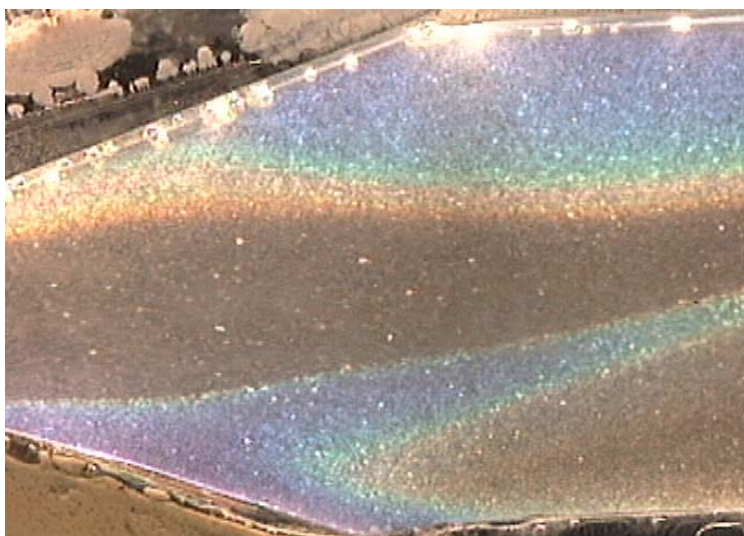




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ ΣΕ
ΑΣΥΜΜΕΤΡΑ ΘΕΡΜΑΙΝΟΜΕΝΗ ΣΤΕΝΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕ
ΧΡΗΣΗ ΥΓΡΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ



ΚΑΡΑΚΩΝΣΤΑΝΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΑΘΙΟΥΛΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πολλές in vivo και in vitro ιατρικές μελέτες έχουν γίνει με σκοπό να διερευνήσουν τη συσχέτιση της θερμοκρασιακής ετερογένειας, μεταξύ αθηρωματικής πλάκας και του παρακείμενου υγιούς αγγειακού τοιχώματος, με την αποκόλληση της πλάκας και κατ' επέκταση με την πρόκληση οξέων στεφανιαίων συνδρόμων.

Με αφορμή αυτές τις εργασίες πραγματοποιήσαμε πείραμα χρησιμοποιώντας, ως μηχανικό ανάλογο αγγείου, οριζόντιο σωλήνα από plexiglas σε σημείο του οποίου ένα συγκλίνον – αποκλίνον ακροφύσιο παριστούσε την πλάκα – στένωση. Τη θερμική ετερογένεια εξασφάλιζε το θερμαινόμενο κάτω μεταλλικό τοίχωμα του ακροφυσίου. Το εργαζόμενο μέσο που χρησιμοποιήσαμε ήταν διάλυμα νερού – υγρών κρυστάλλων, οι οποίοι έχουν την ιδιότητα να ανακλούν ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος του προσπίπτοντος λευκού φωτός, ανάλογα με την τοπική θερμοκρασία εντός του σωλήνα. Μελετήσαμε, για διαφορετικές περιπτώσεις παροχής και θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ μεταλλικής πλάκας και εργαζόμενου μέσου, την εξέλιξη του φαινομένου της ελεύθερης - εξαναγκασμένης συναγωγής εντός του ακροφυσίου. Για κάθε μία απ' αυτές λάβαμε έγχρωμες εικόνες, για διάφορες χρονικές στιγμές, που αντιστοιχούσαν στην επιφάνεια που φώτιζε το προσπίπτον φύλλο φωτός. Από τα στιγμιότυπα αυτά προέκυψαν τα αντίστοιχα θερμοκρασιακά πεδία με τη βοήθεια προγραμμάτων και κυρίως με τη χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης των υγρών κρυστάλλων η οποία αντιστοίχιζε το εκάστοτε χρώμα τους σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία. Από τα παραπάνω αντιλαμβανόμαστε ότι η μέθοδος θερμογράφησης που χρησιμοποιήσαμε ήταν μη επεμβατική.

Ο σχηματισμός θερμικού οριακού στρώματος στο συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου καθώς και πλουμίου στο διαχύτη ήταν τα δύο σημαντικότερα ροϊκά φαινόμενα στη διαδικασία του πειράματός μας. Αυξανόμενης της παροχής το πάχος του θερμικού οριακού στρώματος μειωνόταν, ενώ το πλούμιο μετατοπιζόταν συνεχώς δεξιότερα και το ύψος του μικραίνε.

ABSTRACT

Many in vivo and in vitro medical studies have been carried out in order to investigate the correlation of thermal heterogeneity, between atherosclerotic lesion and proximal healthy vessel wall, with the rupture of the plaque and therefore the cause of acute coronary syndromes.

Based on the above, an experimental flow study was undertaken in which a human vessel was represented by a horizontal rectangular plexiglas tube with a 57 % stenosis heated from below through a copper surface. The working medium used was a solution of water - liquid encapsulated crystals, which have the capacity to reflect a specific wavelength of the incident white light, depending on the local temperature inside the tube. The phenomenon of natural - forced convection was studied for several flow rates and temperature differences between the copper wall and the flowing medium. Colored images were recorded with a rate of 25 frames per sec and they were transformed to temperature distributions through a calibration curve which related the hue component of the images with the fluid temperature.

The characteristics of the thermal boundary layers formed along the heated metallic wall of the stenosis and of a plume in its divergent part were dependent on both the flow rate and the temperature difference between the heated wall and the incoming fluid. Increasing the flow rate, the thickness of the thermal boundary layers is reduced and the plume is shrunk being shifted towards the exit of the stenosis.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία μας περιγράφει μία μη επεμβατική μέθοδο θερμογράφησης, στην οποία χρησιμοποιείται διάλυμα υγρών κρυστάλλων σε νερό με σκοπό την αποτύπωση των θερμοκρασιακών πεδίων εντός στενωμένου οριζόντιου σωλήνα. Απαρτίζεται από τέσσερα κεφάλαια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Σκοπός του είναι η εξοικείωσή μας με τους υγρούς κρυστάλλους ως μίας επιπλέον κατάστασης της ύλης, η ταξινόμησή τους σε διάφορες κατηγορίες και η γνωριμία με τις βασικές του ιδιότητες καθώς και η γνώση των βιολογικών και τεχνολογικών εφαρμογών τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Σ' αυτό παρατίθενται περιληπτικά, έρευνες διαφόρων επιστημόνων απ' όλον τον κόσμο, που σχετίζονται με τη δική μας μελέτη από ιατρικής ή μηχανολογικής πλευράς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εδώ γίνεται διεξοδική περιγραφή της διάταξης που χρησιμοποιήσαμε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος. Εστιάσαμε στον τρόπο λειτουργίας των δύο κυρίως τμημάτων της, υδραυλικού και ηλεκτρικού, καθώς και των επιμέρους μερών που τα απαρτίζουν. Περιγράφουμε τη διαδικασία που ακολουθήσαμε για κάθε μία από τις περιπτώσεις που μελετήσαμε και αναφέρουμε τους τρόπους με τους οποίους αποφύγαμε τεχνικά λάθη έτσι ώστε να επιτύχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Τέλος, γίνεται αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας βαθμονόμησης εκείνων των μερών της διάταξης που την απαιτούσαν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε αναλυτικά τα θερμοκρασιακά πεδία, για διάφορα στιγμιότυπα, και για τις οκτώ περιπτώσεις που μελετήσαμε. Για κάθε μία από τις υποπεριπτώσεις γίνεται σχολιασμός σε σχέση με την εξέλιξη του θερμοκρασιακού πεδίου και στα δύο τμήματα του ακροφυσίου. Τέλος, παραθέτουμε συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη συγκριτική μελέτη των διαφόρων περιπτώσεων χρησιμοποιώντας ως παραμέτρους τη θερμοκρασιακή διαφορά, την παροχή και το χρόνο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΙΑ ΥΓΡΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ.....	6
1.1 Τι είναι υγροί κρύσταλλοι.....	6
1.2 Ιστορία υγρών κρυστάλλων.....	12
1.3 Είδη θερμοτροπικών υγρών κρυστάλλων.....	13
1.3.1 Νηματικοί υγροί κρύσταλλοι.....	13
1.3.2 Σμηκτικοί υγροί κρύσταλλοι.....	13
1.3.3 Κιονικοί υγροί κρύσταλλοι.....	15
1.3.4 Χειρόμορφοι ή ελικοειδείς υγροί κρύσταλλοι.....	16
1.4 Χαρακτηριστικά θερμοχρωμικών υγρών κρυστάλλων και θερμογράφηση.....	18
1.5 Ιδιότητες των ΥΚ που αξιοποιούνται στις τεχνολογικές τους εφαρμογές.....	21
1.6 Τεχνολογικές εφαρμογές των υγρών κρυστάλλων.....	21
1.6.1 Υαλοπίνακες ηλεκτρικά ρυθμιζόμενης διαφάνειας.....	21
1.6.2 Υγροκρυσταλλικά συστήματα προβολής δεδομένων.....	22
1.7 Βιολογικές εφαρμογές υγρών κρυστάλλων.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ - ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ.....	65
3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	65
3.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	76
3.3 Καμπύλες βαθμονόμησης.....	78
3.3.1 Καμπύλη βαθμονόμησης θερμίστορ.....	78
3.3.2 Καμπύλη βαθμονόμησης υγρών κρυστάλλων.....	79
3.3.3 Καμπύλη βαθμονόμησης θερμαινόμενης πλάκας.....	83
3.3.4 Καμπύλη βαθμονόμησης του ζυγού.....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	168

Κεφάλαιο 1: Θεωρία Υγρών Κρυστάλλων

1.1 Τι είναι υγροί κρύσταλλοι

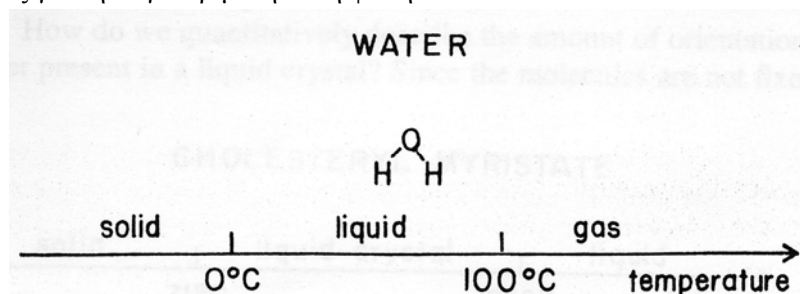
Κάνοντας λόγο για *υγρούς κρυστάλλους* θα αναρωτιέται κανείς πώς είναι δυνατόν κάτι να είναι συγχρόνως *υγρό* και *κρυσταλλικό*. Στην προσπάθειά μας να το εξηγήσουμε θα κάνουμε λόγο για τις τρεις γνωστές μας *καταστάσεις της ύλης*. Είναι γνωστό ότι μια ουσία μπορεί να υπάρχει σε περισσότερες από μία καταστάσεις της ύλης. Για παράδειγμα το νερό είναι στερεό κάτω από τους 0 °C, υγρό μεταξύ 0 – 100 °C και αέριο για θερμοκρασία μεγαλύτερη των 100 °C. Η στερεά, η υγρή και η αέρια είναι πιο γνωστές καταστάσεις της ύλης¹, όχι όμως και οι μοναδικές.

Διαφέρουν μεταξύ τους γιατί τα μόρια της εκάστοτε ουσίας, σε κάθε μία από αυτές, εμφανίζουν διαφορετικά *ποσοστά τάξης*. Στη *στερεά κατάσταση* τα μόρια κατέχουν συγκεκριμένη θέση και είναι προσανατολισμένα με συγκεκριμένο τρόπο. Μπορεί να δονούνται λίγο αλλά, σε γενικές γραμμές, παραμένουν στις θέσεις τους. Μεταξύ τους ασκούνται μεγάλες ελκτικές δυνάμεις και γι' αυτό απαιτούνται και μεγάλες εξωτερικές δυνάμεις για να διασπαστεί αυτή η δομή και κατ' επέκταση να παραμορφωθεί ένα στερεό υλικό. Η περιγραφή αυτή αναφέρεται στα *κρυσταλλικά στερεά*. Υπάρχουν και τα *άμορφα στερεά* των οποίων τα μόρια παρουσιάζουν ένα ποσοστό τάξης ανάμεσα στα κρυσταλλικά στερεά και τα υγρά. Στην *υγρή κατάσταση* τα μόρια δεν κατέχουν συγκεκριμένη θέση ούτε έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό. Σε αντίθεση με τα στερεά τα μόρια της υγρής ουσίας είναι ελεύθερα να διαχυθούν με αποτέλεσμα να συγκρούονται μεταξύ τους και να αλλάζει η διεύθυνση της κίνησής τους. Επομένως, το ποσοστό της τάξης είναι μικρότερο απ' ότι στα στερεά. Υπάρχουν και εδώ ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων αρκετά ασθενέστερες ικανές όμως να κρατούν τα μόρια κοντά το ένα στο άλλο. Αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός ότι ένα υγρό δύσκολα συμπιέζεται, η τυχαία όμως κίνηση των μορίων του επιτρέπει την αλλαγή του σχήματός του με εφαρμογή ασθενών εξωτερικών δυνάμεων. Ουσιαστικά τα υγρά διατηρούν σταθερή πυκνότητα αν και λαμβάνουν το σχήμα του δοχείου που τα περιέχει. Στην *αέρια κατάσταση* παρατηρείται χαοτική κίνηση των μορίων της ουσίας, ενώ οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ τους είναι ασθενέστερες απ' ότι στην υγρή. Το ποσοστό της τάξης είναι εδώ μικρότερο από τις δύο προηγούμενες καταστάσεις. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι υγρή και αέρια κατάσταση παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα, υπάρχει όμως η ουσιαστική διαφορά ότι ενώ στα υγρά τα μόρια διατηρούν μία μέση απόσταση μεταξύ τους ανεξαρτήτως δοχείου που τα περιέχει, στα αέρια η απόσταση αυτή εξαρτάται από τον αριθμό των μορίων και το μέγεθος του δοχείου. Τα αέρια παραμορφώνονται πολύ εύκολα και συμπιέζονται σημαντικά αφού οι εξωτερικές δυνάμεις που απαιτούνται για να πλησιάσουν τα μόρια μεταξύ τους είναι πολύ μικρές.

Η *αλλαγή της κατάστασης* μιας ουσίας εξαρτάται από τη *θερμοκρασία*. Η θερμοκρασία είναι το μέτρο της τυχαίας κίνησης των μορίων η οποία αυξάνει όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Το ποσοστό της τυχαίας αυτής κίνησης των μορίων είναι καθοριστικό για τη μετάβαση από τη μία κατάσταση της ύλης στην άλλη. Αντιλαμβανόμαστε, λοιπόν, ότι παρόλο που οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων, μέσα στην ίδια κατάσταση, δε μεταβάλλονται, αυξανόμενης

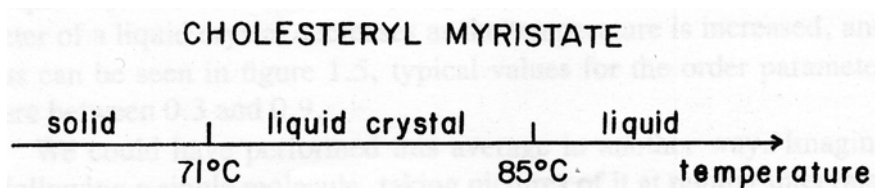
¹Η υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας δημιουργεί μία τέταρτη κατάσταση της ύλης, αυτήν του *πλάσματος* η οποία συνεχώς μελετάται από τους επιστήμονες.

της θερμοκρασίας μειώνεται η ικανότητά τους να συγκρατούν τα μόρια σε συγκεκριμένες θέσεις. Επομένως, σε κάθε θερμοκρασία μια ουσία υπάρχει σε μία συγκεκριμένη κατάσταση της ύλης (φάση). Οι θερμοκρασίες που γίνεται η μετάβαση από τη μία φάση στην άλλη είναι, για κάθε ουσία, συγκεκριμένες ενώ στο μεταξύ αυτών διάστημα λέμε ότι οι ουσίες είναι σταθερές για τη συγκεκριμένη αυτή φάση.



Εικόνα 1.1: Διάγραμμα φάσεων του νερού

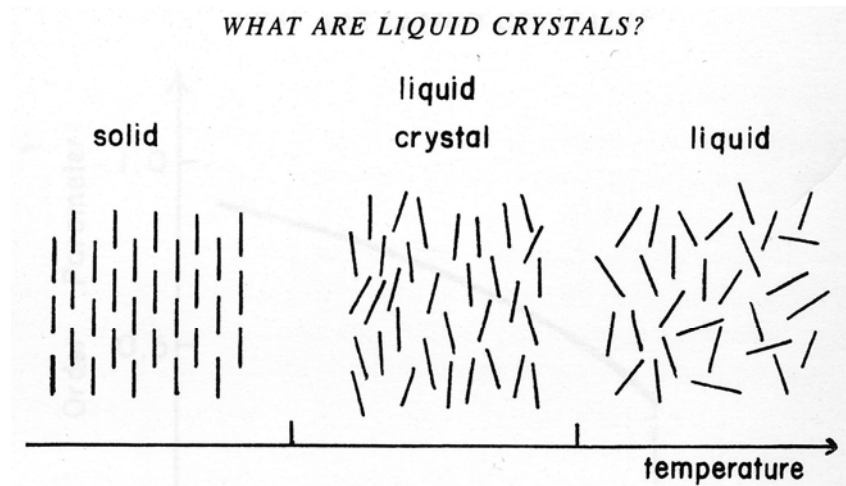
Έχει παρατηρηθεί ότι ορισμένες ουσίες με την αύξηση της θερμοκρασίας περνούν από τη στερεά σε μια *θολή υγρή φάση*, στη συνέχεια σε μια διαυγή και τέλος στην αέρια. Οι ουσίες αυτές δηλαδή υπάρχουν σε μία επιπλέον κατάσταση της ύλης, την *υγροκρυσταλλική*. Οι υγροί κρύσταλλοι μοιάζουν με τα υγρά καθότι παίρνουν το σχήμα του δοχείου που τους περιέχει, η γαλακτώδης όμως μορφή τους τους κάνει να διαφέρουν ουσιαστικά απ' αυτά.



Εικόνα 1.2: Διάγραμμα φάσεων της cholesteryl myristate

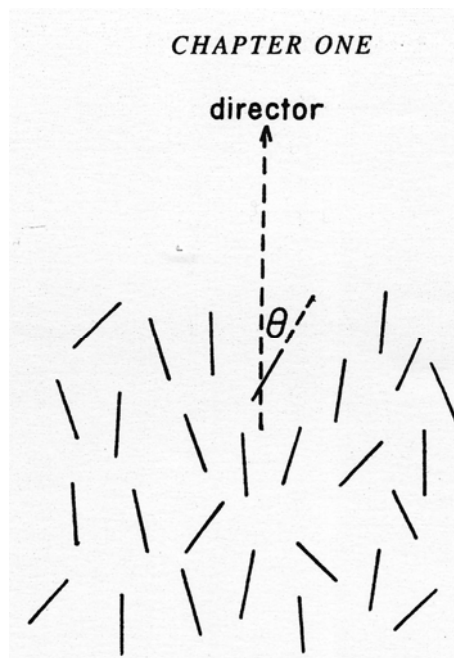
Θεωρώντας ότι τα στερεά εμφανίζουν *τάξη ως προς τη θέση και τον προσανατολισμό των μορίων* τους, η διαφορά στη μετάβασή τους σε υγρό ή σε υγρό κρύσταλλο έγκειται στο ότι στην πρώτη περίπτωση μετά την τήξη χάνονται και τα δύο είδη τάξης που αναφέραμε, ενώ στη δεύτερη χάνεται η τάξη ως προς τη θέση, ενώ διατηρείται ένα ποσοστό της τάξης ως προς τον προσανατολισμό. Οι υγροί κρύσταλλοι λοιπόν αποτελούν ενδιάμεση φάση (*μεσοφάση* ή *μεσομορφική κατάσταση*)² ύλης μεταξύ στερεής (*κρυσταλλικά στερεά*) και υγρής (*ισοτροπικά υγρά*). Είναι ρευστά τα οποία παρουσιάζουν *ανισοτροπία*, δηλαδή εξάρτηση κάποιων φυσικών ιδιοτήτων τους από την διεύθυνση των μορίων μέσα στο υλικό. Από άποψη μοριακής τάξης, ένας υγρός κρύσταλλος παρουσιάζει κάποια αταξία των μοριακών θέσεων, τουλάχιστον σε μία από τις τρεις διαστάσεις του χώρου (πράγμα που καθιστά δυνατή τη ρευστότητα) και κάποια τάξη μοριακών προσανατολισμών ή θέσεων, τουλάχιστον σε μία διεύθυνση (πράγμα που καθιστά δυνατή την ανισοτροπία).

²Στη φύση υπάρχουν διάφορα είδη μεσοφάσεων, ανάλογα με το είδος και την έκταση της μοριακής τάξης που παρουσιάζουν. Μία μεγάλη τους κατηγορία είναι οι μεσοφάσεις που παρουσιάζουν ρευστότητα και είναι αυτές για τις οποίες χρησιμοποιείται ο όρος υγροκρυσταλλικές φάσεις.



Εικόνα 1.3: Σχηματική παράσταση της στερεάς, της υγροκρυσταλλικής και της υγρής φάσης. Οι ράβδοι αντιπροσωπεύουν τα μόρια.

Τα μόρια των υγρών κρυστάλλων είναι ελεύθερα να κινηθούν όπως και στα υγρά, αλλά, όπως προαναφέραμε, τείνουν να παραμένουν προσανατολισμένα προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση. Ο προσανατολισμός αυτός δεν είναι τόσο σταθερός όπως στα στερεά. Αυτό που συμβαίνει εδώ είναι ότι τα μόρια διατηρούν τον προσανατολισμό αυτό για περισσότερο χρόνο απ' οποιονδήποτε άλλον. Ακόμα και αυτός ο μερικός προσανατολισμός, ο οποίος όμως δεν υπάρχει στα υγρά, ορίζει αυτήν την κατάσταση σε μία νέα φάση. Ένας δείκτης του ποσοστού της τάξης προσανατολισμού που υπάρχει σε ένα υγρό κρύσταλλο είναι η μέση γωνία που σχηματίζουν τα μόριά του με τη διεύθυνση του *προτιμώμενου προσανατολισμού* (προσανατολισμός των μορίων στη στερεά φάση).

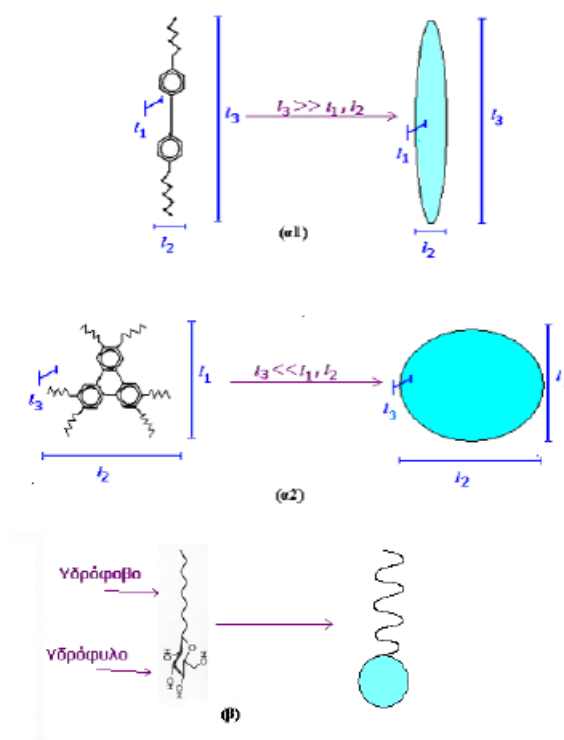


Εικόνα 1.4: Στιγμιότυπο του προσανατολισμού των μορίων μιας ουσίας στην υγροκρυσταλλική φάση και η γωνία που σχηματίζουν τα μόριά της με την προτιμώμενη διεύθυνση (director).

Όσο μικρότερη είναι η μέση γωνία θ ($0^\circ < \theta < 90^\circ$), τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της τάξης που εμφανίζει ο υγρός κρύσταλλος ως προς τον προσανατολισμό.

Διαβάζοντας τα παραπάνω κανείς θα αναρωτηθεί αν τελικά οι υγροί κρύσταλλοι είναι πιο κοντά στα στερεά ή τα υγρά. Η απάντηση δίνεται αν υπολογίσουμε το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για τη μετάβαση από τη στερεά στην υγροκρυσταλλική φάση καθώς και από την υγροκρυσταλλική στην υγρή. Το γεγονός της διαπίστωσης ότι, για όλες τις ουσίες, η ενέργεια που απαιτείται για τη μετάβαση από την υγροκρυσταλλική στην υγρή φάση είναι μικρότερη αποδεικνύει ότι οι υγροί κρύσταλλοι μοιάζουν πιο πολύ με τα υγρά.

Αν και τα περισσότερα μόρια δε σχηματίζουν κρυσταλλική φάση, δεν είναι όμως και σπάνιο φαινόμενο. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εμφάνιση αυτής της κατάστασης της ύλης είναι η *ασυμμετρία*. Ασυμμετρία η οποία χαρακτηρίζει είτε το *σχήμα* είτε την *κατεύθυνση* των μορίων. Ως προς το σχήμα, αυτή η ασυμμετρία, συνήθως εκδηλώνεται ως *ανισομετρία* στις μοριακές διαστάσεις. Για παράδειγμα, όταν μια μοριακή διάσταση είναι σημαντικά μεγαλύτερη (ή μικρότερη) από τις άλλες δύο, οπότε έχουμε *ραβδόμορφα* ή *δισκόμορφα* μόρια. Όσον αφορά στην κατεύθυνση, η μοριακή ασυμμετρία εμφανίζεται όταν έχουμε συνύπαρξη στο ίδιο μόριο δύο ή περισσότερων χημικά διαφορετικών τμημάτων τα οποία προσδίδουν *κατευθυντικότητα* στις διαμοριακές αλληλεπιδράσεις, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στα *αμφιφιλικά* μόρια, χωρίς αυτό να συνοδεύεται κατ' ανάγκη από σημαντική ανισομετρία των μοριακών διαστάσεων.



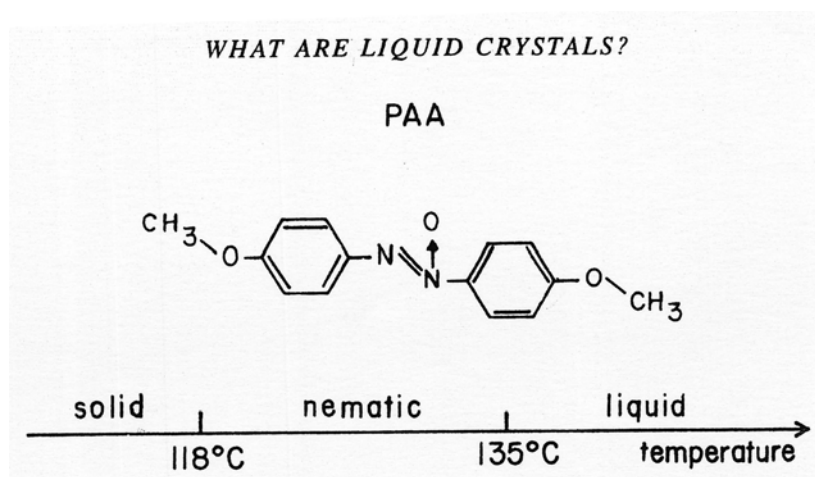
Σχήμα 1.5: Συνήθεις μορφές μοριακής ασυμμετρίας: α₁) ραβδόμορφο μόριο, α₂) δισκόμορφο μόριο, β) αμφιφιλικό μόριο

Κατά κανόνα τα ραβδόμορφα μόρια που σχηματίζουν υγροκρυσταλλικές φάσεις αποτελούνται από ένα επίμηκες και σχετικά άκαμπτο αρωματικό τμήμα, το μεσογόνο πυρήνα, στα δύο άκρα του οποίου (ή και μόνο στο ένα άκρο) συνδέονται εύκαμπτες αλυσίδες υδρογονανθράκων. Αντίστοιχα, στα δισκόμορφα μόρια ο μεσογόνος πυρήνας είναι ένα επίπεδα αναπτυγμένο και σχετικά άκαμπτο αρωματικό σύμπλεγμα στην περίμετρο του οποίου συνδέονται ακτινικά οι εύκαμπτες υδρογονανθρακικές αλυσίδες.

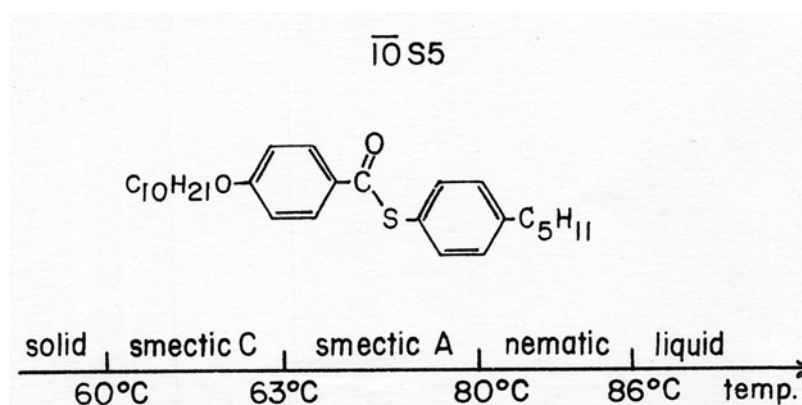
Συγκεκριμένα τα επιμήκη μόρια ειθισται να σχηματίζουν υγροκρυσταλλικές φάσεις γιατί όταν αυτά έχουν την ίδια διεύθυνση εμφανίζουν ισχυρότερες ελκτικές δυνάμεις μεταξύ τους ενώ επιπλέον συγκρούονται δυσκολότερα το ένα με το άλλο, γεγονός που σταθεροποιεί τον

προσανατολισμό τους. Έχει παρατηρηθεί επίσης ότι μόρια με εύκαμπτα άκρα σχηματίζουν υγρούς κρυστάλλους γιατί η εύκαμψία επιτρέπει σε ένα μόριο να τοποθετείται πιο εύκολα μεταξύ άλλων, καθώς όλα κινούνται χαοτικά.

Όπως προαναφέραμε ουσίες με μόρια σε μορφή ράβδου ή δίσκου συνηθίζουν να υπάρχουν σε υγροκρυσταλλική φάση. Σε όποια κατηγορία και αν ανήκουν τα μόρια της ουσίας, μπορεί να υπάρξει σε μία ή και περισσότερες εκ των ακολούθων φάσεων, μεταβαλλόμενης της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα ουσίες με *ραβδόμορφα* μόρια υπάρχουν κυρίως στη *νηματική*, στην *ελικοειδή* ή *χειρόμορφη νηματική*, στη *σημηκτική A* και στη *σημηκτική C* φάση. Οι ελικοειδείς νηματικοί υγροί κρύσταλλοι είναι αυτοί που ονομάζουμε πιο απλά *χοληστερικούς*³ καθώς οι περισσότερες ουσίες που εμφανίζουν αυτή τη φάση αποτελούνται από μόρια που σχετίζονται με τη χοληστερόλη. Οι υγροί κρύσταλλοι που σχηματίζονται από επιμήκη μόρια ονομάζονται γενικά *καλαμιτικοί*, από τον διεθνή όρο calamitic, που προέρχεται από το ελληνικό “ κάλαμος “. Ουσίες με δισκόμορφα μόρια εμφανίζουν κυρίως την *κιονική* ή *σημηκτική δισκοτική* και την *ελικοειδή κιονική* φάση. Εν γένει υγροί κρύσταλλοι σχηματιζόμενοι από δισκόμορφα μόρια ονομάζονται *δισκοτικοί*.



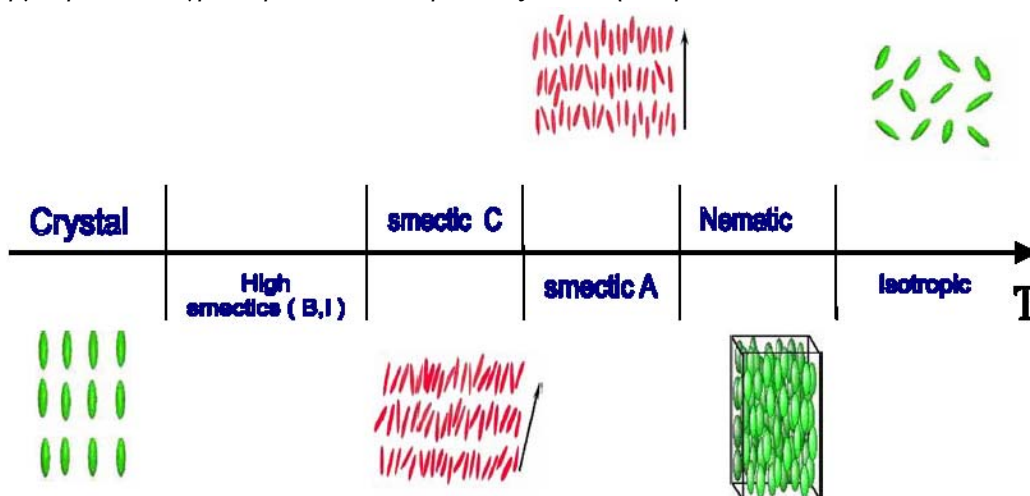
Εικόνα 1.6: Διάγραμμα φάσεων για την p - azoxyanisole. Η ουσία αυτή εμφανίζει μόνο νηματική υγροκρυσταλλική φάση.



Εικόνα 1.7: Διάγραμμα φάσεων του 4 - n - pentylben - zenethio-4' - η - decyloxybenzoate. Η ουσία αυτή εμφανίζει σημηκτική C, σημηκτική A και νηματική υγροκρυσταλλική φάση.

³Η ονομασία αυτή δεν είναι η πιο δόκιμη, αφού υπάρχουν χοληστερικοί υγροί κρύσταλλοι που δεν έχουν καμία σχέση με τη χοληστερόλη.

Όλα τα παραπάνω είδη υγρών κρυστάλλων (εκτός των αμφιφιλικών) μεταβαίνουν από τη μία υγροκρυσταλλική φάση στην άλλη με θερμοκρασιακές αλλαγές γι' αυτό και είναι γνωστοί ως *θερμοτροπικοί υγροί κρύσταλλοι*. Μία ενδεικτική διαδοχή φάσεων ενός θερμοτροπικού υγρού κρυστάλλου παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 1.8: Διαδοχή των φάσεων ενός θερμοτροπικού υγρού κρυστάλλου (απότελούμενου από ραβδόμορφα μόρια)

Οι σχέσεις μεταξύ θερμοκρασίας και τάξης ως προς τη θέση και θερμοκρασίας και τάξης ως προς τον προσανατολισμό στις συνηθέστερες φάσεις ενός θερμοτροπικού υγρού κρυστάλλου, παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

ΦΑΣΕΙΣ	ΤΑΞΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ	ΤΑΞΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΘΕΣΗ
Ισοτροπική	–	–
Νηματική	Τάξη ως προς μία διεύθυνση	–
Σμηκτική A	Τάξη ως προς μία διεύθυνση	Τάξη ως προς μία διεύθυνση
Σμηκτική C	Τάξη ως προς δύο διευθύνσεις	Τάξη ως προς μία διεύθυνση
Κρυσταλλική	Ο κρύσταλλος εμφανίζει πλήρη τάξη	

Πίνακας 1: Τάξη ως προς τον προσανατολισμό και τη θέση των μορίων ενός θερμοτροπικού υγρού κρυστάλλου

Παρατηρούμε ότι καθώς μειώνεται η θερμοκρασία αυξάνεται η τάξη του υγρού κρυστάλλου. Υπάρχουν όμως και υγροί κρύσταλλοι που προκύπτουν από τη μείξη δύο ή περισσότερων, διαφορετικών μεταξύ τους, συστατικών εκ των οποίων κανένα δεν είναι μόνο του υγροκρυσταλλικό. Σ' αυτή την περίπτωση η μετάβαση από τη μία υγροκρυσταλλική φάση στην άλλη μπορεί να συμβαίνει λόγω *αλλαγής της συγκέντρωσης* ενός εκ των συστατικών. Όταν η υγροκρυσταλλική φάση εξαρτάται από την αλλαγή αυτή, οι υγροί κρύσταλλοι ονομάζονται *λυοτροπικοί*. Τέλος, υπάρχουν και οι λεγόμενοι *αμφιτροπικοί υγροί κρύσταλλοι*, στους οποίους η επίτευξη της υγροκρυσταλλικής κατάστασης στο διάλυμα μπορεί να γίνει και με τη μεταβολή της θερμοκρασίας και με την μεταβολή της συγκέντρωσης.

Σε αντιστοιχία με τους “ *μονομερικούς* ” υγρούς κρυστάλλους, που περιγράψαμε έως τώρα, υπάρχουν και “ *πολυμερικοί* ” υγροί κρύσταλλοι που παράγονται από τον *πολυμερισμό*⁴

⁴Τα πολυμερή είναι εξαιρετικά μακριά και λεπτά μόρια που σχηματίζονται όταν χημικές αντιδράσεις ενώνουν μεταξύ τους μικρότερα μόρια.

υγροκρυσταλλικών μονομερών, δηλαδή μορίων σαν τα ραβδόμορφα και τα δισκόμορφα. Υπάρχουν περιπτώσεις, βέβαια, που τα μονομερή αν δε συδεθούν σε μακρομόρια δεν είναι υγροκρυσταλλικά και παραμόνο όταν συνδεθούν σε πολυμερές παρουσιάζουν ισχυρή κατευθυντικότητα. Τα υγροκρυσταλλικά πολυμερή εμφανίζουν, όπως και τα υγροκρυσταλλικά μονομερή, νηματική, ελικοειδή νηματική και σμηκτική φάση και μπορούν να είναι είτε θερμοτροπικά είτε λυοτροπικά.

Τα στερεά, τα υγρά και τα αέρια επηρεάζονται από τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά πεδία αλλά η επίδραση είναι μικρή ακόμα και αν βρεθούν σε ισχυρά πεδία. Αντίθετα, οι υγροί κρύσταλλοι απαντούν με σημαντικές δομικές αλλαγές στην παρουσία τέτοιων πεδίων ακόμα και όταν αυτά είναι ασθενή. Το γεγονός αυτό συνδέεται με μία σειρά εφαρμογών τους.

1.2. Ιστορία υγρών κρυστάλλων

Το 1988 ο αυστριακός βοτανολόγος Friedrich Reinitzer παρατηρώντας τη συμπεριφορά μιας οργανικής ουσίας, σχετιζομένης με τη χοληστερόλη, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της τήξης επεσήμανε την ύπαρξη δύο σημείων τήξης. Συγκεκριμένα ανέφερε ότι στους 145,5 °C η ουσία ετήκετο σε ένα θολό υγρό το οποίο, με τη σειρά του, στους 178,5 °C μετατρέπεται σε ένα διαυγές υγρό. Πριν το Reinitzer, διάφοροι ερευνητές κατά τη διάρκεια πειραμάτων παρατήρησαν πολλές από τις ιδιότητες που σήμερα έχουν κατοχυρωθεί ως ιδιότητες των υγρών κρυστάλλων. Επειδή όμως αυτός ήταν ο πρώτος που έθεσε, υποκινούμενος από την παρατήρησή του, το σωστό ερώτημα, το κατά πόσο δηλαδή το θολό αυτό υγρό θα μπορούσε να αποτελέσει μια άλλη κατάσταση της ύλης, διαφορετική της στερεάς ή της υγρής, θεωρείται σήμερα ως το πρόσωπο που ανακάλυψε τους υγρούς κρυστάλλους. Επί της ουσίας όμως αυτός ο οποίος εκτελώντας επανειλημμένα πειράματα, στο μικροσκόπιο με θερμαινόμενη έδρα το οποίο ο ίδιος είχε ανακαλύψει, και συγκεντρώνοντας τις παρατηρήσεις του Reinitzer και άλλων συναδέλφων του κατέληξε στην ονομασία “ υγροί κρύσταλλοι “, ήταν ο Otto Lehmann. Συγκεκριμένα, στην ονομασία αυτή οδηγήθηκε πεπεισμένος ότι το θολό αυτό υγρό εμφάνιζε ένα συνδυασμό χαρακτηριστικών, τις ροϊκές ιδιότητες των υγρών και τις οπτικές ιδιότητες των στερεών.

Στα χρόνια που ακολούθησαν πολλοί επιστήμονες έκαναν έρευνα σχετικά με τους υγρούς κρυστάλλους. Έτσι ανακαλύφθηκαν τα διάφορα είδη τους και παρατηρήθηκε ότι κάποια είδη μορίων σχηματίζουν συνηθέστερα υγροκρυσταλλική φάση, ότι τα μόρια αυτά παρουσιάζουν μερικό προσανατολισμό και επηρεάζονται έντονα από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία.

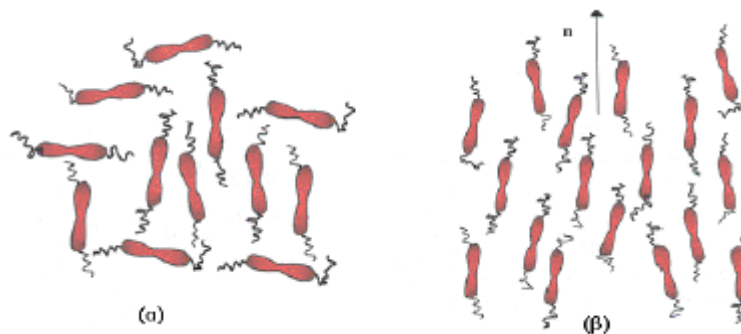
Οι έρευνες αυτές ελαττώθηκαν κατά τη διάρκεια του β' παγκόσμιου πολέμου και σταμάτησαν εντελώς μετά το τέλος του. Πιθανές αιτίες για τις οποίες χάθηκε το ενδιαφέρον για τους υγρούς κρυστάλλους ήταν ότι είχαν ήδη απαντηθεί όλα τα ερωτήματα που τους αφορούσαν, οι συγγραφείς εγχειριδίων χημείας και φυσικής εκείνης της εποχής δεν έκαναν αναφορές στην υγροκρυσταλλική φάση με αποτέλεσμα πολλοί επιστήμονες να αγνοούν την ύπαρξή της και κυρίως το γεγονός ότι εκείνη την περίοδο πίστευαν ότι δεν υπήρχαν πρακτικές εφαρμογές τους.

Η κατάσταση άλλαξε λίγο πριν το 1960 και έγινε πολύ γρήγορα αντιληπτό ότι οι υγροί κρύσταλλοι έχουν την ικανότητα να αντιλαμβάνονται πολύ μικρές αλλαγές στη θερμοκρασία, τη μηχανική καταπόνηση, την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και το χημικό περιβάλλον. Στις ιδιότητές τους αυτές στηρίχθηκαν οι μετέπειτα πολλαπλές εφαρμογές τους.

1.3 Είδη θερμοτροπικών υγρών κρυστάλλων (ΥΚ)

1.3.1 Νηματικοί υγροί κρύσταλλοι

Οι ΥΚ με τη μεγαλύτερη μοριακή αταξία είναι οι *νηματικοί* (nematic) (N). Οι κρύσταλλοι αυτοί συνήθως σχηματίζονται από επιμήκη μόρια. Ένας νηματικός ΥΚ χαρακτηρίζεται από πλήρη αταξία των θέσεων των μορίων που τον απαρτίζουν και από μερική τάξη των προσανατολισμών τους. Η απλούστερη περίπτωση νηματικού ΥΚ, στην οποία και υπάγονται σχεδόν όλοι οι γνωστοί νηματικοί ΥΚ, είναι εκείνη του *μονοαξονικού απολικού νηματικού* όπου η τάξη στον προσανατολισμό των μορίων έγκειται στην (στατιστική) προτίμηση ευθυγράμμισης του κύριου μοριακού άξονα κατά μήκος μίας προεξάρχουσας διεύθυνσης. Η διεύθυνση αυτή ονομάζεται *κατευθυντής* (director) και είναι κοινή για ένα μακροσκοπικά μεγάλο αριθμό μορίων του συστήματος. Η διεύθυνση του κατευθυντή στο χώρο συμβολίζεται με το μοναδιαίο διάνυσμα n . Οι νηματικοί ΥΚ αυτοί λέγονται *μονοαξονικοί* επειδή όλες οι διευθύνσεις οι κάθετες στον κατευθυντή n είναι ισοδύναμες μεταξύ τους. Ο κατευθυντής n δηλαδή, αποτελεί σ' αυτή την περίπτωση άξονα πλήρους περιστροφικής συμμετρίας του ΥΚ και είναι και ο μοναδικός τέτοιος άξονας. Γι' αυτό και ο όρος “ κατευθυντής “ χρησιμοποιείται ισοδύναμα με τον όρο “ ο κύριος άξονας της φάσης “ όταν πρόκειται για μονοαξονική νηματική φάση. Η ιδιότητα της απολικότητας χαρακτηρίζει την ισοδυναμία μεταξύ των διευθύνσεων n και $-n$ του κατευθυντή. Με άλλα λόγια, ο κατευθυντής ενός απολικού νηματικού ΥΚ έχει καθορισμένη διεύθυνση στο χώρο αλλά όχι καθορισμένη φορά κατά μήκος αυτής της διεύθυνσης.



Εικόνα 1.9: Μόρια νηματικών υγρών κρυστάλλων: α) σε αταξία, β) προσανατολισμένα κατά τον κατευθυντή

1.3.2 Σμηκτικοί υγροί κρύσταλλοι

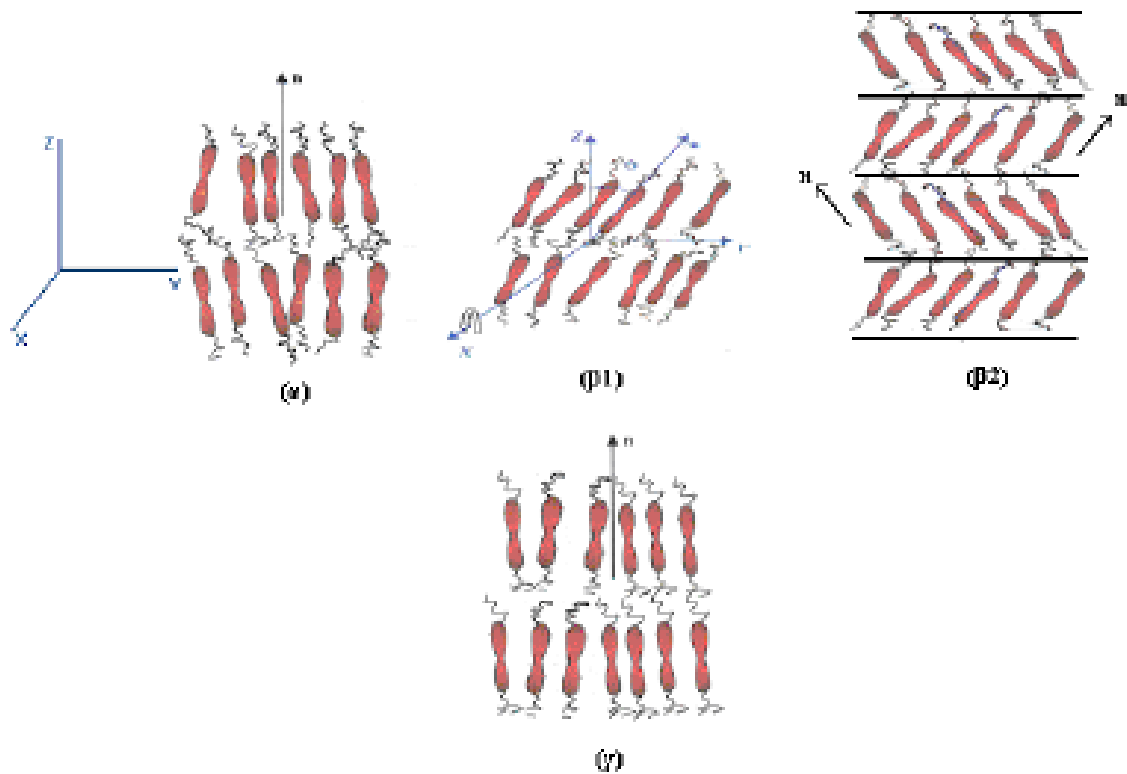
Οι *σμηκτικοί* (smectic) ΥΚ παρουσιάζουν, επιπλέον της τάξης στις μοριακές διευθύνσεις την οποία παρουσιάζουν οι νηματικοί και τάξη ως προς τις θέσεις σε μία διάσταση. Οι θέσεις των μορίων δηλαδή σχηματίζουν επίπεδες στοιβάδες (σμηκτικά επίπεδα ή σμηκτικές στοιβάδες). Η μονοδιάστατη τάξη θέσης των σμηκτικών ΥΚ δεν είναι πλήρης αφού οι θέσεις των μορίων δεν είναι αυστηρά περιορισμένες στα σμηκτικά επίπεδα. Αν ορίσουμε το μακροσκοπικό σύστημα αξόνων X, Y, Z έτσι ώστε ο άξονας Z να είναι κάθετος στα σμηκτικά επίπεδα τότε η μοριακή πυκνότητα θα παρουσιάζει περιοδικότητα στη συντεταγμένη Z. Ανάλογα με την διάταξη του κατευθυντή σε σχέση με τα σμηκτικά επίπεδα και ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι τάξης στις θέσεις των μορίων εντός των σμηκτικών επιπέδων (δηλαδή στο επίπεδο XY) διακρίνουμε τα παρακάτω είδη *σμηκτικών* ΥΚ:

α) *Σμηκτικοί A* (SmA): ο κατευθυντής στους σμηκτικούς A YK είναι κάθετος στα σμηκτικά επίπεδα και δεν υπάρχει κάποιο είδος τάξης των θέσεων των μορίων που απαρτίζουν την ίδια στοιβάδα (συνοπτικά: τάξη θέσεων στη διάσταση Z και αταξία στις διαστάσεις X, Y).

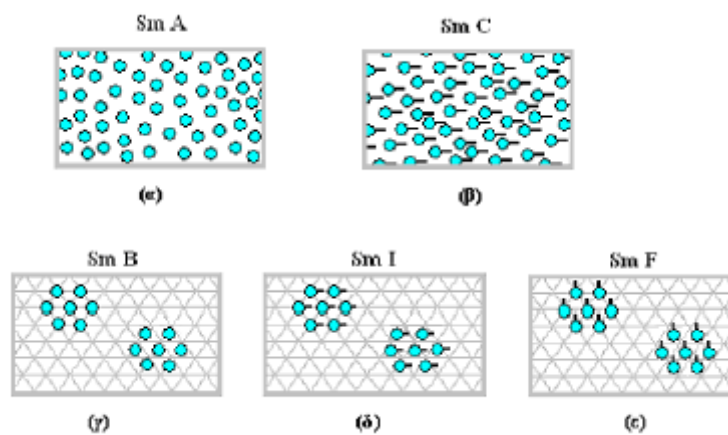
β) *Σμηκτικοί C* (SmC): η σμηκτική C φάση παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά της SmA , δηλαδή τάξη ως προς τις θέσεις των μορίων στη διάσταση Z (κάθετα στα σμηκτικά επίπεδα) και αταξία στις διαστάσεις X, Y , με τη διαφορά ότι ο κατευθυντής δεν είναι παράλληλος με τον άξονα Z (δηλαδή δεν είναι κάθετος στα σμηκτικά επίπεδα), αλλά σχηματίζει γωνία t , την λεγόμενη γωνία κλίσης (tilt angle), η οποία ορίζεται από τη σχέση: $\cos t = n \times Z$. Η απόκλιση του n από τον άξονα Z καταστρέφει την περιστροφική συμμετρία γύρω από τον κατευθυντή (προφανώς και γύρω από την κάθετη στα επίπεδα διεύθυνση Z). Η SmC φάση είναι λοιπόν διαξονική. Παραμένει όμως απολική κατά μήκος του κατευθυντή, δηλαδή υπάρχει συμμετρία ως προς την αναστροφή. Ο κατευθυντής και ο άξονας Z ορίζουν το “ επίπεδο κλίσης ” που είναι και επίπεδο συμμετρίας της SmC φάσης.

γ) *Σμηκτικοί B* (SmB): η σμηκτική B φάση παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά της SmA , δηλαδή τάξη ως προς τις θέσεις των μορίων στη διάσταση Z (κάθετα στα σμηκτικά επίπεδα) και κατευθυντή n παράλληλο με τον άξονα Z (δηλαδή κάθετο στα σμηκτικά επίπεδα) με την διαφορά ότι οι θέσεις των μορίων δεν παρουσιάζουν πλήρη αταξία στις διαστάσεις X, Y αλλά ένα χαρακτηριστικό είδος τάξης που ονομάζεται τάξη προσανατολισμού των δεσμών ($TΠΔ$, bond orientational order). Εδώ με τον όρο “ δεσμός ” εννοείται το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει τα κέντρα δύο γειτονικών μορίων που ανήκουν στην ίδια στοιβάδα.

δ) *Σμηκτικοί I και F* (SmI, SmF): οι φάσεις αυτές είναι ανάλογες της SmC , κατά το ότι ο κατευθυντής αποκλίνει από την κάθετο στα σμηκτικά επίπεδα, αλλά παρουσιάζουν επιπλέον και $TΠΔ$ στις διαστάσεις X, Y , ανάλογη με την $TΠΔ$ των SmB . Η διάκριση μεταξύ SmI και SmF έγκειται στην συσχέτιση της διεύθυνσης απόκλισης του κατευθυντή με τους άξονες της εξαγωνικής $TΠΔ$. Στην SmI η προβολή του κατευθυντή στο επίπεδο XY συμπίπτει με κάποιον από τους άξονες του εξαγωνικού προσανατολισμού των δεσμών, ενώ στην SmF η προβολή του κατευθυντή είναι κάθετη σε κάποιον από τους άξονες αυτούς.



Εικόνα 1.10: Διάταξη των στοιβάδων στους σημκτικούς ΥΚ: α) SmA, β) SmC, γ) SmB



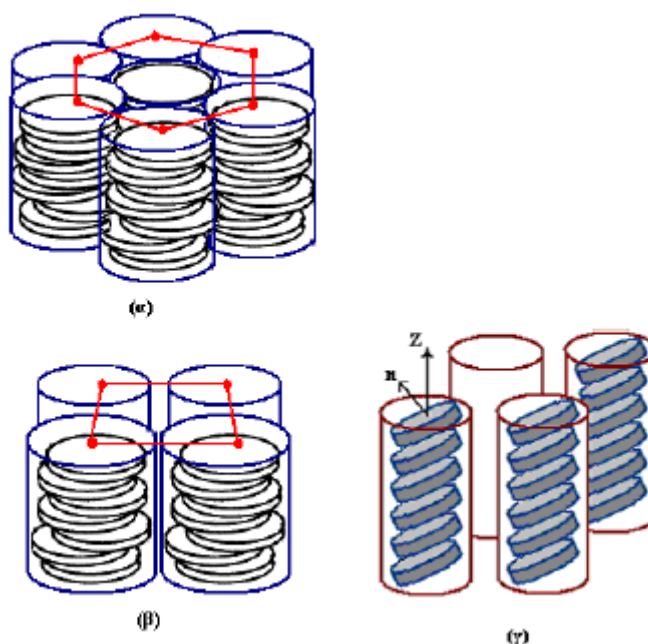
Εικόνα 1.11: Τάξη μοριακών θέσεων στις σημκτικές στοιβάδες

Οι περιγραφείσες σημκτικές φάσεις απαρτίζονται από επιμήκη μόρια. Οι σημκτικές φάσεις των θερμοτροπικών ΥΚ γενικά παρεμβάλονται μεταξύ της ισότροπης υγρής φάσης (ή της νηματικής αν υπάρχει) και της στερεής με σειρά που αντιστοιχεί σε αυξανόμενη τάξη καθώς μειώνεται η θερμοκρασία.

1.3.3 Κιονικοί υγροί κρύσταλλοι

Οι κιονικοί (columnar) ΥΚ παρουσιάζουν εκτός από την τάξη στις μοριακές διευθύνσεις, την οποία παρουσιάζουν οι νηματικοί, και τάξη ως προς τις θέσεις σε δύο διαστάσεις. Οι θέσεις των μορίων σχηματίζουν ευθύγραμμες στήλες (κίονες) και οι στήλες αυτές διατάσσονται παράλληλα μεταξύ τους έτσι ώστε οι κάθετες προβολές των αξόνων τους να

σχηματίζουν 2 - διάστατο πλέγμα. Οι κιονικοί ΥΚ δημιουργούνται από δισκόμορφα μόρια, γι' αυτό και συχνά στην παλαιότερη βιβλιογραφία ονομάζονται *δισκοτικοί σμηκτικοί* (discotic smectic) ΥΚ.



Εικόνα 1.12: Μοριακή τάξη στους κιονικούς ΥΚ

1.3.4 Χειρόμορφοι ή ελικοειδείς υγροί κρύσταλλοι

Οι *χειρόμορφοι* ΥΚ (chiral LCs) αποτελούνται από *χειρόμορφα μόρια*. Τα μόρια αυτά δηλαδή, εκτός από την ασυμμετρία που απαιτείται για τον σχηματισμό ΥΚ φάσης παρουσιάζουν και ασυμμετρία χειρομορφίας (chiral asymmetry). Ένα μόριο λέγεται χειρόμορφο όταν δεν μπορεί να ταυτιστεί με το κατοπτρικό του είδωλο (την ίδια σχέση ασυμμετρίας έχει το δεξί με το αριστερό μας χέρι, απ' όπου προέρχεται και η ορολογία “ χειρομορφία “ (chirality)). Το κατοπτρικό είδωλο ενός χειρόμορφου μορίου ονομάζεται *εναντιομερές* του μορίου αυτού.

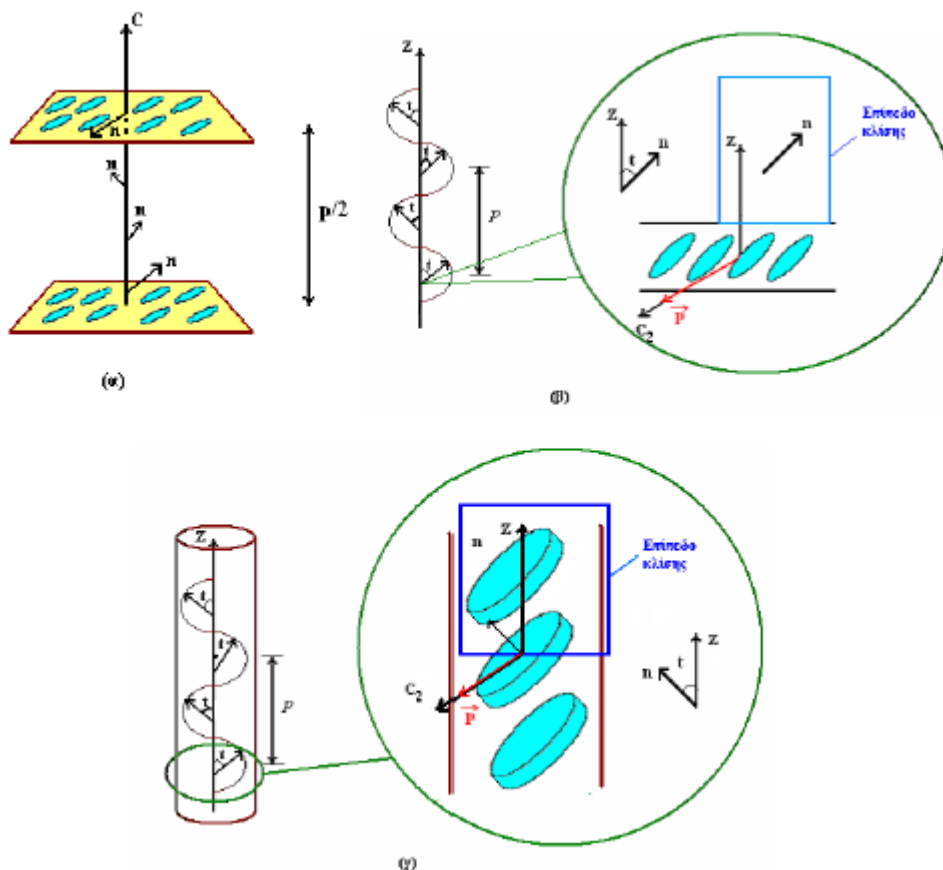
Ο συνδυασμός της χειρομορφίας με την ανισοτροπία που παρουσιάζουν οι ΥΚ οδηγεί σε νέες ΥΚ φάσεις που παρουσιάζουν ενδιαφέρουσα οπτική, ηλεκτρο-οπτική και θερμο-οπτική συμπεριφορά:

α) *Χειρόμορφοι νηματικοί* (N^*) ΥΚ: εδώ η υπέρθεση της χειρομορφίας στην βασική νηματική αυτο-οργάνωση των μορίων προκαλεί την στρέψη του κατευθυντή (σχήμα 8 (α)), δηλαδή την συνεχή αλλαγή του προσανατολισμού του n καθώς μεταβαίνουμε στο χώρο κατά μήκος μιας διεύθυνσης κάθετης στο n . Η κάθετη διεύθυνση αυτή ορίζει έναν άξονα ελικοειδούς συμμετρίας της φάσης (η μετάβαση κατά μήκος του άξονα αυτού, συνδυαζόμενη με ανάλογη στροφή μας δίνει τον κατευθυντή στη νέα θέση). Το βήμα της έλικας (pitch) ορίζεται ως η απόσταση p που χρειάζεται να διανυθεί κατά μήκος του άξονα της έλικας για να συντελεστεί μία πλήρης στροφή (2π) του κατευθυντή. Οι κρύσταλλοι αυτοί δημιουργούνται από επιμήκη χειρόμορφα μόρια.

β) *Χειρόμορφοι σμηκτικοί C* (SmC^*) ΥΚ: Στην SmC^* φάση η επίδραση της χειρομορφίας στην βασική επικλινή σμηκτική αυτο-οργάνωση των μορίων προκαλεί την στροφή της

προβολής του κατευθυντή στο σημητικό επίπεδο XY (σχήμα 8 (β)) καθώς μεταβαίνουμε από την μία στοιβάδα στην επόμενη κατά μήκος του άξονα Z. Δημιουργείται δηλαδή και σ' αυτή την περίπτωση μία ελικοειδής δομή του κατευθυντή. Οι διαφορές με την ελικοειδή δομή της N* φάσης που περιγράψαμε προηγουμένως είναι ότι στη SmC* ο κατευθυντής σχηματίζει την σταθερή γωνία κλίσης t με τον άξονα της έλικας (ο οποίος συμπίπτει με τον άξονα Z τον κάθετο στα σημητικά επίπεδα) ενώ στην N* ο κατευθυντής είναι κάθετος στον άξονα της έλικας και ότι η υποδιαίρεση σε στρώματα ομοιόμορφου προσανατολισμού του κατευθυντή στην περίπτωση της N* είναι νοητή ενώ στη SmC* είναι πραγματική και αναφέρεται στις σημητικές στοιβάδες. Και αυτή η κατηγορία YK σχηματίζεται από επιμήκη χειρόμορφα μόρια.

γ) Χειρόμορφοι επικλινείς κιονικοί (Colt*) YK: Στην Colt* φάση, η επίδραση της χειρομορφίας στην επικλινή κιονική αυτο-οργάνωση των μορίων προκαλεί την στροφή της προβολής του κατευθυντή στο επίπεδο XY (σχήμα 8 (γ)) καθώς μεταβαίνουμε κατά μήκος του άξονα Z της στήλης. Δημιουργείται δηλαδή και σ' αυτή την περίπτωση μία ελικοειδής δομή του κατευθυντή, ανάλογη με εκείνη της SmC*. Η χειρόμορφη ασυμμετρία επιτρέπει και εδώ την εμφάνιση αυθόρμητης ηλεκτρικής πόλωσης σε τμήματα της στήλης, όμως η ελίκωση επιφέρει την αλληλοαναιρέση της πόλωσης στην στήλη συνολικά. Εδώ τα μόρια που απαρτίζουν τους κρυστάλλους είναι δισκόμορφα.

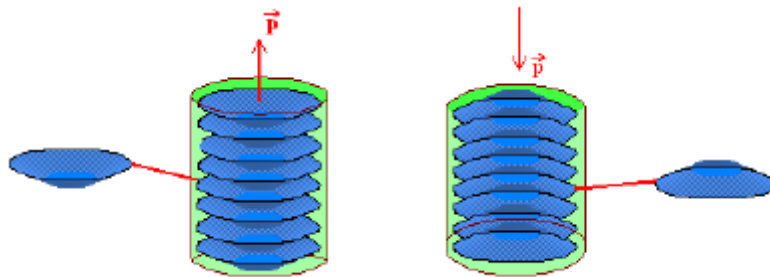


Εικόνα 1.13: Μοριακή τάξη στους χειρόμορφους YK

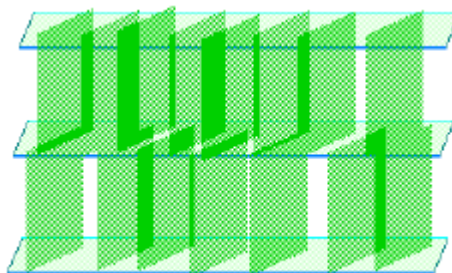
Τέλος, υπάρχουν και περιπτώσεις YK που παράγονται από μόρια τα οποία παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση από την ραβδόμορφη ή δισκόμορφη δομή. Αξιοσημείωτα παραδείγματα δομικών παραλλαγών είναι οι YK τύπου μπανάνας (banana LCs), οι πυραμιδικοί YK (pyramidal LCs) και οι σανιδικοί YK (sanidic LCs).



Εικόνα 1.14: YK τύπου μπανάνας



Εικόνα 1.15: Πυραμιδικοί YK



Εικόνα 1.16: Σανιδικοί YK

1.4 Χαρακτηριστικά θερμοχρωμικών YK και θερμογράφηση

Ένας *θερμοχρωμικός* υγρός κρύσταλλος (δηλαδή ένας κρύσταλλος που αλλάζει χρώμα μεταβαλλόμενης της θερμοκρασίας) (Thermochromic Liquid Crystal – TLC) σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της θερμοκρασίας γεγονότων του, βρίσκεται σε στερεή κατάσταση και είναι διαφανής. Όταν αποκτήσει θερμοκρασία ίση με τη *θερμοκρασία γεγονότων*, εφόσον φωτιστεί από μία πηγή λευκού φωτός και η παρατήρηση γίνει κάτω από αμετάβλητες οπτικές συνθήκες, ο υγρός κρύσταλλος αρχίζει να ανακλά ένα μοναδικό μήκος κύματος του ορατού φωτός (δηλαδή ο υγρός κρύσταλλος αποκτά χρώμα). Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται μέσα στα όρια του *έρους ζώνης* του TLC, το ανακλώμενο χρώμα μεταβάλλεται, ενώ όταν η θερμοκρασία υπερβεί το *σημείο διαφάνειας*, το υλικό εισέρχεται στην υγρή κατάσταση και είναι πάλι διαφανές.

Ας δούμε αναλυτικά κάποιες βασικές έννοιες που αφορούν στους TLCs:

α) *Θερμοκρασία γεγονότων* (event temperature): είναι η θερμοκρασία στην οποία ο υγρός κρύσταλλος αρχίζει να ανακλά φως του ορατού φάσματος. Είναι η θερμοκρασία στην οποία εμείς πρακτικά λέμε ότι χρωματίζεται και συγκεκριμένα λαμβάνει κόκκινο χρώμα.

β) *Εύρος ζώνης* (bandwidth): είναι η περιοχή θερμοκρασίας στην οποία ο υγρός κρύσταλλος ανακλά φως του ορατού φάσματος. Συγκεκριμένα ανακλάται φως που αντιστοιχεί σε διάφορα χρώματα, δηλαδή στο κόκκινο, το κίτρινο, το πράσινο, το μωβ, το μπλε καθώς και στις ενδιάμεσες αποχρώσεις τους.

γ) *Σημείο διαφάνειας* (clearing point temperature): είναι η θερμοκρασία στην οποία ο υγρός κρύσταλλος παύει να ανακλά φως του ορατού φάσματος.

δ) *Επιλεκτική ανάκλαση* (selective reflection): είναι η ανάκλαση ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος και εξαρτάται από τη θερμοκρασία του υγρού κρυστάλλου.

ε) *Ενεργό σημείο διαφάνειας* (active clearing point temperature): είναι η θερμοκρασία στην οποία ο υγρός κρύσταλλος ανακλά φως που αντιστοιχεί στο μπλε χρώμα.

στ) *Ενεργό εύρος ζώνης* (active bandwidth): είναι το θερμοκρασιακό εύρος τα άκρα του οποίου αντιστοιχούν στο κόκκινο και το μπλε χρώμα των υγρών κρυστάλλων.

ζ) *Μίγματα πολλαπλών γεγονότων* (multi–event mixture): πρόκειται για μίγματα δύο ή και περισσότερων υγρών κρυστάλλων που τα θερμοκρασιακά εύρη ζώνης τους δεν συμπίπτουν.

Για το πειράμα μας χρησιμοποιήθηκαν TLCs μικρού εύρους ζώνης με σκοπό την ευκολότερη εξαγωγή της καμπύλης βαθμονόμησης των ΥΚ μέσω της οποίας επαληθεύθηκε με ακρίβεια η θερμοκρασιακή κατανομή στην εξεταζόμενη επιφάνεια (μεσοεπίπεδο κατά μήκος του ακροφυσίου).

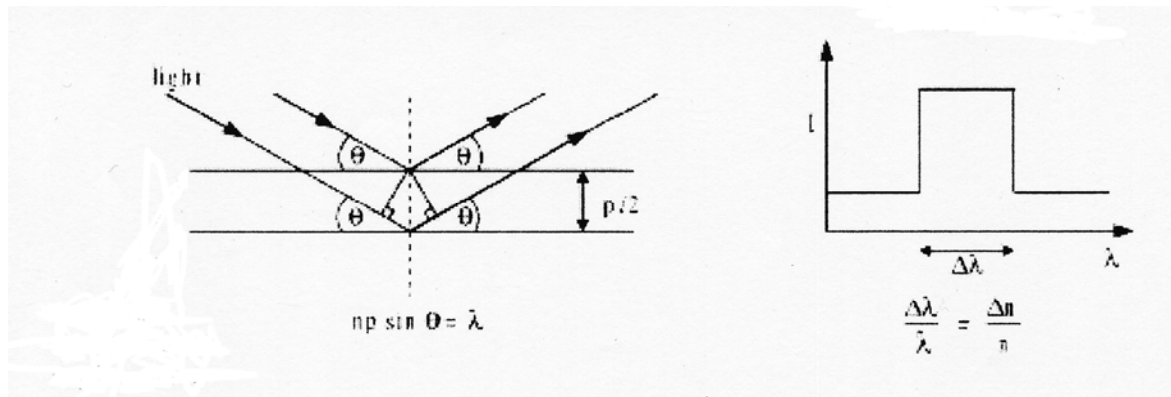
Οι TLCs συγκεκριμένα ήταν ελικοειδείς νηματικοί. Για να κατανοήσουμε καλύτερα την έννοια της επιλεκτικής ανάκλασης για το συγκεκριμένο είδος κρυστάλλου θα πρέπει να στηριχτούμε στις οπτικές του ιδιότητες. Για να χρησιμοποιηθεί ένας χοληστερικός υγρός κρύσταλλος για την καταγραφή θερμοκρασίας θα πρέπει το βήμα της έλικάς του (p) να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος του ορατού φωτός. Στην πραγματικότητα το μήκος κύματος που επιλεκτικά ανακλάται εξαιτίας της χοληστερικής δομής παρέχεται από τον τύπο:

$$\lambda = n \times p \times \sin\theta \quad (1.1),$$

όπου n είναι ο δείκτης διάθλασης του υγρού κρυστάλλου και

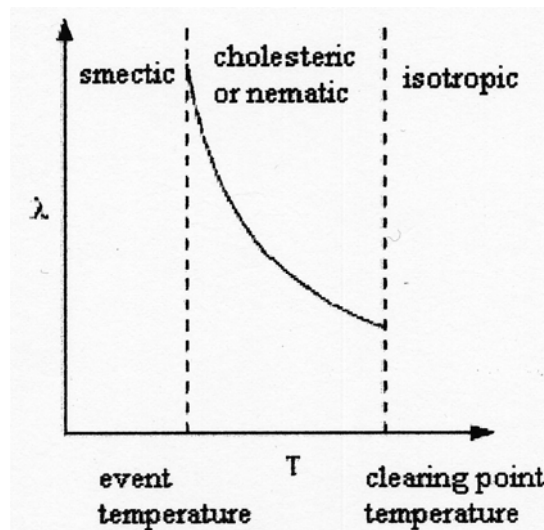
θ η γωνία πρόσπτωσης του φωτός ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

Επειδή ένας νηματικός υγρός κρύσταλλος είναι *διπλοθλαστικός* (δηλαδή ο δείκτης διάθλασής του διαφέρει ανάλογα με το αν η πόλωση του φωτός γίνεται παράλληλα στη διεύθυνση του κατευθυντή ή κάθετα σε αυτήν), λόγω της μοριακής ευθυγράμμισης σε διάφορα επίπεδα, πραγματοποιείται επιλεκτική ανάκλαση ενός μικρού εύρους μηκών κύματος, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1.17: Μοντέλο επιλεκτικής ανάκλασης

Το βήμα της έλικας και κατ' επέκταση το χρώμα που ανακλάται από τον υγρό κρύσταλλο εξαρτώνται από την θερμοκρασία του. Συνήθως, το βήμα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ένα ποιοτικό γράφημα του επιλεκτικά ανακλώμενου χρώματος (δηλαδή του συγκεκριμένου μήκους κύματος λ) σε συνάρτηση με την θερμοκρασία παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1.18: Ποιοτικό γράφημα του λ που ανακλάται από ένα θερμοχρωμικό ΥΚ εντός του εύρους ζώνης του

Όπως φαίνεται παραπάνω ένας νηματικός ή χοληστερικός ΥΚ χάνει την ιδιότητα της επιλεκτικής ανάκλασης εκτός εύρους ζώνης. Προ της θερμοκρασίας γεγονότων, όπου ο ΥΚ υπάρχει σε σημαντικές φάσεις και μετά το σημείο διαφάνειας, όπου ο ΥΚ περνά στη φάση του ισοτροπικού υγρού.

Λόγω της γαλακτώδους μορφής τους, οι ακατέργαστοι υγροί κρύσταλλοι παρουσιάζουν δυσκολία στην χρήση τους. Η απόκρισή τους στη μεταβολή της θερμοκρασίας μειώνεται ταχέως λόγω της χημικής αλλοίωσης που υφίστανται και της έκθεσής τους στην υπεριώδη ακτινοβολία. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προαναφερθέντα προβλήματα και να προστατευθεί ο κρύσταλλος αυτός, χρησιμοποιούνται δύο διαδικασίες, της *μικροπερικάλυψης* και της *πολυμερικής διασκόρπισης*.

Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε η μικροπερικάλυψη (*microencapsulation*). Αυτή είναι μία τεχνική που αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1970 και περιλαμβάνει την εισαγωγή ακατέργαστου υλικού από TLC σε προστατευτικές μικροκάψουλες διαμέτρου 5 – 10 μm . Ψεκάσιμα μίγματα από μικροκάψουλες αιωρούμενες σε υδάτινα διαλύματα,

κατασκευάζονται κατά παραγγελία και πωλούνται στην αγορά. Με τη μικροπερικάλυψη αποφεύγεται η χημική μόλυνση και παρέχεται προστασία από την επίδραση της ακτινοβολίας. Οι μικροπερικαλυμμένοι TLCs πρέπει να προετοιμάζονται και να χρησιμοποιούνται σωστά με σκοπό να αποφεύγεται η υπερβολική εξασθένηση του φωτός που ανακλάται από τους ΥΚ και ο διαχωρισμός του διαλύματος από τις μικροκάψουλες.

Οι TLCs συνοδεύονται από μία κωδικοποιημένη ονομασία, η οποία καθορίζει τη χρωματοθερμοκρασιακή του αντίδραση. Συγκεκριμένα για τους δικούς μας TLCs η ονομασία ήταν “ R25C15W ” και σημαίνει ότι η θερμοκρασία γεγονότων είναι 25 °C (δηλαδή η θερμοκρασία στην οποία ο κρύσταλλος χρωματίζεται κόκκινος (red) R25C), ενώ η θερμοκρασία στην οποία ο κρύσταλλος χρωματίζεται μπλε είναι 15 °C πάνω από τη θερμοκρασία γεγονότων (15W (width)) και παρέχει το δοσμένο από την κατασκευαστική εταιρία ενεργό εύρος ζώνης. Η ονομασία αυτή βοηθά στην επιλογή των κατάλληλων TLCs για την εκάστοτε εφαρμογή, ωστόσο η εταιρία έχει τη δυνατότητα κατασκευής ΥΚ με επιθυμητές προδιαγραφές.

1.5 Ιδιότητες των ΥΚ που αξιοποιούνται στις τεχνολογικές τους εφαρμογές

Στις τεχνολογικές εφαρμογές των υγρών κρυστάλλων αξιοποιούνται ηλεκτρικές και οπτικές ιδιότητές τους. Οι ιδιότητες αυτές συνοψίζονται στα εξής:

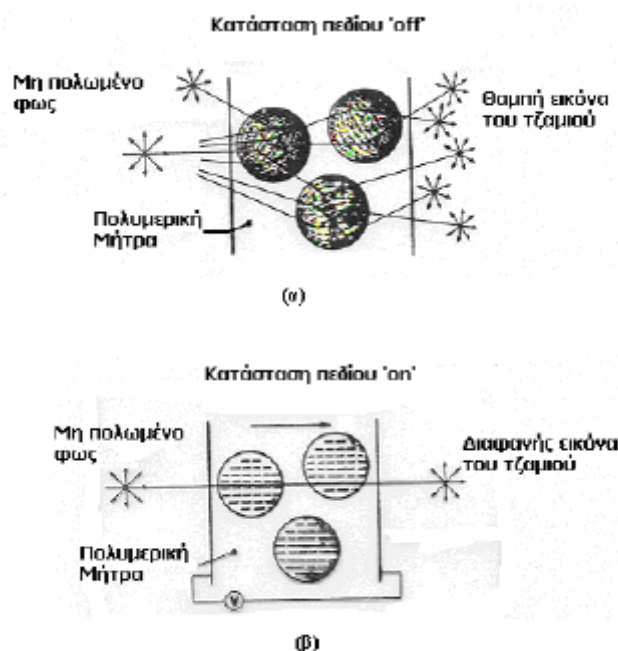
- Με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου είναι δυνατό να αναπροσανατολίζεται ο κατευθυντής των νηματικών ΥΚ. Η αναστροφή του πεδίου δεν αλλάζει τον προσανατολισμό (*απολική ευθυγράμμιση* του κατευθυντή στο ηλεκτρικό πεδίο).
- Σε κατάλληλες διατάξεις, η παραμόρφωση της κατανομής του κατευθυντή που προκαλείται από την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου στο δείγμα του ΥΚ είναι ελαστική. Έτσι, μετά την άρση του ηλεκτρικού πεδίου το δείγμα επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση.
- Με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου είναι δυνατό να αναπροσανατολίζεται το διάνυσμα αυθόρμητης πόλωσης, και μέσω αυτού ο κατευθυντής των χειρόμορφων σημηκτικών C. Η αναστροφή του πεδίου αναστρέφει τον προσανατολισμό της πόλωσης (*πολική ευθυγράμμιση*).
- Λόγω της χαμηλής αγωγιμότητας που επιτυγχάνεται στους ΥΚ, η εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου συνοδεύεται από χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.
- Οι νηματικοί ΥΚ είναι *διπλοθλαστικοί*. Ο δείκτης διάθλασης έχει διαφορετική τιμή όταν η πόλωση του φωτός είναι κατά μήκος του κατευθυντή ($n_{//}$) από ότι όταν είναι κάθετη σ’ αυτόν (n_{\perp}). Επίπεδα πολωμένη ακτίνα που διαδίδεται κατά μήκος του κατευθυντή “ βλέπει ” μόνο την τιμή n_{\perp} του δείκτη διάθλασης ενώ όταν διαδίδεται κάθετα σ’ αυτόν “ βλέπει ” και τις δύο τιμές με συνέπεια να είναι δυνατή η στροφή του επιπέδου πόλωσής της κατά την έξοδο από τον ΥΚ.
- Οι χειρόμορφοι, νηματικοί ή σημηκτικοί, ΥΚ είναι οπτικά ενεργοί. Η διάδοση ακτίνας κατά μήκος του άξονα της έλικας συνοδεύεται από συνεχή στρέψη του επιπέδου της πόλωσης.

1.6 Τεχνολογικές εφαρμογές των ΥΚ

1.6.1 Υαλοπίνακες ηλεκτρικά ρυθμιζόμενης διαφάνειας

Οι υαλοπίνακες ηλεκτρικά ρυθμιζόμενης διαφάνειας είναι υαλοπίνακες των οποίων η διαφάνεια ρυθμίζεται με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν

είτε μεμονωμένα, σε παράθυρα, είτε ως ψηφίδες, σε μεγάλους πίνακες προβολής δεδομένων (display panels). Πρόκειται για σταγονίδια (διάμετρος της τάξης $1 \mu\text{m}$) νηματικού ΥΚ διασπαρμένα σε μήτρα διαφανούς πολυμερούς (polymer dispersed liquid crystals). Όταν δεν εφαρμόζεται εξωτερικό πεδίο οι προσανατολισμοί των κατευθυντών στα σταγονίδια καθορίζονται από την αλληλεπίδραση του ΥΚ με την επιφάνεια του πολυμερούς που τον περικλείει και δεν υπάρχει συσχέτιση κατευθυντών που ανήκουν σε διαφορετικά σταγονίδια (σχήμα 15 (α)). Έτσι, μία ακτίνα που διασχίζει τον υαλοπίνακα συναντά πολλές απότομες μεταβολές του δείκτη διάθλασης, υφίσταται πολλές σκεδάσεις και χάνει κάθε συσχέτιση με την αρχική της διεύθυνση. Στη κατάσταση αυτή ο υαλοπίνακας εμφανίζεται θολός (ημιδιαφανής κατάσταση). Με την εφαρμογή του πεδίου κάθετα στη επιφάνεια του υαλοπίνακα οι κατευθυντές στα διάφορα σταγονίδια τείνουν στην κοινή διεύθυνση που επιβάλλει το πεδίο (σχήμα 15 (β)) και συνεπώς μία ακτίνα που διασχίζει κάθετα τον υαλοπίνακα συναντά πρακτικά μία, σταθερή, τιμή του δείκτη διάθλασης και γι' αυτό δεν υφίσταται σημαντικές σκεδάσεις. Στην κατάσταση αυτή ο υαλοπίνακας είναι διαφανής.

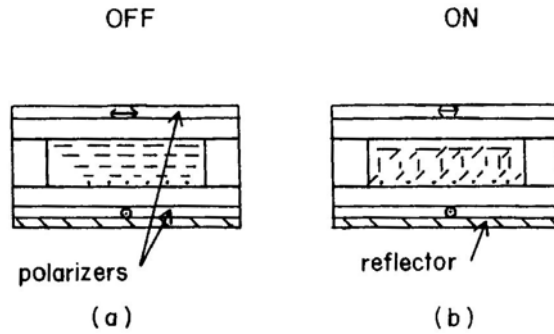


Εικόνα 1.19: Λειτουργία υαλοπίνακα ελεγχόμενης διαφάνειας. Σταγονίδια με κατευθυντές: α) με διαφορετικές διευθύνσεις, β) με κοινή διεύθυνση

1.6.2 Υγροκρυσταλλικά συστήματα προβολής δεδομένων

Τα υγροκρυσταλλικά συστήματα προβολής δεδομένων (Liquid Crystal Displays) είναι η πιο κοινή βιομηχανική εφαρμογή των υγρών κρυστάλλων. Οι οθόνες των διάφορων συσκευών που απαντώνται στην καθημερινή μας ζωή είναι LCDs και αποτελούνται από συστοιχίες κυψελίδων ή “ ψηφίδων ” (pixels) που περιέχουν ΥΚ. Ο προσανατολισμός του ΥΚ σε κάθε ψηφίδα, και συνεπώς η δυνατότητα διέλευσης φωτός από αυτή, ελέγχεται με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου, έτσι ώστε η συστοιχία των ψηφίδων να σχηματίζει την επιθυμητή εικόνα. Το πιο διαδεδομένο είδος κυψελίδας είναι η “ *κυψελίδα νηματικού ΥΚ υπό στρέψη* ” (twisted nematic cell). Η λειτουργία της βασίζεται στο ότι είναι δυνατή η διέλευση του φωτός από διασταυρωμένους πολωτές αν παρεμβληθεί μεταξύ τους νηματικό στρώμα κατάλληλου πάχους και σε προσανατολισμό τέτοιο ώστε ο κατευθυντής, στρίβοντας συνεχώς από το ένα άκρο του στρώματος ως το άλλο, να συμπίπτει στα άκρα του στρώματος με την διεύθυνση

πόλωσης που ορίζουν οι δυο πολωτές. Με τη εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης στην κυψελίδα ο καταυθυντής στη μεγαλύτερη έκταση του στρώματος γίνεται κάθετος στο επίπεδο του ανακλαστήρα και το φως δεν διέρχεται από τους διασταυρωμένους πολωτές αφού είναι πλέον αδύνατη η στροφή του επιπέδου πόλωσης του.



Εικόνα 1.20: Δομή κυψελίδας νηματικού ΥΚ υπό στρέψη: α) υπό την απουσία ηλεκτρικού πεδίου, β) με την παρουσία ηλεκτρικού πεδίου

Υπάρχουν πολλές παραλλαγές κυψελίδων με διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι δύο βασικότερες παραλλαγές κυψελίδων που εξακολουθούν να παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι: (α) οι *διχρωϊκές κυψελίδες* (Dichroic Dye LC Cells), οι οποίες βασίζουν τη λειτουργία τους στη διάλυση διχρωϊκών ουσιών σε νηματικούς ΥΚ και (β) οι *κυψελίδες σιδηροηλεκτρικών ΥΚ* που η λειτουργία τους στηρίζεται στη δυνατότητα άρσης της ελικοειδούς δομής λεπτών στρωμάτων SmC* ΥΚ.

Οι *συστοιχίες κυψελίδων ΥΚ* οι οποίες χρησιμοποιούνται στις τεχνολογικές εφαρμογές των ΥΚ είναι διαφόρων τύπων ανάλογα με το είδος των δεδομένων (ψηφία, εικόνες κ.λ.π.) που προβάλλουν.



Εικόνα 1.21: Τύποι συστοιχιών κυψελίδων ΥΚ

Οι κυψελίδες της συστοιχίας διεγείρονται και αποδιεγείρονται με την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης. Τα στοιχεία της απόκρισης των κυψελίδων που ενδιαφέρουν είναι κυρίως:

1. Η μεταβολή της σχετικής φωτεινότητας (ποσοστό διερχόμενης έντασης φωτός σε σχέση με την προσπίπτουσα ένταση) της κυψελίδας με την εφαρμοζόμενη τάση. Το πόσο απότομα είναι επιθυμητό να ανεβαίνει η φωτεινότητα με την αύξηση της τάσης καθορίζεται από το εάν η κυψελίδα προορίζεται για εφαρμογή που θα έχει μόνο φωτεινή - σκοτεινή κατάσταση ή αν ενδιαφέρει να υπάρχουν και διαβαθμίσεις (“ γκριζες σκάλες ”)

2. Η εξάρτηση της σχετικής φωτεινότητας από τον χρόνο που έπεται της εφαρμογής της ηλεκτρικής τάσης (πόσο γρήγορα “ ανάβει “ η κυψελίδα) και από τον χρόνο που έπεται της άρσης της τάσης (πόσο γρήγορα “ σβήνει ”).

1.7 Βιολογικές εφαρμογές ΥΚ

Η κυτταρική μεμβράνη των ζώων είναι ένας φυσικός υγρός κρύσταλλος. Η δομή της συνίσταται σε μια διπλοστοιβάδα φωσφολιπιδίων. Εκατέρωθεν της διπλοστοιβάδας, αλλά και εμβαπτισμένες σε αυτήν ευρίσκονται πρωτεΐνες.



Εικόνα 1.22: Μικροσκοπική δομή κυτταρικής μεμβράνης

Η συνύπαρξη μοριακής τάξης και ρευστότητας που χαρακτηρίζει τους ΥΚ, προσδίδει στην κυτταρική μεμβράνη την απαιτούμενη μηχανική ευστάθεια και διαπερατότητα για να μπορεί να λειτουργεί ως κατάλληλο περίβλημα των περιεχομένων του κυττάρου αλλά παρέχει και την δυνατότητα γρήγορων μοριακών κινήσεων ώστε να συντελούνται με την απαιτούμενη ταχύτητα οι φυσικο - χημικές διεργασίες που συνιστούν την αλληλεπίδραση του κυττάρου με το περιβάλλον του. Η συγκεκριμένη δόμηση της μεμβράνης καθορίζεται από τα γενικά χαρακτηριστικά της μοριακής δομής των φωσφολιπιδίων. Η δομή της πολικής κεφαλής καθορίζει τις χημικές διεργασίες που συντελούνται στις επιφάνειες της μεμβράνης. Το μήκος των ουρών και η ευκαμψία τους, μεταξύ άλλων, ρυθμίζουν και τα θερμοκρασιακά όρια της υγροκρυσταλλικής κατάστασης της μεμβράνης. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η μεμβράνη μεταπίπτει από την υγροκρυσταλλική φάση στην φάση πηκτώματος (gel phase) στην οποία η ευκαμψία των ουρών χάνεται και οι πολικές κεφαλές διατάσσονται σε εξαγωνικό πλέγμα με αποτέλεσμα η μεμβράνη να περιορίζει δραστικά την αλληλεπίδραση του εσωτερικού του κυττάρου με το περιβάλλον του. Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία λειτουργίας των κυττάρων στους ζώντες οργανισμούς είναι ελαφρώς ανώτερη (1 – 2 °C) της θερμοκρασίας μετάβασης από την υγροκρυσταλλική φάση στην φάση πηκτώματος. Η θερμοκρασία μετάβασης γενικώς εξαρτάται και από την πίεση. Έτσι λοιπόν, το μήκος των ουρών ενός φωσφολιπιδίου φαίνεται να σχετίζεται άμεσα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης υπό τις οποίες ζει ένας οργανισμός.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

- Ενδοστεφανιαία θερμογραφία

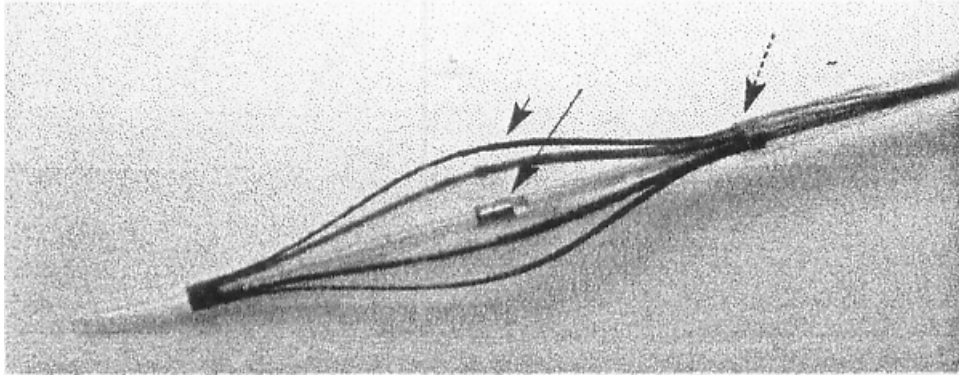
Axel Schmermund, Joerg Rodermann, Raimund Erbel (Herz 28: 505 - 512, 2003)

Η αρτηριοσκληρυνση είναι φλεγμονώδης νόσος. Φλεγμονώδεις διαδικασίες παίζουν ρόλο τόσο στην έναρξη ανάπτυξης της πλάκας και τα πρώιμα στάδια της νόσου όσο και στις σύνθετες πλάκες και τις επιπλοκές, όπως η ενδαρτηριακή θρόμβωση. Όπου υπάρχει φλεγμονή παράγεται τοπικά θερμότητα. Στις στεφανιαίες αρτηρίες η ενεργοποίηση φλεγμονωδών κυττάρων (μακροφάγων) είναι κρίσιμη διαδικασία, γιατί περιοχές με συσσώρευσή τους παρουσιάζουν αυξημένη παραγωγή θερμότητας. Η θερμική ετερογένεια είναι υπαρκτή στις αρτηριοσκληρυντικές πλάκες και η αύξησή της σχετίζεται με δυσμενή μακροπρόθεσμη πρόγνωση για τους ασθενείς. Η ενδοστεφανιαία θερμογραφία επιτρέπει την ανίχνευση της θερμικής ετερογένειας και της θερμότητος που σχετίζονται με τη φλεγμονώδη κυτταρική αντίδραση.

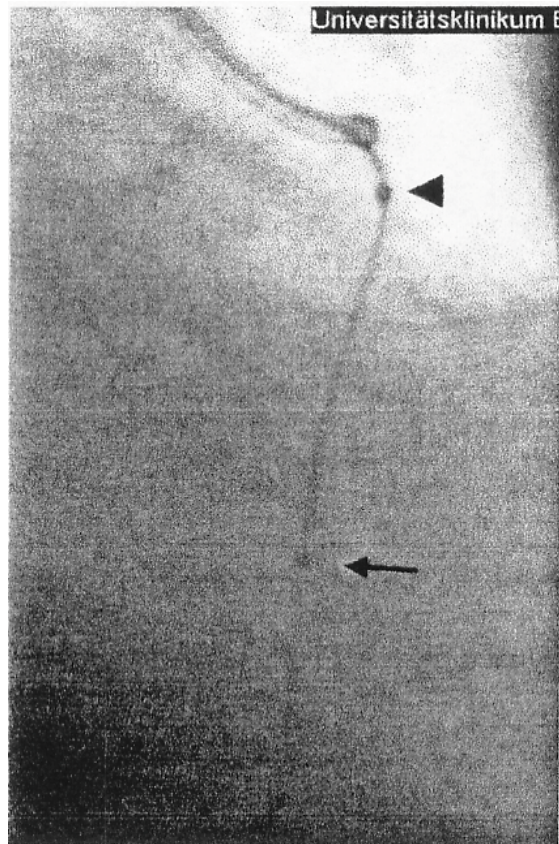
Πρώτοι ο Cascells και οι συνεργάτες του το 1996 μέτρησαν με χρήση θερμίστορα τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του έσω χιτώνα σε δείγματα καρωτιδικής ενδαρτηρεκτομής. Άλλοι επιστήμονες στη συνέχεια μελέτησαν με παρόμοιο τρόπο, in vivo τώρα, τη θερμική ετερογένεια σε αγγεία ζώων. Το 1999 ο κ. Στεφανιάδης και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν τεχνική καθετηριασμού για τη μέτρηση της θερμοκρασίας σε ανθρώπινες αρτηρίες, in vivo, με τη χρήση θερμίστορα. Ο θερμίστορας προσαρμόστηκε στο άπω άκρο ενός συστήματος καθετήρα, επιτρέποντας την εισαγωγή στη στεφανιαία αρτηρία πάνω σε σύρμα οδηγό, ενώ στην αντίθετη από το θερμίστορα άκρη ένα έλασμα εξασφάλισε την επαφή του θερμίστορα με το τοίχωμα του αγγείου.

Ένα νέο σύστημα θερμογραφίας σχεδιασμένο να δείξει τη θερμοκρασία του αγγειακού τοιχώματος και του αίματος χρησιμοποιήθηκε στις ΗΠΑ. Ο καθετήρας έχει ένα αυτο - εκπτυσσόμενο καλάθι με πέντε βραχίονες νιτινόλης στο άπω άκρο του (εικόνα 2.1). Το αυτο - εκπτυσσόμενο καλάθι έχει ένα θερμοζεύγος σε κάθε του βραχίονα καθώς και ένα κεντρικό θερμοζεύγος. Ο καθετήρας έχει ακτινοσκοπικούς δείκτες στο άπω άκρο του καλύμματος (θηκαριού) και στον αυλό του σύρματος – οδηγού που προσεγγίζουν την περιοχή των θερμοζευγών του καλαθιού, ώστε να είναι ακτινοσκοπικά ορατός και να μπορεί να προσανατολίζεται εντός του αυλού του αγγείου (εικόνα 2.2). Ένα κουμπί που συνδέεται με τον καθετήρα χρησιμεύει για να ολισθαίνει το κάλυμμα πίσω και μπροστά πάνω στο καλάθι ώστε αυτό με τη σειρά του να ανοίγει και να κλείνει εντός του αγγείου. Ένα αυτοματοποιημένο σύστημα έλξης προς τα πίσω εκτιμά τη θερμοκρασία και μέσω του υπολογιστή δημιουργείται ένας θερμικός χάρτης (εικόνα 2.3).

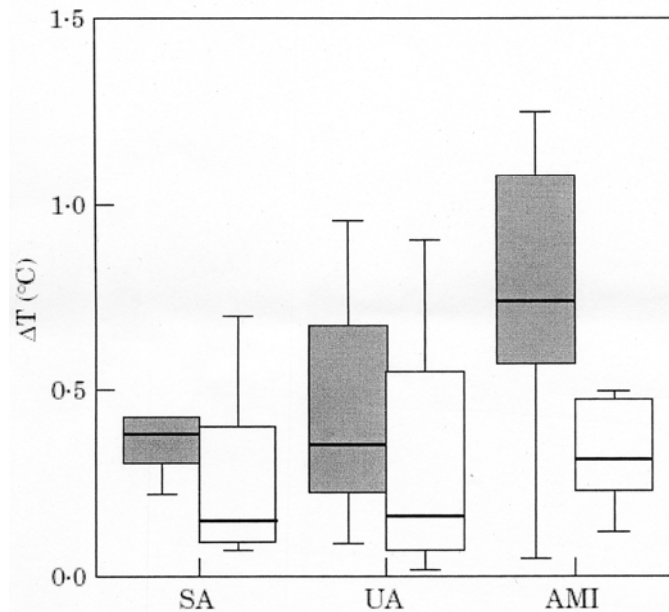
Από τη σύγκριση των περιμετρικών θερμοζευγών με το κεντρικό καθορίστηκαν οι εστιακές αυξήσεις της θερμοκρασίας. Εστιακή θερμική ετερογένεια διαπιστώθηκε σε ασθενείς με στηθάγχη και ήταν σε όλες τις περιπτώσεις στη θέση της υπεύθυνης βλάβης (εικόνα 2.3). Η κλινική παρακολούθηση ασθενών με στεφανιαία νόσο, οι οποίοι είχαν υποβληθεί σε ενδοστεφανιαία θερμογραφία, απέδειξε ότι η διαφορά θερμοκρασίας ήταν ισχυρός προβλεπτικός παράγοντας δυσμενών καρδιακών συμβαμάτων στο διάστημα παρακολούθησης (18 μήνες).



Εικόνα 2.1: Ανοικτό αυτο – εκπτυσσόμενο καλάθι: α) κεφαλή βέλους – θερμοζεύγος σε περιμετρικό βραχίονα, β) βέλος - κεντρικό θερμοζεύγος, γ) διακεκομμένο βέλος - θηκάρι

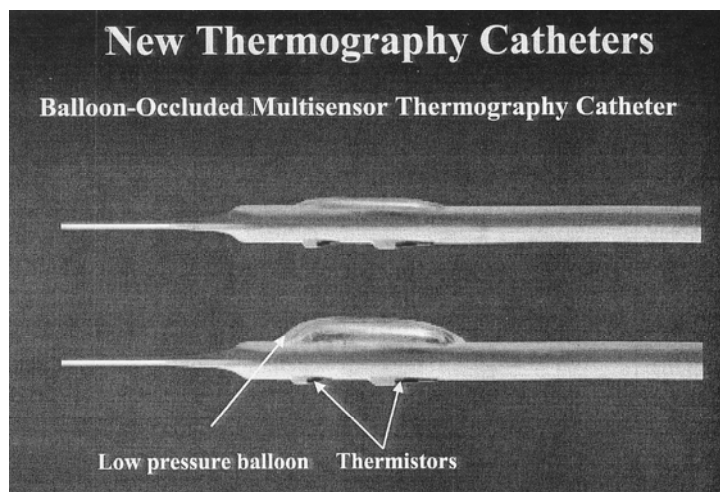


Εικόνα 2.2: Δεξιά στεφανιαία αρτηρία με ακτινοσκοπικούς δείκτες: α) κεφαλή βέλους – άπω άκρο θηκαριού, β) βέλος – ανοικτό καλάθι



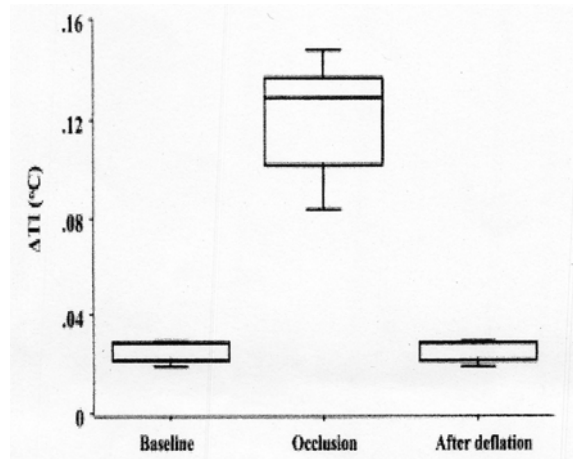
Εικόνα 2.4: Διακυμάνσεις της διαφοράς θερμοκρασίας (η οριζόντια παχιά γραμμή αντιπροσωπεύει τη διάμεση τιμή τους) μεταξύ αθηρωματικής πλάκας και υγιούς παρακείμενου αγγειακού τοιχώματος σε ασθενείς με χορήγηση αντιχοληστερινικών φαρμάκων (λευκό) και χωρίς χορήγηση αυτών (γκρι) σε σταθερή στηθάγχη (SA), ασταθή στηθάγχη (UA) και οξύ έμφραγμα του μυοκαρδίου (AMI)

Ενώ η αναγνώριση των θερμών πλακών έχει κλινική σημασία ιδιαίτερα μετά από φαρμακευτική αγωγή ή επεμβατική παρέμβαση, η θερμοκρασία που εκλύει μια σταθερή πλάκα υποεκτιμάται λόγω της επίδρασης της αιματικής ροής. Με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης της αιματικής ροής στη θερμοκρασία των αθηρωματικών πλακών σχεδιάστηκαν ειδικοί καθετήρες θερμομέτρησης 3F με μπαλόνι αγγειοπλαστικής στο ύψος του θερμίστορα, το οποίο με την έκπτυξή του διακόπτει την αιματική ροή στο σημείο μέτρησης της θερμοκρασίας.



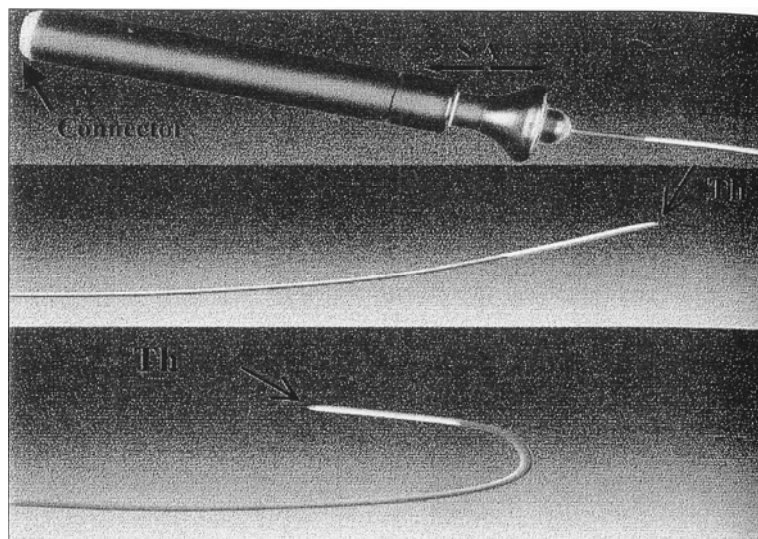
Εικόνα 2.5: Θερμογραφικός καθετήρας με θερμίστορα και μπαλόνι σε έκπτυξη και μη

Σε 18 ασθενείς με στεφανιαία νόσο ευρέθη ότι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αθηρωματικής πλάκας και υγιούς παρακείμενου αγγειακού τοιχώματος ήταν μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια της απόφραξης της αιματικής ροής στο αγγείο. Ιδιαίτερα σε 7 ασθενείς που δεν παρατηρήθηκε διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αθηρωματικής πλάκας και αρτηριακού τοιχώματος, με την έκπτυξη του μπαλονιού αναδείχθηκε σημαντική διαφορά.



Εικόνα 2.6: Διακυμάνσεις της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ αθηρώματος και παρακείμενου υγιούς αρτηριακού τοιχώματος αρχικά, μετά τον αποκλεισμό της αιματικής ροής και μετά την άρση της έκπτυξης

Η μελέτη αυτή ανέδειξε ότι η θερμική ετερογένεια των σταθερών πλακών συχνά υποεκτιμάται καθότι η αιματική ροή μειώνει τη θερμότητα της αθηρωματικής πλάκας καθώς τη μεταδίδει στο υπόλοιπο αγγειακό δίκτυο. Τα τελευταία χρόνια η Πανεπιστημιακή Καρδιολογική Κλινική προκειμένου να ανιχνεύσει την υποκλινική στεφανιαία νόσο σχεδίασε έναν ειδικό πηδαλιούχο καθετήρα με θερμίστορα στο άπω άκρο του, που μετρά τη θερμοκρασία του στεφανιαίου κόλπου και τη συγκρίνει με αυτή του δεξιού κόλπου. Τα μέχρι τώρα ευρήματα της μελέτης σε πληθυσμό στεφανιαίων ασθενών δείχνουν ότι η αυξημένη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ στεφανιαίου και δεξιού κόλπου μπορεί να ανιχνεύσει την παρουσία στεφανιαίας νόσου στο δίκτυο της αριστεράς στεφανιαίας αρτηρίας.



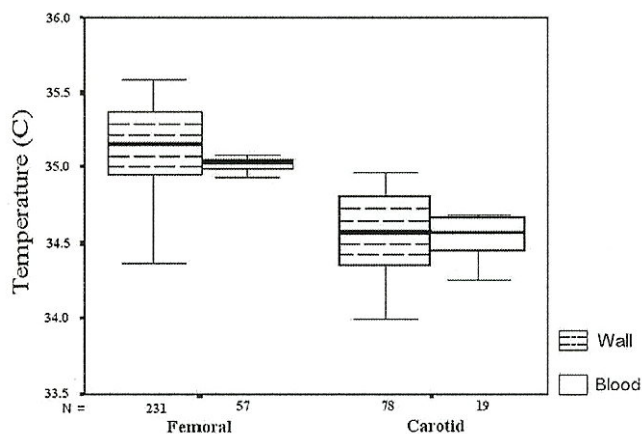
Εικόνα 2.7: Πηδαλιούχος καθετήρας

- Ενδοστεφανιαία θερμογραφία για τη διάγνωση ευάλωτων πλακών υψηλού κινδύνου

Mohammad Madjid, James T. Willerson, S. Ward Casscells (Journal of the American College of Cardiology 47: C 80 – 85, 2006)

Η αθηρωμάτωση είναι φλεγμονώδης νόσος. Οι αθηρωματικές πλάκες είναι θερμές και η επιφανειακή τους θερμοκρασία συσχετίζεται με ένα αυξημένο αριθμό μακροφάγων και μειωμένο πάχος ινώδους κάψας. Οι πιθανοί λόγοι γι' αυτήν την αυξημένη παραγωγή θερμότητας είναι: α) ο υψηλός ρυθμός μεταβολισμού (τα μακροφάγα είναι κύτταρα με υψηλό μεταβολισμό και υψηλό ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας), β) η αναποτελεσματική θερμογένεση (οι αθηρωματικές πλάκες είναι ισχαιμικές και η έλλειψη του οξυγόνου οδηγεί σε αναποτελεσματικό μεταβολισμό των θρεπτικών συστατικών και μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας υπό τη μορφή θερμότητας αντί για παραγωγή ATP), γ) η αυξημένη νεοαγγειογένεση (υπάρχει υψηλός ρυθμός νεοαγγειογένεσης σε ευπαθείς πλάκες, γεγονός που αυξάνει τη ροή αίματος μέσα σ' αυτές οδηγώντας σε υψηλότερη θερμοκρασία) και δ) οι λοιμώξεις (η πιθανή τοπική λοίμωξη και η επικείμενη φλεγμονή συνεισφέρουν στην παραγωγή θερμότητας στην πλάκα).

Ο Naghavi και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν ένα καθετήρα επαφής “ thermo – basket ” για in vivo μετρήσεις σε ζώα. Είναι ένας καθετήρας βασισμένος στη λογική του θερμοζεύγους, εξοπλισμένος με τέσσερα μικρά εύκαμπτα σύρματα με ενσωματωμένα θερμοζεύγη και ένα θερμικό αισθητήρα στο κεντρικό του σύρμα για ταυτόχρονη μέτρηση της θερμοκρασίας του αίματος. Η συσκευή έχει ακρίβεια 0,02 °C με ρυθμό δειγματοληψίας 20 τιμές θερμοκρασίας ανά sec.



Εικόνα 2.8: Υψηλότερη απόλυτη θερμοκρασία και θερμοκρασιακή ανομοιογένεια των αθηρωματικών μηριαίων αρτηριών σκύλων, σε σύγκριση με τις καρωτίδες τους που ήταν υγιείς

Ο Στεφανάδης και οι συνεργάτες του πραγματοποίησαν την πρώτη ανθρώπινη ενδοστεφανιαία θερμογραφική μελέτη το 1999. Χρησιμοποίησαν ένα μεγάλο μονοκαναλικό καθετήρα τύπου θερμίστορ, ο οποίος σχεδόν έφρασσε τον αρτηριακό αυλό, μειώνοντας τη διαχυτική θερμική επίδραση της ροής του αίματος.

Ο Schmermund και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν ένα μη αποφρακτικό θερμογραφικό καθετήρα. Αυτό το σύστημα έχει ένα αυτοεκπτυσσόμενο καλάθι με πέντε βραχίονες από νιτινόλη στο άπω άκρο του, με ένα θερμοζεύγος σε κάθε βραχίονα και άλλο ένα στο κεντρικό σύρμα επιτρέποντας τη, σε πραγματικό χρόνο, θερμοκή χαρτογράφηση της διατομής του αρτηριακού τοιχώματος. Η εστιακή υψηλή θερμοκρασία καθορίστηκε συγκρίνοντας τη

θερμοκρασία μεταξύ των θερμοζευγών του αρτηριακού τοιχώματος με το κεντρικό θερμοζεύγος.

Ο Wainstein και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν ένα διαφορετικό θερμογραφικό καθετήρα “ Thermocoil Guidewire “. Αυτό το σύρμα – οδηγός έχει ένα αισθητήρα θερμοκρασίας στο άπω άκρο του και συνίσταται από ένα σύρμα διαμέτρου 0,014 in με μία υπό γωνία ακμή που περιστρέφεται στα 0,5 Hz με ρυθμό οπίσθιας σάρωσης 0,05 mm / s, εγγράφοντας μίαν έλικα στον αυλό.

Η θερμοκρασιακή διαφορά ΔT έχει αντιστρόφως ανάλογη συσχέτιση με τη ροή του αίματος κατά τη διάρκεια της θερμικής χαρτογράφησης. Η παρουσία ροής αίματος οδήγησε σε σημαντική μείωση της ΔT_{max} μεταξύ νοσούντων και μη τμημάτων.

Αντιχοληστερινικά φάρμακα (στατίνες) έχουν αντιφλεγμονώδη δράση και μπορούν να μειώσουν τον αριθμό των μακροφάγων, αυξάνοντας το περιεχόμενο κολλαγόνου της αθηρωματικής πλάκας, στεροποιώντας έτσι την πλάκα.

Η ΔT είναι ένας ισχυρός προγνωστικός δείκτης δυσμενών καρδιακών συμβαμάτων. Το όριο της ΔT , πάνω από το οποίο ο κίνδυνος δυσμενούς καρδιακού επεισοδίου ήταν σημαντικά αυξημένος, ήταν 0,5 °C.

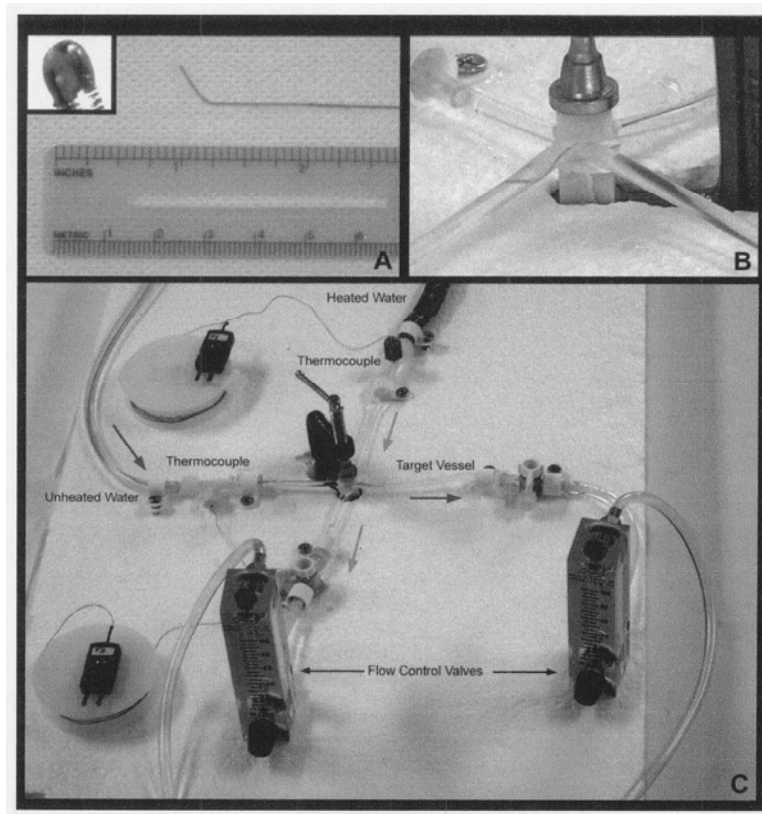
Η θερμογραφία είναι μία μέθοδος λειτουργικής απεικόνισης αθηρωματικών πλακών με δυναμική για ανίχνευση ευπαθών πλακών και αναγνώριση ευπαθών ασθενών. Πολλοί θερμογραφικοί καθετήρες μελετώνται στις μέρες μας σε κλινικές δοκιμές στις ΗΠΑ, στην Ευρώπη και την Ωκεανία. Οι ευπαθείς πλάκες έχουν πολλαπλά χαρακτηριστικά και ένας συνδυασμός θερμογραφίας με ανατομικές μεθόδους απεικόνισης, όπως ενδοαγγειακός υπέρηχος (IVUS), ελαστογραφία και οπτική τομογραφία, μπορεί να είναι η καλύτερη προσέγγιση στη διάγνωσή τους.

- Επικύρωση θερμογραφικού οδηγού για ενδοαυλική χαρτογράφηση της αθηροσκληρωτικής νόσου: in vitro μελέτη

Brian K. Courtney, Mamoo Nakamura, Ross Tsugita, Rick Lilly, Rachna Basisht, Eberhard Grube, Yasuhiro Honda, Paul G. Yock, Peter J. Fitzgerald (Catheterization and Cardiovascular Interventions 62: 221-229, 2004)

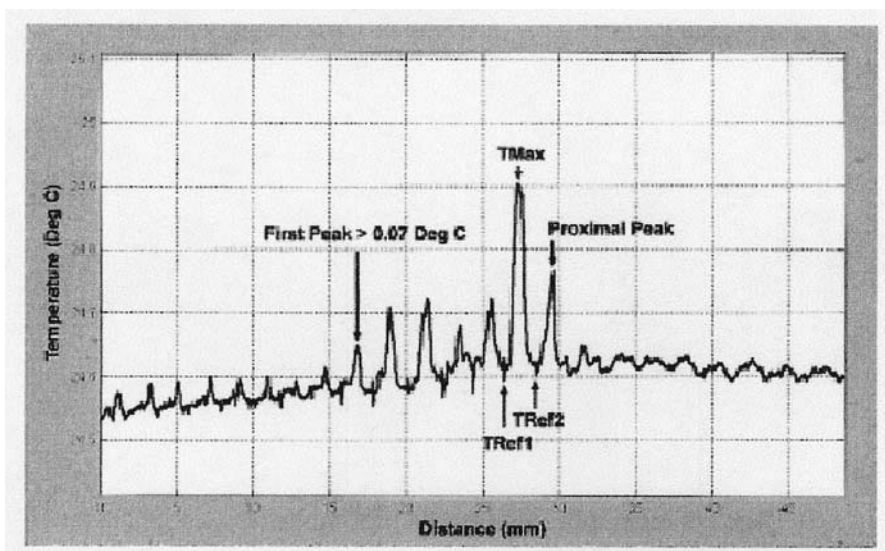
Η ρήξη ενεργών αθηροσκληρωτικών πλακών γνωστές ως “ ευπαθείς πλάκες ” θεωρείται κύρια αιτία των οξέων στεφανιαίων συνδρόμων. Αυτές οι πλάκες αποτελούνται από μεγάλες εναποθέσεις λιπιδίων, φλεγμονώδη κύτταρα, λείες μυϊκές ίνες και κυτταρικά συγκρίμματα, όλα εγκλωβισμένα μέσα σε μία λεπτή ινώδη κάψα. Αυτή η κάψα μπορεί να διαβρωθεί ή να ραγεί οξέως, εκθέτοντας τα θρομβογόνα συστατικά της πλάκας στο αίμα, πυροδοτώντας τον καταρράκτη της πήξης με αποτέλεσμα οξεία στεφανιαία θρόμβωση και πληθώρα άλλων νόσων. Ωστόσο αυτές οι πλάκες μόνο λίγες φορές σχετίζονται με στένωση του αυλού στα στάδια που προηγούνται της ρήξης και δεν μπορούν να ανιχνευτούν με τις συνήθεις τεχνικές απεικόνισης, όπως η αγγειογραφία. Περαιτέρω, ακόμα και σε ασθενείς με σοβαρή νόσο, αυτοί που παρουσιάζονται με οξύ στεφανιαίο επεισόδιο έχουν υψηλότερο μελλοντικό κίνδυνο δυσμενών καρδιακών συμβαμάτων ακόμα και μετά από επιτυχή επαναγγείωση στενωμένου αγγείου. Επομένως, η ανίχνευση στεφανιαίων βλαβών με χαρακτηρές ευπαθούς πλάκας είναι κρίσιμης σημασίας στην αποτελεσματική θεραπεία της στεφανιαίας νόσου. Προηγούμενες ex vivo μελέτες έδειξαν ότι οι εντοπισμένες φλεγμονώδεις αντιδράσεις που σχετίζονται με το σχηματισμό βιολογικά ενεργών πλακών προκαλεί ετερογένεια θερμοκρασίας κατά μήκος της επιφάνειας του αγγειακού τοιχώματος.

Για την ανίχνευση αυτής της ετερογένειας αναπτύχθηκε, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί in vivo, ένα σύστημα θερμογράφησης βάσει σύρματος - οδηγού. Προκειμένου να ελεγχθεί η απόδοση του θερμογραφικού αυτού συστήματος κατασκευάστηκε ένα μοντέλο δύο σιλικονούχων σωλήνων με λεπτά τοιχώματα οι οποίοι είναι έτσι προσανατολισμένοι μεταξύ τους ώστε να σχηματίζουν σταυρό (επίκαθημένος ο ένας επί του άλλου) και να προκαλείται στον άνω σωλήνα ελαφρά στένωση. Το πάχος του τοιχώματος και η διάμετρος των σωλήνων αυτών είναι της τάξης των αντίστοιχων διαστάσεων μιας τυπικής στεφανιαίας αρτηρίας. Στο σημείο της διασταύρωσης υπάρχει σφιγκτήρας που εξασφαλίζει την αποφυγή απωλειών θερμότητας. Στον ένα σωλήνα ρέει νερό θερμοκρασίας δωματίου, ενώ στον άλλο νερό ίσης ή υψηλότερης θερμοκρασίας. Στον πρώτο σωλήνα διέρχεται σύρμα – οδηγός που από το άνω άκρο του προεξέχει θερμοζεύγος. Το θερμοευαίσθητο άνω άκρο του θερμοζεύγους έχει καμφθεί έτσι ώστε να έρχεται σε επαφή με το τοίχωμα του σωλήνα και με τη βοήθεια του σύρματος – οδηγού εισέρχεται στο σωλήνα 20 – 30 mm κάτω από το σημείο της διασταύρωσης. Το εγγύς άκρο του θερμοστοιχείου συνδέεται με μοτέρ που περιλαμβάνει σύστημα υποχώρησης. Με τη βοήθεια του μοτέρ το θερμοστοιχείο πραγματοποιεί σύνθετη κίνηση, δηλαδή συνδυασμό περιστροφικής κίνησης και κίνησης υποχώρησης (ευθύγραμμη γραμμική). Οι ταχύτητες περιστροφής και απόσυρσης του θερμοστοιχείου είναι σταθερές. Λόγω της σύνθετης κίνησης του θερμοστοιχείου το κεκαμμένο άκρο του διαγράφει ελικοειδή πορεία κατά μήκος του τοιχώματος του σωλήνα – αγγείου. Το σημείο της διασταύρωσης λόγω της προαναφερθείσας στένωσης του άνω σωλήνα και της τοπικής μεταφοράς θερμότητας, από το θερμαινόμενο στο μη θερμαινόμενο σωλήνα, αποτελεί μια αξιόπιστη προσομοίωση έκκεντρης αγγειακής βλάβης. Η μέτρηση της θερμοκρασίας του σωλήνα στο πείραμα γίνεται κατά τη διάρκεια της υποχώρησης. Σε κάθε σωλήνα, σε σημείο προ της διασταύρωσης είναι συνδεδεμένο ένα επιπλέον θερμοστοιχείο. Τα θερμοστοιχεία αυτά επιβεβαιώνουν την επιθυμητή διαφορά θερμοκρασίας του νερού των δύο σωλήνων προ του σημείου διασταύρωσής τους. Μετά το σημείο αυτό, και στους δύο σωλήνες, έχουν συνδεθεί βαλβίδες ελέγχου της ροής. Η ροή στο θερμαινόμενο σωλήνα έχει σταθερή τιμή καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, ενώ η ροή στο μη θερμαινόμενο λαμβάνει τις τιμές 0,25 - 0,50 – 0,75 και 1 cc / s. Η θερμοκρασία του νερού στο θερμαινόμενο σωλήνα ρυθμίζεται έτσι ώστε να έχει 0, 2, 4 ή 6 °C διαφορά με το νερό θερμοκρασίας δωματίου. Από τα παραπάνω αντιλαμβανόμαστε ότι προκύπτουν 16 διαφορετικοί συνδυασμοί θερμοκρασίας – ροής για τη λήψη δεδομένων. Η λήψη δεδομένων έγινε συνολικά 48 φορές, αφού το πείραμα επαναλήφθηκε σε τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους και για τους 16 συνδυασμούς. Τα δεδομένα καταγράφονται με τη βοήθεια Η / Υ.



Εικόνα 2.9: Μοντέλο για την επικύρωση της αξιόπιστης λειτουργίας συστήματος θερμογράφησης βάσει σύρματος - οδηγού

Για κάθε μία από τις 48 επαναλήψεις του πειράματος συλλέγονται τιμές της θερμοκρασίας του τοιχώματος του σωλήνα που καταγράφει (με συγκεκριμένη συχνότητα) το κεκαμμένο άκρο του θερμοστοιχείου κατά τη διάρκεια απόσυρσής του, οπότε και περνά πάνω από την υποτιθέμενη βλάβη. Με τη βοήθεια των δεδομένων αυτών κατασκευάζεται κάθε φορά διάγραμμα της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την απόσταση που διανύει το άκρο υποχωρώντας.



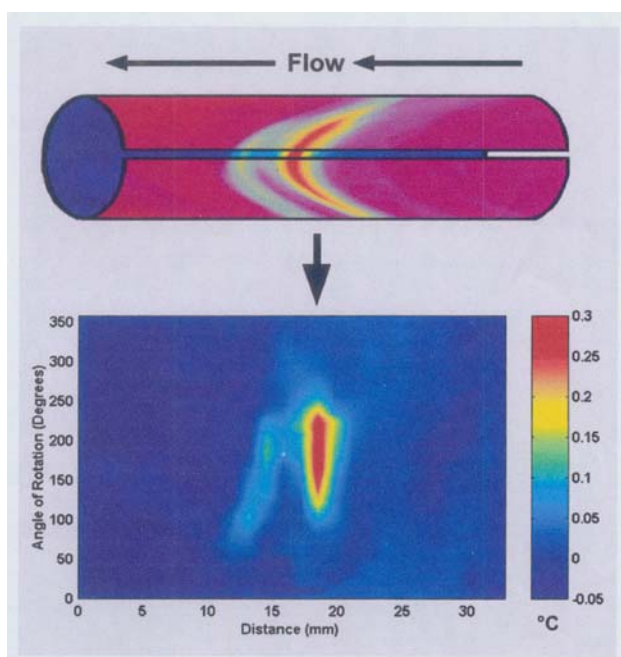
Εικόνα 2.10: Διάγραμμα θερμοκρασίας του αγγειακού τοιχώματος συναρτήσει της απόστασης που διανύει το θερμοζεύγος

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούνται κάποιες κορυφές (απότομες αυξομειώσεις της θερμοκρασίας) που δικαιολογούνται από την πορεία που διαγράφει το θερμοστοιχείο σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το αγγείο θερμαίνεται μόνο από κάτω (προσπάθεια προσομοίωσης με έκκεντρη και όχι συμμετρική βλάβη). Στο διάγραμμα επισημαίνεται η υψηλότερη κορυφή (μέγιστη θερμοκρασία τοιχώματος) T_{max} , η T_{ref1} που είναι η ελάχιστη θερμοκρασία πριν την έναρξη της υψηλότερης κορυφής και η T_{ref2} που είναι η ελάχιστη θερμοκρασία αμέσως μετά την υψηλότερη κορυφή. Το σχετικό ύψος της υψηλότερης κορυφής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\Delta T = T_{max} - (T_{ref1} + T_{ref2}) / 2 \quad (2.1)$$

Κατ' αναλογία υπολογίζονται και τα σχετικά ύψη των χαμηλότερων κορυφών. Επιπλέον στο διάγραμμα επισημαίνεται η εγγύτερη κορυφή καθώς αυτή σηματοδοτεί το εγγύτερο τμήμα της βλάβης. Η οξύτητα της κορυφής αυτής μας ενδιαφέρει και γι' αυτό χαρακτηρίζεται με ένα δείκτη που λαμβάνει τιμές από 0 - 3. Τα διαγράμματα αυτά είναι πολύ σημαντικά γιατί μπορούμε να υπολογίσουμε την έκταση της αθηρωματικής πλάκας πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των κορυφών με σχετικό ύψος της τάξης των 0,08 °C και άνω με το βήμα της ελικοειδούς πορείας που διαγράφει το θερμοστοιχείο. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται ακριβώς η θέση της βλάβης εντός του αγγείου καθώς γνωρίζουμε την έκτασή της και το εγγύτερο τμήμα της.

Εκτός από την 1D θερμογράφιση που περιγράψαμε, με τη βοήθεια του Matlab προκύπτει και 2D θερμογράφιση εισάγοντας σ' αυτό τις τιμές της θερμοκρασίας που καταγράφονται για μια συγκεκριμένη περίπτωση (από τις 16) αλλάζοντας κάθε φορά τη γωνία που σχηματίζει το κεκαμμένο άκρο του θερμοστοιχείου με το υπόλοιπο τμήμα του. Αλλάζοντας τη γωνία αυτή αλλάζει και η ελικοειδής πορεία του θερμοστοιχείου. “ Προσθέτοντας ” διαδοχικές ελικοειδείς πορείες προκύπτει ένας 2D θερμογραφικός χάρτης, όπου κάθε θερμοκρασιακό πεδίο έχει το δικό του χρώμα.



Εικόνα 2.11: 2D θερμογραφικός χάρτης αγγειακού τοιχώματος (τομή κατά μήκος του αγγείου)

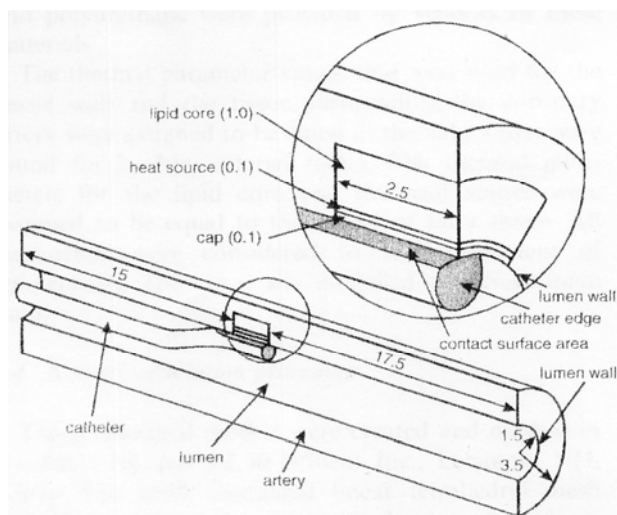
Ένα μειονέκτημα στη χρήση του θερμογραφικού συστήματος που περιγράψαμε, in vivo σε σχέση με in vitro, είναι η αδιαφάνεια του αίματος σε σχέση με το νερό και κατ' επέκταση η μη δυνατότητα παρατήρησης της ελικοειδούς κίνησης του θερμοστοιχείου. Τέλος, στο μοντέλο μας είχαμε σταθερή ροή και ο σωλήνας – αγγείο δεν υπέστη καμία μετακίνηση ως προς το σύρμα - οδηγό πράγμα το οποίο δε μπορεί να συμβεί in vivo, λόγω της συστολής των κοιλιών της καρδιάς.

- Επίδραση του σχεδιασμού του καθετήρα στην κατανομή της θερμοκρασίας αγγειακού τοιχώματος στην ενδοστεφανιαία θερμογραφία

Anna G. ten Have, Erasmus B. G. T. Draaijers, Frank J. H. Gijzen, Jolanda J. Wentzel, Cornelis J. Slager, Patrick W. Serruys, Antonius F. W. van der Steen (Journal of Biomechanics 40: 281 – 288, 2007)

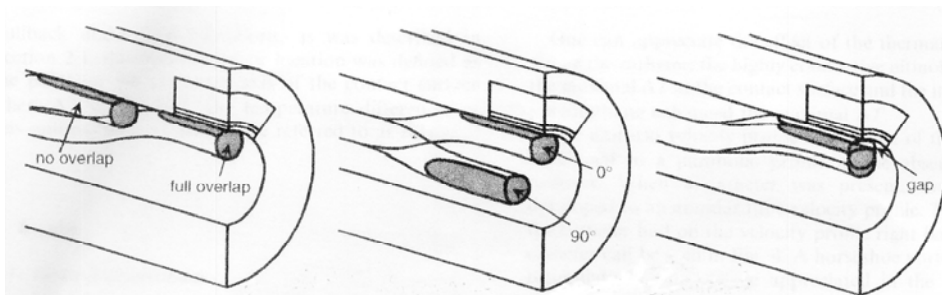
Η ενδοστεφανιαία θερμογραφία είναι μέθοδος ανίχνευσης των ευπαθών πλακών. Πιθανά αίτια αυξημένης θερμοκρασίας είναι η αυξημένη μεταβολική δραστηριότητα των μακροφάγων, εξώθερμες διαδικασίες ενζυμικής αποδόμησης της εξωκυττάριας θεμέλιας ουσίας και μεταβολισμού λιπιδίων. Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι καθετήρες θερμογραφικών μελετών. Αυτοί διαφέρουν ως προς τις διαστάσεις (διαμέτρου από 0,1 - 1,3 mm), ως προς το υλικό κατασκευής (νιτινόλη, πολυουρεθάνη) και τα θερμοευαίσθητα στοιχεία που χρησιμοποιούν (thermocouple, thermistor). Οι θερμογραφικές μετρήσεις επηρεάζονται από τη ροή. Δεδομένου ότι η παρουσία ενός καθετήρα μεταβάλλει το προφίλ της ταχύτητας ροής, είναι πιθανό ότι επηρεάζει και τις μετρήσεις θερμοκρασίας. Αυτές οι επιδράσεις οφείλονται όχι μόνο στη μεταβολή του προφίλ ταχύτητας, αλλά και στις θερμικές ιδιότητες του καθετήρα και τη θέση του σε σχέση με την πηγή θερμότητας.

Με στόχο τη μελέτη της επίδρασης που έχει η παρουσία καθετήρα και ο σχεδιασμός του στις μετρήσεις θερμοκρασίας κάναμε αριθμητικές προσομοιώσεις σ' ένα γεωμετρικό μοντέλο στεφανιαίας αρτηρίας στην οποία υπήρχαν μοντέλο ευπαθούς πλάκας και καθετήρα. Αυτό αποτελούταν από έναν ευθύ κύλινδρο διαμέτρου 3 mm, που αντιπροσώπευε τον αυλό της στεφανιαίας αρτηρίας. Ένας δεύτερος ομοαξονικός κύλινδρος γύρω από αυτόν αντιπροσώπευε το τοίχωμα του αγγείου και τον ιστό γύρω από τη στεφανιαία αρτηρία. Η πηγή θερμότητας και ο λιπιδικός πυρήνας σχεδιάστηκαν ως ομογενείς οντότητες σε περιμετρική κατεύθυνση 90°. Οι διαστάσεις της πλάκας ήταν εντός των ορίων μεγέθους που έχουν αναφερθεί για αθηρώματα με ινώδη κάψα. Οι καθετήρες είχαν διάμετρο 1, 0,5 και 0,2 mm. Η επιφάνεια επαφής του καθετήρα με το τοίχωμα του αυλού διαμορφώθηκε έτσι ώστε να έχει μια καμπυλότητα όμοια με την καμπυλότητα του αυλού.



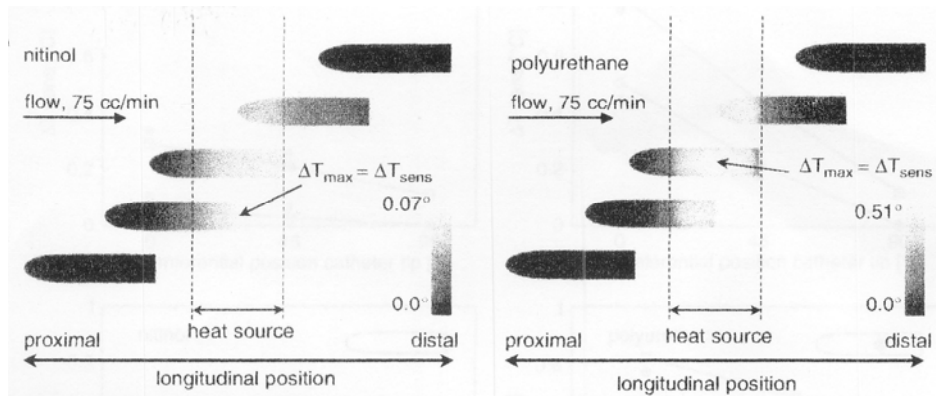
Εικόνα 2.12: Γεωμετρικό μοντέλο στεφανιαίας αρτηρίας και καθετήρα

Όταν η διάμετρος του καθετήρα ήταν μικρότερη, τότε η επιφάνεια επαφής ήταν μικρότερη. Η θέση του καθετήρα ήταν σε επιμήκη, περιμετρική και ακτινική διεύθυνση. Για την επιμήκη κατεύθυνση, που αντιπροσώπευε απόσυρση του καθετήρα για καθορισμό της άριστης θέσης του αισθητήρα, η άκρη του καθετήρα τοποθετήθηκε σε 5 θέσεις ως προς την πηγή θερμότητας, με διαφορετικό βαθμό επικάλυψης της πηγής. Πλήρη επικάλυψη είχαμε όταν η ακμή του καθετήρα βρισκόταν στο τέλος της πηγής θερμότητας, μερική επικάλυψη όταν βρισκόταν στη μέση της πηγής και καμία επικάλυψη όταν απείχε 1 cm από αυτήν. Στην περιμετρική διεύθυνση, ο καθετήρας τοποθετήθηκε σε γωνίες 0° , 45° και 90° , οι οποίες προκαλούσαν πλήρη, μερική ή καμία επικάλυψη της πηγής θερμότητας από τον καθετήρα, αντίστοιχα. Οι ακτινικές θέσεις ήταν πλήρης επαφή ή παρουσία κενού 200 και 300 μm μεταξύ επιφάνειας επαφής και τοιχώματος αυλού.



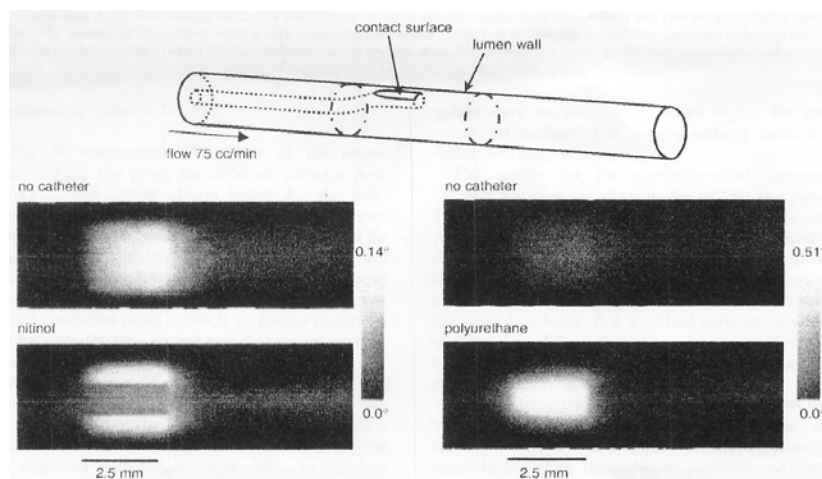
Εικόνα 2.13: Θέσεις καθετήρα ως προς την πηγή θερμότητας κατά την επιμήκη, περιμετρική και ακτινική διεύθυνση

Η ευπαθής πλάκα στην προσομοίωση παράγαγε θερμότητα τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται θερμοκρασία υγρού εντός της αρτηρίας της τάξης των 37°C (θερμοκρασία αίματος). Τα προφίλ της ταχύτητας, που χρησιμοποιήθηκαν στην είσοδο του αυλού, δημιουργούσαν ροή $75\text{ cm}^3/\text{min}$, που είναι ενδεικτική τιμή αιματικής ροής στις ανθρώπινες στεφανιαίες αρτηρίες. Τα αποτελέσματα εκφράζονται ως διαφορές θερμοκρασίας (ΔT) σε σχέση με τη βασική θερμοκρασία των 37°C . Σκοπός του πειράματος είναι να καθοριστεί η θέση στην οποία πρέπει να τοποθετηθεί το θερμοστοιχείο, ώστε να είναι άριστη η μέτρηση της θερμοκρασίας και συνεπώς να είναι άριστη η ανίχνευση της ευπαθούς πλάκας. Η θέση αυτή ορίστηκε ως το σημείο πάνω στον άξονα συμμετρίας της επιφάνειας επαφής όπου η ΔT είναι μέγιστη, βάσει των δεδομένων από την απόσυρση του καθετήρα υπό συνθήκες ροής. Οι διαφορές θερμοκρασίας σ' αυτήν την άριστη θέση του αισθητήρα ονομάζονται ΔT_{sens} .



Εικόνα 2.14: Προσδιορισμός θέσης καθετήρα από νιτινόλη και πολυουρεθάνη όταν καταγράφεται η ΔT_{sens} κατά τη διάρκεια απόσυρσής του

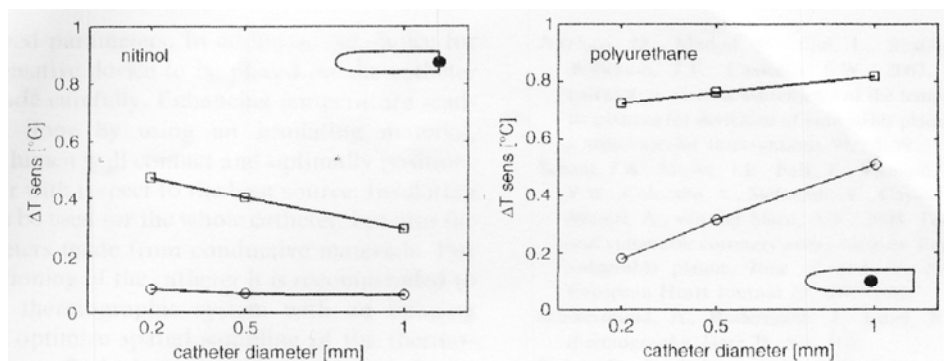
Στην παραπάνω εικόνα δίνονται τα προφίλ θερμοκρασίας στην επιφάνεια επαφής για τις διάφορες κατά μήκος θέσεις καθετήρα νιτινόλης 1 mm και πολυουρεθάνης 1 mm. Η μέγιστη ΔT στη γραμμή συμμετρίας της επιφάνειας επαφής υποδεικνύεται με βέλος. Για τον καθετήρα νιτινόλης η μέγιστη ΔT , και άρα η άριστη θέση του αισθητήρα, βρισκόταν στην ακμή της επιφάνειας επαφής του καθετήρα ενώ για τον καθετήρα πολυουρεθάνης βρισκόνταν 1,1 mm από την ακμή.



Εικόνα 2.15: Κατανομή θερμοκρασίας στο τοίχωμα του αυλού εντός των διακεκομμένων γραμμών με και χωρίς καθετήρα από νιτινόλη και πολυουρεθάνη

Οι ΔT_{sens} ήταν σχεδόν πάντα υψηλότερες για τους καθετήρες πολυουρεθάνης. Η ΔT_{sens} μειωνόταν όταν ο καθετήρας απομακρυνόταν από την πηγή θερμότητας, αλλά αυτό συνέβαινε ταχύτερα με τους καθετήρες πολυουρεθάνης. Επιπλέον, η ΔT_{sens} ήταν υψηλότερη για συνθήκες χωρίς ροή απ' ότι παρουσία ροής. Η μείωση της αιματικής ροής αυξάνει τις μετρώμενες τιμές θερμοκρασίας και αλλάζει το προφίλ θερμοκρασίας. Η παρουσία καθετήρα μεταβάλλει την κατανομή της ταχύτητας και συνεπώς τη μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής, σε σχέση με την απουσία καθετήρα. Η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής μεταβλήθηκε λόγω διαφορών των θερμικών παραμέτρων μεταξύ υλικού καθετήρα και υλικού αίματος και αρτηριακού ιστού. Συνεπώς οι μεταβολές της θερμοκρασίας ήταν αποτέλεσμα τόσο της παρουσίας καθετήρα όσο και των παραμέτρων σχεδιασμού του. Η άριστη θέση του αισθητήρα επελέγη υπό συνθήκες ροής καθότι αυτές είναι και οι in vivo συνθήκες. Πλήρης απόφραξη του αγγείου μπορεί να προκαλέσει θωρακικό άλγος και αίσθημα δυσφορίας για τον ασθενή υπό θεραπεία, γι' αυτό αποφεύγεται. Η πηγή θερμότητας μπορούσε να ανιχνευτεί από τον καθετήρα νιτινόλης όταν η επιφάνεια επαφής επικάλυπτε την πηγή θερμότητας, αλλά οι θερμοκρασίες ήταν υψηλότερες όταν υπήρχε πλήρης επικάλυψη. Όταν ο καθετήρας

νιτινόλης προσέγγιζε την πηγή θερμότητας, οι θερμοκρασίες δεν διέφεραν σημαντικά από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου. Με τον καθετήρα πολυουρεθάνης η θερμοκρασία διέφερε από αυτήν του περιβάλλοντος ακόμα και όταν υπήρχε μόνο μερική επικάλυψη. Αυτό σήμαινε ότι η ακριβής εντόπιση της πηγής θερμότητας δεν μπορούσε να γίνει με ακρίβεια. Ένα μικρό χάσμα μεταξύ της επιφάνειας επαφής και του τοιχώματος του αυλού προκαλούσε μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής από τη μικρή στιβάδα αίματος που έρεε μέσα στο χάσμα αυτό. Συνεπώς για την άριστη ανίχνευση ευπαθών πλακών είναι απαραίτητη η εξασφάλιση επαφής με το τοίχωμα. Η παρουσία καθετήρα πολυουρεθάνης αύξησε τις μετρώμενες ενδείξεις θερμοκρασίας. Αυτό οφείλεται στη χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα της πολυουρεθάνης συγκριτικά με του αίματος, πράγμα που την καθιστά πολύ καλή επιλογή για ανίχνευση πηγών θερμότητας και άρα για ανίχνευση ευπαθών πλακών.



Εικόνα 2.16: Σχέση ΔT_{sens} με τη διάμετρο καθετήρα νιτινόλης και πολυουρεθάνης με παρουσία και απουσία ροής

Για καθετήρες νιτινόλης παρουσία ροής τα αποτελέσματα ήταν λιγότερο ή περισσότερο ανεξάρτητα από τη διάμετρο του καθετήρα. Στους καθετήρες πολυουρεθάνης οι μικρότερες διαμέτρους είχαν υψηλότερες ΔT_{sens} σε σχέση με αυτούς από νιτινόλη τόσο παρουσία όσο και απουσία ροής.

Στην πραγματικότητα οι ευπαθείς πλάκες είναι λιγότερο ομογενείς και οι στεφανιαίες αρτηρίες δεν είναι ευθείς σωλήνες. Τόσο ο σφύζων χαρακτήρας της αιματικής ροής όσο και η μη νευτώνεια συμπεριφορά του αίματος χρήζουν περαιτέρω αξιολόγησης. Η τιμή της θερμότητας στο πείραμα ήταν υψηλότερη από την παραγωγής θερμότητας από τα μακροφάγα. Επιπλέον η γεωμετρία του καθετήρα απλοποιήθηκε εδώ ενώ στην πραγματικότητα μπορεί να είναι πιο σύνθετη.

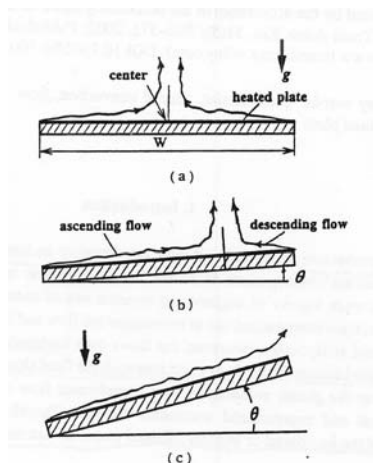
Η παρουσία καθετήρα εντός του αυλού και ο σχεδιασμός του καθετήρα επηρεάζουν τις μετρήσεις θερμοκρασίας για την ανίχνευση των ευπαθών πλακών. Επιπλέον πρέπει να γίνει προσεκτική επιλογή της θερμοευαίσθητης συσκευής που θα τοποθετηθεί στον καθετήρα. Η αύξηση των ενδείξεων θερμοκρασίας μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ένα μονωτικό υλικό, εξασφαλίζοντας πλήρη επαφή με το τοίχωμα του αυλού και τοποθετώντας σε άριστη θέση τον αισθητήρα σε σχέση με την πηγή θερμότητας. Τα μονωτικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ολόκληρο τον καθετήρα ή για την κάλυψη καθετήρων από αγωγίμο υλικό. Για την άριστη τοποθέτηση του καθετήρα συνιστάται συνδυασμός του θερμογραφικού συστήματος με μία συσκευή απεικόνισης. Η μείωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής με την απόφραξη της ροής, κατά προτίμηση τοπικά ώστε να μην βλάπτεται ο ασθενής από αυτό θα συμβάλει επίσης σε καλύτερη ανίχνευση ευπαθών πλακών.

- Ροή ρευστού και μεταφορά θερμότητας φυσικής συναγωγής σε μια ελαφρώς κεκλιμένη, προς τα πάνω προσανατολισμένη, θερμαινόμενη πλάκα
Fumiyoshi Kimura, Tetsuji Yoshioka, Kenzo Kitamura, Manabu Yamaguchi, Toshikiko Asami (Wiley Periodicals, Inc. Heat Trans Asian Res 31 (5): 362 – 375, 2002)

Ροές φυσικής συναγωγής που επάγονται πάνω σε οριζόντιες ή κεκλιμένες θερμαινόμενες πλάκες έχουν γίνει αντικείμενο πολυάριθμων μελετών τις τελευταίες δεκαετίες. Αυτό κυρίως

γιατί τέτοιες ροές συναντώνται σε ένα ευρύ φάσμα μηχανικών συστημάτων και εργοστασιακού εξοπλισμού. Οι ροές πάνω από οριζόντιες ή ελαφρά κεκλιμένες πλάκες είναι ασταθείς λόγω της ύπαρξης ρευστών βαρέων στην κορυφή και ελαφρών στον πυθμένα. Έτσι εξελίσσεται μία ανταλλαγή ρευστών πάνω από τις πλάκες που οδηγεί σε περίπλοκη συμπεριφορά σχετικά με τη ροή και τη μεταφορά θερμότητας.

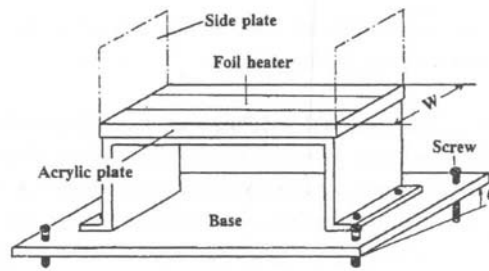
Έτσι έγιναν αρκετά πειράματα και μετρήσεις μεταφοράς θερμότητας σε ροές φυσικής συναγωγής πάνω από οριζόντιες και επικλινείς θερμαινόμενες πλάκες και βρέθηκαν αρκετά ενδιαφέρουσες ροές να εμφανίζονται πάνω από αυτές.



Εικόνα 2.17: Πεδία ροής σε οριζόντιες και κεκλιμένες πλάκες

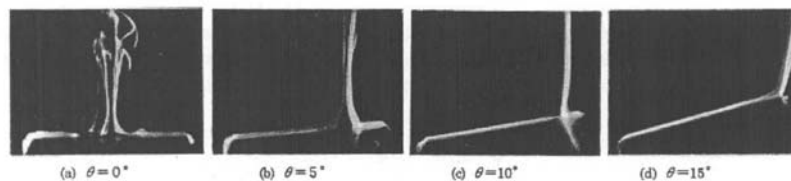
Σε οριζόντιες πλάκες (a), το ρευστό εκκινώντας από τα δύο άκρα της πλάκας ρέει κατά μήκος της επιφάνειάς της. Μετά, τα ρεύματα του ρευστού που έρχονται από τις δύο πλευρές συγκρούονται μεταξύ τους στο κέντρο της πλάκα, αποκολλώνται από αυτή και εγείρονται από ως πλούμιο. Όταν οι γωνίες κλίσης είναι μικρές (b), το περιβάλλον ρευστό εκκινεί, όπως και στις οριζόντιες πλάκες, και από τα δύο άκρα. Το ανερχόμενο από την κάτω πλευρά ρεύμα και το κατερχόμενο από την πάνω πλευρά συγκρούονται μεταξύ τους δεξιάτερα του κέντρου της πλάκας σχηματίζοντας πλούμιο. Διαφορετικός τύπος ροής εμφανίζεται πάνω από κεκλιμένη πλάκα με μεγάλη γωνία κλίσης (c). Εδώ το ρευστό έχοντας ως σημείο εκκίνησης τη χαμηλότερη άκρη της πλάκας, ανεβαίνει κατά μήκος της επιφάνειας και αποκολλάται από την πάνω άκρη. Οι κατιούσες ροές μπορεί να συμβούν για ένα μικρό εύρος των γωνιών κλίσης και μπορούν να τροποποιήσουν ουσιαδώς τα ροϊκά πεδία και τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς θερμότητας από τα αντίστοιχα σε πλάκες μεγάλων γωνιών κλίσης.

Για να εξακριβωθεί η ύπαρξη κατιουσών ροών σε ελαφρά κεκλιμένες πλάκες, έγιναν απεικονίσεις με έμφαση στο ρόλο των αντιτιθέμενων ροών που εμφανίζονται. Για την απεικόνιση της ροής χρησιμοποιήθηκε ιχνηθέτης. Οι επιφανειακές θερμοκρασίες των πλακών δοκιμής απεικονίστηκαν με τη χρήση θερμοχρωμικών υγρών κρυστάλλων, ενώ οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας των πλακών δοκιμής μετρήθηκαν ποσοτικά με τη χρήση θερμοζευγών.

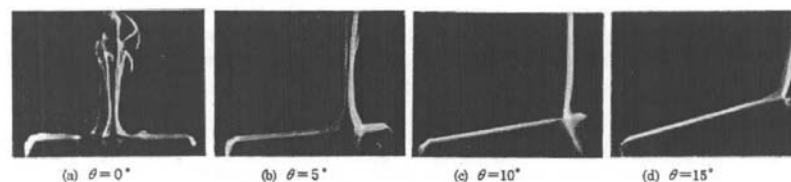


Εικόνα 2.18: Πειραματική διάταξη

Για το σκοπό αυτό, κατασκευάστηκε η παραπάνω πειραματική διάταξη, η οποία αποτελείται από μια πλάκα δοκιμής, μια εξέδρα και πλευρικές πλάκες. Η πλάκα δοκιμής αποτελείται από μια πλάκα ακρυλικού – ρητίνης πάχους 15 mm και λεπτά φύλλα θερμαντήρων από ανοξείδωτο χάλυβα, πάχους 15 μm , οι οποίοι επικολλούνται στην επιφάνεια της ακρυλικής πλάκας και συνδέονται εν σειρά. Σταθερή ροή θερμότητας εξασφαλίζεται με την παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος στους θερμαντήρες. Το πλάτος W της πλάκας δοκιμής παίρνει τις τιμές 50, 100, 200, 300 και 850 mm και το μήκος της είναι 300 mm για τις πλάκες των 50 mm, 100 mm και 200 mm και 500 mm για αυτές των 300 mm και 850 mm. Για την αναστολή των πλευρικών εισερχόμενων ροών και την υλοποίηση ενός διδιάστατου ροϊκού πεδίου, προσαρτώνται πλευρικές πλάκες ύψους 250 mm. Για τα πειράματα χρησιμοποιείται νερό σε θερμοκρασία δωματίου. Οι πλάκες δοκιμής τοποθετούνται σε μια εξέδρα σε αυθαίρετες γωνίες κλίσης, από $\theta = 0^\circ$ έως 20° , προσαρμόζοντας βίδες προσαρτημένες σ' αυτήν. Για τις μετρήσεις μεταφοράς θερμότητας τοποθετούνται θερμοζεύγη κραμάτων χρωμίου – αλουμινίου, διαμέτρου 100 μm , με σημειακή συγκόλληση, στο πίσω μέρος των θερμαντήρων, κατά μήκος του άξονα της πλάκας. Η διάταξη αυτή τοποθετείται στο πάτωμα ορθογώνιων δεξαμενών διαφορετικού μεγέθους ($0.75 \times 0.75 \text{ m}^2$ εμβαδό διατομής και 0.9 m βάθος και $1 \times 2 \text{ m}^2$ εμβαδό διατομής και 1 m βάθος), με πλάκες δοκιμής πλάτους 300 mm και 850 mm, αντίστοιχα.



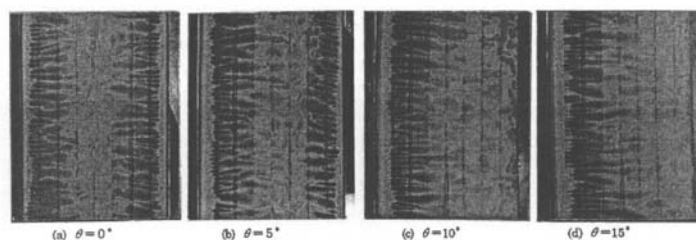
Εικόνα 2.19: Απεικονιζόμενα ροϊκά πεδία πάνω από οριζόντια και επικλινείς πλάκες ($W = 50 \text{ mm}$, $q_w = 1000 \text{ W / m}^2$, $Ra_w^* = 6 \times 10^7$)



Εικόνα 2.20: Απεικονιζόμενα ροϊκά πεδία πάνω από οριζόντια και επικλινείς πλάκες ($W = 200 \text{ mm}$, $q_w = 1000 \text{ W / m}^2$, $Ra_w^* = 1.5 \times 10^{10}$)

Με βάση αυτήν την πειραματική διάταξη, εκτελέστηκαν σε πρώτη φάση απεικονίσεις της ροής με ιχνηθέτη Uranin. Αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 2.19 (πλάκα πλάτους 50 mm, σταθερός αριθμός Rayleigh, $Ra_w^* = g \times \beta \times q_w \times W^4 / (\lambda \times \alpha \times \nu) = 6 \times 10^7$) και 2.20 (πλάκα πλάτους 200 mm, σταθερός αριθμός Rayleigh, $Ra_w^* = 1.5 \times 10^{10}$), μεταβάλλοντας τη γωνία κλίσης από $\theta = 0^\circ$ (οριζόντια) σε 20° , με βήμα 5° . Και τα δύο σχήματα καταδεικνύουν ότι η κλίση επηρεάζει το σημείο αποκόλλησης, το οποίο μάλιστα αυξανόμενης της κλίσης μεταφέρεται όλο και περισσότερο κατάντι του κέντρου, προς την άνω άκρη. Είναι επίσης φανερό ότι ο ιχνηθέτης που απελευθερώθηκε από το άνω άκρο φθίνει κατά μήκος της επιφάνειας και φτάνει το σημείο αποκόλλησης. Το αποτέλεσμα καταδεικνύει πλήρως την ύπαρξη της κατιούσας ροής στην ελαφρώς κεκλιμένη πλάκα. Το σημείο αποκόλλησης μεταφέρεται πιο κατάντι σε γωνία κλίσης 10° και τελικά εξαφανίζεται στις 15° , όπου και τελικά η κατιούσα ροή εξαφανίζεται.

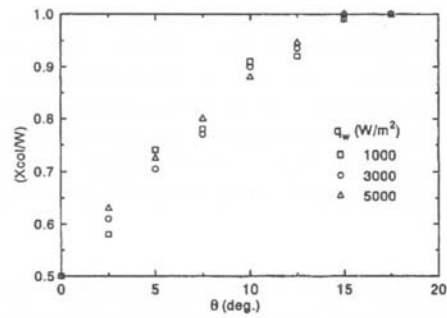
Για να καθοριστούν περαιτέρω τα σημεία αποκόλλησης, έγινε η απεικόνιση των επιφανειακών θερμοκρασιών χρησιμοποιώντας θερμομετρία υγρών κρυστάλλων. Τυπικά αποτελέσματα αυτής φαίνονται στην εικόνα 2.21. Οι φωτογραφίες έχουν ληφθεί από διεύθυνση κάθετη προς την πλάκα και η δεξιά και η αριστερή πλευρά τους αντιστοιχεί στη χαμηλότερη και την υψηλότερη πλευρά της πλάκας αντίστοιχα. Χρησιμοποιήθηκε φύλλο υγρών κρυστάλλων που μεταβάλλει το χρώμα του με αυξανόμενη θερμοκρασία από βαθύ κόκκινο σε κίτρινο, πράσινο και μπλε, τα οποία αναπαράγονται ως μαύρο, γκρι και βαθύ γκρι στις ασπρόμαυρες εικόνες. Σημειώνεται επίσης ότι οι μαύρες περιοχές, οι οποίες εμφανίζονται σε μια μικρή απόσταση κατάντι της αριστερής άκρης στα σχήματα, δείχνουν περιοχές χαμηλής θερμοκρασίας και υψηλής μεταφοράς θερμότητας. Οι περιοχές με βαθύ γκρι, οι οποίες εμφανίζονται ενδιάμεσα των μαύρων περιοχών, αναπαριστούν περιοχές υψηλής θερμοκρασίας και χαμηλής μεταφοράς θερμότητας. Στα σχήματα είναι επίσης εμφανείς αρκετές κάθετες γραμμές, οι οποίες αναπαριστούν τα κενά μεταξύ των λωρίδων του θερμαντήρα.



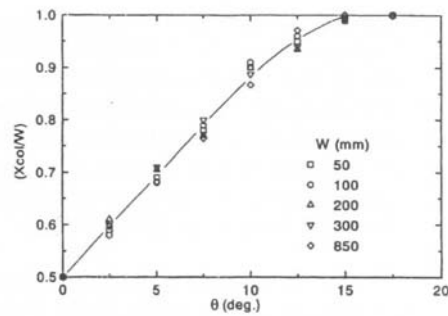
Εικόνα 2.21: απεικονιζόμενη επιφανειακή θερμοκρασία των οριζόντιων και επικλινών πλακών ($W=200\text{mm}$, $q_w=3500\text{W/m}^2$, $Ra_w^*=5.4 \times 10^{10}$).

Στο οριζόντιο επίπεδο (Εικ. 2.21 (a)), τα θερμοκρασιακά πρότυπα επιδεικνύουν μια συμμετρία αναφορικά με τον άξονα συμμετρίας της πλάκας, λόγω της συμμετρικότητας της ροής. Τα ραβδωτά και ακανόνιστα θερμοκρασιακά μοτίβα προκαλούνται από τη δημιουργία διαμήκων στροβίλων και την αποκόλληση των ροών που έρχονται από τα δύο άκρα. Στις κεκλιμένες πλάκες, (Εικ. 2.21 (b) - (d)) οι ραβδώσεις κοντά στο χαμηλότερο άκρο μεταφέρονται κατάντι και επιμηκύνονται προς το άνω άκρο. Αυξανόμενης της γωνίας οι ραβδώσεις κοντά στο υψηλότερο άκρο μεταφέρονται προς το άνω άκρο και τελικά εξαφανίζονται όταν $\theta = 15^\circ$, όπου η ανιούσα ροή καλύπτει όλη την επιφάνεια της πλάκας.

Για να καθορίσουμε τη θέση των σημείων αποκόλλησης στις επικλινείς πλάκες, καταγράφηκαν videos με μια κάμερα VCR και παράχθηκαν στιγμιότυπα των σημείων αποκόλλησης για την εκάστοτε γωνία θ .



(α)



(β)

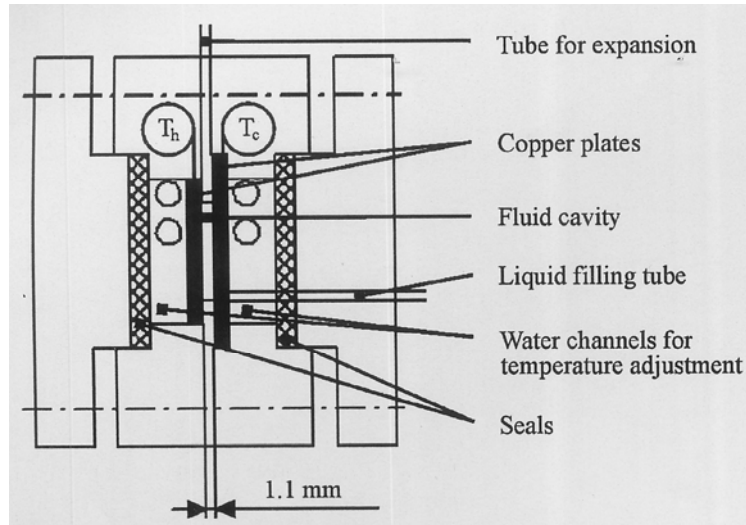
Εικόνα 2.22: Θέση αποκόλλησης της ροής: (α) $W = 200$ mm, (β) $q_w = 3000$ W / m²

Στην Εικ. 2.22 (α) (πλάκα πλάτους 200 mm), όπου παρουσιάζονται κανονικοποιημένες αποστάσεις συναρτήσει της γωνίας κλίσης, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι αυξανόμενης της γωνίας το σημείο αποκόλλησης μεταφέρεται από το κέντρο προς το άνω άκρο, ενώ είναι ανεξάρτητο της ροής θερμότητας. Η επίδραση του πλάτους της πλάκας, μεταβάλλοντας το πλάτος της πλάκας από 50 mm έως 850 mm, παρουσιάζεται στην Εικ. 2.22 (β). Αν και οι μετρήσεις διεξήχθησαν σε ένα ιδιαίτερα μεγάλο εύρος αριθμών Rayleigh, από 6×10^7 έως 8×10^{13} , είναι φανερό ότι το σημείο αποκόλλησης δε μεταβάλλεται με το πλάτος της πλάκας, αλλά μάλλον καθορίζεται αποκλειστικά από τη γωνία κλίσης.

- Μετρήσεις πεδίου ροής και θερμοκρασίας θερμικής συναγωγής σε μικρό κατακόρυφο κενό με τη χρήση υγρών κρυστάλλων
Hans Georg Heiland, Guenter Wozniak, Klaus Wozniak (Heat Mass Transfer 43: 863 – 870, 2007)

Η θερμική συναγωγή σε μικρά κενά είναι γενικότερου ενδιαφέροντος όσον αφορά στις διεργασίες μεταφοράς θερμότητας και μάζας στη φύση και την τεχνολογία. Τρέχουσες τεχνικές εφαρμογές όπου αυτό το φαινόμενο παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι οι μικροαντιδραστήρες στη βιοτεχνολογία, η απομόνωση της θερμότητας σε παράθυρα διπλών τζαμιών και η μεταφορά θερμότητας σε ηλιακούς συλλέκτες.

Το αντικείμενό της έρευνας αυτής είναι η προσομοίωση των διεργασιών ροής σε συστήματα μικροαντιδραστήρων. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε πειραματικά η θερμική συναγωγή σε ένα μικρό κατακόρυφο κενό, εφαρμόζοντας ψηφιακή απεικόνιση ροομετρίας / θερμομετρίας σωματιδίων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της πειραματικής διάταξης της Εικ. 2.23.

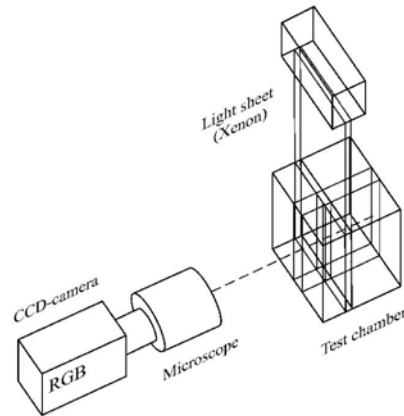


Εικόνα 2.23: Θάλαμος δοκιμής

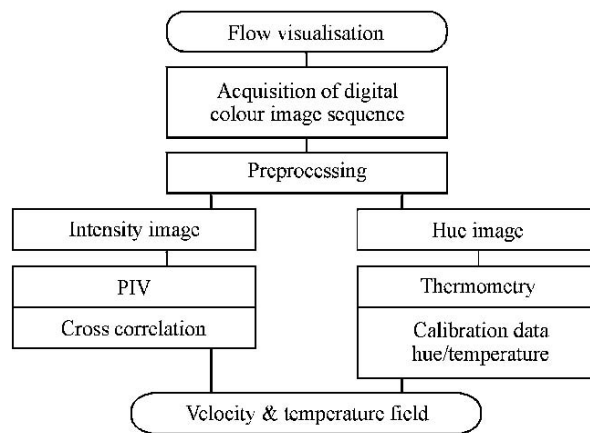
Ο θάλαμος δοκιμής (εσωτερικές διαστάσεις $1.1 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ ($b \times d \times h$)) τοποθετείται σε ένα ρυθμιζόμενο οπτικό πάγκο και γεμίζεται με το ρευστό δοκιμής. Τα διάφανα εμπρός και πίσω τοιχώματα είναι κατασκευασμένα από οπτικό γυαλί. Η θέρμανση και η ψύξη των αριστερών και δεξιών τοιχωμάτων παρέχεται μέσω μαύρων ανοδιωμένων χάλκινων πλακών πάχους 1.5 mm. Σε κάθε πλευρικό τοίχωμα διατηρείται σταθερή, αλλά διαφορετική, ομοιόμορφη θερμοκρασία. Για να επιτευχθεί μια οριζόντια θερμοκρασιακή διαβάθμιση μέσα στο ρευστό, η δεξιά πλευρά ψυχραίνεται και η αριστερή θερμαίνεται μέσω δύο θερμοστατικών εργαστηριακών λουτρών, εξοπλισμένων με κυκλοφορητές νερού. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας στα πλευρικά τοιχώματα γίνεται με την εγκατάσταση θερμοζευγών στις χάλκινες πλάκες. Στη δεξιά πλευρά του δοχείου δοκιμής ολοκληρώνονται οι συνδέσεις για τη πλήρωση και τη διαστολή του ρευστού. Τα πειράματα έγιναν με διαλύματα γλυκερίνης / νερού⁵, 30 % και 60 %. Ο αριθμός Prandtl του διαλύματος 30 % γλυκερίνης / νερού (30 % G / W) είναι $Pr = 18$ και αυτός του 60 % G / W είναι $Pr = 78$, και οι δύο στους 25 °C. Οι θερμοκρασιακές διαφορές που υλοποιήθηκαν είναι $\Delta T = 1 \text{ K}$, $\Delta T = 2.5 \text{ K}$ και $\Delta T = 4.5 \text{ K}$, όπου η δεξιά πλευρά του θαλάμου δοκιμής είναι η ψυχρή, με θερμοκρασία στους 28 °C.

Η μέθοδος μέτρησης, όπως αναφέραμε ονομάζεται απεικόνιση ροομετρίας / θερμομετρίας σωματιδίων (PIV / T). Η αρχή βασίζεται στη διασπορά σωματιδίων θερμοχρωμικών υγρών κρυστάλλων στο ρευστό μέσο, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να υποδεικνύουν ταυτόχρονα το πεδίο ταχύτητας και θερμοκρασίας. Η απεικόνιση και η καταγραφή της ροής γίνεται χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό σύστημα με κάμερα RGB CCD και μικροσκοπικό αντικειμενικό φακό μεγάλης απόστασης. Ως φωτεινή πηγή εφαρμόζεται μια λυχνία Xenon (300 W). Χρησιμοποιώντας κυλινδρικούς φακούς, δημιουργείται ένα λεπτό φωτεινό φύλλο πάχους 1 mm για το φωτισμό του ενδιάμεσου επιπέδου της ροής.

⁵ Τα διαλύματα γλυκερίνης / νερού δεν καταστρέφουν την οπτική δομή των υγρών κρυστάλλων, όπως συμβαίνει με αρκετά άλλα ρευστά δοκιμών.



(α)



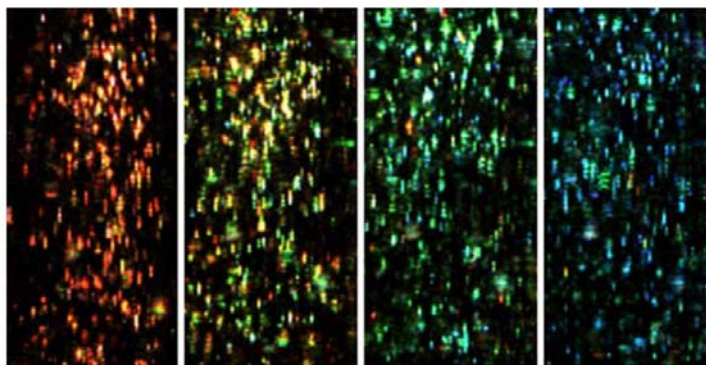
(β)

Εικόνα 2.24: (α) Διάταξη της τεχνικής PIV / T, (β) Διάγραμμα ροής της τεχνικής PIV / T

Το αντικείμενο των μετρήσεων είναι η απόκτηση των κατανομών ταχύτητας και θερμοκρασίας της θερμικά επαγόμενης ροής συναγωγής. Τα διανύσματα μετατόπισης προκύπτουν από δύο διαδοχικά frames του καταγραφόμενου έγχρωμου video με τη βοήθεια των ανιχνεύσιμων υδροκρυσταλλικών σωματιδίων εντός του ρευστού. Μία έγχρωμη εικόνα δημιουργείται από τρεις κύριες χρωματικές συνιστώσες, κόκκινο (Red), πράσινο (Green) και μπλε (Blue). Ως εκ τούτου κάθε pixel χαρακτηρίζεται από μια τριπλέτα τιμών RGB ([0, 1]). Οι εικόνες διαιρούνται σε καθορισμένες περιοχές εξέτασης (Interrogation Areas). Η διαδικασία αναγνώρισης της μετατόπισης των σωματιδίων εφαρμόζεται σε κάθε IA. Για την αξιολόγηση της θερμομετρίας υπολογίζεται η ειδική τιμή απόχρωσης H χρησιμοποιώντας τα καταγεγραμμένα δεδομένα RGB:

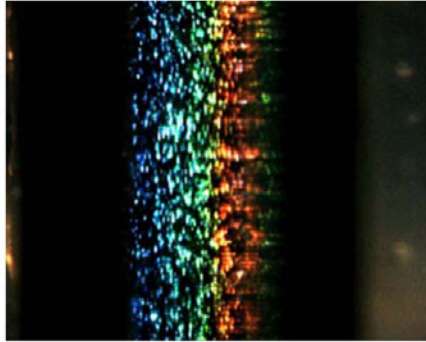
$$\begin{aligned}
 H &= (B - G) / \Delta, & \text{for } R = \max(R, G, B) \\
 H &= 2 + (R - B) / \Delta, & \text{for } G = \max(R, G, B) \\
 H &= 4 + (G - R) / \Delta, & \text{for } B = \max(R, G, B) \\
 \text{with } \Delta &= \max(R, G, B) - \min(R, B, G).
 \end{aligned}
 \tag{ 2.2 }$$

Η τιμή απόχρωσης σε φυσικό επίπεδο αναπαριστά το κυρίαρχο μήκος κύματος του φωτός που αντανακλάται από τους υγρούς κρυστάλλους και έτσι περιέχει την θερμοκρασιακή πληροφορία. Η εικόνα απόχρωσης διαιρείται σε μικρά παράθυρα και σε κάθε ένα από αυτά εφαρμόζεται η διαδικασία της θερμομετρίας. Η βαθμονόμηση του TLC επιτρέπει τον καθορισμό της θερμοκρασίας σε υπο-περιοχές, γεγονός που οδηγεί στη γενική θερμοκρασιακή κατανομή του πεδίου ροής. Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν μικροκάμνουλες TLC. Σημειώνεται ότι το χρωματικό παιχνίδι των υγρών κρυστάλλων προκαλείται από τις ειδικές οπτικές τους ιδιότητες καθώς αντανακλούν μόνο ένα μήκος κύματος λ_0 προσπίπτοντος λευκού φωτός εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία. Αυτό το φαινόμενο προκαλείται από τη μοριακή διάταξη μέσα στην ελικοειδή δομή. Η πυκνότητα του εφαρμοζόμενου υλικού υγρών κρυστάλλων (BM / R30C / 20W) είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από 1 g / ml και η διάμετρος των σφαιρών κυμαίνεται μεταξύ 10 και 15 μm . Η συγκέντρωση των υγρών κρυστάλλων μέσα στο διάλυμα είναι περίπου 200 ppm και επομένως υποτίθεται ότι δεν έχουν σημαντική επίδραση στη ρεολογική συμπεριφορά των διαλυμάτων. Υλοποιήθηκαν διάφορες ισοθερμικές συνθήκες στο θάλαμο δοκιμής και καθορίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές απόχρωσης της κάμερας. Η Εικ. 2.25 δείχνει τις αντανακλάσεις υγρών κρυστάλλων που καταγράφηκαν από το μικροσκοπικό αντικειμενικό φακό για διαφορετικές ισοθερμικές συνθήκες, Κόκκινο (28 °C), πορτοκαλί (28.8 °C), πράσινο (29.5 °C) και μπλε (30 °C). Σε χαμηλές θερμοκρασίες οι TLC συμπεριφέρονται οπτικώς διάφανα. Η θερμοκρασία εκκίνησης είναι $T \approx 27.8 \text{ }^\circ\text{C}$ με $H \approx 30$. Τιμές πάνω από μια θερμοκρασία $T \approx 33 \text{ }^\circ\text{C}$ δεν μπορούν να αξιολογηθούν επακριβώς. Το εύρος 28.0 - 32.5 °C χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα. Η συμπεριφορά της χρωματικής ανάκλασης των TLC που διασκορπίστηκαν στο διάλυμα διαφέρει από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.

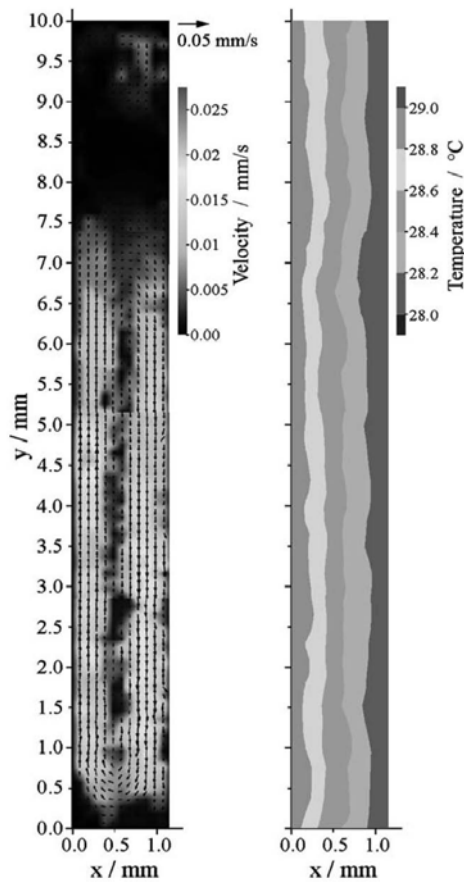


Εικόνα 2.25: Ισοθερμικές καταγραφές των αντανακλάσεων υγρών κρυστάλλων

Μία μόνο καταγεγραμμένη εικόνα ροής δείχνει περίπου το 25 % όλου του ροϊκού πεδίου και έχει μέγεθος $3.97 \times 3.17 \text{ mm}^2$ (b × h) με ανάλυση 3.1 μm / pixel. Κατά συνέπεια, όλο το πεδίο ροής υποδιαιρείται σε τέσσερις υπο-εικόνες. Η πλήρης εικόνα της ροής είναι πάντα μια σύνθεση των τεσσάρων απλών καταγραφών.

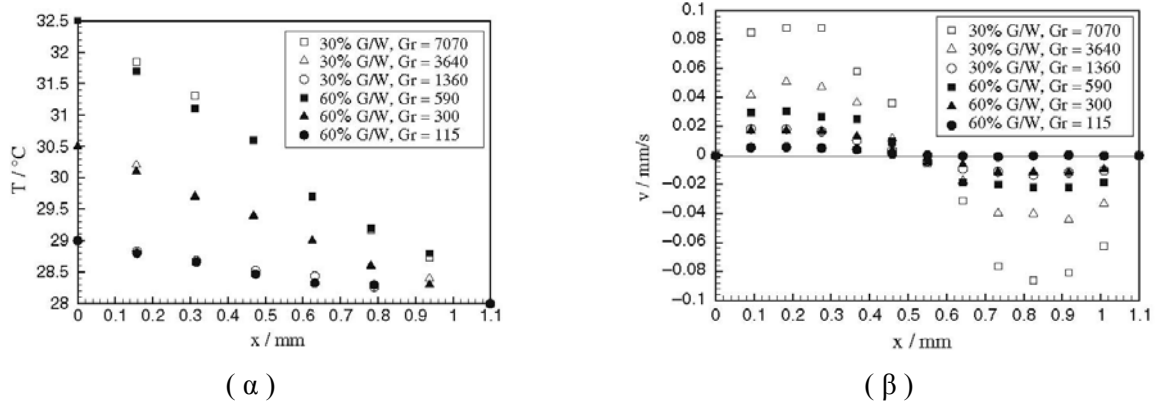


Εικόνα 2.26: Καταγραφή υγρών κρυστάλλων ενός τμήματος (25 %) του υγρού



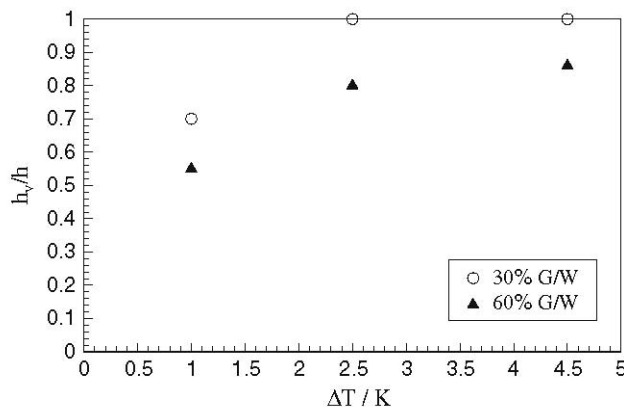
Εικόνα 2.27: Κατανομή ταχύτητας και θερμοκρασίας για διάλυμα 30 % G / W σε $\Delta T = 1$ K, $Pr = 18$ και $Gr = 1360$

Η θερμική ροή συναγωγής μέσα στο μικρό κενό ανακύπτει ήδη σε μικρές θερμοκρασιακές διαφορές που διαταράσσουν την υδροστατική ισορροπία. Η ροή κατευθύνεται ανάντι κατά μήκος της θερμής πλευράς και κατόντι κατά μήκος της ψυχρής, λόγω της μεταβολής της πυκνότητας από τη θερμοκρασία. Στην κεντρική κατακόρυφη γραμμή του κενού η ταχύτητα ροής εξαλείφεται. Η αντιστροφή της ροής στην κορυφή και τον πυθμένα του κενού οδηγεί σε μια μακρά και στενή δίνη συναγωγής. Οι εξεταζόμενες ροές βρίσκονται στην περιοχή ροής Stokes και οι προκύπτουσες ταχύτητες ροής είναι μάλλον μικρές.



Εικόνα 2.28: Οριζόντια προφίλ: (α) θερμοκρασίας $T(x)$ και (β) ταχύτητας $v(x)$, στην κεντρική γραμμή του κενού για $y = 5$ mm

Στην περίπτωση όπου $h \gg b$ η μεταφορά θερμότητας μέσα στο κενό δεν συμβαίνει λόγω συναγωγής. Η θερμότητα μεταφέρεται μόνο από θερμική αγωγή και επομένως το προφίλ θερμοκρασίας είναι σχεδόν γραμμικό. Η μέγιστη ταχύτητα για το 30 % G / W διάλυμα είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη συγκρινόμενη με αυτή του 60 % G / W διαλύματος. Η ταχύτητα αυξάνει με αυξανόμενο αριθμό Gr και το προφίλ της γίνεται ημιτονοειδές.



Εικόνα 2.29: Αδιάστατο ύψος δίνης h_v/h

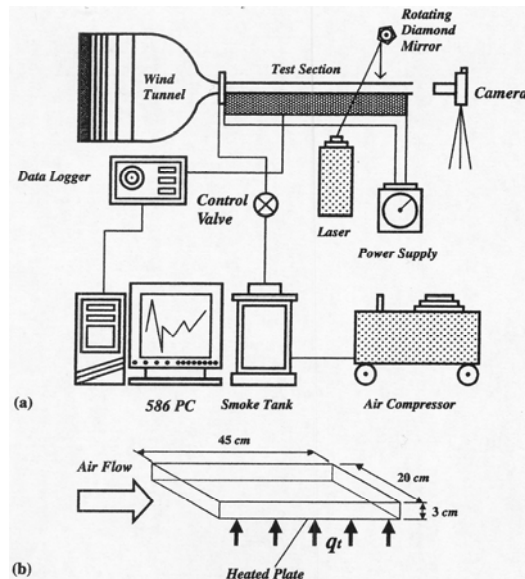
Στην Εικ. 2.29 φαίνεται το αδιάστατο ύψος δίνης h_v/h ως συνάρτηση της θερμοκρασιακής διαφοράς ΔT . Χρησιμοποιώντας το 30 % G / W διάλυμα, το ύψος δίνης καλύπτει ολόκληρο το ύψος του θαλάμου δοκιμής, $h_v = h = 10$ mm, σε θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T = 2.5$ K. Χρησιμοποιώντας το 60 % G / W διάλυμα, η δίνη συναγωγής αγγίζει ύψος $h_v = 8$ mm. Σε αυτό το διάλυμα μια θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T = 4.5$ K δεν είναι επαρκής για να επιτευχθεί ύψος δίνης μεγαλύτερο του συνολικού ύψους του θαλάμου δοκιμής. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στο ιξώδες των υγρών. Μία δίνη συναγωγής πάνω από αυτό το συνολικό ύψος στην περίπτωση του 60 % G / W διαλύματος απαιτεί περισσότερη ενέργεια από αυτή που απαιτείται για το 30 % G / W διάλυμα σε ίσες ταχύτητες.

- Έναρξη δευτερεύουσας ροής και αύξηση μεταφοράς θερμότητας σε οριζόντιους συγκλίνοντες και αποκλίνοντες διαύλους θερμαινόμενους από κάτω
C. W. Liu, C. Gau (International Journal of Heat and Mass Transfer 47: 5427 – 5438, 2004)

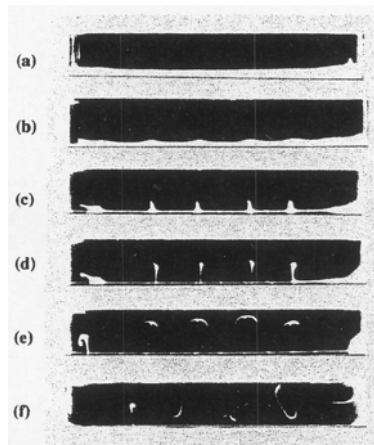
Η μεικτή συναγωγή θερμότητας σε κανάλια έχει προκαλέσει μεγάλο ενδιαφέρον τις τελευταίες δεκαετίες λόγω των πρακτικών εφαρμογών της σε συλλέκτες ηλιακής ενέργειας, ανταλλάκτες θερμότητας, συστήματα γεωθερμικής ενέργειας και στη ψύξη σύγχρονων ηλεκτρονικών εξοπλισμών.

Για οριζόντιους σωλήνες θερμαινόμενους από κάτω η ανωστική δύναμη μπορεί να επαγάγει δευτερεύουσα ροή, που εκδηλώνεται ως πλούμια σχηματος μανιταριού και δίνες, και προκαλεί σημαντική αύξηση της μεταφοράς θερμότητας. Βρέθηκε ότι η έναρξη της δευτερεύουσας ροής εξαρτάται σημαντικά από τον αριθμό Rayleigh, τον Reynolds και τον αριθμό Prandtl της ροής στο κανάλι. Έχουν γίνει πολλά πειράματα για την έναρξη και την ανάπτυξη δευτερεύουσας ροής ανωστικά επαγόμενης και για την αύξηση της μεταφοράς θερμότητας σε οριζόντιο συγκλίνοντα ή αποκλίνοντα δίαυλο. Σε αυτά ο αριθμός Reynolds κυμαινόταν από 200 - 2000, η ανωστική παράμετρος Gr / Re^2 από 2,5 - 907 και ο Pr της ροής αέρα ήταν 0,7.

Μια τέτοια πειραματική μελέτη περιγράφει η παρούσα εργασία. Το πείραμα εκτελείται σε ένα κανάλι από plexiglas (45 cm x 20 cm x 3 cm). Το ηλεκτρικά θερμαινόμενο ξύλινο τοίχωμα διατηρείται οριζόντιο, ενώ το απέναντι τοίχωμα κλίνει με μια συγκλίνουσα ή αποκλίνουσα γωνία 3° . Η ροή θερμότητας επιτυγχάνεται μέσω τροφοδοσίας συνεχούς (DC) τάσης σε λωρίδες ανοξείδωτου χάλυβα που έχουν κολληθεί σε όλο το τοίχωμα. Αφού η μεταβολή της θερμοκρασίας, πιθανόν, να είναι μεγάλη στην εγκάρσια διεύθυνση, το θερμαινόμενο τοίχωμα είναι εξοπλισμένο με επτά σειρές από θερμοζεύγη χρωμίου αλουμινίου. Η μία σειρά βρίσκεται στον άξονα συμμετρίας του τοιχώματος, η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών σειρών είναι 2.5 cm , ενώ η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών θερμοζευγών είναι 1 cm. Πέντε πρόσθετα θερμοζεύγη ενσωματώνονται στην επιφάνεια του μονωμένου τοιχώματος για την εκτίμηση της απώλειας ακτινοβολίας από το θερμαινόμενο τοίχωμα. Τα δεδομένα θερμοκρασίας λαμβάνονται όταν όλο το σύστημα φθάνει σε μόνιμη κατάσταση, συνήθως μετά από 3 - 4 ώρες. Η ροή εντός του διαύλου οπτικοποιείται μέσω έγχυσης καπνού στην είσοδο κατά μήκος του κάτω τοιχώματος. Ένα εγκάρσιο φύλλο φωτός κάθετο στο άνω μονωμένο τοίχωμα χρησιμοποιείται για να απεικονίσει τη δομή της δευτερεύουσας ροής, ενώ ένα άλλο φύλλο φωτός προσπίπτει παράλληλα προς τη ροή απέναντι από την είσοδο της ροής μας δίνει την πλευρική της όψη.



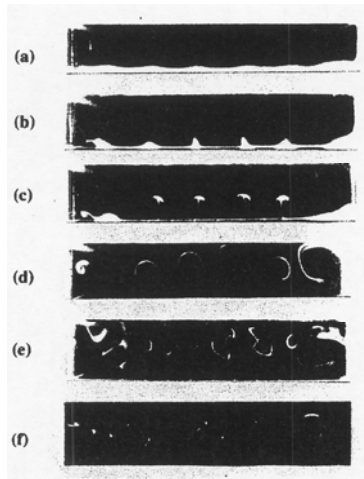
Εικόνα 2.30: Πειραματική διάταξη



Εικόνα 2.31: Δομή ροής σε κανάλι παράλληλων πλακών με $Gr / Re^2 = 20$ και $Re = 500$: (a) $x = 10$ cm, (b) $x = 15$ cm, (c) $x = 20$ cm, (d) $x = 25$ cm, (e) $x = 30$ cm και (f) $x = 44$ cm

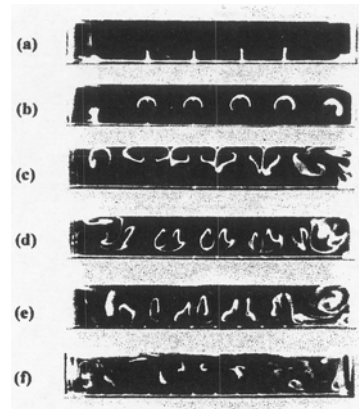
Στο πείραμα ανιχνεύεται η έναρξη της δευτερεύουσας ροής που εμφανίζεται ως εγκάρσιο κύμα αστάθειας και η έναρξη της αρχικής προβολής του κάτω θερμαινόμενου στρώματος. Καθώς ο καπνός εισέρχεται ομαλά στο κανάλι διαμορφώνει ένα λεπτό στρώμα κατά μήκος του τοιχώματος του πυθμένα. Καθώς το στρώμα αυτό θερμαίνεται γίνεται ασταθές και εξωθείται προς τα πάνω σαν πλούμιο. Αυτή η εξώθηση μειώνει το πάχος του θερμαινόμενου στρώματος στον πυθμένα και προκαλεί υψηλότερο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Το πλούμιο αρχίζει από το στρώμα αστάθειας για $x = 15$ cm (2.31b) για το κανάλι παραλλήλων πλακών. Το κύμα αστάθειας μεγαλώνει μόνο σε πλάτος έως ότου γίνει σα μικρά μπουμπούκια (2.31c), προκαλώντας στη συνέχεια την προβολή της ροής σα δάκτυλα (2.31d) και σε μετέπειτα στάδιο, τη σύσταση πλουμίου σχήματος μανιταριού (2.31e). Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται στην περίπτωση του αποκλίνοντος καναλιού, ωστόσο εδώ η απόκλιση επιβραδύνει τη ροή. Έτσι το κύμα αστάθειας αρχίζει νωρίτερα και προκαλεί τον πρώιμο σχηματισμό του πλουμίου. Η δευτερεύουσα ροή στο αποκλίνον κανάλι είναι κάπως διαφορετική από αυτή του παράλληλου καναλιού. Συγκεκριμένα, κατά τη διαμήκη διεύθυνση, τα παραγόμενα πλούμια ταλαντώνονται λόγω μεγαλύτερης αστάθειας. Επιπροσθέτως η επιβράδυνση της ροής οδηγεί στην τοπική αύξηση του Gr / Re^2 . Έτσι οι μανιταρόσχημες δίνες εκτείνονται εγκάρσια πιο γρήγορα απ' ό τι στο παράλληλο κανάλι,

δημιουργώντας αλληλεπίδραση με τις γειτονικές δίνες διαμορφώνοντας μία περίπλοκη ροϊκή δομή. Τα μεγαλύτερα πλούμια που παράγονται εξωθούν στο πάνω τοίχωμα περισσότερο ρευστό του θερμαινόμενου στρώματος, προκαλώντας λεπτότερο θερμικό οριακό στρώμα και μεγαλύτερη αύξηση της μεταφοράς θερμότητας.



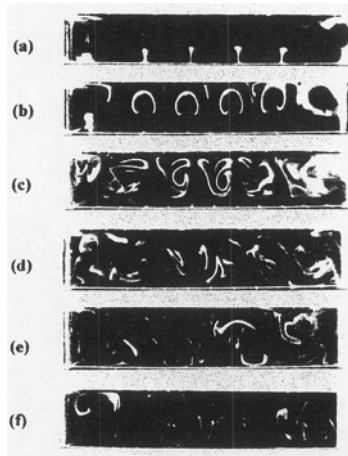
Εικόνα 2.32: Δομή ροής σε αποκλίνον κανάλι με $Gr / Re^2 = 20$ και $Re = 500$: (a) $x = 10$ cm, (b) $x = 15$ cm, (c) $x = 20$ cm, (d) $x = 25$ cm, (e) $x = 30$ cm και (f) $x = 44$ cm

Καθώς αυξάνει η παράμετρος άνωσης το κάτω θερμαινόμενο στρώμα λεπταίνει και η έναρξη του πλουμίου και ο σχηματισμός μανιταριών επέρχεται νωρίτερα. Κατάντι του άξονα συμμετρίας της εγκάρσιας τομής του καναλιού, η αύξηση των πλουμίων και η επέκταση του μανιταριού οδηγεί σε μία ισχυρή και ασταθή αλληλεπίδραση των δινών και σε πολύ περίπλοκη ροή (2.33 (d) - (e)).



Εικόνα 2.33: Δομή ροής σε κανάλι παράλληλων πλακών με $Gr / Re^2 = 60$ και $Re = 500$: (a) $x = 10$ cm, (b) $x = 15$ cm, (c) $x = 20$ cm, (d) $x = 25$ cm, (e) $x = 30$ cm και (f) $x = 44$ cm

Στο αποκλίνον κανάλι παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά αλλά σε προωμότερο στάδιο, σε σύγκριση με το κανάλι με παράλληλα τοιχώματα. Η προωμότερη αλληλεπίδραση των πλουμίων οδηγεί σε ένα λεπτότερο από κάτω θερμαινόμενο στρώμα το οποίο αυξάνει τη μεταφορά θερμότητας. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των δινών είναι τόσο έντονη που δε μπορεί να απεικονιστεί στην περιοχή κατάντι (2.34 (e) - (f)).



Εικόνα 2.34: Δομή ροής σε αποκλίνοντα κανάλι με $Gr / Re^2 = 60$ και $Re = 500$: (a) $x = 10$ cm, (b) $x = 15$ cm, (c) $x = 20$ cm, (d) $x = 25$ cm, (e) $x = 30$ cm και (f) $x = 44$ cm

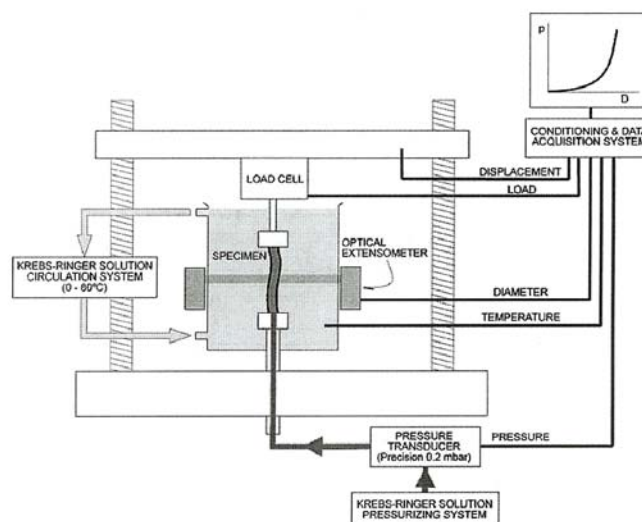
Στη μελέτη αυτή διερευνήθηκε, επιπλέον, και η επίδραση των αριθμών Nusselt, Reynolds και Rayleigh αναφορικά με την ανάπτυξη της δευτερεύουσας ροής και την επακόλουθη αύξηση της μεταφοράς θερμότητας σε αποκλίνοντα και συγκλίνοντα κανάλια και προέκυψαν τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα:

- η αποσταθεροποιητική δράση της επιβραδυνθείσας ροής στον αποκλίνοντα διάυλο καθιστά πρωιμότερη την έναρξη της δευτερεύουσας ροής, της αύξησης μεταφοράς θερμότητας και το σημείο μέγιστης μεταφοράς θερμότητας, ενώ η σταθεροποιητική δράση της επιταχυνόμενης ροής στον συγκλίνοντα διάυλο μετατοπίζει τα ανωτέρω σε οψιμότερο στάδιο. Αυτό οδηγεί σε σημαντική διακύμανση στην τοπική κατανομή των αριθμών Nusselt.
- Στον αποκλίνοντα διάυλο τα σχηματιζόμενα πλούμια είναι μεγαλύτερα και όχι σταθερά. Επιπλέον η επιβράδυνση της ροής οδηγεί σε τοπική αύξηση του Gr / Re^2 . Συνεπώς παρατηρείται ισχυρότερη αλληλεπίδραση με τα παρακείμενα πλούμια και δίνες με αποτέλεσμα περίπλοκη δομή ροής. Αυτό ενδυναμώνει σημαντικά το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας.
- Στον συγκλίνοντα διάυλο, αντιθέτως, η επιτάχυνση της ροής οδηγεί σε τοπική μείωση του Gr / Re^2 . Τα σχηματιζόμενα πλούμια είναι μικρότερα και σταθερά, χωρίς αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Η ενδυνάμωση στη μεταφορά θερμότητας είναι μικρότερη.
- Η επιβραδυνόμενη ροή στον αποκλίνοντα διάυλο και η επιταχυνόμενη στον συγκλίνοντα κάνουν τους μέσους αριθμούς Nusselt να προσεγγίζουν αυτούς του παράλληλου διαύλου, ιδίως όταν ο αριθμός Reynolds είναι υψηλότερος.
- Αυξήσεις της θερμοκρασίας του σώματος ως παράγοντας κινδύνου αστάθειας της αθηρωματικής πλάκας
Gustavo V. Guinea, Jose M. Atienza, Panayotis Fantidis, Francisco J. Rojo, Aranzazu Ortega, Monica Torres, Pablo Gonzalez, Margarita L. Elices, Kozaburo Hayashi, Manuel Elices (Annals of Biomedical Engineering Vol. 36, No. 1: 66 – 76, 2008)

Ο πυρετός είναι το κοινό σύμπτωμα ιογενών και βακτηριακών λοιμώξεων και παρουσιάζει ενδιαφέρον το γεγονός ότι ασθενείς, με αγγειογραφικά φυσιολογικές στεφανιαίες αρτηρίες, που παρουσίασαν έμφραγμα του μυοκαρδίου είχαν συχνά πυρετό πριν από αυτό.

Στην εργασία αυτή ερευνάται η επίδραση των αυξήσεων της σωματικής θερμοκρασίας και ειδικότερα των επιπτώσεων της αναντιστοιχίας του συντελεστή θερμικής διαστολής του αρτηριακού τοιχώματος και της αθηρωματικής πλάκας στην ανάπτυξη των διεπιφανειακών διατμητικών τάσεων που μπορούν να οδηγήσουν στην αποκόλληση της πλάκας και το σχηματισμό θρόμβου.

Η μελέτη έγινε στην κατιούσα θωρακική αορτή αρσενικών λευκών κουνελιών Ν. Ζηλανδίας, η οποία παρουσίαζε διαφορετικό βαθμό αθηροσκλήρυνσης λόγω υπερχοληστεριναιμίας. Η θερμομηχανική συμπεριφορά της θωρακικής αορτής μετρήθηκε μέσω δοκιμών πίεσης – διαμέτρου σε 4 διαφορετικές θερμοκρασίες. Κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη μέσω της οποίας εφαρμοζόταν ενδαγγειακή πίεση στο αγγείο την οποία μετρούσε αισθητήρας ακριβείας. Οπτικό μηκυσιόμετρο μετρούσε συγχρόνως την εξωτερική διάμετρο του αγγείου. Στη συνέχεια, με την ίδια διάταξη πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού, στις ίδιες 4 διαφορετικές θερμοκρασίες, με σκοπό να μετρηθεί ο συντελεστής θερμικής διαστολής σε αθηρωματικές πλάκες και υγιή αρτηριακά τοιχώματα. Η αξονική δύναμη μετρήθηκε με τη μηχανή δοκιμής εφελκυσμού, μέσω κυψέλης, ενώ η επιμήκυνση από τον εσωτερικό αισθητήρα.



Εικόνα 2.35: Πειραματική διάταξη για τις δοκιμές πίεσης - διαμέτρου

Από την εκτέλεση του πειράματος προέκυψαν οι καμπύλες πίεσης – διαμέτρου και εφελκυσμού που μετρήθηκαν στις διάφορες θερμοκρασίες. Αυτές οι καμπύλες χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό του συντελεστή θερμικής διαστολής α , ο οποίος μετρά τη μεταβολή στο μέγεθος ως αποτέλεσμα της θερμοκρασίας. Θετικές τιμές αντιστοιχούν σε ουσίες που διαστέλλονται όταν θερμαίνονται, ενώ οι αρνητικές υποδεικνύουν ότι το υλικό συστέλλεται όταν ανεβαίνει η θερμοκρασία.

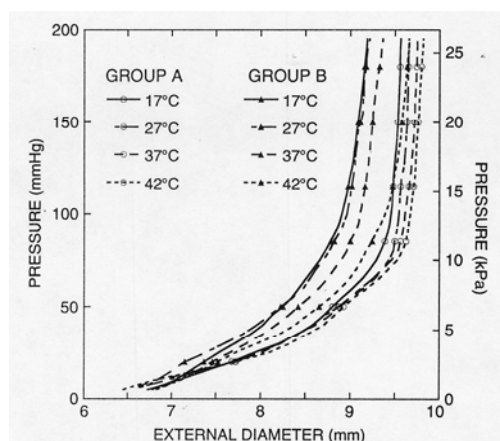
$$dH / H = \alpha \times dT \quad (2.3),$$

όπου α ο συντελεστής θερμικής διαστολής, H το μέγεθος και dH , dT οι απειροστές μεταβολές του μεγέθους και της θερμοκρασίας.

Στις δοκιμές πίεσης – διαμέτρου τα ζεύγη ήταν θερμοκρασία – διάμετρος (T, D) μετρούμενα σε δεδομένη πίεση, ενώ στις δοκιμές εφελκυσμού τα ζεύγη ήταν μήκος του δείγματος – θερμοκρασία (T, L) σε δεδομένο επίπεδο τάσης.

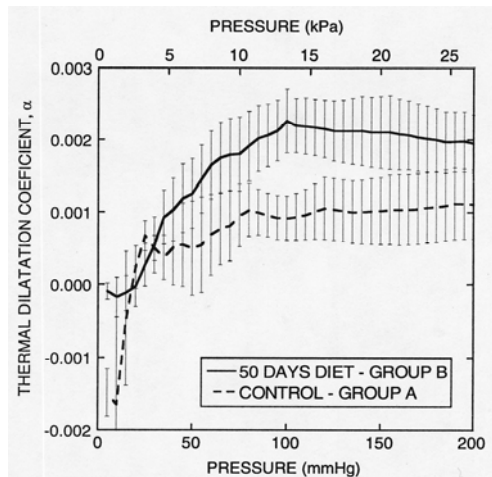
Η εργασία αυτή παρουσιάζει για πρώτη φορά το γεγονός ότι η αύξηση της θερμοκρασίας έχει επίδραση στην ανάπτυξη υψηλών διαμηθικών τάσεων μεταξύ της πλάκας και των αρτηριακών τοιχωμάτων, λόγω των διαφορετικών θερμικών διασταλτικών ιδιοτήτων τους. Το μοντέλο του κουνελιού αδυνατεί να αναπαράγει την προχωρημένη αθηρωματική πλάκα με μεγάλο πυρήνα λιπιδίων και ένα λεπτό ινώδες κάλυμμα, χαρακτηριστικό των προχωρημένων ανθρωπίνων βλαβών, όμως είναι πολύτιμο να αξιολογηθεί η απόκριση σε αυξήσεις της θερμοκρασίας και η σταθερότητα της πρώιμης αθηρωματικής πλάκας, κλινικά σιωπηλή, που μπορεί να είναι αιτία μεγάλου αριθμού εμφραγμάτων.

Οι καμπύλες πίεσης – διαμέτρου ανακλούν την εξέλιξη της νόσου, γίνονται άκαμπτες (ιδιαίτερα πάνω από 80 mmHg) και τελικά επιδεικνύουν μη ομογενή συμπεριφορά λόγω του σχηματισμού της πλάκας (πάχυνση αρτηριακού τοιχώματος).



Εικόνα 2.36: Καμπύλες πίεσης διαμέτρου θωρακικής αορτής για τέσσερις θερμοκρασίες για: (α) Group A - υγιή κουνέλια και (β) Group B – κουνέλια με 50 μέρες χοληστερινικής διαίτας

Η επίδραση της θερμοκρασίας είναι αισθητά υψηλότερη στις καμπύλες πίεσης – διαμέτρου αθηρωματικών αγγείων (Group B) σε σχέση με αυτές των υγιών (Group A). Για δεδομένη αύξηση θερμοκρασίας (λ.χ. από τους 37 στους 42 °C) οι καμπύλες πίεσης – διαμέτρου διαφέρουν εμφανέστερα όσο η αθηρωμάτωση αναπτύσσεται. Η παρατηρούμενη εξάρτηση υπαινίσσεται ότι η αθηρωμάτωση επιφέρει σημαντική μεταβολή του συντελεστή θερμικής διαστολής α , μίας παραμέτρου που αντικατοπτρίζει τις διασταλτικές ιδιότητες του αρτηριακού τοιχώματος. Συνεπώς, είναι αναμενόμενη μία μεγάλη διαφορά των συντελεστών θερμικής διαστολής μεταξύ υγιών και νοσούντων αρτηριακών τοιχωμάτων. Υγιή κουνέλια (Group A) επιδεικνύουν τυπική συμπεριφορά στο αρτηριακό τους τοίχωμα, με αρνητικές τιμές σε συνθήκες μη φόρτισης, ένα σημείο αντιστροφής στα περίπου 10 – 20 mmHg και θετικές τιμές σε φυσιολογικές πιέσεις περίπου 100 mmHg και άνω. Μεσοπρόθεσμα νοσούντα αγγεία (Group B) δείχνουν μια αύξηση στις τιμές του α με μια εξάρτηση από το επίπεδο πίεσης που μοιάζει με αυτή των υγιών αγγείων του Group A. Το σημείο αντιστροφής διατηρείται στα 10 – 20 mmHg.

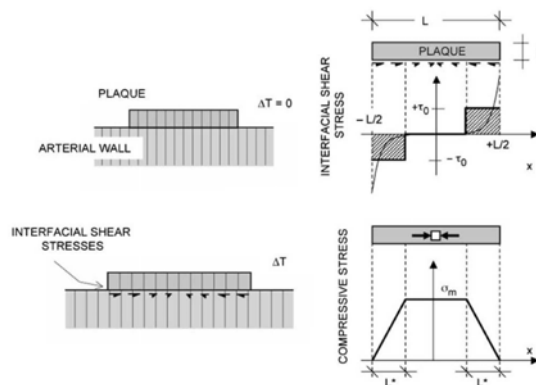


Εικόνα 2.37: Καμπύλες συντελεστή θερμικής διαστολής με την πίεση για τα Group A και B

Μεγάλες διαφορές του συντελεστή θερμικής διαστολής αρτηριακών τοιχωμάτων και αθηρωματικής πλάκας μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές διεπιφανειακές τάσεις οι οποίες τελικά θα μπορούσαν να προκαλέσουν την αποκόλληση της πλάκας, ως αποτέλεσμα αύξησης της θερμοκρασίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλείται από φλεγμονώδεις διεργασίες που σχετίζονται με την αθηρωμάτωση μπορεί να αυξήσει την τοπική θερμοκρασία της πλάκας έως και $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ αθηρωματικών πλακών και υγιών αγγείων μεγαλύτερες των $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ είναι πρόδρομος ανεπιθύμητων καρδιακών συμβαμάτων σε ασθενείς που υποβάλλονται σε επιτυχή διαδερμική παρέμβαση. Επιπρόσθετα, εμπύρετες καταστάσεις προσ αυξάνουν την τοπική θερμοκρασία, καθιστώντας την υπερθερμία σημαντικό παράγοντα για την ανάπτυξη οξέων στεφανιαίων συνδρόμων.

Όταν δύο στρώματα υλικών με διαφορετικές θερμικές ιδιότητες συνδέονται, αυξήσεις της θερμοκρασίας δημιουργούν διεπιφανειακές διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται κοντά στα άκρα, τυπικά κατά μήκος μιας απόστασης της ίδιας τάξης εύρους με το πάχος των στρωμάτων. Αυτές οι τάσεις είναι πολύ υψηλότερες από τη διατμητική τάση λόγω της ροής του αίματος και θεωρούνται ικανές να προκαλέσουν την αποκόλληση της πλάκας.

Ένα απλό θερμοελαστικό μοντέλο επινοήθηκε για να αξιολογήσει την επίδραση των θερμοκρασιακών αλλαγών στην ανάπτυξη διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια πλάκας – αγγείου και υποθέτει σταθερή διεπιφανειακή διατμητική τάση. Η Εικ. 2.38 δείχνει τη γεωμετρία του μοντέλου, όπου η ευπαθής πλάκα παρίσταται από ένα στρώμα μήκους L και πάχους B , τοποθετημένη σε ένα υπόστρωμα.



Εικόνα 2.38: Μοντέλο ανάλυσης τάσεων για τη θερμική διάδραση πλάκας – αγγείου. Διατμητικές τάσεις αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια μεταξύ πλάκας και αρτηριακού τοιχώματος, επάγοντας μια θλιπτική εντατική κατάσταση στην πλάκα.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δείχνουν ότι μια αύξηση στη σωματική θερμοκρασία δημιουργεί διατμητικές τάσεις μεταξύ της πλάκας και του αρτηριακού τοιχώματος που θα μπορούσαν να είναι αρκετά υψηλότερες από αυτές που παράγονται από την κανονική ροή του αίματος. Επί προσθέτως, το γεγονός ότι η αθηρωματική πλάκα έχει υψηλότερο συντελεστή διαστολής από το αρτηριακό τοίχωμα δημιουργεί μια θλιπτική εντατική κατάσταση που αυξάνει την αστάθεια της πλάκας, καταλήγοντας σε φαινόμενα λυγισμού της κατασκευής αυτής.

Η κόπωση μπορεί να είναι ένας από τους μηχανισμούς που διαδραματίζουν κάποιο ρόλο στη ρήξη της πλάκας. Η κόπωση δημιουργείται από επαναλαμβανόμενη φόρτιση και είναι μια συμπτωματικά ήρεμη αλλά δυναμικά προοδευτική διεργασία κάκωσης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ξαφνική θραύση σε επίπεδα τάσεων αρκετά μικρότερα των κρίσιμων. Επιπλέον, επαναλαμβανόμενες εμπύρετες διεργασίες δίνουν χώρο σε πρόσθετα φορτία κόπωσης, τα οποία μπορούν να αυξήσουν τον κίνδυνο αποκόλλησης της πλάκας.

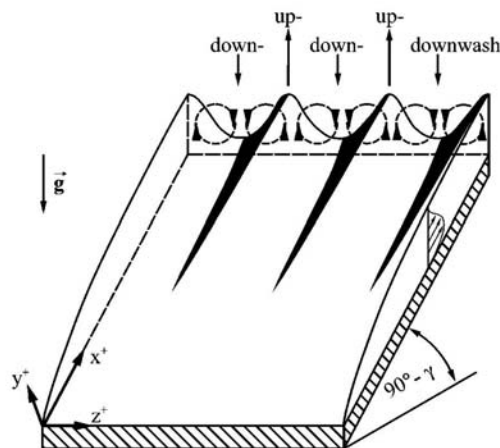
Στην περιοχή διάρρηξης της πλάκας διαμορφώνονται αιμοπετάλιακοι θρόμβοι, αλλά όλες οι ευπαθείς πλάκες δεν οδηγούν σε θρόμβωση. Όντως, μεταθανάτιες μελέτες σε ασθενείς με οξεία στεφανιαία σύνδρομα αποκάλυψαν ότι στις περισσότερες περιπτώσεις οι θρόμβοι δημιουργούνται από αιμοπετάλια και ίνες ή συνθέτονται από στρώματα διαφορετικής ηλικίας, υποδηλώνοντας σταδιακή διαμόρφωση.

Υπό το πρίσμα αυτό, αυξήσεις της σωματικής θερμοκρασίας δε συνοδεύονται απαραίτητα από μια αρνητική εκδήλωση, αλλά θα μπορούσαν να συνεισφέρουν στην προοδευτική αποδυνάμωση της αθηρωματικής πλάκας, με αποτέλεσμα την πιθανή ρήξη της σε χαμηλότερα επίπεδα μηχανικών καταπονήσεων και / ή άλλων παραγόντων ενεργοποίησης.

- Θερμογραφία υγρών κρυστάλλων για μετρήσεις μεταφοράς θερμότητας υπό την παρουσία διαμήκων δινών σε ροή φυσικής συναγωγής

Η θερμογραφία υγρών κρυστάλλων χρησιμοποιείται ευρέως λόγω του ότι παρέχει αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας, πλήρους πεδίου και υψηλής ανάλυσης, όπως επίσης και λόγω της απλότητας και του χαμηλού κόστους σε σχέση με την αποδοτικότητά της. Από τις δύο μεθόδους, τη μεταβατική μέθοδο και τη μέθοδο μόνιμης κατάστασης, μόνο η δεύτερη είναι εφαρμόσιμη σε ροές φυσικής συναγωγής. Εδώ εφαρμόζεται η μέθοδος σταθερής ροής θερμότητας μόνιμης κατάστασης, χρησιμοποιώντας ευρυζωνικούς TLC, η οποία, επιπλέον, παρέχει οπτικές απεικονίσεις πλήρους πεδίου της θερμοκρασίας και των τοιχωμάτων.

Διδιάστατα στρωτά οριακά στρώματα μπορούν να γίνουν ασταθή σε σχέση με τρισδιάστατες διαταραχές υπό τη μορφή μόνιμων, σύμφωνα με τη ροή και αντιστρόφως περιστρεφόμενων δινών.



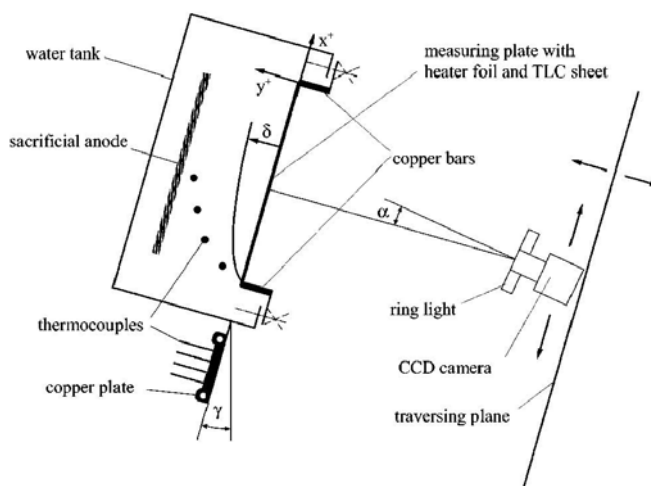
Εικόνα 2.39: Διαμήκειες δίνες σε ροή φυσικής συναγωγής στρωτού οριακού στρώματος, κατά μήκος θερμαινόμενης, επίπεδης, επικλινούς πλάκας. Η μαύρη σκίαση χρησιμοποιείται για να γίνει ορατή η κυματοειδής δομή του οριακού στρώματος.

Μια απαραίτητη συνθήκη για την ανάπτυξη τέτοιων διαμήκων δινών είναι μια δύναμη στα σωματίδια του ρευστού, κάθετη στη διεύθυνση της κύριας κίνησης του ρευστού. Σε μια ροή εξαναγκασμένης συναγωγής οριακού στρώματος, αυτή η δύναμη μπορεί να είναι η φυγόκεντρος. Ωστόσο, αυτή η δύναμη μπορεί επίσης να προκαλείται από την άνωση, έτσι ώστε διαμήκειες δίνες να εμφανίζονται επίσης και σε ροές μεικτής και φυσικής συναγωγής. Στην παρούσα περίπτωση, οι διαμήκειες δίνες μπορούν να αυξήσουν τις μέσες τιμές του συντελεστή τριβής και της μεταφοράς θερμότητας σε επίπεδα αρκετές φορές μεγαλύτερα από τις τιμές τους χωρίς διαταραχές. Ενώ η αύξηση του συντελεστή τριβής είναι γενικά μειονέκτημα στις τεχνικές εφαρμογές, η αύξηση στη μεταφορά θερμότητας μπορεί να αξιοποιείται σε μερικές εφαρμογές, όπως σε εναλλάκτες θερμότητας, αλλά θα πρέπει να αποφεύγεται σε άλλες, όπως για παράδειγμα σε αεριοστρόβιλους. Άλλωστε, οι διαμήκειες δίνες μπορεί να οδηγήσουν έμμεσα τη ροή από στρωτή σε τυρβώδη.

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι ο καθορισμός της κατανομής της τοπικής μεταφοράς θερμότητας, σε μία επίπεδη επικλινή πλάκα σε νερό, στην περίπτωση της φυσικής συναγωγής, υπό τη συνθήκη σταθερής ροής θερμότητας. Σε αυτή την περίπτωση αναπτύσσονται δίνες που περιστρέφονται σύμφωνα με τη ροή και αντίστροφα. Οι δίνες παραμορφώνουν το στρωτό οριακό στρώμα παράγοντας περιοχές δυνατών ζωνών ανοδικού ρεύματος (upwash) και καθοδικού ρεύματος (downwash), μέσα στις οποίες το θερμό ρευστό μεταφέρεται μακριά από το τοίχωμα ενώ αντίθετως το ψυχρό ρευστό προς αυτό. Αυτό οδηγεί σε μια περιοδική κατανομή της επιφανειακής θερμοκρασίας στη διεύθυνση της εγκάρσιας στη θερμαινόμενη πλάκα ροής.

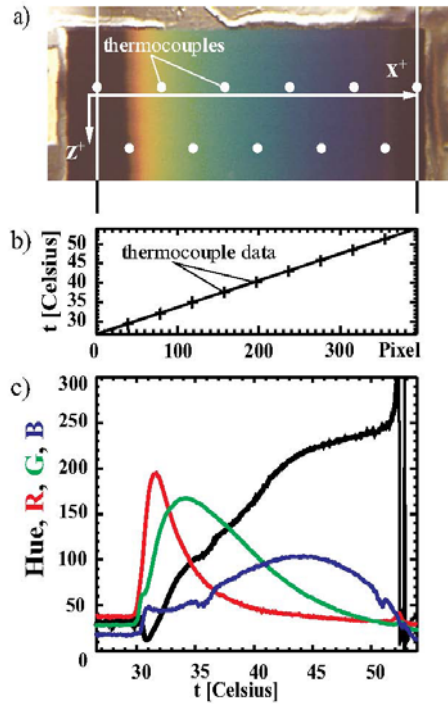
Μία πειραματική εγκατάσταση κατασκευάστηκε για τις μετρήσεις. Οι μετρήσεις μεταφοράς θερμότητας με TLC εκτελούνται σε απομαγνητισμένο, απιονισμένο νερό. Η κύρια φωτεινή πηγή είναι ψυχρό λευκό φως, αποτελούμενη από μια λάμπα αλογόνου για την παροχή μόνιμης φωτεινότητας συνεχούς φάσματος. Για το πείραμα απαιτούνται επίσης ένα σύστημα ψύξης, ένα φίλτρο υπέρυθρων, ένας οδηγός οπτικών ινών, ένα διάφραγμα (που επιτρέπει την προσαρμογή της φωτεινής έντασης δίχως να αλλάζει τη θερμοκρασία του χρώματος) και ένας κατά παραγγελία δακτύλιος οπτικών ινών. Εκμεταλλευόμενοι την οπτική συμπεριφορά των υγρών κρυστάλλων, ο δακτύλιος τοποθετείται ομοαξονικά με το φακό της κάμερας, εξασφαλίζοντας ότι οι υγροί κρύσταλλοι αντανakλούν ένα κυρίαρχο μήκος κύματος, το οποίο είναι πρακτικά ανεξάρτητο από τη γωνία προβολής. Το χρωματικό παιχνίδι των TLC βιντεοσκοπείται από τον πυθμένα του τμήματος δοκιμής με τη βοήθεια κάμερας.

Χρησιμοποιώντας ένα φακό μεγέθυνσης, ο οποίος επιτρέπει την εστίαση ενός ελάχιστου τμήματος περίπου $5\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ και κατ' επέκταση μια εντυπωσιακή ανάλυση και στις δύο διευθύνσεις της επιφάνειας. Το αναλογικό σήμα RGB της κάμερας ψηφιοποιείται με τη βοήθεια H / Y και ενός συλλέκτη καρτέ. Ράγες επιτρέπουν στην κάμερα να μεταφέρεται παράλληλα στη μετρούμενη πλάκα, γεγονός που επιτρέπει την κατά τμήματα εξέταση της επιφάνειας TLC.



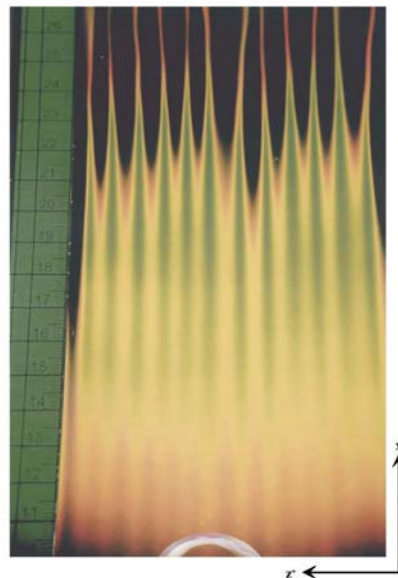
Εικόνα 2.40: Σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης

Για τη συσχέτιση των χρωμάτων των TLC με τις επιφανειακές τους θερμοκρασίες πρέπει να εκτελεστεί βαθμονόμηση. Αν και τα χρώματα των TLC παρατηρούνται από ένα σύστημα απόκτησης RGB, δεδομένα R-, G- και B- δεν χρησιμοποιούνται στη βαθμονόμηση. Αντ' αυτού, ο χρωματικός χώρος RGB μετασχηματίζεται στο χρωματικό χώρο απόχρωσης – φωτεινότητας - κορεσμού, γιατί η τιμή απόχρωσης είναι μονότονη συνάρτηση του κυρίαρχου μήκους κύματος που αντανακλάται από τα TLC και επομένως είναι η πλέον κατάλληλη για μια μοναδική σχέση χρώματος – θερμοκρασίας, αφού το κυρίαρχο μήκος κύματος που αντανακλάται από τα TLC είναι ευθεία συνάρτηση του βήματος της ελικοειδούς δομής των TLC, το οποίο με τη σειρά του είναι μοναδική συνάρτηση της θερμοκρασίας. Από τη γραμμική θερμοκρασιακή μεταβολή καθορίστηκαν οι καμπύλες RGB – θερμοκρασίας και απόχρωσης – θερμοκρασίας που παρουσιάζονται στο Σχ.4.



Εικόνα 2.41: Βαθμονόμηση TLCs (Hallcrest R30C5W): (a) η εικόνα της χάλκινης πλάκας με επικάλυψη από TLCs, (b) η θερμοκρασιακή καμπύλη και (c) καμπύλες RGB – θερμοκρασίας και απόχρωσης – θερμοκρασίας.

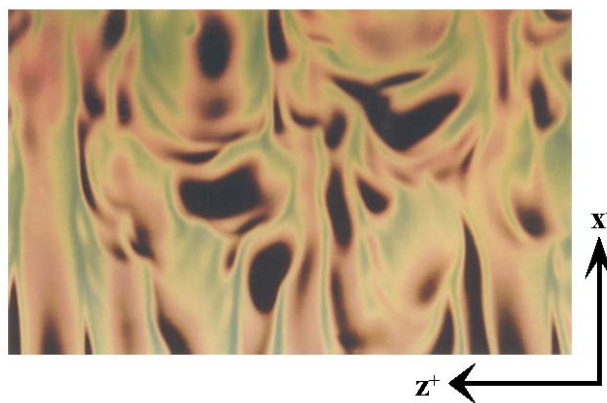
Είναι εμφανές ότι μόνο η καμπύλη απόχρωσης – θερμοκρασίας είναι μονότονη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια μοναδική σχέση χρώματος – θερμοκρασίας.



Εικόνα 2.42: Απεικόνιση διαμήκων δινών, για σταθερή ροή θερμότητας φυσικής συναγωγής, κατά μήκος επικλινούς επίπεδης πλάκας για $\gamma = 20^\circ$. Η άποψη είναι κάθετη προς την πλάκα πίσω από τη δεξαμενή.

Στην ανωτέρω εικόνα παρουσιάζεται μια φωτογραφία των TLC για το τμήμα δοκιμής, σε κλίση 20° προς την κατακόρυφη. Το μαύρο υποδεικνύει τις ψυχρότερες περιοχές, ακολουθούμενο κατά σειρά από το κόκκινο, κίτρινο και πράσινο, που υποδεικνύουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Στον πυθμένα, μπορεί δύσκολα να διακριθεί το τυπικό

θερμοκρασιακό πρότυπο των διαμήκων δινών. Πάνω, οι δίνες μεγαλώνουν πιο ισχυρά και προκαλούν ένα πρότυπο μόνιμων και τακτικών γραμμών στην κατάντη διεύθυνση. Ξεκινώντας από μια θέση περίπου 20 cm από την αιχμή, οι δίνες αυξάνουν την ολική μεταφορά θερμότητας, ούτως ώστε οι θερμοκρασίες των τοιχωμάτων να μειώνονται και το πράσινο χρώμα, το οποίο υποδεικνύει τις υψηλές θερμοκρασίες, εξαφανίζεται με την αυξανόμενη κατάντη θέση. Μια τεχνική απεικόνισης ροής και αριθμητικά διανυσματικά διαγράμματα ταχύτητας αποκαλύπτουν ότι οι διαμήκεις δίνες συνίστανται από ένα ζεύγος δινών, όπου η μία περιστρέφεται σύμφωνα με τη ροή και η άλλη αντιστρόφως, εμφανίζοντας περιοδικότητα στην διεύθυνση που ενώνει τα δύο τοιχώματα με μήκος κύματος που περιλαμβάνει δύο γειτονικές δίνες. Αυτό το μήκος κύματος είναι σταθερό κατάντι και οι δίνες είναι μόνιμες έως την έναρξη δευτερευόντων ασταθειών. Οι δευτερεύουσες αστάθειες ακολουθούνται από την τυρβώδη περιοχή.



Εικόνα 2.43: Απεικόνιση τυρβώδους ροής, για σταθερή ροή θερμότητας φυσικής συναγωγής, κατά μήκος επικλινούς επίπεδης πλάκας για $\gamma = 40^\circ$

Λαμβάνοντας ως βάση τη μέτρηση της θερμοκρασίας, μπορεί να καθοριστεί η τοπική μεταφορά θερμότητας, η οποία χαρακτηρίζεται από τον τοπικό αριθμό Nusselt:

$$Nu = \frac{\alpha_x x^+}{\lambda} = \frac{\dot{q}_\omega x^+}{\lambda(T_\omega - T_\infty)} \quad (2.4),$$

όπου α_x ο τοπικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας,

x^+ η κατάντη θέση από την αιχμή,

λ η θερμική αγωγιμότητα,

\dot{q}_ω η ειδική ροή θερμότητας στο τοίχωμα,

T_ω η θερμοκρασία τοιχώματος και

T_∞ η θερμοκρασία εκτός πεδίου.

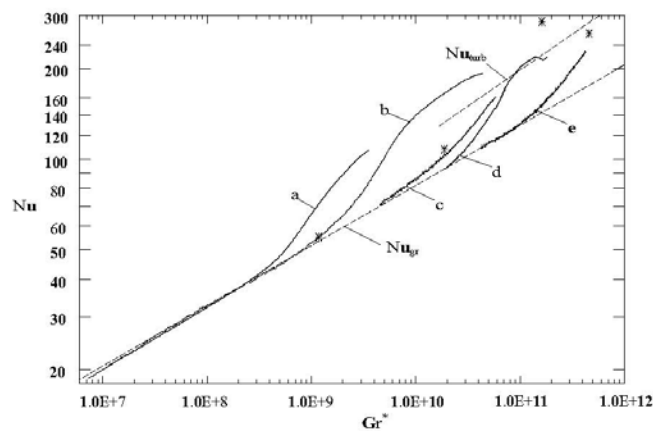
Δίνεται η τοπική μεταβολή του αριθμού Nusselt στην εγκάρσια διεύθυνση για διάφορους αριθμούς Grashof. Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ο τροποποιημένος αριθμός Grashof:

$$Gr^* = \frac{\dot{q}_\omega \beta g (x^+)^4}{\lambda \nu^2} \cos \gamma \quad (2.5),$$

όπου β ο συντελεστής θερμικής διαστολής,
 g η επιτάχυνση της βαρύτητας,
 ν το κινηματικό ιξώδες και
 γ η γωνία κλίσης.

Έως την τιμή $Gr^* = 1.5 \times 10^9$, κατά τη διεύθυνση που ενώνει τα δύο τοιχώματα, πρακτικά δεν παρατηρείται καμία μεταβολή από τον αριθμό Nusselt της βασικής ροής. Κατά την ίδια διεύθυνση, από εκεί έως την τιμή $Gr^* = 1.96 \times 10^{10}$ περίπου, ακολουθεί μια περιοχή όπου παρατηρείται μια κατάντη αναπτυσσόμενη μεταβολή του, με τη μεταφορά θερμότητας ανοδικού ρεύματος να πέφτει φανερά κάτω από την τιμή της βασικής ροής και τη μεταφορά θερμότητας καθοδικού ρεύματος να την υπερβαίνει. Ωστόσο, οι δίνες δεν οδηγούν σε καμία καθαρή αύξηση στη μεταφορά θερμότητας.

Ο μεταβατικός αριθμός Grashof μειώνεται με μια κλιμακούμενα αποσταθεροποιητική, κάθετη στο τοίχωμα, ανωστική δύναμη, σε αυξανόμενες γωνίες κλίσης. Αυτό προκαλεί τη μετάβαση να ξεκινά συντομότερα, σε $Gr^* \approx 3 \times 10^8$ για $\gamma = 50^\circ$, ενώ για $\gamma = 20^\circ$ ξεκινά για $Gr^* \approx 10^{11}$. Είναι αξιοσημείωτο ότι, για μεγάλες γωνίες κλίσης, οι αριθμοί Nusselt υπερβαίνουν τις τυρβώδεις τιμές στο πέρας της μετάβασης και αργότερα πλησιάζουν αυτές τις τιμές « από πάνω ». Με τη βοήθεια μιας απεικόνισης της ροής, αυτό παρατηρείται να είναι το αποτέλεσμα μιας ξαφνικής αποκόλλησης του οριακού στρώματος στις ζώνες ανοδικού ρεύματος στο τέλος της μετάβασης, με τον ψυχρό ρευστό εκτός πεδίου να σπρώχνεται προς το τοίχωμα, κάτι που δε συμβαίνει για χαμηλότερες γωνίες κλίσης.



Σχήμα 2.44: Η κατάντη ανάπτυξη των μέσων αριθμών Nusselt για διάφορες γωνίες κλίσης γ . Οι ιδιότητες του υλικού αξιολογήθηκαν στους 30°C αντιστοιχώντας σε $Pr = 5.414$: (a) $\gamma = 50^\circ$, $dq_w / dt = 6157.8 \text{ W / m}^2$ και $T_\infty = 22.1^\circ\text{C}$ (b) $\gamma = 40^\circ$, $dq_w / dt = 6122.1 \text{ W / m}^2$ και $T_\infty = 23.4^\circ\text{C}$ (c) $\gamma = 30^\circ$, $dq_w / dt = 4176.0 \text{ W / m}^2$ και $T_\infty = 25.3^\circ\text{C}$ (d) $\gamma = 25^\circ$, $dq_w / dt = 5268.7 \text{ W / m}^2$ και $T_\infty = 22.9^\circ\text{C}$ (e) $\gamma = 20^\circ$, $dq_w / dt = 6157.8 \text{ W / m}^2$ και $T_\infty = 23.5^\circ\text{C}$, (*) $\gamma = 29^\circ$, $dq_w / dt = 2291 \text{ W / m}^2$.

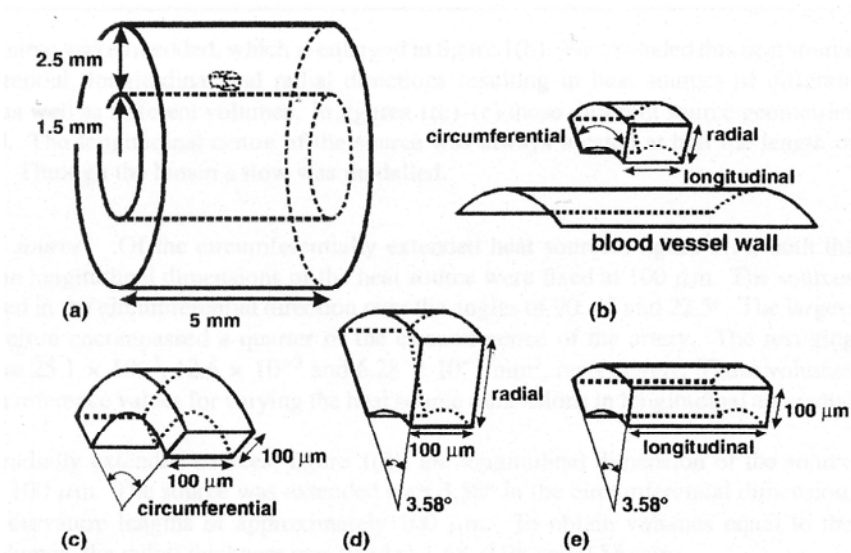
- Κατανομή θερμοκρασίας σε αθηροσκληρωτικές στεφανιαίες αρτηρίες: επίδραση της γεωμετρίας της πλάκας και της ροής (αριθμητική μελέτη)

Η ενδαγγειακή στεφανιαία θερμογραφία είναι μία μέθοδος που μπορεί να ανιχνεύσει ευπαθείς αθηροσκληρωτικές πλάκες. Η ευπαθής πλάκα που προκαλεί θρόμβωση είναι αυτή που είναι επιρρεπής σε ρήξη ή το ινοαθήρωμα λεπτής κάψας TCFA (thin cap fibroatheroma). Τα συστατικά του TCFA είναι ένας αθηρωματώδης πυρήνας πλούσιος σε λιπίδια και μία λεπτή ινώδης κάψα με διήθηση από μακροφάγα και λεμφοκύτταρα μαζί με μειωμένη περιεκτικότητα σε λεία μυϊκά κύτταρα. Τα μακροφάγα της TCFA εντοπίζονται σε πολλές

πιθανές θέσεις, όπως στην ινώδη κάψα ή στην άκρη του λιπιδικού πυρήνα. Η ρήξη της κάψας σχετίζεται με αυξημένη συσσώρευση μακροφάγων, τα οποία είναι φλεγμονώδη κύτταρα που εκκρίνουν ένζυμα αποδόμησης της εξωκυττάριας θεμέλιας ουσίας, που μπορεί να προκαλούν αντιδράσεις απελευθέρωσης θερμότητας στην πλάκα, η οποία ανιχνεύεται με θερμογραφικές μεθόδους.

Δεδομένου ότι τα μακροφάγα και συνεπώς η παραγωγή θερμότητας μπορούν να έχουν διάφορες εντοπίσεις, η επίδραση της ροής μπορεί να είναι διαφορετική για διάφορες διαμορφώσεις της πηγής θερμότητας.

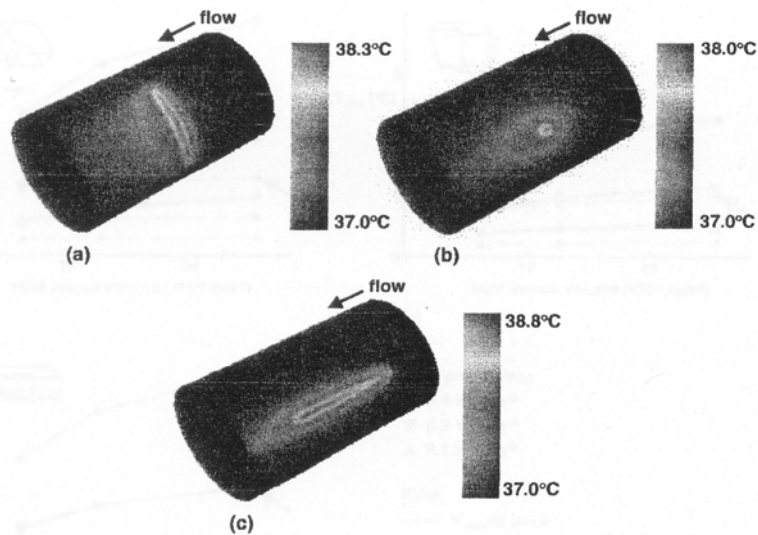
Για να μελετηθεί η επίδραση της γεωμετρίας της πηγής θερμότητας και της ροής στη θερμοκρασία του τοιχώματος έγιναν αριθμητικές προσομοιώσεις βάσει γεωμετρικών μοντέλων που αναπαριστούν τον αυλό στεφανιαίας αρτηρίας και τον περιβάλλοντα ιστό. Μια πηγή θερμότητας τοποθετήθηκε μέσα στον ιστό. Δύο ομοαξονικοί κύλινδροι παριστούν τον αυλό του αγγείου και τον περιβάλλοντα ιστό. Ένας όγκος που παριστά την πηγή παραγωγής θερμότητας τοποθετήθηκε μέσα στον ιστό. Επεκτείνουμε την πηγή στην περιμετρική, επιμήκη και ακτινική διεύθυνση ώστε να επιτύχουμε πηγές με διαφορετική γεωμετρία και διαφορετικό όγκο. Το επίμηκες κέντρο της πηγής ήταν πάντοτε στο μέσο του μήκους του κυλίνδρου. Μέσα στον αυλό διαμορφώθηκε ροή.



Εικόνα 2.45: Γεωμετρικό μοντέλο αυλού αρτηρίας και τα είδη γεωμετρίας της πλάκας

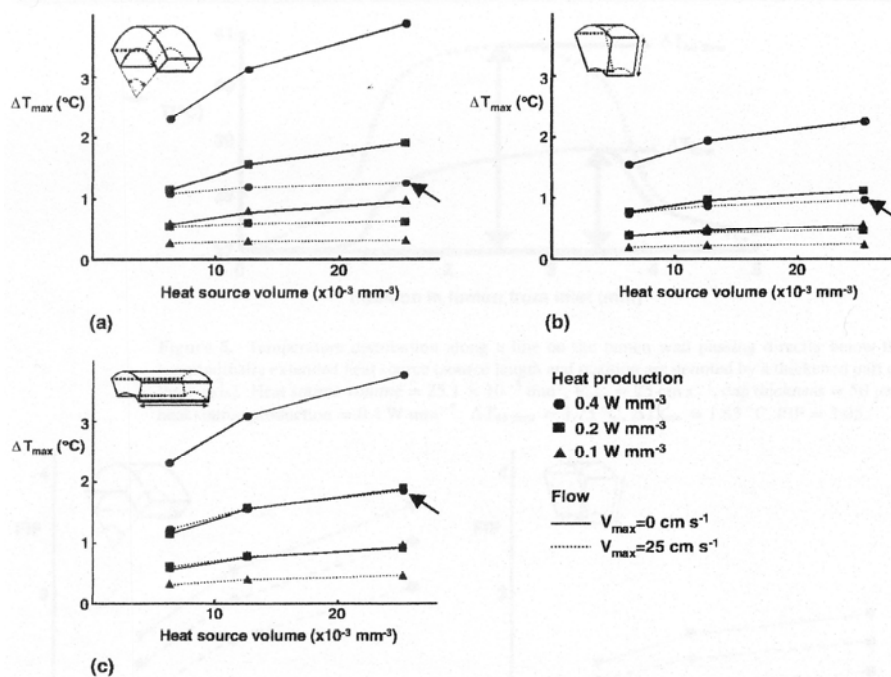
Καθορίσαμε τον παράγοντα επίδρασης της ροής FIF (flow influence factor) για να εκφράσουμε την επίδραση της ροής στη θερμοκρασία του αυλού για διάφορες παραμέτρους της θερμικής πηγής, όπως η γεωμετρία και ο όγκος.

Παραδείγματα κατανομής θερμοκρασίας στο αγγειακό τοίχωμα φαίνονται στην εικόνα 2.46.



Εικόνα 2.46: Κατανομή θερμοκρασίας στο αγγειακό τοίχωμα ανάλογα με τη γεωμετρία της πηγής

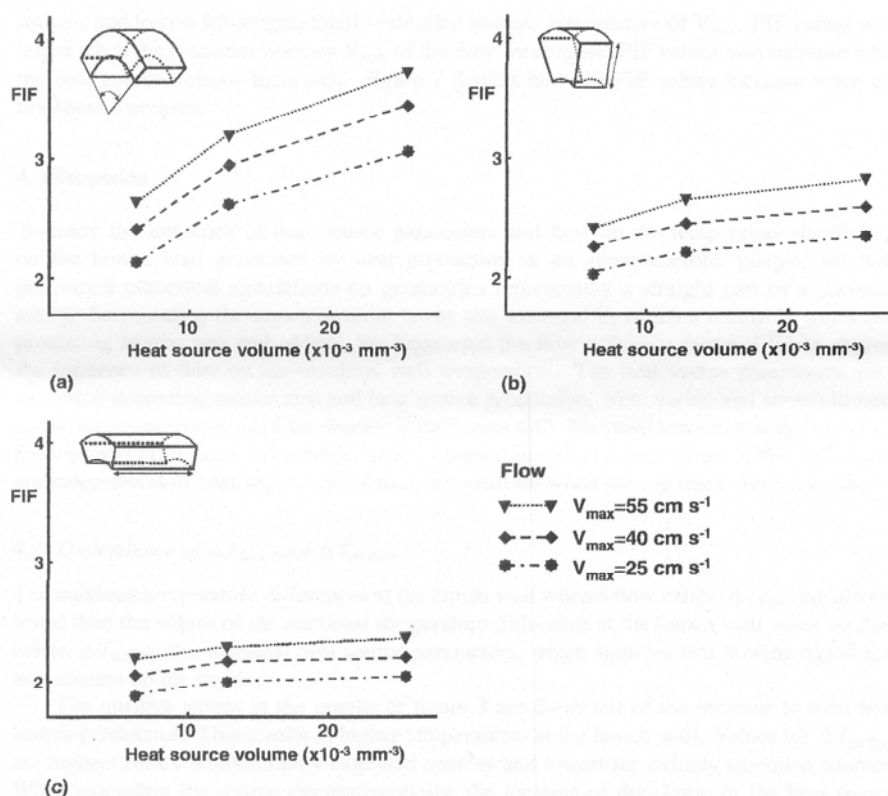
Η επίδραση της γεωμετρίας της πηγής στην κατανομή της θερμοκρασίας απεικονίζεται για τους μεγαλύτερους όγκους πηγής και για ροή με τη μικρότερη V_{max} . Στην περίπτωση περιμετρικά εκτεινόμενης πηγής – εικόνα 2.46 (a) – η κατανομή ήταν ευρύτερη στην περιμετρική κατεύθυνση, ενώ η κατανομή σε μία επιμήκως εκτεινόμενη πηγή – εικόνα 2.46 (c) – εκτεινόταν κατά την επιμήκη κατεύθυνση. Για μια ακτινικά εκτεινόμενη πηγή – εικόνα 2.46 (b) -, η κατανομή έμοιαζε με κηλίδα βραχεία τόσο στην επιμήκη όσο και στην περιμετρική κατεύθυνση. Και στα τρία παραπάνω παραδείγματα της εικόνας 2.46, η επίδραση της ροής μπορεί να εκτιμηθεί με σαφήνεια. Λόγω της ροής το profil των θερμοκρασιών επεκτείνεται στην κατεύθυνση της ροής.



Εικόνα 2.47: Μεταβολή της μέγιστης θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ πλάκας και αγγειακού τοιχώματος σε σχέση με τον όγκο της πλάκας για τις διάφορες γεωμετρίες της

Στις εικόνες 2.47 (a) – (c) φαίνονται οι τιμές των ΔT με ροή και ΔT χωρίς ροή για περιμετρικές, ακτινικές και επιμήκειες πηγές θερμότητας. Σ' αυτές τις εικόνες οι τιμές αφορούν είτε ροή με $V_{max} = 25 \text{ cm / sec}$, είτε απουσία ροής. Οι τιμές των ΔT με ροή και ΔT χωρίς ροή είναι υψηλότερες όταν η παραγωγή θερμότητας είναι υψηλότερη, για όλες τις γεωμετρίες της πηγής. Μέγιστες διαφορές θερμοκρασίας είχαν γραμμική σχέση με την παραγωγή θερμότητας, όταν ο όγκος της πηγής ήταν σταθερός. Αυτό ισχύει και παρουσία και απουσία ροής στον αυλό. Όπως ήταν αναμενόμενο οι τιμές του ΔT με ροή ήταν πάντα χαμηλότερες από τις τιμές του ΔT χωρίς ροή για όμοιους παραμέτρους πηγής. Οι τιμές του ΔT χωρίς ροή είναι υψηλότερες για περιμετρικά εκτεινόμενες πηγές θερμότητας και χαμηλότερες για ακτινικά εκτεινόμενες, ενώ οι διαφορές μεταξύ περιμετρικών και επιμήκων σχεδόν αμελητέες. Οι τιμές του ΔT με ροή είναι υψηλότερες για επιμήκειες πηγές και μικρότερες για ακτινικές πηγές. Οι διαφορές ΔT με ροή μεταξύ περιμετρικών και επιμήκων πηγών θερμότητας είναι σαφώς υπαρκτές, σε αντίθεση με ό,τι ισχύει για το ΔT χωρίς ροή. Όλες οι γραμμές στην Εικ. 2.47 έχουν μια θετική κλίση. Αυτό δείχνει ότι η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας στο αγγειακό τοίχωμα αυξάνει με τον όγκο της πηγής, ανεξάρτητα από τη γεωμετρία της και την παρουσία ροής. Η κλίση είναι πιο απότομη για μικρότερους όγκους θερμικής πηγής που εκτείνεται είτε περιμετρικά είτε επιμήκως όταν δεν υπάρχει ροή. Η κλίση είναι πιο επίπεδη όταν υπάρχει ροή και η θερμική πηγή εκτείνεται είτε περιμετρικά είτε ακτινικά.

Στην εικόνα 2.48 (a) - (c) καταδεικνύεται η εξάρτηση του FIF από τον όγκο της θερμικής πηγής, τη γεωμετρία της και τη μέγιστη ταχύτητα ροής.



Εικόνα 2.48: FIF σε σχέση με τον όγκο της πλάκας για τις διάφορες γεωμετρίες της

Οι τιμές του FIF ήταν υψηλότερες για περιμετρικά εκτεινόμενη πηγή και χαμηλότερες για επιμήκως εκτεινόμενη, ανεξάρτητα από V_{max} . Οι τιμές του FIF ήταν υψηλότερες με

υψηλότερη μέγιστη ταχύτητα ροής. Επίσης ο FIF αυξανόταν με την αύξηση του όγκου της θερμικής πηγής.

Οι διαφορές μέγιστης θερμοκρασίας στο αγγειακό τοίχωμα όταν υπάρχει ροή, το ΔT με ροή, είναι πάντα χαμηλότερες συγκριτικά με τις τιμές όταν δεν υπάρχει ροή, δηλαδή ΔT χωρίς ροή, με όμοιες τις παραμέτρους της θερμικής πηγής, πράγμα που σημαίνει ότι η ροή του αίματος δρα ως ψυκτικό μέσο.

Οι θετικές κλίσεις στα γραφήματα της Εικ. 2.47 είναι αποτέλεσμα της αύξησης της ολικής παραγωγής θερμότητας. Αυτό συνεπάγεται υψηλότερες θερμοκρασίες στο τοίχωμα. Οι τιμές του ΔT χωρίς ροή είναι υψηλότερες για πηγές περιμετρικά εκτεινόμενες και χαμηλότερες για ακτινικά εκτεινόμενες πηγές. Όταν η πηγή επεκτείνεται περιμετρικά, η εντόπιση του κέντρου της θερμικής πηγής μετατοπίζεται ελαφρά προς το αγγειακό τοίχωμα. Όταν η πηγή επεκταθεί ακτινικά, το κέντρο της θερμικής πηγής μετατοπίζεται μακριά από τον αυλό. Σε επιμήκη επέκταση της πηγής το κέντρο παραμένει αμετάβλητο. Αυτές οι διαφορές εξηγούν τις διαφορές στην κατανομή θερμοκρασίας γύρω από την πηγή και τις αντίστοιχες τιμές ΔT χωρίς ροή. Όσο πλησιέστερο είναι το κέντρο βαρύτητας της θερμικής πηγής στο τοίχωμα του αγγείου, τόσο υψηλότερο είναι το ΔT χωρίς ροή.

Οι τιμές του ΔT με ροή είναι υψηλότερες για επιμήκως εκτεινόμενες πηγές θερμότητας και χαμηλότερες για ακτινικά εκτεινόμενες. Για επιμήκεις πηγές, το αίμα διατρέχει μεγαλύτερη απόσταση θερμαινόμενο από την πηγή, συγκριτικά με περιμετρικά ή ακτινικά εκτεινόμενες πηγές, έτσι είχε μικρότερη δυνατότητα ψύξης του αυλού / τοιχώματος διότι η πηγή κατευθύνεται κατά τη φορά της ροής του αίματος.

Οι διαφορές ΔT με ροή μεταξύ περιμετρικών και ακτινικών πηγών οφείλονται στην επιφάνεια της πηγής που είναι πλησιέστερη στον αυλό. Στην περίπτωση της περιμετρικής πηγής η επιφάνεια αυτή αυξάνεται παράλληλα με την αύξηση του όγκου της πηγής, ενώ στην ακτινική πηγή παραμένει σταθερή.

Περισσότερη θερμότητα θα κατευθύνεται προς το αγγειακό τοίχωμα σε περίπτωση περιμετρικής πηγής συγκριτικά με ακτινική πηγή, πράγμα που συνεπάγεται υψηλότερα ΔT με ροή. Η ακτινική πηγή μοιάζει περισσότερο με την σημειακή πηγή, η οποία διαθέτει επιπλέον μία διάσταση για την απελευθέρωση της παραγόμενης θερμότητας, με αποτέλεσμα μικρότερη ποσότητα να κατευθύνεται προς το αγγειακό τοίχωμα και άρα μικρότερες τιμές ΔT με ροή.

Η μείωση του πάχους της κάψας αύξησε τις διαφορές μέγιστης θερμοκρασίας αλλά μείωσε την επίδραση της ροής.

Από τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης συμπεραίνεται ότι μια συγκεκριμένη διαφορά θερμοκρασίας μπορεί να συσχετιστεί με ποικιλία συνδυασμών των εξής παραμέτρων: μέγεθος και γεωμετρία θερμικής πηγής, πάχος κάψας, ροή και παραγωγή θερμότητας.

Στο μοντέλο μας χρησιμοποιήσαμε έναν ευθύ σωλήνα υποθέτοντας ότι η ροή δεν αποφράσσονταν από την πλάκα. Αυτή είναι μια λογική προσέγγιση, δεδομένου ότι στην πραγματικότητα οι περισσότερες ευπαθείς πλάκες μόλις που προεξέχουν εντός του αυλού λόγω προσαρμοστικής αναδιαμόρφωσης του αυλού, που τις καθιστά δύσκολα ανιχνεύσιμες κατά την συμβατική αγγειογραφία. Δεν αναφέρονται δεδομένα για το μέγεθος της πηγής θερμότητας και έτσι οι διαστάσεις της πηγής επιλέχθηκαν μάλλον αυθαίρετα. Η πηγή έχει συγκεκριμένες περιορισμένες διαστάσεις και θεωρήθηκε ομογενής. Στην πραγματικότητα τα όρια των συσσωρεύσεων των μακροφάγων εντός της αθηροσκληρωτικής πλάκας ενδέχεται να μην είναι τόσο ξεκάθαρα και τα μακροφάγα μπορεί να κατανέμονται σε πολύ μεγαλύτερη έκταση. Μία διαφορά ανάμεσα στο μοντέλο μας και της κλινικές συνθήκες είναι ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η παρουσία της συσκευής μετρήσεων εντός του αυλού. Η παρουσία αυτής της συσκευής αλλάζει το προφίλ ταχυτήτων, τις μέγιστες ταχύτητες και συνεπώς αλλάζει τα θερμικά όρια. Αυτό αλλάζει το θερμικό *profil* στο αγγειακό τοίχωμα, που γίνεται

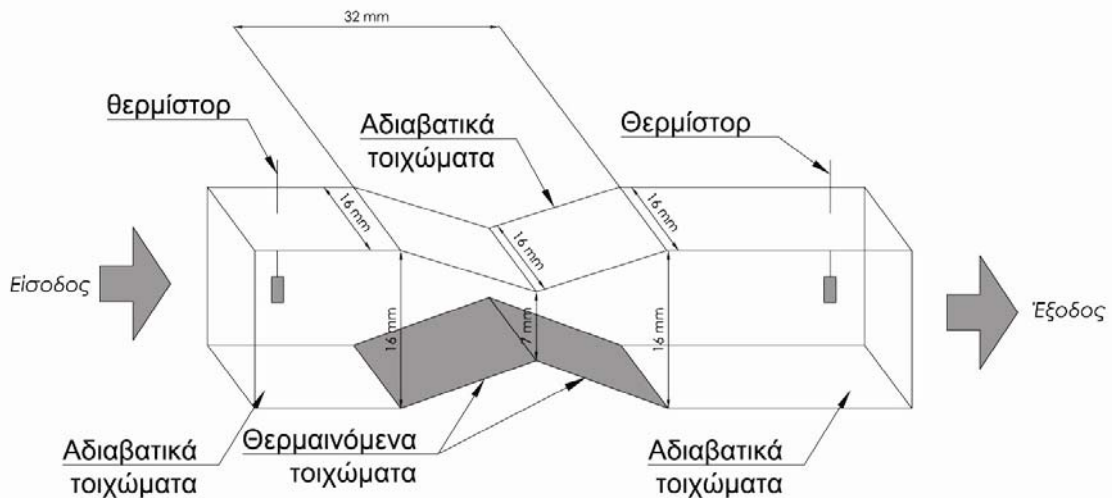
σημαντικά εξαρτώμενο από τη θέση του καθετήρα σε σχέση με το τοίχωμα. Αν ο καθετήρας έρχεται σε επαφή με το τοίχωμα και αν η επιφάνεια επαφής είναι αρκετά μεγάλη, η ροή σ' αυτήν την περιοχή παρεμποδίζεται και τοπικά υπάρχουν σχεδόν συνθήκες μη - ροής. Αβεβαιότητες αυτού του είδους ενδέχεται επίσης να επηρεάσουν τον FIF.

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης δείχνουν ότι οι θερμογραφικές μετρήσεις δεν αντιστοιχούν πάντα μια – προς – μία με την παραγόμενη θερμότητα σε μία ευπαθή πλάκα. Η μέτρηση υψηλότερων διαφορών θερμοκρασίας στο τοίχωμα δεν υποδηλώνει υποχρεωτικά μεγαλύτερη ή εντονότερη πηγή θερμότητας. Η ροή σαφώς επηρεάζει τις μετρήσεις και η επίδραση εξαρτάται από τη γεωμετρία της πλάκας. Συνεπώς μεμονωμένες θερμογραφικές μετρήσεις πρέπει να ερμηνευθούν με μεγάλη προσοχή.

Κεφάλαιο 3: Πειραματική Διάταξη – Πειραματική Διαδικασία – Καμπύλες Βαθμονόμησης

3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Κατά τη διάρκεια του πειράματος μελετήσαμε μία θερμαινόμενη στένωση, μέρος οριζόντιου αγωγού από plexiglas τετραγωνικής διατομής (16 x 16) mm, που αντιστοιχεί σε ένα συγκλίνον – αποκλίνον ακροφύσιο μήκους 32 mm. Αντιλαμβανόμαστε, λοιπόν, ότι το ακροφύσιο στην είσοδο και την έξοδο του έχει τετραγωνική διατομή ίδια με αυτή του οριζοντίου αγωγού, ενώ το υπόλοιπο τμήμα του αποτελείται από ορθογωνικές διατομές η μία πλευρά των οποίων είναι 16 mm, ενώ η άλλη κυμαίνεται από 16 – 7 mm. Η ορθογωνική διατομή των (16 x 7) mm αντιστοιχεί στο λαιμό του ακροφυσίου. Τα κεκλιμένα επίπεδα του ακροφυσίου σχηματίζουν με το οριζόντιο επίπεδο γωνία 15,7°. Από τα τέσσερα τοιχώματα του ακροφυσίου τα τρία είναι κατασκευασμένα από διαφανές plexiglas, ώστε να είναι πρακτικώς αδιαβατικά, ενώ το υλικό του τέταρτου, στην κάτω πλευρά του, είναι χαλκός που είναι καλός αγωγός της θερμότητας.



Εικόνα 3.1: Μοντέλο θερμαινόμενης στένωσης

Ο οριζόντιος αγωγός (παράλληλος στο επίπεδο της τράπεζας με το μεταλλικό τοίχωμα της στένωσης προς τα κάτω) διέρχεται από μία ανοικτή δεξαμενή, κατασκευασμένη από το ίδιο υλικό, με τέτοιο τρόπο ώστε το μεταλλικό τοίχωμα της στένωσης να έρχεται σε επαφή με το νερό που περιέχει η δεξαμενή. Το νερό της δεξαμενής, σε κάθε στάδιο του πειράματος, έχει ενιαία σταθερή θερμοκρασία την οποία θεωρούμε ως θερμοκρασία της μεταλλικής πλάκας ($T_{πλ.}$). Το γεγονός ότι η θερμοκρασία έχει την ίδια τιμή για το νερό, την εσωτερική και την εξωτερική επιφάνεια του μεταλλικού τοιχώματος της στένωσης οφείλεται στο ότι το πάχος του τοιχώματος είναι μικρό (1 mm), η θερμική αγωγιμότητα του χαλκού είναι μεγάλη και η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ μεταλλική πλάκας και εργαζόμενου μέσου είναι εν γένει μικρή.

Τη θερμοκρασία την καθορίζουμε με την βοήθεια κυκλώματος που περιλαμβάνει μία θερμική αντίσταση, ένα θερμόμετρο αντίστασης (RTD) Pt100 και ένα προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή (PLC).

Η θερμική αντίσταση, εμβαπτισμένη στη δεξαμενή, προσδίδει στο νερό που περιβάλλει τη στένωση την επιθυμητή θερμοκρασία την οποία στη συνέχεια μεταδίδει στη μεταλλική πλάκα. Την αντίσταση μετρούμε με τη χρήση πολυμέτρου με σκοπό να εξασφαλίσουμε τιμή της τέτοια που να θερμαίνει σύντομα το νερό χωρίς ταυτόχρονα να καταστρέφεται (στην περίπτωση μας δίνουμε τέτοιο μήκος στην αντίσταση ώστε να είναι περίπου ίση με 12 Ω). Μερικές φορές προέκυπτε πρόβλημα σπινθηρισμού (στα σημεία επαφής της αντίστασης με τα “ κροκοδειλάκια “) ή μειωμένης απόδοσης λόγω εμφάνισης σκουριάς στην βυθισμένη στο νερό αντίσταση.



Εικόνα 3.2: Θερμική αντίσταση

Το Pt100 έχει μήκος 100 mm και διάμετρο 3 mm. Μέσω ενός καλωδίου 3 m εμβαπτίζεται στη δεξαμενή και στερεώνεται έτσι ώστε να μετρά τη θερμοκρασία της μεταλλικής πλάκας σε κάθε χρονική στιγμή. Η θερμοκρασία λειτουργίας του κυμαίνεται από $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως και $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το Pt100 αποτελείται από δύο μεταλλικούς αγωγούς διαφορετικών υλικών που έρχονται σε επαφή μόνο στο άκρο λήψης της μέτρησης. Στα ελεύθερα άκρα των δύο αγωγών η εμφανιζόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη αντιστοιχίζεται μονότονα με τη θερμοκρασία, με βάση τη σχέση:

$$e_i = k(T) \times T_i \quad (3.1).$$

Για αυτό το λόγο το συγκεκριμένο όργανο δε χρίζει βαθμονόμησης.

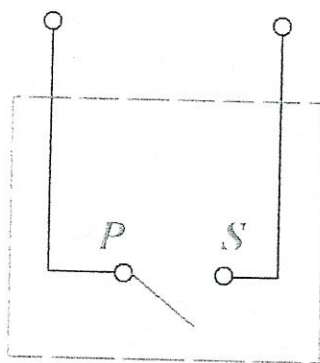


Εικόνα 3.3: Θερμόμετρο αντίστασης Pt100

Ο PLC έχει δύο ενδείξεις. Η μία είναι της θερμοκρασίας που επιθυμούμε να έχει το νερό και κατ' επέκταση η μεταλλική πλάκα και η άλλη η θερμοκρασία που μετρά το Pt100 για κάθε χρονική στιγμή για τη μεταλλική πλάκα. Ουσιαστικά η είσοδος του ελεγκτή είναι η διαφορά δυναμικού στα άκρα των μεταλλικών αγωγών του Pt100. Όταν η θερμοκρασία φθάσει την επιθυμητή τιμή (δηλαδή ταυτισθούν οι δύο ενδείξεις) ο ρόλος του PLC είναι να διατηρήσει αυτήν την τιμή σταθερή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός relay το οποίο είναι μέρος του ελεγκτή και ουσιαστικά κλείνει και ανοίγει το κύκλωμα αφήνοντας να διαρρεύσει την αντίσταση ρεύμα ή όχι.



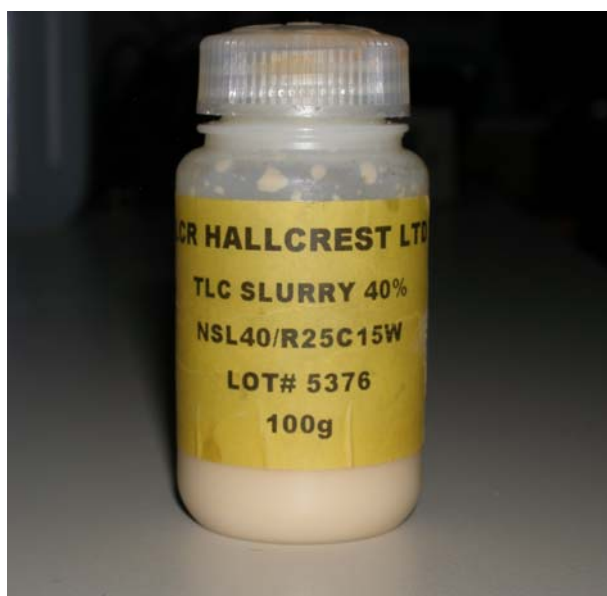
Εικόνα 3.4: Προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής



Εικόνα 3.5: Relay

Το ρευστό που κυλά εντός του οριζόντιου αγωγού και της στένωσης είναι απιονισμένο νερό αναμεμειγμένο με χοληστερικούς υγρούς κρυστάλλους τύπου NSL40/R25C15W της εταιρίας HALLCREST. Η περιεκτικότητα κατ' όγκο του διαλύματος σε κρυστάλλους επιδιώκεται να είναι αρκετά υψηλή ώστε το θερμοκρασιακό εύρος μελέτης των θερμοκρασιακών πεδίων να είναι αρκετά μεγάλο αλλά όχι τόσο υψηλή οπότε οι ανακλάσεις να είναι τόσο έντονες και κατ' επέκταση κακό το οπτικό αποτέλεσμα. Οι υγροί κρύσταλλοι είναι ευαίσθητοι στις μηχανικές τάσεις γι' αυτό και υποβάλλονται σε διαδικασία μικροπερικάλυψης σύμφωνα με την οποία μικρές τους ποσότητες εσωκλείονται σε διαφανές πολυμερές υλικό. Έτσι αποφεύγονται και προβλήματα χημικής αλλοίωσής τους. Οι υγροί κρύσταλλοι είναι διαμέτρου 20 μm και το εύρος λειτουργίας τους, δοσμένο από την εταιρεία κατασκευής τους, είναι από 25 – 40 $^{\circ}\text{C}$. Καθότι οι υγροί κρύσταλλοι είναι θερμοχρωμικοί,

όταν προσπέσει πάνω τους λευκό φως, χρωματίζονται ανάλογα με την τοπική θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου και συγκεκριμένα αυξανόμενης της θερμοκρασίας λαμβάνουν με τη σειρά τα χρώματα κόκκινο – κίτρινο – πράσινο – μωβ - κυανό καθώς και τις ενδιάμεσες αποχρώσεις τους. Τα χρώματα αυτά λαμβάνουν εντός του θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας τους, ενώ εκτός αυτού εμφανίζουν γαλακτώδη μορφή. Ακριβώς επειδή εκμεταλλευόμαστε το χρωματισμό και αποχρωματισμό των υγρών κρυστάλλων είναι απαραίτητο το τοίχωμα της στένωσης που προσπίπτει το φύλλο φωτός καθώς και εκείνο το οποίο παρατηρούμε με την κάμερα να είναι διαφανή ώστε να μπορούμε να λάβουμε τις εικόνες των θερμοκρασιακών πεδίων. Τα υπόλοιπα τοιχώματα βάζονται μαύρα με σκοπό την ελάττωση των ανακλάσεων του προσπίπτοντος λευκού φωτός και κατ' επέκταση τη μεγαλύτερη ευκρίνεια των χρωμάτων που λαμβάνουν οι κρύσταλλοι.



Εικόνα 3.6: Οι υγροί κρύσταλλοι του πειράματος

Το προσπίπτον φως είναι φύλλο φωτός (απαραίτητη προϋπόθεση μιας και οι παρατηρήσεις μας γίνονται σε ένα επίπεδο και όχι στο σύνολο του όγκου του ρευστού) πάχους 2 mm, το οποίο προέρχεται από πηγή λευκού φωτός τοποθετημένης, σε μικρή απόσταση από την πειραματική διάταξη, έτσι ώστε να φωτίζει το μέσο επίπεδο του ακροφυσίου με σταθερή τη διάσταση των 32 mm. Η πηγή λευκού φωτός είναι ρυθμιζόμενης έντασης (με δύο σκάλες ρύθμισης) και ψυχρού φωτισμού (που δεν εκπέμπει θερμοκρασία) για να αποφεύγεται η αλληλεπίδραση με την πειραματική διάταξη. Το προσπίπτον στη διάταξη φύλλο φωτός περνά μέσα από ημικυλινδρικό φακό του οποίου η θέση είναι μεταβαλλόμενη έτσι ώστε να αλλάζει το πάχος της προσπίπτουσας δέσμης.



Εικόνα 3.7: Συσκευή παραγωγής λευκού φωτός



Εικόνα 3.8: Κεφαλή παραγωγής λευκού φύλλου φωτός και ημικυλινδρικός φακός

Την αντίδραση που έχουν οι υγροί κρύσταλλοι στο προσπίπτον λευκό φως καταγράφουμε με τη βοήθεια μας έγχρωμης CCD κάμερας με δυνατότητα λήψης 25 frames το δευτερόλεπτο. Πάνω στην κάμερα είναι τοποθετημένος Macro φακός με δυνατότητα μεγεθύνσεως και αλλαγής του αριθμού του διαφράγματος. Η κάμερα βρίσκεται σε συγκεκριμένη πάντοτε απόσταση αντίκρυ της στένωσης και συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή που δέχεται ως είσοδο τα λαμβανόμενα videos, τα οποία επεξεργαζόμαστε με ένα πρόγραμμα της εταιρείας Pinnacle το οποίο βοηθά στη μετατροπή του αναλογικού σήματος εισόδου σε ψηφιακές εικόνες (μεγέθους 768 x 576 pixels). Η κάμερα καταγράφει την πειραματική διαδικασία με κλίση ως προς τον οριζόντιο άξονα (περίπου 7°), με σκοπό τη βελτιστοποίηση των οπτικών αποτελεσμάτων. Αυτό συμβαίνει διότι η ευκρίνεια των χρωμάτων που λαμβάνουν οι υγροί κρύσταλλοι εξαρτάται κατά πολύ από τη γωνία παρατήρησης.



Εικόνα 3.9: CCD κάμερα και Macro φακός

Η διάταξή μας περιλαμβάνει συνολικά τρεις δεξαμενές. Τη δεξαμενή που περιέχει τον οριζόντιο αγωγό (που έχουμε ήδη περιγράψει), τη δεξαμενή που τροφοδοτεί τη διάταξη με το εργαζόμενο μέσο και τη δεξαμενή στην οποία αυτό καταλήγει.

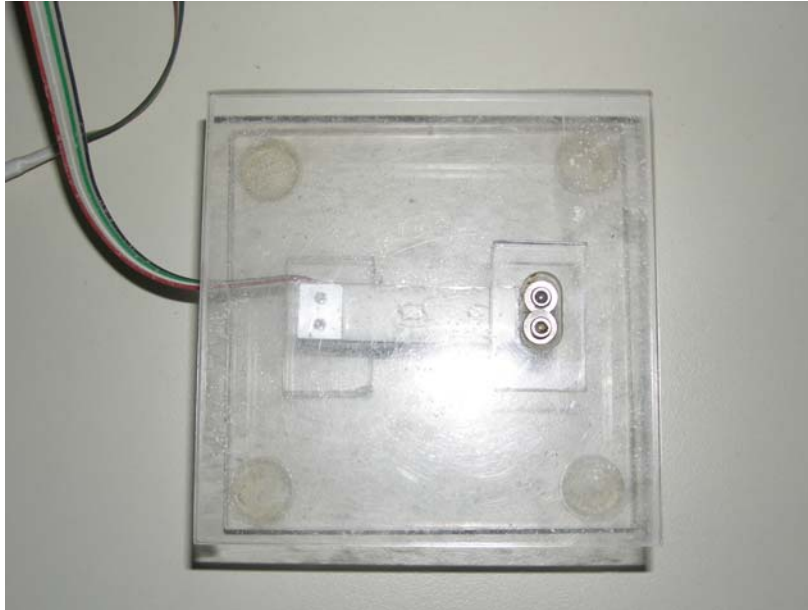
Η δεξαμενή τροφοδοσίας είναι ένα μεταλλικό δοχείο με σταθερή θερμοκρασία ($T_{δεξ.}$) η οποία διαμορφώνεται και σταθεροποιείται με τη βοήθεια κυκλώματος αντίστοιχου με αυτό που περιγράψαμε για τη δεξαμενή που περιέχει τη στένωση.

Η δεξαμενή απόθεσης είναι ένα απλό δοχείο ορθογωνικής διατομής κατασκευασμένο από Plexiglas.

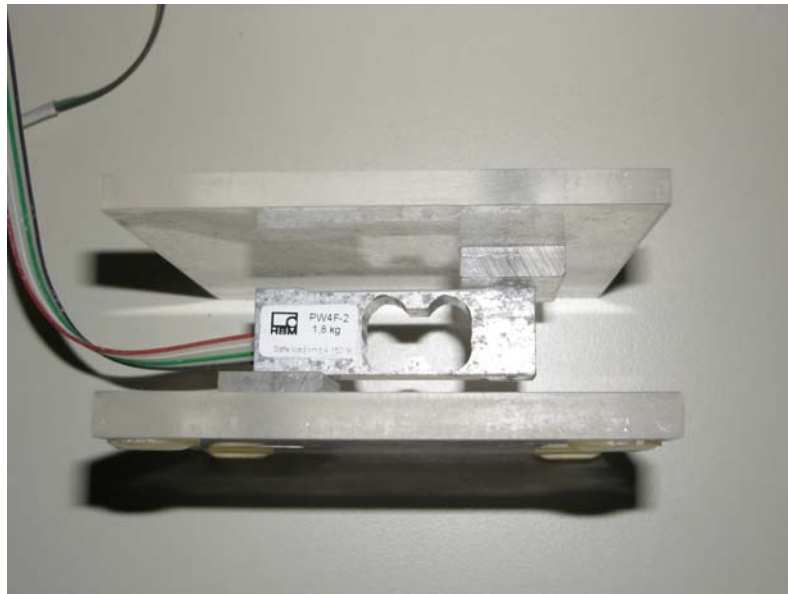
Οι τρεις δεξαμενές βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα και συγκεκριμένα η υψομετρική διαφορά μεταξύ δεξαμενής τροφοδοσίας και δεξαμενής απόθεσης είναι $\Delta h = 1,2$ m. Η ροή του εργαζόμενου μέσου γίνεται λόγω αυτής της υψομετρικής διαφοράς με την επίδραση της βαρύτητας.

Στη διάταξή μας υπάρχουν δύο στρόφιγγες οι οποίες είναι τοποθετημένες στους σωλήνες που συνδέουν ανά δύο τις δεξαμενές. Η στρόφιγγα μεταξύ δεξαμενής τροφοδοσίας και δεξαμενής της στένωσης ρυθμίζει την εκάστοτε παροχή και βοηθά στην απομάκρυνση φυσαλίδων αέρα ενώ η άλλη απλά εξυπηρετεί στην απομάκρυνση του εγκλωβισμένου στο υδραυλικό κύκλωμα αέρα.

Οι στρόφιγγες δεν έχουν ενδείξεις με αποτέλεσμα η εύρεση της ακριβούς τιμής της παροχής να γίνεται με τη χρήση ζυγού με μεταλλάκτη καταπόνησης πάνω στον οποίο βρίσκεται η δεξαμενή απόθεσης.



Εικόνα 3.10: Ζυγός



Εικόνα 3.11: Μεταλλάκτης καταπόνησης

Ανάπτι και κατάντι της στένωσης είναι τοποθετημένα δύο θερμίστορ αρνητικού θερμοκρασιακού συντελεστή (NTC) που μετρούν την τοπική θερμοκρασία. Τα θερμίστορ είναι ηλεκτρονικά στοιχεία με χαρακτηριστικό τη μεταβολή της ηλεκτρικής τους αντίστασης ανάλογα με τη θερμοκρασία. Υπάρχουν δύο είδη θερμίστορ. Αυτά με θετικό θερμοκρασιακό συντελεστή (PTC) και αυτά με αρνητικό (NTC), όπως στη διάταξή μας. Η διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών είναι ότι στα PTC η αντίσταση αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ στα NTC μειώνεται. Τα NTC του πειράματός μας κατασκευάζονται από ημιαγωγό κεραμικό υλικό. Συγκεκριμένα οι μεταλλάκτες που χρησιμοποιούμε στη διάταξή μας είναι πολύ μικρού μεγέθους. Το ένα τους άκρο είναι το σημείο λήψης της θερμοκρασίας (μήκος κεφαλής 22 mm) ενώ το άλλο είναι οι ακροδέκτες τους. Στους ακροδέκτες αυτούς, στην αρχή του πειράματος, συνδέεται πολύμετρο με το οποίο μετράται η αντίσταση του κάθε θερμίστορ για θερμοκρασία δωματίου. Αυτή η μέτρηση, όπως και η μέτρηση της αντίστασης που εμφανίζουν τα θερμίστορ με αύξηση της θερμοκρασίας (που επιτυγχάνουμε με το

άγγιγμα της κεφαλής) έγιναν με σκοπό την διαπίστωση της ορθής λειτουργίας τους. Στη συνέχεια οι ακροδέκτες αυτοί συνδέονται, με τη βοήθεια “ κροκοδειλακίων “, στο Catman το οποίο με τη σειρά του συνδέεται με τον Η / Υ. Οι μεταλλάκτες μας επιτρέπουν τη σημειακή μέτρηση θερμοκρασιών με βήμα της τάξης του msec.

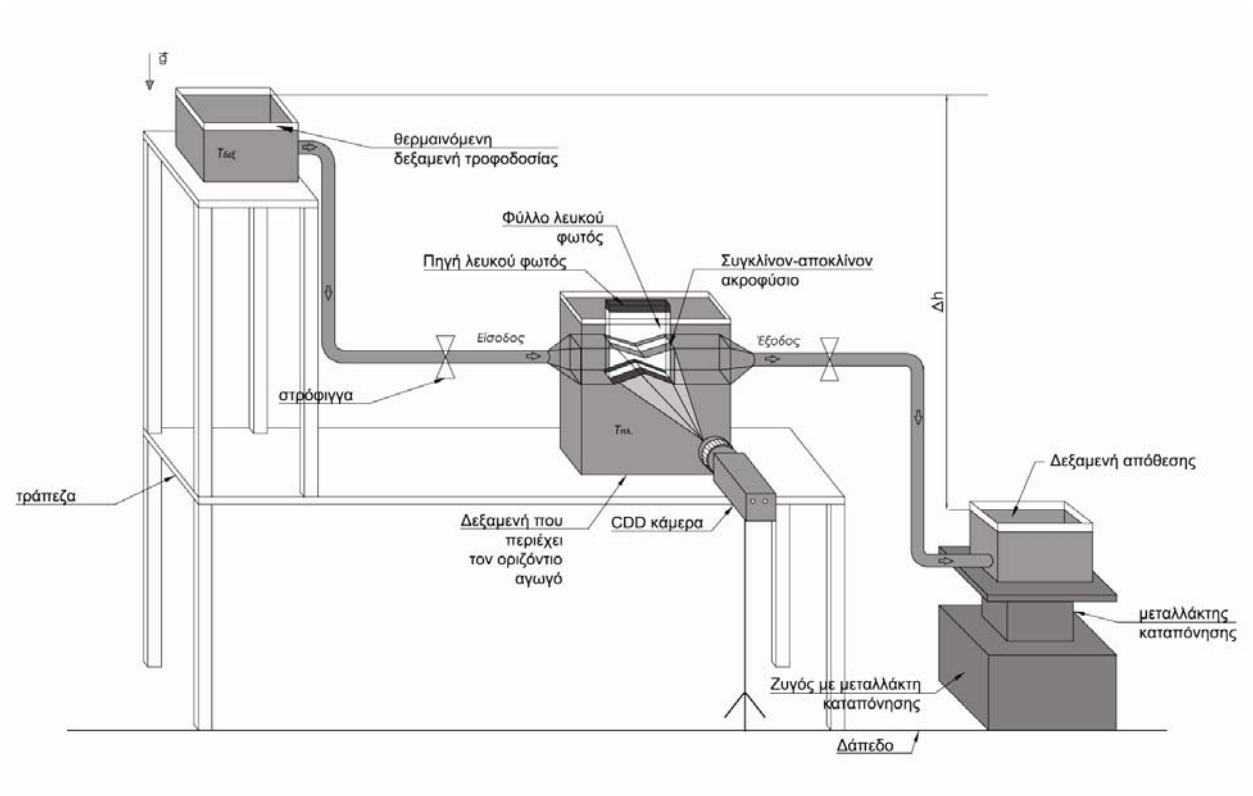


Εικόνα 3.12: Θερμίστορ



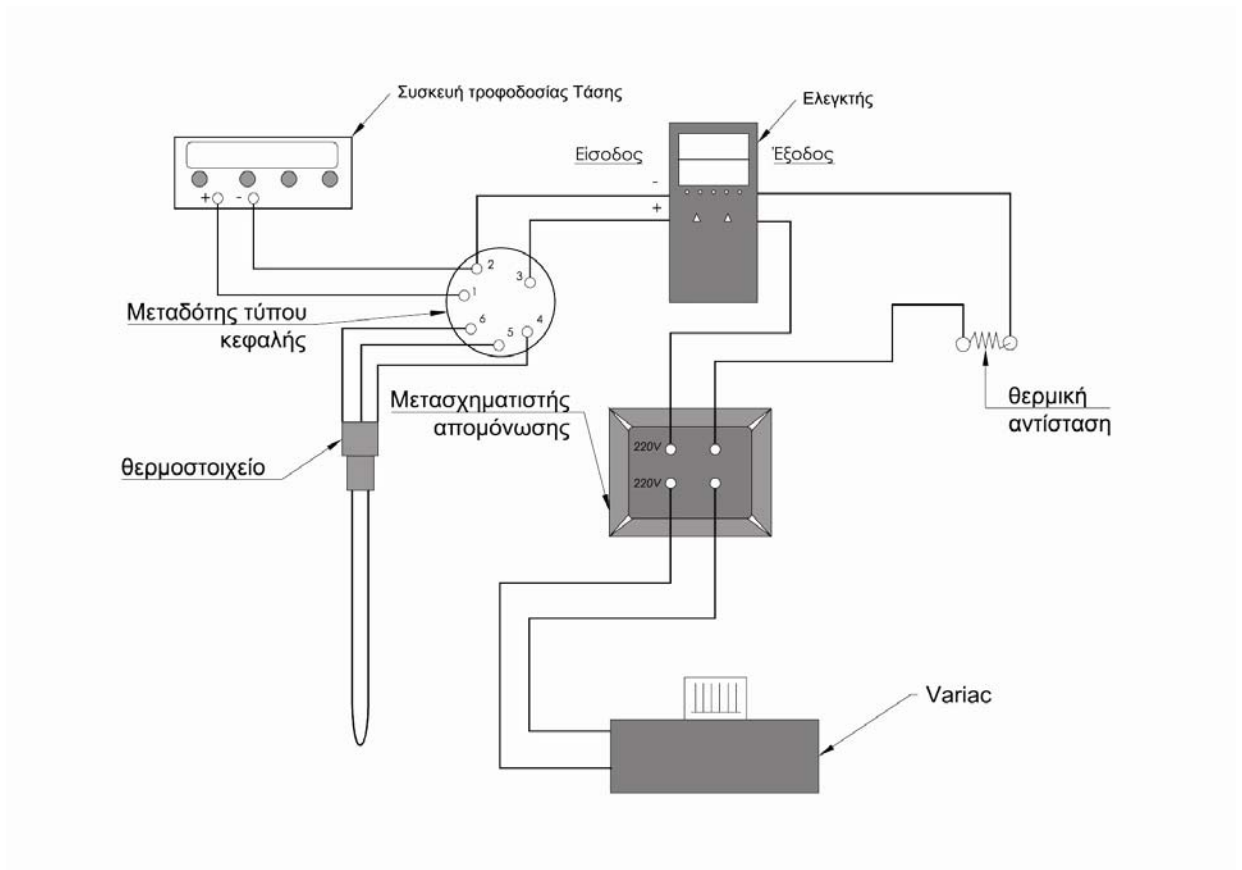
Εικόνα 3.13: Κροκοδειλάκι

Από την παραπάνω περιγραφή αντιλαμβανόμαστε ότι η πειραματική μας διάταξη απαρτίζεται από δύο κυκλώματα, το υδραυλικό και το ηλεκτρικό. Το υδραυλικό κύκλωμα των τριών δεξαμενών με τις σωληνώσεις που τις συνδέουν το έχουμε περιγράψει και φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.14: Σχηματική παράσταση του υδραυλικού συστήματος της πειραματικής διάταξης

Το ηλεκτρικό κύκλωμα και η συνδεσμολογία των στοιχείων που το αποτελούν φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.15: Συνδεσμολογία των στοιχείων του ηλεκτρικού κυκλώματος

Από το σχήμα διαπιστώνουμε ότι, εκτός των στοιχείων που περιγράψαμε, στο ηλεκτρικό κύκλωμα υπάρχουν ακόμη ένα τροφοδοτικό τάσης, ένα variac και ένας μετασχηματιστής απομόνωσης.

Το τροφοδοτικό τάσης είναι απαραίτητο για τη διαρροή της ηλεκτρικής αντίστασης από ρεύμα. Στην περίπτωσή μας η τάση στα άκρα της θερμικής αντίστασης είναι ίση με 16,6 V.



Εικόνα 3.16: Τροφοδοτικό τάσης

Το variac ρυθμίζει την τάση στους ακροδέκτες της αντίστασης. Ο μετασχηματιστής απομόνωσης αποτρέπει πιθανό βραχυκύκλωμα.



Εικόνα 3.17: Variac και μετασχηματιστής απομόνωσης

Τα Pt100, PLC και τροφοτικό τάσης συνδέονται μεταξύ τους με ένα μεταδότη τύπου κεφαλής.

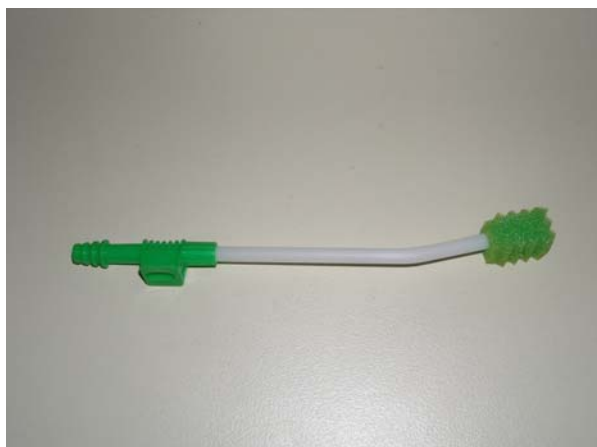


Εικόνα 3.18: PLC συνδεδεμένο στο μεταδότη τύπου κεφαλής

3.2. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Πριν να ξεκινήσει το πείραμα μέλημά μας είναι η εξασφάλιση της καθαριότητας του υδραυλικού τμήματος της διάταξης. Γι' αυτό δεξαμενές και σωληνώσεις πλένονται με νερό βρύσης για να απομακρυνθούν άλατα, σκόνες και εναπομείναντες υγροί κρύσταλλοι από την εκτέλεση του πειράματος άλλη ημέρα. Ιδιαίτερη προσοχή δίδεται στον καθαρισμό του εσωτερικού του οριζόντιου αγωγού που περιέχει τη στένωση αφού στη συνέχεια καταγράφεται με την κάμερα η ροή στο συγκεκριμένο κομμάτι του κυκλώματος. Ο καθαρισμός του γίνεται με βουρτσάκι λεπτό τόσο ώστε να μπορεί να περνά ακόμη και τη μικρότερη διατομή του αγωγού (16 x 7) mm, με μακριά λαβή έτσι ώστε να καθαρίζει τον

αγωγό σ' όλο του το μήκος και μαλακό ώστε να μη χαράζει το plexiglas (αυτό είναι επιδεκτικό κατεργασιών και εμφανίζει σχετική ελαστικότητα, χαράσσεται όμως εύκολα).



Εικόνα 3.19: Βουρτσάκι καθαρισμού στένωσης

Στη συνέχεια γεμίζεται με νερό βρύσης η δεξαμενή που περιέχει τη στένωση και συναρμολογείται το υδραυλικό κύκλωμα το οποίο γεμίζεται με απιονισμένο νερό. Με τη βοήθεια των στροφίγγων και της υψομετρικής διαφοράς των στοιχείων του υδραυλικού συστήματος, με ελαφρά χτυπήματα αφαιρούνται οι φυσαλίδες που εγκλωβίζονται στα σημεία σύνδεσης των στοιχείων, εκατέρωθεν των στροφίγγων και στις γωνίες του μοντέλου.

Ακολούθως παρασκευάζεται το διάλυμα που αποτελεί το εργαζόμενο μέσο. Σε μικρό πλαστικό δοχείο που περιέχει απιονισμένο νερό διαλύεται μικρή ποσότητα υγρών κρυστάλλων (τόση όση κρατά η μύτη ενός κατσαβιδιού) με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία συσσωματωμάτων και το διάλυμα να είναι ομοιογενές. Μετά αδειάζεται στη δεξαμενή τροφοδοσίας. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μερικές φορές ενώ στη συνέχεια ανοίγοντας τις στροφίγγες επιτρέπεται στο εργαζόμενο μέσο να ρεύσει. Το υδραυλικό κύκλωμα αφήνεται να κάνει μερικούς κύκλους έως ότου επιτευχθεί ομοιογένεια του εργαζόμενου μέσου που κυκλοφορεί εντός του. Για να μην αδειάσει κάποια δεξαμενή και γεμίσουν οι σωληνώσεις του συστήματος με αέρα, το πλαστικό δοχείο γεμίζεται με διάλυμα από τη δεξαμενή απόθεσης και αδειάζεται στη δεξαμενή τροφοδοσίας. Παράλληλα ελέγχεται η περιεκτικότητα του εργαζόμενου μέσου σε υγρούς κρυστάλλους αν είναι η επιθυμητή. Στην περίπτωση που αυτό δε συμβαίνει προστίθεται στη δεξαμενή τροφοδοσίας το περιεχόμενο κάποιων ακόμη πλαστικών δοχείων. Το κύκλωμα κάνει μερικούς ακόμη κύκλους μέχρις ότου επιτευχθεί ομοιογένεια του εργαζόμενου μέσου και η επιθυμητή περιεκτικότητα του σε υγρούς κρυστάλλους.

Τότε τοποθετούνται, οι δύο θερμικές αντιστάσεις του ηλεκτρικού κυκλώματος στη δεξαμενή τροφοδοσίας και τη δεξαμενή της στένωσης και το κύκλωμα τίθεται σε λειτουργία. Επιλέγονται στο PLC οι επιθυμητές $T_{πλ}$ και $T_{δεξ}$ για τη δεξαμενή που περιέχει τη στένωση και τη δεξαμενή τροφοδοσίας αντίστοιχα και αναμένεται η επίτευξη των επιλεγμένων επιθυμητών θερμοκρασιών.

Λίγο πριν επιτευχθεί αυτό τίθεται σε λειτουργία η κάμερα και με τη βοήθεια της εικόνας της στένωσης που προβάλλεται στον υπολογιστή κατορθώνεται η καλύτερη δυνατή εστίαση. Στην προσπάθειά μας να ληφθούν τα ευκρινέστερα δυνατά αποτελέσματα και να περιορισθούν οι “ γυαλάδες “ λόγω ανακλάσεων χρησιμοποιήθηκε πολωτικός φακός, ο οποίος όμως τελικά δε βοήθησε στη βελτίωση της εικόνας.

Φθάνοντας στις επιθυμητές θερμοκρασίες των δύο δεξαμενών το εργαζόμενο μέσο αφήνεται να κινηθεί με μεγάλη ταχύτητα, για μικρό χρονικό διάστημα, με σκοπό να ανασηκωθούν οι υγροί κρύσταλλοι που έχουν καθιζάνει όσο περιμέναμε να φθάσουμε στις επιθυμητές θερμοκρασίες.

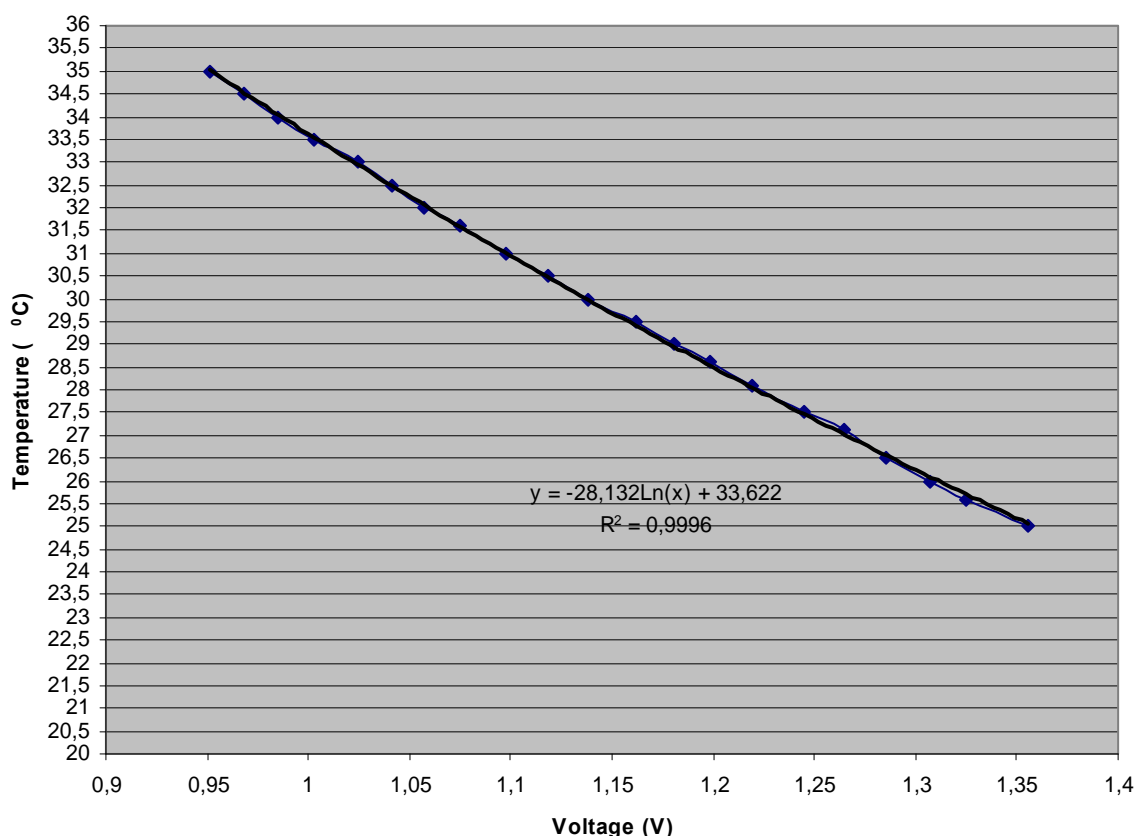
Σ' αυτό το σημείο είμαστε πλέον έτοιμοι ώστε να επιτευχθεί η εκάστοτε επιθυμητή παροχή. Ανοίγεται σταδιακά η πρώτη στρόφιγγα (μεταξύ δεξαμενής τροφοδοσίας και δεξαμενής της στένωσης) και για τη θέση που πιστεύουμε ότι επιτυγχάνεται η επιθυμητή παροχή ανοίγεται, για μικρό χρονικό διάστημα, πλήρως η δεύτερη. Με τις τιμές που καταγράφονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω του software του Catman για το μικρό χρονικό διάστημα που είναι πλήρως ανοικτή η δεύτερη στρόφιγγα, για την αύξηση της μάζας του εργαζόμενου μέσου εντός της δεξαμενής απόθεσης με την πάροδο του χρόνου και δεδομένης της πυκνότητας υπολογίζουμε την παροχή (ο ζυγός είναι συνδεδεμένος στο Catman το οποίο με τη σειρά του συνδέεται στον H / Y). Στην περίπτωση που αυτή δεν είναι η επιθυμητή ανοίγεται περισσότερο η λιγότερο η στρόφιγγα και γίνεται επανέλεγχος. Όταν πλέον επιτύχουμε την παροχή που επιθυμούμε σημειώνουμε με λεπτό μαρκαδόρο τη θέση της πάνω στη στρόφιγγα (αυτό γίνεται για να μπορεί γρήγορα να επιτευχθεί εκ νέου, αν χρειασθεί π.χ. σε περίπτωση που κρύσταλλοι έχουν πάλι καθιζάνει ή όταν η μελέτη μίας συγκεκριμένης περίπτωσης δεν ολοκληρώνεται εντός της ίδιας ημέρας).

Τέλος, ανοίγεται πλήρως η δεύτερη στρόφιγγα, ενώ ταυτόχρονα ξεκινά η λήψη του video μέσω της κάμερας και η καταγραφή μέσω Catman για τη συγκεκριμένη υποκατηγορία. Η καταγραφή του video και του Catman συνεχίζεται έως ότου σταματήσει να εξελίσσεται το φαινόμενο (οπότε έχουμε φθάσει στη μόνιμη κατάσταση). Η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται, σε γενικές γραμμές, για κάθε υποκατηγορία.

3.3 Καμπύλες βαθμονόμησης

3.3.1 Καμπύλη βαθμονόμησης θερμίστορ

Η βαθμονόμηση του θερμίστορ πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός κυκλώματος θερμικής αντίστασης, PLC και Pt100 συνδεδεμένα μεταξύ τους όπως φαίνεται στην εικόνα 3.15. Συγκεκριμένα, με κολλητική ταινία προσαρμόζεται το θερμίστορ στο Pt100, έτσι ώστε η κεφαλή του να έρχεται σε επαφή με το άκρο λήψης θερμοκρασίας του δεύτερου, και μαζί εμβαπτίζονται σε δοχείο γεμάτο με νερό. Με αυτόν τον τρόπο σύνδεσης των δύο στοιχείων εξασφαλίζεται ότι σε κάθε στιγμή η ένδειξη στο PLC για τη θερμοκρασία που μετρά το Pt100 ταυτίζεται με την τοπική θερμοκρασία που θα μετρούσε το θερμίστορ. Στο ίδιο δοχείο βυθίζεται και η θερμική αντίσταση με σκοπό την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού. Οι ακροδέκτες του θερμίστορ, καθ' όλη την διάρκεια βαθμονόμησης του, είναι συνδεδεμένοι με το γνωστό τρόπο στο Catman, το οποίο με τη σειρά του συνδέεται με τον H/Y. Στη συνέχεια τίθεται σε λειτουργία το ηλεκτρικό κύκλωμα και επιλέγεται στο PLC η επιθυμητή θερμοκρασία έναρξης της βαθμονόμησης, η οποία στην περίπτωσή μας είναι 25 °C. Κατόπιν αναμένεται να αποκτήσει το νερό αυτήν τη θερμοκρασία και στη συνέχεια, με βήμα 0,5 °C, μέχρι τους 35 °C, καταγράφονται, μέσω του software του Catman, για λίγα δευτερόλεπτα οι διαφορές δυναμικού στα άκρα του θερμίστορ. Υπολογίζοντας στη συνέχεια τη μέση τιμή αυτών των διαφορών δυναμικού, για την εκάστοτε καταγραφή, και αντιστοιχίζοντάς την στη θερμοκρασία καταγραφής της δημιουργούνται ζεύγη τιμών (\bar{V} , T). Αν τα ζεύγη αυτά τοποθετηθούν σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων με άξονα των x το \bar{V} και άξονα των ψ το T, προκύπτει η καμπύλη βαθμονόμησης του θερμίστορ.



Εικόνα 3.20: Καμπύλη βαθμονόμησης του θερμίστορ

Στην εικόνα 3.20 παρατίθεται η καμπύλη βαθμονόμησης του θερμίστορ (με μπλε χρώμα) καθώς και η καμπύλη προσαρμογής σ' αυτήν (με μαύρο χρώμα). Στην περίπτωση αυτή η προσαρμογή στην πειραματική μας καμπύλη γίνεται με μία καμπύλη λογαριθμική. Επίσης αναγράφεται η εξίσωση της καμπύλης προσαρμογής η οποία θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για τη βαθμονόμηση των υγρών κρυστάλλων. Τέλος, φαίνεται ο συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού $R^2 = 0,9996$ ο οποίος είναι σχεδόν ίσος με τη μονάδα πράγμα που σημαίνει ότι καμπύλη βαθμονόμησης του θερμίστορ, με βάση τα πειραματικά δεδομένα, σχεδόν συμπίπτει με την καμπύλη προσαρμογής.

3.3.2 Καμπύλη βαθμονόμησης υγρών κρυστάλλων

Οι θερμοχρωμικοί υγροί κρύσταλλοι μετασχηματίζουν το προσπίπτον σ' αυτούς λευκό φως σε χρώμα το οποίο σχετίζεται μονότονα με την τοπική θερμοκρασία. Σκοπός, λοιπόν, της διαδικασίας βαθμονόμησης είναι η εξαγωγή μιας καμπύλης που θα χρησιμεύει γι' αυτήν την αντιστοίχιση.

Για να πραγματοποιήσουμε τη βαθμονόμηση φροντίζουμε για την καθαριότητα των δεξαμενών του υδραυλικού συστήματος και το γέμισμά του με ομοιογενές εργαζόμενο μέσο χωρίς εγκλωβισμένο αέρα, με τον ίδιο τρόπο που περιγράψαμε στην πειραματική διαδικασία. Στη συνέχεια για μηδενική παροχή με το προσπίπτον φύλλο λευκού φωτός να φωτίζει το μέσο επίπεδο της στένωσης (όπως αυτό φαίνεται στην εικόνα 3.14 για το υδραυλικό

σύστημα της διάταξης) και την κάμερα να έχει εστιάσει με κέντρο ένα από τα δύο θερμίστορ, αναμένουμε να φθάσουμε στην επιθυμητή θερμοκρασία του εργαζομένου μέσου. Σ' αυτήν φθάνουμε με τη βοήθεια της μεταλλικής πλάκας και του ηλεκτρικού κυκλώματος της διάταξης (του τμήματος που αφορά στη δεξαμενή της στένωσης), όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενες παραγράφους.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει το εύρος λειτουργίας των υγρών κρυστάλλων, δοσμένο από την εταιρεία κατασκευής τους, είναι 25 – 40 °C (με όρια ανοχής $\pm 0,5$ °C). Οι προδιαγραφές αυτές έχουν δοθεί για στρώμα υγρών κρυστάλλων που δημιουργείται από επάλειψή τους σε επίπεδη επιφάνεια και όχι για χρήση τους ως διάλυμα. Θεωρώντας, λοιπόν, ότι το εύρος λειτουργίας θα είναι διαφορετικό, ξεκινούμε τη διαδικασία παρατήρησης και λήψης εικόνας των υγρών κρυστάλλων από την πιθανή επιθυμητή θερμοκρασία για τη μεταλλική πλάκα των 20 °C. Από τους 20 °C και με βήμα 0,2 - 0,5 °C (η διακύμανση του βήματος σχετίζεται με το πόσοι °C απαιτούνται για να λάβουν οι υγροί κρύσταλλοι το επόμενο χρώμα, πληροφορία που δίδεται και αυτή από την εταιρεία) έως και την θερμοκρασία των 41 °C λαμβάνονται, μέσω της κάμερας, videos διάρκειας 30 sec γύρω από το θερμίστορ και ταυτόχρονα γίνεται καταγραφή, από το software του Catman, της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του. Ο τρόπος σύνδεσης του θερμίστορ με το Catman και τον H / Y είναι ο ίδιος με αυτόν που περιγράφηκε στην παράγραφο της πειραματικής διάταξης. Το άνω θερμοκρασιακό όριο όπου σταματήσαμε τις λήψεις, το καθόρισε ο αποχρωματισμός των υγρών κρυστάλλων.

Τα videos αυτά εισάγονται στον H / Y και συγκεκριμένα στο πρόγραμμα Studio Pinnacle 12 με σκοπό να ληφθεί από το καθένα ένα frame για το 15^ο sec. Τα frames αυτά εισάγονται για επεξεργασία στο πρόγραμμα Photoshop CS2. Συγκεκριμένα, για καθένα από τα frames, με τη βοήθεια του εργαλείου “ crop “ λαμβάνουμε περιμετρικά του θερμίστορ τρία ορθογώνια πλαίσια, διαστάσεων (50 x 100) pixels, που απεικονίζουν τους υγρούς κρυστάλλους γύρω του. Τα τρία αυτά πλαίσια συντίθενται με αποτέλεσμα τη δημιουργία εικόνας διαστάσεων (100 x 150) pixels.



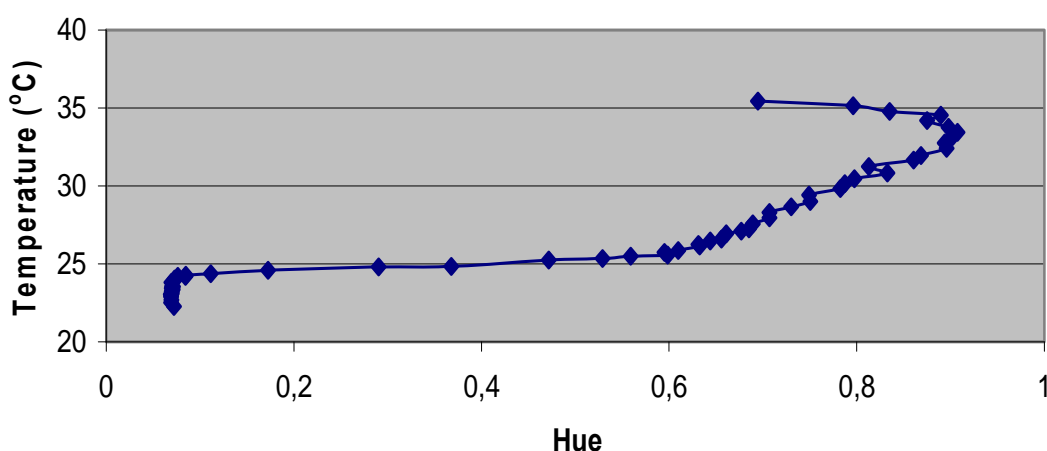
Εικόνα 3.21: Αποτέλεσμα της σύνθεσης των τριών ορθογώνιων πλαισίων που λαμβάνονται γύρω από το θερμίστορ

Ακολούθως, κάθε μία από τις εικόνες αυτές (Photoshop Frame.jpg) εισάγεται στο πρόγραμμα “ Calibration “⁶ του Matlab με σκοπό τη μετατροπή των εικόνων από το σύστημα RGB στο σύστημα HSV. Για την ακρίβεια οι πίνακες r, g, b που αντιστοιχούν στις τρεις συνιστώσες του συστήματος RGB μετατρέπονται στους πίνακες h, s, v που αντιστοιχούν στις συνιστώσες του συστήματος HSV. Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή \bar{h} ⁷ των τιμών του

⁶ Ο κώδικας αυτός γράφτηκε από τον κ. Σταματόπουλο Χρήστο, το 2005, και χρησιμοποιήθηκε για τη διπλωματική του εργασία. Για τον κώδικα και περισσότερες λεπτομέρειες για τον τρόπο λειτουργίας του βλέπε σελ. 90, 91 της εργασίας.

⁷ Οι τιμές που παίρνει το \bar{h} κυμαίνονται στο διάστημα [0, 1], καθώς σ' αυτό κυμαίνονται και οι τιμές όλων των στοιχείων των πινάκων r, g, b, h, s και v.

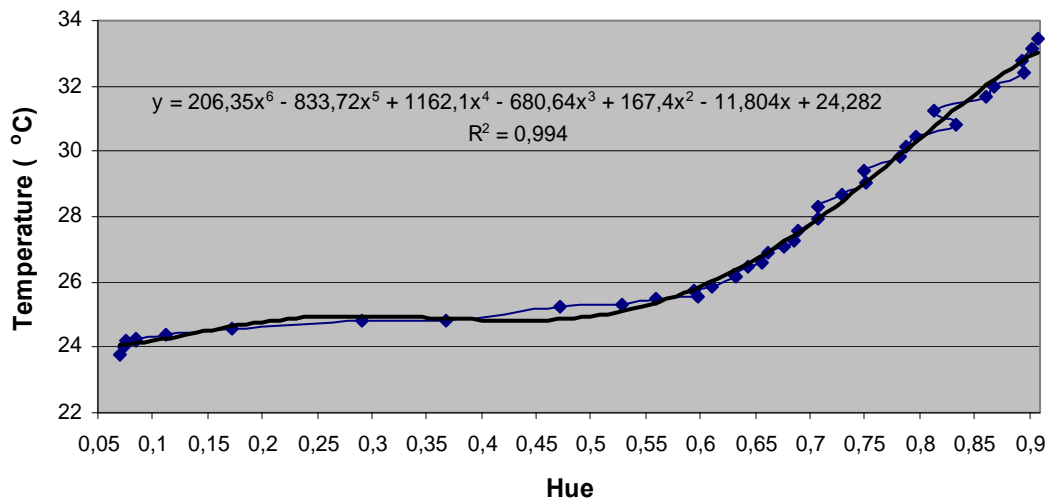
πίνακα h. Επαναλαμβανόμενης της διαδικασίας αυτής για όλες τις “ Photoshop Frame.jpg “ προκύπτουν αντίστοιχου αριθμού ζεύγη τιμών (\bar{h} , T), όπου T όμως δεν είναι η εκάστοτε θερμοκρασία λήψης του video (θερμοκρασία μεταλλικής πλάκας, που βλέπουμε ως ένδειξη στο PLC και αυξάνουμε με βήμα 0,2 - 0,5 °C για να εκτελέσουμε τη διαδικασία της βαθμονόμησης), αλλά η τοπική θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου που μέτρησε το θερμίστορ κατά τη διάρκεια της λήψης του. Η θερμοκρασία αυτή προέκυψε μέσω της καμπύλης βαθμονόμησης του θερμίστορ με δεδομένη τη διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες του. Αυτή η διαφορά δυναμικού είναι η μέση τιμή των διαφορών δυναμικού που καταγράφονται στον H / Y για τους ακροδέκτες του θερμίστορ με τον τρόπο που προαναφέραμε. Τα ζεύγη αυτά τιμών τοποθετημένα σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων με άξονα των x τη Hue (\bar{h}) και άξονα των y, τη θερμοκρασία (T) μας δημιουργούν την καμπύλη βαθμονόμησης των υγρών κρυστάλλων.



Εικόνα 3.22: Καμπύλη βαθμονόμησης των υγρών κρυστάλλων

Η μετατροπή, μέσω του προγράμματος “ Calibration ”, των εικόνων “ Photoshop Frame.jpg ” από το σύστημα RGB (διαμόρφωση όπου οι πίνακες r, g, b αντιστοιχούν στην ερυθρά, την πράσινη και την κυανή συνιστώσα των pixels της εικόνας) στο σύστημα HSV (διαμόρφωση όπου οι πίνακες h, s, v αντιστοιχούν στη χροιά, τον κόρο και τη φωτεινότητα των pixels της εικόνας) καθώς και η επιλογή της συνιστώσας Hue του συστήματος αυτού για την αντιστοίχιση με τη θερμοκρασία γίνεται γιατί έχει αποδειχθεί ότι αυτή η συνιστώσα είναι η λιγότερο φωτοευαίσθητη. Επομένως, οι τιμές που λαμβάνει η \bar{h} εξαρτώνται άμεσα από την τοπική θερμοκρασία των υγρών κρυστάλλων.

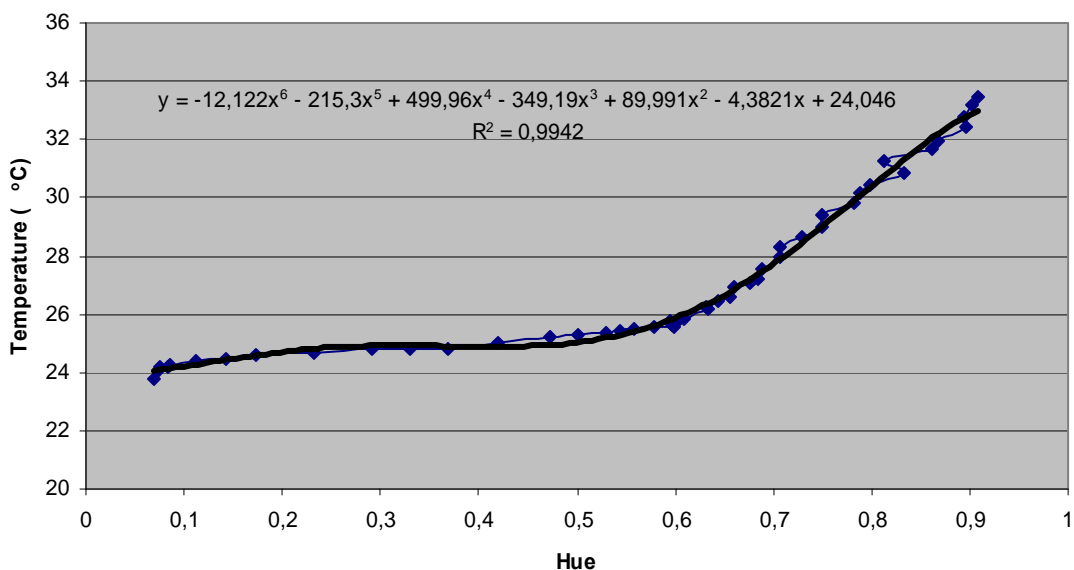
Η καμπύλη βαθμονόμησης που παρουσιάζεται στην εικόνα 3.22, όπως εύκολα παρατηρούμε, δεν είναι μια μονότονη καμπύλη. Υπάρχουν τιμές της Hue για τις οποίες παίρνουμε δύο ή και περισσότερες τιμές θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει γιατί έχουμε πάρει ζεύγη τιμών (\bar{h} , T) εκτός του εύρους λειτουργίας των υγρών κρυστάλλων. Για να καταστήσουμε την καμπύλη μας μονότονη και συγκεκριμένα γνησίως αύξουσα και να βρούμε το πραγματικό θερμοκρασιακό εύρος των υγρών κρυστάλλων πρέπει να κάνουμε αποκοπή σημείων. Έτσι προκύπτει η επόμενη καμπύλη.



Εικόνα 3.23: Καμπύλη βαθμονόμησης των υγρών κρυστάλλων με αποκοπή σημείων και καμπύλη προσαρμογής σ' αυτήν

Στην εικόνα 3.23 απεικονίζεται εκτός από την καμπύλη βαθμονόμησης (μπλε χρώμα) και η καμπύλη προσαρμογής (μαύρο χρώμα) σ' αυτήν. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η προσαρμογή στην καμπύλη βαθμονόμησης επιλέγεται να γίνει με πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού (η εξίσωση του οποίου φαίνεται στην εικόνα 3.23 και δίδεται από το πρόγραμμα excel) με συντελεστή πολλαπλού προσδιορισμού $R^2 = 0,994$. Ο συντελεστής αυτός είναι δείκτης του πόσο κοντά είναι τα πειραματικά μας ζεύγη τιμών στο να επαληθεύουν την εξίσωση της καμπύλης προσαρμογής.

Όσο περισσότερα πειραματικά ζεύγη τιμών έχουμε στη διάθεσή μας, τόσο ευκολότερο είναι να βρεθεί μία καμπύλη παρεμβολής που να προσεγγίζει την καμπύλη των πειραματικών μας δεδομένων. Για το σκοπό αυτό προσθέτουμε ενδιάμεσα σημεία (επιπλέον των πειραματικών) στην καμπύλη της εικόνας 3.23 και έτσι προκύπτει το ακόλουθο γράφημα.



Εικόνα 3.24: Καμπύλη βαθμονόμησης υγρών κρυστάλλων με προσθήκη ενδιάμεσων σημείων και καμπύλη προσαρμογής σ' αυτήν

Η εικόνα 3.24 απεικονίζει την καμπύλη βαθμονόμησης, μετά και από την προσθήκη ενδιάμεσων σημείων, καθώς και την καμπύλη παρεμβολής της. Από την παρατήρηση του γραφήματος της εικόνας 3.24 και τη σύγκριση με το γράφημα της εικόνας 3.23 αντιλαμβανόμαστε ότι η προσθήκη των σημείων έγινε σε συγκεκριμένα διαστήματα όπου η καμπύλη βαθμονόμησης (μπλε χρώμα) και η καμπύλη προσαρμογής (μαύρο χρώμα) δεν προσεγγίζουν τόσο η μία την άλλη. Στην εικόνα 3.24, επομένως, απεικονίζονται οι τελικές μας καμπύλες ενώ συγχρόνως δίδεται η τελική εξίσωση για την καμπύλη προσαρμογής. Η εξίσωση αυτή είναι απαραίτητη και είναι πολύ σημαντικό να προσεγγίζει, όσο γίνεται καλύτερα (R^2 όσο το δυνατόν πιο κοντά στην τιμή της μονάδας), την καμπύλη των πειραματικών μας τιμών, καθότι χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα “ IPP ” του Matlab.

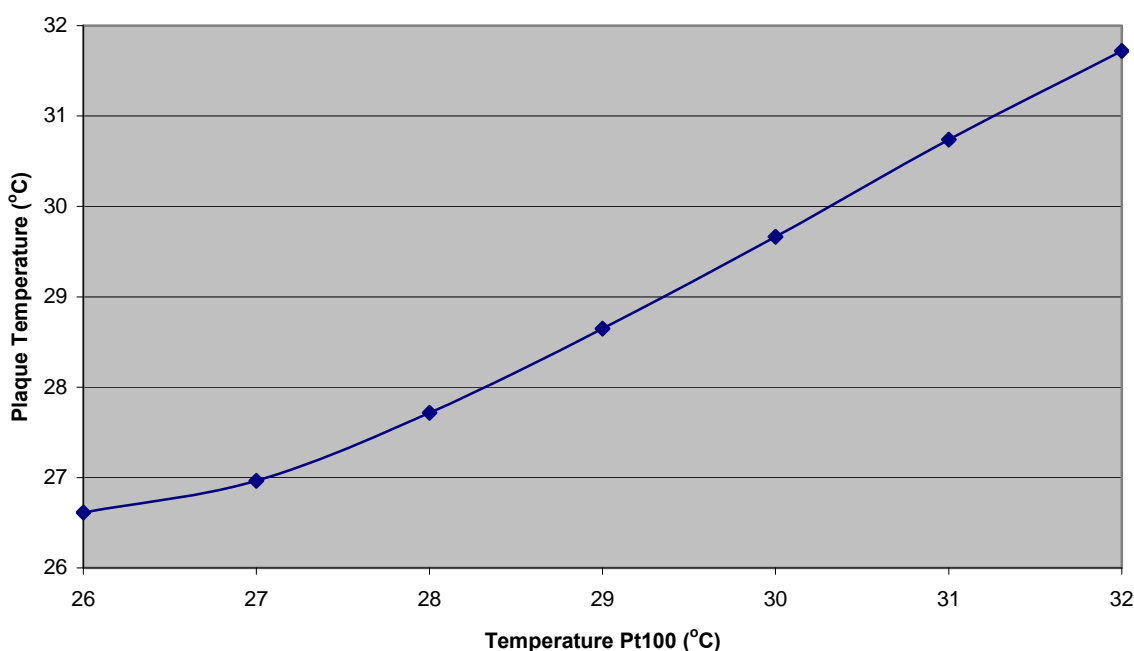
Τέλος, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι υπάρχουν διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν τη διαμόρφωση της καμπύλης βαθμονόμησης, όπως η περιεκτικότητα του διαλύματος, η γωνία λήψης των videos, ο συνθήκες φωτισμού, ο χρόνος παραμονής των υγρών κρυστάλλων στο διάλυμα, η περιεκτικότητα του εργαζομένου μέσου σε υγρούς κρυστάλλους και άλλοι. Επομένως, είναι επιτακτικό να φροντίζουμε ώστε να παραμένουν σταθερές οι συνθήκες μεταξύ της διαδικασίας βαθμονόμησης και της διαδικασίας των πειραμάτων.

3.3.3 Καμπύλη βαθμονόμησης θερμαινόμενης πλάκας

Στην προσπάθειά μας να επαληθευτεί η παραδοχή μας ότι η θερμοκρασία που μετρά το Pt100 , όπως είναι τοποθετημένο μέσα στη δεξαμενή της στένωσης, είναι η ίδια με αυτή και των δύο τοιχωμάτων (εσωτερικού και εξωτερικού) της θερμαινόμενης μεταλλικής πλάκας, εκτελείται η παρακάτω διαδικασία.

Χρησιμοποιώντας, ως καθετήρα, λαβές από τα βουρτσάκια καθαρισμού (εικόνα 3.19) ενωμένες με κολλητική ταινία φέρεται σε επαφή η κεφαλή ενός θερμίστορ με το εσωτερικό τοίχωμα της θερμαινόμενης πλάκας. Στο εξωτερικό της τοίχωμα είναι στερεωμένο το Pt100. Έτσι το θερμίστορ μετρά τη θερμοκρασία του εσωτερικού τοιχώματος, ενώ το Pt100 αυτήν του εξωτερικού τοιχώματος της θερμαινόμενης πλάκας. Το Pt100 είναι συνδεδεμένο στο

ηλεκτρικό κύκλωμα σύμφωνα με την εικόνα 3.14 ενώ το θερμίστορ με H / Y και Catman με το γνωστό τρόπο. Ξεκινώντας από τη θερμοκρασία των 26 °C και με βήμα 1 °C έως και τους 32 °C για το Pt100 καταγράφονται, μέσω του Catman, οι αντίστοιχες διαφορές δυναμικού στους ακροδέκτες του θερμίστορ. Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή των διαφορών δυναμικού για κάθε μία από τις καταγραφές και αντιστοιχίζεται, μέσω της καμπύλης βαθμονόμησης του θερμίστορ, στη θερμοκρασία που αυτό μετρά. Έτσι προκύπτουν τα πειραματικά ζεύγη τιμών (T_{Pt100} , $T_{θερ.}$) ή ($T_{εξ.τοιχ.}$, $T_{εσ.τοιχ.}$) τα οποία τοποθετούμενα σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, όπου άξονας των χ είναι η θερμοκρασία που μετρά το Pt100 και άξονας των ψ η θερμοκρασία που μετρά το θερμίστορ δημιουργούν την παρακάτω καμπύλη.



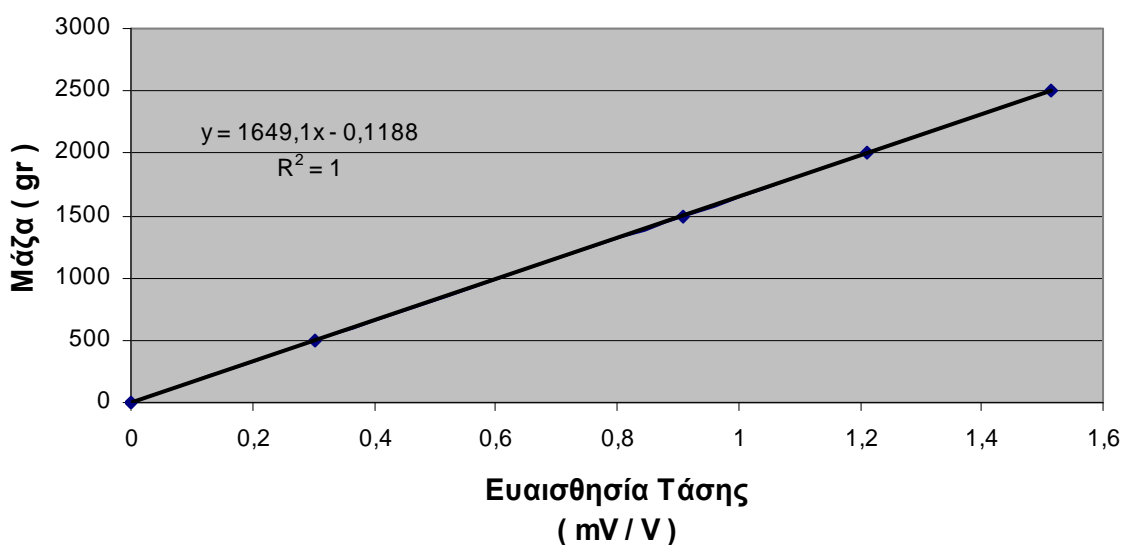
Εικόνα 3.25: Καμπύλη βαθμονόμησης θερμαινόμενης πλάκας

Από την καμπύλη συμπεραίνουμε ότι η $T_{πλ.}$, που είναι η θερμοκρασία που μετρά το Pt100 και αυτή που θεωρείται ως θερμοκρασία της θερμαινόμενης πλάκας καθ' όλη την πειραματική διαδικασία διαφέρει από τη θερμοκρασία του εσωτερικού τοιχώματος της θερμαινόμενης πλάκας, κάθε χρονική στιγμή, κατά 0,5 °C ή λιγότερο. Ουσιαστικά δηλαδή η διαφορά μεταξύ των δύο τοιχωμάτων της θερμαινόμενης πλάκας είναι περίπου 0,5 °C, σε αντίθεση με την παραδοχή που έχει γίνει.

Τα θερμοκρασιακά διαστήματα στα οποία εκτελέστηκαν οι διαδικασίες για την εξαγωγή των καμπυλών βαθμονόμησης του θερμίστορ και της θερμαινόμενης πλάκας λαμβάνονται τυχαία, είναι όμως τόσο μεγάλα ώστε, με το ανάλογο βήμα, να προκύπτει ικανοποιητικός αριθμός πειραματικών σημείων.

3.3.4 Καμπύλη βαθμονόμησης ζυγού

Με συνδεδεμένο το ζυγό στο Catman καταγράφονται στον Η / Υ οι τιμές της ευαισθησίας της τάσης σε mV / V που εμφανίζει ο μεταλλάκτης καταπόνησης του ζυγού, τοποθετώντας πάνω του με τη σειρά τα βάρη των 0, 500, 1500, 2000 και 2500 gr. Τα ζεύγη αυτά τιμών (mV / V , gr) τοποθετούνται σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, όπου άξονας των χ είναι η ευαισθησία τάσης και άξονας των ψ η μάζα και έτσι προκύπτει η καμπύλη βαθμονόμησης του ζυγού.



Εικόνα 3.26: Καμπύλη βαθμονόμησης ζυγού

Στην εικόνα αυτή παρατίθεται η καμπύλη βαθμονόμησης του ζυγού καθώς και η καμπύλη παρεμβολής της. Στην προκειμένη περίπτωση η καμπύλη παρεμβολής είναι ευθεία και ο τύπος της φαίνεται στην ανωτέρω εικόνα. Παρατηρούμε επίσης ότι ο $R^2 = 1$, πράγμα που σημαίνει ότι οι δύο καμπύλες συμπίπτουν. Ο τύπος της καμπύλης προσαρμογής και κατ' επέκταση της καμπύλης βαθμονόμησης του ζυγού χρησιμοποιείται από το Catman για τον υπολογισμό της παροχής κατά την πειραματική διαδικασία.

Κεφάλαιο 4: Επεξεργασία Πειραματικών Αποτελεσμάτων Και Συμπεράσματα

Παρακάτω παρουσιάζεται συγκεντρωτικός πίνακας των περιπτώσεων για τις οποίες μελετήσαμε το θερμοκρασιακό χάρτη της ροής εντός του συγκλίνοντος (ανάντι) – αποκλίνοντος (κατόντι) τμήματος του ακροφυσίου του μοντέλου μας.

A / A	Q (cm ³ / sec)	Re	T _{πλ.} (°C)	T _{δεξ.} (°C)	ΔT (°C)	ΑΝΑΝΤΙ	ΚΑΤΑΝΤΙ
1	0	0	α) 29,5	21,5	8	√	√
			β) 31	23	8	√	√
2	0,05	4	31	23	8	√	√
3	0,1	8	α) 25,5	21,5	4	√	√
			β) 31	23	8	√	√
			γ) 37	21	16	√	√
4	0,2	16	α) 36	20	16	√	
			β) 31	23	8		√
5	0,31	24	α) 25,5	21,5	4	√	√
			β) 29,5	21,5	8	√	√
			γ) 36	20	16	√	√
6	0,49	39	29,5	21,5	8	√	√
7	0,62	48	36	21	15		√
8	1,54	120	α) 25,5	21,5	4	√	√
			β) 29,5	21,5	8	√	√
			γ) 36	20	16	√	√

Η σχέση που υπολογίζει τον αριθμό Reynolds είναι:

$$Re = (v \times D) / \nu = (Q \times D) / (\nu \times A) = (\rho \times v \times D) / \mu \quad (4.1),$$

όπου:

Q, η παροχή του ρευστού σε m³ / sec,

ρ = 997 Kg / m³, η πυκνότητα του νερού για T = 25 °C,

D, η υδραυλική διάμετρος σε m, που για σωλήνα τετραγωνικής διατομής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$D = (4 \times A) / P = A / H \quad (4.2),$$

όπου:

A, το εμβαδόν της τετραγωνικής διατομής του σωλήνα σε m²,

P, η περίμετρος της τετραγωνικής διατομής του σωλήνα σε m,

$H = 0,016$ m, το μήκος της πλευράς της τετραγωνικής διατομής στην είσοδο του ακροφυσίου,
 $\nu = \mu / \rho$, το κινηματικό ιξώδες του ρευστού σε m^2 / sec ,
 $\mu = 0,0008$ Kg / (m x sec), το ιξώδες του νερού και
 ν η ταχύτητα του ρευστού σε m / sec.

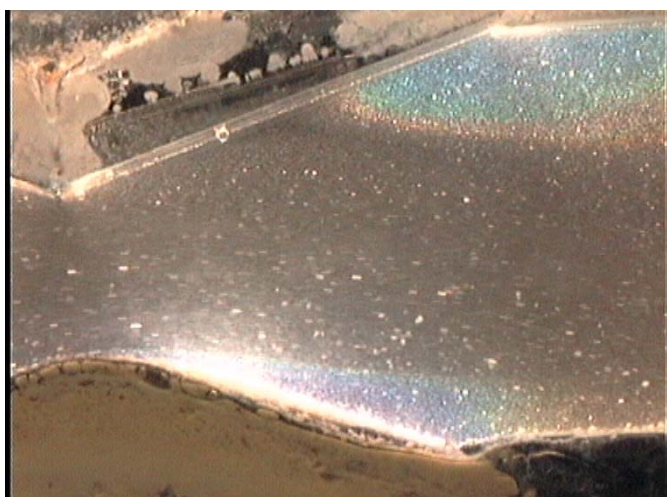
Επίσης,

$$\Delta T = T_{\text{μεταλλικής πλάκας}} - T_{\text{δεξαμενής}} \quad (4.3).$$

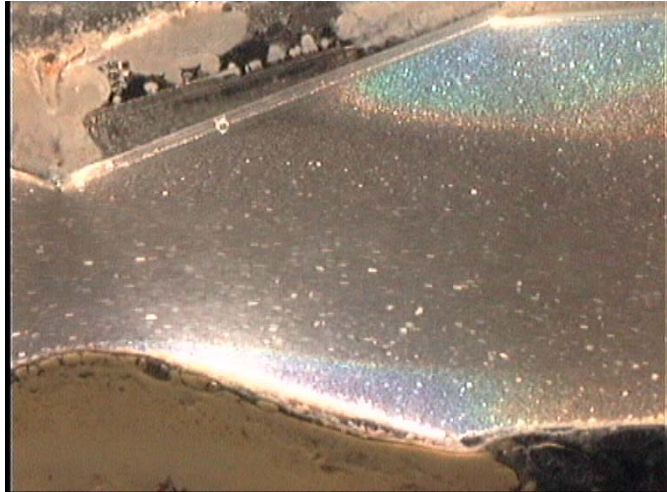
Στόχος του πειράματος αυτού ήταν να μελετήσουμε περιπτώσεις ροής με συγκεκριμένους αριθμούς Reynolds. Επομένως, έχοντας ως δεδομένες συγκεκριμένες τιμές του Re, από τη σχέση (4.1) προέκυψαν οι τιμές της παροχής Q του ρευστού που έπρεπε να επιτύχουμε σε m^3 / sec (SI).

Στη συνέχεια έγινε μετατροπή των τιμών σε cm^3 / sec , με στρογγυλοποίηση στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο (περιπτώσεις 1 – 8).

Το αποτέλεσμα της πειραματικής διαδικασίας ήταν η λήψη ενός video για κάθε μία εκ των περιπτώσεων που προκύπτουν από τον ανωτέρω πίνακα. Η επεξεργασία του κάθε video έγινε στο πρόγραμμα Pinnacle Studio 12, το οποίο χωρίζει κάθε δευτερόλεπτο του video σε 25 (χρονικά) ίσα μέρη και κατ' επέκταση επιτρέπει τη λήψη 25 διαδοχικών εικόνων (grabbed frames). Σκοπός μας ήταν, μελετώντας το κάθε video διεξοδικά, να επιλέξουμε τα δευτερόλεπτα για τα οποία παρατηρείται σημαντική αλλαγή στην εξέλιξη του φαινομένου και για κάθε ένα από αυτά να ληφθούν αυθαίρετα 2 οποιαδήποτε (από τα 25) διαδοχικά frames. Όλα τα frames αποθηκεύονται στον υπολογιστή σε .tif format, γεγονός που σημαίνει ότι τα frames αναπαρίστανται σύμφωνα με το σύστημα RGB.



Εικόνα 4.1: 1^ο από τα διαδοχικά frames στο $t = 339$ sec για $Re = 120$, $T_{\text{πλ.}} = 36$ °C, $T_{\text{δεξ.}} = 20$ °C στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου



Εικόνα 4.2: 2° από τα διαδοχικά frames στο $t = 339$ sec για $Re = 120$, $T_{πλ} = 36$ °C, $T_{δεδ} = 20$ °C στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

Στη συνέχεια ένα ένα τα ζεύγη των διαδοχικών frames εισάγονται στο πρόγραμμα “ IPP ”⁸ που δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου Matlab 6.5. Αρχικά το πρόγραμμα αυτό μετατρέπει το σύστημα αναπαράστασης των frames από RGB σε HSV. Κάθε μία από τις συνιστώσες H, S και V (όπως και προηγουμένως οι R, G και B) του συστήματος αναπαράστασης των εικόνων, εκφράζεται από έναν πίνακα h, s και v αντίστοιχα. Κάθε εικόνα τεμαχίζεται σε ισομεγέθη εικονίδια⁹ που περιέχουν ένα συγκεκριμένο αριθμό pixels. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι και οι πίνακες που συνθέτουν την εικόνα αυτή χωρίζονται σε μικρότερους h_v , s_v και v_v (το v λαμβάνει τιμή ανάλογα με το πόσοι υποπίνακες χωρούν στον αρχικό πίνακα) διαστάσεων αντίστοιχων των pixels που εμπεριέχονται στα εικονίδια. Για κάθε ένα από τους μικρούς πίνακες (h_v , s_v , v_v) των τριών συνιστωσών H, S και V υπολογίζεται η μέση τιμή των περιεχομένων τους η οποία και τα αντικαθιστά. Η διαδικασία υπολογισμού της μέσης τιμής και η αντικατάσταση με αυτήν των περιεχομένων ακολουθείται και για τα δύο εισαγόμενα στο πρόγραμμα frames. Καταλήγουμε, επομένως, να έχουμε για τα δύο frames από τρεις πίνακες (ένα για την κάθε μία συνιστώσα) \bar{H} , \bar{S} και \bar{V} που αποτελούνται από ισομεγέθεις μικρότερους πίνακες μέσω των τιμών. Στη συνέχεια για κάθε μία από τις συνιστώσες H, S, και V προκύπτει ένας πίνακας σε συνδυασμός των αντίστοιχων πινάκων \bar{H} , \bar{S} και \bar{V} των δύο frames. Οι τελικοί αυτοί πίνακες $\bar{\bar{H}}$, $\bar{\bar{S}}$ και $\bar{\bar{V}}$ αποτελούνται από υποπίνακες που περιέχουν σ’ όλα τους τα κελιά τη μέση τιμή των περιεχομένων αριθμών στα κελιά των εικονιδίων αντίστοιχης θέσης των πινάκων \bar{H} , \bar{S} και \bar{V} . Όπως προαναφέραμε κάθε frame τεμαχίζεται σε εικονίδια (interrogation windows). Ο τεμαχισμός αυτός γίνεται από το πρόγραμμα με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους. Από κάθε τρόπο προκύπτουν κάθε φορά οι $\bar{\bar{H}}_v$, $\bar{\bar{S}}_v$ και $\bar{\bar{V}}_v$ (όπου $v = 1, 2, 3, 4$), από τη σύνθεση των οποίων λαμβάνουμε τους τελικούς μας πίνακες $H_{τελ.}$, $S_{τελ.}$ και $V_{τελ.}$. Οι πίνακες αυτοί μεταφράζονται από το πρόγραμμα σε μία εικόνα που είναι η σύνθεση των δύο αρχικών frames που είχαμε

⁸ Το πρόγραμμα IPP κατασκευάστηκε από τον κ. Σταματόπουλο Χρήστο, το 2005, και χρησιμοποιήθηκε για τη διπλωματική του εργασία. Για τον κώδικα και περισσότερες λεπτομέρειες για τον τρόπο λειτουργίας του βλέπε σελ. 56-75.

⁹ Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των εικονιδίων τόσο λιγότερη είναι η πληροφορία που χάνεται άρα και τόσο ακριβέστερη είναι η απόδοση των χρωμάτων της αρχικής εικόνας.

εισάγει. Η εικόνα αυτή είναι σε σύστημα HSV και μετατρέπεται στην εικόνα “ Image.tif ”¹⁰, που είναι σε σύστημα RGB και είναι ένα από τα στοιχεία εξόδου του προγράμματος.



Εικόνα 4.3: Σύνθεση των δύο frames στο $t = 339$ sec για $Re = 120$, $T_{πλ.} = 36$ °C, $T_{δεξ.} = 20$ °C στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

Εκτός της εικόνας “ Image.tif ”, σαν έξοδο, το πρόγραμμα δίνει και τον πίνακα T, ο οποίος περιέχει τις τιμές θερμοκρασίας που αντιστοιχούν στις τιμές του πίνακα $H_{τελ.}$. Η αντιστοίχιση των τιμών του $H_{τελ.}$ με τις τιμές θερμοκρασίας του πίνακα T γίνεται από το πρόγραμμα έχοντας εισάγει τον τύπο της καμπύλης προσαρμογής στην καμπύλη βαθμονόμησης T (Hue) των υγρών κρυστάλλων.

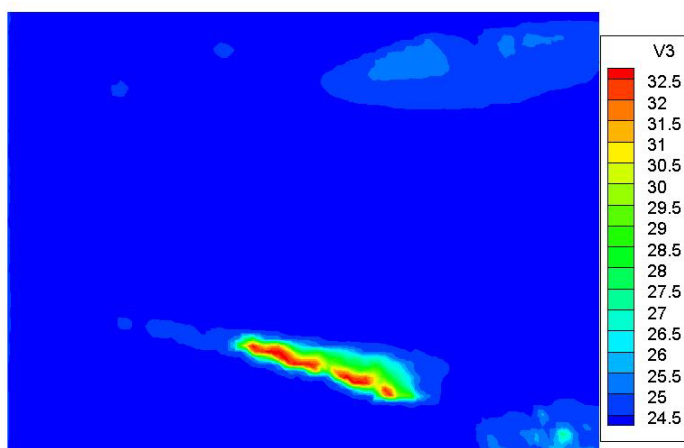
Ο πίνακας T που παίρνουμε σαν έξοδο του “ IPP ” προγράμματος είναι σε μητρωϊκή μορφή (αφού το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται στο Matlab είναι το μητρωϊκό). Για να εισαχθεί στη συνέχεια στο πρόγραμμα Tecplot, έτσι ώστε να λάβουμε το θερμοκρασιακό πεδίο της “ Image.tif ” στην οποία αντιστοιχεί ο πίνακας T, πρέπει να πραγματοποιηθεί μετατροπή του μητρωϊκού συστήματος συντεταγμένων του πίνακα στο χωρικό σύστημα συντεταγμένων. Η μετατροπή αυτή γίνεται με τη βοήθεια προγράμματος που ονομάζεται “ CONVERSIONT ”¹¹, το οποίο είναι γραμμένο στη γλώσσα προγραμματισμού Fortran 6.6. Μετά τη μετατροπή αυτή, στην έξοδο του CONVERSIONT λαμβάνουμε ένα αρχείο “ TEMP.DAT ”, που παρέχει τρεις στήλες δεδομένων. Η κάθε γραμμή του αρχείου περιέχει τη θερμοκρασία και τις συντεταγμένες στις οποίες αυτή εντοπίζεται.

Το αρχείο “ TEMP.DAT ”, φορτώνεται στο Tecplot και επιλέγεται η οπτικοποίηση των στοιχείων του σε καρτεσιανό σύστημα δύο συντεταγμένων. Ακολούθως, δίνοντας την εντολή Triangulate και επιλέγοντας μόνο την ένδειξη Contour, λαμβάνουμε μία εικόνα με τις

¹⁰ Η εικόνα αυτή είναι μικρότερων διαστάσεων από τα frames εισόδου και κατά συνέπεια υπάρχει μικρή απώλεια πληροφορίας.

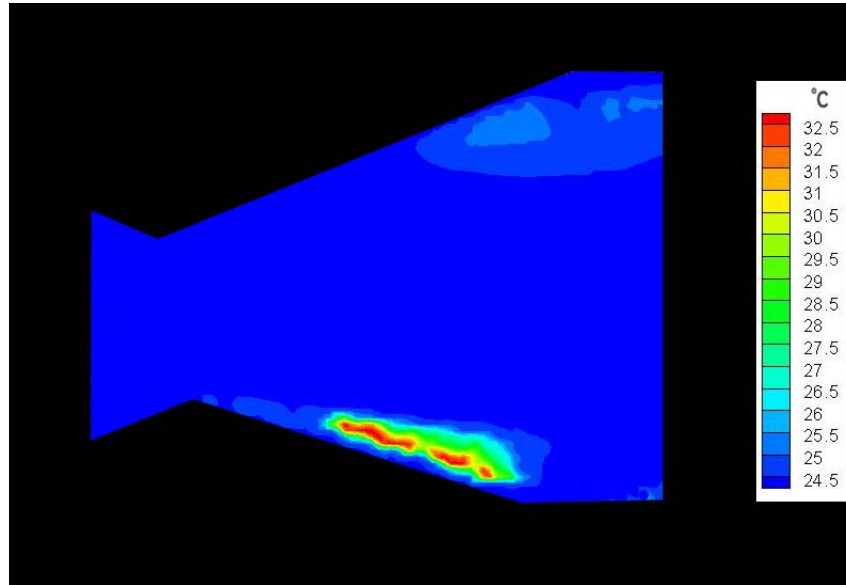
¹¹ Το πρόγραμμα αυτό δημιουργήθηκε από τον κ. Σταματόπουλο Χρήστο για να χρησιμοποιηθεί στην διπλωματική του εργασία. Για τον κώδικα του προγράμματος και λεπτομέρειες για τον τρόπο λειτουργίας του βλέπε σελ. 165 - 179. Στην πρόοδο του προγράμματος ζητείται ο αριθμός SMAG, ο οποίος φανερώνει πόσα pixels αντιστοιχούν σε 1mm του εστιάζοντος αντικειμένου. Στην περίπτωσή μας $SMAG = 28$ pixel / mm. Ο SMAG υπολογίστηκε για το λαϊμό του ακροφυσίου, με γνωστό μήκος 7 mm, με τη βοήθεια του προγράμματος Photoshop CS2 στο οποίο μπορεί να μετρηθεί το μήκος του λαϊμού σε pixels.

περιοχές του τμήματος του ακροφυσίου, που αντιστοιχεί στην “ Image.tif ” με διαφορετικές θερμοκρασίες χρωματισμένες διαφορετικά. Μετά αφαιρούμε τους άξονες των συντεταγμένων (x, y) και εμφανίζουμε το υπόμνημα της τρίτης μεταβλητής (T) που αντιστοιχίζει τις διαφορετικές θερμοκρασίες στα διαφορετικά χρώματα (αυξανόμενης της θερμοκρασίας τα χρώματα κυμαίνονται από το μπλε στο κόκκινο, δηλαδή αντίστροφα από το πως κυμαίνονται τα χρώματα που λαμβάναν οι υγροί κρύσταλλοι). Αυτό είναι το τελικό μας αρχείο στο Tecplot (temperature fields.lay), το οποίο όμως εξάγεται με τη μορφή “ export.jpg ” με σκοπό να είναι επεξεργάσιμο στο Photoshop.



Εικόνα 4.4: Θερμοκρασιακό πεδίο με υπόμνημα σαν έξοδος του Tecplot για $t = 339$ sec, $Re = 120$, $T_{πλ.} = 36$ °C, $T_{δέρ.} = 20$ °C στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

Την εικόνα “ export.jpg ” την επεξεργαζόμαστε στο Photoshop CS2. Συγκεκριμένα λαμβάνουμε το περίγραμμα του ακροφυσίου από το αντίστοιχο Grabbed Frame και δημιουργούμε μία “ μάσκα ” με τη γεωμετρία του. Επικαθίζουμε τη μάσκα αυτή στην εικόνα “ export.jpg ” και έχουμε μία ολοκληρωμένη άποψη για το που βρίσκονται οι θερμές περιοχές εντός του τμήματος του ακροφυσίου που μελετούμε. Με τη βοήθεια της εντολής “ crop ” κόβουμε το υπόμνημα από την “ export.jpg ” και το μεταφέρουμε στην εικόνα με τη μάσκα. Τέλος, δίνοντας την εντολή “ Flatten Image ” συγχωνεύεται η “ export.jpg ” με τη μάσκα και το υπόμνημα. Η έξοδος από το Photoshop είναι η εικόνα αυτή, αποθηκευμένη ως “ t.jpg ” (π.χ. 339.jpg), η οποία αποτελεί την απεικόνιση των θερμοκρασιακών πεδίων για την υπό μελέτη περίπτωση.



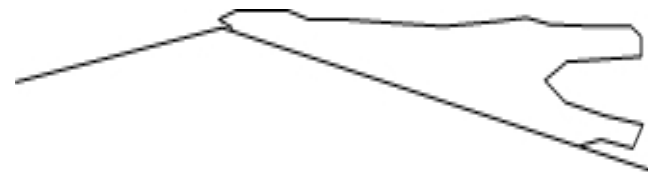
Εικόνα 4.5: Θερμοκρασιακό πεδίο με υπόμνημα και μάσκα σαν έξοδος του Photoshop για $t = 339 \text{ sec}$, $Re = 120$, $T_{\pi\lambda} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

Η εικόνα “ export.jpg ” χρησιμοποιείται ως είσοδος και για το πρόγραμμα “ Grapher 8 “. Με τη βοήθεια του εργαλείου “ Polyline “ λαμβάνουμε το περίγραμμα (με το χέρι, με τεθλασμένη γραμμή) ενός συγκεκριμένου θερμοκρασιακού πεδίου (π.χ. $25,5 \text{ }^\circ\text{C}$) και το εξάγουμε στη μορφή “ Diagram.jpg “ (π.χ. Diagram339.jpg).



Εικόνα 4.6: Περίγραμμα του θερμοκρασιακού πεδίου των $25,5 \text{ }^\circ\text{C}$ για $t = 339 \text{ sec}$, $Re = 120$, $T_{\pi\lambda} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

Τη διαδικασία που ακολουθήσαμε στο “ Grapher 8 ” επαναλαμβάνουμε και για άλλα στιγμιότυπα της ίδιας περίπτωσης (π.χ. για την $Re = 120$, $T_{\pi\lambda} = 36$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 20$, ΚΑΤΑΝΤΙ, τα στιγμιότυπα $t = 0 \text{ sec}$ και $t = 11 \text{ sec}$).

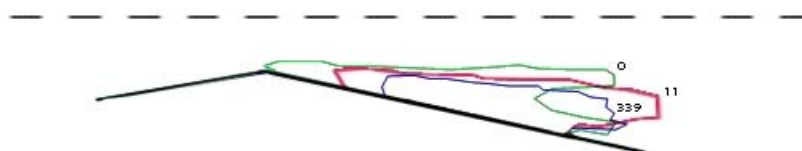


Εικόνα 4.7: Περίγραμμα του θερμοκρασιακού πεδίου των $25,5 \text{ }^\circ\text{C}$ για $t = 0 \text{ sec}$, $Re = 120$, $T_{\pi\lambda} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου



Εικόνα 4.8: Περίγραμμα του θερμοκρασιακού πεδίου των $25,5 \text{ }^\circ\text{C}$ για $t = 11 \text{ sec}$, $Re = 120$, $T_{\pi\lambda} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

Τέλος, εισάγουμε όλες τις εικόνες “ Diagram.jpg “ (εδώ για $t = 0, 11, 339$) της περίπτωσης που μελετάμε στο Photoshop CS2 και βάφουμε καθένα από τα περιγράμματα με διαφορετικό χρώμα. Ακολούθως τα τοποθετούμε όλα στην ίδια εικόνα με μία κοινή γραμμή αναφοράς. Η γραμμή αυτή είναι πάντοτε ένα τμήμα της μεταλλικής θερμαινόμενης πλάκας. Στη συνέχεια τοποθετούμε τον άξονα συμμετρίας του ακροφυσίου και τις χρονικές στιγμές t δίπλα στο αντίστοιχο περίγραμμα. Χρησιμοποιούμε και εδώ την εντολή “ Flatten Image ” και αποθηκεύουμε την εικόνα σε μορφή .jpg. Η εικόνα αυτή συγκεντρώνει τις ισοθερμοκρασιακές καμπύλες για μια συγκεκριμένη τιμή της θερμοκρασίας (εδώ $25,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) σε διάφορες χρονικές στιγμές t ($0, 11, 339\text{ sec}$) της εκάστοτε περίπτωσης. Έτσι έχουμε μία εικόνα της εξέλιξης του συγκεκριμένου θερμοκρασιακού πεδίου με την πάροδο του χρόνου.



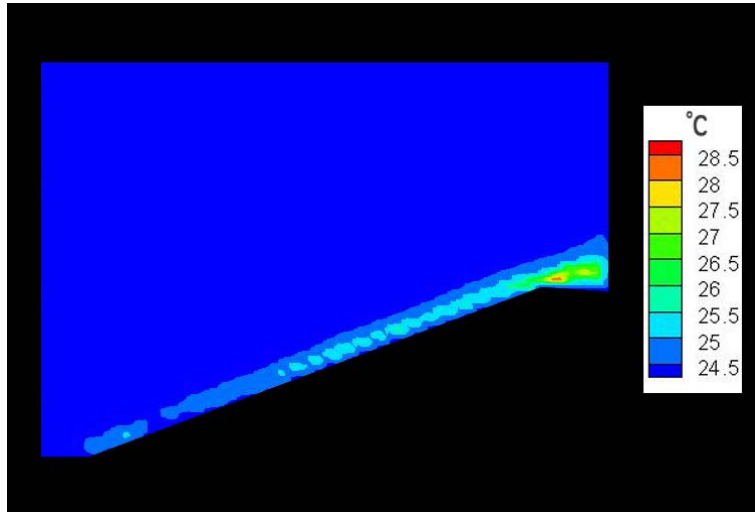
Εικόνα 4.9: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των $25,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ για $t = 0, 11, 339\text{ sec}$, $Re = 120$, $T_{πλ.} = 36\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{αεζ.} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

Μέσω της πειραματικής διαδικασίας λάβαμε για την κάθε περίπτωση, έναν αριθμό εικόνων που αποτυπώνουν τα εντός του ακροφυσίου θερμοκρασιακά πεδία για διαφορετικές χρονικές στιγμές (t). Η κατεύθυνση της ροής είναι πάντοτε από τα αριστερά προς τα δεξιά.

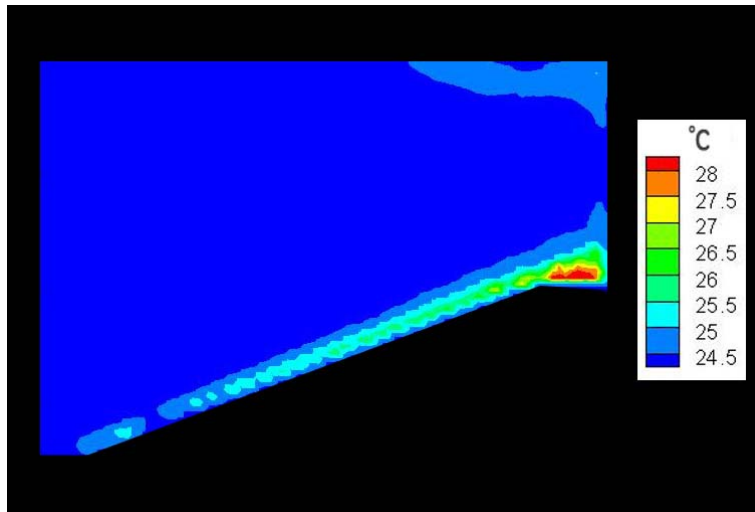
1) $Q = 0\text{ cm}^3 / \text{sec}$ ($Re = 0$)

1α) $\Delta T = 29,5 - 21,5\text{ }^{\circ}\text{C} = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Q = 0\text{ cm}^3 / \text{sec}$

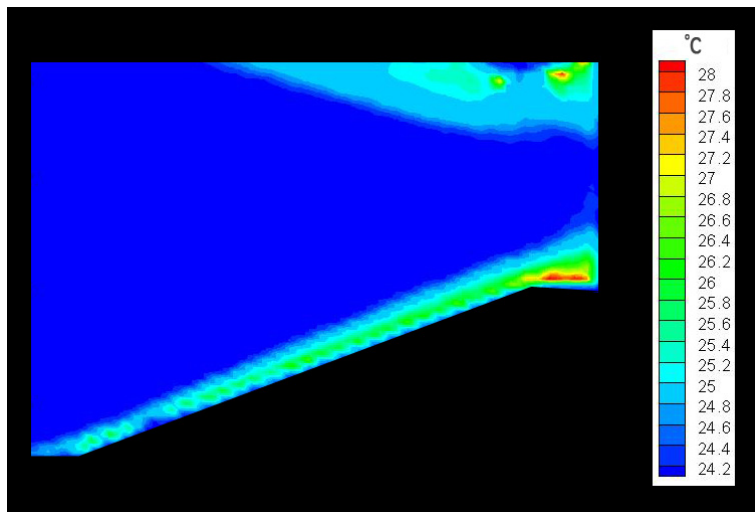
1α₁) ANANTI TMHMA TOY AKPOFYCIOY, $Q = 0\text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 29,5 - 21,5\text{ }^{\circ}\text{C}$



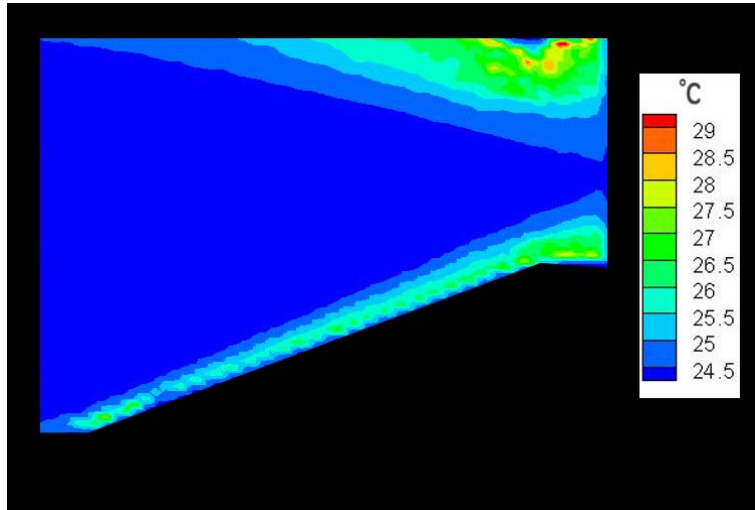
Εικόνα 4.10: $t = 19 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI



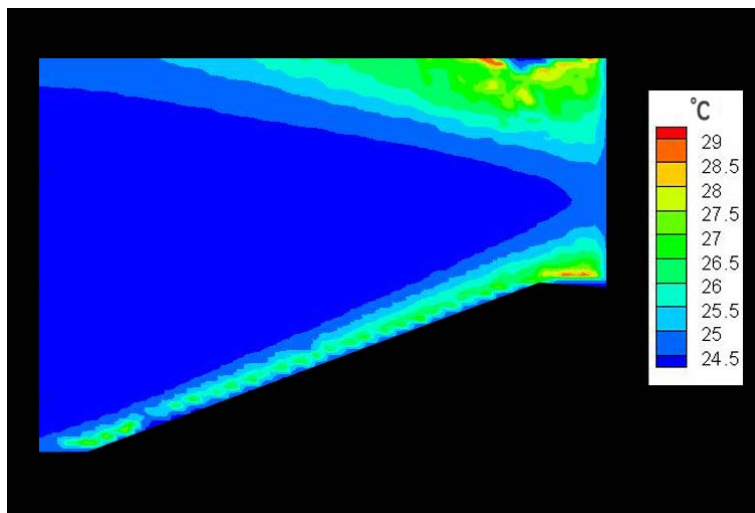
Εικόνα 4.11: $t = 32 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI



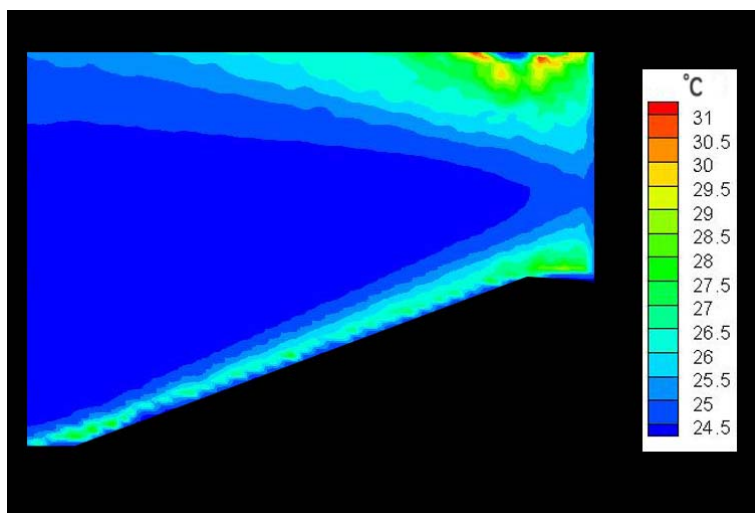
Εικόνα 4.12: $t = 75 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI



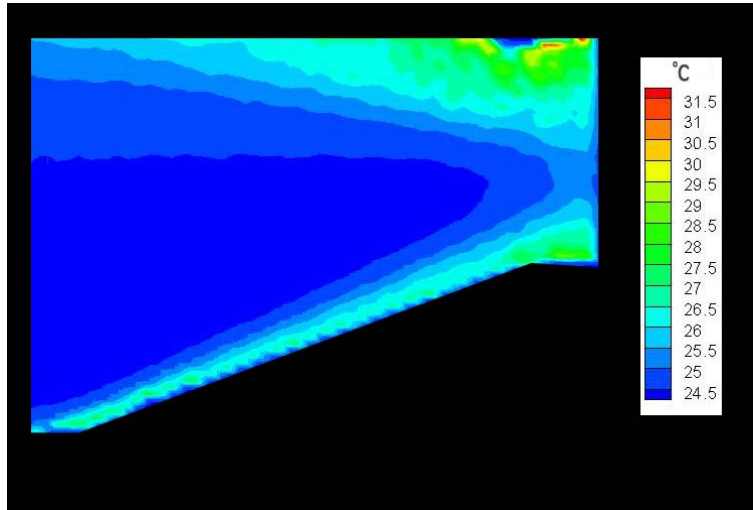
Εικόνα 4.13: $t = 151 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI



Εικόνα 4.14: $t = 195 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

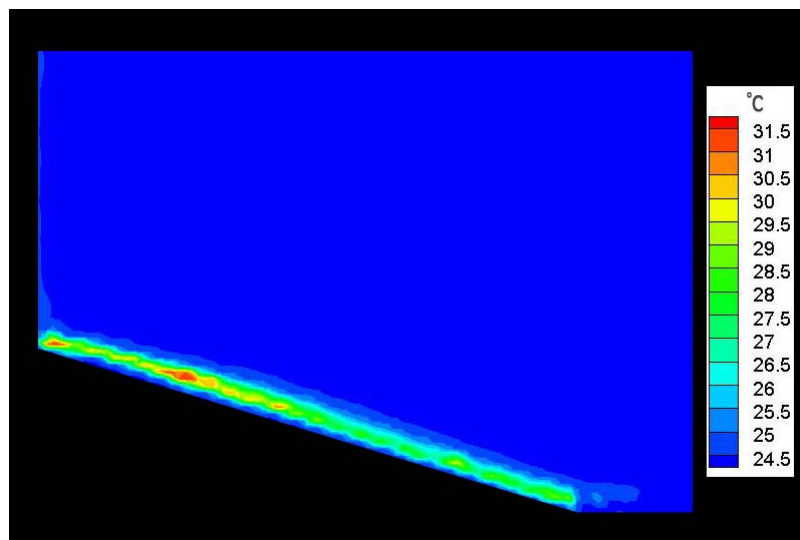


Εικόνα 4.15: $t = 241 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

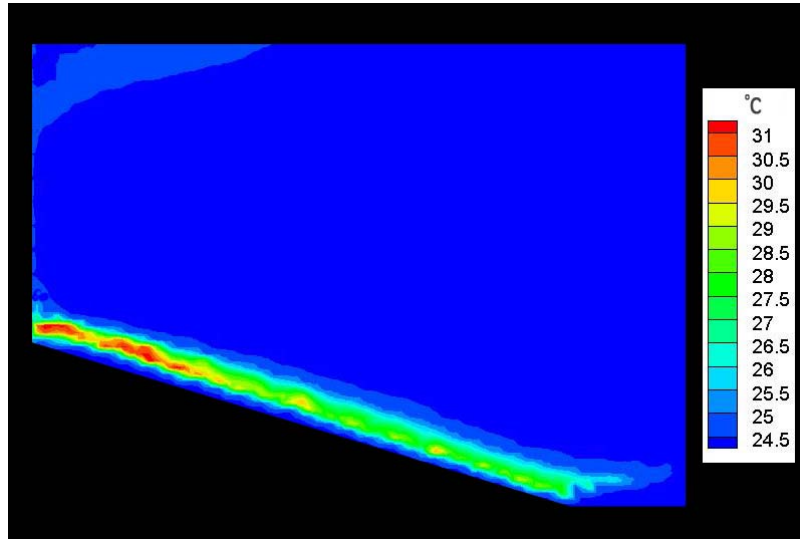


Εικόνα 4.16: $t = 283 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

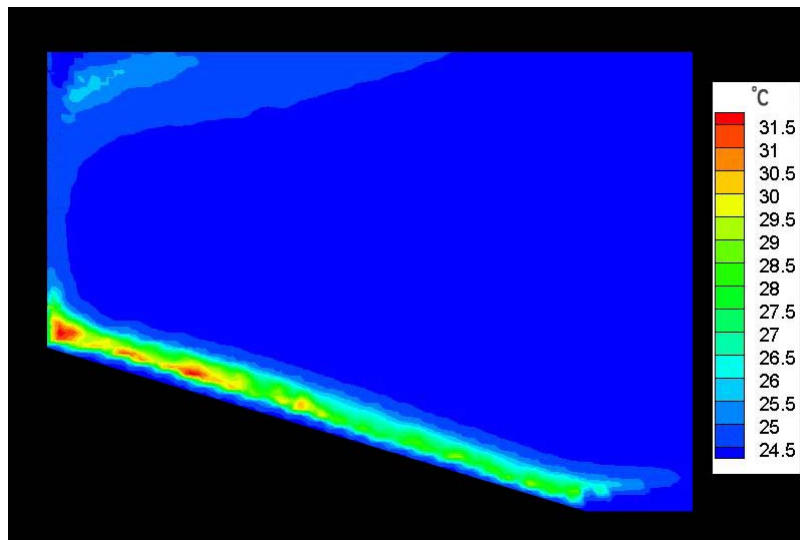
1α₂) ΚΑΤΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 29,5 - 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$



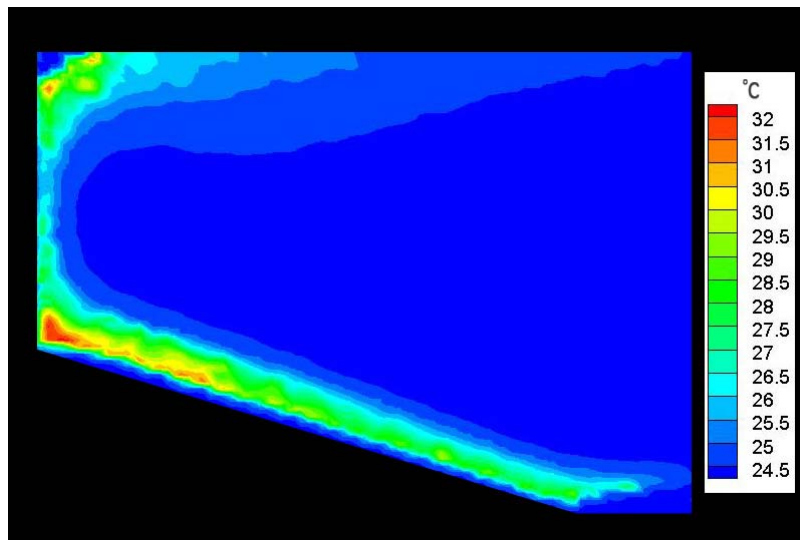
Εικόνα 4.17: $t = 9 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



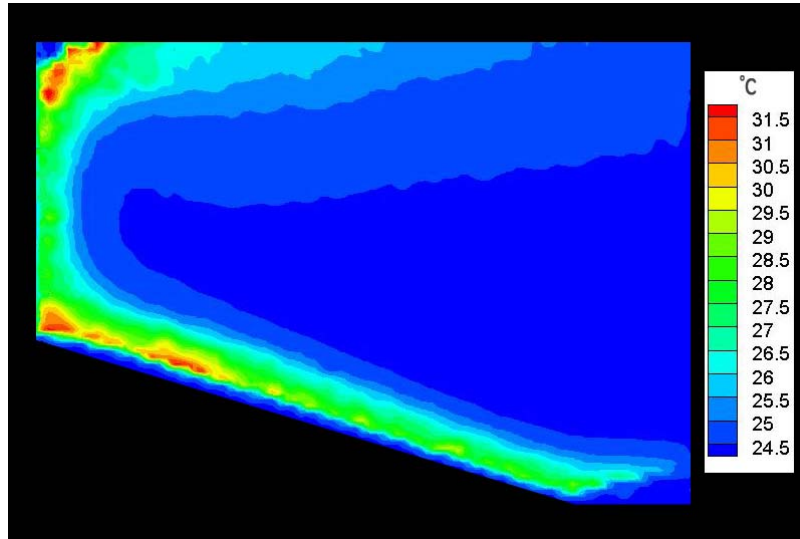
Εικόνα 4.18: $t = 44 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



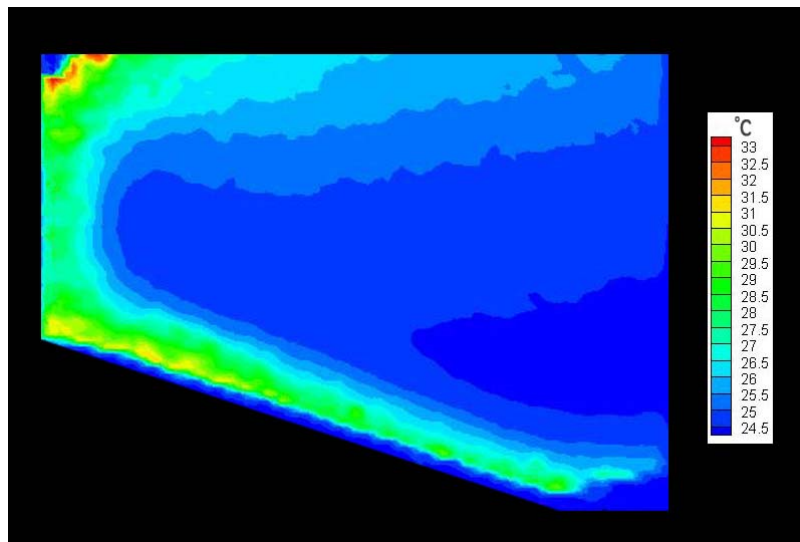
Εικόνα 4.18: $t = 67 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



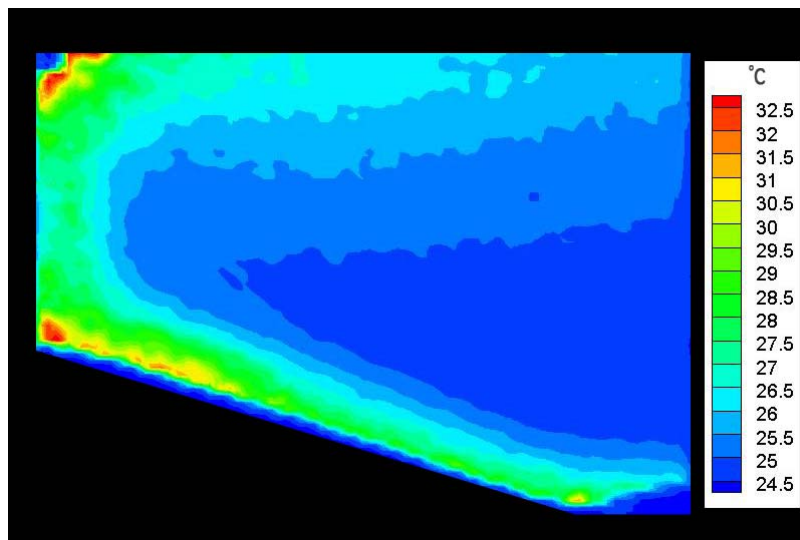
Εικόνα 4.19: $t = 91 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



Εικόνα 4.20: $t = 118 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



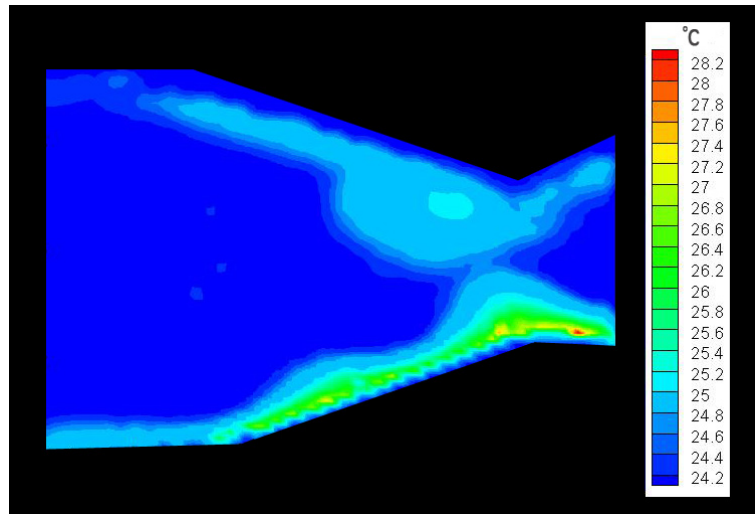
Εικόνα 4.21: $t = 155 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



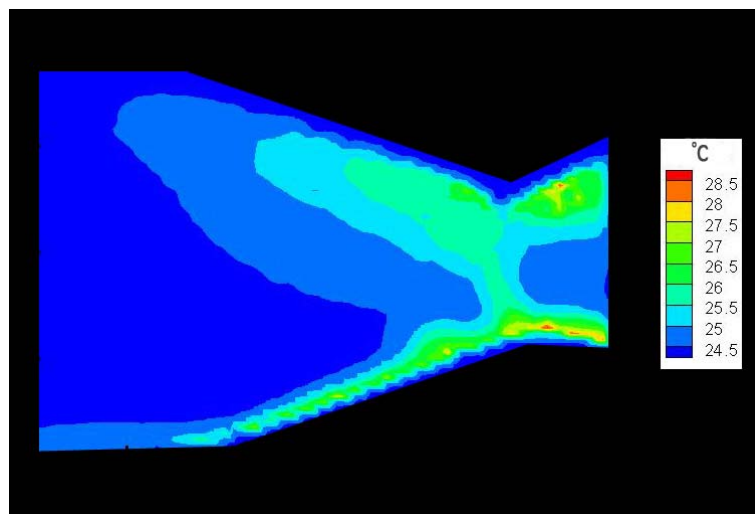
Εικόνα 4.22: $t = 185 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI

1β) $\Delta T = 31 - 23 \text{ }^\circ\text{C} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$

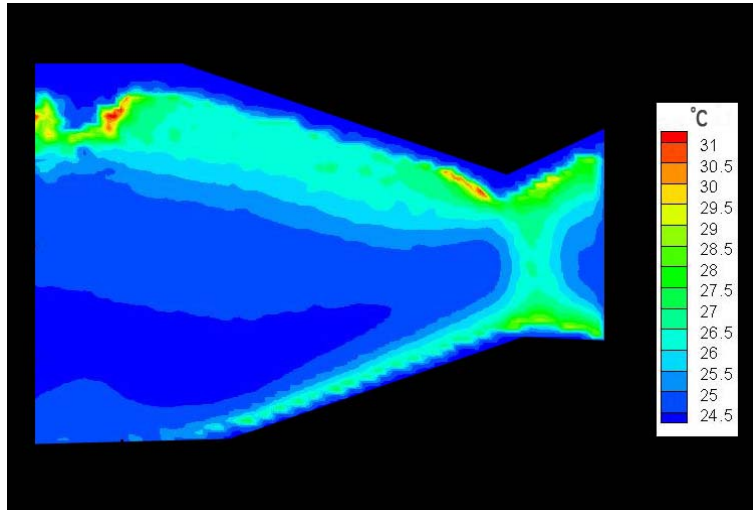
1β₁) ANANTI ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 31 - 23 \text{ }^\circ\text{C}$



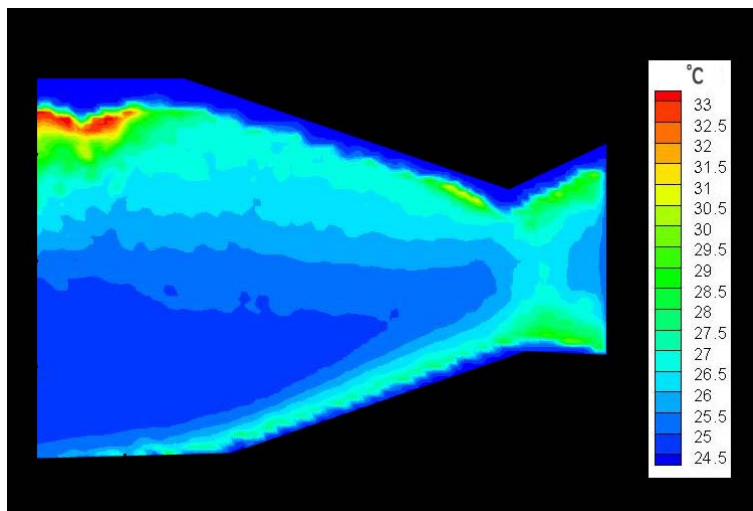
Εικόνα 4.23: $t = 5 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI



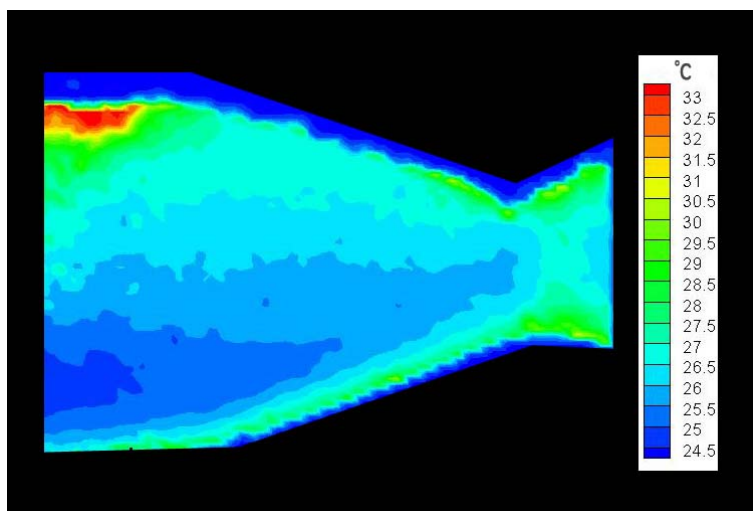
Εικόνα 4.24: $t = 10 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI



Εικόνα 4.25: $t = 21 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

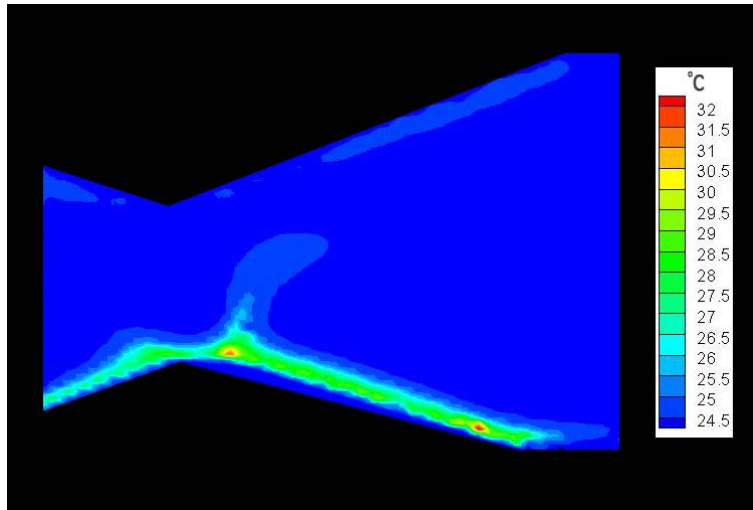


Εικόνα 4.26: $t = 48 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

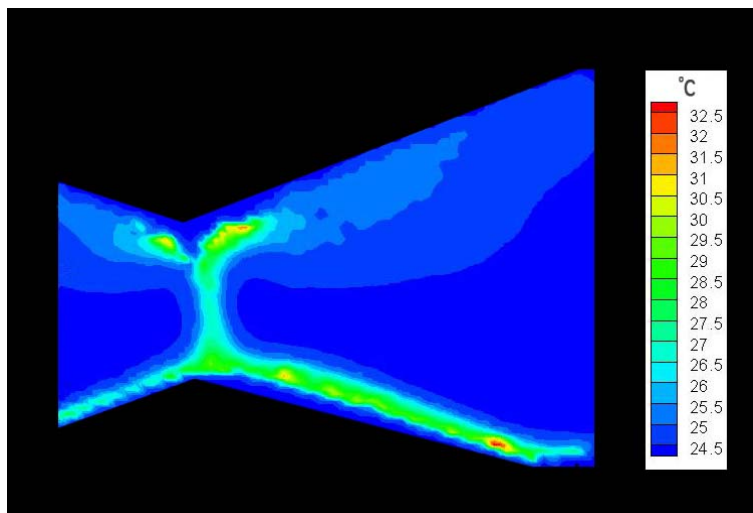


Εικόνα 4.27: $t = 105 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

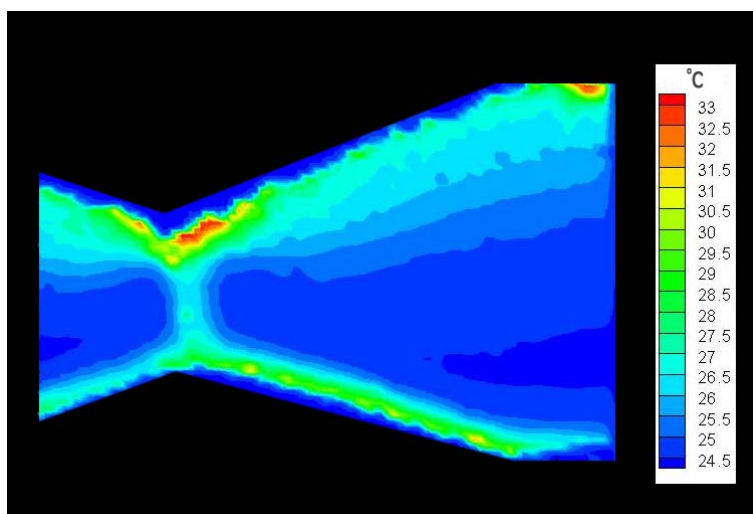
1β₂) ΚΑΤΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 31 - 23 \text{ }^\circ\text{C}$



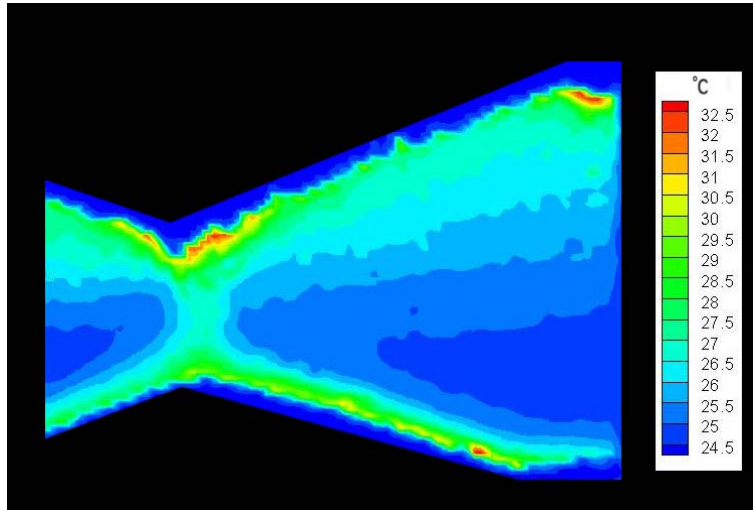
Εικόνα 4.28: $t = 5 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



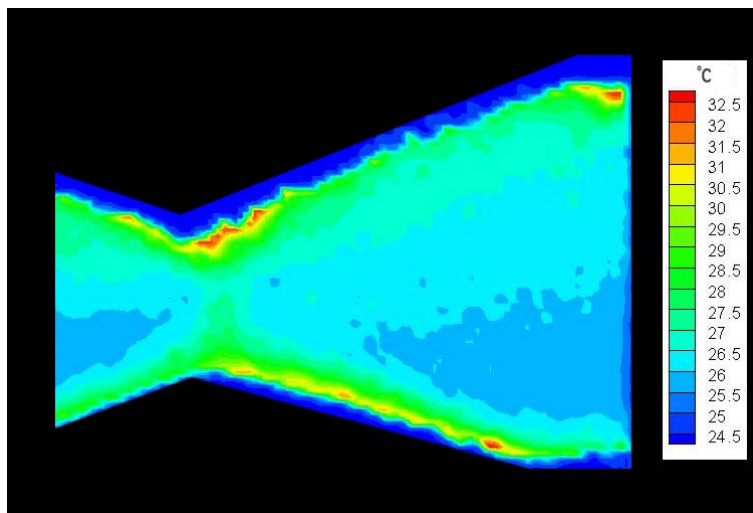
Εικόνα 4.29: $t = 10 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



Εικόνα 4.30: $t = 30 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



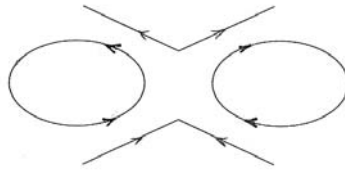
Εικόνα 4.31: $t = 53 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\text{πλ.}} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεξ.}} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



Εικόνα 4.32: $t = 110 \text{ sec}$, $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\text{πλ.}} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεξ.}} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ

Στις παραπάνω περιπτώσεις το πλούμιο εμφανίζεται στο λαιμό. Το φαινόμενο εκτυλίσσεται σχεδόν συμμετρικά ανάντι και κατάντι της στένωσης.

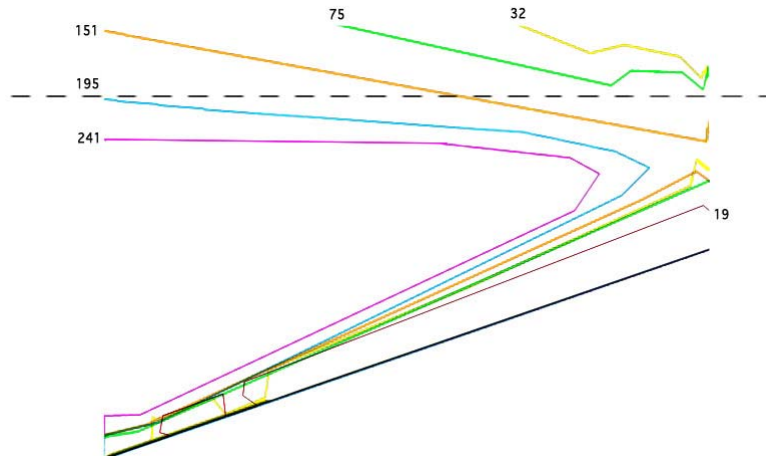
Κατά τη μεταβατική περίοδο δημιουργείται θερμικό οριακό στρώμα κατά μήκος της μεταλλικής θερμαινόμενης πλάκας. Από τη βάση του λαιμού θερμή μάζα ρευστού κινούμενη ανοδικά, σε επίπεδο κάθετο στο επίπεδο της κύριας ροής (πράγμα που φαίνεται από τη διακεκομμένη απεικόνιση της ανοδικής πορείας ρευστού με θερμοκρασία γύρω στους $29 \text{ }^\circ\text{C}$ – πράσινο χρώμα), φθάνει στην κορυφή του, όπου και διαχέεται ομοιόμορφα δεξιά και αριστερά σχηματίζοντας οριακό στρώμα και στην άνω πλάκα του ακροφυσίου. Το πάχος του τελευταίου είναι μεγαλύτερο από εκείνο της θερμαινόμενης πλάκας. Στον ενδιάμεσο χώρο (μεταξύ των δύο οριακών στρωμάτων) παρατηρείται κυκλική κίνηση των μορίων του ρευστού και στα δύο τμήματα του ακροφυσίου με αντίθετες φορές (στο διαχύτη δεξιόστροφα ενώ στο συγκλίνον τμήμα αριστερόστροφα).



Εικόνα 4.33: Κατεύθυνση της κίνησης του ρευστού εντός του ακροφυσίου για $Q = 0 \text{ cm}^3 / \text{sec}$

Παρατηρώντας διαπιστώνουμε ακόμη ότι κατά τη μετάβαση στη μόνιμη κατάσταση¹² η μετατόπιση του θερμού μετώπου γίνεται με κατεύθυνση από πάνω προς τα κάτω. Επίσης συνάγεται ότι φθάνοντας στη μόνιμη κατάσταση τα πάχη των θερμικών οριακών στρωμάτων στην πάνω και κάτω πλάκα καταλήγουν να είναι πρακτικά ίσα.

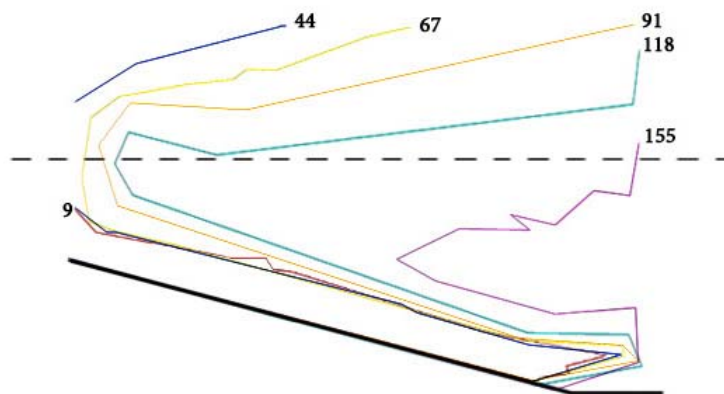
Στην 1α περίπτωση, όπου οι λαμβανόμενες φωτογραφίες είναι σε μεγέθυνση, το ρευστό απέκτησε την ίδια θερμοκρασία σ' όλο του τον όγκο σε $t > 5 \text{ min}$, ενώ στην 1β, παρότι το ΔT είναι το ίδιο ($\Delta T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$), σε $t < 3 \text{ min}$, δηλαδή νωρίτερα λόγω μεγαλύτερης θερμοκρασίας του περιβάλλοντος το ακροφυσίο ρευστού (μεταλλικής πλάκας).



Εικόνα 4.34: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των $24,5 \text{ }^\circ\text{C}$ για $t = 19, 32, 75, 151, 195, 241 \text{ sec}$, $Re = 0$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$ στο ανάντι τμήμα του ακροφυσίου

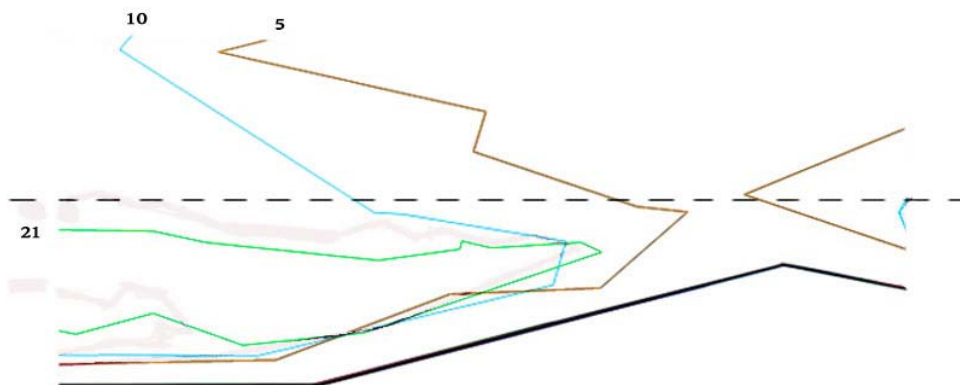
Η εικόνα 4.34 αναφέρεται στην περίπτωση 1α₁ και παρουσιάζει τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των $24,5 \text{ }^\circ\text{C}$ για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t . Το θερμοκρασιακό πεδίο των $24,5 \text{ }^\circ\text{C}$ συνεχώς μειώνεται καθώς το θερμό μέτωπο μετατοπίζεται από την άνω πλάκα προς τη θερμαινόμενη μεταλλική πλάκα (κάτω).

¹² Ως χρόνο που φθάνουμε στη μόνιμη κατάσταση ορίζουμε το χρόνο που χρειάζεται το φαινόμενο για να σταθεροποιηθεί (να σταματήσει να εξελίσσεται). Ο χρόνος αυτός υπολογίστηκε με γυμνό οφθαλμό κατά τη διάρκεια της μελέτης των videos.



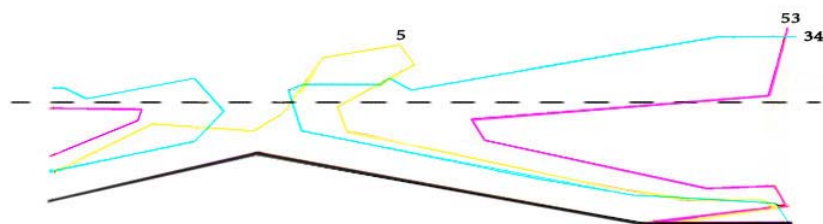
Εικόνα 4.35: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 24,5 °C για $t = 9, 44, 67, 91, 118, 155$ sec, $Re = 0$, $T_{\pi\lambda} = 29,5$ °C, $T_{\delta\alpha\epsilon} = 21,5$ °C στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

Η εικόνα 4.35 αναφέρεται στην περίπτωση 1α₂ και παριστά τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των 24,5 °C για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t . Το πεδίο των 24,5 °C, λόγω του ότι είναι χαμηλής θερμοκρασίας, με την εξέλιξη του φαινομένου, συνεχώς μειώνεται.



Εικόνα 4.36: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 24,5 °C για $t = 5, 10, 21$ sec, $Re = 0$, $T_{\pi\lambda} = 31$ °C, $T_{\delta\alpha\epsilon} = 23$ °C στο ανάντι τμήμα του ακροφυσίου

Η εικόνα 4.36 αναφέρεται στην περίπτωση 1β₁ και παρουσιάζει τα εξωτερικά περιγράμματα για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t του θερμοκρασιακού πεδίου των 24,5 °C. Διαπιστώνουμε ότι για τις χρονικές στιγμές $t = 5, 10, 21$ sec το θερμοκρασιακό πεδίο των 24,5 °C αποτελεί μέρος της προοδευτικά μειούμενης ψυχρής μάζας του ρευστού στον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ των δύο θερμικών οριακών στρωμάτων του συγκλίνοντος τμήματος του ακροφυσίου.



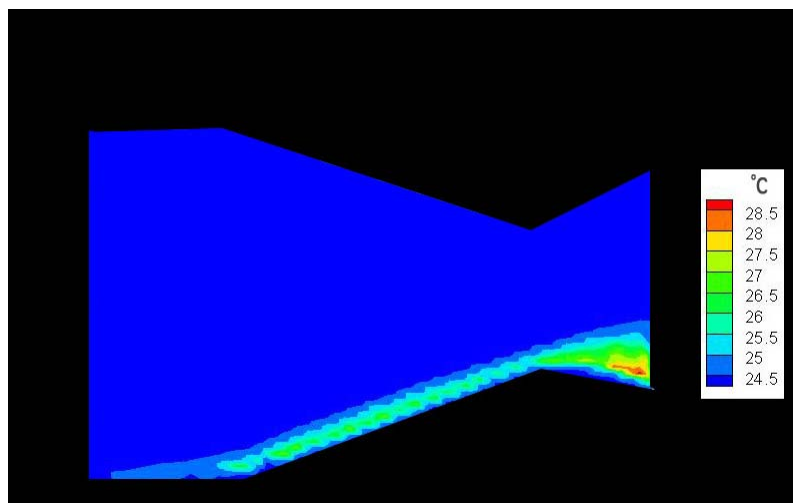
Εικόνα 4.37: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 25 °C για $t = 5, 34, 53 \text{ sec}$, $Re = 0$, $T_{πλ.} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{δεδ.} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

Η εικόνα 4.37 αναφέρεται στην περίπτωση $1\beta_2$ και παρουσιάζει τα εξωτερικά περιγράμματα, για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t , του θερμοκρασιακού πεδίων των 25 °C. Αντιλαμβανόμαστε ότι για τη χρονική στιγμή $t = 5 \text{ sec}$ το θερμοκρασιακό πεδίο των 25 °C αποτελεί μέρος του πλούμιου στο διαχύτη, ενώ τις χρονικές στιγμές $t = 34, 53 \text{ sec}$ αποτελεί μέρος του συνεχώς μειούμενου ψυχρότερου ενδιάμεσου χώρου μεταξύ των δύο οριακών στρωμάτων.

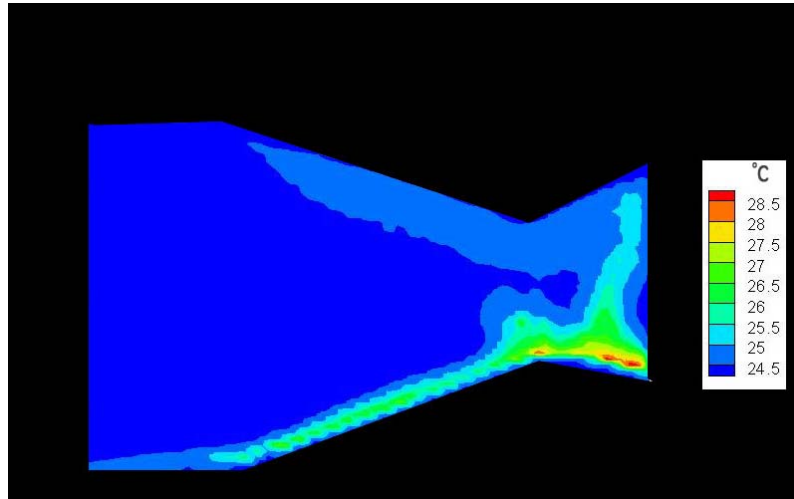
Για το $Q \neq 0$ το πλούμιο εμφανίζεται εν γένει στο διαχύτη δηλαδή μετατοπισμένο, σε σχέση με την περίπτωση της μηδενικής παροχής, προς τα δεξιά ως προς το λαιμό του ακροφυσίου.

2) $Q = 0,05 \text{ cm}^3 / \text{sec}$ ($Re = 4$) για $\Delta T = 31 - 23 \text{ }^\circ\text{C} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$

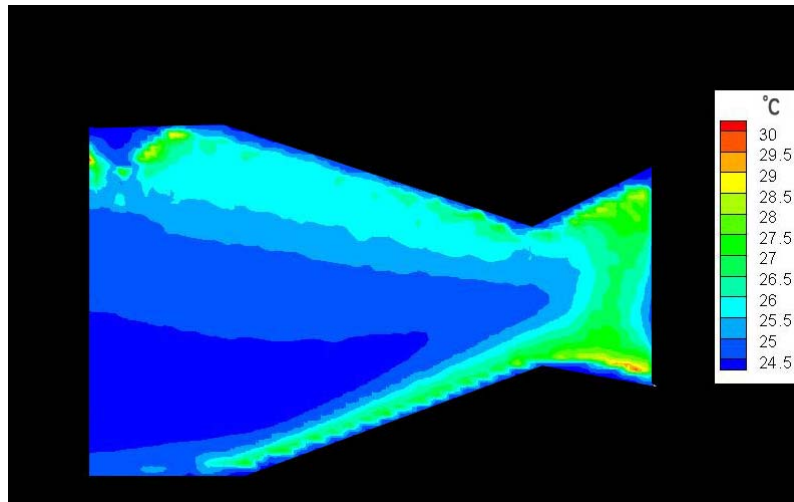
ΑΝΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0,05 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 31 - 23 \text{ }^\circ\text{C}$



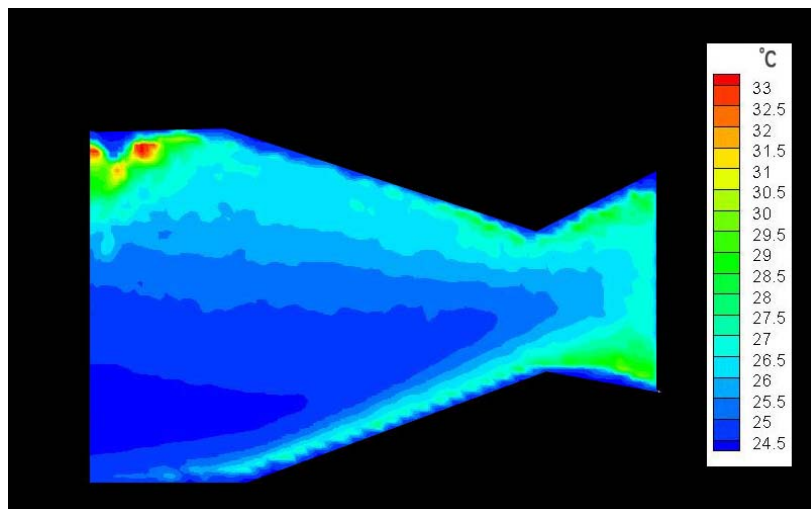
Εικόνα 4.38: $t = 8 \text{ sec}$, $Q = 0,05 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{πλ.} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{δεδ.} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΑΝΑΝΤΙ



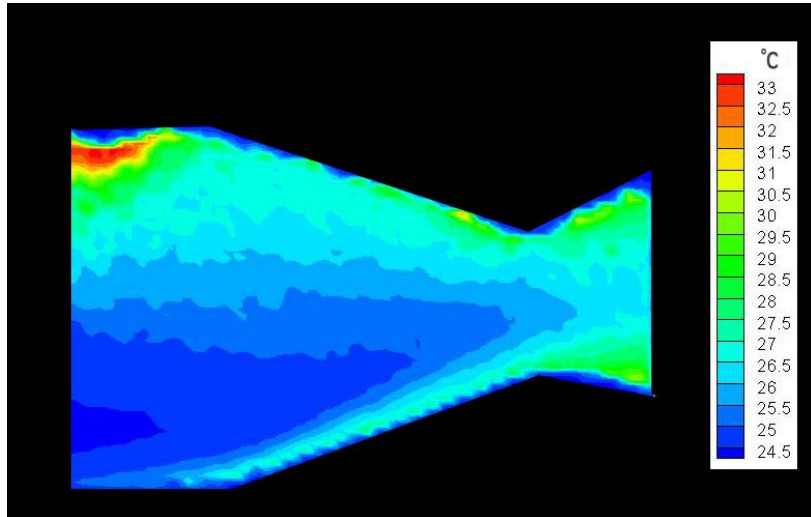
Εικόνα 4.39: $t = 17 \text{ sec}$, $Q = 0,05 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI



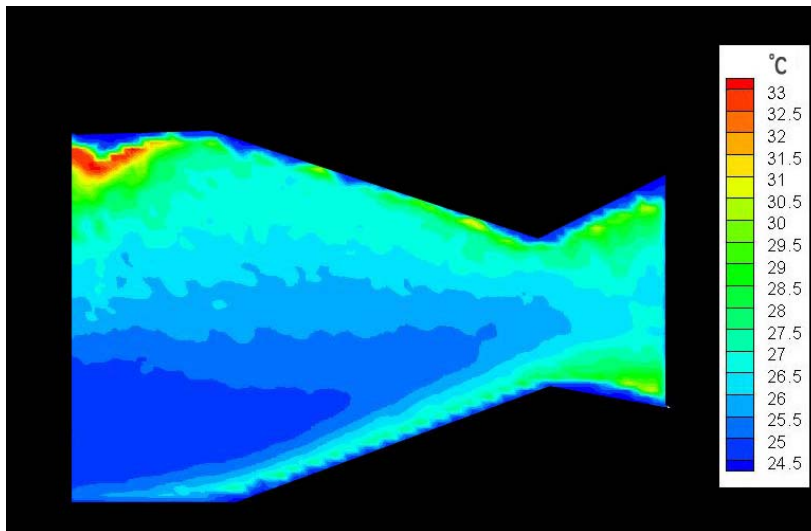
Εικόνα 4.40: $t = 29 \text{ sec}$, $Q = 0,05 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI



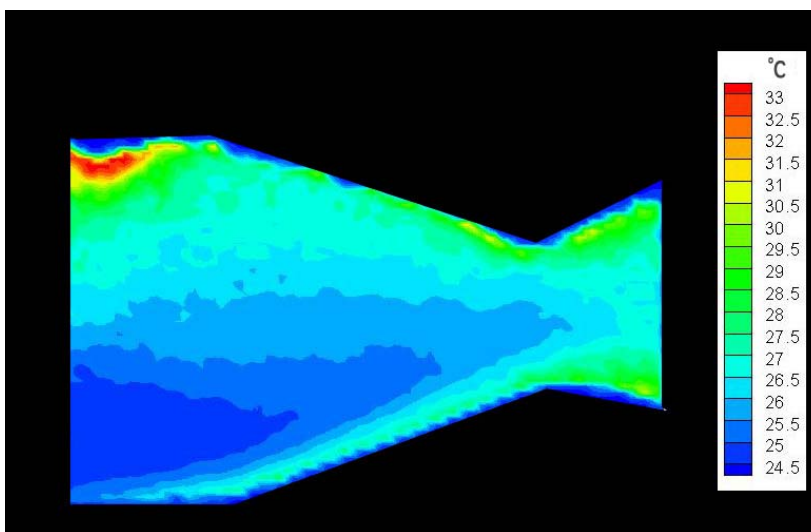
Εικόνα 4.41: $t = 121 \text{ sec}$, $Q = 0,05 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI



Εικόνα 4.42: $t = 221$ sec, $Q = 0,05 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\sigma\zeta.} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

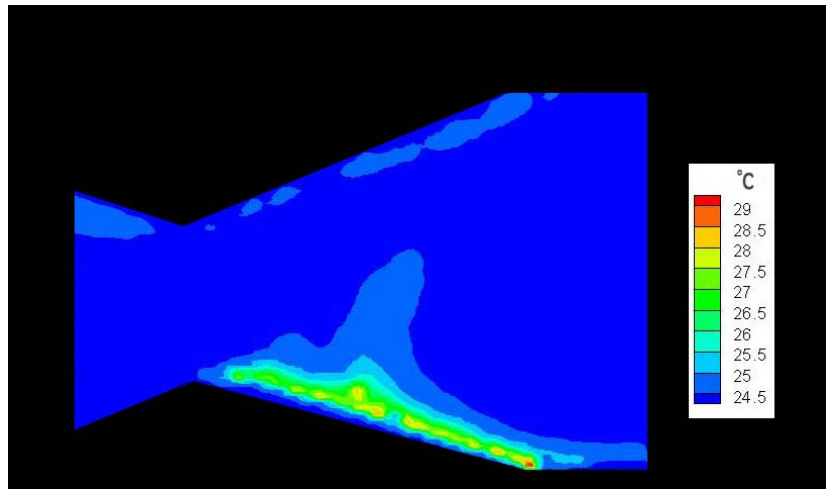


Εικόνα 4.43: $t = 270$ sec, $Q = 0,05 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\sigma\zeta.} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

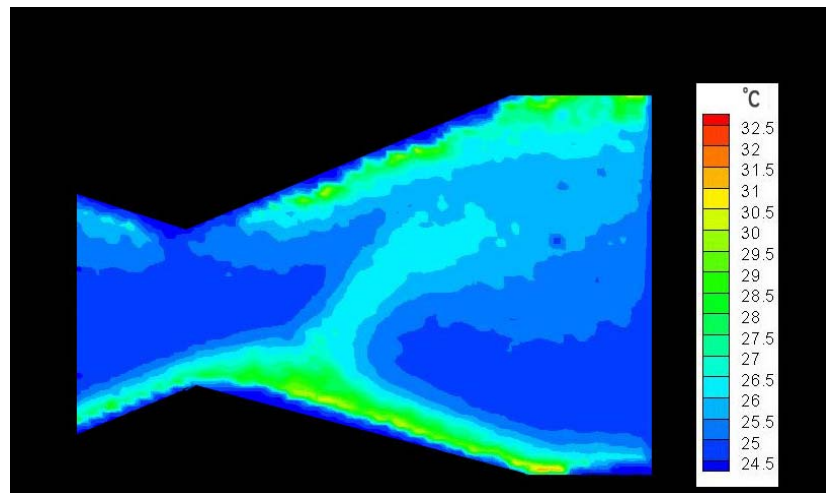


Εικόνα 4.44: $t = 311$ sec, $Q = 0,05 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\sigma\zeta.} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

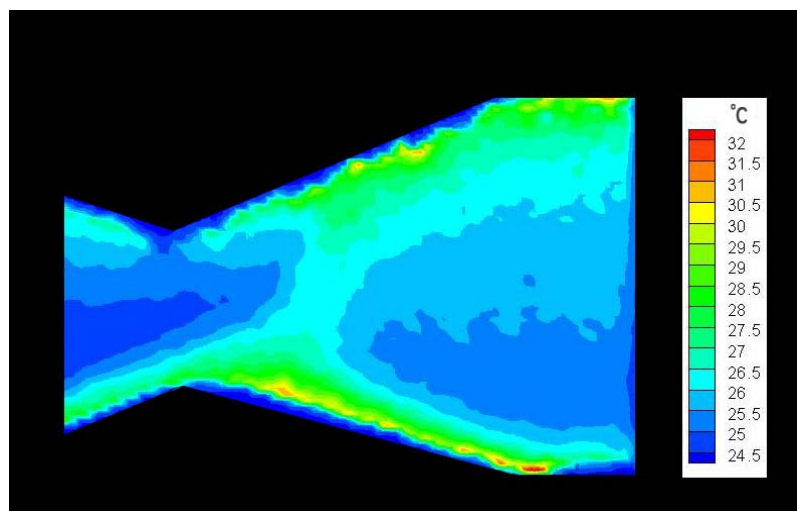
ΚΑΤΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0,05 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 31 - 23 \text{ }^\circ\text{C}$



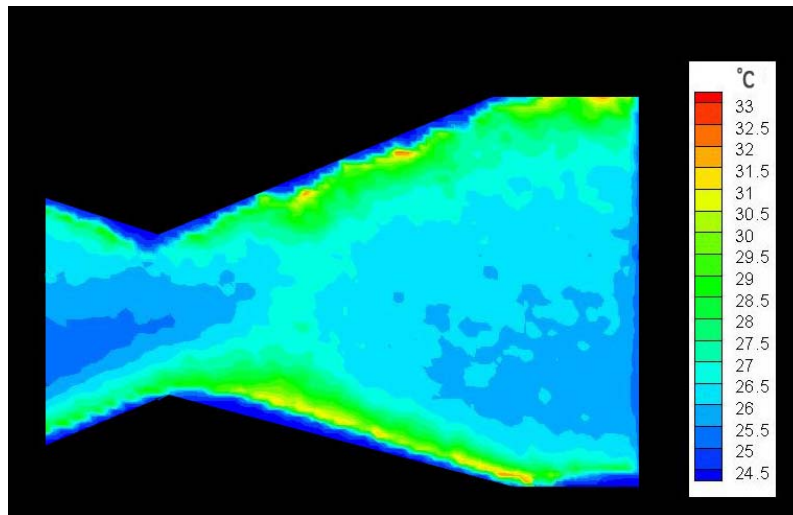
Εικόνα 4.45: $t = 6 \text{ sec}$, $Q = 0,05 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



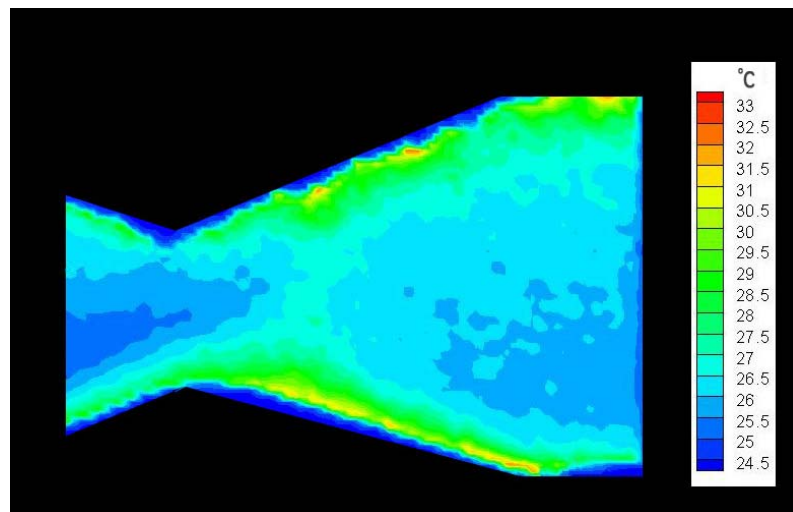
Εικόνα 4.46: $t = 23 \text{ sec}$, $Q = 0,05 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



Εικόνα 4.47: $t = 39 \text{ sec}$, $Q = 0,05 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



Εικόνα 4.48: $t = 69 \text{ sec}$, $Q = 0,05 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\text{πλ.}} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεξ.}} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ

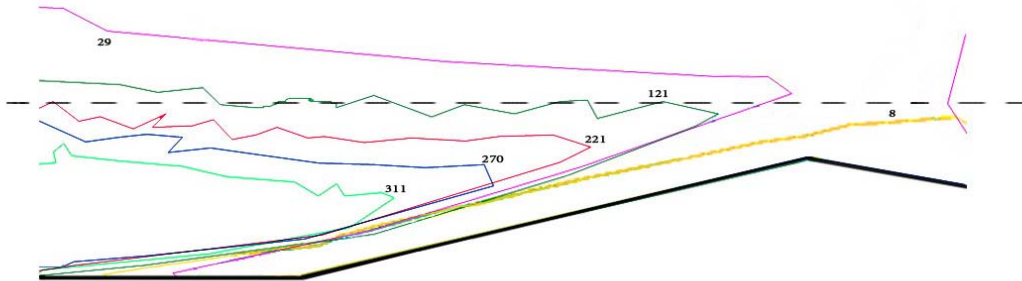


Εικόνα 4.49: $t = 180 \text{ sec}$, $Q = 0,05 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\text{πλ.}} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεξ.}} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ

Στην περίπτωση αυτή η ταχύτητα του εισερχομένου στο ακροφύσιο ρευστού είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα το πλούμιο να εμφανίζεται ελαφρά μετατοπισμένο δεξιά σε σχέση με το λαιμό. Και σ' αυτή την περίπτωση παρατηρείται δημιουργία θερμικού οριακού στρώματος κατά μήκος της θερμαινόμενης πλάκας, καθώς και ανοδική κίνηση θερμής μάζας ρευστού (πλούμιο) με ίδια χαρακτηριστικά (δηλαδή σε επίπεδο κάθετο στο επίπεδο της κύριας ροής και με την ίδια κατεύθυνση) με την περίπτωση για $Re = 0$ η οποία προσκρούοντας στην άνω πλάκα διαχέεται και προς τα δύο τμήματα του ακροφυσίου. Έτσι εξηγείται γιατί οι θερμοκρασίες, κατά τη μεταβατική περίοδο είναι μικρότερες στον ενδιάμεσο χώρο απ' ότι στην πάνω και κάτω πλάκα.

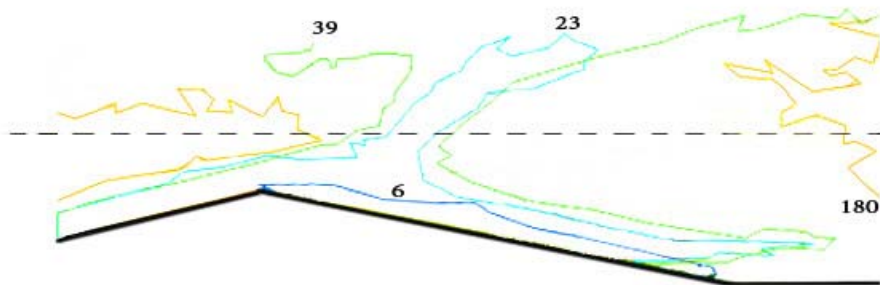
Στη συνέχεια οδεύοντας προς τη χρονική στιγμή όπου ο όγκος του ρευστού αποκτά σχεδόν ενιαία θερμοκρασία παρατηρούμε ότι η μετατόπιση του θερμού μετώπου γίνεται με κατεύθυνση από πάνω προς τον ενδιάμεσο ψυχρότερο χώρο. Μεταξύ συγκλίνοντος και αποκλίνοντος ακροφυσίου παρατηρείται διαφορά στο χρόνο που ο όγκος του ρευστού αποκτά αυτήν την ενιαία θερμοκρασία. Όπως είναι λογικό στο τμήμα του συγκλίνοντος ακροφυσίου που είναι η είσοδος του ψυχρού ρεύματος ρευστού η αποκατάσταση της ενιαίας θερμοκρασίας επέρχεται σε υπερτριπλάσιο χρόνο σε σχέση με το διαχύτη. Ουσιαστικά το εισερχόμενο ψυχρό ρεύμα, λόγω της μικρής του ταχύτητας, δε φθάνει ποτέ στο διαχύτη με

θερμοκρασία κοντά στην αρχική του, με αποτέλεσμα να αποκαθίσταται εκεί γρηγορότερα ομοιόμορφη υψηλή θερμοκρασία.



Εικόνα 4.50: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 25 °C για $t = 8, 29, 121, 221, 270, 311$ sec, $Re = 4$, $T_{πλ.} = 31$ °C, $T_{δεδ.} = 23$ °C στο ανάντι τμήμα του ακροφυσίου

Η εικόνα 4.50 αναφέρεται στο ανάντι τμήμα του ακροφυσίου και παριστά τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των 25 °C για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t . Το πεδίο των 25 °C για τη χρονική στιγμή $t = 8$ sec αποτελεί μέρος του θερμικού οριακού στρώματος στο συγκλίνων τμήμα του ακροφυσίου, ενώ τις χρονικές στιγμές $t = 29, 121, 221, 270, 311$ sec αποτελεί όλο και μικρότερο μέρος του θερμαινόμενου ψυχρού ρεύματος που εισέρχεται στο ακροφύσιο.



Εικόνα 4.51: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 26,5 °C για $t = 6, 23, 39, 180$ sec, $Re = 4$, $T_{πλ.} = 31$ °C, $T_{δεδ.} = 23$ °C στο κατόντι τμήμα του ακροφυσίου

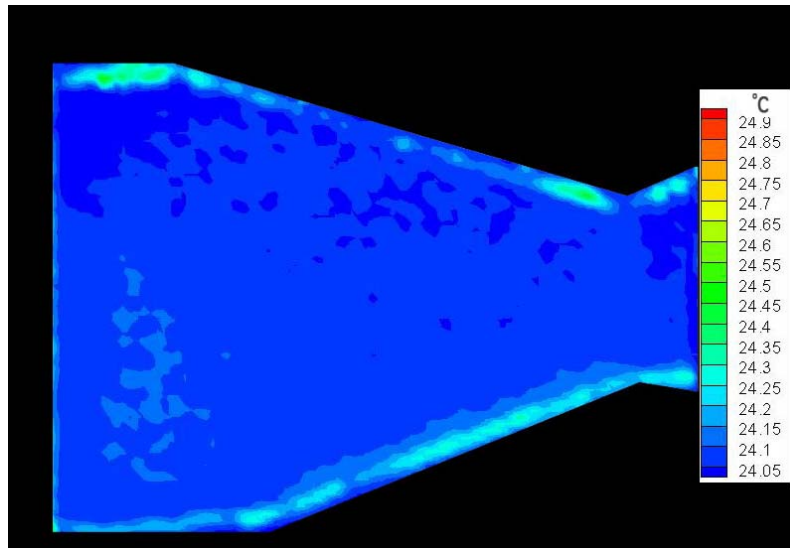
Η εικόνα 4.51 αναφέρεται στην περίπτωση κατόντι τμήμα του ακροφυσίου και παριστά τις ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 26,5 °C για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t . Το πεδίο αυτό για τις χρονικές στιγμές $t = 6, 23, 39$ sec αποτελεί μέρος της θερμής μάζας του ρευστού που ανεβαίνει προς την άνω πλάκα, ενώ πλησιάζοντας στη μόνιμη κατάσταση $t = 180$ sec αποτελεί μέρος του σταδιακά θερμαινόμενου ψυχρού ρεύματος που εισέρχεται στο

ακροφύσιο καθώς και μέρος του ενδιάμεσου χώρου (που δεν έχει αποκτήσει ακόμα την ενιαία τελική θερμοκρασία) μεταξύ των δύο θερμικών οριακών στρωμάτων στο διαχύτη.

3) $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$ ($Re = 8$)

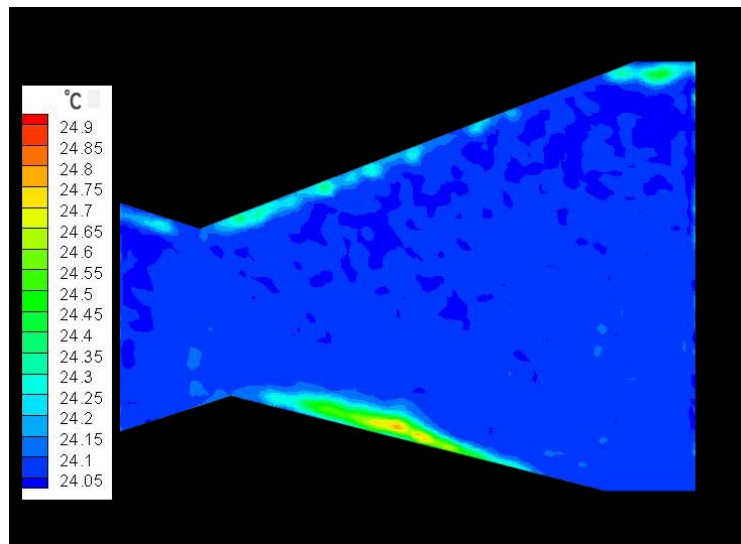
3α) $\Delta T = 25,5 - 21,5 \text{ }^\circ\text{C} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$

3α₁) ANANTI ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 25,5 - 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$

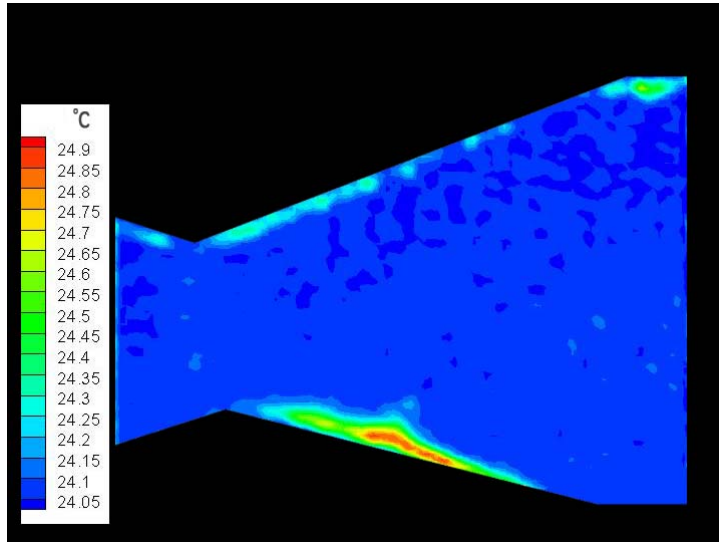


Εικόνα 4.52: $t = 150 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

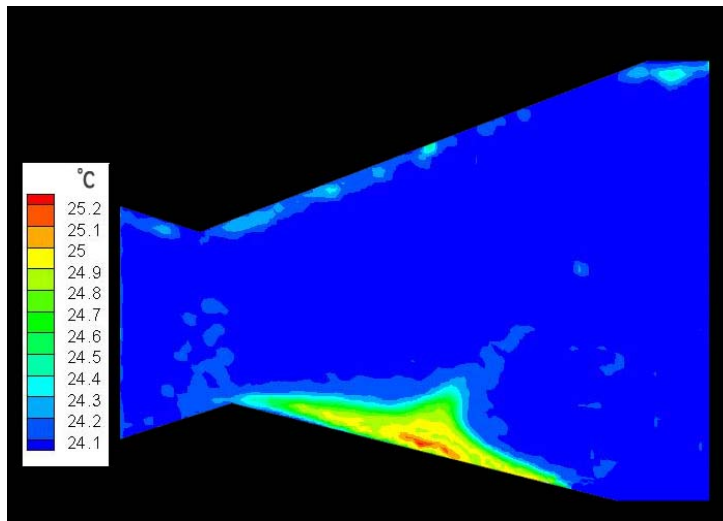
3α₂) ΚΑΤΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 25,5 - 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$



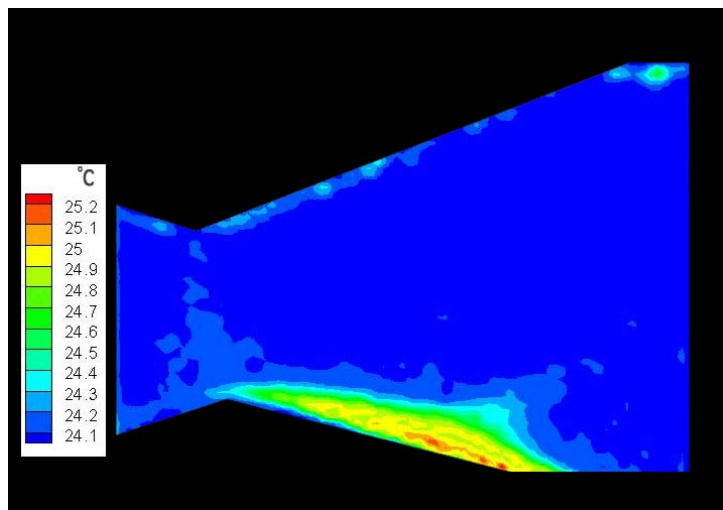
Εικόνα 4.53: $t = 8 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



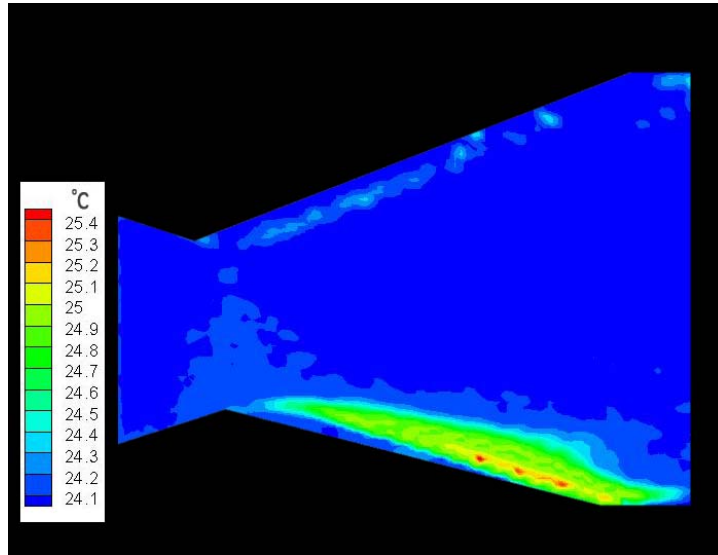
Εικόνα 4.54: $t = 18 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\xi} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



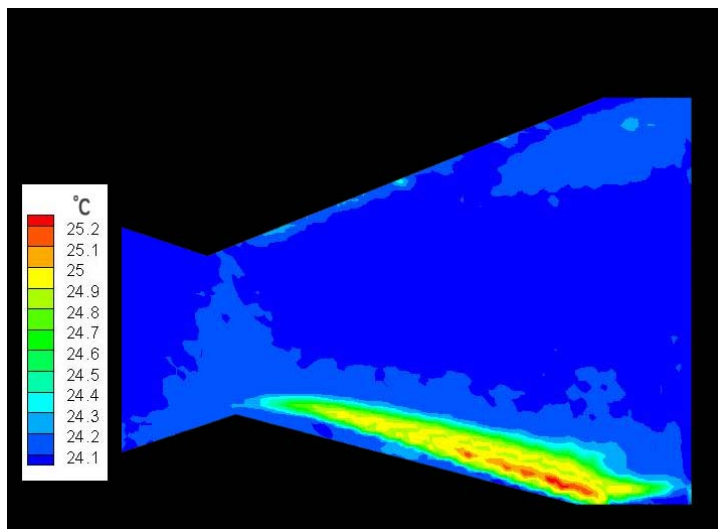
Εικόνα 4.55: $t = 69 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\xi} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



Εικόνα 4.56: $t = 135 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\xi} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



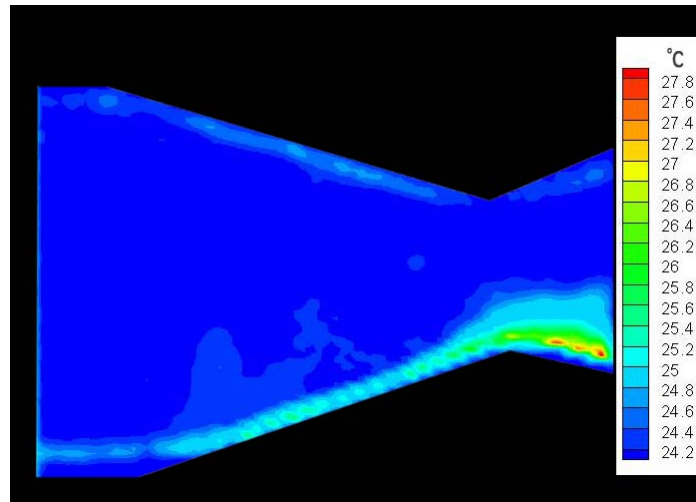
Εικόνα 4.57: $t = 200 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\theta\epsilon} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



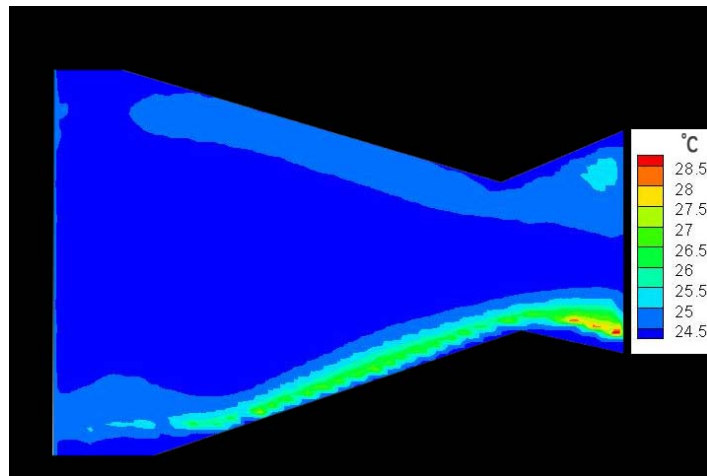
Εικόνα 4.58: $t = 330 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\theta\epsilon} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI

3β) $\Delta T = 31 - 23 \text{ }^\circ\text{C} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$

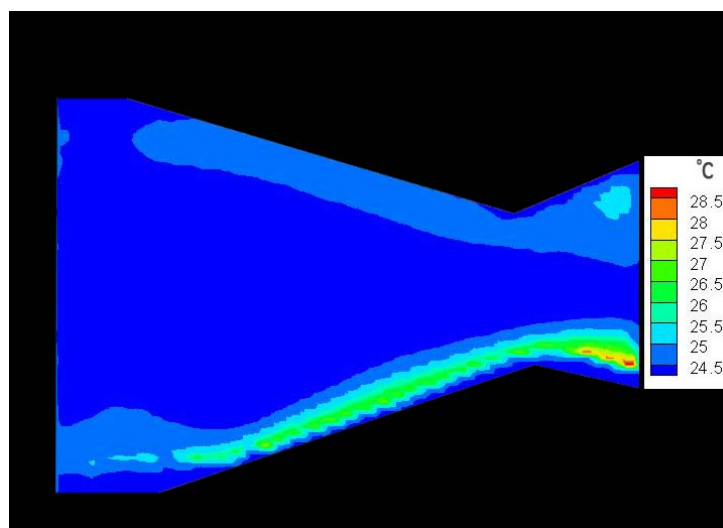
3β₁) ΑΝΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 31 - 23 \text{ }^\circ\text{C}$



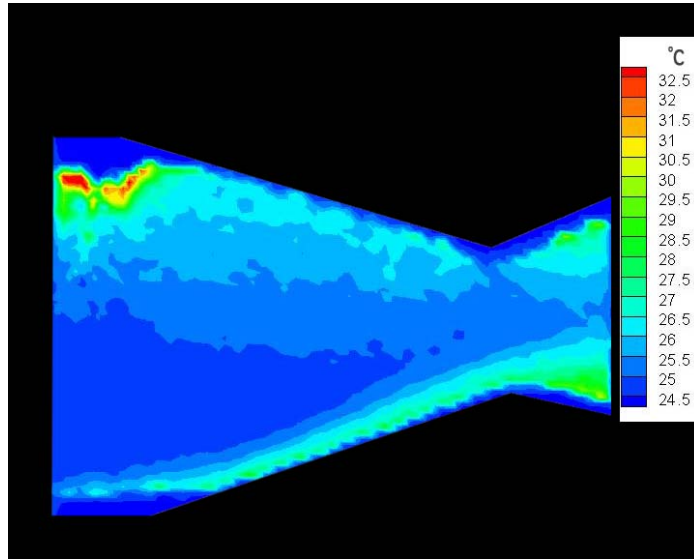
Εικόνα 4.59: $t = 0 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΑΝΑΝΤΙ



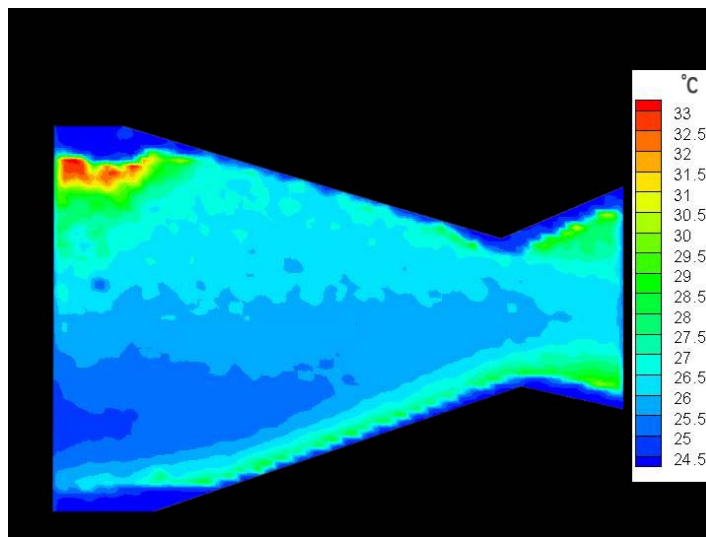
Εικόνα 4.60: $t = 10 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΑΝΑΝΤΙ



Εικόνα 4.61: $t = 23 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΑΝΑΝΤΙ

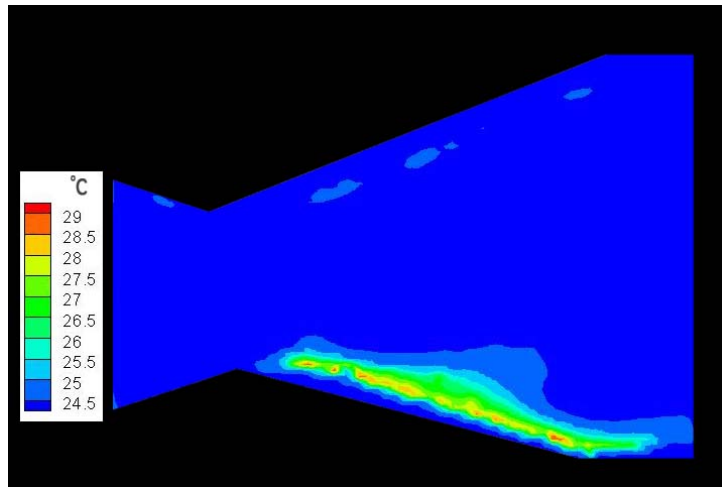


Εικόνα 4.62: $t = 59 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

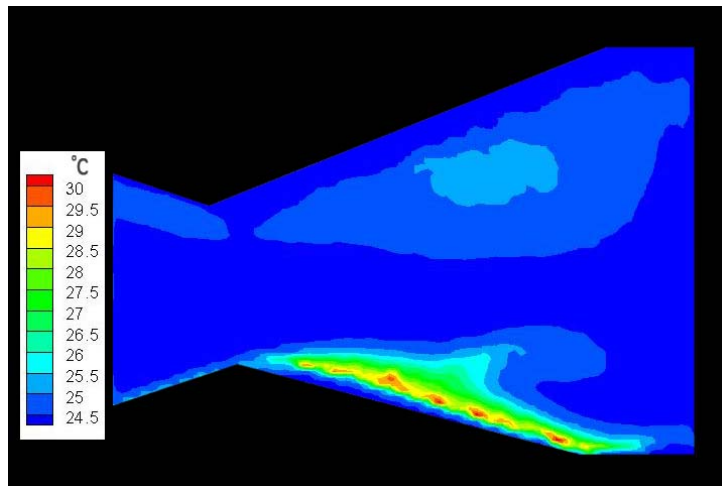


Εικόνα 4.63: $t = 180 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

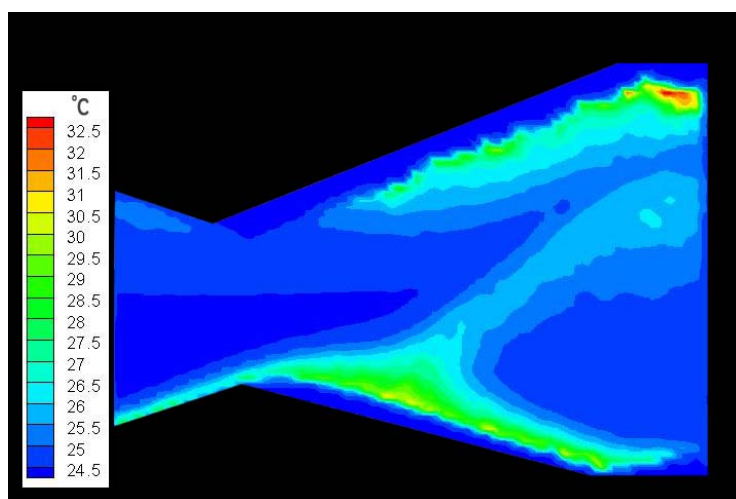
3β₂) ΚΑΤΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 31 - 23 \text{ }^\circ\text{C}$



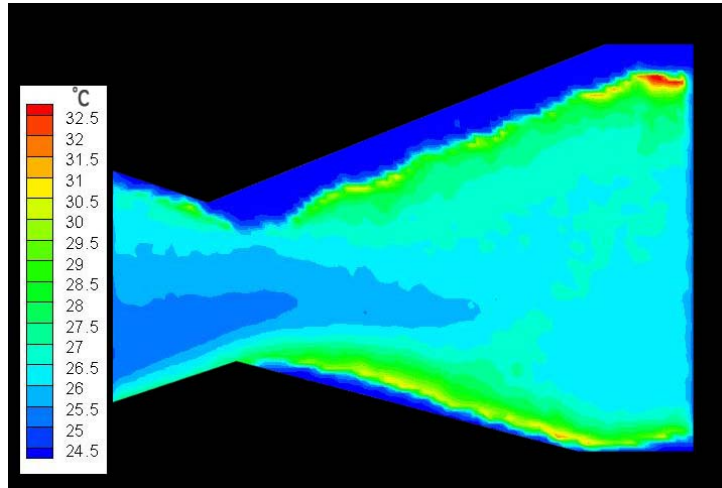
Εικόνα 4.64: $t = 0 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



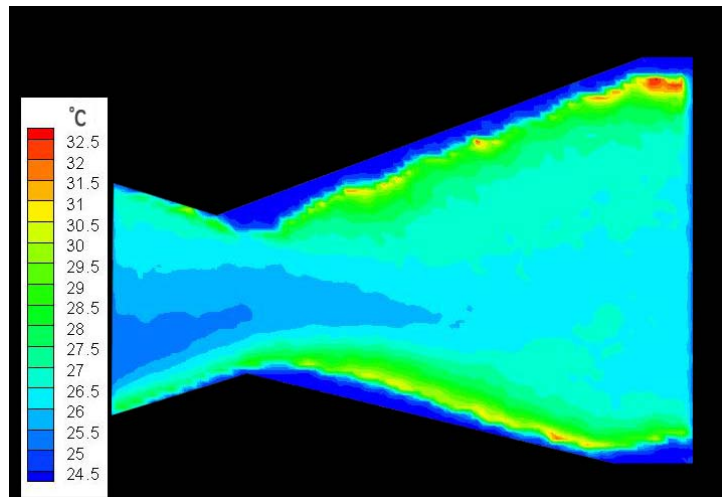
Εικόνα 4.65: $t = 9 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



Εικόνα 4.66: $t = 22 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



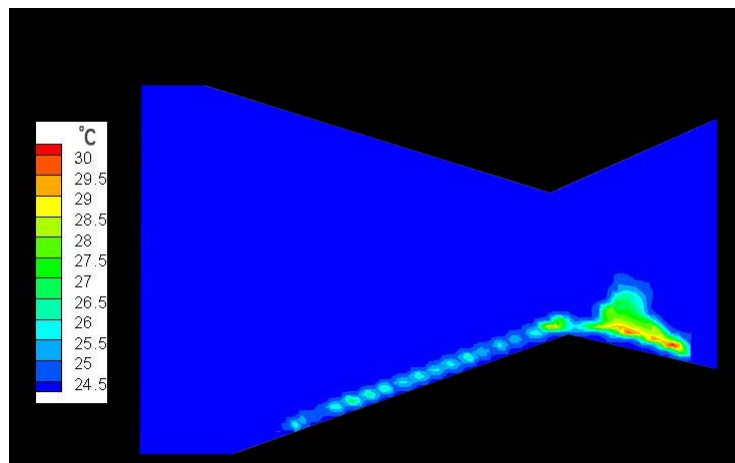
Εικόνα 4.67: $t = 166 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\theta\zeta} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



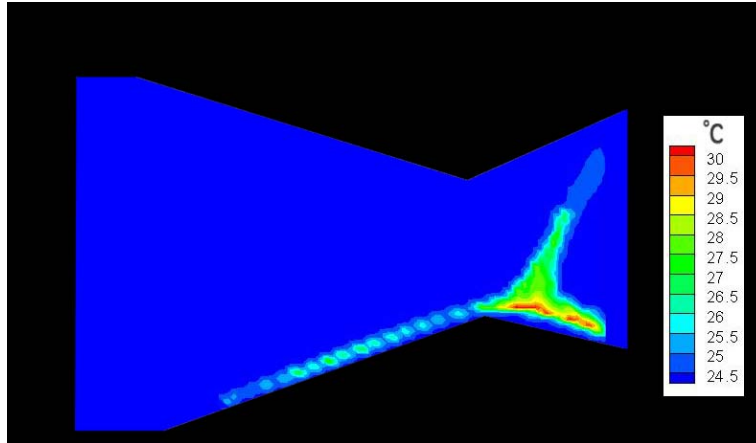
Εικόνα 4.68: $t = 300 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\theta\zeta} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ

3γ) $\Delta T = 37 - 21 \text{ }^\circ\text{C} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$

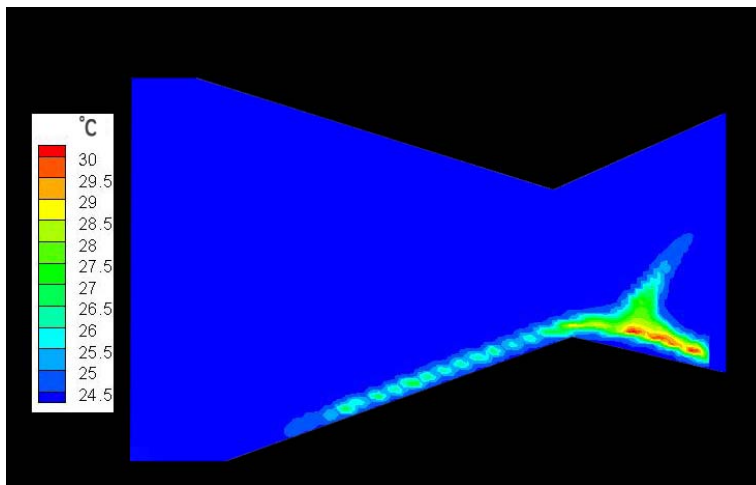
3γi) ΑΝΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 37 - 21 \text{ }^\circ\text{C}$



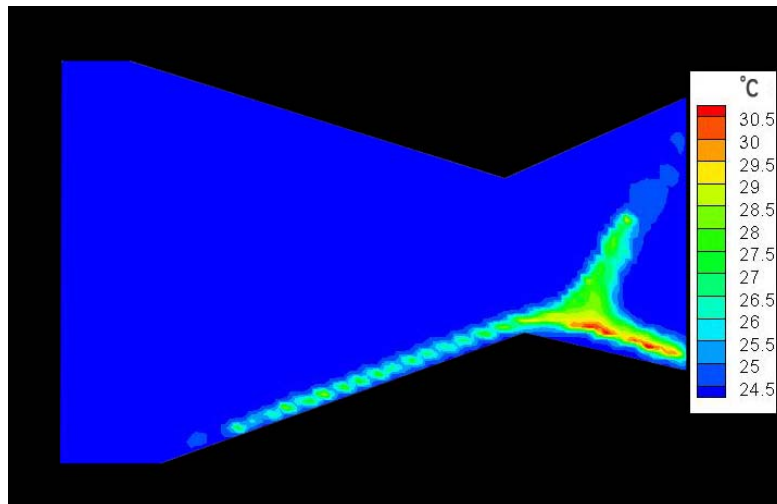
Εικόνα 4.69: $t = 10 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\theta\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, ΑΝΑΝΤΙ



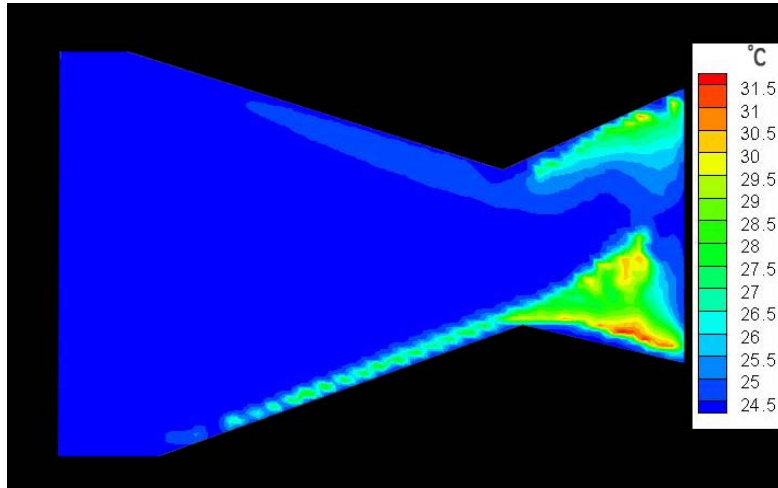
Εικόνα 4.70: $t = 14 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI



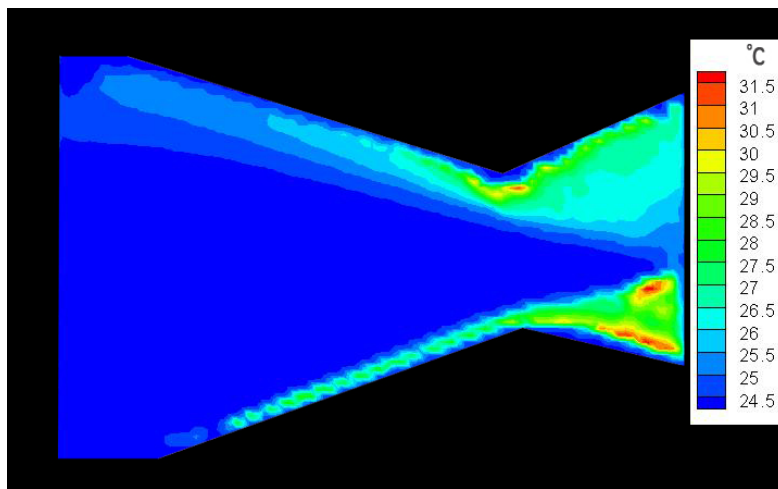
Εικόνα 4.71: $t = 20 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI



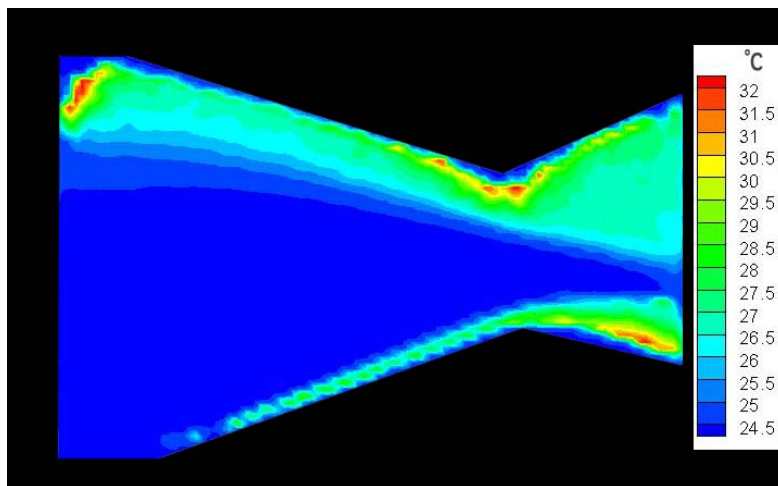
Εικόνα 4.72: $t = 25 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI



Εικόνα 4.73: $t = 25 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

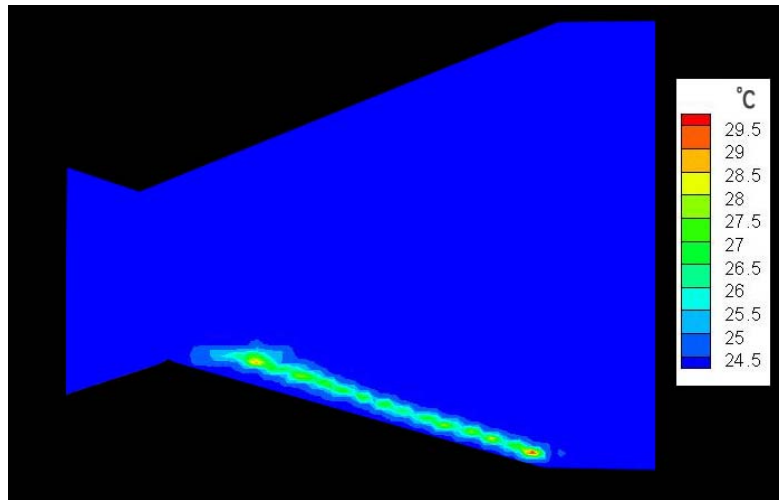


Εικόνα 4.74: $t = 152 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

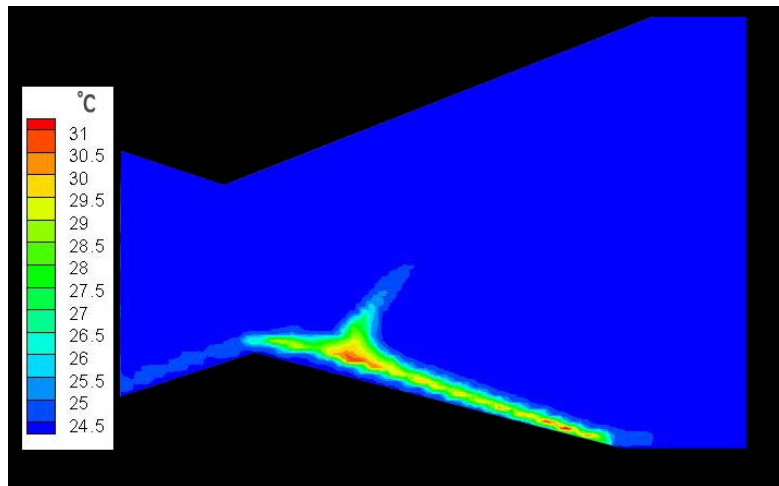


Εικόνα 4.75: $t = 242 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

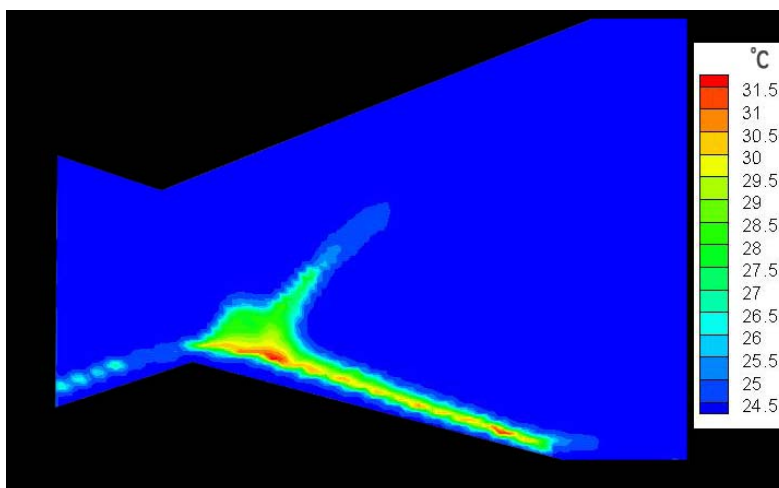
3γ₂) ΚΑΤΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 37 - 21 \text{ }^\circ\text{C}$



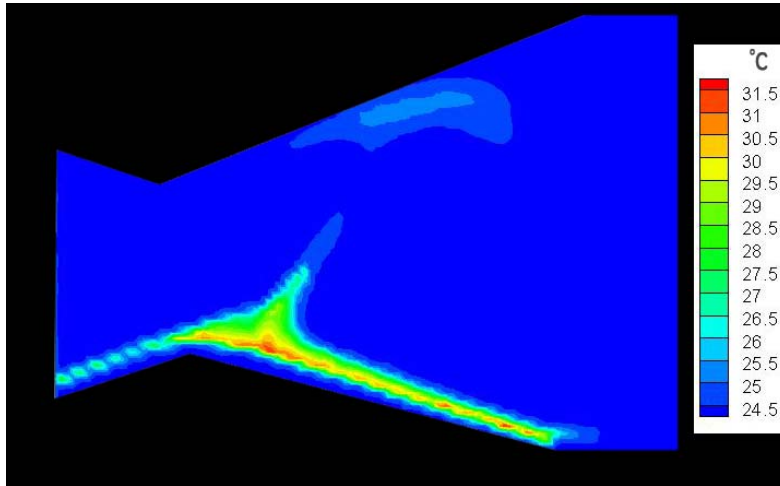
Εικόνα 4.76: $t = 0 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



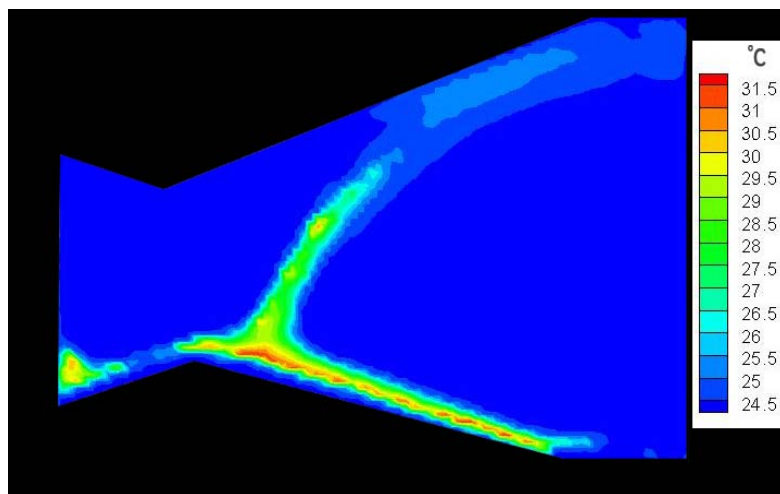
Εικόνα 4.77: $t = 7 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



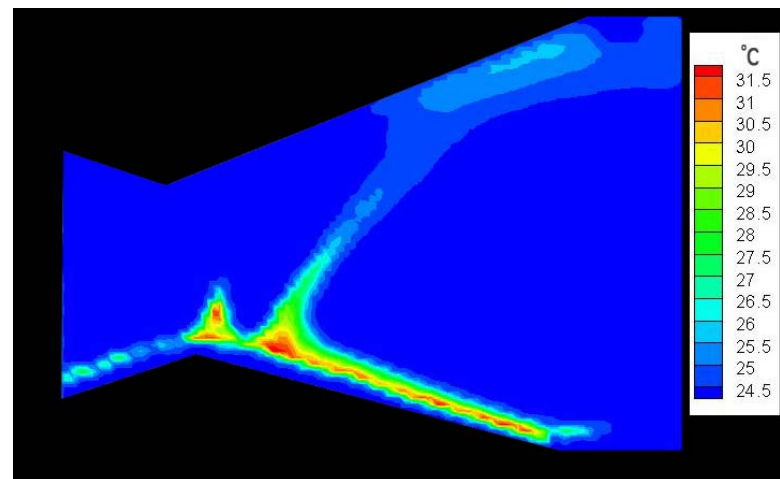
Εικόνα 4.78: $t = 12 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



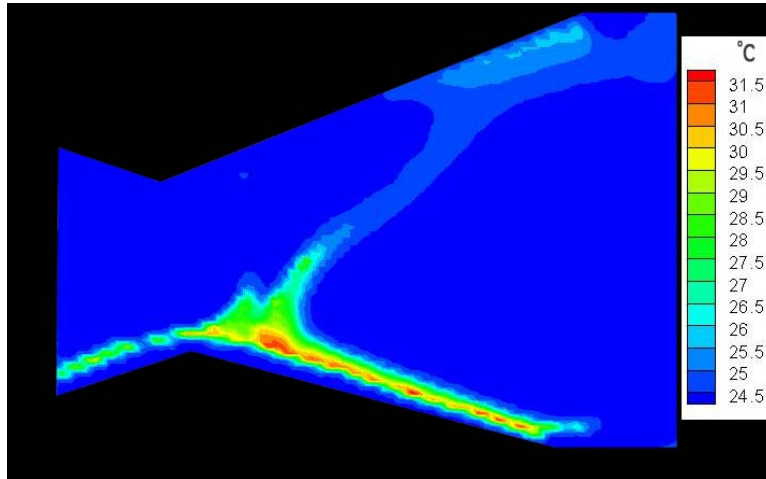
Εικόνα 4.79: $t = 15 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\alpha\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



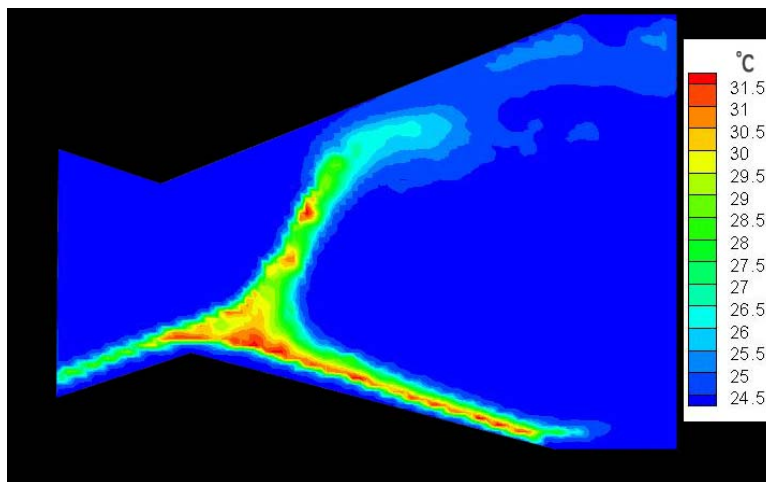
Εικόνα 4.80: $t = 21 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\alpha\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



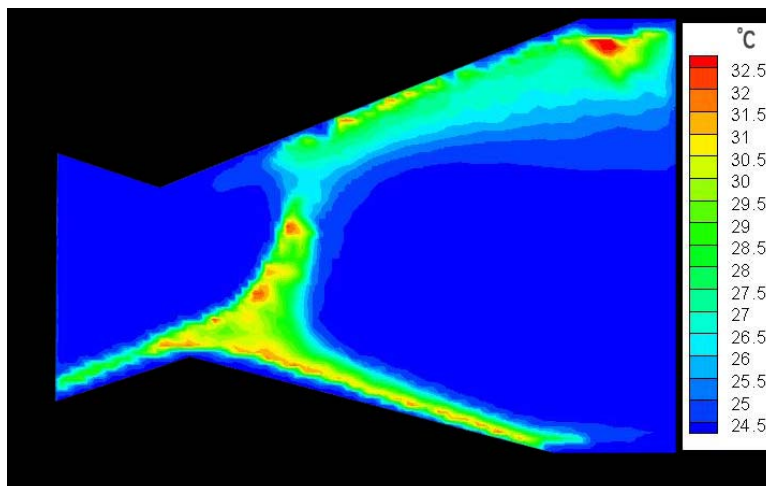
Εικόνα 4.81: $t = 24 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\alpha\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



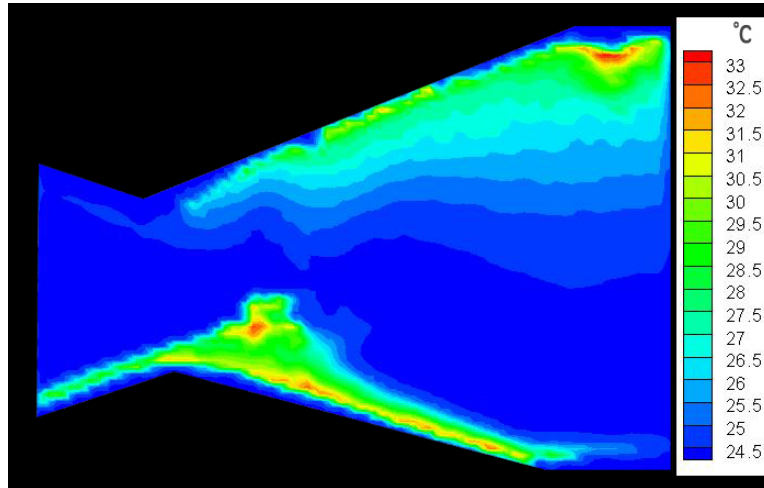
Εικόνα 4.82: $t = 25 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\sigma\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



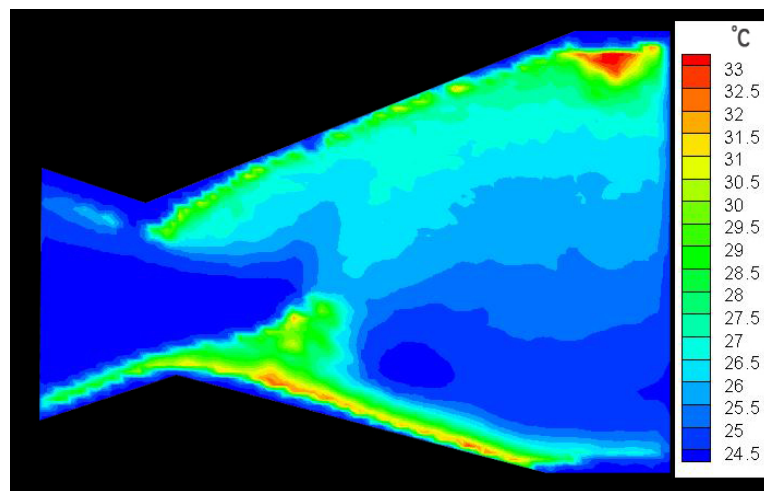
Εικόνα 4.83: $t = 31 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\sigma\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



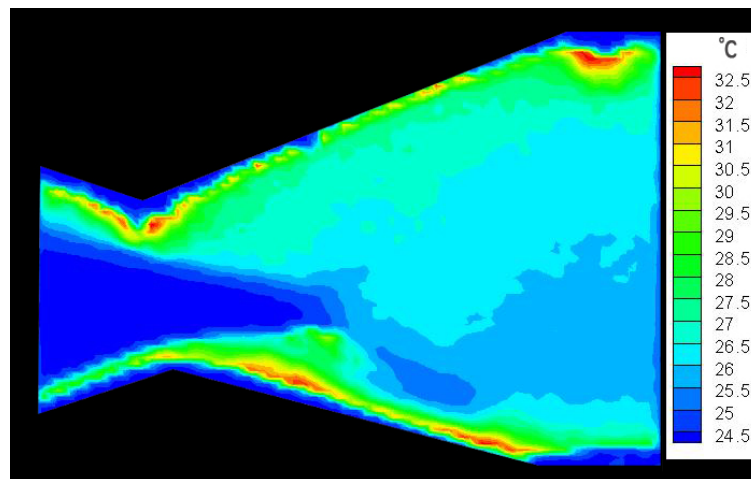
Εικόνα 4.84: $t = 46 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\sigma\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



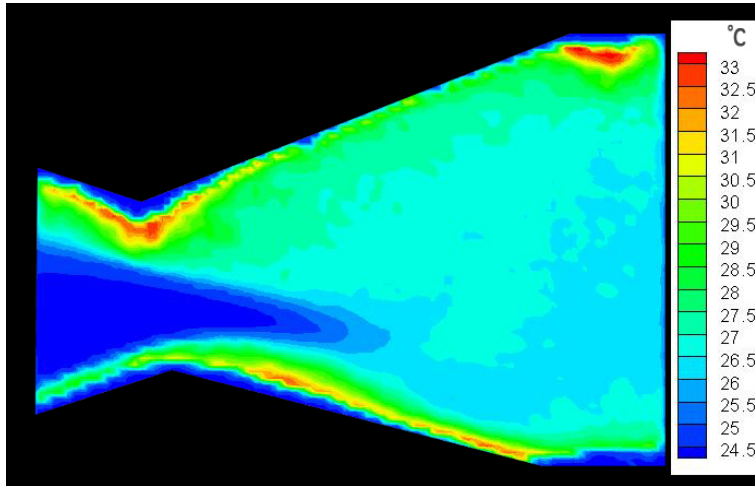
Εικόνα 4.85: $t = 68 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



Εικόνα 4.86: $t = 100 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



Εικόνα 4.87: $t = 153 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



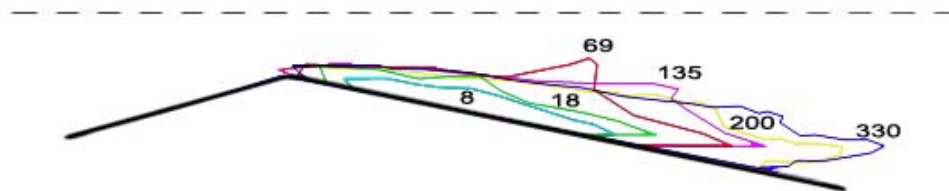
Εικόνα 4.88: $t = 300 \text{ sec}$, $Q = 0,1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\text{πλ.}} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεξ.}} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ

Για $\Delta T = 4$

Στο συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου, λόγω της μικρής θερμοκρασιακής διαφοράς του ρευστού στις δύο δεξαμενές, φθάνουμε στη μόνιμη κατάσταση σε σύντομο χρονικό διάστημα ($t \approx 2,5 \text{ min}$). Στη μόνιμη κατάσταση στο συγκλίνον τμήμα δημιουργείται θερμικό οριακό στρώμα, κατά μήκος της θερμαινόμενης πλάκας, θερμοκρασίας ελαφρώς μεγαλύτερης της ενιαίας θερμοκρασίας που έχει πλέον αποκτήσει η υπόλοιπη μάζα του ρευστού. Στο αποκλίνον τμήμα φθάνουμε στη μόνιμη κατάσταση σε υπερδιπλάσιο χρόνο.

Πλούμιο εμφανίζεται και εδώ εντός του διαχύτη, δηλαδή μετατοπισμένο προς τα δεξιά αρκετά σε σχέση $Re = 0$, ενώ λόγω μικρής διαφοράς της ταχύτητας της εισερχόμενης ροής, μεταξύ των περιπτώσεων $Re = 4$ και $Re = 8$, ελαφρώς δεξιότερα σε σχέση με $Re = 4$.

Λόγω της μικρής θερμοκρασιακής διαφοράς $\Delta T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$, το ποσό της θερμότητας που μεταδίδεται από τη θερμαινόμενη μεταλλική πλάκα στο περιεχόμενο στο ακροφύσιο ρευστό είναι μικρό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία πλουμίου μικρού ύψους σε σύγκριση με προηγούμενες περιπτώσεις όπου το ΔT ήταν μεγαλύτερο, οπότε έφθανε μέχρι την πάνω πλάκα του ακροφυσίου. Παρά το γεγονός ότι το πλούμιο, ξεκινώντας από τη θερμαινόμενη πλάκα, αναπτύσσεται σε κοντινή απόσταση από αυτή, κατά τη διάρκεια της μεταβατικής περιόδου μεγαλώνει κατά μήκος της.



Εικόνα 4.89: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των $24,4 \text{ }^\circ\text{C}$ για $t = 8, 18, 69, 135, 200, 330 \text{ sec}$, $Re = 8$, $T_{\text{πλ.}} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεξ.}} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$ στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

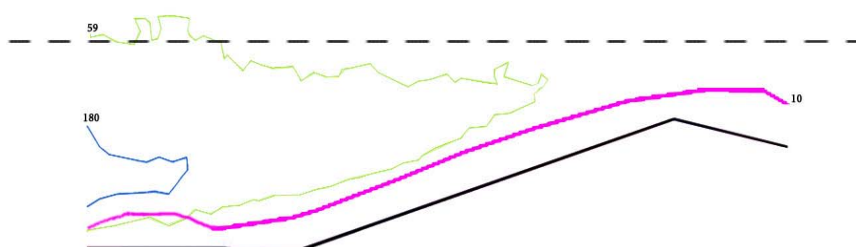
Η εικόνα 4.89 αναφέρεται στην περίπτωση 3 α_2 και παρουσιάζει τις ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 24,4 °C για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t. Συμπεραίνουμε ότι το πεδίο των 24,4 °C αποτελεί για όλες τις χρονικές στιγμές μέρος του πλούμιου.

Για $\Delta T = 8$

Εμφανίζεται πλούμιο στην ίδια θέση με $\Delta T = 4$ °C, μεγαλύτερου ύψους, το οποίο ενώνεται με την άνω πλάκα δεξιότερα σε σχέση με $Re = 4$ και διαχέεται προς τις δύο κατευθύνσεις. Το τμήμα της θερμής μάζας που επιστρέφει στο συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου κινείται πιο αργά σε σύγκριση με την αντίστοιχη περίπτωση για $Re = 4$.

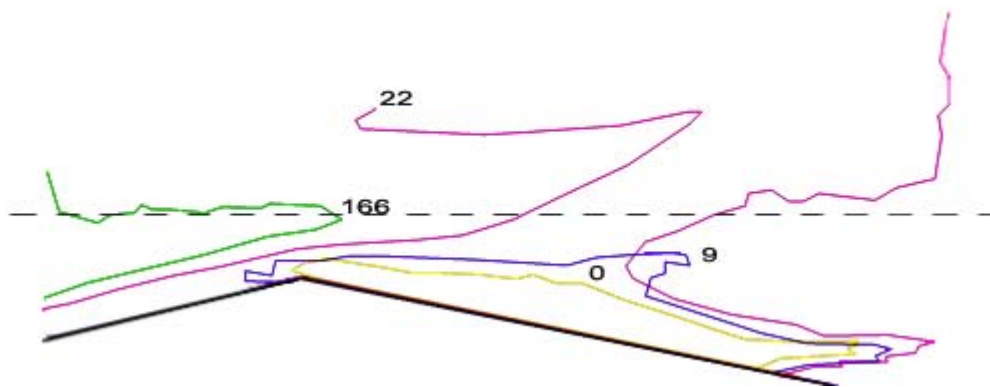
Το θερμικό οριακό στρώμα της θερμαινόμενης πλάκας είναι θερμότερο και πιο καλοσηματισμένο σε σύγκριση με $\Delta T = 4$ °C, εμφανίζεται δε και στην άνω πλάκα. Κατά τη μεταβατική περίοδο έχουμε μετατόπιση του θερμού μετώπου από πάνω προς τα κάτω και στα δύο τμήματα του ακροφυσίου. Κατά την περίοδο αυτή το ψυχρό ρεύμα του ρευστού καταφέρνει, περνώντας το λαιμό, να φθάσει στο διαχύτη με θερμοκρασία κοντά στην αρχική του.

Στο συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου φθάνουμε στη μόνιμη κατάσταση σε μικρότερο χρόνο σε σχέση με το διαχύτη.



Εικόνα 4.90: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 25 °C για $t = 10, 59, 180$ sec, $Re = 8$, $T_{\pi\lambda.} = 31$ °C, $T_{\alpha\epsilon\xi.} = 23$ °C στο ανάντι τμήμα του ακροφυσίου

Η εικόνα 4.90 αναφέρεται στην περίπτωση 3 β_1 και παριστά τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των 25 °C για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t. Συμπεραίνουμε ότι το πεδίο των 25 °C κατά τη μεταβατική περίοδο, αποτελεί μέρος του θερμικού οριακού στρώματος στο συγκλίνον μέρος του ακροφυσίου ($t = 10$ sec), ενώ πλησιάζοντας προς τη μόνιμη κατάσταση αποτελεί όλο και μικρότερο μέρος του θερμαινόμενου ψυχρού ρεύματος που εισέρχεται στο ακροφύσιο ($t = 59, 180$ sec).



Εικόνα 4.91: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 25,5 °C για $t = 0, 9, 22, 166 \text{ sec}$, $Re = 8$, $T_{\pi\lambda} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

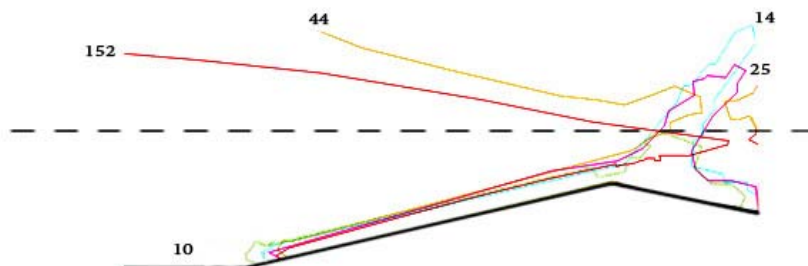
Η εικόνα 4.91 αναφέρεται στην περίπτωση $3\beta_2$ και παριστά τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των 25,5 °C (ή τις ισοθερμοκρασιακές καμπύλες για 25,5 °C) για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t . Το πεδίο των 25,5 °C κατά τη μεταβατική περίοδο αποτελεί μέρος του πλουμίου ($t = 0, 9, 22 \text{ sec}$), ενώ πλησιάζοντας προς τη μόνιμη κατάσταση αποτελεί μέρος του θερμαινόμενου ψυχρού ρεύματος που εισέρχεται στο ακροφύσιο ($t = 166 \text{ sec}$).

Για $\Delta T = 16 \text{ }^\circ\text{C}$

Για το πλούμιο σε σχέση με τη θέση εμφάνισής του, το ύψος – μέγεθός του και την κίνηση της θερμής μάζας που το αποτελεί ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις με $\Delta T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$. Τη χρονική στιγμή $t = 24 \text{ sec}$ εμφανίζεται με θέση εκκίνησης το συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου, ένα δεύτερο πλούμιο μικρότερο από το κυρίως πλούμιο που έχει εμφανιστεί στο διαχύτη και το οποίο μέσα στα 7 επόμενα δευτερόλεπτα ενσωματώνεται στο κυρίως πλούμιο (αστάθεια στη ροή).

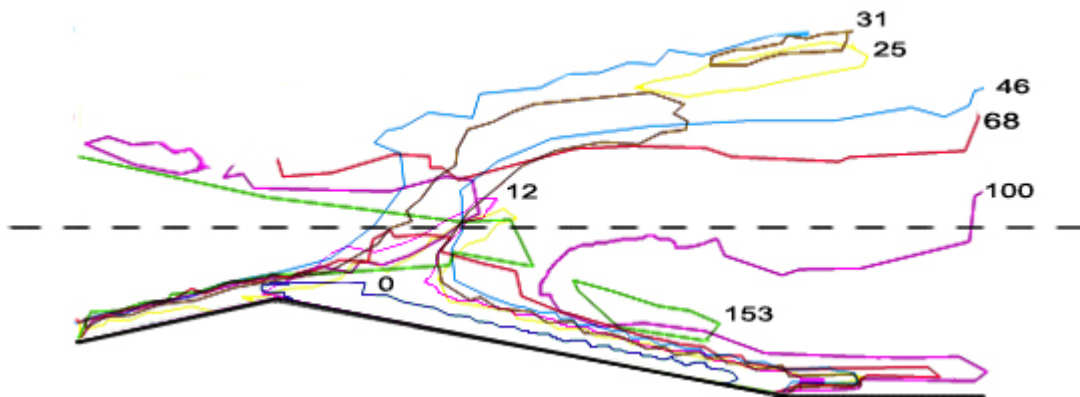
Για το θερμικό οριακό στρώμα ισχύουν οι παρατηρήσεις για $\Delta T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$.

Παρατηρούμε ότι τα δύο τμήματα του ακροφυσίου φθάνουν στη μόνιμη κατάσταση σχεδόν στον ίδιο χρόνο, περίπου 4,5 min. Η μετατόπιση του θερμού μετώπου γίνεται και σ' αυτήν την περίπτωση με την ίδια κατεύθυνση, όπως ίδια είναι και η συμπεριφορά του εισερχόμενου ψυχρού ρεύματος, το οποίο λόγω της μικρής του ταχύτητας κατορθώνει μόλις να φθάσει στο διαχύτη με θερμοκρασία κοντά στην αρχική του.



Εικόνα 4.92: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 25 °C για $t = 10, 14, 25, 44, 152 \text{ sec}$, $Re = 8$, $T_{\pi\lambda} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ στο ανάντι τμήμα του ακροφυσίου

Η εικόνα 4.92 αναφέρεται στην περίπτωση $3\gamma_1$ και παριστά τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των $25\text{ }^\circ\text{C}$ για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t . Παρατηρούμε ότι το εν λόγω πεδίο είναι μέρος του θερμικού οριακού στρώματος του συγκλίνοντος ακροφυσίου κατά μήκος της θερμαινόμενης πλάκας για $t = 10, 14, 25\text{ sec}$, ενώ για τις χρονικές στιγμές $t = 44, 152\text{ sec}$ είναι επιπλέον και μέρος της θερμής μάζας που επιστρέφει στο συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου όταν το πλούμιο προσπίπτει στην άνω πλάκα (οριακό στρώμα άνω πλάκας συγκλίνοντος τμήματος ακροφυσίου).

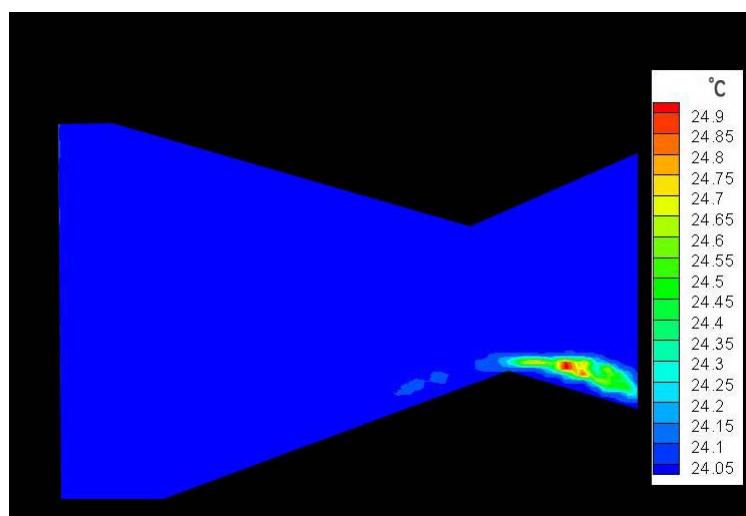


Εικόνα 4.93: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των $25,5\text{ }^\circ\text{C}$ για $t = 0, 12, 25, 31, 46, 68, 100, 153\text{ sec}$, $Re = 8$, $T_{\pi\lambda} = 37\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21\text{ }^\circ\text{C}$ στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

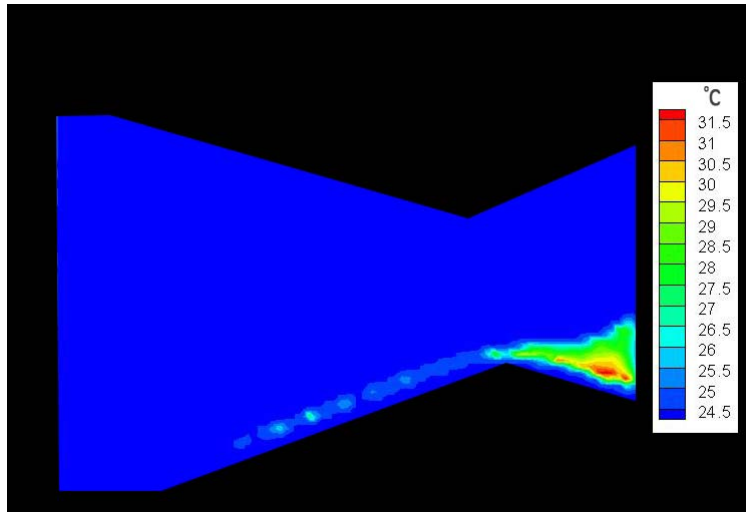
Η εικόνα 4.93 αναφέρεται στην περίπτωση $3\gamma_2$ και παριστά τις ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των $25,5\text{ }^\circ\text{C}$ για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t . Παρατηρούμε ότι για τις χρονικές στιγμές $t = 0, 12, 25, 31, 46, 68, 100\text{ sec}$ το πεδίο των $25,5\text{ }^\circ\text{C}$ είναι μέρος της θερμής μάζας που ανέρχεται από τη θερμαινόμενη μεταλλική πλάκα στην άνω πλάκα του ακροφυσίου, ενώ τη χρονική στιγμή $t = 153\text{ sec}$ το πεδίο αποτελεί μέρος του ψυχρού ρεύματος που κατορθώνει να περάσει το λαιμό του ακροφυσίου.

4) $Q = 0,2\text{ cm}^3 / \text{sec}$ ($Re = 16$)

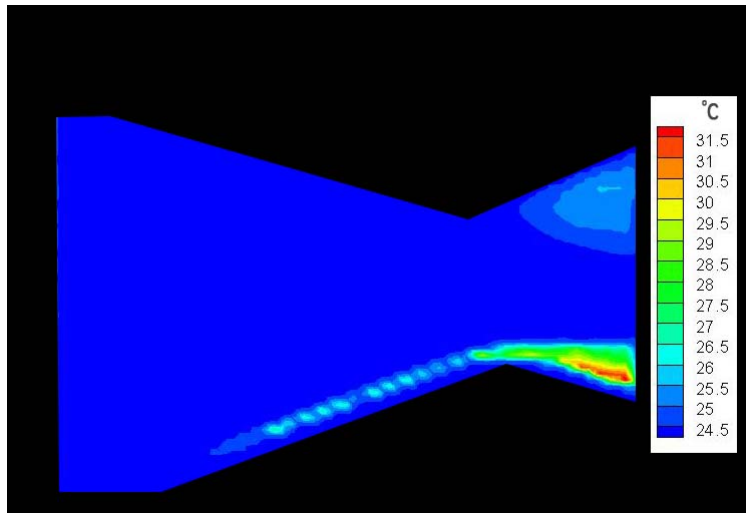
4α) ANANTI ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0,2\text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 36 - 20\text{ }^\circ\text{C} = 16\text{ }^\circ\text{C}$



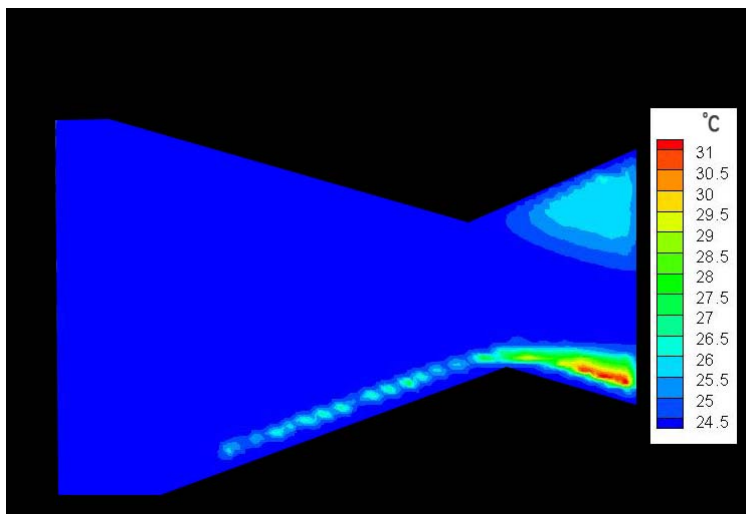
Εικόνα 4.94: $t = 0\text{ sec}$, $Q = 0,2\text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 36\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 20\text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI



Εικόνα 4.95: $t = 31$ sec, $Q = 0,2 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 36 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ANANTI

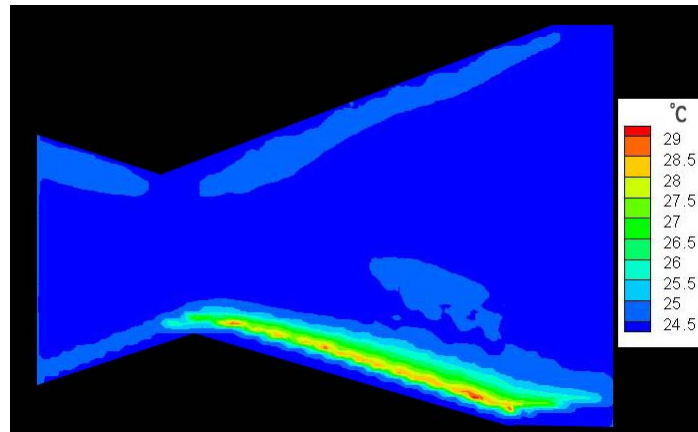


Εικόνα 4.96: $t = 150$ sec, $Q = 0,2 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 36 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ANANTI

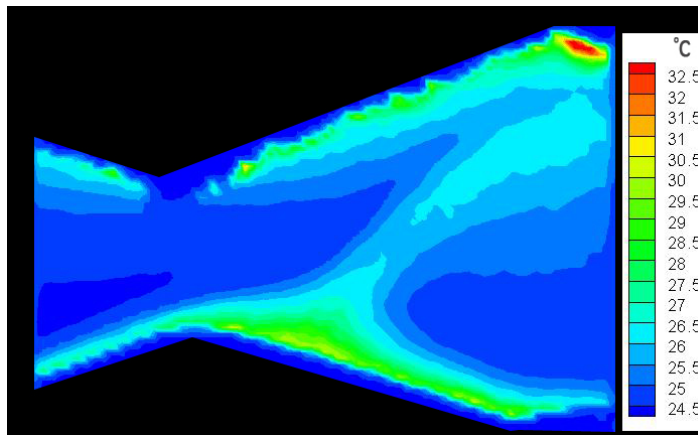


Εικόνα 4.97: $t = 300$ sec, $Q = 0,2 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 36 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ANANTI

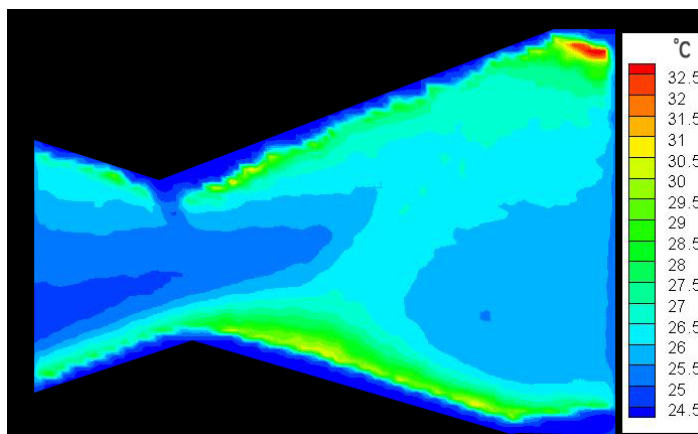
4β) ΚΑΤΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0,2 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 31 - 23 \text{ }^\circ\text{C} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$



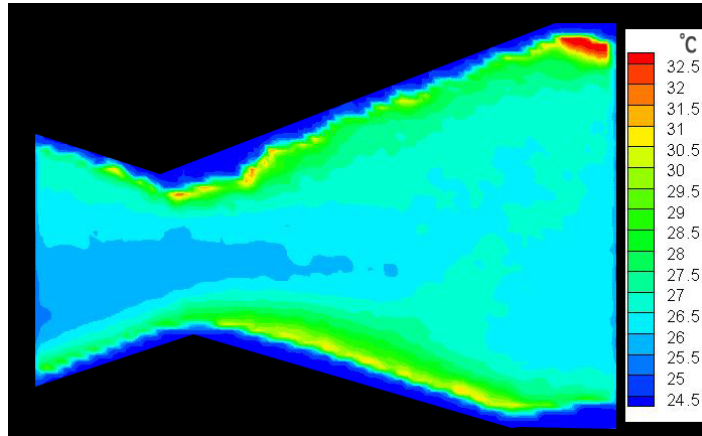
Εικόνα 4.98: $t = 0 \text{ sec}$, $Q = 0,2 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



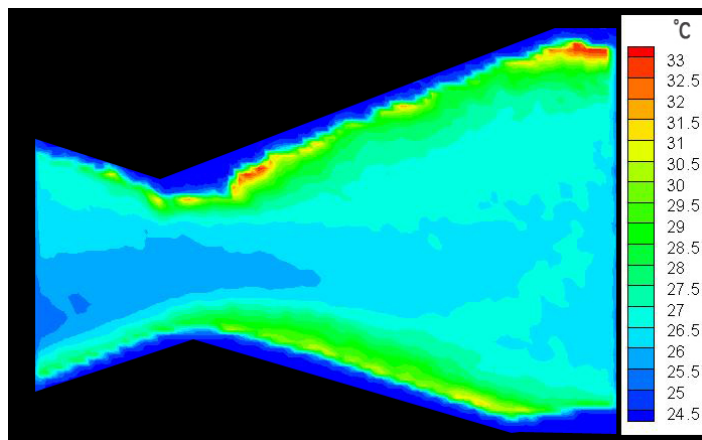
Εικόνα 4.99: $t = 25 \text{ sec}$, $Q = 0,2 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



Εικόνα 4.100: $t = 57 \text{ sec}$, $Q = 0,2 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ

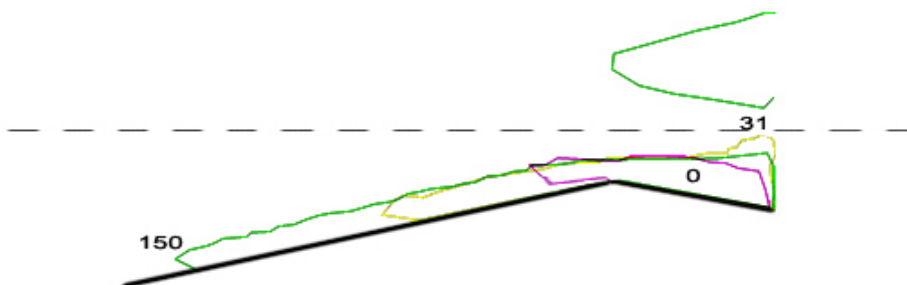


Εικόνα 4.101: $t = 150 \text{ sec}$, $Q = 0,2 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\text{πλ.}} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεξ.}} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



Εικόνα 4.102: $t = 344 \text{ sec}$, $Q = 0,2 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\text{πλ.}} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεξ.}} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ

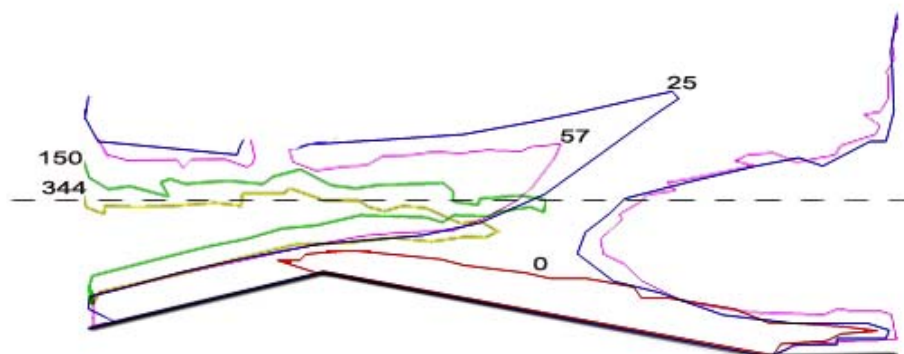
4α) Στο συγκλίνων τμήμα του ακροφυσίου παρατηρούμε την εμφάνιση λεπτού θερμικού οριακού στρώματος, ενώ στο υπόλοιπο κομμάτι του υπάρχει ενιαία σχεδόν θερμοκρασία η οποία είναι κοντά στην αρχική θερμοκρασία του ψυχρού ρεύματος που εισέρχεται στο ακροφύσιο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν υπάρχει κίνηση (ή είναι πρακτικά αμελητέα) θερμής μάζας ρευστού κόντρα στην κύρια ροή, δηλαδή από την άνω πλάκα του διαχύτη προς το συγκλίνων τμήμα του ακροφυσίου. Αυτό είναι λογικό αν σκεφθούμε ότι η ταχύτητα της κύριας ροής είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με προηγούμενες περιπτώσεις και εμποδίζει τη με μικρή ταχύτητα επιστρέφουσα ροή. Εδώ για να φτάσουμε στη μόνιμη κατάσταση απαιτούνται περίπου 2,5 min.



Εικόνα 4.103: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των $25 \text{ }^\circ\text{C}$ για $t = 0, 31, 150 \text{ sec}$, $Re = 16$, $T_{\text{πλ.}} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεξ.}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ στο ανάντι τμήμα του ακροφυσίου

Η εικόνα 4.103 παριστά τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των 25 °C για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t. Το πεδίο αυτό αποτελεί τμήμα του οριακού στρώματος του συγκλίνοντος ακροφυσίου, το οποίο συν τω χρόνω μεγαλώνει κατά μήκος της θερμαινόμενης πλάκας.

4β) Πλούμιο εμφανίζεται, ως αναμένεται, μετατοπισμένο δεξιότερα σε σχέση με προηγούμενες περιπτώσεις. Η κίνηση της θερμής μάζας είναι ανοδική δηλαδή από τη θερμαινόμενη πλάκα προς την άνω πλάκα του ακροφυσίου χωρίς να διαχέεται και προς τις δύο κατευθύνσεις. Το θερμό ρευστό παραμένει στο τμήμα του διαχύτη (παρότι το ΔT είναι διαφορετικό απ' ότι στην 4α δεν παρατηρείται και εδώ ροή επιστρέφουσας θερμής μάζας). Στην περίπτωση αυτή το ψυχρό ρεύμα κατορθώνει να περάσει το λαιμό με θερμοκρασία κοντά στην αρχική του. Ο χρόνος που απαιτείται για να αποκτήσει το ρευστό ενιαία θερμοκρασία είναι περίπου ίσος με 2,5 min. Τα θερμικά οριακά στρώματα, στη μόνιμη κατάσταση, στην πάνω και την κάτω πλάκα έχουν το ίδιο πάχος και είναι θερμότερα από την υπόλοιπη μάζα του ρευστού.



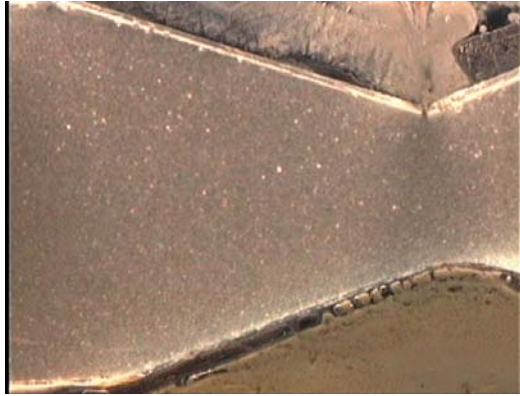
Εικόνα 4.104: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 26 °C για $t = 0, 25, 57, 150, 344$ sec, $Re = 16$, $T_{πλ.} = 31$ °C, $T_{δεδ.} = 23$ °C στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

Η εικόνα 4.104 παριστά τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των 26 °C για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t. Το πεδίο αυτό για τις χρονικές στιγμές $t = 0, 25, 57$ sec αποτελεί μέρος του πλουμίου, ενώ για τις χρονικές στιγμές $t = 150, 344$ sec αποτελεί μέρος του ψυχρού ρεύματος που κατορθώνει να περάσει το λαιμό.

$$5) Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec} \quad (Re = 24)$$

$$5α) \Delta T = 25,5 - 21,5 \text{ °C} = 4 \text{ °C}, \quad Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$$

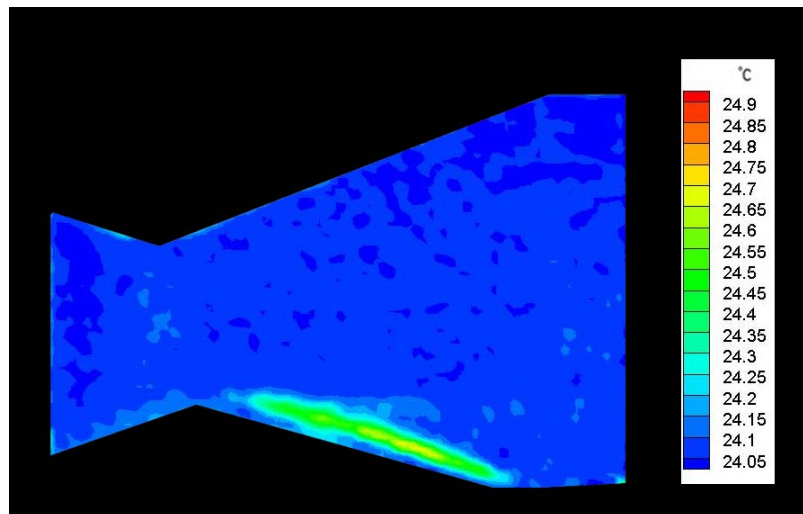
$$5α_1) \text{ ANANTI TMHMA TOY AKPOFYCIOY}, \quad Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}, \quad \Delta T = 25,5 - 21,5 \text{ °C}$$



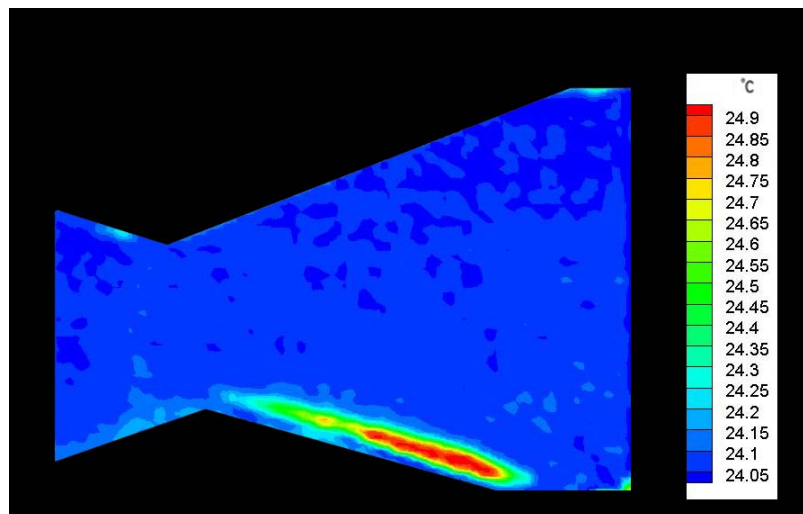
Εικόνα 4.105: $t = 121 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

Η εικόνα 4.105 είναι το στιγμιότυπο για $t = 121 \text{ sec}$ της ροής στο συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου για τη συγκεκριμένη περίπτωση.

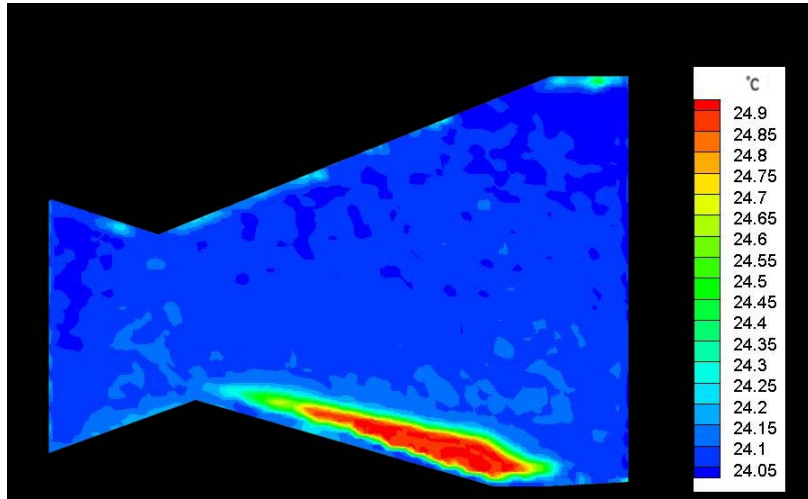
5α₂) ΚΑΤΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 25,5 - 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$



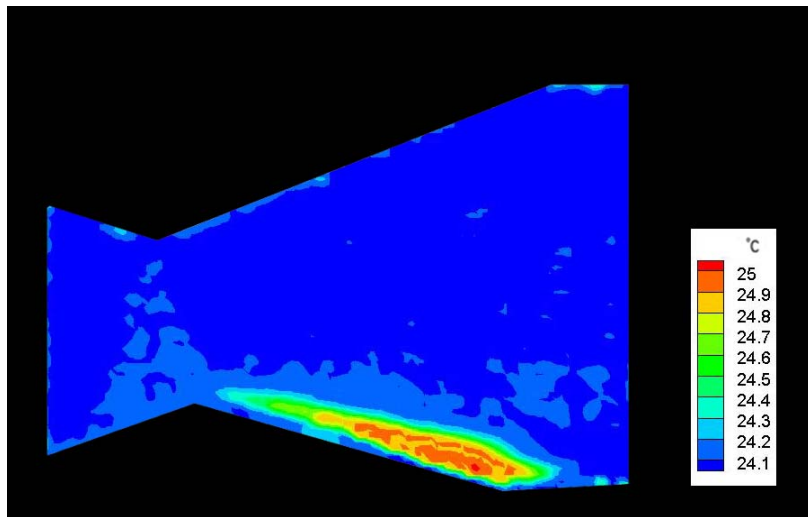
Εικόνα 4.106: $t = 10 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



Εικόνα 4.107: $t = 40 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



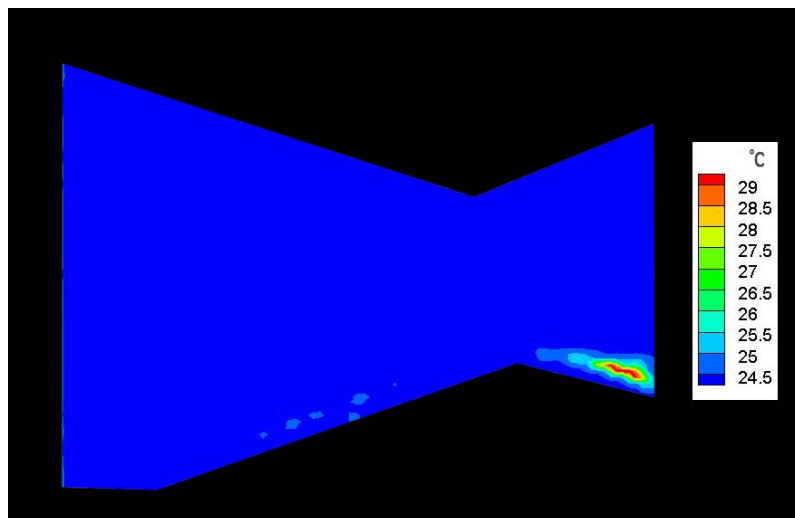
Εικόνα 4.108: $t = 150 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



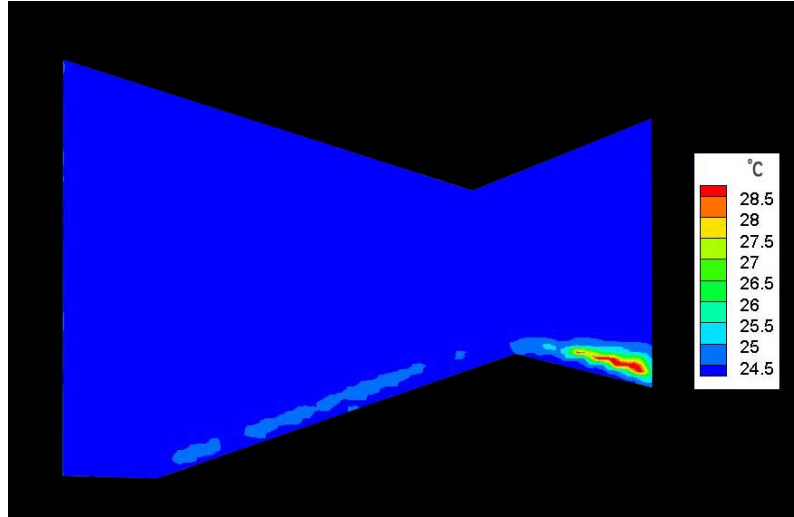
Εικόνα 4.109: $t = 254 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ

5β) $\Delta T = 29,5 - 21,5 \text{ }^\circ\text{C} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$

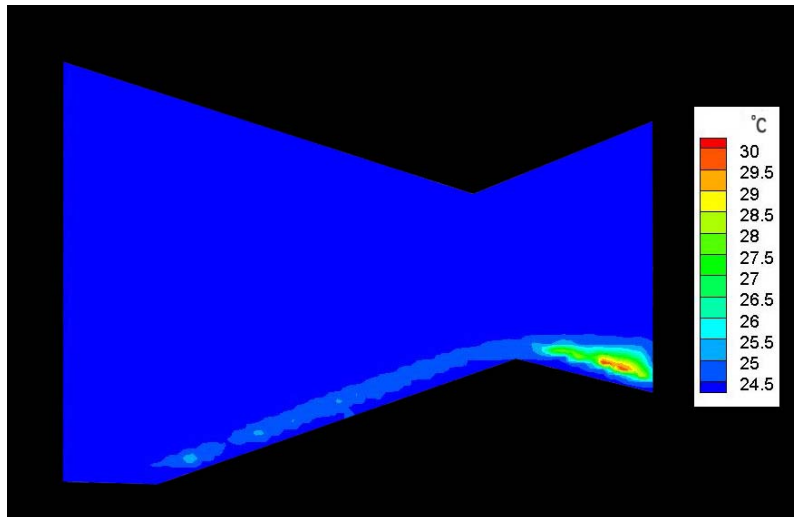
5β₁) ΑΝΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 29,5 - 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$



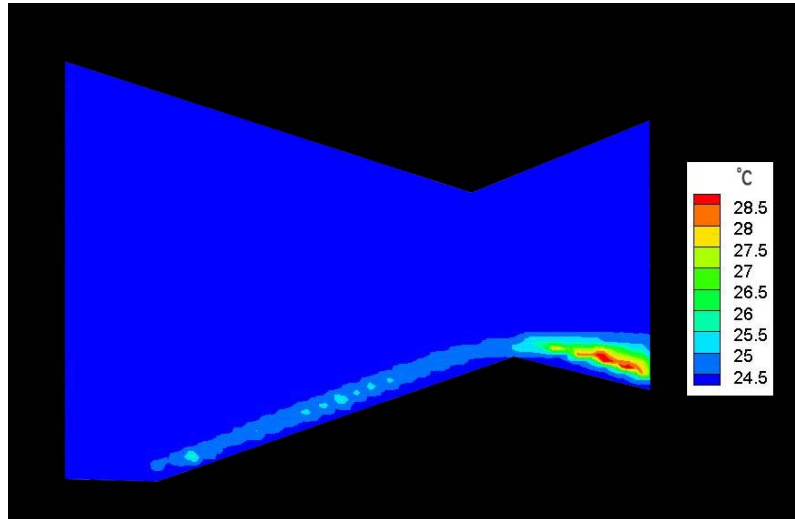
Εικόνα 4.110: $t = 12 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΑΝΑΝΤΙ



Εικόνα 4.111: $t = 35$ sec, $Q = 0,31$ cm³ / sec, $T_{\pi\lambda.} = 29,5$ °C, $T_{\delta\epsilon\xi} = 21,5$ °C, ANANTI



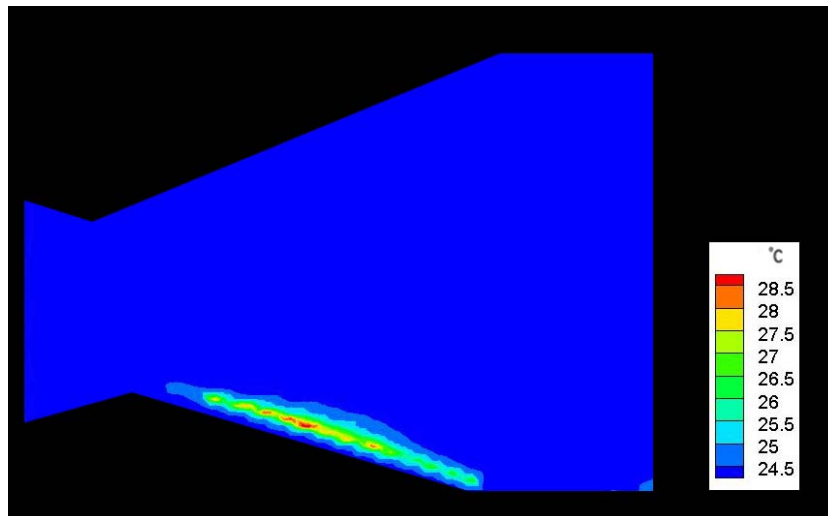
Εικόνα 4.112: $t = 106$ sec, $Q = 0,31$ cm³ / sec, $T_{\pi\lambda.} = 29,5$ °C, $T_{\delta\epsilon\xi} = 21,5$ °C, ANANTI



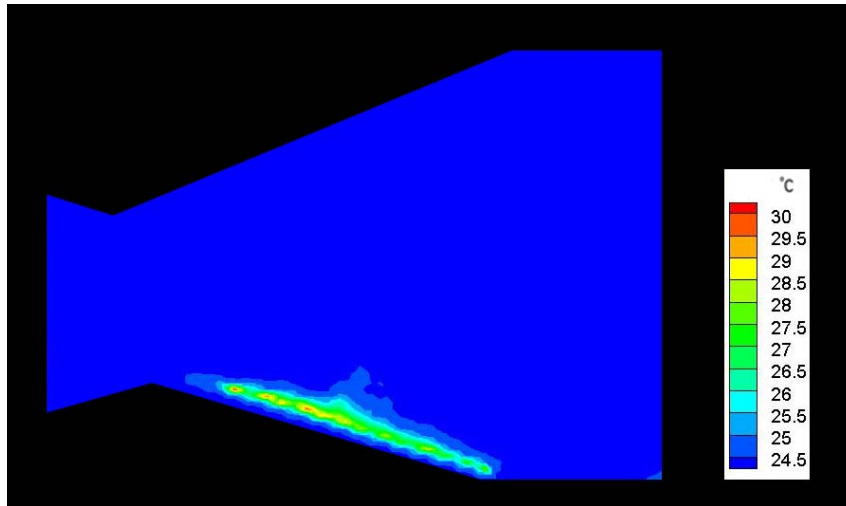
Εικόνα 4.113: $t = 171 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

5β₂) ΚΑΤΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 29,5 - 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$

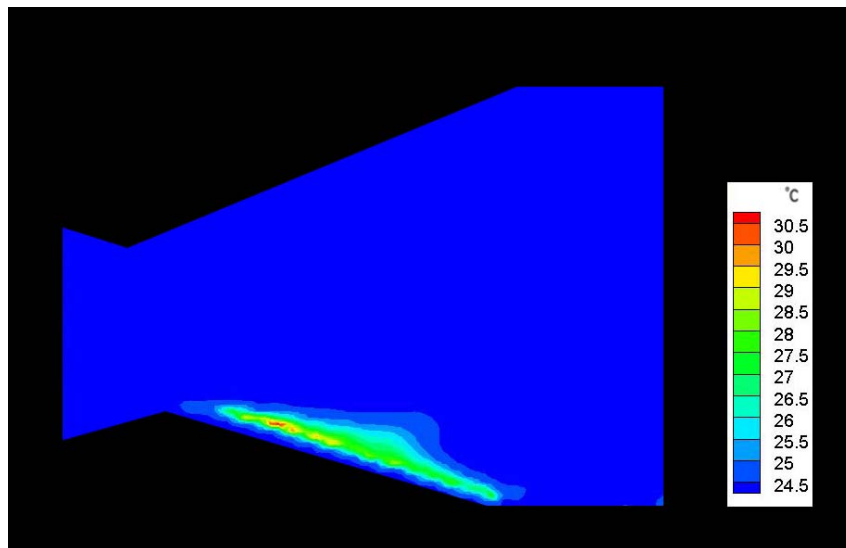
- Ομάδα 1:



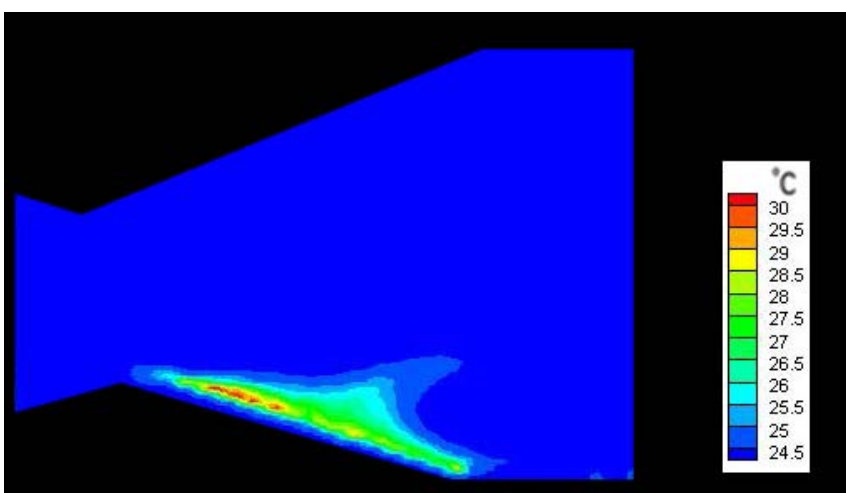
Εικόνα 4.114: $t = 12 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



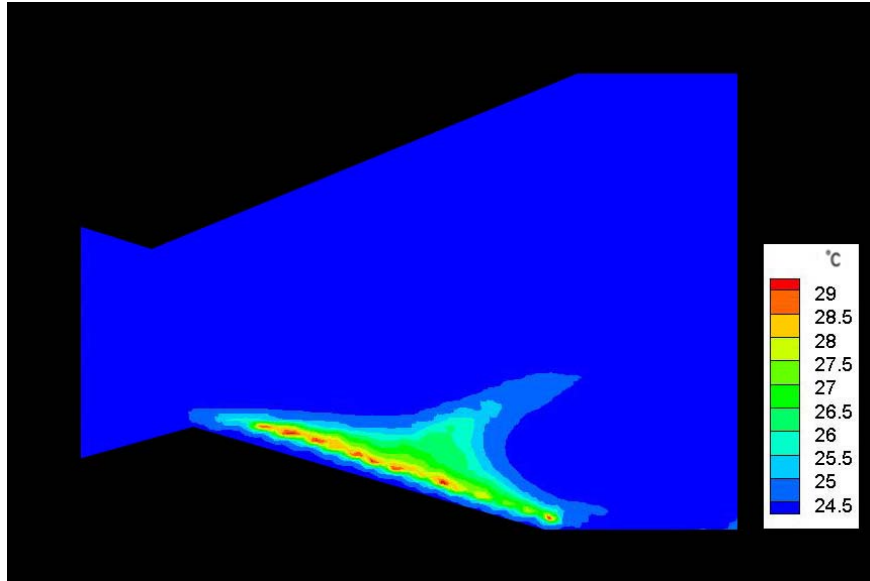
Εικόνα 4.115: $t = 17$ sec, $Q = 0,31$ cm³ / sec, $T_{\pi\lambda} = 29,5$ °C, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5$ °C, KATANTI



Εικόνα 4.116: $t = 27$ sec, $Q = 0,31$ cm³ / sec, $T_{\pi\lambda} = 29,5$ °C, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5$ °C, KATANTI

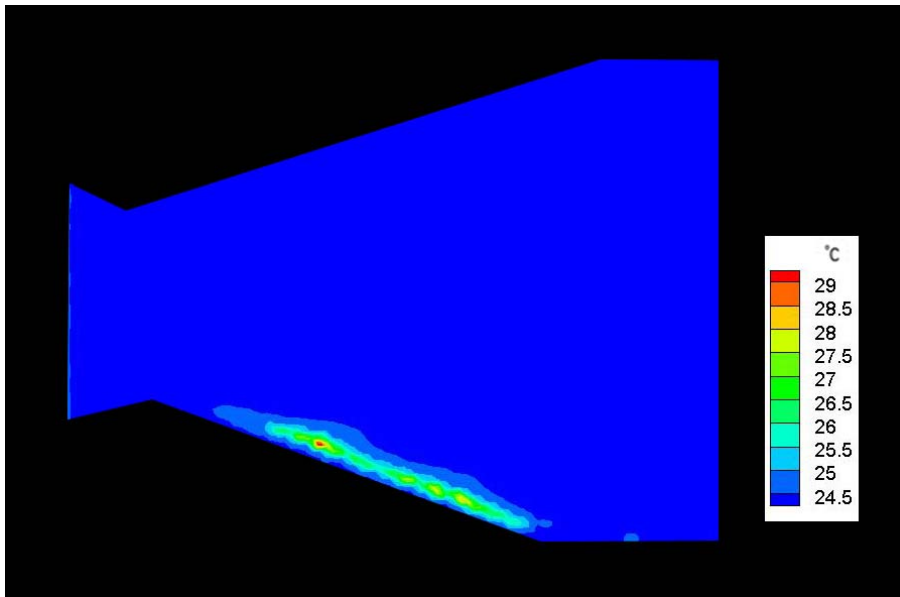


Εικόνα 4.117: $t = 54$ sec, $Q = 0,31$ cm³ / sec, $T_{\pi\lambda} = 29,5$ °C, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5$ °C, KATANTI

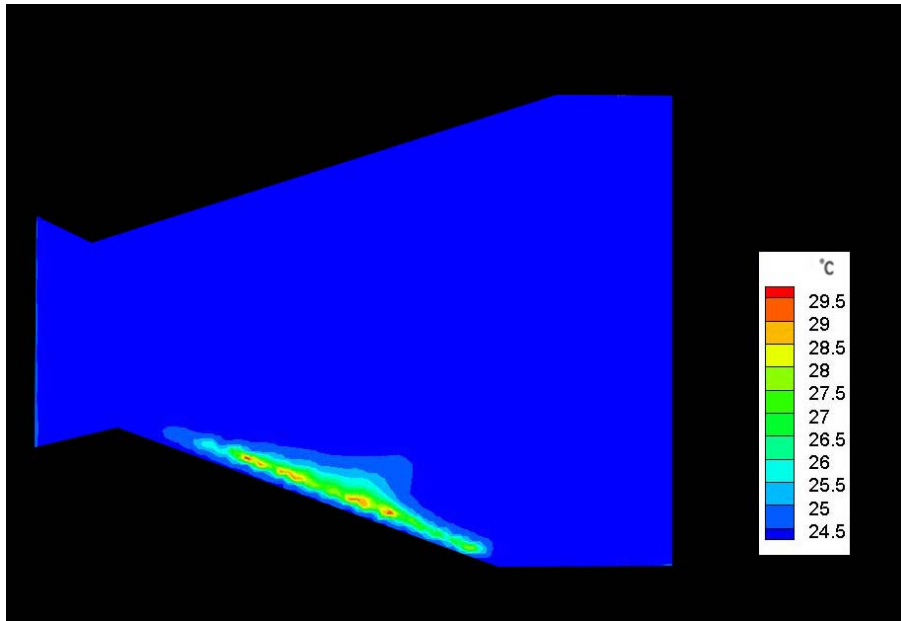


Εικόνα 4.118: $t = 147 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI

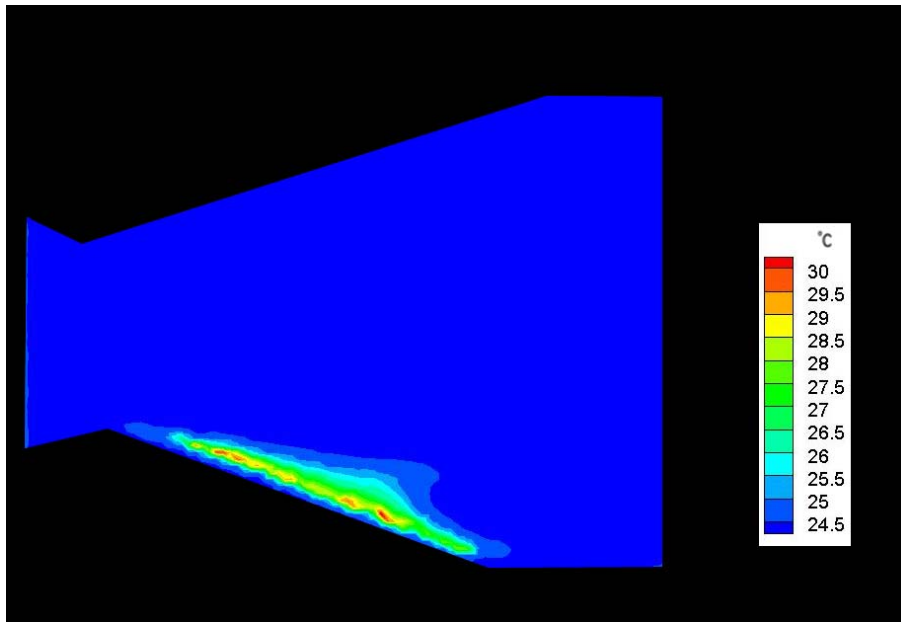
- Ομάδα 2



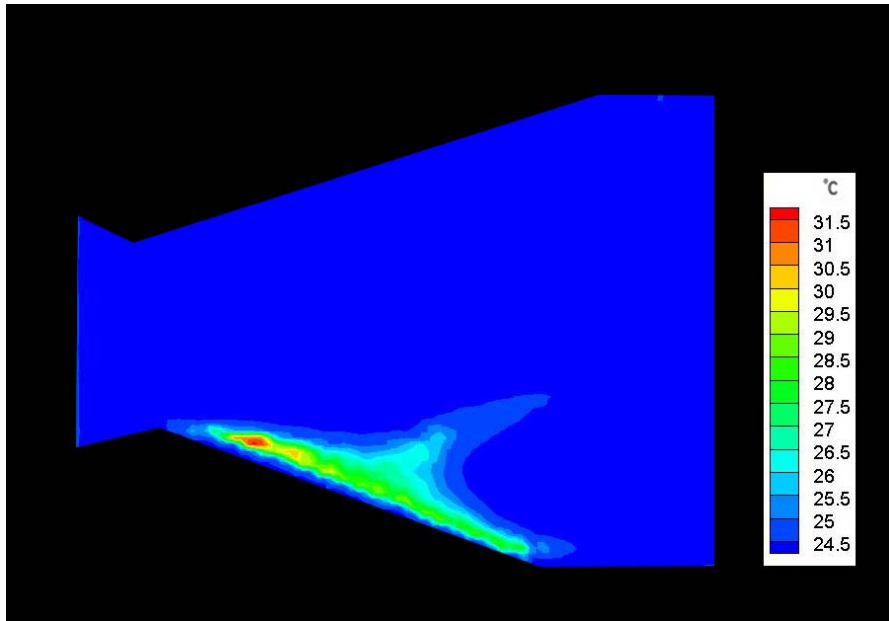
Εικόνα 4.119: $t = 15 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



Εικόνα 4.120: $t = 19$ sec, $Q = 0,31$ cm³ / sec, $T_{\pi\lambda} = 29,5$ °C, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5$ °C, KATANTI



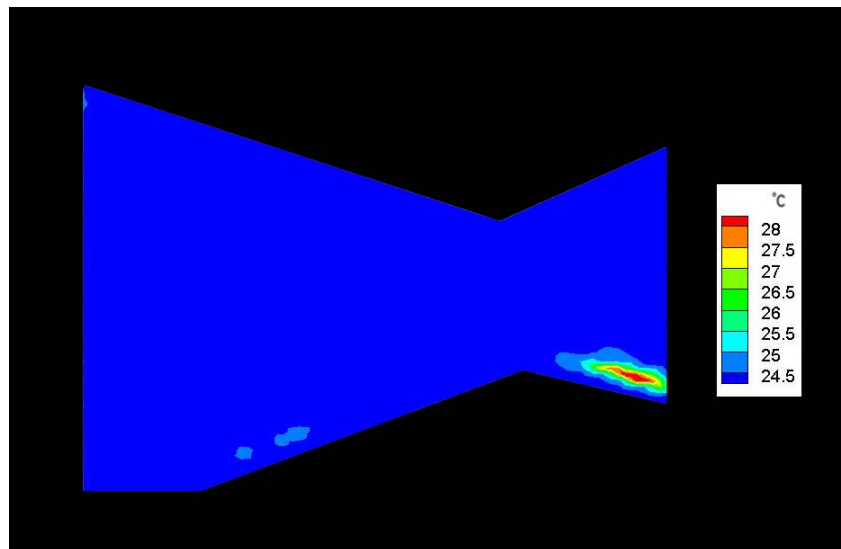
Εικόνα 4.121: $t = 30$ sec, $Q = 0,31$ cm³ / sec, $T_{\pi\lambda} = 29,5$ °C, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5$ °C, KATANTI



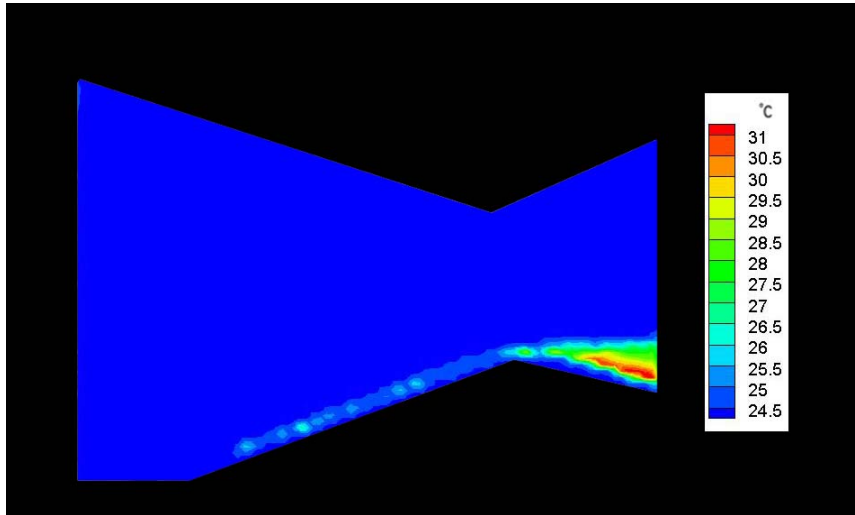
Εικόνα 4.122: $t = 78 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ

5γ) $\Delta T = 36 - 20 \text{ }^\circ\text{C} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$

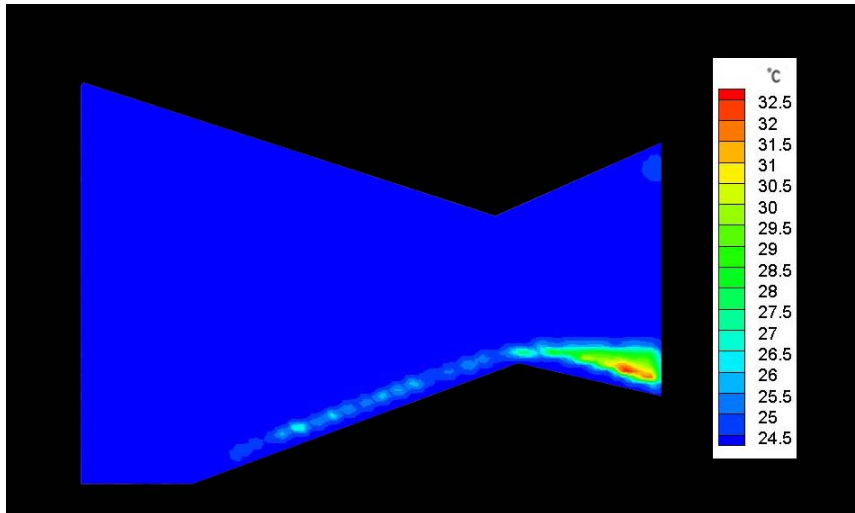
5γ₁) ΑΝΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 36 - 20 \text{ }^\circ\text{C}$



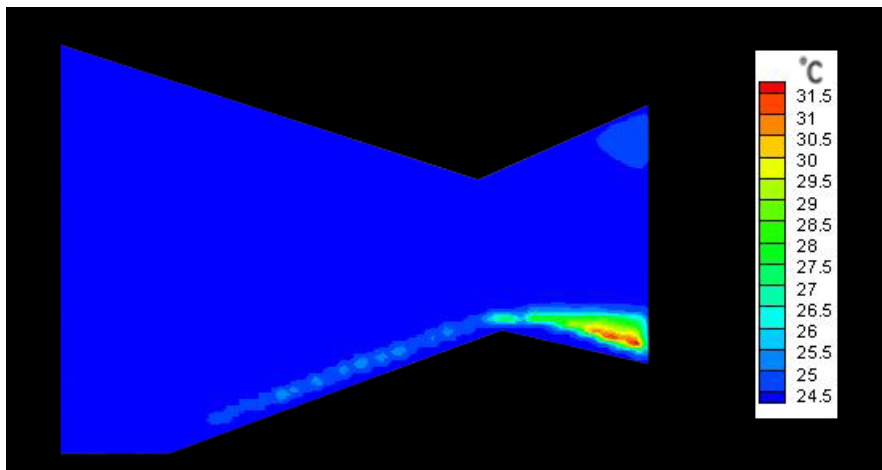
Εικόνα 4.123: $t = 0 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, ΑΝΑΝΤΙ



Εικόνα 4.124: $t = 64 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

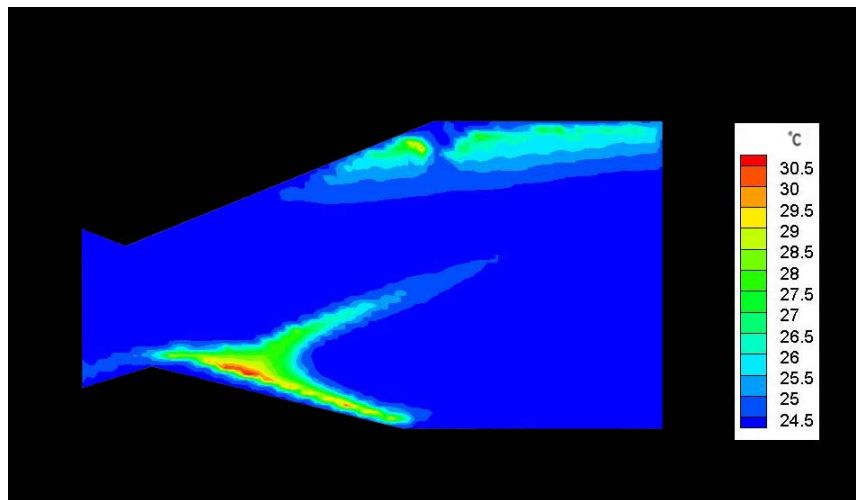


Εικόνα 4.125: $t = 142 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

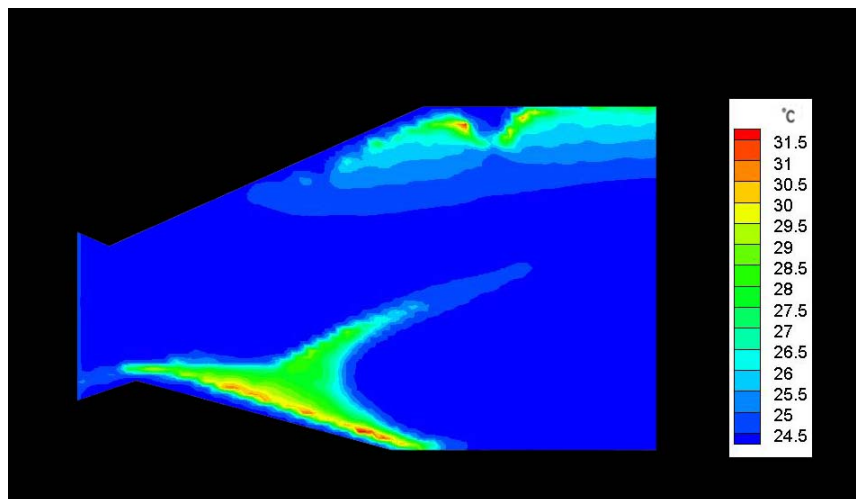


Εικόνα 4.126: $t = 304 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

5γ₂) ΚΑΤΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 36 - 20 \text{ }^\circ\text{C}$



Εικόνα 4.127: $t = 0 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\text{πλ.}} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεδ.}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



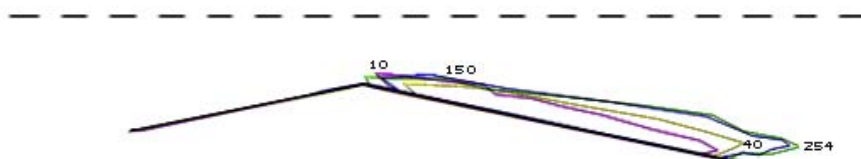
Εικόνα 4.128: $t = 129 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\text{πλ.}} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεδ.}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ

Για $\Delta T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση στο τμήμα του ακροφυσίου ανάντι της στένωσης δεν παρατηρείται δημιουργία θερμικού οριακού στρώματος κατά μήκος της θερμαινόμενης πλάκας σε συνέπεια του συνδυασμού της χαμηλής θερμοκρασιακής διαφοράς ($\Delta T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$) και της μεγαλύτερης σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις παροχής και κατ' επέκταση ταχύτητας. Θεωρητικά θα παρατηρούσαμε μετάδοση μικρού ποσού θερμότητας από τη θερμαινόμενη πλάκα στο οριακό στρώμα και θα είχαμε εικόνα αντίστοιχη αυτής για $\Delta T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ και $Re = 8$. Ενώ η ύπαρξη οριακού στρώματος είναι αδιαμφισβήτητη, η ταχύτητά του είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μην προλαβαίνει ν' απορροφήσει το ποσό της θερμότητας που του μεταδίδει η θερμαινόμενη πλάκα. Έτσι δεν κατορθώνει να αποκτήσει διαφορετική (ελάχιστα μεγαλύτερη) θερμοκρασία από την υπόλοιπη μάζα του ρευστού με αποτέλεσμα να μην είναι ορατό στην αποτύπωση των θερμοκρασιακών πεδίων. Για αυτό, στο συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου υπάρχει σχεδόν ενιαία θερμοκρασία (Εικόνα 4.105) ρευστού και η χρωματική αποτύπωση των θερμοκρασιακών πεδίων είναι ένα ενιαίο χρώμα. Αυτός είναι ο λόγος που δεν παραθέτουμε αντίστοιχη εικόνα.

Στο αποκλίνον τμήμα του ακροφυσίου έχουμε, όπως αναμένεται, εμφάνιση πλουμίου μετατοπισμένου δεξιότερα κατά μήκος της θερμαινόμενης πλάκας, το οποίο εδώ λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας ροής εμποδίζεται να κινηθεί ανοδικά, λόγω δε και του μικρού $\Delta T = 4$ °C έχει μικρό ύψος. Η υπόλοιπη μάζα του ρευστού έχει σχεδόν ενιαία θερμοκρασία. Ο διαχύτης βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση για $t > 2,5$ min.

Στην άνω πλάκα και των δύο τμημάτων του ακροφυσίου δεν παρατηρείται σχηματισμός αποτυπώσιμου οριακού στρώματος.

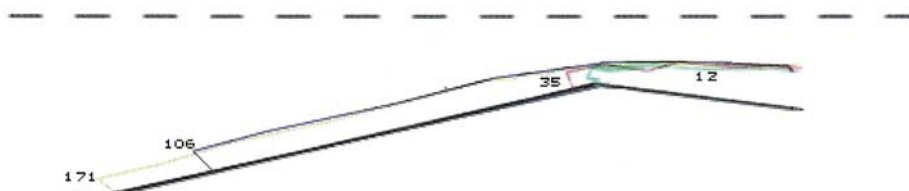


Εικόνα 4.129: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 24,4 °C για $t = 0, 10, 150, 254$ sec, $Re = 24$, $T_{πλ.} = 25,5$ °C, $T_{δεξ.} = 21,5$ °C στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

Η εικόνα 4.129 παριστά τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των 24,4 °C για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t . Το πεδίο αυτό αποτελεί μέρος του πλουμίου που αναπτύσσεται κατά μήκος της θερμαινόμενης πλάκας για κάθε χρονική στιγμή t .

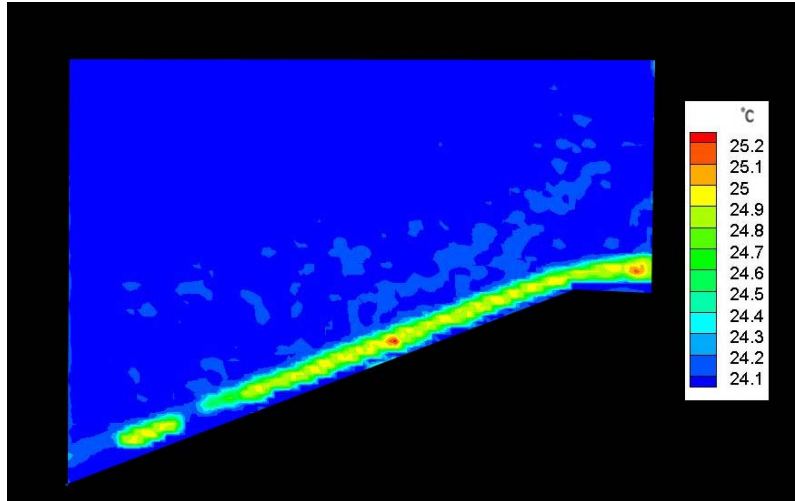
Για $\Delta T = 8$ °C

Στο συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου σε αντίθεση με την περίπτωση $\Delta T = 4$ °C εδώ παρατηρούμε ευκρινέστερο θερμικό οριακό στρώμα κατά μήκος της θερμαινόμενης πλάκας. Το τμήμα αυτό φθάνει στη μόνιμη κατάσταση σε χρόνο μικρότερο των 2 min. Η υπόλοιπη μάζα του ρευστού έχει ενιαία θερμοκρασία, περίπου ίση με 24,5 °C.

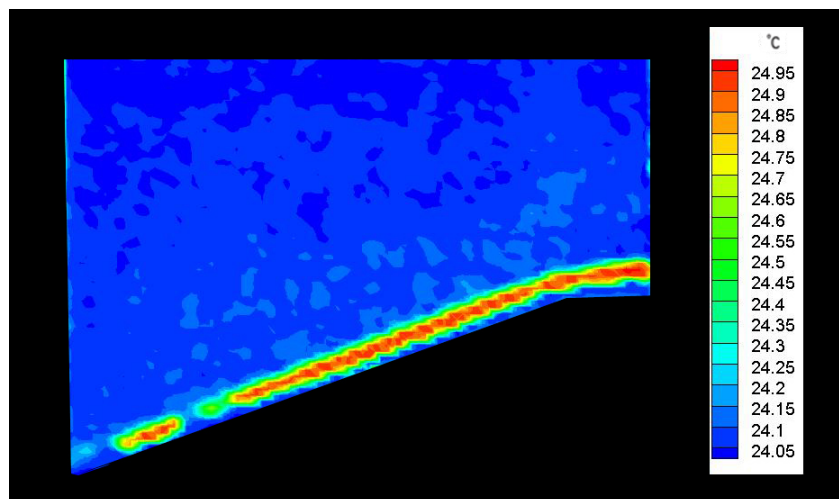


Εικόνα 4.130: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 25 °C για $t = 12, 35, 106, 171$ sec, $Re = 24$, $T_{πλ.} = 29,5$ °C, $T_{δεξ.} = 21,5$ °C στο ανάντι τμήμα του ακροφυσίου

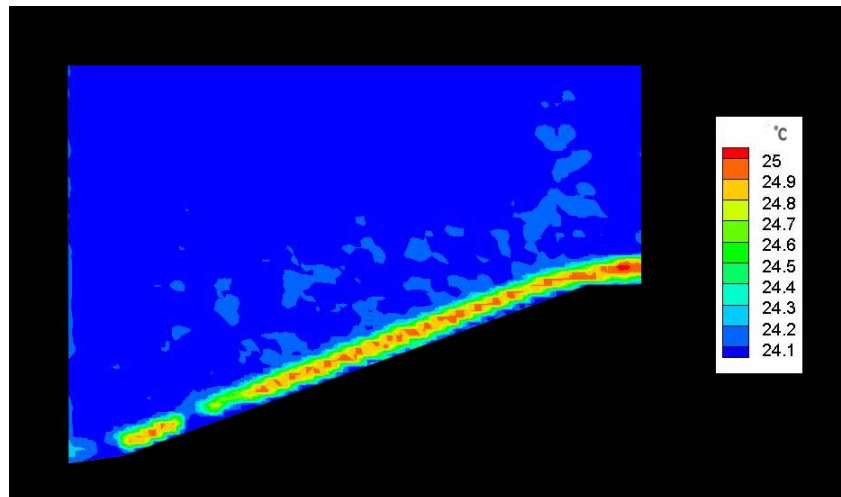
Η εικόνα 4.130 παριστά τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των 25 °C για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t. Το πεδίο αυτό, όπως διαπιστώνουμε από τις χρονικές στιγμές t = 106, 171 sec αποτελεί μέρος του θερμικού οριακού στρώματος του συγκλίνοντος τμήματος του ακροφυσίου. Από τις χρονικές στιγμές t = 12, 35 sec βλέπουμε ότι το αντίστοιχο πεδίο στο τμήμα του διαχύτη αποτελεί μέρος του πλουμίου.



Εικόνα 4.131: t = 0 sec, Q = 0,31 cm³ / sec, T_{πλ.} = 29,5 °C, T_{δεξ.} = 21,5 °C, ANANTI



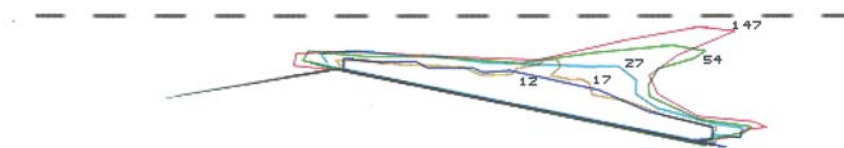
Εικόνα 4.132: t = 25 sec, Q = 0,31 cm³ / sec, T_{πλ.} = 29,5 °C, T_{δεξ.} = 21,5 °C, ANANTI



Εικόνα 4.133: $t = 49 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\text{πλ.}} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεξ.}} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

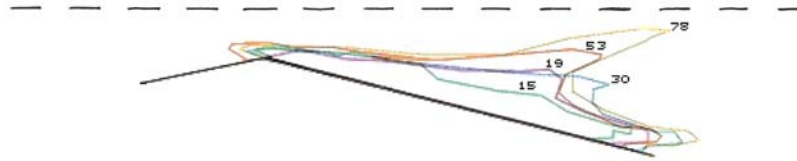
Από τις παραπάνω φωτογραφίες του θερμικού οριακού στρώματος σε μεγέθυνση αντιλαμβανόμαστε ότι το πάχος του, αν και μικρό, αποτελείται από μικρά θερμοκρασιακά πεδία που κυμαίνονται μεταξύ $24,2 \text{ }^\circ\text{C}$ και $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Πλούμιο εμφανίζεται κατά μήκος της θερμαινόμενης πλάκας του διαχύτη μετατοπισμένο δεξιότερα σε σύγκριση με προηγούμενες περιπτώσεις μικρότερης παροχής. Όπως για $\Delta T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ έτσι και εδώ το πλούμιο έχει μικρό ύψος και δεν φθάνει στην άνω πλάκα του διαχύτη καθ' ότι το εμποδίζει η παροχή. Παρότι στις αποτυπώσεις των θερμοκρασιακών πεδίων φαίνεται ότι η υπόλοιπη μάζα του ρευστού στο διαχύτη έχει ενιαία θερμοκρασία ($24,5 \text{ }^\circ\text{C}$), στην πραγματικότητα υπάρχει μάζα ρευστού επαφτόμενη της άνω πλάκας του διαχύτη η οποία έχει ελαφρώς μεγαλύτερη θερμοκρασία και την οποία διαπιστώνουμε παρατηρώντας το video της ροής μέσα στο ακροφύσιο. Όπως και στην υποκατηγορία για $\Delta T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$, δεν έχουμε αποτυπώσιμο οριακό στρώμα στην άνω πλάκα του διαχύτη, φθάνουμε δε στη μόνιμη κατάσταση σε χρόνο λίγο μεγαλύτερο ή ίσο των $2,5 \text{ min}$.



Εικόνα 4.134: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των $25 \text{ }^\circ\text{C}$ για $t = 12, 17, 27, 54, 147 \text{ sec}$, $Re = 24$, $T_{\text{πλ.}} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεξ.}} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$ στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

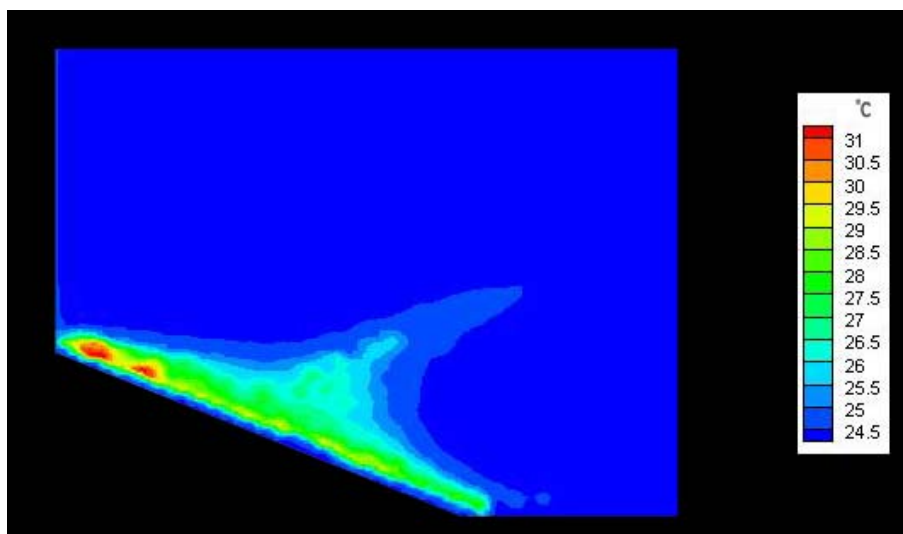
Η εικόνα 4.134 παριστά τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των $25 \text{ }^\circ\text{C}$ για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t . Για όλες τις χρονικές στιγμές $t = 12, 17, 27, 54, 147 \text{ sec}$ το πεδίο αποτελεί μέρος του πλουμίου.



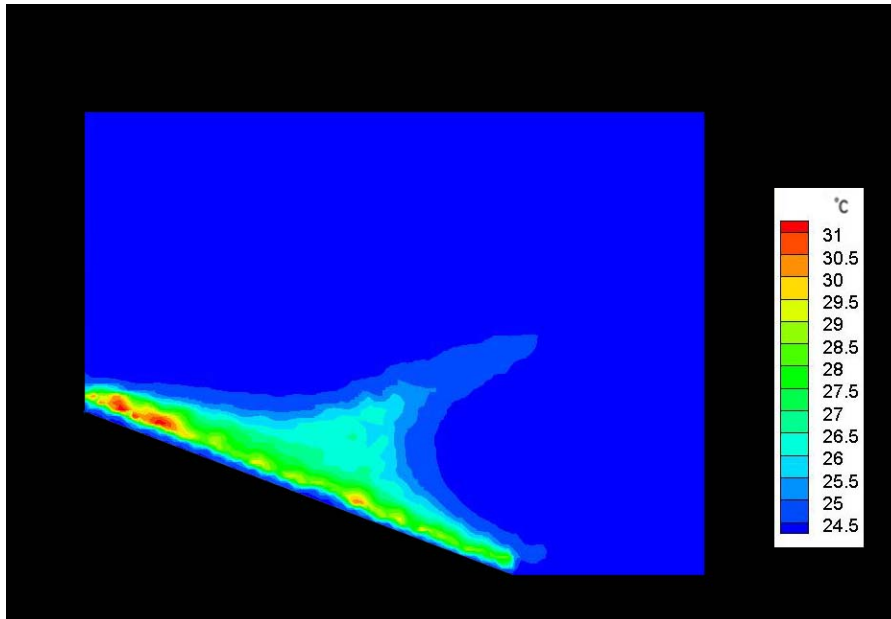
Εικόνα 4.135: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 25 °C για $t = 15, 19, 30, 53, 78$ sec, $Re = 24$, $T_{πλ.} = 29,5$ °C, $T_{δεδ.} = 21,5$ °C στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

Η εικόνα 4.135 παριστά τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των 25° C για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t . Για όλες τις χρονικές στιγμές $t = 15, 19, 30, 53, 78$ sec το πεδίο αποτελεί μέρος του πλουμίου.

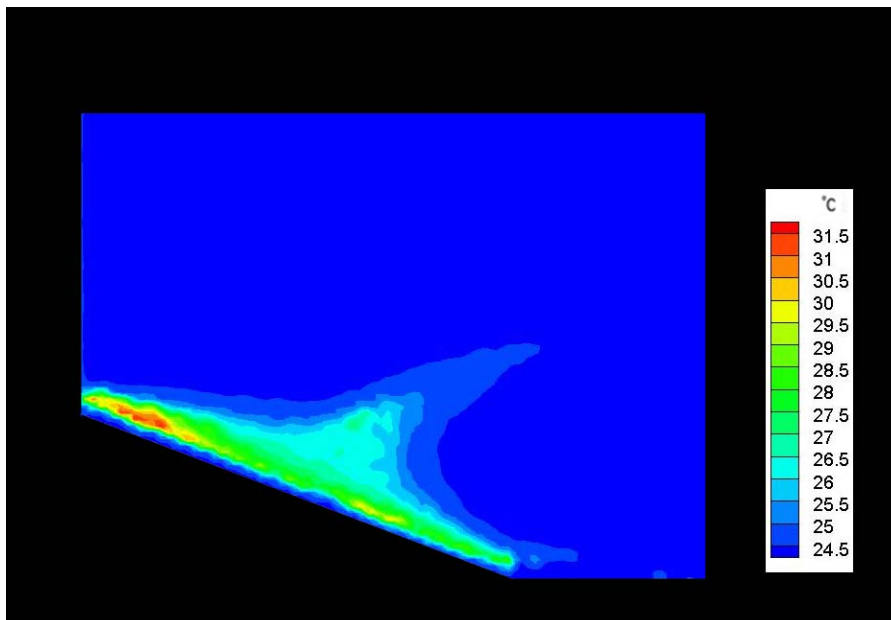
Για $\Delta T = 8$ °C στο διαχύτη παραθέσαμε δύο διαφορετικές ομάδες θερμοκρασιακών πεδίων που προήλθαν από τη μελέτη του φαινομένου, για τις ίδιες συνθήκες, σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Τα αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα, γεγονός που θα μπορούσε να αποτελέσει επαλήθευση για την ορθότητα εκτέλεσης της συγκεκριμένης περίπτωσης του πειράματος.



Εικόνα 4.136: $t = 91$ sec, $Q = 0,31$ cm³ / sec, $T_{πλ.} = 29,5$ °C, $T_{δεδ.} = 21,5$ °C, ΚΑΤΑΝΤΙ

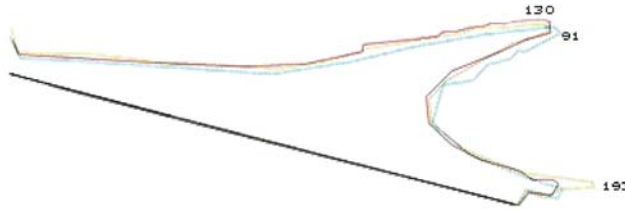


Εικόνα 4.137: $t = 130 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



Εικόνα 4.138: $t = 193 \text{ sec}$, $Q = 0,31 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI

Όπως και στη μεγέθυνση του θερμικού οριακού στρώματος παρατηρούμε λεπτομερέστερα τα θερμοκρασιακά πεδία που αποτελούν το πλούμιο (αμετάβλητα πρακτικά με το χρόνο για $t > 1,5 \text{ min}$) και τα οποία κυμαίνονται από $25 \text{ }^\circ\text{C}$ μέχρι και $31,5 \text{ }^\circ\text{C}$.



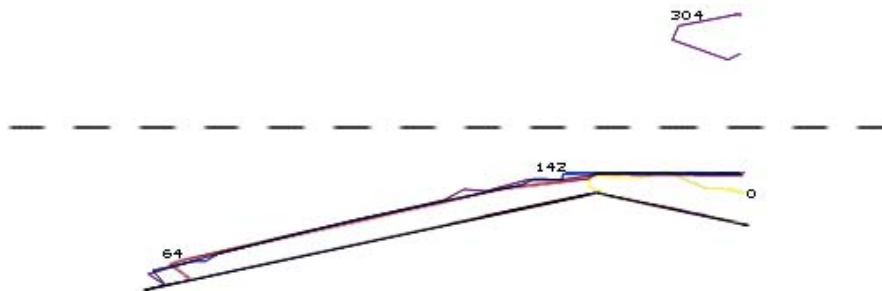
Εικόνα 4.139: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 25 °C για $t = 91, 130, 193 \text{ sec}$, $Re = 24$, $T_{πλ.} = 29,5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_{δεξ.} = 21,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου σε μεγέθυνση

Η εικόνα 4.139 παριστά τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των 25 °C για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t σε μεγέθυνση. Το πεδίο για όλες τις χρονικές στιγμές t αποτελεί μέρος του πλουμίου και συγκεκριμένα το ψυχρότερο. Σε μεγέθυνση φαίνεται καλύτερα ότι το συγκεκριμένο πεδίο (και κατ' επέκταση το πλούμιο) δε μεταβάλλεται ιδιαίτερα ως προς το σχήμα με την πάροδο του χρόνου για $t > 1,5 \text{ min}$.

Για $\Delta T = 16 \text{ } ^\circ\text{C}$

Στο συγκλίνον τμήμα στην κάτω πλάκα του ακροφυσίου σχηματίζεται ευκρινές αλλά λεπτό θερμικό οριακό στρώμα, όπως και στη $\Delta T = 8 \text{ } ^\circ\text{C}$, αλλά νωρίτερα (σχεδόν ακαριαία).

Στη μόνιμη κατάσταση στη συγκεκριμένη περίπτωση φθάνουμε σε χρόνο μικρότερο των 2 min. Η υπόλοιπη μάζα του ρευστού έχει σχεδόν ενιαία θερμοκρασία (24,5 °C).

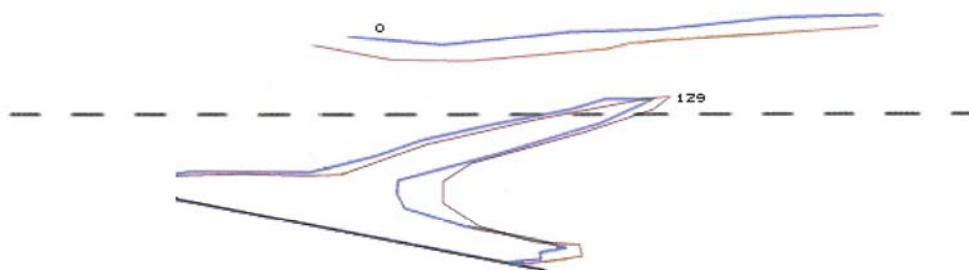


Εικόνα 4.140: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 25 °C για $t = 0, 64, 142, 304 \text{ sec}$, $Re = 24$, $T_{πλ.} = 36 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_{δεξ.} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ στο ανάντι τμήμα του ακροφυσίου

Η εικόνα 4.140 παρουσιάζει τις ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 25 °C για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t . Το πεδίο αυτό αποτελεί μέρος του οριακού στρώματος κατά μήκος της θερμαινόμενης πλάκας στο συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου, όπως αυτό φαίνεται από τις χρονικές στιγμές $t = 64, 142, 304 \text{ sec}$. Παρατηρούμε επίσης με τη βοήθεια της ισοθερμοκρασιακής καμπύλης για $t = 0 \text{ sec}$ ότι το θερμικό οριακό στρώμα (στη συνέχεια πλούμιο) στην κάτω πλάκα του διαχύτη δημιουργείται γρηγορότερα από το αντίστοιχο στο συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου (παρατήρηση που ισχύει και για άλλες περιπτώσεις).

Στο αποκλίνον τμήμα του ακροφυσίου φθάνουμε στη μόνιμη κατάσταση πάρα πολύ σύντομα και συγκεκριμένα σε χρόνο περίπου ίσο με 2 min.

Η μεγάλη διαφορά, στην εξέλιξη του φαινομένου στο διαχύτη, σε σύγκριση με $\Delta T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ και $\Delta T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$, είναι ότι εδώ εκτός από το σχηματισμό του πλουμίου κατά μήκος της θερμαινόμενης πλάκας παρατηρείται ανοδική πορεία της θερμής του μάζας προς την άνω πλάκα, όπου και πλησιάζει τη θερμή μάζα (θερμότερη από αυτή για $\Delta T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$) που έχει ήδη δημιουργηθεί κατά μήκος της. Το πλούμιο δεν καταφέρνει να φθάσει στην άνω πλάκα, λόγω της ταχύτητας της ροής, είναι όμως σαφώς υψηλότερο συγκρινόμενο με τις υπόλοιπες υποκατηγορίες της ίδιας περίπτωσης. Λόγω της υψηλής ροής δεν έχουμε επίσης και εδώ επιστρέφουσα θερμή μάζα ρευστού.



Εικόνα 4.141: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των $25 \text{ }^\circ\text{C}$ για $t = 0, 129 \text{ sec}$, $Re = 24$, $T_{\text{πλ.}} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δωξ.}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

Η εικόνα 4.141 παριστά τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των $25 \text{ }^\circ\text{C}$ για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t . Επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι στην περίπτωση αυτή φθάνουμε γρηγορότερα στη μόνιμη κατάσταση (σε σχέση με τις δύο προηγούμενες υποκατηγορίες της ίδιας περίπτωσης) και ότι για χρόνο $t > 1 \text{ min}$ οι αλλαγές είναι πάρα πολύ μικρές. Το πεδίο των $25 \text{ }^\circ\text{C}$ αποτελεί μέρος του πλουμίου και της θερμής μάζας που δημιουργείται στην άνω πλάκα.

6) $Q = 0,49 \text{ cm}^3 / \text{sec}$ ($Re = 39$) για $\Delta T = 29,5 - 21,5 \text{ }^\circ\text{C} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$

6α₁) ANANTI TMHMA TOY AKPOFYCIOY, $Q = 0,49 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 29,5 - 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$

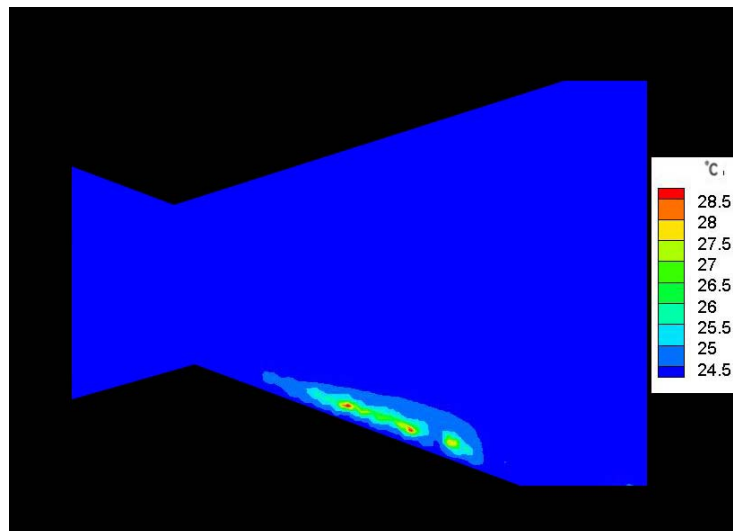
Για το τμήμα του ακροφυσίου ανάντι της στένωσης δεν παραθέτουμε φωτογραφία θερμοκρασιακού πεδίου καθότι, λόγω της αρκετά πλέον υψηλής ροής, το θερμικό οριακό στρώμα είναι αρκετά λεπτό (παρά το ότι $\Delta T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$) και η εικόνα που μας δίνει το tecplot δεν είναι ευδιάκριτη. Επίσης αυτό δημιουργείται σχετικά γρήγορα ($t < 1 \text{ min}$) και εφεξής παραμένει αμετάβλητο. Η υπόλοιπη μάζα του ρευστού έχει σχεδόν ενιαία θερμοκρασία.



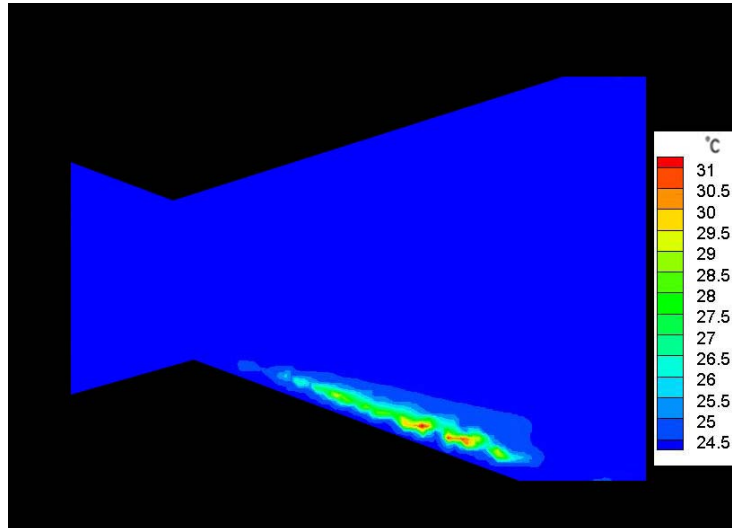
Εικόνα 4.142: $t = 300 \text{ sec}$, $Q = 0,49 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

Η εικόνα 4.142 είναι το στιγμιότυπο για $t = 300 \text{ sec}$ της ροής στο συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου για τη συγκεκριμένη περίπτωση, σε μεγέθυνση.

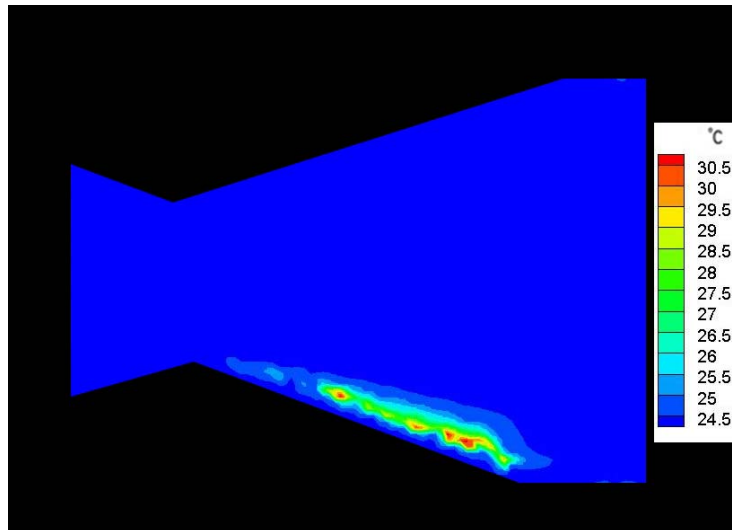
6α₂) ΚΑΤΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 0,49 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 29,5 - 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$



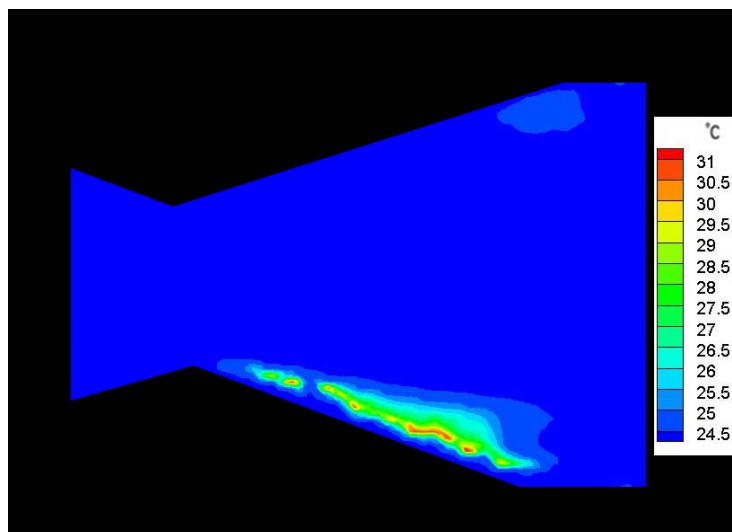
Εικόνα 4.143: $t = 14 \text{ sec}$, $Q = 0,49 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



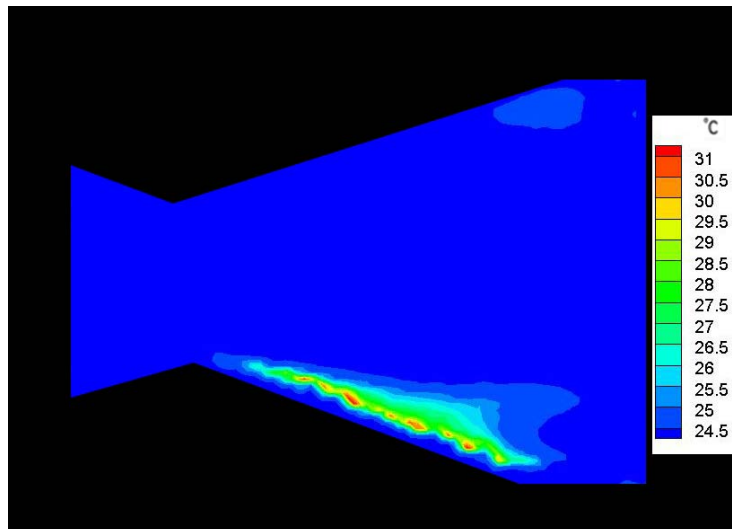
Εικόνα 4.144: $t = 20$ sec, $Q = 0,49$ cm³ / sec, $T_{\pi\lambda} = 29,5$ °C, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5$ °C, KATANTI



Εικόνα 4.145: $t = 39$ sec, $Q = 0,49$ cm³ / sec, $T_{\pi\lambda} = 29,5$ °C, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5$ °C, KATANTI

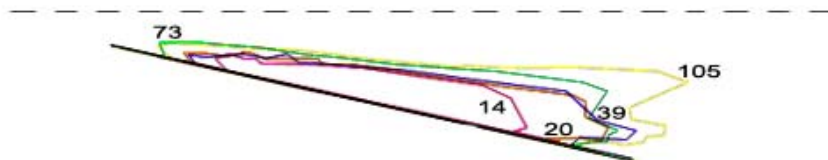


Εικόνα 4.146: $t = 73$ sec, $Q = 0,49$ cm³ / sec, $T_{\pi\lambda} = 29,5$ °C, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5$ °C, KATANTI



Εικόνα 4.147: $t = 105 \text{ sec}$, $Q = 0,49 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\text{πλ.}} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεξ.}} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ

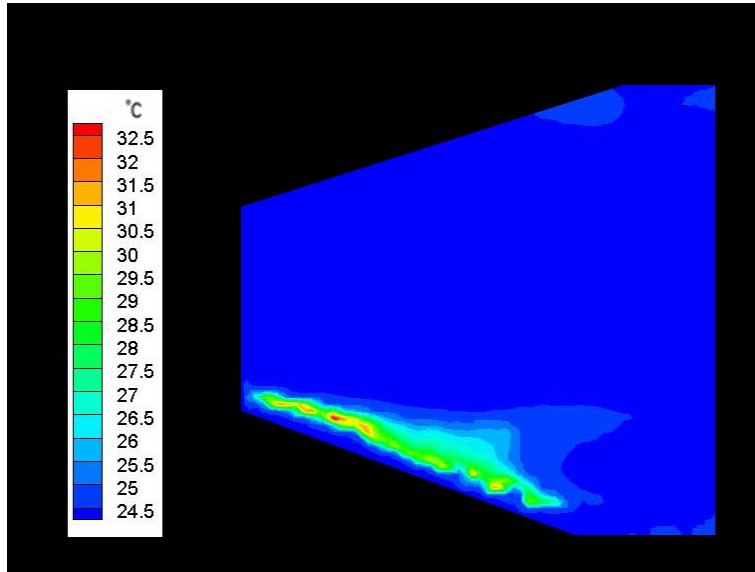
Στο διαχύτη εμφανίζεται πλούμιο κατά μήκος της θερμαινόμενης πλάκας και, κατ' αναλογία με τις προηγούμενες περιπτώσεις, μετατοπισμένο δεξιότερα με σαφώς μικρότερο ύψος σε σύγκριση με αντίστοιχες περιπτώσεις μικρότερης παροχής. Στην άνω πλάκα του διαχύτη σχηματίζεται ελαφρώς θερμότερη μάζα ρευστού σε σχέση με τη θερμοκρασία του υπολοίπου όγκου ($T = 24,5 \text{ }^\circ\text{C}$) στο τμήμα αυτό. Η αυξημένη πλέον ροή (ψυχρό ρεύμα εισόδου) περνά ανάμεσα στη θερμή αυτή μάζα και το πλούμιο, το οποίο και συμπιέζει προς τη θερμαινόμενη πλάκα. Στη μόνιμη κατάσταση φθάνουμε σε περίπου 1,5 min.



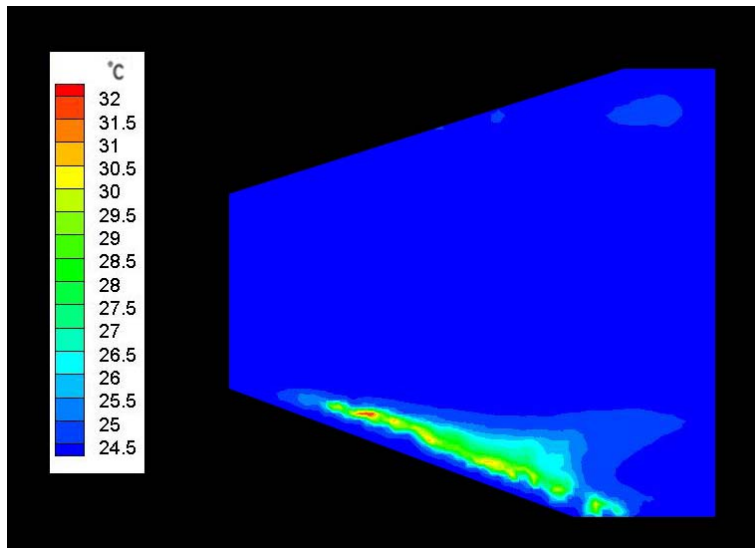
Εικόνα 4.148: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των $25 \text{ }^\circ\text{C}$ για $t = 14, 20, 39, 73, 105 \text{ sec}$, $Re = 39$, $T_{\text{πλ.}} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεξ.}} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$ στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

Η εικόνα 4.148 παρουσιάζει τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των $25 \text{ }^\circ\text{C}$ για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t . Για όλες τις χρονικές στιγμές το πεδίο αυτό αποτελεί μέρος του πλουμίου.

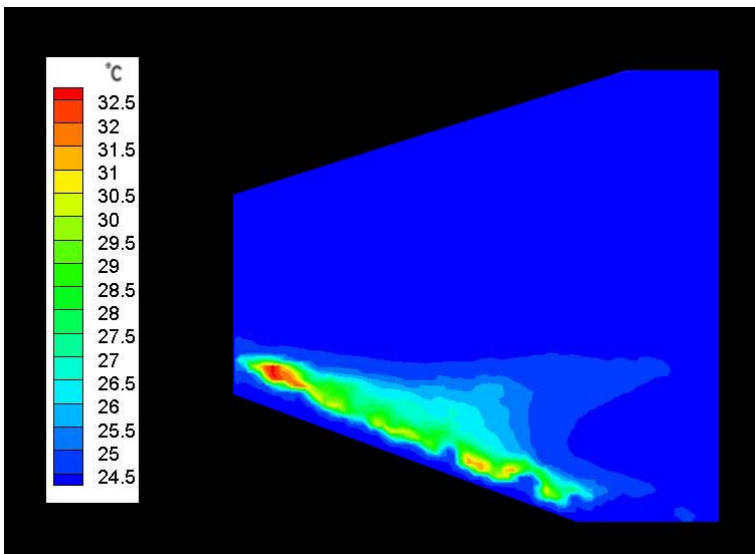
Οι παρακάτω εικόνες αφορούν στο πλούμιο της συγκεκριμένης περίπτωσης σε μεγέθυνση.



Εικόνα 4.149: $t = 158 \text{ sec}$, $Q = 0,49 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI

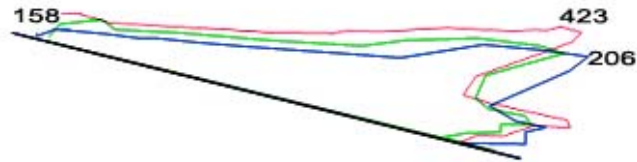


Εικόνα 4.150: $t = 206 \text{ sec}$, $Q = 0,49 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



Εικόνα 4.151: $t = 423 \text{ sec}$, $Q = 0,49 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI

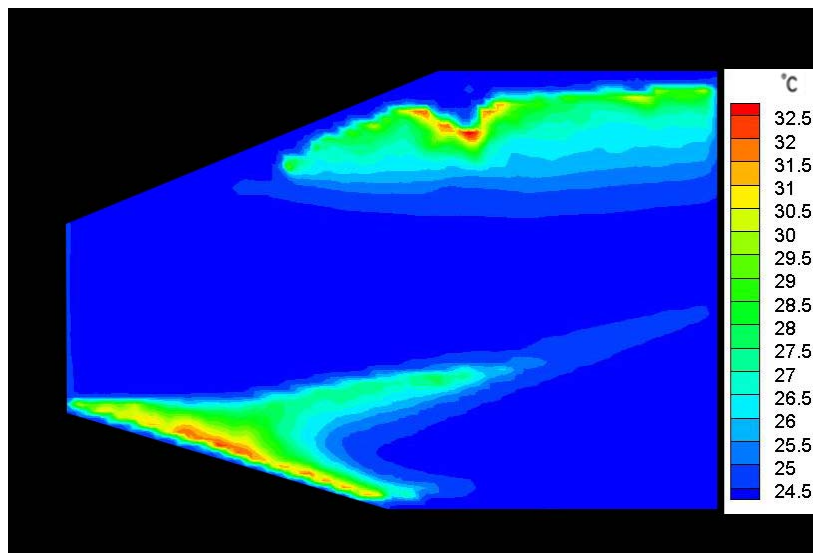
Στη μεγέθυνση παρατηρούμε λεπτομερέστερα τα θερμοκρασιακά πεδία που αποτελούν το πλούμιο και τα οποία κυμαίνονται από 25 °C μέχρι και 32,5 °C.



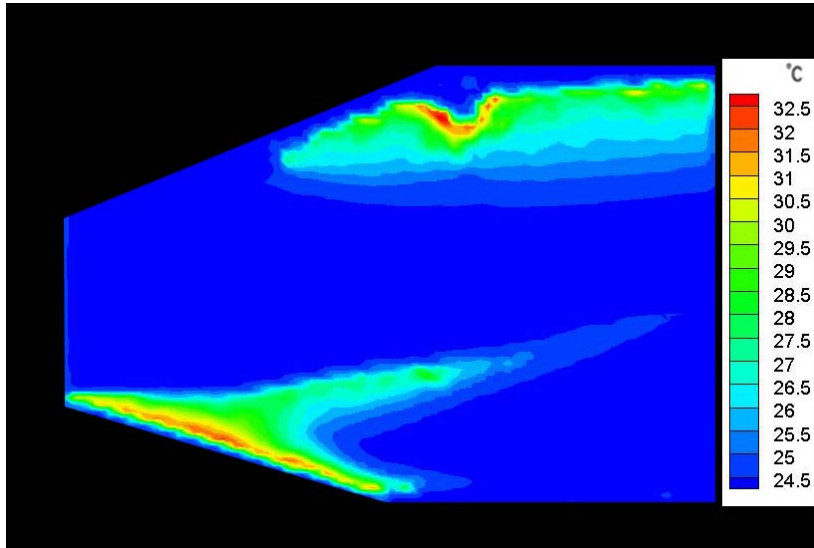
Εικόνα 4.152: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 25 °C για $t = 158, 206, 423 \text{ sec}$, $Re = 39$, $T_{πλ.} = 29,5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_{δρξ.} = 21,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου σε μεγέθυνση

Η εικόνα 4.152 παριστά τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των 25 °C για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t , σε μεγέθυνση.

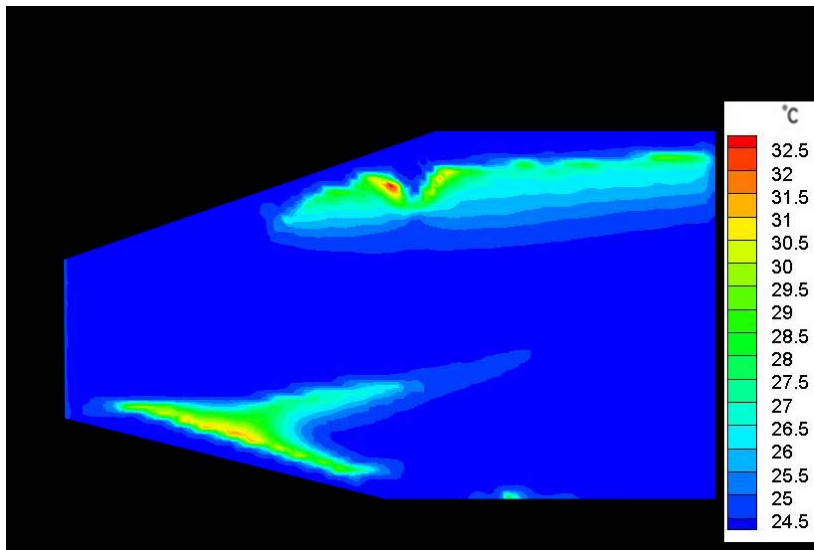
7) $Q = 0,62 \text{ cm}^3 / \text{sec}$ ($Re = 48$) για $\Delta T = 36 - 21 \text{ } ^\circ\text{C} = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$



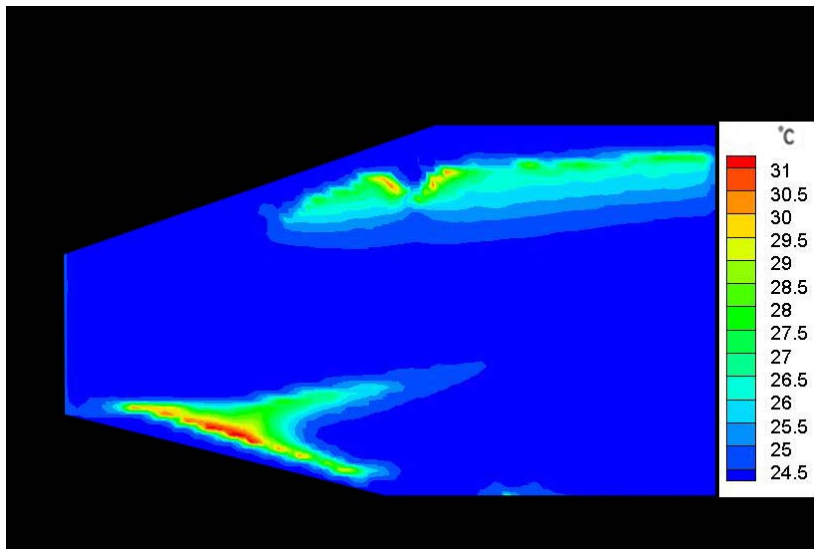
Εικόνα 4.153: $t = 0 \text{ sec}$, $Q = 0,62 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{πλ.} = 36 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_{δρξ.} = 21 \text{ } ^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



Εικόνα 4.154: $t = 49 \text{ sec}$, $Q = 0,62 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI



Εικόνα 4.155: $t = 191 \text{ sec}$, $Q = 0,62 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI

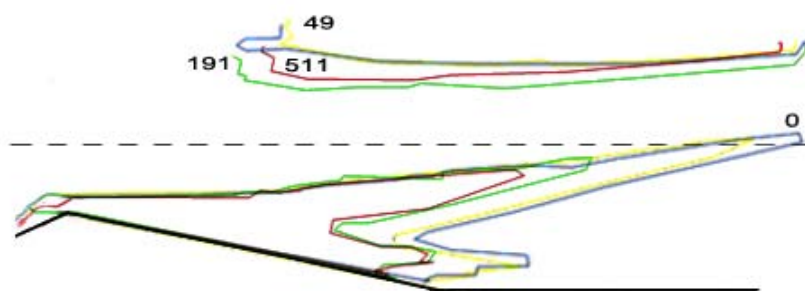


Εικόνα 4.156: $t = 511 \text{ sec}$, $Q = 0,62 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI

Στην περίπτωση αυτή έχουμε δείγμα μόνο για την εξέλιξη του φαινομένου κατάντι της στένωσης. Στη μόνιμη κατάσταση εδώ φθάνουμε σε 1 min περίπου.

Πλούμιο εμφανίζεται κατά μήκος της θερμαινόμενης πλάκας, δεξιότερα σε σχέση με αντίστοιχη υποκατηγορία περίπτωσης μικρότερης παροχής. Στην άνω πλάκα σχηματίζεται θερμή μάζα, όμως, παρά το γεγονός ότι το πλούμιο έχει πολύ μεγάλο ύψος, δεν έρχονται ποτέ σε επαφή μεταξύ τους λόγω της αυξημένης πλέον ταχύτητας του ψυχρού ρεύματος εισόδου που διέρχεται ανάμεσά τους. Θεωρώντας ότι οι παροχές για $Re = 48$ και $Re = 39$ είναι παραπλήσιες μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι, για το μεγαλύτερο ΔT , το φαινόμενο του σχηματισμού του πλουμίου είναι εντονότερο, δηλαδή ευκρινέστερο πλούμιο το οποίο δεν πλησιάζει τη θερμή μάζα της άνω πλάκας, αλλά εμφανίζει εντονότερη ανοδική πορεία και δε συμπιέζεται τόσο προς τη θερμαινόμενη κάτω πλάκα.

Οι εικόνες που παραθέτουμε στην περίπτωση αυτή για το αποκλίνον τμήμα του ακροφυσίου είναι, ανά δύο, διαφορετικών μεγεθύνσεων.



Εικόνα 4.157: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 25 °C για $t = 0, 49, 191, 511$ sec, $Re = 48$, $T_{πλ.} = 36$ °C, $T_{δεδ.} = 21$ °C στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου σε μεγέθυνση

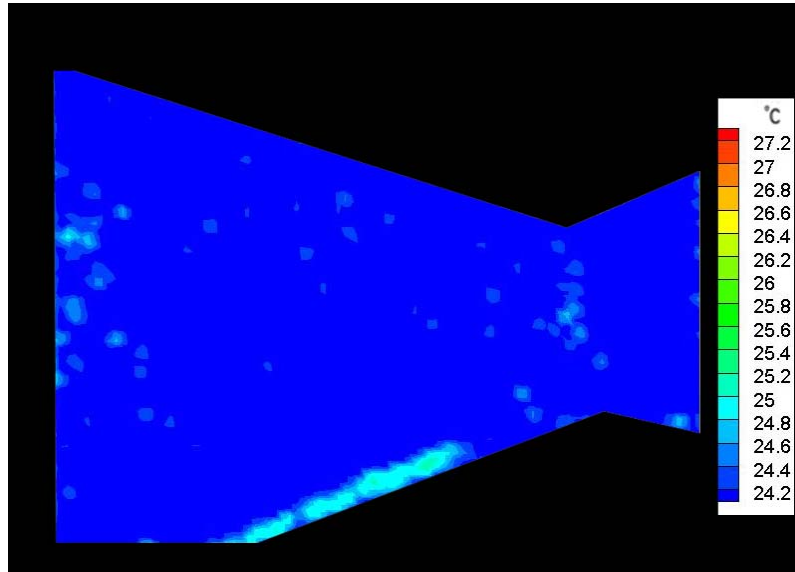
Η εικόνα 4.157 παρουσιάζει τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των 25 °C για τις δύο μεγεθύνσεις. Οι χρονικές στιγμές $t = 0$ sec και $t = 49$ sec αποτελούν τη μία ομάδα, ενώ οι χρονικές στιγμές $t = 191$ sec και $t = 511$ sec την άλλη.

Ανεξαρτήτως μεγέθυνσης αυτό που συμπεραίνουμε είναι ότι το θερμοκρασιακό αυτό πεδίο αποτελεί μέρος του πλουμίου και της θερμής μάζας στην άνω πλάκα καθώς και το ότι με την πάροδο του χρόνου η ροή τείνει να συμπιέζει το πλούμιο προς τη θερμαινόμενη πλάκα.

$$8) Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec} \quad (Re = 120)$$

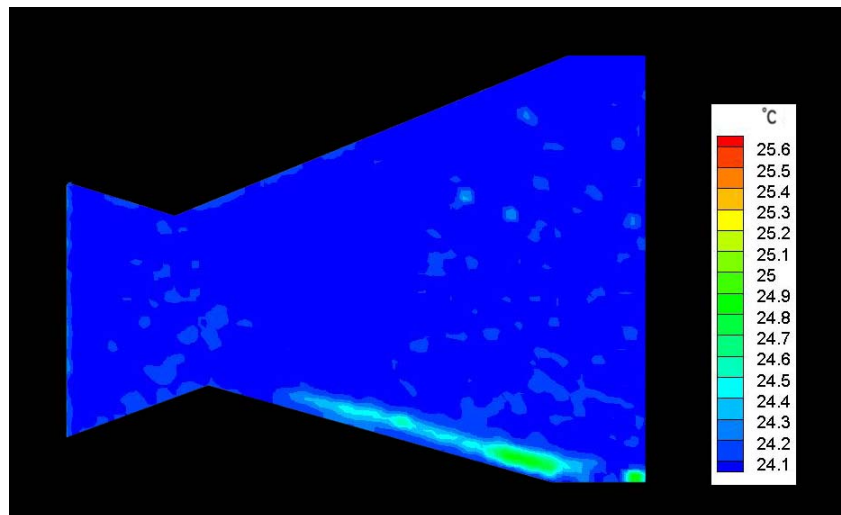
$$8\alpha) \Delta T = 25,5 - 21,5 \text{ } ^\circ\text{C} = 4 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$$

$$8\alpha_1) \text{ ANANTI TMHMA AKROPHYΣIOY}, \quad Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}, \quad \Delta T = 25,5 - 21,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Εικόνα 4.158: $t = 107 \text{ sec}$, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

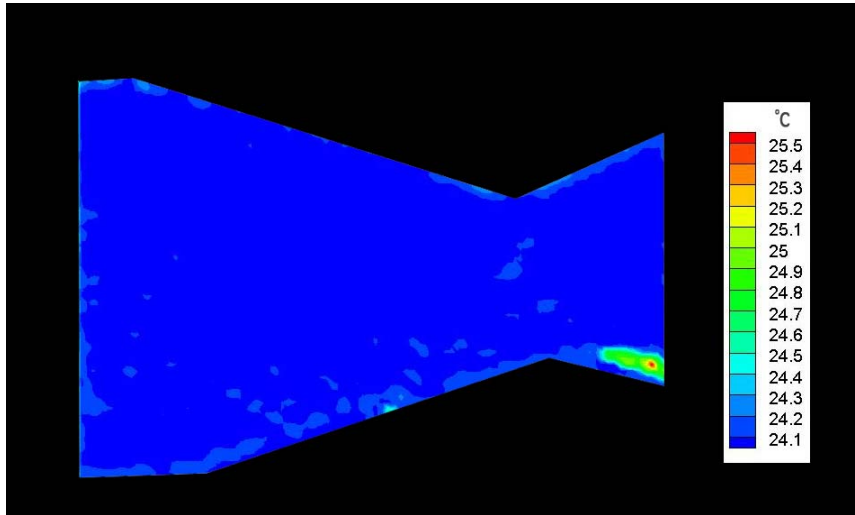
8α₂) ΚΑΤΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 25,5 - 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$



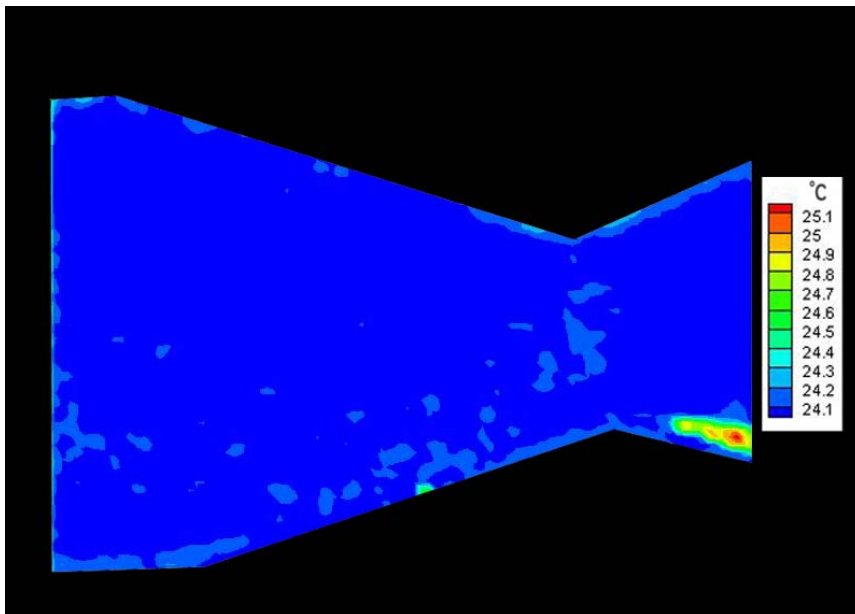
Εικόνα 4.159: $t = 31 \text{ sec}$, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ

8β) $\Delta T = 29,5 - 21,5 \text{ }^\circ\text{C} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$

8β₁) ANANTI ΤΜΗΜΑ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 29,5 - 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$

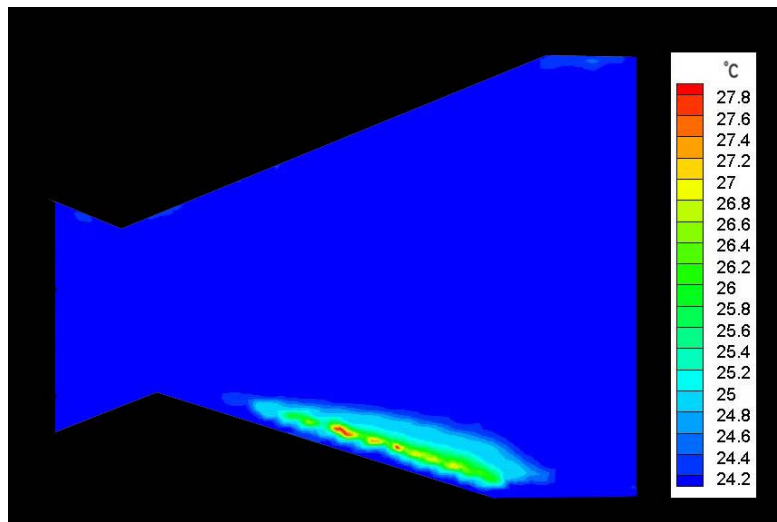


Εικόνα 4.160: $t = 164$ sec, $Q = 1,54$ cm³ / sec, $T_{πλ.} = 29,5$ °C, $T_{δεδ.} = 21,5$ °C, ANANTI

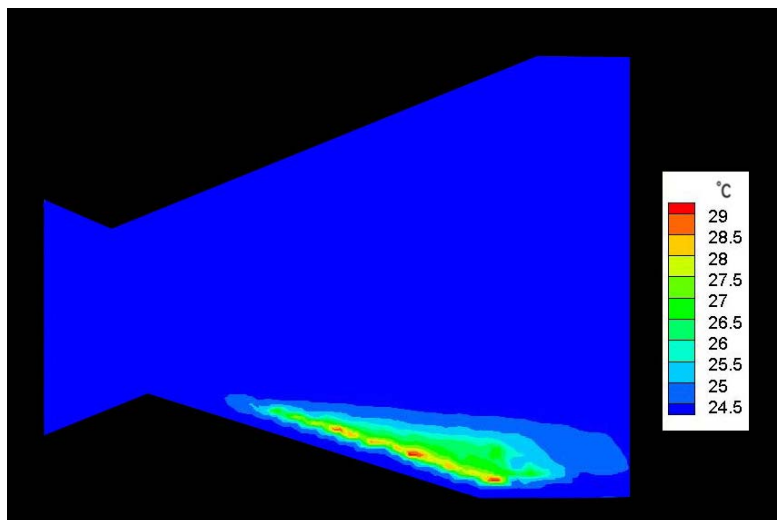


Εικόνα 4.161: $t = 286$ sec, $Q = 1,54$ cm³ / sec, $T_{πλ.} = 29,5$ °C, $T_{δεδ.} = 21,5$ °C, ANANTI

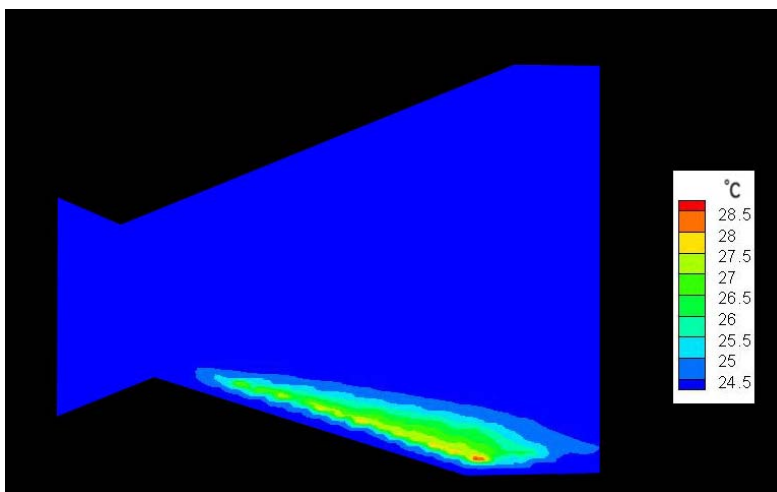
8β₂) ΚΑΤΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 29,5 - 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$



Εικόνα 4.162: $t = 16 \text{ sec}$, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



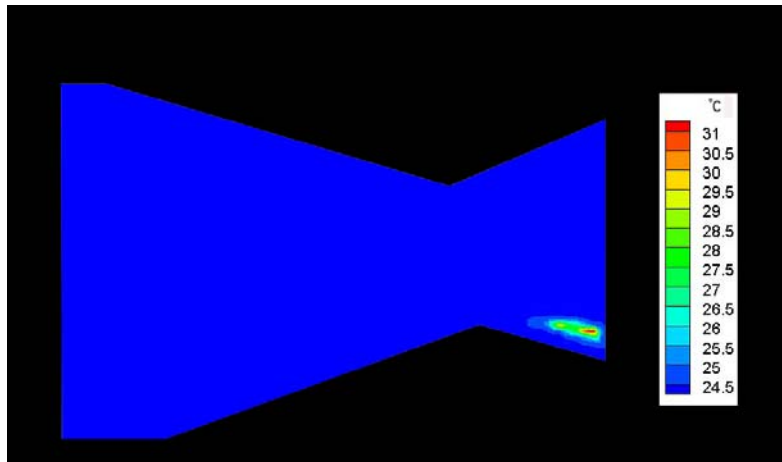
Εικόνα 4.163: $t = 25 \text{ sec}$, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



Εικόνα 4.164: $t = 321 \text{ sec}$, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ

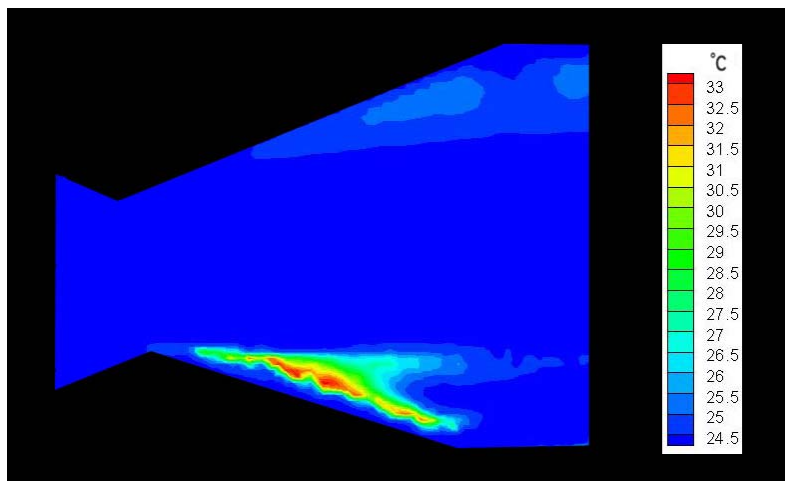
8γ) $\Delta T = 36 - 20 \text{ }^\circ\text{C} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$

8γ₁) ANANTI ΤΜΗΜΑ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 36 - 20 \text{ }^\circ\text{C}$

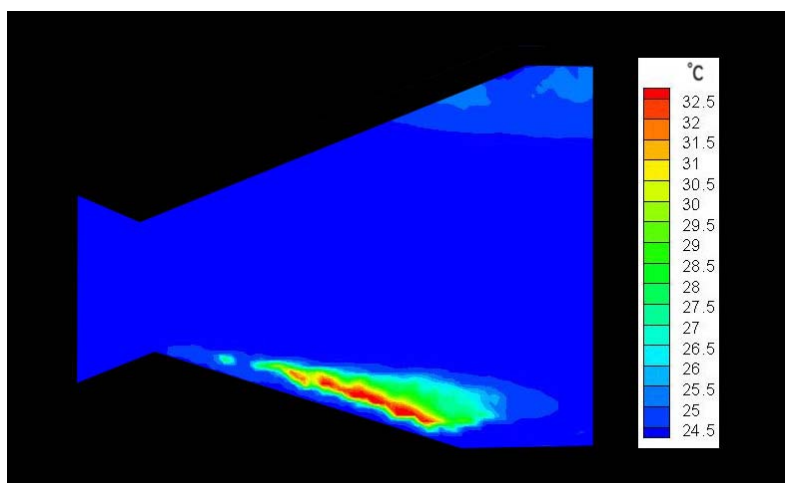


Εικόνα 4.165: $t = 125 \text{ sec}$, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, ANANTI

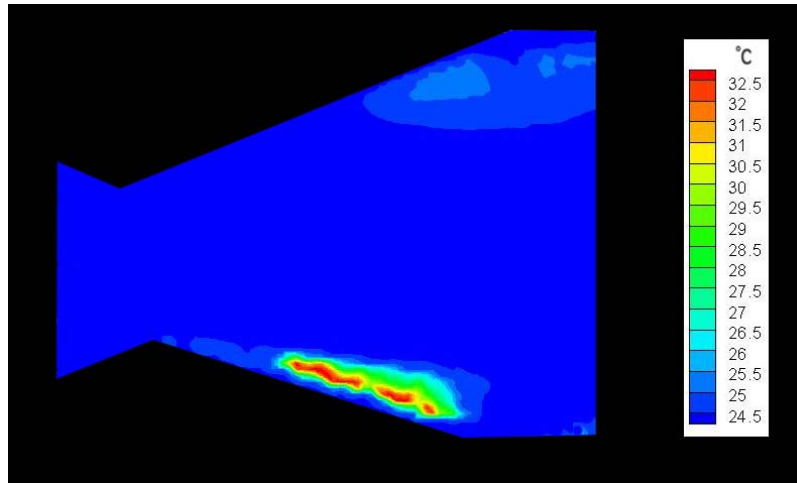
8γ₂) ΚΑΤΑΝΤΙ ΤΜΗΜΑ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $\Delta T = 36 - 20 \text{ }^\circ\text{C}$



Εικόνα 4.166: $t = 0 \text{ sec}$, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



Εικόνα 4.167: $t = 11 \text{ sec}$, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



Εικόνα 4.168: $t = 339$ sec, $Q = 1,54$ cm³ / sec, $T_{πλ.} = 36$ °C, $T_{δελ.} = 20$ °C, ΚΑΤΑΝΤΙ

Για $\Delta T = 4$ °C

Και στα δύο τμήματα του ακροφυσίου όλη σχεδόν η μάζα του ρευστού έχει ενιαία θερμοκρασία, κοντά στους 24,2 °C. Λόγω του χαμηλού ΔT σε συνδυασμό με τη μεγάλη ροή τα φαινόμενα του θερμικού οριακού στρώματος και του πλούμιου παρουσιάζονται πολύ εξασθενημένα. Έχουν, και τα δύο, θερμοκρασία ελαφρώς μεγαλύτερη από την υπόλοιπη μάζα του ρευστού. Το οριακό στρώμα, λόγω του χαμηλού ΔT , έχει μεγάλο πάχος και παρά τη μικρή του θερμοκρασία και τη μεγάλη παροχή είναι ευδιάκριτο στην αποτύπωση του θερμοκρασιακού πεδίου. Το πλούμιο εμφανίζεται να διατηρείται προσκολλημένο στη θερμαινόμενη πλάκα.

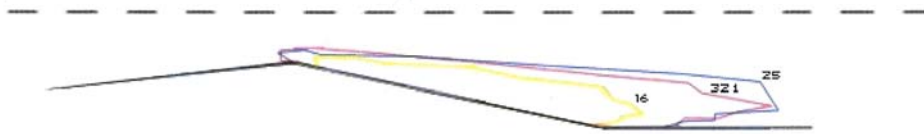
Και στα δύο τμήματα του ακροφυσίου φθάνουμε στη μόνιμη κατάσταση σε $t < 1$ min. Ο μικρός χρόνος που φθάνουμε στη μόνιμη κατάσταση φανερώνει ότι η μεταβατική περίοδος δε διαρκεί πολύ. Κατά τη διάρκεια αυτής οι περιοχές του θερμού ρευστού δε μεταβάλλονται ιδιαίτερα.

Για $\Delta T = 8$ °C

Στο συγκλίνον τμήμα, σε σύγκριση με την προηγούμενη υποκατηγορία της ίδιας περίπτωσης, αυξανόμενου του ΔT παρατηρείται εξαφάνιση του οριακού στρώματος. Όλο το ρευστό έχει σχεδόν ενιαία θερμοκρασία ίση με 24,1 °C.

Στο διαχύτη εμφανίζεται πλούμιο μεγαλύτερης θερμοκρασίας, σε σχέση με $\Delta T = 4$ °C, και μεγαλύτερου μήκους. Παρόλα αυτά λόγω μεγάλης παροχής είναι και σ' αυτήν την περίπτωση μικρού ύψους και προσκολλημένο στη θερμαινόμενη πλάκα. Στο video παρατηρούμε ότι στην άνω πλάκα εμφανίζεται μάζα θερμοκρασίας ελαφρώς μεγαλύτερης από αυτήν της κυρίως μάζας του ρευστού ($T = 24,5$ °C).

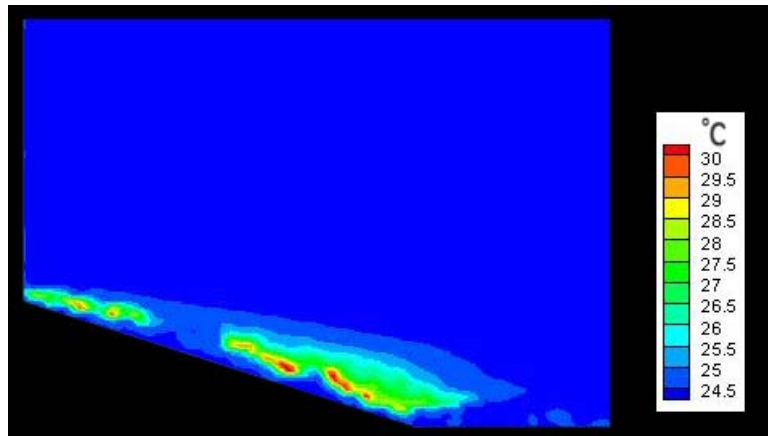
Σ' αυτό το τμήμα του ακροφυσίου περνάμε από τη μεταβατική στη μόνιμη κατάσταση σε χρόνο $t < 1$ min.



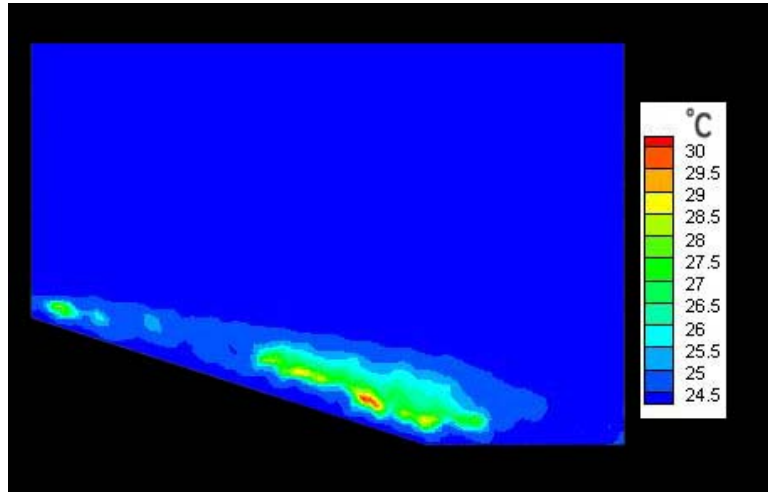
Εικόνα 4.169: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 25 °C για $t = 16, 25, 321 \text{ sec}$, $Re = 120$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$ στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

Η εικόνα 4.169 παριστά τις ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 25 °C για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t . Για όλες τις χρονικές στιγμές παρατηρούμε ότι το πεδίο αποτελεί μέρος του πλουμίου (εξωτερική στοιβάδα). Για $t = 16, 25 \text{ sec}$ συμπεραίνουμε ότι το πλούμιο μεγαλώνει κατά το πρώτο μισό της μεταβατικής περιόδου, ενώ κατά το δεύτερο ήμισυ μειώνεται ανεπαίσθητα. Έτσι, για $t = 321 \text{ sec}$, δηλαδή στη μόνιμη πλέον κατάσταση, το μέγεθος του πλουμίου εκτιμάται ως λίγο μικρότερο αυτού για $t = 25 \text{ sec}$. Αυτό συμφωνεί με τη γενική παρατήρηση ότι σε μεγάλες παροχές το μέγεθος του πλουμίου, στη μόνιμη κατάσταση, είναι ελαφρώς μικρότερο από το μέγιστο μέγεθος που αποκτά αυτό κατά τη μεταβατική περίοδο.

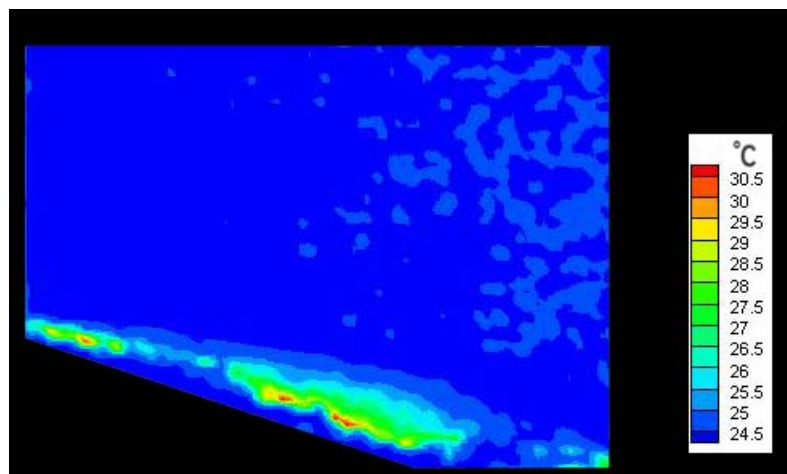
Οι παρακάτω εικόνες αποτυπώνουν το πλούμιο στη συγκεκριμένη περίπτωση, σε μεγέθυνση. Έτσι παρατηρούμε λεπτομερέστερα τα θερμοκρασιακά πεδία που το αποτελούν.



Εικόνα 4.170: $t = 344 \text{ sec}$, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\pi\lambda.} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\delta\epsilon\zeta.} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ΚΑΤΑΝΤΙ



Εικόνα 4.171: $t = 442 \text{ sec}$, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\text{πλ.}} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεξ.}} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI

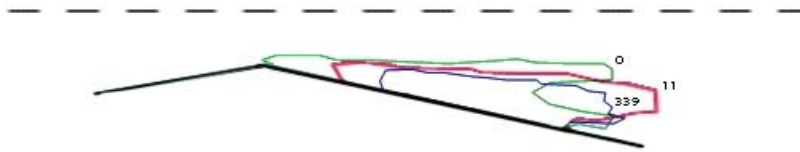


Εικόνα 4.172: $t = 452 \text{ sec}$, $Q = 1,54 \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $T_{\text{πλ.}} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεξ.}} = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$, KATANTI

Για $\Delta T = 16 \text{ }^\circ\text{C}$

Στο συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις για $\Delta T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$, με τη μόνη διαφορά ότι εδώ η ενιαία θερμοκρασία είναι $24,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Στην άνω πλάκα του διαχύτη σχηματίζεται θερμή μάζα με θερμοκρασία μεγαλύτερη απ' ότι για $\Delta T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$. Όπως και στις προηγούμενες υποκατηγορίες της ίδιας περίπτωσης το πλούμιο εμφανίζεται προσκολλημένο κατά μήκος της θερμαινόμενης πλάκας και σε σχέση με προηγούμενες περιπτώσεις μετατοπισμένο δεξιότερα. Το πλούμιο για $\Delta T = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία απ' ότι για $\Delta T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$. Όσον αφορά στο μήκος του είναι περίπου ίδιο, ενώ σε σχέση με το ύψος του παρατηρούμε ότι για $\Delta T = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ κατά τη μεταβατική περίοδο και για λίγα δευτερόλεπτα το πλούμιο ανασηκώνεται (ενώ για $\Delta T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$ όχι) προ του να προσκολληθεί στην θερμαινόμενη πλάκα, λόγω της υψηλής ροής. Αν εξαιρέσουμε τις θερμές περιοχές το υπόλοιπο ρευστό έχει ενιαία θερμοκρασία ίση με $24,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Ο χρόνος που φθάνουμε στη μόνιμη κατάσταση είναι $t < 2 \text{ min}$.

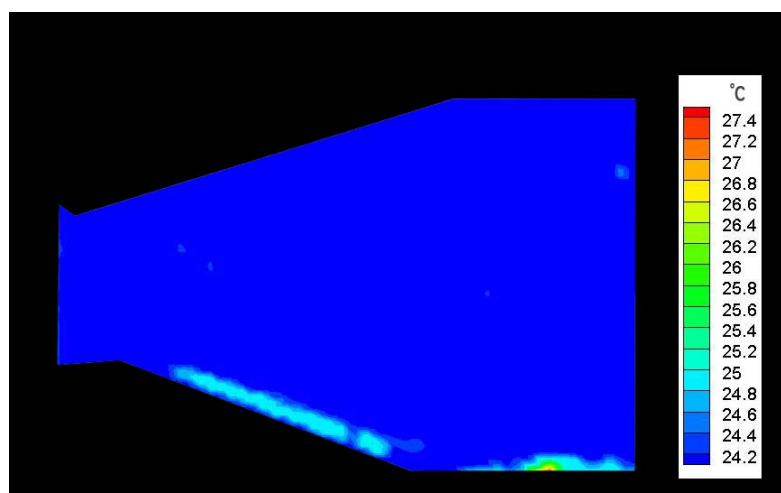


Εικόνα 4.173: Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των 25,5 °C για $t = 0, 11, 339 \text{ sec}$, $Re = 120$, $T_{\text{πλ.}} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{δεδ.}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου

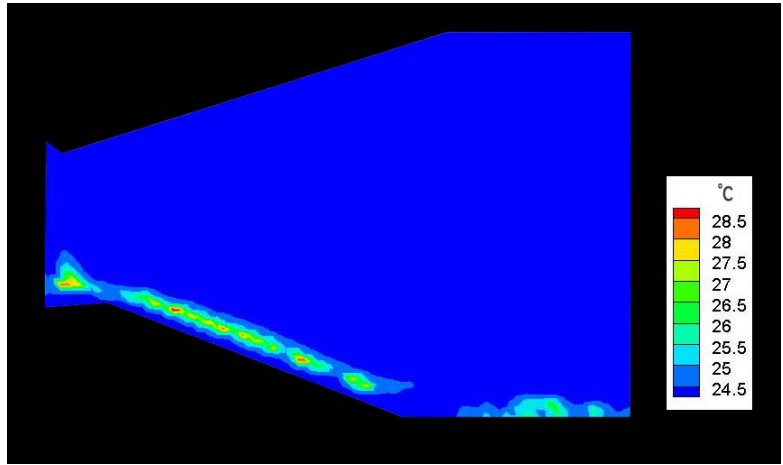
Η εικόνα 4.173 παριστά τα εξωτερικά περιγράμματα του θερμοκρασιακού πεδίου των 25,5 °C για τις εκάστοτε χρονικές στιγμές t . Το πεδίο είναι μέρος του πλούμιου για όλες τις χρονικές στιγμές t .

Επιπλέον, συμπεραίνουμε ότι για μεγάλες παροχές και μεγάλο ΔT το πλούμιο ανυψώνεται και επεκτείνεται πάνω στη μεταλλική πλάκα σχεδόν ακαριαία ($t = 0 \text{ sec}$) αλλά στη συνέχεια χάνει σε μήκος και σε ύψος ($t = 11 \text{ sec}$). Τέλος, για ακόμα μια φορά, παρατηρούμε ότι στη μόνιμη κατάσταση ($t = 339 \text{ sec}$) για μεγάλες παροχές το πλούμιο έχει λίγο μικρότερο μέγεθος από το μεγαλύτερο ($t = 0 \text{ sec}$) που αποκτά κατά τη μεταβατική περίοδο.

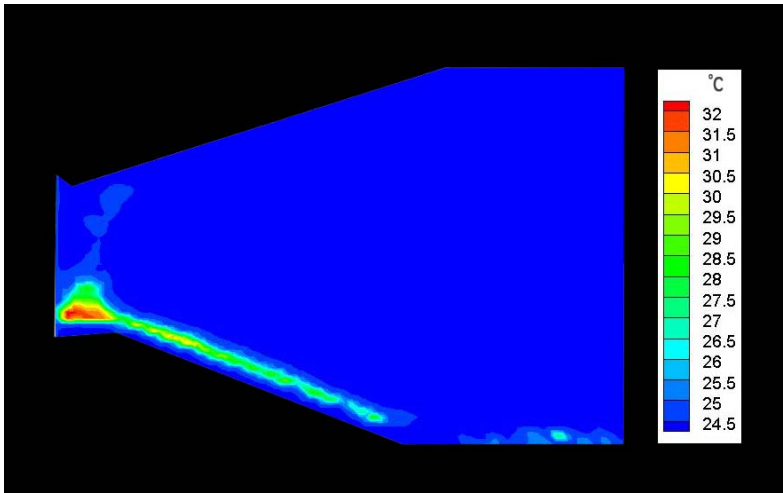
Οι παρακάτω εικόνες είναι 13 διαφορετικά στιγμιότυπα που απομονώθηκαν από video που πήραμε, για το τμήμα του διαχύτη, διατηρώντας σταθερές τις θερμοκρασίες θερμαινόμενης πλάκας και εισερχόμενου ψυχρού ρεύματος και μεταβάλλοντας μόνο την παροχή του τελευταίου. Η μεταβολή της παροχής δεν είναι γνωστή, ήταν όμως συνεχώς αυξανόμενη. Από τη μελέτη των εικόνων δε συνάγονται κάποια συγκεκριμένα συμπεράσματα, παίρνουμε όμως μια ιδέα για την εξελικτική πορεία του φαινομένου του πλούμιου αλλά και για τη γενικότερη κατάσταση στο διαχύτη αυξανόμενης της παροχής.



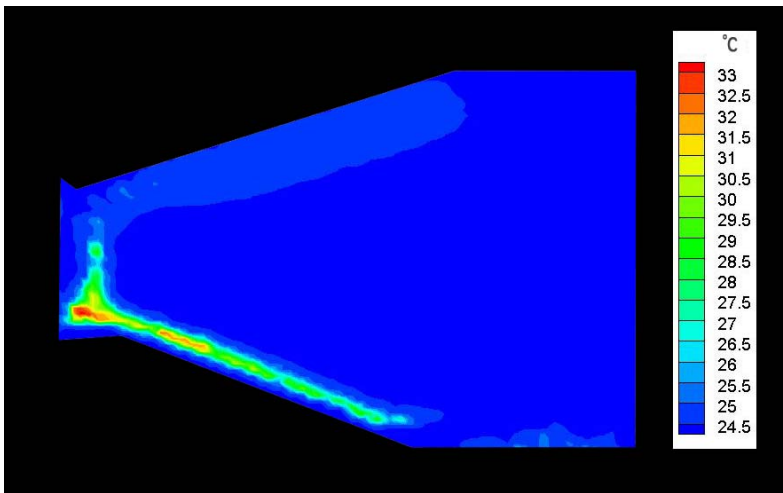
Εικόνα 4.174: $t = 15 \text{ sec}$, $T = \text{σταθ.}$, Q μεταβαλλόμενο, ΚΑΤΑΝΤΙ



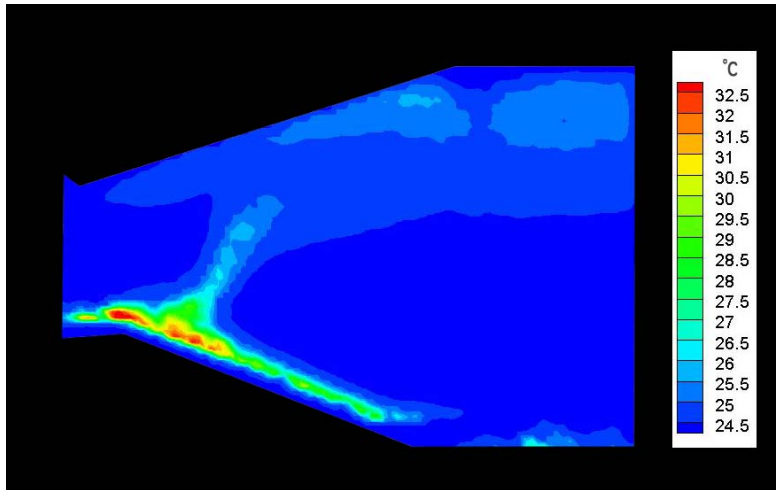
Εικόνα 4.175: $t = 28$ sec, $T = \text{σταθ.}$, Q μεταβαλλόμενο, ΚΑΤΑΝΤΙ



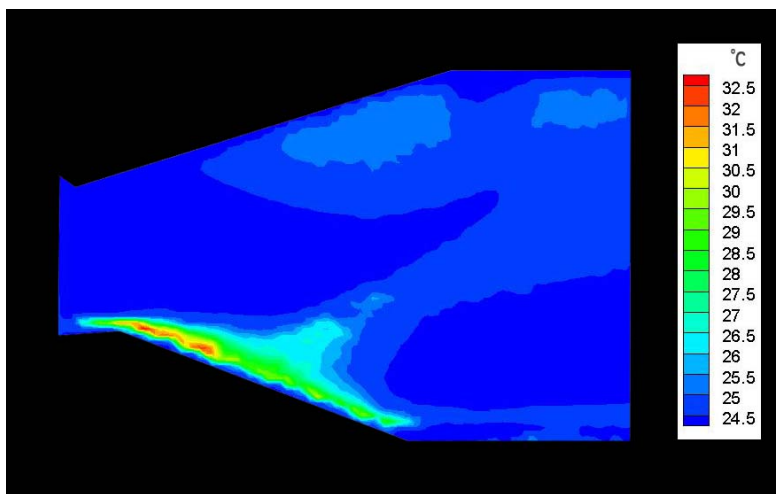
Εικόνα 4.176: $t = 36$ sec, $T = \text{σταθ.}$, Q μεταβαλλόμενο, ΚΑΤΑΝΤΙ



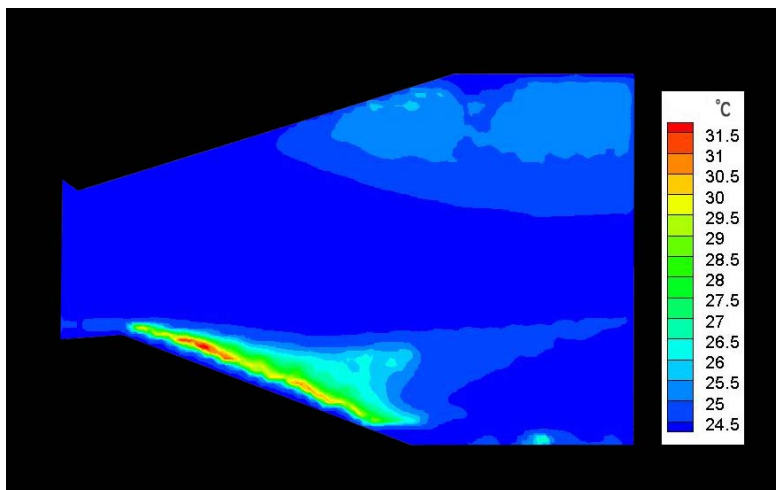
Εικόνα 4.177: $t = 63$ sec, $T = \text{σταθ.}$, Q μεταβαλλόμενο, ΚΑΤΑΝΤΙ



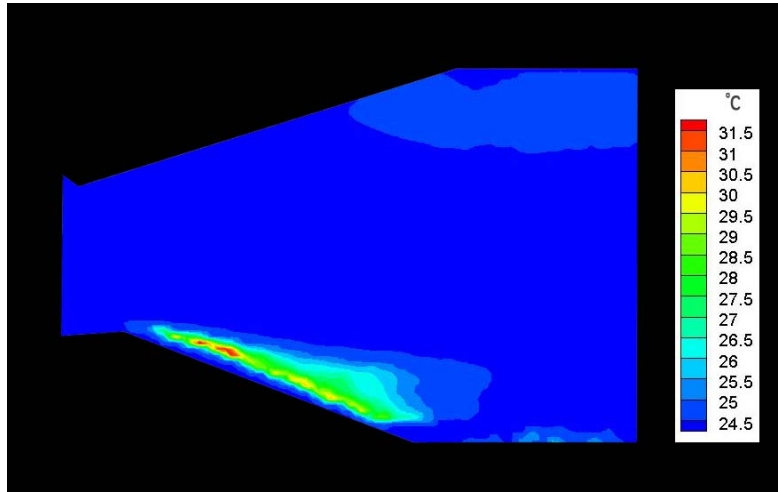
Εικόνα 4.178: $t = 94$ sec, $T = \text{σταθ.}$, Q μεταβαλλόμενο, ΚΑΤΑΝΤΙ



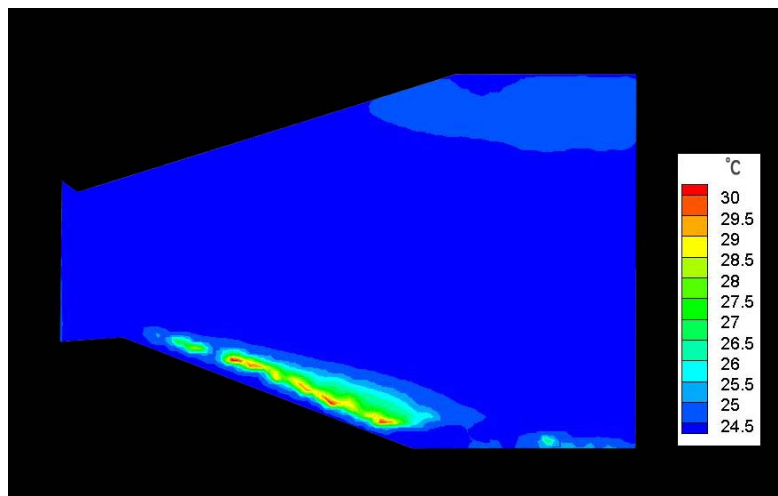
Εικόνα 4.179: $t = 128$ sec, $T = \text{σταθ.}$, Q μεταβαλλόμενο, ΚΑΤΑΝΤΙ



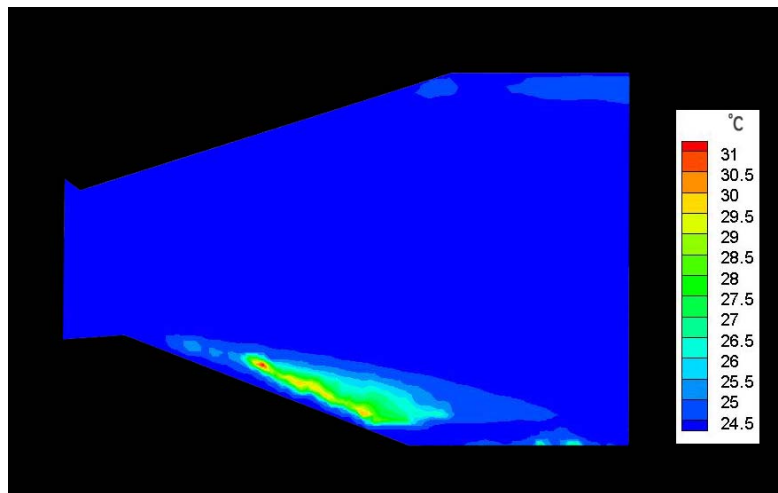
Εικόνα 4.180: $t = 165$ sec, $T = \text{σταθ.}$, Q μεταβαλλόμενο, ΚΑΤΑΝΤΙ



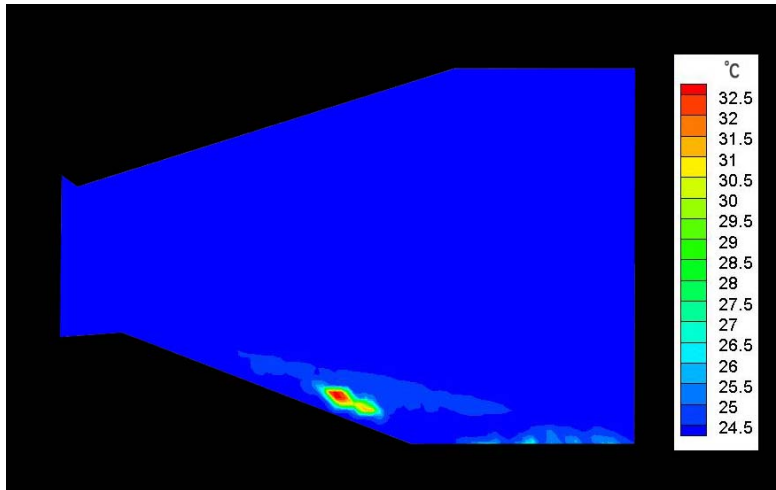
Εικόνα 4.181: $t = 287 \text{ sec}$, $T = \text{σταθ.}$, Q μεταβαλλόμενο, ΚΑΤΑΝΤΙ



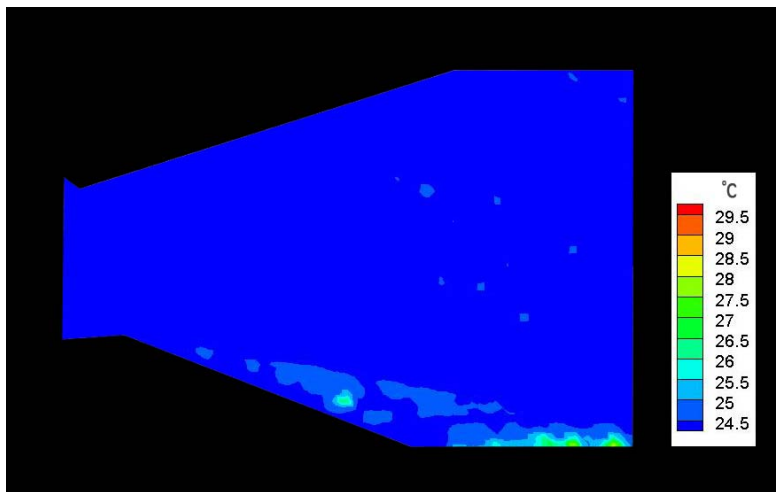
Εικόνα 4.182: $t = 345 \text{ sec}$, $T = \text{σταθ.}$, Q μεταβαλλόμενο, ΚΑΤΑΝΤΙ



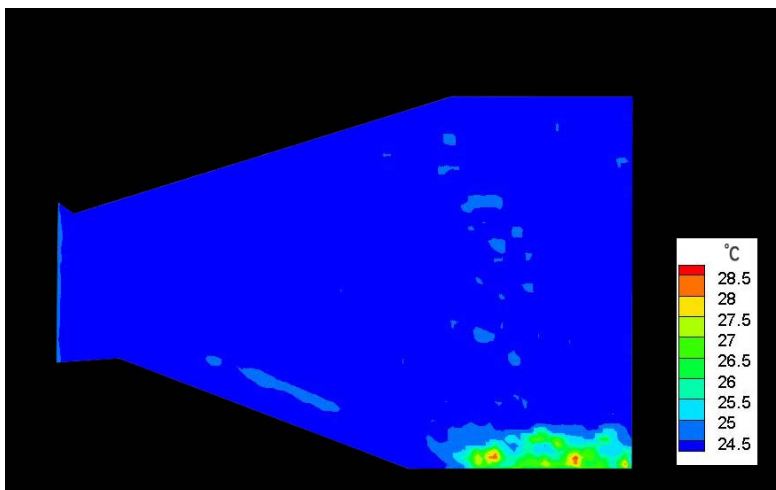
Εικόνα 4.183: $t = 362 \text{ sec}$, $T = \text{σταθ.}$, Q μεταβαλλόμενο, ΚΑΤΑΝΤΙ



Εικόνα 4.184: $t = 394$ sec, $T = \text{σταθ.}$, Q μεταβαλλόμενο, ΚΑΤΑΝΤΙ



Εικόνα 4.185: $t = 403$ sec, $T = \text{σταθ.}$, Q μεταβαλλόμενο, ΚΑΤΑΝΤΙ



Εικόνα 4.186: $t = 413$ sec, $T = \text{σταθ.}$, Q μεταβαλλόμενο, ΚΑΤΑΝΤΙ

Συμπεράσματα:

1. Αυξανόμενης της παροχής (για $Q \neq 0$) μειώνεται ο χρόνος που το θερμοκρασιακό πεδίο φθάνει στη μόνιμη κατάσταση. Συγκεκριμένα, αναφορικά με το χρόνο αυτό, στα δύο τμήματα του ακροφυσίου διαπιστώθηκε ότι για μηδενική παροχή είναι περίπου ο ίδιος. Για μικρές παροχές ($0 < Q \leq 0,05 \text{ cm}^3 / \text{sec}$) ο χρόνος είναι μεγαλύτερος στο ανάντι τμήμα του ακροφυσίου, ενώ αυξανόμενης περαιτέρω της παροχής ($0,05 < Q \leq 0,2 \text{ cm}^3 / \text{sec}$) στα δύο τμήματα ο χρόνος είναι πάλι ο ίδιος, φθάνοντας δε σε μεγαλύτερες παροχές ($Q > 0,2 \text{ cm}^3 / \text{sec}$) είναι μεγαλύτερος στο κατάντι τμήμα του ακροφυσίου.
2. Αυξανόμενης της παροχής παρατηρείται μείωση του πάχους του θερμικού οριακού στρώματος στο συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου. Στο ίδιο τμήμα, μειούμενης της ΔT (όπου ΔT η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ θερμαινόμενης πλάκας και αρχικής θερμοκρασίας του εισερχόμενου ρευστού) το πάχος του αυξάνεται. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ο αριθμός Gr είναι ανάλογος της ΔT , ενώ το πάχος του θερμικού οριακού στρώματος είναι αντιστρόφως ανάλογο του Gr ¹³.
3. Αυξανόμενης της παροχής εξασθενεί το φαινόμενο του πλουμίου, δηλαδή αυτό αποκτά μικρότερο ύψος, συμπιέζεται όλο και περισσότερο προς τη μεταλλική θερμαινόμενη πλάκα και μετατοπίζεται όλο και πιο κατάντι κατά μήκος της. Αυξανόμενης της ΔT παρατηρείται ενδυνάμωση του φαινομένου του πλουμίου, δηλαδή αυξάνουν οι διαστάσεις του και κατά την κατεύθυνση της (κύριας) ροής και εγκάρσια προς αυτήν.
4. Αυξανόμενης της παροχής διαπιστώνεται ελάττωση έως και εξαφάνιση της περιοχής ανακυκλοφορίας.
5. Αυξανόμενης της παροχής το ρεύμα εισόδου διατηρεί τη θερμοκρασία του σε όλο και μεγαλύτερο τμήμα του ακροφυσίου.
6. Στη μόνιμη κατάσταση για μικρές παροχές το θερμοκρασιακό πεδίο του διαχύτη είναι ομοιόμορφο σε αντίθεση με μεγαλύτερες παροχές που είναι ανομοιόμορφο.
7. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας του ρευστού στο αποκλίνον τμήμα του ακροφυσίου είναι μεγαλύτερος σε σχέση με εκείνον του συγκλίνοντος τμήματος.
8. Το θερμοκρασιακό πεδίο στο διαχύτη παρουσιάζει εν γένει υψηλότερες τιμές σε σχέση με το συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου (είσοδος).
9. Η εμφάνιση του πλουμίου στο διαχύτη και εν γένει η ύπαρξη μίας δευτερεύουσας ροής κατά τον κατακόρυφο άξονα διευκολύνει τη μεταφορά θερμότητας από τη θερμαινόμενη επιφάνεια προς το ρευστό.

¹³ Η σχέση αυτή των μεγεθών, με την παραδοχή ότι ισχύει για τη ροή σε κεκλιμένο επίπεδο ότι και κοντά σε κατακόρυφη πλάκα, επαληθεύεται μαθηματικά από τις σχέσεις: $y = n / b$, $b = [Gr_x / 4]^{1/4} x (1 / x)$, $Gr_x = (x^3 \times g \times \beta \times \Delta T) / \nu^2$.

Βιβλιογραφία

1. Φωτεινός Δημήτριος, “ Παρατήρηση υγροκρυσταλλικών φάσεων στο πολωτικό μικροσκόπιο ”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2004.
2. Φωτεινός Δημήτριος, “ Επιστήμη και τεχνολογία των υγροκρυσταλλικών υλικών ”, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2007.
3. Peter J. Collings, “ Liquid crystals: Nature’s delicate phase of matter ”, IOP Publishing Ltd, 1990.
4. P. G. De Gennes and J. Prost, “ The Physics of Liquid Crystals ”, Oxford Science Publications, 2nd edition, 1983.
5. “ Υγρός κρύσταλλος ”, el.wikipedia.org/wiki/Υγρός_κρύσταλλος.
6. Σταματόπουλος Χρήστος, “ Ταυτόχρονη μέτρηση ταχύτητας και θερμοκρασίας πεδίου ροής με χρήση υγρών κρυστάλλων ”, Πτυχιακή Εργασία, 2005.
7. Σταματόπουλος Χρήστος, “ Πειραματική και υπολογιστική μελέτη ροής σε μοντέλα αγγείων με παθοφυσιολογικά χαρακτηριστικά ”, Διδακτορική Διατριβή, 2010.
8. Ξενοφών Κ. Κακάτσιος, “ Μετάδοση θερμότητας ”, εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2^η έκδοση, 2004.
9. Σωκράτης Τσαγγάρης, “ Μηχανική των Ρευστών ”, εκδόσεις Συμεών, 2005
10. Δημήτριος Μαθιουλάκης, “ Μηχανική των ρευστών II ”, εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2006.
11. Anna G. ten Have, Erasmus B. G. T. Draaijers, Frank J. H. Gijzen, Jolanda J. Wentzel, Cornelis J. Slager, Patrick W. Serruys, Antonius F. W. van der Steen, “ Influence of catheter design on lumen wall temperature distribution in intracoronary thermography”, *Journal of Biomechanics*, 41, 281 - 288, 2007.
12. Χρυστίνα Α. Χρυσόχου, “ Επεμβατική προσέγγιση μελέτης αθηρωματικής πλάκας ”, *Καρδιολογικά θέματα*, 2003.
13. Brian K. Courtney, Mamoo Nakamura, Ross Tsigita, Rick Lilly, Rachna Basisht, Eberhard Grube, Yasuhiro Honda, Paul G. Yock and Peter J. Fitzgerald, “ Validation of a Thermographic Guidewire for Endoluminal Mapping of Atherosclerotic Disease: An In Vitro Study ”, *Catheterization and Cardiovascular Interventions*, 623, 221 - 229, 2009.
14. Axel Schmermund, Joerg Rodermann, Raimund Erbel, “ Intracoronary Thermography ”, *Herz*, 28, 509 - 512, 2003.
15. Mohammad Madjid, James T. Willerson, S. Ward Casscells, “ Intracoronary Thermography for Detection of High - Risk Vulnerable Plaques ”, *Journal of the American College of Cardiology*, Vol 47, No 8, suppl. C, 80 - 84, 2006.
16. C. W. Liu, C. Gau, “ Onset of secondary flow and enhancement of heat transfer in horizontal convergent and divergent channels heated from below ”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 5427 - 5438, 2004.
17. Hans Georg Heiland, Günter Wozniak, Kaus Wozniak, “ Flow and temperature field measurements of thermal convection in a small vertical gap using liquid crystals ”, *Heat Mass Transfer*, 43: 863 - 870, 2007.
18. Gustavo V. Guinea, Jose M. Atienza, Panayotis Fantidis, Francisco J. Rojo, Aranzazu Ortega, Monica Torres, Pablo Gonzalez, Margarita L. Elices, Kozaburo Hayashi and Manuel Elices, “ Increases of Corporal Temperature as a Risk Factor of Atherosclerotic Plaque Instability ”, *Annals of Biomedical Engineering*, Vol. 36, No. 1, pp. 66 - 76, 2007.

19. A. G. ten Have, F. J. H. Gijzen, J. J. Wentzel, C. J. Slager and A. F. W. van der Steen, “ Temperature distribution in atherosclerotic coronary arteries: influence of plaque geometry and flow (a numerical study) ”, *Phys. Med. Biol.* 49: 4447 - 4462, 2004.
20. Fumiyoshi Kimura, Tetsuji Yoshioka, Kenzo Kitamura, Manabu Yamaguchi and Toshihiko Asami, “ Fluid Flow and Heat Transfer of Natural Convection at a Slightly Inclined, Upward – Facing, Heated Plate ”, (www.intersciencewiley.com), 2002.
21. Peter Jeschke, Ralf Biertümpfel and Hans Beer, “ Liquid-crystal thermography for heat-transfer measurements in the presence of longitudinal vortices in a natural convection flow ”, *Meas. Sci. Technol.* 11 : 447 - 453, 2000.