

Ε.Μ.ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας
Διευθυντής: Καθ. Σ.Ε. Σιμόπουλος

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΑΝΑΨΥΞΕΩΣ
ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΘΕΙΣΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΣΕ ΠΙΕΣΕΙΣ
4 ΚΑΙ 5 BAR**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ

ΑΝΤΩΝΙΟΥ Γ. ΜΥΛΩΝΑΚΗ

Σπουδαστή της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π

Επίβλεψη: Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Π. Χίνης

Συνεργασία: Δρ. Α.Α. Νικόγλου

Αθήνα 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται πειραματική διερεύνηση του φαινομένου της επανάψυξης ράβδου πυρηνικού καυσίμου. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η επίδραση της πίεσης και της διαμέτρου του καναλιού της πειραματικής εγκατάστασης στο φαινόμενο αυτό. Τα πειράματα της εργασίας αυτής διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Η παρούσα εργασία εντάσσεται σε ένα γενικότερο πλαίσιο πειραματικής διερεύνησης του φαινομένου της επαναψύξεως που ξεκίνησε το 1990 με τη δημιουργία του Θερμοϋδραυλικού Κυκλώματος.

Στο σημείο αυτό θέλω να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Ε.Π. Χίνη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την καθοδήγηση του σε κάθε στάδιο αυτής αλλά και για την πολύτιμη συμβολή του στην τελική μορφή του κειμένου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Σ.Ε. Σιμόπουλο και τον επίκουρο καθηγητή κ. Μ.Ι. Αναγνωστάκη, για την τιμή που μου έκαναν να συμμετάσχουν στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τον διδάκτορα Α.Α. Νικόγλου για τη συνεισφορά του τόσο κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας όσο και κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτής.

Αθήνα, Μάρτιος 2011

1. Εισαγωγή

Το μεταβατικό φαινόμενο της επανάψυξης των υπερθερμανθείσων ράβδων πυρηνικού καυσίμου, είναι ένα από τα κυριότερα φυσικά φαινόμενα που σχετίζονται με την ασφαλή λειτουργία ενός Πυρηνικού Αντιδραστήρα Ισχύος (ΠΑΙ). Η μελέτη του φαινομένου αυτού έχει μείζονα σημασία αφενός για τον σχεδιασμό και την κατασκευή της εγκατάστασης, αφετέρου για την ασφαλή λειτουργία της σε περίπτωση ατυχήματος. Ατύχημα σε έναν ΠΑΙ είναι πιθανόν να οδηγήσει στην απογύμνωση των ράβδων πυρηνικού καυσίμου από ψυκτικό υγρό. Ως αποτέλεσμα του γεγονότος αυτού, η θερμότητα που εκλύεται από τις ραδιενεργές σχάσεις και διασπάσεις δεν απάγεται, οδηγώντας στην υπερθέρμανση των ράβδων πυρηνικού καυσίμου. Για την αντιμετώπιση της υπερθέρμανσης των ράβδων, καθίσταται απαραίτητη η ενεργοποίηση ενός εφεδρικού συστήματος ψύξης έκτακτης ανάγκης (Emergency Core Cooling System, ECCS). Στόχος του συστήματος αυτού είναι η έγκαιρη επανάψυξη των ράβδων πυρηνικού καυσίμου, προτού αυτές αστοχήσουν με δυσμενείς συνέπειες για τον πυρήνα του αντιδραστήρα. Το φαινόμενο της επανάψυξης μίας ράβδου πυρηνικού καυσίμου δύναται να προσομοιωθεί και να διερευνηθεί πλήρως στο Θερμοϋδραυλικό Κύκλωμα νερού του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Το Θερμοϋδραυλικό Κύκλωμα σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στα πλαίσια της Διδακτορικής Διατριβής [1] και λειτουργεί από το έτος 1990. Αποτελεί μία δυναμική εγκατάσταση η οποία συντηρείται και εξελίσσεται προκειμένου να εξασφαλίζεται η ασφαλής και αξιόπιστη λειτουργία της.

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας (ΔΕ) είναι η πειραματική διερεύνηση της επίδρασης, αφενός της πίεσης που επικρατεί στο τμήμα δοκιμών της πειραματικής εγκατάστασης, αφετέρου της γεωμετρίας του υδραυλικού καναλιού του τμήματος δοκιμών, στην ταχύτητα επανάψυξης. Η επιλογή των συγκεκριμένων πειραμάτων επανάψυξης έγινε με γνώμονα τις ελλείψεις στη βιβλιογραφία καθώς και τη συνέχιση της σειράς προηγούμενων πειραμάτων που έγιναν στην ίδια εγκατάσταση στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας [4]. Ακολουθεί συνοπτική αναφορά των θεμάτων που αναπτύσσονται σε κάθε κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση θεμάτων σχετικών με το φαινόμενο της επανάψυξης τόσο από θεωρητική όσο και από πειραματική σκοπιά. Παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες για τα ψυκτικά μέσα των Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος και περιγράφεται το ατύχημα απώλειας ψυκτικού (Loss Of Coolant Accident, LOCA) και η λειτουργία των συστημάτων ECCS με έμφαση την περίπτωση Αντιδραστήρα Πεπιεσμένου Ύδατος. Εισάγεται στοιχειώδες θεωρητικό υπόβαθρο, για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου της επανάψυξης, με την περιγραφή των σταδίων βρασμού δεξαμενής και βρασμού ροής σε κατακόρυφο κανάλι. Εν συνεχεία περιγράφονται οι παράμετροι που εμπλέκονται στο φαινόμενο της επανάψυξης, ενώ παρουσιάζεται και ο μηχανισμός που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια του φαινομένου αυτού. Τέλος παρουσιάζονται θεωρητικά μοντέλα

επίλυσης του προβλήματος, καθώς και τα σημαντικότερα πειράματα σχετικά με την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στο φαινόμενο της επανάψυξης.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται εν συντομία η συγκρότηση και λειτουργία του Θερμοϋδραυλικού Κυκλώματος. Έμφαση δίνεται σε θέματα σχετικά με την εκτέλεση πειραμάτων επανάψυξης, τη συλλογή μετρήσεων καθώς και την διαδικασία προετοιμασίας και εκτέλεσης των πειραμάτων της παρούσας ΔΕ.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται λεπτομερώς οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για τους ελέγχους βαθμονόμησης αφενός των ηλεκτρονικών μονάδων επεξεργασίας και μεταφοράς σημάτων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, αφετέρου των οργάνων μέτρησης της παροχής όγκου του νερού. Ακολουθεί στατιστική επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων καθώς και σύγκριση με παλαιότερους ελέγχους προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της γήρανσης στην αξιοπιστία των συσκευών μέτρησης.

Τέλος στο **Κεφάλαιο 5** αναλύονται τα πειραματικά δεδομένα προκειμένου να ελεγχθεί η επίδραση της πίεσης και της γεωμετρίας του υδραυλικού καναλιού του Τμήματος Δοκιμών στο φαινόμενο της επανάψυξης. Περιγράφονται η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων που συλλέχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ, τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν, ενώ πραγματοποιείται σύγκριση και με αποτελέσματα παλαιότερων εργασιών.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΨΥΚΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΕΠΑΝΑΨΥΞΗΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΨΥΚΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΕΠΑΝΑΨΥΞΗΣ.....	3
2.1 Ψυκτικά μέσα Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος (ΠΑΙ).....	3
2.2 Αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος (Pressurized Water Reactor-PWR).....	8
2.3 Πιθανές καταστάσεις λειτουργίας ενός ΠΑΙ.....	9
2.4 Ατύχημα απώλειας ψυκτικού	11
2.5 Κατηγορίες εφεδρικών συστημάτων ψύξεως (ECCS)	12
2.6 Διεθνείς κανονισμοί.....	13
2.7 Συστήματα ECCS αντιδραστήρα PWR.....	14
2.8 LOCA σε αντιδραστήρα PWR	15
2.8.1 Μεγάλης έκτασης (Large Break , LB) LOCA σε αντιδραστήρα PWR	15
2.8.2 Μικρής έκτασης (Small-Break, SB) LOCA σε αντιδραστήρα PWR	17
2.9 Στάδια βρασμού ρευστού	18
2.9.1 Βρασμός δεξαμενής	18
2.9.2 Στάδια βρασμού σε ψυκτικό που ρέει.....	19
2.10 Επανάψυξη ράβδων πυρηνικού καυσίμου	21
2.10.1 Φυσικοί μηχανισμοί κατά την επανάψυξη ράβδων πυρηνικού καυσίμου....	21
2.10.2 Επιτυχία - Αποτυχία στην προσπάθεια επανάψυξης	23
2.10.3 Παράμετροι που επηρεάζουν την επανάψυξη	24
2.11 Μοντέλα επίλυσης του προβλήματος της επανάψυξης.....	25
2.11.1 Διαφορική εξίσωση αγωγιμότητας	25

2.12	Σημαντικότερα πειράματα.....	27
2.12.1	Πειράματα FLECHT.....	27
2.12.2	Πειράματα Shires et al (1964)	27
2.12.3	Πειράματα Bennet et al (1966)	28
2.12.4	Πειράματα Yamanouchi (1968).....	28
2.12.5	Πειράματα Elliott et al (1971)	28
2.13	Πρόσφατα πειράματα	29
2.13.1	Πειράματα Saxena et al (2001).....	29
2.13.2	Πειράματα Celata et al (2009)	29
2.13.3	Πειράματα Sahu et al (2010)	29
2.14	Συμπεράσματα για την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στην ταχύτητα επανάψυξης.....	30
2.14.1	Αρχική θερμοκρασία ράβδου.....	30
2.14.2	Πίεση.....	31
2.14.3	Παροχή ψυκτικού στο κανάλι.....	31
2.14.4	Υπόψυξη του ψυκτικού μέσου.....	31
2.14.5	Θερμοφυσικές ιδιότητες του τοιχώματος της ράβδου	32
2.14.6	Γεωμετρία καναλιού	32
2.15	Μέθοδος επανάψυξης.....	33
2.15.1	Παροχή ατμού.....	33
2.15.2	Φθίνουσα θερμότητα.....	33

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΨΥΚΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΕΠΑΝΑΨΥΞΗΣ

2.1 Ψυκτικά μέσα Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος (ΠΑΙ)

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες ισχύος χρησιμοποιούν ψυκτικά κυκλώματα για την απαγωγή θερμότητας που αναπτύσσεται στον πυρήνα τους λόγω ραδιενεργών σχάσεων και λοιπών διασπάσεων. Τα γενικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει το ψυκτικό μέσο ενός πυρηνικού αντιδραστήρα είναι τα εξής [6],[8]:

1. Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα, C_p

Κατά τη λειτουργία ενός ΠΑΙ ο πυρήνας του δεν θα πρέπει να υπερβεί συγκεκριμένα θερμοκρασιακά όρια, διότι αυτό μπορεί να οδηγήσει τόσο στην καταστροφή των ράβδων πυρηνικού καυσίμου όσο και των δομικών υλικών του πυρήνα. Επιπλέον για δεδομένη θερμοκρασία εισόδου T_{in} στον πυρήνα του ψυκτικού μέσου και δεδομένη θερμική ισχύ του πυρηνικού καυσίμου Q , το ψυκτικό μέσο θα πρέπει να εξέρχεται από τον πυρήνα με συγκεκριμένη θερμοκρασία T_{out} . Για σταθερή παροχή μάζας \dot{m} του ψυκτικού μέσου, η απαγόμενη θερμική ισχύς από το ψυκτικό μέσο προκύπτει από τη σχέση:

$$Q = \dot{m}C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (2.1)$$

Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι είναι σημαντικό το ψυκτικό μέσο του πυρηνικού αντιδραστήρα να χαρακτηρίζεται από υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα (C_p). Η ειδική θερμοχωρητικότητα συμβολίζει το ποσό θερμότητας που απαιτείται να προσδοθεί σε μια ουσία ανά μονάδα μάζας, ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία της κατά ένα βαθμό K . Συνεπώς χρησιμοποιώντας ψυκτικό μέσο με το υψηλότερο δυνατό C_p επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση του όρου $T_{out} - T_{in}$ και συνεπώς της T_{out} (για σταθερό \dot{m} και σταθερό Q).

2. Πυρηνικές ιδιότητες που να είναι συμβατές με τη λειτουργία του ΠΑΙ

Είναι σημαντικό το ψυκτικό μέσο ενός αντιδραστήρα να χαρακτηρίζεται από χαμηλή απορροφητικότητα νετρονίων, ώστε να μη μειώνεται σημαντικά το ποσοστό των νετρονίων που προκαλούν σχάσεις. Επίσης το ψυκτικό μέσο αφενός δεν πρέπει να αντιδρά με τα νετρόνια σχηματίζοντας ραδιενεργά

ισότοπα, αφετέρου, στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται και ως επιβραδυντής νετρονίων θα πρέπει να έχει καλές επιβραδυντικές ιδιότητες.

3. Χαμηλό κόστος και υψηλή διαθεσιμότητα

Τα τυπικά συστήματα πυρηνικών αντιδραστήρων απαιτούν εκατοντάδες τόνους ψυκτικού μέσου. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να συμβεί διαρροή ψυκτικού από τα κυκλώματα του αντιδραστήρα (πράγμα που συχνά συνεπάγεται υψηλό κόστος), καθιστά απαραίτητη τη χρήση ψυκτικών μέσων με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Επίσης το ιδανικό ψυκτικό μέσο θα πρέπει να είναι επαρκώς διαθέσιμο σε μορφή τέτοια ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα, χωρίς προηγουμένως να απαιτείται ιδιαίτερη επεξεργασία.

4. Συμβατότητα με το ψυκτικό κύκλωμα του αντιδραστήρα

Το ψυκτικό μέσο πρέπει να είναι συμβατό με τον τύπο του ψυκτικού κυκλώματος του αντιδραστήρα, δηλαδή να μην προκαλεί διαβρώσεις σε αυτό, ακόμα και υπό την επίδραση των ακτινοβολιών του πυρήνα.

5. Ευκολία στην άντληση

Υγρά με υψηλή δυναμική συνεκτικότητα (viscosity - μ) απαιτούν αντλίες μικρότερης ισχύος για την άντληση και την κυκλοφορία τους στο ψυκτικό κύκλωμα του αντιδραστήρα.

Στην πράξη καμία ουσία δεν πληροί όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις, δεδομένου ότι όλα τα ψυκτικά μέσα παρουσιάζουν ένα ή περισσότερα μειονεκτήματα. Για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με τις θερμοδυναμικές ιδιότητες καθώς και τις ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας των διαφόρων ψυκτικών, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την αδιάστατη παράμετρο F (Figure of merit) [8] η οποία ορίζεται ως εξής:

$$F = C_p^{2.8} \cdot \rho / \mu^{0.2} \quad (2.2)$$

όπου

C_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα ($J/kg \cdot K$)

ρ : η πυκνότητα του ψυκτικού (kg/m^3)

μ : η δυναμική συνεκτικότητα ($N \cdot s/m^2$)

Στον πίνακα 2.1 γίνεται σύγκριση διαφόρων ψυκτικών μέσων με βάση την αδιάστατη παράμετρο F .

Τα κυριότερα ψυκτικά μέσα που έχουν χρησιμοποιηθεί σε πυρηνικούς αντιδραστήρες διακρίνονται σε υγρά και αέρια. Τα κύρια χαρακτηριστικά των ψυκτικών αυτών, καθώς και τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω:

1) Αέρια ψυκτικά μέσα

Τα αέρια ψυκτικά μέσα έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό ότι δεν υφίστανται αλλαγή φάσης σε καταστάσεις μη κανονικής λειτουργίας του αντιδραστήρα. Η ιδιότητα τους αυτή αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα διότι ενδεχόμενη αλλαγή φάσης θα οδηγούσε σε δημιουργία διφασικής ροής, η οποία μεταβάλλει και περιπλέκει σημαντικά τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Όμως τα αέρια ψυκτικά μέσα έχουν το σημαντικό μειονέκτημα ότι χαρακτηρίζονται από χαμηλή θερμοχωρητικότητα και χαμηλούς συντελεστές μεταβίβασης θερμότητας, στοιχεία που περιορίζουν τη θερμοκρασία λειτουργίας των αντιδραστήρων σε χαμηλά επίπεδα. Τα κυριότερα αέρια ψυκτικά μέσα που έχουν χρησιμοποιηθεί σε ΠΑΙ είναι τα εξής:

a. Αέρας (air)

Ο αέρας χρησιμοποιήθηκε ως ψυκτικό μέσο σε ΠΑΙ που κατασκευάστηκαν στη Μεγάλη Βρετανία και στις ΗΠΑ στη δεκαετία του 1940 και οι οποίοι χρησιμοποιούσαν γραφίτη ως επιβραδυντή. Όμως παρά την υψηλή διαθεσιμότητα του, ο αέρας δεν χρησιμοποιείται πλέον στους σύγχρονους ΠΑΙ ως ψυκτικό μέσο λόγω του γεγονότος ότι προκαλεί έντονη οξειδωση.

b. Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂),

Όσον αφορά στις φυσικές του ιδιότητες, το διοξείδιο του άνθρακα είναι το ιδανικότερο αέριο ψυκτικό μέσο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε μεταξύ άλλων σε αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν γραφίτη ως επιβραδυντή. Στις χαμηλές θερμοκρασίες το CO₂ δεν αντιδρά με το γραφίτη, ούτε με το υλικό του περιβλήματος. Επίσης δεν αντιδρά με τα ψυκτικά κυκλώματα του αντιδραστήρα τα οποία είναι κατασκευασμένα από χάλυβα, ούτε με το πυρηνικό καύσιμο. Όμως σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και σε περιβάλλον αυξημένων επιπέδων ακτινοβολίας, το CO₂ αντιδρά με το γραφίτη σύμφωνα με την αντίδραση $CO_2 + C \rightarrow 2CO$, δημιουργώντας CO και μειώνοντας την ποσότητα του επιβραδυντή που βρίσκεται στον αντιδραστήρα. Επιπλέον η μείωση της ποσότητας του γραφίτη έχει σαν άμεση συνέπεια τη μείωση της μηχανικής αντοχής του πυρήνα. Στους σύγχρονους ΠΑΙ τα παραπάνω προβλήματα αντιμετωπίζονται διατηρώντας τη θερμοκρασία του επιβραδυντή σε χαμηλότερα επίπεδα είτε προσθέτοντας ουσίες οι οποίες αναστέλλουν τη χημική αντίδραση του CO₂ με το γραφίτη.

c. Ήλιο (He)

Το ήλιο το οποίο βρίσκεται σε μικρές ποσότητες στην ατμόσφαιρα αλλά συνήθως εξάγεται από το πετρέλαιο, έχει χρησιμοποιηθεί στους αερίψυκτους αντιδραστήρες υψηλών θερμοκρασιών (High Temperature gas cooled Reactors, HTR) στους οποίους χρησιμοποιείται γραφίτης ως επιβραδυντής. Η χρήση του ηλίου ως ψυκτικού μέσου επιτρέπει θεωρητικά τη λειτουργία των αντιδραστήρων αυτών σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 800 °C) χωρίς να αντιδρά με το γραφίτη. Όμως είναι συχνά αδύνατο να αποφευχθεί η ανάμιξη του ηλίου με ατμό, αέρα και άλλα συστατικά, κυρίως λόγω διαρροών του ψυκτικού κυκλώματος αλλά και λόγω απελευθέρωσης αερίων που αρχικά έχουν απορροφηθεί από το γραφίτη. Έτσι παρόλο που το ήλιο δεν αντιδρά με το γραφίτη ή το χάλυβα, οι τυχόν προσμίξεις του αντιδρούν, γεγονός που δρα ως περιοριστικός παράγοντας στο σχεδιασμό των αντιδραστήρων αυτών, καθώς δεν μπορούν να επιτευχθούν υψηλές θερμοκρασίες.

2) Υγρά ψυκτικά μέσα

Σε αντίθεση με τα αέρια, τα υγρά ψυκτικά μέσα έχουν το μειονέκτημα να υφίστανται αλλαγή φάσης (ατμοποίηση) όταν η θερμοκρασία τους αυξηθεί πέρα από το σημείο βρασμού τους. Όμως λόγω του ότι χαρακτηρίζονται από αρκετά υψηλότερη ειδική θερμοχωρητικότητα και από καλύτερες ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απαγωγή πολύ υψηλότερων θερμικών ροών σε σχέση με τα αέρια ψυκτικά μέσα. Τα κυριότερα ψυκτικά μέσα που έχουν χρησιμοποιηθεί σε ΠΑΙ είναι τα εξής:

a. Βαρύ Νερό (D₂O)

Το βαρύ νερό βρίσκεται μέσα στο φυσικό νερό σε ποσοστό 0.016%. Για το διαχωρισμό του βαρέως νερού από το φυσικό νερό απαιτούνται δαπανηρές διαδικασίες και μεγάλες εγκαταστάσεις. Παρόλα αυτά το D₂O χρησιμοποιείται στους ΠΑΙ λόγω ενός πολύ σημαντικού πλεονεκτήματος. Χαρακτηρίζεται από πολύ μικρότερη απορροφητικότητα θερμικών νετρονίων σε σχέση με το H₂O πράγμα που επιτρέπει τη λειτουργία του αντιδραστήρα με μη εμπλουτισμένο ουράνιο. Με εξαίρεση την απορροφητικότητα των νετρονίων το βαρύ νερό έχει πρακτικά τις ίδιες θερμοφυσικές ιδιότητες με το ελαφρύ νερό και κατά συνέπεια τα ίδια μειονεκτήματα με αυτό. Λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής του D₂O τόσο οι διαρροές του όσο και οι προσμίξεις με φυσικό νερό, μέσω του υδραυλικού κυκλώματος και κυρίως του κυκλώματος της αμοπαγωγής, θα πρέπει να περιορίζονται στο ελάχιστο δυνατό. Στην πράξη οι ετήσιες απώλειες

ενός αντιδραστήρα βαρέως ύδατος είναι περίπου 2% Επιπλέον σε περιβάλλον υψηλών νετρονικών ροών ένα μικρό αλλά σημαντικό μέρος του δευτέρου μετατρέπεται σε τρίτιο, το οποίο είναι ραδιενεργό και έχει μεγάλο χρόνο ημιζωής (12 χρόνια). Για το λόγο αυτόν πρέπει να λαμβάνονται επιπλέον μέτρα για την ελαχιστοποίηση διαρροών τριτίου στο περιβάλλον.

b. Υγρά Μέταλλα (Liquid Metals)

Τα υγρά μέταλλα αφενός προσφέρουν τη δυνατότητα λειτουργίας του αντιδραστήρα σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες από ότι το νερό, αφετέρου χαρακτηρίζονται από πολύ καλές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας. Τα μόνα μέταλλα που συνδυάζουν τα παραπάνω πλεονεκτήματα με σχετικά χαμηλό σημείο τήξης, χαμηλή πίεση ατμών και επιπλέον χαμηλή απορροφητικότητα νετρονίων είναι το Νάτριο (sodium) και το Κάλιο (potassium). Αμφότερα είναι συμβατά με τον ανοξειδωτο χάλυβα ακόμα και σε θερμοκρασίες της τάξης των 800 °C, υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν προσμίξεις οξυγόνου. Αρχικά ως επί το πλείστον ως ψυκτικά χρησιμοποιούνταν διαλλείματα Νατρίου και εν συνεχεία επικράτησαν διαλλείματα μειγμάτων Νατρίου – Καλίου (NaK). Τα μείγματα αυτά έχουν το πλεονέκτημα ότι βρίσκονται σε υγρή μορφή για θερμοκρασίες δωματίου, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται έμμεση θέρμανση των σωληνώσεων του ψυκτικού κυκλώματος κατά τις περιόδους σβέσης του αντιδραστήρα. Σημαντική τροχοπέδη στην εφαρμογή των υγρών μετάλλων Νατρίου – Καλίου ως ψυκτικά μέσα αποτελούν αφενός το γεγονός ότι καθίστανται ραδιενεργά και αφετέρου το γεγονός ότι εμφανίζουν υψηλή χημική αντιδραστικότητα.

c. Ελαφρύ Νερό (H₂O)

Το ελαφρύ (φυσικό) νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ψυκτικό μέσο και ως επιβραδυντής ταυτόχρονα. Επίσης χαρακτηρίζεται από υψηλή διαθεσιμότητα, ενώ πρόσθετο πλεονέκτημα αποτελεί η ανεπτυγμένη τεχνολογία των μετάλλων που χρησιμοποιούνται κατά την μεταφορά θερμότητας με νερό (λέβητες, εναλλάκτες θερμότητας κ.α.). Βέβαια το φυσικό νερό ως ψυκτικό έχει και πολλά μειονεκτήματα όπως χαμηλό σημείο βρασμού και υψηλή απορροφητικότητα νετρονίων. Επίσης παρουσία νετρονικών ροών διασπάται σε οξυγόνο και υδρογόνο, ενώ έχει και διαβρωτικές ιδιότητες.

Πέραν των μειονεκτημάτων του το ελαφρύ νερό αποτελεί σήμερα το κυριότερο ψυκτικό μέσο των Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος. Οι αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν φυσικό νερό ως ψυκτικό μέσο και ως επιβραδυντή, ονομάζονται αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (Light Water Reactors, LWR ή στη ρωσική βιβλιογραφία Water Water Energy Reactors, WWER). Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες

ελαφρού ύδατος χωρίζονται σε αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος (Boiling Water Reactors, BWR), όπου το νερό υφίσταται αλλαγή φάσης κατά τη διέλευσή του μέσα από τον πυρήνα του αντιδραστήρα και σε πεπιεσμένου ύδατος (Pressurized Water Reactors, PWR) όπου το νερό διατηρείται σε υγρή φάση λόγω της υψηλής πίεσης που επικρατεί στον πυρήνα του αντιδραστήρα. Σε αυτή την περίπτωση η ατμοπαραγωγή γίνεται σε δευτερεύον κύκλωμα μέσω εναλλακτών θερμότητας.

Στη συνέχεια η ανάλυσή μας θα επικεντρωθεί στον αντιδραστήρα PWR.

2.2 Αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος (Pressurized Water Reactor-PWR)

Σε παγκόσμια βάση δεδομένων, ο αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος (σχήμα 2.1) είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος. Στους αντιδραστήρες του τύπου αυτού η πίεση διατηρείται σε ονομαστική πίεση 155 bar (2250 psi) και έτσι το νερό παραμένει σε υγρή φάση ακόμα και στην μέγιστη θερμοκρασία της κανονικής του λειτουργίας η οποία είναι περίπου 326 °C (620 °F). Το δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα (σχήμα 2.2), το οποίο περιέχει τον πυρήνα με το πυρηνικό καύσιμο και νερό σε υψηλή πίεση, είναι ένα μεγάλου μήκους κυλινδρικό δοχείο, κατασκευασμένο από υψηλής αντοχής χάλυβα, με την άνω και κάτω πλευρά να έχουν σχήμα ημισφαιρίου. Η πάνω πλευρά (κεφαλή, top head) είναι ασφαλισμένη στην κορυφή του κυλινδρικού δοχείου και είναι κατάλληλα διαμορφωμένη ώστε να επιτρέπει την απομάκρυνση και την αντικατάσταση του πυρηνικού καυσίμου (off-load refuelling). Οι ράβδοι ελέγχου περνούν διαμέσου της κεφαλής μέσα στο δοχείο πίεσης. Το δοχείο πίεσης ενός αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος έχει περίπου 13.7 m ύψος, εσωτερική διάμετρο περίπου 4.6 m, ενώ το πάχος των τοιχωμάτων είναι από 20 έως 23 cm. Ο πυρήνας του αντιδραστήρα αυτού είναι τελείως κυλινδρικός και έχει περίπου 4 m ύψος και 3.4 m πλάτος. Περιέχει γύρω στις 40000 ράβδους πυρηνικού καυσίμου διαμέτρου 1 cm η κάθε μία, διατεταγμένες σε δέσμες όπου η κάθε μία περιέχει 200 ή περισσότερες ράβδους. Το καύσιμο είναι οξείδιο του ουρανίου (UO₂), εμπλουτισμένο κατά 2 έως 4% με το ισότοπο U²³⁵. Το συνολικό βάρος του ουρανίου που βρίσκεται στον πυρήνα είναι περίπου 110 τόνοι.

Απαραίτητος για τη λειτουργία ενός αντιδραστήρα PWR είναι ο ρυθμιστής πίεσης. Ο ρυθμιστής πίεσης έχει ως σκοπό να διατηρεί σταθερή την πίεση στον αντιδραστήρα κατά τη λειτουργία του και να περιορίζει σε ανεκτά όρια τις διακυμάνσεις της κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων. Ο ρυθμιστής πίεσης είναι ένα δοχείο που περιέχει νερό κατά τα 2/3 του όγκου του και ατμό κατά το 1/3. Το δοχείο αυτό έχει όγκο 7 έως 10% του συνολικού όγκου του πρωτεύοντος κυκλώματος νερού, δηλαδή του συστήματος κυκλοφορίας του νερού του αντιδραστήρα που περιλαμβάνει και τον ίδιο τον αντιδραστήρα. Στο κάτω μέρος του ρυθμιστή είναι

τοποθετημένες ηλεκτρικές αντιστάσεις θερμάνσεως, ενώ στο πάνω μέρος υπάρχουν ακροφύσια ψεκασμού νερού. Η ηλεκτρική θέρμανση διατηρεί το νερό του ρυθμιστή πίεσης στη θερμοκρασία κορεσμού που αντιστοιχεί στην πίεση του αντιδραστήρα. Αν για κάποιον λόγο, διασταλεί το νερό στο κύκλωμα ψύξεως του αντιδραστήρα, η στάθμη στο ρυθμιστή πίεσης ανεβαίνει και τότε το σύστημα ελέγχου του ρυθμιστή πίεσης δίνει εντολή ψεκασμού κρύου νερού από τα ακροφύσια. Το νερό αυτό προκαλεί συμπύκνωση μέρους του ατμού στο ρυθμιστή και έτσι μειώνεται η αύξηση της πίεσης που προκλήθηκε από τη διαστολή του νερού. Αν η αύξηση της πίεσης είναι πολύ μεγάλη ώστε να μη μπορεί να ελεγχθεί από το ρυθμιστή πίεσης, τότε ανοίγει αυτόματα η ανακουφιστική βαλβίδα του ρυθμιστή πίεσης. Αν τώρα συσταλεί το νερό στο κύκλωμα ψύξεως, λόγω μείωσης της θερμοκρασίας, το σύστημα ελέγχου του ρυθμιστή πίεσης θέτει σε λειτουργία τις αντιστάσεις ώστε να ατμοποιηθεί μία ποσότητα νερού και να αυξηθεί η πίεση η οποία είχε μειωθεί.

Για να είναι ομαλή η λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος (ΠΑΙ), οι συνθήκες που επικρατούν στον πυρήνα τους πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να εξασφαλίζεται η επικράτηση μόνιμων -ανεξάρτητων του χρόνου- θερμοκρασιακών πεδίων, μέσα σε αυτόν. Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός παραγωγής και απαγωγής θερμότητας πρέπει να είναι ίδιος και χρονικά σταθερός κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του ΠΑΙ.

Στο πρωτεύον κύκλωμα ψύξης ενός ΠΑΙ νερό θερμοκρασίας ~ 292 °C εισέρχεται στον πυρήνα του αντιδραστήρα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 (σημείο 1). Κατά την έξοδό του από το δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα (σημείο 2) το νερό έχει θερμοκρασία ~ 330 °C και εν συνεχεία οδηγείται στον εναλλάκτη θερμότητας (σημείο 3). Στον εναλλάκτη το θερμό νερό (~ 330 °C) του πρωτεύοντος κυκλώματος επαναψύχεται στους ~ 292 °C και αφού εξέλθει από αυτόν (σημείο 4), οδηγείται και πάλι στο δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα. Το νερό του δευτερεύοντος κυκλώματος ψύξης απάγει θερμότητα από το νερό του πρωτεύοντος κυκλώματος διαμέσου του εναλλάκτη θερμαίνεται στους ~ 280 °C και ατμοποιείται. Ο ατμός εξέρχεται από τον εναλλάκτη (σημείο 5) και οδηγείται στον ατμοστρόβιλο (σημείο 6). Το διφασικό μίγμα που εξέρχεται από το στρόβιλο οδηγείται στο συμπυκνωτή (condenser) όπου συμπυκνώνεται (σημείο 7) και ακολούθως επιστρέφει στον εναλλάκτη (σημείο 8).

2.3 Πιθανές καταστάσεις λειτουργίας ενός ΠΑΙ

Ο σχεδιασμός ενός ΠΑΙ πρέπει να συμπεριλάβει τα διάφορα στάδια λειτουργίας τα οποία λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια ζωής του τόσο κατά την ομαλή όσο και τη μη ομαλή λειτουργία του. Τα βασικά στάδια λειτουργίας ενός ΠΑΙ, ορίζονται ως εξής:

1. Ομαλή λειτουργία (normal operation)

Ομαλή λειτουργία είναι η κατάσταση στην οποία ο αντιδραστήρας λειτουργεί σε σταθερή ισχύ στις συνθήκες για τις οποίες έχει σχεδιασθεί.

2. Μεταβατική λειτουργία (operational transients)

Με τον όρο μεταβατικό νοείται το στάδιο λειτουργίας του αντιδραστήρα κατά το οποίο ο ΠΑΙ μεταβαίνει από ένα στάδιο λειτουργίας σε ένα άλλο. Κάθε αντιδραστήρας πρέπει να έχει τη δυνατότητα για την κατά βούληση μεταβολή της θερμικής του ισχύος. Παραδείγματος χάρη, η μετάβαση του αντιδραστήρα από λειτουργία παραγωγής χαμηλής ισχύος σε λειτουργία παραγωγής υψηλής ισχύος, η εκκίνηση και η διακοπή της λειτουργίας του αποτελούν μεταβατικά στάδια.

3. Αναπάντεχες καταστάσεις (upset conditions)

Με τον όρο αυτόν περιγράφονται όλες οι απροσδόκητες δυσλειτουργίες που αναμένεται να συμβούν κατά τη διάρκεια ζωής ενός αντιδραστήρα σαν αποτέλεσμα πληθώρας εξωτερικών παραγόντων. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η ύπαρξη προβλήματος στις γραμμές μεταφοράς τις παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Αν η γεννήτρια αποσυνδεθεί από το δίκτυο ο ατμοστρόβιλος που την κινεί τείνει να επιταχυνθεί σε επικίνδυνα υψηλές ταχύτητες. Για να αποφευχθεί αυτό θα πρέπει ο ατμός να διοχετευτεί απευθείας στο συμπυκνωτή ενώ πρέπει άμεσα να μειωθεί η ατμοπαραγωγή.

4. Επείγουσες καταστάσεις (emergency events)

Κατά τη διάρκεια ζωής ενός πυρηνικού αντιδραστήρα πέραν των καταστάσεων μεταβατικής λειτουργίας, όπου είναι βέβαιο ότι θα συμβούν και των αναπάντεχων καταστάσεων, όπου είναι πρακτικά σχεδόν βέβαιο ότι θα συμβούν, υπάρχει και μία κατηγορία γεγονότων τα οποία έχουν πιθανότητα 1/10 να συμβούν και τα οποία ονομάζονται επείγουσες καταστάσεις. Αν θεωρήσουμε 10 αντιδραστήρες είναι σχεδόν βέβαιο ότι μία επείγουσα κατάσταση θα συμβεί σε έναν από αυτούς κατά τη διάρκεια ζωής του. Έτσι λοιπόν ο αντιδραστήρας πρέπει να έχει τη δυνατότητα να ανταποκριθεί στις καταστάσεις αυτές οι οποίες μπορεί να προκληθούν από βλάβες σε δευτερεύοντα κυκλώματα του αντιδραστήρα, μηχανική αστοχία σε βαλβίδες ή φωτιά σε κάποιο από τα ηλεκτρικά συστήματα ελέγχου.

5. Μικρής πιθανότητας βλάβες (Limiting fault condition)

Είναι πιθανό κάποια γεγονότα όπως ένας σεισμός, ή η ολική αποκοπή ενός σωλήνα που οδηγεί ατμό στον ατμοστρόβιλο να οδηγήσουν σε ένα σοβαρό ατύχημα. Τα ατυχήματα αυτά ίσως συμβούν μία φορά στα 10.000 χρόνια λειτουργίας ενός αντιδραστήρα δηλαδή μια φορά στα 100 χρόνια λειτουργίας 100 αντιδραστήρων.

Όμως οι αντιδραστήρες πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να ανταπεξέρχονται στις καταστάσεις αυτές γιατί αν συμβούν ανεξέλεγκτα είναι πολύ πιθανό να οδηγήσουν σε απελευθέρωση ραδιενέργειας στο περιβάλλον.

2.4 Ατύχημα απώλειας ψυκτικού

Κάθε αστοχία η οποία μπορεί να μειώσει τη ροή ψυκτικού σε έναν αντιδραστήρα μπορεί να έχει σοβαρότατες συνέπειες σε όλο το σταθμό. Το μεγαλύτερο ατύχημα που θα μπορούσε να συμβεί είναι η ολική αποκοπή του μεγαλύτερου σωλήνα ψυκτικού ο οποίος είναι απευθείας συνδεδεμένος με το δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα. Στην περίπτωση αυτή έχουμε «ατύχημα απώλειας ψυκτικού» (Loss Of Coolant Accident, LOCA), που αν δεν αντιμετωπιστεί έγκαιρα, μπορεί να οδηγήσει σε τήξη τμήματος του πυρήνα ή και όλου του αντιδραστήρα. Η αντιμετώπιση ενός LOCA γίνεται με το εφεδρικό σύστημα εκτάκτου ψύξεως του πυρήνα (Emergency Core Cooling System, ECCS). Στόχος του συστήματος αυτού είναι η επανάψυξη (rewetting) των υπερθερμαθέντων στοιχείων του πυρηνικού καυσίμου ώστε να αποφευχθεί πιθανή τήξη του πυρήνα του αντιδραστήρα.

Μόλις διαγνωσθεί LOCA δίνεται εντολή στο σύστημα ελέγχου του αντιδραστήρα να βυθισθούν οι ράβδοι ελέγχου στον πυρήνα ώστε να καταστεί το σύστημα υποκρίσιμο και να περιορισθεί η παραγωγή θερμότητας λόγω σχάσεων του πυρηνικού καυσίμου. Όμως ένα υπολογίσιμο ποσό θερμότητας, που ονομάζεται «αποθηκευμένη θερμότητα» (store heat) παραμένει στον πυρήνα αφού δεν είναι δυνατό να απαχθεί από αυτόν. Επίσης θερμότητα συνεχίζει να παράγεται λόγω των συνεχιζόμενων σχάσεων και λοιπών ραδιενεργών διασπάσεων στον πυρήνα του αντιδραστήρα, η οποία ονομάζεται «παραμένουσα θερμότητα» (decay heat). Η παραγόμενη ισχύς στον πυρήνα ενός πυρηνικού αντιδραστήρα μετά τη βύθιση όλων των ράβδων ελέγχου, είναι φθίνουσα συνάρτηση του χρόνου, και εξαρτάται αφενός από το χρόνο συνεχούς λειτουργίας πριν από το ατύχημα και αφετέρου από τη μέγιστη πυκνότητα της παραγόμενης ισχύος κατά την κανονική λειτουργία του. Αμέσως μετά τη διακοπή της λειτουργίας ενός αντιδραστήρα ο οποίος έχει λειτουργήσει για αρκετό χρονικό διάστημα, η παραγόμενη θερμική ισχύς είναι περισσότερη από το 7 % της παραγόμενης θερμικής ισχύος κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του αντιδραστήρα. Το ποσοστό παραγόμενης ισχύος μειώνεται μετά από 15 λεπτά στο 2 %, μετά από μία μέρα στο 0.4 %, ενώ μετά από μία εβδομάδα μειώνεται στο 0.2 %. Η σχέση η οποία δίδει προσεγγιστικά την πυκνότητα παραγόμενης ισχύος $P(t)$, τη χρονική στιγμή t μετά τη βύθιση των ράβδων ελέγχου είναι η ακόλουθη [6]:

$$p(t)/p(0)=0.15\exp(-0.1t) \quad (2.3)$$

Όπου

$\rho(t)$: η πυκνότητα παραγόμενης ισχύος τη χρονική στιγμή t μετά τη βύθιση των ράβδων ελέγχου

$\rho(0)$: η πυκνότητα παραγόμενης ισχύος κατά την κανονική λειτουργία

t : ο χρόνος που έχει μεσολαβήσει από τη βύθιση των ράβδων ελέγχου

Η κυριότερη παράμετρος που πρέπει να ελεγχθεί μετά από LOCA είναι η θερμοκρασία των στοιχείων και του περιβλήματος του πυρηνικού καυσίμου. Κατά την κανονική λειτουργία, η θερμοκρασία του περιβλήματος του πυρηνικού καυσίμου σε έναν LWR κυμαίνεται στους 300 – 350 °C. Όμως μετά από LOCA η αύξηση της θερμοκρασίας της ράβδου πυρηνικού καυσίμου είναι απότομη λόγω παραμένουσας θερμότητας (decay heat και store heat) και γίνεται με ρυθμό της τάξεως των 10 – 30 °C/s. Το οξείδιο του ουρανίου (UO₂) τήκεται στους 2840 °C, ενώ ο ανοξείδωτος χάλυβας και το κράμα zircaloy, που αποτελούν υλικά του περιβλήματος, στους 1400 °C και 1800 °C αντίστοιχα. Όμως σε θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες από αυτές, τα στοιχεία του πυρηνικού καυσίμου έχουν ήδη χάσει τη μηχανική τους αντοχή και πιθανόν να έχει ήδη συμβεί διαρροή ραδιενέργειας. Για αυτό σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς η μέγιστη θερμοκρασία του περιβλήματος του πυρηνικού καυσίμου δεν πρέπει να υπερβεί τους 1204 °C (2200 °F).

2.5 Κατηγορίες εφεδρικών συστημάτων ψύξεως (ECCS)

Θα πρέπει να τονίσουμε ότι οι πυρηνοληλεκτρικοί σταθμοί είναι εφοδιασμένοι με περισσότερα του ενός ECCS. Στόχος των ECCS είναι η επανάψυξη των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου, δηλαδή η διαδικασία αποκατάστασης πάνω στις ράβδους υγρού φιλμ ψυκτικού και η προώθηση του σε όλο το μήκος των ράβδων. Άλλα ECCS είναι σχεδιασμένα για την αντιμετώπιση μικρών διαρροών ψυκτικού και άλλα για την αντιμετώπιση LOCA. Υπάρχουν και συστήματα που δρουν ως συμπληρωματικά άλλων, ενώ σε πολύ σοβαρά ατυχήματα μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα και περισσότερα του ενός ECCS. Τα ECCS χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα ενεργητικά και τα παθητικά.

Τα ενεργητικά συστήματα απαιτούν εξωτερική ισχύ για να λειτουργήσουν. Με την ανίχνευση και της παραμικρής διαρροής ενεργοποιούνται ακαριαία και τροφοδοτούν με νερό τον πυρήνα όταν η πίεση στο κύκλωμα είναι ακόμα υψηλή και υπάρχει επαρκής κυκλοφορία ψυκτικού.

Τα παθητικά συστήματα λειτουργούν αυτόματα χωρίς να απαιτούν εξωτερική ισχύ. Έτσι μπορούν να δράσουν ακόμα και αν υπάρξει ολική απώλεια ηλεκτρικής

ενέργειας, χρησιμοποιώντας κατά κύριο λόγο τη δύναμη της βαρύτητας (φυσική κυκλοφορία).

Τέλος τα συστήματα ECCS διαχωρίζονται βάσει του τρόπου επανάψυξης του πυρήνα, σε ψεκασμού από πάνω (top spraying) ή πλημμυρισμού από κάτω (bottom flooding).

2.6 Διεθνείς κανονισμοί

Η λειτουργία των συστημάτων ECCS διέπεται από διεθνείς κανονισμούς. Οι βασικοί κανονισμοί σύμφωνα με τη United States Nuclear regulatory Commission¹ (U.S.NRC) είναι οι εξής:

- Η μέγιστη θερμοκρασία του περιβλήματος των στοιχείων καυσίμου δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 2200 °F
- Η συνολική οξείδωση του περιβλήματος δεν πρέπει σε κανένα σημείο να ξεπερνά το 17 % του αρχικού πάχους του περιβλήματος, πριν αυτό υποστεί οξείδωση.
- Το συνολικό ποσό του υδρογόνου που παράγεται από την αντίδραση του μετάλλου του περιβλήματος με το νερό ή/και τον ατμό δεν πρέπει να ξεπερνά το 0.01 της υποτιθέμενης ποσότητας του υδρογόνου που θα παραγόταν αν όλο το υλικό του περιβλήματος που περιβάλλει το πυρηνικό καύσιμο λάμβανε μέρος στην αντίδραση.
- Οι αλλαγές που συμβαίνουν στη γεωμετρία του πυρήνα κατά τη φάση της επανάψυξης, δεν πρέπει να λειτουργούν ανασταλτικά στην επαρκή ψύξη του πυρήνα.
- Μετά από κάθε επιτυχημένη λειτουργία του ECCS, η θερμοκρασία του πυρήνα πρέπει να παραμένει σε επαρκώς χαμηλά επίπεδα, καθώς και να είναι δυνατή η απαγωγή της παραμένουσας θερμότητας για όλο το χρονικό διάστημα που καθορίζεται από το χρόνο παρουσίας ραδιενεργών αντιδράσεων στον πυρήνα.

¹ website : www.nrc.gov

2.7 Συστήματα ECCS αντιδραστήρα PWR

Το εφεδρικό σύστημα ψύξης ενός PWR αποτελείται από τρία ανεξάρτητα υποσυστήματα τα οποία λειτουργούν σε διαφορετικές πιέσεις. Στόχος των τριών υποσυστημάτων του ECCS είναι η αξιόπιστη και συνεχής ψύξη του πυρήνα του αντιδραστήρα, οποτεδήποτε υπάρξει δυσλειτουργία του κύριου συστήματος ψύξης. Τα υποσυστήματα αυτά είναι τα παρακάτω:

1. Οι συσσωρευτές νερού (accumulator injection system).

Το υποσύστημα αυτό αποτελείται από δύο ή περισσότερες ανεξάρτητες δεξαμενές που περιέχουν κρύο, εμπλουτισμένο με βόριο νερό σε πίεση 14 έως 45 bar. Τα δοχεία αυτά είναι συνδεδεμένα διαμέσου βαλβίδων ελέγχου και σωλήνων είτε με το πρωτεύον σύστημα ψύξης και μέσω αυτού με το δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3, είτε απευθείας με το δοχείο πίεσης. Αν η πίεση του πρωτεύοντος ψυκτικού συστήματος πέσει κάτω από την πίεση των συσσωρευτών νερού, οι βαλβίδες ελέγχου ανοίγουν και μεγάλες ποσότητες νερού εμπλουτισμένου με βοριο, οδηγούνται στον πυρήνα. Το βόριο είναι απορροφητής νετρονίων και εξασφαλίζει ότι ο αντιδραστήρας θα καταστεί υποκρίσιμος, δηλαδή θα σβήσει.

2. Το σύστημα ψεκασμού υψηλής πίεσης (High Pressure Injection System, HPIS)

Το υποσύστημα αυτό (σχήμα 2.3) επιτρέπει την άντληση νερού και την εισαγωγή του στο πρωτεύον κύκλωμα ψύξης σε πιέσεις περίπου 100 bar με σχετικά αργό ρυθμό. Η ύπαρξη μικρής διαρροής στο πρωτεύον κύκλωμα ψύξης ενός PWR θα οδηγήσει σε μεσαίας κλίμακας πτώση πίεσης και θα ενεργοποιήσει τις αντλίες του HPIS για αποκατάσταση της ροής του ψυκτικού.

3. Το σύστημα ψεκασμού χαμηλής πίεσης (Low Pressure Injection System, LPIS)

Αν η πίεση του συστήματος μειωθεί περαιτέρω, ως αποτέλεσμα ενός LOCA, το LPIS (σχήμα 2.3) τίθεται σε λειτουργία και εφοδιάζει τον αντιδραστήρα με βοριούχο νερό για μεγάλο διάστημα μετά και το άδειασμα των συσσωρευτών νερού (accumulators). Κατά τη λειτουργία του LPIS το ψυκτικό νερό διέρχεται από εναλλάκτη (Component Cooling Water System, CCWS), προκειμένου να αποβάλει το ποσό θερμότητας που έχει απορροφήσει κατά τη διέλευσή του από τον πυρήνα. Έτσι ο αντιδραστήρας είναι εφοδιασμένος με ένα σύστημα που θα μπορεί να παραλαμβάνει την παραμένουσα θερμότητα ακόμα και σε μεγάλο χρονικό διάστημα μετά από LOCA. Ας σημειωθεί ότι το LPIS μπορεί να ψεκάσει νερό εξωτερικά του δοχείου πίεσης του αντιδραστήρα (containment vessel) ώστε να

συμπυκνώσει τον ατμό που έχει δημιουργηθεί εκεί από τη διαρροή ψυκτικού και την απότομη πτώση της πίεσης.

Ο συνδυασμός των τριών εφεδρικών συστημάτων ψεκασμού νερού μπορεί να ανταποκριθεί αποτελεσματικά σε πολλές διαφορετικές περιπτώσεις απώλειας ψυκτικού και αποσυμπίεσης του αντιδραστήρα.

2.8 LOCA σε αντιδραστήρα PWR

2.8.1 Μεγάλης έκτασης (Large Break , LB) LOCA σε αντιδραστήρα PWR

Κατά τη διάρκεια ενός LB LOCA ένας από τους σωλήνες προσαγωγής ψυκτικού στο δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα, έχει τελείως διαρρηχτεί και λαμβάνει χώρα απώλεια ψυκτικού και από τις δύο πλευρές του σπασμένου σωλήνα. Αυτή η αστοχία αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως “double-ended guillotine brake” ή ως αστοχία “200%” [8]. Επειδή αυτή η δυσλειτουργία πιστεύεται ότι αναπαριστά το χειρότερο ατύχημα που θα μπορούσε να συμβεί σε έναν αντιδραστήρα, έχει επιλεγεί σαν το ατύχημα με βάση το οποίο σχεδιάζονται τα ECCS (Design Basis Accident - DBA). Η αλληλουχία των γεγονότων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου ατυχήματος έχει ως εξής:

α) 1^η φάση (blowdown phase)

Όταν συμβεί LOCA σε έναν από τους κύριους σωλήνες προσαγωγής ψυκτικού στο δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα (cold leg), το ψυκτικό μέσο διαρρέει από το δοχείο πίεσης και το πρωτεύον κύκλωμα ψύξης, στο εξωτερικό του δοχείου πίεσης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4. Μετά από την άμεση αρχική αποσυμπίεση του δοχείου πίεσης του αντιδραστήρα, ο ρυθμός πτώσης της πίεσης μειώνεται εξαιτίας της παρουσίας διφασικού μίγματος στο δοχείο πίεσης και στο πρωτεύον κύκλωμα ψύξης. Η απώλεια μάζας του ψυκτικού λόγω της διαρροής είναι σημαντικά μικρότερη λόγω της δημιουργίας διφασικού μείγματος (στο δοχείο πίεσης και στον κλάδο του κυκλώματος ψύξης - clod leg), απ’ ότι θα ήταν στην περίπτωση μονοφασικής ροής νερού. Μετά από 10 δευτερόλεπτα περίπου η πίεση έχει μειωθεί τόσο ώστε να εκκινήσουν τα συστήματα HPIS και accumulator τα οποία παρέχουν νερό στο κύκλωμα του ECCS.

β) 2^η φάση (bypass phase)

Με την εκκίνηση του HPIS και του accumulator system υπάρχει μία σημαντική ανοδική ροή ατμού προς το κανάλι εισόδου (downcomer annulus, σχήμα 2.2) το οποίο κατά την κανονική λειτουργία του αντιδραστήρα οδηγεί το νερό ψύξης των πυθμένα του δοχείου πίεσης. Η φάση αυτή ξεκινά περίπου 20 δευτερόλεπτα μετά τη στιγμή που συμβαίνει η αρχική δυσλειτουργία και διαρκεί περίπου 10 δευτερόλεπτα. Η ροή αυτή ατμού εμποδίζει το ψυκτικό νερό που στέλνει το accumulator system να φθάσει κάτω από τον πυρήνα (lower plenum) και έτσι το νερό παρακάμπτει το κανάλι εισόδου και ρέει στους κλάδους του πρωτεύοντος συστήματος ψύξης έως ότου φθάσει στο σημείο διάρρηξης του σωλήνα από όπου εξέρχεται όπως φαίνεται στο σχήμα (σχήμα 2.5).

γ) 3η φάση (refill phase)

Η πλήρωση του κατώτερου τμήματος του δοχείου πίεσης του αντιδραστήρα ξεκινά μετά την περαιτέρω αποσυμπίεση του, όταν η ροή μάζας του ατμού στο κανάλι εισόδου μειωθεί αρκετά ώστε να μην μπορεί πλέον να εμποδίσει την είσοδο του νερού στον πυρήνα του αντιδραστήρα. Η πλήρωση του πυρήνα με νερό ξεκινά περίπου 23 δευτερόλεπτα μετά τη στιγμή του ατυχήματος και διαρκεί περίπου 17 δευτερόλεπτα (σχήμα 2.6).

δ) 4^η φάση (reflood phase)

Από τα πρώτα στάδια της πρώτης φάσης ο πυρήνας έχει στεγνώσει και η θερμοκρασία των στοιχείων του καυσίμου αυξάνεται ταχέως φθάνοντας περίπου τους 1000 °C. Αυτό οδηγεί στην αλλοίωση των ιδιοτήτων των ράβδων και σαν συνέπεια αυτού, στην απελευθέρωση αερίων προϊόντων σχάσης στο πρωτεύον κύκλωμα ψύξης τα οποία φθάνουν στο σημείο διάρρηξης απ' όπου και εξέρχονται. Όταν το κατώτερο τμήμα του αντιδραστήρα πληρωθεί με νερό, περίπου 40 δευτερόλεπτα μετά το αρχικό συμβάν, αρχίζει η 4^η φάση (reflood phase) οπότε ξεκινά η επανάψυξη των ράβδων. Στη φάση αυτή η παροχή μάζας του νερού που εισέρχεται στο δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα είναι σταθερή ενώ μέρος του νερού ψύξης υπερχειλίζει και εξέρχεται στο εξωτερικό του δοχείου πίεσης, διαμέσου του σημείου αστοχίας (σχήμα 2.7).

ε) 5^η φάση (long-term cooling)

Μετά από χρόνο μεγαλύτερο των 250 δευτερολέπτων ενεργοποιείται το LPIS, το οποίο διοχετεύει νερό στον πυρήνα. Κατά τη φάση αυτή, ατμός ίσως συνεχίζει να δημιουργείται στον πυρήνα και να εξέρχεται από το σημείο της βλάβης. Ο ατμός αυτός συμπυκνώνεται με τη βοήθεια σωλήνων ψεκασμού νερού οι οποίοι ψεκάζουν νερό στο χώρο που βρίσκεται ο αντιδραστήρας και οι οποίοι τροφοδοτούνται από τις αντλίες του LPIS όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8.

2.8.2 Μικρής έκτασης (Small-Break, SB) LOCA σε αντιδραστήρα PWR

Αρχικά όλη η προσοχή της πυρηνικής τεχνολογίας ήταν στραμμένη στη μελέτη του LB LOCA. Όμως μετά το ατύχημα του Three Mile Island [8] διαπιστώθηκε ότι μία μικρή βλάβη στο πρωτεύον κύκλωμα ψύξης είναι πολύ πιο πιθανή από μία μεγάλη. Όταν αναφερόμαστε σε μικρή βλάβη εννοούμε οπή σε σωλήνα του συστήματος ψύξης, μεγέθους τέτοιου ώστε να μην υπάρξει αποσυμπίεση του συστήματος (οπές διαμέτρου ~12 εκατοστών). Η κύρια διαφορά ενός SB LOCA και ενός LB LOCA, είναι ότι στο πρώτο η πίεση μειώνεται σχετικά αργά. Στην περίπτωση αυτή, λόγω του ότι ο πυρήνας παραμένει σε υψηλή πίεση το accumulator system και το LPIS μπορούν να τεθούν σε λειτουργία μόνο μετά την παρέλευση αρκετού χρόνου. Μόλις συμβεί η βλάβη σημειώνεται σχετικά μικρή πτώση της πίεσης και ο αντιδραστήρας σταματά τη λειτουργία του. Όταν η πίεση μειωθεί στα 100 bar το HPIS τίθεται σε λειτουργία και όταν φθάσει στα 70 bar, το νερό του πρωτεύοντος κυκλώματος αρχίζει να ατμοποιείται. Μόλις τα θερμότερα μέρη του πρωτεύοντος κυκλώματος φθάσουν στη θερμοκρασία κορεσμού του νερού, δημιουργούνται φυσαλίδες ατμού οι οποίες οδηγούνται στα ανώτερα τμήματα του αντιδραστήρα. Αυτά συμβαίνουν τα πρώτα 10 δευτερόλεπτα μετά την διάρρηξη του σωλήνα.

Γενικά υπάρχουν διαφωνίες για το αν πρέπει η οι αντλίες ανακυκλοφορίας να λειτουργούν κατά τη διάρκεια ενός ατυχήματος LOCA ή όχι. Αφενός αν λειτουργούν ίσως βοηθήσουν στην κυκλοφορία του νερού και άρα στην καλύτερη ψύξη του πυρήνα, αφετέρου όμως ωθούν νερό στο σημείο της βλάβης αυξάνοντας έτσι την απώλεια ψυκτικού. Οι ισχύοντες διεθνείς κανονισμοί αναφέρουν ότι οι αντλίες ανακυκλοφορίας πρέπει να τίθενται εκτός λειτουργίας κατά τη διάρκεια ατυχήματος LOCA.

Σαν αποτέλεσμα της αποσυμπίεσης (λόγω της απώλειας ψυκτικού), δημιουργείται ατμός ο οποίος συγκεντρώνεται στο άνω τμήμα του αντιδραστήρα. Από εκεί δεν μπορεί να δραπετεύσει προς το σημείο όπου υπάρχει η οπή, λόγω του ότι οι σωληνώσεις προσαγωγής και εξαγωγής του ψυκτικού βρίσκονται χαμηλότερα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2. Όμως η απώλεια νερού είναι αρκετά γρήγορη και συνεπώς η στάθμη του νερού στο δοχείο πίεσης πέφτει στο επίπεδο των σωλήνων προσαγωγής και απαγωγής ψυκτικού από τον πυρήνα, σε περίπου 250 δευτερόλεπτα. Στο διάστημα αυτό η πίεση διατηρείται σε υψηλά επίπεδα και είναι ανέφικτη η λειτουργία των εφεδρικών συστημάτων χαμηλής πίεσης ECCS (accumulators, LPIS).

Κατά το χρονικό διάστημα των 250 δευτερολέπτων μετά το αρχικό συμβάν, η πλευρά του πρωτεύοντος κυκλώματος των ατμοπαραγωγών (steam generators) αδειάζει σταδιακά λόγω της απώλειας ψυκτικού και έτσι ατμός από τον πυρήνα οδηγείται εκεί όπου συμπυκνώνεται και επιστρέφει ξανά πίσω στον πυρήνα. Οι ατμοπαραγωγοί δηλαδή δρουν σαν σύστημα απαγωγής θερμότητας από τον πυρήνα.

Όμως η διαδικασία αυτή θα συμβεί μόνο αν η πίεση και κατά συνέπεια η θερμοκρασία κορεσμού στο δευτερεύον κύκλωμα είναι επαρκώς χαμηλή ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά θερμότητας από το πρωτεύον στο δευτερεύον κύκλωμα [8]. Λόγω της συνεχόμενης απώλειας νερού από το σύστημα ο πυρήνας αρχίζει να στεγνώνει από πάνω προς τα κάτω (core uncover). Το σύστημα βρίσκεται ακόμα υπό υψηλή πίεση λόγω της παρουσίας ατμού, ο οποίος δεν μπορεί να διαφύγει από τους σωλήνες προσαγωγής εμποδιζόμενος από νερό που υπάρχει στο δοχείο πίεσης. Επιπλέον τμήματα (κλάδοι) του κυκλώματος ψύξης τα οποία βρίσκονται χαμηλότερα από το σημείο προσαγωγής του νερού στο δοχείο πίεσης, παραμένουν γεμάτα με νερό εμποδίζοντας τη ροή του ατμού από τον ατμοπαραγωγό προς το σημείο αστοχίας.

Μόλις όμως η στάθμη του νερού στα σημεία αυτά υποχωρήσει αρκετά, μπορεί ατμός να φθάσει στο σημείο διάρρηξης και να εξέλθει στο εξωτερικό του δοχείου πίεσης του αντιδραστήρα, οδηγώντας σε άμεση αποσυμπίεση. Η εναπομένουσα ποσότητα νερού στον πυρήνα τμηματικά ατμοποιείται και μίγμα νερού και φυσαλίδων ατμού επαναψύχει το επάνω τμήμα του πυρήνα. Όσο η αποσυμπίεση προχωρά ο πυρήνας αρχίζει να στεγνώνει ξανά. Όμως η πτώση της πίεσης επιτρέπει τη λειτουργία των accumulator system και LPIS, τα οποία πλημμυρίζουν με νερό τον πυρήνα και τον επαναψύχουν.

2.9 Στάδια βρασμού ρευστού

2.9.1 Βρασμός δεξαμενής

Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση του φαινομένου της επανάψυξης είναι χρήσιμο να αναφέρουμε τα στάδια βρασμού που εμφανίζονται κατά τη μετάδοση θερμότητας σε υγρό που βρίσκεται μέσα σε δεξαμενή (δηλαδή δεν ρέει). Η κατανόηση τους είναι σημαντική γιατί παρόμοια στάδια εμφανίζονται κατά τη ροή του ψυκτικού επάνω στις ράβδους του πυρηνικού καυσίμου κατά τη διαδικασία της επανάψυξης.

Στην αρχή της υπερθέρμανσης εξαιτίας ατυχήματος των ράβδων καυσίμου, ολόκληρος ο όγκος του υγρού καθώς και τα τοιχώματα της δεξαμενής βρίσκονται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία κορεσμού (η οποία εξαρτάται από την εκάστοτε πίεση) και κατά συνέπεια δεν παρατηρείται εμφάνιση ατμού, βρισκόμαστε δηλαδή σε υπόψυκτη κατάσταση (subcooled phase). Μετά από λίγο χρόνο μπορούμε να παρατηρήσουμε τη δημιουργία φυσαλίδων οι οποίες είναι προσκολλημένες στα τοιχώματα της θερμαινόμενης επιφάνειας. Οι φυσαλίδες αυτές δεν είναι φυσαλίδες ατμού αλλά αέρας ο οποίος βρίσκεται διαλυμένος στο νερό. Με την αύξηση της θερμοκρασίας η διαλυτότητα του αέρα στο νερό μειώνεται, το νερό καθίσταται υπερκορεσμένο σε αέρα και μεταφορά μάζας λαμβάνει χώρα προκειμένου να απομακρυνθεί το πλεονάζον αέριο.

Ο βρασμός ξεκινά όταν η θερμοκρασία του τοιχώματος υπερβεί τη θερμοκρασία κορεσμού κατά λίγους βαθμούς, οπότε και ξεκινά ο σχηματισμός φυσαλίδων ατμού από το υπέρθερμο υγρό. Οι φυσαλίδες ατμού αναπτύσσονται ταχύτατα από τις εστίες βρασμού οι οποίες υπάρχουν πάνω στο υπέρθερμο τοίχωμα της θερμαινόμενης επιφάνειας. Οι φυσαλίδες αυτές αιωρούνται και συμπυκνώνονται αμέσως μόλις εξέλθουν των ορίων του λεπτού θερμικού οριακού στρώματος που έχει δημιουργηθεί λόγω φυσικής συναγωγής και εισέλθουν στον κυρίως όγκο του υπόψυκτου υγρού. Αρχικά οι φυσαλίδες ατμού δεν είναι ορατές δια γυμνού οφθαλμού αλλά όσο η θερμοκρασία του όγκου του υγρού αυξάνει μπορούμε να τις διακρίνουμε καθώς το μέγεθος τους αυξάνεται σημαντικά. Το στάδιο αυτό ονομάζεται υπόψυκτος εστιακός βρασμός (subcooled nucleate boiling). Καθώς η πρόσδοση θερμότητας συνεχίζεται, η υγρή φάση γίνεται ελαφρώς υπέρθερμη και οι φυσαλίδες αρχίζουν να κινούνται προς την επιφάνεια του υγρού. Ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας στο στάδιο αυτό περιλαμβάνει αφενός μεν τη μεταφορά ενθαλπίας αλλαγής φάσης από τον ατμό των φυσαλίδων, αφετέρου δε την απομάκρυνση θερμού υγρού από τη θερμή επιφάνεια λόγω της κίνησης των φυσαλίδων, προκαλώντας ραγδαία αύξηση του συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας. Κατά το στάδιο αυτό, το οποίο ονομάζεται κορεσμένος βρασμός (σχήμα 2.9) παρατηρούνται μεμονωμένες φυσαλίδες όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10α. Περαιτέρω πρόσδοση θερμότητας έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μόνιμων στηλών ατμού οι οποίες δημιουργούν περιοχές ατμού πάνω από τη θερμαινόμενη επιφάνεια όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10β. Τελικά ο ατμός κινείται ανοδικά τόσο γρήγορα ώστε η καθοδική ροή υγρού προς την επιφάνεια δεν μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερο ρυθμό ατμοποίησης. Η φάση αυτή κατά την οποία υπάρχει οριακά ο εστιακός βρασμός ονομάζεται boiling crisis και παρατηρείται μέγιστη θερμική ροή q''_{\max} όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9. Αν η θερμοκρασία αυξηθεί πέρα από την τιμή η οποία αντιστοιχεί στη θερμική ροή q''_{\max} (watt/m^2), ακολουθεί η μεταβατική περιοχή κατά την οποία το υγρό φθάνει όλο και δυσκολότερα στο τοίχωμα της θερμαινόμενης επιφάνειας μέχρις ότου ένα στρώμα ατμού καλύψει εξ' ολοκλήρου το τοίχωμα εμποδίζοντας τελείως το υγρό να έρθει σε επαφή με αυτό όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10γ. Η θερμική ροή τότε είναι πολύ ασθενέστερη από την q''_{\max} λόγω του ότι η θερμότητα μεταφέρεται μέσω του χαμηλής αγωγιμότητας ατμού. Η θερμική ροή μειώνεται έως ότου φθάσει στην τιμή q''_{\min} η οποία αποτελεί ελάχιστο. Από το σημείο αυτό και έπειτα έχουμε μεμβρανοειδή βρασμό (film boiling). Αν η θερμοκρασία του τοιχώματος αυξηθεί και άλλο η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία κατά μήκος του φιλμ ατμού μπορεί να γίνει σημαντική οδηγώντας σε μικρή αύξηση της θερμικής ροής q'' .

2.9.2 Στάδια βρασμού σε ψυκτικό που ρέει

Στην παράγραφο αυτή παραθέτουμε τα στάδια του βρασμού κατά την κατακόρυφη ροή υγρού σε θερμαινόμενο κανάλι, λόγω του ότι κατά τη διάρκεια του

φαινομένου της επανάψυξης παρατηρούνται σχεδόν όλα τα στάδια αυτά. Ας θεωρήσουμε ένα κατακόρυφο κανάλι (vertical tube) το οποίο θερμαίνεται ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του δεχόμενο χαμηλή θερμική ροή. Το κανάλι τροφοδοτείται με υπόψυκτο υγρό στη βάση του. Η παροχή του υγρού είναι τέτοια, ώστε να ατμοποιείται πλήρως έως το πέρας του καναλιού. Το σχήμα 2.11 παριστά τα είδη της ροής τα οποία παρατηρούνται στο υπ' όψιν κανάλι, τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας και τις θερμοκρασίες ανά περιοχή.

Αρχικά, κατά τη φάση A όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11, η μεταφορά θερμότητας στο μονοφασικό υγρό γίνεται με συναγωγή (convective heat transfer) έως ότου το υπόψυκτο υγρό θερμανθεί τόσο ώστε να φθάσει σε θερμοκρασία κορεσμού. Σε κάποιο σημείο του μήκους του καναλιού οι συνθήκες είναι τέτοιες ώστε να δημιουργούνται οι προϋποθέσεις ατμοποίησης του υγρού. Αρχικά η ατμοποίηση λαμβάνει χώρα σε περιοχές υπόψυκτου υγρού (φάση B σχήμα 2.11) και ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι γνωστός ως υπόψυκτος εστιακός βρασμός (subcooled nucleate boiling). Στην περιοχή αυτή η θερμοκρασία του περιβλήματος του καναλιού παραμένει μερικούς βαθμούς πάνω από τη θερμοκρασία κορεσμού, ενώ η θερμοκρασία του υγρού αυξάνεται σταδιακά ως τη θερμοκρασία κορεσμού. Η μετάβαση από τη φάση B (υπόψυκτος εστιακός βρασμός) στη φάση C η οποία ονομάζεται κατάσταση καθολικού βρασμού (saturated nucleate boiling) καθορίζεται σαφώς βάσει θερμοδυναμικού κριτηρίου ως το σημείο στο οποίο το υγρό φθάνει στη θερμοκρασία κορεσμού ($x=0$)². Εντούτοις υπόψυκτο υγρό δύναται να υπάρχει στον πυρήνα του καναλιού, παρόλο που βρισκόμαστε στη φάση καθολικού βρασμού, φαινόμενο το οποίο εξαρτάται από τη γεωμετρία του καναλιού.

Οι καταστάσεις C μέχρι G χαρακτηρίζονται από τη μεταβολή της ποσότητας του ατμού η οποία σταδιακά αυξάνει έως ότου ο καθολικός βρασμός δώσει τη θέση του στην φάση της ατμοποίησης (evaporation). Η μεταβολή αυτή του μηχανισμού μετάδοσης θερμότητας έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του είδους της ροής από τη φάση ροής υγρού με φυσαλίδες ατμού (bubbly & slug flow) σε δακτυλιοειδή ροή (annular flow) (καταστάσεις E και F). Στις καταστάσεις αυτές (E και F) το πάχος του λεπτού στρώματος του νερού το οποίο καλύπτει το θερμαινόμενο τοίχωμα του καναλιού λαμβάνει τιμές τέτοιες ώστε ο συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας να είναι επαρκής για να αποτρέψει την υπερθέρμανση του στρώματος αυτού η οποία θα οδηγούσε σε βρασμό του φιλμ. Η θερμότητα απομακρύνεται τώρα από το τοίχωμα του καναλιού με εξαναγκασμένη συναγωγή από το στρώμα του υγρού, προς τον πυρήνα υγρού - ατμού, μέσω του μηχανισμού της ατμοποίησης. Καθώς η ατμοποίηση συνεχίζεται, σε κάποιο σημείο της ράβδου όλο το υγρό έχει ατμοποιηθεί. Το σημείο αυτό ονομάζεται «σημείο ξηράνσεως» (dryout point) (όριο μεταξύ των περιοχών F και G) και συνοδεύεται από αύξηση της θερμοκρασίας του τοιχώματος του καναλιού, η οποία μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε καύση του τοιχώματος. Η θερμική ροή για την οποία γίνεται καύση του τοιχώματος ονομάζεται «θερμική ροή καύσεως» (burnout

² Όπου x η ποιότητα του διφασικού μείγματος.

heat flux, q'') και κακώς πολλές φορές στη βιβλιογραφία συσχετίζεται με την «κρίσιμη θερμική ροή» [6]. Η περιοχή G που βρίσκεται μετά το σημείο ξηράνσεως χαρακτηρίζεται από την περιπλάνηση υγρών σταγονιδίων μέσα σε ρεύμα ατμού, η οποία ονομάζεται σταγονοειδής ροή (drop flow). Η κατάσταση G ακολουθείται από την κατάσταση H όπου έχουμε μονοφασική ροή ατμού (single-phase vapor).

Πρέπει να σημειωθεί ότι η εμφάνιση των σταδίων αυτών του βρασμού θα συμβεί με την προαναφερθείσα σειρά αν η μεταβολές της θερμικής ροής είναι ομαλές. Αν δεν συμβαίνει αυτό κάποια στάδια μπορεί να παραληφθούν.

2.10 Επανάψυξη ράβδων πυρηνικού καυσίμου

2.10.1 Φυσικοί μηχανισμοί κατά την επανάψυξη ράβδων πυρηνικού καυσίμου

Στο σχήμα 2.13 περιγράφεται η θερμοκρασιακή ιστορία τυχαίου σημείου του περιβλήματος μίας τυπικής ράβδου πυρηνικού καυσίμου, από τη στιγμή που χάνει την επαφή του με το ψυκτικό μέσο, μέχρι τη στιγμή που επαναψύχεται. Θεωρούμε ότι τη χρονική στιγμή t_0 συμβαίνει LOCA. Μέχρι τη χρονική στιγμή αυτή, η θερμοκρασία του μελετώμενου σημείου είναι η θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας T_0 . Μόλις συμβεί LOCA, βυθίζονται οι ράβδοι ελέγχου, ώστε να μειωθεί ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας. Όμως θερμότητα συνεχίζει να παράγεται (λόγω decay heating) και έτσι η θερμοκρασία αυξάνεται με ρυθμό 10 - 30 °C/sec. Τη στιγμή t_1 ενεργοποιείται το ECCS. Το χρονικό διάστημα από την εκκίνηση του ECCS έως ότου το υγρό φιλμ αποκατασταθεί στην άκρη της ράβδου, ονομάζεται σύμφωνα με τους Piggot et al [14] «χρόνος καθυστέρησης». Αρχικά η επίδραση του ECCS στη ψύξη είναι αμελητέα και έτσι η θερμοκρασία συνεχίζει να αυξάνει, με μικρότερο όμως ρυθμό. Τη χρονική στιγμή t_2 η θερμοκρασία φθάνει στη μέγιστη τιμή της (θερμοκρασία καμψής – turn around temperature) και αμέσως μετά αρχίζει να μειώνεται. Η μείωση της θερμοκρασίας γίνεται αργά στην αρχή και με ταχύτερο ρυθμό στη συνέχεια. Τη χρονική στιγμή t_3 η οποία ονομάζεται «χρόνος επανάψυξης» το λεπτό φιλμ του υγρού έχει φθάσει ακριβώς στο σημείο της ράβδου που παρακολουθούμε. Σε αυτή τη φάση μπορούμε να διακρίνουμε κατά το μήκος της ράβδου τρεις περιοχές:

1. Υγρή περιοχή (wet region)

Στην περιοχή αυτή η επιφάνεια της ράβδου καλύπτεται από υγρό συνεχές φιλμ ψυκτικού. Μπορεί να έχουμε συνθήκες είτε μονοφασικής, είτε κορεσμένης διφασικής ροής. Η θερμοκρασία του υγρού φιλμ είναι είτε η θερμοκρασία κορεσμού του νερού στη συγκεκριμένη πίεση, ή πολύ κοντά σε αυτήν, ενώ ο συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας για ροή νερού είναι της τάξεως των 10^4 W/m²K.

2. Περιοχή υγρού μετώπου (wet front region)

Στην περιοχή αυτή μήκους 1 έως 30 mm, συμβαίνουν τα σημαντικότερα φαινόμενα της διαδικασίας της επανάψυξης, ενώ μπορεί να επιτευχθεί πτώση της θερμοκρασίας κατά εκατοντάδες βαθμούς Κελσίου. Κατά μήκος του υγρού μετώπου κυρίαρχο φαινόμενο είναι αυτό του έντονου εκτεταμένου εστιακού βρασμού, με έντονη τάση μεταπτώσεως σε μεμβρανοειδή βρασμό. Ως συνέπεια αυτού, στο άκρο του υγρού μετώπου προς την ξηρή περιοχή, είναι έντονο το φαινόμενο του διασκορπισμού των σταγονιδίων του ρευστού τα οποία πέφτουν στη θερμή επιφάνεια και διασκορπίζονται στο νέφος του ατμού. Για το λόγο αυτό η περιοχή λέγεται και «περιοχή βίαιης σταγονοποίησης» (sputtering region). Ο υπολογισμός των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας στην περιοχή υπήρξε θέμα έντονου προβληματισμού μεταξύ των ερευνητών. Αυτό οφείλεται στο ότι είναι δύσκολο να διεξαχθούν απευθείας μετρήσεις διότι το φαινόμενο αυτό είναι μεταβατικό, η περιοχή του υγρού μετώπου πολύ μικρή, ενώ η θερμοκρασιακή μεταβολή στο τοίχωμα πολύ μεγάλη. Σύμφωνα πάντως με εκτιμήσεις που προκύπτουν από προσαρμογή πειραματικών δεδομένων σε πειραματικά μοντέλα, συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας για νερό είναι της τάξης των $10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Μία ημιεμπειρική εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή αυτού στην περιοχή του υγρού μετώπου, είναι η σχέση του Yu [6] (σχέση 2.5).

3. Ξηρή περιοχή (dry region)

Η ξηρή περιοχή περιλαμβάνει το τμήμα της ράβδου το οποίο δεν έχει επαναψυχθεί ακόμα και καλύπτεται από νέφος ατμού, το οποίο προέρχεται από την ατμοποίηση του νερού που βρίσκεται στα ανάντη. Στο νέφος ατμού ενδεχομένως να υπάρχουν σταγονίδια νερού και έτσι η ροή χαρακτηρίζεται ως σταγονοειδής (περιοχή G, σχήμα 2.11, σύμφωνα με όσα αναφέραμε στο εδάφιο 2.9.2). Ο συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας στην περιοχή αυτή είναι πολύ μικρός της τάξεως των 10 - 100 $\text{W/m}^2\text{K}$, λόγω των ασθενών μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας - αγωγή και ακτινοβολία - προς τον ατμό, ενώ πολλοί ερευνητές δέχονται ότι η ροή στην περιοχή αυτή είναι αδιαβατική [6]. Η θερμοκρασία της ράβδου θεωρείται είτε σταθερή, είτε ότι μειώνεται με μικρό, σχεδόν σταθερό ρυθμό αν αγνοηθεί η πρόδρομη ψύξη. Αυτό σημαίνει ότι εφόσον αποκατασταθεί το υγρό φιλμ πάνω στη ράβδο έχει αρχίσει να προωθείται τότε η παραγωγή φθίνουσας θερμότητας στο πυρηνικό καύσιμο μπορεί να αγνοηθεί ακόμα και στην ξηρή περιοχή. Για να ισχύει η παραπάνω θεώρηση πρέπει η αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης να είναι μεγαλύτερη από την οριακή τιμή 10 s/m. Αν αυτό δεν συμβαίνει τότε η παραγωγή θερμότητας στην ξηρή περιοχή δεν μπορεί να αμεληθεί.

Όλοι οι ερευνητές συμφωνούν ότι ο κύριος μηχανισμός προώθησής του υγρού μετώπου είναι αυτός της αξονικής θερμικής αγωγιμότητας (axial heat conduction) μέσω του περιβλήματος των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου. Κατά την επανάψυξη, θερμότητα από την ξηρή περιοχή της ράβδου, όπου ο συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας προς το μίγμα ατμού - σταγονιδίων είναι πολύ χαμηλός, μεταφέρεται πρωτίστως προς την περιοχή του υγρού μετώπου και δευτερευόντως προς την υγρή περιοχή. Αυτό συμβαίνει γιατί και στις δύο αυτές περιοχές οι συντελεστές μεταβίβασης θερμότητας είναι υψηλοί. Στη συνέχεια η θερμότητα αυτή απάγεται από το υγρό φιλμ. Η έντονη θερμική αποφόρτιση που συμβαίνει στο υγρό μέτωπο, προκαλεί πτώση της θερμοκρασίας αμέσως μπροστά από αυτό (στην ξηρή περιοχή) και έτσι καθίσταται δυνατή η προώθηση του. Οι ερευνητές επίσης συμφωνούν στο ότι ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας προς το ψυκτικό λαμβάνει χώρα στην περιοχή υγρού μετώπου όπου και επικρατούν συνθήκες βρασμού ανάλογες με αυτές που πρώτος περιέγραψε ο Leindefrost το 1756, [6].

Μετά την επίτευξη της θερμοκρασία καμψής (σχήμα 2.12, χρονικό σημείο t_2), αρχίζει η ψύξη στο εν λόγω σημείο της ράβδου, όπως προείπαμε. Η θερμοκρασία του θεωρούμενου σημείου αρχίζει να ελαττώνεται λόγω πρόδρομης ψύξης, η οποία προκαλείται από το sputtering που συμβαίνει στην άκρη του υγρού μετώπου. Μόλις (χρονικό σημείο t_3) το υγρό μέτωπο φθάσει στο εν λόγω σημείο, ο μηχανισμός της βίαιης σταγονοποίησης έχει σαν αποτέλεσμα την ταχύτερη αύξηση στο ρυθμό ψύξης. Το υγρό μέτωπο συνεχίζει να κινείται έως ότου το υγρό φιλμ να αποκατασταθεί στο υπόψη σημείο. Ο χρόνος που μεσολαβεί από το συμβάν του ατυχήματος έως την αποκατάσταση του υγρού φιλμ στο μελετώμενο σημείο ονομάζεται «χρόνος επανάψυξης» (t_4), του συγκεκριμένου σημείου. Εάν το σημείο που μελετούμε βρίσκεται στην άλλη άκρη της ράβδου από εκείνη η οποία τροφοδοτείται πρώτα με νερό, ο χρόνος αυτός ονομάζεται χρόνος επανάψυξης της ράβδου.

Ο ρυθμός προώθησης του υγρού μετώπου πάνω στη ράβδο ονομάζεται ταχύτητα επανάψυξης της ράβδου. Ενώ για πολλά χρόνια οι ερευνητές πίστευαν ότι η ταχύτητα είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της επανάψυξης, τελικά αποδείχθηκε πειραματικά και θεωρητικά ότι η κίνηση του υγρού μετώπου πάνω στη ράβδο είναι επιταχυνόμενη λόγω της πρόδρομης ψύξης η οποία μειώνει ολοένα και περισσότερο τα θερμικά φορτία που πρέπει να αποφορτισθούν, με την προϋπόθεση βέβαια ότι η παραγωγή θερμικής ισχύος δεν αυξάνεται για κάποιο λόγο στη διάρκεια της επανάψυξης.

2.10.2 Επιτυχία - Αποτυχία στην προσπάθεια επανάψυξης

Απαραίτητη προϋπόθεση για να έχουμε επιτυχή επανάψυξη ράβδων πυρηνικού καυσίμου είναι να διατηρηθεί η θερμοκρασία όλων των σημείων τους κάτω από τα θερμοκρασιακά όρια ασφαλείας που θέτουν οι διεθνείς κανονισμοί (2200 °F ή 1204 °C). Παρατηρώντας το σχήμα 2.13 βλέπουμε ότι αρκεί η θερμοκρασία καμψής T_2 να

διατηρηθεί κάτω από τη θερμοκρασία $T_{safe}=1204\text{ }^{\circ}\text{C}$ για να θεωρηθεί επιτυχής η επανάψυξη. Είναι φανερό ότι όσο περισσότερο καθυστερήσει η εκκίνηση του ECCS τόσο αυξάνονται οι πιθανότητες η επανάψυξη να αποτύχει. Οι δυνατές εκβάσεις του φαινομένου της επανάψυξης της ράβδου είναι τρεις:

1. Η επανάψυξη να ξεκινήσει και να ολοκληρωθεί επιτυχώς (σχήμα 2.13, περίπτωση 1-2-3) χωρίς δηλαδή η θερμοκρασία οποιουδήποτε σημείου της εξωτερικής επιφάνειας του περιβλήματος του πυρηνικού καυσίμου να υπερβεί το όριο ασφαλείας.
2. Η επανάψυξη να ξεκινήσει με καθυστέρηση, να ολοκληρωθεί κανονικά, αλλά κατά τη διάρκεια της η θερμοκρασία σε κάποιο σημείο της επιφάνειας πυρηνικού καυσίμου να ξεπεράσει το όριο ασφαλείας με πιθανότητα διαρροής (σχήμα 2.13, περίπτωση 1'-2'-3').
3. Η επανάψυξη να ξεκινήσει τόσο καθυστερημένα ώστε να μην καταστεί δυνατή η προώθηση του υγρού μετώπου πάνω στη ράβδο με αποτέλεσμα αυτή να λιώσει (σχήμα 2.13, περίπτωση 1-2-2").

Ενδεικτική τιμή της ταχύτητας επανάψυξης για επιτυχή επανάψυξη με νερό αποτελεί η τιμή 10-50 mm/sec για τυπική ράβδο πυρηνικού καυσίμου.

2.10.3 Παράμετροι που επηρεάζουν την επανάψυξη

Οι κυριότερες παράμετροι που φαίνεται να επηρεάζουν το φαινόμενο της επανάψυξης είναι οι εξής:

- Η αρχική θερμοκρασία στην επιφάνεια της ράβδου
- Η πίεση του συστήματος
- Η παροχή του υγρού στην είσοδο του καναλιού
- Η υπόψυξη του υγρού στην είσοδο του καναλιού
- Η παροχή του ατμού στην είσοδο του καναλιού
- Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του περιβλήματος
- Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του ψυκτικού υγρού
- Η ποιότητα της επιφάνειας της ράβδου

Τα παραπάνω μεγέθη εμπλέκονται στην ταχύτητα επανάψυξης χωρίς όμως να έχει ξεκαθαριστεί για ορισμένα από αυτά ο ακριβής τρόπος με τον οποίο την επηρεάζουν. Αυτό συμβαίνει, κυρίως λόγω της υπάρχουσας δυσκολίας στη μέτρηση κάποιων μεγεθών, όπως η παροχή ατμού και η οξείδωση της ράβδου.

2.11 Μοντέλα επίλυσης του προβλήματος της επανάψυξης

Για τη διερεύνηση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων στην ταχύτητα επανάψυξης είναι απαραίτητη η αναφορά σε αναλυτικά μοντέλα επίλυσης. Χρήση των μοντέλων αυτών γίνεται σε περιπτώσεις γρήγορων υπολογισμών και σε περιπτώσεις ανεπάρκειας πειραματικών δεδομένων. Από τα διάφορα αναλυτικά μοντέλα που έχουν προταθεί μεταξύ των οποίων τα μοντέλα (Chambre and Elias, 1978), (Piggot and Porthouse, 1973) και (Ueda and Inue, 1983), το μοντέλο του Yamanouchi χρησιμοποιείται ευρέως κυρίως λόγω της απλότητας του.

2.11.1 Διαφορική εξίσωση αγωγιμότητας

Για τη θεωρητική διερεύνηση του φαινομένου της επανάψυξης θα πρέπει να στηριχθούμε στην εξίσωση της θερμικής αγωγιμότητας πάνω στο περίβλημα της ράβδου του πυρηνικού καυσίμου [1], η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{dT}{dt} = a_w \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{dT}{dr} + \frac{d^2 T}{dx^2} \right] + \frac{q_w}{\rho_w c_w} \quad (2.4)$$

όπου,

z : η συντεταγμένη κατά τον άξονα της ράβδου

r : η συντεταγμένη κατά την ακτίνα της ράβδου

t : ο χρόνος που μεσολαβεί από την έναρξη της επανάψυξης έως τη χρονική στιγμή που μας ενδιαφέρει

T : η θερμοκρασία του περιβλήματος της ράβδου

q_w : η πυκνότητα θερμικής ισχύος (W/m³) της ράβδου

a_w : ο συντελεστής θερμοκρασιακής αγωγιμότητας της ράβδου

c_w : ειδική θερμότητα του περιβλήματος της ράβδου

ρ_w : πυκνότητα του περιβλήματος της ράβδου

Θεωρητικά μοντέλα για ισοταχή κίνηση του υγρού μετώπου είναι:

1. Το μοντέλο του Yamanouchi

$$u^{-1} = \frac{1}{a_w} \left[\frac{\delta_w k_w}{h} \right]^{1/2} \frac{T_w - T_0}{T_0 - T_s} \quad (2.5)$$

Όπου

T_w : η αρχική θερμοκρασία της ράβδου (K)

T_0 : η θερμοκρασία υγρού μετώπου (K)

T_s : η θερμοκρασία κορεσμού του υγρού (K)

a_w : ($= k_w/\rho_w c_w$), η θερμοκρασιακή αγωγιμότητα διαχύσεως του περιβλήματος (m^2/s)

ρ_w : η πυκνότητα του υλικού του περιβλήματος (kg/m^3)

c_w : η ειδική θερμότητα του υλικού του περιβλήματος (W/kgK)

δ_w : το πάχος του περιβλήματος (ισοδύναμο) (m)

k_w : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του περιβλήματος (W/mK)

h : ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας την περιοχή του υγρού μετώπου ($W/m^2 K$)

u^{-1} : αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης (s/m)

Το μοντέλο είναι μονοδιάστατο και ισχύει για αριθμούς Biot $= (h \cdot \delta_w / k_w) < 1$.

2. Το μοντέλο του Blair

$$u^{-1} = \frac{\rho_w c_w \pi}{2h} \frac{T_w - T_0}{T_0 - T_s} \quad (2.6)$$

Το μοντέλο αυτό είναι δισδιάστατο και ισχύει για Biot $\gg 1$.

Τα μοντέλα δείχνουν ότι η ταχύτητα επανάψυξης είναι αντιστρόφως ανάλογη της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου, ότι εξαρτάται επίσης από τα χαρακτηριστικά της ράβδου και τις συνθήκες ροής του ψυκτικού (h , σχέση 2.4). Φαίνεται ότι η ταχύτητα επανάψυξης δεν εξαρτάται, άμεσα, από την παροχή του ψυκτικού του συστήματος έκτακτης ψύξεως. Πρακτικό πρόβλημα σχετικά με τη χρησιμοποίηση των παραπάνω μοντέλων είναι η έλλειψη δεδομένων για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταβιβάσεως θερμότητας, στην περιοχή του υγρού μετώπου. Η παραπάνω έλλειψη συμπληρώνεται από ημιεμπειρικές σχέσεις που έχουν διατυπωθεί όπως αυτή του Yu:

$$h(T_0 - T_s)^2 = [1 + 0.036 \Delta T_{sub} \frac{W_1}{\pi D}]^2 (2.04 + 2.48 \log_{10} p) \left(\frac{W_1}{\pi D} \right)^{0.153} \cdot 10^9 \quad (2.7)$$

Όπου

- h : ο συντελεστής μεταβιβάσεως θερμότητας (W/m^2K)
 T_0 : η θερμοκρασία υγρού μετώπου (K)
 T_s : η θερμοκρασία κορεσμού του υγρού (K)
 ΔT_{sub} : η υπόψυξη του νερού του ECCS (K)
 W_1 : η παροχή του νερού του ECCS (kg/s)
 D : η εξωτερική διάμετρος της ράβδου (m)
 P : η πίεση κατά τη διάρκεια της επανάψυξης (bar)

Η εξίσωση αυτή προσαρμόζει τα πειραματικά δεδομένα με μέσο τετραγωνικό σφάλμα 25% σε περιοχή πιέσεων 1-70 bar, αρχικών θερμοκρασιών ράβδου πυρηνικού καυσίμου μέχρι $750^\circ C$ και υπόψυξη από 0 έως $90^\circ C$. Ο Yu προτείνει για τη διαφορά $T_0 - T_s$ την τιμή 80 K.

2.12 Σημαντικότερα πειράματα

Κατά κανόνα η τεχνική που εφαρμόζεται σε πειράματα επανάψυξης είναι αυτή της γεωμετρικής προσομοίωσης. Συνήθως χρησιμοποιείται ράβδος συγκεκριμένων διαστάσεων, η οποία θερμαίνεται έμμεσα ενώ με τη χρήση θερμοστοιχείων παρακολουθείται και καταγράφεται η θερμοκρασία της. Πλήρης και λεπτομερής περιγραφή των σημαντικότερων πειραμάτων επανάψυξης που διεξήχθησαν μέχρι το 1991 είναι διαθέσιμη στις βιβλιογραφικές παραπομπές [7] & [32], ενώ στους πίνακες 2.2 και 2.3 παρουσιάζονται λεπτομέρειες ορισμένων πειραμάτων επανάψυξης.

2.12.1 Πειράματα FLECHT

Τα πειράματα FLECHT (Full Length Experimental Cooling Heat Transfer), είναι τα μόνα που έχουν διεξαχθεί σε πραγματικές συνθήκες ατυχήματος. Για τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών δεν έχουν δημοσιευτεί επαρκή στοιχεία. Επίσης ενώ θεωρούνται τα πλέον ολοκληρωμένα πειράματα επανάψυξης, υπάρχουν ενστάσεις όσον αφορά τον τρόπο μέτρησης της θερμοκρασίας.

2.12.2 Πειράματα Shires et al (1964)

Είναι τα πρώτα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με στόχο τη διερεύνηση των μηχανισμών που επιδρούν στο φαινόμενο της επανάψυξης. Στα πειράματα αυτά, τα οποία διεξήχθησαν σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης, χρησιμοποιήθηκε μεμονωμένη

ράβδος αλλά και πλέγμα 7 ράβδων. Διαπιστώθηκε έντονη εξάρτηση της ταχύτητας επανάψυξης από την αρχική θερμοκρασία της ράβδου και από την παροχή του ψυκτικού. Σε υψηλές τιμές της παροχής ψυκτικού η έντονη ατμοπαραγωγή ανέστειλε την προώθηση του υγρού μετώπου.

2.12.3 Πειράματα Bennet et al (1966)

Στα πειράματα αυτά χρησιμοποιήθηκε μεμονωμένη ράβδος. Διεξήχθησαν σε περιβάλλον ατμού και διαπιστώθηκε ο κυρίαρχος ρόλος της πίεσης στο φαινόμενο της επανάψυξης. Η ταχύτητα επανάψυξης είναι μεγάλη για χαμηλές τιμές θερμοκρασίας της ράβδου, ενώ μειώνεται σημαντικά για υψηλές τιμές θερμοκρασίας της ράβδου. Για αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης μικρότερη από 3.6 s/m, το φαινόμενο εκφυλίζεται από θερμοδυναμικά σε υδροδυναμικά ελεγχόμενο.

2.12.4 Πειράματα Yamanouchi (1968)

Στα πειράματα αυτά, τα οποία έγιναν σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, χρησιμοποιήθηκε πλέγμα 36 ράβδων. Κύριος στόχος ήταν να διερευνηθεί η επίδραση της παροχής και της θερμοκρασίας εισόδου του ψυκτικού και της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου. Διαπιστώθηκε ότι αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του ψυκτικού επιβραδύνει την επανάψυξη ενώ η παροχή του ψυκτικού συμβάλλει ελάχιστα στην αύξηση της ταχύτητας επανάψυξης. Αύξηση της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου μειώνει την ταχύτητα επανάψυξης. Επίσης διαπιστώθηκε δημιουργία υγρού μετώπου πάνω στη ράβδο για αρχική θερμοκρασία πάνω από 150°C.

2.12.5 Πειράματα Elliott et al (1971)

Για τα πειράματα αυτά χρησιμοποιήθηκε μεμονωμένη ράβδος από ανοξείδωτο χάλυβα και από zircaloy, υπό συνθήκες πίεσης, για διάφορες τιμές παροχής του ψυκτικού. Διαπιστώθηκε αύξηση της ταχύτητας επανάψυξης με αύξηση της πίεσης και ανεξαρτησία από την παροχή του ψυκτικού. Επίσης ο ρυθμός επανάψυξης για περίβλημα της ράβδου από zircaloy βρέθηκε διπλάσιος από τον αντίστοιχο για χάλυβα. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την εξάρτηση της ταχύτητας επανάψυξης από τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του τοιχώματος της ράβδου [2].

2.13 Πρόσφατα πειράματα

2.13.1 Πειράματα Saxena et al (2001)

Τα πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκαν σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, για παροχές ψυκτικού έως και 7 L/min, ενώ χρησιμοποιήθηκε μεμονωμένη ράβδος. Κύριο συμπέρασμα ήταν το γεγονός ότι στα πειράματα με πλημμυρισμό η ταχύτητα επανάψυξης είναι μεγαλύτερη από ότι στα πειράματα με ψεκασμό εκ των άνω. Επίσης παρατηρήθηκε εξάρτηση της ταχύτητας επανάψυξης από την παροχή του ψυκτικού και διαπιστώθηκε ότι το μήκος της ράβδου είναι παράγοντας που δεν μπορεί να αγνοηθεί [23].

2.13.2 Πειράματα Celata et al (2009)

Στόχος των πειραμάτων αυτών ήταν να διερευνηθεί η επίδραση του τρόπου με τον οποίον οδηγείται το ψυκτικό μέσο (νερό) σε κατακόρυφη υπερθερμανθείσα επιφάνεια, στην ταχύτητα επανάψυξης [28]. Για το σκοπό αυτό έγινε σύγκριση δεδομένων από πειράματα στα οποία το νερό ψεκαζόταν στη ράβδο (spraying cooling) με τα δεδομένα πειραμάτων όπου το νερό οδηγείται στην υπερθερμανθείσα επιφάνεια εξ αρχής υπό μορφή φιλμ και ρέει ελεύθερα επάνω σε αυτήν (liquid falling film). Η σύγκριση των πειραματικών δεδομένων έδειξε ξεκάθαρα ότι η ταχύτητα επανάψυξης ήταν γενικά μεγαλύτερη στα πειράματα με ψεκασμό νερού (spraying cooling).

2.13.3 Πειράματα Sahu et al (2010)

Τα πειράματα αυτά έγιναν σε ατμοσφαιρικές συνθήκες και για επανάψυξη εκ των άνω με ελεύθερη ροή λεπτού φιλμ νερού. Το εύρος παροχής ψυκτικού (νερού) ήταν 0.35 - 1.86 L/min ενώ η αρχική θερμοκρασία της ράβδου κυμάνθηκε από 500 έως 200°C [29]. Αντικειμενικός σκοπός των πειραμάτων ήταν η μελέτη της επίδρασης της κατανομής της μάζας του υγρού φιλμ περιμετρικά του τμήματος δοκιμών στη διαμόρφωση του υγρού μετώπου κατά την επανάψυξη.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν 3 τρόποι έγχυσης του ψυκτικού στο τμήμα δοκιμών:

1. Χρήση μονού εγχυτήρα ψυκτικού (single coolant injector)
2. Χρήση πολλαπλού εγχυτήρα ψυκτικού (multiple coolant injector)
3. Χρήση εγχυτήρα περιμετρικά ομοιόμορφης δέσμης ψυκτικού (uniform film coolant injector)

Η χρήση μονού εγχυτήρα οδήγησε στη δημιουργία ανομοιόμορφου υγρού μετώπου, πρόβλημα το οποίο βελτιώθηκε με τη χρήση πολλαπλού εγχυτήρα. Πλήρως ομοιόμορφο υγρό μέτωπο επιτεύχθηκε με τη χρήση εγχυτήρα περιμετρικά ομοιόμορφης δέσμης. Η εργασία αυτή έδειξε ότι με ομοιόμορφη κατανομή μάζας του υγρού περιμετρικά της ράβδου είναι δυνατή η δημιουργία περιμετρικά ομοιόμορφου υγρού μετώπου ακόμα και στην περίπτωση χρήσης ψυκτικού με έντονη υπόψυξη της τάξης των 75 °C. Τα πειράματα αυτά επιβεβαίωσαν ότι η ταχύτητα του υγρού μετώπου αυξάνεται όταν αυξάνεται η παροχή και η υπόψυξη του ψυκτικού, ενώ μειώνεται με την αύξηση της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου.

2.14 Συμπεράσματα για την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στην ταχύτητα επανάψυξης

Το φαινόμενο της επανάψυξης είναι πολυπαραμετρικό και έτσι τα πειράματα δίνουν ορισμένες φορές αντικρουόμενα συμπεράσματα για το αν κάποια παράμετρος επιδρά ή όχι αλλά και για τον τρόπο επίδρασης της. Παρακάτω αναφέρονται κάποια συμπεράσματα που έχουν προκύψει από τις εργασίες και τα πειράματα που έχουν διεξαχθεί έως τώρα.

2.14.1 Αρχική θερμοκρασία ράβδου

Από τη στιγμή που θα επιτευχθεί αποκατάσταση του υγρού φιλμ πάνω στην επιφάνεια, είναι αποδεκτό από τους περισσότερους ερευνητές ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου και της αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης. Από τα πειραματικά δεδομένα μπορεί να υπολογιστεί η εξίσωση αναδρομής της μορφής:

$$u^{-1} = a_o + a_1 T_w \quad (2.8)$$

όπου,

T_w : θερμοκρασία της ράβδου

u^{-1} : ταχύτητα επανάψυξης

a_o, a_1 : παράμετροι αναδρομής

Αν στη σχέση αυτή θέσουμε $u^{-1}=0$ μπορούμε να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία του τοιχώματος στη θέση του υγρού μετώπου. Για κάποια κρίσιμη τιμή της θερμοκρασίας της ράβδου και κάτω το φαινόμενο της επανάψυξης μεταπίπτει από θερμοδυναμικά σε υδροδυναμικά ελεγχόμενο. Τότε το φιλμ ρέει κάτω από την επίδραση των βαρυτικών δυνάμεων και των δυνάμεων συνεκτικότητας κατάσταση στην οποία δεν ισχύει η προηγούμενη συσχέτιση, σχέση 2.6.

2.14.2 Πίεση

Αύξηση της πίεσης συνεπάγεται αύξηση της ταχύτητας επανάψυξης και πιο γρήγορη ψύξη της ράβδου. Η επίδραση είναι εντονότερη για πιέσεις κοντά στην ατμοσφαιρική ενώ σε υψηλότερα επίπεδα η μεταβολή της επίδρασης είναι ασθενέστερη.

2.14.3 Παροχή ψυκτικού στο κανάλι

Φαίνεται να υπάρχει αύξηση της ταχύτητας επανάψυξης με αύξηση της παροχής του ψυκτικού σε ατμοσφαιρικά πειράματα. Η επίδραση αυτή γίνεται πολύ ασθενέστερη σε συνθήκες υψηλής πίεσης. Πολύ υψηλές παροχές οδηγούν σε έντονη ατμοποίηση του υγρού η οποία οδηγεί σε επιβράδυνση του υγρού μετώπου. Θα ήταν πιθανώς χρήσιμο να διερευνηθεί η ύπαρξη μιας κρίσιμης τιμής της παροχής του ψυκτικού για κάθε πίεση (1-7 bar σε ΠΑΙ μετά από LOCA) η οποία αποτελεί όριο για την επίδραση της ταχύτητας επανάψυξης. Η δε επίδραση της παροχής φαίνεται να είναι εντονότερη στα ατμοσφαιρικά πειράματα και ασθενέστερη στα πειράματα που εκτελούνται σε υψηλές πιέσεις. Στα πειράματα της παρούσας εργασίας η παροχή εκλέγεται ίση με 1 L/min, τιμή που ταιριάζει πλήρως στις περισσότερες περιπτώσεις ατυχημάτων απώλειας ψυκτικού.

2.14.4 Υπόψυξη του ψυκτικού μέσου

Ως υπόψυξη ορίζεται ως η διαφορά $T_{\text{sub}} = T_{\text{sat}} - T_{\text{water}}$ όπου T_{sat} η θερμοκρασία κορεσμού του ψυκτικού στη συγκεκριμένη πίεση και T_{water} η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου. Παρόλο που η επίδραση του συγκεκριμένου παράγοντα δεν είναι πλήρως ξεκαθαρισμένη, η υπόψυξη φαίνεται να επιδρά σημαντικά στο φαινόμενο σε πιέσεις κοντά στην ατμοσφαιρική. Μάλιστα όταν η υπόψυξη είναι μεγάλη το φαινόμενο εκφυλίζεται από θερμοδυναμικά σε υδροδυναμικά ελεγχόμενο [2]. Στην πράξη, τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο νερό μηδενικής υπόψυξης γιατί προέρχεται από την ποσότητα του νερού που κυκλοφορεί στα ψυκτικά κυκλώματα του αντιδραστήρα κατά τη διάρκεια της κανονικής του λειτουργίας. Έτσι η υπόψυξη αν δεν αναφέρεται μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

2.14.5 Θερμοφυσικές ιδιότητες του τοιχώματος της ράβδου

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του τοιχώματος της ράβδου όπως είναι το πάχος και η ειδική θερμοχωρητικότητα, είναι δύσκολο να ελεγχθούν κατά τη διάρκεια ενός πειράματος και έτσι θεωρούνται σταθερές. Σύμφωνα με τον Thomson [21] υπάρχει μία κρίσιμη τιμή πάχους για κάθε υλικό περιβλήματος (για ζιρκόνιο είναι 0.02 in ή 0.05 m). Για τιμές του πάχους μεγαλύτερες της κρίσιμου τιμής το φαινόμενο της επανάψυξης είναι ανεξάρτητο της θερμικής αγωγιμότητας του περιβλήματος της ράβδου. Η τιμή του κρίσιμου πάχους εξαρτάται από την αρχική θερμοκρασία της ράβδου, την πίεση του ψυκτικού και τις θερμοφυσικές ιδιότητες.

Επίσης έχει διαπιστωθεί ότι ισχύει $\rho \cdot C_p \cdot u = ct$ όπου ρ : πυκνότητα, C_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα και u : ταχύτητα επανάψυξης. Για το λόγο αυτόν επιφάνεια από ζιρκόνιο επαναψύχεται δύο φορές πιο γρήγορα από επιφάνεια από χάλυβα. Η οξείδωση της ράβδου η οποία επέρχεται με την πάροδο του χρόνου μεταβάλλει της θερμοφυσικές ιδιότητες της ράβδου και έτσι η τιμή της ταχύτητας επανάψυξης μεταβάλλεται. Επίσης αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας του τοιχώματος της ράβδου φαίνεται να οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας επανάψυξης αφού οι μικροανωμαλίες της επιφάνειας ευνοούν τον εστιακό βρασμό.

2.14.6 Γεωμετρία καναλιού

Στη παρούσα εργασία θα μελετηθεί το φαινόμενο της επανάψυξης σε μεμονωμένη ράβδο. Στην πραγματικότητα όμως ένας πυρηνικός αντιδραστήρας περιέχει πλέγμα από μεγάλο αριθμό ράβδων (5000 - 50000), σε γεωμετρία η οποία μπορεί να διαφέρει κάθε φορά. Οι πειραματικές εργασίες που έχουν γίνει συγκλίνουν στο ότι το πλέγμα και η γεωμετρία του πυρήνα δεν επηρεάζουν το φαινόμενο της επανάψυξης και έτσι αυτό μπορεί να μελετηθεί και σε μεμονωμένη ράβδο χωρίς μεγάλη απόκλιση από την πραγματικότητα.

2.15 Μέθοδος επανάψυξης

Δύο είναι οι κύριοι τρόποι οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την επανάψυξη μίας θερμής ράβδου. Η επανάψυξη από πάνω (top rewetting) και το πλημμύρισμα από κάτω (bottom flooding). Για τις δύο αυτές μεθόδους έχει διαπιστωθεί ότι για χαμηλές παροχές, όποια από τις δύο μεθόδους και αν χρησιμοποιήσουμε, το φαινόμενο είναι θερμοδυναμικά ελεγχόμενο. Δηλαδή ο κύριος μηχανισμός της επανάψυξης είναι ακριβώς ο ίδιος. Στις μεγάλες παροχές όμως το πλημμύρισμα από κάτω μετατρέπει την επανάψυξη σε υδροδυναμικά ελεγχόμενη. Στην πράξη χρησιμοποιείται συνδυασμός των δύο μεθόδων για την αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση του LOCA.

Όσον αφορά την επανάψυξη από πάνω, στην ταχύτητα επανάψυξης επιδρά και ο τρόπος με τον οποίο διοχετεύεται το ψυκτικό υγρό στη ράβδο, όπως έδειξαν οι εργασίες [28] και [29]. Για παράδειγμα όταν το νερό ψεκάζεται στη ράβδο (spraying cooling) η ταχύτητα επανάψυξης είναι μεγαλύτερη από την περίπτωση που το νερό ρέει στη ράβδο (falling film).

2.15.1 Παροχή ατμού

Υπάρχει ένα κατώφλι κάτω από το οποίο η παροχή ατμού δεν φαίνεται να επηρεάζει την ταχύτητα επανάψυξης. Για τιμές μεγαλύτερες από αυτό μάλλον αυξάνεται η ταχύτητα επανάψυξης. Γενικά, η ύπαρξη ατμού πίεσης μεγαλύτερης της ατμοσφαιρικής προσομοιώνει καλύτερα την κατάσταση LOCA και δεν επιτρέπει την ύπαρξη αέρα στο κανάλι του ψυκτικού ο οποίος ίσως επιδρά στο φαινόμενο.

2.15.2 Φθίνουσα θερμότητα

Φθίνουσα θερμότητα καλείται η θερμότητα που παράγεται αμέσως μετά την πτώση των ράβδων ελέγχου και μέχρι την έναρξη του συστήματος έκτακτης ψύξης, τμήμα 0 – t₁ σχήματος 2.12. Μελέτες απέδειξαν ότι η θερμική ισχύς ανά μονάδα επιφανείας που παράγεται λόγω φθίνουσας θερμότητας δεν ξεπερνά το 1 MW/m² και δεν επιδρά ουσιαστικά στην ταχύτητα επανάψυξης. Το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια LOCA η τιμή δεν πρόκειται να ξεπεραστεί, μας δίνει τη δυνατότητα να κλείνουμε την τροφοδοσία της ράβδου κατά την εκτέλεση του πειράματος επανάψυξης, όπως θα περιγράψουμε στο επόμενο Κεφάλαιο, χωρίς να υπάρχει απόκλιση στα αποτελέσματα που εξάγουμε.

Πίνακας 2.1: Σύγκριση κυριότερων ψυκτικών μέσων ΠΑΙ ως προς τις φυσικές ιδιότητες αδιάστατη παράμετρο F

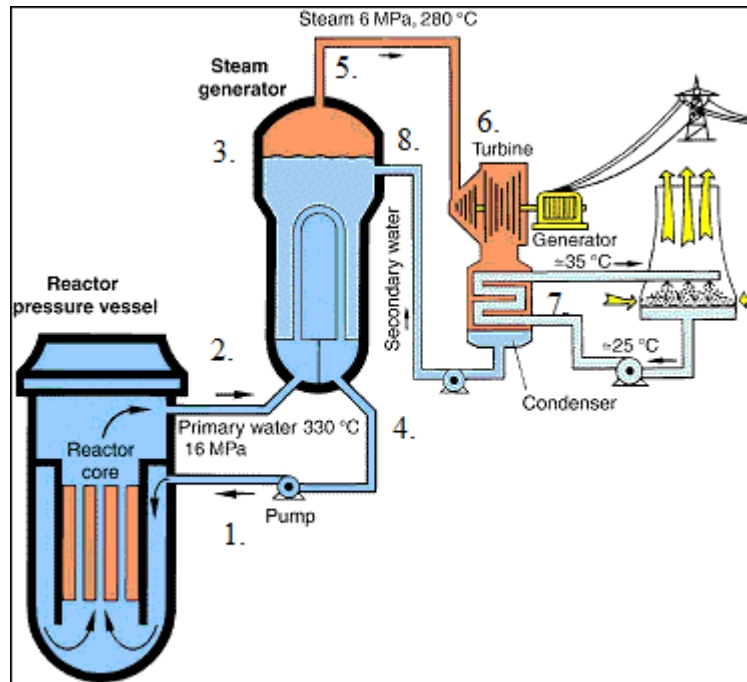
Ψυκτ. Μέσο / Ιδιότητες	Θερμοκρασία (°C)	Πίεση (bar)	Σημείο Βρασμού (°C)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Δυναμική Συνεκτικότητα (N·s/m ² (·10 ⁶))	Ειδική Θερμοχωρητικότητα (kJ/(kg·K))	Παράμετρος F
Ελαφρύ Νερό	270	55	100	767	102	5.14	53
Βαρύ Νερό	270	55	101	845	113	5.27	67
Νάτριο	550	1	883	817	230	1.26	1
Ήλιο	450	41	-269	3.08	36	5.2	1.1·10 ⁻³
Διοξείδιο του Άνθρακα	450	41	-57	29.5	30	1.2	1.7·10 ⁻³

Πίνακας 2.2: Στοιχεία σημαντικών πειραμάτων επανάψυξης με ψεκασμό από πάνω

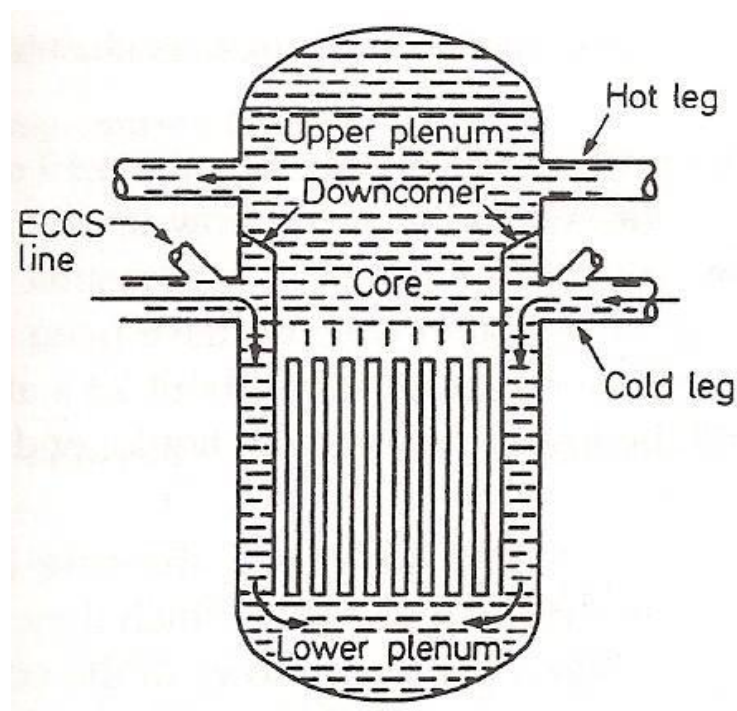
A.A	Ερευνητές	Έτος	Γεωμετρία τμήματος δοκιμών	Μήκος ράβδου (m)	Εύρος παροχής ψυκτικού υγρού (L/min)	Αρχική θερ/σία ράβδου (°C)	Εύρος ταχύτητας επανάψυξης (m/sec)
1	Shires et al	1964	Κυκλική διατομή	3.6	Έως 45	Έως 500	7 – 290
2	Yamanouchi	1968	Πλέγμα ράβδων	1.5 και 2.5	5 – 25	300 – 600	3.5 -28
3	Elliot and Rose	1971	Δακτυλιοειδής διατομή	0.97	0.45 - 1.8	Έως 500	7 - 290
4	Piggot and Durfey	1975	Κυκλική διατομή	0.5	0.1 – 0.55	700	1.5 - 6
5	Bankoff et al	1982	>>	3.5	0.5 – 3.6	550	28 - 100
6	Hinis and Simopoulos	1994	>>	1.016	1	230 - 550	4 - 100
7	Saxena et al	2001	Δακτυλιοειδής διατομή	2.630	1 – 7	200 – 500	10 - 200
8	Celata et al	2009	Κατακόρυφη πλάκα	1x0.1x0.05	0.27	100 – 700	1 – 40
9	Sahu et al	2010	Κυκλική διατομή	1.2	0.35 - 1.86	200 - 500	1.5 - 10

Πίνακας 2.3: Στοιχεία σημαντικών πειραμάτων επανάψυξης πλημμύρισμα από κάτω

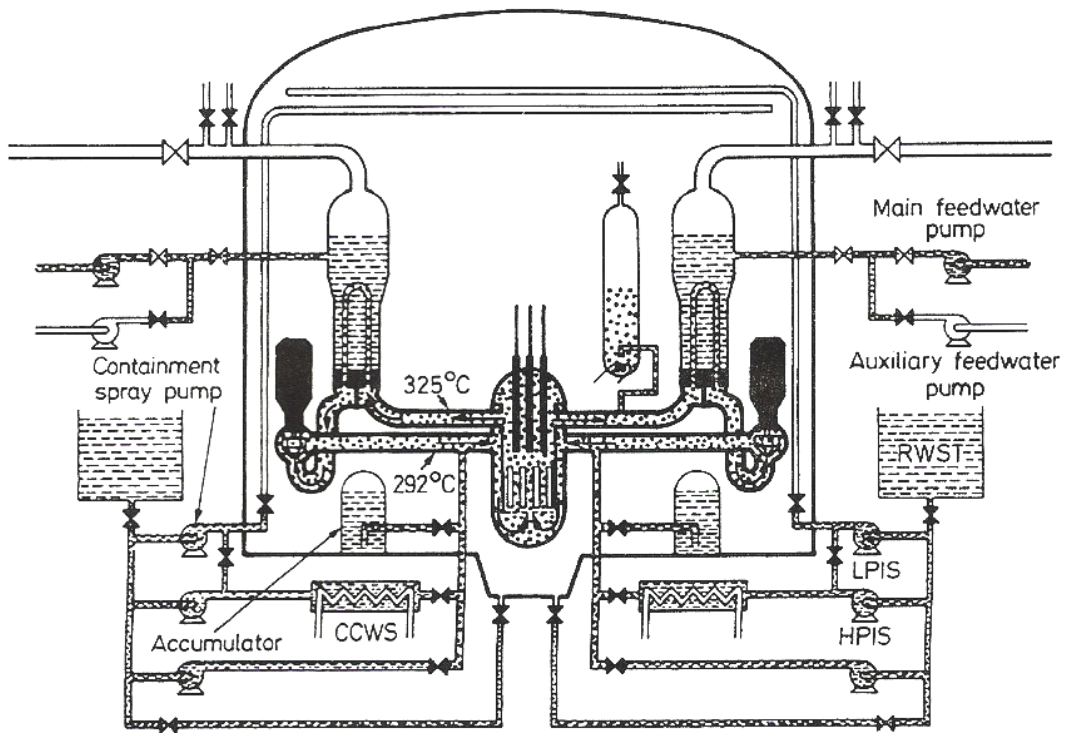
A.A	Ερευνητές	Έτος	Γεωμετρία τμήματος δοκιμών	Μήκος ράβδου (m)	Εύρος παροχής ψυκτικού υγρού (L/min)	Αρχική θερ/σία ράβδου (°C)	Εύρος ταχύτητας επανάψυξης (mm/sec)
1	Piggot and Durfey	1975	Δακτυλιοειδής διατομή	0.5	0.1 – 0.55	700	1.5 – 6.0
2	Piggot and Porthouse	1975	>>	1.2	0.036 – 3.6	400 – 700	1 – 33
3	Lee et al	1978	Κυκλική διατομή	4.0	1.2 – 6.1	450 – 650	25 – 170
4	Neti and Chen	1981	>>	1.45	0.045 – 0.94	400 – 600	5 – 95
5	Bankoff et al	1982	>>	3.5	0.5 – 3.6	550	29 – 100
6	Tuzla et al	1991	Πλέγμα ράβδων	1.2	0.56 – 2.1	800	1 - 5
7	Saxena et al	2001	Δακτυλιοειδής διατομή	3.030	1 - 7	200 - 500	10 - 200



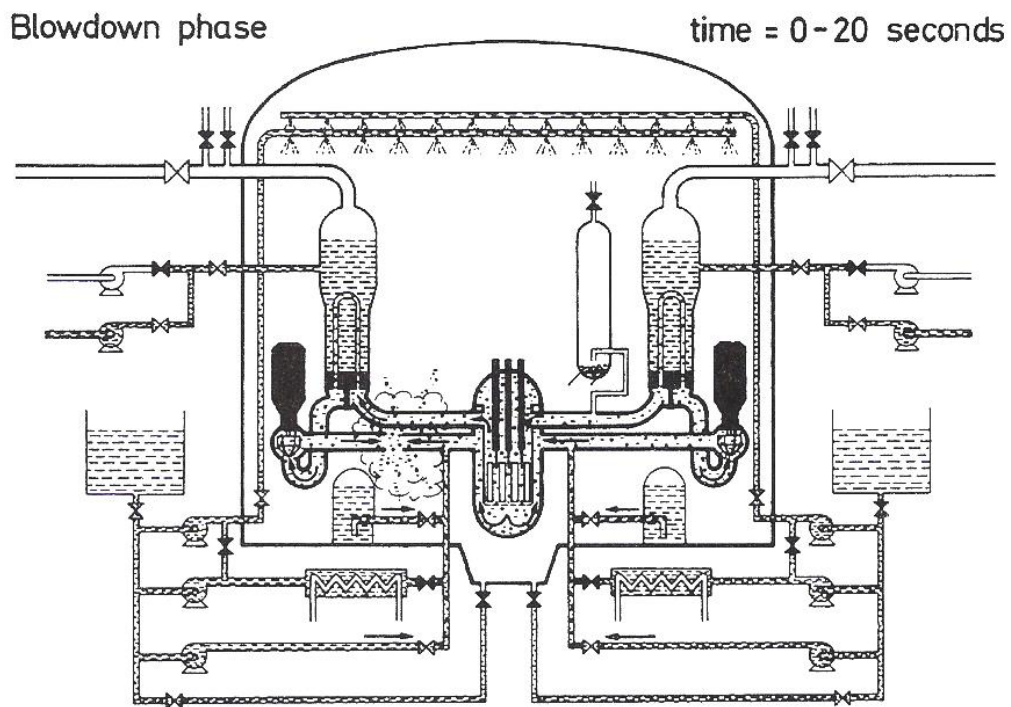
Σχήμα 2.1: Τυπικό κύκλωμα αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος (PWR)



Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση δοχείου πίεσης PWR [8]



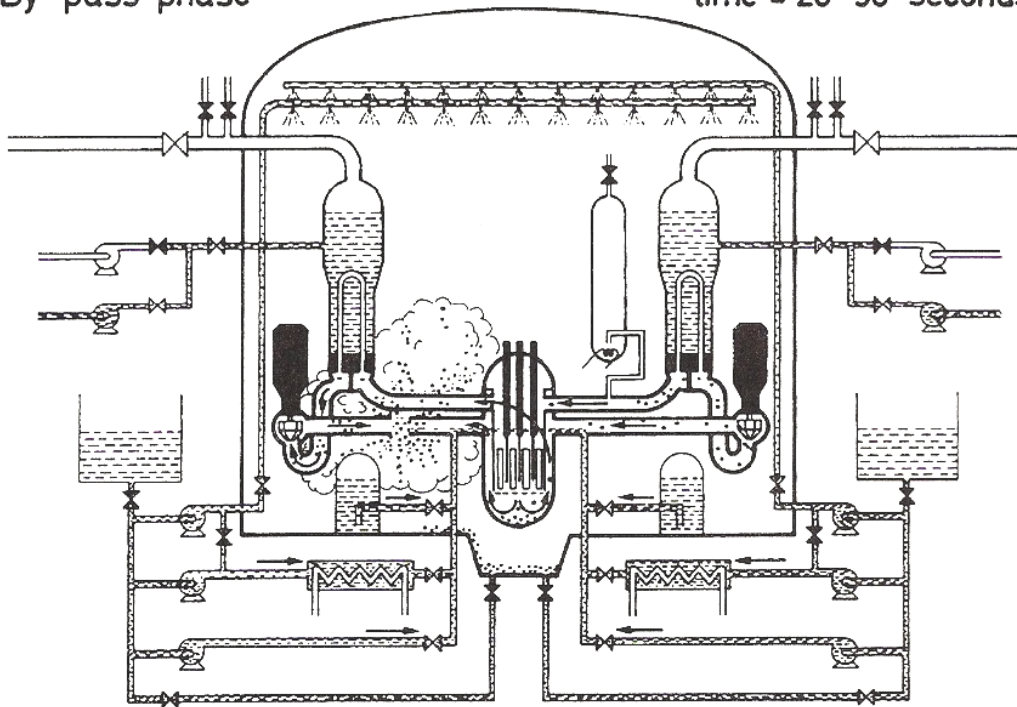
Σχήμα 2.3: Διάγραμμα πρωτεύοντος, δευτερεύοντος, και εφεδρικού κυκλώματος ψύξης PWR [8]



Σχήμα 2.4: LB LOCA, 1^η φάση (blowdown phase) [8]

By-pass phase

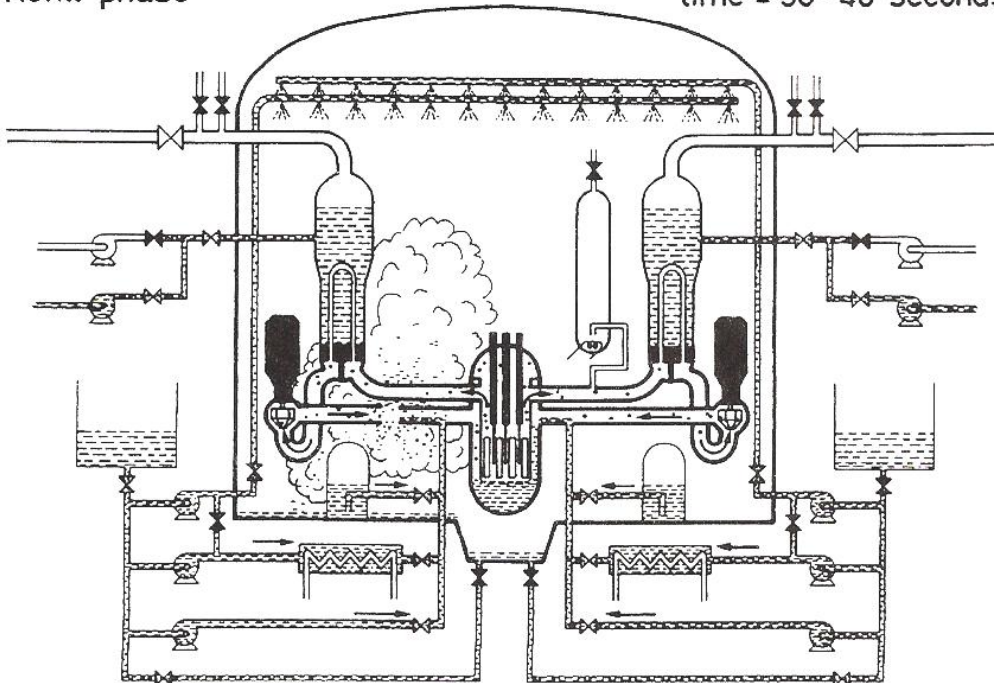
time = 20-30 seconds



Σχήμα 2.5: LB LOCA, 2^η φάση (by-pass phase) [8]

Refill phase

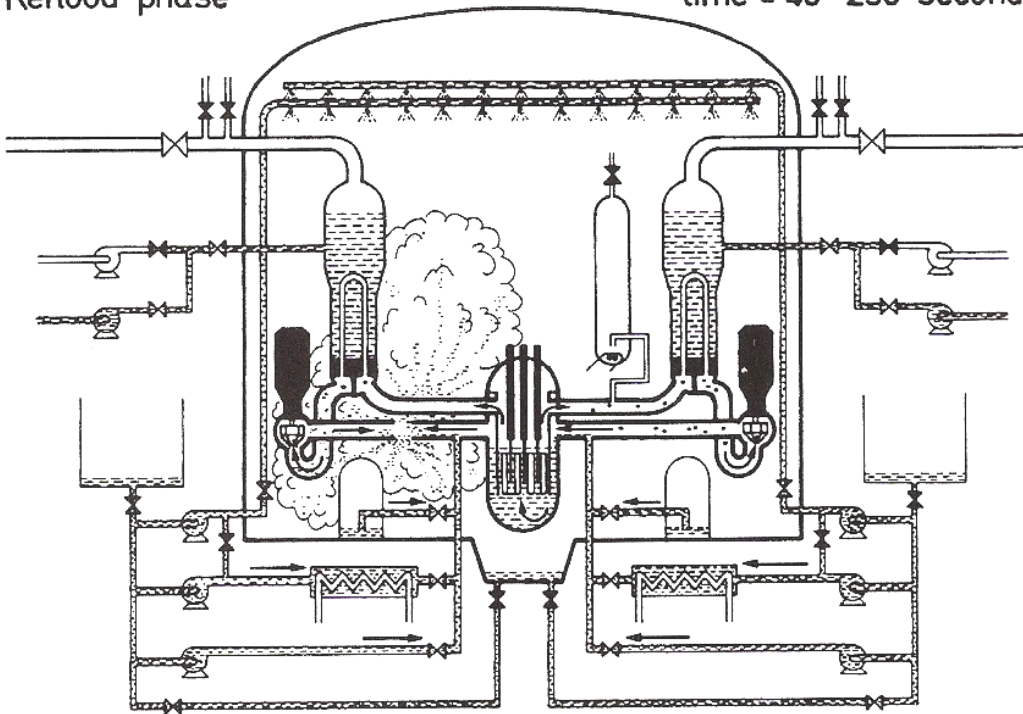
time = 30-40 seconds



Σχήμα 2.6: LB LOCA, 3^η φάση (refill phase) [8]

Reflood phase

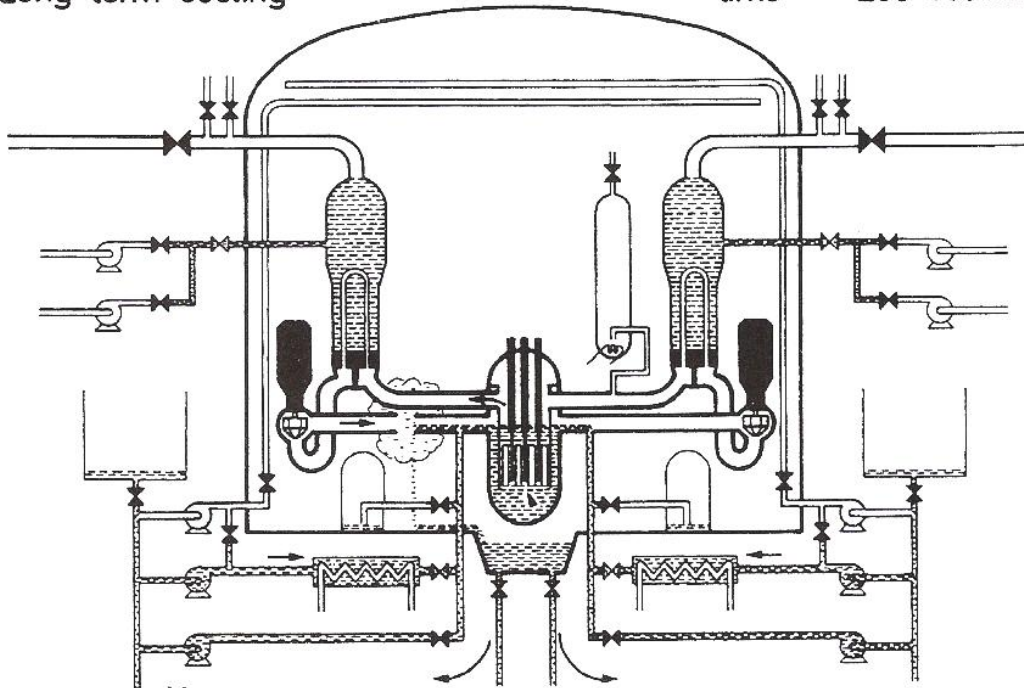
time = 40 - 250 seconds



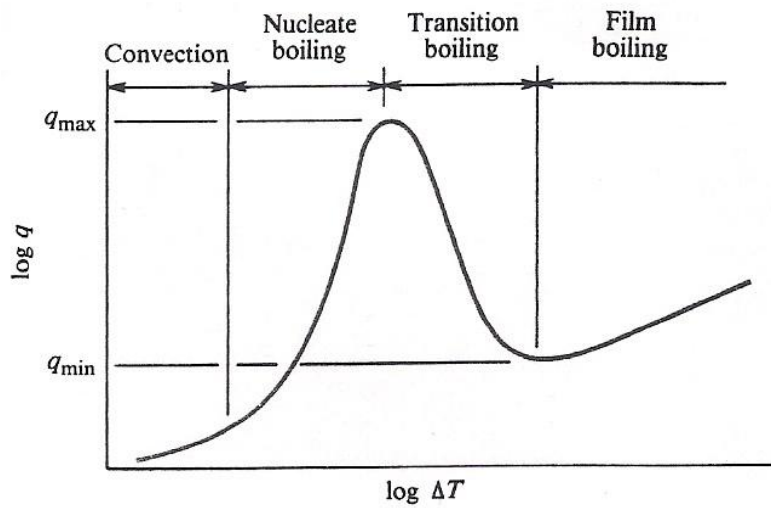
Σχήμα 2.7: LB LOCA, 4^η φάση (reflood phase) [8]

Long term cooling

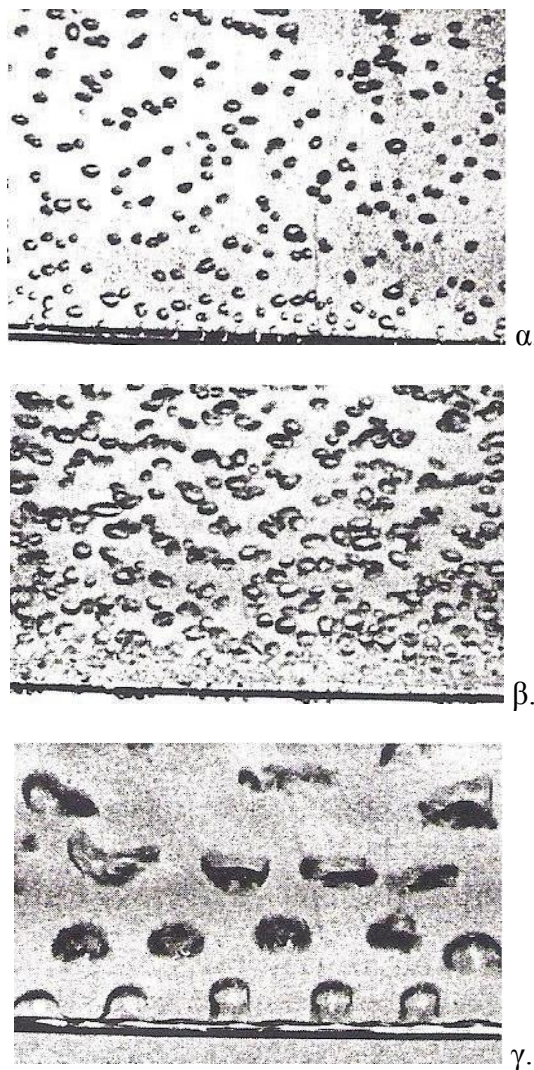
time = >250 seconds



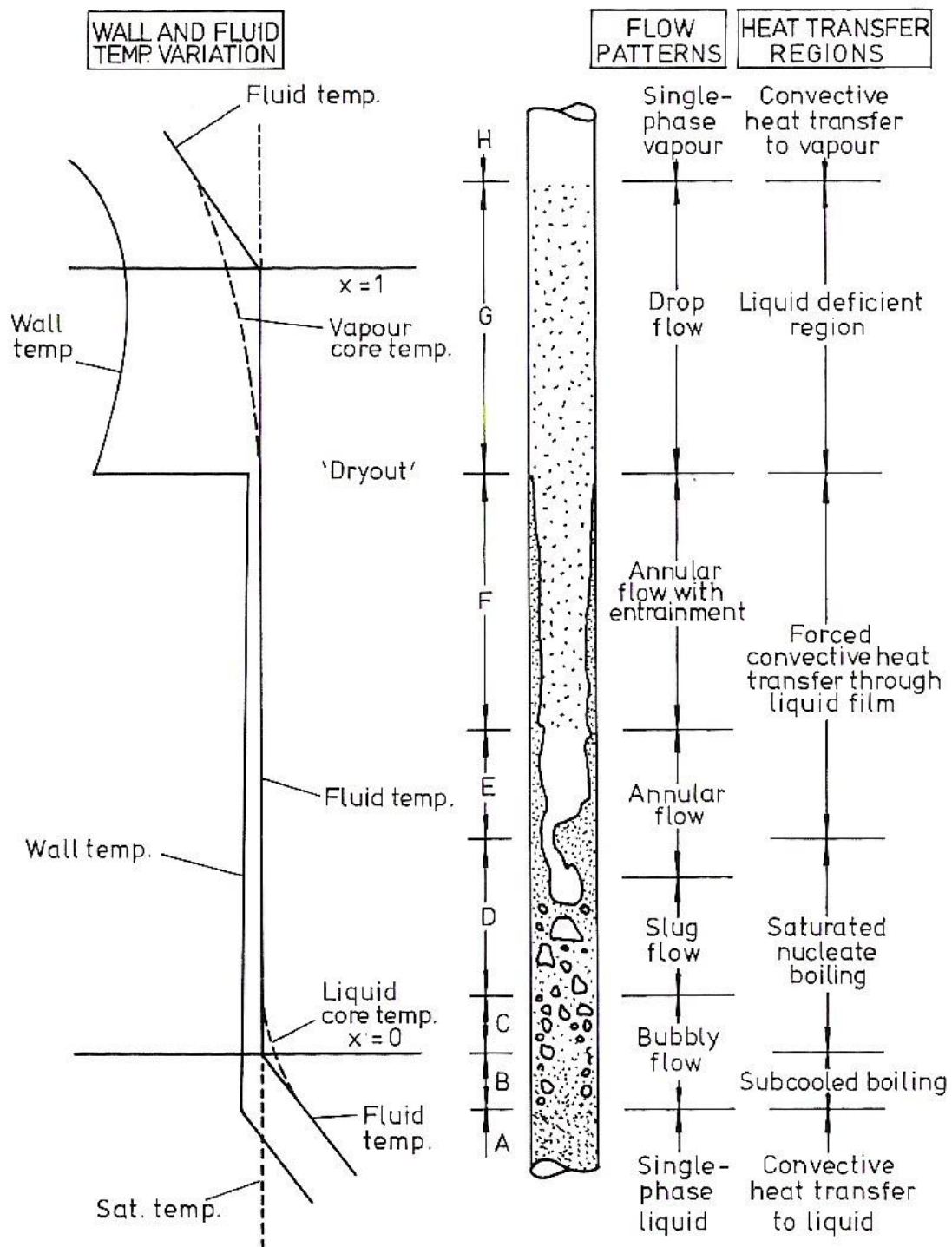
Σχήμα 2.8: LB LOCA, 5^η φάση (long-term phase) [8]



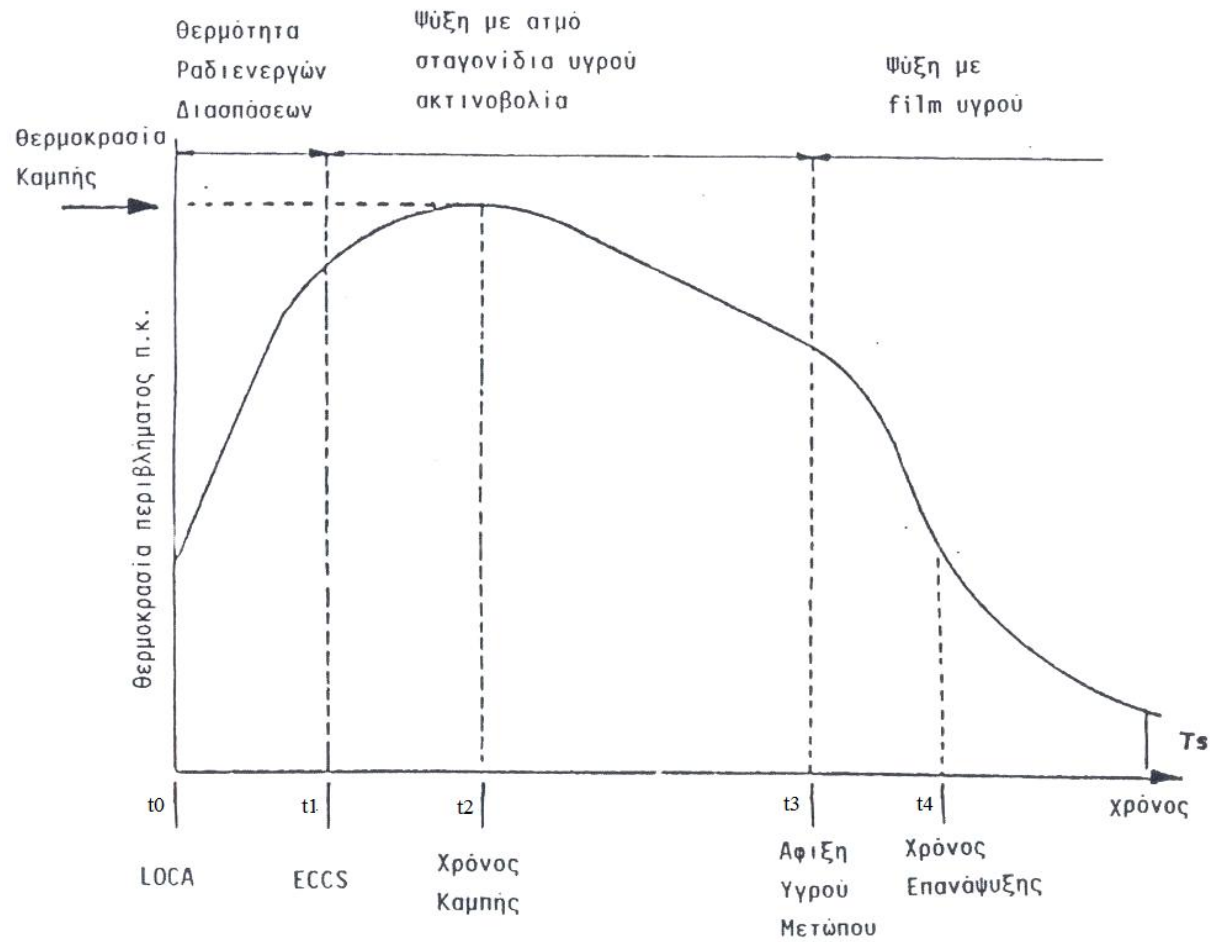
Σχήμα 2.9: Καμπύλη βρασμού νερού σε δεξαμενή (σε ατμοσφαιρική πίεση) [9]



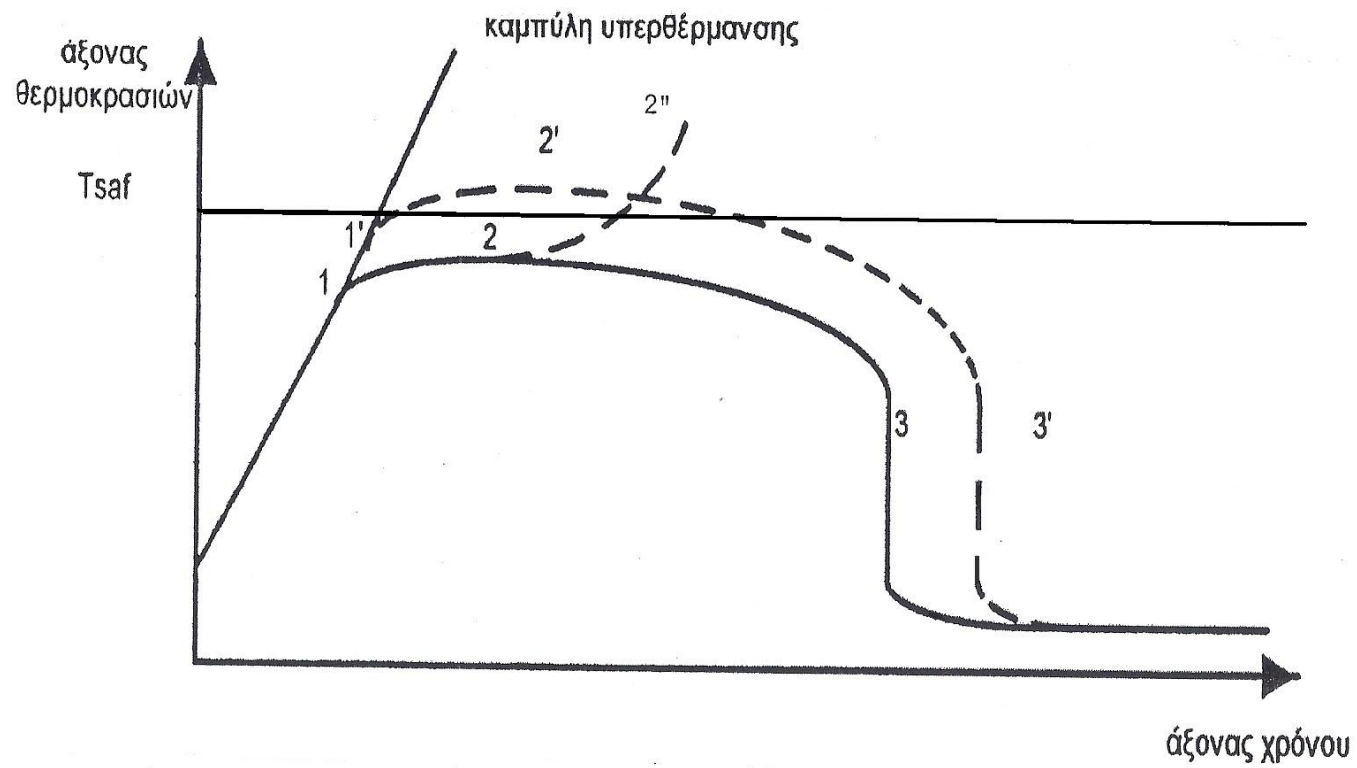
Σχήμα 2.10: Βρασμός δεξαμενής κορεσμένου ρευστού [19]



Σχήμα 2.11: Περιοχές μετάδοσης θερμότητας για ψυκτικό που ρέει σε κατακόρυφο κανάλι [9]



Σχήμα 2.12: Μεταβολή θερμοκρασίας περιβλήματος ράβδου πυρηνικού καυσίμου [6]



Σχήμα 2.13 : Θερμοκρασιακό χρονικό τυχαίο σημείο της ράβδου πυρηνικού καυσίμου. Παρουσιάζονται οι τρεις δυνατές περιπτώσεις έκβασης της επανάψυξης [2]

3. ΤΟ ΘΕΡΜΟΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΟΥ ΕΠΤ-ΕΜΠ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

3.	ΤΟ ΘΕΡΜΟΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΟΥ ΕΠΤ-ΕΜΠ.....	3
3.1	Το Θερμοϋδραυλικό Κύκλωμα και οι δυνατότητες του.....	3
3.2	Περιγραφή των κυρίων τμημάτων του ΘΥΚ	4
3.2.1	Το Δοχείο Βρασμού (heating tank)	4
3.2.2	Το Τμήμα Δοκιμών (test section)	4
3.2.3	Ο συμπυκνωτής (condenser)	6
3.2.4	Το Δοχείο Συγκέντρωσης (holding tank)	6
3.2.5	Η φυγόκεντρη αντλία (pump).....	6
3.3	Το υδραυλικό κύκλωμα του ΘΥΚ.....	6
3.3.1	Βασικοί κλάδοι	7
3.3.2	Δευτερεύοντες κλάδοι	7
3.4	Το ηλεκτρολογικό κύκλωμα.....	8
3.4.1	Το ηλεκτρολογικό κύκλωμα του δοχείου βρασμού	9
3.4.2	Το ηλεκτρολογικό κύκλωμα του τμήματος δοκιμών	9
3.4.3	Το ηλεκτρολογικό κύκλωμα του δοχείου συγκεντρώσεως (holding tank)	10
3.4.4	Το ηλεκτρολογικό κύκλωμα των κλάδων	10
3.5	Σταθμοί σημάτων και ροή μετρήσεων.....	11
3.6	Μεταφορά σημάτων από τους μεταλλάκτες προς τον Η/Υ	12
3.6.1	Οι μονάδες PCL-717 και PCL-718.....	13
3.6.2	Οι ενισχυτές - πολυπλέκτες (MUX), PCLD-889.....	14
3.6.3	Η τερματική μονάδα PCLD-780	15
3.6.4	Συνδεσμολογία	15
3.7	Το πρόγραμμα επιτήρησης, ελέγχου και συλλογής μετρήσεων του ΘΥΚ.....	17

3.8 Η διαδικασία επίτευξης συνθηκών για την πραγμα- τοποίηση πειράματος επανάψυξης.....	19
3.8.1 Προετοιμασία πειράματος σε πιέσεις 4 και 5 bar.....	20
3.8.2 Εκτέλεση πειράματος επανάψυξης σε πιέσεις 4 και 5 bar σε κατάσταση κορεσμού	21
3.8.3 Διαδικασία ψύξης του ΘΥΚ και θέση αυτού εκτός λειτουργίας.....	22
3.9 Περιγραφή της διαδικασίας επεξεργασίας των πειραμάτων επανάψυξης.....	23
3.9.1 Επεξεργασία ενός πειράματος επανάψυξης	24
3.9.2 Επεξεργασία ολόκληρου του πειραματικού υποσυνόλου επαναψύξεως ...	24

3. ΤΟ ΘΕΡΜΟΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΟΥ ΕΠΤ-ΕΜΠ

3.1 Το Θερμοϋδραυλικό Κύκλωμα και οι δυνατότητες του

Το θερμοϋδραυλικό κύκλωμα (ΘΥΚ) του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ) είναι ένα κλειστό κύκλωμα με εργαζόμενο μέσο το νερό, στο οποίο προσομοιώνονται φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνουν χώρα σε ένα τυπικό κανάλι ψύξης ενός ΠΑΙ. Στο ΘΥΚ μπορούν να μελετηθούν μόνιμα (steady state) και μεταβατικά (transient) φαινόμενα. Με τον όρο **μόνιμα** αναφερόμαστε στα φαινόμενα τα οποία σχετίζονται με την κανονική λειτουργία του αντιδραστήρα, ενώ με τον όρο **μεταβατικά** αναφερόμαστε σε χρονικά μεταβαλλόμενα φαινόμενα και κυρίως σε φαινόμενα τα οποία συμβαίνουν κατά τη διάρκεια ενός LOCA καθώς και κατά τη διαδικασία επανάψυξης της ράβδου πυρηνικού καυσίμου μετά την ενεργοποίηση του ECCS. Αναλυτικότερα τα πειράματα τα οποία μπορούν να διεξαχθούν στο ΘΥΚ είναι τα εξής:

- Πειράματα προσδιορισμού της κρίσιμης θερμικής ροής (CHF, Critical Heat Flux).
- Πειράματα για τη μελέτη της υδροδυναμικής και θερμοδυναμικής συμπεριφοράς πιπτόντων φιλμ (free falling films) τόσο κατά την κανονική λειτουργία όσο και κατά τη μεταβατική κατάσταση τυπικού καναλιού ΠΑΙ με ή χωρίς μετάδοση θερμότητας.
- Πειράματα προσδιορισμού του κλάσματος κενού (void fraction) τυπικού καναλιού ΠΑΙ.
- Πειράματα ημισταθερής (quasi-steady state) και μεταβατικής (transient) κατάστασης, κατά την επανάψυξη υπερθερμανθείσας ράβδου τυπικού καναλιού ΠΑΙ. Τα πειράματα αυτά μπορούν να διεξαχθούν τόσο με πίπτον φιλμ υγρού εκ των άνω (top spray cooling), όσο και με πλημμυρισμό εκ των κάτω (bottom flooding). Τα πειράματα επανάψυξης που έχουν πραγματοποιηθεί στο ΘΥΚ και τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους (πίεση, παροχή υγρού και ατμού, θερμοκρασία και υπόψυξη) αναφέρονται στον πίνακα 3.1.
- Πλήθος άλλων θερμοδυναμικών πειραμάτων με εργαζόμενο μέσο νερό

Το ΘΥΚ αποτελείται από πέντε κυρίως τμήματα: το Δοχείο Βρασμού, το Τμήμα Δοκιμών, το συμπυκνωτή, το δοχείο συγκεντρώσεως και τη φυγοκεντρική αντλία (σχήματα 3.1 και 3.2). Ολόκληρη η εγκατάσταση η οποία περιλαμβάνει εκτός από τα κύρια μέρη και πλήθος δευτερευόντων τμημάτων για βοηθητικές λειτουργίες,

είναι αναρτημένη σε ικρίωμα. Η λειτουργία του ΘΥΚ είναι πλήρως αυτοματοποιημένη με περισσότερους από 50 σταθμούς μέτρησης (παροχής, πίεσης, στάθμης, θερμοκρασίας κ.λ.π) οι οποίοι παρέχουν ανά πάσα στιγμή πληροφορίες για κάθε σημείο της εγκατάστασης.

Η μελέτη του ΘΥΚ, η εγκατάσταση του, ο εξοπλισμός του με μετρητικά όργανα καθώς και η επαλήθευση της σωστής λειτουργίας του, διεξήχθησαν στα πλαίσια της Διδακτορικής Διατριβής (ΔΔ) [1]. Στην εργασία αυτή περιλαμβάνονται και όλες οι λεπτομέρειες συγκρότησης του κυκλώματος αυτού. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε συνοπτικά το κύκλωμα και ορισμένες από τις συνιστώσες του, οι οποίες υπεισέρχονται στη μελέτη του φαινομένου της επανάψυξης.

3.2 Περιγραφή των κυρίων τμημάτων του ΘΥΚ

3.2.1 Το Δοχείο Βρασμού (heating tank)

Πρόκειται για έναν ηλεκτρικό ατμολέβητα, ο οποίος τροφοδοτεί το κύκλωμα με ατμό και νερό. Έχει καθαρό βάρος 425 kg και χωρητικότητα 0.635 m³. Δεδομένου ότι η κυκλοφορία του νερού στο κύκλωμα γίνεται λόγω της βαρύτητας (φυσική κυκλοφορία) το δοχείο είναι εγκατεστημένο στο υψηλότερο σημείο της εγκατάστασης. Το μέγιστο ύψος στο οποίο μπορεί να αναρτηθεί το Δοχείο Βρασμού περιορίζεται από το μέγιστο ύψος λειτουργίας της γερανογέφυρας του ΕΠΤ-ΕΜΠ, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την τοποθέτηση του. Η θέρμανση του νερού επιτυγχάνεται με τέσσερις αντιστάσεις συνολικής ισχύος 36 kW (δύο των 12 kW και δύο των 6 kW), τοποθετημένες στις δύο φλάντζες του δοχείου δεξιά και αριστερά, σε διάταξη χιαστί (απέναντι από την αντίσταση των 12 kW βρίσκεται αντίσταση 6 kW), ώστε να είναι εφικτή η κατά το δυνατό ομοιόμορφη θέρμανση του νερού που βρίσκεται στο δοχείο. Η μέγιστη πίεση λειτουργίας, σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι τα 10 bar. Για προστασία από πιέσεις άνω των 10 bar υπάρχουν ασφαλιστικές βαλβίδες, ενώ θερμοστοιχεία ελέγχουν τη θερμοκρασία νερού και ατμού σε κάθε χρονική στιγμή. Ο ατμός και το νερό εξέρχονται από το άνω και κάτω τμήμα του δοχείου αντίστοιχα και οδηγούνται στο Τμήμα Δοκιμών μέσω ξεχωριστών κλάδων όπως φαίνεται στα σχήματα 3.1 και 3.2.

3.2.2 Το Τμήμα Δοκιμών (test section)

Το Τμήμα Δοκιμών της εγκατάστασης προσομοιώνει μία ράβδο πυρηνικού καυσίμου και το αντίστοιχο υδραυλικό κανάλι (σχήμα 3.3). Η εισαγωγή της υγρής και της ατμώδους φάσης πραγματοποιείται μέσω μιας ιδιαίτερα προσεκτικά σχεδιασμένης κατασκευής με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Η κατασκευή αυτή η

οποία εφεξής θα αναφέρεται με τον όρο άνω κεφαλή, σκοπό έχει αφενός την εγκατάσταση της υγρής φάσης στην επιφάνεια της θερμαινόμενης ράβδου και αφετέρου την ομοιόμορφη κατανομή της ατμώδους φάσης περιμετρικά αυτής. Διαθέτει τέσσερις οπές μέσα από τις οποίες διέρχονται οι δύο φάσεις χωρίς η μία να διαταράσσει τη ροή της άλλης όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3. Για την επίτευξη ικανοποιητικής ανάμιξης των φάσεων χρησιμοποιείται ειδικός μεταλλικός πορώδης δακτύλιος.

Η προσομοίωση της ράβδου πυρηνικού καυσίμου και του αντίστοιχου καναλιού ψύξης επιτυγχάνεται από μια ηλεκτρικά θερμαινόμενη ράβδο η οποία έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Εξωτερικό περίβλημα κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα (316SS) διαμέτρου 15.875 mm
- Ομοαξονικά και μέσα στο ανωτέρω κυλινδρικό περίβλημα υπάρχει σωλήνας από το ίδιο υλικό με διάμετρο 12.700 mm
- Η θέρμανση της ράβδου γίνεται έμμεσα, μέσω θερμαντικής ταινίας από Ni-Cr, η οποία παρουσιάζει ηλεκτρική αντίσταση 0.9 Ω και βρίσκεται στο εσωτερικό του σωλήνα.
- Η θερμαντική ταινία είναι εγκιβωτισμένη σε σκόνη οξειδίου του μαγνησίου (MgO), το οποίο είναι θερμοανθεκτικό, θερμοαγώγιμο και έχει θερμοφυσικές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές του οξειδίου του ουρανίου (UO₂) το οποίο είναι το σύνηθες πυρηνικό καύσιμο των αντιδραστήρων ελαφρού ύδατος.
- Στο διάκενο μεταξύ περιβλήματος και σωλήνα, έχουν τοποθετηθεί 12 θερμοστοιχεία τύπου J (Iron – Constantan), η επαφή των οποίων πάνω στον εσωτερικό σωλήνα βρίσκεται περιμετρικά σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του άξονα του.
- Το σύνολο της παραπάνω κατασκευής περιβάλλεται από ειδικού τύπου πυρίμαχο γυαλί QVF εσωτερικής διαμέτρου 50 mm, μέσω του οποίου προσομοιώνεται το υδραυλικό κανάλι της ράβδου πυρηνικού καυσίμου.
- Το ολικό μήκος της ράβδου είναι 1676.4 mm, ενώ το θερμαινόμενο μήκος της είναι 1016 mm.

Στην έξοδο του τμήματος δοκιμών το διφασικό μείγμα διαχωρίζεται σε υγρή και ατμώδη φάση, μέσω κατάλληλης κατασκευής, η οποία εφεξής θα αναφέρεται με τον όρο κάτω κεφαλή. Στη συνέχεια, οι δύο φάσεις οδηγούνται χωριστά στο Δοχείο Συγκέντρωσης, η ατμώδης φάση διαμέσου του συμπυκνωτή, ενώ η υγρή φάση απευθείας, όπως φαίνεται στα σχήματα 3.1 και 3.2.

3.2.3 Ο συμπυκνωτής (condenser)

Ο συμπυκνωτής είναι ουσιαστικά ένας ομοαξονικός εναλλάκτης πέντε κλάδων σε συνδεσμολογία αντιρροής, διαμέσου του οποίου, ο ατμός που εξέρχεται από το Τμήμα Δοκιμών συμπυκνώνεται πριν επιστρέψει στο Δοχείο Συγκέντρωσης. Σημειώνεται ότι αν ο ατμός οδηγηθεί στο Δοχείο Συγκέντρωσης χωρίς να συμπυκνωθεί, θα επέλθει εξίσωση των πιέσεων των δοχείων βρασμού και συγκεντρώσεως και η κυκλοφορία του νερού στο ΘΥΚ θα σταματήσει.

3.2.4 Το Δοχείο Συγκέντρωσης (holding tank)

Στο Δοχείο Συγκέντρωσης συγκεντρώνεται το νερό μετά την έξοδο του από το Τμήμα Δοκιμών και το συμπύκνωμα του ατμού μετά την έξοδο του από το συμπυκνωτή. Το Δοχείο Συγκέντρωσης έχει καθαρό βάρος 200 kg και όγκο 0.200 m³.

3.2.5 Η φυγόκεντρη αντλία (pump)

Το νερό που συγκεντρώνεται στο Δοχείο Συγκέντρωσης επιστρέφει στο Δοχείο Βρασμού μέσω φυγόκεντρης αντλίας ισχύος 0.7 HP, παροχής 10 - 50 L/min και μανομετρικού ύψους 47 m.

3.3 Το υδραυλικό κύκλωμα του ΘΥΚ

Παρακάτω περιγράφονται οι βασικοί και οι δευτερεύοντες κλάδοι οποίοι συνδέουν τις βασικές συνιστώσες της εγκατάστασης μεταξύ τους. Οι βασικές συνιστώσες του ΘΥΚ καθώς και όλοι οι κλάδοι βασικοί και δευτερεύοντες απεικονίζονται στο σχήμα 3.1.

3.3.1 Βασικοί κλάδοι

Οι βασικοί κλάδοι του ΘΥΚ είναι οι εξής:

ΑΒ: για τροφοδοσία του τμήματος δοκιμών με νερό από το Δοχείο Βρασμού. Φέρει ψυκτικό μανδύα για ρύθμιση της υπόψυξης, θερμοαντική ταινία για εξισορρόπηση των θερμικών απωλειών κατά μήκος της σωλήνωσης, καθώς και ροόμετρο για μέτρηση της παροχής όγκου του νερού προς το Τμήμα Δοκιμών.

ΓΒ: για τροφοδοσία του τμήματος δοκιμών με ατμό. Φέρει θερμοαντική ταινία για εξισορρόπηση των θερμικών απωλειών κατά μήκος του σωλήνα προσαγωγής, καθώς και ροόμετρο για τη μέτρηση της παροχής όγκου του ατμού.

ΔΕ: για απομάκρυνση του νερού από το Τμήμα Δοκιμών και εισαγωγής του στο δοχείο συγκεντρώσεως

ΔΖ: για απομάκρυνση του ατμού από το Τμήμα Δοκιμών και προσαγωγής του στο συμπυκνωτή

3.3.2 Δευτερεύοντες κλάδοι

Οι δευτερεύοντες κλάδοι του ΘΥΚ είναι οι εξής:

ΑΒ: by pass κλάδος για την απευθείας τροφοδοσία του δοχείου συγκεντρώσεως με νερό παρακάμπτοντας το Τμήμα Δοκιμών

ΗΕ: by pass κλάδος μετά το μαγνητικό ροόμετρο για τροφοδοσία του δοχείου συγκεντρώσεως με νερό, παρακάμπτοντας το Τμήμα Δοκιμών. Χρησιμοποιείται στην προσομοίωση LOCA.

ΗΘ: για απομάστευση μετά το μαγνητικό ροόμετρο, για εργαστηριακή χρήση ασκήσεως φοιτητών

ΔΧ: για απομάκρυνση υγρού από το Τμήμα Δοκιμών.

ΚΓ: για τροφοδοσία του δοχείου βρασμού με υγρό από το Δοχείο Συγκέντρωσης με χρήση της αντλίας

ΚΕ: κλάδος by pass αντλίας

ΔΓ: για τροφοδοσία του δοχείου βρασμού από το δίκτυο ύδρευσης

ΛΜ: για παροχή του ψύχοντος νερού στο μανδύα ψύξης (δευτερεύον κύκλωμα μανδύα)

ΝΞ: για απομάκρυνση νερού από το μανδύα ψύξης προς την αποχέτευση

ΑΞ: για απομάκρυνση νερού από το Δοχείο Βρασμού προς την αποχέτευση

ΟΕ: για επιστροφή του υγρού από το συμπυκνωτή στο δοχείο συγκεντρώσεως

ΛΠ: για τροφοδοσία συμπυκνωτή με νερό το οποίο ψύχει τον ατμό από το δίκτυο ύδρευσης

ΡΞ: για απομάκρυνση του ψύχοντος νερού από το συμπυκνωτή προς την αποχέτευση

ΓΣ: για σύνδεση με τη χειροπρέσσα για υδραυλική συμπίεση του ΘΥΚ, για δοκιμές στεγανότητας

ΓΥ: για χειροκίνητη εξαέρωση του δοχείου βρασμού. Χρησιμοποιείται για αύξηση της πίεσης στο Δοχείο Βρασμού

ΓΦ: κλάδος ατμοπαγίδας. Γίνεται αυτόματη εξαέρωση με χρήση θερμοστατικής παγίδας χωρίς απώλεια ατμού.

Όλοι οι κλάδοι φέρουν διάφορες βαλβίδες είτε σφαιρικές, οι οποίες ασφαλίζουν χειροκίνητα τον κλάδο στον οποίο βρίσκονται, είτε ρυθμιστικές οι οποίες ρυθμίζουν την παροχή. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις σωληνοειδείς βαλβίδες SV1, SV2, SV3 και SV4 που φέρουν αντίστοιχα οι κλάδοι:

1. προσαγωγής του ατμού από το Δοχείο Βρασμού στο Τμήμα Δοκιμών
2. προσαγωγής του υγρού από το δοχείο ατμού στο Τμήμα Δοκιμών
3. απαγωγής του υγρού από το Τμήμα Δοκιμών προς το Δοχείο Συγκέντρωσης
4. κλάδος by-pass μετά το MFM προς το Δοχείο Συγκέντρωσης

Ο σωστός χειρισμός των βαλβίδων αυτών επιτρέπει την εύκολη προσομοίωση του LOCA και την έναρξη της επανάψυξης, χωρίς μεγάλη δυσκολία όσον αφορά τη σταθεροποίηση της παροχής του νερού η οποία αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ορθότητα των πειραματικών μα αποτελεσμάτων.

3.4 Το ηλεκτρολογικό κύκλωμα

Το ηλεκτρολογικό κύκλωμα του ΘΥΚ σκοπό έχει την τροφοδοσία της εγκαταστάσεως με ηλεκτρικό ρεύμα καθώς και τον αυτοματοποιημένο έλεγχο της λειτουργίας της.

3.4.1 Το ηλεκτρολογικό κύκλωμα του δοχείου βρασμού

Το Δοχείο Βρασμού φέρει 4 ηλεκτρικές αντιστάσεις (δύο των 12 kW και δύο των 6 kW) οι οποίες τροφοδοτούνται με τριφασικό ρεύμα. Η τροφοδοσία ελέγχεται με ηλεκτρονόμους (ρελέ), τα πηνία ελέγχου των οποίων τροφοδοτούνται με 24 VDC. Οι αντιστάσεις ελέγχονται χειροκίνητα από διακόπτη on-off, και αυτόματα μέσω διαφόρων αυτοματισμών, οι οποίοι είναι οι εξής:

- Ειδικός ελεγκτής (controller) μέσω του οποίου προρυθμίζεται η επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας του δοχείου βρασμού. Η θερμοκρασία του νερού στο Δοχείο Βρασμού μετράται από θερμοστοιχείο τύπου K το οποίο είναι τοποθετημένο στον πυθμένα του δοχείου. Όταν η θερμοκρασία φθάσει τη θερμοκρασία που έχουμε επιλέξει, ο controller διακόπτει την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στις αντιστάσεις. Μανόμετρο επαφών το οποίο διακόπτει την τροφοδοσία των αντιστάσεων του δοχείου βρασμού, αν η πίεση σε αυτό υπερβεί την πίεση ασφαλείας (η οποία έχει επιλεγθεί στα 7.66 bar).
- Αυτόματος ελεγκτής στάθμης, ο οποίος φέρει δύο ιχνηλάτες αγωγιμότητας (μπουζί) και παρακολουθεί την ανώτατη και κατώτατη στάθμη του υγρού στο δοχείο. Πρέπει να τονιστεί αφενός ότι οι ηλεκτρικές αντιστάσεις δεν πρέπει να αποκαλυφθούν κατά τη λειτουργία τους, διότι μπορεί να καταστραφούν λόγω υπερθέρμανσης (η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία είναι πολύ ασθενέστερη από αυτήν λόγω συναγωγής), αφετέρου ότι η στάθμη του νερού στο Δοχείο Βρασμού θα πρέπει να παραμένει κάτω από ένα όριο λόγω του απαιτούμενου όγκου ατμοπαραγωγής.

3.4.2 Το ηλεκτρολογικό κύκλωμα του τμήματος δοκιμών

Η ράβδος τροφοδοτείται με ηλεκτρική ισχύ, μέσω ηλεκτρικού κυκλώματος έως ότου φθάσει σε θερμοκρασία της τάξης των 550 °C. Κατ' αυτόν τον τρόπο προσομοιώνεται η θέρμανση της ράβδου πυρηνικού καυσίμου, λόγω παραμένουσας θερμότητας, μετά από LOCA. Πρώτη μέριμνα είναι ο έλεγχος της θερμοκρασίας της ράβδου, ώστε να αποφευχθούν τυχόν κυρτώσεις και ραγίσματα που θα την καταστρέψουν. Στα άκρα της αντίστασης εφαρμόζεται τάση 45 VAC. Με την εφαρμογή της τάσης αυτής η ράβδος θερμαίνεται ομοιόμορφα. Η τροφοδοσία της ράβδου ελέγχεται από θερμοστάτη ο οποίος ελέγχει τη θερμοκρασία που μετρά το θερμοστοιχείο TC11. Πριν την εκτέλεση του πειράματος μας έχουμε προρυθμίσει τη μέγιστη θερμοκρασία στην οποία θέλουμε να φθάσει η ράβδος. Μόλις η

θερμοκρασία που μετράται από το θερμοστοιχείο TC11 υπερβεί τη θερμοκρασία που έχουμε επιλέξει, ενεργοποιείται ο διακόπτης thyristor και η τροφοδοσία της ράβδου διακόπτεται.

Ο δεύτερος εξίσου σημαντικός αυτοματισμός του τμήματος δοκιμών έχει σκοπό, την προστασία των δακτυλίων (O-rings), που χρησιμοποιούνται για στεγάνωση των σημείων εξόδου της ράβδου από την άνω και κάτω κεφαλή αντίστοιχα. Οι δακτύλιοι αυτοί είναι ευαίσθητοι στην αύξηση της θερμοκρασίας η οποία θα πρέπει να παραμένει κάτω από το όριο ασφαλείας των 200 °C. Για το σκοπό αυτόν χρησιμοποιούνται δύο θερμοστάτες που ελέγχουν τη θερμοκρασία που μετρούν τα θερμοστοιχεία TC01 και TC12, τα οποία βρίσκονται στα άκρα της ράβδου και διακόπτουν την τροφοδοσία της μόλις η μετρούμενη θερμοκρασία ξεπεράσει τους 200°C.

3.4.3 Το ηλεκτρολογικό κύκλωμα του δοχείου συγκεντρώσεως (holding tank)

Η στάθμη του δοχείου αυτού ελέγχεται από αυτόματο ελεγκτή στάθμης, ο οποίος φέρει δύο ιχνηλάτες αγωγιμότητας. Όταν η στάθμη του νερού φθάσει τον άνω ιχνηλάτη, κλείνει ο διακόπτης και ενεργοποιείται η αντλία η οποία μεταφέρει νερό στο Δοχείο Βρασμού, έως ότου πέσει η στάθμη σε ασφαλή επίπεδα. Όταν η στάθμη πέσει χαμηλότερα από τον κάτω ιχνηλάτη, ο διακόπτης ανοίγει και δίνεται εντολή να σταματήσει η αντλία ώστε να προστατευθεί από πιθανή εν κενώ λειτουργία. Η λειτουργία της αντλίας ελέγχεται και από χειροκίνητο διακόπτη on-off. Ο χειροκίνητος χειρισμός αυτής δεν είναι εφικτός μόνο σε δύο περιπτώσεις. Πρώτον όταν έχει ξεπεραστεί η στάθμη του άνω ιχνηλάτη και δεύτερον όταν η στάθμη βρίσκεται κάτω από το επίπεδο του κάτω ιχνηλάτη.

3.4.4 Το ηλεκτρολογικό κύκλωμα των κλάδων

Υπάρχουν διακόπτες on/off για τον έλεγχο των τεσσάρων σωληνοειδών βαλβίδων, οι οποίες για λόγους ασφαλείας έχουν επιλεγεί να είναι τύπου normally closed. Αυτό σημαίνει ότι όταν δεν τροφοδοτούνται με ηλεκτρικό ρεύμα βρίσκονται στη θέση off. Μερικές από αυτές θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση LOCA. Ηλεκτρική τροφοδοσία απαιτείται επίσης για τη λειτουργία των μαγνητικών ροόμετρων νερού και ατμού και των μεταλλακτών πίεσης στο Δοχείο Βρασμού, στην είσοδο και την έξοδο του τμήματος δοκιμών.

Το κύκλωμα με τη συμβολή όλων των παραπάνω αυτοματισμών είναι ασφαλές έναντι οποιασδήποτε πιθανής δυσλειτουργίας. Ακόμα και αν υπάρξει διακοπή της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος από το δίκτυο, το ΘΥΚ θα τροφοδοτηθεί αμέσως από γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος που υπάρχει στο εργαστήριο έτσι ώστε να τεθεί εκτός λειτουργίας με ασφάλεια.

3.5 Σταθμοί σημάτων και ροή μετρήσεων

Για την πλήρη εποπτεία της λειτουργίας του ΘΥΚ, υπάρχουν εγκατεστημένοι σταθμοί μέτρησης πλήρως αυτοματοποιημένοι και απευθείας συνδεδεμένοι με Η/Υ. Οι σταθμοί μέτρησης που υπάρχουν στο ΘΥΚ είναι οι εξής:

- 10 θερμοστοιχεία τύπου K (Chromel-Alumel) τοποθετημένα σε διάφορες θέσεις και τα οποία δίνουν τιμές θερμοκρασίας τόσο της υγρής όσο και της ατμώδους φάσης.
- 12 θερμοστοιχεία τύπου J (Iron-Constantan), τα οποία είναι τοποθετημένα στη ράβδο του τμήματος δοκιμών
- 2 μαγνητικά ροόμετρα για απευθείας μέτρησης της παροχής όγκου του υγρού προς και από το Τμήμα Δοκιμών.
- 3 μεταλλάκτες πίεσης PT1, PT2, PT3 οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο Δοχείο Βρασμού, στην είσοδο και την έξοδο του τμήματος δοκιμών αντίστοιχα, για μέτρηση της πίεσης.
- 1 μανόμετρο επαφών στο Δοχείο Βρασμού για έλεγχο έναντι υπερπίεσεως
- 8 μανόμετρα τύπου Bourdon σε διάφορες θέσεις του ΘΥΚ
- 4 ροόμετρα πλωτήρος για μέτρηση της παροχής του υγρού
- 2 ροόμετρα πλωτήρος για μέτρηση της παροχής του ατμού στην είσοδο και στην έξοδο του τμήματος δοκιμών¹
- 26 σφαιρικές και 12 ρυθμιστικές βαλβίδες, για ρύθμιση της παροχής στα επιθυμητά επίπεδα
- 4 ηλεκτρικοί σταθμοδείκτες

¹ Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι το ροόμετρο στον κλάδο εισόδου του ατμού στο ΤΔ έχει τη δυνατότητα αναλογικού σήματος εξόδου 4 – 20 mA.

- 2 οπτικοί σταθμοδείκτες
- 4 σωληνοειδείς βαλβίδες
- 16 σήματα δισταθούς καταστάσεως εξαρτημάτων του ΘΥΚ

Τα σήματα επιλεγμένων μεταλλακτών οδηγούνται στον υπολογιστή για επιτήρηση της λειτουργίας της εγκατάστασης ανά πάσα στιγμή και για να υπάρχει δυνατότητα συγκέντρωσης και καταγραφής πειραματικών δεδομένων. Οι σταθμοί που επικοινωνούν με τον Η/Υ είναι οι εξής:

- τα 8 θερμοστοιχεία τύπου Κ που μετρούν τη θερμοκρασία του ατμού και του υγρού στο Δοχείο Βρασμού, του ατμού και του υγρού στην είσοδο και έξοδο του τμήματος δοκιμών, του υγρού στο δοχείο συγκεντρώσεως και του ψύχοντος νερού στην έξοδο του συμπυκνωτή.
- τα 10 θερμοστοιχεία τύπου J τα οποία μετρούν τη θερμοκρασία κατά μήκος της ράβδου του τμήματος δοκιμών
- το σήμα από τα 2 μαγνητικά ροόμετρα
- το σήμα από το ροόμετρο εισόδου ατμού στο ΤΔ
- το σήμα από τους 3 μεταλλάκτες πίεσης, PT1, PT2, PT3.
- τα σήματα δισταθούς καταστάσεως

3.6 Μεταφορά σημάτων από τους μεταλλάκτες προς τον Η/Υ

Τα μετρητικά όργανα που είναι μεταλλάκτες, παράγουν σήμα τάσης ή έντασης το οποίο στέλνεται στον Η/Υ για καταγραφή και επεξεργασία. Για να αναγνωστούν τα σήματα αυτά από τον υπολογιστή πρέπει πρώτα να ψηφιοποιηθούν. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αναλογοψηφιακή μετατροπή (analog to digital conversion) και πραγματοποιείται από κατάλληλη μονάδα προσαρμογής σήματος, που συνδέεται στο bus του Η/Υ. Η μονάδα αυτή ονομάζεται αναλογοψηφιακός μετατροπέας (Analog to Digital Converter) και εφεξής θα αναφέρεται ως ADC. Για την περίπτωση των θερμοστοιχείων, όπου το σήμα εξόδου είναι της τάξεως των μV , απαιτείται κατάλληλη ενίσχυση του, προτού οδηγηθεί στον ADC ο οποίος λειτουργεί στην περιοχή $0 \sim 10 \text{ V}$. Αυτό γίνεται από τους δύο εξωτερικούς ενισχυτές - πολυπλέκτες (amplifiers - multiplexers, MUX-A, MUX-B). Οι μονάδες προσαρμογής σήματος

που είναι εγκατεστημένες στο ΘΥΚ είναι της εταιρίας Advantech Co.Ltd της σειράς PC-LAB και είναι οι παρακάτω:

- δύο αναλογοψηφιακοί μετατροπείς με κωδικό PCL-717 και PCL-718
- Δύο μονάδες ενισχυτή-πολυπλέκτη PCLD-889
- Τερματική πλακέτα PCLD-780

Συνοπτική περιγραφή των μονάδων αυτών και της συνδεσμολογία τους, γίνεται στις παραγράφους που ακολουθούν. Για περισσότερες λεπτομέρειες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη ΔΔ [1].

3.6.1 Οι μονάδες PCL-717 και PCL-718

Οι δύο μονάδες PCL-717 και PCL-718 συνδέονται απ' ευθείας στο δίαυλο (bus) του H/Y, μέσω ειδικού connector (ISA BUS) στη μητρική πλακέτα, από όπου και τροφοδοτούνται με τάση +5 Volt. Κάθε μονάδα διαθέτει 8 κανάλια δηλαδή έχει τη δυνατότητα να ψηφιοποιήσει 8 αναλογικά διπολικά σήματα (διαφορική σύνδεση) ή 16 μονοπολικά σήματα (απλή σύνδεση) στην περιοχή 0 έως 10 Volt. Η διακριτική ικανότητα του ADC είναι 12 δυαδικά ψηφία ή σε μονάδες τάσεως $10V/4096=2.44$ mV, δηλαδή η μικρότερη μεταβολή τάσεως που μπορεί να ψηφιοποιήσει ο ADC είναι 2.44 mV. Η μετατροπή του αναλογικού σήματος που φθάνει στον ADC σε ψηφιακό γίνεται μέσω της σχέσης:

$$d=(2^v-1)(V_s-V_{\min})/(V_{\max}-V_{\min}) \quad (3.1)$$

Όπου

V_{\max} : η μέγιστη τάση που μπορεί να δεχθεί ο ADC

V_{\min} : η ελάχιστη τάση που μπορεί να δεχθεί ο ADC

V_s : η τάση του σήματος εισόδου

d : η ψηφιακή πληροφορία

Για την ψηφιοποίηση χρησιμοποιείται η μέθοδος των διαδοχικών προσεγγίσεων². Η ακρίβεια και η γραμμικότητα της μετατροπής είναι 1 bit, ενώ ο εσωτερικός ρυθμοδότης/χρονόμετρο της μονάδας 1 MHz.

3.6.2 Οι ενισχυτές - πολυπλέκτες (MUX), PCLD-889

Στις δύο μονάδες PCLD-889 οδηγούνται τα σήματα από τα θερμοστοιχεία για να υποστούν κατάλληλη ενίσχυση πριν φθάσουν στον ADC. Επειδή στο ΘΥΚ χρησιμοποιούνται 2 τύποι θερμοστοιχείων (K και J) οι οποίοι έχουν διαφορετική θερμοηλεκτρική σταθερά, επιβάλλεται η χρησιμοποίηση δύο διαφορετικών ενισχυτών - πολυπλεκτών (MUX-A, MUX-B) με διαφορετικό κέρδος ο καθένας. Έτσι τα θερμοστοιχεία τύπου K οδηγούνται στο MUX-A ενώ τα θερμοστοιχεία τύπου J στο MUX-B.

Όσον αφορά τα θερμοστοιχεία, η θερμοηλεκτρική σταθερά των τύπου K είναι 41 $\mu\text{V/K}$, ενώ των τύπου J, 52.7 $\mu\text{V/K}$. Επειδή τα θερμοστοιχεία τύπου J είναι τοποθετημένα στη ράβδο οι θερμοκρασίες που μετρούν δεν ξεπερνούν τους 900 $^{\circ}\text{C}$, ενώ εκείνες που μετρούν τα θερμοστοιχεία τύπου K, τα οποία βρίσκονται σε διάφορες θέσεις του ΘΥΚ, δεν ξεπερνούν τους 200 $^{\circ}\text{C}$. Συνεπώς οι τάσεις που θα δίνουν τα θερμοστοιχεία τύπου J δεν θα ξεπερνούν τα 47,4 mV ενώ αυτές που θα δίνουν τα θερμοστοιχεία τύπου K, τα 8.2 mV. Στο σημείο αυτό να επισημάνουμε ότι για την εκτίμηση της θερμοκρασίας από τη μετρούμενη θερμοηλεκτρική στάθμη στο ΘΥΚ χρησιμοποιούμε ρουτίνες μετατροπής με τον ακριβή αλγόριθμο βάσει πολωνύμου 15^{ου} βαθμού. Η θερμοηλεκτρική σταθερά k στην περιοχή 0 – 100 $^{\circ}\text{C}$ χρησιμοποιείται προκειμένου να γίνει μία πρώτη προσέγγιση του αναμενόμενου εύρους τάσης ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη ενίσχυση. Όπως έχει αναφερθεί, ο ADC λειτουργεί στην περιοχή 0-10V, με διακριτική ικανότητα 2.44 mV. Άρα λοιπόν τα αναλογικά σήματα που φθάνουν από τα θερμοστοιχεία τύπου K στον ADC πρέπει να έχουν κέρδος ενίσχυσης 1000 ενώ τα σήματα από τα θερμοστοιχεία τύπου J κέρδος ενίσχυσης 200, ώστε να γίνεται σωστή εκμετάλλευση του εύρους τάσεως εισόδου του ADC. Λόγω λοιπόν του ότι σε κάθε ένα ενισχυτή μόνο μία ρύθμιση κέρδους είναι δυνατή, καθίσταται απαραίτητη η χρήση δύο ενισχυτών.

Συνοπτικά, σκοπός των ενισχυτών – πολυπλεκτών είναι:

- η ενίσχυση των αναλογικών σημάτων που παρέχονται από τα θερμοστοιχεία,
- η πλέξη των σημάτων, εφόσον τα κανάλια του ADC δεν επαρκούν,

² Για περισσότερες πληροφορίες για τη συγκεκριμένη μέθοδο προτείνεται η ακόλουθη βιβλιογραφία [5].

- η αντιστάθμιση της θερμοηλεκτρικής τάσης της επαφής αναφοράς με την αξιοποίηση του ενσωματωμένου στους MUX thermistor.

Κάθε MUX προωθεί προς τον ADC δύο πληροφορίες, δεσμεύοντας δύο αναλογικά κανάλια εισόδου του. Η πρώτη πληροφορία αφορά τις ενισχυμένες αλλά μη αντισταθμισμένες τάσεις των θερμοστοιχείων, ενώ η δεύτερη πληροφορία τη θερμοηλεκτρική τάση της επαφής αναφοράς. Μόλις τα δύο σήματα φθάσουν στον ADC και αφού ψηφιοποιηθούν προστίθενται μεταξύ τους ώστε να επιτευχθεί η αντιστάθμιση. Εξαιρέση αποτελούν τα δύο θερμοστοιχεία τύπου K που μετρούν τη θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του νερού ψύξης στο συμπυκνωτή. Σε αυτά η αντιστάθμιση των σημάτων πραγματοποιείται με φορητό ηλεκτρονικό σημείο πάγου. Αυτό συμβαίνει διότι η θερμοκρασία που μετρούν τα θερμοστοιχεία αυτά είναι λίγο μικρότερη από τη θερμοκρασία αντιστάθμισης ηλεκτρονικού σημείου πάγου του MUX.

Το σύστημα ενισχυτή - πολυπλέκτη είναι τοποθετημένο εντός μεταλλικού κιβωτίου τύπου PCLD-ENC. Σκοπός του κιβωτίου αυτού είναι η φυσική προστασία της κάρτας από την επίδραση του χώρου στον οποίο είναι τοποθετημένη (προστασία από σκόνη, υγρασία κ.τ.λ.). Παράλληλα δρα ως ισοθερμοκρασιακό κιβώτιο, συμβάλλοντας στη σωστή αντιστάθμιση της επαφής αναφοράς και ως κλωβός Faraday για τη μείωση του ηλεκτρονικού θορύβου.

3.6.3 Η τερματική μονάδα PCLD-780

Για τη σύνδεση των μεταλλακτών με τους ADC χρησιμοποιούμε την κάρτα συνδεσμολογίας PCLD-780. Στην κάρτα αυτή φθάνουν τα σήματα των τριών μεταλλακτών πίεσης, των δύο μαγνητικών ροόμετρων και του ροομέτρου ατμού. Επιπλέον με την κάρτα αυτή επιτυγχάνουμε εύκολη σύνδεση - αποσύνδεση μεταλλακτών χωρίς κίνδυνο φθοράς του ADC.

3.6.4 Συνδεσμολογία

Στον ADC PCL-718 είναι συνδεδεμένοι οι εξής μεταλλάκτες, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4:

- κανάλι 0: σήματα από θερμοστοιχεία τύπου K (MUX-A)
- κανάλι 1: ηλεκτρονικό σημείο πάγου MUX-A
- κανάλι 2: σήματα από θερμοστοιχεία τύπου J (MUX-B)

- κανάλι 3: ηλεκτρονικό σημείου πάγου MUX-B
- κανάλι 4: μαγνητικό ροόμετρο Endress-Hauser1 (είσοδος τμήματος δοκιμών)
- κανάλι 5: μεταλλάκτης πίεσης PT1
- κανάλι 6: μεταλλάκτης πίεσης PT2
- κανάλι 7: μεταλλάκτης πίεσης PT3

Στον ADC PCL-717 είναι συνδεδεμένοι οι εξής μεταλλάκτες

- κανάλι 0: ροόμετρο ατμού (είσοδος τμήματος δοκιμών)
- κανάλι 1: μαγνητικό ροόμετρο Endress-Hauser2 (έξοδος τμήματος δοκιμών)
- κανάλι 2: -
- κανάλι 3: -
- κανάλι 4: -
- κανάλι 5: -
- κανάλι 6: -
- κανάλι 7: -

Οι μονάδες PCL 717 & 718 έχουν τη δυνατότητα ψηφιακής εισόδου και εξόδου αλλά και αναλογικής εξόδου δηλαδή μπορούν να λειτουργήσουν ως ψηφιοαναλογικοί μετατροπείς. Η ψηφιακή είσοδος της μονάδος PCL 717 δεσμεύεται για την ανίχνευση της δισταθούς κατάστασης των σωληνοειδών βαλβίδων και της αντλίας του ΘΥΚ. Για το σκοπό αυτό έχει κατασκευαστεί ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο αντιστοιχίζει την κατάσταση λειτουργίας ON ή OFF της κάθε συσκευής με ψηφιακή πληροφορία. Αναλυτικότερα:

- Στην περίπτωση που ο διακόπτης είναι ανοιχτός, δηλαδή η συσκευή δεν τροφοδοτείται με ρεύμα, παρέχεται σήμα TTL-HIGH (+5 VDC) στην ψηφιακή είσοδο του ADC το οποίο διαμορφώνει την ψηφιακή τιμή 1.
- Στην περίπτωση που ο διακόπτης είναι κλειστός, δηλαδή η συσκευή τροφοδοτείται με ρεύμα, παρέχεται σήμα TTL-LOW (0 VDC) στην ψηφιακή είσοδο του ADC το οποίο διαμορφώνει την ψηφιακή τιμή 0.

Για περαιτέρω λεπτομέρειες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη ΔΔ [1] και στις ΔΕ [26, 27, 28,], και [29].

3.7 Το πρόγραμμα επιτήρησης, ελέγχου και συλλογής μετρήσεων του ΘΥΚ

Το πρόγραμμα RIG είναι γραμμένο σε γλώσσα FORTRAN 77 και για την επικοινωνία με τις μονάδες προσαρμογής σήματος καλεί υπορουτίνες γραμμένες σε γλώσσα ASSEMBLY. Το πρόγραμμα εκτελείται σε Η/Υ τύπου PC, συχνότητας 40 MHz και δίνει τόσο τη δυνατότητα εύκολης επιτήρησης όλων των κρίσιμων μεγεθών του ΘΥΚ όσο και τη δυνατότητα καταγραφής τους σε αρχείο για περαιτέρω επεξεργασία.

Το RIG σαρώνει τους σταθμούς μέτρησης και ελέγχου του ΘΥΚ με ταχύτητα δειγματοληψίας η οποία επιλέγεται από το χρήστη και εμφανίζει την κατάσταση ολόκληρου του κυκλώματος σε έγχρωμο φιλικό προς το χρήστη μιμικό διάγραμμα στην οθόνη του Η/Υ όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.

Με την εκκίνηση του προγράμματος εμφανίζεται στην οθόνη του Η/Υ το βασικό μενού με τις εξής επιλογές:

- 1: εμφάνιση του μιμικού διαγράμματος στο display
- 9: assist, είσοδος στο βοηθητικό μενού ώστε ο χρήστης να δώσει νέες τιμές σε κάποιες παραμέτρους
- 0: exit, έξοδος από το πρόγραμμα

Επιλέγοντας τον αριθμό 1 εμφανίζεται στην οθόνη το μιμικό διάγραμμα του σχήματος 3.5. Η πρώτη γραμμή εμφανίζει το είδος της λειτουργίας στην οποία βρίσκεται το ΘΥΚ, κανονική (Normal Operation) ή επανάβυξη (Rewetting Condition). Επίσης διακρίνονται η ώρα και ο χρόνος που έχει παρέλθει από την ενεργοποίηση του RIG. Στο μιμικό διάγραμμα απεικονίζονται οι κυριότερες συνιστώσες του ΘΥΚ:

1. Δοχείο Βρασμού (heating tank)

Απεικονίζονται οι τέσσερις αντιστάσεις, οι δύο των 12 kW με μεγάλη οριζόντια γραμμή και οι δύο των 6 kW με μικρότερες γραμμές. Όταν το χρώμα τους είναι κόκκινο σημαίνει ότι τροφοδοτούνται με ηλεκτρικό ρεύμα ενώ όταν είναι μαύρο σημαίνει ότι δεν τροφοδοτούνται. Διακρίνονται επίσης η θερμοκρασία της

υγρής και η θερμοκρασία και η πίεση της αέριας φάσης. Η θερμοκρασία που αναγράφεται σε παρένθεση είναι η θερμοκρασία κορεσμού για την εκάστοτε πίεση του δοχείου. Μέσα στην αγκύλη τα σύμβολα $\leq, =, >$ δηλώνουν υπόψυκτη, κορεσμένη και υπέρθερμη κατάσταση αντίστοιχα.

2. Τμήμα Δοκιμών (test section)

Μέσω του μιμικού διαγράμματος λαμβάνονται πληροφορίες για τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου της υγρής και της ατμώδους φάσης και των 10 θερμοστοιχείων κατά μήκος της ράβδου. Επίσης αναγράφεται η πίεση στην είσοδο και στην έξοδο του τμήματος δοκιμών, η υπόψυξη και η μέση τιμή της θερμοκρασίας των 10 θερμοστοιχείων.

Ο χρωματικός κώδικας για την κατάσταση της ράβδου έχει ως εξής:

- -κόκκινο: ηλεκτρική τροφοδοσία (ON)
- -μαύρο : απουσία ηλεκτρ. τροφοδοσίας (OFF)

Χρωματικός κώδικας για την κατάσταση της υγρής φάσης στο σωλήνα του τμήματος δοκιμών:

- - μπλε εσωτερικός δακτύλιος : ροή υγρού
- - μωβ εσωτερικός δακτύλιος : ροή διφασικού μίγματος
- - λευκός εσωτερικός δακτύλιος: απουσία ροής

Χρωματικός κώδικας για την κατάσταση του ατμού στο σωλήνα του τμήματος δοκιμών:

- - κόκκινος εξωτερικός δακτύλιος : ροή ατμού
- - λευκός εξωτερικός δακτύλιος : απουσία ροής ατμού

3. Κλάδοι ΘΥΚ

Στο μιμικό διάγραμμα απεικονίζεται η κατάσταση των τεσσάρων σωληνοειδών βαλβίδων, με X αν είναι κλειστές και με συνεχή γραμμή — αν είναι ανοικτές. Επίσης διακρίνεται η κατάσταση της αντλίας, για την οποία αν η αντλία λειτουργεί αναβοσβήνει η ένδειξη pump με κόκκινο χρώμα. Στο πάνω δεξιά μέρος του διαγράμματος (σχήμα 3.5) απεικονίζεται ο συμπυκνωτής και η θερμοκρασία του νερού ψύξης (νερό δικτύου) στην είσοδο και την έξοδο του.

Ο χρωματικός κώδικας για την κατάσταση της ροής στους διάφορους κλάδους έχει ως εξής:

4. μπλε : ροή υγρού
5. κόκκινο : ροή ατμού
6. μωβ : ροή διφασικού μίγματος
7. μαύρο : απουσία ροής

Πρέπει να αναφέρουμε ότι στην περίπτωση που επιλεγεί ο αριθμός 9 και ζητηθεί καταγραφή του πειράματος, προκειμένου να αυξηθεί ο χρόνος δειγματοληψίας και καταγραφής το μιμικό διάγραμμα δεν ενημερώνεται με τις θερμοκρασίες των θερμοστοιχείων, εκτός του θερμοστοιχείου TC11, η μέση τιμή παραλείπεται, ενώ ο χρόνος παραμένει στη στιγμή ενάρξεως του πειράματος δειγματοληψίας.

Με την ολοκλήρωση ενός πειράματος, τα αποτελέσματα καταχωρούνται σε αρχείο με την κωδική μορφή DDMMHHLL.YY όπου:

- DD : η ημέρα δημιουργίας του αρχείου
- MM : ο μήνας δημιουργία του αρχείου
- HHLL : η ώρα δημιουργίας του αρχείου
- YY : το έτος δημιουργίας του αρχείου

3.8 Η διαδικασία επίτευξης συνθηκών για την πραγματοποίηση πειράματος επανάψυξης

Στη συνέχεια θα περιγραφούν οι διαδικασίες που απαιτούνται ώστε να καταστεί δυνατή η ασφαλής διεξαγωγή πειραμάτων επανάψυξης με ακρίβεια, στις συνθήκες που έχουν προεπιλεγεί. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν πειράματα επανάψυξης υπό συνθήκες διφασικής ροής σε πιέσεις 4 και 5 bar σε κατάσταση κορεσμού.

3.8.1 Προετοιμασία πειράματος σε πιέσεις 4 και 5 bar

Για την εκτέλεση πειραμάτων σε αυτές τις συνθήκες η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

- Στον ηλεκτρολογικό πίνακα θέτουμε στη θέση ON τους διακόπτες του Η/Υ και των υπολοίπων συσκευών ελέγχου του ΘΥΚ (τροφοδοσία ράβδου, αντιστάσεις δοχείου βρασμού, τροφοδοτικό αντλίας, σωληνοειδείς βαλβίδες κ.τ.λ.)
- Εκτελούμε το πρόγραμμα RIG ώστε να εμφανιστεί το μενού με τις τρεις επιλογές 1,9,0. Το πρόγραμμα αποθηκεύει και καταγράφει ένα πείραμα στο directory στο οποίο βρίσκεται.
- Με την επιλογή 9 εισάγεται χρόνος δειγματοληψίας 0,0001sec, έτσι ώστε το μμικό διάγραμμα να ενημερώνεται με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα για τις τιμές των μετρούμενων μεγεθών.
- Επιλέγεται η καταγραφή ή όχι των πειραματικών μετρήσεων. Χωρίς να ζητηθεί καταγραφή, γίνεται απλά επιτήρηση της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το ΘΥΚ. Η αντλία πρέπει να είναι σε αναμονή ενώ το μαγνητικό ροόμετρο και οι σωληνοειδείς βαλβίδες σε θέση on.
- Μέσω της αντλίας την οποία θέτουμε σε λειτουργία μέσω του αντίστοιχου διακόπτη, οδηγούμε το νερό από το δοχείο συγκεντρώσεως στο Δοχείο Βρασμού.
- Ρυθμίζουμε το θερμοστατικό ελεγκτή του δοχείου βρασμού στην επιθυμητή θερμοκρασία. Η τιμή αυτή είναι η θερμοκρασία κορεσμού του νερού που αντιστοιχεί στην πίεση η οποία θέλουμε να επιτευχθεί στο Δοχείο Βρασμού. Εν συνεχεία τροφοδοτούμε τις τέσσερις αντιστάσεις με ηλεκτρική ισχύ και η θέρμανση του νερού του δοχείου βρασμού ξεκινά. Εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι οι πίεση αναφοράς ενός πειράματος είναι αυτή η οποία θα επιτευχθεί στο Τμήμα Δοκιμών. Για το σκοπό αυτό στην παρούσα ΔΕ ρυθμίζουμε τον controller στους 150 °C και 155 °C κατά περίπτωση, οι οποίες είναι οι θερμοκρασίες κορεσμού στα 4.5 και 5.5 bar αντίστοιχα. Η επίτευξη στο Δοχείο Βρασμού μεγαλύτερης πίεσης από αυτήν που επιθυμούμε στο Τμήμα Δοκιμών είναι απαραίτητη, λόγω του ότι υπάρχουν υδραυλικές απώλειες στο τμήμα του κυκλώματος έως ότου το νερό και ο ατμός φθάσει το Τμήμα Δοκιμών. Υπερπίεση 0.5 bar μας δίνει τη δυνατότητα υπερκάλυψης των απωλειών αυτών αλλά και την απαραίτητη ευχέρεια χειρισμών προκειμένου να διατηρήσουμε σταθερή την πίεση στο Τμήμα Δοκιμών καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων.

- Μόλις η θερμοκρασία του νερού φθάσει στους 100 °C απομονώνουμε το δοχείο από την ατμόσφαιρα, διότι με αυτόν τον τρόπο θα επιτύχουμε αύξηση της πίεσης. Αυτό γίνεται κλείνοντας τον ένα από τους δύο κλάδους που εκτονώνει το περιεχόμενο του δοχείου βρασμού στην ατμόσφαιρα. Ο κλάδος που περιλαμβάνει θερμοστατική ατμοπαγίδα μένει ανοιχτός και μέσω αυτού απομακρύνεται ο αέρας που πιθανόν να υπάρχει στο δοχείο, χωρίς να επιτρέπεται απομάκρυνση ατμού.
- Όταν η θερμοκρασία (συνεπώς και η πίεση) φθάσει στο επιθυμητό επίπεδο η τροφοδοσία των ηλεκτρικών αντιστάσεων διακόπτεται αυτόματα. Κατόπιν ανοίγουμε τη σφαιρική βαλβίδα του κλάδου μέσω του οποίου εκρέει το υγρό από το Δοχείο Βρασμού στους διάφορους κλάδους του ΘΥΚ. Το νερό αφού κυκλοφορήσει στο κύκλωμα, μπορεί είτε να διατρέχει τη διαδρομή προς το Δοχείο Συγκέντρωσης από τον κλάδο bypass (αν η βαλβίδα SV2 είναι κλειστή και η SV4 ανοιχτή), είτε μέσω του τμήματος δοκιμών (αν συμβαίνει το αντίθετο), είτε μέσω και των δύο κλάδων αν και οι δύο σωληνοειδείς βαλβίδες είναι ανοιχτές. Προτιμούμε το δεύτερο ενδεχόμενο ώστε η ράβδος να αρχίσει να αποκτά τη θερμοκρασία του νερού.
- Ρυθμίζουμε την πίεση στο Τμήμα Δοκιμών στα 4 και 5 bar αντίστοιχα με ρύθμιση της παροχής ατμού στο Τμήμα Δοκιμών, μέσω των βαλβίδων εισόδου και εξόδου του ατμού. Κλείνουμε τη σφαιρική βαλβίδα της προσαγωγής της υγρής φάσης στο Τμήμα Δοκιμών και με τελείως ανοιχτή τη σφαιρική βαλβίδα του κλάδου by-pass ρυθμίζουμε την παροχή στο 1 L/min μέσω της ρυθμιστικής βαλβίδας του κλάδου αυτού.
- Ακολούθως κλείνουμε τη σφαιρική βαλβίδα του κλάδου by-pass και ανοίγουμε αυτή της προσαγωγής στο Τμήμα Δοκιμών. Μέσω της ρυθμιστικής βαλβίδας του κλάδου αυτού ρυθμίζουμε και εδώ την παροχή στο 1 L/min.

Είμαστε τώρα έτοιμοι για την εκτέλεση του κυρίως πειράματος, την προσομοίωση LOCA και την επανάψυξη της ράβδου.

3.8.2 Εκτέλεση πειράματος επανάψυξης σε πιέσεις 4 και 5 bar σε κατάσταση κορεσμού

Ακολουθεί η περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης του LOCA και της επανάψυξης της ράβδου.

- Κλείνουμε τη βαλβίδα SV2 της προσαγωγής της υγρής φάσης στο Τμήμα Δοκιμών ενώ ταυτόχρονα ανοίγουμε την SV4 του κλάδου by-pass ώστε να μεταφέρουμε τη ροή στον κλάδο by-pass. Με το κλείσιμο της SV2 το πρόγραμμα RIG μεταπίπτει σε κατάσταση λειτουργίας επανάψυξης (Rewetting Condition). Για περισσότερη ασφάλεια αντίστοιχη ρύθμιση με τις SV2 & 4 γίνεται και στις σφαιρικές βαλβίδες που υπάρχουν στους κλάδους αυτών.
- Τροφοδοτούμε με ρεύμα τη ράβδο του τμήματος δοκιμών (προσομοίωση της θέρμανσης της ράβδου πυρηνικού καυσίμου λόγω decay heating).
- Παρατηρούμε μέσω του display την αύξηση της θερμοκρασίας της ράβδου και μόλις η επιθυμητή θερμοκρασία επιτευχθεί διακόπτουμε την τροφοδοσία της.
- Ανοίγουμε την SV2 της προσαγωγής του υγρού στο Τμήμα Δοκιμών και κλείνουμε την SV4 του by pass κλάδου. Αντίστοιχοι χειρισμοί γίνονται και στις σφαιρικές βαλβίδες των κλάδων αυτών.
- Αρχίζει η επανάψυξη της ράβδου. Η παρατήρηση της προόδου του υγρού μετώπου μπορεί να γίνει τόσο οπτικά, λόγω του υάλινου καναλιού, όσο και μέσω της οθόνης του H/Y. Όταν η διαφορά των θερμοκρασιών TC3 και TC11 γίνει μικρότερη του 2% η καταγραφή των μετρήσεων σταματά και στην οθόνη του H/Y εμφανίζεται για λίγα δευτερόλεπτα το όνομα του αρχείου καταγραφής. Εν συνεχεία το RIG μεταπίπτει στην κατάσταση κανονικής λειτουργίας (Normal Operation) και το ΘΥΚ είναι έτοιμο για την εκτέλεση του επόμενου πειράματος επανάψυξης.

Στην παρούσα ΔΕ τα πειράματα διεξάγονται για αρχική θερμοκρασία της ράβδου από 550 °C έως τη θερμοκρασία όπου η επανάψυξη μεταβαίνει από θερμοεπιφανειακά ελεγχόμενη σε βαρυτικά ελεγχόμενη και είναι τόσο γρήγορη ώστε το πρόγραμμα δεν προλαβαίνει να καταγράψει ικανοποιητικό πλήθος μετρήσεων (~250 °C), με βήμα 5 °C.

3.8.3 Διαδικασία ψύξης του ΘΥΚ και θέση αυτού εκτός λειτουργίας

Εκτός από τους χειρισμούς που απαιτούνται για την εκτέλεση κάποιου πειράματος, πολύ σημαντική είναι και η διαδικασία θέσεως του ΘΥΚ εκτός λειτουργίας τόσο για λόγους ασφαλείας όσο και για την αποφυγή δημιουργίας βλαβών σε αυτό. Η διαδικασία αυτή διακρίνεται στην περίπτωση σβέσης του ΘΥΚ μετά από πειράματα υπό πίεση και στην περίπτωση σβέσης μετά από ατμοσφαιρικά

πειράματα. Ακολουθεί η περιγραφή της διαδικασίας σβέσεως του ΘΥΚ μετά από λειτουργία σε πιέσεις μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής:

1. Κλείνουμε το γενικό διακόπτη τροφοδοσίας της ράβδου και το διακοπή τροφοδοσίας των αντιστάσεων του δοχείου βρασμού.
2. Λόγω του ότι το ΘΥΚ βρίσκεται υπό πίεση, πρέπει πρώτα η πίεση του δοχείου βρασμού να μειωθεί στο 1 bar και μετά να το ανοίξουμε στην ατμόσφαιρα. Για να επιταχυνθεί η ψύξη και συνεπώς η αποπίεση του ΘΥΚ κάνουμε τις εξής ενέργειες:
 - Θέτοντας την αντλία σε θέση on μεταφέρουμε νερό από το Δοχείο Συγκέντρωσης στο Δοχείο Βρασμού ανά τακτά χρονικά διαστήματα.
 - Μεγιστοποιούμε την παροχή του ψύχοντος νερού στο μανδύα ψύξης.
 - Αυξάνουμε την παροχή ατμού προς το συμπυκνωτή. Η παροχή αυτή περιορίζεται από ένα άνω όριο (το οποίο εξαρτάται από την κατάσταση του ψυχόμενου ατμού και του ψύχοντος νερού) για το οποίο οριακά ο ατμός εξέρχεται από το συμπυκνωτή σε κατάσταση κορεσμένου υγρού ($x=0$).
3. Μόλις η πίεση του δοχείου βρασμού μειωθεί στο 1 bar, το ανοίγουμε στην ατμόσφαιρα.
4. Μεταφέρουμε μέσω της αντλίας το νερό από το Δοχείο Συγκέντρωσης στο Δοχείο Βρασμού.
5. Κλείνουμε την τροφοδοσία νερού του μανδύα ψύξης.
6. Κλείνουμε την τροφοδοσία του συμπυκνωτή (ψύχον ρεύμα).
7. Κλείνουμε τις διάφορες βαλβίδες με σωστή σειρά ώστε να μην παραμείνει νερό σε κάποιο σημείο των σωληνώσεων του ΘΥΚ.
8. Απενεργοποιούμε τα όργανα ελέγχου του ΘΥΚ (σωληνοειδείς βαλβίδες, μαγνητικά ροόμετρα).
9. Αφαιρούμε τα πώματα των ροόμετρων ώστε να στραγγίξει η υγρασία και να μην προκληθεί επικάθιση αλάτων στο εσωτερικό τους.

3.9 Περιγραφή της διαδικασίας επεξεργασίας των πειραμάτων επανάψυξης

Αφού ολοκληρωθούν τα πειράματα επανάψυξης ακολουθεί η επεξεργασία των πειραματικών υποσυνόλων. Κάθε πειραματικό υποσύνολο αποτελείται από αρχεία που το κάθε ένα αντιστοιχεί σε μία αρχική θερμοκρασία της ράβδου.

Αρχικά μεταφέρουμε τα υποσύνολα αυτά στον Η/Υ HP-9000/380 υπό το λειτουργικό σύστημα HP-UX 7.05B όπου θα πραγματοποιήσουμε τη στατιστική επεξεργασία τους. Με τη βοήθεια διαφόρων στατιστικών προγραμμάτων απεικονίζονται τα αποτελέσματα και διεξάγονται συγκρίσεις με προγενέστερα πειράματα. Σημειώνεται ότι υπάρχει η δυνατότητα επεξεργασίας είτε ενός ολοκλήρου πειραματικού υποσυνόλου είτε ενός μεμονωμένου πειράματος επανάψυξης.

3.9.1 Επεξεργασία ενός πειράματος επανάψυξης

Για την επεξεργασία ενός πειράματος επανάψυξης χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα TRANSIENT το οποίο είναι γραμμένο σε γλώσσα FORTRAN. Η επεξεργασία με το πρόγραμμα αυτό παρέχει σημαντικές πληροφορίες όπως:

- Θερμοκρασία καθενός από τα θερμοστοιχεία της ράβδου (TC03 έως TC11), συναρτήσει του χρόνου, από την έναρξη της επανάψυξης έως την ολοκλήρωσή της.
- Προσδιορισμός του χρόνου άφιξης του υγρού μετώπου στις θέσεις των θερμοστοιχείων της ράβδου.
- Διάγραμμα θερμοκρασιών των εννέα θερμοστοιχείων (TC03-TC11) σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

3.9.2 Επεξεργασία ολόκληρου του πειραματικού υποσυνόλου επαναψύξεως

Για την επεξεργασία ενός πειραματικού υποσυνόλου χρησιμοποιούμε λογισμικό που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της ΔΔ [1]. Πειραματικό υποσύνολο ορίζεται το σύνολο πειραμάτων επανάψυξης που έγιναν υπό τις ίδιες συνθήκες με μόνη μεταβλητή τη θερμοκρασία της ράβδου.

Ζητούμενο είναι η εύρεση συσχετίσεως μεταξύ της αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης και της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου, της μορφής:

$$u^{-1} = f(T_w) \quad (3.2)$$

όπου:

T_w : αρχική θερμοκρασία της ράβδου

u^{-1} : αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης

Η παραπάνω σχέση είναι γραμμική συνάρτηση πρώτου βαθμού της μορφής:

$$u^{-1} = a_0 + a_1 \cdot T_w \quad (3.3)$$

όπου:

a_0 και a_1 οι παράμετροι της αναδρομής οι οποίες εξαρτώνται από τις παραμέτρους του πειράματος επανάψυξης, και υπολογίζονται από τα πειραματικά δεδομένα με τη βοήθεια του προγράμματος *quasi_st*, $\Delta\Delta$ [1].

Συνοπτικά, ζητείται από το μακροπρόγραμμα *pr1* η εξαγωγή των ζευγών από τα αρχεία ενός πειραματικού υποσυνόλου (T_w, u^{-1}). Ως αντίστροφη ταχύτητα δίνεται η μέση τιμή των τοπικών αντιστρόφων ταχυτήτων επανάψυξης για μια αρχική θερμοκρασία της ράβδου, ενώ σαν αρχική θερμοκρασία της ράβδου δίνεται η μέση τιμή των θερμοστοιχείων TC04 - TC11 τη στιγμή που το υγρό μέτωπο διέρχεται από το θερμοστοιχείο TC03. Τα ζεύγη καταχωρούνται σε αρχείο με την ονομασία RESULTS. Εκτελώντας το πρόγραμμα *quasi_st*, [1], και δίνοντας το όνομα RESULTS παράγονται:

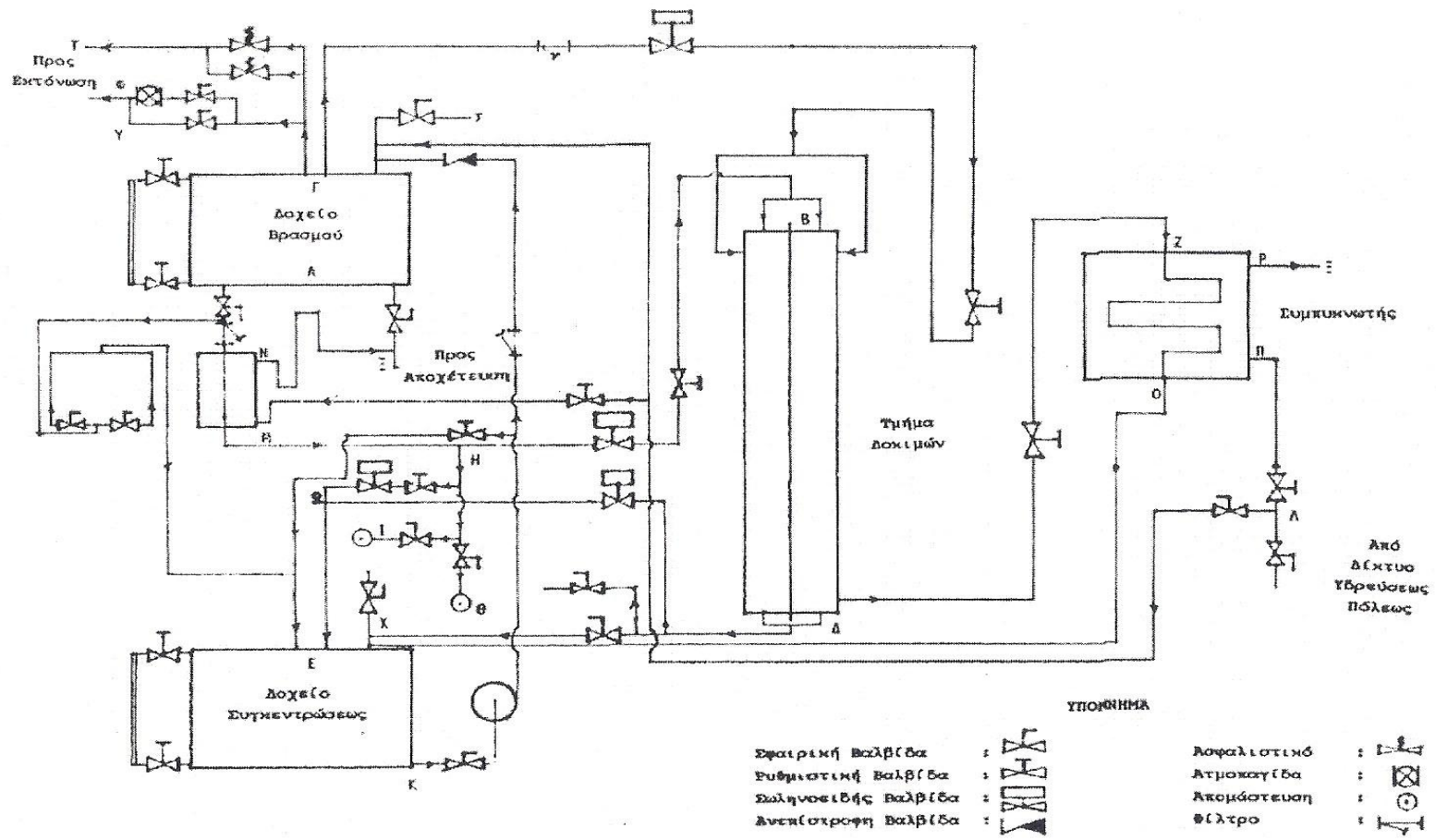
- γράφημα το οποίο περιέχει τα ζεύγη (T_w, u^{-1}) και την ευθεία αναδρομής, σε άξονες αντίστροφη ταχύτητα – επανάψυξη.
- γράφημα των ελλείψεων εμπιστοσύνης της αναδρομής σε επίπεδα σημαντικότητας 5 % και 1 %.
- σύγκριση και παραμετρική επεξεργασία πολλών πειραματικών υποσυνόλων ταυτόχρονα εφόσον έχουν καταχωρηθεί στο αρχείο RESULTS. Η επιλογή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, αφού μας δίνει τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε την επίδραση διαφορετικών παραγόντων στο φαινόμενο της επανάψυξης. Επιπλέον, με τον τρόπο αυτό μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την κατάσταση της ράβδου. Αν για παράδειγμα δύο πειράματα που διεξήχθησαν ακριβώς υπό τις ίδιες συνθήκες πίεσης και υπόψυξης έχουν διαφορετικές

καμπύλες αναδρομής, μπορούμε να θεωρήσουμε ως αιτία την οξείδωση της ράβδου.

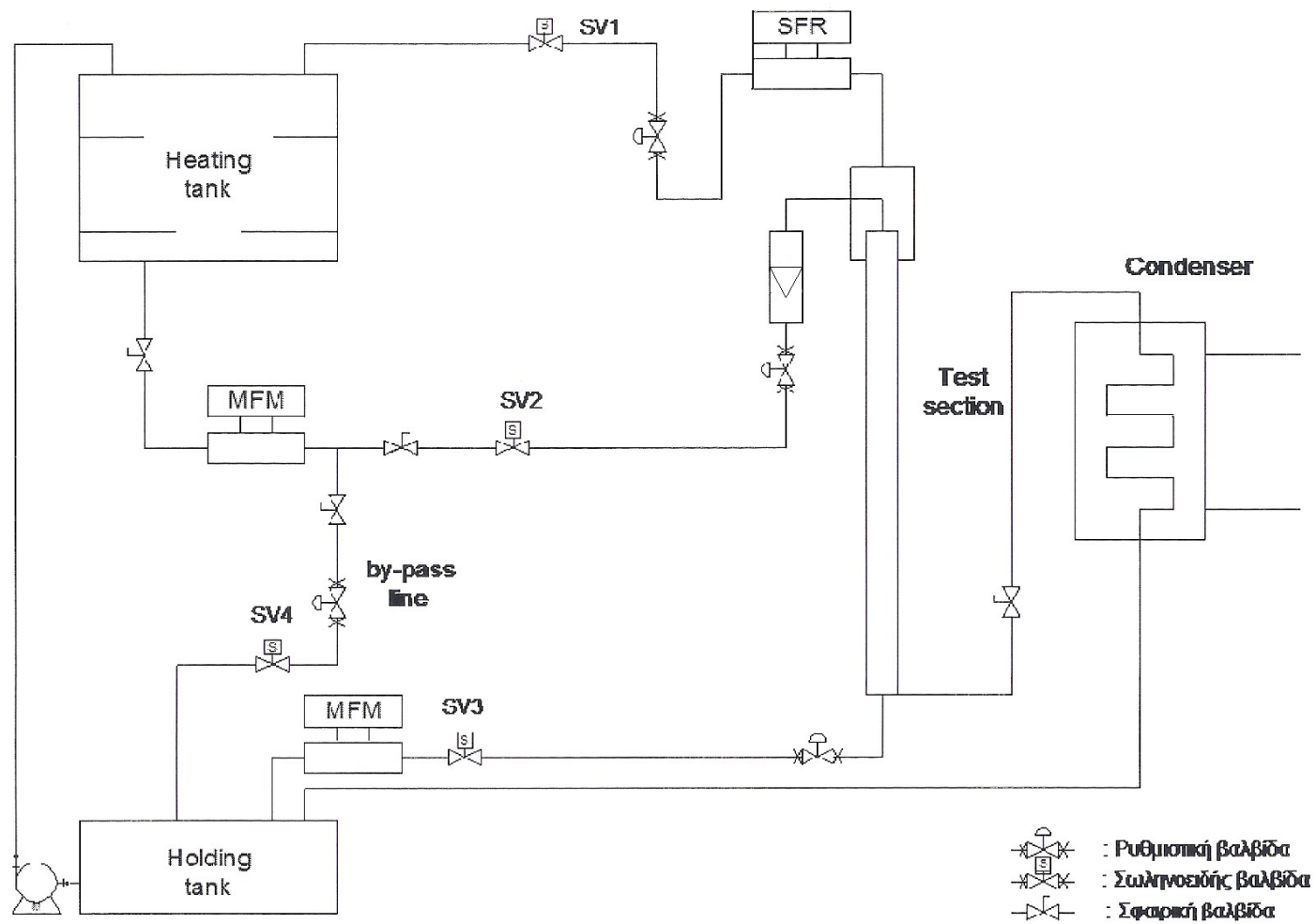
Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τα γραφήματα και την επεξεργασία που πραγματοποιούν τα παραπάνω προγράμματα αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5.

Πίνακας 3.1: Πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί στην πειραματική εγκατάσταση του ΕΠΤ-ΕΜΠ

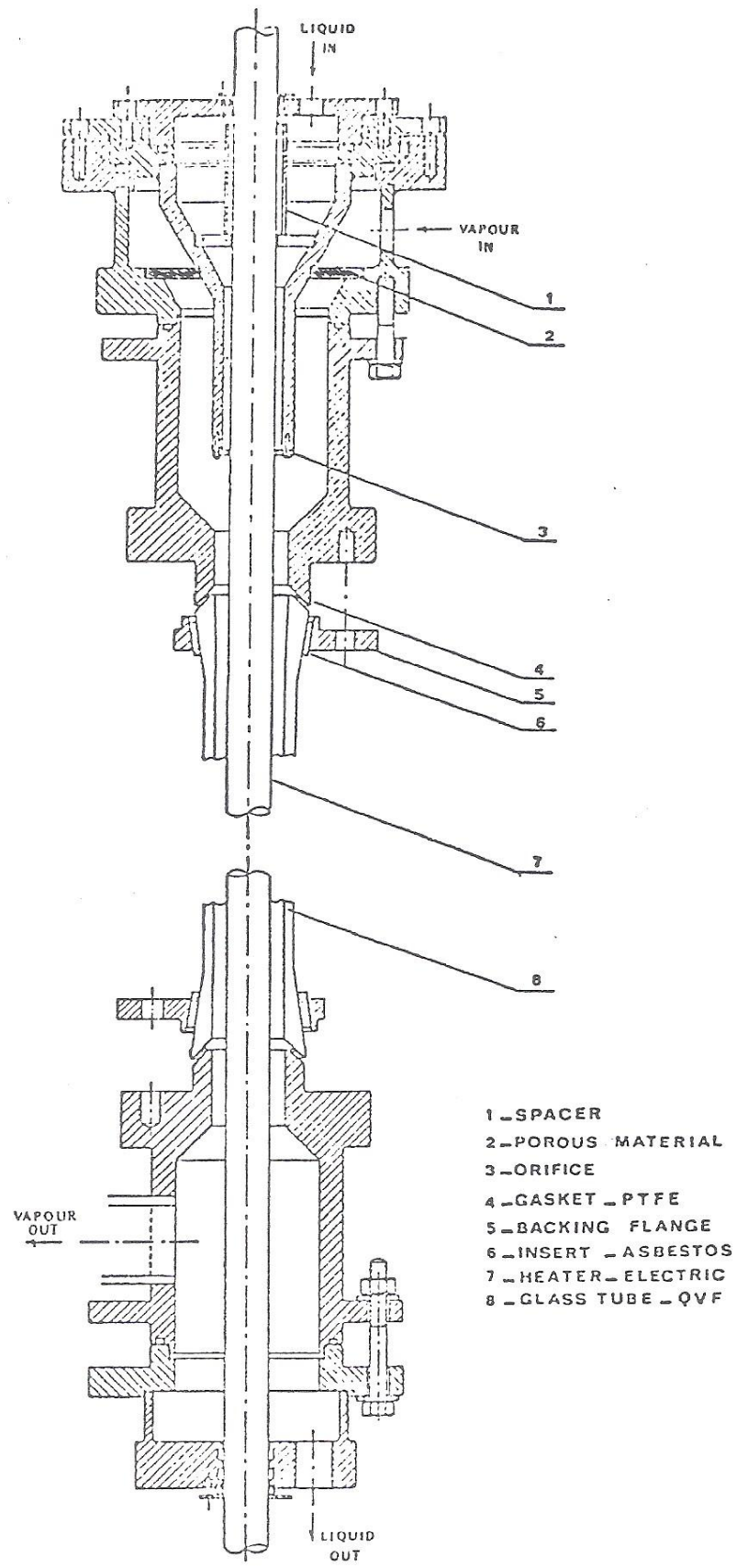
Ερευνητές Παράμετροι	Πίεση	Παροχή υγρού	Παροχή ατμού	Θερμοκρασία	Υπόψυξη
Χίνης	1-7 bar	1L/min	0.03 kg/s	550-220 ⁰ C	0K
Καρασούλος	1 bar	1 L/min	0.03 kg/s	550-225 ⁰ C	0-25-50-75K
Πλαστουργός	1-2 bar	1 L/min	0.03 kg/s	550-225 ⁰ C	25K και 0-25K
Χατζηδάκης	1-2-3 bar	1 L/min	0.03 kg/s	550-220 ⁰ C	0-25-50K και 0-25K και 0-25K



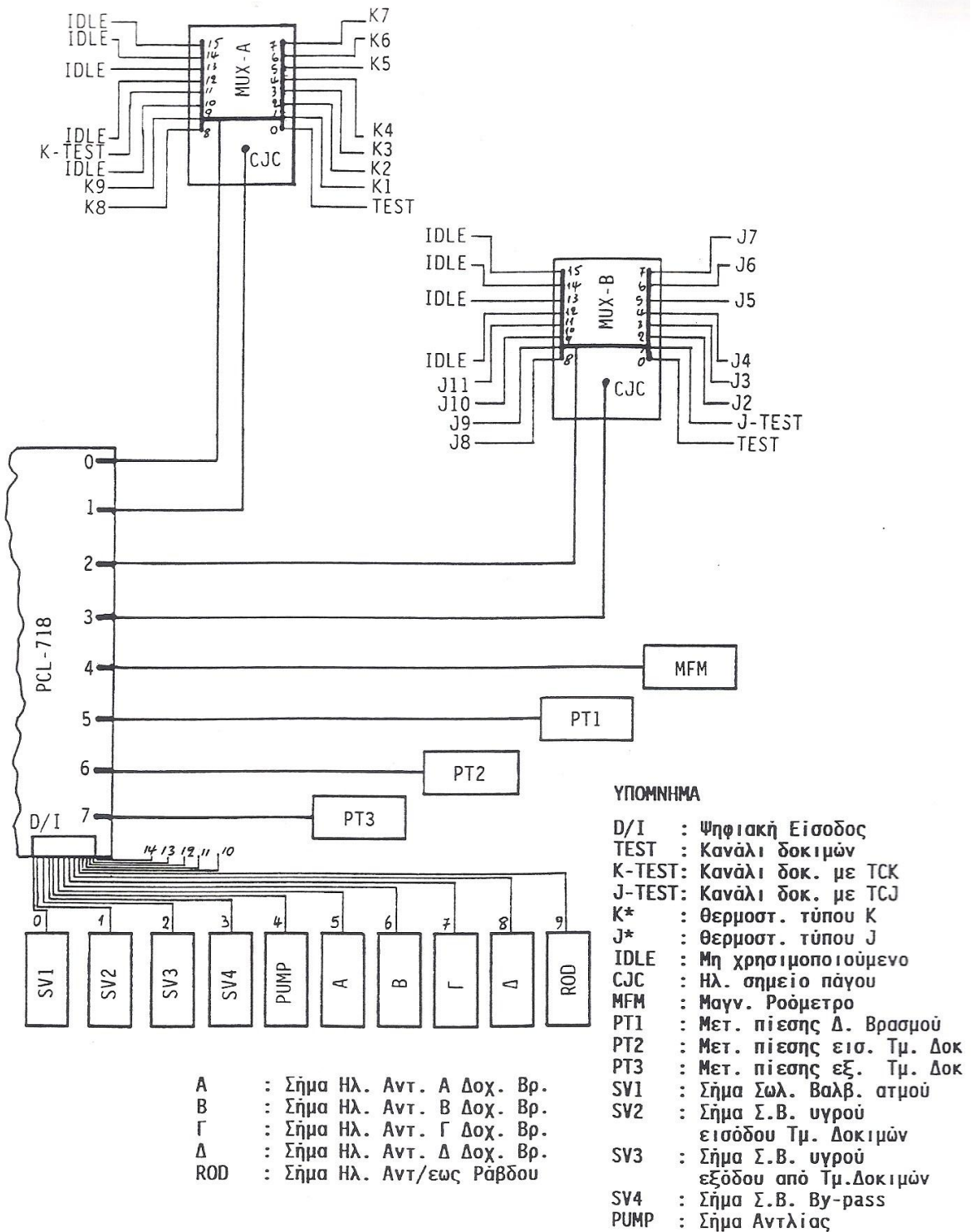
Σχήμα 3.1: Σχηματική απεικόνιση του ΘΥΚ και των κλάδων του, [1]



Σχήμα 3.2: Βασικό κύκλωμα πειράματος επανάψυξης, [4]



Σχήμα 3.3: Σχέδιο τμήματος δοκιμών (Test Section) [1]



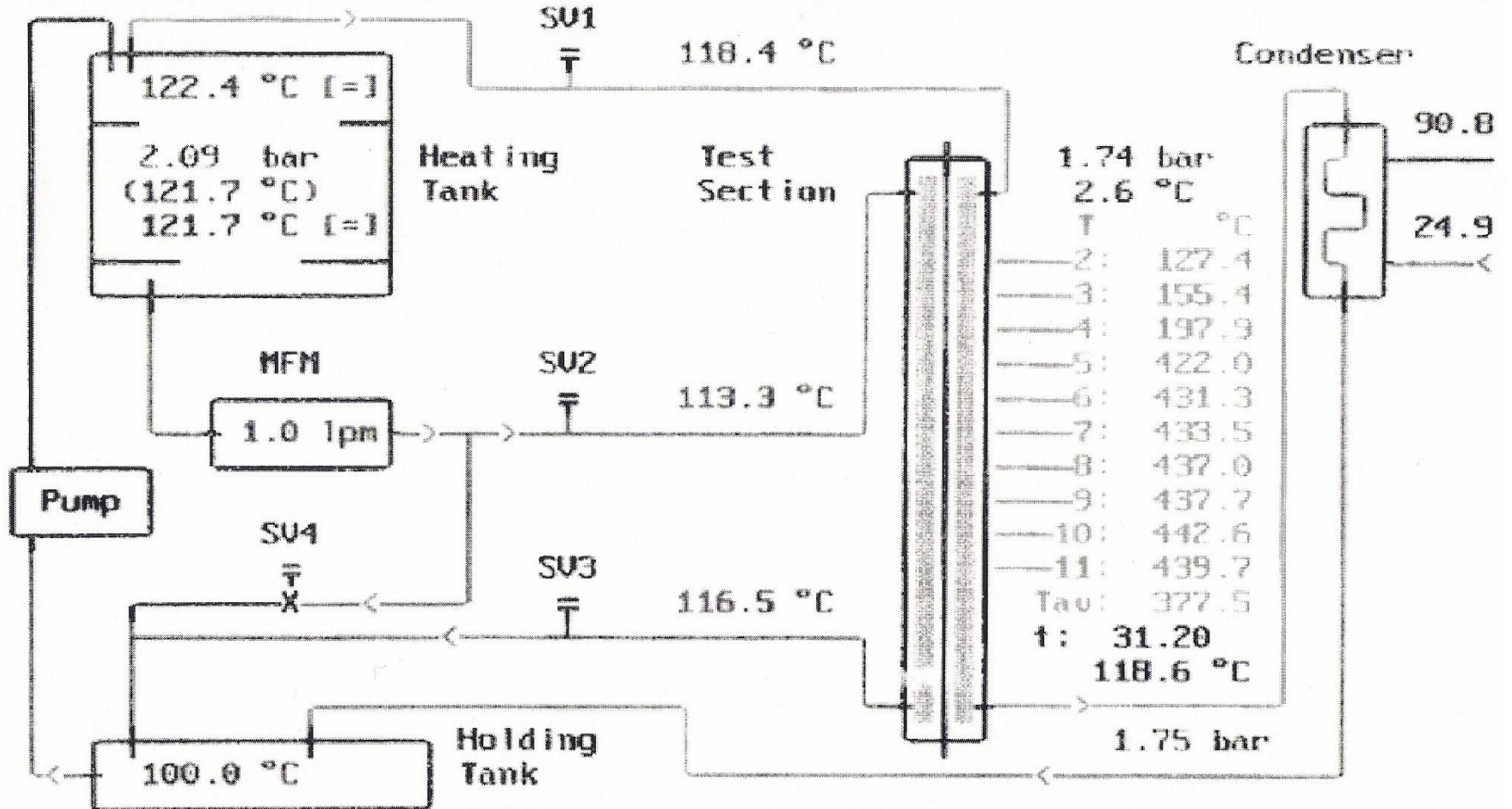
Σχήμα 3.4: Διασύνδεση των μεταλλακτών του ΘΥΚ σε προσωπικό Η/Υ μέσω των μονάδων της σειράς PC-LAB, [1]

Condition of RIG: REMETTING

28- 7-1994

19:58:48. 6

00:18:16



Σχήμα 3.5: Το μικρό διάγραμμα χωρίς καταγραφή, [1]

4. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ ADC, MUX-A, MUX-B, ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΡΟΟΜΕΤΡΩΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

4. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ ADC, MUX-A, MUX-B, ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΡΟΟΜΕΤΡΩΝ	2
4.1 Η συνάρτηση fit.....	2
4.2 Βαθμονόμηση ADC.....	7
4.3 Βαθμονόμηση MUX-A και MUX-B	9
4.3.1 Βαθμονόμηση MUX-A	9
4.3.2 Βαθμονόμηση MUX-B	10
4.4 Συμπεράσματα βαθμονόμησης ADC και MUX.....	11
4.4.1 Συμπεράσματα ελέγχου βαθμονόμησης ADC	11
4.4.2 Συμπεράσματα ελέγχου βαθμονόμησης MUX	12
4.5 Βαθμονόμηση μαγνητικών ροομέτρων	13
4.5.1 Αρχή λειτουργίας και δομή των μαγνητικών ροόμετρων.....	13
4.5.2 Ροόμετρα E+H1, E+H2 και Heine	14
4.5.3 Μέθοδος βαθμονόμησης μαγνητικών ροόμετρων	15
4.5.4 Χρήση προγράμματος fplus	16
4.5.5 Διαδικασία βαθμονόμησης μαγνητικών ροόμετρων	18
4.5.6 Επεξεργασία μετρήσεων	19
4.5.7 Συμπεράσματα βαθμονόμησης μαγνητικών ροόμετρων	20

4. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ ADC, MUX-A, MUX-B, ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΡΟΟΜΕΤΡΩΝ

Πριν την έναρξη των πειραμάτων επανάψυξης πραγματοποιείται έλεγχος της βαθμονόμησης των μεταλλακτών και των συσκευών καταγραφής που θα χρησιμοποιηθούν. Με τη διαδικασία της βαθμονόμησης ελέγχουμε αφενός μεν εάν τα μετρητικά όργανα δίνουν ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις και αφετέρου δε εάν οι μετρήσεις αυτές καταγράφονται αξιόπιστα από τον Η/Υ.

Στην παρούσα ΔΕ θα ελέγξουμε τη βαθμονόμηση των μεταλλακτών παροχής όγκου νερού (μαγνητικά ροόμετρα), του συστήματος αναλογιοψηφιακής μετατροπής της κάρτας συλλογής δεδομένων (Data Acquisition Card, DAC) και των δύο εξωτερικών ενισχυτών – πολυπλεκτών (MUX A & B).

Αρχικά ελέγχουμε αν ο ADC λειτουργεί σωστά, δηλαδή αν το εκάστοτε ψηφιακό σήμα που δίνει στην έξοδο του αντιστοιχεί ακριβώς στο αντίστοιχο αναλογικό σήμα που έλαβε στην είσοδο του. Στη συνέχεια ελέγχουμε αν κάθε ένας από τους δύο αναλογικούς ενισχυτές - πολυπλέκτες (MUX) ενισχύει τα σήματα που δέχεται με την επιθυμητή ακρίβεια και τέλος ελέγχουμε τη βαθμονόμηση των μαγνητικών ροομέτρων του ΘΥΚ σε διαφορετικές θερμοκρασίες και πιέσεις νερού προκειμένου να διαπιστωθεί η ακρίβεια και η πιστότητα των ενδείξεων τους σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Για τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων των ελέγχων των βαθμονομήσεων καθώς και τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήσαμε το υπολογιστικό πακέτο ελεύθερου λογισμικού R-statistics¹ το οποίο εφεξής θα αναφέρεται ως **R**. Πληροφορίες για το **R** καθώς και για τη συνάρτηση *fit* η οποία συντάχθηκε στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ, αναφέρονται στο εδάφιο 4.1 και στο παράρτημα.

Αν διαπιστωθεί ότι κάποιο από τα παραπάνω όργανα δεν λειτουργεί σωστά πρέπει πιθανόν να επέμβουμε είτε στις ρυθμίσεις του οργάνου, είτε στο πρόγραμμα καταγραφής RIG προκειμένου να διορθώσουμε τη βαθμονόμηση του οργάνου αυτού.

4.1 Η συνάρτηση *fit*

Η συνάρτηση *fit* συντάχθηκε στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ με σκοπό τη βαθμονόμηση του ADC, των MUX και των μαγνητικών ροομέτρων. Η συνάρτηση αυτή καλείται από το **R** και υπολογίζει αφενός τις παραμέτρους πρωτοβάθμιας συνάρτησης αναδρομής της μορφής $\hat{Y}_i = \alpha_1 X_i + \alpha_0$, αφετέρου τους ακόλουθους στατιστικούς δείκτες αξιοπιστίας της:

¹ <http://www.r-project.org/>

- Μη Ερμηνεύσιμη Διακύμανση
- Δείκτης RMS
- Μεταβλητότητα και Τυπική Απόκλιση της αναδρομής
- Τυπικά Σφάλματα των παραμέτρων α_0 και α_1
- Δείκτης πολλαπλής συσχέτισης - R
- Μέσες Τιμές των μεταβλητών X_i και Y_i
- Τυπικές Αποκλίσεις των μεταβλητών X_i και Y_i

Επιπλέον μέσω της συνάρτησης αυτής εφαρμόζεται δίπλευρο student test για το στατιστικό έλεγχο των παραμέτρων α_0 και α_1 .

Τέλος η συνάρτηση εγγράφει σε αρχεία κειμένου αλλά και σε αρχεία εικόνας τα αποτελέσματα της αναδρομής, καθώς και τις ακόλουθες γραφικές απεικονίσεις:

- Διάγραμμα πειραματικών σημείων (X_i, Y_i) και συνάρτησης αναδρομής (X_i, \hat{Y}_i)
- Διάγραμμα έλλειψης εμπιστοσύνης των παραμέτρων της αναδρομής.

Ως είσοδο στη συνάρτηση *fit* δίνουμε αρχείο κειμένου που περιέχει τα δεδομένα σε μορφή στηλών X_i, Y_i , ενώ ως έξοδο παράγονται τα παρακάτω αρχεία:

- **Results.txt:** Πρόκειται για αρχείο κειμένου το οποίο περιέχει τα πειραματικά δεδομένα, τις παραμέτρους της αναδρομής, τους προαναφερθέντες στατιστικούς δείκτες αξιοπιστίας της καθώς και τα αποτελέσματα των student tests.
- **Points of regression.txt:** Πρόκειται για αρχείο κειμένου το οποίο περιέχει τα πειραματικά σημεία καθώς και αυτά της συνάρτησης αναδρομής.
- **Graph.jpeg:** Είναι αρχείο εικόνας στο οποίο περιέχεται γραφική απεικόνιση των πειραματικών σημείων και της ευθείας αναδρομής.
- **Points of Ellipses.txt:** Είναι αρχείο κειμένου το οποίο περιέχει τα σημεία των ελλείψεων εμπιστοσύνης των παραμέτρων της αναδρομής για επίπεδα σημαντικότητας 5 και 1%, σε στήλες Y, X.
- **Confidence ellipses.jpeg:** Πρόκειται για αρχείο εικόνας στο οποίο περιέχονται γραφικές απεικονίσεις των ελλείψεων εμπιστοσύνης για επίπεδα σημαντικότητας 5 και 1 %.

Για να χρησιμοποιήσουμε τη συνάρτηση *fit* εκτελούμε τα εξής βήματα:

1. Καλούμε τη συνάρτηση *fit* μέσω του προγράμματος **R** ως εξής:

- Αν η συνάρτηση *fit* είναι αποθηκευμένη σε αρχείο script ανοίγουμε το αρχείο αυτό επιλέγοντας *file* από τον κεντρικό κατάλογο (menu) του προγράμματος **R** και την επιλογή *open script*. Στο παράθυρο που θα εμφανισθεί επιλέγουμε το αρχείο script στο οποίο βρίσκεται η *fit* και εν συνεχεία επιλέγουμε *open* ώστε να ανοίξουμε το αρχείο αυτό.
- Κάνοντας δεξί κλικ στο αρχείο αυτό, το οποίο περιέχει τη συνάρτηση *fit*, επιλέγουμε *select all*.
- Στη συνέχεια αφού κάνουμε δεξί κλικ και πάλι, επιλέγουμε *run selection* ώστε να εισαχθεί η συνάρτηση *fit* στο **R**.

Στο σημείο αυτό ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύσει το περιβάλλον εργασίας του **R**, επιλέγοντας από τον κεντρικό κατάλογο *Save Workspace*. Με αυτόν τον τρόπο η συνάρτηση *fit* θα είναι διαθέσιμη για μελλοντική χρήση «φορτώνοντας» το αποθηκευμένο περιβάλλον εργασίας στο **R**, χωρίς να χρειάζεται να εκτελέσουμε το βήμα 1.

2. Στη συνέχεια επιλέγουμε τον κατάλογο εργασίας του προγράμματος. Από το *file* του κεντρικού καταλόγου του **R** επιλέγουμε *change dir*. Στο παράθυρο το οποίο εμφανίζεται, επιλέγουμε το directory στο οποίο βρίσκεται το αρχείο το οποίο περιέχει τα δεδομένα του ελέγχου της βαθμονόμησης.
3. Ακολούθως πληκτρολογούμε στην κονσόλα του προγράμματος **R** την εντολή:

```
data<- read.table("αρχείο δεδομένων")
```

όπου *data*, το όνομα του data frame που θα δημιουργηθεί και στο οποίο θα αποθηκευθεί το περιεχόμενο του αρχείου που περιέχει τα πειραματικά δεδομένα. Είναι προφανές ότι το data frame μπορεί να έχει οποιοδήποτε όνομα και όχι απαραίτητα το όνομα *data*.

4. Εν συνεχεία επιλέγουμε τον κατάλογο που θα αποθηκευθούν τα αρχεία αποτελεσμάτων της επεξεργασίας. Αν παραλείψουμε το βήμα αυτό τα αρχεία θα εγγραφούν στον κατάλογο εργασίας που επελέγη στο βήμα 2.
5. Τέλος εκτελούμε τη συνάρτηση *fit* ως εξής:

```
fit(data, a0=0, a1=1, sign=4, sign2=8)
```

Οι παράμετροι που βρίσκονται μέσα στην παρένθεση συμβολίζουν τα εξής:

- **data:** Συμβολίζει το όνομα του data.frame το οποίο δημιουργήθηκε στο δεύτερο βήμα και περιέχει τα πειραματικά δεδομένα.
- **sign:** Καθορίζει τον αριθμό των σημαντικών ψηφίων των αριθμητικών αποτελεσμάτων.
(προκαθορισμένη τιμή : sign = 7)
- **sign2:** Καθορίζει τον αριθμό σημαντικών ψηφίων των σημείων των ελλείψεων εμπιστοσύνης.
(προκαθορισμένη τιμή : sign2=8)
- **a0:** Καθορίζει την τιμή την οποία θεωρητικά θα έπρεπε να έχει η παράμετρος a_0 της αναδρομής και βάσει της οποίας θα γίνει ο έλεγχος student.
(προκαθορισμένη τιμή: a0 = 0)
- **a1:** Καθορίζει την τιμή την οποία θεωρητικά θα έπρεπε να έχει η παράμετρος a_1 της αναδρομής και βάσει της οποίας θα γίνει ο έλεγχος student.
(προκαθορισμένη τιμή: a1 = 1)

6. Αφού εκτελέσουμε το βήμα 5 η συνάρτηση αρχίζει να εκτελείται και ζητά σε ξεχωριστά παράθυρα διαλόγου (GUIs) τα εξής δεδομένα από το χρήστη:

- **file 1:** Καθορίζει το όνομα του αρχείου κειμένου (μορφής .txt) που περιέχει τα αποτελέσματα του ελέγχου της βαθμονόμησης.
(προκαθορισμένη τιμή: filename1="Results.txt")
- **file 2:** Καθορίζει το όνομα του αρχείου κειμένου (μορφής .txt) που περιέχει τα πειραματικά σημεία και τα σημεία της συνάρτησης αναδρομής.
(προκαθορισμένη τιμή: "Points of regression.txt")
- **file 3:** Καθορίζει το όνομα του αρχείου κειμένου (μορφής .txt) που περιέχει τα σημεία της έλλειψης εμπιστοσύνης.
(προκαθορισμένη τιμή: "Points of Ellipses.txt")
- **file 4:** Καθορίζει το όνομα του αρχείου εικόνας (μορφής .jpeg) που περιέχει το γράφημα της αναδρομής.
(προκαθορισμένη τιμή: "Graph.jpeg")
- **file 5:** Καθορίζει το όνομα του αρχείου εικόνας (μορφής .jpeg) που περιέχει τα γραφήματα των ελλείψεων εμπιστοσύνης.
(προκαθορισμένη τιμή: "Confidence ellipses.jpeg")

- **labelx**: Καθορίζει τον τίτλο του άξονα x του γραφήματος των πειραματικών δεδομένων και της συνάρτησης αναδρομής.
(προκαθορισμένη τιμή : labelx = "real values")
- **labely**: Καθορίζει τον τίτλο του άξονα y του γραφήματος των πειραματικών δεδομένων και της συνάρτησης αναδρομής.
(προκαθορισμένη τιμή : "values of measurement")
- **ellabelx**: Καθορίζει τον τίτλο του άξονα x του γραφήματος των ελλείψεων εμπιστοσύνης.
(προκαθορισμένη τιμή : "a1")
- **ellabely**: Καθορίζει τον τίτλο του άξονα y του γραφήματος των ελλείψεων εμπιστοσύνης.
(προκαθορισμένη τιμή : "a0")

Στο σημείο αυτό είναι χρήσιμο να παραθέσουμε τις εξής παρατηρήσεις:

1. Δεν είναι απαραίτητο ο χρήστης να εισάγει τιμές σε όλες τις παραμέτρους (sign, sign2, a0, a1). Οι παράμετροι τις οποίες ο χρήστης δεν ορίζει θα λάβουν τις προκαθορισμένες τιμές (default).
2. Στα παράθυρα διαλόγου εμφανίζονται στην οθόνη υπάρχει και η επιλογή cancel. Η επιλογή αυτή δεν συστήνεται διότι είναι πιθανό να δημιουργήσει προβλήματα στη δημιουργία των αρχείων.
3. Είναι σημαντικό ο χρήστης του **R** να αποθηκεύει τα αρχεία που παράγει η συνάρτηση *fit* με διαφορετικά ονόματα κάθε φορά. Αυτό διότι αν στον κατάλογο που θέλει να αποθηκεύσει τα νέα αρχεία της *fit*, προϋπάρχουν αντίστοιχα αρχεία με τις ίδιες ονομασίες, τότε αφενός τα αρχεία κειμένου θα εμπλουτιστούν με τα νέα αποτελέσματα, αφετέρου τα αρχεία εικόνας θα αντικατασταθούν με τα νέα.
4. Βασική προϋπόθεση για τη δημιουργία ελλείψεων από το πρόγραμμα **R**, είναι η ύπαρξη του «πακέτου» *ellipse*.

Αναλυτική περιγραφή των εντολών που χρησιμοποιήθηκαν στη συνάρτηση *fit* καθώς και ορισμένων άλλων πολύ χρήσιμων εντολών του **R** παρατίθεται στο παράρτημα.

4.2 Βαθμονόμηση ADC

Ο έλεγχος της βαθμονόμησης του ADC γίνεται σε όλο το εύρος αναλογικής εισόδου του η οποία είναι 0 – 10 V, βάσει ψηφιακού βολτομέτρου. Η διάταξη την οποία χρησιμοποιούμε, απεικονίζεται στο σχήμα 4.1, και η διαδικασία την οποία ακολουθούμε για τη βαθμονόμηση του ADC έχει ως εξής:

- Συνδέουμε το κανάλι 7 του ADC με πηγή 22.5 VDC εφοδιασμένη με διαιρέτη τάσης.
- Παράλληλα με την πηγή έχουμε συνδέσει διαιρέτη τάσης (ποτενσιόμετρο), έτσι ώστε να έχουμε τη δυνατότητα να ρυθμίζουμε την τάση με την οποία θα τροφοδοτούμε τον ADC στην περιοχή 0 – 10 V.
- Παράλληλα με το διαιρέτη τάσης συνδέουμε ψηφιακό βολτόμετρο της εταιρίας KEITHLEY με το οποίο μετράμε την τάση με την οποία τροφοδοτούμε κάθε φορά το κανάλι αναλογικής εισόδου του ADC.
- Κάνοντας χρήση του διαιρέτη τάσεως τροφοδοτούμε το κανάλι αναλογικής εισόδου του ADC με τάση από 0 έως 10 V με βήμα 0.25 V, έτσι ώστε να καλύψουμε εξολοκλήρου την περιοχή αναλογικής εισόδου του. Η τάση αυτή μετατρέπεται από τον ADC σε ψηφιακή πληροφορία σύμφωνα με τη σχέση 3.1.

Η τάση που αντιστοιχεί στην ψηφιακή πληροφορία εξόδου που δίνει κάθε φορά ο ADC, λαμβάνεται από το πρόγραμμα `mxmux` ($\Delta\Delta$ [1]). Το πρόγραμμα αυτό διαβάζει την ψηφιακή πληροφορία από τον καταχωρητή δεδομένων του ADC και κατόπιν υπολογίζει την αντίστοιχη τιμή τάσης επιλύοντας τη σχέση 3.1 ως V_{out} :

$$V_{out} = \left[\frac{d}{(2^v - 1)} \cdot (V_{max} - V_{min}) \right] + V_{min} \quad (4.1)$$

όπου

V_{out} : η τάση που αντιστοιχεί στην ψηφιακή πληροφορία που δίνει ο ADC έξοδο του.

- Στη συνέχεια συλλέγουμε τα ζεύγη τάσεων της μορφής (V_{in}, V_{out}) και μέσω του προγράμματος **R** καλούμε τη συνάρτηση *fit* η οποία υπολογίζει τη γραμμική συνάρτηση αναδρομής της μορφής:

$$V_{out} = \alpha_0 + \alpha_1 V_{in} \quad (4.2)$$

Κατόπιν οι παράμετροι α_0 και α_1 της αναδρομής υποβάλλονται σε στατιστικούς ελέγχους (student test διότι έχουμε μικρό πλήθος μετρήσεων $N < 30$), ώστε να εξακριβωθεί αν στατιστικά ισχύει $\alpha_0 = 0$ και $\alpha_1 = 1$.

➤ Στατιστικός έλεγχος παραμέτρου α_0

Οι υποθέσεις που εξετάζονται κατά το έλεγχο της παραμέτρου α_0 είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} H_0: \alpha_0 &= 0 \text{ (μηδενική υπόθεση)} \\ H_1: \alpha_0 &\neq 0 \text{ (εναλλακτική υπόθεση)} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Η συνάρτηση *fit* υπολογίζει την τιμή $t = (\alpha_0 - 0) / \text{se}(\alpha_0)$ όπου $\text{se}(\alpha_0)$ είναι το εκτιμώμενο σφάλμα της τεταγμένης επί την αρχή. Κατόπιν για επίπεδο σημαντικότητας α υπολογίζει την κρίσιμη τιμή της μεταβλητής student $t_c = t_{p,v}$ όπου $p = 1 - (\alpha/2)$ και $v = N/2$, όπου N το πλήθος των ζευγαριών (V_{in}, V_{out}) και v οι βαθμοί ελευθερίας.

Για επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 5\%$ ελέγχει τη σχέση των τιμών $|t_0|$ και $t_{975,v}$.

1. Αν $|t_0| < t_{975,v}$ τότε η μηδενική υπόθεση είναι αποδεκτή.
2. Αν $|t_0| > t_{975,v}$ τότε υπολογίζει νέα τιμή t_c για επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 1\%$ και
 - αν $|t_0| < t_{995,v}$ τότε η τιμή της παραμέτρου εμπίπτει στην περιοχή αβεβαιότητας ενώ,
 - αν $|t_0| > t_{995,v}$ η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται.

➤ Στατιστικός έλεγχος παραμέτρου α_1

Για το στατιστικό έλεγχο της παραμέτρου α_1 η συνάρτηση *fit* ακολουθεί ακριβώς όμοια διαδικασία με μόνη διαφορά ότι οι υποθέσεις που ελέγχει είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} H_0: \alpha_1 &= 1 \text{ (μηδενική υπόθεση)} \\ H_1: \alpha_1 &\neq 1 \text{ (εναλλακτική υπόθεση)} \end{aligned} \quad (4.4)$$

ενώ η νέα τιμή σύγκρισης θα είναι: $t_0 = (\alpha_0 - 1) / \text{se}(\alpha_1)$, όπου $\text{se}(\alpha_1)$ το εκτιμώμενο σφάλμα της παραμέτρου α_1 .

Αν από το στατιστικό έλεγχο προκύψει ότι $\alpha_0 \neq 0$ ή $\alpha_1 \neq 1$, συμπεραίνουμε ότι ο ADC δεν λειτουργεί σωστά και απαιτούνται νέες ρυθμίσεις είτε απευθείας στον ADC είτε στο λογισμικό έτσι ώστε οι τιμές που καταγράφονται από τον H/Y να είναι αξιόπιστες και ακριβείς. Στην παρούσα ΔΕ πραγματοποιήσαμε έλεγχο της βαθμονόμησης του ADC δύο φορές, για να διαπιστώσουμε εάν υπάρχει εξάρτηση της ορθότητας των αναλογηφιακών μετατροπών με τη χρονική διάρκεια της λειτουργίας του πριν τον έλεγχο. Με αυτόν τον τρόπο θέλουμε να ελέγξουμε αν η θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά τη λειτουργία του ADC επιδρά στην ακρίβεια των αναλογηφιακών μετατροπών.

4.3 Βαθμονόμηση MUX-A και MUX-B

Κατά τη διαδικασία αυτή ελέγχουμε, βάσει δύο ψηφιακών βολτομέτρων, αν οι δύο MUX ενισχύουν τα σήματα τα οποία δέχονται με την επιθυμητή ακρίβεια.

4.3.1 Βαθμονόμηση MUX-A

Ο MUX-A δέχεται στην είσοδο του τα σήματα που προέρχονται από τα θερμοστοιχεία τύπου K, τα οποία ενισχύει κατά 1000. Η διάταξη την οποία χρησιμοποιούμε, για τη βαθμονόμηση του MUX-A απεικονίζεται στο σχήμα 4.2, και η διαδικασία την οποία ακολουθούμε έχει ως εξής:

- Συνδέουμε πηγή 1.5 VDC με το κανάλι 0 του MUX-A.
- Παράλληλα με την πηγή είναι συνδεδεμένος διαιρέτης τάσης (ποτενσιόμετρο) ώστε να καλύψουμε την περιοχή 0-10 mV με βήμα 0.25 mV.
- Παράλληλα το διαιρέτη τάσης συνδέουμε το βολτόμετρο της εταιρίας KEITHLEY για να μετράμε την τάση που κάθε φορά επιβάλλουμε.
- Στο κανάλι αναλογικής εισόδου 0 του ADC, όπου δεσμεύεται η έξοδος του MUX-A, συνδέουμε βολτόμετρο με το οποίο μετρούμε την ενισχυμένη τάση που δίνει ο MUX-A, η οποία θα πρέπει να βρίσκεται στην περιοχή 0-10 V.
- Εφόσον συλλέξουμε τα ζεύγη της μορφής (V_{in}, V_{out}) , με τη βοήθεια της συνάρτησης *fit* υπολογίζουμε συνάρτηση αναδρομής της μορφής της σχέσης 4.2. και πραγματοποιούμε στατιστικό έλεγχο των παραμέτρων της αναδρομής αυτής ως εξής:

➤ Στατιστικός έλεγχος παραμέτρου α_0

$H_0: \alpha_0 = 0$ (μηδενική υπόθεση)

$H_1: \alpha_0 \neq 0$ (εναλλακτική υπόθεση) (4.5)

τιμή σύγκρισης: $t_0 = (a_0 - 0)/se(a_0)$

➤ Στατιστικός έλεγχος παραμέτρου a_1

$H_0: a_1 = 1000$ (μηδενική υπόθεση)

$H_1: a_1 \neq 1000$ (εναλλακτική υπόθεση) (4.6)

τιμή σύγκρισης: $t_0 = (a_1 - 1000)/se(a_1)$

- Αν διαπιστώσουμε ότι $a_0 \neq 0$ ή $a_1 \neq 1000$, συμπεραίνουμε ότι ο MUX-A δεν λειτουργεί σωστά και απαιτούνται νέες ρυθμίσεις, είτε απευθείας στο MUX είτε στο λογισμικό έτσι ώστε οι τιμές που καταγράφονται από τον Η/Υ να είναι αξιόπιστες και ακριβείς.

4.3.2 Βαθμονόμηση MUX-B

Ο MUX-B δέχεται στην είσοδο του τα σήματα που προέρχονται από τα θερμοστοιχεία τύπου J στα οποία επιβάλλει ενίσχυση 200. Η διάταξη την οποία χρησιμοποιούμε για τη βαθμονόμηση του MUX-B απεικονίζεται στο σχήμα 4.2, και η διαδικασία την οποία ακολουθούμε έχει ως εξής:

- Συνδέουμε την πηγή 1.5 VDC με το κανάλι 0 του MUX-B.
- Παράλληλα με την πηγή είναι συνδεδεμένος διαιρέτης τάσης (ποτενσιόμετρο) ώστε να καλύψουμε την περιοχή 0-50 mV με βήμα 2.5 mV.
- Παράλληλα με την πηγή και το διαιρέτη τάσης συνδέουμε το βολτόμετρο της εταιρίας KEITHLEY για να μετράμε την τάση που κάθε φορά επιβάλλουμε.
- Στο κανάλι 2 του ADC, όπου είναι συνδεδεμένη η έξοδος του MUX-B, συνδέουμε βολτόμετρο με το οποίο μετρούμε την ενισχυμένη τάση που δίνει ο MUX-B ως έξοδο, η οποία βρίσκεται στην περιοχή 0-10 V.
- Κατόπιν συλλέγουμε τα ζεύγη της μορφής (V_{in}, V_{out}) και χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση fit υπολογίζουμε αναδρομή της μορφής της σχέσης 4.2 και διεξάγουμε τους εξής στατιστικούς ελέγχους των παραμέτρων της:

➤ Στατιστικός έλεγχος παραμέτρου a_0

$H_0: a_0 = 0$ (μηδενική υπόθεση)

$H_1: a_0 \neq 0$ (εναλλακτική υπόθεση) (4.7)

τιμή σύγκρισης: $t_0 = (a_0 - 1)/se(a_0)$

➤ Στατιστικός έλεγχος παραμέτρου α_1

$H_0: \alpha_1 = 200$ (μηδενική υπόθεση)

$H_1: \alpha_1 \neq 200$ (εναλλακτική υπόθεση) (4.8)

τιμή σύγκρισης: $t_0 = (\alpha_1 - 1000)/se(\alpha_1)$

- Αν προκύψει ότι $\alpha_0 \neq 0$ ή $\alpha_1 \neq 200$, συμπεραίνουμε ότι ο MUX-B δεν λειτουργεί σωστά και απαιτούνται νέες ρυθμίσεις είτε απευθείας στο MUX είτε στο λογισμικό έτσι ώστε οι τιμές που καταγράφονται από τον H/Y να είναι αξιόπιστες και ακριβείς.

4.4 Συμπεράσματα βαθμονόμησης ADC και MUX

Τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων του ADC και των δύο MUX A & B, παρουσιάζονται στους πίνακες 4.1, 4.2 και 4.3 αντίστοιχα. Επιπλέον προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση της γήρανσης στη μετρητική διάταξη τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων της παρούσας ΔΕ συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των παλαιότερων ΔΕ [2] και [3], τα οποία έχουν συγκεντρωθεί και παρουσιάζονται στους πίνακες αυτούς. Οι γραφικές απεικονίσεις των αποτελεσμάτων των βαθμονομήσεων παρουσιάζονται στα σχήματα 4.8, 4.9, 4.10 και 4.11.

4.4.1 Συμπεράσματα ελέγχου βαθμονόμησης ADC

Αναλυτικότερα, όσον αφορά τον ADC, τα αποτελέσματα των ελέγχων της βαθμονόμησης του, τόσο για την περίπτωση χρόνου λειτουργίας 30 min όσο και για χρόνο λειτουργίας 300 min, δεν έχουν μεταβληθεί σημαντικά από αυτά παλαιότερων βαθμονομήσεων όπως φαίνεται στον πίνακα 4.1. Και στις δύο περιπτώσεις ελέγχου της βαθμονόμησης του, ο δείκτης R φανερώνει υψηλή γραμμική συσχέτιση έχοντας τιμή 1 γεγονός που φαίνεται και από τα γραφήματα των αναδρομών (σχήματα 4.8, 4.9). Επίσης και στις δύο περιπτώσεις ο δείκτης RMS λαμβάνει πολύ μικρές τιμές (της τάξεως του 0.2 %), φανερώνοντας την πολύ καλή προσαρμογή των πειραματικών σημείων στην ευθεία αναδρομής. Ο στατιστικός έλεγχος της παραμέτρου α_1 επιβεβαιώνει τη μηδενική υπόθεση (σχέσεις 4.4) ενώ για την περίπτωση της παραμέτρου α_0 η μηδενική υπόθεση (σχέσεις 4.3) απορρίπτεται. Η απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης κατά το στατιστικό έλεγχο του σταθερού όρου της αναδρομής αποδίδεται στη μεγάλη διακριτική ικανότητα του βολτόμετρου που χρησιμοποιήσαμε με αποτέλεσμα τα σφάλματα των παραμέτρων $se(\alpha_0)$ και $se(\alpha_1)$ τα οποία προκύπτουν να είναι πολύ μικρότερα της διακριτικής ικανότητας του ADC. Για

το λόγο αυτόν παρακάμπτουμε το αποτέλεσμα του στατιστικού ελέγχου της παραμέτρου α_0 και θεωρούμε ότι ο ADC λειτουργεί ικανοποιητικά και δεν χρειάζεται νέα βαθμονόμηση.

Προκειμένου να ελέγξουμε την επίδραση του παράγοντα θερμοκρασία στην λειτουργία του ADC σχεδιάζουμε τις ελλείψεις εμπιστοσύνης σε επίπεδο σημαντικότητας 5 % και 1%, οι οποίες παρουσιάζονται στα σχήματα 4.20 και 4.21. Παρατηρούμε ότι η έλλειψη που αντιστοιχεί στην περίπτωση λειτουργίας 30 min και άρα σε χαμηλότερη θερμοκρασία, υπερκαλύπτει σχεδόν εξολοκλήρου την έλλειψη που αντιστοιχεί σε λειτουργία 300 min. Συνεπώς, ο ευρύς κοινός τόπος των δύο ελλείψεων, φανερώνει ότι δεν υπάρχει επίδραση του παράγοντα θερμοκρασία στη λειτουργία του ADC και οι μετρήσεις του μετά από λειτουργία 30 και 300 min είναι στατιστικά ίδιες.

4.4.2 Συμπεράσματα ελέγχου βαθμονόμησης MUX

Όσον αφορά το MUX-A, ο δείκτης R λαμβάνει την τιμή 1 πράγμα που φανερώνει ότι υπάρχει πολύ υψηλή γραμμική συσχέτιση των πειραματικών σημείων. Επίσης η χαμηλή τιμή του δείκτη RMS πιστοποιεί την πολύ καλή προσαρμογή των πειραματικών σημείων επί της ευθείας αναδρομής και την καλή στατιστική του πειράματος βαθμονόμησης. Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώνονται και οπτικά παρατηρώντας το γράφημα της αναδρομής το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 4.10. Επιπλέον ο στατιστικός έλεγχος της παραμέτρου α_0 καθιστά τη μηδενική υπόθεση αποδεκτή (σχέσεις 4.5) ενώ ο έλεγχος της παραμέτρου α_1 καθιστά απορριπτέα τη μηδενική υπόθεση (σχέσεις 4.6). Επίσης σε σχέση με παλαιότερες βαθμονομήσεις όπως φαίνεται στον πίνακα 4.2, η τιμή της παραμέτρου α_1 , η οποία αντιστοιχεί στο κέρδος ενίσχυσης, προκύπτει μειωμένη, πράγμα που πιθανόν να οφείλεται στη γήρανση του MUX-A.

Προκειμένου να ελεγχθεί αν η διαφορά των εκτιμήσεων της παραμέτρου α_1 στην παρούσα ΔΕ και στις ΔΕ [3] και [2], είναι στατιστικά σημαντική θα εκτελέσουμε κατάλληλο στατιστικό τεστ με τις ακόλουθες υποθέσεις:

$$\begin{aligned} H_0: \alpha_{1_{[3] / [2]}} - \alpha_{1_{\text{This work}}} &= 0 \text{ (μηδενική υπόθεση)} \\ H_1: \alpha_{1_{[3] / [2]}} - \alpha_{1_{\text{This work}}} &> 0 \text{ (εναλλακτική υπόθεση)} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Για τον έλεγχο των υποθέσεων υπολογίζεται η ανηγμένη μεταβλητή:

$$Z = \frac{|\alpha_{1_{[3] / [2]}} - \alpha_{1_{\text{This work}}}|}{\sqrt{se(a_1)_{[3] / [2]}^2 + se(a_1)_{\text{This work}}^2}} \quad (4.10)$$

Για την απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης επιλέγουμε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=1\%$ και ελέγχουμε την ακόλουθη ανισότητα $Z < 2.33$. Οι τιμές της ανηγμένης μεταβλητής Z για τις περιπτώσεις σύγκρισης με τις ΔΕ [3] και [2] προέκυψαν 5.72 και 6.28 αντίστοιχα. Παρατηρούμε λοιπόν ότι σε κάθε περίπτωση η διαφορά εκτίμηση της παραμέτρου α_1 στην παρούσα ΔΕ σε σχέση με παλαιότερες εκτιμήσεις είναι στατιστικά σημαντική.

Εντούτοις και στην περίπτωση αυτή μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η μη αποδοχή της τιμής της παραμέτρου α_1 οφείλεται στη μεγάλη διακριτική ικανότητα των βολτομέτρων που χρησιμοποιήσαμε με αποτέλεσμα το σφάλμα $se(\alpha_1)$ το οποίο υπολογίζουμε να είναι πολύ μικρότερο της διακριτικής ικανότητας του ADC. Για το λόγο αυτό θα θεωρήσουμε ότι ο MUX-A δεν χρειάζεται εκ νέου βαθμονόμηση.

Τέλος, όσον αφορά στο MUX-B ο δείκτης R έχει και στην περίπτωση αυτή την τιμή 1 ενώ ο δείκτης RMS λαμβάνει πολύ χαμηλή τιμή ($=0.0632$) όπως φαίνεται στον πίνακα 4.3. Συνεπώς τα πειραματικά σημεία προσαρμόζονται πολύ ικανοποιητικά στην ευθεία αναδρομής, όπως παρατηρούμε στο γράφημα του σχήματος 4.11. Επίσης τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης είναι παραπλήσια με αυτά παλαιότερων βαθμονομήσεων, ενώ ο στατιστικός έλεγχος των παραμέτρων α_0 και α_1 καθιστά τις μηδενικές υποθέσεις αποδεκτές (σχέσεις 4.7 και 4.8). Κατά συνέπεια συμπεραίνουμε ότι και ο MUX-B δεν χρήζει νέας βαθμονόμησης.

4.5 Βαθμονόμηση μαγνητικών ροόμετρων

Στο ΘΥΚ σύμφωνα με όσα αναφέραμε στο εδάφιο 3.5, είναι εγκατεστημένα δύο μαγνητικά ροόμετρα της εταιρίας Endress+Hauser, με σκοπό τη μέτρηση της παροχής όγκου του νερού στην είσοδο και την έξοδο του τμήματος δοκιμών (σχήμα 3.2). Το ροόμετρο το οποίο είναι εγκατεστημένο στην είσοδο του τμήματος δοκιμών στο εξής θα αναφέρεται ως E+H1 ενώ το ροόμετρο που είναι εγκατεστημένο στην έξοδο του τμήματος δοκιμών θα αναφέρεται εφεξής ως E+H2. Παράλληλα με αυτά θα βαθμονομηθεί και τρίτο ροόμετρο, το οποίο είναι της εταιρίας Heinrichs και χρησιμοποιείται σε άλλες εφαρμογές. Το ροόμετρο αυτό θα αναφέρεται από εδώ και στο εξής ως ροόμετρο Heinr. Για αναλυτική περιγραφή των ροόμετρων, και του προγραμματισμού τους ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη ΔΕ [15].

4.5.1 Αρχή λειτουργίας και δομή των μαγνητικών ροόμετρων

Η αρχή λειτουργίας των μαγνητικών ροόμετρων [5] βασίζεται στο φαινόμενο της επαγωγής (νόμος Faraday), σύμφωνα με το οποίο κατά την κίνηση ευθύγραμμου αγωγού εντός μαγνητικού πεδίου κάθετα προς τις δυναμικές γραμμές του πεδίου, εντός του αγωγού αναπτύσσεται ηλεκτρικό πεδίο κάθετο προς το μαγνητικό πεδίο και τη διεύθυνση κίνησης που έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής

δύναμης από επαγωγή (HEΔ) στα άκρα του κινούμενου αγωγού, το μέτρο της οποίας δίνεται από τη σχέση:

$$e = BuL \quad (4.11)$$

όπου

e : ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή στα άκρα του αγωγού (HEΔ)
(V)

B : μαγνητική επαγωγή (Tesla)

u : ταχύτητα αγωγού (m/sec)

L : μήκος αγωγού (m)

Το μαγνητικό ροόμετρο αποτελείται από έναν σωλήνα μέσα στον οποίο ρέει υγρό. Στο περιβάλλον του σωλήνα επιδρά μαγνητικό πεδίο με δυναμικές γραμμές κάθετες στη διεύθυνση της ροής. Γίνεται συνεπώς αντιληπτό ότι το υγρό έχει το ρόλο του ευθύγραμμου αγωγού και έτσι στα άκρα του αναπτύσσεται HEΔ. Η τάση αυτή (HEΔ) ανιχνεύεται από ζεύγος ηλεκτροδίων τα οποία βρίσκονται σε επαφή με το ρευστό στο εσωτερικό τοίχωμα του σωλήνα. Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε αντιδιαμετρικές θέσεις, και εφάπτονται του εσωτερικού τοιχώματος του σωλήνα, χωρίς να διεισδύουν στο μετρούμενο υγρό. Πλεονέκτημα των μαγνητικών ροόμετρων είναι ότι δεν αποτελούνται από κινούμενα μέρη και έτσι αντέχουν σε μεγάλες πιέσεις χωρίς να έχουμε διαρροές. Επιπλέον δεν χρησιμοποιούν διεισδυτική τεχνική μέτρησης με αποτέλεσμα να μην διαταράσσουν τη ροή του υγρού. Τέλος άλλα θετικά στοιχεία είναι ο μικρός χρόνος απόκρισης (response time) και η μεγάλη ακρίβεια (τάξης 1 - 0.5%).

4.5.2 Ροόμετρα E+H1, E+H2 και Heintz

Τα ροόμετρα E+H1 και E+H2 (σχήμα 4.3) έχουν ονομαστική διάμετρο DN15 και η ονομαστική περιοχή μέτρησης της παροχής είναι 0-10 L/min. Το αποτέλεσμα της μέτρησης παρέχεται αφενός μεν απ' ευθείας στο display του οργάνου και αφετέρου υπό μορφή αναλογικού σήματος εντάσεως το οποίο οδηγείται στον ADC και συγκεκριμένα στο κανάλι 4 της μονάδος PCL 718 (εδάφιο 3.5.5), ψηφιοποιείται και καταγράφεται στον Η/Υ. Η ένδειξη στο display δίνεται επί της εκατό (%) της μέγιστης ονομαστικής παροχής, η οποία είναι 10 L/min. Έτσι όταν η ένδειξη είναι 10 % σημαίνει ότι η μετρούμενη παροχή είναι 1 L/min. Η μέγιστη πίεση λειτουργίας των ροόμετρων είναι 40 bar και η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας 180 °C. Το σήμα εξόδου είναι 4 - 20 mA ενώ η ελάχιστη απαιτούμενη αγωγιμότητα του ρευστού είναι 5 μS/cm. Τα ροόμετρα είναι τοποθετημένα υπό γωνία 25° προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι ακόμα και σε χαμηλές παροχές (< 1 L/min) θα παραμένουν γεμάτα με νερό μετρώντας έτσι με ακρίβεια την πραγματική παροχή που διέρχεται από αυτά.

Το ροόμετρο Heihr έχει σωλήνα διαμέτρου DN25 ενώ μετρά παροχές έως και 40 L/min. Η λειτουργία του είναι πανομοιότυπη με τα παραπάνω ροόμετρα με μόνη σημαντική διαφορά ότι δεν διαθέτει display.

4.5.3 Μέθοδος βαθμονόμησης μαγνητικών ροόμετρων

Ο έλεγχος βαθμονόμησης των μαγνητικών ροόμετρων πραγματοποιείται βάσει βαθμονομημένου ογκομετρικού δοχείου και γίνεται σε διάφορες θερμοκρασίες και πιέσεις. Η εξάρτηση της παροχής που μετρούν τα ροόμετρα από τη θερμοκρασία διερευνάται, γιατί ενώ θεωρητικά η θερμοκρασία δεν επιδρά στη λειτουργία των ροόμετρων, πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι υπάρχει κάποια εξάρτηση [15]. Αφού λοιπόν στα πειράματα επανάψυξης της παρούσας ΔΕ τα ροόμετρα E+H1 και E+H2 θα διαρρέονται από νερό υψηλής θερμοκρασίας, ο έλεγχος της βαθμονόμησης τους σε υψηλές θερμοκρασίες κρίνεται απαραίτητος. Αναλυτικά οι έλεγχοι βαθμονόμησης που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4. Η διαδικασία ελέγχου και τα σχετικά προγράμματα έχουν αναπτυχθεί στο πλαίσιο της ΔΕ [15].

Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, νερό από το δοχείο βρασμού διαρρέει τα ροόμετρα και εισέρχεται σε βαθμονομημένο ογκομετρικό δοχείο το οποίο έχει μέγιστη χωρητικότητα 75 λίτρων. Στο κάτω μέρος του δοχείου αυτού έχει προσαρμοστεί σφαιρική βαλβίδα την οποία συνδέουμε μέσω εύκαμπτου σωλήνα με το δοχείο συγκέντρωσης ώστε να οδηγείται σε αυτό το περιεχόμενο του δοχείου κατά το άδειασμα του. Στο σημείο σύνδεσης του σωλήνα με το δοχείο συγκέντρωσης τοποθετήσαμε στόμιο εξαέρωσης όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4. Στη μία είσοδο του στομίου συνδέσαμε το σωλήνα (λάστιχο) ενώ η άλλη (κατακόρυφη) έμεινε ανοιχτή για να είναι δυνατή η ευκολότερη έξοδος του αέρα και συνεπώς το ογκομετρικό δοχείο να αδειάζει ταχύτερα. Το δοχείο φέρει οπτικό σταθμόμετρο, σε διάφορα ύψη του οποίου έχουν χαραχτεί βαθμίδες κάθε μία εκ των οποίων αντιστοιχεί σε προμετρημένο όγκο νερού. Έτσι μέσω του ογκομετρικού δοχείου θα ξέρουμε τον πραγματικό όγκο νερού που έχει περάσει από τα ροόμετρα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και άρα την πραγματική παροχή όγκου σύμφωνα με τον τύπο:

$$Q_{\pi} = V_{\pi} / T \quad (4.12)$$

Όπου T ο χρόνος που απαιτείται για τη συγκέντρωση στο δοχείο νερό όγκου V_{π} .

Ο υπολογισμός του πραγματικού όγκου γίνεται από το πρόγραμμα fplus εισάγοντας κάθε φορά τον αριθμό αρχικής και τελικής βαθμίδας.

Για τον υπολογισμό της ενδεικνύμενης παροχής όγκου Q_x , χρησιμοποιούνται οι ψηφιοποιημένες τιμές της παροχής τις οποίες λαμβάνει το πρόγραμμα fplus ([4]) από το κάθε ροόμετρο. Το πρόγραμμα αυτό αποτελεί βελτιωμένη εκδοχή του παλαιότερου flowadj ([15]) και η βελτίωση έγκειται στο ότι με το fplus μπορούμε να

βαθμονομούμε ταυτόχρονα και τα τρία ροόμετρα. Ο υπολογισμός του ενδεικνύμενου όγκου V_x σύμφωνα με το κάθε ροόμετρο γίνεται με βάση τη σχέση:

$$V_x = Q(1) \cdot (T(2)-T(1)) + Q(2) \cdot (T(3)-T(2)) + \dots + Q(N) \cdot (T(N+1)-T(N)) \quad (4.13)$$

Το πρόγραμμα σύμφωνα με τη σχέση 4.13 αθροίζει τα γινόμενα των τιμών των παροχών που στέλνει το κάθε ροόμετρο επί το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο μετρήσεων. Το άθροισμα αυτό αποτελεί την εκτίμηση του όγκου του νερού Q_x το οποίο έχει διαρεύσει το ροόμετρο κατά το συνολικό χρονικό διάστημα. Διαιρώντας την τιμή αυτή διά το συνολικό διάστημα βρίσκουμε τη μέση τιμή της ενδεικνύμενης παροχής όγκου στο διάστημα αυτό:

$$Q_x = V_x / T \quad (4.14)$$

Στην παρούσα ΔΕ, κατά τον έλεγχο βαθμονόμησης σε πίεση 1 bar και 25 °C συνδέουμε τα τρία ροόμετρα σε σειρά, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5. Στη συνέχεια, κατά τη βαθμονόμηση σε πίεση 1 bar και 95 °C αποσυνδέουμε από το κύκλωμα το ροόμετρο Heintz διότι, αφενός από την πρώτη βαθμονόμηση είχε φανεί ότι δεν λειτουργεί σωστά, στις χαμηλές παροχές, αφετέρου το ροόμετρο αυτό δεν χρησιμοποιείται στα πειράματα επανάψυξης. Το νέο κύκλωμα βαθμονόμησης που προκύπτει μετά την αφαίρεση του ροομέτρου Heintz απεικονίζεται στο σχήμα 4.6. Ακολούθως σε πιέσεις 2 και 3 bar δεν βαθμονομούμε το ροόμετρο E+H2, διότι οι τιμές που δίνει το ροόμετρο αυτό δεν καταγράφονται από το πρόγραμμα RIG. Αντιθέτως οι τιμές του E+H1 καταγράφονται από το πρόγραμμα RIG και για το λόγο αυτό είναι το ροόμετρο που κατά βάση θα χρησιμοποιήσουμε στα πειράματα επανάψυξης και συνεπώς πρέπει να βαθμονομηθεί σε πλήρες εύρος συνθηκών. Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι κατά τη βαθμονόμηση του ροομέτρου E+H1 σε πιέσεις 2 και 3 bar προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα ύπαρξης αέρα εντός του υδραυλικού κυκλώματος βαθμονόμησης παρακάμπτεται το τμήμα δοκιμών του ΘΥΚ, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7.

4.5.4 Χρήση προγράμματος fplus

Το πρόγραμμα fplus.for βρίσκεται στο directory C:\users\sxatzi\fcilib του Η/Υ της μετρητικής διάταξης του RIG. Κατά την εκκίνηση του προγράμματος εισάγονται τα εξής δεδομένα από το χρήστη:

1. ο χρόνος δειγματοληψίας (σε ticks)
2. τα κανάλια του ADC στα οποία είναι συνδεδεμένο το κάθε ροόμετρο
3. τα ονόματα των αρχείων που θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα

Κατά την παρούσα ΔΕ εισάγουμε τα εξής δεδομένα σε κάθε ενεργοποίηση του προγράμματος:

- χρόνος δειγματοληψίας: 100 ticks (default τιμή αν δεν εισάγει ο χρήστης κάποια τιμή χρόνου)
- το E+H1 στέλνει σήμα στο κανάλι 4 του ADC
το E+H2 στέλνει σήμα στο κανάλι 1 του ADC
το Heinp στέλνει σήμα στο κανάλι 7 του ADC
- τα ονόματα των αρχείων δίνονται στην ακόλουθη μορφή:
“*χαρακτηριστικό όνομα ροομέτρου_ονομαστική παροχή.dat*”
π.χ.: EH1_05.dat , EH2_10.dat , H_40.dat
Η ονομαστική παροχή δίνεται στη μορφή (% 10 L/min).

Μετά την καταχώρηση των αρχικών δεδομένων στο πρόγραμμα, ζητείται η εισαγωγή του αριθμού της βαθμίδας από την οποία θα ξεκινήσουν οι μετρήσεις. Αφού εισάγουμε τον αριθμό της αρχικής βαθμίδας, πληκτρολογούμε enter ακριβώς τη στιγμή που η στάθμη στον οπτικό σταθμοδείκτη του δοχείου βρίσκεται στη βαθμίδα αυτή και ξεκινάει η καταγραφή των μετρήσεων. Όταν η στάθμη φθάσει σε μία από τις επόμενες βαθμίδες (οποιαδήποτε θέλουμε), με το πάτημα οποιοδήποτε πλήκτρου τερματίζουμε τις μετρήσεις και στη συνέχεια εισάγουμε τον αριθμό της τελικής βαθμίδας. Το πρόγραμμα εκτελεί τους απαραίτητους υπολογισμούς και καταχωρεί τα αποτελέσματα στα αρχεία τα οποία ο χρήστης έχει αρχικά ορίσει. Η μορφή των αποτελεσμάτων που δίνει το πρόγραμμα είναι η εξής:

****Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α****

Χρόνος δύο διαδοχικών λήψεων	$\Delta t(10^{**}-2\text{sec}) =$	100
Ενδεικνύμενος όγκος	$V_x(\text{lt}) =$	3.384
Πραγματικός όγκος	$V_\pi(\text{lt}) =$	3.480
Μέση τιμή ενδεικνύμενης παροχής	$Q(\text{lt}/\text{min}) =$.512
Πραγματική παροχή ροομέτρου	$Q_\pi(\text{lt}/\text{min}) =$.526
Τυπική απόκλιση ενδεικ.παροχής	$S(\text{lt}/\text{min}) =$.014
Τυπική απόκλιση της Μ.Τ.ενδ.παρ.	$S_x(\text{lt}/\text{min}) =$.001
Συντελεστής μεταβολής (Sx/Q)	$C_x(\%) =$.144
Μέγεθος δείγματος	N	= 381
Χρονική διάρκεια δειγματοληψίας	T(sec)	= 396.610
Αρχή μέτρησης της βαθμίδας :		0
Τέλος μέτρησης της βαθμίδας:		1

4.5.5 Διαδικασία βαθμονόμησης μαγνητικών ροόμετρων

Τα βήματα που ακολουθούμε κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης είναι τα παρακάτω:

1. Συνδέουμε τα ροόμετρα σε διάταξη σειράς μεταξύ τους όπως φαίνεται στα σχήματα 4.3, 4.4 και 4.5
2. Επιτυγχάνουμε τις επιθυμητές συνθήκες στο δοχείο βρασμού.
3. Κατόπιν τροφοδοτούμε με νερό από το δοχείο βρασμού το κύκλωμα βαθμονόμησης και αναμένουμε μερικά λεπτά έως ότου σταθεροποιηθεί η ροή και φθάσουν σε θερμική ισορροπία τα ροόμετρα.
4. Με τη ρυθμιστική βαλβίδα που υπάρχει στον κλάδο τροφοδοσίας του τμήματος δοκιμών με νερό (κλάδος AB, σχήμα 3.1) ρυθμίζουμε την παροχή στα επιθυμητά επίπεδα.
5. Κλείνουμε το σφαιρικό διακόπτη που υπάρχει στην έξοδο του ογκομετρικού δοχείου. Κατόπιν εκκινούμε το fplus και εισάγουμε τα δεδομένα που ζητά, σύμφωνα με όσα αναφέραμε στο εδάφιο 4.5.4. Εν συνεχεία εισάγουμε το αριθμό της βαθμίδας από την οποία θα ξεκινήσει η μέτρηση και πληκτρολογούμε enter.
6. Με το πάτημα οποιουδήποτε πλήκτρου τερματίζουμε τη μέτρηση και τα αποτελέσματα καταγράφονται στα αρχεία τύπου .dat που έχουμε αρχικά ορίσει. Πρέπει να αναφέρουμε ότι είναι προτιμότερο να τερματίζουμε τη μέτρηση μόλις το νερό φθάνει στην αμέσως επόμενη βαθμίδα από αυτή που ορίσαμε ως βαθμίδα έναρξης, διότι με τον τρόπο αυτό πραγματοποιούμε περισσότερες μετρήσεις προτού χρειαστεί να αδειάσουμε το ογκομετρικό δοχείο και άρα μειώνουμε τον συνολικό χρόνο της διαδικασίας.
7. Μόλις το ογκομετρικό δοχείο γεμίσει, ανοίγουμε το σφαιρικό διακόπτη που υπάρχει στην έξοδο του και αδειάζουμε το περιεχόμενο του στο δοχείο συγκέντρωσης.

Ακολουθούν κάποιες παρατηρήσεις στην παραπάνω διαδικασία:

- Ο αέρας που πιθανόν να είναι εγκλωβισμένος στο κύκλωμα ίσως δημιουργεί ανομοιομορφίες στη ροή (μεταβολές στην ένδειξη και αυξημένες απώλειες). Για το λόγο αυτό το κύκλωμα πρέπει να εξαερίζεται ενδελεχώς πριν από κάθε λειτουργία.

- Για να λειτουργούν σωστά τα ροόμετρα πρέπει να είναι πάντα γεμάτα με νερό. Για το λόγο αυτό κατά την υλοποίηση του κυκλώματος βαθμονόμησης φροντίζουμε ώστε η κατάθλιψη του τελευταίου εν σειρά ροομέτρου να βρίσκεται σε υψηλότερο σημείο και από τα τρία ροόμετρα. Με τον τρόπο αυτό τα ροόμετρα παραμένουν συνεχώς γεμάτα με νερό εξασφαλίζοντας τη σωστή λειτουργία τους.

4.5.6 Επεξεργασία μετρήσεων

Βασικός στόχος του ελέγχου των βαθμονομήσεων είναι να διαπιστώσουμε αν η παροχή όγκου νερού που μετρούν τα ροόμετρα προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική παροχή που διέρχεται μέσα από αυτά. Για να γίνει η απαραίτητη στατιστική επεξεργασία συλλέγουμε τα ζεύγη (Q_π, Q_x) μέσω του προγράμματος *flplus*. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας το στατιστικό πακέτο **R**, καλούμε τη συνάρτηση *fit* (σύμφωνα με όσα αναφέραμε στο εδάφιο 4.1) η οποία υπολογίζει τη συνάρτηση αναδρομής της μορφής:

$$Q_\pi = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot Q_x \quad (4.15)$$

όπου

Q_π : πραγματική παροχή
 Q_x : ενδεικνύμενη παροχή
 α_0, α_1 : παράμετροι αναδρομής

Εφόσον υπολογιστούν οι παράμετροι της αναδρομής, ακολουθούν οι στατιστικοί τους έλεγχοι, οι οποίοι έχουν ως εξής:

Στατιστικός έλεγχος παραμέτρου α_0

$$\begin{aligned} H_0: \alpha_0 &= 0 \text{ (μηδενική υπόθεση)} \\ H_1: \alpha_0 &\neq 0 \text{ (εναλλακτική υπόθεση)} \end{aligned} \quad (4.16)$$

τιμή σύγκρισης: $t_0 = (\alpha_0 - 0)/se(\alpha_0)$

- Στατιστικός έλεγχος παραμέτρου α_1

$$\begin{aligned} H_0: \alpha_1 &= 1 \text{ (μηδενική υπόθεση)} \\ H_1: \alpha_1 &\neq 1 \text{ (εναλλακτική υπόθεση)} \end{aligned} \quad (4.17)$$

τιμή σύγκρισης: $t_0 = (\alpha_1 - 1)/se(\alpha_1)$

Επιλέγουμε δύο επίπεδα σημαντικότητας, $\alpha=5\%$ για αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης και $\alpha=1\%$ για απόρριψη αυτής. Αν οι μηδενικές υποθέσεις γίνουν αποδεκτές, αυτό σημαίνει ότι τα μαγνητικά ροόμετρα λειτουργούν σωστά και ότι οι ενδεικνύμενες τιμές της παροχής, τείνουν με την επιθυμητή ακρίβεια στις πραγματικές τιμές. Αν οι μηδενικές υποθέσεις απορριφθούν συμπεραίνουμε ότι το ροόμετρο δεν λειτουργεί σωστά και άρα πρέπει να γίνουν ρυθμίσεις απευθείας σε αυτό είτε στο πρόγραμμα καταγραφής ώστε οι τιμές που καταγράφονται στον Η/Υ να είναι ακριβείς.

4.5.7 Συμπεράσματα βαθμονόμησης μαγνητικών ροόμετρων

Πριν παρουσιάσουμε τα συμπεράσματα του ελέγχου των βαθμονομήσεων των μαγνητικών ροομέτρων παραθέτουμε κάποιες παρατηρήσεις:

- Πριν τη διαδικασία του πλήρους ελέγχου της βαθμονόμησης των τριών ροομέτρων πραγματοποιήσαμε δοκιμαστικό έλεγχο, σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος, για παροχές 0.5-3.0 L/min. Με τον τρόπο αυτό θέλαμε να διαπιστώσουμε σε γενικές γραμμές την κατάσταση στην οποία βρίσκονται τα ροόμετρα, λόγω του ότι βαθμονομήθηκαν για τελευταία φορά πριν πέντε χρόνια. Η δοκιμαστική βαθμονόμηση έδειξε ότι τα ροόμετρα E+H1 και E+H2 που μας ενδιαφέρουν βρίσκονται σε πολύ καλή κατάσταση.
- Κατά τη διαδικασία του πλήρους ελέγχου ελέγξαμε τη βαθμονόμηση μόνο του ροομέτρου E+H1 σε πλήρη κλίμακα συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας (πίνακας 4.4), διότι μόνο το ροόμετρο αυτό χρησιμοποιείται ουσιαστικά για την καταγραφή της παροχής όγκου νερού στα πειράματα επανάψυξης. Οι τιμές του ροομέτρου E+H2 δεν καταγράφονται από το πρόγραμμα RIG και για το λόγο αυτό δεν ελέγχθηκε η βαθμονόμησης του σε πιέσεις 2 και 3 bar.
- Τόσο κατά το δοκιμαστικό έλεγχο του ροομέτρου Heineg αλλά και κατά τον πλήρη έλεγχο του, φάνηκε ότι το ροόμετρο αυτό χρήζει νέας βαθμονόμησης και σε συνδυασμό με το ότι δεν αποτελεί μέρος του ΘΥΚ δεν ελέγχθηκε σε θερμοκρασία υψηλότερη των 25 °C .
- Ο λόγος που δεν ελέγξαμε τη βαθμονόμηση των ροομέτρων σε πλήρες εύρος παροχής 0-10 L/min είναι ότι αυτό θα απαιτούσε να συμπιέσουμε υδραυλικά το δοχείο βρασμού, πράγμα που θέλαμε να αποφύγουμε. Επίσης η παροχή του νερού στα πειράματα επανάψυξης της παρούσας ΔΕ είναι σταθερή και ίση με 1 L/min. Άρα το εύρος στο οποίο τελικά βαθμονομήθηκαν τα ροόμετρα E+H1 και E+H2 (πίνακας 4.4) ανταποκρίνεται πλήρως στην παροχή αυτή.
- Δεν πραγματοποιήσαμε έλεγχο της βαθμονόμησης του ροομέτρου E+H1 σε πιέσεις 4 και 5 bar λόγω του ότι ήδη από τα 3 bar συνέβαινε βίαιη ατμοποίηση στο

ογκομετρικό δοχείο εξαιτίας της απότομης πτώσης πίεσης - από 3 σε 1 bar - γεγονός που επηρεάζει αρνητικά την ακρίβεια του ελέγχου, καθώς υπήρχαν φυσαλίδες ατμού και στους κλάδους του κυκλώματος βαθμονόμησης.

Για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης των τριών ροόμετρων τα σημαντικότερα στοιχεία τους συγκεντρώθηκαν σε πίνακες και σε συνδυασμό με τα γραφήματα των ευθειών αναδρομής και τις αντίστοιχες ελλείψεις εμπιστοσύνης παρουσιάζονται στο τέλος του κεφαλαίου. Στους πίνακες 4.5 έως 4.11 υπάρχουν συγκεντρωμένα τα εξής στοιχεία κάθε βαθμονόμησης:

1. Οι παράμετροι τις αναδρομής α_0 και α_1
2. Η μέση τετραγωνική απόκλιση RMS
3. συντελεστής πολλαπλής συσχέτισεως R
4. Οι τιμές συγκρίσεως t_0 και t_1
5. Οι κρίσιμες τιμές ελέγχου $t_c(0,95)$ και $t_c(0,99)$
6. Ο στατιστικός έλεγχος των α_0 και α_1

Η εποπτεία των παραμέτρων αυτών μας βοηθά να εξάγουμε πολύ χρήσιμα συμπεράσματα για τη λειτουργία των ροόμετρων και για τη συμπεριφορά τους στις διάφορες θερμοκρασιακές μεταβολές. Επίσης πραγματοποιείται σύγκριση και με παλαιότερες εργασίες [2], [3], [4] ώστε να διαπιστώσουμε αν η ακρίβεια των ροομέτρων έχει μεταβληθεί με την πάροδο του χρόνου. Τέλος θα διερευνήσουμε την εξάρτηση της ακρίβειας των ροομέτρων E+H1 και E+H2 με τη θερμοκρασία του διερχόμενου νερού, μέσω των ελλείψεων εμπιστοσύνης των παραμέτρων τους σε επίπεδα σημαντικότητας 5 και 1 %. Οι ελλείψεις αυτές παρουσιάζονται στα σχήματα 4.20 έως 4.25.

Όσον αφορά το ροόμετρο E+H1 (πίνακες 4.5, 4.6, 4.7, 4.8), σε όλους τους ελέγχους βαθμονόμησης ο δείκτης R λαμβάνει πολύ υψηλή τιμή, γεγονός που συνεπάγεται πολύ υψηλή γραμμική συσχέτιση των πειραματικών σημείων, την οποία μπορούμε να παρατηρήσουμε και οπτικά στα σχήματα 4.12, 4.13, 4.14 και 4.15. Επίσης σε όλες τις περιπτώσεις οι στατιστικοί έλεγχοι των παραμέτρων α_0 και α_1 καθιστούν αποδεκτές τις μηδενικές υποθέσεις (σχέσεις 4.16 και 4.17) και μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το ροόμετρο δεν χρειάζεται εκ νέου βαθμονόμηση. Το ροόμετρο λειτουργεί πολύ καλά σε όλο το εύρος πιέσεων 1 – 3 bar, με την τιμή του δείκτη RMS να κυμαίνεται στην περιοχή 1.08 - 6.02 %. Με αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης έως 2 bar, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια και σταθερότητα των πειραματικών μετρήσεων όπως φαίνεται και από τη μείωση του δείκτη RMS αλλά και την ελάττωση της επιφάνειας που καταλαμβάνουν οι ελλείψεις

εμπιστοσύνης (σχήματα 4.22 και 4.23). Αυτό όμως δεν συμβαίνει στην περίπτωση του ελέγχου σε συνθήκες 3 bar/136 °C όπου ο δείκτης RMS αυξάνει στην τιμή 6.02 % ενώ η επιφάνεια της αντίστοιχης έλλειψης αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με τις προηγούμενες.. Το γεγονός αυτό ενδέχεται να οφείλεται στη βίαιη ατμοποίηση που λαμβάνει χώρα κατά την είσοδο του νερού στο ογκομετρικό δοχείο στις συνθήκες αυτές, η οποία επηρεάζει αρνητικά την ακρίβεια του ελέγχου και συνεπώς χαλάει τη στατιστική της βαθμονόμησης.

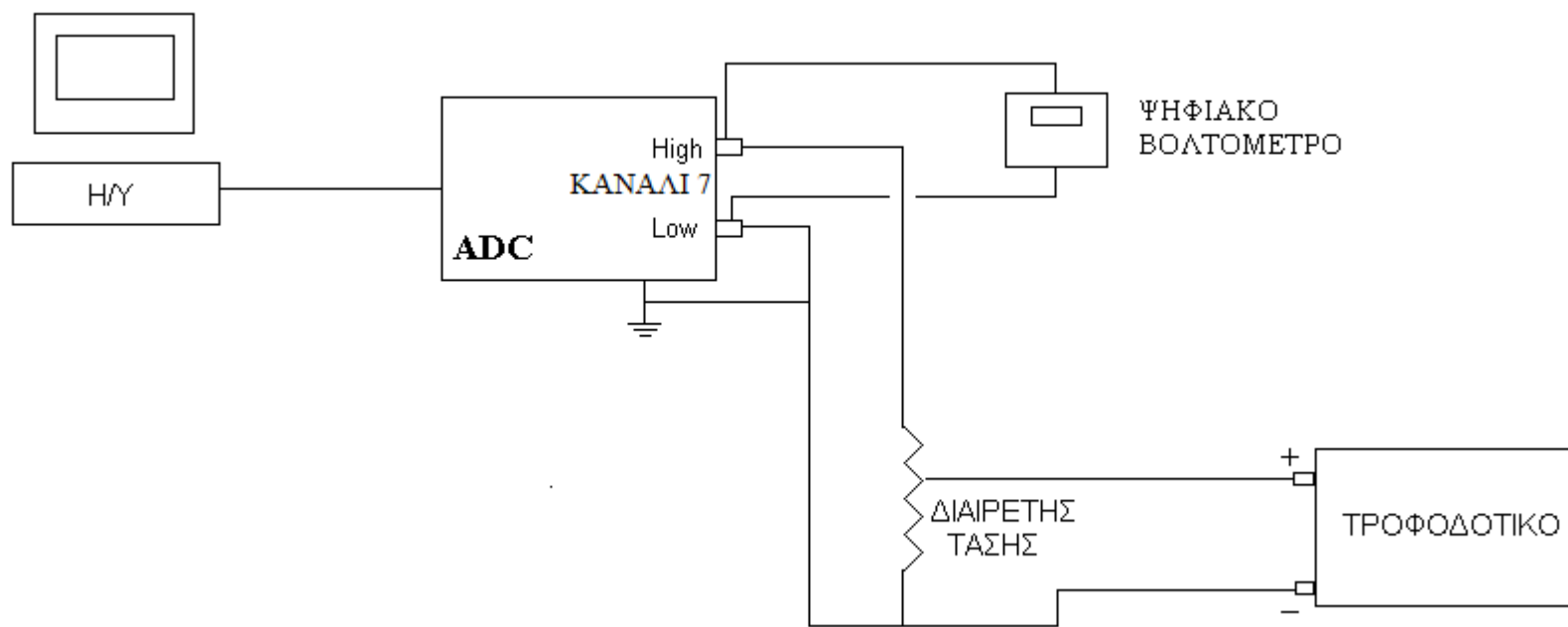
Στη συνέχεια παρατηρώντας τα σχήματα 4.22 και 4.23 διαπιστώνουμε ότι αφενός οι τέσσερις ελλείψεις εμπιστοσύνης σε επίπεδα σημαντικότητας 5 και 1 % συμπίπτουν, αφετέρου και οι τέσσερις ελλείψεις περικλείουν το σημείο (1,0). Κατά συνέπεια προκύπτει ότι στην περιοχή λειτουργίας από 1 έως 3 bar και για θερμοκρασίες από 25 έως 136 °C, οι μετρήσεις του ροομέτρου E+H1 δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά με αποτέλεσμα να μην απαιτείται μεταβολή της βαθμονόμησης του οργάνου συναρτήσει των συνθηκών ροής.

Στην περίπτωση του ροομέτρου E+H2 (πίνακες 4.9 και 4.10), τα πειραματικά δεδομένα έχουν πολύ υψηλή γραμμική συσχέτιση όπως φανερώνει ο δείκτης R ενώ η μικρή τιμή του δείκτη RMS (3.8 - 4.7 %) δείχνει την καλή προσαρμογή της ευθείας αναδρομής στα πειραματικά σημεία γεγονός που παρατηρείται και στα σχήματα 4.16 και 4.17. Επίσης οι έλεγχοι των παραμέτρων α_0 και α_1 καθιστούν αποδεκτές τις μηδενικές υποθέσεις (σχέσεις 4.16 και 4.17) και συνεπώς καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το ροόμετρο αυτό δεν χρειάζεται εκ νέου βαθμονόμηση. Και στην περίπτωση του ροομέτρου αυτού επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια και σταθερότητα των πειραματικών σημείων με την αύξηση της θερμοκρασίας καθώς παρατηρείται μείωση του δείκτη RMS.

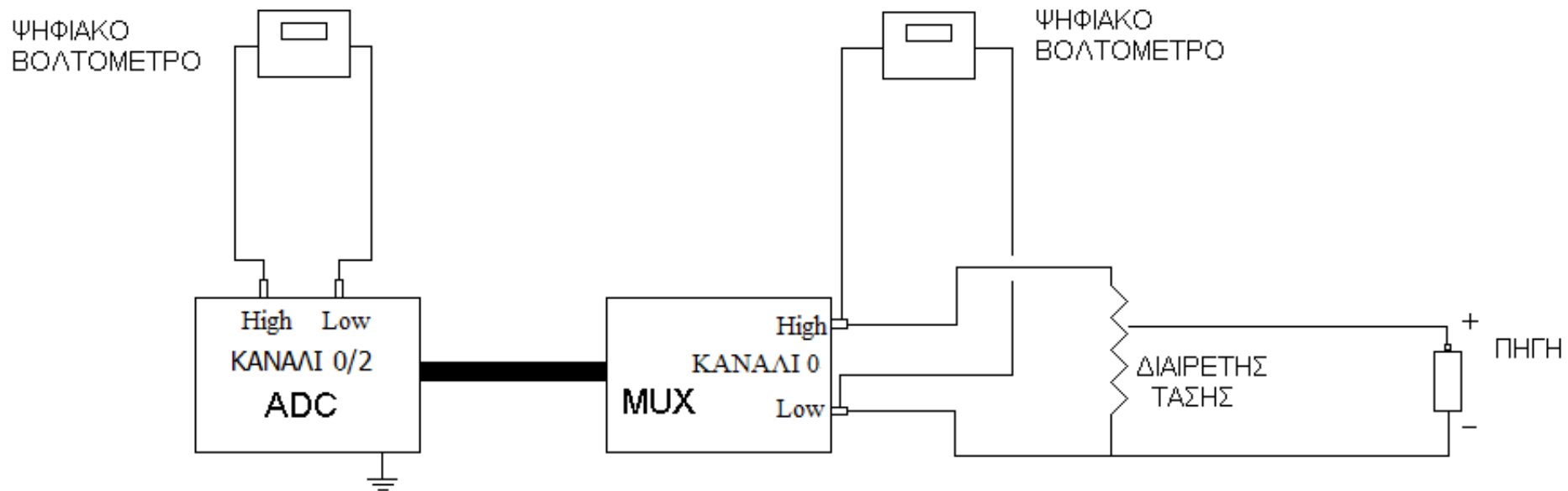
Επιπλέον όσον αφορά τις ελλείψεις εμπιστοσύνης αυτές συμπίπτουν σε κάποιο βαθμό όπως φαίνεται στα σχήματα 4.24 και 4.25. Αναλυτικότερα για την περίπτωση νερού θερμοκρασίας 25 °C παρατηρούμε ότι το σημείο (1,0) βρίσκεται εντός της έλλειψης εμπιστοσύνης σε επίπεδο σημαντικότητας 5%. Αντίθετα για την περίπτωση νερού θερμοκρασίας 95 °C η έλλειψη εμπιστοσύνης σε επίπεδο σημαντικότητας 5% μετατοπίζεται, χωρίς όμως να μεταβάλλει σημαντικά τις διαστάσεις της, αφήνοντας το σημείο (1,0) εκτός. Υπολογίζοντας την έλλειψη και σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1% παρατηρούμε ότι η αύξηση της επιφάνειας της έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή του σημείου (1,0) εντός της έλλειψης. Δεδομένου του κοινού τύπου των ελλείψεων οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η ακρίβεια του ροομέτρου δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη μεταβολή της θερμοκρασίας του νερού από τους 25 °C στους 95°C.

Όσον αφορά στο ροόμετρο Heine (πίνακας 4.11) οι έλεγχοι και των δύο παραμέτρων καθιστούν αποδεκτές τις μηδενικές υποθέσεις (σχέσεις 4.16 και 4.17), γεγονός όμως το οποίο ενδεχομένως να οφείλεται στην κακή στατιστική του πειράματος και το σημαντικό σφάλμα στην εκτίμηση των παραμέτρων α_0 και α_1 . Η κακή στατιστική του πειράματος φαίνεται και από την υπερβολικά μεγάλη τιμή του δείκτη RMS η οποία προκύπτει 260.8 %. Το γεγονός αυτό εξηγείται από το ότι το ροόμετρο αυτό είναι κατασκευασμένο για σχετικά μεγάλες παροχές. Έτσι όταν αφαιρέσαμε την παροχή 0.5 L/min από τα πειραματικά δεδομένα, το RMS

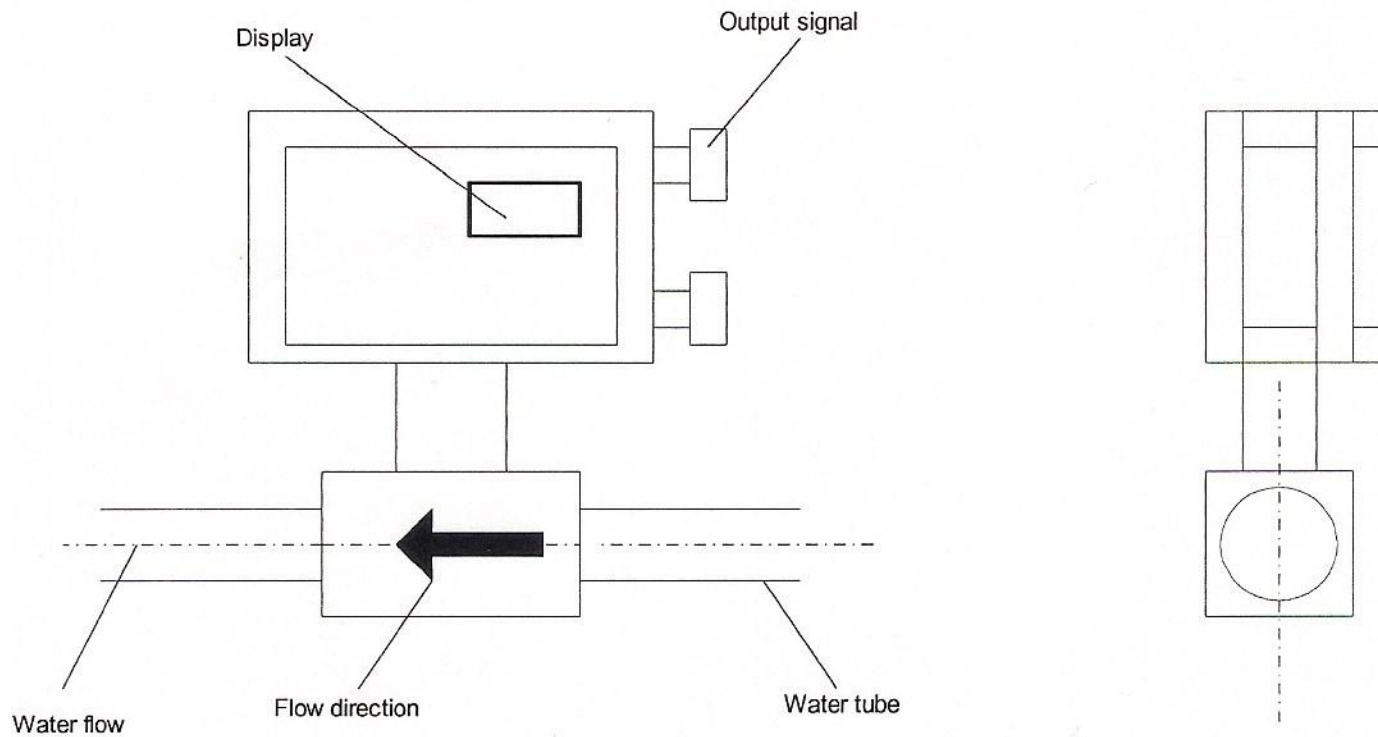
βελτιώθηκε εντυπωσιακά μειούμενο σε επίπεδο της τάξης του 12.5 %. Δηλαδή όπως διακρίνεται και στο σχήμα 4.18 ένα σημείο επί της καμπύλης «κατέστρεψε» τη στατιστική του πειράματος βαθμονόμησης. Για το λόγο αυτό παραθέτουμε τον πίνακα 4.14 στον οποίο περιλαμβάνονται τα στοιχεία της βαθμονόμησης που προκύπτουν μετά την αφαίρεση της παροχής 0.5 L/min καθώς και την αντίστοιχη ευθεία αναδρομής (σχήμα 4.19). Στην περίπτωση αυτή ο στατιστικός έλεγχος της παραμέτρου α_1 καθιστά τη μηδενική υπόθεση αποδεκτή (σχέσεις 4.17), ενώ για την παράμετρο α_0 ο έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης εμπίπτει στην περιοχή αβεβαιότητας (σχέσεις 4.16). Έτσι λοιπόν συμπεραίνουμε ότι αφενός το ροόμετρο αυτό χρειάζεται περεταίρω έλεγχο βαθμονόμησης, ο οποίος θα εξετάσει μεγαλύτερο εύρος παροχών πλησιέστερα στην ονομαστική περιοχή λειτουργίας του, αφετέρου ότι δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για μέτρηση παροχών μικρότερων του 1 L/min όπως αναφέρεται και στην ΔΕ [4].



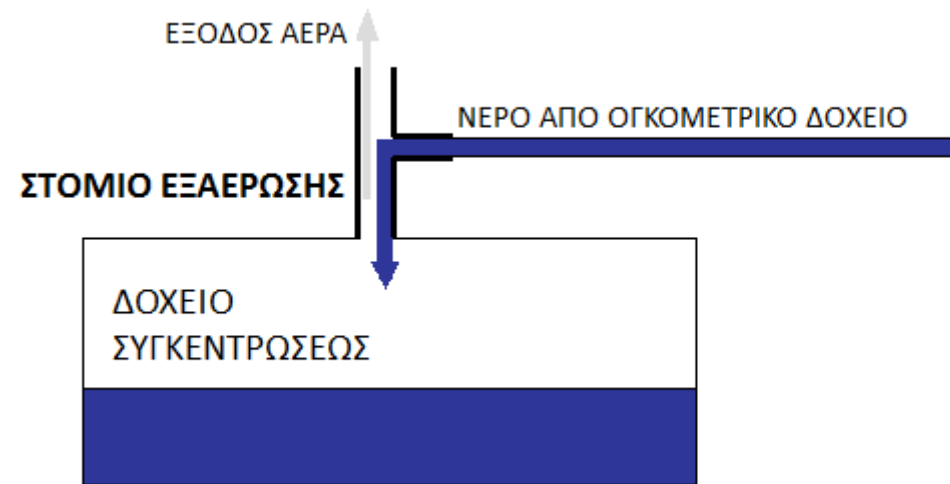
Σχήμα 4.1: Διάταξη βαθμονόμησης ADC



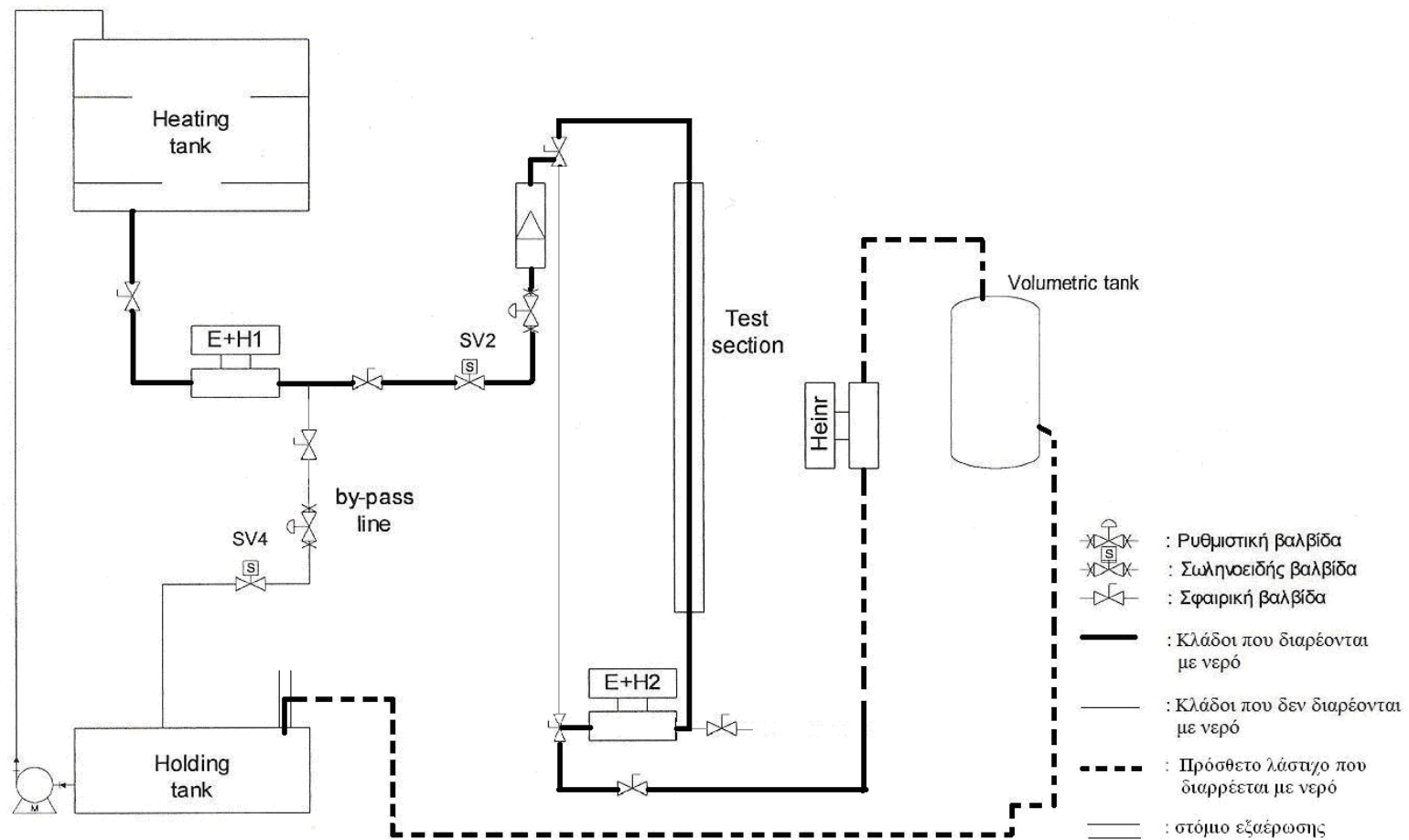
Σχήμα 4.2: Διάταξη βαθμονόμησης MUX-A/MUX-B



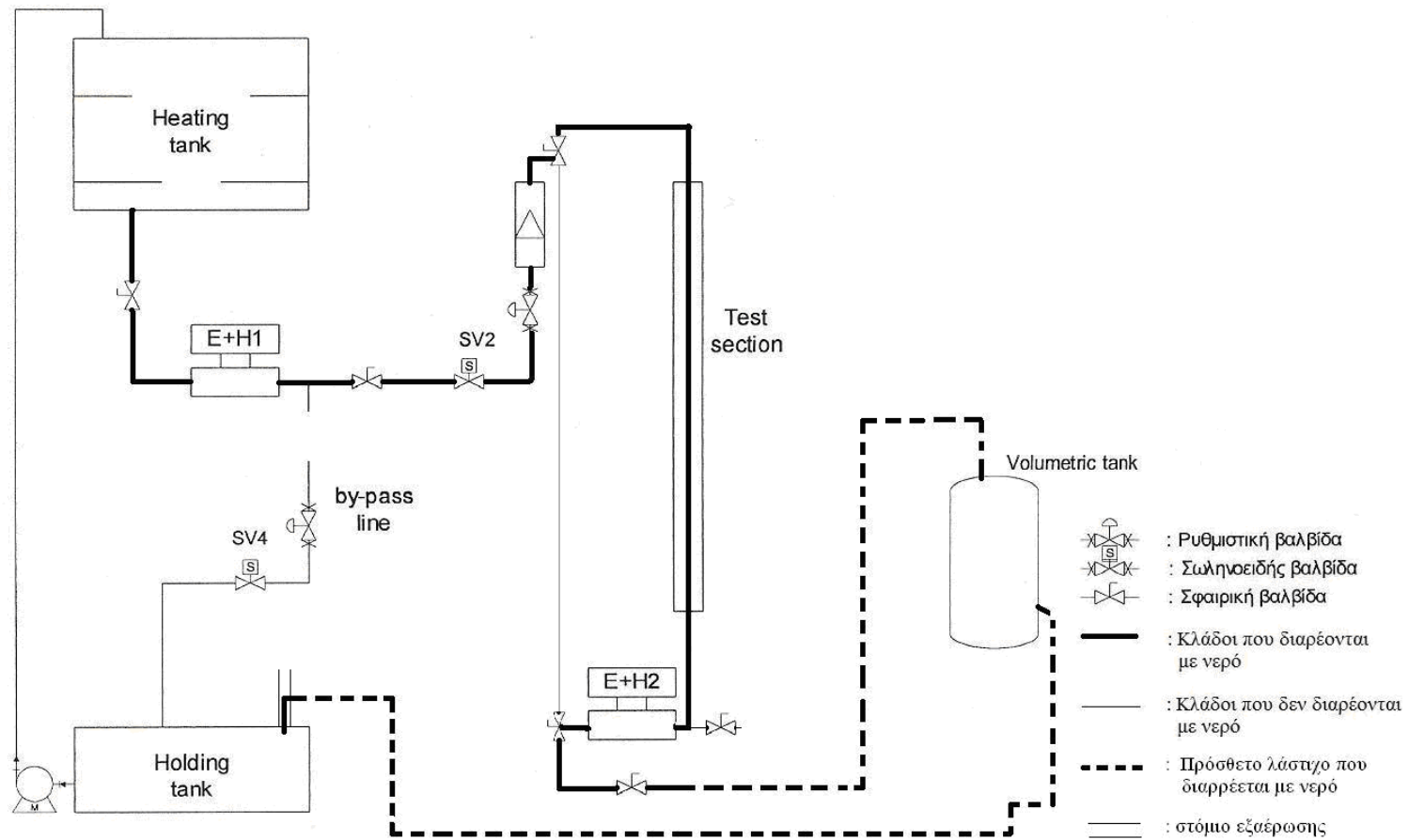
Σχήμα 4.3: Τυπικό μαγνητικό ροόμετρο



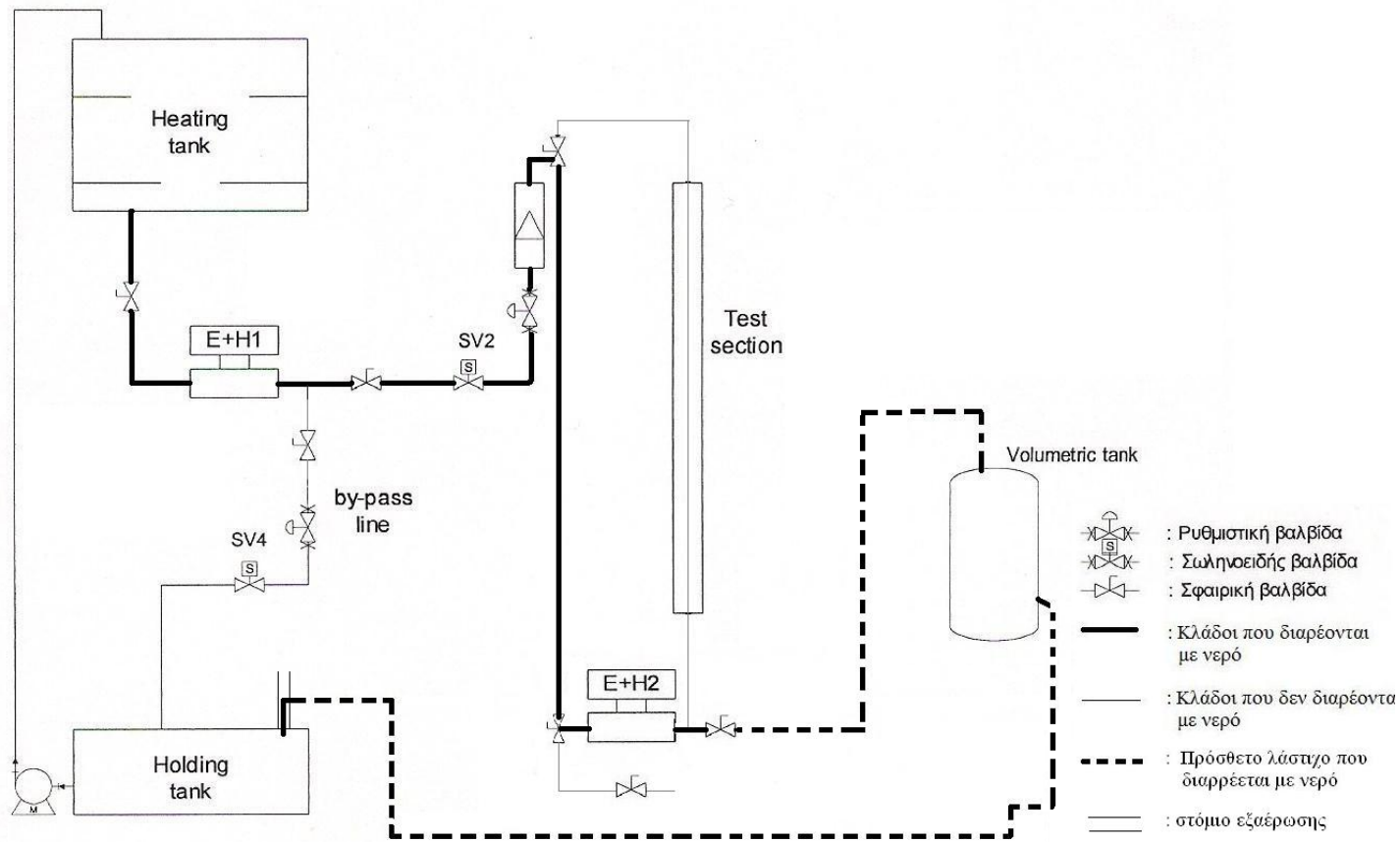
Σχήμα 4.4: Πρόσθετο στόμιο εξαέρωσης στην είσοδο του δοχείου συγκέντρωσης



Σχήμα 4.5: Διάταξη βαθμονόμησης των τριών ροομέτρων εν σειρά σε συνθήκες 1bar/25°C



Σχήμα 4.6: Διάταξη βαθμονόμησης των ροομέτρων E+H1 και E+H2 εν σειρά σε συνθήκες 1bar/95°C



Σχήμα 4.7: Διάταξη βαθμονόμησης του ροόμετρου E+H1 σε πιέσεις 2 και 3 bar

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικός πίνακας για τον ADC

Εργασία \ ΣΒ²	α1	α0	RMS%	R	t1	t0	α1	α0	tc(0.95)	tc(0.99)
Παρούσα ΔΕ (30 min)	0.9999	0.0167	0.1896	1.0000	-0.6247	29.3236	=1	≠0	2.0281	-
Παρούσα ΔΕ(300 min)	0.9999	0.0170	0.2675	1.0000	-0.6479	24.5321	=1	≠0	2.0281	-
Καρασούλος	0.9998	0.0163	0.924	1.0000	-1.277	16.3546	=1	≠0	2.0294	2.7224
Πλαστοργός	1.0000	0.0122	0.269	1.0000	0.0850	11.4900	=1	≠0	2.0370	2.7360

Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικός πίνακας για το MUX-A

Εργασία \ ΣΒ	α1	α0	RMS%	R	se(α₁)	t1	t0	α1	α0	tc(0.95)	tc(0.99)
Παρούσα ΔΕ	993.7969	2.8141	0.1428	1.0000	0.5035	-12.3189	0.9495	≠1	=0	2.0244	-
Καρασούλος	996.9562	5.1598	0.710	1.0000	0.0638*10 ⁻³	-47.713	13.852	≠1	≠0	2.093	2.093
Πλαστοργός	996.6943	3.2812	0.115	1.0000	0.0540	-61.1190	10.2500	≠1	≠0	2.0370	-

² όπου ΣΒ : Στοιχεία Βαθμονόμησης

Πίνακας 4.3 : Συγκεντρωτικός πίνακας για το MUX-B

ΣΒ Εργασία	α1	α0	RMS %	R	t1	t0	α1	α0	tc(0.95)	tc(0.99)
Παρούσα ΔΕ	199.9375	0.6506	0.0632	1.0000	-1.4462	0.5030	=200	=0	2.1199	-
Καρασούλος	199.9970	0.5177	0.667	1.0000	-3.495	2.8168	≠200	? ³	2.101	2.878
Πλαστοργός	199.9114	6.4730	0.4740	1.0000	-0.2600	0.6340	=200	=0	2.0000	-

Πίνακας 4.4: Έλεγχοι βαθμονομήσεων μαγνητικών ροόμετρων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα ΔΕ

Συνθήκες Ροόμετρο	Πίεση	Θερμοκρασία	Εύρος Παροχών
EH+1	1bar	25°C, 95°C	0.5-5L/min
	2bar	120°C	0.5-4L/min
	3bar	136°C	0.5-4L/min
EH+2	1bar	25°C, 95°C	0.5-5L/min
Heinr	1bar	25°C	0.5-5L/min

³ Περιοχή αβεβαιότητας

Πίνακας 4.5: Συγκεντρωτικός πίνακας βαθμονομήσεων για το ροόμετρο E+H1 σε συνθήκες 1 bar/25°C

ΣΒ Εργασία	α1	α0	RMS %	R	t1	t0	α1	α0	tc(0.9)	tc(0.99)
Παρούσα ΔΕ	1.0340	-0.0207	4.5253	0.9974	1.3703	-0.2547	=1	=0	2.2622	-
Καρασούλος	1.0044	-0.08956	1.512	0.9994	5.011	-1.658	≠1	=0	2.131	2.947
Πλαστοργός	1.0442	-0.12264	6.162	0.9990	3.96	-1.936	≠1	=0	2.110	2.576
Χατζηδάκης	1.0078	-0.0267	4.9100	0.9984	0.6739	-0.4733	=1	=0	2.0640	-

Πίνακας 4.6: Συγκεντρωτικός πίνακας βαθμονομήσεων για το ροόμετρο E+H1 σε συνθήκες 1 bar/95°C

ΣΒ Εργασία	α1	α0	RMS %	R	t1	t0	α1	α0	tc(0.95)	tc(0.99)
Παρούσα ΔΕ	0.9798	0.0648	1.8644	0.9995	-1.8553	1.9329	=1	=0	2.3060	-
Καρασούλος (100°C)	0.9974	-0.0360	4.207	0.9964	-0.127	-0.298	=1	=0	2.101	-
Πλαστοργός(100°C)	1.0337	-0.1180	5.115	0.9988	2.738	-1.690	≠1	=0	2.110	2.576
Χατζηδάκης	1.0119	-0.0186	3.2300	0.9985	0.8911	-0.2460	=1	=0	2.1100	-

Πίνακας 4.7: Συγκεντρωτικός πίνακας βαθμονομήσεων για το ροόμετρο E+H1 σε συνθήκες 2 bar/120°C

ΣΒ Εργασία	α1	α0	RMS %	R	t1	t0	α1	α0	tc(0.95)
Παρούσα ΔΕ	0.9799	0.0292	1.8468	0.9996	-1.8142	1.1028	=1	=0	2.4469
Πλαστουργός	1.1005	-0.0133	4.5880	0.9954	0.2930	-0.1510	=1	=0	2.1310

Πίνακας 4.8: Συγκεντρωτικός πίνακας βαθμονόμησης για το ροόμετρο E+H1 σε συνθήκες 3 bar/134°C

ΣΒ Εργασία	α1	α0	RMS %	R	t1	t0	α1	α0	tc(0.95)
Παρούσα ΔΕ	0.9220	0.1241	6.0143	0.9917	-1.5973	1.0135	=1	=0	2.4469

Πίνακας 4.9: Συγκεντρωτικός πίνακας βαθμονόμησης για το ροόμετρο E+H2 σε συνθήκες 1 bar/25°C

ΣΒ Εργασία	α1	α0	RMS %	R	t1	t0	α1	α0	tc(0.95)
Παρούσα ΔΕ	1.0141	-0.0314	4.6438	0.9974	0.5817	-0.3866	=1	=0	2.2622

Πίνακας 4.10: Συγκεντρωτικός πίνακας βαθμονόμησης για το ροόμετρο EH2 σε συνθήκες 1 bar/95°C

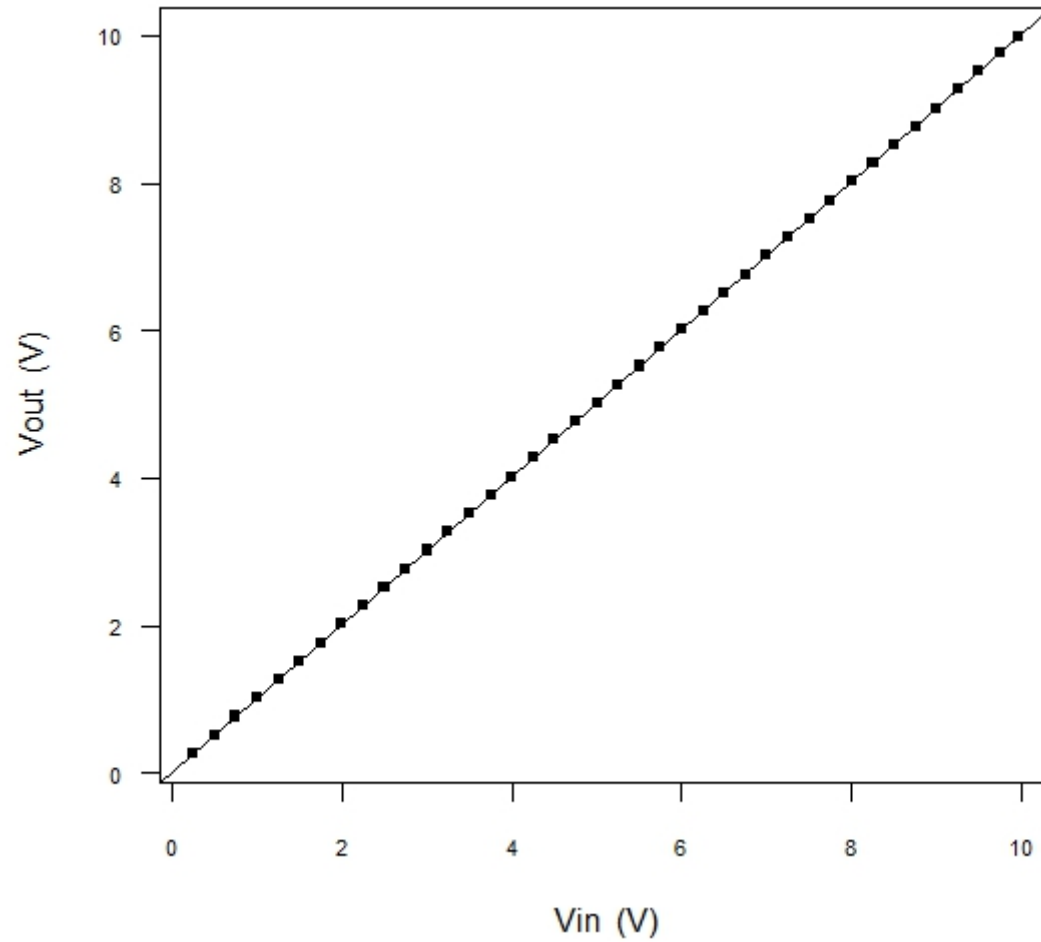
ΣΒ Εργασία	α1	α0	RMS %	R	t1	t0	α1	α0	tc(0.95)
Παρούσα ΔΕ	0.9632	-0.0223	3.8714	0.9973	2.3060	-0.2807	=1	=0	2.3060

Πίνακας 4.11: Συγκεντρωτικός πίνακας βαθμονόμησης για το ροόμετρο Heint σε συνθήκες 1 bar/25°C

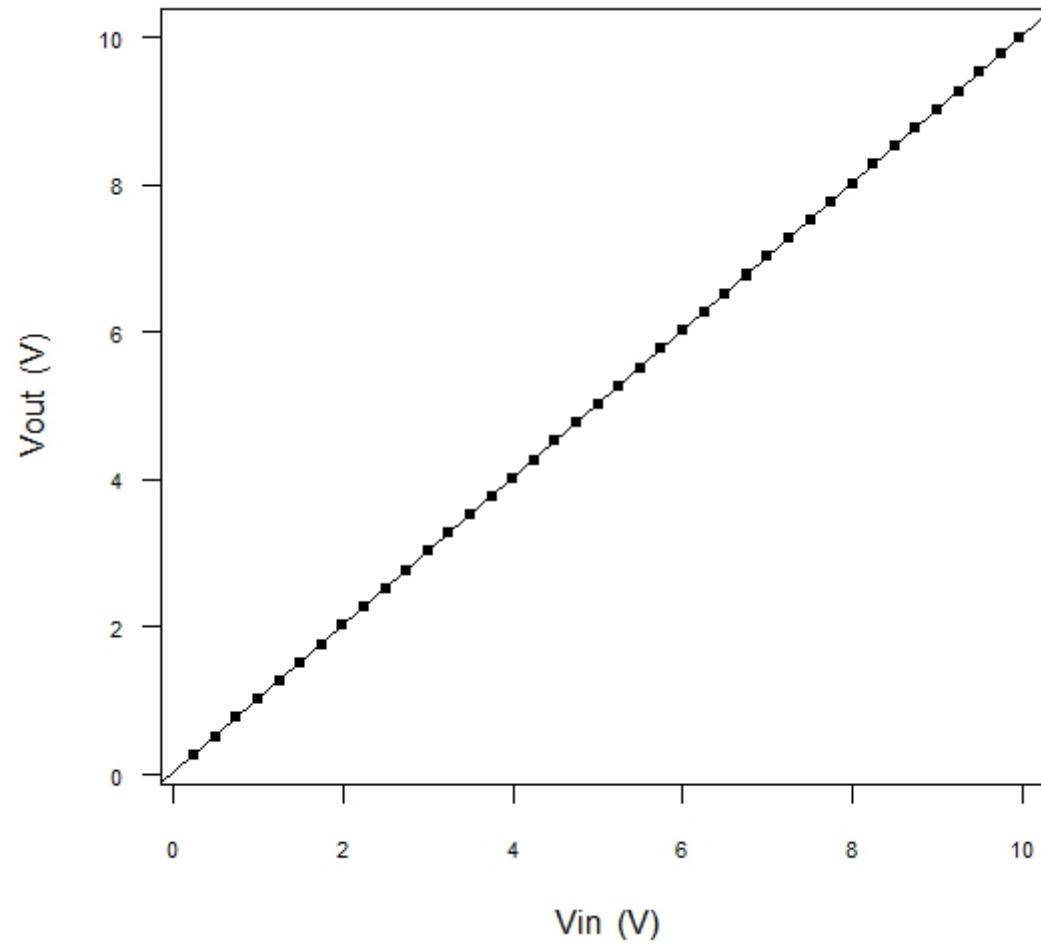
ΣΒ Εργασία	α1	α0	RMS %	R	t1	t0	α1	α0	tc(0.95)
Παρούσα ΔΕ	0.9640	-0.2454	216.8452	0.9643	-0.3848	-0.7608	=1	=0	2.3060

Πίνακας 4.12: Συγκεντρωτικός πίνακας βαθμονόμησης για το ροόμετρο Heint σε εύρος παροχών 1 – 5 L/min, σε συνθήκες 1 bar/25°C

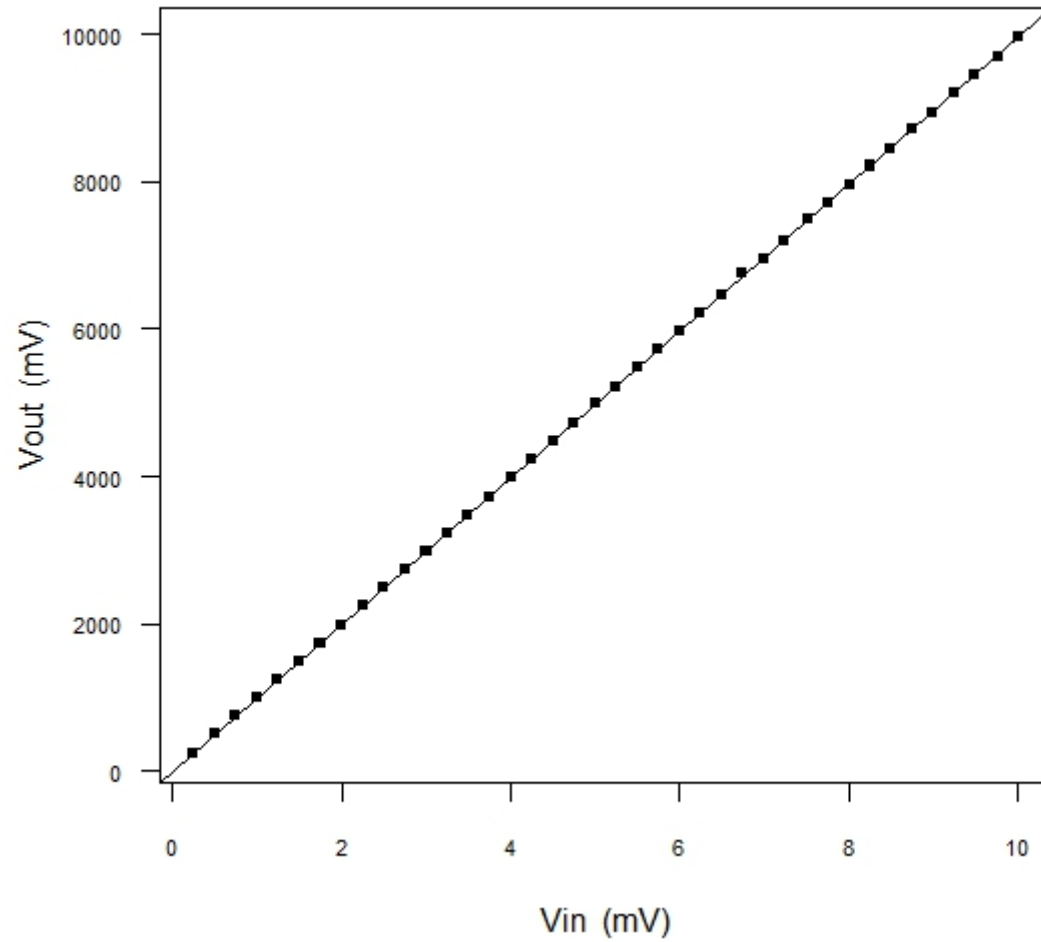
ΣΒ Εργασία	α1	α0	RMS %	R	t1	t0	α1	α0	tc(0.95)	tc(0.99)
Παρούσα ΔΕ	1.1755	- 1.0505	12.500	0.9818	2.0427	-3.3677	=1	?	2.3646	3.4995



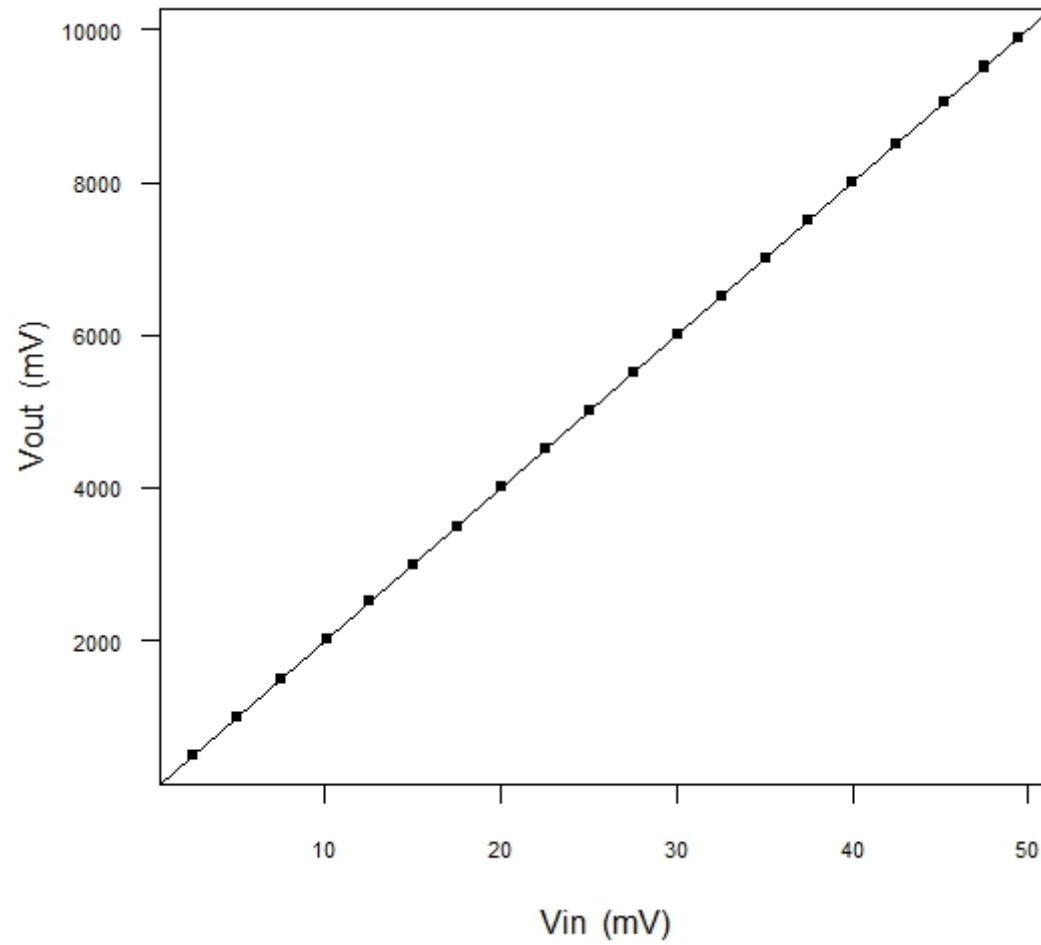
Σχήμα 4.8: Ευθεία αναδρομής του ADC μετά από λειτουργία 30 min



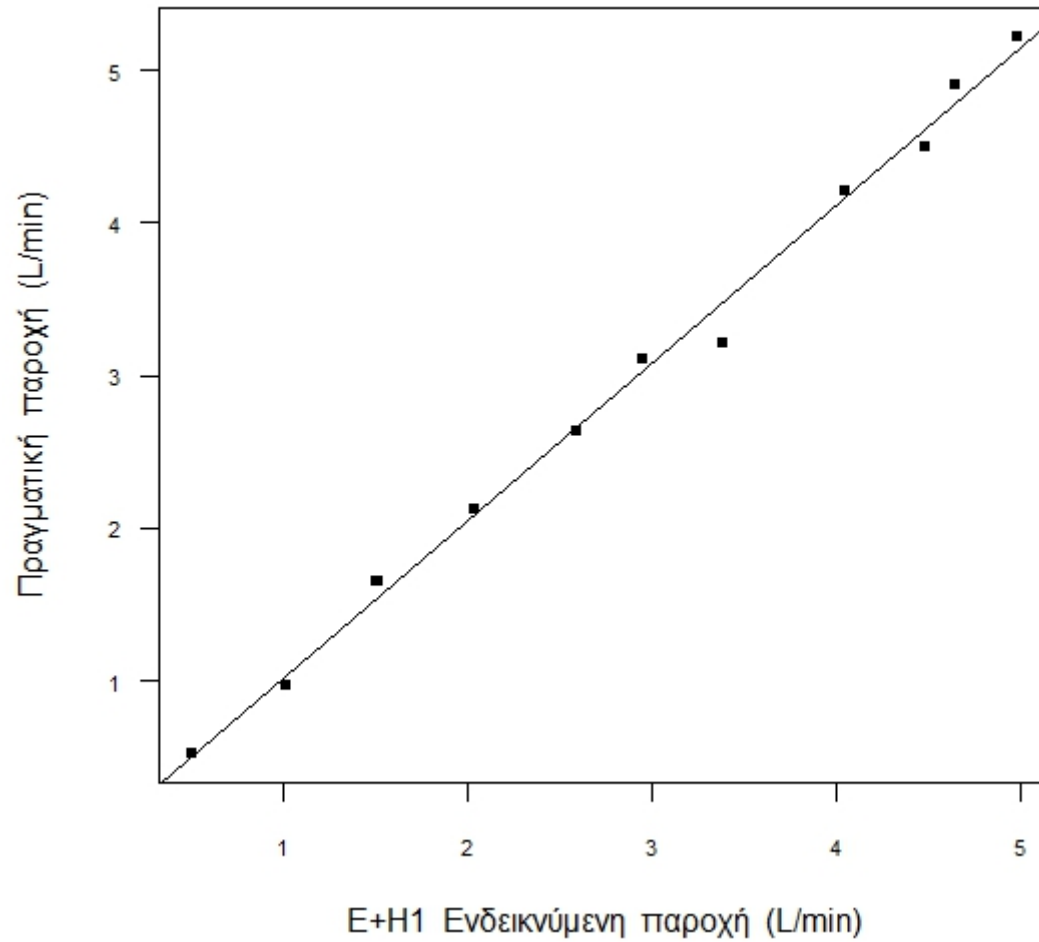
Σχήμα 4.9: Ευθεία αναδρομής του ADC μετά από λειτουργία 300 λεπτών



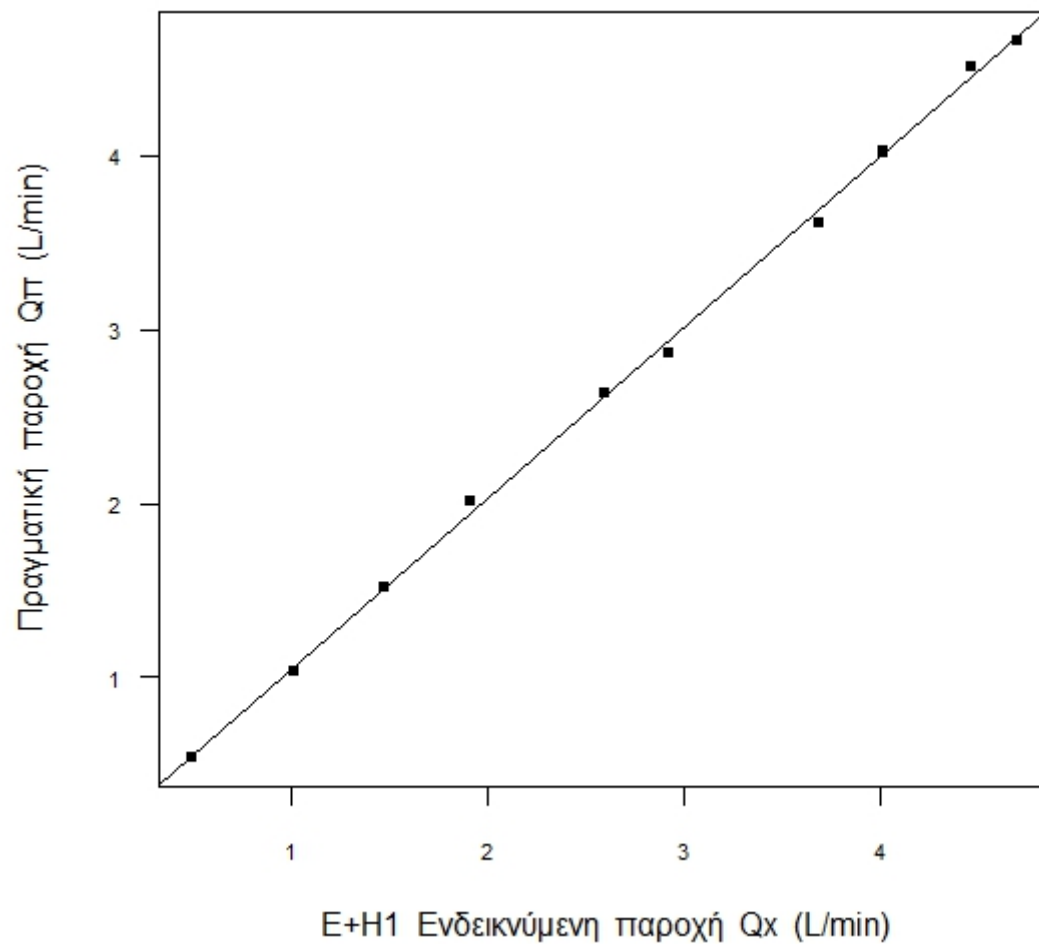
Σχήμα 4.10: Ευθεία αναδρομής του MUX-A



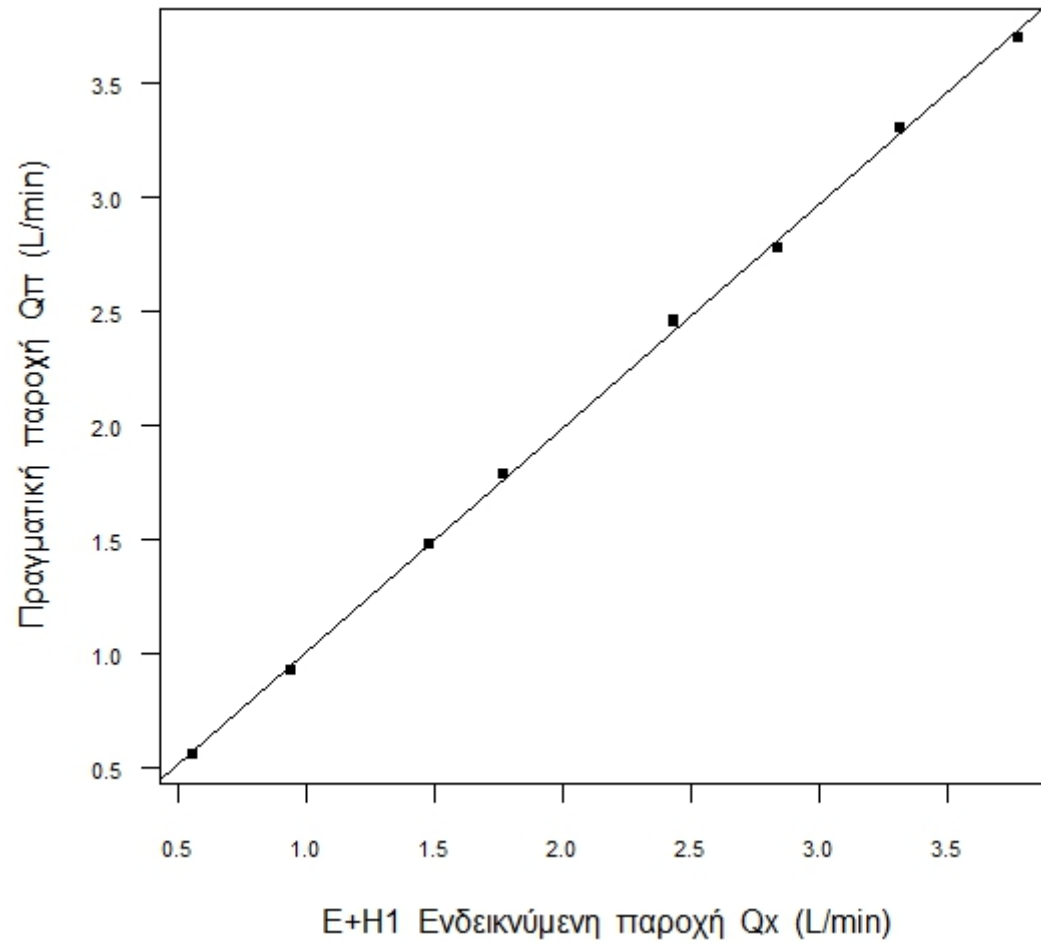
Σχήμα 4.11: Ευθεία αναδρομής του MUX-B



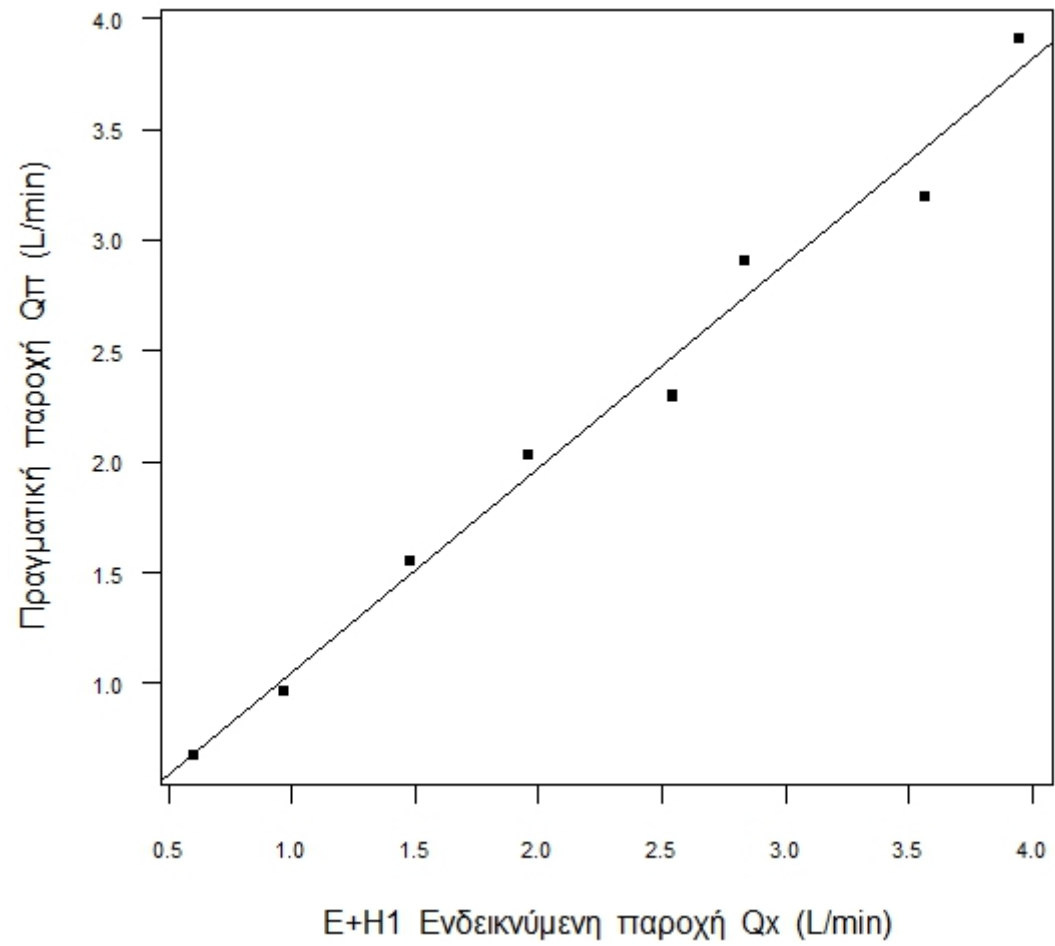
Σχήμα 4.12: Ευθεία αναδρομής του μαγνητικού ροόμετρου E+H1 σε συνθήκες 1bar/25°C



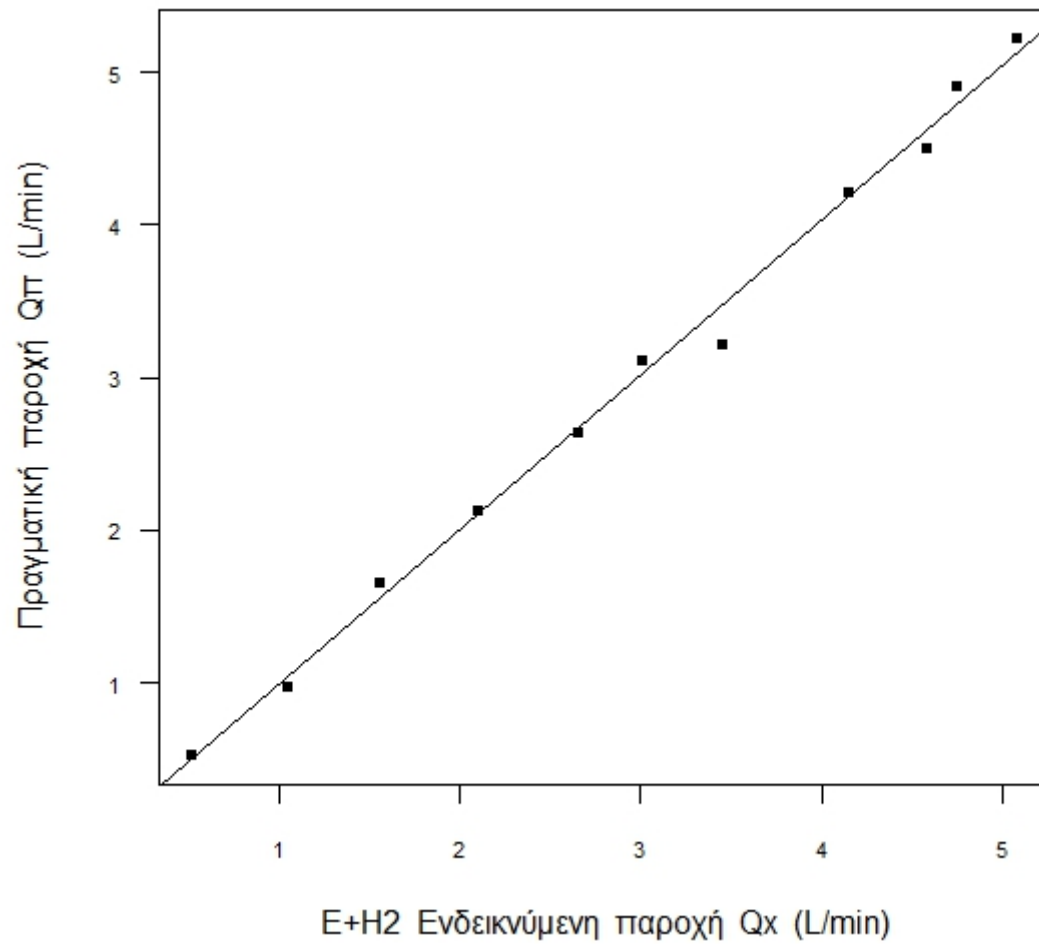
Σχήμα 4.13: Ευθεία αναδρομής μαγνητικού ροόμετρου E+H1 σε συνθήκες 1bar/95°C



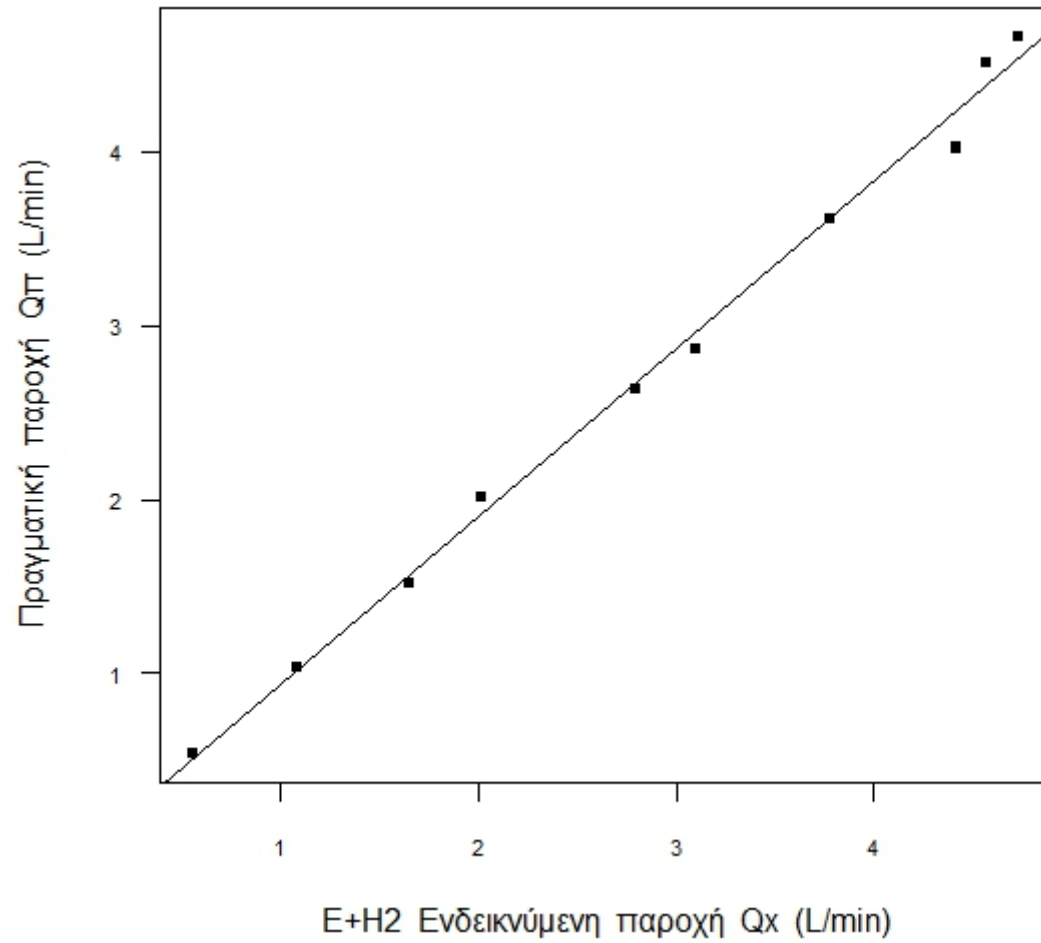
Σχήμα 4.14: Ευθεία αναδρομής μαγνητικού ροόμετρου E+H1 σε συνθήκες 2bar/120°C



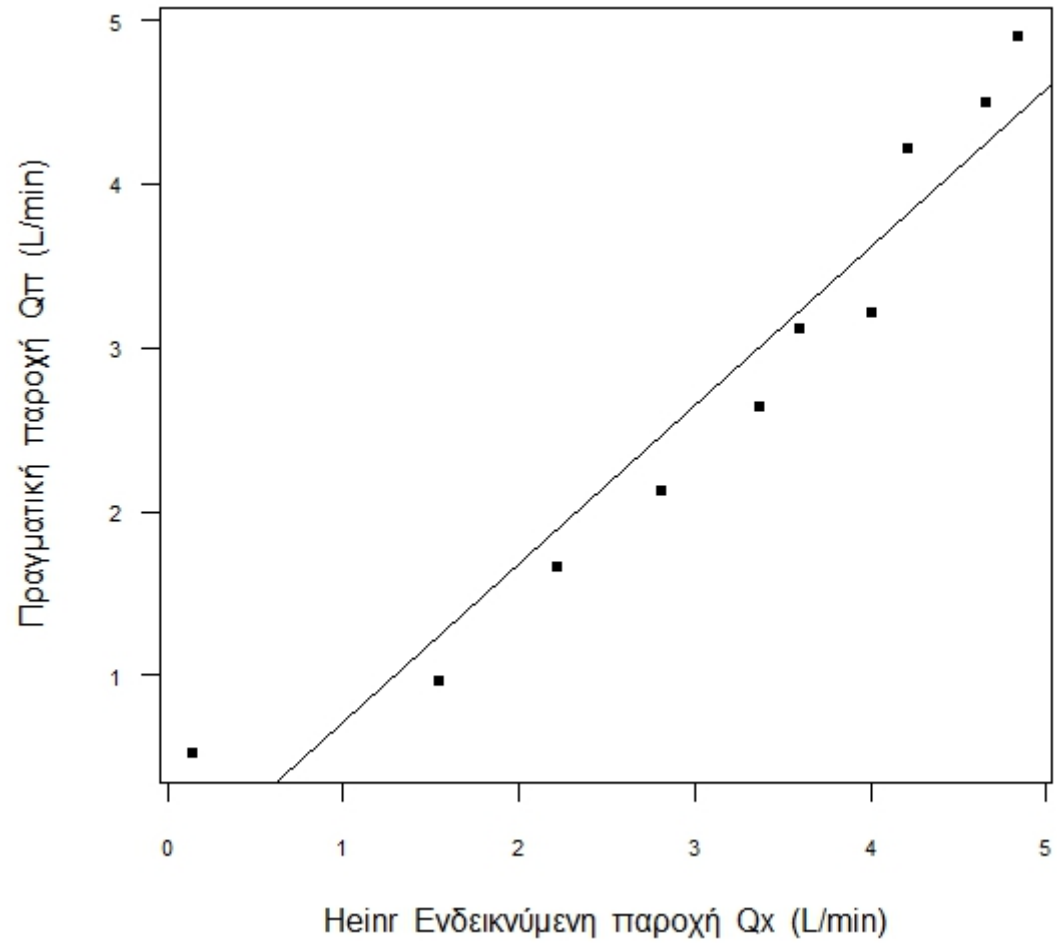
Σχήμα 4.15: Ευθεία αναδρομής μαγνητικού ροόμετρου E+H1 σε συνθήκες 3bar/134°C



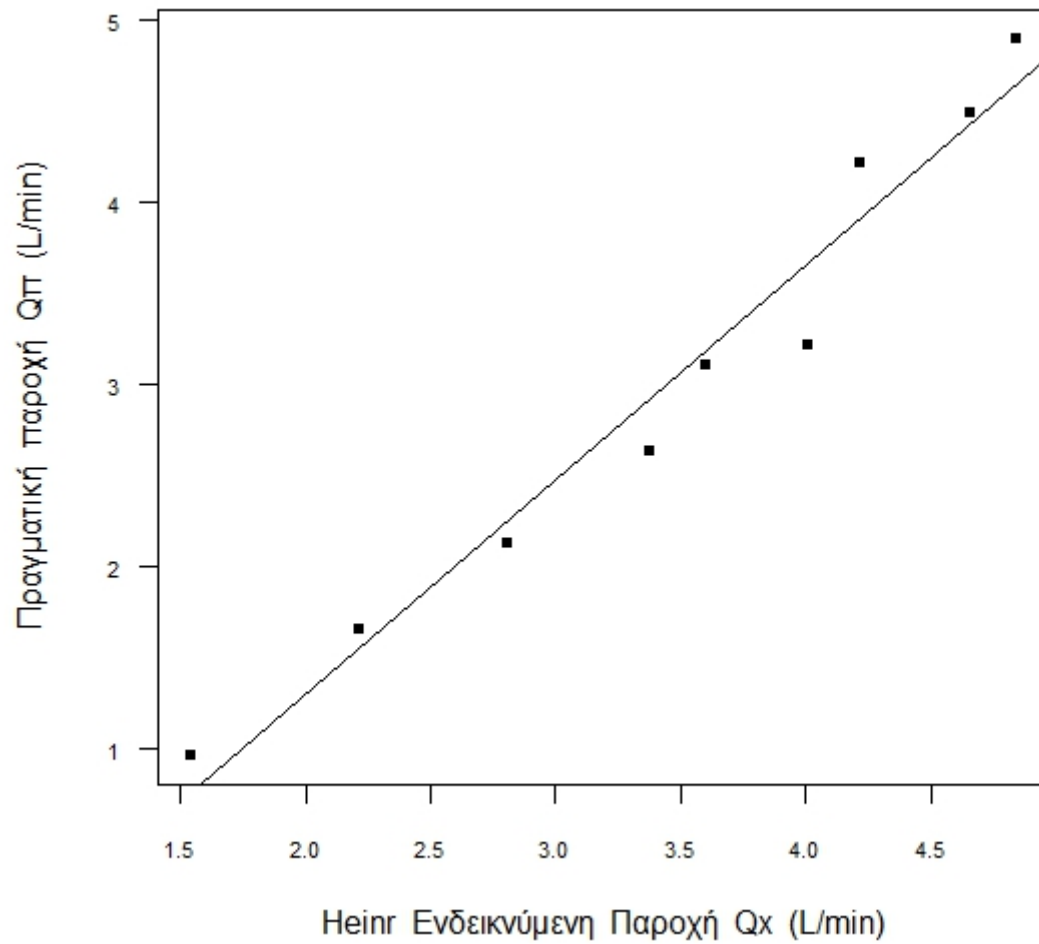
Σχήμα 4.16: Ευθεία αναδρομής μαγνητικού ροόμετρου E+H2 σε συνθήκες 1bar/25°C



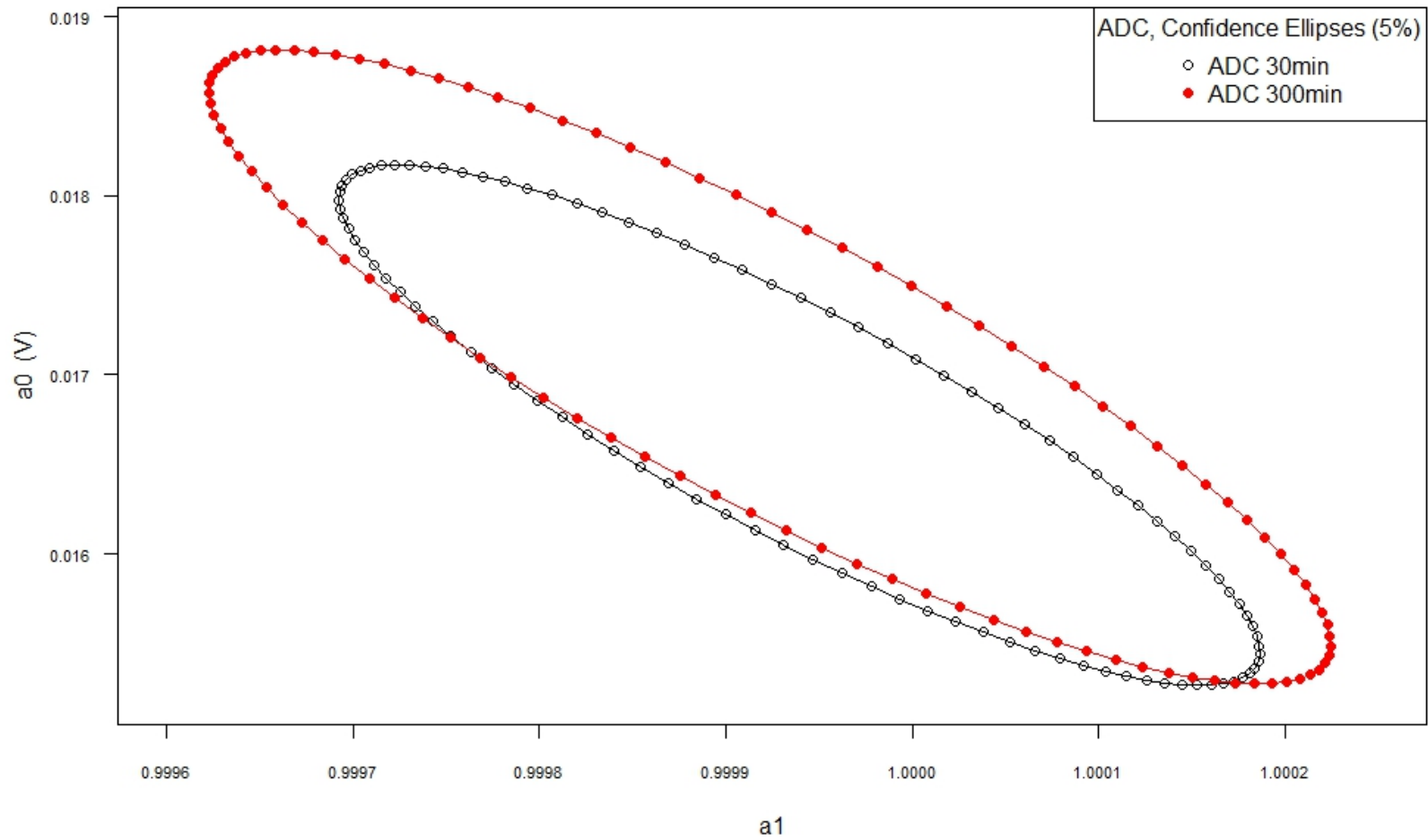
Σχήμα 4.17: Ευθεία αναδρομής μαγνητικού ροόμετρου E+H2 σε συνθήκες 1bar/95°C



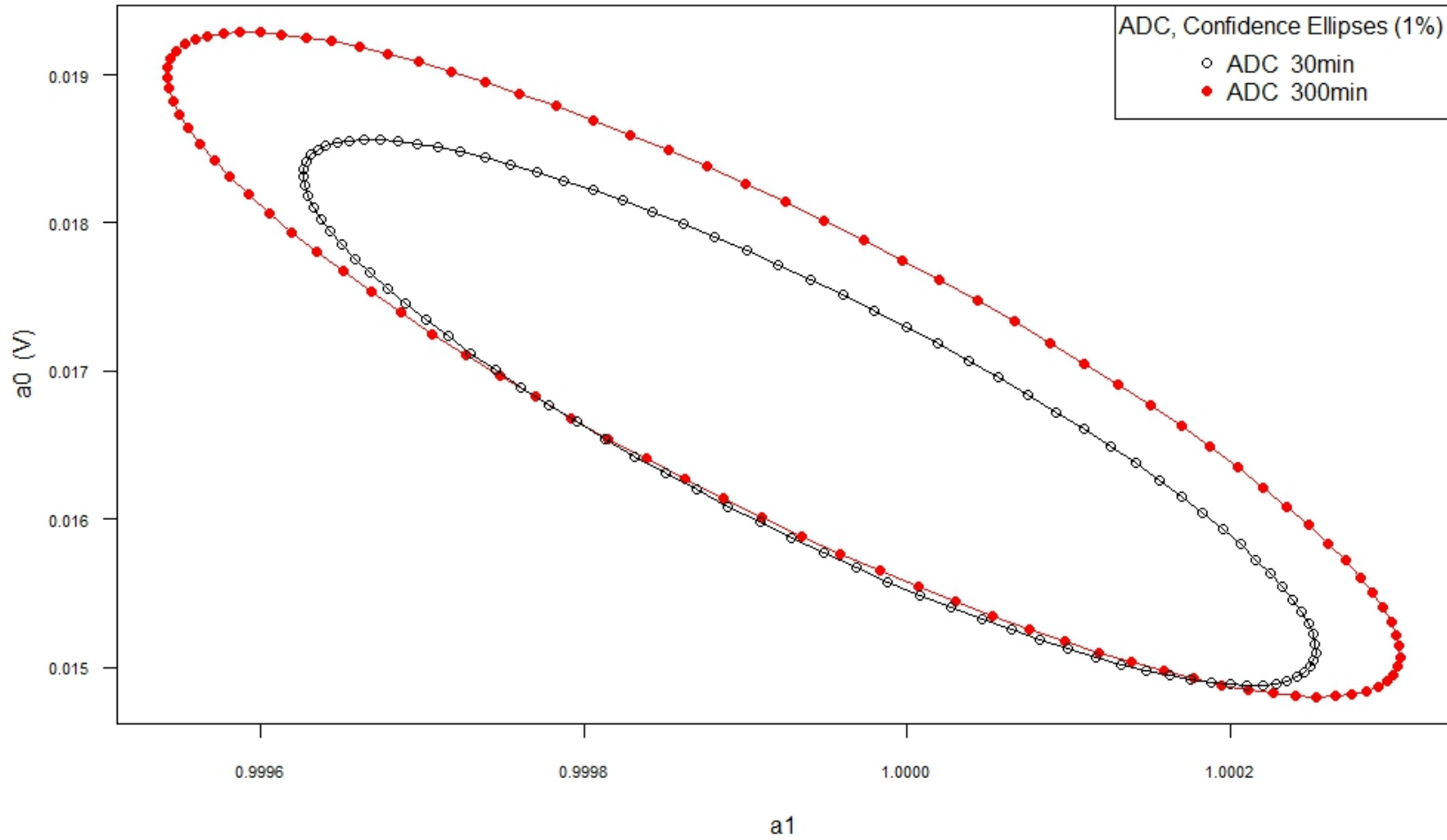
Σχήμα 4.18: Ευθεία αναδρομής μαγνητικού ροόμετρου Heintz σε συνθήκες 1bar/25°C



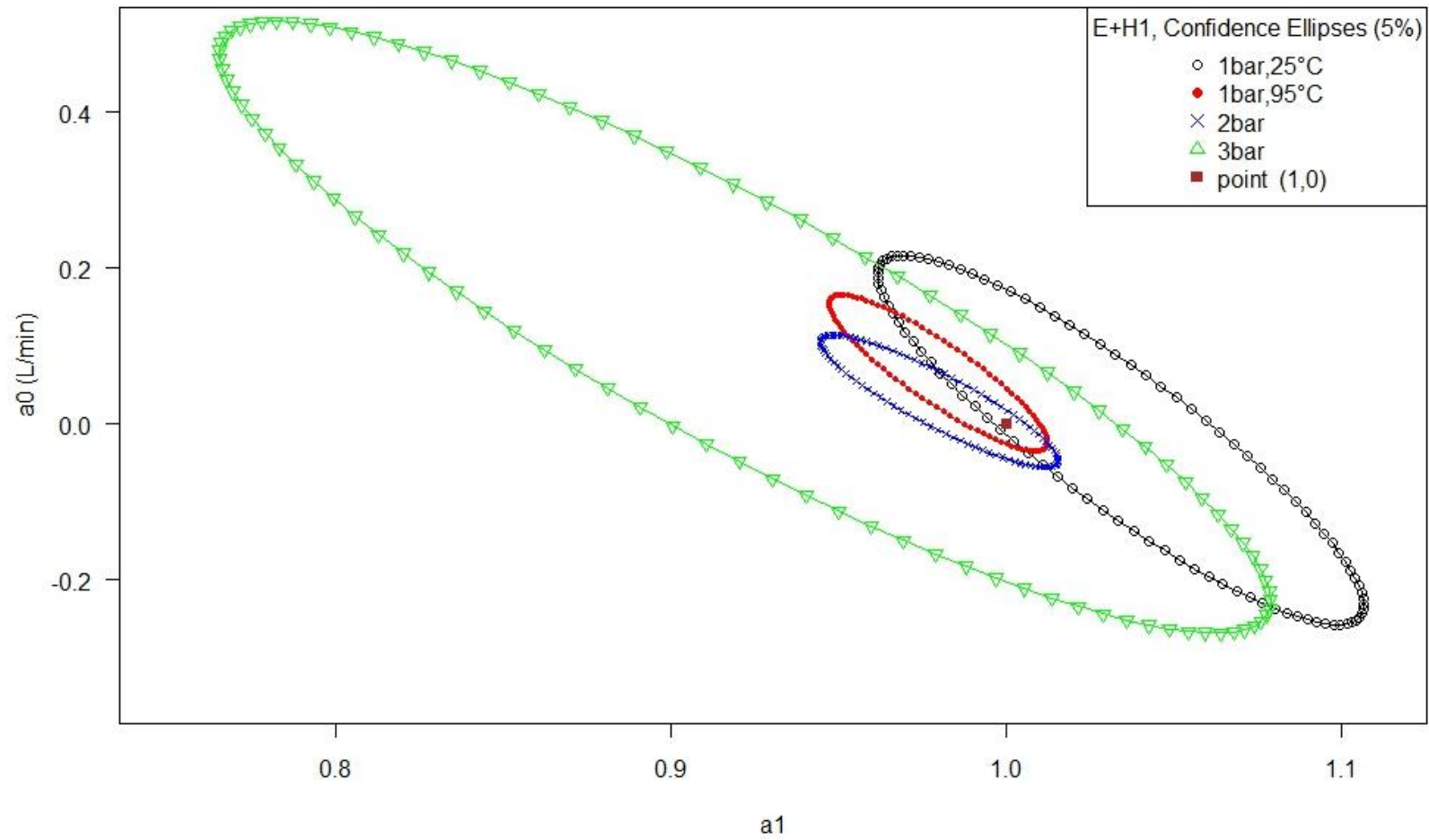
Σχήμα 4.19: Ευθεία αναδρομής μαγνητικού ροόμετρου Heiner σε εύρος παροχών 1-5 L/min, σε συνθήκες 1bar/25°C



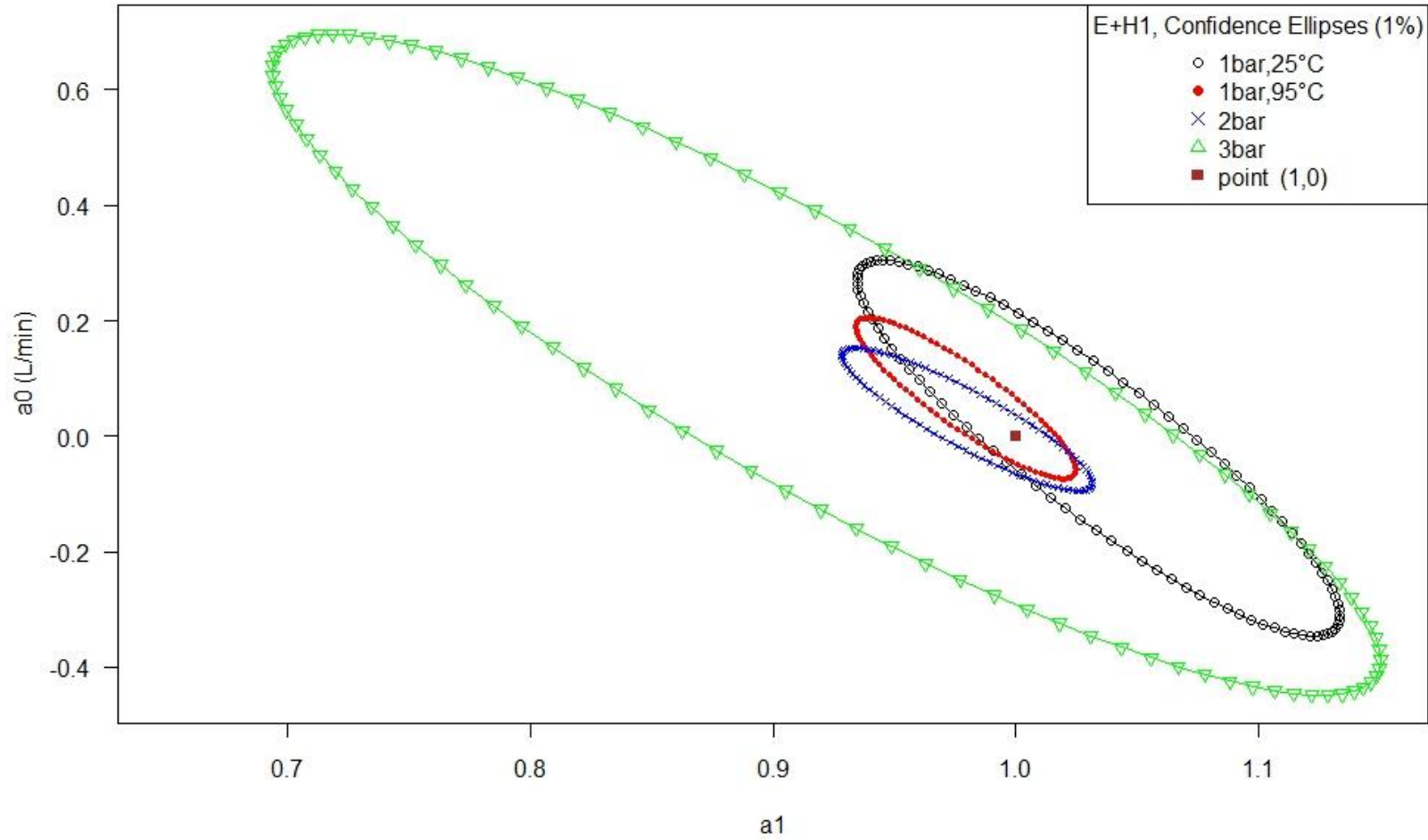
Σχήμα 4.20: Ελλείψεις εμπιστοσύνης σε επίπεδο σημαντικότητας 5 % για τον ADC



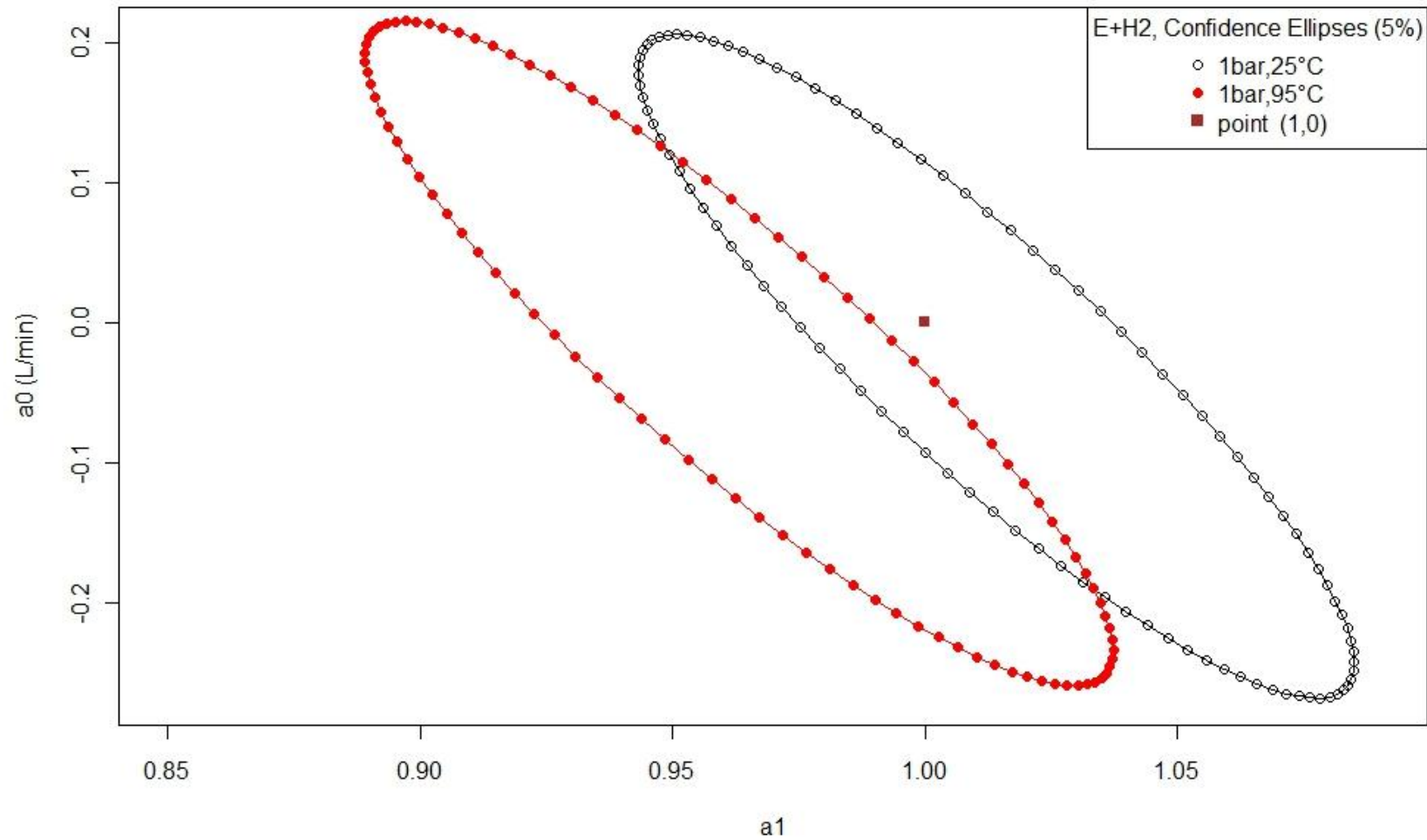
Σχήμα 4.21: Ελλείψεις εμπιστοσύνης σε επίπεδο σημαντικότητας 1 % για τον ADC



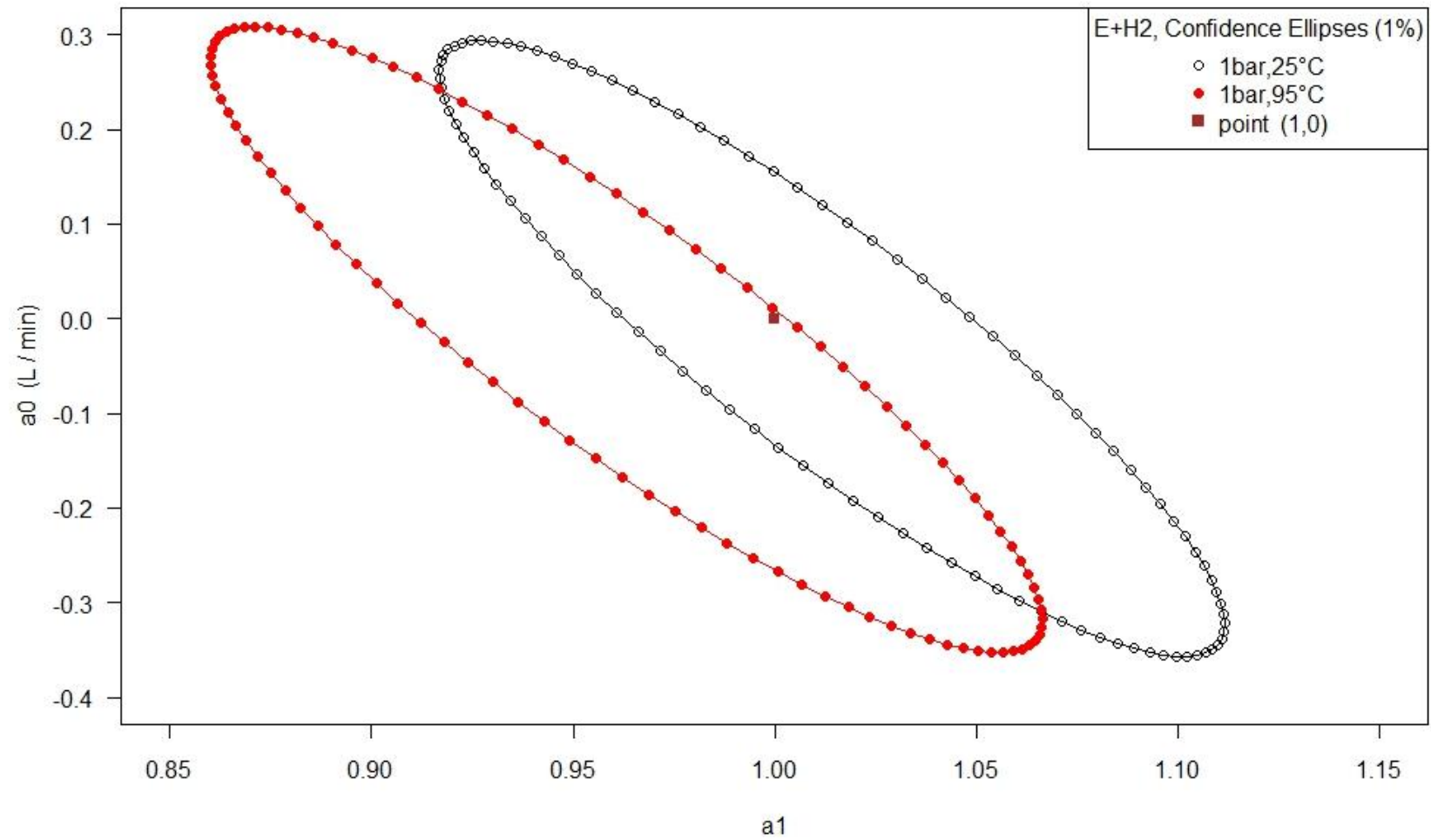
Σχήμα 4.22: Ελλείψεις εμπιστοσύνης σε επίπεδο σημαντικότητας 5 % για το ροόμετρο E+H1



Σχήμα 4.23: Ελλείψεις εμπιστοσύνης σε επίπεδο σημαντικότητας 1 % για το ροόμετρο E+H1



Σχήμα 4.24: Ελλείψεις εμπιστοσύνης σε επίπεδο σημαντικότητας 5 % για το ροόμετρο E+H2



Σχήμα 4.25: Ελλείψεις εμπιστοσύνης σε επίπεδο σημαντικότητας 1 % για το ροόμετρο E+H2

5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

5.	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	2
5.1	Εισαγωγή	2
5.2	Πειραματικές συνθήκες	3
5.3	Επεξεργασία πειραμάτων μίας πειραματικής προσομοίωσης επανάψυξης.....	3
5.4	Επεξεργασία ενός πειραματικού υποσυνόλου προσομοίωσης επανάψυξης.....	5
5.4.1	Επεξεργασία πειραμάτων σε πιέσεις 4 και 5 bar σε θερμοκρασία κορεσμού.	6
5.4.2	Μελέτη της επίδρασης της διαμέτρου του υδραυλικού καναλιού του τμήματος δοκιμών.....	8
5.4.3	Διερεύνηση της επίδρασης της πίεσης στο φαινόμενο της επανάψυξης	11
5.4.4	Υπολογισμός θερμοκρασίας υγρού μετώπου.....	13
5.4.5	Συσχέτιση αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης – πίεσης	14
5.5	Συμπεράσματα	15

5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ διεξήχθησαν πειράματα επανάψυξης με παραμέτρους:

1. Την αρχική θερμοκρασία της ράβδου, πριν την έναρξη της επανάψυξης
2. Την πίεση στο κανάλι δοκιμών

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να απαντηθεί το ερώτημα, κατά πόσο η πίεση επιδρά στο φαινόμενο της επανάψυξης και με ποιον τρόπο. Επίσης θέλουμε να διερευνήσουμε με ποιον τρόπο και σε πιο βαθμό επιδρά η διάμετρος του καναλιού στο φαινόμενο της επανάψυξης και κατά συνέπεια στην ταχύτητα επανάψυξης.

Η εγκατάσταση, την οποία περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 3, ολοκληρώθηκε το έτος 1994 και περιελάμβανε ανοικτό τμήμα δοκιμών με υάλινο περίβλημα εσωτερικής διαμέτρου 25 mm, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του υδραυλικού καναλιού ράβδου πυρηνικού καυσίμου. Το έτος 2000, κατά τη διάρκεια πειράματος κρίσιμης θερμικής ροής προκλήθηκε θραύση του υάλινου περιβλήματος. Η θραύση προκλήθηκε από στρέβλωση της ράβδου του τμήματος δοκιμών, κατά τη θερμική διαστολή αυτής. Το υάλινο περίβλημα αντικαταστάθηκε με νέο ιδίου τύπου αλλά διπλάσιας εσωτερικής διαμέτρου, δηλαδή 50 mm, με στόχο την αποφυγή παρόμοιου ατυχήματος στο μέλλον.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της επίδρασης του καναλιού ροής της πειραματικής διάταξης στο φαινόμενο της επανάψυξης τόσο σε ατμοσφαιρικές συνθήκες όσο και σε περιβάλλον ατμού, καθώς – εξ όσων γνωρίζουμε – δεν υπάρχουν αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα στη διεθνή βιβλιογραφία. Μετά από εκτεταμένη πειραματική εργασία του ΕΠΤ-ΕΜΠ συγκεντρώθηκαν πειραματικά αποτελέσματα στην περιοχή 1 έως 7 bar [29] για το υδραυλικό κανάλι διαμέτρου 25 mm, και στην περιοχή 1 έως 3 bar [4] για το υπάρχον υδραυλικό κανάλι διαμέτρου 50 mm. Η παρούσα ΔΕ στοχεύει στη συμπλήρωση πειραματικών δεδομένων στο νέο κανάλι και συγκεκριμένα στην περιοχή 4 και 5 bar, προκειμένου να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την επίδραση της εσωτερικής διαμέτρου του καναλιού ροής στο μηχανισμό της επανάψυξης.

5.2 Πειραματικές συνθήκες

Κατά τη διεξαγωγή των παρόντων πειραμάτων επανάψυξης, οι πειραματικές συνθήκες έχουν ως εξής:

1. Πίεση (απόλυτη): περιβάλλον διφασικής ροής, 4 και 5 bar
2. Παροχή υγρής φάσης νερού στην είσοδο του τμήματος δοκιμών: 1 L/min
3. Υπόψυξη νερού στην είσοδο του τμήματος δοκιμών: 0 K
4. Παροχή ατμού στην είσοδο του τμήματος δοκιμών: ~0.03 kg/s
5. Αρχική θερμοκρασία εξωτερικής επιφάνειας της ράβδου αμέσως πριν την έναρξη της επανάψυξης: 550 °C έως τη θερμοκρασία που το φαινόμενο μεταπίπτει από θερμοδυναμικά σε υδροδυναμικά ελεγχόμενο.

Με βάση τα ανωτέρω συλλέχθηκαν τα πειραματικά υποσύνολα 4 bar-0K και 5 bar-0K, όπου 0K η υπόψυξη της υγρής φάσης. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι ένα πειραματικό υποσύνολο περιλαμβάνει το σύνολο των πειραμάτων που διεξήχθησαν κάτω υπό τις ίδιες συνθήκες, με μόνη μεταβλητή παράμετρο την αρχική θερμοκρασία του περιβλήματος της ράβδου. Έτσι κάθε πειραματικό υποσύνολο περιλαμβάνει περίπου 60 πειράματα επανάψυξης τα οποία διεξήχθησαν κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Όσον αφορά την παροχή της υγρής φάσης, επιλέξαμε την τιμή 1 L/min, με σκοπό τη συμφωνία με τα διαθέσιμα βιβλιογραφικά δεδομένα, ενώ ως παροχή ατμού επιλέξαμε την τιμή ~0.03 kg/sec η οποία ήταν η ελάχιστη παροχή ατμού που εξασφάλιζε σταθερές συνθήκες πίεσης. Με στόχο την ασφαλή λειτουργία της ράβδου, θέσαμε ως ανώτατο όριο θερμοκρασίας τους 550 °C. Με τον τρόπο αυτό αφενός αποφεύγονται πιθανές κυρτώσεις οι οποίες θα καταπονούσαν τη ράβδο διασφαλίζοντας την καλή λειτουργία της κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, αφετέρου το παραπάνω εύρος θερμοκρασιών έρχεται σε συμφωνία με βιβλιογραφικές τιμές από αντίστοιχα πειράματα με ράβδους χάλυβα [1]. Τέλος για λόγους καλής στατιστικής του πειράματος ορίσαμε το θερμοκρασιακό βήμα μείωσης της αρχικής θερμοκρασίας της ράβδου στους 5 °C.

5.3 Επεξεργασία πειραμάτων μίας πειραματικής προσομοίωσης επανάψυξης

Για την επεξεργασία ενός μεμονωμένου πειράματος επανάψυξης, χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα *transient* το οποίο είναι γραμμένο σε γλώσσα FORTRAN-77 και βρίσκεται στον H/Y HP-9000/380 υπό το λειτουργικό σύστημα

HP-UX 7.05B. Η επεξεργασία γίνεται με την παραδοχή σταθερής ταχύτητας κίνησης του υγρού μετώπου και το πρόγραμμα αυτό παρέχει τις ακόλουθες σημαντικές πληροφορίες :

- a. Θερμοκρασίες στις θέσεις των εννιά θερμοστοιχείων (TC03-TC11) συναρτήσει του χρόνου επανάψυξης, σχήμα 5.1.
- b. Θερμοκρασίες στις θέσεις των εννέα θερμοστοιχείων (TC03-TC11) για μία δεδομένη χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια της επανάψυξης, σχήμα 5.2.
- c. Χρονικές στιγμές άφιξης του υγρού μετώπου στις θέσεις των θερμοστοιχείων., σχήμα 5.3.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον προσδιορισμό των παραπάνω χρονικών στιγμών περιγράφεται αναλυτικά στη ΔΔ [1].

Τα αντίστοιχα γραφήματα που προκύπτουν παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το είδος κίνησης του υγρού μετώπου και τη δράση του μηχανισμού της πρόδρομης ψύξης [1]. Από την αναπαραγωγή της θερμοκρασιακής ιστορίας των εννέα θερμοστοιχείων προκύπτουν εννέα καμπύλες σε ένα διάγραμμα. Ως αρχική θερμοκρασία της ράβδου λαμβάνεται από το πρόγραμμα η μέση θερμοκρασία των θερμοστοιχείων TC04 - TC11, τη χρονική στιγμή που το υγρό μέτωπο φθάσει στο τρίτο θερμοστοιχείο TC03.

Χαρακτηριστικό δείγμα της θερμοκρασιακής ιστορίας των εννέα θερμοστοιχείων κατά τη διάρκεια επανάψυξης με αρχική θερμοκρασία ράβδου 550 °C απεικονίζεται στο σχήμα 5.1. Στο σχήμα αυτό φαίνεται η άφιξη του υγρού μετώπου, από το πρώτο έντονο γόνυ που εμφανίζεται στις καμπύλες των θερμοστοιχείων και η επίδραση του φαινομένου της πρόδρομης ψύξεως, καθώς παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας των θερμοστοιχείων πριν την άφιξη του υγρού μετώπου. Το φαινόμενο αυτό, όπως είναι αναμενόμενο, είναι πιο έντονο για τα πιο απομακρυσμένα σημεία της ράβδου καθότι το υγρό μέτωπο αργεί να φθάσει σε αυτά. Το πέρασμα του υγρού μετώπου σηματοδοτείται από δεύτερο έντονο γόνυ που εμφανίζεται στις καμπύλες των θερμοστοιχείων, πράγμα που σημαίνει ότι η επανάψυξη στο αντίστοιχο θερμοστοιχείο έχει ολοκληρωθεί. Στο τελευταίο τμήμα του διαγράμματος διακρίνεται η αποκατάσταση της θερμοκρασιακής ισορροπίας της ράβδου στα συγκεκριμένα σημεία.

Επιπλέον το πρόγραμμα *transient* υπολογίζει και απεικονίζει σε διάγραμμα το χρόνο επανάψυξης των εννέα θερμοστοιχείων συναρτήσει της κατά μήκος της ράβδου θέσεως τους. Χαρακτηριστικό δείγμα κατά τη διάρκεια επανάψυξης με αρχική θερμοκρασία ράβδου 550 °C απεικονίζεται στο σχήμα 5.3. Για τον υπολογισμό του χρόνου επανάψυξης χρησιμοποιείται η υπορουτίνα *wet_front* η οποία αποτελεί σημαντική πρωτοτυπία της ΔΔ [1], στην οποία ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει για περισσότερες λεπτομέρειες. Η μέχρι τη ΔΔ [1] μέθοδος για τον υπολογισμό του χρόνου άφιξης του υγρού μετώπου ήταν εμπειρική, είτε με οπτική παρατήρηση είτε με μοναδικό κριτήριο το πρώτο γόνυ της θερμοκρασιακής ιστορίας των σημείων της ράβδου. Η μέθοδος αυτή θεωρείται ανεπαρκής επειδή δεν

λαμβάνεται υπόψη το πάχος του υγρού μετώπου. Κατά συνέπεια, ως χρόνος επανάψυξης υπολογιζόταν ο χρόνος που χρειαζόταν το υγρό μέτωπο για να φθάσει στο σταθμό μέτρησης, χωρίς όμως να υπολογίζεται ο χρόνος διέλευσης του υγρού μετώπου από το σταθμό. Η υπορουτίνα αυτή, η οποία συντάχθηκε στο πλαίσιο της ΔΔ [1] υπολογίζει αφενός μεν τη χρονική στιγμή άφιξης του υγρού μετώπου στο σταθμό μέτρησης, αφετέρου δε τη χρονική διάρκεια διέλευσης αυτού από τον εν λόγω σταθμό. Συνεπώς αθροίζοντας τους αντίστοιχους χρόνους άφιξης και διέλευσης υπολογίζεται ο πραγματικός χρόνος επανάψυξης του συγκεκριμένου σταθμού μέτρησης. Υπολογίζοντας τους χρόνους επανάψυξης των θερμοστοιχείων και τοποθετώντας τους σε διάγραμμα, συναρτήσει της θέσης τους κατά μήκος της ράβδου, εξάγεται συμπέρασμα σχετικά με το είδος κίνησης το υγρού μετώπου (σχήμα 5.3). Επιπλέον, από το διάγραμμα αυτό, χαράσσοντας την καμπύλη αναδρομής που ορίζουν τα πειραματικά σημεία, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των τοπικών αντιστρόφων ταχυτήτων επανάψυξης σε κάθε σημείο της ράβδου.

Τέλος, από την επεξεργασία ενός πειράματος επανάψυξης με το πρόγραμμα *TRANSIENT* παράγεται ένα ακόμα διάγραμμα το οποίο παρέχει τις θερμοκρασίες των θερμοστοιχείων για οποιαδήποτε χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια της επανάψυξης. Χαρακτηριστικό δείγμα παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2, στο οποίο φαίνεται στιγμιότυπο για τη χρονική στιγμή $t=70.69$ sec πειράματος επανάψυξης με αρχική θερμοκρασία 550 °C.

5.4 Επεξεργασία ενός πειραματικού υποσυνόλου προσομοίωσης επανάψυξης

Η έννοια του πειραματικού υποσυνόλου αναφέρεται σε μία ομάδα πειραμάτων επανάψυξης τα οποία έχουν πραγματοποιηθεί υπό τις ίδιες συνθήκες. Η επεξεργασία υπό το ΛΣ-UNIX πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα *pr1*, το οποίο αναζητά τα αρχεία του εκάστοτε πειραματικού υποσυνόλου και με βάση την παραδοχή της ισοταχούς κίνησης του υγρού μετώπου καταχωρεί τα ζεύγη (u^{-1}, T_w) στο αρχείο μορφής binary, RESULTS. Στη συνέχεια το πρόγραμμα *quasi_st* επεξεργάζεται το αρχείο αυτό και παράγει γραφήματα, καθώς και πλήρη στατιστική ανάλυση. Η επεξεργασία του αρχείου RESULTS μέσω του προγράμματος *quasi_st* παρέχει τα εξής αποτελέσματα:

1. Γραφική απεικόνιση των σημείων (u^{-1}, T_w) , χαρακτηριστικό δείγμα φαίνεται στο σχήμα 5.4, όπου T_w η θερμοκρασία τοιχώματος η οποία υπολογίζεται ως η μέση τιμή των θερμοκρασιών των θερμοστοιχείων TC04 - TC11, τη χρονική στιγμή όπου το υγρό μέτωπο διέρχεται από το θερμοστοιχείο TC03, και u η μέση ταχύτητα του υγρού μετώπου μεταξύ των θερμοστοιχείων TC03-TC11.

2. Εκτίμηση της ευθείας αναδρομής και γραφική της απεικόνιση. Πρέπει να τονίσουμε ότι κατά τον υπολογισμό της ευθείας αναδρομής θέτουμε ένα όριο αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης (οριακή αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης) ώστε η υπολογιζόμενη ευθεία να καθορίζει το θερμοδυναμικά και όχι το υδροδυναμικά ελεγχόμενο φαινόμενο. Στην παρούσα εργασία ως όριο θεωρήθηκε η τιμή των 20 s/m. Τα σημεία με αντίστροφες ταχύτητες επανάψυξης (u_{lim}^{-1}) μικρότερες της τιμής αυτής δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της ευθείας αναδρομής αφού θεωρούμε ότι ανήκουν σε άλλο φυσικό φαινόμενο (ελεύθερα πέπτοντα φιλμ). Στο πρόγραμμα παραγωγής γραφημάτων quasi_st υπάρχει η δυνατότητα επιλογής της οριακής αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης. Ως εκ τούτου η ευθεία αναδρομής που προκύπτει αποτελεί χαρακτηριστική του θερμοδυναμικά ελεγχόμενου φαινομένου.
3. Εκτίμηση της θερμοκρασίας του υγρού μετώπου
4. Ελλείψεις εμπιστοσύνης των παραμέτρων της γραμμικής αναδρομής, σε δύο επίπεδα σημαντικότητας, 5 και 1 %
5. Παραμετρική επεξεργασία πολλών πειραματικών υποσυνόλων μαζί. Αναγκαία προϋπόθεση για αυτό, είναι η καταχώρηση των υποσυνόλων αυτών στο αρχείο RESULTS. Είναι δυνατή η χάραξη των ευθειών αναδρομής και των ελλείψεων εμπιστοσύνης σε κοινά διαγράμματα ώστε να καθίσταται δυνατή η μελέτη της επίδρασης ενός παράγοντα στο φαινόμενο της επανάψυξης καθώς και η σύγκριση πειραμάτων από διαφορετικές εργασίες.

5.4.1 Επεξεργασία πειραμάτων σε πιέσεις 4 και 5 bar σε θερμοκρασία κορεσμού

Στα σχήματα 5.4 έως και 5.10 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της γραμμικής προσαρμογής των πειραματικών υποσυνόλων 4bar-OK, 5bar-OK, το διάγραμμα σύγκρισης τους με τα υποσύνολα της εργασίας [4] καθώς και οι αντίστοιχες ελλείψεις εμπιστοσύνης σε επίπεδα σημαντικότητας 5 % (για τη στατιστική τους σύμπτωση) και 1% (για τη στατιστική τους διάκριση) αντίστοιχα. Στη ΔΕ [4] πραγματοποιήθηκαν πειράματα στο νέο κανάλι δοκιμών σε πιέσεις 1, 2 και 3 bar. Συνεπώς κρίνεται σκόπιμη η σύγκριση των πειραμάτων των δύο εργασιών, λόγω του ότι αφορούν το ίδιο κανάλι και ουσιαστικά αποτελούν ενιαία σειρά πειραμάτων. Πρέπει να αναφέρουμε ότι στο επάνω μέρος των διαγραμμάτων 5.4 και 5.5 αναφέρονται οι πειραματικές συνθήκες, δηλαδή τα επίπεδα των παραγόντων του υποσυνόλου των πειραματικών προσομοιώσεων, καθώς και η εκτίμηση της θερμοκρασίας του υγρού μετώπου.

Στα σχήματα 5.11, 5.12 και 5.13 γίνεται σύγκριση των πειραμάτων της παρούσας ΔΕ με συγκεκριμένα πειραματικά υποσύνολα της εργασίας [1], τα οποία έχουν διεξαχθεί στις ίδιες πιέσεις και θερμοκρασίες. Με τον τρόπο αυτό θα εξακριβωθεί η επίδραση της αύξησης της διαμέτρου του καναλιού στην ταχύτητα επανάψυξης σε περιβάλλον διαφασικής ροής.

Αναλυτικότερα, στα σχήματα 5.4 και 5.5, έχουν σχεδιασθεί οι ευθείες αναδρομής των πειραματικών υποσυνόλων 4bar-0K και 5bar-0K. Παρατηρώντας τον πίνακα 5.1 διαπιστώνουμε ότι τα σημεία του πειραματικού υποσυνόλου 4bar-0K παρουσιάζουν πολύ καλή προσαρμογή στην ευθεία αναδρομής, με δείκτη $RMS=6.146\%$, για οριακή αντίστροφη ταχύτητα $u^{-1}_{lim} = 5$ s/m. Η πολύ καλή στατιστική της πειραματικής σειράς φαίνεται και από τη γραφική απεικόνιση των πειραματικών σημείων και της ευθείας αναδρομής του σχήματος 5.4. Παρατηρούμε επίσης ότι το κριτήριο $RMS < 10\%$ που χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή της οριακής αντίστροφης ταχύτητας στην περίπτωση των ατμοσφαιρικών πειραμάτων της ΔΕ [4], στην περίπτωση μας ικανοποιείται για $u^{-1}_{lim} = 5$ s/m.

u^{-1}_{lim} (s/m)	α_0 (s/m)	α_1 (s/mK)	se(α_0)	se(α_1)	R	RMS
5	-88.989	0.395	0.8592	0.00215	0.9991	6.146 %

Πίνακας 5.1: Παράμετροι της αναδρομής, σφάλματα των παραμέτρων και δείκτες R και RMS για οριακή αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης 5 s/m, για το πειραματικό υποσύνολο 4bar-0K.

Όσον αφορά το πειραματικό υποσύνολο 5bar-0K παρατηρούμε ότι και στην περίπτωση αυτή τα πειραματικά σημεία προσαρμόζονται πολύ καλά στην ευθεία αναδρομής με το συντελεστή RMS να υπολογίζεται ίσος με 2.424%, ενώ χαρακτηρίζονται από υψηλή θετική συσχέτιση με το συντελεστή γραμμικής προσαρμογής R να υπολογίζεται ίσος με 0.9987. Στην περίπτωση αυτή θέτουμε ως όριο αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης την τιμή 5 s/m με σκοπό να αποκλείσουμε από τον υπολογισμό της συνάρτησης αναδρομής δύο πειραματικά σημεία, τα οποία όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2, δίνουν μηδενική αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.2 δεν μπορούσαμε να προχωρήσουμε στη λήψη πειραματικών σημείων κάτω του ορίου $u^{-1} = 20$ s/m διότι η επανάψυξη ήταν τόσο γρήγορη ώστε το πρόγραμμα RIG δεν προλάβαινε να τα καταγράψει πειραματικά σημεία. Αυτό οφείλεται στο ότι τα σημεία αυτά ανήκουν στο υδροδυναμικά ελεγχόμενο φαινόμενο των πιπτόντων φιλμ και κατά συνέπεια θα μπορούσαμε να ορίσουμε για την περίπτωση των 5 bar ως οριακή αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης τα 20 s/m.

u^{-1}_{lim} (s/m)	α_0 (s/m)	α_1 (s/mK)	se(α_0)	se(α_1)	R	RMS
20	-86.215	0.369	1.1101	0.00266	0.9987	2.424 %

Πίνακας 5.2: Παράμετροι της αναδρομής, σφάλματα των παραμέτρων και δείκτες R και RMS για οριακή αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης 20 s/m, για το πειραματικό υποσύνολο 5bar-0K.

Όσον αφορά την αύξηση της πίεσης από τα 3 στα 4 bar η επίδρασή της δεν είναι ιδιαίτερα ξεκάθαρη, καθώς οι αντίστοιχες ευθείες αναδρομής τέμνονται όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6. Αν παρατηρήσουμε τις αντίστοιχες ελλείψεις εμπιστοσύνης των σχημάτων 5.7 και 5.8 προκύπτει ότι τα αντίστοιχα πειραματικά υποσύνολα διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους καθώς οι ελλείψεις δεν έχουν κοινό τόπο. Άρα συμπεραίνουμε ότι η αύξηση της πίεσης από 3 σε 4 bar επιδρά σημαντικά στο φαινόμενο της επανάψυξης. Από το σημείο τομής των προαναφερθέντων ευθειών φαίνεται ότι για την περιοχή υψηλών αρχικών θερμοκρασιών η αύξηση της πίεσης επιταχύνει την επανάψυξη ενώ στις χαμηλές θερμοκρασίες έχει αντίθετα αποτελέσματα. Η συμπεριφορά αυτή πιθανώς οφείλεται στη διαφορετική κατάσταση (οξείδωση) της επιφανείας της ράβδου καθώς οι δύο πειραματικές εργασίες έχουν χρονική διαφορά 6 χρόνων.

Εν συνεχεία παρατηρώντας τις ευθείες αναδρομής του σχήματος 5.3, που αντιστοιχούν σε πιέσεις 4 και 5 bar, διαπιστώνουμε ότι αύξηση της πίεσης από 4 σε 5 bar επηρεάζει περεταίρω το φαινόμενο της επανάψυξης καθώς οι ευθείες αυτές φαίνεται να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα διαπιστώνουμε ότι η προαναφερθείσα αύξηση της πίεσης επιδρά θετικά στο υπό μελέτη φαινόμενο, αυξάνοντας σημαντικά την ταχύτητα επανάψυξης. Τα συμπεράσματα αυτά επιβεβαιώνονται και από τις αντίστοιχες ελλείψεις εμπιστοσύνης των σχημάτων 5.7 και 5.8, οι οποίες δεν έχουν κανένα κοινό σημείο μεταξύ τους, δηλαδή προέρχονται από στατιστικά διαφορετικά πειραματικά υποσύνολα.

5.4.2 Μελέτη της επίδρασης της διαμέτρου του υδραυλικού καναλιού του τμήματος δοκιμών

Όπως προαναφέραμε, ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην παρούσα ΔΕ εμφανίζει η μελέτη της επίδρασης της διαμέτρου του καναλιού της πειραματικής διάταξης στο φαινόμενο της επανάψυξης. Για το σκοπό αυτό θα συγκρίνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας ΔΕ με εκείνα της εργασίας [1] τα οποία προέρχονται από πειράματα στο παλαιό κανάλι εσωτερικής διαμέτρου 25 mm. Οι ευθείες

αναδρομής των πειραμάτων της παρούσας ΔΕ και της εργασίας [1] απεικονίζονται από κοινού στο σχήμα 5.11.

Παρατηρώντας το σχήμα αυτό διαπιστώνουμε ότι η ευθεία που αντιστοιχεί στα 4 bar της παρούσας εργασίας, φαινομενικά διαφέρει σημαντικά από την αντίστοιχη της προγενέστερης εργασίας [1]. Η μεταβολή έγκειται κυρίως στη μεταβολή της κλίσης της ευθείας (συντελεστής α_1) η οποία φαίνεται να είναι σημαντική. Το γεγονός της έντονης μεταβολής της κλίσης παρατηρείται και για τις ευθείες των δύο εργασιών, οι οποίες αντιστοιχούν σε πίεση 5 bar. Πιο συγκεκριμένα η αύξηση της διαμέτρου του καναλιού φαίνεται να επιδρά αρνητικά στο φαινόμενο της επανάψυξης αφού φαίνεται να οδηγεί στη δραστηκή μείωση της ταχύτητας επανάψυξης. Οι παραπάνω παρατηρήσεις επιβεβαιώνονται και από τις ελλείψεις εμπιστοσύνης των σχημάτων 5.12 και 5.13. Στα σχήματα αυτά βλέπουμε ότι οι ελλείψεις των παραμέτρων των αναδρομών των δύο εργασιών, που αντιστοιχούν στα 4 bar δεν συμπίπτουν και άρα τα δύο πειραματικά υποσύνολα των 4 bar διαφέρουν σημαντικά. Το ίδιο συμπέρασμα εξάγεται και για τα πειραματικά υποσύνολα που αντιστοιχούν στα 5 bar εφόσον οι αντίστοιχες ελλείψεις δεν έχουν κοινό τόπο.

Προκειμένου να γίνει εμφανέστερη η επίδραση της εσωτερικής διαμέτρου του καναλιού της πειραματικής εγκατάστασης στο φαινόμενο της επανάψυξης θα συγκρίνουμε:

- a. τις θερμοκρασίες στις θέσεις των εννιά θερμοστοιχείων (TC03-TC11) συναρτήσει του χρόνου επανάψυξης,
- b. τις θερμοκρασίες στις θέσεις των εννέα θερμοστοιχείων (TC03-TC11) για μία δεδομένη χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια της επανάψυξης,
- c. τις χρονικές στιγμές άφιξης του υγρού μετώπου στις θέσεις εννέα των θερμοστοιχείων

μεταξύ ενός πειράματος της παρούσας ΔΕ και ενός πειράματος της εργασίας [1], τα οποία πραγματοποιήθηκαν για τις ίδιες ακριβώς πειραματικές συνθήκες και με μοναδική διαφορά την εσωτερική διάμετρο του καναλιού του τμήματος δοκιμών. Για τη σύγκριση επιλέξαμε τις ακόλουθες πειραματικές συνθήκες: πίεση 4 bar, υπόψυξη 0 K, παροχή ατμού ~0.03 kg/h και αρχική θερμοκρασία ράβδου 550 °C. Η γραφική απεικόνιση των a, b & c για την περίπτωση του πειράματος της παρούσας ΔΕ παρουσιάζεται στα σχήματα 5.1 έως 5.3 και για την περίπτωση του πειράματος της εργασίας [1] στα σχήματα 5.14 έως 5.16.

Συγκρίνοντας τα σχήματα 5.1 & 5.14 παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του καναλιού μικρότερης διαμέτρου (εργασία [1]) ο χρόνος επανάψυξης είναι χαρακτηριστικά μικρότερος και συνεπώς η ταχύτητα επανάψυξης μεγαλύτερη. Επίσης η κλίση των ευθειών πριν το πρώτο γόνυ είναι μεγαλύτερη γεγονός που υποδηλώνει εντονότερη πρόδρομη ψύξη στην οποία πιθανόν να οφείλεται εν μέρει και η υψηλότερη ταχύτητα επανάψυξης.

Εν συνεχεία συγκρίνοντας τα σχήματα 5.2 & 5.15 παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του καναλιού μικρότερης διαμέτρου, μετά την παρέλευση ~70 s από τη

στιγμή έναρξης της επανάψυξης, το υγρό φιλμ φαίνεται να έχει εγκατασταθεί σε επτά θερμοστοιχεία της ράβδου ενώ στην περίπτωση του αντίστοιχου πειράματος με κανάλι διπλάσιας εσωτερικής διαμέτρου και για το ίδιο χρονικό διάστημα το υγρό φιλμ φαίνεται να έχει εγκατασταθεί μόλις σε τέσσερα θερμοστοιχεία. Για λόγους εποπτείας τα δεδομένα των σχημάτων 5.2 & 5.15 απεικονίζονται από κοινού στο σχήμα 5.17.

Τέλος συγκρίνοντας τα σχήματα 5.3 & 5.16, τα οποία ουσιαστικά απεικονίζουν τις εκτιμήσεις της αντίστροφης ταχύτητας του υγρού μετώπου μεταξύ δύο διαδοχικών σταθμών μέτρησης της θερμοκρασίας της ράβδου, παρατηρούμε ότι διπλασιασμός της εσωτερικής διαμέτρου του καναλιού επιφέρει συστηματική μείωση της ταχύτητας επανάψυξης σε κάθε σημείο της ράβδου. Για λόγους εποπτείας τα δεδομένα των σχημάτων 5.3 & 5.16 απεικονίζονται από κοινού στο σχήμα 5.18. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι για την περίπτωση των πειραμάτων της παρούσας εργασίας η ταχύτητα μετάδοσης του υγρού μετώπου φαίνεται να μεταβάλλεται κατά μήκος της ράβδου. Φυσικά προκειμένου να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για το αν μεταβολή στην ταχύτητα μετάδοσης του υγρού μετώπου κατά μήκος της ράβδου - λόγω της μεγαλύτερης εσωτερικής διαμέτρου του καναλιού - είναι σημαντική, έτσι ώστε να πρέπει να αναθεωρηθεί η παραδοχή της ισοταχούς κίνησης του υγρού μετώπου, χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

Συγκεκριμένα λοιπόν όλες τις παραπάνω παρατηρήσεις καταλήγουμε στο ασφαλές συμπέρασμα ότι η αύξηση της διαμέτρου του καναλιού επιδρά αρνητικά στο φαινόμενο της επανάψυξης μειώνοντας την ταχύτητα επανάψυξης.

Η αρνητική επίδραση της εσωτερικής διαμέτρου του καναλιού στην ταχύτητα επανάψυξης ενδέχεται να οφείλεται στην επίδραση των σταγονιδίων του υγρού που δημιουργούνται κατά τη βίαιη σταγονοποίηση του υγρού φιλμ (sputtering) στην περιοχή του υγρού μετώπου. Από το σύνολο των σταγονιδίων που δημιουργούνται ένα ποσοστό τους προσκρούει στην ξηρή περιοχή της ράβδου προκαλώντας πρόδρομη ψύξη. Ένα άλλο ποσοστό προσκρούει στο εσωτερικό τοίχωμα του υάλινου καναλιού και είτε απομακρύνεται από το τμήμα δοκιμών χωρίς να συμβάλει σημαντικά στο φαινόμενο της επανάψυξης είτε αναπήδα επιστρέφοντας στην ξηρή περιοχή της ράβδου προκαλώντας και πάλι πρόδρομη ψύξη. Τέλος το εναπομείναν ποσοστό των σταγονιδίων ατμοποιείται κατά την κίνηση του κατάντη του υγρού μετώπου, λόγω του μηχανισμού μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία από τη θερμή περιοχή της ράβδου. Κατά συνέπεια πέραν της ατμοποίησης στο υγρό μέτωπο υπάρχει και ένας δεύτερος μηχανισμός παραγωγής ατμού ο οποίος εξαρτάται άμεσα από το διαθέσιμο χώρο που έχουν να κινηθούν τα σταγονίδια του υγρού κατάντη του υγρού μετώπου. Η περιοχή κατάντη του υγρού μετώπου η οποία αποτελείται από ατμό και σταγονίδια υγρού καλείται mist region σύμφωνα με τους Chan και Grolmes [32]. Σημαντική αύξηση του ανοδικού ρεύματος ατμού λόγω της ατμοποίησης των σταγονιδίων στη mist region ενδέχεται να έχει τις ακόλουθες επιπτώσεις στο φαινόμενο της επανάψυξης: Πρώτον ενδέχεται να συμπαρασύρει μέρος των εν τω γενάσθαι σταγονιδίων στην περιοχή του υγρού φιλμ μειώνοντας έτσι το ποσοστό αυτών που θα καταλήξουν στη ξηρή περιοχή και κατ'

επέκταση εξασθενώντας με αυτόν τον τρόπο το μηχανισμό της πρόδρομης ψύξης. Και δεύτερον το ρεύμα ατμού ενδέχεται να καθυστερεί την προώθηση του υγρού μετώπου καθώς κινείται με αντίθετη διεύθυνση από αυτό [32]. Προκειμένου βέβαια να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση.

Τέλος, παρατηρούμε ότι η αύξηση της διαμέτρου του καναλιού, εκτός από μείωση της ταχύτητας επανάψυξης, φαίνεται να προκαλεί έντονη βελτίωση της στατιστικής των πειραμάτων καθώς οι επιφάνειες των αντίστοιχων ελλείψεων μειώνονται αρκετά. Η βελτίωση της στατιστικής θα μπορούσε να αποδοθεί στην εξασθένηση του μηχανισμού της πρόδρομης ψύξης λόγω σταγονιδίων, σύμφωνα με όσα προαναφέραμε, ο οποίος θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως τυχαίο φαινόμενο. Ένας ακόμη λόγος για τον οποίο η αύξηση της διαμέτρου του καναλιού ροής οδηγεί σε δυσμενέστερη επανάψυξη είναι το γεγονός ότι σε στενότερο κανάλι ροής, η έστω και ελάχιστη παροχή ατμού οδηγεί σε καλύτερη επικάλυψη του φιλμ υγρού τόσο στην επαναψυχθείσα περιοχή όσο και στην περιοχή υγρού μετώπου.

5.4.3 Διερεύνηση της επίδρασης της πίεσης στο φαινόμενο της επανάψυξης

Για τη μελέτη της επίδρασης της πίεσης στο φαινόμενο της επανάψυξης, πραγματοποιήθηκε κοινή χάραξη των ευθειών αναδρομής στο σχήμα 5.6 και των ελλείψεων εμπιστοσύνης των πειραματικών υποσυνόλων της παρούσας ΔΕ (4bar-0K και 5bar-0K) και των υποσυνόλων 1bar-0K, 2bar-0K και 3bar-0K της ΔΕ[4], στα σχήματα 5.7 και 5.8. Επίσης για τον ίδιο σκοπό παραθέτουμε τον πίνακα 5.3 στον οποίο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των πειραμάτων αυτών για ευκολότερη σύγκριση μεταξύ τους.

Αναμφίβολα συμπεραίνουμε ότι η αύξηση της πίεσης επιδρά θετικά, οδηγώντας σε αύξηση της ταχύτητας επανάψυξης, λόγω του ότι οι ευθείες είναι μετατοπισμένες προς τα κάτω δηλαδή προς χαμηλότερες τιμές της αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης. Η συμπεριφορά αυτή αιτιολογείται από το γεγονός ότι αυξανόμενη της πίεσης τόσο η θερμοκρασία κορεσμού όσο και η θερμοκρασία Leidenfrost αυξάνουν επιταχύνοντας τη μετάδοση του υγρού μετώπου [32].

Πιο συγκεκριμένα, για αύξηση της πίεσης από 1 σε 2 bar, παρατηρείται μεταβολή τόσο του σταθερού όρου (συντελεστής α_0) όσο και της κλίσης (συντελεστής α_1) της ευθείας αναδρομής, όπως αναφέρεται παρακάτω στον πίνακα 5.3. Για περαιτέρω αύξηση της πίεσης από 2 σε 3 bar η ευθεία αναδρομής είναι μετατοπισμένη προς μικρότερες τιμές της αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης, χωρίς ιδιαίτερη μεταβολή της κλίσης της ([4]). Όπως προαναφέραμε κατά τη μεταβολή από 3 σε 4 bar η επίδραση στην ταχύτητα επανάψυξης φαίνεται να είναι ασθενέστερη από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Τέλος, κατά τη μεταβολή πίεσης από 4 στα 5 bar η επίδραση στο φαινόμενο της επανάψυξης είναι εντονότερη από την προηγούμενη

περίπτωση (3 σε 4 bar), χωρίς μεταβολή της κλίσης της ευθείας, αλλά με σημαντική μεταβολή του συντελεστή α_0 . Οι παραπάνω μεταβολές φαίνονται χαρακτηριστικά και από τα διαγράμματα των ελλείψεων εμπιστοσύνης στα σχήματα 5.7 και 5.8.

Παρατηρώντας τόσο το διάγραμμα 5.6 όσο και τα διαγράμματα 5.7 και 5.8 συμπεραίνουμε ότι η ύπαρξη ατμού διαφοροποιεί σημαντικά τη συμπεριφορά του φαινομένου της επανάψυξης σε σχέση με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό οι ελλείψεις εμπιστοσύνης των πειραματικών υποσυνόλων 2bar-0K, 3bar-0K, 4bar-0K και 5bar-0K, παρουσιάζονται και ξεχωριστά από τα ατμοσφαιρικά πειράματα, στα διαγράμματα 5.9 και 5.10.

Ασφαλές λοιπόν συμπέρασμα είναι ότι η αύξηση της πίεσης επιδρά ευνοϊκά στο φαινόμενο της επανάψυξης, με την επίδραση να μειώνεται όσο η πίεση αυξάνεται, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία, [14]. Οι ελλείψεις εμπιστοσύνης επιβεβαιώνουν ότι πρόκειται για σαφώς ξεχωριστά πειράματα λόγω της μη ύπαρξης κοινών τόπων μεταξύ τους. Τέλος πρέπει να σημειώσουμε ότι αυξανόμενη της πίεσης ως τα 5 bar παρατηρείται μείωση της επιφάνειας των ελλείψεων εμπιστοσύνης, γεγονός που φανερώνει βελτίωση της στατιστικής και μεγαλύτερη σταθερότητα των πειραμάτων και κατ' επέκταση του φαινομένου της επανάψυξης.

Εργασία	Πίεση (bar)	u_{lim}^{-1} (s/m)	α_0 (s/m)	α_1 (s/mK)	R	RMS
[4]	1	30	-181.600	0.764	0.9985	8.251 %
[4]	2	10	-82.358	0.421	0.9985	5.445 %
[4]	3	20	-99.391	0.425	0.9983	2.916 %
This work	4	5	-88.989	0.395	0.9991	6.146 %
This work	5	20	-86.215	0.369	0.9987	2.424 %

Πίνακας 5.3: Συγκριτικός πίνακας για τα πειραματικά υποσύνολα 1bar-0K, 2bar-0K, 3bar-0K, 4bar-0K και 5bar-0K

5.4.4 Υπολογισμός θερμοκρασίας υγρού μετώπου

Η θερμοκρασία που πρέπει να έχει το τοίχωμα της ράβδου για να προωθηθεί εκεί το υγρό μέτωπο, ονομάζεται **θερμοκρασία υγρού μετώπου**. Είναι λίγο χαμηλότερη από τη θερμοκρασία *Leidenfrost* και υπολογίζεται ως η τετμημένη επί την αρχή της ευθείας αναδρομής

$$u^{-1} = \alpha_1 T_w + \alpha_0 \quad (5.1)$$

όπου η ευθεία αυτή υπολογίζεται με την παραδοχή της ισοταχούς κίνησης του υγρού μετώπου. Όπως προαναφέραμε η αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης φράσσεται από ένα κάτω όριο το οποίο σηματοδοτεί την αλλαγή του μηχανισμού επανάψυξης από θερμοεπιφανειακά σε υδροδυναμικά ελεγχόμενο. Στην περίπτωση του υδροδυναμικά ελεγχόμενου φαινομένου η ταχύτητα επανάψυξης εξαρτάται κυρίως από τη συνισταμένη των βαρυτικών δυνάμεων και των δυνάμεων συνεκτικότητας του ρευστού, ενώ δεν υφίσταται υγρό μέτωπο βίαιης σταγονοποίησης. Ο προσδιορισμός του ορίου αυτού (u^{-1}_{lim}) είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την αξιοπιστία των πειραματικών υπολογισμών της θερμοκρασίας υγρού μετώπου. Στην παρούσα ΔΕ η οριακή αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης υπολογίστηκε ίση με $u^{-1}_{lim}=5$ s/m για την περίπτωση πίεσης 4 bar και ίση με $u^{-1}_{lim}=20$ s/m για την περίπτωση πίεσης 5 bar. Στον πίνακα 5.4 αναφέρονται οι τιμές της θερμοκρασίας του υγρού μετώπου, που προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας ΔΕ, βάσει της σχέσης $T_0 = -\alpha_0/\alpha_1$ μαζί με τα σφάλματα τους.

Πίεση (bar)	α_0 (s/m)	α_1 (s/mK)	se(α_0) (s/m)	se(α_1) (s/mK)	T_0 (K)	Σφάλμα T_0 (K)
4	-88.989	0.395	0.8592	0.00215	225	2
5	-86.215	0.369	1.1101	0.00266	233	3

Πίνακας 5.4: Υπολογισμός θερμοκρασίας υγρού μετώπου για πιέσεις 4 και 5 bar και θερμοκρασία κορεσμού.

Η θερμοκρασία υγρού μετώπου για πίεση 4 bar και υπόψυξη 0 K υπολογίζεται ως 225 ± 2 °C, ενώ για πίεση 5 bar και υπόψυξη 0 K, 233 ± 3 °C. Ένα ακόμα μέγεθος με

ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι μέγεθος της θερμοκρασιακής διαφοράς, μεταξύ της θερμοκρασίας υγρού μετώπου T_0 και της θερμοκρασίας κορεσμού T_s . Στην παρούσα εργασία η θερμοκρασιακή διαφορά προκύπτει $T_0-T_s= 82 \pm 2$ °C για πίεση 4 bar και $T_0-T_s= 82 \pm 3$ °C για πίεση 5 bar. Για το εύρος πιέσεων της παρούσας εργασίας (4 και 5 bar) η θερμοκρασιακή διαφορά προκύπτει 82 ± 2 °C. Αντίστοιχες πειραματικές εκτιμήσεις από διάφορους ερευνητές συνοψίζονται ως εξής:

Ερευνητές	Περιβάλλον πειραμάτων	T_0-T_s (°C)
Bennet et al	Steam	81-102
Elliot et al	Steam	100
Yu et al	Steam/atmospheric	80
Piggot et al	Steam/atmospheric	100
Duffey et al	Atmospheric	50-100
Hinis, E.P	Steam/atmospheric	110
Karasoulos, G.J	Atmospheric	105
Chatzidakis, S.E	Steam/atmospheric	100

Παρατηρείται ότι η θερμοκρασιακή διαφορά που υπολογίστηκε στην παρούσα εργασία δεν αποκλίνει σημαντικά από τις βιβλιογραφικές τιμές, και τελικώς καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η αλλαγή της διαμέτρου δεν επιδρά στη θερμοκρασία υγρού μετώπου .

5.4.5 Συσχέτιση αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης - πίεσης

Σύμφωνα με όσα προαναφέραμε στο εδάφιο 5.4.2 είναι πειραματικά αποδεδειγμένο ότι η πίεση επιδρά στο φαινόμενο της επανάψυξης στην περιοχή των 1 έως 5 bar. Εντούτοις δεν θα ήταν ασφαλές να συσχετίσουμε τη μεταβολή της ταχύτητας επανάψυξης συναρτήσει της πίεσης τόσο σε ατμοσφαιρικές συνθήκες όσο και σε περιβάλλον ατμού. Για το σκοπό αυτό και για την περίπτωση πειραμάτων σε περιβάλλον ατμού επιχειρείται, σύμφωνα με την εργασία [29], η προσαρμογή ημιεμπειρικής σχέσης της μορφής:

$$u^{-1}=A \cdot P^B \cdot (T_w-T_0) \quad (5.2)$$

όπου

u^{-1} : Αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης (s/m)

P: Πίεση (bar)

T_w : Αρχική θερμοκρασία ράβδου ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 : Θερμοκρασία υγρού μετώπου ($^{\circ}\text{C}$)

Προσαρμόζοντας τα πειραματικά δεδομένα της ΔΕ [4] για την περιοχή 2 & 3 bar και της παρούσας ΔΕ για την περιοχή 4 & 5 bar (πίνακας 5.3) στη σχέση 5.2 προκύπτει η ακόλουθη συσχέτιση:

$$u^{-1} = 0.5 \cdot P^{0.15} \cdot (T_w - T_0) \quad (5.3)$$

Για τη μη γραμμική προσαρμογή χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα **R** (βλ. Παράρτημα της παρούσας ΔΕ).

Αντίστοιχα πειραματική έρευνα της επίδρασης της πίεσης στο φαινόμενο της επανάψυξης και συγκεκριμένα στην περιοχή 2 έως 7 bar, η οποία έχει πραγματοποιηθεί από το ΕΠΤ, [1, 29] έχει οδηγήσει στην ακόλουθη συσχέτιση:

$$u^{-1} = 0.4 \cdot P^{0.22} \cdot (T_w - T_0) \quad (5.4)$$

Όπου η συσχέτιση 5.3 αφορά πειράματα με το νέο κανάλι του τμήματος δοκιμών του ΘΥΚ εσωτερικής διαμέτρου 50 mm και η συσχέτιση 5.4 πειράματα στο παλαιό κανάλι του ΘΥΚ υποδιπλάσιας διαμέτρου 25 mm.

Τα πειραματικά δεδομένα των συσχετίσεων 5.3 & 5.4, (πίνακας 5.3) καθώς και η εκθετική συνάρτηση προσαρμογής της μορφής:

$$\alpha_1 = A \cdot P^B \quad (5.5)$$

για κάθε πειραματικό σύνολο απεικονίζονται στο σχήμα 5.19. Τέλος στα σχήματα 5.20 και 5.21 σχεδιάζονται, μέσω του προγράμματος **R**, οι ελλείψεις εμπιστοσύνης των παραμέτρων A και B των συσχετίσεων των δύο εργασιών, σε επίπεδα σημαντικότητας 5 και 1%. Παρατηρούμε ότι δεν μπορούμε να εξάγουμε ασφαλές συμπέρασμα εάν οι σχέσεις 5.3 & 5.4 είναι μεταξύ τους στατιστικά ίδιες ή διαφορετικές. Περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου και σε πιέσεις 6 έως 7 bar στο νέο τμήμα δοκιμών του ΘΥΚ κρίνεται απαραίτητη.

5.5 Συμπεράσματα

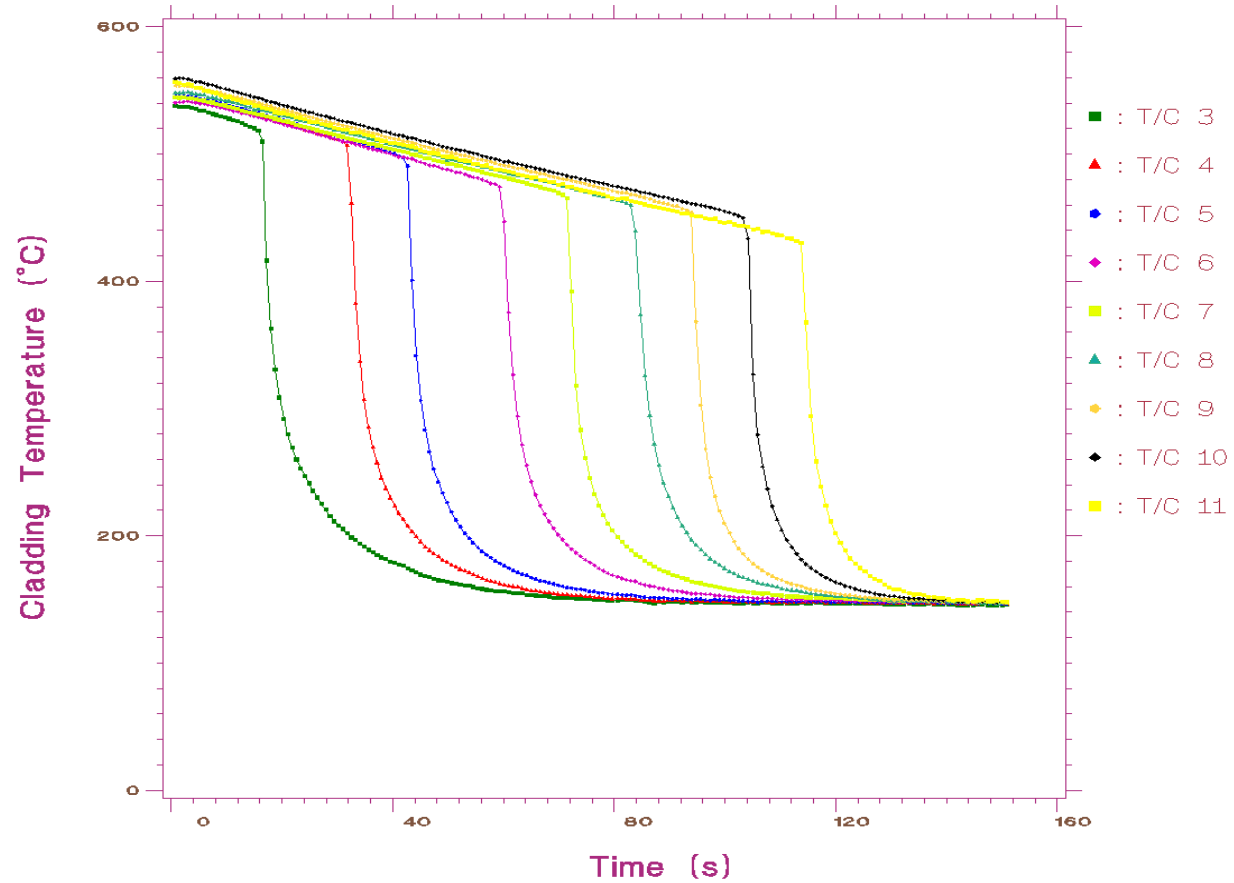
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των πειραματικών υποσυνόλων της παρούσας ΔΕ συνοψίζονται ως εξής:

1. Σημαντική επίδραση της διαμέτρου του καναλιού στο φαινόμενο της επανάψυξης. Η αύξηση της διαμέτρου επιδρά αρνητικά στην ταχύτητα επανάψυξης για πιέσεις 4 και 5 bar. Αύξηση δηλαδή της διαμέτρου του καναλιού συνεπάγεται μείωση της ταχύτητας επανάψυξης.
2. Η πίεση επιδρά θετικά στο φαινόμενο της επανάψυξης. Αύξηση δηλαδή της πίεσης οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας επανάψυξης.
3. Η στατιστική των πειραμάτων βελτιώνεται σημαντικά με την αύξηση της εσωτερικής διαμέτρου του υδραυλικού καναλιού.
4. Προσδιορίστηκε το μη-γραμμικό μοντέλο της σχέσης 5.3, το οποίο συσχετίζει την αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης με την πίεση, για πειράματα επανάψυξης με υγρό φιλμ εκ των άνω, σε περιβάλλον ατμού.
5. Το όριο της αντίστροφης ταχύτητας επανάψυξης υπολογίσθηκε στα 5 και 20 s/m για πιέσεις 4 και 5 bar αντίστοιχα.

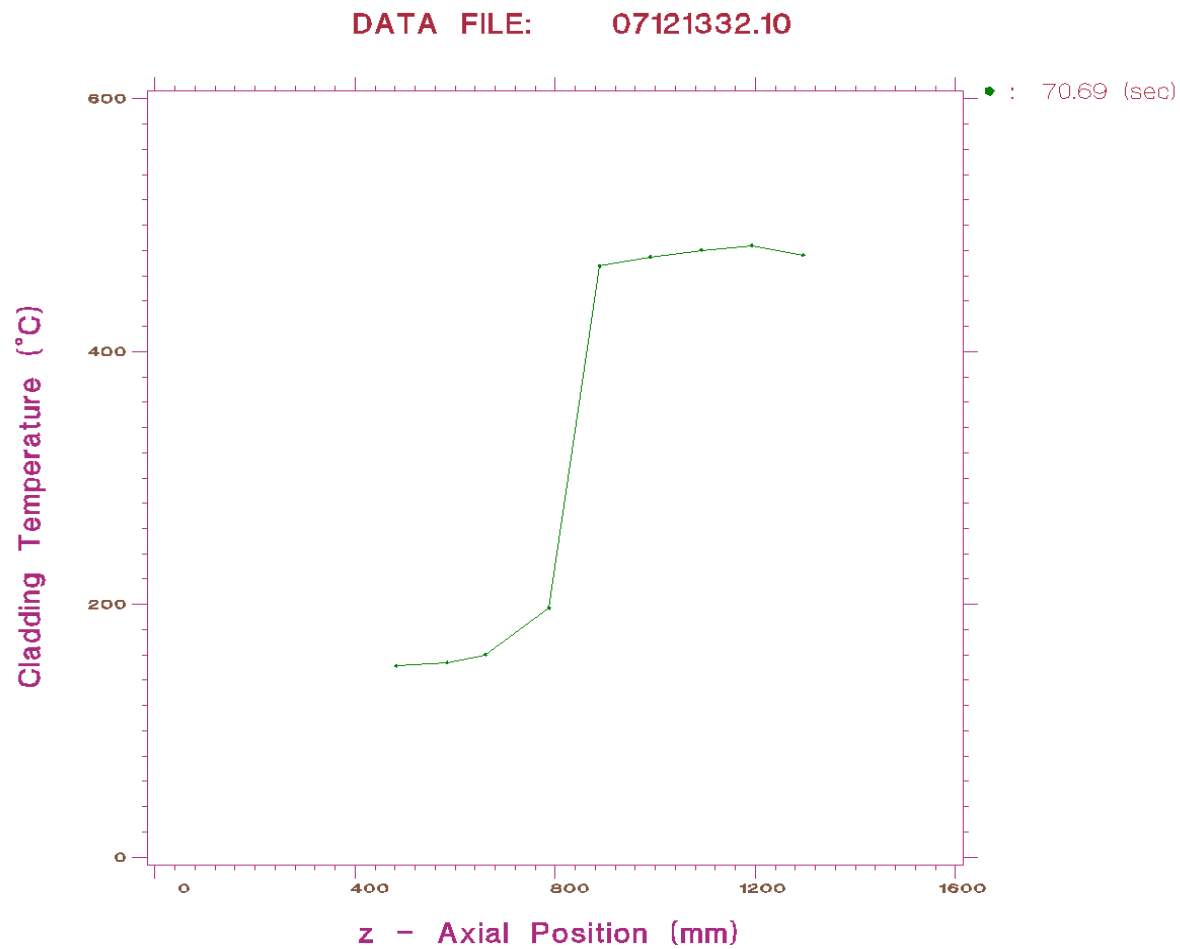
Τέλος, δεδομένης της σημασίας των πειραμάτων, σκόπιμη κρίνεται η πραγματοποίηση περαιτέρω πειραμάτων στο ΘΥΚ, τα οποία θα συμπληρώσουν και θα εμπλουτίσουν τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα. Ενδεικτικά αναφέρονται τα εξής:

- Εκτέλεση πειραμάτων σε πιέσεις 4 και 5 bar και υποψύξεις 25, 50 K.
- Εκτέλεση πειραμάτων επανάψυξης έως 7 bar προκειμένου να υπάρχει ένα αντίστοιχο σύνολο πειραμάτων τα οποία θα συγκριθούν με το παλαιότερο κανάλι υποδιπλάσιας διαμέτρου για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων.
- Πειράματα Bottom Flooding, τα οποία θα συμπληρώσουν τη σειρά πειραμάτων Top Rewetting
- Πειράματα με συνεχή μέτρηση και καταγραφή της πίεσης και της παροχής ατμού στο κανάλι δοκιμών για τη διερεύνηση του φαινομένου της ατμοποίησης λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας στα σταγονίδια του υγρού μετά την περιοχή του υγρού μετώπου.

DATA FILE: 07121332.10

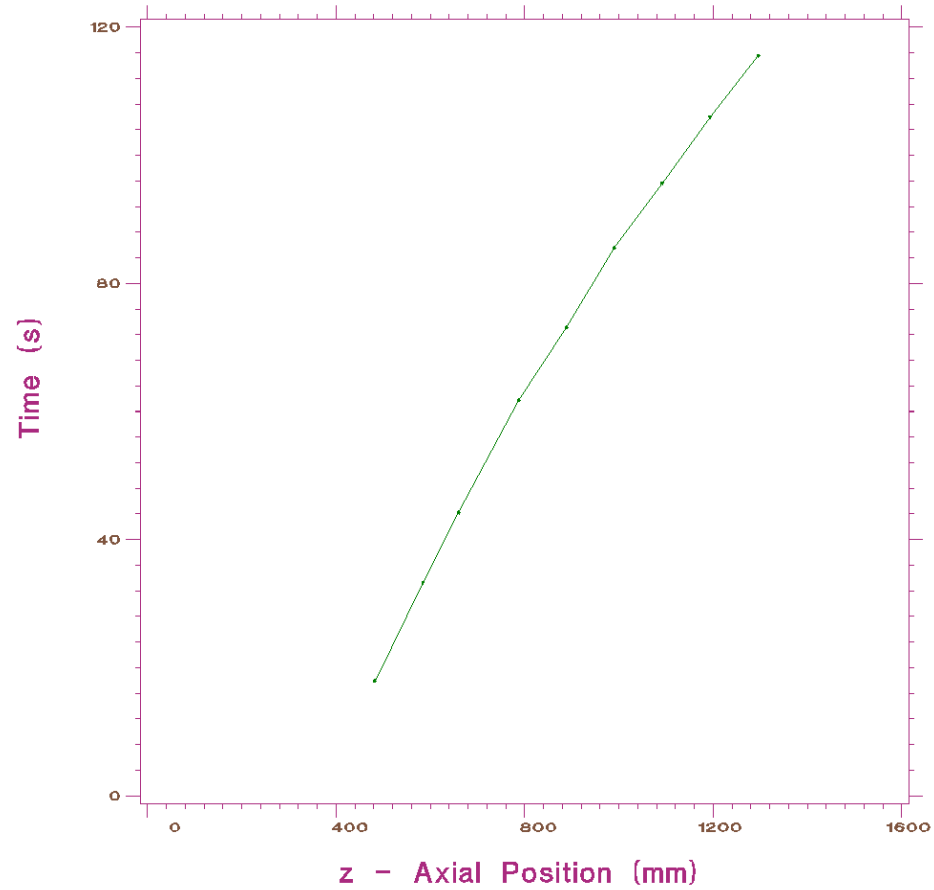


Σχήμα 5.1: Διάγραμμα της θερμοκρασιακής ιστορίας των θερμοστοιχείων TC03 - TC11 του αρχείου 07121332.10 της παρούσας εργασίας για αρχική θερμοκρασία ράβδου 550 °C, σε πίεση 4 bar

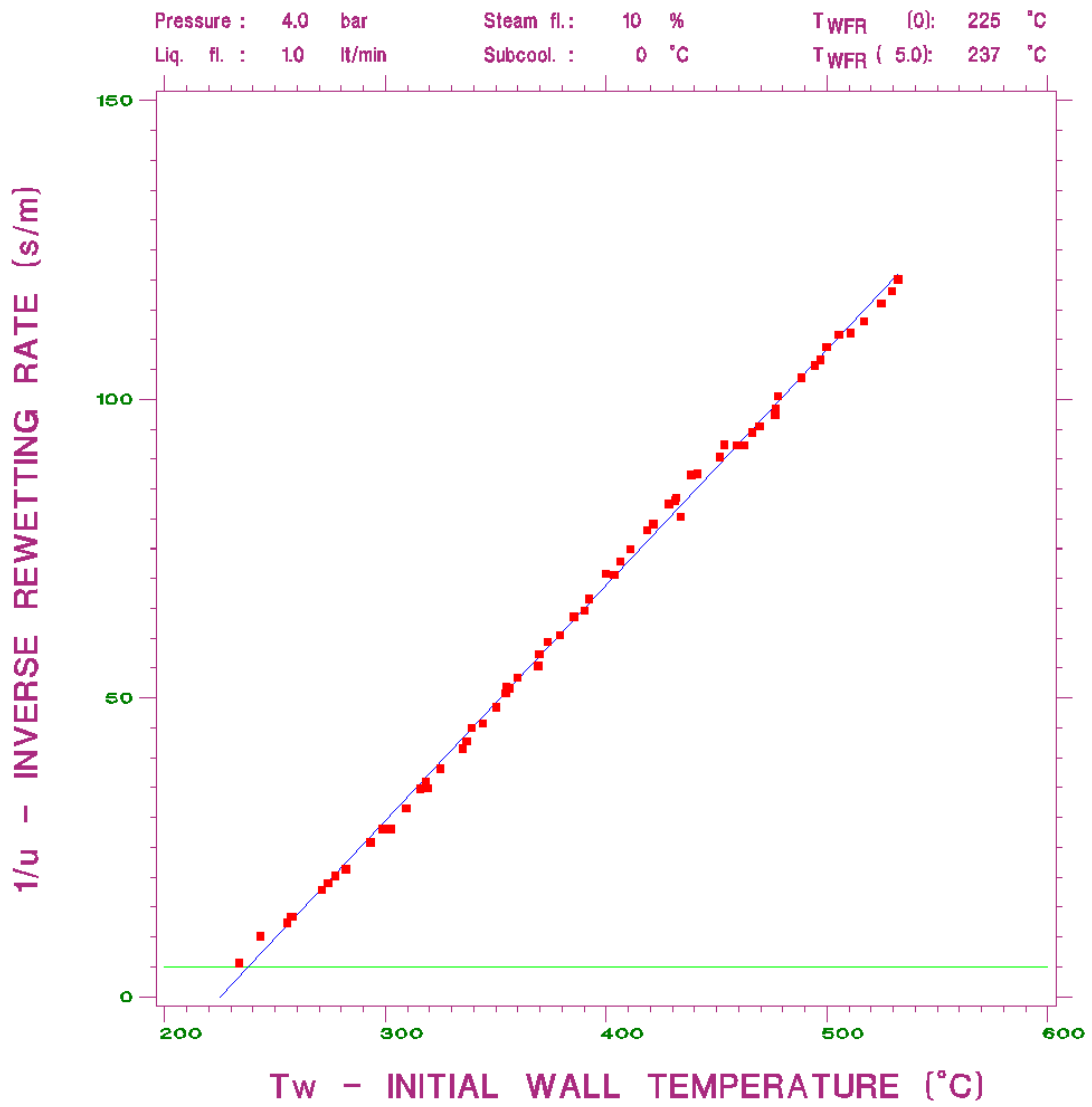


Σχήμα 5.2: Οι θερμοκρασίες στις θέσεις των εννέα θερμοστοιχείων τη χρονική στιγμή 70.69 sec κατά την επανάψυξη από αρχική θερμοκρασία 550 °C και πίεση 4 bar (παρούσα εργασία).

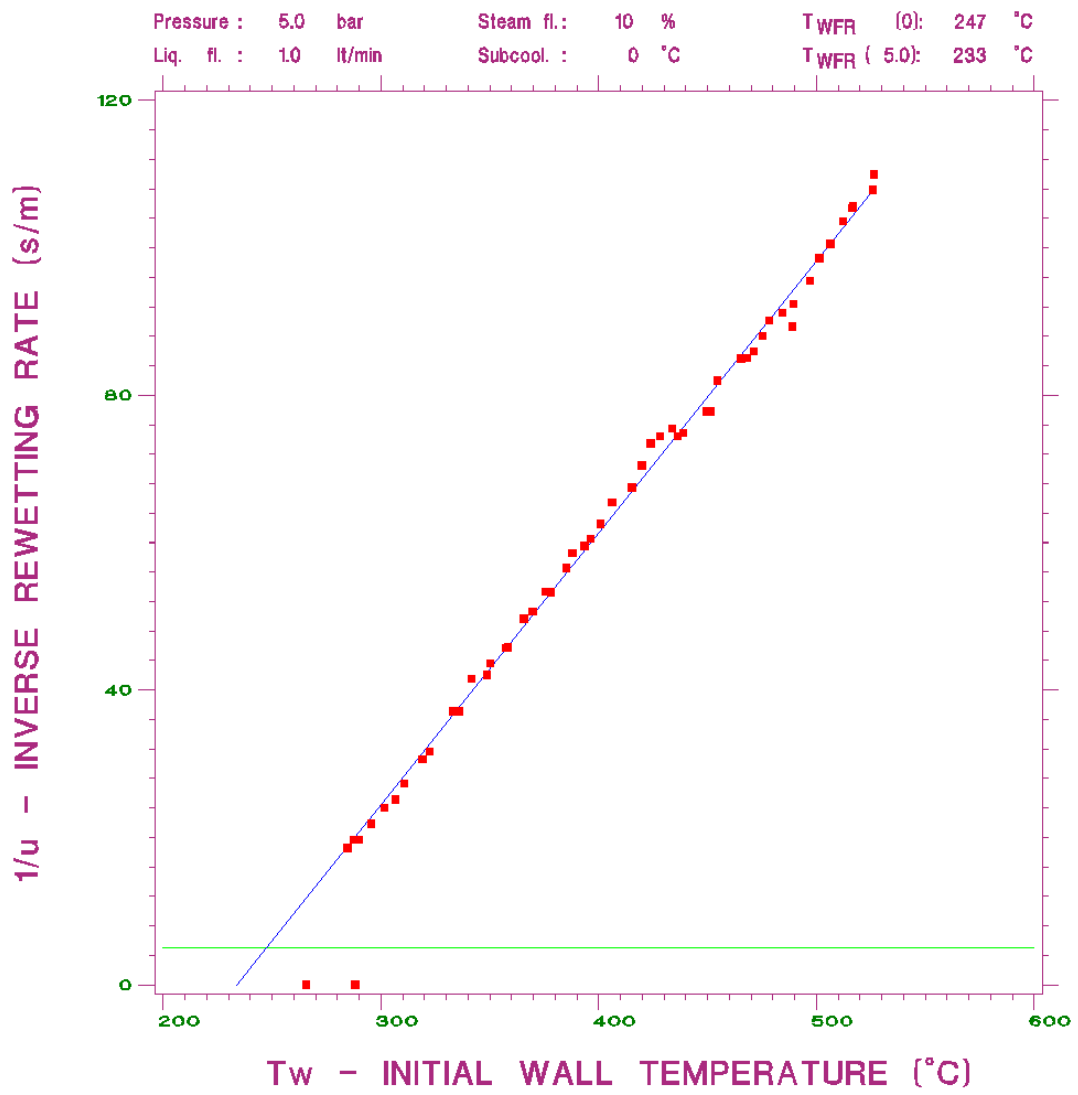
DATA FILE: 07121332.10



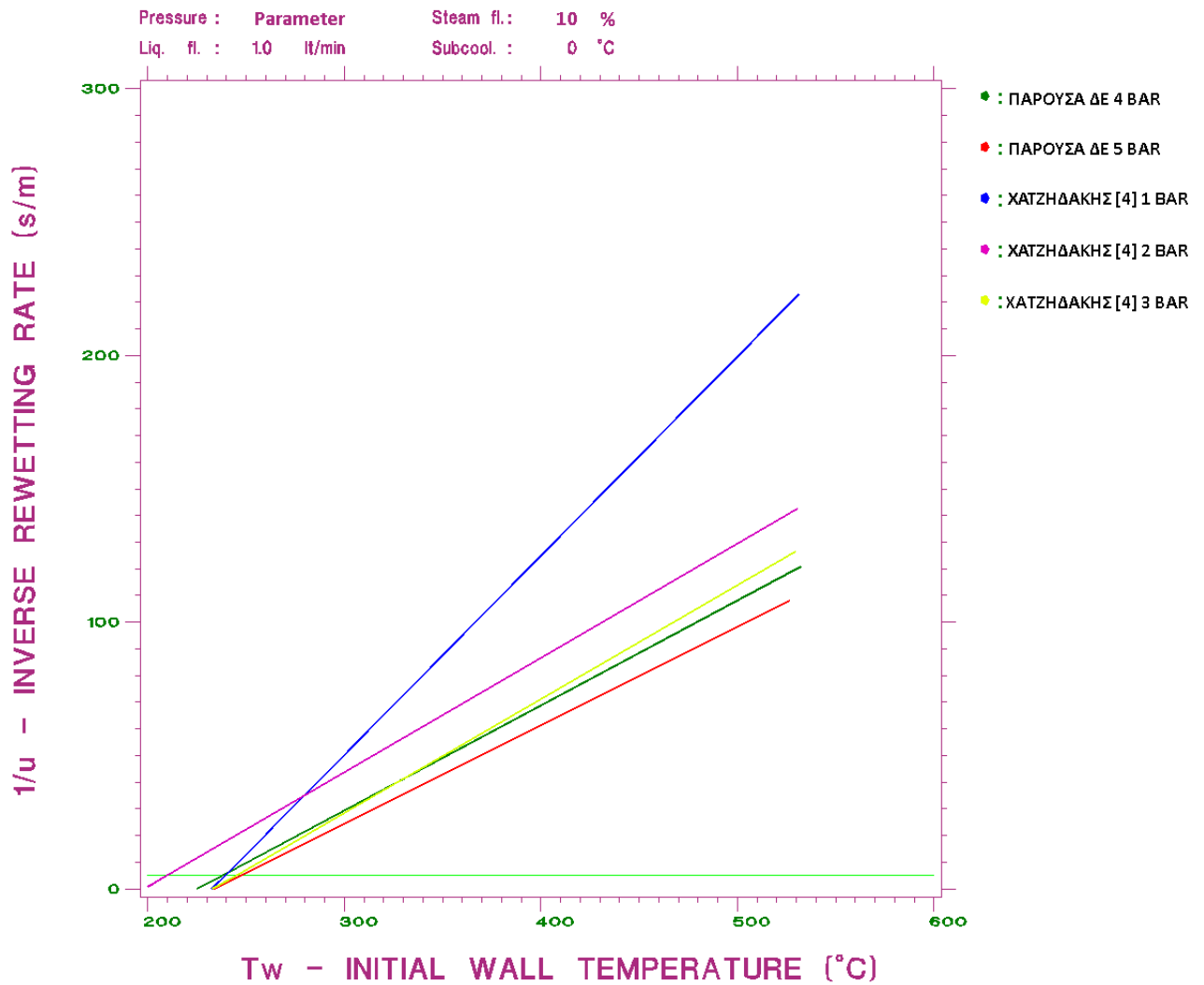
Σχήμα 5.3: Η χρονική στιγμή άφιξης του υγρού μετώπου σε κάθε ένα από τα εννέα θερμοστοιχεία κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης της παρούσας εργασίας για αρχική θερμοκρασία ράβδου 550 °C, σε πίεση 4 bar.



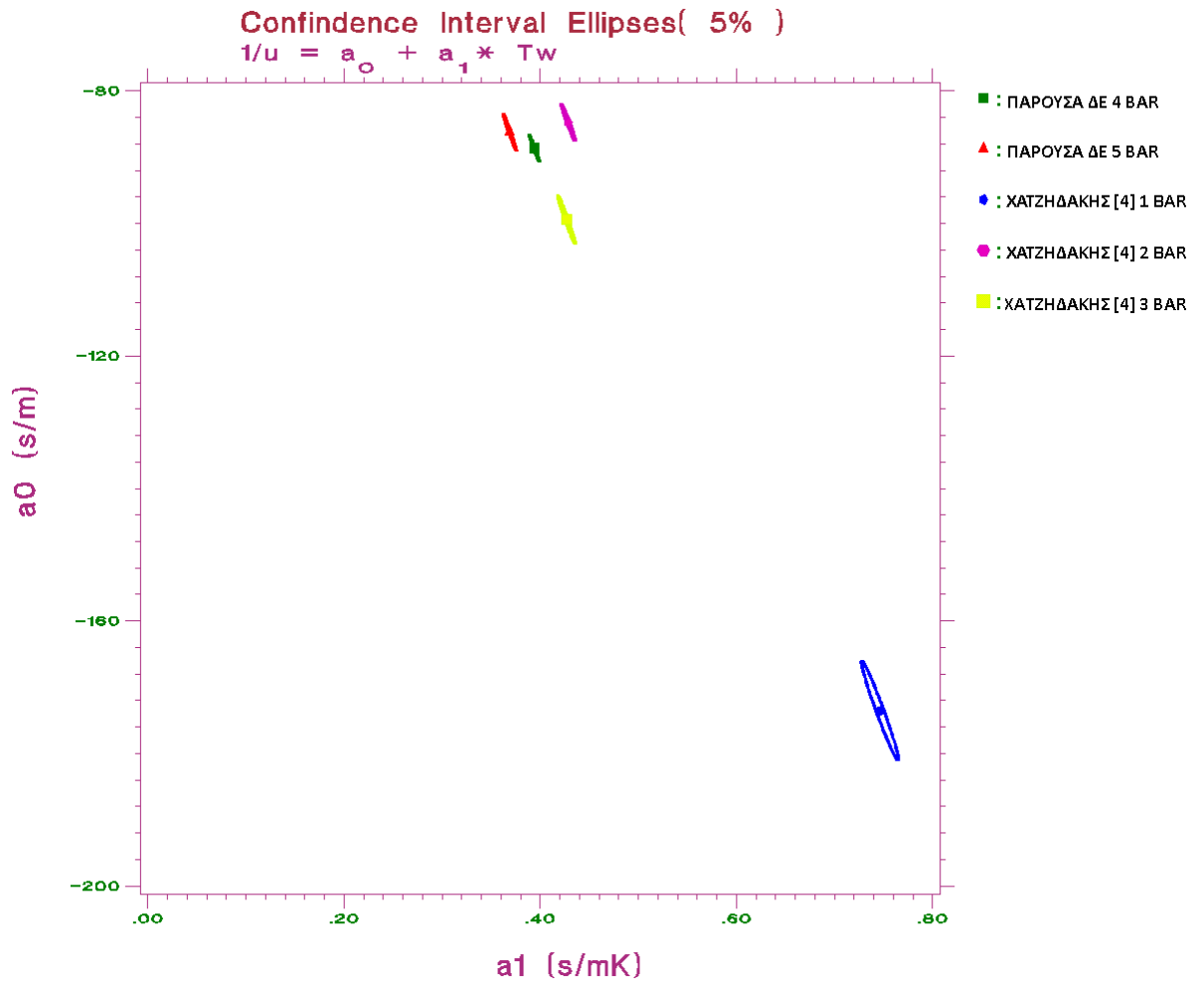
Σχήμα 5.4: Ευθεία αναδρομής του πειραματικού υποσυνόλου 4bar-0K



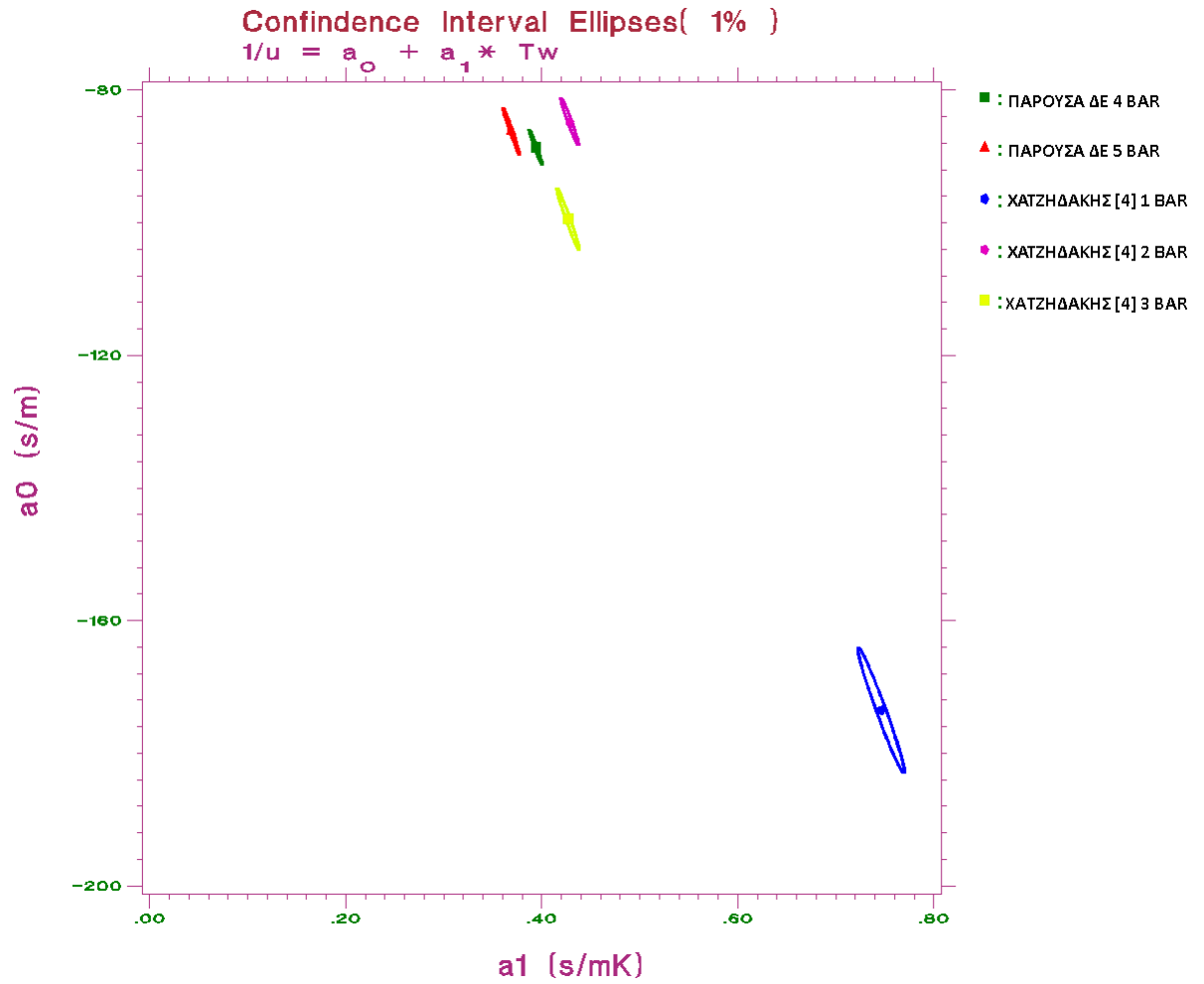
Σχήμα 5.5: Ευθεία αναδρομής του πειραματικού υποσυνόλου 5bar-0K



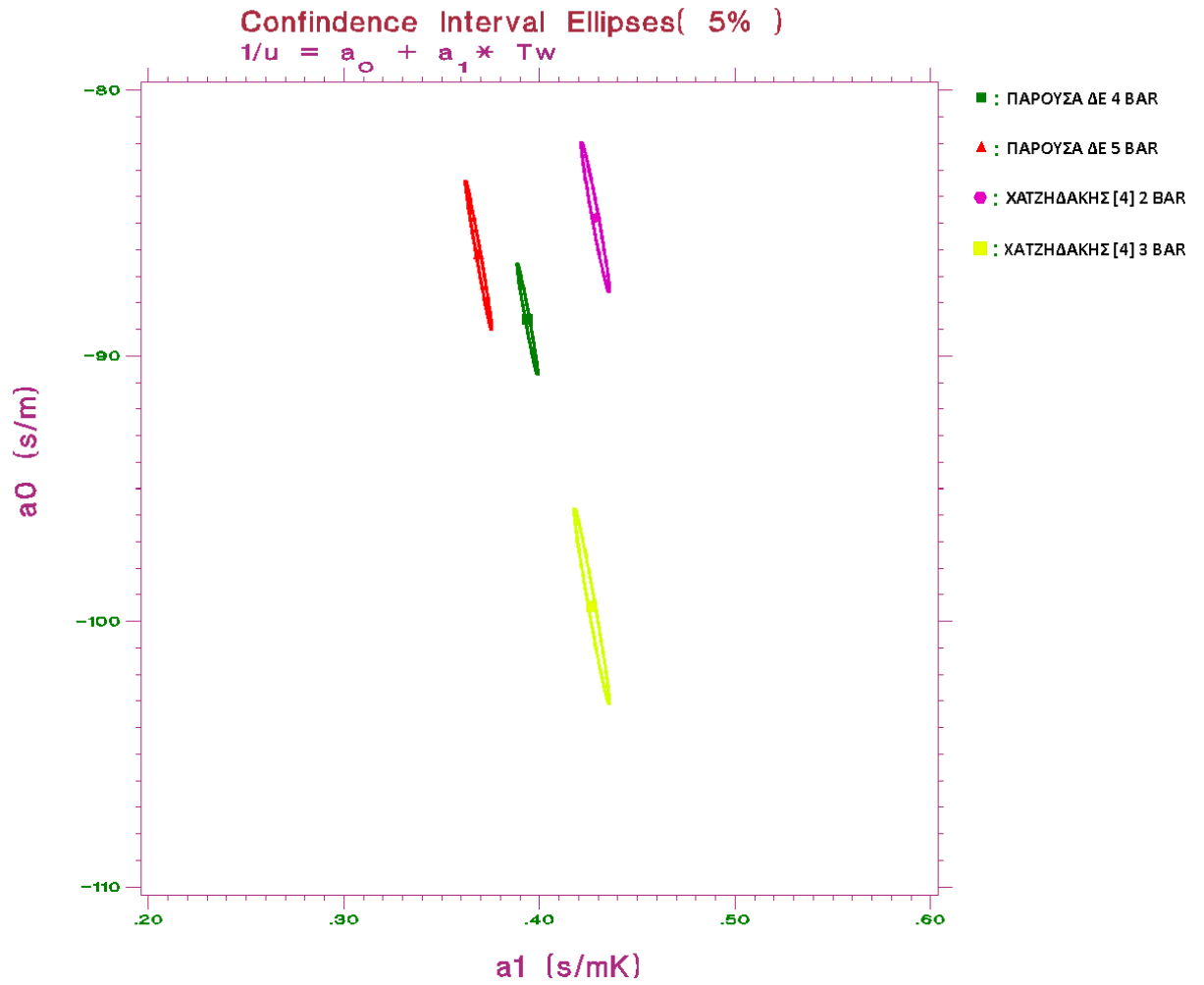
Σχήμα 5.6: Ευθείες αναδρομής πειραματικών υποσυνόλων που αναφέρονται σε πιέσεις 1,2,3,4 και 5 bar και υπόψυξη 0 K



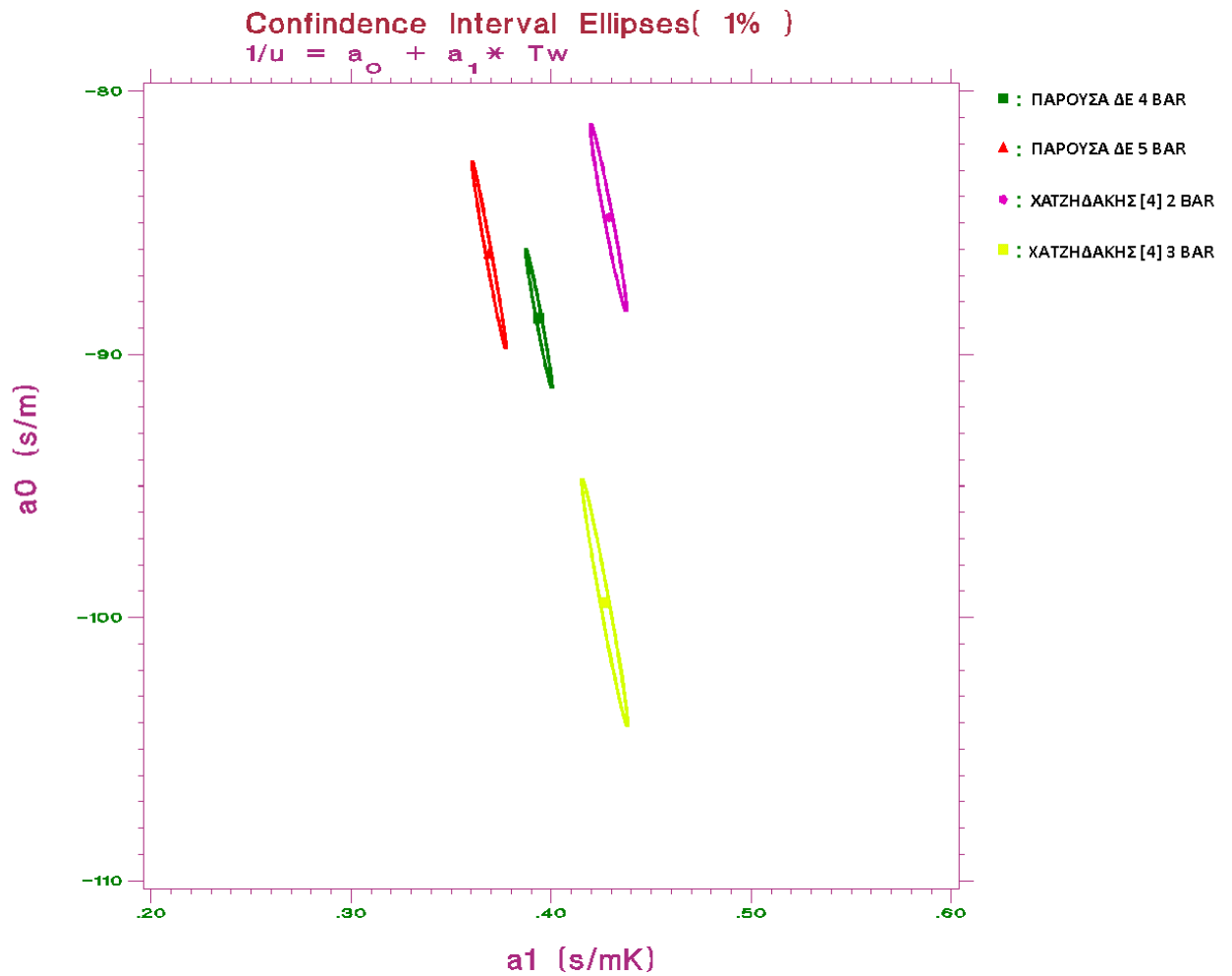
Σχήμα 5.7: Ελλείψεις εμπιστοσύνης σε επίπεδο σημαντικότητας 5 %, πειραματικών υποσυνόλων που αναφέρονται σε πιέσεις 1,2,3,4 και 5 bar και υπόψυξη 0 K



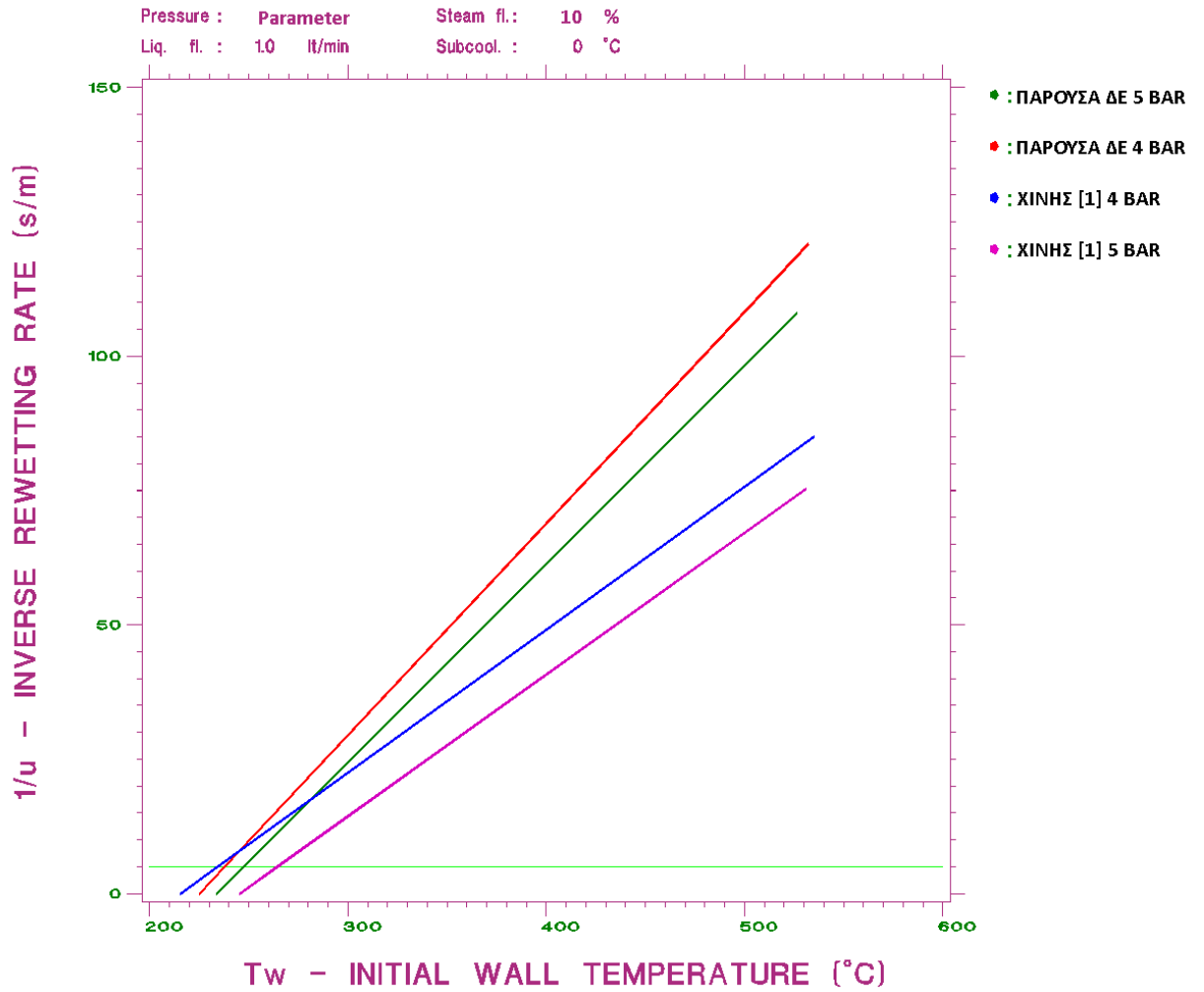
Σχήμα 5.8: Ελλείψεις εμπιστοσύνης σε επίπεδο σημαντικότητας 1%, πειραματικών υποσυνόλων που αναφέρονται σε πιέσεις 1,2,3,4 και 5 bar και υπόψυξη 0 K



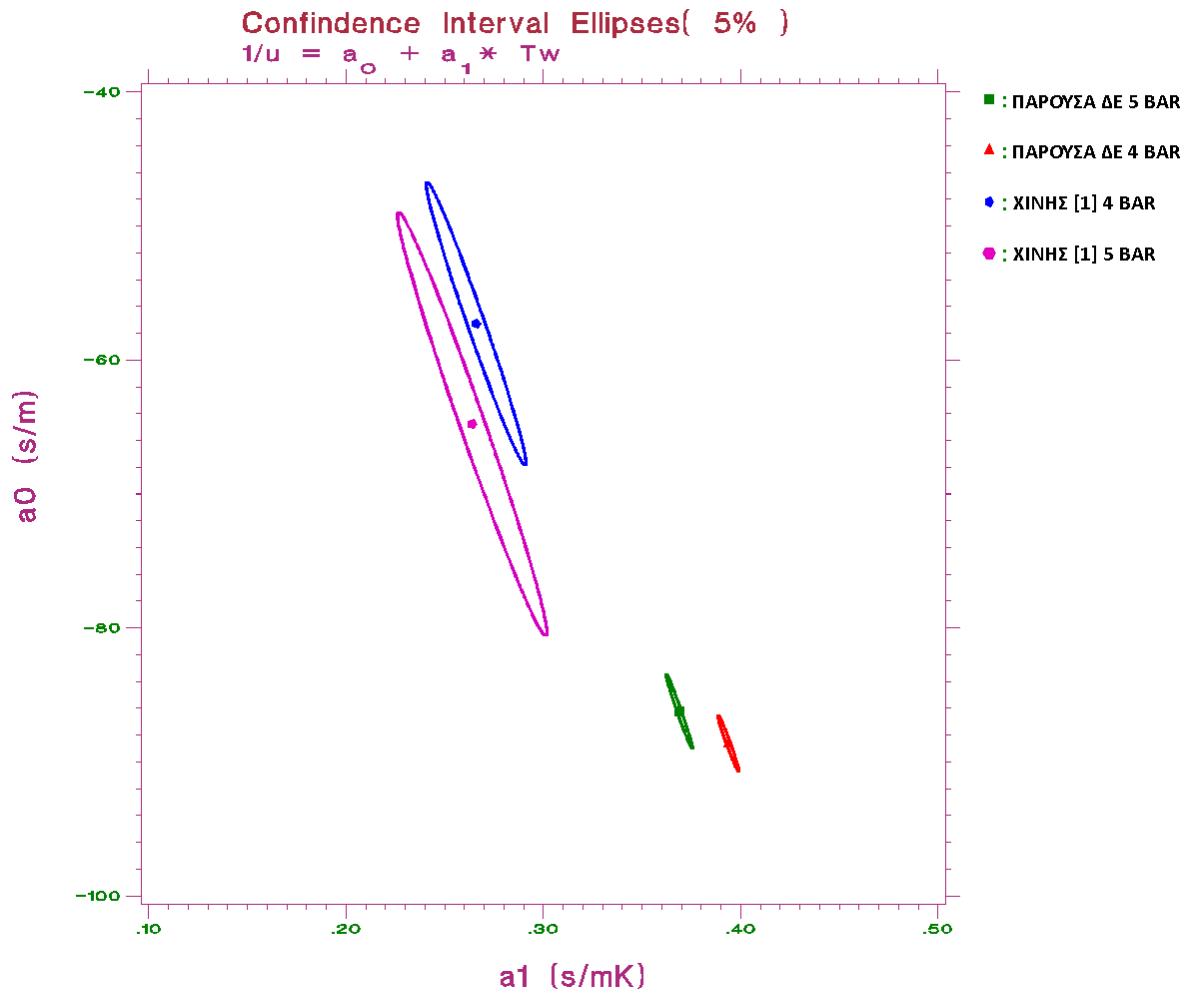
Σχήμα 5.9: Ελλείψεις εμπιστοσύνης σε επίπεδο σημαντικότητας 5 %, πειραματικών υποσυνόλων που αναφέρονται σε πιέσεις 2,3,4 και 5 bar και υπόψυξη 0



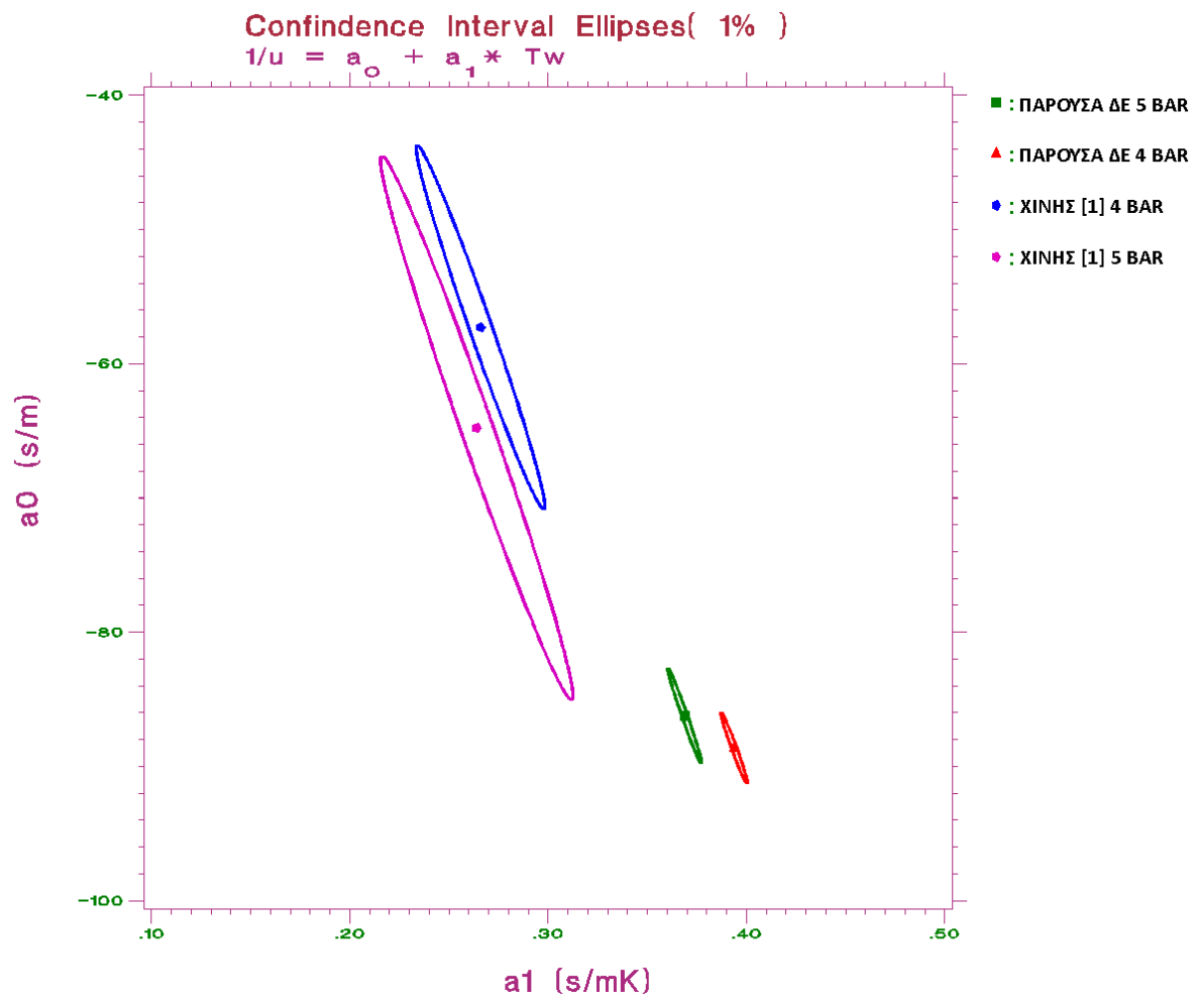
Σχήμα 5.10: Ελλείψεις εμπιστοσύνης σε επίπεδο σημαντικότητας 1%, πειραματικών υποσυνόλων που αναφέρονται σε πιέσεις 2,3,4 και 5 bar και υπόψυξη 0 K



Σχήμα 5.11: Ευθείες αναδρομής πειραματικών υποσυνόλων που αναφέρονται σε πιέσεις 4 και 5 bar και υπόψυξη 0 K

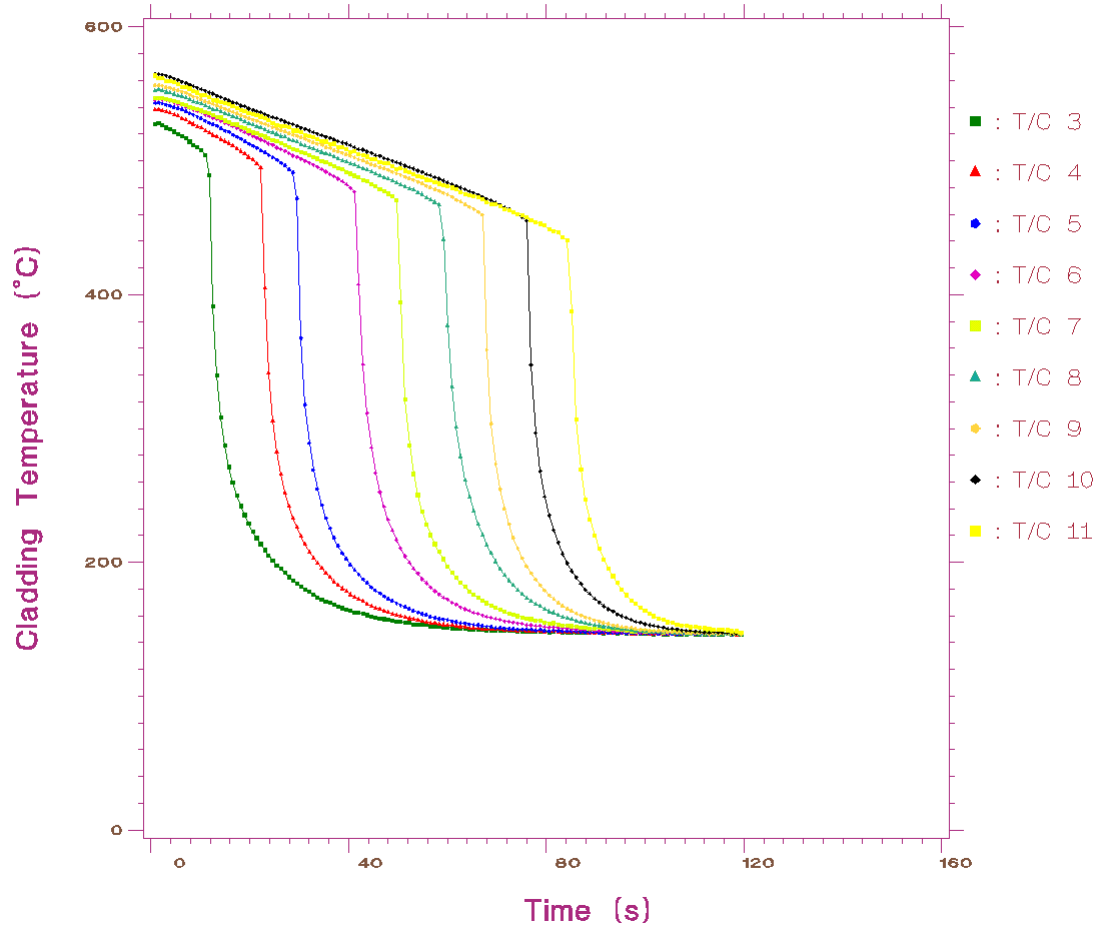


Σχήμα 5.12: Ελλείψεις εμπιστοσύνης σε επίπεδο σημαντικότητας 5 %, πειραματικών υποσυνόλων που αναφέρονται σε πιέσεις 4 και 5 bar και υπόψυξη 0 K



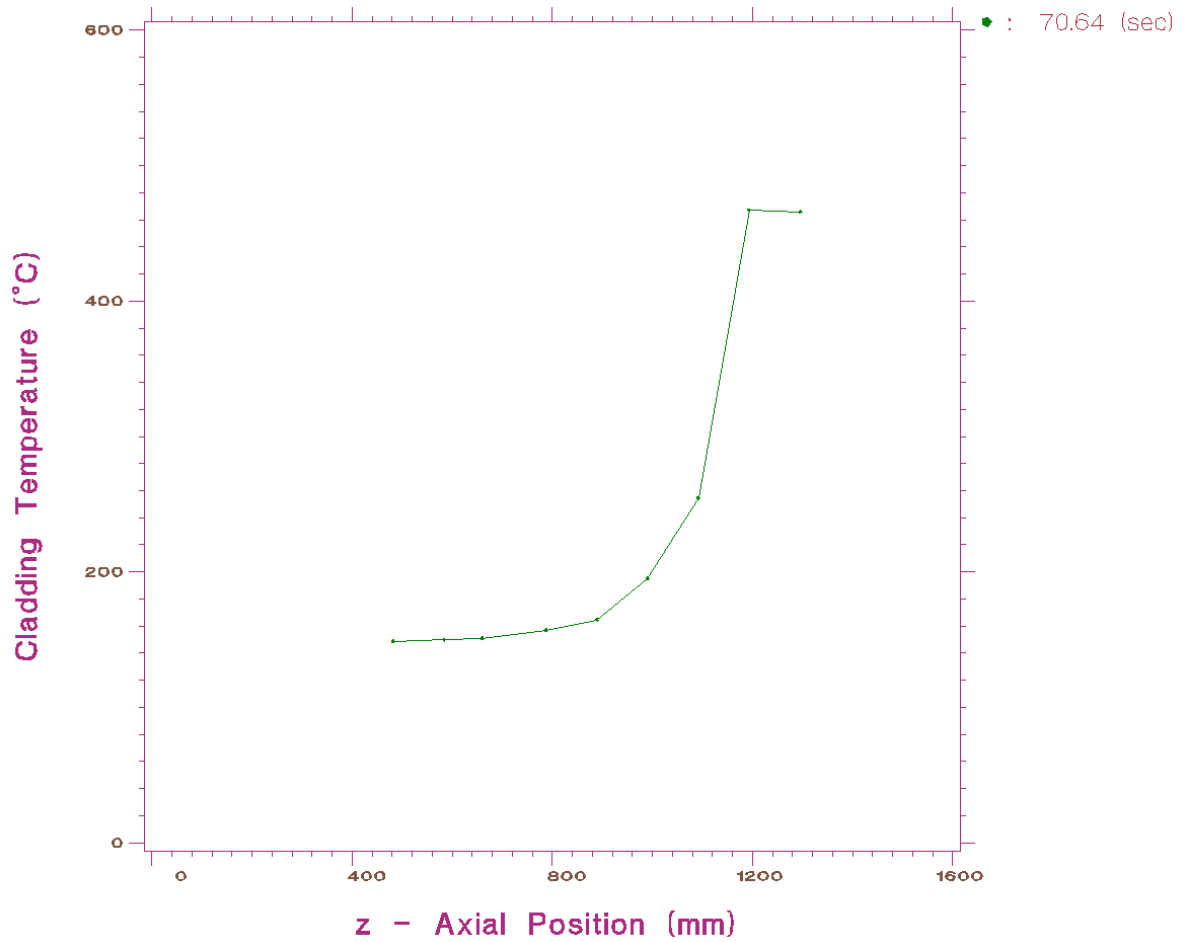
Σχήμα 5.13: Ελλείψεις εμπιστοσύνης σε επίπεδο σημαντικότητας 1 %, πειραματικών υποσυνόλων που αναφέρονται σε πιέσεις 4 και 5 bar και υπόψυξη 0 K

DATA FILE: 19041848.94



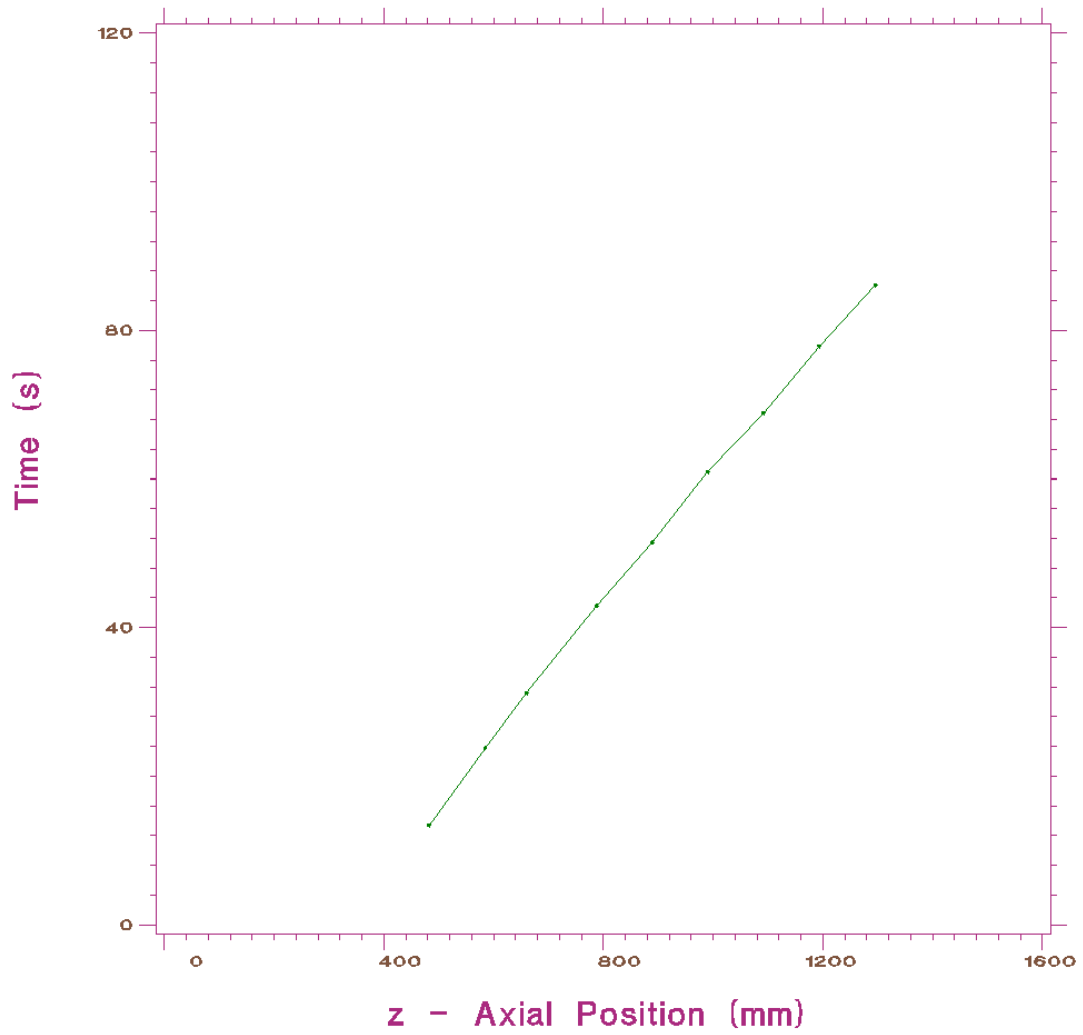
Σχήμα 5.14: Διάγραμμα της θερμοκρασιακής ιστορίας των θερμοστοιχείων TC03 TC11 του αρχείου 19041848.94 της εργασίας [1], για αρχική θερμοκρασία ράβδου 550 °C, σε πίεση 4 bar

DATA FILE: 19041848.94

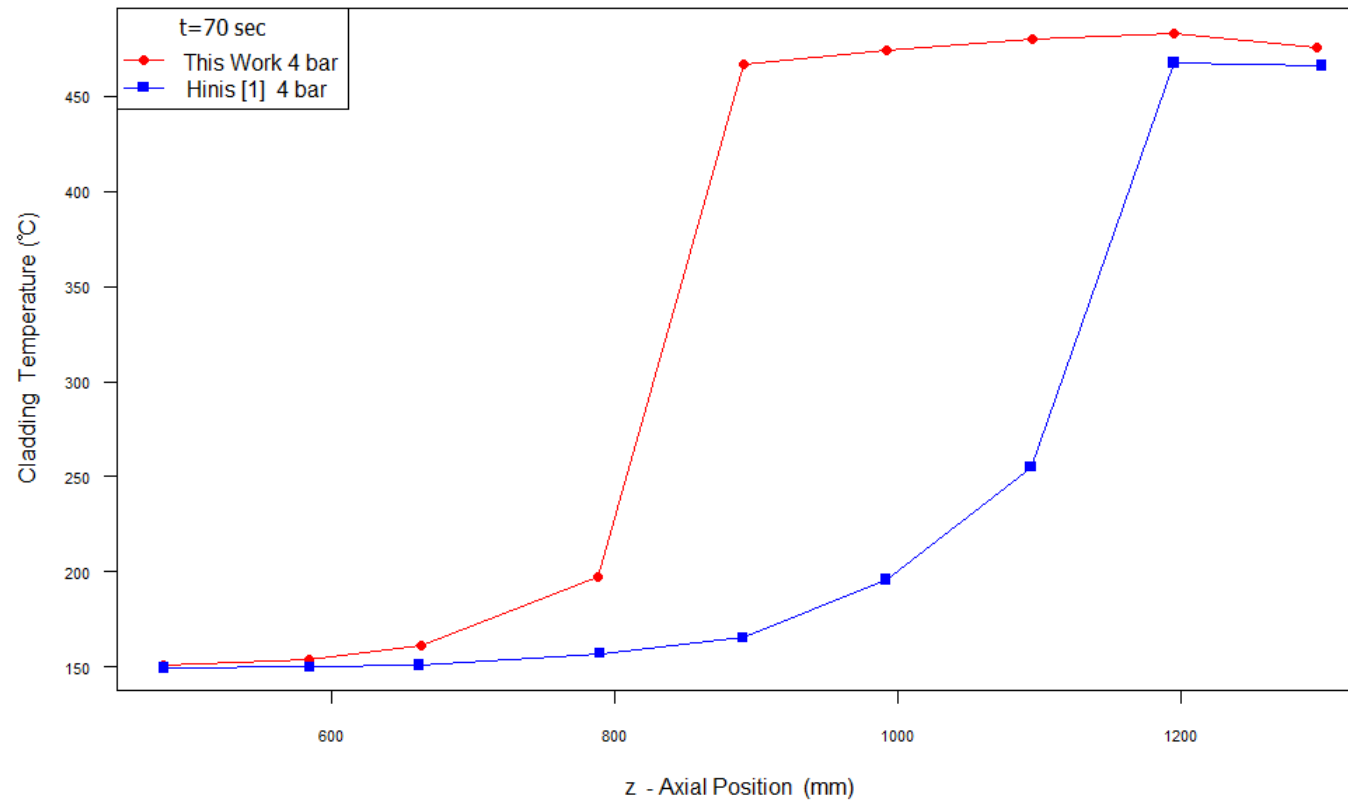


Σχήμα 5.15: Οι θερμοκρασίες στις θέσεις των εννέα θερμοστοιχείων τη χρονική στιγμή 70.69 sec κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης της εργασίας [1] από αρχική θερμοκρασία 550 °C, σε πίεση 4 bar.

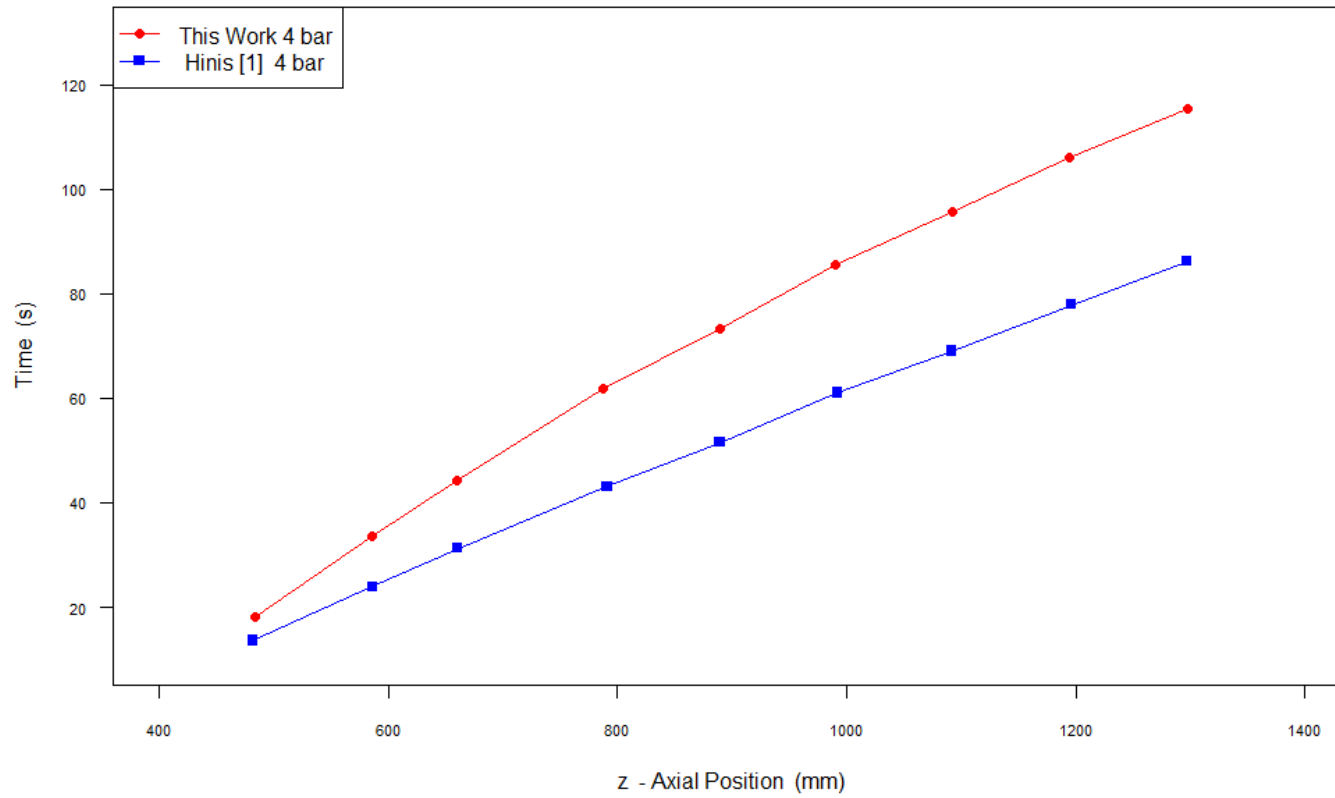
DATA FILE: 19041848.94



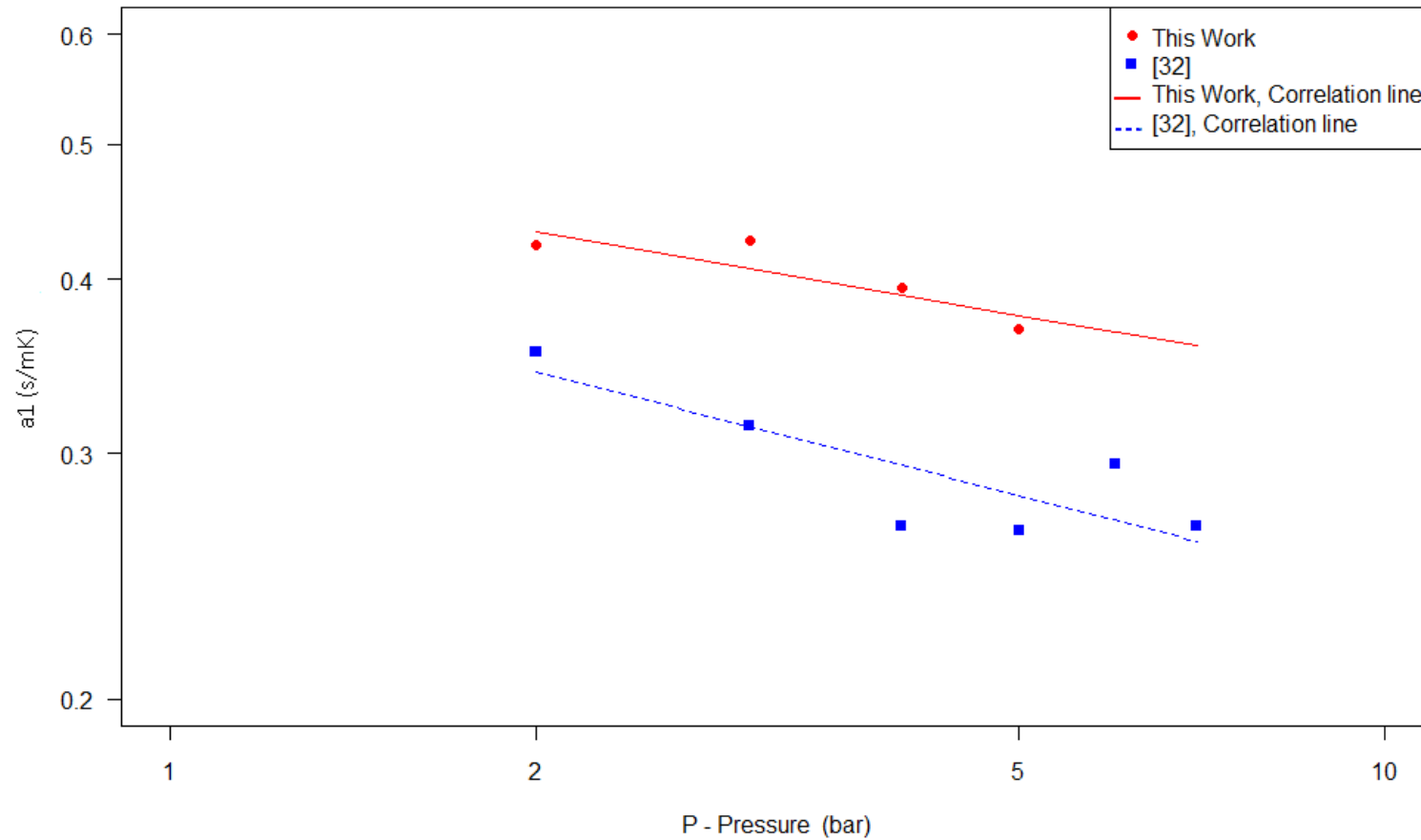
Σχήμα 5.16: Η χρονική στιγμή άφιξης του υγρού μετώπου σε κάθε ένα από τα εννέα θερμοστοιχεία κατά τη διάρκεια πειράματος επανάψυξης της εργασίας [1] για αρχική θερμοκρασία ράβδου 550 °C, σε πίεση 4 bar.



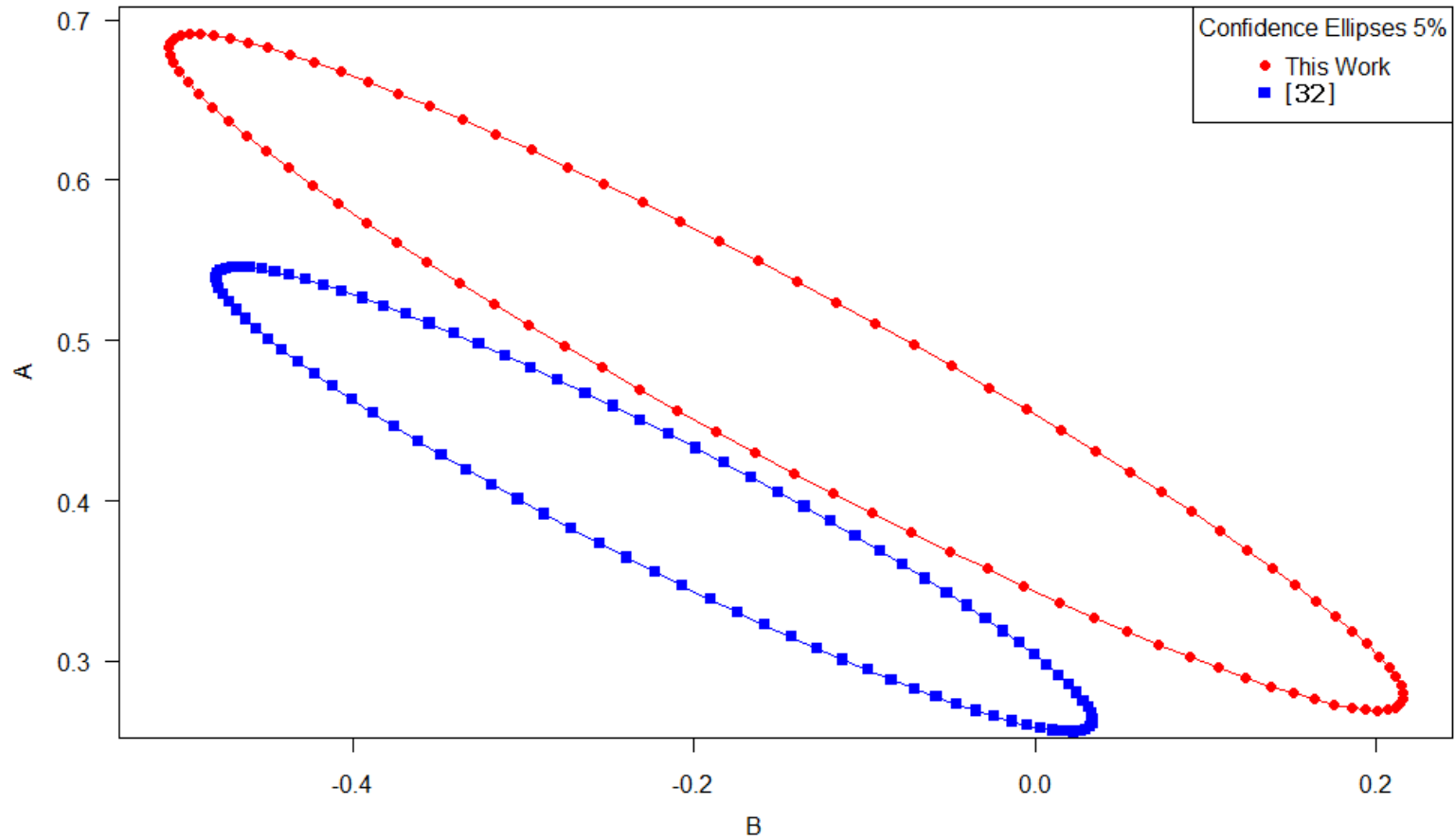
Σχήμα 5.17: Συγκριτικό διάγραμμα (Παρούσα ΔΕ και [1]) θερμοκρασιών στις θέσεις των εννέα θερμοστοιχείων τη χρονική στιγμή ~70 s κατά την επανάφυση από αρχική θερμοκρασία 550 °C, σε πίεση 4 bar



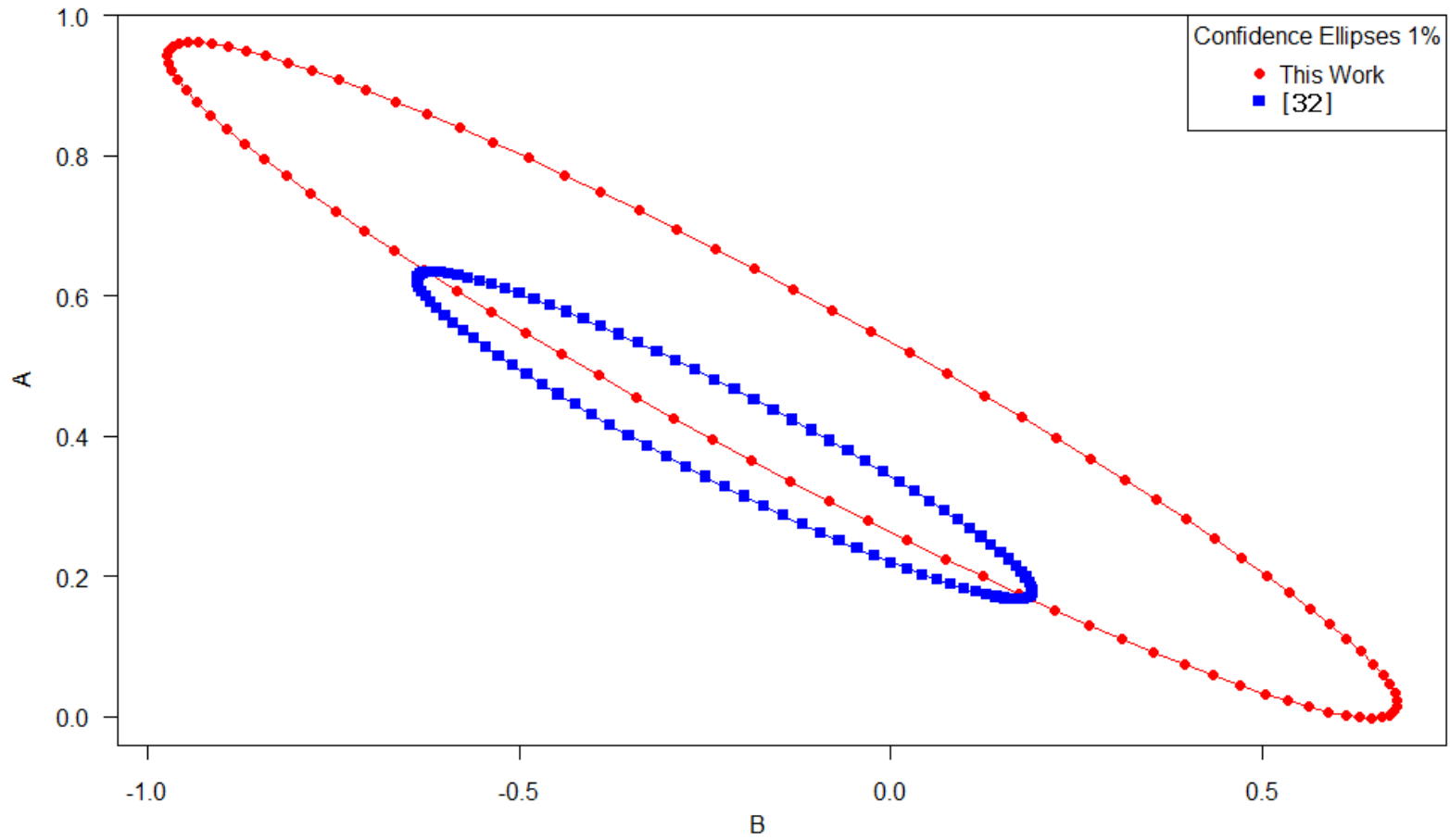
Σχήμα 5.18: Συγκριτικό διάγραμμα χρονικής στιγμής άφιξης του υγρού μετώπου σε κάθε ένα από τα εννέα θερμοστοιχεία, σε δύο πειράματα επανάληψης (Παρούσα ΔΕ και [1]), αρχικής θερμοκρασίας ράβδου 550 °C, σε πίεση 4 bar



Σχήμα 5.19: Συσχετίσεις παραμέτρου a_1 – πίεσης, της παρούσας εργασίας και της εργασίας [29]



Σχήμα 5.20: Ελλείψεις εμπιστοσύνης των παραμέτρων A και B των συσχετίσεων α_1 - πίεσης, της παρούσας εργασίας και της εργασίας [29], σε επίπεδο σημαντικότητας 5 %



Σχήμα 5.21: Ελλείψεις εμπιστοσύνης των παραμέτρων A και B των συσχετίσεων α_1 - πίεσης, της παρούσας εργασίας και της εργασίας [29], σε επίπεδο σημαντικότητας 1 %

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Χίνης, Ε.Π, (Αθήνα 1994)
Πειραματική εγκατάσταση προσομοίωσης φαινομένων βρασμού σε υδρόψυκτους πυρηνικούς αντιδραστήρες.
Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας
2. Καρασούλος, Ι.Γ (Αθήνα 1997)
Πειραματική μελέτη επαναψύξης με παράμετρο την υπόψυξη
Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας
3. Πλαστουργός, Α.Γ, (Αθήνα 2000)
Πειραματική μελέτη επαναψύξεως υπερθερμανθισών επιφανειών με παράμετρο την υπόψυξη σε πιέσεις 1 και 2 bar
Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας
4. Χατζηδάκης, Σ.Ε, (Αθήνα 2006)
Πειραματική μελέτη επαναψύξεως υπερθερμανθισών επιφανειών με παράμετρο την υπόψυξη σε πιέσεις 1 και 2 και 3 bar
Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας
5. Σιμόπουλος, Σ.Ε, (Αθήνα 1989)
Μετρήσεις τεχνικών μεγεθών
ΕΜΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας
6. Σιμόπουλος, Σ.Ε. (Αθήνα 1983)
Απαγωγή θερμότητας από τον πυρήνα πυρηνικών αντιδραστήρων
ΕΜΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

7. Αγγελόπουλος Μ.Γ. (Αθήνα 1983)
Πυρηνική Τεχνολογία
ΕΜΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας
8. Geoffrey F. Hewitt, John G. Collier, (2000)
Introduction to nuclear power
Taylor & Francis, Inc
9. John G. Collier, John R. Thome, (1996)
Convective boiling and condensation, third edition
Oxford science publications
10. Samuel Glasstone, Walter H. Jordan, (USA 1980)
Nuclear power and its environmental effects
American Nuclear Society
11. V.V Kostiouk, I.I Berlin, N.N. Borisov, (Japan 1984)
Transition boiling
Sobun Printing Ltd.
12. W. N. Venables, D. M. Smith and the R Development Core Team, (2010-10-15)
An Introduction to R, Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics Version 2.12.0
13. R Development Core Team, (2010-10-15)
R Data Import/Export, Version 2.12.0
14. Κωστανταροπούλου, Α. (Αθήνα 1991)
Διερεύνηση της παροχής του ψυκτικού στο φαινόμενο της επανάφυξης
Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

15. Χατζηνικολάου, Ζ.Γ., (Αθήνα 1994)
Βαθμονόμηση μαγνητικού ροόμετρου νερού θερμοκρασίας 20°C -80°C
Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας
Πυρηνικής Τεχνολογίας
16. Simopoulos, S.E., (Ph.D., June 1978)
Modelling of the rewetting process in water cooled nuclear reactor fuel elements
University of London
17. Simopoulos, S.E., (1981)
The effect of precursory cooling on the rewetting rate
Atomkernenergie – Kerntechnik 49(1/2) : 37,1981
18. Simopoulos, S.E., El-Shirbini A.A., Murgatroyd W.
Experimental investigation of the rewetting process in a Freon-113 vapour environment
Department of mechanical engineering, Imperial College of science and Technology,
Exhibition Road London, UK
19. Mills A.F., (1995)
Heat and Mass transfer
Richard D. Irwin
20. Holman J.P., (1997)
Heat transfer
Mc-Graw Hill
21. Thomson, T.S., (April 1975)
Rewetting of a hot surface
Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River, Ontario. Conference, Tokyo, p.3-7
22. Yamanouchi, A. (1968)
Effect of core spray cooling in transient state after Loss of Coolant Accident
Journal of Nuclear Science and Technology, 5(11):547

23. Saxena A.K., Venkat V., Govardhana V., (2001)
Experimental studies on rewetting of hot vertical annular channel
Journal of Nuclear Engineering and Design, 208 (2001)283-303
24. Takada E., Nakagawa S., Fujimoto N., Tochio D., (2004)
Core thermal-hydraulic design
Journal of Nuclear Engineering and Design, 233 (2004) 37-43
25. Jones R.C., Ludd R.L., (2003)
An investigation of dryout/rewetting in subcooled two-phase flow boiling
International journal of heat and mass transfer, 46 (2003) 3143- 3152
26. Κουτσομπλής, Λ., (Αθήνα 1991)
Σύνδεση μεταλλακτών μέσω ADC σε προσωπικό Η/Υ κάτω από το Λ/Σ DOS
Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας
Πυρηνικής Τεχνολογίας
27. Αλμυρούδης Ν., (Αθήνα 1991)
Σύνδεση μεταλλακτών μέσω ADC/MUX σε προσωπικό Η/Υ κάτω από το Λ/Σ DOS
Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας
Πυρηνικής Τεχνολογίας
28. E.P Hinis, S.E. Simopoulos, (2003)
Experimental investigation of the rewetting process at pressures of 1-7 bar.
Atomkernenergie – Kerntechnik 68(2003) 1-2
ΕΜΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας
29. G.P Celata, Z.M Cumo, Z.A Mariani, L. Saraceno, (2009)
A comparison between spray cooling and film flow cooling during the rewetting of a hot surface
Heat Mass Transfer (2009) 45:1029–103
30. S.K. Sahu, P.K. Das, S. Bhattacharyya (2010)
An experimental investigation on the quenching of a hot vertical heater by water injection at high flow rate

Nuclear Engineering and Design 240 (2010) 1558–1568

31. S.H. Chan and M.A. Grolmes (1975)
Hydrodynamically-Controlled Rewetting
Nuclear Engineering and Design (1975) 34:307-316

32. Mohamed E. Sawan and Max W. Cerbon
A review of spray-cooling and bottom-flooding work for LWR cores.
Nuclear Engineering and Design (1975) 32:191-207

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΤΟ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ R-STATISTICS ΚΑΙ Η ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ *fit*

Το **R** είναι μία γλώσσα προγραμματισμού συνοδευόμενη από ένα περιβάλλον για επεξεργασία δεδομένων. Αν και χρησιμοποιείται κυρίως σε στατιστικές εφαρμογές οι δημιουργοί της προτιμούν να το αποκαλούν εργαλείο για ανάλυση δεδομένων. Το **R** εφαρμόζει μία διάλεκτο της γλώσσας S (η S δημιουργήθηκε από τη Bell Laboratories και τον J. Chambers και τους συνεργάτες του) η οποία είναι μία διερμηνέας γλώσσα προγραμματισμού. Αυτό σημαίνει ότι οι εντολές διαβάζονται και εκτελούνται αμέσως. Το μεγάλο πλεονέκτημα των διερμηνέων γλωσσών προγραμματισμού είναι ότι επιτρέπουν σταδιακή ανάπτυξη. Δηλαδή μία συνάρτηση μπορεί να δημιουργηθεί, να εκτελεσθεί και μετά να δημιουργηθεί μία καινούργια συνάρτηση η οποία καλεί την προηγούμενη κ.ο.κ. Άλλα πλεονεκτήματα του **R** είναι η ευκολία στη δημιουργία γραφημάτων και η δυνατότητα εισαγωγής μαθηματικών τύπων και συμβόλων όπου αυτό χρειάζεται. Για υπολογιστικά απαιτητικές εργασίες ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει κώδικα σε γλώσσα C, C++ και Fortran, ο οποίος θα καλείται από το πρόγραμμα την ώρα που αυτό τρέχει.

Πρόκειται για λογισμικό ανοικτού κώδικα (open source) που διατίθεται ελεύθερα και αναπτύσσεται υπό την αιγίδα του GNU¹. Η R βελτιώνεται συνεχώς με τη συνεισφορά των χρηστών και ήδη υπάρχουν εκατοντάδες πακέτα (επεκτάσεις) που προσφέρουν νέες δυνατότητες στο υπάρχον σύστημα. Το **R** τρέχει σε περιβάλλοντα Unix, FreeBSD, Linux, Windows και MacOS.

Περιγραφή της συνάρτησης *fit*

Η συνάρτηση *fit* συντάχθηκε στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ με αφορμή τη βαθμονόμηση του ADC, των MUX και των μαγνητικών ροομέτρων και πραγματοποιεί γραμμική προσαρμογή με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Η περιγραφή του τρόπου χρήσης της συνάρτησης αυτής μέσω του προγράμματος **R** γίνεται στο εδάφιο 4.1.

Όσον αφορά τη δομή του κώδικα της συνάρτησης *fit*, αυτή έχει ως εξής: Αρχικά γίνεται ο ορισμός της (τμήμα *function's_name – parameters*). Στο τμήμα

¹ Το project GNU ξεκίνησε το 1984 με σκοπό τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου λειτουργικού συστήματος τύπου Unix το οποίο θα είναι ένα δωρεάν και ανοιχτό, ως προς τον πηγαίο κώδικα, λογισμικό.

αυτό υπάρχουν διάφορες παράμετροι οι οποίες είτε λαμβάνουν τιμές από το χρήστη είτε λαμβάνουν προκαθορισμένες τιμές (εδάφιο 4.1)

Εν συνεχεία στο τμήμα *creation of dialog windows* στο οποίο ορίζονται τα παράθυρα διαλόγου μέσω των οποίων ο χρήστης εισάγει δεδομένα στη συνάρτηση *fit*.

Το τμήμα που ακολουθεί είναι το κύριο τμήμα της συνάρτησης (τμήμα *main_ calculations*). Στο τμήμα αυτό με χρήση έτοιμων συναρτήσεων του **R**, γίνεται η μαθηματική επεξεργασία των δεδομένων και αποθηκεύονται τα αποτελέσματα στη μνήμη του υπολογιστή.

Εν συνεχεία ακολουθεί το τμήμα *print_out_1* όπου καθορίζεται ο τρόπος παρουσίασης των παραμέτρων της αναδρομής (a_0, a_1), των στατιστικών δεικτών αξιοπιστίας της και των student tests και εγγράφεται το αρχείο κειμένου αποτελεσμάτων. Στο τμήμα *print_out_2* εγγράφεται το αρχείο κειμένου το οποίο περιέχει τόσο τα πειραματικά σημεία όσο και τα σημεία της ευθείας αναδρομής. Ακολουθεί το τμήμα *print_out_3* στο οποίο εγγράφεται το αρχείο κειμένου το οποίο περιέχει τα σημεία των ελλείψεων εμπιστοσύνης για επίπεδα σημαντικότητας 5 και 1%. Στο τμήμα *plotting_1* εγγράφεται το αρχείο εικόνας στο οποίο απεικονίζεται το γράφημα των πειραματικών σημείων και της ευθείας αναδρομής και τέλος στο τμήμα *plotting_2* εγγράφεται το αρχείο εικόνας στο οποίο περιέχεται το γράφημα των ελλείψεων εμπιστοσύνης για επίπεδα σημαντικότητας 5 και 1%.

Όσον αφορά τις εντολές του **R** στην παρούσα ΔΕ θα παρουσιασθούν μόνο αυτές που χρησιμοποιούνται από τη συνάρτηση *fit* και μερικές ακόμα πολύ χρήσιμες εντολές. Σημειώνεται ότι η περιγραφή των εντολών αυτών είναι περιληπτική και αναφέρεται σε μερικές μόνο από τις δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά τους.

- **help**

Με την εντολή αυτή ο χρήστης μπορεί να ενημερωθεί λεπτομερώς για τις δυνατότητες και τη σύνταξη κάθε εντολής του **R**.

Σύνταξη:

```
help(όνομα_εντολής)
```

- **read.table**

Η εντολή αυτή διαβάζει αρχείο κειμένου όπου το περιεχόμενο του είναι σε μορφή πίνακα και δημιουργεί μία βάση δεδομένων (*data frame*) με το περιεχόμενο του αρχείου αυτού.

Παράδειγμα σύνταξης :

```
data<- read.table("όνομα_αρχείου")
```

όπου `data`, το `data frame` που θα δημιουργηθεί.

- **c**

Το διάνυσμα (`vector`) είναι η απλούστερη δομή δεδομένων που χρησιμοποιείται από το **R**. Η συνάρτηση `c` χρησιμοποιείται για τη δημιουργία διανυσμάτων .
Παράδειγμα σύνταξης :

```
vector <- c(1, 2, 3, 4)
```

Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται διάνυσμα με το όνομα `vector` και περιεχόμενο τους αριθμούς 1,2,3,4.

- **options**

Επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει μεγάλο αριθμό παραμέτρων ως προς τον τρόπο με τον οποίο το **R** υπολογίζει και παρουσιάζει αποτελέσματα. Για παράδειγμα η εντολή αυτή μπορεί να καθορίσει τον αριθμό των σημαντικών ψηφίων που θα χρησιμοποιείται στην παρουσίαση αριθμητικών αποτελεσμάτων.
Παράδειγμα σύνταξης:

```
options(digits = 7)
```

- **colnames**

Καθορίζει τα ονόματα των στηλών κάθε αντικειμένου που έχει μορφή πίνακα.
Παράδειγμα σύνταξης:

```
colnames(data) <- c("στήλη_1", "στήλη_2")
```

δηλαδή οι στήλες του πίνακα που περιέχεται στη μεταβλητή `data` θα πάρουν τα ονόματα `στήλη_1` και `στήλη_2` αντίστοιχα.

- **dim**

Καθορίζει τις διαστάσεις ενός αντικειμένου που έχει μορφή πίνακα.
Παράδειγμα σύνταξης:

```
dim(x) <- c(n1, n2)
```

Το αντικείμενο `x` θα έχει διαστάσεις `n1 x n2`, με `n1` γραμμές και `n2` στήλες .

- **length**

Η εντολή αυτή αφενός δίδει ως αποτέλεσμα το μήκος ενός διανύσματος αφετέρου μπορεί να καθορίσει το μήκος ενός διανύσματος.

Παράδειγμα σύνταξης:

```
length(x)
```

Δίδει το μήκος του διανύσματος x

```
length(x) <- value
```

Το μήκος του διανύσματος x παίρνει την αριθμητική τιμή *value*.

- **lm**

Στην περίπτωση μας χρησιμοποιείται για απλή γραμμική προσαρμογή με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Μπορεί όμως να επιτελέσει και άλλες λειτουργίες (πληκτρολογήστε `help(lm)`), όπως πολλαπλή γραμμική προσαρμογή.

Παράδειγμα σύνταξης:

```
lm(b~a)
```

όπου a και b τα διανύσματα της ανεξάρτητης και εξαρτημένης μεταβλητής αντίστοιχα.

- **lsfit**

Αντίστοιχη εντολή με την **lm** η οποία εφαρμόζει και αυτή μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων για την περίπτωση γραμμικής προσαρμογής μόνο.

Παράδειγμα σύνταξης:

```
lsfit(a,b)
```

όπου a και b τα διανύσματα της ανεξάρτητης και εξαρτημένης μεταβλητής αντίστοιχα.

- **cat**

Χρησιμοποιείται για εμφάνιση μεταβλητών ή απλών χαρακτήρων στην οθόνη ή σε παραγόμενο αρχείο κειμένου.

Παράδειγμα σύνταξης για εμφάνιση στην οθόνη:

```
cat("\n \n8. standard deviation of variables Y,X:\n\n")
```


Οι χαρακτήρες `n` χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία κενών σειρών.

- **plot**

Είναι γενική συνάρτηση η οποία χρησιμοποιείται για δημιουργία γραφημάτων.

Παράδειγμα σύνταξης:

```
plot(a,b)
```

Οι μεταβλητές `a` και `b` περιέχουν τις συντεταγμένες των σημείων τα οποία απεικονίζονται στο διάγραμμα.

- **abline**

Η συνάρτηση προσθέτει ευθείες γραμμές σε ήδη υπάρχον γράφημα.

Παράδειγμα σύνταξης:

```
abline(lm(b~a))
```

Στην περίπτωση αυτή θα προσθέσει την ευθεία της αναδρομής `lm(b~a)`

- **ellipse**

Γενική συνάρτηση δημιουργίας ελλείψεων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό των σημείων ελλείψεων εμπιστοσύνης.

Παράδειγμα σύνταξης:

```
ellipse(lm(b~a), level=0.95)
```

Θα υπολογίσει τα σημεία της έλλειψης εμπιστοσύνης των παραμέτρων της αναδρομής `lm(b~a)` σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%

- **data.frame**

Μία βάση δεδομένων (data frame) αποτελεί τη γενίκευση ενός πίνακα (matrix). Σε έναν πίνακα όλα τα στοιχεία πρέπει να είναι της ίδιας μορφής (αριθμοί) ενώ σε μία βάση δεδομένων αυτό δεν αποτελεί περιορισμό. Κάθε στήλη αποτελεί και ένα διάνυσμα με δικά του χαρακτηριστικά και με δικό του όνομα. Η εντολή αυτή δημιουργεί data frames.

Παράδειγμα σύνταξης:

```
data.frame("data1"=a1, "data2"=b2)
```

Θα δημιουργηθεί `data.frame` το οποίο θα περιέχει το περιεχόμενο των μεταβλητών `a1` και `b2` με τα ονόματα `data1` και `data2`.

- **sink**

Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία αρχείων κειμένου. Παράδειγμα σύνταξης:

```
sink(file=filename.txt , append=TRUE)
print(data)
sink( )
```

Θα δημιουργήσει το αρχείο κειμένου `filename.txt` το οποίο θα περιέχει το περιεχόμενο της μεταβλητής `data`.

- **jpeg**

Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία αρχείων εικόνας. Παράδειγμα σύνταξης:

```
jpeg(file=filename, quality=100)
plot(a, b)
dev.off()
```

Θα δημιουργήσει το αρχείο εικόνας `filename.jpeg` το οποίο θα περιέχει Το γράφημα των μεταβλητών `a` και `b`. Η παράμετρος `quality` καθορίζει την ποιότητα της εικόνας του αρχείου.

- **as.data.frame**

Με την εντολή αυτή μπορούμε να διαπιστώσουμε αν μία μεταβλητή είναι τύπου `data.frame` καθώς και να μετατρέψουμε μία μεταβλητή άλλου τύπου σε `data.frame` εφόσον αυτό είναι δυνατό.

```
a<-as.data.frame(b)
```

Θα δημιουργηθεί η μεταβλητή `a` η οποία θα είναι τύπου `data.frame` λαμβάνοντας το περιεχόμενο της μεταβλητής `b`

- **qt**

Επιστρέφει τις τιμές της συνάρτησης κατανομής student συναρτήσει του επίπεδου σημαντικότητας $p = 1 - (a/2)$ και των βαθμών ελευθερίας (`df`).

```
qt (p=0.975, df=38)
```

- **if**

Πρόκειται για την κοινή εντολή ελέγχου συνθηκών

```
if (a<b) (print (b))
```

Στην προκειμένη περίπτωση αν η συνθήκη `a<b` είναι αληθής, εκτελείται η εντολή `print (b)`.

```
if (a<b&& c>d) (print (a, b, c, d))
```

Στην προκειμένη περίπτωση αν η συνθήκη `a<b` **και** η συνθήκη `c>d` είναι αληθής, εκτελείται η εντολή `print (b)`.

- **winDialogString**

Δημιουργεί παράθυρο διαλόγου μέσω του οποίου ο χρήστης μπορεί να εισάγει δεδομένα.

```
a<-winDialogString("Name of the file 1"  
default="Results.txt")
```

Η μεταβλητή `a` θα λάβει την τιμή που θα δώσει ο χρήστης.

Προκαθορισμένη τιμή (`default="Results.txt"`)

- **nls**

Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των συντελεστών μη-γραμμικών μοντέλων μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων.

```
nls (y~A*x^B, start=list (A=0.5, B=0.5))
```

Η παράμετρος `start` χρησιμοποιείται προαιρετικά για τον καθορισμό των αρχικών τιμών των ζητούμενων παραμέτρων στη μέθοδο υπολογισμού τους.

ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ *fit* (ΚΩΔΙΚΑΣ)

#function's name – variables

```
fit<-function(data,labelx="real values", labely=" values of measurement",
ellabelx="a1",ellabely="a0",sign=4, colour="black",
file="onoma.txt",a0=0,a1=1,sign2=8,
filename1="Results.txt", filename2="Points of regression.txt", filename3="Points of
ellipse.txt",filename4="Graph.jpeg",
filename5="Confidence ellipses.jpeg"){
```

#creation of dialog windows

```
filename1<-winDialogString("Name of the file 1, ",default="Results.txt")
filename2<- winDialogString("Name of the file 2 ",default="Points of regression.txt")
filename3<- winDialogString("Name of the file 3 ",default="Points of ellipses.txt")

filename4<- winDialogString("Name of the file 4 ",default="Graph.jpeg")
filename5<- winDialogString("Name of the file 5 ",default="Ellipses.jpeg")
labelx<-winDialogString(" Label of the x axis in Regression plot ",default="Real
Values")
labely<-winDialogString(" Label of the y axis in Regression plot ",default="Values of
Measurement ")
ellabelx<-winDialogString(" Label of the x axis in Regression plot ",default="a1 ")
ellabely<-winDialogString(" Label of the y axis in Regression plot ",default="a0")
```

#main calculations

```
options(digits=sign)
colnames(data)<- c("Xi ","Yi")
a<-c(data$Xi)
b<-c (data$Yi)
dim(a)<-c(length(a),1)
dim(b)<-c(length(b),1)
```

```

c<-summary(lm(b~a));
d<-c(c$coefficients);
dim(d)<-c(8,1)
yreg<-d[2,1]*a+d[1,1];
RMS<-100* (( 1/(length(b)-2)) * sum ( ((b-yreg)^2) / (yreg^2) )) ^0.5
R<-(((sum((yreg-mean(b))^2))/(sum((b-mean(b))^2)))^0.5)
resid<-((lsfit(a,b)$residuals/b)*100);
dim(resid)<-c(length(b),1)
f<-data.frame("Experimental"=b,"Estimated"=yreg,"residuals"=resid)
mh.ermin<-sum((lsfit(a,b)$residuals )^2); sd.regr<-mh.ermin/(length(a)-2)
s<-data.frame("variance"=sd.regr,"standard deviation"=sqrt(sd.regr));
elpoints<-ellipse(lm(b~a),level=0.95)
colnames(elpoints)<-c("Y","X")

elpoints2<-as.data.frame(elpoints)
elpoints3<-ellipse(lm(b~a),level=0.99)

colnames(elpoints3)<-c("Y","X")
elpoints4<-as.data.frame(elpoints3)
elpointswwhole<-c(elpoints2$Y, elpoints2$X,elpoints4$Y, elpoints4$X)
dim(elpointswwhole)<-c(100,4)
colnames(elpointswwhole)<-c("Y0.05", "X0.05", "Y0.01", "X0.01")
elpointsWhole<-as.data.frame(elpointswwhole)
regression<-c(a,b,yreg)
dim(regression)<-c(length(a),3)
colnames(regression)<-c("X", "Y", "Yestim")
regression2<-as.data.frame(regression)

```

#print out 1

```

sink(file=filename1,append=TRUE)
cat("\n    **Date/Time**\n\n");cat(date(),"");cat("\n\n")

```



```

cat("  ta1 =",ta1); cat("\n");
cat("  tc0.95=",tc0.95); cat("\n");
if (abs(ta0)>tc0.95 | abs(ta1)>tc0.95) ( cat("  tc0.99=", tc0.99))

```

#test for a0

```

cat("\n\n\n2. Test for the parameter a0 \n\n")
cat("\n Hypothesis H0: a0="); cat(a0, " "); cat("\n");
cat(" Hypothesis H1: a0 is not equal to "); cat(a0, " "); cat("\n");
if (abs(ta0)<tc0.95) ( cat("\n  -> Hypothesis H0 : Acceptable \n"))
else if (abs(ta0)>tc0.95&&abs(ta0)<tc0.99) (cat("\n  -> hypothesis H0 : Uncertainty
region\n"))
else if (abs(ta0)>tc0.95&&abs(ta0)>tc0.99) (cat("\n  -> hypothesis H0 : Not
acceptable\n"))

```

#test for a1

```

cat("\n\n\n3. Test for the parameter a1 \n\n")
cat(" Hypothesis H0: a1="); cat(a1, " "); cat("\n");
cat(" Hypothesis H1: a1 is not equal to "); cat(a1, " "); cat("\n");
if (abs(ta1)<tc0.95) ( cat("\n  -> Hypothesis H0 : Acceptable \n"))
else if (abs(ta1)>tc0.95&&abs(ta1)<tc0.99) (cat("\n  -> Hypothesis H0 : ?
Uncertainty region \n"))
else if (abs(ta1)>tc0.95&&abs(ta1)>tc0.99) (cat("\n  -> Hypothesis H0: Not
acceptable \n"))
sink()

```

#print out 2

```

sink(file=filename2,append=TRUE
print(regression2)
sink()

```


#print out 3

```
options(digits=sign2)

sink(file=filename3,append=TRUE)

print(elpointsWhole);
sink()
```

#plotting 1

```
jpeg(file=filename4,quality=100,width=700)
plot(a,b,xlab=labelx,ylab=labely,pch=15, las=1,cex=0.7,cex.axis=0.7)
abline(lm(b~a),col=colour)
dev.off()
```

#plotting 2

```
jpeg(file=filename5,quality=100,width=700)
plot(elpoints4$X,elpoints4$Y,xlab=ellabelx,ylab=ellabely,type="l",
las=1,cex.axis=0.7,col="red")
lines(elpoints2$X,elpoints2$Y)
legend("topright", title="Confidence Ellipses", col=c("black","red"),
lty=c(1,1),legend=c("5 %","1 %"), ncol=1)
dev.off()
}
```

**ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ
ΤΟΥ ΡΟΟΜΕΤΡΟΥ Ε+Η1 ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ *fit***

- a. Αρχείο **Results.txt**
- b. >> **Points of regression.txt**
- c. >> **Points of ellipses.jpeg**
- d. >> **Graph.jpeg**
- e. >> **Confidence ellipses.jpeg**

a.

DATA

	Xi	Yi
1	0.512	0.526
2	1.017	0.967
3	1.514	1.655
4	2.045	2.127
5	2.594	2.638
6	2.955	3.111
7	3.385	3.216
8	4.046	4.213
9	4.486	4.492
10	4.650	4.896
11	4.985	5.216

****RESULTS OF REGRESSION****

1. Parameters of the regression (a0,a1):

-> -0.02069 1.034

2. Experimental and Estimated values of the depended variable:

	Experimental	Estimated	residuals
1	0.526	0.5087	3.2815
2	0.967	1.0309	-6.6109
3	1.655	1.5448	6.6560
4	2.127	2.0939	1.5555
5	2.638	2.6616	-0.8946
6	3.111	3.0349	2.4466
7	3.216	3.4795	-8.1941
8	4.213	4.1630	1.1864
9	4.492	4.6180	-2.8049
10	4.896	4.7876	2.2145
11	5.216	5.1340	1.5725

3. Variance (about regression):

-> 0.1303

4. Residuals Mean Square - RMS:

-> 4.525 %

5. Variance and Standard Deviation :

-> 0.01447 0.1203

6. Standard Errors of the parameters:

-> 0.08123 0.02484

7. Multiple Correlation Coefficient - R:

-> 0.9974

8. Mean of variables X,Y:

-> 2.926 3.005

9. Standard Deviation of variables X,Y:

-> 1.532 1.588

*****TWO-SIDE STUDENT TESTS FOR THE PARAMETERS OF THE REGRESSION*****

1. student test's values

ta0 = -0.2547
ta1 = 1.370
tc0.95= 2.262

2. Test for the parameter a0

Hypothesis H0: a0=0

Hypothesis H1: a_0 is not equal to 0

-> Hypothesis H0 : Acceptable

3. Test for the parameter a_1

Hypothesis H0: $a_1=1$

Hypothesis H1: a_1 is not equal to 1

-> Hypothesis H0 : Acceptable

b.

	X	Y	Yestim
1	0.512	0.526	0.5087
2	1.017	0.967	1.0309
3	1.514	1.655	1.5448
4	2.045	2.127	2.0939
5	2.594	2.638	2.6616
6	2.955	3.111	3.0349
7	3.385	3.216	3.4795
8	4.046	4.213	4.1630
9	4.486	4.492	4.6180
10	4.650	4.896	4.7876
11	4.985	5.216	5.1340

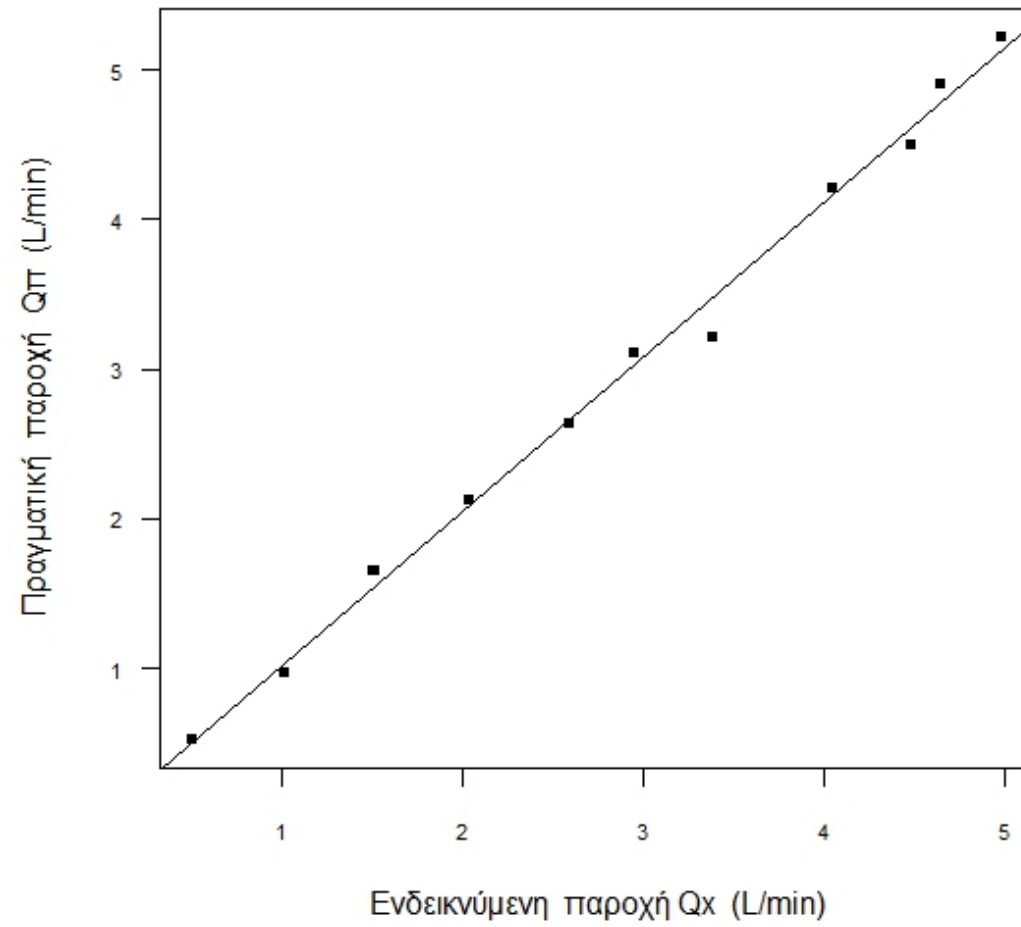
c.

	Y0.05	X0.05	Y0.01	X0.01
1	0.0336816962	1.05065881	1.05685593	1.05685593
2	0.0189414838	1.05509892	1.06295123	1.06295123
3	0.0040417037	1.05945420	1.06893010	1.06893010
4	-0.0109576478	1.06370714	1.07476846	1.07476846
5	-0.0259961737	1.06784059	1.08044279	1.08044279
6	-0.0410133191	1.07183792	1.08593026	1.08593026
7	-0.0559486152	1.07568303	1.09120877	1.09120877
8	-0.0707419230	1.07936043	1.09625705	1.09625705
9	-0.0853336750	1.08285533	1.10105479	1.10105479
10	-0.0996651153	1.08615365	1.10558267	1.10558267
11	-0.1136785364	1.08924210	1.10982245	1.10982245
12	-0.1273175110	1.09210825	1.11375705	1.11375705
13	-0.1405271199	1.09474056	1.11737065	1.11737065
14	-0.1532541726	1.09712843	1.12064868	1.12064868
15	-0.1654474218	1.09926225	1.12357795	1.12357795
16	-0.1770577696	1.10113342	1.12614666	1.12614666
17	-0.1880384651	1.10273441	1.12834447	1.12834447
18	-0.1983452931	1.10405876	1.13016253	1.13016253
19	-0.2079367515	1.10510116	1.13159351	1.13159351
20	-0.2167742190	1.10585740	1.13263166	1.13263166
21	-0.2248221101	1.10632443	1.13327280	1.13327280
22	-0.2320480189	1.10650039	1.13351434	1.13351434
23	-0.2384228492	1.10638454	1.13335532	1.13335532
24	-0.2439209317	1.10597737	1.13279636	1.13279636
25	-0.2485201277	1.10528052	1.13183973	1.13183973
26	-0.2522019177	1.10429678	1.13048927	1.13048927
27	-0.2549514766	1.10303013	1.12875043	1.12875043
28	-0.2567577329	1.10148565	1.12663020	1.12663020
29	-0.2576134133	1.09966958	1.12413712	1.12413712
30	-0.2575150724	1.09758921	1.12128123	1.12128123
31	-0.2564631061	1.09525294	1.11807403	1.11807403
32	-0.2544617503	1.09267016	1.11452844	1.11452844
33	-0.2515190638	1.08985128	1.11065872	1.11065872
34	-0.2476468958	1.08680765	1.10648047	1.10648047
35	-0.2428608380	1.08355152	1.10201051	1.10201051
36	-0.2371801623	1.08009601	1.09726683	1.09726683
37	-0.2306277428	1.07645502	1.09226854	1.09226854
38	-0.2232299637	1.07264322	1.08703577	1.08703577
39	-0.2150166132	1.06867596	1.08158958	1.08158958
40	-0.2060207637	1.06456921	1.07595190	1.07595190
41	-0.1962786382	1.06033952	1.07014544	1.07014544
42	-0.1858294649	1.05600390	1.06419357	1.06419357

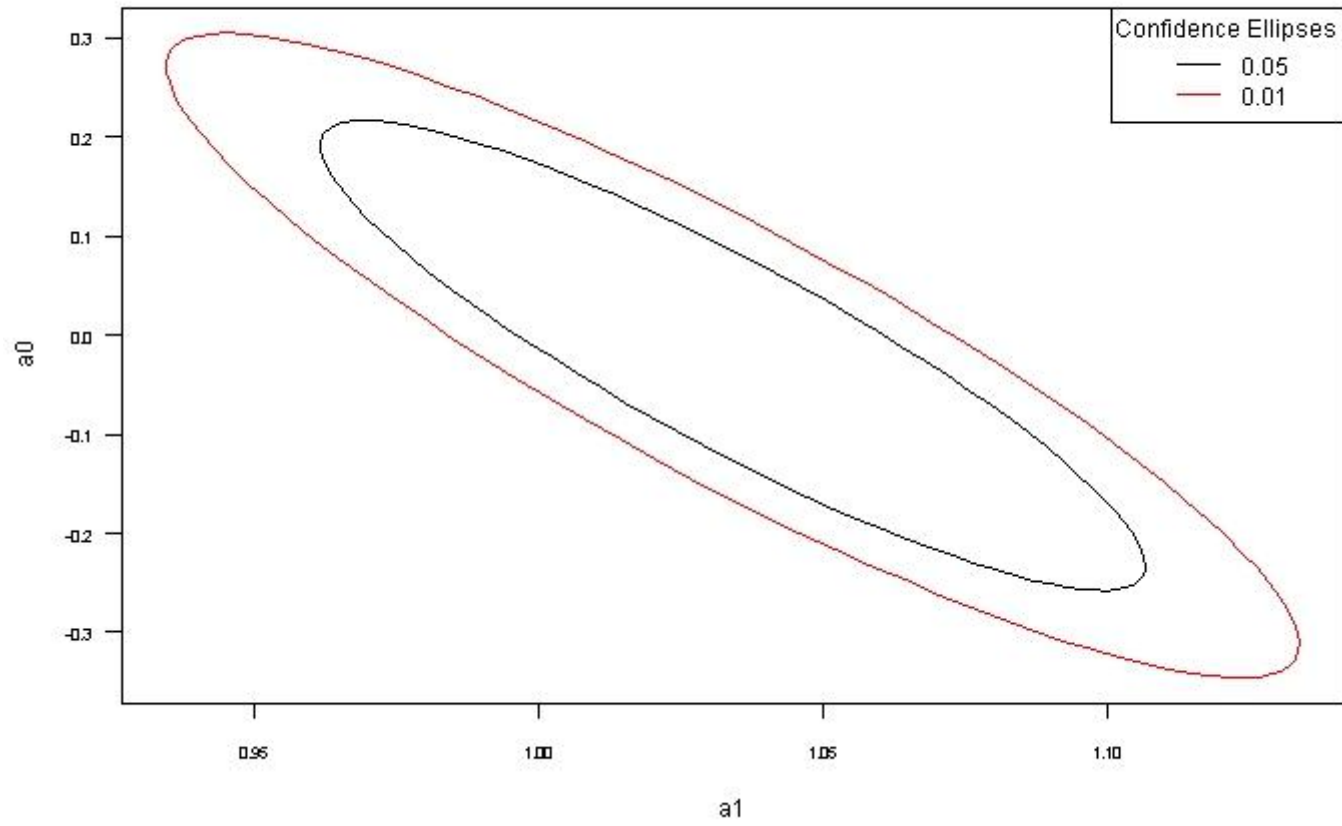
43	-0.1747153188	1.05157982	1.05812027	1.05812027
44	-0.1629809528	1.04708509	1.05194998	1.05194998
45	-0.1506736169	1.04253782	1.04570756	1.04570756
46	-0.1378428685	1.03795631	1.03941813	1.03941813
47	-0.1245403724	1.03335901	1.03310703	1.03310703
48	-0.1108196932	1.02876443	1.02679966	1.02679966
49	-0.0967360791	1.02419107	1.02052143	1.02052143
50	-0.0823462399	1.01965735	1.01429761	1.01429761
51	-0.0677081184	1.01518152	1.00815327	1.00815327
52	-0.0528806572	1.01078161	1.00211315	1.00211315
53	-0.0379235612	1.00647534	0.99620156	0.99620156
54	-0.0228970573	1.00228003	0.99044231	0.99044231
55	-0.0078616519	0.99821259	0.98485860	0.98485860
56	0.0071221125	0.99428940	0.97947290	0.97947290
57	0.0219939018	0.99052625	0.97430690	0.97430690
58	0.0366938325	0.98693829	0.96938141	0.96938141
59	0.0511627131	0.98353997	0.96471625	0.96471625
60	0.0653422826	0.98034498	0.96033022	0.96033022
61	0.0791754449	0.97736617	0.95624096	0.95624096
62	0.0926064986	0.97461556	0.95246496	0.95246496
63	0.1055813617	0.97210420	0.94901741	0.94901741
64	0.1180477890	0.96984222	0.94591220	0.94591220
65	0.1299555825	0.96783872	0.94316183	0.94316183
66	0.1412567939	0.96610177	0.94077737	0.94077737
67	0.1519059170	0.96463836	0.93876842	0.93876842
68	0.1618600717	0.96345438	0.93714308	0.93714308
69	0.1710791761	0.96255461	0.93590789	0.93590789
70	0.1795261080	0.96194267	0.93506782	0.93506782
71	0.1871668548	0.96162101	0.93462626	0.93462626
72	0.1939706497	0.96159094	0.93458498	0.93458498
73	0.1999100964	0.96185258	0.93494415	0.93494415
74	0.2049612787	0.96240487	0.93570233	0.93570233
75	0.2091038573	0.96324559	0.93685645	0.93685645
76	0.2123211516	0.96437135	0.93840188	0.93840188
77	0.2146002066	0.96577763	0.94033239	0.94033239
78	0.2159318453	0.96745875	0.94264021	0.94264021
79	0.2163107058	0.96940795	0.94531604	0.94531604
80	0.2157352625	0.97161738	0.94834911	0.94834911
81	0.2142078324	0.97407814	0.95172721	0.95172721
82	0.2117345661	0.97678033	0.95543673	0.95543673
83	0.2083254225	0.97971307	0.95946274	0.95946274
84	0.2039941290	0.98286453	0.96378902	0.96378902
85	0.1987581262	0.98622205	0.96839816	0.96839816
86	0.1926384976	0.98977209	0.97327160	0.97327160
87	0.1856598848	0.99350035	0.97838971	0.97838971
88	0.1778503883	0.99739184	0.98373188	0.98373188
89	0.1692414541	1.00143088	0.98927661	0.98927661
90	0.1598677473	1.00560120	0.99500156	0.99500156
91	0.1497670126	1.00988602	1.00088368	1.00088368
92	0.1389799220	1.01426807	1.00689930	1.00689930
93	0.1275499115	1.01872972	1.01302418	1.01302418
94	0.1155230055	1.02325300	1.01923366	1.01923366
95	0.1029476322	1.02781969	1.02550274	1.02550274

96	0.0898744281	1.03241141	1.03180618	1.03180618
97	0.0763560345	1.03700966	1.03811859	1.03811859
98	0.0624468852	1.04159594	1.04441456	1.04441456
99	0.0482029874	1.04615177	1.05066873	1.05066873
100	0.0336816962	1.05065881	1.05685593	1.05685593

d.



e.



**ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ R-
STATISTICS**

