

6

ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΤΕΡΕΩΝ

Η υπολογιστική αντιμετώπιση της υδραυλικής μεταφοράς στερεών υλών μπορεί να προκύψει από τις γενικά ισχύουσες σχέσεις της προηγούμενης παραγράφου, λαμβάνοντας απλώς υπόψη τις ιδιότητες που αντιστοιχούν στο φορέα (μέσο μεταφοράς). Επειδή η υδραυλική μεταφορά μπορεί να θεωρηθεί σαν εντελώς ασυμπίεστη, δεν απαιτείται διαχωρισμός σε αραιή και πυκνή υδραυλική μεταφορά. Οι παράγωγες σχέσεις που προκύπτουν ισχύουν για τις βασικές προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.1. Αυτές οι βασικές αρχές υπολογισμού ισχύουν κάτω από περιορισμούς για ομογενή κατανομή της στερεάς ύλης, χρησιμοποιούνται όμως και για ομογενείς συνθήκες, όταν η κατανομή της συγκέντρωσης και της ταχύτητας ληφθεί υπ' όψη μέσω κατάλληλων διορθωτικών συντελεστών. Λόγω της μεγάλης πυκνότητας του φορέα, το βάρος του δεν επιτρέπεται να θεωρηθεί αμελητέο. Η υδραυλική μεταφορά στερεάς ύλης μέσω αγωγού χαρακτηρίζεται ανάλογα με την κλίση δ του αγωγού, σαν οριζόντια ($\delta = 0^\circ$) και σαν κατακόρυφη ($\delta = 90^\circ$).

6.1 Υδραυλική μεταφορά μέσω αγωγού κεκλιμένου προς τα άνω

Για την περίπτωση της υδραυλικής μεταφοράς μέσω αγωγού κεκλιμένου προς τα άνω, όταν στη γενική εξίσωση απώλειας πίεσης εισαχθεί η αναλογία μίξης, ο αδιάστατος βαθμός πληρότητας αντικαθίσταται μέσω της συγκέντρωσης όγκου από τη σχέση :

$$\varepsilon = 1 - c_v \quad (6.1)$$

και για το συντελεστή τριβής λ_z θα χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$\lambda_z = \lambda_z^* \frac{c}{u} + \frac{2\beta}{\frac{c}{Fr^2}} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} \quad (6.2)$$

όπου β ο συντελεστής βάρους και Fr ο χαρακτηριστικός αριθμός Froude. Τότε η εξίσωση απώλειας πίεσης γίνεται :

$$dp = - \left[\rho_f g \eta \mu \delta dl + (\lambda_f + \mu_m \lambda_z) \frac{\rho_f}{2} \frac{u^2 dl}{d} (1 - c_v) + (1 - c_v) \rho_f u du + (1 - c_v) \rho_f \mu_m u dc \right] \quad (6.3)$$

και αντίστοιχα η εξίσωση κίνησης:

$$\frac{3}{4} \frac{c_w}{d_s} \rho_f (u - c) |u - c| = (1 - c_v) \left[\rho_s \left(g \eta \mu \delta + \lambda_z^* \frac{c^2}{2d} + c \frac{dc}{dl} \right) - \rho_f \left(g \eta \mu \delta + \lambda_f \frac{u^2}{2d} + u \frac{du}{dl} \right) \right] - \frac{c_v}{1 - c_v} (\rho_s - \rho_f) g \frac{W_s}{u} \sigma \nu \nu^2 \delta \quad (6.4)$$

όπου για το συντελεστή βάρους β χρησιμοποιείται η σχέση :

$$\beta = \eta \mu \delta + \frac{W_s}{u} \sigma \nu \nu^2 \delta \quad (6.5)$$

6.2 Κατακόρυφη υδραυλική μεταφορά

6.2.1 Εξίσωση απώλειας πίεσης και εξίσωση κίνησης

Η εξίσωση απώλειας πίεσης για την κατακόρυφη υδραυλική μεταφορά, προκύπτει από την εξίσωση (6.3), θέτοντας όπου $\delta = 90^\circ$. Για την κατακόρυφη μεταφορά ο συντελεστής βάρους είναι $\beta = 1$.

Η εξίσωση 6.2 γίνεται :

$$\lambda_z = \lambda_z^* \frac{u}{c} + \frac{2}{\frac{c}{u} Fr^2} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} \quad (6.6)$$

και έτσι προκύπτει για την εξίσωση απώλειας πίεσης:

$$dp = -[\rho_f g dl + (\lambda_f + \mu_m \lambda_z) \frac{\rho_f}{2} u^2 \frac{dl}{d} (1 - c_v) + (1 - c_v) \rho_f u du + (1 - c_v) \rho_f \mu_m u dc] \quad (6.7)$$

Η εξίσωση κίνησης, όπως προκύπτει αντίστοιχα από τη σχέση (6.4), γίνεται :

$$\frac{3}{4} \frac{c_w}{d_s} \rho_f (u - c) |u - c| = (1 - c_v) \left[\rho_s \left(g + \lambda_z^* \frac{c^2}{2d} + c \frac{dc}{dl} \right) - \rho_f \left(g + \lambda_f \frac{u^2}{2d} + u \frac{du}{dl} \right) \right] \quad (6.8)$$

Οι όροι της επιτάχυνσης μπορούν γενικά στην υδραυλική μεταφορά να θεωρηθούν αμελητέοι, επειδή οι ταχύτητες είναι μικρές και η συνολική πτώση πίεσης, ιδιαίτερα σε μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς, είναι μεγάλη. Επειδή η συμπιεστότητα εδώ δεν παίζει κανένα ρόλο, η πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού μεταφοράς είναι λόγω της βαρύτητας γραμμική, ούτως ώστε η εξίσωση απώλειας πίεσης (6.7), παραλείποντας τους όρους της επιτάχυνσης, γράφεται ως εξής :

$$\frac{\Delta P}{\Delta l} = - \left[\rho_f g + (\lambda_f + \mu_m \lambda_z) \frac{\rho_f}{2} \frac{u^2}{d} (1 - c_v) \right] \quad (6.9)$$

η εξίσωση κίνησης (6.8), γίνεται αντίστοιχα :

$$\frac{3}{4} \frac{c_w}{d_s} \rho_f (u - c) |u - c| = (1 - c_v) \left[(\rho_s - \rho_f) g + \rho_s \frac{\lambda_z^* c^2}{2d} - \rho_f \lambda_f \frac{u^2}{2d} \right] \quad (6.10)$$

6.2.2 Πρακτική εφαρμογή των εξισώσεων

Για δεδομένη μεταφερόμενη ποσότητα M_s , και γνωστές τις ιδιότητες της προς μεταφορά στερεής ύλης ρ_s , d_s , λ_z^* και απόσταση μεταφοράς L , είναι δυνατός ο πρακτικός υπολογισμός και η ερμηνεία μιας εγκατάστασης κατακόρυφης υδραυλικής μεταφοράς.

Με βάση τα δεδομένα μεγέθη για τη στερεά ύλη πρέπει να εξακριβωθεί η ταχύτητα βύθισης. Από τη σχέση συνέχειας προκύπτει για μια εκλεγμένη συγκέντρωση μεταφοράς C_T , από τη δεδομένη παροχή μάζας της στερεάς ύλης M_s , η παροχή του υδάτινου όγκου V_f :

$$V_f = \frac{M_s}{\rho_s} \frac{1 - C_T}{C_T} \quad (6.11)$$

Πέρα από τις δύο σχέσεις συνέχειας και την εξίσωση κίνησης (6.10), τώρα τα μεγέθη d (διάμετρος του αγωγού), u και c (οι ταχύτητες των δύο φάσεων), καθώς και η συγκέντρωση όγκου c_v , συνδέονται ως εξής :

$$V_f = \frac{\pi d^2}{4} (1 - c_v) u \quad (6.12)$$

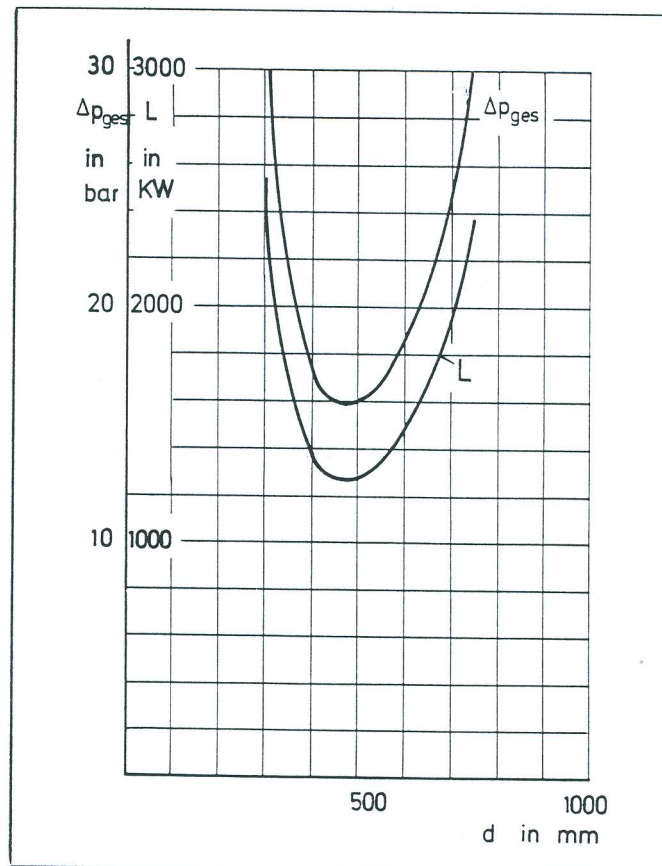
$$V_s = \frac{\pi d^2}{4} c_v c \quad (6.13)$$

Επειδή η υδραυλική μεταφορά θα πραγματοποιηθεί με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις, πρέπει εδώ να ληφθούν υπόψη οι συγκεντρώσεις. Όταν οι ταχύτητες βύθισης της στερεάς ύλης στο νερό είναι πολύ μικρές, άρα υπάρχει λεπτό διαμέτρημα των κόκκων της στερεάς ύλης, οι ταχύτητες της στερεάς ύλης και του νερού δεν θα διαφέρουν ουσιαστικά. Σ' αυτή την περίπτωση λοιπόν μπορεί να τεθεί $u = c$. Για μια επιλεγμένη διάμετρο αγωγού d , σ' αυτή την περίπτωση, η ταχύτητα του μίγματος V προκύπτει από την ολική παροχή όγκου και τη διατομή του αγωγού.

Εάν η ταχύτητα βύθισης δεν είναι τόσο μικρή, η εξίσωση κίνησης (6.10) μπορεί παρόμοια να αντικατασταθεί από την απλή σχέση (3.5.6). Εάν λοιπόν τεθεί $c = u - w_s$ στη σχέση (6.13) και απαλειφθεί το c_v από τις σχέσεις (6.12) και (6.13), προκύπτει, για μια επιλεγμένη διάμετρο αγωγού, μια δευτεροβάθμια εξίσωση για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του νερού u . Από τη σχέση (6.12) ή την (6.13) προκύπτει η συγκέντρωση όγκου c_v .

Για κάθε επιλεγμένη διάμετρο αγωγού μπορεί από την εξίσωση (6.9) να υπολογισθεί η απώλεια πίεσης για την κάθε φορά δεδομένη ή επιλεγμένη συγκέντρωση μεταφοράς. Επιπλέον απώλειες πίεσης λόγω τοπικών απωλειών πρέπει να συνυπολογισθούν για τον υπολογισμό της ολικής απώλειας πίεσης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1, εάν σχεδιαστεί η απώλεια πίεσης συναρτήσει της διαμέτρου του αγωγού, βρίσκεται για κάθε συγκέντρωση μεταφοράς (ή λόγο μίξης) μια ελάχιστη τιμή των απωλειών πίεσης.



Σχήμα 6.1. Απώλεια πίεσης σε κατακόρυφη υδραυλική μεταφορά συναρτήσει της διαμέτρου του αγωγού.

Η ισχύς της αντλίας που αντιστοιχεί στην απώλεια πίεσης που υπολογίζεται, όταν η στέρεα ύλη ρέει μαζί με το φορέα, ισούται με :

$$L = \frac{\left(\Delta p + \frac{\rho_f u^2}{2} \right) (V_s + V_f)}{\eta_p} = \frac{\Delta p_{gs} V_{gs}}{\eta_p} \quad (6.14)$$

Εάν η ισχύς ζητείται σε kW, πρέπει να διαιρέσουμε ακόμη διά του 1000 την τιμή του L που θα υπολογισθεί από τη σχέση (6.14).

6.2.3 Διαγράμματα εργασίας στην κατακόρυφη υδραυλική μεταφορά

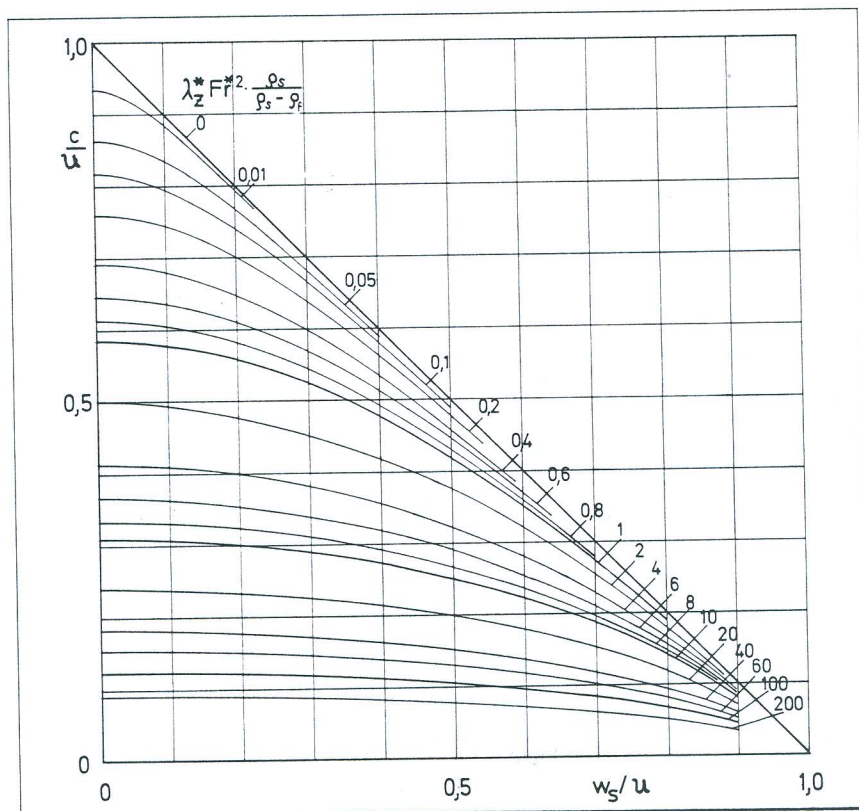
Προσεγγιστικοί υπολογισμοί και εκτιμήσεις για την κατακόρυφη υδραυλική μεταφορά με νερό μπορούν να γίνουν με βάση τα τρία διαγράμματα που φαίνονται στα Σχήματα (6.2), (6.3) και (6.4).

Στο Σχήμα 6.2 η εξίσωση της κίνησης έχει παρασταθεί θεωρώντας αμελητέο τον τελευταίο όρο. Με τη ληφθείσα από το Σχήμα 6.2 σχέση ταχυτήτων c/u , μπορεί να υπολογιστεί από το Σχήμα 6.3 ο συντελεστής τριβής λ_z , σύμφωνα με την προαναφερθείσα εξίσωση (6.6), όταν ο συντελεστής τριβής λ_z^* , η ταχύτητα του νερού u , η διάμετρος του αγωγού d και η σχέση των πυκνοτήτων ρ_s/ρ_f είναι δεδομένα.

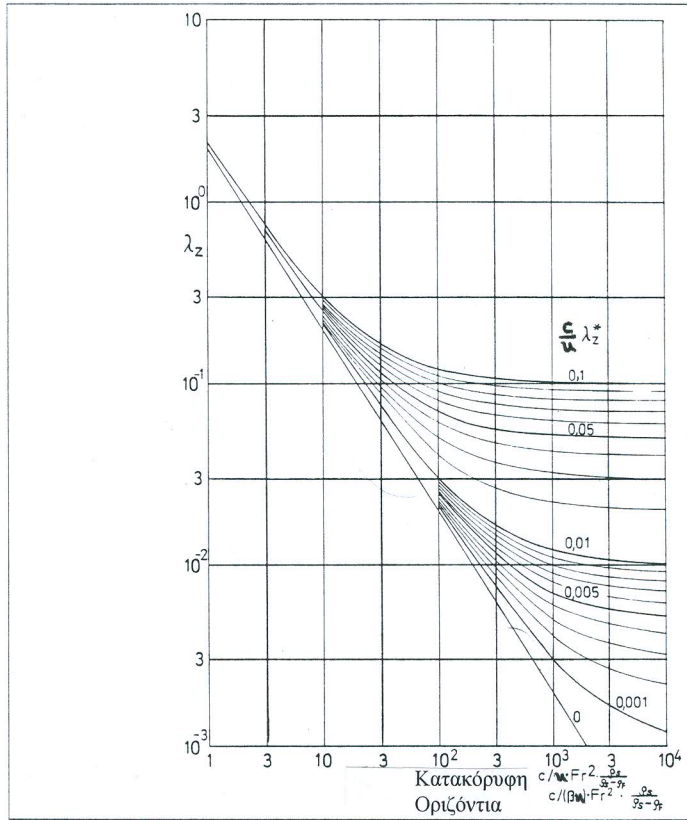
Με το συντελεστή τριβής λ_z , τη συγκέντρωση μεταφοράς C_T ή το λόγο μίξης, μπορεί για δεδομένη διάμετρο αγωγού να ληφθεί η πτώση πίεσης ανά μέτρο μήκους του αγωγού. Η αναλογία μίξης εκφράζεται σαν συνάρτηση της συγκέντρωσης μεταφοράς :

$$\mu_m = \frac{C_T \rho_s}{1 - C_T \rho_f} \quad (6.15)$$

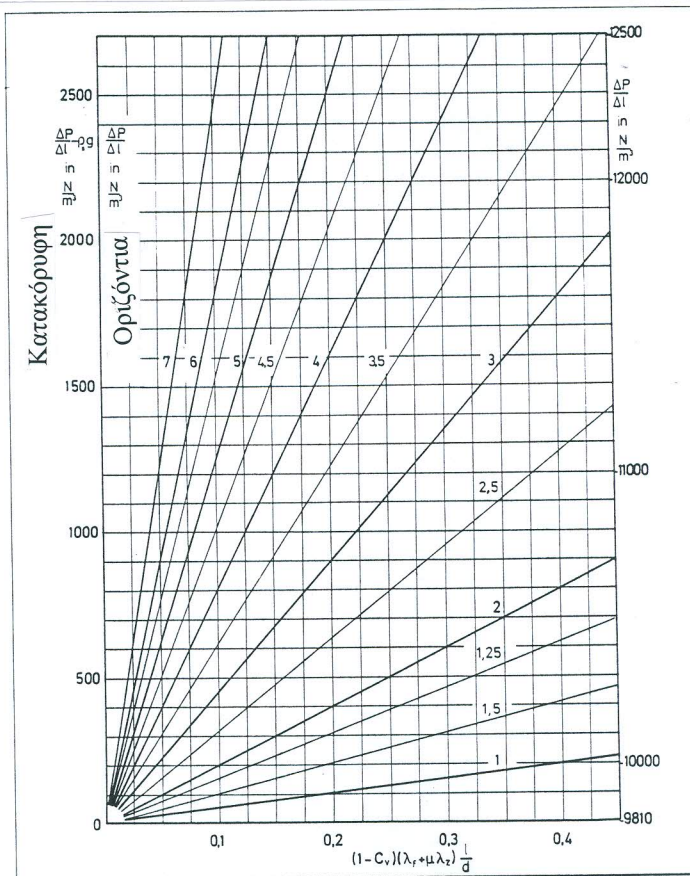
Στο σχήμα 6.4, στην αριστερή κλίμακα παριστάνεται η πτώση πίεσης χωρίς τη γεωδαιτική πτώση πίεσης του νερού, και στη δεξιά κλίμακα μαζί μ' αυτήν.



Σχήμα 6.2: Διάγραμμα εργασίας για τον υπολογισμό του λόγου c/u σε κατακόρυφη υδραυλική μεταφορά.



Σχήμα 6.3: Διάγραμμα εργασίας για τον υπολογισμό του λ_z .



Σχήμα 6.4: Πτώση πίεσης ανά μέτρο μήκους του αγωγού σε κατακόρυφη υδραυλική μεταφορά.

6.3 Οριζόντια υδραυλική μεταφορά

6.3.1 Εξισώσεις απώλειας πίεσης και κίνησης

Η εξίσωση απώλειας πίεσης για την οριζόντια υδραυλική μεταφορά συνάγεται από τις σχέσεις (6.2), (6.3) και (6.5) όταν τεθεί $\delta=0^\circ$. Ο συντελεστής βάρους β θα γίνει τώρα $\beta = w_s / u$.

Έτσι η εξίσωση απώλειας πίεσης παίρνει τη μορφή:

$$dp = - \left[(\lambda_f + \mu_m \lambda_z) \frac{\rho_f}{2} \frac{u^2 dl}{d} (1 - c_v) + (1 - c_v) \rho_f u du + (1 - c_v) \rho_f \mu_m u dc \right] \quad (6.16)$$

και η εξίσωση κίνησης γίνεται :

$$\begin{aligned} \frac{3}{4} \frac{c_w}{d_s} \rho_f (u - c) |u - c| = (1 - c_v) \left[\rho_s \left(\lambda_z^* \frac{c^2}{2d} + c \frac{dc}{dl} \right) - \rho_f \left(\lambda_f \frac{u^2}{2d} + u \frac{du}{dl} \right) \right] - \\ - \frac{c_v}{1 - c_v} (\rho_s - \rho_f) g \frac{w_s}{u} \end{aligned} \quad (6.17)$$

Θεωρώντας τους όρους της επιτάχυνσης αμελητέους και απαλείφοντάς τους από τις παραπάνω εξισώσεις, έχουμε για την εξίσωση απώλειας πίεσης :

$$\frac{\Delta P}{\Delta l} = - (\lambda_f + \mu_m \lambda_z) \frac{\rho_f}{2} \frac{u^2}{d} (1 - c_v) \quad (6.18)$$

και για την εξίσωση κίνησης :

$$\frac{3}{4} \frac{c_w}{d_s} \rho_f (u - c) |u - c| = (1 - c_v) \left[\rho_s \lambda_z^* \frac{c^2}{2d} - \rho_f \lambda_f \frac{u^2}{2d} - c_v (\rho_s - \rho_f) g \frac{w_s}{u} \right] \quad (6.19)$$

6.3.2 Πρακτική εφαρμογή των εξισώσεων

Σύμφωνα με τον Durand, στερεά ύλη της τάξης μεγέθους κόκκου $d_s < 20-30 \mu\text{m}$ μεταφέρεται σε ομογενές αιώρημα, εφ' όσον επικρατεί τυρβώδης ροή. Η απώλεια πίεσης υπολογίζεται τότε όπως και για ένα «καθαρό» ρευστό, όταν χρησιμοποιηθεί η μέση πυκνότητα του μίγματος.

Σε υψηλότερες συγκεντρώσεις τέτοια μίγματα συμπεριφέρονται, εν τούτοις, σαν μη νευτωνικά ρευστά, στα οποία το ιξώδες εξαρτάται από την ταχύτητα.

Στερεά ύλη με διάμετρο σωματιδίων $d_s = 50 \mu\text{m} - 0.2 \text{ mm}$ μεταφέρεται σύμφωνα με τον Durand σαν ετερογενές αιώρημα. Μεγέθη κόκκων με $d_s > 2 \text{ mm}$, εν τούτοις, μεταφέρονται μόνο με πηδήματα.

Για να αποφευχθεί μια διάστρωση με άμμο του οριζόντιου σωληνωτού αγωγού, δεν επιτρέπεται ταχύτητα μικρότερη μιας κρίσιμης ελάχιστης τιμής της ταχύτητας V_{crit} . Αυτή η κρίσιμη ταχύτητα ορίζεται ποικίλα στη βιβλιογραφία και αντιστοίχως διάφορες είναι οι συνοριακές ταχύτητες που πρέπει να προσεχθούν.

Ο Fuhrboter ορίζει την κρίσιμη ταχύτητα σαν εκείνη τη μέση ταχύτητας ροής, πάνω από την οποία όλες οι στερεές ύλες μεταφέρονται μετέωρες, με πηδήματα ή ολισθαίνοντας. Για ταχύτητες μικρότερες της κρίσιμου επέρχονται μόνιμες εναποθέσεις. Ο Fuhrboter ανακάλυψε στα πειράματά του την εξάρτηση της κρίσιμης ταχύτητας από το μέγεθος των κόκκων και την συγκέντρωση. Έτσι αυξάνει η V_{crit} με το μέγεθος των κόκκων, καταρχήν απότομα, και κατόπιν από $d_s = 0.5 \text{ mm}$ σταθερή. Σε συγκεντρώσεις $c_v > 15\%$ επίσης παραμένει σταθερή η V_{crit} .

Λαμβάνοντας υπόψη την κρίσιμη ταχύτητας ροής V_{crit} , και για ταχύτητας ροής $V > V_{crit}$ μπορεί για δεδομένη προς μεταφορά ποσότητα M_s , δεδομένες ιδιότητες της στερεάς ύλης ρ_s , d_s , λ_z^* καθώς και επιθυμητή απόσταση μεταφοράς L , να γίνει ο πρακτικός υπολογισμός και η ερμηνεία μιας εγκατάστασης οριζόντιας υδραυλικής μεταφοράς όπως έγινε και στην περίπτωση της κατακόρυφης υδραυλικής μεταφοράς (παράγραφος 6.2.2). Επίσης από τα στοιχεία της στερεάς ύλης πρέπει να εξακριβωθεί η ταχύτητα βύθισης.

Με τη σχέση (3.2.6) προκύπτει για μια συγκεκριμένη επιλεγμένη ή δεδομένη συγκέντρωση μεταφοράς C_T , από τη δεδομένη παροχή μάζας M_s , η παροχή του υδάτινου όγκου V_f . Μέσω των δύο σχέσεων συνέχειας (6.12) και (6.13) και της εξίσωσης κίνησης (6.19) συνδέονται η διάμετρος του αγωγού d , οι ταχύτητες του νερού και της στερεάς ύλης u και c αντίστοιχα και η συγκέντρωση όγκου C_T .

Για μικρές ταχύτητες βύθισης w_s σε σχέση με την ταχύτητα u , μπορεί να τεθεί $u=c$ και τότε να υπολογισθεί από την ολική παροχή όγκου και τη διατομή του αγωγού.

Εάν η ταχύτητα βύθισης δεν είναι πολύ μικρή, πρέπει με τις σχέσεις (6.12) και (6.13) για την επιλεγμένη διάμετρο αγωγού και την ταχύτητα της στερεάς ύλης $c=u-w_s$, να υπολογισθεί η ταχύτητα του νερού u .

Κατά τον Fuhrboter, η συγκέντρωση μεταφοράς και η συγκέντρωση όγκου ετερογενών καταστάσεων υδραυλικής μεταφοράς σε μια πλατιά περιοχή ελεγμένων διαμέτρων κόκκων ($d_s = 0.2 - 7 \text{ mm}$) συγκεντρώσεων όγκου ($c_v = 5 - 30\%$) και μέσω των ταχυτήτων ροής V_m ($V_m = 3.8 - 5.3 \text{ m/s}$) με μια διάμετρο αγωγού $d = 300 \text{ mm}$ συνδέονται μέσω του σχεδόν σταθερού παράγοντα μεταφοράς:

$$\frac{C_T}{C_V} = \frac{C}{V_m} = 0.65 \quad (6.20)$$

Έτσι προκύπτουν από τις δυο εξισώσεις συνέχειας (6.12) και (6.13) αμέσως οι ταχύτητες του νερού και της στερεάς ύλης. Για ακριβέστερο υπολογισμό, η ταχύτητα της στερεάς ύλης πρέπει να διορθωθεί μέσω της δεδομένης εξίσωσης (6.19) και η πορεία υπολογισμού να επαναληφθεί όπως και παραπάνω.

Σύμφωνα με την εξίσωση (6.18) η πτώση πίεσης μπορεί να υπολογισθεί για κάθε εκλεγμένη διάμετρο αγωγού και συγκέντρωση μεταφοράς. Η αντιστοιχούσα ισχύς της αντλίας συνάγεται από τη σχέση (6.19). Εάν η ταχύτητα του νερού είναι $u \gg V_{crit}$, η κατανομή της στερεάς ύλης θα είναι σχετικά ομοιόμορφη στην διατομή. Εν τούτοις, όταν έρχεται η ταχύτητα του νερού στη περιοχή $u \gg V_{crit}$, πρέπει να υπολογισθεί μια ετερογενή κατανομή της στερεάς ύλης. Αυτό θα έπρεπε να ληφθεί υπόψη στις εξισώσεις (6.18) και (6.19) μέσω του υπολογισμού της κατανομής της συγκέντρωσης και ενός διορθωτικού συντελεστή, ευρεθέντος γι' αυτό το σκοπό, όπως των σχέσεων (3.3.2) και (3.3.3).

Επίσης οι σχέσεις συνέχειας θα έπρεπε κάθε φορά να διορθώνονται. Από τον Adam παρέχονται για την ενδιαφέρουσα περιοχή της υδραυλικής μεταφοράς υπολογισμένες κατανομές συγκέντρωσης, σαν συνάρτηση της απόστασης από τον πυθμένα y , της ταχύτητας βύθισης w_{so} και της μέσης συγκέντρωσης όγκου, έξι διαγράμματα εργασίας, τα οποία φαίνονται στα Σχήματα 6.5, 6.6 και 6.7. Επειδή αυτός ο ακριβής υπολογισμός, σύμφωνα με τις παράγωγες σχέσεις που ισχύουν για ετερογενή ροή, είναι πολύπλοκος για τους γνωστούς λόγους, εδώ μόνο πληροφοριακά αναφέρεται.

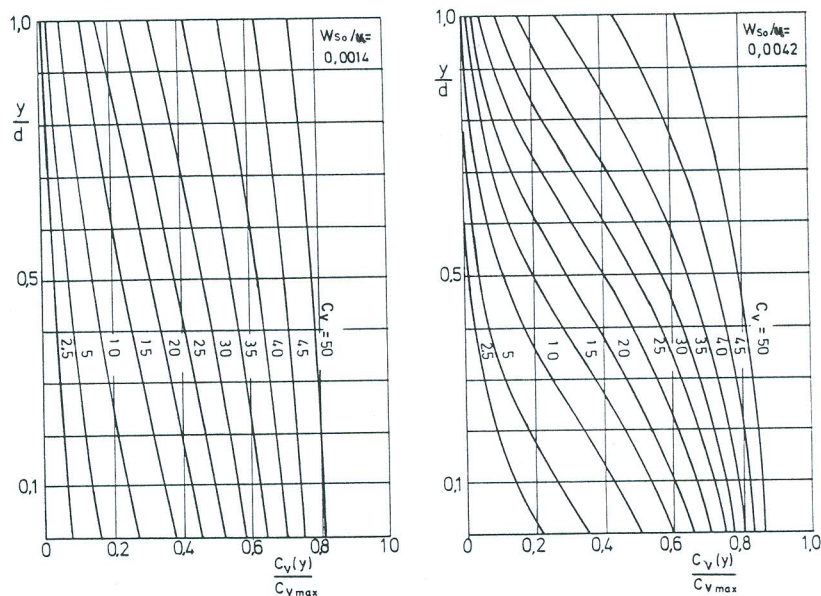
6.3.3 Διαγράμματα εργασίας για οριζόντια υδραυλική μεταφορά

Για τον κατά προσέγγιση υπολογισμό και την εκτίμηση της οριζόντιας υδραυλικής μεταφοράς, υπάρχουν τρία διαγράμματα στη διάθεση μας, τα οποία δίνονται στα Σχήματα 6.3, 6.4 και 6.8.

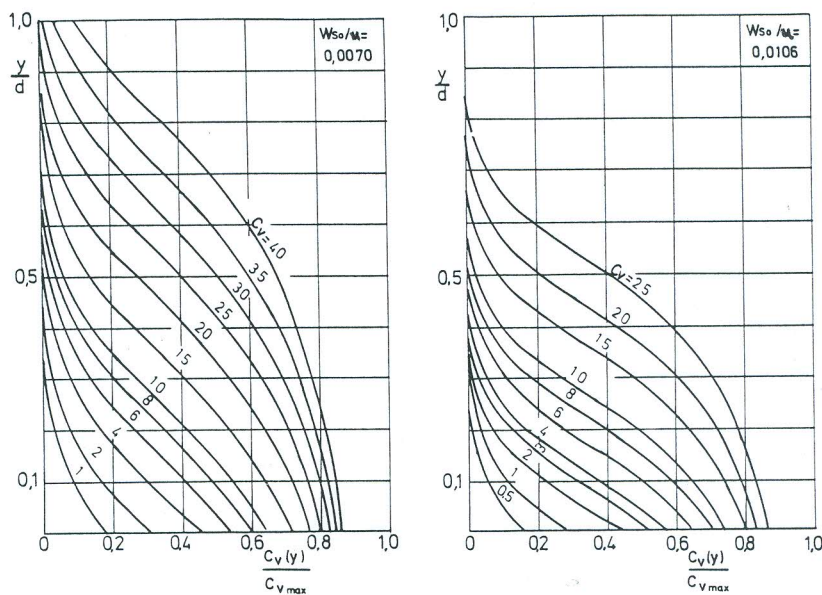
Στο Σχήμα 6.8 η εξίσωση κίνησης (6.19), θεωρώντας τους δύο τελευταίους όρους αμελητέους, περιγράφεται από τη μορφή:

$$\frac{c}{u} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f} \frac{\lambda_z^* Fr^2}{2} \right)^{1/2}} \quad (6.21)$$

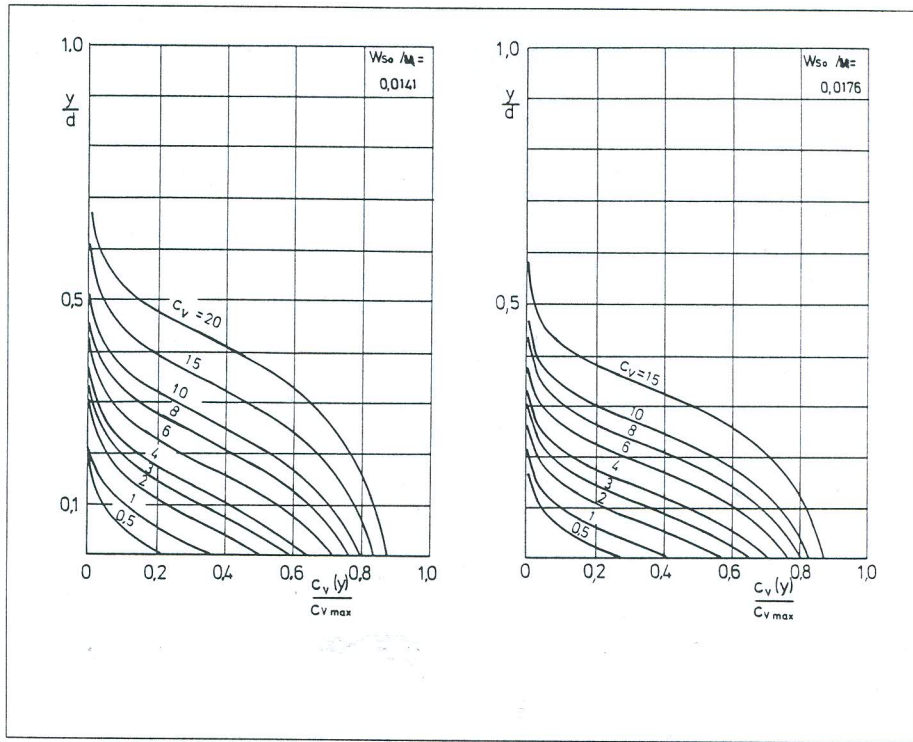
Από το Σχήμα 6.3, για δεδομένη συγκέντρωση μεταφοράς C_T και ταχύτητα u , βρίσκεται ο συντελεστής τριβής λ_z . Κατόπιν η σχέση ταχυτήτων c/u λαμβάνεται από το Σχήμα 6.8 για δεδομένη ταχύτητα βύθισης w_s , συντελεστή τριβής λ_z^* και διάμετρο του αγωγού d . Τέλος, με γνωστό το λόγο των ταχυτήτων, από το Σχήμα 6.4 μπορεί να αναγνωσθεί η αναφερόμενη πτώση πίεσης.



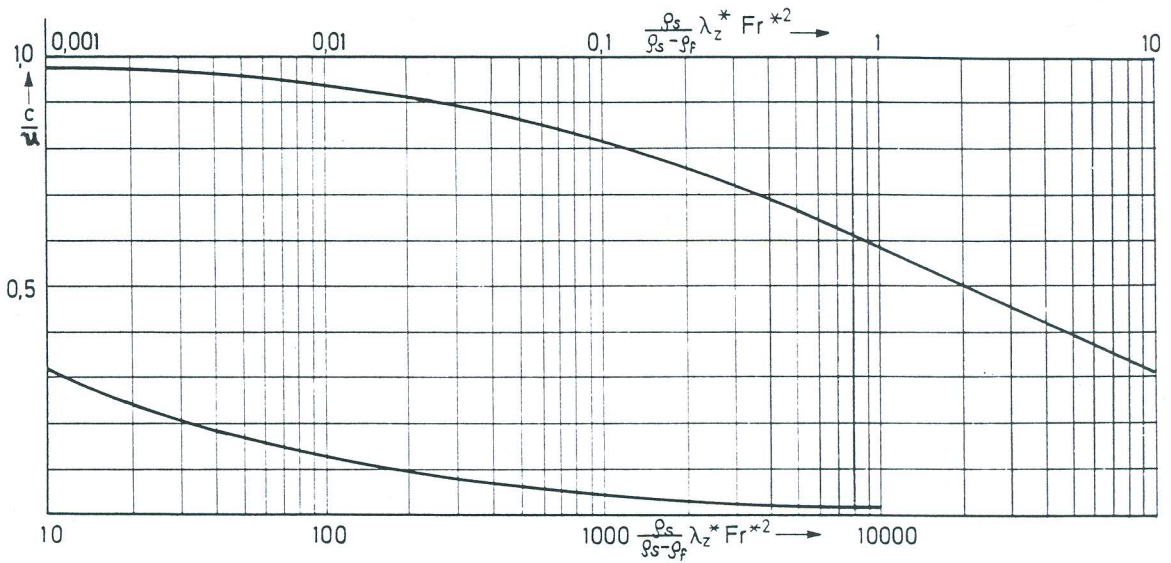
Σχήμα 6.5: Κατανομή της ογκομετρικής συγκέντρωσης για διάφορες τιμές του λόγου w_{so}/u .



Σχήμα 6.6: Κατανομή της ογκομετρικής συγκέντρωσης για διάφορες τιμές του λόγου w_{so}/u .



Σχήμα 6.7: Κατανομή της ογκομετρικής συγκέντρωσης για διάφορες τιμές του λόγου w_{s0}/u .



Σχήμα 6.8: Διάγραμμα εργασίας για τον υπολογισμό του λόγου c/u σε οριζόντια υδραυλική μεταφορά.

7

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ
ΠΡΩΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ**

1. Wallis, G. B., *One dimensional Two-Phase Flow*. Mc Graw-Hill, New York, 1969.
2. Αλεξανδρίδη, Ν. Α., Μπουρμπάκη Ν. Γ., *Επίλυση κανονικών διαφορικών εξισώσεων με ψηφιακό υπολογιστή*. Πάτρα 1977.
3. Παπανίκας Δ. Γ., *Εφαρμοσμένη Ρευστομηχανική*. Πάτρα 1978.
4. Weber G. B., *Stroemungs - Foerdertechnik*. Krausskopf - Verlag, 1974.
5. Muschelknautz E., *Theoretische und experimentelle Untersuchungen uber die Druckverluste pneumatischer Foerderleitungen unter besonderer Berucksichtigung des Einflusses von Gutreibung und Gutgewicht*. VDI Forschungsheft 476, Dusseldorf, VDI Verlag, 1959.
6. Schlichting H., *Boundary Layer Theory*. Mc Graw-Hill, Sixth edition, New York, 1968.
7. Μάργαρης Δ., Παπανίκας Δ., *Πνευματική μεταφορά στερεών σωματιδίων σε ευθύγραμμους αγωγούς*. Συνέδριο Αιολικής Ενέργειας και Βιομηχανικής Αεροδυναμικής, Ε.Μ.Π., Αθήνα, Οκτώβρης 1980.
8. Μάργαρης Δ., Πρωτοψάλτης Α., Παπανίκας Δ., *Διακίνηση Υλικών με Ρευστοδυναμική Μεταφορά*. Συνέδριο για την Περιφερειακή Ανάπτυξη, Οργάνωση ΤΕΕ-Τμ. Δυτικής Ελλάδας, Πάτρα, Μάης 1981.

9. Καστρίτης Π., Κολιγιάννης Ι., *Διερεύνηση διφασικής ροής σε εγκατάσταση πνευματικής μεταφοράς*. Διπλ. Εργασία, Πάτρα, Ιούλης 1979.
10. Molerus O., *Fluid - Feststoff - Stromungen*. Springer-Verlag, Berlin 1982.
11. Muschelknautz E., *Partikelaerodynamic, Preprints Technik der Gas/Feststoff-Stromung-Sichten, Abscheiden, Fordern, Wirbelschichten*. Koln, Dezember 1986.
12. Pai, S. I. *Two Phase Flows. Vieweg Tracks in Pure and Applied Physics*. Vieweg, Braunschweig, 1977.
13. Boothroyd, R.G. *Flowing Gas-Solids Suspensions*. Chapman & Hall Ltd. Edinburgh, 1971.
14. Marble, F. E., *Dynamics of a gas containing small solid particles*. Proc. 5th AGARD Combustion and Propulsion Colloquim. Pergamon Press, New York, USA, pp.175-215, 1963.
15. Soo, S. L., *Fluid Dynamics of Multiphase Systems*, Blaisdell Pub. Co., Waltham, 1967.
16. Pai, S. I., *A Critical Review of the Fundamental Equations of a Mixture of a Gas and Small Solid Particles*. Z. Flugwiss. Vol. 19, Heft 8/9, pp. 353-360, 1971.
17. Gutfinger, C., *Topics in Transport Phenomena*. Hemisphere Publ. Corp., London, 1975.
18. Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N., *Transport Phenomena*. John Willey and Sons, Inc., New York, 1960.
19. Rudinger, G., *Flow of Solids Particles in Gases*. AGARDograph No 222, Oct. 1976.