

6

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

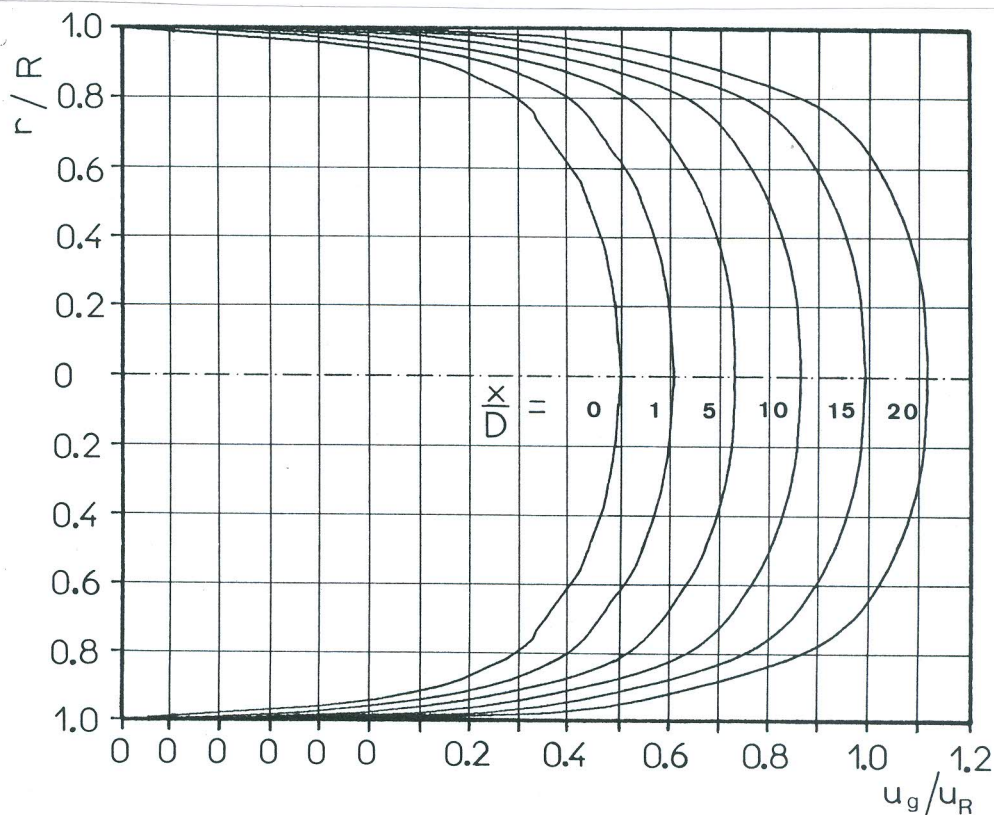
6.1 Ανάλυση θεωρητικών αποτελεσμάτων

Το σημαντικότερο μέρος στη διερεύνηση κάθε φυσικού φαινομένου, είναι η αξιολόγηση και η κριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της παρούσας θεωρητικής διερεύνησης της διφασικής ροής αέρα - σωματιδίων σε κλειστούς ευθύγραμμους αγωγούς κυκλικής διατομής, ενώ αντίστοιχα σχόλια μπορούν να γίνουν και για τη ροή μεταξύ παραλλήλων πλακών. Τα θεωρητικά αποτελέσματα λαμβάνονται με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος “SOLAIR” που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό σύμφωνα με την υπολογιστική διαδικασία που αναφέρεται σε προηγούμενο κεφάλαιο.

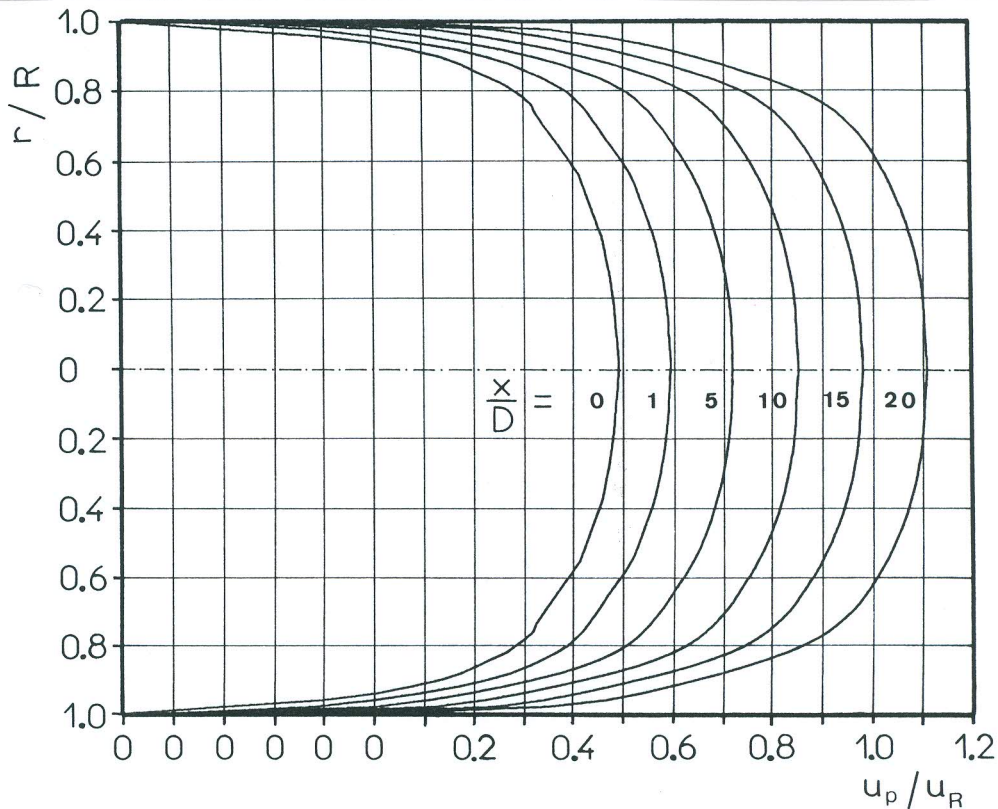
Όλα τα αποτελέσματα δίνονται σε αδιάστατη μορφή. Οι τιμές των μεγεθών αναφοράς, βάσει των οποίων έγινε η αδιαστατοποίηση, είναι: $u_{gR} = 25$ m/s, $\rho_{gR} = 1.2$ kg/m³, $L_R = 0.1$ m και $\mu_{gR} = 1.819 \times 10^{-5}$ kg/ms. Έτσι οι αδιάστατοι χαρακτηριστικοί αριθμοί Reynolds και Froude είναι ίσοι με: $Re_R = 1.65 \times 10^5$ και $Fr_r = 637$. Τα μεταφερόμενα σωματίδια, είναι σφαίρες με διάμετρο $d_p = 2 \times 10^{-5}$ m και πυκνότητα $\rho_{sp} = 800$ kg/m³. Σαν αρχικές συνθήκες χρησιμοποιούνται: α) πειραματική κατανομή της αξονικής ταχύτητας του αέρα u_g , η οποία προσεγγίζει τη θεωρητική κατανομή που δίνει ο εκθετικός νόμος $u_g = n^{1/7}$, β) υποθετική κατανομή της ταχύτητας των σωματιδίων

σύμφωνα με τη σχέση $u_p = 0.999 u_g$ και γ) υποθετική κατανομή της ογκομετρικής συγκέντρωσης των σωματιδίων για αραιή πνευματική μεταφορά, σύμφωνα με τη σχέση $Z_p = 5 \times 10^{-6} u_g$. Για να ικανοποιηθεί η συνθήκη της αξονοσυμμετρικής ροής, η εξέταση έγινε για ένα οριζόντιο επίπεδο, στο οποίο η επίδραση της βαρύτητας είναι παντού η ίδια. Τέλος, η αρχική κατανομή της πίεσης υπολογίζεται από τη σχ. (5.17) με την εύλογη υπόθεση ότι στη θέση $x = 0, r = 0$ η πίεση έχει τιμή $p_0 = 120 \text{ kN/m}^2$. Οι αρχικές συνθήκες για τα υπόλοιπα μεγέθη προσδιορίζονται από τις παραπάνω συνθήκες με επαναληπτική διαδικασία.

Στο Σχήμα 6.1, δίνεται η κατανομή της αξονικής ταχύτητας του αέρα σε διφασική ροή αέρα-σωματιδίων σε διάφορες αποστάσεις από την αρχική διατομή. Η παρουσίαση των κατανομών γίνεται με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου πολλαπλών αρχών, ώστε να υπάρχει σαφήνεια στο σχήμα και να φαίνεται καλύτερα η ανάπτυξη της κατανομής της ταχύτητας. Από την εξέταση των κατανομών, διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνει η απόσταση από την αρχική διατομή, τόσο η ταχύτητα παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές στο μέσο της απόστασης των πλακών και μικρότερες κοντά στα τοιχώματα, γεγονός που οφείλεται στην ανάπτυξη του οριακού στρώματος. Συγκεκριμένα, σε ροή σε κυκλικό αγωγό, έχουμε ανάπτυξη του οριακού στρώματος, συμμετρικά γύρω από τον άξονα της ροής.



Σχήμα 6.1: Ανάπτυξη της αξονικής ταχύτητας του αέρα σε ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγό κυκλικής διατομής.

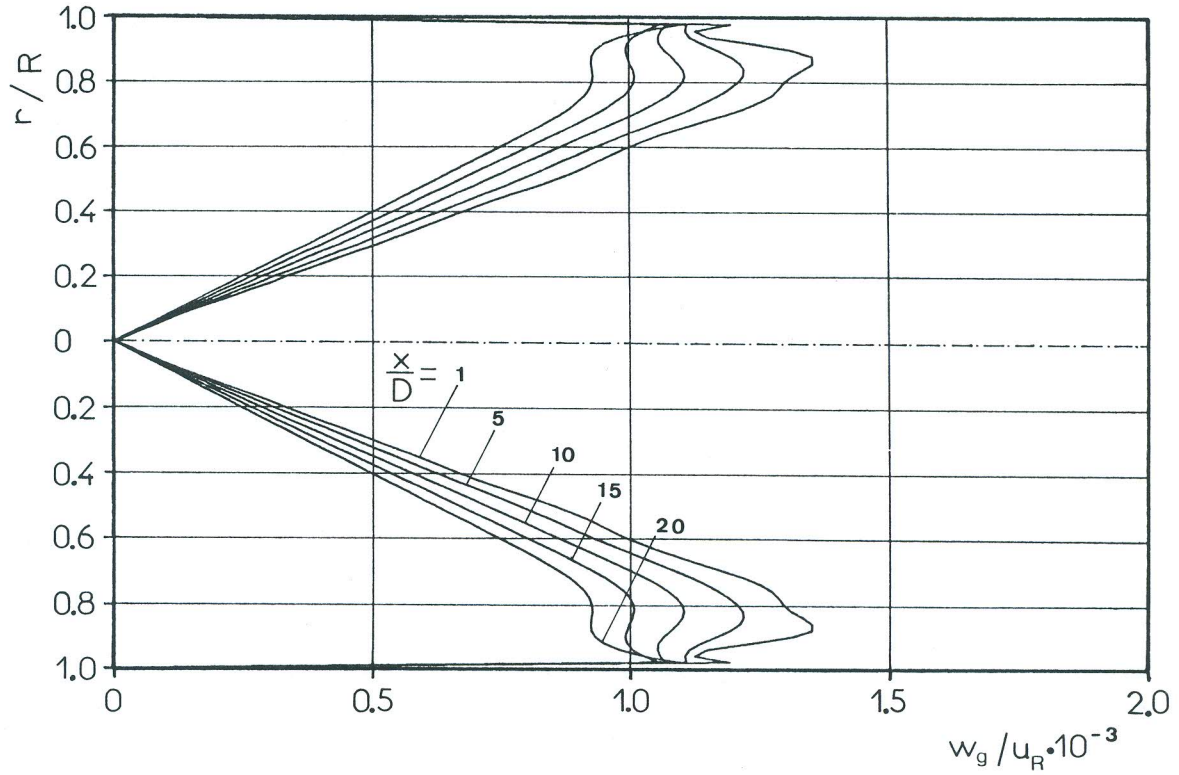


Σχήμα 6.2: Ανάπτυξη της αξονικής ταχύτητας των σωματιδίων σε ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγό κυκλικής διατομής.

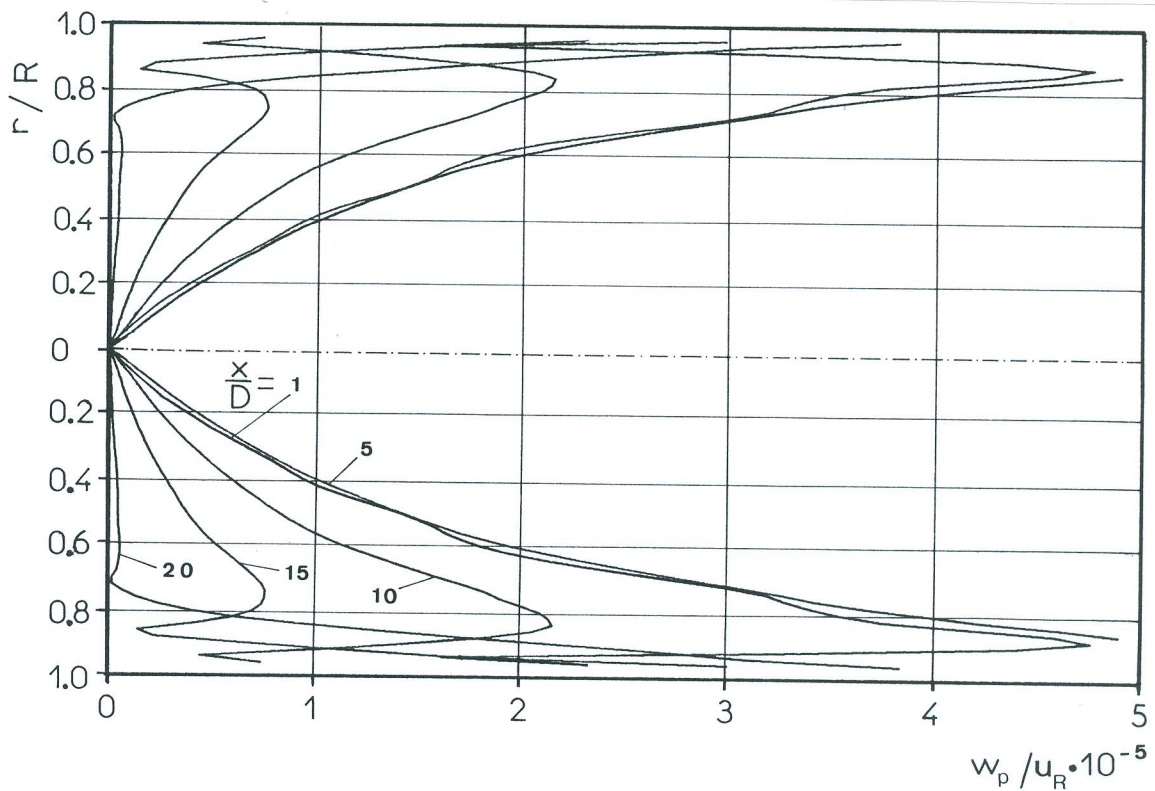
Στο Σχήμα 6.2 δίνεται, με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, η ανάπτυξη της κατανομής της αξονικής ταχύτητας των σωματιδίων σε διασπαστική ροή σε αγωγό κυκλικής διατομής. Όπως φαίνεται καθαρά το προφίλ της ταχύτητας των σωματιδίων αναπτύσσεται, όπως και του αέρα, δηλαδή τα σωματίδια ακολουθούν σε μεγάλο βαθμό τη ροή του αέρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα σωματίδια έχουν πολύ μικρή διάμετρο και επομένως πολύ μικρή ταχύτητα ελεύθερης πτώσης [3], η οποία δεν επιδρά ουσιαστικά στην αξονική ταχύτητα των σωματιδίων.

Ένα σημαντικό γεγονός, που πρέπει να τονιστεί, είναι ότι σε μια μικρή περιοχή πλησίον των τοιχωμάτων τα σωματίδια έχουν ταχύτητα μεγαλύτερη από του αέρα. Η εξήγηση γι αυτό βρίσκεται στις διαφορετικές δυνάμεις αδράνειας των δυο φάσεων. Συγκεκριμένα, λόγω της μεγαλύτερης αδρανείας τους, τα σωματίδια επιβραδύνονται από τις δυνάμεις τριβής με αργότερο ρυθμό από ότι ο αέρας.

Η κάθετη ή ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας του αέρα φαίνεται στο Σχήμα 6.3. Αυτό που αμέσως παρατηρείται είναι η ομοιότητα των κατανομών στις διάφορες διατομές κατά μήκος του αγωγού και η σχεδόν ταύτιση τους σε μεγάλες αποστάσεις από την αρχική διατομή. Η ακτινική συνιστώσα μεταβάλλεται, σχεδόν γραμμικά, από την τιμή μηδέν στο μέσον της απόστασης του αγωγού (επίπεδο συμμετρίας) μέχρι μια



Σχήμα 6.3: Ανάπτυξη της ακτινικής ταχύτητας του αέρα σε ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγό κυκλικής διατομής.



Σχήμα 6.4: Ανάπτυξη της ακτινικής ταχύτητας των σωματιδίων σε ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγό κυκλικής διατομής.

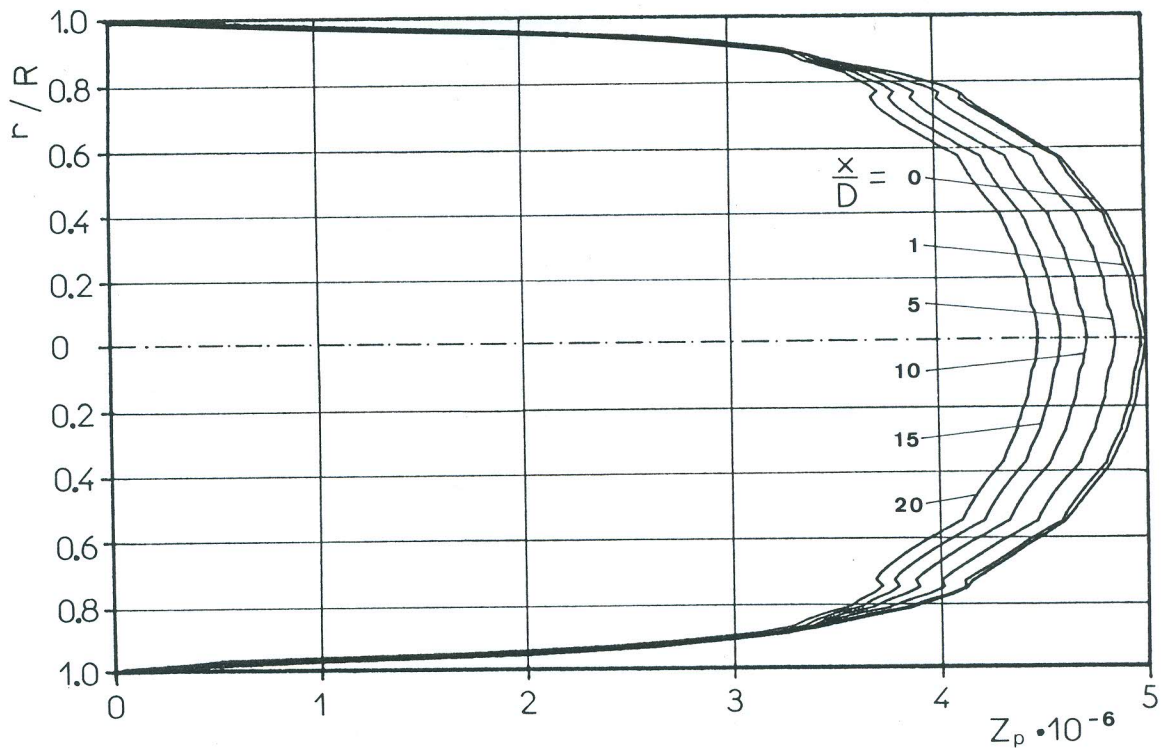
μέγιστη τιμή πλησίον των τοιχωμάτων. Στην υπόλοιπη, σχετικά μικρή, περιοχή μέχρι τα τοιχώματα, παρουσιάζει απότομες μεταβολές, για να καταλήξει στην τιμή μηδέν ακριβώς πάνω στα τοιχώματα. Η ανωμαλία αυτή εξηγείται από το γεγονός ότι ενώ η ακτινική συνιστώσα αυξάνει από το κέντρο προς τα τοιχώματα, αντίθετα με την αξονική συνιστώσα, που μειώνεται, στα τοιχώματα πρέπει και οι δύο να είναι μηδέν. Για να επιτευχθεί αυτή η οριακή συνθήκη πρέπει το ρευστό να επιβραδυνθεί. Η επιβράδυνση όμως αυτή δεν γίνεται με ομαλό τρόπο και έτσι εμφανίζονται τοπικές αυξομειώσεις της ακτινικής ταχύτητας.

Η ακτινική συνιστώσα έχει φορά από το τοίχωμα προς το κέντρο και είναι απόλυτα συμμετρική στα δύο ημιεπίπεδα εκτός από την οριακή περιοχή πλησίον των πλακών, όπου εμφανίζονται οι απότομες μεταβολές. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στην επίδραση των δυνάμεων αλληλεπίδρασης μεταξύ των φάσεων, οι οποίες επηρεάζουν επίσης και την κατανομή της αξονικής συνιστώσας. Η επίδραση όμως αυτή είναι μικρή και γίνεται αισθητή μόνο στην ακτινική συνιστώσα, γιατί αυτή είναι κατά τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη από την αξονική.

Στο Σχήμα 6.4 δίνεται η κατανομή της ακτινικής συνιστώσας των σωματιδίων σε διάφορες διατομές κατά μήκος του αγωγού. Τα σχόλια, που αναφέρονται στο σχήμα 6.3 ισχύουν επίσης και για το σχήμα 6.4. Η διαφορά που παρατηρείται στην ανάπτυξη των κατανομών των δύο ταχυτήτων είναι ότι η ακτινική ταχύτητα των σωματιδίων αυξάνει από το κέντρο προς τα τοιχώματα, όχι με γραμμικό, αλλά με ελλειπτικό τρόπο και είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη από την αντίστοιχη ταχύτητα του αέρα. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει το συμπέρασμα, που αναφέρθηκε στο Σχήμα 6.2 ότι δηλαδή τα σωματίδια ακολουθούν σε μεγάλο βαθμό τη ροή του αέρα κατά την αξονική διεύθυνση.

Η ανάπτυξη της κατανομής της ογκομετρικής συγκέντρωσης των σωματιδίων φαίνεται στο Σχήμα 6.5. Το πρώτο και βασικό συμπέρασμα, που εξάγεται από την εξέταση του σχήματος αυτού, είναι ότι όσο αυξάνει η απόσταση από την αρχική διατομή τόσο μειώνεται η ογκομετρική συγκέντρωση των σωματιδίων. Η μείωση αυτή, που δεν είναι πολύ δραστική, είναι το αποτέλεσμα της αύξησης της ταχύτητας των σωματιδίων. Οι διάφορες ανωμαλίες, που παρατηρούνται στις κατανομές της συγκέντρωσης πλησίον των τοιχωμάτων, οφείλονται στη μεταβολή της σχετικής ταχύτητας των δύο φάσεων κατά την αξονική και την ακτινική διεύθυνση. Συγκεκριμένα η σχετική ταχύτητα κατά την αξονική διεύθυνση έχει αρνητικό πρόσημο πλησίον των τοιχωμάτων, αφού εκεί τα σωματίδια έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα από τον αέρα, και κατόπιν θετικό, γεγονός που επηρεάζει τις τιμές της ογκομετρικής συγκέντρωσης, όπως φαίνεται και από τη σχ. (5.19). Ομοίως, επηρεάζει και η σχετική ταχύτητα κατά την ακτινική διεύθυνση, η οποία ενώ μεταβάλλεται ομαλά από τον

άξονα προς τα τοιχώματα, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 6.3 και 6.4, παρουσιάζει απότομες και ακανόνιστες μεταβολές πλησίον των τοιχωμάτων.

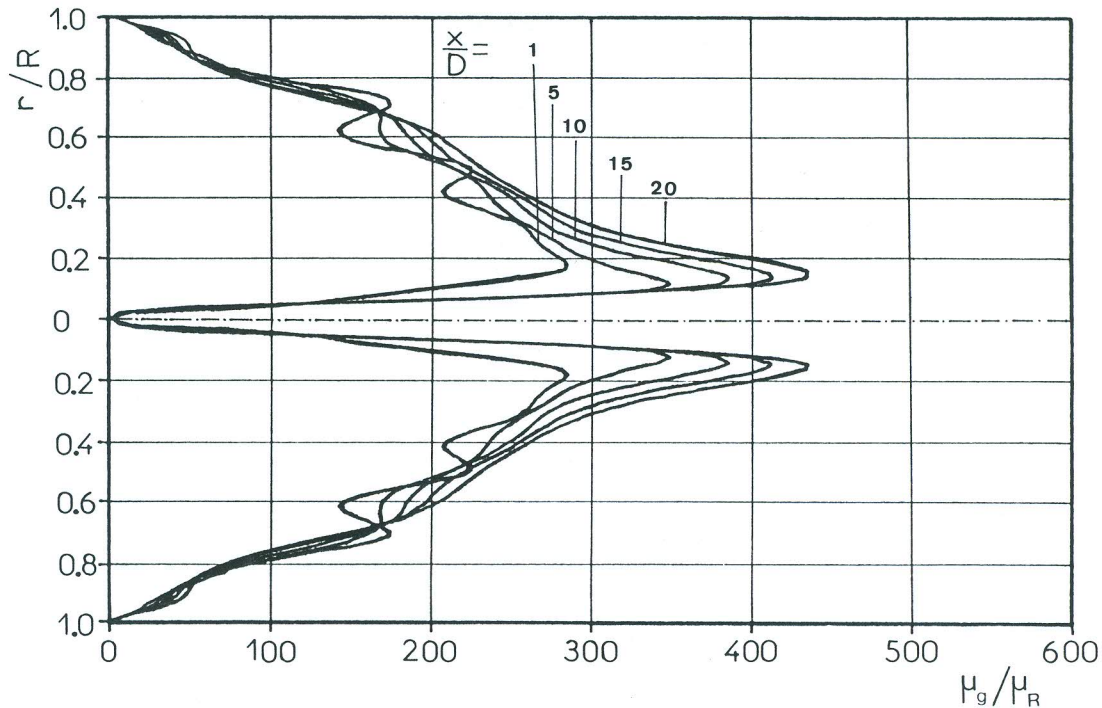


Σχήμα 6.5: Ανάπτυξη της ογκομετρικής συγκέντρωσης των σωματιδίων σε ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγό κυκλικής διατομής.

Οι κατανομές της ογκομετρικής συγκέντρωσης του αέρα δεν παρουσιάζονται σε ιδιαίτερο διάγραμμα, γιατί προκύπτουν απλά από τις αντίστοιχες κατανομές της συγκέντρωσης των σωματιδίων, από τη σχέση $Z_g = 1 - Z_p$ και δεν παρέχουν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την εξέλιξη του φαινομένου. Απλώς αναφέρεται ότι οι κατανομές αυτές παρουσιάζουν αντίθετη μεταβολή από τις αντίστοιχες των σωματιδίων έχοντας μέγιστη τιμή στα τοιχώματα και ελάχιστη στο άξονα του ροϊκού πεδίου.

Στα μέχρι τώρα διαγράμματα παρουσιάστηκαν οι κατανομές των ροϊκών μεγεθών, που διέπουν το φαινόμενο της διφασικής ροής αέρα-σωματιδίων. Η γνώση των κατανομών αυτών παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον τόσο από θεωρητικής όσο και από πρακτικής εφαρμογής. Εξίσου όμως ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι κατανομές διαφόρων άλλων μεγεθών και παραμέτρων, που βρίσκονται σε στενή αλληλεξάρτηση με τις προηγούμενες κατανομές, και επηρεάζουν δραστικά την εξέλιξη του φαινομένου. Οι κατανομές αυτές, που παρουσιάζονται στα επόμενα διαγράμματα, αφορούν το ιξώδες τύρβης της κάθε φάσης και τους συντελεστές αντίστασης και αεροδυναμικής άνωσης των σωματιδίων. Το ενδιαφέρον για τις κατανομές αυτές πολλαπλασιάζεται

από το γεγονός ότι πρόκειται για τα αποτελέσματα της εφαρμογής των πρωτότυπων θεωρητικών μοντέλων, που αναπτύχθηκαν για τον υπολογισμό αυτών των μεγεθών.



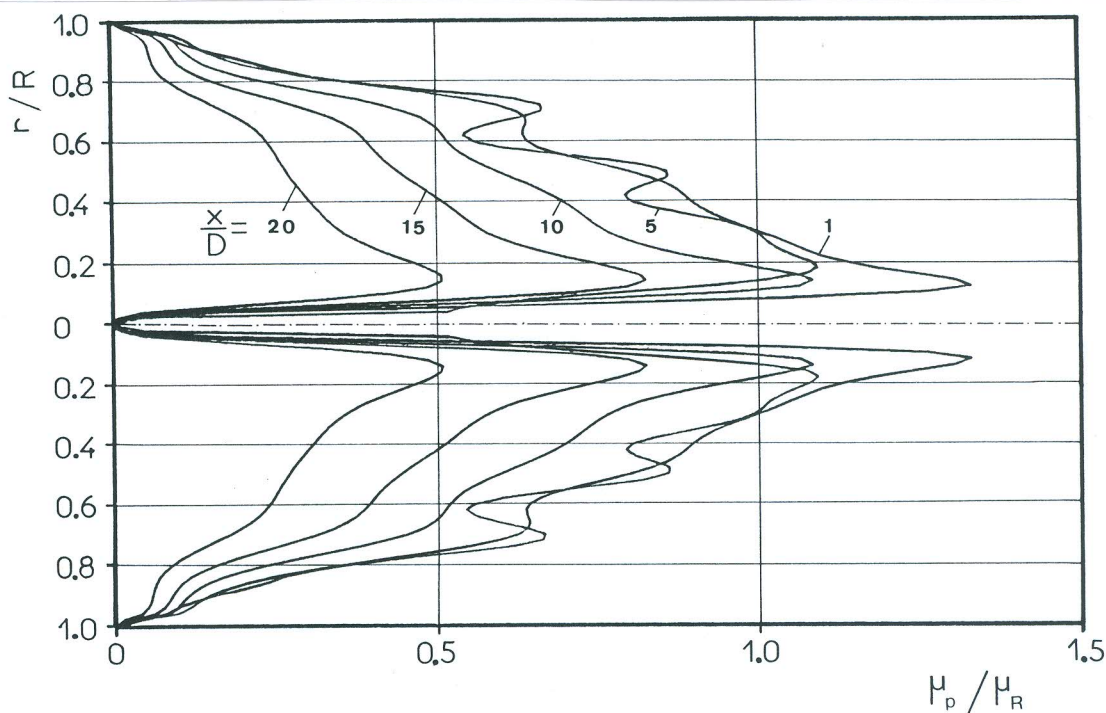
Σχήμα 6.6: Κατανομές ιξώδους τύρβης του αέρα σε ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγό κυκλικής διατομής.

Στο Σχήμα 6.6 δίνονται οι κατανομές του ιξώδους τύρβης του αέρα για την περίπτωση της διφασικής ροής αέρα-σωματιδίων σε αγωγό κυκλικής διατομής. Κατ' αρχήν εντυπωσιάζει η μορφή των κατανομών με τις ακανόνιστες μεταβολές τους, η εξήγηση όμως γι' αυτό είναι απλή. Οι παρατηρούμενες ανωμαλίες οφείλονται στις ανωμαλίες, που παρουσιάζει, όπως ήδη αναφέρθηκε, η αρχική κατανομή της ταχύτητας του αέρα. Εξετάζοντας τη σχέση υπολογισμού του ιξώδους τύρβης του αέρα βλέπουμε ότι αυτό είναι κατ' ευθείαν συνάρτηση της βαθμίδας της ταχύτητας του αέρα. Είναι λοιπόν ευνόητο ότι η παραμικρή ανωμαλία στη βαθμίδα της ταχύτητας μεταφέρεται, και μάλιστα σε μεγαλύτερο βαθμό, λόγω της διαφορετικής τάξης μεγέθους, στη βαθμίδα του ιξώδους τύρβης. Η παραπάνω εξήγηση επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι όσο αυξάνει η απόσταση από την αρχική διατομή τόσο εξομαλύνονται οι κατανομές του ιξώδους, όπως ακριβώς εξομαλύνονται και οι κατανομές της ταχύτητας.

Από την εξέταση των κατανομών προκύπτουν τα εξής βασικά συμπεράσματα: το ιξώδες τύρβης του αέρα αυξάνεται από μια πολύ μικρή τιμή, πάνω στις πλάκες, μέχρι μια μέγιστη, πλησίον του άξονα του ροϊκού πεδίου, και κατόπιν μειώνεται δραστικά λαμβάνοντας την μικρότερη τιμή του ακριβώς πάνω στον άξονα.

Φαίνεται επίσης, πως αύξηση της απόστασης από την αρχική διατομή, επιφέρει αύξηση του ιξώδους τύρβης του αέρα. Η συμπεριφορά αυτή, εξηγείται από την εξέταση της σχέσης υπολογισμού της διατμητικής τάσης στο τοίχωμα, σχ. (4.36) όπου σε κυκλικό αγωγό, η διατμητική τάση είναι συνάρτηση της αξονικής ταχύτητας του αέρα u_x με αποτέλεσμα όσο αυτή αυξάνει, να αυξάνει και το ιξώδες. Στο υπόλοιπο ροϊκό πεδίο (μακριά από τα τοιχώματα), η αύξηση του ιξώδους τύρβης του αέρα, οφείλεται στη μείωση της βαθμίδας της αξονικής ταχύτητας του αέρα (βλέπε σχέση 4.33).

Το Σχήμα 6.7 περιέχει τις κατανομές του ιξώδους τύρβης του ψευδορευστού των σωματιδίων για ροή σε αγωγό κυκλικής διατομής. Οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο σχήμα, ισχύουν γενικά και εδώ, αφού και η ταχύτητα των σωματιδίων, βάση της οποίας υπολογίζεται το ιξώδες των σωματιδίων, παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με την ταχύτητα του αέρα. Η διαφορά εντοπίζεται μόνο στην τάξη μεγέθους και συγκεκριμένα παρατηρείται ότι το ιξώδες τύρβης των σωματιδίων είναι περίπου δύο τάξεις μεγέθους μικρότερο από το ιξώδες τύρβης του αέρα. Το αποτέλεσμα αυτό είναι απολύτως δικαιολογημένο από το γεγονός ότι οι δυνάμεις συνοχής του ψευδορευστού είναι πολύ μικρότερες από τις δυνάμεις συνοχής του αέρα. Η ομοιότητα της κατανομής τύρβης του αέρα με αυτή των σωματιδίων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η θεώρηση των σωματιδίων σαν ψευδορευστό αποτελεί μια λογική και ρεαλιστική προσέγγιση.



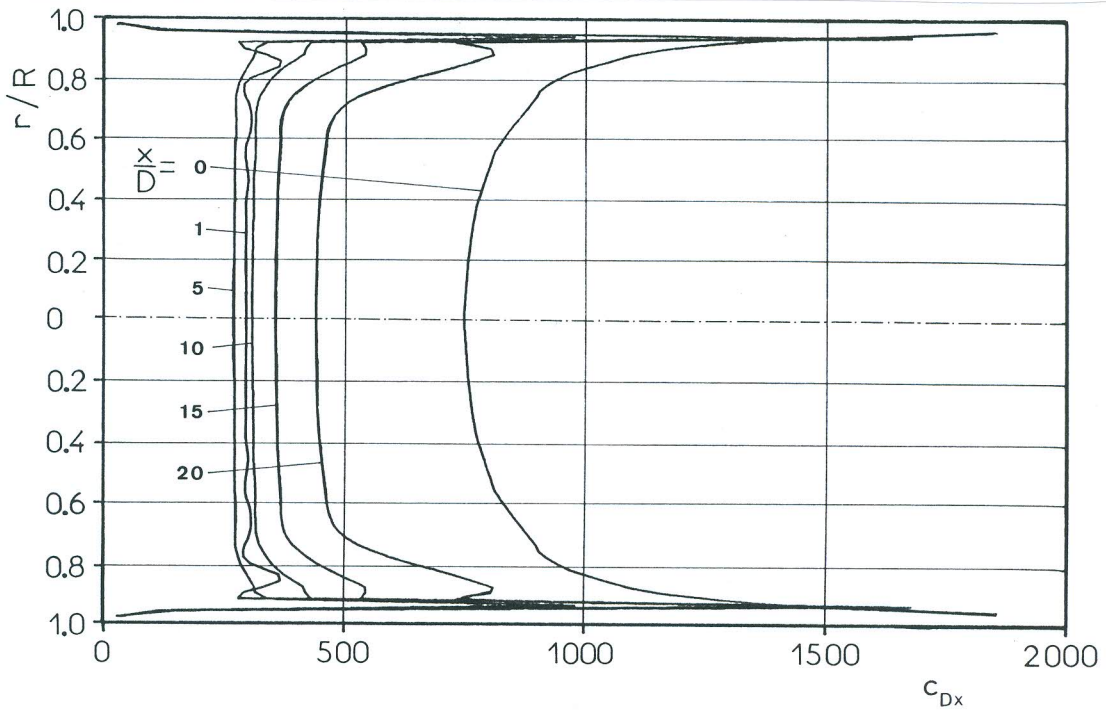
Σχήμα 6.7: Κατανομές ιξώδους τύρβης των σωματιδίων σε ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγό κυκλικής διατομής.

Οι κατανομές του ιξώδους τύρβης κάθε φάσης προκύπτουν, σύμφωνα με το μοντέλο, από τη γνωστή κάθε φορά βαθμίδα της ταχύτητας και από ένα κατάλληλο προσδιορισμό της διατμητικής τάσης. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι ο υπολογισμός του ιξώδους τύρβης γίνεται κατ' ευθείαν χωρίς να απαιτείται προηγουμένως πειραματικός προσδιορισμός κάποιας παραμέτρου, όπως συμβαίνει σε άλλα μοντέλα. Απαιτείται όμως πειραματική επαλήθευση της διατμητικής τάσης, που αναπτύσσεται πάνω στα τοιχώματα, από την τριβή των σωματιδίων. Για το σκοπό αυτό πρέπει να γίνει μια σειρά μετρήσεων σε ειδικά διαμορφωμένες πειραματικές διατάξεις και με όργανα πολύ μεγάλης ακρίβειας. Αυτό ακριβώς είναι ένα από τα θέματα που παραμένουν ανοικτά για τη συνέχιση της παρούσας διερεύνησης.

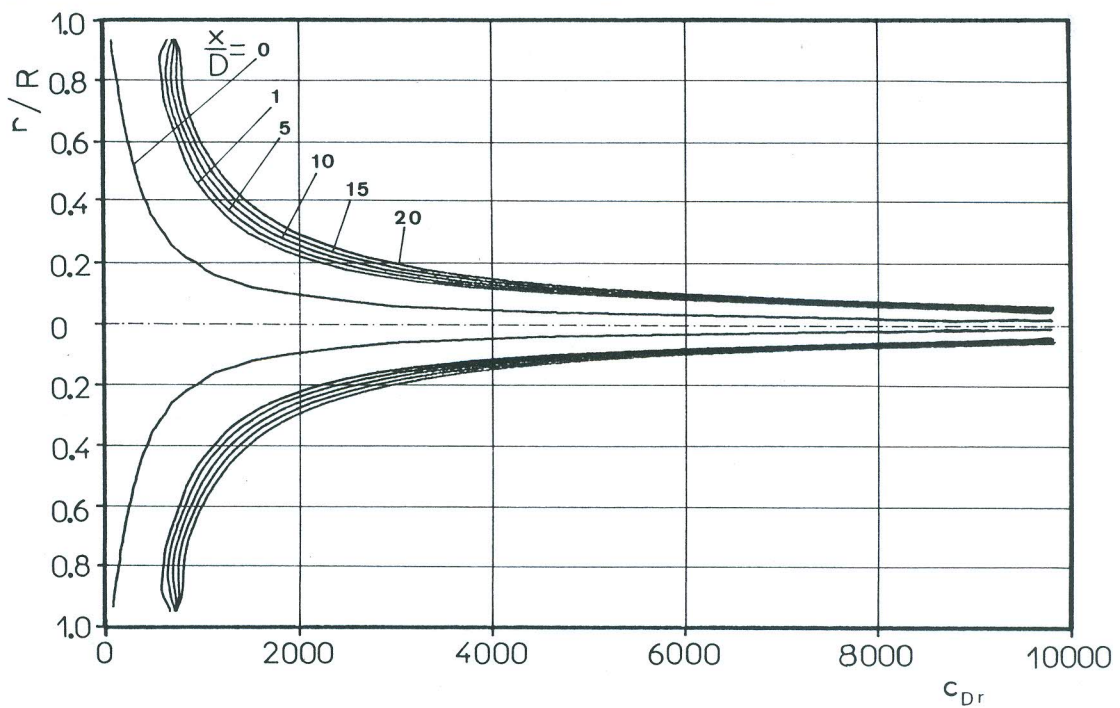
Στα Σχήματα 6.8 και 6.9 παρουσιάζονται οι κατανομές του συντελεστή αντίστασης των σωματιδίων στις διευθύνσεις x και r αντίστοιχα. Εδώ η πρωτοτυπία βρίσκεται όχι στο ίδιο το μέγεθος αλλά στη μορφή με τη οποία εμφανίζεται στις εξισώσεις και επιδρά στις κατανομές των υπόλοιπων μεγεθών. Συγκεκριμένα η αντίσταση των σωματιδίων είναι η μόνη δύναμη αλληλεπίδρασης μεταξύ των φάσεων, που εμφανίζεται σε όλες τις μέχρι τώρα εργασίες, που διαπραγματεύονται την διασπαστική ροή αέρα-σωματιδίων. Στις περισσότερες όμως εργασίες ο συντελεστής αντίστασης υπολογίζεται από τη σχέση του Stokes ή κάποια πιο κατάλληλη σχέση και θεωρείται σταθερό σε όλο το ροϊκό πεδίο. Στον [86] λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή του συντελεστή αντίστασης σαν συνάρτηση της σχετικής ταχύτητας αέρα-σωματιδίων αλλά θεωρείται ότι η μεταβολή αυτή είναι ίδια προς όλες τις διευθύνσεις. Εδώ θεωρείται ότι ο συντελεστής αντίστασης των σωματιδίων είναι διαφορετικός σε κάθε θέση και διεύθυνση του ροϊκού πεδίου και είναι συνάρτηση της αντίστοιχης συνιστώσας της σχετικής ταχύτητας των δύο φάσεων.

Οι απότομες μεταβολές που παρατηρούνται πλησίον των τοιχωμάτων και που εξακολουθούν να παραμένουν σε όλο το μήκος του ροϊκού πεδίου, οφείλονται στο γεγονός ότι στην περιοχή αυτή, η σχετική ταχύτητα αλλάζει πρόσημο, αφού τα σωματίδια έχουν ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του αέρα, όπως έχει ήδη αναφερθεί.

Η αύξηση των τιμών του συντελεστή αντίστασης, όσο αυξάνει η απόσταση από την αρχική διατομή, οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι αντίστοιχα αυξάνει η σχετική ταχύτητα των δύο φάσεων. Αυτό είναι πολύ λογικό, αφού στην αραιή πνευματική μεταφορά (μικρή ογκομετρική συγκέντρωση Z_p), οι ενεργειακές απώλειες του φορέα-ρευστού είναι μικρές με αποτέλεσμα αυτός να μπορεί να προσφέρει περισσότερη ενέργεια στα σωματίδια, τα οποία επιταχύνονται. Η επιτάχυνση των σωματιδίων έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της σχετικής ταχύτητας των δύο φάσεων. Επειδή ο συντελεστής αντίστασης είναι αντιστρόφως ανάλογος της σχετικής ταχύτητας, έπεται ότι η μείωση της ταχύτητας οδηγεί σε αύξηση της τιμής του συντελεστή αντίστασης.



Σχήμα 6.8: Κατανομές του αξονικού συντελεστή αντίστασης των σωματιδίων σε ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγό κυκλικής διατομής.



Σχήμα 6.9: Κατανομές του ακτινικού συντελεστή αντίστασης των σωματιδίων σε ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγό κυκλικής διατομής.

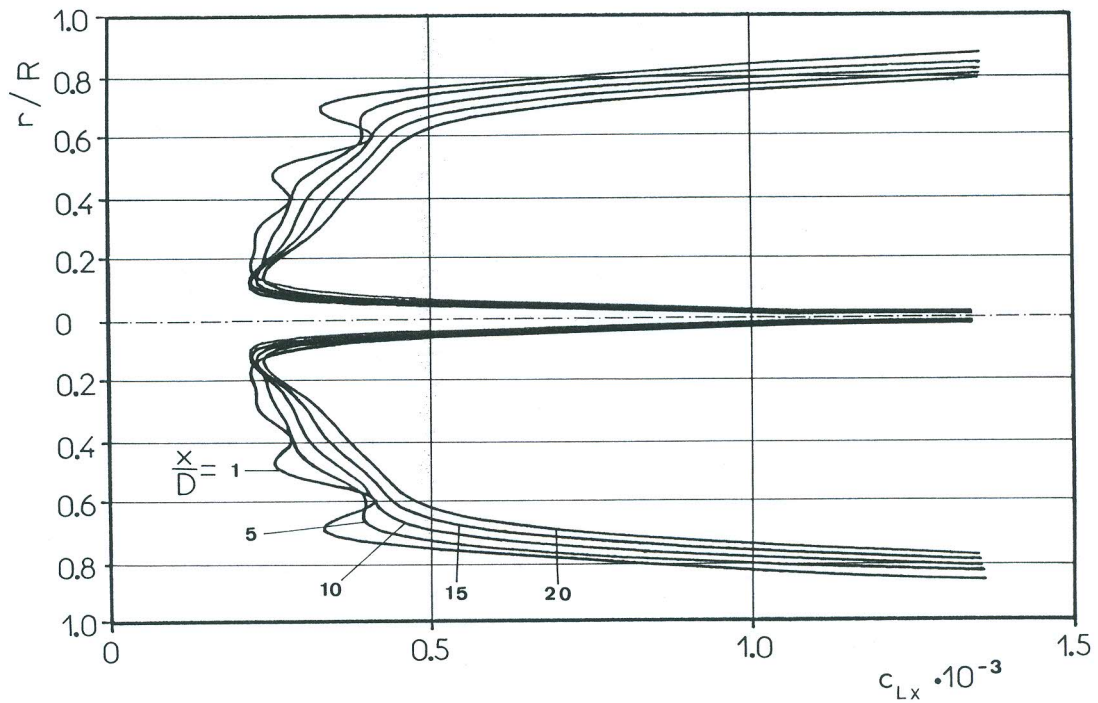
Το Σχήμα 6.9 συμπληρώνει το Σχήμα 6.8 παρουσιάζοντας τις κατανομές του συντελεστή αντίστασης των σωματιδίων κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Ο συντελεστής αντίστασης c_{Dr} είναι συνάρτηση της r συνιστώσας της σχετικής ταχύτητας των δύο φάσεων, η οποία, όπως φαίνεται από τα Σχήματα 6.3 και 6.4 παρουσιάζει μια πολύ ομαλή κατανομή, που έχει σαν συνέπεια την πολύ ομαλή κατανομή του c_{Dr} . Οι απότομες μεταβολές που παρατηρούνται στη γειτονιά των τοιχωμάτων, οφείλονται στις απότομες μεταβολές που παρουσιάζουν οι συνιστώσες w_g και w_p των ταχυτήτων των δύο φάσεων, οι οποίες έχουν ήδη εξηγηθεί.

Από τη σύγκριση των κατανομών του συντελεστή αντίστασης κατά την x - και r -διεύθυνση εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο c_{Dx} παρουσιάζει μικρή σχετικά βαθμίδα ως προς r και μεγάλη ως προς x , ενώ, αντίθετα, ο c_{Dr} παρουσιάζει μεγάλη βαθμίδα ως προς r και μικρή ως προς x . Πράγματι, μετά από ένα πολύ μικρό μήκος ροής, οι κατανομές του c_{Dr} ταυτίζονται ενώ οι κατανομές του c_{Dx} εξακολουθούν να παρουσιάζουν σημαντική διαφορά. Κατά την εγκάρσια διεύθυνση οι κατανομές του c_{Dr} παρουσιάζουν πολύ δραστική μεταβολή. Στον άξονα του ροϊκού πεδίου οι κατανομές του c_{Dr} τείνουν ασυμπτωτικά προς το άπειρο, λόγω του μηδενισμού των συνιστωσών των ταχυτήτων, ενώ ο c_{Dx} λαμβάνει πεπερασμένες τιμές.

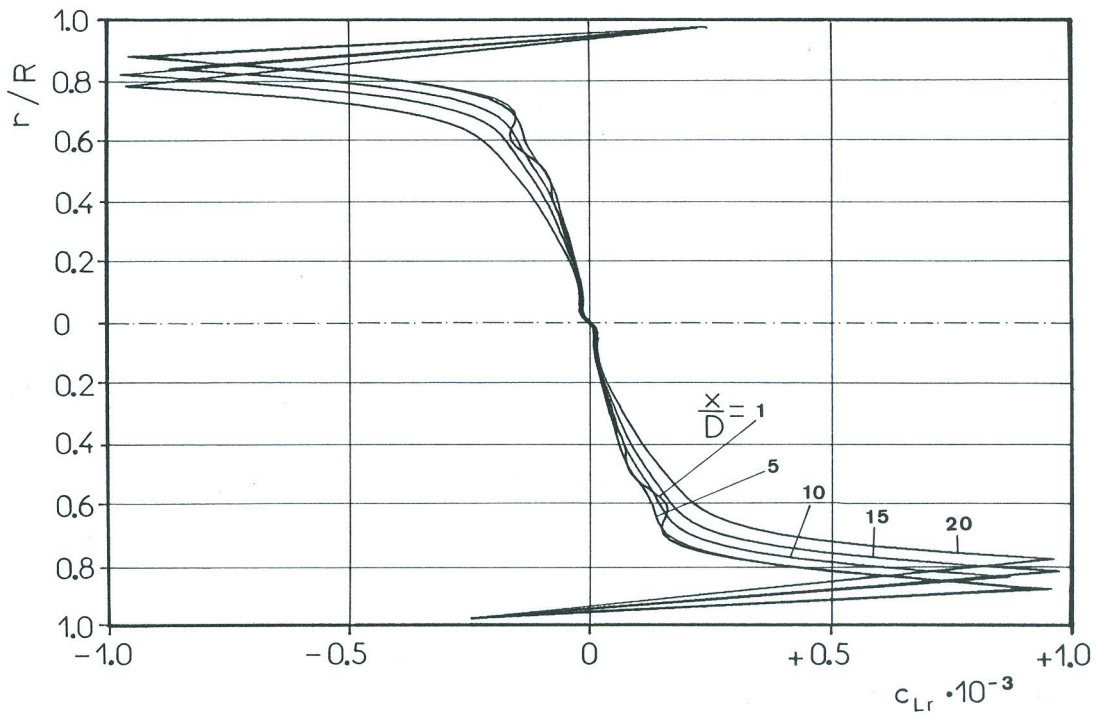
Η διαφορετική μορφή της κατανομής του c_D κατά τις δύο διευθύνσεις οφείλεται στη διαφορετική μορφή των κατανομών των ταχυτήτων και η διαφορά των τιμών $c_{Dr} > c_{Dx}$, οφείλεται στη διαφορετική τάξη μεγέθους των συνιστωσών των ταχυτήτων. Έτσι επειδή η σχετική ταχύτητα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους και προς τις δύο διευθύνσεις και επειδή μεγαλύτερος συντελεστής αντίστασης σημαίνει μεγαλύτερη δύναμη αντίστασης, συνεπάγεται ότι η αντίσταση των σωματιδίων κατά την r -διεύθυνση είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση κατά την x -διεύθυνση σε όλο σχεδόν το πλάτος του ροϊκού πεδίου εκτός από την περιοχή πλησίον των τοιχωμάτων. Το συμπέρασμα αυτό βρίσκεται σε άμεση αλληλεξάρτηση με το συμπέρασμα ότι τα σωματίδια ακολουθούν σε μεγάλο βαθμό τη ροή του αέρα κατά την αξονική διεύθυνση.

Στην παρούσα θεωρητική διερεύνηση η άνωση λαμβάνεται υπ' όψη, σύμφωνα με το μοντέλο που αναπτύχθηκε, σαν μια δύναμη αλληλεπίδρασης μεταξύ των φάσεων, που επιδρά αισθητά στην εξέλιξη του ροϊκού φαινομένου. Η επίδραση της δύναμης αυτής φαίνεται από τις κατανομές του συντελεστή άνωσης, που παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.10 και 6.11.

Σε αντιστοιχία με το συντελεστή αντίστασης και ο συντελεστής άνωσης παρουσιάζει διαφορετικές κατανομές κατά την x - και r -διεύθυνση. Έτσι στο Σχήμα 6.10 περιέχονται οι κατανομές του συντελεστή άνωσης κατά την x -διεύθυνση. Παρατηρούμε ότι ο c_{Lx} λαμβάνει μέγιστες τιμές στη γειτονιά των τοιχωμάτων και του άξονα του ροϊκού πεδίου και ελάχιστες σε μια περιοχή πλησίον του άξονα. Η μεταβολή αυτή εξηγείται απλά από τη μεταβολή των μεγεθών, συνάρτηση των οποίων είναι ο



Σχήμα 6.10: Κατανομές του αξονικού συντελεστή αεροδυναμικής άνωσης των σωματιδίων σε ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγό κυκλικής διατομής.



Σχήμα 6.11: Κατανομές του ακτινικού συντελεστή αεροδυναμικής άνωσης των σωματιδίων σε ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγό κυκλικής διατομής.

συντελεστής άνωσης c_{Lx} . Πράγματι, από τη σχέση υπολογισμού του, φαίνεται ότι ο c_{Lx} είναι ανάλογος της γωνιακής ταχύτητας του σωματιδίου, που είναι ανάλογη της βαθμίδας της ταχύτητας, και αντιστρόφως ανάλογος της σχετικής ταχύτητας $w_g - w_p$ των δύο φάσεων. Πλησίον των τοιχωμάτων η βαθμίδα της ταχύτητας των σωματιδίων και η σχετική ταχύτητα των φάσεων είναι μεγάλες, με αποτέλεσμα τις μεγάλες τιμές του c_{Lx} . Πλησιάζοντας προς τον άξονα του ροϊκού πεδίου και τα δύο αυτά μεγέθη μειώνονται, η μείωση όμως της βαθμίδας της ταχύτητας επιδρά στις τιμές του c_{Lx} δραστηκότερα από την αύξηση, που συνεπάγεται η μείωση της σχετικής ταχύτητας, με αποτέλεσμα τη μείωση του c_{Lx} . Η επίδραση αυτή αντιστρέφεται πλησίον του άξονα, οπότε εκεί παρατηρείται αύξηση του συντελεστή άνωσης. Ακριβώς πάνω στον άξονα έχουμε μια ασυνέχεια της κατανομής του c_{Lx} αφού εκεί η μηδενική βαθμίδα της ταχύτητας οδηγεί σε μηδενισμό του συντελεστή άνωσης, ενώ η μηδενική σχετική ταχύτητα σε απειρισμό. Η ασυνέχεια αυτή αίρεται αν θέσουμε το συντελεστή άνωσης ίσο με μηδέν, λαμβάνοντας υπ' όψη το γεγονός, ότι, αφού δεν υπάρχει ροή ρευστού γύρω από το σωματίδιο, δεν θα αναπτύσσεται καμία δύναμη.

Η άμεση αλληλεπίδραση των κατανομών του c_{Lx} καθώς και των άλλων μεγεθών που έχουν ήδη αναφερθεί με τις κατανομές των ταχυτήτων έχει σαν αποτέλεσμα τον σχετικά βραδύ ρυθμό της αποκατάστασης της ροής.

Παρατηρούμε ότι οι τιμές του συντελεστή άνωσης αυξάνουν όσο αυξάνει η απόσταση από την αρχική διατομή. Όπως και στην περίπτωση του συντελεστή αντίστασης έτσι και εδώ έχουμε μείωση της σχετικής ταχύτητας των δύο φάσεων που οφείλεται στις μικρές ενεργειακές απώλειες του φορέα-ρευστού.

Στο Σχήμα 6.11 παρουσιάζονται οι κατανομές του συντελεστή άνωσης των σωματιδίων κατά την r-διεύθυνση. Η διαφορά του c_{Lr} από τον c_{Lx} είναι ότι αυτός είναι συνάρτηση της αξονικής συνιστώσας της σχετικής ταχύτητας $u_g - u_p$. Η συνιστώσα αυτή έχει μέγιστη τιμή στον άξονα και ελάχιστη στο τοίχωμα. Η μεταβολή αυτή οδηγεί σε μείωση του c_{Lr} από το τοίχωμα προς τον άξονα, η οποία προστίθεται στην μείωση, που επιφέρει η βαθμίδα της ταχύτητας, με αποτέλεσμα ο c_{Lr} να μειώνεται πιο δραστηκόρα από τον c_{Lx} και να λαμβάνει την ελάχιστη τιμή του, μηδέν, πάνω στον άξονα του ροϊκού πεδίου.

Ο συντελεστής άνωσης c_{Lr} παρουσιάζει θετικές τιμές στο κάτω ημιεπίπεδο και αρνητικές στο πάνω. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στην αλλαγή κλίσης της βαθμίδας της ταχύτητας η οποία είναι θετική στο κάτω και αρνητική στο πάνω ημιεπίπεδο. Ίδια μεταβολή βέβαια ισχύει και στην περίπτωση του c_{Lx} αλλά εκεί στο πάνω ημιεπίπεδο αλλάζει ταυτόχρονα πρόσημο και η σχετική ταχύτητα και έτσι ο συντελεστής παραμένει πάντα θετικός. Οι απότομες μεταβολές των τιμών του c_{Lr} πλησίον των τοιχωμάτων οφείλονται στην αρνητική σχετική ταχύτητα, που επικρατεί στην περιοχή αυτή, λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας των σωματιδίων από τον αέρα, όπως έχει ήδη αναφερθεί.

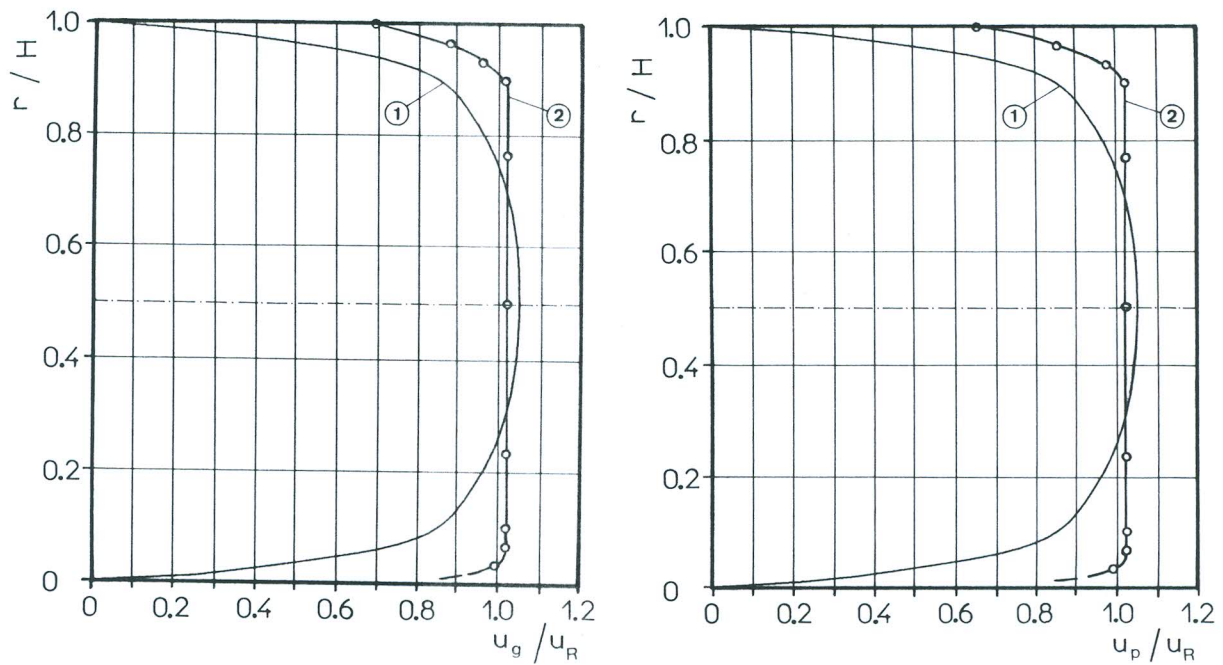
Η μεταβολή του συντελεστή άνωσης των σωματιδίων είναι πολύ δραστική σε όλο το ροϊκό πεδίο γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, παρά τις μικρές απόλυτες τιμές, η άνωση παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του φαινομένου. Όσον αφορά τις μικρές τιμές, αυτές οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στο συντελεστή αδράνειας J , ο οποίος είναι πολύ μικρός λόγω της μεγάλης πυκνότητας των σωματιδίων. Έτσι συμπεραίνεται ότι όσο μικρότερη η πυκνότητα των σωματιδίων τόσο μεγαλύτερη η επίδραση της αεροδυναμικής άνωσης, και πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη στους υπολογισμούς, ενώ για μεγάλες τιμές της πυκνότητας των σωματιδίων μπορεί να αμελείται χωρίς να δημιουργεί μεγάλο σφάλμα στα τελικά αποτελέσματα.

6.2 Σύγκριση θεωρητικών με πειραματικά αποτελέσματα

Το αντικείμενο αυτού του κεφαλαίου είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της θεωρητικής διερεύνησης της διφασικής ροής αέρα-σωματιδίων σε κλειστούς αγωγούς με αντίστοιχα θεωρητικά ή και πειραματικά αποτελέσματα άλλων εργασιών και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ακρίβεια του μαθηματικού μοντέλου. Όμως, παρά τις επίμονες προσπάθειες, δεν βρέθηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία πολλά αντίστοιχα αποτελέσματα και έτσι τα συγκριτικά διαγράμματα εμφανίζονται πολύ λιτά.

Η έλλειψη πολλών αποτελεσμάτων οφείλεται στο γεγονός ότι η πνευματική μεταφορά είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο, που δύσκολα εξομοιώνεται μαθηματικά. Η μεγάλη όμως πρακτική εφαρμογή του φαινομένου, σαν τρόπου διακίνησης υλικών, απαιτεί τον προσδιορισμό και την πρόβλεψη διαφόρων ροϊκών καταστάσεων αναγκαίων για το σχεδιασμό των εγκαταστάσεων. Οι απαιτήσεις αυτές καλύπτονται σε μεγάλο βαθμό από τις διάφορες ημιεμπειρικές σχέσεις, οι οποίες διαπραγματεύονται τη μονοδιάστατη ροή. Οι σχέσεις αυτές αναφέρονται κυρίως στον προσδιορισμό των απωλειών πίεσης, που είναι και το σημαντικότερο μέγεθος για το σχεδιασμό των εγκαταστάσεων. Σε τέτοιου είδους διερευνήσεις, εξετάζεται η επίδραση διαφόρων παραμέτρων, όπως το σχήμα, το μέγεθος, η πυκνότητα των σωματιδίων, θεωρώντας ότι τα ροϊκά μεγέθη είναι σταθερά σε όλο το πλάτος του ροϊκού πεδίου.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι, για διφασική ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγούς ορθογωνικής διατομής, βρέθηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία μόνο θεωρητικά αποτελέσματα, [86], και για ροή σε αγωγό κυκλικής διατομής μόνο πειραματικά αποτελέσματα, [27], σχετικά με τις κατανομές των δύο φάσεων. Αυτά συμπληρώνονται με τα θεωρητικά αποτελέσματα για την πτώση πίεσης, της μονοδιάστατης ροής, που αναπτύχθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της παρούσας θεωρητικής διερεύνησης.



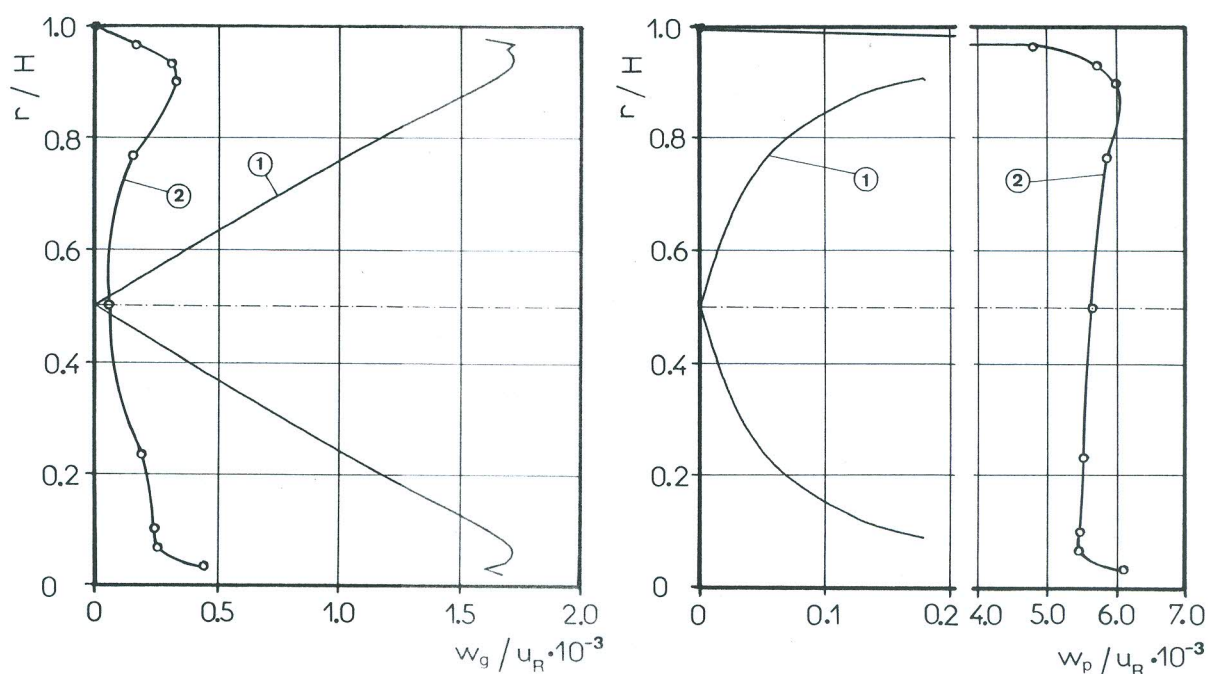
Σχήμα 6.12: Σύγκριση θεωρητικών κατανομών αξονικών ταχυτήτων αέρα και σωματιδίων σε ροή αέρα-σωματιδίων μεταξύ παραλλήλων πλακών.

Στο Σχήμα 6.12 φαίνονται, σε δύο χωριστά διαγράμματα για λόγους ευκρίνειας, οι κατανομές της αξονικής ταχύτητας του αέρα και των σωματιδίων, όπως αυτές προσδιορίζονται από την παρούσα θεωρία και τη θεωρία του Μαρκάτου [86] για ροή αέρα σωματιδίων σε αγωγό ορθογωνικής διατομής. Πριν όμως από τη σύγκριση των κατανομών κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια αναφορά στις βασικές αρχές της θεωρίας του Μαρκάτου.

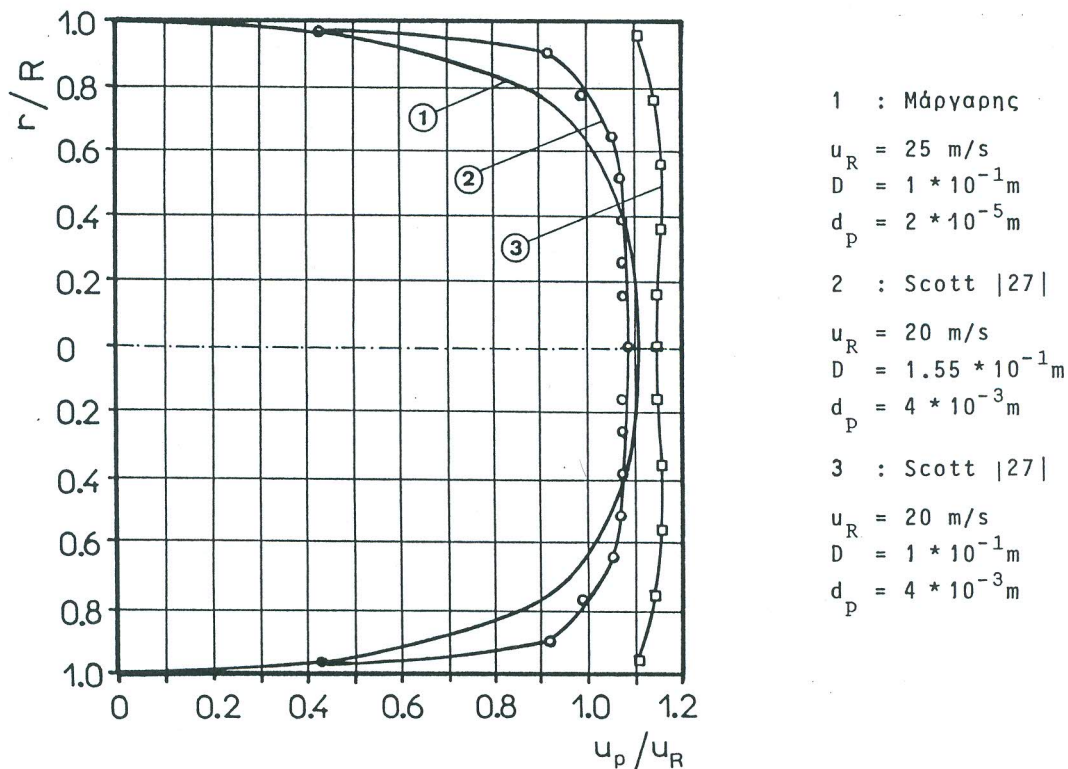
Σύμφωνα λοιπόν με τη θεωρία αυτή, το μαθηματικό μοντέλο αναπτύσσεται για την περίπτωση της τρισδιάστατης ροής, με εφαρμογή της θεωρίας του συνεχούς μέσου. Οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης, που λαμβάνονται υπόψη, είναι η βαρύτητα και η αντίσταση των σωματιδίων. Η αντίσταση υπολογίζεται από το γινόμενο της σχετικής ταχύτητας των δύο φάσεων και ενός εμπειρικού συντελεστή, που εκφράζει την τριβή μεταξύ των δύο φάσεων. Οι δυνάμεις τριβής του αέρα εκφράζονται μέσω του φαινομενικού ιξώδους τύρβης του αέρα, ενώ το ιξώδες των σωματιδίων θεωρείται μηδέν και οι δυνάμεις τριβής των σωματιδίων λαμβάνονται υπόψη μέσω ενός εμπειρικού συντελεστή, ο οποίος εκφράζει τη διατμητική τάση που αναπτύσσεται μεταξύ των σωματιδίων. Και για τους δύο αυτούς συντελεστές αναφέρεται ότι επηρεάζουν δραστικά τα αποτελέσματα και έτσι απαιτείται πειραματική διερεύνηση για τον ακριβή προσδιορισμό των τιμών τους, αφού οι τιμές που χρησιμοποιούνται είναι προϊόν της εμπειρίας των ερευνητών.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων και η εξήγηση των διαφορών είναι τώρα πιο εύκολη. Οι κατανομές των ταχυτήτων και των δύο φάσεων φαίνεται ότι παρουσιάζουν πολύ καλή συμφωνία στον πυρήνα του ροϊκού πεδίου και αποκλίνουν σημαντικά στα άκρα του πεδίου, πλησίον δηλαδή των πλακών. Η απόκλιση αυτή οφείλεται, σχεδόν αποκλειστικά, στο γεγονός ότι το αρχικό προφίλ της ταχύτητας, που χρησιμοποιεί ο Μαρκάτος, είναι πιο πλήρες από αυτό που χρησιμοποιείται στην παρούσα ανάλυση. Το σημαντικό όμως συμπέρασμα είναι ότι και οι δύο θεωρίες δίνουν ομοιόμορφη ανάπτυξη των κατανομών των ταχυτήτων και των δύο φάσεων.

Στο Σχήμα 6.13 συγκρίνονται οι κατανομές των κάθετων συνιστωσών των ταχυτήτων. Οι ταχύτητες του αέρα παρουσιάζουν συμφωνία ως προς τη μορφή αλλά σημαντική διαφορά στις τιμές, η οποία οφείλεται στη διαφορά των κατανομών των αξονικών ταχυτήτων. Σημαντική όμως απόκλιση παρουσιάζουν οι κατανομές των ταχυτήτων των σωματιδίων στη μορφή και τις τιμές, παρά το γεγονός ότι, σύμφωνα και με τις δύο θεωρίες, τα σωματίδια ακολουθούν τη ροή του αέρα κατά την αξονική διεύθυνση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.12. Η μόνη εξήγηση που μπορεί να δοθεί εδώ, είναι ότι η διαφορά οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζει η κάθε θεωρία τα σωματίδια σαν συνεχές μέσο. Λόγω έλλειψης όμως πολλών θεωρητικών και κυρίως πειραματικών αποτελεσμάτων δεν είναι δυνατόν να συμπεράνουμε ποία από τις δύο θεωρίες είναι πιο ακριβής.



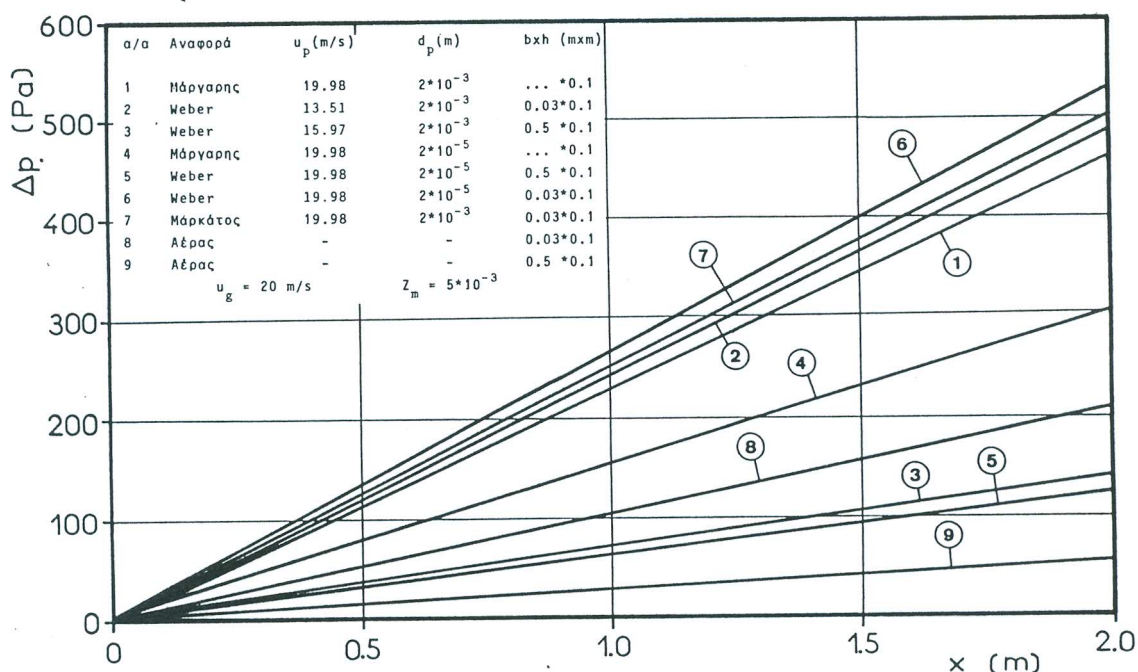
Σχήμα 6.13: Σύγκριση θεωρητικών κατανομών ακτινικών ταχυτήτων αέρα και σωματιδίων σε ροή αέρα-σωματιδίων μεταξύ παραλλήλων πλακών.



Σχήμα 6.14: Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών κατανομών της αξονικής ταχύτητας των σωματιδίων σε ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγό κυκλικής διατομής.

Στο Σχήμα 6.14 συγκρίνονται η θεωρητική κατανομή της ταχύτητας των σωματιδίων με αντίστοιχες πειραματικές κατανομές του Scott [27], για ροή αέρα σωματιδίων σε αγωγό κυκλικής διατομής. Εδώ όμως πρέπει να αναφερθεί ότι η σύγκριση αυτή είναι περισσότερο ποιοτική, διότι η θεωρητική κατανομή αναφέρεται στην ταχύτητα σωματιδίων διαμέτρου $2 \times 10^{-5} \text{ m}$ σε απόσταση 2 m από την αρχική διατομή ενός ευθύγραμμου οριζόντιου τμήματος ενώ οι πειραματικές κατανομές έχουν μετρηθεί σε απόσταση 50 m από την αρχική διατομή, μέχρι το σημείο μέτρησης μεσολαβούν τρία οριζόντια και δύο κατακόρυφα τμήματα, με τις αντίστοιχες καμπυλότητες, και τα μεταφερόμενα σωματίδια έχουν διάμετρο $4 \times 10^{-3} \text{ m}$. Η συμφωνία όμως των κατανομών, έστω και ποιοτική, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το μαθηματικό μοντέλο περιγράφει με επιτυχία και τη διφασική ροή αέρα σωματιδίων σε αγωγούς κυκλικής διατομής.

Τελευταία παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα των απωλειών πίεσης, που είναι ίσως τα πιο σημαντικά από πρακτικής άποψης. Στο Σχήμα 6.15 περιέχονται τα αποτελέσματα για τις απώλειες πίεσης για ροή αέρα σωματιδίων σε αγωγό ορθογωνικής διατομής. Τα αποτελέσματα αυτά έχουν προκύψει από τη παρούσα διερεύνηση, από την εργασία του Μαρκάτου και από την εφαρμογή της ημιεμπειρικής θεωρίας του Weber.



Σχήμα 6.15: Σύγκριση απωλειών πίεσης σε ροή αέρα-σωματιδίων μεταξύ παραλλήλων πλακών.

Ο μεγάλος αριθμός των κατανομών οφείλεται στο γεγονός ότι εξετάζονται διάφορα ροϊκά πεδία. Συγκεκριμένα οι κατανομές 1 και 4 δίνουν την απώλεια πίεσης, όπως αυτή προσδιορίζεται από την παρούσα εργασία, για μεταφορά σωματιδίων διαμέτρου 2×10^{-3} m και 2×10^{-5} m αντίστοιχα, μεταξύ παραλλήλων πλακών που απέχουν απόσταση 0.1 m. Στην περίπτωση αυτή δεν λαμβάνεται υπόψη το πλάτος των πλακών που θεωρείται άπειρο. Η κατανομή 7 δίνει την απώλεια πίεσης για μεταφορά σωματιδίων, διαμέτρου 2×10^{-3} m, σε αγωγό διατομής 0.1×0.3 m², σύμφωνα με τη θεωρία του Μαρκάτου. Οι υπόλοιπες κατανομές προκύπτουν από τη θεωρία του Weber για μεταφορά σωματιδίων, διαμέτρου 2×10^{-3} m και 2×10^{-5} m, σε αγωγό διατομής 0.1×0.3 m². Η πρώτη διατομή είναι ίδια με αυτή που χρησιμοποιεί ο Μαρκάτος και η δεύτερη ταιριάζει στο διδιάστατο χαρακτήρα της παρούσας θεωρητικής διερεύνησης. Τέλος, για εποπτικούς λόγους, περιέχονται και οι κατανομές των απωλειών πίεσης για τη μονοφασική ροή του αέρα.

Από τη σύγκριση των διαφόρων κατανομών διαπιστώνεται ότι υπάρχει πολύ καλή συμφωνία στα αποτελέσματα της παρούσας θεωρίας και του Μαρκάτου. Η μικρή διαφορά που παρατηρείται οφείλεται στο γεγονός ότι ο Μαρκάτος θεωρεί τρισδιάστατη ροή, λαμβάνοντας έτσι υπόψη και τις απώλειες που οφείλονται στην τριβή των δύο

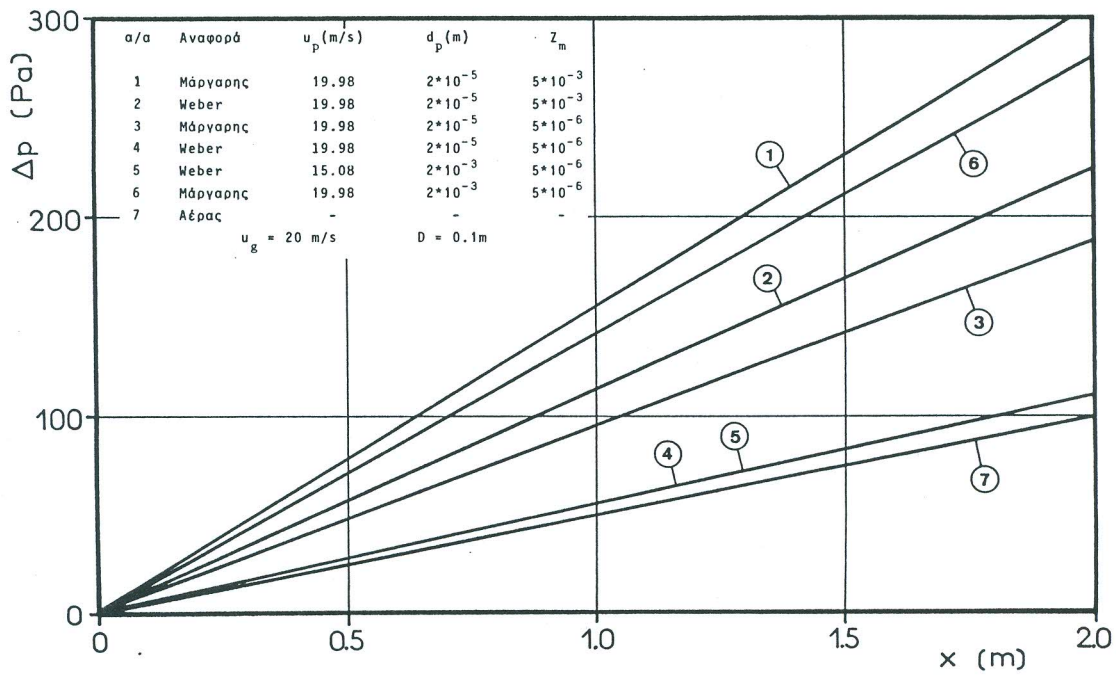
φάσεων και στις δύο κάθετες πλευρές. Μια παρόμοια θεώρηση από την πλευρά της παρούσας θεωρίας θα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών και επομένως την καλύτερη προσέγγιση των δύο θεωριών.

Σε πολύ καλή συμφωνία βρίσκονται και τα αποτελέσματα της ημιεμπειρικής μεθόδου, αφού η κατανομή των απωλειών πίεσης βρίσκεται μεταξύ των δύο προηγούμενων κατανομών. Κι όμως η συμφωνία αυτή δεν οδηγεί σε βάσιμα συμπεράσματα αφού η συμπεριφορά των υπολοίπων κατανομών πίεσης της ίδιας θεωρίας, δημιουργεί αμφιβολίες ως προς το αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι οι απώλειες πίεσης στον αγωγό της μικρής διατομής είναι μεγαλύτερες όταν τα σωματίδια έχουν μικρότερη διάμετρο, ενώ στον αγωγό της μεγάλης διατομής είναι μικρότερες. Το γεγονός αυτό οπωσδήποτε προβληματίζει και, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της θεωρητικής διερεύνησης, που δίνουν τις απώλειες πίεσης ανάλογες της διαμέτρου των σωματιδίων, δημιουργεί κίνητρα για μια αναλυτική πειραματική διερεύνηση.

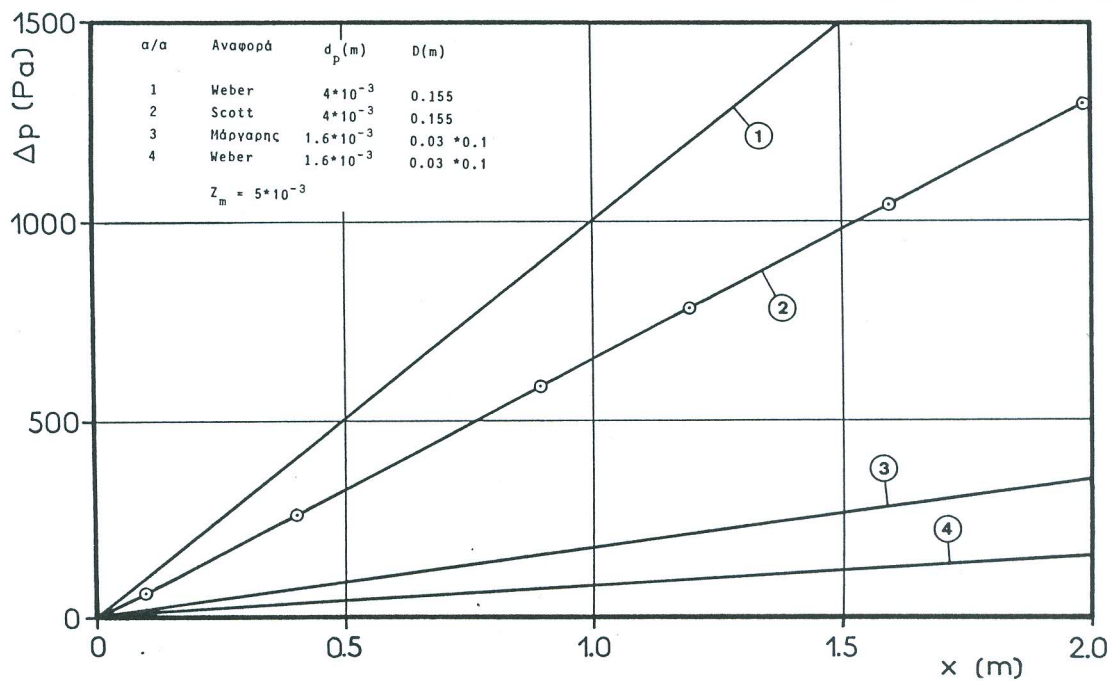
Στο Σχήμα 6.16 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τις απώλειες πίεσης, για τη διφασική ροή σε αγωγό κυκλικής διατομής. Και το σχήμα αυτό περιέχει πολλές κατανομές, οι οποίες προκύπτουν από την παρούσα θεωρία και την ημιεμπειρική μέθοδο του Weber και αφορούν την πνευματική μεταφορά σωματιδίων με διαφορετική διάμετρο και ογκομετρική συγκέντρωση, σε αγωγό διαμέτρου 0.1 m.

Το βασικό συμπέρασμα από τις θεωρητικές κατανομές είναι ότι οι απώλειες πίεσης αυξάνουν όσο αυξάνει η διάμετρος των σωματιδίων και η ογκομετρική συγκέντρωση. Τα αποτελέσματα όμως της ημιεμπειρικής μεθόδου δεν συμφωνούν απόλυτα με το συμπέρασμα αυτό. Έτσι ενώ η μεγαλύτερη ογκομετρική συγκέντρωση δίνει και μεγαλύτερες απώλειες πίεσης, η διάμετρος των σωματιδίων φαίνεται ότι δεν επηρεάζει δραστικά, με αποτέλεσμα να συμπίπτουν οι κατανομές πίεσης, για δύο διαφορετικές διαμέτρους σωματιδίων.

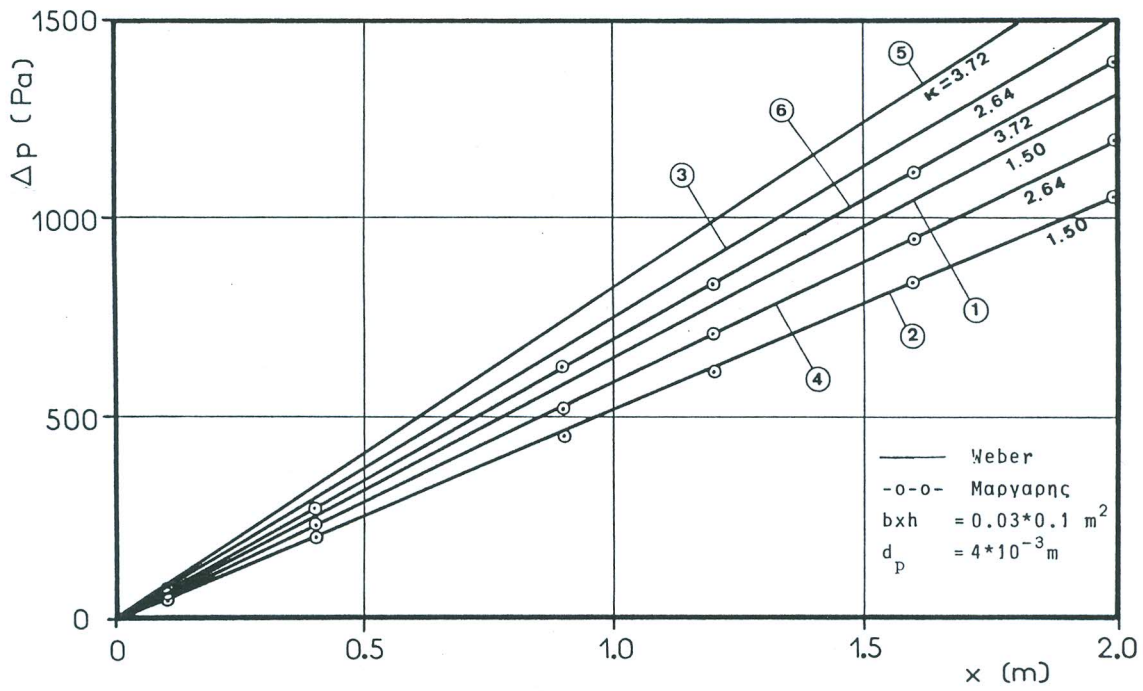
Από τα προηγούμενα σχήματα συμπεραίνεται ότι η ημιεμπειρική μέθοδος δεν είναι αξιόπιστη. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 6.17, στο οποίο παρουσιάζονται πειραματικές κατανομές και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες κατανομές που δίνει η μέθοδος αυτή. Τα πειραματικά δεδομένα, για πνευματική μεταφορά σε αγωγό ορθογωνικής διατομής, προέρχονται από μετρήσεις που έγιναν στην εγκατάσταση πνευματικής μεταφοράς του εργαστηρίου, ενώ αυτά για τον αγωγό κυκλικής διατομής οφείλονται στον Scott [27]. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται μεγάλη απόκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τα θεωρητικά. Η μεγαλύτερη απόκλιση εμφανίζεται στην περίπτωση του ορθογωνικού αγωγού, όπου η θεωρία δίνει πολύ μεγαλύτερη πτώση πίεσης, ενώ στον κυκλικό αγωγό προβλέπει μικρότερη πτώση πίεσης και παρουσιάζει μικρότερη απόκλιση.



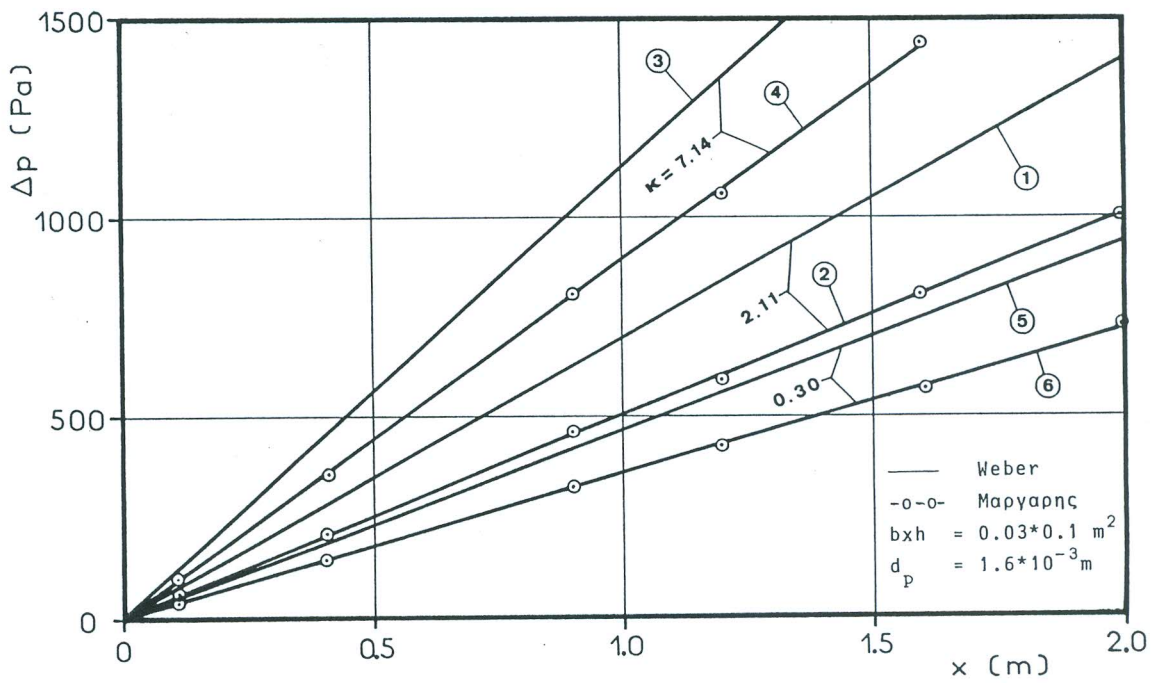
Σχήμα 6.16: Σύγκριση απωλειών πίεσης σε ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγό κυκλικής διατομής.



Σχήμα 6.17: Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών κατανομών απωλειών πίεσης σε ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγό ορθογωνικής και κυκλικής διατομής.



Σχήμα 6.18: Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών κατανομών απωλειών πίεσης σε ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγό ορθογωνικής διατομής για διάφορους λόγους μίξης.



Σχήμα 6.19: Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών κατανομών απωλειών πίεσης σε ροή αέρα-σωματιδίων σε αγωγό ορθογωνικής διατομής για διάφορους λόγους μίξης.

Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και από τα Σχήματα 6.18 και 6.19, τα οποία περιέχουν ένα μεγάλο αριθμό πειραματικών μετρήσεων, που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, και τις αντίστοιχες κατανομές που δίνει η ημιεμπειρική μέθοδος, για μεταφορά διαφόρων υλικών με διαφορετικές ογκομετρικές συγκεντρώσεις των σωματιδίων. Η απόκλιση αυτή μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η ημιεμπειρική μέθοδος χρησιμοποιεί παραμέτρους, οι τιμές των οποίων προκύπτουν από μετρήσεις, που πρέπει να γίνουν στο συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής. Επειδή όμως κάτι τέτοιο δεν ήταν μέσα στο αντικείμενο της παρούσας εργασίας, η ημιεμπειρική μέθοδος εφαρμόστηκε εδώ χρησιμοποιώντας τις τιμές των παραμέτρων που δίνει ο Weber για παρόμοιες συνθήκες.

Βελτιστοποίηση της ημιεμπειρικής μεθόδου, μπορεί να γίνει, με κατάλληλες μετρήσεις, στα πλαίσια της διεξοδικής πειραματικής διερεύνησης, που πρέπει να γίνει σαν συνέχιση της παρούσας εργασίας, η οποία και θα δώσει το μέτρο σύγκρισης για την ακρίβεια προσέγγισης του μαθηματικού μοντέλου με το πραγματικό φυσικό φαινόμενο.

7

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ
ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

1. Pai, S. I. *Two Phase Flows. Vieweg Tracks in Pure and Applied Physics*. Vieweg, Braunschweig, 1977.
2. Boothroyd, R.G. *Flowing Gas-Solids Suspensions*. Chapman & Hall Ltd. Edinburgh, 1971.
3. Weber, M. *Stromungs-Fordertechnik*. Krausskopf - Verlag, Mainz, 1974.
4. Lourenco, L., Margaris, D., Wille, C. *Measurements of particle velocity distribution in a flowing suspension*. Report of a short training program in Von Karman Institute. Bruxelles, September, 1978.
5. Boussinesq, J. *Essay on the theory of flowing water*. Med. Acad. Sci., Paris, Vol. 23, pp. 1-680, 1877.
6. 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.
7. Murray, J. O., *On the mathematics of fluidization. 1. Fundamental equations and wave propagation*, J. Fluid Mech., Vol. 21 pp. 465-494, 1965.
8. Soo, S. L., *Fluid Dynamics of Multiphase Systems*, Blaisdell Pub. Co., Waltham, 1967.

9. Vassiliev, O. F., *Problems of two-phase flow theory*. Lect. Of 13th Congress of Int. Assoc. For Hydraulic Res., Kyoto, 1969.
10. Rudinger, G., *Some Effects of Finite Particles Volume on the Dynamics of Gas Particle Mixtures*. AIAA Journal, Vol. 3, No 7, pp. 1217-1222, July 1965.
11. Faizullaev, D. F., *Laminar Motion of Multiphase Media in Conduits*. Consultants Bureau, New York, 1969.
12. Wallis, G. B., *One-Dimensional Two-Phase Flow*. Mc Graw-Hill Co. New York, 1969.
13. 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.
14. Culick, F. E. C., *Boltzmann Equation Applied to a Problem of Two-Phase Flow*. Phys. of Fluids, Vol. 7, No 12, pp. 1898-1904, Dec. 1964.
15. Rudinger, G., Chang, A., *Analysis of Nonsteady Two-Phase Flow* Phys. of Fluids, Vol. 7, No 11, part 1, pp. 1747-1754, 1964.
16. Torobin, L. B., *The Drag Coefficients of Single Spheres Moving in Steady and Accelerated Motion in a Turbulent Fluid*.
17. Torobin, L. B., Gauvin, W. H., *Fundamental Aspects of Solid-Gas Flow*. Can. Jour. Chem. Eng. In 5 parts, Vol. 37, pp. 129-141, pp. 167-176, pp. 224-236, 1959. Vol. 38, pp. 142-153, pp. 189-200, 1960.
18. Acrivos, A., Taylor, T.D., *The Stokes flow past an arbitrary particle: The slightly deformed sphere*. Chem. Eng. Sci., Vol. 19, pp. 445-451, Pergamon Press Ltd, Oxford, 1964.
19. Marchildon, E. K., Clamen, A., Gauvin, W. H., *Drag and Oscillatory Motion of Freely Falling Cylindrical Particles*. Can. J. Chem. Engineering, Vol. 42, part 4, pp. 178-182, 1964
20. Lee, K. C., *Aerodynamic interaction between two spheres at Reynolds num. around 10^4* . Aeronautical Quarterly.
21. Rubinow, S. I., *The transverse force on a spinning sphere moving in a viscous fluid*.
22. Happel, J., Brenner, H., *Low Reynolds number Hydrodynamics*. Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, 1983.
23. Willets, B. B., *Proc. 1st Int. Conf. on Hydraulic Transport of Solids in Pipes. Paper H2*, Sept. 1970, BHRA Fluid Eng. U.K.
24. Ahmad, K., *A Numerical Study of Motion of a Single Particle in a Duct Flow*. Pneumotransport 5, paper B1, London, U.K. April 1980.
25. Murray, C. G., Willets, B. B., *Lift forces on spheres in air flow between Reynolds numbers 5000-80000*. Pneumotransport 4, paper B3, California, U.S.A., June 1978.

26. Jotaki, T., Tomita, Y., *Solids Velocities and Pressure Drops in a Horizontal Pneumatic Conveying System*. Pneumotransport 1, paper B3, Cambridge, England, Sept. 1971.
27. Scott, A. M., *The influence of particles properties on the pressure drop during the pneumatic transport of granular materials*. Pneumotransport 4, paper A3, California, U.S.A., June 1978.
28. Ottjes, J. A., Meeuse, G. C., Van Kuijk, G. J. L., *Particle velocity and pressure drop in Horizontal and Vertical pipes*. Pneumotransport 3, paper D9, Bath, England, April 1976.
29. Konrad, K., Harrison, D., Nedderman, R. M., Davidson, J. F., *Prediction of the pressure drop for horizontal dense phase pneumatic conveying of particles*. Pneumotransport 5, paper E1, London, England, April 1980.
30. Duckworth, R. A., Kakka, R. S., *The influence of particle size on the frictional pressure drop caused by the flow of Solid Gas Suspension in a pipe*. Pneumotransport 1, paper C3, Cambridge, England, Sept. 1971.
31. Shook, C. A., Haas, D. B., Husdand, W. H. W., Schriek, W., Smith, L., *Some experimental studies of the effect of particle and fluid properties upon the pressure drop for slurry flow*. Hydrotransport 2, paper D2, Coventry, England, Sept. 1972.
32. Pfeffer, R., Rossetti, S., *Experimental Determination of Pressure Drop and Flow Characteristics of Dilute Gas - Solids Suspensions*. NASA CR-1894, August 1971.
33. Knowlton, T. M., Hirsan, I., *The effect of system parameters on the operation of dense-phase vertical lift lines and J-valves*. Pneumotransport 5, paper E3, London, U.K., April 1980.
34. Zuilichem, D. J., Houben, P. J. M., Broekmeijer, E., Stolp, W., *Comparison of some friction calculation methods for coarse granular material*. Pneumotransport 5, paper D1, London, U.K., April 1980.
35. Richards, P. C., Wiersma, S., *Pressure drop in vertical conveying*. Pneumotransport 2, paper A1, Guilford, England, Sept. 1973.
36. Sandy, C. W., Daubert, T. E., Jones, J. H., *Vertical dense-phase gas-solids transport*. Chem. Eng. Prog. Symposium Series, 66, 105, pp. 133-142, 1970.
37. Park, Y., Zenz, F., *Pressure Loss in Horizontal to Vertical upflow Elbows*. Pneumotransport 5, paper D3, London, England, April 1980.
38. Mason, J. S., Smith, B. U., *Pressure drop and flow behaviour for the pneumatic transport of fine particles around 90 degree bends*. Pneumotransport 2, paper A2, Guilford, England, Sept. 1973.
39. Kovacs, L., *Calculation of pressure drop in horizontal and vertical bends inserted in pneumatic conveying pipes*. Pneumotrans. 1, paper C4, Cambridge, England, Sept. 1971.

40. Ghosh, D. P., Kalyanaraman, K., *Pressure drops due to solids around horizontal elbow bends during pneumatic conveyance*. J. Agric. Engng. Res., 15, 2, pp. 117-128, 1970.
41. Burkett, R. J., Chalmers-Dixons, P., Morris, P. J., Pyle, D. L. *On the flow of fluidized solids through orifices*. Chem. Engng. Sci., 26, 3, pp. 405-417, March 1971.
42. Harmens, A., *Flow of granular material through horizontal apertures*. Chem. Engng. Sci., 18, pp. 297-306, 1963.
43. Hoffmann, J. D., *An analysis of the effects of gas particle mixture on the performance of rocket nozzles*. Purdue University Jet Propulsion Centre Report TM-63-1, Jan. 1963.
44. Mills, D., Reed, A. R., *The effect of rotary valve air leakage on the performance of pneumatic conveying systems*. Pneumotrans. 5, paper D2, London, England, April, 1980.
45. Perkins, D. E., Wood, J. E., *Factors controlling rotary feeder efficiency*. Pneumotransport 4, paper E3, California, U.S.A., June 1978.
46. Onley, J. K., Firstbrook, J., *The practical application of pneumatic transport techniques to the raising of mineral from deep shafts*. Pneumotransport 4, paper F1, California, U.S.A., June 1978.
47. Powell, J. E., Ruby, K., *Pneumotransport applied to mine shaft sinking*. Pneumotransport 5, paper A2, London, England, April 1980.
48. Firstbrook, J., *Operation and development of the pneumatic pipeline coal transportation system*. Pneumotransport 5, paper A4, London, England, April 1980.
49. Marcus, R. D., Burgess, H., Fenderico, D. M., Fritella, A., Vogel, R., *The application of pneumatic conveying techniques to the mining industry*. Pneumotransport 5, paper H2, London, England, April 1980.
50. Sproson, J. C., Gray, W. A., Haynes, J., *Pneumatic transport of coal*. Pneumotransport 3, paper A6, Bath, England, April 1976.
51. Vogel, R., Marcus, R. D., *The design of a pneumatic discharge system for brittle materials in bulk cargo holds*. Pneumotrans. 5, paper A1, London, England, April 1980.
52. Stankovich, I., Woolever, K., *A method of air lift design*. Pneumotransport 4, paper F4, California, U.S.A., June 1978.
53. Firstbrook, J., *Operation and development of the pneumatic pipeline coal transportation system*. Pneumotransport 5, paper A4, London, England, April 1980.
54. Shapland, J. D., Carlsen, H., *Bulk cement reloading by pneulift*. Pneumotransport 2, paper F5, Guilford, England, Sept. 1973.

55. Wen-Ching Yang, Eckhardt, D. A., Skriba, M. C., *Dilute phase pneumatic transport of fine nuclear fuel powders*. Pneumotransport 5, paper F3, London, England, April 1980.
56. Richards, P. C., Cook, E. J. *Pneumatic conveying in HTGR nuclear fuel reprocessing*. Pneumotransport 4, paper F5, California, U.S.A., June 1978.
57. Molerus, O., *Fluid-Feststoff-Stromungen*. Springer-Verlag, Berlin, 1982.
58. Gutfinger, C., *Topics in Transport Phenomena*. Hemisphere Publ. Corp., London, 1975.
59. Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*. McGraw-Hill, New York, Sixth ed. 1968.
60. Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N., *Transport Phenomena*. John Willey and Sons, Inc., New York, 1960.
61. Παπανίκας, Δ. Γ., *Εφαρμοσμένη Ρευστομηχανική. Τόμοι I, II, Δεύτερη Έκδοση*, Αχαιός, Πάτρα, 1981.
62. Μάργαρης, Δ. Π., Παπανίκας, Δ. Γ., *Αριθμητική λύση των εξισώσεων στρωτής και τυρβώδους ροής σε αγωγούς*. Τεχνικά Χρονικά -B, Τόμος 2, Τεύχος 3-4, 1982.
63. Jain, A. C., Ghosh, A., *Gas-particulate Laminar Boundary Layer on a Flat plate*. Z. Flugwiss, Weltraumforsch, 3, Heft 1, 1979.
64. Abbot, M. R., *Axially symmetric steady motion of a viscous incompressible fluid: some numerical experiments*. Computer Journal 7, pp. 47-53, 1964.
65. Smith, G. D., *Numerical Solution of Partial Differential Equations*. Oxford University Press, 1975.
66. Hirschel, E. H., *Ein implizites Differenzenverfahren zur Berechnung hypersonischer Gleitstromungs-Grenzschichten*. DLR FB 71-97, 1971.
67. Blottner, F. G., *Finite Difference Methods of Solution of the Boundary Layer Equations*. AIAA Journal, Vol. 2, No 2, February 1970.
68. Paskonov, V. M., *A Standard Program for the Solution of Boundary Layer Problems, in Numerical Methods in Gas Dynamics*. Izdalel stvo Moskovskogo Universita.
69. Richtmyer, R. D., Morton, K. W., *Difference Methods for Initial Value Problems*. Interscience, New York, 1967.
70. Moulton, A., Spalding, D. B., Markatos, N. C. G., *The Solution of flow problems in Highly Irregular Domains by the Finite-Difference Method*. Trans. I. Chem. E., Vol. 57, pp. 200-204, 1979.
71. Markatos, N. C. G., Moulton, A., *The computation of Steady and Unsteady, Turbulent, Chemically Reacting Flows in Axi-Symmetrical Domains*. Trans. I. Chem. E., Vol. 57, pp. 156-162, 1979.

72. Crowe, C. T., Stock, D. E., *A computer solution for two dimensional fluid-particles flows*. Int. Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 10, pp. 185-196, 1976.
73. Spalding, D. B., *GENMIX- A General Computer Program for Two-Dimensional Parabolic Phenomena*. Pergamon Press, Oxford, 1977
74. Dussourd, J. L., Shapiro, A. H., *Jet propulsion* 28, 24, 1958.
75. Trolinger, J. D., *Laser Instrumentation for Flow Field Diagnostics*. AGARDograph No 186, March 1974.
76. Rudinger, G., *Flow of Solids Particles in Gases*. AGARDograph No 222, Oct. 1976.
77. Durst, F., *Studies of Particle Motion by Laser Doppler Techniques*. Proceedings of the Dynamic Flow Conference, 1978.
78. Birchenough, A., Mason, J. S., *Laser anemometry measurements in a gas-solid suspension flow*. Optics and Laser Technology, Dec. 1976.
79. Riethmuller, M. L., Ginoux, J. J., *The application of a Laser Doppler Velocimeter to the Velocity Measurements of Solid Particles Pneumatically Transported*. Pneumotransport 2, paper D3, Guilford, England, Sept. 1973.
80. Farmer, W. M., *Measurements of Particle size and concentration Using LDV Techniques*. Proc. Of the Dynamic Flow Conference, 1978.
81. Lee, S. L., Srinivasan, J., *Measurement of local size and velocity probability density distributions in two-phase suspension flows by Laser-Doppler Technique*. Int. Journal of Multiphase Flow, Vol. 4, pp. 141-155, Pergamon, 1978.
82. Muschelknautz, E., *Partikelaerodynamik, Preprints "Technik der Gas/Feststoff-Stromung-Sichten, Abscheiden, Fordern, Wirbelschichten"*. Koln, Dezember, 1986.
83. Μάργαρης, Δ. Π., Παπανίκας, Δ. Γ., *Επίδραση του Συντελεστή Αντίστασης των Σωματιδίων στο Οριακό Στρώμα Ροής Αέρα Σωματιδίων σε Επίπεδη Πλάκα*. EETEE, Τεχν. Χρον. Β, Τόμος 7, Τεύχος 4, 1987.
84. Margaritis, D. P., Papanikas, D. G., *Effect of Particle Drag Coefficient on the Boundary Layer of Particulate Gas Flow over a Flat Plate*. Z. Flugwissen. Weltraumforschung, Band 13, Heft 2, Marz-April 1989.
85. Μάργαρης, Δ. Π., *Ανάπτυξη Μαθηματικού Μοντέλου Διφασικής Ροής Αέρα-Σωματιδίων σε Κλειστούς Αγωγούς*. Εσωτερική Δημοσίευση 1988 - Πάτρα, Μάιος, 1988
86. Markatos, N. C. G., *Mathematical Model for Two Phase Flow of Gas and Solid Particles*. Προσωπική αλληλογραφία, 1988.
87. Yuu, S. And, Fukui, Y., *Measurement of Fluid Resistance Correction Factor for a Sphere Moving through a Viscous Fluid toward a Plane Surface*. AIChE Journal, Vol. 27, No. 1, pp. 168-170, January 1981.

88. Carmichael, G. R., *Estimation of the Drag Coefficient of Regularly Shaped Particles in Slow Flows from Morphological Descriptors*. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., Vol. 21, No. 3, 1982.
89. Durst, F., Milojevic, D., Schonung, B., *Eulerian and Lagrangian predictions of particulate two-phase flows: a numerical study*. Appl. Math. Modelling, Vol. 8, pp.101-115, April 1984.
90. Rizk, M. A. and Elghobasho, S. E., *A mathematical model for a turbulent gas-solid suspension flow in a vertical pipe*. Turb. Shear Flow, 5th Symposium, Cornell Ithaca, Aug. 7-9, 1985.
92. Hwang, C. J., Chang, G. C., *Numerical Study of Gas-Particle Flow in a Solid Rocket Nozzle*. AIAA Journal, Vol. 26, No. 6, pp. 682-689, June 1988.
93. Mostafa, A. A., Mongia, H. C., McDonell, V. G., Samuelsen, G. S., *Evolution of Particle-Laden Jet Flows: A Theoretical and Experimental Study*. AIAA Journal, Vol. 27, No. 2, pp. 167-183, February 1989.
94. Papanicolaou, G., *Advances in Multiphase Flow and Related Problems*. Siam, Philadelphia, 1986.

