

Υδραυλική & Υδραυλικά Έργα
5^ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών



Υδραυλική των υπονόμων

Δημήτρης Κουτσογιάννης & Ανδρέας Ευστρατιάδης
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, 2018

Υδραυλική αγωγών αποχέτευσης: γενικές αρχές

- Υδραυλική λειτουργία αγωγών ομβρίων και ακαθάρτων:
 - Ελληνικές προδιαγραφές: **υποχρεωτικά με ελεύθερη επιφάνεια**
 - Σε άλλους κανονισμούς επιτρέπεται η ολική πλήρωση των αγωγών, ή ακόμη και η ροή με μικρή πίεση (π.χ. 0.3 m), κυρίως για αγωγούς ομβρίων και μόνο όταν για το μεγαλύτερο εύρος παροχών εξασφαλίζεται ικανοποιητικός αερισμός των αγωγών
 - Γενικά, η εμφάνιση **σημαντικής πίεσης** στη ροή των αγωγών αποχέτευσης είναι μη αποδεκτή, γιατί θα είχε ως συνέπεια την **αναστροφή της ροής**, από τους αγωγούς, προς τις ιδιωτικές συνδέσεις ή τα φρεάτια των οδών
 - **Εξαίρεση**: καταθλιπτικοί αγωγοί, σίφωνες και σήραγγες, των οποίων η λειτουργία υπό πίεση είναι αναπόφευκτη ή επιθυμητή (δεν επιτρέπονται ιδιωτικές συνδέσεις)
- Τυπικά προβλήματα υδραυλικής αγωγών αποχέτευσης:
 - **διαστασιολόγηση** αγωγών, ήτοι επιλογή κατάλληλων διαστάσεων και κλίσεων, για δεδομένη παροχή σχεδιασμού
 - **έλεγχος επάρκειας** ήδη κατασκευασμένων αγωγών
 - **εκτίμηση χαρακτηριστικών ροής** αγωγών που λειτουργούν, μετά από μετρήσεις.
- Ο σχεδιασμός των αγωγών και οι έλεγχοι επάρκειας γίνονται με βάση **περιορισμούς** (α) ελάχιστης διαμέτρου και εναλλαγής διαδοχικών διαμέτρων, (β) μέγιστου ποσοστού πλήρωσης, (γ) μέγιστης ταχύτητας, και (δ) ελάχιστης ταχύτητας (ή, ισοδύναμα, κλίσης).

Υδραυλική αγωγών αποχέτευσης: παραδοχές

- Ποσοστό **στερεών ουσιών** στα λύματα που μεταφέρονται σε διάλυση ή αιώρηση:
 - Περίπου 0.1% στα αστικά λύματα, λίγο μεταλύτερο σε βιομηχανικά απόβλητα και όμβρια (μεταφέρουν άμμο και χώματα)
- Επιπτώσεις στερεών ουσιών στην **υδραυλική λειτουργία** των υπονόμων:
 - Πρακτικά μηδενικές, ως προς τις ιδιότητες του ρευστού (νερού)
 - Σημαντικές, ως προς τα φαινόμενα που δημιουργούν (βιοχημικές αντιδράσεις, διάβρωση, αποθέσεις) → ελαχιστοποίηση επιπτώσεων με κατάλληλο σχεδιασμό
- **Συνθήκες ροής** στους υπονόμους:
 - Κατά κανόνα: ροή με ελεύθερη επιφάνεια, μη μόνιμη, ανομοιόμορφη
 - Απλούστευση: ροή με ελεύθερη επιφάνεια, μόνιμη, ομοιόμορφη
- Στους υδραυλικούς υπολογισμούς εφαρμόζεται η **σχέση του Manning**:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2}$$

όπου V η ταχύτητα ροής, n συντελεστής τραχύτητας, R η υδραυλική ακτίνα (= εμβαδόν βρεχόμενης επιφάνειας / βρεχόμενη περίμετρος), και i η κλίση τριβών (= κλίση γραμμής ενέργειας, για μόνιμη ροή).

- Στην μόνιμη ομοιόμορφη ροή, η κλίση της γραμμής ενέργειας ταυτίζεται με την κλίση του πυθμένα του αγωγού, δηλαδή $i = J$ (**κλίση → μέγεθος σχεδιασμού**).

Σχέση Manning: θεωρητικό υπόβαθρο

- Ημ εμπειρική σχέση Chézy (1768), για πρισματικούς αγωγούς:

$$V = C \sqrt{R i}$$

όπου C συντελεστής που εξαρτάται από την τραχύτητα του αγωγού (στην αρχική της διατύπωση, εισάγεται η κλίση πυθμένα J αντί της κλίσης τριβών i).

- Αργότερα, διαπιστώθηκε ότι ο συντελεστής C εξαρτάται ελαφρώς και από την υδραυλική ακτίνα \rightarrow θεωρητική τεκμηρίωση μέσω της σχέσης Darcy-Weisbach (1858):

$$i = (f/4R) (V^2/2g)$$

όπου ο συντελεστής f εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds, $Re = 4RV/\nu$, και από τη σχετική τραχύτητα $\varepsilon/4R$ (τυρβώδης ροή \rightarrow σχέση Colebrook και White, 1937).

- Η σχέση Darcy-Weisbach ενδείκνυται για κυκλικούς αγωγούς υπό πίεση ($R = D/4$), όχι όμως σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια (σε σύνθετες γεωμετρίες, ο συντελεστής f επηρεάζεται από το σχήμα της διατομής, λόγω ανάπτυξης δευτερευουσών ροών).
- Σχέση Manning (1889) \rightarrow προκύπτει από τη σχέση Chézy για $C = (1/n)R^{1/6}$.
- Ο συντελεστής n συνδέεται με τον αδιάστατο συντελεστή f με τη σχέση:

$$n = (f/8g)^{1/2} R^{1/6}$$

- Στην τυρβώδη ροή, ο συντελεστής n εξαρτάται, πρακτικά, μόνο από την ισοδύναμη τραχύτητα ε και όχι τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της ροής \rightarrow σχέση Müller (ε σε m):

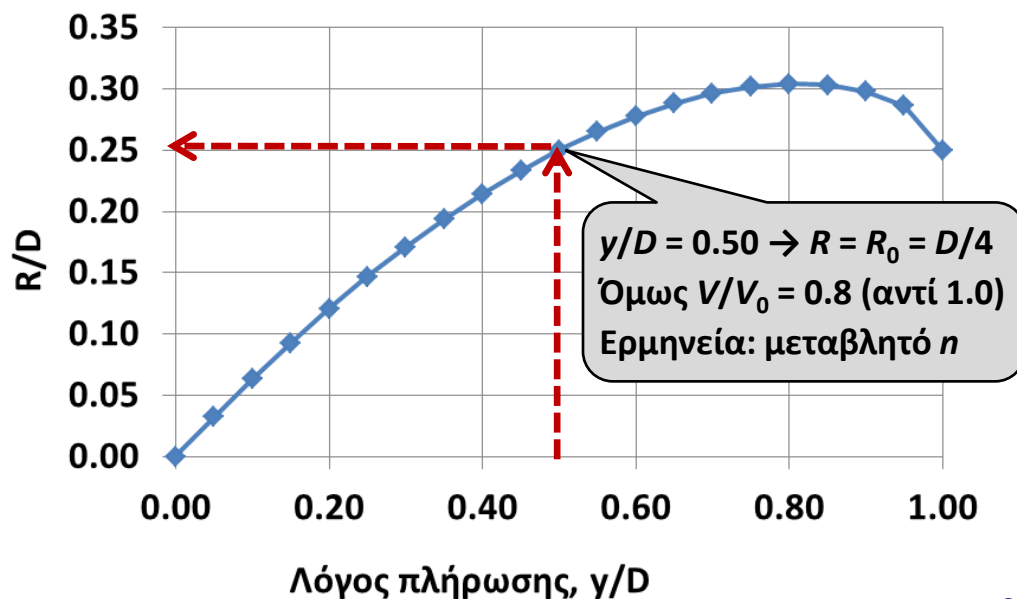
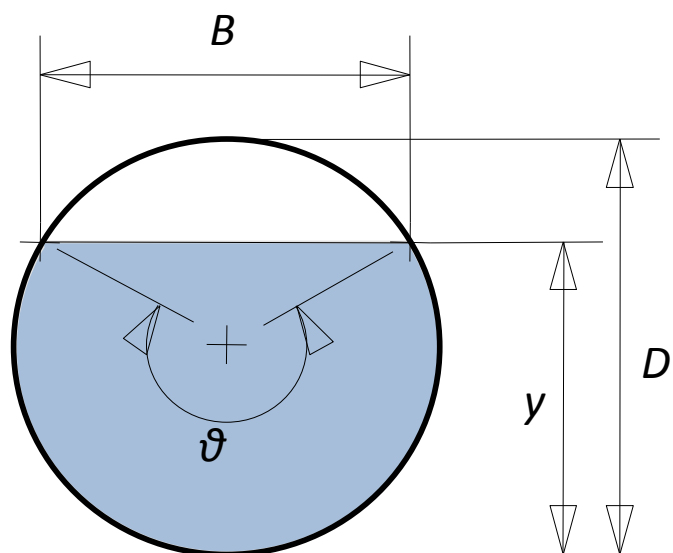
$$n \approx \varepsilon^{1/6} / 26$$

Σχέση Manning: συντελεστής τραχύτητας υπονόμων

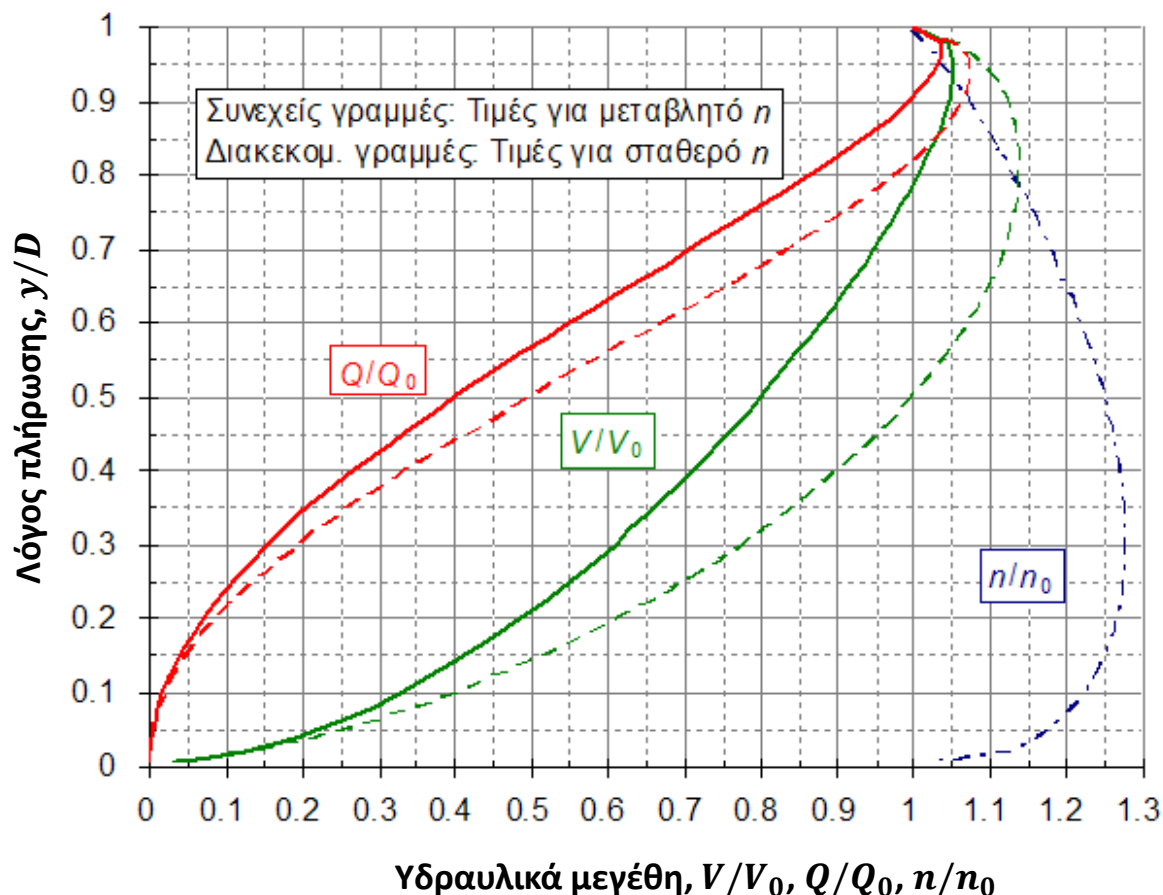
- ❑ Ο συντελεστής τραχύτητας στους υπονόμους εξαρτάται όχι μόνο από το υλικό του αγωγού (σκυρόδεμα, αμιαντοτσιμέντο, πλαστικοί, αργιλοπυριτικοί), αλλά κυρίως από:
 - κατασκευαστικούς παράγοντες (αρμοί, πλευρικές συνδέσεις, κακές ευθυγραμμίσεις, π.χ. λόγω κατασκευαστικών σφαλμάτων ή καθιζήσεων)
 - τις μεταφερόμενες στερεές ουσίες (ποσότητα, διαστάσεις) και αποθέσεις τους
 - άλλα εμπόδια στη ροή (π.χ. ρίζες δέντρων)
- ❑ Τυπικές τιμές συντελεστή τραχύτητας:
 - Πειραματικά αποτελέσματα στις ΗΠΑ: $n = 0.011-0.016$ για αγωγούς σε καλή κατάσταση, μέχρι 0.020 για αγωγούς σε κακή κατάσταση
 - Σύσταση WPCF & ASCE: $n = 0.011-0.015$ (για συνήθη υλικά σωληνώσεων)
 - Γενική σύσταση για τις ελληνικές συνθήκες: $n = 0.015$ όταν δεν γίνεται διάκριση γραμμικών και τοπικών απωλειών (αντιστοιχεί σε ισοδύναμη τραχύτητα $\varepsilon = 3.5$ mm), και $n = 0.013$ ($\varepsilon = 1.5$ mm) αν οι τοπικές απώλειες υπολογίζονται ξεχωριστά.
- ❑ Για μεγάλα n , η σχέση του Manning μπορεί να εφαρμοστεί και για ροή υπό πίεση.
- ❑ Μετρήσεις σε κυκλικούς αγωγούς έδειξαν ότι ο **συντελεστής τραχύτητας σε μερική πλήρωση** είναι έως και κατά 30% μεγαλύτερος από τον συντελεστή σε ολική πλήρωση
 - Θεωρητική ερμηνεία: μεταβολή γεωμετρικού σχήματος της βρεχόμενης διατομής του αγωγού σε συνθήκες μερικής πλήρωσης

Γεωμετρικοί υπολογισμοί κυκλικών αγωγών

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



Υδραυλικοί υπολογισμοί κυκλικών αγωγών



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

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

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

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

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

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

- ❑ Ταχύτητα ολικής πλήρωσης, V_0 (και παροχή πλήρωσης, Q_0): συνάρτηση των D , J , n_0
- ❑ V/V_0 και Q/Q_0 : συνάρτηση του y/D (ή της γωνίας θ) και του λόγου n/n_0
- ❑ Κατάπιση αναλυτικών σχέσεων n/n_0 από πειραματικά δεδομένα
- ❑ **Σύσταση για το μάθημα: χρήση νομογραφημάτων για μεταβλητό n , με $n_0 = 0.015$**

Περιορισμοί διαμέτρων – όρια πλήρωσης

- Σκοπιμότητα καθορισμού **ελάχιστων διαμέτρων**:
 - Αποφυγή κινδύνου εμφράξεων.
- Ελάχιστες διάμετροι σε αγωγούς αποχέτευσης:
 - 20 cm για αγωγούς ακαθάρτων
 - 40 cm για αγωγούς ομβρίων
- Σκοπιμότητα καθορισμού **μέγιστων ποσοστών πλήρωσης**:
 - Εξασφάλιση επαρκούς αερισμού των λυμάτων
 - Αποφυγή κινδύνου λειτουργίας των αγωγών υπό πίεση
 - Αποφυγή ασταθειών ροής (για $y/D \leq 0.80$ αποφεύγεται η λειτουργία του αγωγού στην ανώτερη περιοχή, όπου για την ίδια παροχή αντιστοιχούν δύο τιμές του ομοιόμορφου βάθους ροής)
- Μέγιστα ποσοστά πλήρωσης:

□ Νέοι αγωγοί ακαθάρτων διαμέτρου 20 cm έως 40 cm:	0.50
□ Νέοι αγωγοί ακαθάρτων διαμέτρου 50 cm έως 60 cm:	0.60
□ Νέοι αγωγοί ακαθάρτων διαμέτρου >60 cm:	0.70
□ Νέοι αγωγοί ομβρίων, γενικά:	0.70
□ Παλιοί αγωγοί αποχέτευσης (έλεγχος, όχι ανασχεδιασμός):	0.80

Μέγιστες ταχύτητες

- Σκοπιμότητα καθορισμού **μέγιστων ορίων στην ταχύτητα**:
 - Αποφυγή **διάβρωσης** των τοιχωμάτων των αγωγών και φρεατίων (αυξημένη διαβρωτική ικανότητα λόγω των στερεών υλικών που μεταφέρονται στους υπονόμους, για τα συνήθη υλικά αγωγών αποχέτευσης)
 - Αποφυγή **μεγάλου ύψους κινητικής ενέργειας** (\rightarrow κίνδυνος ανύψωσης της γραμμής ενέργειας πάνω από το οδόστρωμα \rightarrow πιθανή έξοδος λυμάτων στο δρόμο ή στα υπόγεια)
 - Αποφυγή **υπερκρίσιμων ροών** (\rightarrow κίνδυνος εμφάνισης υδραυλικών αλμάτων, ασταθειών ροής, στάσιμων κυμάτων \rightarrow μη προβλέψιμες συνθήκες ροής)
- Μέγιστες επιτρεπόμενες ταχύτητες που επιβάλλουν οι προδιαγραφές (αναφέρονται στην **παροχή σχεδιασμού**):
 - Ελληνικές προδιαγραφές: $V_{max} = 6 \text{ m/s}$
 - Διεθνείς προδιαγραφές: $V_{max} = 3 \text{ m/s}$
 - Σύσταση για τον σχεδιασμό: $V_{max} = 6 \text{ m/s}$ για αγωγούς ομβρίων (διαλείπουσα ροή) και 3 m/s για αγωγούς ακαθάρτων (συνεχής ροή)
- Αντιμετώπιση **υπέρβασης ορίων μέγιστης ταχύτητας** στον σχεδιασμό:
 - Μείωση κλίσης αγωγού (προϋποθέτει και αύξηση της διαμέτρου, διαφορετικά θα υπάρξει υπέρβαση του επιτρεπόμενου ορίου πλήρωσης)

Ελάχιστες ταχύτητες (ταχύτητες αυτοκαθαρισμού)

- Σκοπιμότητα καθορισμού **ελάχιστων ορίων στην ταχύτητα**:
 - Αποφυγή **αποθέσεων φερτών** στους αγωγούς και τα φρεάτια (επιτυγχάνεται για κατάλληλη ταχύτητα αυτοκαθαρισμού → ελάχιστη απαιτούμενη συρτική τάση)
 - Εξασφάλιση **καλού αερισμού** των λυμάτων (κακός αερισμός → δημιουργία αναερόβιων συνθηκών → πιθανότητα παραγωγής υδροθείου → κίνδυνος διάβρωσης των τοιχωμάτων αγωγών και φρεατίων)
- Η ταχύτητα αυτοκαθαρισμού δεν πρέπει να επιτυγχάνεται μόνο όταν η παροχή είναι ίση με την παροχή σχεδιασμού, αλλά και σε μικρότερες τιμές της παροχής.
- Ελληνικές προδιαγραφές, αναφέρονται στο **10% της παροχетеυτικότητας Q_0** (όχι στην παροχή σχεδιασμού):
 - Αγωγοί ομβρίων: $V_{min} = 0.6 \text{ m/s}$
 - Αγωγοί ακαθάρτων: $V_{min} = 0.3 \text{ m/s}$
- Αντίστοιχες **ελάχιστες ταχύτητες πλήρους διατομής**:
 - Αγωγοί ομβρίων: $V_{0,min} = 1.11 \text{ m/s}$
 - Αγωγοί ακαθάρτων: $V_{0,min} = 0.56 \text{ m/s}$
 - Προδιαγραφές ΗΠΑ: $V_{0,min} = 0.60 \text{ m/s}$ (για όλους τους τύπους αγωγών)
- Τα ως άνω όρια προκύπτουν ως εξής:

$$Q/Q_0 = 0.10 \rightarrow V/V_0 = 0.54 \rightarrow V_{0,min} = V_{min}/0.54$$

Ελάχιστες κλίσεις

- Γενική πρακτική: τοποθέτηση αγωγών αποχέτευσης **παράλληλα με τη μηκοτομή του οδοστρώματος** (ελαχιστοποίηση εκσκαφών)
- Εξαιρέσεις:
 - Όρια ελάχιστου/μέγιστου επιτρεπόμενου βάθους τοποθέτησης των αγωγών ή άλλα εμπόδια, που δεν επιτρέπουν την τοποθέτησή τους παράλληλα στο έδαφος
 - Απότομες κλίσεις εδάφους → υπέρβαση ορίων μέγιστης ταχύτητας → μείωση κλίσης με **βαθμιδωτή χάραξη** και κατασκευή **φρεατίων πτώσης**
 - Πολύ μικρές κλίσεις ή χάραξη αντίθετα με την κλίση εδάφους → τοποθέτηση αγωγών με κλίση τέτοια που να τηρείται ο **περιορισμός ελάχιστης ταχύτητας**
- Για δεδομένη διάμετρο, και ελάχιστη ταχύτητα πλήρους διατομής, $V_{0,min}$, προκύπτει η αντίστοιχη ελάχιστη κλίση:

$$V_{0,min} = \frac{1}{n_0} \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} J_{min}^{1/2} \Rightarrow J_{min} = \left(\frac{4}{D}\right)^{4/3} n_0^2 V_{0,min}^2$$

- Για $n_0 = 0.015$ και τα αντίστοιχα όρια $V_{0,min}$, η παραπάνω σχέση γράφεται:
 - Αγωγοί ομβρίων: $J_{min} = 0.00176D^{-4/3}$
 - Αγωγοί ακαθάρτων: $J_{min} = 0.00045D^{-4/3}$
- Η μέγιστη παροχή που μπορεί να μεταφέρει ένας αγωγός που τοποθετείται με την ελάχιστη κλίση προκύπτει αν θεωρηθεί το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο πλήρωσης.

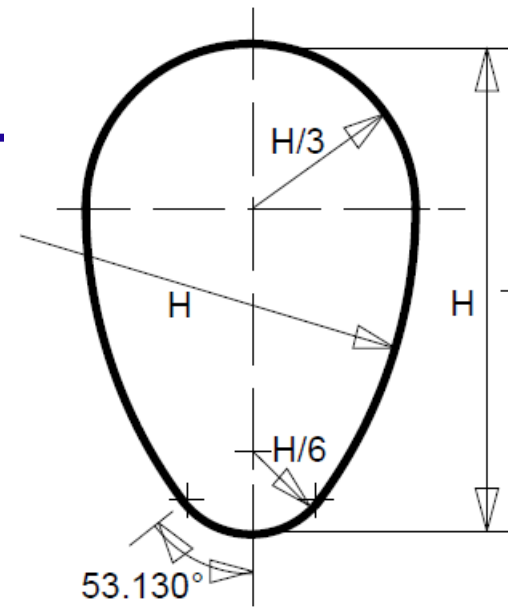
Εφαρμοστές ελάχιστες κλίσεις αγωγών αποχέτευσης

- Για κατασκευαστικούς λόγους, η εφαρμογή πολύ μικρών κλίσεων θα πρέπει να αποφεύγεται, ακόμα και όταν αυτό επιτρέπεται από υδραυλική άποψη.
- Πρακτική σύσταση: κλίση αγωγών αποχέτευσης όχι μικρότερη των 1.0 m/km.
- Η εφαρμογή των ορίων ελάχιστων κλίσεων δεν λύνει πάντα το πρόβλημα του αυτοκαθαρισμού των αγωγών → σε τριτεύοντες αγωγούς ακαθάρτων θα πρέπει να προβλέπεται η περιοδική πλύση των αγωγών με άλλα μέσα (φρεάτια πλύσης).

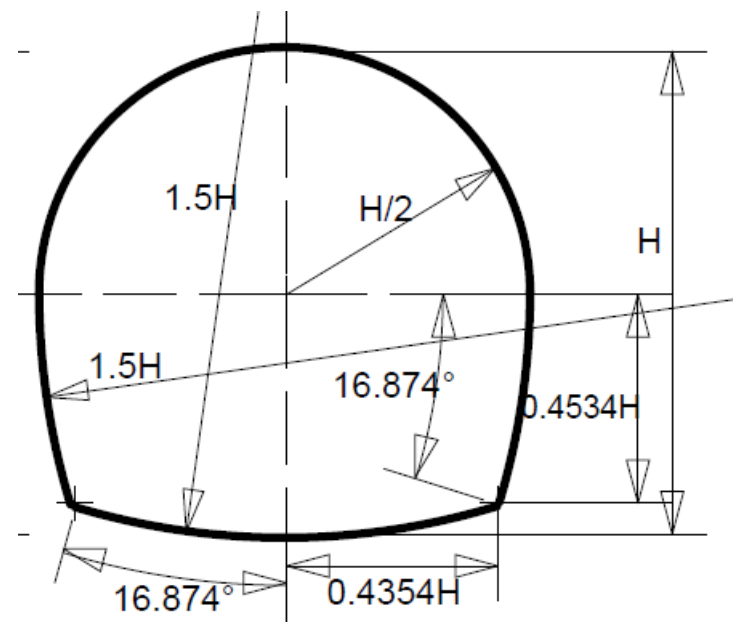
Διά-μετρος (cm)	Αγωγοί ακαθάρτων ($V_0 = 0.56 \text{ m/s}$ – μεταβλητή τραχύτητα με $n_0 = 0.015$)			Αγωγοί ομβρίων ($V_0 = 1.11 \text{ m/s}$ – μεταβλητή τραχύτητα με $n_0 = 0.015$)			Ελάχιστη κλίση αγωγών ομβρ. & ακαθ. κατά τα πρότυπα των ΗΠΑ (για $V_0=0.6 \text{ m/s}$, $n_0=0.015$) (m/km)
	Ελάχιστη κλίση (m/km)	Επιτρεπόμενη πλήρωση (y/D)	Αντίστοιχη παροχή (L/s)	Ελάχιστη κλίση (m/km)	Επιτρεπόμενη πλήρωση (y/D)	Αντίστοιχη παροχή (L/s)	
20	3.8	0.5	7.0	–	–	–	4.4
25	2.8	0.5	10.9	–	–	–	3.3
30	2.2	0.5	15.7	–	–	–	2.6
35	1.8	0.5	21.5	–	–	–	2.0
40	1.5	0.5	28.0	6.0	0.7	99	1.8
50	1.1	0.6	59.8	4.4	0.7	155	1.3
60	0.89 (1.0)	0.6	87.9 (93)	3.5	0.7	225	1.0
70	0.72 (1.0)	0.7	153 (180)	2.8	0.7	303	0.83
80	0.60 (1.0)	0.7	200 (257)	2.4	0.7	396	0.69
90	0.52 (1.0)	0.7	253 (352)	2.0	0.7	501	0.59
100	0.45 (1.0)	0.7	312 (467)	1.8	0.7	619	0.51
110	0.39 (1.0)	0.7	378 (602)	1.6	0.7	749	0.45
120	0.35 (1.0)	0.7	450 (759)	1.4	0.7	891	0.40
130	0.32 (1.0)	0.7	528 (939)	1.2	0.7	1046	0.36
140	0.29 (1.0)	0.7	612 (1144)	1.1	0.7	1213	0.33
150	0.26 (1.0)	0.7	703 (1376)	1.0	0.7	1393	0.30
160	0.24 (1.0)	0.7	799 (1634)	0.94 (1.0)	0.7	1584 (1624)	0.27
180	0.20 (1.0)	0.7	1012 (2237)	0.80 (1.0)	0.7	2005 (2237)	0.23
200	0.18 (1.0)	0.7	1249 (2962)	0.70 (1.0)	0.7	2476 (2962)	0.20

Μη κυκλικές διατομές

- ❑ **Μη κυκλικές διατομές:** συλλεκτήρες ομβρίων ή ακαθάρτων σημαντικής διατομής, παλιότεροι παντοροϊκοί αγωγοί
- ❑ **Τύποι διατομών:** τραπεζοειδής (αστικά ρέματα, τάφροι), ορθογωνική (κλειστή ή ανοιχτή), ωοειδής, πεταλοειδής
- ❑ Η **ωοειδής διατομή** και γενικότερα οι διατομές με σχήμα πυθμένα που πλησιάζει το V υπερέχουν υδραυλικά, καθώς εξασφαλίζουν σχετικά μεγάλες ταχύτητες ακόμα και για μικρά βάθη ροής.
- ❑ Αντίθετα, ο πεπλατυσμένος πυθμένας, όπως της **πεταλοειδούς διατομής**, μειονεκτεί από υδραυλική άποψη, γιατί οδηγεί σε πολύ μικρές ταχύτητες για μικρά βάθη, οι οποίες είναι ανεπιθύμητες στα έργα αποχέτευσης. Η επιλογή πεπλατυσμένων διατομών γίνεται μόνο για στατικούς και κατασκευαστικούς λόγους.
- ❑ Στον σχεδιασμό εφαρμόζονται αντίστοιχοι **περιορισμοί** με τους κυκλικούς αγωγούς (όρια πλήρωσης, ελάχιστες και μέγιστες ταχύτητες).
- ❑ Ωοειδείς αγωγοί: ελάχιστη διατομή 60/90 cm.



Τυπική ωοειδής διατομή



Τυπική πεταλοειδής διατομή