



ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ
ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ

ΜΑΘΗΜΑ κορμού 5ου ΕΞΑΜΗΝΟΥ

**ΜΕΘΟΔΟΙ και ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ
ΡΟΗ υπό ΠΙΕΣΗ**



Τριαντάφυλλος ΚΑΤΣΑΡΕΛΗΣ

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2010

NTUA D AH NV501 A

Εισαγωγικό σημείωμα

- Η νέα έκδοση των τευχών της σειράς: **NTUA D AH NV500** έχει ως **κύριους στόχους**:
 - Να συμβάλει εις την πληρέστερη μεταβίβαση γνώσεων και δεξιοτήτων εις τους, Σπουδαστές / Σπουδάστριες – *Μηχανικούς*, του μαθήματος <Εφαρμοσμένη Υδραυλική> του 5^{ου} εξαμήνου, ώστε να μειωθεί το ποσοστό εμφάνισης κρίσιμων λαθών εις τις ασκήσεις και εις τις εξετάσεις.
 - Να διευκολύνει την παρακολούθηση, την αφομοίωση της *Θεωρίας* και τη σύνδεσή της με τις *Εφαρμογές* μεθόδων υπολογισμού.
 - Να αποτελέσει ένα χρηστικό εργαλείο, ώστε η διεξαγωγή του μαθήματος να είναι ένα έργο, το οποίο προκαλεί ευχαρίστηση εις όλες και όλους τους συμμετέχοντες.
- **Πρόσθετοι στόχοι** της έκδοσης είναι:
 - Η αύξηση του ποσοστού των παρακολουθούντων, κυρίως των πρωτοεγγραφομένων.
 - Η αύξηση του ποσοστού παράδοσης ασκήσεων και συμμετοχής εις τις ενδιάμεσες εξετάσεις, πρωτοεγγραφομένων και παλαιότερων.
 - Η μείωση της χρήσης αθλίων προϊόντων και υπηρεσιών παραπαιδείας.
- Σημειώνεται ότι το μάθημα αποτελεί:
 - Συνέχεια – *εδράζεται επί* του μαθήματος <Μηχανική των Ρευστών> του 5^{ου} εξαμήνου.
 - Ενδιάμεσο κρίκο - *υποστηρίζει* δύο τουλάχιστον μαθήματα, τα <Αστικά Υδραυλικά Έργα> του 6^{ου} εξαμήνου και <Υδραυλική Ανοικτών Αγωγών και Ποταμών> του 7^{ου} εξαμήνου.
- Σημειώνεται επίσης ότι για όλους τους ως άνω κύριους και πρόσθετους **στόχους** έχουν τεθεί – παρακολουθούνται και αναλύονται αντίστοιχοι **Δείκτες Ποιότητας**. Η **συνεχής προσπάθεια βελτίωσης** με βάση την εξέλιξη των Δεικτών οδήγησε αρχικώς εις πέντε ετήσιες αναθεωρημένες εκδόσεις και τελικώς εις την παρούσα ριζικώς αναθεωρημένη έκδοση με κωδικό **NV (Nouvelle Vague)**.
- **Μη- στόχοι** της έκδοσης είναι:
 - Να καταγραφεί ως πλήρες επιστημονικό - διδακτικό σύγγραμμα.
 - Να υποκαταστήσει τα διανεμόμενα συγγράμματα, είναι απλώς «Σημειώσεις».
 - Να υποκαταστήσει την αναγκαιότητα φυσικής παρακολούθησης και συμμετοχής εις την εκπαιδευτική διαδικασία

- Εις τα δύο τεύχη η δομή είναι γενικώς παρόμοια ανά Κεφάλαιο:
Συνοπτική παρουσίαση εννοιών και σχέσεων – Αναλυτική παρουσίαση μεθόδων υπολογισμού – Ερωτήσεις κατανόησης και Εφαρμογές υπολογισμού.
Γίνεται δε συχνή χρήση τριών συμβόλων:
 - Το σύμβολο  **παροτρύνει** εις εμβάθυνση, ανατρέχοντας εις τα διανεμόμενα συγγράμματα ή / και αναζήτηση λεπτομερειών, πινάκων, διαγραμμάτων κ.λπ.
 - Το σύμβολο  επισημαίνει - **προειδοποιεί**, ότι η συγκεκριμένη περιοχή αφορά σε μείζον ζήτημα αφομοίωσης εννοιών ή / και διαδικασίας εφαρμογής και εμπεριέχει σοβαρούς κινδύνους παρανόησης – κρίσιμων λαθών.
 - Το σύμβολο * επισημαίνει - **προειδοποιεί**, ότι το συγκεκριμένη σημείο αφορά σε μείζον ζήτημα εκτίμησης μεγεθών ή / και διαδικασίας εφαρμογής και εμπεριέχει σοβαρούς κινδύνους παγίδευσης – κρίσιμων λαθών.
- Ειδικότερον:
 - Το (παρόν) τεύχος **NTUA D AH NV501** πραγματεύεται το πεδίο της **Ροής** υπό **Πίεση**, ακολουθεί – παραπέμπει κυρίως εις το διανεμόμενο σύγγραμμα: < Εφαρμοσμένη Υδραυλική – Α. Στάμου>
 - Το τεύχος **NTUA D AH NV502** πραγματεύεται το πεδίο της **Ροής** με **Ελεύθερη Επιφάνεια**, ακολουθεί – παραπέμπει εις το διανεμόμενο σύγγραμμα: < Υδραυλική Ανοικτών Αγωγών – Γ. Νουτσόπουλος, Γ. Χριστοδούλου, Τ. Παπαθανασιάδης>.
Αποτελεί δε τη βάση για το τεύχος NTUA D AH NV701 του μαθήματος <Υδραυλική Ανοικτών Αγωγών και Ποταμών> του 7^{ου} εξαμήνου.
- Ο γράφων δεν είναι ο συγγραφέας των «Σημειώσεων του»...
Τις έχουν συγγράψει γενεές Σπουδαστριών και Σπουδαστών, συμμετέχοντας εις τη **διαδικασία γνώσης – μάθησης** με απορίες, αντιρρήσεις, ενστάσεις...
- Ως προσωποποίηση τους αναφέρω και ευχαριστώ τους ανεκτίμητους συντελεστές της παρούσας - νέας έκδοσης: Ηλιάνα Αδαμοπούλου, Γιώργος Δέσκος και Δημήτρης Μπουζιώτας. Συνέβαλλαν μέσω των προτάσεων, της πρακτικής βοήθειας, της ενθάρρυνσης – στήριξης εις το γράφοντα, αλλά και της δημιουργικής γκρίνιας τους...
- Βεβαίως ο γράφων φέρει την αποκλειστική ευθύνη για την ποιότητα περιεχομένου και τεχνικής επεξεργασίας των τευχών, ουδείς άλλος τα θεωρεί πριν από την εκάστοτε έκδοσή τους.
- Τα τεύχη της έκδοσης διατίθενται ελεύθερα εις τις ιστοσελίδες του μαθήματος. Δεν προορίζονται διά αναπαραγωγή και εμπορική εκμετάλλευση, αλλά μόνο δια την αποκλειστική χρήση από τους σπουδαστές και συναδέλφους.
Η όποια πενιχρή πνευματική συνεισφορά – ιδιοκτησία παραμένει εις το συντάκτη τους...
- Η ανάδραση από τους χρήστες αποτελεί τη σημαντικότερη διαδικασία!..
Απορίες – Σχόλια – Αντιρρήσεις – Ενστάσεις... είναι **ευπρόσδεκτες!**
e- mail: neaoktana@hotmail.com

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΘΑ ΕΝΗΜΕΡΩΘΕΙ ΜΕ ΤΗΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΟΥ ΚΕΙΜΕΝΟΥ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ Λ

ΘΑ ΕΝΗΜΕΡΩΘΕΙ ΜΕ ΤΗΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΟΥ ΚΕΙΜΕΝΟΥ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρουσιάζονται οι απαραίτητες έννοιες και στοιχεία από τη Μηχανική των Ρευστών με έμφαση στα βασικά χαρακτηριστικά των ρευστών, τις κατηγορίες ροής σε κλειστούς αγωγούς υπό πίεση και τις μεθόδους ανάλυσης της ροής γενικώς. Αναλύεται η διαδικασία και οι χρησιμοποιούμενοι μέθοδοι αριθμητικής επίλυσης προβλημάτων.

1.1 Βασικές έννοιες και στοιχεία Μηχανικής των Ρευστών

1.1.1 Βασικά χαρακτηριστικά των ρευστών

- **Ρευστό σωματίδιο:** Ο στοιχειώδης όγκος dU ρευστού ο οποίος είναι αρκετά μεγαλύτερος από έναν ελάχιστο όγκο ($\min dU = 10^{-9} \text{ mm}^3$), ώστε να περιλαμβάνει ένα ικανό και περίπου σταθερό αριθμό μορίων.
- **Πυκνότητα $\rho = \text{Μάζα} / \text{Όγκος}$**
 - ο Διάσταση - μονάδες $[\rho] \rightarrow [M / L^3]$: kg / m^3 , gr / cm^3
 - ο Η πυκνότητα ενός ρευστού εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία του.
 - ο Η πυκνότητα ενός υγρού είναι σχετικά σταθερή. Η πυκνότητα του νερού είναι περίπου ίση με 1000 kg/m^3 και όταν αυξήσουμε την πίεση 220 φορές η πυκνότητα αυτή θα αυξηθεί μόνο κατά περίπου 1%.
 - ο Η πυκνότητα των υγρών είναι περίπου τρεις τάξεις μεγαλύτερη της πυκνότητας των αερίων $\rightarrow$ Στην ελεύθερη επιφάνεια ενός αγωγού η παρουσία του υπερκειμένου ρευστού <αέρα> έχει μικρή έως αμελητέα επίδραση.
- **Ειδικό βάρος $\gamma = \text{Βάρος} / \text{Όγκος}$**
 - ο Διάσταση - μονάδες $[\gamma] \rightarrow [F / L^3]$: t / m^3 , kg^* / m^3 , N / m^3
 - ο $\gamma = \rho \cdot g$, όπου g : επιτάχυνση της βαρύτητας **9,81** m / s^2
 - ο Προσοχή! Πυκνότητα και Ειδικό βάρος έχουν την ίδια αριθμητική τιμή σε διαφορετικά συστήματα: Για το νερό
 - Πυκνότητα ρ : περίπου $1.000 \text{ kg} / \text{m}^3 = 1 \text{ t} / \text{m}^3$
 - Ειδικό βάρος γ : περίπου $1.000 \text{ kg}^* / \text{m}^3 = 9,81 \text{ kN} / \text{m}^3$
- **Πίεση $p = \text{Δύναμη (κάθετη)} / \text{Επιφάνεια}$**
 - ο Διάσταση - μονάδες $[p] \rightarrow [F / L^2]$: t / m^2 , kg^* / m^2 , $\text{N} / \text{m}^2 (= \text{Pa})$
 - ο Είναι η κάθετη – θλιπτική – τάση η οποία προέρχεται από την αντίστοιχη δύναμη, την οποία το ρευστό ασκεί στην επιφάνεια στοιχειώδους όγκου.
 - ο Είναι βαθμωτό μέγεθος το οποίο προέρχεται από διανυσματικό μέγεθος.
 - ο Συνήθως ορίζουμε, για λόγους ευκολίας την ατμοσφαιρική πίεση ως σημείο αναφοράς με τιμή μηδέν και μετράμε τη σχετική πίεση ως διαφορά της απόλυτης και της ατμοσφαιρικής: $p_{\text{σχετ}} = p_{\text{απολ}} - p_{\text{ατμοσφ}}$
Αυτό οδηγεί λογιστικά και σε αρνητικές τιμές της σχετικής πίεσης: **υποπίεση**.
 - ο Όταν πραγματοποιείται εξάτμιση του νερού σε ένα κλειστό χώρο, όπως π.χ. σε ένα τμήμα σωλήνα με ροή νερού υπό πίεση, τότε η πίεση από τα μόρια των υδρατμών καλείται **πίεση υδρατμών: p_v** . Στην περίπτωση αυτή η συνέχεια της ροής διακόπτεται (σπηλαίωση) και το ρευστό δεν είναι πλέον ένα συνεχές μέσο. Το φαινόμενο είναι ανεπιθύμητο και θα χρησιμοποιήσουμε μεθόδους ελέγχου και αποφυγής του.
Η p_v αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

- **Συμπιεστικότητα:** Είναι η ιδιότητα της μείωσης του όγκου του ρευστού όταν αυξάνεται η πίεση, η οποία ασκείται σε αυτό.
 - ο Χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας, ή το (αντίστροφο) μέτρο συμπιεστότητας.
 - ο Το μέτρο ελαστικότητας του νερού είναι πολύ μεγάλο (περίπου 20.000 φορές μεγαλύτερο από του αέρα). Στα συνήθη προβλήματα το νερό (και γενικώς τα υγρά) θεωρείται ασυμπίεστο.
- **Δυναμική συνεκτικότητα (ή ιξώδες) μ :** Είναι η ιδιότητα των ρευστών να παραμορφώνονται συνεχώς υπό την επίδραση διατμητικών τάσεων.
 - ο Διάσταση – μονάδες $[\mu] \rightarrow [(F \times T) / L^2]$: gr /cm.s (= poise)
 - ο Το νερό συμπεριφέρεται ως Νευτώνειο ρευστό.
 - ο Η μ μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.
- **Κινηματική συνεκτικότητα ν = Δυναμική συνεκτικότητα / Πυκνότητα**
 - ο Διάσταση – μονάδες $[\nu] \rightarrow [L^2 / T]$: cm² /s (= stoke)
 - ο Η ν μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.
- **Ταχύτητα ροής V = Απόσταση / Χρόνος**
 - ο Διάσταση – μονάδες $[V] \rightarrow [L / T]$: m/s
 - ο Ταχύτητα σε μικροκλίμακα (σημείο ή ρευστό σωματίδιο).
 - ο Αναλύεται σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (u, v, w), σε σφαιρικό σύστημα (r, θ, ϕ), ή σε κυλινδρικό σύστημα (r, θ, z) και τις αντίστοιχες απλοποιήσεις εάν η ροή θεωρείται δισδιάστατη.
 - ο Ταχύτητα σε μακροκλίμακα (διατομή ή τμήμα πεδίου ροής).
Επηρεάζεται από τα στερεά όρια, συνήθως χρησιμοποιείται η μέση ταχύτητα με συνυπολογισμό ή αμελώντας κατά περίπτωση τους σχετικούς συντελεστές συνόρθωσης.
- **Επιτάχυνση a = Μεταβολή Ταχύτητας / Χρόνος**
 - ο Διάσταση – μονάδες $[a] \rightarrow [L / T^2]$: m/s²
 - ο Αντιστοίχως με την ταχύτητα ορίζεται σε μικροκλίμακα ή μακροκλίμακα.
- **Παροχή Q = Μεταβολή Όγκου (ακριβέστερον μάζας) / Χρόνος**
 - ο Διάσταση – μονάδες $[Q] \rightarrow [L^3 / T]$: m³/s (σε ομογενές υγρό)
 - ο Σε μακροκλίμακα συνδέεται άμεσα με την εκάστοτε διατομή ροής, της οποίας η γεωμετρία είναι πιθανόν σταθερή ή μεταβαλλόμενη.
 - ο Σε σωλήνες είναι: $Q = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot V$ (1) και $V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$ (2)
- **Ενέργεια H :** Είναι η ικανότητα του ρευστού να παράγει έργο.
Συνήθως λογίζουμε την ενέργεια της ροής ανά μονάδα βάρους του ρέοντος ρευστού και την καλούμε ύψος ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή:
 - ο Διάσταση – μονάδες $[H] \rightarrow [L]$: m
 - ο Η ολική ενέργεια (ή το ύψος ενέργειας) αποτελείται από τις εξής συνιστώσες:
 - Δυναμική ενέργεια, λόγω θέσης (ύψους).
 - Κινητική ενέργεια, λόγω ταχύτητας.
 - Ενέργεια πίεσης, λόγω πίεσης.

- **Απώλειες Ενέργειας ή ύψους ενέργειας ΔH :** Προκαλούνται από δύο διαφορετικούς μηχανισμούς τους οποίους θα εξετάσουμε αναλυτικώς στη συνέχεια.
 - ο Διάσταση – μονάδες $[\Delta H] \rightarrow [L]$: m
 - ο Απώλειες λόγω τριβών στα στερεά όρια σε ομοιόμορφη ροή (γραμμικές).
 - ο Απώλειες λόγω μεταβολής σχήματος σε ανομοιόμορφη ροή (τοπικές).
- **Μεταβολές στην Ενέργεια ή στο ύψος ενέργειας ΔH_μ :** Προκαλούνται από τη λειτουργία υδραυλικών μηχανών και θα τις εξετάσουμε αναλυτικώς στη συνέχεια.
 - ο Διάσταση – μονάδες $[\Delta H_\mu] \rightarrow [L]$: m
 - ο Η λειτουργία αντλίας αυξάνει το ύψος ενέργειας της ροής.
 - ο Η λειτουργία στροβίλου μειώνει το ύψος ενέργειας της ροής.
 - ο Οι υδραυλικές μηχανές (αντλίες ή στροβίλοι) χαρακτηρίζονται από την ισχύ N , το μανομετρικό ύψος h_μ και το συντελεστή απόδοσης η . Στους υπολογισμούς υπεισέρχεται και το ειδικό βάρος του ρέοντος υγρού γ .
- **Μετατροπές συνήθως χρησιμοποιούμενων μονάδων:**
 - ο **1 t = 9,81 kN**
 - ο **1 kgr*/m² = 9,81 N /m² = 9,81 Pa**
 - ο **1 m³ = 1.000 L** (λίτρα)

1.1.2 Κατηγορίες ροής σε κλειστούς αγωγούς υπό πίεση

- **Μόνιμη – Μη μόνιμη:** Χαρακτηρισμός ως προς κινηματική – χρονική μεταβολή. Θα ασχοληθούμε μόνο με τη Μόνιμη ροή.
- **Ομοιόμορφη – Ανομοιόμορφη:** Χαρακτηρισμός ως προς κινηματική – χωρική μεταβολή. Θα ασχοληθούμε κυρίως με την Ομοιόμορφη αλλά θα αναλύσουμε και την Ανομοιόμορφη ροή, στην οποία εμφανίζεται διαφορετικός μηχανισμός απωλειών ενέργειας.
- **Στρωτή – Τυρβώδης:** Χαρακτηρισμός από δυναμική άποψη - επίδραση συνεκτικότητας $\rightarrow$ αριθμός **Reynolds**. Στη ροή υπό πίεση σπανίως εμφανίζεται στρωτή ροή σε πρακτικά προβλήματα ενδιαφέροντος Υδραυλικού Μηχανικού. Όμως ο αριθμός Reynolds, ο οποίος αποτελεί κριτήριο χαρακτηρισμού της ροής ως στρωτή ή τυρβώδη υπεισέρχεται λογιστικά στις διαδικασίες επίλυσης! Υπενθυμίζεται ότι:
 - ο Αριθμός Reynolds είναι ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις συνεκτικότητας και είναι αδιάστατος. Συμβολίζεται γενικώς ως **R_e** αλλά <εδώ> θα συμβολίζεται για λόγους απλότητας ως **R** προσέχοντας να μη γίνει σύγχυση με την υδραυλική ακτίνα, η οποία επίσης συμβολίζεται ως R .
 - ο Για αγωγούς κυκλικής διατομής (διαμέτρου D)= σωλήνες: $R = \frac{V \cdot D}{\nu}$ (3)
όπου V η μέση ταχύτητα στη διατομή ροής και ν η κινηματική συνεκτικότητα.
 - ο Συνδυάζοντας τις (2) και (3) προκύπτει: $R = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot \nu}$ (4)

- Σε αγωγούς τυχούσας διατομής ισχύει γενικώς: $R = \frac{V \cdot \frac{E}{\Pi}}{v}$ (5)

όπου υπεισέρχεται αντί της διαμέτρου η υδραυλική ακτίνα της διατομής:
 $R = \text{Εμβαδό} / \text{Βρεχόμενη Περίμετρος}$.

- Για αγωγούς **κυκλικής διατομής** το όριο μεταξύ στρωτής και τυρβώδους ροής είναι: **$R_{op} = 2.000$**
- Υπενθυμίζεται ότι: Η ροή εμφανίζει αδράνεια στην αλλαγή κατάσταση
 - Εάν είναι στρωτή, παραμένει - για κάποιο πεδίο - στρωτή για τιμές $R > R_{op}$.
 - Εάν είναι τυρβώδης, παραμένει αντιστοίχως τυρβώδης για τιμές $R < R_{op}$.
- **Υποκρίσιμη – Κρίσιμη – Υπερκρίσιμη:** Χαρακτηρισμός από δυναμική άποψη - επίδραση βαρύτητας → αριθμός **Froude**. Στη ροή με ελεύθερη επιφάνεια αυτή η επίδραση είναι σημαντική και ο χαρακτηριστικός αριθμός Froude αποτελεί σημαντικό εργαλείο στις διαδικασίες επίλυσης και γενικότερα στο σχεδιασμό. (βλ. τεύχος NTUA D AH NV502 A).

1.1.3 Μέθοδοι ανάλυσης της ροής

- **Μονοδιάστατη ανάλυση** (ή όγκου ελέγχου): Είναι η σημαντικότερη είτε αναφερόμαστε σε ροή υπό πίεση είτε σε ροή με ελεύθερη επιφάνεια. Γνωστή από το μάθημα <Μηχανική των Ρευστών> του 4^{ου} εξαμήνου, εις το οποίο προτείνω να ανατρέξετε!
- Διαφορική ανάλυση: Επιλύονται οι βασικές διαφορικές εξισώσεις ροής, με ολοκλήρωσή τους για τις συγκεκριμένες οριακές συνθήκες του προβλήματος, το οποίο εξετάζουμε. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η στρωτή ροή (ροές Poiseuille και Couette), όπως αναλύθηκε στο μάθημα <Μηχανική των Ρευστών> του 4^{ου} εξαμήνου.
- Διαστατική ανάλυση: Δομείται ένα πειραματικό μοντέλο, το οποίο δοκιμάζεται και εξελίσσεται με εργαστηριακές (ή και σε φυσική κλίμακα) μετρήσεις. Οι περισσότερες σχέσεις τις οποίες θα χρησιμοποιήσουμε στη συνέχεια παρήχθησαν με τη μέθοδο αυτή.

1.1.4 Λοιπές απαραίτητες γνώσεις και στοιχεία Μηχανικής των Ρευστών

- **Οριακό Στρώμα:** Λόγω της φυσικής οριακής συνθήκης στη γειτονία στερεού ορίου:
 - Η τιμή της ταχύτητας (παράλληλης προς το στερεό όριο) μεταβάλλεται στην (κάθετη προς το στερεό όριο διεύθυνση) από μηδενική σε πραγματική.
 - Τούτο συμβαίνει σε πολύ μικρό ύψος από το όριο.
 - Με ισχυρή κλίση (μεταβολή) της ταχύτητας.
 - Με ανάπτυξη διατμητικών τάσεων σημαντικού μεγέθους.
 - Η επίδραση της συνεκτικότητας δεν είναι δυνατό να αμεληθεί.
 - Καθοριστική σημασία για τη ροή σε κλειστούς αγωγούς υπό πίεση έχει η εμφάνιση **στρωτού οριακού υποστρώματος**, κοντά στα στερεά όρια –

τοιχώματα του αγωγού, ενώ έχει αναπτυχθεί πλήρως τυρβώδες οριακό στρώμα (βλ. 2.1.1).

- **Αποκλίνουσα και συγκλίνουσα ροή – Αποκόλληση των γραμμών ροής:**
Η μορφολογία των γραμμών ροής έχει καθοριστική σημασία για το μηχανισμό απωλειών σε ανομοιόμορφη ροή (*τοπικές απώλειες*):
 - ο Στην αποκλίνουσα ροή αυξάνεται η επιφάνεια της διατομής της ροής, οι γραμμές ροής αποκλίνουν και μειώνεται η μέση ταχύτητα ροής, ενώ στην συγκλίνουσα ροή συμβαίνει το αντίθετο.
 - ο Στην **αποκλίνουσα** ροή μπορεί να παρατηρηθεί το φαινόμενο της **αποκόλλησης**, με αποτέλεσμα το σχηματισμό στροβίλων (δινών), οι οποίοι απορροφούν ενέργεια από την ροή προκαλώντας **σημαντικές τοπικές απώλειες** ενέργειας (βλ. 2.4).

1.2 Διαδικασία και μέθοδοι αριθμητικής επίλυσης προβλημάτων

1.2.1 Διαδικασία

Είτε εις τα προβλήματα <Ροής υπό Πίεση>, είτε εις τα προβλήματα <Ροής με Ελεύθερη Επιφάνεια> υπεισέρχονται πολλές φορές εξισώσεις ή συστήματα εξισώσεων των οποίων ο χειρισμός ή /και μαθηματική επίλυση είναι αδύνατη ή μάλλον δυσχερής. Επομένως είναι απαραίτητη η χρήση αριθμητικών μεθόδων επίλυσης – σύγκλισης προς **αποδεκτή τιμή** με βάση την εξής διαδικασία:

- Επιλογή του **μεγέθους** του οποίου θα **χειριστούμε** τη **σύγκλιση** προς αποδεκτή τιμή. Προσοχή! Πολλές φορές είναι ευφυέστερη η επιλογή μεγέθους βοηθητικού – διάφορου από το μέγεθος του οποίου εις το πρόβλημα ζητείται η τιμή...
- Επιλογή του **μεγέθους** το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε ως **κριτήριο ελέγχου** της **σύγκλισης**. Το μέγεθος αυτό συνδέεται και με την επιλεγείσα αριθμητική μέθοδο.
- Εκτίμηση της **τιμής απόκλισης** από το ως άνω κριτήριο ελέγχου, η οποία θεωρείται επαρκής ως **όριο**, ώστε να **ικανοποιείται** - αμέσως ή εμμέσως - η **απαίτηση σύγκλισης** προς αποδεκτή τιμή.
- Επιλογή της **αριθμητικής μεθόδου** την οποία θα χρησιμοποιήσουμε ως **εργαλείο** της **σύγκλισης** προς αποδεκτή τιμή (βλ. 1.2.2).
- Εκτίμηση της **αρχικής τιμής** του ως άνω επιλεγέντος **μεγέθους** του οποίου θα χειριστούμε τη σύγκλιση.
- Εφαρμογή της **αριθμητικής μεθόδου** με **τιμή εκκίνησης** την ως άνω εκτιμηθείσα αρχική τιμή του **μεγέθους** του οποίου θα χειριστούμε τη σύγκλιση και πέρας την ικανοποίηση της ως άνω επιλεγείσας τιμής απόκλισης – ορίου.
- Τελικός προσδιορισμός και στρογγύλευση ☹ της **αποδεκτής τιμής** του **ζητούμενου μεγέθους** ☺. Η στρογγύλευση βασίζεται εις την ακρίβεια της μεθόδου, αλλά και συνολικώς της χρησιμοποιούμενης προσέγγισης και τεχνικών απαιτήσεων εφαρμογής της λύσης.

Εις τα δύο τεύχη (NTUA D AH NV501 A και NTUA D AH NV502 A) προτείνονται οι κατάλληλες μέθοδοι για τα αντίστοιχα προβλήματα. Η γενική μορφή των εδαφίων επίλυσης προβλημάτων περιλαμβάνει:

- Βήμα προς βήμα ανάλυση της διαδικασίας με παράθεση των χρησιμοποιούμενων σχέσεων, ορίων κ.λπ.
- Τυποποίηση της διαδικασίας με χρηστικό πινακίδιο υπολογισμών.
- Διάγραμμα ροής της διαδικασίας.

1.2.2 Μέθοδοι

Είναι *προφανές* ότι η **κατάλληλη** μέθοδος, πρέπει να εξασφαλίζει την **ταχύτερη** δυνατή **σύγκλιση** με το **μικρότερο** δυνατό **όγκο πράξεων**, άρα και μικρότερη δυνατή πιθανότητα λάθους!

Οι **άριστες μέθοδοι** επιτρέπουν την ευχερή **εποπτεία** (τουλάχιστον) της **τάξης μεγέθους** των ενδιάμεσων τιμών και διαθέτουν ασφαλιστικές **δικλείδες ελέγχου** σε κάποια στάδια, ώστε να γίνονται **ορατά** και αντιληπτά εγκαίρως **λάθη** υπολογισμού και να λαμβάνονται **διορθωτικές** ενέργειες.

Όσες χρησιμοποιήσουμε <εδώ> κατατάσσονται σε πέντε βασικές κατηγορίες:

- Αριθμητικές - προσεγγιστικές μορφές πεπλεγμένων εξισώσεων
 - Η πεπλεγμένη μορφή αντικαθίσταται από προσεγγιστική – εύχρηστη μορφή, η οποία ισχύει με ικανοποιητική ακρίβεια προσέγγισης μόνο σε κάποιο προκαθορισμένο πεδίο τιμών μιας ή περισσότερων μεταβλητών.
 - Ενδεικτικό παράδειγμα η σχέση Colebrook – White για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβών f σε <Ροή υπό Πίεση> (βλ. NTUA D AH NV501 A - 2.1.4).

Η πεπλεγμένη ως προς f σχέση: $\frac{1}{f^{0,5}} = -2 \cdot \log \left(A + \frac{a}{f^{0,5}} \right)$, A και a σταθερές

Αντικαθίσταται από την: $\frac{1}{f^{0,5}} = -2 \cdot \log \left(A + \frac{a}{b} \right)$, όπου b σταθερά

- Επίλυση πεπλεγμένων εξισώσεων με χρήση πινάκων ή γραφημάτων
 - Η πεπλεγμένη μορφή έχει επιλυθεί σε πυκνά διαστήματα μεταβολής των τιμών σταθερών παραγόντων ή έχει αναπαρασταθεί σε γράφημα, όπου αναζητείται η τιμή του ζητούμενου μεγέθους.
 - Οι μέθοδοι επίλυσης με χρήση πινάκων ή γραφημάτων απαιτούν προσεκτικό χειρισμό, όταν δεν υπάρχει επαρκής εμπειρία. Είναι δυνατό **λανθασμένη ανάγνωση** να οδηγήσει σε **χονδροειδή λάθη**. Προς τούτο προτείνεται η διαδικασία να περιλαμβάνει ένα **βήμα ελέγχου**:
 - Η τιμή η οποία προκύπτει θεωρείται αρχική τιμή και ακολουθεί το βήμα ελέγχου - επαλήθευσής της με βάση την πεπλεγμένη εξίσωση. Τούτο **δεν** είναι απαραίτητο για **καλύτερη σύγκλιση**, αλλά για τον

εντοπισμό των ως άνω χονδροειδών **λαθών** ανάγνωσης και χειρισμού πινάκων και γραφημάτων!

- ο Ενδεικτικό παράδειγμα η διαδικασία υπολογισμού του κρίσιμου βάθους σε συμμετρική τραπεζοειδή διατομή σε <Ροή με Ελεύθερη Επιφάνεια> (βλ. NTUA D AH NV502 A - 2.2.1).

Η πεπλεγμένη ως προς y_k σχέση: $\phi(y_k) = C_k$, C_k σταθερά

επιλύεται μέσω Πίνακα και ακολουθεί επαλήθευση

- Μέθοδος διχοτόμησης

- ο Είναι η **απλούστερη** και **σχετικώς ασφαλέστερη** μέθοδος. Προσφέρει ικανοποιητική εποπτεία της τάξης μεγέθους των διαδοχικών τιμών του χειριζόμενου μεγέθους και της πορείας σύγκλισης.
- ο Απαιτείται όμως η εκτίμηση **δύο** και όχι μιας **αρχικών τιμών**.
- ο Συνήθως οδηγεί σε **αργή** σύγκλιση (όγκος πράξεων κ.λπ.)
- ο Τα δύο αυτά μειονεκτήματα αντιμετωπίζονται με υβριδικές - εμπειρικές προσεγγίσεις προσδιορισμού της δεύτερης τιμής και υβριδικούς τρόπους επιτάχυνσης: γραμμική παρεμβολή (ή προέκταση) αντί της διχοτόμησης.
- ο Στην περίπτωση αυτή όμως έχουμε εισέλθει πλέον εις το πεδίο της επόμενης μεθόδου...

- Μέθοδοι α' τάξεως (τύπου sécante)

- ο Χαρακτηρίζονται από:
 - Τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων του **μεγέθους** του οποίου **χειριζόμαστε** τη **σύγκλιση** με το **μέγεθος** το οποίο χρησιμοποιούμε ως **κριτήριο ελέγχου** της **σύγκλισης**.
 - Επομένως, η σύγκριση των **διαδοχικών τιμών απόκλισης** γίνεται με βάση **όριο** το οποίο **συνδέεται** με το ως άνω **σταθερό μέγεθος ελέγχου** της **σύγκλισης**.
- ο Η εκτίμηση της **δεύτερης τιμής** γίνεται με υβριδικές - εμπειρικές προσεγγίσεις με βάση την **αρχική τιμή** και την **απόκλισή** της από το **όριο**.
- ο Συνήθως οι **επόμενες** - διαδοχικές **τιμές** προκύπτουν από υβριδικούς τρόπους - **συντελεστές διόρθωσης**, με τη σειρά τους βασισμένους στην **προηγούμενη τιμή** και την **απόκλισή** της από το **όριο**.
- ο Ενδεικτικά παραδείγματα:
 - Ο χειρισμός της τριτοβάθμιας εξίσωσης στην περίπτωση ανύψωσης πυθμένα, <Ροή με Ελεύθερη Επιφάνεια> (βλ. NTUA D AH NV502 A - 2.4.1)

- Η σχέση είναι της μορφής: $A = y + \frac{\alpha}{y^2}$, A και α σταθερές

- Ο χειρισμός πεπλεγμένων σχέσεων στην περίπτωση υπολογισμού του ομοιόμορφου βάθους ροής σε αγωγούς σύνθετης διατομής, <Ροή με Ελεύθερη Επιφάνεια> (βλ. NTUA D AH NV502 A - 3.2.6)
- Η πεπλεγμένη ως προς y_0 σχέση είναι: $\phi(y_0) = C_0$, C_0 σταθερά
- Μέθοδοι β' τάξεως (τύπου Newton - Raphson)
 - Χαρακτηρίζονται από:
 - Τη σύγκριση των διαδοχικών αριθμητικών αποτελεσμάτων του **μεγέθους** του οποίου **χειριζόμαστε** τη **σύγκλιση**. Το **μέγεθος** το οποίο χρησιμοποιούμε ως **κριτήριο ελέγχου** της **σύγκλισης** έχει **ενσωματωθεί** στον **αλγόριθμο**.
 - Επομένως, η σύγκριση των **διαδοχικών τιμών απόκλισης** γίνεται με βάση **όριο**, το οποίο **συνδέεται** με αυτές καθαυτές τις ως άνω **διαδοχικές τιμές απόκλισης**.
 - Δεν υπάρχει ανάγκη εκτίμησης της **δεύτερης τιμής**, αυτή γίνεται όπως και όλες οι **επόμενες** προκύπτει από τον **αλγόριθμο**.
 - Ενδεικτικό παράδειγμα και πάλι η ως άνω σχέση Colebrook – White. Αντί να την υποκαταστήσουμε από τη μη πεπλεγμένη σχέση, είναι δυνατό να τη χρησιμοποιήσουμε ως αλγόριθμο διαδοχικών τιμών του f με αρχική τιμή αυτή την οποία δίνει η μη πεπλεγμένη σχέση!
 - Οι μέθοδοι *β' τάξεως* απαιτούν προσεκτικό χειρισμό, διότι **δεν** οδηγούν **πάντοτε** σε **σύγκλιση**. Όσες προτείνονται από το γράφοντα έχουν περάσει εξαντλητικές δοκιμές και μπορείτε να τις εμπιστευθείτε.

1.3 Ερωτήσεις κατανόησης και Εφαρμογές υπολογισμού

1.3.1 (μία μόνο απάντηση είναι ορθή)

	Η δυναμική συνεκτικότητα μ είναι μια ιδιότητα του ρευστού, η οποία:
	Εκφράζει την «αντίστασή» του στην επιβολή διατμητικής τάσης
	Εξαρτάται από την πίεση p και τη θερμοκρασία T
	Όταν σε ένα ρευστό παραμένει σταθερά ανεξάρτητη της ασκούμενης διατμητικής τάσης και της αντίστοιχης μεταβολής της γωνιακής παραμόρφωσης, τότε το ρευστό καλείται νευτώνειο
✓	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Η κινηματική συνεκτικότητα ν:
	Ταυτίζεται με τη δυναμική συνεκτικότητα μ , όταν το ρευστό κινείται
✓	Ορίζεται ως ο λόγος της δυναμικής συνεκτικότητας προς την πυκνότητα
	Είναι ανεξάρτητη από την πίεση p και τη θερμοκρασία T
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Κατά τη στρωτή ροή:
	Οι γειτονικές στρώσεις του ρευστού κινούνται σχηματίζοντας λείες και ευθείες γραμμές ροής
	Οι δυνάμεις συνεκτικότητας είναι μικρότερες από τις δυνάμεις αδράνειας
	Εμφανίζεται ανάμιξη μακροσκοπικής κλίμακας μεταξύ δυο γειτονικών στρώσεων
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
✓	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Κατά την τυρβώδη ροή:
✓	Τα ρευστά σωματίδια έχουν ακανόνιστη, σχεδόν τυχαία, διακυμαινόμενη κίνηση
	Οι δυνάμεις συνεκτικότητας είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις αδράνειας
	Ο αριθμός Reynolds είναι μεγαλύτερος από 2.000
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Κατά την τυρβώδη ροή:
	Υπάρχουν πρόσθετες τυρβώδεις τάσεις
	Προκαλείται μεγαλύτερη ανάμιξη της ροής
	Η κατανομή ταχυτήτων είναι περισσότερο ομοιόμορφη απ' ό,τι στη στρωτή ροή
✓	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Η ροή χαρακτηρίζεται ως μόνιμη:
	Όταν οι βασικές χρονικές παράγωγοι των ταχυτήτων ροής στις εξισώσεις ροής είναι ίσες με μηδέν
	Όταν ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος από 2.000
✓	Όταν η ροή δεν μεταβάλλεται με το χρόνο
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Η ροή χαρακτηρίζεται ως ομοιόμορφη:
✓	Όταν η ροή δεν μεταβάλλεται χωρικά
	Όταν οι βασικές χωρικές παράγωγοι των ταχυτήτων ροής στις εξισώσεις ροής είναι ίσες με μηδέν
	Όταν πραγματοποιείται υπό πίεση σε ένα σωλήνα
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

1.3.2 (μία μόνο απάντηση είναι ορθή)

	Οι εξισώσεις τις οποίες χρησιμοποιούμε στη μέθοδο της μονοδιάστατης ανάλυσης (ή όγκου ελέγχου) είναι:
	Η εξίσωση συνέχειας
	Η εξίσωση ποσότητας κίνησης
	Η εξίσωση ενέργειας
✓	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Οι βασικές μέθοδοι ανάλυσης ενός προβλήματος ροής ρευστού είναι:
	Η μέθοδος της αδιάστατης ανάλυσης
	Η μέθοδος της τρισδιάστατης ανάλυσης
✓	Η μέθοδος της μονοδιάστατης ανάλυσης (ή όγκου ελέγχου)
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Μια ροή χαρακτηρίζεται ως εξωτερική όταν:
	Όταν πραγματοποιείται υπό πίεση σε ένα σωλήνα
	Όταν δεν περιορίζεται καθόλου από στερεά όρια
✓	Όταν δεν περιορίζεται από στερεά όρια, απλώς επηρεάζεται κοντά σε αυτά
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Η παρουσία ενός στερεού ορίου στις εσωτερικές ή εξωτερικές ροές:
	Επηρεάζει τη ροή κοντά σε αυτό
	«Επιβάλλει» το μηδενισμό της ταχύτητας ροής στο όριο (φυσική οριακή συνθήκη)
	Επιβραδύνει το ρευστό, εξαιτίας των τριβών
✓	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Το πάχος δ του οριακού στρώματος, ορίζεται ως η κάθετη απόσταση από το στερεό όριο, μέχρι το σημείο όπου η ταχύτητα ροής είναι ίση με το:
	95% της εξωτερικής ταχύτητας V της ροής
✓	99% της εξωτερικής ταχύτητας V της ροής
	90% της εξωτερικής ταχύτητας V της ροής
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Στην εσωτερική περιοχή του οριακού στρώματος:
	Η ροή είναι στρωτή
	Η επίδραση της συνεκτικότητας μπορεί να αγνοηθεί, (δηλαδή μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το ρευστό είναι ιδεατό)
✓	Κυριαρχεί η συνεκτικότητα και δημιουργείται η κύρια αντίσταση στη ροή ενός βυθισμένου σώματος
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω
	Η ταχύτητα ροής στο στρωτό οριακό υπόστρωμα:
	Εξαρτάται από τις παραμέτρους μ , τ_w , ρ , γ , και δ
	Εκφράζεται από μία γραμμική συνάρτηση, όταν και η εξωτερική ροή είναι στρωτή
✓	Υπολογίζεται από το νόμο του τοιχώματος
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω
	Στη συγκλίνουσα ροή:
	Μειώνεται η μέση ταχύτητα ροής
	Συνήθως εμφανίζεται το φαινόμενο της αποκόλλησης
	Ο σχηματισμός στροβίλων, που απορροφούν ενέργεια από την ροή προκαλεί σημαντικές τοπικές απώλειες ενέργειας
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
✓	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΣΩΛΗΝΕΣ

Παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες οι οποίες αφορούν εις τις απώλειες ενέργειας σε ομοιόμορφη ροή: Είσοδος και μήκος ανάπτυξης ομοιόμορφης ροής σε σωλήνα - Απώλειες ενέργειας λόγω τριβών σε στρωτή και τυρβώδη ροή - Επίδραση της τραχύτητας των τοιχωμάτων. Ορίζονται η πραγματική και ισοδύναμη τραχύτητα και η μεταβολή τους, γήρανση των σωλήνων. Περιγράφεται αναλυτικώς ο υπολογισμός σωλήνων σε μόνιμη ομοιόμορφη ροή - γραμμικές απώλειες με αριθμητικές μεθόδους. Περιγράφεται συνοπτικώς ο υπολογισμός σωλήνων σε ανομοιόμορφη ροή - τοπικές απώλειες.

2.1 Βασικές έννοιες – Απώλειες ενέργειας σε Ομοιόμορφη ροή

2.1.1 Είσοδος σε σωλήνα – Μήκος εισόδου – Ανάπτυξη ομοιόμορφης ροής

- Η ροή από δεξαμενή (πολύ μεγάλη διατομή - πρακτικώς μηδενική ταχύτητα προσπέλασης προς τον αγωγό) εισέρχεται και αναπτύσσεται σε σωλήνα (πεπερασμένη διατομή και ταχύτητα προσπέλασης εντός του αγωγού).
- Στα στερεά όρια του σωλήνα αναπτύσσεται οριακό στρώμα, στο οποίο παρατηρείται μια σχετικά σημαντική πτώση της πίεσης - λόγω της μεταβολής της τιμής της ταχύτητας από μηδενική σε πεπερασμένη - και κατά συνέπεια (τοπική) απώλεια ενέργειας. Εξαιτίας του οριακού στρώματος η ροή είναι ανομοιόμορφη στην αρχή του σωλήνα και γίνεται ομοιόμορφη μετά από μια απόσταση L_e , η οποία καλείται **μήκος ανάπτυξης της ροής ή μήκος εισόδου**.
- Το μήκος εισόδου L_e εξαρτάται μόνο από τον αριθμό Reynolds:
 - Για στρωτή ροή (έως $R < 2.300$): $\frac{L_e}{D} = 0,06 \cdot R$ (6)
 - Για τυρβώδη ροή: $\frac{L_e}{D} = 4,40 \cdot R^{1/6}$ (7)
 - Συνδυάζοντας τις (3) και (7) προκύπτει ότι το μήκος εισόδου σε τυρβώδη ροή είναι της τάξης των $20 \cdot D \sim 40 \cdot D$. Είναι δηλαδή μακροσκοπικώς αμελητέο σε σχέση με τα μήκη των αγωγών στην πράξη - συνήθως $> 1.000 \cdot D$. Οι απώλειες στη μετάβαση δεξαμενή /σωλήνας λόγω ανομοιόμορφης ροής (τοπικές) είναι κατά συνέπεια λογιστικά μικρές έως αμελητέες σε σχέση με τις συνολικές απώλειες σε σύστημα αγωγών – υδραγωγείο (βλ. 2.4.1 και 2.4.2).

2.1.2 Απώλειες ενέργειας λόγω τριβών – Εξίσωση Darcy Weissbach

- Φαινόμενο γαλλογερμανικής συνέργειας περί το 1860!

- $h_f = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{2 \cdot g \cdot D}$ (8) σε αγωγό **σταθερής** - αμετάβλητης διαμέτρου **D** όπου:

- **h_f** είναι οι **απώλειες** λόγω **τριβών** κατά μήκος του σωλήνα – *γραμμικές*.
- **f** είναι ο **συντελεστής τριβών**.
- **V** είναι η μέση ταχύτητα στο σωλήνα.
- **L** είναι το μήκος του σωλήνα.
- **D** είναι η σταθερή – αμετάβλητη διάμετρος του σωλήνα.

- Συνδυάζοντας τις (2) και (8) προκύπτει: $h_f = f \cdot \frac{8 \cdot L \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5}$ (9)

- Οι σχέσεις (8) και (9) **ισχύουν ανεξαρτήτως** εάν η ροή είναι **τυρβώδης** ή **στρωτή**.

2.1.3 Συντελεστής τριβών f σε στρωτή ροή

- Σχέση **Nikuradse**: $f = \frac{64}{R}$ (10)

- Συνδυάζοντας τις (9) και (10) προκύπτει: $Q = \frac{\pi \cdot g \cdot h_f \cdot D^4}{128 \cdot L \cdot \nu}$ (11)

- και $D = \left(\frac{128 \cdot L \cdot \nu \cdot Q}{\pi \cdot g \cdot h_f} \right)^{0,25}$ (12)

- Οι παραπάνω σχέσεις (10), (11) και (12) έχουν **ελάχιστη πρακτική εφαρμογή** και παρατίθενται απλώς για λόγους εκπαιδευτικής πληρότητας!

2.1.4 Συντελεστής τριβών f σε τυρβώδη ροή

- Σχέση **Colebrook – White**: $\frac{1}{f^{0,5}} = -2 \cdot \log \left(\frac{0,27 \cdot k_s}{D} + \frac{2,51}{R \cdot f^{0,5}} \right)$ (13)

- Συνδυάζοντας τις (8) ή (9) και (10) προκύπτουν σχέσεις *απλώς πεπλεγμένες* ως προς τις απώλειες λόγω τριβών **h_f** και *διπλά πεπλεγμένες* ως προς τη διάμετρο **D**. Θα το χειρισθούμε στη συνέχεια (βλ. **2.3**).

- Εκτός από ήδη γνωστά μεγέθη στη (13) εμφανίζεται και η **ισοδύναμη τραχύτητα k_s** (βλ. 2.1.5).

- Για τις ανάγκες του <εδώ> μαθήματος θα **εφαρμόσουμε αποκλειστικώς** τις σχέσεις (8) ή (9) σε συνδυασμό με τις σχέσεις (10) ή (13). Εις το μάθημα <Αστικά Υδραυλικά Έργα> του 6^{ου} εξαμήνου θα διδαχθείτε και άλλες.

2.1.5 Επίδραση της τραχύτητας των τοιχωμάτων σε τυρβώδη ροή

- Στη διαμόρφωση της τιμής του συντελεστή τριβών **f** υπεισέρχονται δύο παράγοντες:
 - Η σχετική μέση **ταχύτητα** της **ροής**, μέσω του αριθμού Reynolds **R**.
Ο ρόλος της κινηματικής συνεκτικότητας **v** στα προβλήματα ενδιαφέροντος Υδραυλικού Μηχανικού είναι πολύ περιορισμένος, διότι το πεδίο μεταβολής των τιμών της είναι στην πράξη πολύ μικρό (καθαρό νερό – λύματα – νερό φορτισμένο με φερτές ύλες κ.λπ.)
 - Η **πραγματική τραχύτητα** της βρεχόμενης επιφάνειας των **τοιχωμάτων**.
 - Είναι προφανές ότι η βιομηχανική ή εργοταξιακή παραγωγή σωλήνων σωλήνων οδηγεί (αναλόγως του υλικού και μεθόδου κατεργασίας) στην ύπαρξη προεξοχών στη βρεχόμενη επιφάνεια του στερεού ορίου. Σε μικροσκοπική ή και μακροσκοπική κλίμακα (φανταστείτε μία ανεπένδυτη σήραγγα η οποία κατασκευάζεται με διάνοιξη μέσω χρήσης εκρηκτικών σε βραχώδες ή ημιβραχώδες έδαφος!) Οι προεξοχές αυτές έχουν κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά:
 - Μορφή: Λεπτές ή Στρογγυλευμένες
 - Κατανομή: Πυκνές ή Αραιές
 - Ποικιλότητα: Μορφής και Κατανομής
 - **Μήκος**: Μικρό ή Μεγάλο

Το χαρακτηριστικό: **Μήκος** έχει ιδιαίτερη σημασία, διότι συνδέεται με την ύπαρξη του **στρωτού οριακού υποστρώματος** (βλ. 1.1.4).

- Το **πάχος δ'** του στρωτού οριακού υποστρώματος σε σωλήνες μεταβάλλεται:

$$\delta' = \frac{4 \cdot 8^{0,5} \cdot D}{R \cdot f^{0,5}} \quad (14)$$

Για σταθερή D ο **f** μεταβάλλεται πολύ βραδύτερον του **R**, οπότε το πάχος δ' εξαρτάται κυρίως από τον **R**: **R**↑ → **δ'**↓ και **R**↓ → **δ'**↑

- Είναι προφανές ότι για τις ανάγκες υπολογισμού ροής σε σωλήνες του Μηχανικού η ανάλυση με μικροσκόπιο / φασματοσκόπιο / μαγνητικό τομογράφο / υπερηχογράφημα... είναι εκτός των υποχρεώσεων εφαρμογής των *Κανόνων Τέχνης και Επιστήμης*.
- Προς τούτο ορίστηκε και χρησιμοποιείται λογιστικά στην πράξη η **ισοδύναμη τραχύτητα k_s**:
 - Εκφράζει το τελικό αποτέλεσμα (απώλειες λόγω τριβών) της πραγματικής τραχύτητας στη ροή, ενοποιώντας τα ως άνω γεωμετρικά χαρακτηριστικά.
 - Προκύπτει από εργαστηριακές μετρήσεις τις οποίες ο κατασκευαστής – προμηθευτής των σωλήνων έχει διεξάγει και τεκμηριώσει.
 - Λαμβάνει κυρίως υπόψη το **μήκος** (αλλά και την κατανομή και μορφή) των προεξοχών:

- **Ισοδύναμη τραχύτητα k_s** είναι η πραγματική τραχύτητα σε πρότυπο σωλήνα επιστρωμένο με σφαιρικές κόκκους άμμου, ομοιομόρφως διανεμημένων, με διάμετρο ίση με το **μεταβλητό ϵ^* πάχος** του στρωτού οριακού υποστρώματος.
- Η **ισοδύναμη τραχύτητα k_s** και η πραγματική τραχύτητα σε πρότυπο σωλήνα επιστρωμένο με σφαιρικές κόκκους άμμου, δίνουν τον ίδιο συντελεστή τριβών **f** στην πλήρως τραχεία περιοχή.
- Η **ισοδύναμη τραχύτητα k_s** είναι **λογιστικό μέγεθος**

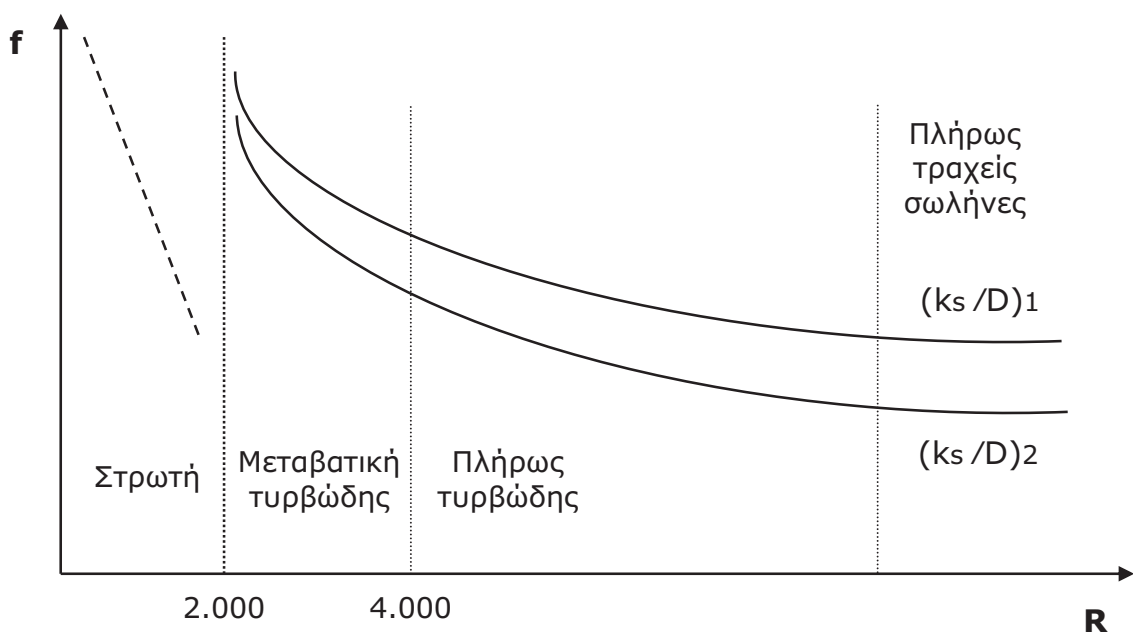
- **Εάν η πραγματική τραχύτητα k ενός αγωγού είναι πολύ μικρή:** $\frac{k}{\delta'} < 1$

Τότε και η **ισοδύναμη τραχύτητα** είναι **πολύ μικρή: $k_s \rightarrow 0$**

Ο αγωγός χαρακτηρίζεται ως **υδραυλικά λείος** ή απλώς **λείος** και στους υπολογισμούς λαμβάνεται: **$k_s = 0$**

- Προσοχή! Όταν ο **αγωγός** ορίζεται ως **υδραυλικά λείος ΔΕΝ** ισχύει κατ' ανάγκην ότι η **ροή** είναι **στρωτή** & απλώς μηδενίζεται ο όρος **k_s** εις την αντίστοιχη σχέση (13) της τυρβώδους ροής! (βλ. 2.1.4).
- Το λογιστικό μέγεθος ισοδύναμη τραχύτητα μεταβάλλεται λογιστικά με την **πάροδο** του **χρόνου**, όταν ο σωλήνας **γηράσκει** (βλ. 2.1.7).

2.1.6 Διερεύνηση της Σχέσης Colebrook – White (13), Διάγραμμα Moody



$$\bullet \quad \frac{1}{f^{0,5}} = -2 \cdot \log \left(\frac{0,27 \cdot k_s}{D} + \frac{2,51}{R \cdot f^{0,5}} \right)$$

- Θέτω: $A = \frac{0,27 \cdot k_s}{D}$ και $B = \frac{2,51}{R \cdot f^{0,5}} \rightarrow f = \frac{0,25}{\log^2(A + B)}$
- Θεωρώ ότι: $k_s / D = \text{σταθερό} \neq 0$ και $2.000 < R < \infty$ (πολύ μεγάλο)
- Εάν $R \rightarrow \infty$ (πολύ μεγάλο), τότε $B \rightarrow 0$ και $f = \frac{0,25}{\log^2(A)}$
 - Ο συντελεστής τριβής f επηρεάζεται κυρίως από το λόγο k_s / D
 - Οι **καμπύλες** με διαφορετικό k_s / D είναι **ευθείες** παράλληλες στον άξονα R
 - Ο σωλήνας συμπεριφέρεται ως υδραυλικώς **πλήρως τραχύς**
- Εάν $R \rightarrow 2.000$, τότε: $A \approx 0,0010 \sim 0,0050$, $B = \frac{25}{R} \approx 0,0125$ και $f = \frac{0,25}{\log^2(A + B)}$
 - Ο συντελεστής τριβής f επηρεάζεται κυρίως από το R
 - Οι **καμπύλες** με διαφορετικό k_s / D **συγκλίνουν** ασυμπτωτικά σε κατακόρυφη ευθεία – όριο στην περιοχή του R_{op}
- Στη μεγάλη πλειοψηφία των προβλημάτων στην πράξη το πεδίο τιμών είναι: $1,0 \cdot 10^5 < R < 1,2 \cdot 10^6$ και $0,0005 < \frac{k_s}{D} < 0,0020$ (πλην λείων σωλήνων)

Για τα παραπάνω πεδία τιμών δημιουργούμε έναν πρόχειρο – συνοπτικό πίνακα τιμών του f :

$k_s/D \rightarrow$ $R \downarrow$	0,0005	0,0010	0,0020
$1,0 \cdot 10^5$	0,020	0,022	0,025
$1,2 \cdot 10^6$	0,017	0,020	0,024

Είναι εμφανές ότι: $0,017 < f < 0,025 \rightarrow \bar{f} \approx 0,021$, θα το αξιοποιήσουμε!

- Στην περιοχή του κρίσιμου αριθμού Reynolds ο υπολογισμός του f μέσω των σχέσεων (10) – στρωτή ροή ή (13) – τυρβώδης ροή οδηγεί σε εντελώς διαφορετικές τιμές!

$k_s/D \rightarrow$ $R=2.000$	0,0005	0,0010	0,0020
(13) τυρβώδης	0,051	0,052	0,053
(10) στρωτή	0,032		

2.1.7 Γήρανση σωλήνων

- Η **εσωτερική επιφάνεια** των αγωγών μετά από πολυετή χρήση υφίσταται **αλλοιώσεις**, οι οποίες κυμαίνονται από **οξείδωση** έως **ισχυρή διάβρωση** σε συνδυασμό με ενδεχόμενες **αποθέσεις αλάτων**.
Επίδραση της **γήρανσης** είναι η **μείωση** της **παροχетеυτικότητας** των αγωγών.
- Τη χρονική **επίδραση** της **γήρανσης** χειριζόμαστε λογιστικώς ως **αύξηση** της **ισοδύναμης τραχύτητας**, ανεξαρτήτως εάν το πρωτογενές - φυσικοτεχνικό φαινόμενο αφορά σε:
 - ο αυξομειώσεις της τραχύτητας
 - ο μεταβολή της *ενεργού διαμέτρου* των αγωγών
- Συνήθως γίνεται δεκτή **σταθερή γραμμική αύξηση** της ισοδύναμης τραχύτητας με το χρόνο: $k_{st} = k_{s0} + a \cdot t$ (15), όπου:
 - ο k_{s0} : η **αρχική** ισοδύναμη τραχύτητα σχεδιασμού
 - ο k_{st} : η **προκύψασα** ισοδύναμη τραχύτητα μετά από t έτη λειτουργίας
 - ο a : ο **συντελεστής γήρανσης** σε m.m / έτος
- Ο υπολογισμός της k_{st} αποτελεί αντικείμενο του Προβλήματος **Л4** (βλ. 2.3.6)
- Προσοχή! δεχόμεθα γενικώς, ότι οι υδραυλικά λείοι σωλήνες δεν γηράσκουν ☹.

2.2 Ερωτήσεις κατανόησης και Εφαρμογές υπολογισμού

2.2.1 (μία μόνο απάντηση είναι ορθή)

	Όταν η ροή εισέρχεται από δεξαμενή στην αρχή ενός σωλήνα:
	Είναι ανομοιόμορφη όταν ο αριθμός Reynolds είναι μεγαλύτερος από $2 \cdot 10^5$
	Γίνεται ομοιόμορφη μετά από κάποιο μήκος, το οποίο καλείται μήκος εισόδου
	Γίνεται ομοιόμορφη μετά από κάποιο μήκος, το οποίο καλείται μήκος ανάπτυξης της ροής
✓	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Ένα στερεό όριο χαρακτηρίζεται υδραυλικά λείο όταν:
	Η ισοδύναμη τραχύτητα του είναι μηδενική
✓	Οι προεξοχές της επιφάνειας του k είναι «βυθισμένες» μέσα στο στρωτό οριακό υπόστρωμα, δηλ. $k < \delta'$
	Η ροή είναι στρωτή
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Η ισοδύναμη τραχύτητα μιας φυσικής επιφάνειας είναι ίση:
✓	Με τη διάμετρο ομοιόμορφων κόκκων άμμου που τοποθετούμε πάνω σε μια λεία επιφάνεια, ώστε να παρουσιάζει τις ίδιες απώλειες εξαιτίας τριβών με την εξεταζόμενη φυσική επιφάνεια
	Με τη διάμετρο ομοιόμορφων κόκκων άμμου που τοποθετούμε πάνω στην εξεταζόμενη φυσική επιφάνεια, ώστε να παρουσιάζει τις ίδιες απώλειες εξαιτίας τριβών με πρότυπη επιφάνεια
	Πρακτικά με το μέσο ύψος προεξοχών της εξεταζόμενης φυσικής επιφάνειας
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Σε ροή υπό πίεση σε σωλήνα η κατανομή των διατμητικών τάσεων:
	Λαμβάνει τη μέγιστη τιμή στον άξονα
	Η θέση της μέγιστης τιμής εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds
✓	Λαμβάνει τη μέγιστη τιμή στα τοιχώματα
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Σε στρωτή ροή υπό πίεση σε σωλήνα ο συντελεστής τριβών f:
	Γενικώς αυξάνει με την αύξηση του αριθμού Reynolds
	Είναι ανεξάρτητος του αριθμού Reynolds όταν ο σωλήνας είναι λείος
✓	Μειώνεται με την αύξηση του αριθμού Reynolds όταν ο σωλήνας είναι τραχύς
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Σε τυρβώδη ροή υπό πίεση σε σωλήνα ο συντελεστής τριβών f:
	Εξαρτάται μόνο από την ισοδύναμη τραχύτητα
	Εξαρτάται μόνο από τον αριθμό Reynolds
	Αυξάνει με την αύξηση του αριθμού Reynolds
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
✓	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Σε τυρβώδη ροή υπό πίεση σε λείο σωλήνα ο συντελεστής τριβών f:
	Υπολογίζεται από τη σχέση Nikuradse
	Εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα ροής
	Εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό Froude
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
✓	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Οι απώλειες λόγω τριβών σε ροή υπό πίεση σε σωλήνα, οι οποίες υπολογίζονται από τη σχέση Darcy-Weissbach:
	Είναι πάντοτε μικρότερες σε λείους σωλήνες
	Είναι γενικώς μικρότερες όταν η ροή είναι στρωτή
✓	Εξαρτώνται περισσότερο από τη διάμετρο του σωλήνα, παρά από την παροχή
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Το φαινόμενο της γήρανσης των σωλήνων οφείλεται σε:
✓	Οξείδωση της εσωτερικής επιφάνειάς τους
	Διάβρωση της εξωτερικής επιφάνειάς τους
	Κακή ποιότητα υλικών και κατασκευής
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Το φαινόμενο της γήρανσης των σωλήνων, όταν οφείλεται σε εναπόθεση αλάτων το χειριζόμαστε λογιστικά με:
✓	Αύξηση της τιμής της αρχικής ισοδύναμης τραχύτητας σχεδιασμού
	Μείωση της τιμής της αρχικής διαμέτρου σχεδιασμού
	Μείωση της τιμής την οποία θα πληρώσουμε για την προμήθειά τους
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Το φαινόμενο της γήρανσης των σωλήνων έχει μεγαλύτερη έκταση:
	Όταν ο σωλήνας δεν είναι λείος εκ κατασκευής
	Όταν το νερό το οποίο μεταφέρεται περιέχει φερτές ύλες
	Όταν το νερό το οποίο μεταφέρεται είναι όξινο
✓	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

2.3 Υπολογισμός σωλήνων σε μόνιμη ομοιόμορφη ροή

2.3.1 Ανακεφαλαίωση

Υπάρχει ένα σύνολο σχέσεων, οι οποίες συνδέουν:

- Γεωμετρικά και τεχνικά χαρακτηριστικά ενός σωλήνα: διάμετρος D , μήκος L , ισοδύναμη τραχύτητα k_s
- Με ιδιότητες και ποσότητες του ρευστού, το οποίο παροχετεύεται μέσα απ' αυτόν: Κινηματική συνεκτικότητα ν , παροχή Q
- Και με τις οφειλόμενες σε τριβές - γραμμικές - απώλειες ενέργειας: h_f

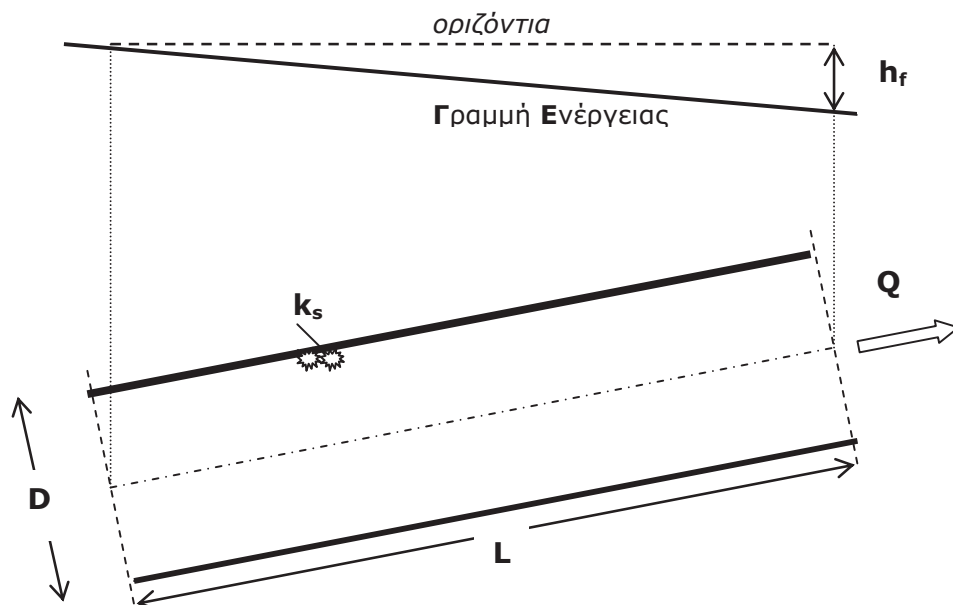
Εκτός από τα παραπάνω βασικά μεγέθη είναι απαραίτητοι:

- Ο αριθμός Reynolds R ως κριτήριο καθορισμού της ροής και ως λογιστικό μέγεθος
- Ο συντελεστής τριβών f , η ταχύτητα της ροής V και η κλίση της γραμμής ενέργειας: $J = h_f / L$

Επιπλέον χρησιμοποιούνται:

- Η υδραυλική ακτίνα: $R = \text{Εμβαδό διατομής} / \text{Περίμετρος}$
- Καθώς και συντελεστές οι οποίοι εμφανίζονται σε εμπειρικούς τύπους

Προσοχή! Τα παραπάνω μεγέθη δίδονται σε διάφορες μονάδες (κυρίως μήκους). Είναι **απαραίτητη η ενοποίηση** τους **πριν από οιονδήποτε υπολογισμό!** (κατά προτίμηση, των μονάδων μήκους σε m).



Σε πρώτη φάση θα χειριστούμε τον **υπολογισμό** των **βασικών μεγεθών**, τα **προβλήματα** αυτά συνήθως καλούνται **Θεμελιώδη**.

2.3.2 Εισαγωγή

Τα 3 + 1 βασικά προβλήματα, των οποίων η ροή επίλυσης παρουσιάζεται παρακάτω αφορούν εις τον προσδιορισμό ενός μεγέθους από τα : h_f , Q , D και k_s , όταν δίδονται τα υπόλοιπα καθώς και τα: L , v .

Σύνθετα προβλήματα, τα οποία θα χειρισθούμε εις τη συνέχεια αναλύονται – διασπώνται σε ένα σύνολο αποτελούμενο από επί μέρους θεμελιώδη προβλήματα.

Είναι επομένως **κρίσιμη** η ανάπτυξη **δύο δεξιοτήτων**:

- **Αναγνώριση** σε ένα πλέγμα – δίκτυο αγωγών εκείνων όπου τα δεδομένα αρκούν για την άμεση εφαρμογή κάποιου θεμελιώδους προβλήματος.
- **Αριθμητική επίλυση** θεμελιωδών προβλημάτων με ταχύτητα και ακρίβεια.

Υπενθυμίζεται ότι, εις τη **συντριπτική πλειοψηφία** των προβλημάτων ενδιαφέροντος *Υδραυλικού Μηχανικού* η **ροή** είναι **τουρβώδης**, επομένως ο έλεγχος για στρωτή ροή ☹ και η υπόδειξη επίλυσης παρατίθεται στη συνέχεια απλώς για λόγους εκπαιδευτικής πληρότητας!

Η **συνολική ακρίβεια** των υπολογισμών σε δίκτυα κλειστών αγωγών υπό πίεση είναι της τάξης του **5%**:

- Ημι-εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού και αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης
- Χρήση στους υπολογισμούς της οριζόντιας προβολής του μήκους των σωλήνων
- Συχνή παράλειψη των απωλειών (*τοπικών*) ανομοιομορφής ροής
- Λοιπές παραδοχές και στρογγυλεύσεις...

Εις τη **συντριπτική πλειοψηφία** των προβλημάτων ενδιαφέροντος *Υδραυλικού Μηχανικού* υπάρχουν - στην πράξη - **όρια τιμών**:

- Ταχύτητα **V** περίπου: **1,0** έως **3,5** m/ s
- Συντελεστής τριβών **f** περίπου: **0,010** έως **0,040** (για τουρβώδη ροή)
- Κατά τη διαδικασία υπολογισμού των θεμελιωδών - αλλά και των πλέον *συνθέτων* - προβλημάτων τα παραπάνω όρια τιμών χρησιμεύουν για τον **προληπτική επιβεβαίωση ακρίβειας** των υπολογισμών, προς αποφυγή χονδροειδούς λάθους.

Προσοχή! Οι αριθμητικές **μέθοδοι** υπολογισμού είναι γενικώς **αριθμητικώς ευαίσθητες**.

- Εις τα παρακάτω προβλήματα (και εις όσα ακολουθούν εις τη συνέχεια) πρέπει οι **σταθερές** και τα **ενδιάμεσα αποτελέσματα** να διατηρούνται – ως έχουν - σε **μνήμη** του υπολογιστή χειρός και να μην καταγράφονται απλώς με πεπερασμένη ακρίβεια.
- Αντιθέτως το **τελικό (στρογγυλευμένο) αποτέλεσμα** οφείλει να συνάδει με – *αντανακλά* την εξασφαλισμένη **συνολική ακρίβεια** των υπολογισμών, αλλά και των **τεχνικών περιορισμών εφαρμογής** της λύσης σε πραγματικές συνθήκες ☹

2.3.3 Υπολογισμός των γραμμικών απωλειών h_f - Πρόβλημα **Λ1** – 1^ο Θεμελιώδες
(εναλλακτικώς: υπολογισμός της κλίσης της Γραμμής Ενέργειας **J**)

- Υπολογίζουμε την ταχύτητα: $V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$ (2)
- Επιβεβαιώνουμε την τάξη μεγέθους: $V \approx 1,0 \sim 3,5$ m/s
- Υπολογίζουμε τον αριθμό Reynolds: $R = \frac{V \cdot D}{\nu}$ (3)
- Εξασφαλίζουμε (τυπικότητα) ότι η ροή είναι τυρβώδης: $R > 2.000$ (*)
- Υπολογίζουμε το συντελεστή τριβών: $f = \frac{0,25}{\log^2 \left[\frac{0,27 \cdot k_s}{D} + \left(\frac{7}{R} \right)^{0,9} \right]}$ (16)
- Επιβεβαιώνουμε την τάξη μεγέθους: $f \approx 0,010 \sim 0,040$

Σημείωση 1: εάν ο σωλήνας είναι υδραυλικώς λείος θέτουμε απλώς $\frac{k_s}{D} = 0$

Σημείωση 2: σε διαδικασίες υπολογισμού κάποιων τυπικών προβλημάτων αρκεί ο υπολογισμός του f , δηλαδή εφαρμόζεται ένα **τμήμα** του **Λ1**

- Υπολογίζουμε τις γραμμικές απώλειες: $h_f = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{2 \cdot g \cdot D}$ (8)
- Ή εναλλακτικώς την κλίση της Γραμμής Ενέργειας: $J = f \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g \cdot D}$ (17)

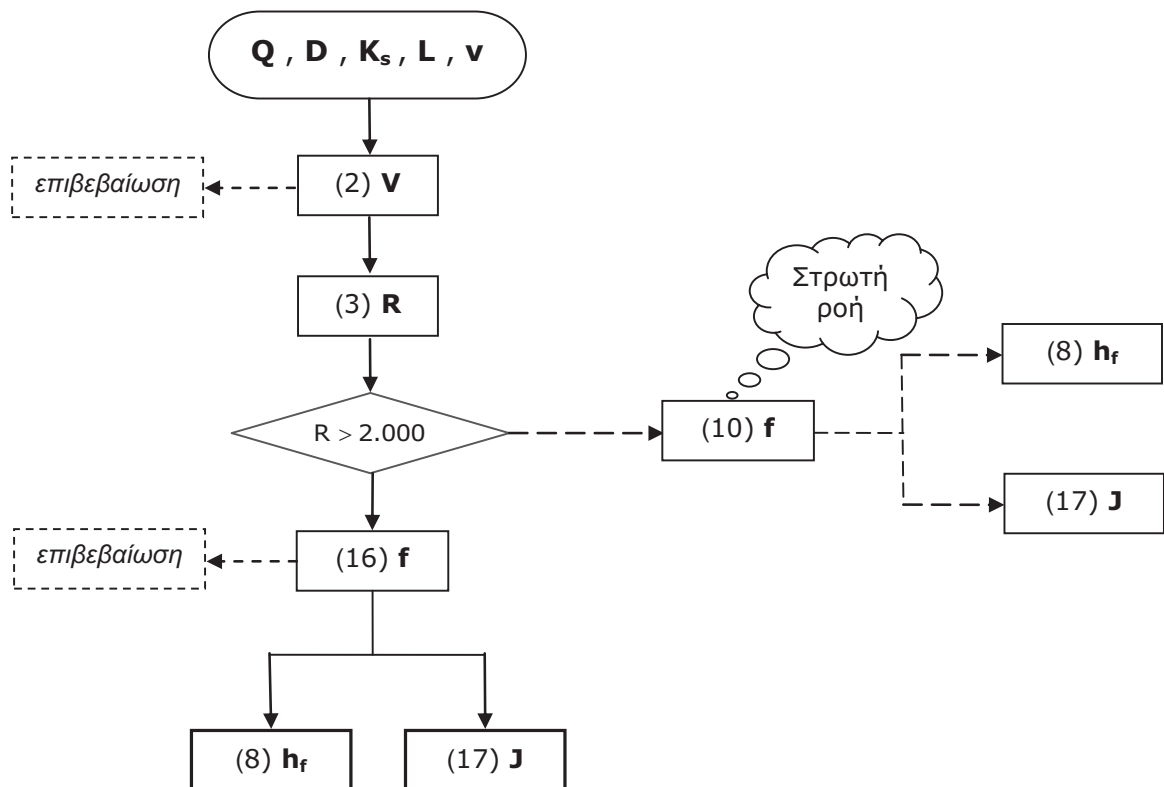
Σημείωση 3: σε διαδικασίες υπολογισμού κάποιων τυπικών προβλημάτων υπεισέρχεται ο υπολογισμός της J , δηλαδή εφαρμόζεται η **παραλλαγή** του **Λ1**

- (*) Εάν (σπανιότατα) η ροή είναι στρωτή ισχύει η σχέση (10) αντί της (16)
- Περιορισμοί: Η σχέση (16) αποτελεί μη- πεπλεγμένη – προσεγγιστική μορφή (βλ. 1.2.2) της σχέσης (13), με όρια εφαρμογής:
 - $0,000001 < \frac{k_s}{D} < 0,01$ και $5 \cdot 10^3 < R < 3 \cdot 10^8$
 - Δηλαδή ουσιαστικώς ισχύει για όλους τους σωλήνες - από υδραυλικώς λείους σωλήνες – έως πολύ τραχείς και για όλο το πεδίο τιμών R της πράξης

- Τυποποίηση διαδικασίας:

Q [m ³ /s]	D [m]	k_s [m]	L [m]	v [m ² /s]	V [m/s]	R	f	h_f [m] ή J

- Διάγραμμα ροής διαδικασίας:



2.3.4 Υπολογισμός της παροχής Q - Πρόβλημα Π2 – 2^ο Θεμελιώδες

- Υποθέτουμε (τυπικότητα) ότι η ροή είναι τυρβώδης: $R > 2.000$
- Υπολογίζουμε το (βοηθητικό) μέγεθος: $R \cdot f^{0,5} = \left(\frac{2 \cdot g \cdot h_f \cdot D}{L} \right)^{0,5} \cdot \frac{D}{v} \quad (18)$
- Υπολογίζουμε το μέγεθος: $\frac{1}{f^{0,5}} = -2 \cdot \log \left(\frac{0,27 \cdot k_s}{D} + \frac{2,51}{R \cdot f^{0,5}} \right) \quad (13)$

Σημείωση 1: εάν ο σωλήνας είναι υδραυλικώς λείος θέτουμε απλώς $\frac{k_s}{D} = 0$

- Επιβεβαιώνουμε την τάξη μεγέθους: $f \approx 0,010 \sim 0,040$
- Υπολογίζουμε την ταχύτητα: $V = \left(\frac{2 \cdot g \cdot h_f \cdot D}{L} \right)^{0,5} \cdot \frac{1}{f^{0,5}} \quad (19)$
- Επιβεβαιώνουμε την τάξη μεγέθους: $V \approx 1,0 \sim 3,5 \text{ m/s}$
- Υπολογίζουμε τον αριθμό Reynolds: $R = \frac{V \cdot D}{v} \quad (3)$
- Επαληθεύουμε (τυπικότητα) ότι η ροή είναι τυρβώδης: $R > 2.000 \quad (*)$
- Υπολογίζουμε την παροχή: $Q = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot V \quad (1)$

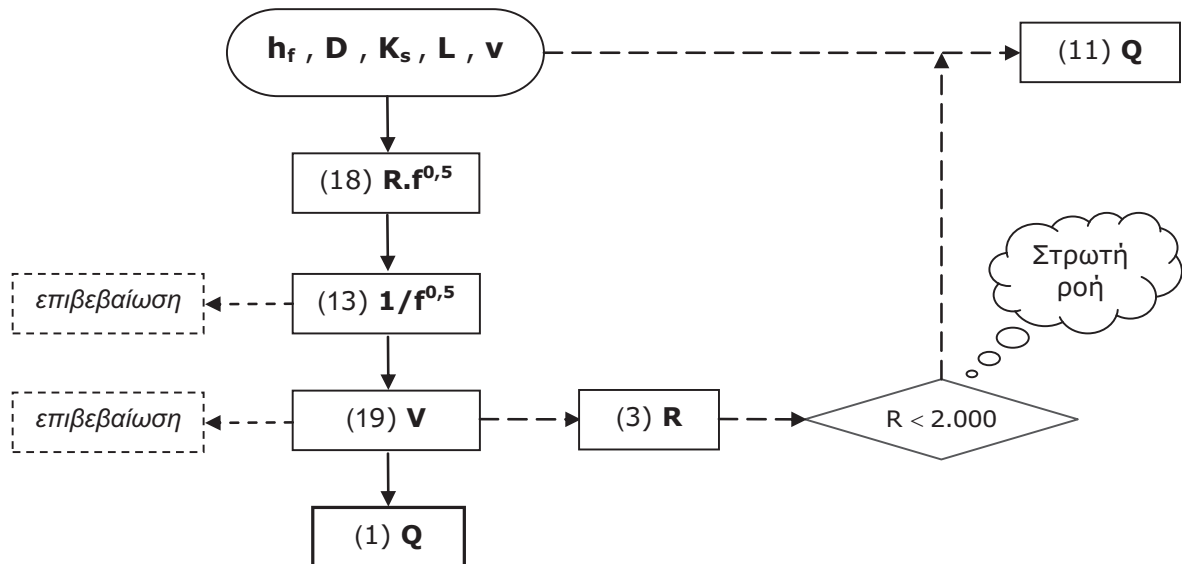
Σημείωση 2: ακολουθούμε πιστά την ως άνω διαδικασία και δεν πειραματιζόμαστε υπολογίζοντας τη V με άλλους τρόπους, οι οποίοι προκαλούν αριθμητική αστάθεια ☹.

- (*) Εάν (σπανιότητα) η ροή είναι στρωτή, ισχύει απ' ευθείας η σχέση (11)

- Τυποποίηση διαδικασίας:

h_f [m]	D [m]	k_s [m]	L [m]	ν [m ² /s]	$R \cdot f^{0,5}$	$1/f^{0,5}$	V [m/s]	Q [m ³ /s]

- Διάγραμμα ροής διαδικασίας:



2.3.5 Υπολογισμός της θεωρητικής διαμέτρου **D** - Πρόβλημα **Λ3 – 3^ο Θεμελιώδες**

Η σχέση είναι πεπλεγμένη ως προς D και λύνεται με διαδοχικές προσεγγίσεις. Η διαδικασία εξασφαλίζει ταχύτητα και εποπτεία του υπολογισμού. Είναι δε βεβαίως στατιστικώς ασφαλέστερη από τη χρήση απ' ευθείας πολύπλοκων τύπων ή /και προγραμματιζόμενων υπολογιστών χειρός!

- Υποθέτουμε (τυπικότερα) ότι η ροή είναι τυρβώδης: **$R > 2.000$**
- Προσδιορίζουμε τους σταθερούς συντελεστές της αριθμητικής μεθόδου:

$$C = \left(\frac{L \cdot Q^2}{h_f} \right)^{0,2} \quad (20)$$

$$A = 0,27 \cdot k_s \quad (21) \text{ εάν ο σωλήνας είναι υδραυλικώς λείος θέτουμε } A = 0$$

$$B = \frac{17}{30} \cdot v \cdot \left(\frac{L}{h_f} \right)^{0,5} \quad (22)$$

- Επιλέγουμε την 1^η τιμή εκκίνησης - εάν η τάξη μεγέθους δεν είναι γνωστή

$D_1 = a \cdot C$ από τον παρακάτω πίνακα:

k_s	0	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00~2,50	3,00	>3,00
a	0,255	0,275	0,285	0,295	0,305	0,310	0,315	0,320~0,325

- Υπολογίζουμε τη 2^η τιμή σύγκλισης από την επαναληπτική σχέση:

$$D_2 = \frac{0,46 \cdot C}{\left\{ -\log \left[\frac{A}{D_1} + \frac{B}{D_1^{1,5}} \right] \right\}^{0,4}} \quad (23)$$

Σημείωση 1: είναι δυνατό να γνωρίζουμε την τάξη μεγέθους της D: π.χ. εάν έχει προηγηθεί υπολογισμός με ελαφρώς διαφορετικά μεγέθη Q, h_f ή k_s

- Ελέγχουμε τη σύγκλιση $\frac{|D_2 - D_1|}{D_1} \leq 5\%$ (24)

Σημείωση 2: ο ακριβής υπολογισμός της θεωρητικής διαμέτρου έχει περιορισμένη σημασία. Αρκεί, όπως θα δούμε εις τη συνέχεια, ο προσδιορισμός της σε σχέση με το αντίστοιχο πεδίο υπαρκτών διαμέτρων εμπορίου.

- Υπολογίζουμε (σπανιότατα) την 3^η τιμή σύγκλισης από την επαναληπτική σχέση:

$$D_3 = \frac{0,46 \cdot C}{\left\{ -\log \left[\frac{A}{D_2} + \frac{B}{D_2^{1.5}} \right] \right\}^{0,4}}$$

- Επανελέγχουμε (σπανιότατα) τη σύγκλιση $\frac{|D_3 - D_2|}{D_2} \leq 5\%$

- Υπολογίζουμε την ταχύτητα: $V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$ (2)

- Επιβεβαιώνουμε την τάξη μεγέθους: $V \approx 1,0 \sim 3,5$ m/s

- Υπολογίζουμε (τυπικότητα) τον αριθμό Reynolds: $R = \frac{V \cdot D}{\nu}$ (3)

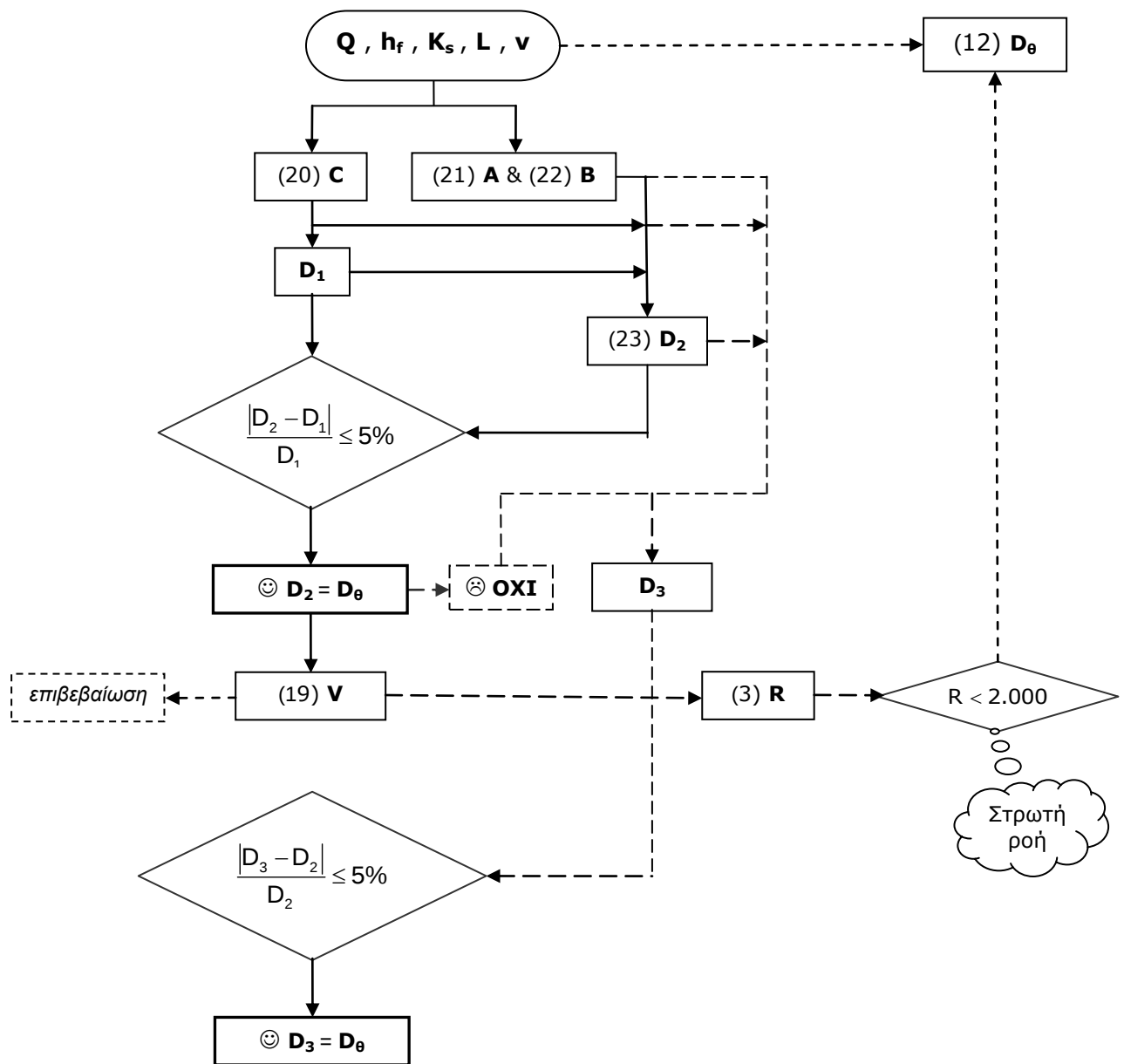
- Επαληθεύουμε (τυπικότητα) ότι η ροή είναι τυρβώδης: $R > 2.000$ (*)

- (*) Εάν (σπανιότατα) η ροή είναι στρωτή, ισχύει απ' ευθείας η σχέση (12)

- Τυποποίηση διαδικασίας:

J= h_f / L	Q [m ³ /s]	k_s [m]	ν.10⁶ [m ² /s]	C	A ·10 ³	B ·10 ⁻⁶	D_i [m]	δD [%] V [m/s]	D_θ [mm]

- Διάγραμμα ροής διαδικασίας:



- Διάμετροι σωλήνων εμπορίου:

- οι υπολογισμούς χρησιμοποιούμε την τιμή της εσωτερικής διαμέτρου, η οποία διαφέρει από την ονομαστική.
- Οι τιμές αυτές διαφέρουν αναλόγως του υλικού κατασκευής του σωλήνα. (Περισσότερα εις το μάθημα <Αστικά Υδραυλικά Έργα> του 6^{ου} εξαμήνου).
- Για τις ανάγκες του <εδώ> μαθήματος θα δεχθούμε - εφαρμόσουμε τις στρογγυλεμένες τιμές εσωτερικής διαμέτρου του παρακάτω πίνακα.

D [m m]	100	125	150	175	200	250	300	350	400	500	600
------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

2.3.6 Υπολογισμός της ισοδύναμης τραχύτητας k_s - Πρόβλημα **Λ4**

(έχει εφαρμογή εις την περίπτωση χειρισμού του φαινομένου γήρανσης βλ. 2.1.7)

Σημείωση 1: έχει εφαρμογή μόνον όταν η ροή είναι τυρβώδης: $R > 2.000$ και βεβαίως μόνο σε αρχικώς τραχείς σωλήνες ☼ (βλ. 2.1.7)

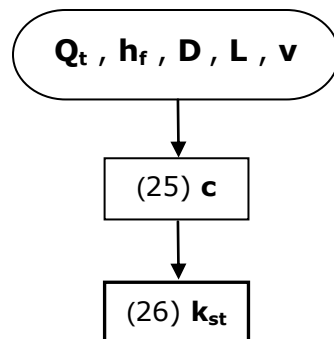
- Υπολογίζουμε το (βοηθητικό) μέγεθος: $c = 0,57 - 0,144 \left(\frac{L \cdot Q_t^2}{h_f \cdot D^5} \right)^{0,5}$ (25)

- Υπολογίζουμε το $k_{st} = \left[10^c - 17,225 \left(\frac{D \cdot v}{Q} \right)^{0,9} \right] \cdot D$ (26)

- Τυποποίηση διαδικασίας:

Q_t [m ³ /s]	h_f [m]	D [m]	L [m]	v [m ² /s]	c	k_{st} [m]	k_{st} [mm]

- Διάγραμμα ροής διαδικασίας:



Για αριθμητικές εφαρμογές των Προβλημάτων Λ1, Λ2, Λ3 και Λ4 βλ. 2.5

2.3.7 Πίνακες Υπολογισμού

- Οι Πίνακες έχουν κατασκευασθεί με χρήση της σχέσης (16) – για την αρχική τιμή του συντελεστή τριβής **f** και δύο επιπλέον *περιστροφές* εις τη σχέση (13).
- Χρησιμοποιήθηκε ως βασική παράμετρος η αδιάστατη τιμή της κλίσης της Γραμμής Ενέργειας **J**, ως συνάρτηση των τιμών της διαμέτρου **D** και της παροχής **Q** του σωλήνα.
- Ισχύουν - εκ κατασκευής - μόνο για το πεδίο επιτρεπομένων τιμών της ταχύτητας του σωλήνα **V** (βλ. 2.3.1)
- Οι τιμές σε γκρίζα περιοχή με *πλάγια γραφή* είναι εκτός του ως άνω πεδίου ταχυτήτων, αλλά είναι χρήσιμες για τη χρήση των Πινάκων (γραμμική παρεμβολή βλ. 2.3.8)
- Οι επί μέρους Πίνακες έχουν κατασκευασθεί για δεδομένη – σταθερή ισοδύναμη τραχύτητα **k_s** - τιμές **k_s** σε m.m
 - Η κλιμάκωση των τιμών της διαμέτρου **D** ακολουθεί την τυποποίηση του εδαφίου 2.3.5 - τιμές **D** σε m.m
 - Η κλιμάκωση των τιμών της παροχής **Q** είναι ανά 25 lt /s - τιμές **Q** σε lt /s.
- Οι Πίνακες είναι χρήσιμοι – χρηστικοί για την επίλυση των Προβλημάτων **Π1** και **Π2** (βλ. 2.3.8) **και** των **συνδεδεμένων** με αυτά Προβλημάτων τα οποία θα χειριστούμε εις τη συνέχεια.
- Προς το παρόν **δεν** είναι **εύχρηστοι** (ευελπιστώ να βελτιωθούν εις την επόμενη έκδοση Β) για την επίλυση των Προβλημάτων **Π3** και **Π4**, αλλά είναι δυνατό να χρησιμεύσουν ως επαλήθευση και αποφυγή χονδροειδών λαθών κατά τις αντίστοιχες αριθμητικές διαδικασίες υπολογισμού 2.3.5 και 2.3.6

$K_s = 0$

1000											
950											
900											
850											
800											
750											
700											
650											
600											
550											
500											
450									0,0181940		
425									0,0163854		
400									0,0146639		
375									0,0130302		
350								0,0218890	0,0114853		
325								0,0191128	0,0100299		
300								0,0165098	0,0086652		
275								0,0140821	0,0073922		
250							0,0249009	0,0118319	0,0062121		
225							0,0205398	0,0097619	0,0051263		
200							0,0165652	0,0078749	0,0041363		
175						0,0312910	0,0129841	0,0061743	0,0032439		
150						0,0236191	0,0098045	0,0046640	0,0024511		
125					0,0496967	0,0169422	0,0070363	0,0033485	0,0017605		
100				0,0629992	0,0330903	0,0112891	0,0046914	0,0022338	0,0011750		
75			0,0784363	0,0373116	0,0196091	0,0066964	0,0027851	0,0013271			
50	0,2647226	0,0903129	0,0375311	0,0178703	0,0093997	0,0032146	0,0013386				
25	0,0751973	0,0257167	0,0107090	0,0051081	0,0026911	0,0009228					
$Q \uparrow$ $D \rightarrow$	100	125	150	175	200	250	300	350	400	500	600

K_s = 0,25

1000											0,0173651
950											0,0156870
900											0,0140942
850											0,0125865
800											0,0111639
750											0,0098266
700										0,0220454	0,0085745
650										0,0190350	0,0074075
600										0,0162453	0,0063258
550										0,0136764	0,0053292
500										0,0113282	0,0044178
450									0,0292482	0,0092007	0,0035917
425									0,0261164	0,0082198	0,0032105
400									0,0231618	0,0072940	0,0028507
375									0,0203844	0,0064235	0,0025122
350								0,0355719	0,0177841	0,0056081	0,0021950
325								0,0307138	0,0153610	0,0048479	0,0018991
300								0,0262119	0,0131150	0,0041429	0,0016245
275								0,0220663	0,0110462	0,0034931	0,0013712
250							0,0407013	0,0182770	0,0091547	0,0028985	
225							0,0330351	0,0148441	0,0074403	0,0023592	
200							0,0261675	0,0117674	0,0059031	0,0018750	
175						0,0518461	0,0200985	0,0090470	0,0045431	0,0014461	
150						0,0382064	0,0148281	0,0066830	0,0033604		
125					0,0851338	0,0266430	0,0103564	0,0046754	0,0023549		
100				0,1097913	0,0547094	0,0171559	0,0066834	0,0030242	0,0015268		
75			0,1388324	0,0620820	0,0309800	0,0097454	0,0038094	0,0017297			
50	0,5193150	0,1611755	0,0621789	0,0278730	0,0139460	0,0044119	0,0017347				
25	0,1311917	0,0409321	0,0158848	0,0071661	0,0036092	0,0011570					
Q ↑ D →	100	125	150	175	200	250	300	350	400	500	600

K_s = 0,50

1000											0,0201605
950											0,0182041
900											0,0163474
850											0,0145906
800											0,0129336
750											0,0113764
700										0,0256823	0,0099190
650										0,0221607	0,0085614
600										0,0188985	0,0073037
550										0,0158959	0,0061458
500										0,0131529	0,0050877
450									0,0342225	0,0106693	0,0041294
425									0,0305426	0,0095248	0,0036877
400									0,0270720	0,0084453	0,0032709
375									0,0238106	0,0074306	0,0028791
350								0,0417398	0,0207584	0,0064808	0,0025123
325								0,0360158	0,0179154	0,0055958	0,0021704
300								0,0307137	0,0152816	0,0047758	0,0018535
275								0,0258335	0,0128571	0,0040206	0,0015616
250							0,0479015	0,0213751	0,0106417	0,0033304	
225							0,0388416	0,0173386	0,0086356	0,0027050	
200							0,0307304	0,0137239	0,0068387	0,0021445	
175						0,0612656	0,0235679	0,0105311	0,0052510	0,0016489	
150						0,0450830	0,0173541	0,0077602	0,0038725		
125					0,1012115	0,0313768	0,0120889	0,0054112	0,0027032		
100				0,1309916	0,0649144	0,0201469	0,0077724	0,0034841	0,0017432		
75			0,1663079	0,0738848	0,0366435	0,0113935	0,0044046	0,0019789			
50	0,6305752	0,1939386	0,0742122	0,0330150	0,0163990	0,0051165	0,0019856				
25	0,1584989	0,0488887	0,0187711	0,0083826	0,0041811	0,0013163					
Q ↑ D →	100	125	150	175	200	250	300	350	400	500	600

K_s = 0,75

1000											0,0221860
950											0,0200297
900											0,0179837
850											0,0160478
800											0,0142221
750											0,0125066
700										0,0283270	0,0109013
650										0,0244369	0,0094062
600										0,0208340	0,0080213
550										0,0175183	0,0067467
500										0,0144897	0,0055822
450									0,0378565	0,0117483	0,0045279
425									0,0337799	0,0104853	0,0040421
400									0,0299353	0,0092940	0,0035838
375									0,0263230	0,0081746	0,0031531
350								0,0462582	0,0229428	0,0071270	0,0027499
325								0,0399053	0,0197948	0,0061511	0,0023743
300								0,0340214	0,0168790	0,0052471	0,0020263
275								0,0286066	0,0141953	0,0044148	0,0017058
250							0,0531979	0,0236607	0,0117437	0,0036543	
225							0,0431215	0,0191838	0,0095244	0,0029656	
200							0,0341020	0,0151760	0,0075372	0,0023488	
175						0,0682247	0,0261395	0,0116371	0,0057822	0,0018037	
150						0,0501783	0,0192339	0,0085672	0,0042593		
125					0,1131378	0,0348983	0,0133853	0,0059664	0,0029686		
100				0,1467658	0,0725132	0,0223848	0,0085936	0,0038346	0,0019101		
75			0,1868371	0,0827088	0,0408867	0,0126378	0,0048590	0,0021717			
50	0,7144111	0,2185696	0,0832648	0,0368944	0,0182580	0,0056573	0,0021813				
25	0,1792554	0,0549510	0,0209832	0,0093227	0,0046274	0,0014435					
Q ↑ D →	100	125	150	175	200	250	300	350	400	500	600

K_s = 1,00

1000											0,0238345
950											0,0215162
900											0,0193165
850											0,0172354
800											0,0152728
750											0,0134288
700										0,0304852	0,0117034
650										0,0262956	0,0100966
600										0,0224155	0,0086084
550										0,0188449	0,0072388
500										0,0155839	0,0059877
450									0,0408328	0,0126325	0,0048552
425									0,0364323	0,0112728	0,0043334
400									0,0322826	0,0099906	0,0038413
375									0,0283837	0,0087857	0,0033788
350								0,0499668	0,0247356	0,0076582	0,0029460
325								0,0430995	0,0213383	0,0066081	0,0025428
300								0,0367395	0,0181919	0,0056354	0,0021693
275								0,0308870	0,0152962	0,0047400	0,0018254
250							0,0575578	0,0255419	0,0126514	0,0039221	
225							0,0466473	0,0207042	0,0102575	0,0031815	
200							0,0368822	0,0163740	0,0081143	0,0025184	
175						0,0739724	0,0282626	0,0125511	0,0062220	0,0019326	
150						0,0543913	0,0207885	0,0092356	0,0045804		
125					0,1230244	0,0378146	0,0144598	0,0064275	0,0031897		
100				0,1598755	0,0788219	0,0242423	0,0092765	0,0041269	0,0020499		
75			0,2039544	0,0900558	0,0444179	0,0136745	0,0052387	0,0023336			
50	0,7848779	0,2391981	0,0908327	0,0401360	0,0198124	0,0061111	0,0023464				
25	0,1967600	0,0600549	0,0228465	0,0101162	0,0050054	0,0015522					
Q ↑ D →	100	125	150	175	200	250	300	350	400	500	600

K_s = 1,25

1000											0,0252523
950											0,0227950
900											0,0204634
850											0,0182575
800											0,0161774
750											0,0142231
700										0,0323456	0,0123945
650										0,0278982	0,0106917
600										0,0237796	0,0091147
550										0,0199898	0,0076634
500										0,0165287	0,0063379
450									0,0434059	0,0133963	0,0051381
425									0,0387259	0,0119534	0,0045854
400									0,0343128	0,0105927	0,0040641
375									0,0301665	0,0093142	0,0035742
350								0,0531786	0,0262872	0,0081179	0,0031158
325								0,0458666	0,0226747	0,0070038	0,0026889
300								0,0390951	0,0193291	0,0059718	0,0022934
275								0,0328641	0,0162504	0,0050221	0,0019293
250							0,0613426	0,0271736	0,0134386	0,0041545	
225							0,0497093	0,0220237	0,0108936	0,0033691	
200							0,0392980	0,0174143	0,0086156	0,0026660	
175						0,0789756	0,0301087	0,0133455	0,0066044	0,0020450	
150						0,0580608	0,0221414	0,0098172	0,0048601		
125					0,1316585	0,0403568	0,0153960	0,0068295	0,0033827		
100				0,1713492	0,0843356	0,0258636	0,0098726	0,0043823	0,0021722		
75			0,2189763	0,0964923	0,0475081	0,0145811	0,0055711	0,0024756			
50	0,8471619	0,2573663	0,0974835	0,0429813	0,0211760	0,0065094	0,0024917				
25	0,2122585	0,0645624	0,0244904	0,0108164	0,0053392	0,0016485					
Q ↑ D →	100	125	150	175	200	250	300	350	400	500	600

K_s = 1,50

1000											0,0265118
950											0,0239311
900											0,0214825
850											0,0191660
800											0,0169816
750											0,0149293
700										0,0340015	0,0130092
650										0,0293250	0,0112211
600										0,0249943	0,0095652
550										0,0210094	0,0080414
500										0,0173704	0,0066497
450									0,0457019	0,0140771	0,0053902
425									0,0407728	0,0125602	0,0048100
400									0,0361249	0,0111297	0,0042627
375									0,0317581	0,0097857	0,0037486
350								0,0560491	0,0276726	0,0085281	0,0032674
325								0,0483400	0,0238682	0,0073570	0,0028193
300								0,0412010	0,0203450	0,0062723	0,0024042
275								0,0346320	0,0171030	0,0052741	0,0020222
250							0,0647317	0,0286332	0,0141422	0,0043623	
225							0,0524520	0,0232044	0,0114626	0,0035370	
200							0,0414625	0,0183457	0,0090642	0,0027981	
175						0,0834664	0,0317634	0,0140571	0,0069469	0,0021457	
150						0,0613558	0,0233546	0,0103386	0,0051108		
125					0,1394309	0,0426407	0,0162362	0,0071902	0,0035559		
100				0,1816973	0,0893014	0,0273212	0,0104081	0,0046118	0,0022823		
75			0,2325564	0,1023007	0,0502934	0,0153973	0,0058703	0,0026035			
50	0,9038295	0,2738412	0,1035010	0,0455520	0,0224069	0,0068689	0,0026229				
25	0,2263743	0,0686567	0,0259815	0,0114512	0,0056420	0,0017361					
Q ↑ D →	100	125	150	175	200	250	300	350	400	500	600

K_s = 1,75

1000											0,0276548
950											0,0249622
900											0,0224075
850											0,0199906
800											0,0177116
750											0,0155705
700										0,0355067	0,0135673
650										0,0306221	0,0117020
600										0,0260988	0,0099745
550										0,0219368	0,0083849
500										0,0181360	0,0069332
450									0,0477936	0,0146966	0,0056194
425									0,0426378	0,0131123	0,0050142
400									0,0377761	0,0116184	0,0044435
375									0,0332086	0,0102148	0,0039072
350								0,0586678	0,0289353	0,0089016	0,0034054
325								0,0505968	0,0249562	0,0076786	0,0029381
300								0,0431227	0,0212713	0,0065460	0,0025052
275								0,0362456	0,0178806	0,0055037	0,0021069
250							0,0678290	0,0299656	0,0147841	0,0045517	
225							0,0549588	0,0242825	0,0119818	0,0036900	
200							0,0434414	0,0191964	0,0094736	0,0029187	
175						0,0875791	0,0332766	0,0147073	0,0072597	0,0022377	
150						0,0643740	0,0244646	0,0108152	0,0053399		
125					0,1465673	0,0447335	0,0170052	0,0075201	0,0037144		
100				0,1912149	0,0938623	0,0286575	0,0108986	0,0048220	0,0023830		
75			0,2450729	0,1076451	0,0528530	0,0161461	0,0061447	0,0027208			
50	0,9563627	0,2890668	0,1090503	0,0479191	0,0235393	0,0071992	0,0027435				
25	0,2394693	0,0724448	0,0273588	0,0120370	0,0059213	0,0018169					
Q ↑ D →	100	125	150	175	200	250	300	350	400	500	600

K_s = 2,00

1000											0,0287078
950											0,0259122
900											0,0232597
850											0,0207505
800											0,0183844
750											0,0161615
700										0,0368955	0,0140818
650										0,0318190	0,0121452
600										0,0271180	0,0103519
550										0,0227926	0,0087017
500										0,0188428	0,0071947
450									0,0497274	0,0152685	0,0058309
425									0,0443620	0,0136222	0,0052027
400									0,0393028	0,0120697	0,0046103
375									0,0345499	0,0106112	0,0040537
350								0,0610918	0,0301031	0,0092465	0,0035328
325								0,0526859	0,0259625	0,0079758	0,0030478
300								0,0449018	0,0221282	0,0067989	0,0025986
275								0,0377397	0,0186000	0,0057159	0,0021851
250							0,0707005	0,0311994	0,0153780	0,0047268	
225							0,0572832	0,0252810	0,0124623	0,0038316	
200							0,0452764	0,0199844	0,0098527	0,0030303	
175						0,0913991	0,0346801	0,0153098	0,0075494	0,0023229	
150						0,0671780	0,0254943	0,0112570	0,0055522		
125					0,1532117	0,0466782	0,0177190	0,0078261	0,0038613		
100				0,2000899	0,0981097	0,0298998	0,0113541	0,0050170	0,0024765		
75			0,2567665	0,1126301	0,0552375	0,0168426	0,0063997	0,0028298			
50	1,0057049	0,3033263	0,1142369	0,0501283	0,0245950	0,0075069	0,0028558				
25	0,2517750	0,0759953	0,0286476	0,0125846	0,0061822	0,0018924					
Q ↑ D →	100	125	150	175	200	250	300	350	400	500	600

K_s = 2,25

1000											0,0296887
950											0,0267972
900											0,0240538
850											0,0214585
800											0,0190113
750											0,0167122
700										0,0381911	0,0145612
650										0,0329356	0,0125584
600										0,0280690	0,0107037
550										0,0235912	0,0089970
500										0,0195023	0,0074385
450									0,0515347	0,0158023	0,0060282
425									0,0459736	0,0140980	0,0053785
400									0,0407299	0,0124910	0,0047659
375									0,0358036	0,0109812	0,0041903
350								0,0633598	0,0311948	0,0095687	0,0036517
325								0,0546407	0,0269033	0,0082533	0,0031502
300								0,0465667	0,0229293	0,0070351	0,0026857
275								0,0391379	0,0192727	0,0059142	0,0022582
250							0,0733909	0,0323542	0,0159335	0,0048905	
225							0,0594613	0,0262157	0,0129118	0,0039639	
200							0,0469962	0,0207222	0,0102074	0,0031346	
175						0,0949846	0,0359957	0,0158740	0,0078205	0,0024025	
150							0,0698102	0,0264597	0,0116708	0,0057510	
125					0,1594619	0,0485041	0,0183883	0,0081128	0,0039989		
100				0,2084502	0,1021058	0,0310664	0,0117814	0,0051999	0,0025642		
75			0,2678013	0,1173270	0,0574816	0,0174971	0,0066391	0,0029321			
50	1,0524985	0,3168125	0,1191327	0,0522107	0,0255891	0,0077962	0,0029613				
25	0,2634493	0,0793554	0,0298653	0,0131014	0,0064283	0,0019636					
Q ↑ D →	100	125	150	175	200	250	300	350	400	500	600

K_s = 2,50

1000											0,0306104
950											0,0276288
900											0,0247999
850											0,0221238
800											0,0196004
750											0,0172298
700										0,0394100	0,0150119
650										0,0339863	0,0129468
600										0,0289639	0,0110344
550										0,0243428	0,0092747
500										0,0201231	0,0076678
450									0,0532380	0,0163047	0,0062137
425									0,0474925	0,0145460	0,0055439
400									0,0420749	0,0128876	0,0049123
375									0,0369854	0,0113296	0,0043188
350								0,0654995	0,0322238	0,0098719	0,0037636
325								0,0564851	0,0277902	0,0085146	0,0032465
300								0,0481377	0,0236846	0,0072576	0,0027677
275								0,0404573	0,0199070	0,0061009	0,0023270
250							0,0759326	0,0334440	0,0164573	0,0050446	
225							0,0615190	0,0270978	0,0133356	0,0040886	
200							0,0486211	0,0214187	0,0105420	0,0032329	
175						0,0983773	0,0372388	0,0164066	0,0080762	0,0024776	
150						0,0723010	0,0273720	0,0120615	0,0059385		
125					0,1653879	0,0502322	0,0190209	0,0083836	0,0041288		
100				0,2163876	0,1058952	0,0321708	0,0121854	0,0053727	0,0026470		
75			0,2782948	0,1217869	0,0596100	0,0181168	0,0068656	0,0030288			
50	1,0972032	0,3296638	0,1237895	0,0541887	0,0265323	0,0080703	0,0030613				
25	0,2746056	0,0825586	0,0310243	0,0135928	0,0066621	0,0020312					
Q ↑ D →	100	125	150	175	200	250	300	350	400	500	600

2.3.8 Υπολογισμός μέσω **Πινάκων**

Πρόβλημα **Λ1** (κλίση της Γραμμής Ενέργειας **J** ή των γραμμικών απωλειών **h_f**)

- Επιλέγουμε τον Πίνακα με την ισοδύναμη τραχύτητα **k_s** του σωλήνα
- Επικεντρώνουμε στη στήλη με τη διάμετρο **D** του σωλήνα
- Εντοπίζουμε (στη στήλη αυτή) τη μικρότερη **Q₁** και μεγαλύτερη **Q₂** παροχές, οι οποίες περιλαμβάνουν τη δεδομένη παροχή Q και τις αντίστοιχες κλίσεις της Γ.Ε. **J₁** και **J₂**
- Υπολογίζουμε την κλίση **J** από τη σχέση: $J = J_1 + [40 \cdot (J_2 - J_1) \cdot (Q - Q_1)]$
- Υπολογίζουμε εναλλακτικώς τις γραμμικές απώλειες: $h_f = J \cdot L$
- Τυποποίηση διαδικασίας:

k_s [mm]	D [mm]	Q [m ³ /s]	Q₂ Q₁	J₂ J₁	J	L [m]	h_f [m]

Πρόβλημα **Λ2** (παροχή **Q**)

- Επιλέγουμε τον Πίνακα με την ισοδύναμη τραχύτητα **k_s** του σωλήνα
- Επικεντρώνουμε στη στήλη με τη διάμετρο **D** του σωλήνα
- Εντοπίζουμε (στη στήλη αυτή) τη μικρότερη **J₁** και μεγαλύτερη **J₂** κλίσεις της Γ.Ε., οι οποίες περιλαμβάνουν τη δεδομένη κλίση της Γ.Ε. J και τις αντίστοιχες παροχές **Q₁** και **Q₂**
- Υπολογίζουμε την παροχή **Q** από τη σχέση: $Q = Q_1 + \frac{(J - J_1)}{40 \cdot (J_2 - J_1)}$
- Τυποποίηση διαδικασίας:

k_s [mm]	D [mm]	h_f [m]	L [m]	J	J₂ J₁	Q₂ Q₁	Q [m ³ /s]

Για αριθμητικές εφαρμογές των Προβλημάτων Λ1 και Λ2 βλ. 2.5

2.4 Απώλειες ενέργειας σε Ανομοιόμορφη ροή

2.4.1 Εισαγωγή

- Οιαδήποτε **γεωμετρική μεταβολή** σε ομοιόμορφο αγωγό συνεπάγεται **διατάραξη** των χαρακτηριστικών της ομοιόμορφης ροής. Σε περιοχές ανομοιόμορφης ροής παρατηρούνται επιταχύνσεις ή επιβραδύνσεις της ροής, αποκόλληση από τα στερεά όρια, δευτερεύουσα ροή, ανάπτυξη οριακών στρωμάτων κ.λπ. (βλ. 1.1.4)
- Ως αποτέλεσμα των παραπάνω εμφανίζονται **απώλειες ενέργειας**, οι οποίες **δεν** οφείλονται σε αντιστάσεις επιφανειακών **τριβών** αλλά κυρίως σε **ανάπτυξη τύρβης** μεγάλης κλίμακας.
- Οι απώλειες αυτές λαμβάνουν χώρα μέσα σε **μικρό μήκος** κατά τη κατεύθυνση της κύριας ροής και ονομάζονται εξ' αυτού **τοπικές: h_T** . Έχουν συνήθως **μικρό μέγεθος** σε **σχέση** με το σύνολο των απωλειών λόγω τριβών - **γραμμικών απωλειών** και ονομάζονται εξ' αυτού **δευτερεύουσες**.
- Συνήθειες **γεωμετρικές μεταβολές** είναι:
 - Μεταβολές στη **διατομή**: Συστολές ή διαστολές, απότομες ή βαθμιαίες. Ειδικώς ενδιαφέρουσα περίπτωση αποτελεί το μήκος εισόδου από δεξαμενή σε σωλήνα (βλ. 2.1.1)
 - Μεταβολές στην **κατεύθυνση**: Σε οριζοντιογραφία ή μηκοτομή, απότομες ή βαθμιαίες.
 - Μεταβολές λόγω **διακλαδώσεων**: Κόμβοι συμβολής αγωγών.
 - Μεταβολές λόγω **παρεμβολής συσκευών** μετρήσεων ή υδραυλικών **μηχανών**.
 - Μεταβολές λόγω **τοποθέτησης** συσκευών ελέγχου της ροής - **δικλείδων**. Την περίπτωση αυτή θα εξετάσουμε ιδιαίτερας εις τη συνέχεια (βλ. 2.4.4).
- Οι απώλειες λόγω ανομοιόμορφης ροής – τοπικές – απώλειες εκφράζονται γενικώς ως:
 - $$h_T = \frac{k_T \cdot V^2}{2 \cdot g} \quad (27), \text{ όπου:}$$
 - **k_T** : ο **αδιάστατος** συντελεστής τοπικών απωλειών (βλ. 2.4.2)
 - **V** : **χαρακτηριστική** ταχύτητα – συνήθως η **μεγαλύτερη** ταχύτητα των αγωγών του κόμβου, ή όπως ειδικώς ορίζεται

2.4.2 Επισημάνσεις

- Οι **τοπικές** απώλειες είναι **προφανώς ανεπιθύμητες** και συνήθως **υπολείπονται** των γραμμικών κατά **τάξη μεγέθους** εντός των ορίων της συνολικής ακρίβειας των υπολογισμών (βλ. 2.3.2).
Εξαιρέση αποτελούν οι τοπικές απώλειες λόγω της λειτουργίας **δικλείδων**, οι οποίες **προβλέπονται** για τον **έλεγχο** της ροής (βλ. 2.4.4).

- Το **μικρό μέγεθος** των τοπικών απωλειών επιτρέπει συνήθως να **αμελούνται** εις τους υπολογισμούς δικτύων, (ή να λογίζονται ως ποσοστό των γραμμικών).
 - Το **σύνηθες κριτήριο**, με το οποίο **αμελούνται** οι τοπικές απώλειες είναι:

$$L > 1.000 \cdot D \quad (28)$$
 - όπου **L**: συνολικό μήκος του δικτύου
 - **D**: μέση διάμετρος των σωλήνων του δικτύου
 - Εις το μάθημα <Αστικά Υδραυλικά Έργα> του 6^{ου} εξαμήνου θα διδαχθείτε την παραδοχή εκτίμησης του μεγέθους των τοπικών απωλειών ως ποσοστού (5%~10%) των γραμμικών απωλειών.
Για τις ανάγκες του <εδώ> μαθήματος θα **αμελήσουμε**- ή **δεν θα αμελήσουμε** - τις τοπικές απώλειες με βάση την (28).
- Προσοχή! Εάν σε ένα κόμβο συνυπάρχουν περισσότερες από μία περιπτώσεις εμφάνισης τοπικών απωλειών (π.χ. αλλαγή διαμέτρου και αλλαγή κατεύθυνσης), **υπολογίζουμε** την **κάθε περίπτωση χωριστά** και **αθροίζουμε**.

2.4.3 Πρακτικές εφαρμογές

- Οι **τοπικές** απώλειες είναι *προφανώς μεγαλύτερες* όταν:
 - Η ροή είναι **αποκλίνουσα** (διαστολές) σε σύγκριση με αντίστοιχη μεταβολή σε συγκλίνουσα ροή (συστολές) (βλ. 1.1.4).
 - Η μεταβολή είναι **απότομη** παρά όταν είναι βαθμιαία.
- Οριακή - ακραία περίπτωση συστολής αποτελεί η είσοδος από δεξαμενή σε σωλήνα: **$k_T = 0,5$**
- Οριακή - ακραία περίπτωση διαστολής αποτελεί η κατάληξη από σωλήνα σε δεξαμενή: **$k_T = 1,0$**

2.4.4 Δικλείδες (ή βάνες)

- Είναι διατάξεις οι οποίες τοποθετούνται σε σωλήνες, για να **ρυθμίσουν** την **παροχή** που διέρχεται, με το άνοιγμα, κλείσιμο ή μερική φραγή. Επομένως εισάγουν **χρήσιμες** – σχεδιασμένες **τοπικές απώλειες**!
- Σε αντίθεση με τις συνήθεις τοπικές απώλειες, όπου είναι δυνατό να τις αμελήσουμε υπό όρους (βλ. 2.4.2):
 - Οι **τοπικές απώλειες** σε **δικλείδες** είναι **σημαντικές** έως *κυρίαρχες* – αυτό το ρόλο παίζουν!
 - Ο **συντελεστής τοπικών απωλειών k_T** σε **δικλείδες** είναι δυνατό να λάβει **πολύ μεγάλες τιμές** ∞
Εάν η δικλείδα τείνει να κλείσει τελείως, τότε **$k_T \rightarrow \infty$**
 - Άρα: **Δεν αμελούμε ποτέ** τις **τοπικές απώλειες** λόγω **δικλείδων** ∞, ακόμη και εάν η δικλείδα είναι εντελώς κλειστή - πλην ρητής προδιαγραφής.

2.5 Ερωτήσεις κατανόησης και Εφαρμογές υπολογισμού

2.5.1 (μία μόνο απάντηση είναι ορθή)

	Η συνολική ακρίβεια των υπολογισμών σε δίκτυα κλειστών αγωγών υπό πίεση είναι της τάξης του 5% διότι μεταξύ άλλων:
	Συχνά παραλείπονται οι (τοπικές) απώλειες ανομοιόμορφης ροής
	Γίνεται χρήση στους υπολογισμούς της οριζόντιας προβολής του μήκους των σωλήνων
	Οι χρησιμοποιούμενες σχέσεις υπολογισμού είναι ημιεμπειρικές
✓	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω
	Η συνολική ακρίβεια των υπολογισμών σε δίκτυα κλειστών αγωγών υπό πίεση είναι της τάξης του 5% διότι:
	Γίνεται χρήση αριθμητικών μεθόδων στους υπολογισμούς
	Είναι αμφίβολη η ποιότητα – αρχική ισοδύναμη τραχύτητα των σωλήνων
	Συνήθως δεν ελέγχεται εάν η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
✓	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω
	Η χρήση του διαγράμματος Moody στους υπολογισμούς:
	Οδηγεί σε ακρίβεια μεγαλύτερη της συνολικής τάξης μεγέθους
	Διευκολύνει και εξασφαλίζει την αποφυγή χονδροειδών λαθών
✓	Έπρεπε να έχει απαγορευθεί δια Νόμου
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω
	Η σχέση Darcy – Weissbach ισχύει:
✓	Και στις δύο περιπτώσεις στρωτής και τυρβώδους ροής
	Μόνο στην περίπτωση τυρβώδους ροής
	Μόνο στην περίπτωση στρωτής ροής
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω
	Η σχέση Colebrook – White ισχύει:
	Και στις δύο περιπτώσεις στρωτής και τυρβώδους ροής
	Μόνο στην περίπτωση στρωτής ροής
✓	Μόνο στην περίπτωση τυρβώδους ροής
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω
	Η σχέση Colebrook – White δεν ισχύει:
	Για υδραυλικώς λείους σωλήνες
	Όταν αμελούνται οι τοπικές απώλειες
	Για αριθμούς Reynolds: $0,5 \cdot 10^4 < R < 5,0 \cdot 10^6$
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
✓	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Η εμφάνιση - εις το πέρας των υπολογισμών - της τελικής τιμής του προς προσδιορισμό μεγέθους με 9 σημαντικά δεκαδικά ψηφία:
	Επιδεικνύει επιμέλεια και ακρίβεια των υπολογισμών
✓	Σηματοδοτεί ανεπάρκεια κατανόησης της ακρίβειας των μεθόδων υπολογισμού
	Είναι επιθυμητή, αλλά απαιτεί τη χρήση προγραμματιζόμενου υπολογιστή χειρός
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

2.5.2 (μία μόνο απάντηση είναι ορθή)

	Τοπικές απώλειες εμφανίζονται μεταξύ άλλων:
	Λόγω της μεταβολής των διαμέτρων των σωλήνων
	Λόγω της παρεμβολής στο δίκτυο υδραυλικών μηχανών
	Λόγω της τοποθέτησης στο δίκτυο συσκευών ελέγχου της ροής - δικλείδων
✓	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Οι τοπικές απώλειες αμελούνται:
	Μόνο στην περίπτωση στρωτής ροής
	Μόνο για υδραυλικώς λείους σωλήνες
	Μόνο για αριθμούς Reynolds: $1,5 \cdot 10^4 < R < 0,5 \cdot 10^5$
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
✓	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Ο συντελεστής τοπικών απωλειών είναι μεγαλύτερος:
	Στην περίπτωση μεταβολής της διαμέτρου κατάντη της ροής από μικρότερη σε μεγαλύτερη
	Στην περίπτωση μεταβολής της διαμέτρου κατάντη της ροής από μεγαλύτερη σε μικρότερη
✓	Στην περίπτωση κατάληξης της ροής από σωλήνα σε δεξαμενή
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Οι τοπικές απώλειες δεν αμελούνται ποτέ:
	Στην περίπτωση κατάληξης της ροής από σωλήνα σε δεξαμενή
	Στην περίπτωση εισόδου της ροής από δεξαμενή σε σωλήνα
	Στην περίπτωση κατάληξης της ροής από σωλήνα σε ελεύθερη εκροή στην ατμόσφαιρα
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
✓	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Οι τοπικές απώλειες δεν αμελούνται ποτέ:
	Όταν ο σωλήνας εμφανίζει το φαινόμενο της γήρανσης
✓	Όταν έχει τοποθετηθεί στο δίκτυο συσκευή ελέγχου της ροής - δικλείδα
	Όταν έχει τοποθετηθεί στο δίκτυο συσκευή ελέγχου της ροής - δικλείδα και είναι κλειστή τουλάχιστον κατά 5%
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

2.5.3 Η εφαρμογή επικεντρώνεται στο Πρόβλημα **Λ1**

A) Η παροχή νερού ($v = 1,1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) σε σωλήνα είναι **Q= 150 lt /s**.
 Να υπολογιστεί η κλίση **J** της Γραμμής Ενέργειας για όλους τους παρακάτω συνδυασμούς *ποιοτήτων* / διαμέτρων:

D [m.m] →	250	300	350
K_s [m.m] ↓			
0	✓	✓	✓
1,0	✓	✓	✓
2,0	✓	✓	✓

Q [m ³ /s]	D [m]	k_s [m]	L [m]	v [m ² /s]	V [m/s]	R	f	J
0,150	0,250	0	-	1,1·10⁻⁶	3,056	6,945×10 ⁵	0,0124	0,0235
	0,300				2,122	5,787×10 ⁵	0,0128	0,0098
	0,350				1,559	4,961×10 ⁵	0,0131	0,0046

Q [m ³ /s]	D [m]	k_s [m]	L [m]	v [m ² /s]	V [m/s]	R	f	J
0,150	0,250	0,001	-	1,1·10⁻⁶	3,056	6,945×10 ⁵	0,0287	0,0545
	0,300				2,122	5,787×10 ⁵	0,0273	0,0209
	0,350				1,559	4,961×10 ⁵	0,0262	0,0093

Q [m ³ /s]	D [m]	k_s [m]	L [m]	v [m ² /s]	V [m/s]	R	f	J
0,150	0,250	0,002	-	1,1·10⁻⁶	3,056	6,945×10 ⁵	0,0354	0,0673
	0,300				2,122	5,787×10 ⁵	0,0334	0,0256
	0,350				1,559	4,961×10 ⁵	0,0319	0,0113

Συγκεντρωτικώς:

D [m.m] →	250	300	350
K_s [m.m] ↓			
0	0,0235	0,0098	0,0046
1,0	0,0545	0,0209	0,0093
2,0	0,0673	0,0256	0,0113

Σημειώστε ότι:

- Απαιτείται διάμετρος μεγαλύτερη κατά *περίπου* 50 m.m, ώστε να έχουμε την *ίδια κλίση* J της Γ.Ε., εάν αντί *λείο* σωλήνα επιλέξουμε τραχύ με $k_s = 1,00 \text{ m.m}$
- Αντιθέτως, ο διπλασιασμός της ισοδύναμης τραχύτητας από $k_s = 1,00 \text{ m.m}$ σε $k_s = 2,00 \text{ m.m}$, έχει σαφώς μικρότερη επίδραση στην κλίση της Γ.Ε.!

B) Η παροχή νερού σε σωλήνα είναι **Q= 165 lt /s**.

Να υπολογιστεί η κλίση **J** της Γραμμής Ενέργειας για σωλήνα διαμέτρου

D: 300 m.m και ισοδύναμης τραχύτητας **K_s: 1,0 m.m**

k_s [mm]	D [mm]	Q [m ³ /s]	Q₂ Q₁	J₂ J₁	J
1,00	300	0,165	0,175	0,0282626	0,0252730
			0,150	0,0207885	

2.5.4 Η εφαρμογή επικεντρώνεται στο Πρόβλημα **Π2**

A) Ένας σωλήνας με ισοδύναμη τραχύτητα **k_s : 0,50 m.m** μεταφέρει νερό.
 Να υπολογιστεί η παροχή **Q** για όλους τους παρακάτω συνδυασμούς κλίσεων της Γραμμής Ενέργειας / διαμέτρων:

J ↓	D [m.m] →	200	250	300
0,016		✓	✓	✓
0,032		✓	✓	✓
0,048		✓	✓	✓

J	D [m]	k_s [m]	v [m²/s]	$R \cdot f^{0,5}$	$1/f^{0,5}$	V [m/s]	Q [m³/s]
0,016	0,200	0,0005	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$4,556 \cdot 10^4$	6,2732	1,572	0,0494
	0,250			$6,367 \cdot 10^4$	6,4740	1,814	0,0890
	0,300			$8,369 \cdot 10^4$	6,6375	2,037	0,1440

J	D [m]	k_s [m]	v [m²/s]	$R \cdot f^{0,5}$	$1/f^{0,5}$	V [m/s]	Q [m³/s]
0,032	0,200	0,0005	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$6,443 \cdot 10^4$	6,2927	2,230	0,0700
	0,250			$9,004 \cdot 10^4$	6,4915	2,572	0,1262
	0,300			$1,184 \cdot 10^5$	6,6536	2,888	0,2041

J	D [m]	k_s [m]	v [m²/s]	$R \cdot f^{0,5}$	$1/f^{0,5}$	V [m/s]	Q [m³/s]
0,048	0,200	0,0005	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$7,891 \cdot 10^4$	6,3014	2,735	0,0859
	0,250			$1,103 \cdot 10^5$	6,4994	3,154	0,1548
	0,300			$1,450 \cdot 10^5$	6,6608	3,540 *	0,2503

Συγκεντρωτικώς:

J ↓	D [m.m] →	200	250	300
0,016		0,0494	0,0890	0,1440
0,032		0,0700	0,1262	0,2041
0,048		0,0859	0,1548	0,2503

Σημειώστε ότι:

- Για την ίδια κλίση **J** της Γ.Ε. η μεταβολή της διαμέτρου από 200 σε 300 m.m προσφέρει περίπου τριπλασιασμό της παροχής.
 Δυστυχώς η μεταβολή της τιμής προμήθειας των σωλήνων δεν είναι γραμμική συνάρτηση της διαμέτρου!..

B) Η κλίση της Γραμμής Ενέργειας σε σωλήνα είναι **J= 0,0185**.
 Να υπολογιστεί η Παροχή **Q** για σωλήνα διαμέτρου **D: 350 m.m**
 και ισοδύναμης τραχύτητας **k_s : 0,50 m.m**

k_s [mm]	D [mm]	J	J_2 J_1	Q_2 Q_1	Q [m³/s]
0,50	350	0,0185	0,0213751	0,250	0,232
			0,0173386	0,225	

2.5.5 Η εφαρμογή επικεντρώνεται στο Πρόβλημα **Λ3**

Ένας σωλήνας με ισοδύναμη τραχύτητα **k_s : 1,0 m.m** μεταφέρει νερό.
 Να υπολογιστεί η απαιτούμενη *θεωρητική* διάμετρος **D_θ** για όλους
 τους παρακάτω συνδυασμούς κλίσεων της Γραμμής Ενέργειας / παροχών:

J ↓	Q [lt /s] →	75	100	125
0,016		✓	✓	✓
0,032		✓	✓	✓
0,048		✓	✓	✓

J	Q [m ³ / s]	k_s [m]	v.10⁶ [m ² / s]	C	A ·10 ³	B ·10 ⁻⁶	D_i [m]	δD [%] V [m/ s]	D_θ [mm]
0,016	0,075	0,00100	1,1	0,8113	0,270	4,928	0,2393 0,2427	 1,41✓ 1,62✓	 243

J	Q [m ³ / s]	k_s [m]	v.10⁶ [m ² / s]	C	A ·10 ³	B ·10 ⁻⁶	D_i [m]	δD [%] V [m/ s]	D_θ [mm]
0,016	0,100	0,00100	1,1	0,9103	0,270	4,928	0,2685 0,2705	 0,72✓ 1,74✓	 270

J	Q [m ³ / s]	k_s [m]	v.10⁶ [m ² / s]	C	A ·10 ³	B ·10 ⁻⁶	D_i [m]	δD [%] V [m/ s]	D_θ [mm]
0,016	0,125	0,00100	1,1	0,9953	0,270	4,928	0,2936 0,2942	 0,19✓ 1,84✓	 294

J	Q [m ³ / s]	k_s [m]	v.10⁶ [m ² / s]	C	A ·10 ³	B ·10 ⁻⁶	D_i [m]	δD [%] V [m/ s]	D_θ [mm]
0,032	0,075	0,00100	1,1	0,7063	0,270	3,485	0,2084 0,2129	 2,20✓ 2,11✓	 213

J	Q [m ³ / s]	k_s [m]	v.10⁶ [m ² / s]	C	A ·10 ³	B ·10 ⁻⁶	D_i [m]	δD [%] V [m/ s]	D_θ [mm]
0,032	0,100	0,00100	1,1	0,7924	0,270	3,485	0,2338 0,2373	 1,49✓ 2,26✓	 237

J	Q [m ³ /s]	k _s [m]	v·10 ⁶ [m ² /s]	C	A ·10 ³	B ·10 ⁻⁶	D _i [m]	δD [%] V [m/s]	D _θ [mm]
0,032	0,125	0,00100	1,1	0,8664	0,270	3,485	0,2556 0,2580	0,95✓ 2,39✓	258

J	Q [m ³ /s]	k _s [m]	v·10 ⁶ [m ² /s]	C	A ·10 ³	B ·10 ⁻⁶	D _i [m]	δD [%] V [m/s]	D _θ [mm]
0,048	0,075	0,00100	1,1	0,6513	0,270	2,845	0,1921 0,1973	2,68✓ 2,11✓	197

J	Q [m ³ /s]	k _s [m]	v·10 ⁶ [m ² /s]	C	A ·10 ³	B ·10 ⁻⁶	D _i [m]	δD [%] V [m/s]	D _θ [mm]
0,048	0,100	0,00100	1,1	0,7307	0,270	2,845	0,2156 0,2198	1,96✓ 2,64✓	220

J	Q [m ³ /s]	k _s [m]	v·10 ⁶ [m ² /s]	C	A ·10 ³	B ·10 ⁻⁶	D _i [m]	δD [%] V [m/s]	D _θ [mm]
0,048	0,125	0,00100	1,1	0,7989	0,270	2,845	0,2357 0,2390	1,41✓ 2,79✓	239

Συγκεντρωτικώς:

J ↓	Q [lt /s] →	75	100	125
0,016		243	270	294
0,032		213	237	258
0,048		197	220	239

Σημειώστε ότι:

- Για την ίδια κλίση J της Γ.Ε. η μεταβολή της παροχής από 75 σε 125 lt /s επιτυγχάνεται με αύξηση της διαμέτρου μόλις κατά περίπου 20%.
- Όλες οι ως άνω τελικές τιμές των διαμέτρων έχουν ελεγχθεί για χονδροειδές σφάλμα μέσω των Πινάκων.

2.5.6 Η εφαρμογή επικεντρώνεται στο Πρόβλημα **Π4**

A) Ένας σωλήνας με διάμετρο **D: 350 m.m** μεταφέρει νερό.

Να υπολογιστεί η ισοδύναμη τραχύτητά του **k_s** για όλους

τους παρακάτω συνδυασμούς κλίσης της Γραμμής Ενέργειας / παροχής:

Q [lt /s] →	200	250	300
J ↓			
0,016	✓	✓	✓
0,032	✓	✓	✓
0,048	✓	✓	✓

Q [m ³ /s]	D [m]	J	v [m ² /s]	c	k_s [m]	k_s [mm]
0,200	0,350	0,016	1,1.10⁻⁶	-2,57168	0,00090	0,901
		0,032		-1,65151	0,00781	7,808
		0,048		-1,24385	0,00199	19,919

Q [m ³ /s]	D [m]	J	v [m ² /s]	c	k_s [m]	k_s [mm]
0,250	0,350	0,016	1,1.10⁻⁶	-3,35710	0,00012	0,118
		0,032		-2,20688	0,00214	2,138
		0,048		-1,69731	0,00699	6,991

Q [m ³ /s]	D [m]	J	v [m ² /s]	c	k_s [m]	k_s [mm]
0,300	0,350	0,016	1,1.10⁻⁶	-4,14252	0,000005	0,005
		0,032		-2,76226	0,00058	0,575
		0,048		-2,15078	0,00244	2,443

Συγκεντρωτικώς:

Q [lt /s] →	200	250	300
J ↓			
0,016	0,901	0,118	0,005
0,032	7,808	2,138	0,575
0,048	19,919	6,991	2,443

Σημειώστε ότι:

- Για την ίδια κλίση J της Γ.Ε. η μεταβολή της παροχής από 300 σε 200 lt /s οδηγεί σε τεράστιες αυξήσεις της ισοδύναμης τραχύτητας.
- Κάποιες τιμές ζευγών {παροχή / διάμετρος} οδηγούν εις εξωφρενικές τιμές ισοδύναμης τραχύτητας...
... Ιδίως δε εις απίστευτους λόγους ισοδύναμης τραχύτητας / διάμετρο.
Δυστυχώς τούτο παρατηρείται και εις τους σωλήνες (κυρίως λόγω απόθεσης αλάτων – μείωσης της διαμέτρου), αλλά και εις τις αρτηρίες των ανθρώπων!... (αθηρωματικές πλάκες – μείωση της διαμέτρου).
Όπως θα δούμε εις τη συνέχεια οι τρόποι αντιμετώπισης – θεραπείας οιονεί συμπίπτουν: Παράλληλοι σωλήνες – bypass!..
- Όλες οι ως άνω τελικές τιμές ισοδύναμης τραχύτητας έχουν ελεγχθεί για χονδροειδές σφάλμα μέσω των Πινάκων.

3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΓΩΓΩΝ (ΣΩΛΗΝΩΝ)

Ορίζονται οι ομοιόμορφοι αγωγοί, περιγράφονται τα συστήματα αγωγών και οι βασικές έννοιες και παραδοχές οι οποίες συνδέονται με την επίλυσή τους. Εισάγεται η έννοια της ενεργειακής βελτιστοποίησης και της απλοποιημένης Γραμμής Ενέργειας ως βασικού εργαλείου σχεδιασμού και επίλυσης. Παρουσιάζεται ένα τυπικό σχήμα συστήματος σωλήνων με χαραγμένες τις Γραμμές Ενέργειας, με επισήμανση των ενεργειακών υπομέτρων και αντιδιαστολή τους με τα τοπογραφικά υψόμετρα.

3.1 Γενικά

3.1.1 Εισαγωγή

Η μεταφορά και διανομή νερού και γενικότερα ρευστών, με κλειστούς αγωγούς υπό πίεση, γίνεται με *συστήματα* αγωγών, δηλαδή με τμήματα **ομοιόμορφων** αγωγών, που συνδέονται μεταξύ τους και αποτελούν ένα **ενιαίο σύνολο λειτουργικά** και **υπολογιστικά**. Ομοιόμορφος αγωγός σημαίνει:

- **Ενιαία διάμετρος** και **ποιότητα** (ισοδύναμη τραχύτητα) και **σταθερή παροχή**, σε όλο το μήκος του. Ως **λογιστικό** μήκος **L** χρησιμοποιείται η **οριζόντια προβολή**.
- **Ουδεμία** περίπτωση εμφάνισης **τοπικών απωλειών** εις το μήκος αυτό, με εξαίρεση την περίπτωση καμπύλης αλλαγής κατεύθυνσης (βλ. 2.4.1).

Μεταξύ των ομοιόμορφων αγωγών παρεμβάλλονται **κόμβοι**:

- **Πραγματικοί** – κατασκευαστικοί (π.χ. Ειδικά τεμάχια, υδραυλικές μηχανές, δικλείδες).
- Ή / και **λογιστικοί** (π.χ. εισόδου σε σωλήνα, αλλαγής διαμέτρου και όλοι οι ως άνω πραγματικοί).

Κάθε σύστημα:

- Υδροδοτείται από ένα ή περισσότερα σημεία: **υδροληψίες**
 - **Δεξαμενές** ή ταμειυτήρες φραγμάτων κ.λπ.
 - **Λογιστικούς κόμβους εισροής** – εις το σύστημα.
- Υδροδοτεί ένα ή περισσότερα σημεία: **υδροδοτήσεις**.
 - **Δεξαμενές** ή άλλους υδάτινους αποδέκτες π.χ. τη θάλασσα κ.λπ.
 - Ελεύθερες **εκροές** εις την **ατμόσφαιρα**.
 - **Λογιστικούς κόμβους εκροής** – από το σύστημα.
- Εξαίρεση αποτελούν τα συστήματα **κλειστής κυκλοφορίας** (ή κυκλώματος), όπου *υδροληψία* και *υδροδότηση* ταυτίζονται σε ένα τουλάχιστον κόμβο, όπου είναι εγκατεστημένη **αντλία**.
- Εις τους υπολογισμούς η **στάθμη** των **δεξαμενών** (και λοιπών υδάτινων στοιχείων) θεωρείται **σταθερή κατά περίπτωση** (μόνιμη ροή – σε αυτό το Μάθημα) και φυσικά αποτελούν και αυτές **κόμβους**!

3.1.2 Κατηγοριοποίηση

Εκπαιδευτικοί και μόνο λόγοι μας οδηγούν, να διακρίνουμε τα **απλά**, τα **σύνθετα** και τα **πολύπλοκα** συστήματα σωλήνων τα οποία θα χειρισθούμε διαδοχικά.

Ο αυξανόμενος βαθμός δυσκολίας της επίλυσης προϋποθέτει τη κατανόηση των μεθόδων, οι οποίες εφαρμόζονται εις το προηγούμενο – απλούστερο στάδιο.

Οι μέθοδοι επίλυσης, οι οποίες παρουσιάζονται εις τη συνέχεια, αφορούν γενικώς σε **τυρβώδη ροή** και αγωγούς κυκλικής διατομής – **σωλήνες**.

Κάποιες είναι δυνατό να εφαρμοσθούν ως έχουν και σε στρωτή ροή ή σε μη - κυκλικούς αγωγούς. Για τις υπόλοιπες η κατανόηση της τεχνικής τους εύκολα οδηγεί σε προσαρμογή τους.

3.2 Μεθοδολογία υπολογισμού

3.2.1 Γραμμή Ενέργειας

Εις το σχεδιασμό και υπολογισμό συστημάτων σωλήνων καθοριστικό κριτήριο είναι σε πρώτη φάση η **ενεργειακή βελτιστοποίηση**:

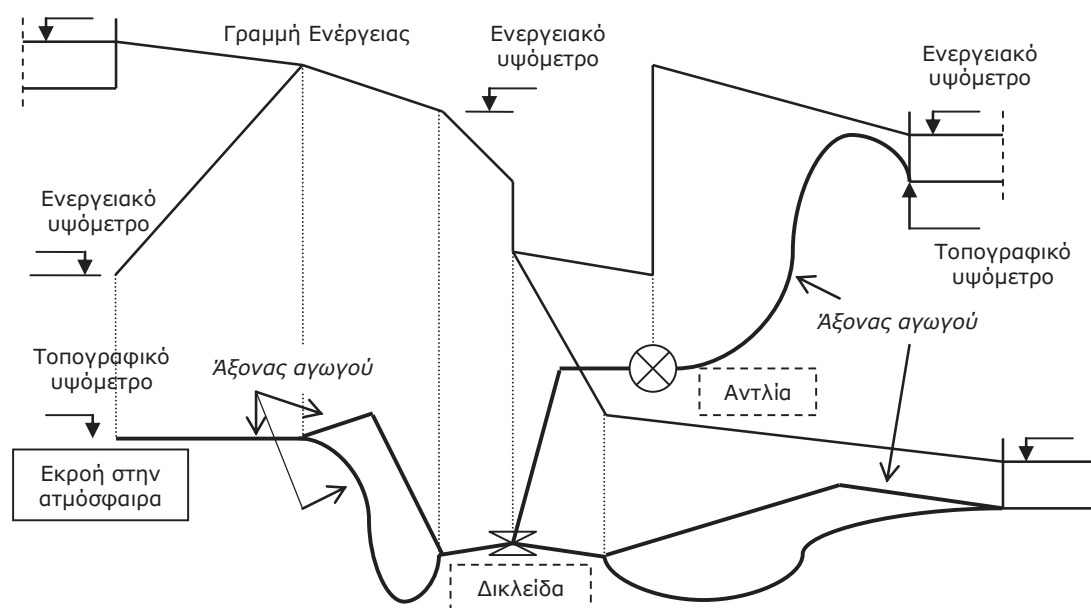
- **Ολόκληρο** το **ενεργειακό διαθέσιμο** προβλέπεται να καταναλωθεί σε **απώλειες ενέργειας**.
- **Εκτός** από το τμήμα το οποίο παραμένει ως **ενέργεια** της **εκρέουσας φλέβας**, εις την περίπτωση **εκροής** εις την **ατμόσφαιρα**!
- **Προσοχή** παρότι η τιμή της ενέργειας της εκρέουσας φλέβας: $V^2/2.g$ είναι της τάξης μεγέθους των τοπικών απωλειών, **δεν παραλείπεται ποτέ** εις τον υπολογισμό ☹.

Η Γραμμή Ενέργειας **ταυτίζεται απλουστευτικά** με την Πιεζομετρική Γραμμή με εξαίρεση ειδικά προβλήματα - όπου η **πίεση** έχει **καθοριστικό ρόλο** - εις τα οποία θα γίνει ειδική αναφορά εις τη συνέχεια.

Έκαστος **κόμβος** του συστήματος **χαρακτηρίζεται** από το ή τα **ενεργειακά υψόμετρα** του → **σημεία της Γραμμής Ενέργειας** (άρα και της Πιεζομετρικής Γραμμής κατά την ως άνω απλούστευση).

Εναλλακτικοί - **ισοδύναμοι** όροι είναι: πίεση κόμβου ή υψόμετρο κόμβου.

Προσοχή: Εις τους υπολογισμούς **δεν** υπεισέρχεται το **τοπογραφικό υψόμετρο** του κόμβου ☹, παρά μόνο ως εργαλείο ελέγχου - όπου η **πίεση** έχει **καθοριστικό ρόλο**.



4. ΑΠΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΩΛΗΝΩΝ

Ορίζονται τα απλά συστήματα σωλήνων και οι βασικές έννοιες και παραδοχές οι οποίες συνδέονται με την επίλυσή τους. Παρουσιάζεται η απλοποιημένη Γραμμή Ενέργειας. Αναλύονται τα τυπικά προβλήματα επίλυσης απλών συστημάτων καθώς και η μεθοδολογία υπολογιστικού χειρισμού της γήρανσης σωλήνων.

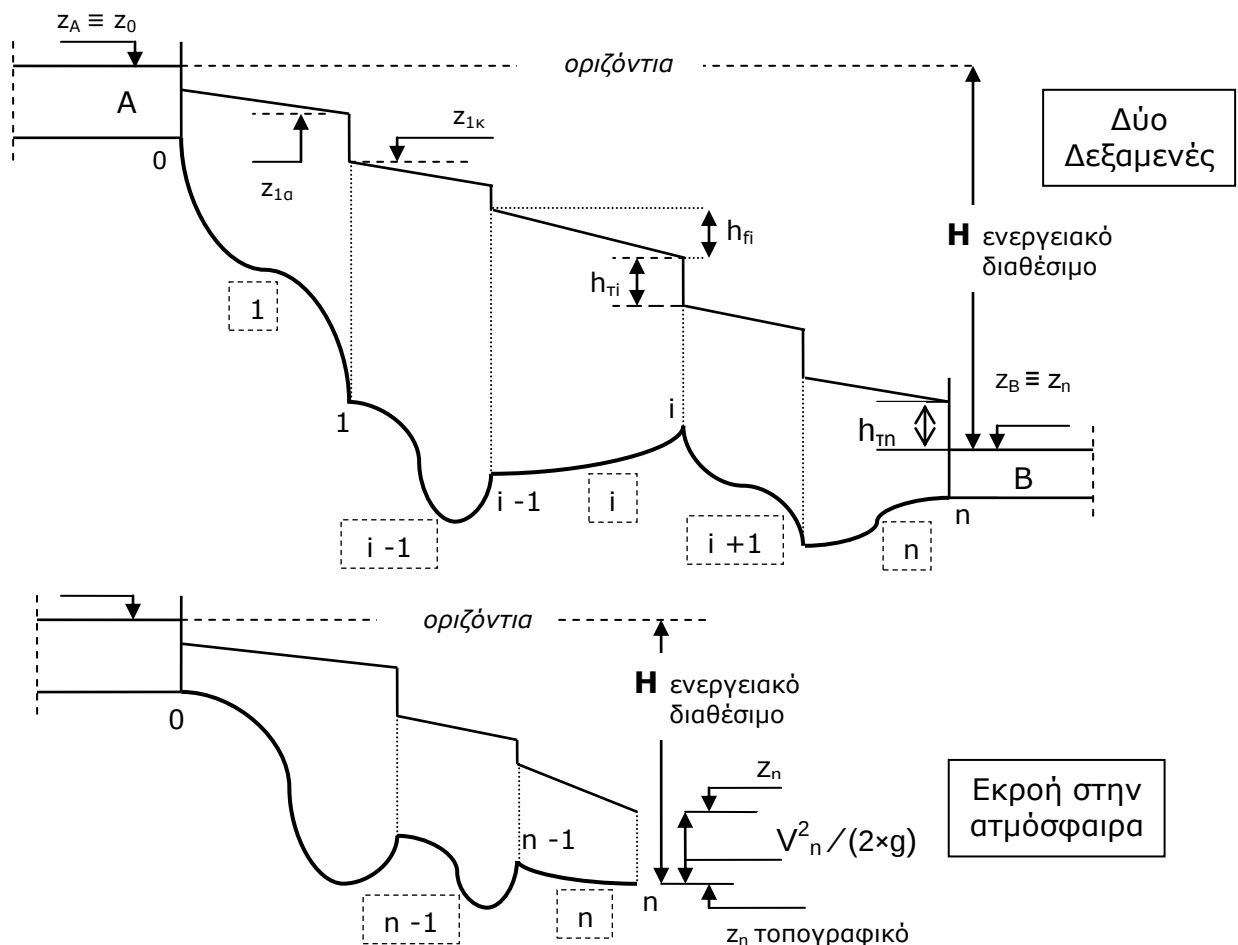
4.1 Γενικά

4.1.1 Εισαγωγή

Τα απλά συστήματα σωλήνων έχουν:

- Ένα σημείο **υδροληψίας** και ένα σημείο - **κόμβο υδροδότησης**.
- Η δυνατή **διαδρομή** του νερού μεταξύ αυτών των δύο κόμβων είναι **μοναδική**, δηλαδή οι σωλήνες δηλαδή είναι τοποθετημένοι εν σειρά.
- **Δεν** περιλαμβάνονται εις το σύστημα **υδραυλικές μηχανές**.

4.1.2 Τυπικές μορφές Γραμμής Ενέργειας



4.2 Τυπικά προβλήματα

4.2.1 Εισαγωγή - Σχέσεις

- Η **παροχή** είναι **ενιαία** σε όλους τους αγωγούς
- **Πρώτα** χαράζουμε *ποιοτικά* τη **Γραμμή Ενέργειας**
- Εις τις χρησιμοποιούμενες επαναληπτικές σχέσεις ακολουθούμε γενικώς τα του Κεφαλαίου **3**.
 - Οι **κόμβοι** αριθμούνται : **1, 2,... i,... n**
 - Οι **σωλήνες** αριθμούνται : **(1), (2),... (i),... (n)**
 - Οι **διαδοχικές επαναλήψεις** αριθμούνται : **1, 2,... v,... v+1,...**
 - Ο **συνδυασμός αγωγών & διαδοχικών επαναλήψεων** συμβολίζεται: **iv,...**
- Η σχέση **ενεργειακής βελτιστοποίησης** (βλ. 4.1.1) – χωρίς υδραυλικές μηχανές τις οποίες θα χειριστούμε στο Κεφάλαιο **5**. είναι:

$$H = \sum_{i=1}^{(n)} h_{fi} + \sum_{i=0}^n h_{Ti} + \frac{V_n^2}{2 \cdot g} \quad (29)$$

Εάν υπάρχει κατάντη **δεξαμενή**: $\frac{V_n^2}{2 \cdot g} = 0$

Εάν **αμελούνται** οι **τοπικές απώλειες** (βλ. 2.4.2): $\sum_{i=0}^n h_{Ti} = 0$

Η σχέση (29) θα επεκταθεί και συμπληρωθεί εις τα επόμενα κεφάλαια.

- Αποτελεί εις τη **γενική** της **μορφή** τη **σχέση – κλειδί** με την οποία **επιλύονται όλα** τα **προβλήματα** του παρόντος τεύχους – **και όχι μόνο!**..
- Η **κατανόηση** της ουσίας της εφαρμογής της σε συνδυασμό με την **αξία** της **χρήσης** της **Γραμμής Ενέργειας** (βλ. 4.1.2) είναι **σημαντικότερη**...
- Εις τα επόμενα εδάφια – προβλήματα θα την **εφαρμόσουμε απ' ευθείας ή εμμέσως** εις τη **δόμηση** αριθμητικών **μεθόδων σύγκλισης**.

4.2.2 Υπολογισμός του Ενεργειακού Διαθέσιμου **H** - Πρόβλημα **Λ5**

(τελικώς: υπολογισμός ενός εκ των υψομέτρων της ελεύθερης επιφάνειας - στάθμης των δεξαμενών: **z_A**, **z_B**, ή του τοπογραφικού υψομέτρου του άξονα του σωλήνα **z_n** εις την περίπτωση ελεύθερης εκροής στην ατμόσφαιρα).

Αξιοποίηση του Προβλήματος **Λ1**

- Αποφασίζουμε εάν θα ληφθούν υπόψη οι τοπικές απώλειες: βλ. (28)
- Εφαρμόζουμε τη διαδικασία επίλυσης του Προβλήματος **Λ1** σε όλους τους αγωγούς του συστήματος
- Υπολογίζουμε - μόνο εάν υπάρχει εκροή στην ατμόσφαιρα - τον όρο ο οποίος εκφράζει την κινητική ενέργεια της εξερχόμενης φλέβας από τον τελευταίο

αγωγό η του συστήματος: $\frac{V_n^2}{2 \cdot g}$, όπου $V_n = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_n^2}$

- Υπολογίζουμε - μόνο εάν δεν αμελούνται - όλες τις τοπικές απώλειες σε όλους

τους κόμβους του συστήματος: $h_{Ti} = \frac{k_{Ti} \cdot V_i^2}{2 \cdot g}$, όπου $V_i = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_i^2}$

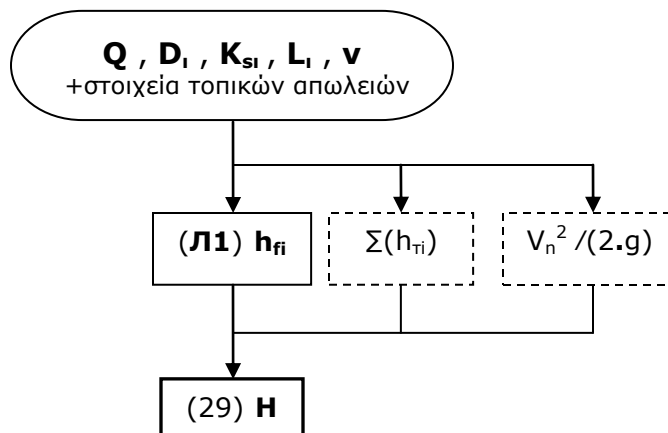
- Υπολογίζουμε το ενεργειακό διαθέσιμο: $H = \sum_{i=1}^{(n)} h_{fi} + \sum_{i=0}^n h_{Ti} + \frac{V_n^2}{2 \cdot g}$ (29)

- Υπολογίζουμε τελικώς ένα από τα υψόμετρα **z_A**, **z_B**, **z_n**

➤ Τυποποίηση διαδικασίας:

Q [m ³ /s]	D_i [m]	k_{si} [m]	L_i [m]	v [m ² /s]	V_i [m/s]	R_i	F_i	h_{fi} [m]
Σh_{fi}								

- Διάγραμμα ροής διαδικασίας:



4.2.3 Υπολογισμός της παροχής **Q** - Πρόβλημα **Λ6**

Αξιοποίηση του Προβλήματος **Λ1** σε αριθμητική μέθοδο *β' τάξεως*.

Προσοχή: η αξιοποίηση του Προβλήματος **Λ2 δεν** είναι δυνατή διότι είναι γνωστό το ενεργειακό διαθέσιμο - σύνολο των γραμμικών απωλειών - αλλά όχι οι επιμέρους απώλειες σε κάθε αγωγό!

- Προσδιορίζουμε τους σταθερούς συντελεστές της αριθμητικής μεθόδου:

$$C_H = \pi \cdot \left(\frac{g \cdot H}{8} \right)^{0,5} \quad (30)$$

$$C_{fi} = \frac{L_i}{D_i^5} \quad (31)$$

$$C_T = \sum_{i=0}^n \frac{k_i}{D_i^4} \quad (32), \text{ εάν } \underline{\text{αμελούνται}} \text{ οι } \underline{\text{τοπικές}} \text{ απώλειες: } C_T = 0$$

$$C_V = \frac{1}{D_n^4} \quad (33), \text{ εάν υπάρχει κατάντη } \underline{\text{δεξαμενή}}: C_V = 0$$

- Επιλέγουμε την 1^η τιμή εκκίνησης - εάν η τάξη μεγέθους δεν είναι γνωστή

$$Q_1 = \frac{C_H}{\left[\sum_{i=1}^{(n)} (f_{i0} \cdot C_{fi}) + C_T + C_V \right]^{0,5}} \quad (34)$$

Όπου ουσιαστικώς επιλέγουμε - *εμπειρικά* - την 1η τιμή της ισοδύναμης τραχύτητας **f_{i0}** για κάθε σωλήνα χωριστά, από τον παρακάτω πίνακα:

k_s/D	0	0,0005	0,0010	0,0015	0,0020	0,0025	0,0030	0,0035
f_{i0}	0,0125	0,0175	0,0200	0,0220	0,0240	0,0250	0,0265	0,0275

k_s/D	0,0040	0,0050	0,0060	0,0070	0,0080	0,0090	0,0100	0,012
f_{i0}	0,0285	0,0305	0,0325	0,0340	0,0355	0,0370	0,0380	0,0405

- Υπολογίζουμε τη 2^η τιμή σύγκλισης από την επαναληπτική σχέση:

$$Q_2 = \frac{C_H}{\left[\sum_{i=1}^{(n)} (f_{i1} \cdot C_{fi}) + C_T + C_V \right]^{0,5}} \quad (35)$$

Όπου έχουμε υπολογίσει τη 2η τιμή της ισοδύναμης τραχύτητας **f_{i1}** για κάθε σωλήνα χωριστά, με βάση την 1^η τιμή εκκίνησης της παροχής Q₁, εφαρμόζοντας τμήμα της διαδικασίας επίλυσης του Προβλήματος **Λ1**

Σημείωση 1: είναι δυνατό να γνωρίζουμε την τάξη μεγέθους της Q: π.χ. εάν έχει προηγηθεί υπολογισμός με ελαφρώς διαφορετικά μεγέθη H, D ή k_s
Στην περίπτωση αυτή έχουμε τιμή εκκίνησης και παραλείπουμε το 1^ο βήμα.

Ελέγχουμε τη σύγκλιση $\frac{|Q_2 - Q_1|}{Q_1} \leq 5\%$ (36)

- Υπολογίζουμε (σπανίως) την 3^η τιμή σύγκλισης από την επαναληπτική σχέση:

$$Q_3 = \frac{C_H}{\left[\sum_{i=1}^{(n)} (f_{i2} \cdot C_{fi}) + C_T + C_V \right]^{0,5}} \quad (35a)$$

Όπου έχουμε υπολογίσει τη 3^η τιμή της ισοδύναμης τραχύτητας f_{i2} για κάθε σωλήνα χωριστά, με βάση την 2^η τιμή σύγκλισης της παροχής Q_2 , εφαρμόζοντας εκ νέου τμήμα της διαδικασίας επίλυσης του Προβλήματος **Λ1**

- Επανελέγχουμε (σπανίως) τη σύγκλιση $\frac{|Q_3 - Q_2|}{Q_2} \leq 5\%$

- Υπολογίζουμε τελικώς τις γραμμικές απώλειες σε όλους τους σωλήνες – με βάση τα f_i της τελευταίας περιστροφής - τις στρογγυλεύουμε ώστε να είναι: $\Sigma h_{fi} = H$ και χαράζουμε επακριβώς τη Γραμμή Ενέργειας με τα ενεργειακά υψόμετρα σε όλους τους κόμβους.

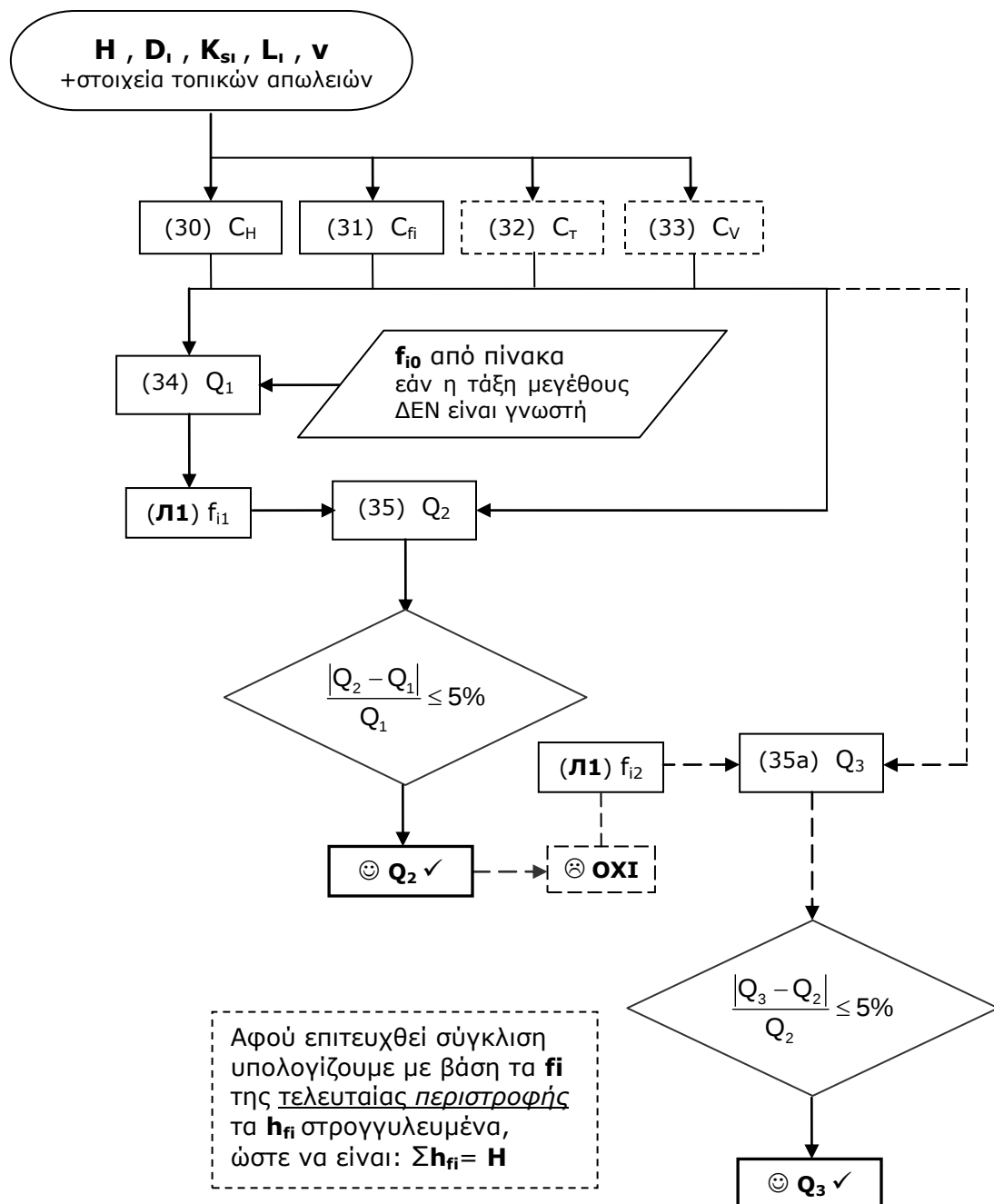
- Τυποποίηση διαδικασίας:

H	D _i	k _{si}	L _i	v	C _H	C _{fi}	C _T	C _V	f _{i0}
[m]	[m]	[m]	[m]	[m ² /s]					

Q ₁	D _i	k _{si}	v	V _{i1}	R _{i1}	f _{i1}	Q ₂	ΔQ
[m ³ /s]	[m]	[m]	[m ² /s]	[m/s]			[m ³ /s]	[%]

Σημείωση 2: Εις τη περίπτωση απλού συστήματος ενός σωλήνα και δύο δεξαμενών και εφόσον αμελούνται οι τοπικές απώλειες το πρόβλημα εκφυλίζεται:
Αρκεί η εφαρμογή του **Λ2**, θέτοντας προφανώς: $hf_1 = H$

- Διάγραμμα ροής διαδικασίας:



4.2.4 Υπολογισμός της διάμετρος **ενός** αγωγού **Di** - Πρόβλημα **Λ7**
(Οι διάμετροι όλων των υπολοίπων αγωγών είναι δεδομένες).

Αξιοποίηση των Προβλημάτων **Λ1** και **Λ3**

- Αποφασίζουμε εάν θα ληφθούν υπόψη οι τοπικές απώλειες: βλ. (28)
- Εφαρμόζουμε τη διαδικασία επίλυσης του Προβλήματος **Λ1** σε όλους τους αγωγούς του συστήματος – εκτός από τον αγωγό (i) όπου ζητείται η διάμετρος
- Υπολογίζουμε - μόνο εάν υπάρχει εκροή στην ατμόσφαιρα - τον όρο ο οποίος εκφράζει την κινητική ενέργεια της εξερχόμενης φλέβας από τον τελευταίο

αγωγό n του συστήματος: $\frac{V_n^2}{2 \cdot g}$, όπου $V_n = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_n^2}$

- Υπολογίζουμε - μόνο εάν δεν αμελούνται – όλες τις τοπικές απώλειες σε όλους

τους κόμβους του συστήματος: $h_{Ti} = \frac{k_{Ti} \cdot V_i^2}{2 \cdot g}$, όπου $V_i = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_i^2}$

- Υπολογίζουμε τις γραμμικές απώλειες στον αγωγό (i) όπου ζητείται η διάμετρος:

$$h_{fi} = H - \sum_{i=1}^{(i-1)} h_{fi} - \sum_{(i+1)}^{(n)} h_{fi} - \sum_{i=0}^n h_{Ti} - \frac{V_n^2}{2 \cdot g} \quad (37)$$

- Υπολογίζουμε τη (θεωρητική) διάμετρο του αγωγού (i) από το Πρόβλημα **Λ3**
- Τυποποίηση διαδικασίας:

Q [m ³ /s]	Di [m]	k_{si} [m]	Li [m]	v [m ² /s]	Vi [m/s]	Ri	Fi	h_{fi} [m]
Σh_{fi}								

J= h_{fi} / L	Q [m ³ /s]	k_{si} [m]	v.10⁶ [m ² /s]	C	A .10 ³	B .10 ⁻⁶	D_{iv} [m]	ΔD [%] V [m/s]	D_{θi} [mm]

Σημείωση 1: Εις τη περίπτωση απλού συστήματος ενός σωλήνα και δύο δεξαμενών και εφόσον αμελούνται οι τοπικές απώλειες το πρόβλημα εκφυλίζεται:

Αρκεί η εφαρμογή του **Λ3**, θέτοντας προφανώς: **h_{f1} = H**

Σημείωση 2: Η περίπτωση υπολογισμού διαμέτρων **περισσοτέρων** του ενός αγωγού είναι πρόβλημα **αόριστο** - άπειροι ενεργειακά δεκτοί συνδυασμοί.
Το ενδιαφέρον μετατίθεται τότε σε οικονομική βελτιστοποίηση.

Σημείωση 3: Εις την περίπτωση όπου υπάρχει **εκροή** εις την **ατμόσφαιρα και** ζητείται η διάμετρος του **ακραίου κατάντη** αγωγού (**n**),

ο όρος $\frac{V_n^2}{2 \cdot g}$ είναι άγνωστος.

- Υπολογίζουμε τον παρακάτω όρο Γ στον αγωγό (**n**) όπου ζητείται η διάμετρος:

$$\Gamma = H - \sum_{i=1}^{(n-1)} h_{fi} - \sum_{i=0}^n h_{Ti} = h_{fn} + \frac{V_n^2}{2 \cdot g} \quad (37a)$$

- Εφαρμόζουμε την παρακάτω **παραλλαγή** του Προβλήματος **Λ3**

- Προσδιορίζουμε τον όρο:

$$C_r = \left(\frac{L \cdot Q^2}{\Gamma} \right)^{0,2} \quad (20a) - \text{παραλείπουμε δηλαδή τον όρο } \frac{V_n^2}{2 \cdot g}$$

- Επιλέγουμε κανονικά την 1^η τιμή εκκίνησης με βάση όμως τον όρο C_r

$D_1 = a \cdot C_r$ από τον παρακάτω πίνακα:

k_s	0	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00~2,50	3,00	>3,00
a	0,255	0,275	0,285	0,295	0,305	0,310	0,315	0,320~0,325

- Εφαρμόζουμε το Πρόβλημα **Λ1**

-
-
-

- Υπολογίζουμε τις γραμμικές απώλειες: $h_{fn1} = f_1 \cdot \frac{L \cdot V_{n1}^2}{2 \cdot g \cdot D_1} \quad (8)$

- Υπολογίζουμε τον όρο: $\Gamma_1 = h_{fn1} + \frac{V_{n1}^2}{2 \cdot g}$

- Ελέγχουμε τη σύγκλιση $\frac{|\Gamma_1 - \Gamma|}{\Gamma} \leq 5\% \quad (38)$

4.2.5 Υπολογισμός του συντελεστή τοπικών απωλειών μιας δικλείδας **k_{Τi}**
κόμβος i - Πρόβλημα **Λ8**

Αξιοποίηση του Προβλήματος **Λ1**

- Αποφασίζουμε εάν θα ληφθούν υπόψη οι λοιπές τοπικές απώλειες: βλ. (28)
- Εφαρμόζουμε τη διαδικασία επίλυσης του Προβλήματος **Λ1** σε όλους τους αγωγούς του συστήματος
- Υπολογίζουμε - μόνο εάν υπάρχει εκροή στην ατμόσφαιρα - τον όρο ο οποίος εκφράζει την κινητική ενέργεια της εξερχόμενης φλέβας από τον τελευταίο

αγωγό n του συστήματος: $\frac{V_n^2}{2 \cdot g}$, όπου $V_n = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_n^2}$

- Υπολογίζουμε - μόνο εάν δεν αμελούνται - όλες τις λοιπές τοπικές απώλειες σε

όλους τους κόμβους του συστήματος: $h_{Ti} = \frac{k_{Ti} \cdot V_i^2}{2 \cdot g}$, όπου $V_i = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_i^2}$

- Υπολογίζουμε τις τοπικές απώλειες λόγω της δικλείδας στον κόμβο i:

- $h_{Ti} = H - \sum_{i=1}^{(n)} h_{fi} - \sum_{i=0}^n h_{Ti} - \frac{V_n^2}{2 \cdot g}$ (39)

- Υπολογίζουμε την ταχύτητα στον αγωγό ανάντη ή συνήθως κατάντη της

δικλείδας, όπου η διάμετρος είναι μικρότερη: $V_{i+1} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_{i+1}^2}$

- Υπολογίζουμε το συντελεστή τοπικών απωλειών της δικλείδας: $k_{Ti} = h_{Ti} \frac{2 \cdot g}{V_{i+1}^2}$

- Τυποποίηση διαδικασίας:

Q [m ³ /s]	D_i [m]	k_{si} [m]	L_i [m]	v [m ² /s]	V_i [m/s]	R_i	F_i	h_{fi} [m]
Σh_{fi}								

h_{Ti} [m]	V_{i+1} [m/s]	k_{Ti} [m]

Σημείωση 1: Χειριστήκαμε (βλ. 2.3.5 - Πρόβλημα **Λ3**) τον υπολογισμό της θεωρητικής διαμέτρου D και πληροφορηθήκαμε ότι, διάμετροι εμπορίου υπάρχουν σε περιορισμένες - τυποποιημένες τιμές.

- Μία πρακτική λύση είναι:
 - Η πρόβλεψη **διαμέτρου** με τιμή ίση με την **αμέσως μεγαλύτερη** από τυποποιημένη κλάση της τιμής της *θεωρητικής*, σε **όλο** το δεδομένο **μήκος** του **αγωγού**
 - **και** η πρόβλεψη **δικλείδας** της οποίας ο συντελεστής τοπικών απωλειών υπολογίζεται ως άνω.

Από ενεργειακή προσέγγιση είναι δυνατό να προβλεφθεί μεγαλύτερη διάμετρος από οιαδήποτε τυποποιημένη κλάση, αλλά δεν οδηγεί συνήθως σε βέλτιστη οικονομική λύση...

- Μία εναλλακτική πρακτική λύση αποτελεί:
 - Η πρόβλεψη **ζεύγους διαμέτρων**, με τιμές **αμέσως μεγαλύτερη** και **αμέσως μικρότερη** από τυποποιημένη κλάση της τιμής της *θεωρητικής*:
 - Το **ζεύγος** είναι **ενεργειακά ισοδύναμο** με τη **θεωρητική διάμετρο**.
 - Οι δύο **διάμετροι** του ζεύγους προβλέπονται με **διαφορετικά μήκη**, των οποίων το **άθροισμα** είναι **ίσο** με το δεδομένο - συνολικό **μήκος** του **αγωγού**.
 - Στη λύση αυτή προσδιορίζονται τα **μήκη εφαρμογής εκάστης** εκ των **διαμέτρων** από το επόμενο Πρόβλημα **Λ9**.

Και στη λύση αυτή - από ενεργειακή προσέγγιση - είναι δυνατό να προβλεφθεί οιαδήποτε ζεύγος διαμέτρων με τιμές μεγαλύτερη / μικρότερη της θεωρητικής από οιαδήποτε τυποποιημένη κλάση, αλλά επίσης δεν οδηγεί συνήθως σε βέλτιστη οικονομική λύση...

4.2.6 Υπολογισμός του *ισοδυνάμου ζεύγους διαμέτρων εμπορίου* **D_α** & **D_κ** αγωγός (i) - Πρόβλημα **Λ9**

Αξιοποίηση του Προβλήματος **Λ1**

(Υποτίθεται ότι, **έχει προηγηθεί** ο υπολογισμός της *θεωρητικής* διαμέτρου - **Λ3**)

- Επιλέγουμε το ζεύγος διαμέτρων **D_α** & **D_κ**
- Έχουμε ήδη αποφασίσει εάν θα ληφθούν υπόψη οι τοπικές απώλειες: βλ. (28)
- Υπολογίζουμε - μόνο εάν δεν αμελούνται ως άνω - τις τοπικές απώλειες λόγω της διαφοράς των διαμέτρων του ζεύγους
- Έχουμε ήδη υπολογίσει τις γραμμικές απώλειες στον αγωγό (i):

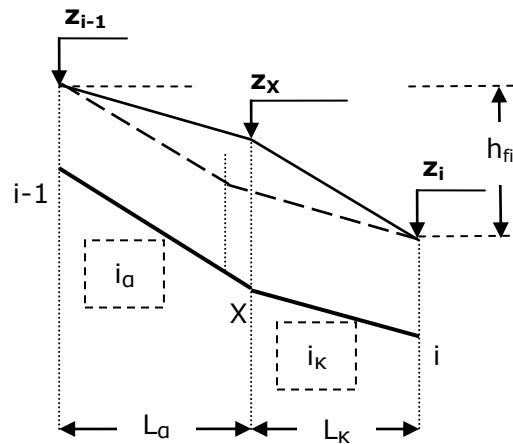
$$h_{fi} = H - \sum_{i=(1)}^{(i-1)} h_{fi} - \sum_{(i+1)}^{(n)} h_{fi} - \sum_{i=0}^n h_{Ti} - \frac{V_n^2}{2 \cdot g} \quad (37)$$

- Υπολογίζουμε τις δύο κλίσεις της Γραμμής Ενέργειας **J_α** & **J_κ** για τις δύο διαμέτρους **D_α** & **D_κ** (μέσω **Λ1**)
- Υπολογίζουμε τα δύο μήκη **L_α** & **L_κ** εφαρμογής των διαμέτρων **D_α** & **D_κ**:

$$L_{\alpha} = \frac{h_{fi} - J_{\kappa} \cdot L}{J_{\alpha} - J_{\kappa}} \quad (40) \text{ και } L_{\kappa} = L - L_{\alpha} \quad (41)$$

- Υπολογίζουμε τελικώς τις γραμμικές απώλειες στους δύο αγωγούς – με βάση τα h_{fi} της επίλυσης του **Λ1** - τις στρογγυλεύουμε ώστε να είναι: $\Sigma h_{fak} = h_{fi}$ και χαράζουμε επακριβώς τη Γραμμή Ενέργειας με το ενεργειακό υψόμετρο του κόμβου αλλαγής διαμέτρου.

Σημείωση 1: Η **μεγαλύτερη** διάμετρος τοποθετείται γενικώς **ανάντη**. Ενεργειακά όμως η σχετική θέση τοποθέτησης των διαμέτρων είναι αδιάφορη.



- Τυποποίηση διαδικασίας:

Q [m ³ /s]	D [m]	k_s [m]	L [m]	v [m ² /s]	V [m/s]	R	f	J

Σημείωση 2: Η ως άνω μεθοδολογία επίλυσης – με αξιοποίηση της δυνατότητας υπολογισμού της κλίσης της Γραμμής Ενέργειας **J** – δηλαδή εφαρμογή **τμήματος** του Προβλήματος **Λ1**, έχει ευρύτερη εφαρμογή, την οποία θα συναντήσουμε και εφαρμόσουμε και σε άλλες περιπτώσεις εις τη συνέχεια.

4.3 Ερωτήσεις κατανόησης και Εφαρμογές υπολογισμού

4.3.1 (μία μόνο απάντηση είναι ορθή)

	Σε όλο το μήκος ενός ομοιόμορφου αγωγού:
	Η διάμετρος παραμένει σταθερή
	Η ισοδύναμη τραχύτητα παραμένει σταθερή
	Η παροχή παραμένει σταθερή
✓	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Σε συστήματα αγωγών η ενεργειακή βελτιστοποίηση:
	Αποτελεί την τελική – τεχνική λύση
	Έπεται της οικονομικής βελτιστοποίησης
	Δεν συνδέεται με την οικονομική βελτιστοποίηση
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
✓	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Σε συστήματα αγωγών η ενεργειακή βελτιστοποίηση βασίζεται:
	Στην εξίσωση Bernoulli
	Στην εξίσωση ποσότητας κίνησης
✓	Στις εξισώσεις συνέχειας και ενέργειας και τη Γραμμή Ενέργειας
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Σε συστήματα αγωγών η ενεργειακή βελτιστοποίηση εξασφαλίζει ότι:
✓	Ολόκληρο το ενεργειακό διαθέσιμο θα καταναλωθεί σε απώλειες ενέργειας, ή /και θα παραμείνει ως ενέργεια της εκρέουσας φλέβας στην περίπτωση εκροής στην ατμόσφαιρα
	Δεν θα υπάρχουν απώλειες στην παροχή του συστήματος λόγω διαρροών
	Θα ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ενέργειας
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Σε απλά συστήματα σωλήνων:
	Αμελούνται οι τοπικές απώλειες
	Αποκλείεται να υπάρχουν δικλείδες
✓	Η ροή πραγματοποιείται λόγω της βαρύτητας
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

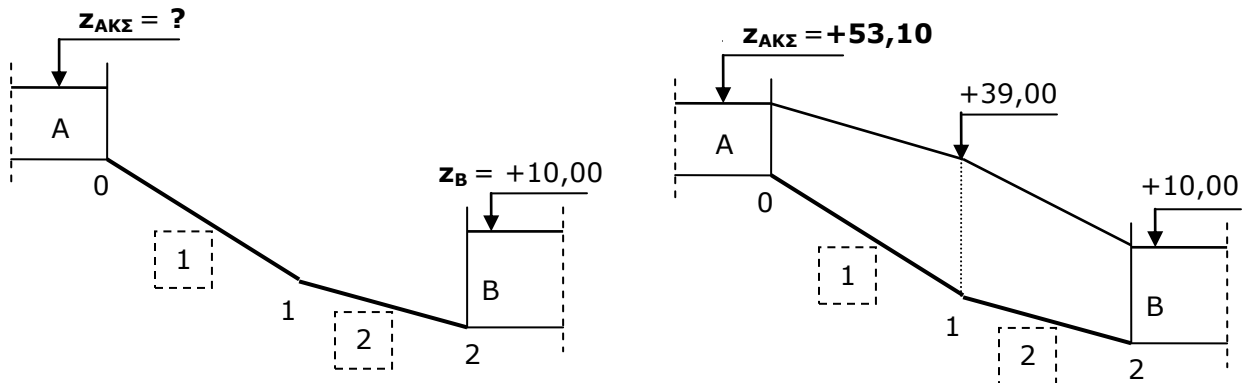
	Σε απλά συστήματα σωλήνων:
	Αποκλείεται η ροή να καταλήγει στη θάλασσα
	Συμπεριλαμβάνονται οπωσδήποτε δύο δεξαμενές
	Δεν επιτρέπεται η παροχέτευση μη επεξεργασμένων λυμάτων
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
✓	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

4.3.2 Η εφαρμογή επικεντρώνεται στο Πρόβλημα **Λ5**

Στο υδραγωγείο του σχήματος η παροχή νερού για την **Κατωτάτη Στάθμη** στη δεξαμενή **A** είναι **Q: 125 lt /s**. Δίδονται επίσης τα στοιχεία:

αγωγός	D_i [mm]	k_{si} [mm]	L_i [m]
(1)	300	0,50	1.160
(2)	250	0,50	920

Να υπολογιστεί η **Κ.Σ.** της δεξαμενής **A** και να χαραχθεί η Γραμμή Ενέργειας.



(28) → οι τοπικές απώλειες αμελούνται

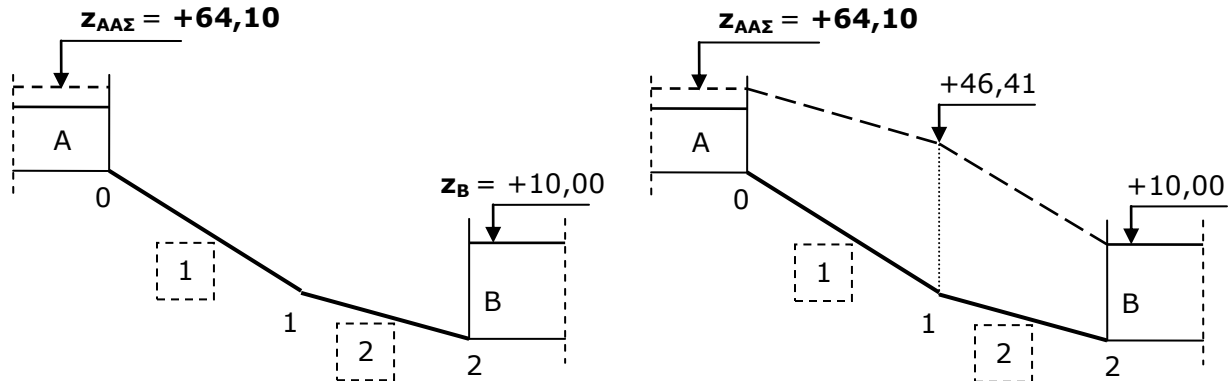
Q [m³/ s]	D _i [m]	k _{si} [m]	L _i [m]	v [m²/ s]	V _i [m/ s]	R _i	F _i	h _{fi} [m]
0,125	0,300	0,50	1.160	1,1.10 ⁻⁶	1,768	4,823×10 ⁵	0,0229	14,10
	0,250	0,50	920		2,546	5,787×10 ⁵	0,0238	29,00
Σh _{fi}								43,10

$$z_{AK\Sigma} = 10,00 + (14,10 + 29,00) = +53,10 \text{ m}, (z_1 = 10,00 + 29,00 = +39,00 \text{ m})$$

4.3.3 Η εφαρμογή επικεντρώνεται στο Πρόβλημα **Λ6**

Στο προηγούμενο υδραγωγείο η **Ανωτάτη Στάθμη** στη δεξαμενή **A** είναι υψηλότερη από την Κ.Σ. κατά **11,00 m**.

Να υπολογιστεί η αντίστοιχη παροχή **Q*** και να χαραχθεί η Γραμμή Ενέργειας.



Οι τοπικές απώλειες αμελούνται και δεν υπάρχει ελεύθερη εκροή

H [m]	D _i [m]	k _{si} [m]	L _i [m]	v [m ² /s]	C _H	C _{fi}	C _T	C _V	f _{i0}
54,10	0,300	0,50	1.160	1,1·10 ⁻⁶	25,5881	4,774×10 ⁵	0	X	0,0227
	0,250	0,50	920			9,421×10 ⁵		0	0,0240

Q ₁ [m ³ /s]	D _i [m]	k _{si} [m]	v [m ² /s]	V _{i1} [m/s]	R _{i1}	f _{i1}	Q ₂ [m ³ /s]	ΔQ [%]
0,1399	0,300	0,50	1,1·10 ⁻⁶	1,979	5,398×10 ⁵	0,0228	0,1402	0,20%✓
	0,250	0,50		2,850	6,478×10 ⁵	0,0238		

→ **Q* = 140 lt/s** και **h_{f1} = 17,69 m**, **h_{f2} = 36,41 m**, (**z₁ = 10,00 + 36,41 = +46,41 m**)

Σημείωση 1: <Εδώ> η τάξη μεγέθους της είναι **Q*** γνωστή!

Αξιοποιώντας **δημιουργικά** τις (9) και (35) προκύπτει:

$$Q_1 = Q \cdot \left(\frac{H^*}{H} \right)^{0,5} = 0,125 \cdot \left(\frac{54,1}{43,1} \right)^{0,5} = 0,140$$

Σημείωση 2: Ας υπολογίσουμε τις τοπικές απώλειες για να διαπιστώσουμε την επίδρασή τους στην τάξη μεγέθους της ακρίβειας των υπολογισμών:

$$h_{T0} = 0,5 \frac{V_1^2}{2 \cdot g} = 0,100\text{m}, \quad h_{T1} = 0,0935 \frac{V_2^2}{2 \cdot g} = 0,039\text{m}, \quad h_{T2} = 1,0 \frac{V_2^2}{2 \cdot g} = 0,415\text{m}$$

$$\rightarrow \sum_0^1 h_{Ti} = 0,61\text{m} = 1,12\% \cdot \sum_{(1)}^{(2)} h_{fi}$$

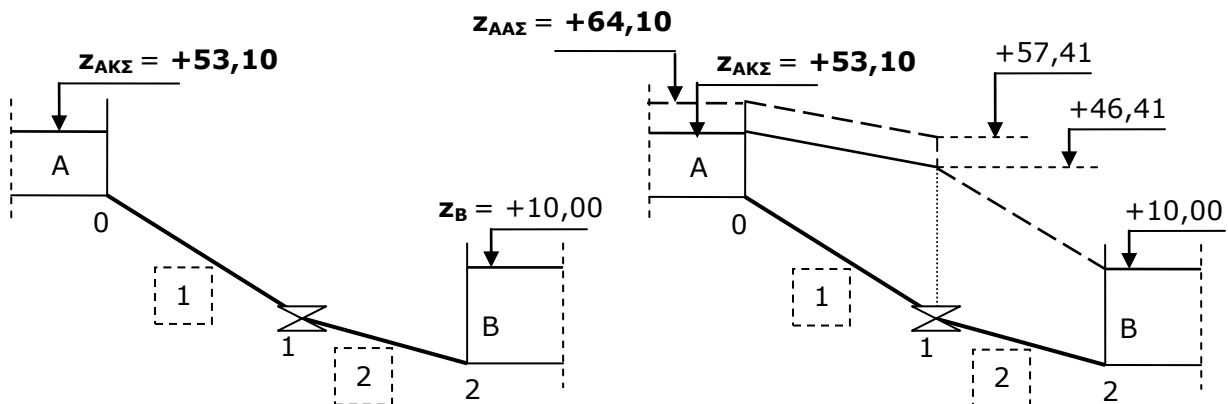
4.3.4 Η εφαρμογή επικεντρώνεται στα Προβλήματα **Λ17** και **Λ18**

Στο προηγούμενο υδραγωγείο εξετάζεται η εναλλακτική δυνατότητα, ώστε η παροχή νερού **και** για την **Κατωτάτη Στάθμη** στη δεξαμενή **A** να είναι η Q^* : **140** lt /s.

A) Να υπολογιστεί η *εναλλακτικώς* απαιτούμενη (θεωρητική) διάμετρος $D_{\theta 1}^*$ του αγωγού (**1**) και να χαραχθεί η Γραμμή Ενέργειας.

B) Στη λύση της *εναλλακτικής* ως άνω διαμέτρου $D_{\theta 1}^*$ προβλέπεται και η τοποθέτηση στον κόμβο 1 δικλείδας, ώστε η παροχή για την **Ανώτατη Στάθμη** στη δεξαμενή **A** να είναι η Q^* : **140** lt /s.

Να υπολογιστεί ο συντελεστής τοπικών απωλειών k_{T1} στη δικλείδα και να χαραχθεί η Γραμμή Ενέργειας.



Παρατήρηση A: Εφ' όσον η παροχή εις τον αγωγό (2) είναι η Q^* : **140** lt /s, οι απώλειες στον αγωγό είναι γνωστές – τις έχουμε ήδη υπολογίσει, άρα και το ενεργειακό υψόμετρο του κόμβου 1 είναι **γνωστό** ☺

Το έχουμε ήδη υπολογίσει εις την 4.3.3 : $z_1 = +46,41 \rightarrow h_{f1} = 53,10 - 46,41 = \mathbf{6,69}$ m

$J = \frac{h_f}{L}$	Q [m ³ /s]	k_s [m]	$v \cdot 10^6$ [m ² /s]	C	A · 10 ³	B · 10 ⁻⁶	D_i [m]	$\frac{\delta D}{V}$ [%] [m/s]	D_{θ} [mm]
0,00577	0,140	0,0005	1,1	1,2772	0,135	8,208	0,3640		
							0,3606	0,94✓ 1,37✓	361

Παρατήρηση B: Εφ' όσον η παροχή εις τούς αγωγούς (1), (2) είναι η Q^* : **140** lt /s, οι απώλειες εις τούς αγωγούς είναι γνωστές – τις έχουμε ήδη υπολογίσει:

- ως άνω: $h_{f1} = \mathbf{6,69}$ m
- 4.3.3: $h_{f2} = \mathbf{36,41}$ m
- Επομένως οι συνολικές γραμμικές απώλειες στο σύστημα είναι **γνωστές** ☺
→ $\Sigma h_{fi} = 6,69 + 36,41 = \mathbf{43,10}$ m
- Άρα οι τοπικές απώλειες λόγω της δικλείδας στον κόμβο 1 είναι **γνωστές** ☺
→ $h_{T1} = (64,10 - 10,00) - 43,10 = \mathbf{11,00}$ m

$$○ V_2 = \frac{4 \cdot Q^*}{\pi \cdot D_2^2} = 2,852 \rightarrow \frac{V_2^2}{2 \cdot g} = 0,4146 \rightarrow k_{T1} = h_{T1} \frac{2 \cdot g}{V_2^2} = \mathbf{26,532}$$

4.3.5 Η εφαρμογή επικεντρώνεται στο Πρόβλημα **Π9**

Στο προηγούμενο υδραγωγείο εξετάσθηκε η εναλλακτική δυνατότητα, ώστε η παροχή νερού και για την **Κατωτάτη Στάθμη** στη δεξαμενή **A** να είναι η **Q***: **140 lt /s** και υπολογίσθηκε η απαιτούμενη **θεωρητική** διάμετρος του αγωγού (**1**).

Να υπολογιστούν τα μήκη αγωγών διαμέτρων **400 m.m** και **250 m.m**, ώστε να αποτελούν το ισοδύναμο ζεύγος διαμέτρων εμπορίου της υπολογισθείσας **θεωρητικής** διαμέτρου.

Q [m ³ /s]	D [m]	k_s [m]	v [m ² /s]	V [m/s]	R	f	J
0,140	0,400	0,0005	1,1.10⁻⁶	1,114	4,051×10 ⁵	0,0215	0,00340
	0,250			2,852	6,482×10 ⁵	0,0238	0,03947

(40) → **L_{a1} = 1.083,88 m** και (41) → **L_{κ1} = 76,12 m**

Σημείωση 1: Το επιβαλλόμενο από την εκφώνηση ζεύγος διαμέτρων **δεν** περιλαμβάνει την **αμέσως μικρότερη** διάμετρο από τον πίνακα διαμέτρων *εμπορίου* (βλ. 2.3.5), εάν είχαμε επιλέξει *ελεύθερα*, η μικρότερη διάμετρος θα ήταν 350 m.m

Σημείωση 2: Επιλέγουμε γενικώς να τοποθετήσουμε τη μεγαλύτερη διάμετρο: 400 m.m ανάντη (βλ. 4.2.6)

Τελικώς δηλαδή: **L₍₄₀₀₎ ≈ 1.084 m** και **L₍₂₅₀₎ ≈ 76 m**

4.4 Γήρανση σωλήνων

4.4.1 Εισαγωγή

- Εξετάσαμε ήδη (βλ. 2.1.7) το φαινόμενο, τις επιπτώσεις και τη λογιστική μέθοδο με την οποία το χειριζόμαστε.
- Διατυπώθηκε η σχέση (15) $k_{st} = k_{s0} + a \cdot t$, γραμμικής ως προς το χρόνο μεταβολής της αρχικής ισοδύναμης τραχύτητας.
- Επισημάνθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης του Προβλήματος **Π4** (βλ. 2.3.6) για τον υπολογισμό της k_{st} .

4.4.2 Πρακτικές προσεγγίσεις σε συστήματα αγωγών

- Το φαινόμενο είναι δυνατό να το χειριστούμε **προληπτικώς**:
 - Εκτιμούμε - από την εμπειρία - το συντελεστή γήρανσης **a**
 - Χρησιμοποιούμε στο σχεδιασμό τις εκτιμώμενες ισοδύναμες τραχύτητες **k_{st}** , **αντί** για τις αντίστοιχες **k_{s0}** .
 - Δηλαδή υπερδιαστασιολογούμε τις διαμέτρους (ή σπανιότερα το ενεργειακό διαθέσιμο), ώστε **μετά από t** έτη λειτουργίας η διερχόμενη <τότε> παροχή να είναι **ίση** με την **αρχικώς απαιτούμενη** από τις προδιαγραφές του σχεδιασμού: **$Q_t = Q_0$**
 - Προβλέπουμε την τοποθέτηση **δικλείδας** (βλ. 4.2.5 - Σημείωση 1)
 - Η **δικλείδα** είναι αρχικώς **σχετικώς κλειστή**
 - Υπολογίζεται - προδιαγράφεται να **ανοίγει σταδιακώς**
 - Όστε σε **όλες** τις χρονικές **φάσεις** λειτουργίας να παροχετεύεται η **αρχικώς απαιτούμενη** από τις προδιαγραφές του σχεδιασμού **Q_0**
- Το φαινόμενο είναι δυνατό να το χειριστούμε με **επανορθωτικές** ενέργειες:
 - Διαπιστώνεται μετά από **t** έτη λειτουργίας, ότι η διερχόμενη <τότε> παροχή είναι **μικρότερη** από την **αρχικώς απαιτούμενη** από τις προδιαγραφές του σχεδιασμού: **$Q_t < Q_0$**
 - Υπολογίζουμε την <παρούσα> ισοδύναμη τραχύτητα και το συντελεστή γήρανσης **a**
 - Επεμβαίνουμε με αντικατάσταση (τμημάτων) σωλήνων ή τοποθέτηση παραλλήλων σωλήνων (βλ. Κεφάλαιο 5), (ή σπανιότερα με αύξηση του ενεργειακού διαθέσιμου).

4.4.3 Μέθοδοι υπολογισμού

- Προτείνονται δύο μέθοδοι, οι οποίες εφαρμόζονται αναλόγως με χαρακτηριστικά του συστήματος:

- Μέθοδος Α
 - ο Εφαρμόζεται όταν το σύστημα περιλαμβάνει σωλήνες **μεγάλου εύρους τιμών** ισοδύναμης τραχύτητας ή / και διαμέτρων
 - ο **Δεχόμεθα** ότι μετά τη γήρανση (και παρά τη μεταβολή της παροχής), οι **γραμμικές απώλειες** κάθε αγωγού παραμένουν **αμετάβλητες**
 - ο Δηλαδή: $h_{fit} = h_{fio}$
 - ο Υπολογίζουμε, μέσω του Προβλήματος **Λ14** τα k_{ist} και a_i **εκάστου** αγωγού
 - ο Δηλαδή ο **συντελεστής γήρανσης** προκύπτει **διαφορετικός** σε κάθε αγωγό
- Μέθοδος Β
 - ο Εφαρμόζεται όταν το σύστημα περιλαμβάνει σωλήνες **μικρού εύρους τιμών** ισοδύναμης τραχύτητας ή / και διαμέτρων
 - ο **Δεχόμεθα** ότι το **σύνολο των αγωγών** - ανεξαρτήτως πραγματικής ποιότητας και διαμέτρου ενός εκάστου - συμπεριφέρεται λογιστικά όπως η **ισοδύναμη διάμετρος** του συστήματος
 - ο Η **ισοδύναμη διάμετρος** είναι πλασματική - **ενιαία** διάμετρος με **ενιαία ισοδύναμη τραχύτητα**, η οποία **αντικαθιστά** λογιστικά τις **επί μέρους** - πραγματικές διαμέτρους με τις αντίστοιχες ισοδύναμες τραχύτητές τους
 - ο Υπολογίζουμε την **ισοδύναμη διάμετρο** $D_{ισδ}$ του συστήματος
 - ο Υπολογίζουμε, μέσω του Προβλήματος **Λ14** τα k_{ist} και a_i της **ισοδυνάμου διαμέτρου**
 - ο Δηλαδή ο **συντελεστής γήρανσης** προκύπτει **ενιαίος** για το **σύστημα**

4.4.4 Υπολογισμός των συντελεστών γήρανσης - Πρόβλημα **Λ10**

Αξιοποίηση του Προβλήματος **Λ14**

- Εφαρμόζουμε το Πρόβλημα **Λ14** σε κάθε αγωγό χωριστά, λαμβάνοντας υπόψη τις αρχικές γραμμικές απώλειες κάθε αγωγού h_{fio} και την παρούσα παροχή Q_t
- Υπολογίζουμε για κάθε αγωγό χωριστά το συντελεστή γήρανσης:

$$a_i = \frac{(k_{sti} - k_{s0i})}{t} \quad (42)$$

- Τυποποίηση διαδικασίας:

Q_t [m ³ /s]	D_i [m]	h_{fio} [m]	L_i [m]	v [m ² /s]	k_{sio} [mm]	C_i	k_{sit} [mm]	a_i

4.5 Ερωτήσεις κατανόησης και Εφαρμογές υπολογισμού

4.5.1 (μία μόνο απάντηση είναι ορθή)

	Το φαινόμενο της γήρανσης των σωλήνων:
	Είναι δυνατό να το χειριστούμε προληπτικώς
	Είναι δυνατό να το χειριστούμε με επανορθωτικές ενέργειες
	Δεχόμαστε ότι δεν εμφανίζεται σε υδραυλικώς λείους σωλήνες
✓	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Το φαινόμενο της γήρανσης των σωλήνων είναι δυνατό να το χειριστούμε προληπτικώς:
	Μόνο με πρόβλεψη στο σχεδιασμό χρήσης υδραυλικώς λείων σωλήνων
	Μόνο με πρόβλεψη στο σχεδιασμό εγκατάστασης αντλιών
✓	Με υπερδιαστασιολόγηση των διαμέτρων σχεδιασμού
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Το φαινόμενο της γήρανσης των σωλήνων είναι δυνατό να το χειριστούμε μεταξύ άλλων με τις παρακάτω επανορθωτικές ενέργειες:
✓	Αντικατάσταση τμημάτων των γηρασμένων σωλήνων
	Καθαρισμό των γηρασμένων σωλήνων
	Τοποθέτηση δικλείδων
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Σε απλά συστήματα σωλήνων:
	Είναι δυνατό να θεωρήσουμε ότι, η διερχόμενη παροχή σε κάθε σωλήνα δεν επηρεάζεται σημαντικώς από το φαινόμενο της γήρανσης
	Είναι δυνατό να θεωρήσουμε ότι, οι συντελεστές γήρανσης είναι ίδιοι σε κάθε σωλήνα
✓	Είναι δυνατό να θεωρήσουμε ότι, οι γραμμικές απώλειες σε κάθε σωλήνα δεν επηρεάζονται σημαντικώς από το φαινόμενο της γήρανσης
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

	Σε απλά συστήματα σωλήνων:
	Δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της γήρανσης
	Το φαινόμενο της γήρανσης προλαμβάνεται με την τοποθέτηση δικλείδων
	Το φαινόμενο της γήρανσης θεωρείται αμελητέο, όταν αμελούνται οι τοπικές απώλειες
	Ισχύουν ΟΛΑ τα παραπάνω
✓	ΔΕΝ ισχύει ΤΙΠΟΤΑ από τα παραπάνω

4.5.2 Η εφαρμογή αξιοποιεί τα Προβλήματα **Λ9**, **Λ8** και (**Λ1** με Πίνακες)

Στο υδραγωγείο των εφαρμογών 4.3.1 έως 4.3.5 εκτιμάται – στη φάση σχεδιασμού – ότι ο συντελεστής γήρανσης για όλους τους αγωγούς θα είναι: $a_i = 0,025$ m.m/έτος. Προδιαγράφεται ότι, η παροχή νερού για την **Κατωτάτη Στάθμη** στη δεξαμενή **A** θα είναι εξασφαλισμένη: $Q_{30} = Q_0$: **125** lt /s για **30 έτη** από την κατασκευή - έναρξη λειτουργίας του υδραγωγείου.

Ζητείται λύση για την προληπτική αντιμετώπιση του φαινομένου της γήρανσης.

Υπολογίζουμε την εκτιμώμενη ισοδύναμη τραχύτητα (όλων των αγωγών) μετά από 30έτη: (15) $\rightarrow k_{s30} = 0,50 + 0,025 \cdot 30 = 1,25$ m.m

Προσοχή! Δεν είναι βέβαιο ότι ο συνδυασμός των διαμέτρων 300/250 θα μας καλύπτει και στην περίπτωση της εκτιμώμενης (αυξημένης) τραχύτητας $\bullet^*$.

Αξιοποιούμε τους Πίνακες , για να ελέγξουμε κατά πόσο η μεγαλύτερη διάμετρος μας καλύπτει, εάν προβλεφθεί για όλο το μήκος του συστήματος:
 $\rightarrow$ εφαρμόζουμε το Πρόβλημα **Λ1** (βλ. 2.3.8)

k_s [mm]	D [mm]	Q [m ³ /s]	J	L [m]	h_f [m]
1,25	300	0,125	0,0153960	2.080	32,02 < 43,10 ✓

Σημείωση 1: Εάν δεν αρκεί το ενεργειακό διαθέσιμο δοκιμάζουμε με την επόμενη διάμετρο *εμπορίου*. Εφόσον αυτή μας καλύπτει επιλέγουμε το αντίστοιχο ζεύγος. (δηλαδή <εδώ> θα επιλέγαμε 350/300)

Σημείωση 2: Εάν η τιμή της ισοδύναμης τραχύτητας είναι μεταξύ δύο Πινάκων, κάνουμε απλή γραμμική παρεμβολή μεταξύ των δύο τιμών της J . (Δεν απαιτείται *μεγάλη* ακρίβεια, έλεγχος επάρκειας κάνουμε...)

Αξιοποιούμε το Πρόβλημα **Λ9**

Q [m ³ /s]	D [m]	k_s [m]	v [m ² /s]	V [m/s]	R	f	J
0,125	0,300	0,00125	$1,1 \cdot 10^{-6}$	1,768	$4,823 \times 10^5$	0,0291	0,01545
	0,250			2,546	$5,787 \times 10^5$	0,0306	0,04047

(40) $\rightarrow L_1 = 1.641,75$ m και (41) $\rightarrow L_2 = 438,25$ m

$\rightarrow h_{f130} = 0,01545 \cdot 1641,75 = 25,35$ m και $h_{f230} = 0,04047 \cdot 438,25 = 17,75$ m

Αξιοποιούμε προφανώς και το Πρόβλημα **Λ8**

- Για παροχή Q_0 : **125** lt /s και $k_{i50} = 0,25$ m.m έχουμε ήδη υπολογίσει τα βασικά στοιχεία (βλ. 4.3.2). Με βάση τα νέα μήκη είναι:

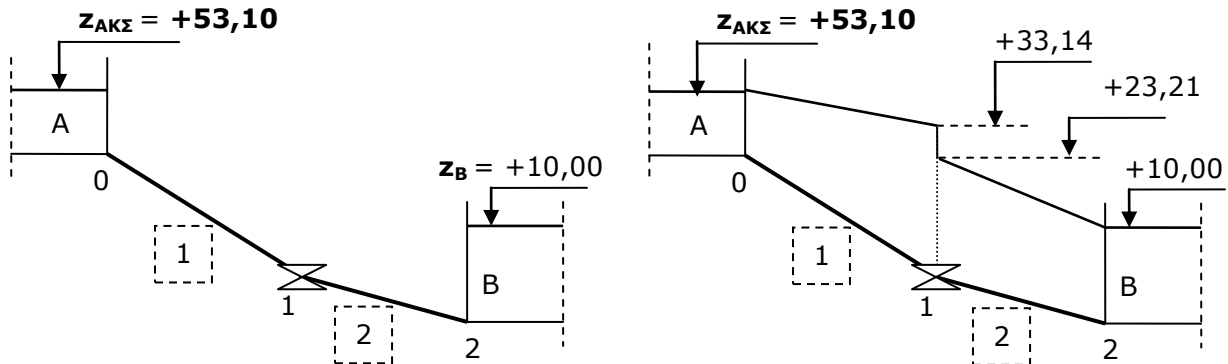
$$h_{f10} = \frac{1641,75}{1160,00} 14,10 = 19,96\text{m} \text{ και } h_{f20} = \frac{438,25}{920,00} 29,00 = 13,81\text{m}$$

$$\rightarrow \sum h_{f10} = 33,77\text{m} \rightarrow h_{T10} = (53,10 - 10,00) - 33,77 = 9,33\text{m}$$

(απαιτούμενες τοπικές απώλειες λόγω της δικλίδας στον κόμβο 1 στην αρχή)

$$\bullet \quad V_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_2^2} = 2,546 \rightarrow \frac{V_2^2}{2 \cdot g} = 0,3305 \rightarrow k_{T10} = h_{T10} \frac{2 \cdot g}{V_2^2} = 28,229$$

Σημείωση 3: Ο συντελεστής απωλειών της δικλείδας θα μεταβάλλεται από **28,229** στην αρχή, έως **0** εις το πέρας της 30ετίας – η δικλείδα σταδιακώς θα ανοίγει! Ο ρυθμός της μεταβολής αυτής {άνοιγμα δικλείδας → μείωση συντελεστή} είναι δυνατό να *προδιαγραφεί* σε τακτά διαστήματα (π.χ. *ανά έτος*).



4.5.3 Η εφαρμογή αξιοποιεί το Πρόβλημα **Π10**

Στο προηγούμενο υδραγωγείο τα προληπτικά μέτρα για την αντιμετώπιση του φαινομένου της γήρανσης (βλ. 4.5.2) αστόχησαν:

Μετά την πάροδο 20ετίας από την κατασκευή και με τη δικλείδα πλήρως ανοιχτή, η παροχή νερού για την **Κατωτάτη Στάθμη** στη δεξαμενή **A** είναι: **$Q_{20} = 120$ lt /s.**

α) Να υπολογισθεί – απολογιστικώς – ο συντελεστής γήρανσης.

β) Να προταθούν και τεκμηριωθούν λύσεις διορθωτικών ενεργειών, ώστε με τη **λήξη της 30ετίας** να παροχετεύεται (για την **Κ.Σ.** στη δεξαμενή **A**), η **απαιτούμενη – συμβατική** παροχή: **$Q_{30} = Q_0 = 125$ lt /s.**

- Αρχικώς υπολογίζουμε το συντελεστή γήρανσης των αγωγών - **Π10**

Q_t [m ³ /s]	D_i [m]	h_{fio} [m]	L_i [m]	v [m ² /s]	k_{sio} [mm]	C_i	k_{sit} [mm]	a_i
0,120	0,300	25,35	1.641,75	$1,1 \cdot 10^{-6}$	0,50	-2,2510	1,63	0,0566
	0,250	17,75	438,25		0,50	-2,1776	1,62	0,0562

Υπολογίζουμε απολογιστικώς την ισοδύναμη τραχύτητα (όλων των αγωγών) μετά από 30έτη:

$$(15) \rightarrow k_{s130} = 0,50 + 0,0566 \cdot 30 = 2,198 \text{ m.m}, k_{s230} = 0,50 + 0,0562 \cdot 30 = 2,186 \text{ m.m}$$

Σημείωση 1: Επειδή η τιμή της ισοδύναμης τραχύτητας είναι περίπου ίση σε όλους τους αγωγούς, θα δεχθούμε **ενιαία** τιμή στρογγυλεύοντας προς τα πάνω: **2,25 m.m**

Σημείωση 2: Σε αυτό το Κεφάλαιο θα εξετάσουμε λύσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν μόνο αντικατάσταση αγωγών. Εις το Κεφάλαιο **5** θα εξετάσουμε και πρόσθετες λύσεις.

Το σύστημά μας περιλαμβάνει διαμέτρους 300 και 250, ενδεικτικές λύσεις είναι:

- ο **A**: Αντικατάσταση τμήματος, ή ολόκληρου του αγωγού (2) Φ250 με *καινούργιο*, της ίδιας (αρχικής) ποιότητας, επίσης Φ250
- ο **B**: Αντικατάσταση τμήματος, ή ολόκληρου του αγωγού (2) Φ250 με *καινούργιο*, της ίδιας (αρχικής) ποιότητας, αλλά Φ300
- ο **Γ**: Αντικατάσταση τμήματος, ή ολόκληρου του αγωγού (2) Φ250 με *καινούργιο*, υδραυλικά λείο, επίσης Φ250
- ο **Δ**: Αντικατάσταση τμήματος, ή ολόκληρου του αγωγού (1) Φ300 με *καινούργιο*, της ίδιας (αρχικής) ποιότητας, επίσης Φ300
- ο Αντικατάσταση τμήματος, ή ολόκληρου του αγωγού (1) Φ300 με *καινούργιο*, υδραυλικά λείο, επίσης Φ300 κ.ο.κ.

Θα εξετάσουμε δειγματοληπτικώς κάποιες από τις ως άνω λύσεις, (**A** έως **Δ**) ελέγχοντας πρώτα τη δυνατότητα εφαρμογής τους $\bullet^*$ και λαμβάνοντας υπόψη ότι: Οι *παλαιοί* αγωγοί θα συνεχίσουν να γηράσκουν, οι *καινούργιοι* αγωγοί θα αρχίσουν να γηράσκουν $\bullet^*$, εκτός εάν είναι υδραυλικά λείοι $\bullet^*$.
Θα αξιοποιήσουμε εναλλακτικώς και τους Πίνακες!

- **A**: Αντικατάσταση τμήματος, ή ολόκληρου του αγωγού (2) Φ250 με *καινούργιο*, της ίδιας (αρχικής) ποιότητας, επίσης Φ250

- Αγωγός (1) *παλαιός*: → εφαρμόζουμε το Πρόβλημα **Λ1** (βλ. 2.3.8)

k_s [mm]	D [mm]	Q [m ³ /s]	J	L [m]	h_f [m]
2,25	300	0,125	0,0183883	1.641,75	30,19 < 43,10 ✓

- Αγωγός (2) *καινούργιος*: → εφαρμόζουμε το Πρόβλημα **Λ1** (βλ. 2.3.8)

k_s [mm]	D [mm]	Q [m ³ /s]	J	L [m]	h_f [m]
0,50	250	0,125	0,0313768	438,25	13,75 → 30,19+13,75= 43,94 > 43,10 ☹

Η λύση **A** είναι ανέφικτη!

- **B**: Αντικατάσταση τμήματος, ή ολόκληρου του αγωγού (2) Φ250 με *καινούργιο*, της ίδιας (αρχικής) ποιότητας, αλλά Φ300

- Αγωγός (1) *παλαιός*: → εφαρμόζουμε το Πρόβλημα **Λ1** (βλ. 2.3.8)
Ως λύση **A** → $h_{f1} = 30,19 < 43,10$ ✓

- Αγωγός (2) *καινούργιος*: → εφαρμόζουμε το Πρόβλημα **Λ1** (βλ. 2.3.8)

k_s [mm]	D [mm]	Q [m ³ /s]	J	L [m]	h_f [m]
0,50	300	0,125	0,0173541	438,25	7,61 → 30,19+7,61= 37,80 < 43,10 ✓

Η λύση **B** είναι εφικτή, θα εφαρμόσουμε παραλλαγή του Προβλήματος **Λ9** (βλ. 4.2.6 - Σημείωση 2) για τμήμα του (2), με $h_{f2} = 53,10 - 30,19 - 10,00 = 12,91$ m
→ $z_1 = 53,10 - 30,19 = +22,91$ m

Σημείωση 3: Φροντίζουμε να αξιοποιήσουμε ήδη υπολογισμένα στοιχεία!

Q [m ³ /s]	D [m]	k_s [m]	v [m ² /s]	V [m/s]	R	f	J
0,125	0,300	0,00050	1,1·10⁻⁶	βλ. 4.3.2			0,01215
	0,250	0,00225		2,546	5,787×10 ⁵	0,0368	0,04860

(40) → **L_{a2} = 230,20 m αντικατάσταση παλαιού Φ250 με καινούργιο Φ300**
h_{f2a} = 2,80 m → z₃ = 22,91-2,80 = +20,11 m

Σημείωση 4: Θα ήταν δυνατό να χρησιμοποιήσουμε για τον υπολογισμό τους Πίνακες, ας τους χρησιμοποιήσουμε απλώς για επαλήθευση:

$$(0,0120889 \cdot 230,20) + (0,0485041 \cdot 208,05) = \mathbf{12,87 \approx 12,91 m} \checkmark$$

➤ **Γ:** Αντικατάσταση τμήματος, ή ολόκληρου του αγωγού (2) Φ250 με καινούργιο, υδραυλικά λείο, επίσης Φ250

• Αγωγός (1) παλαιός: → εφαρμόζουμε το Πρόβλημα **Λ1** (βλ. 2.3.8)
Ως λύση **A** → **h_{f1} = 30,19 < 43,10** ✓

• Αγωγός (2) καινούργιος: → εφαρμόζουμε το Πρόβλημα **Λ1** (βλ. 2.3.8)

k_s [mm]	D [mm]	Q [m ³ /s]	J	L [m]	h_f [m]
0	250	0,125	0,0169422	438,25	7,42 → 30,19+7,42 = 37,61 < 43,10 ✓

Η λύση **Γ** είναι επίσης εφικτή, θα εφαρμόσουμε παραλλαγή του Προβλήματος **Λ9** (βλ. 4.2.6 - Σημείωση 2) για τμήμα του (2), με **h_{f2} = 53,10-30,19-10,00 = 12,91 m**
→ z₁ = 53,10-30,19 = +22,91 m

Αξιοποιούμε <εδώ> τους Πίνακες:

k_s [mm]	D [mm]	Q [m ³ /s]	J
0	250	0,125	0,0169422
2,25			0,0485041

(40) → **L_{a2} = 264,50 m αντικατάσταση παλαιού Φ250 με καινούργιο – λείο Φ250**
h_{f2a} = 4,48 m → z₄ = 22,91-2,80 = +18,43m

Σημείωση 5: Οι λύσεις **B** και **Γ** είναι εφικτές και ενεργειακά ισοδύναμες.

Σε επόμενο επίπεδο πρέπει να συγκριθούν ως προς το κόστος:

[230,20 m].[τιμή Φ300 (0,5m.m)/m] v.s [264,50 m].[τιμή Φ250 (λείος)/m]

➤ **Δ:** Αντικατάσταση τμήματος, ή ολόκληρου του αγωγού (1) Φ300 με καινούργιο, της ίδιας (αρχικής) ποιότητας, επίσης Φ300

• Αγωγός (2) παλαιός: → εφαρμόζουμε το Πρόβλημα **Λ1** (βλ. 2.3.8)

k_s [mm]	D [mm]	Q [m ³ /s]	J	L [m]	h_f [m]
2,25	250	0,125	0,0485041	438,25	21,26 < 43,10 ✓

- Αγωγός (1) καινούργιος: → εφαρμόζουμε το Πρόβλημα **Λ1** (βλ. 2.3.8)

k_s [mm]	D [mm]	Q [m ³ /s]	J	L [m]	h_f [m]
0,50	300	0,125	0,0120889	1.641,75	19,85 → 19,85+21,26= 41,11 < 43,10 ✓

Η λύση **Δ** είναι επίσης εφικτή, θα εφαρμόσουμε παραλλαγή του Προβλήματος **Λ9** (βλ. 4.2.6 - Σημείωση 2) για τμήμα του (2), με $h_{f1} = 53,10 - 21,26 - 10,00 = \mathbf{21,84}$ m
→ $z_1 = 53,10 - 21,84 = \mathbf{+31,26}$ m

Αξιοποιούμε <εδώ> τους Πίνακες:

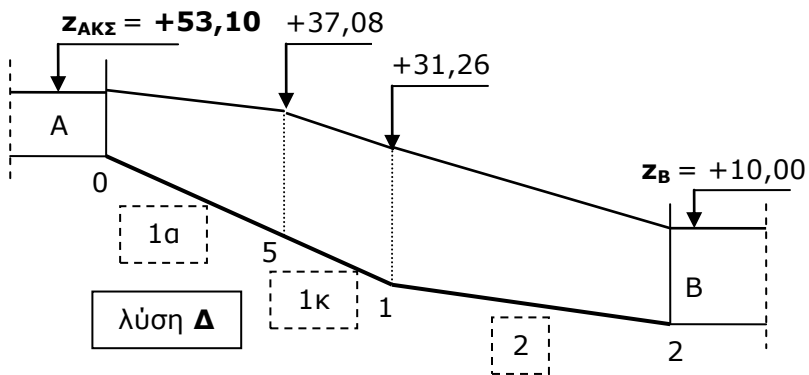
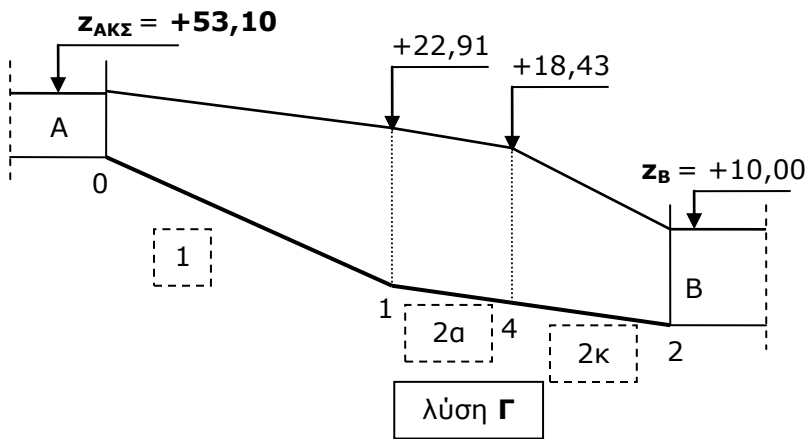
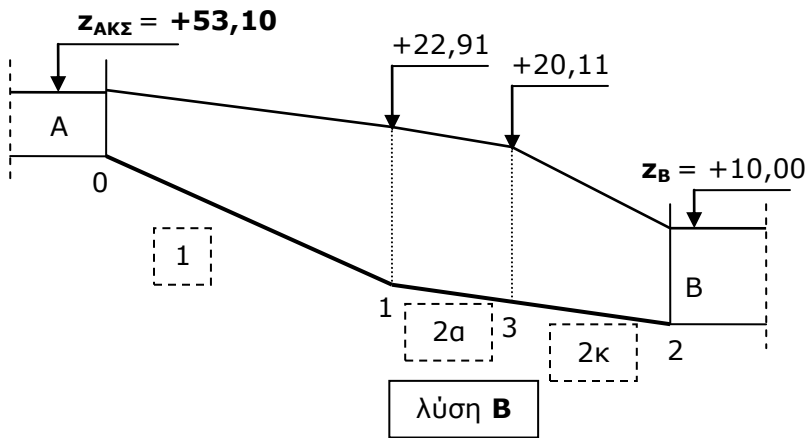
k_s [mm]	D [mm]	Q [m ³ /s]	J
0,50	300	0,125	0,0120889
2,25			0,0183883

(40) → $L_{a1} = \mathbf{1.325,35}$ m αντικατάσταση παλαιού Φ300 με καινούργιο Φ300
 $h_{f1a} = \mathbf{16,02}$ m → $z_5 = 53,1 - 16,02 = \mathbf{+37,08}$ m

Σημείωση 6: Οι λύσεις **B** και **Δ** είναι εφικτές και ενεργειακώς ισοδύναμες.

<Εδώ> όμως η σύγκρισή τους ως προς το κόστος είναι άμεση:

- **B**: καινούργιος Φ300 – αντικατάσταση σε μήκος **230,20** m ☺
- **Δ**: καινούργιος Φ300 – αντικατάσταση σε μήκος **1.325,35** m



5. ΣΥΝΘΕΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΩΛΗΝΩΝ

Ορίζονται τα σύνθετα συστήματα σωλήνων και οι βασικές έννοιες και παραδοχές οι οποίες συνδέονται με την επίλυσή τους. Αναλύονται τα προβλήματα επίλυσης σωλήνων εν σειρά με μεταβλητή παροχή, σωλήνων σε παράλληλη διάταξη και δικτύων τα οποία περιλαμβάνουν υδραυλικές μηχανές: αντλίες ή στροβίλους. Επί πλέον εξετάζονται οι περιπτώσεις δικτύων, όπου η πίεση παίζει καθοριστικό ρόλο.

5.1 Γενικά

5.1.1 Εισαγωγή

Τα σύνθετα συστήματα σωλήνων ονομάζονται και **δίκτυα**.

- ο Εάν κάθε σημείο υδροδότησης υδροδοτείται με **μία** μόνο **διαδρομή** του νερού από κάθε σημείο υδροληψίας, το δίκτυο ονομάζεται **ακτινωτό**.
- ο Εάν κάθε σημείο υδροδότησης *δύναται* να υδροδοτηθεί μέσω **περισσοτέρων** από **μία διαδρομές** του νερού από ένα σημείο υδροληψίας, το δίκτυο ονομάζεται **κυκλοφοριακό**.

Σε κάθε δίκτυο, μεταξύ των σημείων υδροληψίας και **όλων** των σημείων υδροδότησης πρέπει να υπάρχει **ικανό ενεργειακό διαθέσιμο**, ώστε να μεταφέρεται η απαιτούμενη παροχή.

- ο Εάν τούτο υπάρχει λόγω των τοπογραφικών θέσεων, το δίκτυο **λειτουργεί με βαρύτητα**.
- ο Εάν όχι, πρέπει να **δοθεί** ή να **συμπληρωθεί** το **ενεργειακό διαθέσιμο** με τη βοήθεια **αντλίας**. Το δίκτυο (ή τμήματά του) **λειτουργεί με κατάθλιψη**.

5.1.2 Τυπικές μορφές

- ο **Σωλήνες εν σειρά** με **μεταβλητή παροχή**, δηλαδή δίκτυα τα οποία συνδέουν δύο δεξαμενές (ή μία δεξαμενή και μία εκροή στην ατμόσφαιρα), όπου **τουλάχιστον** σε **ένα κόμβο** υπάρχει **πλευρική παροχέτευση**: εκροή ή εισροή παροχής.
- ο **Σωλήνες σε παράλληλη διάταξη**, δηλαδή δίκτυα τα οποία περιλαμβάνουν **ένα τουλάχιστον βρόχο** και επιτρέπουν **περισσότερες από μία δυνατές διαδρομές** της ροής.
- ο **Δίκτυα** τα οποία **περιλαμβάνουν υδραυλικές μηχανές**:
 - **Αντλίες** οι οποίες **προσδίδουν** μηχανικό έργο (ενεργειακό διαθέσιμο) στο δίκτυο.
 - **Στροβίλους** οι οποίοι **αφαιρούν** μηχανικό έργο (ενεργειακό διαθέσιμο) **από** το δίκτυο.

Εις το παρόν κεφάλαιο θα χειρισθούμε επιπλέον **δίκτυα** όπου εμφανίζονται **προβλήματα** με **καθοριστικό ρόλο** της **πίεσης**.

5.2 Σωλήνες εν σειρά με μεταβλητή παροχή

5.2.1 Εισαγωγή

Αποτελεί κομβικό σημείο η κατανόηση ότι: Οι εκροές (από) / εισροές (στους) κόμβους **δεν** είναι εκροές (στην) / εισροές (από την) **ατμόσφαιρα**, αλλά **λογιστικές** μειώσεις / αυξήσεις της παροχής του δικτύου.

Τις εκροές / εισροές θα συμβολίζουμε <εδώ> με **αστερίσκο** και τον **αριθμό** του **κόμβου**: Q_i^* . Δίδονται συνήθως με απόλυτη αριθμητική τιμή ή ως ποσοστό της ανάπτυξης του κόμβου παροχής.

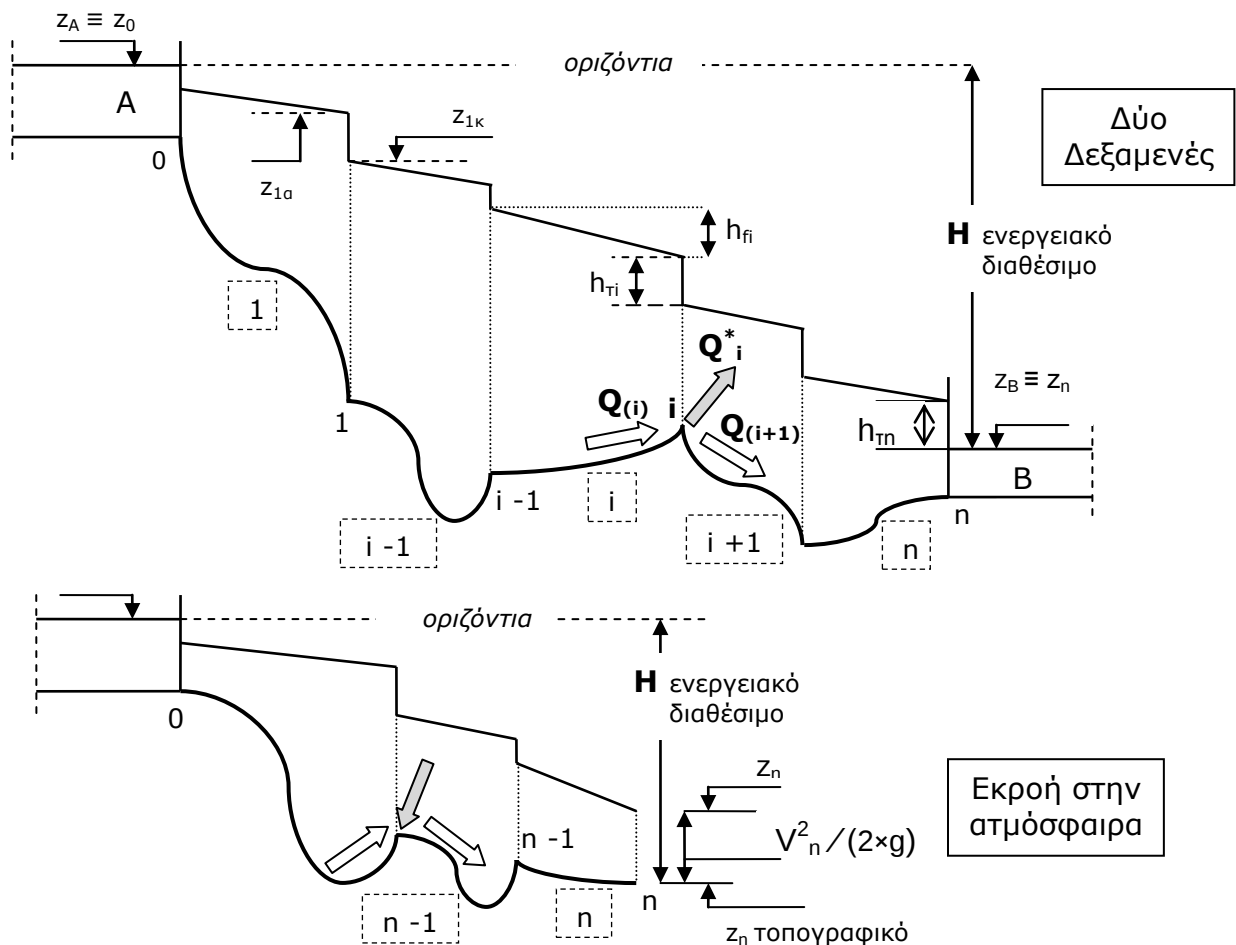
Σε κάθε κόμβο ισχύει η εξίσωση συνέχειας και λαμβάνουμε υπ' όψη τις σημειούμενες εισροές / εκροές κατά περίπτωση. Επομένως σε αντίθεση με τα απλά συστήματα η **παροχή** κάθε **αγωγού** είναι γενικώς **διαφορετική**.

Εις τον κόμβο i ισχύει: $\sum Q_i = 0$, άρα

εις τον επόμενο κατάντη αγωγό ($i+1$) θα είναι: $Q_{(i+1)} = Q_{(i)} \pm Q_i^*$ (43)

Προφανώς η σχέση (29): $H = \sum_{i=1}^{(n)} h_{fi} + \sum_{i=0}^n h_{Ti} + \frac{V_n^2}{2 \cdot g}$ ισχύει ως έχει!

5.2.2 Τυπικές μορφές Γραμμής Ενέργειας



5.2.3 Προβλήματα τα οποία αποτελούν *επέκταση* των τυπικών (βλ. **4.2**)

- Ένα υποσύνολο από τα προβλήματα υπολογισμών τα οποία ήδη χειριστήκαμε σε απλά συστήματα, ακολουθούν την **ίδια** ακριβώς **διαδικασία**, με απλή – **επιπλέον απαίτηση** τη χρήση της **σχέσης (43)**!
- Τα Προβλήματα αυτά είναι τα: **Л5, Л7, Л8, Л9** και **Л10**.
- Θα τα συμβολίζουμε αντιστοίχως ως: **Л5_б, Л7_б, Л8_б, Л9_б** και **Л10_б**.

Ως παράδειγμα ας εξετάσουμε το Πρόβλημα **Л5_б**

- Τα ζητούμενα είναι ακριβώς τα ίδια του **Л5**, αλλά η δεδομένη ενιαία παροχή **Q** αντικαθίσταται από:
 - Τη δεδομένη παροχή **Q₁** του πρώτου (ανάντη) αγωγού (1)
 - Η** τη δεδομένη παροχή **Q_n** του τελευταίου (κατάντη) αγωγού (n)
 - Και όλες** τις **εκροές / εισροές** εις τους κόμβους **Q^{*}_i**
- Προστίθεται επομένως ένα βήμα: Ο υπολογισμός όλων των διαφορετικών (γενικώς) παροχών **Q_i** σε κάθε αγωγό, με βάση την **Q₁** (ή την **Q_n**) και τις **Q^{*}_i**
- Τυποποίηση διαδικασίας:

Q_i [m ³ /s]	D_i [m]	k_{si} [m]	L_i [m]	v [m ² /s]	V_i [m/s]	R_i	F_i	h_{fi} [m]
Σh_{fi}								

- Διάγραμμα ροής διαδικασίας:

