

4

ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΠΤΩΣΗΣ

4.1 Γενικής ισχύος σχέση για την ταχύτητα ελεύθερης πτώσης

Η μελέτη των ροϊκών φαινομένων της ρευστομεταφοράς, απαιτεί τη γνώση της συμπεριφοράς της προς μεταφορά στερεάς ύλης μέσα στον απαραίτητο για τη μεταφορά φορέα.

Ξεκινώντας από γνωστές τιμές μεγεθών της προς μεταφορά ύλης, όπως μέγεθος κόκκου, κατανομή κόκκου, πυκνότητα και σχήμα κόκκου, πρέπει να διαπιστωθεί η αναμενόμενη συμπεριφορά κίνησης μέσα στο φορέα και να διαγνωσθεί η διαμορφούμενη κατάσταση μεταφοράς.

Για το σκοπό αυτό είναι κατάλληλη η εξίσωση κίνησης για ελεύθερη πτώση σε αδιατάρακτο μέσο σε ηρεμία, χωρίς επιδράσεις από πλησίον υπάρχοντα τοιχώματα.

Αυτή η εξίσωση κίνησης, προκύπτει από τη γενική εξίσωση για κατακόρυφη μεταφορά, που δίνεται από τη σχ.(3.4.14), αφού εκλείψουν οι όροι που περιέχουν τη τριβή της στερεάς ουσίας και του φορέα στο τοίχωμα του αγωγού καθώς επίσης οι όροι που περιέχουν επιταχύνσεις επειδή η θεώρηση της πτώσης γίνεται όταν έχει ξεπεραστεί το στάδιο της επιτάχυνσης, δηλαδή, σε κατάσταση σταθερής ταχύτητας . Η ειδική εξίσωση κίνησης για την ελεύθερη πτώση με σταθερή ταχύτητα (την οριακή) διατυπώνεται μετά από αυτό, ως εξής :

$$\frac{3}{4} \frac{C_w}{d_s} \rho_f (u-c)^2 = \varepsilon g (\rho_s - \rho_f) \quad (4.1.1)$$

Στη σχ.(4.1.1) περιέχονται μόνο η ροϊκή αντίσταση και οι επιδράσεις των βαρών των δύο φάσεων . Η ταχύτητα του φορέα πρέπει να τεθεί εδώ ίση με μηδέν. Έτσι για την ταχύτητα ελεύθερης πτώσης της στερεάς ύλης ή τη σχετική ταχύτητα προσροής, ισχύει η σχέση :

$$w_s = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d_s}{c_w} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g \varepsilon} \quad (4.1.2)$$

Στη σχ.(4.1.2) για την ταχύτητα ελεύθερης πτώσης περιέχονται εκτός από τις επιδράσεις των πυκνοτήτων της στερεάς ύλης και του φορέα και άλλες ακόμη επιδράσεις.

Το βάρος της στερεάς ύλης προκαλεί την ταχύτητα ελεύθερης πτώσης, ενώ αντίθετα το βάρος του φορέα προκαλεί μείωσή της, όπως επίσης και η πυκνότητα του φορέα . Από τη πλευρά της βαρύτητας δηλώνεται με τον αδιάστατο βαθμό πληρότητας ε μια έμμεση επίδραση που λαμβάνει υπόψη την αύξηση της μέσης πυκνότητας του μίγματος, εάν αυξηθεί η πυκνότητα της στερεάς ύλης κατά $(1-\varepsilon)$. Είναι ένα είδος υποστήριξης που αλληλοεξασκούν τα σωματίδια της στερεάς ύλης μέσω της κλίσης της πίεσης . Για μεμονωμένα τεμαχίδια πρέπει να τεθεί $\varepsilon=1$. Αυξανόμενου του κόκκου αυξάνεται και η ταχύτητα ελεύθερης πτώσης . Με το συντελεστή ροϊκής αντίστασης c_w υπεισέρχεται η επίδραση της αντίστασης με τις πολλές της εξαρτήσεις από το αποτέλεσμα. Επειδή ο συντελεστής ροϊκής αντίστασης εξαρτάται ιδιαίτερα από τον αριθμό Reynolds:

$$Re_s = \frac{w_s d_s}{\nu} \quad (4.1.3)$$

η σχ.(4.1.2) δεν είναι ακόμα μια ρητή συνάρτηση του w_s .

Με το συντελεστή ροϊκής αντίστασης για τη περιοχή του Stokes ($Re_s \leq 0,2$) :

$$c_m = \frac{24}{Re_s} \quad (4.1.4)$$

εξάγεται για τη ταχύτητα ελεύθερης πτώσης, από την σχ.(4.1.2) για σφαίρες πολύ μικρής διαμέτρου, η σχέση :

$$w_s = \frac{1}{18} \frac{\rho_s - \rho_f}{\mu} g \varepsilon d_s^2 \quad (4.1.5)$$

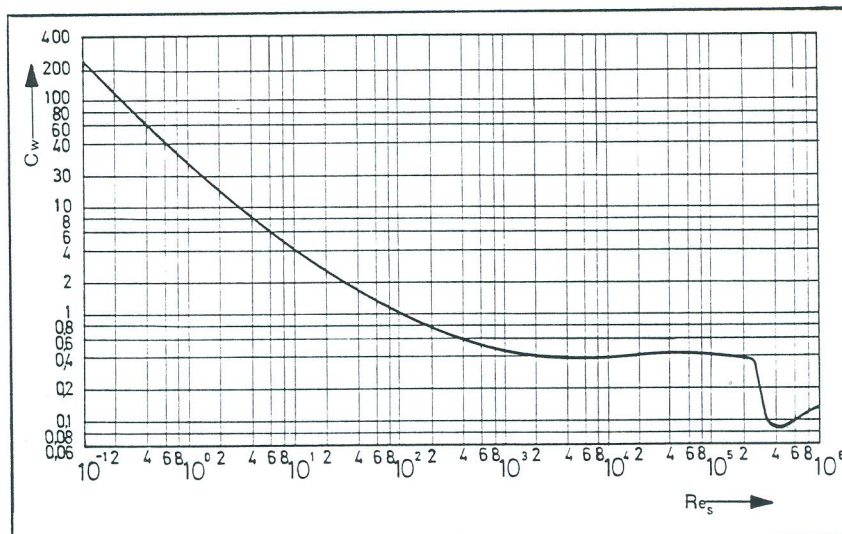
Για την περιοχή Newton ($1000 < Re_s < 10^5$) ακολουθεί, εάν τεθεί $c_w = 0.4$, η σχέση :

$$w_s = 1,83 \sqrt{d_s \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g \epsilon} \quad (4.1.6)$$

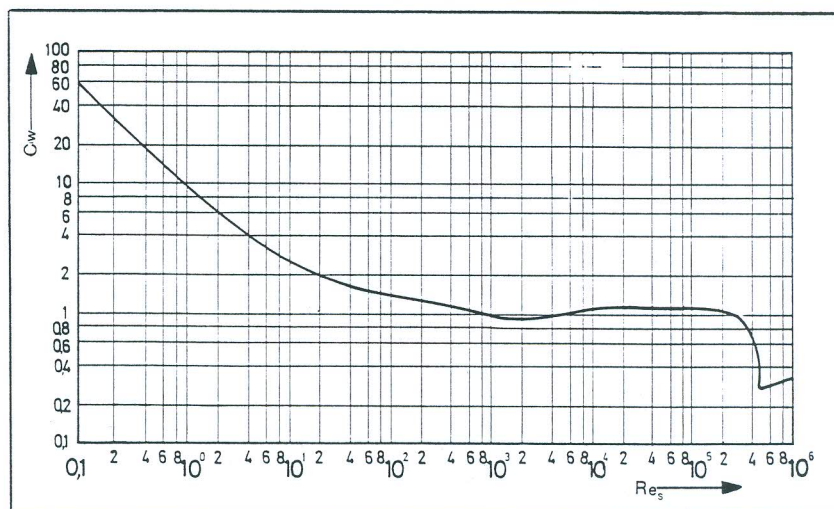
Στη μεταβατική περιοχή ($0,1 \leq Re_s \leq 10^4$) ο συντελεστής ροϊκής αντίστασης δίνεται από τη σχέση :

$$c_w = 0,4 + \frac{26}{Re_s^{0,8}} \quad (4.1.7)$$

Αντί των παραπάνω σχέσεων για τον συντελεστή αντίστασης των σωματιδίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια γενικευμένη σχέση, η οποία σύμφωνα με τον Molerus [10] ισχύει για αριθμούς Re μέχρι $Re_s \leq 10^5$ και αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης του $c_w = f(Re_s)$ που φαίνεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Συντελεστής ροϊκής αντίστασης σφαίρας σε συνάρτηση από τον αριθμό Reynolds.



Σχήμα 4.2: Συντελεστής ροϊκής αντίστασης κυλίνδρου σε συνάρτηση από τον αριθμό Reynolds.

Η σχέση αυτή σύμφωνα με πειραματικά αποτελέσματα του Muschelknautz [11] μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό του c_w σωματιδίων διαφόρων σχημάτων, όπως κύβος, πολύεδρο, κύλινδρος. Η διαφορά βρίσκεται στους αριθμητικούς συντελεστές. Η γενικευμένη αυτή σχέση είναι η εξής :

$$c_w = \frac{A}{Re_s} + \frac{B}{\sqrt{Re_s}} + \Gamma \quad (4.1.8)$$

όπου οι τιμές των συντελεστών A, B, Γ φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί :

Σχέση υπολογισμού c_w : $c_w = \frac{A}{Re_s} + \frac{B}{\sqrt{Re_s}} + \Gamma$					
Συντελεστές			Χαρακτηριστικό μέγεθος σωματιδίων	Σχήμα σωματιδίων	Αναφορά
A	B	Γ			
24	0	0	διάμετρος , d_s	σφαίρα	Stokes
24	4	0.4	διάμετρος , d_s	σφαίρα	Molerus
21.5	6.5	0.23	διάμετρος , d_s	σφαίρα	Muschelknautz
24	6	0.35	$1,1 * \alpha$ α=μέγ. διάσταση	πολύεδρο	Muschelknautz
23	6	0.5	$1,08 * d_z$ d_z =διάμ. βάσης	κύλινδρος $l/d_z = 1$	Muschelknautz
27	4.5	0.65	$1,24 * \alpha$ α=ακμή	κύβος	Muschelknautz

Πίνακας 1. Τιμές των συντελεστών A, B, Γ για τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης σωματιδίων διαφόρων σχημάτων .

Για την ταχύτητα ελεύθερης πτώσης εξάγεται τότε μια υπερβατική συνάρτηση, που μπορεί να λυθεί μόνο με τη μέθοδο των διαδοχικών προσεγγίσεων.

Για ακριβείς ταχύτητες ελεύθερης πτώσης, ιδιαίτερα στη μεταβατική περιοχή, συνιστάται η χρήση του συντελεστή ροϊκής αντίστασης c_w σύμφωνα με το Σχήμα 4.1, που έχει προκύψει πειραματικά. Πρέπει να γίνει και εκεί επίσης χρήση των διαδοχικών προσεγγίσεων. Το απλούστερο είναι να αρχίσει κανείς με $c_w=0.4$ στην περιοχή Newton, με την αποκτηθείσα ταχύτητα ελεύθερης πτώσης να υπολογίσει το Re_s και σύμφωνα με το Σχήμα 4.1 να τοποθετήσει εκ νέου ένα διορθωμένο c_w . Αυτή η διαδικασία πρέπει να επαναληφθεί τόσες φορές, μέχρις ότου το w_s , σύμφωνα με μία προκαθορισμένη ακρίβεια δεν μεταβάλλεται πλέον.

4.2 Ταχύτητα ελεύθερης πτώσης στερεών υλών στον αέρα

Για την εφαρμογή στη περιοχή της πνευματικής μεταφοράς έχει υπολογισθεί από τη σχέση (4.1.2), η ταχύτητα ελεύθερης πτώσης σφαιρικών μεμονομένων σωματιδίων στερεάς ύλης w_{s0} , κάνοντας χρήση των πειραματικά μετρηθέντων συντελεστών ροϊκής αντίστασης c_w , σύμφωνα με το Σχήμα 4.1, και τα αποτελέσματα έχουν καταγραφεί σε δύο διαγράμματα, που φαίνονται στα Σχήματα 4.3 και 4.4, σε συνάρτηση με το μέγεθος του κόκκου, για διάφορες τιμές πυκνότητας της στερεάς ύλης.

4.3 Ταχύτητα ελεύθερης πτώσης στερεών υλών στο νερό

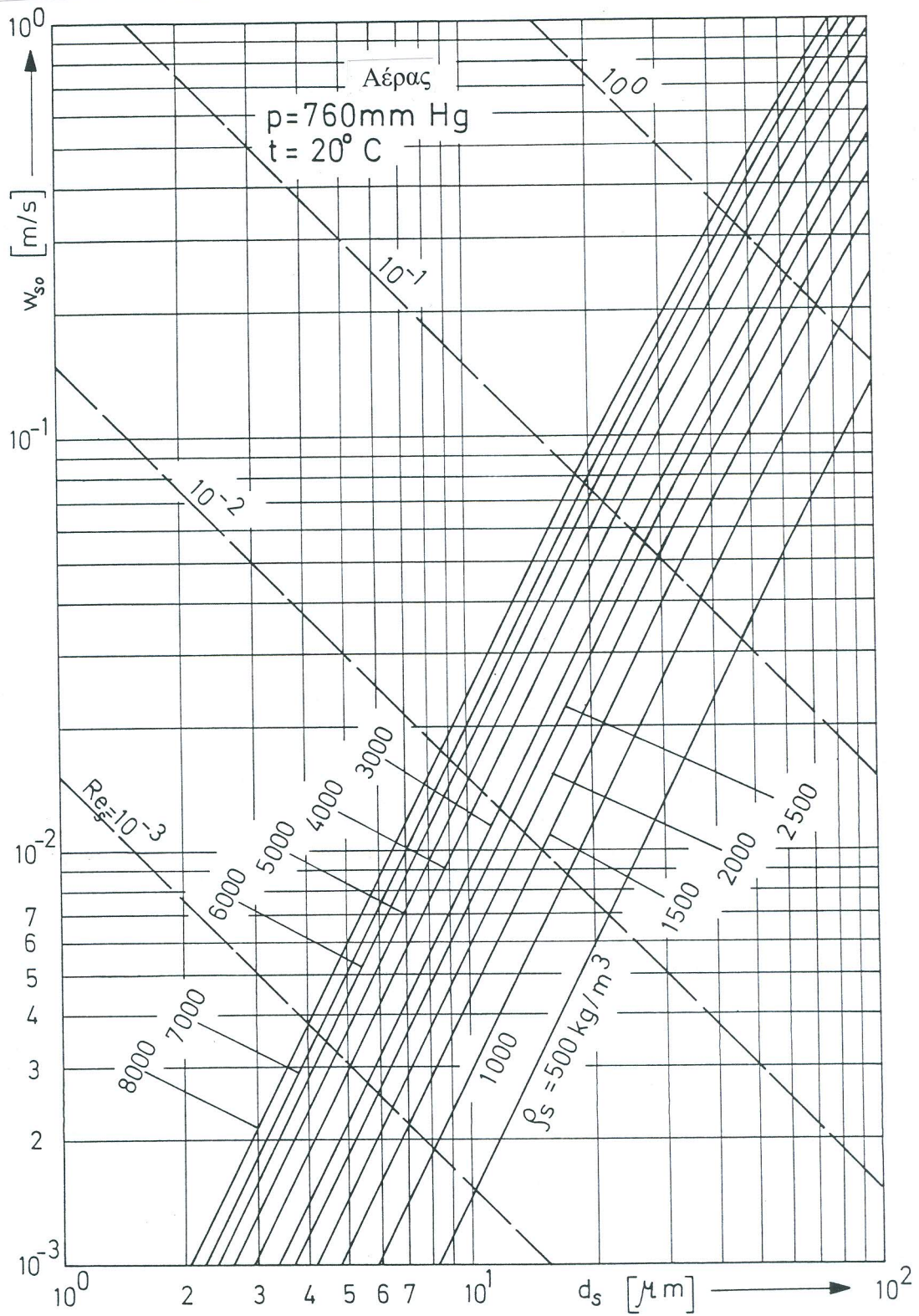
Για την εφαρμογή στη περιοχή της υδραυλικής μεταφοράς, έχει επίσης καταγραφεί η ταχύτητα ελεύθερης πτώσης σφαιρικών μεμονομένων σωματιδίων στερεάς ύλης w_{s0} σε δύο διαγράμματα, που φαίνονται στα Σχήματα 4.5 και 4.6, σε συνάρτηση του μεγέθους του κόκκου, για διάφορες πυκνότητες της στερεάς ύλης.

Στον πίνακα που φαίνεται στο Σχήμα 4.7, έχουν συνοψισθεί με βάση τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.3 έως 4.6, τα μεγέθη των κόκκων και οι αντίστοιχες ταχύτητες ελεύθερης πτώσης, στα όρια της μεταβατικής περιοχής μεταξύ των περιοχών Stokes και Newton, για διάφορες πυκνότητες της στερεάς ύλης.

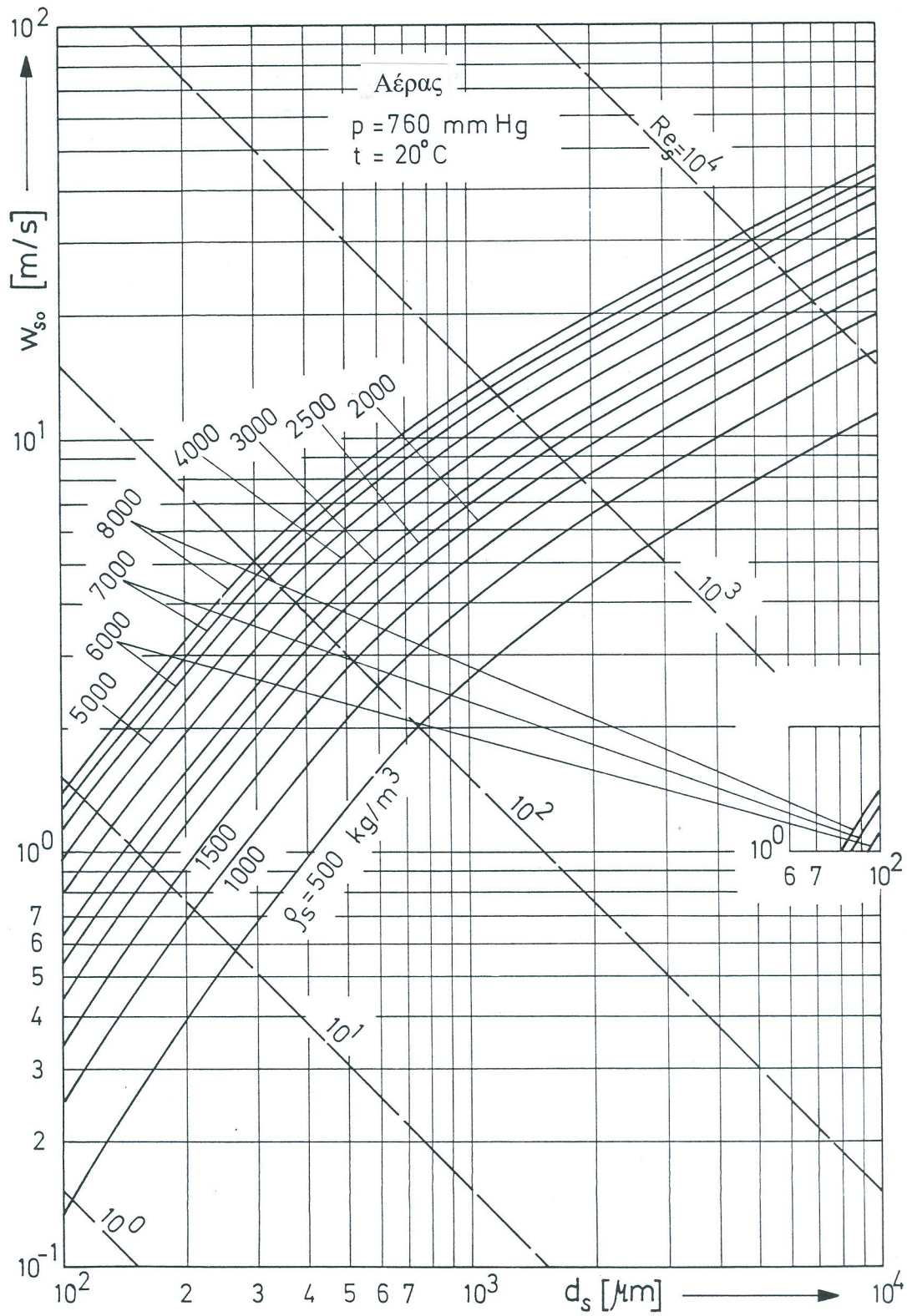
4.4 Ταχύτητα ελεύθερης πτώσης στερεών υλών σε οποιονδήποτε φορέα

Για γενική εφαρμογή στη περιοχή της ρευστοδυναμικής μεταφοράς γενικά, δηλ. για οποιονδήποτε φορέα, οι υπολογισθείσες τιμές για την ταχύτητα ελεύθερης πτώσης με βάση τη σχ.(4.1.2), έχουν καταγραφεί σε ένα ιδιαίτερο διάγραμμα, που φαίνεται στο Σχήμα 4.8, σε συνάρτηση από το μέγεθος $d_s \rho_f / \mu$ όπου μ το δυναμικό ιξώδες του φορέα. Εδώ γίνεται χρήση του μεγέθους $\mu(\rho_s - \rho_f) / \rho_f$ σαν παραμέτρου.

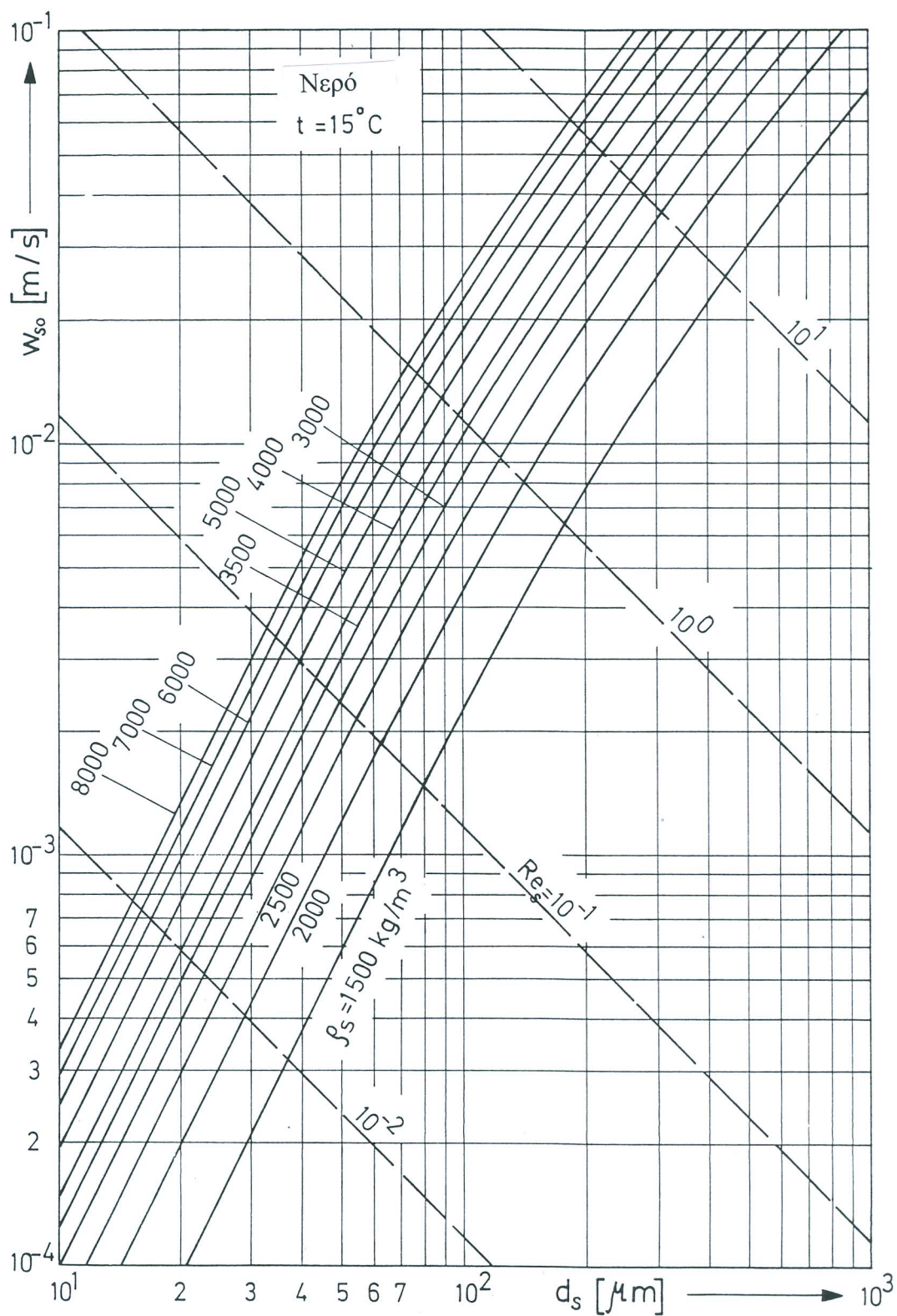
Το διάγραμμα του Σχήματος 4.8 είναι πολύ χρήσιμο για αέρα και νερό για οποιεσδήποτε θερμοκρασίες.



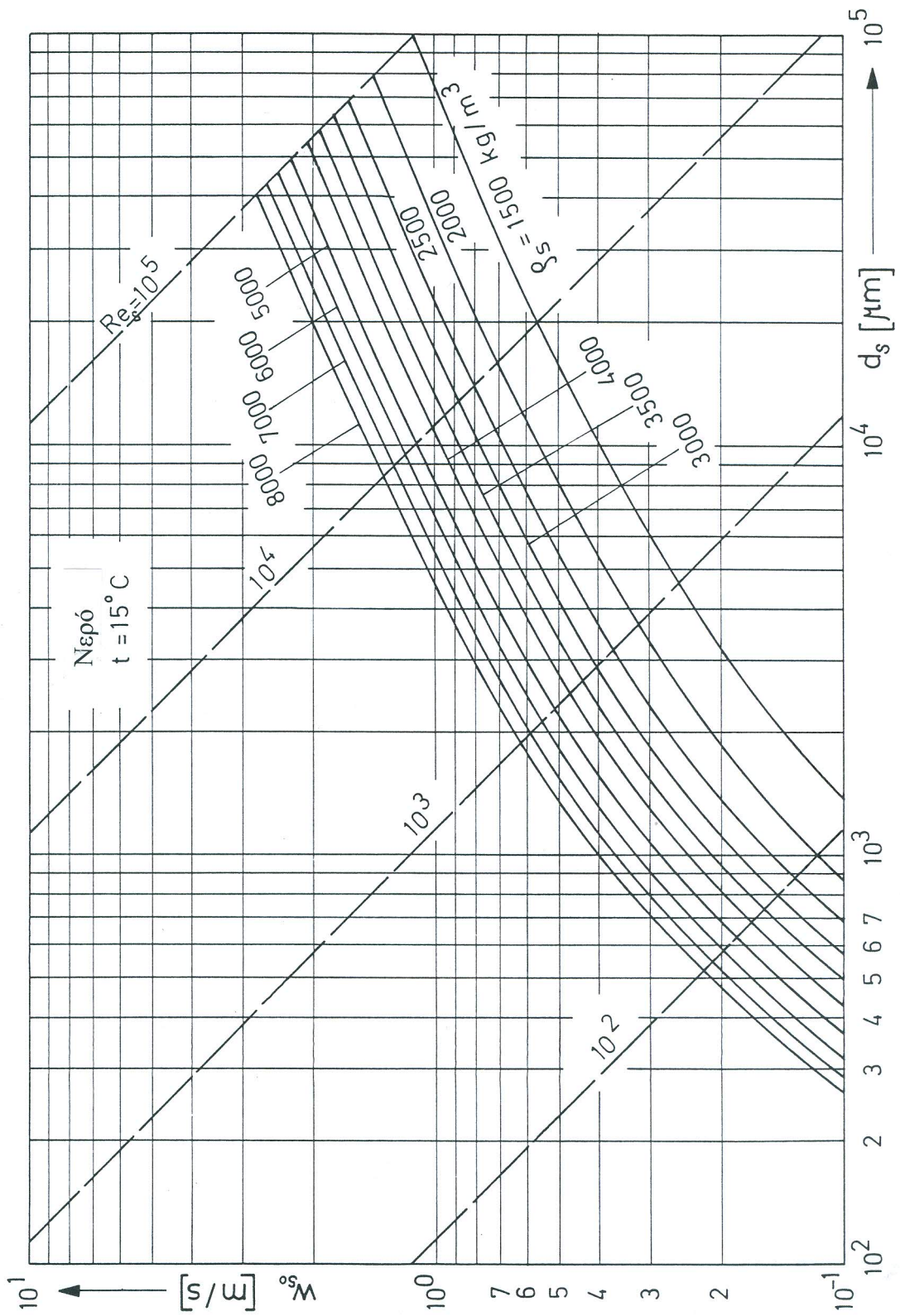
Σχήμα 4.3 : Ταχύτητα ελεύθερης πτώσης σφαιρικών μεμονωμένων τεμαχιδίων στον σε ηρεμία αέρα, σε 760 Torr και 293°K, για διάμετρο κόκκων $d_s = 2$ μέχρι 100 μm .



Σχήμα 4.4 : Ταχύτητα ελεύθερης πτώσης σφαιρικών μεμονωμένων τεμαχιδίων στον σε ηρεμία αέρα, σε 760 Torr και 293⁰K, για διάμετρο κόκκου $d_s = 100$ μέχρι 10000 μm .



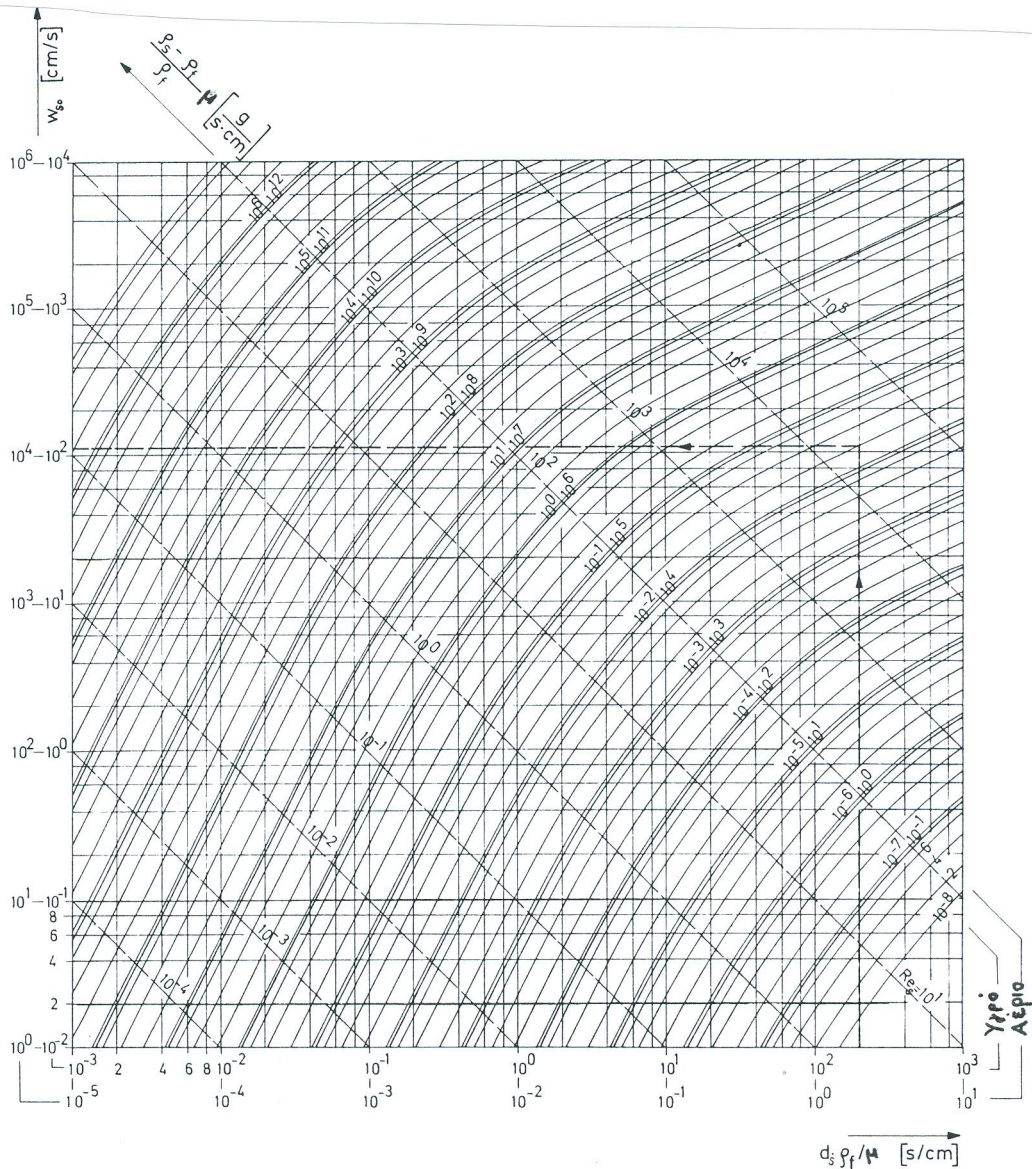
Σχήμα 4.5 : Ταχύτητα ελεύθερης πτώσης σφαιρικών μεμονωμένων τεμαχιδίων στο σε ηρεμία νερό σε 288°K , για διάμετρο κόκκου $d_s = 10$ μέχρι $250 \mu\text{m}$.



Σχήμα 4.6 : Ταχύτητα ελεύθερης πτώσης σφαιρικών μεμονωμένων τεμαχιδίων στο σε ηρεμία νερό, σε 288°K , για διάμετρο κόκκων $d_s = 250 \mu\text{m}$ μέχρι 10 cm .

Πυκνότητα στερεάς ύλης ρ_s , kg/m ³	Res=0.2 Αέρας		Res=0.2 Νερό		Res=1000 Αέρας		Res=1000 Νερό	
	Διάμετρος κόκκου ds, μm	Ταχύτητα ελεύθερης πτώσης wso, m/s	Διάμετρος κόκκου ds, μm	Ταχύτητα ελεύθερης πτώσης wso, m/s	Διάμετρος κόκκου ds, μm	Ταχύτητα ελεύθερης πτώσης wso, m/s	Διάμετρος κόκκου ds, μm	Ταχύτητα ελεύθερης πτώσης wso, m/s
500	60,0	0,051			2700	5,5		
1000	47,0	0,065			2150	7,0		
1500	41,0	0,074	100	0,0023	1850	8,0	4600	0,225
2000	38,0	0,080	78	0,0029	1700	8,9	3650	0,320
2500	35,0	0,088	69	0,0033	1575	9,5	3200	0,370
3000	32,5	0,093	62	0,0037	1500	10,0	2900	0,400
3500	31,0	0,098	58	0,0040	1425	10,5	2650	0,440
4000	30,0	0,102	54	0,0042	1370	11,0	2500	0,470

Σχήμα 4.7: Διάμετρος κόκκου και ταχύτητα ελεύθερης πτώσης, που αντιστοιχούν στα όρια της μεταβατικής περιοχής, μεταξύ των περιοχών Stokes και Newton, για διάφορες πυκνότητες στερεάς ύλης.



Σχήμα 4.8: Ταχύτητα ελεύθερης πτώσης σφαιρικών μεμονωμένων τεμαχιδίων σε οποιοδήποτε φορέα .

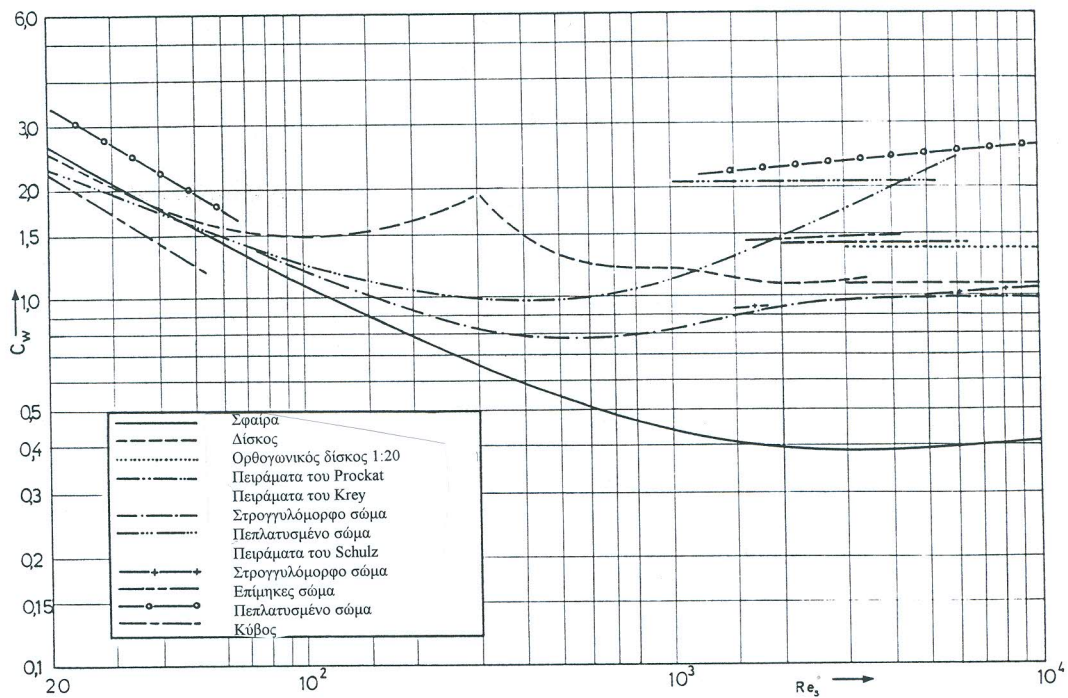
4.5 Επίδραση σχήματος κόκκου στην ταχύτητα ελεύθερης πτώσης

Η επίδραση του σχήματος του κόκκου στη ταχύτητα ελεύθερης πτώσης πρέπει να ληφθεί υπόψη για κάθε περίπτωση χωριστά, υπολογισμένη από την σχ. (4.1.2) με τιμή για το συντελεστή ροϊκής αντίστασης c_w από το διάγραμμα του Σχήματος 4.9.

Για στρογγυλόμορφα σώματα αρκεί να χρησιμοποιηθεί ένας συντελεστής σχήματος για την απόκλιση τους από τη σφαιρική μορφή, που ονομάζεται σφαιρικότητα Ψ και ορίζεται σαν ο λόγος της επιφάνειας σφαίρας, που έχει τον ίδιο όγκο με το θεωρούμενο στρογγυλόμορφο σώμα, προς την πραγματική επιφάνεια του σώματος, δίνεται από τη σχέση :

$$\psi = \frac{\pi \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{2/3}}{S_p} \quad (4.5.1)$$

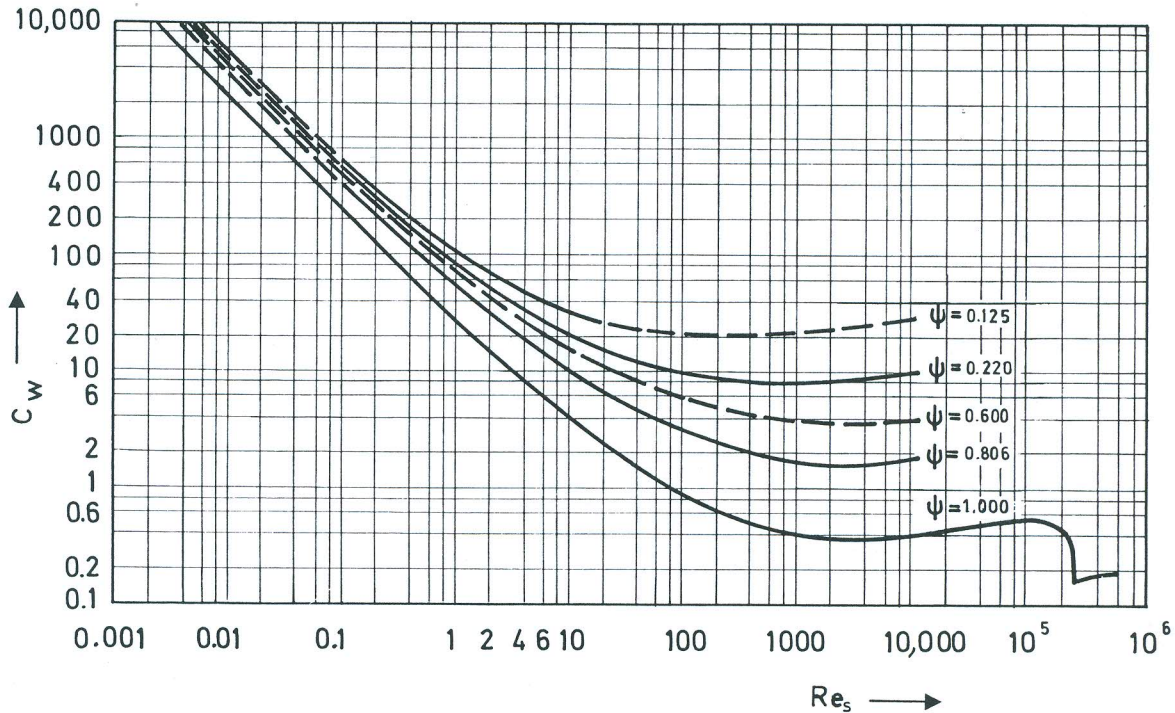
όπου V_p και S_p ο όγκος και η εξωτερική επιφάνεια του σώματος αντίστοιχα.



Σχήμα 4.9: Συντελεστής ροϊκής αντίστασης σε συνάρτηση από τον αριθμό Reynolds και το σχήμα του σώματος.

Αν τεθεί στη σχ. (4.1.2) ο συντελεστής ροϊκής αντίστασης c_w από το διάγραμμα του Σχήματος 4.10, που δίνει τιμές για το c_w σε συνάρτηση με τον Re_s , για διάφορα Ψ , προκύπτει η ταχύτητα ελεύθερης πτώσης του στρογγυλόμορφου μεμονωμένου τεμαχιδίου $w_{s0\Psi}$.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.11 φαίνεται η επίδραση της σφαιρικότητας Ψ στη ταχύτητα ελεύθερης πτώσης για μεμονωμένα σωματίδια. Το διάγραμμα αυτό δίνει τιμές του λόγου της ταχύτητας ελεύθερης πτώσης του στρογγυλόμορφου μεμονωμένου τεμαχιδίου προς τη ταχύτητα ελεύθερης πτώσης του σφαιρικού μεμονωμένου τεμαχιδίου, $w_{s0\Psi}/w_{s0}$, σε συνάρτηση από τον Re_s για διάφορες τιμές της σφαιρικότητας.



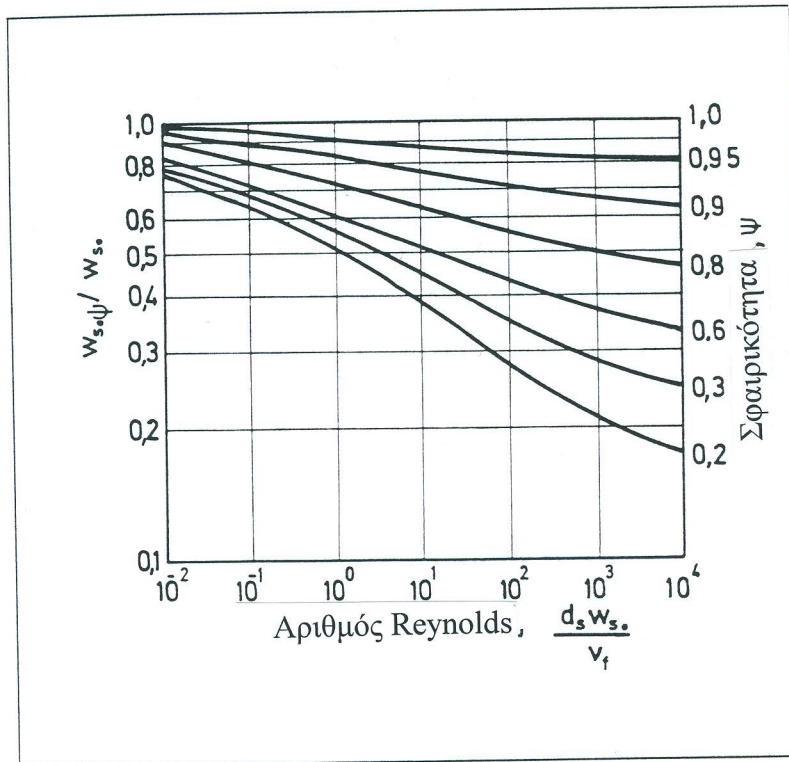
Σχήμα 4.10: Συντελεστής ροϊκής αντίστασης σε συνάρτηση από τον αριθμό Reynolds και τη σφαιρικότητα.

4.6 Επίδραση του τοιχώματος του αγωγού στην ταχύτητα ελεύθερης πτώσης

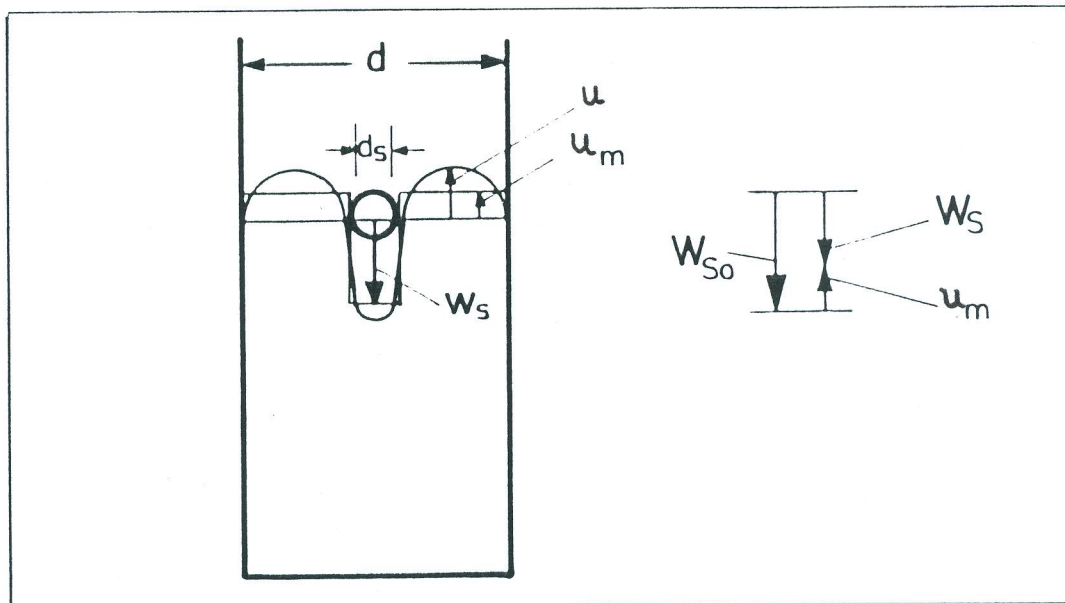
Όταν πέφτουν σωματίδια στερεάς ύλης σε ένα αγωγό, που το κάτω του άκρο είναι κλειστό, ο ρέων όγκος στέρεας ύλης εκτοπίζει ίσο όγκο του φορέα. Ο εκτοπιζόμενος φορέας ρέει αντίθετα προς τη στερεά ύλη. Συνεπώς η στερεά ύλη δεν πέφτει μέσα σε ένα μέσο που είναι σε ηρεμία, αλλά μέσα σε ένα ρευστό που αντιρρέει. Η πραγματική ταχύτητα πτώσης είναι μειωμένη κατά το μέτρο της ταχύτητας αντιρροής του φορέα.

Αυτή η ελαττωμένη ταχύτητα πτώσης της στερεάς ύλης εξ' αιτίας του τοιχώματος του αγωγού προκύπτει από τη θεώρηση της συνέχειας της ροής όγκων. Αν υποθέσει κανείς, χάρη απλότητας ότι ο εκτοπιζόμενος φορέας, από τα τεμαχίδια της στερεάς ύλης αντιρρέει κατανεμημένος ομοιόμορφα στη διατομή A_f , που παραμένει ελεύθερη μεταξύ του στερεού σωματιδίου και του τοιχώματος αγωγού, τότε ισχύει για τη ροή όγκων σύμφωνα με το Σχήμα 4.12 η εξής σχέση :

$$w_s A_s = u_m A_f \quad (4.6.1)$$



Σχήμα 4.11: Επίδραση της σφαιρικότητας στην ταχύτητα ελεύθερης πτώσης μεμονωμένων σωματιδίων.



Σχήμα 4.12: Επίδραση του τοιχώματος στην ταχύτητα ελεύθερης πτώσης.

όπου w_s η διαταραγμένη ταχύτητα ελεύθερης πτώσης, u_m η μέση ταχύτητα του φορέα στη διατομή A_f και A_s η μετωπική επιφάνεια του στερεού σωματιδίου.

Για τις ταχύτητες ισχύει η σχέση :

$$w_s + u_m = w_{s0} \quad (4.6.2)$$

όπου w_{s0} η αδιατάρακτη ταχύτητα ελεύθερης πτώσης του στερεού σωματιδίου.

Για το λόγο της διαταραγμένης, από το τοίχωμα, ταχύτητας ελεύθερης πτώσης προς την αδιατάρακτη, ισχύει η σχέση :

$$\frac{w_s}{w_{s0}} = 1 - \frac{A_s}{A} = 1 - \left(\frac{d_s}{D}\right)^2 = \varepsilon \quad (4.6.3)$$

4.7 Επίδραση της συγκέντρωσης της στερεάς ύλης στην ταχύτητα ελεύθερης πτώσης ή την αντίσταση

Με αυξανόμενη συγκέντρωση στερεάς ύλης τα στερεά σωματίδια πλησιάζουν περισσότερο μεταξύ τους και επηρεάζονται αμοιβαία όσον αφορά τη συμπεριφορά τους ως προς την αντίσταση. Το Σχήμα 4.13 μας δίνει μια παράσταση για την τάξη μεγέθους της απόστασης l_s/d_s των στερεών σωματιδίων για διάφορες συγκεντρώσεις όγκου.

4.7.1 Επίδραση της συγκέντρωσης της στερεάς ύλης όταν επικρατεί ομοιόμορφη κατανομή στερεάς ουσίας

Αν τα τεμαχίδια της στερεάς ύλης ούτε απομινγνούνται ούτε συσσωματώνονται, τότε για αυξανόμενη συγκέντρωση μειώνεται η ταχύτητα ελεύθερης πτώσης.

Αυτό προκαλείται, ιδιαίτερα για διφασικά μίγματα νερού-στερεάς ύλης, ως ένα ορισμένο βαθμό, από το βάρος των στερεών τεμαχιδίων. Το βάρος αυτό προκαλεί μια μεγαλύτερη βάρυνση πίεσης και έτσι ασκεί μεγαλύτερη άνωση στο τεμαχίδιο στερεάς ύλης μέσα στο μίγμα. Η επίδραση αυτή εκφράζεται στη σχ.(4.1.2) με τον αδιάστατο ελεύθερο όγκο ε .

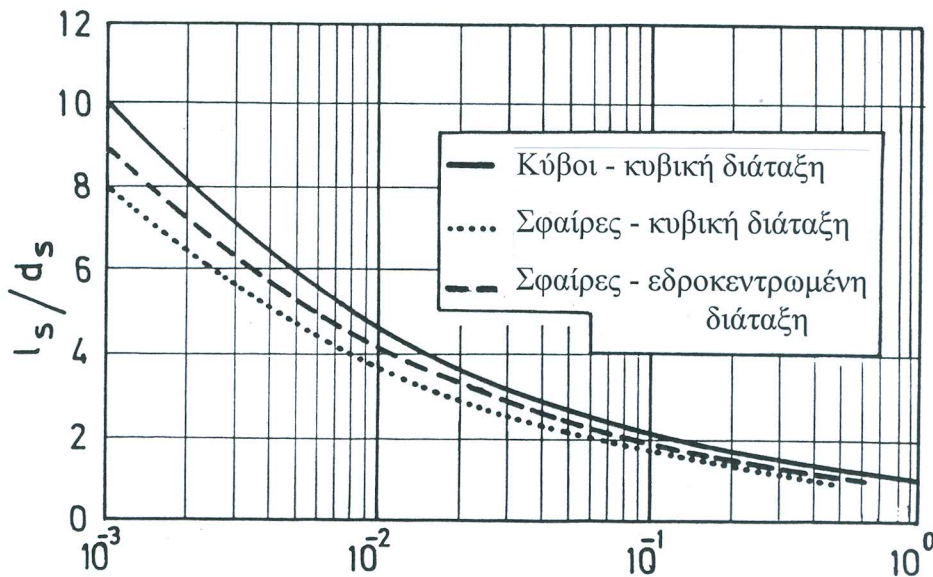
Η έκφραση $eg(\rho_s - \rho_f)/\rho_f$ στη σχ. (4.1.2) σημαίνει ότι το βάρος της στερεάς ύλης μειώνεται κατά το βάρος του μίγματος νερού-στερεάς ύλης. Αντί της αναφερθείσας σχέσης μπορεί να γραφεί $g(\rho_s - \rho_m)/\rho_f$, όπου ρ_m η μέση πυκνότητα του μίγματος που δίνεται από την σχέση :

$$\rho_m = \varepsilon \rho_f + (1 - \varepsilon) \rho_s \quad (4.7.1)$$

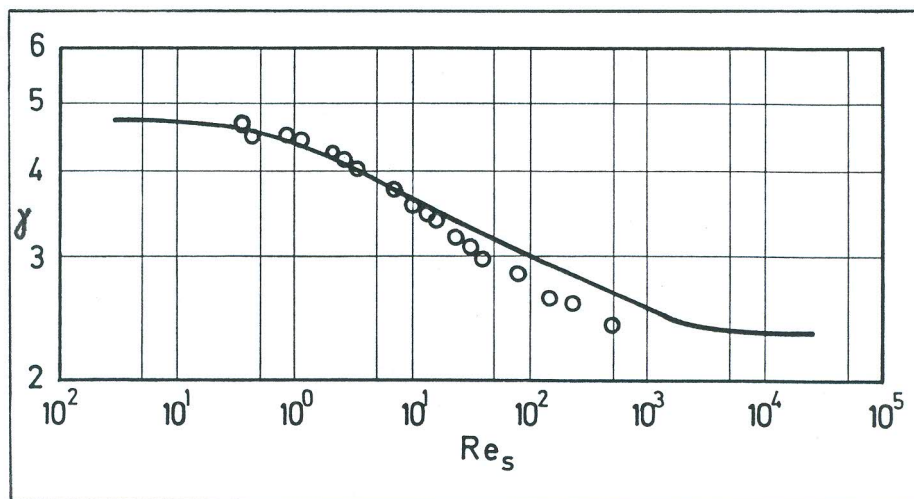
Στην επίδραση αυτή, μέσω της βαρύτητας προστίθενται και άλλες επιδράσεις της αυξημένης συγκέντρωσης στερεάς ύλης στην ταχύτητα ελεύθερης πτώσης. Με την αύξηση της συγκέντρωσης αποκτά ουσιώδη σημασία το φαινόμενο εκτόπισης του φορέα κατά την καθίζηση της στερεάς ύλης, που περιγράφεται στην παράγραφο 4.6. Οι Maude και Whitmore συνοψίζουν αυτή την επίδραση της συγκέντρωσης στη διαταραγμένη ταχύτητα ελεύθερης πτώσης w_s στην ακόλουθη σχέση :

$$\frac{w_s}{w_{s0}} = (1 - c_v)^{\gamma} \quad (4.7.2)$$

Στο Σχήμα 4.14 φαίνεται ο εκθέτης γ , της σχ.(4.7.2), σαν συνάρτηση του αριθμού Reynolds Re_s , σύμφωνα με τα πειράματα των Richardson και Zaki. Όμοια μορφή με αυτή των καμπυλών της ταχύτητας ελεύθερης πτώσης για μίγματα νερού - στερεάς ύλης σύμφωνα με τη σχ. (4.7.2), παρουσιάζει η ταχύτητα ελεύθερης πτώσης σα συνάρτηση της συγκέντρωσης στερεάς ύλης για μίγματα αερίου-στερεάς ύλης, εφόσον η στερεά ύλη είναι αρκετά χονδρόκοκκη, ώστε χάρη στην αδράνεια να μην απομινγνούνται. Το Σχήμα 4.15 δείχνει την ταχύτητα αιώρησης w_{s0}/w_s γυάλινων σφαιρών σα συνάρτηση του ελευθέρου όγκου ϵ και τη σχέση διαμέτρου κόκκου προς τη διάμετρο του αγωγού, σύμφωνα με μετρήσεις του Weber[4] σε εκτεταμένα ρευστοποιημένα στρώματα.



Σχήμα 4.13 Απόσταση τεμαχιδίων από κέντρο σε κέντρο, σε συνάρτηση από τη συγκέντρωση όγκου κατά Govier και Aziz.



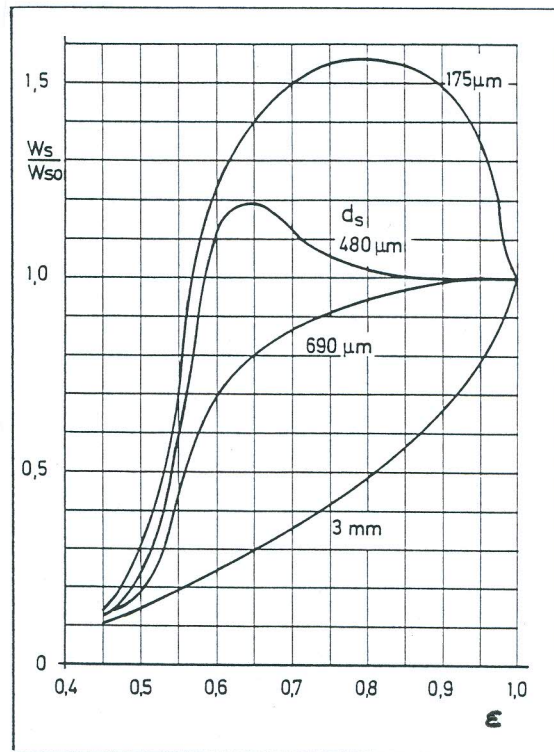
Σχήμα 4.14 : Γραφική παράσταση του εκθέτη γ , για τη περιγραφή της επίδρασης της συγκέντρωσης στη ταχύτητα ελεύθερης πτώσης σε συνάρτηση από τον αριθμό Reynolds σύμφωνα με τις θεωρητικές καταστρώσεις των Maude και Whitmore. Πειραματικά αποτελέσματα των Richardson και Zaki.

4.7.2 Επίδραση της συγκέντρωσης της στερεάς ύλης στα φαινόμενα απόμιξης

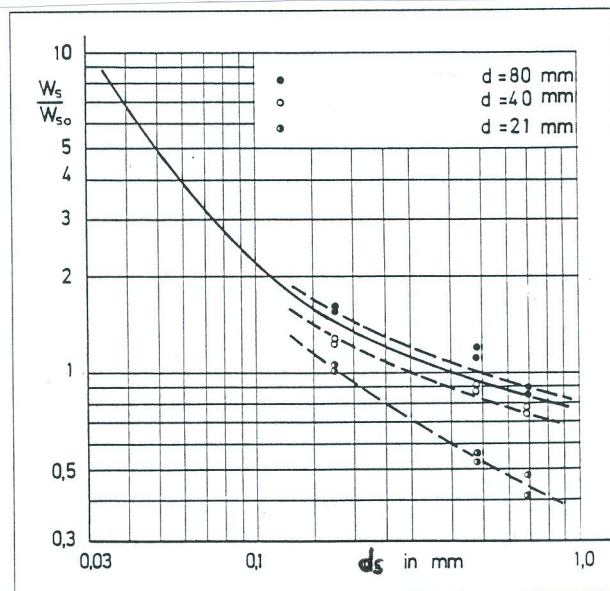
Από ένα ορισμένο μέγεθος κόκκου στερεάς ύλης και κάτω εμφανίζονται φαινόμενα απόμιξης, σε μίγματα αερίου - στερεάς ύλης με υψηλή συγκέντρωση στερεάς ουσίας, κατά τέτοιο τρόπο ώστε η να στοιχίζονται τεμαχίδια το ένα πίσω από το άλλο ή να λαμβάνει χώρα μια μειωμένη ροή, επειδή ο φορέας εκλέγει τη διαδρομή της μικρότερης αντίστασης, μέσα από περιοχές που είναι φτωχότερες σε στερεά ύλη. Έτσι απαιτείται μια σημαντικά υψηλότερη τιμή μέσης ταχύτητας φορέα για να μπορέσει να κρατηθεί σε αιώρηση η στερεά ύλη με τις δέσμες της και τις σφαίρες της.

Το Σχήμα 4.15 δείχνει για μικρότερο μέγεθος κόκκου μια εντελώς διαφορετική συμπεριφορά της ταχύτητας αιώρησης w_{s0}/w_s , σε αυξανόμενη συγκέντρωση απ' ότι για χονδρόκοκκες στερεές ύλες. Η ταχύτητα αιώρησης σύμφωνα με μετρήσεις σε εκτεταμένο ρευστοποιημένο στρώμα, δηλ. χωρίς την επίδραση των τοιχωμάτων, αυξάνεται αρχικά ισχυρά ένεκα της αυξανόμενης απόμιξης φτάνει στο μέγιστο για τιμές ελευθέρου όγκου $\varepsilon=0.6$ μέχρι 0.8 και στη συνέχεια πέφτει πολύ έντονα όσο αυξάνεται η συγκέντρωση και τελειώνει σε τιμές, που είναι γνωστές από το ρευστοποιημένο στρώμα. Αυτή η συμπεριφορά αντίστασης σε ροή με απόμιξη επιβεβαιώνεται και για οριζόντια πυκνή ρευστοδυναμική μεταφορά. Το Σχήμα 4.16 δείχνει την ταχύτητα αιώρησης του

εκτεταμένου ρευστοποιημένου στρώματος για τη μέγιστη απόμιξη, σαν συνάρτηση του μεγέθους του κόκκου.



Σχήμα 4.15 : Επίδραση της συγκέντρωσης της στερεάς ύλης και της διαμέτρου του κόκκου στη ταχύτητα αιώρησης. Διάμετρος αγωγού 80 mm.



Σχήμα 4.16 : Ταχύτητα ελεύθερης πτώσης για μέγιστη απόμιξη σε συνάρτηση από τη διάμετρο του κόκκου και του αγωγού. Συνεχής καμπύλη σύμφωνα με τον Broetz. Πειραματικά αποτελέσματα του Weber.

5

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΛΥΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ

Για τη θεωρητική μελέτη μονοδιάστατης διφασικής ροής αέρα-στερεών σωματιδίων, οι εξισώσεις απώλειας πίεσης και κίνησης που περιγράφουν τη ροή, δίνουν αποτελέσματα που φαίνονται στα Σχήματα 5.4 έως 5.13.

Ειδικότερα στα σχήματα 5.4, 5.6, 5.8 και 5.10 λαμβάνεται η απώλεια πίεσης Δp κατά μήκος του αγωγού μεταφοράς για λόγους μίξης $\mu = 5, 10, 15, 20, 25$, συναρτήσει της διαμέτρου d αυτού, σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα (Σχήμα 5.3). Αντίστοιχα αυτών των σχημάτων είναι τα σχήματα 5.5, 5.7, 5.9, και 5.11, τα οποία δίνουν την απαιτούμενη ισχύ της εγκατάστασης πνευματικής μεταφοράς συναρτήσει της διαμέτρου d του αγωγού σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα (Σχήμα 5.3) και τα αποτελέσματα των σχημάτων 5.4, 5.6, 5.8 και 5.10 για λόγους μίξης $\mu = 5, 10, 15, 20, 25$.

Ενδεικτικά εδώ αναφερόμαστε στα Σχήματα 5.4 και 5.5 όπου σε εγκατάσταση οριζόντιας πνευματικής μεταφοράς (Σχήμα 5.1), η εξίσωση απώλειας πίεσης δίνει για κάθε τιμή της διαμέτρου d του αγωγού μεταφοράς και για κάθε λόγο μίξης μ =σταθ. μια ελάχιστη τιμή πτώσης πίεσης.

Σ' αυτή την ελάχιστη τιμή απώλειας πίεσης αντιστοιχεί η ελάχιστη ισχύς που πρέπει να αποδώσει ο φυσητήρας της εγκατάστασης για την υπερνίκηση αυτής της ελάχιστης τιμής των απωλειών.

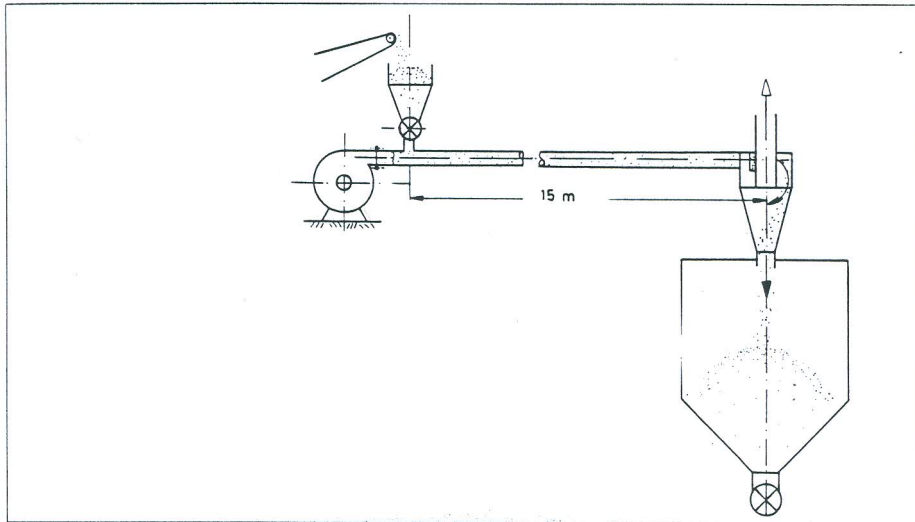
Η ελάχιστη ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$L_{\min} = \frac{\Delta P_{\min} + \frac{\rho_f}{2} u^2}{1.000 n_G} V_f \quad \text{σε kW.} \quad (5.1)$$

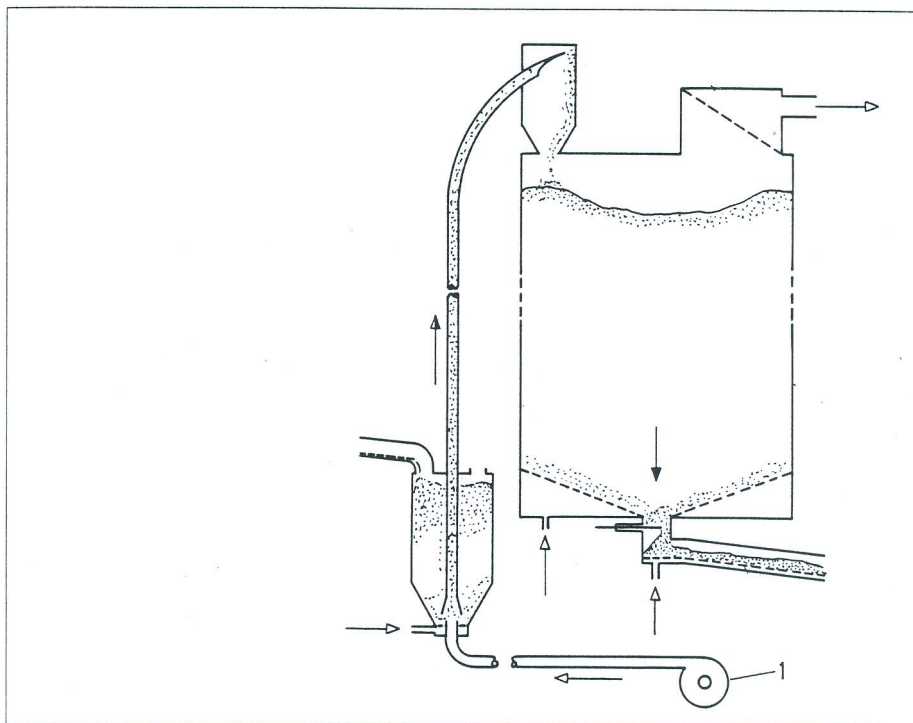
Επίσης στο Σχήμα 5.12 δίνονται οι απώλειες πίεσης σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα (Σχήμα 5.3) σε συγκεκριμένο αγωγό διαμέτρου $d = 8$ cm, συναρτήσει της γωνίας κλίσης, δ , του αγωγού ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Η διαφορά της αρχικής και τελικής τιμής του Δp δίνει τη διαφορά μεταξύ οριζόντιας και κάθετης μεταφοράς. Η διαφορά αυτή οφείλεται στη διεύθυνση δράσης της δύναμης της βαρύτητας, η οποία στην οριζόντια μεταφορά δεν επιδρά, ενώ στην κάθετη επιδρά κατευθείαν, αντίθετα με τη φορά κίνησης των σωματιδίων.

Επίσης παρατηρούμε ότι για μεγάλο λόγο μίξης $\mu = 15$ η πτώση πίεσης είναι πολύ μεγάλη σε σχέση μ' αυτή του λόγου μίξης $\mu = 10$. Αυτό γίνεται διότι οι όροι στην εξίσωση που δίνει το Δp δρουν πολλές φορές αντίρροπα, επειδή, δεν εξαρτώνται μόνο από το λόγο μίξης μεταφοράς αλλά και από άλλες ροϊκές συνθήκες.

Τέλος στο Σχήμα 5.13 γίνεται σύγκριση της απώλειας πίεσης, που προέρχεται από το μοντέλο της χωριστής ροής κατά Weber με συντελεστή ροϊκής αντίστασης c_w κατά Molerus και Muschelknautz, και της ομογενούς ροής κατά Wallis. Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα της πτώσης πίεσης κατά Molerus και Muschelknautz συμπίπτουν, στο μοντέλο χωριστής ροής. Υπάρχει όμως μια μεγάλη διαφορά με τα αποτελέσματα της ομογενούς ροής. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί το μοντέλο της ομογενούς ροής στην πνευματική μεταφορά αλλά πρέπει οπωσδήποτε να χρησιμοποιείται το μοντέλο της χωριστής ροής.



Σχήμα 5.1: Σχηματική διάταξη εγκατάστασης οριζόντιας πνευματικής μεταφοράς.

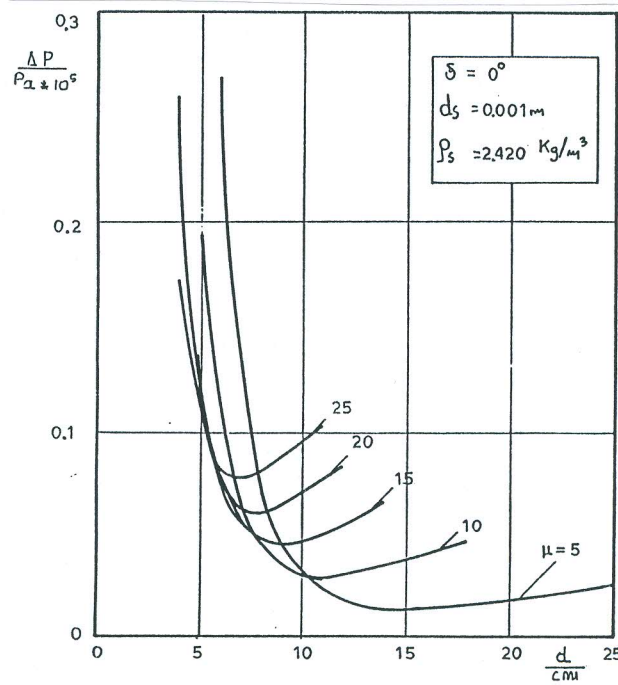


Σχήμα 5.2: Σχηματική διάταξη εγκατάστασης κατακόρυφης πνευματικής μεταφοράς.

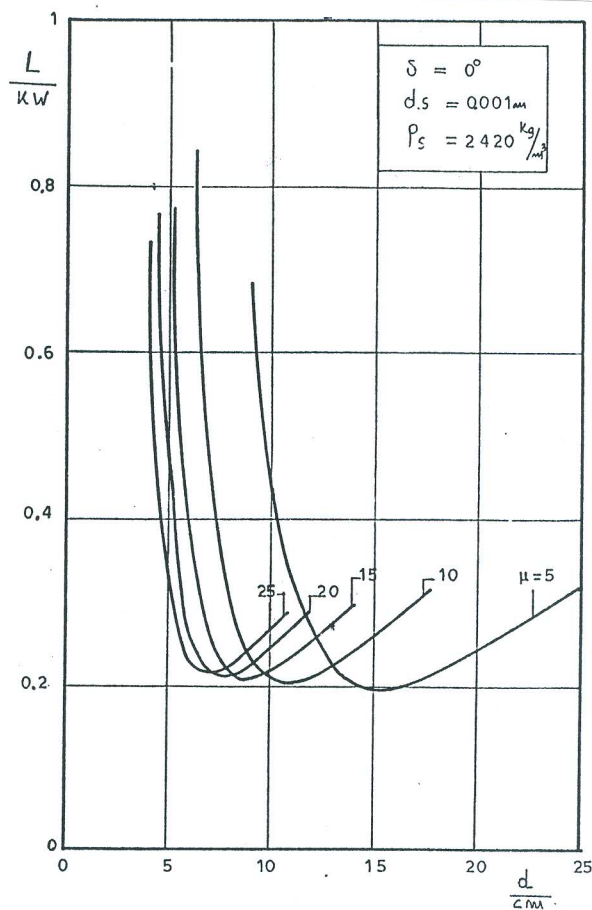
ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Παροχή μάζας στερεάς ύλης	$M_s = 0.833 \text{ kg/s}$
Πυκνότητα στερεάς ύλης	$\rho_s = 2420 \text{ kg/m}^3$
Διάμετρος κόκκου στερεάς ύλης	$d_s = 0.001 \text{ m}$
Μήκος αγωγού μεταφοράς στερεάς ύλης	$l = 15 \text{ m}$
Λόγος μίξης	$\mu_m = 5, 10, 15, 20, 25$
Συντελεστής τριβής του φορέα	$\lambda_f = 0.02 = \text{σταθ.}$
Συντελεστής τριβής της στερεάς ύλης	$\lambda_z^* = 0.007 = \text{σταθ.}$
Πυκνότητα του φορέα	$\rho_f = 1.23 \text{ kg/m}^3$
Συντελεστής απόδοσης του φυσητήρα	$\eta_G = 0.7$
Στερεά ύλη = άμμος	
Φορέας = αέρας	

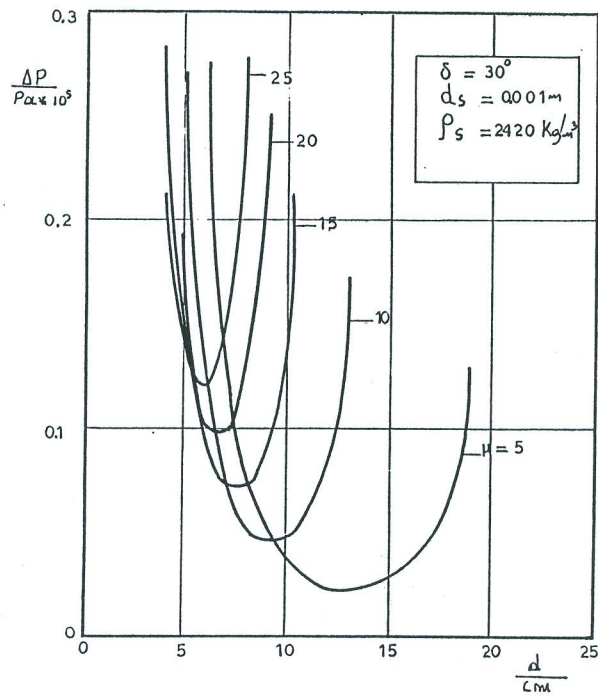
Σχήμα 5.3: Αριθμητικά δεδομένα για τη διερεύνηση εγκατάστασης πνευματικής μεταφοράς, ως προς το βέλτιστο σημείο λειτουργίας.



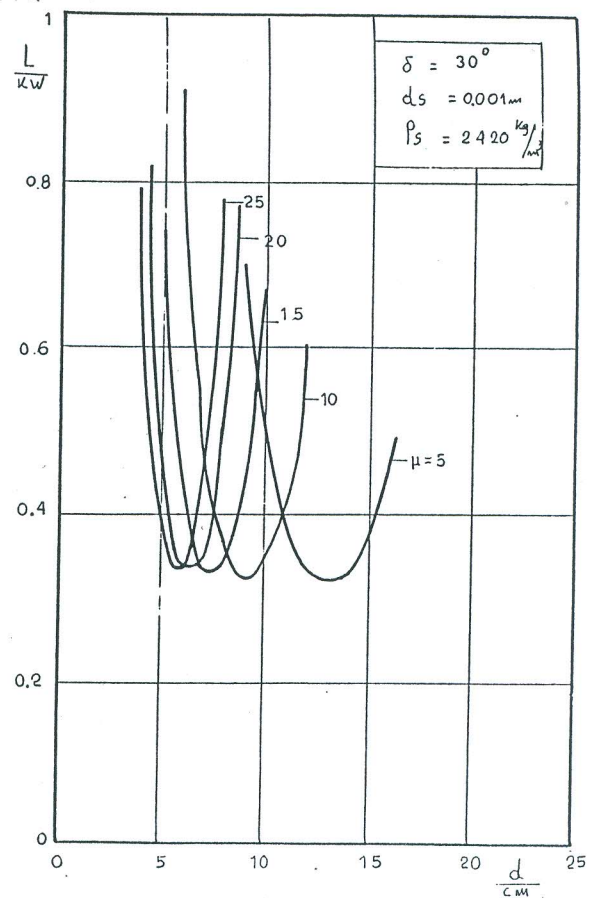
Σχήμα 5.4 : Απόλλειες πίεσης στην εγκατάσταση συναρτήσει της διαμέτρου d του αγωγού, για γωνία κλίσης $\delta=0^\circ$. (Αριθμητικά δεδομένα από τον πίνακα, Σχήμα 5.3).



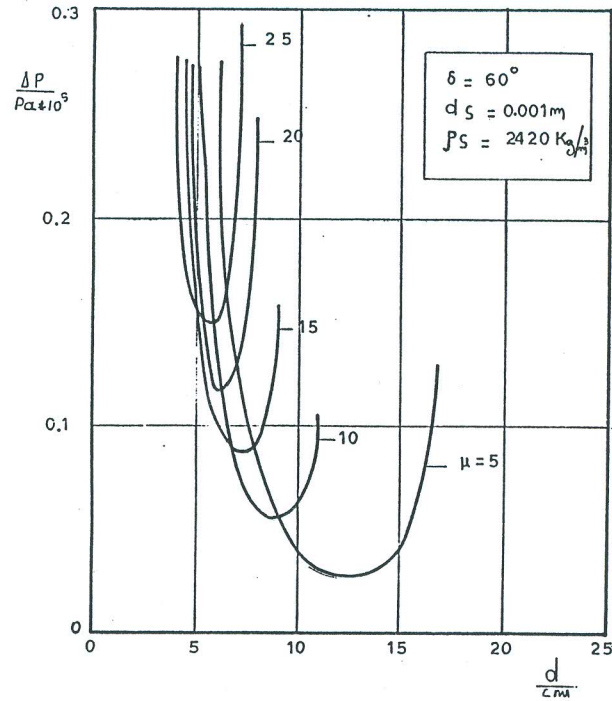
Σχήμα 5.5: Απαιτούμενη ισχύς της εγκατάστασης συναρτήσει της διαμέτρου d του αγωγού, σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα (Σχήμα 5.3) και τα αποτελέσματα του Σχήματος 5.4.



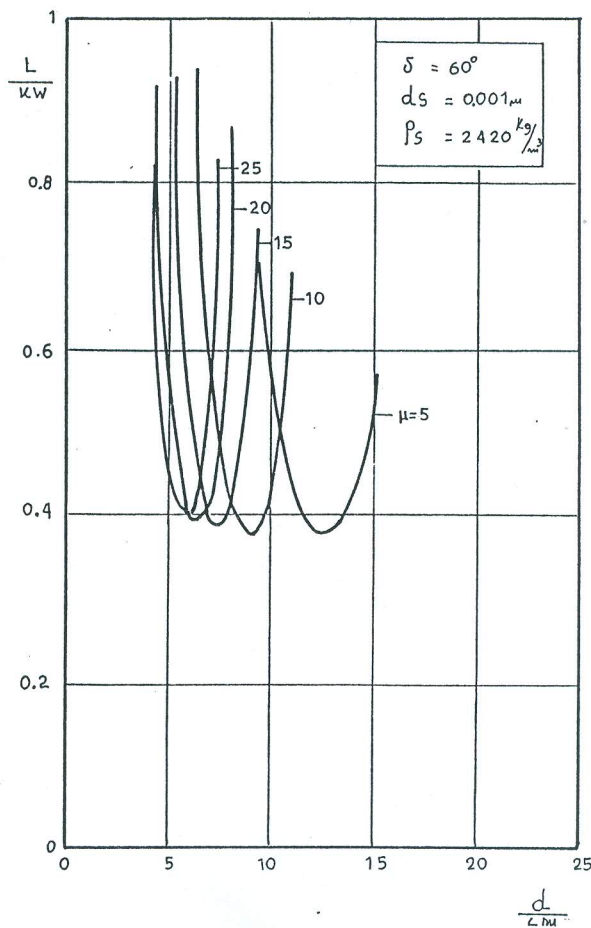
Σχήμα 5.6 : Απόλλειες πίεσης στην εγκατάσταση συναρτήσει της διαμέτρου d του αγωγού, για γωνία κλίσης $\delta=30^\circ$. (Αριθμητικά δεδομένα από τον πίνακα, Σχήμα 5.3).



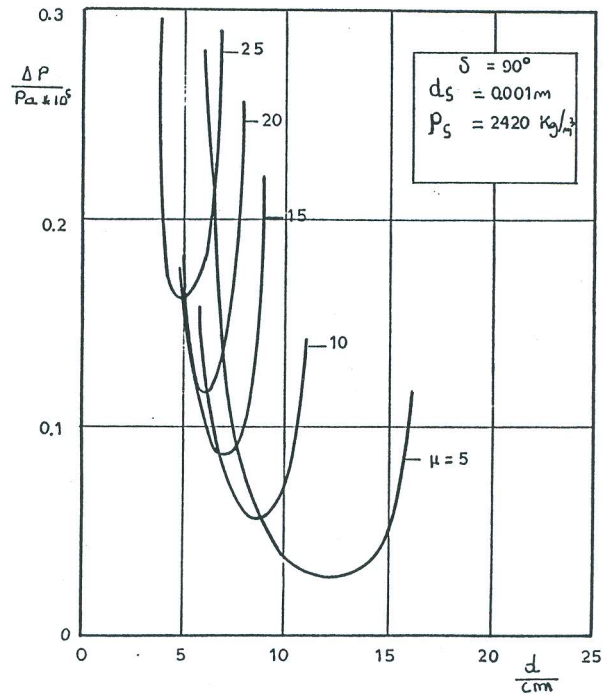
Σχήμα 5.7: Απαιτούμενη ισχύς της εγκατάστασης συναρτήσει της διαμέτρου d του αγωγού, σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα (Σχήμα 5.3) και τα αποτελέσματα του Σχήματος 5.6.



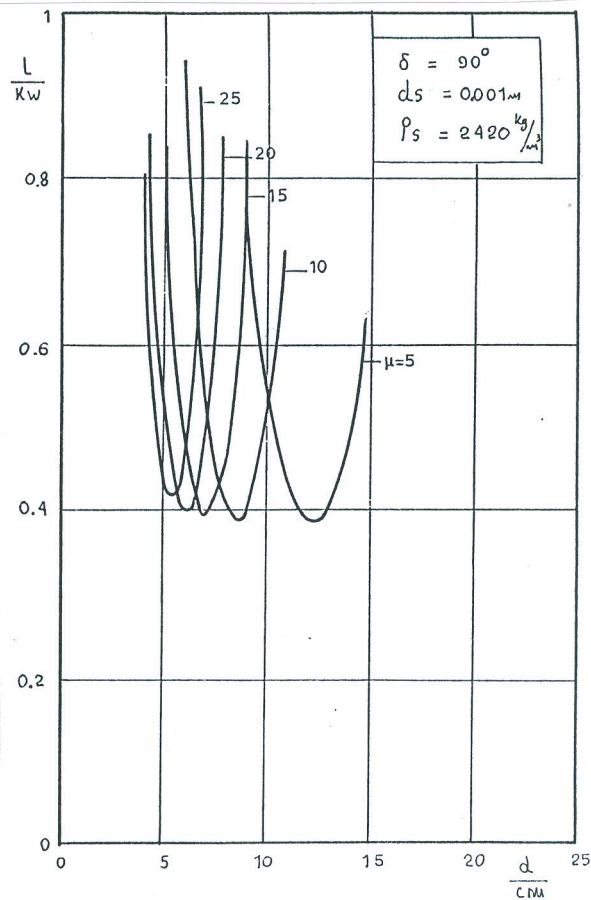
Σχήμα 5.8 : Απώλειες πίεσης στην εγκατάσταση συναρτήσει της διαμέτρου d του αγωγού, για γωνία κλίσης $\delta=60^\circ$. (Αριθμητικά δεδομένα από τον πίνακα, Σχήμα 5.3).



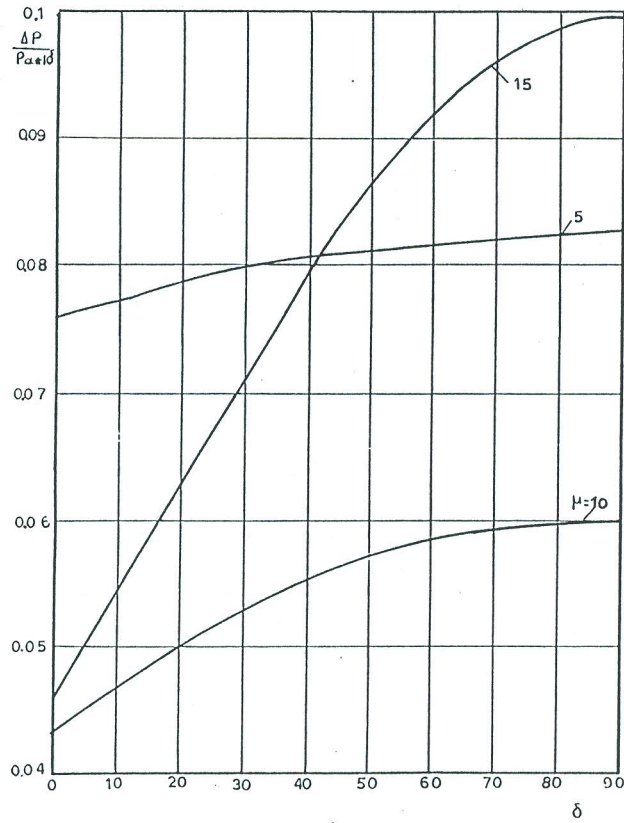
Σχήμα 5.9: Απαιτούμενη ισχύς της εγκατάστασης συναρτήσει της διαμέτρου d του αγωγού, σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα (Σχήμα 5.3) και τα αποτελέσματα του Σχήματος 5.8.



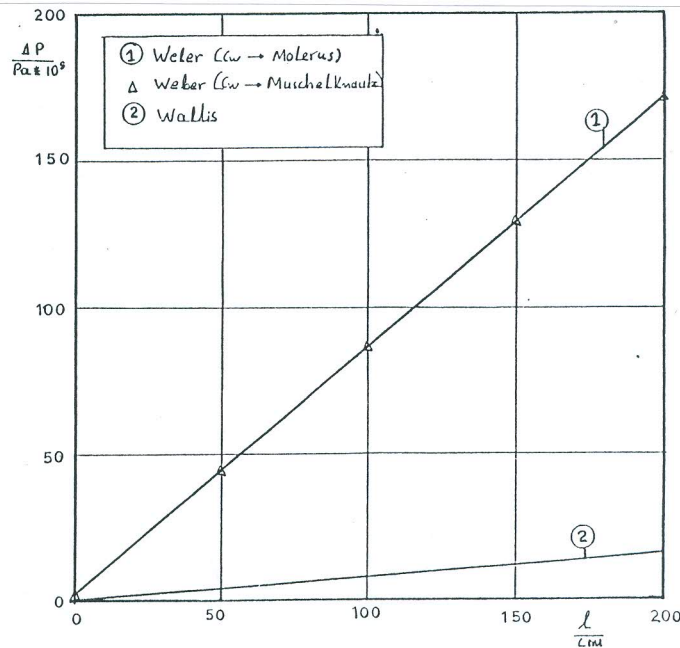
Σχήμα 5.10 : Απώλειες πίεσης στην εγκατάσταση συναρτήσει της διαμέτρου d του αγωγού, για γωνία κλίσης $\delta=90^\circ$. (Αριθμητικά δεδομένα από τον πίνακα, Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.11 : Απαιτούμενη ισχύς της εγκατάστασης συναρτήσει της διαμέτρου d του αγωγού, σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα (Σχήμα 5.3) και τα αποτελέσματα του Σχήματος 5.10.



Σχήμα 5.12: Απώλειες πίεσης της εγκατάστασης, σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα (Σχήμα 5.3), για αγωγό διαμέτρου $d = 8 \text{ cm}$, συναρτήσει της γωνίας κλίσης του αγωγού ως προς το οριζόντιο επίπεδο.



Σχήμα 5.13: Απώλειες πίεσης κατά μήκος οριζόντιου αγωγού κυκλικής διατομής, σύμφωνα με τη θεωρία της χωριστής, 1, και της ομογενούς, 2, ροής.
(Πυκνότητα στερεάς ύλης $\rho_s = 800 \text{ kg/m}^3$, διάμετρος κόκκου $d_s = 0.00001 \text{ m}$, λόγος μίξης μεταφοράς $\mu_m = 0.00333$).

