

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων. Κατά την πειραματική φάση εκτελέστηκαν πολλά πειράματα και καλύφθηκε μεγάλο εύρος τιμών των πειραματικών παραμέτρων. Στο παρόν τμήμα της αναφοράς επιχειρείται η κατηγοριοποίηση των πειραμάτων και ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων με στόχο να αποκαλυφθούν πιθανά ενδιαφέροντα φαινόμενα που προκαλούνται από την επίδραση των σωματιδίων στη μεταφορά θερμότητας και την πτώση πίεσης.

### 4.1. Αριθμός Reynolds του φέροντος ρευστού

Βασικό στοιχείο για την εξαγωγή συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα που θα ακολουθήσουν αποτελεί ο αριθμός Reynolds του φέροντος ρευστού του προϊόντος. Συγκεκριμένα, ο αδιάστατος αυτός αριθμός συμμετέχει στη συζήτηση των αποτελεσμάτων, τόσο του συντελεστή συναγωγής μεταξύ αγωγού και φέροντος ρευστού όσο και της πτώσης πίεσης, και αποτελεί βασικό όρο στο μαθηματικό μοντέλο που παράχθηκε μέσα από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Κρίνεται, λοιπόν, απαραίτητο να επεξηγηθεί ο τρόπος με τον οποίο ορίστηκε και υπολογίστηκε ο αριθμός Reynolds για το φέρον ρευστό στην παρούσα εργασία.

Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι, εφόσον το φέρον ρευστό του διαφασικού προϊόντος είναι ένα ψευδοπλαστικό ρευστό, ο αριθμός Reynolds χαρακτηρίζεται ως *αντιπροσωπευτικός* και, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2.4. , υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Re_{repr} = \frac{\rho \cdot D^n \cdot u^{2-n}}{K \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n}\right)^n \cdot 8^{n-1}} \quad (75)$$

όπου

- $\rho$  : η πυκνότητα του φέροντος ρευστού
- $D$  : η διάμετρος του αγωγού
- $u$  : η ταχύτητα ροής του φέροντος ρευστού
- $K$  : ο συντελεστής συνεκτικότητας του φέροντος ρευστού
- $n$  : ο δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς του φέροντος ρευστού

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται η πορεία των υπολογισμών ως τον τελικό στόχο, που είναι ο υπολογισμός του αριθμού Reynolds, για κάθε πείραμα.

**Πίνακας 6: Πορεία των υπολογισμών με στόχο τον υπολογισμό του αριθμού Reynolds του φέροντος ρευστού για τα πειράματα HEX001 - HEX024**

Ταυτότητα πειράματος	Μέση Τ ρευστού (οC)	Πυκνότητα ρευστού (kg/lit)	Ογκ. Παροχή ρεύματος ρευστού (lit/h)	Μαζική παροχή ρεύματος "πολτού" (kg/h)	Ογκ. Παροχή ρεύματος "πολτού" (lit/h)	Ογκ. Παροχή προϊόντος (lit/h)	Ταχύτητα προϊόντος (m/s)	K (Pas <sup>n</sup> )	n	Reynolds φέροντος ρευστού
HEX001	42,00	0,9915	118,1	340,0	342,9	461,1	0,50	0,0425	0,8001	<b>850,0</b>
HEX002	41,90	0,9916	216,0	700,2	706,2	922,1	1,01	0,0426	0,7998	<b>1950,4</b>
HEX003	39,49	0,9923	424,4	950,1	957,5	1381,9	1,51	0,0462	0,7928	<b>3089,1</b>
HEX004	43,48	0,9905	157,9	299,9	302,7	460,7	0,50	0,0066	0,9376	<b>2100,4</b>
HEX005	38,82	0,9920	316,1	600,0	604,9	921,0	1,01	0,0067	0,9306	<b>4623,0</b>
HEX006	36,44	0,9926	473,5	900,0	906,7	1380,2	1,51	0,0071	0,9271	<b>6897,8</b>
HEX007	45,45	0,9941	109,0	350,3	352,3	461,4	0,50	0,0508	0,9095	<b>336,4</b>
HEX008	41,32	0,9955	216,4	699,9	703,1	919,4	1,00	0,0595	0,9000	<b>656,2</b>
HEX009	39,01	0,9961	422,7	949,8	953,5	1376,2	1,50	0,0650	0,8947	<b>977,7</b>
HEX010	39,98	0,9922	0,0	458,6	462,2	462,2	0,50	0,0357	0,8165	<b>908,2</b>
HEX011	42,25	0,9915	0,0	916,0	923,9	923,9	1,01	0,0328	0,8237	<b>2122,1</b>
HEX012	36,77	0,9931	398,7	974,2	981,0	1379,7	1,51	0,0402	0,8062	<b>3191,6</b>
HEX013	41,38	0,9917	288,0	169,7	171,1	459,1	0,50	0,0433	0,7983	<b>838,5</b>
HEX014	38,37	0,9926	595,9	320,4	322,7	918,7	1,00	0,0480	0,7896	<b>1862,0</b>
HEX015	36,85	0,9931	894,0	480,0	483,4	1377,4	1,50	0,0505	0,7852	<b>2991,2</b>
HEX016	44,43	0,9907	0,0	458,0	462,3	462,3	0,50	0,0265	0,8450	<b>1005,4</b>
HEX017	43,70	0,9910	0,0	916,2	924,6	924,6	1,01	0,0227	0,8600	<b>2337,7</b>
HEX018	43,51	0,9911	0,0	687,1	693,3	693,3	0,76	0,0248	0,8507	<b>1645,6</b>
HEX019	37,84	0,9928	0,0	458,0	461,3	461,3	0,50	0,0238	0,8586	<b>1021,5</b>
HEX020	40,11	0,9921	0,0	915,9	923,2	923,2	1,01	0,0220	0,8643	<b>2337,4</b>
HEX021	41,31	0,9918	399,8	973,8	981,9	1381,7	1,51	0,0211	0,8673	<b>3760,6</b>
HEX022	42,52	0,9914	185,4	574,0	579,0	764,4	0,83	0,0328	0,8340	<b>1575,3</b>

### Παρατηρήσεις :

- i. Η μέση θερμοκρασία («Μέση  $T$ ») του φέροντος ρευστού προκύπτει από το μέσο όρο των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του προϊόντος στον αγωγό.
- ii. Ο συντελεστής συνεκτικότητας  $K$  και ο δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς  $n$  του φέροντος ρευστού και η εξάρτηση αυτών από τη θερμοκρασία προκύπτουν από τις ρεολογικές αναλύσεις που γίνονται σε δείγματα του ρευστού κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Τα αποτελέσματα των εν λόγω αναλύσεων παρατίθενται εκτενώς στο Παράρτημα 4.
- iii. Για να προκύψει η συνολική ογκομετρική παροχή του διφασικού προϊόντος προστίθενται οι επιμέρους παροχές του ρεύματος ρευστού και ρεύματος «πολτού». Για το ρεύμα «πολτού» μετράται η μαζική παροχή και για να μετατραπεί σε ογκομετρική χρησιμοποιήθηκε η πυκνότητα του φέροντος ρευστού (Παράρτημα 1). Θα ήταν ίσως ορθότερο να χρησιμοποιηθεί η πυκνότητα του «πολτού» αλλά ο υπολογισμός της πυκνότητας των σωματιδίων με τη χρήση του «PhysProp Estimator» (Παράρτημα 1) αποδείχθηκε ότι είναι σχετικά ανακριβής.
- iv. Στον παραπάνω πίνακα δεν είναι εμφανής η διάμετρος του αγωγού (που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς), η οποία είναι  $D = 18 \text{ mm}$ .

## 4.2. Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από τον αγωγό προς το φέρον ρευστό ( $h_{W,F}$ )

### 4.2.1 Περιγραφή της μεθόδου υπολογισμού του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από τον αγωγό προς το φέρον ρευστό ( $h_{W,F}$ )

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και η συζήτηση που ακολουθεί στηρίζεται στις υπολογισμένες τιμές του συντελεστή συναγωγής μεταξύ του τοιχώματος του αγωγού και του φέροντος ρευστού. Για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμο να ξεκαθαριστεί η **πορεία των υπολογισμών** από τις πρωτογενείς μετρήσεις ως και τον υπολογισμένο συντελεστή συναγωγής  $h_{W,F}$ .

Αρχικά, πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μετράται η **θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του θερμαντικού μέσου και της υγρής φάσης του προϊόντος**, η **ογκομετρική παροχή του θερμαντικού μέσου** και η **μαζική παροχή του προϊόντος**. Επίσης, οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιούνται στις παρακάτω εξισώσεις υπολογίζονται με τη βοήθεια των σχέσεων του Παραρτήματος 1, που περιγράφουν την εξάρτηση των μεγεθών αυτών από τη θερμοκρασία.

Ξεκινώντας, λοιπόν, από το ζητούμενο, ο συντελεστής συναγωγής  $h_{W,F}$  υπολογίζεται από την εξίσωση (22):

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{1}{A_{OUT}} \cdot \frac{1}{h_{M,W}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{OUT}}{r_{IN}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_W} + \frac{1}{A_{IN}} \cdot \frac{1}{h_{W,F}} \quad (22)$$

A) Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $U$  υπολογίζεται από την εξίσωση (31), η εξαγωγή της οποίας περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 1. Έτσι:

$$U = \frac{\dot{m}_M \cdot C_{p,M} \cdot (T_{M,in} - T_{M,out})}{A_{mean} \cdot \Delta T_{ln}} \quad (31)$$

Όπου η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας ορίζεται ως εξής:

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{M,out} - T_{F,in}) - (T_{M,in} - T_{F,out})}{\ln \frac{T_{M,out} - T_{F,in}}{T_{M,in} - T_{F,out}}} \quad (32)$$

Στις εξισώσεις (31) και (32) όλες οι παράμετροι είναι γνωστές. Πιο συγκεκριμένα:

- Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μετράται η ογκομετρική παροχή του θερμαντικού μέσου  $\dot{v}_M$  και η μαζική παροχή του  $\dot{m}_M$  υπολογίζεται εύκολα από την εξίσωση  $\dot{m}_M = \rho \cdot \dot{v}_M$ , αφού η πυκνότητα του θερμαντικού μέσου (θερμό νερό) είναι γνωστή.
- Οι θερμοκρασίες που εμπλέκονται στις εξισώσεις (31) και (32) προέρχονται από τις πρωτογενείς μετρήσεις κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.
- Η επιφάνεια  $A_{mean}$  είναι η μέση λογαριθμική επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας του αγωγού. Υπολογίζεται δε από την εξίσωση  $A_{mean} = \frac{A_{out} - A_{in}}{\ln\left(\frac{A_{out}}{A_{in}}\right)}$ .

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνεται λεπτομερώς η πορεία των υπολογισμών από τις μετρήσεις της θερμοκρασίας έως τον τελικό στόχο, που ήταν ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $U$ .

**Πίνακας 7: Πορεία των υπολογισμών με στόχο τον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας U για τα πειράματα HEX001 - HEX024**

Ταυτότητα πειράματος	Ογκ. παροχή μέσου (lt/h)	Πυκνότητα μέσου (kg/lt)	Μαζική παροχή μέσου (kg/h)	Cp του μέσου (KJ/kg*oC)	T εισόδου - προϊόν (oC)	T εξόδου - προϊόν (oC)	T εξόδου - μέσο (oC)	T εισόδου - μέσο (oC)	Q μέσου (KJ/h)	DT <sub>ln</sub> (oC)	Συνολικός συντελεστής U (W/m <sup>2</sup> * oC)
HEX001	500,09	0,9733	486,72	4,1905	22,51	60,89	42,21	78,09	73184	18,42	546,38
HEX002	999,97	0,9733	973,29	4,1915	22,60	61,21	44,41	79,09	141505	19,78	983,72
HEX003	1500,15	0,9734	1460,21	4,1919	21,35	57,63	46,32	78,56	197337	22,88	1185,95
HEX004	749,94	0,9732	729,85	4,1921	17,29	69,67	46,93	78,89	97776	17,49	768,80
HEX005	1000,09	0,9734	973,46	4,1904	18,12	59,52	41,33	78,50	151646	21,03	991,76
HEX006	1499,87	0,9734	1459,95	4,1904	15,69	57,18	41,37	78,33	226107	23,34	1332,09
HEX007	750,38	0,9734	730,44	4,1926	21,51	69,39	48,61	78,80	92438	16,72	760,19
HEX008	1200,02	0,9763	1171,55	4,1900	21,73	60,92	44,67	73,83	143155	17,45	1128,39
HEX009	1800,06	0,9763	1757,38	4,1908	20,35	57,67	46,94	74,39	202172	21,27	1306,90
HEX010	599,45	0,9734	583,50	4,1904	19,11	60,86	42,52	77,29	85013	19,72	592,94
HEX011	1199,73	0,9734	1167,77	4,1914	19,37	65,12	44,56	78,71	167156	18,80	1222,74
HEX012	1499,92	0,9763	1464,34	4,1898	20,31	53,22	44,47	73,14	175951	21,97	1101,31
HEX013	599,73	0,9735	583,84	4,1922	21,24	61,53	47,42	78,48	76021	21,24	492,29
HEX014	1199,97	0,9734	1168,02	4,1938	20,83	55,91	52,14	78,94	131256	26,96	669,50
HEX015	1799,90	0,9734	1752,02	4,1947	20,56	53,14	54,64	79,51	182748	30,06	836,13
HEX016	750,08	0,9733	730,07	4,1920	18,66	70,20	45,89	79,31	102269	16,55	849,83
HEX017	1500,42	0,9733	1460,37	4,1932	19,10	68,30	49,48	79,69	184972	19,36	1313,94
HEX018	1125,02	0,9733	1094,94	4,1922	18,76	68,26	47,42	78,59	143105	17,96	1095,59
HEX019	752,50	0,9962	749,67	4,1774	52,61	23,08	34,35	16,02	-57411	-11,78	669,97
HEX020	1178,63	0,9962	1174,18	4,1776	53,54	26,69	36,49	16,17	-99697	-13,52	1013,77

**Παρατήρηση :** Η πυκνότητα του θερμαντικού μέσου (θερμό νερό) εξαρτάται από τη θερμοκρασία αυτού. Για να μετατραπεί η ογκομετρική παροχή (ένδειξη του ροόμετρου) σε μαζική παροχή, χρησιμοποιείται η πυκνότητα του μέσου, η οποία υπολογίζεται στον παραπάνω πίνακα με βάση τη μετρηθείσα θερμοκρασία του μέσου πριν το ροόμετρο. Η θερμοκρασία αυτή μετρούνταν κατά την εκτέλεση των πειραμάτων αλλά δεν περιλαμβάνεται στον παραπάνω πίνακα.

**Β) Ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ θερμαντικού μέσου και τοιχώματος αγωγού  $h_{M,W}$  υπολογίζεται από την εξίσωση (37) :**

$$Nu = \frac{h_{M,W} \cdot D_H}{k_{water}} \quad (37)$$

Ο αριθμός Nusselt της εξίσωσης (37) υπολογίζεται από την εξίσωση (33) :

$$Nu = 0,0090385 \cdot Re^{0,895} \cdot Pr^X \quad (33)$$

όπου

- Ο αριθμός Reynolds δίνεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{\rho_{water} \cdot u \cdot D_H}{\mu_{water}} \quad (35)$$

με  $u$  συμβολίζεται η ταχύτητα ροής του θερμαντικού μέσου και αυτή υπολογίζεται εύκολα, γνωρίζοντας την ογκομετρική παροχή, από την εξίσωση  $\dot{V}_M = u \cdot \pi \cdot r_{tube}^2$ . Επίσης, η υδραυλική διάμετρος του αγωγού  $D_H$  υπολογίζεται από την εξίσωση  $D_H = d_{out} - d_{in}$ .

- Ο αριθμός Prandtl δίνεται από τη σχέση:

$$Pr = \frac{C_{p,water} \cdot \mu_{water}}{k_{water}} \quad (36)$$

Οι φυσικές ιδιότητες του θερμαντικού μέσου (θερμό νερό) που υπεισέρχονται στον ορισμό των αριθμών Reynolds και Prandtl υπολογίζονται για μία μέση θερμοκρασία μεταξύ των μετρούμενων θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου.

Ακόμη, όπως περιγράφηκε και στο Κεφάλαιο 1, η εξίσωση (33) είναι μία εμπειρική σχέση που συνδέει τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του θερμαντικού μέσου και του τοιχώματος του αγωγού με τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ρευστού. Αυτή η σχέση δημιουργήθηκε με την εκτέλεση πειραμάτων αναφοράς με νερό και στους δύο αγωγούς του εναλλάκτη διπλού σωλήνα. Για την εξίσωση (33), λοιπόν, και για την περίπτωση των πειραμάτων αναφοράς που διεξήχθησαν, ο εκθέτης  $X$  αναλύεται ως εξής:

$$X = \frac{1}{A} \cdot e^{\frac{Sigma}{Pr+B}} \quad (34)$$

Όπου

$$A = 3$$

$$B = 27$$

$$Sigma = 9$$

Έτσι, μετρώντας τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου για το θερμαντικό μέσο, υπολογίζονται οι φυσικές και ρεολογικές του ιδιότητες και κατ' επέκταση οι αδιάστατοι αριθμοί Reynolds και Prandtl. Επίσης, γνωρίζοντας τον εκθέτη  $X$ , από την εξίσωση (33) υπολογίζεται εύκολα ο συντελεστής συναγωγής  $h_{M,W}$  μέσω του αριθμού Nusselt.

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνεται λεπτομερώς η πορεία των υπολογισμών από τις μετρήσεις της θερμοκρασίας έως τον υπολογισμό των αριθμών Reynolds και Prandtl και, τελικά, του συντελεστή συναγωγής μεταξύ του θερμαντικού μέσου και του τοιχώματος του αγωγού  $h_{M,W}$ .

Πίνακας 8: Πορεία των υπολογισμών με στόχο τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής μεταξύ του θερμαντικού μέσου και του τοιχώματος αγωγού για τα πειράματα HEX001 - HEX024

Ταυτότητα πειράματος	Μέση T του θερμαντικού μέσου (°C)	Cp (J/kg*°C)	Ιξώδες (10 <sup>-3</sup> Pas)	Θερμική Αγωγιμότητα k (W/m*°C)	Πυκνότητα (kg/l)	Prandtl	Ογκ. Παροχή θερμαντικού μέσου (lt/h)	Ταχύτητα (m/s)	Reynolds	x εκθέτης Prandtl	Nusselt	Συντελεστής h <sub>m,w</sub> (W/m <sup>2</sup> *°C)
HEX001	60,16	4190,5	0,461945	0,6541	0,9838	2,96	500,1	0,2043	6786,8	0,4501	39,59	<b>1659,8</b>
HEX002	61,75	4191,5	0,450988	0,6556	0,9830	2,88	1000,0	0,4085	13890,3	0,4505	74,30	<b>3122,4</b>
HEX003	62,44	4191,9	0,446379	0,6562	0,9827	2,85	1500,2	0,6128	21046,4	0,4506	107,25	<b>4511,5</b>
HEX004	62,91	4192,1	0,443233	0,6566	0,9825	2,83	749,9	0,3063	10593,6	0,4507	57,83	<b>2434,0</b>
HEX005	59,91	4190,4	0,463707	0,6538	0,9839	2,97	1000,1	0,4085	13522,3	0,4501	73,50	<b>3080,5</b>
HEX006	59,85	4190,4	0,464166	0,6538	0,9839	2,98	1499,9	0,6127	20260,5	0,4501	105,60	<b>4425,4</b>
HEX007	63,70	4192,6	0,438064	0,6574	0,9821	2,79	750,4	0,3065	10720,7	0,4509	58,12	<b>2449,2</b>
HEX008	59,25	4190,0	0,468484	0,6532	0,9842	3,01	1200,0	0,4902	16065,0	0,4499	86,17	<b>3608,1</b>
HEX009	60,67	4190,8	0,458427	0,6545	0,9835	2,94	1800,1	0,7353	24610,7	0,4502	124,94	<b>5242,2</b>
HEX010	59,91	4190,4	0,463769	0,6538	0,9839	2,97	599,4	0,2449	8104,1	0,4501	46,49	<b>1948,3</b>
HEX011	61,64	4191,4	0,451753	0,6555	0,9831	2,89	1199,7	0,4901	16637,7	0,4505	87,40	<b>3672,2</b>
HEX012	58,81	4189,8	0,471697	0,6527	0,9844	3,03	1499,9	0,6127	19947,0	0,4498	104,93	<b>4390,6</b>
HEX013	62,95	4192,2	0,442955	0,6567	0,9825	2,83	599,7	0,2450	8476,9	0,4507	47,35	<b>1993,3</b>
HEX014	65,54	4193,7	0,426488	0,6590	0,9812	2,71	1200,0	0,4902	17593,6	0,4513	89,40	<b>3776,8</b>
HEX015	67,07	4194,7	0,417206	0,6603	0,9805	2,65	1799,9	0,7353	26955,8	0,4515	129,62	<b>5486,7</b>
HEX016	62,60	4192,0	0,445267	0,6564	0,9827	2,84	750,1	0,3064	10548,7	0,4507	57,73	<b>2429,0</b>
HEX017	64,58	4193,2	0,432447	0,6582	0,9817	2,76	1500,4	0,6129	21705,9	0,4511	108,61	<b>4582,2</b>
HEX018	63,00	4192,2	0,442624	0,6567	0,9825	2,83	1125,0	0,4596	15913,1	0,4507	83,18	<b>3501,5</b>
HEX019	25,18	4177,4	0,886698	0,6120	0,9949	6,05	752,5	0,3074	5380,3	0,4377	43,39	<b>1702,2</b>
HEX020	26,33	4177,6	0,86408	0,6136	0,9947	5,88	1178,6	0,4815	8645,9	0,4383	65,59	<b>2579,9</b>
HEX021	24,50	4177,3	0,900672	0,6110	0,9950	6,16	1781,9	0,7279	12544,5	0,4373	93,20	<b>3650,3</b>
HEX022	62,12	4191,7	0,448452	0,6550	0,9830	2,87	200,0	0,2260	11172,0	0,4506	60,00	<b>2564,2</b>



**Παρατηρήσεις :**

- i. Στον παραπάνω πίνακα δεν είναι εμφανής η υδραυλική διάμετρος του αγωγού (που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς), η οποία είναι  $D_H = 15,6 \text{ mm}$ .
- ii. Η θερμοκρασία που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των μεγεθών του παραπάνω πίνακα (ειδική θερμοχωρητικότητα, ιξώδες, θερμική αγωγιμότητα, πυκνότητα) είναι η «Μέση  $T$  του θερμαντικού μέσου» της δεύτερης στήλης του πίνακα. Αυτή είναι η μέση θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου κατά μήκος του αγωγού και προκύπτει από τις μετρηθείσες θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου.

Γ) Τέλος, στην εξίσωση (22) ο όρος που περιγράφει τη θερμική αντίσταση λόγω αγωγής θερμότητας διαμέσου του τοιχώματος του αγωγού υπολογίζεται γνωρίζοντας την τιμή της **θερμικής αγωγιμότητας του υλικού του τοιχώματος**. Όπως περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα 2, ο εναλλάκτης είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα τύπου AISI 316, του οποίου η εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας από τη θερμοκρασία περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$k_w = -2 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 0,017 \cdot T + 12,997 \quad (39)$$

Στον πίνακα 9 που ακολουθεί περιγράφεται ο υπολογισμός της θερμικής αγωγιμότητας του αγωγού για κάθε πείραμα.

Τέλος, υπολογίζοντας όλους τους όρους της εξίσωσης (22), φτάνει κανείς εύκολα στον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής μεταξύ τοιχώματος και φέροντος ρευστού  $h_{w,F}$ , που είναι και το ζητούμενο. Στον πίνακα 10 που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών, δηλαδή ο συντελεστής συναγωγής  $h_{w,F}$  για τα πειράματα HEX001 – HEX024.

**Πίνακας 9: Υπολογισμός της θερμικής αγωγιμότητας του τοιχώματος του αγωγού για τα πειράματα HEX001 - HEX024**

Ταυτότητα πειράματος	Μέση T του θερμαντικού μέσου (°C)	$k_w$ (W/m*°C)
HEX001	60,16	14,0125
HEX002	61,74	14,0391
HEX003	62,43	14,0506
HEX004	62,91	14,0585
HEX005	59,91	14,0083
HEX006	59,85	14,0072
HEX007	63,70	14,0718
HEX008	59,24	13,9971
HEX009	60,66	14,0209
HEX010	59,90	14,0082
HEX011	61,63	14,0372
HEX012	58,80	13,9897
HEX013	62,95	14,0592
HEX014	65,53	14,1025
HEX015	67,07	14,1282
HEX016	62,60	14,0534
HEX017	64,58	14,0865
HEX018	63,00	14,0601
HEX019	25,18	13,4238
HEX020	26,32	13,4431
HEX021	24,50	13,4123
HEX022	62,12	14,0454
HEX023	61,34	14,0324
HEX024	59,83	14,0069

**Πίνακας 10: Πειραματικές τιμές του συντελεστή συναγωγής μεταξύ του τοιχώματος του αγωγού και του φέροντος ρευστού για τα πειράματα HEX001 - HEX024**

Ταυτότητα πειράματος	$h_{w,F}$ (W/m <sup>2</sup> *°C)
HEX001	886,0
HEX002	1639,7
HEX003	1872,5
HEX004	1252,5
HEX005	1672,4
HEX006	2262,4
HEX007	1227,3
HEX008	1906,1
HEX009	2051,0
HEX010	932,4
HEX011	2154,3
HEX012	1695,4
HEX013	708,7
HEX014	897,9
HEX015	1104,7
HEX016	1471,2
HEX017	2177,6
HEX018	1843,2
HEX019	1221,9
HEX020	1932,3
HEX021	1712,2
HEX022	1241,2
HEX023	1727,9
HEX024	2002,8

#### **4.2.2. Επίδραση της συγκέντρωσης σωματιδίων στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $h_{w,F}$**

Είναι σημαντικό να ερευνηθεί το πως η παρουσία των σωματιδίων στο προϊόν επηρεάζει τον συντελεστή συναγωγής μεταξύ του εσωτερικού τοιχώματος του αγωγού και του φέροντος ρευστού. Σύμφωνα με παλαιότερες μελέτες, είναι αναμενόμενο ο συντελεστής  $h_{w,F}$  να αυξάνεται με τη συγκέντρωση σωματιδίων στο μίγμα. Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστεί μια προσπάθεια που έγινε ώστε να αναδειχθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η σχέση μεταξύ του συντελεστή συναγωγής και της συγκέντρωσης σωματιδίων. Είναι κατανοητό, ότι η συγκέντρωση (ή κατά βάρος περιεκτικότητα) των σωματιδίων είναι μια παράμετρος η οποία δύσκολα μπορεί να ρυθμιστεί με ακρίβεια. Κατά συνέπεια, όλα τα πειράματα έχουν διαφορετικές συγκεντρώσεις μεταξύ τους, παρόλο που έγινε προσπάθεια να ομαδοποιηθούν από το στάδιο του πειραματικού σχεδιασμού (βλ. "Σχεδιασμός Πειραμάτων"). Έτσι, τα πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν οι κύβοι καρότου μικρού μεγέθους (6mm) ομαδοποιήθηκαν

με βάση τη συγκέντρωση σωματιδίων τους. Αυτό βοηθά στη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους και στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι κατηγορίες των πειραμάτων σύμφωνα με την περιεκτικότητά τους σε σωματίδια. Στις κατηγορίες αυτές περιλαμβάνονται μόνο πειράματα με μικρά σωματίδια καρότου, για να απομονωθεί η επίδραση της συγκέντρωσης σωματιδίων. ( βλ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5 )

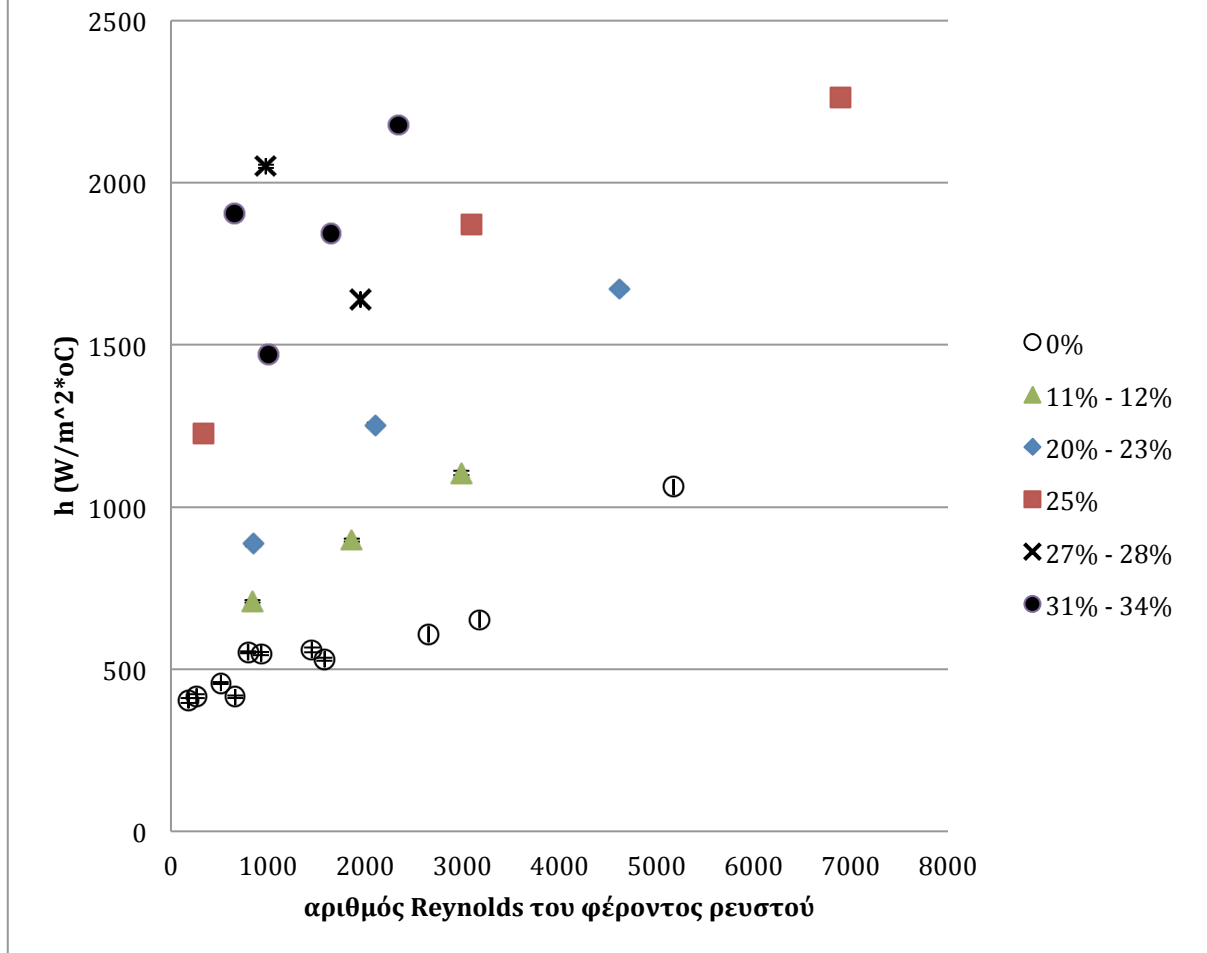
**Πίνακας 11: Ομάδες πειραμάτων με κύβους καρότου μικρού μεγέθους σύμφωνα με την %κ.β. περιεκτικότητα σε σωματίδια**

11% - 12%		20% - 23%		25%	
Πείραμα	Περιεκτικότητα σωματιδίων (%w/w)	Πείραμα	Περιεκτικότητα σωματιδίων (%w/w)	Πείραμα	Περιεκτικότητα σωματιδίων (%w/w)
HEX013	11,23%	HEX001	21,18%	HEX003	25,29%
HEX014	11,93%	HEX004	20,08%	HEX006	24,49%
HEX015	12,44%	HEX005	23,41%	HEX007	24,97%
				HEX021	24,91%

27% - 28%		33%	
Πείραμα	Περιεκτικότητα σωματιδίων (%w/w)	Πείραμα	Περιεκτικότητα σωματιδίων (%w/w)
HEX002	27,02%	HEX008	31,07%
HEX009	28,19%	HEX016	30,93%
		HEX017	34,64%
		HEX018	33,35%
		HEX019	30,79%
		HEX020	33,53%

Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, δημιουργήθηκε γράφημα που δείχνει τη σχέση μεταξύ του αριθμού Reynolds του φέροντος ρευστού και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $h_{w,F}$ .

## Μεταβολή του συντελεστή $h_{W,F}$ με τον αριθμό Reynolds του ρευστού και τη συγκέντρωση των σωματιδίων



Γράφημα 1: Μεταβολή του συντελεστή συναγωγής στο εσωτερικό τοίχωμα του αγωγού με τον αριθμό Reynolds του ρευστού για διαφορετικές συγκεντρώσεις σωματιδίων

Στο παραπάνω γράφημα φαίνεται ότι ο συντελεστής συναγωγής επηρεάζεται από τον αριθμό Reynolds αλλά και από τη συγκέντρωση των σωματιδίων στο μίγμα. Ο συντελεστής συναγωγής αυξάνεται με την αύξηση των δύο αυτών παραμέτρων και η επίδρασή τους λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα μέσα στον αγωγό.

Είναι αναμενόμενο η αύξηση του αριθμού Reynolds να προκαλεί αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, καθώς η ροή τείνει να μετατραπεί από στρωτή σε τυρβώδη και αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση του πάχους του οριακού στρώματος του ρευστού στο τοίχωμα του αγωγού. Αυτό βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια του τοιχώματος προς την υγρή φάση του προϊόντος.

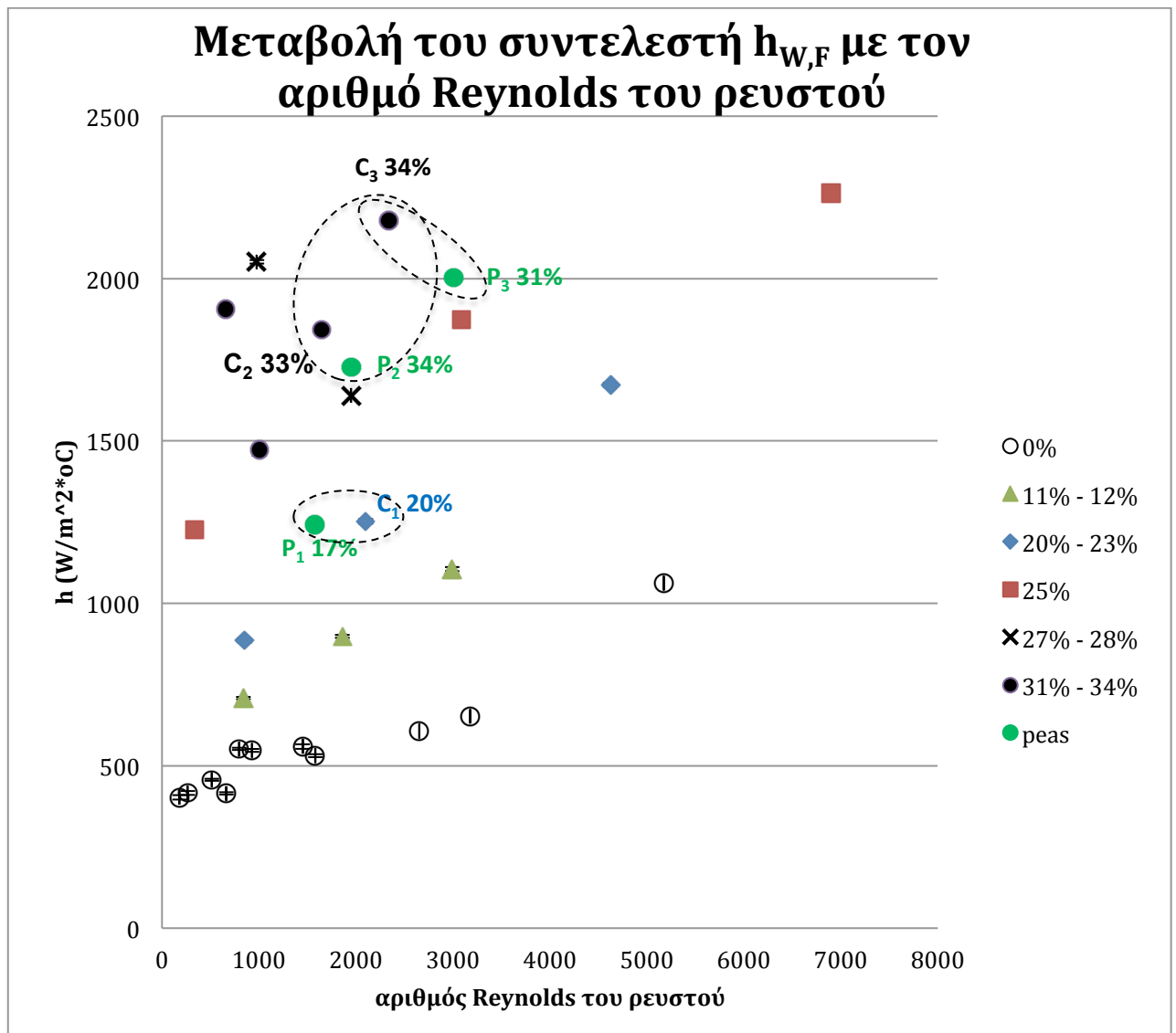
Σχετικά με την επίδραση της συγκέντρωσης σωματιδίων, παρατηρείται ότι όσο υψηλότερη είναι η συγκέντρωση των σωματιδίων στο μίγμα τόσο πιο γρήγορη

είναι η εξέλιξη των φαινομένων μεταφοράς στο τοίχωμα του αγωγού. Αυτό σημαίνει ότι αυξάνοντας τη συγκέντρωση των σωματιδίων μπορεί να επιτευχθούν υψηλές τιμές συντελεστή συναγωγής σε σχετικά χαμηλά επίπεδα αριθμού Reynolds. Φαίνεται ότι η κίνηση των σωματιδίων μέσα στο ρευστό επιφέρει αλληλεπιδράσεις με την εσωτερική επιφάνεια του αγωγού προκαλώντας, επίσης, μείωση του πάχους του οριακού στρώματος μεταξύ του τοιχώματος του αγωγού και του φέροντος ρευστού. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται για όλες σχεδόν τις ομάδες πειραμάτων που περιλαμβάνονται στο παραπάνω γράφημα.

Η μόνη περίπτωση που δε συμβαδίζει με τη γενικότερη τάση του γραφήματος είναι η ομάδα «27% - 28%». Αυτά τα δύο σημεία έχουν σχεδόν την ίδια συγκέντρωση σωματιδίων και, σύμφωνα με τον αριθμό Reynolds, το δεύτερο σημείο θα έπρεπε να εμφανίζει υψηλότερο συντελεστή συναγωγής από το πρώτο. Ωστόσο, αυτό δε συμβαίνει και το πρώτο σημείο έχει σημαντικά υψηλότερο συντελεστή συναγωγής από το δεύτερο, όπως φαίνεται και στο γράφημα. Έπειτα από λεπτομερή έρευνα των πειραματικών παραμέτρων και των συνθηκών των δύο αυτών πειραμάτων ανακαλύφθηκε ότι διαφέρουν σημαντικά ως προς την ογκομετρική παροχή του θερμαντικού μέσου. Κατά τη διάρκεια του HEX009 (πρώτο σημείο) η παροχή του μέσου ήταν 1800 Lt/h, ενώ κατά τη διάρκεια του HEX002 (δεύτερο σημείο) ήταν 1000 Lt/h. Ως αποτέλεσμα, η συνολική παροχόμενη θερμότητα στο πείραμα HEX009 είναι σημαντικά υψηλότερη και αυτό επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον συντελεστή συναγωγής  $h_{w,F}$ . Μια ακόμη διαφορά μεταξύ των δύο αυτών πειραμάτων έγκειται στο είδος του χρησιμοποιούμενου φέροντος ρευστού. Συγκεκριμένα, στο HEX009 χρησιμοποιήθηκε ρευστό υψηλού ιξώδους (1,2% CEKOL 700) και στο HEX002 ρευστό μέσου ιξώδους (0,25% CEKOL 30000). Βέβαια, η διαφορά αυτή θα έπρεπε να εκφράζεται με τον αριθμό Reynolds, αφού στον υπολογισμό του χρησιμοποιείται το ιξώδες του ρευστού που μετράται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Βαθύτερη έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση θα αποκάλυπτε πιθανώς πειραματικά σφάλματα τα οποία οδήγησαν σε αυτά τα μη αναμενόμενα αποτελέσματα σχετικά με τα συγκεκριμένα δύο πειράματα.

#### **4.2.3. Επίδραση του σχήματος των σωματιδίων στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $h_{w,F}$**

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εξέταση της επίδρασης του σχήματος των σωματιδίων στον συντελεστή συναγωγής. Για να ερευνηθεί η επίδραση αυτή, πραγματοποιήθηκαν πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν μπιζέλια. Με τον τρόπο αυτό υπάρχει διαφοροποίηση ως προς το σχήμα, καθώς συλλέχθηκαν αποτελέσματα από πειράματα με κύβους καρότου και πειράματα με μπιζέλια (σφαιρικά σωματίδια). Βέβαια, τα σωματίδια αυτά διαφέρουν και ως προς τη σύσταση, εκτός από το σχήμα. Ωστόσο, στην παρούσα αναφορά, η διαφορά ως προς τη σύσταση εκφράζεται στον υπολογισμό των φυσικών ιδιοτήτων των σωματιδίων και δεν εξετάζεται στην ανάλυση αυτής της παραγράφου.



Γράφημα 2: Μεταβολή του συντελεστή συναγωγής στο εσωτερικό τοίχωμα του αγωγού με τον αριθμό Reynolds για πειράματα με κύβους καρότου μικρού μεγέθους και μπιζέλια

Στο παραπάνω γράφημα υπάρχουν τα πειραματικά σημεία που αντιπροσωπεύουν πειράματα με μικρούς κύβους καρότου – ομαδοποιημένα σύμφωνα με την περιεκτικότητά τους σε σωματίδια – και πειράματα με μπιζέλια. Για να δοθεί έμφαση στην επίδραση του σφαιρικού σχήματος των μπιζελιών στον συντελεστή συναγωγής, τα πειραματικά σημεία που αντιστοιχούν σε πειράματα με μπιζέλια «συνδέθηκαν» με αντίστοιχα πειράματα με κύβους καρότου, που έχουν παρόμοιες πειραματικές παραμέτρους. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω γράφημα, με το γράμμα «C» συμβολίζονται τα πειράματα με κύβους καρότου (=carrots) ενώ με το γράμμα «P» τα πειράματα με μπιζέλια (=peas). Επίσης, ο αριθμός δίπλα σε κάθε σημείο αντιπροσωπεύει την % κ.β. περιεκτικότητα σε σωματίδια του πειράματος.

Το σημείο P<sub>1</sub> συγκρίνεται με το σημείο C<sub>1</sub>. Φαίνεται ότι τα σημεία είναι ευθέως συγκρίσιμα, παρόλο που παρατηρούνται μικρές διαφορές σε συγκέντρωση σωματιδίων και αριθμό Reynolds. Από αυτή τη σύγκριση δεν εξάγεται κάποιο

συμπέρασμα, αφού τα σημεία δεν εμφανίζουν κάποια διαφορά ως προς τον συντελεστή συναγωγής.

Σχετικά με το σημείο P<sub>2</sub>, αυτό συγκρίνεται με τα σημεία C<sub>2</sub> και C<sub>3</sub>. Αυτά τα πειράματα είναι σχεδόν όμοια ως προς τη συγκέντρωση σωματιδίων και αριθμό Reynolds. Ωστόσο, το σημείο P<sub>2</sub> έχει σημαντικά χαμηλότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συγκριτικά με τα αντίστοιχα πειράματα με κύβους καρότου, και ιδιαίτερα με το C<sub>3</sub>.

Τέλος, το P<sub>3</sub> συγκρίνεται με το C<sub>3</sub>. Η σύγκριση αυτή είναι πιο δύσκολη από τις δύο προηγούμενες, αφού τα δύο αυτά πειράματα διαφέρουν εμφανώς ως προς τη συγκέντρωση σωματιδίων. Η επίδραση που παρατηρείται, ωστόσο, είναι η ίδια με την προηγούμενη σύγκριση, ότι δηλαδή το πείραμα με τα μπιζέλια έχει χαμηλότερο συντελεστή συναγωγής από αυτό με τους κύβους καρότου.

Το συμπέρασμα που εξάγεται από τις τρεις συγκρίσεις μεταξύ των πειραμάτων είναι ότι το σφαιρικό σχήμα, συγκριτικά με το κυβικό, ελαττώνει τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από το εσωτερικό τοίχωμα προς το ρευστό σε υψηλές τιμές συγκέντρωσης σωματιδίων.

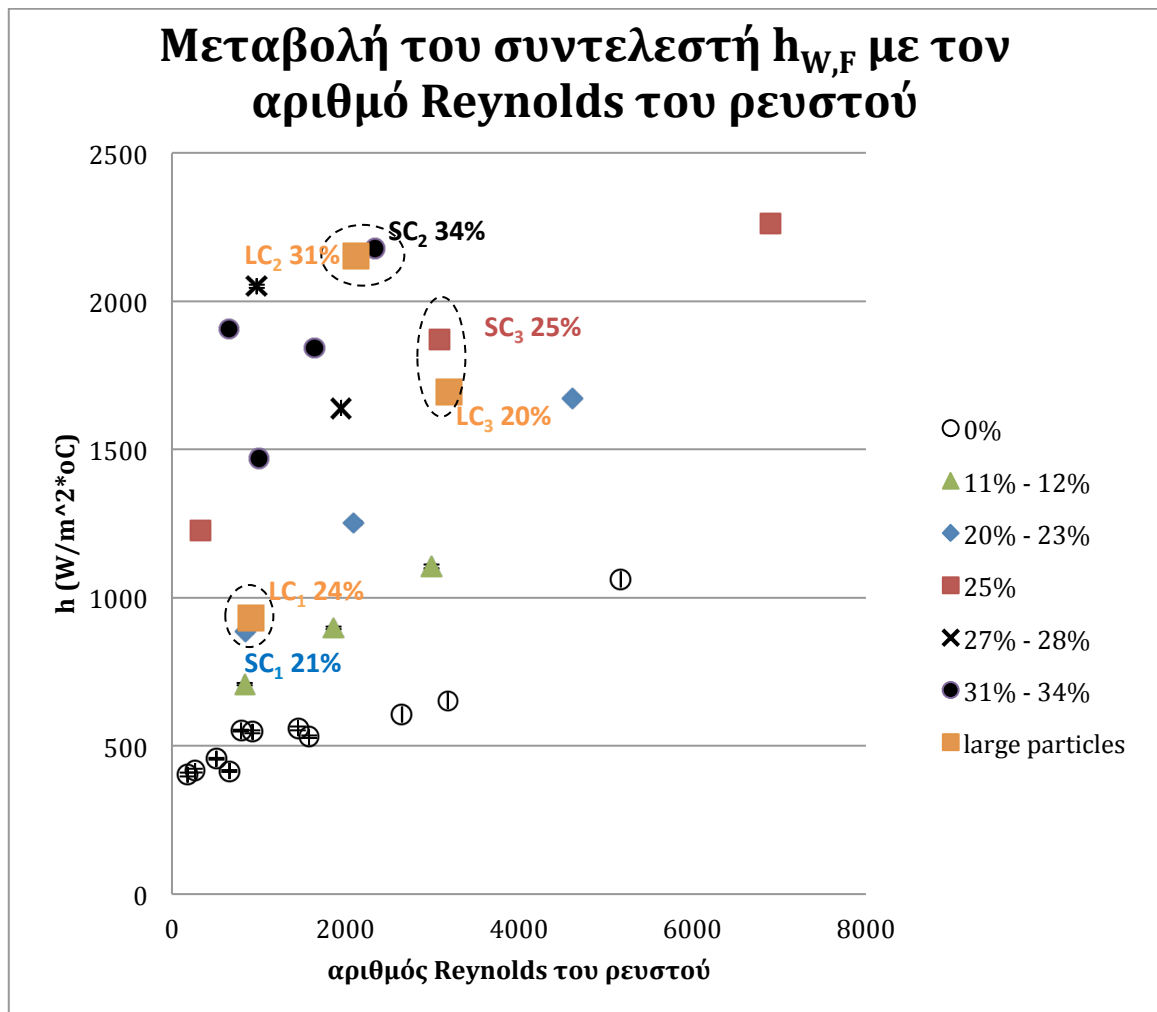
#### **4.2.4. Επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $h_{w,F}$**

Στην παρούσα εργασία ερευνήθηκε, επίσης, η επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων στα φαινόμενα μεταφοράς στο τοίχωμα του αγωγού. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν 3 πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν κύβοι καρότου μεγαλύτερου μεγέθους. Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα να συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων με αντίστοιχα πειράματα με κύβους καρότου μικρού μεγέθους. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να σημειωθούν τα πραγματικά μεγέθη των σωματιδίων που χρησιμοποιήθηκαν, όπως μετρήθηκαν πειραματικά.

Πίνακας 12: Μεγέθη των σωματιδίων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα

<b>ΜΕΓΕΘΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ</b>		
<b>Είδος</b>	<b>Ονομαστική διάσταση (mm)</b>	<b>Πραγματική μέση διάσταση (mm)</b>
Καρότα	6	6,03
Καρότα	10	8,37
Μπιζέλια	<8,75	3,94

Στο γράφημα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία που αντιπροσωπεύουν πειράματα με μικρούς κύβους καρότου και πειράματα με μεγάλους κύβους καρότου, σε μια προσπάθεια να απομονωθεί η επίδραση που επιφέρει η διαφορά μεγέθους μεταξύ των σωματιδίων στο αποτέλεσμα.



Γράφημα 3: Μεταβολή του συντελεστή συναγωγής στο εσωτερικό τοίχωμα του αγωγού με τον αριθμό Reynolds του ρευστού για πειράματα με μικρούς και μεγάλους κύβους καρότου

Στο παραπάνω γράφημα υπάρχουν τα πειραματικά σημεία που αντιπροσωπεύουν πειράματα με μικρούς κύβους καρότου – ομαδοποιημένα σύμφωνα με την περιεκτικότητά τους σε σωματίδια – και πειράματα με μεγάλους κύβους καρότου. Για να δοθεί έμφαση στην επίδραση του διαφορετικού μεγέθους των κύβων καρότου στον συντελεστή συναγωγής, τα πειραματικά σημεία που αντιστοιχούν σε πειράματα με μεγάλα σωματίδια «συνδέθηκαν» με αντίστοιχα πειράματα με μικρά σωματίδια, που έχουν παρόμοιες πειραματικές παραμέτρους. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω γράφημα, με το γράμμα «SC» συμβολίζονται τα πειράματα με μικρούς κύβους καρότου (=small carrots) ενώ με το γράμμα «LC» τα πειράματα με μεγάλους κύβους καρότου (=large carrots). Επίσης, ο αριθμός δίπλα σε κάθε σημείο αντιπροσωπεύει την % κ.β. περιεκτικότητα σε σωματίδια του πειράματος.

Συγκρίνοντας τα σημεία SC<sub>1</sub> και LC<sub>1</sub>, τα οποία έχουν σχεδόν όμοιο αριθμό Reynolds και διαφέρουν ελαφρώς ως προς τη συγκέντρωση σωματιδίων, δεν παρατηρείται κάποια διαφορά ως προς τον συντελεστή συναγωγής. Αυτό σημαίνει ότι στην προκειμένη περίπτωση η διαφορά στο μέγεθος δεν επιδρά στο αποτέλεσμα. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από τη σύγκριση των σημείων SC<sub>2</sub> και LC<sub>2</sub>.



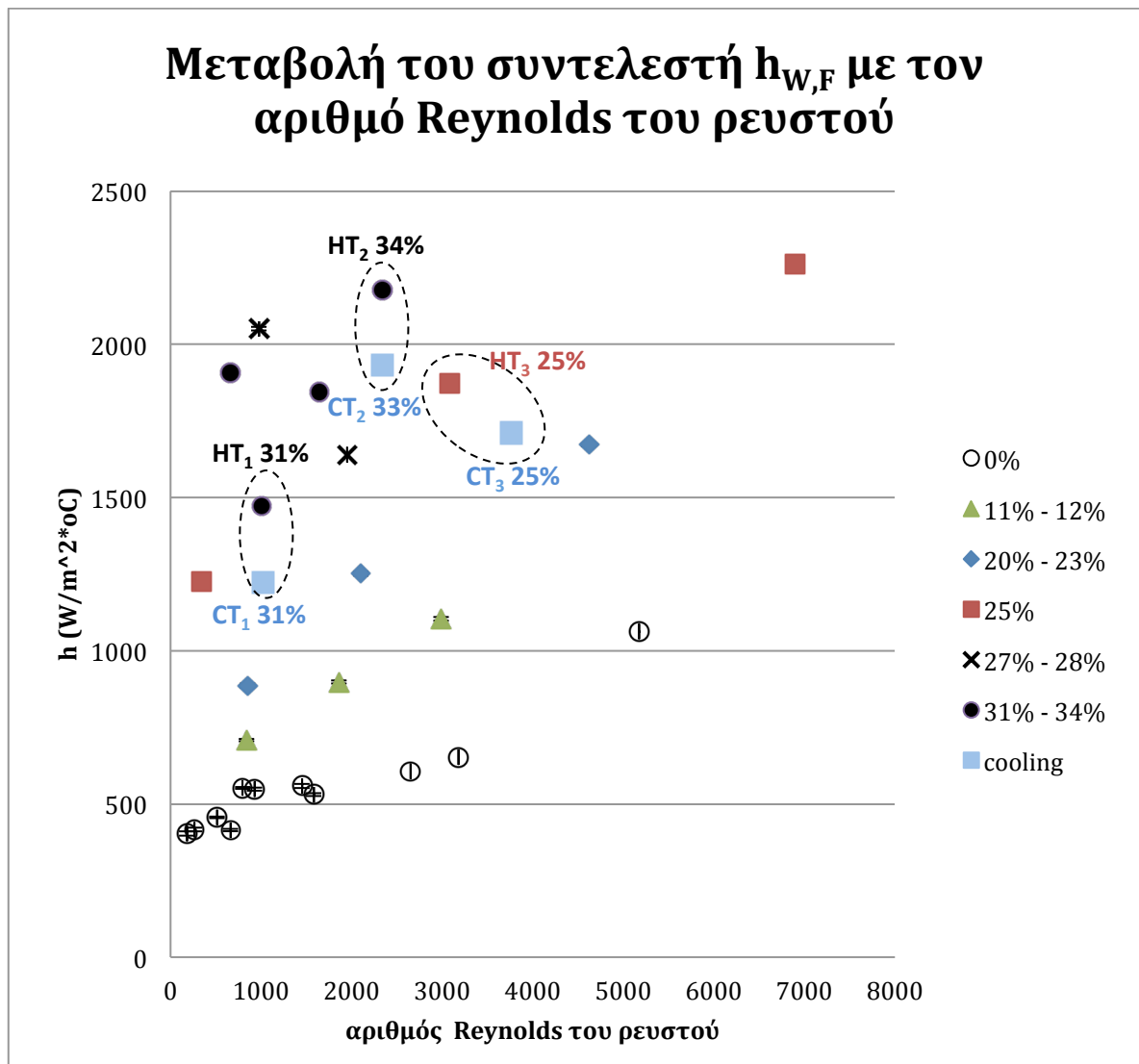
Σχετικά με τα σημεία SC<sub>3</sub> και LC<sub>3</sub>, έχουν όμοιο αριθμό Reynolds αλλά εμφανίζουν διαφορά στον συντελεστή συναγωγής. Αυτή η διαφορά φαίνεται ότι οφείλεται πιθανότατα στη διαφορετική συγκέντρωση σωματιδίων μεταξύ αυτών των δύο πειραμάτων. Έτσι, στην προκειμένη περίπτωση δεν είναι δυνατή η εξαγωγή συμπαγούς συμπεράσματος σχετικά με την επίδραση του μεγέθους στον συντελεστή συναγωγής.

Το γενικό συμπέρασμα που εξάγεται και από τις τρεις περιπτώσεις σύγκρισης, που αναλύθηκαν ανωτέρω, είναι ότι η διαφορά μεγέθους σωματιδίων δεν επέφερε καμία μεταβολή στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από τον αγωγό προς την υγρή φάση του προϊόντος. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με χρήση μεγάλων κύβων καρότου καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τιμών αριθμού Reynolds και συγκέντρωσης σωματιδίων. Για το λόγο αυτό, το συμπέρασμα που διατυπώθηκε κρίνεται αξιόπιστο. Ωστόσο, περισσότερη έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση θα αποκάλυπτε πιθανώς επιδράσεις του μεγέθους των σωματιδίων που δεν είναι εμφανείς στο παραπάνω γράφημα.

#### **4.2.5. Επίδραση της ψύξης στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $h_{w,f}$**

Στα πειράματα που εκτελέστηκαν συμπεριλαμβάνονται και 3 στα οποία η θερμική κατεργασία που υφίσταται το προϊόν είναι ψύξη. Συγκεκριμένα, το προϊόν θερμαίνεται στις δεξαμενές προετοιμασίας (Slurry Tank και Liquid Tank) και εισέρχεται στο σωληνωτό εναλλάκτη σε θερμοκρασία 50°C. Στον εναλλάκτη ψύχεται με τη χρήση νερού απευθείας από την παροχή ψυχρού νερού θερμοκρασίας 16°C σε αντιστροφή. Ο σκοπός των πειραμάτων αυτών είναι να διερευνηθεί αν υπάρχει μεταβολή στη μεταφορά θερμότητας στο τοίχωμα του αγωγού λόγω ψύξης.

Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται τα πειραματικά σημεία που αντιπροσωπεύουν πειράματα θέρμανσης – ομαδοποιημένα σύμφωνα με την περιεκτικότητά τους σε σωματίδια – και πειράματα ψύξης. Για να δοθεί έμφαση στην επίδραση του είδους της θερμικής κατεργασίας στον συντελεστή συναγωγής, τα πειραματικά σημεία που αντιστοιχούν σε πειράματα ψύξης «συνδέθηκαν» με αντίστοιχα πειράματα θέρμανσης, που έχουν παρόμοιες πειραματικές παραμέτρους. Όπως φαίνεται και στο γράφημα, με «HT» συμβολίζονται τα πειράματα θέρμανσης (=heating treatment) ενώ με «CT» τα πειράματα ψύξης (=cooling treatment). Επίσης, ο αριθμός δίπλα σε κάθε σημείο αντιπροσωπεύει την % κ.β. περιεκτικότητα σε σωματίδια του πειράματος.



Γράφημα 4: Μεταβολή του συντελεστή συναγωγής στο τοίχωμα του αγωγού με τον αριθμό Reynolds του ρευστού για πειράματα θέρμανσης και ψύξης

Στις δύο πρώτες περιπτώσεις σύγκρισης (HT<sub>1</sub> - CT<sub>1</sub> και HT<sub>2</sub> - CT<sub>2</sub>), τα πειράματα που έχουν ομαδοποιηθεί σε ζεύγη έχουν σχεδόν όμοιες πειραματικές παραμέτρους (όχι μόνο αριθμό Reynolds και συγκέντρωση σωματιδίων αλλά και είδος φέροντος ρευστού, ταχύτητα ροής, είδος και μέγεθος σωματιδίων). Ωστόσο, είναι εμφανής η διαφορά τους ως προς τον συντελεστή συναγωγής και μάλιστα παρατηρείται ότι τα πειραματικά σημεία που συμβολίζουν κατεργασία ψύξης είναι αυτά που έχουν χαμηλότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Στην τρίτη περίπτωση, τα δύο συγκρινόμενα σημεία έχουν ίδια συγκέντρωση σωματιδίων και, σύμφωνα με τη διαφορά τους ως προς τον αριθμό Reynolds, το σημείο CT<sub>3</sub> θα έπρεπε να εμφανίζει υψηλότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από το HT<sub>3</sub>, αφού ο συντελεστής αυξάνεται με τον αριθμό Reynolds. Ωστόσο, στο γράφημα παρατηρείται το αντίθετο.

Αποδεικνύεται, λοιπόν, και από τις τρεις περιπτώσεις πειραμάτων ότι η ψύξη επιδρά αρνητικά – δηλαδή τον ελαττώνει – στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από την εσωτερική επιφάνεια του αγωγού προς το φέρον ρευστό.

#### 4.2.6. Δημιουργία μοντέλου

Ένας συνήθης τρόπος περιγραφής της μεταφοράς θερμότητας είναι μέσω του αριθμού Nusselt. Μια μορφή εξίσωσης που συνδέει τους αριθμούς Nusselt, Reynolds και Prandtl και χρησιμοποιείται ευρέως στη βιβλιογραφία για συνεχείς διεργασίες θερμικής κατεργασίας ρευστών τροφίμων είναι η ακόλουθη [10]:

$$Nu = a \cdot Re^b \cdot Pr^c$$

Στην παρούσα εργασία, όπως προαναφέρθηκε, επιχειρήθηκε να αξιοποιηθούν τα αποτελέσματα των πειραμάτων προς την κατεύθυνση της δημιουργίας ενός μοντέλου το οποίο να προβλέπει τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στο τοίχωμα του αγωγού για περιπτώσεις τροφίμων με σωματίδια. Αρχικά, όμως, θα ήταν χρήσιμο να δοθούν οι ορισμοί των αδιάστατων αριθμών που χρησιμοποιήθηκαν.

- **Αριθμός Nusselt** : είναι ο λόγος της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή προς τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή διαμέσου του οριακού στρώματος του ρευστού στην επιφάνεια του τοιχώματος του αγωγού. Ο αριθμός Nusselt για συναγωγή με εξαναγκασμένη ροή σε αγωγό ορίζεται ως εξής:

$$Nu = \frac{h_{w,F} \cdot D_H}{k_{susp}}$$

- **Αριθμός Reynolds** : είναι ο λόγος των αδρανειακών δυνάμεων προς τις ιξώδεις δυνάμεις του ρευστού. Στην παρούσα αναφορά, ο αριθμός Reynolds που χρησιμοποιείται περιγράφει τις ρεολογικές ιδιότητες του φέροντος ρευστού. Ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Re = \frac{\rho_{liq} \cdot u \cdot D_H}{\mu_{liq}}$$

- **Αριθμός Prandtl** : είναι ο λόγος της διαχυτότητας ορμής προς τη διαχυτότητα θερμότητας. Σε προβλήματα μεταφοράς θερμότητας, ο αριθμός Prandtl δείχνει το σχετικό πάχος του οριακού στρώματος ταχύτητας και του οριακού στρώματος θερμοκρασίας. Όταν ο αριθμός Prandtl είναι μικρός, για παράδειγμα, αυτό σημαίνει ότι η θερμότητα διαχέεται πιο γρήγορα από την ορμή. Ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Pr = \frac{C_{p,susp} \cdot \mu_{liq}}{k_{susp}}$$

Σύμφωνα με τις σχέσεις που δόθηκαν παραπάνω και με τη χρήση των αποτελεσμάτων από τα πειράματα, υπολογίστηκαν οι αδιάστατοι αριθμοί για κάθε πείραμα. Έπειτα, επιχειρήθηκε να προσαρμοστούν στα αποτελέσματα δύο μορφές εξισώσεων με στόχο να προκύψει ένα μοντέλο που θα προβλέπει με ακρίβεια. Οι δύο προσπάθειες που έγιναν θα παρουσιαστούν λεπτομερώς στη συνέχεια και θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα.

Κατά τη διαδικασία της προσαρμογής χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο βελτιστοποίησης Solver του Microsoft Excel. Η μεταβλητή βελτιστοποίησης ήταν το συνολικό σχετικό τετραγωνισμένο σφάλμα (=total relative squared error) και οι παράμετροι που μεταβάλλονταν είναι ο συντελεστής  $a$  και οι εκθέτες  $b$  και  $c$ . Το συνολικό σχετικό τετραγωνισμένο σφάλμα ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$TRSE = \sum \left( \frac{Nu_{exp} - Nu_{theor}}{Nu_{exp}} \right)^2$$

### 1η προσπάθεια προσαρμογής - Μοντέλο που δεν υπολογίζει την επίδραση των σωματιδίων

$$Nu = a \cdot Re^b \cdot Pr^c$$

Η παραπάνω εξίσωση περιγράφει ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται ευρέως σε περιπτώσεις συναγωγής με εξαναγκασμένη ροή σε αγωγό. Εφαρμόζεται συνήθως σε περιπτώσεις που το προϊόν που υφίσταται θερμική κατεργασία είναι υγρό. Στη βιβλιογραφία έχουν σημειωθεί προσπάθειες προσαρμογής του μοντέλου αυτού σε αποτελέσματα πειραμάτων με διφασικά τρόφιμα (φέρρον ρευστό και σωματίδια) [10]. Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε, επίσης, η προσαρμογή του μοντέλου αυτού στα πειραματικά δεδομένα και η εξίσωση στην οποία κατέληξε η διαδικασία βελτιστοποίησης είναι η ακόλουθη.

$$Nu = 1,311 \cdot Re^{0,374} \cdot Pr^{0,025}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην παραγωγή του μοντέλου συμπεριλήφθηκαν τα αποτελέσματα όλων των πειραμάτων εκτός από τα 3 πειράματα με ψύξη του προϊόντος. Αυτό έγινε, γιατί, όπως αποδείχθηκε ανωτέρω, η ψύξη εμφανίζει αρνητική επίδραση στον συντελεστή συναγωγής και αυτό είναι κάτι που δεν περιγράφεται από το μοντέλο. Έτσι, αν συμπεριλαμβανόταν θα ήταν μόνο ένας παράγοντας αύξησης του σφάλματος. Η τακτική που ακολουθείται συνήθως είναι να προσαρμόζεται το μοντέλο ξεχωριστά στα πειράματα της ψύξης και να λαμβάνεται μια δεύτερη εξίσωση που τα περιγράφει. Ωστόσο, ο αριθμός των συγκεκριμένων πειραμάτων είναι πολύ περιορισμένος για να υποστηριχθεί αυτή η διαδικασία.

Ο δείκτης που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας των προβλέψεων του μοντέλου είναι το "Mean Root Relative Squared Error" (MRRSE). Ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$MRRSE = \frac{\sqrt{\sum \left( \frac{Nu_{exp} - Nu_{theor}}{Nu_{exp}} \right)^2}}{N}$$

Συγκεκριμένα, για το μοντέλο που μόλις παρουσιάστηκε το σφάλμα είναι **MRRSE = 7,6 %**.

### **2η προσπάθεια προσαρμογής - Μοντέλο που υπολογίζει την επίδραση των σωματιδίων**

$$Nu = a \cdot Re^b \cdot Pr^c \cdot (1 + \Phi)^d$$

Το μοντέλο αυτό προέκυψε από την εξίσωση του προηγούμενου στην οποία προστέθηκε ένας νέος όρος. Ο όρος αυτός είναι ο  $(1+\Phi)^d$ , όπου  $\Phi$  είναι το κλάσμα της στερεής φάσης του διφασικού προϊόντος (ή περιεκτικότητα σωματιδίων). Ο στόχος είναι να συμπεριληφθεί στο μοντέλο η επίδραση της παρουσίας των σωματιδίων στο τρόφιμο. Η εξίσωση που προέκυψε μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι η ακόλουθη:

$$Nu = 0,567 \cdot Re^{0,348} \cdot Pr^{0,194} \cdot (1 + \Phi)^{4,196}$$

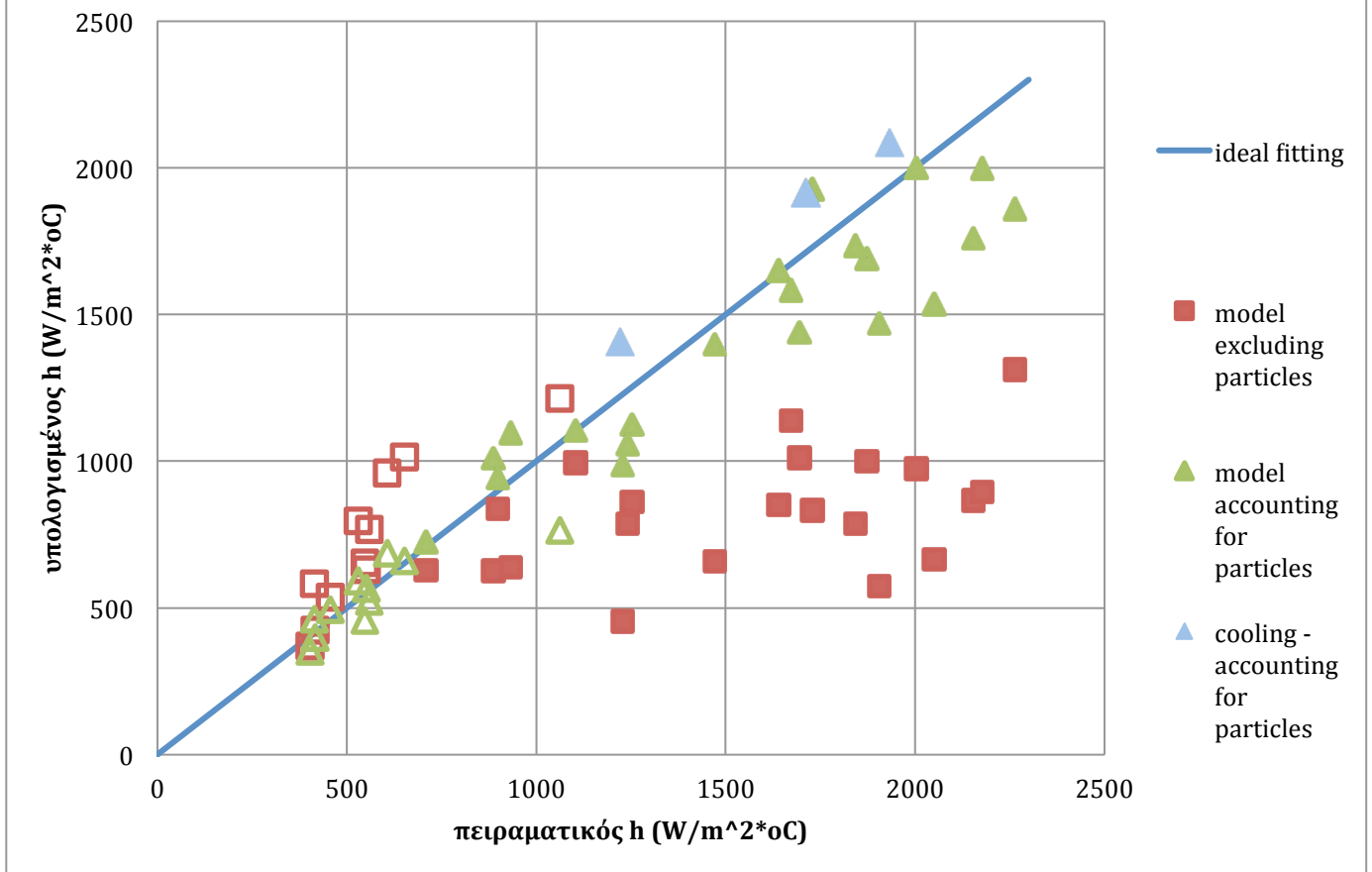
Στην παραγωγή και αυτού του μοντέλου δεν συμπεριλήφθηκαν τα πειράματα με ψύξη του προϊόντος.

Το σφάλμα για την εξίσωση αυτή είναι **MRRSE = 2,2 %**.

Συγκρίνοντας τα σφάλματα των δύο μοντέλων, προκύπτει εύλογα το συμπέρασμα ότι το δεύτερο μοντέλο περιγράφει τα πειραματικά αποτελέσματα με μεγαλύτερη ακρίβεια. Αυτό, βέβαια, είναι αναμενόμενο, καθώς η επίδραση των σωματιδίων στα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας είναι σημαντική και το πρώτο μοντέλο την αγνοεί.

Ένας τρόπος για να συγκριθούν τα δύο μοντέλα πιο ξεκάθαρα είναι μέσω ενός γραφήματος.

## Ακρίβεια πρόβλεψης των προτεινόμενων μοντέλων



Γράφημα 5: Ο συντελεστής συναγωγής που υπολογίστηκε από τα δύο μοντέλα προς τον πειραματικό συντελεστή συναγωγής (τα «άδεια» σημεία αντιπροσωπεύουν πειράματα χωρίς σωματίδια)

Στο παραπάνω γράφημα, ο άξονας x αντιστοιχεί στον πειραματικό συντελεστή συναγωγής, ενώ ο άξονας y αντιστοιχεί στον συντελεστή συναγωγής που υπολογίστηκε με τη χρήση του μοντέλου που δεν υπολογίζει την παρουσία σωματιδίων (πορτοκαλί σημεία) και του μοντέλου που υπολογίζει την επίδραση αυτών (πράσινα σημεία). Σε μια ιδανική περίπτωση, τα σημεία θα συνέπιπταν με την μπλε ευθεία γραμμή, η οποία περιγράφει ακριβώς αυτή την ιδανική περίπτωση προσαρμογής. Τα «άδεια» σημεία (μόνο με περίγραμμα) αντιστοιχούν σε πειράματα με 0% περιεκτικότητα σωματιδίων.

Είναι προφανές ότι το μοντέλο που συμπεριλαμβάνει την παρουσία των σωματιδίων στην εξίσωσή του προβλέπει με μεγαλύτερη ακρίβεια τον συντελεστή συναγωγής, καθώς τα σημεία του έχουν μικρότερη απόκλιση από την ευθεία της ιδανικής περιπτώσεως σε σχέση με τα σημεία του μοντέλου που αγνοεί την παρουσία των σωματιδίων.

Μια ακόμη ενδιαφέρουσα παρατήρηση πάνω στο γράφημα μπορεί να γίνει για τα σημεία που αντιπροσωπεύουν πειράματα με ψύξη. Όπως προαναφέρθηκε, τα πειράματα με ψύξη δεν συμπεριλήφθηκαν στη διαδικασία παραγωγής του

μοντέλου. Υπολογίστηκε, όμως, ο θεωρητικός συντελεστής συναγωγής για τα τρία αυτά πειράματα με τη χρήση του νέου μοντέλου που υπολογίζει και τη συγκέντρωση σωματιδίων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παραπάνω γράφημα με μπλε τριγωνικά σημεία. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι βρίσκονται «πάνω» από την ευθεία ιδανικής κατάστασης, στην οποία ο θεωρητικός συντελεστής συναγωγής είναι ίσος με τον πειραματικό. Αυτό σημαίνει ότι ο συντελεστής συναγωγής που υπολογίζεται με το μοντέλο είναι μεγαλύτερος του πραγματικού για τα τρία αυτά πειράματα. Αυτό είναι ακόμη μια απόδειξη ότι η ψύξη μειώνει τον συντελεστή συναγωγής στο τοίχωμα του αγωγού.

### 4.3. Πτώση Πίεσης

Εκτός από τη θερμοκρασία του φέροντος ρευστού, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μετράται και καταγράφεται και η πίεση μέσα στον αγωγό όπου ρέει το προϊόν. Στο σημείο αυτό, τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τα πειράματα θα παρουσιαστούν με τη μορφή γραφημάτων. Ακόμη, είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι στα αποτελέσματα, η πτώση πίεσης παρουσιάζεται με τη μορφή του συντελεστή τριβής Fanning. Τα δύο αυτά μεγέθη συνδέονται με την εξίσωση (78):

$$f = \frac{1}{2} \cdot \frac{D}{\rho \cdot u^2} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (78)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, η πυκνότητα  $\rho$  του προϊόντος είναι ο σταθμικός μέσος της πυκνότητας των επιμέρους φάσεων και υπολογίζεται από την εξίσωση  $\rho = (1 - \Phi_p) \cdot \rho_{fluid} + \Phi_p \cdot \rho_{particles}$ . Ακόμη, η πτώση πίεσης  $\Delta P$  προκύπτει άμεσα από τις μετρήσεις πίεσης στην είσοδο και έξοδο του εναλλάκτη. Τέλος, όσον αφορά την ταχύτητα ροής  $u$ , αυτό που μετράται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων είναι η ογκομετρική παροχή του ρευστού από τη Δεξαμενή Ρευστού (Liquid Tank) και η μαζική παροχή του «πολτού» από τη Δεξαμενή Πολτού (Slurry Tank). Για τον υπολογισμό της ταχύτητας, η μαζική παροχή του ρεύματος «πολτού» μετατρέπεται σε ογκομετρική μέσω της πυκνότητας και οι δύο παροχές αθροίζονται για να υπολογιστεί η συνολική. Έπειτα, με τη βοήθεια της εξίσωσης  $\dot{v}_p = u \cdot \pi \cdot r_{tube}^2$ , η ογκομετρική παροχή του διαφασικού προϊόντος μετατρέπεται σε ταχύτητα ροής  $u$ .

Στον πίνακα που ακολουθεί συγκεντρώνονται οι τιμές για την μετρηθείσα πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού και για τον συντελεστή τριβής Fanning, που υπολογίστηκε από την εξίσωση (78).

**Πίνακας 13: Πειραματικές τιμές πτώσης πίεσης και συντελεστή τριβής Fanning για τα πειράματα HEX001 - HEX024**

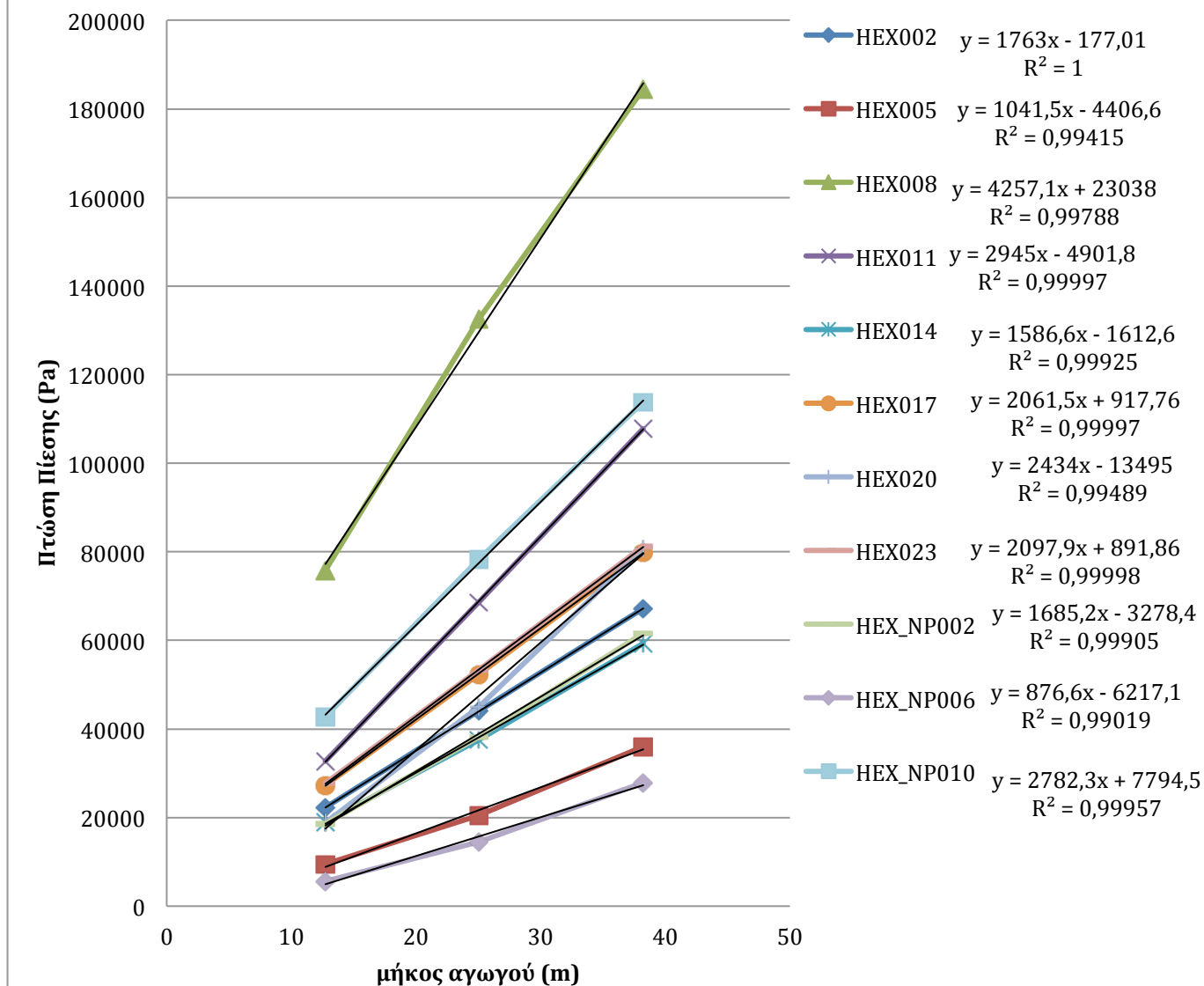
Ταυτότητα πειράματος	Πτώση πίεσης (bar)	Πτώση πίεσης (Pa)	Συντελεστής τριβής Fanning f
HEX001	0,34381	34380,5	0,03191
HEX002	0,67221	67220,6	0,01556
HEX003	0,93871	93870,8	0,00968
HEX004	0,15809	15808,7	0,01472
HEX005	0,35982	35981,6	0,00836
HEX006	0,57086	57086,2	0,00590
HEX007	0,75058	75057,8	0,06933
HEX008	1,84413	184412,6	0,04276
HEX009	2,47273	247272,5	0,02560
HEX010	0,46591	46590,6	0,04296
HEX011	1,07813	107813,0	0,02482
HEX012	1,02762	102761,6	0,01064
HEX013	0,33887	33887,1	0,03184
HEX014	0,59359	59359,3	0,01392
HEX015	0,82171	82171,0	0,00856
HEX016	0,47995	47994,8	0,04415
HEX017	0,79823	79823,2	0,01833
HEX018	0,60371	60371,3	0,02466
HEX019	0,46354	46353,5	0,04289
HEX020	0,80807	80806,8	0,01866
HEX021	0,96589	96588,6	0,00999
HEX022	0,56569	56569,0	0,01914
HEX023	0,81179	81179,3	0,01867
HEX024	1,19664	119663,7	0,01233

#### **4.3.1. Εξέλιξη της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού**

Η πίεση στο εσωτερικό του αγωγού μετράται σε 4 σημεία που σχεδόν ισαπέχουν μεταξύ τους. Ο σκοπός αυτού του σχεδιασμού είναι να ερευνηθεί βαθύτερα το πώς αυξάνεται η πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού. Γραμμική αύξηση αναμένεται, καθώς τα τμήματα αγωγού που παρεμβάλλονται μεταξύ των σημείων μέτρησης είναι όμοια σε μήκος και σχήμα. Στο ακόλουθο γράφημα παρουσιάζεται η μεταβολή της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού. Επειδή τα πειράματα είναι πολλά σε πλήθος και αν συμπεριλαμβάνονταν όλα στο ίδιο γράφημα θα ήταν αδύνατο να εξαχθεί συμπέρασμα, στο επόμενο γράφημα παρουσιάζονται μόνο κάποια αντιπροσωπευτικά που έχουν επιλεγεί.



## Pressure Drop against tube length

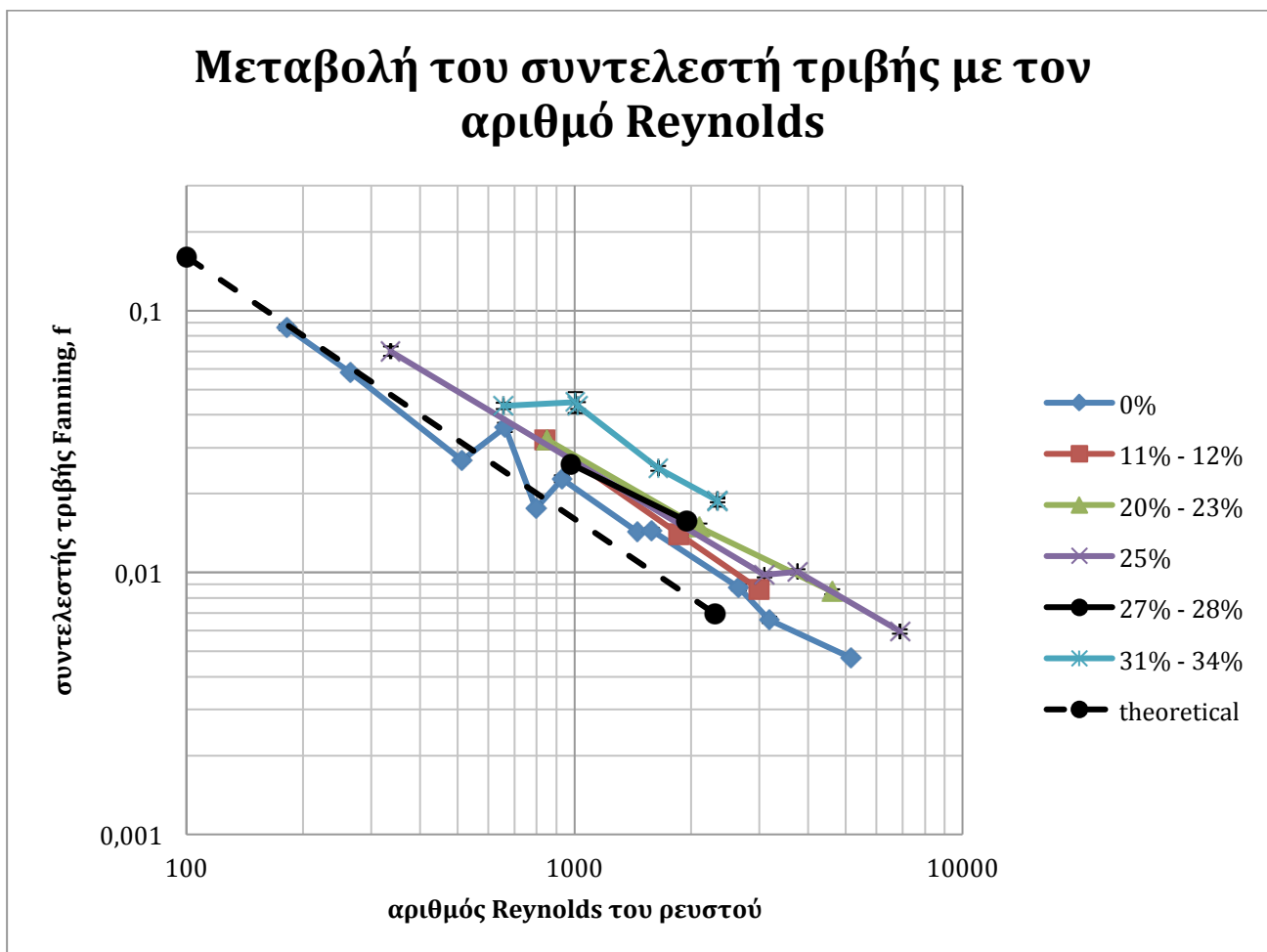


Γράφημα 6: Μεταβολή της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού για αντιπροσωπευτικά πειράματα

Στο γράφημα φαίνεται ξεκάθαρα ότι η πτώση πίεσης αυξάνεται κατά μήκος του αγωγού γραμμικά. Στις καμπύλες που αντιστοιχούν στα διάφορα πειράματα προσαρμόστηκε γραμμή τάσης και η εξίσωση κάθε μίας από αυτές σημειώνεται στο γράφημα δίπλα στο αντίστοιχο πείραμα. Οι εξισώσεις των γραμμών τάσης αποκαλύπτουν γραμμική αύξηση της πτώσης πίεσης με  $R^2 > 0,99$  σε κάθε περίπτωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο, γιατί τα σημεία μέτρησης ισαπέχουν, η διάμετρος του αγωγού είναι σταθερή και τα ειδικά τμήματα αγωγού (π.χ. στενώσεις, βαλβίδες, καμπύλες) είναι τα ίδια και για τα 3 διαστήματα που μεσολαβούν μεταξύ των σημείων μέτρησης.

#### 4.3.2. Επίδραση της συγκέντρωσης σωματιδίων στην πτώση πίεσης

Για να ερευνηθεί η επίδραση της συγκέντρωσης σωματιδίων στην πτώση πίεσης, χρησιμοποιήθηκε η κατηγοριοποίηση των πειραμάτων με βάση τη συγκέντρωση σωματιδίων που παρουσιάστηκε ανωτέρω. Ο συντελεστής τριβής Fanning υπολογίστηκε για το κάθε πείραμα και σχεδιάστηκε σε γράφημα η μεταβολή του σε σχέση με τον αριθμό Reynolds του φέροντος ρευστού. Πρέπει να σημειωθεί ότι στο ακόλουθο γράφημα παρουσιάζονται μόνο πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν μικροί κύβοι καρότου.



Γράφημα 7: Μεταβολή του συντελεστή τριβής με τον αριθμό Reynolds του ρευστού σε άξονες με λογαριθμική κλίμακα για πειράματα με μικρούς κύβους καρότου σε διαφορετικές συγκεντρώσεις

Στο γράφημα έχουν σχεδιαστεί οι καμπύλες που περιγράφουν τη μεταβολή του συντελεστή τριβής με τον αριθμό Reynolds για κάθε ομάδα πειραμάτων. Επιπροσθέτως, στο γράφημα έχει συμπεριληφθεί και η ευθεία που περιγράφει τη θεωρητική σχέση που συνδέει τις δύο μεταβλητές (εξίσωση 74) για μονοφασικό ρευστό στην περιοχή της στρωτής ροής, δηλαδή  $Re < 2300$ . Επίσης, οι άξονες του γραφήματος είναι βαθμονομημένοι σε λογαριθμική κλίμακα.

Αρχικά, παρατηρείται μια γενική τάση που δείχνει ότι ο συντελεστής τριβής αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης σωματιδίων. Σε ορισμένες περιπτώσεις η τάση αυτή δεν επαληθεύεται, αλλά αυτό πιθανότατα συμβαίνει

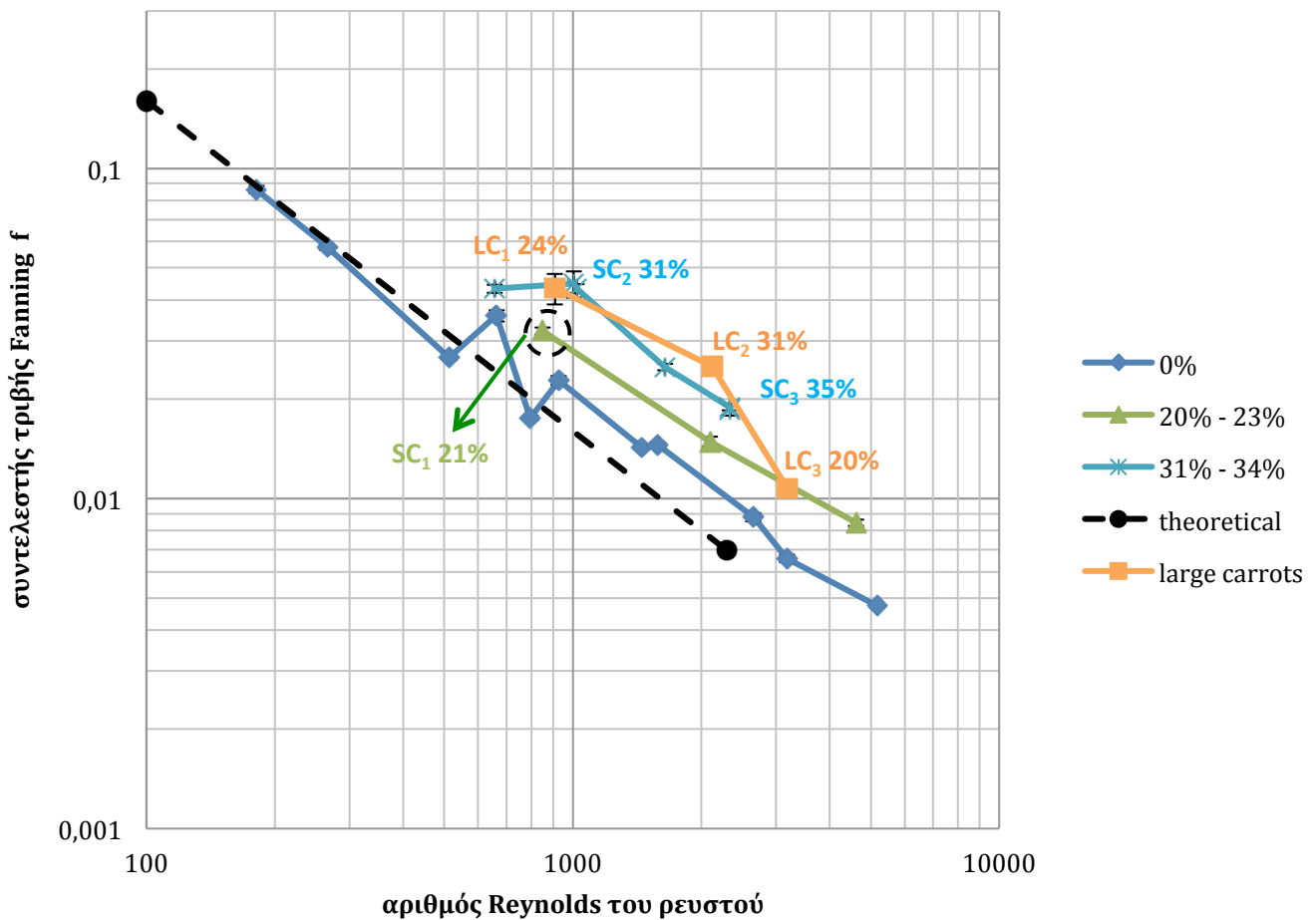
λόγω πειραματικών σφαλμάτων τα οποία έχουν μεταφερθεί στους υπολογισμούς. Πιο συγκεκριμένα, τα σφάλματα αυτά πιστεύεται ότι πηγάζουν από τις παραδοχές που έγιναν στις μετρήσεις του ιξώδους του φέροντος ρευστού. Δείγμα ρευστού δεν λήφθηκε για κάθε ένα πείραμα ξεχωριστά, λόγω του υψηλού κόστους της ανάλυσης. Για το λόγο αυτό, λήφθηκε η παραδοχή ότι κάποια πειράματα εμφανίζουν μεγάλες ομοιότητες ως προς το ιξώδες του φέροντος ρευστού. Αυτή η παραδοχή επαληθεύτηκε για μία περίπτωση και κρίθηκε σωστή. Ωστόσο, πιθανώς να επιφέρει μείωση της ακρίβειας των υπολογισμών και λάθη τα οποία πολλαπλασιάζονται και έχουν ως συνέπεια την παρατήρηση μη αναμενόμενων φαινομένων στο παραπάνω γράφημα. Επίσης, μη αναμενόμενες είναι και οι μεγάλες διακυμάνσεις που παρατηρούνται μεταξύ των σημείων της καμπύλης που αντιστοιχεί σε πειράματα με 0% σωματίδια. Η καμπύλη αυτή θα έπρεπε να είναι σχεδόν απόλυτα ευθεία, καθώς δεν υπάρχουν σωματίδια που να προκαλούν διακυμάνσεις. Το αντίθετο, όμως, παρατηρείται και μπορεί να αποδοθεί σε λάθη είτε πειραματικά είτε υπολογιστικά τα οποία δεν έχουν αποκαλυφθεί παρά την ενδελεχή έρευνα. (βλ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4)

Το δεύτερο ενδιαφέρον εύρημα που προκύπτει από την παρατήρηση του παραπάνω γραφήματος είναι ότι όλες οι καμπύλες εμφανίζουν γραμμική τάση και αυτή η τάση διατηρείται και για τιμές αριθμού Reynolds μεγαλύτερες από 2300, η οποία και είναι το θεωρητικό όριο της στρωτής ροής για μη Νευτωνικά ρευστά. Το αναμενόμενο είναι οι καμπύλες να αλλάζουν τάση κοντά σε αυτή την τιμή. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί ως ένα σημάδι πως η περιοχή τιμών της στρωτής ροής επεκτείνεται λόγω της παρουσίας των σωματιδίων στο μίγμα. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώνεται για όλες τις καμπύλες που ξεπερνούν την οριακή τιμή του αριθμού Reynolds για στρωτή ροή. Μια πιθανή εξήγηση για το φαινόμενο αυτό είναι ότι η κίνηση των σωματιδίων στο ρευστό δυσχεραίνει τη δημιουργία δινών διατηρώντας έτσι τη στρωτή ροή για υψηλότερες τιμές αριθμού Reynolds. Ωστόσο, ακόμα κι αν η θεωρία αυτή αποδειχτεί αληθής, θα εξηγούσε μόνο τις περιπτώσεις πειραμάτων με σωματίδια και όχι την περίπτωση της καμπύλης που αντιστοιχεί σε πειράματα χωρίς σωματίδια στο ρευστό. Ίσως, λοιπόν, η εξήγηση να βρίσκεται στα ρεολογικά χαρακτηριστικά του διαλύματος CMC, που χρησιμοποιήθηκε ως φέρον ρευστό, και στη συμπεριφορά του σχετικά με την πτώση πίεσης σε αγωγό.

#### **4.3.3. Επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων στην πτώση πίεσης**

Το γράφημα της προηγούμενης παραγράφου υπέστη κάποιες μετατροπές, ώστε να μελετηθεί η επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων στην πτώση πίεσης. Έτσι, στο γράφημα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή τριβής με τον αριθμό Reynolds για τη θεωρητική περίπτωση ρευστού σε στρωτή ροή, τις ομάδες πειραμάτων με συγκέντρωση σωματιδίων 0%, 20% - 23% και 31% - 34% και τα πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν κύβοι καρότου μεγάλου μεγέθους. Οι καμπύλες και τα σημεία αυτών συγκρίνονται μεταξύ τους με στόχο να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων στην πτώση πίεσης στον αγωγό.

## Μεταβολή του συντελεστή τριβής με τον αριθμό Reynolds



Γράφημα 8: Μεταβολή του συντελεστή τριβής με τον αριθμό Reynolds σε άξονες με λογαριθμική κλίμακα για πειράματα με μικρούς και με μεγάλους κύβους καρότου

Ο αριθμός δίπλα στα σημεία δηλώνει την % κ.β. περιεκτικότητα του προϊόντος σε σωματίδια και με τα γράμματα «SC» περιγράφονται τα πειράματα με μικρούς κύβους καρότου (=small carrots) και με «LC» τα πειράματα με μεγάλους κύβους καρότου (=large carrots).

Το πρώτο πείραμα με μεγάλα σωματίδια  $LC_1$  συγκρίνεται με τα  $SC_1$  και  $SC_2$ . Με κριτήριο τη συγκέντρωση σωματιδίων των πειραμάτων, το  $LC_1$  θα έπρεπε να εμφανίζει συντελεστή τριβής μεταξύ των αντίστοιχων των άλλων δύο πειραμάτων. Ωστόσο, ο συντελεστής τριβής του  $LC_1$  είναι σχεδόν ίσος με αυτόν του  $SC_2$ , παρά τη μεγάλη διαφορά τους ως προς τη συγκέντρωση σωματιδίων. Έτσι, φαίνεται ότι υπάρχει κάποια άλλη επίδραση η οποία αυξάνει τον συντελεστή τριβής και αυτή πιστεύεται πως είναι η διαφορά μεγέθους σωματιδίων μεταξύ των συγκρινόμενων πειραμάτων.

Το δεύτερο πείραμα με μεγάλα σωματίδια  $LC_2$  είναι συγκρίσιμο με το  $SC_3$ , καθώς έχουν παρόμοιο αριθμό Reynolds και συγκέντρωση σωματιδίων. Η σύγκριση

αυτή, λοιπόν, δείχνει ότι το LC<sub>2</sub> έχει σημαντικά μεγαλύτερο συντελεστή τριβής από το αντίστοιχο SC<sub>3</sub>.

Το τρίτο πείραμα με μεγάλα σωματίδια LC<sub>3</sub> βρίσκεται εκτός της θεωρητικής περιοχής της στρωτής ροής. Δεν είναι συγκρίσιμο με κάποιο πείραμα με μικρά σωματίδια, αλλά παρατηρείται ότι συμπίπτει με την καμπύλη που αντιστοιχεί σε πειράματα με μικρά σωματίδια συγκέντρωσης 20% - 23%. Το LC<sub>3</sub> έχει συγκέντρωση σωματιδίων 20%, οπότε μπορεί να διατυπωθεί το συμπέρασμα ότι στην περίπτωση αυτή δεν παρατηρείται καμία επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων στον συντελεστή τριβής.

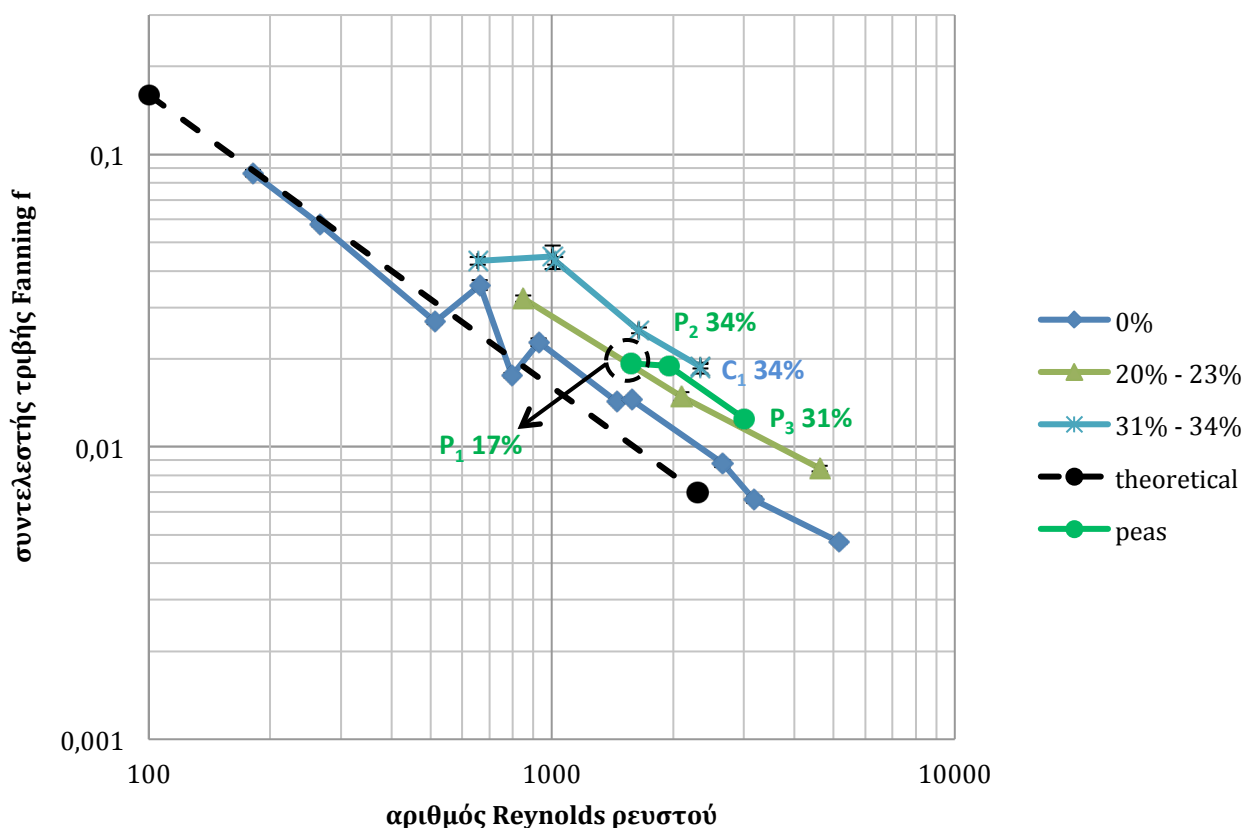
Συνοψίζοντας, λοιπόν, το συμπέρασμα που προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα είναι ότι στην θεωρητική περιοχή της στρωτής ροής (δηλαδή για  $Re < 2300$ ) ο συντελεστής τριβής αυξάνει με την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων.

#### **4.3.4. Επίδραση του σχήματος των σωματιδίων στην πτώση πίεσης**

Το γράφημα της προηγούμενης παραγράφου υπέστη κάποιες μετατροπές, ώστε να μελετηθεί η επίδραση του σχήματος των σωματιδίων στην πτώση πίεσης. Έτσι, στο γράφημα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή τριβής με τον αριθμό Reynolds για τη θεωρητική περίπτωση ρευστού σε στρωτή ροή, τις ομάδες πειραμάτων με συγκέντρωση σωματιδίων 0%, 20% - 23% και 31% - 34% και τα πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν μπιζέλια. Οι καμπύλες και τα σημεία αυτών συγκρίνονται μεταξύ τους με στόχο να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση του σχήματος των σωματιδίων στην πτώση πίεσης στον αγωγό. Ο αριθμός δίπλα στα σημεία δηλώνει την % κ.β. περιεκτικότητα του προϊόντος σε σωματίδια και με το γράμμα «C» περιγράφονται τα πειράματα με κύβους καρότου (=carrots) και με «P» τα πειράματα με μπιζέλια (=peas).

Από το ακόλουθο γράφημα είναι δύσκολο να εξαχθούν συμπαγή συμπεράσματα γιατί τα σημεία που αντιπροσωπεύουν τα πειράματα με μπιζέλια δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα υπόλοιπα. Παρόλα αυτά θα επιχειρηθεί η σύγκριση κάποιων από αυτά.

## Μεταβολή του συντελεστή τριβής με τον αριθμό Reynolds



Γράφημα 9: Μεταβολή του συντελεστή τριβής με τον αριθμό Reynolds σε άξονες με λογαριθμική κλίμακα για πειράματα με μικρούς κύβους καρότου και μπιζέλια

Το P<sub>2</sub> μπορεί να συγκριθεί με το C<sub>1</sub> και είναι φανερό ότι έχουν ίσο αριθμό Reynolds και συγκέντρωση σωματιδίων. Έχουν, επίσης, και ίσο συντελεστή τριβής και αυτό δείχνει ότι η διαφορά στο σχήμα των σωματιδίων δεν επιδρά σημαντικά στον συντελεστή τριβής. Ακόμη, το P<sub>1</sub> παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με την καμπύλη πειραμάτων με κύβους καρότου συγκέντρωσης 20% - 23%, ενώ το P<sub>3</sub> δεν είναι άμεσα συγκρίσιμο με κάποιο άλλο σημείο ή καμπύλη.

Συμπερασματικά, το σφαιρικό σχήμα των μπιζελιών δεν επιφέρει καμία σημαντική μεταβολή στον συντελεστή τριβής και κατ' επέκταση στην πτώση πίεσης στον αγωγό.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**

### **5.1. Συμπεράσματα**

#### **5.1.1. Μεταφορά θερμότητας**

Τα πειράματα οδήγησαν σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα όσον αφορά τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του τοιχώματος του αγωγού και του φέροντος ρευστού. Αρχικά, παρατηρήθηκε ότι η παρουσία των σωματιδίων έχει θετική επίδραση στον συντελεστή συναγωγής. Αυτό σημαίνει ότι ο συντελεστής αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης σωματιδίων του προϊόντος. Μια πιθανή εξήγηση στο φαινόμενο αυτό είναι ότι τα σωματίδια αλληλεπιδρούν με την εσωτερική επιφάνεια του αγωγού μειώνοντας το πάχος του οριακού στρώματος ρευστού. Κατά συνέπεια, η συντελεστής συναγωγής που περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας διαμέσου αυτού του οριακού στρώματος αυξάνεται.

Επίσης, πραγματοποιήθηκαν τρία πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν κύβοι καρότου μεγαλύτερου μεγέθους, με στόχο να διερευνηθεί η επίδραση του μεγέθους του σωματιδίου στη μεταφορά θερμότητας στο τοίχωμα του αγωγού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συγκεκριμένη πειραματική παράμετρος δεν έχει καμία σημαντική επίδραση στον συντελεστή συναγωγής που μελετήθηκε.

Για να ερευνηθεί η επίδραση του σχήματος των σωματιδίων στη μεταφορά θερμότητας, τρία πειράματα με χρήση μπιζελιών ως σωματίδια πραγματοποιήθηκαν. Με τον τρόπο αυτό, προσομοιάστηκε με μεγάλο βαθμό το σφαιρικό σχήμα και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα των πειραμάτων όπου χρησιμοποιήθηκαν κύβοι καρότου. Σε δύο από τα τρία πειράματα με μπιζέλια η συγκέντρωση αυτών στο προϊόν ήταν υψηλή (31% και 34%) και σε ένα χαμηλότερη (17%). Στο πείραμα με τη χαμηλότερη συγκέντρωση σωματιδίων δεν παρατηρήθηκε καμία επίδραση του σχήματος των σωματιδίων στον συντελεστή συναγωγής. Στα δύο πειράματα, όμως, με υψηλή συγκέντρωση μπιζελιών σημειώθηκε ότι ο συντελεστής συναγωγής είναι μικρότερος από τα αντίστοιχα πειράματα με κύβους καρότου. Έτσι, όπως φαίνεται, σε υψηλές τιμές συγκέντρωσης σωματιδίων το σφαιρικό σχήμα των μπιζελιών μειώνει τον συντελεστή συναγωγής στην εσωτερική επιφάνεια του αγωγού.

Ακόμη, στο πλάνο των πειραμάτων συμπεριλαμβάνονται και τρία πειράματα με ψύξη του προϊόντος στο στάδιο της θερμικής κατεργασίας. Τα αποτελέσματα των τριών αυτών πειραμάτων έδειξαν ότι η ψύξη επιφέρει σημαντική μείωση στον συντελεστή συναγωγής μεταξύ του τοιχώματος του αγωγού και του φέροντος ρευστού. Αυτή είναι μια γνωστή θεωρία η οποία επιβεβαιώθηκε μέσα από τα πειράματα της παρούσας εργασίας.

Σε μια προσπάθεια να δημιουργηθεί ένα εργαλείο υπολογισμού του συντελεστή συναγωγής, που περιγράφει τα μελετηθέντα φαινόμενα μεταφοράς, για ένα

ευρύ φάσμα παραμέτρων, τα αποτελέσματα των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν για να παραχθεί ένα μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν δύο προσεγγίσεις: η μία δεν «λαμβάνει υπόψη» την παρουσία των σωματιδίων στο προϊόν, ενώ η άλλη υπολογίζει τα σωματίδια και την επίδραση αυτών. Στο δεύτερο μοντέλο, η παρουσία των σωματιδίων στο μίγμα περιγράφεται από έναν νέο όρο που εισήχθη στην εξίσωση και αντιστοιχεί στο κλάσμα της στερεής φάσης του προϊόντος (ή % w/w περιεκτικότητα σωματιδίων). Το μοντέλο αυτό προσαρμόζεται στα αποτελέσματα των πειραμάτων με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με το μοντέλο που αγνοεί την παρουσία των σωματιδίων στο μίγμα. Αυτό είναι επόμενο, επειδή η επίδραση των σωματιδίων στον συντελεστή συναγωγής είναι σημαντική και αυτό αποδείχθηκε παραπάνω μέσα από την μελέτη των αποτελεσμάτων. Έτσι, στην παρούσα εργασία προτείνεται το μοντέλο που περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Nu = 0,567 \cdot Re^{0,348} \cdot Pr^{0,194} \cdot (1 + \Phi)^{4,196}$$

### **5.1.2. Πτώση Πίεσης**

Ο δεύτερος τομέας που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία είναι η επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας στην πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού στον οποίο ρέει το προϊόν. Η πτώση πίεσης στα αποτελέσματα περιγράφεται από τον συντελεστή τριβής Fanning και τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάστηκαν σε γράφημα που δείχνει τη μεταβολή του συντελεστή τριβής με τον αριθμό Reynolds του φέροντος ρευστού.

Σε ό,τι αφορά την επίδραση των σωματιδίων στην πτώση πίεσης, παρατηρήθηκε ότι η πτώση πίεσης αυξάνει με την αύξηση της συγκέντρωσης σωματιδίων. Αυτό το γενικό συμπέρασμα δεν επιβεβαιώνεται για κάθε περίπτωση πειράματος. Αυτό πιθανώς οφείλεται σε σφάλματα κατά τη μέτρηση ιξώδους του φέροντος ρευστού ή κατά τη συλλογή των δειγμάτων. Μια άλλη πιθανή αιτία είναι το ότι τα σωματίδια με την προσθήκη τους στο διάλυμα CMC απελευθερώνουν κάποια ποσότητα νερού και προκαλούν αραίωση του αρχικού διαλύματος. Αυτό οδηγεί σε μείωση του ιξώδους του φέροντος ρευστού και κατ'επέκταση και της πτώσης πίεσης. Έτσι, σε κάποιες περιπτώσεις παρατηρείται ότι η πτώση πίεσης μειώνεται με τη συγκέντρωση σωματιδίων, αλλά μόνο για χαμηλές τιμές συγκέντρωσης σωματιδίων (<25%).

Ένα ακόμη ενδιαφέρον εύρημα που παρατηρήθηκε στο γράφημα των αποτελεσμάτων είναι ότι οι καμπύλες που δείχνουν τη μεταβολή του συντελεστή τριβής με τον αριθμό Reynolds εμφανίζουν γραμμική τάση για όλες τις κατηγορίες πειραμάτων. Αυτό είναι αναμενόμενο να συμβαίνει μόνο στην περιοχή τιμών της στρωτής ροής. Όταν η θεωρητική οριακή τιμή της στρωτής ροής ξεπερνιέται και το ρευστό εισέρχεται σε μεταβατική κατάσταση ροής, η καμπύλη αναμένεται να αλλάξει τάση. Στην παρούσα εργασία παρατηρείται ότι η γραμμικότητα των καμπυλών διατηρείται για τιμές αριθμού Reynolds πολύ μεγαλύτερες της οριακής τιμής για την περιοχή της στρωτής ροής ρευστού.



Αυτό το φαινόμενο προφανώς προκαλείται από την ύπαρξη των σωματιδίων στο ρευστό διαφασικό τρόφιμο και πιστεύεται ότι η κίνησή τους εμποδίζει τη δημιουργία δινών διατηρώντας έτσι τη στρωτή ροή.

Επίσης, αντικείμενο έρευνας ήταν και η επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων στην πτώση πίεσης. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων με μεγάλα σωματίδια συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα των πειραμάτων με μικρά σωματίδια και το συμπέρασμα είναι ότι στην περιοχή της στρωτής ροής η πτώση πίεσης στον αγωγό αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων. Για τιμές αριθμού Reynolds που ξεπερνούν τη θεωρητική οριακή τιμή για τη στρωτή ροή, δεν παρατηρήθηκε καμία σημαντική επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων στην πτώση πίεσης στον αγωγό.

Τέλος, εξετάστηκε και η επίδραση του σχήματος των σωματιδίων στην πτώση πίεσης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα πειράματα με μπιζέλια με τα αντίστοιχα των πειραμάτων με κύβους καρότου οδήγησε στο συμπέρασμα ότι τα δύο είδη σωματιδίων παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά ως προς την πτώση πίεσης στον αγωγό, καθώς δεν σημειώθηκε καμία σημαντική επίδραση του σφαιρικού σχήματος στον συντελεστή τριβής  $f$ .

## **5.2. Προτάσεις για Βελτίωση και Μελλοντική Έρευνα**

### **5.2.1. Βελτιώσεις**

Το μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων και τα βασικά του μέρη περιγράφονται παραπάνω. Είναι, όμως απαραίτητο στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι κατασκευάστηκε κατά παραγγελία για να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του project (custom made) και δεν είναι ένα εμπορικό μηχάνημα. Για το λόγο αυτό, τα τεχνικά προβλήματα ήταν αναπόφευκτα. Αρκετές εβδομάδες αφιερώθηκαν στην επίλυση τεχνικών προβλημάτων και σε απαραίτητες μετατροπές, ώστε να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία της γραμμής πάντα σε σχέση με τους σκοπούς των πειραμάτων. Στην παρούσα αναφορά ο στόχος δεν είναι να καταγραφούν τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν και λύθηκαν ή όχι. Ωστόσο, στο σημείο αυτό θα αναλυθεί το σημαντικότερο τεχνικό εμπόδιο που συναντήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και θα προταθούν λύσεις για την πλήρη εξάλειψή του σε πιθανά μελλοντικά πειράματα.

Το πιο σοβαρό τεχνικό εμπόδιο προκλήθηκε από την Δεξαμενή Πολτού (Slurry Tank). Η δεξαμενή που εξ αρχής είχε επιλεγεί για τη συγκεκριμένη λειτουργία ήταν απολύτως ακατάλληλη. Όχι μόνο δε λειτουργούσε επικουρικά αλλά δυσχέραινε την άντληση των σωματιδίων από την αντίστοιχη αντλία (M20). Τα βασικά μειονεκτήματα της συγκεκριμένης δεξαμενής είναι ότι είχε επίπεδο πυθμένα και έναν αναδευτήρα μικρής διαμέτρου. Γενικά, ήταν εμφανώς σχεδιασμένη για λεπτόρευστα υγρά. Κατά συνέπεια, τα σωματίδια βυθίζονταν στον πυθμένα της δεξαμενής και ποτέ δεν κινούνταν προς την έξοδό της. Η αντλία που ήταν συνδεδεμένη με τη δεξαμενή αντλούσε μόνο το φέρον ρευστό

χωρίς σωματίδια, καθώς το ρευστό χωρίς τη βοήθεια ενός αναδευτήρα δεν ήταν ικανό να παρασύρει τα σωματίδια προς την κατεύθυνση της ροής του. Το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε αντικαθιστώντας την παλιά δεξαμενή με μια νέα, η οποία διέθετε κωνικό πυθμένα και έναν αναδευτήρα μεγάλης διαμέτρου, ο οποίος «σαρώνει» τα τοιχώματα και τον πυθμένα ωθώντας τα σωματίδια προς την έξοδο της δεξαμενής. Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζονται και οι δύο δεξαμενές.



Εικόνα 25: Η παλιά και η νέα Δεξαμενή "Πολτού" (Slurry Tank) και η σύνδεση της τελευταίας με την αντλία M20

Η διαφορά μεταξύ των δύο δεξαμενών μπορεί να παρατηρηθεί και από την εικόνα. Η αντικατάσταση της δεξαμενής υπήρξε καταλυτική για τη συνέχιση των πειραμάτων. Ωστόσο, κάποια προβλήματα συνέχιζαν να αποτελούν τροχοπέδη στην επίτευξη των βέλτιστων συνθηκών ακόμα και μετά τη σύνδεση της νέας δεξαμενής. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην εικόνα, η δεξαμενή είναι τοποθετημένη σε σχετικά μεγάλη απόσταση από την αντλία και η σύνδεσή τους γίνεται με τη χρήση εύκαμπτου λαστιχένιου αγωγού, και όχι ενός λείου μεταλλικού σωλήνα. Αυτοί είναι δύο περιοριστικοί παράγοντες στην ροή του διφασικού προϊόντος προς την αντλία. Η απόσταση μεταξύ της δεξαμενής και της αντλίας και η αυξημένη τριβή στο εσωτερικό τοίχωμα του λαστιχένιου αγωγού ήταν εμπόδια που δυσχέραιναν την ροή των σωματιδίων από τη δεξαμενή προς την αντλία. Ως αποτέλεσμα, το μίγμα που φτάνει στην αντλία (ο

«πολτός») δεν έχει τη συγκέντρωση σωματιδίων που έχει μέσα στη δεξαμενή αλλά χαμηλότερη. Συγκεκριμένα, η μέγιστη συγκέντρωση σωματιδίων του μίγματος που μπορεί να αντληθεί από την αντλία M20 είναι 40%, ακόμη κι αν στο εσωτερικό της δεξαμενής η συγκέντρωση είναι υψηλότερη.

Όσον αφορά τις προτάσεις για πλήρη εξάλειψη των τεχνικών εμποδίων που μόλις περιγράφηκαν, προτείνεται η τοποθέτηση της δεξαμενής όσο το δυνατόν πιο κοντά στην αντλία και η σύνδεσή τους με λείο μεταλλικό αγωγό. Έτσι, πιστεύεται ότι η συγκέντρωση σωματιδίων στην αναρρόφηση της αντλίας θα είναι ίση με αυτή του περιεχομένου της δεξαμενής, η οποία πλέον δε θα αποτελεί περιοριστικό παράγοντα στην επιτυχία των πειραμάτων.

### **5.2.2. Μελλοντική έρευνα**

Η έρευνα της επίδρασης των πειραματικών παραμέτρων στη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του τοιχώματος του αγωγού και του ρευστού και στην πτώση πίεσης δεν απάντησε μόνο αρκετά ερωτήματα αλλά δημιούργησε και πολλά νέα. Επίσης, έδωσε μερικές ιδέες για μελλοντική έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Όπως περιγράφηκε στο μέρος του πειραματικού σχεδιασμού, εκτός από τη συγκέντρωση σωματιδίων και τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ρευστού, μελετήθηκε και η επίδραση του μεγέθους και του σχήματος των σωματιδίων στη μεταφορά θερμότητας και πτώση πίεσης. Σε κάποιες περιπτώσεις υπήρχαν ενδείξεις ότι υπάρχει σημαντική επίδραση των παραμέτρων αυτών και σε κάποιες άλλες όχι. Επίσης, τα συμπεράσματα που σχηματίστηκαν κρίνονται μεν αξιόπιστα αλλά είναι μόνο ποιοτικά, καθώς ο περιορισμένος αριθμός των πειραμάτων δεν επέτρεπε περαιτέρω ανάλυση. Προτείνονται, λοιπόν, περισσότερα πειράματα και βαθύτερη διερεύνηση των επιδράσεων αυτών, που πιθανώς να οδηγήσουν σε ποσοτικά αποτελέσματα και συμπεράσματα.

Ακόμη, ενδιαφέροντα ευρήματα προέκυψαν και από τη μελέτη των πειραμάτων με ψύξη του προϊόντος. Επιβεβαιώθηκε ότι η κατεργασία της ψύξης μειώνει τον συντελεστή συναγωγής σημαντικά και γ'αυτο τα συγκεκριμένα τρία πειράματα δεν συμπεριλήφθηκαν στην παραγωγή του μοντέλου. Ωστόσο, η επίδραση της ψύξης θα μπορούσε να προβλέπεται από ένα μοντέλο το οποίο θα ήταν ακόμη πιο γενικό στην εφαρμογή του. Πιθανώς θα μπορούσε να προστεθεί ένας νέος όρος στην εξίσωση που θα αντιπροσωπεύει την επίδραση της ψύξης. Βέβαια, στην παρούσα εργασία αυτό κρίθηκε αδύνατο, γιατί το πλήθος των πειραμάτων αυτών ήταν περιορισμένο. Έτσι, προτείνεται περισσότερη μελέτη της επίδρασης της ψύξης και υποστήριξη της ανάλυσης με πληθώρα πειραμάτων.



## ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

### Συμβολισμοί του λατινικού αλφάβητου

Σύμβολο Μονάδα SI Επεξήγηση

$A$	$m^2$	επιφάνεια
$A_{mean}$	$m^2$	μέση λογαριθμική επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας
$A_{IN}$	$m^2$	εσωτερική επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας
$A_{OUT}$	$m^2$	εξωτερική επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας
$A_t$	$m^2$	επιφάνεια διατομής του αγωγού
$C_{p,M}$	$J/kg^{\circ}C$	ειδική θερμοχωρητικότητα του θερμαντικού μέσου
$C_{p,F}$	$J/kg^{\circ}C$	ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού
$C_{p,P}$	$J/kg^{\circ}C$	ειδική θερμοχωρητικότητα των σωματιδίων
$C_{p,susp}$	$J/kg^{\circ}C$	ειδική θερμοχωρητικότητα του εναιωρήματος, δηλαδή του διφασικού προϊόντος
$C_f$	-	συντελεστής αναλογίας που συσχετίζει την ταχύτητα του ρευστού με τη μέση συνολική ταχύτητα του μίγματος
$C_p$	-	συντελεστής αναλογίας που συσχετίζει την ταχύτητα των σωματιδίων με τη μέση συνολική ταχύτητα του μίγματος
$D$	$m$	διάμετρος αγωγού
$D_H$	$m$	υδραυλική διάμετρος αγωγού
$d_p$	$m$	διάμετρος σωματιδίου
$F$	$N$	δύναμη διάτμησης
$Fo$	-	αριθμός Fourier
$f$	-	συντελεστής τριβής Fanning
$H$	$W$	συνολικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας (Sannervik [10] )
$h$	$W/m^2^{\circ}C$	συντελεστής συναγωγής
$h_r$	$W/m^2^{\circ}C$	πλασματικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία
$h_{fp}$	$W/m^2^{\circ}C$	συντελεστής συναγωγής μεταξύ φέροντος ρευστού και επιφάνειας σωματιδίων
$h_{M,W}$	$W/m^2^{\circ}C$	συντελεστής συναγωγής μεταξύ θερμαντικού μέσου και τοιχώματος αγωγού
$h_{W,F}$	$W/m^2^{\circ}C$	συντελεστής συναγωγής μεταξύ τοιχώματος αγωγού και φέροντος ρευστού
$K$	$Pa \cdot s^n$	συντελεστής συνεκτικότητας του φέροντος ρευστού
$k$	$W/m^{\circ}C$	συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
$k_h$	$W/m^2^{\circ}C$	συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (Sannervik [10] )
$k_w$	$W/m^{\circ}C$	θερμική αγωγιμότητα του τοιχώματος του αγωγού
$k_{susp}$	$W/m^{\circ}C$	θερμική αγωγιμότητα του εναιωρήματος, δηλαδή του διφασικού προϊόντος
$L$	$m$	μήκος αγωγού
$L_t$	$m$	μήκος αγωγού
$l_p$	$m$	μήκος ακμής σωματιδίου κυβικού σχήματος
$M_p$	$kg/s$	μαζική παροχή του προϊόντος (Sannervik [10] )
$M_w$	$kg/s$	μαζική παροχή θερμαντικού μέσου (Sannervik [10] )
$m_F$	$kg/s$	μαζική παροχή του ρευστού

$m_M$	kg/s	μαζική παροχή του θερμαντικού μέσου
$m_P$	kg/s	μαζική παροχή των σωματιδίων
$N$	-	πλήθος πειραμάτων
$Nu$	-	αριθμός Nusselt
$Nu_{exp}$	-	πειραματικός αριθμός Nusselt
$Nu_{theor}$	-	θεωρητικός αριθμός Nusselt
$n$	-	δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς του ρευστού
$P$	Pa	πίεση
$Pr$	-	αριθμός Prandtl
$Q_{acc}$	W	συσσώρευση θερμότητας στον στοιχειώδη όγκο του αγωγού
$Q_{in}$	W	εισροή θερμότητας στον στοιχειώδη όγκο του αγωγού μέσω του ρευστού
$Q_{out}$	W	εκροή θερμότητας από τον στοιχειώδη όγκο του αγωγού μέσω του ρευστού
$Q_{fp}$	W	θερμότητα που μεταφέρεται από το φέρον ρευστό στα σωματίδια
$Q_F$	W	ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από την εσωτερική επιφάνεια του αγωγού προς το φέρον ρευστό
$Q_{loss}$	W	ρυθμός απώλειας θερμότητας προς το περιβάλλον
$Q_M$	W	ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από το θερμαντικό μέσο προς την εξωτερική επιφάνεια του αγωγού
$Q_{TOT}$	W	συνολικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας
$Q_W$	W	ρυθμός μεταφοράς θερμότητας διαμέσου του τοιχώματος του αγωγού
$q$	-	εκθέτης Quemada
$q_x''$	W/m <sup>2</sup>	ροή θερμότητας στον άξονα x
$q_x$	W	ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στον άξονα x
$q_b''$	W/m <sup>2</sup>	μέγιστη θερμική ισχύς που μπορεί ένα σώμα να ακτινοβολεί
$q_{rad}$	W	ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία
$q_{conv}$	W	ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή
$q_b$	W	ολική θερμική ισχύς που εκπέμπει μια επιφάνεια
$q_F''$	W/m <sup>2</sup>	ροή θερμότητας από την εσωτερική επιφάνεια του αγωγού προς το φέρον ρευστό
$q_M''$	W/m <sup>2</sup>	ροή θερμότητας από το θερμαντικό μέσο προς την εξωτερική επιφάνεια του αγωγού
$q_W''$	W/m <sup>2</sup>	ροή θερμότητας διαμέσου του τοιχώματος του αγωγού
$Re$	-	αριθμός Reynolds
$Re_{eff}$	-	ισοδύναμος αριθμός Reynolds του εναιωρήματος
$Re_{repr}$	-	αντιπροσωπευτικός αριθμός Reynolds για μη Νευτωνικά ρευστά
$r$	m	ακτίνα αγωγού
$R_p$	m	ακτίνα σωματιδίου
$r_{in}$	m	εσωτερική ακτίνα αγωγού
$r_{out}$	m	εξωτερική ακτίνα αγωγού
$r_p$	m	συντεταγμένη στην ακτίνα του σωματιδίου
$S_p$	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	ειδική επιφάνεια του σωματιδίου
$T$	°C	θερμοκρασία

$T_s$	°C	θερμοκρασία επιφάνειας στερεού κατά τη συναγωγή
$T_\infty$	°C	θερμοκρασία του ρευστού κατά τη συναγωγή μεταξύ στερεού και ρευστού
$T_{sur}$	°C	θερμοκρασία περιβάλλοντος γύρω από την επιφάνεια του σώματος (μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία)
$T_F$	°C	θερμοκρασία του ρευστού
$T_M$	°C	θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου
$T_{M,in}$	°C	θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου στην είσοδο
$T_{M,out}$	°C	θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου στην έξοδο
$T_{F,in}$	°C	θερμοκρασία του ρευστού στην είσοδο
$T_{F,out}$	°C	θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο
$T_p$	°C	θερμοκρασία των σωματιδίων
$T_{W,in}$	°C	θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του αγωγού
$T_{W,out}$	°C	θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του αγωγού
$t$	s	χρόνος
$U$	W/m <sup>2</sup> *°C	συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
$u$	m/s	ταχύτητα
$u_{tot}$	m/s	μέση συνολική ταχύτητα του διαφασικού προϊόντος
$V_f$	m <sup>3</sup> /s	ογκομετρική παροχή του ρευστού
$V_p$	m <sup>3</sup> /s	ογκομετρική παροχή των σωματιδίων
$V_{tot}$	m <sup>3</sup> /s	συνολική ογκομετρική παροχή του διαφασικού προϊόντος
$w$	m	πάχος τοιχώματος
$X$	-	εκθέτης του αριθμού Prandtl στην εξίσωση (33)
$x$	m	θέση σωματιδίου στο μήκος του αγωγού (απόσταση από την είσοδο του αγωγού)
$y$	m	απόσταση από το τοίχωμα του αγωγού

### Συμβολισμοί του ελληνικού αλφάβητου

Σύμβολο	Μονάδα SI	Επεξήγηση
$\alpha_f$	m <sup>2</sup> /s	συντελεστής θερμικής διάχυτότητας του ρευστού
$\alpha_p$	m <sup>2</sup> /s	συντελεστής θερμικής διάχυτότητας των σωματιδίων
$\Gamma$	-	ανηγμένο μήκος του αγωγού
$\gamma$	s <sup>-1</sup>	ρυθμός διάτμησης
$\Delta_1$	°C	διαφορά θερμοκρασίας στο μήκος του εναλλάκτη για το προϊόν (Sannervik [10] )
$\Delta_2$	°C	διαφορά θερμοκρασίας στο μήκος του εναλλάκτη για το θερμαντικό μέσο (Sannervik [10] )
$\Delta T_{ln}$	°C	μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας
$\varepsilon$	-	συντελεστής εκπομπής
$\theta_i$	-	ανηγμένη θερμοκρασία
$\theta_f$	-	ανηγμένη θερμοκρασία του ρευστού
$\theta_p$	-	ανηγμένη θερμοκρασία των σωματιδίων
$\lambda_p$	W/m*K	συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των σωματιδίων
$\mu_{app}$	Pa*s	φαινόμενο ιξώδες
$\mu$	Pa*s	ιξώδες
$\mu_o$	Pa*s	ιξώδες της υγρής φάσης (Gradeck [6])
$\mu_{eff}$	Pa*s	ισοδύναμο ιξώδες του εναιωρήματος

$\mu_{liq}$	Pa*s	ιξώδες της υγρής φάσης
$\mu_{repr}$	Pa*s	αντιπροσωπευτικό ιξώδες (για μη Νευτωνικά ρευστά)
$\xi$	-	αηγμένη ακτίνα του σωματιδίου
$\rho$	kg/lt	πυκνότητα
$\rho_{eff}$	kg/lt	ισοδύναμη πυκνότητα του εναιωρήματος
$\rho_{liq}$	kg/lt	πυκνότητα της υγρής φάσης
$\sigma$	-	σταθερά Stefan – Boltzmann ( $\sigma=5,6704*10^{-8} Js^{-1}m^{-2}K^{-4}$ )
$\tau$	Pa	διατμητική τάση
$\Phi$ (ή $\Phi_p$ )	-	κλάσμα στερεών
$\Phi_{packing}$	-	κλάσμα συσσώρευσης σωματιδίων



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Barnes H., A Handbook of Elementary Rheology, University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Aberystwyth, 2000
2. Bylund G., Dairy processing handbook, Tetra Pak Processing Systems AB, Lund, Sweden, 1995
3. Martinez – Padilla L. P. & Rivera – Vargas C., Flow behaviour of Mexican sauces using a vane-in-a-large-cup rheometer, *Journal of Food Engineering*, 80 (2007) 24 – 32
4. Singh R. P. & Heldman D. R., Introduction to Food Engineering, Academic Press, San Diego, USA, 2001
5. Α. Παπαϊωάννου, Μηχανική των Ρευστών, Τόμος Ι, Β' έκδοση, εκδόσεις Κοράλι, Αθήνα 2002, p. 222-256
6. M. Gradeck, B. F. Z. Fagla, C. Baravian, M. Lebouche, Experimental thermomechanic study of Newtonian and non-Newtonian suspension flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48 (2005) 3469 – 3477
7. M. Eesa & M. Barigou, Horizontal laminar flow of coarse nearly – neutrally buoyant particles in non-Newtonian conveying fluids: CFD and PEPT experiments compared, *International Journal of Multiphase Flow*, 34 (2008) 997 – 1007
8. McCabe W. L., Smith C. L., Harriot P., Unit operations of chemical engineering, 6<sup>th</sup> edition, McGraw – Hill, New York, 2001
9. A. B. Metzner, J. C. Reed, Flow of non - Newtonian fluids - correlation of the laminar, transition, and turbulent-flow regions, *American Institute of Chemical Engineers Journal*, December 1955, vol. 1, issue 4, p. 434 – 440
10. J. Sannervik, U. Bolmstedt, C. Trägårdh, Heat transfer in tubular heat exchangers for particulate containing liquid foods, *Journal of Food Engineering*, 29 (1996) 63-74
11. Δ. Ασημακόπουλος, Β. Λυγερού, Γ. Αραμπατζής, Μεταφορά Θερμότητας, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2009, p. 68-70, 218-228, 487
12. [www7.slv.se/Naringssock/Naringsamnen.aspx](http://www7.slv.se/Naringssock/Naringsamnen.aspx)
13. McCance and Widdowson's, "The Composition of Foods" , FOOD STANDARDS AGENCY
14. J. P. Holman, Heat Transfer, Metric Editions, McGraw Hill, 1989, p. 134, 526
15. P. N. Baptista et al, The effect of translational and rotational relative velocity components on fluid-to-particle heat transfer coefficients in continuous tube flows, *Food Research International*, 1997, vol. 30 , pp. 21-27.
16. H.S. Ramaswamy, M.R. Zareifard, Evaluation of factors influencing tube-flow fluid-to-particle heat transfer coefficient using calorimetric technique, *Journal of food engineering*, 2000, 45, pp. 127-138.

17. J.M. Mwangi et al, Heat transfer to Particles in Shear Flow: Application in Aseptic Processing, *Journal of Food Engineering*, 1993, 19, pp. 55-74
18. F. Chinesta, R. Torres, A. Ramon, M. C. Rodrigo, M. Rodrigo, Homogenized thermal conduction model for particulate foods, *International Journal of Thermal Sciences*, 41, 2002, p. 1141 – 1150

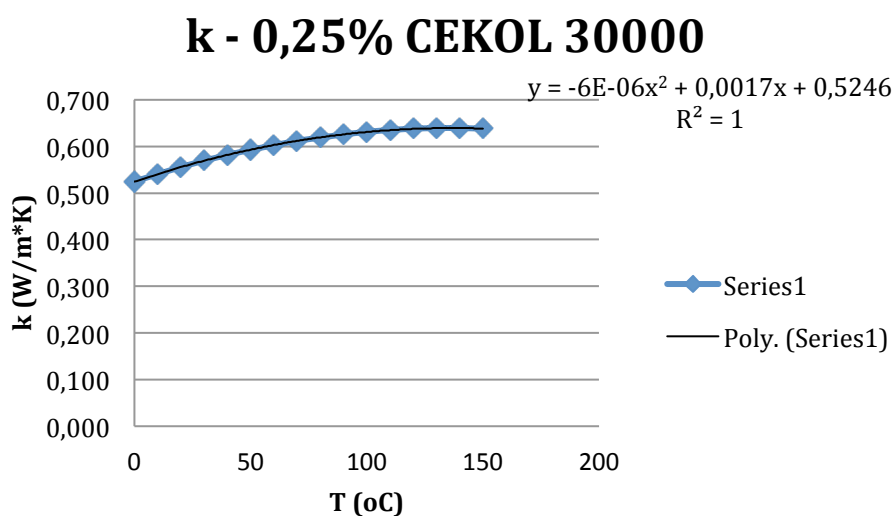
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 – Φυσικές ιδιότητες

Είναι απαραίτητο στην παρούσα εργασία να συμπεριληφθεί η σχέση των φυσικών ιδιοτήτων, που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα, με τη θερμοκρασία. Παρακάτω παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς. Συγκεκριμένα, για την εξαγωγή των εν λόγω εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε ένα έτοιμο εργαλείο Microsoft Excel, το «PhysProp Estimator». Αυτό, ουσιαστικά, δέχεται ως είσοδο την ακριβή σύσταση του υλικού και τις θερμοκρασίες που ενδιαφέρουν το χρήστη και επιστρέφει τιμές φυσικών ιδιοτήτων – θερμική αγωγιμότητα, πυκνότητα και ειδική θερμοχωρητικότητα  $C_p$  – για την κάθε θερμοκρασία ως έξοδο. Έπειτα, με τις τιμές αυτές σχεδιάζονται τα αντίστοιχα γραφήματα και η εξίσωση της γραμμής τάσης αυτών περιγράφει τη σχέση των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών με τη θερμοκρασία.

### 1. Υδατικό διάλυμα CMC – 0,25% CEKOL 30000

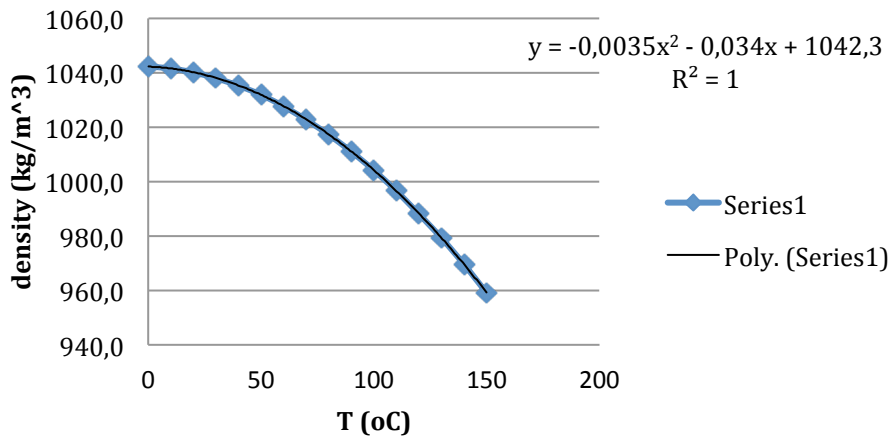
Πίνακας 14: Σύσταση του υδατικού διαλύματος CMC περιεκτικότητας 0,25% σε CEKOL 30000

	Water	Protein	Fat	Carbo	Fibre	Ash	Total	
X	99,75	0	0	0,25	0	0	100	%



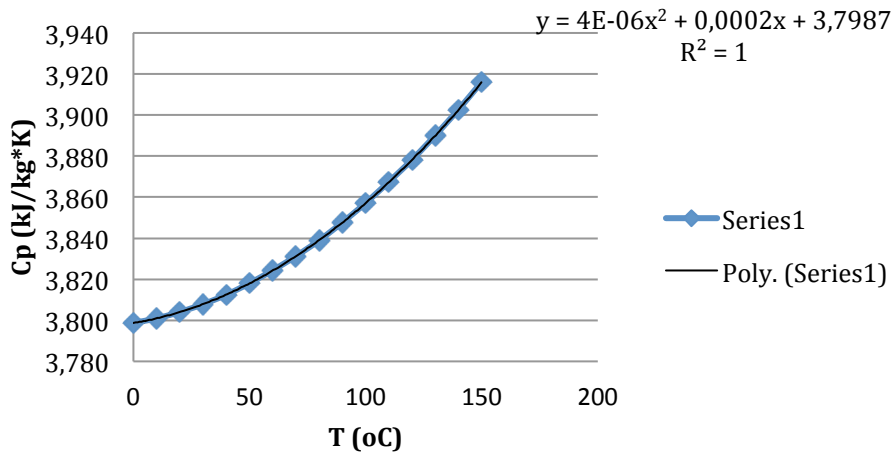
Γράφημα 10: Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας του υδατικού διαλύματος CMC με περιεκτικότητα 0,25% CEKOL 30000 με τη θερμοκρασία

## density - 0,25% CEKOL 30000



Γράφημα 11: Μεταβολή της πυκνότητας του υδατικού διαλύματος CMC με περιεκτικότητα 0,25% CEKOL 30000 με τη θερμοκρασία

## Cp - 0,25% CEKOL 30000



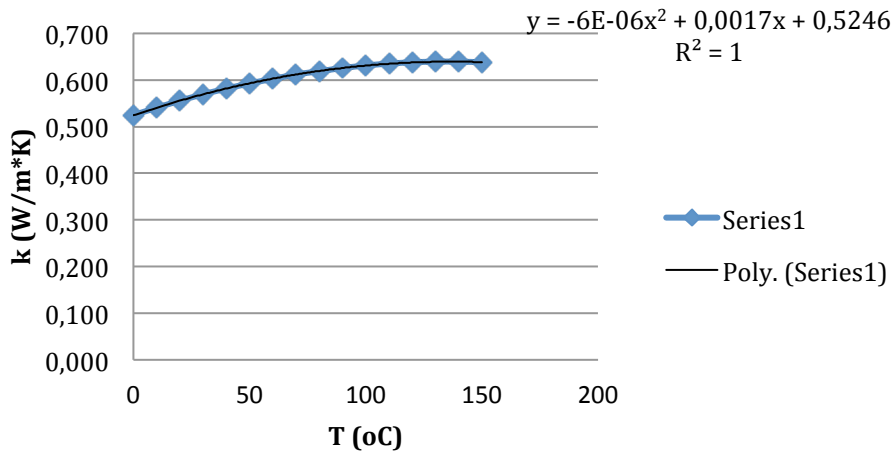
Γράφημα 12: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του υδατικού διαλύματος CMC με περιεκτικότητα 0,25% CEKOL 30000 με τη θερμοκρασία

## 2. Υδατικό διάλυμα CMC - 0,1% CEKOL 30000

Πίνακας 15: Σύσταση του υδατικού διαλύματος CMC περιεκτικότητας 0,1% σε CEKOL 30000

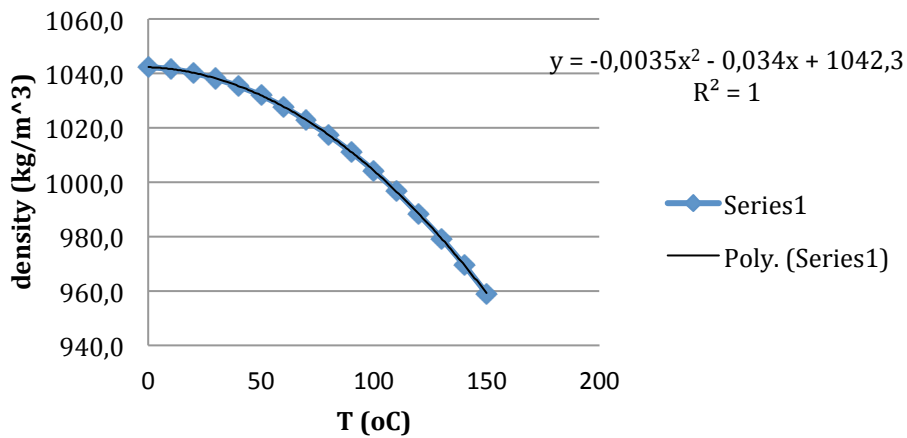
	Water	Protein	Fat	Carbo	Fibre	Ash	Total	
X	99,9	0	0	0,1	0	0	100	%

### k - 0,1% CEKOL 30000



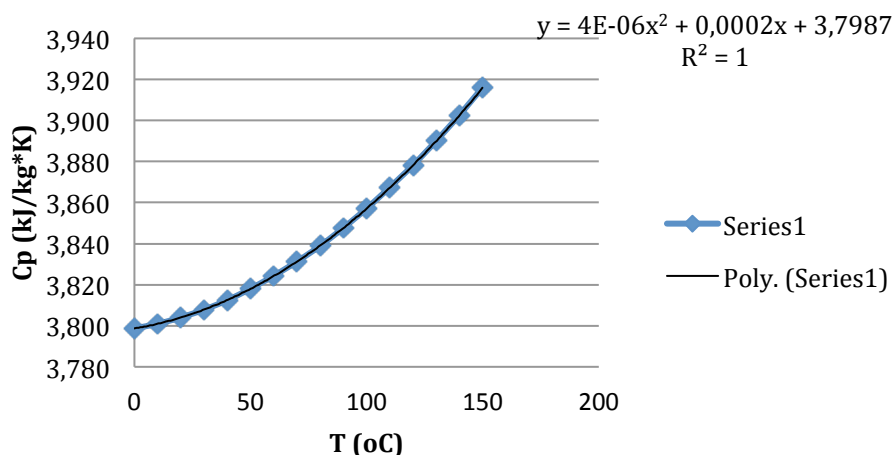
Γράφημα 13: Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας του υδατικού διαλύματος CMC με περιεκτικότητα 0,1% CEKOL 30000 με τη θερμοκρασία

### density - 0,1% CEKOL 30000



Γράφημα 14: Μεταβολή της πυκνότητας του υδατικού διαλύματος CMC με περιεκτικότητα 0,1% CEKOL 30000 με τη θερμοκρασία

### Cp - 0,1% CEKOL 30000



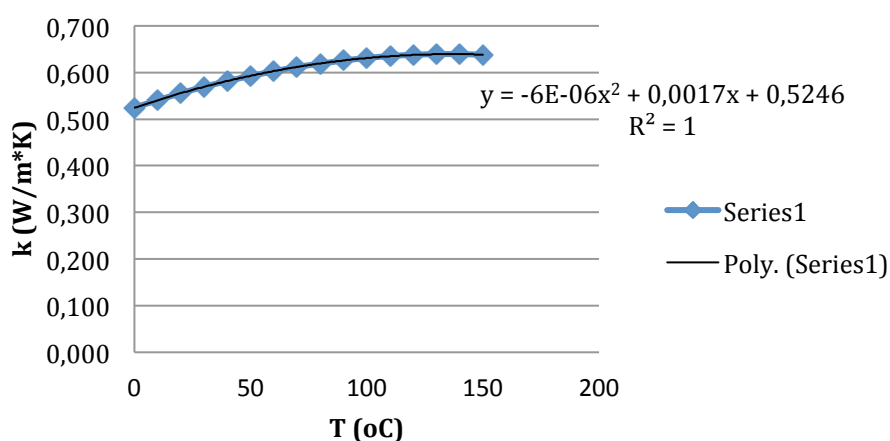
Γράφημα 15: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του υδατικού διαλύματος CMC με περιεκτικότητα 0,1% CEKOL 30000 με τη θερμοκρασία

### 3. Υδατικό διάλυμα CMC - 1,2% CEKOL 700

Πίνακας 16: Σύσταση του υδατικού διαλύματος CMC περιεκτικότητας 1,2% σε CEKOL 700

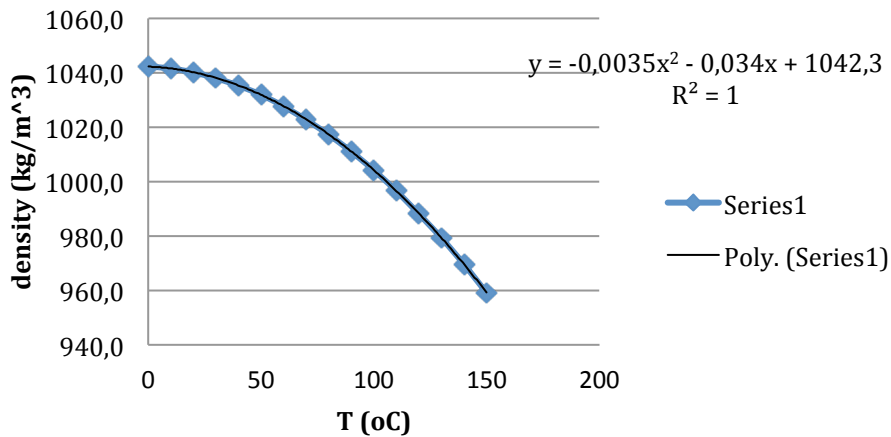
	Water	Protein	Fat	Carbo	Fibre	Ash	Total	
X	98,8	0	0	1,2	0	0	100	%

### k - 1,2% CEKOL 700



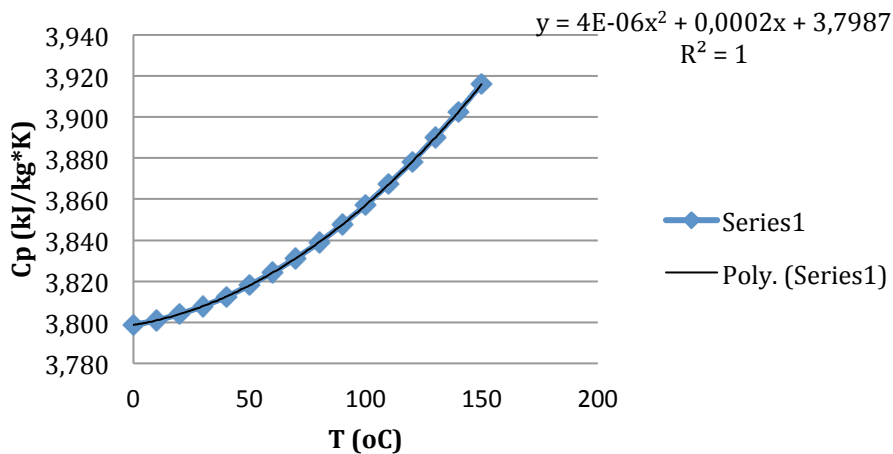
Γράφημα 16: Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας του υδατικού διαλύματος CMC με περιεκτικότητα 1,2% CEKOL 700 με τη θερμοκρασία

## density - 1,2% CEKOL 700



Γράφημα 17: Μεταβολή της πυκνότητας του υδατικού διαλύματος CMC με περιεκτικότητα 1,2% CEKOL 700 με τη θερμοκρασία

## Cp - 1,2% CEKOL 700



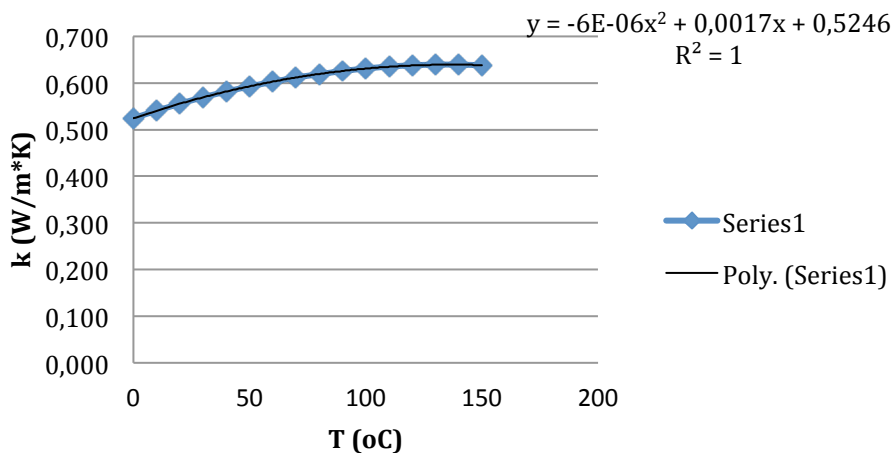
Γράφημα 18: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του υδατικού διαλύματος CMC με περιεκτικότητα 1,2% CEKOL 700 με τη θερμοκρασία

## 4. Υδατικό διάλυμα CMC - 0,15% CEKOL 30000

Πίνακας 17: Σύσταση του υδατικού διαλύματος CMC περιεκτικότητας 0,15% σε CEKOL 30000

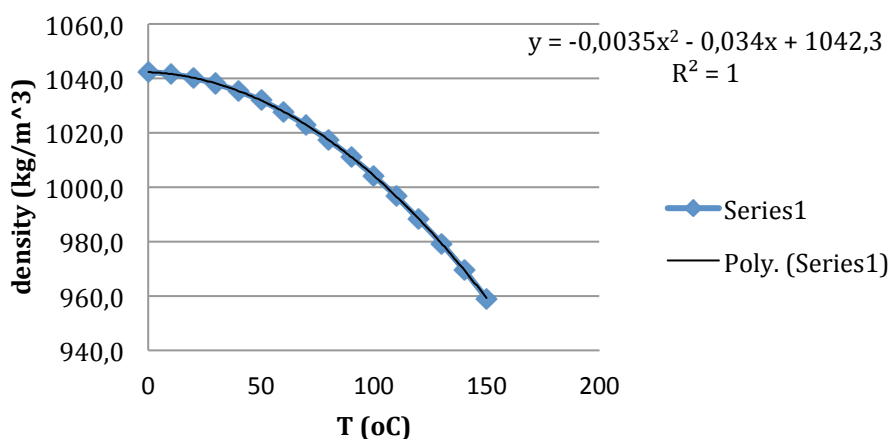
	Water	Protein	Fat	Carbo	Fibre	Ash	Total	
X	99,85	0	0	0,15	0	0	100	%

### k - 0,15% CEKOL 30000



Γράφημα 19: Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας του υδατικού διαλύματος CMC με περιεκτικότητα 0,15% CEKOL 30000 με τη θερμοκρασία

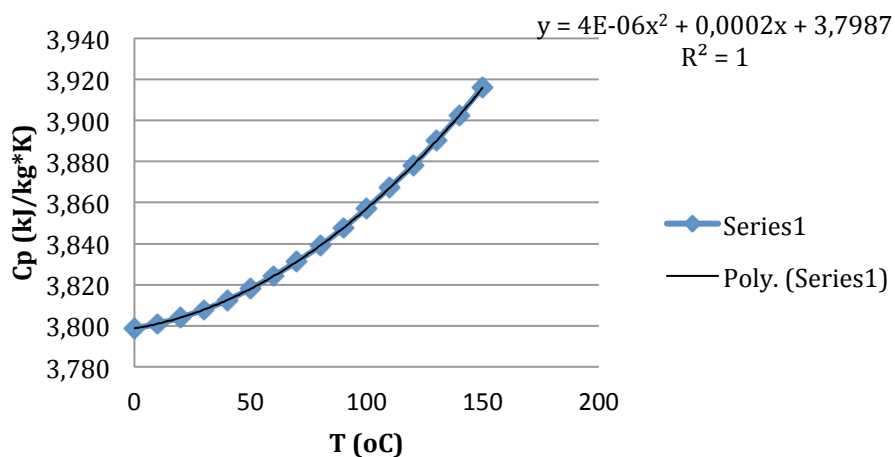
### density - 0,15% CEKOL 30000



Γράφημα 20: Μεταβολή της πυκνότητας του υδατικού διαλύματος CMC με περιεκτικότητα 0,15% CEKOL 30000 με τη θερμοκρασία



## Cp - 0,15% CEKOL 30000



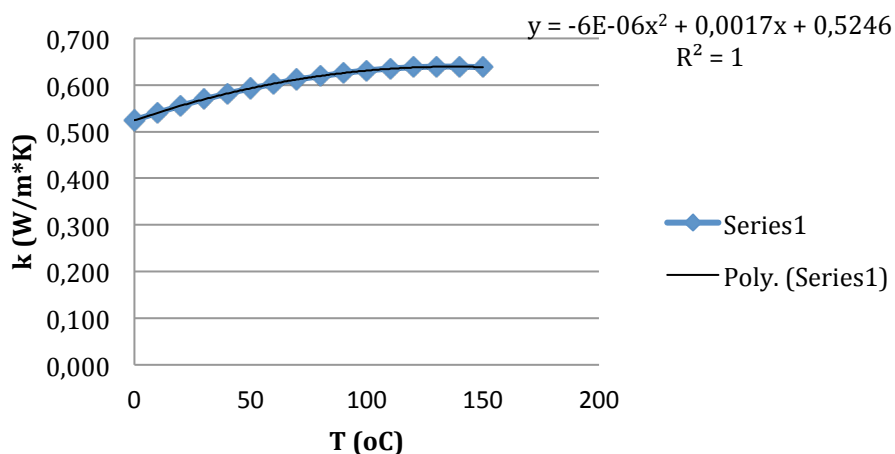
Γράφημα 21: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του υδατικού διαλύματος CMC με περιεκτικότητα 0,15% CEKOL 30000 με τη θερμοκρασία

## 5. Κύβου καρότου

Πίνακας 18: Σύσταση των κύβων καρότου [12]

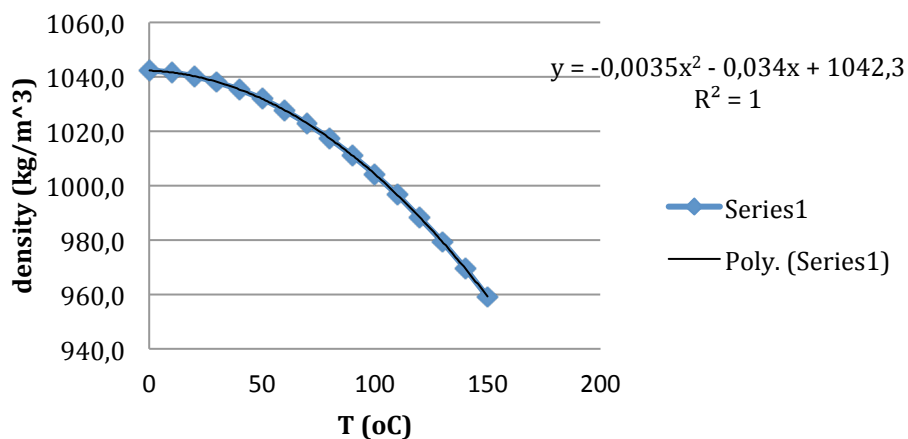
	Water	Protein	Fat	Carbo	Fibre	Ash	Total	
X	89,5	0,7	0,2	6,6	2,4	0,6	100	%

## k - carrots



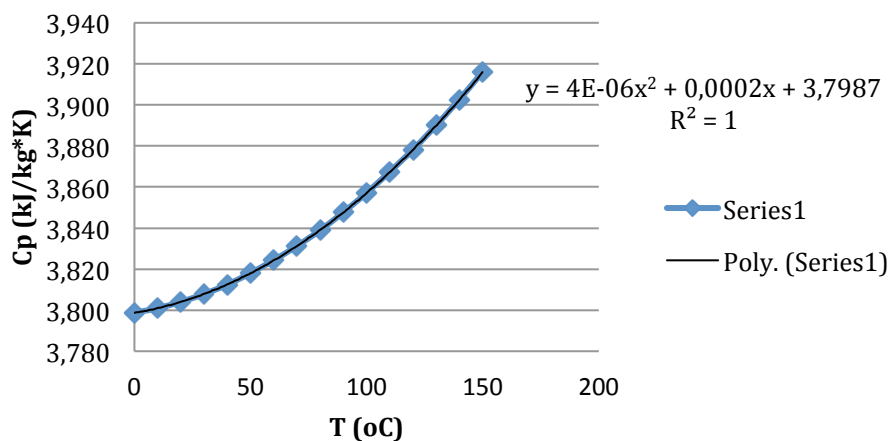
Γράφημα 22: Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας των κύβων καρότου με τη θερμοκρασία

## density - carrots



Γράφημα 23: Μεταβολή της πυκνότητας των κύβων καρότου με τη θερμοκρασία

## Cp - carrots

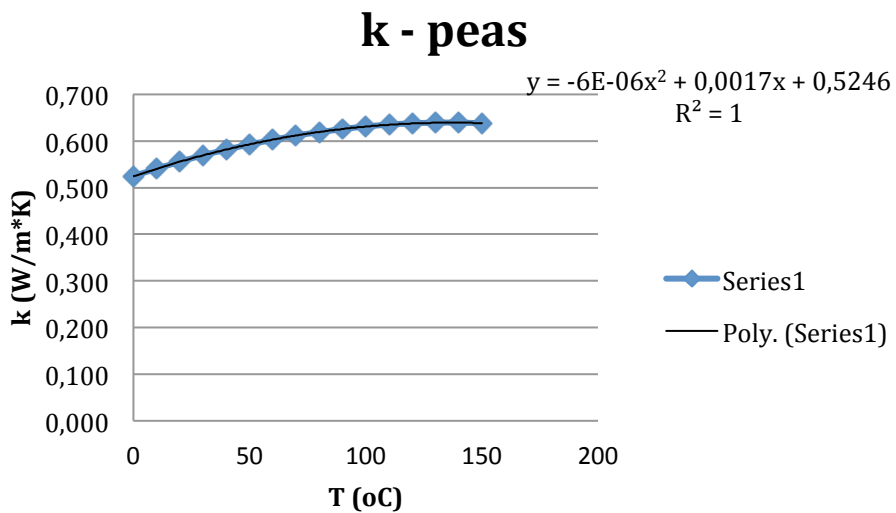


Γράφημα 24: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας των κύβων καρότου με τη θερμοκρασία

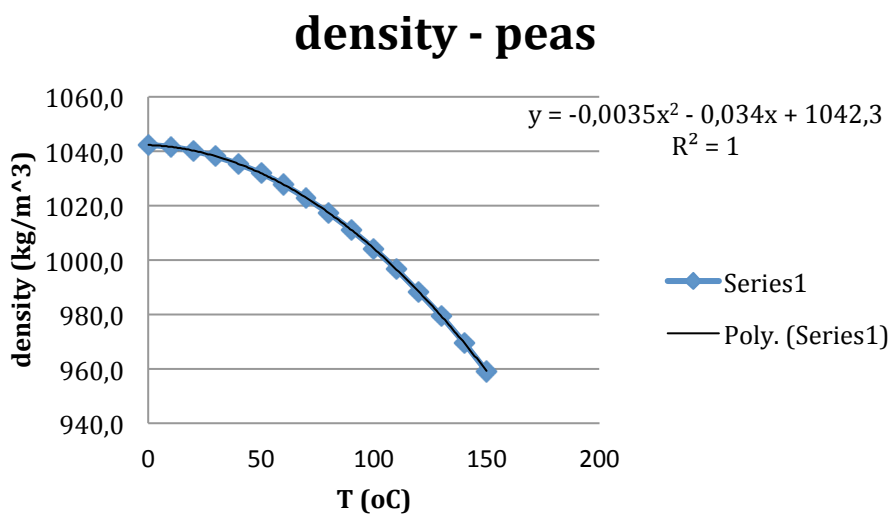
## 6. Μπιζέλια

Πίνακας 19: Σύσταση των μπιζελιών [13]

	Water	Protein	Fat	Carbo	Fibre	Ash	Total	
X	84,1	5	0,9	5,5	4,5	0	100	%

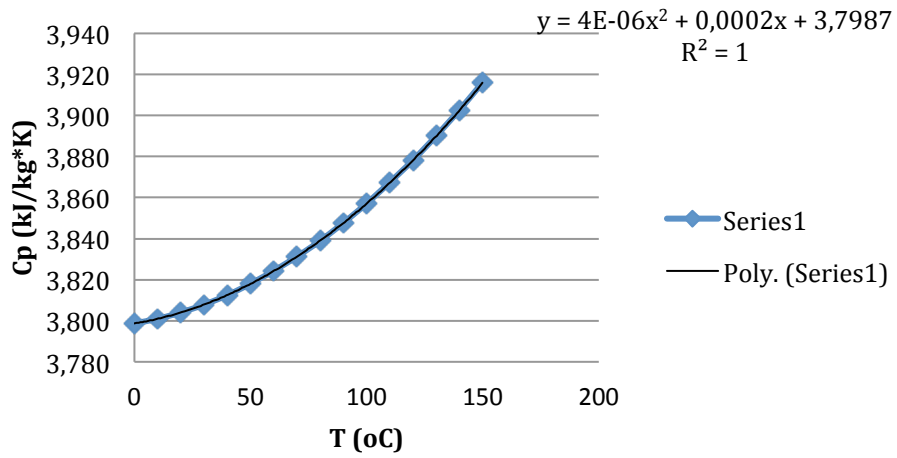


Γράφημα 25: Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας των μπιζελιών με τη θερμοκρασία



Γράφημα 26: Μεταβολή της πυκνότητας των μπιζελιών με τη θερμοκρασία

## Cp - peas



Γράφημα 27: Μεταβολή της πυκνότητας των μπιζελιών με τη θερμοκρασία

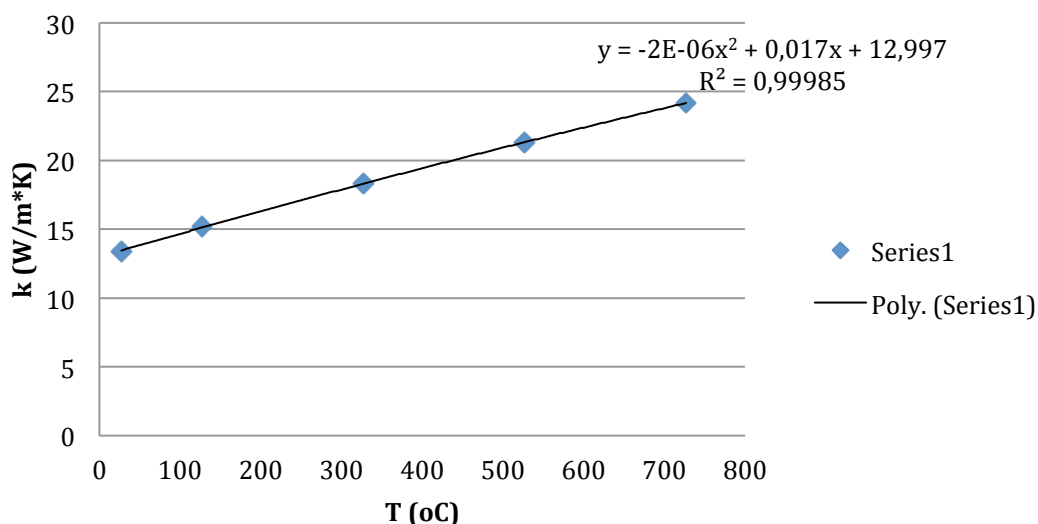
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 - Θερμική αγωγιμότητα του ανοξείδωτου χάλυβα AISI 316

Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένοι οι αγωγοί του εναλλάκτη που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα είναι ανοξείδωτος χάλυβας τύπου AISI 316. Από τη βιβλιογραφία ανακτήθηκαν τιμές θερμικής αγωγιμότητας σε διαφορετικές θερμοκρασίες για το συγκεκριμένο κράμα χάλυβα [11]. Χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές σχεδιάστηκε γράφημα που δείχνει τη μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας με τη θερμοκρασία. Η εξίσωση της γραμμής τάσης περιγράφει και ποσοτικά αυτή τη σχέση.

Πίνακας 20: Θερμική αγωγιμότητα ανοξείδωτου χάλυβα AISI 316 σε διαφορετικές θερμοκρασίες [11]

T (K)	T(oC)	k (W/m*K)
300	27	13,4
400	127	15,2
600	327	18,3
800	527	21,3
1000	727	24,2

### stainless steel AISI 316 - thermal conductivity



Γράφημα 28: Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας του ανοξείδωτου χάλυβα AISI 316 με τη θερμοκρασία

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 – Αβεβαιότητα Μετρήσεων

Στα γραφήματα, που παρουσιάζονται στο τμήμα των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, έχουν εισαχθεί οι ράβδοι σφάλματος (=error bars) με στόχο να εκφραστεί σχηματικά η αβεβαιότητα του κάθε σημείου. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις η αβεβαιότητα είναι τόσο μικρή που οι ράβδοι σφάλματος δεν είναι ορατές, γιατί καλύπτονται από τις απεικονίσεις των πειραματικών σημείων. Για το λόγο αυτόν, η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων συνοψίζεται στο ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 21: Τιμές αβεβαιότητας για το συντελεστή συναγωγής, την πτώση πίεσης και το συντελεστή τριβής f

Ταυτότητα πειράματος	Συντελεστής συναγωγής		Πτώση πίεσης		Συντελεστής τριβής f	
	Απόλυτη αβεβαιότητα (W/m <sup>2</sup> *oC)	Σχετική αβεβαιότητα	Απόλυτη αβεβαιότητα (KPa)	Σχετική αβεβαιότητα	Απόλυτη αβεβαιότητα	Σχετική αβεβαιότητα
HEX001	6,83	1,29%	0,84	2,47%	0,00083	2,58%
HEX002	5,65	0,87%	1,16	1,74%	0,00028	1,80%
HEX003	7,91	0,70%	1,97	2,11%	0,00020	2,13%
HEX004	7,06	0,97%	0,55	3,52%	0,00053	3,58%
HEX005	5,48	0,58%	0,81	2,27%	0,00019	2,32%
HEX006	7,44	0,59%	1,12	1,97%	0,00011	2,00%
HEX007	19,64	2,72%	2,89	3,86%	0,00295	4,22%
HEX008	16,11	1,51%	5,12	2,78%	0,0012	2,88%
HEX009	11,16	0,90%	5,74	2,32%	0,00061	2,36%
HEX010	39,74	7,07%	4,96	10,66%	0,00463	10,70%
HEX011	27,28	2,35%	5,52	5,13%	0,00129	5,15%
HEX012	21,50	2,06%	4,70	4,57%	0,00049	4,61%
HEX013	4,14	0,89%	0,50	1,50%	0,00054	1,69%
HEX014	4,75	0,75%	0,91	1,54%	0,00022	1,61%
HEX015	6,40	0,81%	0,69	0,84%	0,00008	0,92%
HEX016	16,89	2,10%	4,43	9,24%	0,00414	9,26%
HEX017	15,86	1,27%	3,33	4,18%	0,00078	4,20%
HEX018	8,55	0,82%	1,30	2,16%	0,00055	2,23%
HEX019	11,04	1,74%	1,35	2,93%	0,00130	3,02%
HEX020	9,37	0,98%	1,49	1,84%	0,00035	1,89%
HEX021	8,60	0,86%	2,37	2,46%	0,00024	2,48%
HEX022	6,36	0,86%	0,89	1,58%	0,00036	1,90%
HEX023	9,29	0,96%	1,74	2,15%	0,00041	2,21%
HEX024	7,00	0,63%	2,99	2,50%	0,00031	2,52%
<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗΣ</b>						
HEX025	15,92	1,27%	10,69	4,59%	0,00251	4,61%
HEX026	7,54	0,67%	0,63	0,73%	0,00004	0,77%

HEX027	8,31	0,70%	2,03	3,70%	0,00047	3,72%
HEX028	8,35	0,75%	2,13	3,21%	0,00022	3,22%
<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΧΩΡΙΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ</b>						
HEX_NP001	7,22	2,26%	1,21	3,19%	0,00141	3,95%
HEX_NP002	3,54	0,83%	1,14	1,86%	0,00027	1,90%
HEX_NP003	4,91	0,99%	2,32	2,78%	0,00024	2,79%
HEX_NP004	2,88	0,76%	0,30	2,80%	0,00069	3,04%
HEX_NP005	2,99	0,72%	0,20	1,34%	0,00021	1,52%
HEX_NP006	4,39	0,86%	0,72	2,61%	0,00017	2,65%
HEX_NP007	7,12	0,88%	0,51	1,15%	0,00006	1,19%
HEX_NP008	2,62	0,87%	0,89	2,20%	0,00211	2,46%
HEX_NP009	2,46	0,77%	0,90	1,47%	0,00098	1,71%
HEX_NP010	3,08	0,82%	1,92	1,69%	0,00047	1,79%
HEX_NP011	6,13	1,34%	2,76	1,65%	0,00031	1,77%

Πρέπει να σημειωθεί ότι η αβεβαιότητα του συντελεστή συναγωγής μεταξύ του τοιχώματος και του φέροντος ρευστού έχει θεωρηθεί ίση με αυτή του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας U. Ο λόγος είναι ότι αποδείχθηκε πολύ δύσκολο να ερευνηθεί σε βάθος η αβεβαιότητα όλων των όρων που υπεισέρχονται στον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής. Επίσης, στον υπολογισμό της αβεβαιότητας λήφθηκε υπόψη και το σφάλμα ανάγνωσης των οργάνων μέτρησης και η τυπική απόκλιση των μετρήσεων.

Ο επόμενος πίνακας συγκεντρώνει τις τιμές της τυπικής απόκλισης των μετρήσεων της συγκέντρωσης σωματιδίων για κάθε πείραμα.

**Πίνακας 22: Τιμές τυπικής απόκλισης των μετρήσεων της συγκέντρωσης σωματιδίων**

Ταυτότητα πειράματος	Συγκέντρωση σωματιδίων (w/w)	Τυπική απόκλιση (w/w)
HEX001	21,18%	0,63%
HEX002	27,02%	0,21%
HEX003	25,29%	0,10%
HEX004	20,08%	1,01%
HEX005	23,41%	0,42%
HEX006	24,49%	1,53%
HEX007	24,97%	0,51%
HEX008	31,07%	1,53%
HEX009	28,19%	1,06%
HEX010	23,53%	0,68%
HEX011	30,80%	1,49%
HEX012	20,13%	0,60%
HEX013	11,23%	0,42%
HEX014	11,93%	0,21%
HEX015	12,44%	0,09%
HEX016	30,93%	1,19%
HEX017	34,64%	0,73%

HEX018	33,35%	0,18%
HEX019	30,79%	1,61%
HEX020	33,53%	0,70%
HEX021	24,91%	0,26%
HEX022	17,01%	1,36%
HEX023	34,72%	1,22%
HEX024	31,41%	0,15%
<b>Πειράματα Επικύρωσης</b>		
HEX025	40,67%	1,54%
HEX026	17,66%	0,27%
HEX027	32,74%	0,60%
HEX028	22,02%	0,32%



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4 - Μετρήσεις Ιξώδους του φέροντος ρευστού

Όπως περιγράφηκε και στην παρουσίαση της πειραματικής διαδικασίας, δείγμα του φέροντος ρευστού συλλέγεται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και αναλύεται σχετικά με τα ρεολογικά του χαρακτηριστικά (συντελεστής συνεκτικότητας  $K$  και δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς  $n$ ). Πιο συγκεκριμένα, δείγμα του επεξεργασμένου προϊόντος συλλέγεται στο σημείο απόρριψης, τα σωματίδια διαχωρίζονται με τη χρήση κόσκινου και μόνο το ρευστό υφίσταται ανάλυση.

Εξαίρεση σε αυτή τη διαδικασία αποτελούν τα πειράματα με προϊόν χωρίς σωματίδια (το φέρον ρευστό αποτελεί το σύνολο του προϊόντος και είναι καθαρό υδατικό διάλυμα CMC). Στις περιπτώσεις αυτές το δείγμα προς ανάλυση συλλέγεται από την αρχική δεξαμενή (Liquid Mixing Tank) και όχι από το σημείο απόρριψης.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, λόγω του υψηλού κόστους των ρεολογικών αναλύσεων, δεν λαμβάνεται δείγμα ρευστού από το κάθε πείραμα αλλά ανά ομάδα τριών πειραμάτων (όπου μόνο η ταχύτητα ροής αλλάζει) συλλέγεται δείγμα από ένα από τα τρία πειράματα. Έχει, βέβαια, επιβεβαιωθεί ότι οι τιμές των ρεολογικών ιδιοτήτων μεταξύ αυτών των τριών πειραμάτων δε διαφέρουν σημαντικά και αυτό επιτρέπει τη χρήση των δεδομένων του ενός στους υπολογισμούς και των τριών.

Στους επόμενους πίνακες παρουσιάζονται οι μετρήσεις των ρεολογικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων που αναλύθηκαν. Επίσης, τα δεδομένα συνδέονται με τα πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν, έτσι ώστε να μπορεί να κριθεί μεταγενέστερα η καταλληλότητά τους.

1. Για τα πειράματα **HEX001**, **HEX002**, **HEX003**, **HEX013**, **HEX014** και **HEX015** δε συλλέχθηκε δείγμα από το σημείο απόρριψης. Για το λόγο αυτόν, στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις ενός δείγματος που συλλέχθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος **HT012** του Αγωγού Συγκράτησης (Holding Tube). Οι μετρήσεις του δείγματος αυτού παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 23: Ρεολογικές ιδιότητες του δείγματος απόρριψης από το πείραμα HT012

ΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ HT012							
T (°C)	n	K (Pa*s <sup>n</sup> )	ιξώδες (mPas)				ρυθμός διάτμησης (1/s)
			10	50	100	500	
20	0,729	0,093	49,8	32,2	26,7	17,3	
60	0,87	0,021	15,6	12,6	11,5	9,4	
90	0,93	0,009	7,7	6,8	6,5	5,8	

- Ημερομηνία παραγωγής: 5 - 7 - 2013
- Ημερομηνία ανάλυσης: 5 - 7 - 2013

2. Για τα πειράματα **HEX004**, **HEX005** και **HEX006** το δείγμα απόρριψης του πειράματος **HEX004** χρησιμοποιήθηκε και οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 24: Ρεολογικές ιδιότητες του δείγματος απόρριψης από το πείραμα HEX004

ΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ HEX004							
T (°C)	n	K (Pa*s <sup>n</sup> )	ιξώδες (mPas)				ρυθμός διάτμησης (1/s)
			10	50	100	500	
20	0,898	0,012	9,5	8,1	7,5	6,4	PhysProp No. #6273
60	0,97	0,004	3,7	3,6	3,5	3,3	
90	1	0,002	2	2	2	2	

- Ημερομηνία παραγωγής: 10 - 7 - 2013
- Ημερομηνία ανάλυσης: 11 - 7 - 2013

3. Για τα πειράματα **HEX007**, **HEX008**, **HEX009** και **HEX025** το δείγμα απόρριψης του πειράματος **HEX007** χρησιμοποιήθηκε και οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 25: Ρεολογικές ιδιότητες του δείγματος απόρριψης από το πείραμα HEX007

ΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ HEX007							
T (°C)	n	K (Pa*s <sup>n</sup> )	ιξώδες (mPas)				ρυθμός διάτμησης (1/s)
			10	50	100	500	
20	0,844	0,143	99,8	77,7	69,7	54,2	PhysProp No. #6277
60	0,955	0,025	22,5	21	20,3	18,9	
90	1	0,01	10	10	10	10	

- Ημερομηνία παραγωγής: 11 - 7 - 2013
- Ημερομηνία ανάλυσης: 12 - 7 - 2013

4. Για τα πειράματα **HEX010**, **HEX011** και **HEX012** το δείγμα απόρριψης του πειράματος **HEX010** χρησιμοποιήθηκε και οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 26: Ρεολογικές ιδιότητες του δείγματος απόρριψης από το πείραμα HEX010

ΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ HEX010							
T (°C)	n	K (Pa*s <sup>n</sup> )	ιξώδες (mPas)				ρυθμός διάτμησης (1/s)
			10	50	100	500	
20	0,744	0,079	43,8	29	24,3	16,1	PhysProp No. #6279
60	0,9	0,015	11,9	10,1	9,5	8,1	
90	0,965	0,006	5,5	5,2	5,1	4,8	

- Ημερομηνία παραγωγής: 12 - 7 - 2013
- Ημερομηνία ανάλυσης: 12 - 7 - 2013

5. Για τα πειράματα **HEX016**, **HEX017** και **HEX018** συλλέχθηκε δείγμα απόρριψης από το κάθε ένα και οι τιμές των ρεολογικών ιδιοτήτων παρουσιάζονται στους επόμενους πίνακες:

Πίνακας 27: Ρεολογικές ιδιότητες του δείγματος απόρριψης από το πείραμα HEX016

ΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ HEX016							
T (°C)	n	K (Pa*s <sup>n</sup> )	ιξώδες (mPas)				ρυθμός διάτμησης (1/s)
			10	50	100	500	
20	0,762	0,067	38,7	26,4	22,4	15,3	PhysProp No. #6271
60	0,906	0,014	11,3	9,7	9,1	7,8	
90	0,974	0,005	4,7	4,5	4,4	4,3	

- Ημερομηνία παραγωγής: 10 - 7 - 2013
- Ημερομηνία ανάλυσης: 11 - 7 - 2013

Πίνακας 28: Ρεολογικές ιδιότητες του δείγματος απόρριψης από το πείραμα HEX017

ΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ HEX017							
T (°C)	n	K (Pa*s <sup>n</sup> )	ιξώδες (mPas)				ρυθμός διάτμησης (1/s)
			10	50	100	500	
20	0,78	0,055	33,1	23,3	20	14	PhysProp No. #6269
60	0,935	0,011	9,5	8,5	8,2	7,3	
90	0,98	0,005	4,8	4,6	4,6	4,4	

- Ημερομηνία παραγωγής: 10 - 7 - 2013
- Ημερομηνία ανάλυσης: 10 - 7 - 2013

Πίνακας 29: Ρεολογικές ιδιότητες του δείγματος απόρριψης από το πείραμα HEX018

ΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ HEX018							
T (°C)	n	K (Pa*s <sup>n</sup> )	ιξώδες (mPas)				ρυθμός διάτμησης (1/s)
			10	50	100	500	
20	0,771	0,061	36	24,9	21,2	14,7	PhysProp No. #6270
60	0,925	0,012	10,1	8,9	8,5	7,5	
90	0,98	0,005	4,8	4,6	4,6	4,4	

- Ημερομηνία παραγωγής: 10 - 7 - 2013
- Ημερομηνία ανάλυσης: 10 - 7 - 2013

6. Για τα πειράματα **HEX019**, **HEX020** και **HEX021** το δείγμα απόρριψης του πειράματος **HEX019** χρησιμοποιήθηκε και οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 30: Ρεολογικές ιδιότητες του δείγματος απόρριψης από το πείραμα HEX019

ΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ HEX019							
T (°C)	n	K (Pa*s <sup>n</sup> )	ιξώδες (mPas)				ρυθμός διάτμησης (1/s)
			10	50	100	500	
20	0,805	0,046	29,4	21,5	18,7	13,7	PhysProp No. #6275
60	0,94	0,01	8,7	7,9	7,6	6,9	
90	0,98	0,004	3,8	3,7	3,6	3,5	

- Ημερομηνία παραγωγής: 11 - 7 - 2013
- Ημερομηνία ανάλυσης: 12 - 7 - 2013

7. Για τα πειράματα **HEX022**, **HEX023** και **HEX024** το δείγμα απόρριψης του πειράματος **HEX022** χρησιμοποιήθηκε και οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 31: Ρεολογικές ιδιότητες του δείγματος απόρριψης από το πείραμα HEX022

ΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ HEX022							
T (°C)	n	K (Pa*s <sup>n</sup> )	ιξώδες (mPas)				ρυθμός διάτμησης (1/s)
			10	50	100	500	
20	0,746	0,081	45,1	30	25,1	16,7	PhysProp No. #6285
60	0,92	0,015	12,5	11	10,4	9,1	
90	0,99	0,006	4,9	4,8	4,8	4,7	

- Ημερομηνία παραγωγής: 16 - 7 - 2013
- Ημερομηνία ανάλυσης: 16 - 7 - 2013

8. Για τα πειράματα **HEX026**, **HEX027** και **HEX028** το δείγμα απόρριψης του πειράματος **HEX026** χρησιμοποιήθηκε και οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 32: Ρεολογικές ιδιότητες του δείγματος απόρριψης από το πείραμα HEX026

ΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ HEX026							
T (°C)	n	K (Pa*s <sup>n</sup> )	ιξώδες (mPas)				ρυθμός διάτμησης (1/s)
			10	50	100	500	
20	0,824	0,029	19,3	14,6	12,9	9,7	PhysProp No. #6291
60	0,918	0,008	6,6	5,8	5,5	4,8	
90	0,965	0,004	3,7	3,5	3,4	3,2	

- Ημερομηνία παραγωγής: 17 - 7 - 2013
- Ημερομηνία ανάλυσης: 17 - 7 - 2013

9. Για τα πειράματα **HEX\_NP001**, **HEX\_NP002** και **HEX\_NP003** χρησιμοποιήθηκε δείγμα καθαρού υδατικού διαλύματος CMC περιεκτικότητας 0,25% σε CEKOL 30000 και οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 33: Ρεολογικές ιδιότητες δείγματος καθαρού υδατικού διαλύματος 0,25% CEKOL 30000

ΔΕΙΓΜΑ ΚΑΘΑΡΟΥ 0,25% CEKOL 30000							
T (oC)	n	K	ιξώδες (mPas)				ρυθμός διάτμησης (1/s)
			10	50	100	500	
20	0,651	0,181	81	46,2	36,3	20,7	PhysProp No. #6185
60	0,755	0,057	32,4	21,9	18,4	12,4	
90	0,832	0,026	17,7	13,5	12	9,2	

- Ημερομηνία παραγωγής: 5 - 6 - 2013
- Ημερομηνία ανάλυσης: 10 - 6 - 2013

10. Για τα πειράματα **HEX\_NP004**, **HEX\_NP005**, **HEX\_NP006** και **HEX\_NP007** χρησιμοποιήθηκε δείγμα απόρριψης από το πείραμα **HEX\_NP004** και οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 34: Ρεολογικές ιδιότητες του δείγματος απόρριψης από το πείραμα HEX\_NP004

ΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ HEX_NP004							
T (oC)	n	K	ιξώδες (mPas)				ρυθμός διάτμησης (1/s)
			10	50	100	500	
20	0,772	0,037	21,9	15,2	12,9	9	PhysProp No. #6188
60	0,862	0,013	9,5	7,6	6,9	5,5	
90	0,919	0,007	5,8	5,1	4,8	4,2	

- Ημερομηνία παραγωγής: 10 - 6 - 2013
- Ημερομηνία ανάλυσης: 10 - 6 - 2013

11. Για τα πειράματα **HEX\_NP008**, **HEX\_NP009**, **HEX\_NP010** και **HEX\_NP011** χρησιμοποιήθηκε δείγμα καθαρού υδατικού διαλύματος CMC περιεκτικότητας 1,2% σε CEKOL 700 και οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 35: Ρεολογικές ιδιότητες δείγματος καθαρού υδατικού διαλύματος 1,2% CEKOL 700

ΔΕΙΓΜΑ ΚΑΘΑΡΟΥ 1,2% CEKOL 700							
T (oC)	n	K	ιξώδες (mPas)				ρυθμός διάτμησης (1/s)
			10	50	100	500	
20	0,831	0,18	122	92,9	82,7	63	PhysProp No. #6276
60	0,964	0,028	25,8	24,3	23,7	22,4	
90	0,98	0,013	12,4	12	11,9	11,5	

- Ημερομηνία παραγωγής: 11 – 7 – 2013
- Ημερομηνία ανάλυσης: 12 – 7 – 2013

Για κάθε δείγμα σημειώνονται η ημερομηνία παραγωγής και η ημερομηνία ανάλυσης. Είναι σημαντική η πληροφορία της διάρκειας παραμονής του δείγματος στο ψυγείο μέχρι την ανάλυσή του. Έχει παρατηρηθεί ότι το ιξώδες των δειγμάτων διαλύματος CMC μειώνεται αν η παραμονή τους στο ψυγείο είναι μακρά. Ο λόγος είναι ότι, επειδή η διεργασία δε γίνεται σε ασηπτικές συνθήκες, η ανάπτυξη των μικροοργανισμών στο δείγμα καταστρέφει τη μοριακή δομή του CMC με αποτέλεσμα να μειώνει το ιξώδες του ρευστού. Στην παρούσα εργασία, ο μεγαλύτερος χρόνος αναμονής μεταξύ παραγωγής και ανάλυσης για τα περισσότερα δείγματα είναι μία ημέρα. Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα. Η μόνη εξαίρεση είναι το δείγμα καθαρού υδατικού διαλύματος 0,25% CEKOL 30000 με αριθμό καταχώρησης #6185, το οποίο παρέμεινε στο ψυγείο για 5 ημέρες μέχρι την ανάλυσή του.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5 – Αποτελέσματα πειραμάτων με κύβους καρότου μικρού μεγέθους

Τα πειράματα κατηγοριοποιήθηκαν με βάση τη συγκέντρωση των σωματιδίων στο πορτόν. Σε κάθε κατηγορία ανήκουν πειράματα με σχεδόν ίδια συγκέντρωση σωματιδίων στο μίγμα. Ο σκοπός αυτής της ταξινόμησης είναι να διευκολυνθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφόρων πειραμάτων μεταξύ τους με βάση (α') τον αριθμό Reynolds του ρευστού και (β') τη συγκέντρωση των σωματιδίων. Οι ακόλουθοι πίνακες παρουσιάζουν τις ομάδες των πειραμάτων και τα αντίστοιχα ακριβή αποτελέσματα.

Πίνακας 36: Αποτελέσματα των πειραμάτων της ομάδας "Group 0%"

Group 0%					
Ταυτότητα πειράματος	% Συγκέντρωση σωματιδίων	Re	Πτώση Πίεσης (Pa)	$h_{w,F}$ (W/m <sup>2</sup> *°C)	Συντελεστής Τριβής Fanning
HEX_NP008	0,00%	181,3	40804,1	403,1	0,086
HEX_NP009	0,00%	265,5	61172,5	416,3	0,057
HEX_NP010	0,00%	513,5	113766,0	456,5	0,026
HEX_NP001	0,00%	662,9	37896,2	414,6	0,035
HEX_NP011	0,00%	795,8	167667,6	551,5	0,017
HEX_NP004	0,00%	1404,4	10761,1	547,5	0,022
HEX_NP002	0,00%	1581,9	61525,2	530,3	0,014
HEX_NP005	0,00%	2065,1	15104,6	559,1	0,014
HEX_NP003	0,00%	2653,4	83727,3	606,4	0,008
HEX_NP006	0,00%	4057,7	27919,4	652,5	0,006
HEX_NP007	0,00%	6308,4	44946,5	1062,1	0,00

Πίνακας 37: Αποτελέσματα των πειραμάτων της ομάδας "Group 11% - 12%"

Group 11% - 12%					
Ταυτότητα πειράματος	% Συγκέντρωση σωματιδίων	Re	Πτώση Πίεσης (Pa)	$h_{w,F}$ (W/m <sup>2</sup> *°C)	Συντελεστής Τριβής Fanning
HEX013	11,23%	838,5	33887,1	708,7	0,031
HEX014	11,93%	1862,0	59359,2	897,9	0,013
HEX015	12,44%	2991,1	82171,0	1104,6	0,008

Πίνακας 38: Αποτελέσματα των πειραμάτων της ομάδας "Group 21%"

Group 21%					
Ταυτότητα πειράματος	% Συγκέντρωση σωματιδίων	Re	Πτώση Πίεσης (Pa)	$h_{w,F}$ (W/m <sup>2</sup> *°C)	Συντελεστής Τριβής Fanning
HEX001	21,18%	849,9	34380,5	885,9	0,032
HEX004	20,08%	2100,4	15808,7	1252,4	0,014
HEX005	23,41%	4622,9	35981,5	1672,3	0,008

Πίνακας 39: Αποτελέσματα των πειραμάτων της ομάδας "Group 25%"

Group 25%					
Ταυτότητα πειράματος	% Συγκέντρωση σωματιδίων	Re	Πτώση Πίεσης (Pa)	$h_{w,F}$ (W/m <sup>2</sup> *°C)	Συντελεστής Τριβής Fanning
HEX003	25,29%	3089,0	93870,8	1872,5	0,009
HEX006	24,49%	6897,8	57086,1	2262,3	0,005
HEX007	24,97%	336,3	75057,8	1227,3	0,069
HEX021	24,91%	3760,6	96588,5	1712,2	0,010

Πίνακας 40: Αποτελέσματα των πειραμάτων της ομάδας "Group 27% - 28%"

Group 27%-28%					
Ταυτότητα πειράματος	% Συγκέντρωση σωματιδίων	Re	Πτώση Πίεσης (Pa)	$h_{w,F}$ (W/m <sup>2</sup> *°C)	Συντελεστής Τριβής Fanning
HEX009	28,19%	977,6	247272,5	2050,9	0,025
HEX002	27,02%	1950,3	67220,5	1639,7	0,015

Πίνακας 41: Αποτελέσματα των πειραμάτων της ομάδας "Group 31% - 34%"

Group 31% - 34%					
Ταυτότητα πειράματος	% Συγκέντρωση σωματιδίων	Re	Πτώση Πίεσης (Pa)	$h_{w,F}$ (W/m <sup>2</sup> *°C)	Συντελεστής Τριβής Fanning
HEX008	31,07%	656,2	184412,6	1906,1	0,043
HEX016	30,93%	1005,3	47994,8	1471,1	0,044
HEX017	34,64%	2337,7	79823,2	2177,6	0,018
HEX018	33,35%	1645,6	60371,3	1843,1	0,025
HEX019	30,79%	1021,5	46353,5	1221,9	0,043
HEX020	33,53%	2337,3	80806,8	1932,3	0,018



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 6 – Αποτελέσματα πειραμάτων με κύβους καρότου μεγάλου μεγεθους

Ο ακόλουθος πίνακας συγκεντρώνει τα ακριβή αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν κύβοι καρότου μεγάλου μεγέθους.

Πίνακας 42: Αποτελέσματα πειραμάτων όπου χρησιμοποιήθηκαν κύβοι καρότου μεγάλου μεγέθους

Κύβοι καρότου μεγάλου μεγέθους						
Ταυτότητα πειράματος	Μέγεθος (mm)	% Συγκέντρωση σωματιδίων	Re	Πτώση Πίεσης (Pa)	$h_{w,F}$ (W/m <sup>2</sup> *°C)	Συντελεστής Τριβής Fanning
HEX010	8,37	23,53%	908,2	46590,5	932,3	0,043
HEX011	8,37	30,80%	2122,1	107812,9	2154,2	0,025
HEX012	8,37	20,13%	3191,5	102761,5	1695,3	0,010

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 7 - Αποτελέσματα πειραμάτων με μπιζέλια

Ο ακόλουθος πίνακας συγκεντρώνει τα ακριβή αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν μπιζέλια.

Πίνακας 43: Αποτελέσματα πειραμάτων όπου χρησιμοποιήθηκαν μπιζέλια

Μπιζέλια						
Ταυτότητα πειράματος	Σχήμα	% Συγκέντρωση σωματιδίων	Re	Πτώση Πίεσης (Pa)	$h_{w,F}$ (W/m <sup>2</sup> *°C)	Συντελεστής Τριβής Fanning
HEX022	sphere	17,01%	1575,2	56568,9	1241,1	0,019
HEX023	sphere	34,72%	1954,2	81179,2	1727,9	0,018
HEX024	sphere	31,41%	3011,7	119663,6	2002,7	0,012