

Υδραυλικές Κατασκευές – Φράγματα

8ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών



Συστήματα εκτροπής

Ανδρέας Ευστρατιάδης

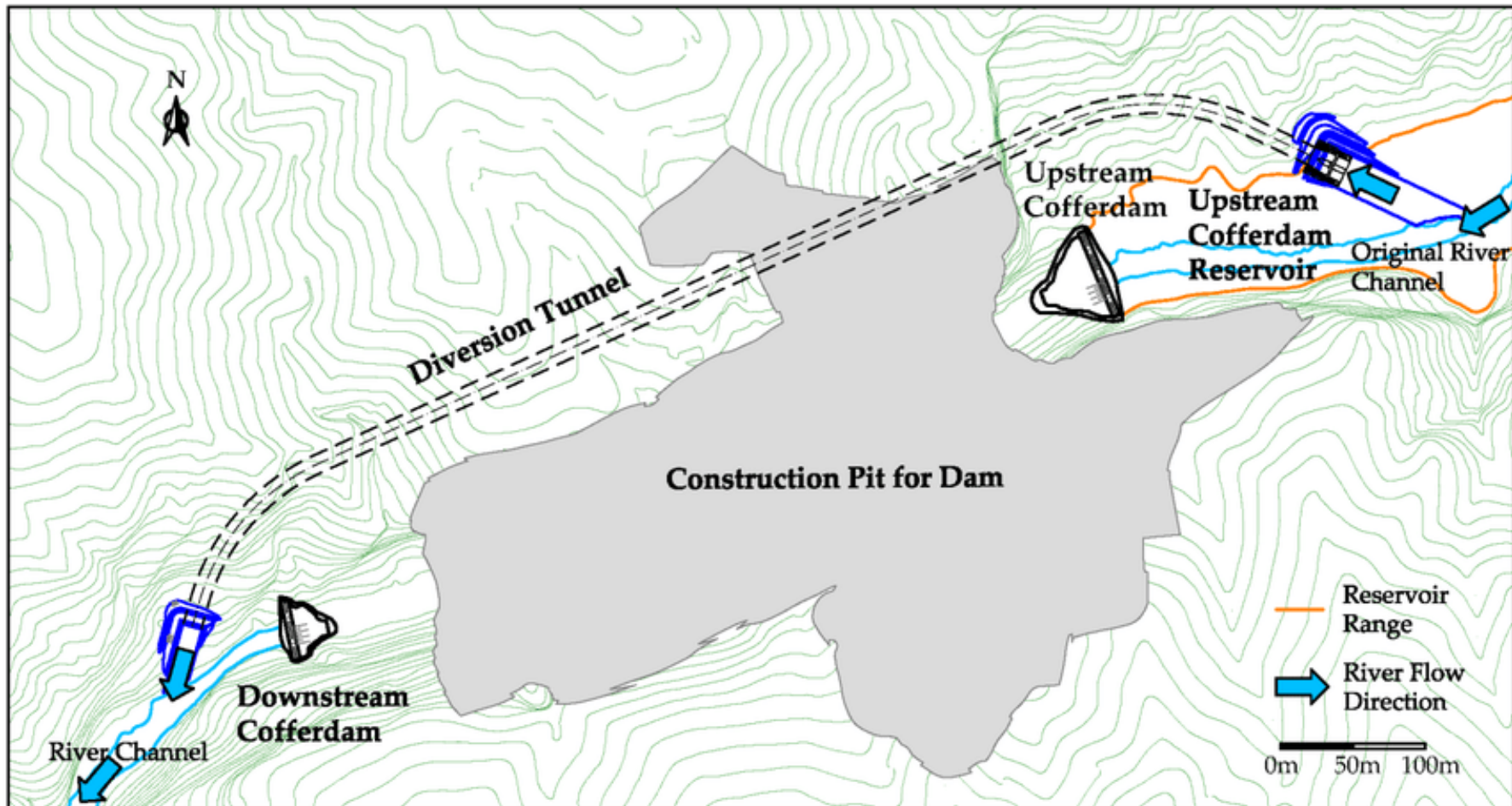
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2022-23

Συστήματα εκτροπής

- ❑ Προσωρινά έργα, με σκοπό την εξασφάλιση ασφαλών και ξηρών συνθηκών στη θέση του φράγματος για όλη την **περίοδο κατασκευής**.
- ❑ Η ασφαλής εκτροπή επιτυγχάνεται με συνδυασμό έργων:
 - διακοπής, καθοδήγησης και προσωρινής ανάσχεσης της ροής (κυρίως ανάντη πρόφραγμα, ενσωματωμένο ή μη)
 - απόληψης της απορροής ανάντη (έργα εισόδου)
 - διοχέτευσης της παροχής κατάντη, ώστε να μην επηρεάζονται οι συνθήκες κατασκευής του κυρίως έργου (έργα μεταφοράς)
 - εκβολής της παροχής εκτροπής με ασφάλεια κατάντη (έργα εξόδου, σε συνδυασμό με κατάντη πρόφραγμα)
- ❑ Τα συνήθη έργα περιλαμβάνουν το **πρόφραγμα** και τον **αγωγό εκτροπής**.
- ❑ Για την **εξοικονόμηση του κόστους**, συχνά τα έργα εκτροπής συνδυάζονται με **μόνιμα λειτουργικά στοιχεία του φράγματος**, συνήθως με την **εκκένωση** και την **υδροληψία**.
- ❑ Οι επιλογές του είδους των έργων και των διαστάσεών τους βασίζονται σε τεχνικο-οικονομικά δεδομένα, τους προβλεπόμενους χρόνους εκτέλεσης του έργου, τις κλιματικές συνθήκες, και τα επιτρεπόμενα επίπεδα διακινδύνευσης.
- ❑ Τυπικό εύρος τιμών περιόδου επαναφοράς πλημμύρας σχεδιασμού: 10 ως 50 έτη

Τυπικές διατάξεις εκτροπής: ανάντη πρόφραγμα, κατάντη πρόφραγμα και σήραγγα



Πηγή: Song, Z., Q. Liu, Z. Hu, H. Li, and J. Xiong, Assessment of sediment impact on the risk of river diversion during dam construction: A simulation-based project study on the Jing river, China, *Water*, 10(2), 217, doi:10.3390/w10020217, 2018.

Προφράγματα: τύποι και λειτουργία

- ❑ Διακόπτουν τη ροή στο σύνολό της ή μερικώς, υποχρεώνοντάς την να κατευθυνθεί προς το έργο εκτροπής.
- ❑ Ως κατασκευές, συνήθως μοιάζουν με τα κυρίως φράγματα, αλλά:
 - Κατασκευάζονται υπό περιορισμό διαθέσιμου χρόνου
 - Κατασκευάζονται σε συνθήκες ροής
 - Λειτουργούν με χαμηλότερα αποδεκτά επίπεδα ασφαλείας
- ❑ Κατηγορίες προφραγμάτων:
 - Ανάντη πρόφραγμα (σύνηθες)
 - Κατάντη πρόφραγμα (όταν απαιτείται)
 - Βοηθητικά προφράγματα (όταν απαιτούνται)
- ❑ **Βοηθητικό ανάντη πρόφραγμα** απαιτείται όταν δεν υπάρχουν ασφαλείς συνθήκες κατασκευής προφραγματος.
- ❑ **Κατάντη πρόφραγμα** απαιτείται όταν οι υδραυλικές συνθήκες της ροής κατάντη της εξόδου του συστήματος εκτροπής δημιουργούν κίνδυνο στα ανάντη.
- ❑ Συχνά τα προφράγματα **ενσωματώνονται** στο κυρίως σώμα του φράγματος.

Προφράγματα: αρχές σχεδιασμού

- ❑ Το μέγεθος και η διάταξη του προφράγματος πρέπει να είναι τέτοια που να επιτρέπει την ταχεία κατασκευή του. Η κατασκευή γίνεται από εύκολα διαθέσιμα υλικά, με απαιτήσεις προσωρινής κατασκευής και μικρής διάρκειας ζωής:
 - Γαιώδη υλικά
 - Σκυρόδεμα ή RCC
 - Πασσαλοσανίδες
 - Ελαστικά
 - Συνδυασμός υλικών και μεθόδων
- ❑ Όταν είναι από γαιώδη υλικά, μπορούν να είναι ομοιογενή ή με ζώνες. Συχνά δεν προβλέπεται ειδική ζώνη εξωτερικής προστασίας.
- ❑ Το **μέγεθος του προφράγματος** καθορίζεται από τα υδρολογικά δεδομένα πλημμυρών, τη διάρκεια κατασκευής και το επιθυμητό επίπεδο ασφαλείας, που με τη σειρά του εξαρτάται από τεχνικοοικονομικούς παράγοντες.
- ❑ Για την επιλογή του ύψους του προφράγματος, απαιτούνται υπολογισμοί **ανάσχεσης της πλημμύρας σχεδιασμού** και διόδευσης από το έργο εκτροπής.
- ❑ Η παροχετευτικότητα του έργου εκτροπής επηρεάζει το ύψος του προφράγματος. Η διαστασιολόγηση των έργων γίνονται με σκοπό την ελαχιστοποίηση του **συνολικού κόστους του συστήματος εκτροπής**.

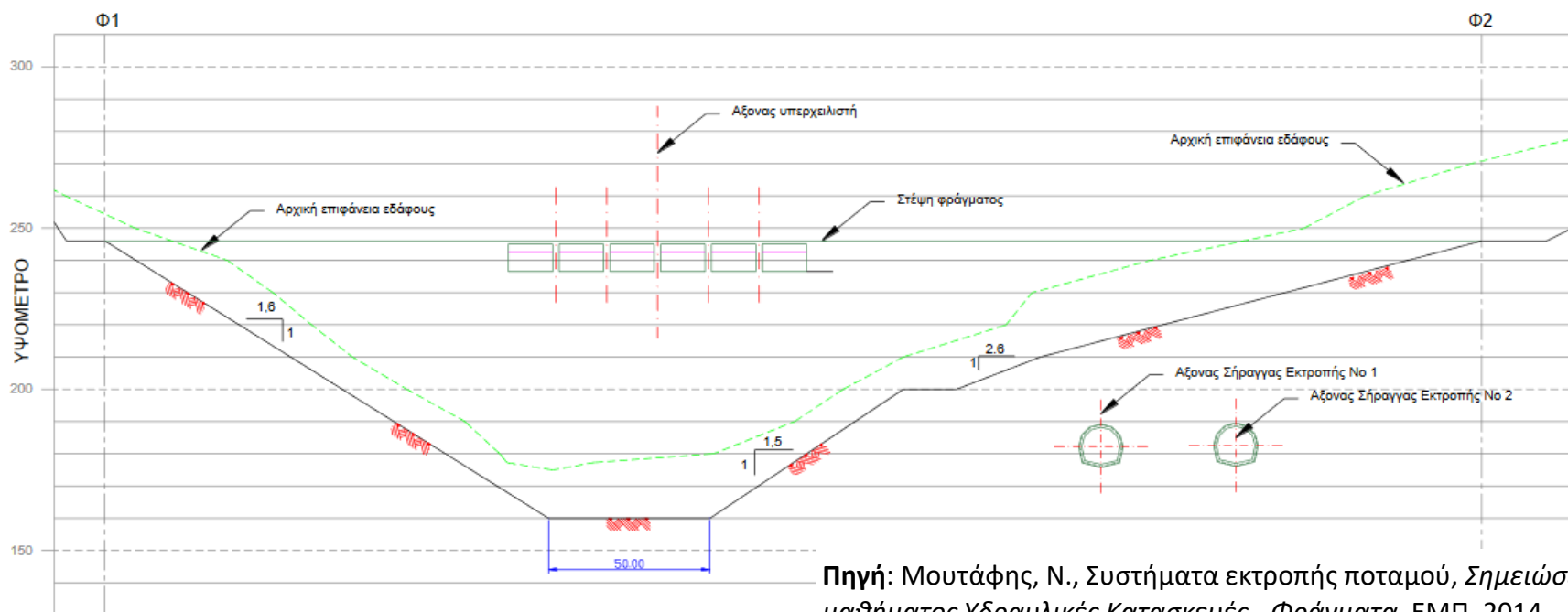
Αγωγοί εκτροπής

- ❑ Έργα μεταφοράς που εξασφαλίζουν την ομαλή απαγωγή και διοχέτευση των υδάτων από τα ανάντη προς τα κατόντη της θέσης κατασκευής του φράγματος.
- ❑ Συνήθεις μορφές:
 - Σήραγγες (μεγάλα έργα, υπόγεια κατασκευή)
 - Οχετοί/κλειστοί αγωγοί (επιφανειακή κατασκευή)
 - Ανοικτοί αγωγοί (επιφανειακή κατασκευή)
 - Σωληνωτοί αγωγοί ($D < 2.5$ m, επιφανειακή κατασκευή)
- ❑ Στη φάση κατασκευής του αγωγού, η ροή εμποδίζεται με προσωρινό ανάχωμα, που καθαιρείται όταν ολοκληρωθεί το έργο (**έναρξη εκτροπής**).
- ❑ Στο πέρας προβλέπεται διάταξη **έμφραξης** (προσωρινή/μόνιμη).
- ❑ Το **μέγεθος του αγωγού** επιλέγεται μετά από τεχνικοοικονομική ανάλυση (μεγαλύτερος αγωγός → μικρότερο πρόφραγμα και αντίστροφα)
- ❑ Συχνά εξετάζεται η **αξιοποίηση του αγωγού** (διαφορετικά αχρηστεύεται μετά την ολοκλήρωση του φράγματος).



Σήραγγες εκτροπής σε αντέρισμα φράγματος

- ❑ Μεγάλες παροχές, διάμετροι από 3 m και άνω (έχουν κατασκευαστεί έως 14 m)
- ❑ Ομαλή χάραξη αγωγού – ευθύγραμμα τμήματα με κυκλικά τόξα μεταξύ τους
- ❑ Διέλευση κάτω από το αντέρισμα (υγίες πέτρωμα)
- ❑ Ανεξαρτητοποίηση έργου από άλλες εργασίες
- ❑ Υψηλό κόστος κατασκευής
- ❑ Πεταλοειδής διατομή ευνοϊκότερη για μεταφορά φερτών
- ❑ Διάνοιξη και από τις δύο πλευρές

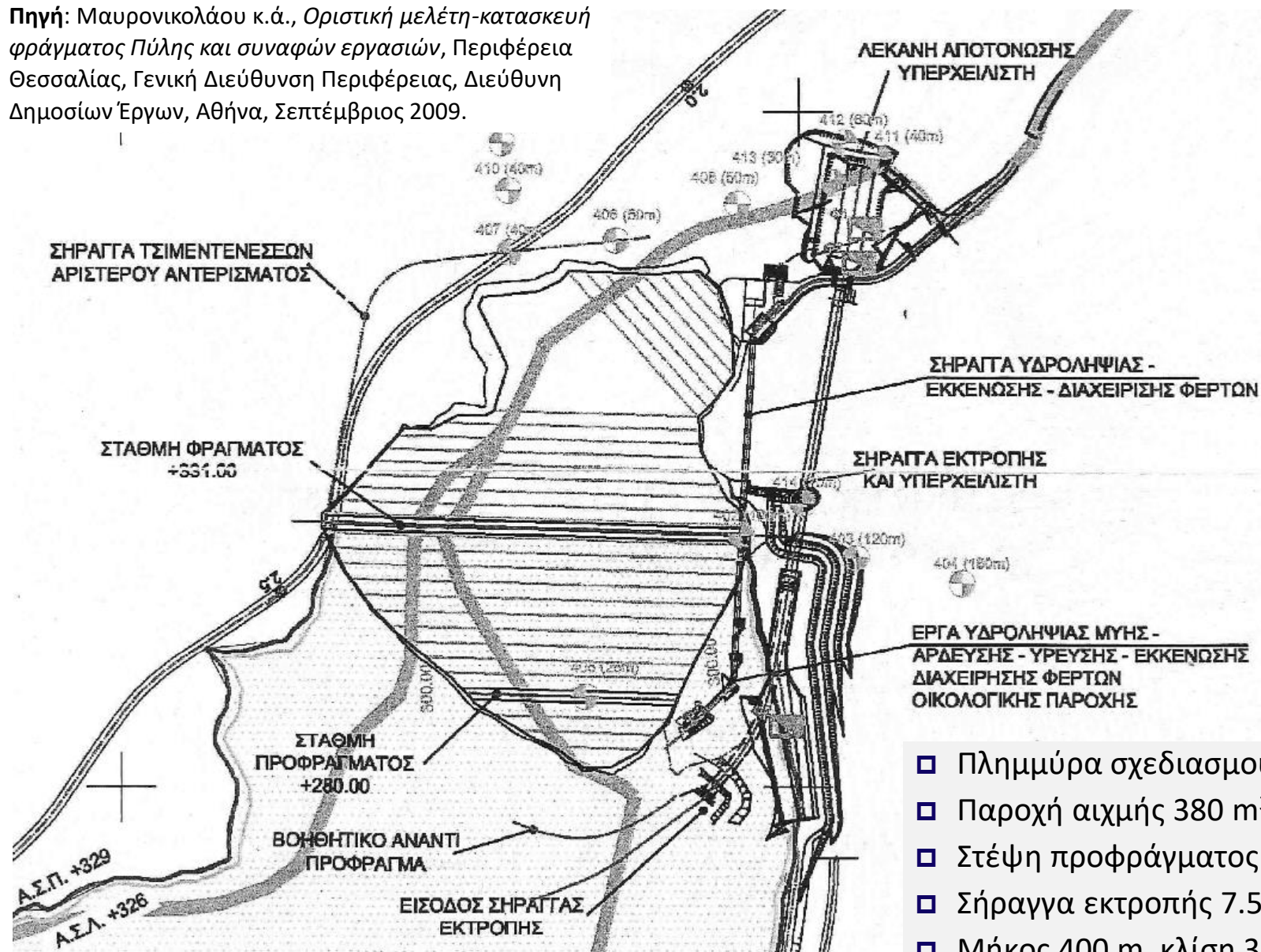


Παράδειγμα: Έργα εκτροπής στον άνω ρου του Αχελώου



Παράδειγμα: Φράγμα Πύλης, Πορταϊκός

Πηγή: Μαυρονικολάου κ.ά., Οριστική μελέτη-κατασκευή φράγματος Πύλης και συναφών εργασιών, Περιφέρεια Θεσσαλίας, Γενική Διεύθυνση Περιφέρειας, Διεύθυνση Δημοσίων Έργων, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009.

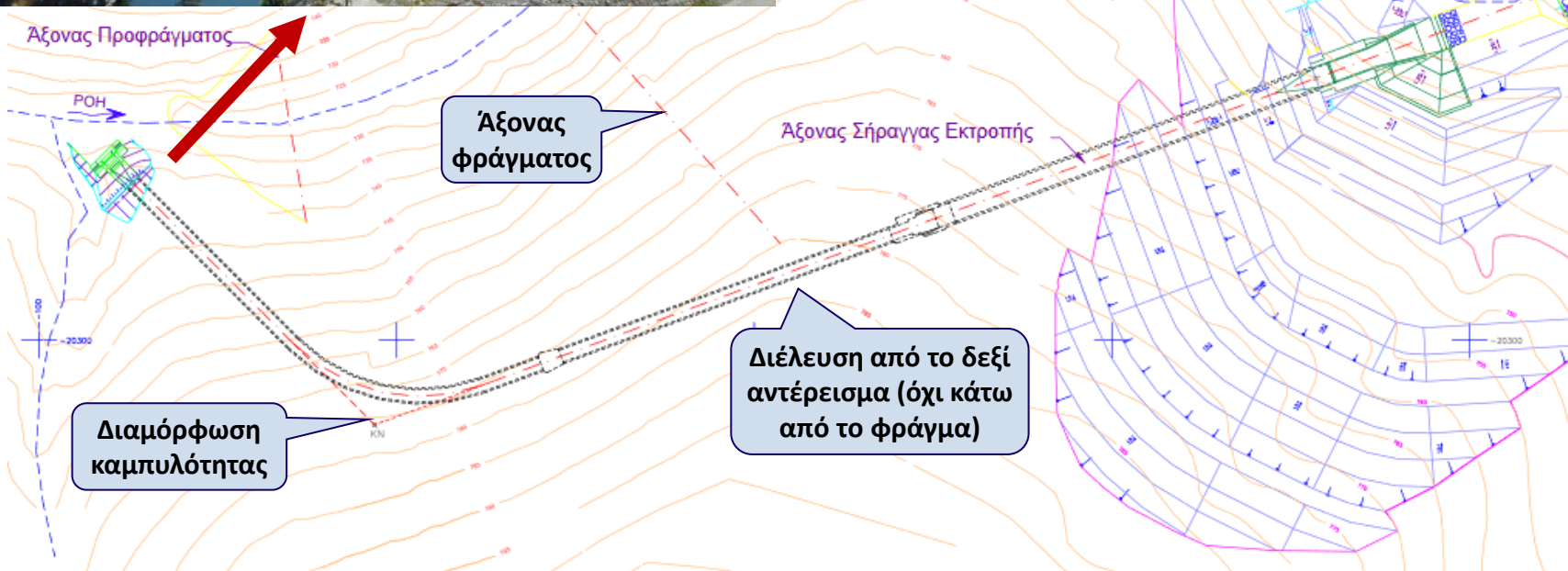


- Πλημμύρα σχεδιασμού 100 ετών
- Παροχή αιχμής 380 m³/s
- Στέψη προφράγματος +280 m
- Σήραγγα εκτροπής 7.5 m
- Μήκος 400 m, κλίση 3.26%

Παράδειγμα: Φράγμα Σέττα Μανίκια, Εύβοια



Πηγή: Μουτάφης, Ν., Συστήματα εκτροπής ποταμού, Σημειώσεις μαθήματος Υδραυλικές Κατασκευές - Φράγματα, ΕΜΠ, 2014.



Παράδειγμα: Φράγμα Γαδουρά, Ρόδος



Είσοδος έργου εκτροπής

- ❑ Γεωμετρία προσαρμοσμένη στον τύπο του αγωγού.
- ❑ Δάπεδο εισόδου 1-3 m πάνω από κοίτη ποταμού.
- ❑ Καθοδηγητικοί τοίχοι για ομαλά επιταχυνόμενη ροή νερού προς το στόμιο εισόδου του αγωγού.
- ❑ Ομαλές καμπύλες στομίου, καθοδηγητικοί πλευρικοί τοίχοι και οροφή: υδραυλικός σχεδιασμός (ομαλή μετάβαση ροής, ελαχιστοποίηση τοπικών απωλειών).
- ❑ Ορθογωνική διατομή στομίου εισόδου για την τοποθέτηση θυροφραγμάτων ή/και δοκών έμφραξης (δύο για ασφάλεια).
- ❑ Μεσόβαθρο για κατανομή φορτίων δοκών έμφραξης (σε περιπτώσεις μεγάλου ανοίγματος).
- ❑ Παρεμβολή τμήματος μεταβλητής διατομής μεταξύ του ορθογωνικού στομίου και της κυκλικής ή πεταλοειδούς διατομής της σήραγγας → ομαλές καμπύλες προσαρμογής.

Φράγμα Ιλαρίωνα



Φράγμα Αγιονερίου

Κατασκευαστικές λεπτομέρειες

Καθοδηγητικοί τοίχοι
σήραγγας Σισανίου



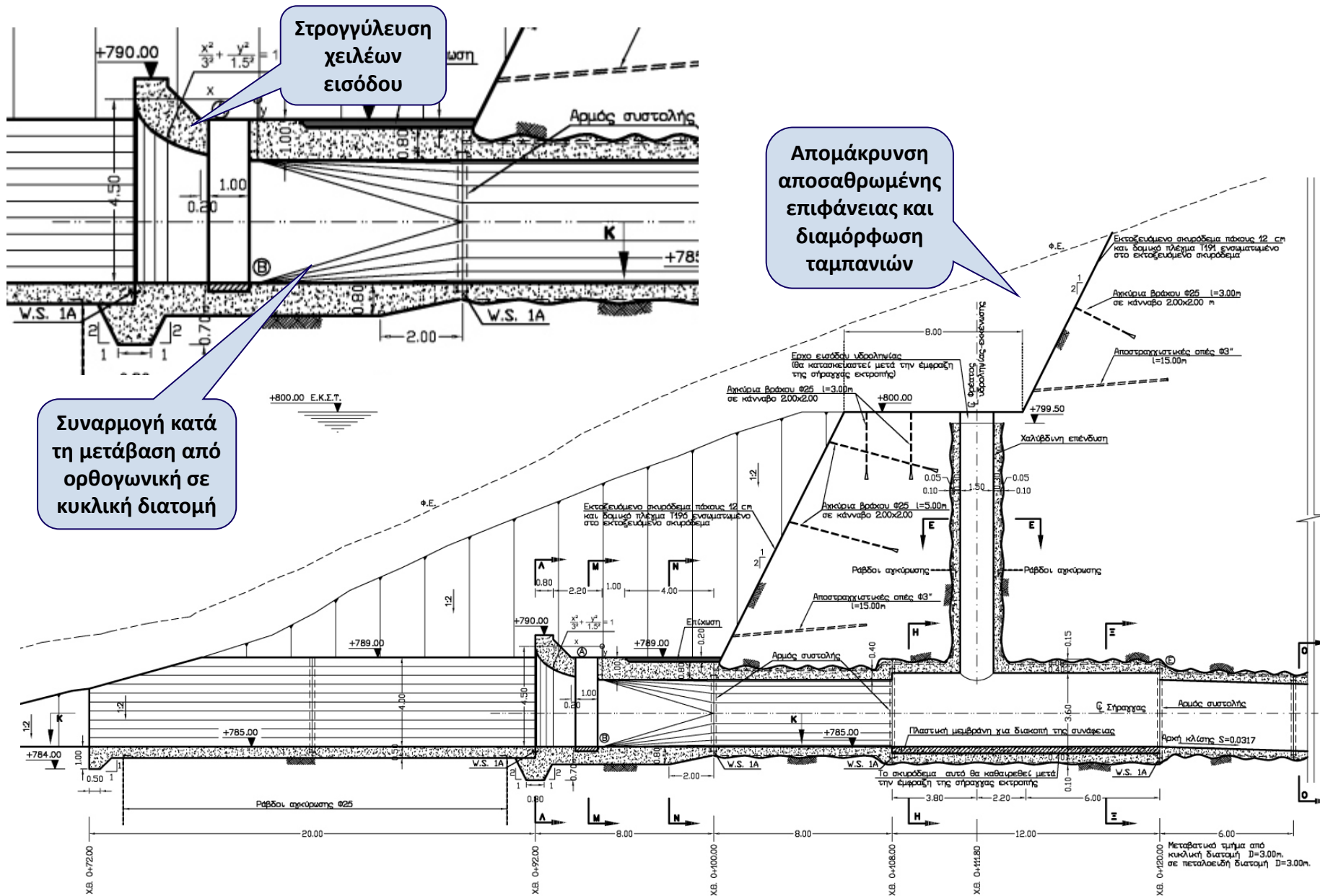
Δοκοί έμφραξης
σήραγγας Ιλαρίωνα



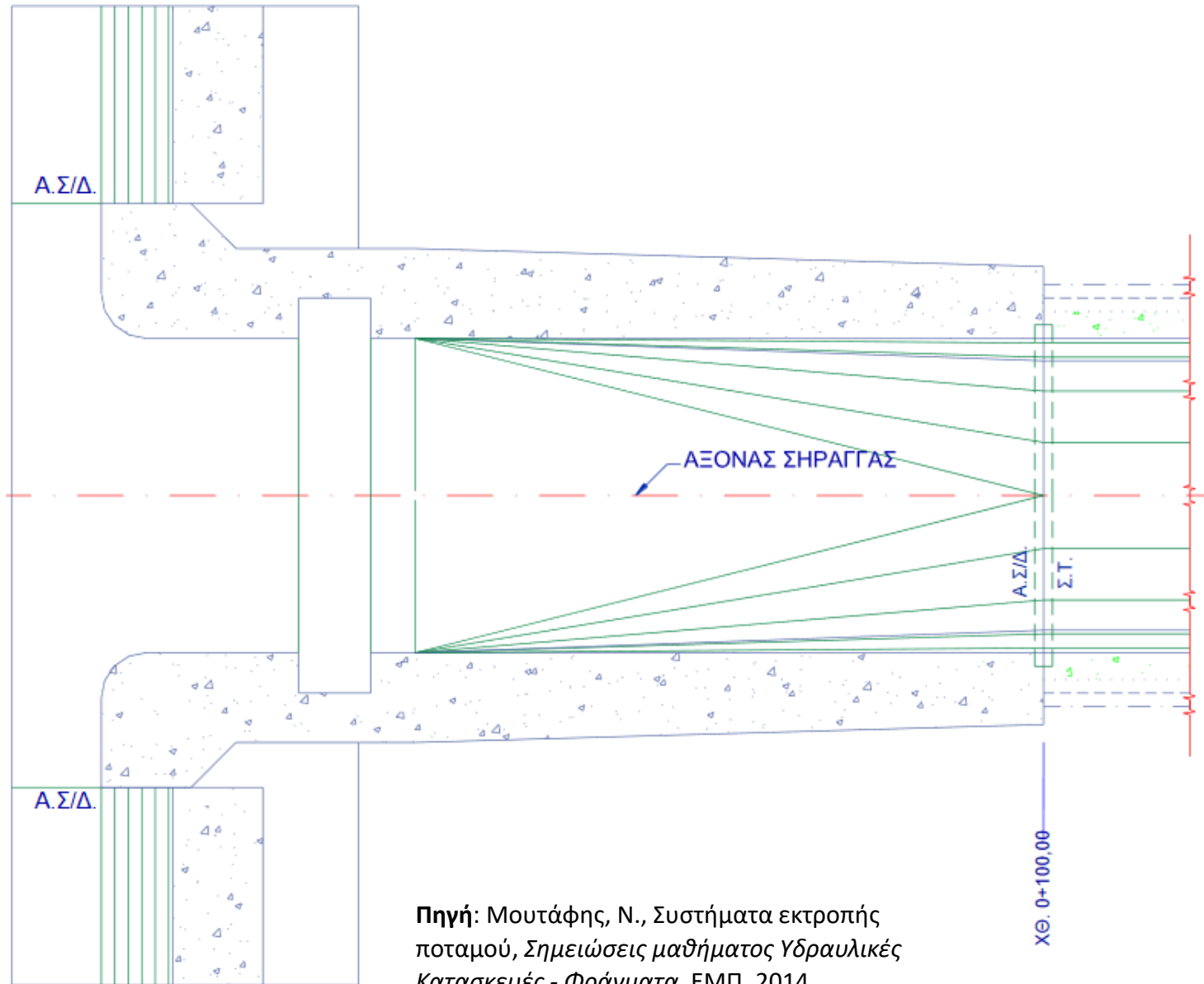
Στόμιο εισόδου
σήραγγας Πύλης



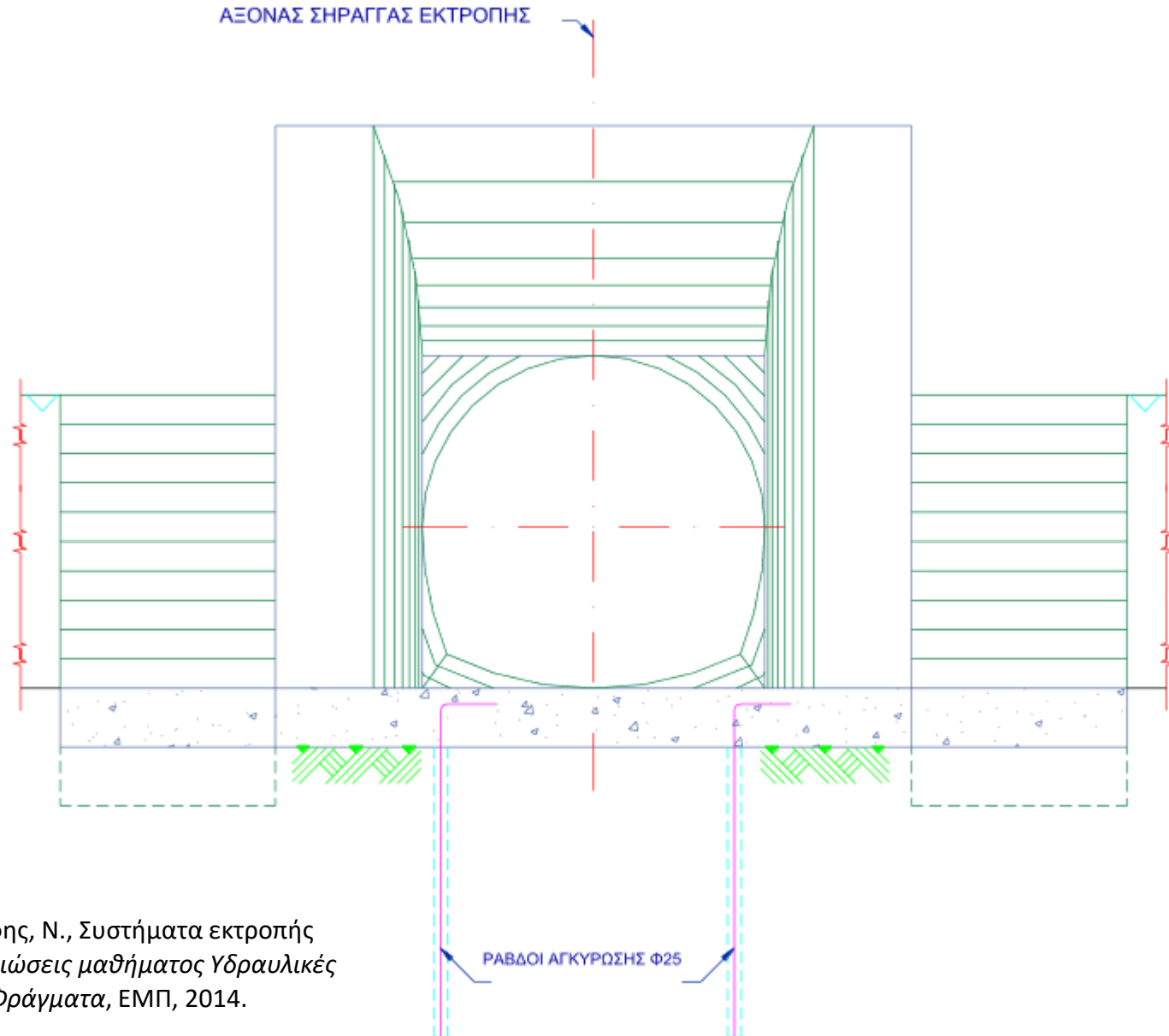
Παράδειγμα: είσοδος σήραγγας φρ. Τριανταφυλλιάς



Λεπτομέρεια έργου εισόδου: κάτοψη

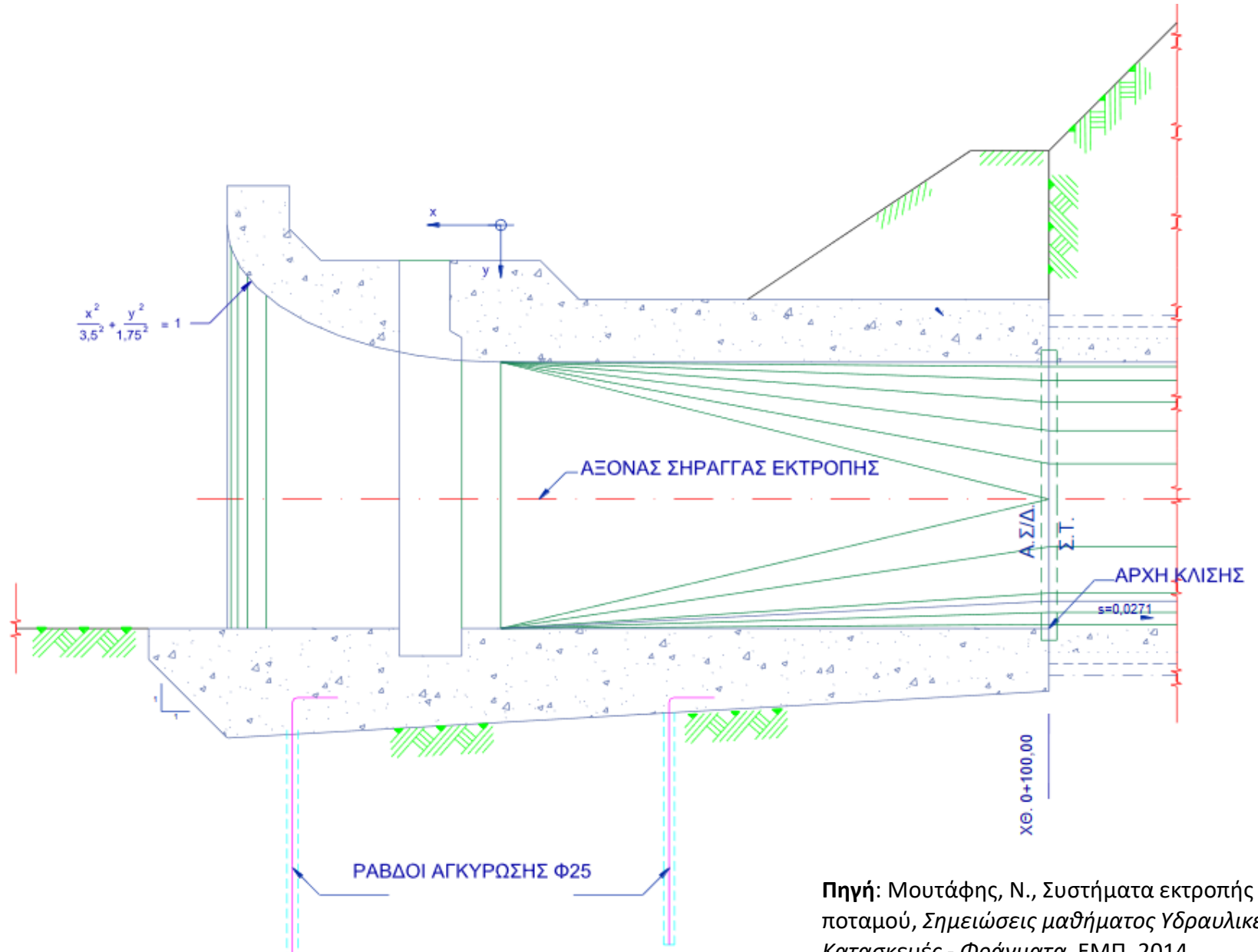


Λεπτομέρεια έργου εισόδου: όψη



Πηγή: Μουτάφης, Ν., Συστήματα εκτροπής ποταμού, Σημειώσεις μαθήματος Υδραυλικές Κατασκευές - Φράγματα, ΕΜΠ, 2014.

Λεπτομέρεια έργου εισόδου: τομή



Πηγή: Μουτάφης, Ν., Συστήματα εκτροπής ποταμού, Σημειώσεις μαθήματος Υδραυλικές Κατασκευές - Φράγματα, ΕΜΠ, 2014.

Έξοδος έργου εκτροπής

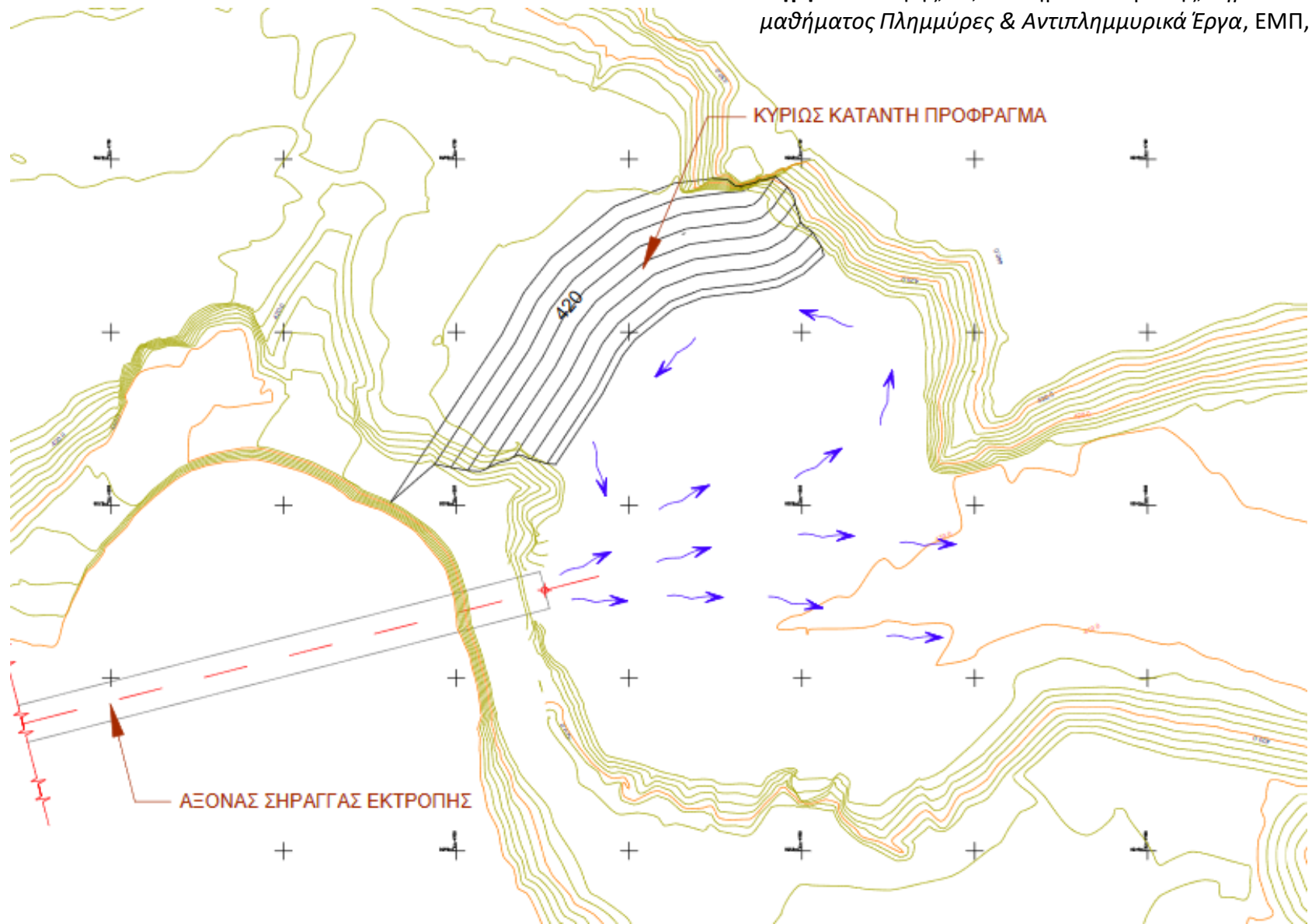
- ❑ Θέση τοποθέτησης έργων χειρισμού του ταμιευτήρα, όταν τα έργα εκτροπής συνδυάζονται με λειτουργικά έργα απόληψης και εκκένωσης.
- ❑ Μέγεθος και μορφή διατομής προσαρμοσμένη στη μορφή του αγωγού και τις αναμενόμενες παροχές.
- ❑ Πλευρικοί τοίχοι (αποκλίνοντες – υδραυλικός σχεδιασμός)
- ❑ Η στάθμη (και η κλίση του αγωγού εκτροπής) επιλέγεται ώστε:
 - να ικανοποιεί τις απαιτήσεις υδραυλικής λειτουργίας του αγωγού
 - να μη δημιουργεί κίνδυνο υποσκαφής στη θέση εκβολής
 - να επιτυγχάνει καταστροφή ενέργειας
- ❑ Προστασία κυρίως έργου σε συνδυασμό με το κατάντη πρόφραγμα

Φράγμα Συκιάς

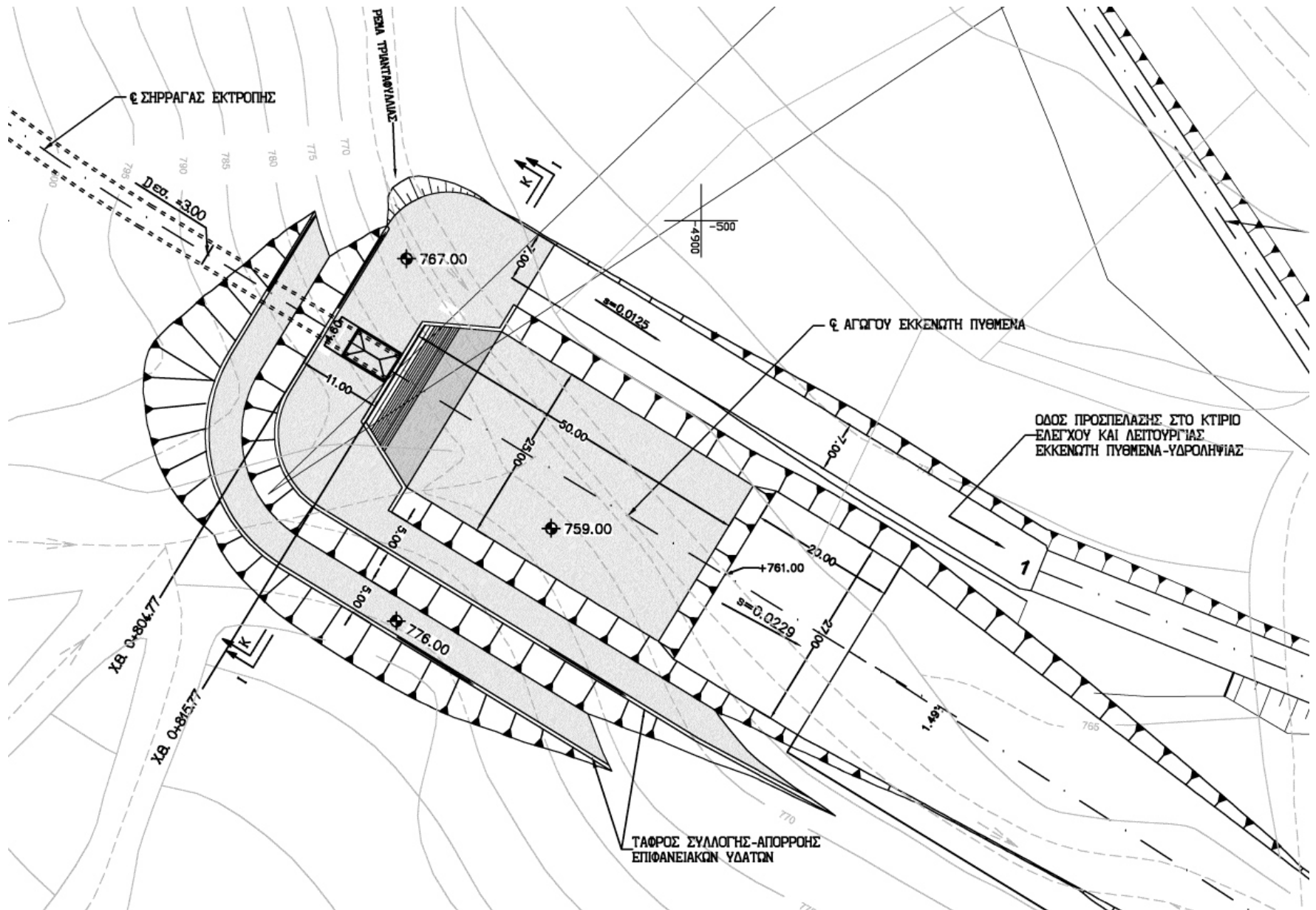


Έξοδος εκτροπής Συκιάς: προβλήματα συνθηκών ροής

Πηγή: Μουτάφης, Ν., Συστήματα εκτροπής, Σημειώσεις μαθήματος Πλημμύρες & Αντιπλημμυρικά Έργα, ΕΜΠ, 2012.



Λεπτομέρεια έργου εξόδου: κάτοψη



Τυπικές διατάξεις εκτροπής: επιφανειακοί αγωγοί

□ Μόνιμα έργα εκτροπής:

- Αγωγός διερχόμενος από τη θεμελίωση (ποτέ μέσα από το σώμα του φράγματος)
- Αγωγοί μικρών διαστάσεων ($D < 2.5$ m), για μικρές παροχές
- Χαλύβδινοι ή σκυροδέματος (προκατασκευασμένο ή ένχυτο επί τόπου)
- Τεθλασμένες χαράξεις αξόνων λόγω εκσκαφών
- Μόνο για μικρές επικαλύψεις επιχωμάτων
- Χαμηλό κόστος κατασκευής

□ Προσωρινά έργα εκτροπής:

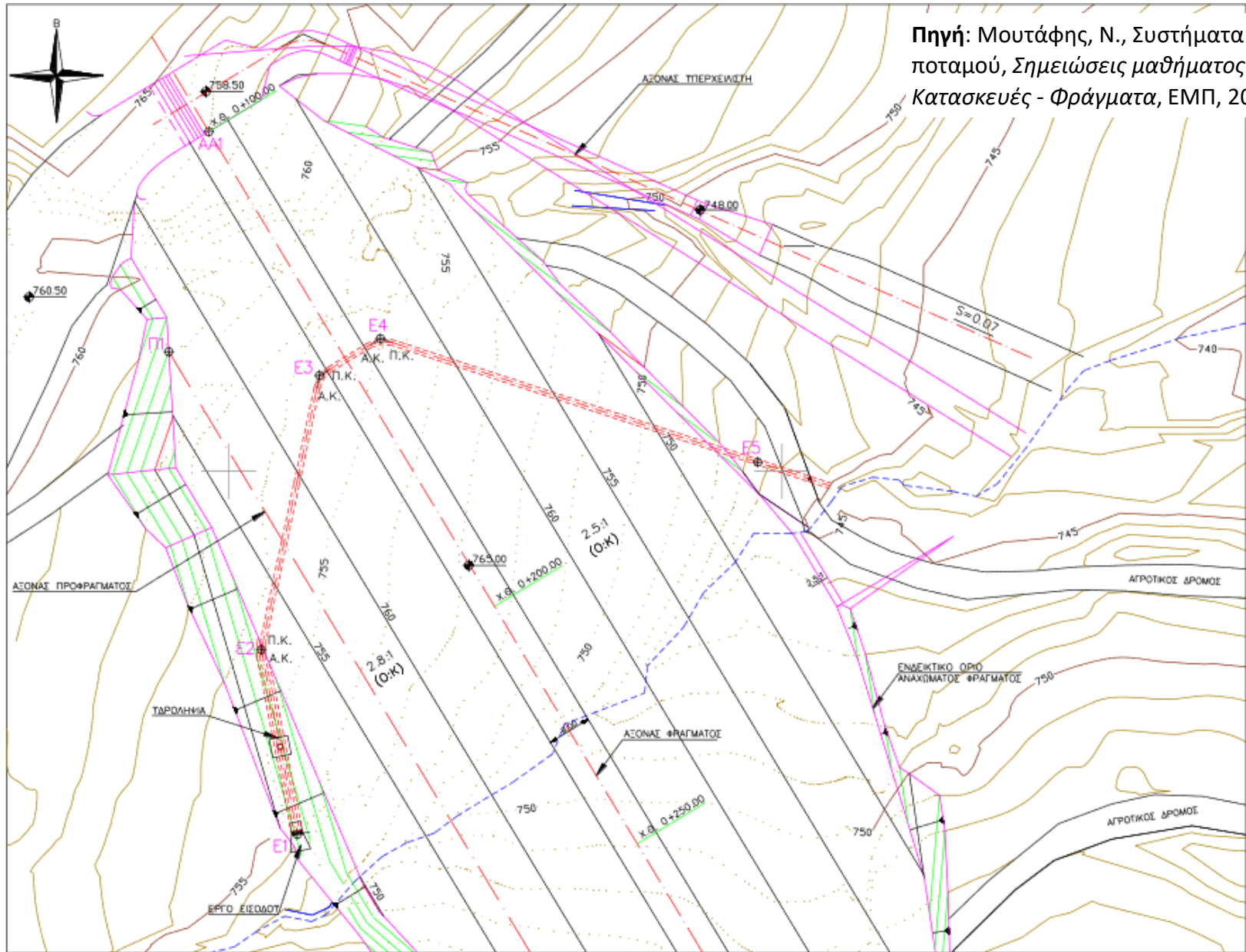
- Ξύλινες διώρυγες
- Τσιμεντοσωλήνες
- Τάφρος διαμέσου του σώματος

- Προσωρινά έργα κατάλληλα για φράγματα σχετικά μικρού ύψους, με έναρξη κατασκευής την ξηρή περίοδο και πρόβλεψη ταχείας ανύψωσης (σκληρού επιχώματος, RCC)



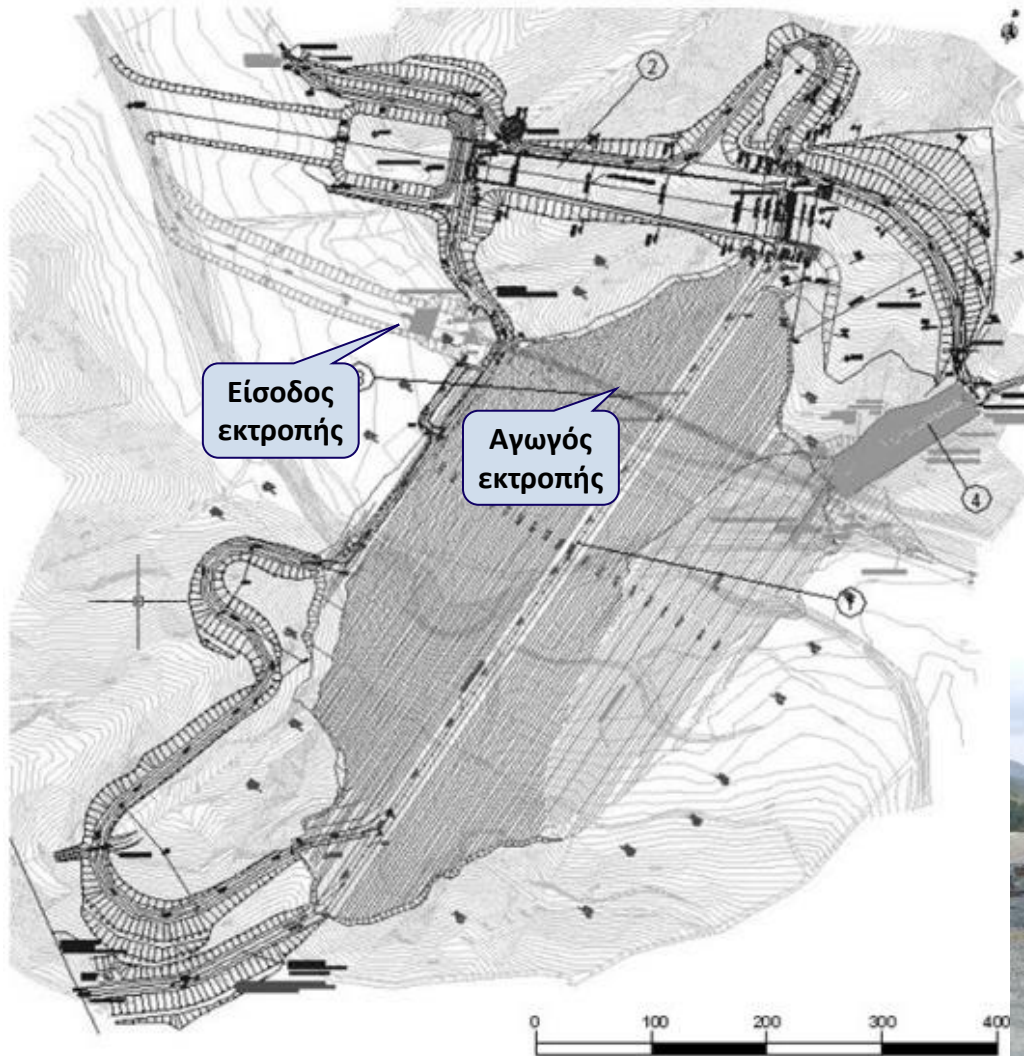
Πηγή: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, *Design of Small Dams*, 860 p., 1987

Παράδειγμα χάραξης επιφανειακού αγωγού εκτροπής



Πηγή: Μουτάφης, Ν., Συστήματα εκτροπής ποταμού, Σημειώσεις μαθήματος Υδραυλικές Κατασκευές - Φράγματα, ΕΜΠ, 2014.

Παράδειγμα: Φράγμα Αποσελέμη, Κρήτη



Πηγή: <http://www.hydroex.gr/projects/aposelemis-dam-water-treatment-and-supply-works-northern-crete-island>

Παράδειγμα: Φράγμα Ραπεντώσας

Μεταλλικός αγωγός εκτροπής
φράγματος Ραπεντώσας (Ø2000)



Διέλευση κάτω από την πλίνθο (όπου
εδράζεται η ανάντη πλάκα σκυροδέματος)



Επένδυση αγωγού με
οπλισμένο σκυρόδεμα



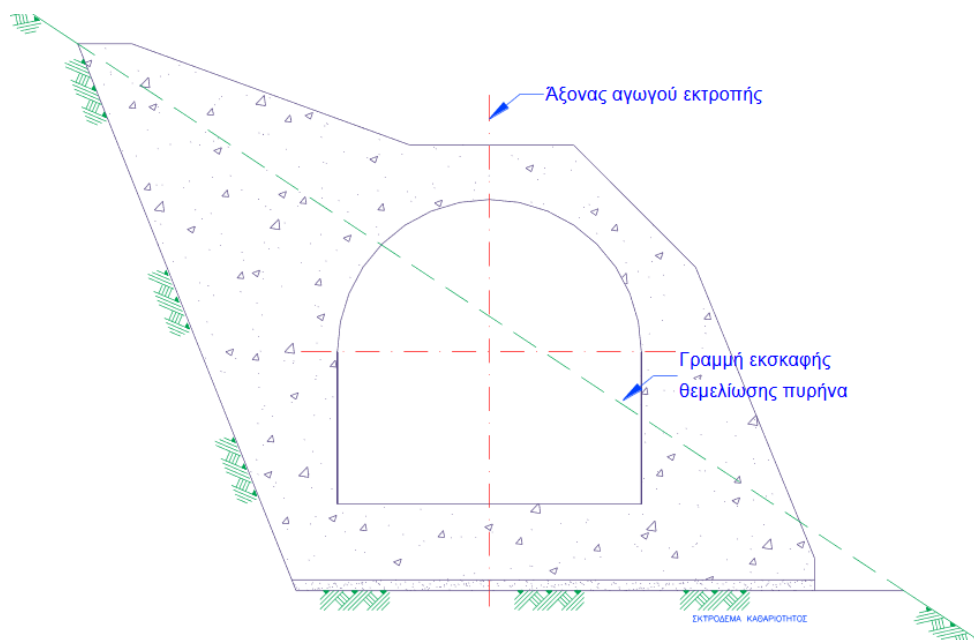
Πηγή: Μουτάφης, Ν., Συστήματα εκτροπής, Σημειώσεις
μαθήματος Πλημμύρες & Αντιπλημμυρικά Έργα, ΕΜΠ, 2012.



Διέλευση αγωγού κάτω από τον πυρήνα γεωφράγματος



Αγωγός εκτροπής φράγματος Μυλοποτάμου



Έναρξη εκτροπής

- ❑ Ολοκλήρωση συστήματος έργων εκτροπής (σήραγγα, πρόφραγμα).
- ❑ Στο διάστημα της κατασκευής τους, ένα μικρό ανάχωμα διαχωρίζει το έργο εισόδου από τη ροή του ποταμού.
- ❑ Στη φάση έναρξης της εκτροπής, το ανάχωμα καθαιρείται.
- ❑ Σε επόμενο στάδιο, γίνεται σταδιακός περιορισμός της κύριας ροής με την κατασκευή του προφράγματος, ώστε ολοκληρωθεί η εκτροπή.

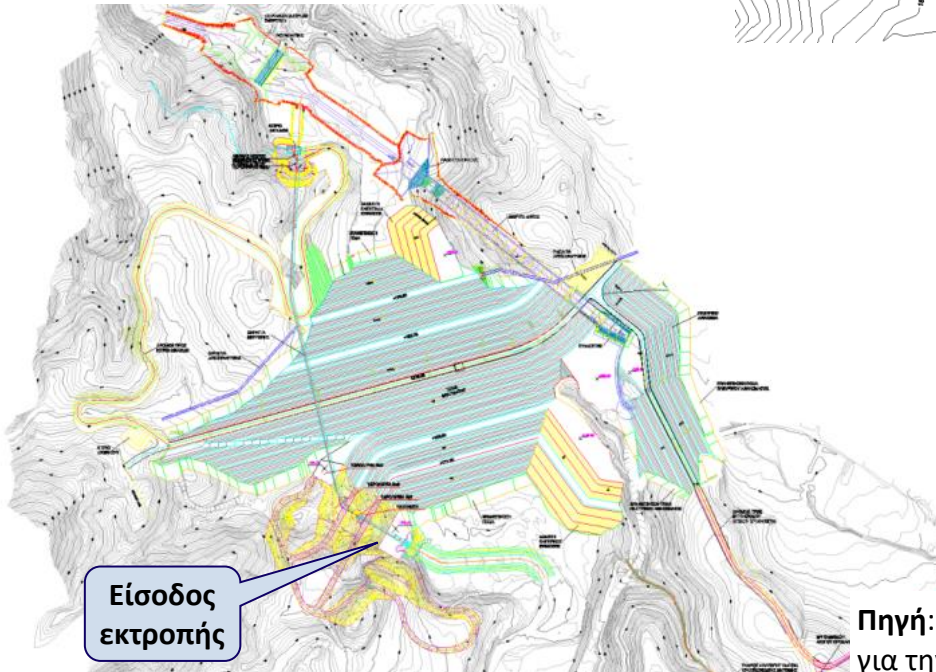
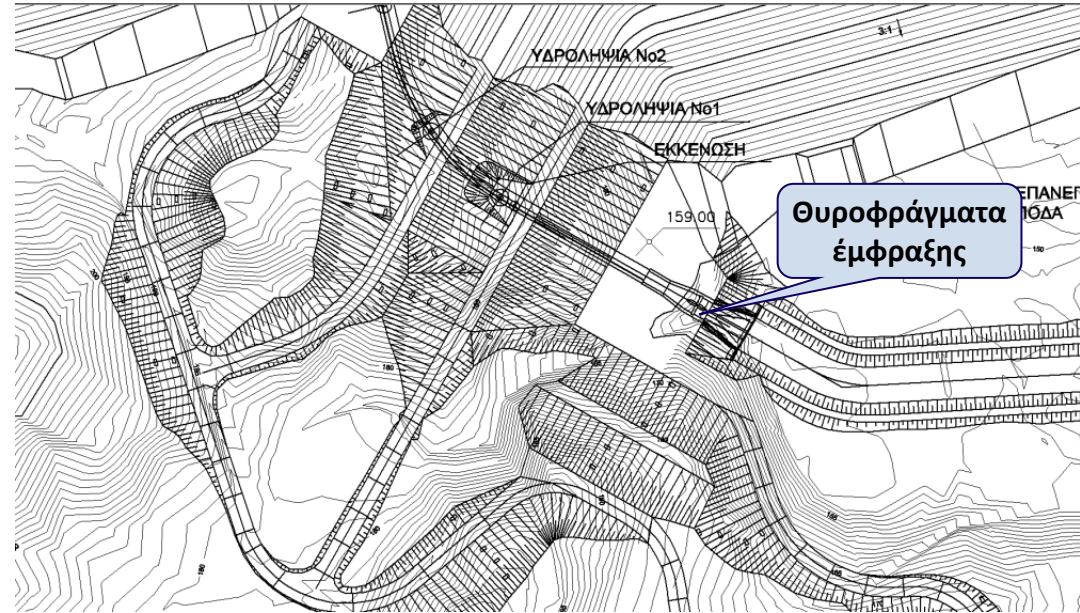


Έμφραξη εκτροπής – πρώτη πλήρωση ταμιευτήρα

- Δεν απαιτείται πάντα ειδική κατασκευή για την έμφραξη, αλλά αρκεί η αναίρεση της εκτροπής (π.χ. προσωρινοί επιφανειακοί αγωγοί).
- Η έμφραξη σηράγγων εκτροπής γίνεται με μόνιμη κατασκευή από σκυρόδεμα (**πώμα**), που αγκυρώνεται στη θέση κατασκευής
- Η θέση του πώματος πρέπει να εξασφαλίζει στεγάνωση → περιοχή **πετάσματος τσιμεντενέσεων** (πυρήνας, σε γεωφράγματα).
- Διαδικασία έμφραξης σήραγγας:
 - Προσωρινή έμφραξη στομίου εισόδου με θυροφράγματα
 - Κατασκευή πώματος και άλλων μόνιμων κατασκευών
 - Άρση προσωρινής έμφραξης
 - Τσιμεντενέσεις επαφής μεταξύ πώματος και επένδυσης για την πλήρωση των κενών σκυροδέτησης



Έμφραξη αγωγού εκτροπής φράγματος Αστερίου



Πηγή: ΥΠΟΜΕ/ΕΥΔΕ ΚΥΛΥ & Υδροεξυγιαντική ΑΕ, Τεχνικός Σύμβουλος για την έμφραξη και πρώτη πλήρωση φράγματος Αστερίου, 2019

Αξιοποίηση έργου εκτροπής

- ❑ Μικρή διάρκεια ζωής, αχρήστευση έργου μετά την οριστική έμφραξη.
- ❑ Αξιοποίηση τμημάτων του έργου εκτροπής:
 - Εκκενωτής πυθμένα
 - Αγωγός προσαγωγής οικολογικής παροχής
 - Κατασκευή μικρού υδροηλεκτρικού έργου
 - Λοιποί αγωγοί υδροληψίας

Φράγμα Ασωμάτων



Φράγμα Θησαυρού



Φράγμα Αποσελέμη



Τυπικές διατάξεις εκτροπής: Κατασκευή σε φάσεις με κατάληψη μέρους της κοίτης

Πηγή: <https://www.nsenenergybusiness.com/news/oxec-ii-hydroelectric-project-guatemala/>



Τυπικές διατάξεις εκτροπής: Αμφίπλευρη κατασκευή φράγματος από σκυρόδεμα



Sashta dam (1942)

Παράδειγμα: Three Gorges Dam, Κίνα



Στάδιο 1

- ❑ A cofferdam is formed on one side of the river by dumping rocks into the water to create an embankment dam.
- ❑ Water is pumped out from the enclosure formed between the riverbank and the dam to create a dry pit.
- ❑ The pit is excavated to a deep enough level so that all of the river water can be diverted through it during Stage 2 of the construction.
- ❑ A concrete cofferdam is constructed along one side of the pit.

Στάδιο 2

- ❑ Two more rockfill cofferdams are constructed on the other side of the river, again by dumping rocks in the water, one upstream of the dam location and one downstream
- ❑ These form an enclosure with the river bank and the Stage 1 concrete cofferdam. The enclosure is then pumped dry and excavated, so that the first portion of the main dam can be built within it.
- ❑ Meanwhile, the water flows through the deeper channel on the other side of the river formed during Stage 1.

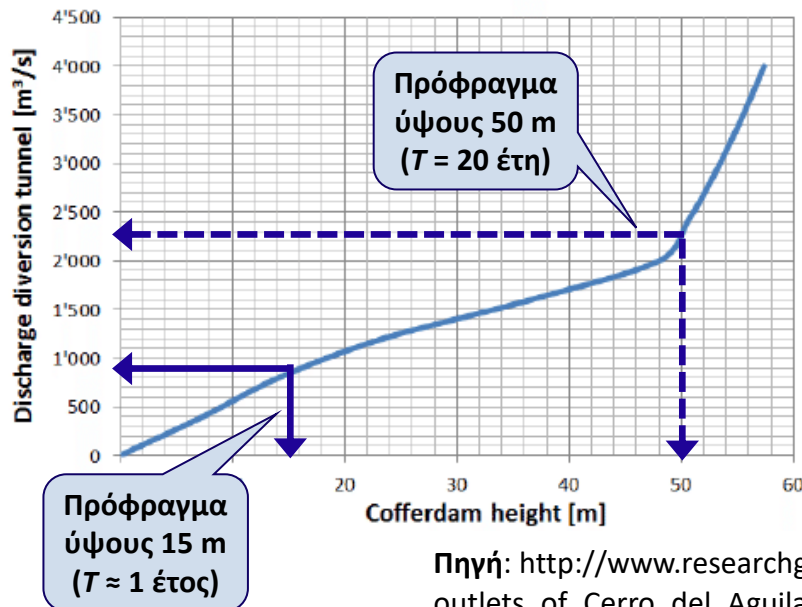
Στάδιο 3

- ❑ Two more rockfill cofferdams are constructed to create a final enclosure, which is pumped dry and excavated to complete the construction of the dam across the river.

Πηγή: British Dam Society

Λοιπές διατάξεις: θύρες εκκένωσης στον πυθμένα

- ❑ Φράγμα βαρύτητας Cerro del Aguila, Περού, μήκους στέψης 270 m και ύψους 80 m.
- ❑ Παροχετευτικότητα υπερχειλιστή 7000 m³/s.
- ❑ Στον πυθμένα κατασκευάστηκαν έξι θύρες εκκένωσης, διαστάσεων 4.5 × 6.0 m, παροχετευτικότητας 4560 m³/s, για την έκπλυση των φερτών (μέση στερεοαπορροή 3.5 Mm³/έτος, νεκρός όγκος μόλις 0.6 Mm³).
- ❑ Κατά την κατασκευή του έργου λειτούργησαν ως πρόσθετα έργα εκτροπής, καθώς η σήραγγα εκτροπής και το πρόφραγμα σχεδιάστηκαν για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς μικρότερης του έτους.



Πηγή: http://www.researchgate.net/publication/284284812_Design_and_erection_of_the_6_bottom_outlets_of_Cerro_del_Aguila_dam_for_flood_routing_during_construction_and_future_sediment_flushing

Λοιπές διατάξεις: Ελεγχόμενη υπερπήδηση φράγματος

- ❑ Υ/Η φράγμα Tekeze, Αιθιοπία (τοξωτό, 188 m).
- ❑ Δύο σήραγγες εκτροπής με προφράγματα για τις συνήθεις παροχές της ξηρής περιόδου.
- ❑ Αρχική επιλογή για την απαγωγή των πλημμυρών των περιόδων των μουσώνων η κατασκευή δύο προσωρινών θυροφραγμάτων ανοίγματος 2.2×8.5 m στον πυθμένα.
- ❑ Τελική επιλογή η διαμόρφωση μπλοκ ανοιγμάτων σε χαμηλές στάθμες, για την ελεγχόμενη υπερπήδηση της κατασκευής
- ❑ Επιτυχής διόδευση πλημμύρας δεκαετίας, παροχής αιχμής $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Αύγουστος 2006).



Υδρολογικός σχεδιασμός συστήματος εκτροπής

- Ως έργο ασφαλείας, σχεδιάζεται με βάση πλημμυρογράφημα κατάλληλης περιόδου επαναφοράς, που επιλέγεται με βάση ένα αποδεκτό **επίπεδο διακινδύνευσης (risk)**:

$$r = 1 - (1 - 1/T)^N$$

όπου T η περίοδος επαναφοράς της πλημμύρας και N ο αναμενόμενος χρόνος εκτέλεσης του έργου (π.χ. για $T = 50$ έτη και $N = 3$ έτη, το ρίσκο είναι της τάξης του 6%).

- Μέγιστο αποδεκτό επίπεδο διακινδύνευσης για έργα εκτροπής: 25% (εξαιρετικά μικρότερο για υπερχειλιστές, η υδρολογική αστοχία των οποίων αναμένεται να έχει μείζονες επιπτώσεις και ζημίες).
- Επιλύεται το πρόβλημα **διόδευσης της πλημμύρας μέσω του αγωγού εκτροπής και ανάσχεσής της στο πρόφραγμα**, μέσω του οποίου ελέγχονται:
 - τα χαρακτηριστικά μεγέθη του αγωγού (διάμετρος, κλίση)
 - το ύψος του προφράγματος (με βάση την ανώτατη στάθμη πλημμύρας)
- Γενικά επιδιώκονται συνθήκες **υπερκρίσιμης ροής** (επιτυγχάνεται διαμορφώνοντας σήραγγα σχετικά μεγάλης κλίσης).
- Στις συνήθεις παροχές, ο αγωγός εκτροπής λειτουργεί με ελεύθερη επιφάνεια, ωστόσο για μεγάλες πλημμυρικές παροχές σχεδιάζεται ώστε να λειτουργεί και **υπό πίεση**, για κάποιο χρονικό διάστημα (σύνθετη σχέση στάθμης-παροχής).
- Τα **έργα εισόδου και εξόδου** σχεδιάζονται με την (εξομαλυμένη) παροχή αιχμής.

Αστοχία έργων εκτροπής

- ❑ Υπέρβαση των συνθηκών σχεδιασμού οδηγεί σε αστοχία του συστήματος, και ενδεχόμενες ζημιές στο υπό κατασκευή έργο (κυμαινόμενη έκταση, ανάλογα με τον τύπο του φράγματος)
- ❑ Σχέδιο αντιμετώπισης
 - Σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης
 - Χώροι φύλαξης εξοπλισμού
 - Ασφάλιση έργου



Φράγμα Μαραθώνα

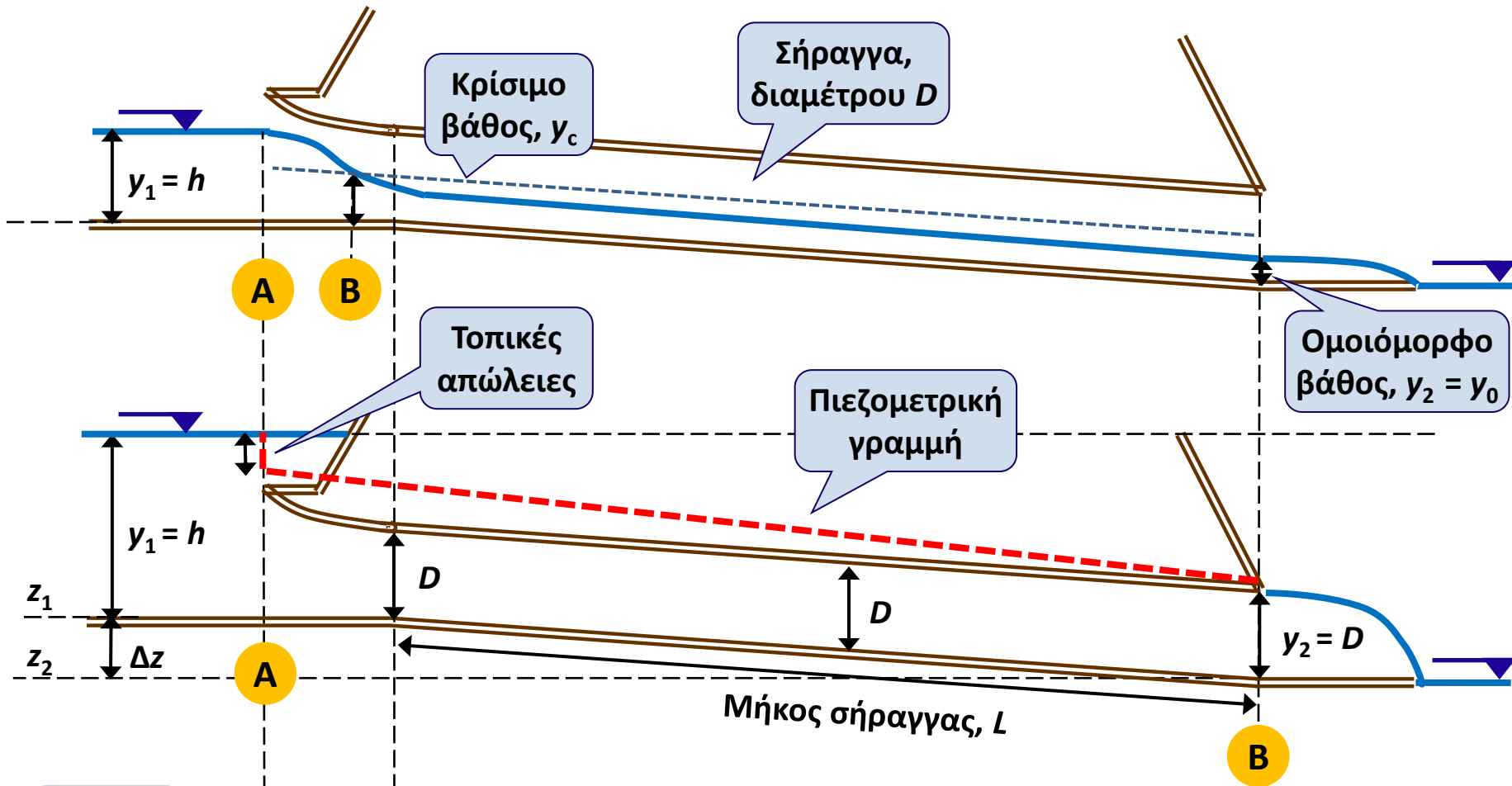


Waimea Community Dam, Νέα Ζηλανδία

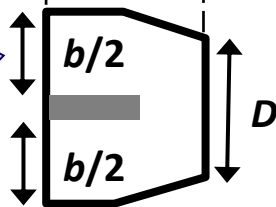


Nathpa Jhakri, Ινδία

Υδραυλικοί υπολογισμοί σήραγγας εκτροπής



Διατομή εισόδου, ενεργού πλάτους b



Τύποι ροής στη σήραγγα εκτροπής:

- $h \leq 1.2 D$: Ροή με ελεύθερη επιφάνεια (h : υδραυλικό φορτίο)
- $1.2 D < h < 1.5 D$: Μεταβατική ροή (ασταθής)
- $h \geq 1.5 D$: Ροή υπό πίεση

Ροή με ελεύθερη επιφάνεια ($h \leq 1.2D$)

Δεδομένα και υποθέσεις

- Οριζόντιος πυθμένας και μηδενική ταχύτητα ανάντη (ταμιευτήρας)
- Ορθογωνική διατομή εισόδου, ενεργού πλάτους b ,
- Συντελεστής τοπικών απωλειών k (για ομαλή συναρμογή $k \approx 0.1$)
- **Ροή υπερκρίσιμη** → η ελεύθερη επιφάνεια τέμνει τη γραμή κρίσιμου βάθους κοντά στην είσοδο της διατομής συναρμογής (έλεγχος: ομοιόμορφο βάθος < κρίσιμο βάθος)

Βασικές σχέσεις υπολογισμού

- Εξίσωση ενέργειας μεταξύ ανάντη διατομής και διατομής κρίσιμου βάθους:

$$h = y_c + \frac{V_c^2}{2g} + k \frac{V_c^2}{2g} = y_c + (1 + k) \frac{V_c^2}{2g} \quad (1)$$

- Επειδή στη θέση του κρίσιμου βάθους η διατομή είναι ορθογωνική ισχύει:

$$Fr = 1 \rightarrow \frac{V_c}{\sqrt{g y_c}} = 1 \rightarrow \frac{V_c^2}{g} = y_c \quad (2)$$

- Αντικαθιστώντας την (2) στην (1) προκύπτει:

$$h = y_c + (1 + k) \frac{y_c}{2} = (3 + k) \frac{y_c}{2} \rightarrow y_c = \frac{2h}{3 + k} \quad (3)$$

- Συνδυάζοντας τις (2) και (3) προκύπτει η **σχέση στάθμης-παροχής**:

$$y_c = \frac{Q^2}{b^2 y_c^2 g} \rightarrow Q = b \sqrt{g y_c^3} \rightarrow Q = b \sqrt{\frac{8g h^3}{(3 + k)^3}} \rightarrow Q = \lambda h^{3/2} \quad (4)$$

Ροή υπό πίεση ($h \geq 1.5D$)

- Εξίσωση ενέργειας μεταξύ διατομών εισόδου και εξόδου:

$$z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (1)$$

- Θέτοντας $y_1 = h$ (υδραυλικό φορτίο ανάντη), $y_2 = D$ (βάθος ροής κατάντη = διάμετρος σήραγγας), $V_1 \approx 0$ (μηδενική ροή ανάντη) και $V_2 = 4Q/\pi D^2$ προκύπτει:

$$\Delta h = \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4} + h_f \quad (2)$$

όπου $\Delta h = h + \Delta z - D$ (Δz : υψομετρική διαφορά πυθμένων διατομών εισόδου και εξόδου).

- Οι απώλειες ενέργειας, h_f , περιλαμβάνουν τις **τοπικές απώλειες** στην διατομή εισόδου, εμβαδού $A_{\text{εισ}}$, και τις **γραμμικές απώλειες**, κατά μήκος της σήραγγας εκτροπής. Οι πρώτες υπολογίζονται από τη σχέση:

$$h_T = k \frac{V_{\text{εισ}}^2}{2g} = k \frac{Q^2}{2g A_{\text{εισ}}^2} \quad (3)$$

- Οι γραμμικές απώλειες ενέργειας εκτιμώνται από τη **σχέση του Manning**:

$$h_L = J L = \frac{4^{10/3} n_0^2 Q^2}{\pi^2 D^{16/3}} L \quad (4)$$

- Συνδυάζοντας τις (2), (3) και (4) προκύπτει η **σχέση στάθμης-παροχής**:

$$\Delta h = \left(\frac{8}{\pi^2 g D^4} + \frac{k}{2g A_{\text{εισ}}^2} + \frac{4^{10/3} n_0^2 L}{\pi^2 D^{16/3}} \right) Q^2 \rightarrow Q = \mu (h + \Delta z - D)^{1/2} \quad (5)$$

Ροή υπό πίεση – Παρατηρήσεις

- Ο **συντελεστής τοπικών απωλειών** στη διατομή εισόδου, για ομαλή προσαγωγή της ροής, λαμβάνεται ίσος με $k = 0.10$ ως 0.20 .
- Οι **γραμμικές απώλειες** εκτιμώνται από τη σχέση ομοιόμορφης ροής του Manning, όπου το μέγεθος J αναφέρεται στην κλίση της πιεζομετρικής γραμμής (όχι του πυθμένα). Η χρήση της εν λόγω σχέσης γίνεται λόγω των σχετικά μεγάλων συντελεστών τραχύτητας, επιτρέποντας την κατάρτιση αναλυτικών σχέσεων στάθμης-παροχής.
- **Συντελεστής τραχύτητας**, n_0 , για ολική πλήρωση της σήραγγας:
 - Επένδυση με σκυρόδεμα $n_0 = 0.014$
 - Επένδυση με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα $n_0 = 0.022$
 - Χωρίς επένδυση (φυσικός βράχος) $n_0 = 0.030$
- Για μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να εφαρμοστεί η **γενικευμένη εξίσωση Manning**:

$$J = \left(\frac{4^{3+\beta} N^2 Q^2}{\pi^2 D^{5+\beta}} \right)^{1/(1+\gamma)}$$

με χρήση των ακόλουθων συντελεστών, που ισχύουν για μεγάλες διαμέτρους και ταχύτητες:

$$\beta = 0.25 + 0.0006 \varepsilon_* + \frac{0.024}{1 + 7.2 \varepsilon_*} \quad \gamma = \frac{0.083}{1 + 0.42 \varepsilon_*} \quad N = 0.00757 (1 + 2.47 \varepsilon_*)^{0.14}$$

όπου $\varepsilon_* := \varepsilon/\varepsilon_0$ η αδιαστατοποιημένη τραχύτητα (ε σε m), με $\varepsilon_0 = (v^2/g)^{1/3} = 0.00005$ m.

- Ο **συντελεστής τραχύτητας κατά Manning**, n_0 , και η **ισοδύναμη τραχύτητα**, ε , συνδέονται μέσω της προσεγγιστικής σχέσης: $n_0 \approx \varepsilon^{1/6}/26$ (π.χ. για $n_0 = 0.014$, $\varepsilon = 2.5$ mm).

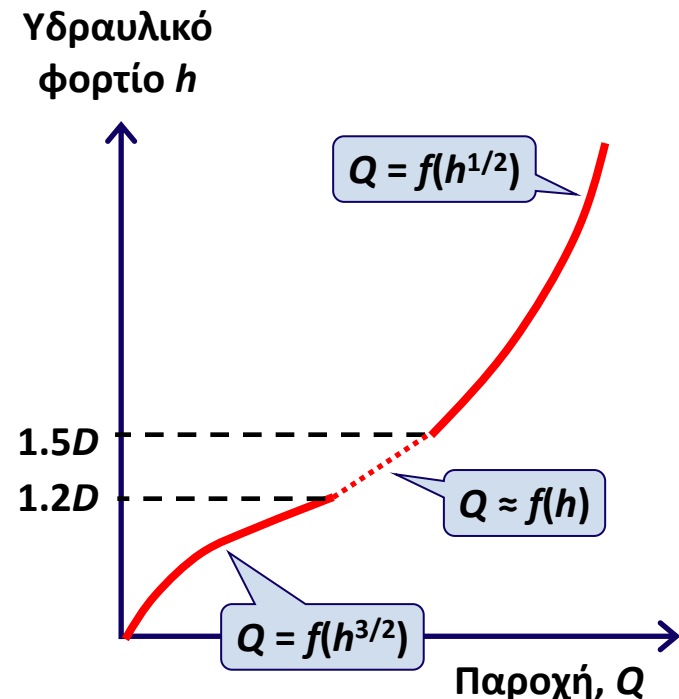
Διόδευση πλημμύρας από σήραγγα εκτροπής

□ Δεδομένα εισόδου:

- Πλημμυρογράφημα εισροής, I_t
- Σχέση στάθμης-αποθέματος λεκάνης κατάκλυσης, $S = S(z)$
- Χαρακτηριστικά μεγέθη διατομής εισόδου (ενεργό πλάτος b , εμβαδόν καθαρής διατομής $A_{\text{εισ}}$, συντελεστής τοπικών απωλειών, k)
- Χαρακτηριστικά μεγέθη σήραγγας (μήκος L , διάμετρος D , συντελεστής τραχύτητας n_0)
- Υψομετρική διαφορά, Δz , μεταξύ των πυθμένων των διατομών εισόδου και εξόδου

□ Υπολογιστική διαδικασία:

- Κατάρτιση σχέσης στάθμης-παροχής σήραγγας εκτροπής, $Q = Q(h)$
- Στην ενδιάμεση περιοχή $1.2D < h < 1.5D$, η ροή είναι ασταθής, και η σχέση στάθμης-παροχής θεωρείται κατά προσέγγιση γραμμική.
- Επίλυση μοντέλου διόδευσης, με επιλογή, σε κάθε χρονικό βήμα, της κατάλληλης σχέσης $Q(h)$, ανάλογα με το τρέχον υδραυλικό φορτίο, h .
- Από την επίλυση προκύπτει μια μέγιστη τιμή του υδραυλικού φορτίου, από το οποίο καθορίζεται το ύψος του προφράγματος (αφού προστεθεί και ένα ελεύθερο περιθώριο μέχρι τη στέψη).



Ειδικά θέματα: Υπολογισμοί ομοιόμορφης ροής σε αγωγούς κυκλικής διατομής

Βασικές σχέσεις υπολογισμού για μεταβλητό συντελεστή τραχύτητας:

$$V = \frac{1}{n} \left(1 - \frac{\sin \vartheta}{\vartheta}\right)^{2/3} \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} J^{1/2}$$

$$V_0 = \frac{1}{n_0} \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} J^{1/2}$$

$$\frac{V}{V_0} = \frac{n_0}{n} \left(1 - \frac{\sin \vartheta}{\vartheta}\right)^{2/3}$$

$$Q = \frac{1}{2 \times 4^{5/3}} \frac{1}{n} \vartheta \left(1 - \frac{\sin \vartheta}{\vartheta}\right)^{5/3} D^{8/3} J^{1/2}$$

$$Q_0 = \frac{\pi}{4^{5/3}} \frac{1}{n_0} D^{8/3} J^{1/2}$$

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{n_0}{n} \frac{\vartheta}{2\pi} \left(1 - \frac{\sin \vartheta}{\vartheta}\right)^{5/3}$$

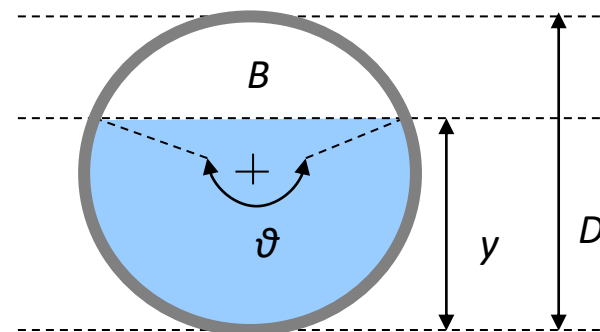
$$n/n_0 = 1 + 0.62(y/D)^{0.4} (1 - y/D)^{0.9}$$

$$n/n_0 = 1 + 2.31(\vartheta/2\pi)^{1.2} (1 - \vartheta/2\pi)^2$$

Σχέσεις γεωμετρικών χαρακτηριστικών ροής σε αγωγό κυκλικής διατομής με μερική και ολική πλήρωση

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	Μερική πλήρωση ($y < D$)	Ολική πλήρωση ($y = y_0 = D$)
Λόγος πλήρωσης, y/D	$\frac{y}{D} = \frac{1 - \cos(\vartheta/2)}{2}$	$\frac{y_0}{D} = 1$
Γωνία, ϑ	$\vartheta = 2 \arccos(1 - 2y/D)$	$\vartheta_0 = 2\pi$
Εμβαδό υγρής διατομής, A	$A = (\vartheta - \sin \vartheta) D^2 / 8$	$A_0 = \pi D^2 / 4$
Βρεχόμενη περίμετρος, P	$P = \vartheta D / 2$	$P_0 = \pi D$
Υδραυλική ακτίνα, R	$R = (1 - \sin \vartheta / \vartheta) D / 4$	$R_0 = D / 4$
Πλάτος στην ελεύθερη επιφάνεια, B	$B = D \sin(\vartheta/2) = 2\sqrt{y(D-y)}$	0
Λόγος A/A_0	$A/A_0 = (\vartheta - \sin \vartheta) / 2\pi$	1
Λόγος R/R_0	$R/R_0 = 1 - \sin \vartheta / \vartheta$	1

Εναλλακτικές (όχι ισοδύναμες) σχέσεις μεταβολής συντελεστή τραχύτητας συναρτήσει του βάθους ροής y



Πηγή: Κουτσογιάννης, 1999, σ. 63-69

Ειδικά θέματα: Υπολογισμός ομοιόμορφου βάθους ροής σε κυκλικό αγωγό για δεδομένη παροχή

1. Για διάμετρο D , κλίση πυθμένα J , και συντελεστή τραχύτητας n_0 , υπολογίζεται η παροχή πλήρωσης:

$$Q_0 = \frac{\pi}{4^{5/3}} \frac{1}{n_0} D^{8/3} J^{1/2}$$

2. Για παροχή Q , υπολογίζεται ο λόγος Q/Q_0 .
3. Η γωνία ϑ υπολογίζεται από την γενική επαναληπτική σχέση:

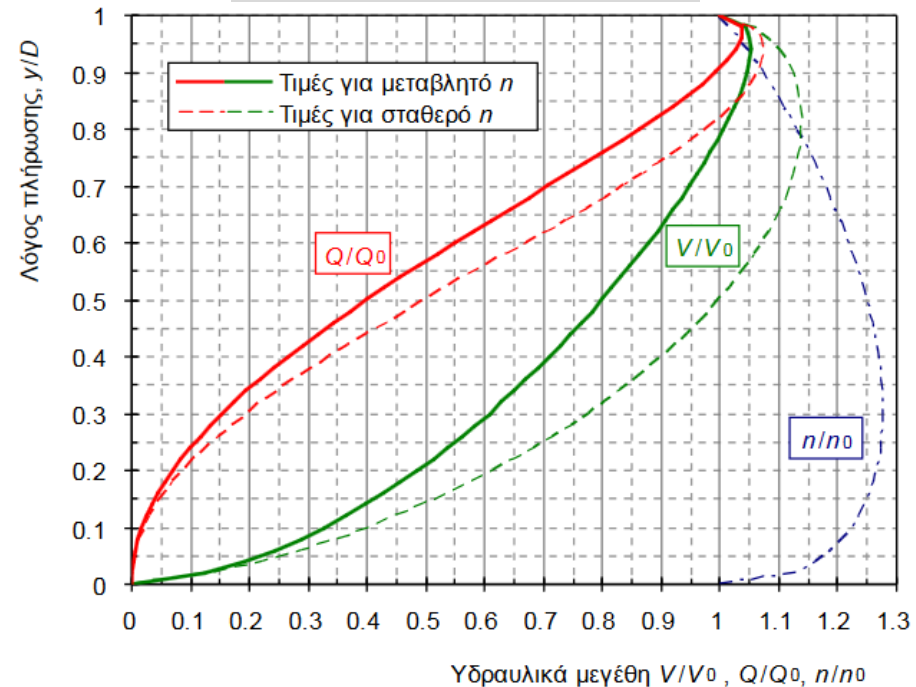
$$\vartheta = \left[\vartheta + \sin \vartheta + \left(2\pi \frac{Q}{Q_0} \frac{n}{n_0} \right)^{0.6} \vartheta^{0.4} \right] / 2$$

όπου ως αρχική τιμή θέτουμε $\vartheta_0 = \pi$ (που αντιστοιχεί σε ποσοστό πλήρωσης $y/D = 0.50$), και οι επαναλήψεις συνεχίζουν μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια.

4. Σε κάθε επαναληπτικό βήμα, ο λόγος n/n_0 υπολογίζεται από την σχέση:

$$n/n_0 = 1 + 2.31(\vartheta/2\pi)^{1.2}(1 - \vartheta/2\pi)^2$$

Πηγή: Κουτσογιάννης, 1999, σ. 66



5. Για γωνία πλήρωσης ϑ , το βάθος ροής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$y = D \frac{1 - \cos(\vartheta/2)}{2}$$

6. Ελέγχεται αν $y < y_c$ (στις σήραγγες εκτροπής επιθυμητή η υπερκρίσιμη ροή)

Ειδικά θέματα: Ελάχιστη κλίση για την εξασφάλιση συνθηκών υπερκρίσιμης ροής στη σήραγγα εκτροπής

Για $h = 1.2D$ (μέγιστο υδραυλικό φορτίο για ροή με ελεύθερη επιφάνεια) και $k = 0.10$ (συντελεστής τοπικών απωλειών για ομαλή συναρμογή εισόδου), το κρίσιμο βάθος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$y_c = \frac{2h}{3+k} = \frac{2.4 D}{3+k} = 0.78 D \quad (1)$$

Η παροχή που αντιστοιχεί στο παραπάνω υδραυλικό φορτίο είναι:

$$Q = b \sqrt{g y_c^3} \rightarrow Q = 2.13 b D^{3/2} \quad (2)$$

όπου b το ενεργό πλάτος της διατομής εισόδου.

Η ροή είναι υπερκρίσιμη εφόσον $y < y_c$, που αντιστοιχεί σε ποσοστό πλήρωσης $y/D < 0.78$, ή, ισοδύναμα, $Q/Q_0 < 0.82$. Σε συνδυασμό με τη (2) προκύπτει ότι η ελάχιστη απαιτούμενη παροχή πλήρωσης είναι:

$$Q_{0,\min} = 2.60 b D^{3/2} \quad (3)$$

Επιλύοντας τη σχέση του Manning ως προς την κλίση J , προκύπτει ότι η ελάχιστη απαιτούμενη κλίση της σήραγγας εκτροπής είναι:

$$J_{\min} = \frac{4^{10/3} n_0^2}{\pi^2 D^{16/3}} Q_{0,\min}^2 \quad (4)$$

όπου n_0 ο συντελεστής τραχύτητας της σήραγγας.

Ειδικά θέματα: Τοπικές απώλειες

- Για συνήθεις ταχύτητες, ο συντελεστής απωλειών για **απότομη συστολή ροής**, με μετάβαση από αγωγό διαμέτρου D_1 σε διάμετρο $D_2 < D_1$, εκτιμάται σε:

$$k \approx 0.42 [1 - (D_2/D_1)^2]$$

- Περίπτωση **υδροληψίας** (μετάβαση από ταμιευτήρα ή δεξαμενή άπειρης διατομής σε αγωγό διαμέτρου D):

- Αγωγός που εισέρχεται στη δεξαμενή: $k = 1$
- Αγωγός που εφάπτεται στη δεξαμενή: $k = 0.50$
- Συστολή με απλό κώνο συναρμογής: $k = 0.25$
- Βαθμιαία συστολή μέσω κώνου συναρμογής γωνίας ϑ : $k = 0.02-0.04$ (ισχύει για $\vartheta = 30-45^\circ$)
- Βαθμιαία συστολή μέσω κώνου συναρμογής ακτίνας r :

r/D	0.00	0.02	0.04	0.06	0.10	>0.15
k_T	0.50	0.28	0.24	0.15	0.09	0.04

- Για συνήθεις ταχύτητες, ο συντελεστής απωλειών για **απότομη διαστολή ροής**, με μετάβαση από αγωγό διαμέτρου D_1 σε διάμετρο $D_2 > D_1$, εκτιμάται σε:

$$k = [1 - (D_1/D_2)^2]^2$$

- Σε απότομη διαστολή ($D_1/D_2 \rightarrow 0$) λαμβάνεται $k = 1$ (εκροή σε δεξαμενή).

