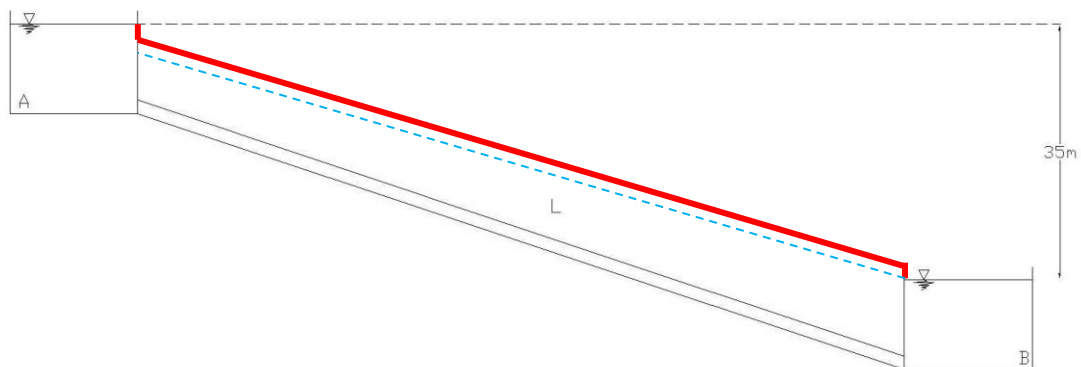


Μερικές ερωτήσεις στους κλειστούς αγωγούς:

- Παροχή: $Q = A \cdot V = \frac{\pi D^2}{4} V$ (στους ανοικτούς αγωγός συνήθως χρησιμοποιούμε μία ποικιλία διατομών, σε αντίθεση με τους κλειστούς που έχουμε συνήθως κυκλικές διατομές και μάλιστα του **εμπορίου**).
- Έστω δύο δεξαμενές που συνδέονται με αγωγό διαμέτρου D. Να γραφεί η εξίσωση της ενέργειας:

$$z_A + \frac{p_{atm}}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g} = z_B + \frac{p_{atm}}{\rho g} + \frac{V_B^2}{2g} + \underbrace{h_f}_{\text{γραμμικές απώλειες}} + \underbrace{h_f'}_{\text{τοπικές απώλειες}} \left. \vphantom{z_A} \right\} \rightarrow \Delta z = \underbrace{h_f}_{\text{γραμμικές απώλειες}} + \underbrace{h_f'}_{\text{τοπικές απώλειες}}$$

- Να σχεδιαστεί η γραμμή ενέργειας:



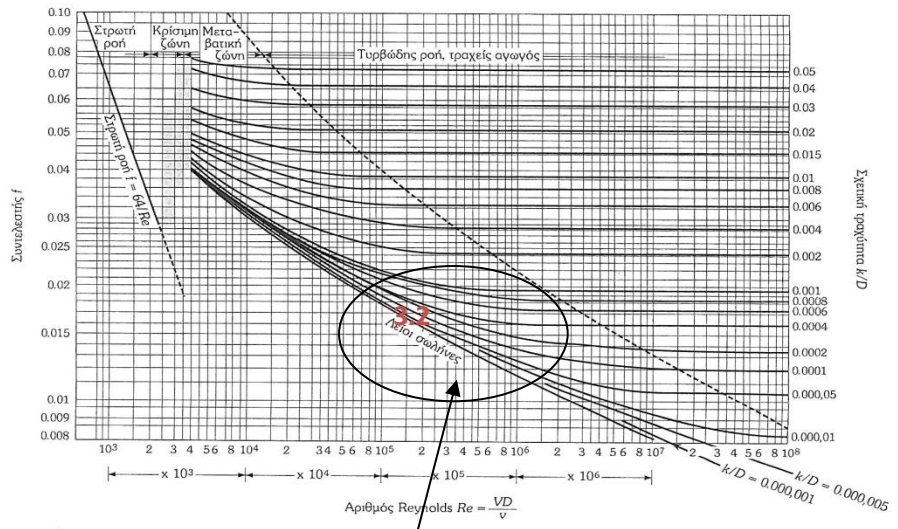
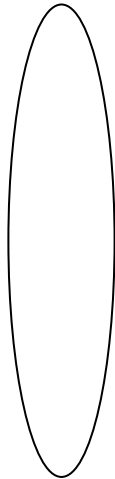
(απώλειες ενέργειας: $0.5v^2/2g + \text{γραμμικές} + v^2/g$)

- Σχέση γραμμής ενέργειας και πιεζομετρικής γραμμής (απλά αφαιρώ το ύψος κινητικής ενέργειας, βλ διακεκομμένη γραμμή)

$$\Gamma E = H = \frac{V^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} \rightarrow \left(z + \frac{p}{\rho g} = \text{Π.Γ.}_{\text{ορισμός}} \right) \rightarrow \text{Π.Γ.} = \Gamma E - \frac{V^2}{2g}$$

- Πως μπορώ να αυξήσω την παροχή?
 - Αύξηση διαμέτρου. Πράγματι έστω χοντρικά μόνο γραμμικές απώλειες: $h_f = \frac{8fL}{g\pi^2 D^5} Q^2 = \Delta z$, αν αυξηθεί το D συνακόλουθα αυξάνεται κατά πολύ (μη γραμμικά το Q)
 - Αντλία για αύξηση της παροχής
 - Σύνδεση παράλληλου αγωγού για ένα μήκος

- Ποιές είναι οι συνήθεις τιμές για το συντελεστή τριβής f ? (απ. βλέπε διάγραμμα MOODY)



Σχ. 2.2: Διάγραμμα Moody.

- Περιγραφή του διαγράμματος Moody:

1. Στρωτή ροή
2. κρίσιμη
3. τυρβώδης:

- υδραυλικώς λείοι σωλήνες (βλ καμπύλη) , εξάρτηση μόνο από Re
- υδραυλικώς τραχείς σωλήνες ('η πλήρως αναπτυγμένη τυρβώδη ροή) (περιοχή από διακεκομμένη, πρακτικά ο Re δεν επηρεάζει το συντελεστή τριβής f , εξαρτάται μόνο από το λόγο k/D)
- Μεταβατική περιοχή μεταξύ των δύο περιοχών (αλλά πάντως τυρβώδη ροή) $f=f(k/D, Re)$

- Γιατί στην πράξη η ροή είναι τυρβώδη σε κλειστούς αγωγούς?

Η ταχύτητες σε κλειστούς αγωγούς ύδρευσης και εγγ. έργων θα πρέπει να είναι μικρότερες από 1.5-2m/s και μεγαλύτερες από 0.5. Επομένως έστω:

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{1.5 \cdot D}{10^{-6} (\text{κινηματική συνεκτικότητα νερού})} > 4000$$

- ποια είναι η εξίσωση που ισχύει στην τυρβώδη περιοχή για το f ? Απ. Η εξ των Colebrook-White, από πειράματα αγωγών με κόκκους άμμου, με βάση την οποία καταστρώθηκε το διάγραμμα Moody

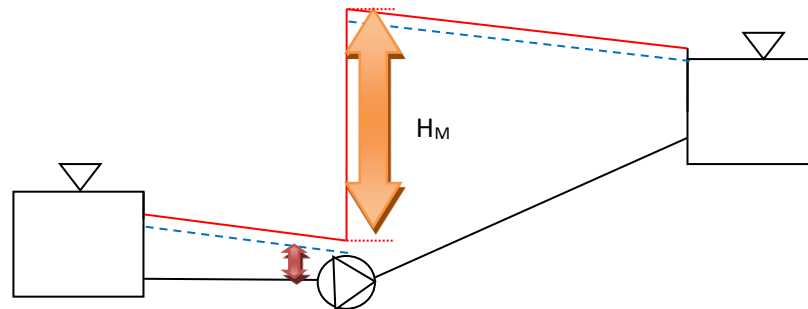
- Η εξίσωση των Colebrook-White καλύπτει τις «ακραίες» καταστάσεις των λείων σωλήνων και των τραχέων σωλήνων εφόσον για $(k/D) \rightarrow 0$ ή $Re \rightarrow \infty$ αντίστοιχα οδηγούμαστε στις εξισώσεις των λείων σωλήνων και της πλήρως ανεπτυγμένης τυρβώδους ροής αντίστοιχα όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1.

Πιν. 2.1: Τιμές του συντελεστή τριβής f

Είδος Ροής	Εξίσωση f	Περιοχή ισχύος
Στρωτή	$f = \frac{64}{Re}$	$Re < 2100$
Λείοι σωλήνες	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$	$(k/D) \rightarrow 0, Re > 4000$
Μεταβατική περιοχή	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$	$Re > 4000$
Πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδη ροή	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k}{3.7D} \right)$	$Re > 4000$, σημαντικοί αριθμοί Re και σημαντική τραχύτητα

(μη απομνημόνευση εξισώσεων)

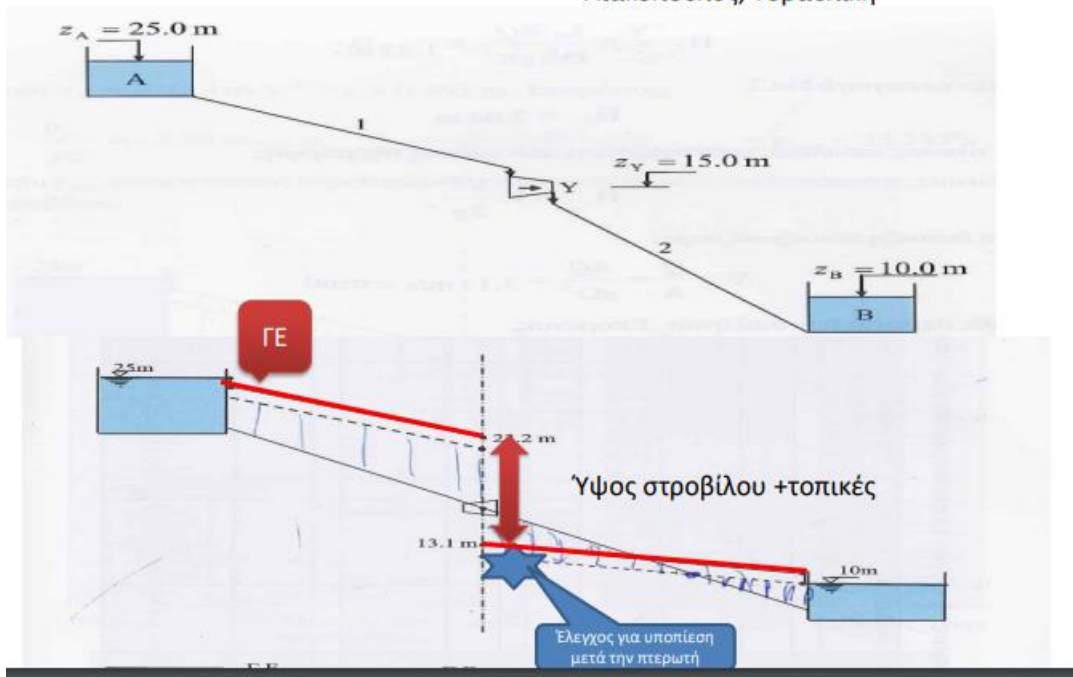
- Να γίνει σκαρίφημα της γραμμής ενέργειας στην παρακάτω διάταξη με αντλία Αντλία , μέσω πτερωτής (προπέλας) το ρευστό λαμβάνει ενέργεια, άνοδος τοπικά της ΓΕ




Υδροστρόβιλος: για το ρευστό απώλεια ενέργειας (σαν μία μεγάλη τοπική απώλεια, πτώση ΓΕ)

Υδρ. σε μοντέλο δύο δεξαμενών

Λιακόπουλος, Υδραυλική



- Γραφικά πως φαίνεται το ύψος πίεσης?
είναι το ύψος της ΠΓ (μπλε γραμμή) πάνω από τον αγωγό: $h_p = \Pi.G. - z$ 
- Ποια είναι η ισχύς που παραλαμβάνει το ρευστό και ποια αυτή που λαμβάνει η αντλία?
Ισχύς = ενέργεια στη μονάδα του χρόνου

Ισχύς που λαμβάνει το ρευστό την αντλία

- Ισχύς που λαμβάνει το ρευστό: $\rho g Q H_M$
- προφανώς, ισχύει:
 $\rho g Q H_M (\text{ρευστό}) < \rho g Q H_M / \eta (\text{αντλίας})$

- Ύψος αντλίας: (Πρακτικά ενέργεια που λαμβάνει το ρευστό σε μονάδες μήκους)

Ύψος αντλίας και υδροστροβίλου

$$\text{Ύψος αντλίας} = h_p = \frac{\dot{W}_p}{\dot{m}g} = \frac{\text{Έργο/χρόνος από την αντλία στη ροή}}{\text{βάρους/χρόνος του ρέοντος ρευστού}}$$

$$\text{Ύψος στροβίλου} = h_t = \frac{\dot{W}_t}{\dot{m}g} = \frac{\text{Έργο/χρόνος από τη ροή στο στροβίλο}}{\text{βάρους/χρόνος του ρέοντος ρευστού}}$$

Πρακτικά: ενέργεια σε μονάδες μήκους.

Ύψος αντλίας προστίθεται ισχύος στο ρευστό (μοναδική απότομη παρόμοια επιχειρησιακή άνοδος της Γ.Ε. υλικοστέν αγωγών)

Ύψος στροβίλου: απότομη πτώση της Γ.Ε. (ενεργειακή ισοδύναμη με τοπική απώλεια), καταβύθισμα ισχύος από το ρευστό

- **Ενεργειακός υπολογισμός ύψους αντλίας: Από ΑΔΕ**

Για το παρακάτω σχήμα ισχύει:

$$H_A = z_A + \frac{p_{atm}}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g}$$

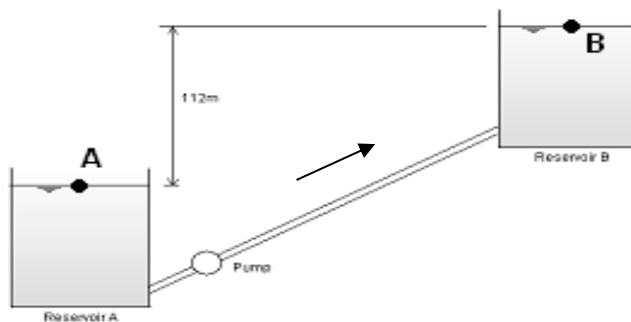
$$H_B = z_B + \frac{p_{atm}}{\rho g} + \frac{V_B^2}{2g}$$

$$H_B - H_A = z_B - z_A$$

Οπότε:

$$H_M = (z_B - z_A) + \sum_{A \rightarrow B} h_f + \sum_{A \rightarrow B} h_f' \quad (2.105)$$

Η υψομετρική διαφορά των στάθμων των δύο δεξαμενών συμπεριλαμβανομένης της ανώτατης στάθμης λειτουργίας καθορίζει το ολικό στατικό ύψος το οποίο εξαρτάται αποκλειστικά από αυτήν την υψομετρική διαφορά και όχι από τις ενδιάμεσες διαδρομές των αγωγών



- **Πότε θα έχω άνοδο στη Γ.Ε.?**
Μόνο από αντλία (τοπική άνοδος)
- **Ποια είναι το ενεργειακό ισοδύναμο του υδροστροβίλου (Ύψος στροβίλου)?**
Η τοπική απώλεια, απότομη τοπική ΠΤΩΣΗ της Γ.Ε.
- **Σε αντλητική διάταξη που γίνεται ο έλεγχος για σπηλαιώση?**
Εκεί που έχουμε χαμηλές πιέσεις (κίνδυνος δημιουργίας φυσαλίδων όταν απόλυτη πίεση = τάση ατμών και θραύση κατάντη). Από τη Π.Γ είναι προφανές ότι το δυσμενές σημείο είναι πριν την αντλία.
- **Με βάση την απόλυτη ή τη σχετική πίεση γίνονται οι υπολογισμοί του μαθήματος?**
Με βάση τη σχετική πίεση, δλδ. θεωρώντας ατμοσφαιρική πίεση μηδέν.
Η απόλυτη πίεση = σχετική πίεση + ατμοσφαιρική πίεση.

- Πως προσδιορίζονται οι τοπικές απώλειες θεωρητικά και πολλές φορές στην πράξη?

Γενικά: $K \frac{V^2}{2g}$, K **συντελεστής** που διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση και

προσδιορίζεται από πίνακες από τη βιβλιογραφία.

(καμία σχέση ο αδιάστατος συντελεστής τοπικών απωλειών ενέργειας K με την (ισοδύναμη) τραχύτητα k (άλλος συμβολισμός ϵ)

Πρακτικά πολλές φορές, απλά προσαυζάνουμε την τραχύτητα του αγωγού, επομένως, προσδιορίζουμε τις τοπικές απώλειες έμμεσα με προσαύξηση των γραμμικών απωλειών.

Προσαύξηση τραχύτητας για υδραυλικό δίκτυο (Κουτσονιαννης και Ευστροατιάδης. 2014)

Τιμές της τραχύτητας σχεδιασμού

- Δεδομένου ότι τα δίκτυα διανομής σχεδιάζονται με ορίζοντα 40 ετών, οι τιμές εφαρμογής των συντελεστών τραχύτητας πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τη γήρανση των αγωγών.
- Κατά κανόνα οι τιμές εφαρμογής λαμβάνονται προσαυξημένες (**ισοδύναμη τραχύτητα**) προκειμένου να συμπεριληφθούν και τοπικές απώλειες (βλ. επόμενη σελίδα).
- Η ελάχιστη αποδεκτή ισοδύναμη τραχύτητα, με την προϋπόθεση νερού που δεν προκαλεί διάβρωση ή επικαθίσεις αλάτων, λαμβάνεται $\epsilon = 0.1 \text{ mm}$ ($\epsilon_s = 2$).
- Στη συνήθη περίπτωση πλαστικών αγωγών, με την υπόθεση ότι αναμένονται φαινόμενα διάβρωσης ή επικαθίσεων αλάτων, συστήνεται $\epsilon = 1.0-2.0 \text{ mm}$ ($\epsilon_s = 20-40$).

Ενδεικτικός πίνακας εργαστηριακών τιμών ισοδύναμης τραχύτητας τυπικών υλικών (Δεν συστήνεται η χρήση τους σε μελέτες δικτύων)

Υλικό	ϵ (mm)
Ορείχαλκος, χαλκός	0.0015
Χάλυβας εμπορίου ή σφυρήλατος σίδηρος	0.045
Χυτοσίδηρος με ασφαλική επάλειψη	0.12
Γαλβανισμένος σίδηρος	0.15
Χυτοσίδηρος χωρίς επάλειψη	0.26
Σκυρόδεμα	0.3 – 3.0
Πλαστικό (λείο σωλήνες εργοστασίου)	< 0.01
Πλαστικό, μετά από χρήση	> 0.10

http://www.itia.ntua.gr/getfile/774/90/documents/2007_UHWHydraulics_1.pdf

Δ. Κουτσονιάνης & Α. Ευστροατιάδης. Αρχές υδραυλικής στα αστικά υδραυλικά έργα 13

- Όταν ο αγωγός καταλήγει σε δεξαμενή ποιες είναι οι τοπικές απώλειες? Απ. Είναι απότομη διεύρυνση σε δεξαμενή (άπειρη διάμετρος), άρα $K=1$, **ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ** από το πως συνδέεται η δεξαμενή με τον αγωγό. άρα όλη η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε τοπική απώλεια.
- Τι είναι παράλληλη σύνδεση αγωγών? (Κοινή αρχή και πέρας (σηματισμός βρόχου), και μάλιστα έχουν τις ίδιες απώλειες ενέργειας βλπ απόδειξη από διαφάνειες)

Προσοχή, εξίσωση ενέργειας, ακολουθώντας την κίνηση του ρευστού

- Η εξίσωση ενέργειας ισχύει κατά μήκος μιας γραμμής ροής
- Σε μόνιμη ροή, γραμμή ροής και τροχιά συμπίπτουν
- Ακολουθώ την λοιπόν, την κίνηση του ρευστού



Παράλληλη σύνδεση(1),(2) :

$$h_{f,1} = h_{f,2}$$

Εξ. ενέργειας(A) →(B) :

$$1) z_A + \frac{p_{atm}}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2} = z_B + \frac{p_{atm}}{\rho g} + \frac{V_B^2}{2} + h_{f,1} + h_{f,3}$$

ή

$$1) z_A + \frac{p_{atm}}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2} = z_B + \frac{p_{atm}}{\rho g} + \frac{V_B^2}{2} + h_{f,2} + h_{f,3}$$

Το νερό είναι έξυπνο...

- Και διαλέγει το ενεργειακό ευκολότερο δρόμο
- Έστω δύο αγωγοί συνδεδεμένοι παράλληλα, ίδιου υλικού, ίδιου μήκους αλλά διαφορετικής διαμέτρου και έστω ίδιο f , $D_1 > D_2$
- Το νερό θα προτιμήσει τον αγωγό με τη μεγαλύτερη διάμετρο.

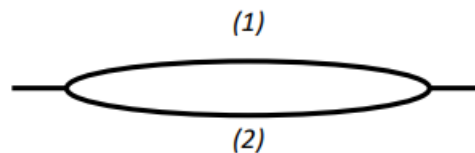
Πράγματι:

Παράλληλη σύνδεση(1),(2) :

$$h_{f,1} = h_{f,2} \Leftrightarrow$$

$$\frac{8fL}{g\pi^2 D_1^5} Q_1^2 = \frac{8fL}{g\pi^2 D_2^5} Q_2^2 \Leftrightarrow$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{D_1^5}{D_2^5}}$$



Οι παροχές ρυθμίζονται με βάση την ενέργεια

- Σε συνήθεις αγωγούς αποχέτευσης οι κυκλικοί αγωγοί αποχέτευσης είναι υπό πίεση? Όχι, είναι μερικής πλήρωσης με νερό και επομένως σχηματίζουν ελεύθερη επιφάνεια και επομένως έχουν τα χαρακτηριστικά των ανοικτών αγωγών (υδροστατική κατανομή πίεσης, ελ. επιφάνεια κλπ)

Ρητή σχέση απωλειών ενέργειας- παροχής, ένας αγωγός μόνο γραμμικές απώλειες

Β' τρόπος (προτεινόμενη ρητή εξίσωση)

Σε τυρβώδη ροή με γνωστές τις γραμμικές απώλειες, αγνοώντας τις τοπικές απώλειες, μπορεί άμεσα να προσδιοριστεί η ταχύτητα από την παρακάτω αναλυτική εξίσωση:

$$V = -2 \sqrt{\frac{2gh_{f(i-1) \rightarrow i} D}{L}} \log \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51\nu}{D} \sqrt{\frac{L}{2gh_{f(i-1) \rightarrow i} D}} \right)^* \quad (2.35)$$

* Από την εξίσωση των Darcy - Weisbach ισχύει

$$h_{f(i-1) \rightarrow i} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \Leftrightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = V \sqrt{\frac{L}{2gh_{f(i-1) \rightarrow i} D}}$$

Από την εξίσωση των Colebrook - White $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$, προκύπτει:

$$V \sqrt{\frac{L}{2gh_{f(i-1) \rightarrow i} D}} = -2 \log \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51}{VD/\nu} V \sqrt{\frac{L}{2gh_{f(i-1) \rightarrow i} D}} \right)$$

$$V = -2 \sqrt{\frac{2gh_{f(i-1) \rightarrow i} D}{L}} \log \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51\nu}{D} \sqrt{\frac{L}{2gh_{f(i-1) \rightarrow i} D}} \right)$$

όπου $H_{i-1} - H_i = h_{f(i-1) \rightarrow i}$.

Άρα είναι μία ακριβής και όχι προσεγγιστική εξίσωση