



Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
ΔΠΜΣ: Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων

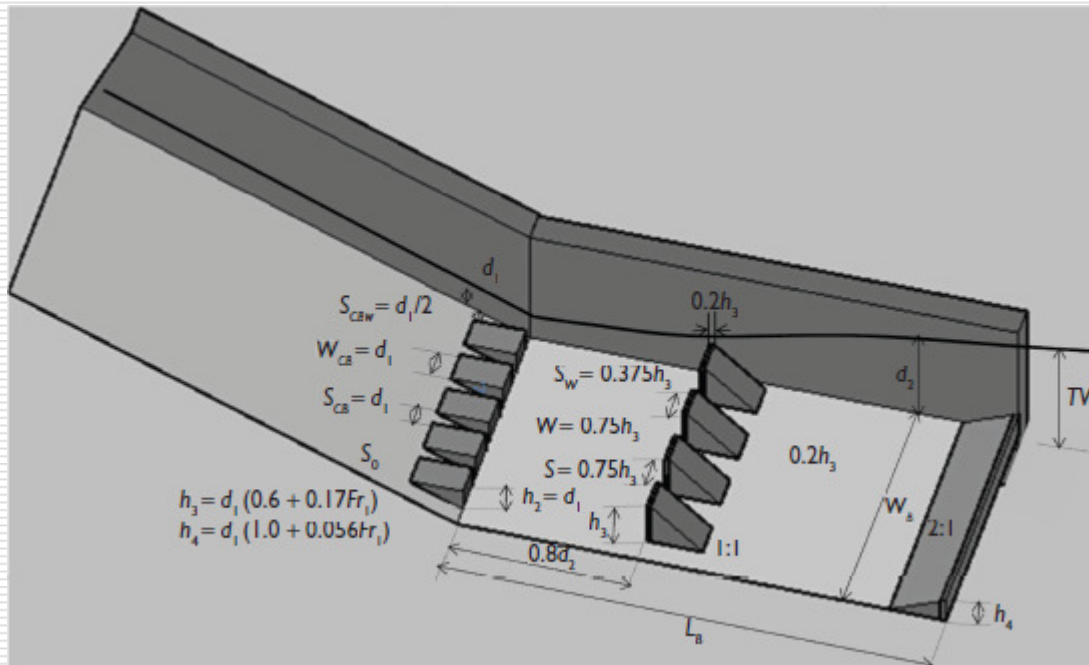
Μάθημα: ΦΡΑΓΜΑΤΑ



ΕΝΟΤΗΤΑ 2 – Π. Ν. Παπανικολάου

Διδάσκοντες: ΝΙ Μουτάφης – ΠΝ Παπανικολάου

Έργα αποτόνωσης ενέργειας υπερχειλιστών



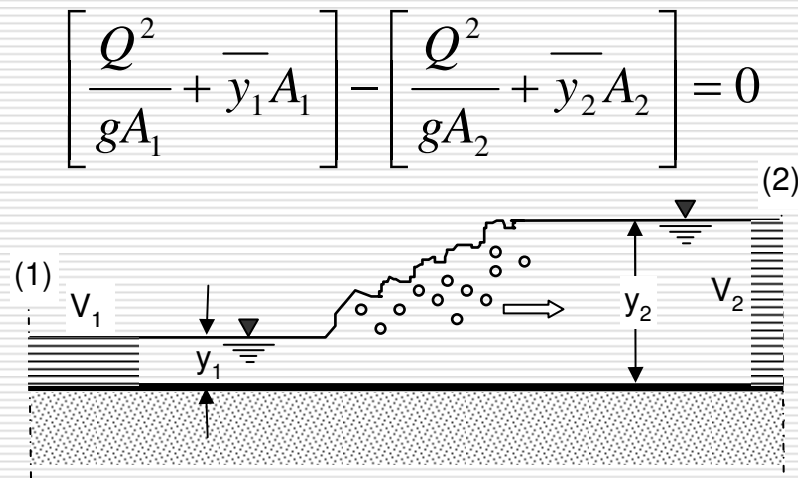
Από H. Chanson (2015), Hydraulic jumps and stilling basins

1. Υδραυλικό άλμα



ΕΜΠ-ΔΠΜΣ Σχολή Πολ. Μηχ.
Μάθημα: Φράγματα, Διδάσκοντες
ΝΙ Μουτάφης, ΠΝ Παπανικολάου

Αρχή: Ισότητα ειδικής δύναμης



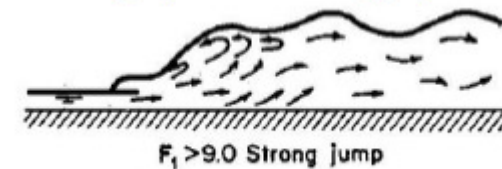
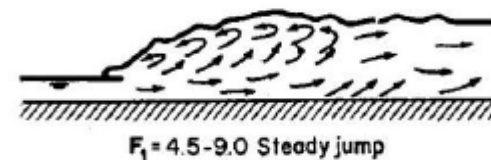
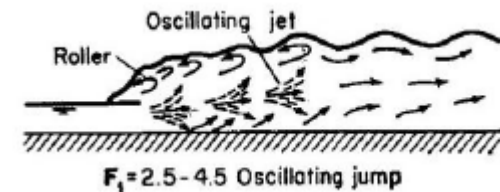
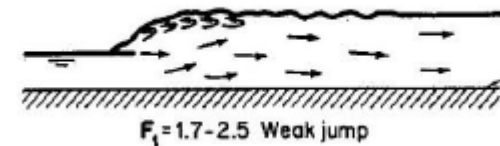
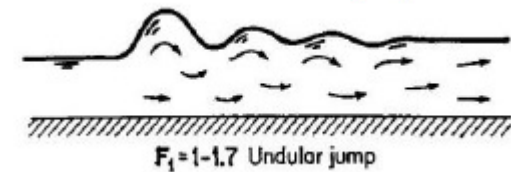
Ορθογωνική διώρυγα

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right]$$






$$\Delta H = \frac{(y_1 - y_2)^3}{4y_1 y_2}$$

Κατηγορίες υδραυλικού άλματος

1. Κυματοειδές (undular) $1 < Fr_1 < 1.7$
2. Ασθενές (weak) $1.7 < Fr_1 < 2.5$
3. Δονούμενο (oscillating) $2.5 < Fr_1 < 4.5$
4. Μόνιμο (steady) $4.5 < Fr_1 < 9.0$
5. Ισχυρό (strong) $Fr_1 > 9.0$



Κατηγορίες υδραυλικού άλματος (2)

Type of Jump	Froude Number Range	Description	Energy Dissipation	Flow Schematic
Pre-Jump	$Fr_1 < 1.0$	Jump is impossible because it violates the 2 nd Law of Thermodynamics.	N/A	N/A
Undular Jump	$Fr_1 = 1.0 - 1.7$	Standing-wave about $4y_2$ long	< 5%	
Weak Jump	$Fr_1 = 1.7 - 2.5$	Smooth surface rise with small rollers.	5% - 15%	
Oscillating Jump	$Fr_1 = 2.5 - 4.5$	Unstable; each irregular pulsation creates a large wave that can travel downstream for miles, damaging earth banks and other structures. Not recommended for design conditions.	15% - 45%	
Steady Jump	$Fr_1 = 4.5 - 9.0$	Stable, well-balanced jump that offers best performance and action; insensitive to downstream conditions. This is the best design range.	45% - 70%	
Strong Jump	$Fr_1 > 9.0$	Rough, somewhat intermittent but good performance.	70% - 85%	

Μήκος & μορφή του υδραυλικού άλματος

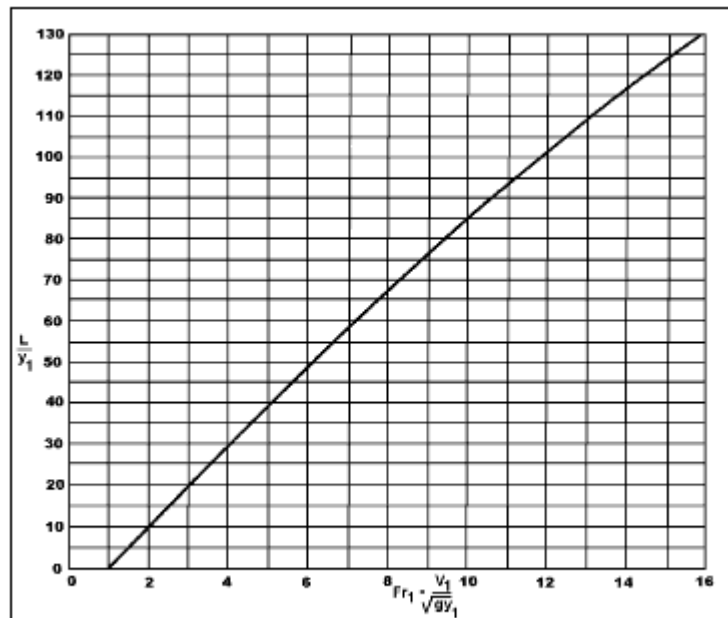


Figure 6.5. Length of Jump for a Rectangular Channel

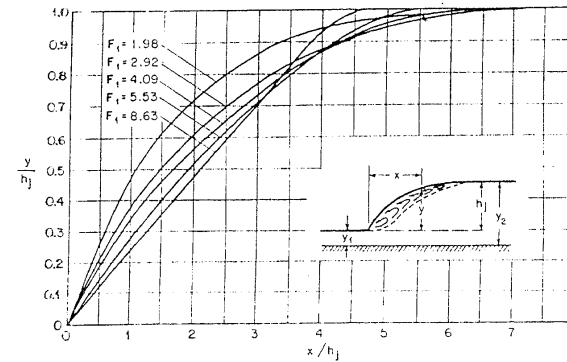
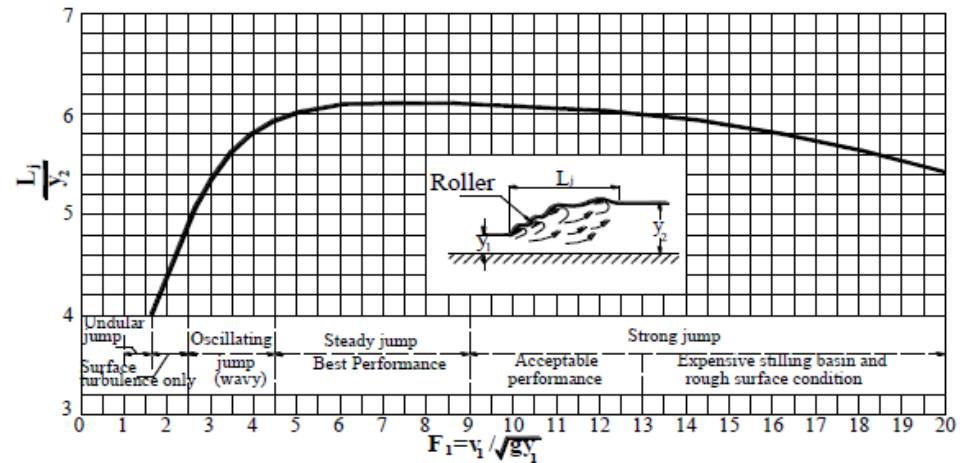


Fig.5. Dimensionless surface profiles of hydraulic jumps in horizontal channels.

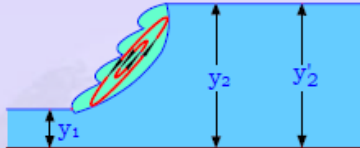


ΕΜΠ-ΔΠΜΣ Σχολή Πολ. Μηχ.
Μάθημα: Φράγματα, Διδάσκοντες
ΝΙ Μουτάφης, ΠΝ Παπανικολάου

Υδραυλικό άλμα & καταστροφή ενέργειας

Relationship between Tailwater (y_t) and Sequent depth (y_2)

y_2 = sequent depth,
 y_t = tailwater depth



y_t tailwater depth (βάθος ροής στα κατάντη)

y_2 sequent (συζυγές)

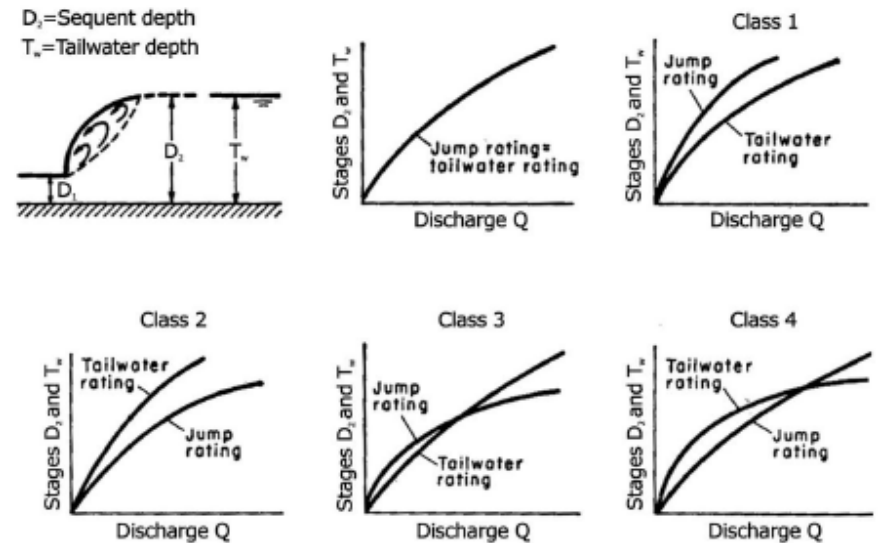
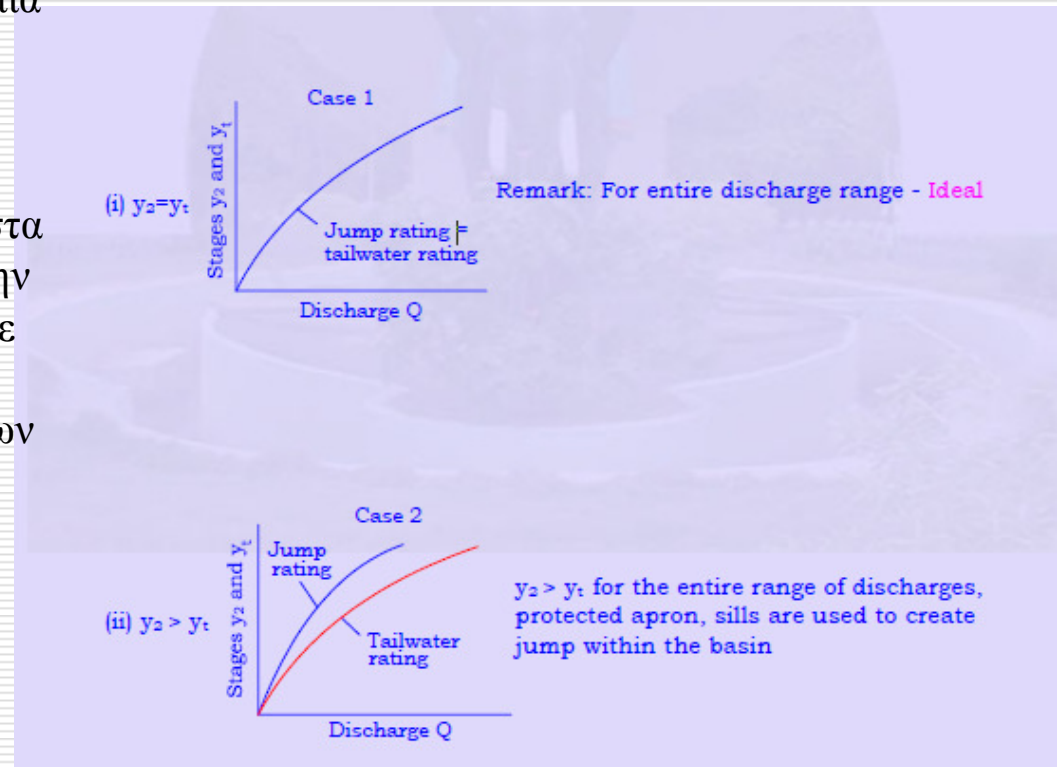


FIG. 15-10. Classification of tailwater conditions for the design of scour-protection works.

Υδραυλικό άλμα & καταστροφή ενέργειας (2)

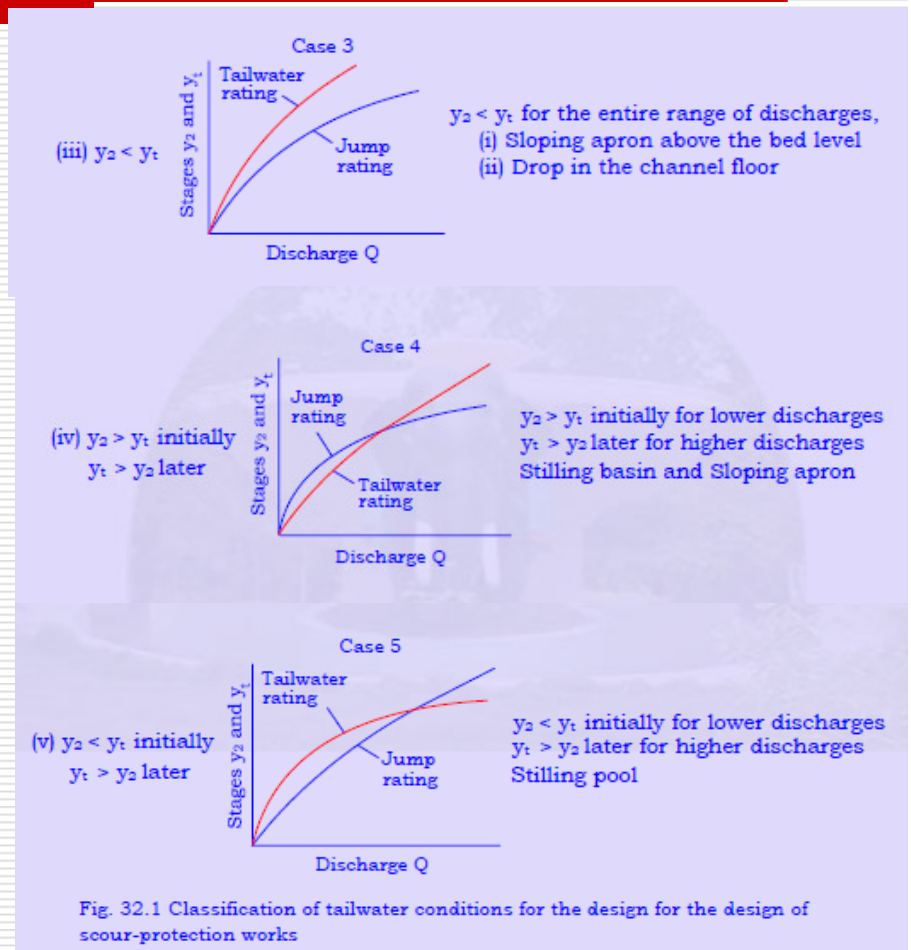
1. Ιδανική περίπτωση, δεν χρειάζεται καμμία παρέμβαση στη ροή. Δύσκολο να επιτευχθεί.

2. $M_1 > M_{2t}$, χρειάζεται αύξηση της ορμής στα κατάντη που επιτυγχάνεται είτε με την κατασκευή κάποιου εμποδίου, είτε με ταπείνωση πυθμένα λεκάνης ηρεμίσεως, είτε με συνδυασμό και των δύο.



Υδραυλικό άλμα & καταστροφή ενέργειας (3)

- $M_1 < M_{2t}$, χρειάζεται αύξηση της ορμής στα ανάντη που επιτυγχάνεται με αύξηση της κλίσης του αγωγού, είτε μείωση πυθμένα λεκάνης
- Μεγάλη κλίση για τις μεγάλες παροχές και άλμα πάνω στην κλίση, εμπόδιο για τις μικρότερες παροχές
- Εμπόδιο για τις μεγάλες παροχές, μικρή βύθιση για τις μικρότερες.



Έλεγχος υδραυλικού άλματος – υπερχειλιστής λεπτής στέψης

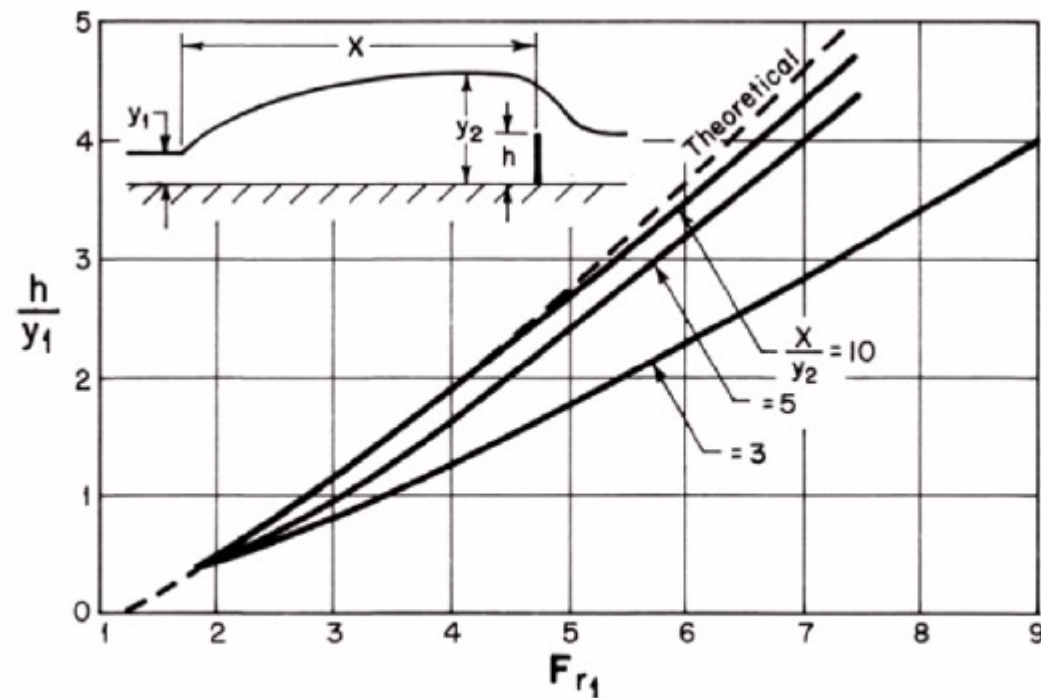


Fig. 7-15. Control of hydraulic jump by sharp-crested weir (After Forster and Skrinde [1950])

Έλεγχος υδραυλικού άλματος – ανύψωση πυθμένα

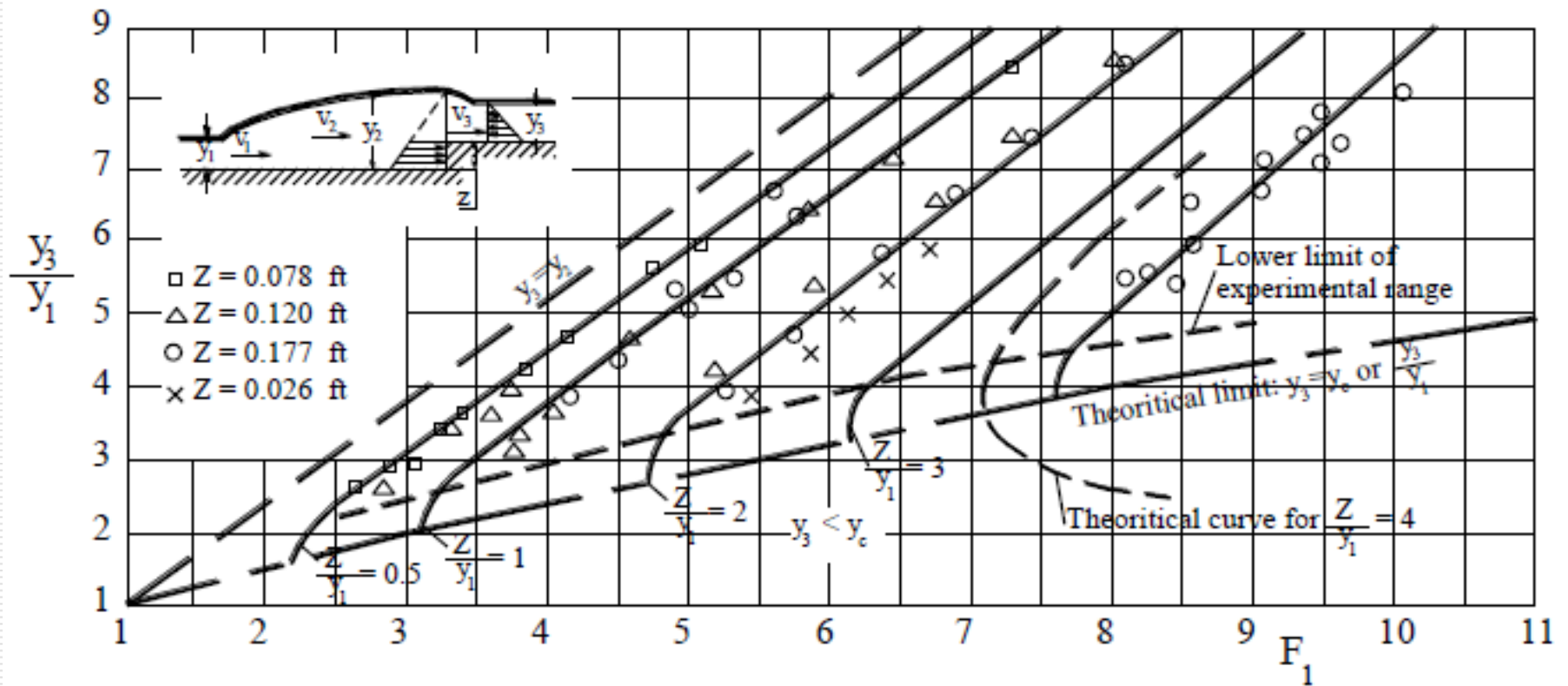
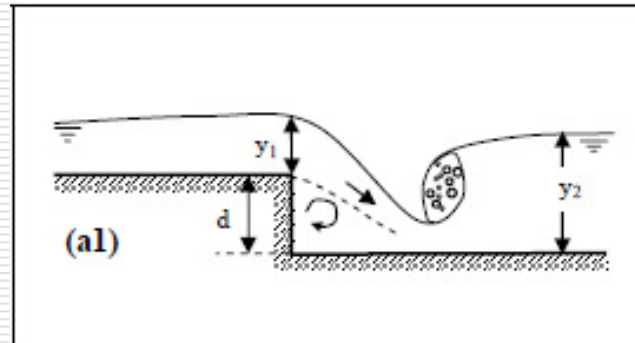


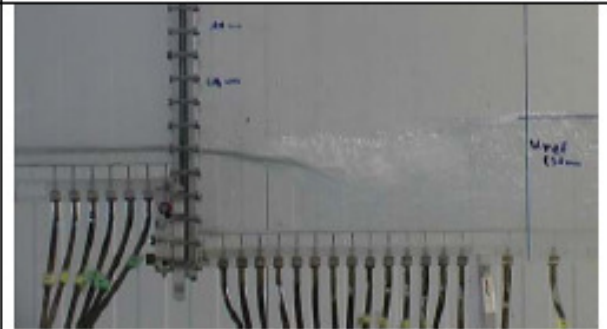
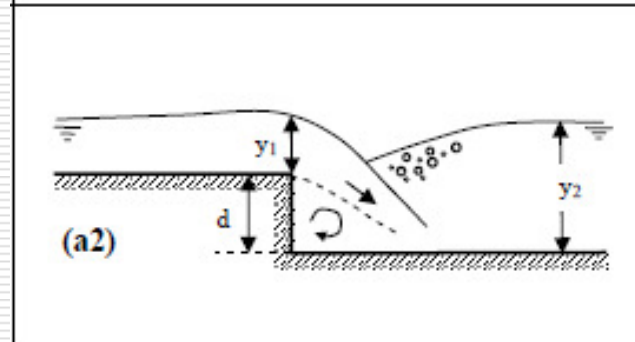
Fig. 7-16. Control of hydraulic jump by abrupt rise (After Forster and Skrinde [1950])

Έλεγχος υδραυλικού άλματος – ταπείνωση πυθμένα (1)

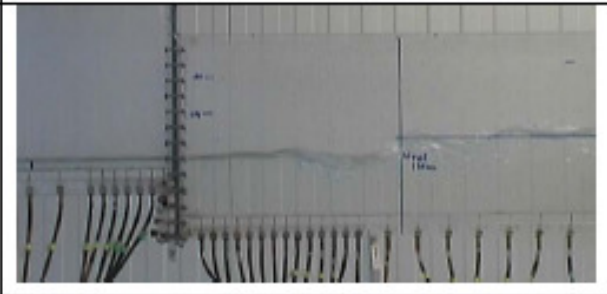
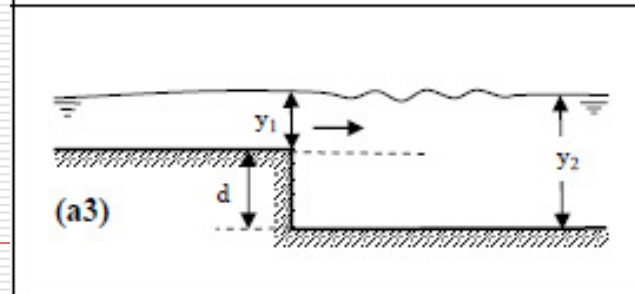
Minimum
B-jump



B-jump

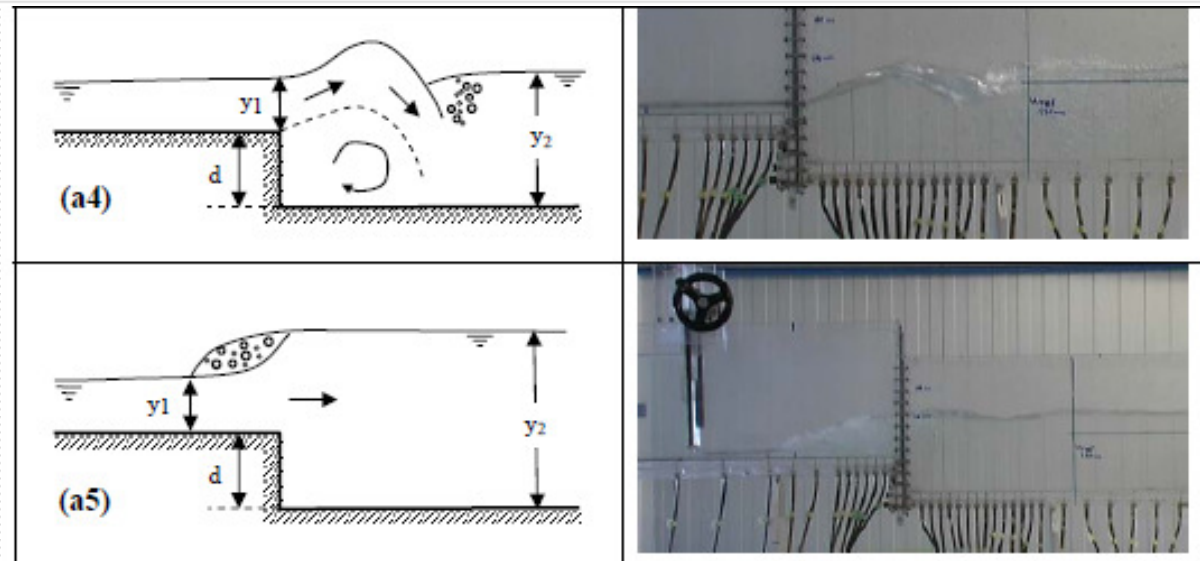


Wave train



Έλεγχος υδραυλικού άλματος – ταπείνωση πυθμένα (2)

Wave jump



A-jump

2. Λεκάνες καταστροφής ενέργειας ή λεκάνες ηρεμίσσεως

Παναγιώτης Παπανικολάου
Αν. Καθηγητής
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

Άλμα vs λεκάνη καταστροφής ενέργειας

$1.7 < F_1 < 2.5$ (ασθενές άλμα) η λεκάνη ηρεμίσσεως ίση με το μήκος του

$2.5 < F_1 < 4.5$ (δονούμενο άλμα) χρειάζεται λήψη μέτρων για την απόσβεση των κυματισμών που μεταφέρονται στα κατάντη, γι' αυτό η περιοχή αυτή θα πρέπει να αποφεύγεται

Το **μόνιμο άλμα** είναι εξαιρετικά αποτελεσματικό στην καταστροφή ενέργειας και έχουν μελετηθεί διάφοροι τύποι λεκανών ηρεμίσσεως με μειωμένες διαστάσεις, στις οποίες δεν μειώνεται η αποτελεσματικότητα του άλματος.

$F_1 > 9$ Κατασκευή λεκανών ηρεμίσσεως πολύ δαπανηρή

Λεκάνη ηρεμίσσεως SAF

Μήκος λεκάνης

$$L_b = \left(\frac{4.5}{F_1^{0.76}} \right) y_2; \quad 1.7 < F_1 < 17$$

Υψος λεκάνης

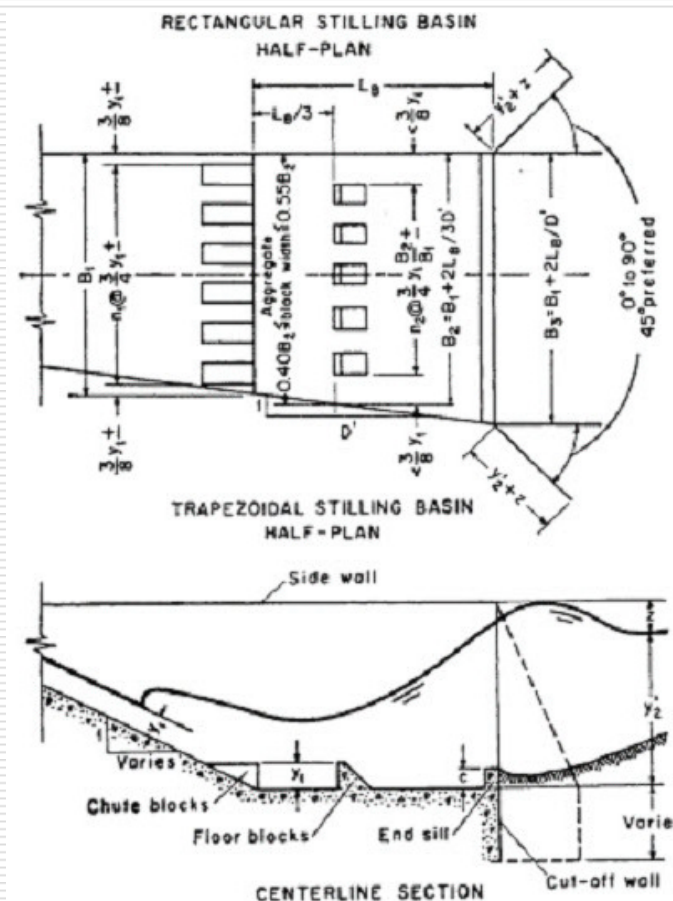
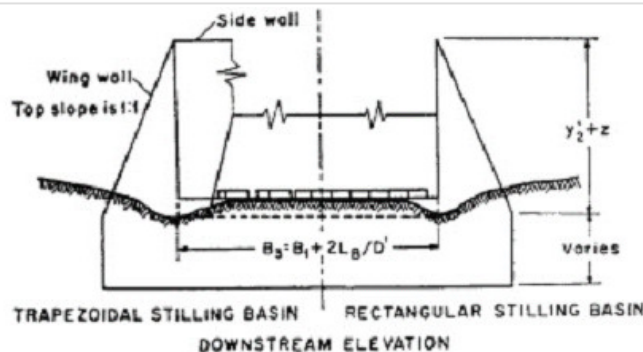
$$y_2' = \left(1.1 - \frac{F_1^2}{120} \right); \quad 1.7 < F_1 < 5.5$$

$$z = \frac{y_2}{3}$$

$$y_2' = 0.85 y_2; \quad 5.5 < F_1 < 11$$

$$\frac{\alpha}{2} < \frac{1}{1.5 F_1}$$

$$y_2' = \left(1 - \frac{F_1^2}{800} \right); \quad 11 < F_1 < 17$$

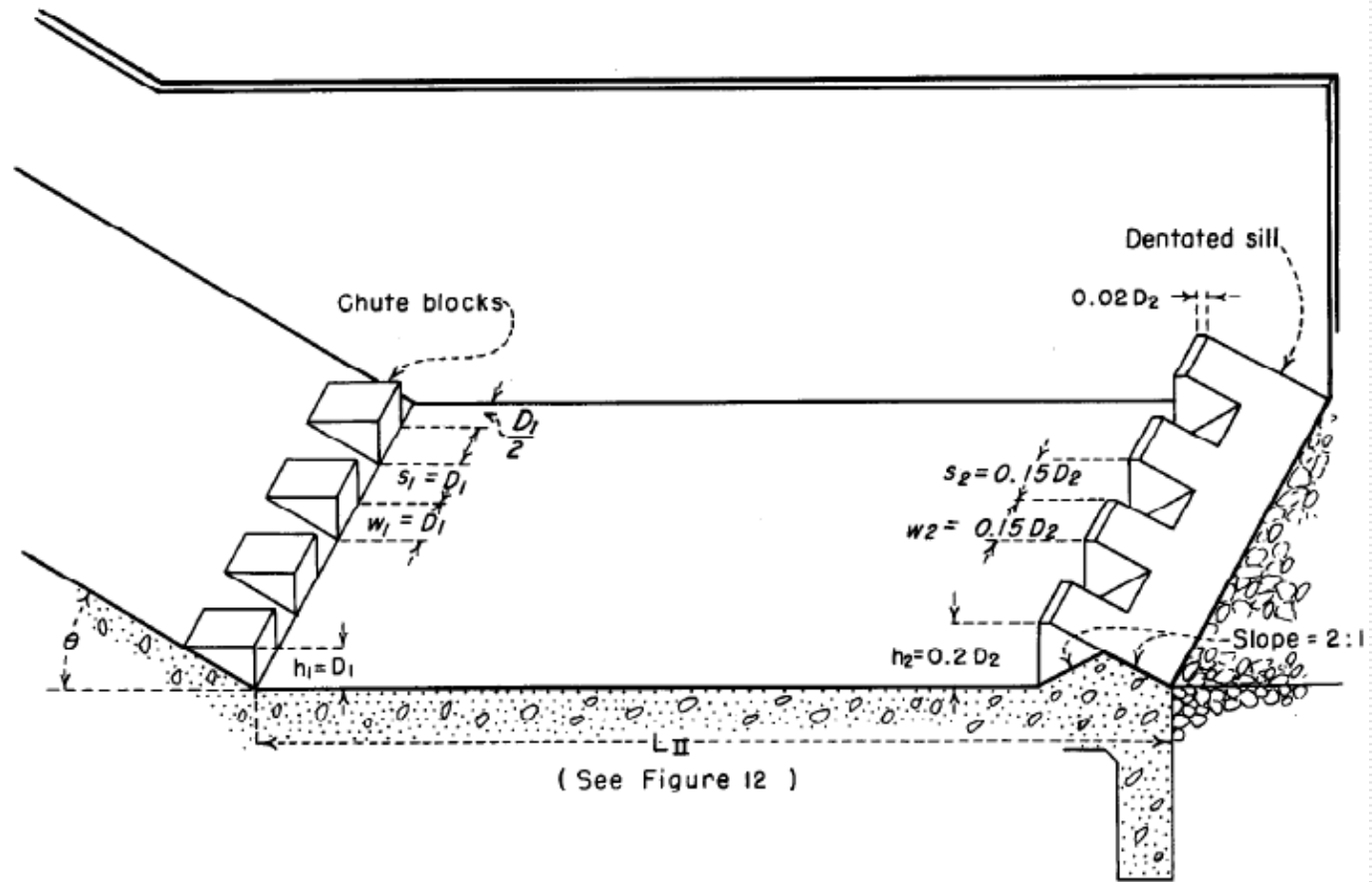


ΕΜΠ-ΔΠΜΣ Σχολή Πολ. Μηχ.
Μάθημα: Φράγματα, Διδάσκοντες
ΝΙ Μουτάφης, ΠΝ Παπανικολάου

USBR type II

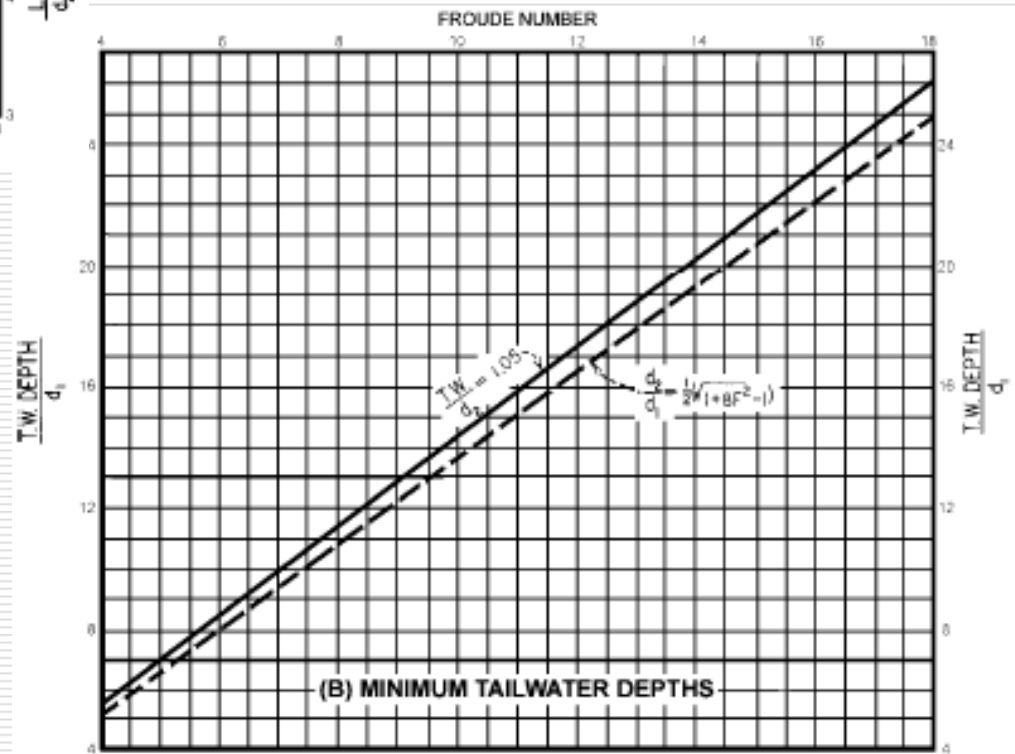
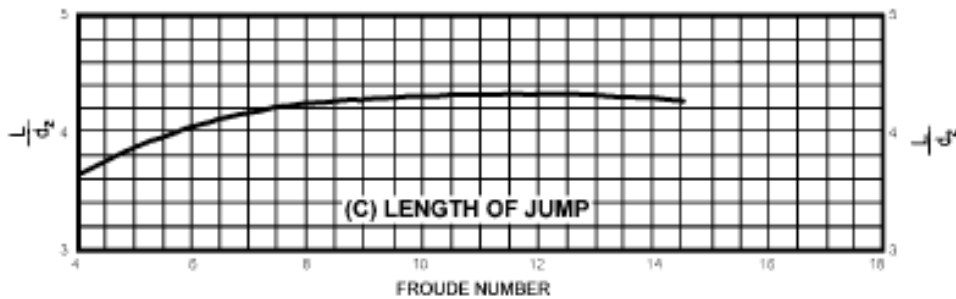
$$q \leq 50 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$F_1 > 4.5$$



ΕΜΠ-ΔΠΜΣ Σχολή Πολ. Μηχ.
Μάθημα: Φράγματα, Διδάσκοντες
ΝΙ Μουτάφης, ΠΝ Παπανικολάου

USBR type II (συνέχεια)



ΕΜΠ-ΔΠΜΣ Σχολή Πολ. Μηχ.
Μάθημα: Φράγματα, Διδάσκοντες
ΝΙ Μουτάφης, ΠΝ Παπανικολάου

USBR type III

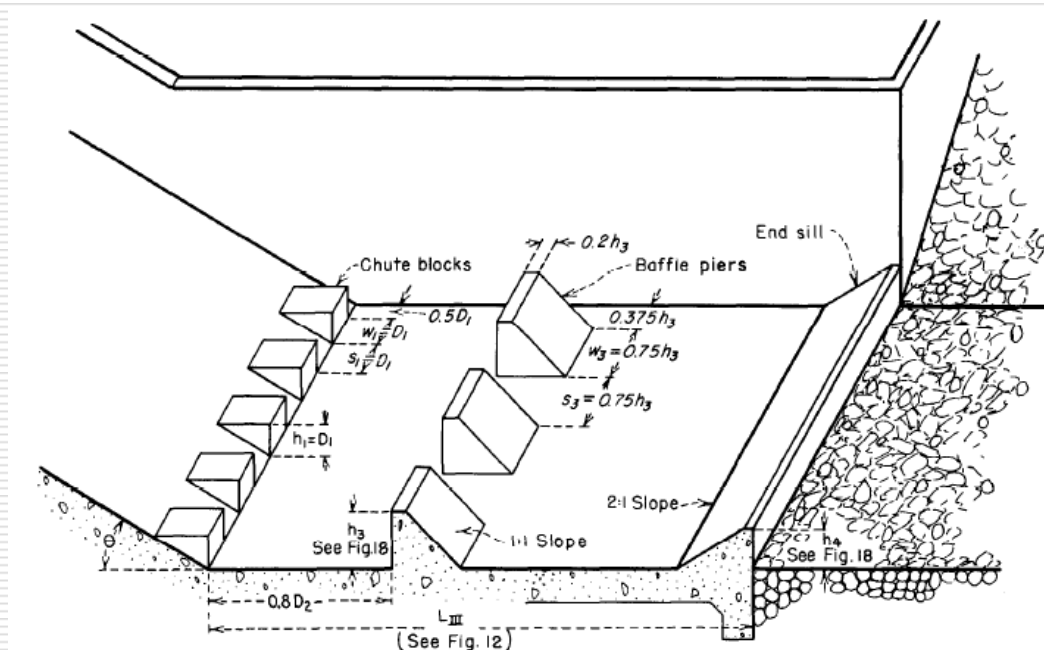
$$q \leq 20 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$F_1 > 4.5$$

$$V_1 \leq 20 \text{ m/s}$$

$$h_3 = \left(0.6 + \frac{F_1}{6}\right) D_1$$

$$h_4 = \left(1 + \frac{F_1}{18}\right) D_1$$



USBR type III διαστάσεις

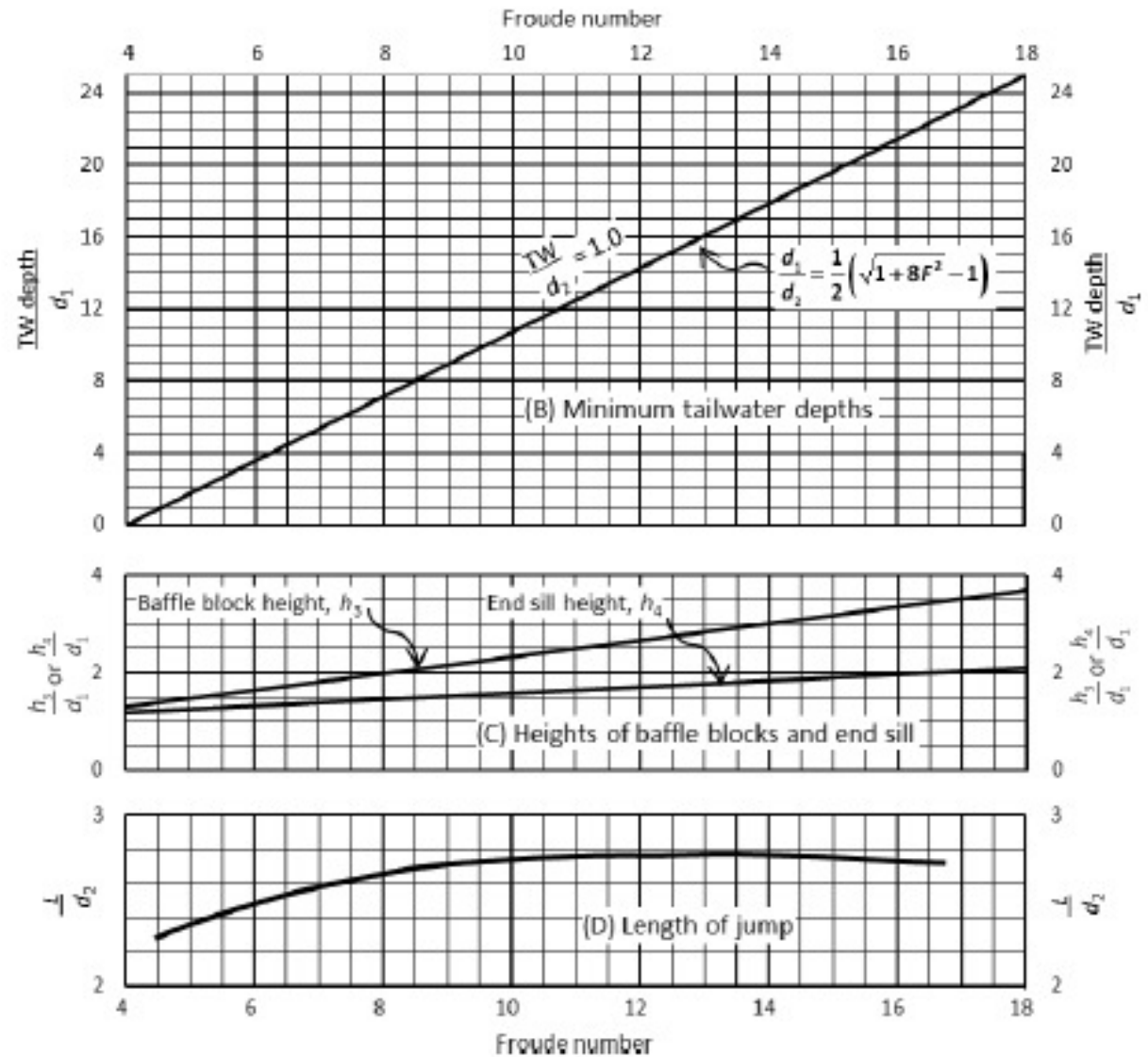


Figure 33.—Type III basin characteristics for Froude numbers above 4.5 and incoming velocities less than 60 ft/s (Reclamation, 1987, p. 393). See Reclamation (1987) for information related to variables as denoted in this figure.

USBR type IV

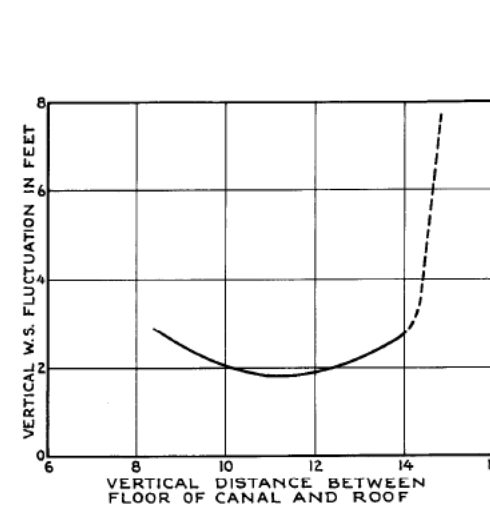
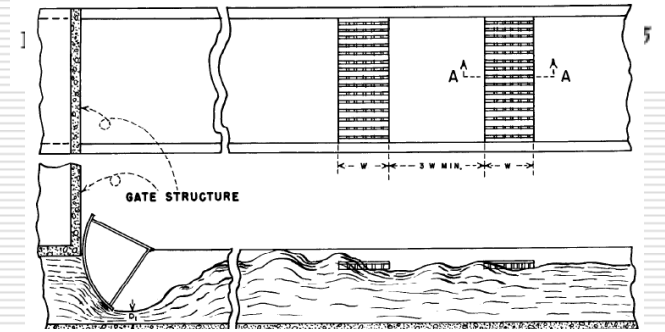
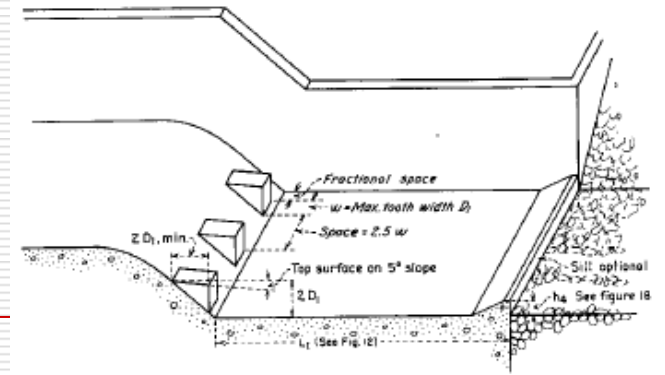
Σε διώρυγες εκτροπής

$$2.5 < F_1 < 4.5$$

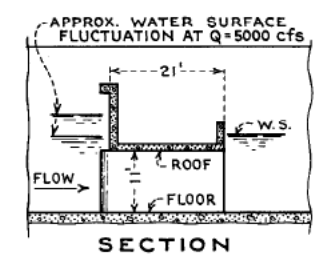
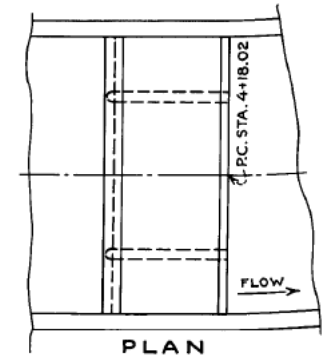
Εμφάνιση κυματισμών

Εναλλακτικά:

Αναστολείς κυματισμών
 τύπου σχεδίας (raft type)
 και κλειστού αγωγού
 (under pass suppressor)



TEST NO. 1
 TO DETERMINE MOST EFFECTIVE
 ELEVATION FOR ROOF - Q = 5000 cfs.



Μήκος λεκάνης καταστροφής ενέργειας

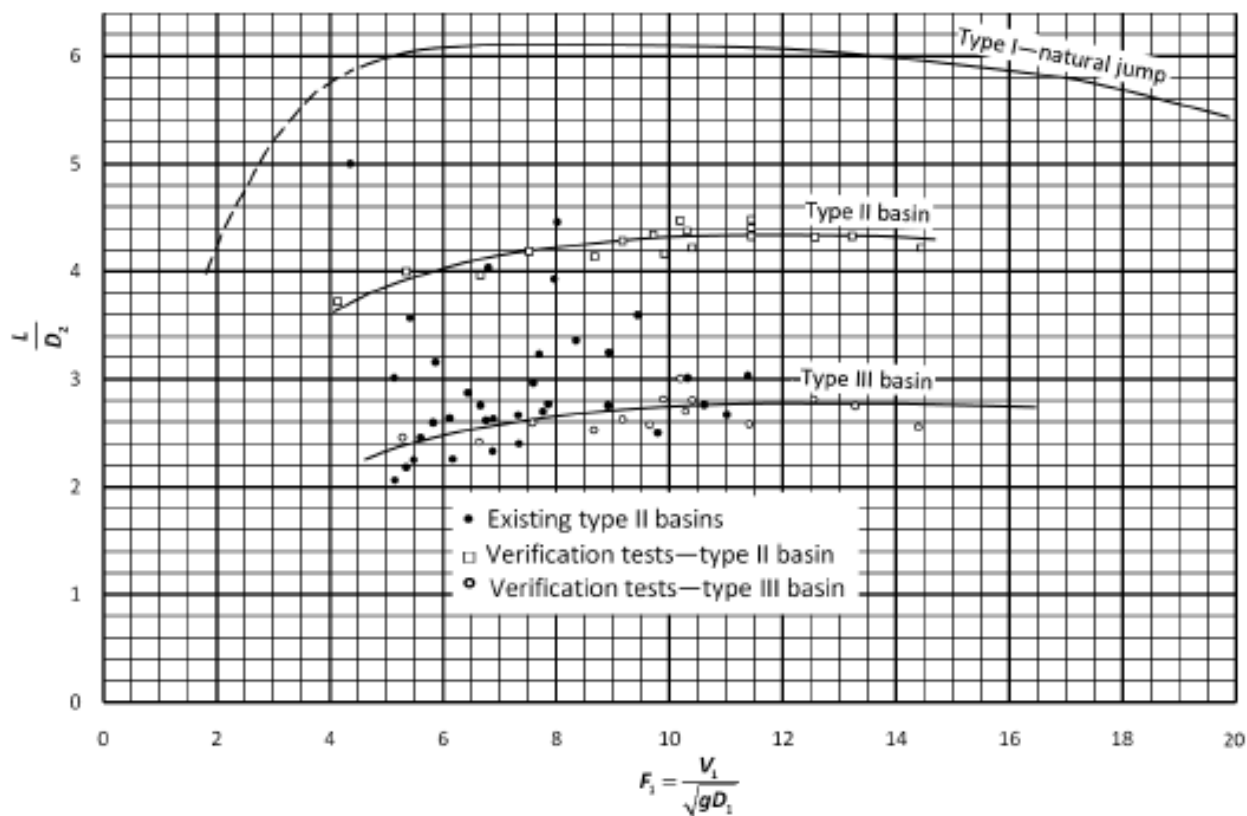


Figure 20.—Length of hydraulic jump for type I, II, and III basins (Reclamation, 1984, p. 27). See Reclamation (1984) for information related to the variables as denoted in this figure.

USBR type V (sloping apron)

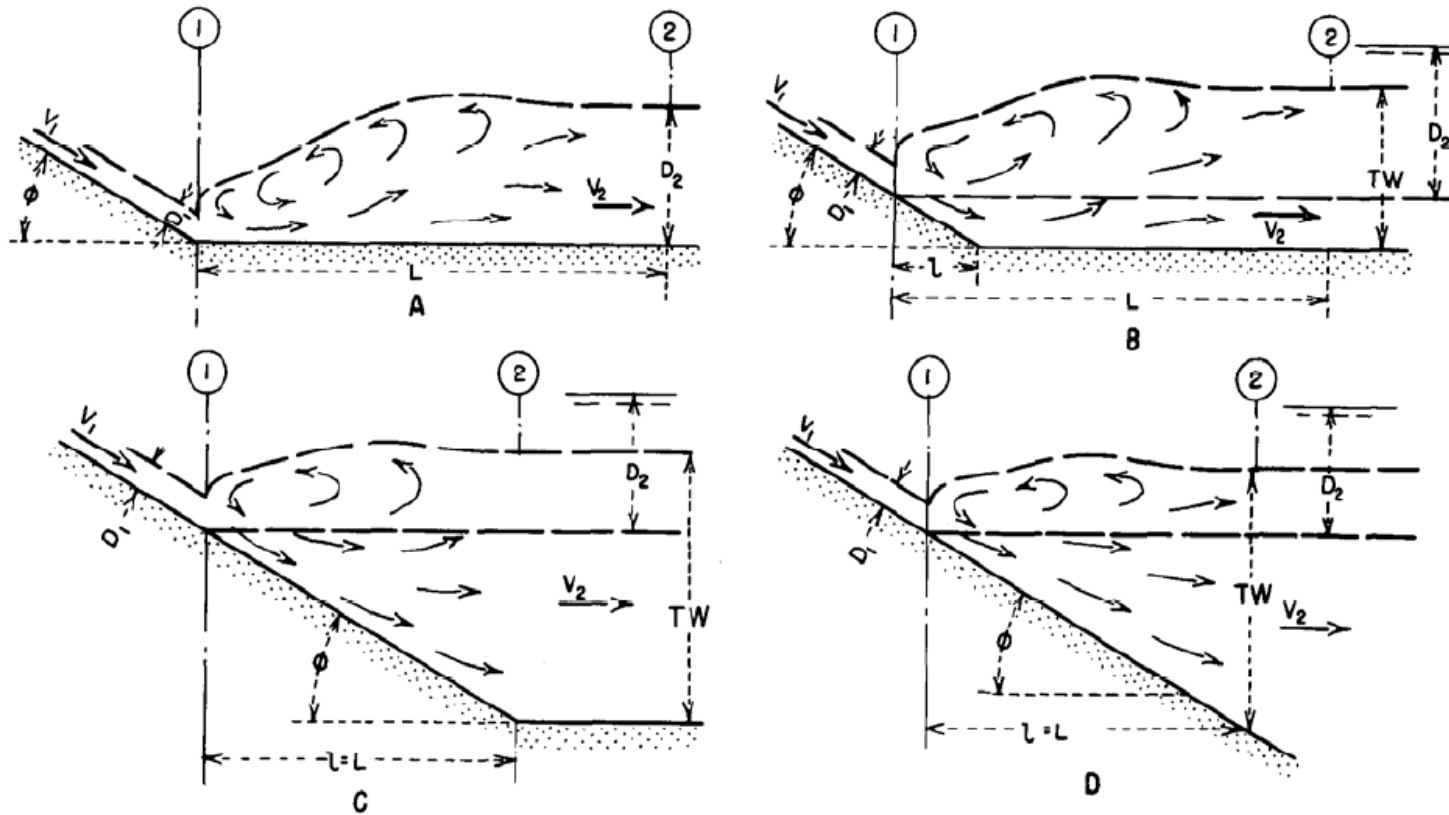
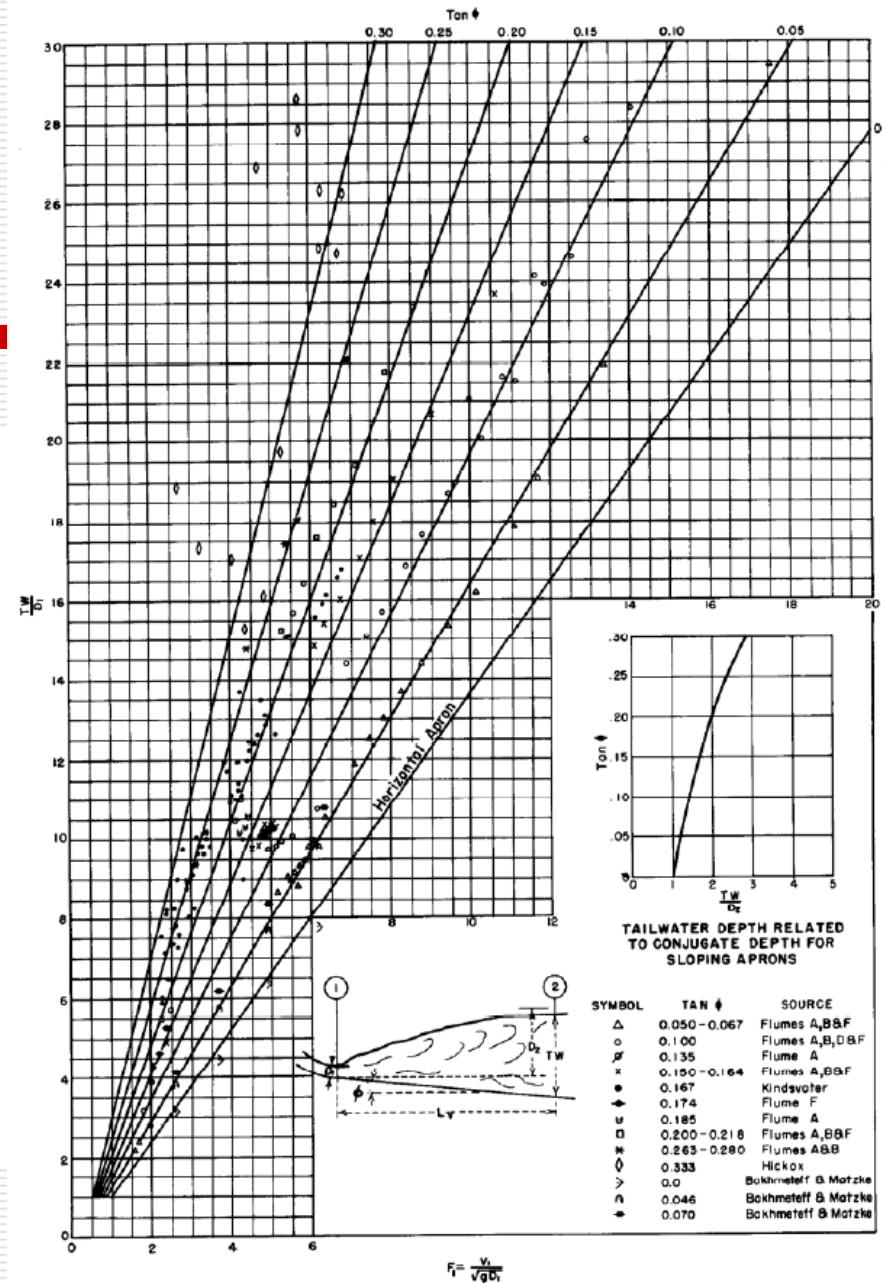
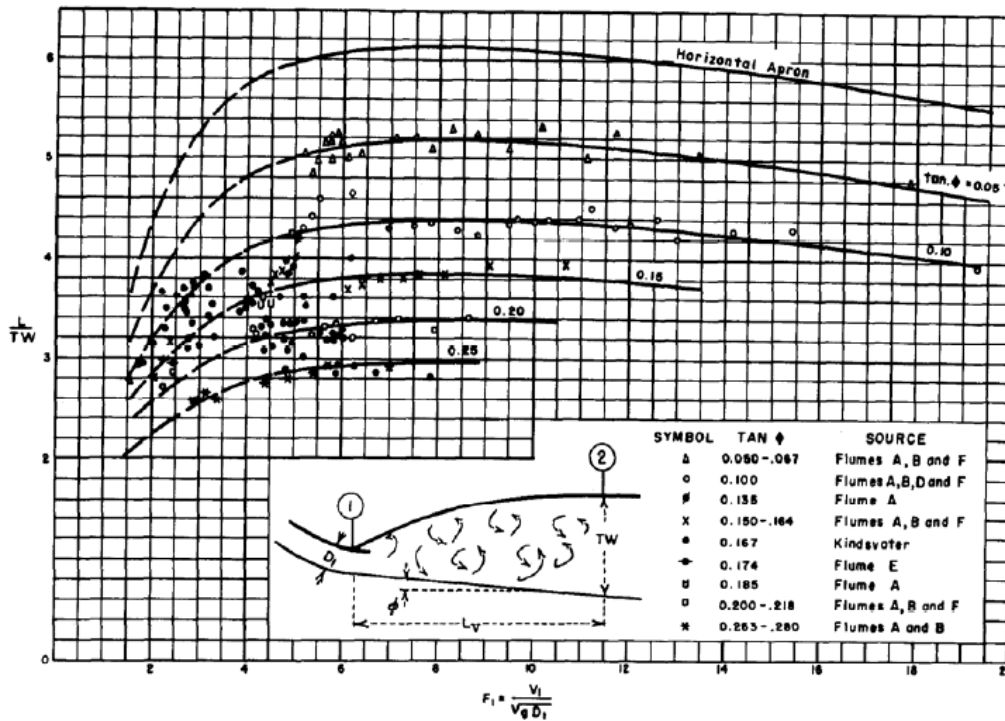


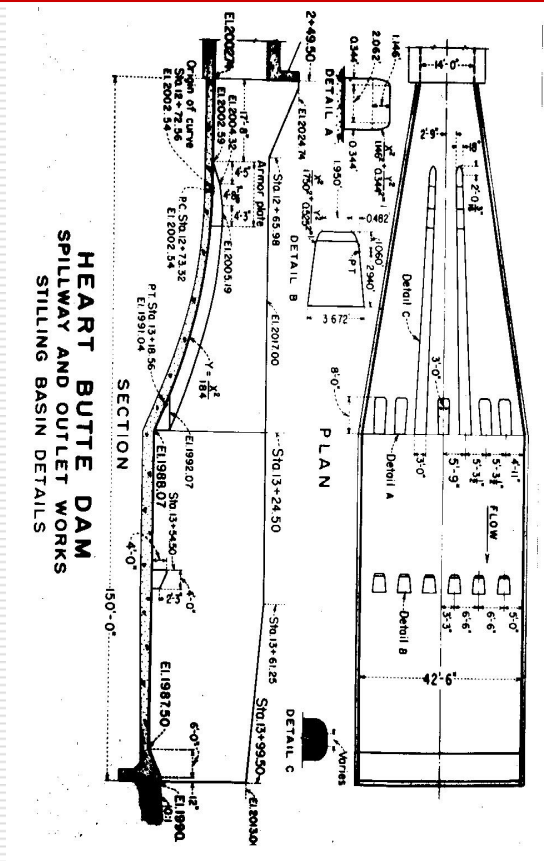
FIGURE 30.—Sloping aprons (Basin V).

USBR type V, μήκος και βάθος στα κατάντη



ΕΜΠ-ΔΠΜΣ Σχολή Πολ. Μηχ.
Μάθημα: Φράγματα, Διδάσκοντες
ΝΙ Μουτάφης, ΠΝ Παπανικολάου

Άλλοι τύποι λεκανών. Λεκάνη καταστροφής ενέργειας φράγματος Heart Butte



ΕΜΠ-ΔΠΜΣ Σχολή Πολ. Μηχ.
Μάθημα: Φράγματα, Διδάσκοντες
ΝΙ Μουτάφης, ΠΝ Παπανικολάου

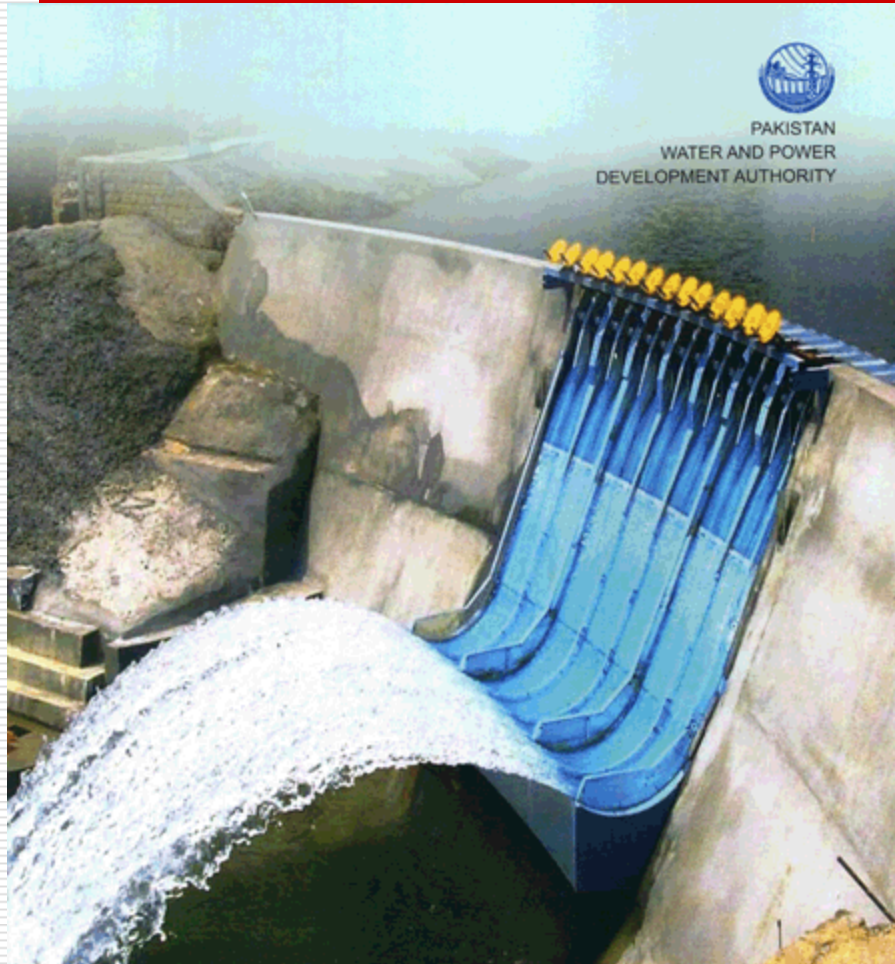
Oahe Dam Stilling Basin May 26, 2011

Πλημμύρα στο Missouri River



ΕΜΠ-ΔΠΜΣ Σχολή Πολ. Μηχ.
Μάθημα: Φράγματα, Διδάσκοντες
ΝΙ Μουτάφης, ΠΝ Παπανικολάου

Flip bucket (κατασκευή εκτόξευσης)

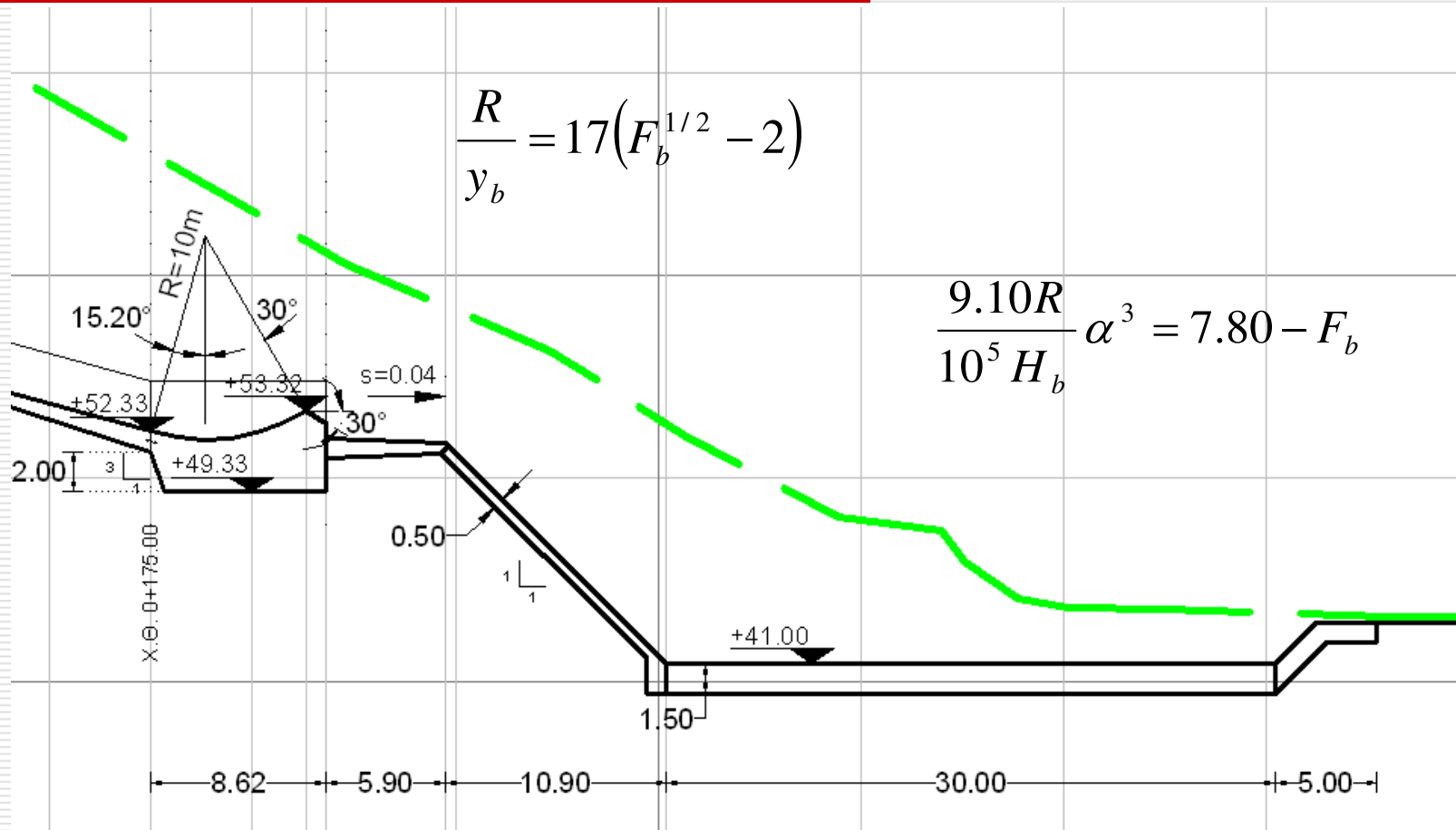


Karakaya Dam, Turkey



ΕΜΠ-ΔΠΜΣ Σχολή Πολ. Μηχ.
Μάθημα: Φράγματα, Διδάσκοντες
ΝΙ Μουτάφης, ΠΝ Παπανικολάου

Flip bucket (ski jump)



ΕΜΠ-ΔΠΜΣ Σχολή Πολ. Μηχ.
 Μάθημα: Φράγματα, Διδάσκοντες
 ΝΙ Μουτάφης, ΠΝ Παπανικολάου

Ski jump - definition sketch (Chanson, 2015)

$$\alpha = 15 - 35^\circ \quad 12 \text{ m} < r < 19 \text{ m} \quad r/d = 4Fr - 15 \quad (5.5 < Fr < 10)$$

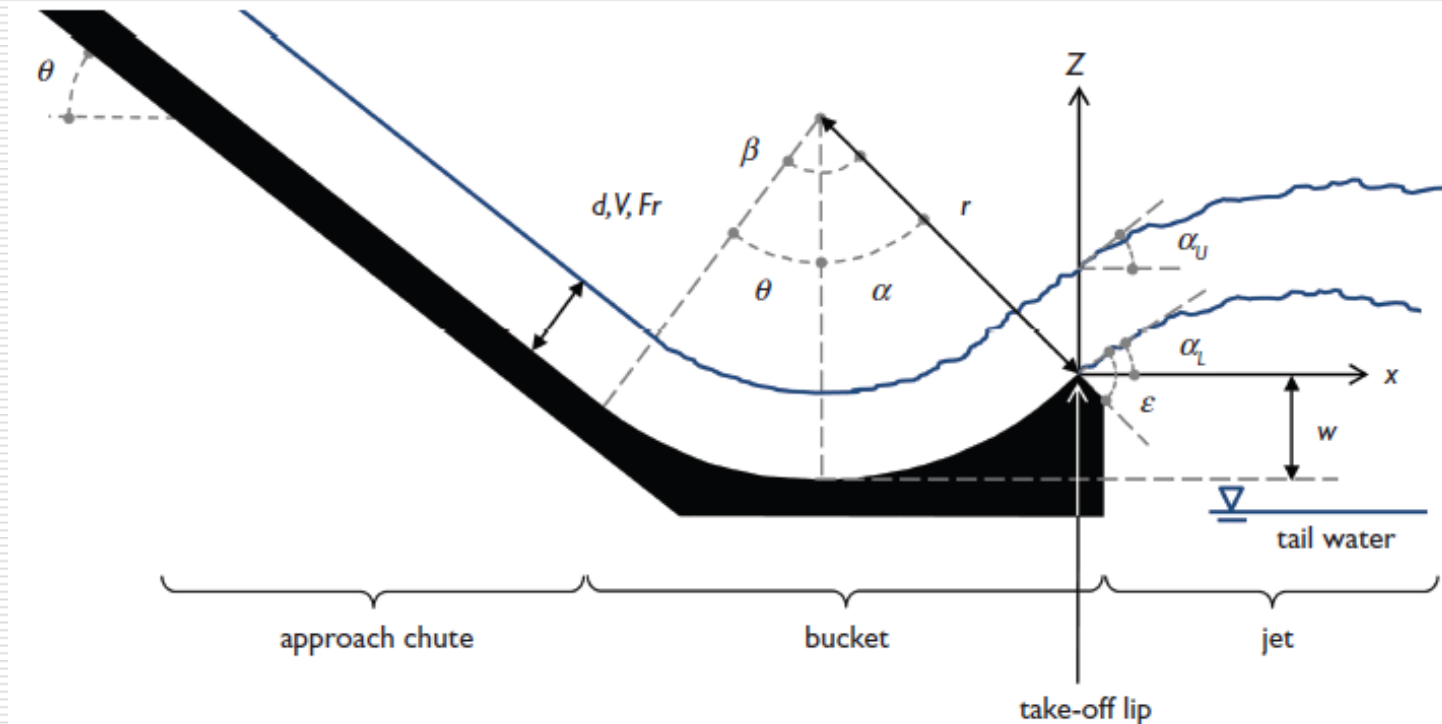
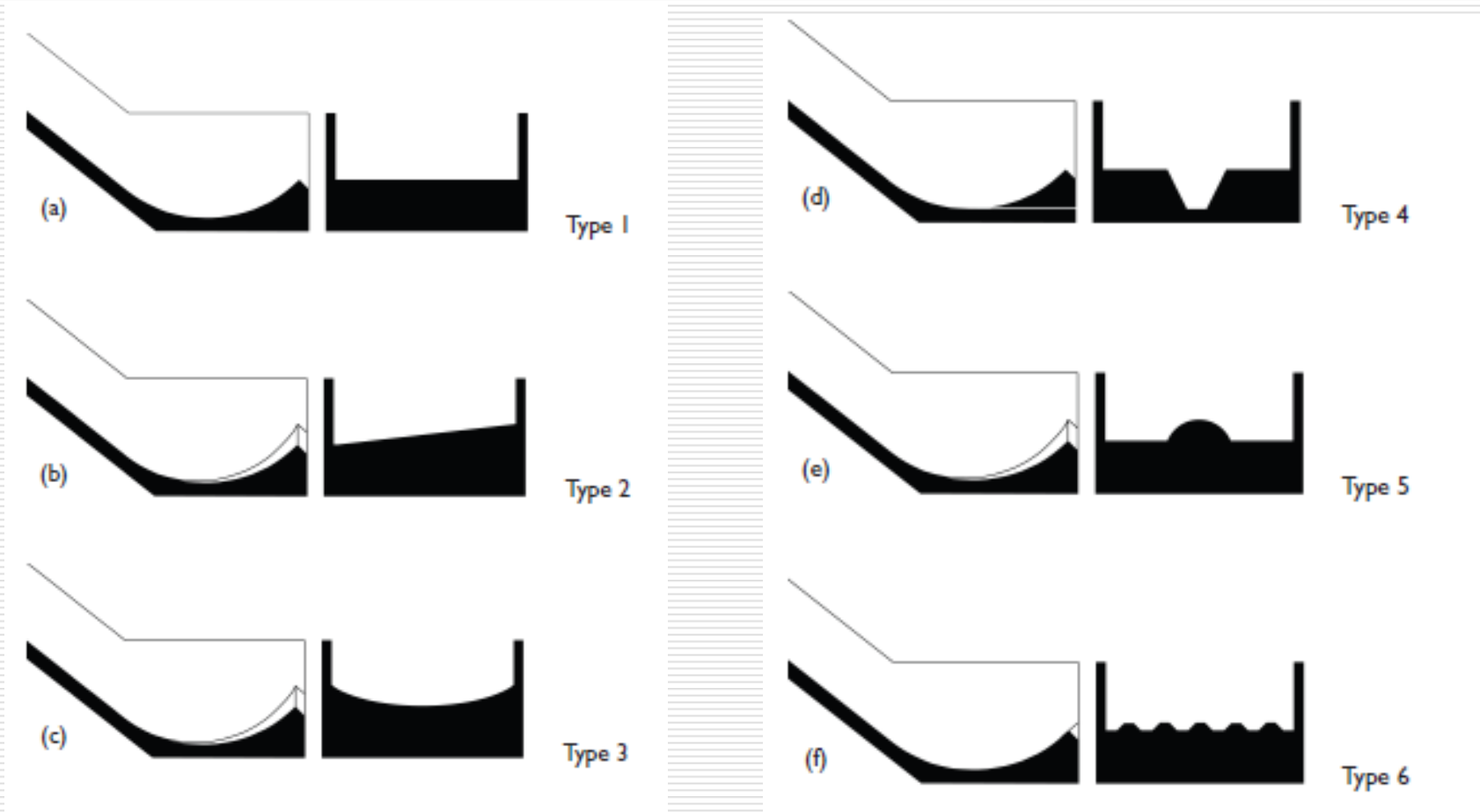
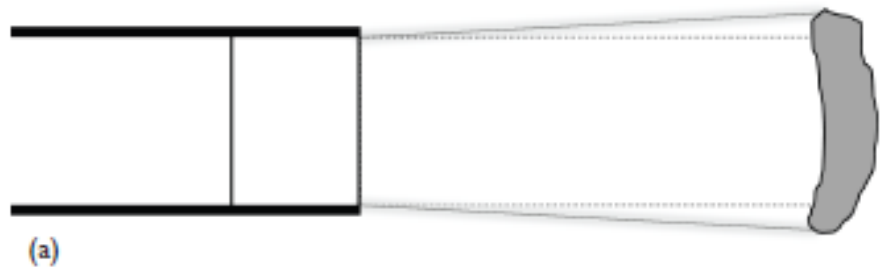


Figure 5.1 Definition sketch with geometry and flow parameters of a ski jump.

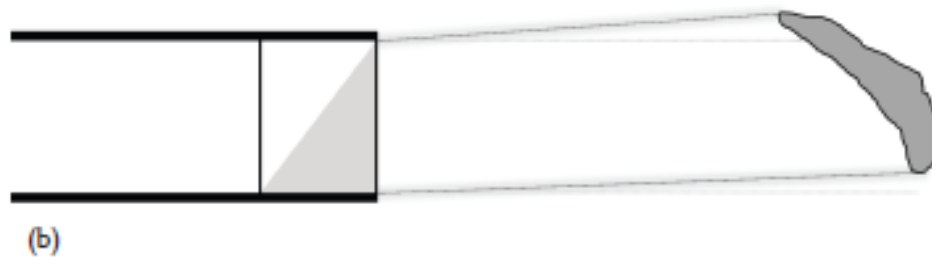
Ski jump types (Chanson, 2015)



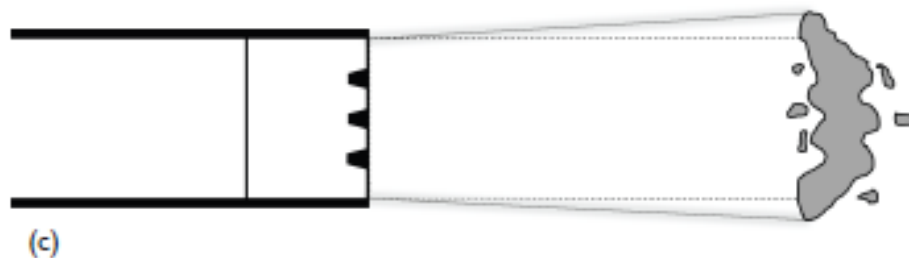
Σκίτσα εκτοξευόμενων φλεβών από ski jump (Chanson, 2015)



Layout 1 with parallel side-walls combined with bucket Type 1



Layout 1 with parallel sidewalls combined with bucket Type 2



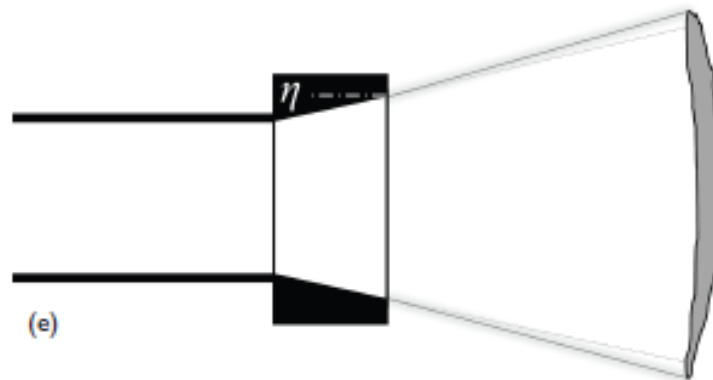
Layout 1 with parallel side-walls combined with bucket Type 6 (Mason 1983)

Σκίτσα εκτοξευόμενων φλεβών από ski jump 2 (Chanson, 2015)



Layout 2. Contraction (or slit-type bucket, Zhenlin et al. 1988, Dai et al. 1988)

(d)



Layout 3. Expansion

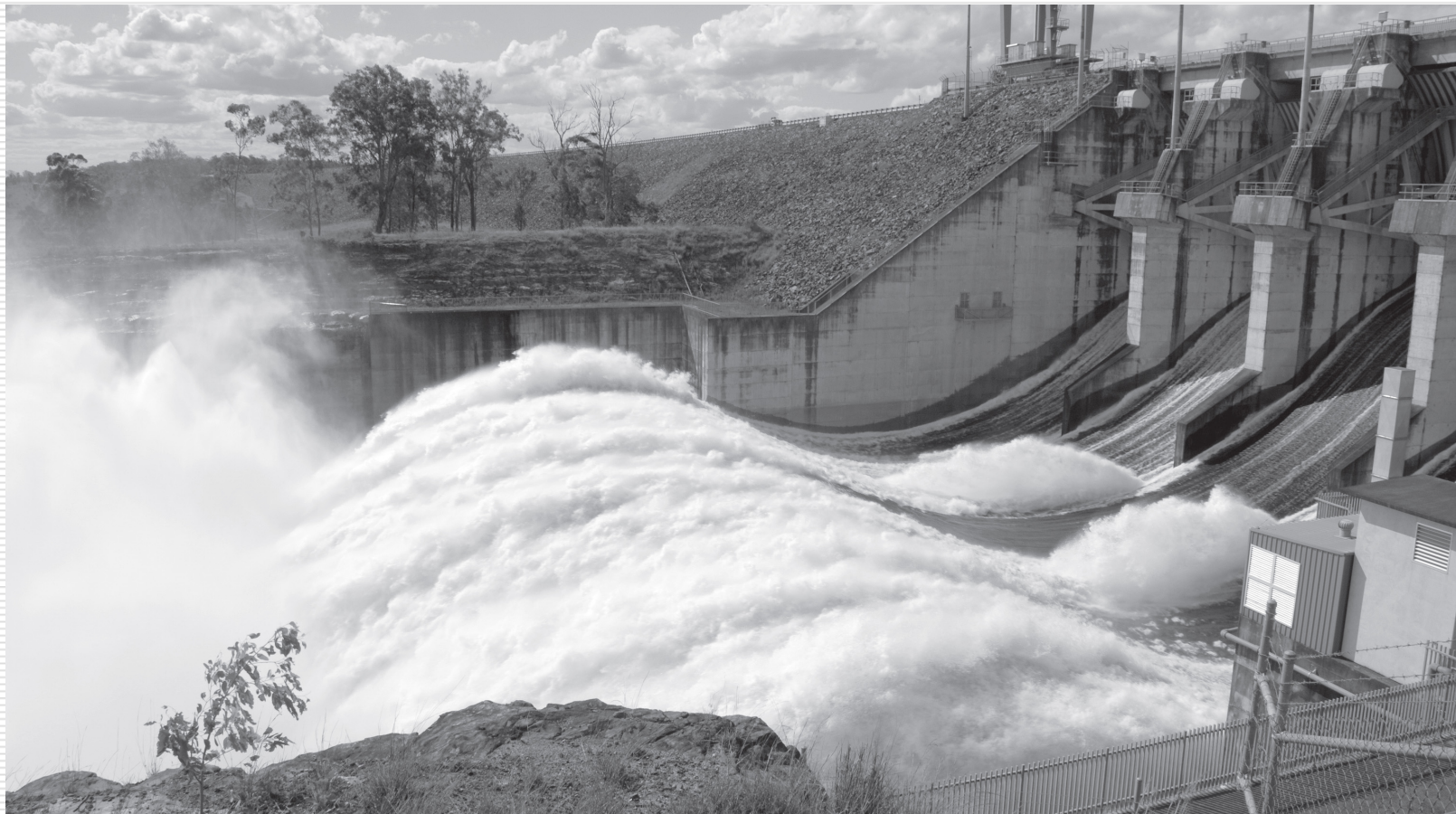
(e)



Layout 4. Vertical deflector (Juon and Hager 2000, Lucas et al. 2013, Fig. 5.6b)

(f)

Spillway of (b) Wivenhoe dam (Australia) during operation (Photo H. Chanson) with bucket Type 1



ΕΜΠ-ΔΠΜΣ Σχολή Πολ. Μηχ.
Μάθημα: Φράγματα, Διδάσκοντες
ΝΙ Μουτάφης, ΠΝ Παπανικολάου

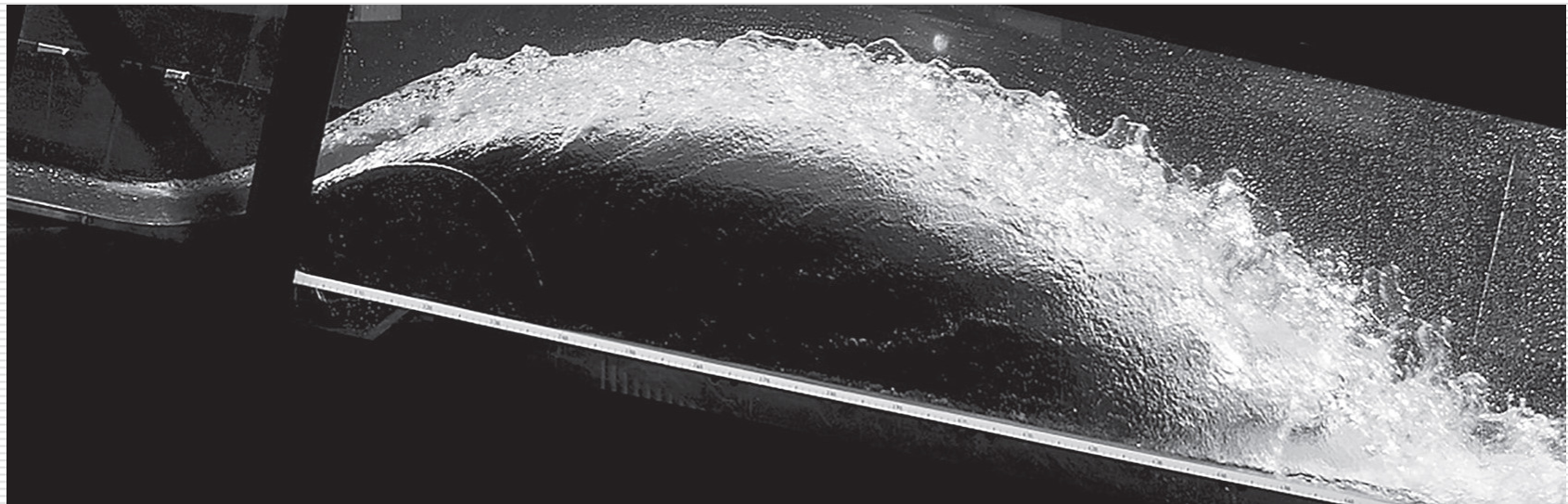
Chute end of Kárahnjúkar Dam spillway, Iceland, (Chanson, 2015)

Plain end-overfall with oblique takeoff lip equipped with baffles) with in operation with a discharge of some 300 m³/s (Photos Landsvirkjun, Iceland).



Jet trajectory (Chanson, 2015)

Jet features on a physical model, showing transition from black-water approach flow to fully aerated jet (Photo VAW, ETH Zurich)



Scour depth (Indian Standard)

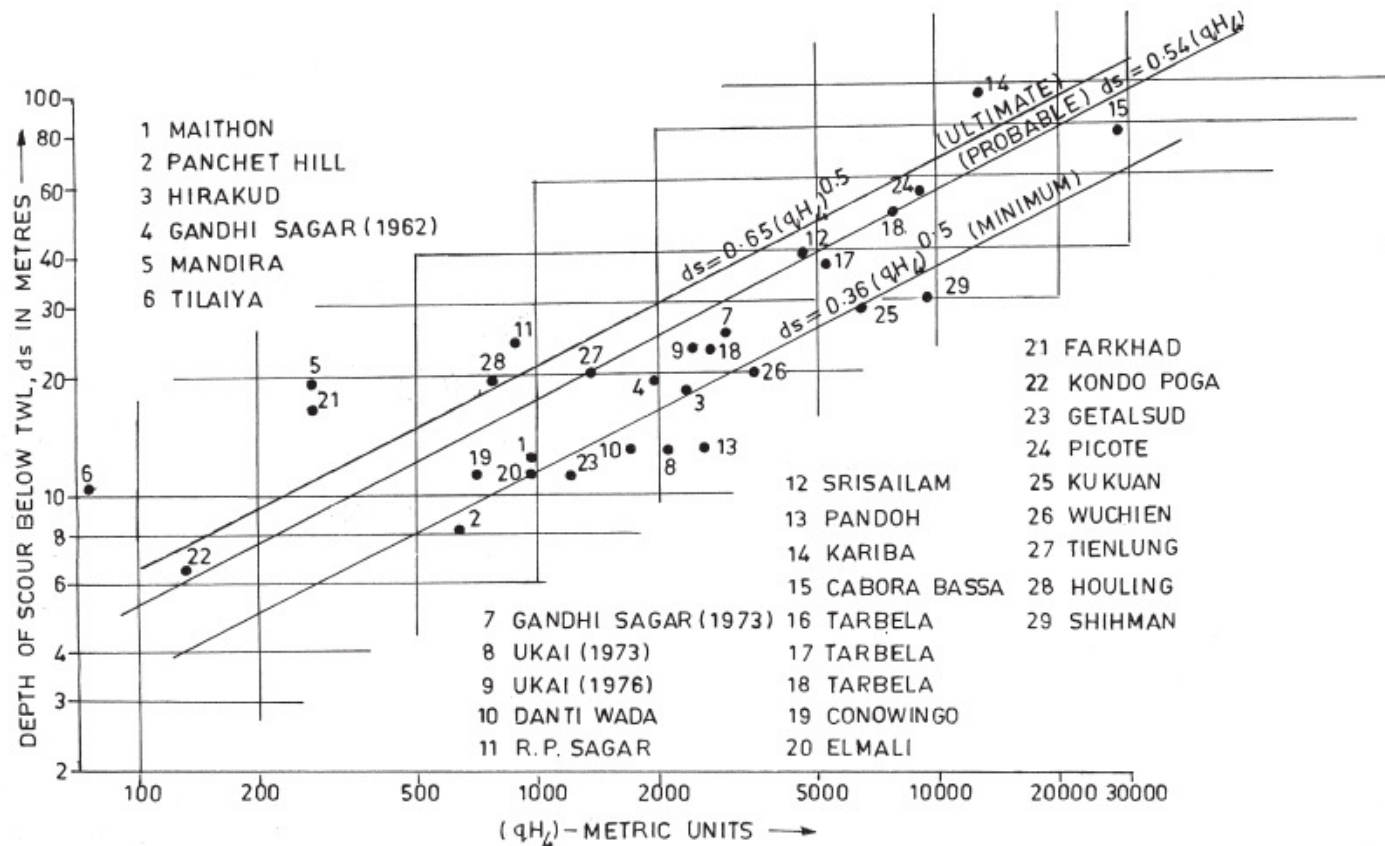


FIG. 16 DESIGN OF TRAJECTORY BUCKET — ESTIMATION OF SCOUR DOWNSTREAM OF BUCKET

IS 7365 : 2010

ΕΜΠ-ΔΠΜΣ Σχολή Πολ. Μηχ.
Μάθημα: Φράγματα, Διδάσκοντες
ΝΙ Μουτάφης, ΠΝ Παπανικολάου

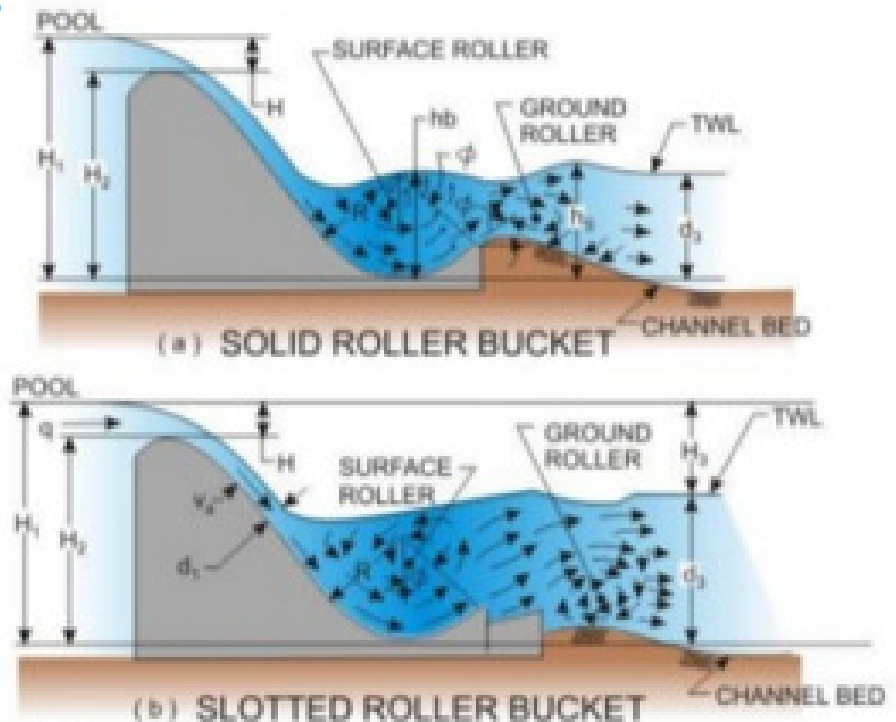
Βυθισμένο flip bucket

Reference

Bureau of Indian Standards

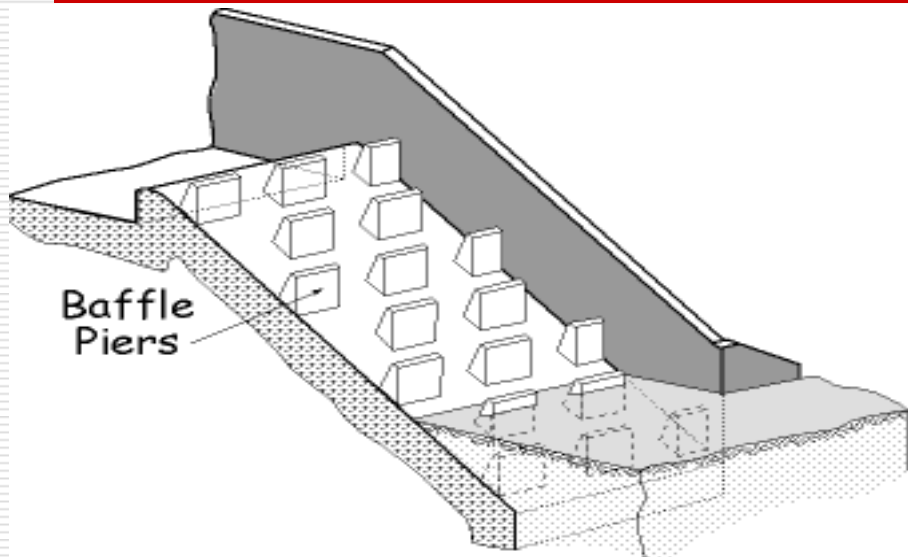
CRITERIA FOR HYDRAULIC DESIGN OF
BUCKET TYPE ENERGY DISSIPATORS

(Second Revision)



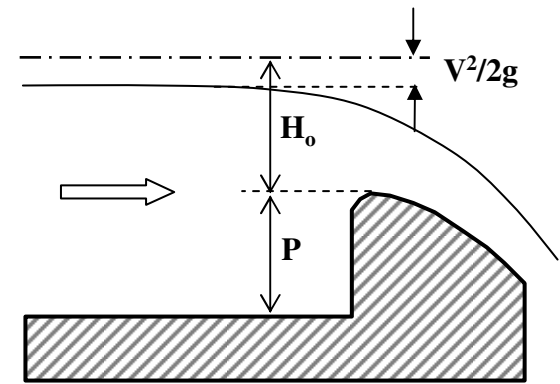
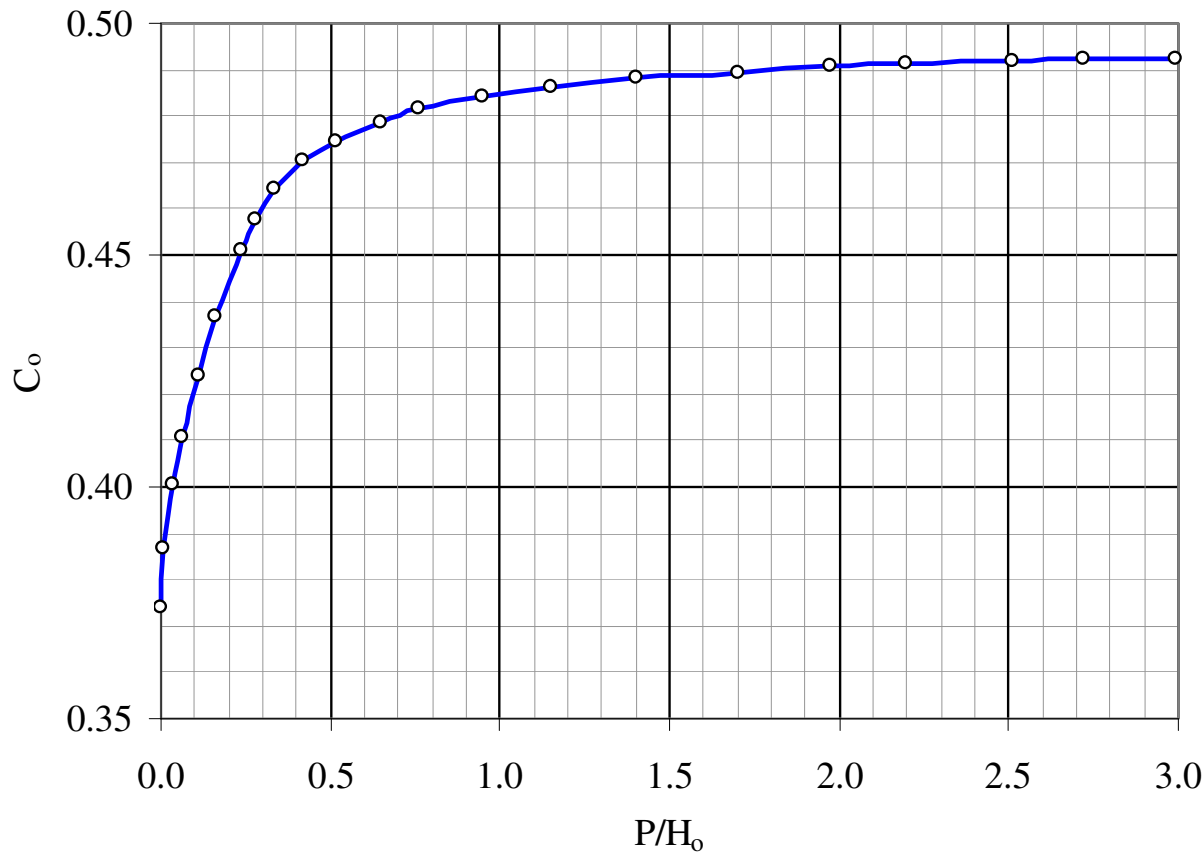
ΕΜΠ-ΔΠΜΣ Σχολή Πολ. Μηχ.
Μάθημα: Φράγματα, Διδάσκοντες
ΝΙ Μουτάφης, ΠΝ Παπανικολάου

Baffles



ΕΜΠ-ΔΠΜΣ Σχολή Πολ. Μηχ.
Μάθημα: Φράγματα, Διδάσκοντες
ΝΙ Μουτάφης, ΠΝ Παπανικολάου

3. Υπερχειλιστής Ogee μήκους L, υπολογισμός παροχής



$$Q = C_o L \sqrt{2g} H_o^{3/2}$$

Αναφορές

1. Νουτσόπουλος, Γ, Χριστοδούλου, Γ, Παπαθανασιάδης, Τηλ 2007. Υδραυλική ανοικτών αγωγών. Εκδόσεις ΕΜΠ
2. Bureau of Indian Standards CRITERIA FOR HYDRAULIC DESIGN OF BUCKET TYPE ENERGY DISSIPATORS (Second Revision)
3. Chanson, H. (Editor) 2015. Energy Dissipation in Hydraulic Structures, CRC Press/Balkema (Chapters 4 and 5)
4. Federal Emergency Management Agency (FEMA P-679), 2010. Technical manual: Outlet Works Energy Dissipators (Chapter 2)
5. Khatsuria, RM 2005. Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators, Marcel Dekker
6. Peterka, AJ, 1984. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators (8th printing). Eng. Monograph No. 25, US DOI, Bureau of Reclamation
7. Wei, CY, and Lindell, JE 2004. Hydraulic design handbook Chapter 18, HYDRAULIC DESIGN OF STILLING BASINS AND ENERGY DISSIPATORS. McGraw-Hill
8. US DOT Hydraulic Engineering Circular No. 14, Third Edition, Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels. Publication No. FHWA-NHI-06-086, July 2006 (Chapters 6 and 8)