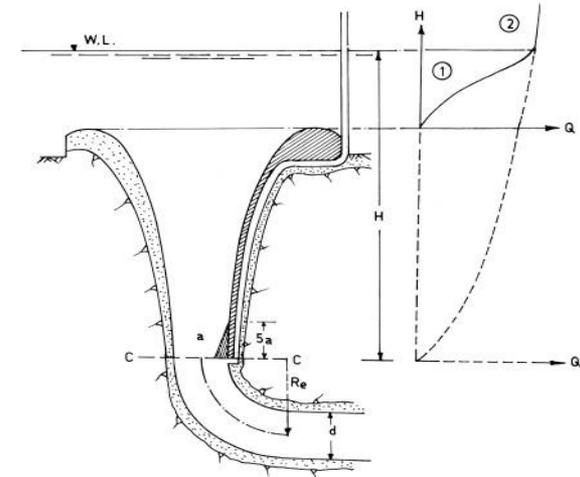
Τυποποίηση υπερχειλιστών με κριτήριο τη μορφή του έργου υπερχείλισης σε σχέση με τη ροή



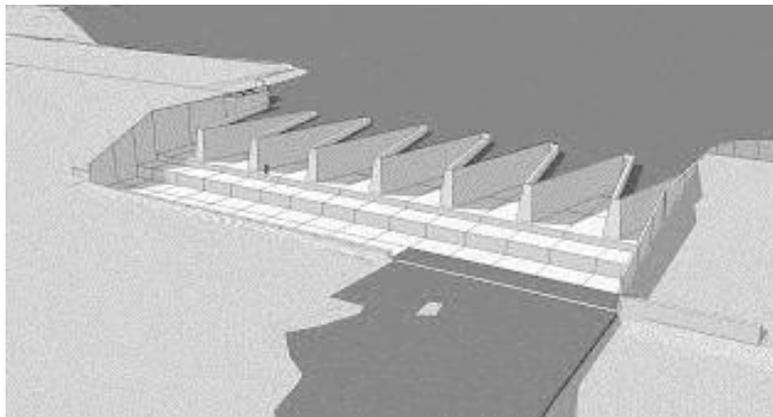
Μετωπικός



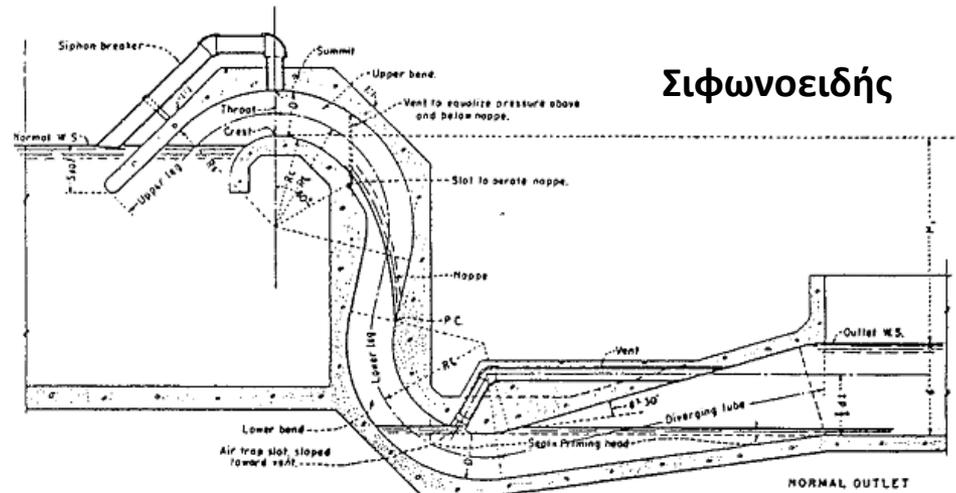
Πλευρικός



Χοανοειδής

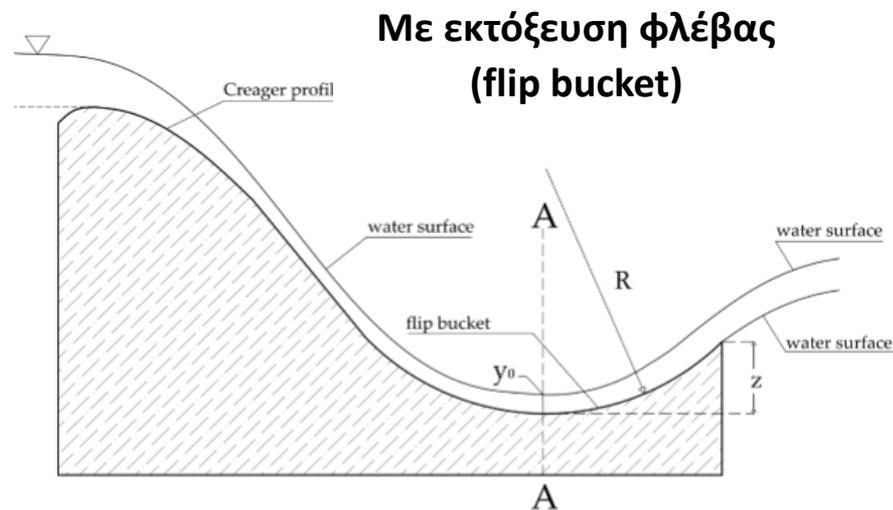
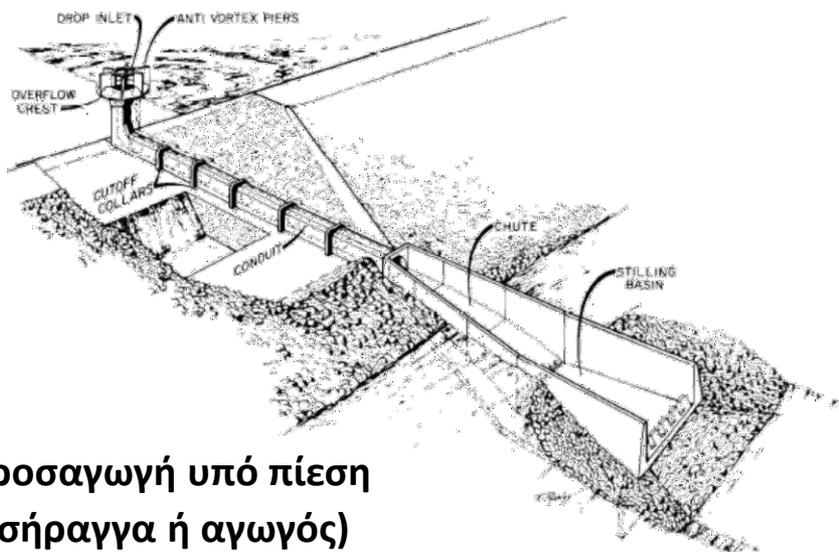
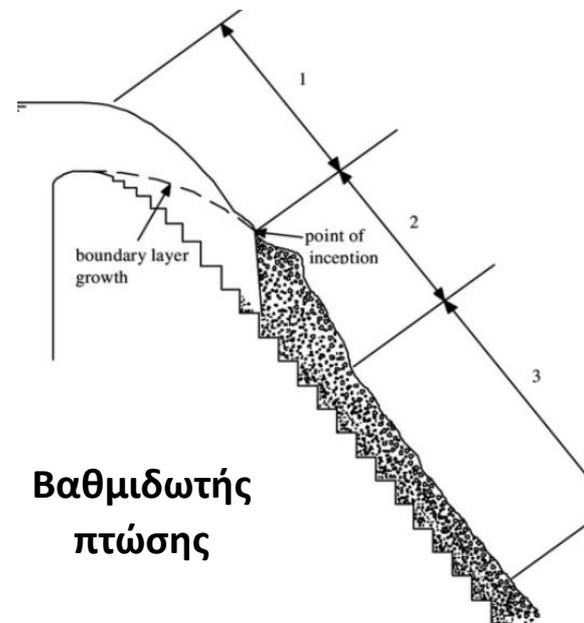
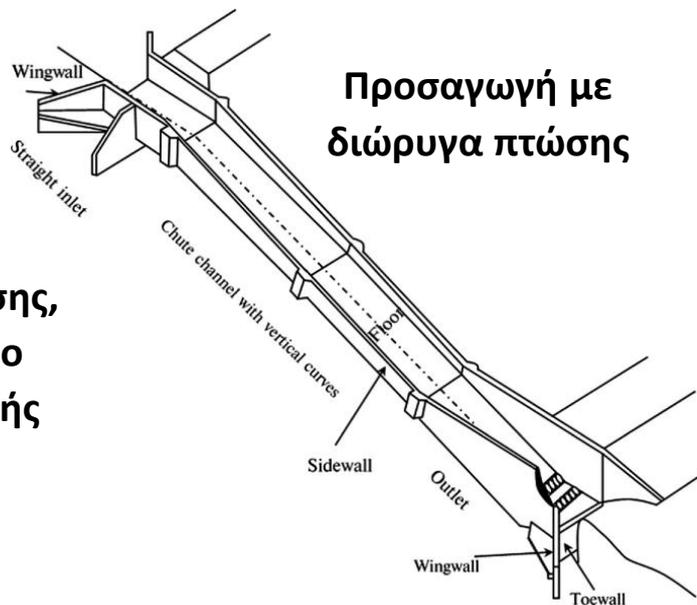
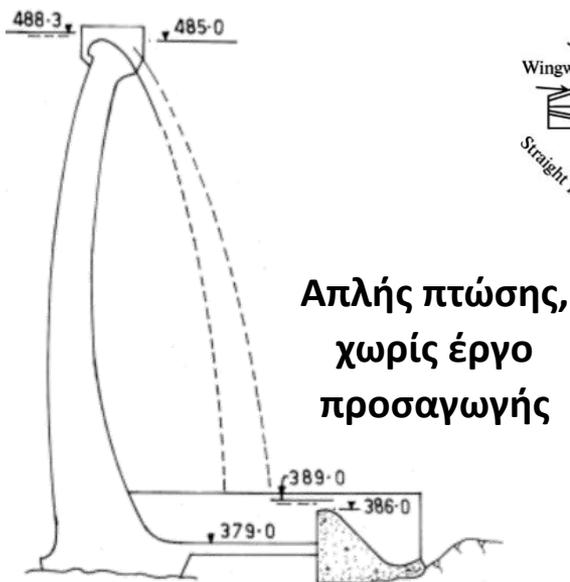


Λαβυρινθοειδής



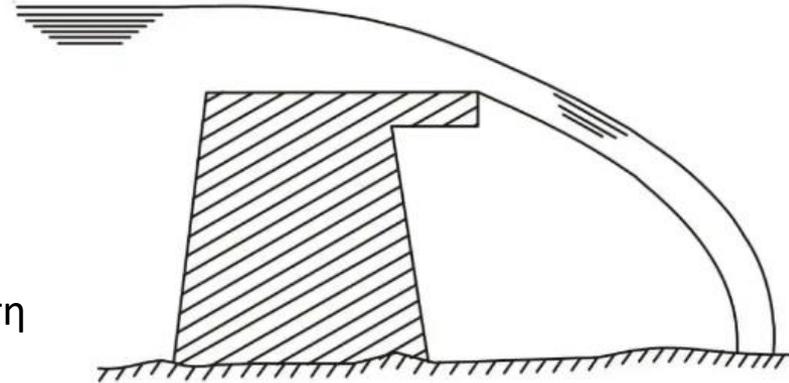
Σιφωνοειδής

Τυποποίηση με κριτήριο την προσαγωγή της ροής



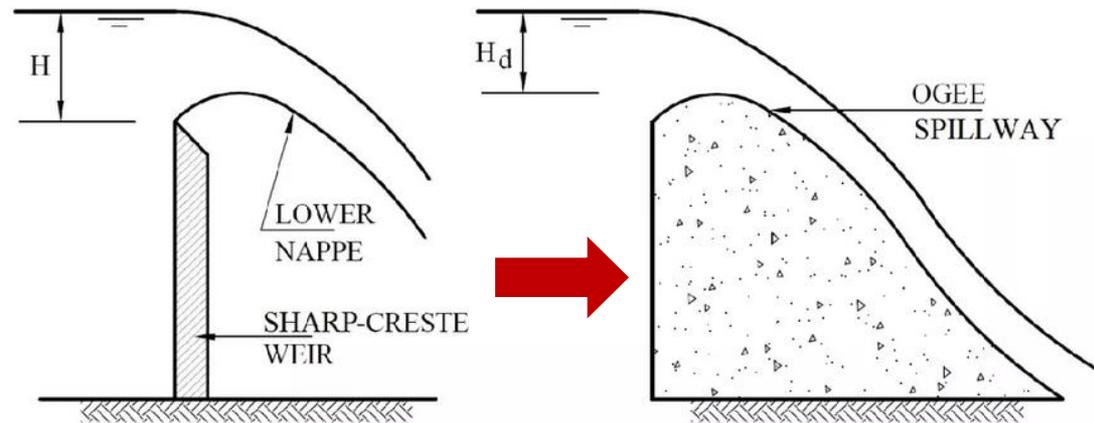
Μετωπικοί κατακόρυφοι υπερχειλιστές

- Εφαρμόζονται σε μικρού ύψους φράγματα, με κατακόρυφη ή σχεδόν κατακόρυφη παρειά.
- Εκτόξευση της φλέβας πάνω από τη στέψη, εξασφαλίζοντας επαρκή αερισμό από κάτω.
- Επέκταση της στέψης, για διευκόλυνση της ροής.
- Σχεδόν κατακόρυφη πτώση της φλέβας στην κατάντη επιφάνεια → σημαντική καταστροφή ενέργειας.
- Περαιτέρω καταστροφή ενέργειας επιτυγχάνεται με:
 - Διαμόρφωση μικρού τμήματος της κατάντη επιφάνειας από σκυρόδεμα
 - Διαμόρφωση μικρής δεξαμενής νερού, όπου προσπίπτει η φλέβα
 - Διαμόρφωση μικρής λεκάνης καταστροφής ενέργειας, με οδοντώσεις
 - Διαμόρφωση συνθηκών ροής για την ανάπτυξη υδραυλικού άλματος
- Ουσιώδης διαφορά με υπερχειλιστή τύπου ogee: η φλέβα δεν έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια κάποιου δομικού στοιχείου



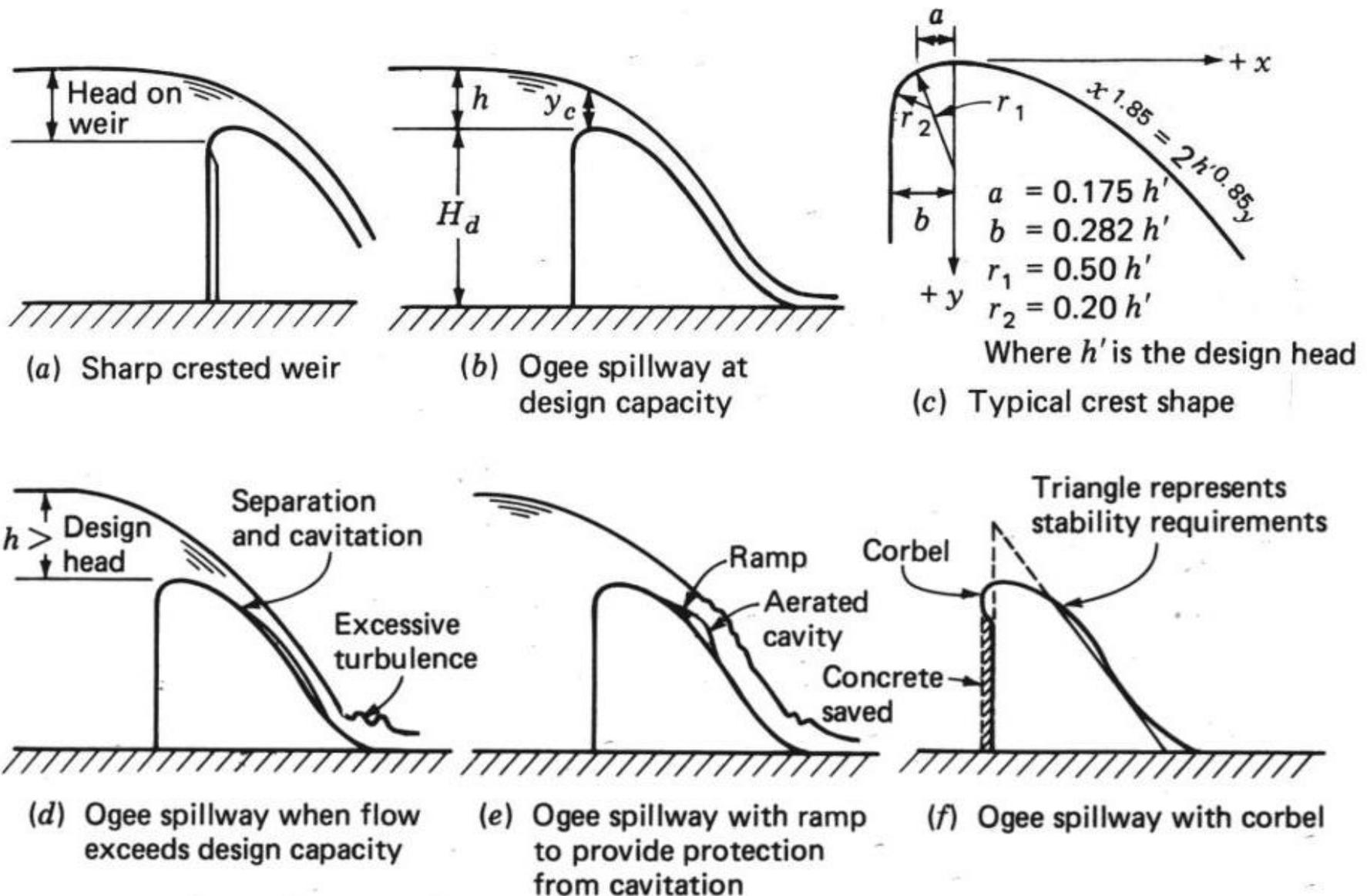
Υπερχειλιστές ελεύθερης πτώσης (ogee)

- Προσαγωγής της ροής σε ένα καμπύλο σχήμα, η γεωμετρία του οποίου ακολουθεί τη μορφή της κάτω επιφάνειας μιας φλέβας που ρέει ελεύθερα πάνω από έναν υπερχειλιστή λεπτής στέψης (ελαχιστοποίηση υποπιέσεων).
- Η διαμόρφωση της γεωμετρίας γίνεται για δεδομένη παροχή σχεδιασμού Q_d , και το αντίστοιχο υδραυλικό φορτίο H_d , και περιγράφεται:
 - από την κλίση της ανάντη παρειάς
 - από καμπύλη κυκλικού τόξου ανάντη του άξονα υπερχείλισης
 - από μια εκθετική καμπύλη κατάντη
 - από καμπύλη κυκλικού τόξου προσαρμογής στη διώρυγα πτώσης
- Για υδραυλικό φορτίο μικρότερο από το φορτίο σχεδιασμού, ήτοι $H < H_d$, αναπτύσσονται υπερπιέσεις στη στέψη → μείωση παροχετευτικότητας.
- Όταν $H > H_d$, δημιουργείται αποκόλληση της ροής και ανάπτυξη υποπιέσεων.
- Κίνδυνος σπηλαιώσης στην περιοχή της αποκόλλησης → απαιτείται αερισμός της ροής.



Εκπαιδευτικό βίντεο για τον σχεδιασμό υπερχειλιστών
ogee: <https://www.youtube.com/watch?v=mWBzCfeTLAg>

Χαρακτηριστικά υπερχειλιστών οgee



Παραδείγματα υπερχειλιστών οgee στην Ελλάδα



Φράγμα Κρεμαστών: εκχειλιστής με θυροφράγματα



ΜΥΗΕ Δαφνοζωνάρας: φράγμα χαμηλού ύψους



Φράγμα Πλαστήρα:
οgee επί του σώματος



Φράγμα Λούρου: οgee σε όλο το μήκος της στέψης

Γεωμετρικός σχεδιασμός κατάντη παρειάς οgee

- Εφαρμόζεται μια παραβολική σχέση της μορφής:

$$\frac{y}{H_d} = -K \left(\frac{x}{H_d} \right)^n$$

όπου H_d το φορτίο σχεδιασμού του υπερχειλιστή και K, n παράμετροι που εξαρτώνται από τη κλίση της ανάντη παρειάς.

- Το φορτίο σχεδιασμού εκτιμάται από τη θεωρητική στάθμης-παροχής του οgee, ήτοι:

$$Q_d = c_0 \sqrt{2g} L H_d^{3/2}$$

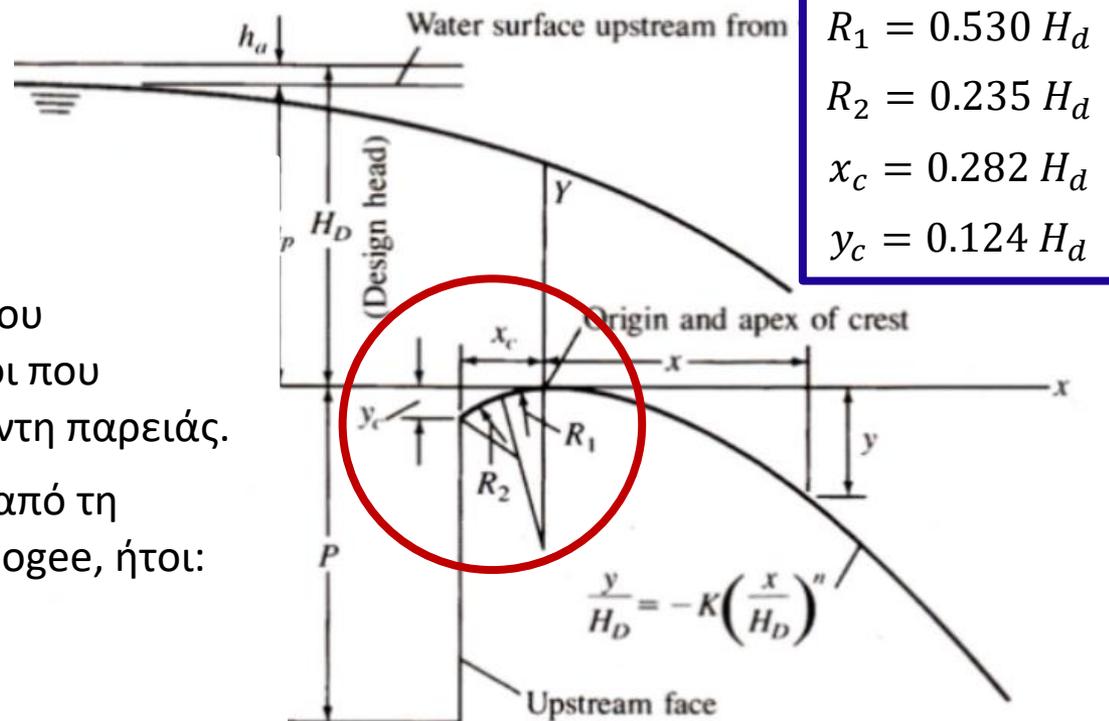
όπου c_0 συντελεστής παροχής.

- Για το φορτίο σχεδιασμού H_d , ο συντελεστής παροχής εκτιμάται από νομογράφημα, συναρτήσε του λόγου P/H_d . Το νομογράφημα προσεγγίζεται από την αναλυτική σχέση:

$$c_0 = 0.708 \left(\frac{P}{H_d} \right)^3 - 0.976 \left(\frac{P}{H_d} \right)^2 + 0.508 \left(\frac{P}{H_d} \right) + 0.376, \text{ για } P/H_d < 0.5$$

$$c_0 = 0.003 \left(\frac{P}{H_d} \right)^3 - 0.019 \left(\frac{P}{H_d} \right)^2 + 0.043 \left(\frac{P}{H_d} \right) + 0.458, \text{ για } 0.5 < P/H_d < 2.5$$

- Για μεγαλύτερες τιμές του λόγου P/H_d , ο συντελεστής c_0 τείνει στην οριακή τιμή 0.492.



Παράμετροι σχεδιασμού κατόντη παρειάς για κατακόρυφο και κεκλιμένο οgee

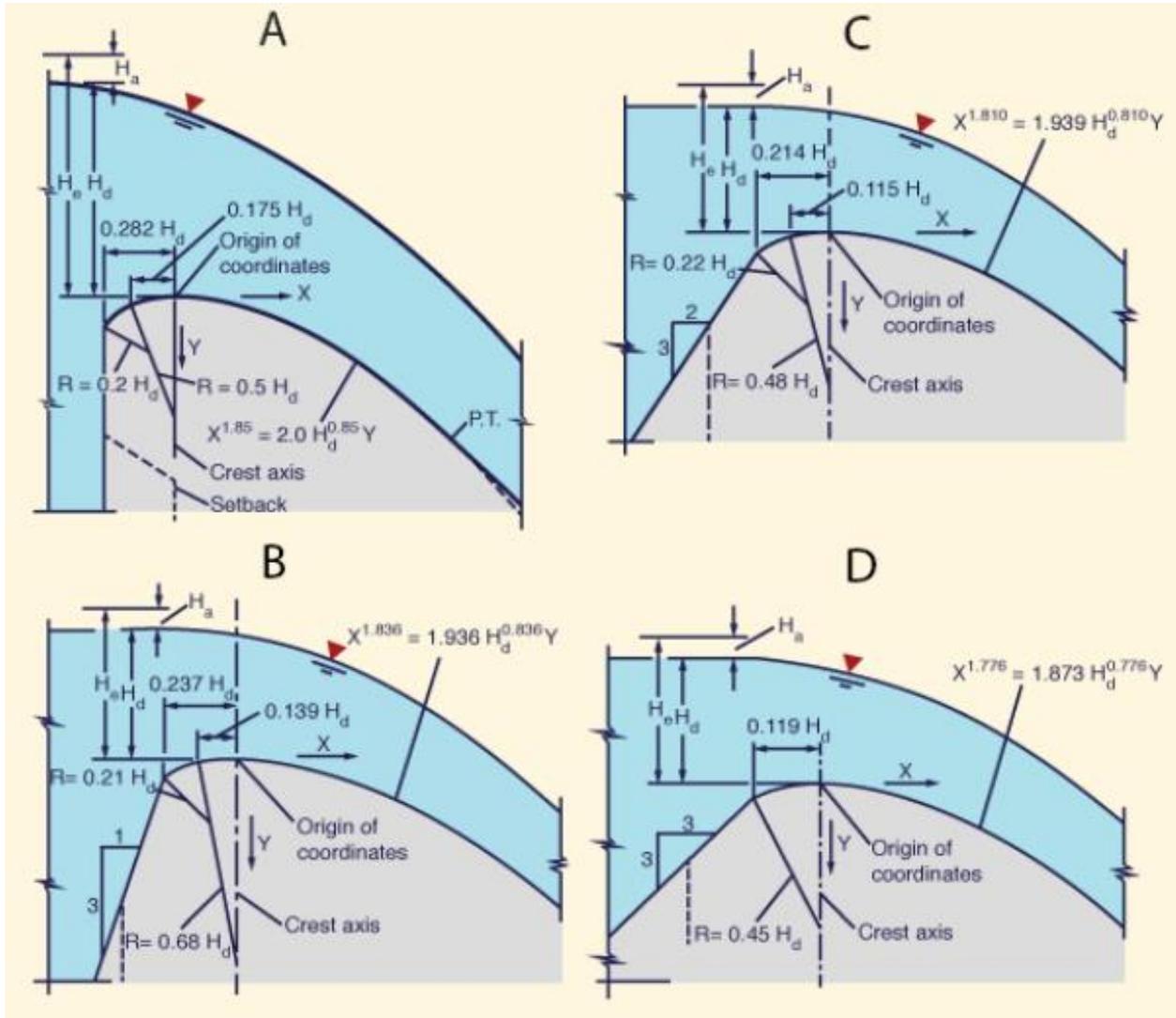


Table 1 Values of K and n .

Slope on upstream face	K	n
Vertical	2.000	1.850
3 V : 1 H	1.936	1.836
3 V : 2 H	1.939	1.810
3 V : 3 H	1.873	1.776

Πηγή: <https://ponce.sdsu.edu/onlinewesspillwaydescription.html>

Υδραυλικοί υπολογισμοί για διάφορες τιμές φορτίου

- Αναλυτική σχέση εκτίμησης του συντελεστή παροχής για τυχαίο υδραυλικό φορτίο:

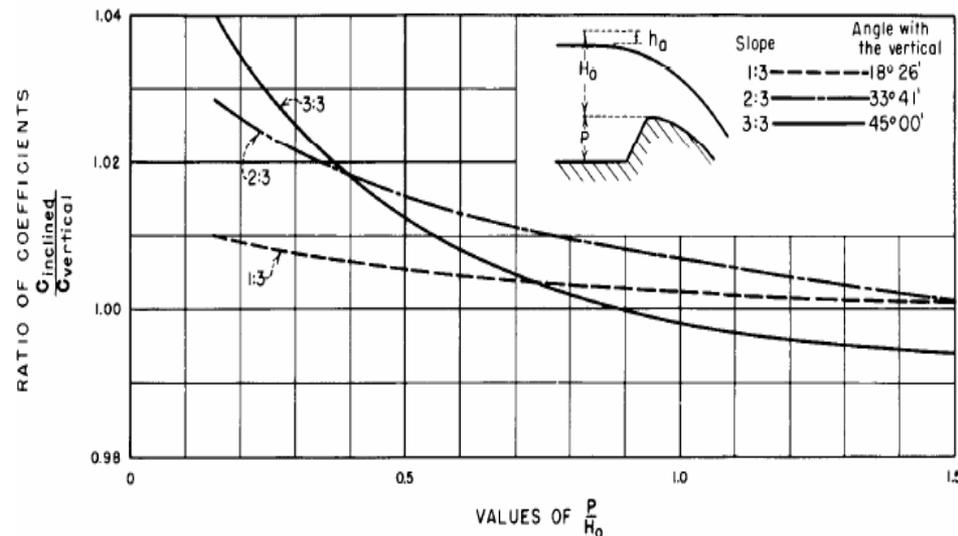
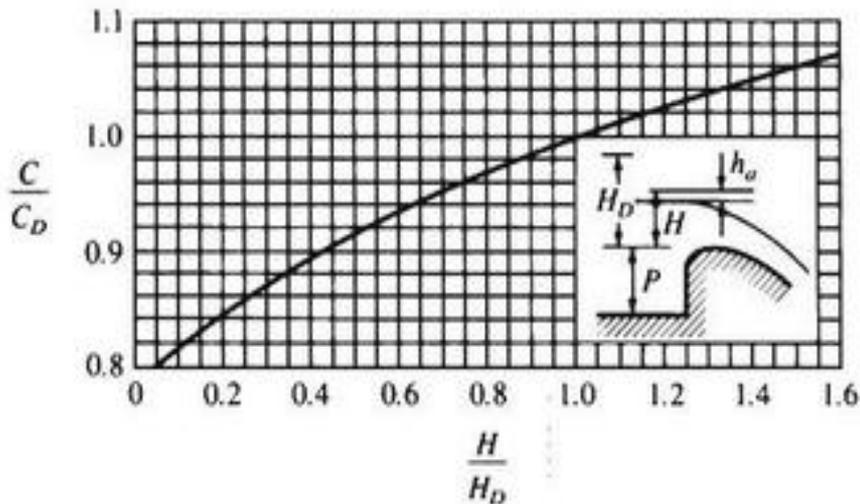
$$\frac{c}{c_0} = 0.03 \times \left(\frac{H}{H_0}\right)^3 - 0.14 \times \left(\frac{H}{H_0}\right)^2 + 0.32 \times \left(\frac{H}{H_0}\right) + 0.79$$

- Αναλυτικές σχέσεις αναγωγής για κεκλιμένη ανάντη παρειά:

$$\frac{c_i}{c_v} = -0.0281 \times \left(\frac{P}{H}\right)^3 + 0.1022 \times \left(\frac{P}{H}\right)^2 - 0.1328 \times \frac{P}{H} + 1.057 \text{ για κλίση } 3:3$$

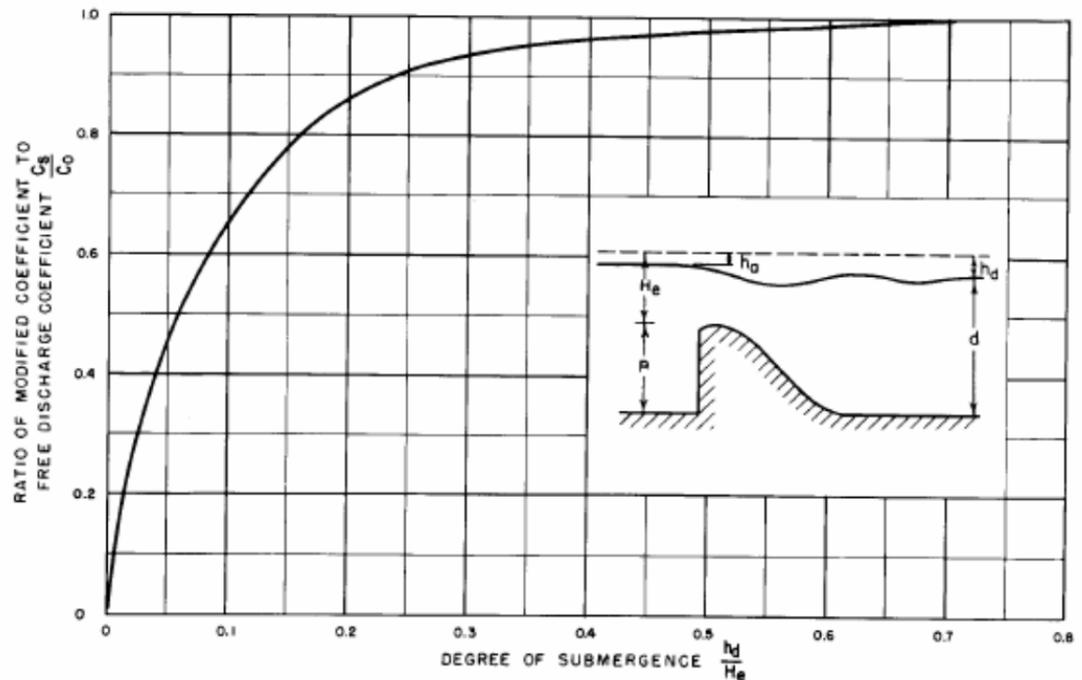
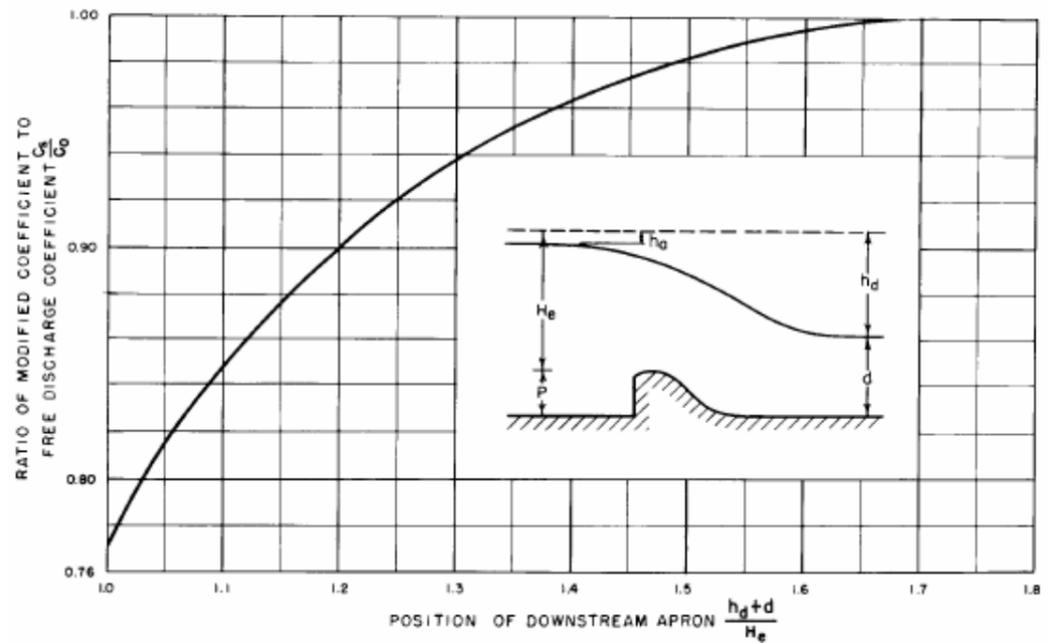
$$\frac{c_i}{c_v} = -0.0068 \times \left(\frac{P}{H}\right)^3 + 0.0272 \times \left(\frac{P}{H}\right)^2 - 0.0479 \times \frac{P}{H} + 1.0343 \text{ για κλίση } 2:3$$

$$\frac{c_i}{c_v} = -0.003 \times \left(\frac{P}{H}\right)^3 + 0.0118 \times \left(\frac{P}{H}\right)^2 - 0.0191 \times \frac{P}{H} + 1.0127 \text{ για κλίση } 1:3$$



Επίδραση κατάντη στάθμης νερού

- ❑ Σε χαμηλού ύψους φράγματα ή όταν η διώρυγα φυγής στο αρχικό της τμήμα έχει μικρή κλίση, η ροή πάνω από το οgee είναι δυνατόν να επηρεάζεται από τη στάθμη του νερού στα κατάντη (**apron effect**).
- ❑ Στην περίπτωση αυτή, η φλέβα του νερού είτε απομακρύνεται ελεύθερα ή είναι βυθισμένη (summerged).
- ❑ Ο λόγος του διορθωμένου συντελεστή παροχής ως προς αυτόν της ανεμπόδιστης ροής δίνεται με τη μορφή νομογραφημάτων.



Μετωπικοί υπερχειλιστές με εκροή από οπή (orifice)

Artvin Dam,
Τουρκία

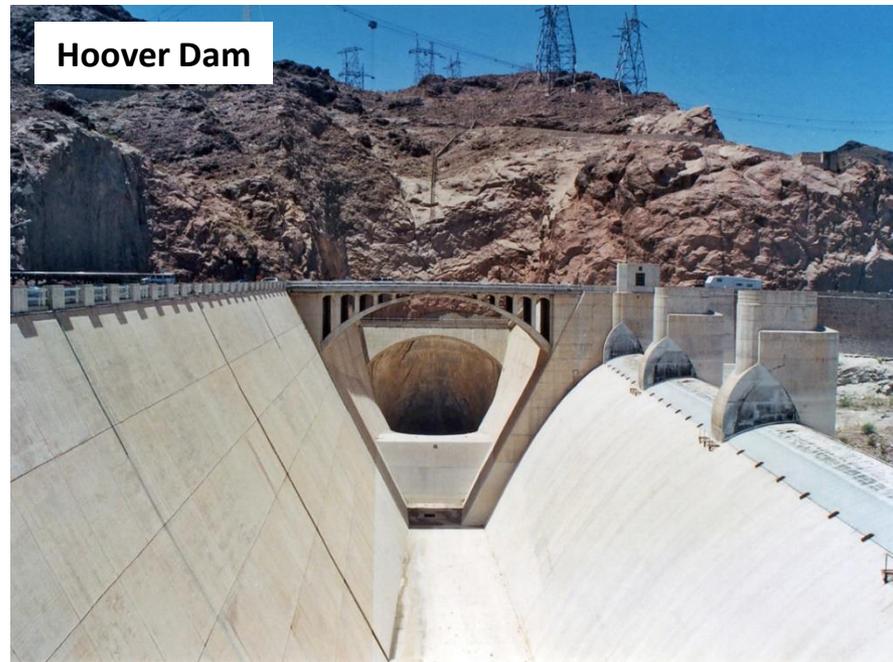


Tekeze Dam, Αιθιοπία



Πλευρικοί υπερχειλιστές

- Εφαρμόζονται σε γεωφράγματα ή σε φράγματα βαρύτητας σε στενές κοιλάδες.
- Βέλτιστη επιλογή για τον περιορισμό του υδραυλικού φορτίου, το οποίο επιβάλλει μεγάλο μήκος υπερχείλισης.
- Συνήθης διάταξη: διόδευση ροής πάνω από υπερχειλιστή οgee, σε εγκάρσια διώρυγα τραπεζοειδούς διατομής (στροφή 90°).
- Παρεμφερής υδραυλική λειτουργία με οgee, αλλά σε υψηλές παροχές η ροή μπορεί να είναι βυθισμένη.

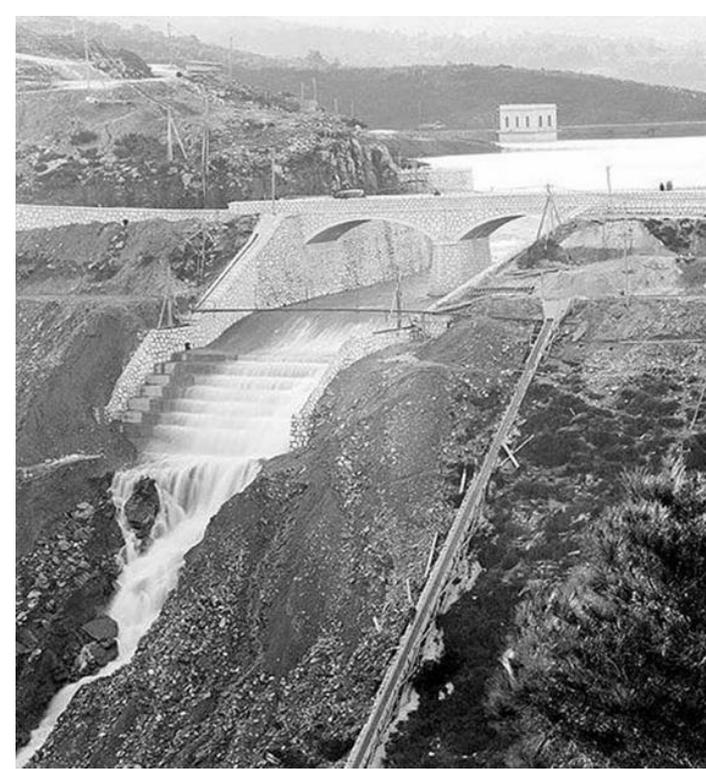


Υπερχειλιστής μορφής L



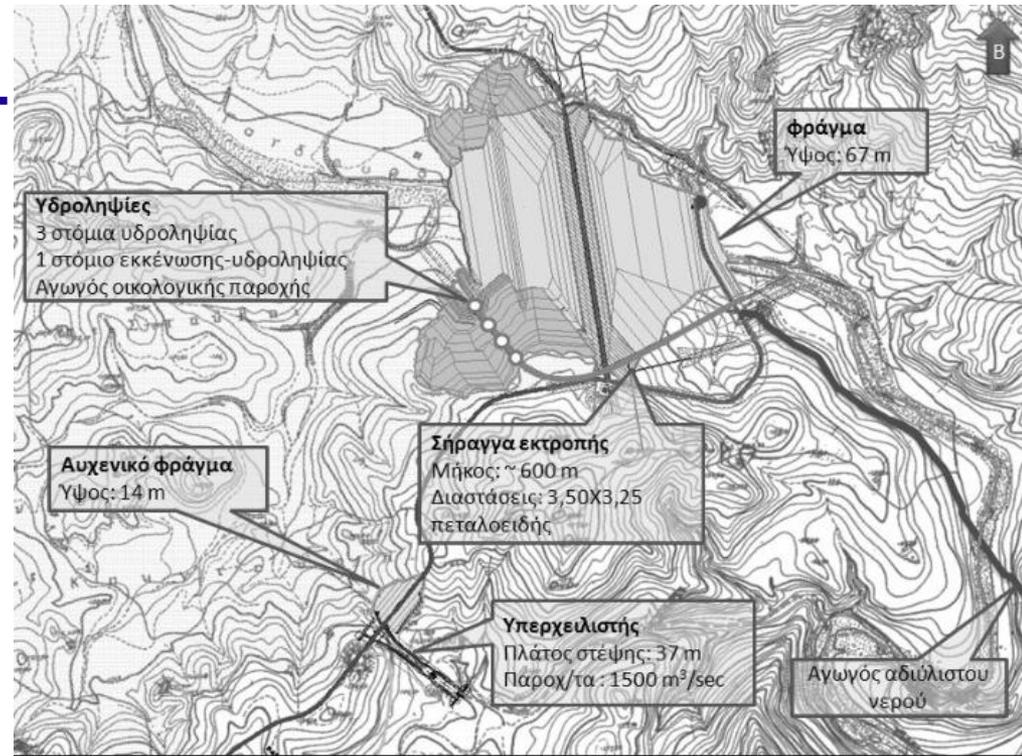
Φράγμα Καστρακίου

Παράδειγμα: Φράγμα Μαραθώνα



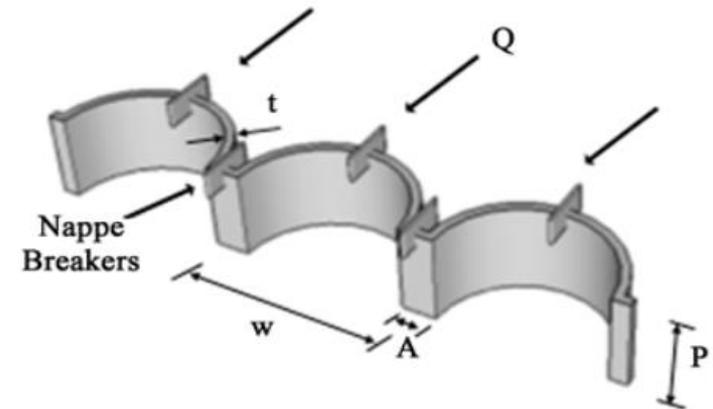
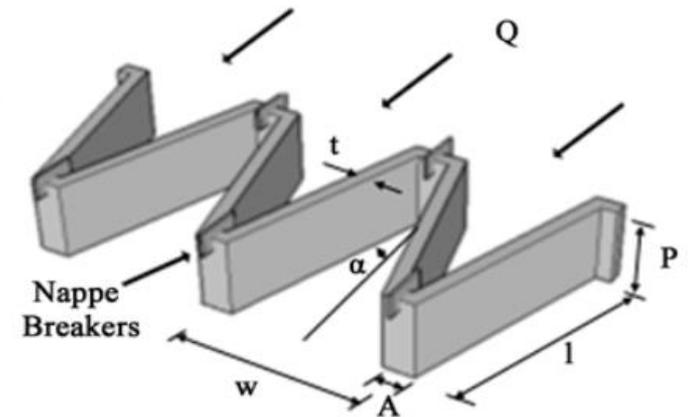
Αυχενικοί υπερχειλιστές

- Αναζήτηση κατάλληλης θέσης εντός της λεκάνης κατάκλυσης, με ευνοϊκά μορφολογικά χαρακτηριστικά (αυχένas, ρέμα που καταλήγει στο κυρίως υδατόρευμα).
- Απαιτείται η κατασκευή βοηθητικού (αυχενικού) φράγματος, με ίδιο υψόμετρο στέψης με το κυρίως έργο.
- Παράδειγμα: Φράγμα Γαδουρά, αυχενικό φράγμα 14 m και Υ/Χ, 700 m ΝΔ του κυρίως έργου.



Λαβυρινθοειδείς υπερχειλιστές

- ❑ Προσαύξηση παροχетеυτικότητας 3 έως 4 φορές σε σχέση με ευθύγραμμο υπερχειλιστή.
- ❑ Μορφές διατομών: ορθογωνική, τριγωνική, τραπεζοειδής, ημικυκλική.
- ❑ Τυπικές διατάξεις επιμέρους στοιχείων: ζιγκ-ζαγκ (τύπου W) ή τοξωτή.
- ❑ Με στρογγυλεμένα ή όχι άκρα.
- ❑ Απαιτούν μεγάλο πλάτος ανάπτυξης → περιορισμένη εφαρμογή σε φράγματα βαρύτητας.



Λαβυρινθοειδείς υπερχειλιστές: παραδείγματα

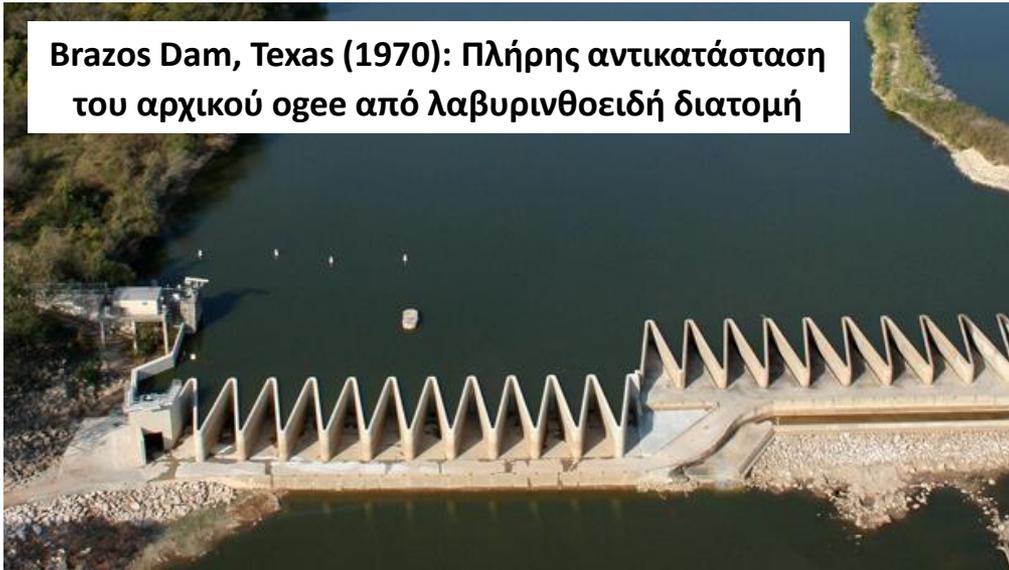
Ute Dam,
New Mexico



Fontenelle Dam,
Wyoming

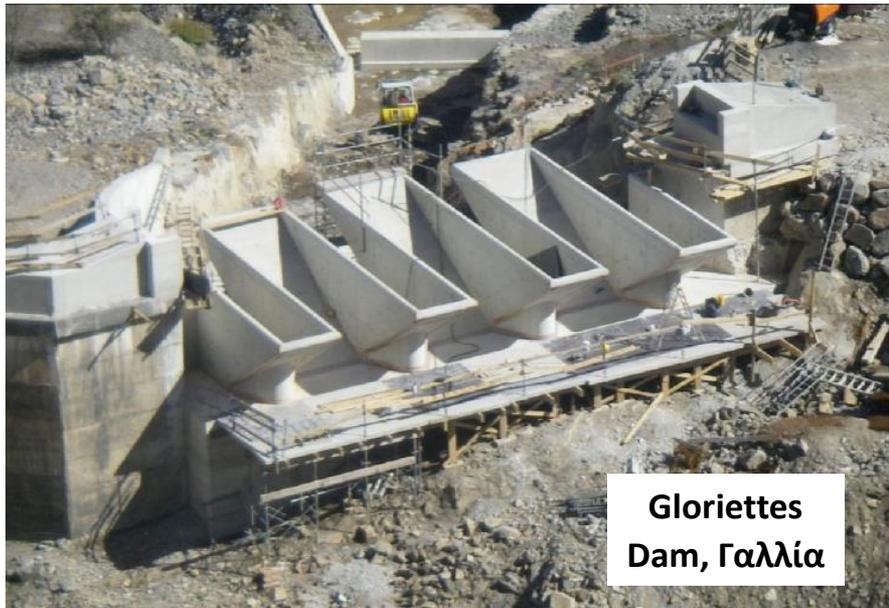


Brazos Dam, Texas (1970): Πλήρης αντικατάσταση
του αρχικού ogee από λαβυρινθοειδή διατομή

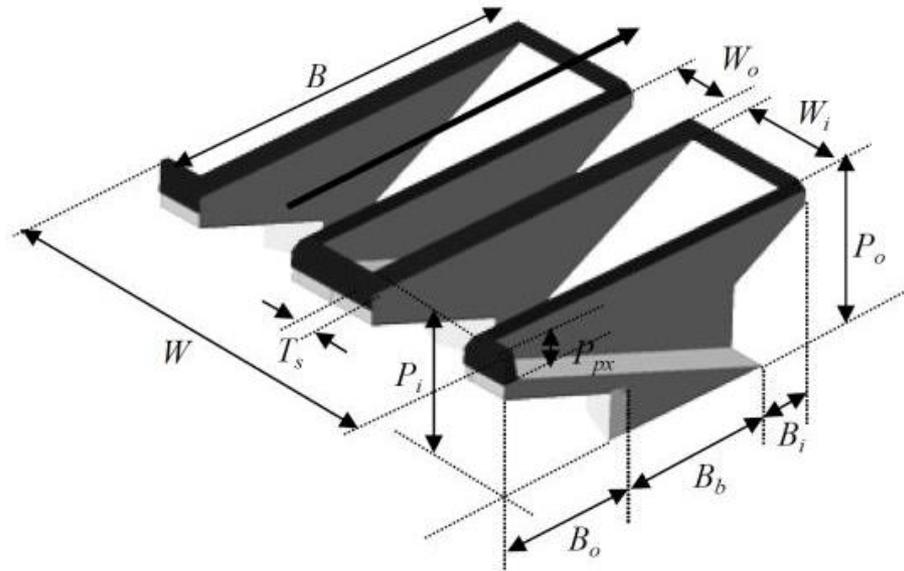


Υπερχειλιστές μορφής “ρίανο key”

- Σχετικά νέα τεχνολογία, στην ευρύτερη κατηγορία των λαβυρινθοειδών διατομών.
- Μικρότερη διατομή → μικρότερο κόστος
- Μικρότερο απαιτούμενο πλάτος ανάπτυξης → προσαρμογή σε υφιστάμενες στέψεις υπερχειλιστών

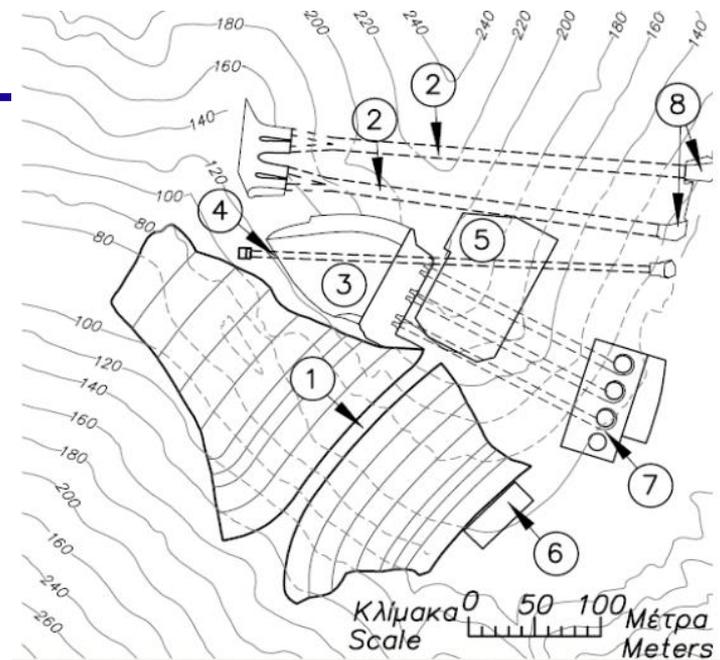


**Gloriettes
Dam, Γαλλία**



Σηραγγοειδείς υπερχειλιστές

- ❑ Επιλέγεται όταν συντρέχουν σημαντικοί τοπογραφικοί και γεωτεχνικοί περιορισμοί.
- ❑ Αναπτύσσονται ιδιαίτερα μεγάλες ειδικές παροχές.
- ❑ Αποφυγή κινδύνου εμφάνισης διαλείπουσας ροής (slug flow) μέσα στη σήραγγα.
- ❑ Εξασφάλιση καλού αερισμού της ροής.
- ❑ Εκμετάλλευση σήραγγας εκτροπής.
- ❑ Έξοδος σε έργο εκτόξευσης.



Φράγμα Ευήνου

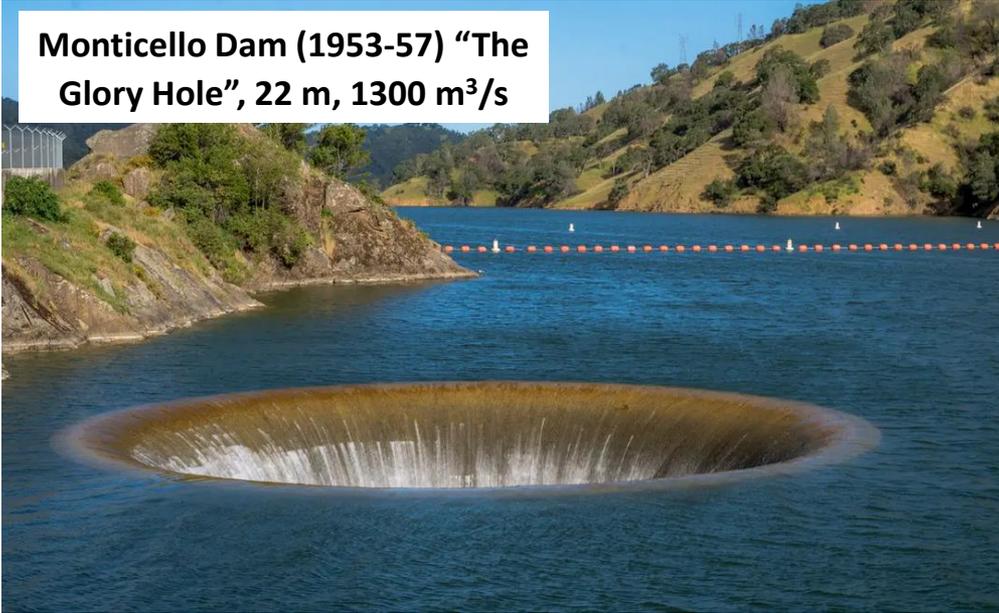


Φράγμα Σφηκιάς



Φρεατοειδείς υπερχειλιστές (“morning glory”)

Monticello Dam (1953-57) “The Glory Hole”, 22 m, 1300 m³/s

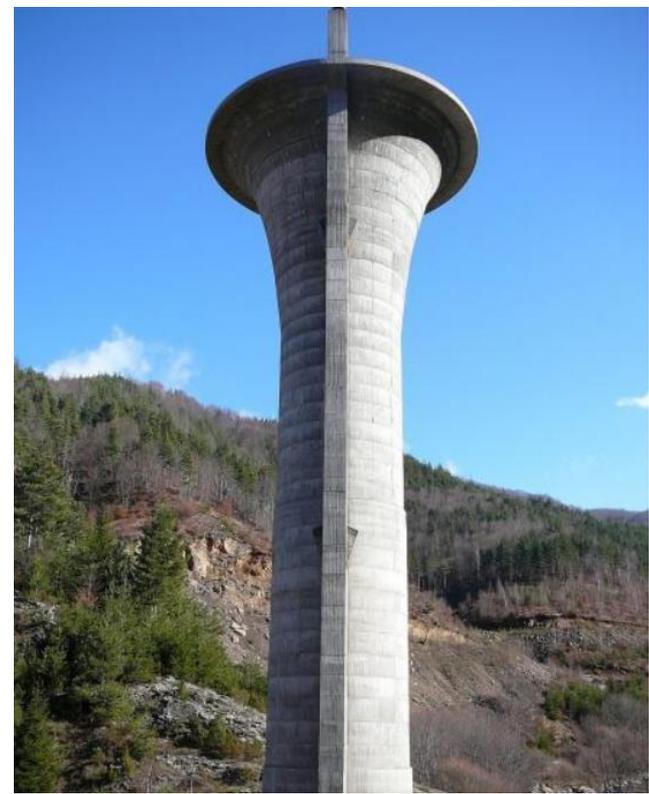
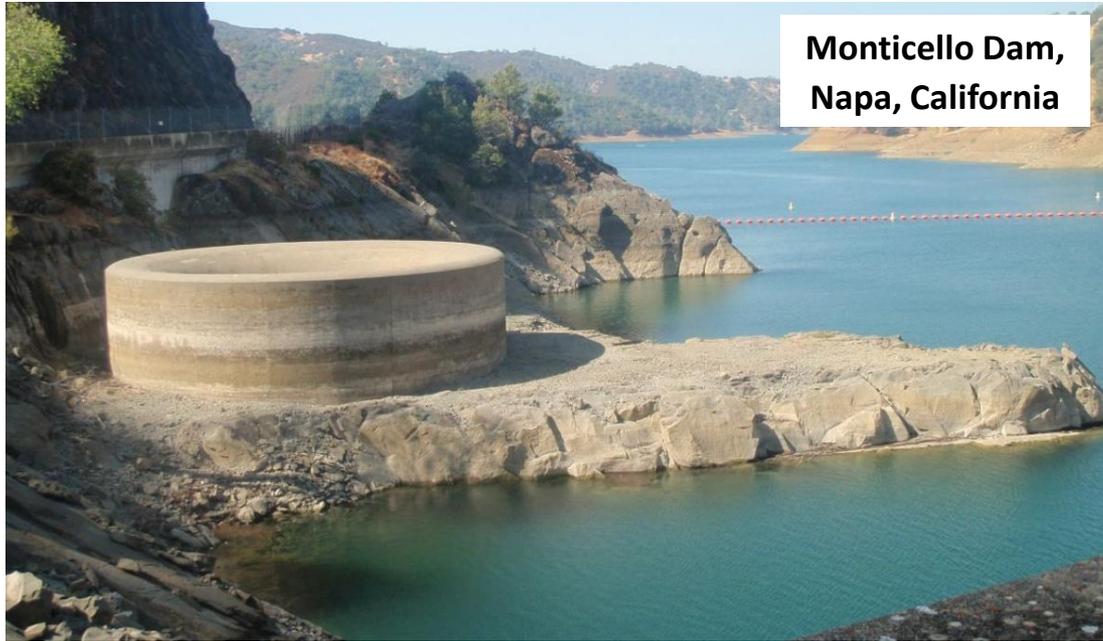


Gibson Dam, Montana

Ladybower Dam, Derbyshire

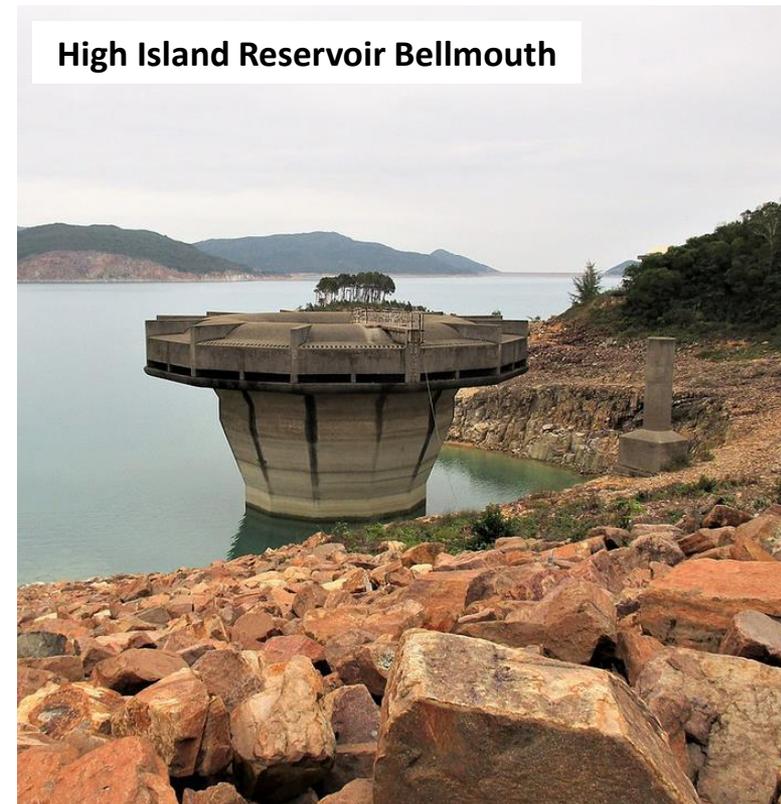
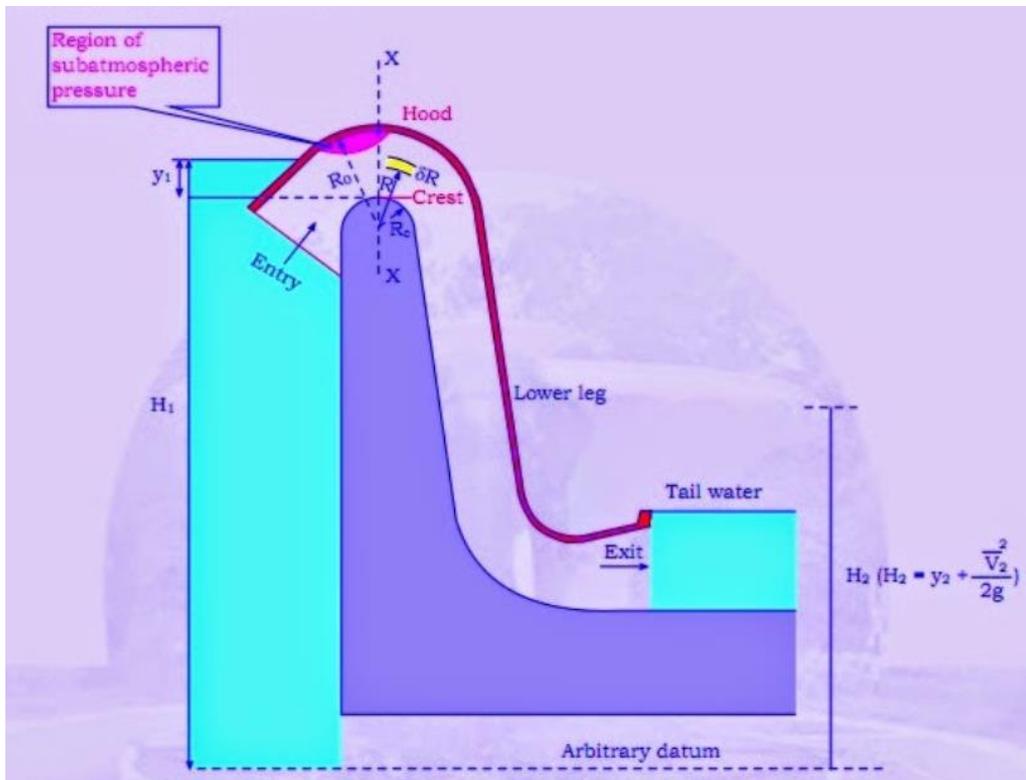


Φρεατοειδείς υπερχειλιστές



Σιφωνοειδείς υπερχειλιστές

- ❑ Λειτουργεί από μια δεδομένη στάθμη και πάνω, και η παροχή δεν εξαρτάται από το υδραυλικό φορτίο, όπως σε άλλους τύπους υπερχειλιστών (η υδραυλική λειτουργία του συστήματος βασίζεται στο φαινόμενο του σιφωνισμού).
- ❑ Πλεονέκτημα: συνεχής λειτουργίας σε πλήρη παροχетеυτικότητα → διατήρηση σχεδόν σταθερής στάθμης στον ταμιευτήρα.
- ❑ Κατάλληλοι για σχετικές μικρές παροχές.
- ❑ Υψηλές απαιτήσεις συντήρησης.



Συστήματα προσαγωγής

- ❑ Διώρυγες για την ομαλή προσαγωγή της ροής προς το έργο υπερχειλίσης → επιπτώσεις περιδινήσεων
- ❑ Καθοδηγητικοί τοίχοι καμπύλου σχήματος
- ❑ Επενδύσεις πρανών και δαπέδων
- ❑ Προστασία πρανών – Κατολισθήσεις
- ❑ Καθαρισμοί από επιπλέοντα φερτά – συντήρηση



Παραδείγματα από κατασκευαστικές εργασίες

Φράγμα Τριανταφυλλιάς



Φράγμα Ασωμάτων



Φράγμα Στράτου

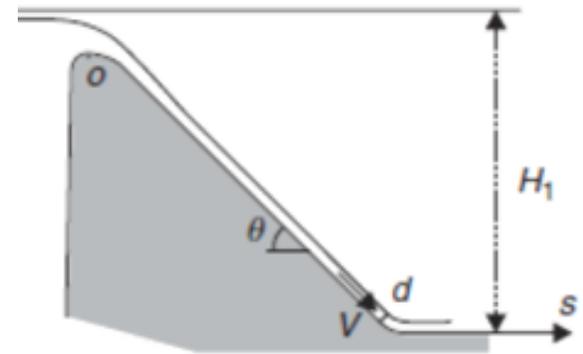


Φράγμα Αγιονερίου



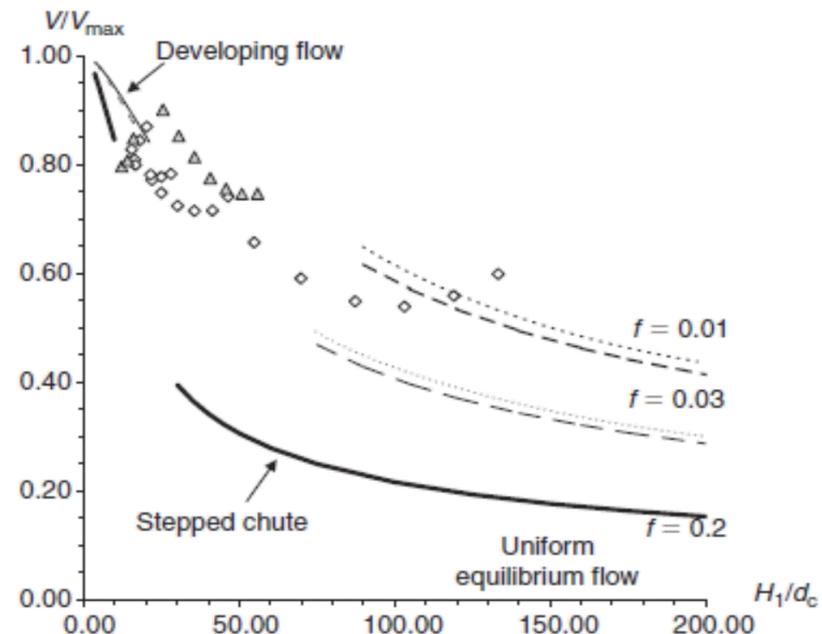
Διώρυγες πτώσης και έργα καταστροφής ενέργειας

- Υδραυλικοί υπολογισμοί σε διώρυγες πτώσης:
 - Ταχέως μεταβαλλόμενη ροή στη στέψη
 - Ομαλά μεταβαλλόμενη ροή στη διώρυγα
 - Μεγάλες κλίσεις ροής
 - Προσρόφηση αέρα – Αυξημένες απώλειες
 - Εγκάρσιοι κυματισμοί σε στενώσεις

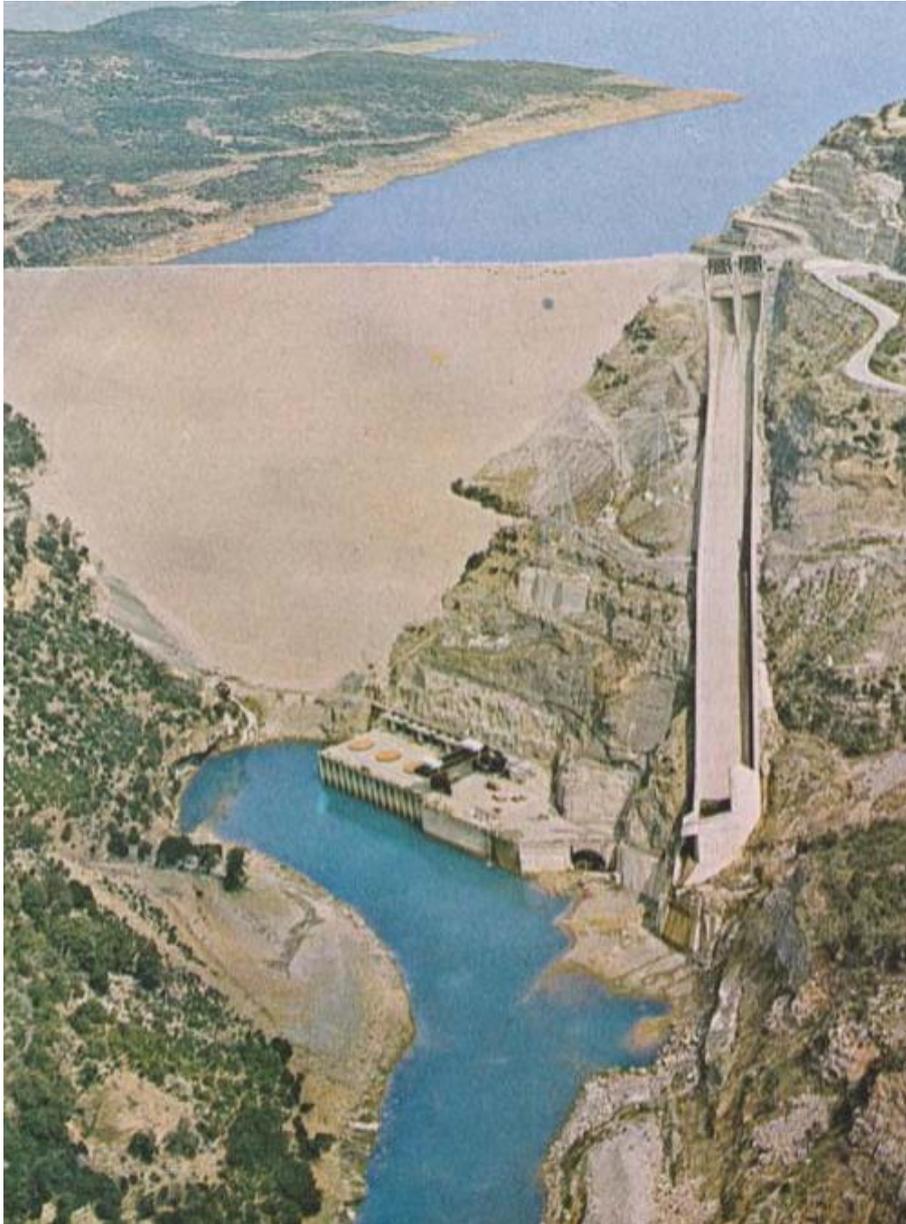


- Ταχύτητα ροής στον πόδα: $V_{max} = \sqrt{2g(H_1 - d \cos\theta)}$
- Συνήθης μηχανισμός καταστροφής ενέργειας είναι η δημιουργία ελεγχόμενου (θέση, μορφή) υδραυλικού άλματος, μέσω:

- Λεκάνης καταστροφής ενέργειας.
 - Εκτόξευσης της φλέβας (ski jump, flip bucket) και απόσβεση της ενέργειας με πτώση της σε λεκάνη ηρεμίας.
 - Διαμόρφωσης βαθμιδωτού υπερχειλιστή, που επιτυγχάνει απόσβεση της ενέργειας κατά την πτώση (μπορεί να απαιτείται και μικρού μεγέθους λεκάνη ηρεμίας)
- Σχεδιασμός με βάση τα χαρακτηριστικά της ροής στον πόδα (ταχύτητα, ενέργεια, Froude).



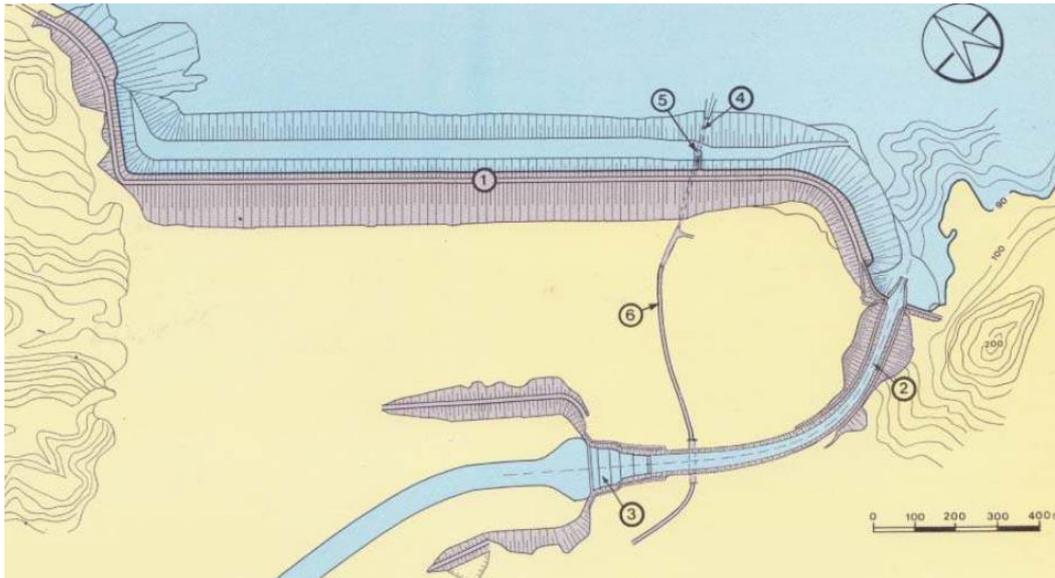
Παράδειγμα διώρυγας πτώσης: Φράγμα Κρεμαστών



Παράδειγμα διώρυγας πτώσης: Φράγμα Μεσοχώρας



Παράδειγμα διώρυγας πτώσης: Φράγμα Πηνειού



Παράδειγμα διώρυγας πτώσης: Φράγμα Αποσελέμη

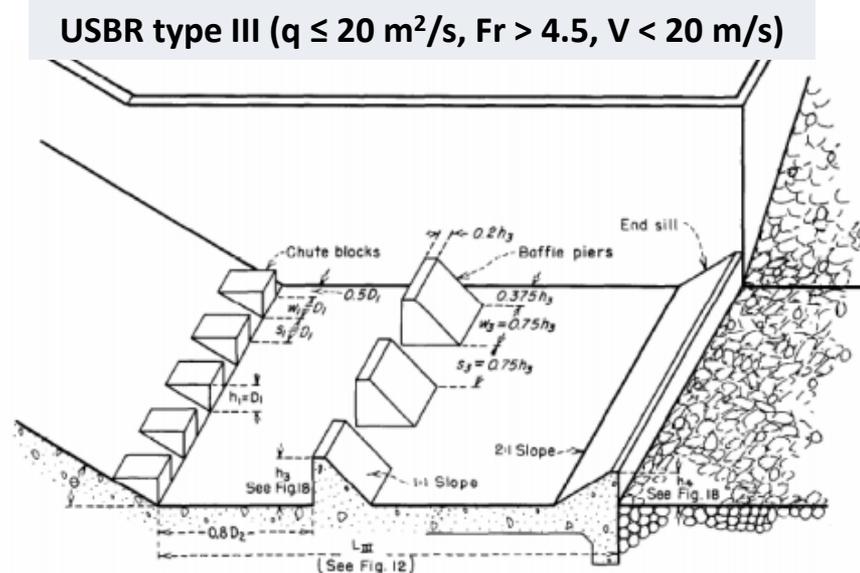
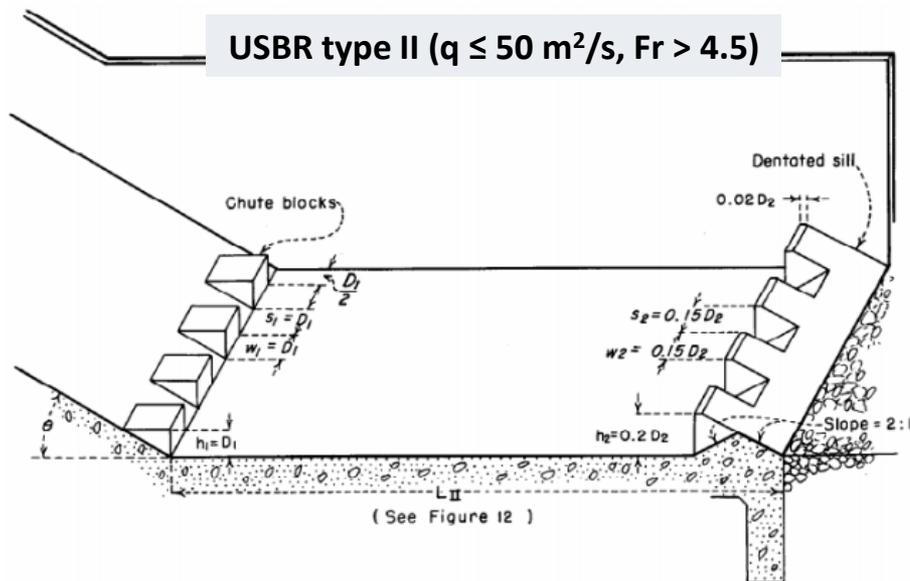


Παράδειγμα διώρυγας πτώσης: Φράγμα Γαδουρά



Λεκάνες καταστροφής ενέργειας (ΛΚΕ)

- ❑ Προσδιορισμός στάθμης διώρυγας φυγής (εξαρτάται από την στάθμη του κατάντη αποδέκτη)
- ❑ Επιλογή υψομέτρου πυθμένα λεκάνης
- ❑ Διαμόρφωση ΛΚΕ με βάση τον τύπο του υδραυλικού άλματος (κριτήριο ελέγχου: Froude):
 - **Ασθενές άλμα** ($1.7 < Fr < 2.5$): ΛΚΕ ίση με το μήκος του άλματος
 - **Δονούμενο άλμα** ($2.5 < Fr < 4.5$): Απαιτούνται μέτρα για την απόσβεση των κυματισμών που μεταφέρονται στα κατάντη, γι' αυτό η περιοχή αυτή θα πρέπει να αποφεύγεται.
 - **Μόνιμο άλμα** ($4.5 < Fr < 9$): Το άλμα είναι εξαιρετικά αποτελεσματικό στην καταστροφή ενέργειας και έχουν μελετηθεί διάφοροι τύποι λεκανών ηρεμίας με σχετικά μικρές διαστάσεις, στις οποίες δεν επηρεάζεται η αποτελεσματικότητα του άλματος.
 - **Ισχυρό άλμα** ($Fr > 9$): Η κατασκευή ΛΚΕ είναι πολύ δαπανηρή.



Παραδείγματα ΛΚΕ στην Ελλάδα



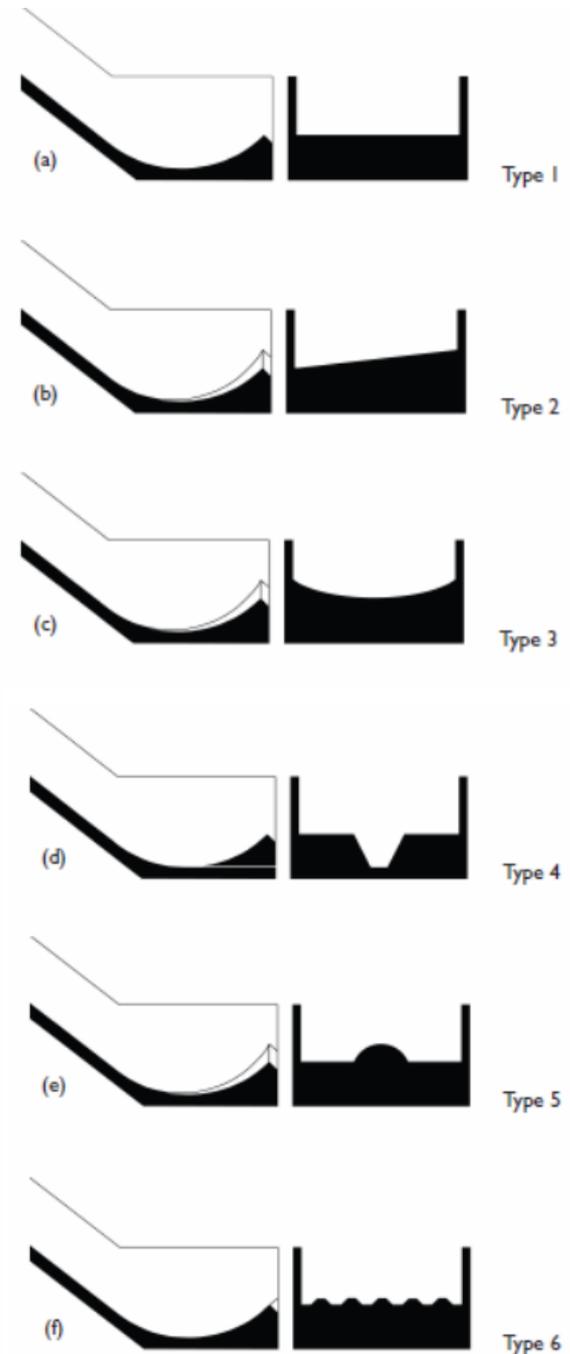
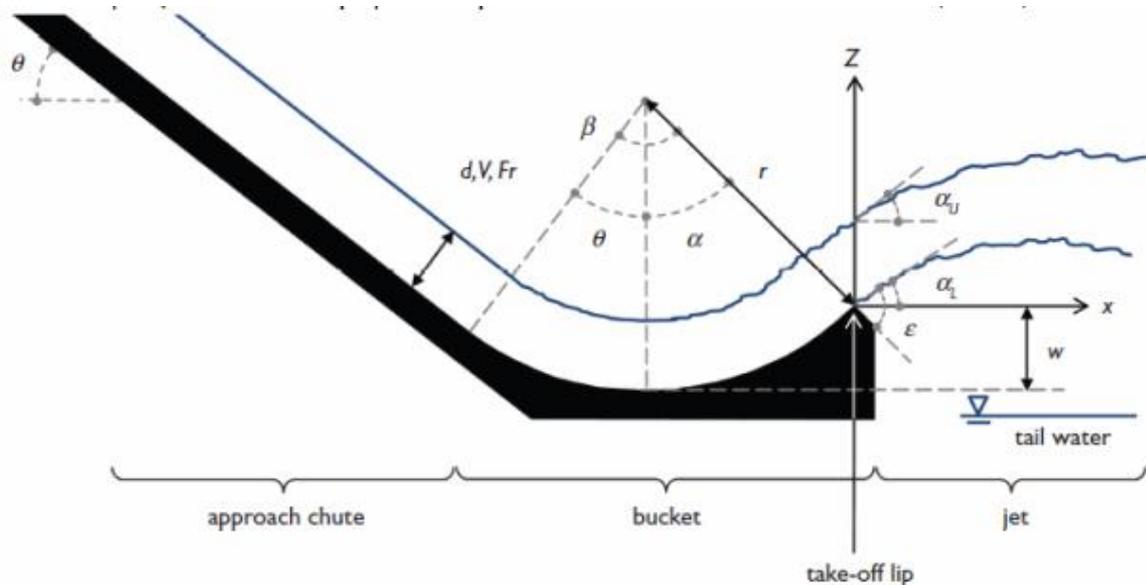
Κάδος αναπήδησης (flip bucket)

- Το νερό εκτοξεύεται προς αποδέκτη ή λεκάνη, με επένδυση ή χωρίς (σε περίπτωση σκληρού πετρώματος).
- Σχέση μεταξύ γωνίας εκτόξευσης α και ακτίνα καμπυλότητας R της κατασκευής (Vischer & Hager, 1995):

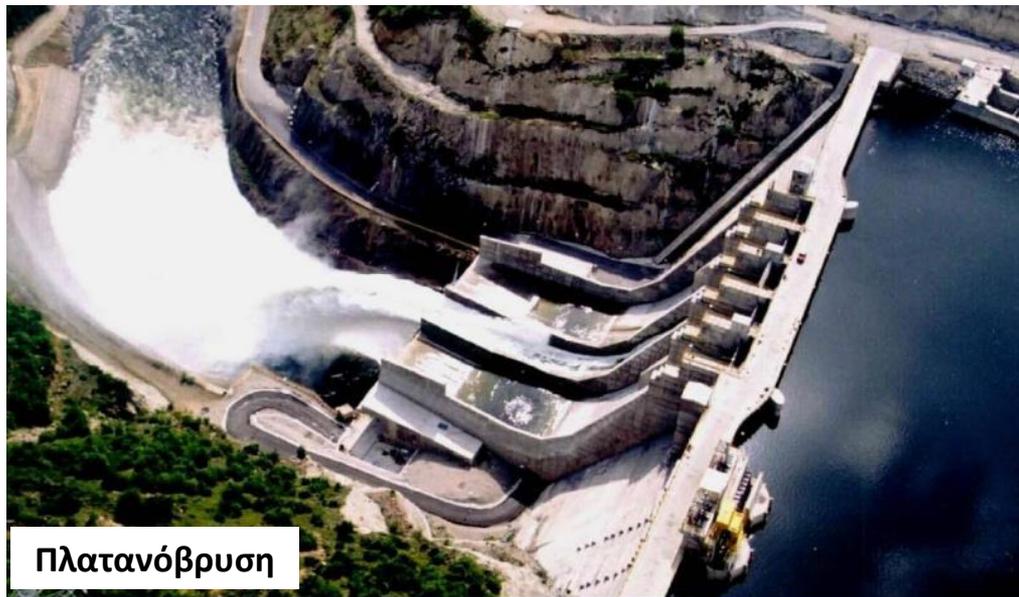
$$\frac{9.10R}{10^5 H_b} \alpha^3 = 7.80 - F_b \quad \text{και} \quad \frac{R}{y_b} = 17(F_b^{1/2} - 2)$$

όπου b το χαμηλότερο σημείο της κατασκευής εκτόξευσης και H_b το συνολικό ύψος ενέργειας.

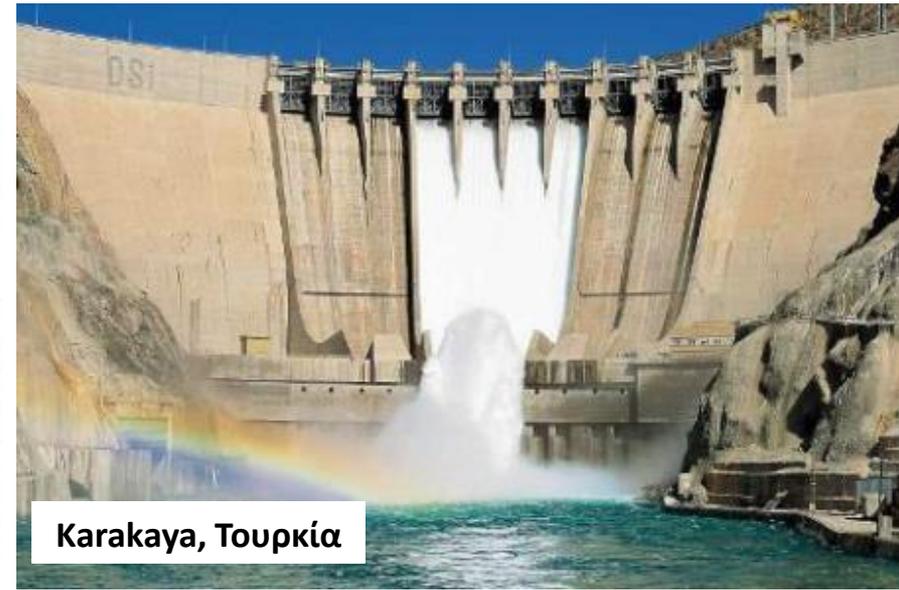
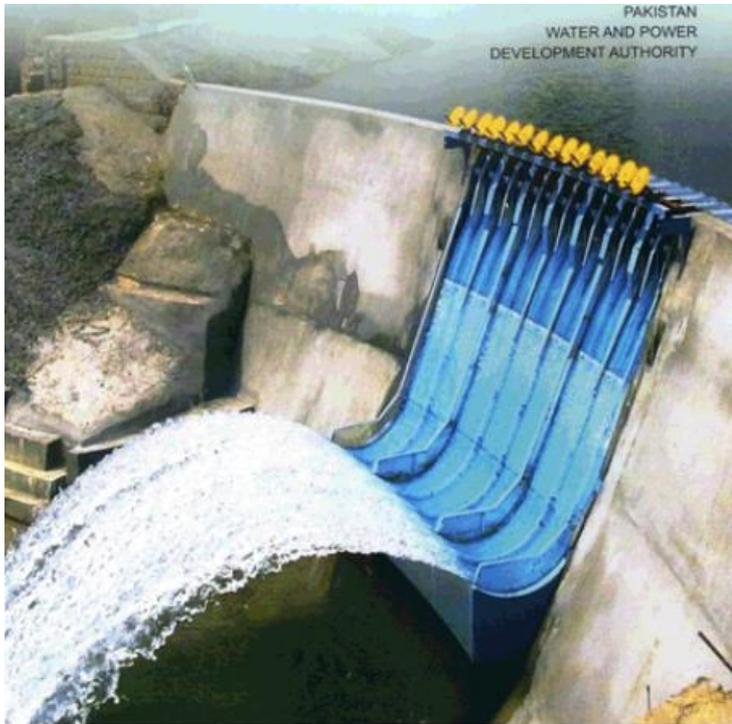
- Γενικοί περιορισμοί: $\alpha = 15-35^\circ$, $R = 12 - 19 \text{ m}$ (συνήθης τιμή 15 m), και $r/y = 4Fr - 15$ ($5.5 < Fr < 10$).



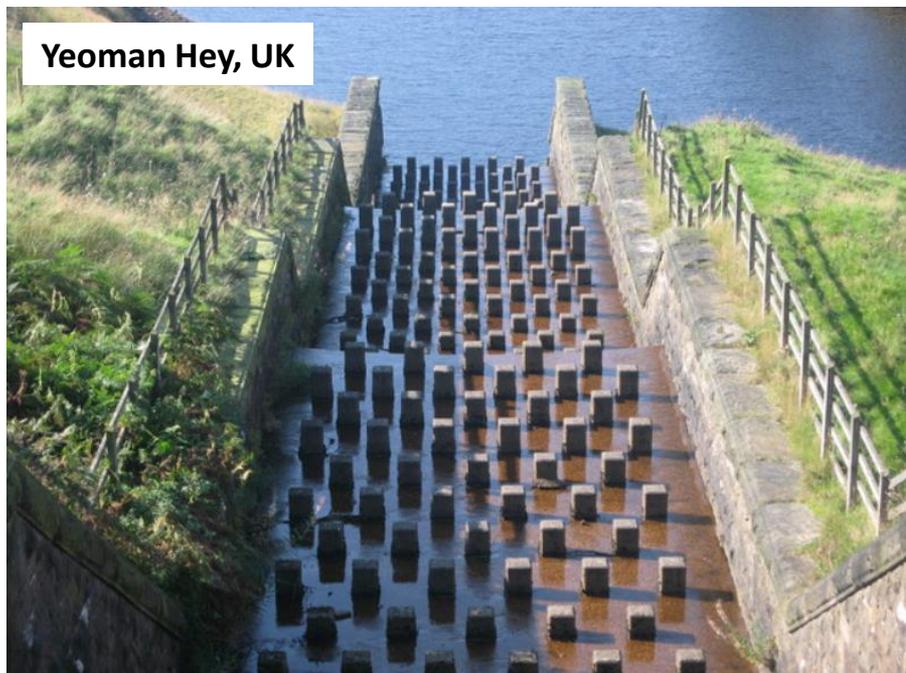
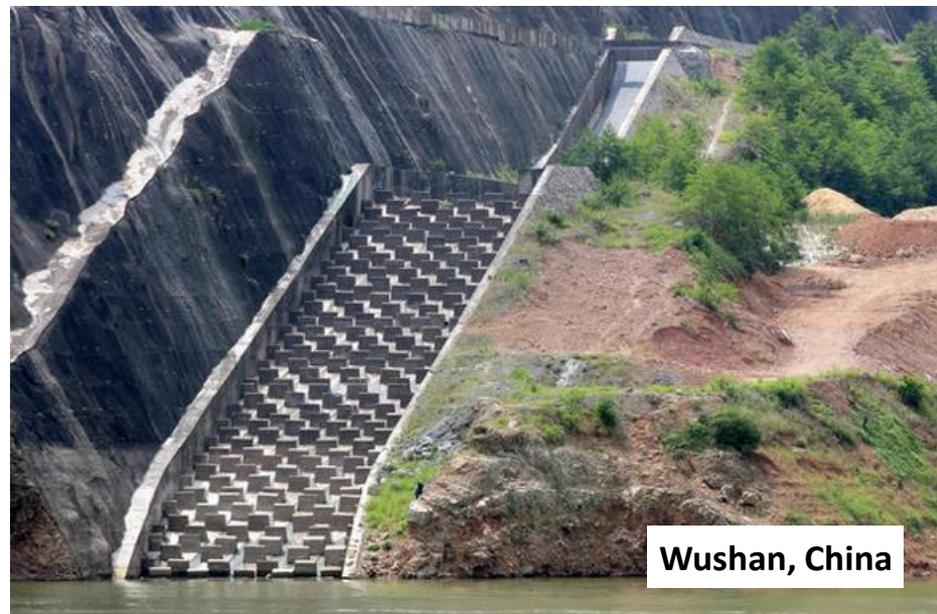
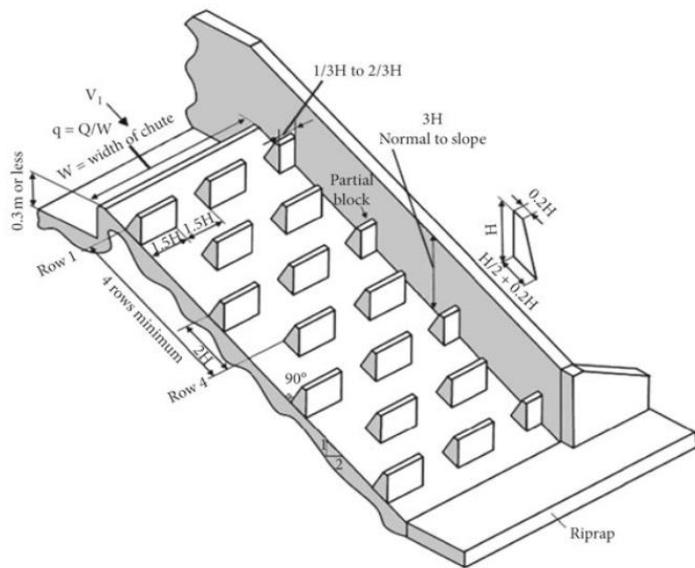
Παραδείγματα συστημάτων εκτόξευσης στην Ελλάδα



Παραδείγματα συστημάτων εκτόξευσης στο εξωτερικό



Διώρυγες πτώσεις με οδοντώσεις (baffle chutes)



Βαθμιωτοί (stepped) υπερχειλιστές

Hinze, Australia



Opuha, New Zealand



Standley Lake,
Colorado

