ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Μελέτη της επανάψυξης υπερθερμανθείσας ράβδου πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος,σε κατακόρυφο κανάλι ροής με προσαγωγή νερού σε διάφορες συνθήκες

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΝΙΚΗΣ Μ. ΛΥΜΠΕΡΕΑ

Διπλωματούχου Χημικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων:
Ευάγγελος Π. Χίνης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2018

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Μελέτη της επανάψυξης υπερθερμανθείσας ράβδου πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος,σε κατακόρυφο κανάλι ροής με προσαγωγή νερού σε διάφορες συνθήκες

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΝΙΚΗΣ Μ. ΛΥΜΠΕΡΕΑ

Διπλωματούχου Χημικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ	**ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**
1. **Ε.Π. Χίνης ,** Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π. **(επιβλέπων)**	1. **Δ. Χουντάλας,** Καθηγητής Ε.Μ.Π.
2. **Μ.Ι. Αναγνωστάκης,** Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.	2. **Μ.Ι. Αναγνωστάκης,** Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
3. **Ν.Π. Πετρόπουλος,** Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.	3. **Ν.Π. Πετρόπουλος,** Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
	4. **Α. Στέγγου-Σαγιά,** Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
	5. **Ε. Ρογδάκης,** Καθηγητής Ε.Μ.Π.
	6. **Π. Ρούνη,** Λέκτορας Ε.Μ.Π.
	7. **Χ. Χουσιάδας,** Ερευνητής Α', Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος»

ΑΘΗΝΑ, 2018

«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)»

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια, πρακτική και ψυχολογική, ενός μικρού αριθμού ανθρώπων, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω προσωπικά.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον αείμνηστο Καθηγητή μου, Ευάγγελο Π. Χίνη. Η εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου από την πρώτη στιγμή της συνεργασίας μας σε συνδυασμό με την καθοδήγησή του, με βοήθησαν στην επίτευξη του πιο σημαντικού ακαδημαϊκού μου στόχου. Ευχαριστώ θερμά!

Ευχαριστώ επίσης τον κ. Α. Νικόγλου, ο οποίος ήταν εξαιρετικός συνεργάτης σε όλη την διάρκεια της Διδακτορικής Διατριβής μου. Τόσο η επιστημονική και πρακτική συμβολή του όσο και η ψυχολογική του συμπαράσταση ήταν καθοριστικής σημασίας και ανεκτίμητης αξίας.

Ακόμη, ευχαριστώ θερμά τα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής κ.κ. Μ. Αναγνωστάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π., και Ν. Πετρόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π., καθώς και τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου, για τη συνεργασία και τη βοήθειά τους στην αδιάκοπτη ολοκλήρωση της μελέτης μου.

Ξεχωριστά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σ.Ε. Σιμόπουλο, Ομότιμο Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την επιστημονική του συνδρομή στο σύνολο της Διατριβής, καθώς και για την βοήθειά του και την άμεση ανταπόκρισή του με σκοπό την ολοκλήρωση του διδακτορικού μου έργου.

Ακόμα, ευχαριστώ τον Διδάκτορα Δ. Καράγγελο, τον Διδάκτορα Κ. Καρφόπουλο καθώς και την Διδάκτορα Μ. Σάββα για τη διαρκή και ουσιαστική υποστήριξη τους στη καθημερινότητα της εργαστηριακής ζωής.

Τελειώνοντας, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ και στον πατέρα μου, στην μητέρα μου, στα δύο μου αδέλφια και στον σύζυγό μου οι οποίοι με υποστήριξαν με όλες τους τις δυνάμεις όλα αυτά τα χρόνια ενώ μου συμπαρίστανται σε κάθε προσωπικό μου βήμα.

Για την εκπόνηση της παρούσας Δ.Δ., έλαβα οικονομική ενίσχυση από τον Ε.Λ.Κ.Ε. Ε.Μ.Π. για τέσσερα έτη, υπό μορφή υποτροφίας. Ευχαριστώ τον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας και τη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών που εισηγήθηκαν θετικά και που γενικά παρείχαν τις απαιτούμενες υποδομές για τις ανάγκες της παρούσας Διατριβής.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2018

Νίκη Μ. Λυμπερέα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 11

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ 15

2.1 Εισαγωγή 15

2.2 Πειραματικές εργασίες 18

2.2.1 Επανάψυξη εκ των άνω 19

2.2.2 Επανάψυξη εκ των κάτω 23

2.2.3 Επανάψυξη εκ των άνω και κάτω 29

2.3 Μοντέλα υπολογισμού ρυθμού επανάψυξης 37

2.3.1 Αναλυτικά μοντέλα επαναψύξεως 37

2.3.2 Συσχετίσεις και ημιεμπειρικές εξισώσεις 43

2.4 Μοντέλα υπολογισμού θερμοκρασίας επανάψυξης 49

2.5 Κώδικας αξιολόγησης μοντέλων επανάψυξης (RELAP5) 58

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ 63

3.1 Βασική συγκρότηση του ΘΥΚ 63

3.2 Προδιεργασίες 68

3.3 Πειραματική διαδικασία 69

3.4 Λογισμικό καταγραφής πειραματικών δεδομένων 71

3.4.1 *Εκτέλεση προγράμματος RIG* 72

3.4.2 Πρόγραμμα RIG 73

i. RIG.FOR 77

ii. N.FOR 77

iii. R.FOR 78

iv. RW.FOR 78

v. S1.FOR 79

vi. S2.FOR 80

vii. S3.FOR 81

viii. S4.FOR – S6.FOR 82

ix. S5.FOR 82

x. STEM.FOR 83

3.4.3 Επιλογή προγράμματος επανάψυξης RIG 83

4. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ 85

4.1 Πρόγραμμα μορφοποίησης πειραματικών δεδομένων 85

4.2 Πρόγραμμα επεξεργασίας μιας πειραματικής προσομοίωσης 86

4.2.1 Διαδικασία προγραμματιστικής εξέλιξης επεξεργασίας μιας πειραματικής προσομοίωσης 88
4.3 Πρόγραμμα στατιστικής επεξεργασίας των αρχείων μιας πειραματικής σειράς προσομοιώσεων 90
4.3.1 Διαδικασία προγραμματιστικής εξέλιξης επεξεργασίας των αρχείων μιας πειραματικής σειράς προσομοίωσης 94
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 97
5.1 Ανάλυση του φυσικού μηχανισμού επανάψυξης 97
5.1.1 Ατμοπαραγωγή και πτώση πίεσης 103
5.2 Μελέτη της ταχύτητας επανάψυξης 105
5.2.1 Επίδραση της γεωμετρίας του καναλιού δοκιμών στην ταχύτητα επανάψυξης 113
5.3 Μελέτη της θερμοκρασίας επανάψυξης 124
5.3.1 Διαστατική ανάλυση 129
5.3.2 Μελέτη θερμοκρασίας επανάψυξης σε πειράματα επανάψυξης εκ των άνω 134
6. ΚΩΔΙΚΑΣ RELAP5/MOD 3.3 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΠΑΝΑΨΥΞΗΣ 137
6.1 Αξιολόγηση κώδικα RELAP5 138
6.2 Άδεια χρήσης κώδικα RELAP5 139
6.3 Γενικά στοιχεία σύνταξης κώδικα 139
6.3.1 Εντοπισμός σφαλμάτων (debugging) 140
6.4 Διαδικασία κατασκευής ενός μοντέλου RELAP5 140
6.5 Αξιολόγηση χρησιμοποίησης κώδικα 146
6.6 Στάδια ανάλυσης των πειραμάτων επανάψυξης εκ των κάτω 148
6.6.1 Συγκέντρωση και οργάνωση των πληροφοριών που ορίζουν την πειραματική εγκατάσταση 148
6.6.2 Καθορισμός, τμηματοποίηση (nodalization) και οριοθέτηση συστήματος προσομοίωσης 149
6.6.3 Εισαγωγή και αρχικοποίηση του προβλήματος 154
6.6.4 Εκτέλεση του κώδικα RELAP5/MOD3.3 και ανάλυση του αποτελέσματος .. 156
6.7 Ανάλυση αποτελεσμάτων RELAP5/MOD3.3 157
6.7.1 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του RELAP5/MOD3.3 158
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 171
7.1 Σημεία πρωτοτυπίας της Διατριβής 173
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 177

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1 Αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος [1] 16
Σχήμα 2-2 Αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος [2] 16
Σχήμα 2-3 Πειραματική εγκατάσταση των White-Duffey [28] 25
Σχήμα 2-4 Μεταβολές πίεσης και ισχύος κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης με ρυθμό παροχής ψυκτικού 59 l/min [29] 27
Σχήμα 2-5 Μεταβολές πίεσης και ισχύος κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης με ρυθμό παροχής ψυκτικού 29 l/min [29] 27
Σχήμα 2-6 Συσχέτιση πειραματικών δεδομένων των Piggott et al. [36] 30
Σχήμα 2-7 Εκτιμήσεις ανάπτυξης των κυμάτων σύμφωνα με τα πειράματα των Duffey-Ackerman [40]. Στον άξονα των τεταγμένων δίνεται το ύψος των κυμάτων ενώ στον άξονα των τετμημένων ο χρόνος που πέρασε μετά το σχηματισμό τους. Στον πίνακα του διαγράμματος η στήλη (j_g) δίνει τις διάφορες ταχύτητες αέρα/ατμού ενώ η δεύτερη στήλη τις αρχικές θερμοκρασίες της υπερθερμανθείσας ράβδου. 33
Σχήμα 2-8 Σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση [36] 38
Σχήμα 2-9 Συσχέτιση πειραματικών δεδομένων των Duffey et al. [39] 45
Σχήμα 2-10 Συσχέτιση πειραματικών δεδομένων των Saxena et al. [38] 49
Σχήμα 2-11 Επανάψυξη εκ των κάτω με υψηλό ρυθμό ροής μάζας και διάγραμμα θερμικής ροής [64] 51
Σχήμα 2-12 Θερμοκρασιακή ιστορία επαναψυχόμενης ράβδου και πρώτη παράγωγος από πείραμα της παρούσης Δ.Δ. (πείραμα No 12051341.14) 52
Σχήμα 2-13 Προτεινόμενη συσχέτιση της θερμοκρασίας επανάψυξης από την ταχύτητα εισόδου του ψυκτικού από τους Kimball et al. [71] 57
Σχήμα 3-1 Σχηματική αναπαράσταση θερμοϋδραυλικού κυκλώματος του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Με κόκκινο έχουν χρωματιστεί οι κλάδοι που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση πειραμάτων επανάψυξης εκ των κάτω 65
Σχήμα 3-2 Σχηματικό διάγραμμα υπέρθερμης ράβδου και θέσεις των θερμοστοιχείων 67
Σχήμα 3-3 Σχηματικό διάγραμμα δοχείου βρασμού και θέσεις των θερμοστοιχείων 69
Σχήμα 3-4 Μιμικό διάγραμμα του ΘΥΚ κατά τη διαδικασία επανάψυξης εκ των άνω 75
Σχήμα 3-5 Μιμικό διάγραμμα του ΘΥΚ κατά τη διαδικασία επανάψυξης εκ των κάτω 76
Σχήμα 4-1 Απόσταση θερμοστοιχείων TC11 έως TC4 από το θερμοστοιχείο TC12 έναντι του χρόνου επανάψυξής τους (πείραμα No 12051143.14) 92
Σχήμα 5-1 Διάγραμμα της θερμοκρασιακής ιστορίας του τοιχώματος της ράβδου κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης (πείραμα No 14051043.14) 98
Σχήμα 5-2 Διάγραμμα της θερμοκρασιακής ιστορίας του θερμοστοιχείου TC6 της ράβδου κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης (πείραμα No 13101105.14) 101
Σχήμα 5-3 Διάγραμμα της θερμοκρασιακής ιστορίας του θερμοστοιχείου TC6 της ράβδου κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης (πείραμα No 19051047.14) 102
Σχήμα 5-4 Διάγραμμα της παροχής μάζας του ψυκτικού κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης (πείραμα No 01101100.14) 104
Σχήμα 5-5 Διάγραμμα της θερμοκρασιακής ιστορίας των θερμοστοιχείων TC6 και TC4 κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης (πείραμα No 01101100.14) 104
Σχήμα 5-6 Αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης έναντι αρχικής θερμοκρασίας ράβδου για κάθε πειραματική σειρά σε συνθήκες κορεσμού 108

Σχήμα 5-7 Αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης έναντι αρχικής θερμοκρασίας ράβδου για κάθε πειραματική σειρά σε υπόψυξη 25°C 109
Σχήμα 5-8 Αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης έναντι αρχικής θερμοκρασίας ράβδου για κάθε πειραματική σειρά σε υπόψυξη 50°C 110
Σχήμα 5-9 Box-Cox διάγραμμα κανονικότητας για την εξίσωση 5-1 112
Σχήμα 5-10 Κανονικό διάγραμμα ποσοστημορίων της προτεινόμενης εμπειρικής συσχέτισης προσδιορισμού της ταχύτητας επανάψυξης 113
Σχήμα 5-11 Ταχύτητα πλημμυρισμού έναντι παροχής μάζας ψυκτικού για τέσσερα κανάλια δοκιμών διαφορετικής γεωμετρίας 115
Σχήμα 5-12 Διάγραμμα πειραματικών τιμών ταχύτητας επανάψυξης έναντι παροχής μάζας ψυκτικού σε αρχικές θερμοκρασίες τοιχώματος ράβδου 400°C 117
Σχήμα 5-13 Διάγραμμα πειραματικών τιμών ταχύτητας επανάψυξης έναντι παροχής μάζας ψυκτικού σε αρχικές θερμοκρασίες τοιχώματος ράβδου 500°C 118
Σχήμα 5-14 Λογαριθμικά διαδράμματα πειραματικών αδιάστατων τιμών αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης έναντι τροποποιημένου αριθμού Biot σε σταθερή αρχική θερμοκρασία τοιχώματος (πάνω: 400°C, κάτω: 500°C) 120
Σχήμα 5-15 Διάγραμμα αδιάστατων τιμών ταχύτητας έναντι τροποποιημένου αριθμού Biot. Με κόκκινο απεικονίζονται οι παρατηρήσεις σε αρχική θερμοκρασία τοιχώματος 400°C και με μπλε σε θερμοκρασία 500°C 122
Σχήμα 5-16 Διάγραμμα αδιάστατων τιμών ταχύτητας έναντι τροποποιημένου αριθμού Biot. Με κόκκινο απεικονίζονται οι παρατηρήσεις σε αρχική θερμοκρασία τοιχώματος 400°C, με μπλε σε θερμοκρασία 500°C, με πράσινο σε θερμοκρασία 700°C και με πορτοκαλί σε θερμοκρασία 800°C 123
Σχήμα 5-17 Θερμοκρασία επανάψυξης των θερμοστοιχείων TC11 έως TC4 έναντι της απόστασής τους από το θερμοστοιχείο TC12 (πείραμα No 01101044.14) 125
Σχήμα 5-18 Θερμοκρασία επανάψυξης των θερμοστοιχείων TC10 έως TC4 έναντι της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου (πειραματικές συνθήκες: βαθμοί υπόψυξης ψυκτικού 25°C, παροχή ψυκτικού 0.042 $kg \cdot s^{-1}$) 126
Σχήμα 5-19 Επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου, της παροχής μάζας ψυκτικού και της θερμοκρασίας εισόδου του ψυκτικού στη θερμοκρασία επανάψυξης 128
Σχήμα 5-20 Πειραματική θερμοκρασία επανάψυξης έναντι προβλεπόμενης θερμοκρασίας επανάψυξης 134
Σχήμα 5-21 Επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου και της παροχής μάζας ψυκτικού στη θερμοκρασία επανάψυξης στα πειράματα επανάψυξης εκ των άνω [20] 135
Σχήμα 6-1 Παράδειγμα *στοιχείου*, *κάρτας* και *λέξης* σε ένα τμήμα του κώδικα RELAP5 142
Σχήμα 6-2 Λογικό διάγραμμα αξιολόγησης χρησιμοποίησης κώδικα RELAP5/MOD3 [110] 147
Σχήμα 6-3 Διάγραμμα βηματικής προώθησης του υγρού μετώπου έναντι του χρόνου για τις δύο προτεινόμενες τμηματοποιήσεις του καναλιού δοκιμών 152
Σχήμα 6-4 Σχηματική αναπαράσταση καθορισμού, οριοθέτησης και τμηματοποίησης του συστήματος προσομοίωσης 153
Σχήμα 6-5 Μήνυμα σφάλματος του Relap5/MOD3.3 156
Σχήμα 6-6 Σύγκριση της πραγματικής θερμοκρασιακής ιστορίας με την προβλεπόμενη θερμοκρασιακή ιστορία του θερμοστοιχείου TC10 (πείραμα No 14051030.14) 159
Σχήμα 6-7 Σύγκριση της πραγματικής θερμοκρασιακής ιστορίας με την προβλεπόμενη θερμοκρασιακή ιστορία του θερμοστοιχείου TC10 (πείραμα No 28051213.14) 160

Σχήμα 6-8 Σύγκριση της πραγματικής θερμοκρασιακής ιστορίας με την προβλεπόμενη θερμοκρασιακή ιστορία του θερμοστοιχείου TC10 (πείραμα No 07101413.14)..... 161
Σχήμα 6-9 Σύγκριση της πραγματικής θερμοκρασιακής ιστορίας με την προβλεπόμενη θερμοκρασιακή ιστορία του θερμοστοιχείου TC10 (πείραμα No 30101101.14)..... 162
Σχήμα 6-10 Σύγκριση πειραματικών και προβλεπόμενων θερμοκρασιακών καμπυλών του πειράματος FZK No. T16106 [124] 163
Σχήμα 6-11 Πειραματική και προβλεπόμενη θερμοκρασιακή ιστορία του θερμοστοιχείου TC10 με τη χρήση κάρτας σκανδαλισμού (πείραμα No 28051213) 164
Σχήμα 6-12 Απόκλιση θερμοκρασίας επανάψυξης έναντι απόστασης από την είσοδο του καναλιού δοκιμών με χρήση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων MgO..... 166
Σχήμα 6-13 Απόκλιση θερμοκρασίας επανάψυξης έναντι απόστασης από την είσοδο του καναλιού δοκιμών με χρήση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων UO_2 167
Σχήμα 7-1 Διαγραμματική αποτύπωση των μηχανισμών επανάψυξης καθώς και καταγραφή του υγρού μετώπου κατά τη διάρκεια επανάψυξης (πείραμα No 13101105.14) 174

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1 Πειραματικές εργασίες στην επανάψυξη εκ των άνω 34
Πίνακας 2-2 Πειραματικές εργασίες στην επανάψυξη εκ των κάτω..... 35
Πίνακας 2-3 Πειραματικές εργασίες στην επανάψυξη εκ των κάτω και εκ των κάτω 36
Πίνακας 2-4 Εργασίες με σταθερή θερμοκρασία επανάψυξης 54
Πίνακας 5-1 Συντελεστές γραμμικής συσχέτισης και έλεγχος αξιοπιστίας τριών πειραματικών σειρών..... 106
Πίνακας 5-2 Ατμοσφαιρικά πειραματικά δεδομένα επανάψυξης εκ των κάτω 116
Πίνακας 5-3 Ανάλυση διαστάσεων μεταβλητών 131
Πίνακας 6-1 Σύνοψη των θερμουδραυλικών στοιχείων του RELAP5 [109]..... 143
Πίνακας 6-2 Σύνοψη των μεταβλητών ελέγχου του RELAP5 [109] 145
Πίνακας 6-3 Πειράματα επανάψυξης προς αξιολόγηση με τον κώδικα RELAP5/MOD3.3. 159
Πίνακας 6-4 Μέση τετραγωνική απόκλιση της προβλεπόμενης από την πειραματική θερμοκρασία επανάψυξης για κάθε πείραμα..... 169

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής (ΔΔ) είναι η μελέτη της επανάψυξης της επιφάνειας μιας υπερθερμανθείσας ράβδου με εισαγωγή νερού εκ των άνω ή εκ των κάτω, σε διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας και παροχής ώστε να μελετηθούν όλα τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κάτω από αυτές τις συνθήκες. Με τον γενικό όρο επανάψυξη εννοούμε τη διαδικασία μείωσης της θερμοκρασίας μιας υπερθερμανθείσας επιφάνειας έπειτα από την εισαγωγή κάποιου ψυκτικού μέσου όπως νερό, φρέον κ.ά.

Η μελέτη των φαινομένων κατά τη διαδικασία της επανάψυξης αποτελεί ένα από τα κύρια θέματα της παγκόσμιας βιβλιογραφίας στον τομέα της θερμοϋδραυλικής και έχει άμεση επίδραση σε τομείς όπως η πυρηνική τεχνολογία, η μεταλλουργία κτλ. Συγκεκριμένα, στον τομέα της πυρηνικής τεχνολογίας, η επανάψυξη μιας υπερθερμανθείσας ράβδου πυρηνικού καυσίμου είναι μεγίστης σημασίας όταν έχει προηγηθεί ατύχημα απώλειας ψυκτικού.

Στη συγκεκριμένη ΔΔ η μελέτη των προαναφερθέντων φαινομένων γίνεται:

- Με τη διενέργεια πειραμάτων επανάψυξης εκ των κάτω και τη σύγκρισή τους με προηγούμενα πειράματα επανάψυξης εκ των άνω, όπου έλαβαν χώρα στην ίδια θερμοϋδραυλική εγκατάσταση.
- Με τη βοήθεια του λογισμικού προσομοίωσης της θερμοϋδραυλικής λειτουργίας ενός πυρηνικού αντιδραστήρα (RELAP5/MOD3.3) κατά την διάρκεια ενός πιθανού ατυχήματος.

Στη συνέχεια αναφέρεται το περιεχόμενο και ο σκοπός του κάθε κεφαλαίου της ΔΔ, ώστε να έχει ο αναγνώστης μια πρώτη επαφή με το αντικείμενο που πραγματεύεται.

Στο Κεφάλαιο 2 της ΔΔ γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των κυριότερων εργασιών που μελετούν την επανάψυξη μιας υπερθερμανθείσας ράβδου μετά από ατύχημα απώλειας ψυκτικού μέσου. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των βασικότερων πειραματικών εργασιών και των συμπερασμάτων τους. Ακόμη, παρουσιάζονται τα κυριότερα αναλυτικά και ημιεμπειρικά μοντέλα που συσχετίζουν την ταχύτητα και τη θερμοκρασία επανάψυξης με βασικές μεταβλητές όπως είναι οι θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού της ράβδου καθώς και οι αρχικές

πειραματικές συνθήκες. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μια σύντομη περιγραφή των εργασιών που έχουν γίνει για την αξιολόγηση και τη βελτίωση του κώδικα RELAP5 ο οποίος εφαρμόζεται εκτός των άλλων και για την προσομοίωση των φαινομένων επανάψυξης μιας πυρηνικής ράβδου καυσίμου μετά από ατύχημα απώλειας ψυκτικού μέσου.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η θερμοϋδραυλική εγκατάσταση του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας όπου έλαβαν χώρα τα πειράματα επανάψυξης της ΔΔ. Έμφαση δίνεται στη λειτουργία της εγκατάστασης κατά την εκτέλεση των πειραμάτων επανάψυξης με πλημμυρισμό. Για την επιτήρηση της πειραματικής εγκατάστασης χρησιμοποιήθηκε ένα λογισμικό που αρχικά συντάχθηκε ώστε να μπορεί ο πειραματιστής να παρακολουθεί και να καταγράφει τα πειράματα επανάψυξης εκ των άνω. Σημαντικό κομμάτι του κεφαλαίου κατέχει η αναφορά στις αναγκαίες τροποποιήσεις που έγιναν στο εν λόγω λογισμικό με σκοπό να δωθούν στον πειραματιστή οι ίδιες δυνατότητες και για τα πειράματα επανάψυξης εκ των κάτω.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για να γίνει η μορφοποίηση και η στατιστική επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων. Απαραίτητη, για να επιτραπεί η ανάγνωση των πειραματικών δεδομένων από το πρόγραμμα στατιστικής επεξεργασίας, είναι η κατάλληλη μορφοποίησή τους με το πρόγραμμα *rrewetting.f90* γραμμένο σε γλώσσα Fortran. Στη συνέχεια, το σύνολο των υπολογισμών, της στατιστικής επεξεργασίας και της σχεδιαστικής απεικόνισης των μορφοποιημένων πειραματικών δεδομένων γίνεται με τη βοήθεια των προγραμμάτων *ExpRun.R* και *StatsRun.R* γραμμένα σε γλώσσα R Statistics.

Στο Κεφάλαιο 5 μελετώνται οι μηχανισμοί επανάψυξης μέσω της οπτικής παρατήρησης αλλά και κατάλληλων γραφημάτων που προκύπτουν από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων. Επίσης, διερευνάται η εξάρτηση της ταχύτητας και της θερμοκρασίας επανάψυξης από τις αρχικές πειραματικές συνθήκες, τη γεωμετρία του καναλιού δοκιμών και τις θερμοφυσικές ιδιότητες της ράβδου. Σαν αποτέλεσμα αυτής της μελέτης, προτείνεται η χρήση αδιάστατων και μη ημιεμπειρικών εξισώσεων οι οποίες συσχετίζουν τα ανωτέρω μεγέθη.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται ο κώδικας RELAP5/MOD3.3 που συντάχθηκε στο πλαίσιο της ΔΔ. Σκοπός του κώδικα είναι η προσομοίωση των πειραμάτων

επανάψυξης εκ των κάτω όπως διεξήχθησαν στη θερμοϋδραυλική εγκατάσταση του εργαστηρίου. Κατόπιν αξιολογείται η ικανότητα πρόβλεψης του κώδικα μέσω της σύγκρισης των προβλεπόμενων τιμών με τις πειραματικές.

Ολοκληρώνοντας, στο Κεφάλαιο 7 αναφέρονται τα πιο βασικά συμπεράσματα της εργασίας. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα σημεία πρωτοτυπίας της παρούσης ΔΔ ενώ προτείνονται και μελλοντικές ερευνητικές εργασίες τόσο στο πειραματικό κομμάτι όσο και στο κομμάτι της προσομοίωσης με το πακέτο RELAP5.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

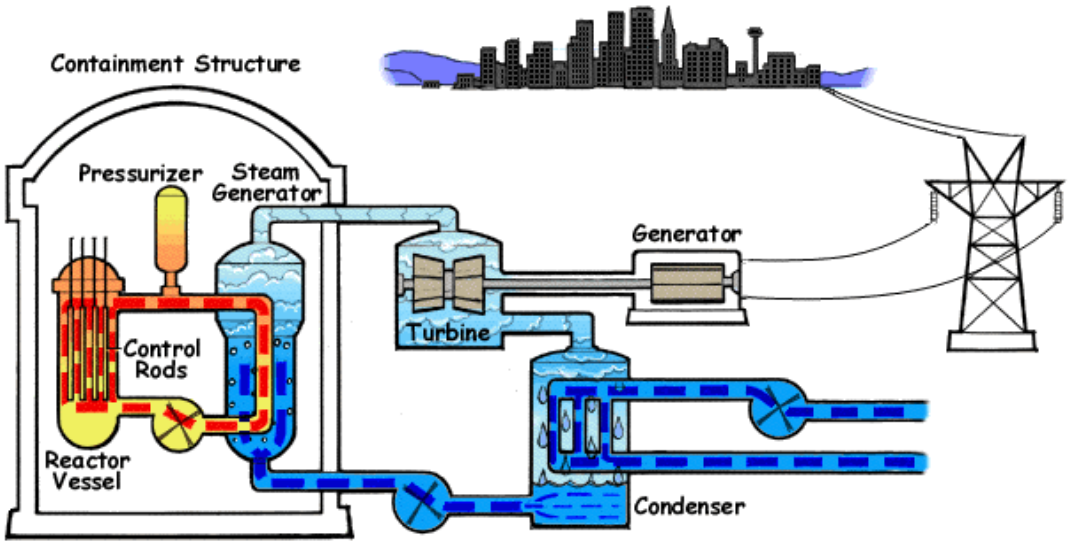
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά του αντικειμένου μελέτης της παρούσας ΔΔ. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια εκτενέστερη αναφορά της κυριότερης βιβλιογραφίας πάνω στο θέμα της επαναψύξεως των ράβδων πυρηνικού καυσίμου μετά από ατύχημα απώλειας ψυκτικού μέσου (Loss Of Coolant Accident: LOCA). Αρχικά γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των πειραμάτων που διενεργήθηκαν από τους ερευνητές τόσο για επανάψυξη εκ των άνω (Top Spray Cooling ή Top Rewetting: T.R.) όσο και για επανάψυξη εκ των κάτω με τη μέθοδο του πλημμυρισμού (Bottom Flooding: B.F.). Έπειτα παρουσιάζονται τα βασικότερα αναλυτικά και ημιεμπειρικά μοντέλα που αφορούν στον υπολογισμό του ρυθμού επαναψύξεως. Τέλος γίνεται εκτενής αναφορά στη θερμοκρασία επανάψυξης καθώς και ανασκόπηση στα κυριότερα μοντέλα υπολογισμού της.

2.1 Εισαγωγή

Κατά το παρελθόν έχουν πραγματοποιηθεί ατυχήματα μεγάλης κλίμακας σε πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος (Chernobyl, Three Mile Island, Fukushima) τα οποία και ενεργοποίησαν την επιστημονική κοινότητα με σκοπό να γίνει μια πιο ενδελεχής έρευνα πάνω στους φυσικούς μηχανισμούς απώλειας και επανένταξης ψυκτικού μέσου στον πυρήνα των αντιδραστήρων. Η μεγαλύτερη προσοχή δόθηκε στους υδρόψυκτους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος ελαφρού ύδατος (Light Water Reactor – LWR), καθώς αποτελούν και τον πιο κοινό τύπο παγκοσμίως.

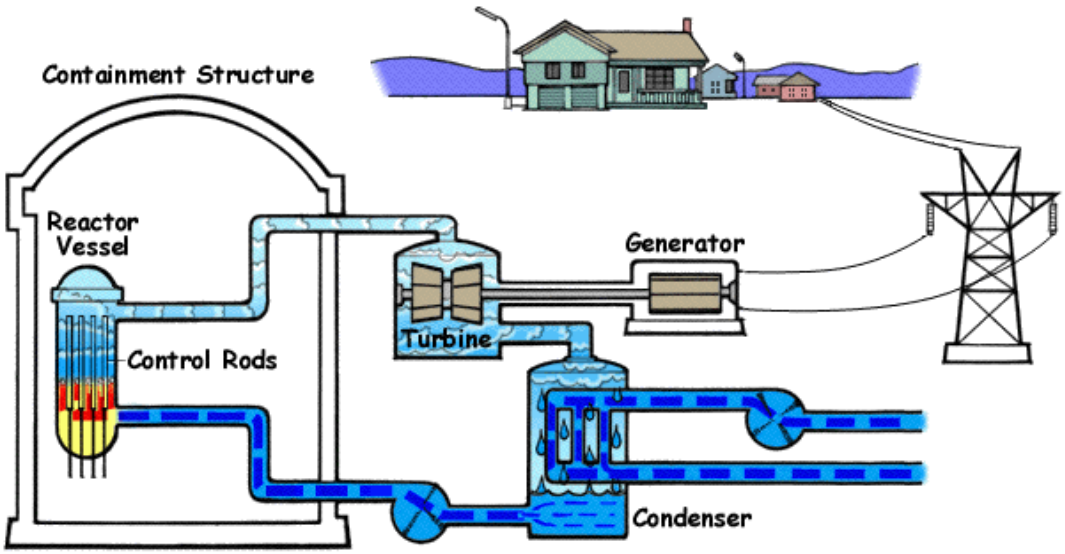
Οι LWR χρησιμοποιούν το νερό για την μεταφορά θερμότητας από τον πυρήνα στους ατμοστροβίλους καθώς και για την απομάκρυνση της εναπομείνουσας θερμότητας (residual heating) από το κύκλωμα ατμού. Οι LWR χωρίζονται στους αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος (Pressurized Water Reactors – PWR) και στους αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος (Boiling Water Reactors – BWR). Η βασική διαφορά τους έγκειται στον τρόπο μεταφοράς θερμότητας από τον πυρήνα στους ατμοστροβίλους. Στους αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος, η θερμότητα του πυρηνικού καυσίμου μεταφέρεται στο νερό του πυρήνα το οποίο θερμαίνεται χωρίς ωστόσο να βράζει (συνήθης πίεση λειτουργίας 150 bar). Στη συνέχεια, το υπέρθερμο νερό του πυρήνα διέρχεται εντός σωληνώσεων από την ατμογεννήτρια, όπου μεταφέρει τη θερμότητά

του σε ένα δευτερεύον κύκλωμα νερού το οποίο ατμοποιείται και κατευθύνεται στους στροβίλους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 2-1).



Σχήμα 2-1 Αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος **[1]**

Αντίθετα με τον PWR, στους αντιδραστήρες BWR το νερό του πυρήνα του Π.Α.Ι. βράζει υπό πίεση 60 bar και θερμοκρασία 285 ˚C. Ο ατμός που παράγεται από τον βρασμό κατευθύνεται απευθείας στους ατμοστροβίλους οι οποίοι ανήκουν και αυτοί στο κύκλωμα λειτουργίας του αντιδραστήρα (Σχήμα 2-2).



Σχήμα 2-2 Αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος **[2]**

Κατά τον τερματισμό της λειτουργίας ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ή κατά τη διάρκεια ατυχήματος λόγω απώλειας του ψυκτικού μέσου, συνεχίζει να παράγεται θερμότητα λόγω ραδιενεργής διάσπασης των ατόμων (decay heat) στον πυρήνα. Αυτή η εναπομείνουσα θερμότητα είναι απαραίτητο να απομακρυνθεί έγκαιρα. Η μη έγκαιρη απομάκρυνσή της μπορεί να οδηγήσει στο «λιώσιμο» του πυρήνα και στην απελευθέρωση ραδιενέργειας στο περιβάλλον. Για αυτόν τον λόγο, οι Π.Α.Ι. είναι εφοδιασμένοι με συστήματα έκτακτης επανάψυξης του πυρήνα (Emergency Core Cooling Systems: ECCS). Το νερό αποτελεί το κύριο ψυκτικό μέσο αυτών των συστημάτων με σκοπό την απομάκρυνση της θερμότητας από τον πυρήνα.

Η μελέτη των φυσικών μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα στον πυρήνα κατά την ενεργοποίηση των συστημάτων επανάψυξής του καθώς και οι φυσικές παράμετροι που επηρεάζουν τους μηχανισμούς αυτούς, αποτελούν το αντικείμενο μελέτης ενός μεγάλου συνόλου θεωρητικών και πειραματικών εργασιών. Η πλειοψηφία των πειραματικών ερευνητικών εργασιών αποτελούν μικρής κλίμακας πειραματικές προσομοιώσεις ατυχήματος απώλειας ψυκτικού μέσου του πυρήνα του Π.Α.Ι. Μοναδική εξαίρεση απότελούν τα μεγάλης κλίμακας πειράματα FLECHT (Full Length Emergency Cooling Heat Transfer). Το πυρηνικό καύσιμο καθώς και η θερμότητα που παραμένει στον αντιδραστήρα μετά τον τερματισμό λειτουργίας, προσομοιάζονται είτε από μία απλή ράβδο είτε από μία δέσμη ράβδων ηλεκτρικά θερμαινόμενων με θερμοκρασίες που μπορεί να ξεπεράσουν και τους 1200°C. Οι αρχικές συνθήκες πίεσης των πειραμάτων κυμαίνονται μεταξύ 1-70 bar ενώ οι παροχές μάζας του ψυκτικού μέσου παίρνουν τιμές μεταξύ 1.016 $kg \cdot s^{-1}$ – 116 $kg \cdot s^{-1}$. Ως ψυκτικά μέσα προσομοίωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτός του νερού και άλλα κρυογενικά υγρά όπως το Freon-12. Ωστόσο, λόγω του υψηλού δυναμικού καταστροφής του όζοντος (ozone-depletion potential ODP) του Freon-12, προτάθηκε από τους Cheng και Mullerκαι η χρήση του Freon-134a, το οποίο έχει αποδειχθεί πως έχει παρόμοιες θερμοφυσικές ιδιότητες με το Freon-12 [3]. Η σωστή επιλογή των υγρών προσομοίωσης μπορεί να επιφέρει πολλά πλεονεκτήματα κατά την πειραματική διεργασία όπως είναι η μείωση της πίεσης λειτουργίας και της θερμοκρασίας λειτουργίας.

Οι ερευνητικές εργασίες που αφορούν τη μελέτη των μηχανισμών επανάψυξης, πολλές από τις οποίες αναφέρονται στη συνέχεια του κεφαλαίου, χωρίζονται σε θεωρητικές και πειραματικές. Το αποτέλεσμα τως εργασιών αυτών είναι ένα σύνολο προτεινόμενων θεωρητικών, ημιεμπειρικών και εμπειρικών μοντέλων το καθένα από τα οποία είναι εφαρμόσιμο σε ένα εύρος συνθηκών πίεσης, θερμοκρασίας και ρυθμού παροχής του ψυκτικού μέσου.

Στη συνέχεια αναφέρονται οι πειραματικές εργασίες που αφορούν την προσομοίωση της επανάψυξης ράβδου ή ράβδων πυρηνικού καυσίμου σε διάφορες αρχικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας με τη χρήση νερού ως ψυκτικού μέσου.

2.2 Πειραματικές εργασίες

Οι διάφορες πειραματικές εργασίες μπορούν να χωριστούν σε αυτές που μελέτησαν την επανάψυξη εκ των άνω με φιλμ πίπτοντος υγρού και σε αυτές που μελέτησαν την επανάψυξη εκ των κάτω με πλημμυρισμό. Υπάρχουν και άλλες οι οποίες αφορούν τη διενέργεια πειραμάτων επανάψυξης είτε εκ των άνω είτε εκ των κάτω στην ίδια πειραματική εγκατάσταση και τους δύο τρόπους επανάψυξης στην ίδια πειραματική εγκατάσταση και επιχειρούν να εξάγουν συγκριτικά αποτελέσματα και να μελετήσουν τις διαφορές στους φυσικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα στις δύο ξεχωριστές περιπτώσεις. Η πρώτη πειραματική εργασία πάνω στο ατύχημα απώλειας ψυκτικού μέσου έγινε με επανάψυξη εκ των άνω όπως αναφέρεται από τους Shires et al. το 1964 [4].

Δύο είναι τα βασικά μεγέθη που ενδιαφέρουν περισσότερο να υπολογιστούν και να προσδιοριστούν κατά τη διενέργεια πειράματος επανάψυξης: η ταχύτητα επανάψυξης ή/και η θερμοκρασία επανάψυξης. Ως **ταχύτητα επανάψυξης** ορίζεται η ταχύτητα μετακίνησης του υγρού μετώπου του ψυκτικού επί της υπερθερμανθείσας επιφάνειας κατά τη φορά κίνησης του υγρού [5, 6]. Από την άλλη, η **θερμοκρασία επανάψυξης** ορίζεται ως η μέγιστη υφιστάμενη θερμοκρασία μιας υπέρθερμης στερεής επιφάνειας κατά την οποία είναι εφικτή η επαφή της επιφανείας με το ψυκτικό υγρό [7].

Παρακάτω, για την κατανόηση των φαινομένων, αναφέρονται ορισμένες σημαντικές πειραματικές εργασίες επανάψυξης υπερθερμανθείσας ράβδου που διενεργήθηκαν

συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας καθώς και τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν.

2.2.1 Επανάψυξη εκ των άνω

Πειράματα με T.R. παρουσιάστηκαν στις εργασίες: [4, 8, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Κάθε εργασία διενεργήθηκε σε διαφορετικές αρχικές συνθήκες όπως πιέσεις, αρχικές θερμοκρασίες περιβλήματος ή παροχές ψυκτικού μέσου. Ακόμη χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά υλικά περιβλήματος καθώς και διαφορετική μορφολογία υπερθερμανθείσας επιφανείας (ράβδος - σωλήνας, πλάκα). [1]

Μία από τις πιο πρώιμες πειραματικές εργασίες σε αυτόν τον τομέα διενεργήθηκε από τους Shires et al. [4] το 1964 οι οποίοι μελέτησαν το φαινόμενο της επανάψυξης τόσο σε απλές ράβδους όσο και σε δέσμες των 7 ράβδων. Κατά τη διάρκεια διενέργειας των ατμοσφαιρικών πειραμάτων των Shires et al. πραγματοποιήθηκαν και οι πρώτες οπτικές παρατηρήσεις εγκατάστασης του υγρού φιλμ πάνω στην υπέρθερμη επιφάνεια μετά από τον ψεκασμό της με ψυκτικό. Ακόμη, παρατήρησαν ότι όταν η θερμοκρασία του τοιχώματος του περιβλήματος της ράβδου υπερβαίνει τους 138 ˚C τότε το φιλμ νερού που κατευθυνόταν προς τα χαμηλότερα σημεία της ράβδου διαχωριζόταν σε ατμό και υγρό υπό μορφή σταγονιδίων. Αυτή η περιοχή υγρού-ατμού που ονομάστηκε περιοχή βίαιης σταγονοποίησης ή αλλιώς *sputtering region*, όρος που ορίστηκε από τους Shires et al., φάνηκε ότι μπορούσε να περιορίσει την ταχύτητα επανάψυξης. Ακόμη παρατηρήθηκε ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ της αρχικής θερμοκρασίας του τοιχώματος (T_w) και της αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης (1/u).

Το 1966 οι Bennett et al. [8] εκτέλεσαν μια σειρά πειραμάτων με φιλμ υγρού σε σωλήνα από ανοξείδωτο ατσάλι (Stainless Steel: S.S.) σε περιβάλλον ατμού με πιέσεις μεταξύ 6.89-68.9 bar. Παρατήρησαν ότι η ταχύτητα επανάψυξης μειωνόταν όσο αυξανόταν η θερμοκρασία του τοιχώματος της ράβδου όπως συνέβη και στα πειράματα των Shires et al. [4]. Μία ακόμη σημαντική παρατήρηση ήταν ότι η ταχύτητα επανάψυξης αύξανε με την αύξηση της πίεσης (P) και ήταν τελείως ανεξάρτητη από το ρυθμό ροής μάζας του νερού (G).

[1] Η διαφορά μεταξύ ράβδου και σωλήνα δεν έχει διευκρινιστεί ωστόσο στο παρόν κείμενο αναφέρονται ως ακριβής μετάφραση της βιβλιογραφίας.

Επόμενο σημαντικό πείραμα επανάψυξης εκ των άνω, διεξήχθη από τον Yamanouchi [6] το 1968. Στα πειράματα, τα οποία έγιναν σε ατμοσφαιρικές συνθήκες πίεσης, χρησιμοποίησε μια δέσμη 36 ράβδων από S.S. τοποθετημένες σε πλέγματα των 6x6 εγκιβωτισμένες σε κανάλια 119x119 mm^2. Όσον αφορά την εξάρτηση της ταχύτητας επανάψυξης από την αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος, επιβεβαίωσε τις παρατηρήσεις των προαναφερθέντων ερευνητών. Ακόμη, παρατήρησε μια μικρή εξάρτηση της ταχύτητας επανάψυξης από το ρυθμό ροής του νερού για παροχές μάζας μεταξύ των τιμών $5 \cdot 10^{-4}$ $kg \cdot s^{-1}$ έως $16.7 \cdot 10^{-4}$ $kg \cdot s^{-1}$

Το 1970 οι Yoshioka και Hasegawa [9] διενέργησαν πειράματα πίπτοντος φιλμ υγρού σε ατμοσφαιρικές συνθήκες πίεσης χρησιμοποιώντας μια ράβδο από S.S μήκους 400 mm και εξωτερικής διαμέτρου 13 mm με παροχή μάζας εισόδου ψυκτικού μεταξύ 0.245 $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ και 2.45 $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$. Τα συμπεράσματα που κατέληξαν επιβεβαίωσαν τον Yamanouchi ως προς την επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας τοιχώματος και παροχής μάζας στην ταχύτητα επανάψυξης.

Τα έτη 1970-1971 έλαβαν χώρα από τους Duncan και Leonard [14, 15, 16] μια σειρά πειραμάτων επανάψυξης εκ των άνω σε πραγματικές συνθήκες ατυχήματος απώλειας ψυκτικού ενός αντιδραστήρα BWR (Boiling Water Reactor), τα επονομαζόμενα πειράματα FLECHT (Full Length Experimental Critical Heat Transfer). Η εγκατάσταση αποτελούνταν από 49 ράβδους τοποθετημένες σε πλέγματα των 7x7 κατασκευασμένες από S.S. ή Zircalloy. Διευκρινίζεται ότι σε κάθε πείραμα υπήρχε μόνο ένα είδος ράβδων είτε από S.S. είτε από Zircalloy. Τα πειράματα διενεργήθηκαν σε αρχικές συνθήκες πίεσης μεταξύ 1 και 6 bar και παροχής ψυκτικού μεταξύ $1.66 \cdot 10^{-5}$ $kg \cdot s^{-1}$ και $10.83 \cdot 10^{-5}$ $kg \cdot s^{-1}$. Μετά τη διεξαγωγή των πειραμάτων κατέληξαν σε δύο πολύ ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Καταρχήν παρατήρησαν ότι παρά τις διαφορετικές θερμικές ιδιότητες των ράβδων από S.S. και Zircalloy, οι δύο διαφορετικοί τύποι ράβδων ψύχθηκαν με τον ίδιο τρόπο. Ακόμη, συμπέραναν ότι για πιέσεις μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής, οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση της πίεσης ενισχύει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της επανάψυξης.

Παράλληλα με τους Duncan και Leonard οι Elliott και Rose [10, 11] μελέτησαν την επίδραση του ψεκασμού εκ των άνω στο εσωτερικό διαφόρων σωλήνων κατασκευασμένων από S.S., Zircalloy και Inconel. Τα πειράματα διενεργήθηκαν σε περιβάλλον ατμού με αρχικές πιέσεις από 3.43 bar έως και 52.8 bar. Από τα

πειράματα επιβεβαιώθηκαν τα συμπεράσματα των προγενέστερων ερευνών [4, 8, 6, 9] σχετικά με τη συσχέτιση της αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης με την αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος, για όλο το εύρος των πειραματικών πιέσεων. Επιπλέον, επιβεβαίωσαν ότι με την αύξηση της πίεσης υπάρχει αύξηση της ταχύτητας επανάψυξης, αλλά δε βρήκαν κάποια επίδραση του ρυθμού ροής μάζας με την ταχύτητα. Σε αντίθεση όμως με τους Duncan και Leonard παρατήρησαν ότι η ταχύτητα επανάψυξης ενός σωλήνα από Zircalloy (u_z) ήταν διπλάσια από την ταχύτητα επανάψυξης σε σωλήνα από S.S. (u_{ss}) ή Inconel (u_{Inc}). Τέλος, μία ακόμα σημαντική παρατήρηση που εξήχθη μετά από τα πειράματά τους στους σωλήνες από Zircalloy ήταν ότι με την αύξηση της οξείδωσης στο τοίχωμα του σωλήνα η ταχύτητα αυξανόταν κάτι που επιβεβαιώθηκε και το 1972 από τον Tong [17] ο οποίος επεσήμανε ότι μια ελαφριά εναπόθεση κρούστας πάνω στην επιφάνεια του τοιχώματος βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας από τη ράβδο στο ψυκτικό μέσο.

Το 1994 διενεργήθηκαν στο Θερμοϋδραυλικό Κύκλωμα στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας (ΕΠΤ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου πειράματα [12, 18, 19] με επανάψυξη μιας ράβδου από S.S. εκ των άνω με φιλμ πίπτοντος υγρού, τόσο σε ατμοσφαιρική πίεση (1 bar) όσο και σε μεγαλύτερες πιέσεις (2-7 bar) σε περιβάλλον ατμού. Τα συμπεράσματα αυτής της εργασίας επιβεβαίωσαν όλες τις προηγούμενες πειραματικές εργασίες. Ακόμη παρατηρήθηκε βραδύτερη επανάψυξη στα πειράματα σε ατμοσφαιρική πίεση σε σχέση με τα πειράματα που διενεργήθηκαν σε μεγαλύτερες πιέσεις ενώ επαληθεύθηκε πειραματικά ότι όσο αυξάνει η πίεση, η επίδρασή της στην ταχύτητα επανάψυξης μειώνεται. Από το 1994 και μέχρι σήμερα έχει πραγματοποιηθεί στο Θερμοϋδραυλικό Κύκλωμα του ΕΠΤ σημαντική πειραματική έρευνα πάνω στα φαινόμενα επανάψυξης με φιλμ πίπτοντος υγρού σε διάφορες αρχικές συνθήκες πίεσης, θερμοκρασίας ράβδου και παροχής ψυκτικού [20, 21]. Οι τελικές παρατηρήσεις όλων των πειραμάτων συμπίπτουν με τις προαναφερθείσες.

Η τελευταία πειραματική εργασία αποκλειστικά στην εκ των άνω επανάψυξη με φιλμ υγρού έγινε το 2010 από τους Sahu et al. [13]. Τα πειράματα έγιναν σε έναν σωλήνα από S.S. κάτω από ατμοσφαιρική πίεση. Οι Sahu et al. παρατήρησαν ότι η μεταβολή της ταχύτητας επανάψυξης είναι πιο ευαίσθητη στο ρυθμό ροής μάζας του νερού (G) για αρχική θερμοκρασία τοιχώματος 200°C σε σύγκριση με τη μεταβολή της ταχύτητας επανάψυξης για αρχική θερμοκρασία τοιχώματος ίση με 400°C. Έτσι

επιβεβαιώθηκαν όλες οι προηγούμενες εργασίες των Shires et al., Yamanouchi και Yoshioka et al.. Ωστόσο θεώρησαν πως τα μοντέλα των προηγούμενων μελετητών ήταν μερικώς επιτυχημένα στην ανάλυση των φαινομένων επανάψυξης με υψηλούς ρυθμούς παροχής μάζας ψυκτικού καθώς δεν λάμβαναν υπόψιν τους το φαινόμενο της πρόδρομης ψύξης. Ως **πρόδρομη ψύξη** ορίζεται η ψύξη της στεγνής περιοχής της υπερθερμανθείσας επιφάνειας κατάντη του υγρού μετώπου λόγω του ψεκασμού της στεγνής περιοχής από το ψυκτικό μέσο. Κατέληξαν λοιπόν πως σε υψηλούς ρυθμούς ροής μάζας νερού η διατάραξη της περιοχής του υγρού μετώπου σε συνδυασμό με το φαινόμενο της πρόδρομης ψύξης είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού επανάψυξης. Επίσης απεικόνισαν σε διαγράμματα την γραμμική εξάρτηση της ταχύτητας επανάψυξης από το γινόμενο του βαθμού υπόψυξης (ΔTsub) του νερού με το ρυθμό ροής της μάζας του. Ως βαθμός υπόψυξης υπολογίζεται η διαφορά της θερμοκρασίας κορεσμού του νερού για δεδομένη πίεση με τη θερμοκρασία κατά την είσοδό του στο τμήμα δοκιμών. Επιπλέον, για άλλη μια φορά, έγινε επιβεβαίωση της γραμμικής εξάρτησης της αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης από την αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος.

Στον Πίνακα 2-1 συνοψίζονται όλες οι πειραματικές εργασίες που προαναφέρθηκαν. Στις δύο πρώτες στήλες αναφέρονται τα ονόματα των ερευνητών και το έτος δημοσίευσης των αποτελεσμάτων τους. Στην τρίτη στήλη παρουσιάζεται η υπερθερμανθείσα επιφάνεια που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε πειραματική εγκατάσταση. Στην τέταρτη, πέμπτη και έκτη στήλη παρουσιάζονται οι αρχικές συνθήκες της πειραματικής εγκατάστασης (πίεση, αρχική θερμοκρασία τοιχώματος και ρυθμός ροής μάζας νερού). Τέλος, στην τελευταία στήλη παρουσιάζονται τα συμπεράσματα κάθε εργασίας.

Από τον Πίνακα 2-1 μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι όταν έχουμε επανάψυξη εκ των άνω η ταχύτητα επανάψυξης εξαρτάται από την αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος της υπερθερμανθείσας επιφάνειας. Ακόμη, όλα τα πειράματα που έλαβαν χώρα σε ατμοσφαιρικές πιέσεις κατέληξαν στη διαπίστωση ότι με την αύξηση της παροχής μάζας του νερού αυξάνεται και ο ρυθμός επανάψυξης. Η εξήγηση δόθηκε από τους Sahu et al. [13] όπου έγινε σύνδεση του ρυθμού παροχής μάζας με το φαινόμενο της πρόδρομης ψύξης στην ξηρή περιοχή της επιφάνειας. Αντίθετα, στα πειράματα σε πιέσεις μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής παρατηρήθηκε μια επίδραση της μεταβολής της πίεσης στην ταχύτητα επανάψυξης (αύξηση της

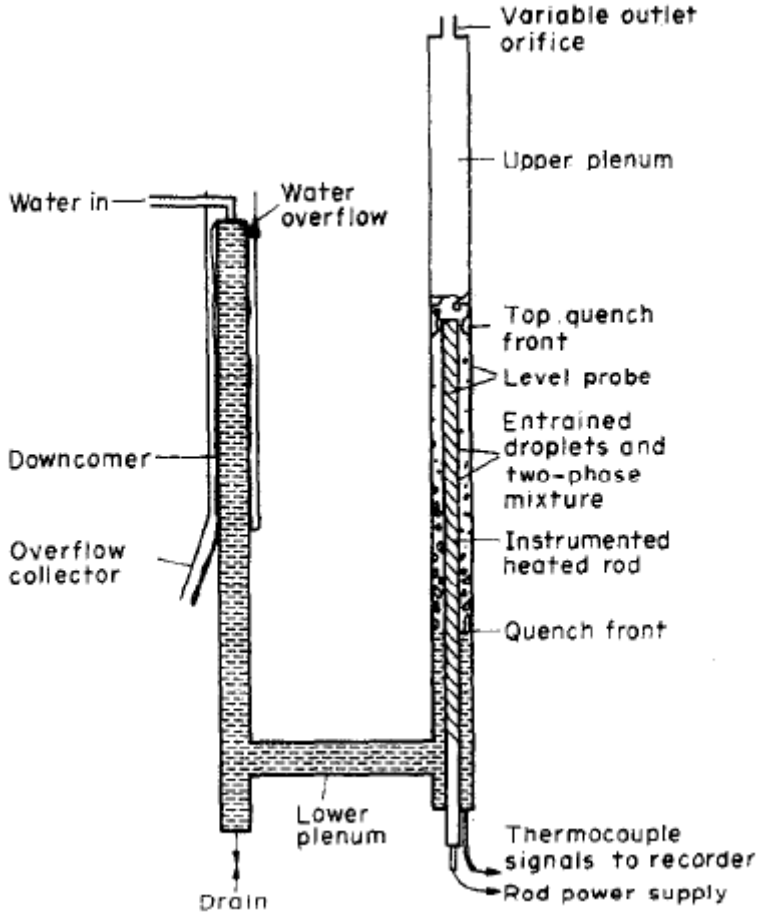
πίεσης οδηγούσε σε αύξηση της ταχύτητας) αλλά δεν παρατηρήθηκε καμία επίδραση του ρυθμού παροχής μάζας στην ταχύτητα.. Μια επιπλέον παρατήρηση από την ανάλυση που προηγήθηκε, είναι η αδυναμία εξαγωγής ασφαλούς συμπεράσματος που να αφορά την επίδραση του υλικού της υπερθερμανθείσας επιφάνειας στην ταχύτητα επανάψυξης καθώς από τα πειράματα των Dunkan et al. [15] διαπιστώνεται ότι η ταχύτητα επανάψυξης των ράβδων από zircalloy είναι σχεδόν ίση με την ταχύτητα επανάψυξης των ράβδων από ανοξείδωτο χάλυβα, ενώ από τα πειράματα των Elliott et al. [11] διαπιστώνεται πως η ταχύτητα επανάψυξης των ράβδων από zircalloy είναι διπλάσια από αυτή των ράβδων του ανοιξείδωτου χάλυβα. Τέλος, μια ακόμη διαπίστωση της ανασκόπησης των πειραμάτων επανάψυξης εκ των άνω είναι το γεγονός ότι μια ελαφριά οξείδωση της υπερθερμανθείσας επιφανείας φαίνεται να αυξάνει και την ταχύτητα επανάψυξής της.

2.2.2 Επανάψυξη εκ των κάτω

Όπως και με την επανάψυξη εκ των άνω, κατά τις προηγούμενες δεκαετίες έγιναν και πειράματα με επανάψυξη εκ των κάτω σε διάφορες αρχικές συνθήκες [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31]. Τα πειράματα επανάψυξης εκ των κάτω πραγματοποιούνται με πλημμυρισμό του καναλιού δοκιμών στο οποίο εμπεριέχεται η υπερθερμανθείσα επιφάνεια.

Ο Πίνακας 2-2 συνοψίζει τις πιο σημαντικές πειραματικές εργασίες που έγιναν από το 1971 έως σήμερα. Όπως φαίνεται από τα συμπεράσματα του πίνακα, από τις εργασίες [22, 23, 27] βλέπουμε ότι όπως και προηγουμένως με την αύξηση της πίεσης έχουμε και αύξηση της ταχύτητας επανάψυξης. Το φαινόμενο αυτό εξηγήθηκε από τον Thompson [32] ο οποίος υποστήριξε ότι η αύξηση της πίεσης οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας sputtering (T_{sput}) ή επανάψυξης (T_q), η οποία με τη σειρά της αυξάνει το ρυθμό επανάψυξης. Ακόμη παρατήρησε και εξήγησε ότι με την αύξηση του βαθμού υπόψυξης (ΔT_{sub}), δηλαδή της διαφοράς της θερμοκρασίας κορεσμού και της θερμοκρασίας εισόδου του ψυκτικού, αυξάνεται και η ταχύτητα επανάψυξης λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας επανάψυξης. Τέλος, ο Thompson παρατήρησε ότι υπάρχει ένα κρίσιμο όριο πάχους του περιβλήματος της ράβδου (δ_{crit}) άνω του οποίου η ταχύτητα επανάψυξης δεν επηρεάζεται. Το πάχος δεν έχει μια σταθερή τιμή αλλά είναι συνάρτηση της αρχικής θερμοκρασίας της υπερθερμανθείσας επιφανείας και της πίεσης του περιβάλλοντος.

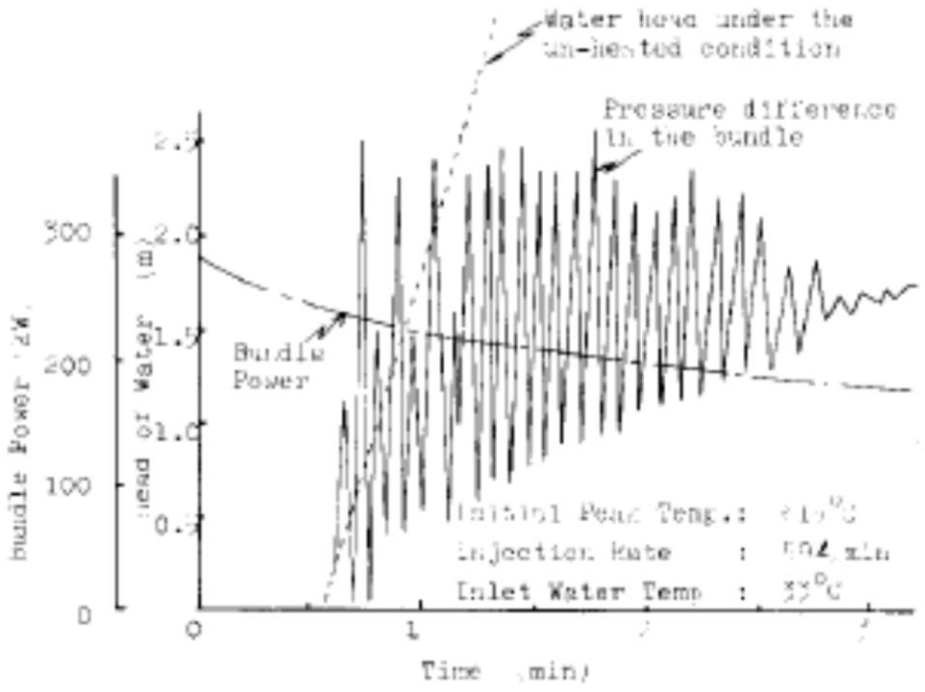
Το 1976 οι White και Duffey [28] έκαναν πειράματα επανάψυξης εκ των κάτω σε μια εγκατάσταση σχήματος U η οποία δεν επέτρεπε απευθείας την εισαγωγή του ψυκτικού με τη μορφή πλημμύρας αλλά δημιουργούσε συνθήκες ασταθούς ροής κατά την είσοδο του ψυκτικού. Με τον τρόπο αυτό μελετήθηκαν οι μηχανισμοί και η επίδραση των ενδιάμεσων αντιστάσεων των σωληνώσεων στην επανάψυξη όταν σε ένα ατύχημα απώλειας ψυκτικού δεν είναι διαθέσιμη δεξαμενή ψυκτικού στο επίπεδο κάτω από τον πυρήνα του αντιδραστήρα. Στο Σχήμα 2-3 απεικονίζεται το διάγραμμα της εγκατάστασης που χρησιμοποιήθηκε. Όπως φαίνεται από το σχήμα, το ψυκτικό έπρεπε πρώτα να περάσει από μια κάθετη σωλήνωση (downcomer) και να διέλθει μια οριζόντια σωλήνωση (lower plenum) πριν φτάσει τελικά στο κατώτερο επίπεδο της ράβδου και ξεκινήσει η διαδικασία της επανάψυξης. Μετά από μια σειρά πειραμάτων εξήχθη το συμπέρασμα ότι η ταχύτητα επανάψυξης στην περίπτωση μιας ασταθούς ροής νερού είναι σχεδόν ίση με την ταχύτητα επανάψυξης στην περίπτωση που έχουμε σταθερή ροή νερού και η επίδραση των αντιστάσεων των σωληνώσεων στη ροή του ψυκτικού μέσου είναι αμελητέα.



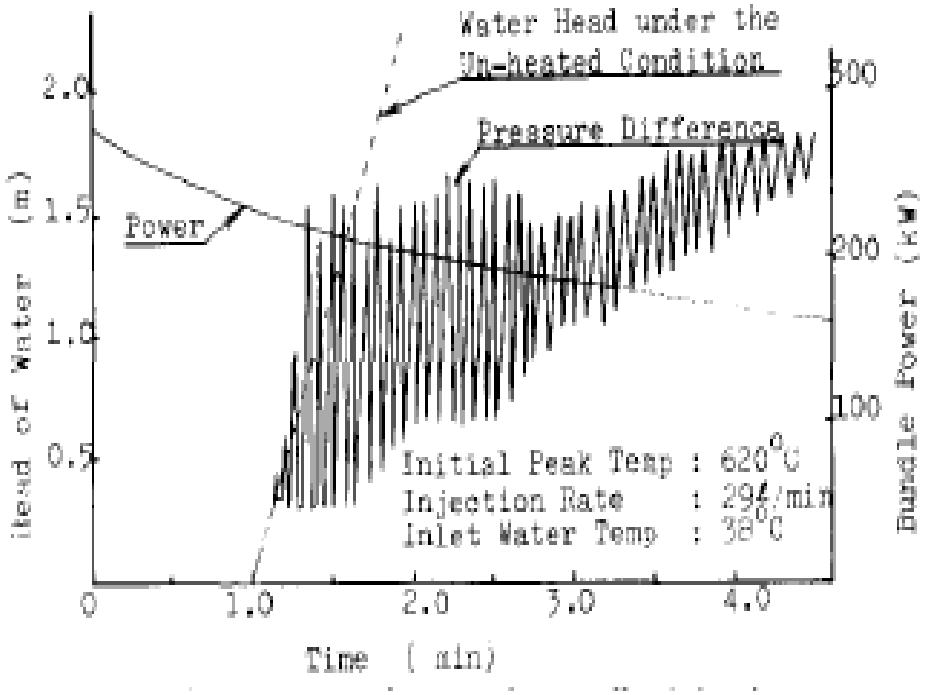
Σχήμα 2-3 Πειραματική εγκατάσταση των White-Duffey **[28]**

Το 1977 οι Naitoh et al. [29] διενήργησαν πειράματα επανάψυξης σε μία δέσμη 49 ηλεκτρικά θερμαινόμενων ράβδων με τη μέθοδο του πλημμυρισμού. Μελέτησαν διεξοδικά το φαινόμενο της "δέσμευσης ατμού" (*steam binding*) το οποίο φάνηκε να επηρεάζει σημαντικά την ταχύτητα επανάψυξης. Το φαινόμενο της δέσμευσης ατμού παρατηρείται στα πειράματα επανάψυξης εκ των κάτω και εμφανίζεται όταν η παραγωγή ατμού κατά την επανάψυξη είναι τόσο μεγάλη που προκαλεί άνοδο της πίεσης στο κανάλι επανάψυξης και καταστολή του ρυθμού εισροής του ψυκτικού. Αυτή η αντίσταση στη διέλευση του υγρού μετώπου έχει και σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας επανάψυξης. Κατά τα πειράματά τους λοιπόν παρατήρησαν ότι ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει το μέγεθος της ατμοπαραγωγής είναι ο ρυθμός ροής μάζας του ψυκτικού. Όσο μικρότερος είναι αυτός ο ρυθμός τόσο μικρότερος είναι και ο ρυθμός ατμοπαραγωγής με αποτέλεσμα η πτώση πίεσης και άρα η καταστολή του ρυθμού εισροής του ψυκτικού να είναι μικρότερη. Το

φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε να έχει την ίδια ποιοτική τάση τόσο σε υψηλές όσο και σε χαμηλές παροχές μάζας, όπως απεικονίζεται και στα Σχήματα 2-4 και 2-5. Ακόμη οι Naitoh et al. διερεύνησαν και τους παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία επανάψυξης και κατέληξαν πως η θερμοκρασία επανάψυξης εξαρτάται από την ισχύ της θερμαινόμενης ράβδου και όχι από τη θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού, την παροχή εισόδου του ψυκτικού ή την αρχική θερμοκρασία της ράβδου. Αυτό το συμπέρασμα εξήχθη από την μελέτη της αξονικής κατανομής της θερμοκρασίας επανάψυξης σε συνάρτηση με το συνημίτονο της αξονικής κατανομής της ισχύος. Εκεί παρατηρήθηκε ότι στα ανώτερα τμήματα των ράβδων, όπου υπήρχε χαμηλότερη ισχύς, η θερμοκρασία επανάψυξης ήταν σημαντικά χαμηλότερη από τα υπόλοιπα τμήματα. Στα τμήματα των ράβδων με τη μεγαλύτερη ισχύ, η θερμοκρασία επανάψυξης ήταν ίση με την θερμοκρασία της επιφάνειάς τους κατά τη στιγμή του πρώτου βίαιου βρασμού όπου σταματάει η αύξηση της θερμοκρασίας της ράβδου λόγω decay heat. Στα υπόλοιπα τμήματα, η θερμοκρασία επανάψυξης ήταν συγκριτικά χαμηλότερη. Γενικά, στο σύνολο των πειραμάτων, η θερμοκρασία επανάψυξης στα διάφορα τμήματα των ράβδων κυμάνθηκε μεταξύ των 420°C και 550°C.



Σχήμα 2-4 Μεταβολές πίεσης και ισχύος κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης με ρυθμό παροχής ψυκτικού 59 l/min **[29]**



Σχήμα 2-5 Μεταβολές πίεσης και ισχύος κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης με ρυθμό παροχής ψυκτικού 29 l/min **[29]**

Το 1981 οι Dhir et al. [30] έκαναν πειράματα επανάψυξης εκ των κάτω σε μια δέσμη 4 ράβδων. Πειραματίστηκαν πάνω σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις: α) 4 ράβδοι από Zircalloy, β) 4 ράβδοι από S.S., γ) 2 ράβδοι από Zircalloy και 2 ράβδοι από S.S. ταυτόχρονα. Παρατήρησαν ότι αν και η ταχύτητα επανάψυξης διαφέρει από τη μία ράβδο στην άλλη, παρόλα αυτά η ταχύτητα μεταβάλλεται με την απόσταση από τη θέση εισαγωγής του ρευστού. Συγκεκριμένα η ταχύτητα επανάψυξης στο κατώτερο και στο ανώτερο τμήμα της ράβδου ήταν υψηλότερη από την ταχύτητα επανάψυξης στο μεσαίο τμήμα της ράβδου. Ο υψηλότερος ρυθμός επανάψυξης στο κατώτερο τμήμα της ράβδου αποδόθηκε στο μεγαλύτερο βαθμό υπόψυξης του ψυκτικού μέσου κατά την εισαγωγή του στο κανάλι δοκιμών, ενώ στο ανώτερο τμήμα της ράβδου αποδόθηκε στο φαινόμενο της πρόδρομης ψύξης. Στο μεσαίο τμήμα της ράβδου ο μειωμένος ρυθμός επανάψυξης αποδόθηκε στην υψηλή ατμοποίηση η οποία ήταν σε θέση να προκαλέσει και αναστροφή της ροής του ψυκτικού στη ράβδο. Ακόμη, παρατήρησαν ότι η ταχύτητα επανάψυξης αυξάνει με την αύξηση της ροής μάζας του υγρού και μάλιστα ότι είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της ροής. Ακόμη, όσον αφορά τις ράβδους παρατήρησαν όπως και άλλοι μελετητές [11] ότι οι ράβδοι από Zircalloy ψύχονται γρηγορότερα από τις ράβδους από S.S.. Σημαντική παρατήρηση ήταν και η γραμμική εξάρτηση της θερμοκρασίας επανάψυξης από το βαθμό υπόψυξης του ψυκτικού καθώς και από το ρυθμό παροχής μάζας του.

Το 1987 οι De Salve et al. [33] διεξήγαγαν πειράματα B.F. και τα χρησιμοποίησαν για τη σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα του υπολογιστικού κώδικα RIBFA που δημιούργησαν οι ίδιοι. Από τα πειράματά τους προέκυψε ότι η θερμοκρασία επανάψυξης φαίνεται να εξαρτάται από τη θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού στο κανάλι και από την αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος της υπερθερμανθείσας επιφανείας. Αναφέρουν επίσης και την επίδραση του ρυθμού ροής μάζας του ψυκτικού στη θερμοκρασία επανάψυξης η οποία όμως φαίνεται να είναι μικρή σε σχέση με την επίδραση των προηγούμενων παραμέτρων.

Τέλος, το 1991 οι Tuzla et al. [31] διαπίστωσαν από τα δικά τους πειράματα B.F. ότι όταν σε ατμοσφαιρική πίεση αυξηθεί η ροή εισόδου του νερού υπάρχει αύξηση της ταχύτητας επανάψυξης, φαινόμενο που παρατηρήθηκε και στα πειράματα T.R..

Από τα προηγούμενα φαίνεται ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την επανάψυξη εκ των άνω και οι παράγοντες που επηρεάζουν την επανάψυξη εκ των κάτω είναι

παρόμοιοι αφού οι παρατηρήσεις των μελετητών δείχνουν να συμπίπτουν και να αλληλοεπιβεβαιώνονται. Ωστόσο, όσον αφορά την περίπτωση της επίδρασης της παροχής μάζας, τα συμπεράσματα είναι διαφορετικά για τις δύο περιπτώσεις επανάψυξης εφόσον διαπιστώνεται ότι στην περίπτωση της επανάψυξης εκ των κάτω ο παράγοντας αυτός είναι ισχυρός και επηρεάζει σημαντικά το ρυθμό της επανάψυξης. Σε αντίθετη περίπτωση, κατά τα πειράματα επανάψυξης εκ των άνω δεν διαπιστώνεται ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της παροχής μάζας ψυκτικού και της ταχύτητας επανάψυξης.

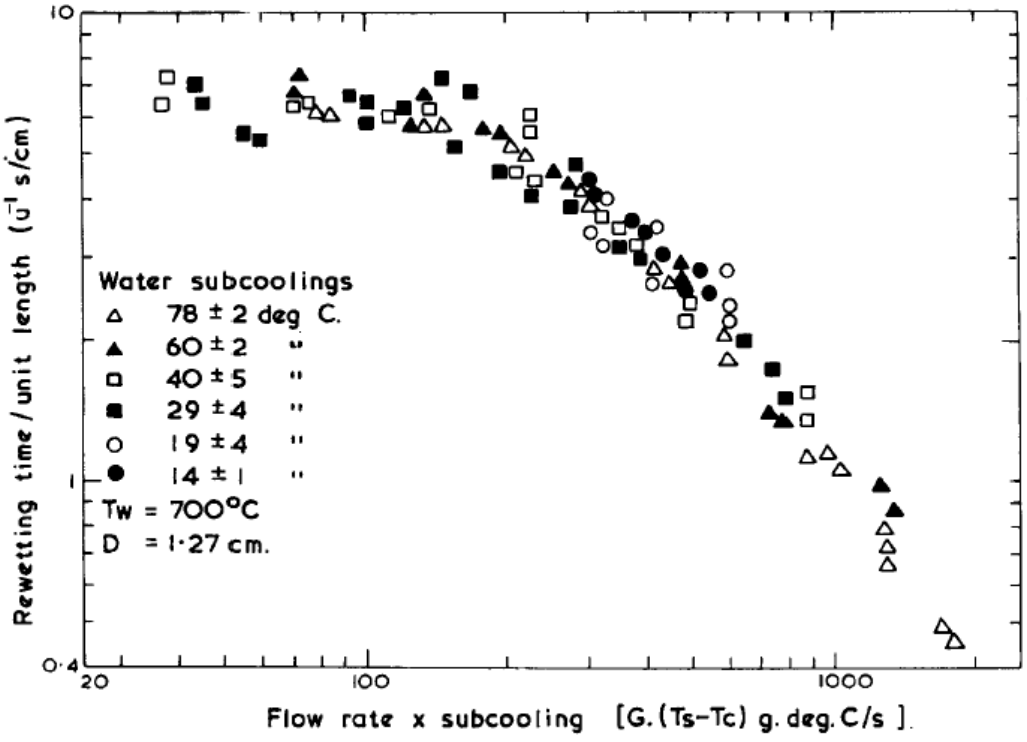
2.2.3 Επανάψυξη εκ των άνω και κάτω

Είναι λίγοι οι μελετητές οι οποίοι κατάφεραν στην ίδια πειραματική διάταξη να διεξάγουν πειράματα επανάψυξης τόσο εκ των άνω όσο και εκ των κάτω, ώστε στο τέλος να γίνει μια ακριβέστερη σύγκριση των αποτελεσμάτων [34, 35, 36, 37, 38].

Το 1972 οι Duffey και Porthouse [34] διεξήγαγαν πειράματα επανάψυξης εκ των άνω με φιλμ πίπτοντος υγρού τόσο σε υπερθερμανθείσα ράβδο από S.S. όσο και σε σωλήνα χαλκού. Όλα τα πειράματα έγιναν σε περιβάλλον ατμοσφαιρικής πίεσης. Από τα συμπεράσματά τους επιβεβαιώθηκαν οι προηγούμενοι ερευνητές όσον αφορά την εξάρτηση της ταχύτητας από την αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος, το ρυθμό ροής μάζας του νερού και την πίεση. Διαπίστωσαν ότι η αύξηση της ροής μάζας του νερού συσχετίζεται σε ευθεία αναλογία με το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (h) από την επιφάνεια της υπερθερμανθείσας ράβδου στο ψυκτικό, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ανάλογα και ο ρυθμός επανάψυξης. Ακόμη, έδωσαν και μια εξήγηση που αφορά την εξάρτηση της ταχύτητας επανάψυξης από την πίεση. Σύμφωνα με αυτήν, μια αύξηση της πίεσης, η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη με την μετατόπιση προς τα πάνω της θερμοκρασίας βρασμού, έχει σαν αποτέλεσμα την ταυτόχρονη μείωση του όγκου του ατμού στην περιοχή του υγρού μετώπου άρα και τη μείωση της διαταραχής της ροής του ψυκτικού επί της υπέρθερμης επιφάνειας.

Το 1973 οι Duffey et al. [39] διεξήγαγαν πειράματα επανάψυξης εκ των κάτω στην ίδια εγκατάσταση με την προαναφερθείσα. Συμπέραναν ότι οι φυσικοί μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα τόσο στα πειράματα T.R. όσο και στα πειράματα B.F. είναι παρόμοιοι και η ταχύτητα επανάψυξης θα μπορούσε να υπολογιστεί από μία μόνο σχέση.

Τα έτη 1973 και 1975 οι Piggott και Porthouse [35, 36] έκαναν πειράματα επανάψυξης στην ίδια εγκατάσταση με ροή ψυκτικού μέσου εκ των άνω με φιλμ υγρού και με ροή ψυκτικού εκ των κάτω με πλημμυρισμό. Από τα πειράματα παρατήρησαν ότι μια αύξηση του βαθμού υπόψυξης αυξάνει την ταχύτητα επανάψυξης, γεγονός που επιβεβαιώθηκε αργότερα και από άλλους πειραματιστές [37]. Επίσης, παρατήρησαν ότι ελαφρά οξείδωση της επιφάνειας της ράβδου, η οποία μπορεί να γίνει ορατή δια γυμνού οφθαλμού, οδηγούσε σε αύξηση της ταχύτητας επανάψυξης έως και πέντε φορές. Αυτή η αύξηση του ρυθμού επανάψυξης αποδίδεται στην αύξηση του αριθμού των πυρήνων βρασμού πάνω στην υπέρθερμη επιφάνεια. Ακόμη, ανέφεραν ότι σε υψηλούς ρυθμούς ροής μάζας και υψηλούς βαθμούς υπόψυξης, η ταχύτητα επανάψυξης είναι ανάλογη του γινομένου $G \cdot \Delta T_{sub}$ ενώ σε χαμηλούς ρυθμούς ροής και μικρούς βαθμούς υπόψυξης η ταχύτητα επανάψυξης είναι σταθερή (Σχήμα 2-6). Τέλος, απέδωσαν την εξάρτηση του ρυθμού επανάψυξης από την πίεση στο γεγονός ότι μία μεταβολή της πίεσης οδηγεί σε μεταβολή του βαθμού υπόψυξης όταν η θερμοκρασία του νερού εισόδου διατηρηθεί σταθερή.



Σχήμα 2-6 Συσχέτιση πειραματικών δεδομένων των Piggott et al. **[36]**

Το 1977 οι Yu, Farmer και Coney [37] πειραματίστηκαν και στους δύο τρόπους επανάψυξης, με ροή λεπτού φιλμ εκ των άνω και με πλημμυρισμό, με στόχο να λάβουν όσο το δυνατόν περισσότερα πειραματικά αποτελέσματα για να εξάγουν σχέσεις συσχέτισης σε όλο το εύρος των πειραματικών συνθηκών. Παρατήρησαν και αυτοί την ίδια επίδραση του ρυθμού ροής μάζας του νερού και του βαθμού υπόψυξης στην ταχύτητα επανάψυξης όπως και οι προηγούμενοι μελετητές. Μετά από σύγκριση των δύο τρόπων επανάψυξης παρατήρησαν ότι ο αδιάστατος αριθμός Biot, ο οποίος εκφράζει το κριτήριο συσχέτισης της αγωγής και της συναγωγής κατά τη μεταφορά θερμότητας και ορίζεται ως:

$$Bi = \frac{\varepsilon h}{k} \qquad \textbf{2-1}$$

είναι πολύ μικρότερος στην επανάψυξη εκ των κάτω (Bi_{BF}=1-27) από την επανάψυξη εκ των άνω (Bi_{TR}=5-120), όταν το νερό είναι σε θερμοκρασία κορεσμού. Όταν όμως το νερό εισέρχεται με υπόψυξη από 70°C έως 90°C, οι αριθμοί Biot των δύο τρόπων επανάψυξης είναι συγκρίσιμοι μεταξύ.

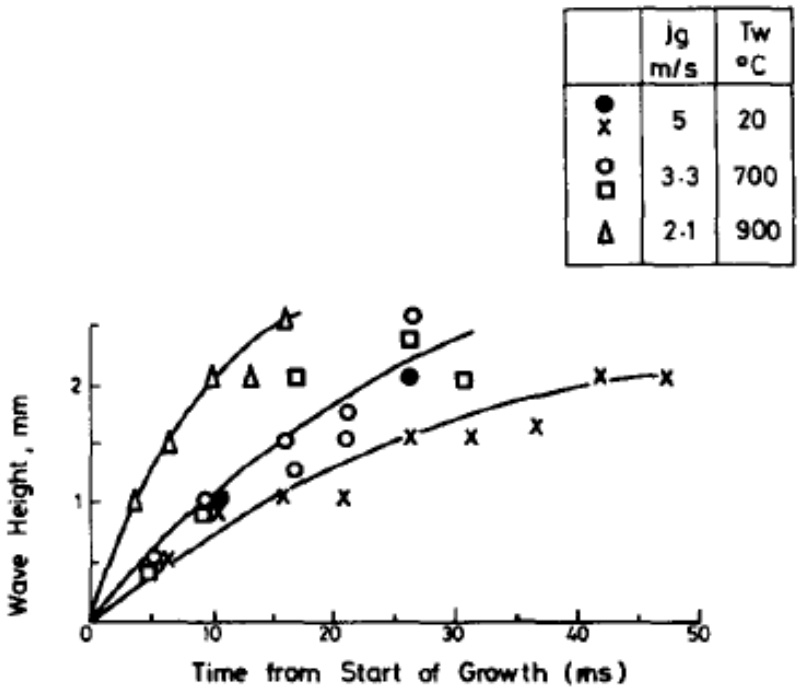
Μία από τις πιο πρόσφατες εργασίες πάνω στις δύο μεθόδους επανάψυξης είναι αυτή των Saxena et al. [38] το 2001. Το πιο σημαντικό συμπέρασμα που εξήχθη από τη σύγκριση των πειραματικών δεδομένων ήταν ότι η ταχύτητα επανάψυξης με B.F. ήταν μεγαλύτερη από 1.3 έως και 1.7 φορές από την ταχύτητα με T.R.. Δύο ήταν οι πιθανές εξηγήσεις που δόθηκαν για αυτήν την παρατήρηση. Η πρώτη ήταν ότι κατά την επανάψυξη εκ των άνω ο ατμός που δημιουργείται κοντά στο υγρό μέτωπο λειτουργεί σαν αντίσταση στην επανάψυξη, αφού η κίνησή του είναι αντίθετη προς το ρεύμα του υγρού που κινείται προς τα κάτω. Η δεύτερη εξήγηση που δόθηκε στηρίζεται στην ανομοιόμορφη επανάψυξη της υπερθερμανθείσας επιφάνειας κατά την επανάψυξη εκ των άνω λόγω της δημιουργίας διαύλων νερού περιμετρικά της. Το γεγονός αυτό όμως φαίνεται να επηρεάζει την ταχύτητα επανάψυξης η οποία είναι σημαντικά μικρότερη της ταχύτητας των πειραμάτων επανάψυξης εκ των κάτω, όπου η επανεγκατάσταση του ψυκτικού επί της επιφανείας γίνεται με ομοιόμορφο τρόπο. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι όσον αφορά τα πειράματα επανάψυξης εκ των άνω των Saxena et al. [38], έγινε ειδική κατασκευή στην κορυφή του τμήματος δοκιμών

με σκοπό την ομοιόμορφη κατανομή ψυκτικού στη ράβδο και την αποφυγή των διαύλων νερού (*ρυάκια*). Παρόλα αυτά, κατά την εξέλιξη των πειραμάτων η δημιουργία ρυακίων δεν μπόρεσε να αποφευχθεί.

Σε αντίθεση με τα παραπάνω πειράματα, το 1978 οι Duffey-Ackerman [40] διενήργησαν κάποια ενδιαφέροντα πειράματα πάνω στην επανάψυξη μιας υπερθερμανθείσας ράβδου με ψεκασμό νερού σε ένα ενδιάμεσο σημείο της ράβδου και εισαγωγή αέρα ή ατμού από το κάτω μέρος του καναλιού δοκιμών που περιείχε τη ράβδο. Σκοπός των πειραμάτων ήταν η μελέτη του φαινομένου της αντίθετης ροής ενός φιλμ πίπτοντος υγρού (CCFL: Counter-Current Flow). Το φαινόμενο CCFL δημιουργείται λόγω της παραγωγής ατμού στο κατάντη της ροής του ψυκτικού η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να αναστρέψει και τη φορά ροής του ψυκτικού. Η αλληλεπίδραση του υγρού και του ατμού οδηγεί στο σχηματισμό κυμάτων στην επιφάνειά του υγρού. [41, 42, 43, 44].

Η παρουσία κυμάτων σε λεπτό φιλμ νερού είναι ένα πολύ ενδιαφέρον κομμάτι της θερμοϋδραυλικής ανάλυσης και η σημασία της μελέτης τους κατά την επανάψυξη μιας υπέρθερμης επιφάνειας είναι μεγάλη, καθώς τα θερμικά φαινόμενα μπορεί να περιπλέξουν ακόμα περισσότερο τη μελέτη λόγω βρασμού του ψυκτικού. Έχει διαπιστωθεί ότι ο σχηματισμός κυμάτων σε μια επιφάνεια υγρού φιλμ κατά την επανάψυξη εκ των άνω προκαλεί ανομοιομορφία στην επιφάνεια του φιλμ πίπτοντος υγρού με αποτέλεσμα να προκαλεί πτώση πίεσης ενώ ακόμα μπορεί και να αντιστρέψει τη ροή του φιλμ υγρού [45, 41, 46, 47].

Κατά τα πειράματά τους οι Duffey-Ackerman παρατήρησαν ότι είτε εισήγαγαν ατμό είτε αέρα οι ταχύτητες επανάψυξης της ράβδου ήταν ίδιες. Ακόμη διαπίστωσαν πως μετά τον σχηματισμό των κυμάτων στην επιφάνεια του ψυκτικού, το ύψος τους αυξάνεται με το πέρασμα του χρόνου ενώ φαίνεται να εξαρτάται και από την αρχική θερμοκρασία της υπό επανάψυξη επιφανείας (Σχήμα 2-7). Τέλος, μια ακόμη σημαντική παρατήρηση ήταν πως όταν η αρχική θερμοκρασία της ράβδου ήταν μεγαλύτερη των 700°C, υπήρχε ταυτόχρονη μετακίνηση του υγρού μετώπου τόσο προς τα πάνω (αναρρίχηση) όσο και προς τα κάτω (πτώση), ενώ για αρχικές θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 900°C και παροχές μάζας ψυκτικού μικρότερες των 0.09 $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ τα δύο υγρά μέτωπα ήταν στάσιμα και προς τις δύο κατευθύνσεις.



Σχήμα 2-7 Εκτιμήσεις ανάπτυξης των κυμάτων σύμφωνα με τα πειράματα των Duffey-Ackerman **[40]**. Στον άξονα των τεταγμένων δίνεται το ύψος των κυμάτων ενώ στον άξονα των τετμημένων ο χρόνος που πέρασε μετά το σχηματισμό τους. Στον πίνακα του διαγράμματος η στήλη (j_g) δίνει τις διάφορες ταχύτητες αέρα/ατμού ενώ η δεύτερη στήλη τις αρχικές θερμοκρασίες της υπερθερμανθείσας ράβδου.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η ταχύτητα επανάψυξης συνδέεται με τη θερμοκρασία του τοιχώματος του περιβλήματος, το υλικό του περιβλήματος, το ρυθμό ροής μάζας του νερού, την πίεση, το βαθμό υπόψυξης. Ακόμη, η θερμοκρασία επανάψυξης φαίνεται να μην είναι σταθερή αλλά να είναι συνάρτηση διαφόρων παραμέτρων όπως του ρυθμού ροής μάζας του ψυκτικού, της αρχικής θερμοκρασίας της υπερθερμανθείσας επιφανείας και του βαθμού υπόψυξης. Αυτές οι παρατηρήσεις εκφράστηκαν και με τη μορφή συσχετίσεων και ημιεμπειρικών μοντέλων, μερικά από τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Πίνακας 2-1 Πειραματικές εργασίες στην επανάψυξη εκ των άνω

Ερευνητές	**Έτος**	**Περιγραφή πειραματικής εγκατάστασης**	**Πίεση (bar)**	**Αρχική θερμοκρασία τοιχώματος (°C)**	**Ρυθμός ροής νερού (10^{-3} kg·s^{-1})**	**Συμπεράσματα**
Shires et al. [4]	1964	Απλή ράβδος S.S. Δέσμη 7 ράβδων S.S.	1	90-500	1.8-18.1	$\uparrow T_w \Rightarrow \downarrow u$ $\uparrow G \Rightarrow \uparrow u$
Bennett et al. [8]	1966	Απλός σωλήνας S.S.	6.89-68.9	240-470	3.9-21	$\uparrow T_w \Rightarrow \downarrow u$ $\uparrow P \Rightarrow \uparrow u$ $u \neq f(G)$
Yamanouchi [6]	1968	Δέσμη 36 ράβδων S.S.	1	200-650	0.2-21	$\uparrow T_w \Rightarrow \downarrow u$ $\uparrow G \Rightarrow \uparrow u$
Yoshioka et al. [9]	1970	Απλή ράβδος S.S.	1	300-500	8.3-64.2	$\uparrow T_w \Rightarrow \downarrow u$ $\uparrow G \Rightarrow \uparrow u$
Duncan et al. [15]	1971	Δέσμη 49 ράβδων S.S. και Zircalloy	1-6	360-1020	0.016-0.11	$u_z \approx u_{ss}$ $\uparrow P \Rightarrow \uparrow u$
Elliott et al. [11]	1971	Απλός σωλήνας S.S. Απλός σωλήνας Zircalloy Απλός σωλήνας Inconel	3.43-52.8	300-950	7.5-30	$\uparrow T_w \Rightarrow \downarrow u$ $\uparrow P \Rightarrow \uparrow u$ $u \neq f(G)$ $u_z \approx 2u_{ss}$ $u_z \approx 2u_{Inc}$ ↑βαθμός οξείδωσης => ↑u
Χίνης [12]	1994	Απλή ράβδος S.S.	1-7	200-550	16.7	$\uparrow T_w \Rightarrow \downarrow u$ $\uparrow P \Rightarrow \uparrow u$
Sahu et al. [13]	2010	Απλός σωλήνας S.S.	1	200-500	5.8-31	$\uparrow T_w \Rightarrow \downarrow u$ $\uparrow G \Rightarrow \uparrow u$ $\uparrow G \cdot \Delta T_{sub} \Rightarrow \uparrow u$

Πίνακας 2-2 Πειραματικές εργασίες στην επανάψυξη εκ των κάτω

Ερευνητές	**Έτος**	**Περιγραφή πειραματικής εγκατάστασης**	**Πίεση (bar)**	**Αρχική θερμοκρασία τοιχώματος (°C)**	**Ρυθμός ροής νερού (10^{-3} kg·s^{-1})**	**Συμπεράσματα**
Cadek et al. [22]	1971	Δέσμη 49 και 100 ράβδων S.S.	1-3.88	430-1210	5.4-29	↑P => ↑u
Riedle et al. [23]	1972	Δέσμη 340 ράβδων Inconel	1-6	650	3.4-17	↑P => ↑u
Campanile et al. [24]	1972	Δέσμη 21 σωλήνων Inconel		854-1275	0.91-1.37	
Andreoni et al. [25]	1972	Απλή ράβδος S.S.	1	400-900	9.8-102	↑ΔT_{sub} => ↑T_{sput} => ↑u
Thompson et al. [27]	1972	Δέσμη 18 ράβδων S.S.	1-2.5	150-650	4.2-25	↑P => ↑T_{sput} => ↑u ↑ΔT_{sub} => ↑T_q => ↑u δ_{crit}=f(T_w,P)
White et al. [28]	1976	Απλή ράβδος S.S.		έως 1000	1.5-25	$u_{unsteady_flow} \approx u_{constant_flow}$
Naitoh et al. [29]	1977	Δέσμη 49 ράβδων S.S.		έως 410-620	19-60	T_q = f(Power level)
Dhir et al. [30]	1981	Δέσμη 49 ράβδων S.S. και Zircalloy	1	έως 1127	0.7-22	$u_z > u_{ss}$ ↑G => ↑u T_q = f(T_c,T_w,G)
De Salve et al. [33]	1987	Απλός σωλήνας S.S.	1	600-800	10-20	↑T_w => ↓u T_q = f(ΔT_{sub},G)
Tuzla et al. [31]	1991	Δέσμη 9 ράβδων S.S.	1	500-750		↑ΔT_{sub} => ↑u ↑G => ↑u

Πίνακας 2-3 Πειραματικές εργασίες στην επανάψυξη εκ των κάτω και εκ των κάτω

Ερευνητές	**Έτος**	**Πείραμα**	**Περιγραφή πειραματικής εγκατάστασης**	**Πίεση (bar)**	**Αρχική θερμοκρασία τοιχώματος (°C)**	**Ρυθμός ροής νερού (g/s)**	**Συμπεράσματα**
Duffey et al. [34, 39]	1972	Επανάψυξη εκ των άνω	Απλή ράβδος S.S. ή απλός σωλήνας χαλκού	1	100-777	0.3-3.8	$\uparrow G \Rightarrow \uparrow h \Rightarrow \downarrow u$ $\uparrow T_w \Rightarrow \downarrow u$ $\uparrow G \Rightarrow \downarrow T_q$
	1973	Επανάψυξη εκ των κάτω	Απλή ράβδος S.S. ή απλός σωλήνας silica	1	300-800	0.1-30	$\uparrow G \Rightarrow \uparrow h \Rightarrow \uparrow u$ $\uparrow T_w \Rightarrow \downarrow u$
Piggott et al. [35, 36]	1973	Επανάψυξη εκ των άνω	Απλή ράβδος Inconel	1	400-700	0.5-28.7	$\uparrow \Delta T_{sub} \Rightarrow \uparrow u$ ↑βαθμός οξείδωσης $\Rightarrow \uparrow u$
	1975	Επανάψυξη εκ των κάτω	Απλή ράβδος Inconel	1	400-700	0.6-60	$\uparrow \Delta T_{sub} \Rightarrow \uparrow u$
Yu et al. [37]	1977	Επανάψυξη εκ των άνω	Απλή ράβδος S.S.	1-14.8	200-650	2-50	$\uparrow G \Rightarrow \uparrow u$ $\uparrow \Delta T_{sub} \Rightarrow \uparrow u$
	1975	Επανάψυξη εκ των κάτω	Απλή ράβδος S.S.	1	300-800	1-200	$\uparrow G \Rightarrow \uparrow u$ $\uparrow \Delta T_{sub} \Rightarrow \uparrow u$
Saxena et al. [38]	2001	Επανάψυξη εκ των άνω	Απλός σωλήνας S.S.	1	200-500	16.7-116.9	$\uparrow G \Rightarrow \uparrow u$ $\uparrow T_w \Rightarrow \downarrow u$
	2001	Επανάψυξη εκ των κάτω	Απλός σωλήνας S.S.	1	200-500	16.7-116.9	$\uparrow G \Rightarrow \uparrow u$ $\uparrow T_w \Rightarrow \downarrow u$

όπου u η ταχύτητα επανάψυξης, T_q η θερμοκρασία επανάψυξης, h ο συντελεστής συναγωγής, T_w η αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος της ράβδου, G η παροχή μάζας του ψυκτικού, P η πίεση του πειράματος, ΔT_{sub} ο βαθμός υπόψυξης, T_c η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού, δ_{crit} το πάχος του περιβλήματος της ράβδου και T_{sput} η θερμοκρασία sputtering.

2.3 Μοντέλα υπολογισμού ρυθμού επανάψυξης

2.3.1 Αναλυτικά μοντέλα επαναψύξεως

Οι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα κατά την επανάψυξη είναι η μεταφορά θερμότητας με αγωγή κατά τον άξονα της ράβδου από το στεγνό της τμήμα στο επαναψυχθέν, η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή στη στενή πολύ μικρή περιοχή του υγρού μετώπου και με ακτινοβολία από το στεγνό τμήμα της επιφανείας στο περιβάλλον. Για την καλύτερη διερμηνεία των μηχανισμών αυτών προτάθηκαν αρκετά αναλυτικά μοντέλα είτε μονοδιάστατα είτε δισδιάστατα ανάλογα με το μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας που επικρατεί στην κάθε περίπτωση επανάψυξης.

Έχοντας σαν εκκίνηση το νόμο του Fourier, σε σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων για έναν στοιχειώδη όγκο της επιφάνειας του περιβλήματος, η χρονικά εξαρτώμενη εξίσωση διατυπώνεται ως εξής (Σχέση 2-2):

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}-\frac{\rho c}{k}\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{q'''}{k}=0 \qquad \textbf{2-2}$$

όπου T η μεταβλητή της θερμοκρασίας (K), x η αξονική συντεταγμένη (m), r η κυλινδρική συντεταγμένη (m), ρ η πυκνότητα ρευστού του ψυκτικού (kg/m^3), c η ειδική θερμότητα του περιβλήματος της ράβδου (J/kg·K), q''' ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας ανά μονάδα όγκου (W/m^3) και k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του περιβλήματος της ράβδου (W/m·K).

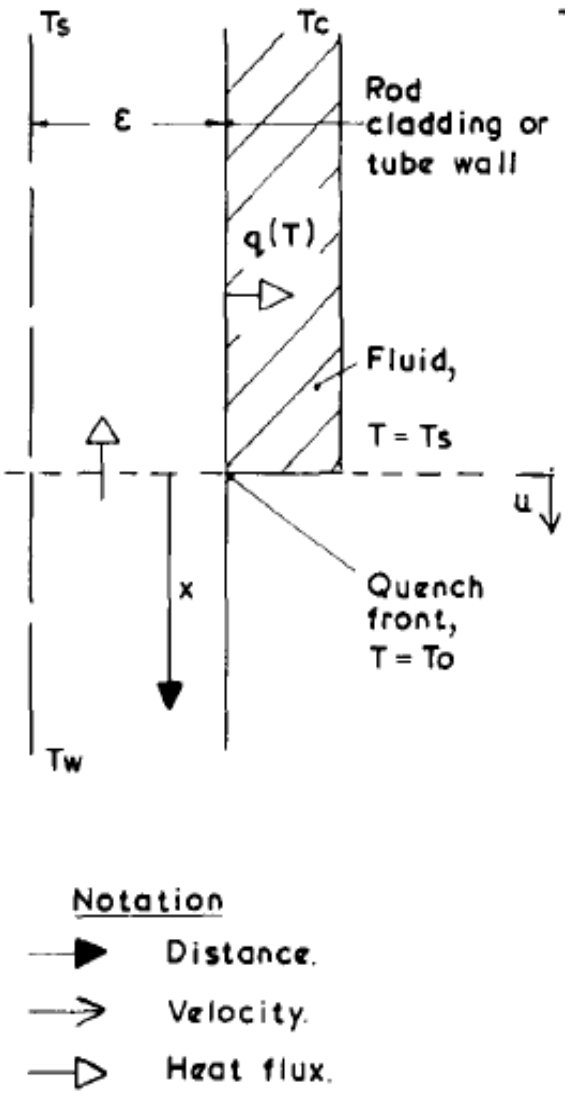
Θεωρώντας όμως ότι η ταχύτητα επανάψυξης είναι σταθερή, κάτι που παρατηρήθηκε από πολλούς πειραματιστές [4, 8, 38], οι μεταβλητές x και t μπορούν να συσχετιστούν με τη γραμμική σχέση $X=x-ut$ έτσι ώστε να προκύψει η παρακάτω σχέση 2-3, η οποία κατέληξε να είναι και η αρχική σχέση κάθε αναλυτικού μοντέλου της ταχύτητας επαναψύξεως:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 T}{\partial X^2}+\frac{\rho cu}{k}\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{q'''}{k}=0 \qquad \textbf{2-3}$$

Στην περίπτωση που η επανάψυξη ελέγχεται μόνο από την αγωγή το παραπάνω δισδιάστατο μοντέλο μπορεί να καταλήξει σε μονοδιάστατο απαλείφοντας τον όρο που αφορά την ακτίνα της υπέρθερμης επιφανείας. Αυτό μπορεί να συμβεί στην

περίπτωση που οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία είναι αμελητέοι. Ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή θεωρείται αμελητέος στην περίπτωση που η πυκνότητα θερμικής ροής είναι πολύ μικρή, ο Thompson [32] έθεσε το όριο των 64 $J/s \cdot m^2$ ενώ σύμφωνα με τους Karyampudi et al. [48] η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία δεν λαμβάνεται υπ' όψιν σε πειράματα επανάψυξης όπου η αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος της θερμής επιφάνειας είναι μικρότερη των 600°C.

Το Σχήμα 2-8 απεικονίζει διαγραμματικά το σύστημα των συντεταγμένων που χρησιμοποιείται στην ανάλυση της επαναψύξεως, στην περίπτωση δισδιάστατης μετάδοσης θερμότητας (αγωγή και συναγωγή).



Σχήμα 2-8 Σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση **[36]**

Μονοδιάστατα αναλυτικά μοντέλα επανάψυξης

Είναι πολλοί οι ερευνητές οι οποίοι ανέλυσαν και πρότειναν μονοδιάστατα μοντέλα που αφορούν στον υπολογισμό της ταχύτητας επαναψύξεως [6, 14, 15, 16, 49, 50, 51, 52]. Για λόγους απλούστευσης της πειραματικής διαδικασίας, τα περισσότερα πειράματα πάνω στα οποία στηρίχθηκαν τα προτεινόμενα μονοδιάστατα αναλυτικά μοντέλα επανάψυξης, διενεργήθηκαν σε steady-state (σταθερές) αρχικές συνθήκες. Εξαίρεση αποτελούν τα προτεινόμενα μοντέλα των Duncan και Leonard τα οποία στηρίχθηκαν πάνω στα FLECHT πειράματα που πραγματοποιήθηκαν κάτω από transient (μεταβατικές) συνθήκες ισχύος των υπερθερμανθείσων ράβδων [14, 15, 16].

Το 1965 έγινε μια από τις πρώτες προσπάθειες προσδιορισμού της ταχύτητας επανάψυξης με αναλυτικά μοντέλα από τους Semeria και Martinet [49] οι οποίοι προσδιόρισαν την αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης σύμφωνα με την εξίσωση 2-4 που προέκυψε απόολοκλήρωση της σχέσης 2-3:

$$u^{-1} = \rho c(\frac{\varepsilon}{hk})^{1/2}\ \frac{(T_w - T_s)^{1/2}(T_w - T_q)^{1/2}}{T_q - T_s} \qquad \textbf{2-4}$$

όπου u^{-1} η αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης (s/m), ε το πάχος του περιβλήματος (m), h ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας από το περίβλημα στο ρευστό ($W/m^2 \cdot K$), ρ η πυκνότητα ρευστού του ψυκτικού (kg/m^3), c η ειδική θερμότητα του περιβλήματος της ράβδου (J/kg·K), k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του περιβλήματος της ράβδου (W/m·K), T_w η αρχική θερμοκρασία της ράβδου (K), T_s η θερμοκρασία κορεσμού του ψυκτικού μέσου (K) και T_q η θερμοκρασία επανάψυξης (K).

Το σημαντικότερο μονοδιάστατο μοντέλο καθώς και το απλούστερο στη χρήση του αποτελεί το μοντέλο του Yamanouchi [6] το οποίο αποτελεί μια βελτίωση της σχέσεως 2-4.

Ο Yamanouchi παρουσίασε ένα μοντέλο το οποίο αποτελεί έκφραση τριών αδιάστατων παραμέτρων (Bi, Pe, θ_1). Ο αριθμός Bi αναφέρεται στην παράγραφο §2.2.3 και ορίζεται από τη σχέση 2-1. Ο αριθμός Pe είναι η αδιάστατη τιμή της ταχύτητας επανάψυξης και ορίζεται από τη σχέση:

$$Pe = \frac{\rho c \varepsilon u}{k} \qquad \textbf{2-5}$$

ενώ ο αριθμός θ_1 ορίζει την αδιάστατη τιμή της θερμοκρασίας σύμφωνα με τη σχέση:

$$\theta_1 = \frac{T_w - T_q}{T_q - T_s} \qquad \textbf{2-6}$$

Κατά την ανάλυσή του (ο Yamanouchi), χρησιμοποίησε δύο διαφορετικούς συντελεστές μετάδοσης θερμότητας· έναν σταθερό στην υγρή περιοχή (h_w=ct) και έναν μηδενικό στη στεγνή περιοχή (h_d=0):

$$\frac{Bi^{\frac{1}{2}}}{Pe} = [\theta_1(\theta_1 + 1)]^{1/2} \qquad \textbf{2-7}$$

ή αλλιώς:

$$u^{-1} = \rho c \frac{\varepsilon}{hk} \frac{T_w - T_q}{T_q - T_s} \qquad \textbf{2-8}$$

Όλες οι ανωτέρω εξισώσεις ισχύουν μόνο για πολύ μικρούς αριθμούς Bi (Bi<<1), δηλαδή για περιπτώσεις με πολύ μικρό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας (h).

<u>Δισδιάστατα αναλυτικά μοντέλα επανάψυξης</u>

Μετά τα πρώτα μονοδιάστατα μοντέλα της ταχύτητας επαναψύξεως που ισχύουν μόνο στην στενή περιοχή Bi<<1, πολλοί ερευνητές [39, 53, 54, 55, 56] επιχείρησαν να εξάγουν δισδιάστατα αναλυτικά μοντέλα τα οποία να καλύπτουν όλη την περιοχή των αριθμών Bi και να μπορούν να βρίσκουν χρήση σε πραγματικές συνθήκες απώλειας ψυκτικού μέσου.

Το 1973 οι Duffey et al. [39] μετά από ανάλυση της σχέσης 2-2 πρότειναν δύο αναλυτικά μοντέλα, ένα που είναι κατάλληλο στην περιοχή Bi<<1 και ένα που είναι κατάλληλο στην περιοχή Bi>>1. Το πρώτο εξ αυτών μοντέλο, καταλήγει τελικά να παίρνει τη μορφή της σχέσεως 2-4 ενώ το δεύτερο καταλήγει στην ακόλουθη μορφή (σχέση 2-9):

$$Pe = 2Bi\frac{T^*}{\pi} \qquad \textbf{2-9}$$

όπου T* αδιάστατη θερμοκρασιακή ομάδα $\frac{T_q - T_s}{T_w - T_s}$, όπου Tq η θερμοκρασία επανάψυξης (K), Ts η θερμοκρασία κορεσμού του ψυκτικού μέσου (K) και Tw η αρχική θερμοκρασία της ράβδου (K).

Η ανάλυση της σχέσεως 2-9 στα επιμέρους μεγέθη οδηγεί στη σχέση 2-10:

$$u^{-1} = \frac{\pi\rho c}{2h}\frac{T_w - T_s}{T_q - T_s} \qquad \textbf{2-10}$$

Ένα από τα απλούστερα μοντέλα αποτελεί η αναλυτική σχέση του Blair [54] η οποία όμως είναι έγκυρη μόνο για συνθήκες B.F. και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σύνολο των πειραμάτων.

Οι Tien και Yao το 1975 [56] θεώρησαν πως τα φαινόμενα επανάψυξης που λαμβάνουν χώρα για μικρούς αριθμούς Bi (Bi<<1) είναι παρόμοια με τα φαινόμενα επανάψυξης που παρουσιάζονται για μικρούς αριθμούς Pe (Pe<<1) ενώ κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και για μεγάλους αριθμούς Bi και Pe (Bi>>1 και Pe>>1). Μετά από ανάλυση, οι μελετητές παρουσίασαν ένα μοντέλο δύο διαστάσεων τριών παραμέτρων το οποίο ισχύει για μεγάλους αριθμούς Pe (σχέση 2-11) ενώ για μικρούς αριθμούς Pe το μοντέλο που παρουσίασαν καταλήγει στο μονοδιάστατο μοντέλο του Yamanouchi (σχέση 2-7).

$$\frac{Bi}{Pe} = \frac{1+\sqrt{2}}{2}\frac{\theta}{1-\theta} + \frac{(1+\sqrt{2})^2}{4}\left(\frac{\theta}{1-\theta}\right)^2 \qquad \textbf{2-11}$$

όπου θ η αδιάστατη θερμοκρασία επανάψυξης $\frac{T_w - T_q}{T_w - T_s}$.

Στη συνέχεια οι ίδιοι ερευνητές έκαναν μια προσπάθεια να παρουσιάσουν μια γενική σχέση που να είναι έγκυρη στο σύνολο των αριθμών Pe. Η σχέση που κατέληξαν είναι η εξής:

$$\frac{Bi(1-\theta)}{Pe\,\theta} = \frac{(1.707 - 0.25\theta)[3(1-\theta)^2 + Pe^2\theta]}{3(1-\theta)^2(1.707 - 0.25\theta) + Pe[3(1-\theta)^2 + Pe^2\theta]}\frac{Pe}{1-\theta} \qquad \textbf{2-12}$$

<u>Αναλυτικά μοντέλα επανάψυξης με τη χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων</u>

Το 1974 ο Coney [57] χρησιμοποίησε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα, το REWET, ώστε να υπολογίσει τη θερμοκρασία επανάψυξης σαν συνάρτηση της ταχύτητας επανάψυξης, του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και των φυσικών ιδιοτήτων του περιβλήματος της ράβδου. Θεωρώντας δύο οριακές συνθήκες (στεγνή περιοχή και υγρή περιοχή) και διαιρώντας κάθε περιοχή σε N το πλήθος διαφορετικά σημεία (όπου N είναι ανάλογο του αδιάστατου αριθμού Bi), έλυσε συγχρόνως ένα σύστημα 2N εξισώσεων. Η τελική προτεινόμενη λύση (σχέση 2-13), η οποία θεωρεί σταθερό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στην υγρή περιοχή, είναι έγκυρη σε όλη την επιφάνεια χωρίς να γίνεται διάκριση μεταξύ των περιοχών της.

$$\frac{Bi}{Pe} = 1.6\frac{\theta}{(1-\theta)^2} \qquad \textbf{2-13}$$

Το 1977 οι πειραματικές συσχετίσεις που εξήχθησαν από τα πειράματα των Yu et al. [37] επαλήθευσαν τις προτεινόμενες συσχετίσεις του κώδικα REWET.

Το 1981 οι Sawan και Temraz [58] έγραψαν το υπολογιστικό πρόγραμμα SARA για να προβλέψουν την ταχύτητα επανάψυξης χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν περισσότερους όρους ώστε να καταλήξουν σε μία πιο έγκυρη λύση. Σε αντίθεση με άλλες εργασίες θεώρησαν ότι υπάρχουν τρεις διαφορετικοί σταθεροί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας σε κάθε μία από τις τρεις διαφορετικές περιοχές της

επαναψυχθείσας ράβδου (την υγρή περιοχή, την περιοχή βρασμού και τη στεγνή περιοχή).

Έκτοτε έχουν δημιουργηθεί πολλοί υπολογιστικοί κώδικες όπως ο RIBFA [33], ο ZETHYF [59] ο οποίος θεώρησε ασταθείς αρχικές συνθήκες καθώς και υπολογιστικά προγράμματα ακόμα και εμπορίου (LMS Imagine.Lab) [60], τα οποία θα μπορούσαν να προσομοιάσουν σε ικανοποιητικό βαθμό μια μελέτη επανάψυξης και ίσως να διευκολύνουν τον υπολογισμό της ταχύτητας επανάψυξης καθώς και άλλων παραμέτρων αλλά η ανάπτυξή τους ξεφεύγει από τα όρια αυτής της Διδακτορικής Διατριβής.

2.3.2 Συσχετίσεις και ημιεμπειρικές εξισώσεις

Σχεδόν κάθε πειραματιστής προσπάθησε να εκφράσει τα αποτελέσματά του σε μία σχέση η οποία θα ήταν έγκυρη σε όλα τα πειράματα με παρόμοιες αρχικές συνθήκες. Έτσι λοιπόν αναπτύχθηκαν πολλές συσχετίσεις και ημιεμπειρικές εξισώσεις οι οποίες υπολογίζουν το ρυθμό επανάψυξης και αναφέρονται τόσο σε πειράματα επανάψυξης εκ των άνω όσο και εκ των κάτω [4, 10, 11, 12, 35, 37, 38, 39, 40, 18].

Σύμφωνα με την παράγραφο §2.2 από το σύνολο των πειραμάτων βγήκε το συμπέρασμα ότι η ταχύτητα επανάψυξης επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του τοιχώματος του περιβλήματος (T_w), το υλικό (ρ,c,k), το πάχος του περιβλήματος (δ), η ακτίνα της ράβδου (R), το ρυθμό ροής μάζας του ψυκτικού μέσου (G), την πίεση στο κανάλι δοκιμών (P) και το βαθμό υπόψυξης (ΔT_{sub}) του ψυκτικού. Δηλαδή η ταχύτητα επανάψυξης αποτελεί μια σχέση της μορφής:

$$u = f(T_w, \rho, c, \varepsilon, k, R, G, P, \Delta T_{sub}) \qquad \textbf{2-14}$$

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή συσχετίσεων ήταν η μέθοδος της γραμμικής προσαρμογής. Παρακάτω παραθέτονται οι πιο σημαντικές εξισώσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και φαίνεται να έχουν την καλύτερη προσαρμογή στα μεγαλύτερο σύνολο των πειραματικών δεδομένων.

Το 1964 οι Shires et al. [4] μετά από πειράματα υπό ατμοσφαιρική πίεση εξήγαγαν τη σχέση 2-15 όπου η ταχύτητα είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας του τοιχώματος:

$$u^{-1} = 0.344(T_w - T_s) - 13.8 \qquad \textbf{2-15}$$

Τα έτη 1970-1971 οι Elliott et al. [10, 11] εκτίμησαν τις ακόλουθες αναδρομές (σχέσεις 2-16 και 2-17) μετά από πειράματα που έκαναν σε πιέσεις 3.43-52.8 bar σε σωλήνα από S.S., σε σωλήνα από Inconel και σε σωλήνα από Zircalloy:

$$u^{-1} = 0.58P^{-0.29}\left(T_w - T_q\right) \qquad \textbf{2-16}$$

$$u^{-1} = 0.2P^{-0.18}\left(T_w - T_q\right) \qquad \textbf{2-17}$$

Η σχέση 2-16 ισχύει για τους σωλήνες κατασκευασμένους από Inconel και S.S. ενώ η σχέση 2-17 ισχύει για τους σωλήνες από Zircalloy. Οι παραπάνω εξισώσεις υπολογίζουν το ρυθμό επανάψυξης σαν συνάρτηση μόνο της πίεσης και της αρχικής θερμοκρασίας του τοιχώματος και άρα η γενίκευσή τους χαρακτηρίζεται ως ελεγχόμενη.

Το 1973 οι Duffey και Porthouse [39] ξεκινώντας από ένα αναλυτικό δισδιάστατο μοντέλο που ανέπτυξαν οι ίδιοι και το οποίο αναφέραμε στο εδάφιο §2.3.1 παρουσίασαν τις δύο ακόλουθες ημιεμπειρικές εξισώσεις (2-18 και 2-19) οι οποίες ισχύουν για πειράματα υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες:

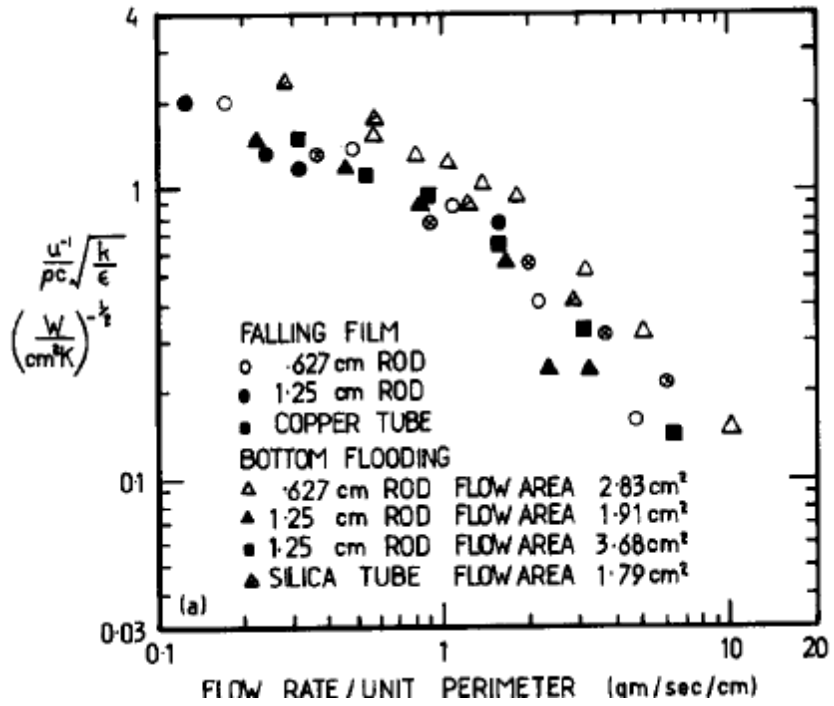
$$u = \frac{3(T_q - T_s)}{\rho c (T_w - T_q)} \left(\frac{k}{\varepsilon}\right)^{1/2} \left(\frac{G}{2\pi R}\right)^{1/2} \qquad \textbf{2-18}$$

$$u = \frac{6(T_q - T_s)}{\rho c (T_w - T_q)} \frac{G}{2\pi R} \qquad \textbf{2-19}$$

όπου G η ροή μάζας του ψυκτικού ($kg \cdot s^{-1}$).

Η σχέση 2-18 ισχύει για τη μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας όπου ο επικρατών μηχανισμός επανάψυξης είναι η αγωγή αξονικά της ράβδου ενώ η σχέση 2-19 ισχύει για τη δισδιάστατη μετάδοσή της όπου αυτή πραγματοποιείται τόσο με αγωγή αξονικά της ράβδου όσο και με συναγωγή από τη ράβδο στο ρευστό.

Στο Σχήμα 2-9 απεικονίζεται γραφικά η συσχέτιση των Duffey et al.. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι για την επανάψυξη υπερθερμανθεισών επιφανειών η ταχύτητα είναι περίπου η ίδια είτε η επανάψυξη γίνει εκ των άνω είτε εκ των κάτω σε ράβδους ίδιου υλικού και σε πειράματα κάτω από τις ίδιες αρχικές συνθήκες.



Σχήμα 2-9 Συσχέτιση πειραματικών δεδομένων των Duffey et al. **[39]**

Το 1973 οι Piggott-Porthouse [35, 36] παρουσίασαν την εξίσωση 2-20 η οποία ισχύει και για τις δύο μεθόδους επανάψυξης:

$$u^{-1} = \frac{8.9 \cdot 10^{-5} \rho c (2\pi R)}{G} \frac{(T_w - T_q)}{(T_s - T_c)} \qquad \textbf{2-20}$$

όπου T_c η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού (K).

Η τελευταία εξίσωση αναδρομής ισχύει για τις ακόλουθες συνθήκες: πίεση 1-53 bar, αρχική θερμοκρασία τοιχώματος 300-700˚C, βαθμός υπόψυξης 4-146˚C. Ακόμη είναι έγκυρη για ράβδους, σωλήνες ή δέσμες ράβδων διαφόρων υλικών.

Το 1974 ο Thompson [32, 61] έπειτα από πειράματα επανάψυξης εκ των άνω με φιλμ πίπτοντος υγρού πρότεινε μια συσχέτιση η οποία δε λαμβάνει υπ' όψιν καθόλου το πάχος του τοιχώματος, τη θερμική αγωγιμότητα, την ακτίνα της ράβδου και το ρυθμό παραγωγής θερμότητας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της επανάψυξης. Ακόμη υποστήριξε ότι όταν η πίεση είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και υπάρχει περιβάλλον ατμού, η ταχύτητα επανάψυξης δεν εξαρτάται από το ρυθμό μεταφοράς μάζας ψυκτικού ανά όγκο. Επίσης, θεώρησε ότι ο βαθμός υπόψυξης (ΔT_{sub}) δεν επηρεάζει σημαντικά το ρυθμό επανάψυξης. Έτσι λοιπόν, για πιέσεις μεγαλύτερες των 3.43 bar οι οποίες είναι τυπικές για περιπτώσεις επανάψυξης εκ των άνω, πρότεινε τη σχέση 2-21:

$$u^{-1} = \frac{\rho c(T_w - T_q)}{q''} \qquad \textbf{2-21}$$

ενώ για πιέσεις μικρότερες των 3.43 bar οι οποίες είναι τυπικές για περιπτώσεις επανάψυξης εκ των κάτω, πρότεινε τη σχέση 2-22:

$$u^{-1} = \frac{\rho c(T_w - (600 + \Delta T_{sub}))}{q''} \qquad \textbf{2-22}$$

όπου q'' ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας ανά μονάδα επιφανείας (W/m^2).

Το 1977 οι Yu et al. [37] μετά από μια σειρά δικών τους πειραμάτων και χρησιμοποιώντας δεδομένα και άλλων πειραματιστών κατέληξαν στις παρακάτω συσχετίσεις (2-23, 2-24, 2-25).

$$u^{0.15} = 4.52 \cdot 10^4 (1 + 1.216 log_{10} P)^{1/2} G_p^{0.0765/P} \qquad \textbf{2-23}$$

όπου G_p η ροή μάζας του ψυκτικού ανά μονάδα περιμέτρου ($kg/m \cdot s$).

Η σχέση 2-23 ισχύει για ταχύτητες μεταξύ 0.005-1.5 $m \cdot s^{-1}$ και για τις δύο μεθόδους επανάψυξης. Ωστόσο θεώρησαν πως δεν συσχετίζει καλά τα πειραματικά δεδομένα για επανάψυξη εκ των κάτω με υπόψυκτο νερό. Αυτό ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτόν τον τρόπο επανάψυξης η ταχύτητα επηρεάζεται κυρίως από τον ρυθμό μεταφοράς μάζας και τον βαθμό υπόψυξης. Έτσι προτάθηκαν οι δύο ακόλουθες σχέσεις οι οποίες ισχύουν μόνο για ατμοσφαιρικά πειράματα επανάψυξης εκ των κάτω με υπόψυκτο νερό:

$$1 + 0.036\Delta T_q G_p = 0.4839(1 + u\Delta T_q^2)^{0.346} \qquad \textbf{2-24}$$

η οποία ισχύει για $1 + u\Delta T_q^2 \geq 40$ $(m \cdot s^{-1} \cdot (°C)^2)$

$$1 + 0.036\Delta T_q G_p = (1 + u\Delta T_q^2)^{0.13} \qquad \textbf{2-25}$$

η οποία ισχύει για $1 + u\Delta T_q^2 \leq 40$ $(m \cdot s^{-1} \cdot (°C)^2)$. Η μεταβλητή ΔT_q ισούται με το βαθμό υπόψυξης στο υγρό μέτωπο και είναι ίσο με T_q-T_s.

Το 2001 στην εργασία των Hinis και Simopoulos [18, 19] προτάθηκε η συσχέτιση 2-26, η οποία ισχύει μόνο σε πιέσεις μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής και δείχνει την επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας του τοιχώματος και της πίεσης στο ρυθμό επανάψυξης:

$$u^{-1} = 0.4P^{-0.22}\left(T_w - T_q\right) \qquad \textbf{2-26}$$

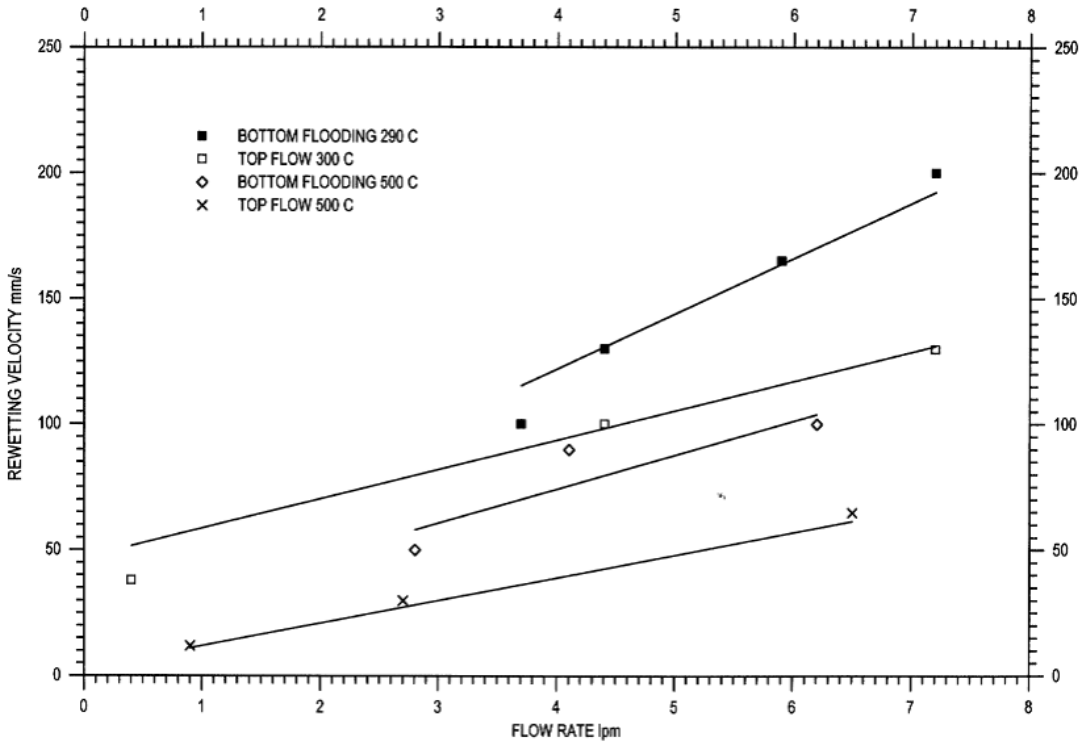
Συγκρίνοντας τη σχέση 2-26 με τη σχέση 2-16 των Elliot et al. εξάγεται το συμπέρασμα ότι και οι δύο σχέσεις δίνουν παρόμοια αποτελέσματα για περιοχές χαμηλής πίεσης εφόσον τα πειράματα των Hinis και Simopoulos [18, 19] διεξήχθησαν σε πιέσεις 2-7 bar ενώ τα πειράματα των Elliott et al. διεξήχθησαν στην περιοχή πιέσεων 3.5-52.8 bar.

Το 2001 οι Saxena et al. [38] έπειτα από πειράματα και με τις δύο μεθόδους επανάψυξης πρότειναν δύο συσχετίσεις οι οποίες ισχύουν για αρχικές θερμοκρασίες τοιχώματος μεταξύ των 200˚C και 500˚C (χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι 200˚C).

$$u^{-1} = 1.8 \cdot 10^{-4} \rho c \left(\frac{2\pi R}{G}\right)^{0.8} \left(\frac{(T_w - T_q)}{(T_s - T_c)}\right)^{1.15} \quad \textbf{2-27}$$

$$u^{-1} = 1.37 \cdot 10^{-4} \rho c \left(\frac{2\pi R}{G}\right)^{0.84} \frac{(T_w - T_q)}{(T_s - T_c)} \quad \textbf{2-28}$$

Η σχέση 2-27 ισχύει για επανάψυξη εκ των άνω ενώ η σχέση 2-28 για επανάψυξη εκ των κάτω. Στο Σχήμα 2-10 απεικονίζεται γραφικά η συσχέτιση της ταχύτητας επανάψυξης με το ρυθμό ροής μάζας στα πειράματα επανάψυξης των Saxena et al. [38] και για τους δύο τρόπους επανάψυξης. Από το σχήμα συμπεραίνεται ότι ο ρυθμός επανάψυξης επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από το ρυθμό ροής μάζας κατά την επανάψυξη εκ των κάτω (σχέση 2-28) παρά κατά την επανάψυξη εκ των άνω (σχέση 2-27). Ακόμη, οι Saxena et al. προσπάθησαν να επαληθεύσουν τις πειραματικές συσχετίσεις των Duffey-Porthouse [39] και Piggott-Porthouse [36] με τα δικά τους πειραματικά δεδομένα. Το αποτέλεσμα ήταν πως μόνο κάτω από προϋποθέσεις (T_w>300°C και G>1lpm) η συσχέτιση των Duffey-Porthouse κρίθηκε ικανοποιητική για τα πειράματα επανάψυξης εκ των άνω.



Σχήμα 2-10 Συσχέτιση πειραματικών δεδομένων των Saxena et al. **[38]**

Πρόσφατα, το 2005, προτάθηκε από τους Casamirra et al. [62] μια ακόμη συσχέτιση η οποία όμως ισχύει για επανάψυξη εκ των άνω μόνο και εισάγει δύο αδιάστατες παραμέτρους οι οποίες πρέπει να αλλάζουν ανάλογα με το πείραμα και τις συνθήκες.

$$u = \frac{\frac{Bi(T_w - T_s)}{T_q - T_s}}{\sqrt{\alpha + b\frac{T_w - T_s}{T_q - T_s}}}\sqrt{\frac{T_w - T_s}{T_q - T_w}} \qquad \textbf{2-29}$$

όπου οι παράμετροι α και b ισούνται με: $\alpha = \frac{1.057}{T_q - T_s}$ και $b = \frac{1.322}{T_q - T_s}$.

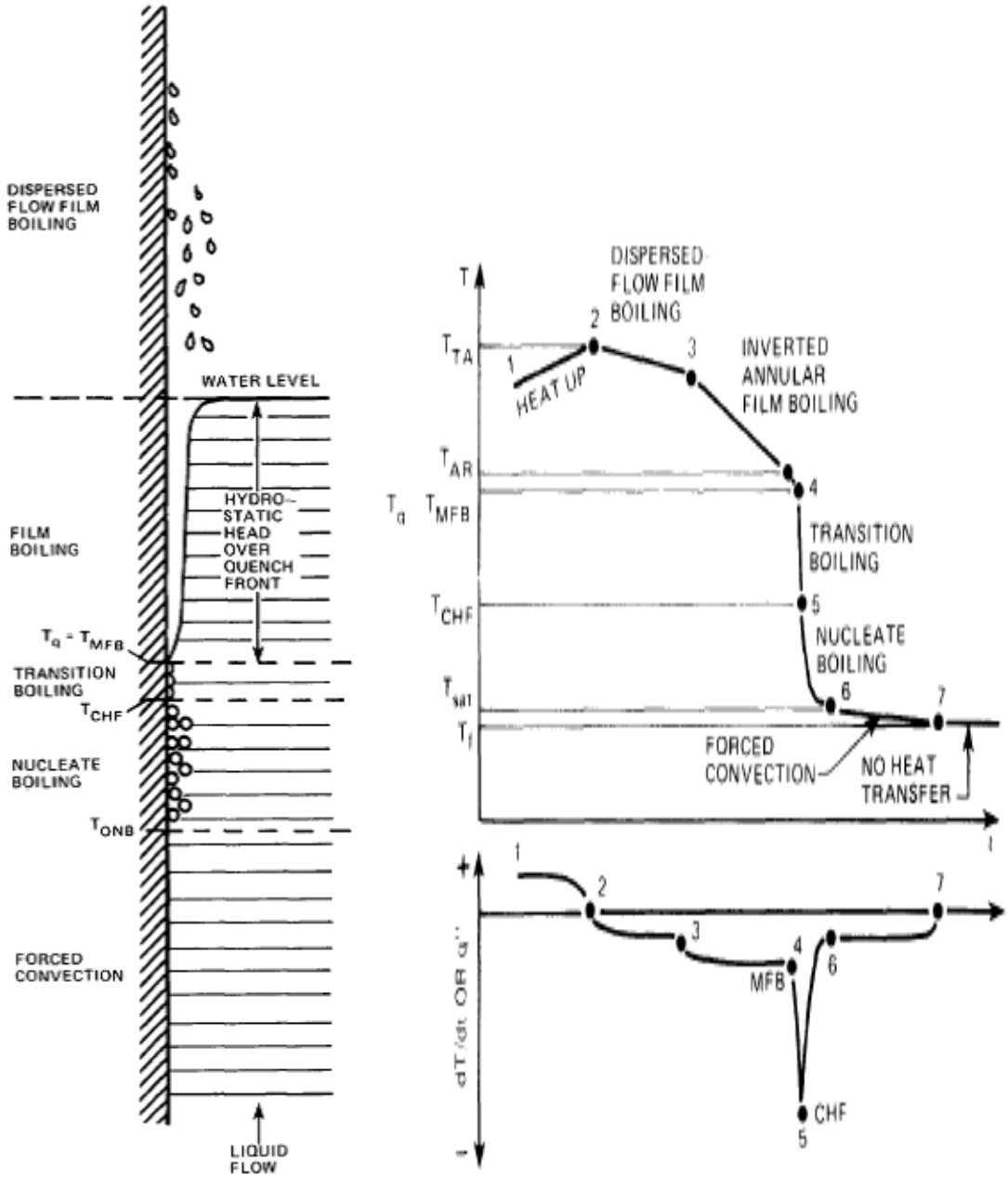
2.4 Μοντέλα υπολογισμού θερμοκρασίας επανάψυξης

Μέχρι σήμερα στη βιβλιογραφία δεν έχει αποσαφηνιστεί πλήρως ο ορισμός της θερμοκρασίας επανάψυξης και ο διαχωρισμός της από τη θερμοκρασία επανεγκατάστασης υγρού μετώπου ή τη θερμοκρασία Leidenfrost. Για αυτόν τον

λόγο στην παράγραφο αυτή γίνεται μια πολύ μικρή περιγραφή των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της επανάψυξης ώστε να γίνει κατανοητή η διαφορά των προαναφερθεισών θερμοκρασιών μεταξύ τους.

Κατά την εισαγωγή ψυκτικού υγρού σε υπερθερμανθείσα επιφάνεια, η επιφάνεια δεν ψύχεται ερχόμενη σε άμεση επαφή με το υγρό αλλά παρατηρείται το φαινόμενο της ψύξης της με ατμό (*film boiling*). Όσο διαρκεί αυτό το φαινόμενο μία μεμβράνη ατμού διαχωρίζει τη θερμή επιφάνεια από το υγρό και η μετάδοση θερμότητας γίνεται αποκλειστικά με ακτινοβολία και συναγωγή μέσω της μεμβράνης του ατμού προς το ψυκτικό. Με την πτώση της θερμοκρασίας αρχίζουν να σχηματίζονται σε διακριτές εστίες της υπέρθερμης επιφάνειας φυσαλίδες ατμού και έτσι ξεκινάει η μετάβαση στον εστιακό βρασμό (*nucleate boiling*). Η περιοχή μετάβασης από την ψύξη με ατμό στον εστιακό βρασμό αποτελεί την περιοχή του μεταβατικού βρασμού (*transition boiling*). Η κατάσταση κατά την έναρξη του μεταβατικού βρασμού (*departure from nucleate boiling)* ονομάζεται *boiling crisis* ή *burnout point*, κατά την οποία παρατηρείται η μέγιστη θερμική ροή ή αλλιώς κρίσιμη θερμική ροή. Γενικά, ως κρίσιμη θερμική ροή ορίζεται το άνω όριο της ροής θερμότητας που υπάρχει στην περίπτωση που μια υπερθερμανθείσα επιφάνεια επαναψύχεται και το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας που μεταφέρεται στο υγρό απορροφάται από την λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης. Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να μεταφερθεί μεγάλη ποσότητα θερμότητας με πολύ μικρή διαφορά θερμοκρασίας [63]. Η διαδικασία της επανάψυξης λαμβάνει χώρα όταν η θερμοκρασία της επιφάνειας μειωθεί τόσο ώστε να υπάρξει αλλαγή του μηχανισμού μεταφοράς θερμότητας από film boiling σε transition ή nucleate boiling. Όλες οι περιοχές βρασμού που αναφέρονται φαίνονται στο Σχήμα 2-11.

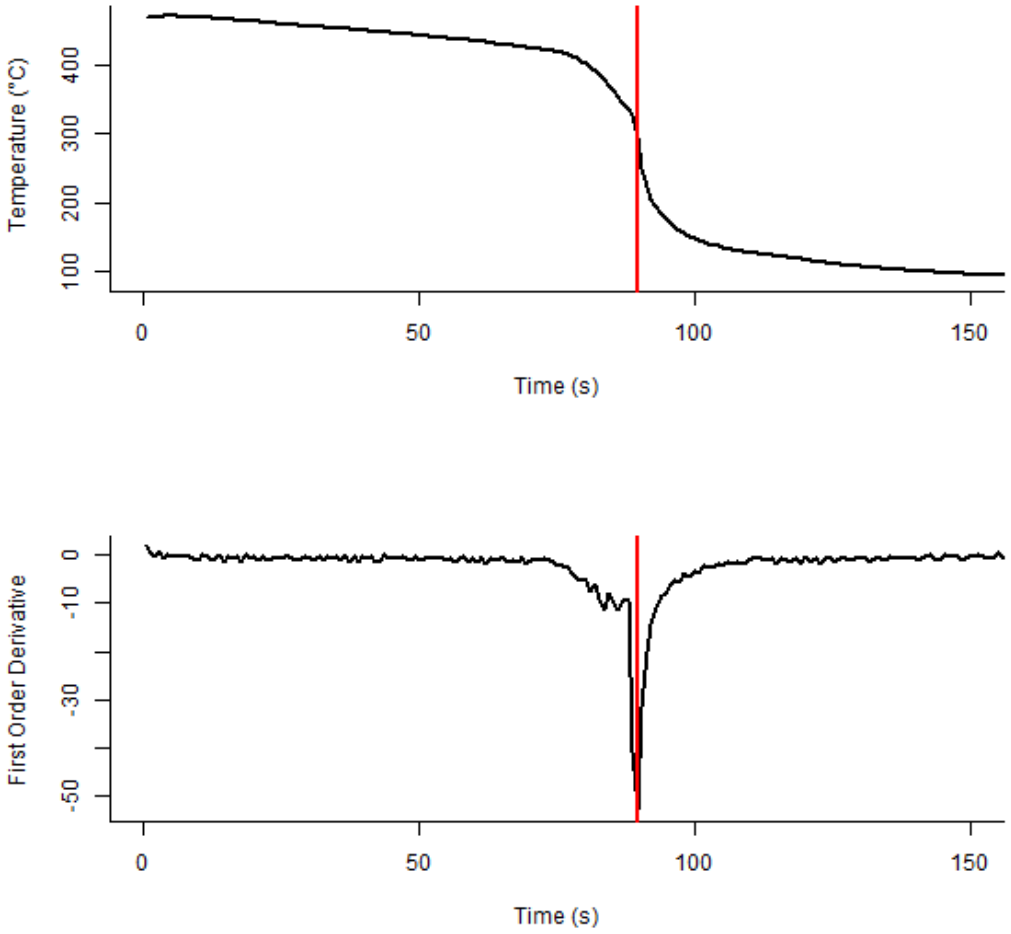
Σημαντικό είναι επίσης να αναφερθεί ότι η θερμοκρασία μετάβασης από την περιοχή ψύξης με ατμό στην περιοχή μεταβατικού βρασμού καλείται σημείο ξηράνσεως T_{MFB} (MFB: Minimum Film Boiling) ενώ η θερμοκρασία μετάβασης από την περιοχή μεταβατικού βρασμού στην περιοχή εστιακού βρασμού καλείται θερμοκρασία κρίσιμης θερμικής ροής T_{CHF} (CHF: Critical Heat Flux) [64].



Σχήμα 2-11 Επανάψυξη εκ των κάτω με υψηλό ρυθμό ροής μάζας και διάγραμμα θερμικής ροής **[64]**

Κατά τη διαδικασία της επανάψυξης πραγματοποιείται η ταχεία ψύξη μιας υπερθερμανθείσας επιφάνειας από ένα ψυκτικό υγρό. Η ψύξη συμβαίνει λόγω ενισχυμένου ρυθμού μεταφοράς θερμότητας από την επιφάνεια στο ψυκτικό υγρό και υπολογίζεται από το γόνυ της καμπύλης της θερμοκρασιακής ιστορίας της επιφάνειας, δηλαδή στο σημείο ελαχίστου της πρώτης παραγώγου (Σχήμα 2-12). Η θερμοκρασία όπου λαμβάνει χώρα αυτό το φαινόμενο ονομάζεται θερμοκρασία

επανάψυξης [7] ή φαινόμενη θερμοκρασία επανεγκατάστασης υγρού μετώπου [65]. Άλλοι ερευνητές [64, 66] θεωρούν ότι η ίδια αυτή θερμοκρασία είναι και το σημείο Leidenfrost.



Σχήμα 2-12 Θερμοκρασιακή ιστορία επαναψυχόμενης ράβδου και πρώτη παράγωγος από πείραμα της παρούσης Δ.Δ. (πείραμα No 12051341.14)

Εκτός από τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας επανάψυξης, οι Gunnerson et al. [7] πρότειναν και τη θερμοκρασία επαναΰγρανσης (rewetting) η οποία είναι κατά πολύ χαμηλότερη της θερμοκρασίας επανάψυξης και ορίζεται ως η θερμοκρασία στην οποία σχηματίζεται μια τριπλή επιφάνεια στερεού-υγρού-αερίου. Ωστόσο, ο υπολογισμός της εν λόγω θερμοκρασίας είναι αρκετά δύσκολος και για το λόγο αυτό το μεγαλύτερο μέρος των ερευνητών προσδιόρισε μόνο τη θερμοκρασία επανάψυξης, επιτρέποντας έτσι και τη σύγκριση των μεταξύ τους αποτελεσμάτων.

Στο σύνολο της βιβλιογραφίας υπάρχουν ερευνητές που υποστηρίζουν ότι η θερμοκρασία επανάψυξης παίρνει μία σταθερή τιμή καθώς και άλλοι που υποστηρίζουν ότι εξαρτάται από διάφορους πειραματικούς παράγοντες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα όμως της μεγάλης ασυμφωνίας μεταξύ των ερευνητών είναι ότι ακόμα και αυτοί που υποστηρίζουν την ύπαρξη μιας σταθερής τιμής [6, 13, 22, 37, 62, 67, 68, 69] έχουν μεγάλες αποκλίσεις (Πίνακας 2-4). Για παράδειγμα, ο Yamanouchi [6] θεώρησε ότι η θερμοκρασία επανάψυξης είναι σταθερή και ίση με 150°C ενώ μετά από πειράματα οι Bergles et al. [67] παρατήρησαν πως η θερμοκρασία επανάψυξης παίρνει μια σταθερή τιμή κοντά στους 400°C. Επιπλέον, για λόγους σύγκρισης, στον Πίνακα 2-4 παρουσιάζεται και η σταθερή θερμοκρασία επαναΰγρανσης η οποία προτάθηκε από τους Olek et al. [69], όπου και προσδιορίστηκε σύμφωνα με την προτεινόμενη θεωρία των Gunnerson et al. [7].

Εν αντιθέσει με τους προηγούμενους ερευνητές, υπάρχουν και άλλοι ερευνητές όπου μετά την εξέταση πειραματικών δεδομένων παρατήρησαν ότι η θερμοκρασία επανάψυξης δεν παίρνει σταθερή τιμή αλλά κυμαίνεται μεταξύ κάποιων ορίων ανάλογα με τις συνθήκες του εκάστοτε πειράματος. Για παράδειγμα οι Naitoh et al. [29] παρατήρησαν ότι η θερμοκρασία επανάψυξης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 420°C και 550°C σε όλες τις σειρές πειραμάτων τους. Παρόμοια, οι Kim et al. [66] σε πειράματα επανάψυξης που διενήργησαν για τη μελέτη της επίδρασης των ιδιοτήτων της υπερθερμανθείσας επιφάνειας πάνω στη διαδικασία επανάψυξης μέτρησαν τιμές της θερμοκρασίας επανάψυξης μεγαλύτερες των 453°C.

Επειδή η θεωρητική προσέγγιση και ο τρόπος υπολογισμού της θερμοκρασίας επανάψυξης είναι ίδιος για όλους τους προαναφερθέντες ερευνητές, οι αποκλίσεις μεταξύ των τιμών της θερμοκρασίας επανάψυξης φαίνεται να οφείλονται καθαρά και μόνο στην επίδραση των αρχικών συνθηκών των εκάστοτε πειραμάτων επανάψυξης αλλά και στο υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένες οι υπερθερμανθείσες ράβδοι.

Πίνακας 2-4 Εργασίες με σταθερή θερμοκρασία επανάψυξης

Ερευνητές	**Έτος**	**Έρευνα**	**Θερμοκρασία επανάψυξης (°C)**
Yamanouchi [6]	1968	Αναλυτική	150
Bergles et al. [67]	1970	Πειραματική	400
Cadek et al. [22]	1971	Πειραματική	420
Naitoh et al. [29]	1977	Πειραματική	420-550
Yu et al. [37]	1977	Πειραματική και αναλυτική	150
Yao et al. [68]	1978	Πειραματική	250
Olek et al. [69]	1988	Αναλυτική	260
Casamirra et al. [62]	2005	Πειραματική	265
Sahu et al. [13]	2010	Πειραματική και αναλυτική	200
Kim et al. [66]	2012	Πειραματική	>453

Ωστόσο, υπάρχει και ένα σύνολο ερευνητών όπου επιχείρησε να υπολογίσει τη θερμοκρασία επανάψυξης μέσω ενός θεωρητικού μοντέλου. Οι ερευνητές αυτοί μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

1) σε αυτούς που στηρίχθηκαν στο μηχανισμό της υδροδυναμικής και

2) σε αυτούς που στηρίχθηκαν στο μηχανισμό της θερμοδυναμικής.

Οι δύο προαναφερθέντες μηχανισμοί περιγράφονται στη συνέχεια:

1) Ο μηχανισμός της υδροδυναμικής

Όσο διατηρείται μια σταθερή μεμβράνη ατμού πάνω στην επιφάνεια του τοιχώματος της ράβδου, υφίσταται διαχωρισμός της διεπιφάνειας υγρού-ατμού από τη ράβδο. Αν οι συνθήκες που διατηρούν αυτή τη μεμβράνη μεταβληθούν, τότε το στρώμα ατμού θα καταρρεύσει και θα αρχίσει η επανάψυξη.

2) Ο μηχανισμός της θερμοδυναμικής

Ένα υγρό θεωρείται ότι δεν μπορεί να υφίσταται πάνω από ένα ανώτατο θερμοκρασιακό όριο το οποίο εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τις ιδιότητες του υγρού αυτού. Για αυτόν τον λόγο δεν είναι εφικτή η διατήρηση της επαφής του υγρού σε μια θερμή επιφάνεια όταν η θερμοκρασία της επιφάνειας αυτής ξεπεράσει αυτό το όριο.[2]

Το 1961 ο Berenson [70] εξήγαγε την πρώτη σχέση υπολογισμού της θερμοκρασίας επανάψυξης βασιζόμενος στην υδροδυναμική θεωρία. Συνδύασε μια εξίσωση υδροδυναμικής αστάθειας με τη θεωρία της ελάχιστης ροής θερμότητας. Η τελική σχέση που πρότεινε είναι η ακόλουθη (σχέση 2-30):

$$T_q = T_s + 0.127 \frac{\rho_g h_{fg}}{k_g} \left[\frac{g(\rho_f - \rho_g)}{\rho_f + \rho_g}\right]^{\frac{2}{3}} \left[\frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)}\right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\mu_g}{g(\rho_f - \rho_g)}\right]^{\frac{1}{3}} \quad \textbf{2-30}$$

όπου οι δείκτες f και g αντιπροσωπεύουν το υγρό και το αέριο αντίστοιχα, η μεταβλητή σ αντιστοιχεί στην επιφανειακή τάση (N/m), g είναι η παγκόσμια σταθερά επιτάχυνσης (m/s^2) και μ το ιξώδες ($N \cdot s/m^2$).

Το 1987 οι De Salve et al. [33] ασχολήθηκαν με τη θερμοδυναμική θεωρία και πρότειναν ένα νέο μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας επανάψυξης (σχέση 2-31) λαμβάνοντας υπ' όψιν τη ροή μάζας του ψυκτικού ανά μονάδα επιφανείας (G_A) και

[2] Σύμφωνα με τα ανωτέρω, για την πραγματοποίηση της επανάψυξης μιας υπερθερμανθείσας ράβδου πυρηνικού καυσίμου εισέρχονται και οι δύο μηχανισμοί. Αρχικά πρέπει να ικανοποιούνται οι υδροδυναμικές συνθήκες ώστε να επιτραπεί η επαφή του υγρού με την επιφάνεια και εν συνεχεία πρέπει η θερμοκρασία της διεπιφάνειας υγρού-ράβδου να βρίσκεται κάτω από το θερμοδυναμικό όριο.

την τοπική θερμοκρασία του ψυκτικού (T_l) όπου η τελευταία υπολογίζεται από ένα θερμοκρασιακό ισοζύγιο σταθερής κατάστασης.

$$T_q = T_l + 0.355(1 + 0.279G_A^{0.49})(273 - T_l) \quad \textbf{2-31}$$

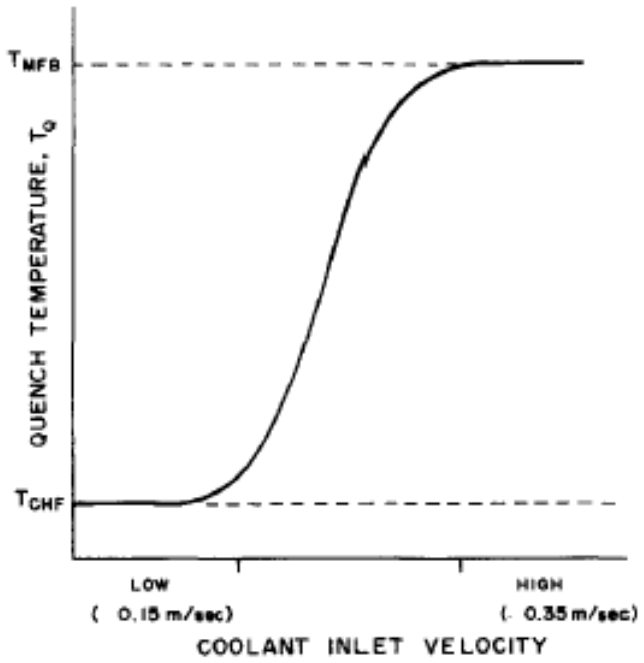
όπου G_A η ροή μάζας του ψυκτικού ανά μονάδα επιφανείας ($kg/m^2 \cdot s$) και T_l η τοπική θερμοκρασία του ψυκτικού (K).

Τέλος, υπάρχουν και ερευνητές όπου παρουσίασαν είτε αναλυτικά είτε ημιεμπειρικά μοντέλα υπολογισμού της θερμοκρασίας επανάψυξης [65, 71, 72].

Οι Kimball et al. [71] το 1983 θεώρησαν πως η επανάψυξη πραγματοποιείται στην περιοχή μεταβατικού βρασμού και η θερμοκρασία επανάψυξης παίρνει τιμές μεταξύ της θερμοκρασίας κρίσιμης θερμικής ροής T_{CHF} και του σημείου ξηράνσεως T_{MFB} όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-13. Ακόμη μετά από ανάλυση των πειραματικών δεδομένων του Siegel [73] παρατήρησαν πως η θερμοκρασία επανάψυξης εξαρτάται σημαντικά από την ταχύτητα εισόδου του ψυκτικού στο κανάλι (u_{in}) καταλήγοντας στην ακόλουθη έκφραση (σχέση 2-32):

$$T_q = 0.5(T_{CHF} + T_{MFB}) + 0.5(T_{CHF} - T_{MFB})tanh[\frac{4u_{in}}{0.23} - 4] \quad \textbf{2-32}$$

όπου T_{CHF} η θερμοκρασία κρίσιμης θερμικής ροής (K), T_{MFB} η θερμοκρασία του σημείου ξηράνσεως (K) και u_{in} ταχύτητα εισόδου του ψυκτικού στο κανάλι (m/s).



Σχήμα 2-13 Προτεινόμενη συσχέτιση της θερμοκρασίας επανάψυξης από την ταχύτητα εισόδου του ψυκτικού από τους Kimball et al. **[71]**

Η πρώτη εμπειρική συσχέτιση παρουσιάστηκε το 1967 από τον Bradfield [72] ο οποίος συσχέτισε τη θερμοκρασία επανάψυξης με το βαθμό υπόψυξης σύμφωνα με τη σχέση 2-33:

$$T_q = 101 + 8\Delta T_{sub} \qquad \textbf{2-33}$$

Τα πειράματα του Bradfield πραγματοποιήθηκαν σε ατμοσφαιρικές συνθήκες και διενεργήθηκαν σε μια υπερθερμανθείσα σφαίρα (~870 °C) η οποία εμβαπτιζόταν σε λουτρό νερού με διαφορετικές αρχικές θερμοκρασίες.

Το 1979 οι Kim et al. [65] με τη μέθοδο της Ανάλυσης Πολλαπλής Γραμμικής Συσχέτισης μεταξύ 470 πειραματικών σημείων κατέληξαν στην ημιεμπειρική σχέση 2-34 όπου συσχετίζει τη θερμοκρασία επανάψυξης με παραμέτρους όπως είναι οι ιδιότητες του υλικού της επιφάνειας, η παροχή μάζας του ψυκτικού, ο βαθμός υπόψυξης, η ισχύς της υπερθερμανθείσας επιφάνειας και η αρχική θερμοκρασία της:

$$T_q = 19.51 T_{ws} \left(\frac{T_S - T_C}{T_W - T_S}\right)^{0.107} \left(\frac{cG\varepsilon}{k}\right)^{-0.162} \left(\frac{kPower^2 (T_W - T_S)}{\varepsilon G^3}\right)^{-0.0989} \left(\frac{Z}{\varepsilon}\right)^{-0.163} + T_S \quad \textbf{2-34}$$

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι ο υπολογισμός της θερμοκρασίας επανάψυξης δεν είναι εύκολος και μπορεί η a priori θεώρηση μιας σταθερής τιμής της να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα στον υπολογισμό της ταχύτητας επανάψυξης καθώς και στη συνολική μελέτη του φαινομένου επανάψυξης, όπως γίνεται αντιληπτό και από την παράγραφο §2.3.1.

Κατά καιρούς έχουν γραφτεί αρκετές εργασίες [64, 74, 75, 64, 76] πάνω στο σύνολο της βιβλιογραφίας στις οποίες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει και να βρει σημαντικές πληροφορίες για τις πειραματικές εργασίες και για τις θεωρητικές αναλύσεις των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα κατά την επανάψυξη υπερθερμανθείσων επιφανειών.

2.5 Κώδικας αξιολόγησης μοντέλων επανάψυξης (RELAP5)

Τα τελευταία 20 τουλάχιστον χρόνια έχουν δημοσιευτεί αρκετές εργασίες πάνω στην προσομοίωση του φυσικού φαινομένου της επανάψυξης ράβδων πυρηνικού καυσίμου μετά από ατύχημα απώλειας ψυκτικού. Ένα από τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν και χρησιμοποιούνται ακόμα διεθνώς για αυτόν το σκοπό αποτελεί και ο υπολογιστικός κώδικας RELAP5.

Ο κώδικας RELAP (Reactor Excursion and Leak Analysis Program) είναι ένα υπολογιστικό εργαλείο που επιτρέπει στο χρήστη τη μοντελοποίηση του συνολικού συστήματος ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος είτε σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, είτε σε μεταβατικές συνθήκες όπως στην περίπτωση ενός ατυχήματος. Το πρόγραμμα αρχικά αναπτύχθηκε από το Εθνικό Εργαστήριο του Idaho ενώ σήμερα συνεχίζει και εξελίσσεται κάτω από την επιτήρηση του Αμερικανικού Υπουργείου Ενέργειας και της Διεθνούς Ομάδας Χρηστών RELAP5 (IRUG: International Relap5 Users Group) [77]. Έχει γραφτεί σε γλώσσα fortran ενώ το RELAP5/MOD3.3 αποτελεί την τελευταία και πιο αναβαθμισμένη έκδοση της σειράς.

Η αξιολόγηση και βελτίωση του κώδικα γίνεται μέσα από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του RELAP5 με συγκεκριμένες πειραματικές τιμές. Παρακάτω γίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση των σημαντικότερων εργασιών σκοπός των οποίων ήταν η αξιολόγηση ή η βελτίωση του κώδικα ώστε να προσομοιάζει σε ικανοποιητικό βαθμό τις συνθήκες επανάψυξης με τη μέθοδο του πλημμυρισμού.

Μία από τις πρώτες προσπάθειες που έγιναν για αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του RELAP5 σε συνθήκες πλημμυρισμού δημοσιεύτηκε σε εργασία το 1995 από τους Sencar και Aksan [78]. Σε αυτήν την εργασία παρουσιάστηκε η προσπάθεια προσομοίωσης των πειραμάτων επανάψυξης των εγκαταστάσεων του PSI-NEPTUN καθώς και του πανεπιστημίου Lehigh με τη χρήση των εκδόσεων RELAP5/MOD2.5, RELAP5/MOD3/v5m5 και RELAP5/MOD3/v7j. Τα συμπεράσματα της μελέτης κατέδειξαν ότι τα αποτελέσματα του κώδικα δεν ήταν κοντά στις πραγματικές πειραματικές τιμές ενώ τα φαινόμενα επανάψυξης, όπως για παράδειγμα η απότομη πτώση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της ράβδου τη στιγμή της επανάψυξης, δεν ήταν ευδιάκριτα.

Βασιζόμενος στα προαναφερόμενα μη ικανοποιητικά αποτελέσματα του κώδικα που δημοσίευσαν οι Sencar και Aksan, ο Analytis το 1996 πρότεινε κάποιες τροποποιήσεις στα θερμοϋδραυλικά μοντέλα που χρησιμοποιούσαν οι εκδόσεις RELAP5/MOD3/v5m5 και RELAP5/MOD3/v7j οι οποίες και εφαρμόστηκαν στην νεότερη έκδοση RELAP5/MOD3.1 [79]. Συγκεκριμένα, τροποποίησε το μοντέλο υπολογισμού του συντελεστή μετάδοσης ενέργειας μεταξύ τοιχώματος και ψυκτικού, το μοντέλο υπολογισμού του μεγέθους σταγόνας το οποίο επηρέαζε σημαντικά το υγρό μέτωπο σε χαμηλές πιέσεις καθώς και τον πίνακα Κρίσιμης Θερμικής Ροής Groeneveld για μικρές παροχές μάζας ψυκτικού.. Όλες οι παραπάνω αλλαγές ελέγχθηκαν με επιλεγμένα πειράματα επανάψυξης εκ των κάτω (πειραματικά προγράμματα PSI-NEPTUN και FLECHT-SEASET), ενώ τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά των προηγούμενων εκδόσεων του RELAP5 [80]. Συμπερασματικά φάνηκε ότι όλες οι προηγούμενες τροποποιήσεις βελτίωσαν σημαντικά τα αποτελέσματα του κώδικα τα οποία αποδείχθηκαν πιο ρεαλιστικά.

Δύο χρόνια αργότερα, το 1998, οι Jeong και No αξιολόγησαν με τη σειρά τους την έκδοση RELAP5/MOD3.1 μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων του κώδικα με

πειράματα του προγράμματος FLECHT-SEASET [81]. Οι ερευνητές παρατήρησαν κάποια ανεπάρκεια του υπολογιστικού μοντέλου επανάψυξης, η οποία θεώρησαν πως οφείλεται στον λανθασμένο υπολογισμό του μεγέθους των σταγόνων. Το μεγάλο μέγεθος σταγόνων που χρησιμοποιούνταν (0.0025 m) είχε ως αποτέλεσμα μεγάλη, μη ρεαλιστική συσσώρευση ψυκτικού κατάντη του υγρού μετώπου και εσφαλμένη επανάψυξη λόγω ατμού [82]. Οι ίδιοι πρότειναν ως ελάχιστο μέγεθος σταγόνων επανάψυξης το 0.0007 m. Συμπερασματικά η πρότασή τους βελτίωσε τις προηγούμενες προβλέψεις ενώ τελικά εφαρμόστηκε στην έκδοση RELAP5/MOD3.1.

Κατά τη χρήση διαφόρων εκδόσεων του RELAP5 διαπιστώθηκε πως η πρόβλεψη της θερμοκρασίας επανάψυξης δεν ήταν επαρκώς ικανοποιητική και οι αποκλίσεις μεταξύ των προβλεπόμενων και των πειραματικών τιμών κρίνονταν σημαντικές [83]. Λαμβάνοντας αυτά υπ' όψιν, οι Elias et al. το 1998 έκαναν μια προσπάθεια βελτίωσης του μοντέλου επανάψυξης του RELAP5/MOD3.1 αναπτύσσοντας και εφαρμόζοντας ένα μοντέλο μεταφοράς θερμότητας στην περιοχή του μεταβατικού βρασμού [84]. Το μοντέλο δεν βασίστηκε σε παραμέτρους που έχουν να κάνουν με την ιστορία της επανάψυξης, όπως είναι η θέση του υγρού μετώπου ή οι θερμοκρασίες του σημείου ξηράνσεως και της κρίσιμης θερμικής ροής αλλά βασίστηκε στην εισαγωγή γνωστών τοπικών τιμών θερμοκρασίας, πίεσης, παροχής μάζας, στατικής ποιότητας και κλάσματος κενού οι οποίες και μπορούν να μετρηθούν απευθείας σε κάθε πείραμα από τους σταθμούς μέτρησης. Το μοντέλο μεταβατικού βρασμού που προτάθηκε και εφαρμόστηκε ήταν των Chen et al [85]. Για την αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου εφαρμόστηκε ο κώδικας σε πειράματα επανάψυξης δύο διαφορετικών προγραμμάτων, του προγράμματος FZK-απλή ράβδος και του προγράμματος PSI-NEPTUN [86, 80]. Τα αποτελέσματα κρίθηκαν επαρκώς ικανοποιητικά αφού συμφωνούσαν σε μεγάλο βαθμό με τα πειραματικά αποτελέσματα. Ωστόσο δεν εξαλείφθηκαν όλες οι αδυναμίες των προηγούμενων εκδόσεων και κυρίως αυτές που προέκυπταν μετά από προσομοιώσεις πειραμάτων με υψηλούς ρυθμούς παροχής μάζας ψυκτικού.

Το 2003 ο Koszela αξιολόγησε την έκδοση RELAP5/MOD3.2.2 Gamma συγκρίνοντας τα αποτελέσματά της με 36 πειράματα επανάψυξης στην εγκατάσταση ABB Atom 3x3 Rod Bundle (9 ράβδοι καυσίμων) [87]. Η αξιολόγηση έγινε με τη χρήση μόνο των βασικών επιλογών του κώδικα και χωρίς την πρόθεση πρότασης και εισαγωγής νέων μοντέλων υπολογισμού. Συμπερασματικά διαπιστώθηκε ότι αν και οι

μέγιστες θερμοκρασίες της ράβδου ήταν σωστά υπολογισμένες ωστόσο ο χρόνος επανάψυξης ήταν πιο σύντομος από τον πραγματικό.

Οι διαδικασίες αξιολόγησης και βελτίωσης του κώδικα συνεχίζονται μέχρι και σήμερα. Επιλεκτικά αναφέρεται μία από τις πιο πρόσφατες δημοσιεύσεις του 2010 των Choi και No [88]. Σε αυτήν την εργασία, οι ερευνητές αφού αξιολόγησαν την έκδοση του RELAP5/MOD3.3 συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του κώδικα με 8 πειράματα του προγράμματος FLECHT-SEASET κατέληξαν στα ίδια συμπεράσματα και παρατηρήσεις ως προς τον χρόνο επανάψυξης, τα οποία είχε διαπιστώσει και ο Koszela [87]. Για να μειωθούν αυτές οι αποκλίσεις μεταξύ των υπολογιστικών και των πειραματικών τιμών προτάθηκε ένα μοντέλο υπολογισμού της μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας μεταξύ τοιχώματος ράβδου και ψυκτικού καθώς και τρεις διαφορετικοί συντελεστές μεταφοράς ενέργειας. Οι προτεινόμενες τροποποιήσεις αποδείχτηκε ότι μείωσαν σημαντικά την απόκλιση του χρόνου επανάψυξης (από 85.9 s σε 33.2 s) ενώ μειώθηκαν και οι αποκλίσεις μεταξύ των πειραματικών και υπολογιστικών τιμών των μέγιστων θερμοκρασιών τοιχώματος της ράβδου (από 48.3 K σε 36.1 K). Ωστόσο και σε αυτήν την εργασία παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ πραγματικών και υπολογιστικών τιμών κυρίως όσον αφορά τους συντελεστές μετάδοσης θερμότητας τοιχώματος-ψυκτικού.

Το τελευταίο αυτό γεγονός αποδεικνύει ότι ο κώδικας έχει περιθώριο να δεχτεί ακόμα πολλές σημαντικές βελτιώσεις πριν γίνει κοινώς αποδεκτό ότι μπορεί να προσομοιάσει ικανοποιητικά όλους τους φυσικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα κατά την επανάψυξη εκ των κάτω μιας υπερθερμανθείσας ράβδου πυρηνικού καυσίμου.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. είναι εξοπλισμένο με μια θερμοϋδραυλική εγκατάσταση συνολικού ύψους 4.48 m με βασικό σκοπό τη μελέτη της θερμοϋδραυλικής συμπεριφοράς των πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος. Πιο συγκεκριμένα προσομοιάζεται η λειτουργία των συστημάτων εφεδρικής ψύξης για την αντιμετώπιση του ατυχήματος απώλειας ψυκτικού από τους πυρήνες των πυρηνικών αντιδραστήρων ώστε να μελετηθούν σε πειραματικό επίπεδο οι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της επανάψυξης.

Η μελέτη και ο σχεδιασμός της εγκατάστασης ξεκίνησε το 1978 στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Σ.Ε. Σιμόπουλου, η οποία διενεργήθηκε στο Imperial College of Science and Technology του Λονδίνου [89]. Η κατασκευή του συνολικού μηχανολογικού κυκλώματος και η διασύνδεσή του με το λογισμικό εξοπλισμό ολοκληρώθηκε στα πλαίσια της ΔΔ του Ε.Π. Χίνη το 1991 [12]. Η πειραματική αυτή εγκατάσταση ονομάστηκε Θερμο-Υδραυλικό Κύκλωμα και στη συνέχεια της εργασίας θα αναφέρεται συχνά ως ΘΥΚ.

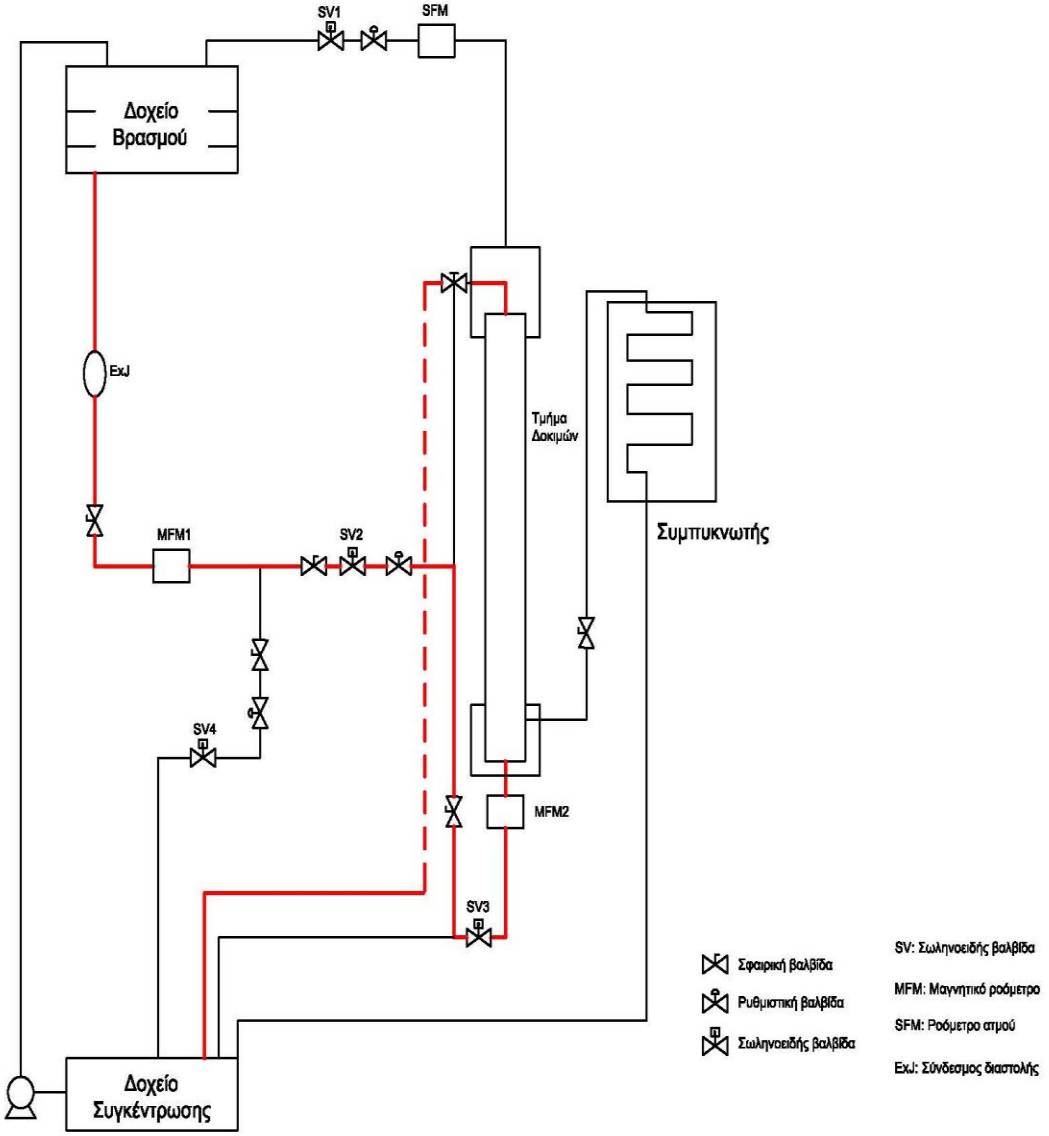
Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται εν συντομία η συγκρότηση του ΘΥΚ ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη λειτουργία της εγκατάστασης κατά την εκτέλεση πειραμάτων επανάψυξης εκ των κάτω. Τέλος, έμφαση δίνεται και στις αναγκαίες τροποποιήσεις που χρειάστηκε να γίνουν στο λογισμικό επιτήρησης της πειραματικής εγκατάστασης και στο μιμικό διάγραμμα αυτής προκειμένου να προσαρμοστεί στις ανάγκες των παρακολούθησης και καταγραφής των πειραμάτων επανάψυξης με τη διαδικασία του πλημμυρισμού.

3.1 Βασική συγκρότηση του ΘΥΚ

Μια πλήρη περιγραφή της συγκρότησης της θερμοϋδραυλικής εγκατάστασης υπάρχει στη ΔΔ του Ε.Π. Χίνη όπου ο ενδιαφερόμενος μπορεί να ανατρέξει για μια πιο λεπτομερή ανάλυση τόσο του μηχανολογικού όσο και του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού του [12]. Επισημαίνεται ότι αντικειμενικός σκοπός της συγκρότησης,

μέχρι τότε, ήταν η διεξαγωγή πειραμάτων ψεκασμού εκ των άνω (Top Spray Cooling).

Τα βασικά στοιχεία του ΘΥΚ αποτελούν το δοχείο βρασμού, το δοχείο συγκέντρωσης και το τμήμα δοκιμών. Η διασύνδεση όλων αυτών μεταξύ τους γίνεται μέσω κλάδων σωληνώσεων. Σε συγκεκριμένα σημεία του κυκλώματος υπάρχουν εγκατεστημένα μετρητικά όργανα τα οποία επιτρέπουν στον πειραματιστή την επιτήρηση της εγκατάστασης, ενώ κατάλληλα συστήματα ελέγχου διασφαλίζουν αυτοματοποιημένα τη σωστή και ασφαλή λειτουργία του. Το Σχήμα 3-1 απεικονίζει το σχηματικό διάγραμμα του ΘΥΚ όπου με κόκκινο έχει χρωματιστεί η διαδρομή του εργαζόμενου μέσου κατά την εκτέλεση ενός πειράματος επανάψυξης εκ των κάτω.

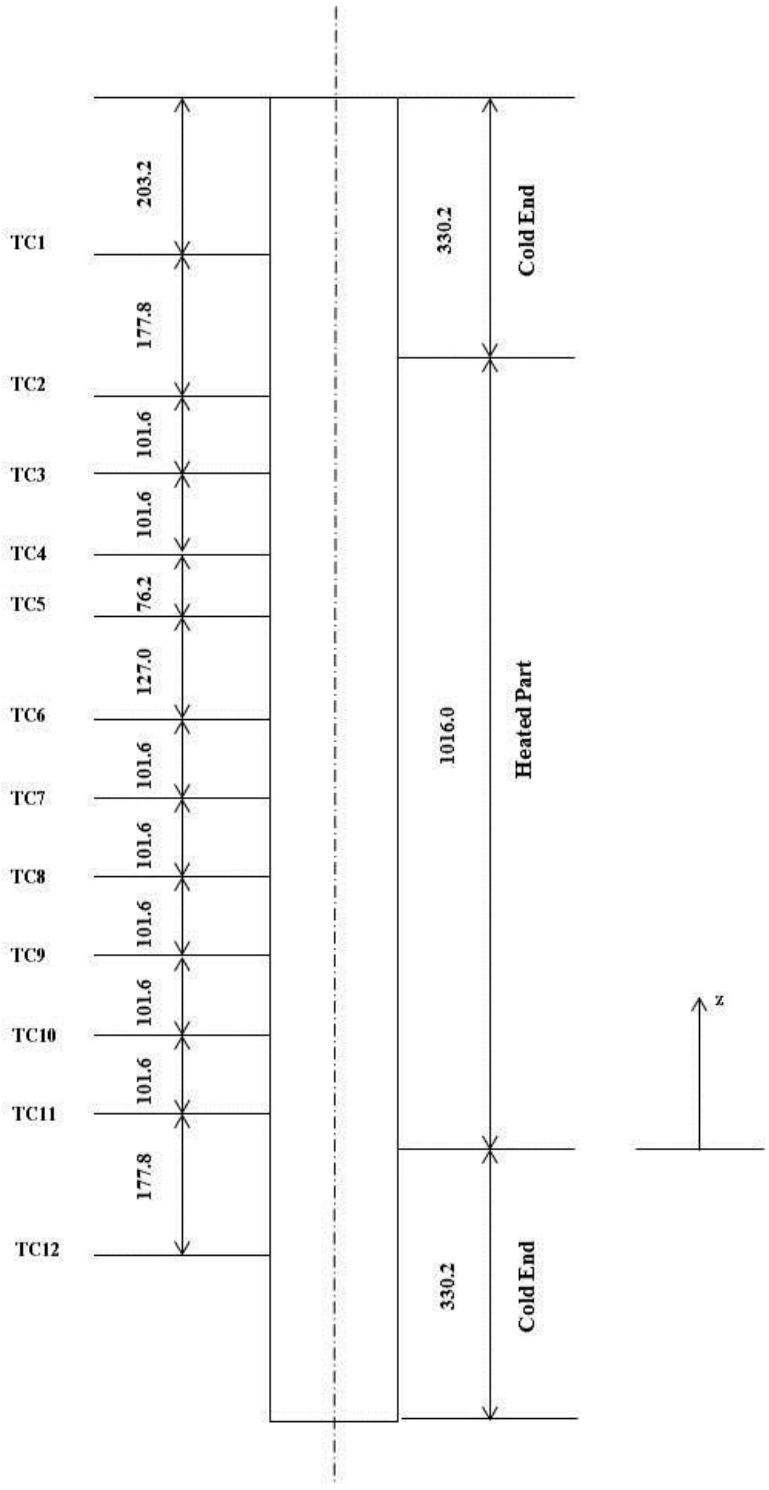


Σχήμα 3-1 Σχηματική αναπαράσταση θερμοϋδραυλικού κυκλώματος του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Με κόκκινο έχουν χρωματιστεί οι κλάδοι που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση πειραμάτων επανάψυξης εκ των κάτω

Το δοχείο βρασμού (χωρητικότητας 0.635 m^3) βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο της εγκατάστασης και με τη βοήθεια τεσσάρων αντιστάσεων συνολικής ισχύος 36 kW τροφοδοτεί το τμήμα δοκιμών με νερό κατάλληλης θερμοκρασίας σε πιέσεις 1- 7 bar. Όταν το νερό περάσει από το τμήμα δοκιμών στη συνέχεια εισέρχεται στο δοχείο συγκέντρωσης. Το δοχείο συγκέντρωσης (χωρητικότητας 0.200 m^3) βρίσκεται στο χαμηλότερο σημείο της εγκατάστασης και όταν ολοκληρωθεί η πλήρωσή του, το νερό

οδηγείται ξανά στο δοχείο βρασμού με τη βοήθεια αντλίας η λειτουργία της οποίας ελέγχεται από αυτόματο σύστημα ελέγχου στάθμης.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό πως το βασικότερο κομμάτι της εγκατάστασης αποτελεί το τμήμα δοκιμών. Το τμήμα δοκιμών αποτελείται από μια ράβδο ανοξείδωτου χάλυβα η οποία φέρει στο εσωτερικό της ηλεκτρική αντίσταση για την ομοιόμορφη θέρμανσή της. Ακόμα, στο εσωτερικό της υπάρχουν 12 θερμοστοιχεία τύπου J (Iron – Constantan) τοποθετημένα σε συγκεκριμένες αποστάσεις κατά μήκος της ράβδου, τα οποία παρέχουν την ένδειξη της θερμοκρασίας του περιβλήματος της ράβδου χωρίς να διαταρράσουν την ροή στην επιφάνεια του περιβλήματος. Το σημείο μέτρησης κάθε θερμοστοιχείου απέχει 1 mm περίπου από την εξωτερική επιφάνεια της ράβδου παρέχοντας αντιπροσωπευτικές τιμές της θερμοκρασίας επιφανείας. Η ράβδος είναι ομοαξονικά τοποθετημένη σε ένα κατακόρυφο κανάλι κατασκευασμένο από borosilicate glass. Η εξωτερική διάμετρος της ράβδου είναι 0.015875 m ενώ η εσωτερική διάμετρος του καναλιού είναι 0.05 m. Το συνολικό μήκος της ράβδου είναι 1676.4 m ενώ το θερμαινόμενο κομμάτι της είναι 1016.0 m. Το Σχήμα 3-2 απεικονίζει την ακριβή θέση των θερμοστοιχείων στο εσωτερικό της.



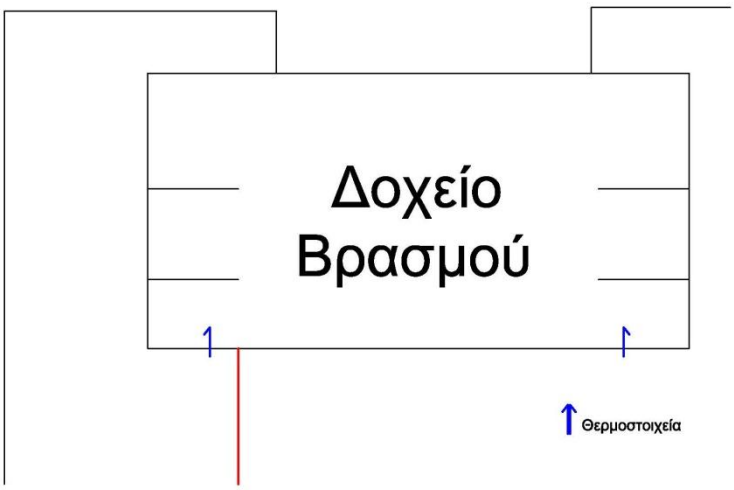
Σχήμα 3-2 Σχηματικό διάγραμμα υπέρθερμης ράβδου και θέσεις των θερμοστοιχείων

3.2 Προδιεργασίες

Πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας διενεργήθηκε, στα πλαίσια των πειραματικών εργασιών της παρούσης ΔΔ, επιτήρηση της εγκατάστασης και έλεγχος της σωστής λειτουργίας των σταθμών μέτρησης.

Κατά την επιτήρηση του συστήματος σωληνώσεων της εγκατάστασης παρουσιάστηκε αστοχία και διαρροή στον κλάδο εισόδου του ψυκτικού στο κύκλωμα, με σημείο εκκίνησης το δοχείο βρασμού (Σχήμα 3-3). Η αστοχία αυτή αποδόθηκε στη συνεχή διαστολή και συστολή που υφίσταντο ο κλάδος λόγω συχνής διέλευσης πολύ θερμού νερού κατά την πραγματοποίηση παλαιότερων πειραμάτων επανάψυξης [90]. Έπειτα από μελέτη και έρευνα αγοράς, επελέγη η λύση της τοποθέτησης ενός συνδέσμου διαστολής (Expansion Joint) ο οποίος δύναται να απορροφάει τις διαστολές και συστολές του κλάδου χωρίς καταπόνηση των σωληνώσεων [91]. Η εγκατάσταση του συνδέσμου διαστολής πραγματοποιήθηκε τη χρονική περίοδο πριν την εκτέλεση των πειραμάτων της παρούσας ΔΔ.

Επιπλέον, κατά τον έλεγχο του ΘΥΚ διαπιστώθηκε πως τα δύο θερμοστοιχεία που είναι εμβαπτισμένα στο κάτω μέρος του δοχείου βρασμού (Σχήμα 3-3) παρουσίαζαν σημαντική διαφορά στην ένδειξή τους της τάξεως των πέντε θερμοβαθμίδων. Έτσι αποφασίστηκε το άνοιγμα του δοχείου βρασμού και ο έλεγχος του εσωτερικού του. Η επιτήρηση του δοχείου βρασμού έγινε μέσω των οπών (διάμετρος οπών 2΄΄) στις οποίες ήταν τοποθετημένες οι αντιστάσεις της μίας φλάντζας, αφού πρωτίστως αφαιρέθηκαν. Παρατηρήθηκε πως τόσο οι αντιστάσεις του δοχείου βρασμού όσο και το ίδιο το δοχείο βρασμού από το επίπεδο των αντιστάσεων και κάτω ήταν επικαλυμμένα με ένα παχύ στρώμα αλάτων. Μετά από εκτενή βιβλιογραφική έρευνα και δοκιμή διαφόρων καθαριστικών διαλυμάτων αποφασίστηκε ο χημικός καθαρισμός του δοχείου βρασμού και των αντιστάσεων με τη χρήση ήπιου διαλύματος φωσφορικού οξέος (10% $H_3PO_{4(aq)}$). Η δοκιμή, μετά τον υπόψη καθαρισμό, έδωσε πρακτικά ταυτόσημες ενδείξεις στα δύο θερμοστοιχεία.



Σχήμα 3-3 Σχηματικό διάγραμμα δοχείου βρασμού και θέσεις των θερμοστοιχείων

Περισσότερες λεπτομέρειες που αφορούν το σύνδεσμο διαστολής αλλά και τη διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τον χημικό καθαρισμό του δοχείου βρασμού και των αντιστάσεων αναφέρονται αναλυτικά στα Παραρτήματα στο Κεφάλαιο §Π2.

Τέλος, πριν την πραγματοποίηση των πειραμάτων έπρεπε να ολοκληρωθεί η διακρίβωση της βαθμονόμησης των δύο μαγνητικών ροομέτρων της εγκατάστασης, των αναλογοψηφιακών μετατροπέων (PCL-717 και PCL-718) οι οποίοι ψηφιοποιούν το αναλογικό σήμα των μεταλλακτών της εγκατάστασης καθώς και των δύο ενισχυτών-πολυπλεκτών (MUX A και MUX B) οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την ένδειξη των μετρήσεων των θερμοστοιχείων της εγκατάστασης αλλά και για την ένδειξη της λειτουργίας των σωληνοειδών βαλβίδων. Η διαδικασία της διακρίβωσης της βαθμονόμησης που ακολουθήθηκε καθώς και τα αποτελέσματά της περιγράφονται εκτενώς στα Παραρτήματα στο Κεφάλαιο §Π3.

3.3 Πειραματική διαδικασία

Η διαδικασία εκτέλεσης των πειραμάτων επανάψυξης έχει αναλυθεί λεπτομερώς στο παρελθόν σε εργασίες του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας [12, 90, 92]. Κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης όλων των προαναφερθεισών εργασιών εκτελέστηκαν πειράματα επανάψυξης με προσαγωγή νερού στην άνω κεφαλή του Τμήματος Δοκιμών. Στόχος της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής ήταν η εκπόνηση

πειραμάτων επανάψυξης με πλημμυρισμό του καναλιού του Τμήματος Δοκιμών, σε ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Γενικά η διαδικασία επανάψυξης με πλημμυρισμό είχε ως εξής:

i. Καθορισμός αρχικών πειραματικών συνθηκών πριν την έναρξη των πειραμάτων και εξασφάλιση της σταθεροποίησής τους καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος με τη βοήθεια των οργάνων επιτήρησης και ελέγχου.
ii. Προσομοίωση του ατυχήματος απώλειας ψυκτικού με διακοπή της παροχής νερού στο τμήμα δοκιμών, αποστράγγιξη του Τμήματος Δοκιμών και παροχέτευση του ψυκτικού απευθείας στο δοχείο συγκέντρωσης μέσω ενός κλάδου παράκαμψης.
iii. Προσομοίωση decay heat με την έναρξη της τροφοδοσίας της ηλεκτρικής αντίστασης της ράβδου έως ότου η θερμοκρασία του τοιχώματός της φτάσει την επιθυμητή τιμή.
iv. Διακοπή της τροφοδοσίας της ηλεκτρικής αντίστασης της ράβδου και προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος έκτακτης ψύξης με αποκατάσταση της ροής του ψυκτικού μέσου στο κανάλι δοκιμών.
v. Παρακολούθηση της εξέλιξης και της λήξης της πειραματικής διαδικασίας στην οθόνη του συνδεδεμένου Η/Υ τύπου IBM – PC συμβατού με παράλληλη καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων.
vi. Αποθήκευση και μεταφορά πειραματικών δεδομένων σε άλλον προσωπικό Η/Υ για την επεξεργασία τους.

Κατά την παρούσα ΔΔ όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε ατμοσφαιρικές συνθήκες (1 bar). Σε κάθε σειρά πειραμάτων καθορίστηκε σταθερή παροχή του ψυκτικού μέσου (0.008 $kg \cdot s^{-1}$ – 0.050 $kg \cdot s^{-1}$) καθώς και σταθερή θερμοκρασία υπόψυξης (0°C – 50°C). Ως υπόψυξη ορίζεται η διαφορά της θερμοκρασίας κορεσμού του νερού σε ατμοσφαιρικές συνθήκες από τη θερμοκρασία του νερού κατά την είσοδό του στο κανάλι δοκιμών. Η μέγιστη αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος της ράβδου πριν την έναρξη της επανάψυξης καθορίστηκε στους 550°C

ενώ η ελάχιστη στους 300°C (βήμα 5°C). Συνολικά διενεργήθηκαν 20 σειρές 50 περίπου πειραμάτων έκαστη (~1083 πειράματα) [3]:

- Παροχή ψυκτικού μέσου ($kg \cdot s^{-1}$): 0.008 / 0.012 / 0.017 / 0.025 / 0.033 / 0.042 / 0.050
- Θερμοκρασία υπόψυξης ψυκτικού μέσου (°C): 0 / 25 / 50
- Αρχική θερμοκρασία τοιχώματος ράβδου (°C): 550 / 545 / 540 /... / 305 / 300

3.4 Λογισμικό καταγραφής πειραματικών δεδομένων

Παράλληλα με την εκτέλεση των πειραμάτων επανάψυξης ο πειραματιστής έχει τη δυνατότητα εποπτείας όλης της διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο μέσω ενός μιμικού διαγράμματος της θερμοϋδραυλικής εγκατάστασης που εμφανίζεται στην οθόνη του συνδεδεμένου Η/Υ, ενώ ταυτόχρονα καταγράφονται τα δεδομένα σε αρχεία ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία τους σε μεταγενέστερο χρόνο. Η καταγραφή των δεδομένων καθώς και η εμφάνιση του μιμικού διαγράμματος της πειραματικής εγκατάστασης γίνεται με το πρόγραμμα RIG. Το πρόγραμμα RIG που αρχικά συντάχθηκε στα πλαίσια της ΔΔ του Ε.Π. Χίνη [12], σκοπό είχε την οπτική εποπτεία και καταγραφή των πειραμάτων επανάψυξης εκ των άνω. Ωστόσο, για τους σκοπούς των πειραμάτων της παρούσης ερευνητικής εργασίας, το πρόγραμμα τροποποιήθηκε έτσι ώστε να δίνεται η δυνατότητα καταγραφής και παρακολούθησης και των πειραμάτων επανάψυξης εκ των κάτω έτσι όπως εκτελούνται στην ίδια πειραματική εγκατάσταση(§ 3.4.2). Επιπλέον, προς διευκόλυνση των πειραματιστών και προς αποφυγή συγχύσεων, στα πλαίσια της εργασίας δημιουργήθηκε ένα batch αρχείο που δίνει την επιλογή στον ερευνητή να καλέσει με μία εντολή το πρόγραμμα RIG που αντιστοιχεί στον τρόπο επανάψυξης που μελετά (§ 3.4.3). Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι ρουτίνες του τροποποιημένου προγράμματος και οι αλλαγές που έγιναν για την εποπτεία των πειραμάτων επανάψυξης με την μέθοδο του πλημμυρισμού.

[3] Αναφέρεται πως τα πειράματα που διενεργήθηκαν για παροχή ψυκτικού 0.008 $kg \cdot s^{-1}$ και θερμοκρασία υπόψυξης ψυκτικού 50°C δεν ολοκληρώθηκαν λόγω πολύ χαμηλού ρυθμού επανάψυξης ίσο με το ρυθμό πλημμυρισμού του καναλιού.

3.4.1 *Εκτέλεση προγράμματος RIG*

Για την έναρξη εκτέλεσης του προγράμματος εποπτείας και καταγραφής είναι απαραίτητο ο πειραματιστής να δώσει την εντολή:

RIG

Στη συνέχεια εμφανίζονται στην οθόνη οι παρακάτω επιλογές:

1: DISPLAY

9: ASSIST

0: EXIT

Για την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων σε αρχείο ο χρήστης επιλέγει το πλήκτρο **9** και στο καινούριο παράθυρο που προβάλλεται, στην επιλογή:

Καταγραφή πειράματος REWETTING (Y/N):

ο χρήστης επιλέγει **Y** ενώ συγχρόνως του δίνεται η δυνατότητα επιλογής της συχνότητας δειγματοληψίας των πειραματικών δεδομένων.

Στη συνέχεια αναδύεται ένα τελευταίο παράθυρο που ζητάει περαιτέρω πληροφορίες για τις συνθήκες του πειράματος το οποίο θα διεξαχθεί:

XPQQQDDSSNNN

όπου:

X=1 (για πειράματα επανάψυξης)
P=1 (ατμοσφαιρική πίεση σε bar)
QQQ= 0.50 / 0.75 / 1.00 / 1.50 / 2.00 / 2.50 / 3.00 (παροχή ψυκτικού σε l/min)
DD= 00 / 25 / 50 (υπόψυξη σε °C)
SS= 10 (παροχή ατμού %)
NNN= Run Number

Αφού συμπληρωθούν όλα τα προαναφερθέντα βήματα ξεκινάει η καταγραφή του πειράματος και εμφανίζεται στην οθόνη το μιμικό διάγραμμα της εγκατάστασης. Όταν ολοκληρωθεί η επανάψυξη εμφανίζεται μήνυμα λήξης στην οθόνη του Η/Υ ενώ ταυτόχρονα αποθηκεύεται το αρχείο με τα πειραματικά δεδομένα με ένα μοναδικό όνομα αρχείου της μορφής:

DDMMHHLL.YY

όπου:

DD: η μέρα διεξαγωγής του πειράματος
MM: ο μήνας διεξαγωγής του πειράματος
HHLL: η ώρα και το λεπτά καταγραφής του αρχείου των αποτελεσμάτων
YY: το έτος διεξαγωγής του πειράματος

Για παράδειγμα, το πείραμα με όνομα αρχείου 13101054.14 διεξήχθη στις 13/10/2014 και ολοκληρώθηκε στις 10:54 το πρωί όπου και έκλεισε το αρχείο καταγραφής των πειραματικών δεδομένων.

3.4.2 Πρόγραμμα RIG

Το πρόγραμμα RIG και οι υπορουτίνες που περιέχονται σε αυτό γράφτηκαν με σκοπό να εμφανίσουν την πειραματική διαδικασία της επανάψυξης εκ των άνω καθώς και να καταγράψουν τα πειραματικά δεδομένα που προκύπτουν από αυτή. Για να γίνει δυνατή και η εμφάνιση και η καταγραφή των πειραμάτων επανάψυξης εκ των κάτω ήταν απαραίτητο να γίνουν κάποιες μετατροπές σε διάφορες ρουτίνες του κώδικα.

Η λίστα των ρουτινών σε γλώσσα fortran που συγκροτούν το πρόγραμμα RIG είναι η ακόλουθη:

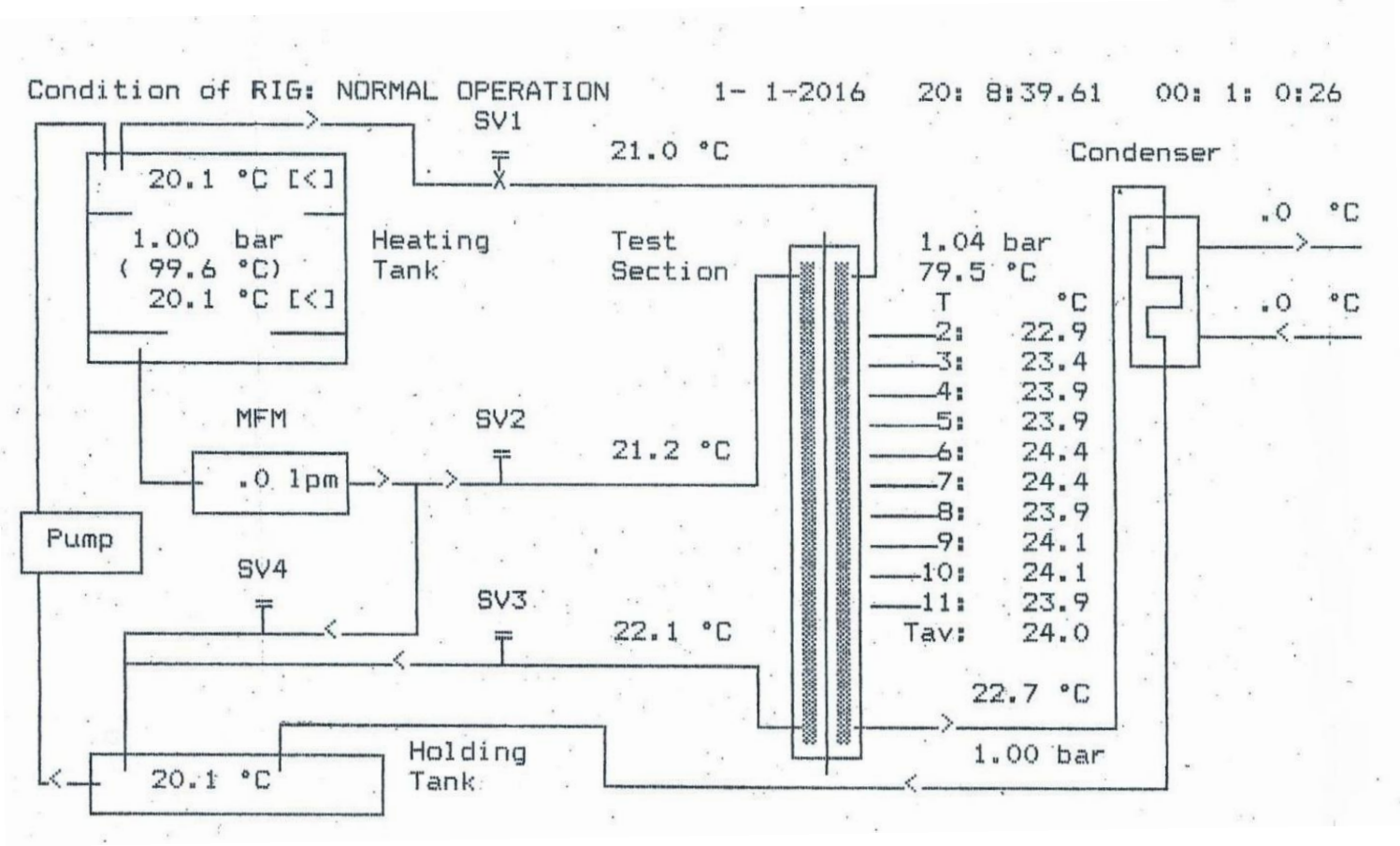
i. RIG.FOR
ii. N.FOR
iii. R.FOR
iv. RW.FOR
v. S1.FOR
vi. S2.FOR
vii. S3.FOR
viii. S4.FOR – S6.FOR

ix. S5.FOR

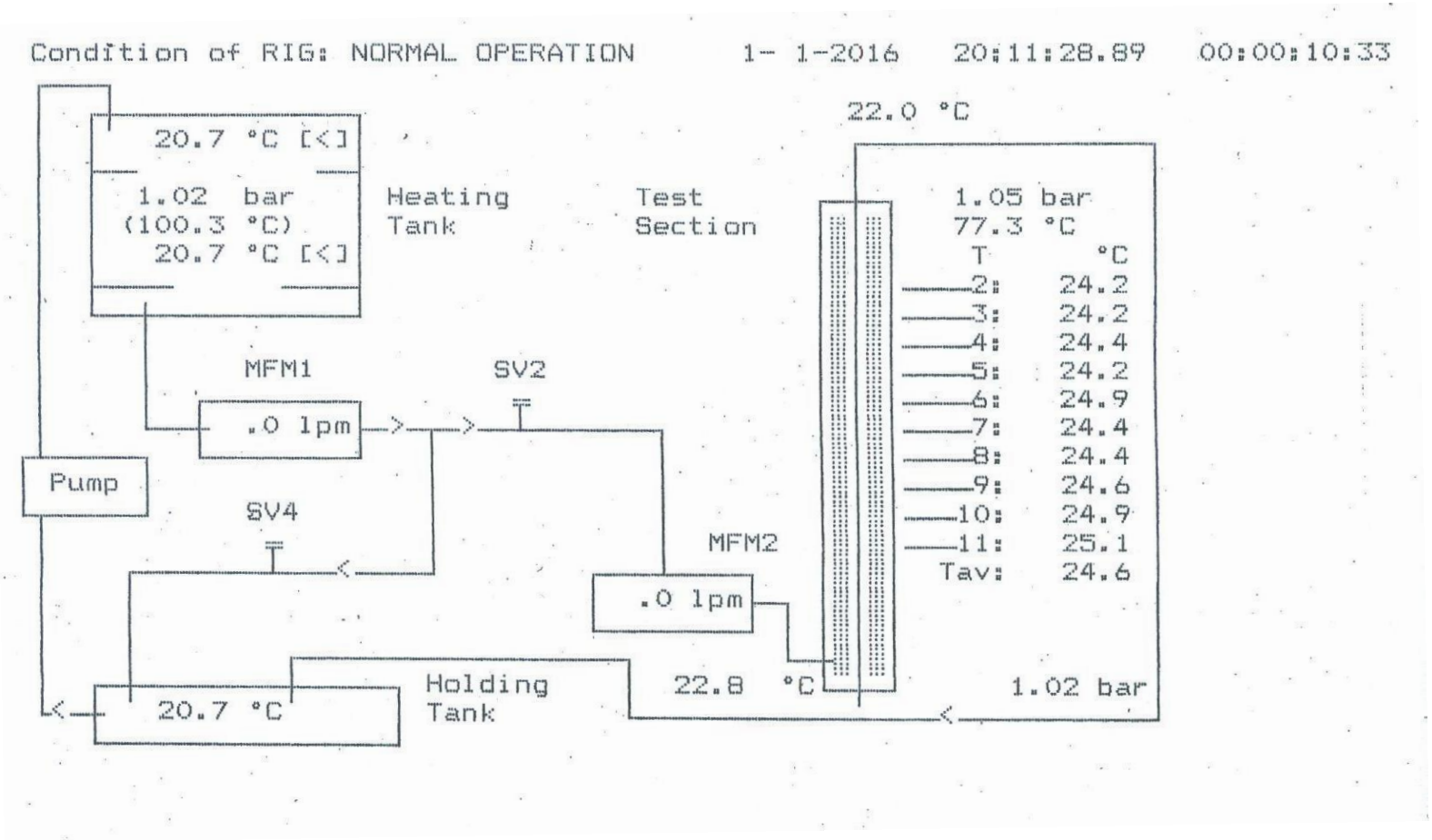
x. STEM.FOR

Για περισσότερες πληροφορίες για το σύνολο των ρουτίνων που περιέχονται στο πρόγραμμα RIG καθώς και για τη λειτουργία αυτών ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη ΔΔ [12].

Το Σχήμα 3-4 απεικονίζει το μιμικό διάγραμμα της επανάψυξης εκ των άνω όπως εμφανίζεται στην οθόνη του Η/Υ κατά την κανονική λειτουργία της εγκατάστασης ενώ το Σχήμα 3-5 απεικονίζει το μιμικό διάγραμμα της επανάψυξης εκ των κάτω όπως προέκυψε έπειτα από τις αλλαγές του έγιναν στον κώδικα RIG. Στη συνέχεια της παραγράφου αναφέρονται εν συντομία οι ρουτίνες της παραπάνω λίστας του κώδικα καθώς και οι τροποποιήσεις που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ΔΔ.



Σχήμα 3-4 Μιμικό διάγραμμα του ΘΥΚ κατά τη διαδικασία επανάψυξης εκ των άνω



Σχήμα 3-5 Μιμικό διάγραμμα του ΘΥΚ κατά τη διαδικασία επανάψυξης εκ των κάτω

i. RIG.FOR

Η ρουτίνα RIG.FOR είναι υπεύθυνη για την έναρξη, τον έλεγχο και τον τερματισμό του προγράμματος RIG. Ακόμη είναι υπεύθυνη για την εμφάνιση του μιμικού διαγράμματος της εγκατάστασης ενώ επίσης ελέγχει αν έχει ζητηθεί καταγραφή ή όχι των πειραματικών δεδομένων και καλεί τις ανάλογες υπορουτίνες.

Κατά την επισκόπηση της ρουτίνας δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο αρχείο EXCOB.DAT που καλεί η ρουτίνα και το οποίο περιέχει πληροφορίες σχετικά με το χρωματικό κώδικα, με τους συντελεστές κορεσμού του νερού ή με κάποιες σταθερές τιμές όπως είναι οι τιμές των συντελεστών βαθμονόμησης. Οι τελευταίες προσδιορίστηκαν μετά τα αποτελέσματα της τελευταίας διακρίβωσης βαθμονόμησης που διενεργήθηκε.

ii. N.FOR

Η ρουτίνα N.FOR καλείται από τη RIG.FOR και είναι υπεύθυνη επιτήρησης της κανονικής λειτουργίας του ΘΥΚ καθώς και της εμφάνισης στην οθόνη των ενδείξεων των σταθμών μέτρησης του κυκλώματος. Η ρουτίνα αυτή καλείται από τη RIG.FOR όταν διαπιστωθεί πως η σωληνοειδής βαλβίδα SV2 είναι ανοιχτή και έτσι το νερό διέρχεται ελεύθερα μέσω αυτής από το δοχείο βρασμού προς το τμήμα δοκιμών.

Μετά τον έλεγχο και τη μελέτη της δομής της ρουτίνας έγιναν τροποποιήσεις στην εμφάνιση των ενδείξεων των μεταλλακτών στην οθόνη του Η/Υ ώστε να είναι σύμφωνες με τη διαδικασία επανάψυξης εκ των κάτω αλλά και να εμφανίζονται μόνο οι ενδείξεις αυτών των σταθμών μέτρησης που χρησιμοποιούνται. Έτσι:

- διαγράφηκε η εμφάνιση των ενδείξεων θερμοκρασίας του συμπυκνωτή ενώ
- προστέθηκε η ένδειξη του δεύτερου ροομέτρου E+H2 (MFM2) που βρίσκεται λίγο πριν την είσοδο του ψυκτικού στο τμήμα δοκιμών.

Τέλος, στη λειτουργία bottom flooding, αντικαταστάθηκε στη σχέση υπολογισμού της θερμοκρασίας υπόψυξης η θερμοκρασία του ψυκτικού στην κορυφή του Τμήματος Δοκιμών με τη θερμοκρασία του ψυκτικού στο κάτω μέρος του Τμήματος Δοκιμών:

IDATA5: θερμοκρασία ψυκτικού στην κορυφή του Τμήματος Δοκιμών

IDATA6: θερμοκρασία ψυκτικού στο κάτω μέρος του Τμήματος Δοκιμών

iii. R.FOR

Η ρουτίνα R.FOR είναι υπεύθυνη επιτήρησης της εκτέλεσης του πειράματος επανάψυξης χωρίς καταγραφή των αποτελεσμάτων. Μετά τον έλεγχο της ρουτίνας αντικαταστάθηκε στη σχέση υπολογισμού της θερμοκρασίας υπόψυξης η θερμοκρασία του ψυκτικού στην κορυφή του Τμήματος Δοκιμών με τη θερμοκρασία του ψυκτικού στο κάτω μέρος του Τμήματος Δοκιμών, όπως αναφέρθηκε και προγουμένως. Ακόμη αντιστράφηκαν οι τιμές των θερμοστοιχείων TC3 και TC11 της ράβδου (Σχήμα 3-2) στους βρόχους ελέγχου της θερμοκρασίας της επιφάνειας της ράβδου, όπως φαίνεται παρακάτω:

Κώδικας για επανάψυξη εκ των άνω:

IF (TB3.GT.TSIGN-100..OR.TB11.GT.TSIGN) THEN

Κώδικας για επανάψυξη εκ των κάτω:

IF (TB11.GT.TSIGN-100..OR.TB3.GT.TSIGN) THEN

iv. RW.FOR

Η ρουτίνα RW.FOR είναι υπεύθυνη επιτήρησης της εκτέλεσης του πειράματος επανάψυξης με καταγραφή των αποτελεσμάτων. Όπως και στις προηγούμενες δύο ρουτίνες που αναφέρθηκαν και εδώ οι βασικές αλλαγές ήταν η αντικατάσταση της θερμοκρασίας εισόδου του ψυκτικού στο τμήμα δοκιμών αλλά και η αντιστροφή των θερμοστοιχείων TC3 και TC11 τόσο στους βρόχους ελέγχου της θερμοκρασίας της επιφάνειας της ράβδου όσο και στους βρόχους ελέγχου του τερματισμού της διαδικασίας της επανάψυξης, όπως φαίνεται παρακάτω:

Κώδικας ελέγχου τερματισμού επανάψυξης εκ των άνω:

```
15601  IF (TB11.GT.TLFR+50..OR.
     1 ABS(FLOAT(IDB11)-FLOAT(IDATB3)).GT.
     2 0.02*FLOAT(IDATB3)) THEN …
```

Κώδικας ελέγχου τερματισμού επανάψυξης εκ των κάτω:

```
15601  IF (TB3.GT.TLFR+50..OR.
     1 ABS(FLOAT(IDATB3)-FLOAT(IDB11)).GT.
     2 0.02*FLOAT(IDB11)) THEN …
```

v. S1.FOR

Η ρουτίνα S1.FOR συγκροτείται από δεκατρείς επιμέρους υπορουτίνες οι οποίες είναι υπεύθυνες για την επιτήρηση του ΘΥΚ και την απεικόνισή του υπό μορφή μιμικού διαγράμματος. Οι αλλαγές που υπέστη η εν λόγω ρουτίνα ήταν σημαντικές καθώς αποτελεί ένα από τα βασικότερα κομμάτια του προγράμματος RIG.

Η υπορουτίνα η οποία είναι η κύρια υπεύθυνη για την εμφάνιση του μιμικού διαγράμματος είναι η DISPL.FOR. Παρατηρώντας και συγκρίνοντας το μιμικό διάγραμμα της επανάψυξης εκ των άνω (Σχήμα 3-4) με το τελικό τροποποιημένο μιμικό διάγραμμα τη επανάψυξης εκ των κάτω (Σχήμα 3-5) γίνεται άμεσα αντιληπτό πως στο τροποποιημένο μιμικό διάγραμμα διαγράφηκαν πλήρως κάποιοι κλάδοι ενώ άλλοι άλλαξαν σημαντικά. Για παράδειγμα ο κλάδος ατμού από το δοχείο βρασμού στο τμήμα δοκιμών όπως και ο κλάδος ατμού από το τμήμα δοκιμών στο Συμπυκνωτή και στη συνέχεια στο δοχείο συγκέντρωσης διαγράφηκαν πλήρως. Η παρουσία των εν λόγω κλάδων στο μιμικό διάγραμμα θεωρήθηκε περιττή αφού τα διεξαχθέντα πειράματα επανάψυξης της παρούσας ΔΔ έγιναν όλα κάτω από ατμοσφαιρικές συνθήκες χωρίς να υπάρξει μεταφορά ατμού από το δοχείο βρασμού στο τμήμα δοκιμών. Παράλληλα όμως προστέθηκαν και νέοι κλάδοι στο μιμικό διάγραμμα. Παράδειγμα τέτοιων κλάδων αποτελεί ο κλάδος εισαγωγής νερού στην κάτω κεφαλή του Τμήματος Δοκιμών και ο κλάδος απαγωγής του από την άνω κεφαλή.

Επιπλέον, η S1.FOR διαθέτει και υπορουτίνες ελέγχου της δισταθούς κατάστασης των σωληνοειδών βαλβίδων με σκοπό την εφαρμογή κατάλληλης χρωματικής ένδειξης των κλάδων σωληνώσεων του ΘΥΚ αλλά και του κατάλληλου συμβόλου όταν η σωληνοειδείς είναι ανοιχτή ή κλειστή αντίστοιχα . Σε συνδυασμό με τις αλλαγές στη DISPL.FOR, κάποιες υπορουτίνες από αυτές διαγράφηκαν πλήρως ενώ άλλες τροποποιήθηκαν ελαφρώς. Για παράδειγμα, οι υπορουτίνες S0WAY.FOR και S1WAY.FOR οι οποίες είναι υπεύθυνες για τον έλεγχο της δισταθούς κατάστασης της σωληνοειδούς βαλβίδας SV1 διαγράφηκαν πλήρως αφού η SV1 βρίσκεται στον ήδη διαγεγραμμένο κλάδο του ατμού που συνδέει το δοχείο βρασμού με το τμήμα δοκιμών.

Σημαντικές αλλαγές υπέστη και η υπορουτίνα VALVES.FOR η οποία μέσα από βρόχους ελέγχου που διαθέτει είναι υπεύθυνη για την παρακολούθηση της κατάστασης και των τεσσάρων σωληνοειδών βαλβίδων. Στα πειράματα επανάψυξης εκ των κάτω όμως απαραίτητος είναι μόνο ο έλεγχος της δισταθούς κατάστασης της σωληνοειδούς βαλβίδας SV2 από την οποία διέρχεται το ψυκτικό για να οδηγηθεί στο τμήμα δοκιμών καθώς επίσης και της σωληνοειδούς βαλβίδας SV4 του κλάδου παράκαμψης. Έτσι, όλοι οι βρόχοι ελέγχου των σωληνοειδών βαλβίδων SV1 και SV3 διαγράφηκαν.

Τέλος, η S1.FOR διαθέτει και υπορουτίνες όπως είναι η BACKGR.FOR που αφορά την επιλογή του χρωματικού υποβάθρου στο οποίο σχεδιάζεται το μιμικό διάγραμμα καθώς και οι RESIS.FOR και PWAY.FOR οι οποίες είναι υπεύθυνες εμφάνισης της δισταθούς κατάστασης των θερμαντικών αντιστάσεων του δοχείου βρασμού και της αντλίας τροφοδοσίας αντίστοιχα, οι οποίες μετά τον έλεγχο παρέμειναν αμετάβλητες.

vi. S2.FOR

Η ρουτίνα S2.FOR συγκροτείται από την υπορουτίνα BLOCK DATA DISPLMEN. Η υπορουτίνα αυτή αποτελείται από δομές Block Data όπου αντιστοιχίζονται διάφορες μεταβλητές οι οποίες διαθέτουν πληροφορίες για την απεικόνιση του μιμικού διαγράμματος στην οθόνη του Η/Υ χρησιμοποιώντας αποκλειστικά ASCII χαρακτήρες. Οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν σε αυτή τη ρουτίνα έγιναν σε συνδυασμό με τις αλλαγές της υπορουτίνας DISPL.FOR ώστε να διαγραφούν, να

προστεθούν, να μετακινηθούν ή να τροποποιηθούν οι μεταβλητές των Block Data ανάλογα με την επιζητούμενη τελική εμφάνιση του μιμικού διαγράμματος.

Για παράδειγμα, η μεταβλητή **L403** που αντιστοιχεί στην πληροφορία εμφάνισης του συμβόλου της σωληνοειδούς βαλβίδας SV1 ‘ ∓ ’, διαγράφηκε από το αντίστοιχο Block Data καθώς κρίθηκε περιττή η ύπαρξή της λόγω διαγραφής του κλάδου ατμού από το δοχείο βρασμού στο τμήμα δοκιμών.

vii. S3.FOR

Η ρουτίνα S3.FOR αποτελείται από επιμέρους υπορουτίνες οι οποίες είναι υπεύθυνες για την εμφάνιση της κατάστασης του Τμήματος Δοκιμών.

Τη βασικότερη υπορουτίνα της S3.FOR αποτελεί η RIGWAY.FOR. Η υπορουτίνα αυτή περιέχει εμφωλευμένους βρόχους οι οποίοι ελέγχουν τη δισταθή κατάσταση των σωληνοειδών βαλβίδων SV2 και SV3 και της ηλεκτρικής αντίστασης της ράβδου ενώ ταυτόχρονα συγκρίνουν τη θερμοκρασία των θερμοστοιχείων της ράβδου με τη θερμοκρασία επανάψυξης (η οποία ορίστηκε 85°C πάνω από τη θερμοκρασία κορεσμού). Ακόμη, μέσα στους ίδιους βρόχους γίνεται σύγκριση και των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του ψυκτικού από το τμήμα δοκιμών. Επειδή οι βρόχοι ελέγχου της δισταθούς κατάστασης των σωληνοειδών βαλβίδων SV2 και SV3 είναι ξεχωριστοί μεταξύ τους και δεν αλληλοκαλύπτονται, όλοι οι βρόχοι που περιέχουν την SV3 διαγράφηκαν εφόσον ο έλεγχός της δεν κρίθηκε απαραίτητος ενώ διατηρήθηκαν και τροποποιήθηκαν μόνο όσοι περιέχουν την SV2. Η τροποποίησή τους αφορούσε κυρίως την αντιστροφή των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του ψυκτικού από το τμήμα δοκιμών αλλά και τη διαγραφή των εντολών κλήσης ήδη διαγεγραμμένων υπορουτίνων.

Ακόμη, η S3.FOR περιέχει και άλλες υπορουτίνες οι οποίες είναι υπεύθυνες μόνο για τη χρωματική εμφάνιση του Τμήματος Δοκιμών ανάλογα με τη λειτουργία της εγκατάστασης. Για παράδειγμα, οι υπορουτίνες TS.FOR και TS47.FOR εμφανίζουν την κατάσταση της υπερθερμανθείσας ράβδου στις περιπτώσεις επανάψυξης και κανονικής λειτουργίας αντίστοιχα ενώ οι υπορουτίνες TS46.FOR και TS48.FOR εμφανίζουν την ύπαρξη ή όχι του ατμού στο τμήμα δοκιμών εφαρμόζοντας κατάλληλο χρωματικό υπόβαθρο. Όλες αυτές οι υπορουτίνες παρέμειναν οι ίδιες

χωρίς καμία αλλαγή αφού η χρωματική εμφάνιση του Τμήματος Δοκιμών σε περίπτωση επανάψυξης είναι η ίδια είτε έχουμε εισαγωγή νερού εκ των άνω είτε εκ των κάτω.

viii. S4.FOR – S6.FOR

Η ρουτίνα S4.FOR αποτελείται από την υπορουτίνα εμφάνισης διαγνωστικών μηνυμάτων WARNGS.FOR. Η τελευταία καλείται όταν έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή του αρχείου των πειραματικών δεδομένων και ελέγχει αν οι αρχικές συνθήκες του πειράματος παρέμειναν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Η διαδικασία ελέγχου γίνεται μέσω κλήσης της ρουτίνας S6.FOR η οποία διενεργεί Student's tests μεταξύ των 50 πρώτων και των 50 τελευταίων τιμών των θερμοκρασιών εισόδου του νερού και του ατμού στο τμήμα δοκιμών καθώς και της πίεσης στην είσοδο του Τμήματος Δοκιμών.

Οι αλλαγές που επιδέχτηκε η WARNGS.FOR ήταν η διαγραφή του βρόχου ελέγχου των τιμών της θερμοκρασίας ατμού και η αντικατάσταση των ενδείξεων του θερμοστοιχείου και του μανόμετρου που βρίσκονται στην άνω κεφαλή του Τμήματος Δοκιμών με τις αντίστοιχες ενδείξεις των μεταλλακτών που είναι τοποθετημένοι στην κάτω κεφαλή.

Η ρουτίνα S6.FOR, η οποία περιλάμβανε την υπορουτίνα STUDENT.FOR παρέμεινε ως έχει χωρίς καμία τροποποίηση.

ix. S5.FOR

Η ρουτίνα S5.FOR περιλαμβάνει υπορουτίνες βοηθητικών υπολογισμών των θερμοκρασιών στις οποίες αντιστοιχούν οι θερμοηλεκτρικές τάσεις των θερμοστοιχείων τύπου K και J που υπάρχουν σε διάφορες θέσεις του ΘΥΚ. Όλες οι εν λόγω υπορουτίνες έμειναν αμετάβλητες.

x. STEM.FOR

Η ρουτίνα STEM.FOR, η οποία είναι υπεύθυνη για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας κορεσμού, έμεινε αμετάβλητη αφού περιέχει τους πρότυπους πίνακες πιέσης και θερμοκρασίας κορεσμού του νερού.

Όλες οι προαναφερθείσες ρουτίνες που συγκροτούν το πρόγραμμα RIG για την επιτήρηση της εγκατάστασης κατά την επανάψυξη εκ των κάτω, βρίσκονται αποθηκευμένες στο συνδεδεμένο Η/Υ τύπου IBM – PC του ΘΥΚ στο directory:

.\users\niki\test1

3.4.3 Επιλογή προγράμματος επανάψυξης RIG

Η κλήση του προγράμματος RIG για την επιτήρηση της εγκατάστασης κατά την επανάψυξη εκ των κάτω γίνεται μόνο εφόσον ο χρήστης βρίσκεται στο κατάλληλο directory (C:\users\niki\test1) ενώ στην περίπτωση που ο χρήστης θέλει να παρακολουθήσει τη διαδικασία πειραμάτων επανάψυξης εκ των άνω πρέπει να επιστρέψει στο αρχικό directory (C:\) πριν ξανακαλέσει το πρόγραμμα.

Για λόγους διευκόλυνσης, δημιουργήθηκε ένα batch αρχείο το οποίο είναι αποθηκευμένο στο αρχικό directory και ενεργοποιεί απευθείας το ζητούμενο πρόγραμμα επανάψυξης ανάλογα με την επιλογή του χρήστη χωρίς να είναι απαραίτητη η γνώση του path (μονοπατιού) του κατάλληλου directory.

Η ονομασία του batch αρχείου είναι **REWET.BAT** και παρέχει τις εξής δύο επιλογές:

1: Top rewetting

2: Bottom reflooding

οι οποίες καλούν αντίστοιχα δύο διαφορετικά .exe αρχεία. Έτσι, ανάλογα με τη διαδικασία της επανάψυξης που λαμβάνει χώρα, ο χρήστης πληκτρολογεί είτε την εντολή **REWET 1** η οποία αντιστοιχεί σε πειράματα top rewetting, είτε την εντολή **REWET 2** η οποία αντιστοιχεί σε πειράματα bottom flooding και αμέσως ενεργοποιείται το αντίστοιχο πρόγραμμα επανάψυξης RIG.

4. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά τη λήξη κάθε πειράματος επανάψυξης όλα τα πειραματικά δεδομένα αποθηκεύονται σε ένα αρχείο με μοναδικό όνομα της μορφής:

DDMMHHLL.YY

Τα πειραματικά δεδομένα στα τελικά αρχεία παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις πιέσεις και τις θερμοκρασίες στην κορυφή και στο κάτω μέρος του Τμήματος Δοκιμών, τις θερμοκρασίες των θερμοστοιχείων TC2 έως TC11 καθώς και την παροχή του μαγνητικού ροομέτρου E+H1. Ακόμη παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις θερμοκρασίες των ηλεκτρονικών σημείων πάγου των θερμοστοιχείων τύπου K και τύπου J.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αναφέρονται όλα τα προγράμματα υπολογισμών, σχεδιαστικής απεικόνισης και στατιστικής επεξεργασίας των πειραματικών μετρήσεων που ελήφθησαν στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ και αφορούν τα πειράματα επανάψυξης εκ των κάτω.

4.1 Πρόγραμμα μορφοποίησης πειραματικών δεδομένων

Πριν την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων πραγματοποιείται η μορφοποίηση του αρχείου που περιέχει τα δεδομένα. Η μορφοποίηση αφορά τον διαχωρισμό των ενδείξεων σε ξεχωριστές στήλες για τη διευκόλυνση της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων με τη χρήση οποιουδήποτε λογισμικού πακέτου. Η διαδικασία μορφοποίησης πραγματοποιείται με το πρόγραμμα fortran **rrewetting.f90**.

Το rrewetting.f90 αναλαμβάνει να διαχωρίσει τις αποθηκευμένες πληροφορίες σε 18 στήλες χρησιμοποιώντας συγκεκριμένη μορφοποιήση (format) για κάθε στήλη, η οποία παρέχεται από την υπορουτίνα **init.f90**. Οι στήλες του αρχείου εξόδου αντιστοιχούν στις ακόλουθες τιμές των αρχείων καταγραφής πειραματικών δεδομένων: διάρκεια επανάψυξης, ενδείξεις μεταλλακτών πίεσης άνω και κάτω κεφαλής του Τμήματος Δοκιμών αντίστοιχα, ένδειξη μαγνητικού ροομέτρου, θερμοκρασία ηλεκτρονικού σημείου πάγου τύπου K, ενδείξεις θερμοστοιχείων τύπου

K της κάτω και άνω κεφαλής του Τμήματος Δοκιμών αντίστοιχα, θερμοκρασία ηλεκτρονικού σημείου πάγου τύπου J, ενδείξεις των θερμοστοιχείων της ράβδου TC2 έως TC11. Σύμφωνα με το format που καθορίστηκε, εκτός από την πρώτη στήλη η οποία αποδόθηκε σε πραγματικό αριθμό 2 σημαντικών ψυφίων μετά το δεκαδικό σημείο, όλες οι υπόλοιπες στήλες αποδόθηκαν σε ακέραιες τιμές 5 θέσεων συμπεριλαμβανομένων των κενών μεταξύ τους.

Για την εκτέλεση του προγράμματος ζητείται από το χρήστη το όνομα του αρχείου των πειραματικών δεδομένων ενώ μετά τη λήξη του προγράμματος λαμβάνεται ένα μορφοποιημένο αρχείο 18 στηλών τύπου .dat με μοναδικό όνομα:

DDMMHHLL.YY.dat

το οποίο επεξεργάζεται στατιστικά στη συνέχεια.Το πρόγραμμα rrewetting.f90 καθώς και η υπορουτίνα init.f90 συντάχθηκε στα πλαίσια της συνεργασίας [91].

Αναφέρεται πως οι 18 στήλες του αρχείου μορφής .dat παρέχουν πληροφορίες σε ψηφιακή μορφή (0 – 4095) οι οποίες στη συνέχεια είναι απαραίτητο να μετατραπούν σε κατάλληλες μονάδες του αντίστοιχου φυσικού μεγέθους πριν τη γραφική τους απεικόνιση και τη στατιστική τους επεξεργασία.

4.2 Πρόγραμμα επεξεργασίας μιας πειραματικής προσομοίωσης

Για τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων των πειραμάτων επανάψυξης καθώς και για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το πακέτο ελεύθερου λογισμικού R Statistics [93]. Το R Statistics είναι ένα λογισμικό ελεύθερου κώδικα το οποίο τρέχει σε λειτουργικά περιβάλλοντα UNIX, Windows και MacOS. Χρησιμοποιείται κατά βάση για στατιστικούς σκοπούς καθώς διαθέτει μια πολύ μεγάλη ποικιλία στατιστικών συναρτήσεων και γραφικών τεχνικών. Ωστόσο, το βασικό του πλεονέκτημα αποτελεί η επεκτασιμότητά του καθώς δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να εισαγάγουν νέες βελτιωμένες συναρτήσεις στην ήδη μεγάλη βιβλιοθήκη εγγενών συναρτήσεων που διαθέτει.

Στη συνέχεια της παραγράφου παρουσιάζονται οι ρουτίνες επεξεργασίας μιας πειραματικής προσομοίωσης καθώς και η εξέλιξη της προγραμματιστικής επεξεργασίας.

Για τον έλεγχο και την επιτήρηση ενός πειράματος επανάψυξης γράφτηκε στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ το πρόγραμμα **ExpRun.R**[4]. Το πρόγραμμα αυτό καλείται από το λογισμικό R Statistics και περιλαμβάνει τις δύο ακόλουθες ρουτίνες:

1. Ρουτίνα **Functions.R**: διαθέτει τις συναρτήσεις μετατροπής της ψηφιακής ένδειξης των θερμοστοιχείων, των ηλεκτρονικών σημείων πάγου και του μαγνητικού ροομέτρου στο αντίστοιχο φυσικό μέγεθός τους. Η ρουτίνα αυτή δεν παρέχει αποτελέσματα αλλά δημιουργεί και αποθηκεύει στο περιβάλλον R τις συναρτήσεις μετατροπής οι οποίες έπειτα μπορεί να κληθούν από τις ρουτίνες του κώδικα κατά το δοκούν.

2. Ρουτίνα **CheckExp.R**: αποτελεί το κυρίως πρόγραμμα επεξεργασίας των δεδομένων μιας πειραματικής προσομοίωσης. Δημιουργεί πλαίσια δεδομένων (data frames) με τη θερμοκρασιακή ιστορία των θερμοστοιχείων της ράβδου καθώς και data frames που παρέχουν τη θερμοκρασία και τη χρονική στιγμή επανάψυξης κάθε θερμοστοιχείου της ράβδου. Ακόμη εγγράφει σε αρχεία εικόνας τις ακόλουθες γραφικές απεικονίσεις με σκοπό τη γενική εποπτεία της προσομοίωσης:

   - Elevation vs Time.png: πρόκειται για τη γραφική παράσταση της απόστασης των θερμοστοιχείων TC11 έως TC4 από το θερμοστοιχείο TC12 έναντι της χρονικής στιγμής επανάψυξής τους. Παράλληλα εκτελείται και από τη ρουτίνα απλή γραμμική αναδρομή μεταξύ των σημείων (Εικόνα Π25).

   - Elevation vs Temperature.png: πρόκειται για τη γραφική παράσταση της απόστασης των θερμοστοιχείων TC11 έως TC4 από το θερμοστοιχείο TC12 έναντι της θερμοκρασίας επανάψυξής τους. Παράλληλα εκτελείται απλή γραμμική αναδρομή μεταξύ των σημείων (Εικόνα Π26).

[4] Η κατάληξη **.R** αφορά αλγόριθμους του στατιστικού πακέτου προγραμματισμού R Statistics, όπως συντάχθηκαν στα πλαίσια της ΔΔ.

- Rewetting History.png: πρόκειται για τη γραφική παράσταση της θερμοκρασιακής ιστορίας των θερμοστοιχείων TC3 έως TC11 κατά τη διάρκεια του πειράματος επανάψυξης (Εικόνα Π27).

- Rewetting History and First Derivative.png: πρόκειται για τις γραφικές παραστάσεις της θερμοκρασίας επανάψυξης των θερμοστοιχείων έναντι του χρόνου καθώς και των πρώτων χρονικών παραγώγων της θερμοκρασίας των θερμοστοιχείων (Εικόνα Π28).

- Temperature and First Deriv. vs Time.png: πρόκειται για τις γραφικές παραστάσεις της θερμοκρασίας και της πρώτης χρονικής παραγώγου της θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου TC6 έναντι του χρόνου (Εικόνα Π29).

Ο αλγόριθμος υπολογισμού της χρονικής στιγμής επανάψυξης καθώς και της θερμοκρασίας επανάψυξης κάθε σταθμού μέτρησης της ράβδου περιγράφεται στα Παραρτήματα στο Κεφάλαιο §Π5 ενώ όλα τα αρχεία εικόνας απεικονίζονται στα Παραρτήματα στο Κεφάλαιο §Π4.

4.2.1 Διαδικασία προγραμματιστικής εξέλιξης επεξεργασίας μιας πειραματικής προσομοίωσης

Προγραμματιστικά η εξέλιξη της υπολογιστικής επεξεργασίας έχει ως εξής:

- Καταρχάς ο χρήστης πρέπει να εισέλθει στο κατάλληλο directory όπου βρίσκονται οι προαναφερθείσες ρουτίνες με την εντολή:

setwd(dir)

όπου η μεταβλητή dir αποτελεί το path του directory. Το directory αυτό ονομάζεται working directory (wd). Πριν την εκτέλεση των προγραμμάτων R, είναι καλή πρακτική να οριστεί από τον χρήστη το wd το οποίο περιέχει όλους τους κώδικες.

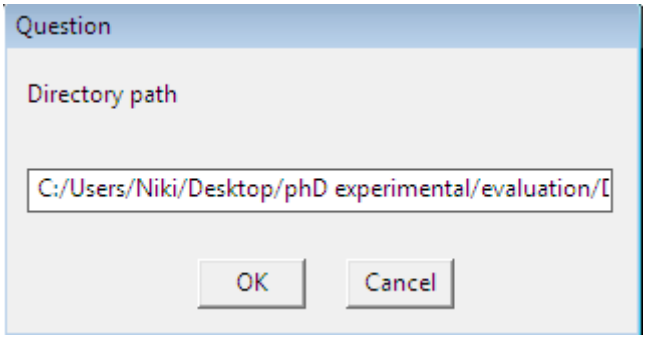
- ’Επειτα ο χρήστης καλεί το πρόγραμμα ExpRun.R με την εντολή:

source("ExpRun.R")

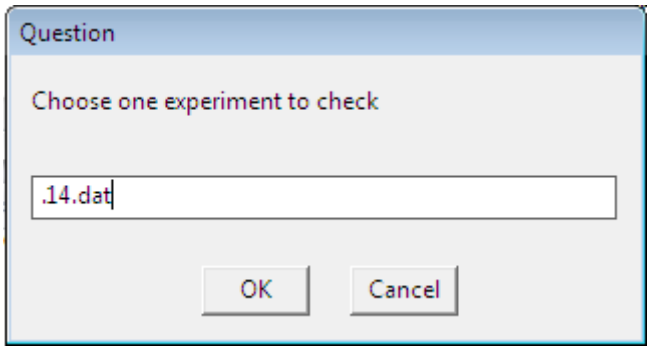
Στην περίπτωση που ο χρήστης δεν έχει ορίσει εξαρχής το wd, μπορεί να καλέσει το πρόγραμμα με ταυτόχρονη κλήση του path όπου εμπεριέχεται:

source("dir/ExpRun.R")

- Στη συνέχεια εμφανίζεται στην οθόνη ένα παράθυρο διαλόγου το οποίο ζητάει από το χρήστη να πληκτρολογήσει το κατάλληλο directory όπου είναι αποθηκευμένα τα προς επεξεργασία πειραματικά αρχεία.



- Ακολούθως εμφανίζεται ένα ακόμη παράθυρο διαλόγου το οποίο ζητάει από το χρήστη να εισάγει το όνομα του αρχείου δεδομένων του πειράματος που θέλει να επεξεργαστεί, παρέχοντας για διευκόλυνση ως default απάντηση την κατάληξη ".14.dat", αφού όλα τα πειράματα της παρούσης ΔΔ διενεργήθηκαν το έτος 2014 με αποτέλεσμα όλα τα αρχεία δεδομένων να έχουν την ίδια κατάληξη:



- Τέλος, όταν ολοκληρωθεί το πρόγραμμα δημιουργούνται στο ίδιο directory τα αρχεία εικόνων που ήδη προαναφέρθηκαν ενώ στην περίπτωση που ο χρήστης

επιθυμεί να επιστρέψει στην οθόνη τις τιμές από το διδιάστατο πίνακα δεδομένων που δημιουργήθηκαν μπορεί να πληκτρολογήσει τις εντολές:

finalData
timeData
tempData

οι οποίες παρέχουν αντίστοιχα το διδιάστατο πίνακα δεδομένων της θερμοκρασιακής ιστορίας των θερμοστοιχείων της ράβδου, τη χρονική στιγμή επανάψυξης κάθε θερμοστοιχείου της ράβδου καθώς και τη θερμοκρασία επανάψυξης κάθε θερμοστοιχείου.

4.3 Πρόγραμμα στατιστικής επεξεργασίας των αρχείων μιας πειραματικής σειράς προσομοιώσεων

Στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ διεξήχθησαν πάνω από 1000 πειράματα προσομοίωσης της διαδικασίας της επανάψυξης. Όλα αυτά τα πειράματα ομαδοποιούνται σε 18 σειρές 50 πειραμάτων όπου καταχωρούνται σύμφωνα με την παροχή του ψυκτικού μέσου καθώς και τη θερμοκρασία υπόψυξής του όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο §3.3. Η ομαδοποίηση των προσομοιώσεων δίνει τη δυνατότητα στο μελετητή να διερευνήσει το βαθμό επίδρασης των αρχικών συνθηκών του πειράματος στο φαινόμενο της επανάψυξης όπως είναι για παράδειγμα η θερμοκρασία υπόψυξης του ψυκτικού μέσου, η παροχή του ψυκτικού μέσου στο κανάλι δοκιμών καθώς και η αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος της υπερθερμανθείσας επιφανείας.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι ρουτίνες επεξεργασίας των δεδομένων μιας πειραματικής σειράς προσομοιώσεων όπως επίσης και τα εξαγώγιμα αρχεία που προκύπτουν μετά το πέρας της εκτέλεσής τους. Όλα τα αρχεία εικόνας και κειμένου απεικονίζονται στα Παραρτήματα στο Κεφάλαιο §Π4.

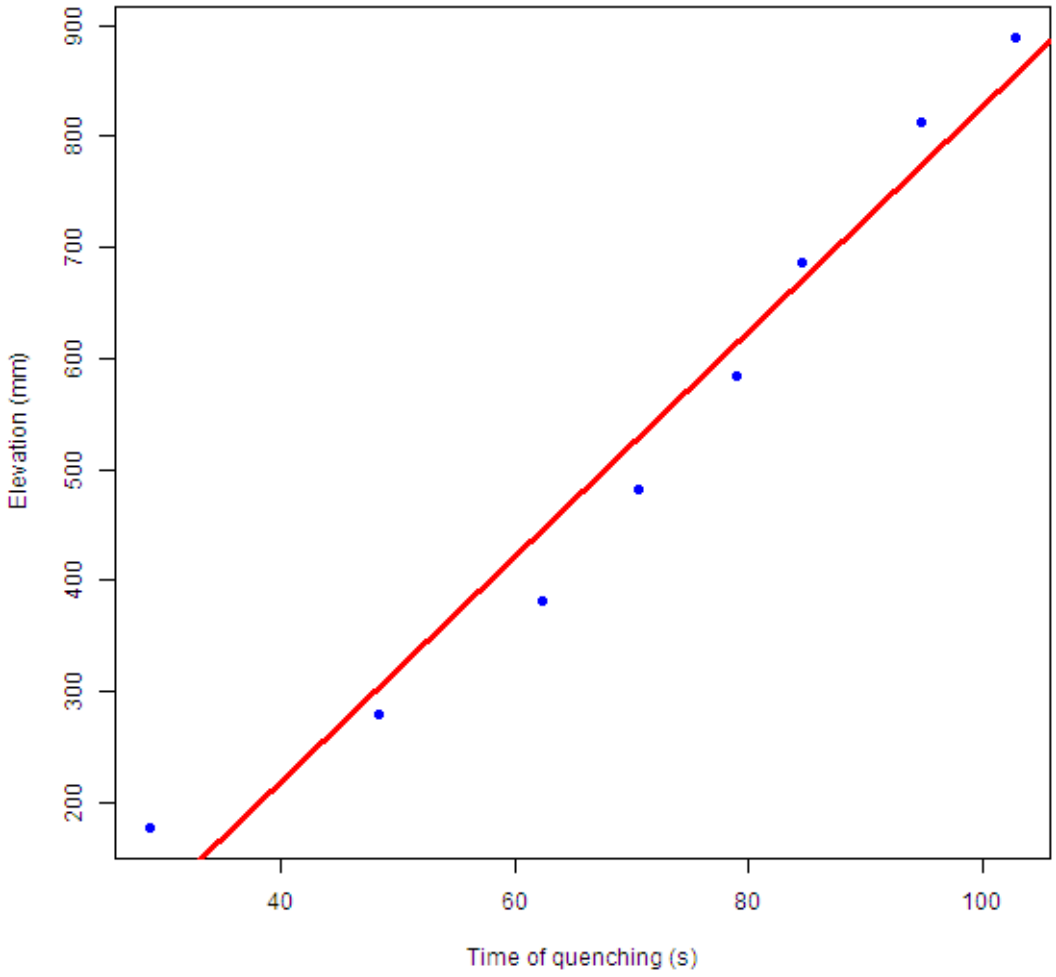
Για τη μελέτη αλλά και τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων των πειραματικών προσομοιώσεων γράφτηκε στα πλαίσια της ΔΔ το πρόγραμμα **StatsRun.R** όπου καλεί τις ακόλουθες ρουτίνες:

1. Ρουτίνα **Functions.R**: η λειτουργία της έχει ήδη παρουσιαστεί στην παράγραφο §4.2.

2. Ρουτίνα **VelocityQuenching.R**: επεξεργάζεται κάθε ένα πείραμα μιας πειραματικής σειράς προσομοίωσης ξεχωριστά και εγγράφει σε εξαγώγιμα .txt αρχεία τα πειραματικά δεδομένα που αφορούν τις μέσες τιμές της θερμοκρασίας υπόψυξης και της παροχής του ψυκτικού μέσου που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του κάθε πειράματος μιας πειραματικής σειράς (Tlinlet.txt, Flow.txt). Ακόμα η ρουτίνα αυτή υπολογίζει την αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος της ράβδου αλλά και την αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης της ράβδου σύμφωνα με την παραδοχή της ισοταχούς κίνησης του υγρού μετώπου. Επίσης υπολογίζει και τη θερμοκρασία επανάψυξης του κάθε θερμοστοιχείου ξεχωριστά αλλά και τη μέση τιμή όλων των θερμοστοιχείων (μέση θερμοκρασία επανάψυξης της ράβδου). Όλα αυτά τα αποτελέσματα των υπολογισμών εγγράφονται στα αρχεία κειμένου (dataCooling.txt, reverse velocity.txt) για περαιτέρω επεξεργασία.

Η αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος της ράβδου (T_w) υπολογίζεται ως η εκτιμώμενη μέση τιμή των ενδείξεων όλων των θερμοστοιχείων μεταξύ του TC10 και του TC4 τη στιγμή που επαναψύχεται το θερμοστοιχείο TC11. Η ταχύτητα επανάψυξης ορίζεται ως το πηλίκο της απόστασης μεταξύ των θερμοστοιχείων TC11 και TC4 της ράβδου (711.2 mm) και του χρόνου που χρειάζεται το υγρό μέτωπο να «ταξιδέψει» μεταξύ τους. Η άφιξη του υγρού μετώπου σε ένα θερμοκρασιακό σταθμό υπολογίζεται από το σημείο καμπής της θερμοκρασιακής ιστορίας του σταθμού και υπολογίζεται από το ελάχιστο της πρώτης χρονικής παραγώγου (Παραρτήματα §Π5).

Η παραδοχή της ισοταχούς κίνησης του υγρού μετώπου επιβεβαιώνεται από το διάγραμμα στην Σχήμα 4-1. Στο διάγραμμα αποτυπώνονται τα σημεία της απόστασης των θερμοστοιχείων TC11 έως TC4 από το θερμοστοιχείο TC12 έναντι του χρόνου επανάψυξής τους καθώς επίσης και η ευθεία αναδρομής με εκτιμώμενο συντελεστή γραμμικής συσχέτισης ίσο με 0.9821. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται σε όλα τα πειράματα επανάψυξης.



Σχήμα 4-1 Απόσταση θερμοστοιχείων TC11 έως TC4 από το θερμοστοιχείο TC12 έναντι του χρόνου επανάψυξής τους (πείραμα No 12051143.14)

3. Ρουτίνα **PlotsTextsQuenching.R**: διαβάζει τα αρχεία κειμένου που δημιουργήθηκαν από τη ρουτίνα VelocityQuenching.R και παράγει αρχεία εξόδου σε μορφή εικόνας με σκοπό την ανάλυση της διαδικασίας επανάψυξης μέσω της διερεύνησης των συσχετίσεων που αναπτύσσονται μεταξύ των παραμέτρων του πειράματος. Στη συνέχεια αναφέρονται τα αρχεία εικόνας που δημιουργούνται κατά την εκτέλεση της παρούσας ρουτίνας:

    - Tw-revVel.png: πρόκειται για δύο γραφικές παραστάσεις. Η πρώτη αποτελεί το διάγραμμα διασποράς των σημείων της αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης έναντι της αρχικής θερμοκρασίας του

τοιχώματος της ράβδου. Η δεύτερη αποτελεί τη γραφική παράσταση του αθροίσματος των τετραγώνων των υπολοίπων της γραμμικής συσχέτισης (Εικόνα Π30):

$$u^{-1} = f(T_w) \quad \textbf{4-1}$$

Το διάγραμμα της κατανομής των υπολοίπων αποτελεί μια οπτική ένδειξη απόρριψης ή αποδοχής της γραμμικής συνάρτησης. Συγκεκριμένα, η τυχαία κατανομή των υπολοίπων οδηγεί στην αποδοχή της προτεινόμενης γραμμικής συσχέτισης ενώ η μη τυχαία κατανομή οδηγεί στην απόρριψή της [94].

- Tw-Tqmean.png: πρόκειται για τη γραφική παράσταση των σημείων της μέσης θερμοκρασίας επανάψυξης της ράβδου έναντι της αρχικής θερμοκρασίας του τοιχώματός της (Εικόνα Π31).

- Tw-Tq6.png: πρόκειται για τη γραφική παράσταση των πειραματικών σημείων της θερμοκρασίας επανάψυξης του θερμοστοιχείου TC6 έναντι της αρχικής θερμοκρασίας του τοιχώματος της ράβδου (Εικόνα Π32).

- Tw-Tq (all TCs).png: πρόκειται για τη γραφική παράσταση των σημείων της θερμοκρασίας επανάψυξης του κάθε θερμοστοιχείου ξεχωριστά έναντι της αρχικής θερμοκρασίας του τοιχώματος της ράβδου (Εικόνα Π33).

4. Ρουτίνα **Statistics.R**: υπολογίζει με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων τη γραμμική συσχέτιση μεταξύ της αντίστροφης θερμοκρασίας επανάψυξης και της αρχικής θερμοκρασίας επιφανείας της ράβδου και δημιουργεί ένα αρχείο εξόδου με το όνομα Stats.txt. Στο αρχείο εξόδου εγγράφονται όλες οι στατιστικές παράμετροι που αφορούν αυτή τη συσχέτιση όπως είναι για παράδειγμα οι παράμετροι της αναδρομής και τα σφάλματά τους, οι δείκτες προσαρμογής R και RMS καθώς και οι μέσες τιμές και οι σχετικές αποκλίσεις των μεταβλητών της αναδρομής.

4.3.1 Διαδικασία προγραμματιστικής εξέλιξης επεξεργασίας των αρχείων μιας πειραματικής σειράς προσομοίωσης

Η προγραμματιστική διαδικασία έχει ως εξής:

- Πριν την κλήση του προγράμματος, ο χρήστης πρέπει να βεβαιωθεί ότι έχει κατεβάσει από το δίκτυο των αρχείων της R Statistics [95] και έχει εγκαταστήσει τη βιβλιοθήκη ρουτινών R "psych" [96], η οποία καλείται στη συνέχεια του προγράμματος. Η λήψη και η εγκατάστασή της στο λογισμικό R Statistics γίνεται εύκολα με την εντολή:

  install.packages("psych")

- Ακολούθως, ο χρήστης πρέπει να σιγουρευτεί ότι διαθέτει ένα αρχείο list.txt μέσα στο φάκελο των πειραματικών δεδομένων που είναι προς επεξεργασία. Το αρχείο αυτό θα περιέχει τα ονόματα των αρχείων των δεδομένων του κάθε πειράματος μιας πειραματικής σειράς προσομοίωσης και θα καλείται από το πρόγραμμα κατά την έναρξή του.

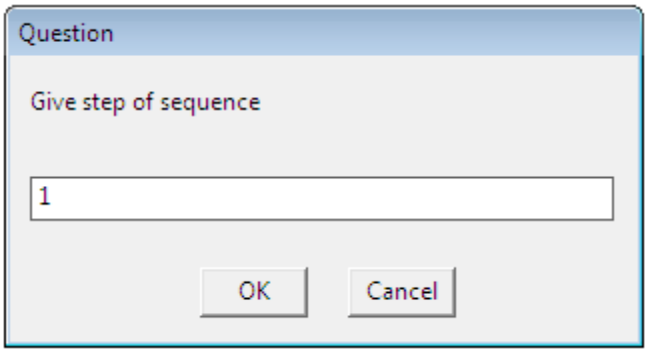
- Στη συνέχεια γίνεται κλήση του προγράμματος StatsRun.R με την εντολή:

  source("StatsRun.R")

- Μετά την κλήση του προγράμματος ζητείται από το χρήστη, με τη μορφή παραθύρου διαλόγου, να εισάγει το κατάλληλο directory όπου βρίσκονται τα αρχεία των πειραμάτων.

  Διευκρινίζεται σε αυτό το σημείο ότι προς διευκόλυνση του χρήστη και αντί να εισάγεται ξεχωριστά το όνομα κάθε πειραματικού αρχείου, όλα τα ονόματα των προς επεξεργασία πειραμάτων μπορούν να καταγραφούν σε ένα αρχείο με το όνομα *list.txt* το οποίο καλείται από το πρόγραμμα όπου με τη βοήθεια ενός εμφωλευμένου for βρόγχου επεξεργάζεται κάθε πειραματικό αρχείο της λίστας.

- Στη συνέχεια ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου το οποίο ζητά το βήμα μεταξύ των πειραμάτων που είναι προς διερεύνηση. Το παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται στην οθόνη παρατίθεται στη συνέχεια:



  Σκοπός αυτού του παραθύρου διαλόγου είναι να δοθεί στο χρήστη η δυνατότητα επιλογής του πλήθους των προς διερεύνηση πειραμάτων. Για παράδειγμα αν ο χρήστης θέλει να διερευνήσει 500 πειράματα μεταξύ 1000 μπορεί να δώσει στο αναδυόμενο παράθυρο την τιμή 2. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται σημαντικά ο υπολογιστικός χρόνος και ο χρήστης θα μπορεί να έχει μια πρώτη, γρήγορη εντύπωση της εξέλιξης της πειραματικής διαδικασίας.

- Τέλος, μετά την ολοκλήρωση του προγράμματος, όλα τα προαναφερθέντα αρχεία εξόδου αποθηκεύονται στο working directory και ο χρήστης είναι πλέον σε θέση να αρχίσει τη διερεύνηση των πειραματικών προσομοιώσεων.

Αναλυτική περιγραφή των σημαντικότερων εγγενών συναρτήσεων του R Statistics που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στα Παραρτήματα στο Κεφάλαιο §Π5.

Όλα τα παραπάνω διαγράμματα καθώς και τα αρχεία εξόδου που δημιουργούνται χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση του φαινομένου της επανάψυξης τόσο από τη φυσική πλευρά του όσο και από τη στατιστική πλευρά του. Τα συναφή συμπεράσματα που προκύπτουν σχολιάζονται στο επόμενο Κεφάλαιο 5.

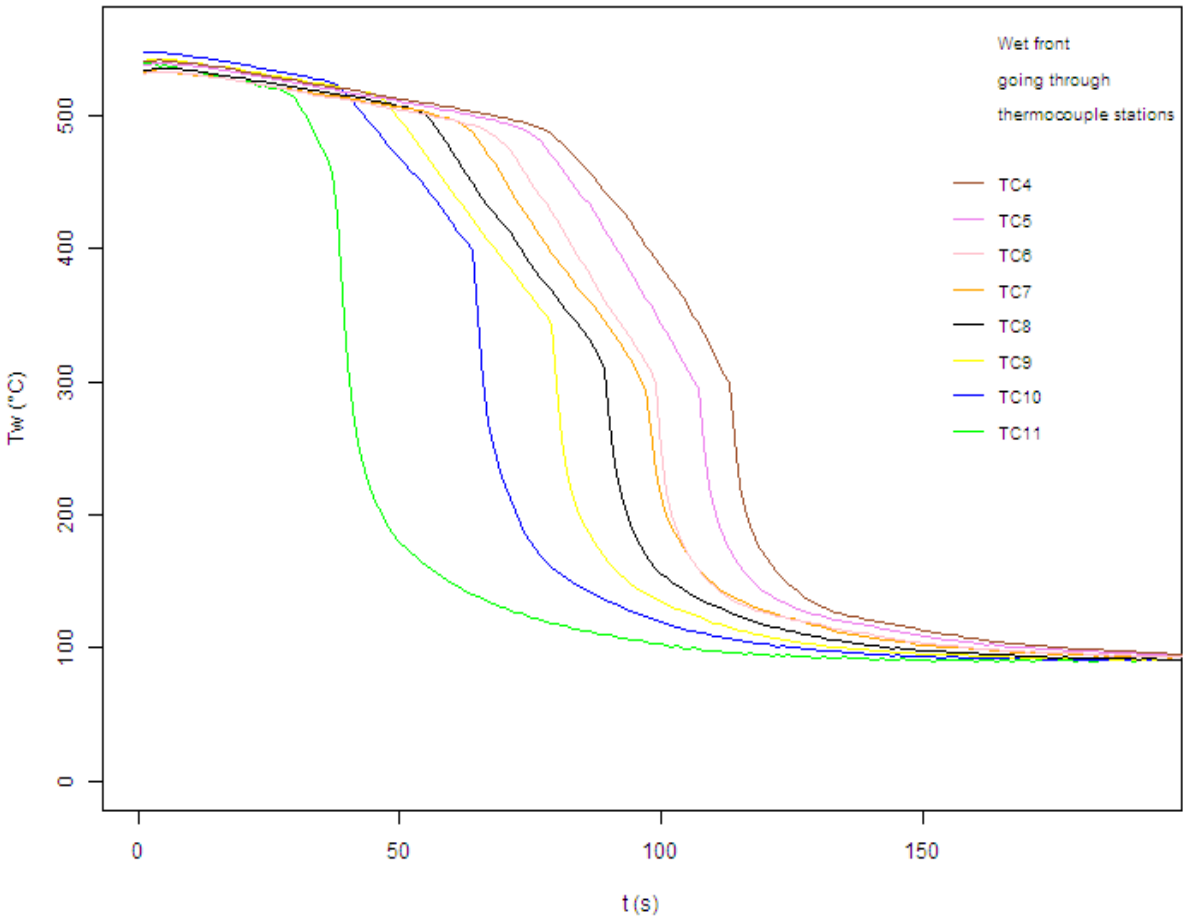
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων επανάψυξης με πλημμυρισμό, προέκυψαν διάφορα ουσιαστικά συμπεράσματα που αφορούν τόσο το φυσικό μηχανισμό επανάψυξης όσο και την επίδραση των πειραματικών παραμέτρων στην εξέλιξη της διαδικασίας. Υπενθυμίζεται ότι τα πειράματα έγιναν σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, συναρτήσει της παροχής εισόδου του νερού, της υπόψυξης στην είσοδο του τμήματος δοκιμών και της αρχικής θερμοκρασίας του τοιχώματος της ράβδου.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται η εποπτική παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων μέσω κατάλληλων γραφημάτων ενώ αναλύονται και επεξηγούνται όλα τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τις πειραματικές προσομοιώσεις της παρούσης ΔΔ. Ακόμη, γίνεται και αναλυτική περιγραφή της στατιστικής επεξεργασίας που πραγματοποιήθηκε πριν προταθούν οι τελικές εμπειρικές και ημιεμπειρικές συσχετίσεις.

5.1 Ανάλυση του φυσικού μηχανισμού επανάψυξης

Το Σχήμα 5-1 αποτελεί το γράφημα της θερμοκρασιακής ιστορίας των θερμοστοιχείων κατά τη διάρκεια της επανάψυξης της ράβδου.



Σχήμα 5-1 Διάγραμμα της θερμοκρασιακής ιστορίας του τοιχώματος της ράβδου κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης (πείραμα No 14051043.14)

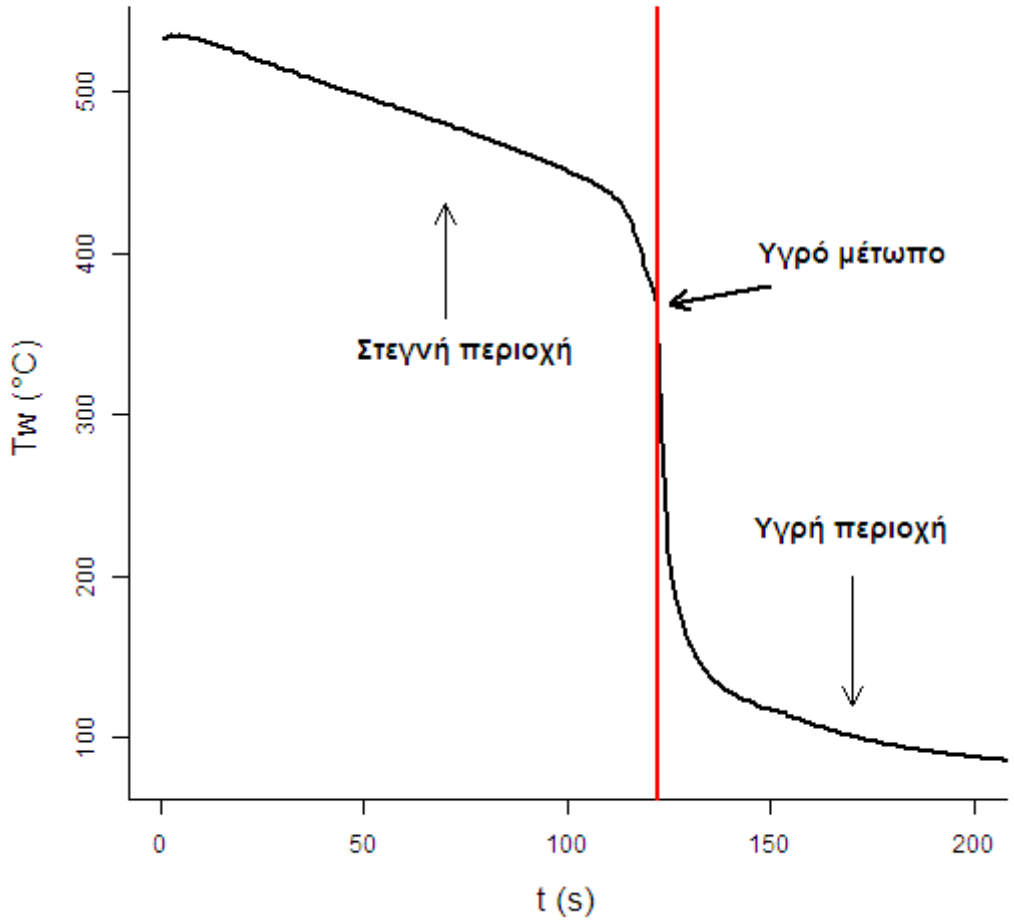
Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας κάθε ενός θερμοστοιχείου της ράβδου κατά τη διάρκεια ενός πειράματος επανάψυξης εκ των κάτω. Χαρακτηριστικό είναι το γόνυ της κάθε καμπύλης που αντιστοιχεί στην άφιξη του υγρού μετώπου στους αντίστοιχους θερμοκρασιακούς σταθμούς. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η συνεχής, σχεδόν γραμμική, πτώση της θερμοκρασίας που παρατηρείται σε όλα τα θερμοστοιχεία και η οποία διαρκεί μέχρι τη στιγμή της επανάψυξής τους όπου πλέον η πτώση της θερμοκρασίας γίνεται απότομα. Εν συνεχεία και μετά το γόνυ, παρατηρείται πάλι σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας κάθε σταθμού έως ότου εξισωθεί με τη θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου και ολοκληρωθεί το πείραμα. Γενικά, τα πειράματα ολοκληρώνονται όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των θερμοστοιχείων TC11 και TC3 είναι μικρότερη των 5°C.

Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων επανάψυξης παρατηρήθηκε από τον πειραματιστή, μέσω της οπτικής δυνατότητας που παρέχει το πυρίμαχο γυάλινο κανάλι του Τμήματος Δοκιμών, πως ανάλογα με το μέγεθος της παροχής του ψυκτικού μέσου στην είσοδο του Τμήματος Δοκιμών λαμβάνουν χώρα και διαφορετικά φαινόμενα εναλλαγής θερμότητας μεταξύ της ράβδου και του ψυκτικού μέσου. Στην περίπτωση των πειραμάτων επανάψυξης με χαμηλό ρυθμό παροχής ψυκτικού μέσου κάτω των 0.012 $kg \cdot s^{-1}$, ο πειραματιστής είναι σε θέση να εντοπίσει με ευκολία τη σταδιακή άνοδο του υγρού μετώπου επί της υπερθερμανθείσας ράβδου. Το υγρό μέτωπο αποτελεί το όριο που διαχωρίζει τη ράβδο σε δύο περιοχές: στη στεγνή περιοχή κατάντη του υγρού μετώπου και στην υγρή περιοχή ανάντη αυτού (Σχήμα 5-2). Σε αυτήν την περίπτωση ο κυριότερος μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας πραγματοποιείται μέσω αξονικής αγωγής και μπορεί να θεωρηθεί μονοδιάστατος ενώ το φαινόμενο της πρόδρομης ψύξης επηρεάζει ελάχιστα τη διαδικασία [39]. Από την άλλη μεριά, στην περίπτωση των πειραμάτων επανάψυξης με υψηλό ρυθμό παροχής ψυκτικού, το υγρό μέτωπο και η κίνησή του επί της ράβδου δεν γίνονται με ευκολία διακριτά. Σε αυτήν την περίπτωση ο πειραματιστής είναι σε θέση να παρατηρήσει στο κανάλι δοκιμών τέσσερις διαφορετικές περιοχές: την υγρή περιοχή ανάντη του υγρού μετώπου, την περιοχή του υγρού μετώπου, την περιοχή κατάντη του υγρού μετώπου και την περιοχή κοντά στο ανώτερο τμήμα της ράβδου όπου περιβάλλεται από διασκορπισμένα σταγονίδια και ατμό (Σχήμα 5-3). Συγκεκριμένα, η περιοχή του υγρού μετώπου είναι μια πολύ στενή περιοχή στην οποία πραγματοποιείται η μετάβαση από τον έντονο μεταβατικό βρασμό στον εστιακό βρασμό και αναγνωρίζεται από τον υψηλό ρυθμό παραγωγής φυσαλίδων. Στην περιοχή κατάντη του υγρού μετώπου η ράβδος είναι στεγνή και περιβάλλεται από ένα στρώμα ατμού περιμετρικά του οποίου παρατηρείται δακτυλιοειδής ροή υγρού και φυσαλίδων ατμού. Τέλος, η τέταρτη περιοχή είναι εύκολα αναγνωρίσιμη καθώς ξεκινά από το τέλος της στήλης υγρού της προηγούμενης περιοχής και φτάνει μέχρι την άνω κεφαλή της ράβδου. Σε αντίθεση με την περίπτωση επανάψυξης με χαμηλό ρυθμό παροχής μάζας, εδώ το φαινόμενο πρόδρομης ψύξης είναι κυρίαρχο ενώ ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας πρέπει να θεωρείται πλέον δισδιάστατος [39]. Οι παρατηρήσειςαυτές ενισχύθηκαν και από τη μελέτη των γραφημάτων της θερμοκρασιακής ιστορίας των θερμοστοιχείων όπου εμφανίζονται ευδιάκριτα οι δύο διαφορετικές περιπτώσεις επανάψυξης (Σχήματα 5-2 και 5-3). Από τα γραφήματα γίνεται αντιληπτό πως οι δύο καμπύλες έχουν σημαντικές ομοιότητες και

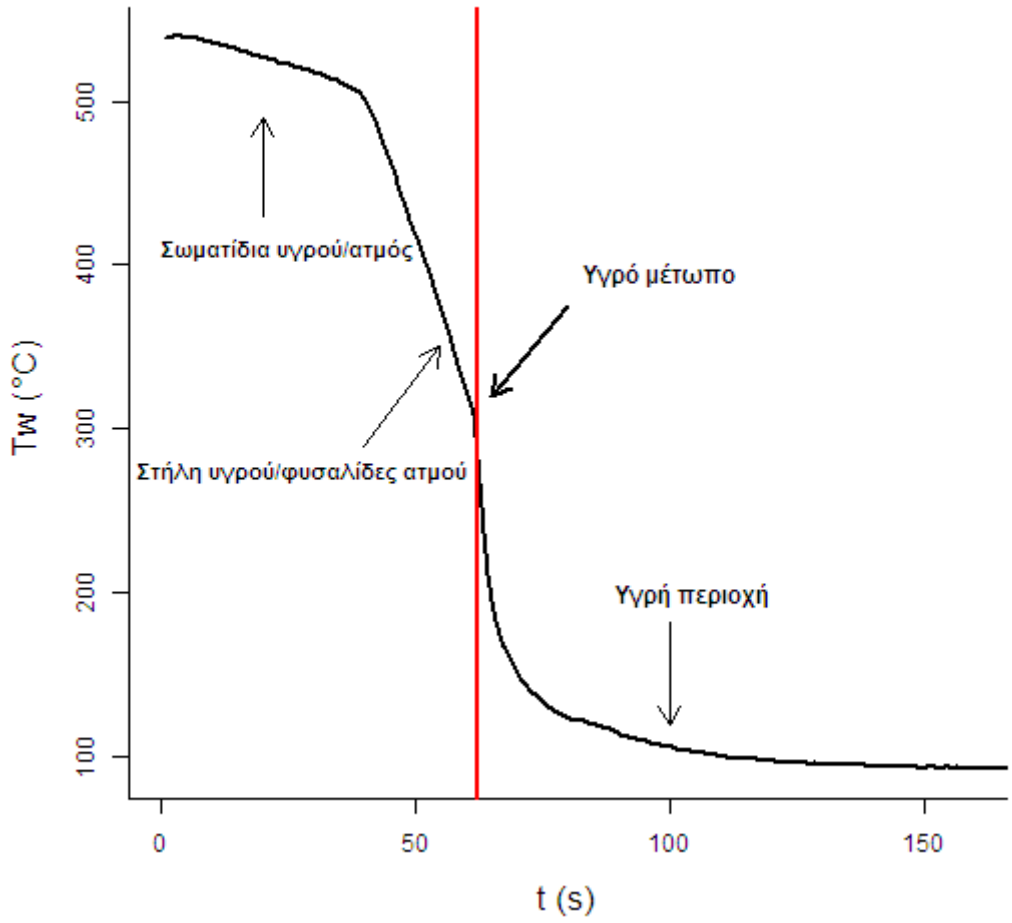
περιγράφουν παρόμοιους μηχανισμούς επανάψυξης. Εντούτοις, η περιοχή όπου εμφανίζονται η στήλη υγρού και οι φυσαλίδες ατμού κατά την επανάψυξη με υψηλό ρυθμό παροχής ψυκτικού, αποτελεί την ειδοποιό διαφορά των δύο περιπτώσεων επανάψυξης και είναι αυτή η οποία διαχωρίζει τη ράβδο από δύο σε τρεις διαφορετικές περιοχές. Σε αυτό το σημείο, αποτελεί ενδιαφέρον η σύγκριση των φαινομένων μετάδοσης θερμότητας που παρατηρούνται κατά την επανάψυξη εκ των κάτω με τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την επανάψυξη εκ των άνω [12, 92]. Το υγρό μέτωπο αποτελεί και πάλι το όριο διαχωρισμού στεγνής (κατάντη) και υγρής (ανάντη) περιοχής. Όπως και προηγουμένως, η εναλλαγή από μεταβατικό σε εστιακό βρασμό γίνεται στην στενή περιοχή του υγρού μετώπου. Ωστόσο, η έντονη παραγωγή φυσαλίδων και η μεταξύ τους παρέμβαση, οδηγούν στη διατάραξη της άκρης του υγρού μετώπου και στην αποκόλλησή του από την επιφάνεια της ράβδου. Από αυτό το σημείο και έπειτα, διακόπτεται η επαφή του υγρού με την υπερθερμανθείσα ράβδο λόγω ενός στρώματος ατμού που εγκαθίσταται μεταξύ τους και η βαρυτική αποτελεί τη μόνη δύναμη που επιδρά στην κίνηση του υγρού [64]. Όπως και στην περίπτωση επανάψυξης εκ των κάτω με χαμηλό ρυθμό παροχής ψυκτικού, κυριότερος μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας είναι η αξονική αγωγή ωστόσο η διαδικασία επηρεάζεται ως έναν βαθμό και από το φαινόμενο της πρόδρομης ψύξης και τη μετάδοση θερμότητας λόγω ακτινοβολίας μέσω του στρώματος ατμού. Όσον αφορά τώρα τα πειράματα επανάψυξης εκ των κάτω, ο προσδιορισμός υψηλής και χαμηλής παροχής ψυκτικού εξαρτάται από τη γεωμετρία του καναλιού δοκιμών της κάθε πειραματικής εγκατάστασης στην οποία εκτελούνται τα πειράματα επανάψυξης με πλημμυρισμό. Στην περίπτωση των πειραμάτων που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της παρούσας ΔΔ και έπειτα από ανάλυση των γραφημάτων που προέκυψαν μετά από κάθε πειραματική προσομοίωση, ως χαμηλός ρυθμός παροχής προσδιορίστηκε η παροχή από 0.012 $kg \cdot s^{-1}$ και κάτω, ενώ οι παροχές ψυκτικού άνω των 0.017 $kg \cdot s^{-1}$ θεωρήθηκαν υψηλές. Για την περιοχή τιμών παροχής μεταξύ 0.012 $kg \cdot s^{-1}$ και 0.017 $kg \cdot s^{-1}$ δεν διενεργήθηκαν πειράματα. Εννοείται πως το μέγεθος της παροχής εξαρτάται από τη γεωμετρία του καναλιού δοκιμών και οι τιμές αυτές δεν μπορούν να συγκριθούν άμεσα με τις τιμές άλλων ερευνητών που πειραματίστηκαν σε μικρότερα κανάλια δοκιμών.

Στη συνέχεια της ΔΔ, στην παράγραφο 5.2.1, γίνεται μια προσπάθεια μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας του καναλιού δοκιμών στην ταχύτητα επανάψυξης μιας

υπερθερμανθείσας ράβδου με τη χρήση αδιάστατων μεγεθών. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει εφικτή η έμμεση σύγκριση του μεγέθους του ρυθμού παροχής του ψυκτικού μέσου στο σύνολο των πειραματικών εργασιών.



Σχήμα 5-2 Διάγραμμα της θερμοκρασιακής ιστορίας του θερμοστοιχείου TC6 της ράβδου κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης (πείραμα No 13101105.14)



Σχήμα 5-3 Διάγραμμα της θερμοκρασιακής ιστορίας του θερμοστοιχείου TC6 της ράβδου κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης (πείραμα No 19051047.14)

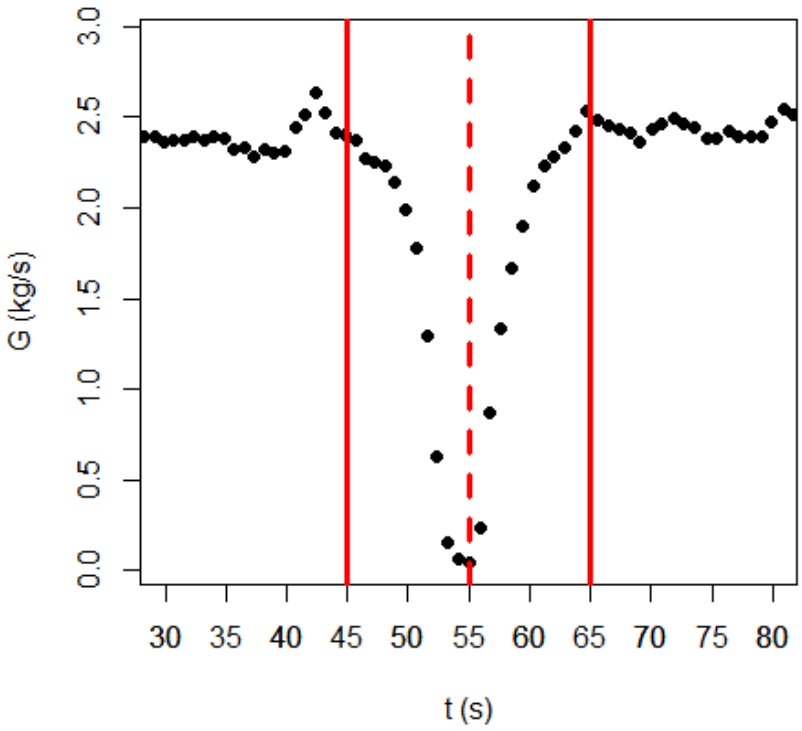
Οι προηγούμενες περιπτώσεις επανάψυξης καθώς και τα φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την εκτέλεση των πειραμάτων συμφωνούν με τη βιβλιογραφία, αφού όλες αυτές οι παρατηρήσεις έχουν ήδη αναφερθεί σε προηγούμενες εργασίες επανάψυξης εκ των κάτω σε υπερθερμανθείσες ράβδους αλλά και σε ράβδους πυρηνικού καυσίμου [64, 13, 22, 97].

5.1.1 Ατμοπαραγωγή και πτώση πίεσης

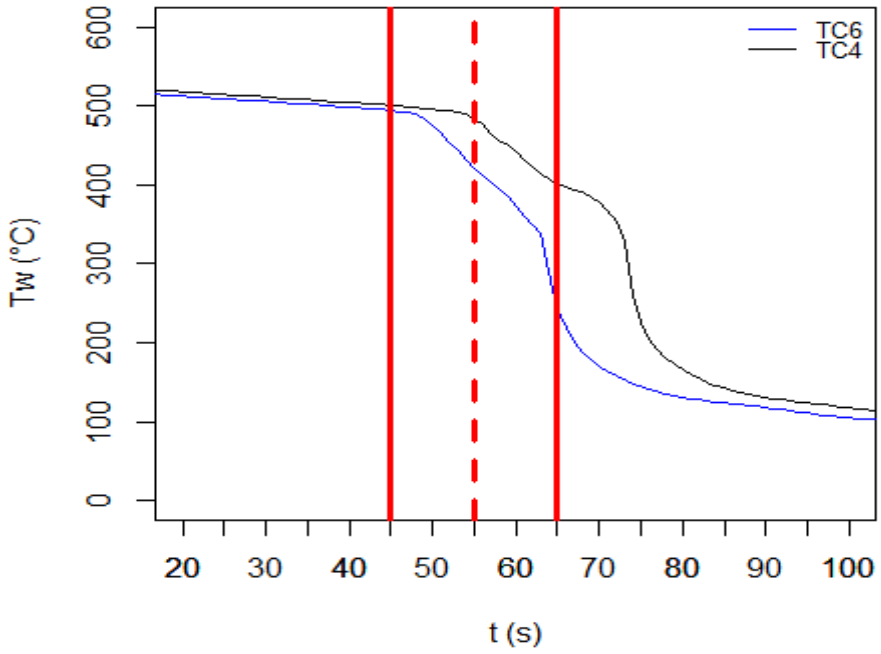
Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων, ενδιαφέρον παρουσίασε η υψηλή ατμοπαραγωγή η οποία παρατηρήθηκε έντονα στα πειράματα επανάψυξης με υψηλό ρυθμό παροχής ψυκτικού. Σε πολλές περιπτώσεις πειραμάτων η αυξημένη ατμοπαραγωγή μπορούσε να προκαλέσει σημαντική πτώση πίεσης στο κανάλι δοκιμών καθώς και βύθιση και αντιστροφή της ροής του ψυκτικού (Σχήμα 5-4). Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση, η ροή επανερχόταν στην αρχική της τιμή και το πείραμα ολοκληρωνόταν. Οι παρατηρήσεις αυτές έχουν γίνει αντιληπτές και από όλους πειραματιστές οι οποίοι και τις απέδωσαν στο φαινόμενο δέσμευσης ατμού (steam binding effect) [29, 30], όπως αναλύθηκε ήδη στην παράγραφο § 2.2.2.

Το φαινόμενο της βύθισης έγινε αντιληπτό στα πειράματα επανάψυξης με υπόψυξη 25°C σε παροχές ψυκτικού από 0.025 $kg \cdot s^{-1}$ έως 0.050 $kg \cdot s^{-1}$ καθώς και στα πειράματα κορεσμού και παροχής 0.042 $kg \cdot s^{-1}$. Μεγαλύτερης διάρκειας βύθιση μετρήθηκε στα πειράματα κορεσμού όπου το φαινόμενο μπορεί να διαρκούσε 30-45 s ενώ στα πειράματα υπόψυξης, η διάρκεια του φαινομένου μετρήθηκε στα 10-15 s.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της επίδρασης του φαινομένου βύθισης ροής συγκρινόμενη με την θερμοκρασιακή ιστορία δύο θερμοστοιχείων: ενός θερμοστοιχείου που κατά τη διάρκεια της βύθισης της παροχής του ψυκτικού, βρίσκεται ήδη στην περιοχή της ράβδου όπου συνυπάρχουν φυσαλίδες ατμού με τη στήλη υγρού (TC6) και ενός θερμοστοιχείου όπου βρίσκεται στην ξηρή περιοχή της ράβδου (TC4). Όσον αφορά το TC6, γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 5-5 πως δεν υπάρχει καμία αλλαγή στην καμπύλη της θερμοκρασιακής ιστορίας του. Ωστόσο, δεν ισχύει το ίδιο και για την περιοχή της ράβδου κοντά στον σταθμό TC4, όπου και παρατηρείται απότομη πτώση της θερμοκρασίας της που διαρκεί όσο διαρκεί η επαναφορά της παροχής μάζας του ψυκτικού από τη μηδενική στην αρχική της σταθερή τιμή. Η απότομη πτώση της θερμοκρασίας αντιστοιχεί στην ξαφνική αλλαγή του μηχανισμού μετάδοσης θερμότητας όπου από μονοδιάσταστος γίνεται απότομα δισδιάστατος. Μετά την επαναφορά της παροχής μάζας του ψυκτικού στην αρχική της τιμή, η επανάψυξη ολοκληρώνεται με σταθερό πλέον ρυθμό για το θερμοστοιχείο TC4.



Σχήμα 5-4 Διάγραμμα της παροχής μάζας του ψυκτικού κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης (πείραμα No 01101100.14)



Σχήμα 5-5 Διάγραμμα της θερμοκρασιακής ιστορίας των θερμοστοιχείων TC6 και TC4 κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης (πείραμα No 01101100.14)

5.2 Μελέτη της ταχύτητας επανάψυξης

Ένα από τα αντικείμενα μελέτης της παρούσης πειραματικής ΔΔ αποτελεί η εκτίμηση του ρυθμού επανάψυξης της υπερθερμανθείσας επιφάνειας και ιδιαίτερα ο προσδιορισμός των παραμέτρων που τον επηρεάζουν. Από το σύνολο της βιβλιογραφίας (Κεφάλαιο §2) έχει διαπιστωθεί πως η ταχύτητα επανάψυξης επηρεάζεται θετικά με την αύξηση της παροχής του ψυκτικού μέσου καθώς και από την αύξηση της υπόψυξης ενώ συσχετίζεται αρνητικά με την αρχική θερμοκρασία της υπέρθερμης επιφάνειας. Τα διαγράμματα στα Σχήματα 5-6–5-8 απεικονίζουν το σύνολο των πειραματικών σημείων της αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης έναντι της αρχικής θερμοκρασίας του τοιχώματος της ράβδου στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ. Η μαύρη οριζόντια γραμμή απεικονίζει την αντίστροφη ταχύτητα πλημμυρισμού που αντιστοιχεί σε κάθε παροχή. Ως **ταχύτητα πλημμυρισμού** ορίζεται η ταχύτητα του νερού στο κανάλι δοκιμών όταν δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας μεταξύ της ράβδου δοκιμών και του εργαζόμενου μέσου. Από την παρατήρηση των διαγραμμάτων αυτών γίνεται αντιληπτό πως τα παρόντα πειραματικά δεδομένα έρχονται σε πλήρη συμφωνία με τα προαναφερθέντα συμπεράσματα των υπολοίπων ερευνητών όσον αφορά την εξάρτηση του ρυθμού επανάψυξης από την παροχή, την υπόψυξη και την αρχική θερμοκρασία της ράβδου.

Επιπλέον, τα παρακάτω διαγράμματα προσφέρουν πληροφορίες που αφορούν τα πειράματα αυτά καθεαυτά, όπως πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της ΔΔ. Για παράδειγμα, τα πειράματα που διεξήχθησαν σε παροχή ψυκτικού 0.008 $kg \cdot s^{-1}$ τόσο σε συνθήκες κορεσμού (Πείραμα 1 Πίνακας 5-1) όσο και σε συνθήκες υπόψυξης 25°C (Πείραμα 2 Πίνακας 5-1), δεν φαίνεται να παρουσιάζουν την αναμενόμενη γραμμική εξάρτηση των δύο μεταβλητών ενώ οι αντίστροφες ταχύτητες επανάψυξης βρίσκονται πολύ κοντά στην αντίστροφη ταχύτητα πλημμυρισμού ανεξάρτητα της αρχικής θερμοκρασίας επιφανείας. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι τα πειράματα αυτά δεν αποτελούν πειράματα επανάψυξης υπερθερμανθείσας επιφάνειας αλλά διαδικασία ταχείας ψύξεως[5] της επιφάνειας. Με αυτές τις οπτικές παρατηρήσεις συμφωνεί και ο στατιστικός έλεγχος που έγινε με την εκτίμηση της αξιοπιστίας του

[5] Ως διαδικασία ταχείας ψύξεως ορίζεται η διαδικασία ψύξεως της θερμής ράβδου λόγω μετάδοσης θερμότητας μέσω του μηχανισμού συναγωγής μεταξύ του ψυκτικού και της ράβδου χωρίς ωστόσο να παρατηρούνται τα φαινόμενα του εστιακού ή του μεταβατικού βρασμού όπου παρατηρούνται στη διαδικασία επανάψυξης μιας υπερθερμανθείσας επιφανείας, όπως και μελετάμε στην παρούσα ΔΔ.

συντελεστή γραμμικής συσχέτισης μεταξύ της αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης και της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου, όπου οι υπολογιζόμενοι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης καθώς και η εκτίμηση της αξιοπιστίας τους είναι:

Πίνακας 5-1 Συντελεστές γραμμικής συσχέτισης και έλεγχος αξιοπιστίας τριών πειραματικών σειρών

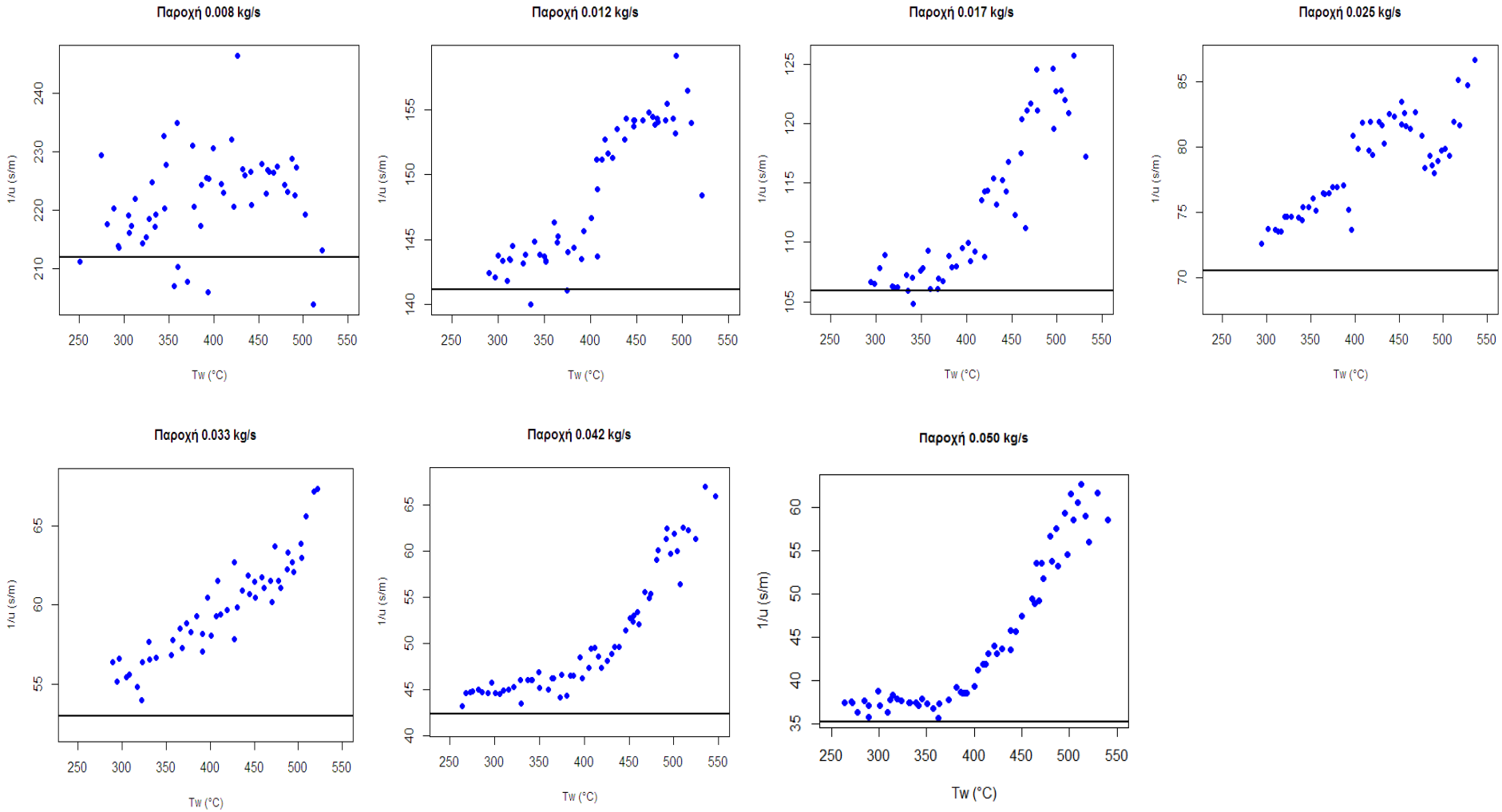
Πειράματα	**Αρχικές συνθήκες πειραμάτων**		**Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης (r)**	**Εκτίμηση αξιοπιστίας (p value)**
	Παροχή ψυκτικού ($kg \cdot s^{-1}$)	**Βαθμοί υπόψυξης (°C)**		
Πείραμα 1	0.008	0	0.2369	0.0845
Πείραμα 2	0.008	25	0.2742	0.0652

Σημειώνεται εδώ πως έλεγχος γραμμικής συσχέτισης με ταυτόχρονο στατιστικό έλεγχο σημαντικότητας έγινε για κάθε πειραματική σειρά είτε υπήρχε προφανή οπτική ένδειξη από τα διαγράμματα είτε όχι. Εν τέλει σε όλες τις υπόλοιπες πειραματικές σειρές διαπιστώθηκε σημαντική γραμμική συσχέτιση μεταξύ της αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης και της αρχικής θερμοκρασίας επιφανείας της ράβδου. Έτσι, κατά τη μετέπειτα μελέτη και επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, αποκλείστηκαν μόνο οι πειραματικές τιμές των δύο παραπάνω πειραματικών σειρών.

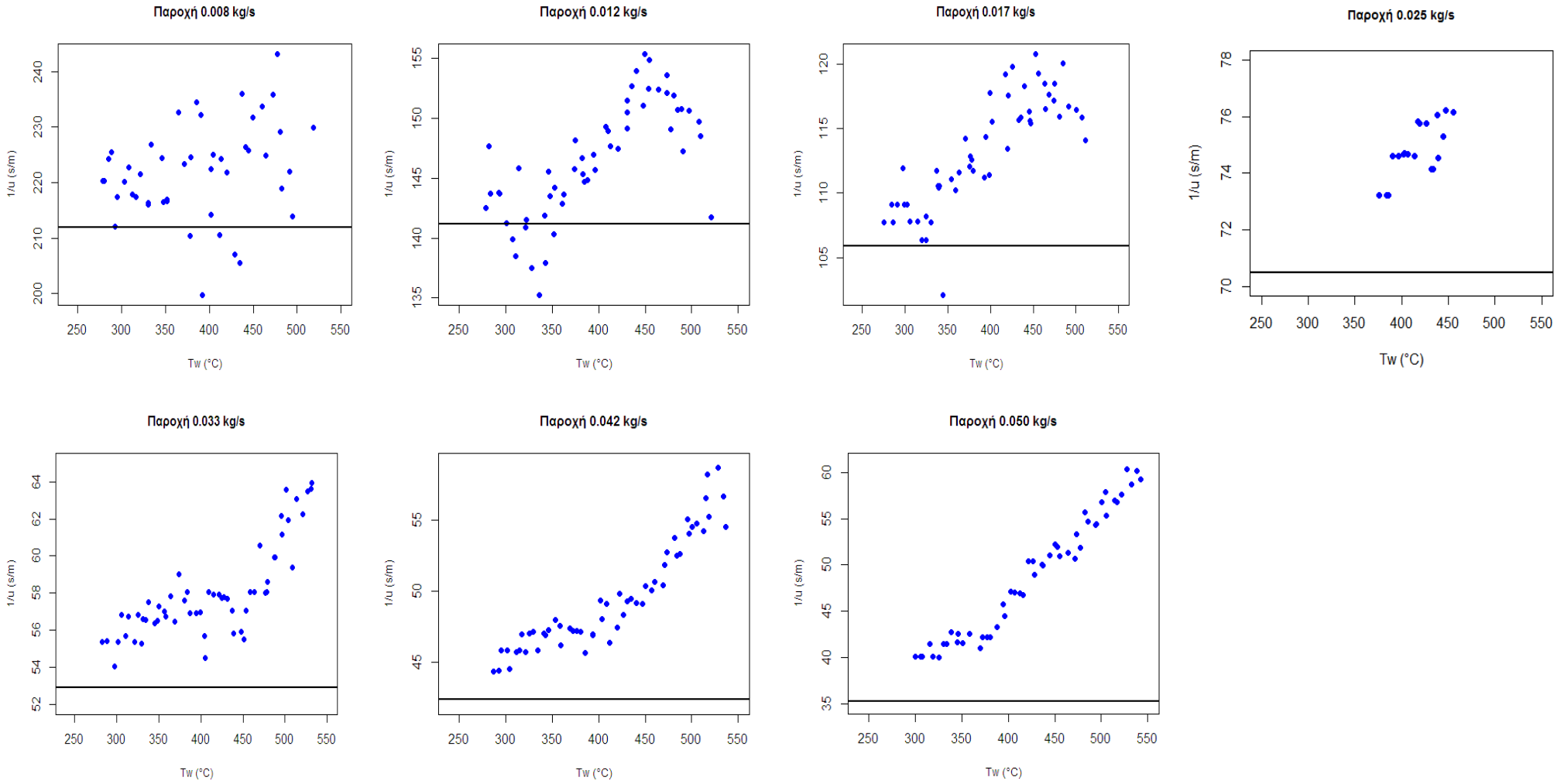
Ακόμη, από την εξέταση των διαγραμμάτων προκύπτει ότι υφίσταται μια οριακή τιμή της αρχικής θερμοκρασίας του τοιχώματος της ράβδου πάνω από την οποία παρατηρείται γραμμική συσχέτιση μεταξύ της αντίστροφης θερμοκρασίας επανάψυξης και της αρχικής θερμοκρασίας επιφανείας. Η τιμή αυτή από τα παρόντα πειράματα εντοπίζεται στην περιοχή μεταξύ των 350°C και 400°C. Συγκεκριμένα, για τα πειράματα που διεξήχθησαν σε συνθήκες κορεσμού και σε συνθήκες υπόψυξης ψυκτικού 25°C η οριακή τιμή της θερμοκρασίας φαίνεται να είναι κοντά στους 400°C ενώ για τα πειράματα που διενεργήθηκαν σε συνθήκες υπόψυξης 50°C και παροχής μεγαλύτερης των 0.025 $kg \cdot s^{-1}$, δεν παρατηρείται εύκολα μία συγκεκριμένη οριακή

τιμή αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με την παροχή του ψυκτικού. Παρατηρείται δηλαδή πως όσο αυξάνεται η παροχή του ψυκτικού στην είσοδο του καναλιού δοκιμών, η οριακή τιμή της θερμοκρασίας μειώνεται ενώ μπορεί να φτάσει και τιμές μικρότερες των 300 °C. Πάραυτα, η τιμή των 350°C φαίνεται να βρίσκεται εντός της γραμμικής περιοχής όλων αυτών των πειραμάτων, άνω της οποίας μπορούμε με ασφάλεια να θεωρήσουμε πως εξελίσσεται πείραμα επανάψυξης και όχι διαδικασία ταχείας ψύξεως.

Πρέπει να αναφερθεί πως η επιλογή των ορίων 350°C και 400°C, αν και εκ πρώτης όψεως φαίνεται αυθαίρετη εφόσον δεν αποδεικνύεται υπολογιστικά παρά μόνο γίνεται οπτικά αντιληπτή, εντούτοις συμφωνεί με τη βιβλιογραφία που υποστηρίζει πως πειράματα επανάψυξης λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 320°C για θερμαινόμενες ράβδους από s.s. [98]. Έτσι, στη συνέχεια της μελέτης θα ασχοληθούμε μόνο με τα πειραματικά σημεία με αρχική θερμοκρασία ράβδου άνω των 350°C (715 πειράματα επανάψυξης).

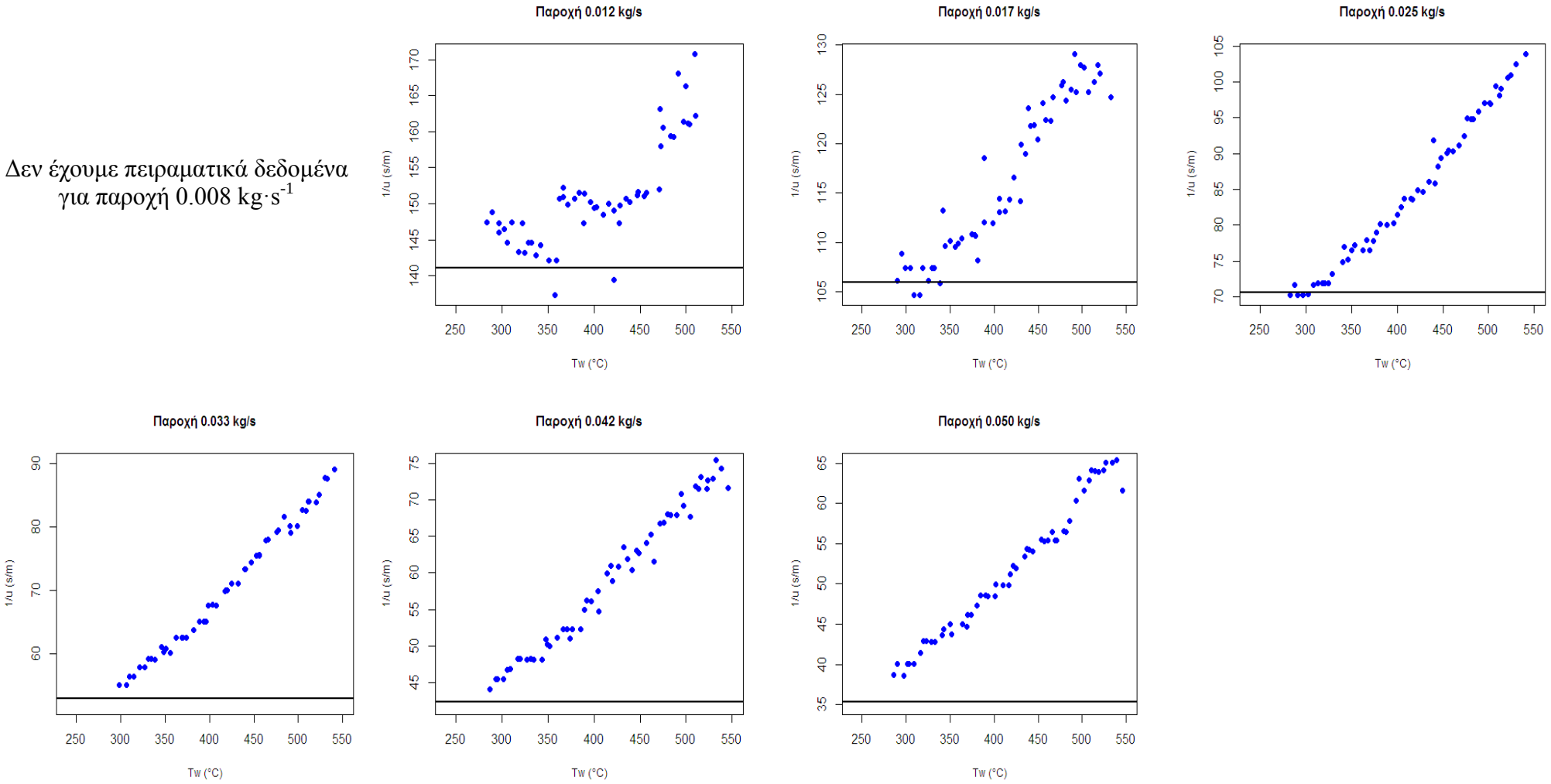


Σχήμα 5-6 Αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης έναντι αρχικής θερμοκρασίας ράβδου για κάθε πειραματική σειρά σε συνθήκες κορεσμού



Σχήμα 5-7 Αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης έναντι αρχικής θερμοκρασίας ράβδου για κάθε πειραματική σειρά σε υπόψυξη 25°C

Δεν έχουμε πειραματικά δεδομένα για παροχή 0.008 $kg \cdot s^{-1}$



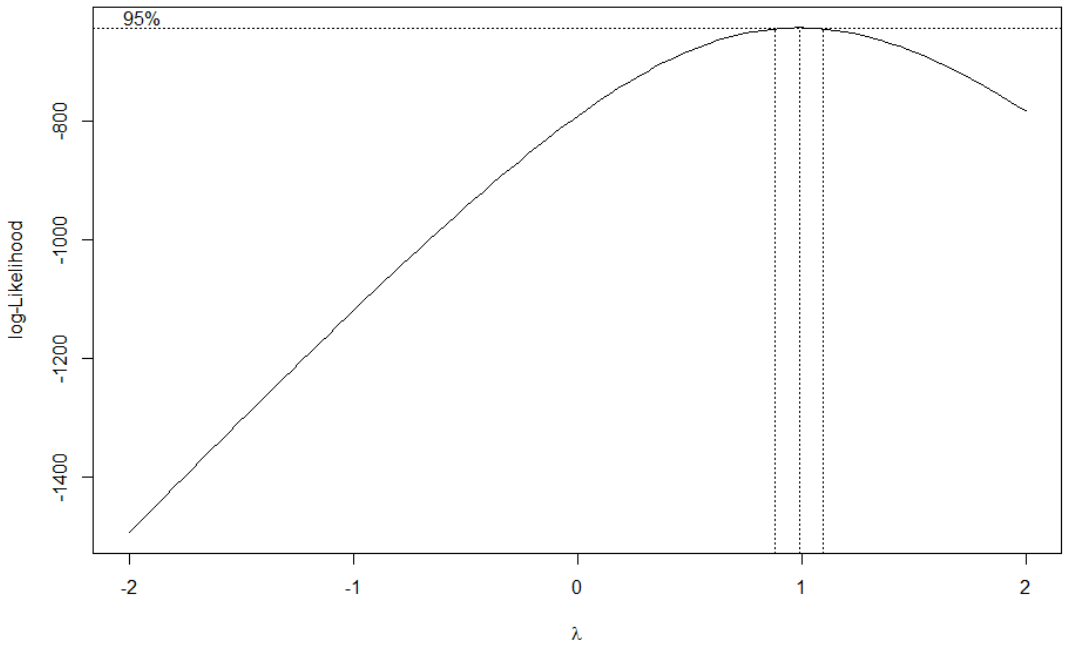
Σχήμα 5-8 Αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης έναντι αρχικής θερμοκρασίας ράβδου για κάθε πειραματική σειρά σε υπόψυξη 50°C

Από τα τελικά πειραματικά δεδομένα που προκύπτουν μετά την εξέταση των παραπάνω διαγραμμάτων, διεξάγεται στατιστική ανάλυση πολλαπλής γραμμικής συσχέτισης με σκοπό την εξαγωγή μιας τελικής εμπειρικής συσχέτισης μεταξύ της ταχύτητας επανάψυξης και των πειραματικών παραμέτρων που την επηρεάζουν και συγκεκριμένα της παροχής και της υπόψυξης του ψυκτικού και της αρχικής θερμοκρασίας του τοιχώματος της ράβδου. Ο προσδιορισμός της τελικής συσχέτισης που προκύπτει γίνεται με τη μέθοδο της προοδευτικής σταδιακής αναζήτησης (forward stepwise regression) του πιο ισχυρού μοντέλου μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής και του συνόλου των ανεξάρτητων μεταβλητών. Η τελική συσχέτιση που προτείνεται είναι αυτή που ελαχιστοποιεί το κριτήριο AIC (Akaike Information Criterion) [99]. Η τελική εμπειρική συσχέτιση που προτείνεται από το σύνολο των πειραμάτων επανάψυξης είναι η εξής:

$$u = 1.043 \cdot 10^{-2} - 1.981 \cdot 10^{-5} \cdot T_w + 4.626 \cdot 10^{-1} \cdot G + 2.726 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta T_{sub} - 2.823 \cdot 10^{-3} \cdot G \cdot \Delta T_{sub} \quad \textbf{5-1}$$

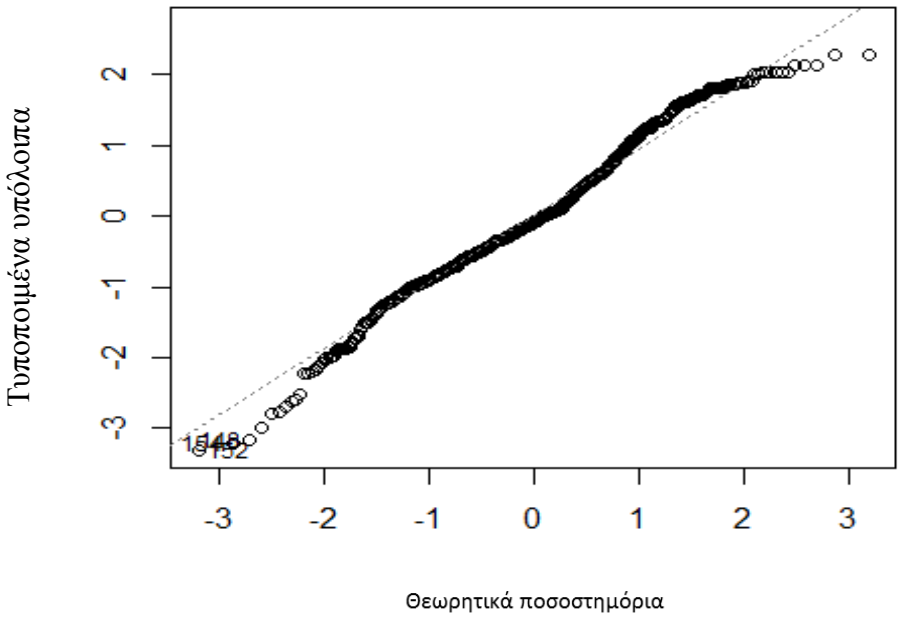
Παράμετροι	Συντελεστές	Σφάλμα παραμέτρων	p_value
Intercept	$1.043 \cdot 10^{-2}$	4.903e-04	< 2e-16
T_w	$-1.981 \cdot 10^{-5}$	8.298e-07	< 2e-16
G	$4.626 \cdot 10^{-1}$	9.096e-03	< 2e-16
ΔT_{sub}	$2.726 \cdot 10^{-5}$	9.482e-06	0.00416
$G \cdot \Delta T_{sub}$	$-2.823 \cdot 10^{-3}$	2.809e-04	< 2e-16

όπου το κριτήριο AIC υπολογίστηκε ίσο με -9557.66 ενώ ο συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού R^2 ίσος με 0.9323. Επιπλέον, έγινε έλεγχος της κανονικότητας του μοντέλου με το διάγραμμα κανονικότητας Box-Cox (Σχήμα 5-9). Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι το διάστημα εμπιστοσύνης συμπεριλαμβάνει την τιμή λ=1, κάτι που υποδηλώνει ότι δεν απαιτείται κανένας μετασχηματισμός των αρχικών, πειραματικών δεδομένων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το στατιστικό πακέτο R statistics [93] και τη βοήθεια των συναρτήσεων *step()* της βιβλιοθήκης συναρτήσεων *leaps* και *boxcox( )* της βιβλιοθήκης συναρτήσεων *MASS*.



Σχήμα 5-9 Box-Cox διάγραμμα κανονικότητας για την εξίσωση 5-1

Τέλος, στο Σχήμα 5-10 παρουσιάζεται το κανονικό διάγραμμα ποσοστημορίων (Q-Q plot) της παραπάνω συσχέτισης όπου φαίνεται ότι τα σημεία της συνάρτησης δεν απέχουν πολύ από την διαγώνιοούτε παρατηρούνται ακραίες παρατηρήσεις. Φυσικά η προτεινόμενη συσχέτιση έχει εφαρμογή μόνο στα πειραματικά δεδομένα που προκύπτουν από τα πειράματα επανάψυξης εκ των κάτω και τα οποία διενεργήθηκαν στο ΘΥΚ αποκλειστικά κάτω από ατμοσφαιρικές πιέσεις.



Σχήμα 5-10 Κανονικό διάγραμμα ποσοστημορίων της προτεινόμενης εμπειρικής συσχέτισης προσδιορισμού της ταχύτητας επανάψυξης

5.2.1 Επίδραση της γεωμετρίας του καναλιού δοκιμών στην ταχύτητα επανάψυξης

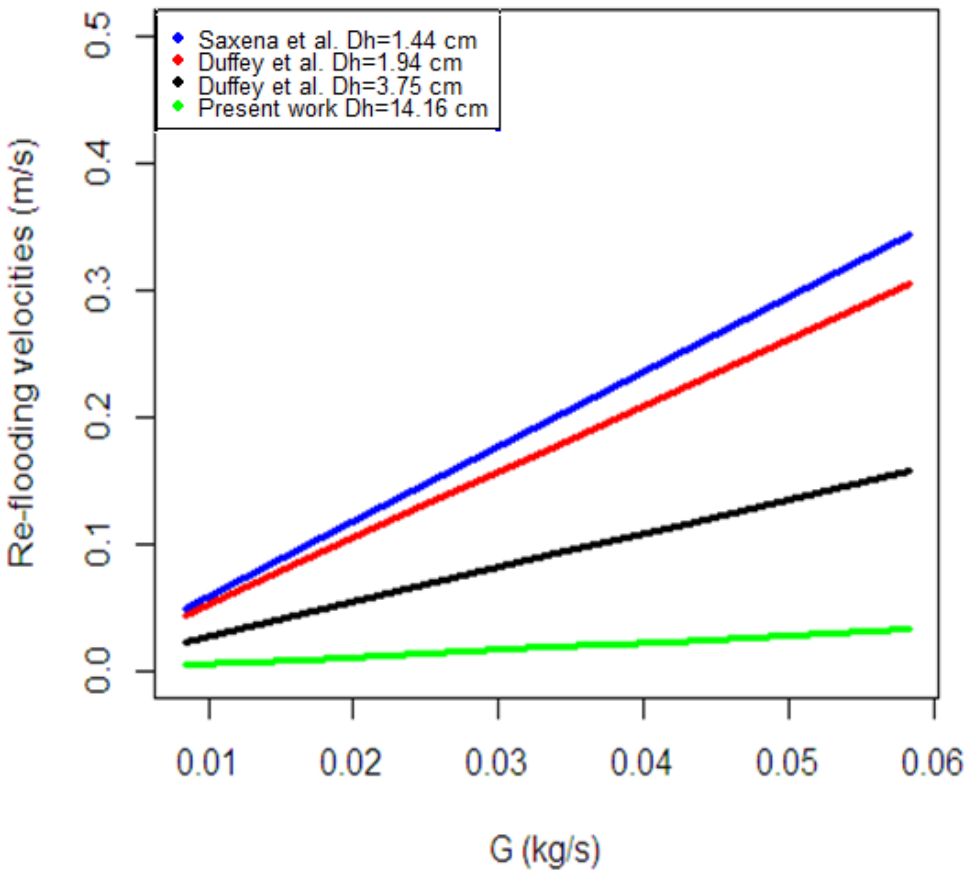
Από τα διαγράμματα στα Σχήματα 5-6–5-8 είναι εμφανές ότι η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας της επιφάνειας στην ταχύτητα επανάψυξης είναι ασθενέστερη όσο μειώνεται η παροχή μάζας του ψυκτικού μέσου στο κανάλι δοκιμών. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι σε χαμηλές παροχές μάζας η ταχύτητα επανάψυξης βρίσκεται πολύ κοντά στην ταχύτητα πλημμυρισμού του καναλιού ανεξάρτητα απτην αρχική θερμοκρασία της επιφάνειας. Η παρατήρηση αυτή αποδίδεται στη γεωμετρία του καναλιού δοκιμών. Στην παράγραφο αυτή γίνεται μελέτη του βαθμού επίδρασης της γεωμετρίας του καναλιού στο συνολικό μηχανισμό επανάψυξης.

Για τη μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας του καναλιού στην ταχύτητα επανάψυξης πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των παρόντων πειραματικών δεδομένων και των πειραματικών δεδομένων άλλων ερευνητών τα πειράματα των οποίων πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικής γεωμετρίας κανάλια δοκιμών αλλά στις ίδιες αρχικές πειραματικές συνθήκες. Τα πειραματικά δεδομένα που επιλέχθηκαν προέρχονται από τις εργασίες των Saxena et al. και των Duffey – Porthouse [38, 39]

και αφορούν ατμοσφαιρικά πειράματα που διενεργήθηκαν σε συνθήκες κορεσμού, αρχικές θερμοκρασίες τοιχώματος ράβδου 400°C και 500°C και σε διάφορες παροχές μάζας ψυκτικού. Επιπροσθέτως αναφέρεται ότι οι Duffey–Porthouse πραγματοποίησαν τα πειράματά τους σε δύο διαφορετικά κανάλια δοκιμών με γεωμετρίες καναλιών που ισοδυναμούν με υδραυλικές διαμέτρους ίσες με 1.94 cm και 3.75 cm ενώ τα πειράματα των Saxena et al. έλαβαν χώρα σε κανάλι με γεωμετρία καναλιού που ισοδυναμεί με υδραυλική διάμετρο 1.44 cm. Από την άλλη, η υδραυλική διάμετρος του καναλιού δοκιμών του ΘΥΚ υπολογίζεται ίση με 17.65 cm από τη σχέση:

$$D_h = \frac{4 \cdot (\pi R_{Ch}^2 - \pi R^2)}{2\pi R} \qquad \textbf{5-2}$$

όπου R_{ch} και R είναι η εσωτερική ακτίνα του καναλιού δοκιμών και η εξωτερική ακτίνα της ράβδου αντίστοιχα. Για να γίνει ευκολότερα αντιληπτή η επίδραση της γεωμετρίας του καναλιού δοκιμών στην ταχύτητα πλημμυρισμού, στο Σχήμα 5-11 απεικονίζονται οι ταχύτητες πλημμυρισμού έναντι των παροχών μάζας όλων των προαναφερθέντων πειραματικών εγκαταστάσεων.



Σχήμα 5-11 Ταχύτητα πλημμυρισμού έναντι παροχής μάζας ψυκτικού για τέσσερα κανάλια δοκιμών διαφορετικής γεωμετρίας

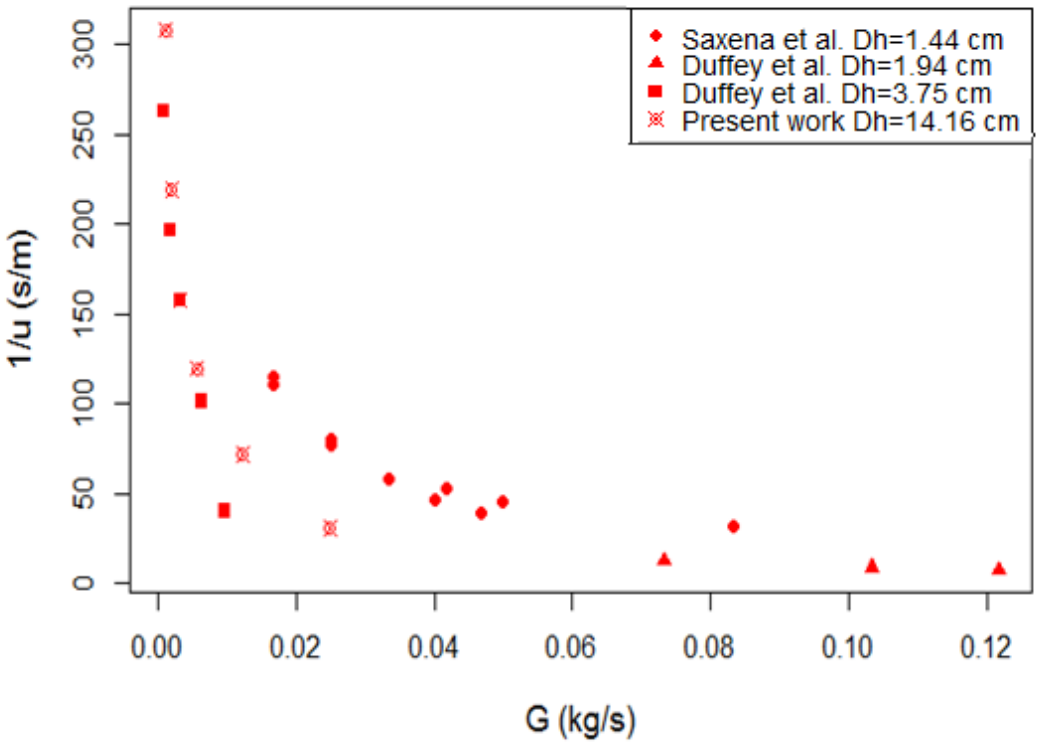
Στη συνέχεια, ο Πίνακας 5-2 συνοψίζει τα στοιχεία που αφορούν τα Τμήματα Δοκιμών όπως επίσης και τις πειραματικές συνθήκες όλων των πειραμάτων.

Πίνακας 5-2 Ατμοσφαιρικά πειραματικά δεδομένα επανάψυξης εκ των κάτω

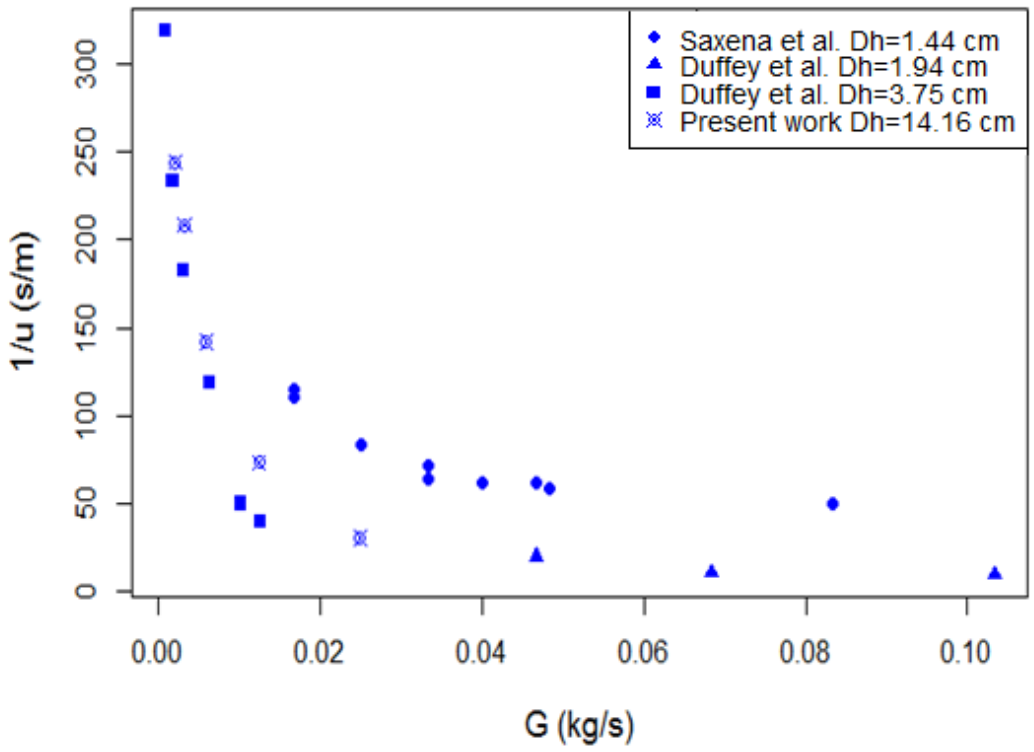
Εργασία	**Επιφάνεια δοκιμών**	**Αρχική θερμοκρασία τοιχώματος επιφανείας (°C)**	**Παροχή μάζας ψυκτικού (kg·s^{-1})**
Duffey – Porthouse [39]	S.S. ράβδος πάχος τοιχώματος=0.085 cm σκόνη μαγνησίου εσ. διάμετρος ράβδου=1.25 cm υδραυλική διάμετρος=3.75 cm	400-500	0.0003-0.0100
	S.S. ράβδος πάχος τοιχώματος=0.085 cm σκόνη μαγνησίου εσ. διάμετρος ράβδου=1.25 cm υδραυλική διάμετρος=1.94 cm	400-500	0.0001-0.0370
Saxena et al. [38]	S.S. σωλήνας πάχος τοιχώματος=0.030 cm εξ. διάμετρος σωλήνα=1.5 cm υδραυλική διάμετρος=1.44 cm	400-500	0.0167-0.1217
Παρούσα ΔΔ	S.S. ράβδος πάχος τοιχώματος=0.030 cm σκόνη μαγνησίου εξ. διάμετρος ράβδου=1.5875 cm υδραυλική διάμετρος=17.65 cm	400-500	0.0083-0.0500

Στα Σχήματα 5-12 και 5-13 απεικονίζονται οι πειραματικές τιμές της αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης έναντι της παροχής μάζας του ψυκτικού για όλα τα πειράματα επανάψυξης που εξετάζονται. Από την ανάγνωση των διαγραμμάτων παρατηρείται πως οι αντίστροφες ταχύτητες επανάψυξης που υπολογίζονται από τα πειραματικά δεδομένα της παρούσης ΔΔ στις ίδιες παροχές μάζας ψυκτικού είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές των πειραματικών εργασιών των Duffey – Porthouse και των Saxena et al. Η τελευταία αυτή παρατήρηση φαίνεται να οφείλεται στη μεγαλύτερη

διάσταση του καναλιού δοκιμών και στο γεγονός ότι απαιτείται περισσότερος χρόνος για τον πλήρη πλημμυρισμό του. Αυτό ουσιαστικά εξηγείται ως εξής: για να προχωρήσει το υγρό μέτωπο επί της υπερθερμανθείσας ράβδου, πρέπει να έχει προηγηθεί πλημμυρισμός του καναλιού μέχρι το σημείο ξηράνσεως (T_{MFB}), σύμφωνα και με το Σχήμα 2-11. Καθώς το κανάλι δοκιμών της πειραματικής εγκατάστασης του ΕΠΤ έχει μεγαλύτερη υδραυλική διάμετρο, για την ίδια παροχή ψυκτικού, χρειάζεται να περάσει μεγαλύτερο χρονικό διάστημα έως ότου η στάθμη του ψυκτικού ανέλθει στο σημείο ξηράνσεως.



Σχήμα 5-12 Διάγραμμα πειραματικών τιμών ταχύτητας επανάψυξης έναντι παροχής μάζας ψυκτικού σε αρχικές θερμοκρασίες τοιχώματος ράβδου 400°C



Σχήμα 5-13 Διάγραμμα πειραματικών τιμών ταχύτητας επανάψυξης έναντι παροχής μάζας ψυκτικού σε αρχικές θερμοκρασίες τοιχώματος ράβδου 500°C

Σε συνδυασμό με τα παραπάνω συμπεράσματα που αφορούν την ταχύτητα επανάψυξης, έχει προταθεί από τους Duffey – Porthouse ότι όπως η ταχύτητα επανάψυξης, έτσι και οι μηχανισμοί επανάψυξης εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αλλά και τις θερμικές ιδιότητες του υλικού της υπερθερμανθείσας ράβδου [39]. Στα πλαίσια αυτής της παρατήρησης εκφράστηκαν οι παράμετροι της ταχύτητας επανάψυξης και της παροχής μάζας με τους αδιάστατους αριθμούς Peclet και Biot αντίστοιχα.

Συγκεκριμένα, ο αριθμός Peclet που εκφράζει το λόγο της θερμότητας που μεταφέρεται στο ρευστό με συναγωγή ως προς τη θερμότητα που μεταφέρεται στο ρευστό με τον μηχανισμό της αγωγής, ορίζεται ως η αδιάστατη ταχύτητα επανάψυξης και υπολογίζεται από την σχέση 2-5.

Ο αριθμός Biot εκφράζει το λόγο της θερμικής αντίστασης αγωγής μέσα στο σώμα προς τη θερμική αντίσταση συναγωγής. Εξαρτάται από τις θερμικές ιδιότητες του υλικού της επιφάνειας και είναι ανάλογος με τον συντελεστή συναγωγής και δίνεται από τη σχέση 2-1.

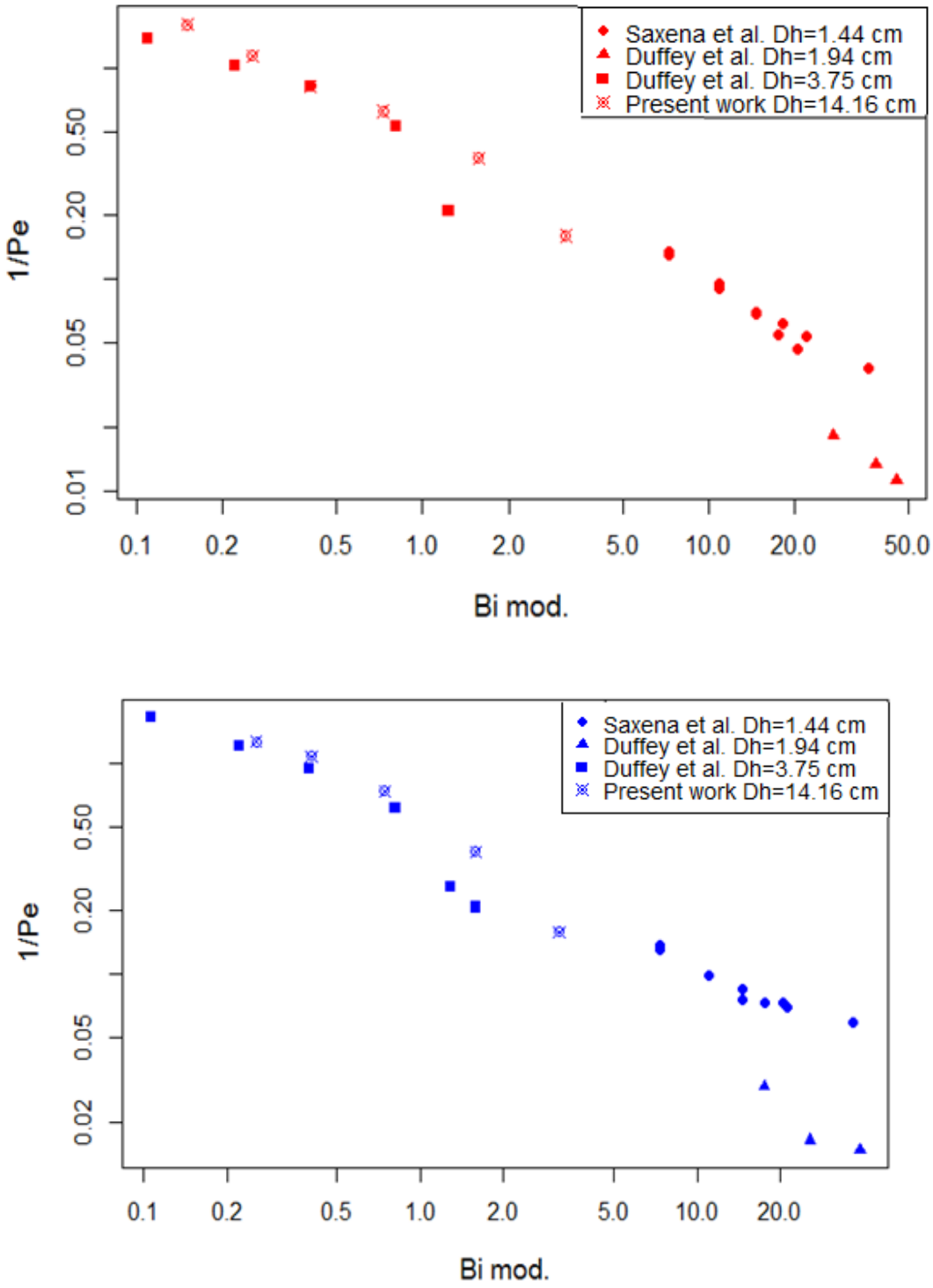
Ωστόσο λόγω της δυσκολίας προσδιορισμού του συντελεστή συναγωγής σε συνθήκες επανάψυξης εξαιτίας των πολύπλοκων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα, προτάθηκε από τους Duffey – Porthouse η επόμενη συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή συναγωγής και της παροχής μάζας ψυκτικού ανά μονάδα επιφανείας της ράβδου:

$$h = \frac{G}{2\pi r} \qquad \textbf{5-3}$$

Έτσι από τις σχέσεις 2-1 και 5-3 προκύπτει ο επόμενος τροποποιημένος αριθμός Biot:

$$Bi_{mod} = \frac{G}{2\pi r}\frac{\varepsilon}{k} \qquad \textbf{5-4}$$

Ακολουθώντας τη διαδικασία της επεξεργασίας των Duffey – Porthouse μπορούμε να απεικονίσουμε τις αδιάστατες τιμές σε λογαριθμικά διαγράμματα για σταθερή αρχική θερμοκρασία τοιχώματος (Σχήμα 5-14).



Σχήμα 5-14 Λογαριθμικά διαδράμματα πειραματικών αδιάστατων τιμών αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης έναντι τροποποιημένου αριθμού Biot σε σταθερή αρχική θερμοκρασία τοιχώματος (πάνω: 400°C, κάτω: 500°C)

Με εφαρμογή ανάλυσης παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προκύπτουν οι συσχετίσεις 5-5 και 5-6:

T_w=400°C $$\log\left(\frac{1}{Pe}\right) = -0.909 - 0.732 \log(Bi_{mod}) \quad \textbf{5-5}$$

T_w=500°C $$\log\left(\frac{1}{Pe}\right) = -0.801 - 0.724 \log(Bi_{mod}) \quad \textbf{5-6}$$

με R^2 ίσο με 0.946 και 0.9184 αντίστοιχα.

Οι τελευταίες συσχετίσεις μετά τον μετασχηματισμό γίνονται:

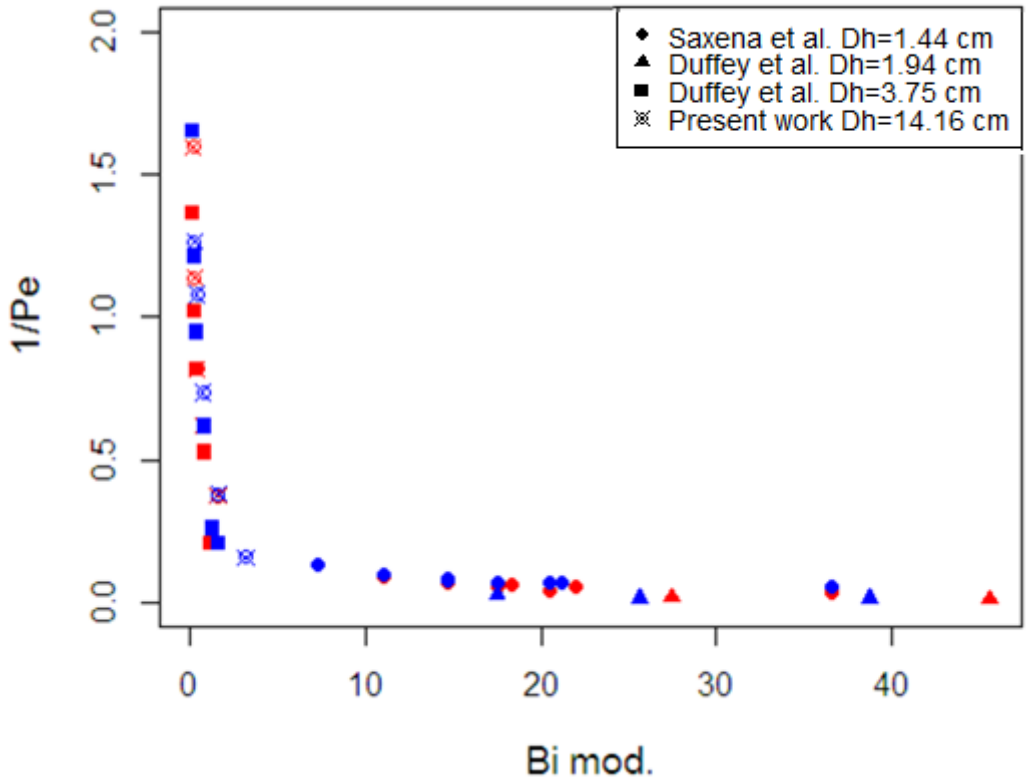
T_w=400°C $$Pe = 10^{0.909} Bi_{mod}^{0.732} \quad \textbf{5-7}$$

T_w=500°C $$Pe = 10^{0.801} Bi_{mod}^{0.724} \quad \textbf{5-8}$$

Ανεξάρτητα με τη διερευνητική τεχνική των προαναφερθέντων ερευνητών, στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ απεικονίσαμε όλες τις πειραματικές αδιάστατες τιμές σε ένα κανονικό γράφημα, αντί για λογαριθμικό (Σχήμα 5-15). Από το διάγραμμα αυτό παρατηρούμε ότι μπορεί να εφαρμοστεί μια πολύ καλή εκθετική προσαρμογή μεταξύ του αντίστροφου αριθμού Peclet και του τροποποιημένου αριθμού Biot η οποία φαίνεται να είναι ανεξάρτητη της αρχικής θερμοκρασίας του τοιχώματος:

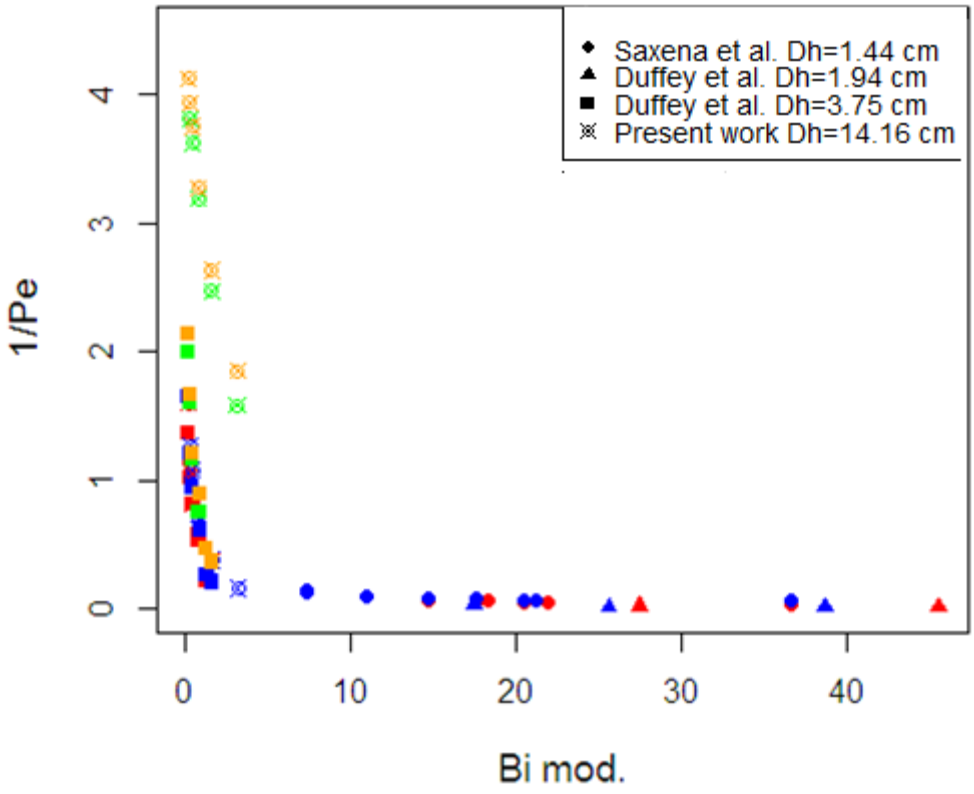
$$^1/_{Pe} = 0.5120 - 1.3174 * Bi_{mod} \quad \textbf{5-9}$$

με RSS (Residual Sum of Squares: Άθροισμα Τετραγώνων Υπολοίπων) ίσο με 0.5065 ενώ το υπολογιζόμενο R^2 είναι ίσο με 0.9528.



Σχήμα 5-15 Διάγραμμα αδιάστατων τιμών ταχύτητας έναντι τροποποιημένου αριθμού Biot. Με κόκκινο απεικονίζονται οι παρατηρήσεις σε αρχική θερμοκρασία τοιχώματος 400°C και με μπλε σε θερμοκρασία 500°C

Επειδή από την τελευταία ανάλυση προκύπτει ότι η αδιάστατη ταχύτητα επανάψυξης όπως αυτή ορίζεται, δεν εξαρτάται από την αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος της ράβδου, εισάγουμε στη διερεύνησή μας τις μετρήσεις των πειραμάτων επανάψυξης των Duffey – Porthouse που διενεργήθηκαν σε αρχικές θερμοκρασίες επιφανείας 700°C και 800°C ώστε να διαπιστώσουμε για ποιες πειραματικές συνθήκες και σε ποια θερμοκρασιακά εύρη ισχύει η παραπάνω παρατήρηση. Έτσι προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 5-16 Διάγραμμα αδιάστατων τιμών ταχύτητας έναντι τροποποιημένου αριθμού Biot. Με κόκκινο απεικονίζονται οι παρατηρήσεις σε αρχική θερμοκρασία τοιχώματος 400°C, με μπλε σε θερμοκρασία 500°C, με πράσινο σε θερμοκρασία 700°C και με πορτοκαλί σε θερμοκρασία 800°C

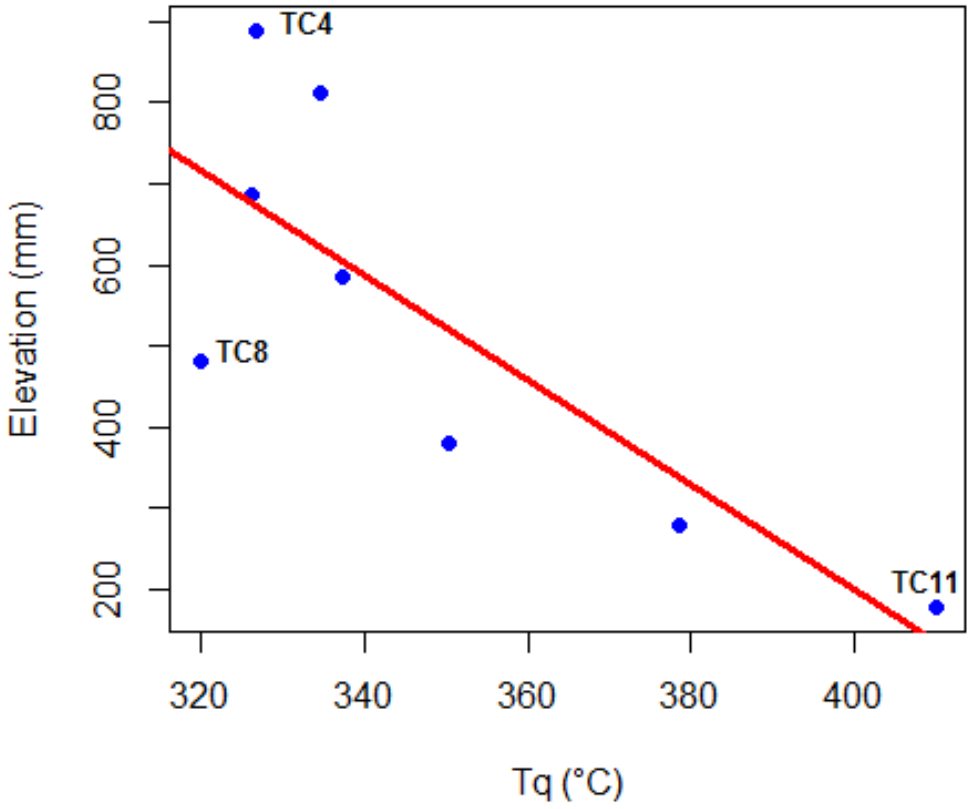
Παρατηρώντας το διάγραμμα στο Σχήμα 5-16 διαπιστώνεται πως τα μόνα πειραματικά σημεία που αποκλίνουν περισσότερο από την εκθετική κατανομή είναι αυτά που εξήχθησαν από τα πειράματα που έγιναν στο κανάλι δοκιμών με υδραυλική διάμετρο 3.75 cm και αρχικές θερμοκρασίες ράβδου 700°C και 800°C.

Από τα παραπάνω οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως αν και σαν απόλυτες τιμές οι πειραματικές ταχύτητες επανάψυξης της παρούσας ΔΔ είναι συγκριτικά μικρότερες από τις υπόλοιπες πειραματικές τιμές που έχουν παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία, εντούτοις είναι απόλυτα συγκρίσιμες σε αδιάστατη βάση. Ωστόσο, η παρατήρηση ότι η αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τον μηχανισμό επανάψυξης στις περιπτώσεις επανάψυξης με τη διαδικασία του πλημμυρισμού, χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

5.3 Μελέτη της θερμοκρασίας επανάψυξης

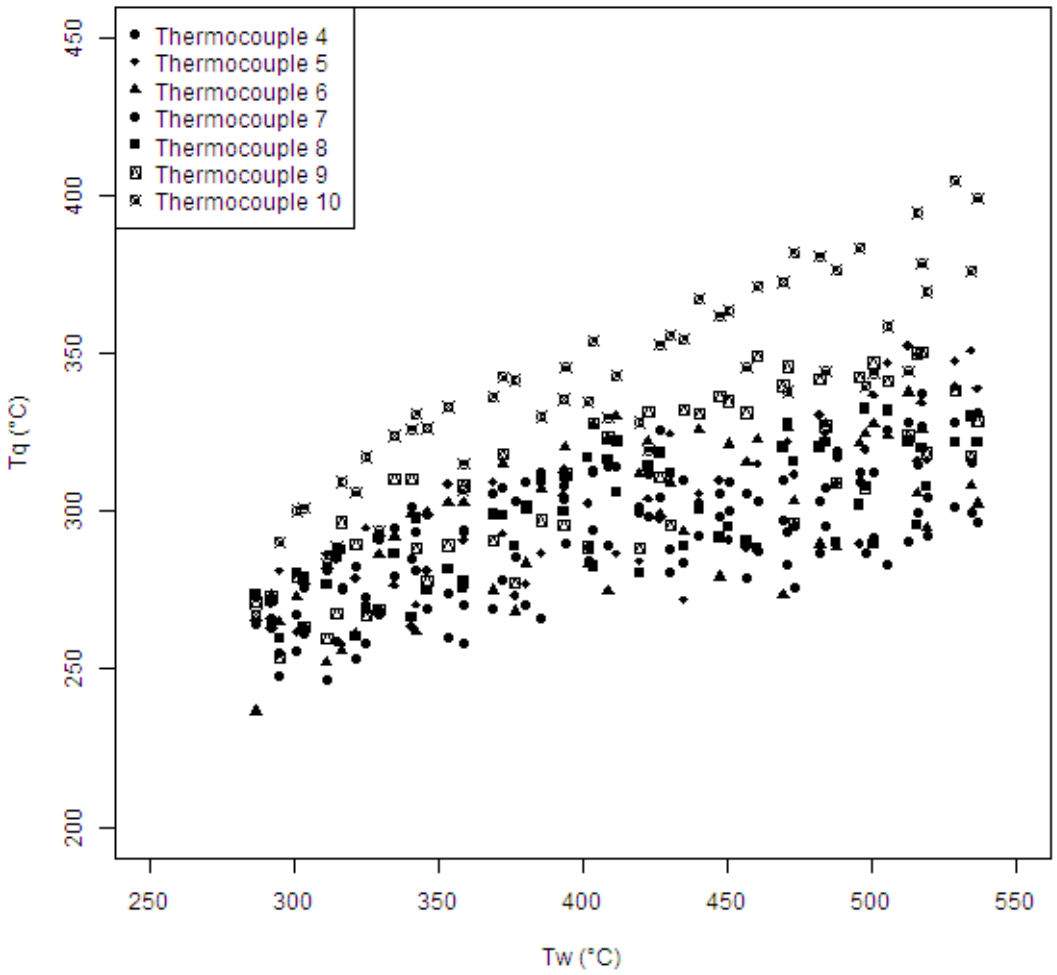
Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της παρούσης ΔΔ είναι η μελέτη της θερμοκρασίας επανάψυξης, όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 2.2. Συγκεκριμένα, διερευνάται ο βαθμός επίδρασης της αρχικής θερμοκρασίας της υπέρθερμης επιφάνειας, της παροχής μάζας του ψυκτικού και του βαθμού υπόψυξής του στη θερμοκρασία επανάψυξης.

Στο διάγραμμα στο Σχήμα 5-17 απεικονίζεται η θερμοκρασία επανάψυξης των θερμοστοιχείων TC11 έως TC4 σε σχέση με την απόστασή τους από το θερμοστοιχείο TC12 (Σχήμα 3-2) κατά τη διάρκεια ενός πειράματος επανάψυξης εκ των κάτω (βαθμοί υπόψυξης ψυκτικού 25°C, παροχή ψυκτικού 0.042 $kg \cdot s^{-1}$, αρχική θερμοκρασία τοιχώματος ράβδου 530°C). Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η θερμοκρασία επανάψυξης δεν είναι ίδια για όλα τα θερμοστοιχεία αλλά κυμαίνεται στο θερμοκρασιακό εύρος από 320°C έως 410°C με τα θερμοστοιχεία που βρίσκονται πιο κοντά στην είσοδο του ψυκτικού να επαναψύχονται στις υψηλότερες θερμοκρασίες ενώ τα πιο απομακρυσμένα θερμοστοιχεία επαναψύχονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Η διαφοροποίηση των τιμών της θερμοκρασίας επανάψυξης σε συνάρτηση με την αρχική θερμοκρασία της επιφανείας παρατηρήθηκε και από άλλους ερευνητές [29, 100]. Το φαινόμενο αυτό, από φυσικής πλευράς, έχει την ακόλουθη εξήγηση [101]: λόγω της μεγαλύτερης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του ψυκτικού υγρού και της θερμοκρασίας της επιφάνειας της ράβδου που αντιστοιχεί στα θερμοστοιχεία που βρίσκονται πιο κοντά στην είσοδο του ψυκτικού στο τμήμα δοκιμών σε σχέση με τη διαφορά των θερμοκρασιών με τα πιο απομακρυσμένα τμήματά της, το εύρος της περιοχής του μεταβατικού βρασμού που αντιστοιχεί σε κάθε θερμοκρασιακό σταθμό αυξάνει ενώ ταυτόχρονα μετακινείται και σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Παράλληλα, ενισχύεται και ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στην εκάστοτε περιοχή με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται επανάψυξη σε όλο και μεγαλύτερες θερμοκρασίες.



Σχήμα 5-17 Θερμοκρασία επανάψυξης των θερμοστοιχείων TC11 έως TC4 έναντι της απόστασής τους από το θερμοστοιχείο TC12 (πείραμα No 01101044.14)

Το διάγραμμα στο Σχήμα 5-18 απεικονίζει τη θερμοκρασία επανάψυξης των θερμοστοιχείων TC4 έως TC11 έναντι των αρχικών θερμοκρασιών της ράβδου για τα πειράματα μίας πειραματικής σειράς με βαθμούς υπόψυξης ψυκτικού 25°C και παροχή ψυκτικού 0.033 $kg \cdot s^{-1}$. Από το διάγραμμα αυτό συμπεραίνεται πως η θερμοκρασία επανάψυξης του κάθε θερμοστοιχείου ξεχωριστά επηρεάζεται θετικά από την αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος της ράβδου. Επίσης, για τη συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων η μέγιστη θερμοκρασία υγρού μετώπου εκτιμήθηκε ίση με 404°C στη θέση του θερμοστοιχείου TC11 όταν η αρχική θερμοκρασία της ράβδου ρυθμίστηκε στους 540°C. Ακόμα είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία επανάψυξης είναι υψηλότερη κοντά στην είσοδο του ψυκτικού, δηλαδή στο θερμοστοιχείο TC11, και μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από αυτήν.

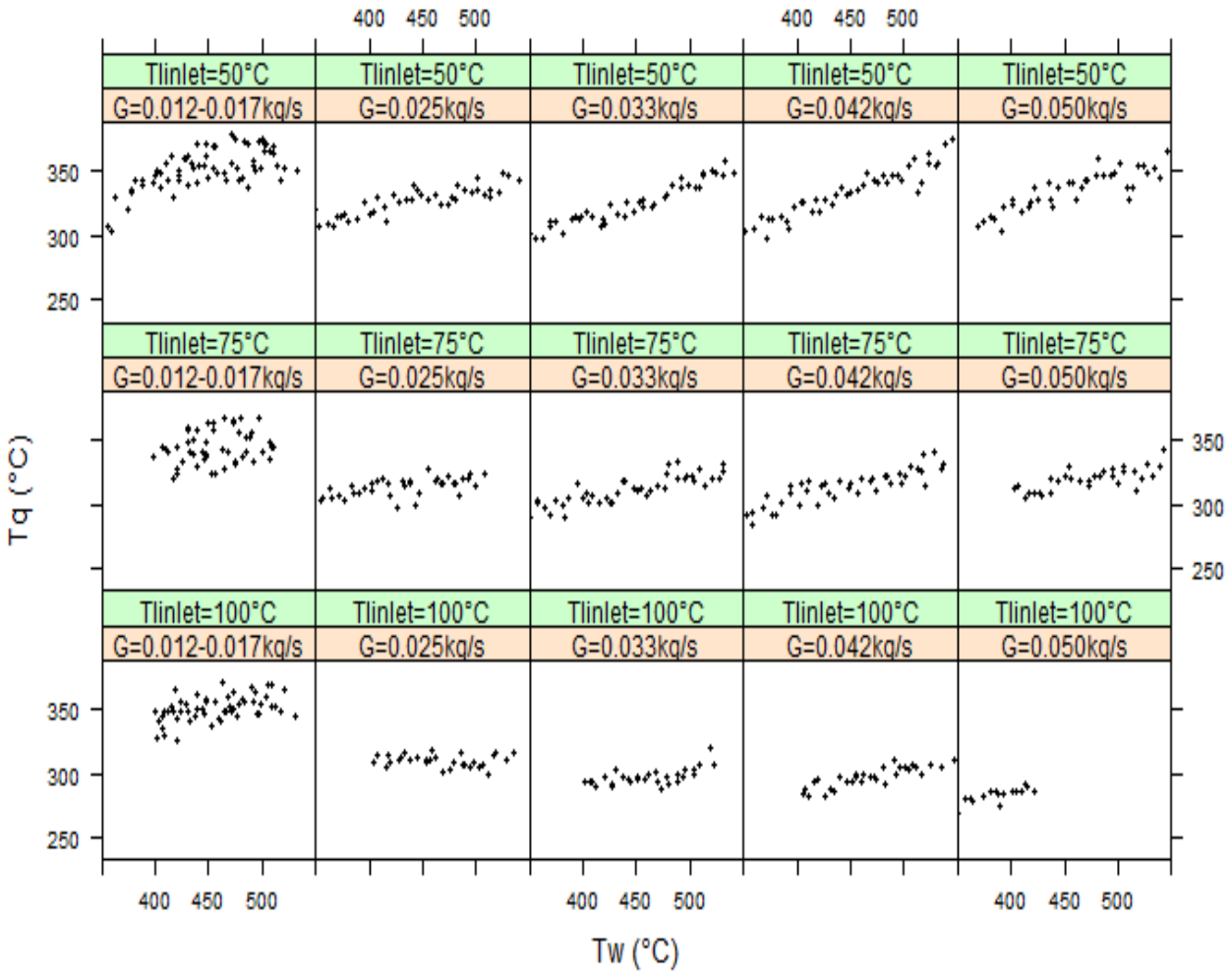


Σχήμα 5-18 Θερμοκρασία επανάψυξης των θερμοστοιχείων TC10 έως TC4 έναντι της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου (πειραματικές συνθήκες: βαθμοί υπόψυξης ψυκτικού 25°C, παροχή ψυκτικού 0.042 $kg \cdot s^{-1}$)

Η μέγιστη θερμοκρασία επανάψυξης που παρατηρήθηκε στο σύνολο των πειραμάτων επανάψυξης που διενεργήθηκαν ήταν οι 452.6°C και μετρήθηκε στο θερμοστοιχείο TC11 κατά το ατμοσφαιρικό πείραμα επανάψυξης που πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες κορεσμού, παροχή μάζας ψυκτικού 0.012 kg/s και αρχική θερμοκρασίας τοιχώματος 550°C (13101054.14). Η ελάχιστη θερμοκρασία επανάψυξης που μετρήθηκε στο εν λόγω πείραμα ήταν ίση με 357.9°C και αφορούσε το θερμοστοιχείο TC4. Το εύρος των θερμοκρασιών επανάψυξης εμπίπτει μέσα στο αναμενόμενο θερμοκρασιακό εύρος που αναφέρεται στο σύνολο της βιβλιογραφίας (από 320°C έως 550°C) [29, 98].

Για καλύτερη εποπτεία του βαθμού επίδρασης της κάθε πειραματικής συνθήκης στη θερμοκρασία επανάψυξης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-19 όλες οι πειραματικές τιμές της μέσης θερμοκρασίας επανάψυξης της ράβδου έναντι της αρχικής θερμοκρασίας επιφανείας (715 πειραματικές τιμές). Η μέση θερμοκρασία επανάψυξης της ράβδου προκύπτει ως η μέση τιμή των θερμοκρασιών επανάψυξης των θερμοστοιχείων TC4 έως TC10[6]. Τα διαγράμματα ταξινομούνται σε τρεις σειρές ανάλογα με τη θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού (πράσινος τίτλος διαγραμμάτων) και σε πέντε στήλες ανάλογα με την παροχή του ψυκτικού (πορτοκαλί τίτλος διαγραμμάτων). Οι θερμοκρασίες εισόδου του ψυκτικού είναι 50°C, 75°C και 100°C ενώ το εύρος των τιμών της παροχής του ψυκτικού στην είσοδο του Τμήματος Δοκιμών είναι 0.012-0.050 $kg \cdot s^{-1}$.

[6] Η μέση τυπική απόκλιση των μέσων τιμών θερμοκρασίας επανάψυξης υπολογίστηκε ίση με 27.19 °C.



Σχήμα 5-19 Επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου, της παροχής μάζας ψυκτικού και της θερμοκρασίας εισόδου του ψυκτικού στη θερμοκρασία επανάψυξης

Μια γενική παρατήρηση που προκύπτει από το Σχήμα 5-19 είναι το εύρος των τιμών της μέσης θερμοκρασίας επανάψυξης όπου κυμαίνεται μεταξύ 280°C και 380°C με τις μέγιστες να παρατηρούνται στα πειράματα επανάψυξης με υψηλή αρχική θερμοκρασία επιφανείας και χαμηλή θερμοκρασία εισόδου ψυκτικού. Ακόμα είναι εμφανές ότι όταν αυξάνεται ο βαθμός υπόψυξης του ψυκτικού μέσου αυξάνεται η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας επανάψυξης ενώ αυξάνει επίσης και το εύρος μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας. Η τελευταία αυτή διάκριση φαίνεται να οφείλεται στο μειωμένο ρυθμό ανάπτυξης φυσαλίδων στην περιοχή του εστιακού και του μεταβατικού βρασμού στην περίπτωση επανάψυξης με χρήση υπόψυκτου υγρού συγκριτικά με την επανάψυξη με κορεσμένο υγρό, καθώς στην πρώτη περίπτωση οι φυσαλίδες καταρρέουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες [101]. Το γεγονός

αυτό εξηγεί την επίδραση της αύξησης του βαθμού υπόψυξης στην αύξηση της θερμοκρασίας έναρξης του μεταβατικού βρασμού, δηλαδή στη θερμοκρασία επανάψυξης.

Τέλος, διενεργώντας ανάλυση αναδρομής μεταξύ της θερμοκρασίας επανάψυξης και της αρχικής θερμοκρασίας της υπέρθερμης επιφάνειας σε κάθε μία από τις 15 πειραματικές σειρές που φαίνονται στο Σχήμα 5-19 προκύπτουν μερικά αξιόλογα αποτελέσματα. Καταρχάς, μετά την ανάλυση παρατηρείται χαμηλή γραμμική συσχέτιση της θερμοκρασίας επανάψυξης από την αρχική θερμοκρασία της ράβδου για τα πειράματα που διενεργήθηκαν σε συνθήκες κορεσμού και παροχές ψυκτικού 0.012-0.017 $kg \cdot s^{-1}$ (r=0.4764) ενώ δεν παρατηρείται καμία γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο θερμοκρασιών για τα πειράματα κορεσμού και παροχής ψυκτικού 0.025 $kg \cdot s^{-1}$ καθώς και για τα πειράματα που διενεργήθηκαν σε θερμοκρασία εισόδου ψυκτικού 75°C και παροχές ψυκτικού 0.012-0.017 $kg \cdot s^{-1}$ (r=0.1030 και r=0.2379 αντίστοιχα). Από την άλλη παρατηρείται ισχυρή γραμμική εξάρτηση μεταξύ της θερμοκρασίας επανάψυξης και της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου στις πειραματικές σειρές που διενεργήθηκαν σε υψηλότερες παροχές μάζας ψυκτικού με ισχυρότερη γραμμική εξάρτηση να παρατηρείται για τα πειράματα υπόψυξης 50°C και παροχής εισόδου του ψυκτικού 0.033 $kg \cdot s^{-1}$ (r=0.9524). Ο χαμηλός ρυθμός πλημμυρισμού στα πειράματα της πρώτης περίπτωσης και η υψηλή ένταση του φαινομένου της πρόδρομης ψύξης στα υπόλοιπα πειράματα φαίνεται να αποτελούν την αιτία εμφάνισης αυτών των διαφορών κατά την εκτέλεση της γραμμικής ανάλυσης αναδρομής.

Ο βαθμός επίδρασης κάθε παράγοντα στη θερμοκρασία επανάψυξης μελετάται στην επόμενη παράγραφο με τη μέθοδο της διαστατικής ανάλυσης με σκοπό την πρόταση μιας ημιεμπειρικής σχέσης.

5.3.1 Διαστατική ανάλυση

Η μέθοδος της διαστατικής ανάλυσης απαιτεί την επιλογή των κατάλληλων μεταβλητών και παραγόντων που είναι γνωστό ότι επηρεάζουν τη διαδικασία της επανάψυξης. Ωστόσο, η τελική επιλογή των αδιάστατων ομάδων μεταβλητών μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να μην έχει καμία φυσική σημασία αλλά να εξυπηρετεί

αποκλειστικά και μόνο το συνολικό λογισμό. Στην παρούσα περίπτωση, η μέθοδος που ακολουθήθηκε για τη διαστατική ανάλυση είναι η μέθοδος Buckingham (θεώρημα π), η οποία χρησιμοποιείται κατά κόρον στον τομέα της θερμοϋδραυλικής [102].

Στη συνέχεια αναλύονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν πριν την τελική πρόταση της ημιεμπειρικής σχέσης προσδιορισμού της θερμοκρασίας επανάψυξης:

1. Αναλύεται προσεκτικά το φαινόμενο της επανάψυξης καθώς και η πειραματική διαδικασία όπως διενεργήθη και εντοπίζονται η εξαρτημένη και οι ανεξάρτητες μεταβλητές.

Ως εξαρτημένη μεταβλητή θεωρούμε τη θερμοκρασία επανάψυξης T_q ενώ ως ανεξάρτητες μεταβλητές θεωρούμε τις μεταβλητές που σχετίζονται με τις αρχικές συνθήκες του πειράματος (G, T_s, T_w, T_c) καθώς και αυτές που σχετίζονται με τη ράβδο και τις ιδιότητες του υλικού της (c_p, k, ρ, ε, R). Επειδή όλα τα πειράματά μας διενεργήθηκαν σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, η μεταβλητή που αφορά τη θερμοκρασία κορεσμού του νερού T_s είναι σταθερή. Αυτό διευκολύνει τη διαδικασία καθώς τώρα μπορούμε να μειώσουμε τις τέσσερις μεταβλητές της θερμοκρασίας σε τρεις νέες:

$$T_{qs} = T_q - T_s, \qquad T_{ws} = T_w - T_s, \qquad T_{cs} = T_c - T_s$$

όπου Tq είναι η θερμοκρασία επανάψυξης, Ts η θερμοκρασία κορεσμού του νερού, Tw η θερμοκρασία του τοιχώματος της ράβδου και Tc η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού,

Έτσι, ο συνολικός αριθμός των μεταβλητών είναι ίσος με n=9 και συσχετίζονται μεταξύ τους με την ακόλουθη σχέση:

$$F\left(T_{qs}, T_{ws}, T_{cs}, G, c_p, k, \rho, \varepsilon, R\right) = 0 \qquad \textbf{5-10}$$

2. Εξετάζονται οι διαστάσεις των μεταβλητών ώστε να βρεθεί το πλήθος των θεμελιωδών μεγεθών (Πίνακας 5-3).

Πίνακας 5-3 Ανάλυση διαστάσεων μεταβλητών

Μεταβλητή	**Μονάδες**	**Διαστάσεις**
T_{qs}, θερμοκρασία	K	θ
T_{ws}, θερμοκρασία	K	θ
T_{cs}, θερμοκρασία	K	θ
G, παροχή μάζας	$kg \cdot s^{-1}$	$M\ T^{-1}$
c_p, ειδική θερμοχωρητικότητα	$J/kg \cdot K$	$L^2\ T^{-2}\ \theta^{-1}$
k, θερμική αγωγιμότητα	$W/m \cdot K$	$M\ L\ T^{-3}\ \theta^{-1}$
ρ, πυκνότητα	kg/m^3	$M\ L^{-3}$
ε, πάχος τοιχώματος	m	L
R, ακτίνα ράβδου	m	L

Από την ανάγνωση του παραπάνω πίνακα προκύπτουν m=4 θεμελιώδη μεγέθη (θ,M, L, T).

3. Καθορίζονται m=4 πρωτεύουσες μεταβλητές σύμφωνα με τα κριτήρια του θεωρήματος Buckingham. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι εξής:

$$T_{ws},\ G,\ \varepsilon,\ c_p.$$

4. Διαμορφώνονται n-m=5 ομάδες Π, όπου είναι οι ακόλουθες:

$$\Pi_1 = T_{ws}^{a1} G^{\beta 1} \varepsilon^{\gamma 1} c_p^{\delta 1} k$$
$$\Pi_2 = T_{ws}^{a2} G^{\beta 2} \varepsilon^{\gamma 2} c_p^{\delta 2} \rho$$
$$\Pi_3 = T_{ws}^{a3} G^{\beta 3} \varepsilon^{\gamma 3} c_p^{\delta 3} R$$
$$\Pi_4 = T_{ws}^{a4} G^{\beta 4} \varepsilon^{\gamma 4} c_p^{\delta 4} T_{qs}$$
$$\Pi_5 = T_{ws}^{a5} G^{\beta 5} \varepsilon^{\gamma 5} c_p^{\delta 5} T_{sc}$$

5. Αντικαθιστώντας τα θεμελιώδη μεγέθη σε κάθε παράμετρο των ομάδων Π του βήματος 4 και εξισώνοντας το άθροισμα των εκθετών κάθε μεγέθους με το μηδέν γίνεται η αδιαστατοποίηση των πέντε ομάδων Π. Τελικά, οι ομάδες που προκύπτουν είναι οι εξής:

$$\Pi_1 = \frac{\varepsilon \cdot k}{c_p \cdot G}$$

$$\Pi_2 = \frac{\varepsilon^2 \cdot \rho}{G}\sqrt{T_{ws} \cdot c_p}$$

$$\Pi_3 = \frac{R}{\varepsilon}$$

$$\Pi_4 = \frac{T_{qs}}{T_{ws}}$$

$$\Pi_5 = \frac{T_{cs}}{T_{ws}}$$

και σχηματίζεται η ακόλουθη συνάρτηση:

$$\Phi(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5) = 0 \qquad \textbf{5-11}$$

στην οποία διενεργείται πολλαπλή γραμμική αναδρομή μεταξύ των 715 πειραματικών δεδομένων ελέγχοντας το βαθμό επίδρασης του κάθε όρου στην αδιάστατη ομάδα Π_4, η οποία περιέχει την εξαρτημένη μεταβλητή.

Τέλος, με τη μέθοδο της σταδιακής αναζήτησης του πιο ισχυρού μοντέλου μεταξύ των μεταβλητών καταλήγουμε στην ακόλουθη σχέση:

$$\Pi_4 = 5.105 \cdot 10^{-1} + 1.782 \cdot 10^{2} \cdot \Pi_1 - 4.756 \cdot 10^{-4} \cdot \Pi_2 \\ -6.934 \cdot 10^{-1} \cdot \Pi_5 \qquad \textbf{5-12}$$

Παρατηρούμε ότι ο αδιάστατος παράγοντας Π_3 δεν αναφέρεται στη σχέση αφού δεν επηρεάζει καθόλου τη θερμοκρασία επανάψυξης και τον παράγοντα Π_4 καθώς είναι λόγος δύο σταθερών τιμών της πειραματικής μας διαδικασίας.

Ο τροποποιημένος συντελεστής πολλαπλής συσχέτισης της σχέσης 5-12 υπολογίζεται ίσος με 0.8658, γεγονός που υποδεικνύει την πολύ καλή συσχέτιση των τεσσάρων αδιάστατων ομάδων. Στη συνέχεια, επιλύοντας ως προς τη θερμοκρασία επανάψυξης, προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

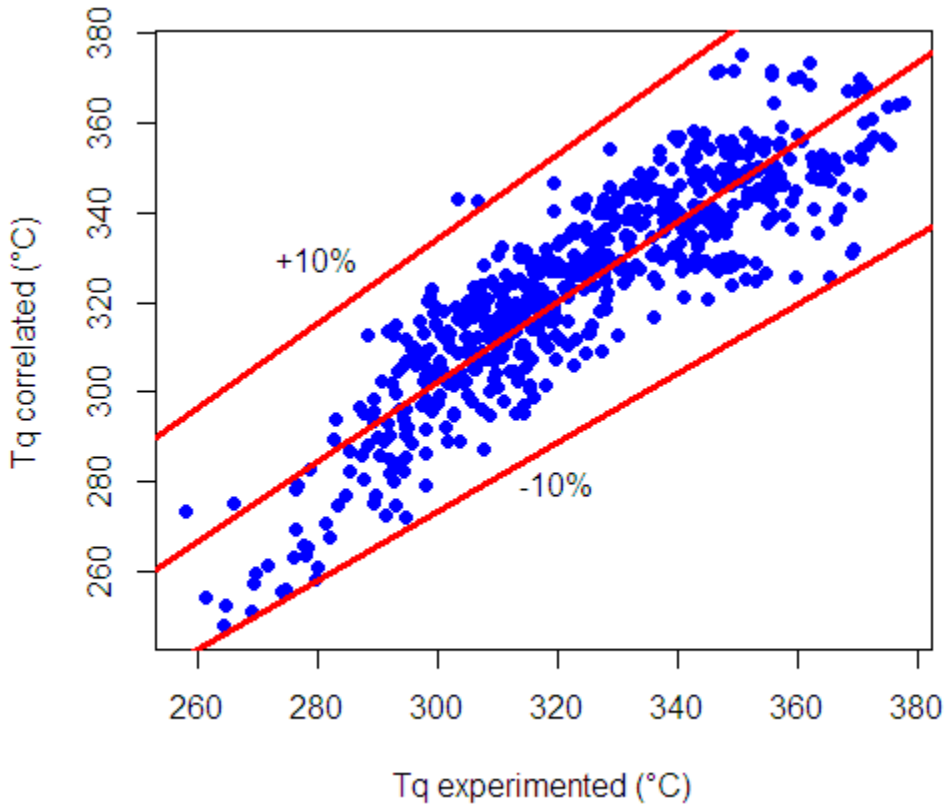
$$T_q = (T_w - T_s) \cdot (5.105 \cdot 10^{-1} + 1.782 \cdot 10^{2} \cdot \left(\frac{\varepsilon \cdot k}{c_p \cdot G}\right) - 4.756 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{\varepsilon^2 \cdot \rho}{G}\sqrt{T_{ws} \cdot c_p}\right) - 6.934 \cdot 10^{-1} \cdot \left(\frac{T_{cs}}{T_{ws}}\right) + T_s \quad \textbf{5-13}$$

με συντελεστής γραμμικής προσαρμογής ίσο με 0.9304 και RMSE ίσο με 0.035.

Από την εξέταση της απλής γραμμικής προσαρμογής μεταξύ των πειραματικών τιμών της θερμοκρασίας επανάψυξης και των προβλεπόμενων από τη συσχέτιση 5-13 προκύπτει η επόμενη σχέση:

$$T_{q_correlated} = 47.289 + 0.855 \cdot T_{q_experimented} \quad \textbf{5-14}$$

όπου ο συντελεστής γραμμικής προσαρμογής υπολογίζεται ίσος με 0.8738. Στο Σχήμα 5-20 απεικονίζεται το γράφημα μεταξύ των πειραματικών και των προβλεπόμενων τιμών από το οποίο γίνεται αντιληπτό ότι το σύνολο σχεδόν των προβλεπόμενων τιμών (εκτός ελαχίστων εξαιρετικών περιπτώσεων) εμπίπτει στο ±10% των πειραματικών τιμών.



Σχήμα 5-20 Πειραματική θερμοκρασία επανάψυξης έναντι προβλεπόμενης θερμοκρασίας επανάψυξης

5.3.2 Μελέτη θερμοκρασίας επανάψυξης σε πειράματα επανάψυξης εκ των άνω

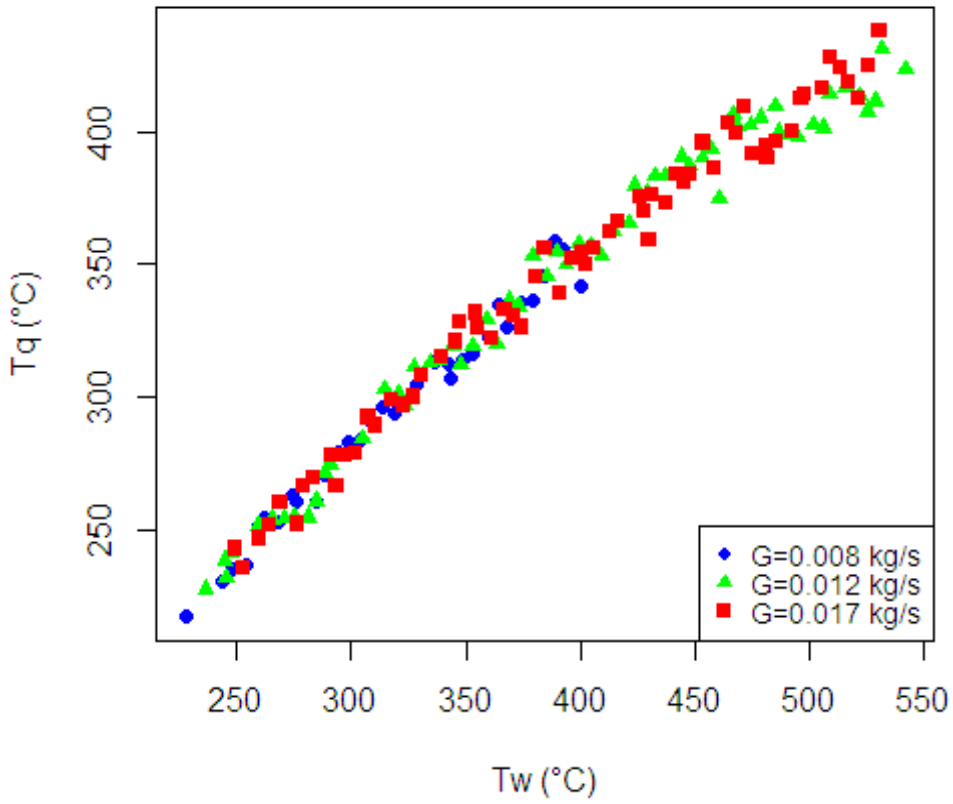
Παράλληλα, μελετάται η θερμοκρασία επανάψυξης όπως αυτή προσδιορίστηκε στα πειράματα επανάψυξης εκ των άνω που έλαβαν χώρα στο παρελθόν στο ΘΥΚ κάτω από ατμοσφαιρικές συνθήκες κορεσμού και παροχές μάζας ψυκτικού 0.008 kg/s 0.012 kg/s και 0.017 kg/s [20][7]. Στο Σχήμα 5-21 παρουσιάζονται τα δεδομένα της μέσης θερμοκρασίας επανάψυξης έναντι της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου όπως προέκυψαν από αυτά τα πειράματα. Σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρείται ότι η θερμοκρασία επανάψυξης δεν επηρεάζεται καθόλου από την παροχή μάζας του ψυκτικού αλλά εξαρτάται σημαντικά από την αρχική θερμοκρασία της επιφανείας. Ο συντελεστής γραμμικής προσαρμογής μεταξύ αυτών των δύο παραμέτρων

[7] Η θερμοκρασία επανάψυξης των πειραμάτων επανάψυξης εκ των άνω υπολογίστηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία της παρούσης ΔΔ, με τη βοήθεια των προγραμμάτων του Κεφαλαίου §4 έπειτα από κατάλληλη τροποποίηση.

προσδιορίζεται ίσος με 0.9885 ενώ η εμπειρική συσχέτιση που προκύπτει μετά την εφαρμογή της μεθόδου γραμμικής παλινδρόμησης είναι η:

$$T_q = 81.585 + 0.667 \cdot T_w \quad \textbf{5-15}$$

Τέλος, από τα πειραματικά δεδομένα της επανάψυξης με ψεκασμό εκ των άνω προκύπτει ότι η μέγιστη μέση θερμοκρασία επανάψυξης είναι 437.9°C, σχεδόν 50°C υψηλότερη από αυτή που μετρήθηκε στα πειράματα επανάψυξης εκ των κάτω. Η παραπάνω διαπίστωση ίσως οφείλεται στη χαμηλή ένταση του φαινομένου της πρόδρομης ψύξης στα εν λόγω πειράματα.



Σχήμα 5-21 Επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου και της παροχής μάζας ψυκτικού στη θερμοκρασία επανάψυξης στα πειράματα επανάψυξης εκ των άνω **[20]**

Περαιτέρω διερεύνηση της θερμοκρασίας επανάψυξης των πειραμάτων επανάψυξης εκ των άνω ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσης ΔΔ ωστόσο αποτελεί μια πολύ καλή πρόταση για μελλοντική μελέτη.

6. ΚΩΔΙΚΑΣ RELAP5/MOD 3.3 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΠΑΝΑΨΥΞΗΣ

Ο κώδικας RELAP5/MOD3 αποτελεί την τρίτη έκδοση του αρχικού κώδικα RELAP5 (RELAP: Reactor Excursion and Leak Analysis Program) ο οποίος αναπτύχθηκε το 1979 από το Idaho National Laboratory (INL) [103]. Έκτοτε διανέμεται παγκοσμίως μέσω του Γραφείου Τεχνολογίας και Ανάπτυξης του INL σε πανεπιστήμια, κυβερνήσεις και εταιρίες [104]. Αρχικά σχεδιάστηκε για τη θερμοϋδραυλική ανάλυση των υδρόψυκτων πυρηνικών αντιδραστήρων κατά τη διάρκεια ατυχήματος απώλειας ψυκτικού μέσου. Στη συνέχεια όμως εξελίχθηκε και πλέον είναι σε θέση να αναλύσει όλα τα μεταβατικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε αντιδραστήρες BWR και PWR [105, 106, 107, 108, 109].

Ο κώδικας RELAP5 αποτελεί ένα εργαλείο προσομοίωσης το οποίο δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να μοντελοποιήσει τη συμπεριφορά του πυρήνα και του ψυκτικού συστήματος ενός αντιδραστήρα τόσο κατά την κανονική λειτουργία όσο και κατά τη διάρκεια πιθανού ατυχήματος [110]. Οι δυνατότητες που προσφέρει ο κώδικας οφείλονται:

- στα εγγενή συστήματα εξισώσεων που περιλαμβάνει ο κώδικας και τα οποία διερευνούν όλα τα μεταβατικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε υδρόψυκτους πυρηνικούς αντιδραστήρες
- στα συστήματα εξισώσεων που επιτρέπουν τη σύζευξη φαινομένων θερμοϋδραυλικής και νετρονικής και
- στην εφικτότητα προσομοίωσης οποιουδήποτε τμήματος των συστημάτων ελέγχου, των υδροδυναμικών συστημάτων και των συστημάτων θερμότητας ενός πυρηνικού αντιδραστήρα (ατμογεννήτριες, συμπυκνωτές, δευτερεύον σύστημα ψύξης) [110].

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονιστεί ότι ο κώδικας RELAP5 χρησιμοποιείται για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης των όγκων ελέγχου ενός θερμοϋδραυλικού συστήματος και δεν προσφέρει λεπτομερή προσομοίωση της ροής του εργαζόμενου μέσου εντός των στοιχείων αυτών. Κατ’ επέκταση έχει δυνατότητες μονοδιάστατης ανάλυσης φαινομένων υδροδυναμικής, μεταφοράς θερμότητας ή κινητικής πυρηνικών αντιδραστήρων. Εξαίρεση αποτελεί η ανάλυση φαινομένων διασταυρούμενης ροής (crossflow) στον πυρήνα αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος

καθώς και φαινομένων μεταφοράς θερμότητας κατά την επανάψυξη υπερθερμανθείσων ράβδων πυρηνικού καυσίμου όπου η τελευταία περίπτωση είναι η μοναδική περίπτωση όπου εφαρμόζεται δισδιάστατο μοντέλο μεταφοράς θερμότητας για την περιοχή πλησίον του υγρού μετώπου [111].

Η ικανότητα του κώδικα να προσομοιάζει τα στοιχεία του συστήματος ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ενισχύεται σημαντικά από τη δυνατότητα ενσωμάτωσης και συστημάτων ελέγχου. Τα στοιχεία προσομοίωσης συστημάτων ελέγχου περιγράφουν όργανα μετρήσεων και ελέγχου διαδικασιών οι οποίες περιγράφονται μέσω λογικών, αλγεβρικών, διαφορικών ή ολοκληρωτικών μεταβλητών [111].

Στο πλαίσιο της παρούσας ΔΔ συντάχθηκε για πρώτη φορά κώδικας RELAP5/MOD3.3 ο οποίος προσομοιάζει το κανάλι δοκιμών του ΘΥΚ του ΕΠΤ κατά τη διαδικασία επανάψυξης με πλημμυρισμό. Στο παρόν κεφάλαιο αφενός περιγράφεται το μοντέλο που αναπτύχθηκε και αφετέρου, για λόγους κατανόησης, παρουσιάζονται βασικά στοιχεία και χαρακτηριστικά του κώδικα RELAP5/MOD3.3. Αναλυτικότερη παρουσίαση του κώδικα RELAP5/MOD3.3 ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας ΔΔ και ο αναγνώστης παραπέμπεται στα εγχειρίδια χρήσης του κώδικα [110, 112].

6.1 Αξιολόγηση κώδικα RELAP5

Οι προβλέψεις των Best-Estimate κωδίκων συστήματος, όπως το RELAP5 / MOD3.3, περιέχουν αβεβαιότητες, οι ρίζες των οποίων εμπίπτουν σε τέσσερις κύριες κατηγορίες: αβεβαιότητες κώδικα (εξισώσεις ισοζυγίου, ιδιότητες υλικών κ.λπ.), αβεβαιότητες καθορισμού όγκων ελέγχου (κόμβων), αβεβαιότητες πειραματικών εγκαταστάσεων και αβεβαιότητες χρήστη, με τις τελευταίες να είναι από τις σημαντικότερες. Συνεπώς, οι προβλέψεις της καλύτερης εκτίμησης συμπληρώνονται με την κατάλληλη ανάλυση αβεβαιότητας δίνοντας ένα διάστημα αβεβαιότητας ορισμένης πιθανότητας ενώ η πραγματοποίηση ανάλυσης ευαισθησίας δίνει την δυνατότητα μελέτης της επίδρασης των παραμέτρων εισόδου στις παραμέτρους εξόδου [113, 114, 115, 116]. Στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ, η αξιολόγηση του κώδικα δεν πραγματοποιήθηκε μέσω των προαναφερθείσων τεχνικών αλλά μέσω της σύγκρισης των προβλεπόμενων τιμών του κώδικα με τις πραγματικές πειραματικές

τιμές. Ωστόσο, η αξιολόγηση με μεθόδους ανάλυσης ευαισθησίας προτείνεται να αποτελέσουν το βασικό κορμό μιας μελλοντικής εργασίας του ΕΠΤ.

6.2 Άδεια χρήσης κώδικα RELAP5

Το ΕΠΤ έχει υπογράψει άδεια χρήσης του προγράμματος RELAP5-3D (αρ. Αδείας 12-LA-96) με το INL όπου αποτελεί τον ανάδοχο διαχείρισης και λειτουργίας του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ και την Battelle Energy Alliance (BEA) η οποία έχει συνεισφέρει στην σύνταξη και στην ανάπτυξη του κώδικα. Η άδεια χορηγήθηκε για προσομοίωση συμβατικών και μη-συμβατικών πυρηνικών συστημάτων για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς ενώ δεν επιτρέπει την χρήση του στην προσομοίωση πραγματικών πυρηνικών σταθμών ενέργειας.

6.3 Γενικά στοιχεία σύνταξης κώδικα

Η εισαγωγή δεδομένων στον κώδικα RELAP5 οργανώνεται σε σειρές δεδομένων. Η κάθε σειρά δεδομένων ονομάζεται «κάρτα», ονομασία που έχει απομείνει από την εποχή χρησιμοποίησης των διάτρητων καρτών στον προγραμματισμό. Κάθε κάρτα μπορεί να περιέχει μέχρι και 80 χαρακτήρες, ωστόσο λόγω περιορισμών κάποιων τερματικών και κειμενογράφων (editors) ακολουθείται γενικά η σύμβαση χρησιμοποίησης 72 χαρακτήρων σε κάθε σειρά δεδομένων.

Για την προσομοίωση ενός προβλήματος με τη χρήση του RELAP5 απαιτούνται τουλάχιστον μια κάρτα τίτλου, κάρτες δεδομένων και μια τερματική κάρτα. Η κάρτα τίτλου αναγνωρίζεται με το σύμβολο "=" στο πρώτο πεδίο της. Το περιεχόμενο της κάρτας τίτλου συνίσταται να είναι περιγραφικό του κώδικα και να παρέχει πληροφορίες για την θερμοϋδραυλική εγκατάσταση, τον σκοπό του προγράμματος καθώς επίσης και για το χρονολογικό προσδιορισμό δημιουργίας ή εξέλιξης του κώδικα. Ο κώδικας ολοκληρώνεται όταν αναγνωστεί η τερματική κάρτα η οποία αποτελείται αποκλειστικά από τα σύμβολα "." ή "/". Ο κώδικας είναι σε θέση να αναγνωρίσει τα εισαγόμενα δεδομένα σύμφωνα με τον αριθμό της κάρτας που ορίζεται στο πρώτο πεδίο κάθε σειράς δεδομένων. Για δεδομένο αριθμό κάρτας ο κώδικας δέχεται τις παραμέτρους εισόδου με τη σειρά και την κατάσταση (πχ.

αλφαριθμητική, ακέραιη, πραγματική) που ορίζονται στο εγχειρίδιο του κώδικα. Οι κάρτες μπορεί να εισαχθούν με οποιαδήποτε σειρά ωστόσο για να είναι ο κώδικας καλογραμμένος και εύκολα διαχειρίσιμος, προτείνεται η εισαγωγή καρτών να γίνεται με μια λογική σειρά.

Ακόμη ο προγραμματιστής μπορεί να εισαγάγει προαιρετικά και κάρτες με σχολιασμό του κώδικα για διευκόλυνση του αναγνώστη. Ο κώδικας αναγνωρίζει ως σχόλια τα δεδομένα που βρίσκονται αμέσως μετά τα σύμβολα "*" ή "$". Η εισαγωγή σχολιασμού αν και χρονοβόρα καθίσταται απαραίτητη κατά τη μελλοντική επεξεργασία του κώδικα από οποιονδήποτε χρήστη.

6.3.1 Εντοπισμός σφαλμάτων (debugging)

Κατά τη διαδικασία του debugging του κώδικα όταν εντοπιστεί σε μία κάρτα ένα σφάλμα συντακτικού (πχ. σε αλφαριθμητικό πεδίο εντοπιστεί αριθμητική παράμετρος) τότε εμφανίζεται ένα μήνυμα όπου αναφέρει την κάρτα και τη στήλη που εντοπίστηκε το σφάλμα ενώ στο σημείο του κώδικα όπου παρουσιάζεται το σφάλμα εμφανίζεται το σύμβολο "^".

Σε ένα πρότυπο μήνυμα σφάλματος προηγείται μια αλληλουχία οχτώ αστερίσκων (********) την οποία ακολουθεί το μήνυμα του σφάλματος. Είναι απαραίτητο ο προγραμματιστής να καταλάβει πως ένα μήνυμα σφάλματος μπορεί να το διαδεχτούν πολλά ακόμα μηνύματα σφαλμάτων λόγω της προσπάθειας του κώδικα να επεξεργαστεί εσφαλμένα δεδομένα. Για αυτό το λόγο η καλύτερη τακτική που μπορεί να ακολουθήσει κανείς είναι να διαβάσει, να κατανοήσει και να διορθώσει τα σφάλματα με τη σειρά με την οποία εμφανίζονται στο κείμενο.

6.4 Διαδικασία κατασκευής ενός μοντέλου RELAP5

Η διαδικασία κατασκευής ενός μοντέλου RELAP5 είναι παρόμοια με τη διαδικασία κατασκευής του φυσικού συστήματος το οποίο μοντελοποιείται. Αυτό σημαίνει ότι για την κωδικοποίηση του συστήματος απαιτούνται τα κατάλληλα δομικά στοιχεία (building blocks). Τα building blocks του RELAP5 χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- Θερμοϋδραυλική κατηγορία (thermal-hydraulic group): αποτελείται από τα στοιχεία που προσομοιάζουν και ελέγχουν τη ροή (Πίνακας 6-1).
- Κατηγορία θερμικών στοιχείων (heat structures group): προσομοιάζει τα υλικά και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υλικών και του ρευστού.
- Κατηγορία σημάτων σκανδαλισμού (trips group): προσομοιάζει τα σήματα σκανδαλισμού για την έναρξη λειτουργίας του εξοπλισμού, όπως π.χ. ενεργοποίηση αντλίας, άνοιγμα-κλείσιμο εκτονωτικής βαλβίδας σε συγκεκριμένη πίεση κ.ά..
- Κατηγορία μεταβλητών ελέγχου (control variables group): προσομοιάζει τα συστήματα ελέγχου (Πίνακας 6-2).

Τα βασικά θερμοϋδραυλικά στοιχεία δόμησης ενός μοντέλου προσομοίωσης αποτελούν τα υδροδυναμικά στοιχεία (hydrodynamic components) και τα θερμικά στοιχεία (heat structures).Τα υδροδυναμικά στοιχεία συμβολίζονται με τον κωδικό **CCCXXNN** όπου:

CCC: είναι ο αριθμός του στοιχείου (001-999)

XX: είναι ο τύπος της κάρτας

NN: είναι ο αριθμός της κάρτας εντός ενός τύπου

Τα θερμικά στοιχεία επειδή είναι πάντα αλληλένδετα με τα υδροδυναμικά στοιχεία μέσα στα οποία βρίσκονται συμβολίζονται με τον κωδικό **1CCCGXNN** όπου:

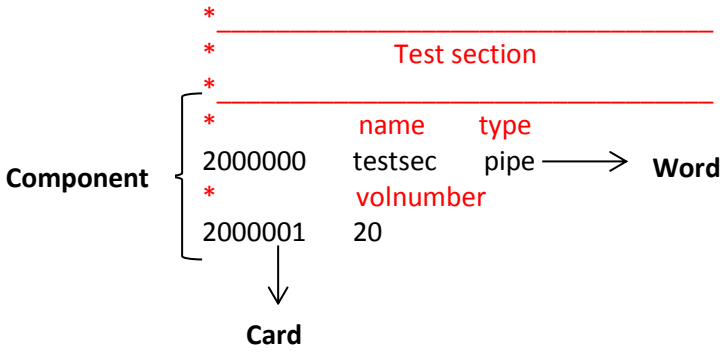
CCC: είναι ο αριθμός του υδροδυναμικού στοιχείου

G: είναι ο τύπος του θερμικού στοιχείου

X: είναι ο τύπος της κάρτας

NN: είναι ο αριθμός της κάρτας εντός ενός τύπου

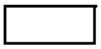
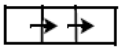
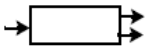
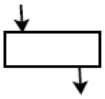
Για την κατασκευή ενός μοντέλου με τον κώδικα RELAP5, είτε σε μόνιμη (steady state) κατάσταση είτε σε μεταβατική (transient) κατάσταση απαραίτητη είναι η εισαγωγή περισσότερων του ενός στοιχείων όπου το κάθε ένα θα περιέχει περισσότερες από μία κάρτες δεδομένων (cards) στις οποίες θα αναγράφονται μία ή περισσότερες λέξεις (words).



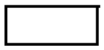
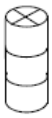
Σχήμα 6-1 Παράδειγμα *στοιχείου*, *κάρτας* και *λέξης* σε ένα τμήμα του κώδικα RELAP5

Η λεπτομερής επεξήγηση της κάθε κατηγορίας καθώς και του κάθε στοιχείου των κατηγοριών ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσης ΔΔ. Ωστόσο, ο ενδιαφερόμενος μπορεί να βρει περισσότερες πληροφορίες για τον κώδικα και τη σύνταξή του στο εγχειρίδιο του RELAP5/MOD3 [112].

Πίνακας 6-1 Σύνοψη των θερμουδραυλικών στοιχείων του RELAP5 **[110]**

Component	Label	Schematic	Primary Uses
Single-volume	SNGLVOL		Represents a portion of stream-tube that does not require a PIPE or BRANCH.
Pipe	PIPE		Represents a pipe in the system. PIPE can have 1 to 99 subvolumes. PIPE with more than 1 subvolume has internal junctions connecting the subvolumes.
Annulus	ANNULUS		Special form of PIPE. Has the same characteristics as PIPE but is used to simulate annular flow passages (e.g., downcomer).
Pressurizer	PRIZER		Special form of PIPE. Has the same characteristics as PIPE but is used to simulate a PWR pressurizer.
Branch	BRANCH		Represents a stream-tube flow juncture that can have as many as 9 junctions defined.
Separator	SEPARATR		Special form of BRANCH that simulates a liquid separator in a steam generator.
Jet Pump	JETMIXER		Special form of BRANCH that simulates a jet pump.
Turbine	TURBINE		Special form of BRANCH that simulates a turbine.
Feedwater Heater	FWHTR		Special form of BRANCH. It has special characteristics for modeling a feedwater heater.
ECC Mixer	ECCMIX		Special form of BRANCH that simulates a stream-tube flow juncture with a potential of large condensation rates.
Single-junction	SNGLJUN		Designed to connect one component to another.

Πίνακας 6-1 Σύνοψη των θερμουδραυλικών στοιχείων του RELAP5 **[110]** (συνέχεια)

Component	Label	Schematic	Primary Uses
Multiple-junction	MTPLJUN		Connects components to other components (up to 99 connections allowed).
Time-dependent Volume	TMDPVOL		Specifies boundary conditions on system model.
Time-dependent Junction	TMDPJUN		Connects one component to another and specifies junction boundary conditions concurrently.
Valve	VALVE		Simulates the actions and the presence of six different valve types: check, trip, inertial, motor, servo, and relief. The valve component is a special junction component.
Pump	PUMP		Simulates the actions and presence of a centrifugal pump.
Compressor	CPRSSR		Simulates the actions and presence of a compressor.
Accumulator	ACCUM		Simulates a PWR accumulator. Model includes not only the vessel, but also the accumulator surge line.
Multi-dimensional	MULTID		Simulates a PWR core and downcomer.

Πίνακας 6-2 Σύνοψη των μεταβλητών ελέγχου του RELAP5 **[110]**

Component	Label	Function
Sum-Difference	SUM	Allows addition or subtraction of variables
Multiplier	MULT	Allows multiplication of variables
Divide	DIV	Allows division of two variables
Differentiating	DIFFRENI or DIFFREND	Performs differentiation of a variable as a function of time
Integrating	INTEGRAL	Performs integration of a variable as a function of time
Functional	FUNCTION	Defines a table lookup functional relationship to a variable
Standard Function	STDFNCTN	Performs absolute value, square root, exponential, natural logarithm, sine, cosine, tangent, arc-tangent, minimum value, or maximum value operation on designated variable
Delay	DELAY	Acts as a time delay factor operating on designated variable
Unit Trip	TRIPUNIT	Becomes true at defined time (when true = defined factor, when false = 0); also can be defined as complementary function
Trip Delay	TRIPDLAY	Becomes true at defined time (when true = trip time x factor, when false = -1)
Integer Power	POWERI	Gives variable raised to integer constant power I quantity times constant

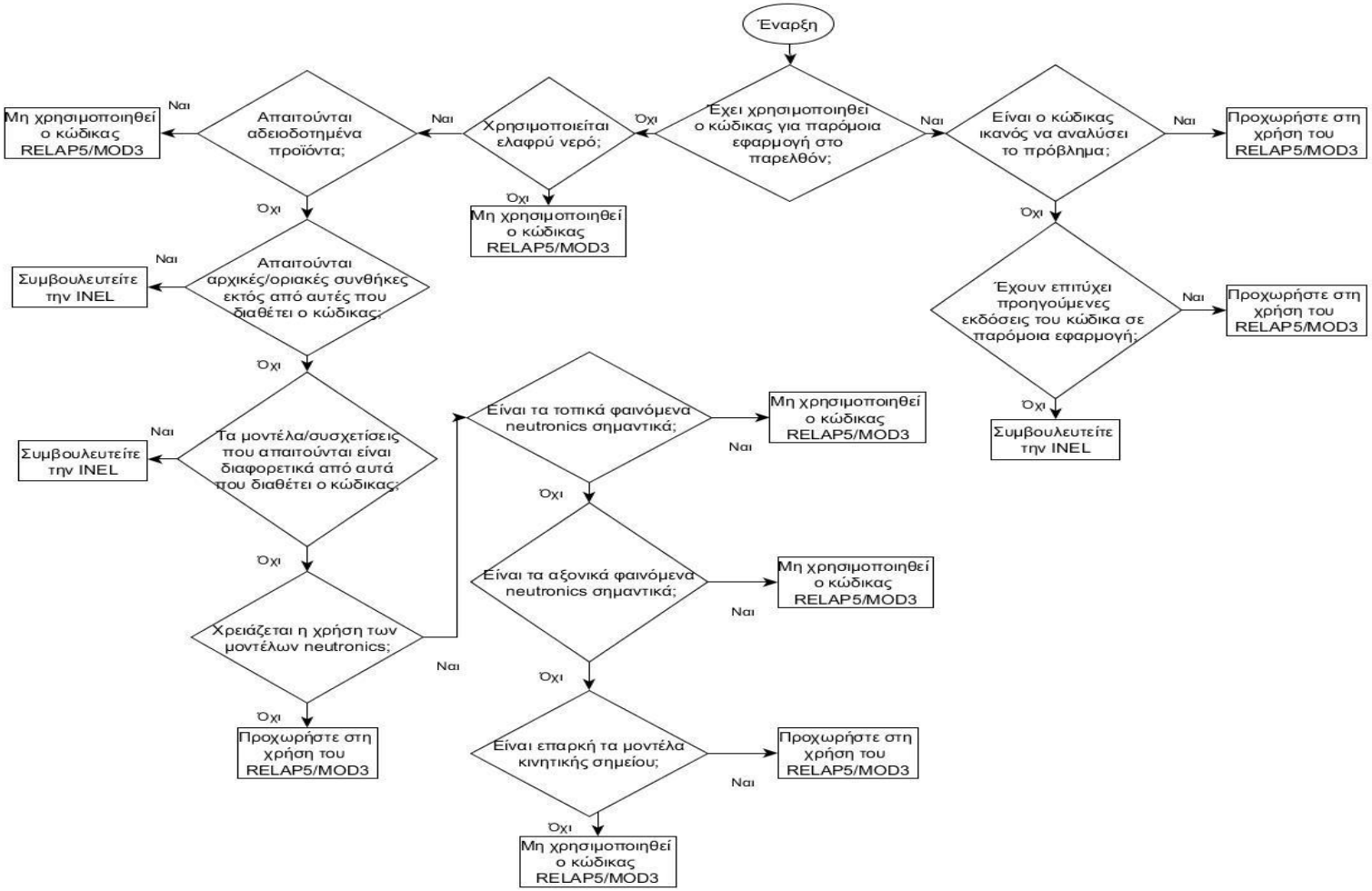
Πίνακας 6-2 Σύνοψη των μεταβλητών ελέγχου του RELAP5 **[110]** (συνέχεια)

Component	Label	Function
Real Power	POWERR	Gives variable raised to real constant power R quantity times constant
Variable Power	POWERX	Gives variable raised to real variable power V quantity times constant
Proportional-Integral	PROP-INT	Defines a proportional-integral controller
Lag	LAG	Defines a lag controller function
Lead Lag	LEAD-LAG	Defines a lead-lag controller function
Constant	None	Defines a constant value to be used with other control variables
Shaft	SHAFT	Defines shaft characteristics that may be used in conjunction with a generator
Pump control	PUMPCTL	Defines a pump controller (used principally during steady-state portion of analysis)
Steam control	STEAMCTL	Defines a steam flow controller (used principally during steady-state portion of analysis)
Feed control	FEEDCTL	Defines a feedwater flow controller (used principally during steady-state portion of analysis)

Στις επόμενες παραγράφους του κεφαλαίου παρατίθενται τα στάδια προσομοίωσης της διαδικασίας επανάψυξης εκ των κάτω όπως διενεργήθηκε στο ΘΥΚ στα πλαίσια της ΔΔ.

6.5 Αξιολόγηση χρησιμοποίησης κώδικα

Πριν την εφαρμογή του κώδικα RELAP5 για την προσομοίωση μιας κατάστασης είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί από τον προγραμματιστή αν το πρόβλημα μπορεί να προσδιοριστεί από τον κώδικα και μέχρι ποιο βαθμό. Για παράδειγμα, αν η εφαρμογή που καλείται να προσομοιάσει έχει εκτιμηθεί και στο παρελθόν από τον κώδικα, τότε ο προγραμματιστής μπορεί να προχωρήσει στην ανάλυση της διαδικασίας. Ωστόσο, αν η συγκεκριμένη κατάσταση τίθεται για πρώτη φορά προς ανάλυση, τότε είναι χρήσιμο να ληφθεί υπ' όψιν το παρακάτω λογικό διάγραμμα (Σχήμα 6-2) πριν την εφαρμογή του κώδικα.



Σχήμα 6-2 Λογικό διάγραμμα αξιολόγησης χρησιμοποίησης κώδικα RELAP5/MOD3 **[110]**

6.6 Στάδια ανάλυσης των πειραμάτων επανάψυξης εκ των κάτω

Για την ανάλυση των πειραμάτων επανάψυξης εκ των κάτω όπως αυτά πραγματοποιήθηκαν στο ΘΥΚ του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ, ακολουθήθηκε μια συγκεκριμένη πορεία βημάτων. Η πορεία επίλυσης κατεγράφη σε ένα βιβλίο εργασιών (logbook) στο οποίο επεξηγούνται όλοι οι υπολογισμοί και οι παράμετροι που αναφέρονται στο τελικό κείμενο του κώδικα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στάδια ανάλυσης που ακολουθήθηκαν πριν την συγγραφή του τελικού κώδικα.

Σημαντικό βοήθημα για τη συγγραφή του τελικού κώδικα αποτέλεσε ο κώδικας των Chung et al. του 1996 [117] ο οποίος αφορούσε τα πειράματα επανάψυξης FLECHT.

6.6.1 Συγκέντρωση και οργάνωση των πληροφοριών που ορίζουν την πειραματική εγκατάσταση

Στο στάδιο αυτό συγκεντρώνονται όλες οι πληροφορίες που αφορούν την πειραματική εγκατάσταση και ταξινομούνται στις δύο ακόλουθες κατηγορίες:

- Πληροφορίες για τα υδροδυναμικά συστήματα

  Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν το κανάλι δοκιμών και οι όγκοι ελέγχου στην είσοδο και στην έξοδό του. Οι όγκοι ελέγχου οριοθετούν και τμηματοποιούν το προς προσομοίωση σύστημα ώστε να απομονώνονται και να μοντελοποιούνται μόνο τα σημαντικότερα στοιχεία της θερμοϋδραυλικής εγκατάστασης. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις διαστάσεις του καναλιού καθώς και στις συνθήκες του ψυκτικού μέσου εντός των όγκων ελέγχου.

- Πληροφορίες για τα θερμικά στοιχεία

  Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσεται μόνο η ηλεκτρικά θερμαινόμενη ράβδος που βρίσκεται στο τμήμα δοκιμών. Οι πληροφορίες που ενδιαφέρουν τον προγραμματιστή αφορούν το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένη η ράβδος, οι διαστάσεις της, η τοποθεσία της εντός του καναλιού δοκιμών καθώς και η θερμική ισχύς της ανά μονάδα μήκους.

6.6.2 Καθορισμός, τμηματοποίηση (nodalization) και οριοθέτηση συστήματος προσομοίωσης

Ο καθορισμός, η τμηματοποίηση και η οριοθέτηση του συστήματος προσομοίωσης αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στάδιο της ανάλυσης και το στάδιο στο οποίο πραγματοποιούνται όλοι οι υπολογισμοί οι οποίοι αφορούν τον καθορισμό των αρχικών συνθηκών του προβλήματος καθώς και όλων των διαστάσεων των εμπλεκόμενων συστημάτων.

Καταρχάς, σημαντικό κομμάτι αυτού του σταδίου αποτελεί ο καθορισμός και η κωδικοποίηση των θερμικών στοιχείων, των όγκων ελέγχου και των στοιχείων που τους συνδέουν μεταξύ τους (σύνδεσμοι). Οι όγκοι ελέγχου και οι σύνδεσμοι χωρίζονται στους χρονικά εξαρτώμενους (TMDP) και στους μη χρονικά εξαρτώμενους (SNGL). Τα χρονικά εξαρτώμενα στοιχεία, σε αντίθεση με τα μη χρονικά, δίνουν στο χρήστη τη δυνατότητα εισαγωγής των αρχικών συνθηκών του πειράματος όπως είναι η πίεση, η θερμοκρασία και η παροχή μάζας του ψυκτικού. Συνήθως ως χρονικά εξαρτώμενα στοιχεία ορίζονται οι όγκοι ελέγχου και οι σύνδεσμοι πριν το κανάλι δοκιμών. Ως μη χρονικά εξαρτώμενα στοιχεία μπορούν να θεωρηθούν οι όγκοι ελέγχου και οι σύνδεσμοί τους μετά το κανάλι δοκιμών οι οποίοι λειτουργούν κυρίως σαν δεξαμενή αποθήκευσης ψυκτικού μετά τη διεξαγωγή του πειράματος επανάψυξης ενώ η μελέτη οποιονδήποτε φαινομένων σε αυτούς δεν είναι κεντρικής σημασίας για τον ερευνητή.

Σύμφωνα με την ανάλυση της διαδικασίας επανάψυξης και λαμβάνοντας υπόψιν την εγκατάσταση του ΘΥΚ καταλήξαμε στην κωδικοποίηση των ακόλουθων στοιχείων:

i. Η είσοδος του ψυκτικού μέσου στο κανάλι δοκιμών κωδικοποιείται ως **TMDP Inlet Volume: 100**
ii. Ο σύνδεσμος εισόδου του ψυκτικού στο κανάλι δοκιμών ο οποίος κωδικοποιείται ως **TMDP Inlet Junction: 110**
iii. Ο σύνδεσμος εξόδου του ψυκτικού από το κανάλι δοκιμών ο οποίος κωδικοποιείται ως **SNGL Outlet Junction: 120**
iv. Η έξοδος του ψυκτικού μέσου από το κανάλι δοκιμών κωδικοποιείται ως **SNGL Outlet Volume: 130**
v. Το κανάλι δοκιμών που αντιστοιχίζεται στο θερμαινόμενο τμήμα της ράβδου και το οποίο κωδικοποιείται ως **Test Section: 200**

vi. Η θερμαινόμενη ράβδος η οποία κωδικοποιείται ως **Heated Rod: 1200**

Μετά τον καθορισμό των στοιχείων του συστήματος ακολουθεί η τμηματοποίηση του καναλιού δοκιμών το οποίο αποτελεί το στοιχείο του συστήματος στο οποίο εστιάζεται η προσοχή του αναλυτή. Σκοπός αυτής της τμηματοποίησης είναι η λεπτομερέστερη μελέτη της συμπεριφοράς του ψυκτικού μέσου σε καθορισμένες περιοχές αυτού του υδροδυναμικού στοιχείου.

Ο απλούστερος τρόπος υποδιαίρεσης ενός όγκου ελέγχου είναι η διαίρεση όλου του όγκου σε ισομεγέθεις κόμβους (nodes). Όμως το μέγεθος του κάθε κόμβου δεν μπορεί να είναι αυθαίρετο αλλά πρέπει να υπόκειται στους εξής δύο περιορισμούς: πρέπει ο λόγος του μήκους του κόμβου προς την υδραυλική διάμετρό του να είναι μεγαλύτερος ή ίσος της μονάδος και το όριο Courant[8] να είναι μικρότερο ή ίσο με τη μονάδα ανάλογα με την μεθοδολογία επίλυσης που χρησιμοποιείται (implicit solver ή explicit solver). Στην προκειμένη ανάλυση ελέγχεται μόνο ο πρώτος περιορισμός καθώς ο έλεγχος του δεύτερου περιορισμού πραγματοποιείται από τον ίδιο τον κώδικα και σε περίπτωση μη αποδεκτής τιμής, τυπώνει σφάλμα και τερματίζεται απευθείας η εκτέλεσή του.

Κατά την ανάλυση και προς χάριν απλούστευσης της διαδικασίας προσομοίωσης, τμηματοποιήθηκε μόνο το μήκος του καναλιού δοκιμών που αντιστοιχίζεται στο θερμαινόμενο τμήμα της ράβδου (1.016 m) εφόσον σε αυτό το τμήμα πραγματοποιούνται και μελετώνται όλα τα φαινόμενα επανάψυξης. Προτάθηκαν δύο τρόποι τμηματοποίησης: ο πρώτος χωρίζει το κανάλι δοκιμών σε 10 ίσους κόμβους και ο δεύτερος σε 20 ίσους κόμβους όπου το μήκος κάθε κόμβου θεωρείται ίσο με 0.1016 m και 0.0508 m αντίστοιχα. Σε κάθε περίπτωση ελέγχεται ο πρώτος περιορισμός του μεγέθους του κάθε κόμβου όπου και προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

$1^{η}$ τμηματοποίηση:

$$\frac{Node\ Length}{Hydraulic\ Diameter} = \frac{0.1016}{0.03413} = 2.98 > 1$$

[8] Όριο Courant: Καθορίζει τον μέγιστο χρονικό βηματισμό της προσομοίωσης και ισούται με τον λόγο του μήκους του κόμβου (node) ως προς την μέγιστη ταχύτητα του ψυκτικού μέσου.

$2^{η}$ τμηματοποίηση:

$$\frac{Node\ Length}{Hydraulic\ Diameter} = \frac{0.0508}{0.03413} = 1.49 > 1$$

Σε αυτό το σημείο αναφέρεται ότι η προσπάθεια τμηματοποίησης σε 30 κόμβους με μήκος κόμβου 0.034 m απορρίφθηκε καθώς θα οδηγούσε σε λόγο μήκους κόμβου προς υδραυλική διάμετρο μικρότερο της μονάδος.

Η τιμή της υδραυλικής διαμέτρου (D_h: Hydraulic Diameter) που αντιστοιχεί στα 0.03413 m προκύπτει από τους επόμενους υπολογισμούς:

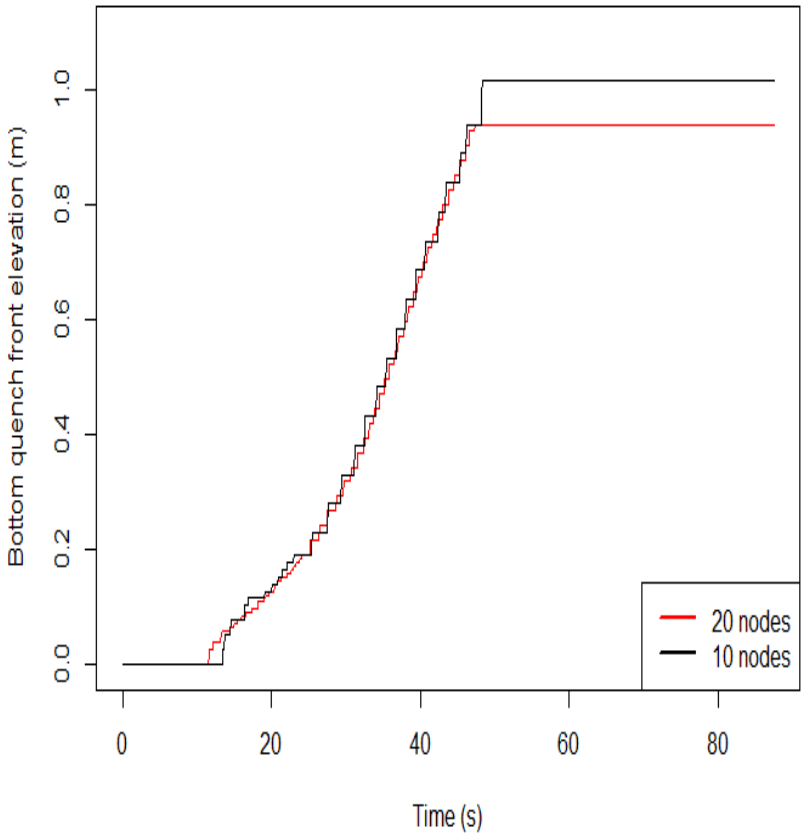
$$P_h = \pi \cdot 2R + \pi \cdot 2R_{ch} \quad \textbf{6-1}$$

$$D_h = 4\frac{Flow\ Area}{P_h} \quad \textbf{6-2}$$

όπου η περιοχή ροής (Flow Area) ισούται με 0.001765 m^2.

Από τα παραπάνω είναι εμφανές πως και οι δύο προτεινόμενοι τρόποι τμηματοποίησης είναι εντός των περιορισμών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τη μοντελοποίηση.

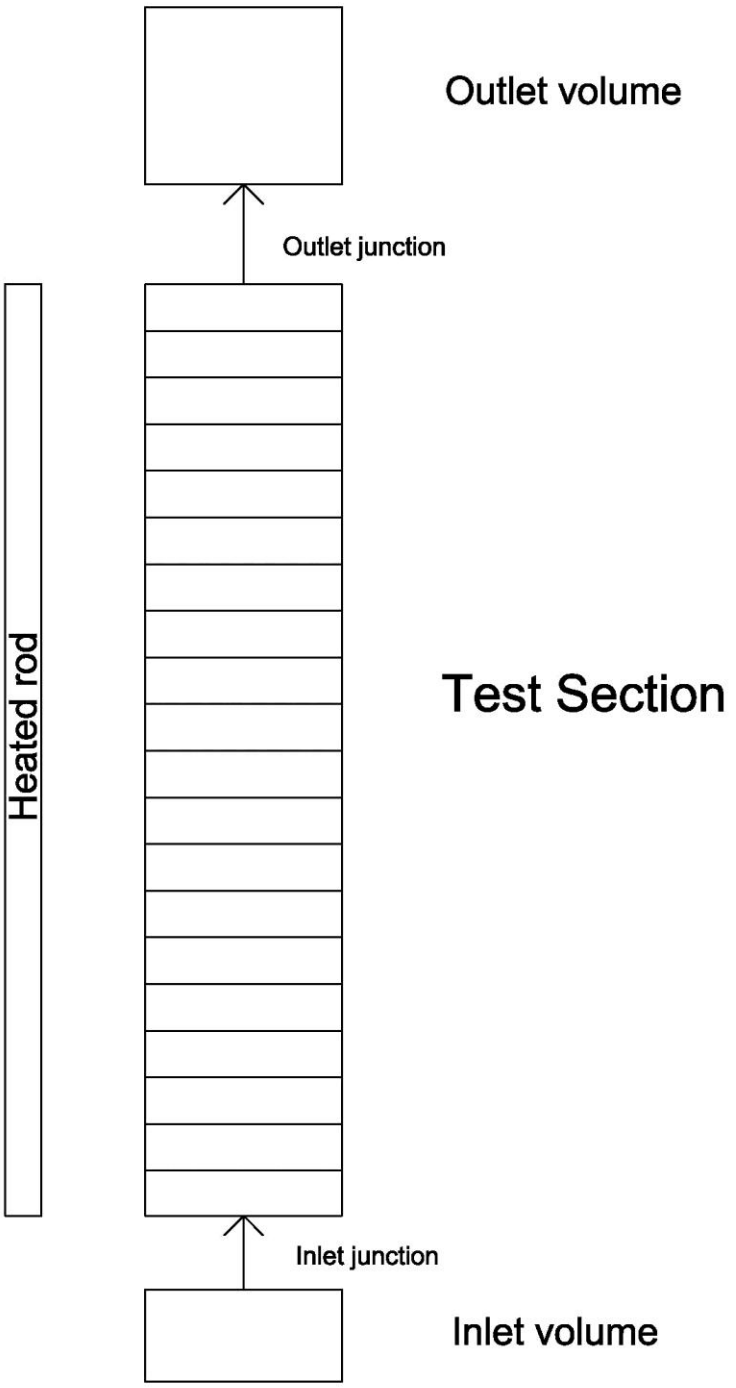
Πριν καταλήξουμε στο τελικό προτεινόμενο μοντέλο το οποίο παρουσιάζεται στη συνέχεια, γράφτηκαν και εκτελέστηκαν δύο κώδικες προσομοίωσης της επανάψυξης λαμβάνοντας υπ’ όψιν τις δύο προτεινόμενες διαφορετικές τμηματοποιήσεις του καναλιού δοκιμών. Από τα αποτελέσματα των δύο κωδίκων προέκυψε το Σχήμα 6-3 που παρουσιάζει τη βηματική προώθηση του υγρού μετώπου συναρτήσει του χρόνου επανάψυξης.



Σχήμα 6-3 Διάγραμμα βηματικής προώθησης του υγρού μετώπου έναντι του χρόνου για τις δύο προτεινόμενες τμηματοποιήσεις του καναλιού δοκιμών

Από το τελευταίο σχήμα επικρατεί η πρόταση του μοντέλου των 20 κόμβων καθώς η βηματική προώθηση του υγρού μετώπου είναι ομαλότερη. Επιπλέον ο υπολογιστικός χρόνος εκτέλεσης των προσομοιώσεων με 20 κόμβους διαφέρει ελάχιστα από τον χρόνο εκτέλεσης προσομοιώσεων με 10 κόμβους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, η προσομοίωση του πειράματος 07101412.14 με τμηματοποίηση 10 κόμβων διήρκησε 26 s ενώ ο cpu χρόνος μετρήθηκε στα 20.2. Αντίστοιχα, ο χρόνος προσομοίωσης του ίδιου πειράματος αλλά με τμηματοποίηση 20 κόμβων διήρκησε 43 s με cpu χρόνο ίσο με 30.2. Ωστόσο, ο χρήστης πρέπει να γνωρίζει πως η επιλογή των κόμβων περιορίζεται και από την ελεύθερη μνήμη του υπολογιστή καθώς τα αρχεία εξόδου των πειραμάτων 20 κόμβων είναι σχεδόν διπλάσια από τα αρχεία εξόδου των πειραμάτων με 10 κόμβους.

Όλα τα στοιχεία του κώδικα απεικονίζονται σχηματικά στην Σχήμα 6-4:



Σχήμα 6-4 Σχηματική αναπαράσταση καθορισμού, οριοθέτησης και τμηματοποίησης του συστήματος προσομοίωσης

6.6.2.1 Προσομοίωση θερμαινόμενης ράβδου

Η προσομοίωση της θερμαινόμενης ράβδου είναι από τα πιο ουσιαστικά κομμάτια του κώδικα. Τμηματοποιείται οριζόντια σε κόμβους ίσους με τον αριθμό των κόμβων του καναλιού δοκιμών ενώ διαχωρίζεται κάθετα σε πλέγματα (mesh points) τα οποία αντιστοιχούν στα διαφορετικά υλικά της ράβδου. Στην παρούσα μελέτη, η ράβδος διαχωρίστηκε σε 6 πλέγματα τα οποία προσομοιάζουν τα 3 κυριότερα τμήματά της: το περίβλημα από ανοξείδωτο χάλυβα, την περιοχή που περιέχει τη σκόνη του οξειδίου του μαγνησίου καθώς και το κέντρο της ράβδου που αποτελείται και αυτό από ανοξείδωτο χάλυβα.

Υπάρχουν αναφορές στην παγκόσμια βιβλιογραφία πως οι θερμοφυσικές ιδιότητες του οξειδίου του μαγνησίου ιδιότητες του είναι παρόμοιες με τις αυτές του διοξειδίου του ουρανίου [118] και έτσι κατά την προσομοίωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι καταχωρημένες στο RELAP5/MOD3.3 εγγενείς βιβλιοθήκες ιδιοτήτων του διοξειδίου του ουρανίου. Ωστόσο, προκειμένου να προσομοιωθεί πιο ρεαλιστικά η ράβδος της εγκατάστασης, οι θερμοφυσικές ιδιότητες της σκόνης οξειδίου του μαγνησίου σε συμπιεσμένη μορφή χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα [119].

6.6.3 Εισαγωγή και αρχικοποίηση του προβλήματος

Το στάδιο αυτό πρέπει να ακολουθηθεί με αρκετά μεγάλη προσοχή καθώς σε αυτό το στάδιο ξεκινάει η σύνταξη του κώδικα και γίνεται ο έλεγχος για σφάλματα και ασυνέπειες πριν την επεξεργασία των τελικών αποτελεσμάτων. Είναι σημαντικό να δοθεί προσοχή στις συνθήκες εισόδου του προβλήματος καθώς είναι μια ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία η οποία ωστόσο είναι αυτή που καθορίζει το τελικό αποτέλεσμα.

Η φιλοσοφία με την οποία δομείται ο κώδικας προσομοίωσης ενός προβλήματος επανάψυξης, η οποία ακολουθήθηκε και στη συγκεκριμένη περίπτωση, έχει ως εξής:

1. Στις εισαγωγικές κάρτες του κώδικα και μετά τον ορισμό του τύπου του προβλήματος, είναι απαραίτητο να οριστούν η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης και ο χρόνος τερματισμού της. Σημαντική επίσης λεπτομέρεια

είναι και η δυνατότητα επιλογής της επιθυμητής συχνότητας καταγραφής των αποτελεσμάτων στο αρχείο εξόδου.

2. Στη συνέχεια, ανάλογα με τα ζητούμενα αποτελέσματα καθορίζονται ποιες παράμετροι θα υπολογίζονται και θα τυπώνονται στο αρχείο εξόδου επιπλέον αυτών που είναι ήδη στη λίστα δεδομένων του κώδικα. Για παράδειγμα, σε μια προσομοίωση επανάψυξης ζητείται από το πρόγραμμα να υπολογίσει και τη θερμοκρασία επανάψυξης η οποία ορίζεται στον κώδικα RELAP5 ως TREWET.

3. Έπειτα, δίνεται η δυνατότητα στον προγραμματιστή να ορίσει τη χρονική στιγμή έναρξης της επανάψυξης μέσω των καρτών σκανδαλισμού του κώδικα. Αυτό τυπικά σημαίνει ότι μπορεί να οριστεί η χρονική υστέρηση εισόδου του ψυκτικού στο κανάλι δοκιμών από τη στιγμή επαναφοράς της ροής του, όπως ακριβώς συμβαίνει και πειραματικά.

4. Το τελικό βήμα είναι η προσεκτική εισαγωγή όλων των καρτών που αφορούν τα υδροδυναμικά στοιχεία του μοντέλου όπως είναι οι όγκοι ελέγχου και οι σύνδεσμοι. Στις ίδιες κάρτες εισάγονται και όλες οι αρχικές πειραματικές συνθήκες όπως καταγράφονται από τα μετρητικά όργανα στην έναρξη του προς προσομοίωση πειράματος επανάψυξης. Αυτές οι αρχικές συνθήκες αφορούν την πίεση, την αρχική θερμοκρασία των θερμοστοιχείων της ράβδου καθώς και τη θερμοκρασία εισόδου και την παροχή μάζας του ψυκτικού μέσου.

Ένα από τα πιο ουσιαστικά κομμάτια αυτού του τμήματος του κώδικα είναι η προσομοίωση της θερμαινόμενης ράβδου. Στην κάρτα που αφορά τα γενικά χαρακτηριστικά της ράβδου ορίζεται εκτός των άλλων και το πρόβλημα προσομοίωσης ως πρόβλημα επανάψυξης (κάρτα 12001000, έκτη λέξη, τιμή 2). Η έκτη λέξη της κάρτας αυτής αναφέρεται ως «σημαία» επανάψυξης. Σύμφωνα με το Input Manual [110] RELAP5/MOD3.3, για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα ως πρόβλημα επανάψυξης πρέπει να τεθεί μία μη μηδενική τιμή στη λέξη αυτή και τότε το πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας γίνεται δισδιάστατο. Επιπλέον, η επιλογή της τιμής 2 στο συγκεκριμένο πρόβλημα ορίζει την έναρξη της επανάψυξης ως τη στιγμή που ξεκινάει το στέγνωμα της ράβδου (dry out), όταν δηλαδή το κλάσμα κενού είναι μεταξύ των τιμών 0.1 (σχεδόν στεγνή ράβδος) και 0.9 (σχεδόν άδειο κανάλι).

Στα Παραρτήματα στο Κεφάλαιο §Π6γίνεται αναλυτική παρουσίαση όλων των παραπάνω βημάτων που αφορούν τη φιλοσοφία της δόμησης του κώδικα.

6.6.4 Εκτέλεση του κώδικα RELAP5/MOD3.3 και ανάλυση του αποτελέσματος

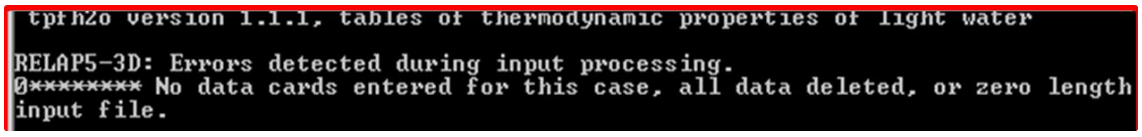
Η τελική φάση της διαδικασίας προσομοίωσης εμπεριέχει την εκτέλεση του προγράμματος και την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Η εντολή εκτέλεσης ενός προγράμματος RELAP5/MOD3.3 δίνεται στο τερματικό του Η/Υ και είναι η εξής:

relap5 –i rewet.f –o data.out –r data.rst

όπου rewet.f είναι το όνομα του κώδικα, γραμμένο σε γλώσσα fortran, data.out είναι το όνομα του αρχείου εξόδου όπου συμπεριλαμβάνει το σύνολο των υπολογισμών όπως προέκυπταν μετά από κάθε επανάληψη του κώδικα και data.rst είναι το μορφοποιημένο αρχείο εξόδου στο οποίο είναι αποθηκευμένα τα αποτελέσματα του κώδικα.Αποτελέσματα του κώδικα θεωρούνται οι τιμές των ζητούμενων παραμέτρων μετά από κάθε επανάληψη του κώδικα, όπως τις έχει καθορίσει ο ερευνητής.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην εμφάνιση σφαλμάτων τα οποία τερματίζουν το πρόγραμμα νωρίτερα από το αναμενόμενο. Στο Σχήμα 6-5 απεικονίζεται το μήνυμα σφάλματος όπως εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή:



Σχήμα 6-5 Μήνυμα σφάλματος του Relap5/MOD3.3

Για να μπορέσει ο προγραμματιστής να εντοπίσει την πηγή του σφάλματος πρέπει να ανοίξει το αρχείο εξόδου και να το «διορθώσει», σύμφωνα και με τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο §6.3.1.

Έπειτα, εφόσον διορθωθούν όλα τα σφάλματα και τερματιστεί σωστά ο κώδικας, ξεκινάει η ανάλυση των αποτελεσμάτων. Το πρώτο βήμα για την ανάλυση των

αποτελεσμάτων είναι η γραφική απεικόνισή τους όπουγίνεται με τη βοήθεια του εργαλείου αποτύπωσης AptPlot[9], το οποίο είναι σε θέση να διαβάσει και να παρουσιάσει διαγραμματικά τα δεδομένα του αρχείου data.plt ενός προγράμματος RELAP5 [120]. Το αρχείο data.plt, προκύπτει μετά το πέρασς της εκτέλεσης του RELAP5/MOD3.3 και η ανάγνωση του οποίου γίνεται με τη βοήθεια του προγράμματος AptPlot (Κεφάλαιο §Π6.1 Παραρτήματα).

Στην επόμενη παράγραφο γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων όπως προέκυψαν μετά την εκτέλεση του κώδικα RELAP5 καθώς και η σύγκρισή τους με τα πειραματικά αποτελέσματα.

6.7 Ανάλυση αποτελεσμάτων RELAP5/MOD3.3

Πριν ξεκινήσει η ανάλυση και η σύγκριση των αποτελεσμάτων ενός προγράμματος RELAP5 με τα πειραματικά αποτελέσματα, είναι απαραίτητο να γίνουν αρχικά οι εξής έλεγχοι:

a) Έλεγχος των αρχικών και οριακών συνθηκών του προβλήματος

Οι αρχικές και οριακές συνθήκες οι οποίες ορίζονται από τον χρήστη στα πλαίσια του κώδικα, ελέγχονται κατά το πέρας της εκτέλεσής του ώστε να διαπιστωθεί αν το πρόγραμμα ολοκληρώθηκε σωστά. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση επανάψυξης με πλημμυρισμό, συγκρίνονται οι αρχικές πειραματικές συνθήκες της παροχής μάζας ψυκτικού και της θερμοκρασίας εισόδου ψυκτικού στο κανάλι δοκιμών με τις συνθήκες που αποθηκεύονται στο αρχείο εξόδου του προγράμματος και ελέγχονται οι τυχόν αποκλίσεις μεταξύ τους.

b) Έλεγχος για τον εντοπισμό μη αποδεκτών ή μη φυσιολογικών αποτελεσμάτων

Οι παράμετροι του αρχείου εξόδου του προγράμματος πρέπει να ελεγχθούν για τον εντοπισμό μη αποδεκτών ή μη ρεαλιστικών αποτελεσμάτων. Στην περίπτωση της προσομοίωσης της επανάψυξης ελέγχονται αν οι υπολογιζόμενες από το πρόγραμμα τιμές της κρίσιμης θερμικής ροής συμφωνούν με τις αναμενόμενες από τη

[9] https://www.aptplot.com/

βιβλιογραφία τιμές της [121, 84], και άρα ο κώδικας αποτελεί παράδειγμα μιας ρεαλιστικής θερμοϋδραυλικής προσομοίωσης.

Οι προαναφερόμενοι έλεγχοι διευκολύνονται με τη χρήση διαγραμμάτων τα οποία δίνουν μια γενικότερη εποπτεία του συνόλου των παραμέτρων της προσομοίωσης. Στα Παραρτήματα στην παράγραφο §Π6.2 αναφέρονται αναλυτικότερα οι παράμετροι που ελέγχονται μετά το πέρας της εκτέλεσης ενός προγράμματος προσομοίωσης ενώ παρατίθενται και τα αντίστοιχα διαγράμματά τους.

6.7.1 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του RELAP5/MOD3.3

Για να αξιολογηθεί η δυνατότητα πρόβλεψης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν μετά την εκτέλεση του κώδικα RELAP5/MOD3.3 πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων τιμών της θερμοκρασίας των θερμοστοιχείων έναντι του χρόνου, ενώ υπολογίζεται και η απόκλιση της τιμής της υπολογιζόμενης θερμοκρασίας επανάψυξης από την πειραματική.

Όλα τα παραπάνω αφορούν την προσομοίωση με χρήση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του οξειδίου του μαγνησίου. Ωστόσο, στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται και οι αποκλίσεις των προβλεπόμενων θερμοκρασιών από τις πειραματικές με χρήση των ιδιοτήτων του διοξειδίου του ουρανίου και αξιολογούνται τα αποτελέσματα.

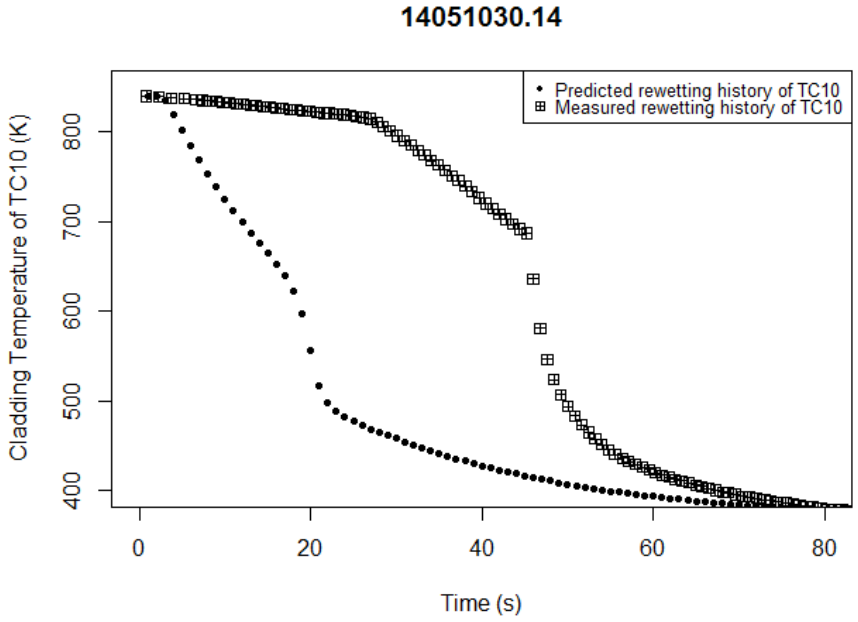
6.7.1.1 Θερμοκρασιακή ιστορία

Από τα 715 πειράματα επανάψυξης που διενεργήθηκαν, επιλέχθηκαν 4 πειράματα ώστε να χρησιμοποιηθούν ως παραδείγματα αξιολόγησης του κώδικα RELAP5/MOD3.3 όπως συντάχθηκε στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ. Οι αρχικές πειραματικές συνθήκες των επιλεχθέντων πειραμάτων παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 6-3).

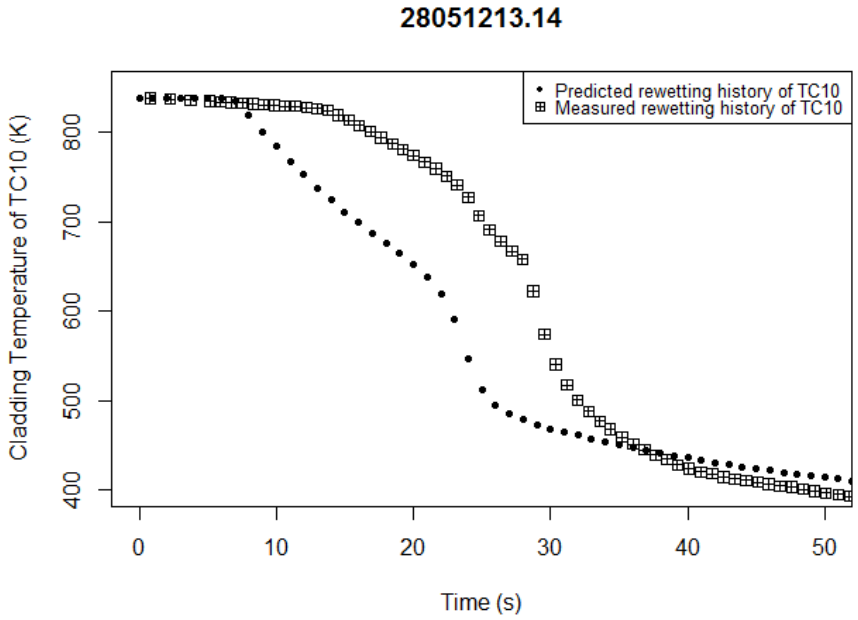
Πίνακας 6-3 Πειράματα επανάψυξης προς αξιολόγηση με τον κώδικα RELAP5/MOD3.3

A/A	Πείραμα	G (kg/s)	T_c (°C)	T_w (°C)
1	14051030.14	0.025	100	550
2	28051213.14	0.050	100	550
3	07101413.14	0.050	75	550
4	30101101.14	0.050	50	550

Από τις καμπύλες της θερμοκρασιακής ιστορίας των θερμοστοιχείων της ράβδου σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες κορεσμένου ψυκτικού (Σχήματα 6-6 και 6-7), παρατηρείται πως ενώ οι πειραματικές θερμοκρασιακές καμπύλες δεν συμπίπτουν με τις προβλεπόμενες από τον κώδικα RELAP5 χρονικά, η μορφή τους είναι συγκρίσιμη. Αυτό αποδεικνύει πως ο κώδικας μπορεί και προβλέπει ικανοποιητικά τα φαινόμενα επανάψυξης στην επιφάνεια της υπερθερμανθείσας ράβδου σε αυτές τις συνθήκες.



Σχήμα 6-6 Σύγκριση της πραγματικής θερμοκρασιακής ιστορίας με την προβλεπόμενη θερμοκρασιακή ιστορία του θερμοστοιχείου TC10 (πείραμα No 14051030.14)

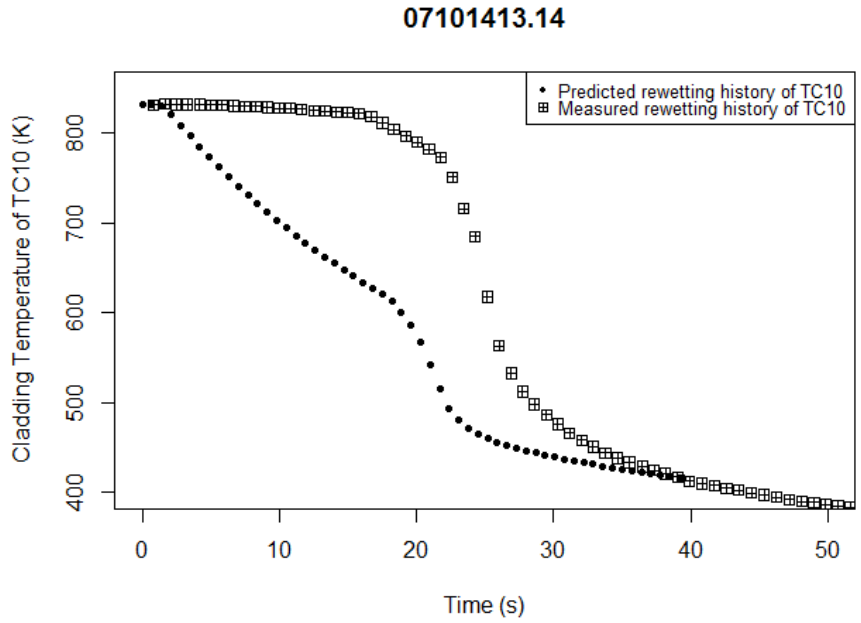


Σχήμα 6-7 Σύγκριση της πραγματικής θερμοκρασιακής ιστορίας με την προβλεπόμενη θερμοκρασιακή ιστορία του θερμοστοιχείου TC10 (πείραμα No 28051213.14)

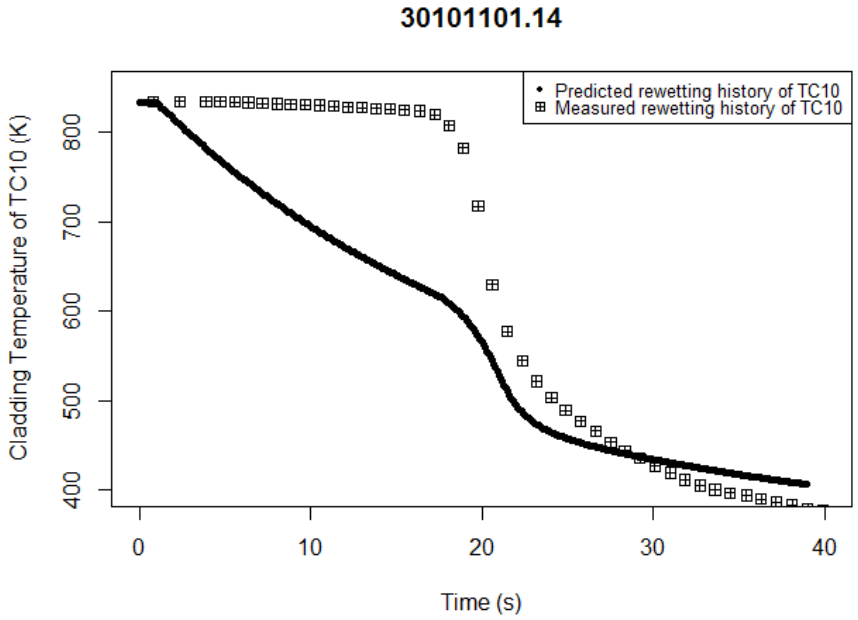
Αντίθετα με τις συνθήκες κορεσμού, σε συνθήκες υπόψυξης, οι πειραματικές και οι προβλεπόμενες καμπύλες επανάψυξης έχουν μεγάλες αποκλίσεις. Οι αποκλίσεις αυτές πιθανώς οφείλονται στο ότι μέχρι σήμερα τα φαινόμενα της επανάψυξης που λαμβάνουν χώρα μετά από LOCA δεν έχουν καθοριστεί όλα πλήρως με τη χρήση μοντέλων στο RELAP5. Συγκεκριμένα, ο κώδικας χρησιμοποιεί μοντέλα μεταφοράς θερμότητας που δεν διαχωρίζουν τους δύο τρόπους μεταφοράς θερμότητας film boiling στην εγγύτερη περιοχή του υγρού μετώπου [ψύξη με ατμό μέσω διεσπαρμένης ροής σταγονιδίων (Dispersed Flow Film Boiling) και ψύξη με ατμό λόγω ανεστραμμένης δακτυλιοειδούς ροής (Inverted Annular Film Boiling) (Σχήμα 2-11)]. Ακόμη, ο κώδικας δεν λαμβάνει υπόψιν την πρόδρομη ψύξη λόγω του sputtering ή του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας μέσω μιας μεμβράνης ατμού τα οποία είναι έντονα σε πειράματα επανάψυξης με υψηλή παροχή μάζας ή με υπόψυκτο υγρό, γεγονός που οδηγεί και στην μειωμένη ικανότητα πρόβλεψης. Σύμφωνα με το μοντέλο του RELAP5/MOD3.3, για να επαναψυχθεί ένας κόμβος, πρέπει το υγρό μέτωπο του αμέσως προηγούμενου κόμβου να τον φτάσει, με σταθερή διάδοση. Ωστόσο, σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα [122], η διάδοση του υγρού μετώπου δεν πρέπει να θεωρείται σταθερή αλλά χρονικά μεταβαλλόμενη ενώ εξαρτάται έντονα

από το φαινόμενο της πρόδρομης ψύξης. Η μη σταθερή διάδοση του μετώπου εξηγείται και από την παρατήρηση ότι λόγω του φαινομένου της πρόδρομης ψύξης, η θερμοκρασία του τοιχώματος της υπερθερμανθείσας ράβδου δεν παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της επανάψυξης.

Από αυτές τις παρατηρήσεις κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό να πραγματοποιηθεί μια ουσιαστικότερη αξιολόγηση των μοντέλων του κώδικα σε αντιδιαστολή με τα πειραματικά δεδομένα του ΘΥΚ ενώ προτείνεται και η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα χρονικά μεταβαλλόμενα μοντέλα πρόβλεψης της ταχύτητας του υγρού μετώπου, όπως έχουν προταθεί από τη διεθνή βιβλιογραφία. Παρόλα αυτά, μέχρι και σήμερα ο κώδικας είναι υπό συνεχή αξιολόγηση και βελτίωση από πολλούς ερευνητές [123].

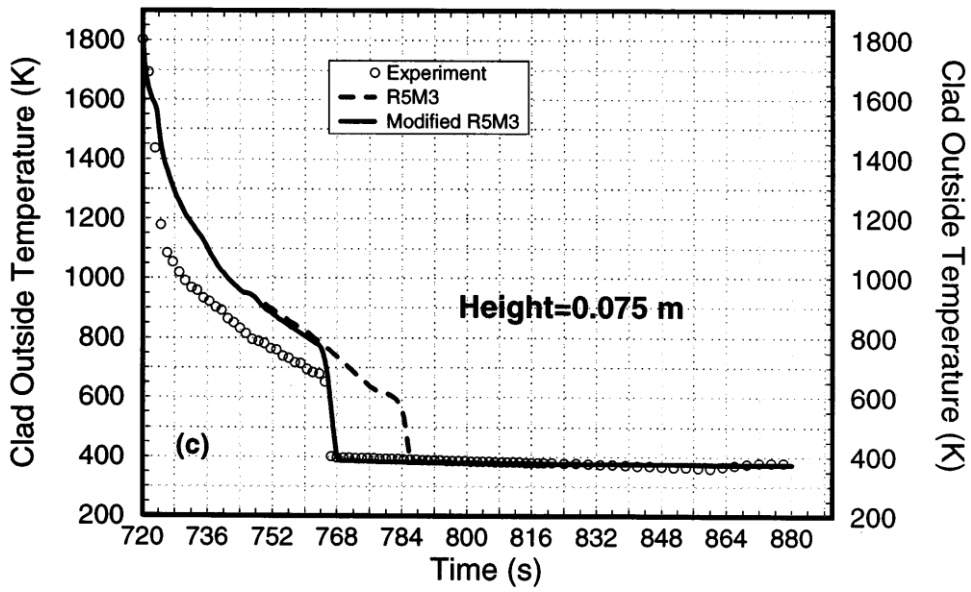


Σχήμα 6-8 Σύγκριση της πραγματικής θερμοκρασιακής ιστορίας με την προβλεπόμενη θερμοκρασιακή ιστορία του θερμοστοιχείου TC10 (πείραμα No 07101413.14)



Σχήμα 6-9 Σύγκριση της πραγματικής θερμοκρασιακής ιστορίας με την προβλεπόμενη θερμοκρασιακή ιστορία του θερμοστοιχείου TC10 (πείραμα No 30101101.14)

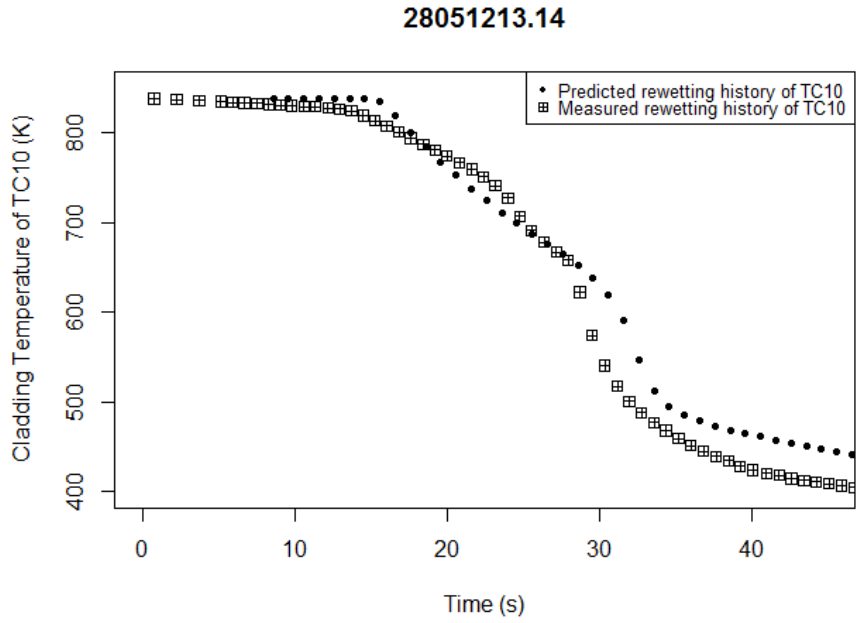
Αντίστοιχη διαφοροποίηση μεταξύ των θερμοκρασιών παρουσίασαν και οι θερμοκρασιακές καμπύλες των Elias et al. [124] (Σχήμα 6-10) όπου οι χαμηλότερες μετρούμενες πειραματικές θερμοκρασίες αποδόθηκαν στην αυξημένη απαγωγή θερμότητας από τα θερμοστοιχεία της ράβδου, λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας.



Σχήμα 6-10 Σύγκριση πειραματικών και προβλεπόμενων θερμοκρασιακών καμπυλών του πειράματος FZK No. T16106 **[124]**

Τέλος, όπως έχει ήδη διαπιστωθεί και προηγουμένως, από το σύνολο των διαγραμμάτων επανάψυξης παρατηρείται πως η πρόβλεψη της θερμοκρασιακής ιστορίας της ράβδου από τον κώδικα RELAP5/MOD3.3, είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα για τα πειράματα επανάψυξης που διενεργήθηκαν σε συνθήκες κορεσμού. Ωστόσο, οι πειραματικές θερμοκρασιακές καμπύλες των πειραμάτων κορεσμού δεν συμπίπτουν χρονικά με τις καμπύλες πρόβλεψης του κώδικα. Η διαφοροποίηση αυτή αποδίδεται κατά κύριο λόγο στο χρονικό διάστημα που χρειάζεται το ψυκτικό μέσο να εισέλθει στο κανάλι δοκιμών μετά την έναρξη καταγραφής του πραγματικού πειράματος (Παράγραφος §6.6.3), χρονικό διάστημα που δεν λαμβάνεται υπ'όψιν κατά την προσομοίωση. Αυτή η καθυστέρηση εισόδου του ψυκτικού οφείλεται κυρίως στης μεγάλης χωρητικότητας κάτω κεφαλή του ΘΥΚ καθώς και στις αρχικές συνθήκες του πειράματος (υψηλή – χαμηλή παροχή μάζας ψυκτικού). Η κάτω κεφαλή του ΘΥΚ είχε κατασκευαστεί ως κεφαλή πλημμυρισμού κατά τα πειράματα επανάψυξης εκ των άνω. Ωστόσο, οι μεγάλες διαστάσεις της που εξυπηρετούσαν τα παραπάνω πειράματα, αποτελούν χρονικό εμπόδιο στα πειράματα επανάψυξης εκ των κάτω καθώς για να ξεκινήσει ο πλημμυρισμός του τμήματος δοκιμών, πρέπει να προηγηθεί η πλήρωση της κάτω κεφαλής. Αντίθετα, η προσομοίωση της επανάψυξης στο RELAP5/MOD3.3 ξεκινάει άμεσα με την έναρξη

εκτέλεσης του προγράμματος. Ωστόσο, με την εισαγωγή μιας κάρτας σκανδαλισμού (κάρτα 500 στον παρόντα κώδικα), ο κώδικας παρέχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης του χρόνου καθυστέρησης με αποτέλεσμα να παρατηρείται μεγαλύτερη σύγκλιση των δύο χρονικά εξαρτώμενων καμπυλών (Σχήμα 6-11).



Σχήμα 6-11 Πειραματική και προβλεπόμενη θερμοκρασιακή ιστορία του θερμοστοιχείου TC10 με τη χρήση κάρτας σκανδαλισμού (πείραμα No 28051213)

Η χρονική καθυστέρηση δεν είναι ίδια για κάθε πείραμα και εξαρτάται από διάφορες αρχικές συνθήκες όπως είναι και η παροχή μάζας του ψυκτικού. Η επιλογή της βέλτιστης χρονικής καθυστέρησης προκύπτει με την ελαχιστοποίηση του RMS του προβλεπόμενου από του πειραματικού χρόνου επανάψυξης, σύμφωνα με την επόμενη σχέση:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum \frac{(t_{exp} - t_{pred})^2}{{t_{pred}}^2}} \qquad \textbf{6-3}$$

Όσον αφορά το πείραμα 28051213.14 που απεικονίζεται στα Σχήματα 6-7 και 6-11, παρατηρείται πως μετά την εισαγωγή 8.6 s χρονικής υστέρησης στην κάρτα εισόδου, η σύγκλιση των δύο θερμοκρασιακών καμπυλών είναι εμφανώς καλύτερη. Η RMS

(Root-Mean-Square) τιμή των χρόνων της προσομοίωσης χωρίς την εισαγωγή χρονικής καθυστέρησης υπολογίστηκε ίση με 30.01 ενώ με την εισαγωγή χρονικής υστέρησης μειώθηκε στο 14.80.

Παρόλο που η διαφορά μεταξύ πειραματικής και προβλεπόμενης τιμής αποδίδεται στο σύστημα σωληνώσεων εισόδου και στην παροχή μάζας του ψυκτικού, η εκτίμηση της χρονικής υστέρησης μέσω της τιμής RMS είναι ανεξάρτητη από αυτές τις παραμέτρους, παρέχοντας μια πιο γενική προσέγγιση στον υπολογισμό της χρονικής υστέρησης κάθε μοναδικού πειράματος.

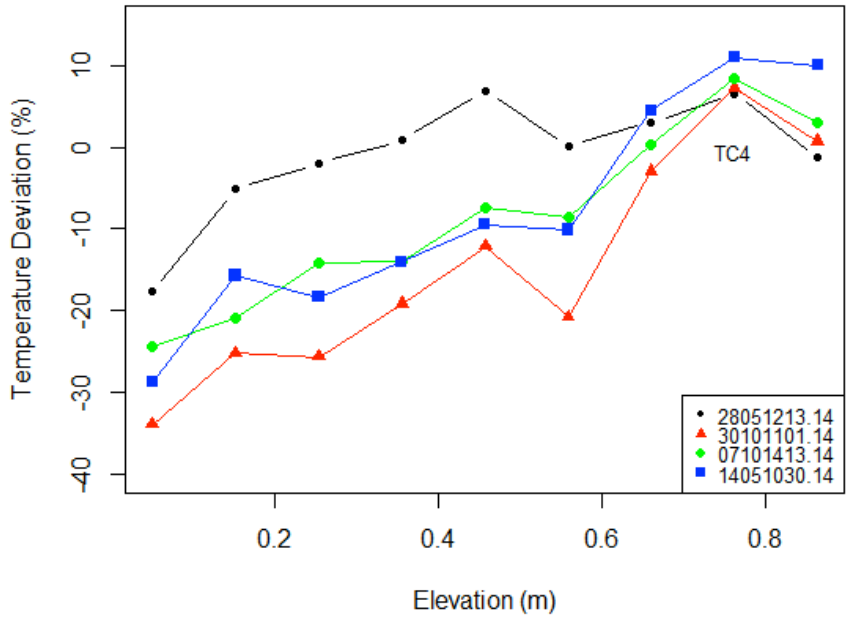
6.7.1.2 Απόκλιση τιμών θερμοκρασίας επανάψυξης

Για την αξιολόγηση της δυνατότητας πρόβλεψης του κώδικα προσδιορίστηκε η απόκλιση της πειραματικά μετρήσιμης από την προβλεπόμενη από τον κώδικα θερμοκρασίας επανάψυξης. Οι μετρήσεις της απόκλισης της θερμοκρασίας δεν πραγματοποιήθηκαν μόνο για τις προσομοιώσεις με την χρήση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του οξειδίου του μαγνησίου αλλά και για τις προσομοιώσεις με διοξείδιο του ουρανίου, για λόγους σύγκρισης. Το Σχήμα 6-13 απεικονίζει την απόκλιση της πειραματικά μετρήσιμης θερμοκρασίας από την προβλεπόμενη έναντι της απόστασης από την είσοδο του ψυκτικού στο κανάλι δοκιμών μετά την εισαγωγή στον κώδικα των ιδιοτήτων του οξειδίου του μαγνησίου ενώ το Σχήμα 6-13 απεικονίζει την απόκλιση αυτή με χρήση των ιδιοτήτων του διοξειδίου του ουρανίου, σύμφωνα με τη σχέση:

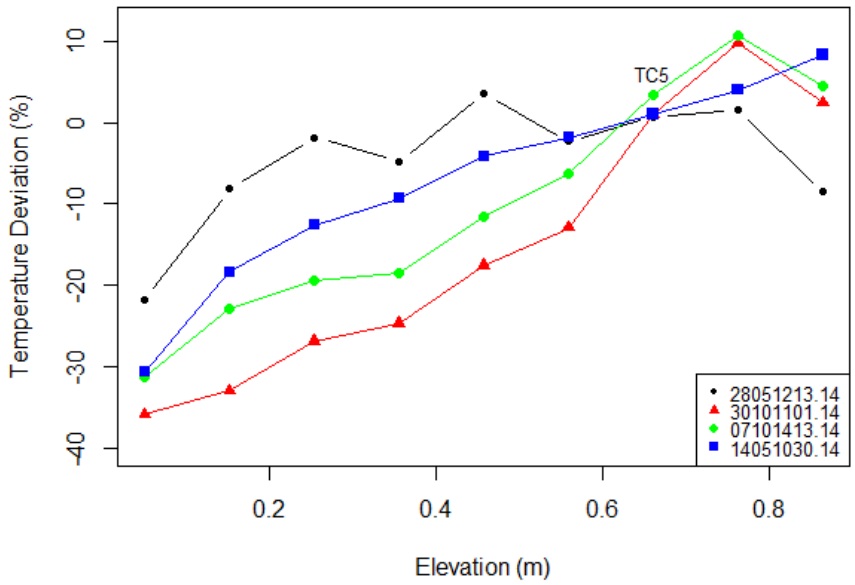
$$Deviation = \frac{Predicted - Measured}{Measured} \cdot 100\% \qquad \textbf{6-4}$$

Παρατηρείται ότι οι προβλέψεις του κώδικα μετά τη χρήση των ιδιοτήτων του MgO (Σχήμα 6-12), αποκλίνουν από τις πραγματικές σε ποσοστό μεταξύ 18% και 34% για το θερμοστοιχείο που βρίσκεται πιο κοντά στην είσοδο του ψυκτικού (TC11) ενώ σε μεγαλύτερα ύψη η απόκλιση μειώνεται σημαντικά. Συγκεκριμένα, τα χαμηλότερα ποσοστά απόκλισης με τιμές από 0.3% έως 4.5%, αφορούν το θερμοστοιχείο TC5 που βρίσκεται σε απόσταση 0.6604 m από την είσοδο. Επιπλέον, η απόκλιση που υπολογίζεται στα τρία πιο απομακρυσμένα θερμοστοιχεία από την είσοδο του καναλιού δοκιμών (TC5, TC4 και TC3) δεν υπερβαίνει το ±10%. Οι θέσεις των θερμοστοιχείων απεικονίζονται στο Σχήμα 3-2.

Αντίστοιχες τάξεως αποκλίσεις παρατηρούνται και για τις θερμοκρασιακές προβλέψεις με χρήση των ιδιοτήτων του UO_2 (Σχήμα 6-13). Για παράδειγμα, οι προβλέψεις του κώδικα με χρήση UO_2, αποκλίνουν από τις πραγματικές σε ποσοστό 17% και 35% για το θερμοστοιχείο TC11 ενώ τα χαμηλότερα ποσοστά απόκλισης με τιμές από -0.81% έως +3.31%, αφορούν και πάλι το θερμοστοιχείο TC5.



Σχήμα 6-12 Απόκλιση θερμοκρασίας επανάψυξης έναντι απόστασης από την είσοδο του καναλιού δοκιμών με χρήση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων MgO



Σχήμα 6-13 Απόκλιση θερμοκρασίας επανάψυξης έναντι απόστασης από την είσοδο του καναλιού δοκιμών με χρήση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων UO_2

Συγκρίνωντας τα πειράματα 28051213.14, 07101413.14 και 30101101.14 τα οποία πραγματοποιήθηκαν στις ίδιες συνθήκες παροχής μάζας ψυκτικού, G=0.050 kg/s και αρχικής θερμοκρασίας τοιχώματος ράβδου T_w=550°C αλλά σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας εισόδου του ψυκτικού 100 °C, 75 °C και 50 °C αντίστοιχα, παρατηρείται παρόμοια διακύμανση στην απόκλιση των θερμοκρασιών επανάψυξης, σύμφωνα με τα Σχήματα 6-12 και 6-13. Συγκεκριμένα και στα τρία πειράματα παρατηρείται ότι όσο απομακρυνόμαστε από την είσοδο του καναλιού δοκιμών μειώνεται και η απόκλιση της προβλεπόμενης από τη μετρούμενη θερμοκρασία επανάψυξης μέχρι την απόσταση 0.6604 m όπου σχεδόν μηδενίζεται ενώ στη συνέχεια αυξάνεται και πάλι. Όσον αφορά τις προσομοιώσεις με MgO, οι μεγαλύτερες αποκλίσεις, της τάξεως του 26.8%, παρατηρούνται στο πείραμα 30101101.14 (βαθμός υπόψυξης ψυκτικού μέσου 50 °C) ενώ οι μικρότερες (8.1%) στο πείραμα 28051213.14 (ψυκτικό μέσο σε κορεσμό). Για τις προσομοιώσεις με UO_2, οι αποκλίσεις για το πείραμα 30101101.14 είναι της τάξεως του 36% ενώ για το πείραμα 28051213.14 είναι ίσες με 22%. Όλα τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ύπαρξης μιας αντιστοιχίας της ικανότητας πρόβλεψης του κώδικα της θερμοκρασίας επανάψυξης με τη θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού μέσου. Ο λόγος της αδυναμίας προσέγγισης του κώδικα των πραγματικών φαινομένων που

λαμβάνουν χώρα κάτω από συνθήκες εισροής υπόψυκτου νερού για την επανάψυξη μιας υπερθερμανθείσας ράβδου μπορεί να αποδοθεί στην ανεπάρκεια των εγγενών μοντέλων μεταφοράς θερμότητας film boiling, όπως έχει ήδη προαναφερθεί. Για παράδειγμα, στην εργασία των Choi et al [123] έγινε προσπάθεια βελτίωσης αυτών των μοντέλων υπολογισμού με αποτέλεσμα να παρατηρηθεί σημαντική μείωση της θερμοκρασιακής απόκλισης στις μικρότερες αποστάσεις από την είσοδο του ψυκτικού (μείωση έως και 5% σε αποστάσεις από 2.4 έως 3.2 m). Ωστόσο η απόκλιση αυξήθηκε έως και 5% σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 3.2 m. Αυτό αποδεικνύει ότι η συσχέτιση της θερμοκρασιακής απόκλισης με την απόσταση από την είσοδο του ψυκτικού οφείλεται στα μοντέλα μεταφοράς θερμότητας από τη ράβδο στο ψυκτικό. Για αυτόν τον λόγο, οι νεότερες αξιολογήσεις και διορθώσεις του κώδικα με τη χρήση πιο εξελιγμένων υπολογιστικών συναρτήσεων, αποσκοπούν στη μείωση αυτών των αποκλίσεων μεταξύ πειραματικής και υπολογιστικής μέτρησης.

Επιπλέον των προαναφερθέντων, δεν παρατηρείται εμφανής συσχέτιση των υπόλοιπων αρχικών συνθηκών του πειράματος (αρχική θερμοκρασία ράβδου και παροχή μάζας ψυκτικού) με τη διακύμανση των αποκλίσεων της θερμοκρασίας επανάψυξης με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να εξαχθούν κάποια αξιόλογα συμπεράσματα.

Τέλος, ο Πίνακας 6-4 παρουσιάζει τη μέση τετραγωνική απόκλιση RMS της προβλεπόμενης από τον κώδικα θερμοκρασίας από την πειραματική, η οποία υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum \frac{(T_{exp} - T_{pred})^2}{T_{pred}{}^2}} \qquad \textbf{6-5}$$

Πίνακας 6-4 Μέση τετραγωνική απόκλιση της προβλεπόμενης από την πειραματική θερμοκρασία επανάψυξης για κάθε πείραμα

Α/Α	**Πείραμα**	**Αρχικές συνθήκες πειράματος (G (kg/s)/ T_c (°C)/ T_w (°C))**	**RMS % (με χρήση ιδιοτήτων MgO)**	**RMS % (με χρήση ιδιοτήτων UO_2)**
1	14051030.14	0.025/100/550	18.78	17.83
2	28051213.14	0.050/100/550	8.07	10.45
3	07101413.14	0.050/75/550	16.64	22.16
4	30101101.14	0.050/50/550	26.78	31.09

Τα παραπάνω αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις που έγιναν και από τους Choi και No [123, 125] κατά την αξιολόγηση του RELAP5/MOD3.3 με την προσομοίωση 8 πειραμάτων FLECHT – SEASET σε αποστάσεις από 0.6 m μέχρι 1.0 m από την είσοδο του ψυκτικού. Πιο συγκεκριμένα, οι ερευνητές παρατήρησαν ότι η απόκλιση της θερμοκρασίας επανάψυξης μεταξύ προβλεπόμενης και πειραματικής τιμής κυμαίνεται μεταξύ -10% και +10% για αποστάσεις μεγαλύτερες των 0.6 m από την είσοδο του ρευστού στο κανάλι δοκιμών ενώ η τιμή RMS υπολογίστηκε ίση με 48.3. Ωστόσο, δεν μπορεί να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων για μικρότερες ή μεγαλύτερες αποστάσεις αυτού του εύρους καθώς δεν υπάρχουν δημοσιευμένα αποτελέσματα.

Τέλος, από τον Πίνακα 6-4 παρατηρείται πως ενώ οι τιμές των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των δύο υλικών μπορούν να θεωρηθούν ίδιες, παρόλα αυτά, όταν γίνεται μοντελοποίηση των φαινομένων επανάψυξης σε συνθήκες μη κορεσμένου υγρού, οι διαφορά στην ικανότητα πρόβλεψης του κώδικα είναι εμφανής. Θεωρείται χρήσιμο στο μέλλον να πραγματοποιηθεί μια πιο ενδελεχής μελέτη της επίδρασης του βαθμού υπόψυξης καθώς και των μοντέλων μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιεί ο κώδικας RELAP5/MOD3.3 όσον αφορά τον κάθε μηχανισμό επανάψυξης (Dispersed Flow Film Boiling, Inverted Annular Film Boiling).

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σκοπός της παρούσας ΔΔ ήταν η μελέτη των φαινομένων επανάψυξης μιας υπερθερμανθείσας ράβδου κάτω από ατμοσφαιρική πίεση σε διάφορες αρχικές συνθήκες θερμοκρασίας και παροχής μάζας ψυκτικού με πλημμυρισμό. Για την ολοκλήρωσή της συγκεντρώθηκαν τα δεδομένα από περίπου 1083 πειράματα επανάψυξης με πλημμυρισμό, τα οποία εκτελέστηκαν στο ΘΥΚ του ΕΠΤ. Τα τελικά συμπεράσματα εξήχθησαν μέσα από οπτικές παρατηρήσεις αλλά και μετά από ποιοτική και ποσοτική στατιστική επεξεργασία.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα επανάψυξης αυξάνεται με την αύξηση του βαθμού υπόψυξης και την αύξηση της παροχής μάζας του ψυκτικού ενώ μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας επιφάνειας της ράβδου. Οι παρατηρούμενες τάσεις για την ταχύτητα επανάψυξης συμφωνούν επίσης με τα πειραματικά αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας. Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως λόγω της κατασκευής της εγκατάστασης, η διεξαγωγή πειραμάτων σε πιέσεις μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής ήταν απαγορευτική. Η εισαγωγή και η απαγωγή ατμού από τους ήδη υπάρχοντες κλάδους σωληνώσεων δεν ήταν επιτρεπτή για πειράματα επανάψυξης με πλημμυρισμό με αποτέλεσμα τον περιορισμό διεξαγωγής πειραμάτων υπό ατμοσφαιρική πίεση. Αφού πραγματοποιηθεί η απαραίτητη τροποποίηση της θερμοϋδραυλικής εγκατάστασης, προτείνεται η διεξαγωγή πειραμάτων επανάψυξης εκ των κάτω σε πιέσεις μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής ώστε να είναι δυνατή και η μελέτη της επίδρασης της πίεσης σε συνδυασμό με την επίδραση των υπολοίπων πειραματικών συνθηκών**.**

Ένα ακόμη σημαντικό κομμάτι της εργασίας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης της γεωμετρίας του καναλιού του Τμήματος Δοκιμών στους μηχανισμούς επανάψυξης η οποία πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης αδιάστατων πειραματικών δεδομένων με τα αδιάστατα πειραματικά δεδομένα άλλων μελετητών. Ως αδιάστατες τιμές χρησιμοποιήθηκε ο αριθμός Peclet καθώς και ένας τροποποιημένος αριθμός Biot λαμβάνοντας υπόψιν τόσο τις θερμικές ιδιότητες όσο και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της υπερθερμανθείσας ράβδου. Τα αποτελέσματα όλων των εργασιών ήταν συγκρίσιμα. Αυτό οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η γεωμετρία του καναλιού που περιέχει τη θερμαινόμενη ράβδο δεν επηρεάζει τους μηχανισμούς επανάψυξης που λαμβάνουν χώρα σε μια υπερθερμανθείσα επιφάνεια αλλά αυτοί

επηρεάζονται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ράβδου καθώς και τις ιδιότητες της υπερθερμανθείσας επιφάνειάς της.

Από τις πειραματικές παρατηρήσεις της εργασίας προτάθηκε μια εμπειρική συσχέτιση της θερμοκρασίας επανάψυξης σε συνάρτηση με τις αρχικές πειραματικές συνθήκες των πειραμάτων πλημμυρισμού. Ωστόσο, η συσχέτιση δε μελετήθηκε και σε άλλες πειραματικές εργασίες επανάψυξης εκ των κάτω, καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμα επαρκή πειραματικά δεδομένα. Μελλοντικά, προτείνεται η επέκταση της συσχέτισης και σε πειράματα επανάψυξης εκ των άνω προκειμένου να αποκτηθεί μια πιο εμπεριστατωμένη εικόνα των μεταβλητών που επηρεάζουν τη θερμοκρασία επανάψυξης.

Επιπρόσθετα, συντάχθηκαν για πρώτη φορά οι κάρτες εισόδου του κώδικα RELAP5 με σκοπό την προσομοίωση του καναλιού δοκιμών του ΘΥΚ του ΕΠΤ κατά τη διαδικασία επανάψυξης με πλημμυρισμό. Από τις συγκρίσεις μεταξύ προβλεπόμενων και πειραματικών τιμών παρατηρήθηκε ότι για τα πειράματα που έχουν διεξαχθεί με θερμοκρασία εισόδου ψυκτικού κοντά στον κορεσμό, οι επιφανειακές θερμοκρασίες έχουν ικανοποιητικά προβλεφθεί από τον κώδικα τόσο σε χαμηλή όσο και σε υψηλή παροχή. Ωστόσο, παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ πειραματικών και προβλεπόμενων επιφανειακών θερμοκρασιών για τα πειράματα που διεξήχθησαν σε 25°C και 50°C υπόψυξη. Η μελέτη της θερμοκρασίας επανάψυξης οδήγησε σε παρόμοια συμπεράσματα με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις να παρατηρούνται στα πειράματα που χρησιμοποιούν υπόψυκτο νερό.

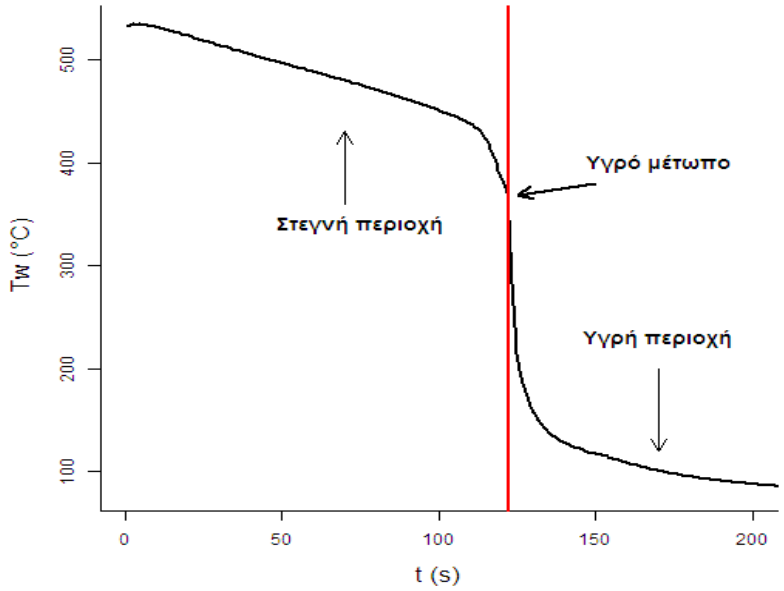
Στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ διερευνήθηκαν εκτενώς τα φαινόμενα επανάψυξης υπερθερμανθείσας ράβδου με πλημμυρισμό. Ωστόσο, για μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα του μηχανισμού επανάψυξης, η εργασία θα μπορούσε να εμπλουτιστεί με τα πειραματικά αποτελέσματα και τις παρατηρήσεις έπειτα από τη διενέργεια πειραμάτων κάτω από διάφορες πιέσεις μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής. Ακόμη, σημαντική προσθήκη θα ήταν και η μελέτη της επίδρασης διαφόρων χαρακτηριστικών της ράβδου όπως είναι για παράδειγμα ο βαθμός οξείδωσης του υλικού της. Τέλος, πολύ μεγάλο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η εκτενέστερη αξιολόγηση του κώδικα RELAP5/MOD3.3 και κυρίως στα πειράματα που αφορούν υπόψυκτο υγρό. Προτείνεται η μελέτη των μοντέλων επανάψυξης που χρησιμοποιεί ο

κώδικας και η αντιδιαστολή τους με μοντέλα επανάψυξης της σύγχρονης βιβλιογραφίας.

7.1 Σημεία πρωτοτυπίας της Διατριβής

Στην παράγραφο αυτή συνοψίζονται τα σημεία πρωτοτυπίας της παρούσης ΔΔ:

- Διεξαγωγή πειραμάτων επανάψυξης στη θερμοϋδραυλική εγκατάσταση του ΕΠΤ με τη μέθοδο του πλημμυρισμού σε διάφορες αρχικές συνθήκες: ατμοσφαιρική πίεση, παροχή μάζας ψυκτικού μέσου 0.008 $kg \cdot s^{-1}$ – 0.050 $kg \cdot s^{-1}$, θερμοκρασία ψυκτικού μέσου 50°C – 100°C, αρχική θερμοκρασία τοιχώματος ράβδου 300°C – 550°C.
- Τροποποίηση του προγράμματος RIG, γλώσσας FORTRAN, για την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων και την εμφάνιση του μιμικού διαγράμματος του ΘΥΚ κατά τη διαδικασία επανάψυξης με πλημμυρισμό. Δημιουργία batch αρχείου που δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει πληκτρολογώντας μία εντολή, το πρόγραμμα RIG που θέλει να ενεργοποιήσει και αντιστοιχεί στον τρόπο επανάψυξης που μελετά.
- Σύνταξη κώδικα γλώσσας R, για την στατιστική επεξεργασία των πειραμάτων επανάψυξης καθώς και για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων.
- Διεξοδική μελέτη των μηχανισμών επανάψυξης με πλημμυρισμό τόσο σε υψηλές όσο και σε χαμηλές παροχές ψυκτικού μέσου. Λόγω του πολύ καλού συστήματος συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων, επετεύχθη η ακριβής διαγραμματική απεικόνιση της θερμοκρασιακής ιστορίας της ράβδου καθώς και η αποτύπωση του υγρού μετώπου (Σχήμα 7-1).



Σχήμα 7-1 Διαγραμματική αποτύπωση των μηχανισμών επανάψυξης καθώς και καταγραφή του υγρού μετώπου κατά τη διάρκεια επανάψυξης (πείραμα No 13101105.14)

- Πρόταση ημιεμπειρικής εξίσωσης πρόβλεψης της ταχύτητας επανάψυξης σε συνάρτηση με τις αρχικές πειραματικές συνθήκες. Ακόμη, πραγματοποιήθηκε συγκριτική μελέτη της ταχύτητας επανάψυξης, όπως καταγράφηκε στα πειράματα που διενεργήθηκαν κατά τη διάρκεια της παρούσας ΔΔ, με την ταχύτητα επανάψυξης όπως καταγράφηκε από τα πειράματα των Saxena et al. και Duffey – Porthouse [38, 39]. Προτάθηκαν ημιεμπειρικές συσχετίσεις της αδιάστατης ταχύτητας Peclet και μιας τροποποιημένης μορφής του αδιάστατου αριθμού Biot, οι οποίες συσχετίζουν ικανοποιητικά το σύνολο των πειραματικών δεδομένων και των τριών εργασιών που μελετήθηκαν.
- Εκτενής μελέτη της εξάρτησης της θερμοκρασίας επανάψυξης από τις αρχικές συνθήκες του πειράματος επανάψυξης και από τις θερμοφυσικές ιδιότητες της υπερθερμανθείσας ράβδου. Επίσης, πραγματοποιήθηκε διαστατική ανάλυση και προτάθηκε ημιεμπειρική συσχέτιση με συντελεστή γραμμικής προσαρμογής ίσο με 0.9304.
- Σύνταξη των καρτών εισόδου του κώδικα RELAP5/MOD3.3 με σκοπό την προσομοίωση της θερμοϋδραυλικής εγκατάστασης του ΕΠΤ και των πειραμάτων επανάψυξης εκ των κάτω.

- Αξιολόγηση της ικανότητας πρόβλεψης του κώδικα RELAP5/MOD3.3 μέσα από την σύγκριση των εκτιμήσεών του με τα πειραματικά δεδομένα. Διαπιστώθηκε πολύ καλή ποιοτική πρόβλεψη των μηχανισμών επανάψυξης των πειραμάτων που διενεργήθηκαν κάτω από συνθήκες κορεσμού. Για την καλύτερη χρονική σύγκλιση των πειραματικών με των προβλεπόμενων τιμών επανάψυξης, προτάθηκε η εισαγωγή χρόνου καθυστέρησης ο οποίος αντιστοιχεί στο χρόνο πλήρωσης της κάτω κεφαλής του τμήματος δοκιμών πριν την έναρξη του πλημμυρισμού του.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] «The Pressurized Water Reactor (PWR),» United States Nuclear Regulatory Commision, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/animated-pwr.html.

[2] «The Boiling Water Reactor (BWR),» United States Nuclear Regulatory Commision, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/animated-bwr.html.

[3] X. M. U. Cheng, «Review on Critical Heat Flux in Water Cooled Reactors,» *Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6825,* αρ. ISSN 0947-8620, 2003.

[4] G. Shires, A. Pickering και P. Blacker, «Film cooling of vertical fuel rods,» AEEW-R343, 1964.

[5] H. Bonakdar και E. McAssey Jr, «A method for determining rewetting velocity under generalized boiling conditions,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 66, pp. 7-12, 1981.

[6] A. Yamanouchi, «Effect of core spray cooling in transient state after a loss of coolant accident,» *Journal of Nuclear Science and Technology,* τόμ. 5, pp. 547-558, 1968.

[7] F. Gunnerson και T. Yackle, «Quenching and rewetting of nuclear fuel rods,» *Nuclear Technology,* τόμ. 54, pp. 113-117, 1981.

[8] A. Bennett, G. Hewitt, H. Kearsey και R. Keeys, «The wetting of hot surfaces by water in a steam environment at high pressure,» AEEW-R5146, 1966.

[9] K. Yoshioka και S. Hasegawa, «A correlation in displacement velocity of liquid film boundary formed on a heated vertical surface in emergency core cooling,» *Journal of Nuclear Science and Technology,* τόμ. 7, pp. 418-425, 1970.

[10] D. Elliott και R. P.W., «The quenching of a heated surface by a film of water in a steam environment at pressures up to 53 bar,» AEWW-M976, 1970.

[11] D. Elliott και P. Rose, «The quenching of a heated Zircalloy surface by a film of water in a steam environment at pressures up to 53 bar,» AEEW-M1027, 1971.

[12] Ε. Χίνης, *Πειραματική εγκατάσταση προσομοίωσης φαινομένων βρασμού σε υδρόψυκτους πυρηνικούς αντιδραστήρες: Εφαρμογή (Μελέτη του φαινομένου της επαναψύξεως ράβδων πυρηνικού καυσίμου),* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα: Διαδακτορική Διατριβή, 1994.

[13] S. Sahu, P. Das και S. Bhattacharyya, «An experimental investigation on the quenching of a hot vertical heater,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 240, pp. 1558-1568, 2010.

[14] J. Dunkan και J. Leonard, «BWR FLECHT final report,» GEAP-13197, 1971.

[15] J. Dunkan και J. Leonard, «BWR standby cooling heat transfer under simulated loss-of-coolant conditions between 15 and 300 psia,» GEAP-13190, 1971.

[16] J. Dunkan και J. Leonard, «Heat transfer in a simulated BWR fuel bundle cooled by spray under loss-of-coolant conditions,» GEAP-13086, 1970.

[17] L. Tong, «Heat-transfer mechanisms in nucleate and film boiling,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 21, pp. 1-25, 1972.

[18] E. Hinis και S. Simopoulos, «Experimental investigation of the rewetting process at low steam pressures,» σε *1st Conference of the Yugoslav Nuclear Society*, Belgrade, 1996.

[19] E. Hinis και S. Simopoulos, «Experimental investigation of the rewetting process at pressures of 1-7 bar,» *Kerntechnik,* τόμ. 68, pp. 1-2, 2001.

[20] P. Kastanidis, A. Nikoglou, E. Hinis και S. Simopoulos, «An Experimental Study of the Rewetting of a Hot Surface at Atmospheric Conditions Using Subcooled Liquid at Various Flowrates,» σε *15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermohydraulics*, Pisa, Italy, 2013.

[21] S. Chatzidakis, A. Nikoglou, E. Hinis και S. Simopoulos, «A study on the rewetting of a hot surface, using low pressure, subcooled liquid,» σε *The 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics*, Pisa, Italy, 2013.

[22] F. Cadek, D. Dominicis και R. Leyse, «PWR FLECHT final report,» WCAP-7665, 1971.

[23] K. Riedle και F. Wikler, «ECC-Reflooding Experiments with a 340-rod bundle,» σε *CREST Specialist Meeting on ECC for LWR*, Munich, Germany, 1972.

[24] A. Campanile και G. Pozzi, «Low rate emergency reflooding heat transfer tests in rod bundle,» σε *CREST Specialist Meeting on Emergency Core Cooling for Light Water Reactors*, 1972.

[25] D. Andreoni και M. Courtaud, «Study of heat transfer during the reflooding of a single rod test section,» σε *CREST Specialist Meeting on Emergency Core Cooling for Light Water Reactors*, 1972.

[26] R. Martini και A. Premoli, «Bottom flooding experiments with simple geometries under different ECC conditions,» σε *CREST Specialist Meeting on Emergency Core Cooling for Light Water Reactors*, 1972.

[27] T. Thompson, «Simulated bottom-flooding emergency cooling of a close-spaced rod bundle,» σε *European Two-Phase Flow Group Meeting*, 1972.

[28] E. White και R. Duffey, «A study of the unsteady flow and heat transfer in the reflooding of water reactor cores,» *Annals of Nuclear Energy,* τόμ. 3, pp. 197-210, 1976.

[29] M. Naitoh, K. Chino και H. Ogasawara, «Cooling mechanism during transient reflooding of a reactor fuel bundle after loss of coolant,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 44, pp. 193-200, 1977.

[30] V. Dhir, R. Duffey και I. Catton, «Quenching studies on a zircalloy rod bundle,» *Journal of Heat Transfer,* τόμ. 103, pp. 293-299, 1981.

[31] K. Tuzla, C. Unal και J. Chen, «An experimental study of bottom rewetting in a rod bundle geometry,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 125, pp. 189-200, 1991.

[32] T. Thompson, «On the process of rewetting a hot surface by a falling liquid film,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 31, pp. 234-245, 1974.

[33] M. De Salve και B. Panella, «Validation of a bottom flooding model,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 99, pp. 213-222, 1987.

[34] R. Duffey και D. Porthouse, «Experiments on the cooling of high temperature surfaces by water jets and drops,» CEGB, 1972.

[35] B. Piggott και D. Porthouse, «Water reactor emergency cooling: the effect of pressure, subcooling and surface condition on the rewetting of hot surfaces,» CEGB, 1973.

[36] B. Piggott και D. Porthouse, «A correlation of rewetting data,» τόμ. 32, pp. 171-181, 1975.

[37] S. Yu, P. Farmer και M. Coney, «Methods and correlations for the prediction of quenching rates on hot surfaces,» τόμ. 3, pp. 415-443, 1977.

[38] A. Saxena, V. Venkat Raj και V. Govardhana Rao, «Experimental studies on rewetting of hot vertical annular channel,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 208, pp. 283-303, 2001.

[39] R. Duffey και D. Porthouse, «The physics of rewetting in water reactor emergency core cooling,» τόμ. 5, pp. 379-394, 1973.

[40] R. Duffey και M. Ackerman, «The effects of counter-current single and two phase flows on the quenching rate of hot surfaces,» *International Journal of Multiphase Flow,* τόμ. 4, pp. 117-140, 1978.

[41] G. Hewitt και G. Wallis, «Flooding and associated phenomena in falling film flow in a tube,» UKAEA report, AERE-R4022, 1963.

[42] G. Wallis, One-dimensional two-phase flow, New York: McGraw Hill, 1969.

[43] S. Naff και J. Whitbeck, «Steady state investigation of entrainment and countercurrent flow in small vessels,» σε *ANS, Topical meeting in Water Reactor Safety*, Salt Lake City, 1973.

[44] S. Chan και M. Grolmes, «Hydrodynamically controlled rewetting,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 34, pp. 307-316, 1975.

[45] A. Cetinbudaklar και G. Jameson, «The mechanism of flooding in vertical countercurrent two-phase flow,» *Chemical Engineering Science,* τόμ. 24, pp. 1669-1680, 1969.

[46] G. Anderson και B. Mantzouranis, «Two-phase (gas-liquid) flow phenomena-1. Pressure drop and hold-up for two-phase flow in vertical tubes,» *Chemical Engineering Science,* τόμ. 12, pp. 109-126, 1960.

[47] A. Dukler, «Characterization, effects and modelling of the wavy gas-liquid interface,» *Heat Mass Transfer,* τόμ. 6, pp. 207-234, 1972.

[48] R. Karyampudi και W. Chon, «Effect of thermal radiation on rewetting of top spray emergency coolant,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 36, pp. 27-36, 1976.

[49] R. Semeria και B. Martinet, «Calefaction spots on a heating wall: temperature distribution and resorption,» σε *Symposium on Boiling Heat Transfer in Steam Generating Units and Heat Exchangers*, Manchester, G.B., 1965.

[50] M. Sawan, G. Zaki και H. Temraz, «A three-regions rewetting model with heat generation and subcooling,» *Atomkernenergie - Kerntechnik Bd.,* τόμ. 34, pp. 199-204, 1979.

[51] P. Chambre και E. Elias, «Boiling heat transfer during rewetting,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 50, pp. 353-363, 1978.

[52] K. Sun, G. Dix και C. Tien, «Cooling of a very hot vertical surface by a falling liquid film,» *Journal of Heat Transfer, ASME,* τόμ. 96, pp. 126-131, 1974.

[53] H. Yeh, «An analysis of rewetting of a nuclear fuel rod in water reactor emergency core cooling,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 34, pp. 317-322, 1975.

[54] J. Blair, «An analytical solution to a two-dimensional model of the rewetting of a hot dry rod,» *Nuclear engineering and Design,* τόμ. 32, pp. 159-170, 1975.

[55] S. Dua και C. Tien, «Two dimensional analysis of conduction-controlled rewetting with precursory cooling,» *Journal of Heat Transfer, ASME,* τόμ. 98, pp. 407-413, 1976.

[56] C. Tien και L. Yao, «Analysis of conduction controlled rewetting of a vertical surface,» *Journal of Heat Transfer, ASME,* τόμ. 97, pp. 161-165, 1975.

[57] M. Coney, «Calculations on the rewetting of hot surfaces,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 31, pp. 246-259, 1974.

[58] M. Sawan και H. Temraz, «A three regions semi-analytical rewetting model,» *Nuclear engineering and Design,* τόμ. 64, pp. 319-327, 1981.

[59] R. Schutzle και H. Unger, «A mathematical model for investigation of the rewetting of fuel rods,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 101, pp. 315-322, 1987.

[60] «Thermal-Hydraulic Simulation,» Siemens, 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/lms/imagine-lab/mechanical/thermal-hydraulics.shtml.

[61] T. Thompson, «Rewetting of a hot surface,» σε *5th International Heat Transfer Conference* , Tokyo, Japan, 1974.

[62] M. Casamirra, F. Castiglia, M. Giardina, C. Lombardo, G. M. A. Celata και L. Saraceno, «Rewetting of a hot vertical surface by liquid sprays,» *Experimental Thermal and Fluid Science,* τόμ. 29, pp. 885-891, 2005.

[63] Y. Katto, «Critical Heat Flux,» *Advances in Heat Transfer,* τόμ. 17, pp. 1-64, 1985.

[64] J. Carbajo, «A study on the rewetting temperature,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 84, pp. 21-52, 1985.

[65] A. Kim και Y. Lee, «A correlation of rewetting temperature,» *Letters in Heat and Mass Transfer,* τόμ. 6, pp. 117-123, 1979.

[66] H. Kim, B. Truong, J. Buongiorno και L. Hu, «Effects of micro\nano-scale surface characteristics on the Leidenfrost point temperature of water,» *Journal of Thermal Science and Technology,* τόμ. 7, pp. 453-462, 2012.

[67] A. Bergles και W. Thompson, «The relationship of quench data to steady-state pool boiling data,» *International Journal Heat Mass Transfer,* τόμ. 13, pp. 55-68, 1970.

[68] S. Yao και R. Henry, «An investigation of the minimum film boiling temperature on horizontal surfaces,» *Journal of Heat Transfer, ASME,* τόμ. 100, pp. 260-267, 1978.

[69] S. Olek, Y. Zvirin και E. Elias, «Rewetting of hot surfaces by falling liquid films as a conjugate heat transfer problem,» *International Journal of Multiphase Flow,* τόμ. 14,

pp. 13-33, 1988.

[70] P. Berenson, «Film boiling heat transfer from a horizontal surface,» *Journal of Heat Transfer, ASME,* τόμ. 83, pp. 351-358, 1961.

[71] K. Kimball και R. Roy, «Quench front propagation during bottom reflooding of a heated annular channel,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 76, pp. 79-88, 1983.

[72] W. Bradfield, «On the effect of subcooling on wall superheat in pool boiling,» *Journal of Heat Transfer,* τόμ. 89, pp. 269-270, 1967.

[73] A. Siegel, Rewetting temperature during top and bottom reflood, University of Illinois, Urbana-Champaign: M.S. Thesis, 1979.

[74] M. Sawan και M. Carbon, «A review of spray-cooling and bottom-flooding work for LWR cores,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 32, pp. 191-207, 1975.

[75] D. Butterworth και R. Owen, «The quenching of hot surfaces by top and bottom flooding - a review,» AERE-R7992, 1975.

[76] E. Elias και G. Yadigaroglu, «Rewetting and liquid entrainment during reflooding - state of the art,» EPRI NP-435, 1977.

[77] N. S. A. Division, RELAP5/MOD3.3 Code Manual Volume I: Code Structure, System Models, and Solution Methods, 2001.

[78] M. Sencar και N. Aksan, «Evaluation and assessment of reflooding models in RELAP5/MOD2.5 and RELAP5/MOD3 codes using Lehigh University and PSI-NEPTUN bundle experimental data,» σε *Seventh International Meeting. Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics NURETH-7*, Saratoga Springs, New York, 1995.

[79] G. Analytis, «Developmental assessment of RELAP5/MOD3.1 with separate effect and integral test experiments: model changes and options,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 163, pp. 125-148, 1996.

[80] M. Richner, G. Analytis και S. Aksan, «Assessment of RELAP5:MOD2, cycle 36.02, using NEPTUN reflooding experimental data, Paul Scherrer Institut, PSI104,» *NUREG,* αρ. IA-00103, 1991.

[81] H. Jeong και H. No, «Modification of the reflood model in RELAP5/MOD3.1,» *Nuclear Technology,* τόμ. 124, pp. 52-64, 1998.

[82] M. Sencar και N. Aksan, «Evaluation of Reflooding, Models in RELAP5/MOD2.5, RELAP5/MOD3/5m5 and RELAP5/MOD3/v7j Codes by Leheigh University and PSI-NEPTUN Bundle Reflooding Experiment Data,» σε *2nd CAMP Meeting*, Brussels, 1993.

[83] T. Hatse, B. Adroguer, C. Allison, S. Hagen, P. Hofmann και V. Noack, «Degraded core quench: a status report,» AEA Technology, Winfrith Technology Centre Dorset, DT2 8DH, Dorchester, 1996.

[84] E. Elias, V. Sanchez και W. Hering, «Development and validation of a transition boiling model for RELAP5:MOD3 reflood simulation,» *Nuclear Engineering and Design ,* τόμ. 183, pp. 269-286, 1998.

[85] J. Chen, «Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow,» *Process Design and Development,* τόμ. 5, pp. 322-329, 1966.

[86] P. Hofmann και V. Noack, «Experiment on the quench behavior of fuel rod segments,» σε *Second International Quench Workshop*, Karlsruhe, 1996.

[87] Z. Koszela, «Assessment of RELAP5/MOD3.2.2 Gamma against ABB Atom 3 × 3-Rod Bundle Reflooding Tests,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 223, pp. 49-73, 2003.

[88] T. Choi και H. No, «Improvement of the reflood model of RELAP5/MOD3.3 based on the assessments against FLECHT-SEASET tests,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 240, pp. 832-841, 2010.

[89] S. Simopoulos, MODELLING OF THE REWETTING PROCESS IN WATER-COOLED NUCLEAR REACTOR FUEL ELEMENTS, London: phD Thesis, 1978.

[90] Α. Μυλωνάκης, Πειραματική μελέτη επαναψύξεως υπερθερμανθείσων επιφανειών σε πιέσεις 4 και 5 bar, Αθήνα, 2011.

[91] *Α. Νικόγλου, Μέλος ΕΔΙΠ Τομέα Πυρηνικής Τενολογίας ΕΜΠ, Προσωπική επικοινωνία,* 2012-2017.

[92] Σ. Χατζηδάκης, Πειραματική μελέτη επαναψύξεως υπερθερμανθεισών επιφανειών με παράμετρο την υπόψυξη σε πιέσεις 1,2 και 3 bar, Αθήνα, 2006.

[93] T. R. Foundation, «What is R?,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.r-project.org/about.html.

[94] «Statistics Dictionary,» StatTrek.com, 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://stattrek.com/statistics/dictionary.aspx?definition=residual%20plot.

[95] «The Comprehensive R Archive Network,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://cran.r-project.org/.

[96] «psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://cran.r-project.org/web/packages/psych/index.html.

[97] J. Cermak, A. KItzes, F. Cadek, R. Leyse και D. Dominicis, «PWR Full Length Emergency

Cooling Heat Transfer,» WCAP-7435, 1970.

[98] Y. Murao και T. Duboh, «A study on quench phenomena during reflood phase,» σε *JAERI-M 6984*, 1977.

[99] J. Pinheiro, D. Bates και R-core, «Akaike's An Information Criterion,» R Documentation Stats version, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/AIC.html.

[100] J. Stevens και L. Witte, «Transient film and transition boiling from a sphere,» *International Journal of Heat Mass Transfer,* pp. 443-450, 1971.

[101] E. Kalinin, I. Berlin και V. Kostiouk, «Transition Boiling Heat Transfer,» *Advances in Heat Transfer,* τόμ. 18, pp. 241-323, 1987.

[102] J. Langhaar, Dimensional analysis and theory of models, New York: J. Wiley, 1951.

[103] V. Ransom και e. al., «RELAP5/MOD "0" Code Description: Volume 1,» CDAP-TR-057, 1979.

[104] «Technology Deployment Annual Report 2010,» Idaho National Laboratory, 2010.

[105] I. Brittain και S. Aksan, «OECD-LOFT Large Break LOCA experiments: Phenomenology and Computer Model Analyses,» PSI-Bericht Nr. 72, 1990.

[106] C. Fletcher και C. Kullberg, «Break spectrum analysis for Small Break Loss-Of-Coolant-Accidents in a Resar-3S Plant,» σε *NUREG/CR 4384*, 1985.

[107] E. Stubbe, «Assessment Study of RELAP5/MOD2 Cycle 36.01 Based on the DOEL-2 Steam Generator Tube Rupture Incident of June 1979,» σε *NUREG/IA-0008*, 1986.

[108] 0. Rosdahl και D. Caraher, «Assessment of RELAPS/MOD2 Against Critical Flow Data from Marviken Tests JIT 11 and CFT 21,» σε *NUREG/IA-0007*, 1986.

[109] R. Dallman, R. Gottula, E. Holcomb, W. Jouse, S. Wagoner και P. Wheatley, «Severe Accident SequenceAnalysis Program-AnticipatedT ransient Without Scram Simulations for Browns Feny Nuclear Plant Unit 1,» NUREG/CR-4165, 1987.

[110] C. Fletcher και R. Schultz, «RELAP5/MOD3 Code Manual,» NUREG/CR-5535, 1991.

[111] A. Petruzzi και J. Freixa, *RELAP5: Input Organization,* Barcelona, Spain: 3D SUNCOP Seminars, 2013.

[112] «RELAP5/MOD3.3 CODE MANUAL VOLUME II: APPENDIX A INPUT REQUIREMENTS,» Information Systems Laboratories, Inc., Idaho, 2006.

[113] D. Li, X. Liu και Y. Yang, «Improvement of reflood model in RELAP5 code based on sensitivity analysis,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 303, pp. 163-172, 2016.

[114] A. Ghione, B. Noel, P. Vinai και C. Demazière, «Uncairtainty and sensitivity analysis for the simulation of a station blakout scenario in the Jules Horowitz reactor,» *Annals of Nuclear Energy,* τόμ. 104, pp. 28-41, 2017.

[115] C. Clark, J. Schlegel, T. Hibiki, M. Ishii και I. Kinoshita, «Uncertainty in RELAP5/MOD3.2 calculations for interfacial drag in downward two-phase flow,» *Annals of Nuclear Energy,* τόμ. 94, pp. 230-240, 2016.

[116] S. M. Hoseyni και M. Pourgol-Mohammad, «Model Uncertainty in Severe Accident Calculations: A Structural Methodology with Application to LOFT LP-FP-2 Experiment,» *Nuclear Technology,* τόμ. 193, 2016.

[117] B. Chung, J. C. Young, S. Lee, Y. bang, K. Seul και H. Kim, «Improvements to the RELAP5/MOD3 Reflood Model and Uncertainty Quantification of Reflood Peak Clad Temperature,» U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C., 1996.

[118] B. Piggott και R. Duffey, «The quenching of irradiated fuel pins,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 32, 1975.

[119] D. W. P. R. H. Green, Perry's Chemical Engineers' Handbook, Eighth Edition, McGraw-Hill Professional, 2008 .

[120] Applied Programming technology, Inc., [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.aptplot.com.

[121] S. Kandlikar, «Critical heat flux in subcooled flow boiling - An assessment of current understanding and future directions for research,» *Multiphase Science and Technology,* τόμ. 13, pp. 207-232, 2001.

[122] S. Simopoulos, «The effect of the precursory cooling on the rewetting rate,» *Kerntechnic,* τόμ. 49, pp. 37-42, 1986.

[123] T. Choi και H. No, «Improvement of the reflood model of RELAP5/MOD3.3 based on the assessments against FLECHT-SEASET tests,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 240, pp. 832-841, 2010.

[124] E. Elias, V. Sanchez και W. Hering, «Development and validation of a transition boiling model for RELAP5:MOD3 reflood simulation,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 183, pp. 269-286, 1998.

[125] S. Choi και H. NO, «An improved RELAP5/MOD3.3 reflood model considering the effect of spacer grids,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 250, pp. 613-625, 2012.

[126] J. Carbajo και A. Siegel, «Review and comparison among the different models for rewetting in LWR's,» *Nuclear engineering and Design,* τόμ. 58, pp. 33-44, 1980.

[127] J. Kim, H. Park, J. Yoon, S. Kim, E. Kim και K. Ahn, «Advanced glycation end product (AGE)-induced proliferation of HEL cells via receptor for AGE-related signal pathways,» *International Journal of Oncology,* τόμ. 33, pp. 493-501, 2008.

[128] «How Nuclear Power Works,» DiaNuke.org, [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.dianuke.org/how-nuclear-power-works/.

[129] «Cooling Power Plants,» World Nuclear Association, February 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/cooling-power-plants.aspx.

[130] «Pressurized Water Reactor,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Pressurized_water_reactor.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Μελέτη της επανάψυξης υπερθερμανθείσας ράβδου πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος,σε κατακόρυφο κανάλι ροής με προσαγωγή νερού σε διάφορες συνθήκες

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΝΙΚΗΣ Μ. ΛΥΜΠΕΡΕΑ

Διπλωματούχου Χημικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων:
Ευάγγελος Π. Χίνης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2018

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ 193
2 ΠΡΟΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ 195
2.1 Διαστολικός σύνδεσμος 195
2.2 Καθαρισμός αντιστάσεων και Δοχείου Βρασμού 198
3 ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΩΝ 205
3.1 Διακριβώσεις ADC 207
3.1.1 Διακρίβωση ADC 1 207
3.1.2 Διακρίβωση ADC 2 213
3.2 Διακριβώσεις MUX 217
3.2.1 Διακρίβωση MUX A 217
3.2.2 Διακρίβωση MUX B 222
3.3 Διακρίβωση μαγνητικών ροομέτρων 226
4 ΑΡΧΕΙΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 233
4.1 Αρχεία μιας πειραματικής προσομοίωσης 233
4.2 Αρχεία μιας μιας πειραματικής σειράς προσομοιώσεων 238
5 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 249
5.1 Αλγόριθμος υπολογισμού θερμοκρασίας και χρονικής στιγμής επανάψυξης ενός θερμοστοιχείου της ράβδου 249
5.2 Περιγραφή εγγενών συναρτήσεων του λογισμικού R Statistics που χρησιμοποιήθηκαν κατά την επεξεργασία 250
6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ RELAP5/MOD3.3 ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΕΠΑΝΑΨΥΞΗΣ ΕΚ ΤΩΝ ΚΑΤΩ 257
6.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων με τη χρήση του AptPlot 268
6.2 Έλεγχοι παραμέτρων προσομοίωσης 271
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 275

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα Π1 Σχηματική αναπαράσταση θερμοϋδραυλικού κυκλώματος του εργαστηρίου. Με μπλε έχει χρωματιστεί ο διαστολικός σύνδεσμος.....Π-196
Σχήμα Π2 Φωτογραφία (πάνω), όψεις (κάτω) του διαστολικού συνδέσμου που χρησιμοποιήθηκε [1].....Π-198
Σχήμα Π3 Αντιστάσεις και εσωτερικό δοχείου βρασμού πριν τον καθαρισμό.....Π-199
Σχήμα Π4 Αντίσταση η οποία είχε αστοχήσει στο παρελθόν λόγω συσσώρευσης αλάτων πριν και μετά τον καθαρισμό με το First Spray.....Π-203
Σχήμα Π5 Εγκατάσταση καθαρισμού της αντίστασης.....Π-204
Σχήμα Π6 Αντιστάσεις και δοχείο μετά τον καθαρισμό με φωσφορικό οξύ.....Π-204
Σχήμα Π7 Διάταξη βαθμονόμησης ADC1 [9].....Π-209
Σχήμα Π8 Γραφική απεικόνιση των τιμών διακρίβωσης του ADC1.....Π-210
Σχήμα Π9 Κατανομή τυποποιημένων υπολοίπων για τον ADC1.....Π-212
Σχήμα Π10 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και α_1 της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής του ADC1 σε επίπεδα εμπιστοσύνης 5% και 1%.....Π-213
Σχήμα Π11 Γραφική απεικόνιση των τιμών διακρίβωσης του ADC2.....Π-214
Σχήμα Π12 Κατανομή τυποποιημένων υπολοίπων για τον ADC2.....Π-216
Σχήμα Π13 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και α_1 της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής του ADC2 σε επίπεδα εμπιστοσύνης 5% και 1%.....Π-217
Σχήμα Π14 Διάταξη βαθμονόμησης MUX [9].....Π-218
Σχήμα Π15 Γραφική απεικόνιση των τιμών διακρίβωσης του MUX A.....Π-219
Σχήμα Π16 Κατανομή τυποποιημένων υπολοίπων για τον MUX A.....Π-221
Σχήμα Π17 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και α_1 της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής του MUX A σε επίπεδα εμπιστοσύνης 5% και 1%.....Π-221
Σχήμα Π18 Γραφική απεικόνιση των τιμών διακρίβωσης του MUX B.....Π-223
Σχήμα Π19 Κατανομή τυποποιημένων υπολοίπων για τον MUX B.....Π-225
Σχήμα Π20 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και α_1 της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής του MUX B σε επίπεδα εμπιστοσύνης 5% και 1%.....Π-225
Σχήμα Π21 Διάταξη βαθμονόμησης των ροομέτρων.....Π-226
Σχήμα Π22 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και α_1 της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής του E+H1 σε επίπεδα εμπιστοσύνης 5% και 1% σε πίεση 1 bar και θερμοκρασίες νερού 25 °C και 95°C.....Π-229
Σχήμα Π23 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και α_1 της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής του E+H1 σε επίπεδα εμπιστοσύνης 5% και 1% σε πιέσεις 1 και 2 bar και θερμοκρασία νερού 25 °C.....Π-230
Σχήμα Π24 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και α_1 της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής του E+H2 σε επίπεδα εμπιστοσύνης 5% και 1% σε πίεση 1 bar και θερμοκρασίες νερού 25 °C και 95°C.....Π-230
Σχήμα Π25 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και α_1 της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής του E+H2 σε επίπεδα εμπιστοσύνης 5% και 1% σε πιέσεις 1 και 2 bar και θερμοκρασία νερού 25 °C.....Π-231
Σχήμα Π26 Elevation vs Time of quenching.png.....Π-234
Σχήμα Π27 Elevation vs Quench Temperature.png.....Π-234
Σχήμα Π28 Rewetting History.png.....Π-235
Σχήμα Π29 Rewetting History and First Derivative.png.....Π-236

Σχήμα Π30 Temperature and First Deriv. vs Time.png Π-237
Σχήμα Π31 Tw-u^{-1}.png Π-239
Σχήμα Π32 Tw-Tqmean.png Π-240
Σχήμα Π33 Tw-Tq6.png.....Π-240
Σχήμα Π34 Tw-Tq (all TCs).png Π-241
Σχήμα Π35 Θερμοκρασιακή ιστορία επαναψυχόμενης ράβδου και πρώτη παράγωγος από πείραμα της παρούσης Δ.Δ. (πείραμα No 12051341.14) Π-250
Σχήμα Π36 Διαχωρισμός πλέγματος στη δεξιά κατεύθυνση της ράβδου Π-268
Σχήμα Π6-2 Ανάγνωση δεδομένων RELAP5 με τη βοήθεια του προγράμματος AptPlotΠ-269
Σχήμα Π6-3 Επιλογή αρχείου .plt προς ανάγνωση Π-270
Σχήμα Π6-4 Λίστα παραμέτρων του RELAP5/MOD3.3 και επιλογές προγράμματος για διαγραμματική απεικόνιση ή εξαγωγή των δεδομένων.....Π-270
Σχήμα Π37 Διάγραμμα πειραματικών τιμών και τιμών προσομοίωσης της θερμοκρασίας εισόδου του ψυκτικού έναντι του χρόνου που αφορούν το πείραμα 28051213.14 (συνθήκες πειράματος: κορεσμός, παροχή ψυκτικού 0.050 kg/s, αρχική θερμοκρασία τοιχώματος ράβδου 550 °C) Π-271
Σχήμα Π38 Διάγραμμα πειραματικών τιμών και τιμών προσομοίωσης της παροχής εισόδου του ψυκτικού έναντι του χρόνου που αφορούν το πείραμα 28051213.14 (συνθήκες πειράματος: κορεσμός, παροχή ψυκτικού 0.050 kg/s, αρχική θερμοκρασία τοιχώματος ράβδου 550 °C) Π-272
Σχήμα Π39 Κρίσιμη θερμική ροή του κόμβου 10 του καναλιού δοκιμών όπως υπολογίστηκε από τον κώδικα RELAP5 και αφορά το πείραμα 28051213.14 (συνθήκες πειράματος: κορεσμός, παροχή ψυκτικού 0.050 kg/s, αρχική θερμοκρασία τοιχώματος ράβδου 550 °C)..Π-273
Σχήμα Π40 Θερμοκρασιακή ιστορία του κόμβου 10 όπως υπολογίστηκε από τον κώδικα RELAP5 και αφορά το πείραμα 28051213.14 (συνθήκες πειράματος: κορεσμός, παροχή ψυκτικού 0.050 kg/s, αρχική θερμοκρασία τοιχώματος ράβδου 550 °C) Π-274

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας Π1 Κανάλια ADC-PCL718 και συνδεδεμένοι σταθμοί μέτρησης Π-206
Πίνακας Π2 Κανάλια ADC-PCL717 και συνδεδεμένοι σταθμοί μέτρησης.....Π-206
Πίνακας Π3 Κανάλια MUX A και σταθμοί μέτρησης.....Π-206
Πίνακας Π4 Κανάλια MUX B και σταθμοί μέτρησης Π-207
Πίνακας Π5 Συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας κατά τη διακρίβωση των μαγνητικών ροομέτρων Π-228
Πίνακας Π6 Αποτελέσματα βαθμονόμησης μαγνητικών ροομέτρων.....Π-228

1 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

Λατινικοί χαρακτήρες

Bi: αδιάστατος αριθμός Biot, $\frac{h\delta}{k}$

c: ειδική θερμότητα του περιβλήματος (J/kg·K)

f: συντελεστής τριβής

G: ροή μάζας του ψυκτικού (kg/s)

G_p: ροή μάζας του ψυκτικού ανά μονάδα περιμέτρου, (kg/m·s)

G_A: ροή μάζας του ψυκτικού ανά μονάδα επιφανείας, (kg/m^2·s)

h: συντελεστής μετάδοσης θερμότητας από το περίβλημα στο ρευστό (W/m^2·K)

k: συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του περιβλήματος (W/m·K)

P: πίεση (bar)

Pe: αδιάστατη ταχύτητα επανάψυξης, $\frac{\rho c \delta u}{k}$

P_w: βρεχόμενη περίμετρος (m)

q΄΄: ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας ανά μονάδα επιφανείας (W/m^2)

q΄΄΄: ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας ανά μονάδα όγκου (W/m^3)

r: η ακτινική συντεταγμένη της ράβδου

R: ακτίνα της ράβδου (m)

R_{ch}: εσωτερική ακτίνα του καναλιού δοκιμών (m)

t: η μεταβλητή του χρόνου (s)

T^*: αδιάστατο θερμοκρασιακό σύνολο, $\frac{T_q - T_s}{T_w - T_s}$

T_c: θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού (K)

T_l: τοπική θερμοκρασία ψυκτικού (K)

T_q: θερμοκρασία επανάψυξης (K)

T_s: θερμοκρασία κορεσμού του ψυκτικού (K)

T_{sput}: θερμοκρασία sputtering (K)

T_w: αρχική θερμοκρασία υπέρθερμης επιφάνειας (K)

T_{CHF}: θερμοκρασία κρίσιμης θερμικής ροής (Critical Heat Flux)(K)

T_{MFB}: θερμοκρασία σημείου ξηράνσεως (Minimum Film Boiling)(K)

ΔT_q: βαθμός υπόψυξης στο υγρό μέτωπο, $T_q - T_s$ (K)

ΔT_{sub}: βαθμός υπόψυξης, $T_s - T_c$ (K)

u: ταχύτητα επανάψυξης (m/s)

u_{in}: ταχύτητα εισόδου του ψυκτικού (m/s)

x: η αξονική συντεταγμένη της ράβδου

Ελληνικοί χαρακτήρες

α: κλάσμα κενού (void fraction)

β: $\beta = \sqrt{\frac{(k\rho c)_l}{(k\rho c)_w}}$

γ: συντελεστής συνθηκών επιφάνειας

ε: πάχος περιβλήματος (m)

θ: αδιάστατη θερμοκρασία Leidenfrost, $\frac{T_w - T_q}{T_w - T_s}$

θ_1: αδιάστατο θερμοκρασιακό σύνολο, $\frac{T_w - T_q}{T_q - T_s}$

ρ: πυκνότητα ρευστού (kg/m^3)

2 ΠΡΟΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

2.1 Διαστολικός σύνδεσμος

Στις 20/1/2012 έγινε η εγκατάσταση ενός διαστολικού συνδέσμου (expansion joint) στον κλάδο τροφοδοσίας ψυκτικού του Τμήματος Δοκιμών από το Δοχείο Βρασμού. Η σύνδεση έγινε στο κατακόρυφο μέρος του κλάδου εξόδου του Δοχείου Βρασμού με ταυτόχρονη εγκατάσταση καινούριας σωλήνωσης (Σχήμα Π2). Ο λόγος που μας οδήγησε στην εγκατάσταση του διαστολικού συνδέσμου ήταν η παρατήρηση διαρροής ατμού από τον εν λόγω κλάδου, κατά τη διάρκεια πειράματος σε πίεση 3 bar. Η διαρροή οφειλόταν σε οπή μικρών διαστάσεων ιδιαίτερα δυσδιάκριτη με γυμνό μάτι. Η αστοχία αυτή θεωρήθηκε ότι ήταν αποτέλεσμα αφενός της διάβρωσης της σωλήνας και αφετέρου της θερμικής και μηχανικής κόπωσης λόγω της συνεχούς συστολής και διαστολής της εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών του κυκλοφορούντος νερού κατά τη διάρκεια της πολυετούς λειτουργίας του θερμοϋδραυλικού κυκλώματος.

Δεδομένου ότι η αστοχία στη σωλήνωση παρατηρήθηκε στο μέσον αυτής, όπου η μηχανική καταπόνηση είναι εντονότερη λόγω βέλους κάμψης, αποφασίσθηκε η εγκατάσταση διαστολικού συνδέσμου με απώτερο σκοπό την απορρόφηση της θερμικής διαστολής έτσι ώστε να μην προκαλείται στρέβλωση της σωλήνωσης. Σημαντικό στοιχείο είναι πως το κομμάτι του κλάδου που αστόχησε και εγκαταστάθηκε βρίσκεται μεταξύ δύο σταθερών σημείων της εγκατάστασης.

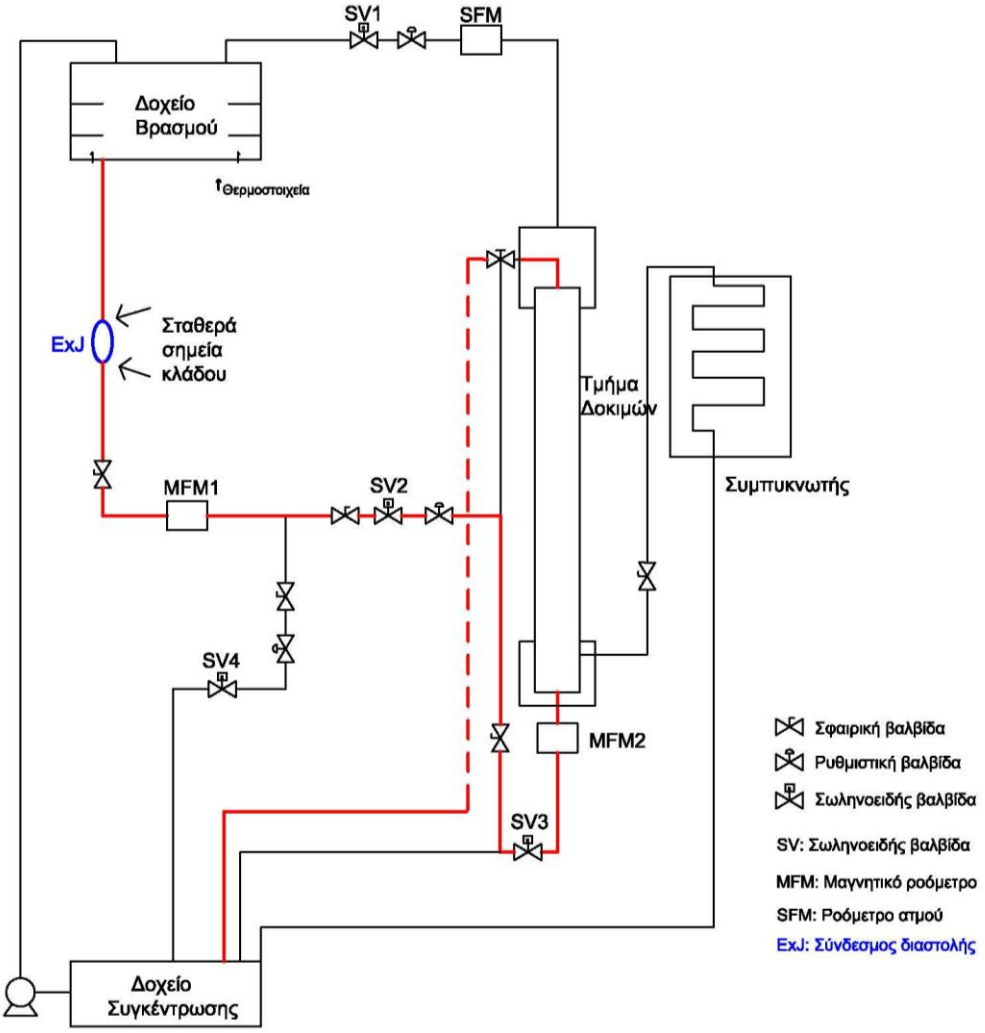
Λειτουργία

Η κύρια λειτουργία ενός διαστολικού συνδέσμου είναι η απορρόφηση των μεταβολών του μήκους των διάφορων συστημάτων σωληνώσεων, μηχανημάτων και συσκευών που προκαλούνται είτε από διακυμάνσεις της θερμοκρασίας είτε από κακή ευθυγράμμιση κατά τη διάρκεια εγκατάστασης ή κατασκευής [1] [10].

Ο σύνδεσμος λειτουργεί τηλεσκοπικά. Η κίνηση των σωληνώσεων λόγω θερμικής διαστολής απορροφάται από το έλασμα (bellow) (Σχήμα Π3). Το έλασμα λόγω της θέσης του επιτρέπει την κίνηση μόνο του εξωτερικού περιβλήματος του συνδέσμου

[10] Όλες οι βιβλιογραφικές αναφορές, αντιστοιχούν στην βιβλιογραφία των Παραρτημάτων και όχι του κυρίως κειμένου.

με τέτοιο τρόπο ώστε να παραμένει στεγανό Η μετακίνηση αυτή πραγματοποιείται χωρίς καμία καταπόνηση του κλάδου σωληνώσεων.



Σχήμα Π2 Σχηματική αναπαράσταση θερμοϋδραυλικού κυκλώματος του εργαστηρίου. Με μπλε έχει χρωματιστεί ο διαστολικός σύνδεσμος

Χαρακτηριστικά συνδέσμου

Ύστερα από κατάλληλη έρευνα αγοράς έγινε παραγγελία από την εταιρία ΜΕΤΑΛΛΟΒΙΟΤΕΧΝΙΚΗ Α.Β.Ε.Ε. του διαστολικού συνδέσμου «small expansion joint Type Ga» της εταιρίας BOA AG (Σχήμα Π3).

DN: 3/4¨.

Πίεση: PN 16.

Αντοχή: 5000 πλήρεις κύκλοι φορτίου.

Θερμοκρασιακή αντοχή: έως 450 ºC.

Μήκος συμπίεσης: 25 mm

Έλεγχος

Πίεσης

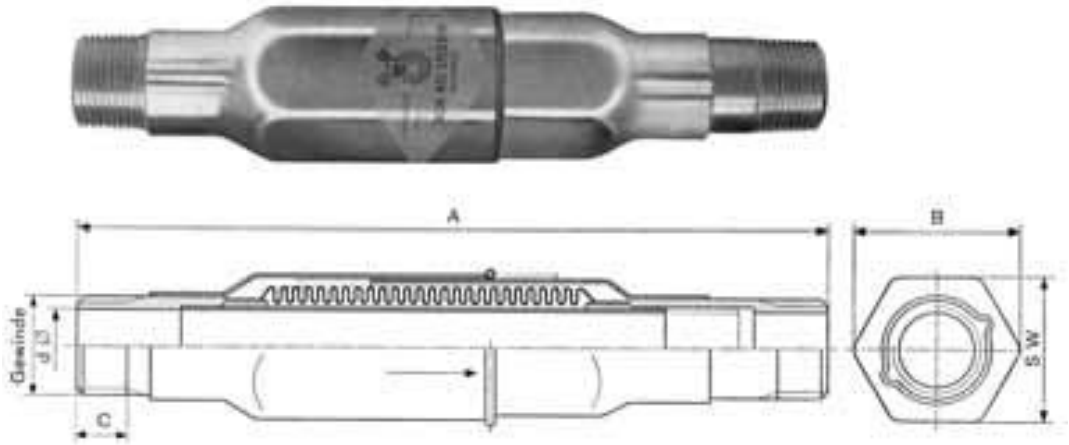
Μετά την εγκατάσταση του διαστολικού συνδέσμου έγινε έλεγχος πίεσης στα 41 psi = 2.83 bar για τυχόν διαρροές. Ο έλεγχος κρίθηκε επιτυχής.

Θερμοκρασίας

Κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών ασκήσεων που ακολούθησαν, παρατηρήθηκε μετακίνηση του συνδέσμου λόγω αύξησης θερμοκρασίας από την κυκλοφορία θερμού νερού (≈ 90 ºC) χωρίς ωστόσο να στρεβλωθεί ή να καταπονηθεί η σωλήνωση.

Μονωτικής συμπεριφοράς

Για να ελέγξουμε τη μονωτική συμπεριφορά του συνδέσμου έγινε μέτρηση της θερμοκρασίας του περιβλήματός του κατά τη διάρκεια κυκλοφορίας νερού θερμοκρασίας 50 ºC στο εσωτερικό του συνδέσμου. Η θερμοκρασία η οποία μετρήθηκε ήταν 25 ºC αποτέλεσμα που επιβεβαίωσε την καλή μονωτική συμπεριφορά του.



Σχήμα Π3 Φωτογραφία (πάνω), όψεις (κάτω) του διαστολικού συνδέσμου που χρησιμοποιήθηκε **[1]**

2.2 Καθαρισμός αντιστάσεων και Δοχείου Βρασμού

Η διάβρωση και η επικάθιση αλάτων πάνω σε μεταλλικό εξοπλισμό βιομηχανικών εγκαταστάσεων είναι ένα πολύ συχνό πρόβλημα το οποίο χρίζει αντιμετώπισης. Ωστόσο, η αντιμετώπισή του διαφέρει ανάλογα με τη χρήση και τη λειτουργία του εξοπλισμού. Για παράδειγμα, ο μεταλλικός εξοπλισμός όπου χρησιμοποιείται για παρασκευή και φύλαξη τροφίμων πρέπει να καθαρίζεται καθημερινά. Από την άλλη, ο εξοπλισμός εγκαταστάσεων μεταλλουργίας αν και πρέπει να ελέγχεται για τυχόν διαβρώσεις και αστοχίες, δεν είναι απαραίτητος ο συνεχής καθαρισμός του.

Όσον αφορά τη θερμοϋδραυλική εγκατάσταση του εργαστηρίου και λόγω της πολυετούς λειτουργίας της, έπρεπε να γίνει έλεγχος όλων του μηχανολογικού εξοπλισμού καθώς και των συστημάτων μέτρησης και ελέγχου πριν την έναρξη των πειραμάτων της ΔΔ. Κατά τον έλεγχο διαπιστώθηκε πως τα θερμοστοιχεία του Δοχείου Βρασμού δεν είχαν τον ίδιο χρόνο απόκρισης καθώς το ένα παρουσίαζε άμεσα οποιαδήποτε αλλαγή της θερμοκρασίας ενώ το δεύτερο είχε σημαντική καθυστέρηση απόκρισης. Έτσι αποφασίστηκε το άνοιγμα του Δοχείου Βρασμού ώστε να γίνει επιθεώρηση του εσωτερικού του (Σχήμα Π4). Κατά την επιθεώρηση παρατηρήθηκε πως τόσο οι αντιστάσεις όσο και το Δοχείο από το επίπεδο των αντιστάσεων και κάτω ήταν επικαλυμμένα με ένα παχύ στρώμα αλάτων και

προϊόντων οξείδωσης. Αποφασίστηκε λοιπόν ο άμεσος καθαρισμός της εγκατάστασης.

Μετά από εκτενή βιβλιογραφική έρευνα αποφασίστηκε χημικός και όχι μηχανικός καθαρισμός της εγκατάστασης. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του χημικού έναντι του μηχανικού καθαρισμού είναι ότι δεν απαιτείται αποσυναρμολόγηση και επανασυναρμολόγηση της μηχανικής εγκατάστασης και αν ο καθαρισμός γίνει σωστά, το μέταλλο δεν καταστρέφεται και είναι λιγότερο ευάλωτο σε μελλοντική διάβρωση [2].

Σχήμα Π4 Αντιστάσεις και εσωτερικό δοχείου βρασμού πριν τον καθαρισμό

Χημικός καθαρισμός

Για την απομάκρυνση ανόργανων ουσιών (άλατα, σκουριά) από μεταλλικές επιφάνειες κύρια τακτική αποτελεί η χρήση ενός κατάλληλου οξέως. Δυστυχώς όμως δεν είναι όλα τα οξέα κατάλληλα για όλες τις μεταλλικές επιφάνειες για το λόγο ότι

μπορεί να αντιδράσουν και να τις διαβρώσουν σε τέτοιο βαθμό που να πρέπει να απομακρυνθούν και να αντικατασταθούν με καινούριες.

Για παράδειγμα, η λιγότερο χρονοβόρα και οικονομική λύση καθαρισμού του χάλυβα αποτελεί η χρήση του υδροχλωρικού οξέως (HCl). Ωστόσο, το υδροχλωρικό οξύ είναι αρκετά επιθετικό σε μέταλλα όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας επειδή το αλογονίδιο του οξέως αντιδρά με την ανοξείδωτη προστατευτική στοιβάδα χρωμίου με αποτέλεσμα να τη διαβρώνει με πολύ γρήγορο ρυθμό. Από την άλλη, το νιτρικό οξύ (HNO_3) είναι το κατάλληλο οξύ για τον καθαρισμό ανοξείδωτου χάλυβα ωστόσο διαβρώνει μέταλλα όπως ο απλός χάλυβας και η χρήση του απαιτεί μεγάλη προσοχή [2].

Κάποιες λιγότερο επιθετικές και ήπιες λύσεις κατάλληλες σχεδόν για κάθε μεταλλική επιφάνεια αποτελούν το κιτρικό οξύ ($C_6H_8O_7$), το σουλφαμικό οξύ (H_3NSO_3) ή ένα μίγμα αυτών των δύο [3]. Όσον αφορά όμως τη συγκεκριμένη περίπτωση του Δοχείου Βρασμού του ΘΥΚ, η διαδικασία που απαιτείτο για τον πλήρη καθαρισμό του θεωρήθηκε πολύ χρονοβόρα καθώς θα περιελάμβανε θέρμανση και συνεχή ανακυκλοφορία αυτών των οξέων κάτι το οποίο δεν ήταν επιθυμητό.

Η λύση που προκρίθηκε ήταν η χρήση φωσφορικού οξέως (H_3PO_4). Το φωσφορικό οξύ είναι ένα πολύ σημαντικό βιομηχανικό χημικό. Είναι πιο ισχυρό από τα περισσότερα οργανικά οξέα αλλά πιο ήπιο από το υδροχλωρικό οξύ [4]. Χρησιμοποιείται πολύ συχνά στον καθαρισμό χαλύβδινων σωληνώσεων και προτιμάται από το υδροχλωρικό οξύ για τον καθαρισμό επιφανειών από ανοξείδωτο χάλυβα [5]. Ένα ακόμα πλεονέκτημα του φωσφορικού οξέως είναι ότι βοηθάει στην παθητικοποίηση[11] της επιφάνειας που είναι προς καθαρισμό [3].

Ωστόσο, πριν την τελική απόφαση για τη χρήση του φωσφορικού οξέως έπρεπε να μελετηθούν και τα προϊόντα αντίδρασης του οξέως με τα άλατα του σκληρού νερού και να διαπιστωθεί αν είναι ασφαλής η ρίψη τους στο περιβάλλον μέσω του αποχετευτικού συστήματος μετά το πέρας του καθαρισμού. Επειδή τα άλατα του νερού είναι κατά κύριο λόγο άλατα ασβεστίου και μαγνησίου, τα προϊόντα της αντίδρασής τους με το H_3PO_4 αποτελούν το φωσφορικό άλας ασβεστίου

[11] Με τον όρο παθητικοποίηση εννοούμε την απώλεια της ηλεκτροχημικής δραστικότητας των μετάλλων με αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού διάβρωσής του. Κατά άλλους, παθητικοποίηση είναι η διαδικασία καθαρισμού μεταλλικών επιφανειών με οξύ με αποτέλεσμα την διάλυση των οξειδίων του σιδήρου [2].

($Ca(H_2PO_4)_2$) και το φωσφορικό άλας μαγνησίου ($Mg(H_2PO_4)_2$) αντίστοιχα. Όμως σχεδόν όλα τα φωσφορικά άλατα, συμπεριλαμβανομένων και των προαναφερθέντων, είναι απόλυτα ασφαλή για το περιβάλλον αφού αποτελούν κύριο συστατικό πολλών τροφίμων (γαλακτοκομικά, κρέας, σιτηρά κ.ά.) και χρησιμοποιούνται πολύ συχνά στην φαρμακοβιομηχανία σαν συμπληρώματα διατροφής [6].

Αποφασίστηκε λοιπόν η χρήση του φωσφορικού οξέως για τον καθαρισμό τόσο των ηλεκτρικών αντιστάσεων του Δοχείου (ανοξείδωτος χάλυβας) όσο και του Δοχείου Βρασμού (χάλυβας) στον πυθμένα του οποίου είναι στεγανωμένα δύο θερμοστοιχεία τύπου Κ από ανοξείδωτο χάλυβα.

Καθαρισμός αντιστάσεων

Πριν τον καθαρισμό των τεσσάρων αντιστάσεων του Δοχείου Βρασμού έγιναν δοκιμές πιο ήπιων καθαριστικών πάνω σε μια παλαιότερη αντίσταση (αντίσταση ελέγχου) του Δοχείου Βρασμού η οποία αστόχησε στο παρελθόν λόγω συσσώρευσης αλάτων (Σχήμα Π5 αριστερά). Σκοπός ήταν να δοκιμαστούν χημικά καθαριστικά ευρείας κλίμακας προτού αγοραστούν βιομηχανικά χημικά.

Η πρώτη δοκιμή ήταν με το καθαριστικό αλάτων "First spray" της εταιρίας NewLine. Αφέθηκε η μία άκρη της αντίστασης ελέγχου μέσα στο υγρό για περίπου μία ημέρα και αφού ξεπλύθηκε και τρίφτηκε, παρατηρήσαμε μόνο μερικό καθαρισμό της αντίστασης ο οποίος όμως δεν θεωρήθηκε αποδεκτός (Σχήμα Π5 δεξιά).

Η δεύτερη δοκιμή ήταν με το καθαριστικό αλάτων "Viakal" το οποίο αφού το θερμάναμε στους 50 ºC εμβαπτίσαμε στη συνέχεια την αντίσταση. Η εγκατάσταση καθαρισμού που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην Σχήμα Π6. Μετά από 2 ώρες στο διάλυμα και ενδιάμεσο ξέπλυμα με άφθονο νερό και τρίψιμο με σφουγγάρι, τα υπολείμματα των αλάτων ήταν ακόμη εμφανή και θεωρήθηκε πως ο επιθυμητός βαθμός αφαίρεσης των αλάτων ήταν ανέφικτος με τη χρήση του εν λόγω καθαριστικού.

Η τελική δοκιμή ήταν η χρήση διαλύματος 10% φωσφορικού οξέως πάνω στα άλατα της αντίστασης ελέγχου. Από την πρώτη στιγμή της εμβάπτισης της αντίστασης στο διάλυμα του οξέως ξεκίνησε άμεσα η παραγωγή φυσαλίδων διοξειδίου του άνθρακα

η οποία υποδείκνυε και την αντίδρασή του με τα ανθρακικά άλατα της αντίστασης. Ακόμη, ο χρόνος που χρειάστηκε για να γίνει πλήρης καθαρισμός ήταν περίπου 20 λεπτά. Οπότε το φωσφορικό οξύ αποδείχτηκε και από πρακτική πλευρά να είναι η καλύτερη λύση για τον καθαρισμό των αντιστάσεων του Δοχείου Βρασμού.

Τα βήματα καθαρισμού των τεσσάρων αντιστάσεων ήταν τα εξής:

1. Μετά την απομάκρυνση κάθε αντίστασης από το Δοχείο Βρασμού, έγινε πλύση της κάθε μίας με άφθονο νερό.
2. Στη συνέχεια ακολούθησε εμβάπτιση της αντίστασης στο διάλυμα του φωσφορικού οξέως μέχρι να παρατηρηθεί ο τερματισμός της αντίδρασης των αλάτων με το οξύ.
3. Έπειτα ακολούθησε πλύση της αντίστασης με άφθονο νερό για μεγάλο χρονικό διάστημα με σκοπό την απομάκρυνση των προϊόντων αντίδρασης αλλά και την αραίωση της πυκνότητας του οξέως στην επιφάνεια της αντίστασης. Συγχρόνως πραγματοποιήθηκε και ελαφρύ τρίψιμο της αντίστασης με το χέρι για τη διευκόλυνση της απομάκρυνσης των ουσιών.
4. Τέλος, οι αντιστάσεις αφέθηκαν για μία ημέρα στο περιβάλλον ώστε να γίνει παθητικοποίηση της επιφάνειάς τους με τη βοήθεια του αέρα [2].

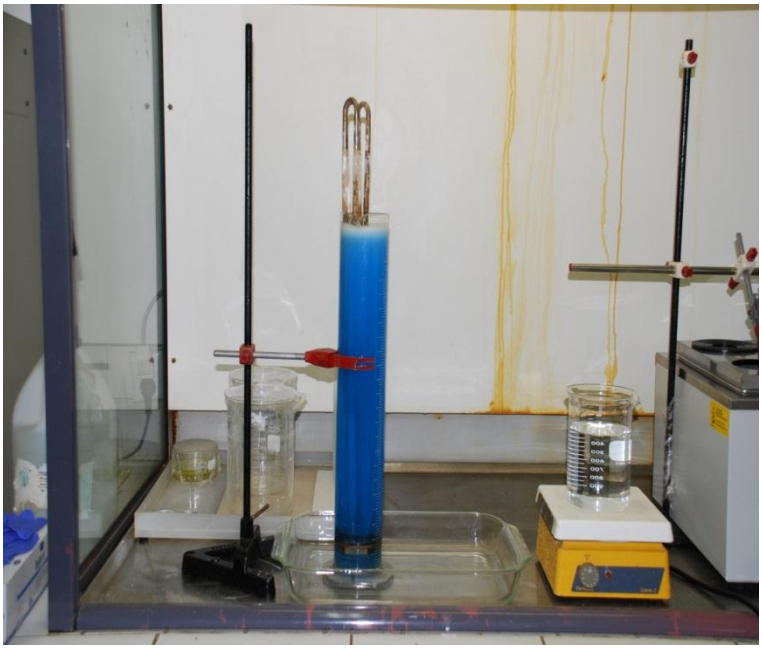
Οι αντιστάσεις μετά τον καθαρισμό με το φωσφορικό οξύ ελέγχθηκαν για οποιαδήποτε πιθανή διάβρωση της επιφάνειάς τους λόγω αντίδρασης με το οξύ και έπειτα επανατοποθετήθηκαν στο Δοχείο Βρασμού όπως φαίνεται στην Σχήμα Π7.

Καθαρισμός Δοχείου Βρασμού

Για τον καθαρισμό του Δοχείου Βρασμού χρησιμοποιήθηκε διάλυμα 10% φωσφορικού οξέως όπως χρησιμοποιήθηκε και για τις αντιστάσεις. Άμεσα με την ρίψη του διαλύματος στο εσωτερικό του Δοχείου παρατηρήθηκε παραγωγή φυσαλίδων CO_2. Στη συνέχεια το χρησιμοποιημένο διάλυμα του οξέως, αφού διακριβώθηκε πως αντέδρασε πλήρως με τα άλατα, οδηγήθηκε απευθείας στην αποχέτευση του εργαστηρίου.

Ο έλεγχος για να διαπιστωθεί ότι η αντίδραση ήταν πλήρης και ολοκληρωμένη έγινε με τη μέτρηση του τελικού pH του διαλύματος με πεχαμετρικό χαρτί. Μια πλήρης αντίδραση θα οδηγούσε σε μέτρηση pH κοντά στο 7, όπως κι έγινε. Στην περίπτωση που η τιμή δεν γινόταν αποδεκτή, είχε ήδη συμφωνηθεί η προσθήκη επιπλέον νερού στο Δοχείο για τη μείωση της πυκνότητας του διαλύματος.

Σχήμα Π5 Αντίσταση η οποία είχε αστοχήσει στο παρελθόν λόγω συσσώρευσης αλάτων πριν και μετά τον καθαρισμό με το First Spray



Σχήμα Π6 Εγκατάσταση καθαρισμού της αντίστασης

Σχήμα Π7 Αντιστάσεις και δοχείο μετά τον καθαρισμό με φωσφορικό οξύ

3 ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΩΝ

Πριν την έναρξη κάθε σειράς πειραμάτων κρίνεται απαραίτητος ο έλεγχος της λειτουργίας όλων των μετρητικών σταθμών της πειραματικής εγκατάστασης ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα και συγκρίσιμα με τις υπόλοιπες ερευνητικές εργασίες.

Για τον παραπάνω λόγο, πριν την έναρξη των πειραμάτων της παρούσας ΔΔ έπρεπε να πραγματοποιηθούν διακριβώσεις των αναλογοψηφιακών μετατροπέων, των ενισχυτών – πολυπλεκτών και των μαγνητικών ροομέτρων της εγκατάστασης.

Η διακρίβωση των αναλογοψηφιακών μετατροπέων και των ενισχυτών – πολυπλεκτών ήταν αναγκαία εξαιτίας του γεγονότος ότι όλα τα αναλογικά σήματα των μετρητικών σταθμών της εγκατάστασης (θερμοστοιχεία, μαγνητικά ροόμετρα, μεταλλάκτες πιέσεως) καταλήγουν στους αναλογοψηφιακούς μετατροπείς ADC–PCL718 (ADC1) και ADC–PCL717 (ADC2) είτε απευθείας (κανάλια 4-7 του ADC1 και κανάλια 0 - 2 του ADC2) είτε μέσω των ενισχυτών – πολυπλεκτών τύπου PCLD-789D MUX A και MUX B για τις περιπτώσεις των θερμοστοιχείων τύπου K και J (Πίνακας Π5-Π4). Έτσι η οποιαδήποτε ανακρίβεια των παραπάνω οργάνων έπρεπε να διαπιστωθεί και να διορθωθεί ώστε να μειώσουμε στο ελάχιστο τα οποιαδήποτε συστηματικά σφάλματα των πειραματικών αποτελεσμάτων μας.

Η διακρίβωση των μαγνητικών ροομέτρων της εγκατάστασης θεωρήθηκε απαραίτητη καθώς εκτός του αναλογικού σήματος που στέλνουν στους αναλογο – ψηφιακούς μετατροπείς προσφέρουν και οπτική ένδειξη της παροχής κατά τη διάρκεια του πειράματος παρέχοντας στον πειραματιστή τη δυνατότητα ρύθμισης και διατήρησης της ροής του ψυκτικού μέσου καθόλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

Πίνακας Π5 Κανάλια ADC-PCL718 και συνδεδεμένοι σταθμοί μέτρησης

Κανάλι	Σταθμός μέτρησης
0	MUX A
1	Ηλεκτρονικό σημείο πάγου θερμοστοιχείων τύπου K
2	MUX B
3	Ηλεκτρονικό σημείο πάγου θερμοστοιχείων τύπου J
4	Μαγνητικό ροόμετρο A
5	Μανόμετρο πίεσης ατμού στο Δοχείο Βρασμού
6	Μανόμετρο πίεσης στην άνω κεφαλή του Τμήματος Δοκιμών
7	Μανόμετρο πίεσης στο κάτω μέρος του Τμήματος Δοκιμών

Πίνακας Π6 Κανάλια ADC-PCL717 και συνδεδεμένοι σταθμοί μέτρησης

Κανάλι	Σταθμός μέτρησης
0	Ροόμετρο ατμού
1	Μαγνητικό ροόμετρο B

Πίνακας Π7 Κανάλια MUX A και σταθμοί μέτρησης

Κανάλι	Σταθμός μέτρησης
1	Θερμοστοιχείο ατμού στο Δοχείο Βρασμού
2	Θερμοστοιχείο υγρού στο Δοχείο Βρασμού
3	Θερμοστοιχείο ατμού στην άνω κεφαλή του Τμήματος Δοκιμών
4	Θερμοστοιχείο ατμού στο κάτω μέρος του Τμήματος Δοκιμών
5	Θερμοστοιχείο υγρού στην άνω κεφαλή του Τμήματος Δοκιμών
6	Θερμοστοιχείο υγρού στο κάτω μέρος του Τμήματος Δοκιμών
7	Θερμοστοιχείο υγρού στο Δοχείο Συγκέντρωσης
8	Θερμοστοιχείο στην είσοδο του συμπυκνωτή
9	Θερμοστοιχείο στην έξοδο του συμπυκνωτή

*όλα τα θερμοστοιχεία είναι τύπου K

Πίνακας Π8 Κανάλια MUX B και σταθμοί μέτρησης

Κανάλι	Σταθμός μέτρησης
1	Ένδειξη σωληνοειδούς βαλβίδας στον κλάδο by-pass
2	Θερμοστοιχείο 2 του Τμήματος Δοκιμών
3	Θερμοστοιχείο 3 του Τμήματος Δοκιμών
4	Θερμοστοιχείο 4 του Τμήματος Δοκιμών
5	Θερμοστοιχείο 5 του Τμήματος Δοκιμών
6	Θερμοστοιχείο 6 του Τμήματος Δοκιμών
7	Θερμοστοιχείο 7 του Τμήματος Δοκιμών
8	Θερμοστοιχείο 8 του Τμήματος Δοκιμών
9	Θερμοστοιχείο 9 του Τμήματος Δοκιμών
10	Θερμοστοιχείο 10 του Τμήματος Δοκιμών
11	Θερμοστοιχείο 11 του Τμήματος Δοκιμών
12	Ένδειξη σωληνοειδούς βαλβίδας του κλάδου ατμού του Δοχείου Βρασμού
13	Ένδειξη σωληνοειδούς βαλβίδας υγρού εισόδου στο Τμήμα Δοκιμών
14	Ένδειξη σωληνοειδούς βαλβίδας υγρού εξόδου από το Τμήμα Δοκιμών
15	Ένδειξη λειτουργίας της αντλίας

*όλα τα θερμοστοιχεία είναι τύπου J

3.1 Διακριβώσεις ADC

3.1.1 Διακρίβωση ADC 1

Κατά τη διαδικασία διακρίβωσης του ADC1 έγινε έλεγχος για να εξακριβωθεί αν το ψηφιακό σήμα εξόδου του μετατροπέα είναι το ίδιο με το αναλογικό σήμα που δέχεται από τους μετρητικούς σταθμούς. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε για το κανάλι 7 του ADC1 στο οποίο είναι συνδεδεμένο το μανόμετρο πίεσης στο κάτω μέρος του Τμήματος Δοκιμών όπου είναι η είσοδος του ψυκτικού για τα πειράματα της παρούσης ΔΔ.

Η πειραματική διάταξη η οποία συγκροτήθηκε για τον έλεγχο της διακρίβωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα Π8:

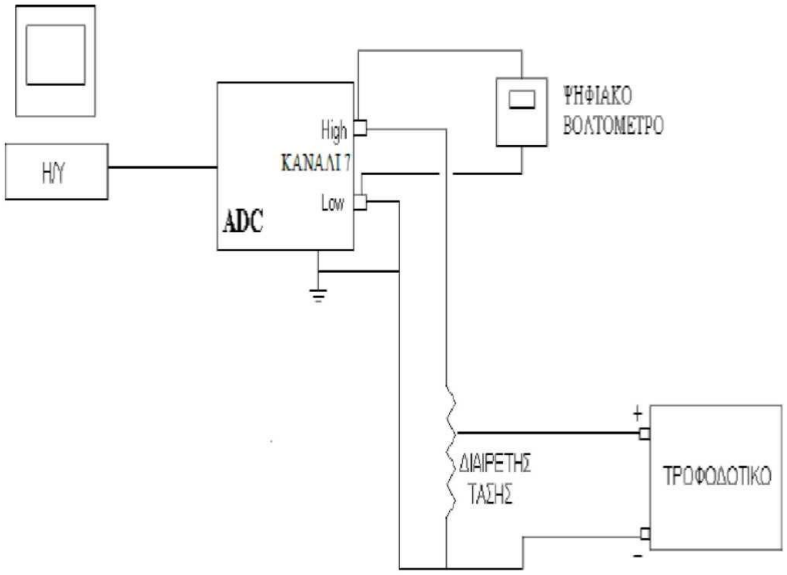
- Συνδέουμε το κανάλι 7 του ADC1 με πηγή σταθερής τάσης. Επειδή το σήμα εισόδου είναι μονοπολικό, η σύνδεση με τον ADC1 είναι απλή. Αυτό σημαίνει πως ο αρνητικός πόλος και ο ακροδέκτης Low του μετατροπέα βραχυκυκλώνονται με την γη του συστήματος ενώ ο θετικός πόλος της πηγής συνδέεται με τον ακροδέκτη High.Η τελική τάση που μετράται είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ του θετικού πόλου και της γης.
- Παράλληλα με την πηγή συνδέουμε διαιρέτη τάσης (ποτενσιόμετρο) για να μπορούμε να ρυθμίζουμε την τάση εισόδου στον ADC1 στην περιοχή λειτουργίας του (0-10 V).
- Παράλληλα με το ποτενσιόμετρο συνδέουμε ένα ψηφιακό βολτόμετρο της εταιρείας Kiethley το οποίο μας παρέχει ένδειξη της τάσης με την οποία τροφοδοτούμε το κανάλι εισόδου του ADC1.
- Με τη βοήθεια του ποτενσιόμετρου τροφοδοτούμε τον ADC με τάση από 0 έως 10 V με βήμα 0.25 V ώστε να καλύψουμε όλη την περιοχή λειτουργίας τουADC1 με τόσες μετρήσεις ώστε να είναι εφικτός και αποδεκτός ο στατιστικός τους έλεγχος.
- Τέλος συλλέγουμε όλα τα ζεύγη τάσεων (τάση εισόδου στον ADC σύμφωνα με την ένδειξη του βολτομέτρου V_{in} – τάση που αντιστοιχεί στην ψηφιακή πληροφορία που δίνει ο ADC V_{out}) και τα συγκρίνουμε.

Η τάση που αντιστοιχεί στην ψηφιακή πληροφορία που δέχεται ο ADC1 λαμβάνεται από το πρόγραμμα MXSCAN [7]. Η μετατροπή της ψηφιακής πληροφορίας σε τάση γίνεται με την σχέση **3-1** [8]

$$V_{out} = \left[\frac{d}{2^v - 1}(V_{max} - V_{min})\right] + V_{min} \qquad 3\text{-}1$$

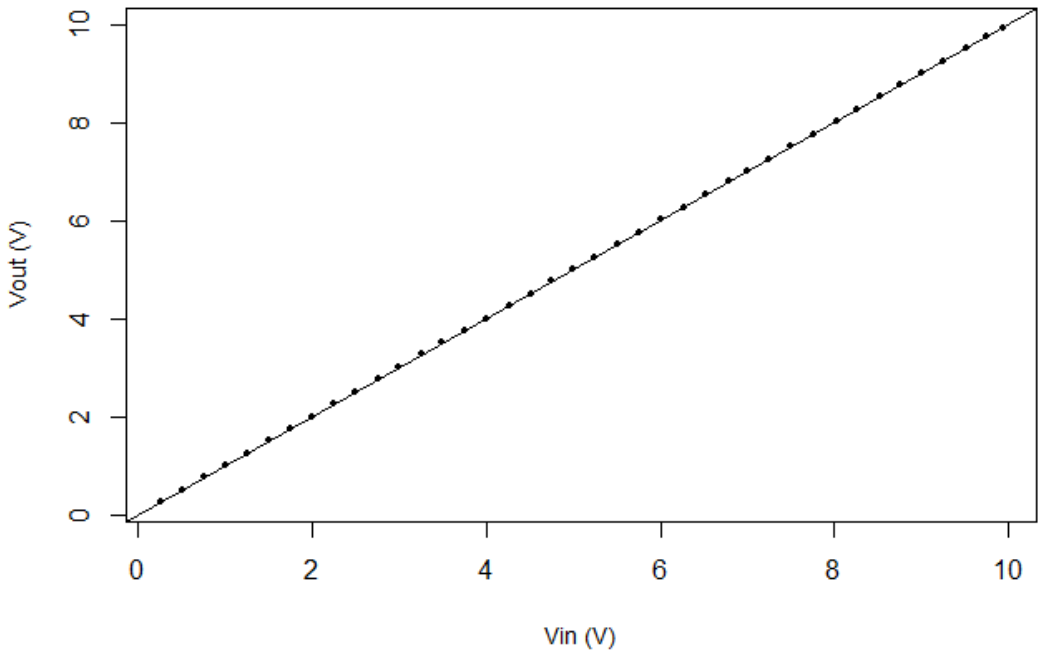
Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων υπολογίζεται η γραμμική συνάρτηση αναδρομής (3-2) και πραγματοποιούνται Student's tests στις παραμέτρους α_0 και α_1 της αναδρομής.

$$V_{out} = a_o + a_1 V_{in} \qquad 3\text{-}2$$



Σχήμα Π8 Διάταξη βαθμονόμησης ADC1 **[9]**

Αποτελέσματα - Συμπεράσματα Από τη στατιστική επεξεργασία προκύπτει πως ο συντελεστής πολλαπλής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 1.0000 άρα η εγγύτητα της προσαρμογής επί των πειραματικών σημείων είναι πάρα πολύ καλή. Επιπλέον, η μέση τετραγωνική απόκλιση RMS παίρνει την τιμή 0.13% η οποία φανερώνει ότι η ποσοστιαία απόκλιση των πειραματικών σημείων από την εξίσωση αναδρομής είναι πολύ μικρή. Στο Σχήμα Π9 απεικονίζεται διαγραμματικά η γραμμική προσαρμογή των τιμών V_{in} και V_{out}.



Σχήμα Π9 Γραφική απεικόνιση των τιμών διακρίβωσης του ADC1

Σε συνδυασμό με τα παραπάνω διενεργήθηκαν στην R στατιστικά τεστ για τον έλεγχο των επόμενων υποθέσεων:

- Συντελεστής α_0

  H_0: Ο συντελεστής α_0 ισούται με το 0

  H_1: Ο συντελεστής α_0 είναι διάφορος του 0

- Συντελεστής α_1

  H_0: Ο συντελεστής α_1 ισούται με το 1

  H_1: Ο συντελεστής α_1 είναι διάφορος του 1

Από τα παραπάνω στατιστικά τεστ προέκυψε ότι η μηδενική υπόθεση για το α_0 απορρίπτεται ενώ η μηδενική υπόθεση για το $\alpha_ι$ είναι αποδεκτή σε διάστημα εμπιστοσύνης 99%. Έτσι καταλήξαμε στην παρακάτω γραμμική συνάρτηση προσαρμογής για τον ADC1:

$$V_{out} = 0.0181 + 0.9997 \cdot V_{in} \qquad 3\text{-}3$$

Όλα τα παραπάνω υπολογίζονται απευθείας μέσα από την R Statistics και συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα που αποτελεί την περίληψη της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής:

```
Residuals:
      Min        1Q    Median        3Q       Max
-0.004132 -0.001344 -0.000022  0.000770  0.003971

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
a0          0.018095   0.000608    29.8   <2e-16 ***
a1          0.999718   0.000103  9680.7   <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 0.00188 on 38 degrees of freedom
Multiple R-squared:     1,  Adjusted R-squared:     1
F-statistic: 9.37e+07 on 1 and 38 DF,  p-value: <2e-16
```

από τις στήλες Estimate και Std.Error ενώ στην στήλη Pr(>|t|) υπολογίζεται η στατιστική σημαντικότητα η οποία αντιστοιχεί στην πιθανότητα απόρριψης της μηδενικής υποθέσεως. Τιμές Pr(>|t|) μικρότερες του 0.05 θεωρούνται στατιστικά σημαντικές και γίνονται αποδεκτές. Έτσι, με την ανάγνωση της τελικής περίληψης μπορούμε να καταλήξουμε άμεσα στις τιμές των συντελεστών της αναδρομής όπου ισούνται με:

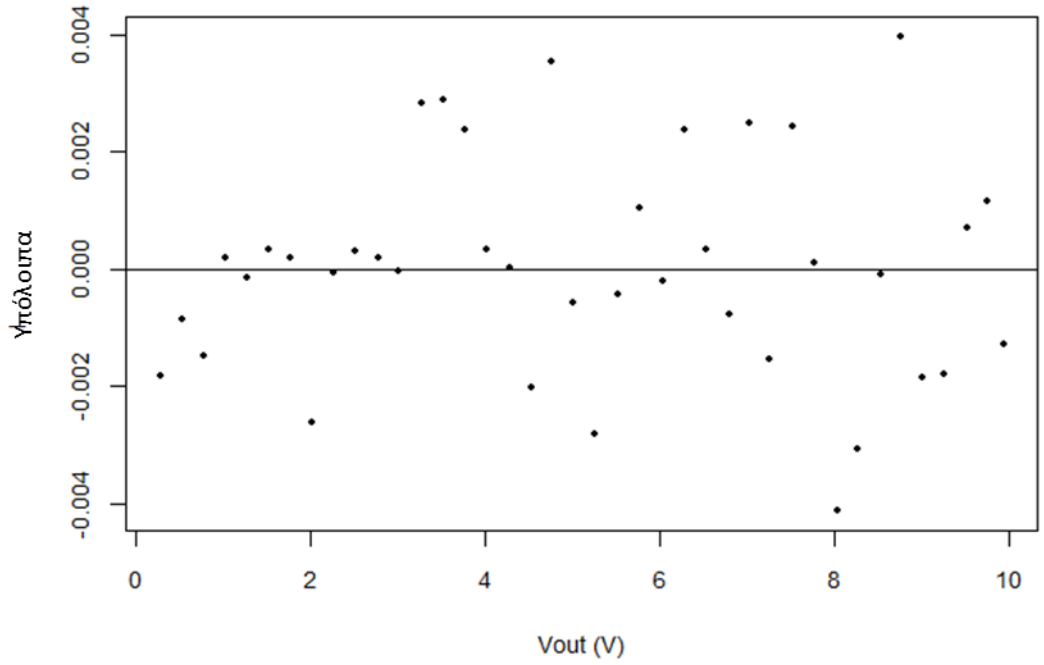
$a_0 = 0.0181 \pm 0.0006$ και $a_1 = 0.9997 \pm 0.0001$.

Για την αποδοχή της γραμμικής συσχέτισης πραγματοποιούνται έλεγχοι αποκλίσεων των τυποποιημένων υπολοίπων του μοντέλου. Συνήθεις αποκλίσεις είναι: μη κανονική κατανομή σφαλμάτων, ύπαρξη εξάρτησης μεταξύ των σφαλμάτων, μη γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των σφαλμάτων και της ανεξάρτητης μεταβλητής καθώς και μη σταθερή διακύμανσή τους γύρω από την τιμή 0. Στις περιπτώσεις ύπαρξης μίας ή περισσότερων αποκλίσεων τότε η γραμμική συσχέτιση δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή.

Αρχικά, διενεργείται έλεγχος Shapiro – Wilk για την διαπίστωση κανονικής κατανομής των υπολοίπων. Η μη απόρριψη της υπόθεσης αποτελεί ένδειξη κανονικής

κατανομής των υπολοίπων. Επιπλέον, με τον δείκτη Durbin – Watson μπορούμε να ελέγξουμε την ύπαρξη ή μη εξάρτησης μεταξύ των υπολοίπων. Τέλος, με το διάγραμμα των υπολοίπων και της τάσης εξόδου γίνεται γραφική εποπτεία της γραμμικότητας της παλινδρόμησής τους καθώς και της διακύμανσής τους.

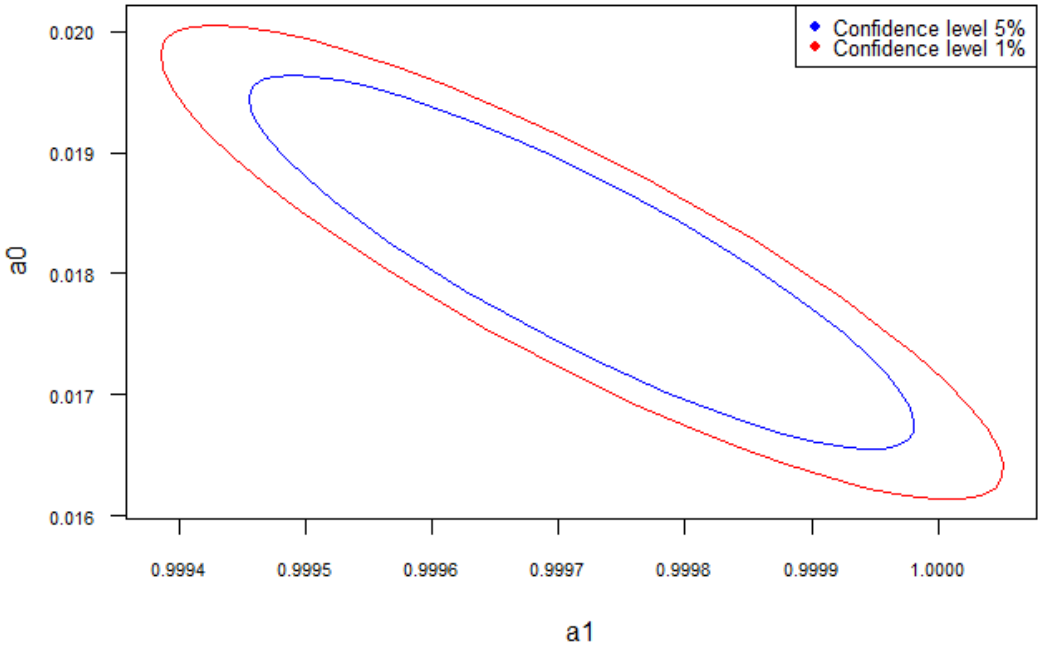
Στην περίπτωση του ADC1 ο έλεγχος Shapiro – Wilk δεν απορρίπτει την υπόθεση κανονικότητας αφού η τιμή στατιστικής σημαντικότητας υπολογίζεται ίση με 0.4169. Ακόμη, ο δείκτης Durbin – Watson είναι ίσος με 1.85 με στατιστική σημαντικότητα ίση με 0.2556 αποτέλεσμα που δεν απορρίπτει την ύπαρξη μη εξάρτησης μεταξύ των υπολοίπων. Τέλος, ο έλεγχος των τελευταίων αποκλίσεων γίνεται γραφικά με το διάγραμμα των τυποποιημένων υπολοίπων και της ανεξάρτητης μεταβλητής. Στο Σχήμα Π9 φαίνεται ότι τα υπόλοιπα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα και δεν παρουσιάζουν ανομοιογένεια των διασπορών. Επίσης η γραφική παράσταση των υπολοίπων δείχνει μια τυχαία τοποθέτησή τους γύρω από τη γραμμή που αντιστοιχεί σε υπόλοιπο "0".



Σχήμα Π10 Κατανομή τυποποιημένων υπολοίπων για τον ADC1

Το Σχήμα Π11 παρουσιάζει τις ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και $\alpha_ι$ σε διαστήματα εμπιστοσύνης 95% και 99%.

Από τη σχέση 3-3 συμπεραίνουμε ότι οι τιμές τάσης που παίρνουμε μετά από τη μετατροπή τους από τον ADC1 είναι μεγαλύτερες κατά α_0 = 0.0181 από τις πραγματικές τιμές τάσης. Η παραπάνω στατιστική επεξεργασία μας οδήγησε στη διόρθωση του κώδικα του θερμοϋδραυλικού κυκλώματός μας και του κώδικα επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων μας με την προσθήκη του συντελεστή α_0 στις συναρτήσεις μετατροπής της ψηφιακής πληροφορίας σε τάση των μετρητικών σταθμών που καταλήγουν στα κανάλια 4,5,6 και 7 του ADC1.



Σχήμα Π11 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και α_1 της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής του ADC1 σε επίπεδα εμπιστοσύνης 5% και 1%

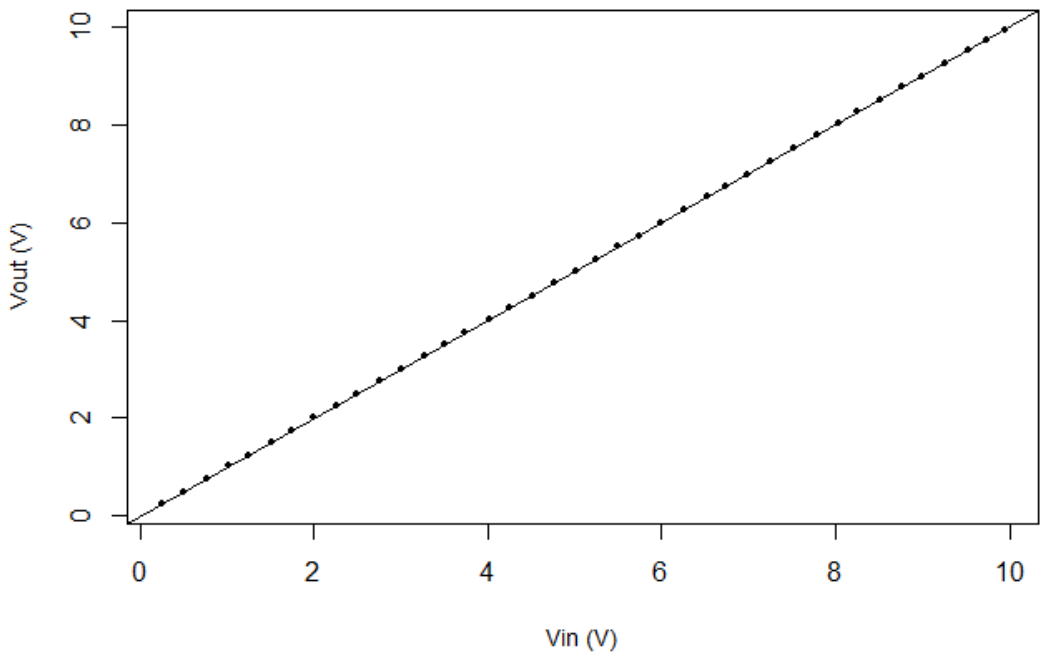
3.1.2 Διακρίβωση ADC 2

Η διαδικασία διακρίβωσης του ADC2 ήταν παρόμοια με αυτή που ακολουθήθηκε για τον ADC1 .

Σε αυτήν την περίπτωση το κανάλι του ADC2 το οποίο συνδέθηκε με τη σταθερή πηγή τάσης ήταν το κανάλι 3.

Αποτελέσματα - Συμπεράσματα Για τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων της διακρίβωσης βαθμονόμησης για τον ADC2 ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με αυτή που ακολουθήθηκε και στον ADC1.

Ο συντελεστής πολλαπλής συσχέτισης R και η μέση τετραγωνική απόκλιση RMS είχαν τιμές 1 και 0.0586% οι οποίες μας φανέρωσαν πολύ καλή εγγύτητα της προσαρμογής με πολύ μικρή απόκλιση των πειραματικών σημείων. Στο Σχήμα Π12 απεικονίζεται διαγραμματικά η γραμμική προσαρμογή των τιμών V_{in} και V_{out}.



Σχήμα Π12 Γραφική απεικόνιση των τιμών διακρίβωσης του ADC2

Όπως και στον ADC1 έτσι και στον ADC2 διενεργήθηκαν τα ίδια στατιστικά τεστ για τον έλεγχο των ίδιων μηδενικών υποθέσεων. Από αυτά καταλήξαμε στην απόρριψη της μηδενικής υποθέσεως για τον συντελεστή α_0 και στην αποδοχή της μηδενικής υποθέσεως του συντελεστή α_1 (Σχήμα Π14). Έτσι η συνάρτηση αναδρομής που υπολογίστηκε είναι η ακόλουθη :

$$V_{out} = -0.0011 + 1 \cdot V_{in} \qquad 3\text{-}4$$

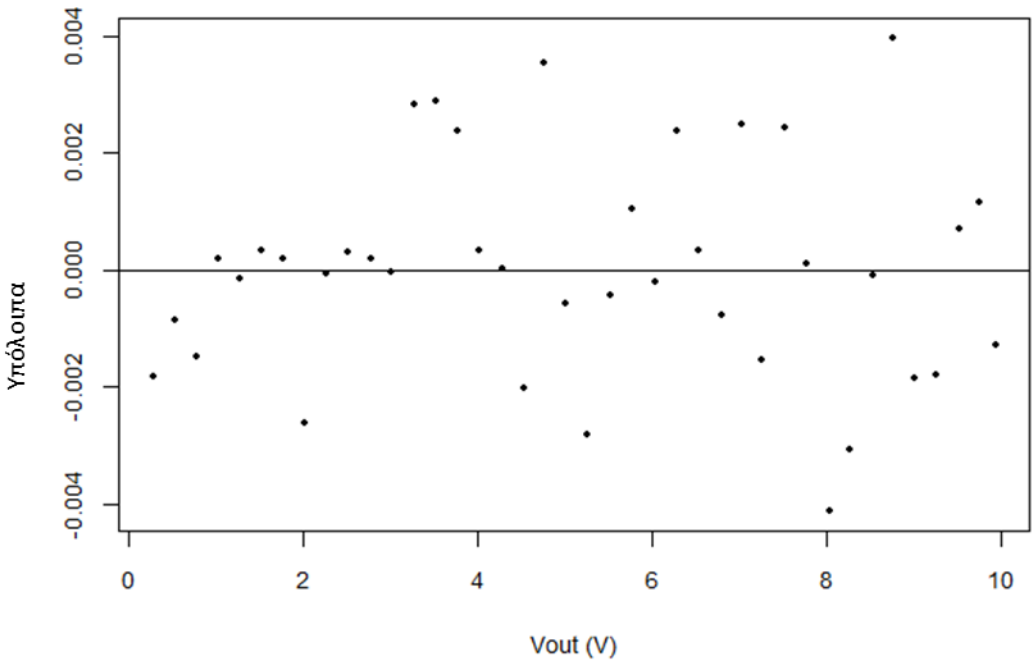
Η περίληση της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής είναι η ακόλουθη:

```
Residuals:
      Min        1Q    Median        3Q       Max
-2.78e-03 -7.92e-04 -7.77e-05  8.89e-04  1.89e-03

Coefficients:
             Estimate Std. Error  t value Pr(>|t|)
(Intercept) -1.11e-03   3.66e-04    -3.04   0.0042 **
data[, 1]    1.00e+00   6.22e-05 16077.51   <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 0.00113 on 38 degrees of freedom
Multiple R-squared:     1,  Adjusted R-squared:     1
F-statistic: 2.58e+08 on 1 and 38 DF,  p-value: <2e-16
```

Οι τιμές των συντελεστών της αναδρομής είναι στατιστικά σημαντικοί και ισούνται με:

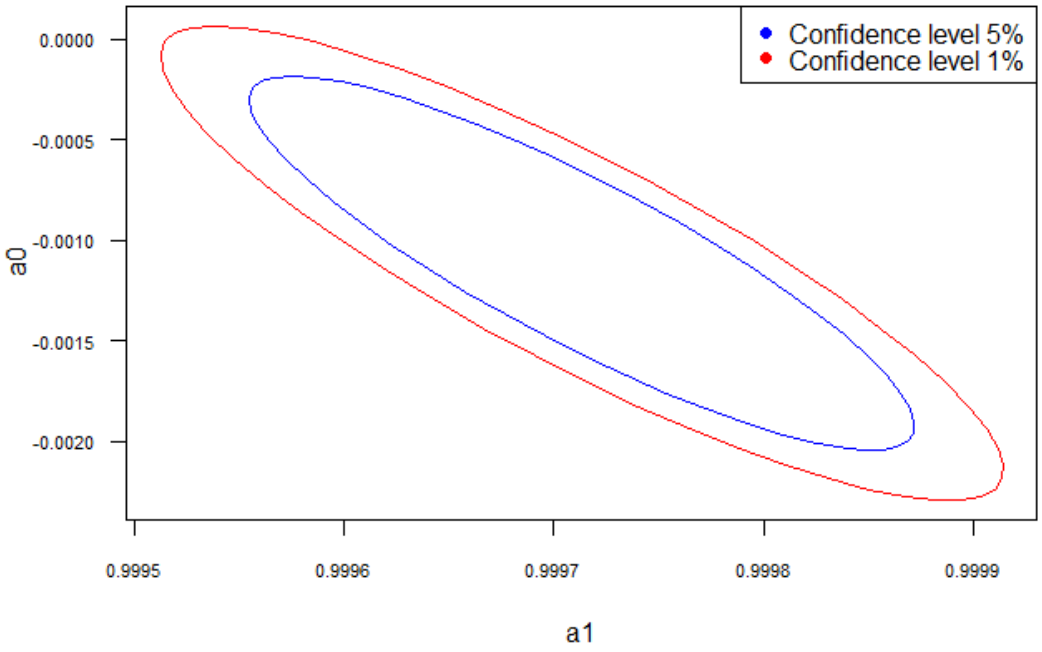
$a_0 = -0.0011 \pm 0.0004$ και $a_1 = 1.0000 \pm 0$.

Ο έλεγχος Shapiro – Wilk δεν απορρίπτει την υπόθεση κανονικότητας με τιμή στατιστικής σημαντικότητας ίση με 0.5464. Ο δείκτης Durbin – Watson είναι ίσος με 2.05 με στατιστική σημαντικότητα ίση με 0.4948 αποτέλεσμα που δεν απορρίπτει την ύπαρξη μη εξάρτησης μεταξύ των υπολοίπων. Στο Σχήμα Π66 φαίνεται ότι τα υπόλοιπα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα γύρω από την τιμή 0 ενώ δεν παρουσιάζουν ανομοιογένεια των διασπορών.



Σχήμα Π66 Κατανομή τυποποιημένων υπολοίπων για τον ADC2

Από τη σχέση 3-4 παρατηρούμε μια υστέρηση των μετρούμενων μεγεθών από τα πραγματικά κατά 0.0011. Όπως και με τον ADC1 και στην περίπτωση του ADC2 διορθώσαμε τους κώδικες που μετατρέπουν την ψηφιακή πληροφορία σε τάση μόνο στο κανάλι 1 που μας ενδιαφέρει και συνδέεται το μαγνητικό ροόμετρο Β.



Σχήμα Π14 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και α_1 της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής του ADC2 σε επίπεδα εμπιστοσύνης 5% και 1%

3.2 Διακριβώσεις MUX

3.2.1 Διακρίβωση MUX A

Ο MUX A δέχεται στην είσοδό του σήμα από τα θερμοστοιχεία τύπου K και το ενισχύει κατά 1000.

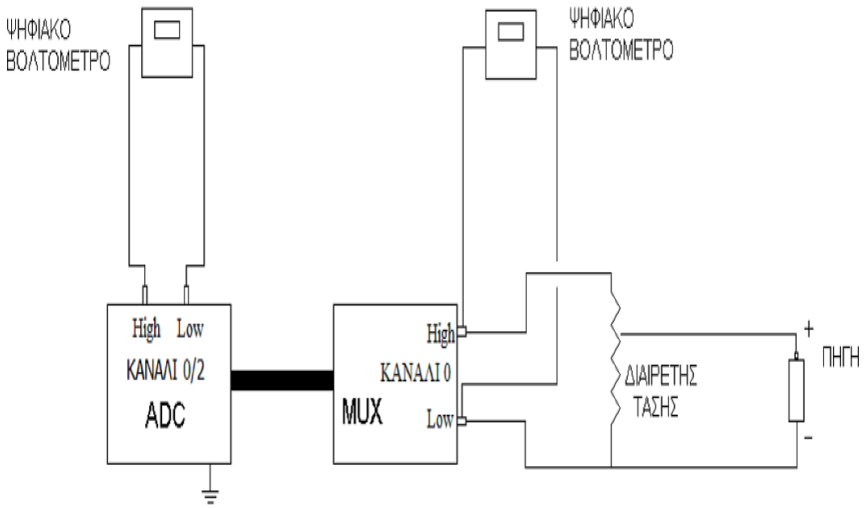
Η διαδικασία διακρίβωσης του ενισχυτή – πολυπλέκτη η οποία ακολουθήθηκε αναλύεται παρακάτω και στο Σχήμα Π68 απεικονίζεται η διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε κατά τη διακρίβωση:

- Συνδέουμε το κανάλι 0 του MUX A με πηγή σταθερής τάσης.
- Παράλληλα με την πηγή συνδέουμε διαιρέτη τάσης (ποτενσιόμετρο) για να μπορούμε να ρυθμίζουμε την τάση εισόδου στον MUX A στην περιοχή από 0 έως 10 mV.
- Παράλληλα με το ποτενσιόμετρο συνδέουμε ένα ψηφιακό βολτόμετρο της

εταιρείας Kiethley με το οποίο μετράμε την τάση με την οποία τροφοδοτούμε κάθε φορά το κανάλι εισόδου του MUX A. Με τη βοήθεια του ποτενσιόμετρου τροφοδοτούμε τον MUX A με τάση από 0 έως 10 mV με βήμα 0.25 mV ώστε μετά την ενίσχυση του σήματος με ενισχυτή κέρδους 1000 να καλυφθεί όλη η περιοχή λειτουργίας του ADC1 (0 - 10 V) όπου είναι συνδεδεμένος ο MUX A (κανάλι 0 του ADC1).

• Στο κανάλι αναλογικής εισόδου του ADC στο οποίο δεσμεύεται η έξοδος του MUX A συνδέουμε βολτόμετρο όπου μετράμε την ενισχυμένη τάση του πολυπλέκτη.

• Τέλος συλλέγουμε όλα τα ζεύγη τάσεων (τάση εισόδου στον MUX A (Vin) – τάση που αντιστοιχεί στην ψηφιακή πληροφορία που δίνει ο ADC1 (Vout)) και τα συγκρίνουμε.

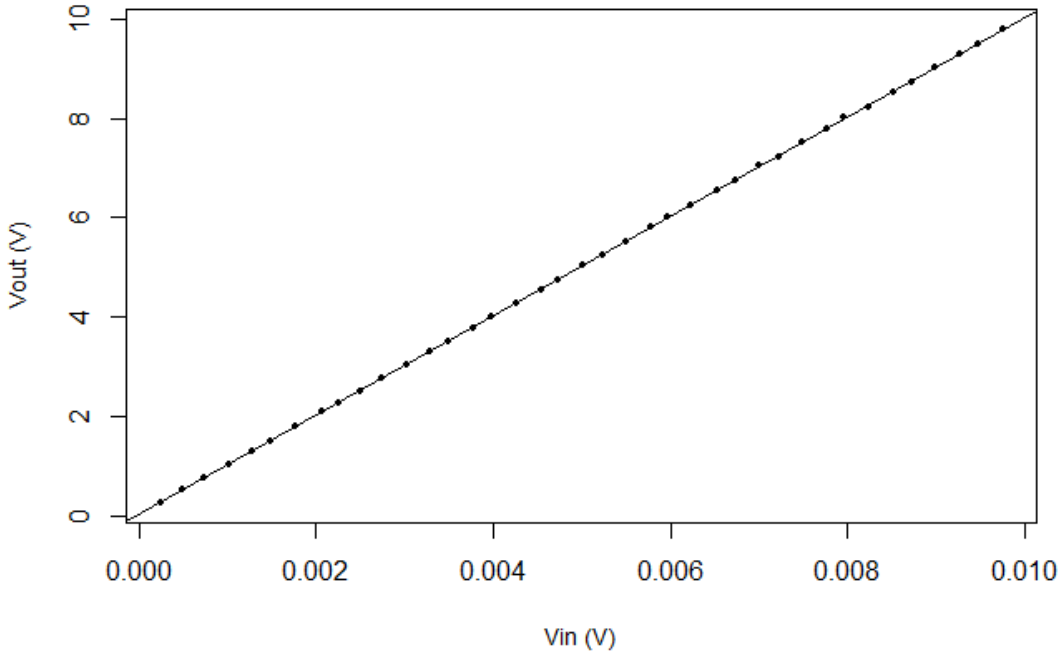


Σχήμα Π68 Διάταξη βαθμονόμησης MUX **[9]**

Αποτελέσματα - Συμπεράσματα Η διαδικασία της στατιστικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων που ακολουθήθηκε ήταν παρόμοια με αυτή των ADC.

Ο συντελεστής πολλαπλής συσχέτισης R^2 και η μέση τετραγωνική απόκλιση RMS είχαν τιμές 1.0000 και 0.389% οι οποίες μας φανέρωσαν πολύ καλή εγγύτητα της προσαρμογής με πολύ μικρή απόκλιση των πειραματικών σημείων. Στο Σχήμα Π69

απεικονίζεται η γραμμική προσαρμογή των τιμών τάσεων εισόδου και εξόδου.



Σχήμα Π69 Γραφική απεικόνιση των τιμών διακρίβωσης του MUX A

Ακόμη διενεργήθηκαν στατιστικά τεστ για τον έλεγχο των επόμενων υποθέσεων:

- Συντελεστής α_0

  H_0: Ο συντελεστής αο ισούται με το 0

  H_1: Ο συντελεστής α_0 είναι διάφορος του 0

- Συντελεστής α_1

  H_0: Ο συντελεστής α_1 ισούται με το 1000

  H_1: Ο συντελεστής α_1 είναι διάφορος του 1000

Μετά τα στατιστικά τεστ απορρίφθηκε η μηδενική υπόθεση για το α_0 ενώ έγινε αποδεκτή για το α_1. Έτσι καταλήξαμε στην παρακάτω γραμμική συνάρτηση προσαρμογής για τον MUX A:

$$V_{out} = 0.0177 + 1000 \cdot V_{in}$$ Εξίσωση 3-5

Η περίληψη της γραμμικής προσαρμογής είναι η ακόλουθη:

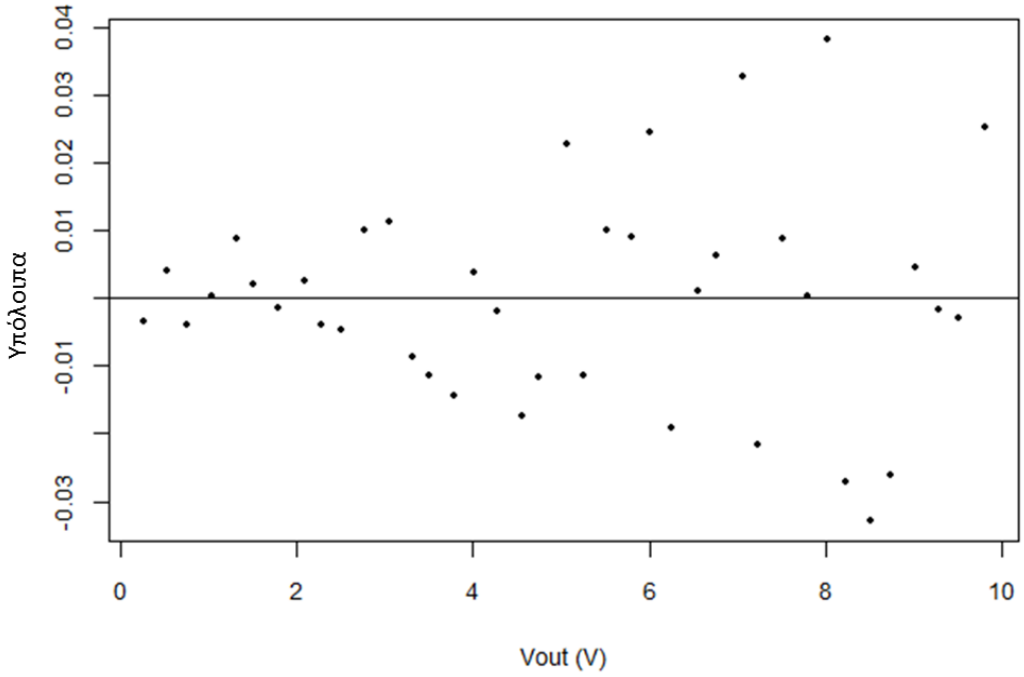
```
Residuals:
     Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.03291 -0.01008  0.00022  0.00883  0.03829

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 1.77e-02   5.20e-03    3.41   0.0016 **
data[, 1]   1.00e+03   9.06e-01 1104.01   <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 0.0159 on 37 degrees of freedom
Multiple R-squared:     1,  Adjusted R-squared:     1
F-statistic: 1.22e+06 on 1 and 37 DF,  p-value: <2e-16
```

Οι συντελεστές γραμμικής προσαρμογής είναι στατιστικά σημαντικοί και υπολογίζονται ίσοι με:

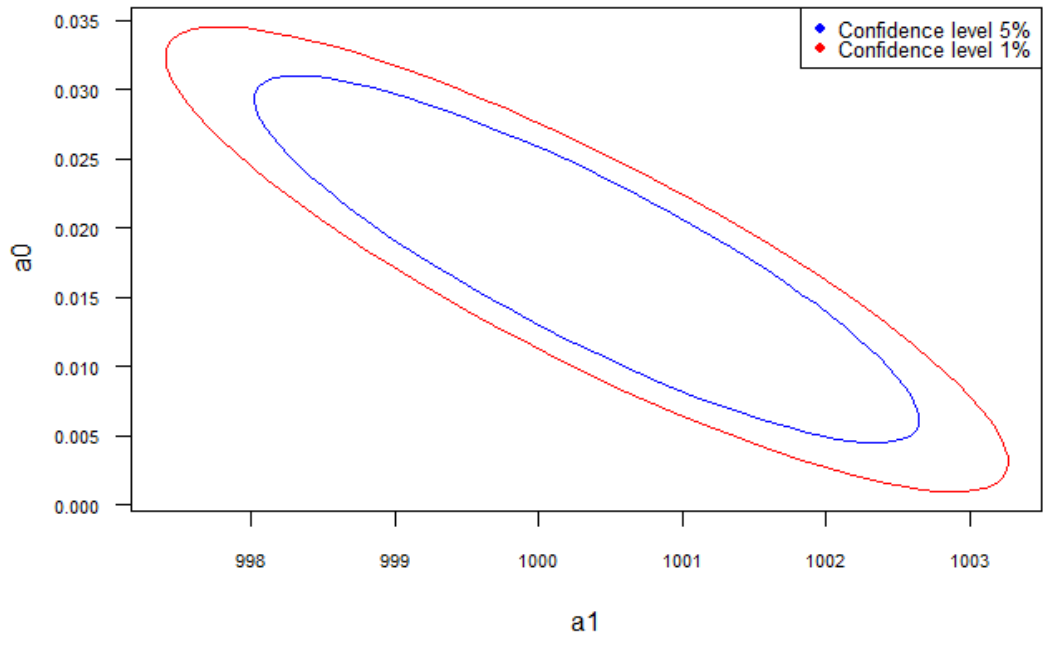
$a_0 = 0.0177 \pm 0.0052$ και $a_1 = 1000.0 \pm 0.9060$.

Ο έλεγχος Shapiro – Wilk δεν απορρίπτει την υπόθεση κανονικότητας με τιμή στατιστικής σημαντικότητας ίση με 0.5381. Ο δείκτης Durbin – Watson είναι ίσος με 2.06 με στατιστική σημαντικότητα ίση με 0.5008 αποτέλεσμα που δεν απορρίπτει την ύπαρξη μη εξάρτησης μεταξύ των υπολοίπων.

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, στο Σχήμα Π66παρατηρείται ότι τα υπόλοιπα δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα γύρω από την τιμή 0 και παρουσιάζουν ανομοιογένεια των διασπορών. Ωστόσο, επειδή το εύρος των τιμών της τάσης εξόδου του MUX A για τα πειράματα της παρούσης ΔΔ και θερμοκρασίες 0 έως 100 °C αναμένεται μεταξύ των τιμών 0 έως 4.1 V όπου δεν υπάρχει τόσο μεγάλη διασπορά υπολοίπων και εφόσον όλοι οι άλλοι στατιστικοί έλεγχοι δεν απορρίπτουν τις υπόλοιπες υποθέσεις των υπολοίπων, δεν πραγματοποιήθηκε κάποια αλλαγή στην τελική συσχέτιση και έγινε αποδεκτή η γραμμική προσαρμογή.



Σχήμα Π70 Κατανομή τυποποιημένων υπολοίπων για τον MUX A



Σχήμα Π71 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και α_1 της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής του MUX A σε επίπεδα εμπιστοσύνης 5% και 1%

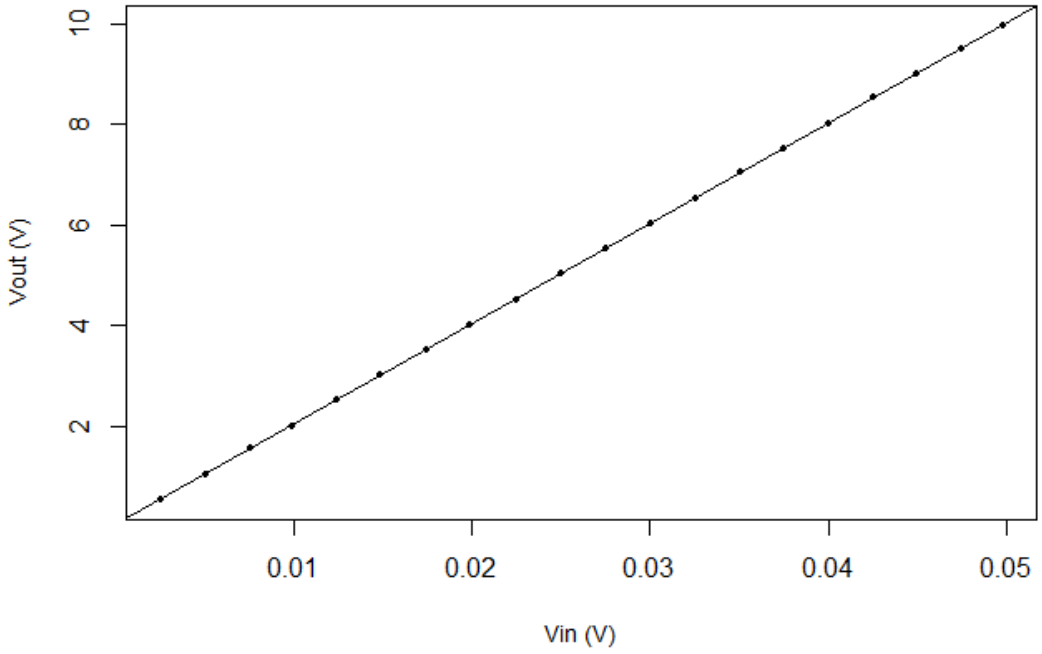
Το αποτέλεσμα της παραπάνω ανάλυσης ήταν η αλλαγή του κώδικα του θερμοϋδραυλικού κυκλώματος με προσθήκη του συντελεστή α_0 στις τάσεις των θερμοστοιχείων τύπου Κ.

3.2.2 Διακρίβωση MUX B

Ο MUX B δέχεται στην είσοδό του σήμα από τα θερμοστοιχεία τύπου J και το ενισχύει κατά 200.

Η διαδικασία διακρίβωσης η οποία ακολουθήθηκε είναι παρόμοια με αυτή που ακολουθήθηκε για τον MUX A με τη μόνη διαφορά ότι πλέον με τη βοήθεια του ποτενσιόμετρου τροφοδοτούμε τον MUX B με τάση από 0 έως 50 mV με βήμα 2.5 mV ώστε μετά την ενίσχυση του σήματος με ενισχυτή κέρδους 200 να καλυφθεί όλη η περιοχή λειτουργίας του ADC1 (0 - 10 *V)* όπου είναι συνδεδεμένος ο MUX B (κανάλι 2 του ADC1).

Αποτελέσματα - Συμπεράσματα Ο συντελεστής πολλαπλής συσχέτισης R και η μέση τετραγωνική απόκλιση RMS είχαν τιμές 1 και 0.213% οι οποίες μας φανέρωσαν πολύ καλή εγγύτητα της προσαρμογής με πολύ μικρή απόκλιση των πειραματικών σημείων. Στο Σχήμα Π72 απεικονίζονται η γραμμική προσαρμογή των τιμών τάσεων εισόδου και εξόδου.



Σχήμα Π72 Γραφική απεικόνιση των τιμών διακρίβωσης του MUX B

Ακόμη διενεργήθηκαν στατιστικά τεστ για τον έλεγχο των επόμενων υποθέσεων:

- Συντελεστής α_0

  H_0: Ο συντελεστής α_0 ισούται με το 0

  H_1: Ο συντελεστής α_0 είναι διάφορος του 0

- Συντελεστής α_1

  H_0: Ο συντελεστής α_1 ισούται με το 200

  H_1: Ο συντελεστής α_1 είναι διάφορος του 200

Μετά τα στατιστικά τεστ απορρίφθηκε η μηδενική υπόθεση για το α_0 ενώ έγινε αποδεκτή για το α_1 (Σχήμα Π74). Έτσι προέκυψε η παρακάτω γραμμική συνάρτηση προσαρμογής για τον MUX B:

$$V_{out} = 0.0205 + 200 \cdot V_{in}$$ Εξίσωση 3-6

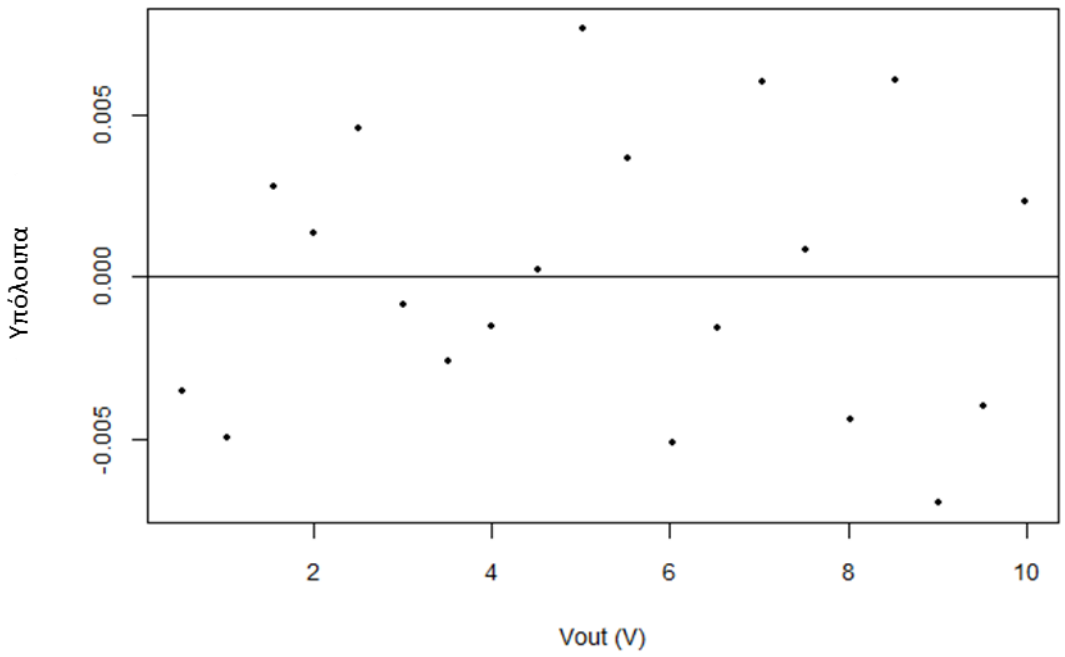
Η περίληψη της γραμμικής προσαρμογής είναι η ακόλουθη:

```
Residuals:
      Min        1Q    Median        3Q       Max
-0.006968 -0.003655 -0.000317  0.002994  0.007676

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 2.05e-02   2.02e-03    10.1  7.4e-09 ***
data[, 1]   2.00e+02   6.76e-02  2957.7  < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 0.00436 on 18 degrees of freedom
Multiple R-squared:     1,  Adjusted R-squared:     1
F-statistic: 8.75e+06 on 1 and 18 DF,  p-value: <2e-16
```

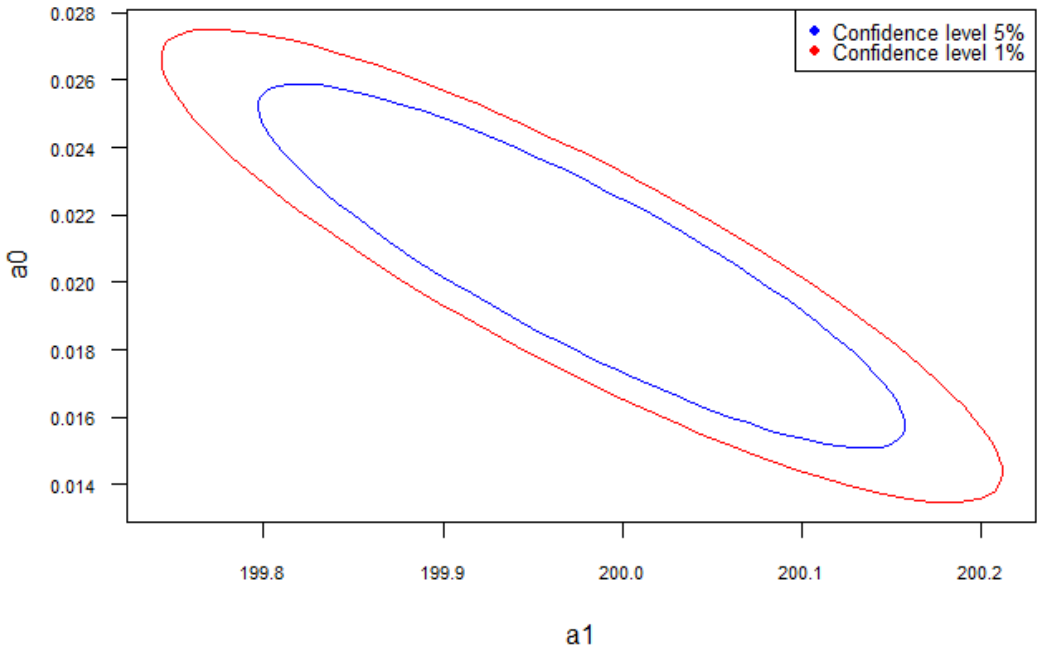
Οι συντελεστές γραμμικής προσαρμογής είναι στατιστικά σημαντικοί και υπολογίζονται ίσοι με:

$a_0 = 0.0205 \pm 0.0020$ και $a_1 = 200.0 \pm 0.0676$.

Ο έλεγχος Shapiro – Wilk δεν απορρίπτει την υπόθεση κανονικότητας με τιμή στατιστικής σημαντικότητας ίση με 0.6761. Ο δείκτης Durbin – Watson είναι ίσος με 2.09 με στατιστική σημαντικότητα ίση με 0.4768 αποτέλεσμα που δεν απορρίπτει την ύπαρξη μη εξάρτησης μεταξύ των υπολοίπων. Στο Σχήμα Π73 φαίνεται ότι τα υπόλοιπα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα γύρω από την τιμή 0 ενώ δεν παρουσιάζουν ανομοιογένεια των διασπορών.



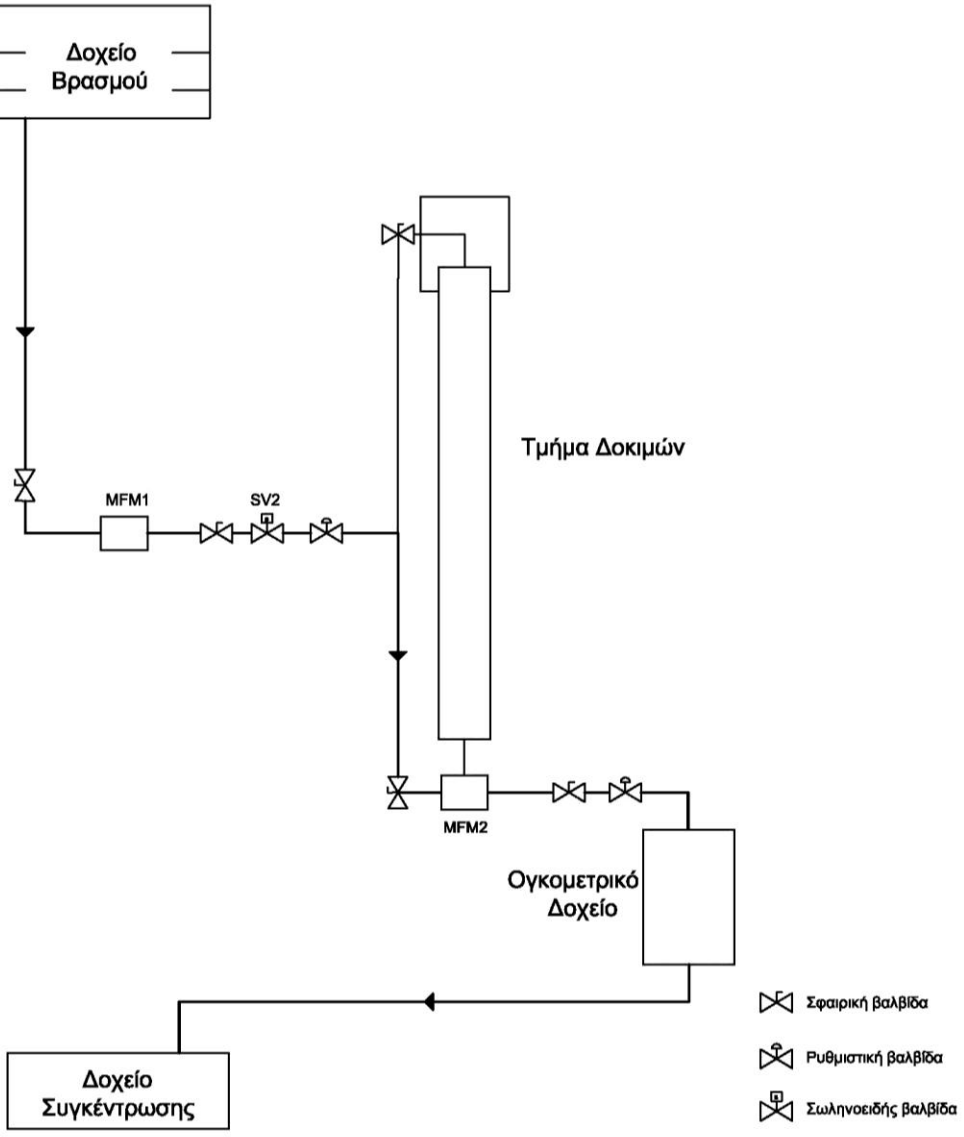
Σχήμα Π73 Κατανομή τυποποιημένων υπολοίπων για τον MUX B



Σχήμα Π74 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και α_1 της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής του MUX B σε επίπεδα εμπιστοσύνης 5% και 1%

3.3 Διακρίβωση μαγνητικών ροομέτρων

Πριν την έναρξη των πειραματικών διαδικασιών κρίθηκε απαραίτητη και η διακρίβωση των μαγνητικών ροομέτρων E+H1 (MFM1) και E+H2 (MFM2) της εταιρίας Endress+Hauser Flowtec AG. Στο Σχήμα Π75 φαίνεται η θέση των δύο ροομέτρων στην εγκατάσταση καθώς και η όλη διάταξη διακρίβωσης που χρησιμοποιήθηκε η οποία και θα αναλυθεί παρακάτω.



Σχήμα Π75 Διάταξη βαθμονόμησης των ροομέτρων

Ο έλεγχος διακρίβωσης των ροομέτρων έλαβε χώρα σε διάφορες θερμοκρασίες και πιέσεις για να διαπιστωθεί πειραματικά αν επιδρούν στη λειτουργία των ροομέτρων. Η διαδικασία διακρίβωσης είχε ως εξής:

- Τα ροόμετρα διαρρέονται από νερό που προέρχεται από το Δοχείο Βρασμού και βρίσκεται σε προκαθορισμένη πίεση και θερμοκρασία (Πίνακας Π9). Το νερό αυτό καταλήγει σε ένα ογκομετρικό δοχείο ωφέλιμου όγκου 12 λίτρων, το οποίο φέρει οπτικό σταθμοδείκτη 12 διαβαθμίσεων.
- Με τη βοήθεια του ογκομετρικού δοχείου γνωρίζουμε τον πραγματικό όγκο του νερού που έχει διέλθει από τα ροόμετρα και υπολογίζουμε την πραγματική παροχή από τη σχέση:

$$Q_\pi = {}^{V_\pi}/_{T}$$ Εξίσωση 3-7

όπου Τ είναι ο χρόνος που απαιτείται για τη συγκέντρωση στο ογκομετρικό δοχείο νερού πραγματικού όγκου V_π. Με το πρόγραμμα fplus.for [10] (έπειτα από κατάλληλη τροποποίηση και πρόσθεση των παραμέτρων α_0 και α_1 που προήλθαν έπειτα από τη διακρίβωση των δύο προαναφερθέντων ADC) γίνεται μέτρηση της πραγματικής παροχής Q_π εισάγοντας την αρχική και την τελική βαθμίδα μέτρησης του σταθμοδείκτη.

- Η ενδεικνύμενη παροχή Q_x υπολογίζεται και αυτή από το fplus.for χρησιμοποιώντας την ψηφιοποιημένη πληροφορία που προέρχεται από τους δύο ADC.

Σημειώνεται πως κατά τη διακρίβωση σε πίεση 1 bar η ροή ελέγχεται από τη ρυθμιστική βαλβίδα που βρίσκεται αμέσως μετά το μαγνητικό ροόμετρο E+H1 ενώ κατά τη διακρίβωση σε πίεση 2 bar ο στραγγαλισμός του νερού γίνεται από τη ρυθμιστική βαλβίδα που προστέθηκε ειδικά για αυτά τα πειράματα αμέσως μετά το μαγνητικό ροόμετρο E+H2 και πριν το ογκομετρικό δοχείο.

Πίνακας Π9 Συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας κατά τη διακρίβωση των μαγνητικών ροομέτρων

Πίεση	Θερμοκρασία
1 bar	25 °C, 95 °C
2 bar	125 °C

Αποτελέσματα - Συμπεράσματα Όλες οι διακριβώσεις των μαγνητικών ροομέτρων παρουσίασαν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Όλοι οι συντελεστές πολλαπλής συσχέτισης καθώς και οι τιμές των μέσων τετραγωνικών αποκλίσεων φανέρωσαν πολύ καλή εγγύτητα της προσαρμογής και πολύ μικρή απόκλιση των πειραματικών σημείων (Πίνακας Π10).

Πίνακας Π10 Αποτελέσματα βαθμονόμησης μαγνητικών ροομέτρων

Μαγνητικό ροόμετρο	Πίεση / Θερμοκρασία	R	RMS%
E+H1	1 bar / 25 °C	0.996	7.72
E+H1	1 bar / 95 °C	0.993	7.34
E+H1	2 bar/ 125 °C	0.991	6.63
E+H2	1 bar / 25 °C	0.998	6.70
E+H2	1 bar / 95 °C	0.992	7.17
E+H2	2 bar/ 125 °C	0.990	6.02

Ακόμη διενεργήθηκαν στατιστικά τεστ για τον έλεγχο των επόμενων υποθέσεων:

- Συντελεστής α_0

  H_0: Ο συντελεστής α_0 ισούται με το 0

H_1: Ο συντελεστής α_0 είναι διάφορος του 0

- Συντελεστής α_1

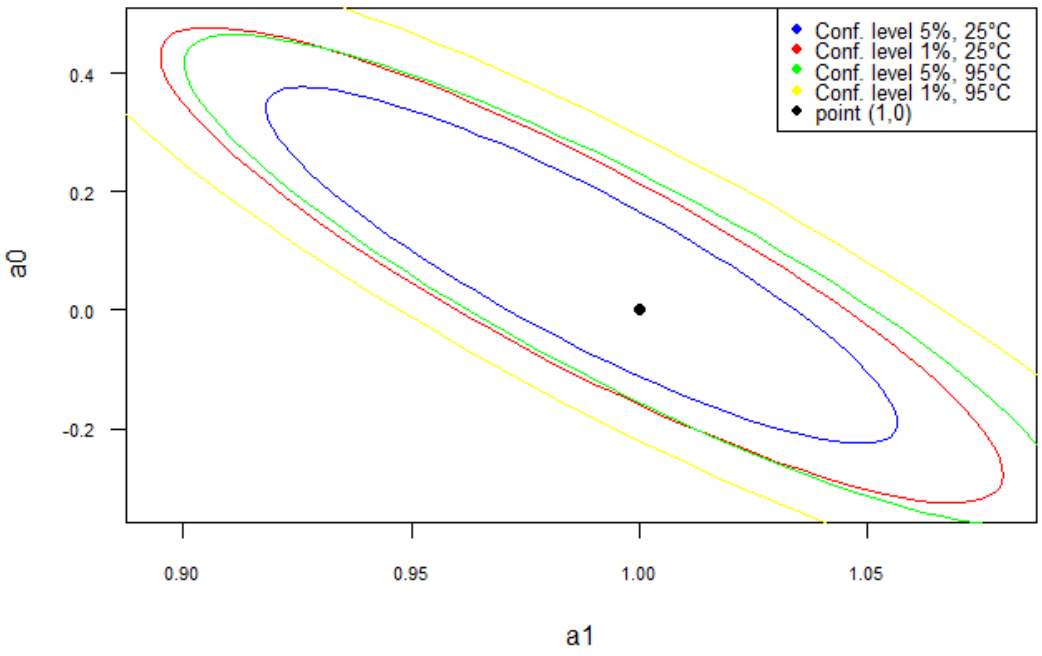
  H_0: Ο συντελεστής α_1 ισούται με το 1

  H_1: Ο συντελεστής α_1 είναι διάφορος του 1

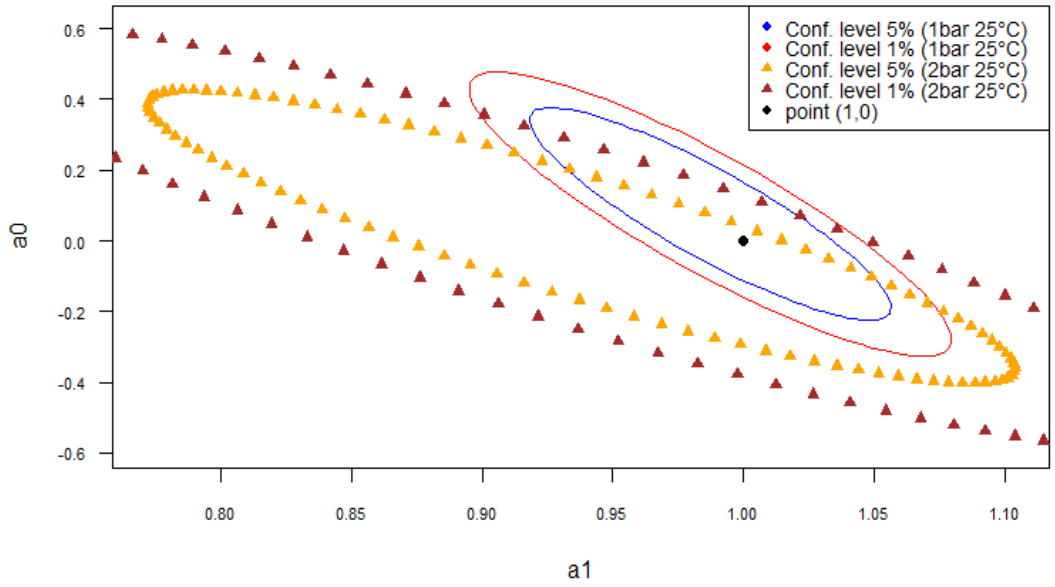
Από τα παραπάνω στατιστικά τεστ όλες οι μηδενικές υποθέσεις τόσο για το α_0 όσο και για το α_1 έγιναν αποδεκτές σε όλες τις συνθήκες διακρίβωσης και στα δύο μαγνητικά ροόμετρα. Έτσι η τελική γραμμική συνάρτηση προσαρμογής και για τα δύο ροόμετρα έχει την παρακάτω μορφή:

$$Q_x = 0 + 1 \cdot Q_\pi \qquad \text{Εξίσωση 3-8}$$

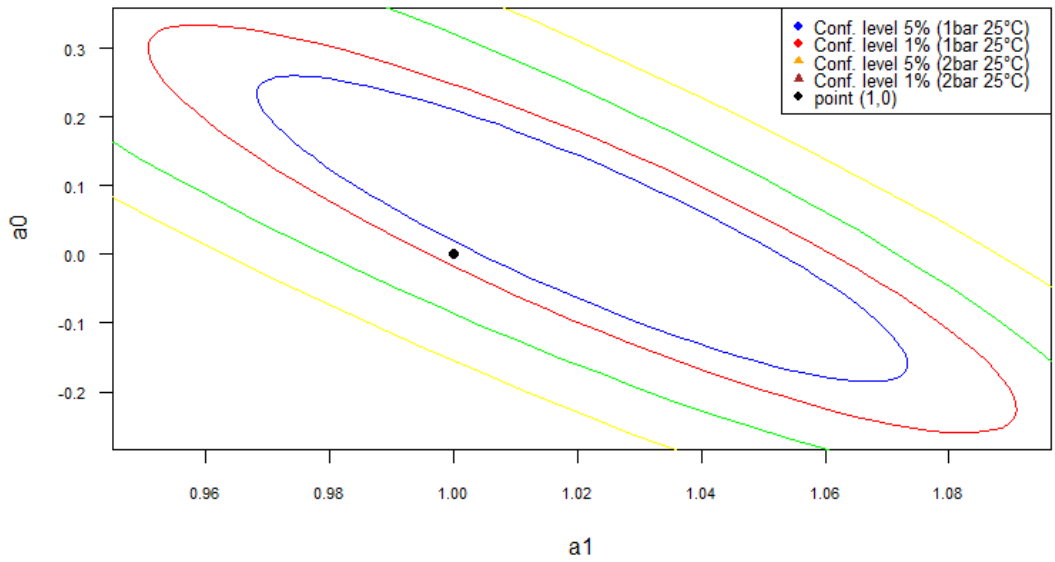
Όλη η στατιστική επεξεργασία γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου R statistics [11] και του κώδικα "Vathmonomiseis.R" που γράφτηκε στο πλαίσιο της παρούσης ΔΔ.



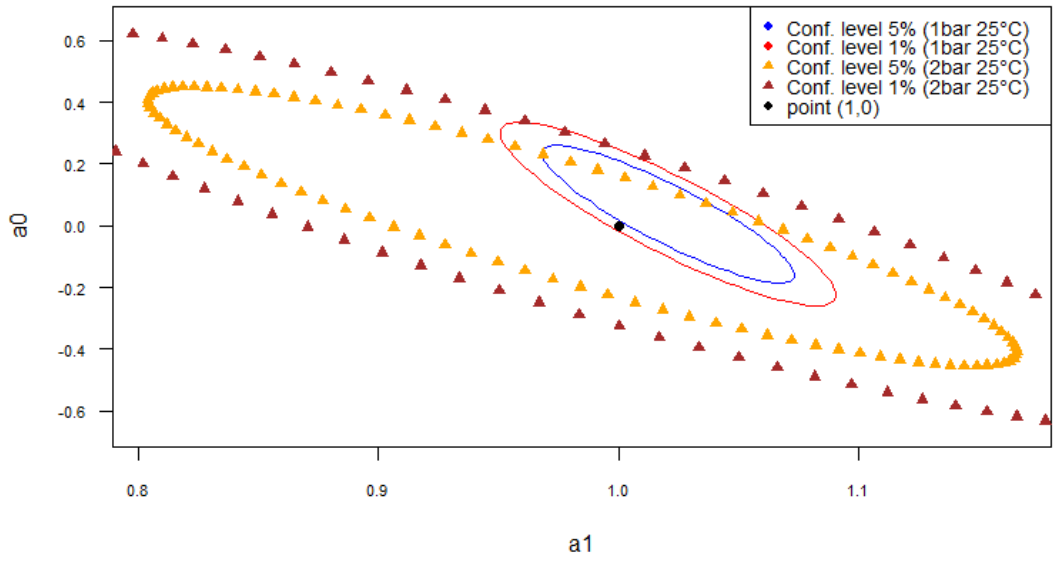
Σχήμα Π76 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και α_1 της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής του **E+H1** σε επίπεδα εμπιστοσύνης 5% και 1% σε πίεση 1 bar και θερμοκρασίες νερού 25 °C και 95°C



Σχήμα Π77 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και α_1 της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής του **E+H1** σε επίπεδα εμπιστοσύνης 5% και 1% σε πιέσεις 1 και 2 bar και θερμοκρασία νερού 25 °C



Σχήμα Π78 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και α_1 της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής του **E+H2** σε επίπεδα εμπιστοσύνης 5% και 1% σε πίεση 1 bar και θερμοκρασίες νερού 25 °C και 95°C



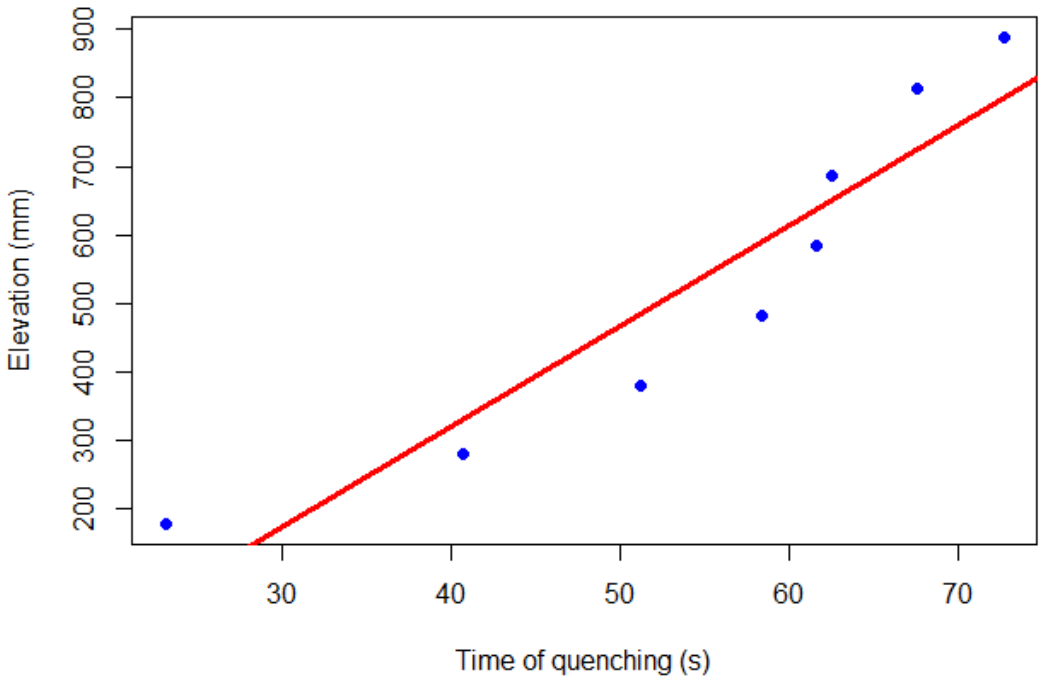
Σχήμα Π79 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των συντελεστών α_0 και α_1 της γραμμικής συνάρτησης αναδρομής του **E+H2** σε επίπεδα εμπιστοσύνης 5% και 1% σε πιέσεις 1 και 2 bar και θερμοκρασία νερού 25 °C

4 ΑΡΧΕΙΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

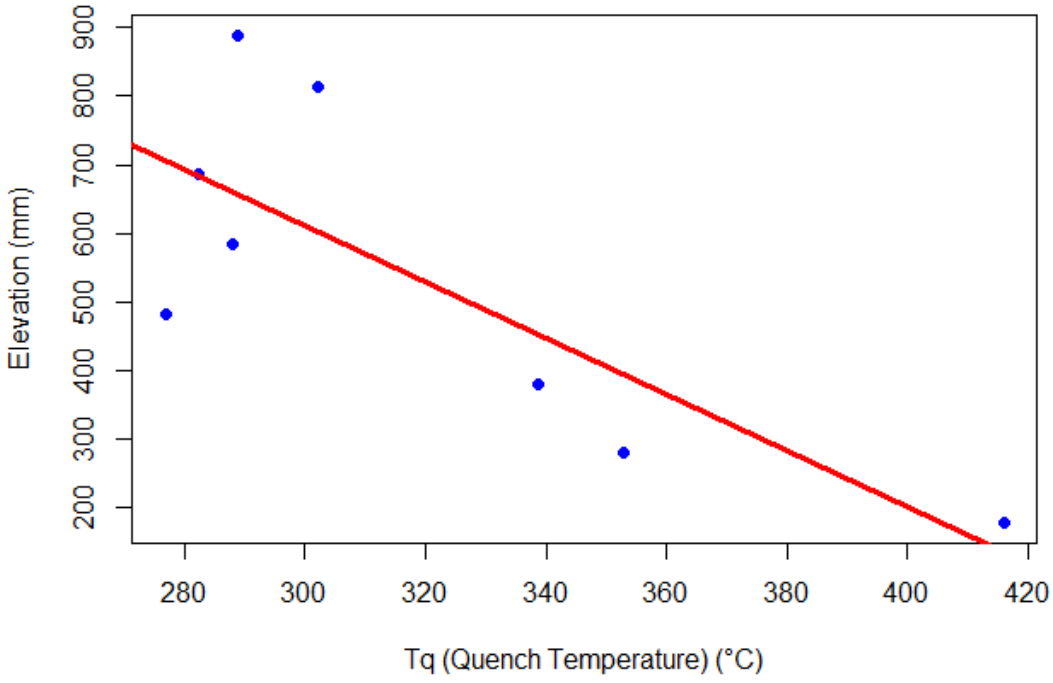
Κατά την εκτέλεση των προγραμμάτων επεξεργασίας δεδομένων ExpRun.R και StatsRun.R, τα οποία συντάχθηκαν στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ με τη χρήση του πακέτου R Statistics, εγγράφονται αρχεία εικόνας και αρχεία κειμένου τα οποία είναι χρήσιμα για την διερεύνηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα αλλά και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται όλα τα αρχεία κειμένου και εικόνας που αναφέρονται ονομαστικά στις παραγράφους §4.2 και §4.3 της ΔΔ.

4.1 Αρχεία μιας πειραματικής προσομοίωσης

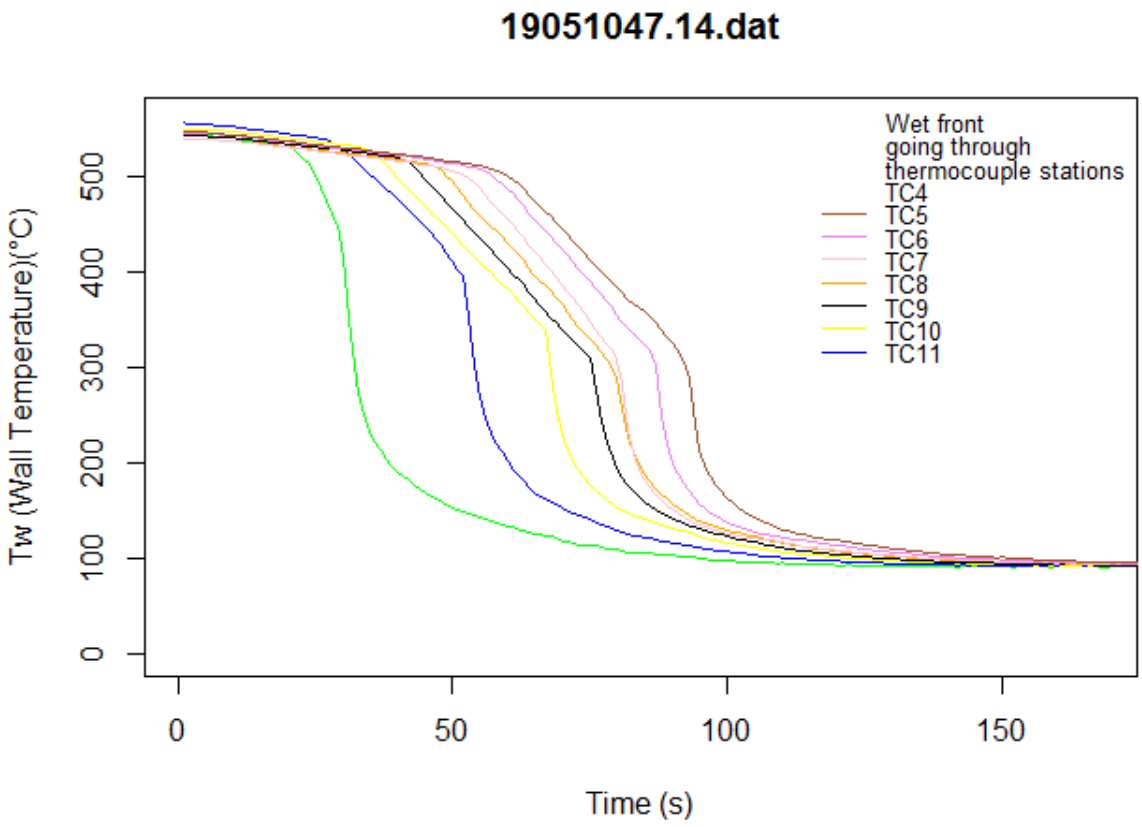
Μετά την εκτέλεση του προγράμματος ExpRun.R προκύπτουν πέντε αρχεία εικόνας που αφορούν τα πειραματικά δεδομένα ενός μόνο πειράματος προσομοίωσης. Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται τα αρχεία εικόνας που προκύπτουν μετά την επεξεργασία των δεδομένων του ατμοσφαιρικού πειράματος 19051047.14 το οποίο διενεργήθη σε συνθήκες κορεσμού, παροχής ψυκτικού 0.033 kg/s και αρχικής θερμοκρασία τοιχώματος ράβδου 550 °C.



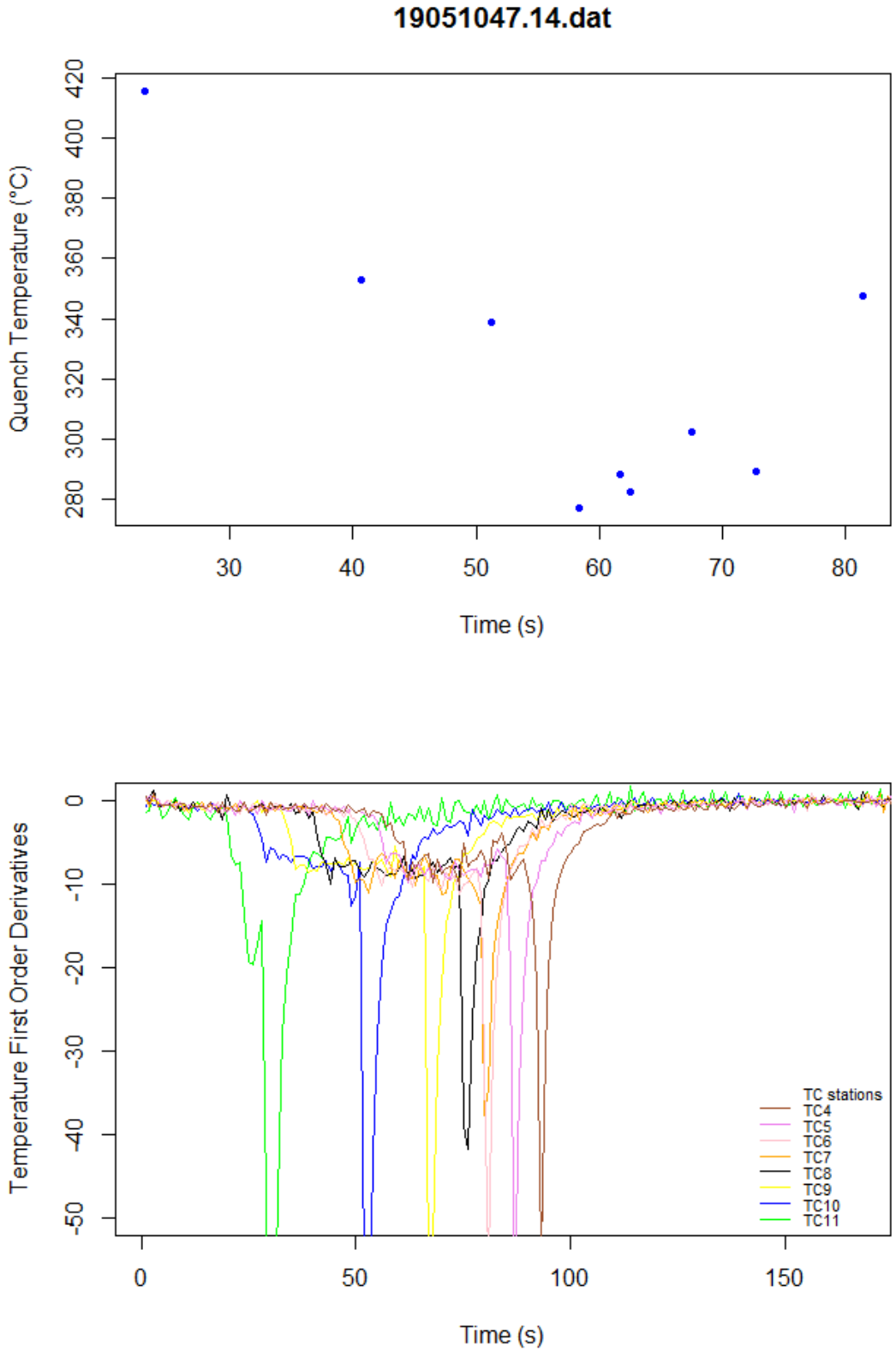
Σχήμα Π80 Elevation vs Time of quenching.png



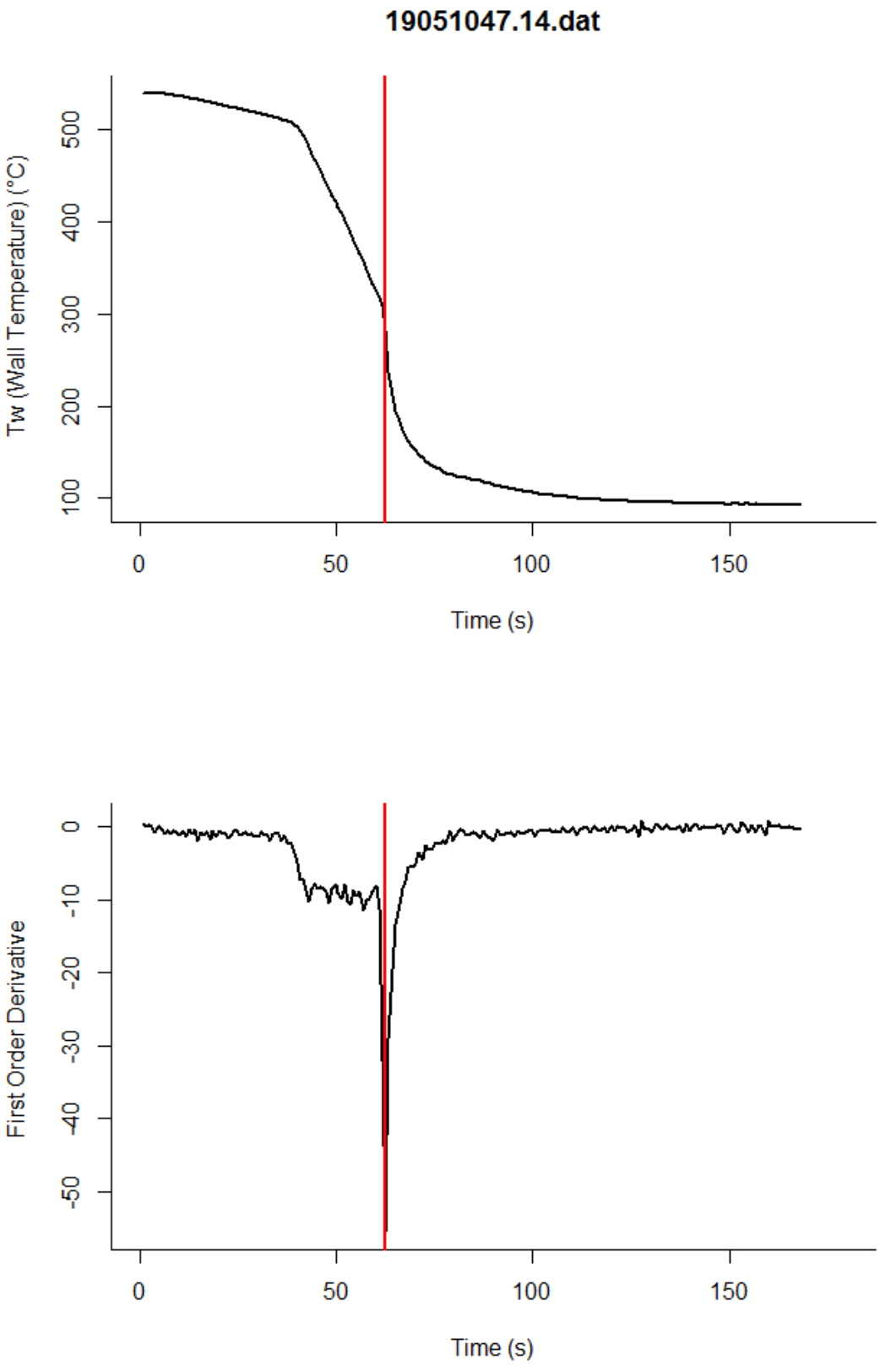
Σχήμα Π81 Elevation vs Quench Temperature.png



Σχήμα Π82 Rewetting History.png



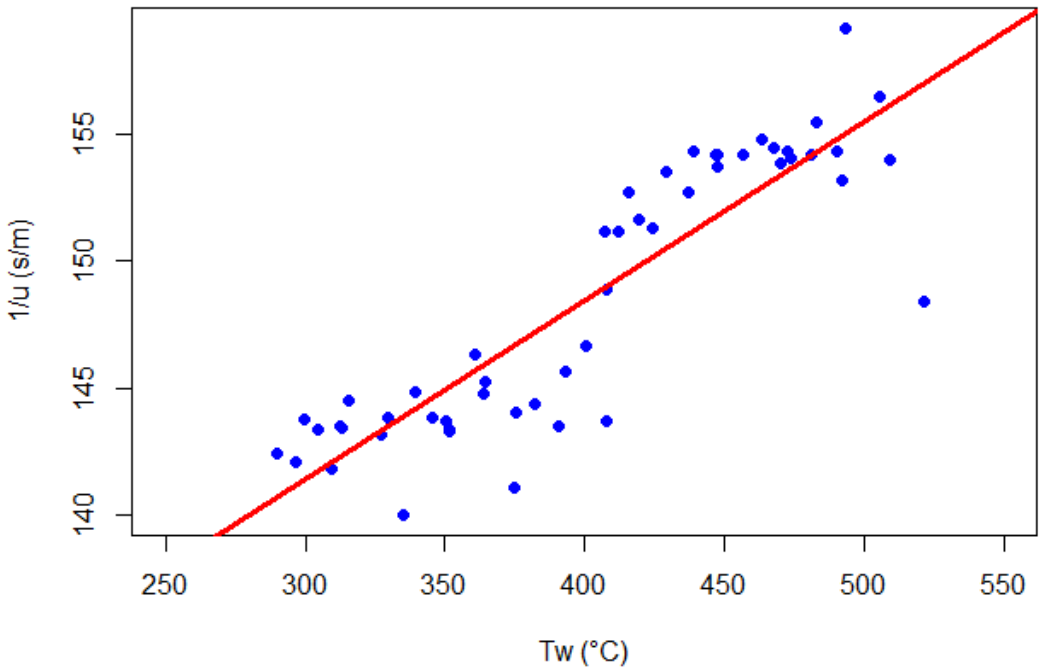
Σχήμα Π83 Rewetting History and First Derivative.png

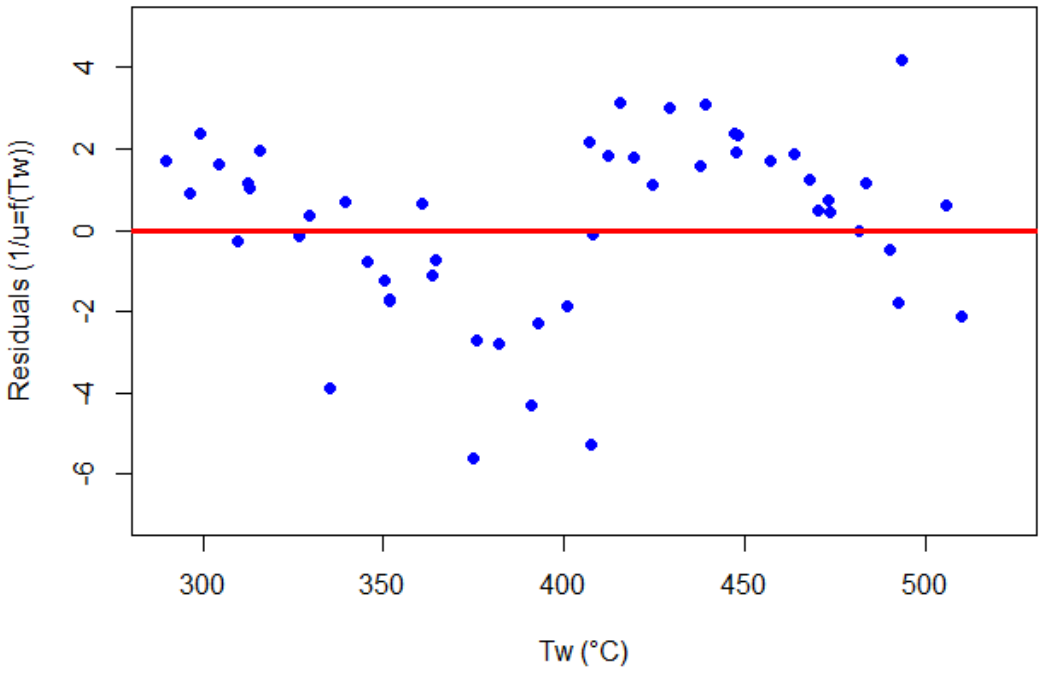


Σχήμα Π84 Temperature and First Deriv. vs Time.png

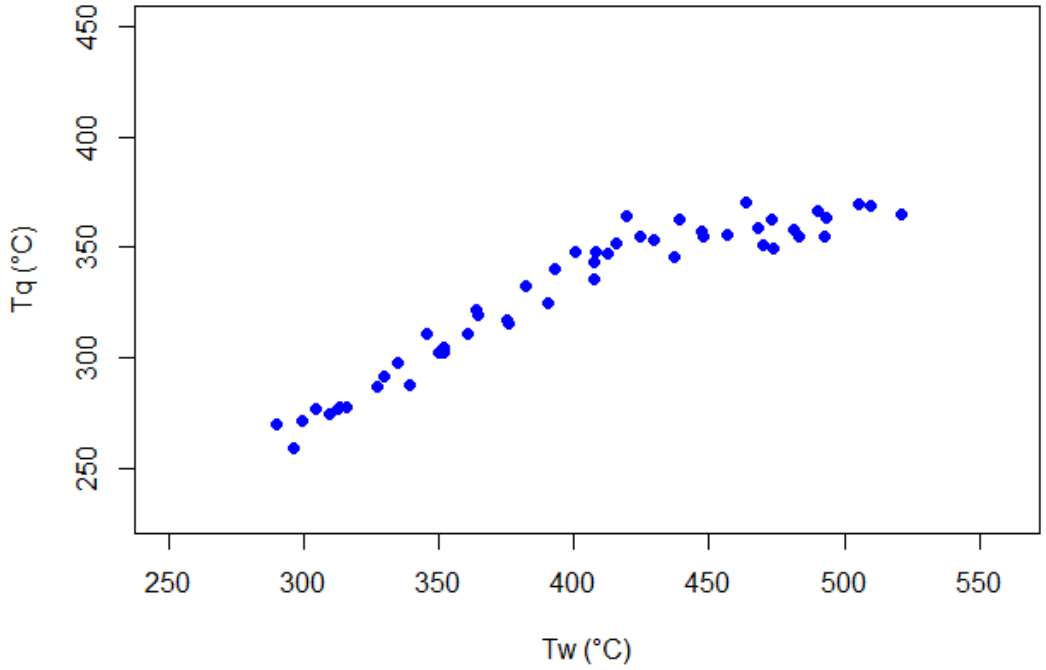
4.2 Αρχεία μιας μιας πειραματικής σειράς προσομοιώσεων

Μετά την εκτέλεση του προγράμματος StatsRun.R προκύπτουν τέσσερα αρχεία εικόνας και ένα αρχείο κειμένου που αφορούν τα πειραματικά δεδομένα μιας σειράς προσομοιώσεων. Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται τα αρχεία εικόνας που προκύπτουν μετά την επεξεργασία των δεδομένων της πειραματικής σειράς προσομοιώσεων που διενεργήθη σε συνθήκες κορεσμού και παροχής ψυκτικού 0.033 kg/s.

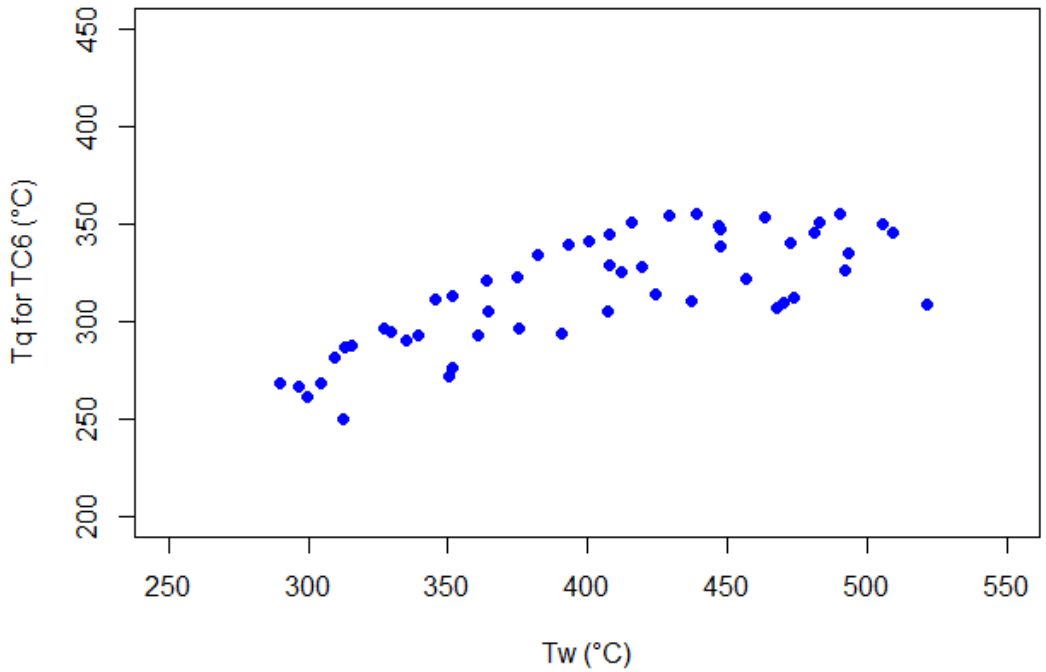




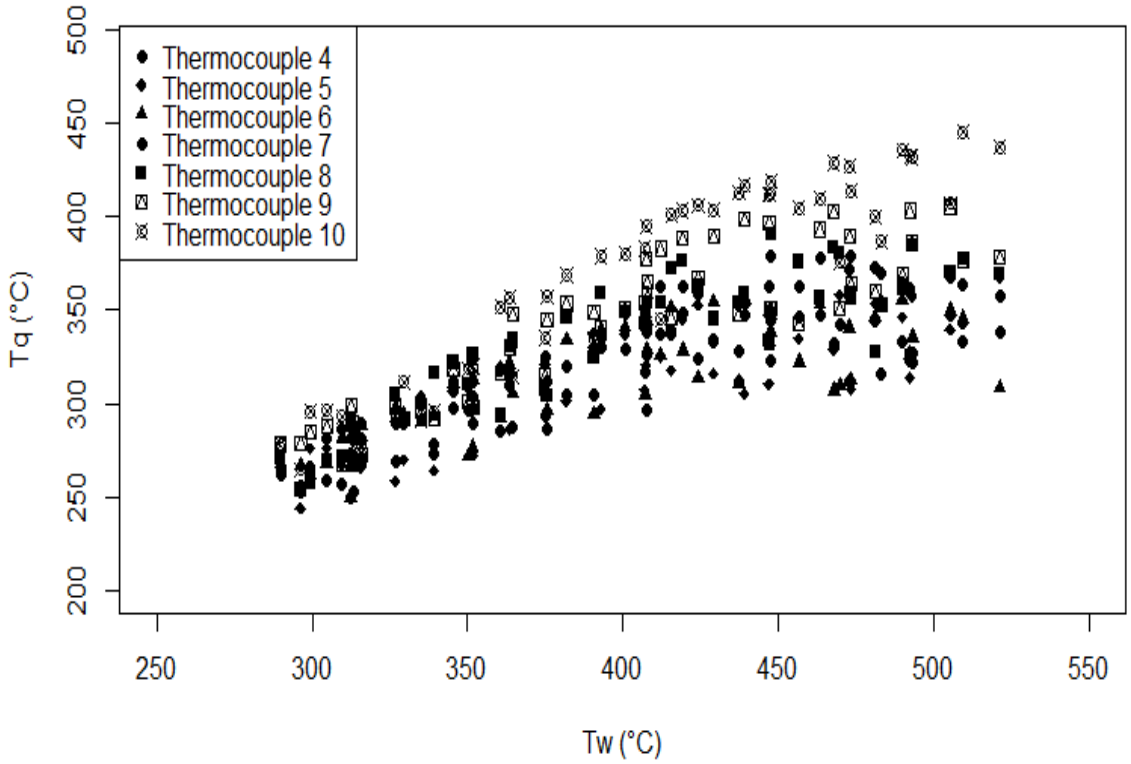
Σχήμα Π85 Tw-u^{-1}.png



Σχήμα Π86 Tw-Tqmean.png



Σχήμα Π87 Tw-Tq6.png



Σχήμα Π88 Tw-Tq (all TCs).png

Αρχείο εξόδου αποτελεσμάτων Stats.txt

INPUT DATA

	1/u	Tw
1	148.4393	521.3482
2	154.0073	509.5700
3	156.4679	505.4500
4	159.1676	493.1801
5	154.3026	490.0566
6	153.1496	492.4500
7	155.4556	483.2086
8	154.1479	481.2579
9	154.0636	473.5866
10	153.8386	469.8998
11	154.3026	472.9309
12	154.4573	467.9621
13	154.7666	463.4002
14	154.1479	456.7312
15	154.1479	447.1365
16	154.1479	447.7684
17	153.6839	447.4579
18	154.3026	439.1734
19	152.6715	437.3980
20	153.5292	429.2725
21	151.2936	424.2492
22	151.6029	419.2834
23	152.6856	415.5824

24 151.1389 412.1659

25 151.1389 407.1147

26 148.8892 407.9004

27 143.7289 407.5564

28 146.6535 400.6962

29 145.6552 392.8557

30 143.4899 390.6571

31 144.4179 381.9122

32 144.0242 375.5674

33 141.0996 374.9139

34 145.2615 364.5840

35 144.7975 363.5782

36 146.3442 360.6822

37 143.3493 351.4969

38 143.7148 350.0921

39 143.3352 351.6922

40 143.8695 345.4104

41 144.8819 339.2944

42 140.0169 334.9937

43 143.8695 329.5550

44 143.1805 326.8755

45 144.4882 315.7274

46 143.4196 313.1451

47 143.4899 312.4005

48 141.8588 309.5872

49 143.4055 304.6712

50 143.7992 299.4278

51 142.1119 296.2820

52 142.4213 289.7665

RESULTS

1. Estimation of the parameters of the regression

a0 a1

120.4234 0.07008062

2. Experimental and estimated values of the dependent variable

1/u(exp) 1/u(est) Deviation %

1 148.4393 156.9598 -852.0549474

2 154.0073 156.1344 -212.7125899

3 156.4679 155.8457 62.2206261

4 159.1676 154.9858 418.1788478

5 154.3026 154.7669 -46.4314701

6 153.1496 154.9346 -178.5045661

7 155.4556 154.2870 116.8597394

8 154.1479 154.1503 -0.2396338

9 154.0636 153.6127 45.0913133

10 153.8386 153.3543 48.4286368

11 154.3026 153.5667 73.5864997

12 154.4573 153.2185 123.8781588

13 154.7666 152.8988 186.7782375

14 154.1479 152.4314 171.6450039

15 154.1479 151.7590 238.8852577

16 154.1479 151.8033 234.4568633

17 153.6839 151.7816 190.2328666

18 154.3026 151.2010 310.1611574

19 152.6715 151.0766 159.4932709

20 153.5292 150.5071 302.2072798

21 151.2936 150.1551 113.8508784

22 151.6029 149.8071 179.5815133

23 152.6856 149.5477 313.7883513

24 151.1389 149.3083 183.0613956

25 151.1389 148.9543 218.4605191

26 148.8892 149.0094 -12.0157153

27 143.7289 148.9852 -525.6349419

28 146.6535 148.5045 -185.0982341

29 145.6552 147.9550 -229.9815228

30 143.4899 147.8009 -431.1035974

31 144.4179 147.1881 -277.0187948

32 144.0242 146.7434 -271.9240421

33 141.0996 146.6976 -559.8042735

34 145.2615 145.9737 -71.2216924

35 144.7975 145.9032 -110.5729835

36 146.3442 145.7003   64.3923644

37 143.3493 145.0566 -170.7264824

38 143.7148 144.9581 -124.3315567

39 143.3352 145.0703 -173.5051569

40 143.8695 144.6300 -76.0519122

41 144.8819 144.2014   68.0493959

42 140.0169 143.9000 -388.3110313

43 143.8695 143.5189   35.0637163

44 143.1805 143.3311 -15.0581812

45 144.4882 142.5498 193.8383963

46 143.4196 142.3688 105.0753152

47 143.4899 142.3167 117.3235183

48 141.8588 142.1195 -26.0707005

49 143.4055 141.7750 163.0509330

50 143.7992 141.4075 239.1670060

51 142.1119 141.1871 92.4829679

52 142.4213 140.7305 169.0839967

3. Variance (about regression) : 312.9558 %
4. Residuals mean square -RMS: 1.664241 %
5. Variance - Standard Deviation of the regression :

   6.259115 2.501822

6. Variance - covariance matrix of the parameters

   4.656612 -0.01128691

   -0.01128691 2.808367e-05

7. Standard errors of the parameters

   2.157918 0.005299403

   1.791942 7.561867 (%)

8. Multiple correlation coefficient -R: 0.8818503
9. Means of variables

   1/v Tw

   148.5891 401.903

10. Standard deviation of variables

    1/v Tw

    5.253485 66.10654

11. Correlation matrix

1	0.8818503
0.8818503	1

5 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

5.1 Αλγόριθμος υπολογισμού θερμοκρασίας και χρονικής στιγμής επανάψυξης ενός θερμοστοιχείου της ράβδου

Σύμφωνα με όσα αναφέρθησαν στην παράγραφο §2.3 της Δ.Δ. ως θερμοκρασία επανάψυξης θεωρείται η θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η ψύξη μιας υπέρθερμης επιφάνειας από το ψυκτικό μέσο. Η θερμοκρασία αυτή μπορεί να υπολογιστεί από το γόνυ της καμπύλης που απεικονίζει τη θερμοκρασιακή ιστορία του κάθε θερμοστοιχείου [12, 13].

Επειδή το γόνυ αποτελεί το σημείο καμπής της καμπύλης της θερμοκρασίας ενός θερμοστοιχείου έναντι του χρόνου, ο ακριβής προσδιορισμός του (χρόνος, θερμοκρασία) γίνεται με τον υπολογισμό του ακρότατου της πρώτης χρονικής παραγώγου της θερμοκρασιακής ιστορίας (Σχήμα Π89).

Ο αλγόριθμος υπολογισμού της χρονικής στιγμής και της θερμοκρασίας επανάψυξης του κάθε σταθμού μέτρησης της θερμοκρασίας της ράβδου εμπεριέχεται στη ρουτίνα CheckExp.R και έχει ως εξής:

- Αρχικά υπολογίζεται η πρώτη χρονική παράγωγος της θερμοκρασίας του κάθε θερμοστοιχείου:
  πχ. για το θερμοστοιχείο TC6

```
derTC6<-diff(finalData$TC6)/diff(expData$Time)
```

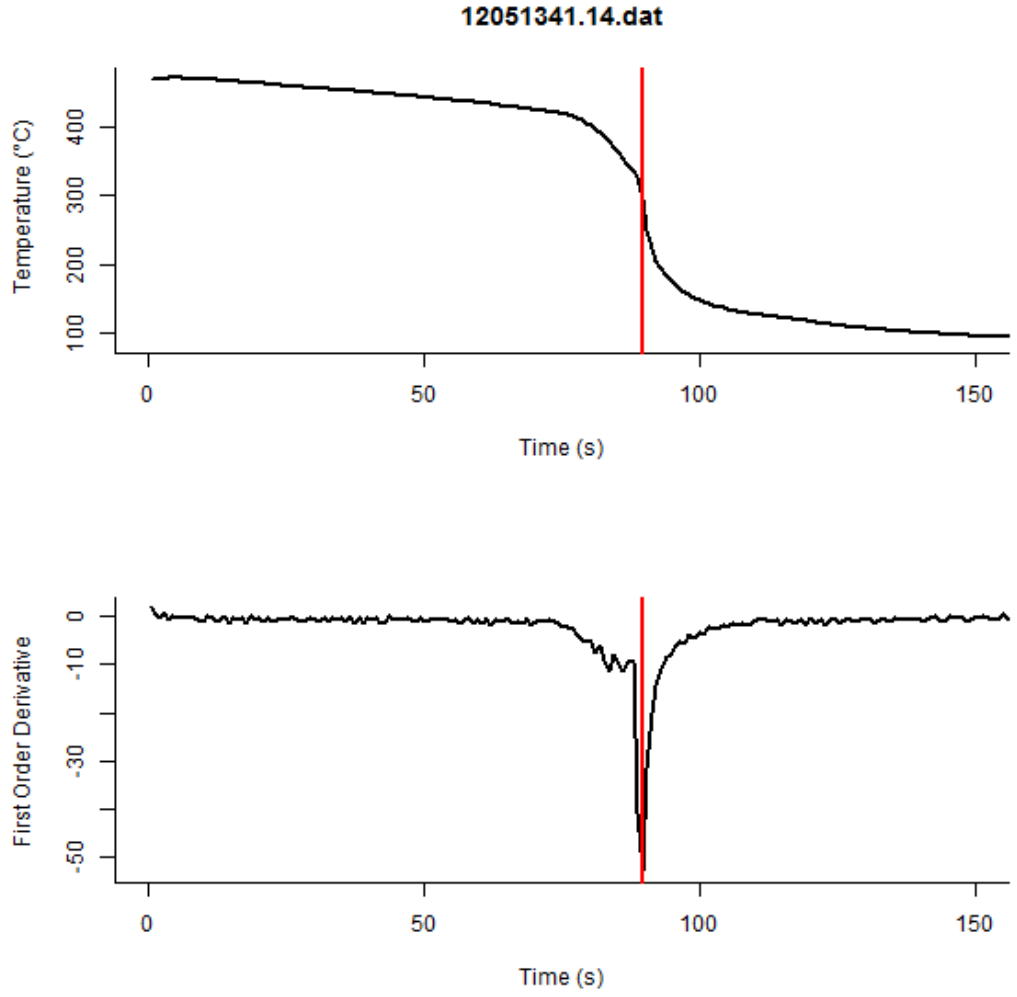
- Έπειτα υπολογίζεται ο χρόνος στον οποίο εμφανίζεται το ελάχιστο ακρότατο της παραγώγου:

```
minderTC6<-min(derData$derTC6)
timeTC6<-subset(derData, derData[,6] == minderTC6)
```

- Τέλος από τα αρχικά πειραματικά δεδομένα, αντιστοιχίζουμε το χρόνο που πραγματοποιήθηκε η επανάψυξη του κάθε θερμοστοιχείου στην αντίστοιχη τιμή της θερμοκρασίας:

```
TcTC6<-subset(finalData, derData[,1] == timeTC6)
```

Έτσι λοιπόν οι τιμές timeTC6 και TcTC6 αντιστοιχούν στη χρονική στιγμή επανάψυξης και στη θερμοκρασία επανάψυξης του θερμοκρασιακού σταθμού TC6 της ράβδου.



Σχήμα Π89 Θερμοκρασιακή ιστορία επαναψυχόμενης ράβδου και πρώτη παράγωγος από πείραμα της παρούσης Δ.Δ. (πείραμα No 12051341.14)

5.2 Περιγραφή εγγενών συναρτήσεων του λογισμικού R Statistics που χρησιμοποιήθηκαν κατά την επεξεργασία

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται κάποιες από τις σημαντικότερες εντολές και εγγενείς συναρτήσεις του λογισμικού πακέτου R Statistics, οι οποίες αναφέρονται

στις ρουτίνες επεξεργασίας των πειραματικών προσομοιώσεων. Σκοπός της παραγράφου είναι να διευκολύνει τον αναγνώστη στην κατανόηση κάποιων δυνατοτήτων που προσφέρει το προγραμματιστικό πακέτο στη στατιστική διερεύνηση μεγάλου όγκου δεδομένων.

- ***source(file)***

Η εντολή αυτή είναι υπεύθυνη για την ανάγνωση ενός κώδικα από ένα αρχείο ή από μία σύνδεση, πχ:

```
source("ExpRun.R")
```

- ***winDialogString(message, default)***

Η εντολή αυτή δημιουργεί παράθυρο διαλόγου το οποίο ζητάει από το χρήστη να εισάγει κάποια δεδομένα, πχ:

```
winDialogString("Choose one experiment to check",
                default=".14.dat")
```

- ***read.table(file, header=F, sep="")***

Η εντολή αυτή διαβάζει ένα αρχείο το οποίο βρίσκεται σε μορφή πίνακα και το αποθηκεύει σε πλαίσιο δεδομένων (data frame), πχ:

```
dataCooling <- read.table("dataCooling.txt", sep=",")
```

Το όρισμα sep αποτελεί το χαρακτήρα διαχωριστή πεδίων του προς ανάγνωση πίνακα (default επιλογή είναι το κενό).

- ***data.frame(name1, name2, …)***

Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία και την αποθήκευση δεδομένων σε μορφή πίνακα, πχ:

```
finalData <- data.frame(expData$Time,TC2,TC3,TC4,
          TC5,TC6,TC7,TC8,TC9,TC10,TC11)
```

- ***colnames(x)***

Η εντολή αυτή επιτρέπει στο χρήστη να ονομάσει τις στήλες ενός πίνακα , πχ:

```
colnames(finalData)<-c("Time","TC2","TC3","TC4","TC5","TC6"
,"TC7","TC8","TC9","TC10","TC11")
```

- ***max(x) or min(x)***

Οι εντολές αυτές επιστρέφουν το μέγιστο ή το ελάχιστο ενός συνόλου τιμών, πχ:

```
min(derData$derTC4)
```

- ***subset(x, y)***

Η συνάρτηση αυτή επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει ένα υποσύνολο (y) από ένα σύνολο δεδομένων (x) σύμφωνα με κάποιες συνθήκες, πχ:

```
subset(derData, derData[,4] == minderTC4)
```

- ***rbind(x,y) or cbind(x,y)***

Οι εντολές αυτές επιτρέπουν στο χρήστη να συνδυάσει κάποια στοιχεία δεδομένων (διανύσματα τιμών, πίνακες κτλ) κατά σειρά ή κατά στήλη αντίστοιχα, πχ:

```
timeData<-rbind(timeTC3,timeTC4,timeTC5,timeTC6,
timeTC7, timeTC8, timeTC9, timeTC10, timeTC11)
```

- ***par(mfrow=c(x,y))***

Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει το περιβάλλον εκτύπωσης έτσι ώστε να μπορούν να συνδυαστούν δύο ή περισσότερα γραφήματα, πχ:

```
par(mfrow=c(1,2))
```

Η τελευταία εντολή χωρίζει καθέτως το περιβάλλον σχεδιασμού σε δύο ίσα μέρη όπου σε κάθε ένα μπορεί να τοποθετηθεί ένα διάγραμμα.

- ***plot(x, y, main="", xlab="", ylab="", par=<arguments>)***

Η εντολή αυτή είναι υπεύθυνη σχεδιασμού ενός γραφήματος της μορφής x-y, ενώ ο χρήστης έχει τη δυνατότητα καθορισμού των γραφικών παραμέτρων, πχ:

```
plot(expData$Time,
TC2,pch=1,lwd=1,cex=0.5,type="n",ylim=c(0,560),
main=name1,xlab="Time (s)", ylab="Cladding Temperature
(°C)")
```

Η τελευταία εντολή σχεδιάζει ένα γράφημα όπου ο άξονας των x περιλαμβάνει τη μεταβλητή expData$Time και έχει το όνομα "Time (s)" και ο άξονας των y περιλαμβάνει τη μεταβλητή TC2, έχει το όνομα "Cladding Temperature (°C)" ενώ τα όριά του εκτείνονται μεταξύ των τιμών 0 και 560. Ο τίτλος του γραφήματος προκύπτει από το όνομα που προσδίδεται στην μεταβλητή name1 όπου αντιστοιχεί στο εκάστοτε πείραμα που αναλύεται.

- ***lines(x, par=<arguments>) and points(x, par=<arguments>)***

Είναι σχεδιαστικές εντολές και προσθέτουν γραμμές ή σημεία στο γράφημα, πχ:

```
lines(TC4,pch=9,col="sienna",lwd=1,cex=0.5)
```

- ***png(file="filename", width=480, height=480)***
  plot(<arguments>)
  dev.off()

Η εντολή αυτή είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία αρχείων εικόνας μορφής .png ενώ επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει και τις διαστάσεις τους (default επιλογή και για τις δύο διαστάσεις είναι το 480), πχ:

```
png(file="Rewetting history and First Derivative.png",
            height=1*480, width=1.5*480)

                        …

                    dev.off()
```

- ***capture.output(expressions , file="filename)***

Αξιολογεί τα ορίσματα που του αναθέτονται και το αποτέλεσμα το στέλνει σε ένα αρχείο εξόδου, πχ:

```
                    capture.output(

        for(i in x){u=dataCooling$tcooling[i]/distance

                        cat(u, sep="\n")},

                file="reverse velocity.txt")
```

- ***lm(y~x1+x2+ ...)***

Χρησιμοποιείται για απλή ή πολλαπλή γραμμική προσαρμογή όπου η μεταβλητή y αποτελεί τη συνισταμένη της προσαρμογής ενώ οι μεταβλητές x1, x2, … αποτελούν τις συνιστπωσες, πχ:

```
            lm1<-lm(rodLength[2:9]~timeData[2:9])
```

- ***summary(object)***

Επιστρέφει αποτελέσματα κάποιων μοντέλων, όπως αυτών της γραμμικής προσαρμογής, εμφανίζοντας τις παραμέτρους του μοντέλου, τα σφάλματά τους αλλά και τους δείκτες αξιοπιστίας του μοντέλου, πχ:

```
                    summary(lm1)
```

Για παράδειγμα, η τελευταία εντολή οδηγεί στην εμφάνιση στην οθόνη του επόμενου κειμένου:

```
> summary(lm1)

Call:
lm(formula = rodLength[2:9] ~ timeData[2:9])

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-29.345 -20.026  -6.817  18.707  46.323

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -810.4124    60.5300  -13.39 1.07e-05 ***
timeData[2:9]    8.7228     0.3861   22.59 4.93e-07 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 29.43 on 6 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9884, Adjusted R-squared:  0.9864
F-statistic: 510.3 on 1 and 6 DF,  p-value: 4.927e-07
```

Όλα τα παραπάνω αποτελούν κάποιες από τις εγγενείς συναρτήσεις – εντολές του λογισμικού πακέτου R Statistics όπου χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων της παρούσης Δ.Δ.. Ωστόσο η περιγραφή των προαναφερθεισών εντολών και παραμέτρων είναι περιληπτική και στην περίπτωση που ο αναγνώστης θέλει να μάθει περισσότερα για τις δυνατότητες κάθε εντολής και παραμέτρου μπορεί να εκτελέσει την παρακάτω εντολή

```
help(topic)
```

η οποία θα εμφανίσει στο περιβάλλον του R Statistics περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το προς διερεύνηση αντικείμενο.

6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ RELAP5/MOD3.3 ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΕΠΑΝΑΨΥΞΗΣ ΕΚ ΤΩΝ ΚΑΤΩ

Στην παράγραφο αυτή γίνεται ανάλυση των δεδομένων που εισήχθησαν στον κώδικα RELAP5/MOD3.3 που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των πειραμάτων επανάψυξης. Συγκεκριμένα γίνεται περιληπτική περιγραφή τμημάτων του κώδικα ώστε να γίνουν αντιληπτές στον αναγνώστη οι δυνατότητες του.

Αρχικά, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν ο τύπος του προβλήματος και ο χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος. Τα παραπάνω ορίζονται στον κώδικα ως εξής:

```
*          type       state
100        new        transnt
*          CPU1       CPU2
105        10.0       40.0       1200.0
```

Στην κάρτα 100 ορίστηκε το πρόβλημα ως νέο ενώ οι συνθήκες σταθερής κατάστασης που επιθυμούμε επιτυγχάνονται μόνο με έλεγχο των οριακών συνθηκών και εκτέλεση του προγράμματος σε μεταβατική λειτουργία (transient mode). Η κάρτα 105 είναι απαραίτητη για έλεγχο του τερματισμού του προγράμματος ο οποίος πραγματοποιείται όταν ο χρόνος εκτέλεσης, μετρημένος σε CPU time, υπερβεί το χρονικό όριο του υπολογιστή.

Στη συνέχεια πρέπει να οριστούν η διάρκεια της προσομοίωσης και η συχνότητα των υπολογισμών. Η διάρκεια προσομοίωσης ορίζεται ως η μέγιστη χρονική διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος (t_end) ενώ η συχνότητα υπολογισμών (plfreq) αφορά τη συχνότητα καταγραφής των αποτελεσμάτων στο αρχείο εξόδου, μετρημένη σε s. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η καταγραφή γίνεται κάθε 1s καθώς ισχύει η σχέση¨

$$Συχνότητα\ καταγραφής = maxt \cdot plfreq$$

όπου maxt είναι το μέγιστο υπολογιστικό βήμα (s).

Τα παραπάνω απεικονίζονται ως εξής στον κώδικα:

*	t_end	mint	maxt	copt	plfreq	majfreq	rstfreq
201	200.0	1.e-10	0.01	00103	100	5000	5000

Έπειτα, ανάλογα με τα ζητούμενα του προβλήματος καθορίζονται ποιες παράμετροι θα υπολογίζονται και θα τυπώνονται στο αρχείο εξόδου επιπλέον αυτών που είναι ήδη στη λίστα δεδομένων. Λόγω της ιδιότητας της εφαρμογής επανάψυξης, στην προκειμένη περίπτωση ορίζονται να τυπώνονται και οι παράμετροι:

HTMODE: Boundary Heat Transfer Mode Number
Ο αριθμός λειτουργίας (mode number) υποδεικνύει ποια περιοχή μεταφοράς θερμότητας είναι σε ισχύ.

HTTEMP: Mesh Point Temperature
Θερμοκρασία σημείου πλέγματος.

TCHFQF: Temperature at the Critical (maximum) Heat Flux
Θερμοκρασία στην κρίσιμη ροή θερμότητας.

TREWET: Quench Temperature
Θερμοκρασία επανάψυξης.

ZQBOT: Elevation of Bottom Quench Front
Ανύψωση του μετώπου επανάψυξης.

Μια επιπλέον δυνατότητα του κώδικα προσομοίωσης είναι αυτή που δίνεται στον προγραμματιστή ώστε να καθορίσει τη χρονική στιγμή έναρξης της διαδικασίας προσομοίωσης μέσω των καρτών σκανδαλισμού. Κατά την προσομοίωση των πειραμάτων της παρούσας ΔΔ για τους λόγους όπου αναφέρθηκαν αναλυτικά στην παράγραφο §6.5.1 ορίζεται και διαφορετική χρονική στιγμή έναρξης της επανάψυξης ανάλογα με την παροχή μάζας του ψυκτικού. Ο προσδιορισμός της χρονικής στιγμής έναρξης γίνεται μέσω διαδοχικών δοκιμών, ξεκινώντας από τη χρονική στιγμή 0, και σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων του κώδικα με τα πειραματικά αποτελέσματα. Στην προκειμένη περίπτωση θεωρείται ότι η επανάψυξη ξεκινάει απευθείας τη χρονική στιγμή 0.0 s.

*	vrbl	prmtr	rltnshp	vrbl	prmtr	add.cnst	latch	timeofquantity
500	time	0	gt	null	0	0.0	l	-1.0

Εφόσον ολοκληρωθεί όλη η παραπάνω διαδικασία η οποία είναι απαραίτητη για την έναρξη της προσομοίωσης, ξεκινάει η εισαγωγή των στοιχείων του μοντέλου (υδροδυναμικά και θερμικά) καθώς και οι αρχικές συνθήκες προσομοίωσης. Επειδή σε κάθε εκτελούμενο πείραμα οι αρχικές συνθήκες δεν είναι απόλυτα σταθερές αλλά μεταβάλλονται γύρω από μια ονομαστική τιμή, είναι απαραίτητο ο προγραμματιστής να έχει στη διάθεσή του όλα τα αρχικά πειραματικά δεδομένα του προς προσομοίωση πειράματος ώστε να γίνει η επακριβής καταγραφή τους στον κώδικα. Όσο πιο ακριβής είναι η εισαγωγή των αρχικών συνθηκών στον κώδικα, τόσο πιο ακριβέστερη είναι η δυνατότητα πρόβλεψης της πορείας του πειράματος επανάψυξης από τον κώδικα. Ωστόσο, επειδή οι πειραματικές μετρήσεις είναι εκατοντάδες, επιλέγεται να καταγραφούν μετρήσεις των αρχικών συνθηκών ανά τυχαία τακτά χρονικά διαστήματα τα οποία θα καλύπτουν όλο τον πειραματικό χρόνο. Για παράδειγμα, στο πείραμα στο οποίο αντιστοιχούν οι επόμενες κάρτες 1000201-1000225, επιλέχθηκε να καταγραφούν ανά περίπου 5s, οι αρχικές τιμές πίεσης (Pa) και θερμοκρασίας εισόδου ψυκτικού (K), όπως ακριβώς και καταγράφηκαν πειραματικά.

```
*       test specific pressure and temperature
*       time    pressure        temperature
1000201     0.0     1.e5     341.7184
1000202     5.00    1.e5     341.8973
.....................................................................
1000224     125.72     1.e5     349.8636
1000225     131.65     1.e5     350.0414
```

Στη συνέχεια παρατίθεται ο κώδικας που αφορά κάθε στοιχείο του μοντέλου ξεχωριστά (Σχήμα 4 ΔΔ) και γίνεται επεξήγηση των παραμέτρων που ορίστηκαν σε κάθε περίπτωση. Το πείραμα το οποίο προσομοιάζεται και παρουσιάζεται είναι το 28051213.14 (αρχικές συνθήκες: ατμοσφαιρικό πείραμα σε κορεσμό και παροχή μάζας ψυκτικού 0.050 kg/s)

Όγκος εισόδου

Inlet Volume: 100

*	name	type	
1000000	htank	**tmdpvol**	
*	area	length	vol
1000101	0.001762	0.3302	0.0
*	azim	incl	elev
1000102	0.0	90.0	0.3302
*	roughn	Dw	flag
1000103	**0.0000457**	**0.03413**	0
*	flag	trip	
1000200	**003**	500	
*	test specific pressure and temperature		
*	time	pressure	temperature
1000201	0.0	1.e5	351.10544
1000202	8.30	1.e5	353.51509
.			
.			
.			
1000224	136.82	1.e5	368.03101

Οι σημαντικότερες προγραμματιστικές παράμετροι που αξίζουν αναφορά και αφορούν τον όγκο εισόδου (Inlet Volume) είναι: η παράμετρος που προσδιορίζει τον τύπο του υδροδυναμικού στοιχείου όπου ορίστηκε σε χρονικά εξαρτώμενο (tmdpvol), η παράμετρος που αφορά την τραχύτητα του υλικού (S.S.) από το οποίο είναι κατασκευασμένη η υπερθερμανθείσα ράβδος (ορίστηκε συμβατικά ίση με 0.0000457 m [14]) και η βρεχόμενη περίμετρος η οποία υπολογίστηκε ίση με 0.03413 m. Τέλος στις κάρτες 1000201-1000221 αναφέρονται οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του όγκου εισόδου. Για την προσομοίωση των πειραμάτων θεωρήσαμε σταθερή πίεση 1 bar ενώ επιλέξαμε να καταγράψουμε επακριβώς την θερμοκρασία εισόδου τυ

ψυκτικού όπως αυτή μετρήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία. Η εισαγωγή της πίεσης και της θερμοκρασίας στις κάρτες του όγκου εισόδου είναι εφικτή μόνον εφόσον οριστεί η παράμετρος 003 στην κάρτα 1000200.

Σύνδεσμος εισόδου

Inlet Junction: 110

*	name	type		
1100000	inlet	**tmdpjun**		
*	from	to	area	
1100101	**100000000**	**200000000**	0.001762	
*	flag	trip		
1100200	**1**	500		
*	test specific mass flows			
*	time	lmasfl	vmasf	intvel
1100201	0.0	0.012455	0.0	0.0
1100202	8.30	0.04863	0.0	0.0
.				
.				
.				
1100224	136.82	0.05034	0.0	0.0

Παρόμοια με τον όγκο ελέγχου με τον οποίο συνδέεται, έτσι και ο σύνδεσμος εισόδου (Inlet Junction) είναι χρονικά εξαρτώμενο στοιχείο το οποίο συνδέει τον όγκο εισόδου (100000000) με το κανάλι δοκιμών (200000000). Η παροχή μάζας του ψυκτικού εισόδου ορίζεται στις κάρτες 1100201-1100224 σε καθορισμένες χρονικές στιγμές.

Τμήμα δοκιμών

Test Section: 200

*	name	type					
2000000	testsec	**pipe**					
*	numbvolumes						
2000001	**20**						
*	area	volnumber					
2000101	0.001762	20					
*	junarea	volnumber					
2000201	0.001762	**19**					
*	length	volnumber					
2000301	**0.0508**	20					
*	volume	volnumber					
2000401	0.0	20					
*	verangle	volnumber					
2000601	90.0	20					
*	elevation	volnumber					
2000701	0.0508	20					
*	roughness	Dw	volnumber				
2000801	0.0000457	0.03413	20				
*	flag	volnumber					
2001001	0	20					
*	flag	volnumber					
2001101	100000	19					
*	flag	pressure	temp	0	0	0	volnumber
2001201	**3**	1.e5	827.67000	0.0	0.0	0.0	1

.

.

.

2001220 3 1.e5 754.20432 0.0 0.0 0.0 20

* flag

2001300 1

* liqmflow vapmflow interface junnumber

2001301 0.0 0.0 0.0 19

* Dw b c slope junnumber

2001401 0.03413 0.0 1.0 1.0 19

Όσον αφορά το κανάλι δοκιμών σημαντική παράμετρος είναι ο προσδιορισμός του τύπου του ως pipe και η τμηματοποίησή του σε 20 όγκους ελέγχου (κόμβους) μήκους 0.0508 m μεταξύ των οποίων υπάρχουν 19 σύνδεσμοι. Ακόμη, ορίζοντας την παράμετρο 3 στις κάρτες 2001201-2001220 επιτρέπεται η εισαγωγή της αρχικής θερμοκρασίας κάθε όγκου ελέγχου όπως μετρήθηκε από τα αντίστοιχα θερμοστοιχεία της ράβδου.

Σύνδεσμος εξόδου

Outlet Junction: 120

* name type

1200000 outlet **sngljun**

* from to area

1200101 **200010000** **130000000** 0.001762

* forwloss revloss jefvcahs

1200102 0.0 **0.1878** 101000

* cntrlword intliqflow intvapflow interface

1200201 1 0.0 0.0 0.0

Ο τύπος του συνδέσμου εξόδου (Outlet Junction) είναι μη χρονικά εξαρτώμενος και έτσι ορίζεται ως sngljun. Είναι σημαντικό να δηλωθούν οι όγκοι ελέγχου τους οποίους συνδέει (200010000 και 130000000). Στην κάρτα 1200102 μία πολύ

σημαντική παράμετρο αποτελεί ο συντελεστής απώλειας ενέργειας κατά την εμπρόσθια ροή λόγω τριβής, k_{loss}=0.1878, ο οποίος υπολογίζεται μέσα από τις επόμενες σχέσεις:

$$Re = \frac{D_w u \rho}{m}$$ **Εξίσωση 6-1**

$$f = \frac{16}{Re}$$ **Εξίσωση 6-2**

$$\Delta P = 4 f \rho u^2 \frac{1}{2} \left(\frac{Length}{Wetted\ Diameter}\right)$$ **Εξίσωση 6-3**

όπου f είναι ο συντελεστής τριβής όπου υπολογίζεται από την εξίσωση Hagen – Poiseuille (σχέσηΕξίσωση 6-2) για αριθμούς Reynolds 0 και 2100. Το μήκος (Length) του συνδέσμου θεωρείται ίσο με το μήκος του ψυχρού τμήματος της ράβδου (0.3302 m).

Τέλος, στην κάρτα 1200201 δηλώνονται οι τιμές της παροχής του ψυκτικού στον σύνδεσμο εξόδου. Οι τιμές είναι μηδενικές καθώς θεωρείται πως μετά το πέρας του πειράματος δεν ενδιαφέρει τον χρήστη η συμπεριφορά του ρευστού.

Όγκος εξόδου

Outlet Volume: 130

*	name	type	
1300000	contank	**snglvol**	
*	area	lengh	vol
1300101	0.001762	1.0	0.0
*	azim	incl	elevat
1300102	0.0	0.0	0.0
*	roughn	Dw	tlpvbfe
1300103	0.0000457	0.0	0000010

*	flag	pressure	temperature
1300200	003	1.e5	**373.0**

Ο όγκος εξόδου (Outlet Volume) δεν είναι χρονικά εξαρτώμενος και ορίζεται ως snglvol. Μία ακόμη παράμετρος που ζητείται από τον κώδικα είναι η θερμοκρασία του ρευστού στον όγκο εξόδου η οποία θεωρείται ίση με τη θερμοκρασία κορεσμού του νερού υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες (373 K).

Υπερθερμανθείσα ράβδος

Heated Rod: 1200

*	nh	mesh	geom	flag	left	reflood	boundary	axialinterv
12001000	**20**	**6**	**2**	0	0.0	**2**	1	8
*	location_flag		format_flag					
12001100	0		1					
*	intervals		right_coordinate					
12001101	**3**		**0.0049375**					
12001102	**2**		**0.0079375**					
*	composition_number			interval				
12001201	**1**			**2**				
12001202	**2**			**3**				
12001203	**1**			**5**				
*	factor		mesh					
12001301	0.0		2					
12001302	1.0		3					
12001302	0.0		5					
*	flag							
12001400	-1							
*	initial temperatures data for every mesh point							

12001401 827.67 827.67 827.67 827.67 827.67 827.67

12001402 827.67 827.67 827.67 827.67 827.67 827.67

.

.

.

12001420 754.20432 754.20432 754.20432 754.20432 754.20432 754.20432

* left boundary conditions

*	bound_vol	incr	type	area_code	factor	number
12001501	0	0	0	1	0.0254	1
12001502	0	0	0	1	0.0508	19
12001503	0	0	0	1	0.0254	20

* right boundary conditions

12001601	200010000	0	1	1	0.0254	1
12001602	200020000	10000	1	1	0.0508	19
12001603	200100000	0	1	1	0.0254	20

* test specific power fraction

*	type	multiplier	left_mode	right_mode	number
12001701	0	**0.0**	0.0	0.0	1
12001702	0	0.0	0.0	0.0	2

.

.

.

12001720	0	0.0	0.0	0.0	20
12001900	0				

*	heat_D	lng_forw	lng_rev	grid_forw		grid_rev	
	grid_loss_f	grid_loss_r	boil_fact	number			
12001901	**0.14162**	0.0508	0.9652	0.0	0.0	0.0	0.0
	1.0 1						
12001902	0.14162	0.1016	0.9144	0.0	0.0	0.0	0.0
	1.0 2						

.

.

.

12001920 0.14162 0.9906 0.1270 0.0 0.0 0.0 0.0
1.0 20

****

* Heat structure thermal properties *

****

* material type

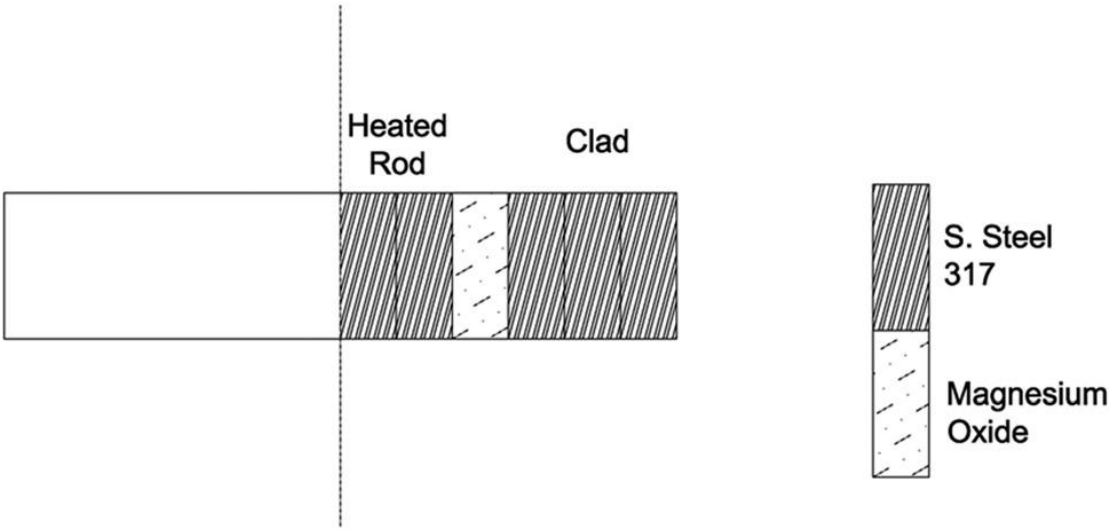
20100100 **s-steel**

20100200 **uo2**

Η προσομοίωση της θερμαινόμενης ράβδου είναι από τα πιο ουσιαστικά κομμάτια του κώδικα. Οι παράμετροι στην κάρτα 12001000 αφορούν τα γενικά χαρακτηριστικά του μοντέλου της ράβδου (παράγραφος §6.4.2) όπως είναι ο αριθμός των κόμβων (20), τα πλέγματα (mesh points) στα οποία χωρίζεται η ράβδος οριζόντια (6), η γεωμετρία της ράβδου η οποία ορίζεται ως κυλινδρική (τρίτη λέξη, τιμή 2) καθώς και η παράμετρος του κώδικα που ορίζει ότι μελετάται πρόβλημα επανάψυξης (έκτη λέξη, τιμή 2). Όσον αφορά τον αριθμό των πλεγμάτων, προτείνεται από τους Fletcher και Schultz ο αριθμός 6 ως σημείο εκκίνησης της ανάλυσης μιας υπέρθερμης ράβδου ενώ ο αριθμός 12 προτείνεται ως ο ανώτερος αριθμός πλεγμάτων [14]). Οι αριθμοί αυτοί προτείνονται ως η βέλτιστη λύση μεταξύ εξοικονόμησης υπολογιστικού χρόνου και προσομοίωσης των φαινομένων επανάψυξης. Για την παρούσα ΔΔ χρησιμοποιήθηκαν 6 πλέγματα σε κάθε προσομοίωση που μελετήθηκε με σκοπό στο μέλλον να γίνει έλεγχος και σύγκριση των αποτελεσμάτων μετά τη χρήση περισσότερων πλεγμάτων.

Στις κάρτες 12001101 και 12001102 ορίζονται σε ποια απόσταση από το κέντρο της ράβδου και προς τα δεξιά (συμβατικά όλα τα φαινόμενα μελετώνται στα δεξιά της ράβδου [14]) βρίσκονται τα χωρίσματα των 6 mesh points που ορίζονται. Στις κάρτες 12001201-12001203 προτείνεται το τοίχωμα της ράβδου να χωριστεί σε 3 mesh points, σε 1 mesh point να οριστεί η περιοχή της ράβδου που περιέχει τη σκόνη μαγνησίου και σε 2 mesh points το υπόλοιπο κομμάτι της ράβδου μέχρι το κέντρο της (Σχήμα Π90). Αναφέρεται πως οι θερμικές ιδιότητες της σκόνης του μαγνησίου είναι

παρόμοιες με τις θερμικές ιδιότητες του διοξειδίου του ουρανίου [15] και έτσι κατά την προσομοίωση χρησιμοποιούνται οι καταχωρημένες στο RELAP5/MOD3.3 βιβλιοθήκες ιδιοτήτων του διοξειδίου του ουρανίου (κάρτα 20100200).



Σχήμα Π90 Διαχωρισμός πλέγματος στη δεξιά κατεύθυνση της ράβδου

Η αρχική θερμοκρασία, σε βαθμούς K, κάθε mesh point κάθε κόμβου ορίζεται στις κάρτες 12001401-12001420. Επιπλέον, στις κάρτες 12001701-12001720 ορίζεται ότι κατά την επανάψυξη η θερμαινόμενη ράβδος δεν παράγει ισχύ (δεύτερη λέξη, τιμή 0.0). Ακόμη, σημαντική παράμετρος του κώδικα αποτελεί η τιμή της θερμαινόμενης διαμέτρου (Heated Diameter) η οποία υπολογίζεται ίση με 0.14162 m σύμφωνα με τη σχέση:

$$Heated\ Diameter = 4\frac{Flow\ Area}{2\pi R} \qquad \textbf{Εξίσωση 6-4}$$

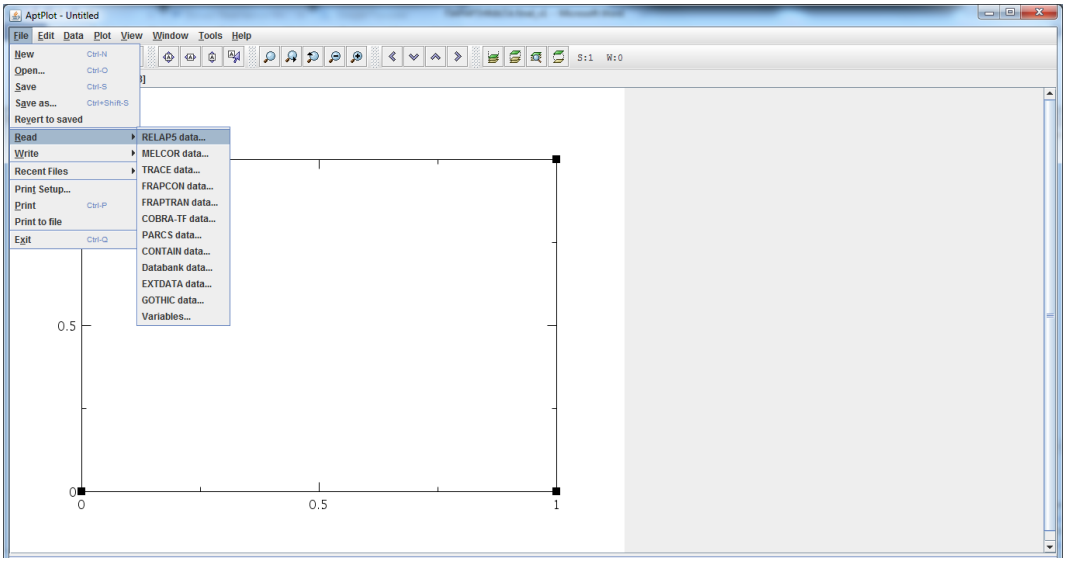
6.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων με τη χρήση του AptPlot

Μετά την εκτέλεση του προγράμματος RELAP5/MOD3.3 προκύπτουν τρία αρχεία: το data.out στο οποίο είναι αποθηκευμένοι όλοι οι υπολογισμοί του κώδικα μετά από κάθε επανάληψή του, το αρχείο data.rst στο οποίο είναι αποθηκευμένα όλα τα αποτελέσματα του κώδικα σε συμπιεσμένη μορφή και το data.plt. Αποτελέσματα του

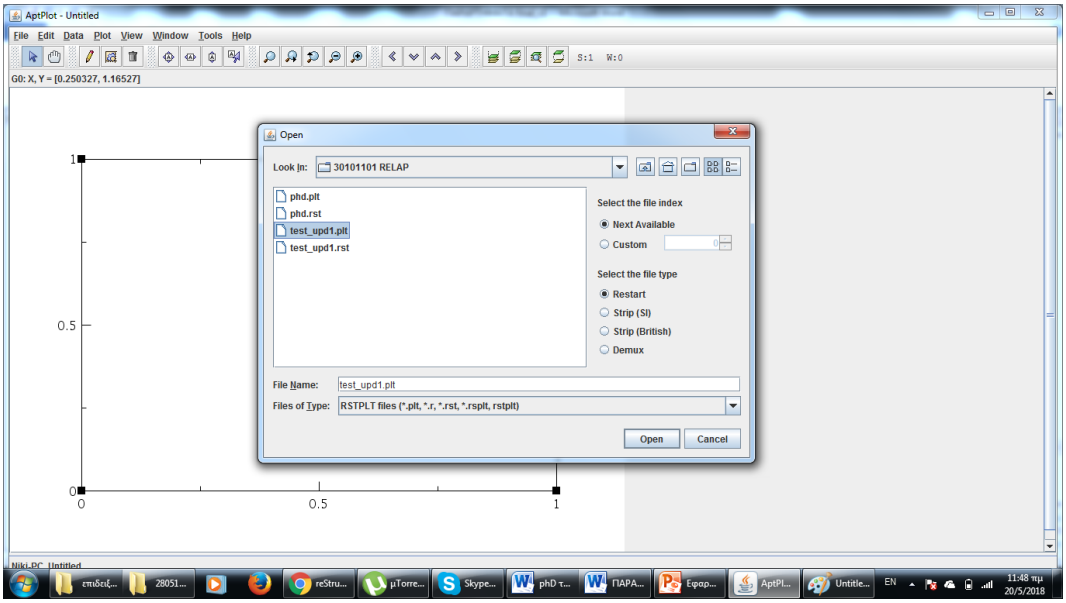
κώδικα θεωρούνται οι τιμές των ζητούμενων παραμέτρων μετά από κάθε επανάληψη του κώδικα, όπως τις έχει καθορίσει ο ερευνητής.

Από τα τρία προαναφερθέντα αρχεία, ιδιαίτερη σημασία για τη συνέχεια της ανάλυσης, έχει το αρχείο μορφής *.plt* το οποίο μπορεί να αναγνωστεί από το πρόγραμμα AptPlot και μέσα από αυτό μπορεί να γίνει η γραφική απεικόνιση των παραμέτρων αλλά και να αποθηκευτούν τα αποτελέσματα σε αρχείο μορφής *.txt* για την μετέπειτα ανάλυσή τους με τη βοήθεια άλλων υπολογιστικών προγραμμάτων. Παρακάτω αναφέρονται τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσει ο ερευνητής για την ανάλυση των αποτελεσμάτων του κώδικα, με την χρήση του προγράμματος AptPlot:

1. Μετά την έναρξη του προγράμματος, ο χρήστης αφού επιλέξει από το μενού την ανάγνωση αρχείου RELAP5 (Σχήμα Π6-91), καλείται να επιλέξει το όνομα του αρχείου πειράματος το οποίο θέλει να επεξεργαστεί (Σχήμα Π6-92).

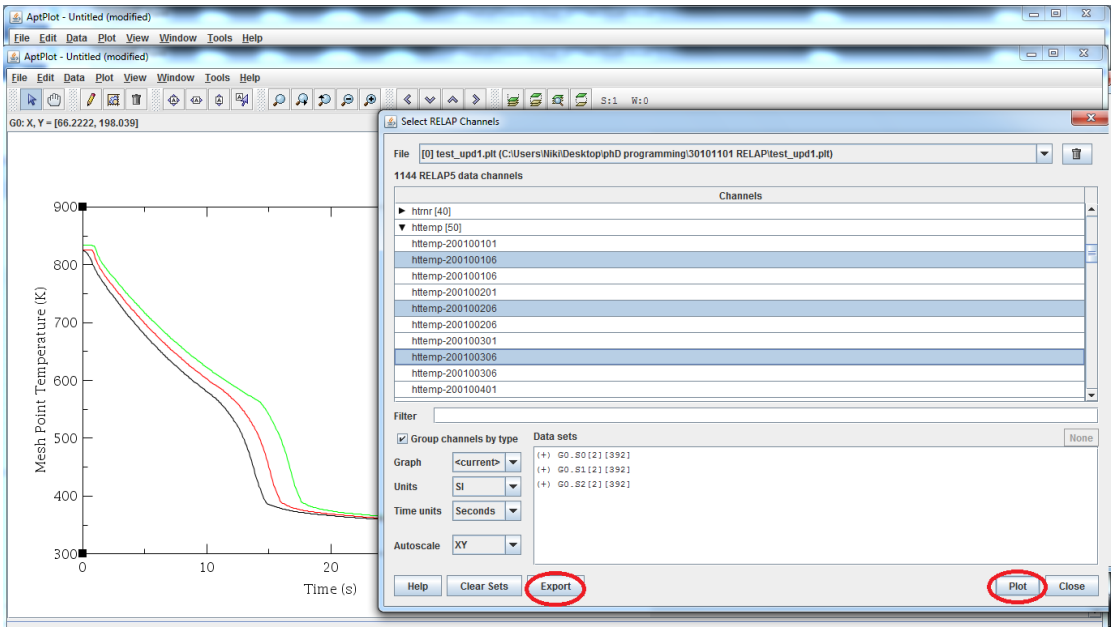


Σχήμα Π6-91 Ανάγνωση δεδομένων RELAP5 με τη βοήθεια του προγράμματος AptPlot



Σχήμα Π6-92 Επιλογή αρχείου .plt προς ανάγνωση

2. Στη συνέχεια, εμφανίζεται η λίστα των παραμέτρων του προγράμματος (Σχήμα Π6-93) και δίνεται η δυνατότητα στον ερευνητή να επιλέξει αν θέλει να τις απεικονίσει διαγραμματικά ή να εξάγει τις τιμές τους σε αρχείο μορφής .txt για περαιτέρω επεξεργασία με τη βοήθεια άλλων προγραμμάτων (όπως R statistics, Matlab κλτ).



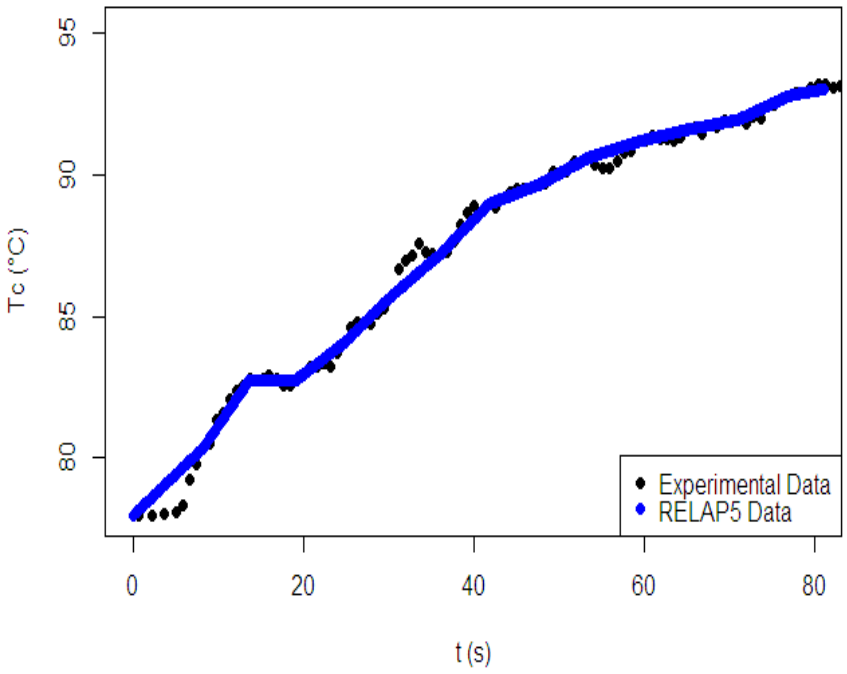
Σχήμα Π6-93 Λίστα παραμέτρων του RELAP5/MOD3.3 και επιλογές προγράμματος για διαγραμματική απεικόνιση ή εξαγωγή των δεδομένων

6.2 Έλεγχοι παραμέτρων προσομοίωσης

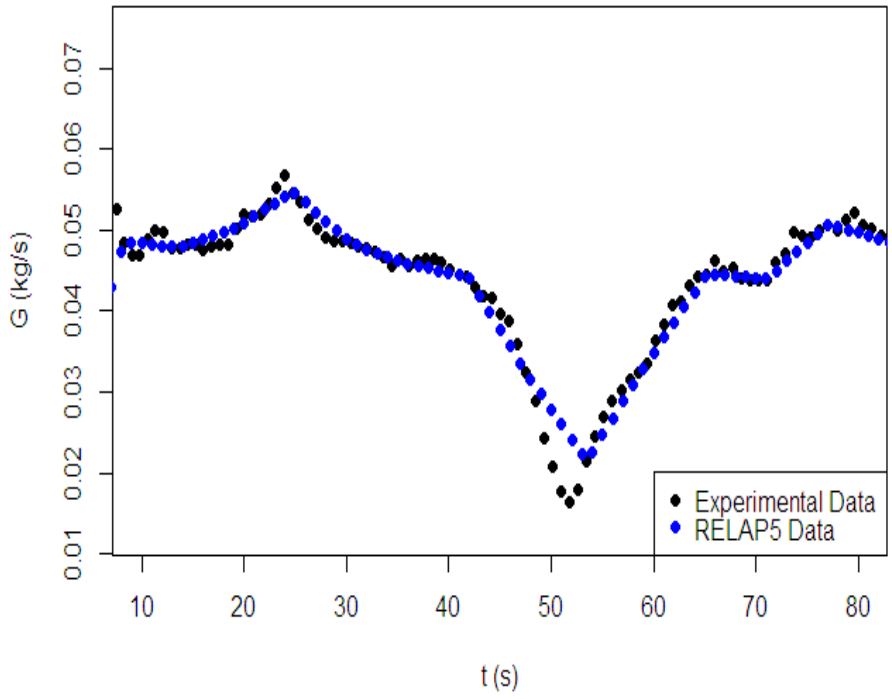
Δύο είναι οι βασικοί έλεγχοι που γίνονται μετά το πέρας της εκτέλεσης ενός προγράμματος προσομοίωσης RELAP5/MOD3.3:

a) Έλεγχος των αρχικών και οριακών συνθηκών του προβλήματος

Κατά τη σύνταξη του προγράμματος RELAP5/MOD3.3, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην σωστή καταγραφή των αρχικών συνθηκών του προβλήματος. Για την καλύτερη εποπτεία των αρχικών τιμών αλλά και για τη διευκόλυνση του προγραμματιστή, προτείνεται να γίνεται και οπτικός έλεγχος μέσω διαγραμμάτων όλων των αρχικών συνθηκών όπως καταγράφηκαν στο αρχείο εξόδου μετά το τέλος της εκτέλεσης του προγράμματος. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της προσομοίωσης ενός πειράματος επανάψυξης εκ των κάτω καταγράφονται κατά τη σύνταξη του προγράμματος η παροχή μάζας και η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού ανά τακτά χρονικά διαστήματα της τάξεως των 6-8 sec τα οποία καλύπτουν όλη την πειραματική διαδικασία. Στα Σχήματα Π36 και Π37 απεικονίζονται οι τιμές αυτών των παραμέτρων έναντι του χρόνου και αντιπαραβάλλονται με τις πραγματικές για το πείραμα 28051213.14.



Σχήμα Π94 Διάγραμμα πειραματικών τιμών και τιμών προσομοίωσης της θερμοκρασίας εισόδου του ψυκτικού έναντι του χρόνου που αφορούν το πείραμα 28051213.14



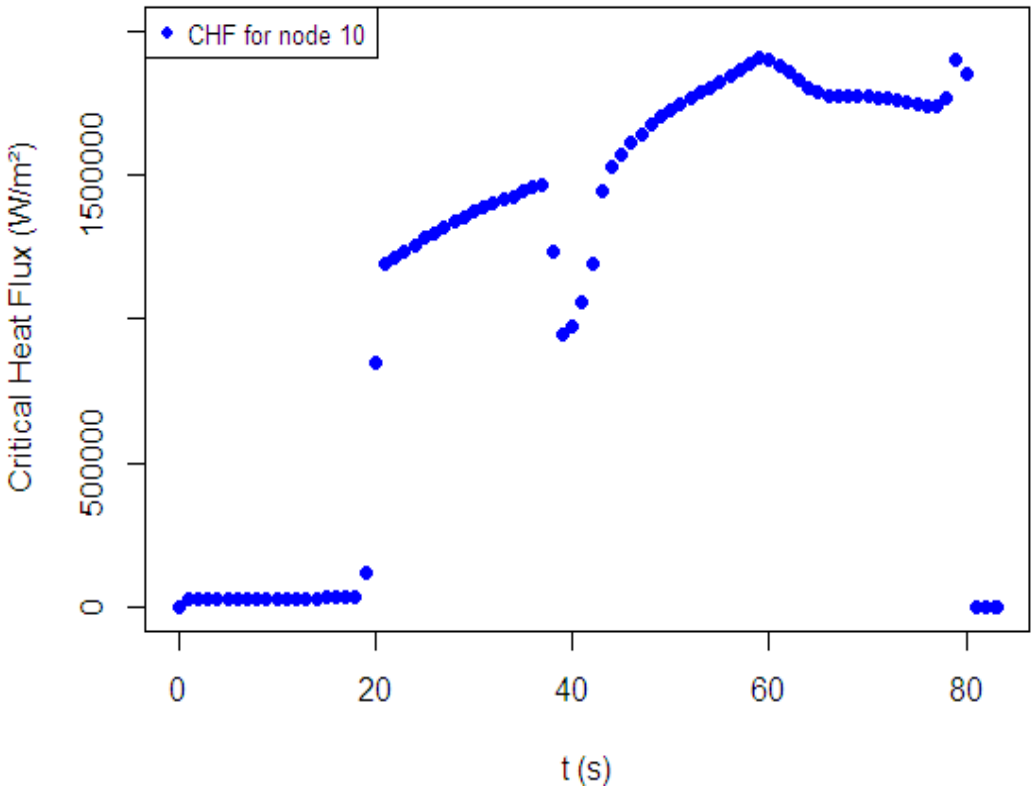
Σχήμα Π95 Διάγραμμα πειραματικών τιμών και τιμών προσομοίωσης της παροχής εισόδου του ψυκτικού έναντι του χρόνου που αφορούν το πείραμα 28051213.14

Από τα παραπάνω Σχήματα διαπιστώνεται και οπτικά πως η καταγραφή των αρχικών συνθηκών του πειράματος 28051213.14 είναι πολύ κοντά στην πραγματική και ο προγραμματιστής μπορεί να προχωρήσει στη συνέχεια της ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Οι διαφορές οφείλονται στις χρονικές στιγμές που επιλέχτηκαν και οι οποίες καθορίζουν το πλήθος των αρχικών συνθηκών που καταγράφηκαν.

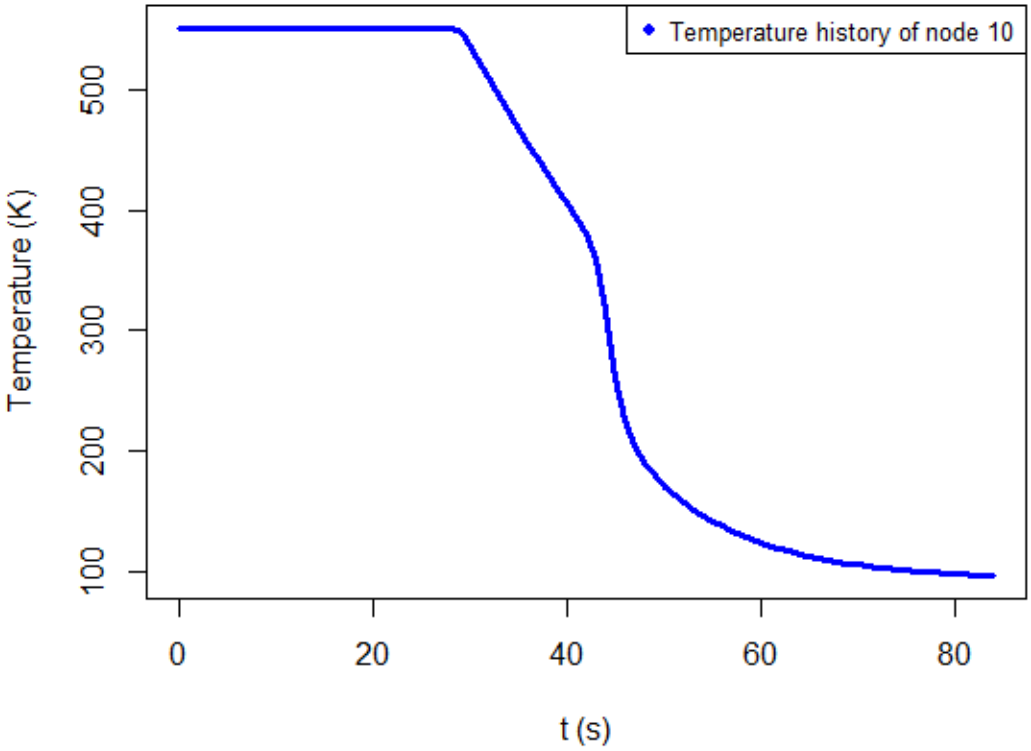
b) Έλεγχος για τον εντοπισμό μη αποδεκτών ή μη φυσιολογικών αποτελεσμάτων

Κατά το τέλος της εκτέλεσης του προγράμματος προσομοίωσης και προτού ξεκινήσει η ανάλυση των αποτελεσμάτων και η διασύγκρισή τους με τα πειραματικά, προέχει ο έλεγχος των καταγεγραμμένων παραμέτρων του αρχείου εξόδου για τον εντοπισμό μη αποδεκτών και μη ρεαλιστικών αποτελεσμάτων. Μια τέτοια παράμετρος ελέγχου αποτελεί η υπολογιζόμενη από το πρόγραμμα κρίσιμη θερμική ροή των όγκων ελέγχου του Τμήματος Δοκιμών. Η απόκλιση των υπολογιζόμενων τιμών από αυτές που προτείνονται από τη βιβλιογραφία αποτελεί το γνώμονα απόρριψης ή μη της προσομοίωσης. Στο Σχήμα Π96 απεικονίζεται η κρίσιμη θερμική ροή ενός όγκου ελέγχου ο οποίος βρίσκεται κοντά στο μέσο της ράβδου (κόμβος 10 σε απόσταση

0.508 m από την είσοδο του καναλιού δοκιμών) ενώ στο Σχήμα Π97 αντιπαραβάλλεται η θερμοκρασιακή ιστορία αυτού του κόμβου για σύγκριση. Συγκρίνοντας τις τιμές της υπολογιζόμενης κρίσιμης θερμικής ροής με τιμές της θερμικής ροής όπως αυτές αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία [16, 17], συμπεραίνεται ότι η προσομοίωση παρήγαγε ρεαλιστικά αποτελέσματα και έτσι ο προγραμματιστής είναι πλέον σε θέση να ξεκινήσει την ανάλυσή τους.



Σχήμα Π96 Κρίσιμη θερμική ροή του κόμβου 10 του καναλιού δοκιμών όπως υπολογίστηκε από τον κώδικα RELAP5 και αφορά το πείραμα 28051213.14



Σχήμα Π97 Θερμοκρασιακή ιστορία του κόμβου 10 όπως υπολογίστηκε από τον κώδικα RELAP5 και αφορά το πείραμα 28051213.14

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] D. Group, «Expansion joints guide,» [Ηλεκτρονικό]. Available: www.boa.ch.

[2] N. Z. I. o. Chemistry, «Chemical cleaning of metals,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.nzic.org.nz/ChemProcesses/metals/8H.pdf.

[3] L. Garverick, «Corrosion in the petrochemical industry,» σε *ASM International* , Ohio, 1995.

[4] R. Ross, «Corrosion by Phosphoric Acid».

[5] A. I. a. S. Institute, Cleaning and Descaling Stainless Steel, a designers' handbook series No 9001.

[6] [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/druginfo/natural/735.html.

[7] Ε. Χίνης, Πειραματική εγκατάσταση προσομοίωσης φαινομένων βρασμού σε υδρόψυκτους πυρηνικούς αντιδραστήρες: Εφαρμογή (Μελέτη του φαινομένου της επαναψύξεως ράβδων πυρηνικού καυσίμου), Αθήνα, 1994.

[8] Σ. Σιμόπουλος, Μετρήσεις τεχνικών μεγεθών, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1989.

[9] Α. Μυλωνάκης, Πειραματική μελέτη επαναψύξεως υπερθερμανθείσων επιφανειών σε πιέσεις 4 και 5 bar, Αθήνα, 2011.

[10] Σ. Χατζηδάκης, Πειραματική μελέτη επαναψύξεως υπερθερμανθεισών επιφανειών με παράμετρο την υπόψυξη σε πιέσεις 1,2 και 3 bar, Αθήνα, 2006.

[11] R. Ihaka και R. Gentleman, «R Project for Statistical Computing. Free software.».

[12] A. Yamanouchi, «Effect of core spray cooling in transient state after a loss of coolant accident,» *Journal of Nuclear Science and Technology,* τόμ. 5, pp. 547-558, 1968.

[13] A. Kim και Y. Lee, «A correlation of rewetting temperature,» *Letters in Heat and Mass Transfer,* τόμ. 6, pp. 117-123, 1979.

[14] C. Fletcher και R. Schultz, «RELAP5/MOD3 Code Manual,» NUREG/CR-5535, 1991.

[15] V. Yemel'yanov, A. Yevstyukhin και J. Dunworth, «The Metallurgy of Nuclear Fuel: Properties and Principles of the Technology of Uranium, Thorium and Plutonium,» J.V. Dunworth, 1969, pp. 273-280.

[16] S. Kandlikar, «Critical heat flux in subcooled flow boiling - An assessment of current understanding and future directions for research,» *Multiphase Science and Technology,* τόμ. 13, pp. 207-232, 2001.

[17] E. Elias, V. Sanchez και W. Hering, «Development and validation of a transition boiling model for RELAP5:MOD3 reflood simulation,» *Nuclear Engineering and Design ,* τόμ. 183, pp. 269-286, 1998.

[18] K. Yoshioka και S. Hasegawa, «A correlation in displacement velocity of liquid film boundary formed on a heated vertical surface in emergency core cooling,» *Journal of Nuclear Science and Technology,* τόμ. 7, pp. 418-425, 1970.

[19] J. Dunkan και J. Leonard, «Heat transfer in a simulated BWR fuel bundle cooled by spray under loss-of-coolant conditions,» GEAP-13086, 1970.

[20] J. Dunkan και J. Leonard, «BWR standby cooling heat transfer under simulated loss-of-coolant conditions between 15 and 300 psia,» GEAP-13190, 1971.

[21] J. Dunkan και J. Leonard, «BWR FLECHT final report,» GEAP-13197, 1971.

[22] D. Elliott και R. P.W., «The quenching of a heated surface by a film of water in a steam environment at pressures up to 53 bar,» AEWW-M976, 1970.

[23] D. Elliott και P. Rose, «The quenching of a heated Zircalloy surface by a film of water in a steam environment at pressures up to 53 bar,» AEEW-M1027, 1971.

[24] G. Shires, A. Pickering και P. Blacker, «Film cooling of vertical fuel rods,» AEEW-R343, 1964.

[25] A. Bennett, G. Hewitt, H. Kearsey και R. Keeys, «The wetting of hot surfaces by water in a steam environment at high pressure,» AEEW-R5146, 1966.

[26] L. Tong, «Heat-transfer mechanisms in nucleate and film boiling,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 21, pp. 1-25, 1972.

[27] S. Sahu, P. Das και S. Bhattacharyya, «An experimental investigation on the quenching of a hot vertical heater,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 240, pp. 1558-1568, 2010.

[28] F. Cadek, D. Dominicis και R. Leyse, «PWR FLECHT final report,» WCAP-7665, 1971.

[29] K. Riedle και F. Wikler, «ECC-Reflooding Experiments with a 340-rod bundle,» σε *CREST Specialist Meeting on ECC for LWR*, Munich, Germany, 1972.

[30] T. Thompson, «Simulated bottom-flooding emergency cooling of a close-spaced rod bundle,» σε *European Two-Phase Flow Group Meeting*, 1972.

[31] T. Thompson, «On the process of rewetting a hot surface by a falling liquid film,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 31, pp. 234-245, 1974.

[32] E. White και R. Duffey, «A study of the unsteady flow and heat transfer in the reflooding of water reactor cores,» *Annals of Nuclear Energy,* τόμ. 3, pp. 197-210, 1976.

[33] M. Naitoh, K. Chino και H. Ogasawara, «Cooling mechanism during transient reflooding of a reactor fuel bundle after loss of coolant,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 44, pp. 193-200, 1977.

[34] V. Dhir, R. Duffey και I. Catton, «Quenching studies on a zircalloy rod bundle,» *Journal of Heat Transfer,* τόμ. 103, pp. 293-299, 1981.

[35] M. De Salve και B. Panella, «Validation of a bottom flooding model,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 99, pp. 213-222, 1987.

[36] K. Tuzla, C. Unal και J. Chen, «An experimental study of bottom rewetting in a rod bundle geometry,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 125, pp. 189-200, 1991.

[37] A. Campanile και G. Pozzi, «Low rate emergency reflooding heat transfer tests in rod bundle,» σε *CREST Specialist Meeting on Emergency Core Cooling for Light Water Reactors*, 1972.

[38] D. Andreoni και M. Courtaud, «Study of heat transfer during the reflooding of a single rod test section,» σε *CREST Specialist Meeting on Emergency Core Cooling for Light Water Reactors*, 1972.

[39] R. Martini και A. Premoli, «Bottom flooding experiments with simple geometries under different ECC conditions,» σε *CREST Specialist Meeting on Emergency Core Cooling for Light Water Reactors*, 1972.

[40] R. Duffey και D. Porthouse, «Experiments on the cooling of high temperature surfaces by water jets and drops,» CEGB, 1972.

[41] R. Duffey και D. Porthouse, «The physics of rewetting in water reactor emergency core cooling,» τόμ. 5, pp. 379-394, 1973.

[42] B. Piggott και D. Porthouse, «Water reactor emergency cooling: the effect of pressure, subcooling and surface condition on the rewetting of hot surfaces,» CEGB, 1973.

[43] B. Piggott και D. Porthouse, «A correlation of rewetting data,» τόμ. 32, pp. 171-181, 1975.

[44] S. Yu, P. Farmer και M. Coney, «Methods and correlations for the prediction of quenching rates on hot surfaces,» τόμ. 3, pp. 415-443, 1977.

[45] A. Saxena, V. Venkat Raj και V. Govardhana Rao, «Experimental studies on rewetting of hot vertical annular channel,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 208, pp. 283-303, 2001.

[46] R. Duffey και M. Ackerman, «The effects of counter-current single and two phase flows on the quenching rate of hot surfaces,» *International Journal of Multiphase Flow,* τόμ. 4, pp. 117-140, 1978.

[47] R. Karyampudi και W. Chon, «Effect of thermal radiation on rewetting of top spray emergency coolant,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 36, pp. 27-36, 1976.

[48] R. Semeria και B. Martinet, «Calefaction spots on a heating wall: temperature distribution and resorption,» σε *Symposium on Boiling Heat Transfer in Steam Generating Units and Heat Exchangers*, Manchester, G.B., 1965.

[49] M. Sawan, G. Zaki και H. Temraz, «A three-regions rewetting model with heat generation and subcooling,» *Atomkernenergie - Kerntechnik Bd.,* τόμ. 34, pp. 199-204, 1979.

[50] P. Chambre και E. Elias, «Boiling heat transfer during rewetting,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 50, pp. 353-363, 1978.

[51] J. Blair, «An analytical solution to a two-dimensional model of the rewetting of a hot dry rod,» *Nuclear engineering and Design,* τόμ. 32, pp. 159-170, 1975.

[52] C. Tien και L. Yao, «Analysis of conduction controlled rewetting of a vertical surface,» *Journal of Heat Transfer, ASME,* τόμ. 97, pp. 161-165, 1975.

[53] K. Sun, G. Dix και C. Tien, «Cooling of a very hot vertical surface by a falling liquid film,» *Journal of Heat Transfer, ASME,* τόμ. 96, pp. 126-131, 1974.

[54] H. Yeh, «An analysis of rewetting of a nuclear fuel rod in water reactor emergency core cooling,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 34, pp. 317-322, 1975.

[55] S. Dua και C. Tien, «Two dimensional analysis of conduction-controlled rewetting with precursory cooling,» *Journal of Heat Transfer, ASME,* τόμ. 98, pp. 407-413, 1976.

[56] M. Coney, «Calculations on the rewetting of hot surfaces,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 31, pp. 246-259, 1974.

[57] M. Sawan και H. Temraz, «A three regions semi-analytical rewetting model,» *Nuclear engineering and Design,* τόμ. 64, pp. 319-327, 1981.

[58] R. Schutzle και H. Unger, «A mathematical model for investigation of the rewetting of fuel rods,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 101, pp. 315-322, 1987.

[59] T. Thompson, «Rewetting of a hot surface,» σε *5th International Heat Transfer Conference* , Tokyo, Japan, 1974.

[60] M. Casamirra, F. Castiglia, M. Giardina, C. Lombardo, G. M. A. Celata και L. Saraceno, «Rewetting of a hot vertical surface by liquid sprays,» *Experimental Thermal and Fluid Science,* τόμ. 29, pp. 885-891, 2005.

[61] J. Carbajo, «A study on the rewetting temperature,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 84, pp. 21-52, 1985.

[62] F. Gunnerson και T. Yackle, «Quenching and rewetting of nuclear fuel rods,» *Nuclear Technology,* τόμ. 54, pp. 113-117, 1981.

[63] H. Kim, B. Truong, J. Buongiorno και L. Hu, «Effects of micro\nano-scale surface characteristics on the Leidenfrost point temperature of water,» *Journal of Thermal Science and Technology,* τόμ. 7, pp. 453-462, 2012.

[64] A. Bergles και W. Thompson, «The relationship of quench data to steady-state pool boiling data,» *International Journal Heat Mass Transfer,* τόμ. 13, pp. 55-68, 1970.

[65] S. Yao και R. Henry, «An investigation of the minimum film boiling temperature on horizontal surfaces,» *Journal of Heat Transfer, ASME,* τόμ. 100, pp. 260-267, 1978.

[66] S. Olek, Y. Zvirin και E. Elias, «Rewetting of hot surfaces by falling liquid films as a conjugate heat transfer problem,» *International Journal of Multiphase Flow,* τόμ. 14, pp. 13-33, 1988.

[67] P. Berenson, «Film boiling heat transfer from a horizontal surface,» *Journal of Heat Transfer, ASME,* τόμ. 83, pp. 351-358, 1961.

[68] K. Kimball και R. Roy, «Quench front propagation during bottom reflooding of a heated annular channel,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 76, pp. 79-88, 1983.

[69] W. Bradfield, «On the effect of subcooling on wall superheat in pool boiling,» *Journal of Heat Transfer,* τόμ. 89, pp. 269-270, 1967.

[70] A. Siegel, Rewetting temperature during top and bottom reflood, University of Illinois, Urbana-Champaign: M.S. Thesis, 1979.

[71] Ε. Χίνης, *Πειραματική εγκατάσταση προσομοίωσης φαινομένων βρασμού σε υδρόψυκτους πυρηνικούς αντιδραστήρες: Εφαρμογή (Μελέτη του φαινομένου της επαναψύξεως ράβδων πυρηνικού καυσίμου),* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα: Διαδακτορική Διατριβή, 1994.

[72] M. Sawan και M. Carbon, «A review of spray-cooling and bottom-flooding work for LWR cores,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 32, pp. 191-207, 1975.

[73] D. Butterworth και R. Owen, «The quenching of hot surfaces by top and bottom flooding - a review,» AERE-R7992, 1975.

[74] J. Carbajo και A. Siegel, «Review and comparison among the different models for rewetting in LWR's,» *Nuclear engineering and Design,* τόμ. 58, pp. 33-44, 1980.

[75] E. Elias και G. Yadigaroglu, «Rewetting and liquid entrainment during reflooding - state of the art,» EPRI NP-435, 1977.

[76] G. Hewitt και G. Wallis, «Flooding and associated phenomena in falling film flow in a tube,» UKAEA report, AERE-R4022, 1963.

[77] G. Wallis, One-dimensional two-phase flow, New York: McGraw Hill, 1969.

[78] S. Naff και J. Whitbeck, «Steady state investigation of entrainment and countercurrent flow in small vessels,» σε *ANS, Topical meeting in Water Reactor Safety*, Salt Lake City, 1973.

[79] S. Chan και M. Grolmes, «Hydrodynamically controlled rewetting,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 34, pp. 307-316, 1975.

[80] G. Anderson και B. Mantzouranis, «Two-phase (gas-liquid) flow phenomena-1. Pressure drop and hold-up for two-phase flow in vertical tubes,» *Chemical Engineering Science,* τόμ. 12, pp. 109-126, 1960.

[81] A. Dukler, «Characterization, effects and modelling of the wavy gas-liquid interface,» *Heat Mass Transfer,* τόμ. 6, pp. 207-234, 1972.

[82] A. Cetinbudaklar και G. Jameson, «The mechanism of flooding in vertical countercurrent two-phase flow,» *Chemical Engineering Science,* τόμ. 24, pp. 1669-1680, 1969.

[83] N. S. A. Division, RELAP5/MOD3.3 Code Manual Volume I: Code Structure, System Models, and Solution Methods, 2001.

[84] G. Analytis, «Developmental assessment of RELAP5/MOD3.1 with separate effect and integral test experiments: model changes and options,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 163, pp. 125-148, 1996.

[85] M. Sencar και N. Aksan, «Evaluation of Reflooding, Models in RELAP5/MOD2.5, RELAP5/MOD3/5m5 and RELAP5/MOD3/v7j Codes by Leheigh University and PSI-NEPTUN Bundle Reflooding Experiment Data,» σε *2nd CAMP Meeting*, Brussels, 1993.

[86] M. Sencar και N. Aksan, «Evaluation and assessment of reflooding models in RELAP5/MOD2.5 and RELAP5/MOD3 codes using Lehigh University and PSI-NEPTUN bundle experimental data,» σε *Seventh International Meeting. Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics NURETH-7*, Saratoga Springs, New York, 1995.

[87] H. Jeong και H. No, «Modification of the reflood model in RELAP5/MOD3.1,» *Nuclear Technology,* τόμ. 124, pp. 52-64, 1998.

[88] M. Richner, G. Analytis και S. Aksan, «Assessment of RELAP5:MOD2, cycle 36.02, using NEPTUN reflooding experimental data, Paul Scherrer Institut, PSI104,» *NUREG,* αρ. IA-00103, 1991.

[89] P. Hofmann και V. Noack, «Experiment on the quench behavior of fuel rod segments,» σε *Second International Quench Workshop*, Karlsruhe, 1996.

[90] T. Hatse, B. Adroguer, C. Allison, S. Hagen, P. Hofmann και V. Noack, «Degraded core quench: a status report,» AEA Technology, Winfrith Technology Centre Dorset, DT2 8DH, Dorchester, 1996.

[91] J. Chen, «Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow,» *Process Design and Development,* τόμ. 5, pp. 322-329, 1966.

[92] Z. Koszela, «Assessment of RELAP5/MOD3.2.2 Gamma against ABB Atom 3 × 3-Rod Bundle Reflooding Tests,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 223, pp. 49-73, 2003.

[93] T. Choi και H. No, «Improvement of the reflood model of RELAP5/MOD3.3 based on the assessments against FLECHT-SEASET tests,» *Nuclear Engineering and Design,* τόμ. 240, pp. 832-841, 2010.