

Ανανεώσιμη Ενέργεια & Υδροηλεκτρικά Έργα

8ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών



Αρχές υδροενεργειακής τεχνολογίας

Ανδρέας Ευστρατιάδης, Νίκος Μαμάσης, & Δημήτρης Κουτσογιάννης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2017-18

Θεμελιώδεις έννοιες υδροδυναμικής

- **Θεωρητική ισχύς** που αποδίδεται από ένα Υ/Η έργο, για πλήρη εκμετάλλευση της διαθέσιμης δυναμικής ενέργειας νερού, χωρίς απώλειες ενέργειας κατά τη μεταφορά του νερού και τη μετατροπή της δυναμικής ενέργειας σε ηλεκτρική:

$$P_0 = \gamma Q H$$

όπου γ το ειδικό βάρος του νερού (9.81 kN/m^3), Q η παροχή που διέρχεται από τους στροβίλους, και H η υψομετρική διαφορά μεταξύ της στάθμης του νερού ανάντη, z_A , και ενός χαρακτηριστικού ενεργειακού υψομέτρου κατόντη.

- **Πραγματική ισχύς**, για χρονικά μεταβαλλόμενη στάθμη, z_A , και παροχή, Q :

$$P(t) = \eta(t) \gamma Q(t) H_n(t)$$

όπου η ο βαθμός απόδοσης της μονάδας παραγωγής και H_n το καθαρό ύψος πτώσης, που είναι συναρτήσεις των μεταβλητών z_A και Q .

- Η διαφορά $H - H_n$ εκφράζει τις **υδραυλικές απώλειες** κατά τη μεταφορά του νερού, ενώ η ποσότητα $(1 - \eta) \gamma Q H_n$ εκφράζει τις απώλειες κατά τη **μετατροπή της ενέργειας** που αποδίδεται στον υδροστρόβιλο (κινητική ενέργεια, πίεση) σε ηλεκτρική ενέργεια.

- Παραγόμενη **ενέργεια**:

$$E(t) = \int P(t) dt = \gamma \int \eta[z_A(t), Q(t)] Q(t) H_n[z_A(t), Q(t)] dt$$

- Παραγόμενη ενέργεια, υποθέτοντας σταθερά η και H_n :

$$E = \eta \gamma H_n \int Q(t) dt = \eta \gamma V H_n$$

Βασικά ενεργειακά μεγέθη: Ύψος πτώσης

- Ως **ύψος πτώσης** νοείται η ανά μονάδα μάζας ενέργεια που διατίθεται στον στρόβιλο:

$$H_n = h_A - h_K - h_L$$

όπου h_A το ενεργειακό υψόμετρο ανάντη, h_K το ενεργειακό υψόμετρο κατάντη και h_L οι συνολικές ενεργειακές απώλειες στο σύστημα προσαγωγής και, εφόσον υπάρχει, στον αγωγό φυγής (για στροβίλους αντίδρασης).

- Το ανάντη ενεργειακό υψόμετρο ταυτίζεται με τη μεταβλητή στάθμη νερού, z_A , στον ταμιευτήρα ή τη στάθμη νερού στη δεξαμενή φόρτισης, που είναι πρακτικά σταθερή.
- Το κατάντη ενεργειακό υψόμετρο εξαρτάται από τον τύπο των στροβίλων:
 - Σε **στροβίλους δράσης**, στους οποίους πραγματοποιείται εκροή νερού στην ατμόσφαιρα μέσω ακροφυσίου, ως διατομή εξόδου λαμβάνεται το κατάντη πέρας του ακροφυσίου, οπότε το ενεργειακό υψόμετρο είναι σταθερό.
 - Σε **στροβίλους αντίδρασης**, το ενεργειακό υψόμετρο εξαρτάται από τη στάθμη του νερού στην έξοδο του συστήματος (π.χ. διώρυγα φυγής), που είναι μεταβλητή (εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από την παροχή που διέρχεται από τους στροβίλους).
- Η ποσότητα $H_{\text{tot}} = h_A - h_K$ είναι θεωρητικό μέγεθος, που καλείται **ολικό ύψος πτώσης**.
- Οι ενεργειακές απώλειες κατά τη μεταφορά του νερού (υδραυλικές απώλειες) διακρίνονται σε **γραμμικές** (απώλειες τριβών) και **τοπικές**, δηλαδή:

$$h_L = h_f + h_T$$

Άλλοι ορισμοί του ύψους πτώσης

- Ως **ακαθάριστο ύψος πτώσης**, H_g (gross head, σε αντιδιαστολή με το καθαρό ύψος πτώσης, net head) νοείται η διαφορά μεταξύ της μέγιστης στάθμης ανάντη (ανώτατη στάθμη λειτουργίας, ΑΣΛ) και της ελάχιστης στάθμης κατόντη, δηλαδή:

$$H_g = \text{ΑΣΛ} - h_{\text{K,min}}$$

- Ως **μέγιστο ύψος πτώσης**, H_{max} , νοείται το ακαθάριστο ύψος, θεωρώντας λειτουργία μίας μονάδας χωρίς φορτίο, δηλαδή με πολύ μικρή παροχή (π.χ., 5% της ονομαστικής παροχής), για την οποία αγνοούνται οι ενεργειακές απώλειες, δηλαδή:

$$H_{\text{max}} = \text{ΑΣΛ} - h_{\text{K,min}} - h_L(Q_{\text{min}}) \approx H_g$$

- Ως **ελάχιστο ύψος πτώσης**, H_{min} , νοείται η υψομετρική διαφορά μεταξύ της κατώτατης στάθμης λειτουργίας (ΚΣΛ) και της μέγιστης στάθμης κατόντη, για λειτουργία όλων των στροβίλων της εγκατάστασης με το μέγιστο άνοιγμα ρυθμιστικών πτερυγίων (οπότε μεγιστοποιείται η παροχή και συνακόλουθα οι ενεργειακές απώλειες), δηλαδή:

$$H_{\text{min}} = \text{ΚΣΛ} - h_{\text{K,max}} - h_L(Q_{\text{max}})$$

- Ως **σταθμισμένο ύψος πτώσης**, H_w , νοείται το καθαρό ύψος για το οποίο ο ταμιευτήρας παράγει την ίδια ποσότητα ενέργειας σε μέση ετήσια βάση, θεωρώντας όλο το εφικτό εύρος διακύμανσης της στάθμης του, μεταξύ της ΕΣΛ και της ΑΣΛ.
- Ως **ύψος πτώσης σχεδιασμού**, H_d , νοείται το καθαρό ύψος πτώσης που εξασφαλίζει τον μέγιστο βαθμό απόδοσης (σχεδόν ταυτίζεται με το H_w , και επιλέγεται ώστε το ύψος πτώσης να μην είναι εκτός των επιτρεπόμενων ορίων λειτουργίας των στροβίλων).

Εκτίμηση γραμμικών απωλειών

- Χαρακτηριστικά μεγέθη αγωγού: μήκος L , (εσωτερική) διάμετρος D , ισοδύναμη τραχύτητα ε , παροχή Q , ταχύτητα $V = 4Q / \pi D^2$, κλίση ενέργειας $J = h_f / L$

- Εξίσωση Darcy-Weisbach:

$$J = f \frac{1}{D} \frac{V^2}{2g} = 0.0826 f \frac{Q^2}{D^5}$$

- Για συνήθεις ταχύτητες ροής (= υδραυλικά τραχείς αγωγοί), ο συντελεστής απωλειών f εκτιμάται από τη σχέση Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[\frac{k_s}{3.7 D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right]$$

όπου Re ο αριθμός Reynolds της ροής (= $V D / \nu$) και ν η κινηματική συνεκτικότητα του νερού, ίση με $1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, για θερμοκρασία 15°C .

- Γενικευμένη εξίσωση Manning:

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

- Για μεγάλες διαμέτρους και ταχύτητες ($0.1 \leq D \leq 10 \text{ m}$, $0.3 \leq V \leq 10 \text{ m/s}$) ισχύει:

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

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

Τοπικές απώλειες

- Οφείλονται σε γεωμετρικές μεταβολές που προκαλούν διατάραξη των χαρακτηριστικών της ομοιόμορφης ροής, όπως επιτάχυνση ή επιβράδυνση της ροής, αποκόλληση από τα στερεά όρια, δευτερεύουσες ροές, ανάπτυξη οριακών στρωμάτων, κτλ.
- Γενική σχέση υπολογισμού:

$$h_T = k_T V^2 / 2g$$

όπου k_T αδιάστατος συντελεστής.

- Τυπικές τιμές συντελεστή τοπικών απωλειών σε Υ/Η έργα:
 - Είσοδος υδροληψίας: $k_T = 0.04$ (στρογγυλευμένη συναρμογή)
 - Εσχάρες: $k_T = 0.10-0.15$
 - Εγκοπές: $k_T = 0.01$
 - Στενώσεις: $k_T = 0.08$
 - Καμπύλες: $k_T = 0.10$
 - Δικλίδες, πλήρως ανοιχτές: $k_T = 0.10-0.20$
 - Έξοδος στη διώρυγα φυγής: $k_T = 1$

Παρατήρηση: Σε συνήθη υδραυλικά έργα, και για μεγάλα μήκη αγωγών ($L/D > 1000$), οι τοπικές απώλειες δεν υπολογίζονται αναλυτικά (εσωματώνονται στις γραμμικές, με προσαύξηση της ισοδύναμης τραχύτητας), πλην αυτών που οφείλονται στη λειτουργία δικλίδων. Αντίθετα, στα μεγάλα ΥΗΕ, συνήθως υπολογίζονται αναλυτικά (λόγω των μεγάλων ταχυτήτων).

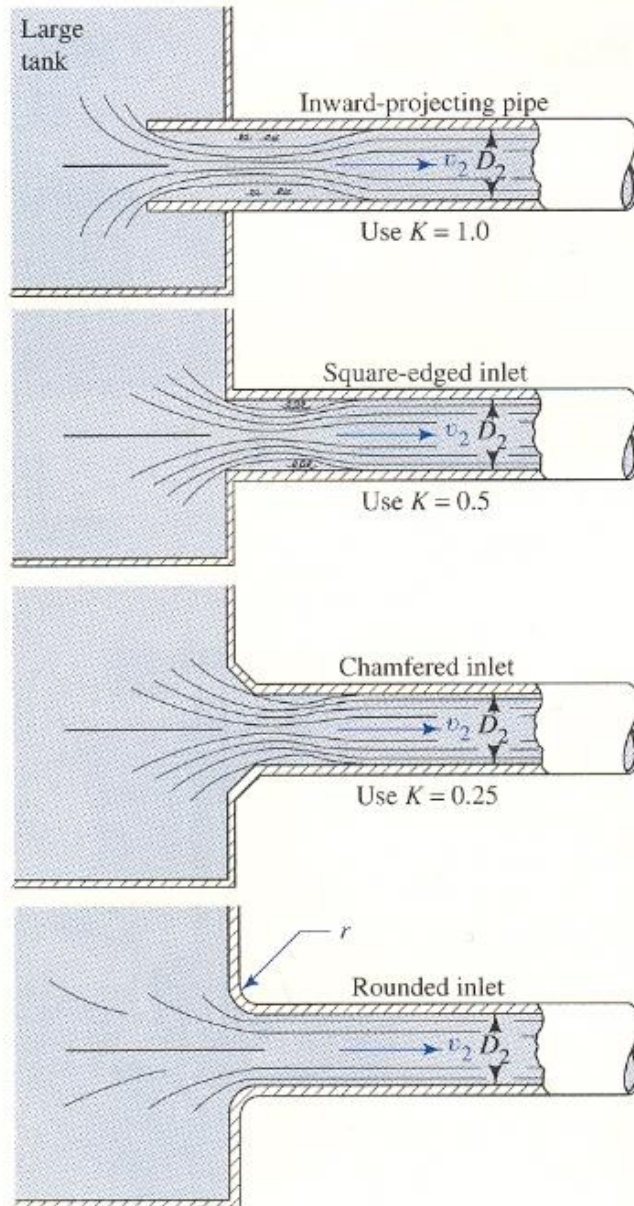
Ειδικές διατάξεις: Συστολές αγωγών και υδροληψίες

- 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:

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

- Για βαθμιαία συστολή, με χρήση κώνου συναρμογής γωνίας ϑ , λαμβάνεται $k_T = 0.02-0.04$, για $\vartheta = 30-45^\circ$ (ο συντελεστής k_T είναι ανεξάρτητος του λόγου D_2/D_1)
- Η **υδροληψία** αποτελεί ειδική περίπτωση συστολής, λόγω της μετάβασης από αγωγό άπειρης διατομής (ταμιευτήρας ή δεξαμενή φόρτισης) στον **αγωγό πτώσης**, διατομής D :
 - Αγωγός που εισέρχεται στη δεξαμενή: $k_T = 1$
 - Αγωγός που εφάπτεται στη δεξαμενή: $k_T = 0.50$
 - Συστολή με απλό κώνο συναρμογής: $k_T = 0.25$
 - Βαθμιαία συστολή, με χρήση στρογγυλεμένου 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 |

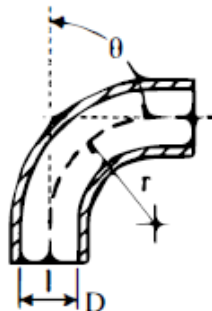


Ειδικές διατάξεις: Διαστολές αγωγών και στροφές

- 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:

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

- Ειδική μορφή διαστολής αποτελεί η έξοδος αγωγού σε δεξαμενή (απότομη διαστολή, με $D_1/D_2 = 0$), για την οποία λαμβάνεται $k_T = 1$ (περίπτωση **αγωγού φυγής**).
- Σε **αλλαγές διεύθυνσης** (στροφή αγωγού), η τιμή του συντελεστή τοπικών απωλειών εξαρτάται από την γωνία θ , τον λόγο r/D (όπου r η καμπυλότητα και D η διάμετρος του αγωγού), και την τραχύτητα των τοιχωμάτων (βλ. πίνακα).

| r/D θ (deg) | 1 | 1,5 | 2 | 4 | 6 | | |
|-------------------------|------|------|------|------|-------|----------------------|--|
| 15 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | λεία επιφάνεια |  |
| 30 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | | |
| 45 | 0,14 | 0,11 | 0,09 | 0,08 | 0,075 | | |
| 60 | 0,19 | 0,16 | 0,12 | 0,10 | 0,09 | | |
| 90 | 0,21 | 0,18 | 0,14 | 0,11 | 0,09 | | |
| 15 | 0,10 | 0,08 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | τραχεία επιφάνεια | |
| 30 | 0,23 | 0,19 | 0,14 | 0,11 | 0,08 | | |
| 45 | 0,34 | 0,27 | 0,20 | 0,15 | 0,12 | | |
| 60 | 0,41 | 0,33 | 0,24 | 0,19 | 0,15 | | |
| 90 | 0,51 | 0,41 | 0,30 | 0,23 | 0,18 | | |

Ειδικές διατάξεις: Εσχάρες

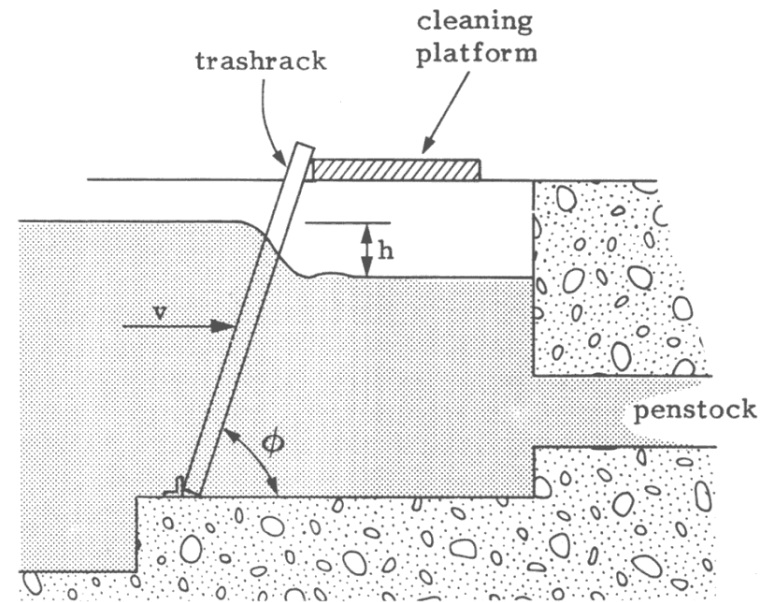
- Η παρεμβολή της εσχάρας στην είσοδο της υδροληψίας δημιουργεί απώλειες ενέργειας και αντίστοιχη πτώση στάθμης:

$$h_T = \beta \left(\frac{s}{b} \right)^{4/3} \frac{V^2}{2g} \sin\varphi$$

όπου s το πάχος ή η διάμετρος των ράβδων της εσχάρας, b το καθαρό διάκενο μεταξύ δύο διαδοχικών ράβδων, φ η οριζόντια κλίση της εσχάρας, και β συντελεστής μορφής των ράβδων της εσχάρας (βλ. πίνακα).

- Η καθαρή διατομή A_t της εσχάρας (ολική διατομή μείον τη διατομή των ράβδων) υπολογίζεται ώστε η μέση ταχύτητα ροής V να κυμαίνεται μεταξύ 0.75 ως 1.5 m/s.
- Για παροχή Q και καλά καθαριζόμενες εσχάρες, εφαρμόζεται η σχέση:

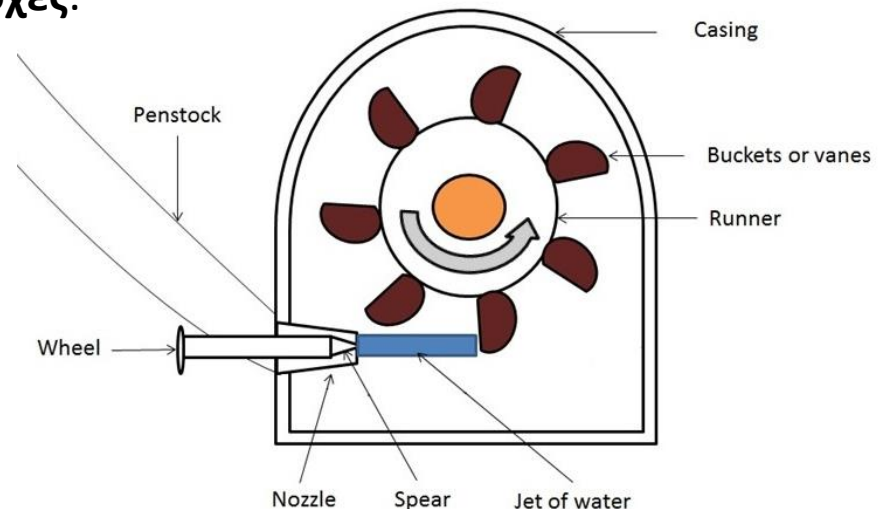
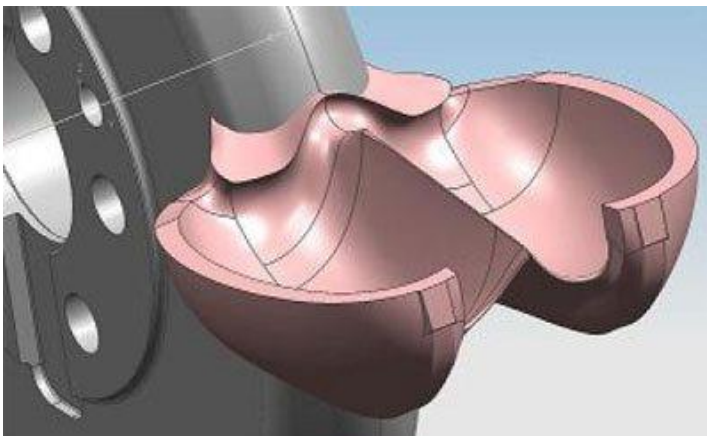
$$\frac{Q}{V} = 0.8 A_t \frac{s}{s + b} \sin\varphi$$



| | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|
| | | | | | |
| 2,42 | 1,83 | 1,67 | 0,92 | 0,76 | 1,79 |

Στρόβιλοι δράσης (impulse turbines)

- ❑ Η στροβιλομηχανή περιλαμβάνει έναν **δρομέα** (runner) με **σκαφίδια** (buckets), που τίθενται σε κίνηση μέσω του νερού, το οποίο εκτοξεύεται από **ακροφύσια** (nozzles) με **πολύ μεγάλη ταχύτητα** (η ταχύτητα εκτόξευσης μπορεί να φτάσει στα 100 ως 150 m/s, ενώ η ταχύτητα στον αγωγό προσαγωγής δεν υπερβαίνει τα 4 ως 6 m/s).
- ❑ Η δυναμική ενέργεια (ύψος πτώσης) του νερού μετατρέπεται σε **κινητική ενέργεια** στην έξοδο του ακροφυσίου, η οποία μετατρέπεται σε περιφερειακή ταχύτητα του τροχού στα σκαφίδια (ταχύτητα περιστροφής = $0.5 \cdot \text{ταχύτητα νερού}$).
- ❑ Ο στρόβιλος εγκιβωτίζεται σε κάλυμμα και εκτίθεται στην **ατμοσφαιρική πίεση**.
- ❑ Επειδή τροφοδοτείται και λειτουργεί ένα μόνο τμήμα του δρομέα (δύο ως τρία από τα ~20 σκαφίδια), ο στρόβιλος δράσης αναφέρεται και ως **μερικής προσβολής**.
- ❑ Η τυπικότερη κατηγορία είναι οι τύπου Pelton, που είναι κατάλληλοι για **μεγάλα ύψη πτώσης** (>250 m) και σχετικά **μικρές παροχές**.



Υπολογισμός ύψους πτώσης σε στρόβιλο δράσης

- Οι ενεργειακές απώλειες εκτιμώνται από τη σχέση:

$$h_L = \frac{V^2}{2g} \left[f \frac{L}{D} + \sum k_{1-2} + k_N \left(\frac{D}{D_N} \right)^2 \right]$$

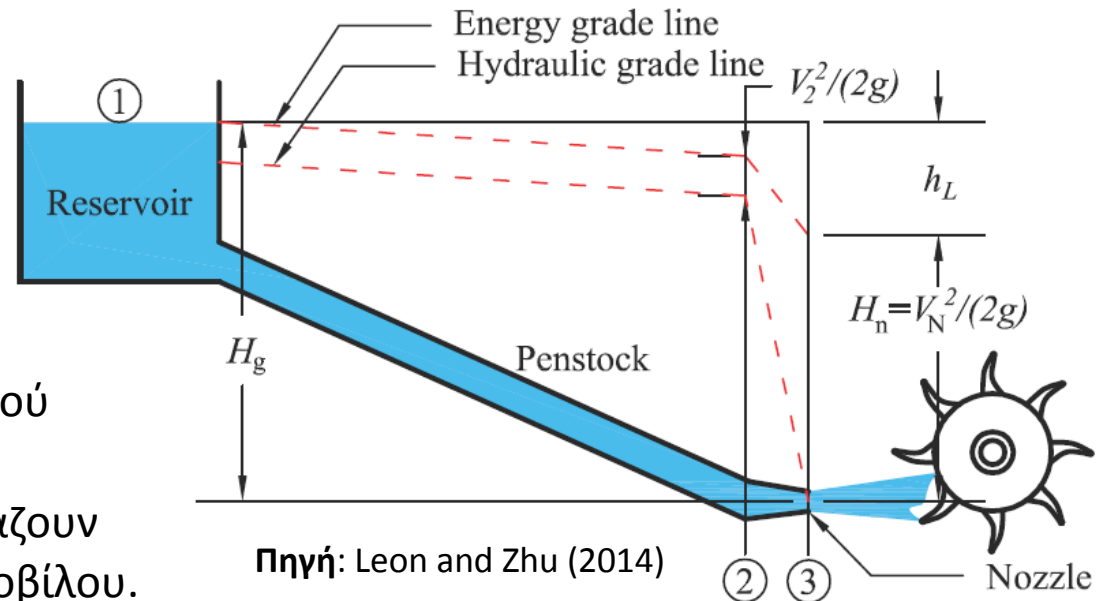
όπου Q η παροχή, D η διάμετρος του αγωγού πτώσης, L το μήκος του αγωγού, f ο συντελεστής γραμμικών απωλειών, $\sum k_{1-2}$ ο συνολικός συντελεστής τοπικών απωλειών μεταξύ των διατομών 1 και 2, D_N η διάμετρος του ακροφυσίου, και k_N συντελεστής τοπικών απωλειών, που σε τυπικούς στρόβιλους Pelton κυμαίνεται από 0.02 έως 0.04.

- Ο λόγος των ταχυτήτων στον αγωγό πτώσης και τον στρόβιλο είναι: $V_N/V = (D/D_N)^2$

- Η θεωρητικά μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να αναπτυχθεί στην έξοδο του ακροφυσίου (για μηδενικές απώλειες, συνεπώς $H_n = H_g$) είναι:

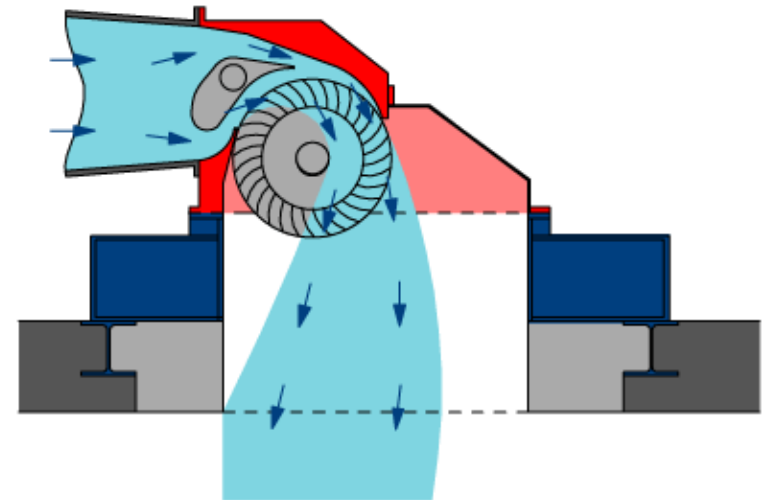
$$V_{N,max} = (2g H_g)^{1/2}$$

- Βασικό στοιχείο του σχεδιασμού είναι η **ελαχιστοποίηση των απωλειών νερού**, που επηρεάζουν τον βαθμό απόδοσης του στρόβιλου.



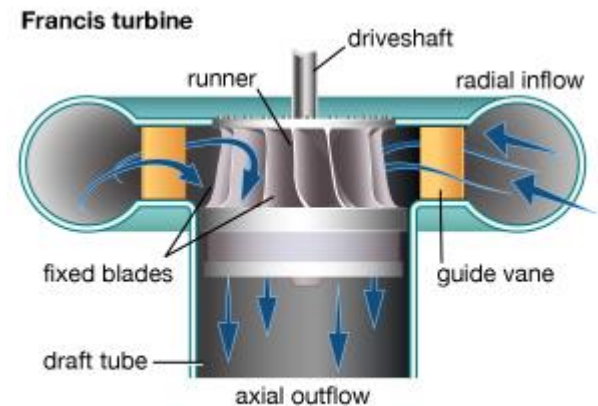
Άλλοι τύποι στροβίλων δράσης

- ❑ **Στρόβιλος Turgo:** Η δέσμη του νερού προσπίπτει στον δρομέα υπό κλίση. Οικονομικότερη επιλογή σε σχέση με τον τύπο Pelton, καθώς χρησιμοποιεί ένα αντί για δύο πτερύγια (άρα η ειδική ταχύτητα διπλασιάζεται), τα οποία είναι στενότερα σε σχέση με τον στρόβιλο Pelton. Ενδείκνυεται για ύψη πτώσης 15-300 m και μεγάλος εύρος παροχών, γιατί εμποδίζεται η αλληλεπίδραση του εκτοξευόμενου νερού μεταξύ των διαδοχικών πτερυγίων. Ο βαθμός απόδοσής του είναι λίγο μικρότερος από του Pelton (~ 87%).
- ❑ **Στρόβιλος cross-flow:** Το νερό διέρχεται δύο φορές από τον δρομέα, εξασφαλίζοντας υψηλότερο βαθμό απόδοσης, και επιτρέποντας τον αυτοκαθαρισμό του στροβίλου από λάσπη, φύλλα, κτλ. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι ο πρακτικά σταθερός βαθμός απόδοσης, που καθιστά τον στρόβιλο κατάλληλο για μικρά ΥΗΕ, τα οποία δεν έχουν δυνατότητα αποθήκευσης και άρα ρύθμισης της ροής.

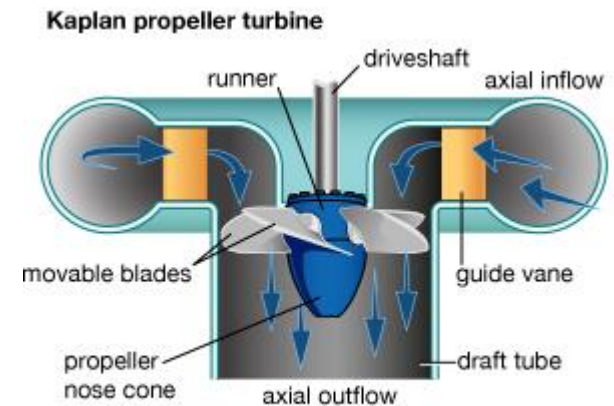


Στρόβιλοι αντίδρασης (reaction turbines)

- Η ροή, μέσω του αγωγού πτώσης, κατευθύνεται μέσα από σταθερά πτερύγια στον δρομέα του στροβίλου και εισέρχεται με **ακτινική** και **εφαπτομενική** συνιστώσα.
- Ο δρομέας και τα πτερύγια τοποθετούνται σε περίβλημα που είναι πλήρως καλυμμένο με νερό, και συνεπώς ο στρόβιλος βρίσκεται συνεχώς **υπό πίεση**.
- Η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε **κινητική ενέργεια** και **πίεση**, που αποδίδονται στον δρομέα, εξασφαλίζοντας υψηλότερο **βέλτιστο βαθμό απόδοσης** σε σχέση με τους στροβίλους δράσης (για μικρή όμως περιοχή φορτίου).
- Ο άξονας είναι συνήθως κατακόρυφος και το νερό εξέρχεται κατακόρυφα προς τα κάτω μέσα στον **αγωγό φυγής** (draft tube).
- Οι κύριοι τύποι στροβίλων αντίδρασης είναι:
 - Στρόβιλοι **Francis**, ακτινικής ή μικτής ροής, που είναι κατάλληλοι για μέτρια ύψη πτώσης (60 ως 150 m) και μέτριες παροχές.
 - Στρόβιλοι **Kaplan**, αξονικής ροής, που είναι κατάλληλοι για μικρά ύψη πτώσης (<30 m) και μεγάλες παροχές.



© Encyclopædia Britannica, Inc.

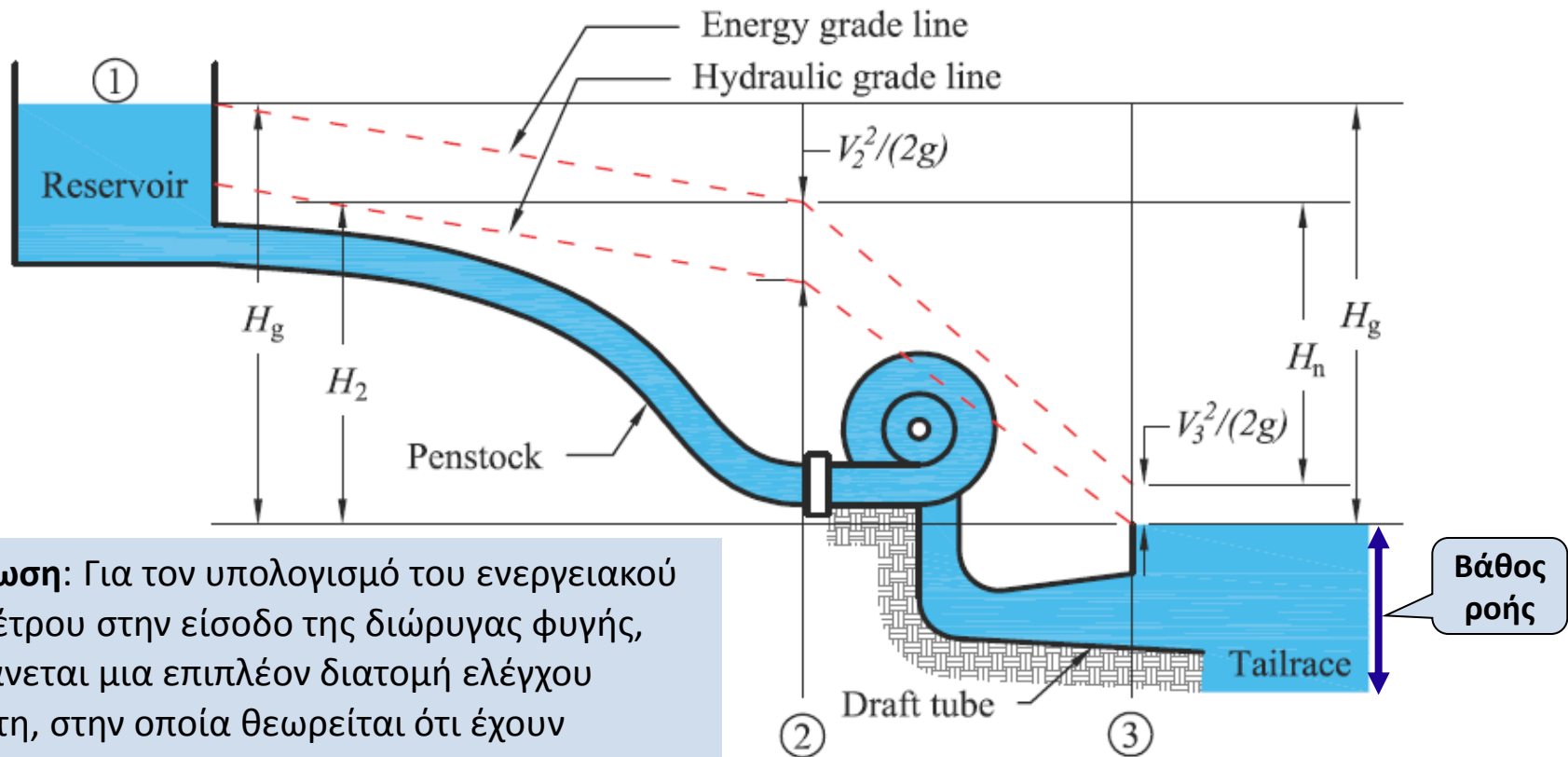


Υπολογισμός ύψους πτώσης σε στρόβιλο αντίδρασης

- Γενική σχέση υπολογισμού ενεργειακών απωλειών:

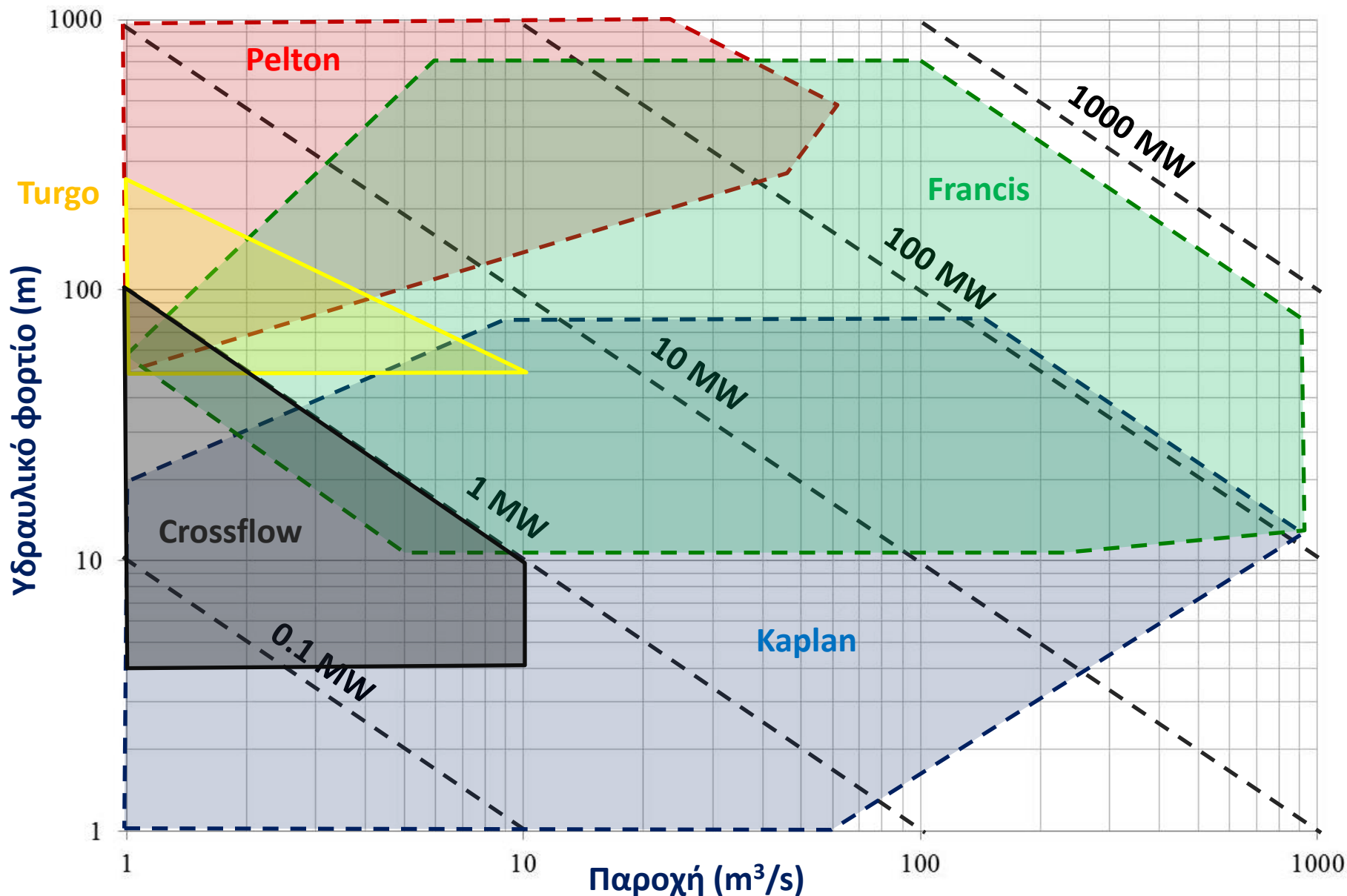
$$h_L = \frac{V^2}{2g} \left[f \frac{L}{D} + \sum k_{1-2} + \left(\frac{D}{D_d} \right)^2 \right]$$

όπου D_d η διάμετρος του αγωγού φυγής (η διάμετρος πρέπει να είναι μεγάλη, ώστε να ελαχιστοποιείται το ύψος κινητικής ενέργειας).



Σημείωση: Για τον υπολογισμό του ενεργειακού υψομέτρου στην είσοδο της διώρυγας φυγής, λαμβάνεται μια επιπλέον διατομή ελέγχου κατάντη, στην οποία θεωρείται ότι έχουν αποκατασταθεί συνθήκες ομοιόμορφης ροής.

Εύρος εφαρμογής διαφορετικών τύπων στροβίλων



Βασικά ενεργειακά μεγέθη: Βαθμός απόδοσης

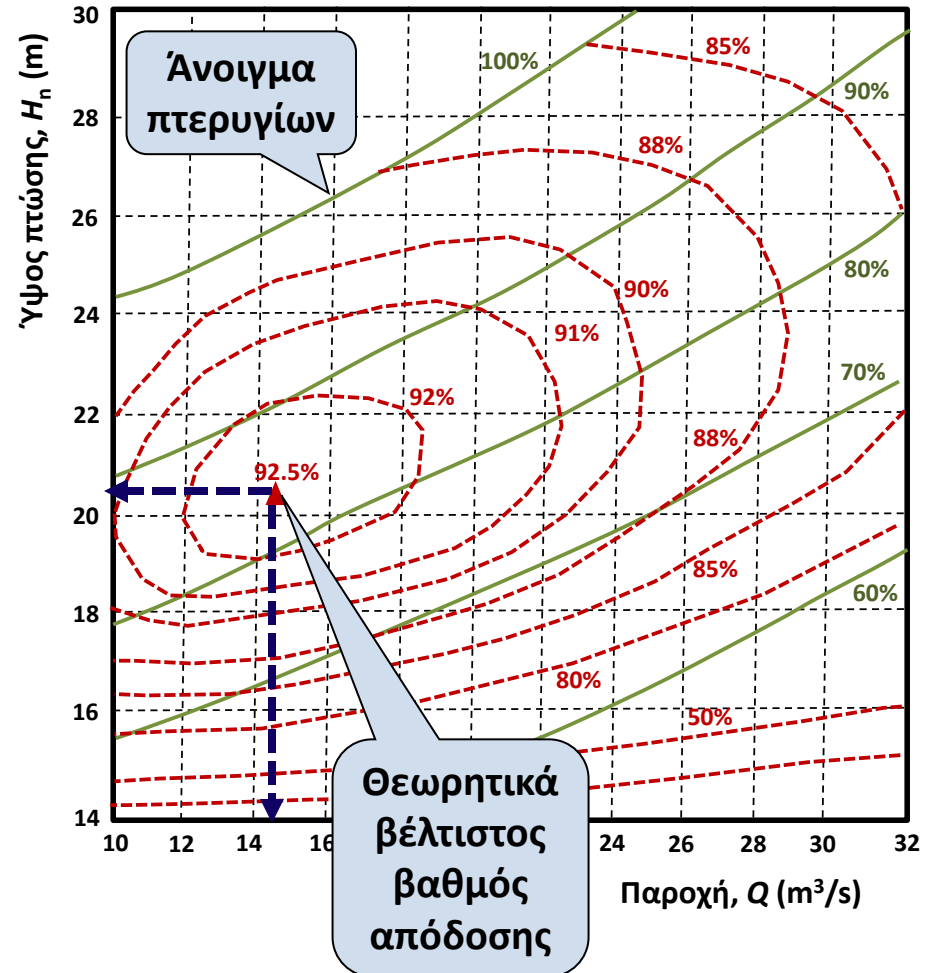
- Ως βαθμός απόδοσης των στροβίλων, η_{TB} , νοείται ο λόγος της παραγόμενης **μηχανικής ενέργειας** προς τη διαθέσιμη **υδραυλική ενέργεια** (καθαρό ύψος πτώσης).
- Η διαφορά των δύο μεγεθών οφείλεται σε απώλειες ενέργειας, που περιλαμβάνουν:
 - **Υδραυλικές απώλειες**, λόγω **τριβών** κατά μήκος της ροής (π.χ. στον αγωγό φυγής) και **κρούσης**, κατά την πρόσπτωση του νερού στα πτερυγία του δρομέα.
 - **Ογκομετρικές απώλειες**, που οφείλονται σε διαρροές νερού μέσω των διάκενων που σχηματίζονται στο κέλυφος της μηχανής, ενώ περιορίζονται δραστικά με τη διαμόρφωση λαβυρίνθων (αφορά μόνο σε στροβίλους δράσης).
 - **Μηχανικές απώλειες**, που αναπτύσσονται στα έδρανα και τον στρεφόμενο δίσκο.
- Κατ' αντιστοιχία, ο συντελεστής η_{TB} εκτιμάται ως γινόμενο τριών συνιστωσών, δηλαδή του υδραυλικού (η_h), ογκομετρικού (η_q) και μηχανικού (η_m) βαθμού απόδοσης, με τυπικές τιμές $\eta_h = 0.90-0.96$, $\eta_q = 0.97-0.98$ (στρόβιλοι δράσης), και $\eta_m = 0.97-0.99$.
- Ο **συνολικός βαθμός απόδοσης** του υδροδυναμικού συστήματος λαμβάνει υπόψη και τις απώλειες κατά τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε **ηλεκτρική**, καθώς και τη μεταφορά της τελευταίας μέσω του δικτύου υψηλής τάσης, και ορίζεται ως το γινόμενο:

$$\eta = \eta_{TB} \times \eta_{GN} \times \eta_{TF} \times \eta_{TP}$$

όπου η_{GN} ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας, η_{TF} ο βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή, και η_{TP} ο βαθμός απόδοσης της γραμμής μεταφοράς, με τυπικές τιμές 0.96, 0.98 και 0.98, αντίστοιχα.

Χαρακτηριστικές καμπύλες στροβίλων

- Ο βαθμός απόδοσης ενός Υ/Η έργου δεν είναι σταθερός, αλλά μεταβάλλεται συναρτήσει των χαρακτηριστικών της ροής (καθαρό ύψος πτώσης, παροχή) και των χαρακτηριστικών μεγεθών του στροβίλου (ταχύτητα περιστροφής, άνοιγμα πτερυγίων).
- Η ταχύτητα περιστροφής διατηρείται σταθερή, ώστε να παράγεται ρεύμα **σταθερής συχνότητας** (είναι ωστόσο πλέον τεχνικά εφικτή η λειτουργία των Υ/Η μονάδων με μεταβλητή ταχύτητα).
- Οι χαρακτηριστικές καμπύλες ενός υδροστροβίλου απεικονίζουν τη σχέση μεταβολής του **βαθμού απόδοσης η** , συναρτήσει του διαθέσιμου **ύψους πτώσης H_n** , της **παροχής Q** και του **ανοίγματος των πτερυγίων A** , για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής.
- Οι καμπύλες αυτές προσδιορίζονται **εργαστηριακά**, μετρώντας την ισχύ που παράγεται για διάφορους συνδυασμούς H_n , Q και A , σε υδραυλικά ομοιώματα.

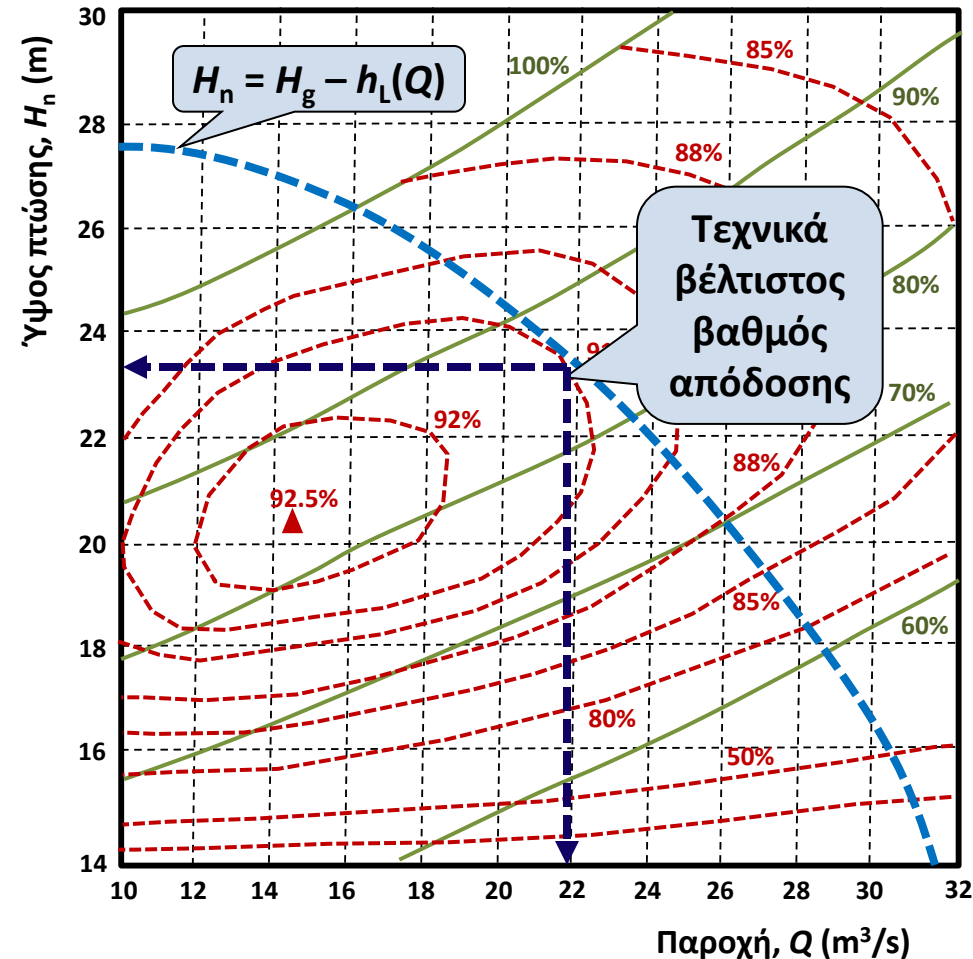


Καμπύλη λειτουργίας συστήματος

- Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων λειτουργίας του συστήματος προκύπτει από την τομή των χαρακτηριστικών καμπυλών του στροβίλου με τη συνάρτηση $H_n = H_g - h_L(Q)$, όπου $h_L(Q)$ οι ενεργειακές απώλειες του συστήματος μεταφοράς, που είναι συνάρτηση της παροχής Q και των χαρακτηριστικών των σχετικών έργων (γεωμετρία, τραχύτητα).
- Θεωρώντας αγωγό διαμέτρου D και αγνοώντας τις τοπικές απώλειες, προκύπτει μια σχέση της μορφής:

$$H_n = H_g - \frac{fLQ^2}{8g\pi^2 D^5}$$

- Συνδυάζοντας τα δύο διαγράμματα μπορούν να προσδιοριστούν:
 - ο σημείο λειτουργίας (H_n, Q, η) του συστήματος, για κάθε τιμή ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων του στροβίλου
 - το κατάλληλο άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων για την επίτευξη της ζητούμενης ισχύος



Προκαταρκτικός υδρο-ενεργειακός σχεδιασμός

- Αν V_E είναι η μέση ετήσια απορροή ποταμού σε θέση δημιουργίας ταμιευτήρα επαρκούς χωρητικότητας, με τον οποίο διαμορφώνεται υψομετρική διαφορά H_g με τον σταθμό παραγωγής, τότε η θεωρητικά μέγιστη ετήσια παραγωγή ενέργειας είναι:

$$E_0 = \gamma V_E H_g$$

- Η αδρομερής-προκαταρκτική εκτίμηση της τιμής σχεδιασμού $E_{\sigma\chi\epsilon\delta} = \eta \gamma V_\alpha H_d$, που είναι προφανώς μικρότερη από την E_0 , βασίζεται στα εξής δεδομένα και παραδοχές:
 - Εξαιτίας των απωλειών λόγω υπερχειλίσεων, δεν είναι εφικτή η αξιοποίηση του συνόλου της μέσης ετήσιας απορροής, αλλά ενός ποσοστού της $V_\alpha = \alpha V_E$ (εκμεταλλεύσιμος όγκος νερού), που εξαρτάται από τη ρυθμιστική ικανότητα του ταμιευτήρα και τη μεταβλητότητα της απορροής (συνήθως $\alpha \rightarrow 1$, για $K/V_E > 2-3$).
 - Η τιμή V_α μειώνεται περαιτέρω λόγω των απωλειών λόγω εξάτμισης και διαφυγών, άλλων χρήσεων νερού, καθώς και περιβαλλοντικών και λειτουργικών περιορισμών.
 - Για την εκτίμηση του ύψους πτώσης σχεδιασμού H_d θεωρείται μια μέση στάθμη λειτουργίας του ταμιευτήρα και εκτιμώνται οι απώλειες ενέργειας υποθέτοντας μια εύλογη κλίση της γραμμής ενέργειας ($J = 2-3\%$).
 - Με βάση τα αδρομερή χαρακτηριστικά του συστήματος (τύπος στροβίλων, παροχή σχεδιασμού), λαμβάνεται μια εύλογη τιμή του βαθμού απόδοσης ($\eta = 80-90\%$).
- Τα υδροδυναμικά μεγέθη η , V_α και H_d αναθεωρούνται αρκετές φορές, μέχρι να αποσαφηνιστούν η τελική διάταξη και τα τελικά μεγέθη σχεδιασμού του συστήματος.

Επιλογή βασικών μεγεθών σχεδιασμού

- Για δεδομένη τιμή της ενέργειας σχεδιασμού, $E_{\text{σχεδ}}$, και ανάλογα με τον σκοπό του Υ/Η έργου (έργο βάσης, έργο αιχμής ή μικτό), προσδιορίζεται ο χρόνος λειτουργίας των στροβίλων t_a , με βάση τον οποίο εκτιμάται η απαιτούμενη ισχύς των στροβίλων:

$$P_{\alpha\pi} = E_{\text{σχεδ}} / t_a$$

- Με βάση τον εκμεταλλεύσιμο όγκο νερού και τον χρόνο λειτουργίας των στροβίλων, εκτιμάται η παροχή σχεδιασμού των έργων προσαγωγής και των στροβίλων:

$$Q_{\text{σχεδ}} = V_{\alpha} / t_a$$

- Με βάση το διαθέσιμο υδραυλικό φορτίο (ακαθάριστο ύψος πτώσης) και την παροχή επιλέγονται ο τύπος, το πλήθος και η γενική διάταξη των στροβίλων.
- Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος λαμβάνεται ίση με:

$$P_{\text{εγκ}} = 1.20-1.30 P_{\alpha\pi}$$

- Για τη δεδομένη παροχή σχεδιασμού γίνεται ο υδραυλικός σχεδιασμός των έργων προσαγωγής, και προσδιορίζονται οι σχέσεις $Q = Q(z_A)$, $H_n = H_n(z_A)$ και $\eta = \eta(z_A)$.

Παρατήρηση: Αν και η λειτουργία των στροβίλων επιτρέπει ένα μεγάλο φάσμα παροχών Q για δεδομένο ύψος πτώσης H_n , λόγοι λειτουργικοί και οικονομικοί οδηγούν συνήθως σε μονοσήμαντη σχέση παροχής-ύψους. Με αυτή την προϋπόθεση, σε δεδομένο ολικό ύψος πτώσης αντιστοιχεί μία τιμή της παροχής και του καθαρού ύψους πτώσης, οπότε από τις καμπύλες του στροβίλου προκύπτει μία τιμή του συντελεστή απόδοσης.