

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΝΑΝΟΦΛΟΙΟΥ ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΣΥΣΤΑΔΩΝ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ**Ν. Π. Καραγιαννάκης,^{1,2} Ε. Δ. Σκούρας,^{1,3} και Β. Ν. Μπουργανός¹**¹ Ινστιτούτο Επιστημών Χημικής Μηχανικής (ΙΕΧΜΗ), Ίδρυμα Τεχνολογίας & Έρευνας (ΙΤΕ),
Πάτρα, Ελλάδα² Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Ρίο, Πάτρα, Ελλάδα³ ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, Τμήμα Μηχανολογίας, Πάτρα, Ελλάδα**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σε αυτή την εργασία μελετάται η επίδραση της δομής του νανοφλοιού και των συσσωματωμάτων νανοσωματιδίων στην αγωγιμότητα ενός νανορευστού. Για την μελέτη αυτή αναπτύσσεται μια τεχνική αποτύπωσης των συσσωματωμάτων και του νανοφλοιού. Επίσης αναπτύσσεται μια τεχνική υπολογισμού της ισοδύναμης αγωγιμότητας τριφασικών συστημάτων με βάση καινοτόμες απλεγματικές μεθόδους για την επίλυση του προβλήματος της αγωγής θερμότητας. Παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων για την ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα μεταβάλλοντας το κλάσμα όγκου των νανοσωματιδίων, την κλασματική διάσταση των νανοςυσσωματωμάτων καθώς και το μέγεθος και την αγωγιμότητα του νανοφλοιού. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με θεωρητικά μοντέλα για την πρόβλεψη της αγωγιμότητας των αιωρημάτων.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο όρος νανορευστά εισήχθη το 1995^[1] και ορίζει μια νέα κατηγορία ρευστών, τα οποία δημιουργούνται με τη διασπορά και την αιώρηση σωματιδίων μεγέθους μικρότερου των 100nm. Με τη χρήση αυτών των ρευστών αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα και άλλες ιδιότητές τους, βελτιώνοντας σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας σε διάφορες διεργασίες^[1,2,3]. Υπάρχουν σημαντικά ερωτήματα σχετικά με τον ακριβή μηχανισμό που ευθύνεται για τις θερμικές ιδιότητες των νανορευστών.

Ένα μεγάλο πλήθος μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί στηρίζεται στην υπόθεση ύπαρξης μιας νανοδομής γύρω από τα νανοσωματίδια^[3,4]. Τα μόρια του ρευστού που είναι κοντά στα νανοσωματίδια δύναται να σχηματίζουν ένα διατεταγμένο στρώμα, μια σχεδόν στέρα δομή, η οποία καλείται νανοφλοιός. Ο φλοιός αυτός να μπορεί να λειτουργεί σαν θερμική γέφυρα ανάμεσα σε ένα στερεό νανοσωματίδιο και στο υγρό μέσο, οδηγώντας σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του νανορευστού.

Παράλληλα, έρευνες έχουν δείξει ότι η μεταβλητότητα των δεδομένων της βιβλιογραφίας και οι ασυνήθιστα υψηλές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών που έχουν αναφερθεί μπορούν να εξηγηθούν ποσοτικά από την παρουσία συμπλεγμάτων ή συστάδων νανοσωματιδίων.^[2,5] Η συσσωμάτωση των νανοσωματιδίων οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας εξαιτίας του σχηματισμού ζώνης σωματιδίων που έχουν μικρότερη θερμική αντίσταση στην ροή θερμότητας σε σχέση με μια ζώνη από ελεύθερα σωματίδια. Από την άλλη, τα συσσωματώματα με μεγαλύτερη μάζα είναι δυνατόν να εμποδίσουν τη μεταφορά θερμότητας. Κατά συνέπεια είναι δυνατόν να δρουν είτε θετικά, είτε αρνητικά ως προς την θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΝΑΝΟΦΛΟΙΟΥ

Σε έρευνες που έχουν γίνει έως τώρα^[6], η μορφολογία των συσσωματωμάτων θεωρείται ότι έχει τα τυπικά χαρακτηριστικά συσσωμάτωσης σωματιδίου-σωματιδίου, σωματιδίου-συσσωματώματος και συσσωματώματος-συσσωματώματος. Για την περιγραφή της διαδικασίας συσσωμάτωσης των αιωρούμενων νανοσωματιδίων και τη μορφολογία του νανορευστού

χρησιμοποιείται κατά κόρον το μοντέλο DLA (Diffusion-limited Aggregation).

Το μοντέλο αυτό περιγράφει τα κατάλληλα φαινόμενα για το σχηματισμό μορφοκλασματικών δομών. Ως μέτρο για την μορφολογία των συσσωματωμάτων χρησιμοποιείται η κλασματική διάσταση, D_f ^[6,7], η οποία πρακτικά είναι ένα μέτρο που δηλώνει πόσο απλωμένο είναι το συσσωμάτωμα στο χώρο. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της, τόσο πιο πυκνό είναι το συσσωμάτωμα. Η κλασματική διάσταση συσχετίζει τον αριθμό των σωματιδίων στο συσσωμάτωμα, N_p , με τη γυροσκοπική του ακτίνα, R_g ,

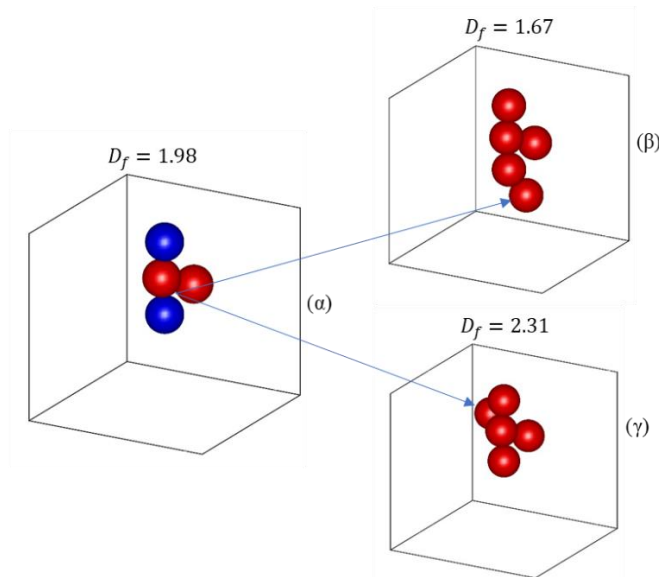
$$N_p \sim (R_g/r_p)^{D_f} \quad (1)$$

όπου r_p η ακτίνα των σωματιδίων. Τα συσσωματώματα σωματιδίων προκύπτουν από ένα πλήθος δυνάμεων. Ο ακριβής μηχανισμός δεν είναι γνωστός, όπως άγνωστη είναι επίσης η επίδραση των διάφορων πρόσθετων επιφανειοδραστικών στην συσσωμάτωση. Επίσης δεν είναι ξεκάθαρη η επίδραση της θερμοκρασίας στην μορφολογία των συσσωματωμάτων. Έχοντας ως στόχο να μελετήσουμε την επίδραση της συσσωμάτωσης και της μορφολογίας των συσσωματωμάτων στην θερμική αγωγιμότητα των νανορευστών, αναπτύξαμε μια τεχνική όπου η κλασματική διάσταση προκαθορίζεται και κατευθύνει τη δημιουργία των συσσωματωμάτων, καθώς η προσθήκη των σωματιδίων γίνεται με κατάλληλο τρόπο ώστε να ικανοποιείται η κλασματική διάσταση. Αναλυτικότερα, αρχικά καθορίζεται η επιθυμητή κλασματική διάσταση, ή ένα εύρος τιμών για αυτήν. Στη συνέχεια καθορίζονται επιτρεπόμενες τιμές που αφορούν τον αριθμό των σωματιδίων ανά συσσωμάτωμα και, εν τέλει, ορίζεται το κλάσμα όγκου των νανοσωματιδίων και ο αριθμός των συσσωματωμάτων.

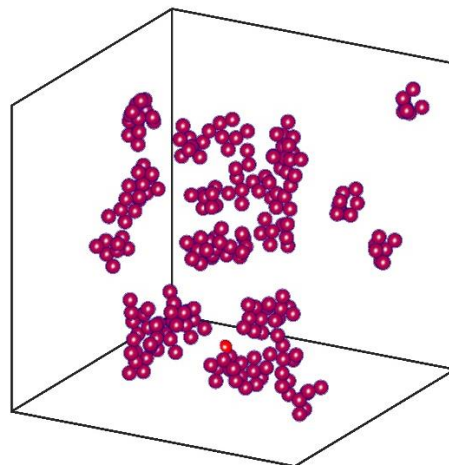
Η διαδικασία αρχίζει με τυχαία εναπόθεση ενός σωματιδίου-πυρήνα στο χώρο. Στη συνέχεια επιλέγονται στοχαστικά δύο γωνίες κατεύθυνσης ($\theta \in [0, 2\pi]$, $\varphi \in [0, \pi]$), οι οποίες καθορίζουν το σημείο της επιφάνειας του αρχικού σωματιδίου σε τοπικό σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων όπου θα τοποθετηθεί το δεύτερο σε επαφή σωματίδιο. Κάθε επόμενο σωματίδιο γεννάται στην επιφάνεια ενός σωματιδίου του συσσωματώματος, με περιορισμό να μην υπάρχει αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των σωματιδίων. Μετά την προσθήκη και του τρίτου σωματιδίου υπολογίζεται η γυροσκοπική ακτίνα του συσσωματώματος και η κλασματική του διάσταση. Τα σωματίδια που απαρτίζουν το συσσωμάτωμα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Σε αυτά που το κέντρο τους είναι εντός της γυροσκοπικής ακτίνας και σε αυτά που βρίσκονται εκτός, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1α (μπλε τα σωματίδια που βρίσκονται εκτός της γυροσκοπικής ακτίνας, κόκκινα αυτά που βρίσκονται εντός). Ανάλογα με το αν η επιθυμητή κλασματική διάσταση είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της υπολογιζόμενης, το επόμενο σωματίδιο θα εμφανιστεί στην επιφάνεια ενός τυχαία επιλεγμένου σωματιδίου της αντίστοιχης κατηγορίας. Στο Σχήμα 1β δείχνεται προσθήκη νέου σωματιδίου που μειώνει την κλασματική διάσταση, ενώ στο Σχήμα 1γ γίνεται προσθήκη νέου σωματιδίου όπου αυξάνεται η κλασματική διάσταση. Μετά τον υπολογισμό της κλασματικής διάστασης ελέγχεται εάν αυτή δεν μεταβλήθηκε κατά τον επιθυμητό τρόπο, οπότε το προστιθέμενο σωματίδιο διαγράφεται και ένα καινούριο γεννάται με τον ίδιο τρόπο, ενώ στην αντίθετη περίπτωση παραμένει. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το συσσωμάτωμα να αποκτήσει το επιθυμητό πλήθος των σωματιδίων. Τότε, το επόμενο σωματίδιο εναποτίθεται σε άλλο τυχαίο σημείο του χώρου, το οποίο δρα ως πυρήνας για νέο συσσωμάτωμα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Η μέθοδος που αναπτύχθηκε μπορεί να σταθεροποιεί την κλασματική διάσταση ακόμα και σε πολύ μικρό αριθμό σωματιδίων.

Για την μοντελοποίηση του νανοφλοίου η διαδικασία είναι πιο απλή. Θεωρώντας σταθερή την ακτίνα των νανοσωματιδίων, r_p , ορίζουμε ένα πάχος, δ , το οποίο εκφράζεται ως ένα επιπρόσθετο ποσοστό επί της ακτίνας των σωματιδίων και είναι το πάχος του νανοστρώματος, το οποίο θεωρείται ότι έχει διαφορετικές θερμικές ιδιότητες από το κυρίως ρευστό. Τα σωματίδια τοποθετούνται τυχαία στον χώρο, με την μέθοδο Monte Carlo^[8]. Για πλήρως διεσπαρμένα

νανοσωματίδια, ο μόνος περιορισμός που επιβάλλεται είναι να μην υπάρχει αλληλοεπικάλυψη των σωματιδίων. Αντίστοιχα, για την αποτύπωση του νανοφλοιού σε συμπλέγματα νανοσωματιδίων χρησιμοποιούμε την παραπάνω τεχνική για την αποτύπωση των συσσωματωμάτων και, εν συνεχεία, ορίζουμε το πάχος του νανοφλοιού, ο οποίος ελέγχεται για την αποφυγή τυχόν επικάλυψης με μέρη γειτονικών σωματιδίων. Στο Σχήμα 2 φαίνεται ένα τέτοιο σύστημα συστάδων νανοσωματιδίων με κλάσμα όγκου $\varphi = 0.01$ και πάχος νανοστρώματος 15% της ακτίνας των σωματιδίων



Σχήμα 1. (α) Η κατηγοριοποίηση των σωματιδίων σε εσωτερικά (κόκκινα) και εξωτερικά (μπλε), (β), (γ) το προκύπτον συσσωμάτωμα ανάλογα με την επιθυμητή κλασματική διάσταση



Σχήμα 2. Σύστημα 30 συσσωματωμάτων νανοσωματιδίων αποτελούμενα από 5 έως 10 νανοσωματίδια με κλασματική διάσταση που κυμαίνεται από 1.9 έως 2.5, με κλάσμα όγκου 0.01 και πάχος νανοστρώματος 15% της ακτίνας των σωματιδίων.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Η μετάδοση θερμότητας προκαλείται από διαφορά θερμοκρασίας που επιβάλλεται στα τοιχώματα σε μια διεύθυνση, συνήθως σε έναν κύριο άξονα (εδώ, τον κατακόρυφο). Στα υπόλοιπα σύνορα των μέσων επιβάλλονται περιοδικές συνθήκες. Η αριθμητική επίλυση της εξίσωσης της ενέργειας πραγματοποιείται με την απλεγματική μέθοδο Meshless Local Petrov-Galerkin (MLPG)^[9,10]. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην έκφραση των μερικών διαφορικών εξισώσεων στην τοπική ασθενή

τους μορφή, δηλαδή στην ολοκλήρωσή τους μέσα σε τοπικούς τομείς. Η προσέγγιση των μεταβλητών πραγματοποιείται με συναρτήσεις βάσης, οι οποίες προκύπτουν από τη μέθοδο παρεμβολής Κυλιόμενων Ελαχίστων Τετραγώνων (MLS)^[9]. Όλα τα ολοκληρώματα υπολογίζονται σε κυβικούς τομείς γύρω από κάθε κόμβο, καθώς έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει τη σταθερότητα της μεθόδου^[10]. Η σταθμισμένη ολοκληρωτική μορφή της εξίσωσης της θερμότητας στο χωρίο Ω_x γύρω από τον κόμβο x δίδεται από τη σχέση

$$\int_{\Omega_x} \tilde{\nabla}(\tilde{k}\tilde{\nabla}\tilde{T})v d\Omega = 0, \quad (2)$$

όπου v η συνάρτηση βάρους της ολοκλήρωσης (εδώ, συνάρτηση βήματος) και $\tilde{k} = \tilde{k}(x)$ η θερμική αγωγιμότητα. Ορίζουμε δύο συναρτήσεις Φ_p, Φ_l τύπου βήματος, που ορίζονται στην περιοχή των σωματιδίων (μονάδα εκεί, μηδέν αλλού) και στην περιοχή του νανοφλοιού, αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας το θεώρημα της απόκλισης, παίρνουμε την τελική ασθενή μορφή της εξίσωσης της ενέργειας

$$\int_{\partial\Omega_x} (k_{rp} - 1) \Phi_p \nabla T_{\tilde{n}} d(\partial\Omega_x) + \int_{\partial\Omega_x} (k_{rl} - 1) \Phi_l \nabla T_{\tilde{n}} d(\partial\Omega_x) + \int_{\partial\Omega_x} \nabla T_{\tilde{n}} d(\partial\Omega_x) = 0 \quad (3)$$

όπου $k_{rp} = \frac{k_p}{k_f}$, ο λόγος της θερμικής αγωγιμότητας των σωματιδίων προς αυτή του κυρίως ρευστού και $k_{rl} = \frac{k_l}{k_f}$ ο λόγος της θερμικής αγωγιμότητας του νανοφλοιού προς αυτή του κυρίως ρευστού. Επιλύοντας την παραπάνω εξίσωση έχουμε την θερμοκρασιακή κατανομή σε όλο το χώρο. Δύναται έτσι να υπολογισθεί η αδιάστατη ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα του χωρίου από το παρακάτω ολοκλήρωμα

$$k_{eff} = \overline{\int_S k \frac{\partial T}{\partial z} dS}. \quad (4)$$

Οι επιφάνειες S , στις οποίες γίνονται οι υπολογισμοί, είναι κάθετες στη ροή της θερμότητας. Για τον καθορισμό της αγωγιμότητας λαμβάνονται τουλάχιστον 10 τέτοιες επιφάνειες και ο μέσος όρος τους καθορίζει την ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα.

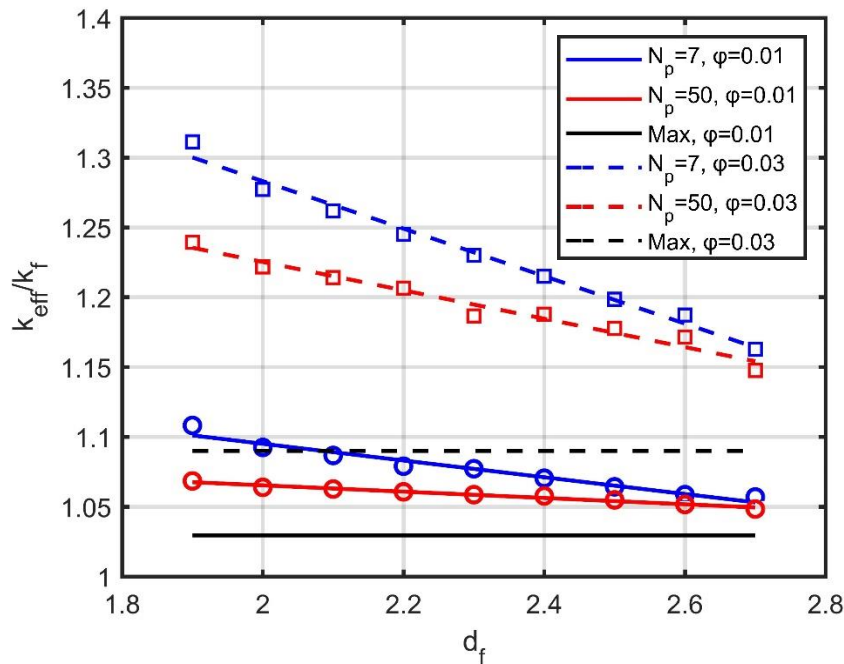
Αναφορικά με της αγωγιμότητα του νανοφλοιού, πληθώρα προσεγγίσεων έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Μεταξύ αυτών είναι ο αριθμητικός μέσος της αγωγιμότητας του ρευστού βάσης και του νανοσωματιδίου, ο γεωμετρικός μέσος, αλλά και διαφόρων τύπων συνεχείς συναρτήσεις^[11].

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

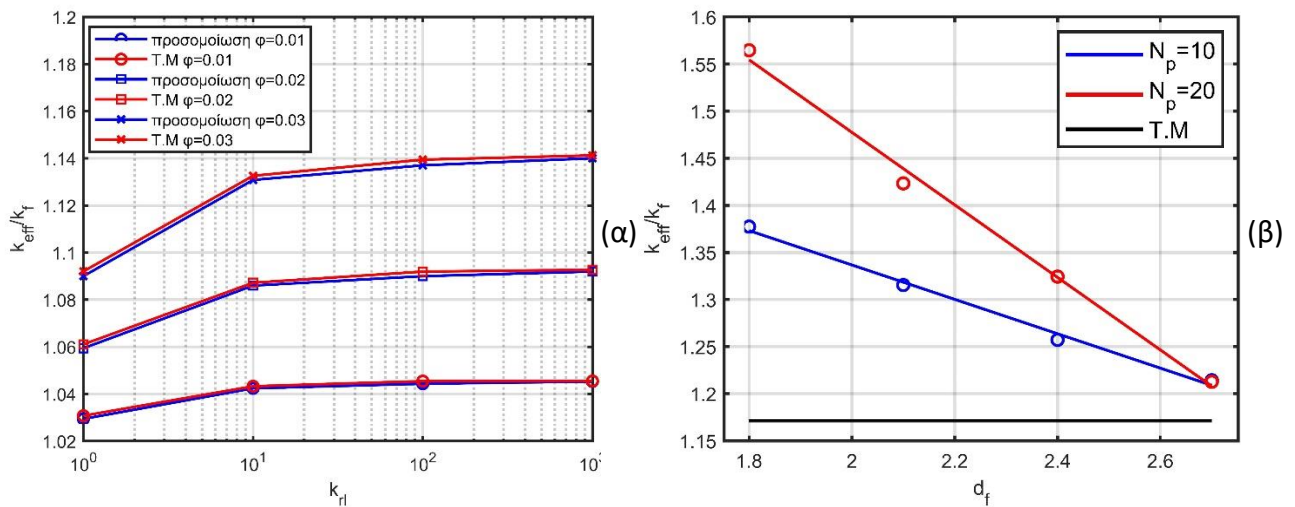
Σε όλες τις παρακάτω προσομοιώσεις η αγωγιμότητα των νανοσωματιδίων επιλέχθηκε να είναι 130 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του ρευστού βάσης ($k_{rp} = 130$), όπως σε χαρακτηριστικά νανορευσα αποτελούμενα από νερό-Fe, νερό-CuO και μηχανέλαιο-Al₂O₃. Τα σημεία των προσομοιώσεων προκύπτουν από τον μέσο όρο δέκα προσομοιώσεων με τα ίδια χαρακτηριστικά (κλάσμα όγκου φ , αριθμός σωματιδίων ανά συσσωμάτωμα N_p , κλασματική διάσταση d_f , πάχος νανοφλοιού δ).

Στο Σχήμα 3 φαίνεται η αδιάστατη ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα ως συνάρτηση της κλασματικής διάστασης για δύο κλάσματα όγκου των σωματιδίων και για δύο διαφορετικούς αριθμούς νανοσωματιδίων ανά συσσωμάτωμα, απουσία νανοφλοιού. Στο σχήμα παρουσιάζεται επίσης η πρόβλεψη της αγωγιμότητας από το μοντέλο του Maxwell^[4] (Max). Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η αγωγιμότητα επηρεάζεται σημαντικά από όλες τις παραμέτρους. Πιο συγκεκριμένα, η ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα φαίνεται να ελαττώνεται γραμμικά με την

κλασματική διάσταση, με την κλίση της να επηρεάζεται τόσο από το κλάσμα όγκου των σωματιδίων, όσο και από τον αριθμό των σωματιδίων που απαρτίζουν το συσσωμάτωμα.



Σχήμα 3. Η ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα ως συνάρτηση της κλασματικής διάστασης. Συνεχείς γραμμές: $\phi=0.01$ Διακεκομμένες: $\phi=0.03$. Μπλε γραμμές: 7 σωματίδια ανά συσσωμάτωμα. Κόκκινες γραμμές: 50 σωματίδια ανά συσσωμάτωμα. Μαύρες γραμμές: μοντέλο του Maxwell.



Σχήμα 4. (α) Η ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα ως συνάρτηση της αγωγιμότητας του νανοφλοιού σε πλήρως διεσπαρμένα σωματίδια για δύο κλάσματα όγκου. Μπλε γραμμές: αποτελέσματα προσομοιώσεων. Κόκκινες γραμμές: το τροποποιημένο μοντέλο του Maxwell, (β) Η ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα ως συνάρτηση της κλασματικής για συσσωμάτωμα σωματιδίων. Μπλε γραμμή: 10 σωματίδια ανά συσσωμάτωμα. Κόκκινη γραμμή: 20 σωματίδια ανά συσσωμάτωμα. Μαύρη γραμμή: το τροποποιημένο μοντέλο του Maxwell.

Στο Σχήμα 4(α) παρουσιάζεται η αγωγιμότητα πλήρως διεσπαρμένων σωματιδίων με την ύπαρξη νανοφλοιού γύρω από αυτά. Η πάχος του νανοφλοιού είναι το 15% της ακτίνας των σωματιδίων^[12] και το κλάσμα όγκου κυμαίνεται από $\phi = 0.01$ έως $\phi = 0.03$. Στον οριζόντιο άξονα είναι ο λόγος της αγωγιμότητας του νανοφλοιού προς αυτήν του ρευστού βάσης. Στο σχήμα παρουσιάζεται και

ένα τροποποιημένο μοντέλο του Maxwell (T.M) για τον υπολογισμό της ισοδύναμης αγωγιμότητας νανορευστών που λαμβάνει υπόψιν του την ύπαρξη νανοφλοιού.^[4] Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η ισοδύναμη αγωγιμότητα του νανορευστού αυξάνεται δραστικά με μια μικρή αύξηση της αγωγιμότητας του νανοφλοιού ($k_{r_l} < 10$) και στην συνέχεια σταθεροποιείται για όλα τα κλάσματα όγκου των νανοσωματιδίων. Επίσης, οι προσομοιώσεις είναι σε πολύ καλή συμφωνία με το αναλυτικό μοντέλο. Στο Σχήμα 4(β) η αγωγιμότητα του νανοφλοιού λαμβάνεται ίση με τον γεωμετρικό μέσο της αγωγιμότητας των σωματιδίων και του ρευστού βάσης, τα νανοσωματίδια οργανώνονται σε συσσωματώματα και το κλάσμα όγκου τους είναι $\varphi = 0.03$. Ο νανοφλοιός λαμβάνεται ίσος με το 20% της ακτίνας των σωματιδίων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την ισοδύναμη αγωγιμότητα για συσσωματώματα που αποτελούνται από 10 και 20 σωματίδια ως συνάρτηση της κλασματικής διάστασης. Το τροποποιημένο μοντέλο του Maxwell φαίνεται να έχει μεγάλη απόκλιση από τις προσομοιώσεις, καθώς δεν λαμβάνει υπόψιν του την επίδραση της συσσωμάτωσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά σε αυτήν την εργασία αναπτύχθηκε μια μέθοδος ανακατασκευής νανοσυστάδων, η οποία επιτρέπει την αναπαραγωγή της επιθυμητής κλασματικής διάστασης, και μια μέθοδος αποτύπωσης του νανοφλοιού. Αναπτύχθηκε μια μέθοδος υπολογισμού της ισοδύναμης αγωγιμότητας τέτοιων συστημάτων και συγκρίθηκε με αναλυτικά μοντέλα από την βιβλιογραφία. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα επηρεάζεται σημαντικά από την κλασματική διάσταση, αλλά και από τον αριθμό των σωματιδίων που απαρτίζουν τα συσσωματώματα. Το τροποποιημένο μοντέλο του Maxwell προβλέπει με επιτυχία την αγωγιμότητα για πλήρως διεσπαρμένα σωματίδια, αλλά αποτυγχάνει στην περίπτωση όπου τα σωματίδια οργανώνονται σε συσσωματώματα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια των υποτροφιών διδασκόντων του Ελληνικού Ιδρύματος Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) 2017 (κωδικός έργου: Ν. Καραγιαννάκης 80264). Οι συγγραφείς εκφράζουν θερμές ευχαριστίες προς το Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Ινστιτούτο Επιστημών Χημικής Μηχανικής (ΙΤΕ/ΙΕΧΜΗ).



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] S. Choi, *Int. Mech. Eng. Congr. & Expos.* (1995).
- [2] S. Lotfizadeh, T. Matsoukas, *J. Nanopart. Res.* (2015) 17:262.
- [3] P. Keblinski, S.R.P., S.U.S. Choi, J.A. Eastman, *Int. J. Heat Mass Transfer* 45 (2002) 855-863.
- [4] W. Yu, S.U.S. Choi, *J. of Nanoparticle Research* 5 (2003) 167-171
- [5] D. Wen, G.L., S. Vafaei, K. Zhang, (2009). *Particuology*. 7: p. 141-150.
- [6] Xuan Y., Li Q., and Hu W. *AIChE* 49 (2003) 1038-1043
- [7] C. Xiong and S. K. Friedlander *AS* October 9 98(21) (2001) 11851-11856
- [8] N. Bali, A.J. Petsi, E.D. Skouras, V.N. Burganos. *J. of Membrane Science* (2017) (524).
- [9] G. C. Bourantas, E. D. Skouras, V. C. Loukopoulos, and G. C. Nikiforidis, *Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow* (2013) 230:248
- [10] N.P. Karagiannakis, G.C. Bourantas, A.N. Kalarakis, E.D. Skouras, V.N. Burganos. *Appl. Math. Comp.* (2016) 272:676.
- [11] Ali Khodayari, Matteo Fasano, Masoud Bozorg Bigdeli, Shahin Mohammadnejad, Eliodoro Chiavazzo, Pietro Asinari, *Case Studies in Thermal Engineering* 12 (2018) 54-461
- [12] Mehrabi, M. Thesis (PhD)-University of Pretoria (2015)