

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΜΣ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗ ΘΕΡΜΟΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

*Ασυμπτωτική ανάλυση της μαγνητοϋδροδυναμικής  
φυσικής συναγωγής πράσινου νανορευστού σε πο-  
ρώδη ορθογώνια κοιλότητα*

Θεοδοσίου Νικόλαος, msrtf21X04

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Ιωάννης Σαρρής

Αιγάλω 1/06/2024

**Επιτροπή αξιολόγησης και βαθμολόγησης διπλωματικής**

<b>α/α</b>	<b>ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΑΔΑ / ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
<b>1</b>	<b>Κωσταντίνος Μου- στρής</b>	<b>Καθηγητής</b>	
<b>2</b>	<b>Κωσταντίνος – Ιωάννης Βασιλόπουλος</b>	<b>Μεταδιδακτορικός Ερευ- νητής</b>	
<b>3</b>	<b>Ιωάννης Σαρρής</b>	<b>Καθηγητής</b>	

## Δήλωση συγγραφέα μεταπτυχιακής εργασίας

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Νικόλαος Θεοδοσίου του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου msrtf21x04 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗ ΘΕΡΜΟΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ» του Τμήματος ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Ο Δηλών,



ΘΕΟΔΟΣΙΟΥ  
ΝΙΚΟΛΑΟΣ

## Ευχαριστίες

---

Με την ολοκλήρωση αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου εκτίμηση σε όσους η συμβολή τους ήταν απαραίτητη για την επίτευξη των στόχων μου. Είμαι βαθύτατα ευγνώμων σε όλα τα αξιόλογα μέλη που απαρτίζουν την συμβουλευτική επιτροπή. Ιδιαίτερα, επιθυμώ να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ιωάννη Σαρρή, η καθοδήγηση και η συνεργασία του οποίου συνέβαλαν καθοριστικά στην επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Επιπροσθέτως, δε θα ήθελα να παραλείψω από τις ευχαριστίες μου τον μεταδιδάκτορα του Εθνικού Κέντρου Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ) Ελευθέριο Μπένο, ο οποίος με βοήθησε στην κατανόηση του συγκεκριμένου προβλήματος της φυσικής συναγωγής καθώς και της σημαντικότητας των πράσινων νανορευστών.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στην οικογένειά μου για τη σταθερή υποστήριξη και ενθάρρυνση κατά τη διάρκεια αυτού του μεταπτυχιακού προγράμματος. Η αγάπη και η υποστήριξή σας ήταν το μεγαλύτερο μου κίνητρο.

Σε έναν κόσμο που βρίσκεται αντιμέτωπος με τις κλιμακούμενες ενεργειακές απαιτήσεις και τις επακόλουθες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η επιτακτική ανάγκη για την εξεύρεση βιώσιμων λύσεων δεν ήταν ποτέ πιο επιτακτική. Προς την κατεύθυνση αύξησης της απόδοσης των θερμικών συστημάτων έχουν διερευνηθεί πρόσφατα τα νανορευστά. Η προσέγγιση αυτή περιλαμβάνει την διασπορά στερεών σωματιδίων σε συμβατικά υγρά για την εκμετάλλευση των θερμικών ιδιοτήτων των προκύπτοντων μειγμάτων. Όμως, τα νανορευστά παρόλο τις αξιοσημείωτες δυνατότητες θερμικής ενίσχυσης, έχουν δημιουργήσει στην επιστημονική κοινότητα σημαντικές ανησυχίες για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Ο αναπτυσσόμενος τομέας των πράσινων νανορευστών, ωστόσο, προσφέρει μια συναρπαστική εναλλακτική λύση, αξιοποιώντας τις εγγενείς ιδιότητες των φυσικών εκχυλισμάτων για την παροχή οικονομικά αποδοτικών και φιλικών προς το περιβάλλον λύσεων.

Έτσι, η επιλογή μιας ελκυστικής λύσης με ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις με ώθησε να αναλάβω αυτή τη μελέτη. Ως εκ τούτου, απόλαυσα ολόψυχα την πρόκληση να ερευνήσω ένα επίμαχο θέμα που θα επηρεάσει σημαντικά ολόκληρο τον κόσμο τις επόμενες δεκαετίες.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	4
Λίστα Εικόνων .....	8
Λίστα Πινάκων.....	11
Περίληψη .....	12
Περίληψη (στα αγγλικά).....	15
Περίγραμμα της μεταπτυχιακής εργασίας .....	17
Συμβολή και καινοτομία της παρούσας εργασίας.....	18
1  Επισκόπηση των νανορευστών και των εφαρμογών τους .....	19
1.1  Σύντομη ιστορική ανασκόπηση .....	20
1.2  Εφαρμογές χρήσης νανορευστών.....	21
1.3  Πλεονεκτήματα νανορευστών .....	23
1.4  Μειονεκτήματα νανορευστών.....	24
2  Επισκόπηση των πράσινων νανορευστών .....	25
2.1  Πεδία εφαρμογής των πράσινων νανορευστών .....	27
2.1.1  Εναλλάκτες θερμότητας .....	27
2.1.2  Λίπανση στις μηχανουργικές κατεργασίες.....	29
2.1.3  Ηλιακοί συλλέκτες .....	31
2.1.4  Χορήγηση φαρμάκων.....	32
2.1.5  Βιοκτόνοι παράγοντες .....	33
2.1.6  Απομάκρυνση ρύπων .....	33
2.2  Τα οφέλη από την πράσινη σύνθεση έναντι των άλλων φυσικών και χημικών μεθόδων 34	
2.3  Τα είδη των πράσινων νανοσωματιδίων .....	38
2.4  Παράγοντες που επηρεάζουν την πράσινη σύνθεση των νανοσωματιδίων .....	41

2.4.1	Μέθοδοι προετοιμασίας.....	41
2.4.2	Τεχνικές υποβοήθησης .....	43
2.4.3	Η μορφολογία των νανοσωματιδίων .....	43
2.4.4	Η Θερμοκρασία.....	44
2.4.5	Το pH.....	45
2.4.6	Ο Χρόνος αντίδρασης.....	45
3	Μαθηματική διατύπωση του εξεταζόμενου προβλήματος .....	46
3.1	Φυσική συναγωγή .....	47
3.2	Εισάγοντας μαγνητοϋδροδυναμικά φαινόμενα.....	47
3.2.1	Βασικά στοιχεία μαγνητοϋδροδυναμικής (MHD) .....	47
3.2.2	Μαγνητοϋδροδυναμική φυσική συναγωγή .....	49
3.3	Γεωμετρία και οριακές συνθήκες.....	49
3.4	Ανοιγμένες ιδιότητες του πράσινου νανορευστού .....	51
3.5	Σύντομη περιγραφή των πειραματικών αποτελεσμάτων παρασκευής του πράσινου νανορευστού και μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας.....	53
3.6	Παραγωγή των αδιάστατων εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα .....	57
3.7	Παραγωγή των συνήθων διαφορικών εξισώσεων με τη μέθοδο των ασυμπτωτικών αναπτυγμάτων .....	59
3.8	Παραγωγή των αναλυτικών λύσεων .....	61
3.9	Σύγκριση των ασυμπτωτικών λύσεων με τα αριθμητικά αποτελέσματα .....	63
4	Αποτελέσματα .....	67
4.1	Ιδιότητες πράσινου νανορευστού συναρτήσει της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης νανοσωματιδίων.....	67
4.2	Επίδραση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης νανοσωματιδίων στους αδιάστατους αριθμούς .....	70
4.2.1	Επίδραση στον αριθμό Rayleigh.....	71
4.2.2	Επίδραση στον αριθμό Prandtl .....	73
4.2.3	Επίδραση στον αριθμό Hartmann .....	75

4.3	Επίδραση των αδιάστατων αριθμών στην ροή του νανορευστού και στη μεταφορά θερμότητας.....	76
4.3.1	Επίδραση του αριθμού Hartmann.....	76
4.3.2	Επίδραση του αριθμού Rayleigh.....	79
4.3.3	Επίδραση του αριθμού Darcy.....	81
5	Συμπεράσματα.....	85
6	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	87
6.1	Βελτιωμένες τεχνικές μοντελοποίησης και προσομοίωσης.....	87
6.2	Πειραματικές έρευνες.....	87
6.3	Εξερεύνηση διαφορετικών πράσινων νανορευστών.....	88
6.4	Ειδικές μελέτες εφαρμογών.....	88
	Αναφορές.....	89

## Λίστα Εικόνων

---

<b>Εικόνα 1.</b> Θερμική αγωγιμότητα ορισμένων κοινών υγρών και στερεών, [3].	20
<b>Εικόνα 2.</b> Φυσικές και χημικές τεχνικές για την επίτευξη ενός σταθερού νανορευστού, [3].	21
<b>Εικόνα 3.</b> Εφαρμογές των πράσινων νανορευστών.	27
<b>Εικόνα 4.</b> Τα οφέλη από την πράσινη σύνθεση νανοσωματιδίων, [27].	36
<b>Εικόνα 5.</b> Σύνολο εξισώσεων που περιγράφουν την ασυμπίεστη μαγνητοϋδροδυναμική για σταθερή πυκνότητα, $\rho=1$ .	48
<b>Εικόνα 6.</b> Γεωμετρία και οριακές συνθήκες του προβλήματος.	50
<b>Εικόνα 7.</b> Σχηματική απεικόνιση σχηματισμού του πράσινου νανορευστού, [98].	54
<b>Εικόνα 8.</b> Αποτελέσματα της δοκιμής καταμέτρησης σωματιδίων νανοσωματιδίων Ag, [98].	55
<b>Εικόνα 9.</b> Πειραματική θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού σε διαφορετικές θερμοκρασίες και συγκεντρώσεις νανοσωματιδίων, [98].	56
<b>Εικόνα 10.</b> Σύγκριση της προτεινόμενης συσχέτισης με πειραματικά δεδομένα, [98].	57
<b>Εικόνα 11.</b> Επίδραση του $Rs$ (α) και $Ha$ (β) στον μέσο αριθμό Nusselt, σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων, [86].	64
<b>Εικόνα 12.</b> Επίδραση του $Rs$ (αριστερά) και $Ha$ (δεξιά) στην κατανομή της ροϊκής συνάρτησης στο κεντρικό τμήμα της κοιλότητας στο μέσο ύψος της κοιλότητας ( $z = 0$ ), σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων, [86].	65
<b>Εικόνα 13.</b> Επίδραση του $Rs$ (αριστερά) και $Ha$ (δεξιά) στην κατανομή της κάθετης ταχύτητας στο κεντρικό τμήμα της κοιλότητας στο μέσο ύψος της κοιλότητας ( $z = 0$ ), σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων, [86].	66
<b>Εικόνα 14.</b> Σύγκριση των αναλυτικών και αριθμητικών τιμών θερμοκρασίας στο κέντρο της κοιλότητας (σε $\xi = 0.5, z = 0$ ) για διάφορες τιμές των $Ha, Rs$ και $Pr$ , [86].	66
<b>Εικόνα 15.</b> Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας για διαφορετικές θερμοκρασίες του νανορευστού και συγκεντρώσεις των πράσινων νανοσωματιδίων.	68
<b>Εικόνα 16.</b> Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας για διαφορετικές συγκεντρώσεις των πράσινων παραγόμενων νανοσωματιδίων και θερμοκρασίες του νανορευστού.	68
<b>Εικόνα 17.</b> Μεταβολή του δυναμικού ιξώδους για διαφορετικές συγκεντρώσεις των πράσινων παραγόμενων νανοσωματιδίων.	69
<b>Εικόνα 18.</b> Μεταβολή της πυκνότητας για διαφορετικές συγκεντρώσεις των πράσινων παραγόμενων νανοσωματιδίων.	70



<b>Εικόνα 19.</b> Μεταβολή του αριθμού $Rs$ του νανορευστού για διαφορετικές συγκεντρώσεις των πράσινων νανοσωματιδίων και θερμοκρασίες του νανορευστού. ....	72
<b>Εικόνα 20.</b> Μεταβολή του αριθμού $Rs$ του νανορευστού για διαφορετικές θερμοκρασίες του πράσινου νανορευστού και συγκέντρωση αναφοράς $\varphi = 0.5\%$ ( $Rs_{\text{αναφοράς}} = 2500$ ). ....	72
<b>Εικόνα 21.</b> Μεταβολή του αριθμού Prandtl του νανορευστού για διαφορετικές συγκεντρώσεις των πράσινων νανοσωματιδίων και θερμοκρασίες του νανορευστού. ....	73
<b>Εικόνα 22.</b> Μεταβολή του αριθμού Prandtl του νανορευστού για διαφορετικές θερμοκρασίες του πράσινου νανορευστού και $\varphi = 0.5\%$ . ....	74
<b>Εικόνα 23.</b> Μεταβολή του αριθμού Hartmann του νανορευστού για διαφορετικές συγκεντρώσεις των πράσινων νανοσωματιδίων και θερμοκρασίες του νανορευστού (ως Hartmann αναφοράς επιλέχθηκε $Ha = 5$ για $\varphi = 0$ ). ....	76
<b>Εικόνα 24.</b> Μεταβολή της ροϊκής συνάρτησης για διαφορετικούς αριθμούς Hartmann και $Da = 0.01$ , $Rs = 2500$ . ....	77
<b>Εικόνα 25.</b> Μεταβολή της ταχύτητας για διαφορετικούς αριθμούς Hartmann και $Da = 0.01$ , $Rs = 2500$ . ....	78
<b>Εικόνα 26.</b> Μεταβολή της θερμοκρασίας για διαφορετικούς αριθμούς Hartmann και $Da = 0.01$ , $Rs = 2500$ . ....	78
<b>Εικόνα 27.</b> Μεταβολή του μέσου αριθμού Nusselt για διαφορετικούς αριθμούς Hartmann και $Da = 0.01$ , $Rs = 2500$ . ....	79
<b>Εικόνα 28.</b> Μεταβολή της ροϊκής συνάρτησης για διαφορετικούς αριθμούς Rayleigh και $Da = 0.01$ , $Ha = 5$ . ....	80
<b>Εικόνα 29.</b> Μεταβολή της ταχύτητας για διαφορετικούς αριθμούς Rayleigh και $Da = 0.01$ , $Ha = 5$ . ....	80
<b>Εικόνα 30.</b> Μεταβολή της θερμοκρασίας για διαφορετικούς αριθμούς Rayleigh και $Da = 0.01$ , $Ha = 5$ . ....	81
<b>Εικόνα 31.</b> Μεταβολή του μέσου αριθμού Nusselt για διαφορετικούς αριθμούς Rayleigh και, $Da = 0.01$ , $Ha = 5$ . ....	81
<b>Εικόνα 32.</b> Μεταβολή της ροϊκής συνάρτησης για διαφορετικούς αριθμούς Darcy και $Rs = 2500$ , $Ha = 5$ . ....	82
<b>Εικόνα 33.</b> Μεταβολή της ταχύτητας για διαφορετικούς αριθμούς Darcy και $Rs = 2500$ , $Ha = 5$ . ....	83
<b>Εικόνα 34.</b> Μεταβολή της θερμοκρασίας για διαφορετικούς αριθμούς Darcy και $Rs = 2500$ , $Ha = 5$ . ....	83

**Εικόνα 35.** Μεταβολή του μέσου αριθμού Nusselt του νανορευστού για διαφορετικές του αριθμού Darcy και,  $Rs = 5000$ ,  $Ha = 5$ .....84

## Λίστα Πινάκων

---

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες του νερού, της αιθελενογλυκόλης, και του αργύρου (Ag), [99,100].....	67
---	----

## Περίληψη

---

Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζεται η μελέτη της φυσικής συναγωγής πράσινου νανορευστού εντός μιας δισδιάστατης ορθογώνιας οριζόντιας κοιλότητας που υποβάλλεται σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και εσωτερική θέρμανση. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ασυμπτωτικών αναπτυγμάτων για την εξαγωγή της ροϊκής συνάρτησης στο κέντρο της κοιλότητας, καθώς και της κατακόρυφης ταχύτητας και θερμοκρασίας του νανορευστού. Οι εξεταζόμενοι αδιάστατοι αριθμοί ( $0 \leq Ha_{nf} \leq 50$  και  $200 \leq Rs_{nf} \leq 5000$ ) εξασφάλισαν το καθεστώς στρωτής ροής πριν από την εμφάνιση οποιασδήποτε ασταθούς ροής. Η παρουσία πορώδους στην κοιλότητα ενίσχυσε, επίσης, τον στρωτό χαρακτήρα της ροής μειώνοντας τις ταχύτητες του νανορευστού.

Η μελέτη του πράσινου νανορευστού επιλέχθηκε λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων του έναντι των παραδοσιακών νανορευστών. Εν συντομία, τα πράσινα νανορευστά είναι οικολογικά και βιώσιμα και προέρχονται από φυσικές πηγές, μειώνοντας έτσι τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η φυσική τους προέλευση εξασφαλίζει υψηλή βιοσυμβατότητα, καθιστώντας τα κατάλληλα και για βιοϊατρικές εφαρμογές, όπως η χορήγηση φαρμάκων. Τα πράσινα νανορευστά προσφέρουν βελτιωμένη θερμική αγωγιμότητα και απόδοση, ενώ η μειωμένη τοξικότητά τους τα καθιστά ασφαλέστερα για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Επιπλέον, η χρήση φυσικών υλικών μπορεί να μειώσει το κόστος παραγωγής, καθιστώντας τα μια πιο οικονομική επιλογή.

Το πράσινο νανορευστό που μελετήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ήταν αυτό που παράχθηκε από εκχύλισμα *Camellia sinensis* (φύλλα πράσινου τσαγιού), το οποίο μετά από θερμική και χημική επεξεργασία απέδωσε νανοσωματίδια αργύρου αναμεμειγμένα σε μίγμα νερού/αιθυλενογλυκόλης 50:50. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν, όπως η θερμοκρασία του νανορευστού και το κλάσμα όγκου των παραγόμενων νανοσωματιδίων, ήταν ίδιο με τα πειράματα. Για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας του πράσινου νανορευστού ενσωματώθηκε στο μοντέλο η σχέση που προέκυψε από τα ίδια πειράματα, η οποία αντιπροσωπεύει την καλύτερη προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων σε ένα εύρος συγκεντρώσεων και θερμοκρασιών νανοσωματιδίων.

Τα παραγόμενα αναλυτικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση του μαγνητικού πεδίου, που εκφράζεται με τον αριθμό Hartmann, οδηγεί σε επιβράδυνση της ροής του νανορευστού και κατά συνέπεια σε χειροτέρευση της μεταφοράς θερμότητας. Αντίθετα, τα ρεύματα συναγωγής εντείνονται με την αύξηση της εσωτερικής θέρμανσης, που ισοδυναμεί με αύξηση του αριθμού

Rayleigh, με αποτέλεσμα την ενίσχυση της συναγωγής έναντι της αγωγής, που οδηγεί σε καλύτερη ψύξη. Επιπλέον, η μείωση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων και της θερμοκρασίας του νανορευστού συνέβαλε κυρίως σε αύξηση του αριθμού Rayleigh, ενισχύοντας έτσι τη μεταφορά θερμότητας, όπως αποδεικνύεται από τις αυξημένες κατακόρυφες ταχύτητες στο κέντρο της κοιλότητας και τη μειωμένη θερμοκρασία στο κέντρο της.

Η ρύθμιση της μεταφοράς θερμότητας ήταν επίσης εφικτή μέσω της χρήσης ενός πορώδους μέσου, το οποίο βελτιστοποιεί τη μεταφορά θερμότητας αυξάνοντας την επιφάνεια επαφής μεταξύ του ψυκτικού μέσου (πράσινου νανορευστού σε αυτή τη μελέτη) και του στερεού υποστρώματος. Η αυξημένη διαπερατότητα μείωσε την αντίσταση ροής, οδηγώντας σε υψηλότερες ταχύτητες και καλύτερη ψύξη. Για πολύ υψηλές τιμές του αριθμού Darcy, οι λύσεις πλησίαζαν εκείνες χωρίς τη χρήση πορώδους μέσου, ενώ για πολύ μικρές τιμές του Darcy, οι λύσεις αντιστοιχούσαν στην αγωγή θερμότητας.

Το κύριο πλεονέκτημα της παρούσας ασυμπτωτικής ανάλυσης, η οποία αποδείχθηκε ακριβής για το χειρισμό της κεντρικής περιοχής της κοιλότητας υπό συνθήκες στρωτής ροής, είναι η γρήγορη εξέταση του τρόπου με τον οποίο σημαντικές παράμετροι σχεδιασμού επηρεάζουν τη μαγνητοϋδροδυναμική φυσική συναγωγή. Αυτή η πρόχειρη αίσθηση της επίδρασης διαφόρων παραγόντων στη μεταφορά θερμότητας, δηλαδή των ιδιοτήτων του νανορευστού, της διαπερατότητας του πορώδους μέσου, του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου και της εσωτερικής θέρμανσης, αναμένεται να αποτελέσει ένα πολύτιμο θεωρητικό εργαλείο, δεδομένου του ταχέως αυξανόμενου ενδιαφέροντος για τα πράσινα νανορευστά λόγω της φιλικότητάς τους προς την υγεία και το περιβάλλον.

Λαμβάνοντας υπόψη το εύρος του φάσματος πιθανών εφαρμογών για τα πράσινα νανορευστά, η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση της χρήσης τους σε συγκεκριμένους τομείς. Αυτή θα μπορούσε να περιλαμβάνει τη διερεύνησή τους σε εναλλάκτες θερμότητας για τη βελτίωση της απόδοσης της μεταφοράς θερμότητας, την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους σε ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες για τη βελτίωση της απορρόφησης ηλιακής ενέργειας, τη μελέτη της αποτελεσματικότητάς τους σε στοχευμένα συστήματα χορήγησης φαρμάκων για ελεγχόμενη απελευθέρωση φαρμάκων και την εξέταση της ικανότητάς τους σε περιβαλλοντικές εφαρμογές, όπως η απομάκρυνση ρύπων από το νερό και τον αέρα.

Συμπερασματικά, η παρούσα διατριβή παρέχει μια ολοκληρωμένη ανάλυση των θερμικών και ροϊκών χαρακτηριστικών της μαγνητοϋδροδυναμικής φυσικής συναγωγής σε μία πορώδη κοιλότητα κορεσμένη με πράσινο νανορευστό, προσφέροντας πολύτιμες γνώσεις και θέτοντας τις βάσεις για μελλοντική έρευνα και εφαρμογές σε αυτό το πολλά υποσχόμενο πεδίο.

## Περίληψη (στα αγγλικά)

---

In this thesis, the study of natural convection of a green nanofluid within a shallow rectangular horizontal cavity subjected to an external magnetic field and internal heating is presented. The method of asymptotic expansions was employed to derive the streamfunction at the center of the cavity, as well as the vertical velocity and temperature of the nanofluid. The dimensionless numbers examined ( $0 \leq Ha_{nf} \leq 50$  and  $200 \leq Rs_{nf} \leq 5000$ ) ensured the laminar flow regime before the onset of any unstable flow. The presence of a porous cavity enhanced the laminar nature of the flow by reducing the velocities of the nanofluid.

The study of green nanofluid was selected due to its significant advantages over traditional nanofluids. In brief, green nanofluids are ecological and sustainable, derived from natural sources, thus, reducing environmental impact. Their natural origin ensures high biocompatibility, making them suitable also for biomedical applications, such as drug delivery. Green nanofluids offer also improved thermal conductivity and heat transfer efficiency while their reduced toxicity makes them safer for human health and the environment. Furthermore, the use of natural materials can reduce production costs, making them a more economical option.

The green nanofluid studied in the preset Master Thesis was that produced from *Camellia sinensis extract* (green tea leaves), which after thermal and chemical treatment yielded Ag nanoparticles mixed in a 50:50 water/ethylene glycol mixture. The parameters, such as nanofluid temperature and the volume fraction of the produced nanoparticles, were consistent with the experiments. For calculating the thermal conductivity of the green nanofluid, the relationships derived from the same experiments were incorporated, representing the best fit of experimental data over a range of nanoparticle concentrations and temperatures.

The produced analytical results indicated that increasing the magnetic field, expressed by the Hartmann number, leads to a deceleration of the nanofluid flow and consequently a deterioration in heat transfer. In contrast, convection currents intensify with the increase of internal heating, equivalent to an increase in the Rayleigh number, resulting in enhanced convection over conduction, leading to better cooling. Moreover, reducing nanoparticle concentration and nanofluid temperature contributed to an increase mainly in the Rayleigh number, thereby enhancing heat transfer, as evidenced by increased vertical velocities at the center of the cavity and decreased core temperature.

Heat transfer regulation was also achievable through the use of a porous medium, which optimizes heat transfer by increasing the contact surface area between the coolant (nanofluid in this study) and the solid substrate. Increased permeability reduced flow resistance, leading to higher velocities and better cooling. For very high Darcy number values, the solutions approached those without the use of a porous medium, while for very small Darcy values, the solutions corresponded to heat conduction.

The primary advantage of this asymptotic analysis, which proved accurate for handling the central region of the cavity under laminar flow conditions, is the quick examination of how significant design parameters affect magnetohydrodynamic natural convection. This quick insight into the impact of various factors on heat transfer, including the properties of the nanofluid, the permeability of the porous medium, the applied magnetic field, and internal heating, is expected to be a valuable theoretical tool given the rapidly growing interest in green nanofluids due to their health and environmental friendliness.

Given the wide range of potential applications for green nanofluids, future research should focus on optimizing their use in specific areas. This includes investigating their performance in heat exchangers to enhance heat transfer efficiency, evaluating their efficiency in solar thermal collectors for improved solar energy absorption, studying their effectiveness in targeted drug delivery systems for controlled and sustained drug release, and exploring their capability in environmental applications, such as pollutant removal from water and air.

In conclusion, this thesis provides a detailed analysis of the thermal and flow characteristics of the magnetohydrodynamic natural convection in a green nanofluid-saturated porous enclosure, offering valuable insights and laying the groundwork for future research and applications in this promising field.



## Περίγραμμα της μεταπτυχιακής εργασίας

---

- Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζεται μια επισκόπηση των νανορευστών και των εφαρμογών τους συμπεριλαμβανομένων των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων τους.
- Το **Κεφάλαιο 2** παρέχει μια επισκόπηση των πράσινων νανορευστών και των εφαρμογών τους εξετάζοντας προηγούμενες έρευνες που πραγματοποιήθηκαν σε αυτόν τον ταχέως εξελισσόμενο τομέα.
- Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύεται το πρόβλημα μαγνητοϋδροδυναμικής φυσικής συναγωγής που εξετάζει η παρούσα εργασία, συμπεριλαμβανομένης της γεωμετρίας και των οριακών συνθηκών καθώς και της μεθόδου επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα μέσω των ασυμπτωτικών αναπτυγμάτων.
- Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα κύρια αποτελέσματα υπό μορφή διαγραμμάτων, ενώ ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή τους.
- Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται μια συνοπτική περίληψη των βασικών ευρημάτων που προέκυψαν από τη μελέτη, υπογραμμίζοντας τα κύρια στοιχεία που προέκυψαν.
- Στο **Κεφάλαιο 6** συζητούνται οι συνέπειες των ευρημάτων της εργασίας για τις μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις, περιγράφοντας τομείς για περαιτέρω διερεύνηση και πρόοδο.

## Συμβολή και καινοτομία της παρούσας εργασίας

---

Η εργασία αυτή συμβάλλει σημαντικά στον τομέα της απόδοσης των θερμικών συστημάτων, εισάγοντας τα πράσινα νανορευστά ως βιώσιμη εναλλακτική λύση στα συμβατικά νανορευστά που χρησιμοποιούν συνήθως μεταλλικά νανοσωματίδια.

Η κύρια καινοτομία της παρούσας εργασίας έγκειται στην ανάπτυξη αναλυτικών λύσεων μέσω της μεθόδου των ασυμπτωτικών αναπτυγμάτων για μια απλή γεωμετρία. Αυτές οι αναλυτικές λύσεις παρέχουν μια εναλλακτική λύση έναντι των αριθμητικών λύσεων, οι οποίες συνήθως απαιτούν εξειδικευμένες αριθμητικές γνώσεις, υλικοτεχνική υποστήριξη και σημαντικό υπολογιστικό χρόνο. Προσφέροντας μια έγκυρη και προσιτή λύση για τη μελέτη της ροής πράσινων νανορευστών και της μεταφοράς θερμότητας, η εργασία αυτή επιτρέπει την λήψη μιας πρώτης εικόνας αυτών των φαινομένων χωρίς την πολυπλοκότητα των αριθμητικών προσομοιώσεων.

Επιπλέον, η παρούσα μελέτη δεν παρέχει μόνο θεωρητικές γνώσεις, αλλά προτείνει και πρακτικές μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις. Δίνει έμφαση στη βελτιστοποίηση των πράσινων νανορευστών σε διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των εναλλακτών θερμότητας, των ηλιακών συλλεκτών, των συστημάτων χορήγησης φαρμάκων και της απομάκρυνσης ρύπων. Αυτή η διπλή εστίαση στη θεωρία και την εφαρμογή επεκτείνει τη χρηστικότητα των πράσινων νανορευστών, συμβάλλοντας ουσιαστικά τόσο στον ακαδημαϊκό χώρο όσο και στη βιομηχανία. Αντιμετωπίζοντας τις σύγχρονες προκλήσεις με λύσεις φιλικές προς το περιβάλλον, η εργασία αυτή ευθυγραμμίζεται με την αυξανόμενη ζήτηση για βιώσιμες και συνειδητές για την υγεία τεχνολογίες, προσφέροντας έτσι σημαντική πρόοδο στον τομέα των νανορευστών.

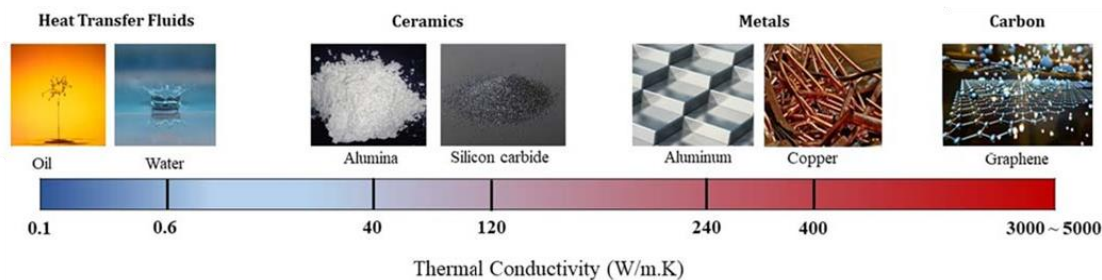
## 1 Επισκόπηση των νανορευστών και των εφαρμογών τους

---

Τα νανορευστά αποτελούν μια σύγχρονη εκδήλωση της επιστήμης των κολλοειδών με ρίζες που χρονολογούνται από τις αρχές του 1900 [1]. Αυτό το ιστορικό υπόβαθρο υπογραμμίζει το παγκόσμιο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση των διασπορών νανοσωματιδίων μέσα σε συμβατικά ρευστά για διάφορες εφαρμογές. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα των νανορευστών έγκειται στην ικανότητά τους να διατηρούν σταθερότητα μέσω της κίνησης Brown που εξουδετερώνει την καθίζηση λόγω βαρύτητας, καθιστώντας το εναιώρημα θεωρητικά σταθερό όσο τα σωματίδια παραμένουν αρκετά μικρά (συνήθως μικρότερα των 100 nm). Ωστόσο, προκύπτουν προκλήσεις στη διατήρηση αυτού του μεγέθους, καθώς τα σωματίδια τείνουν να συσσωρεύονται κατά την επαφή τους με άλλα σωματίδια, οδηγώντας συχνά σε καθίζηση [2]. Επιπλέον, ο όρος "νανορευστό" υποδηλώνει ένα μείγμα στο οποίο το ιδιότητες τόσο των νανοσωματιδίων όσο και του βασικού ρευστού συμβάλλουν στις ιδιότητες του τελικού μείγματος. Σε αυτό το πλαίσιο, μπορεί να δημιουργηθεί ένα νανορευστό με την εισαγωγή νανοσωματιδίων που τροποποιούν ελεγχόμενα τις ιδιότητες ενός συγκεκριμένου βασικού ρευστού ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή.

Τα νανορευστά έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Ο κύριος τομέας εφαρμογής τους αφορά την διερεύνηση τρόπων για την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας, η οποία θεωρείται ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση των υφιστάμενων ενεργειακών συσκευών και τη σύλληψη νέων καινοτόμων ιδεών. Εκτός από την επάρκεια της μηχανικής διαδικασίας, το κατάλληλο υγρό ψύξης φαίνεται να είναι μείζονος σημασίας για τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας της ψύξης. Ένα ενδεικτικό ρευστό που χρησιμοποιείται ευρέως είναι το νερό. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των συμβατικών υγρών είναι η ιδιαίτερα χαμηλή θερμική αγωγιμότητά τους σε αντίθεση για παράδειγμα με αυτή από τους νανοσωλήνες άνθρακα, τα μέταλλα ή τα οξειδία μετάλλων.

Στην **Εικόνα 1** παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ της θερμικής αγωγιμότητας ορισμένων υγρών, συμπεριλαμβανομένου του νερού, με κάποια στερεά, όπως τα κεραμικά, τα μέταλλα και το γραφένιο. Όπως φαίνεται, η θερμική αγωγιμότητα των μετάλλων και του γραφενίου είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη των υγρών, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλη επιλογή για χρήση σε θερμικά συστήματα.



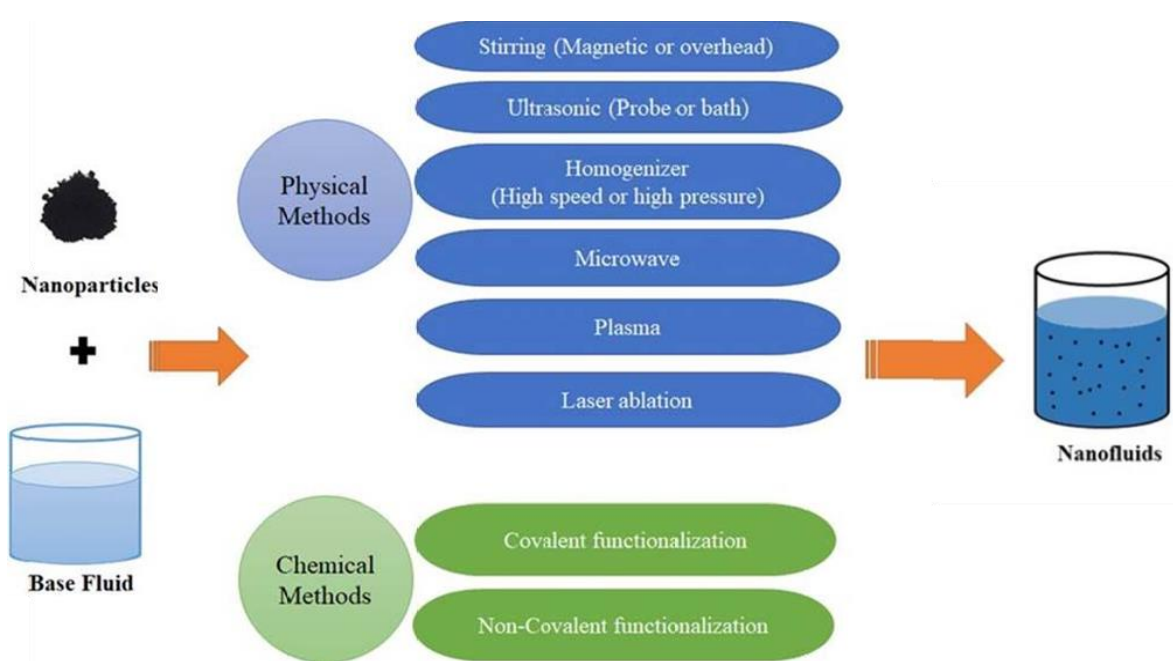
*Εικόνα 1. Θερμική αγωγιμότητα ορισμένων κοινών υγρών και στερεών, [3].*

Από την παραπάνω συζήτηση, μια ιδέα για την ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας του νερού θα μπορούσε να είναι η προσθήκη στερεών σωματιδίων σε χαμηλές συγκεντρώσεις στο βασικό ρευστό για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Ωστόσο, ποια μεγέθη σωματιδίων είναι τα καταλληλότερα; Η χρήση σωματιδίων με διάμετρο στην περιοχή των χιλιοστών ή ακόμη και των μικρομέτρων έχει ως αποτέλεσμα την ενδεχόμενη καθίζηση των αιωρούμενων σωματιδίων. Οι βαρυντικές επιδράσεις ελαχιστοποιούνται με τη χρήση στερεών σωματιδίων με το μικρότερο δυνατό μέγεθος, στην περιοχή μεγεθών της νανοκλίμακας. Τα πειράματα έχουν δείξει ότι η σταθερότητα των υγρών με βάση τα νανοσωματίδια είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη των υγρών με βάση τα μικροσωματίδια. Επιπλέον, σε δεδομένη μάζα στερεών σωματιδίων, η επιφάνεια επαφής μεταξύ των νανοσωματιδίων είναι μεγαλύτερη από εκείνη των μικροσωματιδίων, γεγονός που οδηγεί σε ταχύτερη θερμική απόκριση των σωματιδίων στη μεταβολή της θερμοκρασίας του υγρού σε μείγματα που περιέχουν νανοσωματίδια [3].

### 1.1 Σύντομη ιστορική ανασκόπηση

Το 1993, οι Masuda et al. [1] μέτρησαν τη θερμική αγωγιμότητα και το ιξώδες τριών διαφορετικών μειγμάτων με βάση το νερό που περιείχαν νανοσωματίδια  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  και  $SiO_2$  (σωματίδια με μέγεθος μεταξύ 1 και 100 nm). Ανέφεραν ότι τόσο η θερμική αγωγιμότητα όσο και το ιξώδες του νερού γίνονται μεγαλύτερα από ό,τι πριν με την προσθήκη νανοσωματιδίων. Αργότερα, το 1995, οι Choi & Eastman, [4] επέλεξαν την ονομασία "νανορευστό" (nanofluid) για ένα μείγμα νανοσωματιδίων και ενός υγρού. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα νανορευστά δεν παρασκευάζονται απλά με την προσθήκη νανοσωματιδίων σε νερό ή λάδι, για παράδειγμα, και την ανάδευση του μείγματος, παρόμοια με την ανάμειξη ζάχαρης. Ο σχηματισμός ενός νανορευστού απαιτεί ειδικές φυσικές και χημικές διεργασίες προκειμένου να παραχθεί μια ομοιόμορφη και αποτελεσματική διασπορά των σωματιδίων. Η χρήση επιφανειοδραστικών ουσιών, ο έλεγχος του pH και ο καθαρισμός με υπέρηχους (sonication) είναι ορισμένες πρωταρχικές προσεγγίσεις για την αύξηση της σταθερότητας των νανορευστών [5]. Στην **Εικόνα 2** παρουσιάζονται οι κύριες φυσικές και χημικές προσεγγίσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν

για την παρασκευή σταθερών νανορευστών. Η καταλληλότερη μέθοδος για την παρασκευή σταθερών νανορευστών καθορίζεται με βάση τον τύπο των νανοσωματιδίων και την επιλογή του βασικού υγρού.



*Εικόνα 2. Φυσικές και χημικές τεχνικές για την επίτευξη ενός σταθερού νανορευστού, [3].*

## 1.2 Εφαρμογές χρήσης νανορευστών

Τα νανορευστά, λόγω των μοναδικών θερμικών και ρεολογικών ιδιοτήτων τους, έχουν βρει πληθώρα εφαρμογών σε διάφορους τομείς. Η ικανότητά τους να αυξάνουν σημαντικά τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας τα έχει καταστήσει ιδιαίτερα ελκυστικά για τη βελτίωση της απόδοσης διαφόρων διεργασιών ανταλλαγής θερμότητας, αυξάνοντας έτσι την ενεργειακή απόδοση και μειώνοντας το λειτουργικό κόστος. Συνοπτικά:

- Τα νανορευστά έχουν διερευνηθεί εκτενώς για τις δυνατότητές τους να βελτιώσουν την αποδοτικότητα των εναλλακτών θερμότητας. Ενδεικτικά οι Gkountas et al. [6,7] διερεύνησαν αριθμητικά την χρήση  $Al_2O_3$ -νερού σε εναλλάκτες θερμότητας με ενθαρρυντικά αποτελέσματα.
- Οι κινητήρες αυτοκινήτων μπορούν να υποστούν βλάβη, εάν η ανεπιθύμητη θερμότητα δεν διαχυθεί γρήγορα. Το κοινό ψυκτικό υγρό που χρησιμοποιείται στο σύστημα ψύξης αυτοκινήτων είναι το HTF με βάση την αιθυλενογλυκόλη (EG) που περιέχει ογκομετρική αναλογία EG προς νερό 60/40, ή 50/50, για παράδειγμα. Με τη χρήση νανορευστού μπορεί να σχεδιαστεί πιο αποδοτικό σύστημα ψύξης [8].

- Στη βιομηχανία παραγωγής ενέργειας, η ψύξη του μετασχηματιστή είναι σημαντική. Οι ερευνητές καταβάλλουν αδιάκοπα τις προσπάθειές τους για τη μείωση του μεγέθους και του βάρους του μετασχηματιστή με ταυτόχρονη ενίσχυση του συστήματος ψύξης. Το νανορευστό μπορεί να αποτελέσει μια πιθανή εναλλακτική λύση βελτιώνοντας τις ιδιότητες του συμβατικού λαδιού μετασχηματιστή [9]. Επίσης, τα τσιπ του ηλεκτρονικού εξοπλισμού παράγουν πολλή περιττή θερμότητα η οποία πρέπει να διαχέεται γρήγορα για τη μεγάλη διάρκεια ζωής του ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Οι Jang & Choi [10] σχεδίασαν μια ψύκτρα μικροκαναλιών όπου χρησιμοποιήθηκε νανορευστό. Η έρευνά τους έδωσε ικανοποιητικό αποτέλεσμα σε σχέση με το καθαρό νερό. Έτσι, μπορεί να εξοικονομηθεί αρκετή ηλεκτρική ενέργεια με τη βελτίωση της απόδοσης του ψύκτη με τη βοήθεια νανορευστού.
- Τα μηχανήματα βαρέως τύπου που λειτουργούν όλη την ημέρα για την παραγωγή προϊόντων παράγουν μεγάλη ποσότητα ανεπιθύμητης θερμότητας, η οποία πρέπει να απομακρύνεται γρήγορα για να αποφευχθεί η βλάβη των μηχανημάτων. Τα νανορευστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ψυκτικό υγρό σε αυτές τις μηχανές. Και πάλι, μπορεί να εξοικονομηθεί πολλή ενέργεια με τα νανορευστά σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως η ψύξη και η θέρμανση του νερού με αποτέλεσμα λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στο περιβάλλον [8].
- Η πυκνότητα ισχύος είναι πολύ υψηλή στα πυρηνικά συστήματα. Το νανορευστό έχει πιθανή εφαρμογή ως το κύριο ψυκτικό μέσο του αντιδραστήρα [11]
- Η γεωθερμική ενέργεια είναι ένας ανανεώσιμος και βιώσιμος ενεργειακός πόρος. Η εκτιμώμενη ισοδύναμη ισχύς της γεωθερμικής ενέργειας είναι 42 εκατομμύρια MW. Το νανορευστό μπορεί να εξάγει περισσότερη γεωθερμική ενέργεια και να παράγει περισσότερη ισχύ στον κύκλο Rankine. Οι Deneshipour & Rafee [132] διερεύνησαν τα νανορευστά  $Al_2O_3$ -νερού και  $CuO$ -νερού ως ρευστό κυκλώματος σε γεωθερμικό εναλλάκτη θερμότητας γεωτρήσεων. Η εξαγόμενη θερμότητα από το νανορευστό  $CuO$ -νερού ήταν υψηλότερη από το νανορευστό  $Al_2O_3$ -νερού. Επίσης, έδειξαν ότι η απαγωγή θερμότητας αυξάνεται με την αύξηση του κλάσματος όγκου [12].
- Έχουν γίνει αρκετές έρευνες στον τομέα του ηλιακού συλλέκτη με βάση το νανορευστό, οι οποίες καταδεικνύουν καλύτερα αποτελέσματα από το βασικό ρευστό. Ενδεικτικά, Οι Li et al. [13] χρησιμοποίησαν υβριδικό νανορευστό με βάση το EG SiC-MWCNT σε ηλιακούς συλλέκτες άμεσης απορρόφησης. Η έρευνά τους διαπίστωσε 48,6% υψηλότερη απόδοση ηλιοθερμικής μετατροπής από την καθαρή EG σε ηλιακούς συλλέκτες άμεσης απορρόφησης.

- Τα νανορευστά έχουν χρησιμοποιηθεί για την θεραπεία του καρκίνου μέσω της υπερθερμίας που προκαλεί το θάνατο του όγκου με αυξάνοντας τοπικά τη θερμοκρασία [14,15].
- Οι εφαρμογές των νανορευστών επεκτείνονται σε χορήγηση φαρμάκων [16,17] για διάφορες ασθένειες.
- Τα νανορευστά έχουν χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση της προστασίας των καλλιιεργειών [18].

### 1.3 Πλεονεκτήματα νανορευστών

Στην σχετική βιβλιογραφία [2,3,19] αναφέρονται τα ακόλουθα οφέλη:

- Ενισχυμένη μεταφορά θερμότητας σε σύγκριση με τα συμβατικά ρευστά, οδηγώντας σε ενισχυμένους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας: Αυτή η ιδιότητα είναι ιδιαίτερα επωφελής ενδεικτικά στους εναλλάκτες θερμότητας, όπου η βελτιωμένη απόδοση μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του κόστους λειτουργίας.
- Βελτιωμένη απόδοση ψύξης: Τα νανορευστά είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην απαγωγή θερμότητας από ηλεκτρονικές συσκευές, μηχανήματα και άλλα συστήματα που παράγουν θερμότητα. Διευκολύνοντας την αποτελεσματικότερη απομάκρυνση της θερμότητας, τα νανορευστά μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση ψύξης και την αξιοπιστία αυτών των συστημάτων, παρατείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής τους.
- Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας: Οι βελτιωμένες δυνατότητες μεταφοράς θερμότητας των νανορευστών μπορούν να συμβάλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας μειώνοντας την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για διαδικασίες θέρμανσης ή ψύξης. Αυτό είναι ιδιαίτερα επωφελές σε βιομηχανίες όπου η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί σημαντικό λειτουργικό κόστος.
- Ρυθμιζόμενες ιδιότητες: Οι ιδιότητες των νανορευστών, όπως η θερμική αγωγιμότητα και το ιξώδες, μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες απαιτήσεις εφαρμογών, προσαρμόζοντας παράγοντες όπως ο τύπος, το μέγεθος και η συγκέντρωση των νανοσωματιδίων [20]. Αυτή η δυνατότητα ρύθμισης επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του νανορευστού σε διάφορες εφαρμογές.
- Σε σύγκριση με τα μικρορευστά, τα νανορευστά έχουν μεγαλύτερη σταθερότητα.
- Η αλληλεπίδραση μεταξύ του βασικού υγρού και των νανοσωματιδίων αυξάνεται λόγω της αυξημένης ειδικής επιφάνειας των νανοσωματιδίων.
- Τα διασκορπισμένα νανοσωματίδια δημιουργούν κινήσεις Brown που αυξάνουν την αλληλεπίδραση και τη σύγκρουση μεταξύ ρευστού και σωματιδίων.

#### 1.4 Μειονεκτήματα νανορευστών

Στην σχετική βιβλιογραφία [2,3,21] αναφέρονται επίσης τα ακόλουθα μειονεκτήματα από τη χρήση νανορευστών:

- **Κόστος:** Λόγω του κόστους των νανοσωματιδίων και της πολυπλοκότητας των διαδικασιών κατασκευής, η παραγωγή των νανορευστών μπορεί να είναι πιο δαπανηρή από τα παραδοσιακά ρευστά. Αυτό το αυξημένο κόστος μπορεί να περιορίσει την ευρεία υιοθέτησή τους, ιδίως σε βιομηχανικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.
- **Συσσωμάτωση σωματιδίων:** Τα νανοσωματίδια έχουν την τάση να συσσωματώνονται με την πάροδο του χρόνου, οδηγώντας σε καθίζηση και μειωμένη σταθερότητα του αιωρήματος του νανορευστού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση των επιδόσεων και αυξημένες απαιτήσεις συντήρησης, ιδίως σε συστήματα που απαιτείται μεγάλη διάρκεια λειτουργίας [22].
- **Θέματα συμβατότητας:** Τα νανοσωματίδια ενδέχεται να αλληλοεπιδράσουν με υλικά εξοπλισμού ή πρόσθετα στο βασικό υγρό, οδηγώντας σε ζητήματα συμβατότητας ή υποβάθμισης των εξαρτημάτων του συστήματος. Η προσεκτική εξέταση της συμβατότητας των υλικών είναι απαραίτητη κατά τη χρήση νανορευστών για την αποφυγή δυσμενών επιπτώσεων στην απόδοση και τη μακροζωία του συστήματος.
- **Προβλήματα υγείας και ασφάλειας:** Ορισμένα νανοσωματίδια που χρησιμοποιούνται στα νανορευστά ενδέχεται να ενέχουν κινδύνους για την υγεία και την ασφάλεια εάν εισπνευστούν ή έρθουν σε επαφή με το δέρμα. Επιπλέον, υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της απελευθέρωσης νανοσωματιδίων κατά την παραγωγή, χρήση και διάθεση νανορευστών, γεγονός που απαιτεί προσεκτικό χειρισμό και διαδικασίες διάθεσης για τον μετριασμό των πιθανών κινδύνων.
- **Το υψηλότερο ιξώδες των νανορευστών σε σύγκριση με τα βασικά ρευστά:** Αυτό οδηγεί σε αύξηση της απαιτούμενης ισχύος άντλησης και αυξάνει τον ρυθμό θέρμανσης λόγω τριβής.
- **Η χρήση νανορευστών μπορεί να αυξήσει τα ποσοστά διάβρωσης των εξαρτημάτων που έρχονται σε επαφή με τα νανορευστά.**



## 2 Επισκόπηση των πράσινων νανορευστών

---

Λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση των μειονεκτημάτων της χρήσης των νανοσωματιδίων που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο, και κυρίως αυτών που αφορούν τους κινδύνους για το περιβάλλον και την υγεία των ανθρώπων, έχει γίνει επιτακτική η ανάγκη για ανάπτυξη των λεγόμενων «πράσινων» νανοσωματιδίων. Οι πράσινες τεχνολογίες περιλαμβάνουν τις μεθόδους που δεν εγκυμονούν κινδύνους για το περιβάλλον, διατηρώντας τους φυσικούς πόρους και εισάγοντας βιώσιμες μεθόδους που ελαχιστοποιούν τις αρνητικές επιπτώσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων [23]. Υπό αυτή την έννοια, η πράσινη νανοτεχνολογία χρησιμοποιεί φυσικούς πόρους για την εξάλειψη ή τον μετριασμό των κινδύνων που σχετίζονται με τη χρήση νανοϋλικών για το περιβάλλον και προωθεί τη σταδιακή αντικατάσταση των συμβατικών νανοϋλικών.

Τα τελευταία χρόνια, η ενσωμάτωση βιοϋλικών όπως φυτά και φρούτα σε κοινά ρευστά έχει βελτιώσει τις θερμοφυσικές ιδιότητες των πράσινων νανορευστών. Για παράδειγμα, οι μέθοδοι κατασκευής του γραφενίου συνήθως συνεπάγονται με την ανεπιθύμητη εξάντληση τοξικών αερίων και οι εγγενείς κίνδυνοι τους μπορεί να απειλήσουν την οικολογική ισορροπία. Ως εκ τούτου, μελέτες όπως αυτή των Chufa et al. [24] ερεύνησαν την πράσινη σύνθεση γραφενίου με την αναγωγή του οξειδίου του γραφενίου χρησιμοποιώντας εκχύλισμα φύλλων του φυτού *Vernonia amygdalina*. Οι αναγωγικοί και καλυπτικοί παράγοντες στο φυτικό εκχύλισμα ήταν τα τερπενοειδή και οι πολυφαινόλες. Οι τερματικές ομάδες καρβονυλίου και υδροξυλίου συνέθεσαν σταθερά νανοσωματίδια και οι συγγραφείς θεώρησαν αυτή τη σύνθεση ως την προτιμώμενη μέθοδο για την κατασκευή νανοϋλικών με βάση το γραφένιο με φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο σε μεγάλη κλίμακα.

Οι αναγωγικοί παράγοντες και οι σταθεροποιητές που εφαρμόζονται παραδοσιακά για την παραγωγή νανοσωματιδίων για τη βελτίωση της σταθερότητάς τους μέσω της τροποποίησης της επιφανειακής τους τάσης επηρεάζουν αρνητικά το περιβάλλον, γεγονός που εγείρει ανησυχίες μεταξύ των ερευνητών, ιδίως στον τομέα της βιοϊατρικής [25]. Σε αυτό το πλαίσιο, είναι επείγον να αντικατασταθούν οι τοξικοί αναγωγικοί παράγοντες και σταθεροποιητές από πιο φιλικά προς το περιβάλλον αντιδραστήρια που εξάγονται από φυτά.

Οι Rangaraj & Venkatachalam [26] παρασκεύασαν πράσινα νανοσωματίδια πυριτίου χρησιμοποιώντας τη βιομάζα φύλλων μπαμπού (*Dendrocalamus strictus*). Η τοξικότητα των νανοσωματιδίων αξιολογήθηκε και μια μελέτη *in vitro* σε ζωικές κυτταρικές σειρές οστεοβλαστών έδειξε τη μη τοξική φύση τους μέχρι  $125 \mu\text{g/mL}^{-1}$ . Οι ερευνητές υπογράμμισαν επίσης την

καταλληλότητα για την παραγωγή νανοσωματιδίων πυριτίου σε μεγάλη κλίμακα με τη χρήση αποβλήτων φύλλων μπαμπού αντί της χρήσης οποιασδήποτε χημικής πρόδρομης ουσίας πυριτίου για τη χορήγηση φαρμάκων και άλλους ιατρικούς σκοπούς.

Τα συμβατικά υγρά, συμπεριλαμβανομένης της αιθυλενογλυκόλης και της προπυλενογλυκόλης, χρησιμοποιούνται συχνά ως μέσα μεταφοράς θερμότητας και αντιψυκτικά υγρά σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Η αιθυλενογλυκόλη θεωρείται από την επιστημονική κοινότητα ως μέτρια τοξική, με χαμηλή μέση θανατηφόρα δόση για τον άνθρωπο που μπορεί να προκαλέσει σοβαρή βλάβη. Από την άλλη πλευρά, η προπυλενογλυκόλη θα μπορούσε να αντικαταστήσει την αιθυλενογλυκόλη, καθώς είναι ασφαλέστερη και δεν προκαλεί βλάβες στο κεντρικό νευρικό σύστημα [27]. Ωστόσο, αυτές οι γλυκόλες προέρχονται από το πετρέλαιο, μια μη ανανεώσιμη πηγή με συνεχώς μειούμενη προσφορά λόγω της παγκόσμιας υψηλής ζήτησης ενέργειας. Επιπλέον, η εξόρυξη πετροχημικών με καύση προκαλεί υπερθέρμανση του πλανήτη και κλιματική αλλαγή.

Συνεπώς, είναι ζωτικής σημασίας η χρήση νέων φιλικών προς το περιβάλλον πηγών γλυκόλης. Στο πλαίσιο αυτό, οι Khdher et al. [28] ανέφεραν την ασφαλή και βιοδιασπώμενη βιογλυκόλη που εξάγεται από φυτά ως πράσινο βασικό ρευστό σε νανορευστά αλουμίνας (alumina nanofluids). Οι ερευνητές παρήγαγαν τα νανορευστά αλουμίνας/βιογλυκόλης χωρίς προσθήκη μειωτικού ή επιφανειοδραστικού, παρά τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα που παρουσίασαν τα νανορευστά. Οι συγγραφείς ανέφεραν αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας έως και 17%, 9% και 3.6% με το ίδιο κλάσμα βιογλυκόλης, αιθυλενογλυκόλης και προπυλενογλυκόλης, αντίστοιχα. Σε μια άλλη εργασία των Abdolbaqi et al. [29] προέκυψε διασπορά νανοσωματιδίων αλουμίνας σε βιογλυκόλη αναμεμειγμένη με νερό σε αναλογίες 60:40 και 40:60. Αυτό το μείγμα οδήγησε σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας κατά 7.5% σε σύγκριση με το μείγμα προπυλενογλυκόλης και νερού με τις ίδιες αναλογίες. Επίσης, οι ίδιοι συγγραφείς συμπέραναν τη θερμική αγωγιμότητα νανορευστών τιτανίας/βιογλυκόλης και νερού και πυριτίας/βιογλυκόλης και νερού [30,31]. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θερμική αγωγιμότητα ενισχύθηκε έως και 12.6% και 7.2% για τα μείγματα τιτανίας/βιογλυκόλης και νερού και πυριτίας/βιογλυκόλης και νερού, αντίστοιχα, σε σύγκριση με τα μείγματα προπυλενογλυκόλης και νερού με τις ίδιες αναλογίες.

Γενικά μιλώντας, η διερεύνηση των πράσινων νανορευστών βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Η παραγωγή πράσινων νανορευστών από μη τοξικές πηγές είναι σχετικά δύσκολο να επιτευχθεί, καθώς πρέπει να μελετηθούν περαιτέρω άλλοι παράγοντες, όπως η

συμβατότητα, η σταθερότητα και η διαθεσιμότητα των φυσικών πόρων. Επιπλέον, οι πραγματικές γνώσεις σχετικά με τα πράσινα νανορευστικά προκαλούν διαφωνίες και αντιφατικά ευρήματα στη βιβλιογραφία. Το μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας υπογραμμίζει την τάση προς τη σύνθεση νανοσωματιδίων με πράσινες τεχνικές αντί των επικίνδυνων συμβατικών μεθόδων. Από την άλλη πλευρά, η βιβλιογραφία εξακολουθεί να δείχνει ότι η αντικατάσταση των χημικών γλυκολών από βιογλυκόλη παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι μπορεί να δημιουργήσουν ευκαιρίες για νέους τύπους πράσινων ρευστών βάσης [32]. Η ανάπτυξη πράσινων τεχνολογιών για την παρασκευή νανορευστών προάγει την βιωσιμότητα με τη χρήση ανανεώσιμων πόρων, αλλά η μελλοντική εφαρμογή τους είναι γεμάτη από εμπόδια που δεν έχουν ακόμη κατανοηθεί πλήρως, γεγονός που αναδεικνύει την επιτακτική ανάγκη περαιτέρω ερευνητικών μελετών επί του θέματος.

## 2.1 Πεδία εφαρμογής των πράσινων νανορευστών

Οι κυριότερες εφαρμογές των πράσινων νανορευστών συνοψίζονται στην **Εικόνα 3**, ενώ αμέσως μετά αυτές αναλύονται σε ξεχωριστές υποενότητες για καλύτερη επεξήγηση σε συνδυασμό με μερικές ενδεικτικές αναφορές για κάθε πεδίο εφαρμογής.



**Εικόνα 3.** Εφαρμογές των πράσινων νανορευστών.

### 2.1.1 Εναλλάκτες θερμότητας

Οι εναλλάκτες θερμότητας αποτελούν καίριο κεφάλαιο για τον έλεγχο της απαγόμενης θερμότητας. Τα τελευταία χρόνια, έχει γίνει προσπάθεια να βελτιωθεί η θερμική απόδοση των εναλλακτών. Με τα συμβατικά ψυκτικά μέσα εμφανίζονται πολλοί περιορισμοί. Για το λόγο αυτό, η έρευνα για τα νανορευστικά απέκτησε ξεχωριστή σημασία καθώς αυτά προσφέρουν πολύ

καλύτερη μεταφορά θερμότητας λόγω των βελτιωμένων θερμικών ιδιοτήτων που προσφέρουν. Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, τα περισσότερα από τα νανορευστά που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν αντιδραστήρια και χημικές ουσίες που οδηγούν σε ρύπανση του περιβάλλοντος και, ως εκ τούτου, υπάρχει την αναγκαιότητα ανάπτυξης μεθόδων που βασίζονται στην πράσινη σύνθεση.

Ενδεικτικά, στην έρευνα των Sarafraz et al. [33] προσδιορίστηκε ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ενός πράσινου νανορευστού που ρέει σε σωλήνα εναλλάκτη με διπλό σωλήνα. Σύμφωνα με την έρευνα αυτή, στο νανορευστό αιθυλενογλυκόλης/νερού με αναλογία 50:50 κατά όγκο έγινε διασπορά νανοσωματιδίων αργύρου τα οποία προήλθαν από πράσινο εκχύλισμα φύλλων τσαγιού (*Camelia sinensis*) ως αναγωγικός παράγοντας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα νανοσωματίδια αργύρου σε συγκεντρώσεις 0.1%, 0.5% και 1% παρήγαγαν βελτιώσεις στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας 22%, 36% και 67%, αντίστοιχα, συγκρινόμενο με το βασικό ρευστό. Παρ'όλα αυτά, η περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων οδήγησε σε πτώση πίεσης και αυξήσεις της τριβής. Γενικά, η αύξηση του αριθμού Reynolds οδηγεί σε μεγαλύτερη πτώση πίεσης από αυτή που προκαλείται στο καθαρό νερό. Ο δείκτης απόδοσης του νανορευστού αυξήθηκε σχεδόν κατά 142% όταν ο αριθμός Reynolds αυξήθηκε από 1000 σε 3000.

Σε άλλη εργασία οι Hosseini et.al. [34] ανέπτυξαν μέσω μιας φιλικής προς το περιβάλλον μεθόδου ένα νανορευστό από νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων (MWCNTs) και απεσταγμένο νερό σε διαφορετικές συγκεντρώσεις 0.075 wt%, 0.125 wt% και 0.175 wt%, το οποίο έρεε σε ένα δακτυλοειδές εναλλάκτη θερμότητας με καθεστώς τυρβώδους ροής. Τα MWCNTs υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με μπουμπούκια γαρύφαλλου με μόσχευμα ελεύθερων ριζών, και παρατηρήθηκε αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και αριθμού Nusselt 35.89% και 20.15%, αντίστοιχα, σε σχέση με το απεσταγμένο νερό. Η βελτίωση επιτεύχθηκε σε αριθμό Reynolds 7944 και σε συγκέντρωση 0.175 wt%. Η μέγιστη ενίσχυση του συντελεστή τριβής (κατά 3%) παρατηρήθηκε σε συγκέντρωση 0.175 wt%. Ο δείκτης απόδοσης ήταν μεγαλύτερος από 1, πράγμα που σήμαινε τη αυξημένη μεταφορά θερμότητας και την απόδειξη για εξοικονόμηση ενέργειας χρησιμοποιώντας νανορευστά ως ρευστά μεταφοράς θερμότητας σε τέτοιου είδους θερμικά συστήματα.

Οι Kulkarni et al. [35] έκαναν πειραματική μελέτη ώστε να αξιολογηθεί η θερμική απόδοση ενός ελικοειδούς εναλλάκτη που χρησιμοποιούσε νανορευστό από πράσινο συνθετικό άργυρο. Τα νανοσωματίδια αργύρου τα συνέθεσαν χρησιμοποιώντας εκχύλισμα φύλλων *Neem*. Τα

αποτελέσματα έδειξαν ότι με τη χρήση του πράσινου νανορευστού ενισχύθηκε ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας κατά 32% σε σχέση με το βασικό ρευστό. Παράλληλα, όμως, μειώθηκε ελαφρά ο συντελεστής θερμικής απόδοσης με την αύξηση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων καταλήγοντας σε μια συγκέντρωση στο νανορευστό 0.05%.

Σε ακόμη μία εργασία, οι Yadav et al. [36] παρουσίασαν μια αριθμητική έρευνα για τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας νανορευστού από νερό και φλοιό δέντρου μάνγκο σε εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα. Ο σκοπός της μελέτης ήταν να αναλύσει τη θερμική απόδοση του σε σχέση νανορευστό αλουμίνιας και νερού. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, φάνηκε ότι η παρουσία νανοσωματιδίων φλοιού μάνγκο στο βασικό ρευστό βελτίωσε την μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Ωστόσο, για το ίδιο κλάσμα όγκου νανοσωματιδίων, το νανορευστό αλουμίνιας-νερού ήταν πιο αποτελεσματικό από το νανορευστό από φλοιό μάνγκο. Επίσης ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξήθηκε με την αύξηση του αριθμού Reynolds. Στα πράσινα νανορευστά που ρέουν σε σωλήνα, το αυξημένο ιξώδες τους είναι η κύρια αιτία για την αύξηση της τριβής. Η αριθμητική ανάλυση βρήκε ότι οι τιμές του αριθμού Nusselt και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ήταν υψηλότερες στην περίπτωση χρήσης νανοσωματιδίων αλουμίνιας σε σύγκριση με νανοσωματίδια φλοιού μάνγκο κατά 5%.

### 2.1.2 Λίπανση στις μηχανουργικές κατεργασίες

Στις μηχανουργικές κατεργασίες υπάρχει σαφής βελτίωση στις τριβολογικές ιδιότητες των λιπαντικών λόγω των νανοσωματιδίων, η οποία οφείλεται τόσο στο σχηματισμό μιας προστατευτικής μεμβράνης που προκύπτει από κάποιες αντιδράσεις, όσο και σε ένα μηχανισμό κύλισης, μιας και τα σφαιρικά νανοσωματίδια μπορούν και κυλούνται πάνω στις επιφάνειες επαφής. Κατά συνέπεια μειώνουν την τραχύτητα των επιφανειακών στρώσεων και λειαίνουν την επιφάνεια.

Η επιστημονική κοινότητα κατά καιρούς έχει αναρωτηθεί για τη χρήση των λιπαντικών και κατά πόσο αυτά τελικά βλάπτουν την υγεία και το περιβάλλον. Πόσο ύποπτα είναι τα λεγόμενα αερομεταφερόμενα υγρά σωματίδια των λιπαντικών, τα οποία καταλήγουν στα πατώματα των εργοστασίων, για παράδειγμα; Κάτω από το πρίσμα αυτό, τα λεγόμενα «πράσινα» υγρά κοπής αποτελούν μια καινοτόμο τάση, καθώς όχι μόνο μειώνονται οι ποσότητες λίπανσης, αλλά και αυτές που χρησιμοποιούνται είναι φιλικότερες για το περιβάλλον. Αν και η θερμική απόδοση των φυτικών ελαίων δεν είναι η καλύτερη, έχει αναφερθεί ως επαρκής για τις διαδικασίες μηχανικής κατεργασίας, κάτι που αποτελεί τεράστιο βήμα προς τη βιώσιμη παραγωγή, καθώς αυτά τα έλαια είναι μη τοξικά, μη διαβρωτικά και βιοδιασπώμενα.

Επίσης, κατά τη διάρκεια μιας κατεργασίας, το ποσό θερμότητας που παράγεται μεταξύ του κοπτικού και της επιφάνειας κατεργασίας φθείρει το κοπτικό. Συνεπώς μειώνει τη διάρκεια ζωής του. Το ποσοστό της απαγωγής θερμότητας μπορεί να αυξηθεί λόγω της μείωσης της τριβής από την κύλιση των νανοσωματιδίων. Έρευνα σύγκρινε νανορευστό από νανοσωματίδια αλουμίνια σε σογιέλαιο και σε ψυκτικό γαλάκτωμα 5%. Η διάρκεια ζωής του κοπτικού αυξήθηκε κατά 177% σε σύγκριση με το σογιέλαιο και 230% σε σύγκριση με το ψυκτικό γαλάκτωμα 5%. Τα πιο χρησιμοποιούμενα φυτικά έλαια είναι τα έλαια από σόγια, φιστίκι, καλαμπόκι, ελαιοκράμβη, φοίνικα και ηλιάνθο [27]. Τα μη τοξικά συστατικά, η μοριακή δομή, το ιξώδες και ο συντελεστής τριβής είναι οι κύριες παράμετροι για φυτικά έλαια που χρησιμοποιούνται στη μηχανική κατεργασία. Αυτά τα έλαια αποτελούνται από κορεσμένα λιπαρά οξέα που μπορούν να μειώσουν την τριβή και τη φθορά, ειδικά το στεατικό οξύ που παράγει ένα πιο σταθερό φιλμ στη ζώνη επαφής. Εκτός αυτού, και τα λιπαρά οξέα παραμένουν στις μεταλλικές επιφάνειες σχηματίζοντας φιλμ που βοηθάει κατά της τριβής και της φθοράς.

Σχετικά με τα υβριδικά νανορευστά (μείγμα δύο ή περισσότερων νανορευστών) υπάρχουν δημοσιευμένα παραδείγματα σε υποβοηθούμενη μηχανική κατεργασία. Συγκεκριμένα έχει εξεταστεί η περίπτωση νανοσωματιδίων αλουμίνια και γραφενίου σε μείγμα απιονισμένου νερού και φυτικού ελαίου. Ενδεικτικά οι Shafi & Charoo [37] ανάμειξαν εξαγωγικό νιτρίδιο βορίου σε αβοκάντο και φυσικό λάδι φουντουκιού και αξιολόγησαν τις τριβολογικές ιδιότητες αυτού του νανο-λιπαντικού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπήρξε βελτίωση στην καταπολέμηση της φθοράς και με τα δύο βιολογικά έλαια. Αυτή η βελτίωση επήλθε λόγω του σχηματισμού τριβολογικής μεμβράνης και παγίδευσης νανοσωματιδίων μεταξύ των συσσωματωμάτων φθοράς. Οι βελτιώσεις κατά της φθοράς που παρατηρήθηκαν σε συγκέντρωση νανοσωματιδίων 1 wt%, ήταν 19.5% και 36.55% για το λάδι αβοκάντο και για το λάδι φουντουκιού, αντίστοιχα.

Σε άλλη έρευνα οι Su et al. [38] παρασκεύασαν φιλικά προς το περιβάλλον πράσινα νανορευστά με βάση το λάδι γραφίτη/φυτικού ελαίου και λάδι γραφίτη/εστέρα ως ρευστά βάσης με σκοπό να τα δοκιμάσουν ως νανο-λιπαντικά. Τα νανορευστά λαδιού γραφίτη/εστέρα έδειξαν υψηλότερο ιξώδες και θερμική αγωγιμότητα από τα νανορευστά γραφίτη/φυτικού ελαίου. Βάσει αυτού του γεγονότος, οι ερευνητές θεώρησαν ότι το λάδι γραφίτη/εστέρα ήταν τα προτιμότερα για εφαρμογή στην τεχνολογία μηχανικής κατεργασίας, δεδομένου ότι είχε καλύτερη ικανότητα μείωσης της τριβής και διάχυσης της θερμότητας στη ζώνη κατεργασίας.

Οι Rahman et al. [39] έβαλαν νανοσωματίδια  $Al_2O_3$ ,  $MoS_2$  και ρουτίλιο- $TiO_2$  με κλάσματα όγκου 0.5%, 2% και 4%, σε λάδι ελαιοκράμβης (*canola*) και εξαιρετικά παρθένα ελαιόλαδα

για βιοϊατρικούς σκοπούς τόνρευσης κράματος τιτανίου. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το πράσινο νανορευστό που ετοίμασαν είχε όλα τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά ώστε να θεωρηθεί φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση ως λιπαντικό κοπής μετάλλων. Προσέφερε δε, μια τιμή τραχύτητας επιφάνειας 0.248  $\mu\text{m}$  για το νανορευστό 0.5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -λάδι *canola*, η οποία είναι κατά 73.1% και 57.95% χαμηλότερη από αυτή που αναμένεται στη ξηρή κοπή και κατεργασία με βάση ορυκτέλαια αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι η αύξηση της συγκέντρωσης νανοσωματιδίων οδήγησε στη μείωση της αποτελεσματικότητας της νανολίπανσης, και ότι το λάδι *canola* αποτέλεσε καλύτερη επιλογή από το ελαιόλαδο για υγρό βάσης. Στη συγκέντρωση 0.5% το  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -*canola* δεν εμφάνισε επιφανειακά ελαττώματα.

### 2.1.3 Ηλιακοί συλλέκτες

Η συνεχώς αυξανόμενη έλλειψη συμβατικών πηγών ενέργειας, όπως για παράδειγμα τα ορυκτά καύσιμα με τις όποιες αρνητικές επιπτώσεις τους στο περιβάλλον, στρέφει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στην ηλιακή ενέργεια, η οποία είναι καθαρή, ασφαλής και αστείρευτη. Υπό το πρίσμα αυτό, δημιουργείται η ανάγκη για ηλιακούς συλλέκτες, όπως για παράδειγμα στους επίπεδους, έτσι ώστε να μετατρέπεται η ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια μέσω μηχανισμών μετατροπής ενέργειας. Τα συμβατικά υγρά των ηλιακών θερμικών συστημάτων συνήθως έχουν περιορισμένη θερμική αγωγιμότητα, χαμηλή απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας και η επεξεργασία τους απαιτεί τη χρήση ορυκτών καυσίμων, που αποτελεί πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Για το λόγο αυτό δημιουργείται η ανάγκη βελτίωσης της αποτελεσματικότητας της ηλιακής θερμικής ενέργειας μέσω των συστημάτων αυτών, σε συνδυασμό με την φιλικότητα στο περιβάλλον.

Ερευνητές παρήγαγαν νανοσωματίδια αργύρου μέσω βιοσύνθεσης και χρήσης εκχυλισμάτων αγροτοβιομηχανικών υπολειμμάτων από κρασί ως αναγωγικό παράγοντα, έτσι ώστε να μελετηθούν οι δυνατότητες του νανορευστού που δημιούργησαν στη θερμική απορρόφηση σε τιμή συγκέντρωσης 1 mM [40]. Το νανορευστό αργύρου/λαδιού άφησε πολλές υποσχέσεις ως εναλλακτική λύση εφαρμογών ηλιακών θερμικών συστημάτων.

Οι Okonkwo et al. [41] αξιολόγησαν τη θερμική απόδοση ενός παραβολικού συλλέκτη χρησιμοποιώντας πράσινα νανορευστά με βάση το νερό. Οι ερευνητές στην προσπάθεια αυτή χρησιμοποίησαν συνθετικά νανοσωματίδια από εκχύλισμα φύλλων ελιάς και κριθαριού στο νερό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπήρξε μια μέση αύξηση 0.073% της θερμικής απόδοσης με τη χρήση νανοσωματιδίων από κριθάρι, και μέση ενίσχυση 0.77% με τη χρήση εκχυλίσματος

φύλλων ελιάς-νανορευστών οξειδίου του τιτανίου. Όσον αφορά τη μεταφορά θερμότητας, παρουσιάστηκε μέση βελτίωση 128% και 138% αντίστοιχα. Η μέση διακύμανση στις απώλειες πίεσης μεταξύ των νανορευστών και του βασικού ρευστού ήταν λιγότερη από 14.85% σε κλάσμα όγκου 3%.

#### 2.1.4 Χορήγηση φαρμάκων

Η χορήγηση φαρμάκων έχει κι αυτή μεγάλο πεδίο διερεύνησης. Στόχος είναι να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα κατά τη χορήγηση των φαρμακευτικών ενώσεων. Στο πεδίο αυτό η πράσινη νανοτεχνολογία έχει κι εδώ να προσφέρει πολλά. Με τη χρήση των πράσινων νανοϋλικών δημιουργήθηκε η προσπάθεια για όλο και πιο στοχευόμενη θεραπεία στα καρκινικά κύτταρα, στα αυξημένα θεραπευτικά χαρακτηριστικά του σκευάσματος, στην ασφάλειά του, στην ελαχιστοποιημένη τοξικότητά του, στη βιοδιάσπασή του αλλά και στην παρατεταμένη διάρκεια ζωής του.

Η σημασία της χρήσης νανοσωματιδίων ως παραγόντων χορήγησης φαρμάκων στη πρόληψη και τη θεραπεία ασθενειών έγκειται στην υψηλή βιοδιαθεσιμότητα, την ελεγχόμενη και παρατεταμένη απελευθέρωση του φαρμάκου, στον παρατεταμένο χρόνο κυκλοφορίας, στην τροποποιημένη κυτταρική πρόσληψη, στην στοχευόμενη χορήγηση και στους τρόπους χορήγησης όπως είναι η παρεντερική, η στοματική, η ρινική και η ενδοφθάλμια. Με την ως σήμερα γνώση [14,42], μια μεγάλη ποικιλία νανοσωματιδίων από μέταλλα και οξείδια μετάλλων, αμέταλλα, πολυμερή, αλλά και με βάση τον άνθρακα και στερεούς φορείς λιπιδίων, έχουν σχεδιαστεί ως μεταφορείς φαρμάκων, πρωτεϊνών, πεπτιδίων και αντισωμάτων.

Η ποιότητα της παροχής αυτής μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την εισαγωγή πράσινων συνθέσεων με μη δηλητηριώδεις πρώτες ύλες. Επίσης, τα παραμαγνητικά νανοσωματίδια οξειδίου του σιδήρου είναι από τους πιο χρησιμοποιούμενους φορείς για μαγνητική χορήγηση φαρμάκου προς ανίχνευση, προσυμπτωματικό έλεγχο και θεραπεία του καρκίνου [43]. Ως προς αυτό, υπάρχουν αρκετές δημοσιευμένες εργασίες για τη πράσινη σύνθεση υπερπαραμαγνητικών νανοσωματιδίων μαγνητίτη για αντικαρκινικό συστήματα χορήγησης φαρμάκων.

Ενδεικτικά, σε μία εργασία που βρέθηκε κατά την βιβλιογραφική ανασκόπηση [44], οι ερευνητές ανέπτυξαν μια «πράσινη» πρόταση φαρμάκου για την καταπολέμηση καρκινικών κύτταρων.



### 2.1.5 Βιοκτόνοι παράγοντες

Η βακτηριακή αντοχή έχει αναπτυχθεί έναντι των συμβατικών αντιβακτηριακών. Συγκεκριμένα, η αυξημένη χρήση αντιμικροβιακών φαρμάκων έχει οδηγήσει σε ανάπτυξη ανθεκτικότητας μικροοργανισμών σε πολλά αντιβιοτικά. Αυτό εμπόδισε τη θεραπεία των λοιμώξεων που προκαλούνται από αυτούς τους μικροοργανισμούς. Συνεπώς, πρέπει να υιοθετηθούν εναλλακτικές λύσεις για την ελαχιστοποίηση αυτών των περιορισμών. Οι φυσικές ενώσεις ή εκχυλίσματα φυτών εμφανίζουν την απαιτούμενη βιοσυμβατότητα για την ανάπτυξη μιας νέας κατηγορίας. Επομένως, βιοδραστικές ενώσεις με ενισχυμένο αντιβακτηριακό δράση μπορεί να χρησιμοποιηθούν στη θεραπεία βακτηριακών λοιμώξεων. Εξαιτίας της υψηλής βιοσυμβατότητάς τους, τα νανοσωματίδια χρυσού, αργύρου και παλλαδίου μελετώνται για βιοϊατρικές εφαρμογές. Δεδομένου ότι τα φυτά είναι πηγή βακτηριοκτόνων παραγόντων κατά μυκήτων, εντόμων, ζυμομυκήτων και νηματωδών, οι ερευνητές υιοθετούν, κι εδώ, την παρασκευή νανοσωματιδίων με πράσινη σύνθεση με χρήση των αναγωγικών παραγόντων που συναντώνται στα φυτά.

Η πιο πρόσφατη ερευνητική τάση ασχολείται με τη δέσμευση των αντιβιοτικών σε νανοσωματίδια για ενίσχυση της αντιμικροβιακής δράσης και για μετριασμό των παρενεργειών, δεδομένου ότι απαιτείται μικρότερη δόση αντιβιοτικών δεδομένου ότι τα νανοσωματίδια παρέχουν τη συγκέντρωση της προσφοράς φαρμάκων στο θέση αλληλεπίδρασης με τα βακτηριακά κύτταρα. Η μελέτη των Vijilvani et.al. [45] δημιούργησε νανοσωματίδια αργύρου και παλλαδίου με πράσινη σύνθεση και εκχύλισμα φύλλων *nigrum* ως αναγωγικό παράγοντα και σταθεροποιητή. Οι αντιμικροβιακές μελέτες που έγιναν σε αυτά τα νανορευσά, έδειξαν ότι σε μέγεθος 3.46 nm τα νανοσωματίδια αργύρου είχαν αποτελεσματική αναστολή έναντι των βακτηρίων.

### 2.1.6 Απομάκρυνση ρύπων

Ο συνεχώς αυξανόμενος πληθυσμός και η περαιτέρω ανάπτυξη των βιομηχανιών έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, οδηγώντας σε εξάντληση των φυσικών πόρων. Η απόρριψη των βιομηχανικών και οικιακών αποβλήτων περιέχει βαρέα μέταλλα που είναι δηλητηριώδη για τα έμβια είδη με μακροχρόνια πρόσληψη. Μεταξύ αυτών, ο χαλκός και ο μόλυβδος είναι δύο από τα πιο γνωστούς ρύπους που συναντώνται στα υγρά απόβλητα που προέρχονται από την ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση, ηλεκτρικά καλώδια και βιομηχανίες βαφής, όπως η κλωστοϋφαντουργία, τα τρόφιμα και τα φαρμακευτικά προϊόντα. Ως εκ τούτου, είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία του περιβάλλοντος και της υγείας η απομάκρυνση αυτών των βαρέων μετάλλων από τα υγρά απόβλητα και, στο πλαίσιο αυτό, διάφορες προσεγγίσεις, μεταξύ των οποίων οι φυσικές, χημικές και βιολογικές ακολουθούνται για την επεξεργασία των υγρών

αποβλήτων. Ένα παράδειγμα αυτών των προσεγγίσεων είναι η φωτοκατάλυση, η οποία είναι μια μέθοδος χαμηλού κόστους, μη τοξική και υψηλής αποδοτικότητας που πραγματοποιεί την οξείδωση των τοξικών ρύπων με υπεριώδη ακτινοβολία και ευαισθητοποιείται από φωτοκαταλύτες που, στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι νανοσωματίδια μετάλλων και οξειδίων μετάλλων.

Σε μια πρόσφατη μελέτη [46], νανοσωματίδια οξειδίου του τιτανίου παρασκευάστηκαν με βιοσύνθεση από εκχύλισμα φύλλων *Syzygium cumini* και χρησιμοποιήθηκαν για την απομάκρυνση του μολύβδου από εκρηκτικά βιομηχανικά λύματα με τη βοήθεια φωτοκαταλυτικής αποικοδόμησης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα νανοσωματίδια οξειδίου του τιτανίου ήταν κατάλληλα για την απομάκρυνση του μολύβδου, δεδομένου ότι πραγματοποίησαν 75.5% απομάκρυνση της χημικής απαίτησης σε οξυγόνο και 82.53% απομάκρυνση του μολύβδου ιοντικής μορφής  $Pb^{2+}$ .

Τέλος, μία άλλη εργασία [47] περιέγραψε δύο μεθόδους χαμηλής τοξικότητας για τη σύνθεση πράσινων νανοσωματιδίων οξειδίου του ψευδαργύρου: η μία χρησιμοποιώντας αλόη βέρα και η άλλη χρησιμοποιώντας άμυλο μανιόκας (*cassava starch*). Τα νανοσωματίδια που παράχθηκαν και με τις δύο μεθόδους δοκιμάστηκαν ως προσροφητικά για την απομάκρυνση χαλκού σε υγρά απόβλητα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε χαμηλή συγκέντρωση ιόντων  $Cu^{2+}$ , τα νανοσωματίδια που παρασκευάστηκαν και με τις δύο μεθόδους είχαν την ίδια αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης, αλλά για υψηλότερες τιμές συγκέντρωσης προσροφητικού ( $> 80 \text{ mg/L}$ ) τα νανοσωματίδια που παράχθηκαν με τη χρήση εκχυλίσματος αλόης βέρα είχαν υψηλότερη αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης.

## **2.2 Τα οφέλη από την πράσινη σύνθεση έναντι των άλλων φυσικών και χημικών μεθόδων**

Ο όρος πράσινη σύνθεση νανοσωματιδίων αναφέρεται σε μεθόδους παρασκευής νανοσωματιδίων με φυσικά εκχυλίσματα. Αυτές οι πράσινες μέθοδοι μπορούν να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα των πόρων με την ανάπτυξη μη τοξικών, ανανεώσιμων και βιοδιασπώμενων νανοϋλικών. Η χρήση των πράσινων μεθόδων αμβλύνει την ανάγκη για επικίνδυνα αντιδραστήρια και δηλητηριώδη βοηθητικά χημικά προϊόντα. Τα πράσινα νανορευστά μπορούν να οριστούν από τους διάφορους τύπους νανοσωματιδίων που διασκορπίζονται σε συμβατικά ή φυσικά ρευστά. Η υποχρέωση περιορισμού της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων συνεπάγεται τη χρήση πράσινων πηγών ενέργειας που βελτιώνει την αποδοτικότητα των συστημάτων θερμικής διαχείρισης. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να τονιστεί η ανάγκη χρήσης ρευστών που προέρχονται από

φυσικούς πόρους. Αυτή είναι η περίπτωση των φυτών, των φρούτων και των φύλλων τσαγιού, των φυτικών ελαίων, των κολοβωμάτων καλαμποκιού, των μικροοργανισμών, των υπολειμμάτων αποβλήτων και των εκχυλισμάτων. Τα οφέλη των φυσικών ρευστών περιλαμβάνουν την εξοικονόμηση ενεργειακών δαπανών και εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με την παραγωγή πετροχημικών γλυκολών. Επίσης, τα φυσικά ρευστά βάσης είναι βιώσιμα με χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα και ευρύ πεδίο εφαρμογών μεγάλης κλίμακας.

Τα πλεονεκτήματα που έχει η πράσινη σύνθεση έναντι των συμβατικών φυσικών και χημικών μεθόδων είναι πολλά [27]. Επιγραμματικά:

- Είναι μια σχετικά εύκολη μέθοδος παρασκευής και απαιτεί μικρό χρόνο αντίδρασης σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Είναι μια καθαρή, ασφαλής και φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος, δεδομένου ότι απαιτούνται μη τοξικές χημικές ουσίες.
- Χρησιμοποιεί ανανεώσιμες πηγές και είναι πιο αποδοτική από άποψη κόστους σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους.
- Τα πράσινα νανοσωματίδια χρησιμοποιούν βιολογικά συστατικά που εξάγονται από φυτά, όπως φωτοχημικά, τα οποία δρουν ως αναγωγικοί και σταθεροποιητικοί παράγοντες αντί για επικίνδυνες ουσίες στη θέση τους. Κατά συνέπεια, τα νανοσωματίδια που παρασκευάζονται με φιλικές προς το περιβάλλον μεθόδους είναι περισσότερο βιοσυμβατά από εκείνα που συντίθενται με συμβατικές φυσικές και χημικές μεθόδους.
- Δεν απαιτούνται συνθήκες παρασκευής όπως υψηλή πίεση και θερμοκρασία, προκαλώντας σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Οι φωτοχημικές ουσίες των φυτών και τα ένζυμα από βακτήρια είναι υπεύθυνα για τις περισσότερες πράσινες συνθέσεις. Τα νανοσωματίδια λαμβάνονται μετά από πλύση, διήθηση, ξήρανση, θέρμανση, πύρωση και ανόπτηση.
- Τα φυτικά εκχυλίσματα παράγουν πιο σταθερά νανοσωματίδια και είναι προτιμότερα για παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Τα φυτικά εκχυλίσματα περιέχουν βιομόρια, όπως φλαβονοειδή, τερπενοειδή και άλλες πολυφαινόλες, τα οποία επικαλύπτουν την επιφάνεια των νανοσωματιδίων, αποτρέποντας τη συσσωμάτωση και επιτυγχάνοντας μια πιο ομοιόμορφη κατανομή μεγέθους σωματιδίων [48].

Αρκετά νανοϋλικά όπως ο άργυρος, ο χαλκός, το οξείδιο του χαλκού και το οξείδιο του σιδήρου έχουν συντεθεί χρησιμοποιώντας μύκητες, βακτήρια, φύκια και φυτικά εκχυλίσματα σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών [27]. Αν και υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί, τα πράσινα νανορευστά έχουν σχετικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά νανορευστά. Ανακαλύφθηκαν

κάποιοι τύποι πράσινων νανορευστών που εμφάνισαν μεγάλη σταθερότητα και πολλά υποσχόμενες θερμοφυσικές ιδιότητες. Αν στα παραπάνω προσθέσουμε την εύκολη διαθεσιμότητα, την ευκολία προετοιμασίας και την μικρή κατανάλωση ενέργειας που χρειαζόμαστε για την παρασκευή τους, εύκολα καταλαβαίνουμε ότι αυτή η κατηγορία νανορευστών δε μπορεί παρά να αποτελέσει μια εξαιρετική εναλλακτική λύση ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας.

Στην παρακάτω **Εικόνα 4** συνοψίζονται μερικά πλεονεκτήματα που έχει η πράσινη σύνθεση έναντι των συμβατικών φυσικών και χημικών μεθόδων.



*Εικόνα 4. Τα οφέλη από την πράσινη σύνθεση νανοσωματιδίων, [27].*

Όσον αφορά τα νανοϋλικά, τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί μεγάλη προσοχή στο επίπεδο της τοξικότητάς τους και τις πιθανές βιολογικές επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι διαφορετικές μέθοδοι παρασκευής των νανοσωματιδίων έχουν διακριτές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι οποίες μπορούν να αξιολογηθούν από τον LCA (Life Cycle Assessment). Πάνω σε αυτό υπήρξε έρευνα των Grimaldi et al. [49], για τη σύνθεση νανοσωματιδίων χρυσού. Η έρευνα αυτή συμπέρανε ότι η συνεχής ροή είχε λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, κυρίως λόγω ηπιότερης σύνθεσης, λιγότερα επικίνδυνα απόβλητα και χαμηλότερες απαιτήσεις εργασίας. Επιπλέον, οι Meesters et al. [50] εισήγαγαν ένα μοντέλο για την πιθανή περιβαλλοντική επίπτωση κατά την παραγωγή νανοσωματιδίων από οξείδιο του τιτανίου και οξείδιο του ψευδαργύρου, και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η υψηλότερη συγκέντρωση νανοσωματιδίων στο νερό προέρχεται από τη συσσωμάτωση με φυσικά κolloειδή στοιχεία τα οποία αφού δημιουργήσουν ιζήματα εισχωρούν στο έδαφος.

Οι Hewitt et. al. [51] διερεύνησαν την τοξικότητα διαφορετικών οδών εισόδου των νανοσωματιδίων στο ανθρώπινο σώμα, υποδεικνύοντας ότι αυτά έχουν τις ακριβείς διαστάσεις για αλληλεπίδραση με τα κύτταρα μέσω της εισπνοής, ή στοματικών και δερματικών οδών, προκαλώντας αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία όπως φλεγμονή, αλλεργία, γονοτοξικότητα, καρκινογένεση, επηρεάζοντας το κεντρικό νευρικό σύστημα και όλο το ανοσοποιητικό σύστημα. Οι Hou et. al. [52] παρουσίασαν μια μελέτη για τους μηχανισμούς που επηρεάζουν την τοξικότητα των νανοσωματιδίων οξειδίου του τιτανίου και κατέληξαν ότι η παραγωγή των αντιδραστικών ειδών οξυγόνου (Reactive Oxygen Species) μπορεί να προκαλέσει βλάβη του κυτταρικού τοιχώματος.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των νανορευστών είναι συνδυασμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων νανοσωματιδίων και βασικού ρευστού. Βασικό ρευστό για παράδειγμα θα μπορούσε να είναι το νερό, το οποίο έχει και μεγάλη διαθεσιμότητα και μεγάλη ασφάλεια με παντελή απουσία τοξικότητας. Τα νανοσωματίδια μοιραία αποκτούν όλο το μερίδιο ευθύνης στην πιθανή αρνητική συμβολή στο περιβάλλον. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των νανορευστών οπότε, μπορούν να προέλθουν από τρεις κύριοι παράγοντες:

- Τύπο
- Συγκέντρωση νανοσωματιδίων
- Μέθοδο παρασκευής.

Σύμφωνα με το μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας όσον αφορά παρασκευασμένα νανορευστά, βλέπουμε ότι οι συγκεντρώσεις των νανοσωματιδίων είναι περίπου έως 10%. Προκαλείται συνεπώς μια υπερβολική ανεπιθύμητη αύξηση του ιξώδους και της πυκνότητας των νανορευστών που προκαλεί υψηλές ανάγκες άντλησης, αυξημένες τριβές, πτώση πίεσης και διάβρωση του εξοπλισμού.

Η χαμηλή συγκέντρωση νανοσωματιδίων μπορεί να μειώσει σημαντικά τους κινδύνους που σχετίζονται με πιθανή απόρριψη του νανορευστού στο περιβάλλον, κάτι το οποίο θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά το χειρισμό νανορευστών με τοξικότητα για τα υδρόβια οικοσυστήματα. Οι έρευνες στο μέλλον όσον αφορά την ανάπτυξη των πράσινων νανοσωματιδίων πρέπει να επικεντρωθούν στην επέκταση των εργαστηριακών εργασιών σε βιομηχανική κλίμακα, λαμβάνοντας υπόψη τις ανησυχίες για την υγεία και το περιβάλλον.

### 2.3 Τα είδη των πράσινων νανοσωματιδίων

Σύμφωνα με την ως τώρα βιβλιογραφία υπάρχουν τα εξής είδη:

**α) Μεταλλικά νανοσωματίδια.** Αυτά είναι ίσως τα περισσότερα μελετημένα. Ενδεικτικά αναφέρονται οι παρακάτω έρευνες:

- Η έρευνα των Sun et al. [53] στην οποία παρουσιάζεται παρασκευή νανοσωματιδίων αργύρου από φύλλα πράσινου τσαγιού, έπειτα από πλύσιμο, ξήρανση και διασπορά σε απεσταγμένο νερό της προκύπτουσας νανοσκόνης.
- Η έρευνα των Kalita & Ganguli [54] όπου παρασκεύασαν νανοσωματίδια χρησιμοποιώντας εκχύλισμα φύλλων *Hibiscus sabdariffa*.
- Η έρευνα του Al-Ghamdi [55] όπου νανοσωματίδια αργύρου βιοσυντέθηκαν χρησιμοποιώντας υδατικό εκχύλισμα φύλλων δάφνης ως αναγωγικό και καλυπτικό μέσο. Τα νανοσωματίδια ήταν σταθερά για περίοδο 6 μηνών και παρουσίασαν αυξημένη αντιμικροβιακή δράση με την αύξηση της δοσολογίας του φυτικού εκχυλίσματος. Τα νανοσωματίδια έδειξαν, επίσης, ότι διαθέτουν υψηλό δυναμικό στην απομάκρυνση της βασικής καστανής χρωστικής 1 από υδατικά μέσα, επιτυγχάνοντας πλήρη απομάκρυνση μετά από οκτώ ώρες.
- Η μελέτη που διεξήχθη από τους Karadnis et al. [56] συνέθεσε νανοσωματίδια χαλκού με την αναγωγή εξαϋδρικού νιτρικού χαλκού χρησιμοποιώντας γλυκόζη ως αναγωγικό μέσο. Οι συγγραφείς αξιολόγησαν την επίδραση της ποσότητας του αναγωγικού παράγοντα και του τύπου και της συγκέντρωσης της επιφανειοδραστικής ουσίας στη μορφολογία των νανοσωματιδίων. Στο πλαίσιο αυτό παρατήρησαν ότι όταν η συγκέντρωση του αναγωγικού παράγοντα αυξήθηκε από 10 gm σε 20 gm, το μέγεθος των νανοσωματιδίων μειώθηκε κατά 50%.

**β) Νανοσωματίδια οξειδίου μετάλλου.** Ενδεικτικές έρευνες αυτών των νανοσωματιδίων αποτελούν:

- Η εργασία των Jegadeesan et al. [57], όπου αναπτύχθηκε μια βιογενής σύνθεση νανοσωματιδίων οξειδίου του σιδήρου με τη χρήση υδατικών εκχυλισμάτων *Terminalia bellirica*, *Moringa oleifera fruits* και *Moringa oleifera leaf*. Οι συγγραφείς διέσπειραν τα νανοσωματίδια σε μείγμα νερού και προπυλενογλυκόλης και προσδιόρισαν τη θερμική αγωγιμότητά τους. Ανέφεραν ότι η υψηλή θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού έδειξε τις δυνατότητές του ως εναλλακτικό ρευστό μεταφοράς θερμότητας.

- Η έρευνα των Sone et al. [58] όπου δημιουργήθηκαν νανοσωματίδια οξειδίου του χαλκού χρησιμοποιώντας εκχυλίσματα λουλουδιών *Callistemon viminalis oleanolic* και *betulic acids*. Ο σχηματισμός οξειδίου του χαλκού ήταν εμφανής στους 500 °C μετά από ανόπτηση στους 200 °C και 500 °C για 2 ώρες έκαστη.
- Η πειραματική εργασία των Judenta et al. [59] διεξήγαγε τη βιοσύνθεση νανοσωματιδίων αλουμίνιας με sol-gel και χρησιμοποιώντας εκχύλισμα *Averrhoa bilimbi* ως παράγοντα για την αποτροπή της συσσώρευσής τους σε συσσωματώματα. Τα νανοσωματίδια διασκορπίστηκαν σε νερό και αναφέρθηκαν τιμές της κρίσιμης ροής θερμότητας 17.29%, 77.04% και 76.70% σε κλάσματα όγκου 0.2%, 0.5% και 0.8% αντίστοιχα.
- Φιλικά προς το περιβάλλον νανοσωματίδια οξειδίου του ψευδαργύρου συντέθηκαν χρησιμοποιώντας εκχύλισμα φύλλων *Veronica multifida* και αφυδατωμένο οξικό ψευδάργυρο ως πρόδρομη ουσία στην εργασία των Doğan & Kocabaş [60]. Τα αποτελέσματα διευκρίνισαν ότι αυτά τα νανοσωματίδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά επικάλυψης σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συγκεκριμένα στις φαρμακευτικές και καλλυντικές βιομηχανίες.
- Η έρευνα των Ranjbarzade et al. [61], όπου συντέθηκαν πράσινα νανοσωματίδια πυριτίου χρησιμοποιώντας πίτουρο ρυζιού. Συγκεκριμένα, διασκορπίστηκαν σε νερό και σχημάτισαν ένα σταθερό για περισσότερο από έξι μήνες νανορευστό. Η βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας του νανορευστού αυτού ήταν εμφανέστατη, καθώς αυξήθηκε κατά 38,2% σε σύγκριση με το νερό (που ήταν το ρευστό βάσης) σε κλάσμα όγκου 3% και στους 55 °C.

**γ) Νανοσωματίδια άνθρακα/νανοσωλήνες άνθρακα:** Τα νανορευστά αυτά κατέχουν σημαντικό ρόλο στην κατηγορία των πράσινων νανορευστών. Ενδεικτικές μελέτες είναι οι παρακάτω:

- Οι Kumar et al. [62] δημιούργησαν νανοσωματίδια γραφενίου χρησιμοποιώντας γαλλικό οξύ (gallic acid) από την μέθοδο της ελεύθερης ρίζας (free radical method). Η ισχυρή ομοιοπολική λειτουργικότητα των πράσινων νανοσωματιδίων του γραφενίου είχε ως αποτέλεσμα μια πιο ομοιόμορφη διασπορά στο νερό.
- Οι Sadri et al. [63] εφάρμοσαν επίσης ομοιοπολική λειτουργικότητα στα νανοσωματίδια γραφενίου χρησιμοποιώντας εκχυλίσματα μπουμπουκιού γαρύφαλλου με την τεχνική των ελεύθερων ριζών.
- Σε άλλη έρευνα των Sadri et al. [64] παράχθηκαν νανορευστά που αποτελούνταν από πολλαπλών τοιχωμάτων νανοσωλήνες άνθρακα (MWCNTs) προερχόμενα από βιομάζα 1,2-προπανοδιόλη ή 1,3-προπανοδιόλη και N-βινυλοπυρρολιδόνη. Τόσο η θερμική

αγωγιμότητα όσο και η πυκνότητα των νανορευστών αυτών παρέμενε αναλλοίωτη για 8 μήνες και δεν υπήρξε καθίζηση για 14 μήνες. Τα νανορευστά με 2 wt% MWCNTs βελτίωσαν τη θερμική αγωγιμότητα κατά 22% και 20% σε σύγκριση με αυτά της ίδιας συγκέντρωσης 1,2-προπανοδιόλης και 1,3-προπανοδιόλης, αντίστοιχα.

**δ) Σύνθετα/υβριδικά νανοσωματίδια:** Αν και τα υβριδικά πράσινα νανορευστά εμφανίζουν ενισχυμένη θερμική αγωγιμότητα, εντούτοις παρουσίασαν μη ικανοποιητικές ρεολογικές ιδιότητες. Παρόλα αυτά έχουν προσελκύσει ιδιαίτερα το ενδιαφέρον των ερευνητών το τελευταίο διάστημα [27]. Αντιπροσωπευτικές έρευνες αποτελούν:

- Η εργασία των Luna-Sánchez et al. [65], όπου σχηματίστηκε ένα βιο-σύνθετο νανορευστό από νανοσωματίδια αργύρου και ακρυλική ρητίνη χρησιμοποιώντας εκχύλισμα *jalapeno chili*.
- Η εργασία των Wang et al. [66], όπου παρήγαγαν ένα νανοςύνθετο βιο-μετάξι από ανάμειξη γραφενίου από τη φωτοαναγωγή του οξειδίου του γραφίτη και την ινώδη πρωτεΐνη του μεταξιού που εκχυλίζεται από διάλυμα μεταξοσκώληκα *Bombyx mori*.
- Η εργασία των Gajrani et al. [67], όπου αναμείχθηκε  $\text{CaF}_2$  και  $\text{MoS}_2$  σε έλαιο καρύδας, εκχυλίσματα *Azadirachta indica*, *Cymbopogon citratus*, *Centella asiatica* και σιρόπι *jaggery* για την απόκτηση υβριδικών πράσινων νανορευστών με την προσθήκη σταθεροποιητών όπως φύλλα τσαγιού.
- Η εργασία των Yang et al. [68], όπου παρασκεύασαν πράσινα νανορευστά νανοσωματίδιων νικελίου. Η συμπεριφορά του υγρού στους  $50.6^\circ\text{C}$  εμπόδισε τη συσσωμάτωση νανοσωματιδίων νικελίου και παρουσίασε καλή ομοιόμορφη διασπορά, θερμική σταθερότητα και δυνατότητα επεξεργασίας.

**ε) Νανοσωματίδια βιοϋλικών:** Πρόσφατες μελέτες απέδειξαν ότι τα φυσικά εκχυλίσματα φυτών και φρούτων μπορούν να διασπαρθούν σε βασικά υγρά για να παρασκευαστούν νανορευστά με βελτιωμένες θερμοφυσικές ιδιότητες. Ενδεικτικά, αναφέρονται οι παρακάτω έρευνες που βρέθηκαν κατά την βιβλιογραφική ανασκόπηση:

- Στη μελέτη των Rajakumari et al. [69] νανοςύνθετα υλικά που αποτελούνταν από υπολείμματα γεωργικών αποβλήτων και γραφενίου συντέθηκαν με ικανοποιητική αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας και άλλων ιδιοτήτων. Παρόλα αυτά υπάρχουν περιορισμοί στις συνθέσεις που βασίζονται σε βιοϋλικά.



- Στην εργασία των Chen et al. [70] ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας επιδεινώθηκε γρήγορα σε νανοσωματίδια από φλοιό μάνγκο διασκορπισμένα στο νερό, Τα νανορευστά παρουσίασαν αμελητέα αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας, ενώ το ιζώδες τους παρουσίασε φθίνουσα πορεία.
- Οι Awua et al. [71] προσδιόρισαν το ιζώδες των διασπορών νανοσωματιδίων ινών πυρήνα φοινικοειδούς που παράγονται από σφαιρική άλεση. Το ιζώδες των νανορευστών ήταν υψηλότερο από εκείνο του βασικού ρευστού και αυξανόταν με τη συγκέντρωση των νανοσωματιδίων.
- Οι Hosseini & Mirzaei [72] πηλός μοντμοριλλονίτης (montmorillonite) διασκορπίστηκε στο νερό για να σχηματιστούν πράσινα νανορευστά μοντμοριλλονίτη (MMTNF). Για το σκοπό αυτό, προστέθηκαν στο νερό διαφορετικές συγκεντρώσεις νανοσωματιδίων μοντμοριλλονίτη 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% και 1%. Τα αποτελέσματα διαπίστωσαν ότι τα MMTNFs παρουσίαζαν μια αρχική αστάθεια, αλλά σταδιακά την ξεπερνούσαν και διέθεταν καλή μακροπρόθεσμη σταθερότητα. Η προσθήκη νανοσωματιδίων μοντμοριλλονίτη οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας έως και 8.3% σε σύγκριση με εκείνη του νερού. Το πράσινο νανορευστό αξιολογήθηκε να ρέει σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, ενώ η καλύτερη θερμική απόδοση επιτεύχθηκε σε κλάσμα βάρους μοντμοριλλονίτη 0.6%. Σε αυτή τη συγκέντρωση νανοσωματιδίων, ο συντελεστής και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας και η θερμική απόδοση βελτιώθηκαν κατά 27.25%, 17.65% και 7.82%, αντίστοιχα, σε σύγκριση με το νερό.

## 2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την πράσινη σύνθεση των νανοσωματιδίων

### 2.4.1 Μέθοδοι προετοιμασίας

Όπως και τα συμβατικά, τα πράσινα νανορευστά μπορούν να παρασκευαστούν με τη μέθοδο ενός ή δύο σταδίων. Η μέθοδος ενός σταδίου συνήθως παράγει νανορευστά υψηλής σταθερότητας, χωρίς καθίζηση ή οξείδωση, αλλά δεν ενδείκνυται για παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Η μέθοδος δύο σταδίων απαιτεί πρόσθετα αφού έχει τα μειονεκτήματα της ταχείας συσσωμάτωσης και καθίζησης των νανοσωματιδίων στο βασικό ρευστό. Ανεξάρτητα όμως από αυτό είναι ένας εύκολος και οικονομικός τρόπος παραγωγής νανορευστών σε μεγάλη κλίμακα. Και οι δύο μέθοδοι περιλαμβάνουν διαδικασίες καθαρισμού και διήθησης με στόχο την απομάκρυνση των μορίων που δεν αντιδρούν και ακαθαρσιών που υπάρχουν στα φυσικά εκχυλίσματα και διαλύματα. Η ύπαρξη των ακαθαρσιών μπορεί να επιδεινώσει την αναγωγική αντίδραση και τις τελικές θερμοφυσικές ιδιότητες των νανορευστών. Επιπροσθέτως, και το ιζώδες αυξάνεται με την παρουσία των ακαθαρσιών, κάτι που όπως έχει προαναφερθεί πρέπει να αποφεύγεται για-

τί προσκαλεί ανάγκες επιπλέον αντλητικής ισχύος στις συσκευές και τα συστήματα θερμικής διαχείρισης. Στις πράσινες συνθέσεις έχει μεγάλη σημασία ο σωστός καθαρισμός των νανοσωματιδίων πριν τη χρησιμοποίησή τους σε οποιαδήποτε εφαρμογή. Για το λόγο αυτό, οι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει τη μέθοδο της φυγοκέντρωσης για τον καθαρισμό λόγω της γρηγοράδας και της ευκολίας λειτουργίας της μεθόδου. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος έχει ορισμένους περιορισμούς [27].

Μια άλλη απλή μέθοδος καθαρισμού είναι η μέθοδος του διαχωρισμού (dialysis) με χρήση μεμβράνης. Τα μικρά οργανικά μόρια που υπάρχουν στα φυτικά εκχυλίσματα διαπερνούν τη μεμβράνη, ενώ τα οργανικά μόρια που υπάρχουν ως παράγοντες παθητικοποίησης της επιφάνειας παραμένουν με τα νανοσωματίδια εντός της μεμβράνης. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος καθαρισμού είναι χρονοβόρα και απαιτεί αρκετές ώρες μέχρι την ολοκλήρωση. Τα μαγνητικά μεταλλικά νανοσωματίδια, όπως για παράδειγμα τα  $Fe_2O_3$  και  $Fe_3O_4$ , μπορούν να διαχωριστούν με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Παρόλα αυτά, η αφαίρεση των βιομορίων που συκρατούνται γερά στην επιφάνεια των νανοσωματιδίων περιλαμβάνει αρκετούς διαχωρισμούς και βήματα επεξεργασίας. Στην μελέτη των Shirmehenji et al. [73], οι ερευνητές παράγαν νανοσωματίδια σεληνίου, χρησιμοποιώντας απόβλητα με ποσότητες σεληνίου (6.11%), αργύρου (4.12%), μολύβδου (4.69%), χαλκού (3.61%), αντιμόνιου (4.97%) και θεικού βαρίου (70.01%).

Οι πράσινες τεχνικές συνεπάγονται λιγότερη ενέργεια κι επομένως είναι πιο οικονομικές από τις συμβατικές. Ως εκ τούτου, είναι πολλά υποσχόμενες τεχνικές για παραγωγές μεγάλης κλίμακας νανοσωματιδίων. Οι Punnoose et al. [74] συνέθεσαν νανοσωματίδια οξειδίου του ψευδαργύρου στα οποία τροποποιήθηκε η επιφανειακή τους δομή. Επίσης, οι διαδικασίες καθαρισμού, διαχωρισμού, διήθησης, φυγοκέντρωσης, ξήρανσης, θερμικής επεξεργασίας και ανάδευσης μαζί με τον τύπο και οι ιδιότητες του ρευστού βάσης επηρεάζουν την ποιότητα των νανοσωματιδίων.

Τα νανοσωματίδια, οι νανοσωλήνες και τα νανοφύλλα μπορούν να παραχθούν από αλλαγή των παραμέτρων των μεθόδων παρασκευής, όπως είναι τα διάφορα επιφανειοδραστικά, οι πρόδρομες ουσίες και οι διαλύτες. Επίσης, υπάρχουν βοηθητικές τεχνικές που επηρεάζουν τα νανοϋλικά όπως, για παράδειγμα, τη θέρμανση με μικροκύματα, που προάγει την ομοιογενή θέρμανση και πυρηνοποίηση (διαδικασία που καθορίζει τον χρόνο που πρέπει να περιμένει ένας παρατηρητής πριν εμφανιστεί η νέα φάση ή η αυτοοργανωμένη δομή) των νανοσωματιδίων.

#### 2.4.2 Τεχνικές υποβοήθησης

Η πράσινη σύνθεση νανοσωματιδίων μπορεί να υποβοηθηθεί από ακτινοβολία μικροκυμάτων ή από μια διαδικασία υποβοηθούμενη από υπερήχους με ακτινοβολία, η οποία μαζί με την αναγωγή των νανοσωματιδίων είναι γνωστή από την ηχοχημική μέθοδο (sonochemical method). Η μέθοδος αυτή έχει αναπτυχθεί για την κατασκευή διαφόρων νανορευστών και νανοσωματιδίων, ιδίως μετάλλων και οξειδίων μετάλλων. Οι κύριοι φυσικοί μηχανισμοί που συνδέονται στενά με τη σύνθεση με τη βοήθεια υπερήχων είναι η σπηλαιώση, δηλαδή ο σχηματισμός, η ανάπτυξη και η κατάρρευση φυσαλίδων σε ένα ρευστό, και η νεφελοποίηση. Τα κύρια ευεργετικά χαρακτηριστικά της ηχοχημικής διαδικασίας είναι οι ηπιότερες συνθήκες, οι συντομότεροι χρόνοι αντίδρασης και οι υψηλότερες αποδόσεις των σχηματιζόμενων νανοσωματιδίων. Οι χημικές επιδράσεις της υπερηχητικής ακτινοβολίας προκαλούνται από την πολύ υψηλή θερμοκρασία και πίεση που υφίστανται παροδικά στις φυσαλίδες που καταρρέουν, οι οποίες με τη σειρά τους αυξάνουν τη μετατροπή, ενισχύουν την επιτευχθείσα απόδοση, αλλάζουν την πορεία της αντίδρασης και ξεκινούν την αντίδραση σε βιολογικά συστήματα. Κατά συνέπεια, η τεχνική της υπερηχητικής ακτινοβολίας όπως και η ακτινοβολία μικροκυμάτων εισήχθησαν σταδιακά στην πράσινη και περιβαλλοντικά ασφαλή σύνθεση των νανοσωματιδίων.

Στην έρευνα των Popov et al. [75] οι ερευνητές συνέθεσαν νανοσωματίδια αργύρου με υποβοήθηση υπερήχων. Η μέθοδος αυτή εκτός από αποτελεσματική και γρήγορη αποδείχθηκε συμφέρουσα για παραγωγές μεγάλης κλίμακας και εξαιρετικά οικονομική. Επίσης, οι Yadav et al. [76] διεξήγαγαν τη σύνθεση με τη βοήθεια μικροκυμάτων διμεταλλικών πράσινων νανοσωματιδίων χρυσού/πλατίνας, τα οποία παρασκευάστηκαν με ανάμειξη  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$  και  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ , με συγκεντρώσεις 0.1 % κ.β., με υδατικό διάλυμα κιτρικού τρισοντρίου (0.1 % κ.β.). Το μείγμα θερμάνθηκε σε φούρνο μικροκυμάτων για τέσσερα λεπτά για να ληφθούν σφαιρικά νανοσωματίδια χρυσού/πλατίνας με διάμετρο 10-25 nm. Οι συγγραφείς δήλωσαν ότι τα νανορευστά είχαν πολύ διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των μονομεταλλικών νανορευστών.

#### 2.4.3 Η μορφολογία των νανοσωματιδίων

Η μορφολογία των πράσινων νανοσωματιδίων διαφοροποιεί τις θερμοφυσικές ιδιότητες των νανορευστών που προκύπτουν και μπορούν να διαμορφωθεί από παραμέτρους όπως η συγκέντρωση, η θερμοκρασία και το pH. Η παραγωγή διαφορετικής μορφολογίας στα νανοσωματίδια, όπως για παράδειγμα σφαιρικά ή ραβδοειδή, οδηγεί σε μια μεγάλη γκάμα πιθανών

εφαρμογών. Μικροοργανισμοί, όπως βακτήρια, μύκητες, φύκια και φυτά είναι τα υποστρώματα για την πράσινη σύνθεση νανοϋλικών. Διαφορετικά ενεργά βιομόρια και πρόδρομες ουσίες αντί-δρασης, όπως το μεταλλικό άλας, καθορίζουν το τελικό σχήμα και το μέγεθος των νανοσωματιδίων. Τα ενεργά αυτά μόρια είναι τα υπεύθυνα για τη μορφολογία και την τελική εφαρμογή των νανοσωματιδίων. Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για τη σύνθεση ενός επι-διωκόμενου νανοϋλικού είναι η πρωταρχική ουσία που θα χρησιμοποιηθεί. Για την παραγωγή ομοιογενών μορφολογικά νανοϋλικών, η πρωταρχική ουσία θα πρέπει να επιλέγεται με γνώμονα την υψηλή ενθαλπία και το χαμηλό σημείο τήξης. Σε διαφορετική περίπτωση, το προϊόν που θα προκύψει θα είναι, στις περισσότερες περιπτώσεις, ένα ετερογενές μείγμα νανοϋλικών χωρίς πρακτικά καμία χρήση.

Όσον αφορά τη χρήση βακτηρίων, ενδεικτικά οι Gurunathan et al. [77] ανέφεραν τη σύνθεση διαφορετικών σχημάτων νανοσωματιδίων αργύρου και χρυσού λόγω της αλληλεπίδρασής τους με διαφορετικά βιομόρια ως πρωταρχικές ουσίες. Αποδείχθηκε ότι σε σύγκριση με τα βακτήρια και τους μύκητες, τα φύκια παράγουν νανοσωματίδια με μεγαλύτερη ποικιλία στη μορφολογία. Για παράδειγμα, με φύκια *Cystophora moniliformis* σχηματίστηκαν νανοσφαίρες.

#### 2.4.4 Η Θερμοκρασία

Οι πράσινες συνθέσεις απαιτούν λιγότερη θέρμανση από τις άλλες συμβατικές συνθέσεις. Παρόλα αυτά, η θερμοκρασία της αντίδρασης επηρεάζει το σχήμα, το μέγεθος και την ταχύτητα που θα προκύψουν τα νανοσωματίδια. Ο σχηματισμός κέντρων πυρήνωσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία με τη σειρά της αυξάνει την τιμή της βιοσύνθεσης.

Οι Sneha et al. [78] μελέτησαν την επίδραση της θερμοκρασίας στη βιοσύνθεση νανοσωματιδίων χρυσού χρησιμοποιώντας εκχύλισμα φύλλων *Piper betle*. Οι Sheny et al. [79] συνέκριναν τη μείωση των ιόντων χρυσού και αργύρου χρησιμοποιώντας το εκχύλισμα φύλλων του *Anacardium occidentale* σε διαφορετικές θερμοκρασίες για την εκτίμηση των βέλτιστων συνθηκών για την σύνθεση διμεταλλικού νανοσωματιδίου χρυσού/ασημιού. Παρατήρησαν ότι απαιτείται περισσότερο εκχύλισμα για τη σύνθεση των νανοσωματιδίων σε χαμηλές θερμοκρασίες και λιγότερο σε υψηλές. Παρατήρησαν επίσης ότι τα νανοσωματίδια που σχηματίστηκαν σε υψηλότερες θερμοκρασίες ήταν μεγαλύτερα και πιο σταθερά.

Τέλος, στη μελέτη των Harshiny et al. [80] ο σχηματισμός νανοσωματιδίων σιδήρου χρησιμοποιώντας *Amaranthus dubius* εξαρτιόταν από τη θερμοκρασία της βιοσύνθεσης. Η συγκομιδή νανοσωματιδίων ήταν υψηλότερη στους 37 °C, ενώ στους 25 °C χαμηλότερη.

#### 2.4.5 Το pH

Το pH μπορεί να επηρεάσει το μέγεθος, το σχήμα και την ταχύτητα καθίζησης των νανοσωματιδίων. Αυτό οφείλεται κυρίως στον σχηματισμό κέντρων πυρήνων, τα οποία αυξάνονται με την αύξηση του pH [27]. Καθώς αυτά αυξάνονται, η μείωση των μεταλλικών ιόντων επίσης αυξάνεται.

Οι Zhan et al. [81] μελέτησαν την επίδραση του pH στη βιοσύνθεση νανοσωματιδίων χρυσού χρησιμοποιώντας εκχυλίσματα φύλλων *Cacumen platycladi* και έφτασαν στο συμπέρασμα ότι το μέγεθος των νανοσωματιδίων μειώθηκε με την αύξηση του pH. Ψηλότερες τιμές pH οδηγούν σε γρήγορο ρυθμό μείωσης των χλωροαυρικών ιόντων, ενίσχυση της ομοιογενούς πυρήνωσης και μείωσης της ανισότροπης ανάπτυξης. Αντίθετα, χαμηλές τιμές του pH οδηγούν σε αργούς ρυθμούς μείωσης, σε ετερογενή και δευτερογενή πυρήνωση.

Οι Jacob et al [82] συνέθεσαν νανοσωματίδια χρυσού, αργύρου και χρυσού/αργύρου χρησιμοποιώντας *Brassica oleracea var. capitata* ως αναγωγικούς και καλυπτικούς παράγοντες, ρυθμίζοντας το pH του υδατικού μέσου. Με χαμηλό pH τα ιόντα αργύρου μειώθηκαν πολύ αργά σε σύγκριση με τα ιόντα χρυσού. Με υψηλό pH σημειώθηκε ταυτόχρονη μείωση τόσο για στα μεταλλικά ιόντα όσο και στα σχηματιζόμενα κράματα νανοσωματιδίων.

#### 2.4.6 Ο Χρόνος αντίδρασης

Η αποτελεσματικότητα των νανοσωματιδίων θα μπορούσε ρυθμιστεί με τον έλεγχο του χρόνου αντίδρασης. Ο μεγαλύτερος χρόνος εγκυμονεί τον κίνδυνο τα σωματίδια είτε να μεγαλώσουν είτε να συρρικνωθούν. Οι Dwivedi & Gopal [83] παρατήρησαν ότι οι αντιδράσεις του φύλλου *Chenopodium* στη σύνθεση νανοσωματιδίων αργύρου και χρυσού ξεκινούν σχεδόν άμεσα, ενώ αύξηση του χρόνου επαφής επηρεάζει την απορρόφηση. Τέλος, στην μελέτη των Li et al. [84] για τα νανοσωματίδια αργύρου που συντέθηκαν χρησιμοποιώντας εκχύλισμα *Capsicum annuum*, αποδείχθηκε ότι διαφορετικός χρόνος αναμονής έδωσε διαφορετικά μεγέθη νανοσωματιδίων.

### 3 Μαθηματική διατύπωση του εξεταζόμενου προβλήματος

---

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, θα εξετάσουμε την ροή και την μεταφορά θερμότητας ενός πράσινου νανορευστού, οι ιδιότητες του οποίου λήφθηκαν μέσω κάποιων πειραματικών μελετών και μαθηματικών σχέσεων που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία.

Όσο αναφορά την εξεταζόμενη γεωμετρία, μελετάται μία δισδιάστατη ορθογώνια πορώδης κοιλότητα μεγάλου λόγου μήκους προς ύψος, το οποίο γεμάτο με νανορευστό. Κατά συνέπεια, η πορώδης κοιλότητα γεμίζει πλήρως με πράσινο νανορευστό που μπορεί να ρέει μέσω των κενών. Επιπλέον, εφαρμόζεται εσωτερική θέρμανση. Η ροή διατηρείται στρωτή, κυρίως λόγω των σχετικά χαμηλών αριθμών Rayleigh που χρησιμοποιούνται. Τέλος, προκύπτουν λύσεις κλειστής μορφής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ασυμπτωτικών αναπτυγμάτων, για τα πεδία θερμοκρασίας και ταχύτητας όσον αφορά την κεντρική περιοχή. Τα αποτελέσματα που αφορούν την εν λόγω ασυμπτωτική ανάλυση θεωρούνται ωφέλιμα στην επιστημονική κοινότητα των νανορευστών, δεδομένου ότι προκύπτουν αναλυτικές σχέσεις, αποφεύγοντας έτσι το υπολογιστικό κόστος των αντίστοιχων αριθμητικών λύσεων [20]. Επιπλέον, μπορούν ενδεχομένως να δώσουν χρήσιμες κατευθύνσεις όσον αφορά τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας ψύξης σε πορώδη κοιλότητες. Η τεχνική χειρισμού αυτού του είδους των προβλημάτων με τη χρήση των ασυμπτωτικών αναπτυγμάτων περιγράφεται λεπτομερώς παρακάτω.

Συγκεκριμένα, η παρούσα έρευνα αποτελεί επέκταση των μελετών στην συγκεκριμένη γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες των Daniels και Jones [85] (υδροδυναμική φυσική συναγωγή), καθώς και των Benos et al. [86] (επέκταση της [85] σε καθεστώς μαγνητοϋδροδυναμικής (MHD) φυσικής συναγωγής) και Benos et al. [87–90] (επέκταση της [86] για να ληφθούν υπόψη και νανορευστά διαφορετικών ειδών, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικούς φυσικούς μηχανισμούς). Η συγκεκριμένη ροή και συνοριακές συνθήκες, που περιλαμβάνει επιπρόσθετα την πορώδη κοιλότητα κορεσμένη με νανορευστό μελετήθηκε εκτενώς από την [91]. Στις παρώνω εργασίες μελετήθηκαν εκτενώς η ροή και η μεταφορά θερμότητας διάφορων νανορευστών σε ποικίλα μεγέθη και συγκεντρώσεις, ενώ εξετάστηκαν διάφοροι παράμετροι που επηρεάζουν την θερμική αγωγιμότητα, όπως οι συσσωματώσεις νανοσωματιδίων και η κίνηση Brown των νανοσωματιδίων μέσα στο βασικό ρευστό. Τέλος, οι Benos et al. [42] μελέτησαν με την προαναφερθείσα μέθοδο την φυσική συναγωγή νανορευστού αποτελούμενου από οξειδίου του σιδήρου και αίματος μέσα σε παρόμοια πορώδη κοιλότητα (προσομοιάζοντας το καρκινικό κύτταρο) στο πλαίσιο της θεραπείας καρκίνου με την μέθοδο της υπερθερμίας. Σε όλες

τις παραπάνω περιπτώσεις μελετήθηκε η φυσική συναγωγή ρευστού ή νανορευστού παρουσία ή μη εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

### 3.1 Φυσική συναγωγή

Όσο αναφορά την φυσική συναγωγή, αυτή είναι μια θεμελιώδης διεργασία στην επιστήμη των ρευστών, όπου η κίνηση του ρευστού προκύπτει λόγω των μεταβολών της πυκνότητας που προκαλούνται από τις κλίσεις της θερμοκρασίας μέσα σε ένα ρευστό. Όταν ένα ρευστό θερμαίνεται, γίνεται λιγότερο πυκνό και τείνει να ανεβαίνει, ενώ το ψυχρότερο, πυκνότερο ρευστό κατεβαίνει για να το αντικαταστήσει, δημιουργώντας έναν βρόχο συναγωγής. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε διάφορα φυσικά και μηχανικά συστήματα και παίζει καθοριστικό ρόλο στη μεταφορά θερμότητας και στην ανάμιξη ρευστών. Συχνά περιγράφεται μαθηματικά χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Boussinesq, η οποία υποθέτει ότι οι μεταβολές της πυκνότητας είναι μικρές εκτός από τον όρο άνωσης. Ορισμένα παραδείγματα εφαρμογών της φυσικής συναγωγής είναι ροές που λαμβάνουν χώρα σε ηλιακούς θερμοσίφωνες, γεωθερμικά συστήματα, συστήματα ηλεκτρονικής ψύξης και ωκεάνια ρεύματα.

### 3.2 Εισάγοντας μαγνητοϋδροδυναμικά φαινόμενα

#### 3.2.1 Βασικά στοιχεία μαγνητοϋδροδυναμικής (MHD)

Η μαγνητοϋδροδυναμική (MHD) είναι ένα διεπιστημονικό πεδίο στο σταυροδρόμι του ηλεκτρομαγνητισμού και της δυναμικής ρευστών. Διερευνά τη συμπεριφορά ηλεκτρικά αγώγιμων ρευστών, όπως το πλάσμα και ορισμένα υγρά μέταλλα, παρουσία μαγνητικών πεδίων. Αυτή η δυναμική αλληλεπίδραση δημιουργεί ένα πλήθος πολύπλοκων φαινομένων με εφαρμογές που κυμαίνονται από την αστροφυσική έως τη μηχανική και τους αντιδραστήρες σύντηξης.

Στον πυρήνα της, η μαγνητοϋδροδυναμική διερευνά πώς τα μαγνητικά πεδία και τα ηλεκτρικά ρεύματα επηρεάζουν την κίνηση και τις ιδιότητες των ρευστών, οδηγώντας σε ένα ευρύ φάσμα φαινομένων, όπως η μαγνητική επανασύνδεση και η δημιουργία μαγνητικών πεδίων. Οι εξισώσεις που διέπουν τη μαγνητοϋδροδυναμική, οι οποίες προκύπτουν από τις θεμελιώδεις αρχές διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας, σε συνδυασμό με τις εξισώσεις του Maxwell για τον ηλεκτρομαγνητισμό, παρέχουν ένα ισχυρό πλαίσιο για την κατανόηση και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των μαγνητισμένων ρευστών. Στην **Εικόνα 5** παρουσιάζεται το σύστημα των εξισώσεων που περιγράφουν την ασυμπίεστη μαγνητοϋδροδυναμική για σταθερή πυκνότητα,  $\rho=1$ .

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} &= -\nabla p + \mathbf{B} \cdot \nabla \mathbf{B} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{B} &= \mathbf{B} \cdot \nabla \mathbf{u} + \eta \nabla^2 \mathbf{B} \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned}$$

*Εικόνα 5. Σύνολο εξισώσεων που περιγράφουν την ασυμπίεστη μαγνητοϋδροδυναμική για σταθερή πυκνότητα,  $\rho=1$ .*

Όπου:

- $\mathbf{u}$  αντιπροσωπεύει την ταχύτητα,
- $\mathbf{B}$  αντιπροσωπεύει το μαγνητικό πεδίο,
- $p$  αντιπροσωπεύει τη συνολική πίεση,
- $\nu$  είναι το κινηματικό ιξώδες και  $\eta$
- $\eta$  αντιπροσωπεύει τη μαγνητική διάχυση.

Οι σημαντικοί αδιάστατοι αριθμοί είναι:

- Αριθμός Reynolds ( $Re$ ) =  $UL/\nu$ : Ο αριθμός Reynolds είναι ο λόγος του μη γραμμικού όρου  $\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}$  της εξίσωσης Navier-Stokes προς στον ιξώδη όρο.
- Μαγνητικός αριθμός Reynolds ( $Re_m$ ) =  $UL/\eta$ : Ο μαγνητικός αριθμός Reynolds είναι ο λόγος του μη γραμμικού όρου  $\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{B}$  προς τη μαγνητική διάχυση της εξίσωσης επαγωγής.
- Μαγνητικός αριθμός Prandtl ( $Pr_m$ ) =  $Re_m/Re = \eta/\nu$ : Ο μαγνητικός αριθμός Prandtl είναι μια σημαντική ιδιότητα του ρευστού. Χαρακτηρίζει τη σχετική σημασία της μαγνητικής διάχυσης σε σχέση με τη διάχυση ορμής σε μαγνητοϋδροδυναμικές ροές.

Η ιστορία της μαγνητοϋδροδυναμικής χρονολογείται από τις αρχές του 20ού αιώνα, με πρωτοποριακές εργασίες του Hannes Alfvén. Οι θεωρητικές γνώσεις και οι πειραματικές παρατηρήσεις του Alfvén άνοιξαν το δρόμο για την ανάπτυξη της μαγνητοϋδροδυναμικής ως ξεχωριστού ερευνητικού πεδίου. Έκτοτε, η μαγνητοϋδροδυναμική έχει εξελιχθεί ραγδαία, χάρη στην πρόοδο των πειραματικών τεχνικών, των υπολογιστικών μεθόδων και των θεωρητικών γνώσεων.

Σήμερα, η μαγνητοϋδροδυναμική βρίσκει ευρείες εφαρμογές σε διάφορους επιστημονικούς και μηχανολογικούς κλάδους. Στην έρευνα για την ενέργεια σύντηξης, η μαγνητοϋδροδυναμική



διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην κατανόηση και τον έλεγχο της συμπεριφοράς του πλάσματος σε συσκευές μαγνητικού περιορισμού, όπως τα TOKAMAK, με απώτερο στόχο την επίτευξη βιώσιμης πυρηνικής σύντηξης ως καθαρής και άφθονης πηγής ενέργειας [92–95]. Στην εξερεύνηση του διαστήματος, η μαγνητοϋδροδυναμική είναι, επίσης, απαραίτητη για τη μελέτη φαινομένων όπως οι αλληλεπιδράσεις του ηλιακού ανέμου με τις πλανητικές μαγνητόσφαιρες, οι μαγνητοϋδροδυναμικές κρούσεις και η δυναμική των αστροφυσικών πλασμάτων σε αστέρια και γαλαξίες.

Επιπλέον, η μαγνητοϋδροδυναμική έχει πρακτικές εφαρμογές σε βιομηχανικές διεργασίες, όπως η μαγνητοϋδροδυναμική παραγωγή ενέργειας, όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται απευθείας από την κίνηση αγώγιμων ρευστών σε μαγνητικό πεδίο, η επεξεργασία μετάλλων, όπου οι τεχνικές MHD χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ροής και της κατανομής των λιωμένων μετάλλων σε διαδικασίες χύτευσης.

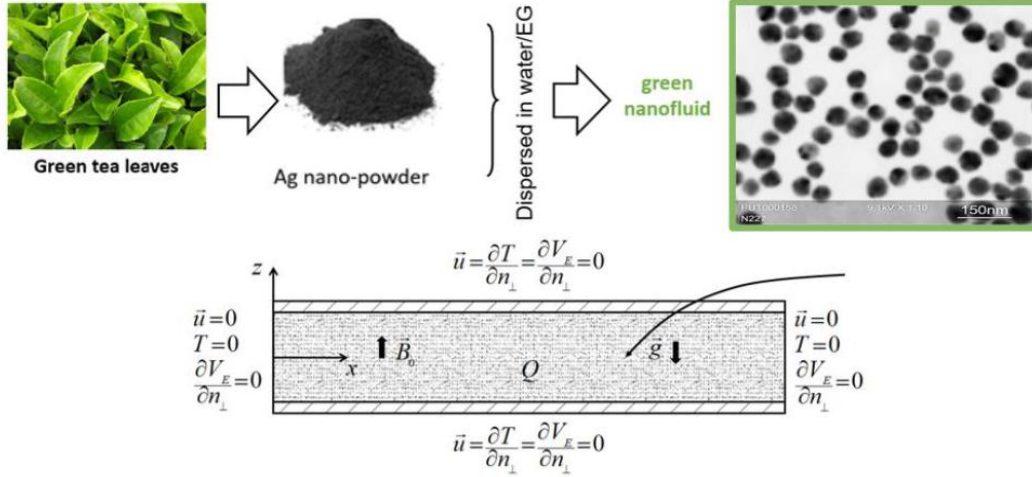
### 3.2.2 Μαγνητοϋδροδυναμική φυσική συναγωγή

Η μαγνητοϋδροδυναμική φυσική συναγωγή, που εμφανίζεται και στο παρόν πρόβλημα που μελετάται στην μεταπτυχιακή εργασία, εμφανίζεται όταν η φυσική συναγωγή επηρεάζεται από μαγνητικά πεδία. Στα συστήματα μαγνητοϋδροδυναμικής, η ροή ηλεκτρικά αγώγιμων ρευστών, όπως τα υγρά μέταλλα και τα νανορευστά, συνδυάζεται με ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις. Όταν υπάρχει μαγνητικό πεδίο, αυτό μπορεί να μεταβάλει τη συμπεριφορά της φυσικής συναγωγής ασκώντας δυνάμεις Lorentz στο αγώγιμο ρευστό, οι οποίες μπορούν να ενισχύσουν ή να καταστείλουν τη ροή ανάλογα με τον προσανατολισμό και την ισχύ του μαγνητικού πεδίου.

Η μαγνητοϋδροδυναμική φυσική συναγωγή έχει επιπτώσεις σε ένα μεγάλο εύρος φαινομένων, από τη δυναμική των αστροφυσικών πλασμάτων έως βιομηχανικές διεργασίες όπως η ψύξη υγρών μετάλλων σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Η κατανόηση της μαγνητοϋδροδυναμικής φυσικής συναγωγής είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση συστημάτων όπου τα μαγνητικά πεδία αλληλοεπιδρούν με την κίνηση των ρευστών, οδηγώντας σε νέους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας και φαινόμενα ροής. Ενδεικτικές εφαρμογές αποτελούν οι ροές στην κατασκευή ημιαγωγών και οι ροές μέσα σε μανδύες από υγρό μέταλλο για την ψύξη αντιδραστήρων πυρηνικής σύντηξης [89,90].

### 3.3 Γεωμετρία και οριακές συνθήκες

Το παρόν πρόβλημα εξετάζει μια ορθογώνια πορώδη κοιλότητα γεμάτη με πράσινο νανορευστό [96], όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6.



**Εικόνα 6.** Γεωμετρία και οριακές συνθήκες του προβλήματος.

Τα κατακόρυφα τοιχώματα θεωρούνται ισοθερμικά, ενώ τα οριζόντια θεωρούνται αδιαβατικά ( $\partial T / \partial \vec{n}_\perp = 0$ ), όπου  $T$  συμβολίζει τη θερμοκρασία του νανορευστού. Επιπλέον, εφαρμόζεται μια ογκομετρική εσωτερική πηγή θερμότητας,  $Q$ . Οι τοίχοι είναι ηλεκτρικά μονωμένοι ( $\partial V_E / \partial \vec{n}_\perp = 0$ ) ( $V_E$  είναι το ηλεκτροστατικό δυναμικό και το  $\vec{n}_\perp$  είναι το κάθετο στην επιφάνεια μοναδιαίο διάνυσμα).

Οι εξισώσεις που διέπουν το παρόν πρόβλημα είναι η διατήρηση της συνέχειας, της ορμής και της ενέργειας, εξισώσεις (1)-(4):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu_{nf} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \frac{\sigma_{nf} B_0^2 u}{\rho_{nf}} - \frac{\nu_{nf}}{K} u \quad (2)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu_{nf} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \beta_{nf} g \Delta T - \frac{\nu_{nf}}{K} w \quad (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} = a_{nf} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (4)$$

όπου  $u$  και  $w$  είναι η οριζόντια και η κατακόρυφη ταχύτητα του πράσινου νανορευστού αντίστοιχα, το  $P$  είναι η πίεση, ενώ  $\Delta T$  είναι η διαφορά θερμοκρασίας. Επίσης, οι ανοιγμένες ιδιότητες του νανορευστού είναι ο συντελεστής ογκομετρικής διαστολής,  $\beta_{nf}$ , το κινηματικό ιξώδες,  $\nu_{nf}$ , η ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση,  $C_{p,nf}$ , η πυκνότητα του νανορευστού,  $\rho_{nf}$ , η

ηλεκτρική αγωγιμότητα του νανορευστού,  $\sigma_{nf}$ , και η θερμική διάχυση,  $a_{nf} = k_{nf} / (\rho C_p)_{nf}$ , με  $k_{nf}$  να είναι η θερμική αγωγιμότητα του πράσινου νανορευστού. Τέλος, οι οριακές συνθήκες που αφορούν τη θερμοκρασία, και την συνθήκη μη ολίσθησης στους τοίχους απεικονίζονται στην Εικόνα 6.

Ειδικότερα στην Εξ. (1), η πορώδης κοιλότητα θεωρείται ότι είναι ισότροπη και περιγράφεται από το μοντέλο Darcy, παρόμοια με μελέτες όπως η [42]. Εκτός αυτού, στην εξίσωση που περιλαμβάνεται η ορμή υπάρχουν δυνάμεις άνωσης, θεωρώντας τη συνήθη προσέγγιση Oberbeck-Boussinesq και δύναμη Lorentz, ενώ στην εξίσωση διατήρησης της ενέργειας, Εξ. (4), η θέρμανση Joule και η ιζώδης διάχυση έχουν αμεληθεί. Τέλος, χρησιμοποιείται η προσέγγιση χαμηλού μαγνητικού Reynolds [87].

### 3.3 Ανοιγμένες ιδιότητες του πράσινου νανορευστού

Παρόμοια με την πλειονότητα των υφιστάμενων μελετών [87–90], οι φυσικές ιδιότητες του νανορευστού μπορούν να προσεγγιστούν ως εξής:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad (5)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_p \quad (6)$$

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f + \varphi\beta_p \quad (7)$$

$$\sigma_{nf} = \sigma_f \left[ 1 + \frac{\left( 3\varphi \frac{\sigma_p}{\sigma_f} - 1 \right)}{\left( \frac{\sigma_p}{\sigma_f} + 2 \right) + \varphi \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_f} - 1 \right)} \right] \quad (8)$$

Σε όλες τις παραπάνω εξισώσεις το  $\varphi$  είναι το κλάσμα όγκου των νανοσωματιδίων, ενώ οι δείκτες  $f$ ,  $nf$  και  $p$  αντιστοιχούν στο βασικό ρευστό, το νανορευστό και το νανοσωματίδιο, αντίστοιχα.

Τα νανορευστά εμφανίζουν διαφορετικές ρεολογικές συμπεριφορές, επειδή υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορούν να τις επηρεάσουν. Η ρεολογική συμπεριφορά θα μπορούσε για παράδειγμα να αλλάξει από το μέγεθος και τη συγκέντρωση των νανοσωματιδίων, τη θερμοκρασία, την κατάσταση διασποράς και από τις δυνάμεις διάτμησης [3]. Οι συσσωματώσεις επίσης επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό, ειδικά όταν το νανορευστό γίνεται πυκνότερο [89]. Επίσης, έχουν χρησιμοποιηθεί μοντέλα στα οποία έχουν συμπεριληφθεί οι κινήσεις Brown των

νανοσωματιδίων [87]. Εκτενής μελέτη σχετικά με τις θεωρητικές σχέσεις για το δυναμικό ιξώδες αρκετών νανορευστών μπορεί να βρεθεί στην βιβλιογραφική επισκόπηση των Mahian et al. [3].

Εκτός από την περίπλοκη φύση των ρεολογικών ιδιοτήτων των νανορευστών μέσα σε συμβατικά υγρά, ο μηχανισμός πίσω από την παρατηρούμενη ανώμαλη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας αυτών φαίνεται να είναι ακόμη πιο δύσκολη να ερευνηθεί. Εν συντομία, έχει αναπτυχθεί ένας αριθμός μοντέλων που αφορούν την επίδραση της κίνησης Brown, όπως προαναφέρθηκε. Επιπλέον, η διεπιφανειακός υμένας, ο οποίος σχηματίζεται γύρω από το νανοσωματίδιο, λόγω της προσκόλλησης των μορίων του υγρού σε αυτό, φαίνεται να αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τον καθορισμό της ανοιγμένης θερμικής αγωγιμότητας του νανορευστού [90]. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι το σχήμα καθώς και το μέγεθος των νανοσωματιδίων, όπως έχει επισημανθεί από κλασικά μοντέλα, όπως αυτό των Hamilton-Crosser και των βελτιώσεών του. Τέλος, μια αξιοσημείωτη ανασκόπηση των θεωρητικών μοντέλων των νανορευστών μπορεί να βρεθεί στην βιβλιογραφική μελέτη των Mahian et al. [3]

Στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό του δυναμικού ιξώδους χρησιμοποιήθηκε το κλασικό θεωρητικό μοντέλο του Brinkman [97], που χρησιμοποιείται πολύ συχνά:

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 - \varphi)^{-2.5} \quad (9\alpha)$$

Όσο αναφορά τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας έγινε μια προσπάθεια να εισαχθούν, όσο το δυνατόν, πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Συνεπώς, πήραμε την σχέση:

$$k_{nf} = k_f (0.981 + 0.00114T + 30.661\varphi) \quad (9\beta)$$

Αυτή η σχέση περιγράφει την θερμική αγωγιμότητα του παραγόμενου πράσινου νανορευστού συναρτήσει της θερμοκρασίας,  $T$ , και της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων,  $\varphi$ , όπως αυτή προέκυψε από τα πειράματα των Sharifpur et al. [98].

Σε περίπτωση που έχουμε για βασικό ρευστό ένα μείγμα ρευστών, όλες οι ιδιότητές του προκύπτουν από τον λεγόμενο «rule of mixture», δηλαδή:

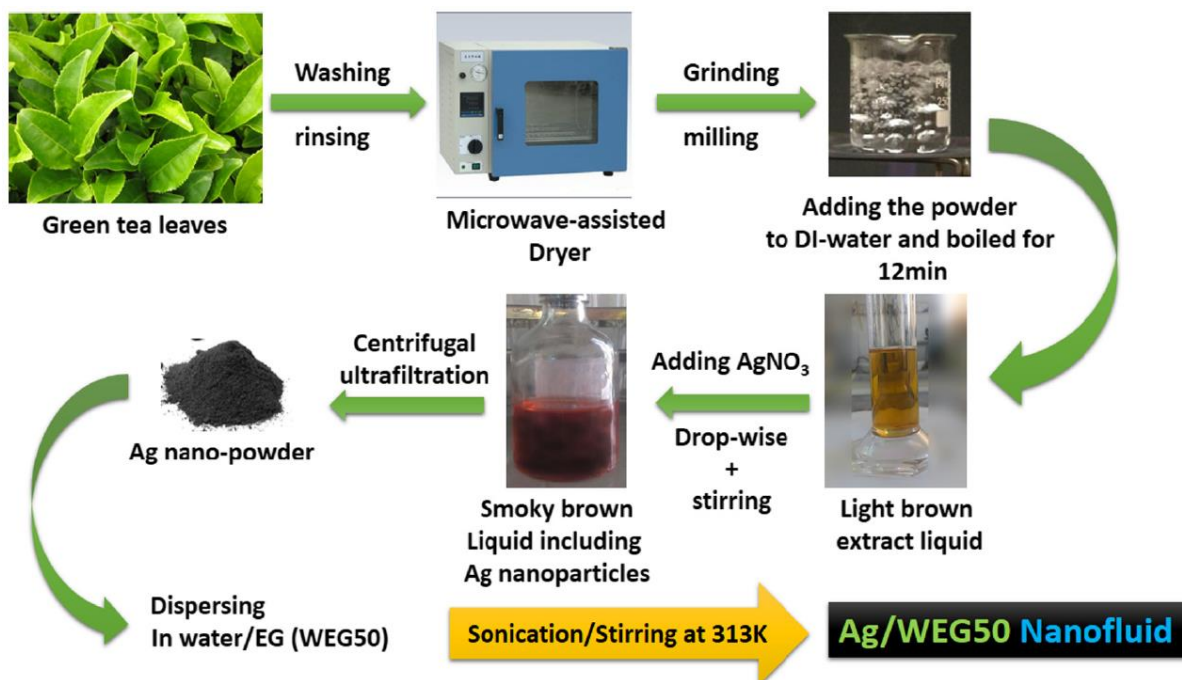
$$\text{παράμετρος}_f = \varphi \cdot \text{παράμετρος}_{f_1} + (1 - \varphi) \cdot \text{παράμετρος}_{f_2}$$

### 3.4 Σύντομη περιγραφή των πειραματικών αποτελεσμάτων παρασκευής του πράσινου νανορευστού και μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας

Στα πειράματα των Sharifpur et al. [98] χρησιμοποιήθηκε το εκχύλισμα *Camellia sinens* (φύλλα πράσινου τσαγιού). Αρχικά, περίπου 15.54 g φύλλων τσαγιού πλύθηκαν και αποξηράθηκαν σε φούρνο μικροκυμάτων. Τα αποξηραμένα φύλλα κατόπιν αλέστηκαν. Οι ληφθείσες σκόρες προστέθηκαν σε 100 ml απιονισμένου νερού σε καθαρή φιάλη. Το μείγμα βράστηκε για 12 λεπτά, κοσκινίστηκε και διηθήθηκε με χαρτί μικροφίλτρου.

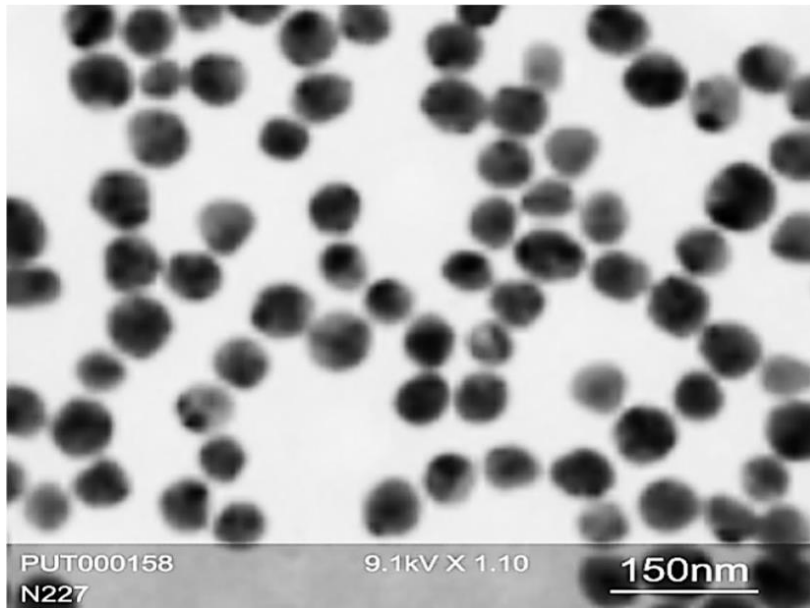
Στο επόμενο βήμα, 750 mL νιτρικού αργύρου (10 mM) προστέθηκαν σταγόνα-σταγόνα στο διάλυμα εκχυλίσματος τσαγιού 20 mL υπό υπερηχητική επεξεργασία με τη χρήση Hielscher UP400S GmbH και μηχανική ανάδευση με ταχύτητα 400 rpm για 100 λεπτά στους 303-323 K. Τα νανοσωματίδια Ag συμπυκνώθηκαν και καθαρίστηκαν με φυγοκεντρική υπερδιήθηση, ενώ στη συνέχεια ξεπλύθηκαν και στεγνώθηκαν. Αξιοσημείωτα, ο σχηματισμός των νανοσωματιδίων Ag υποδηλώθηκε από την εμφάνιση της χαρακτηριστικής καστανής υπογραφής του χρώματος του διαλύματος.

Στην συγκεκριμένη πειραματική εργασία, αναμίχθηκε νερό/αιθυλενογλυκόλη σε αναλογία 50:50 κατ' όγκο ως βασικό υγρό. Τα παραγόμενα νανοσωματίδια Ag διασκορπίστηκαν στην αιθυλενογλυκόλη και δεν προστέθηκαν επιφανειοδραστικά στο νανορευστό. Κατά τη διάρκεια της ανάμιξης χρησιμοποιήθηκε μηχανική ανάδευση πριν από τα πειράματα. Επιπλέον, το νανορευστό εκτέθηκε σε υπερήχους στα 20 kHz/650W για 2 ώρες. Για συγκεντρώσεις vol.% 0.1, 0.5 και 1, το pH ήταν 7.43, 7.76 και 8.07 αντίστοιχα. Η σταθερότητα των νανορευστών εξετάστηκε με πείραμα με χρήση μεθόδου χρόνου-καθίζησης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα νανορευστά είναι σταθερά για 7, 9 και 12 ημέρες σε ποσοστά vol.% 0.1, 0.5 και 1 αντίστοιχα. Η **Εικόνα 7** Εικόνα 7. Σχηματική απεικόνιση σχηματισμού του πράσινου νανορευστού, [98].παρουσιάζει σχηματικά την παρασκευή του πράσινου νανορευστού που περιγράφτηκε.

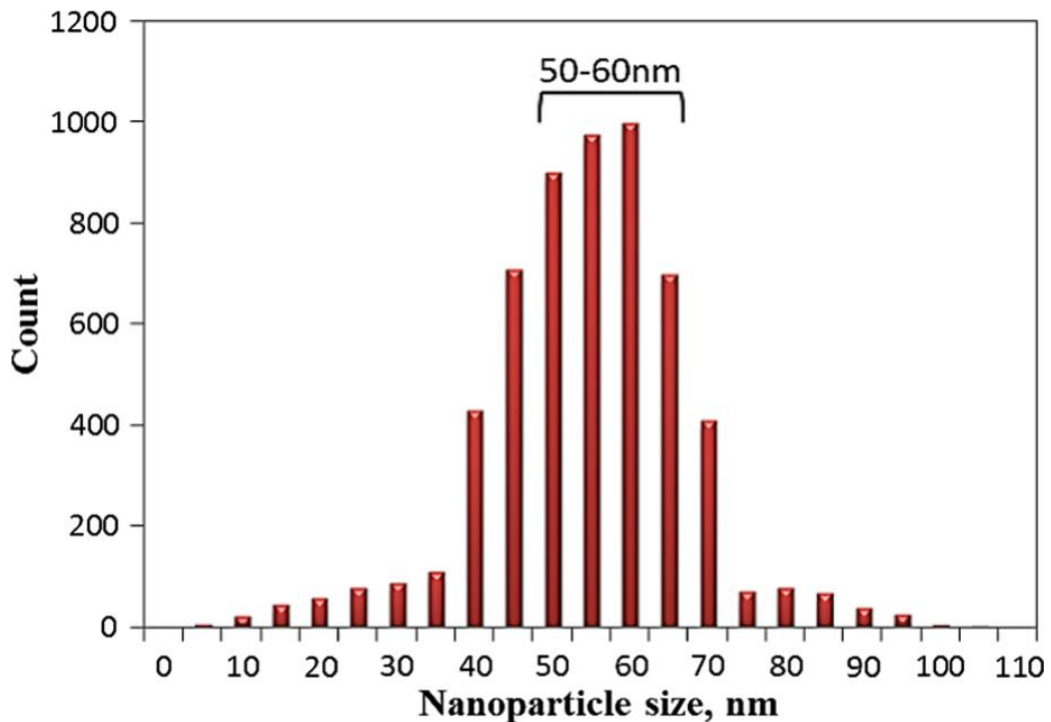


*Εικόνα 7. Σχηματική απεικόνιση σχηματισμού του πράσινου νανορευστού, [98].*

Πραγματοποιήθηκαν, επίσης, δοκιμές ποιότητας για να διασφαλιστεί το μέγεθος, το σχήμα και η ομοιομορφία της διασποράς των νανοσωματιδίων στο βασικό ρευστό. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 8**, τα νανοσωματίδια έχουν ομοιόμορφο σφαιρικό σχήμα από 50 έως 60 nm, το οποίο αποδείχθηκε με ειδική δοκιμή μέτρησης μεγέθους σωματιδίων.



(a)

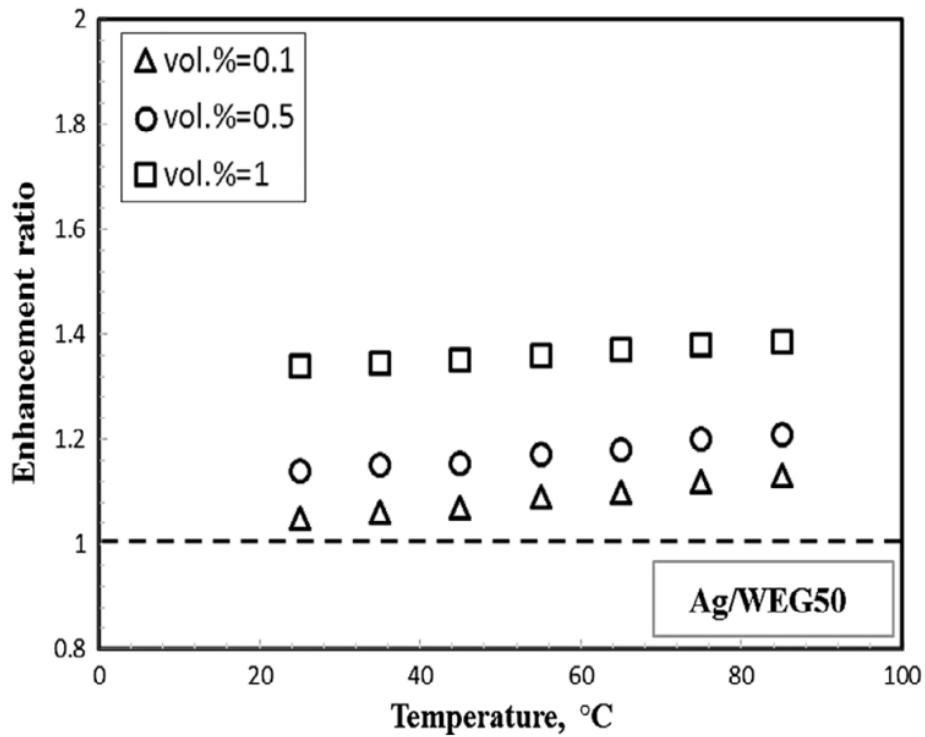


(b)

*Εικόνα 8. Αποτελέσματα της δοκιμής καταμέτρησης σωματιδίων νανοσωματιδίων Ag, [98].*

Όσο αναφορά την θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού, αυτή μετρήθηκε πειραματικά με τη χρήση KD2 Decagon (αβεβαιότητα 5%) σε διαφορετικές θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 25 έως 80 °C και κλάσματα όγκου 0.1%, 0.5% και 1%. Σύμφωνα με τις πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην **Εικόνα 9**, η θερμική αγωγιμότητα του πράσινου

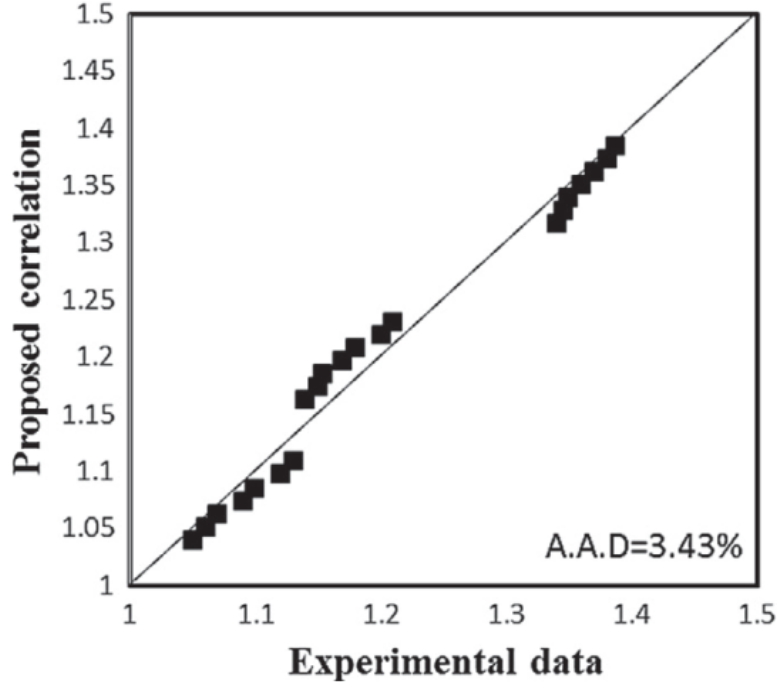
νανορευστού εξαρτάται από την συγκέντρωση των παραγόμενων νανοσωματιδίων και από την θερμοκρασία.



*Εικόνα 9.* Πειραματική θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού σε διαφορετικές θερμοκρασίες και συγκεντρώσεις νανοσωματιδίων, [98].

Σύμφωνα με την [98], η προτεινόμενη σχέση  $k_{nf} = k_f (0.981 + 0.00114T + 30.661\phi)$  είχε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα (A.A.D = 3.43%) (Εικόνα 12).





*Εικόνα 10. Σύγκριση της προτεινόμενης συσχέτισης με πειραματικά δεδομένα, [98].*

### 3.5 Παραγωγή των αδιάστατων εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα

Το σύστημα των δισδιάστατων, ασυμπίεστων, μαγνητοϋδροδυναμικών εξισώσεων παρουσιάζεται στις εξισώσεις (1)-(4). Υπολογίζοντας την παράγωγο των Εξισώσεων (2) και (3) ως προς  $z$  και  $x$ , αντίστοιχα, και λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση συνέχειας (δηλ. Εξίσωση (1)):

$$u \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial x} + w \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial^2 p}{\partial z \partial x} + v_{nf} \frac{\partial^3 u}{\partial z \partial x^2} + v_{nf} \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} - \frac{\sigma_{nf} B_o^2}{\rho_{nf}} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{v_{nf}}{K} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (10)$$

$$u \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + w \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial z} + v_{nf} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + v_{nf} \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial z^2} + g \beta_{nf} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{v_{nf}}{K} \frac{\partial w}{\partial x} \quad (11)$$

Αφαιρώντας την εξίσωση (11) από την εξίσωση (10):

$$u \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + w \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) = \quad (12)$$

$$v_{nf} \left( \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial z} + \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} - \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - \frac{\partial^3 w}{\partial z^2 \partial x} \right) - \frac{\sigma_{nf} B_o^2}{\rho_{nf}} \frac{\partial u}{\partial z} - g \beta_{nf} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{v_{nf}}{K} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

Η ροϊκή συνάρτηση  $\psi(x,z)$  σχετίζεται με τις συνιστώσες ταχύτητας  $u$  και  $v$  μέσω:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial z}, w = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (13)$$

Ενσωματώνοντας την εξίσωση (13) στην εξίσωση (12):

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial}{\partial x} \underbrace{\left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right)}_{\nabla^2 \psi} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial z} \underbrace{\left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right)}_{\nabla^2 \psi} = \nu_{nf} \underbrace{\left( \frac{\partial^4 \psi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \psi}{\partial x^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4 \psi}{\partial z^4} \right)}_{\nabla^4 \psi} - \frac{\sigma_{nf} B_o^2}{\rho_{nf}} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - g \beta_{nf} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\nu_{nf}}{K} \underbrace{\left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right)}_{\nabla^2 \psi} \quad (14)$$

Ενσωματώνοντας, επίσης, την εξίσωση (13) στην εξίσωση της ενέργειας, (δηλ. εξίσωση (4)):

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial z} = a_{nf} \nabla^2 T + \frac{Q}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (15)$$

Στη συνέχεια, προκύπτει η αδιάστατη μορφή των εξισώσεων της ροϊκής συνάρτησης και της ενέργειας μέσω της εξέτασης των ακόλουθων μεγεθών:

$$X = \frac{x}{h}, Z = \frac{z}{h}, \Psi = \frac{\psi}{a_{nf}}, \Theta = \frac{T(\rho c_p)_{nf} a_{nf}}{h^2 Q} \quad (16)$$

Έτσι, οι εξισώσεις (14) και (15) καταλήγουν στις αντίστοιχες (17α) και (17β):

$$\nabla^4 \Psi = Pr_{nf}^{-1} \frac{\partial(\nabla^2 \Psi, \Psi)}{\partial(X, Z)} + Ha_{nf}^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} + Ra_{nf} \frac{\partial \Theta}{\partial X} + Da^1 \nabla^2 \Psi \quad (17\alpha)$$

$$\nabla^2 \Theta + 1 = \frac{\partial(\Theta, \Psi)}{\partial(X, Z)} \quad (17\beta)$$

Στο παραπάνω σύστημα εξισώσεων,  $\Psi = \psi / a_{nf}$  είναι η αδιάστατη ροϊκή συνάρτηση, που ορίζεται από τις  $u = \partial \psi / \partial z$  και  $w = -\partial \psi / \partial x$ . Οι αδιάστατες συντεταγμένες στην οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση είναι  $X = x/h$  και  $Z = z/h$ , αντίστοιχα, με  $h$  να είναι το ύψος της κοιλότητας, ενώ:

$$\Theta = T / (h^2 Q / k_{nf}) \quad (18)$$

αντιστοιχεί στην αδιάστατη θερμοκρασία του νανορευστού. Στη συνέχεια, τα  $X, Z, \Theta$  and  $\Psi$  μετατρέπονται σε  $x, z, T$  and  $\psi$ , αντίστοιχα, για ευκολία.

Οι αδιάστατοι αριθμοί που αφορούν το πράσινο νανορευστό και οι οποίοι εμφανίζονται στις εξισώσεις είναι οι  $Pr_{nf}, Ha_{nf}, Ra_{nf}$ , και  $Da$ , οι οποίοι θα αναλυθούν εκτενώς στα αποτελέσματα.

Οι οριακές συνθήκες όσον αφορά τα κατακόρυφα τοιχώματα είναι:

$$\psi = \frac{\partial \psi}{\partial x} = T = 0 \quad (19)$$

Ενώ στα οριζόντια τοιχώματα:

$$\psi = \frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (20)$$

Εκτός από τις προαναφερθείσες οριακές συνθήκες, οι συμμετρίες όσον αφορά τη  $\psi$  και  $T$  είναι:

$$\psi(x, z) = -\psi(L-x, z) \quad (21)$$

$$T(x, z) = T(L-x, z) \quad (22)$$

Αν επικρατεί μόνο η αγωγιμότητα, σύμφωνα με την [85], η θερμοκρασία στο  $z = 0$  μπορεί να δοθεί μέσω:

$$T = \frac{1}{2}x(L-x) \quad (23)$$

Επίσης, αποδείχθηκε ότι όταν ο Rayleigh είναι τάξης μεγέθους  $L^{-1}$ , πρέπει να λάβουμε υπόψη και φαινόμενα συναγωγής. Έτσι, ένας αριθμός Rayleigh με διαστάσεις εισάχθηκε για να διευκολύνει το πρόβλημα,  $Rs = Ra \cdot L$ , που είναι τάξης 1 καθώς  $L \rightarrow \infty$  όμοια με τις εργασίες των Benos et al. που προαναφέρθηκαν.

Η ροή στην περιοχή του κέντρου της κοιλότητας καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος και εισάγονται οι ακόλουθες μεταβλητές μήκους:

$$\xi = x/L, z = z \quad (24)$$

### 3.6 Παραγωγή των συνήθων διαφορικών εξισώσεων με τη μέθοδο των ασυμπτωτικών αναπτυγμάτων

Η παράμετρος που διέπει το παρόν πρόβλημα είναι η  $\varepsilon$ , η οποία μπορεί να οριστεί ως εξής  $\varepsilon \equiv L^{-1} \ll 1$ , όπου  $L$  είναι ο λόγος διαστάσεων της κοιλότητας που είναι πολύ μεγάλος, όπως έχει ήδη τονιστεί. Η ροή του κεντρικού τμήματος καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της κοιλότητας και η επίλυσή της βασίζεται στις παραμέτρους  $\xi, z$ .

Η ροϊκή συνάρτηση και τα πεδία θερμοκρασίας αναπτύσσονται ως προς  $\xi, z$  ως εξής:

$$\psi = \psi_0(\xi, z) + L^{-1} \psi_1(\xi, z) + L^{-2} \psi_2(\xi, z) + \dots \quad (25)$$

$$T = L^2 T_0(\xi, z) + L T_1(\xi, z) + T_2(\xi, z) + L^{-1} T_3(\xi, z) + \dots \quad (26)$$

Αυτά τα αναπτύγματα αντικαθίστανται στις εξισώσεις ροής και ενέργειας και στις συνοριακές συνθήκες τους, οι οποίες έχουν αναλυθεί παραπάνω, με σκοπό να προκύψει ένα σύστημα συζευγμένων μερικών εξισώσεων για τη συνάρτηση ροής και τη θερμοκρασία για κάθε τάξη μεγέθους του  $L$ .

Συνεπώς, αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (25) και (26) στην (17α) με όρους  $\xi, z$ :

$$\begin{aligned} & L^{-4} \frac{\partial^4 \psi_0}{\partial \xi^4} + 2L^{-2} \frac{\partial^4 \psi_0}{\partial \xi^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4 \psi_0}{\partial z^4} + L^{-5} \frac{\partial^4 \psi_1}{\partial \xi^4} + 2L^{-3} \frac{\partial^4 \psi_1}{\partial \xi^2 \partial z^2} + L^{-1} \frac{\partial^4 \psi_1}{\partial z^4} + \dots = \\ & \text{Pr}_{nf}^{-1} \left[ L^{-3} \frac{\partial(\partial^2 \psi_0 / \partial \xi^2, \psi_0)}{\partial(\xi, z)} + L^{-1} \frac{\partial(\partial^2 \psi_0 / \partial z^2, \psi_0)}{\partial(\xi, z)} \right] \\ & + \text{Pr}_{nf}^{-1} \left[ L^{-4} \frac{\partial(\partial^2 \psi_1 / \partial \xi^2, \psi_1)}{\partial(\xi, z)} + L^{-2} \frac{\partial(\partial^2 \psi_1 / \partial z^2, \psi_1)}{\partial(\xi, z)} \right] + \dots \\ & + \text{Ha}_{nf}^2 \frac{\partial^2 \psi_0}{\partial z^2} + \text{Ha}_{nf}^2 L^{-1} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial z^2} + \dots \\ & + \text{Ra}_{nf} L \frac{\partial \Gamma_0}{\partial \xi} + \text{Ra}_{nf} \frac{\partial \Gamma_1}{\partial \xi} + \dots \\ & + \text{Da}^{-1} L^{-1} \frac{\partial^2 \psi_0}{\partial \xi^2} + \text{Da}^{-1} \frac{\partial^2 \psi_0}{\partial z^2} + \text{Da}^{-1} L^{-2} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial \xi^2} + \text{Da}^{-1} L^{-1} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial z^2} + \dots \end{aligned} \quad (27\alpha)$$

Στη συνέχεια, οι όροι πρώτης τάξης και  $L^{-1}$  εξισώνονται:

$$\frac{\partial^4 \psi_0}{\partial z^4} - (\text{Ha}_{nf}^2 + \text{Da}^{-1}) \frac{\partial^2 \psi_0}{\partial z^2} = \text{Rs}_{nf} \frac{\partial \Gamma_0}{\partial \xi} \quad (27\beta)$$

$$\frac{\partial^4 \psi_1}{\partial z^4} = \text{Pr}_{nf}^{-1} \frac{\partial(\partial^2 \psi_0 / \partial z^2, \psi_0)}{\partial(\xi, z)} + (\text{Ha}_{nf}^2 + \text{Da}^{-1}) \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial z^2} + \text{Rs}_{nf} \frac{\partial \Gamma_1}{\partial \xi} + \text{Da}^{-1} \frac{\partial^2 \psi_0}{\partial \xi^2} \quad (27\gamma)$$

Όμοια, εισάγοντας τις εξισώσεις (25) και (26) στην εξίσωση (17β) για  $L^2, L$  και 1 λαμβάνεται αντίστοιχα:

$$\frac{\partial^2 T_0}{\partial z^2} = 0 \quad (28\alpha)$$

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} = \frac{\partial T_0}{\partial \xi} \frac{\partial \psi_0}{\partial z} \quad (28\beta)$$

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} = -1 - \frac{\partial^2 T_0}{\partial \xi^2} + \frac{\partial T_1}{\partial \xi} \frac{\partial \psi_0}{\partial z} + \frac{\partial T_0}{\partial \xi} \frac{\partial \psi_1}{\partial z} - \frac{\partial T_1}{\partial z} \frac{\partial \psi_0}{\partial \xi} \quad (28\gamma)$$

Η λύση της εξίσωσης (28a) με τις αδιαβατικές οριακές συνθήκες  $\partial T_0 / \partial z = 0$  at  $z = \pm 0.5$  είναι:

$$T_0 = \theta_0(\xi) \quad (29)$$

όπου  $\theta_0$  είναι συνάρτηση του  $\xi$ , ανεξάρτητη του  $z$ .

### 3.7 Παραγωγή των αναλυτικών λύσεων

Ακολουθώντας την προσέγγιση των Benos et al. [91] θα αναλυθούν μόνο οι συναρτήσεις ροής τάξης 1 και οι θερμοκρασίες τάξης  $L^2$ , οι οποίες δίνουν μια ικανοποιητική εικόνα της ροής και της μεταφοράς θερμότητας του νανορευστού για το κεντρικό τμήμα της κοιλότητας. Εστιάζοντας στην εξίσωση (27β), η συμπληρωματική της εξίσωση είναι:

$$\frac{\partial^4 \psi_0}{\partial z^4} - (Ha_{nf}^2 + Da^{-1}) \frac{\partial^2 \psi_0}{\partial z^2} = 0 \quad (30)$$

Η γενική λύση της συμπληρωματικής εξίσωσης είναι:

$$\begin{aligned} \psi_{0,c} = & A(\xi) \cosh\left[\left(Ha_{nf}^2 + Da^{-1}\right)z\right] + B(\xi) \sinh\left[\left(Ha_{nf}^2 + Da^{-1}\right)z\right] \\ & + C(\xi)z + D(\xi) \end{aligned} \quad (31\alpha)$$

ενώ η ειδική λύση της είναι με τον ίδιο τρόπο όπως στην [91]:

$$\psi_{0,p} = -\frac{Rs_{nf} \theta_0'}{Ha^2 + Da^{-1}} \frac{z^2}{2} \quad (31\beta)$$

Αντικαθιστώντας τις οριακές συνθήκες που αφορούν το  $\psi_0$  και προσθέτοντας τις ειδικές και γενικές λύσεις:

$$\psi_0 = \frac{Rs_{nf} \theta_0'}{Ha^2 + Da^{-1}} \cdot G(z) \quad (32)$$

όπου:

$$G(z) = \frac{1}{2} \left( \frac{\cosh(\sqrt{Ha^2 + Da^{-1}} z)}{\sqrt{Ha^2 + Da^{-1}} \sinh(\sqrt{Ha^2 + Da^{-1}} / 2)} - \frac{\coth(\sqrt{Ha^2 + Da^{-1}} / 2)}{\sqrt{Ha^2 + Da^{-1}}} + \frac{1}{4} - z^2 \right) \quad (33)$$

Ολοκληρώνοντας ως προς  $z$  την εξίσωση (28γ) και εφαρμόζοντας την συνοριακή συνθήκη για αδιαβατικό τοίχωμα  $\partial T_2 / \partial z|_{z=\pm 0.5} = 0$  η μόνη συνεπής λύση σύμφωνα με την [91] για  $\theta_0$  είναι:

$$\theta_0'' + a_m R_1^2 (\theta_0')^2 \theta_0'' + 1 = 0 \quad (34)$$

όπου:

$$\alpha_m = \frac{3}{(Ha^2 + Da^{-1})^2} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} G(z)^2 dz \Rightarrow \quad (35)$$

Ακολουθώντας την ανάλυση [91], η πρώτη ολοκλήρωση της εξίσωσης (43) λαμβάνοντας υπόψη τη συνθήκη συμμετρίας της λύσης, δίνει:

$$\theta_0' = a_m^{-1/2} R_1^{-1} [F_m^+(\xi) + F_m^-(\xi)] \quad (36)$$

όπου:

$$F_m^\pm(\xi) = \left\{ \frac{3}{2} a_m^{1/2} R_1 \left( \frac{1}{2} - \xi \right) \pm \left[ 1 + \frac{9}{4} a_m R_1^2 \left( \xi - \frac{1}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3} \quad (37)$$

Επιπλέον, χρησιμοποιώντας  $\sinh y_m = \sinh^{-1} \left[ \frac{3}{2} a_m^{1/2} R_{s_{nf}} \left( \xi - \frac{1}{2} \right) \right]$  με μια περαιτέρω ολοκλήρωση, παράγονται λύσεις κλειστής μορφής της ροϊκής συνάρτησης του ναορευστού (38α) για το κεντρικό τμήμα της κοιλότητας, της κατακόρυφης ταχύτητας (38β) (από την παράγωγο της ροϊκής συνάρτησης) και της θερμοκρασίας (38γ), όπου  $y_{m,0} = \sinh^{-1} \left( \frac{3}{4} a_m^{1/2} R_{s_{nf}} \right)$ .

$$\psi_0 = -2 \frac{a_m^{-1/2} G}{Ha_{nf}^2 + Da^{-1}} \sinh \frac{1}{3} y_m \quad (38\alpha)$$

$$w_0 = -\frac{\partial \psi_0}{\partial \xi} = \frac{R_{s_{nf}} G}{(Ha_{nf}^2 + Da^{-1}) \left( 1 + 4 \sinh^2 \frac{1}{3} y_m \right)} \quad (38\beta)$$

$$\theta_0 = a_m^{-1} Rs_{nf}^{-2} \left( \cosh \frac{2}{3} y_m - \frac{1}{2} \cosh \frac{4}{3} y_m - \cosh \frac{2}{3} y_{m,0} + \frac{1}{2} \cosh \frac{4}{3} y_{m,0} \right) \quad (38\gamma)$$

θα πρέπει να αναφερθεί ότι:

$$\begin{aligned} a_m &= f(Ha_{nf}, Da), \quad y_m = f(Ha_{nf}, Rs_{nf}, Da, \xi), \\ y_{m,0} &= f(Ha_{nf}, Rs_{nf}, Da), \quad G = f(Ha_{nf}, Da, z) \end{aligned} \quad (39)$$

Επιπλέον, για πολύ μεγάλες τιμές της διαπερατότητας, οι ασυμπτωτικές λύσεις, δηλαδή οι εξισώσεις (38α)-(38γ), οδηγούν στα MHD αποτελέσματα των Benos, Sarris et al. [87–90]. Για  $Da^{-1} \rightarrow 0$  οι προαναφερθείσες λύσεις ανάγονται στα αποτελέσματα MHD καθαρού ρευστού των Benos et al. [86]. Τέλος, αν προστεθεί επιπλέον  $Ha_{nf} \rightarrow 0$ , το υδροδυναμικό (HD) όριο των Daniels και Jones [85] προκύπτει ακριβώς, δηλαδή:

$$\lim_{Ha_{nf} \rightarrow 0} a_m = a_{m,HD} = \frac{1}{120960} \quad (40)$$

$$\lim_{Ha_{nf} \rightarrow 0} \psi_0 = -\frac{2}{\sqrt{a_{m,HD}}} \frac{1}{24} \left( \frac{1}{4} - z^2 \right)^2 \sinh \left( \frac{1}{3} y_{m,HD} \right) \quad (41)$$

$$\lim_{Ha_{nf} \rightarrow 0} w_{an} = \frac{Rs}{384} \quad (42)$$

με  $a_{m,HD}$ ,  $y_{m,HD}$  να είναι τα όρια των  $a_m$  and  $y_m$ , αντίστοιχα, στην υδροδυναμική περίπτωση.

Όπως και στις προαναφερθείσες μελέτες της παραπάνω παραγράφου, οι αναλυτικές λύσεις για την περιοχή του κέντρου της κοιλότητας ισχύουν για κοιλότητες με μεγάλο λόγο διαστάσεων σε σχετικά μικρούς αριθμούς Rayleigh μαζί με/ή υψηλούς αριθμούς Hartmann.

### 3.8 Σύγκριση των ασυμπτωτικών λύσεων με τα αριθμητικά αποτελέσματα

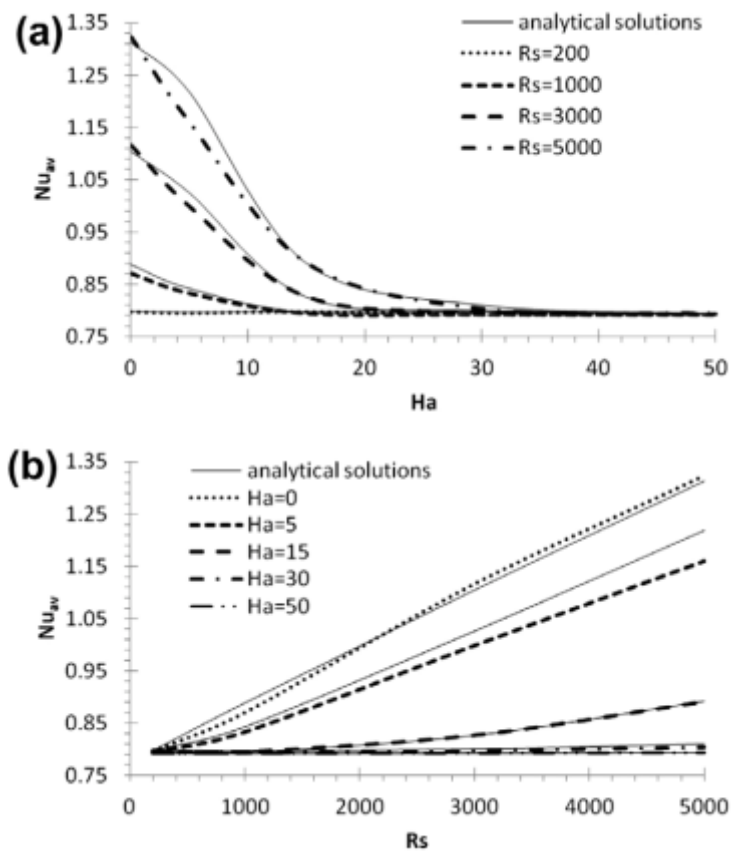
Για το σκοπό αυτό, η επιτυχής σύγκριση των ασυμπτωτικών λύσεων με τα αριθμητικά αποτελέσματα αποδείχθηκε και αναλύθηκε λεπτομερώς στην [86] (βλ. **Εικόνα 11-Εικόνα 14**).

Με βάση την [86], η συγκεκριμένη ροή παρουσιάζει δύο συμμετρικές ανακυκλοφορίες με το ρευστό να ανέρχεται στο θερμό κέντρο της κοιλότητας και να κατέρχεται στα κρύα τοιχώματα. Η παρούσα ασυμπτωτική ανάλυση δεν μπορεί να συλλάβει τη ροή του ρευστού προς τα κάτω κοντά στα κατακόρυφα ψυχρά όρια και είναι ακριβής μόνο για στρωτές ροές. Συνολικά, μικροί αριθμοί Rayleigh ή/και μεγάλοι αριθμοί Hartmann συμβάλλουν στην εγκαθίδρυση στρωτής ροής. Επιπλέον, οι μικρές τιμές των αριθμών Darcy αναμένεται να επιβραδύνουν τη ροή και

τη μεταφορά θερμότητας του νανορευστού, να διατηρήσουν τη στρωτή ροή και να τη διατηρήσουν κοντά στο τοίχωμα καθεστώ αγωγιμότητας όπως αποδείχθηκε στην από τις εργασίες των Benos et al. Που προαναφέρθηκαν.

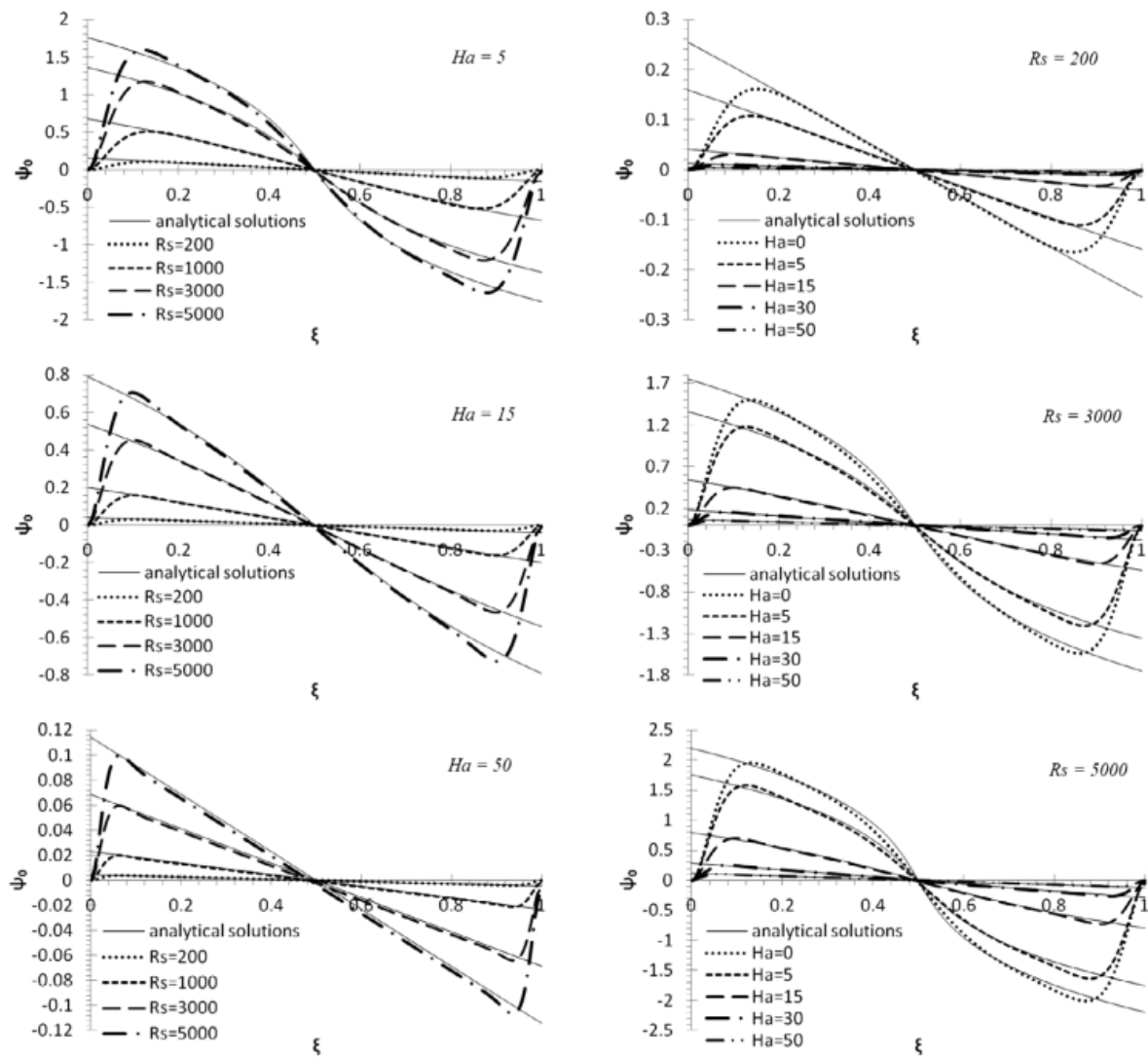
Τέλος, προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η μεταφορά θερμότητας, χρησιμοποιείται ο μέσος αριθμός Nusselt,  $Nu_{av}$ , όπως στην [86] (σύγκριση μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και αγωγή). Έτσι, όπως απέδειξαν οι Daniels και Jones [85]:

$$Nu_{av} = \frac{1}{T(0.5L, 0.5)} \int_{-0.5}^{0.5} \frac{\partial T}{\partial x}(0, z) dz = \frac{1}{2T(0.5L, 0.5)} \square \frac{1}{2L\theta_0(0.5)} \quad (43)$$

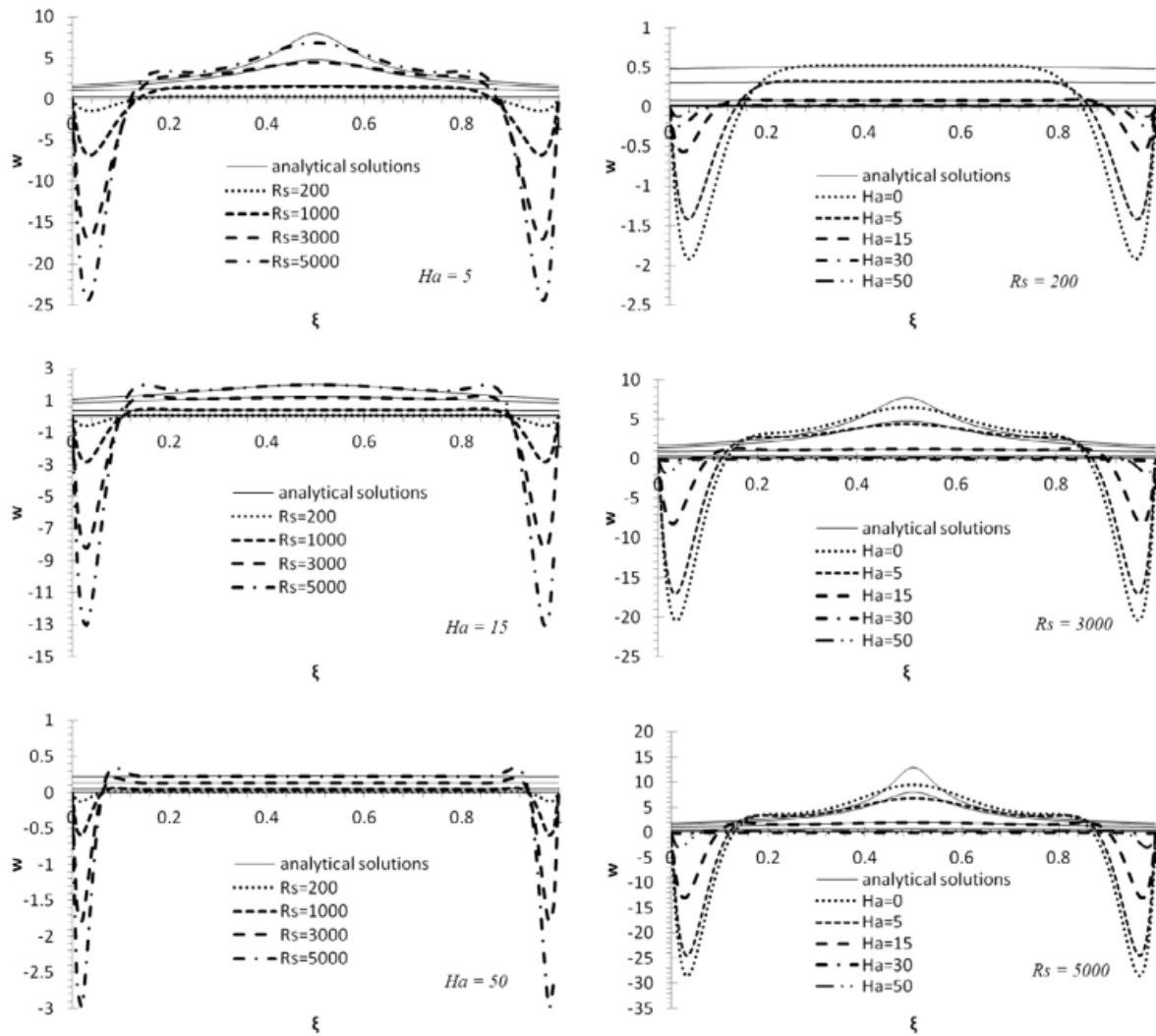


**Εικόνα 11.** Επίδραση του  $Rs$  (α) και  $Ha$  (β) στον μέσο αριθμό Nusselt, σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων, [86].





**Εικόνα 12.** Επίδραση του  $Rs$  (αριστερά) και  $Ha$  (δεξιά) στην κατανομή της ροϊκής συνάρτησης στο κεντρικό τμήμα της κοιλότητας στο μέσο ύψος της κοιλότητας ( $z = 0$ ), σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων, [86].



**Εικόνα 13.** Επίδραση του  $Rs$  (αριστερά) και  $Ha$  (δεξιά) στην κατανομή της κάθετης ταχύτητας στο κεντρικό τμήμα της κοιλότητας στο μέσο ύψος της κοιλότητας ( $z = 0$ ), σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων, [86].

$Rs$	$T_{an}$	$T_{num}$			
		$Pr = 0.0321$	Error (%)	$Pr = 0.7$	Error (%)
<b><math>Ha = 5</math></b>					
200	3.138	3.118	-0.64	3.118	-0.64
3000	2.437	2.590	5.91	2.510	2.91
5000	2.052	2.326	11.78	2.172	5.52
<b><math>Ha = 15</math></b>					
200	3.135	3.123	-0.38	3.123	-0.38
3000	3.023	3.011	-0.40	3.009	-0.47
5000	2.805	2.865	2.09	2.862	1.99
<b><math>Ha = 50</math></b>					
200	3.125	3.125	0.00	3.123	-0.06
3000	3.124	3.120	-0.13	3.120	-0.13
5000	3.118	3.119	0.03	3.116	-0.06

**Εικόνα 14.** Σύγκριση των αναλυτικών και αριθμητικών τιμών θερμοκρασίας στο κέντρο της κοιλότητας (σε  $\xi = 0.5, z = 0$ ) για διάφορες τιμές των  $Ha, Rs$  και  $Pr$ , [86].

## 4 Αποτελέσματα

Όσο αναφορά τις φυσικές ιδιότητες του νερού, της αιθυλενογλυκόλης, και του αργύρου (Ag), αυτές συνοψίζονται στον **Πίνακα 1**.

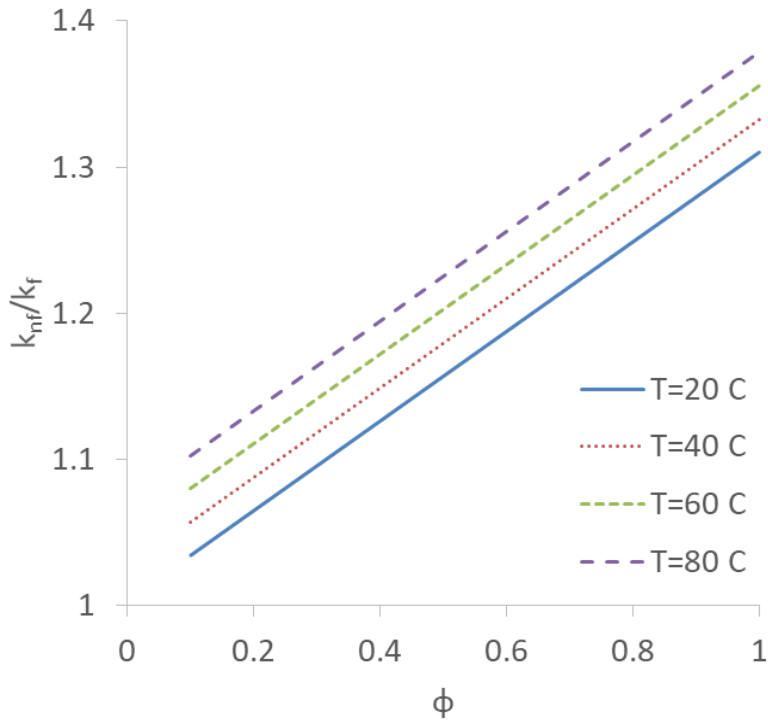
**Πίνακας 1.** Φυσικές ιδιότητες του νερού, της αιθυλενογλυκόλης, και του αργύρου (Ag), [99,100].

Ιδιότητα	Νερό	Αιθυλενογλυκόλη	Νερό- Αιθυλενογλυκόλη (50:50)*	Ag
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	997.1	1109	1053.05	10500
$c_p$ (J/kgK)	4179	2400	3289.5	235
$k$ (W/mK)	0.613	0.258	0.4355	429
$\beta$ (1/K)	$21 \cdot 10^{-5}$	$57 \cdot 10^{-5}$	$39 \cdot 10^{-5}$	$1.89 \cdot 10^{-5}$
$\mu$ (Pas)	$0.85 \cdot 10^{-3}$	$16.1 \cdot 10^{-3}$	$8.475 \cdot 10^{-3}$	-
$\sigma$ (S/m)	$5.6 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$63 \cdot 10^6$

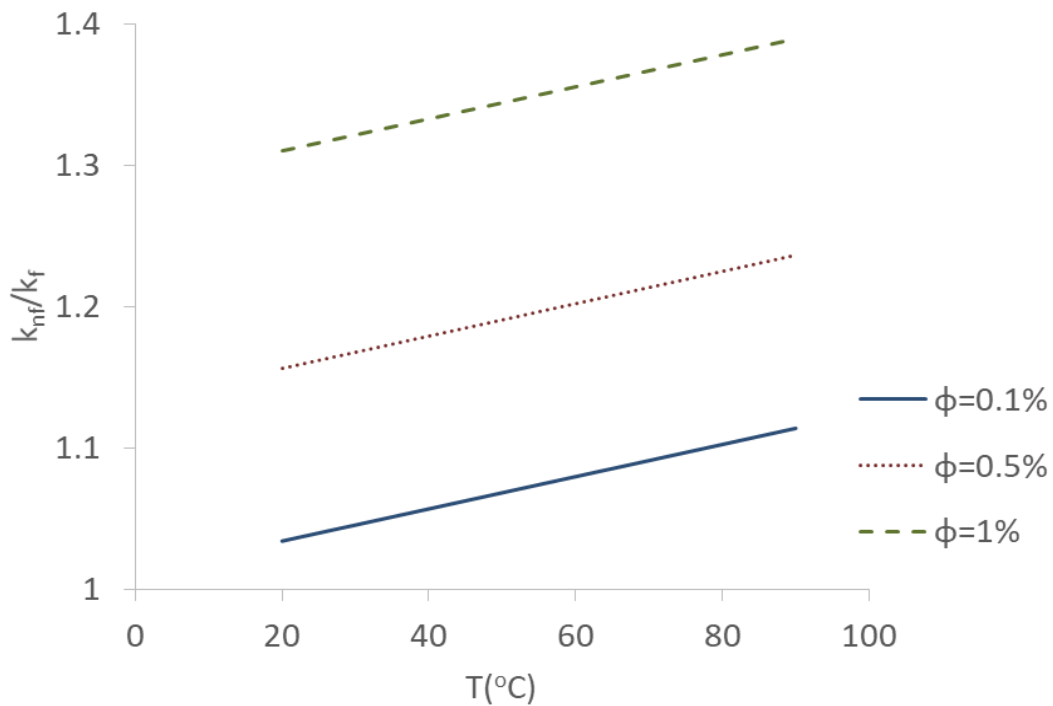
\*Οι τιμές αυτής της στήλης υπολογίστηκαν ως μέσος όρος των δύο προηγούμενων.

### 4.1 Ιδιότητες πράσινου νανορευστού συναρτήσει της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης νανοσωματιδίων

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (9β) για την θερμική αγωγιμότητα, προκύπτουν τα διαγράμματα που απεικονίζονται στην **Εικόνα 15**, **Εικόνα 16**. Συγκεκριμένα στα διαγράμματα παρουσιάζεται η ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας ( $k_{nf}/k_f$ ) για διαφορετικές συγκεντρώσεις και θερμοκρασίες. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι η θερμική αγωγιμότητα του πράσινου νανορευστού αυξάνεται τόσο με την αύξηση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων όσο και με την αύξηση της θερμοκρασίας.



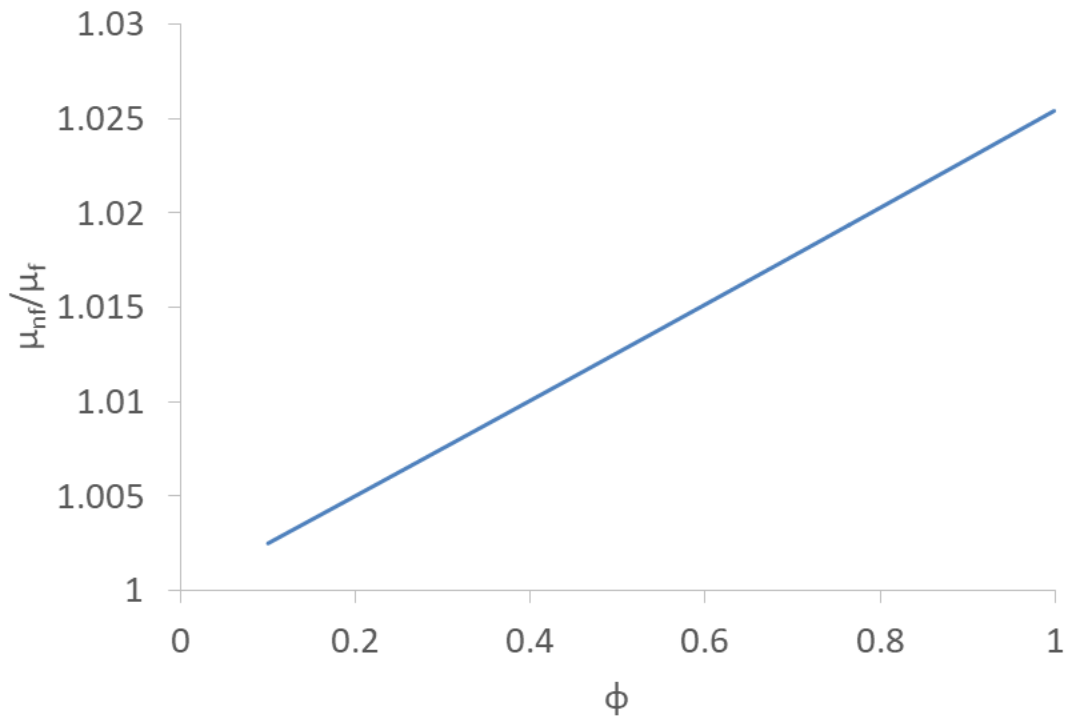
**Εικόνα 15.** Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας για διαφορετικές θερμοκρασίες του νανορευστού και συγκεντρώσεις των πράσινων νανοσωματιδίων.



**Εικόνα 16.** Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας για διαφορετικές συγκεντρώσεις των πράσινων παραγόμενων νανοσωματιδίων και θερμοκρασίες του νανορευστού.

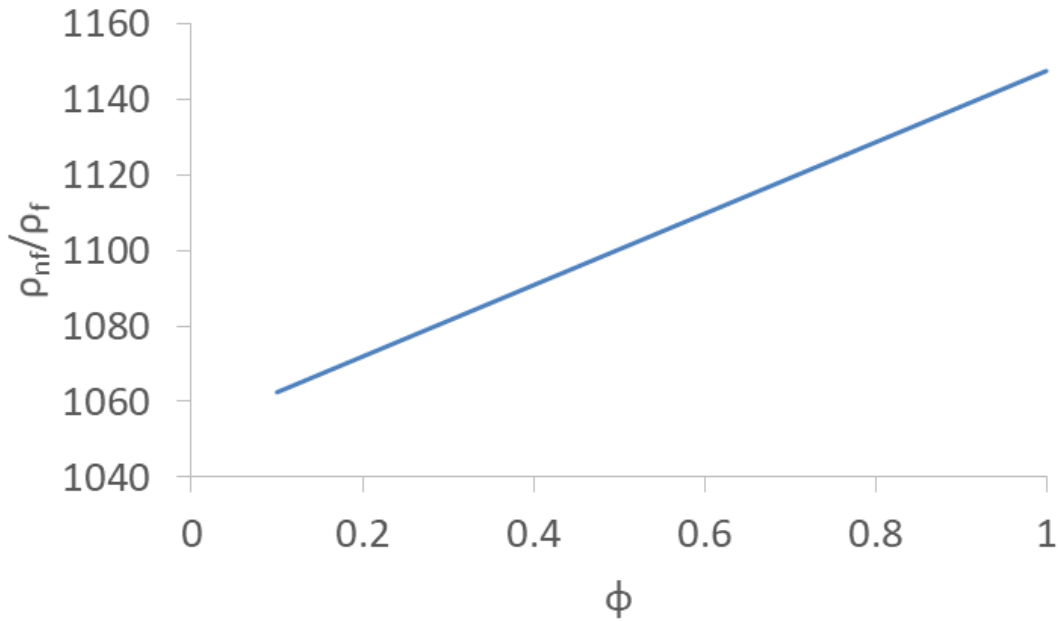
Αντίθετα, όπως φαίνεται από την εξίσωση (9α) για το δυναμικό ιξώδες ( $\mu_{nf}$ ), αυτό είναι

ανεξάρτητο της θερμοκρασίας, μια απλούστευση που εισάγει η εξίσωση Brinkman. Έτσι, το γράφημα στην **Εικόνα 17** παρουσιάζει την αύξηση του δυναμικού ιξώδους καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση των νανοσωματιδίων.



**Εικόνα 17.** Μεταβολή του δυναμικού ιξώδους για διαφορετικές συγκεντρώσεις των πράσινων παραγόμενων νανοσωματιδίων.

Ομοίως, παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας του ναορευστού με την αύξηση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων (**Εικόνα 18**). Σε όλα τα σχήματα λήφθηκε υπόψη το εύρος τιμών των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική μελέτη των Sharifpur et al. [98]. Συγκεκριμένα, οι θερμοκρασίες ήταν από 20 °C - 90 °C και η συγκέντρωση των πράσινων νανοσωματιδίων από 0.1% - 1%.



*Εικόνα 18. Μεταβολή της πυκνότητας για διαφορετικές συγκεντρώσεις των πράσινων παραγόμενων νανοσωματιδίων.*

#### 4.2 Επίδραση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης νανοσωματιδίων στους αδιάστατους αριθμούς

Όπως αποδείχθηκε από τις εργασίες των Benos et al. [86,90,91], οι αδιάστατοι αριθμοί Prandtl, Hartmann, Rayleigh και Darcy (εξισώσεις 44α-δ) διέπουν το παρόν πρόβλημα (για ολόκληρη την περιοχή της κοιλότητας). Συνεπώς, παρατηρώντας πώς επηρεάζουν αυτοί οι αδιάστατοι αριθμοί τη ροή του πράσινου νανορευστού και την μεταφορά θερμότητας, δίνει μια πλήρης εξήγηση για το πρόβλημα της μαγνητουδροδυναμικής φυσικής συναγωγής. Αυτοί οι αδιάστατοι αριθμοί δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις.

$$Pr_{nf}(\varphi) = \frac{\nu_{nf}}{a_{nf}} \quad (44\alpha)$$

$$Ha_{nf}(\varphi) = B_0 h (\sigma_{nf} / \rho_{nf} \nu_{nf})^{1/2} \quad (44\beta)$$

$$Ra_{nf}(\varphi) = \frac{g \beta_{nf} Q h^5}{(\rho C_p)_{nf} \nu_{nf} a_{nf}^2} \quad (44\gamma)$$

$$Da = \frac{K}{h^2} \quad (44\delta)$$

Ο  $Pr_{nf}$  είναι ο αριθμός Prandtl που συσχετίζει την ορμή με τη θερμική διαχυτότητα, ενώ ο  $Ha_{nf}$  είναι ο αριθμός Hartmann, ο οποίος μετρά τη σχετική ισχύ των ηλεκτρομαγνητικών προς τις ιξώδεις δυνάμεις.

Ο  $Ra_{nf}$  είναι ο αριθμός Rayleigh του νανορευστού. Γενικά, ο αριθμός Rayleigh είναι το γινόμενο μεταξύ του αριθμού Grashof και του αριθμού Prandtl και σχετίζεται με ροές που οδηγούνται από την άνωση. Γενικά, όταν ο αριθμός Rayleigh βρίσκεται κάτω από μια κρίσιμη τιμή, η μεταφορά θερμότητας οφείλεται αποκλειστικά στην αγωγιμότητα. Αντίθετα, όταν ο αριθμός Rayleigh υπερβαίνει την εν λόγω κρίσιμη τιμή, η μεταφορά θερμότητας ενισχύεται σταδιακά λόγω της υπεροχής της συναγωγής έναντι της αγωγής.

Τέλος, ο αριθμός Darcy,  $Da$ , είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη χωρίς διαστάσεις παράμετρος για τη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας μέσω πορώδων μέσων και δείχνει το σχετικό αποτέλεσμα της διαπερατότητας του πορώδους μέσου,  $K$ , προς το χαρακτηριστικό μήκος στο τετράγωνο.

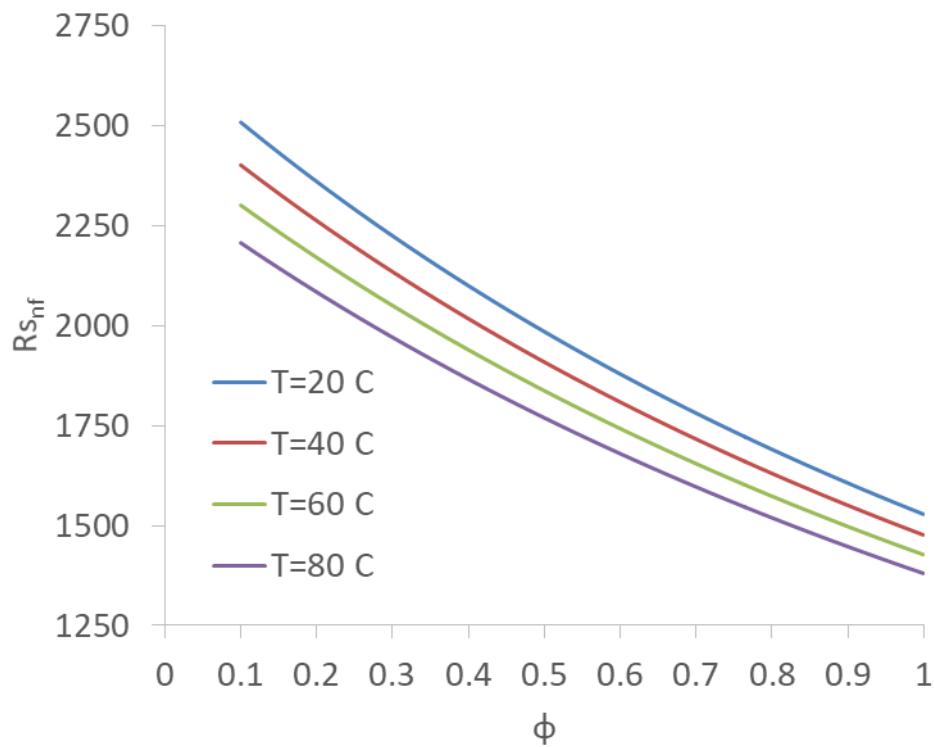
Θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα  $Pr_{nf}$ ,  $Ha_{nf}$ ,  $Ra_{nf}$  εξαρτώνται από το κλάσμα όγκου των νανοσωματιδίων,  $\phi$ , ενώ ο αριθμός  $Da$  είναι μια εγγενής ιδιότητα της πορώδους κοιλότητας και ανεξάρτητη της συγκέντρωσης νανοσωματιδίων. Το “ $nf$ ” κάθε φορά αναφέρεται στην ανοιγμένη τιμή της παραμέτρου.

Επίσης, για να παραμένει στρωτή ροή, και άρα έγκυρες και οι αναλυτικές λύσεις, θα πρέπει  $200 \leq Rs \leq 5000$  και  $0 \leq Ha \leq 50$  όμοια με τις [86,90,91]. Πρέπει να τονιστεί ότι για  $Ha = 0$  και για πολύ μεγάλες τιμές  $Da$  έχουμε ακριβώς την υδροδυναμική λύση των Daniels και Jones [85].

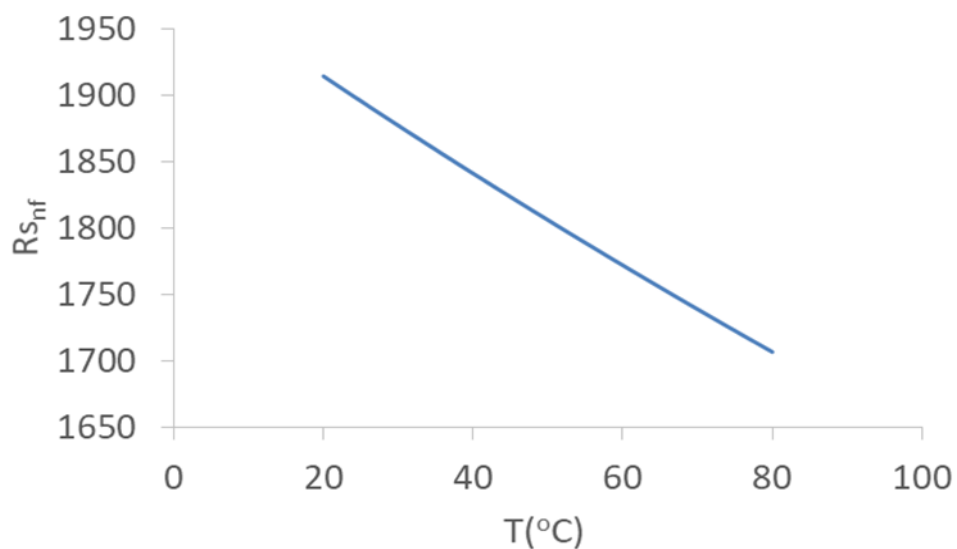
#### 4.2.1 Επίδραση στον αριθμό Rayleigh

Παρακάτω, στην **Εικόνα 19**, παρατηρείται πως επηρεάζει η αύξηση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων τον αριθμό Rayleigh (συγκεκριμένα τον  $Rs = Ra \cdot L$ , που είναι τάξης 1). Ως αναφορά για  $\phi = 0$  (δηλαδή να νερό- αιθυλενογλυκόλη (50:50)) χρησιμοποιήθηκε ο  $Rs = 2500$ . Επιπλέον, μελετήθηκαν 4 θερμοκρασίες 20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C, όμοια με τα πειράματα των Sharifpur et al. [98]. Παρατηρείται ότι όσο πιο πυκνό γίνεται το πράσινο νανορευστό, ο αριθμός  $Rs$  μειώνεται (**Εικόνα 19**). Όμοια, ο αριθμός  $Rs$  μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία (**Εικόνα 20**). Στην **Εικόνα 20** έχει επιλεγθεί ως συγκέντρωση αναφοράς  $\phi = 0.5\%$ , ενώ χρησιμοποιήθηκε ξανά ο  $Rs = 2500$  για  $\phi = 0\%$ . Επομένως, αναμένουμε μικρότερες ταχύτητες του νανορευστού για μεγαλύτερες συγκεντρώσεις και θερμοκρασίες. Μικροί αριθμοί Rayleigh

σημαίνουν σταδιακή επικράτηση της αγωγής έναντι της συναγωγής, εις βάρος της μεταφοράς θερμότητας.



**Εικόνα 19.** Μεταβολή του αριθμού  $R_s$  του νανορευστού για διαφορετικές συγκεντρώσεις των πράσινων νανοσωματιδίων και θερμοκρασίες του νανορευστού.



**Εικόνα 20.** Μεταβολή του αριθμού  $R_s$  του νανορευστού για διαφορετικές θερμοκρασίες του πράσινου νανορευστού και συγκέντρωση αναφοράς  $\phi = 0.5\%$  ( $R_{s_{αναφοράς}} = 2500$ ).

Για παράδειγμα όσο αναφορά την τιμή του  $R_s$ :

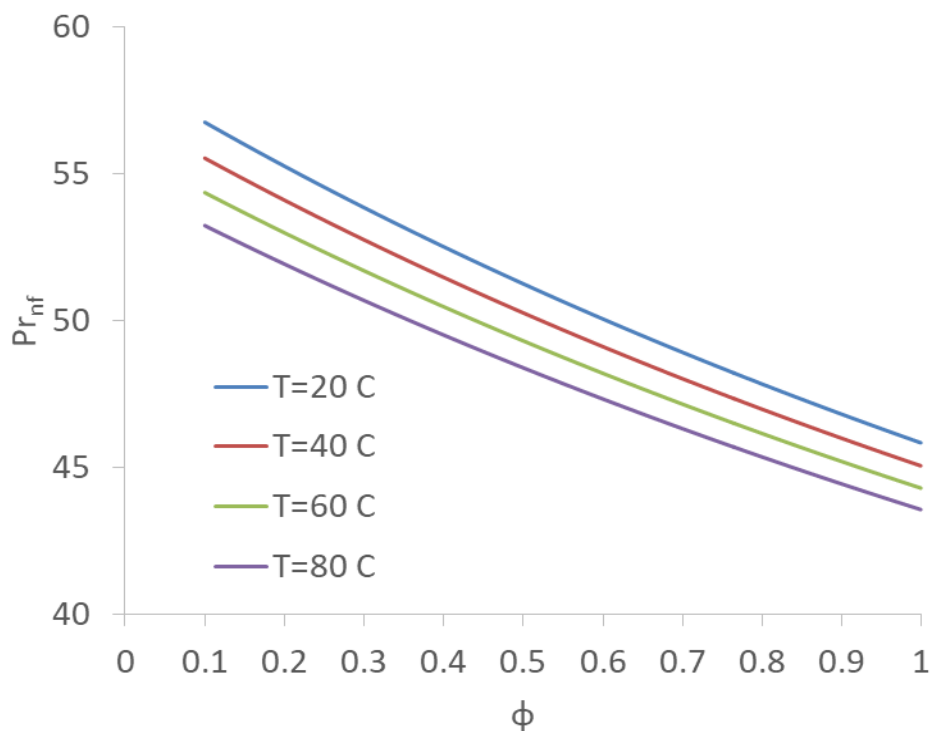


- Για θερμοκρασία  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και για μεταβολή συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων από 0 σε 1% υπάρχει μείωση 38.9%.
- Για θερμοκρασία  $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και για μεταβολή συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων από 0 σε 1% υπάρχει μείωση 40.9%.
- Για θερμοκρασία  $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  και για μεταβολή συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων από 0 σε 1% υπάρχει μείωση 42.9%.
- Για θερμοκρασία  $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  και για μεταβολή συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων από 0 σε 1% υπάρχει μείωση 44.8%.

Τέλος, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 20**, για  $Rs$  αναφοράς ίσο με 2500 και  $\varphi = 0.5\%$ , από  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  σε  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  υπάρχει μείωση του  $Rs$  περίπου 10.9%.

#### 4.2.2 Επίδραση στον αριθμό Prandtl

Όμοια με τον αριθμό Rayleigh, ο αριθμός Prandtl επηρεάζεται από την συγκέντρωση των νανοσωματιδίων στο πράσινο νανορευστό καθώς κι από την θερμοκρασία του νανορευστού, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 21**. Συγκεκριμένα μεγάλες συγκεντρώσεις και μεγάλες θερμοκρασίες συνεισφέρουν στην μείωση του αριθμού Prandtl.



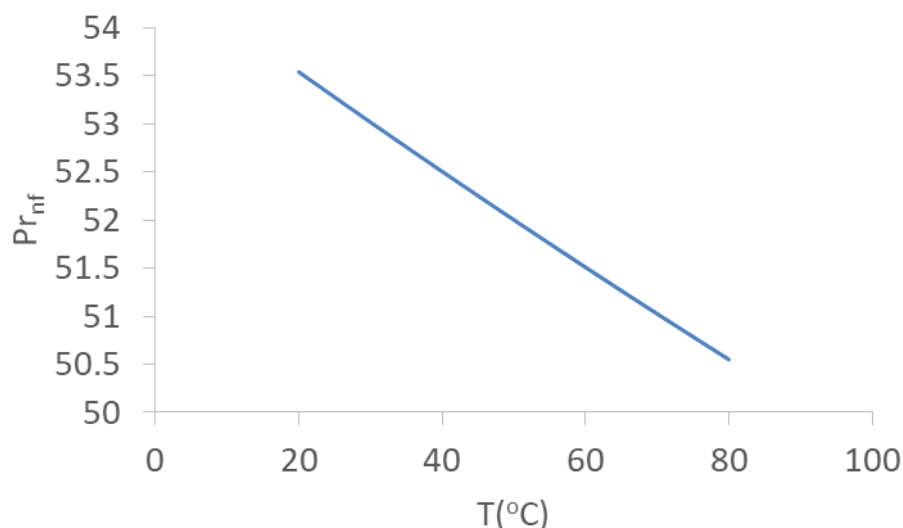
**Εικόνα 21.** Μεταβολή του αριθμού Prandtl του νανορευστού για διαφορετικές συγκεντρώσεις των πράσινων νανοσωματιδίων και θερμοκρασίες του νανορευστού.

Μικρές τιμές του αριθμού Prandtl,  $Pr \ll 1$ , σημαίνουν ότι η θερμική διαχυτότητα κυριαρχεί. Ενώ με μεγάλες τιμές,  $Pr \gg 1$ , η διάχυση ορμής κυριαρχεί. Σε προβλήματα μεταφοράς θερμότητας, ο αριθμός Prandtl ελέγχει το σχετικό πάχος των οριακών στρωμάτων ορμής και θερμότητας. Όταν ο  $Pr$  είναι μικρός, σημαίνει ότι η θερμότητα διαχέεται γρήγορα σε σύγκριση με την ταχύτητα (ορμή). Αυτό σημαίνει ότι για  $Pr \ll 1$  το θερμικό οριακό στρώμα είναι πολύ παχύτερο από το οριακό στρώμα ταχύτητας.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα:

- Για θερμοκρασία  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  και για μεταβολή συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων από 0.1 σε 1% υπάρχει μείωση 19.2%.
- Για θερμοκρασία  $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  και για μεταβολή συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων από 0.1 σε 1% υπάρχει μείωση 18.9%.
- Για θερμοκρασία  $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  και για μεταβολή συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων από 0.1 σε 1% υπάρχει μείωση 18.5%.
- Για θερμοκρασία  $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  και για μεταβολή συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων από 0.1 σε 1% υπάρχει μείωση 18.2%.

Τέλος, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 22**, για  $\phi = 0.5\%$ , από  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  σε  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  υπάρχει μείωση του  $Pr$  περίπου 5.6%.

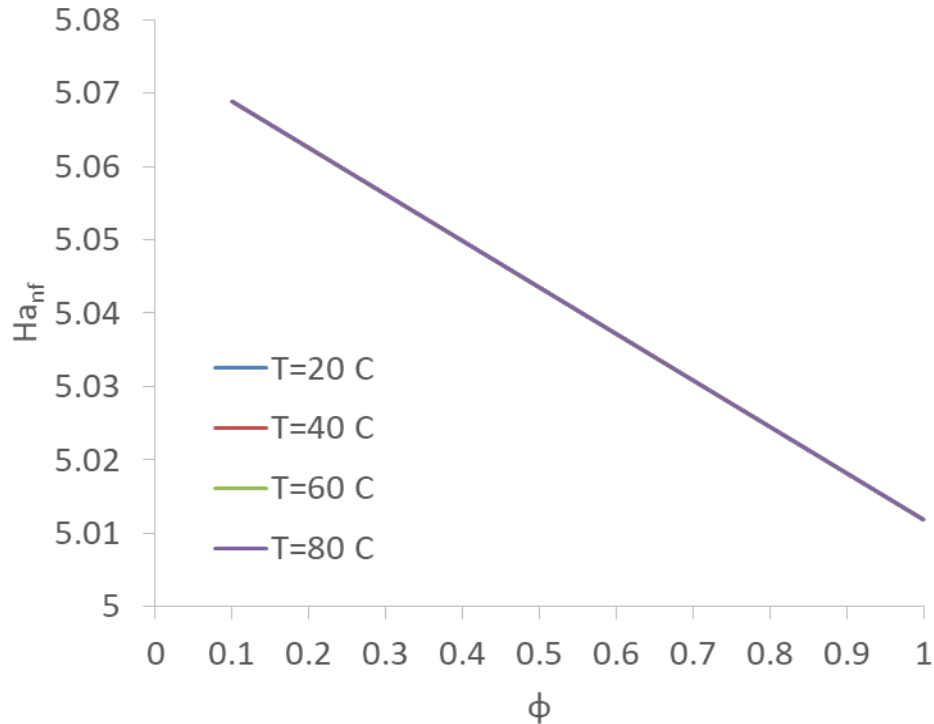


**Εικόνα 22.** Μεταβολή του αριθμού Prandtl του νανορευστού για διαφορετικές θερμοκρασίες του πράσινου νανορευστού και  $\phi = 0.5\%$ .

#### 4.2.3 Επίδραση στον αριθμό Hartmann

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις που αναλύθηκαν, ο αριθμός Hartmann δεν μεταβάλλεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του πράσινου νανορευστού. Αυτό φαίνεται κι από την σχέση (44β), όπου ορίζεται ως  $Ha_{nf}(\varphi) = B_0 h (\sigma_{nf} / \rho_{nf} \nu_{nf})^{1/2}$ . Αυτό οφείλεται επειδή στην παρούσα μελέτη, η θερμοκρασία εισάγεται μόνο μέσω την πειραματικής σχέσης για την θερμική αγωγιμότητα. Επομένως, όποιος αδιάστατος αριθμός δεν την περιλαμβάνει θα είναι και ανεξάρτητος της θερμοκρασίας.

Γενικά, στο συγκεκριμένο πρόβλημα μαγνητοϋδροδυναμικής φυσικής συναγωγής, η αύξηση του αριθμού Hartmann είτε ως μείωση της πυκνότητας και του κινητικού ιξώδους του νανορευστού είτε ως αύξηση του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου,  $B_0$ , έχει πολλή σημαντική επίδραση στη μεταφορά θερμότητας. Συγκεκριμένα, όταν αυξάνεται ο Hartmann το ρευστό επιβραδύνεται προς επιβάρυνση της μεταφοράς θερμότητας. Έτσι, η αγωγή υπερτερεί της συναγωγής ως μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας. Αντίθετα, όταν μειώνεται ο αριθμός Hartmann, η συναγωγή σταδιακά αρχίζει να υπερτερεί της αγωγής με αποτέλεσμα την βελτιστοποίηση της μεταφοράς θερμότητας. Πρέπει να σημειωθεί ότι για σταθερό μαγνητικό πεδίο, η αύξηση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων ισοδυναμεί με πολύ μικρή μείωση του Hartmann. Συγκεκριμένα, καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση από 0% σε 1% υπάρχει μείωση ίση με 0.2% (Εικόνα 23). Στο συγκεκριμένο σχήμα ως Hartmann αναφοράς επιλέχθηκε  $Ha = 5$  για  $\varphi = 0$ .



**Εικόνα 23.** Μεταβολή του αριθμού Hartmann του νανορευστού για διαφορετικές συγκεντρώσεις των πράσινων νανοσωματιδίων και θερμοκρασίες του νανορευστού (ως Hartmann αναφοράς επιλέχθηκε  $Ha = 5$  για  $\varphi = 0$ ).

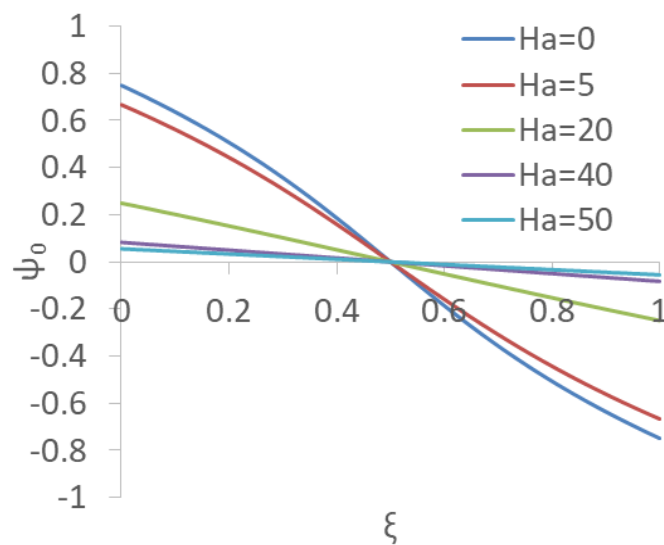
### 4.3 Επίδραση των αδιάστατων αριθμών στην ροή του νανορευστού και στη μεταφορά θερμότητας

#### 4.3.1 Επίδραση του αριθμού Hartmann

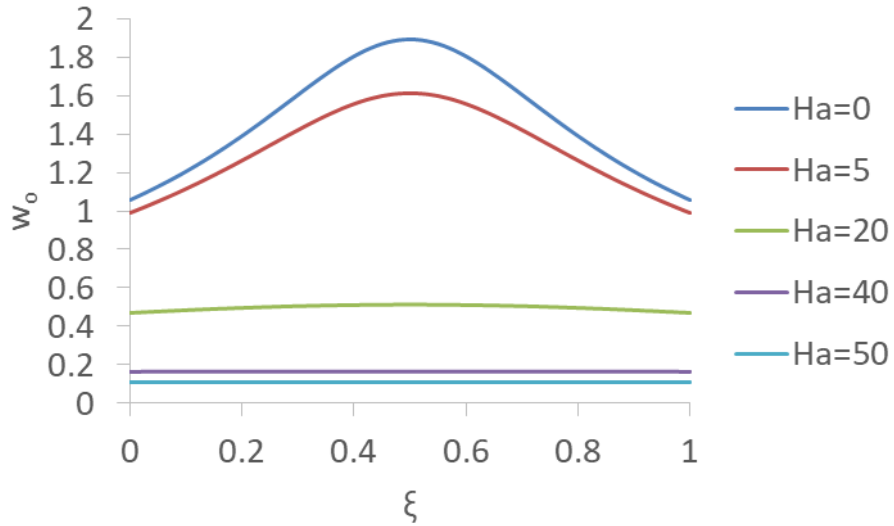
Γενικά, η αύξηση του αριθμού Hartmann είναι συνδεδεμένη είτε με την αύξηση του μαγνητικού πεδίου είτε με την μείωση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων, ενώ είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας (τουλάχιστον με την παρούσα απλοϊκή προσέγγιση) (**Εικόνα 23**).

Όπως βρέθηκε και σε παρόμοιες μελέτες [20,86,88,90,95], η σταδιακή αύξηση του αριθμού Hartmann επιφέρει μια επιβράδυνση στο νανορευστό, που είναι φανερή από την μείωση του  $\psi_0$  (**Εικόνα 24**) και την μείωση της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας (**Εικόνα 25**) στο κέντρο της κοιλότητας. Σε αυτή την περίπτωση, όσο το νανορευστό ρέει πιο αργά, η απαγωγή θερμότητας δυσχεράνει, με αποτέλεσμα θερμοκρασία να παραμένει σε ψηλά επίπεδα στο κέντρο της κοιλότητας ( $\xi = 0.5, z = 1/2$ ) (**Εικόνα 26**). Η σταδιακή χειροτέρευση της μεταφοράς θερμότητας και η βαθμιαία επικράτηση της αγωγής έναντι της συναγωγής είναι φανερή και με την μείωση του αριθμού Nusselt όσο μεγαλώνει ο  $Ha$  μέχρι την τιμή  $Nu \approx 0.8$ , που φαίνεται να είναι η οριακή τιμή του για μεταφορά θερμότητας μόνο με αγωγή (**Εικόνα 28**).

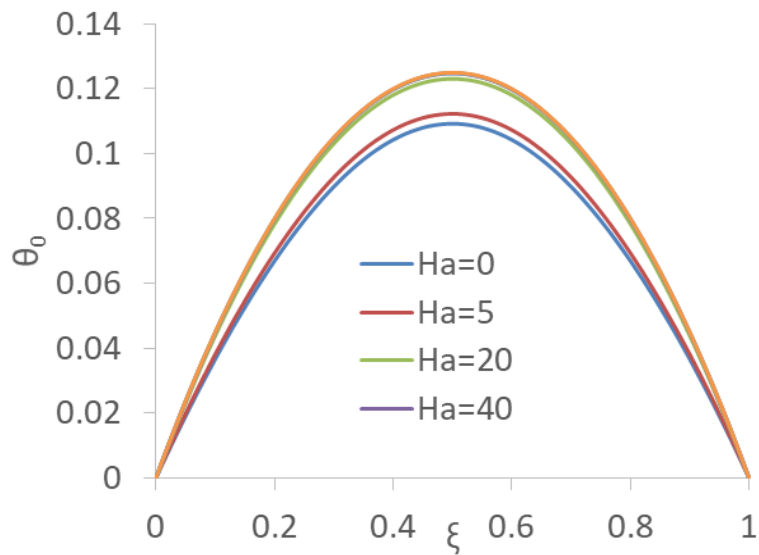
Αντίθετα, η σταδιακή μείωση του αριθμού Hartmann επιφέρει μια επιτάχυνση στο νανορευστό, που είναι φανερή από την αύξηση του  $\psi_0$  (Εικόνα 24) και την αύξηση της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας (Εικόνα 25) στο κέντρο της κοιλότητας. Όσο το νανορευστό ρέει πιο γρήγορα, η απαγωγή θερμότητας ευνοείται, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα στο κέντρο της κοιλότητας (Εικόνα 26). Η σταδιακή αύξηση της μεταφοράς θερμότητας και η βαθμιαία επικράτηση της συναγωγής έναντι της αγωγής είναι φανερή με την αύξηση του αριθμού Nusselt όσο μικραίνει ο  $Ha$  μέχρι την τιμή  $Nu \approx 0.92$ , που φαίνεται να είναι η οριακή τιμή του για  $Ha = 0$ , που είναι το όριο όπου δεν υπάρχουν μαγνητοϋδροδυναμικά φαινόμενα (Εικόνα 27).



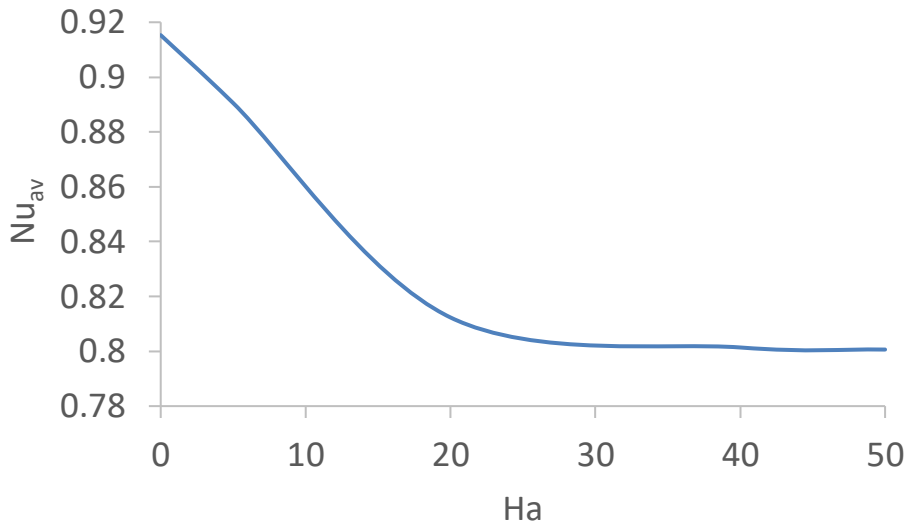
**Εικόνα 24.** Μεταβολή της ροϊκής συνάρτησης για διαφορετικούς αριθμούς Hartmann και  $Da = 0.01$ ,  $Rs = 2500$ .



**Εικόνα 25.** Μεταβολή της ταχύτητας για διαφορετικούς αριθμούς Hartmann και  $Da = 0.01$ ,  $Rs = 2500$ .



**Εικόνα 26.** Μεταβολή της θερμοκρασίας για διαφορετικούς αριθμούς Hartmann και  $Da = 0.01$ ,  $Rs = 2500$ .



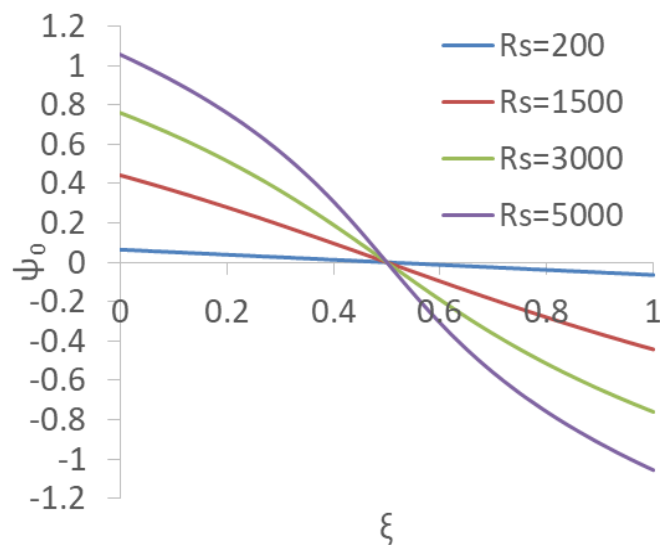
**Εικόνα 27.** Μεταβολή του μέσου αριθμού Nusselt για διαφορετικούς αριθμούς Hartmann και  $Da = 0.01, Rs = 2500$ .

#### 4.3.2 Επίδραση του αριθμού Rayleigh

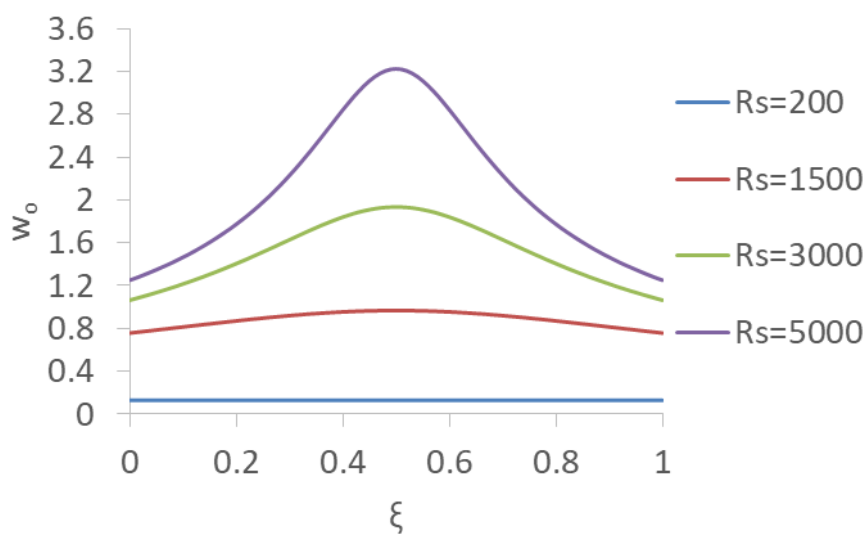
Γενικά, η αύξηση του αριθμού Rayleigh είναι συνδεδεμένη είτε με την αύξηση της εσωτερικής θερμότητας  $Q$  είτε με την μείωση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων (**Εικόνα 19**). Επιπλέον, εξαρτάται από την θερμοκρασία (μέσω της επίδρασής της στην θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού και άρα στο  $\alpha_{nf}$ ). Συγκεκριμένα, η μείωση της θερμοκρασίας,  $T$ , μειώνει την θερμική αγωγιμότητα (**Εικόνα 16**) που οδηγεί, για σταθερή συγκέντρωση νανοσωματιδίων, σε αύξηση του  $Rs$  (**Εικόνα 20**).

Όπως βρέθηκε και σε παρόμοιες εργασίες [20,86,88,90,95], η σταδιακή αύξηση του αριθμού Rayleigh επιφέρει μια επιτάχυνση στο νανορευστό, που είναι φανερή από την αύξηση του  $\psi_0$  (**Εικόνα 28**) και την αύξηση της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας (**Εικόνα 29**) στο κέντρο της κοιλότητας. Όσο το νανορευστό ρέει πιο γρήγορα, η απαγωγή θερμότητας ευνοείται, με αποτέλεσμα θερμοκρασία να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα στο κέντρο της κοιλότητας (**Εικόνα 30**). Η σταδιακή αύξηση της μεταφοράς θερμότητας και η βαθμιαία επικράτηση της συναγωγής έναντι της αγωγής είναι φανερή με την αύξηση του αριθμού Nusselt όσο αυξάνεται ο  $Rs$  μέχρι την τιμή  $Nu \approx 1.04$ , που φαίνεται να είναι η οριακή τιμή του για τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές, δηλαδή στο συγκεκριμένο παράδειγμα:  $Rs = 5000, Ha = 5$  και  $Da = 0.01$  (**Εικόνα 31**). Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί ξανά ότι η παρούσα μελέτη περιορίζεται σε στρωτές ροές. Αυτό εξασφαλίζεται από το όριο των τιμών για  $Rs$ , το οποίο φτάνει μέχρι 5000 [20,85,101].

Αντίθετα, η σταδιακή μείωση του αριθμού Rayleigh επιφέρει μια επιβράδυνση στο νανορευστό, που είναι φανερή από την μείωση του  $\psi_0$  (Εικόνα 28) και την μείωση της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας (Εικόνα 29) στο κέντρο της κοιλότητας. Όσο το νανορευστό ρέει πιο αργά, η απαγωγή θερμότητας δυσχεράνει, με αποτέλεσμα θερμοκρασία να παραμένει σε ψηλά επίπεδα στο κέντρο της κοιλότητας (Εικόνα 26). Η σταδιακή χειροτέρευση της μεταφοράς θερμότητας και η βαθμιαία επικράτηση της αγωγής έναντι της συναγωγής είναι φανερή με την μείωση του αριθμού Nusselt όσο μεγαλώνει ο  $Ha$  μέχρι την τιμή  $Nu \approx 0.8$ , που είναι η οριακή τιμή του για μεταφορά θερμότητας μόνο με αγωγή, όπως προαναφέρθηκε (Εικόνα 28).



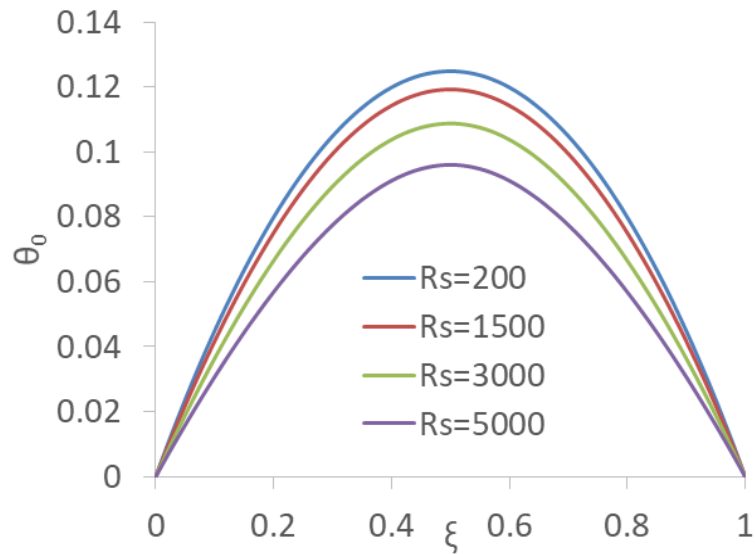
**Εικόνα 28.** Μεταβολή της ροϊκής συνάρτησης για διαφορετικούς αριθμούς Rayleigh και  $Da = 0.01$ ,  $Ha = 5$ .



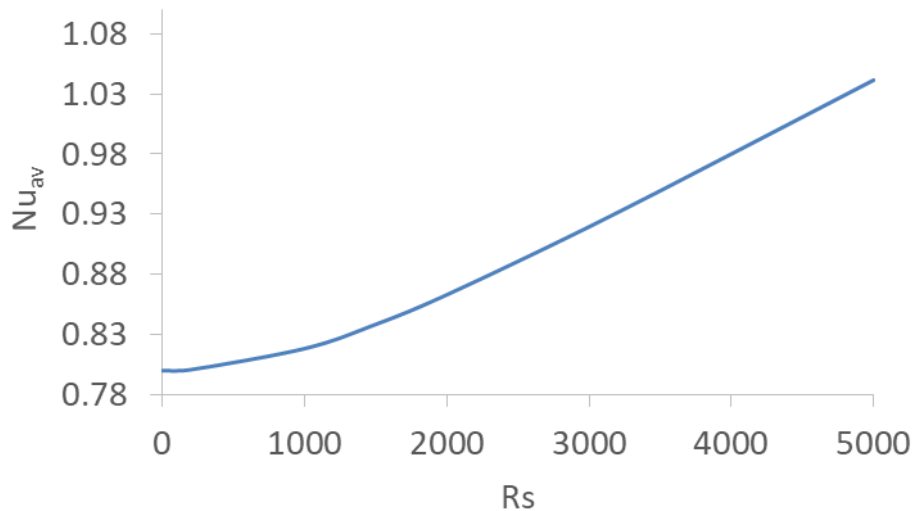
**Εικόνα 29.** Μεταβολή της ταχύτητας για διαφορετικούς αριθμούς Rayleigh και  $Da = 0.01$ ,  $Ha$



= 5.



**Εικόνα 30.** Μεταβολή της θερμοκρασίας για διαφορετικούς αριθμούς Rayleigh και  $Da = 0.01$ ,  $Ha = 5$ .



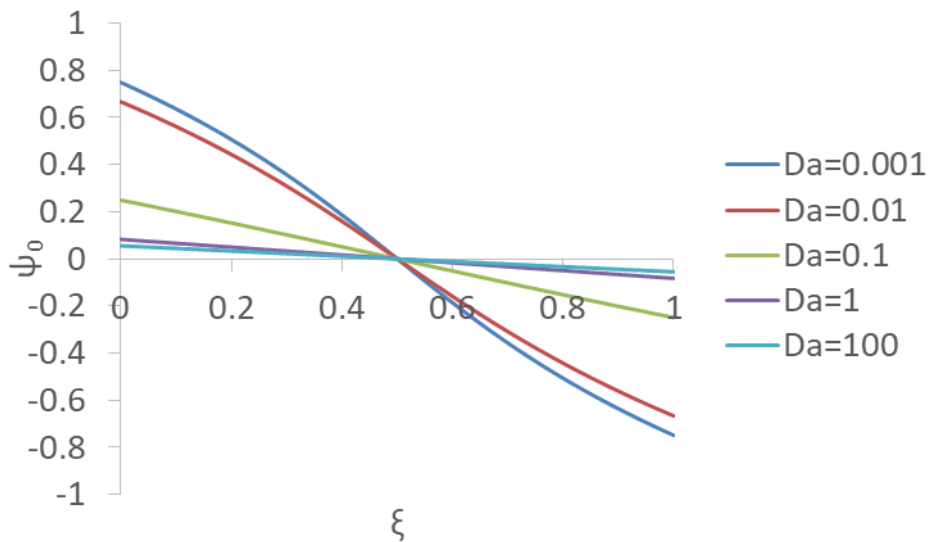
**Εικόνα 31.** Μεταβολή του μέσου αριθμού Nusselt για διαφορετικούς αριθμούς Rayleigh και,  $Da = 0.01$ ,  $Ha = 5$ .

#### 4.3.3 Επίδραση του αριθμού Darcy

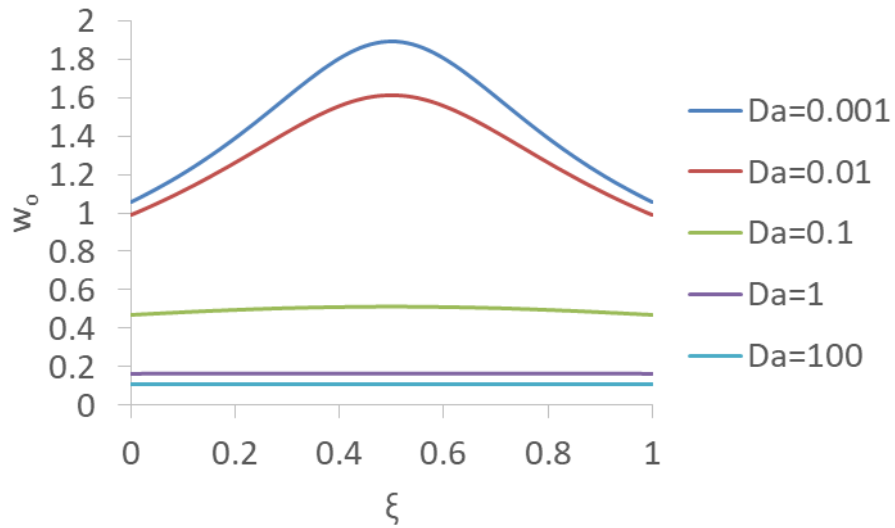
Τέλος, δεδομένου ότι εξετάζεται ένα πορώδες μέσο, ακολουθεί μια ανάλυση για την επίδραση του αριθμού Darcy ( $Da$ ). Συγκεκριμένα, για συγκεκριμένη γεωμετρία της κοιλότητας, η μείωση του  $Da$  είναι αποτέλεσμα της μείωσης της διαπερατότητας,  $K$ , του μέσου ( $Da = \frac{K}{h^2}$ ). Με τη σειρά της, η μείωση του  $K$  ισοδυναμεί με την ενίσχυση της αντίστασης ροής, η οποία οδηγεί στην επιβράδυνση της ροής του νανορευστού (δηλαδή σε χαμηλότερες τιμές της ροϊκής

συνάρτησης,  $\psi_0$ , (**Εικόνα 32**) και της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας,  $w_0$ , (**Εικόνα 33**) και στην εγκαθίδρυση των υψηλών θερμοκρασιών στην κεντρική περιοχή της κοιλότητας (**Εικόνα 34**). Αυτό γίνεται υπέρ της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή που είναι φανερή από το πλατό που εμφανίζεται για πολύ μικρές τιμές του αριθμού Darcy ( $Da \approx 0.8$ ) στην **Εικόνα 35**.

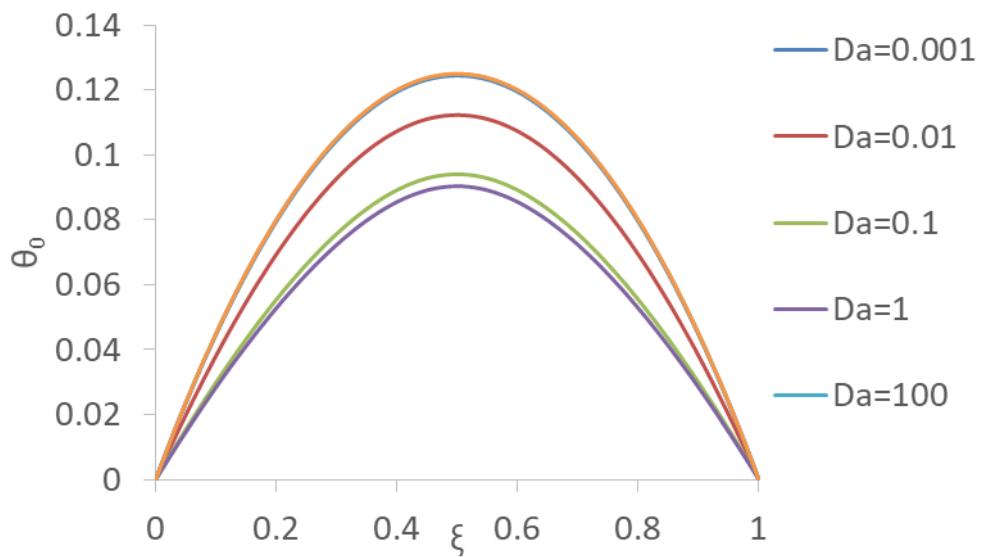
Αντίθετα, δεδομένου η αύξηση του  $Da$  είναι αποτέλεσμα της αύξησης της διαπερατότητας, η οποία οδηγεί στην επιτάχυνση της ροής του ναορευστού (δηλαδή σε μεγαλύτερες τιμές της ροϊκής συνάρτησης,  $\psi_0$ , (**Εικόνα 32**) και της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας,  $w_0$ , (**Εικόνα 33**)). Επίσης, αυτό το καθεστώς οδηγεί στην εγκαθίδρυση των χαμηλών θερμοκρασιών στην κεντρική περιοχή της κοιλότητας (**Εικόνα 34**) υπέρ της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή που είναι φανερή από το πλατό που εμφανίζεται για πολύ μεγάλες τιμές του αριθμού Darcy στην **Εικόνα 35**.



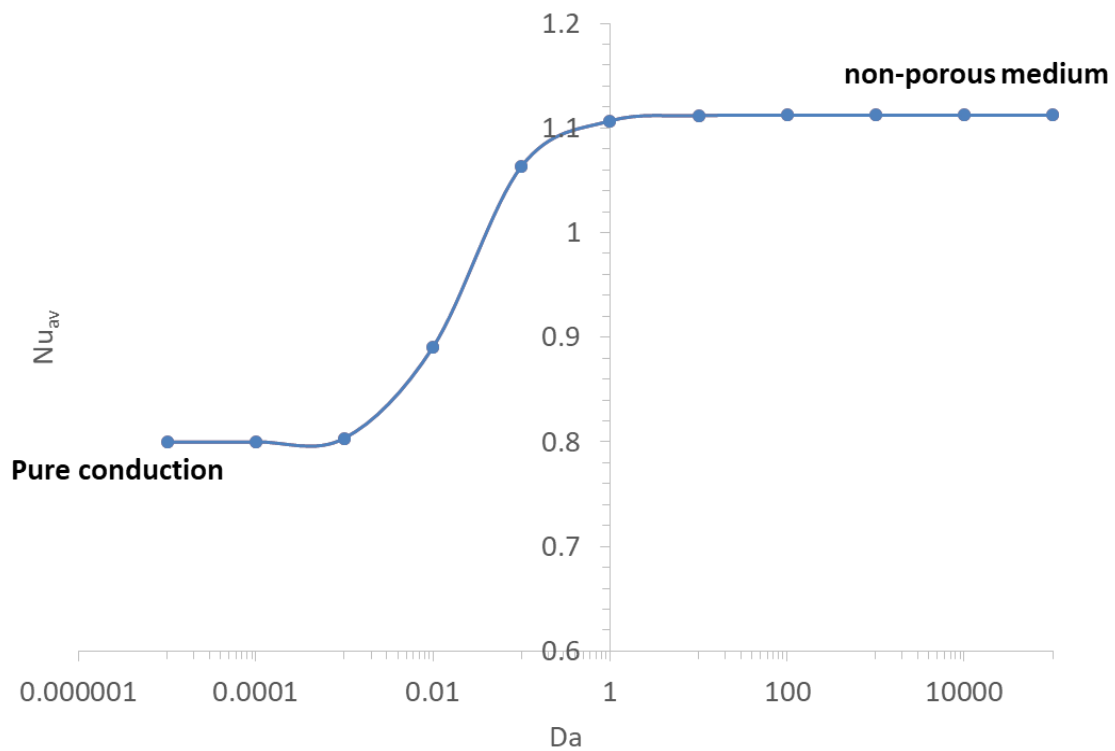
**Εικόνα 32.** Μεταβολή της ροϊκής συνάρτησης για διαφορετικούς αριθμούς Darcy και  $Rs = 2500$ ,  $Ha = 5$ .



**Εικόνα 33.** Μεταβολή της ταχύτητας για διαφορετικούς αριθμούς Darcy και  $Rs = 2500$ ,  $Ha = 5$ .



**Εικόνα 34.** Μεταβολή της θερμοκρασίας για διαφορετικούς αριθμούς Darcy και  $Rs = 2500$ ,  $Ha = 5$ .



*Εικόνα 35. Μεταβολή του μέσου αριθμού Nusselt του νανορευστού για διαφορετικές του αριθμού Darcy και,  $Rs = 5000$ ,  $Ha = 5$ .*

## 5 Συμπεράσματα

---

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετήθηκε η φυσική συναγωγή μέσα σε μια ορθογώνια οριζόντια κοιλότητα, η οποία υπόκειται σε εξωτερικό κάθετο μαγνητικό πεδίο και εσωτερική θέρμανση. Η μέθοδος ασυμπτωτικών αναπτυγμάτων [20] χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη σχετικά με την εξαγωγή της ροϊκής συνάρτηση στο κέντρο της κοιλότητας, της κατακόρυφης ταχύτητας και της θερμοκρασίας. Το εύρος των αδιάστατων αριθμών που εξετάζονται στην παρούσα έρευνα είναι παρόμοιο με την βιβλιογραφία [20], δηλαδή  $0 \leq Ha_{nf} \leq 50$  και  $200 \leq Rs_{nf} \leq 5000$ , εξασφαλίζοντας έτσι το καθεστώς στρωτής ροής πριν από την εμφάνιση οποιασδήποτε ασταθούς ροής [86]. Η θεώρηση μιας πορώδους κοιλότητας ενισχύει τον στρωτό χαρακτήρα της ροής, καθώς μειώνει τις ταχύτητες του νανορευστού [102].

Προκειμένου να εξεταστεί η ροή και η μεταφορά θερμότητας ενός πράσινου νανορευστού, επιλέχθηκε αυτό που παράχθηκε πειραματικά από εκχύλισμα *Camellia sinens* (φύλλα πράσινου τσαγιού) που μετά από θερμική και χημική επεξεργασία έδωσε νανοσωματίδια Ag τα οποία αναμείχθηκαν σε μείγμα νερό/αιθυλενογλυκόλη σε αναλογία 50:50 κατ' όγκο [98]. Όσον αφορά τις παραμέτρους του παρόντος προβλήματος, όπως η θερμοκρασία του νανορευστού και το κλάσμα όγκου των παραγόμενων νανοσωματιδίων, οι τιμές τους είναι σύμφωνες με τα πειράματα των Sharifpur et al. [98].

Επιπλέον, για τον σκοπό του υπολογισμού της θερμικής αγωγιμότητας του πράσινου νανορευστού, ενσωματώθηκαν οι σχέσεις που προέκυψαν στη [98], οι οποίες αποτελούν το βέλτιστο αποτέλεσμα προσαρμογής των πειραματικών δεδομένων για ένα εύρος συγκεντρώσεων νανοσωματιδίων και θερμοκρασιών.

Τα παρόντα αναλυτικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η αύξηση του μαγνητικού πεδίου, η οποία μπορεί να εκφραστεί έμμεσα με την αύξηση του αριθμού Hartmann, οδηγεί στην επιβράδυνση της ροής του νανορευστού και, συνεπώς, στην επιδείνωση της μεταφοράς θερμότητας. Αντίθετα, τα ρεύματα συναγωγής εντείνονται από την αύξηση της εσωτερικής θέρμανσης, η οποία ισοδυναμεί με αύξηση του αριθμού Rayleigh και έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της συναγωγής έναντι της αγωγής που οδηγεί σε καλύτερη ψύξη. Τέλος, όπως αποδείχθηκε από τους Benos et al. [86], η ροή στο κέντρο της κοιλότητας δεν εξαρτάται από τον αριθμό Prandtl, τουλάχιστον στο εύρος των παραμέτρων που μελετήθηκαν.

Επιπλέον, η μείωση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων και η μείωση της θερμοκρασίας συμβάλλει στην αύξηση του αριθμού Rayleigh και συνεπώς στην ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας, η οποία είναι εμφανής μέσω της αύξησης των κατακόρυφων ταχυτήτων στο

κέντρο της κοιλότητας και της ταυτόχρονης μείωσης της θερμοκρασίας του πυρήνα.

Η ρύθμιση της μεταφοράς θερμότητας μπορεί επίσης να επιτευχθεί μέσω της χρήσης ενός πορώδους μέσου. Πρόκειται για μια τεχνική με σκοπό τη βελτιστοποίηση της μεταφοράς θερμότητας κυρίως μέσω της αύξησης της επιφάνειας επαφής μεταξύ του ψυκτικού ρευστού (πράσινο νανορευστό στην παρούσα εργασία) και του στερεού υποστρώματος. Συμπεραίνεται ότι καθώς αυξάνεται η διαπερατότητα του μέσου, μειώνεται η αντίσταση ροής που οδηγεί σε μεγαλύτερες ταχύτητες που ισοδυναμούν με καλύτερη ψύξη και άρα μικρότερες θερμοκρασίες. Σε πολύ μεγάλες τιμές του αριθμού Darcy οι λύσεις προσεγγίζουν αυτές που θα λαμβάναμε χωρίς την χρήση πορώδους μέσου, ενώ για απειροελάχιστες τιμές του Darcy, έχουμε τις αντίστοιχες λύσεις με την μεταφορά θερμότητας με αγωγή.

Το κύριο πλεονέκτημα της παρούσας ασυμπτωτικής ανάλυσης, η οποία αποδείχθηκε ότι είναι ακριβής για το χειρισμό της κεντρικής περιοχής της κοιλότητας για στρωτή ροή, είναι η «γρήγορη» εξέταση του τρόπου με τον οποίο ορισμένες σημαντικές παράμετροι σχεδιασμού επηρεάζουν τη μαγνητοϋδροδυναμική φυσική συναγωγή. Ως εκ τούτου, αυτή η γρήγορη αίσθηση της επίδρασης διαφόρων παραγόντων στη μεταφορά θερμότητας, δηλαδή των ιδιοτήτων του νανορευστού, της διαπερατότητας του πορώδους μέσου καθώς και του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου και της εσωτερικής θέρμανσης, αναμένεται να αποτελέσει ένα πολύ χρήσιμο θεωρητικό εργαλείο, δεδομένου του ταχέως αυξανόμενου ενδιαφέροντος στον τομέα των πράσινων νανορευστών και δεδομένου της φιλικότητας προς την υγεία του ανθρώπου και το περιβάλλον.

## 6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

---

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει παράσχει σημαντικές γνώσεις σχετικά με την μελέτη της φυσικής συναγωγής παρουσία μαγνητικού πεδίου και εσωτερικής πηγής θέρμανσης, χρησιμοποιώντας ως ψυκτικό μέσο πράσινα νανορευστά. Η εργασία αυτή ανοίγει αρκετές δυνατότητες για μελλοντική έρευνα, η οποία θα μπορούσε να επεκτείνει τα ευρήματα της παρούσας μελέτης και να εξερευνήσει νέες εφαρμογές και βελτιώσεις.

Εν συντομία, τα πράσινα νανορευστά παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά νανορευστά. Πρώτον, είναι οικολογικά και βιώσιμα, καθώς προέρχονται από φυσικές πηγές, μειώνοντας έτσι την περιβαλλοντική επιβάρυνση. Επιπλέον, η φυσική τους προέλευση εξασφαλίζει υψηλή βιοσυμβατότητα, καθιστώντας τα κατάλληλα για βιοϊατρικές εφαρμογές, όπως η χορήγηση φαρμάκων. Ταυτόχρονα, προσφέρουν βελτιωμένη θερμική αγωγιμότητα και αποτελεσματικότητα στη μεταφορά θερμότητας, ενώ η μειωμένη τοξικότητά τους τα καθιστά πιο ασφαλή για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Τέλος, η χρήση φυσικών υλικών μπορεί να μειώσει το κόστος παραγωγής, καθιστώντας τα μια πιο οικονομική επιλογή.

Παρακάτω παρατίθενται κάποιες πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις δεδομένου των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν τα πράσινα νανορευστά, τα οποία αναλύθηκαν εκτενώς στο κεφάλαιο 2.

### 6.1 Βελτιωμένες τεχνικές μοντελοποίησης και προσομοίωσης

Ενώ η ασυμπτωτική ανάλυση έδωσε ακριβή αποτελέσματα για την κεντρική περιοχή της κοιλότητας υπό συνθήκες στρωτής ροής, μελλοντικές εργασίες θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν την ανάπτυξη και εφαρμογή πιο προηγμένων αριθμητικών μεθόδων και προσομοιώσεων. Τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) θα μπορούσαν να αποτυπώσουν τη συμπεριφορά του νανορευστού σε διαφορετικές περιοχές της κοιλότητας, συμπεριλαμβανομένων των οριακών στρωμάτων και των περιοχών με ενδεχόμενη αστάθεια ροής. Αυτά τα μοντέλα θα μπορούσαν επίσης να ενσωματώσουν πιο σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του μαγνητικού πεδίου, των ιδιοτήτων του νανορευστού και των χαρακτηριστικών του πορώδους μέσου.

### 6.2 Πειραματικές έρευνες

Για να συμπληρωθούν τα θεωρητικά και αναλυτικά ευρήματα, οι πειραματικές μελέτες είναι απαραίτητες. Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην πραγματοποίηση πειραματικών διατάξεων για την επικύρωση των προβλέψεων της ασυμπτωτικής ανάλυσης. Επιπλέον, η κλιμάκωση των πειραμάτων σε μεγαλύτερα συστήματα θα παρείχε πολύτιμα

δεδομένα σχετικά με την εφικτότητα και απόδοση των πράσινων νανορευστών σε πραγματικές εφαρμογές.

### **6.3 Εξερεύνηση διαφορετικών πράσινων νανορευστών**

Η παρούσα μελέτη επικεντρώθηκε σε ένα συγκεκριμένο πράσινο νανορευστό που χρησιμοποιήθηκε εκχύλισμα φύλλων πράσινου τσαγιού ως νανοσωματίδια, λόγω των της εκτεταμένης πληροφορίας που βρέθηκε για αυτό στην βιβλιογραφία. Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εξερευνήσει και να συγκρίνει κι άλλα πράσινα νανορευστά, χρησιμοποιώντας διαφορετικά φυτικά εκχυλίσματα και βασικά ρευστά. Αυτό θα βοηθούσε στον εντοπισμό των πιο αποτελεσματικών συνδυασμών για διάφορες εφαρμογές και στην κατανόηση της επίδρασης των διαφορετικών ιδιοτήτων των νανορευστών στη μεταφορά θερμότητας και στη ροή του ρευστού.

### **6.4 Ειδικές μελέτες εφαρμογών**

Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί σε ειδικές μελέτες εφαρμογών για τη βελτιστοποίηση της χρήσης των πράσινων νανορευστών σε πολλούς τομείς, Ενδεικτικά:

- Εναλλάκτες θερμότητας: Διερεύνηση της απόδοσης των πράσινων νανορευστών σε εναλλάκτες θερμότητας διαφόρων τύπων με στόχο τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης μεταφοράς θερμότητας.
- Ηλιακοί συλλέκτες: Αξιολόγηση της αποδοτικότητας των πράσινων νανορευστών σε ηλιακούς συλλέκτες με στόχο την ενίσχυση της απορρόφησης και μεταφοράς ηλιακής ενέργειας.
- Χορήγηση φαρμάκων: Μελέτη της αποτελεσματικότητας των πράσινων νανορευστών σε συστήματα στοχευμένης χορήγησης φαρμάκων [14,103], εκμεταλλευόμενοι τις μοναδικές τους ιδιότητες για ελεγχόμενη και παρατεταμένη απελευθέρωση φαρμάκων.
- Απομάκρυνση ρύπων: Διερεύνηση της ικανότητας των πράσινων νανορευστών σε περιβαλλοντικές εφαρμογές, όπως η απομάκρυνση ρύπων από νερό και αέρα [104].



## Αναφορές

---

1. Hauser, E.A. The history of colloid science: In memory of Wolfgang Ostwald. *J. Chem. Educ.* **1955**, *32*, 2, doi:10.1021/ed032p2.
2. Taylor, R.; Coulombe, S.; Otanicar, T.; Phelan, P.; Gunawan, A.; Lv, W.; Rosengarten, G.; Prasher, R.; Tyagi, H. Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids. *J. Appl. Phys.* **2013**, *113*, 11301, doi:10.1063/1.4754271.
3. Mahian, O.; Kolsi, L.; Amani, M.; Estellé, P.; Ahmadi, G.; Kleinstreuer, C.; Marshall, J.S.; Siavashi, M.; Taylor, R.A.; Niazmand, H.; et al. Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows-Part I: Fundamentals and theory. *Phys. Rep.* 2019, *790*, 1–48.
4. Choi, S.U.S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. In Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FED; ASME, 1995; Vol. 231, pp. 99–105.
5. Ghadimi, A.; Saidur, R.; Metselaar, H.S.C. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2011**, *54*, 4051–4068, doi:https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014.
6. Gkountas, A.A.; Benos, L.T.; Sofiadis, G.N.; Sarris, I.E. A printed-circuit heat exchanger consideration by exploiting an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid: Effect of the nanoparticles interfacial layer on heat transfer. *Therm. Sci. Eng. Prog.* **2021**, *22*, 100818, doi:https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100818.
7. Gkountas, A.A.; Th. Benos, L.; Nikas, K.S.; Sarris, I.E. Heat transfer improvement by an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid coolant in printed-circuit heat exchangers of supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle. *Therm. Sci. Eng. Prog.* **2020**, *20*, 100694, doi:10.1016/j.tsep.2020.100694.
8. Ali, A.R.I.; Salam, B. A review on nanofluid: preparation, stability, thermophysical properties, heat transfer characteristics and application. *SN Appl. Sci.* **2020**, *2*, 1636, doi:10.1007/s42452-020-03427-1.
9. Lee, S.; Choi, S.U.-S.; Li, S.; Eastman, J.A. Measuring Thermal Conductivity of Fluids

- Containing Oxide Nanoparticles. *J. Heat Transfer* **1999**, *121*, 280–289, doi:10.1115/1.2825978.
10. Jang, S.P.; Choi, S.U.S. Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids. *Appl. Therm. Eng.* **2006**, *26*, 2457–2463, doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.036.
  11. Buongiorno, J.; Hu, L.-W.; Kim, S.J.; Hannink, R.; Truong, B.; Forrest, E. Nanofluids for Enhanced Economics and Safety of Nuclear Reactors: An Evaluation of the Potential Features, Issues, and Research Gaps. *Nucl. Technol.* **2008**, *162*, 80–91, doi:10.13182/NT08-A3934.
  12. Daneshpour, M.; Rafee, R. Nanofluids as the circuit fluids of the geothermal borehole heat exchangers. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2017**, *81*, 34–41, doi:https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.12.002.
  13. Li, X.; Zeng, G.; Lei, X. The stability, optical properties and solar-thermal conversion performance of SiC-MWCNTs hybrid nanofluids for the direct absorption solar collector (DASC) application. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2020**, *206*, 110323, doi:https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110323.
  14. Benos, L.; Spyrou, L.A.; Sarris, I.E. Development of a new theoretical model for blood-CNTs effective thermal conductivity pertaining to hyperthermia therapy of glioblastoma multiform. *Comput. Methods Programs Biomed.* **2019**, *172*, 79–85, doi:10.1016/j.cmpb.2019.02.008.
  15. Hedayatnasab, Z.; Abnisa, F.; Daud, W.M.A.W. Review on magnetic nanoparticles for magnetic nanofluid hyperthermia application. *Mater. Des.* **2017**, *123*, 174–196, doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.036.
  16. Mojgan Sheikhpour Mohadeseh Arabi, A.K.A.R.R.; Taherian, Z. Role of Nanofluids in Drug Delivery and Biomedical Technology: Methods and Applications. *Nanotechnol. Sci. Appl.* **2020**, *13*, 47–59, doi:10.2147/NSA.S260374.
  17. Enjavi, Y.; Sedghamiz, M.A.; Rahimpour, M.R. Chapter 19 - Application of nanofluids in drug delivery and disease treatment. In *Nanofluids and Mass Transfer*; Rahimpour, M.R., Makarem, M.A., Kiani, M.R., Sedghamiz, M.A., Eds.; Elsevier, 2022; pp. 449–

465 ISBN 978-0-12-823996-4.

18. Zehra, A.; Rai, A.; Singh, S.K.; Aamir, M.; Ansari, W.A.; Upadhyay, R.S. Chapter 10 - An overview of nanotechnology in plant disease management, food safety, and sustainable agriculture. In *Food Security and Plant Disease Management*; Kumar, A., Droby, S., Eds.; Woodhead Publishing, 2021; pp. 193–219 ISBN 978-0-12-821843-3.
19. Pordanjani, A.H.; Aghakhani, S.; Afrand, M.; Sharifpur, M.; Meyer, J.P.; Xu, H.; Ali, H.M.; Karimi, N.; Cheraghian, G. Nanofluids: Physical phenomena, applications in thermal systems and the environment effects- a critical review. *J. Clean. Prod.* **2021**, *320*, 128573, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128573>.
20. Aslani, K.-E.; Benos, L.; Sarris, I.E. Chapter Thirteen - Investigating magnetohydrodynamic natural convection in nanofluid-saturated enclosures through asymptotic expansions. In *Advanced Materials-Based Fluids for Thermal Systems*; Muhammad Ali, H., Ed.; Elsevier, 2024; pp. 311–338 ISBN 978-0-443-21576-6.
21. Pordanjani, A.H.; Aghakhani, S.; Afrand, M.; Sharifpur, M.; Meyer, J.P.; Xu, H.; Ali, H.M.; Karimi, N.; Cheraghian, G. Nanofluids: Physical phenomena, applications in thermal systems and the environment effects- a critical review. *J. Clean. Prod.* **2021**, *320*, 128573, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128573>.
22. Karvelas, E.G.; Lampropoulos, N.K.; Benos, L.T.; Karakasidis, T.; Sarris, I.E. On the magnetic aggregation of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *Comput. Methods Programs Biomed.* **2020**, *198*, 105778, doi:[10.1016/j.cmpb.2020.105778](https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105778).
23. Nasrollahzadeh, M.; Sajjadi, M.; Sajadi, S.M.; Issaabadi, Z. Chapter 5 - Green Nanotechnology. In *An Introduction to Green Nanotechnology*; Nasrollahzadeh, M., Sajadi, S.M., Sajjadi, M., Issaabadi, Z., Atarod, M., Eds.; Interface Science and Technology; Elsevier, 2019; Vol. 28, pp. 145–198.
24. Meka Chufa, B.; Abdisa Gonfa, B.; Yohannes Anshebo, T.; Adam Workneh, G. A Novel and Simplest Green Synthesis Method of Reduced Graphene Oxide Using Methanol Extracted *Vernonia Amygdalina*: Large-Scale Production. *Adv. Condens. Matter Phys.* **2021**, *2021*, 6681710, doi:[10.1155/2021/6681710](https://doi.org/10.1155/2021/6681710).
25. Patra, J.K.; Baek, K.-H. Green Nanobiotechnology: Factors Affecting Synthesis and

- Characterization Techniques. *J. Nanomater.* **2014**, *2014*, 417305, doi:10.1155/2014/417305.
26. Rangaraj, Suriyaprabha Venkatachalam, R. A lucrative chemical processing of bamboo leaf biomass to synthesize biocompatible amorphous silica nanoparticles of biomedical importance. *Appl. Nanosci.* **2017**, *7*, 145–153.
  27. Pereira, J.E.; Moita, A.S.; Moreira, A.L.N. The pressing need for green nanofluids: A review. *J. Environ. Chem. Eng.* **2022**, *10*, 107940, doi:https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107940.
  28. Khdher, A.M.; Sidik, N.A.C.; Hamzah, W.A.W.; Mamat, R. An experimental determination of thermal conductivity and electrical conductivity of bio glycol based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids and development of new correlation. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2016**, *73*, 75–83, doi:https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.02.006.
  29. Abdolbaqi, M.K.; Azmi, W.H.; Mamat, R.; Sharma, K. V; Najafi, G. Experimental investigation of thermal conductivity and electrical conductivity of BioGlycol–water mixture based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid. *Appl. Therm. Eng.* **2016**, *102*, 932–941, doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.074.
  30. Abdolbaqi, M.K.; Sidik, N.A.C.; Aziz, A.; Mamat, R.; Azmi, W.H.; Yazid, M.N.A.W.M.; Najafi, G. An experimental determination of thermal conductivity and viscosity of BioGlycol/water based TiO<sub>2</sub> nanofluids. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2016**, *77*, 22–32, doi:https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.07.007.
  31. Abdolbaqi, M.K.; Sidik, N.A.C.; Rahim, M.F.A.; Mamat, R.; Azmi, W.H.; Yazid, M.N.A.W.M.; Najafi, G. Experimental investigation and development of new correlation for thermal conductivity and viscosity of BioGlycol/water based SiO<sub>2</sub> nanofluids. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2016**, *77*, 54–63, doi:https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.07.001.
  32. Zhao, Z.; Jiang, J.; Zheng, M.; Wang, F. Advancing development of biochemicals through the comprehensive evaluation of bio-ethylene glycol. *Chem. Eng. J.* **2021**, *411*, 128516, doi:https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128516.
  33. Sarafraz, M.M.; Arya, A.; Nikkhah, V.; Hormozia, F. Thermal Performance and

- Viscosity of Biologically Produced Silver/Coconut Oil Nanofluids. *Chem. Biochem. Eng. Q.* **2016**, *30*, doi:<https://doi.org/10.15255/CABEQ.2015.2203>.
34. Hosseini, M.; Sadri, R.; Kazi, S.N.; Bagheri, S.; Zubir, N.; Bee Teng, C.; Zaharinie, T. Experimental Study on Heat Transfer and Thermo-Physical Properties of Covalently Functionalized Carbon Nanotubes Nanofluids in an Annular Heat Exchanger: A Green and Novel Synthesis. *Energy & Fuels* **2017**, *31*, 5635–5644, doi:[10.1021/acs.energyfuels.6b02928](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02928).
  35. Ravi Kulkarni, H.; Dhanasekaran, C.; Rathnakumar, P.; Sivaganesan, S. Experimental study on thermal analysis of helical coil heat exchanger using Green synthesis silver nanofluid. *Mater. Today Proc.* **2021**, *42*, 1037–1042, doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.087>.
  36. Yadav, R.K.; Singhai, A. Heat Transfer Enhancement in a Double Pipe Heat Exchanger using Bio-Nano fluid (Mango-Bark) using CFD. *Int. J. Innov. Res. Technol.* **2020**, *6*, 123–130.
  37. Shafi, W.K.; Charoo, M.S. An experimental study on the effect of concentration of green nanoadditives on the tribological properties of the biolubricants. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* **2021**, *236*, 3755–3771, doi:[10.1177/09544062211042046](https://doi.org/10.1177/09544062211042046).
  38. Su, Y.; Gong, L.; Chen, D. Dispersion stability and thermophysical properties of environmentally friendly graphite oil-based nanofluids used in machining. *Adv. Mech. Eng.* **2016**, *8*, 1687814015627978, doi:[10.1177/1687814015627978](https://doi.org/10.1177/1687814015627978).
  39. Rahman, S.S.; Ashraf, M.Z.I.; Amin, A.K.M.N.; Bashar, M.S.; Ashik, M.F.K.; Kamruzzaman, M. Tuning nanofluids for improved lubrication performance in turning biomedical grade titanium alloy. *J. Clean. Prod.* **2019**, *206*, 180–196, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.150>.
  40. Asmat-Campos, D.; others Synthesis and characterization of nanofluids from the biosynthesis of nanoparticles and their evaluation in solar thermal systems. **2020**.
  41. Okonkwo, E.C.; Essien, E.A.; Akhayere, E.; Abid, M.; Kavaz, D.; Ratlamwala, T.A.H. Thermal performance analysis of a parabolic trough collector using water-based green-synthesized nanofluids. *Sol. Energy* **2018**, *170*, 658–670,

doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.012>.

42. Benos, L.; Ninos, G.; Polychronopoulos, N.D.; Exomanidou, M.-A.; Sarris, I. Natural Convection of Blood–Magnetic Iron Oxide Bio-nanofluid in the Context of Hyperthermia Treatment. *Computation* **2022**, *10*, doi:10.3390/computation10110190.
43. Aslani, K.-E.; Benos, L.; Tzirtzilakis, E.; Sarris, I.E. Micromagnetorotation of MHD Micropolar Flows. *Symmetry (Basel)*. **2020**, *12*, 148, doi:10.3390/SYM12010148.
44. Lim, E.-K.; Huh, Y.-M.; Yang, J.; Lee, K.; Suh, J.-S.; Haam, S. pH-triggered drug-releasing magnetic nanoparticles for cancer therapy guided by molecular imaging by MRI. *Adv. Mater.* **2011**, *23*, 2436.
45. Vijilvani, C.; Bindhu, M.R.; Frincy, F.C.; AlSalhi, M.S.; Sabitha, S.; Saravanakumar, K.; Devanesan, S.; Umadevi, M.; Aljaafreh, M.J.; Atif, M. Antimicrobial and catalytic activities of biosynthesized gold, silver and palladium nanoparticles from *Solanum nigurum* leaves. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* **2020**, *202*, 111713, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2019.111713>.
46. Sethy, N.K.; Arif, Z.; Mishra, P.K.; Kumar, P. Green synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles from *Syzygium cumini* extract for photo-catalytic removal of lead (Pb) in explosive industrial wastewater. *Green Process. Synth.* **2020**, *9*, 171–181, doi:doi:10.1515/gps-2020-0018.
47. Primo, J. de O.; Bittencourt, C.; Acosta, S.; Sierra-Castillo, A.; Colomer, J.-F.; Jaeger, S.; Teixeira, V.C.; Anaissi, F.J. Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles by Ecofriendly Routes: Adsorbent for Copper Removal From Wastewater. *Front. Chem.* **2020**, *8*, doi:10.3389/fchem.2020.571790.
48. Sharma, D.; Kanchi, S.; Bisetty, K. Biogenic synthesis of nanoparticles: A review. *Arab. J. Chem.* **2019**, *12*, 3576–3600, doi:<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.11.002>.
49. Grimaldi, F.; Pucciarelli, M.; Gavriilidis, A.; Dobson, P.; Lettieri, P. Anticipatory life cycle assessment of gold nanoparticles production: Comparison of milli-continuous flow and batch synthesis. *J. Clean. Prod.* **2020**, *269*, 122335, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122335>.

50. Meesters, J.; Quik, J.; Koelman, A.; Hendriks, A.; van de Meent, D. Multimedia environmental fate and speciation of engineered nanoparticles: a probabilistic modeling approach. *Environ. Sci. Nano* **2016**, *3*, 715–727.
51. Hewitt, R.E.; Chappell, H.F.; Powell, J.J. Small and dangerous? Potential toxicity mechanisms of common exposure particles and nanoparticles. *Curr. Opin. Toxicol.* **2020**, *19*, 93–98, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cotox.2020.01.006>.
52. Hou, J.; Wang, L.; Wang, C.; Zhang, S.; Liu, H.; Li, S.; Wang, X. Toxicity and mechanisms of action of titanium dioxide nanoparticles in living organisms. *J. Environ. Sci.* **2019**, *75*, 40–53, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.06.010>.
53. Sun, Q.; Cai, X.; Li, J.; Zheng, M.; Chen, Z.; Yu, C.-P. Green synthesis of silver nanoparticles using tea leaf extract and evaluation of their stability and antibacterial activity. *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* **2014**, *444*, 226–231, doi:<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.12.065>.
54. Kalita, N.K.; Ganguli, J.N. Hibiscus sabdariffa L. leaf extract mediated green synthesis of silver nanoparticles and its use in catalytic reduction of 4-nitrophenol. *Inorg. Nano-Metal Chem.* **2017**, *47*, 788–793, doi:10.1080/15533174.2016.1218506.
55. Abdulaziz Yahya Al-Ghamdi Antimicrobial and Catalytic Activities of Green Synthesized Silver Nanoparticles Using Bay Laurel (*Laurus nobilis*) Leaves Extract. *J. Biomater. Nanobiotechnol.* **2019**, *10*.
56. Kapadnis, C. V.; Gundeli, K.P.; Saini, D.R.; Bhatkhande, D.S. Synthesis of Copper Nanoparticles in Presence of Surfactants and Evaluation of Heat Transfer Performance of Copper Nanofluid. *J. Nanofluids*, **2017**, *6*, doi:<https://doi.org/10.1166/jon.2017.1316>.
57. Jegadeesan, G.B.; Srimathi, K.; Santosh Srinivas, N.; Manishkanna, S.; Vignesh, D. Green synthesis of iron oxide nanoparticles using Terminalia bellirica and Moringa oleifera fruit and leaf extracts: Antioxidant, antibacterial and thermoacoustic properties. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* **2019**, *21*, 101354, doi:<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101354>.
58. Sone, B.T.; Diallo, A.; Fuku, X.G.; Gurib-Fakim, A.; Maaza, M. Biosynthesized CuO nano-platelets: Physical properties & enhanced thermal conductivity nanofluidics. *Arab.*

- J. Chem.* **2020**, *13*, 160–170, doi:<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.03.004>.
59. Judenta, K.; Ratnawulan, R.; Syarif, G. Synthesis and characterization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles using sol gel method by chelating extracts of starfruit (*Averrhoa bilimbi*) for nanofluid applications. *Judenta* **2017**, *10*.
60. Doğan, S.Ş.; Kocabaş, A. Green synthesis of ZnO nanoparticles with *Veronica multifida* and their antibiofilm activity. *Hum. Exp. Toxicol.* **2019**, *39*, 319–327, doi:[10.1177/0960327119888270](https://doi.org/10.1177/0960327119888270).
61. Ranjbarzadeh, R.; Moradikazerouni, A.; Bakhtiari, R.; Asadi, A.; Afrand, M. An experimental study on stability and thermal conductivity of water/silica nanofluid: Eco-friendly production of nanoparticles. *J. Clean. Prod.* **2019**, *206*, 1089–1100, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.205>.
62. Kumar, L.H.; Kazi, S.N.; Masjuki, H.H.; Zubir, M.N.M.; Jahan, A.; Bhinitha, C. Energy, exergy and economic analysis of liquid flat-plate solar collector using green covalent functionalized graphene nanoplatelets. *Appl. Therm. Eng.* **2021**, *192*, 116916, doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116916>.
63. Sadri, R.; Hosseini, M.; Kazi, S.N.; Bagheri, S.; Abdelrazek, A.H.; Ahmadi, G.; Zubir, N.; Ahmad, R.; Abidin, N.I.Z. A facile, bio-based, novel approach for synthesis of covalently functionalized graphene nanoplatelet nano-coolants toward improved thermo-physical and heat transfer properties. *J. Colloid Interface Sci.* **2018**, *509*, 140–152, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.07.052>.
64. Sadri, R.; Hosseini, M.; Kazi, S.N.; Bagheri, S.; Zubir, N.; Solangi, K.H.; Zaharinie, T.; Badarudin, A. A bio-based, facile approach for the preparation of covalently functionalized carbon nanotubes aqueous suspensions and their potential as heat transfer fluids. *J. Colloid Interface Sci.* **2017**, *504*, 115–123, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.03.051>.
65. Luna-Sánchez, J.L.; Jiménez-Pérez, J.L.; Carbajal-Valdez, R.; Lopez-Gamboa, G.; Pérez-González, M.; Correa-Pacheco, Z.N. Green synthesis of silver nanoparticles using Jalapeño Chili extract and thermal lens study of acrylic resin nanocomposites. *Thermochim. Acta* **2019**, *678*, 178314, doi:<https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.178314>.



66. Wang, F.; Jyothirmayee Aravind, S.S.; Wu, H.; Forys, J.; Venkataraman, V.; Ramanujachary, K.; Hu, X. Tunable green graphene-silk biomaterials: Mechanism of protein-based nanocomposites. *Mater. Sci. Eng. C* **2017**, *79*, 728–739, doi:https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.05.120.
67. Gajrani, K.K.; Suvin, P.S.; Kailas, S.V.; Mamilla, R.S. Thermal, rheological, wettability and hard machining performance of MoS<sub>2</sub> and CaF<sub>2</sub> based minimum quantity hybrid nano-green cutting fluids. *J. Mater. Process. Technol.* **2019**, *266*, 125–139, doi:https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.10.036.
68. Shiwen Yang Ye qiang Tan, X.Y.L.W.H.W.; Zhou, Y. A facile and green approach to prepare monodispersion nanonickel nanofluids. *Part. Sci. Technol.* **2018**, *36*, 141–145, doi:10.1080/02726351.2016.1226225.
69. Rajakumari, R.; Thomas, S.; Kalarikkal, N. Chapter 9 - Synthesis of eco-friendly graphene from agricultural wastes. In *Agri-Waste and Microbes for Production of Sustainable Nanomaterials*; Abd-Elsalam, K.A., Periakaruppan, R., Rajeshkumar, S., Eds.; Nanobiotechnology for Plant Protection; Elsevier, 2022; pp. 215–230 ISBN 978-0-12-823575-1.
70. Chen, J.L.T.; Azizuddin, A.A.; Oumer, A.N.; At-Tasneem, M.A. Preparation and characterisation of mango bark and mango leaf nanoparticles. In Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 30 - 31 July 2019, Kuantan, Malaysia, 2019.
71. Justin T Awua, Jacob S Ibrahim, Saheed A Adio, Mehdi Mehrabi, M.S. Experimental investigations into viscosity, pH and electrical conductivity of nanofluid prepared from palm kernel fibre and a mixture of water and ethylene glycol. *Bull. Mater. Sci.* **2018**, *156*.
72. Hosseini, S.M.S.; Mirzaei, M. Assessment of the colloidal montmorillonite dispersion as a low-cost and eco-friendly nanofluid for improving thermal performance of plate heat exchanger. *SN Appl. Sci.* **2020**, *2*.
73. Shirmehenji, R.; Javanshi, S.; Honarmand, M. A Green Approach to the Bio-based Synthesis of Selenium Nanoparticles from Mining Waste. *J. Clust. Sci.* **2021**, *32*, 1311–1323.

74. Punnoose, A.; Dodge, K.; Rasmussen, J.W.; Chess, J.; Wingett, D.; Anders, C. Cytotoxicity of ZnO Nanoparticles Can Be Tailored by Modifying Their Surface Structure: A Green Chemistry Approach for Safer Nanomaterials. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2014**, *2*, 1666–1673, doi:10.1021/sc500140x.
75. Popov, V.; Hinkov, I.; Diankov, S.; Karsheva, M.; Handzhiyski, Y. Ultrasound-assisted green synthesis of silver nanoparticles and their incorporation in antibacterial cellulose packaging. *Green Process. Synth.* **2015**, *4*, 125–131, doi:doi:10.1515/gps-2014-0085.
76. Yadav, N.; Chaturvedi, V.K.; Yadav, R.R. Microwave assisted green synthesis and characterization of bimetallic Au/Pt nanofluids. *AIP Conf. Proc.* **2020**, *2265*, 30183, doi:10.1063/5.0017109.
77. Gurunathan, S.; Kalishwaralal, K.; Vaidyanathan, R.; Venkataraman, D.; Pandian, S.R.K.; Muniyandi, J.; Hariharan, N.; Eom, S.H. Biosynthesis, purification and characterization of silver nanoparticles using *Escherichia coli*. *Colloids Surfaces B Biointerfaces* **2009**, *74*, 328–335, doi:https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2009.07.048.
78. Sneha, K.; Sathishkumar, M.; Kim, S.; Yun, Y.-S. Counter ions and temperature incorporated tailoring of biogenic gold nanoparticles. *Process Biochem.* **2010**, *45*, 1450–1458, doi:https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.05.019.
79. Sheny, D.S.; Philip, D.; Mathew, J. Synthesis of platinum nanoparticles using dried *Anacardium occidentale* leaf and its catalytic and thermal applications. *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* **2013**, *114*, 267–271, doi:https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.05.028.
80. Harshiny, M.; Iswarya, C.N.; Matheswaran, M. Biogenic synthesis of iron nanoparticles using *Amaranthus dubius* leaf extract as a reducing agent. *Powder Technol.* **2015**, *286*, 744–749, doi:https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.09.021.
81. Zhan, G.; Huang, J.; Lin, L.; Lin, W.; Emmanuel, K.; Li, Q. Synthesis of gold nanoparticles by *Cacumen Platycladi* leaf extract and its simulated solution: toward the plant-mediated biosynthetic mechanism. *J. Nanoparticle Res.* **2011**, *13*, 4957–4968.
82. Jacob, J.; Mukherjee, T.; Kapoor, S. A simple approach for facile synthesis of Ag, anisotropic Au and bimetallic (Ag/Au) nanoparticles using cruciferous vegetable

- extracts. *Mater. Sci. Eng. C* **2012**, *32*, 1827–1834, doi:<https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.04.072>.
83. Dwivedi, A.D.; Gopal, K. Biosynthesis of silver and gold nanoparticles using *Chenopodium album* leaf extract. *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* **2010**, *369*, 27–33, doi:<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.07.020>.
84. Li, S.; Shen, Y.; Xie, A.; Yu, X.; Qiu, L.; Zhang, L.; Zhang, Q. Green synthesis of silver nanoparticles using *Capsicum annuum* L. extract. *Green Chem.* **2007**, *9*, 852–858, doi:[10.1039/B615357G](https://doi.org/10.1039/B615357G).
85. Daniels, P.G.; Jones, O.K. Convection in a shallow rectangular cavity due to internal heat generation. *Int. J. Heat Mass Transf.* **1998**, *41*, 3979–3987, doi:[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(98\)00059-3](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(98)00059-3).
86. Benos, L.T.; Kakarantzas, S.C.; Sarris, I.E.; Grecos, A.P.; Vlachos, N.S. Analytical and numerical study of MHD natural convection in a horizontal shallow cavity with heat generation. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2014**, *75*, doi:[10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.062](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.062).
87. Benos, L.; Sarris, I.E. Analytical study of the magnetohydrodynamic natural convection of a nanofluid filled horizontal shallow cavity with internal heat generation. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2019**, *130*, doi:[10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.004](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.004).
88. L. Th. Benos, E. G. Karvelas, I.E.S. A theoretical model for the magnetohydrodynamic natural convection of a CNT-water nanofluid incorporating a renovated Hamilton-Crosser model. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2019**, *135*, 548–560, doi:[10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.148](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.148).
89. Benos, L.; Karvelas, E.G.; Sarris, I.E. Crucial effect of aggregations in CNT-water nanofluid magnetohydrodynamic natural convection. *Therm. Sci. Eng. Prog.* **2019**, *11*, 263–271, doi:[10.1016/j.tsep.2019.04.007](https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.04.007).
90. Benos, L.T.; Sarris, I.E. The interfacial nanolayer role on magnetohydrodynamic natural convection of an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid. *Heat Transf. Eng.* **2021**, *42*, doi:[10.1080/01457632.2019.1692487](https://doi.org/10.1080/01457632.2019.1692487).

91. Benos, L.T.; Polychronopoulos, N.D.; Mahabaleshwar, U.S.; Lorenzini, G.; Sarris, I.E. Thermal and flow investigation of MHD natural convection in a nanofluid-saturated porous enclosure: an asymptotic analysis. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2021**, *143*, doi:10.1007/s10973-019-09165-w.
92. Pelekasis, N.; Benos, L.; Gomes, R. Deflection of a liquid metal jet/drop in a tokamak environment. *Fusion Eng. Des.* **2014**, *89*, doi:10.1016/j.fusengdes.2014.09.004.
93. Pelekasis, N.; Benos, L. Static arrangement of a capillary porous system (CPS): Modelling. *Fusion Eng. Des.* **2017**, *117*, doi:10.1016/j.fusengdes.2016.06.059.
94. Kakarantzas, S.; Knaepen, B.; Caby, M.; Benos, L.; Sarris, I.; Pelekasis, N. Investigation of various nozzles configurations with respect to IFMIF and liquid walls concepts. *Fusion Eng. Des.* **2015**, *98–99*, doi:10.1016/j.fusengdes.2015.02.023.
95. Kakarantzas, S.C.; Benos, L.T.; Sarris, I.E.; Knaepen, B.; Grecos, A.P.; Vlachos, N.S. MHD liquid metal flow and heat transfer between vertical coaxial cylinders under horizontal magnetic field. *Int. J. Heat Fluid Flow* **2017**, *65*, doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.01.001.
96. Adewumi, G.A.; Inambao, F.; Sharifpur, M.; Meyer, J. Thermal Conductivity of Nanofluids Prepared from Biobased Nanomaterials Dispersed in 60:40 Ethylene Glycol/Water Base Fluid. *Int. J. Mech. Eng. Technol.* **2019**, *10*, 151–159.
97. Brinkman, H. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *Chem. Phys.* *20*, 571–581, doi:10.1063/1.1700493.
98. Sarafraz, M.M.; Hormozi, F. Intensification of forced convection heat transfer using biological nanofluid in a double-pipe heat exchanger. *Exp. Therm. Fluid Sci.* **2015**, *66*, 279–289, doi:https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.03.028.
99. Das, S.; Mahato, N.; Ali, A.; Jana, R.N. Dynamical behaviour of magneto-copper-titania/water-ethylene glycol stream inside a gyrating channel. *Chem. Phys. Lett.* **2022**, *793*, 139476, doi:https://doi.org/10.1016/j.cplett.2022.139476.
100. Nithyadevi, N.; Mahalakshmi, T. A numerical study on MHD natural convective heat transfer in an Ag-water nanofluid filled enclosure with center heater. *J. Korean Soc. Ind.*

*Appl. Math.* **2017**, *21*, 225–244.

101. Benos, L.T.; Polychronopoulos, N.D.; Mahabaleshwar, U.S.; Lorenzini, G.; Sarris, I.E. Thermal and flow investigation of MHD natural convection in a nanofluid-saturated porous enclosure: an asymptotic analysis. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2019**, doi:10.1007/s10973-019-09165-w.
102. Benos, L.; Bochtis, D.D. An Analysis of Safety and Health Issues in Agriculture Towards Work Automation BT - Information and Communication Technologies for Agriculture—Theme IV: Actions. In; Bochtis, D.D., Pearson, S., Lampridi, M., Marinoudi, V., Pardalos, P.M., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2021; pp. 95–117 ISBN 978-3-030-84156-0.
103. Samioti, S.E.; Benos, L.T.; Sarris, I.E. Effect of fractal-shaped outer boundary of glioblastoma multiforme on drug delivery. *Comput. Methods Programs Biomed.* **2019**, *178*, doi:10.1016/j.cmpb.2019.06.031.
104. Karvelas, E.; Liosis, C.; Benos, L.; Karakasidis, T.; Sarris, I. Micromixing Efficiency of Particles in Heavy Metal Removal Processes under Various Inlet Conditions. *Water* **2019**, *11*, 1135, doi:10.3390/w11061135.