

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ ΣΕ
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΟΥΣ ΜΟΡΦΗΣ: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ
ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ Sc .**

Χ.Π. Κουτσού, Σ.Γ. Γιάντσιος, Α.Γ. Καράμπελας

Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, 54006 Θεσσαλονίκη
Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών – ΕΚΕΤΑ
6ο χλμ Οδού Χαριλάου-Θέρμης, Τ.Θ. 361, 57001 Θέρμη-Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή συνοψίζεται μέρος των αποτελεσμάτων θεωρητικής και πειραματικής μελέτης των φαινομένων μεταφοράς μάζας που λαμβάνουν χώρα στα στοιχεία μεμβρανών σπειροειδούς μορφής, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σε διεργασίες αφαλάτωσης. Τα στοιχεία αυτά διαθέτουν ένα λεπτό πολυμερικό ένθετο/πλέγμα (spacer), το οποίο τοποθετείται μεταξύ των γειτονικών φύλλων των μεμβρανών και δημιουργεί το απαραίτητο διάκενο για την κυκλοφορία του νερού τροφοδοσίας. Τα πλέγματα αυτά, προάγουν την ανάπτυξη τυρβώδους και αυξάνουν τις διατμητικές τάσεις επάνω στην επιφάνεια της μεμβράνης, με αποτέλεσμα τη μείωση των ανεπιθύμητων φαινομένων της πόλωσης συγκέντρωσης και της ρύπανσης των μεμβρανών. Αποτέλεσμα της παραπάνω λειτουργίας των πλεγμάτων είναι η βελτίωση των συντελεστών μεταφοράς μάζας. Παράλληλα όμως, τα πλέγματα συντείνουν στην αύξηση της πτώσης πίεσης και στη δημιουργία ζωνών περιορισμένης ροής. Η παρούσα εργασία έχει σκοπό τη μελέτη της επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των πλεγμάτων στη μεταφορά μάζας των στοιχείων σπειροειδούς μορφής και τον προσδιορισμό των πλεγμάτων εκείνων που συνδέονται με αυξημένους αριθμούς Sherwood, με την όσο το δυνατόν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας λόγω της πτώση πίεσης. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιούνται τρισδιάστατες προσομοιώσεις της μεταφοράς μάζας που επιτυγχάνεται σε επίπεδα κανάλια με ένθετο πλέγμα. Επιπλέον, πραγματοποιούνται πειραματικές μετρήσεις του συντελεστή μεταφοράς μάζας στα κανάλια αυτά, σε ειδική πειραματική διάταξη.

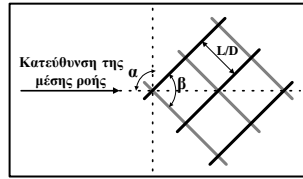
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει αναγνωριστεί ο σημαντικός ρόλος των πλεγμάτων στη λειτουργία των στοιχείων σπειροειδούς μορφής και έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές θεωρητικές και πειραματικές μελέτες με σκοπό την κατανόηση των χαρακτηριστικών της ροής και μεταφοράς μάζας, και τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας των πλεγμάτων. Οι Schock και Miquel [1] μελέτησαν πειραματικά διάφορα εμπορικά πλέγματα και πρότειναν συσχετισμούς για την πτώση πίεσης και τη μεταφορά μάζας. Όπως ήταν αναμενόμενο, η παρουσία των πλεγμάτων συντέλεσε σε αυξημένη μεταφορά μάζας συγκριτικά με το άδειο κανάλι, αλλά και σε αυξημένη πτώση πίεσης. Οι Li et al. [2] πραγματοποίησαν θεωρητικές μελέτες της ροής και της μεταφοράς μάζας, κάνοντας τρισδιάστατες προσομοιώσεις σε ρεαλιστικές γεωμετρίες των πλεγμάτων. Κατόπιν, τα αποτελέσματά τους αξιολογήθηκαν με βάση πειραματικές μετρήσεις [3,4]. Από τη μελέτη αυτή [2-4], προκύπτουν ορισμένα βέλτιστα γεωμετρικά χαρακτηριστικά πλέγματος, τα οποία και προτείνονται. Γενικά όμως η βιβλιογραφία είναι ανεπαρκής τόσο ως προς το μελετώμενο εύρος των γεωμετρικών παραμέτρων των πλεγμάτων όσο και ως προς τη λεπτομερή περιγραφή της ροής και τη μεταφορά μάζας. Ειδικά η επίδραση του αριθμού Sc στα φαινόμενα μεταφοράς μάζας του συγκεκριμένου συστήματος, δεν έχει μελετηθεί συστηματικά εκτός από την παρούσα μελέτη.

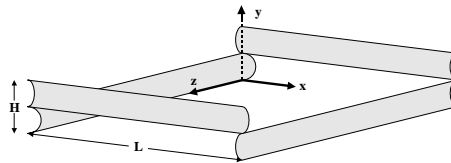
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Η γεωμετρία της μελετώμενης ροής (Σχήμα 1) είναι μία σχετικά ακριβής προσέγγιση των καναλιών που σχηματίζονται στα στοιχεία σπειροειδούς μορφής. Αποτελείται από ένα επίπεδο κανάλι, στο οποίο είναι τοποθετημένα δύο στρώματα κυλίνδρων που έχουν διαφορετική κατεύθυνση και τέμνονται υπό ορισμένη γωνία. Οι κύλινδροι κάθε στρώματος είναι

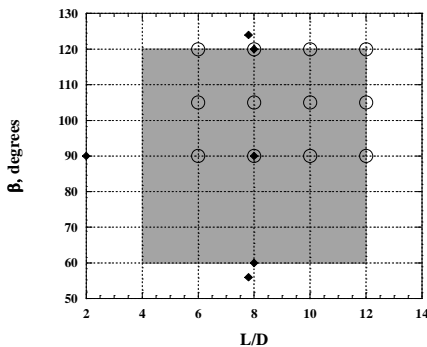
παράλληλοι μεταξύ τους, ισαπέχουν, και έχουν και την ίδια διάμετρο (D). Επιπλέον το ύψος του καναλιού (H) είναι διπλάσιο της διαμέτρου των κυλίνδρων (H=2D) (Σχήμα 2). Οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη γεωμετρία ενός πλέγματος είναι ο λόγος της απόστασης μεταξύ των κυλίνδρων προς τη διάμετρό τους (L/D), η γωνία τομής μεταξύ των κυλινδρικών ινών (β), και η γωνία διεύθυνσης του πλέγματος ως προς την κατεύθυνση της μέσης ροής (α). Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται μόνο η περίπτωση γωνίας α ίσης με 90^ο. Οι τιμές των άλλων δύο παραμέτρων (L/D και β) επιλέγονται από μία περιοχή τυπικών τιμών του Σχήματος 3. Σε όλες τις γεωμετρίες πλέγματος που εξετάζονται η γωνία β είναι μεγαλύτερη από 90^ο γιατί όπως αποδεικνύεται [3], η μεταφορά μάζας ελαττώνεται όταν το πλέγμα τείνει να γίνει παράλληλο με την κατεύθυνση της μέσης ροής.



Σχήμα 1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός πλέγματος.



Σχήμα 2. Η γεωμετρία των τρισδιάστατων προσομοιώσεων του πεδίου ροής.



Σχήμα 3. Περιοχή τυπικών τιμών των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται σε διεργασίες αντίστροφης ώσμωσης. Οι ρόμβοι αντιστοιχούν σε αποτελέσματα προηγούμενων μελετών για α=90^ο. Οι κύκλοι αντιστοιχούν στις γεωμετρίες πλέγματος που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Η προσομοίωση του πεδίου ροής και της μεταφοράς μάζας, γίνεται με απευθείας αριθμητική επίλυση (Direct Numerical Simulation - DNS) των εξισώσεων Navier – Stokes, της εξίσωσης συνεχείας καθώς επίσης και του ισοζυγίου της μάζας. Ο αριθμοί Reynolds και Schmidt ορίζονται ως εξής:

$$Re = DU_0 / \nu \quad (1)$$

$$Sh = \frac{\langle \bar{k} \rangle \cdot D}{\mathcal{D}} \quad (2)$$

Όπου:

D: η διάμετρος των κυλίνδρων
 U₀: η μέση ταχύτητα στο κανάλι.
 ν: το κινηματικό ιξώδες

$\langle \bar{k} \rangle$: η χωρο-χρονικά μέση τιμή του συντελεστή μεταφοράς μάζας.

\mathcal{D} : η διαχυτότητα

Οι οριακές συνθήκες που επιβάλλονται είναι: σταθερή συγκέντρωση στα τοιχώματα του καναλιού, μηδενική ταχύτητα στις στερεές επιφάνειες και περιοδικές συνθήκες για όλες τις

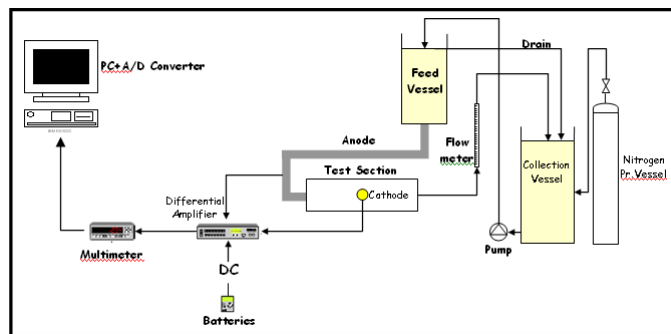
μεταβλητές ως προς το μήκος L. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με το πρόβλημα της περιοδικότητας στη μεταφορά μάζας, στις γεωμετρίες που εξετάζονται, παρέχονται αλλού [5].

Οι προσομοιώσεις που έγιναν καλύπτουν μία περιοχή αριθμών Reynolds μέχρι 200 που είναι τυπική της λειτουργίας των μεμβρανών και για τον οποίο έχουν πραγματοποιηθεί αναλυτικές προσομοιώσεις του διαμορφωμένου πεδίου ροής σε προηγούμενη μελέτη [6]. Οι αντίστοιχοι αριθμοί Schmidt λειτουργίας των στοιχείων σπειροειδούς μορφής είναι της τάξεως 10^3 . Στις παρούσες προσομοιώσεις, ο αριθμός Schmidt κυμαίνεται από 1 έως 100. Ο λόγος για το οποίο δεν πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε υψηλότερους αριθμούς Schmidt είναι γιατί τα οριακά στρώματα της μάζας γίνονται πολύ λεπτά με αποτέλεσμα να απαιτείται ένα αριθμητικό πλέγμα μεγάλης πυκνότητας το οποίο αυξάνει σημαντικά το υπολογιστικό φορτίο. Το τελευταίο ξεπερνά της υπολογιστικές δυνατότητες της παρούσας εργασίας. Για την επίλυση των εξισώσεων αξιοποιήθηκε ο εμπορικός κώδικας FLUENT 6.0

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Για τη μέτρηση των συντελεστών μεταφοράς μάζας αξιοποιήθηκε γνωστή ηλεκτροχημική τεχνική πόλωσης συγκέντρωσης που αναπτύχθηκε από τους Hanratty και συνεργάτες [7]. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, οι συντελεστές μεταφοράς μάζας μετριοούνται πάνω στην επιφάνεια ενός ηλεκτροδίου (κάθοδος) το οποίο τοποθετείται “πρόσωπο” σε ένα από τα δύο τοιχώματα του καναλιού. Η άνοδος είναι ένα αρκετά μεγαλύτερο ηλεκτρόδιο το οποίο τοποθετείται πριν από το κανάλι. Περισσότερες λεπτομέρειες για την αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης τεχνικής και για τον τρόπο εφαρμογής της παρέχονται αλλού [5]. Οι μετρήσεις των συντελεστών μεταφοράς μάζας έγιναν για αριθμούς Schmidt που κυμαίνονται από 1450 έως 5550.

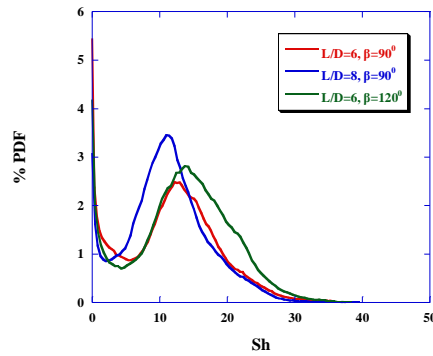
Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις φαίνεται στο Σχήμα 4. Το κανάλι αποτελείται από δύο πλάκες Plexiglas και διευκολύνει την ομαλή είσοδο και έξοδο της ροής καθώς και την πλήρη ανάπτυξή της. Το δοχείο της τροφοδοσίας τοποθετείται σε ύψος μεγαλύτερο του καναλιού, ώστε να εξασφαλίζεται η απαραίτητη υδροστατική πίεση για τη ροή. Το ρευστό, μετά την έξοδό του από το κανάλι, συλλέγεται σε ένα δεύτερο δοχείο από το οποίο, με τη βοήθεια μιας αντλίας στέλνεται ξανά στο δοχείο της τροφοδοσίας.



Σχήμα 4. Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης.

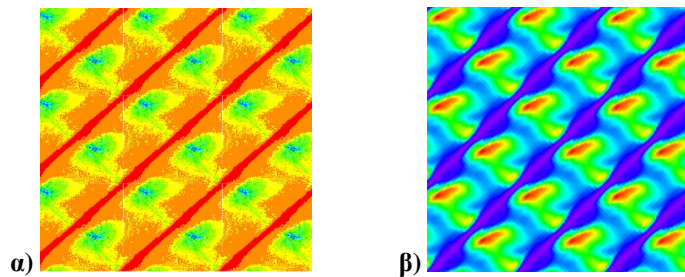
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων έδειξαν τη σημαντική επίδραση της γεωμετρίας του πλέγματος στις κατανομές του τοπικού αριθμού Sh. Όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 5, οι κατανομές αυτές τείνουν να μετατοπίζονται προς τις χαμηλότερες τιμές του αριθμού Sh καθώς αυξάνεται ο λόγος L/D και προς τις υψηλότερες τιμές με την αύξηση της γωνίας β.

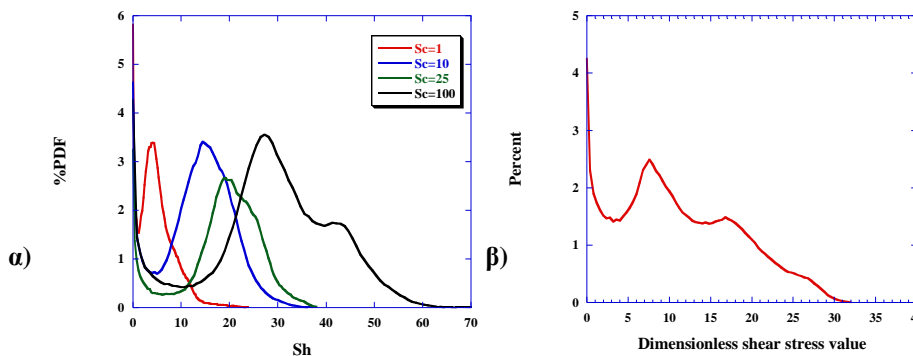


Σχήμα 5. Κατανομές πυκνότητας πιθανότητας των τοπικών χρονικά μέσων τιμών του αριθμού Sh, ενδεικτικά για τρεις γεωμετρικές πλέγματατος.

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται οι χωρικές κατανομές του αριθμού Sh συγκριτικά με τις αντίστοιχες κατανομές των διαμηθικών τάσεων στα τοιχώματα της μεμβράνης. Παρατηρείται ότι οι δύο αυτές κατανομές είναι όμοιες, με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές να εμφανίζονται στα ίδια σημεία. Η ομοιότητα αυτή επιβεβαιώνεται και από τις κατανομές της πυκνότητας πιθανότητας των τιμών του αριθμού Sh και των διαμηθικών τάσεων που φαίνονται στο Σχήμα 7. Παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός Sc, οι δύο αυτές κατανομές πλησιάζουν ακόμη περισσότερο μεταξύ τους. Το τελευταίο συμπέρασμα αποδίδεται στο γεγονός ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός Sc, τα οριακά στρώματα της μάζας τείνουν να γίνονται λεπτότερα και κατά συνέπεια η μεταφορά μάζας στην επιφάνεια της μεμβράνης, επηρεάζεται περισσότερο από τις συνθήκες ροής πολύ κοντά στην επιφάνεια της μεμβράνης παρά από το κύριο μέρος της (bulk flow).

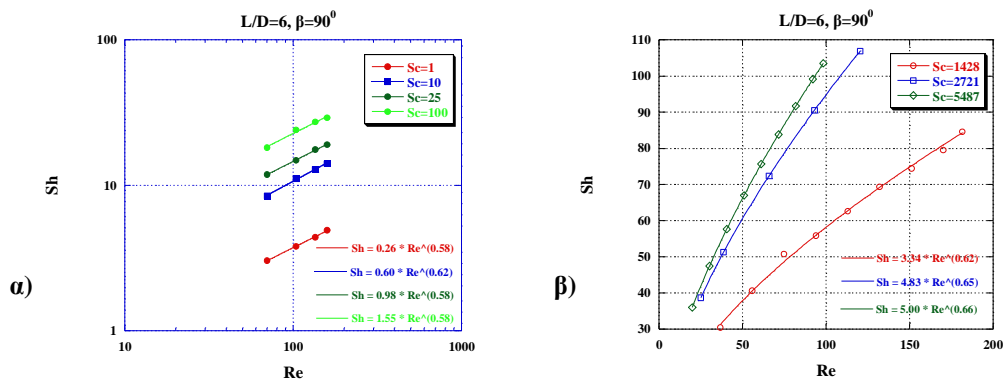


Σχήμα 6. Τοπικές κατανομές των χρονικά μέσων τιμών των α) αριθμών Sh και β) διαμηθικών τάσεων. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πλέγματος: $L/D=6$, $\beta=90^\circ$. $Re=159$ και $Sc=1$.

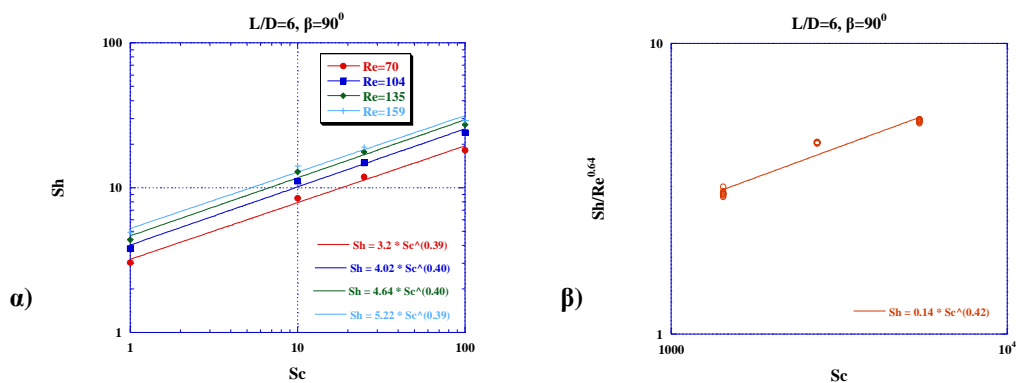


Σχήμα 7. Τοπικές κατανομές των χρονικά μέσων τιμών των α) αριθμών Sh για $Sc=1, 10, 25$ και 100 και β) αδιάστατων διαμηθικών τάσεων στην επιφάνεια της μεμβράνης για $Re=159$. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πλέγματος: $L/D=6$, $\beta=90^\circ$.

Στα Σχήματα 7 και 8, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (αριθμητικά και πειραματικά) της επίδρασης των αριθμών Re και Sc στον αριθμό Sh αντίστοιχα, ενδεικτικά για μία γεωμετρία πλέγματος. Παρατηρείται ότι ο εκθέτης εξάρτησης του αριθμού Sh από τον αριθμό Re παραμένει σχεδόν σταθερός για όλες τις τιμές αριθμού Sc που έγιναν οι μετρήσεις. Το ίδιο ισχύει και για τον εκθέτη εξάρτησης του αριθμού Sh από τον αριθμό Sc, δηλαδή παραμένει σχεδόν αμετάβλητος για όλες τις τιμές Re όπου έγιναν οι μετρήσεις. Το συμπέρασμα αυτό, το οποίο επιβεβαιώνεται για όλες τις γεωμετρίες πλέγματος που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη και που δεν παρουσιάζεται εδώ για οικονομία χώρου, επιτρέπει την ανάπτυξη συσχετισμών του αριθμού Sh με τους αριθμούς Re και Sc. Οι συσχετισμοί αυτοί, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 για όλες τις γεωμετρίες πλέγματος που εξετάστηκαν. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η παρούσα εργασία αποτελεί τη πρώτη συστηματική μελέτη της επίδρασης τόσο του αριθμού Re όσο και του αριθμού Sc στον αριθμό Sh, ενώ όλες οι προηγούμενες εργασίες περιορίζονται στην μελέτη της επίδρασης του αριθμού Re για ένα σταθερό αριθμό Sc [1-4]. Από τον Πίνακα 1, συνάγεται ότι για γεωμετρίες πλέγματος με γωνία $\beta=90^{\circ}$, ο εκθέτης εξάρτησης του αριθμού Sh από τον αριθμό Re είναι περίπου 0.6. Ο εκθέτης αυτός τείνει να αυξάνεται συστηματικά με την αύξηση της γωνίας β . Επιπλέον πρέπει να τονιστεί ότι ο εκθέτης εξάρτησης από τον αριθμό Sc είναι σχεδόν σταθερός για όλες τις γεωμετρίες πλέγματος που εξετάστηκαν και περίπου ίσος με 0.40.



Σχήμα 7. Αποτελέσματα εξάρτησης του αριθμού Sh από τον αριθμό Re που προκύπτουν από α) την αριθμητική προσομοίωση και β) τις πειραματικές μετρήσεις.

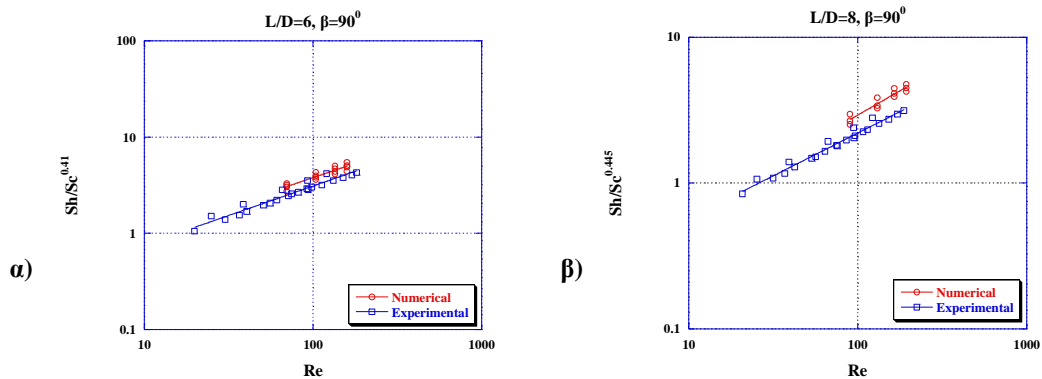


Σχήμα 8. Αποτελέσματα εξάρτησης του αριθμού Sh από τον αριθμό Sc που προκύπτουν από α) την αριθμητική προσομοίωση και β) τις πειραματικές μετρήσεις.

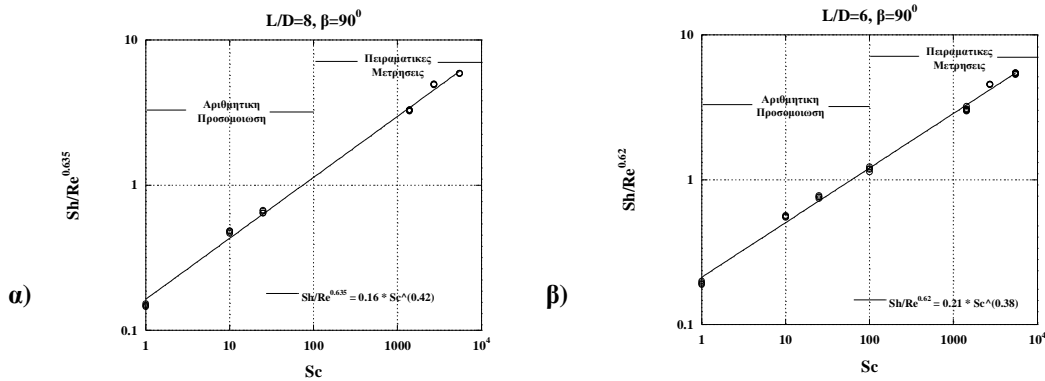
Πίνακας 1. Συσχετισμοί εξάρτησης του αριθμού Sh από τους αριθμούς Re και Sc, για όλες τις γεωμετρίες πλέγματος που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

	$\beta=90^0$	$\beta=105^0$	$\beta=120^0$
L/D=6	$Sh=0.14Re^{0.64}Sc^{0.42}$	$Sh=0.08Re^{0.715}Sc^{0.48}$	$Sh=0.073Re^{0.87}Sc^{0.45}$
L/D=8	$Sh=0.16Re^{0.605}Sc^{0.42}$	$Sh=0.17Re^{0.625}Sc^{0.42}$	$Sh=0.12Re^{0.71}Sc^{0.43}$
L/D=12	$Sh=0.26Re^{0.57}Sc^{0.37}$	$Sh=0.17Re^{0.64}Sc^{0.40}$	$Sh=0.19Re^{0.645}Sc^{0.38}$

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αναφορικά με τη σύγκριση των δεδομένων που προκύπτουν από τις αριθμητικές προσομοιώσεις και από τις μετρήσεις του συντελεστή μεταφοράς μάζας. Αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 9 με τη μορφή Sh/Sc^n προς Re, ενδεικτικά για ορισμένες γεωμετρίες πλέγματος. Από το Σχήμα 9 γίνεται φανερό ότι οι αριθμητικές προσομοιώσεις και οι μετρήσεις βρίσκονται σε καλή συμφωνία, με τις αποκλίσεις να κυμαίνονται από 10 έως 30%. Η συμφωνία αυτή είναι ικανοποιητική δεδομένου ότι οι προσομοιώσεις έγιναν για ένα εύρος αριθμών Sc από 10^0 to 10^2 ενώ οι μετρήσεις για ένα εύρος από 10^3 έως 10^4 . Προκειμένου να αξιολογηθούν περαιτέρω τα αποτελέσματα από τις αριθμητικές προσομοιώσεις και από τις μετρήσεις, τα δεδομένα και από τις δύο προσεγγίσεις σχεδιάζονται ξανά με τη μορφή Sh/Re^m ως προς Sc στο Σχήμα 10, καλύπτοντας με αυτόν τον τρόπο όλο το εύρος αριθμών Sc που μελετήθηκαν (από 10^0 έως 10^4). Η επιλογή αυτή δικαιολογείται εξαιτίας των πολύ μικρών διαφοροποιήσεων του έκθετη εξάρτησης από τον αριθμό Re (m) που προέκυψε και από τις δύο προσεγγίσεις. Συνεπώς επιλέχθηκε μια μέση τιμή του εκθέτη m. Η πολύ καλή συμφωνία που παρατηρείται στο Σχήμα 10 επιτρέπει την ασφαλή αξιοποίηση των συσχετισμών που προέκυψαν από την παρούσα εργασία, ακόμη και σε ενδιάμεσους αριθμούς Sc (π.χ. Sc~700) οι οποίοι επικρατούν στις διεργασίες επεξεργασίας θαλασσινού και υφάλμυρου νερού με τεχνολογία μεμβρανών.



Σχήμα 9. Σύγκριση μεταξύ των αριθμητικών προσομοιώσεων και των μετρήσεων της μεταφοράς μάζας στα στοιχεία μεμβρανών. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πλέγματος: α) L/D=6, $\beta=90^0$ και β) L/D=8, $\beta=90^0$.



Σχήμα 10. Σύγκριση των αριθμητικών προσομοιώσεων με τις μετρήσεις του μέσου αριθμού Sh στα στοιχεία μεμβρανών. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πλέγματος: α) $L/D=8$, $\beta=90^0$ και β) $L/D=6$, $\beta=120^0$.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης δείχνουν τη σημαντική επίδραση της γεωμετρίας του πλέγματος στη χωρική κατανομή του αριθμού Sh στο τοίχωμα, το οποίο αντιπροσωπεύει την επιφάνεια της μεμβράνης. Η κατανομή αυτή τείνει να μετατοπίζεται προς μικρότερες τιμές για αραιά πλέγματα και προς μεγαλύτερες όταν η γωνία “τομής” μεταξύ των ινών του πλέγματος αυξάνεται. Επιπλέον, οι χωρικές κατανομές των χρονικά μέσων Sh είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες των διατμητικών τάσεων, όπως αναμένεται. Για κάθε γεωμετρία πλέγματος προτείνονται συσχετισμοί του αριθμού Sh με τους αριθμούς Re και Sc, οι οποίοι δείχνουν ότι ο εκθέτης του αριθμού Sc είναι ~ 0.4 , για όλες τις μελετηθείσες γεωμετρίες. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν κατευθύνσεις για βελτιστοποίηση των γεωμετρικών παραμέτρων των πλεγμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. G. Shock and A. Miquel, “Mass transfer and pressure loss in spiral wound modules”, *Desalination*, **64**, 339-352, (1987).
- [2]. F. Li, W. Meindersma, A.B. de Haan, and T. Reith, “Optimization of commercial net spacers in spiral wound membrane modules”, *J. Membrane Sci.*, **208**, 289-302, (2002).
- [3]. F. Li, W. Meindersma, A.B. de Haan, and T. Reith, “Optimization of non-woven spacers by CFD and validation with experiments”, *Desalination*, **146**, 209-212, (2002).
- [4]. F. Li, W. Meindersma, A.B. de Haan, and T. Reith, “Experimental validation of CFD mass transfer simulations in flat channels with non-woven spacers”, *J. Membrane Sci.*, **232**, 19-30, (2004).
- [5]. Koutsou, C.P., Yiantsios, S.G., Karabelas, A.J., (2009). A numerical and experimental study of mass transfer in spacer-filled channels: Effects of spacer geometrical characteristics and Schmidt number. *J. Membrane Sci.*, **326**, 234.
- [6]. Koutsou, C.P., Yiantsios, S.G., Karabelas, A.J., (2007). Direct Numerical simulation of flow in spacer-filled channels: effect of spacer geometrical characteristics. *J. Membrane Sci.*, **291**, 53.
- [7]. Reiss, L.P. & Hanratty, T.J., 1962. Measurement of instantaneous rates of mass transfer to a small sink on a wall. *A.I.Ch.E. J.* **8**, 245-247.