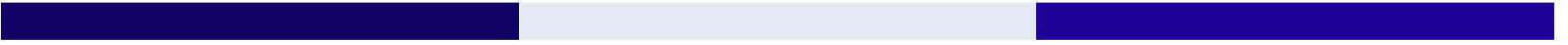


Ανανεώσιμη Ενέργεια & Υδροηλεκτρικά Έργα

8ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών



Μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα – Υδροηλεκτρικοί ταμιευτήρες

Ανδρέας Ευστρατιάδης, Νίκος Μαμάσης, & Δημήτρης Κουτσογιάννης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2017-18

Μεγάλα Υ/Η έργα: Οφέλη και επιπτώσεις

- Οφέλη ως έργα πολλαπλού σκοπού:
 - Αποθήκευση και παραγωγή Υ/Η ενέργειας
 - Απολήψεις νερού για άλλες χρήσεις (με αξιοποίηση νερού που διέρχεται από τους στροβίλους)
 - Αντιπλημμυρική προστασία
 - Έμμεσα οφέλη από τουριστική αξιοποίηση
 - Συνδυαστική λειτουργία με άλλες ΑΠΕ (υβριδικά)
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις
 - Σημαντική διαφοροποίηση της φυσικής υδρολογικής διαίτας του ποταμού (εξομάλυνση ροής, σημαντικά μειωμένη συχνότητα και μέγεθος πλημμυρικών αιχμών, διακοπή ροής στο τμήμα μεταξύ του φράγματος και του ΥΗΣ)
 - Συγκράτηση φερτών (μη αναστρέψιμη επίπτωση)
 - Παρεμπόδιση κυκλοφορίας ψαριών
 - Αλλαγή οικοσυστήματος από ποτάμιο σε λιμναίο
 - Αισθητική όχληση σε περίπτωση έντονων διακυμάνσεων της στάθμης



Κατηγοριοποίηση Υ/Η έργων (1)

- Με βάση την **εγκατεστημένη ισχύ**:
 - Μικρά έργα, για $P < 15$ MW (όριο που εφαρμόζεται τώρα και στην Ελλάδα – σε άλλες χώρες εφαρμόζονται επίσης όρια από 5 έως 15 MW)
 - Επιπλέον κατηγοριοποίηση, με βάση τα όρια των 100 kW (mini) και 1 MW (micro)
 - Μεγάλα έργα, για $P > 15$ MW
- Με βάση το **ύψος πτώσης**:
 - Έργα μικρού ύψους, για $H < 30$ m
 - Έργα μεσαίου ύψους, για $30 < H < 200-300$ m
 - Έργα μεγάλου ύψους, για $H > 200-300$ m
- Με βάση τη **θέση του Υ/Η σταθμού**:
 - Σταθμός στον πόδα του φράγματος ή σε κοντινή θέση
 - Σταθμός σε κατάντη θέση, μακριά από το φράγμα
 - Σταθμός σε γειτονική λεκάνη, για αξιοποίηση της υψομετρικής διαφοράς με τη λεκάνη του φράγματος (**έργο εκτροπής**)
- Με βάση τον **τύπο των στροβίλων**:
 - Στρόβιλοι δράσης (εκροή στην ατμόσφαιρα)
 - Στρόβιλοι αντίδρασης (ροή υπό πίεση)
 - Αντλιοστρόβιλοι (αντιστρεπτή λειτουργία, δηλ. άντληση-ταμίευση)

Κατηγοριοποίηση Υ/Η έργων (2)

- Με βάση τη **χωρητικότητα** του ταμιευτήρα:
 - Με ταμιευτήρα μεγάλης ωφέλιμης χωρητικότητας, που εξασφαλίζει υπερετήσια ή εποχιακή ρύθμιση των εισροών, επιτρέποντας σημαντική διακύμανση της στάθμης
 - Με ταμιευτήρα μικρής ρυθμιστικής ικανότητας (ο ταμιευτήρας δημιουργεί το αναγκαίο ύψος πτώσης, ενώ η στάθμη του διατηρείται πρακτικά σταθερή)
 - Χωρίς ταμιευτήρα (run-of-river), με αξιοποίηση μέρους της ροής του ποταμού (αναφέρονται κυρίως ως *μικρά υδροηλεκτρικά έργα*, ΜΥΗΕ)
- Με βάση τη **χρονική κατανομή** της παραγόμενης ενέργειας:
 - Έργα βάσης (συνεχής λειτουργία στροβίλων)
 - Έργα αιχμής (λειτουργία στροβίλων τις ώρες αιχμής της ενεργειακής ζήτησης)
 - Έργα αντιστρεπτής λειτουργίας (παραγωγή ενέργειας τις ώρες αιχμής της ζήτησης, άντληση τις ώρες περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας από άλλες πηγές, π.χ. ΑΠΕ)
- Με βάση τη **διάταξη** του ταμιευτήρα:
 - Μεμονωμένα έργο
 - Έργο ενταγμένο σε σύστημα ταμιευτήρων (υδροσύστημα)
- Με βάση τις **χρήσεις νερού** του ταμιευτήρα:
 - Έργα απλού σκοπού (αποκλειστική λειτουργία για παραγωγή Υ/Η ενέργειας)
 - Έργα πολλαπλού σκοπού (αξιοποίηση του νερού για άρδευση, ύδρευση, κτλ.)

Παράδειγμα: Σύστημα Υ/Η έργων Αχελώου



	Πλαστήρας	Κρεμαστά	Καστράκι	Στράτος	Μεσοχώρα
Έκταση λεκάνης απορροής (km ²)	161	3570	4118	4320	633
Μέση ετήσια απορροή (hm ³)	167	3600	3950	4110	730
Ύψος φράγματος (m)	83	160	96	26	135
Ωφέλιμη χωρητικότητα (hm ³)	286	2800	90	10	225
Ελάχιστη στάθμη λειτουργίας (m)	776.0	227.0	142.0	67.0	731.0
Μέγιστη στάθμη λειτουργίας (m)	792.0	282.0	144.2	68.6	770.0
Μέγιστο ύψος πτώσης (m)	577.0	136.0	76.0	37.0	220.0
Σταθμός παραγωγής	Εκτός λεκάνης	Κοντά στο φράγμα	Κοντά στο φράγμα	Υπόγειος	7.5 km κατάντη
Τύπος στροβίλων	Pelton	Francis	Francis	Francis	Francis
Εγκατεστημένα ισχύς (MW)	3×43=129	4×109=436	4×80=420	2×75=150 2×3=6	2×81=162
Λοιπές χρήσεις νερού	Άρδευση, ύδρευση, αναψυχή		Ύδρευση	Άρδευση, αναψυχή	

Υ/Η φράγματα: Βασικές έννοιες και συνοδά έργα

- ❑ **Φράγμα (dam):** Τεχνικό έργο μορφής αναχώματος που κατασκευάζεται εγκάρσια στην κοίτη ενός ποταμού, με σκοπό την διαμόρφωση **αποθηκευτικού χώρου** (ταμιευτήρας) για τη **ρύθμιση της ροής** και την δημιουργία τεχνητής **υψομετρικής διαφοράς**.
- ❑ **Ταμιευτήρας (reservoir):** Λεκάνη κατάκλυσης που δημιουργείται από τη συγκέντρωση νερού ανάντη του φράγματος, τα όρια της οποίας μεταβάλλονται ανάλογα με την αποθηκευμένη ποσότητα νερού.
- ❑ **Λεκάνη απορροής (river basin):** Περιοχή δεδομένης έκτασης που συνεισφέρει στην παραγωγή επιφανειακής απορροής, ο υδροκρίτης της οποίας διέρχεται από την θέση του φράγματος (ο ταμιευτήρας καλύπτει, συνήθως, μικρό τμήμα της λεκάνης).
- ❑ **Συνοδά υδραυλικά έργα:**
 - Πρόφραγμα (συχνά ενσωματωμένο στο κυρίων φράγμα)
 - Σήραγγα ή αγωγός εκτροπής (προσωρινό έργο ασφαλείας, κατά την κατασκευή, κατά περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μόνιμη χρήση)
 - Εκκενωτής πυθμένα (έργο ασφαλείας)
 - Υπερχειλιστής, σύστημα απαγωγής (συνήθως διώρυγα) και έργα καταστροφής ενέργειας (έργα ασφαλείας)
 - Θυροφράγματα, για έλεγχο των πλημμυρών
 - Υδροληψίες και αγωγοί προσαγωγής (έργα συνεχούς λειτουργίας)
 - Σταθμός παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας

Παραδείγματα Υ/Η φραγμάτων στην Ελλάδα



Λάδωνα (1955, αντιρρηδωτό)



Ταυρωπού (1959, τοξωτό)

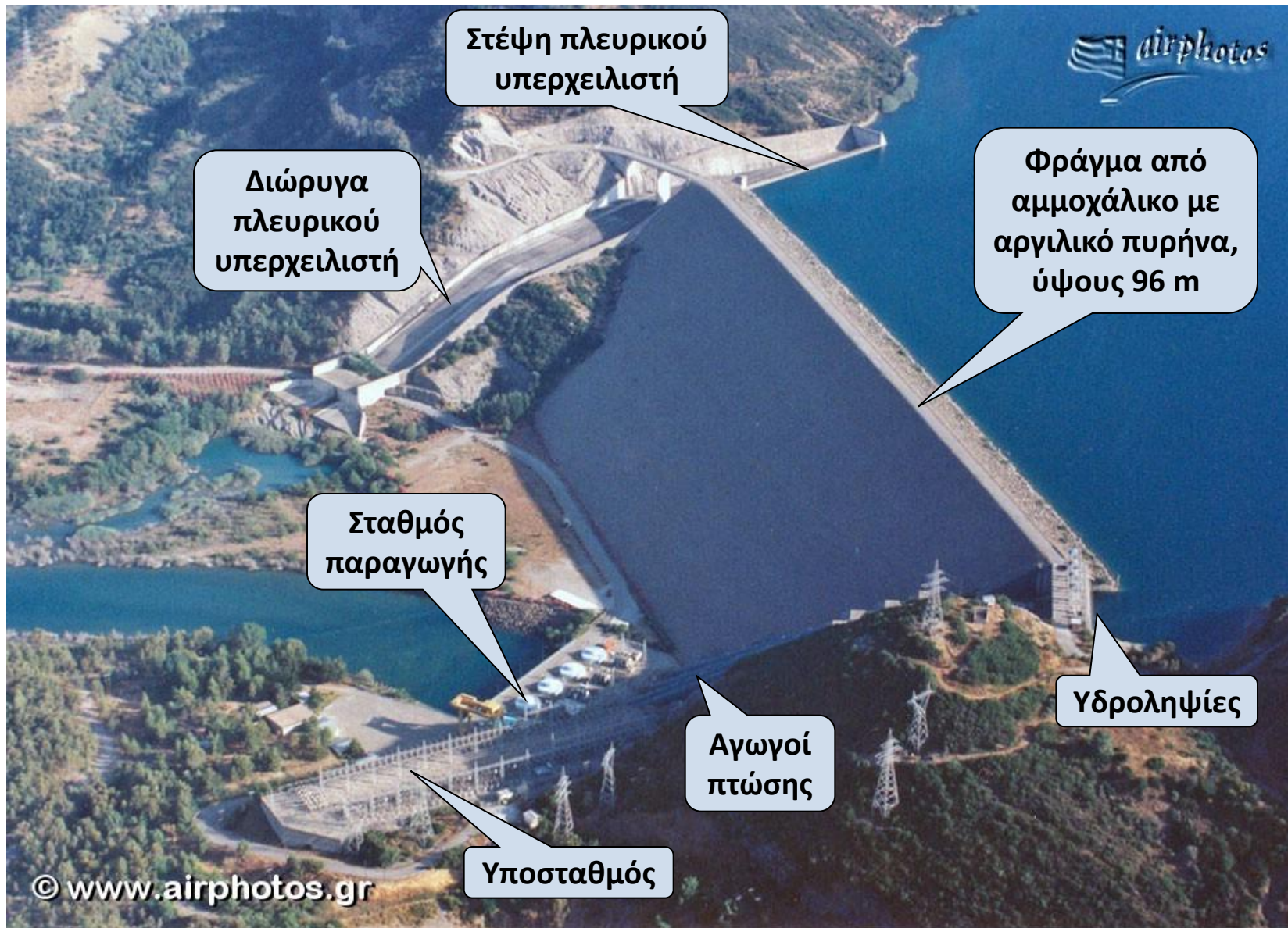


Κρεμαστών (1965, χωμάτινο)

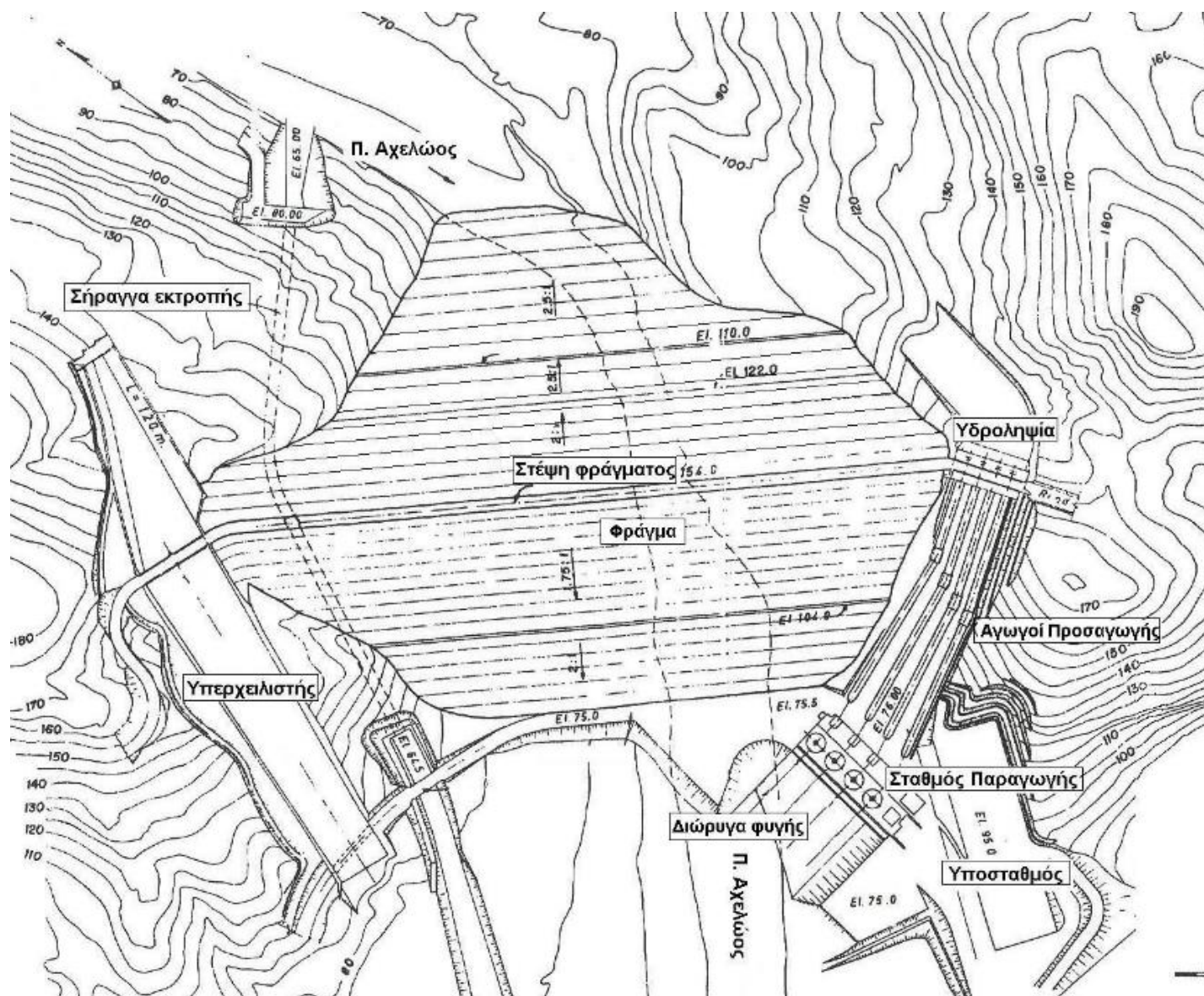


Μεσοχώρας (2009, λιθόρριπτο με ανάντη πλάκα σκυροδέματος)

Παράδειγμα: Υδροηλεκτρικό έργο Καστρακίου

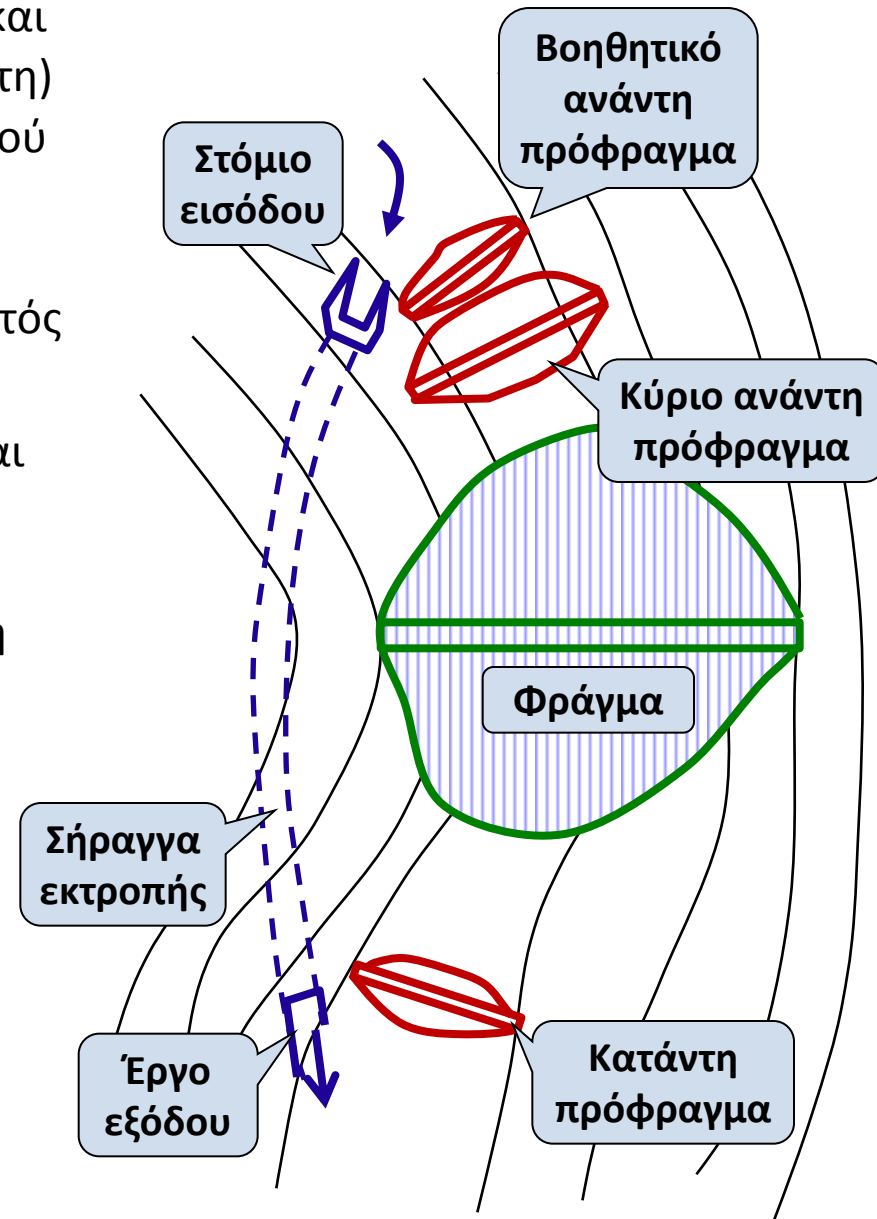


Γενική διάταξη έργων Καστρακίου



Έργα ασφάλειας κατά την κατασκευή φράγματος (1)

- ❑ Κατά τη φάση κατασκευής του φράγματος και των συναφών έργων (τυπική διάρκεια 2-8 έτη) εξασφαλίζεται διακοπή της ροής του ποταμού με την κατασκευή προσωρινών έργων παρεμπόδισης της ροής (προφράγματα, ανάντη και κατάντη) και διοχέτευσής της εκτός της ευρύτερης περιοχής των εργασιών.
- ❑ Σε ευρείες κοίτες ποταμών η εκτροπή γίνεται μέσω έργων διευθέτησης **εντός της κοίτης** (διώρυγα εκτροπής), ενώ η κατασκευή του φράγματος προχωρά παράλληλα στην κοίτη (συνήθως σε δύο φάσεις).
- ❑ Η εκτροπή **εκτός της κοίτης** γίνεται:
 - μέσω επιφανειακού αγωγού που διέρχεται από τη θεμελίωση του φράγματος (ποτέ από το σώμα)
 - μέσω υπόγειου αγωγού (σήραγγα) που διέρχεται από το αντέρεισμα (μεγάλες παροχές, υψηλό κόστος)



Έργα ασφάλειας κατά την κατασκευή φράγματος (2)

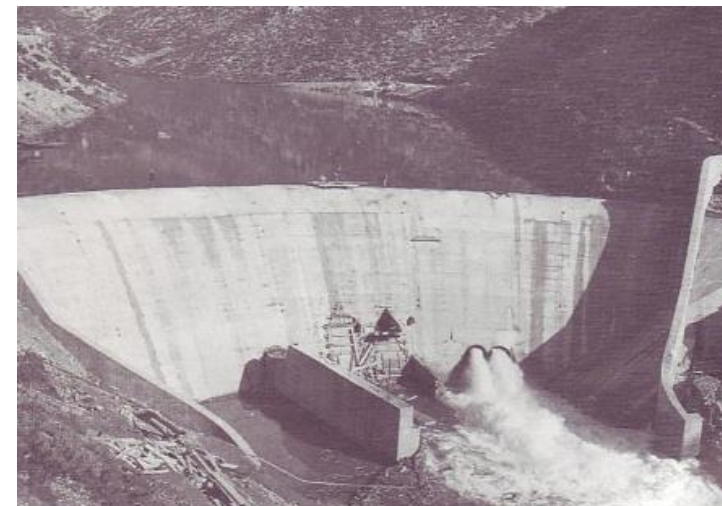
- ❑ Ο σχεδιασμός των προσωρινών έργων γίνεται για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς 20 ως 50 ετών, που εξασφαλίζει ικανοποιητικό επίπεδο διακινδύνευσης κατά τη διάρκεια κατασκευής των έργων (υδραυλική λειτουργία με ελεύθερη επιφάνεια και υπό πίεση).
- ❑ Το κυρίως **ανάντη πρόφραγμα** έχει μικρό σχετικά ύψος (μικρότερο όσο αυξάνει η διατομή του αγωγού εκτροπής), εκτός και αν ενσωματώνεται στο σώμα του κυρίως φράγματος (οπότε το ύψος του ενδέχεται να είναι σχετικά μεγάλο).
- ❑ Μετά την ολοκλήρωση των έργων η σήραγγα εκτροπής φράζεται (προσωρινή έμφραξη με δοκούς στο στόμιο εισόδου, μόνιμη έμφραξη με πώμα σκυροδέματος σε ενδιάμεση θέση, όπου τοποθετείται το πέτασμα τσιμεντενέσεων), ώστε να υλοποιηθεί η πλήρωση του ταμιευτήρα.
- ❑ Η σήραγγα εκτροπής (ή τμήμα της) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τμήμα του εκχειλιστή, ως εκκενωτής πυθμένα ή για τη διοχέτευση της περιβαλλοντικής παροχής (σε συνδυασμό με ΜΥΗΕ).



Είσοδος και έξοδος σήραγγας εκτροπής φράγματος Ιλαρίωνα

Εκκενωτής πυθμένα

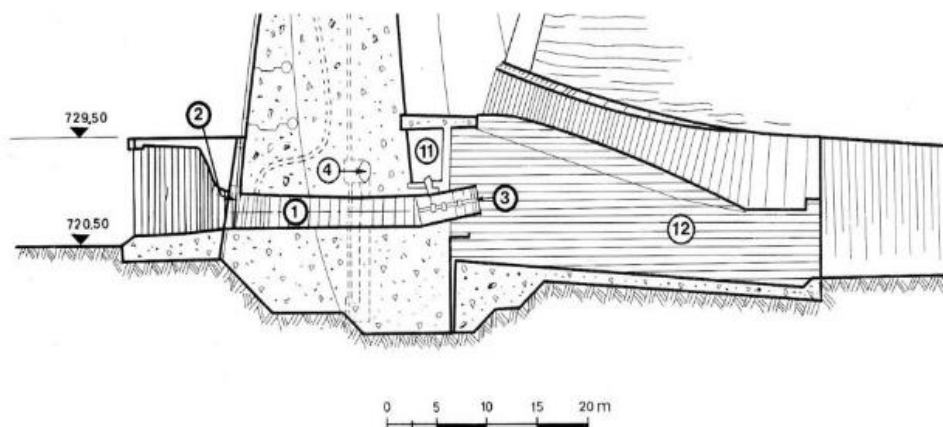
- Έργο ασφαλείας, για (βραδεία) εκκένωση του ταμιευτήρα σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.
- Συνήθως αποτελεί ανεξάρτητη διάταξη ή συνδυάζεται με τη σήραγγα εκτροπής, αλλά με διαμόρφωση διαφορετικού έργου εισόδου που τοποθετείται ψηλότερα από την είσοδο της σήραγγας (η τελευταία φράσσεται, μετά την ολοκλήρωση του φράγματος).
- Στις σύγχρονες κατασκευές χρησιμοποιείται μόνιμα, για διοχέτευση της **οικολογικής παροχής**.



Πρώτη δοκιμαστική λειτουργία εκκενωτή φράγματος Λούρου (1954)



Έξοδος εκκενωτή φράγματος Ταυρωπού

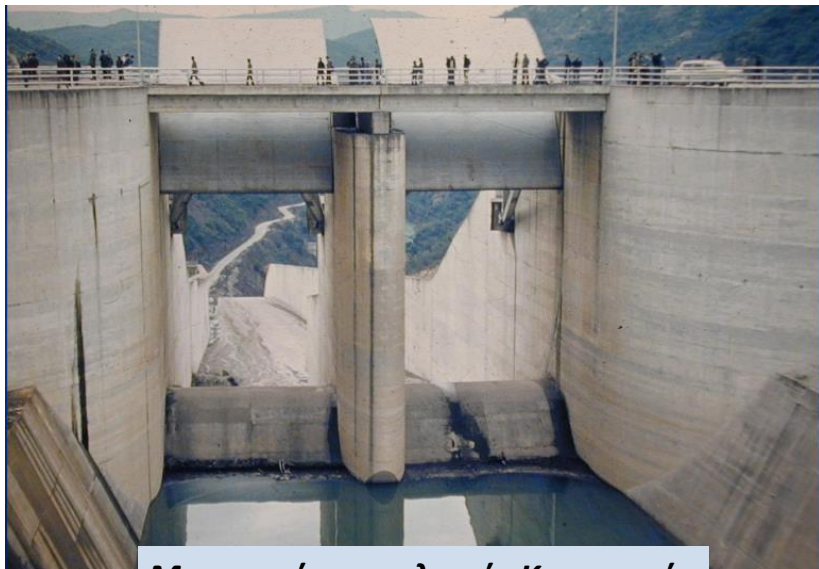


1. Εκκενωτής πυθμένα, 2. Ανάντη θυρόφραγμα, 3. Βαλβίδα κοίλης φλέβας, 4. Στοά πρόσβασης, 11. Δωμάτιο χειρισμού, 12. Διώρυγα από σκυρόδεμα.

Υπερχειλιστής-εκχειλιστής (spillway)

- ❑ Επειδή δεν είναι επιτρεπτή η υπερπήδηση του φράγματος, κατασκευάζεται πάντοτε ένα έργο **υπερχειλίσσης** χαμηλότερα από τη στέψη του φράγματος, που μπορεί να διοχετεύσει με ασφάλεια πλημμύρες εξαιρετικά μεγάλης περιόδου επαναφοράς.
- ❑ Διακρίνονται δύο τύποι υπερχειλιστών:
 - Ελεύθεροι υπερχειλιστές
 - Εκχειλιστές (ρύθμιση της ροής με **θυροφράγματα**, που σε περιόδους χαμηλών εισροών διατηρούνται κλειστά ώστε να αυξηθούν η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα και το διαθέσιμο ύψος πτώσης).
- ❑ Διάκριση υπερχειλιστών, ανάλογα με τη **θέση τοποθέτησης**:
 - Μετωπικοί, στο σώμα του φράγματος (δυνατότητα μεγάλου μήκους στέψης και ευνοϊκός προσανατολισμός, αλλά υψηλότερος κίνδυνος υποσκαφής και περιορισμοί στην τοποθέτηση του ΥΗΣ)
 - Πλευρικοί, στα αντερείσματα (προϋποθέσεις γεωλογικής καταλληλότητας)
 - Φρεατοειδείς (σε σήραγγα)
 - Χοανοειδείς
 - Σιφωνοειδείς (συνήθως σε ΜΥΗΕ)
- ❑ Στο πέρας του υπερχειλιστή συνήθως διαμορφώνεται **λεκάνη ηρεμίας-αποτόνωσης** για την καταστροφή της ενέργειας της πλημμύρας (διαφορετικά υπάρχει κίνδυνος έντονης διάβρωσης και υποσκαφής του φράγματος).

Παραδείγματα υπερχειλιστών



Μετωπικός εκχειλιστής Κρεμαστών



**Πλευρικός υπερχειλιστής
φράγματος Καστρακίου**



**Ανατρεπόμενα θυροφράγματα
σε ελεύθερο υπερχειλιστή**



**Δοκιμαστική λειτουργία
υπερχειλιστή Πλατανόβρυσης**

Υδροληψία (intake)

- Τεχνικό έργο εισόδου του νερού, σε ανοιχτό ή κλειστό αγωγό, που περιλαμβάνει:
 - εσχάρες (trash racks), κατάλληλου ανοίγματος και κλίσης, που εμποδίζουν την είσοδο επιπλεόντων αντικειμένων
 - δεξαμενή καθίζησης των φερτών (σε ΜΥΗΕ, με μείωση της ταχύτητας του νερού)
 - διάταξη προστασίας για απομάκρυνση των ψαριών
 - εξοπλισμό ρύθμισης της ροής
 - μηχανισμό καθαρισμού
 - θυροφράγματα ασφαλείας (π.χ. για τη συντήρηση της υδροληψίας)
- Διακρίνονται δύο τύποι, κατάλληλες για ΜΥΗΕ και ταμιευτήρες, αντίστοιχα:
 - **Επιφανειακές υδροληψίες**, στις οποίες η παροχή ρυθμίζεται από το υδραυλικό φορτίο (ύψος νερού πάνω από το στόμιο της υδροληψίας)
 - **Βυθισμένες υδροληψίες**, στις οποίες η παροχή ρυθμίζεται από τον χρήστη με κατάλληλο μηχανισμό (π.χ., δικλίδες, θυροφράγματα)
- Σε υδροληψίες υδροηλεκτρικών έργων, η παροχή ελέγχεται με τα **ρυθμιστικά πτερύγια** του υδροστροβίλου.
- Για την μείωση των τοπικών απωλειών ενέργειας, σχεδιάζεται ένα **μεταβατικό τμήμα** (συναρμογή) μεταξύ του ορθογωνικού ανοίγματος της υδροληψίας και του κυκλικού αγωγού πτώσης, με σταδιακή μείωση της διατομής.

Παραδείγματα υδροληψιών σε μεγάλα ΥΗΕ

Τομή υδροληψίας
ΥΗΕ Κρεμαστών



Εσχάρες

Δοκοί
έμφραξης

Θυρόφραγμα
ασφαλείας

Συναρμογή

Αγωγός
προσαγωγής

Κατασκευή υδροληψίας ΥΗΕ Στράτου



ΥΗΕ Καστρακίου – Διάταξη εσχάρων
και μηχανισμοί θυροφραγμάτων

Αγωγός προσαγωγής ή πτώσης (penstoke)

- ❑ Ένας ή περισσότεροι αγωγοί, που μεταφέρουν νερό υπό πίεση από την υδροληψία ή τη δεξαμενή ανάπαλσης μέχρι στους στροβίλους.
- ❑ Για μεγάλες Υ/Η μονάδες και μεγάλες παροχές, το πλήθος των αγωγών ισούται με το πλήθος των στροβίλων (δαπανηρή διάταξη), διαφορετικά διαμορφώνεται ένας αγωγός με διακλαδώσεις στο πέρας του (αυξημένες απώλειες ενέργειας).
- ❑ Διάταξη αγωγών προσαγωγής-πτώσης:
 - Μέσα στο σώμα του φράγματος, για φράγματα σκυροδέματος, στα οποία ο σταθμός παραγωγής βρίσκεται στον πόδα του φράγματος
 - Αγωγοί υπαίθριοι (απότομα πρηνή, απαιτείται στήριξη σε βάθρα και αγκύρωση), επιφανειακοί σε τάφρο (ήπια πρηνή), ή υπόγειοι σε σήραγγα, με ή χωρίς μεταλλική επένδυση, για χωμάτινα ή λιθόρριπτα φράγματα
- ❑ Υλικά: χάλυβας, σκυρόδεμα, ενισχυμένο πλαστικό, βράχος (σήραγγες).
- ❑ Τύποι φορτίσεων: υδροστατικές πιέσεις, υδραυλικό πλήγμα, θερμοκρασιακές μεταβολές (υπαίθριοι αγωγοί), φορτία επιχώματος, σεισμικά φορτία
- ❑ Γενικές αρχές σχεδιασμού:
 - Τυπική ταχύτητα 4-6 m/s (νερό με σημαντική συγκέντρωση φερτών)
 - Τυπική τιμή κλίσης ενέργειας 2-5% (εμπειρικό όριο για αρχική επιλογή διαμέτρου)
- ❑ Η διαστασιολόγηση είναι πρόβλημα **οικονομικής βελτιστοποίησης**.

Παραδείγματα αγωγών προσαγωγής-πτώσης

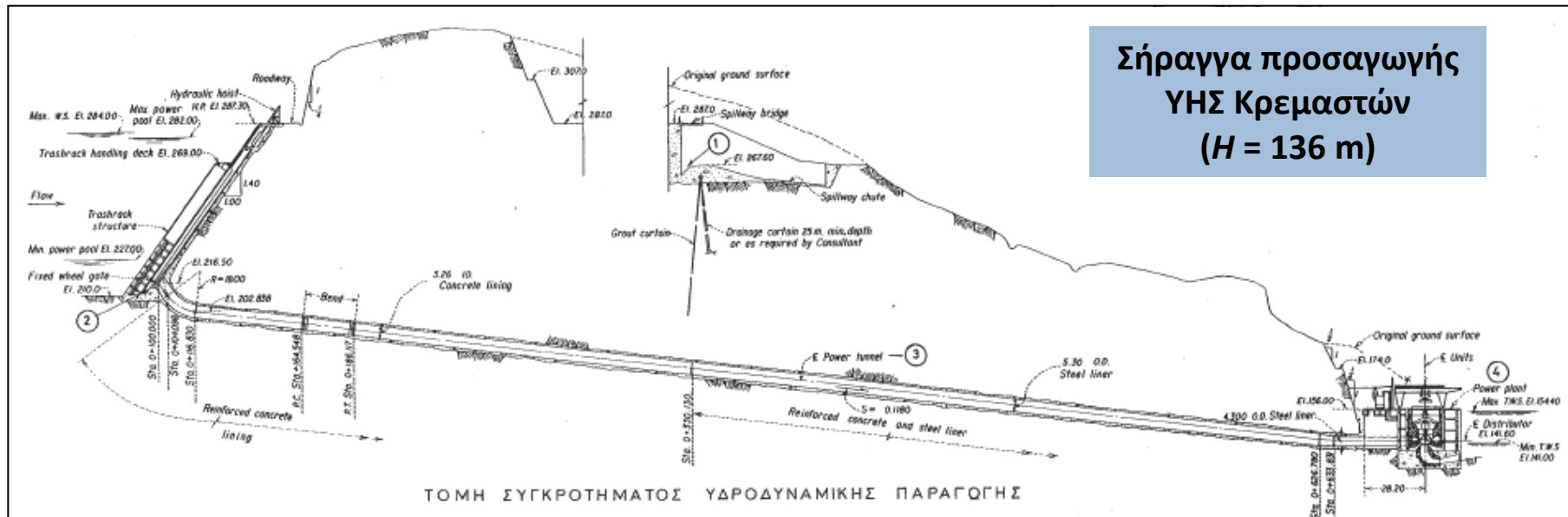
Αγωγός ΥΗΣ Πλαστήρα ($H = 577$ m)



Αγωγοί ΥΗΣ Καστρακίου ($H = 76$ m)



Σήραγγα προσαγωγής
ΥΗΣ Κρεμαστών
($H = 136$ m)



Δεξαμενή ή πύργος ανάπαλσης (surge tank)

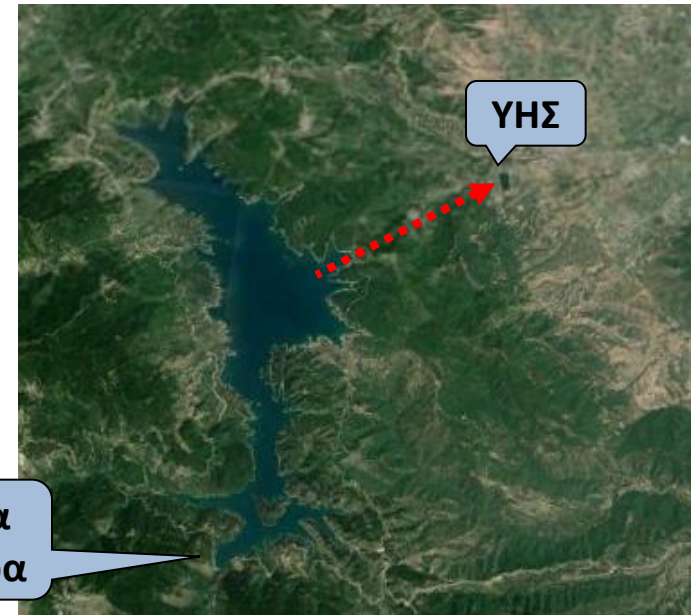
- Εφαρμόζεται σε **μεσαίου και μεγάλου ύψους** Η/Υ έργα, εφόσον ο ταμιευτήρας βρίσκεται σε **μεγάλη απόσταση** από τον σταθμό παραγωγής, και ειδικότερα όταν το μήκος του αγωγού προσαγωγής/πτώσης είναι πενταπλάσιο του ολικού ύψους πτώσης.
- Η δεξαμενή (ή πύργος) τοποθετείται στην είσοδο του αγωγού πτώσης με σκοπό την εκτόνωση των πιέσεων λόγω υδραυλικού πλήγματος.
- Η δεξαμενή ανάπαλσης διαθέτει νερό στον αγωγό πτώσης, όταν ο στρόβιλος ανοίγει τα ρυθμιστικά πτερύγια, και συνεπώς απαιτεί μεγαλύτερη παροχή, και αντίστροφα αποθηκεύει νερό όταν κλείνει ο στρόβιλος και μηδενίζεται η παροχή.
- Ακόμη, παραλαμβάνει τις ταλαντώσεις που οφείλονται σε φαινόμενα **υδραυλικού πλήγματος** στον αγωγό πτώσης, κατά το άνοιγμα ή κλείσιμο του στροβίλου (συνεπώς, απαιτεί ικανή χωρητικότητα, ώστε κατά την εμφάνιση του πλήγματος να μη γίνεται υπερχείλιση).

Αγωγός πτώσης και πύργος
ανάπαλσης ΥΗΣ Isawa (Ιαπωνία)



Σταθμοί παραγωγής

- Κριτήρια χωροθέτησης:
 - Ελαχιστοποίηση μήκους αγωγού πτώσης
 - Ελαχιστοποίηση κατάντη υψομέτρου
 - Λοιπά κριτήρια (τοπογραφία, κόστος, κτλ.)
- Τοποθέτηση σταθμού παραγωγής:
 - Στον πόδα του φράγματος, κεντρικά στην κοίτη
 - Στον πόδα του φράγματος, πλευρικά στην κοίτη (στο αντέρεισμα)
 - Σε αντέρεισμα – υπόγειος
 - Σε απόσταση από το φράγμα
- Τύποι σταθμών:
 - Υπαίθριος (εξωτερικά διακρίνεται το κάλυμμα των μονάδων παραγωγής και η γερανογέφυρα)
 - Ημι-υπαίθριος (εξωτερικά φαίνεται μόνο η γερανογέφυρα)
 - Ημι-υπαίθριος στεγασμένος (καλύπτεται η γερανογέφυρα)
 - Υπόγειος



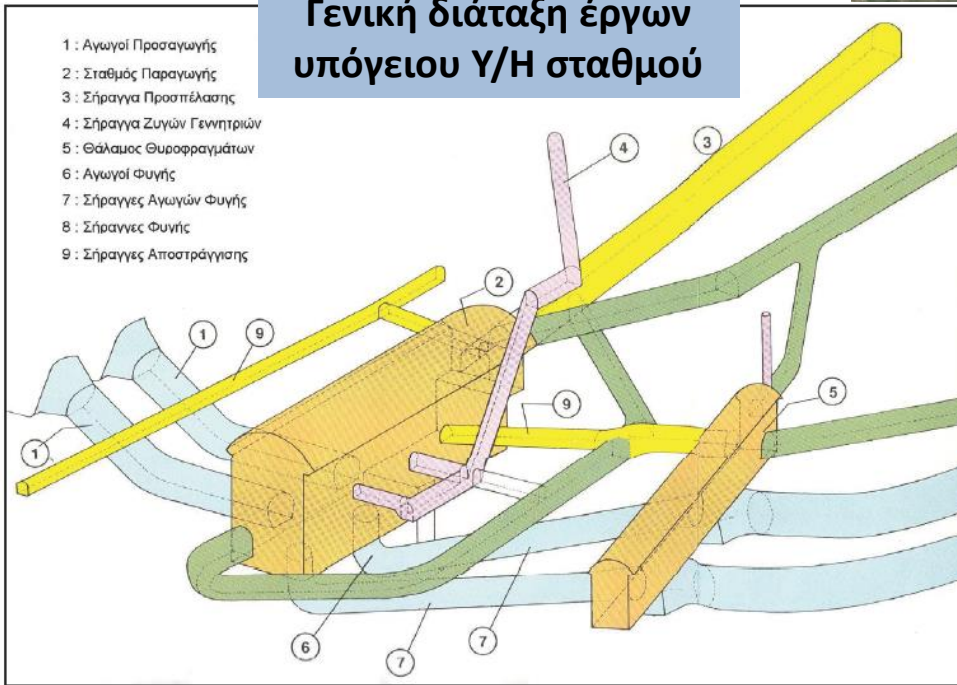
Αγωγός φυγής (draft tube) & διώρυγα φυγής (tailrace)

- ❑ Ο αγωγός φυγής θεωρείται ενιαίο τμήμα του στροβίλου αντίδρασης, είτε αυτός είναι αξονικής ροής είτε ακτινικής ροής (στον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του στροβίλου, ως διατομή εξόδου λαμβάνεται η έξοδος του αγωγού φυγής).
- ❑ Μπορεί να είναι κατακόρυφος σωλήνας (το οποίο εξασφαλίζει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, αλλά απαιτεί μεγάλο χώρο ανάπτυξης) ή, συνηθέστερα, σωλήνας σε καμπύλη μορφή, με συνεχώς αυξανόμενη διατομή μέχρι τη **διώρυγα (ή σήραγγα) φυγής (tailrace)**.
- ❑ Ο αγωγός φυγής εκτελεί δύο βασικές λειτουργίες:
 - επιτρέπει την αξιοποίηση ενός τουλάχιστον μέρους της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ του στροβίλου και της διώρυγας φυγής (που ωστόσο δεν πρέπει ποτέ να υπερβαίνει τα 4-5 m, για την αποφυγή κινδύνου σπηλαίωσης)
 - επιβραδύνει τη ροή, μετατρέποντας την υψηλή κινητική ενέργεια στην έξοδο του δρομέα (μέση ταχύτητα 6-10 m/s) σε ενέργεια πίεσης, με ελάχιστες απώλειες (η ταχύτητα εξόδου περιορίζεται σε 1.0-2.5 m/s)
- ❑ Στην έξοδο του αγωγού φυγής τοποθετείται θυρόφραγμα, για την συντήρησή του.
- ❑ Η διώρυγα φυγής σχεδιάζεται με ταχύτητα της τάξης των 1.0 m/s, ενώ σε περίπτωση σήραγγας ο σχεδιασμός συνήθως γίνεται θεωρώντας ροή με ελεύθερη επιφάνεια.
- ❑ Εφόσον πρέπει να σχεδιαστεί σήραγγα υπό πίεση, στην αρχή της κατασκευάζεται **δεξαμενή ανάπαλσης**, για την απόσβεση των από κατάντη δυναμικών φαινομένων.

Παράδειγμα: ΥΗΣ Στράτου και διώρυγα φυγής

Γενική διάταξη έργων υπόγειου Υ/Η σταθμού

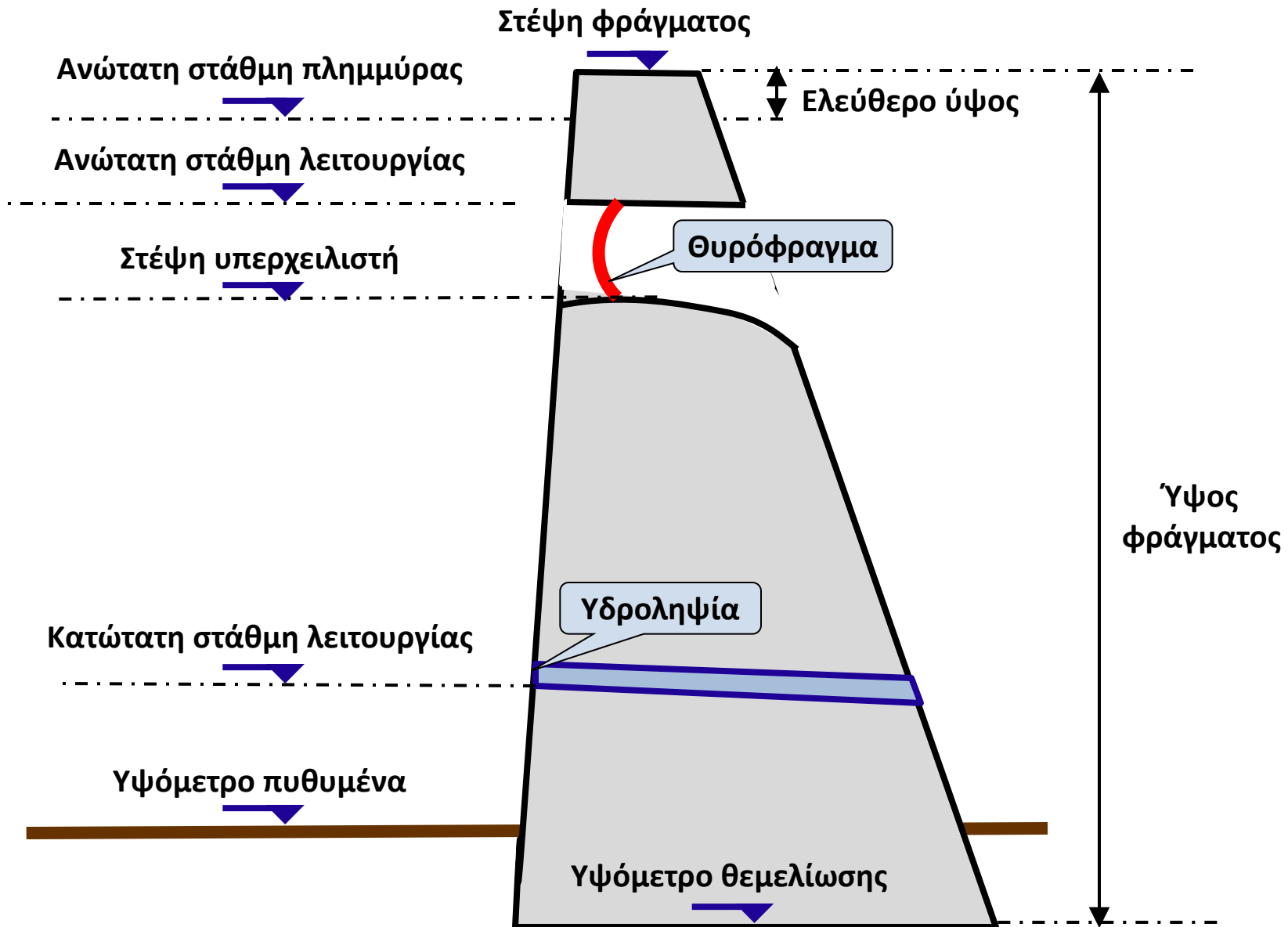
- 1 : Αγωγοί Παραγωγής
- 2 : Σταθμός Παραγωγής
- 3 : Σήραγγα Προσπέλασης
- 4 : Σήραγγα Ζυγών Γεννητριών
- 5 : Θάλαμος Θυροφραγμάτων
- 6 : Αγωγοί Φυγής
- 7 : Σήραγγες Αγωγών Φυγής
- 8 : Σήραγγες Φυγής
- 9 : Σήραγγες Αποστράγγισης



Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρα

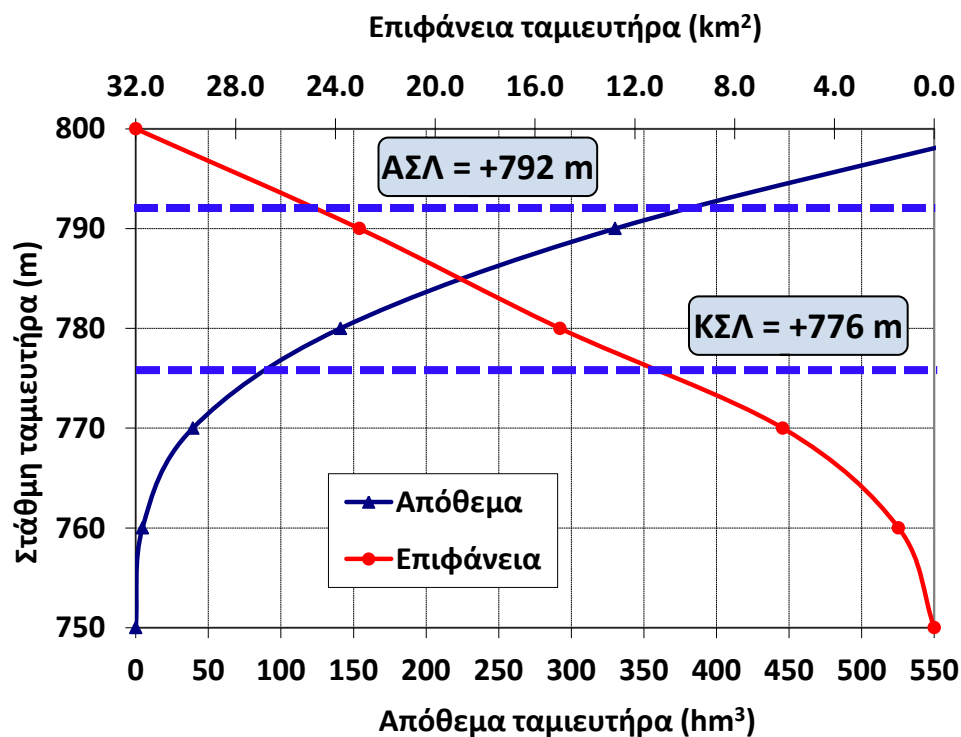
- ❑ **Νεκρός όγκος:** Όγκος ταμιευτήρα, που στο πέρας της ζωής του έργου προβλέπεται να καταληφθεί από φερτά (μη απολήψιμο απόθεμα)
- ❑ **Κατώτατη στάθμη λειτουργίας (ΚΣΛ) ή στάθμη υδροληψίας:** Ελάχιστη στάθμη για την παραλαβή νερού από την υδροληψία (γενικά τοποθετείται στη στάθμη του νεκρού όγκου, ωστόσο σε μεγάλα ΥΗΕ μπορεί να τοποθετηθεί ψηλότερα, ώστε να αυξηθεί το ύψος πτώσης)
- ❑ **Ανώτατη στάθμη λειτουργίας (ΑΣΛ):** Μέγιστη στάθμη απολήψεων
 - υψόμετρο στέψης υπερχειλιστή (ελεύθερος υπερχειλιστής, χωρίς θυροφράγματα)
 - υψόμετρο άνω παρειάς θυροφραγμάτων (Υ/Η ταμιευτήρας, με εκχειλιστή)
- ❑ **Ανώτατη στάθμη πλημμύρας (ΑΣΠ):** Μέγιστη στάθμη που εκτιμάται ότι μπορεί να ανέλθει το νερό στη διάρκεια της πλημμύρας σχεδιασμού του υπερχειλιστή
- ❑ **Ελεύθερο ύψος:** Υψομετρική διαφορά μεταξύ ΑΣΠ και στέψης φράγματος (περιθώριο ασφάλειας για κυματισμούς, κτλ.)
- ❑ **Ωφέλιμο απόθεμα:** Όγκος νερού που μπορεί να αξιοποιηθεί για διάφορες χρήσεις, που υπολογίζεται αφαιρώντας τον όγκο που αντιστοιχεί στην ΚΣΛ από το τρέχον απόθεμα
- ❑ **Ωφέλιμη χωρητικότητα:** Μέγιστος απολήψιμος όγκος νερού (μέγιστο ωφέλιμο απόθεμα), που ορίζεται ως η διαφορά αποθέματος μεταξύ της ΑΣΛ και της ΚΣΛ
- ❑ **Μικτή χωρητικότητα:** Συνολική χωρητικότητα ταμιευτήρα στην ΑΣΛ
- ❑ **Πλημμυρικός όγκος:** Μέγιστος όγκος πλημμύρας που μπορεί να ανασχεθεί στον ταμιευτήρα, που ορίζεται ως η διαφορά αποθέματος μεταξύ της ΑΣΠ και της ΑΣΛ

Χαρακτηριστικά υψομετρικά μεγέθη ταμιευτήρα

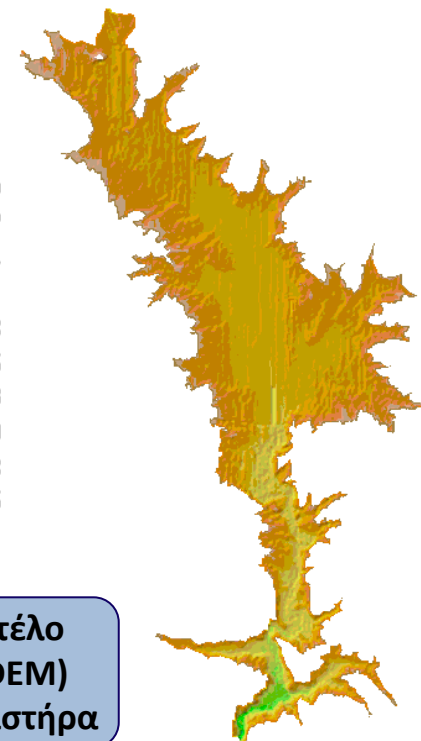


Σχέσεις στάθμης-αποθέματος-επιφάνειας

- Εκφράζουν τη μεταβολή του (μικτού) αποθέματος, s , και της επιφάνειας της λεκάνης κατάκλισης, a , συναρτήσει της στάθμης νερού στον ταμιευτήρα, z .
- Οι σχέσεις $s = f_1(z)$, και $a = f_2(z)$ κατασκευάζονται με βάση ζεύγη τιμών (z_i, a_i) , που προκύπτουν με εμβαδομέτρηση των επιφανειών πάνω σε τοπογραφικό χάρτη ή εκτιμώνται με ακρίβεια από ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων.



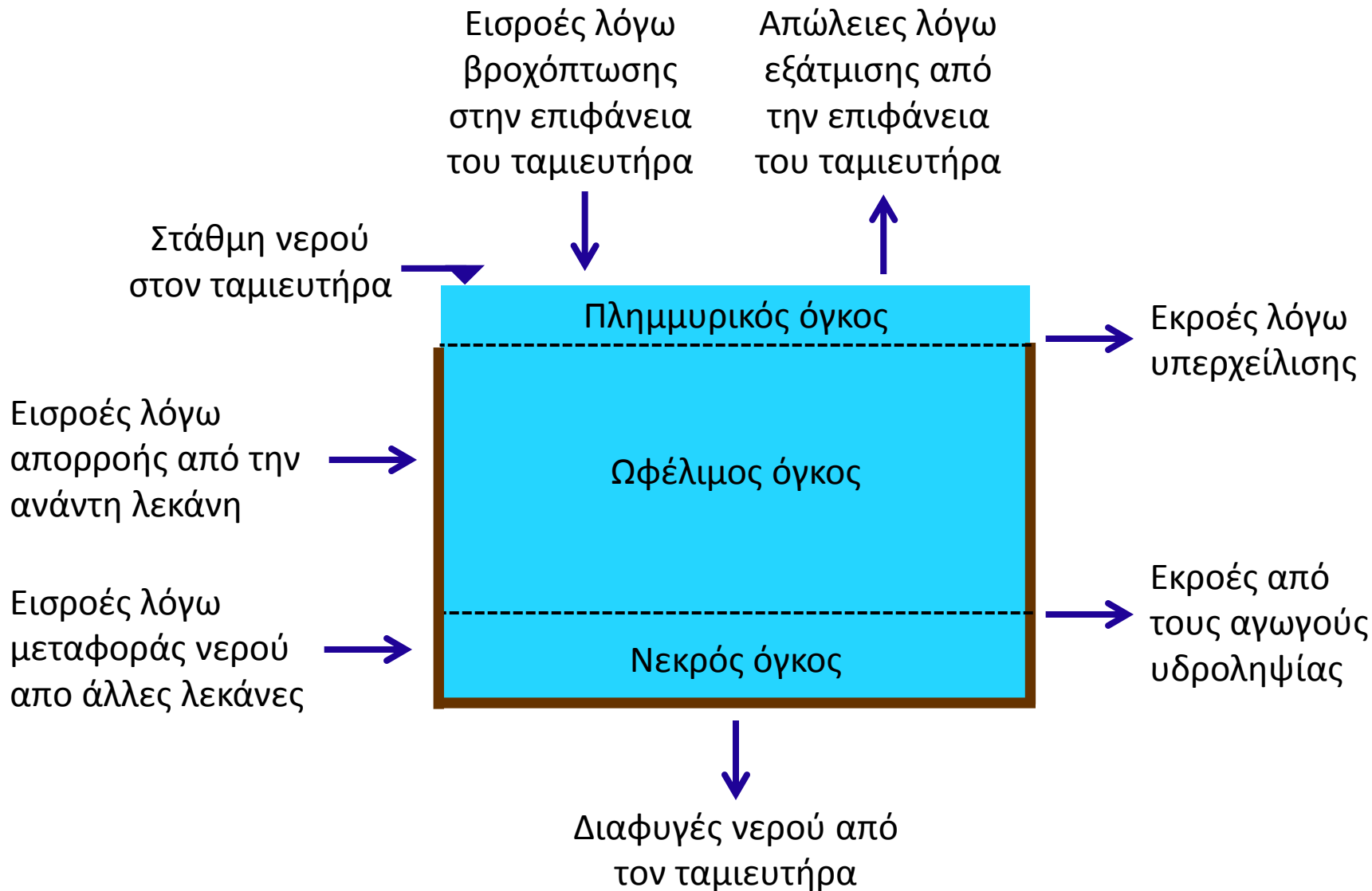
Υψόμετρα (m)	
722 - 729	729 - 737
737 - 744	744 - 751
751 - 758	758 - 766
766 - 773	773 - 780
780 - 788	788 - 796



Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων (DEM) ταμιευτήρα Πλαστήρα

- Συνήθως, διατυπώνονται αναλυτικά, μέσω σχέσεων δύναμης της μορφής:
$$s = \kappa (z - z_0)^\lambda \quad \text{ή} \quad s = \kappa (z/z_0)^\lambda$$
όπου κ , λ παράμετροι που εκτιμώνται μέσω παλινδρόμησης και z_0 ένα ελάχιστο υψόμετρο αναφοράς (π.χ. υψόμετρο πυθμένα).

Μεταβλητές υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρα



Εξίσωση υδατικού ισοζυγίου

- Γενική εξίσωση υδατικού ισοζυγίου, στο διακριτό χρονικό διάστημα $(t, t + \Delta t)$:

$$s_{t+\Delta t} = s_t + q_t + i_t + g_t + p_t - e_t - l_t - r_t - w_t$$

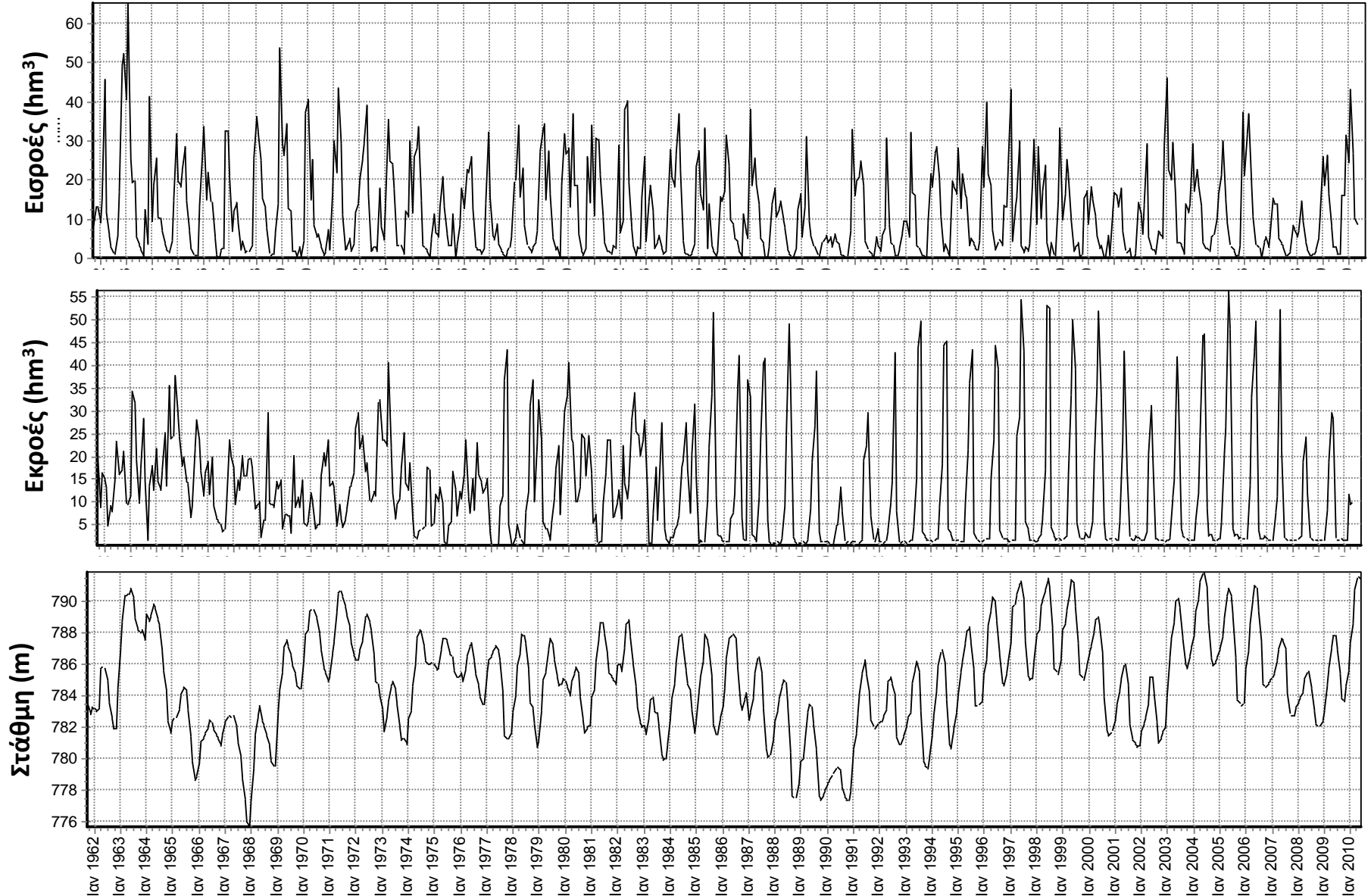
όπου:

- s_t αποθηκευμένος όγκος νερού στην αρχή του χρονικού διαστήματος
 - q_t εισροές από την ανάντη λεκάνη (φυσική απορροή που παράγεται στη λεκάνη ή/και ρυθμιζόμενες εκροές ανάντη ταμιευτήρα, εφόσον υπάρχει)
 - i_t μεταφορά (εκτροπή) νερού από άλλες λεκάνες
 - g_t υπόγεια τροφοδοσία από κοινά υδρογεωλογικά συστήματα
 - p_t όγκος βροχής που προσπίπτει στην επιφάνεια του ταμιευτήρα
 - e_t απώλειες λόγω εξάτμισης από την επιφάνεια του ταμιευτήρα
 - l_t απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών νερού
 - r_t ρυθμιζόμενες εκροές από τον ταμιευτήρα
 - w_t απώλειες λόγω υπερχειλίσης (εκροές νερού μέσω του υπερχειλιστή)
- Κατά κανόνα, η απορροή αποτελεί την ζητούμενη άγνωστη μεταβλητή του ισοζυγίου.
 - Μοναδικά μετρήσιμα μεγέθη είναι η **στάθμη** (με βάση την οποία εκτιμώνται το απόθεμα και οι απώλειες λόγω υπερχειλίσης) και οι ρυθμιζόμενες **εκροές**.
 - Η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου είναι πιο ακριβής όσο αυξάνουν η χρονική κλίμακα και το μέγεθος του ταμιευτήρα.

Κατάρτιση υδατικού ισοζυγίου ως προς τις εισροές

- Μεταβλητές εισόδου:
 - z_t στάθμη ταμιευτήρα στην αρχή του χρονικού βήματος (π.χ. 1^η μέρα του μήνα)
 - p_t^* ισοδύναμο ύψος βροχής που προσπίπτει στην επιφάνεια του ταμιευτήρα
 - e_t^* ισοδύναμο ύψος εξάτμισης από την επιφάνεια του ταμιευτήρα
 - r_t μετρημένες εκροές από τον ταμιευτήρα
 - w_t απώλειες λόγω υπερχειλίσης (υδατικό ισοζύγιο σε κλίμακα πλημμύρας)
- Χαρακτηριστικές σχέσεις:
 - Σχέση στάθμης-αποθέματος: $s = f_1(z)$
 - Σχέση στάθμης-επιφάνειας: $a = f_2(z)$
 - Σχέση στάθμης-διαφυγών: $l = f_3(z)$
- Υπολογισμοί:
 - Μεταβολή αποθέματος: $\Delta s_t = s_t - s_{t-1} = f_1(z_t) - f_1(z_{t-1})$
 - Μέση στάθμη: $z_{m,t} = (z_t + z_{t-1})/2$
 - Μέση επιφάνεια: $a_{m,t} = (a_t + a_{t-1})/2 = [f_2(z_t) + f_2(z_{t-1})]/2$
 - Εισροές ανάντη λεκάνης: $i_t = \Delta s_t - \underbrace{p_t^* a_{m,t}}_{\text{όγκος βροχής}} + \underbrace{e_t^* a_{m,t}}_{\text{όγκος εξάτμισης}} + \underbrace{f_3(z_{m,t})}_{\text{υπόγειες διαφυγές}} + r_t + w_t$

Παράδειγμα: Υδατικό ισοζύγιο ταμιευτήρα Πλαστήρα



Χαρακτηριστικά μεγέθη και δεδομένα εισόδου μοντέλου λειτουργίας υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα

- Χαρακτηριστικά υψομετρικά μεγέθη
 - ελάχιστη στάθμη λειτουργίας, z_{\min}
 - μέγιστη στάθμη λειτουργίας, z_{\max}
 - υψόμετρο που αντιστοιχεί σε μηδενική (ή σχεδόν μηδενική) αποθήκευση, z_0
 - υψόμετρο εξόδου αγωγού προσαγωγής, z_k
- Χαρακτηριστικές σχέσεις ($\kappa, \lambda, \alpha, \beta, \psi$: παράμετροι):

- Σχέση στάθμης-αποθέματος:

$$s = \kappa (z - z_0)^\lambda$$

- Σχέση στάθμης-παροχетеυτικότητας αγωγού προσαγωγής:

$$u = \alpha (z - z_k)^\beta$$

- Σχέση στάθμης-εκροής-παραγωγής ενέργειας ($\psi \leq 0.2725 \text{ GWh/hm}^4$):

$$e = \psi r (z - z_k)$$

- Χρονοσειρά υδρολογικών εισροών, i_t (για χρονικό ορίζοντα μήκους n)
- Χαρακτηριστικά διαχειριστικά μεγέθη:
 - στόχος ενεργειακής ζήτησης, e^* (σταθερός ή χρονικά μεταβαλλόμενος)
 - αρχικό απόθεμα, s_0

Μοντέλο λειτουργίας υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα

- Έστω ταμιευτήρας ωφέλιμης χωρητικότητας k , για τον οποίο τίθεται στόχος σταθερής ενεργειακής ζήτησης e^* (στόχος παραγωγής **πρωτεύουσας ενέργειας**).
- Σε κάθε χρονικό βήμα $t = 1, \dots, n$ ορίζεται ένας **μεταβλητός στόχος εκροής** νερού από τους στροβίλους, που εξαρτάται από την τρέχουσα στάθμη του ταμιευτήρα, z_t , δηλαδή:

$$d_t = e^* / [\psi (z_t - z_k)]$$

- Το **μοντέλο προσομοίωσης** της λειτουργίας του ταμιευτήρα γράφεται:

$$s_t = s_{t-1} + i_t - r_t - r'_t - w_t \quad (\text{εξίσωση υδατικού ισοζυγίου})$$

$$r_t = \min(s_t, d_t, u_t) \quad (\text{εκροές από στροβίλους, με βάση τον στόχο } e^*)$$

$$r'_t = \min(u_t - r_t, s_t - k) \quad (\text{επιπλέον εκροές από στροβίλους, αν } s_t > k)$$

$$w_t = \max(0, s_t - k) \quad (\text{απώλειες λόγω υπερχειλίσεων})$$

- Εφόσον ο ταμιευτήρας εξυπηρετεί και άλλες χρήσεις νερού (π.χ. ύδρευση, άρδευση, οικολογική παροχή), η εκροή από τους στροβίλους εξαρτάται και από τις τιμές-στόχους και την ιεραρχία των λοιπών χρήσεων.
- Αν υπάρχει πλεονάζον απόθεμα στον ταμιευτήρα, διοχετεύεται κατά προτεραιότητα από τους στροβίλους αντί για τον υπερχειλιστή, παράγοντας ενέργεια πέραν του στόχου e^* , η οποία καλείται **δευτερεύουσα ενέργεια** (στην πράξη, όποτε πραγματοποιείται υπερχείλιση, επιδιώκεται πάντοτε η λειτουργία των στροβίλων στην πλήρη παροχетеυτικότητα τους).
- Το ποσοστό των χρονικών βημάτων κατά τα οποία επιτυγχάνεται ο στόχος παραγωγής ενέργειας αποτελεί μέτρο της **αξιοπιστίας** της υδροηλεκτρικής παραγωγής.

Αποτίμηση ενεργειακής επίδοσης

- Η αποτίμηση γίνεται με βάση την προσομοιωμένη χρονοσειρά παραγωγής ενέργειας, e_t , με βάση την οποία εκτιμώνται:
 - η αξιοπιστία κάλυψης της ενεργειακής ζήτησης (εκτιμάται εμπειρικά ως ποσοστό των χρονικών βημάτων για τα οποία ισχύει $e_t \geq e^*$)
 - η παραγωγή ενέργειας πάνω από τον στόχο e^* (δευτερεύουσα ενέργεια)
 - η παραγωγή ενέργειας κάτω από τον στόχο e^* (έλλειμμα ενέργειας)
- Κατατάσσοντας τη χρονοσειρά σε φθίνουσα σειρά, και αντιστοιχώντας μια πιθανότητα υπέρβασης σε κάθε τιμή, προκύπτει η καμπύλη διάρκειας-παραγωγής ενέργειας.
- Αν n είναι το μέγεθος της προσομοιωμένης χρονοσειράς, η εμπειρική πιθανότητα υπέρβασης της ταξινομημένης τιμής που βρίσκεται στη θέση i εκτιμάται από τη σχέση:
$$p_i = i / (n + 1)$$
- Με βάση την καμπύλη διάρκειας μπορεί να εκτιμηθεί η ενέργεια που εξασφαλίζεται για υψηλό (της τάξης του 95 έως 99%) επίπεδο αξιοπιστίας (πρωτεύουσα ενέργεια).

