



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ II: ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία  
του ΠΑΠΑΣΠΥΡΟΥ ΛΑΜΠΡΟΥ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ  
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΑΠΑΓΩΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ  
ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ  
ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Επιβλέποντες

ΑΝΔΡΕΑΣ Γ. ΜΠΟΥΝΤΟΥΒΗΣ

Καθηγητής ΕΜΠ

Δρ. ΗΛΙΑΣ ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ

Διευθυντής Ερευνών  
Εργαστήριο Ηλιακών και Άλλων  
Ενεργειακών Συστημάτων, ΕΚΕΦΕ  
«Δημόκριτος»

Αθήνα

Ιούλιος 2019



*Στον παππού μου, Λάμπρο*



*Out of the night that covers me,  
Black as the pit from pole to pole,  
I thank whatever gods may be  
For my unconquerable soul.*

*In the fell clutch of circumstance  
I have not winced nor cried aloud.  
Under the bludgeonings of chance  
My head is bloody, but unbowed.*

*Beyond this place of wrath and tears  
Looms but the Horror of the shade,  
And yet the menace of the years  
Finds and shall find me unafraid.*

*It matters not how strait the gate,  
How charged with punishments the scroll,  
I am the master of my fate,  
I am the captain of my soul.*

*Invictus by William Ernest Henley*



## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία, που σηματοδοτεί το τέλος των προπτυχιακών μου σπουδών και ενός μεγάλου και σημαντικού κεφαλαίου της ζωής μου, διεκπεραιώθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και με τη συνεργασία του Εργαστηρίου Ηλιακών και Άλλων Ενεργειακών Συστημάτων του ΕΚΕΦΕ 'Δημόκριτος'. Προτού ξεκινήσει η παρουσίαση του έργου που εκπονήθηκε, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω από καρδιάς, κάποια σημαντικά πρόσωπα, χωρίς τη βοήθεια των οποίων, δεν θα κατάφερνα να φέρω επιτυχώς εις πέρας, τις προπτυχιακές μου σπουδές.

Κατ' αρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συνοδοιπόρους μου σε αυτό το ταλαιπώρο αλλά εν τέλει ευχάριστο ταξίδι. Τους ανθρώπους που από συμφοιτητές, έγιναν φίλοι και από φίλοι, 'οικογένεια'. Αυτούς, που στάθηκαν δίπλα μου στις δύσκολες στιγμές, ακαδημαϊκές και προσωπικές, και με τη συνεχή τους στήριξη με βοήθησαν στο ακαδημαϊκό μου ταξίδι αλλά και στο ευρύτερο ταξίδι της ζωής. Ένα τεράστιο ευχαριστώ λοιπόν, στον Αντρέα, τον Νικόλα, τον Παναγιώτη, τη Μαργαρίτα, τον Βασίλη, την Κέλλυ και την Ηρώ. Χωρίς εσάς, οι ατελείωτες ώρες διαβάσματος, αλλά και οι πεπερασμένες στιγμές χαλάρωσης θα ήταν κατά πολύ λιγότερο διασκεδαστικές και εποικοδομητικές.

Ακολούθως, οφείλω επίσης ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ, στον καθηγητή, κ. Ανδρέα Μπουντουβή, στον διευθυντή ερευνών και προϊστάμενο του Εργαστηρίου Ηλιακών και Άλλων Ενεργειακών Συστημάτων, Δρ. Βασίλειο Μπελεσιώτη, καθώς και στον διευθυντή ερευνών του ίδιου εργαστηρίου, κ. Ηλία Παπανικολάου, που έδειξαν την απαραίτητη εμπιστοσύνη και που μου έδωσαν την ευκαιρία να εργαστώ πάνω σε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας.

Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ, θα ήθελα να δώσω στον κ. Παπανικολάου, ο οποίος κατά την εκπόνηση της εργασίας, ήταν πάντα διαθέσιμος και πρόθυμος να βοηθήσει με οποιαδήποτε απορία και πρόβλημα που είχε προκύψει. Επίσης, μέσω των συζητήσεών μας, κατάφερε χάρη στην εκτεταμένη του εμπειρία στον τομέα των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας, να καθοδηγήσει τον τρόπο σκέψης μου, ώστε να προκύψουν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην εν λόγω διπλωματική.

Ακόμα ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ, οφείλω στον κ. Μπουντουβή, ο οποίος πέρα από τις συμβουλές του σχετικά με την διεκπεραίωση της εργασίας αυτής, μου πρόσφερε πολύτιμες συμβουλές για την μετέπειτα πορεία μου και ήταν πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει με οποιοδήποτε πρόβλημα.

Θα ήθελα επίσης να προσφέρω ένα ευχαριστώ, στους παιδικούς μου φίλους, από την Κύπρο: Γιώργο, Νικόλα, Μάριο, Θεόδουλο, Χρύση, Αλέξανδρο και Χρήστο, που παρά το γεγονός ότι οι ακαδημαϊκοί μας δρόμοι μας οδήγησαν μακριά, η φίλια μας έχει παραμείνει και με έχει βοηθήσει σε αρκετά δύσκολες στιγμές.

Τελευταίο αλλά ίσως και το πιο σημαντικό ευχαριστώ, είναι αυτό που προσφέρω στην οικογένεια μου· τους γονείς μου, Σπύρο και Γεωργία, και στον αδερφό μου, Κωνσταντίνο. Τους ευχαριστώ για την ατελείωτη υπομονή τους, τη συνεχή στήριξη, υλική και ηθική, και για την ατέρμονη εμπιστοσύνη που μου έχουν δείξει καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Είμαι πραγματικά ευγνώμων, και ξανά, Σας Ευχαριστώ.



# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract.....	4
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	6
<b>1.1. Ηλιακά Συστήματα - Συλλέκτες</b> .....	6
<b>1.2. Μη Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα</b> .....	7
1.2.1. Επίπεδοι Συλλέκτες .....	7
1.2.2. Υβριδικοί ηλιοθερμικοί συλλέκτες (Photovoltaic thermal hybrid - PVT).....	9
1.2.3. Ενισχυμένοι και διπλής όψεως υβριδικοί ηλιοθερμικοί συλλέκτες .....	10
<b>1.3. Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα</b> .....	12
1.3.1. Συλλέκτες επίπεδης απορροφητικής επιφάνειας .....	12
1.3.2. Γραμμικός συλλέκτης με ανακλαστήρες τύπου Fresnel (linear Fresnel solar collector).....	13
1.3.3. Συλλέκτες τύπου παραβολικής σκάφης (parabolic-trough collector).....	14
1.3.4. Συλλέκτες με παραβολικό πιάτο (parabolic dish) .....	16
1.3.5. Συλλέκτες κεντρικού δέκτη (power tower/central receiver) .....	17
<b>1.4. Διατάξεις Απαγωγής Θερμότητας</b> .....	19
1.4.1. Ευθύγραμμα και παράλληλα κανάλια με τετράγωνη, τρίγωνη και τραπεζοειδή διατομή .....	20
1.4.2. Κανάλια με μετατοπισμένα/διακοπτόμενα πτερύγια.....	22
1.4.3. Ευθύγραμμα κανάλια ορθογωνικής διατομής με διαταρασόμενη ροή.....	24
1.4.4. Κυματοειδή κανάλια .....	25
1.4.5. Ζγκ-Ζαγκ, καμπυλωτά και βηματικά κανάλια .....	27
1.4.6. Ευθύγραμμα αντιπαράλληλα κανάλια σε δύο επίπεδα .....	28
1.4.7. Στοιβαγμένα ευθύγραμμα παράλληλα κανάλια σε 3 ως και 5 επίπεδα .....	29
1.4.8. Σωλήνες τύπου μαιάνδρου.....	30
<b>1.5. Διακλαδούμενο δίκτυο καναλιών και δομικός νόμος (constructal law)</b> .....	33
1.5.1. Διακλαδούμενο δίκτυο καναλιών .....	33
1.5.2. Δομικός νόμος .....	35
1.5.3. Μελέτες με εφαρμογή διακλαδούμενου δικτύου καναλιών .....	39
<b>1.6. Διαστασιολόγηση διακλαδούμενου δικτύου καναλιών της παρούσας διερεύνησης</b> .....	47

<b>Κεφάλαιο 2: Μαθηματική Μοντελοποίηση και Αριθμητικές Μέθοδοι</b> .....	51
<b>2.1. Εισαγωγή</b> .....	51
<b>2.2. Μαθηματικό Μοντέλο</b> .....	52
2.2.1. Εξίσωση Navier-Stokes.....	52
2.2.2. Εξίσωση Συνέχειας .....	53
2.2.3. Εξίσωση Ενέργειας .....	53
<b>2.3. Αριθμητικές Μέθοδοι Επίλυσης Διαφορικών Εξισώσεων</b> .....	55
2.3.1. Αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων .....	55
<b>Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα Βασικών Δομών Προβλήματος</b> .....	60
<b>3.1. Εισαγωγή</b> .....	60
<b>3.2. Μελέτη Ανεξαρτησίας Λύσης Από Το Πλέγμα</b> .....	62
<b>3.2. Επαλήθευση Αποτελεσμάτων</b> .....	67
<b>3.3. Υδροδυναμική Συμπεριφορά</b> .....	70
<b>3.4. Θερμική Συμπεριφορά</b> .....	95
<b>Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Διάταξης Διακλαδούμενων Καναλιών</b> .....	103
<b>4.1. Εισαγωγή</b> .....	103
<b>4.2. Υδροδυναμική συμπεριφορά</b> .....	106
<b>4.3. Θερμική Συμπεριφορά</b> .....	114
<b>4.4. Σύγκριση διατάξεων διακλαδούμενων καναλιών</b> .....	118
<b>4.5. Πλήρης γεωμετρία με δύο αντιπαράλληλες δενδριτικές διατάξεις</b> .....	131
<b>Κεφάλαιο 5: Σύγκριση Διάταξης Διακλαδούμενων Καναλιών Με Άλλες Διατάξεις Απαγωγής Θερμότητας</b> .....	137
<b>5.1. Εισαγωγή</b> .....	137
<b>5.2. Υδροδυναμική και θερμική συμπεριφορά διάταξης μαιάνδρου</b> .....	138
<b>5.3. Υδροδυναμική και θερμική συμπεριφορά διάταξης ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών</b> .....	144
<b>5.4. Σύγκριση δενδριτικών διατάξεων με μαιάνδρο και ευθύγραμμο παράλληλα κανάλια</b> .....	147
<b>Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα</b> .....	151
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	156

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. 1: Σχηματική αναπαράσταση ηλιακού συλλέκτη με αγωγό σχήματος U και πορώδες υλικό στο δεύτερο πέρασμα [2] .....	9
Σχήμα 1. 2: Διατομή, διευρυμένη εικόνα και ολοκληρωμένη διάταξη συστήματος PVT [7].....	10
Σχήμα 1. 3: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης υβριδικού συστήματος PVT διπλής όψεως [10] .....	11
Σχήμα 1. 4: Σχηματική αναπαράσταση συγκεντρωτικού συλλέκτη επίπεδης απορροφητικής επιφάνειας .....	13
Σχήμα 1. 5: (α) Διδιάστατη [14] και (β) τριδιάστατη [13] σχηματική αναπαράσταση γραμμικού συλλέκτη με ανακλαστήρες τύπου Fresnel.....	14
Σχήμα 1. 6: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης συλλέκτη με παραβολική σκάφης [16] .....	15
Σχήμα 1. 7: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης ηλιακού συλλέκτη με παραβολικό πιάτο [17].....	16
Σχήμα 1. 8: Αναπαράσταση συλλέκτη κεντρικού δέκτη και πεδίου ηλιοστάτων .....	18
Σχήμα 1. 9: Σχηματική αναπαράσταση (α) διάταξης ευθύγραμμων και παράλληλων καναλιών με (β) τετράγωνη, τριγωνική και τραπεζοειδή διατομή [21].....	21
Σχήμα 1. 10: Σχηματική αναπαράσταση της (α) ολοκληρωμένης διάταξης των μετατοπισμένων λωρίδων πτερυγίων, (β) της βασικής δομικής μονάδας της ολοκληρωμένης γεωμετρίας και (γ) της κάθετης διατομής ως προς την κύρια διεύθυνση της ροής της δομικής μονάδας [23] .....	23
Σχήμα 1. 11: Σχηματική αναπαράσταση των ευθύγραμμων καναλιών ορθογωνικής διατομής με διαταρασσομένη ροή [24] .....	25
Σχήμα 1. 12: Σχηματική αναπαράσταση κυματοειδούς καναλιού [25] .....	26
Σχήμα 1. 13: Παράδειγμα κυματοειδών καναλιών με (α) σταθερό μήκος κύματος (β) φθίνων μήκος κύματος και (γ) συνδυασμός μεγάλου και μικρού μήκους κύματος [25]	26
Σχήμα 1. 14: Σχηματική αναπαράσταση (α) ολοκληρωμένης διάταξης (β) καναλιών ζιγκ-ζαγκ (γ) κυρτών καναλιών (δ) βηματικών καναλιών [27] .....	27
Σχήμα 1. 15: Σχηματική αναπαράσταση ευθύγραμμων αντιπαράλληλων καναλιών [28] .....	29
Σχήμα 1. 16: Σχηματική αναπαράσταση ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών για διάταξη 4 στοιβαγμένων επιπέδων .....	30
Σχήμα 1. 17: Σχηματική αναπαράσταση καναλιών τύπου μαιάνδρου [30] .....	31
Σχήμα 1. 18: Τριδιάστατη αναπαράσταση πλήρους γεωμετρίας διακλαδούμενων καναλιών με 4 επίπεδα διακλάδωσης.....	33
Σχήμα 1. 19: Διατάξεις ροών που προκύπτουν βάσει του δομικού νόμου [32] .....	36
Σχήμα 1. 20: Λόγος τοπικής προς κατανεμημένης πτώσης πίεσης συναρτήσει της λυγρότητας για διάφορους αριθμούς Re [32] .....	38

Σχήμα 1. 21: Σχηματική αναπαράσταση της κατανομής της ταχύτητας σε διδιάστατη γεωμετρία διακλαδούμενων καναλιών με γωνίες διακλάδωσης ( $\alpha$ ) $\alpha=30^\circ$ ( $\beta$ ) $\alpha=45^\circ$ ( $\gamma$ ) $\alpha=75^\circ$ ( $\delta$ ) $\alpha=90^\circ$ [36] .....	39
Σχήμα 1. 22: Αδιάστατη μέση ταχύτητα σε κάθε κανάλι εξόδου για τις διάφορες γωνίες διακλάδωσης [36] .....	40
Σχήμα 1. 23: Διαγράμματα $\beta(\%)$ και $\xi(\%)$ συναρτήσει της γωνίας διακλάδωσης ( $\alpha$ ) [36]	41
Σχήμα 1. 24: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης διακλαδούμενου δικτύου καναλιών με πολλαπλές δενδριτικές μονάδες διαταγμένες αντιπαράλληλα [37] .....	42
Σχήμα 1. 25: Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της κάτω επιφάνειας και του ρευστού για διάταξη με 2 επίπεδα διακλάδωσης και 4 δενδριτικές διατάξεις [37] .....	43
Σχήμα 1. 26: Πτώση πίεσης σε διακλάδωση T γωνίας $90^\circ$ και με κύρτωμα για διάφορους αριθμούς Re και αναπαράσταση της δευτερογενούς ροής που προκύπτει μετά τη διακλάδωση [38] .....	44
Σχήμα 1. 27: Αριθμός Nusselt κατά μήκος διακλάδωσης T και συνεχόμενης γωνιάς $90^\circ$ για βέλτιστη μεταφορά θερμότητας και πτώσης πίεσης για μεταβλητές και αμετάβλητες ιδιότητες ρευστού .....	45
Σχήμα 1. 28: Πειραματική διάταξη διακλαδούμενων καναλιών χαραγμένα σε πλάκα χαλκού [39] .....	46
Σχήμα 1. 29: Πεδίο θερμοκρασίας στην πάνω επιφάνεια της τριδιάστατης διάταξης για εργαζόμενο ρευστό ( $\alpha$ ) υδρατμό ( $\beta$ ) αέρα [39] .....	47
Σχήμα 1. 30: Διαστασιολόγηση διάταξης διακλαδούμενων καναλιών .....	49
Σχήμα 2. 1: Αναπαράσταση ( $\alpha$ ) διακριτοποίησης τριδιάστατης γεωμετρίας με ελεύθερο τετραεδρικό πλέγμα και ( $\beta$ ) τετραεδρικού στοιχείου $i$ .....	57
Σχήμα 3. 1: Αγωγός τύπου ( $\alpha$ ) γωνιάς $90^\circ$ και ( $\beta$ ) διακλάδωσης T .....	61
Σχήμα 3. 2: Επίπεδο συμμετρίας διακλάδωσης τύπου T .....	62
Σχήμα 3. 3: Αναπαράσταση σημείων υπολογισμού ταχύτητας σε κάθε πλέγμα .....	63
Σχήμα 3. 4: Μέση ποσοστιαία απόκλιση (% M.D) συναρτήσει αριθμού στοιχείων πλέγματος για εύρος αριθμών Reynolds στη διακλάδωση τύπου T .....	64
Σχήμα 3. 5: Μέση ποσοστιαία απόκλιση (% M.D) συναρτήσει αριθμού στοιχείων πλέγματος για εύρος αριθμών Reynolds στον αγωγό γωνιάς $90^\circ$ .....	66
Σχήμα 3. 6: Σχηματική αναπαράσταση ευθύγραμμου καναλιού τετραγωνικής διατομής με σταθερή θερμοροή στα τοιχώματα και συμμετρία στα επίπεδα $xy$ και $zx$ που περνούν από το κέντρο του αγωγού .....	67
Σχήμα 3. 7: Αριθμός Nusselt συναρτήσει του αριθμού Graetz για ευθύγραμμο κανάλι και συνοριακές συνθήκες H2 .....	70
Σχήμα 3. 8: Γραμμές πάνω στις οποίες υπολογίζεται η αδιάστατη πτώση πίεσης .....	71
Σχήμα 3. 9: Αδιάστατη πτώση πίεσης στο κέντρο του αγωγού κατά μήκος της ροής.....	72
Σχήμα 3. 10: Αδιάστατη πτώση πίεσης στο εσωτερικό τοίχωμα του αγωγού κατά μήκος της ροής.....	72

Σχήμα 3. 11: Αδιάστατη πτώση πίεσης στο εξωτερικό τοίχωμα του αγωγού κατά μήκος της ροής.....	73
Σχήμα 3. 12: Ροϊκές γραμμές στον αγωγό διακλάδωσης T και μεγέθυνση του σημείου πρόσκρουσης του ρευστού για $Re=350$ .....	74
Σχήμα 3. 13: Αδιάστατη ταχύτητα και διανυσματικά τόξα των συνιστωσών $u_x$ και $u_z$ της ταχύτητας σε επίπεδο $xz$ στο $\gamma=0.5$ (μέσο αγωγού) για $Re=350$ .....	75
Σχήμα 3. 14: Κανονικοποιημένη ελικότητα σε επίπεδα $yz$ μετά τη διακλάδωση σε αγωγό T για αριθμούς Reynolds ( $\alpha$ ) $Re=100$ ( $\beta$ ) $Re=150$ ( $\gamma$ ) $Re=200$ ( $\delta$ ) $Re=250$ ( $\epsilon$ ) $Re=300$ ( $\sigma$ ) $Re=350$ .....	77
Σχήμα 3. 16: Ροϊκές γραμμές σε επίπεδο $yz$ κάθετο στη κύρια κατεύθυνση της ροής μετά τη διακλάδωση στο σημείο $x = 2$ cm για αριθμούς Reynolds ( $\alpha$ ) $Re=100$ ( $\beta$ ) $Re=150$ ( $\gamma$ ) $Re=200$ ( $\delta$ ) $Re=250$ ( $\epsilon$ ) $Re=300$ ( $\sigma$ ) $Re=350$ (ποιοτική απεικόνιση : πυκνότητα γραμμών ροής ανεξάρτητη της έντασης της ανακυκλοφορίας).....	80
Σχήμα 3. 17: Κανονικοποιημένες ισοεπιφάνειες κριτηρίου Q και ροϊκές γραμμές για αριθμούς Reynolds: ( $\alpha$ ) $Re=100$ και $Q_{max} = 25 s - 2$ ( $\beta$ ) $Re=150$ και $Q_{max} = 126 s - 2$ ( $\gamma$ ) $Re=200$ και $Q_{max} = 450 s - 2$ .....	84
Σχήμα 3. 18: Κανονικοποιημένες ισοεπιφάνειες κριτηρίου Q και ροϊκές γραμμές για αριθμούς Reynolds: ( $\alpha$ ) $Re=250$ και $Q_{max} = 1050 s - 2$ ( $\beta$ ) $Re=300$ και $Q_{max} = 1500 s - 2$ ( $\gamma$ ) $Re=350$ και $Q_{max} = 3000 s - 2$ .....	85
Σχήμα 3. 19: Ροϊκές γραμμές για $Re=350$ και γραμμές πάνω στις οποίες υπολογίζεται η αδιάστατη πτώση πίεσης στον αγωγό γωνίας $90^\circ$ .....	86
Σχήμα 3. 19: Κανονικοποιημένη ταχύτητα και διανυσματικά τόξα σε $xz$ επίπεδο στο $\gamma=0.5$ στον αγωγό γωνίας $90^\circ$ για $Re=350$ .....	87
Σχήμα 3. 21: Αδιάστατη πτώση πίεσης στο κέντρο του αγωγού κατά μήκος της ροής... ..	88
Σχήμα 3. 22: Αδιάστατη πτώση πίεσης στο εσωτερικό τοίχωμα του αγωγού κατά μήκος της ροής.....	88
Σχήμα 3. 23: Αδιάστατη πτώση πίεσης στο εξωτερικό τοίχωμα του αγωγού κατά μήκος της ροής.....	89
Σχήμα 3. 24: Κανονικοποιημένη ελικότητα σε επίπεδα $xy$ μετά τη γωνία $90^\circ$ για αριθμούς Reynolds ( $\alpha$ ) $Re=50$ ( $\beta$ ) $Re=100$ ( $\gamma$ ) $Re=150$ ( $\delta$ ) $Re=200$ ( $\epsilon$ ) $Re=250$ ( $\sigma$ ) $Re=300$ ( $\zeta$ ) $Re=350$ .....	90
Σχήμα 3. 25: Κανονικοποιημένες ισοεπιφάνειες κριτηρίου Q και ροϊκές γραμμές για αριθμούς Reynolds: ( $\alpha$ ) $Re=50$ και $Q_{max} = 0.75 s - 2$ ( $\beta$ ) $Re=100$ και $Q_{max} = 7.5 s - 2$ ( $\gamma$ ) $Re=150$ και $Q_{max} = 80 s - 2$ : ( $\delta$ ) $Re=200$ και $Q_{max} = 240 s - 2$ ( $\epsilon$ ) $Re=250$ και $Q_{max} = 420 s - 2$ ( $\sigma$ ) $Re=300$ και $Q_{max} = 620 s - 2$ ( $\zeta$ ) $Re=350$ και $Q_{max} = 850 s - 2$ .....	92
Σχήμα 3. 26: Σχηματική αναπαράσταση αλλαγής θέσης της δίνης κατά μήκος της ροής για $Re=350$ στη διακλάδωση T .....	93
Σχήμα 3. 27: Σχηματική αναπαράσταση της μετατόπισης της δίνης από το εξωτερικό προς το εσωτερικό τοίχωμα κατά μήκος της ροής βάσει του κριτηρίου Q για $Re=250$ ..	94

Σχήμα 3. 28: Σχηματική αναπαράσταση βασικών γεωμετρικών δομών, ενσωματωμένων σε πλάκα αλουμινίου .....	95
Σχήμα 3. 29: Κανονικοποιημένη θερμοκρασία σε επίπεδα yz μετά τη διακλάδωση σε αγωγό T για αριθμούς Reynolds (α) Re=100 (β) Re=150 (γ) Re=200 (δ) Re=250 (ε) Re=300 (στ) Re=350.....	96
Σχήμα 3. 30: Κανονικοποιημένη θερμοκρασία σε επίπεδα xy μετά τη γωνία 90° για αριθμούς Reynolds (α) Re=50 (β) Re=100 (γ) Re=150 (δ) Re=200 (ε) Re=250 (στ) Re=300 (ζ) Re=350.....	97
Σχήμα 3. 31: Θερμοκρασία και μεγέθυνση με διανυσματικά τόξα σε επίπεδο xz στο $y=0.5$ cm στη διακλάδωση T για Re=350.....	99
Σχήμα 3. 32: Θερμοκρασία και μεγέθυνση με διανυσματικά τόξα σε xz επίπεδο στο $y=0.5$ cm στον αγωγό γωνίας 90° για Re=350.....	99
Σχήμα 3. 33: Αριθμός Nusselt κατά μήκος της ροής στη διακλάδωση T .....	101
Σχήμα 3. 34: Αριθμός Nusselt κατά μήκος της ροής σε αγωγό γωνίας 90° .....	102
Σχήμα 4. 1: Τριδιάστατες διατάξεις διακλαδούμενων καναλιών, συμμετρικές ως προς την αριστερή yz επιφάνεια με τρία επίπεδα και γωνία διακλάδωσης: (α) $\theta=90^\circ$ (β) $\theta=80^\circ$ (γ) $\theta=70^\circ$ (δ) $\theta=60^\circ$ (ε) $\theta=50^\circ$ (στ) $\theta=40^\circ$ (ζ) $\theta=30^\circ$ .....	104
Σχήμα 4. 2: Τριδιάστατες διατάξεις διακλαδούμενων καναλιών, συμμετρικές ως προς την αριστερή yz επιφάνεια με τέσσερα επίπεδα και γωνία διακλάδωσης: (α) $\theta=90^\circ$ (β) $\theta=80^\circ$ (γ) $\theta=70^\circ$ (δ) $\theta=60^\circ$ (ε) $\theta=50^\circ$ (στ) $\theta=40^\circ$ (ζ) $\theta=30^\circ$ .....	105
Σχήμα 4. 3: Αναπαράσταση της αδιάστατης πτώσης πίεσης κατά μήκος του (α) εξωτερικού τοιχώματος (β) του κέντρου του καναλιού και (γ) της πορείας πάνω στην οποία υπολογίζεται η αδιάστατη πτώση πίεσης σε κάθε περίπτωση .....	107
Σχήμα 4. 4: Πεδίο ταχύτητας και μεγέθυνση του πεδίου ταχύτητας (δεξιά) και του πεδίου θερμοκρασίας (αριστερά) στη διάταξη γωνίας διακλάδωσης 30° και τριών επιπέδων.....	109
Σχήμα 4. 5: Αδιάστατη πτώση πίεσης κατά μήκος του εξωτερικού τοιχώματος της δενδριτικής διάταξης για 3 επίπεδα και γωνίες διακλάδωσης: (α) $\theta=90^\circ$ (β) $\theta=80^\circ$ (γ) $\theta=70^\circ$ (δ) $\theta=60^\circ$ (ε) $\theta=50^\circ$ (στ) $\theta=40^\circ$ (ζ) $\theta=30^\circ$ .....	110
Σχήμα 4. 6: Αδιάστατη πτώση πίεσης κατά μήκος του κέντρου των καναλιών της δενδριτικής διάταξης για 3 επίπεδα και γωνίες διακλάδωσης: (α) $\theta=90^\circ$ (β) $\theta=80^\circ$ (γ) $\theta=70^\circ$ (δ) $\theta=60^\circ$ (ε) $\theta=50^\circ$ (στ) $\theta=40^\circ$ (ζ) $\theta=30^\circ$ .....	111
Σχήμα 4. 7: Αδιάστατη πτώση πίεσης κατά μήκος του εξωτερικού τοιχώματος της δενδριτικής διάταξης για 4 επίπεδα και γωνίες διακλάδωσης: (α) $\theta=90^\circ$ (β) $\theta=80^\circ$ (γ) $\theta=70^\circ$ (δ) $\theta=60^\circ$ (ε) $\theta=50^\circ$ (στ) $\theta=40^\circ$ (ζ) $\theta=30^\circ$ .....	112
Σχήμα 4. 8: Αδιάστατη πτώση πίεσης κατά μήκος του κέντρου των καναλιών της δενδριτικής διάταξης για 4 επίπεδα και γωνίες διακλάδωσης: (α) $\theta=90^\circ$ (β) $\theta=80^\circ$ (γ) $\theta=70^\circ$ (δ) $\theta=60^\circ$ (ε) $\theta=50^\circ$ (στ) $\theta=40^\circ$ (ζ) $\theta=30^\circ$ .....	113
Σχήμα 4. 9: Αναπαράσταση διαδρομής κατά την οποία υπολογίζεται και απεικονίζεται ο αριθμός Nusselt στα αντίστοιχα διαγράμματα .....	115

Σχήμα 4. 10: Αριθμός Nusselt κατά μήκος της ροής των διακλαδούμενων καναλιών της πλήρους γεωμετρίας για τρία επίπεδα και για γωνίες διακλάδωσης: (α) $\theta=90^\circ$ (β) $\theta=80^\circ$ (γ) $\theta=70^\circ$ (δ) $\theta=60^\circ$ (ε) $\theta=50^\circ$ (στ) $\theta=40^\circ$ (ζ) $\theta=30^\circ$ .....	116
Σχήμα 4. 11: Αριθμός Nusselt κατά μήκος της ροής των διακλαδούμενων καναλιών της πλήρους γεωμετρίας για τέσσερα επίπεδα και για γωνίες διακλάδωσης: (α) $\theta=90^\circ$ (β) $\theta=80^\circ$ (γ) $\theta=70^\circ$ (δ) $\theta=60^\circ$ (ε) $\theta=50^\circ$ (στ) $\theta=40^\circ$ (ζ) $\theta=30^\circ$ .....	117
Σχήμα 4. 12: Κανονικοποιημένη θερμοκρασία για (α) 3 επίπεδα και $\theta=60^\circ$ (β) 4 επίπεδα και $\theta=50^\circ$ .....	123
Σχήμα 4. 13: Δείκτης απόδοσης συναρτήσει της γωνία διακλάδωσης για 3 επίπεδα διακλάδωσης .....	126
Σχήμα 4. 14: Δείκτης απόδοσης συναρτήσει της γωνίας διακλάδωσης για 4 επίπεδα διακλάδωσης .....	126
Σχήμα 4. 15: Δείκτης απόδοσης συναρτήσει της γωνία διακλάδωσης για 3 επίπεδα διακλάδωσης και $E = 3$ .....	130
Σχήμα 4. 16: Δείκτης απόδοσης συναρτήσει της γωνία διακλάδωσης για 4 επίπεδα διακλάδωσης και $E = 3$ .....	130
Σχήμα 4. 17: Σχηματική αναπαράσταση τριδιάστατων αντιπαράλληλων διακλαδούμενων καναλιών με τις βέλτιστες μονάδες για (α) 3 επίπεδα και (β) 4 επίπεδα διακλάδωσης .....	131
Σχήμα 4. 18: Αδιάστατη πτώση πίεσης πολλαπλασιασμένη με τον αριθμό Reynolds στη διάταξη αντιπαράλληλων διακλαδούμενων καναλιών για αριθμούς Reynolds 75 (μπλε γραμμή) και 150 (πορτοκαλί γραμμή) στο (α) κέντρο του αγωγού – 3 επίπεδα διακλάδωσης (β) εξωτερικό τοίχωμα – 3 επίπεδα διακλάδωσης (γ) κέντρο του αγωγού – 4 επίπεδα διακλάδωσης (δ) εξωτερικό τοίχωμα – 4 επίπεδα διακλάδωσης .....	132
Σχήμα 4. 19: Κανονικοποιημένη θερμοκρασία σε επίπεδο xz στο $y=0.5$ για την περίπτωση (α) 3 επιπέδων και $Re=75$ (β) 3 επιπέδων και $Re=150$ (γ) 4 επιπέδων και $Re=75$ (δ) 4 επιπέδων και $Re=150$ .....	133
Σχήμα 4. 20: Αριθμός Nusselt κατά μήκος της ροής για (α) $Re=75$ και 3 επίπεδα διακλάδωσης (β) $Re=150$ και 3 επίπεδα διακλάδωσης (γ) $Re=75$ και 4 επίπεδα διακλάδωσης (δ) $Re=150$ και 4 επίπεδα διακλάδωσης .....	136
Σχήμα 5. 1: Τριδιάστατη αναπαράσταση των διατάξεων (α) μαιάνδρου 4 περασμάτων και (β) ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών .....	137
Σχήμα 5. 2: Σχηματική αναπαράσταση δινών που εμφανίζονται μετά τις απότομες στροφές $90^\circ$ στη διάταξη του μαιάνδρου .....	139
Σχήμα 5. 3: (α) Διάταξη μαιάνδρου και γραμμές υπολογισμού πτώσης πίεσης και αδιάστατη πτώση πίεσης στο (β) κέντρο του αγωγού (γ) στο εσωτερικό τοίχωμα και (δ) στο εξωτερικό τοίχωμα για τη διάταξη του μαιάνδρου .....	140
Σχήμα 5. 4: Αριθμός Nusselt συναρτήσει του αδιάστατου αριθμού $\xi$ στη διάταξη του μαιάνδρου .....	141

<i>Σχήμα 5. 5: Κανονικοποιημένη θερμοκρασία σε επίπεδο xz στο <math>y=0.5</math> για την περίπτωση καναλιού μαιάνδρου με 4 περάσματα .....</i>	<i>142</i>
<i>Σχήμα 5. 6: Αδιάστατη πτώση πίεσης κατά μήκος ευθύγραμμου καναλιού στη διάταξη παράλληλων ευθύγραμμων καναλιών με 16 κανάλια .....</i>	<i>144</i>
<i>Σχήμα 5. 7: Κανονικοποιημένη θερμοκρασία σε επίπεδο xz στο <math>y=0.5</math> για την περίπτωση ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών με (α) 16 κανάλια και (β) 26 κανάλια .....</i>	<i>146</i>
<i>Σχήμα 5. 8: Σύγκριση όλων των διατάξεων που έχουν μελετηθεί ως προς το συνολικό δείκτη απόδοσης .....</i>	<i>148</i>
<i>Σχήμα 5. 9: Σύγκριση όλων των διατάξεων που έχουν μελετηθεί ως προς την τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας .....</i>	<i>149</i>

## **Κατάλογος Πινάκων**

<i>Πίνακας 3. 1: Μέση ποσοστιαία απόκλιση συναρτήσε αριθμού στοιχείων πλέγματος για εύρος αριθμών Reynolds στη διακλάδωση τύπου T .....</i>	<i>64</i>
<i>Πίνακας 3. 2: Μέση ποσοστιαία απόκλιση συναρτήσε αριθμού στοιχείων πλέγματος για εύρος αριθμών Reynolds στον αγωγό γωνίας <math>90^\circ</math> .....</i>	<i>65</i>

<i>Πίνακας 4. 1: Μέση θερμοκρασία πλάκας αλουμινίου και τυπική απόκλιση του πεδίου θερμοκρασίας: σύγκριση όλων των διατάξεων .....</i>	<i>121</i>
<i>Πίνακας 4. 2: Μέση θερμοκρασία τοιχώματος, όγκου ρευστού, θερμοροής στο τοίχωμα, συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και θερμικής αντίστασης λόγω συναγωγής: σύγκριση όλων των διατάξεων .....</i>	<i>122</i>
<i>Πίνακας 4. 3: Επιφάνεια, όγκος και λυγερότητα καναλιών – αδιάστατη πτώση πίεσης, αντλητική δύναμη, μέσος αριθμός Nusselt και δείκτης απόδοσης: σύγκριση όλων των διατάξεων .....</i>	<i>122</i>
<i>Πίνακας 4. 4: Μέση θερμοκρασία πλάκας αλουμινίου και τυπική απόκλιση του πεδίου θερμοκρασίας για <math>E = 3</math> : σύγκριση όλων των διατάξεων .....</i>	<i>128</i>
<i>Πίνακας 4. 5: Μέση θερμοκρασία τοιχώματος, όγκου ρευστού, θερμοροής στο τοίχωμα, συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και θερμικής αντίστασης συναγωγής για <math>E = 3</math>: σύγκριση όλων των διατάξεων .....</i>	<i>128</i>
<i>Πίνακας 4. 6: Επιφάνεια, όγκος και λυγερότητα καναλιών – αδιάστατη πτώση πίεσης, αντλητική δύναμη, μέσος αριθμός Nusselt .....</i>	<i>129</i>
<i>Πίνακας 4. 7: Μέση θερμοκρασία πλάκας αλουμινίου και τυπική απόκλιση του πεδίου θερμοκρασίας για 2 αντιπαράλληλα διακλαδούμενα κανάλια .....</i>	<i>134</i>
<i>Πίνακας 4. 8: Μέση θερμοκρασία τοιχώματος, όγκου ρευστού, θερμοροής στο τοίχωμα, συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και θερμικής αντίστασης λόγω συναγωγής για 2 αντιπαράλληλα διακλαδούμενα κανάλια .....</i>	<i>134</i>
<i>Πίνακας 4. 9: Επιφάνεια, όγκος και λυγερότητα καναλιών – αδιάστατη πτώση πίεσης, αντλητική δύναμη, μέσος αριθμός Nusselt .....</i>	<i>135</i>



<i>Πίνακας 5. 1: Μέση θερμοκρασία πλάκας αλουμινίου και τυπική απόκλιση του πεδίου θερμοκρασίας για μαίανδρο .....</i>	<i>142</i>
<i>Πίνακας 5. 2: Μέση θερμοκρασία τοιχώματος, όγκου ρευστού, θερμοροής στο τοίχωμα, συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και θερμικής αντίστασης λόγω συναγωγής για μαίανδρο .....</i>	<i>143</i>
<i>Πίνακας 5. 3: Επιφάνεια, όγκος και λυγρότητα καναλιών – αδιάστατη πτώση πίεσης, αντλητική ισχύς, μέσος αριθμός Nusselt .....</i>	<i>143</i>
<i>Πίνακας 5. 4: Μέση θερμοκρασία πλάκας αλουμινίου και τυπική απόκλιση του πεδίου θερμοκρασίας για διάταξη ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών .....</i>	<i>145</i>
<i>Πίνακας 5. 5: Επιφάνεια, όγκος και λυγρότητα καναλιών – ταχύτητα εισόδου στα κανάλια και αριθμός Reynolds για ευθύγραμμο παράλληλα κανάλια .....</i>	<i>147</i>
<i>Πίνακας 5. 6: Πτώση πίεσης, αντλητική ισχύς, μέσος αριθμός Nusselt και δείκτης απόδοσης για τη διάταξη ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών .....</i>	<i>147</i>

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, το φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη και οι κλιματικές αλλαγές που συμβαίνουν, έχουν δώσει μεγάλη βαρύτητα στην ανάγκη για εξέλιξη μεθόδων αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η εκμετάλλευση της φαινομενικά ατελείωτης ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλανήτη, ίσως είναι μια υποσχόμενη λύση που θα απαλύνει το πρόβλημα που προκύπτει από τη συνεχή χρήση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η παρούσα διπλωματική εργασία, σχετίζεται με τα συστήματα εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας και πιο συγκεκριμένα με την υπολογιστική διερεύνηση συγκεκριμένων τριδιάστατων διατάξεων καναλιών, τα οποία είναι ενσωματωμένα σε απορροφητική επιφάνεια συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, και τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας με σκοπό τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας του συστήματος. Κίνητρο της μελέτης είναι η ανάγκη για την απαγωγή της μέγιστης δυνατής θερμότητας από της απορροφητική επιφάνεια ενός συγκεντρωτικού συλλέκτη με χρήση εργαζόμενων ρευστών.

Αρχικά, γίνεται μια εισαγωγή στους ηλιακούς συλλέκτες και γίνεται ανάλυση των μη συγκεντρωτικών και συγκεντρωτικών συστημάτων. Παρουσιάζονται κάποιες βασικές περιπτώσεις από το κάθε είδος συλλέκτη και καταγράφεται η αρχή λειτουργίας τους. Ακολούθως, παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές, όπως π.χ. κατάλληλα σχεδιασμένες διατάξεις καναλιών που αξιοποιούν την παθητική μέθοδο για απαγωγή θερμότητας από τις απορροφητικές επιφάνειες των ηλιακών συλλεκτών μέσω της κυκλοφορίας ενός ρευστού (νερό, λάδι, κλπ.).

Αφού παρουσιαστούν οι γεωμετρίες που έχουν μελετηθεί σε προηγούμενες έρευνες, γίνεται η εισαγωγή στη διάταξη των διακλαδούμενων καναλιών τα οποία είναι και ο πυρήνας αυτής της διπλωματικής εργασίας. Αναφέρεται η προέλευση της συγκεκριμένης γεωμετρίας ως μιας βελτιωμένης διάταξης και το πώς αυτή εμπνεύστηκε από τη φύση, και αναλύονται οι μαθηματικές σχέσεις που ορίζουν τη κατασκευή της.

Πριν παρουσιαστούν τα αποτελέσματα μιας εκτεταμένης σειράς υπολογιστικών προσομοιώσεων που έγιναν στα πλαίσια της εργασίας, αναφέρονται οι βασικές μαθηματικές σχέσεις που ορίζουν το πρόβλημα της ροής ρευστού και μεταφοράς θερμότητας που επιλύεται καθώς και η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιεί το λογισμικό COMSOL Multiphysics για την επίλυση του προβλήματος.

Ακολουθεί ο έλεγχος της ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα για της ροή το ρευστού μέσα από τις βασικές δομές που απαρτίζουν την ολοκληρωμένη γεωμετρία του προβλήματος, και η επαλήθευση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Τα βασικά δομικά στοιχεία, είναι η διακλάδωση τύπου T και ο αγωγός γωνίας  $90^\circ$ . Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη προσομοίωση της ροής σε αυτές. Συγκεκριμένα, γίνεται παρουσίαση της δευτερογενούς ροής που αναπτύσσεται σε αυτά τα στοιχεία και πώς αυτή εξελίσσεται συναρτήσει του αριθμού Reynolds. Η ένταση και ο όγκος των δινών που αναπτύσσονται, αναλύονται με τη χρήση της ελικότητας, του κριτηρίου Q και των ροϊκών γραμμών της τριδιάστατης γεωμετρίας, με στόχο να μελετηθεί η επίδραση τους στην μεταφορά θερμότητας. Η θερμική συμπεριφορά στις βασικές δομές αναλύεται μέσω της κανονικοποιημένης θερμοκρασίας σε διάφορες διατομές κάθετες στη ροή, και υπολογισμού του μέσου αριθμό Nusselt κατά τη διεύθυνση αυτής.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι τριδιάστατες ολοκληρωμένες γεωμετρίες διακλαδούμενων καναλιών. Κατασκευάζονται διατάξεις με 3 και 4 διαδοχικά επίπεδα, το καθένα αποτελούμενο από συνδυασμό μιας διακλάδωσης T και μιας γωνιάς  $(90 - \theta)^\circ$  και γωνίες διακλάδωσης με τιμές μεταξύ  $30^\circ$  και  $90^\circ$ . Οι διατάξεις, όντας συμμετρικές, επιλύονται υπολογιστικά στη μισή γεωμετρία με το κατάλληλο πλέγμα όπως αυτό έχει προσδιοριστεί από τη μελέτη των βασικών δομικών μονάδων. Η θερμική και υδροδυναμική συμπεριφορά τους, παρουσιάζεται καταγράφοντας τον αριθμό Nusselt και την αδιάστατη πτώση πίεσης κατά μήκος της ροής. Γίνεται ακολούθως μια προσπάθεια σύγκρισης της συνολικής απόδοσης κάθε γεωμετρίας με βάση ένα δείκτη απόδοσης που συμπεριλαμβάνει την ομοιομορφία της θερμοκρασίας στην απορροφητική πλάκα, την ισχύ άντλησης του ρευστού και την αντίσταση στη μεταφορά

θερμότητας στην πλάκα και προσδιορίζεται η βέλτιστη γωνία διακλάδωσης ανάλογα με τον αριθμό των επιπέδων διακλάδωσης.

Τέλος, η βέλτιστη γεωμετρία που έχει προσδιοριστεί συγκρίνεται με άλλες συνήθεις διατάξεις καναλιών όπως τα ευθεία, παράλληλα κανάλια και ο μαϊάνδρος. Συγκρίνονται οι δείκτες απόδοσης της κάθε γεωμετρίας με σκοπό να αποδειχθεί κατά πόσο η προς μελέτη γεωμετρία είναι όντως πιο αποδοτική σε σύγκριση με τις διατάξεις που ήδη χρησιμοποιούνται.

# Abstract

During the last few years, the global temperature rise and the ongoing climate change being observed around the world have brought a great need for developing methods to better harness renewable energy sources. The exploitation of the seemingly infinite solar energy which reaches the Earth's surface, may be a promising solution which will alleviate the problems caused by the constant use of non-renewable sources of energy. This diploma thesis deals with the exploitation of solar collectors and more specifically, with the computational investigation of certain three-dimensional channel geometries which are embedded in the absorbing surfaces of solar collectors and their optimisation so as to achieve a higher overall efficiency. The motive behind this work is the challenge of designing a channel network which removes the maximum amount of heat from the absorbing surface of a solar collector with the use of working fluids.

Initially, an introduction to solar collectors is made and the differentiation between non-concentrating and concentrating systems is presented. Some of the basic cases of solar collectors are showcased and their working principles are analyzed. Following this, some basic channel techniques, such as suitably designed geometries used in solar collectors for heat removal by means of the through-flow of a working fluid (water, oil etc.) are also presented.

An introduction to the branching tree-like channel network follows, which is the core of this diploma thesis follows. The origins of the idea for this particular channel geometry as a more advanced technique is also discussed, as well as the mathematical formulation of its construction.

Before the results of a series of computer simulations, carried out in the course of the work, are presented, the basic mathematical equations which describe the flow and heat problem to be solved, are introduced, as well as the finite element method, which is used by the commercial software COMSOL Multiphysics for the numerical solution of the problem. The next part of this work corresponds to the investigation of the independence

of the solution of the present flow problem as a function of the density of the mesh which is constructed by the commercial software used and the validation of the obtained results. This examination is performed on the T-Junction and L-Bend separately, which are the elementary units which comprise the complete tree-like geometry. The results of these fundamental units are subsequently illustrated. Specifically, the behavior of the secondary flow which is developed within the volume of the T-Junction and L-Bend and is expected to significantly affect the heat transfer, is analyzed as a function of the Reynolds number of the flow. Its intensity and size are defined using the helicity and the Q-criterion, as well as the streamlines of the fluid. The thermal behavior within the elementary units is analyzed using normalized temperature on planes perpendicular to the main direction of the flow and by calculating the Nusselt number following the motion of the fluid.

Then, the complete three-dimensional channel geometries, for 3 and 4 branching levels (each comprising a single T-Junction and L-Bend) and branching angles in the range of  $30^\circ$  to  $90^\circ$ , are presented. These geometries are constructed and solved using the software mentioned above. Being symmetrical, the model is used to solve only over half of its total volume, with the appropriate mesh, as it has been found in the analysis of the elementary units. The thermal and hydrodynamic behavior of these geometries are determined by calculating the Nusselt number and the dimensionless pressure drop along the main path of the flow. Afterwards, an attempt is made to compare the overall efficiency of each model using a performance factor which takes into consideration both the thermal and hydrodynamic behavior as well as the temperature uniformity of the absorbing surface. This performance factor is used in order to determine which branching angle yields the optimal overall system efficiency.

Finally, the optimal geometry determined above, is compared with other channel geometries which are more commonly used in concentrating solar collectors for heat removal. Examples of such channels are the straight parallel channels and the serpentine channels. The performance factor of each model is compared in an attempt to prove whether the investigated channel geometry is indeed more efficient when compared to the ones in use in similar devices.

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

## 1.1. Ηλιακά Συστήματα - Συλλέκτες

Το παγκόσμιο φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη που προκαλείται από τη συνεχή εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα έχει φτάσει σε κρίσιμα επίπεδα και δεν μπορεί πλέον να αγνοηθεί. Η αποτελεσματική αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως για παράδειγμα η ηλιακή ενέργεια, είναι μια αρκετά υποσχόμενη και βιώσιμη λύση σε αυτό το πρόβλημα. Το αστέρι του ηλιακού μας συστήματος απελευθερώνει μια τεράστια ποσότητα ενέργειας στο περιβάλλον του, εκ της οποίας  $174 \text{ PW}$  ( $1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$ ), φτάνει στην ανώτερη ατμόσφαιρα της Γης. Εξαιρώντας το ποσοστό το οποίο απορροφάται και ανακλάται από την ατμόσφαιρα και τα σύννεφα της Γης, μια ποσότητα της τάξης των  $89 \text{ PW}$  φτάνει στο έδαφος και τους ωκεανούς του πλανήτη. Ωστόσο, αυτή η ενέργεια είναι χαμηλής πυκνότητας και περιοδικότητας και χρειάζεται πρώτα να συλλεχθεί και έπειτα να αποθηκευτεί για να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά [1].

Οι ηλιακοί συλλέκτες και τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι τα υποσυστήματα που αποτελούν τον πυρήνα των ηλιακών θερμικών εφαρμογών. Οι ηλιακοί συλλέκτες χρειάζεται να έχουν καλή οπτική απόδοση, δηλαδή να απορροφούν όσο το δυνατό περισσότερη από την προσπίπτουσα ακτινοβολία και τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας πρέπει να έχουν μεγάλη θερμική αποθηκευτική πυκνότητα (μικρός όγκος και κόστος κατασκευής), να μπορούν να πετύχουν μεγάλους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας και να είναι ανθεκτικά στο χρόνο [2].

Ένας ηλιακός συλλέκτης, μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμική ενέργεια στο εργαζόμενο ρευστό όταν πρόκειται για ηλιακά θερμικά συστήματα ή απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια όταν πρόκειται για φωτοβολταϊκά συστήματα. Στα ηλιακά θερμικά συστήματα, η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από έναν ηλιακό συλλέκτη και μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία μεταφέρεται στο εργαζόμενο ρευστό (αέρας, νερό

ή λάδι). Η θερμότητα που μεταφέρεται από το εργαζόμενο ρευστό μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για παροχή ζεστού νερού σε οικίες ή για τη φόρτιση δεξαμενής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, από την οποία μπορεί να αντληθεί σε μεταγενέστερο στάδιο για την αξιοποίησή της. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια αλλά παράγουν και αρκετή ανεπιθύμητη θερμότητα, η οποία όμως μπορεί να ανακτηθεί για μετέπειτα θερμική χρήση, συνδέοντας στο φωτοβολταϊκό σύστημα αγωγών με εργαζόμενα ρευστά που ανακτούν τη χαμένη θερμότητα [2].

Οι ηλιακοί συλλέκτες συνήθως κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες σύμφωνα με τον βαθμό συγκέντρωσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που επιτυγχάνουν. Οι δύο κατηγορίες είναι: μη συγκεντρωτικοί συλλέκτες και συγκεντρωτικοί συλλέκτες. Στους μη συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες, η επιφάνεια στην οποία προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία και η επιφάνεια στην οποία απορροφάται είναι οι ίδιες, ενώ στα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα, συνήθως υπάρχει κάποια, κατά κανόνα, κοίλη επιφάνεια που ανιχνεύει τη θέση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας και που αντανάκλα την ακτινοβολία, συγκεντρώνοντας την σε μια πολύ πιο μικρή επιφάνεια-δέκτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μεγαλύτερο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας και μεγαλύτερη απόδοση στο θερμοδυναμικό κύκλο Carnot όταν εργάζεται το σύστημα σε υψηλότερες θερμοκρασίες [2].

## 1.2. Μη Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα

### 1.2.1. Επίπεδοι Συλλέκτες

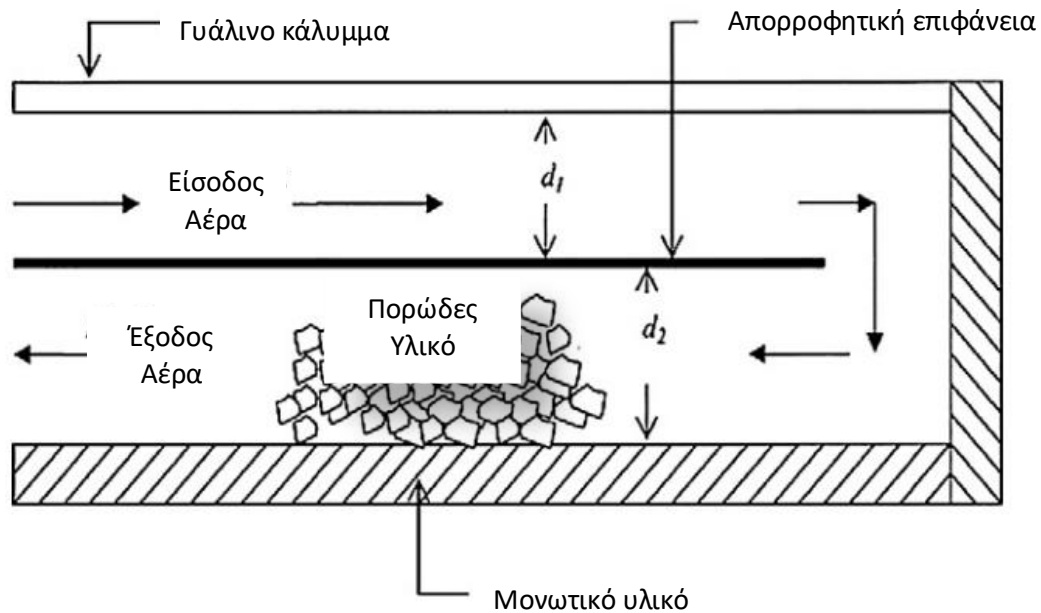
Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες είναι συνήθως στερεωμένοι σε μια θέση και για αυτό το λόγο πρέπει να τοποθετούνται με σωστό προσανατολισμό. Ένας τυπικός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από επικάλυψη φύλλων γυαλιού, απορροφητικές πλάκες, μονωτικά στρώματα, αγωγούς στους οποίους ρέει κάποιο ρευστό μεταφοράς θερμότητας και άλλα βοηθητικά εξαρτήματα. Η επικάλυψη γίνεται με ένα ή πολλαπλά φύλλα γυαλιού ή άλλων υλικών μεγάλης διαπερατότητας μικρών μηκών κύματος, και



μικρής διαπερατότητας μεγάλων μηκών κύματος. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η μείωση των απωλειών λόγω συναγωγής από την απορροφητική επιφάνεια και των απωλειών λόγω ακτινοβολίας του συλλέκτη λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου που δημιουργείται από τα φύλλα γυαλιού. Γυαλί χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο είναι επιθυμητό για την επικάλυψη λόγω της σχετικά υψηλής διαπερατότητας του, ως προς την ηλιακή ακτινοβολία (0.85 – 0.87) και της σχεδόν μηδενικής διαπερατότητας του, ως προς τα μεγάλα μήκους κύματα της θερμικής ακτινοβολίας [3]. Η απορροφητική επιφάνεια του συλλέκτη είναι συνήθως επικαλυμμένη με κάποια μαύρη ουσία για να απορροφά όσο παραπάνω θερμότητα γίνεται. Έχουν ωστόσο προταθεί επικαλύψεις αρκετών χρωμάτων σε έρευνες που έχουν γίνει. Συγκεκριμένα, επιθυμητές είναι επιφάνειες που έχουν ένα λεπτό άνω στρώμα υψηλά απορροφητικό ως προς ηλιακή ακτινοβολία χαμηλού μήκους κύματος, αλλά σχετικά διαπερατό ως προς τη μεγάλη μήκους θερμική ακτινοβολία, και ένα κατώτερο στρώμα με υψηλή ανακλαστικότητα και μικρή εκπομπή ως προς την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος [4]. Για περαιτέρω βελτίωση της θερμικής απόδοσης του συστήματος, οι θερμικές απώλειες της επιφάνειας που απορροφά τη θερμότητα πρέπει επίσης να μειωθούν. Έχει προσδιοριστεί ότι η προσθήκη κυψελοειδούς διάφανου υλικού στο διάκενο μεταξύ της επικάλυψης γυαλιού και στην απορροφητική επιφάνεια, μειώνει τις θερμικές απώλειες.

Η θερμότητα που απορροφάται από την απορροφητική πλάκα, πρέπει να μεταφέρεται άμεσα σε κάποιο εργαζόμενο ρευστό, για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του συστήματος. Η αποδοτική και ταχεία μεταφορά θερμότητας στο εργαζόμενο ρευστό είναι ζωτικής σημασίας στους ηλιακούς δέκτες. Έτσι, έχουν μελετηθεί διάφορες μέθοδοι ενίσχυσης της μεταφοράς θερμότητας, όπως, π.χ. αυτή των Ravi Kumar και Reddy, όπου προσθέτοντας πορώδες υλικό στο χώρο που ρέει το εργαζόμενο ρευστό, παρατηρήθηκε αύξηση της αποδοτικότητας, κατά 64.3% [5]. Δοκιμάστηκε επίσης, διάταξη με αγωγό σχήματος U (βλ. Σχήμα 1. 1) που είχε επίσης ως αποτέλεσμα αυξημένη μεταφορά θερμότητας. Ακόμη μια μελέτη από τους Sorian et al. [6] έδειξε ότι η προσθήκη πορώδους υλικού στο δεύτερο κομμάτι του αγωγού U, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. 1, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου και της θερμικής απόδοσης

του συστήματος [2]. Επίσης, γεωμετρικά μεγέθη όπως τα ύψη των καναλιών,  $d_1$  και  $d_2$ , όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα έχουν επίσης μελετηθεί για την επίδραση τους στην αποδοτικότητα του συστήματος.



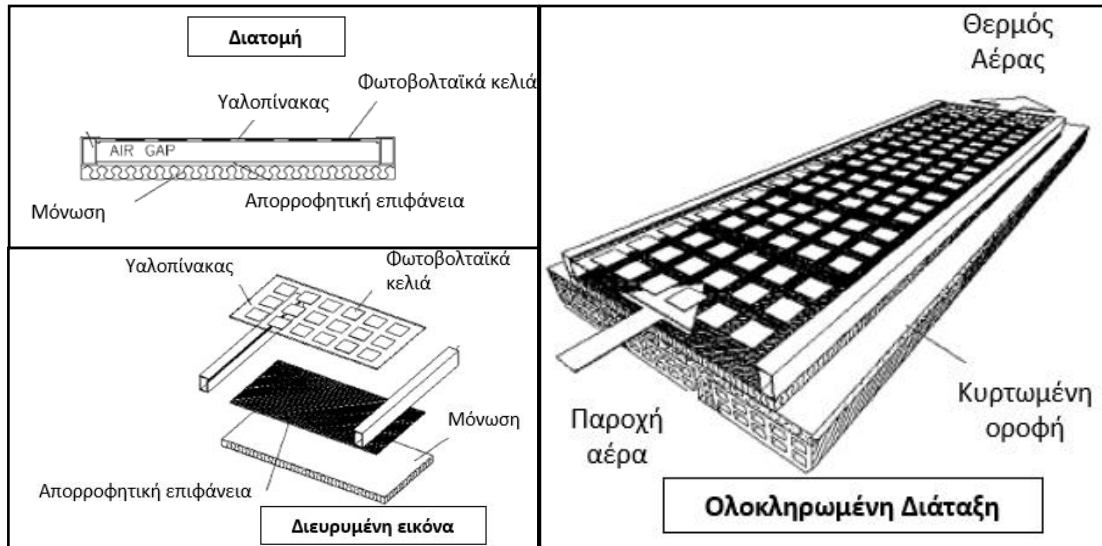
Σχήμα 1. 1: Σχηματική αναπαράσταση ηλιακού συλλέκτη με αγωγό σχήματος U και πορώδες υλικό στο δεύτερο πέρασμα [2]

Άλλες έρευνες έχουν δείξει ότι η προσθήκη κυψελίδων από πολυανθρακικό πολυμερές είχε επίσης ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης του συστήματος [2].

### 1.2.2. Υβριδικοί ηλιοθερμικοί συλλέκτες (Photovoltaic thermal hybrid - PVT)

Οι υβριδικοί ηλιοθερμικοί συλλέκτες μετατρέπουν ταυτόχρονα την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια [7]. Ένας συνηθισμένος PVT συλλέκτης αποτελείται από ένα τμήμα που αντιστοιχεί στη φωτοβολταϊκή μονάδα, η οποία παράγει ηλεκτρικό ρεύμα με απόδοση στην περιοχή του 5% – 20%, και μια απορροφητική επιφάνεια η οποία αφαιρεί τη θερμότητα που περισσεύει και δεν την εκμεταλλεύεται η φωτοβολταϊκή μονάδα. Η απορροφητική επιφάνεια ψύχει παράλληλα τη φωτοβολταϊκή μονάδα σε κατάλληλη θερμοκρασία με χρήση εργαζόμενου ρευστού, έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη ηλεκτρική απόδοση, συλλέγοντας ταυτόχρονα και τη θερμότητα που

δεν αξιοποιείται. Η θερμότητα που συλλέγεται, μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση νερού σε οικιακά συστήματα που απαιτούν σχετικά χαμηλή θερμοκρασία [8].



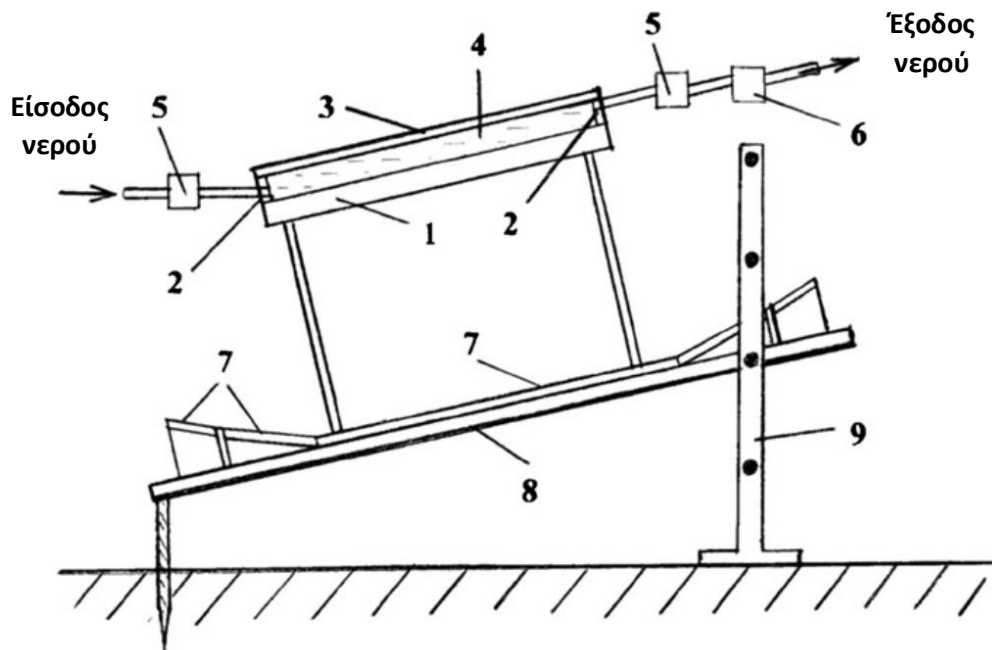
Σχήμα 1. 2: Διατομή, διευρυμένη εικόνα και ολοκληρωμένη διάταξη συστήματος PVT [7]

Οι πιο σημαντικές έρευνες πάνω σε αυτά τα συστήματα, έχουν γίνει σε επίπεδους συλλέκτες όπου έχουν μελετηθεί παράγοντες όπως η απορροφητική επιφάνεια, οι διαστάσεις των αγωγών του εργαζόμενου ρευστού, η παροχή του ρευστού, ο παράγοντας συσσώρευσης των φωτοβολταϊκών κελιών, η χρήση άμορφης σιλικόνης, μεταλλικών πτερυγίων και αγωγών πολλαπλών περασμάτων [2]. Έχει επίσης γίνει σύγκριση μεταξύ υβριδικών PVT συστημάτων και συμβατικών φωτοβολταϊκών συστημάτων, με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι τα υβριδικά συστήματα μπορούν να πετύχουν μεγαλύτερες αποδόσεις μετατροπής ενέργειας με προοπτικές μείωσης του κόστους.

### 1.2.3. Ενισχυμένοι και διπλής όψεως υβριδικοί ηλιοθερμικοί συλλέκτες

Οι υβριδικοί PVT συλλέκτες, συνήθως κατηγοριοποιούνται σε αυτούς που χρησιμοποιούν νερό ως μέσο αφαίρεσης της θερμότητας, και σε αυτούς που χρησιμοποιούν αέρα. Το νερό είναι ένα ικανοποιητικό ρευστό για αυτά τα συστήματα, λόγω της μεγάλης του θερμοχωρητικότητας και των εξαιρετικών του οπτικών ιδιοτήτων.

Έχει δοκιμαστεί σύστημα στο οποίο το φωτοβολταϊκό φύλλο είναι βυθισμένο μέσα σε όγκο νερού πάχους 4 cm με αποτέλεσμα τη μείωση των οπτικών και θερμικών απωλειών και την αύξηση της απόδοσης κατά 15% [9]. Ο λόγος που προκύπτει αυτή η αύξηση στην απόδοση, είναι ότι το νερό απορροφά κυρίως το υπέρυθρο κομμάτι της ηλιακής ακτινοβολίας και είναι πλήρως διαπερατό από την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος. Έτσι, το νερό απορροφά την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας και η ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος απορροφάται από το φωτοβολταϊκό σύστημα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 1. 3: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης υβριδικού συστήματος PVT διπλής όψεως [10]

Έχει επίσης προταθεί και κατασκευαστεί διάταξη υβριδικού συστήματος PVT διπλής όψεως, όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 1. 3. Η διάταξη αποτελείται από μια φωτοβολταϊκή μονάδα διπλής όψεως (1), η οποία είναι τοποθετημένη πάνω στα τοιχώματα που φαίνονται στο σχήμα (2). Η φωτοβολταϊκή μονάδα καλύπτεται με γυαλί (3), με τέτοιο τρόπο που να βρίσκεται το στρώμα του νερού (4), σε άμεση επαφή με την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού. Υπάρχουν θερμομέτρα (5), που μετράνε τη θερμοκρασία και ροόμετρα (6), που μετράνε τη ροή. Οι καθρέφτες (7), κατευθύνουν την ηλιακή

ακτινοβολία στο πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού, το οποίο δεν μπορεί άμεσα να δεχτεί την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Όλο το σύστημα που αναφέρεται παραπάνω, στερεώνεται στη διάταξη που αντιστοιχεί στο (8), και ρυθμίζεται η κλίση του με την ανάλογη τοποθέτηση του στις τρύπες που φαίνονται στη ράβδο (9) [10]. Η απόδοση του συστήματος του Σχήματος 1. 3 ήταν περίπου 40% μεγαλύτερη ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ένα συμβατικό σύστημα PVT. Η αποδοτικότητα ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω, αξιοποιώντας τη θερμότητα που χάνεται για την παραγωγή ζεστού νερού για πιθανή οικιακή χρήση.

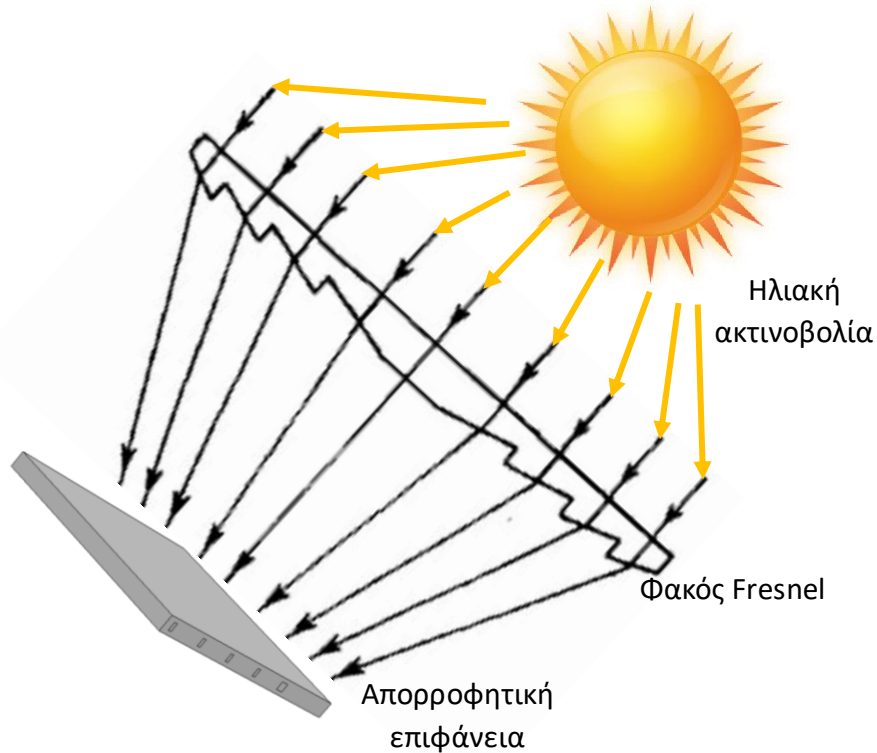
### 1.3. Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα

#### 1.3.1. Συλλέκτες επίπεδης απορροφητικής επιφάνειας

Αυτό το είδος συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος, αποτελείται από μια επίπεδη απορροφητική επιφάνεια αγωγίμου υλικού όπως αυτή του σχήματος 1. 3, διαμέσου της οποίας ρέει κάποιο εργαζόμενο ρευστό και απάγει τη θερμότητα που συγκεντρώνεται πάνω στην επιφάνεια. Η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται πάνω σε αυτές τις επιφάνειες με τη χρήση ανακλαστών και φακών ( π.χ. φακών Fresnel) σε λόγους οπτικής συγκέντρωσης,  $n_c$  μεγαλύτερους του 1. Ο λόγος οπτικής συγκέντρωσης είναι ίσος με τη θερμότητα που προσπίπτει πάνω στην απορροφητική επιφάνεια ως προς τη θερμότητα που προσπίπτει πάνω στον φακό που εστιάζει την ηλιακή ακτινοβολία πάνω στο δέκτη. Μια απλουστευμένη απεικόνιση τέτοιων συστημάτων, παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. 4.

Αυτά τα συστήματα δεν επιτυγχάνουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες λόγω του χαμηλού λόγου συγκέντρωσης της ακτινοβολίας πάνω στην απορροφητική επιφάνεια, σε σχέση με άλλα συγκεντρωτικά συστήματα, ωστόσο απάγουν αρκετή θερμότητα για παραγωγή π.χ. ζεστού νερού για οικιακή χρήση. Επίσης, τέτοια συστήματα μπορούν να αξιοποιηθούν σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκά συστήματα για την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμού νερού. Οι διατάξεις απαγωγής θερμότητας που μελετώνται στη παρούσα διπλωματική εργασία βρίσκουν εφαρμογή σε τέτοιου

είδους συλλεκτών, όπου η ηλιακή ακτινοβολία εστιάζεται σε επίπεδες απορροφητικές επιφάνειες. Οι Oyinlola et al. [11] καθώς και οι Moss et al. [12] μελέτησαν την επίδραση της γεωμετρίας διάφορων μικροκαναλιών και των υδραυλικών τους διαμέτρων στη μεταφορά θερμότητας και στην ισχύ άντλησης σε τέτοιου είδους συλλέκτες.

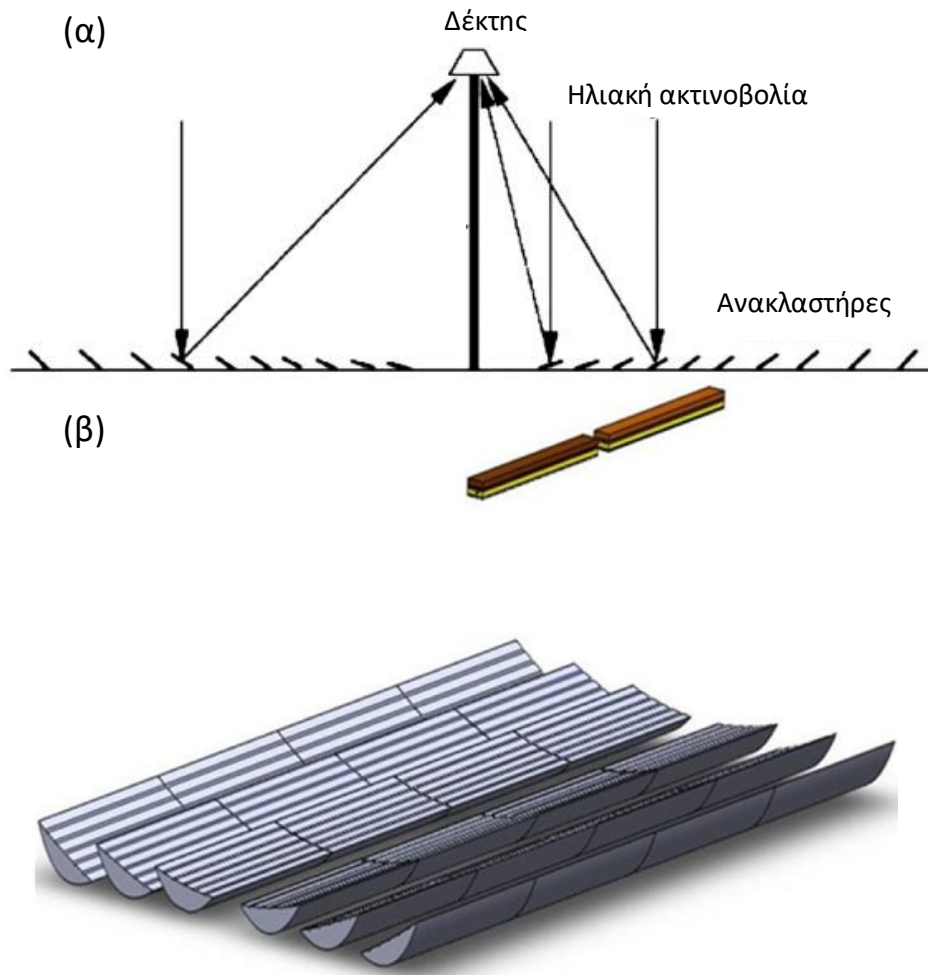


*Σχήμα 1. 4: Σχηματική αναπαράσταση συγκεντρωτικού συλλέκτη επίπεδης απορροφητικής επιφάνειας*

### 1.3.2. Γραμμικός συλλέκτης με ανακλαστήρες τύπου Fresnel (linear Fresnel solar collector)

Η τεχνολογία των γραμμικών συλλεκτών με ανακλαστήρες τύπου Fresnel βασίζεται σε μια συστοιχία γραμμικών ανακλαστήρων που εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα κεντρικό γραμμικό δέκτη που βρίσκεται σε σταθερή θέση στο κέντρο της διάταξης. Οι ανακλαστήρες είναι τοποθετημένοι κοντά στο έδαφος, με αποτέλεσμα το κατασκευαστικό κόστος της διάταξης να είναι σχετικά μικρό. Η διάταξη αυτού του είδους συλλέκτη φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 1. 5 όπου απεικονίζεται διδιάστατα και

τριδιάστατα η συγκεκριμένη διαμόρφωση. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 1. 5 (β) φαίνεται η διάταξη που διερευνήθηκε υπολογιστικά και πειραματικά από τους Bellos et al. [13] ως προς την θερμική, οπτική και εξεργετική απόδοση του για διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

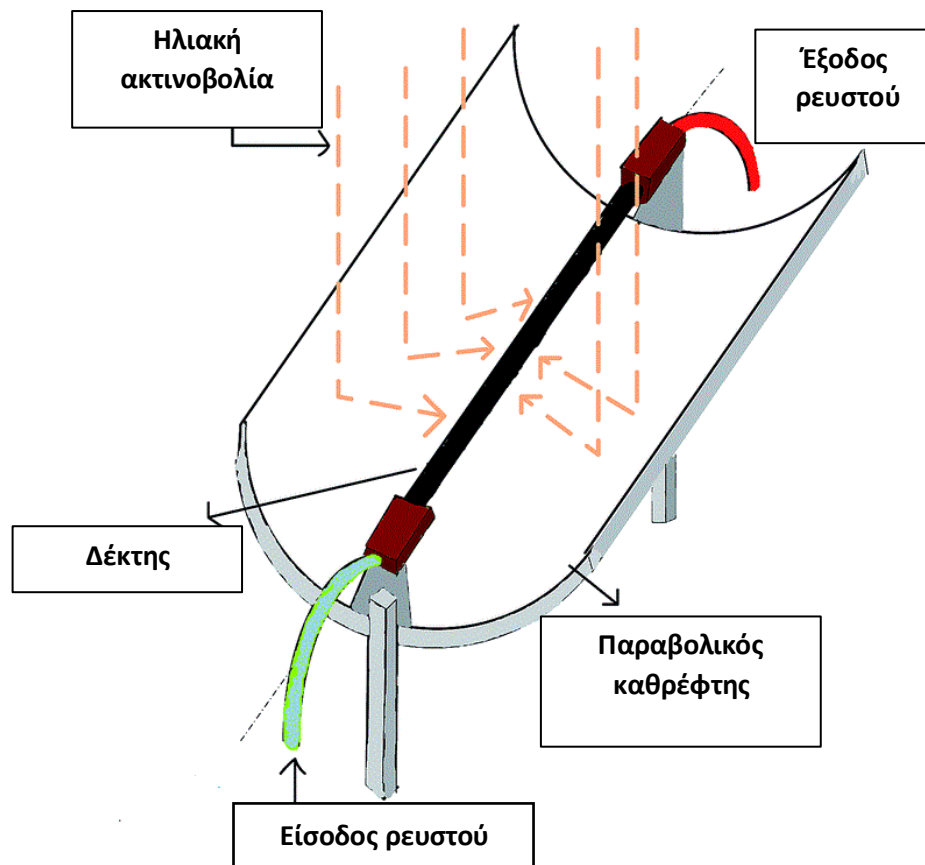


Σχήμα 1. 5: (α) Διδιάστατη [14] και (β) τριδιάστατη [13] σχηματική αναπαράσταση γραμμικού συλλέκτη με ανακλαστήρες τύπου Fresnel

### 1.3.3. Συλλέκτες τύπου παραβολικής σκάφης (parabolic-trough collector)

Οι συλλέκτες τύπου παραβολικής σκάφης μπορούν να συγκεντρώσουν την ηλιακή ακτινοβολία με αναλογίες συγκέντρωσης που μπορεί να φτάσουν και 40 φορές μεγαλύτερες από αυτές που προσπίπτουν κανονικά στην επιφάνεια της Γης, ανάλογα με το μέγεθος της παραβολικής κοιλότητας. Η γραμμή πάνω στην οποία εστιάζεται η ηλιακή

ακτινοβολία μπορεί να φτάσει μέχρι και  $350^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ . Σημαντική δομική μονάδα αυτού του είδους συλλέκτη είναι η διάταξη παραβολικών καθρεφτών από τους οποίους ο καθένας έχει την ικανότητα να αντανακλά την ηλιακή ακτινοβολία, που είναι παράλληλη προς τον άξονα συμμετρίας του προς το σημείο εστίασης. Στο σημείο εστίασης τοποθετείται ένας μεταλλικός δέκτης επικαλυμμένος με μαύρο χρώμα και με ένα γυάλινο σωλήνα για τη μείωση θερμικών απωλειών, απορροφά την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και θερμαίνεται [2]. Οι συλλέκτες αυτοί μπορούν να τοποθετηθούν με δύο διαφορετικούς προσανατολισμούς: με τον κύριο άξονα τους ανατολικά-δυτικά, ακολουθώντας τον ήλιο βόρεια προς νότια ή με κύριο άξονα βόρεια-νότια, ακολουθώντας τον ήλιο ανατολικά προς δυτικά. Έρευνες έχουν δείξει ότι ένα σύστημα το οποίο ανιχνεύει τη θέση του ήλιου κατά τη διάρκεια της μέρας και προσανατολίζεται κατάλληλα, αποδίδει σχεδόν 50% καλύτερα σε σχέση με σύστημα το οποίο διατηρεί ένα συγκεκριμένο προσανατολισμό όλη τη διάρκεια της ημέρας [15].



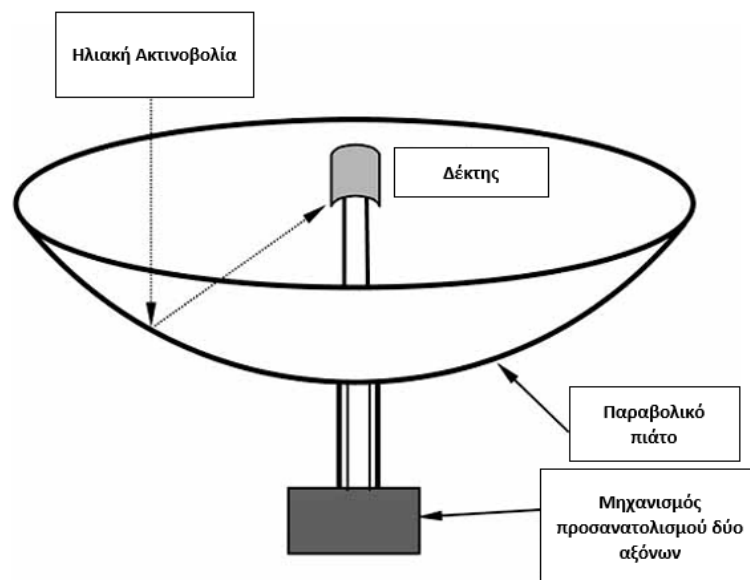
Σχήμα 1. 6: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης συλλέκτη με παραβολική σκάφης [16]



Οι συλλέκτες αυτοί παρουσιάζουν αρκετά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τα οποία τους δίνουν κάποια πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα συγκεντρωτικά συστήματα. Το πρώτο πλεονέκτημα, είναι η επεκτασιμότητά τους προσθέτοντας και άλλους παραβολικούς καθρέφτες κατά μήκος της γραμμής εστίασης της ακτινοβολίας. Δεύτερο πλεονέκτημα, είναι το ότι το σύστημα ιχνηλασίας τους χρειάζεται να ρυθμίζεται μόνο σε δύο διαστάσεις, ενώ συστήματα όπως ο συλλέκτης με παραβολικό πιάτο, χρειάζεται ρύθμιση σε 3 διαστάσεις. Αποτέλεσμα της ρύθμισης σε 2 διαστάσεις αντί 3, είναι μεγαλύτερη ακρίβεια του συστήματος ιχνηλασίας [2].

#### 1.3.4. Συλλέκτες με παραβολικό πιάτο (parabolic dish)

Οι συλλέκτες παραβολικού τύπου χρησιμοποιούν μια σειρά από παραβολικούς καθρέφτες που μοιάζουν σε σχήμα με 'δορυφορικά πιάτα' για να συγκεντρώσουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα δέκτη που βρίσκεται στο κοινό σημείο εστίασης όλων των παραβολικών καθρεφτών. Το εργαζόμενο ρευστό που είναι μέσα στο δέκτη θερμαίνεται μέχρι να φτάσει την επιθυμητή θερμοκρασία και πίεση λειτουργίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας διαμέσου ενός μικρού κινητήρα που βρίσκεται συνδεδεμένος με το δέκτη [2].



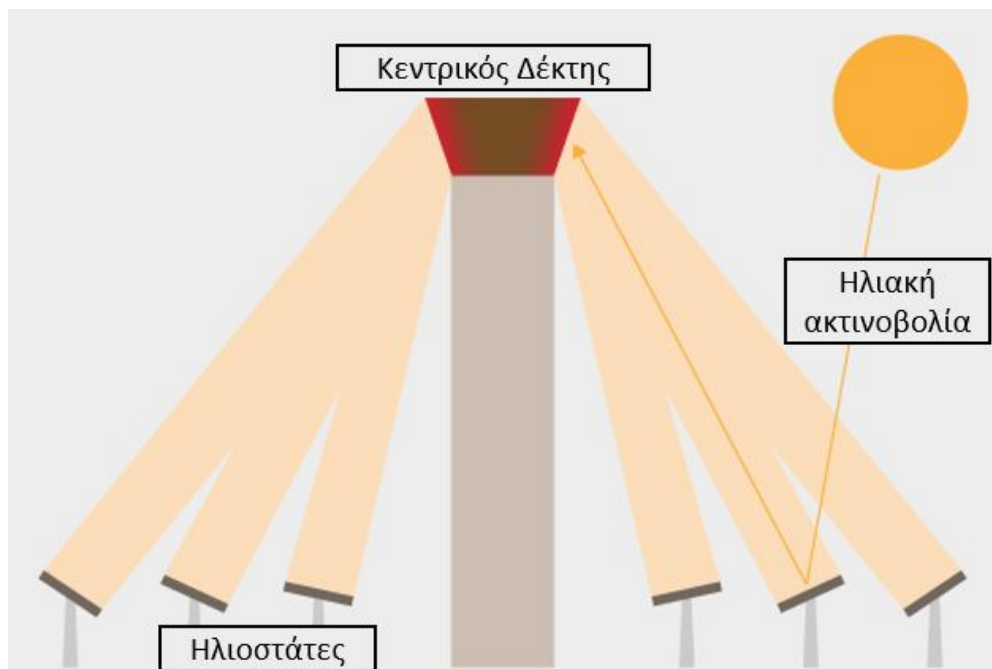
Σχήμα 1. 7: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης ηλιακού συλλέκτη με παραβολικό πιάτο [17]

Τα συστήματα παραβολικού πιάτου σε συνδυασμό με τον κινητήρα, έχουν τα εξής πλεονεκτήματα: υψηλή οπτική απόδοση, μικρές απώλειες κατά την εκκίνηση του συστήματος και ευκολία τροποποίησης της διάταξης η οποία μπορεί εύκολα να μεγαλώσει σε κλίμακα, για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις σε ενέργεια σε περιοχές όπου ένα κεντρικό δίκτυο ενέργειας δεν έχει εύκολη πρόσβαση, και είναι πολύ ακριβό [2].

### 1.3.5. Συλλέκτες κεντρικού δέκτη (power tower/central receiver)

Οι συλλέκτες κεντρικού δέκτη, συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα υπερυψωμένο κεντρικό σημείο (δέκτη) που βρίσκεται στην κορυφή ενός πύργου. Αυτά τα συστήματα, είναι συνήθως εξοπλισμένα με εξαρτήματα τα οποία ανιχνεύουν τη θέση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας, και έχουν αρκετά μεγαλύτερο λόγο συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε σύγκριση με τα μη συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα. Τα συγκεκριμένα συστήματα μπορούν να πετύχουν αρκετά υψηλότερες θερμοκρασίες στο εργαζόμενο ρευστό, και κατά συνέπεια μεγαλύτερη θερμοδυναμική απόδοση. Ο ηλιοστατικός συλλέκτης αποτελείται από μια σειρά επίπεδων καθρεφτών. Λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από τον άξονα της, η θέση του ήλιου σε σχέση με το πού βρίσκεται ο ηλιακός συλλέκτης, αλλάζει κατά τη διάρκεια της μέρας και η διάταξη πρέπει να προσανατολίζεται σε όλη τη διάρκεια της μέρας, έτσι ώστε να αντανakλά τις προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες και να τις κατευθύνει προς το δέκτη. Ο προσανατολισμός των καθρεφτών γίνεται από ένα αυτόματο σύστημα ρύθμισης που χρησιμοποιεί τεχνολογία αλταζιμούθιου εντοπισμού. Για την αύξηση της συνολικής οπτικής απόδοσης του συστήματος, χρειάζεται επίσης μια βέλτιστη διάταξη τοποθέτησης του πεδίου των ηλιοστάτων. Υπάρχουν αρκετές προτεινόμενες μέθοδοι για το σχεδιασμό του συγκεκριμένου πεδίου. Αυτή η βέλτιστη διάταξη, θα πρέπει να μπορεί να αντανakλά αποτελεσματικά την ηλιακή ακτινοβολία με ελάχιστες απώλειες, και να τη συσσωρεύει σε ένα κεντρικό πύργο όπου είναι τοποθετημένη μια γεννήτρια ατμού που απορροφά τη θερμική ενέργεια, θερμαίνει νερό και το μετατρέπει σε υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης ατμό που θα οδηγηθεί σε αεροστρόβιλους και στην επακόλουθη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [2].

Οι ηλιοστάτες, μπορούν να χωριστούν σε εξωτερικού τύπου και τύπου κοιλότητας, ανάλογα με το είδος του κεντρικού δέκτη που χρησιμοποιείται. Οι συλλέκτες εξωτερικού τύπου έχουν συνήθως λόγους ύψους προς διαμέτρου ίσους με 1: 1 ή 2: 1. Για τη μείωση των θερμικών απωλειών, η επιφάνεια του δέκτη πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να είναι όσο πιο μικρή γίνεται. Ωστόσο, το κατώτατο όριο της επιφάνειας του δέκτη ορίζεται από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των αγωγών του εναλλάκτη θερμότητας, και της ικανότητας αφαίρεσης θερμότητας του εργαζόμενου ρευστού, για την προστασία του ρευστού από υπερθέρμανση. Η επιφάνεια του δέκτη μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας αγωγούς με μεγαλύτερο όριο ανοχής ως προς τη θερμοκρασία, ή ρευστό με καλύτερες ικανότητες απορρόφησης θερμότητας. Το εργαζόμενο ρευστό, ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας, μπορεί να είναι νερό/ατμός, συνθετικά λάδια, υγρό νάτριο και άλλα λιωμένα άλατα που έχουν υψηλές δυνατότητες απορρόφησης θερμότητας [18].



Σχήμα 1. 8: Αναπαράσταση συλλέκτη κεντρικού δέκτη και πεδίου ηλιοστατών

Στους συλλέκτες τύπου κοιλότητας, η ροή θερμότητας από το πεδίο του ηλιοστατικού συλλέκτη, αντανακλάται μέσα στην οπή/κοιλότητα του συστήματος, η οποία έχει επιφάνεια ίση με περίπου το  $\frac{1}{3}$  ή το  $\frac{1}{2}$  της εσωτερικής απορροφητικής

επιφάνειας, και απορροφάται από τις επιφάνειες που σχηματίζουν τους τοίχους της κοιλότητας. Το μέγεθος του διαφράγματος ελαχιστοποιείται για την μείωση των απωλειών λόγω ακτινοβολίας και συναγωγής, χωρίς όμως να μειώνεται η ροή ηλιακής ακτινοβολίας προς το δέκτη.

#### 1.4. Διατάξεις Απαγωγής Θερμότητας

Στα ηλιοθερμικά συστήματα που αναφέρονται στην προηγούμενη υποενότητα, η θερμότητα που απορροφάται από αυτά, απάγεται από το εργαζόμενο ρευστό που χρησιμοποιείται. Εκτός από την επιλογή του κατάλληλου ρευστού, που συνήθως ορίζεται από τις θερμοκρασίες στις οποίες λειτουργεί το σύστημα, ακόμα μια παράμετρος που έχει σημαντικό ρόλο στο πόσο αποτελεσματικά απάγεται η θερμότητα που απορροφάται από το συλλέκτη είναι η γεωμετρία των αγωγών (σωλήνων ή καναλιών), στα οποία ρέει το εργαζόμενο ρευστό. Η ανάγκη για αποδοτική απαγωγή θερμότητας από τα συστήματα αυτά με κατάλληλες διαμορφώσεις αγωγών, προέρχεται από την ανάγκη του να απορροφηθεί με όσο μεγαλύτερο ρυθμό γίνεται η θερμότητα, αλλά και για να αποφευχθούν θερμά σημεία πάνω στη διάταξη που μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για ηλεκτρονικά εξαρτήματα [19] αλλά και για ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα.

Υπάρχουν δύο είδη μεθόδων ενίσχυσης της απαγωγής θερμότητας: οι ενεργητικές και οι παθητικές μέθοδοι. Μια ενεργητική μέθοδος, συμπεριλαμβάνει κατανάλωση ενέργειας για την ενίσχυση της απαγωγής θερμότητας, εν αντιθέσει με ένα παθητικό σύστημα, το οποίο δεν καταναλώνει ενέργεια για την απαγωγή θερμότητας αλλά μόνο για την άντληση του ρευστού. Τα παθητικά συστήματα είναι πιο φτηνά στη κατασκευή και λειτουργία τους και πιο αξιόπιστα λόγω του ότι δεν υπάρχουν κινούμενα εξαρτήματα. Παθητικές μέθοδοι απαγωγής θερμότητας χρησιμοποιούνται στους ηλιακούς συλλέκτες, αλλά και σε αρκετές μικροηλεκτρονικές συσκευές για ψύξη (μικροκανάλια) [19].

Λόγω των διαστάσεων της απορροφητικής πλάκας στην οποία θα μελετηθεί η απόδοση της διάταξης καναλιών και των διαστάσεων των ίδιων των καναλιών, τα οποία, δεν ξεπερνούν την τάξη των εκατοστών, η ροή που αναπτύσσεται είναι στρωτή. Λόγω του ότι η ροή είναι στρωτή, δημιουργείται ένα θερμό στρώμα ρευστού κοντά στα τοιχώματα του αγωγού, ενώ στο πυρήνα υπάρχει πιο ψυχρό ρευστό, που οφείλεται στο θερμικό οριακό στρώμα που δημιουργείται κατά μήκος μιας στρωτή ροής. Αντίθετα λοιπόν με την τυρβώδη ροή δεν μπορεί να γίνει ανάμιξη του θερμού και του ψυχρού στρώματος ρευστού χωρίς κάποια υποβοήθηση. Γίνεται προφανές λοιπόν ότι οι παθητικές μέθοδοι, εκμεταλλεύονται τη γεωμετρία των καναλιών έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ανάμιξη των στρωμάτων θερμού και ψυχρού ρευστού για ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας [19].

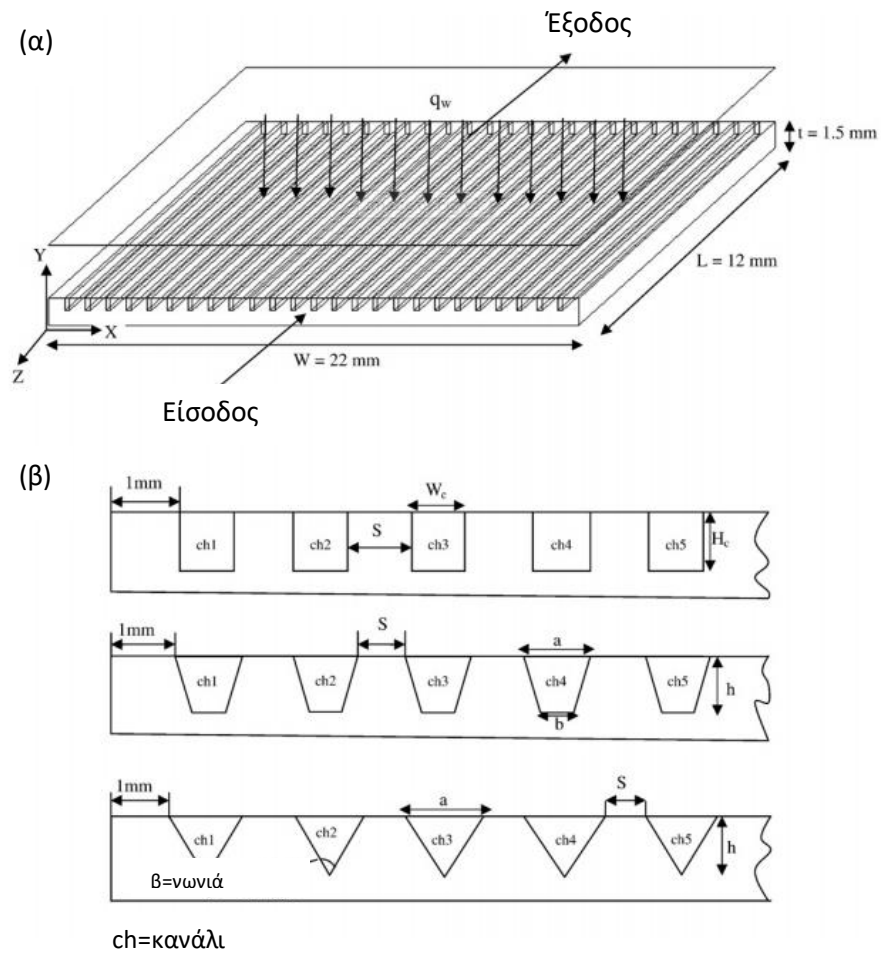
Η παθητική ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας έχει ερευνηθεί μεταβάλλοντας το λόγο του πλάτους του αγωγού ως προς το ύψος του, του μήκους του καναλιού, το πάχος του τοιχώματος ή ακόμα και το σχήμα της διατομής του αγωγού. Έχει μελετηθεί επίσης η διαταραχή της ροής με σκοπό την επακόλουθη δημιουργία δευτερογενούς ροής που έχει ως αποτέλεσμα τη διαταραχή του θερμικού οριακού στρώματος εντός του καναλιού [20]. Στη συνέχεια, θα ακολουθήσει η παρουσίαση κάποιων γεωμετριών που έχουν προταθεί και μελετηθεί ως προς την απόδοση τους στη μεταφορά θερμότητας.

Καθότι ένας τομέας με μεγάλες απαιτήσεις είναι η ψύξη ηλεκτρονικού εξοπλισμού όπου αναπτύσσονται μεγάλες πυκνότητες θερμότητας, οι περισσότερες σχετικές μελέτες έχουν γίνει σε ψύκτρες (heat sinks) που προορίζονται για ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Όμως, τα σχετικά ευρήματα βρίσκουν εφαρμογή και σε συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα με επίπεδες απορροφητικές επιφάνειες προσαρμοσμένες σε μεταλλική πλάκα μέσω της οποίας ρέει το εργαζόμενο ρευστό.

#### 1.4.1. Ευθύγραμμο και παράλληλα κανάλια με τετράγωνη, τρίγωνη και τραπεζοειδή διατομή

Έχει γίνει έρευνα από τους Gunnasegaran et al. [21] σχετικά με διάταξη ευθύγραμμων παραλλήλων καναλιών διαφορετικών διατομών και η επίδραση τους στην

απαγωγή θερμότητας. Η διάταξη της γεωμετρίας της συγκεκριμένης έρευνας και τα σχήματα των διατομών φαίνονται στο Σχήμα 1. 9. Θερμότητα,  $q_w$  διοχετεύεται στο υπόστρωμα αλουμινίου διαμέσου μιας πλάκας στο πάνω μέρος της διάταξης και απάγεται από το νερό που ρέει διαμέσου των καναλιών. Μελετάται το πόσο αποτελεσματικά απάγεται η θερμότητα σε κάθε διατομή αλλάζοντας κάποιες βασικές διαστάσεις των καναλιών της κάθε γεωμετρίας [21].



Σχήμα 1. 9: Σχηματική αναπαράσταση (α) διάταξης ευθύγραμμων και παράλληλων καναλιών με (β) τετράγωνη, τριγωνική και τραπεζοειδή διατομή [21]

Για κανάλια τετραγωνικής διατομής έχει βρεθεί ότι η μικρότερη υδραυλική διάμετρος συνεπάγεται και μεγαλύτερη τιμή στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Επίσης έχει βρεθεί ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και ο αριθμός Poiseuille αυξάνονται ανάλογα με τον αριθμό Reynolds. Για τα κανάλια τετραγωνικής διατομής, ο

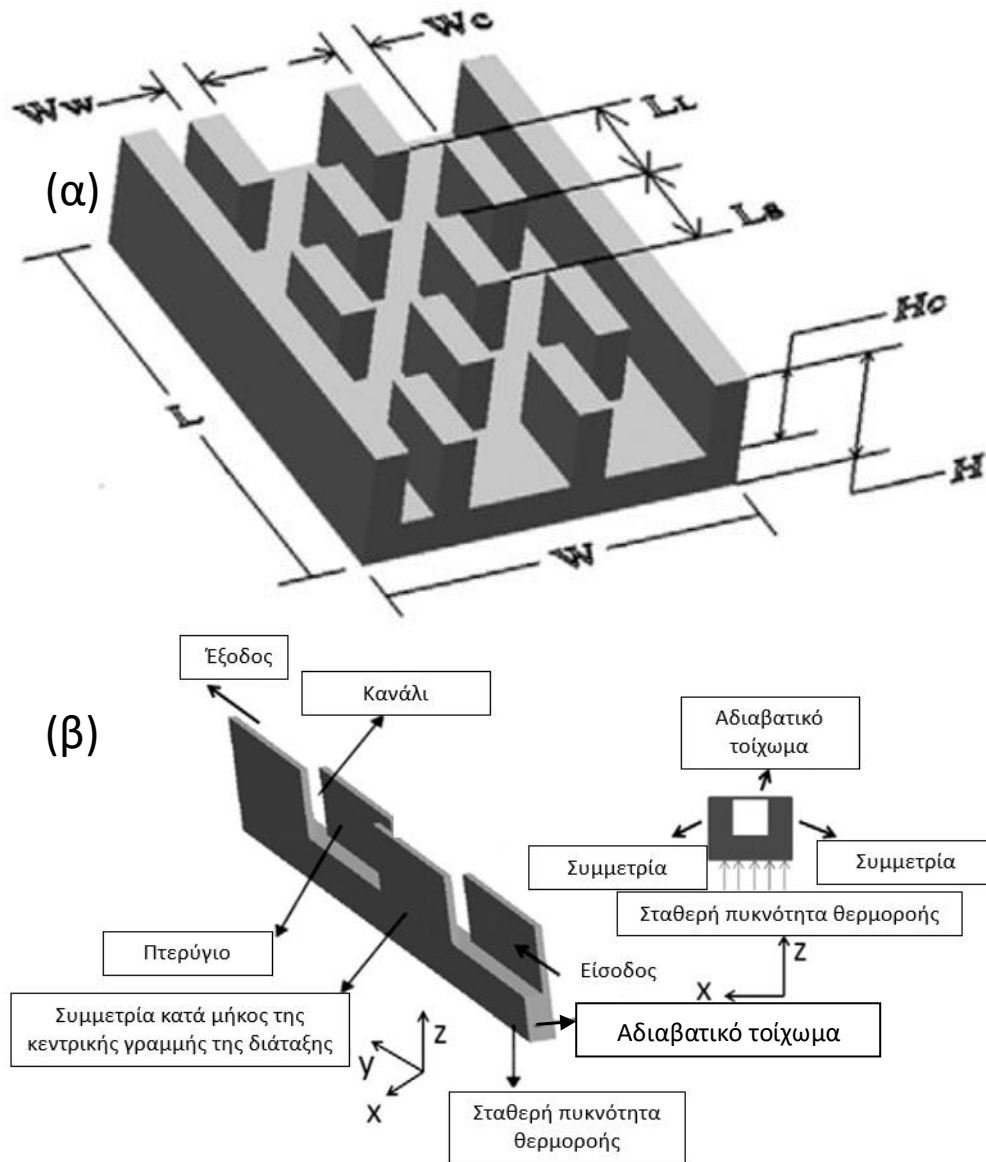
συντελεστής συναγωγής και ο αριθμός Poiseuille μεγιστοποιούνται, ενώ για τα κανάλια τριγωνικής διατομής ελαχιστοποιούνται. Για τα κανάλια τραπεζοειδούς διατομής τα αποτελέσματα είναι ενδιάμεσα των δύο προηγούμενων. Έχει βρεθεί επίσης ότι κρατώντας σταθερό τον αριθμό Reynolds και αυξάνοντας τη πυκνότητα θερμορροής από την πλάκα στη κορυφή της διάταξης μειώνεται η πτώση πίεσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τα τετραγωνικά κανάλια, ο λόγος  $W_c/H_c$  παίζει σημαντικό ρόλο στον αριθμό Poiseuille, ο οποίος μεγιστοποιείται για  $\frac{W_c}{H_c} = 0.974$  και ελαχιστοποιείται για  $\frac{W_c}{H_c} = 0.391$  [21]. Όσον αφορά τα τραπεζοειδή κανάλια, τα σημαντικά μεγέθη προς διερεύνηση είναι τα  $H/\alpha$ ,  $b/a$  και  $L/D_h$  και προκύπτει ότι για αύξηση του πρώτου και του τρίτου και μείωση του δεύτερου λόγου ο αριθμός Poiseuille αυξάνεται. Για τα κανάλια με τριγωνική διατομή η γωνία  $\beta$  της κορυφής του τριγώνου έχει μεγάλη επίδραση στον αριθμό Poiseuille, ο οποίος αυξάνεται για τιμές της γωνίας  $\beta = 22.14^\circ - 51.95^\circ$ . Για την επίτευξη της μεγαλύτερης συνολικής ενίσχυσης της μεταφοράς θερμότητας τα κανάλια τετραγωνικής διατομής είναι τα πιο αποτελεσματικά, με τα τραπεζοειδή και τριγωνικά να ακολουθούν με αυτή τη σειρά [21], [22].

#### 1.4.2. Κανάλια με μετατοπισμένα/διακοπτόμενα πτερύγια

Οι Hong και Cheng [23] διερεύνησαν τη γεωμετρία που φαίνεται στο Σχήμα 1. 10. Μελετήθηκε στην έρευνα τους, κατά πόσο η συγκεκριμένη γεωμετρία επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της ροής και της μεταφοράς θερμότητας στο σύστημα και πως η αλλαγή συγκεκριμένων γεωμετρικών μεγεθών της διάταξης αλλάζει την απόδοση του συστήματος ως προς της πτώση πίεσης και τη μεταφοράς θερμότητας [23]. Η ροή στην συγκεκριμένη έρευνα είχε μικρούς αριθμούς Reynolds και ήταν στρωτή.

Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής έδειξαν ότι λόγω της περιοδικής αλλαγής της κατεύθυνσης της ροής, αναμιγνύεται ο κρύος όγκος ρευστού με τον ζεστό και ενισχύεται η μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής. Η περιοδική αλλαγή της κατεύθυνσης της ροής διαταράσσει και το θερμικό οριακό στρώμα του ρευστού που συνεισφέρει επίσης στην ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας. Για το πως επηρεάζουν τα γεωμετρικά

χαρακτηριστικά την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας ελέγχεται το μέγεθος  $K = \frac{L_1}{L_s}$  και  $M = \frac{L}{L_s + L_1}$  που αντιστοιχούν στο λόγο του κενού ανάμεσα στα πτερύγια προς το μήκος του πτερυγίου και στον αριθμό των πτερυγίων. Κρατώντας το  $K$  σταθερό και αυξάνοντας των αριθμό πτερυγίων, μειώνεται η απαραίτητη μαζική παροχή για τη διατήρηση της μέγιστης θερμοκρασίας τοιχώματος.



Σχήμα 1. 10: Σχηματική αναπαράσταση της (α) ολοκληρωμένης διάταξης των μετατοπισμένων λωρίδων πτερυγίων, (β) της βασικής δομικής μονάδας της ολοκληρωμένης γεωμετρίας και (γ) της κάθετης διατομής ως προς την κύρια διεύθυνση της ροής της δομικής μονάδας [23]



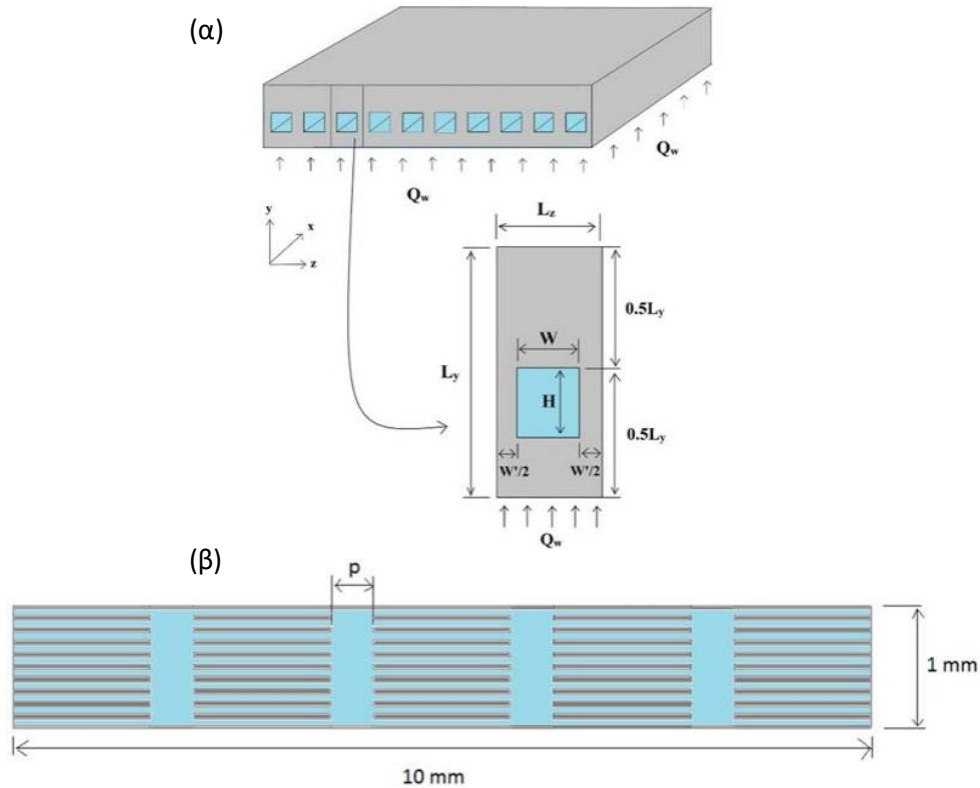
Υπάρχει βέλτιστος συνδυασμός των μεγεθών  $K$  και  $M$  έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η πτώση πίεσης, που εξαρτάται από τη πυκνότητα θερμορροής και τη μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία τοιχώματος. Από τις περιπτώσεις που διερευνήθηκαν στην έρευνα των Hong και Cheng βρέθηκε ότι για  $K = 1$  προέκυψαν τα καλύτερα αποτελέσματα.

#### 1.4.3. Ευθύγραμμα κανάλια ορθογωνικής διατομής με διαταρασόμενη ροή

Οι Kamal και Dewan[24] μελέτησαν τη διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 1. 11. Διερεύνησαν υπολογιστικά την διδιάστατη γεωμετρία που φαίνεται παρακάτω που αντιστοιχεί σε διατομή  $xz$  της τριδιάστατης γεωμετρίας του Σχήματος 1. 11 (α). Σκοπός της συγκεκριμένης διάταξης, όπως και στις προηγούμενες που παρουσιάστηκαν, είναι η διαταραχή της ροής με στόχο την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας. Το μέγεθος  $p$  που φαίνεται στο Σχήμα 1. 11 (β) αντιστοιχεί στο μήκος του διάκενου χώρου που χρησιμοποιείται για τη διαταραχή της ροής και είναι αυτό που ερευνάται προς βελτιστοποίηση [24].

Τα συμπεράσματα της έρευνας καταλήγουν στο ότι η περιοδική διαταραχή της ροής οδηγεί σε σημαντική αύξηση της μεταφοράς θερμότητας κατά μήκος της ροής και μικρότερη πτώση πίεσης[24].

Η έρευνα κατέληξε επίσης στο ότι υπάρχει βέλτιστο μήκος  $p$  του διάκενου για το οποίο η θερμική απόδοση μεγιστοποιείται και το ότι η διδιάστατη μοντελοποίηση της συγκεκριμένης διάταξης μπορεί να δώσει ικανοποιητικές πληροφορίες για την βελτιστοποίηση της τριδιάστατης διάταξης [24].



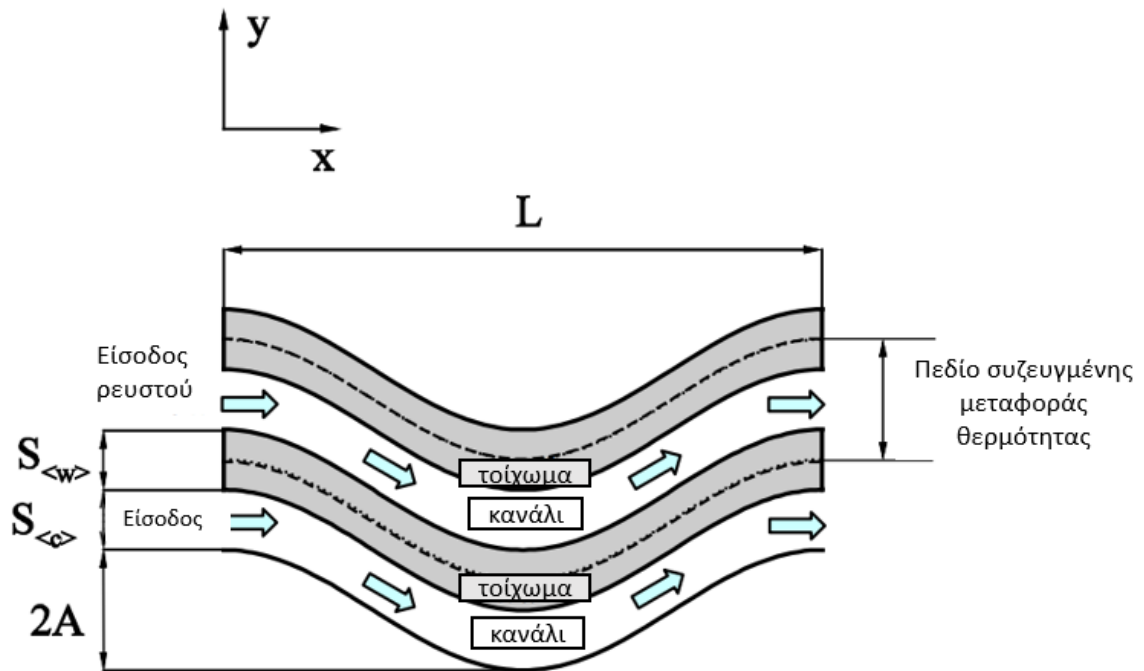
Σχήμα 1. 11: Σχηματική αναπαράσταση των ευθύγραμμων καναλιών ορθογωνικής διατομής με διαταρασσόμενη ροή [24]

#### 1.4.4. Κυματοειδή κανάλια

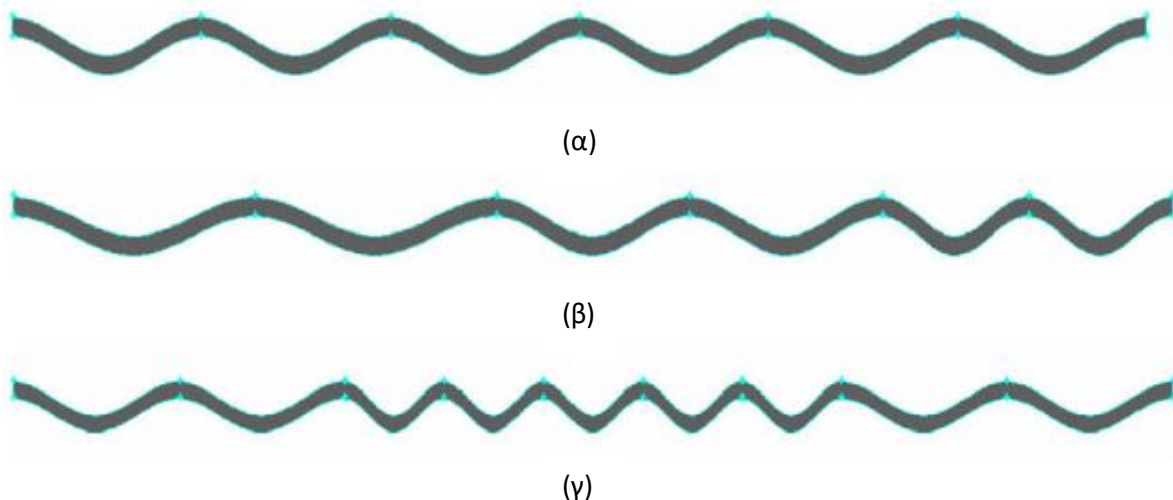
Οι Sui et al. [25] και Mohammed et al. [26] μελέτησαν τη διάταξη των κυματοειδών καναλιών που φαίνεται στο Σχήμα 1. 12. Οι διατάξεις που μελετήθηκαν περιείχαν 10 και 12 κυματοειδή κανάλια παράλληλα τοποθετημένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. 12. Επίσης διερευνήθηκε η επίδραση του μήκους κύματος του καναλιού στην ενίσχυση μεταφοράς θερμότητας. Συγκεκριμένα, τα μήκη κύματος που μελετήθηκαν φαίνονται στο Σχήμα 1. 13 [25], [26].

Η υπολογιστική μελέτη που έγινε αφορούσε κυματοειδή κανάλια τετραγωνικής διατομής και συνθήκες σταθερής πυκνότητας θερμορροής στα τοιχώματα ( $H_2$ ), σταθερής θερμοκρασίας στα τοιχώματα ( $T$ ) και συνθήκες συζευγμένης μεταφοράς θερμότητας. Η ανάλυση του πεδίου ταχύτητας ανέδειξε τη δημιουργία δινών τύπου Dean στα κυματοειδή κανάλια. Αξιοσημείωτο σημείο της έρευνας είναι επίσης η εξέλιξη των δινών

αυτών οι οποίες αλλάζουν σε αριθμό και τοποθεσία εντός του καναλιού και μπορεί να οδηγήσουν σε χαοτική ανάμιξη. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας της ολοκληρωμένης διάταξης για ικανοποιητική πτώση πίεσης, συγκριτικά με τα συνήθη ευθύγραμμα, παράλληλα κανάλια [25], [26].



Σχήμα 1. 12: Σχηματική αναπαράσταση κυματοειδούς καναλιού [25]

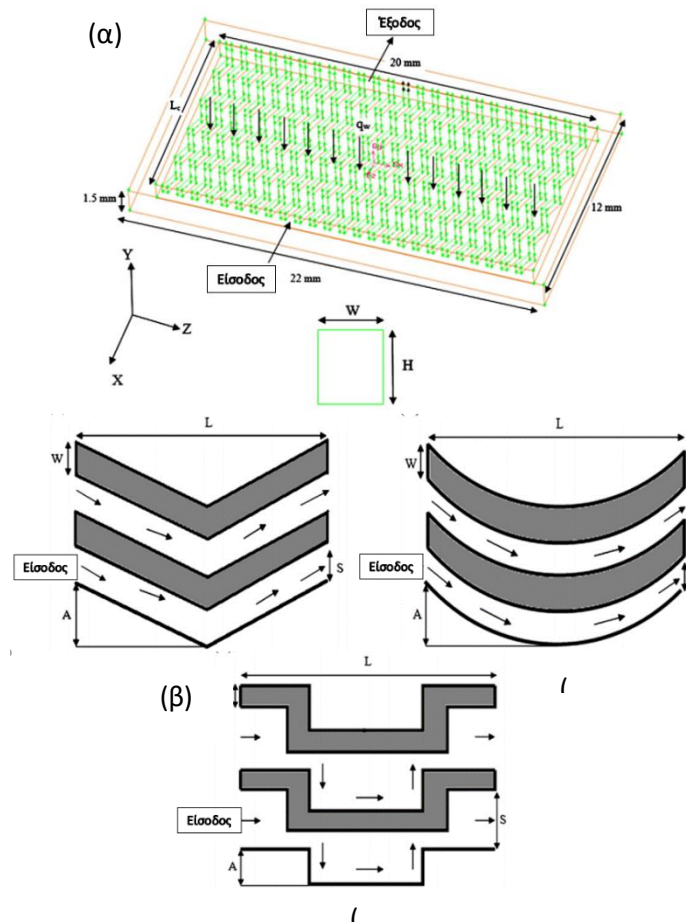


Σχήμα 1. 13: Παράδειγμα κυματοειδών καναλιών με (α) σταθερό μήκος κύματος (β) φθίνων μήκος κύματος και (γ) συνδυασμός μεγάλου και μικρού μήκους κύματος [25]

Όσον αφορά τα κυματοειδή κανάλια με συνδυασμό μηκών κύματος μπορούν να αξιοποιηθούν σε διατάξεις όπου τοπικά υπάρχει μεγάλη θερμοροή, στις οποίες θα αντιστοιχεί περιοχή του καναλιού με μικρό μήκος κύματος και άρα ακόμα μεγαλύτερη ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας [25], [26].

#### 1.4.5. Ζιγκ-Ζαγκ, καμπυλωτά και βηματικά κανάλια

Οι Mohammed et al. [27] μελέτησαν υπολογιστικά την επίδραση της γεωμετρίας των ζιγκ-ζαγκ, καμπυλωτών και βηματικών καναλιών (βλ. Σχήμα 1. 14 (β), (γ) και (δ)) τετραγωνικής διατομής στη θερμική και υδραυλική συμπεριφορά της ροής. Τα υπολογιστικά προβλήματα που έλεγξαν ανήκαν σε εύρος αριθμών Reynolds 100 – 1000.



Σχήμα 1. 14: Σχηματική αναπαράσταση (α) ολοκληρωμένης διάταξης (β) καναλιών ζιγκ-ζαγκ (γ) κυρτών καναλιών (δ) βηματικών καναλιών [27]

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας συμπεριλαμβάνουν το πεδίο θερμοκρασίας, το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, τη πτώση πίεσης, το συντελεστή τριβής και τη διατμητική τάση στο τοίχωμα. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με αυτά των ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών και των κυματοειδών καναλιών. Τα συμπεράσματα της έρευνας είναι τα εξής: η θερμοκρασία ελαχιστοποιείται και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεγιστοποιείται στις διατάξεις των καναλιών ζιγκ-ζαγκ [27].

Η δεύτερη καλύτερη θερμική απόδοση παρατηρείται στα κυρτά κανάλια που ακολουθούν τα κυματοειδή. Η πτώση πίεσης σε όλα τα είδη καναλιών που μελετήθηκαν ήταν μεγαλύτερη από τα συνήθη ευθύγραμμο παράλληλα κανάλια με τα κανάλια ζιγκ-ζαγκ να παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη πτώση πίεσης καθώς και το μεγαλύτερο συντελεστή τριβής ακολουθούμενα από τα κυματοειδή, τα κυρτά και τα βηματικά κανάλια.

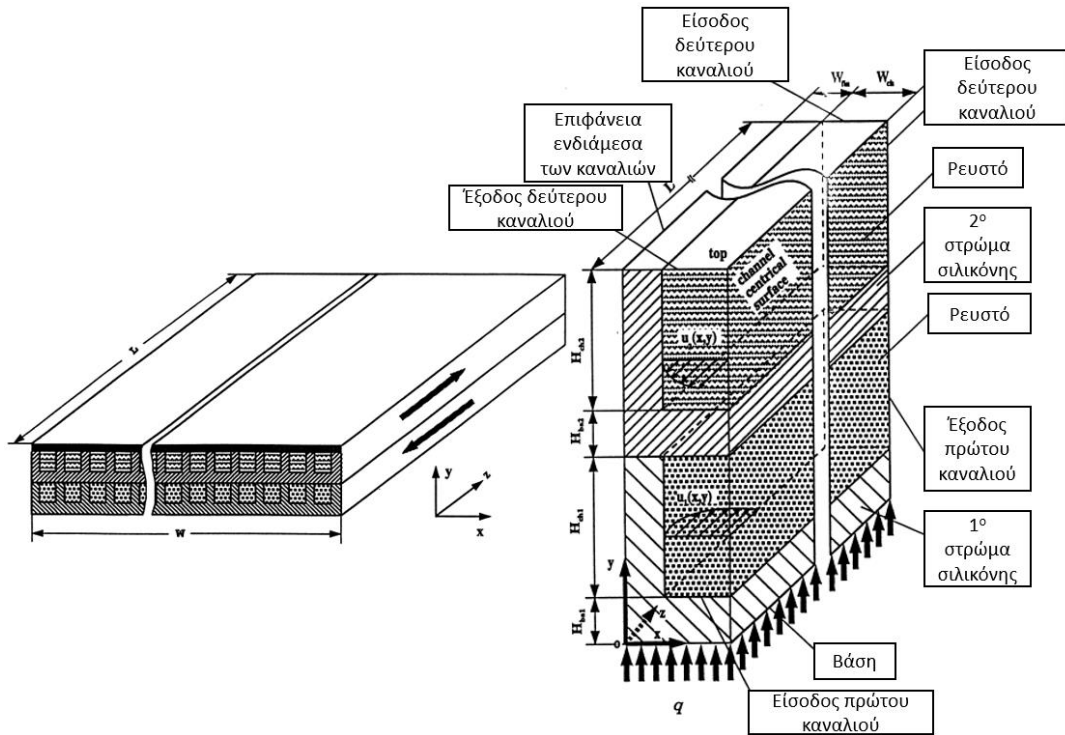
#### 1.4.6. Ευθύγραμμο αντιπαράλληλα κανάλια σε δύο επίπεδα

Οι Vafai και Zhu [28] μελέτησαν υπολογιστικά τη διάταξη ευθύγραμμων αντιπαράλληλων καναλιών που φαίνεται στο Σχήμα 1. 15. Η θερμική απόδοση διάταξης διερευνάται και βελτιστοποιείται μεταβάλλοντας κάποιες σχεδιαστικές παραμέτρους. Όπως γίνεται προφανές από το παρακάτω σχήμα το εργαζόμενο ρευστό εισέρχεται στα δύο κανάλια με αντιπαράλληλη φορά. Δηλαδή σε μια οποιαδήποτε κάθετη τομή  $xy$  της γεωμετρίας, τα διανύσματα της ταχύτητας έχουν διαφορετική φορά. Για τη βελτιστοποίηση της θερμικής απόδοσης εξετάζονται συγκεκριμένες γεωμετρικές παράμετροι [28].

Ελέγχεται η επίδραση του λόγου  $\frac{W_{ch}}{W_{fin}}$  και  $\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2}$  στη θερμική αντίσταση του καναλιού.

Τα μεγέθη  $W_{ch}$  και  $W_{fin}$  αντιστοιχούν στο πάχος του καναλιού και στο πάχος του στερεού που μεσολαβεί ενδιάμεσα στα κανάλια που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, ενώ τα μεγέθη  $\Delta p_1$  και  $\Delta p_2$  αντιστοιχούν στη πτώση πίεσης του κάτω και πάνω καναλιού όπως αυτά εμφανίζονται στο Σχήμα 1. 15. Έχει βρεθεί ότι οι λόγοι  $\frac{W_{ch}}{W_{fin}} = 0.6$  και  $\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} =$

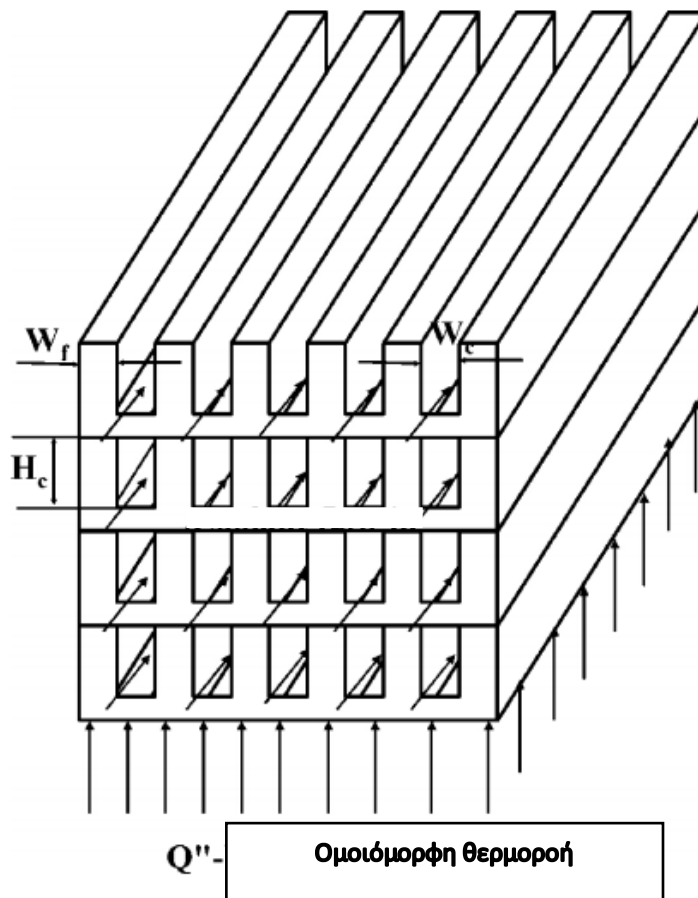
2.5 – 3.0 είναι οι βέλτιστοι για τη μικρότερη θερμική αντίσταση του καναλιού. Γίνεται επίσης σύγκριση με αντίστοιχη διάταξη συμβατικών ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών ενός επιπέδου και η θερμική συμπεριφορά της διάταξης των ευθύγραμμων αντιπαράλληλων καναλιών δύο επιπέδων απάγει πιο αποτελεσματικά θερμότητα.



Σχήμα 1. 15: Σχηματική αναπαράσταση ευθύγραμμων αντιπαράλληλων καναλιών [28]

#### 1.4.7. Στοιβαγμένα ευθύγραμμο παράλληλα κανάλια σε 3 ως και 5 επίπεδα

Μελετήθηκε υπολογιστικά από τους Wei και Joshi [29] η διάταξη στοιβαγμένων ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών με 3 ως και 5 επίπεδα όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. 16. Εκτελέστηκε αριθμητική προσομοίωση μοντέλου συζευγμένης μεταφοράς θερμότητας και υπολογίστηκε η θερμική αντίσταση του ολικού δικτύου η οποία και συγκρίθηκε με τη συνήθη γεωμετρία των ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών ενός επιπέδου. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι η στοιβαγμένη διαμόρφωση για συγκεκριμένη απαίτηση ως προς τη ποσότητα της απαγόμενης ενέργειας και αριθμό επιπέδων μεγαλύτερο του 2 χρειάζεται λιγότερη αντλητική δύναμη για την επίτευξη του στόχου της συγκριτικά με τα ευθύγραμμο παράλληλα κανάλια ενός επιπέδου.



Σχήμα 1. 16: Σχηματική αναπαράσταση ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών για διάταξη 4 στοιβαγμένων επιπέδων

Συμπεραίνεται επίσης ότι η αύξηση των επιπέδων έχει επίδραση στο πόσο αποτελεσματικά απάγεται θερμότητα μόνο όταν το υλικό στο οποίο είναι ενσωματωμένα τα κανάλια έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα (π.χ. χαλκός ή αλουμίνιο). Για υλικά όπως ο χάλυβας, η αύξηση των επιπέδων δεν θα έχει αρκετή επίδραση λόγω του ότι η θερμότητα δεν θα μεταφέρεται αρκετά γρήγορα στα ανώτερα επίπεδα που βρίσκονται μακριά από τη επιφάνεια θερμοροής, καθιστώντας τα αχρείαστα.

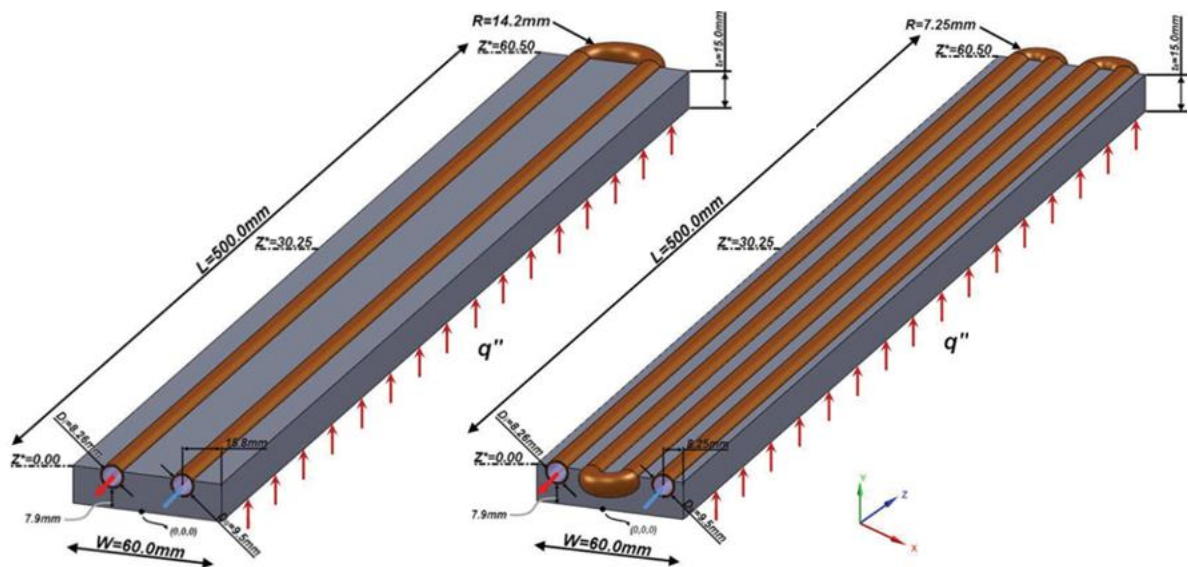
#### 1.4.8. Σωλήνες τύπου μαιάνδρου

Μια άλλη διαδεδομένη διάταξη σε ηλιακά συστήματα, κυρίως σε επίπεδους συλλέκτες, αλλά και σε συγκεντρωτικούς με επίπεδο απορροφητή, είναι ο σωλήνας τύπου μαιάνδρου. Οι Karathanasis et al. [30] μελέτησαν υπολογιστικά τη διάταξη τέτοιου

σωλήνα, ενσωματωμένου σε απορροφητική επιφάνεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. 17 με μοντέλο συζευγμένης μεταφοράς θερμότητας για αριθμό Reynolds ίσο με 5124 και τυρβώδη ροή.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. 17 οι διατάξεις που μελετήθηκαν ήταν 2 και 4 περασμάτων, στην αριστερή και δεξιά εικόνα αντίστοιχα. Η γεωμετρία μαιάνδρου, όπως και οι προηγούμενες γεωμετρίες καναλιών που έχουν μελετηθεί βασίζεται στη παραμόρφωση του προφίλ της ταχύτητας με σκοπό τη διαταραχή του θερμικού οριακού στρώματος και κατ' επέκταση τη μίξη του θερμού ρευστού κοντά στο τοίχωμα με το ψυχρό ρευστό που βρίσκεται στο κέντρο του καναλιού [30].

Τα αποτελέσματα της έρευνας ανέδειξαν ότι και στις δύο περιπτώσεις, στο σημείο όπου αλλάζει η κατεύθυνση της ροής λόγω της στροφής του καναλιού, δημιουργείται ένα ζεύγος τοπικών δινών κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα, ένα ζεύγος δινών τύπου Dean και ένα ζεύγος λοξών δινών στο κέντρο του αγωγού. Οι δίνες αυτές παραμένουν μετά τη στροφή του αγωγού και κινούνται κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος όπου και φθίνουν σε ένταση μέχρι την επόμενη στροφή όπου ενισχύονται ξανά. Ελέγχοντας την ίδια γεωμετρία για μικρότερους αριθμούς Reynolds του εύρους 400-1600 ανέδειξε ότι η δημιουργία δινών εξακολουθεί να εμφανίζεται [30].



Σχήμα 1. 17: Σχηματική αναπαράσταση καναλιών τύπου μαιάνδρου [30]



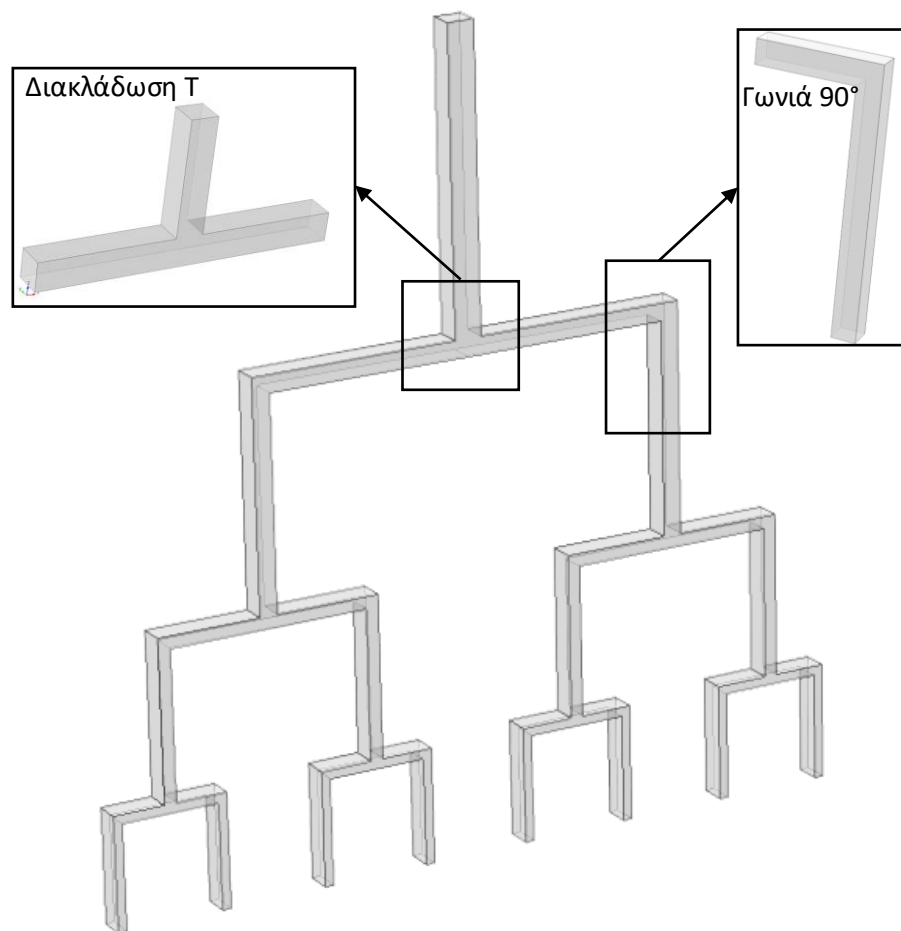
Όσον αφορά τη θερμοκρασία της απορροφητικής επιφάνειας, αυτή μεγιστοποιείται στο πλάγιο τοίχωμα που βρίσκεται κοντά στην έξοδο του ρευστού και μειώνεται όταν ο αγωγός είναι πλήρως ενσωματωμένος στη πλάκα. Ο υπολογισμός του αριθμού Nusselt δείχνει ότι η μεταφορά θερμότητας ενισχύεται σημαντικά στις περιοχές που διαταράσσεται η ροή λόγω του σχηματισμού των δινών που εκτείνονται κατά μήκος της κύριας διεύθυνσης της ροής.

Συγκρίνοντας τις δύο διατάξεις μεταξύ τους, βρέθηκε ότι ο αγωγός με 2 περάσματα είχε μικρότερη πτώση πίεσης και καλύτερη ομοιομορφία στη θερμοκρασία της απορροφητικής επιφάνειας αλλά ο αγωγός με 4 περάσματα είχε μικρότερη συνολική θερμική αντίσταση και μέγιστη θερμοκρασία [30].

## 1.5. Διακλαδούμενο δίκτυο καναλιών και δομικός νόμος (constructal law)

### 1.5.1. Διακλαδούμενο δίκτυο καναλιών

Αφού έχουν αναφερθεί κάποιες από τις βασικές διατάξεις απαγωγής θερμότητας που έχουν μελετηθεί σε προηγούμενες έρευνες, έρχεται η σειρά της παρουσίασης της γεωμετρίας που θα μελετηθεί εις βάθος στην παρούσα διπλωματική εργασία. Πρόκειται για τη διάταξη διακλαδούμενων καναλιών. Η συγκεκριμένη διάταξη αναπαρίσταται στο Σχήμα 1. 18, έτσι όπως κατασκευάζεται στο λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος.



Σχήμα 1. 18: Τριδιάστατη αναπαράσταση πλήρους γεωμετρίας διακλαδούμενων καναλιών με 4 επίπεδα διακλάδωσης

Αυτή η γεωμετρία καναλιών προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Adrian Bejan το 1997[31]. Τα ορθογωνικά κανάλια με διακλαδώσεις είναι ένας συνδυασμός διακλαδώσεων T και γωνιών  $90^\circ$  που όταν τοποθετηθούν σε σειρά κατά την αλληλουχία που φαίνεται παραπάνω, δημιουργούν τη γεωμετρία που θα μελετηθεί. Πέρα από τα ορθογωνικά κανάλια με διακλαδώσεις μελετώνται επίσης διατάξεις με διακλαδώσεις Y και γωνίες που ανήκουν στη περιοχή  $30^\circ - 80^\circ$ . Οι διατάξεις αυτές αναπαρίστανται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις γεωμετρίες αυτές. Οι συγκεκριμένες διατάξεις πιστεύεται ότι αξιοποιούν αποτελεσματικά το διαθέσιμο χώρο με αποτέλεσμα τη βέλτιστη απόδοση. Ο λόγος για τον οποίο αναπτύχθηκε αυτό το σκεπτικό είναι ότι οι ροές που θυμίζουν τις διακλαδώσεις δέντρων συναντώνται συχνά στη φύση και αποτελούν τον κανόνα και όχι την εξαίρεση [32].

Αυτό το είδος διάταξης ορίζει το σχεδιασμό έμβιων και άβιων συστημάτων ροής όπως για παράδειγμα στους πνεύμονες, αγγειακούς ιστούς, νευρικά συστήματα, λεκανοπέδια και δέλτα ποταμών, αστραπές, νιφάδες χιονιού, βλάστηση κ.α. Η εμπειρική οπτική γωνία των φυσικών επιστημών είναι ότι οι δενδριτικές ροές είναι αποτέλεσμα αυθόρμητης αυτο-οργάνωσης και αυτο-βελτιστοποίησης. Εν αντιθέσει με αυτή την αντίληψη, η δομική θεωρία αναφέρει ότι οι δενδριτικές αρχιτεκτονικές ροές είναι το αποτέλεσμα της φυσικής εξέλιξης προς καλύτερη ροϊκή πρόσβαση. Η ροή διακλαδούμενων καναλιών είναι συναγόμενη από τον δομικό νόμο [32].

Τα συστήματα διακλαδούμενων καναλιών φαίνεται να έχουν επιζήσει με το πέρασμα του χρόνου στη φύση αλλά και στη μηχανική, λόγω του ότι είναι αποδοτικά και αξιοποιούν το διαθέσιμο χώρο αποτελεσματικά. Αυτές οι διατάξεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές στη μηχανική όπου η αποδοτικότητα και ο τρόπος που αξιοποιείται ο διαθέσιμος χώρος είναι κλειδιά για το σχεδιασμό και την ολοκλήρωση εξαρτημάτων μικρότερης κλίμακας μεγέθους [32].

Κοινό χαρακτηριστικό των διατάξεων διακλαδούμενων καναλιών είναι το ότι αποτελούνται από δύο φαινομενικά ανόμοιους μηχανισμούς ροής. Ο ένας μηχανισμός

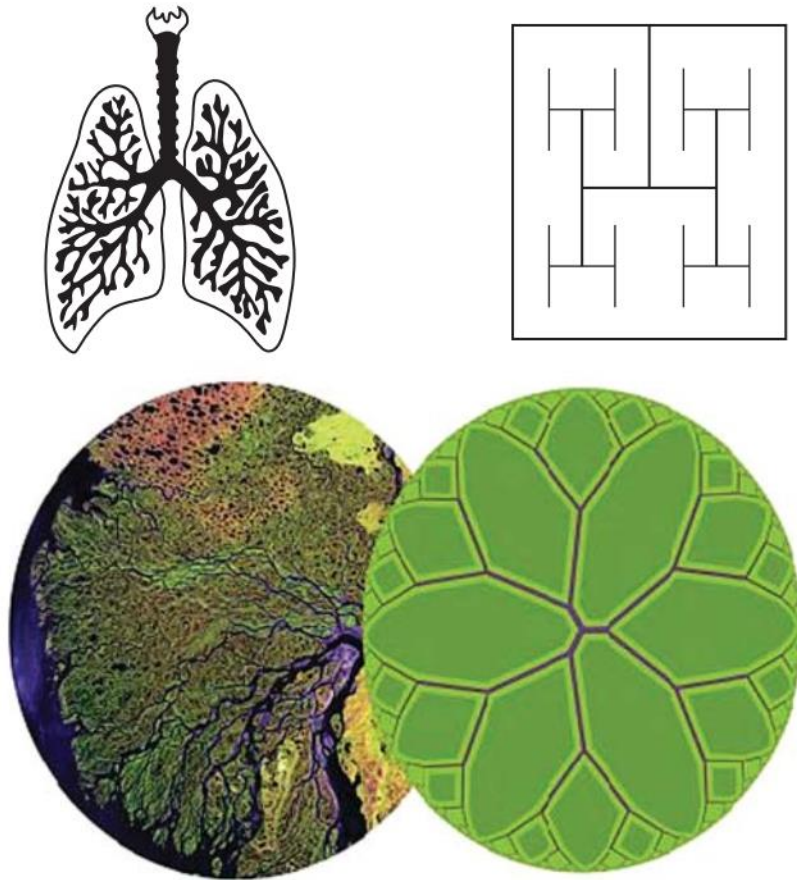
προκαλεί μικρή αντίσταση στη ροή και αντιστοιχεί στα ευθύγραμμα τμήματα των καναλιών και ο δεύτερος μηχανισμός που προκαλεί μεγάλη αντίσταση στη ροή αντιστοιχεί στις διακλαδώσεις T και Y και στις γωνίες εκτροπής της ροής. Η ροή που οδηγεί σε βέλτιστη πτώση πίεσης και απαγωγή θερμότητας επιτυγχάνεται όταν τα κανάλια της δενδριτικής ροής οργανώνονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε τα τμήματα που προκαλούν μεγάλη αντίσταση στη ροή να βρίσκονται στα σημεία μικρής κλίμακας της διάταξης ενώ αντίθετα τα τμήματα μικρής αντίστασης να καταλαμβάνουν τις μεγαλύτερες κλίμακες της διάταξης. Ο συνδυασμός των δύο μηχανισμών για την ευκολία της πρόσβασης της ροής είναι κοινός στη φύση και εφόσον οι αντιστάσεις στη ροή δεν μπορούν να εξαλειφθούν, αυτό που μένει, είναι η αναδιοργάνωση τους με τέτοιο τρόπο που οδηγεί στη συνύπαρξη τους σε ένα πεπερασμένο όγκο με ελάχιστη επίδραση στην αποδοτικότητα του συστήματος [32]. Πέραν των πλεονεκτημάτων, όσον αφορά την αντίσταση στη ροή, ο συνδυασμός των δύο διακλαδώσεων που εκτρέπει τη ροή και διαταράσσει το προφίλ της θερμοκρασίας και της ταχύτητας, έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας σε τέτοιες διαμορφώσεις.

### 1.5.2. Δομικός νόμος

Ο δομικός νόμος πάνω στον οποίο βασίζεται η έμπνευση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι δημιούργημα του Adrian Bejan [31]–[34]. Σύμφωνα με τον Bejan η ροή αντιπροσωπεύει τη κίνηση μιας οντότητας σχετικά με κάποια άλλη. Για να περιγράψουμε μια ροή αναφερόμαστε στο τι μεταφέρει η ροή (ρευστό, θερμότητα, μάζα), πόση ποσότητα μεταφέρει (μαζική παροχή, ρεύμα θερμότητας) και που βρίσκεται το ρεύμα της ροής αυτής στο διαθέσιμο χώρο. Το **που** είναι το κέντρο εστίασης του δομικού νόμου [32], [35].

Συνήθως στην επιστήμη, η διαμόρφωση ενός συστήματος ροής αγνοείται. Το σχέδιο θεωρείται δεδομένο και αποδίδεται στη τύχη, την έμπνευση, το ταλέντο και τη τέχνη. Η θεώρηση του σχεδιασμού ως επιστήμη επιφέρει τεράστια πλεονεκτήματα. Η πορεία προς μικρότερες διαστάσεις της τάξεως του μικρο και νανο, δεν εστιάζει στη δημιουργία ολοένα μικρότερων εξαρτημάτων αλλά στο πως διατάσσονται τα στοιχειώδη

εξαρτήματα κάθε συστήματος με τέτοιο τρόπο που να επικοινωνούν αποτελεσματικά μεταξύ τους, όπως οι νευρώνες ενός εγκεφάλου ή οι κυψελίδες των πνευμόνων. Είναι η σωστή και αποτελεσματική διάταξη αυτών των μεμονωμένων εξαρτημάτων που οδηγεί στην εντυπωσιακά αποδοτική λειτουργία των βιολογικών και άλλων φυσικών συστημάτων [32], [35].



*Σχήμα 1. 19: Διατάξεις ροών που προκύπτουν βάσει του δομικού νόμου [32]*

Λόγω του ότι τα φυσικά συστήματα ροής έχουν συγκεκριμένες διαμορφώσεις ο δομικός νόμος αντιμετωπίζει την εμφάνιση αυτών των συστημάτων ως φυσικό φαινόμενο το οποίο βασίζεται σε κάποια επιστημονική αρχή. Η θεωρία αυτή είναι η πεποίθηση ότι οι διατάξεις ροής που παρατηρούνται στη φύση (λεκανοπέδια ποταμών, πνεύμονες, ατμοσφαιρική κυκλοφορία, αγγειακοί ιστοί κ.α.) μπορούν να διασαφηνιστούν βάσει μιας εξελικτικής αρχής που οδηγεί σε μεγαλύτερη ευκολία πρόσβασης της ροής. Αυτή η αρχή είναι ο δομικός νόμος και συνοψίζεται ως εξής: «Για

να επιμείνει στο χρόνο ένα σύστημα ροής πεπερασμένου μεγέθους, η διαμόρφωση του πρέπει να είναι τέτοια ώστε να προσφέρει συνεχώς ευκολότερη πρόσβαση στο ρεύμα που τη διαρρέει» [32].

Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα της αρχής του δομικού νόμου και διαμόρφωσης που ενώνει ένα δομικό στοιχείο με πολλά άλλα είναι η διάταξη των διακλαδούμενων καναλιών που θυμίζουν δέντρο που διακλαδώνεται. Η δενδριτική διαμόρφωση είναι η βασική αρχιτεκτονική ροής που έχει κεντρικό ρόλο στις διατάξεις του δομικού νόμου.

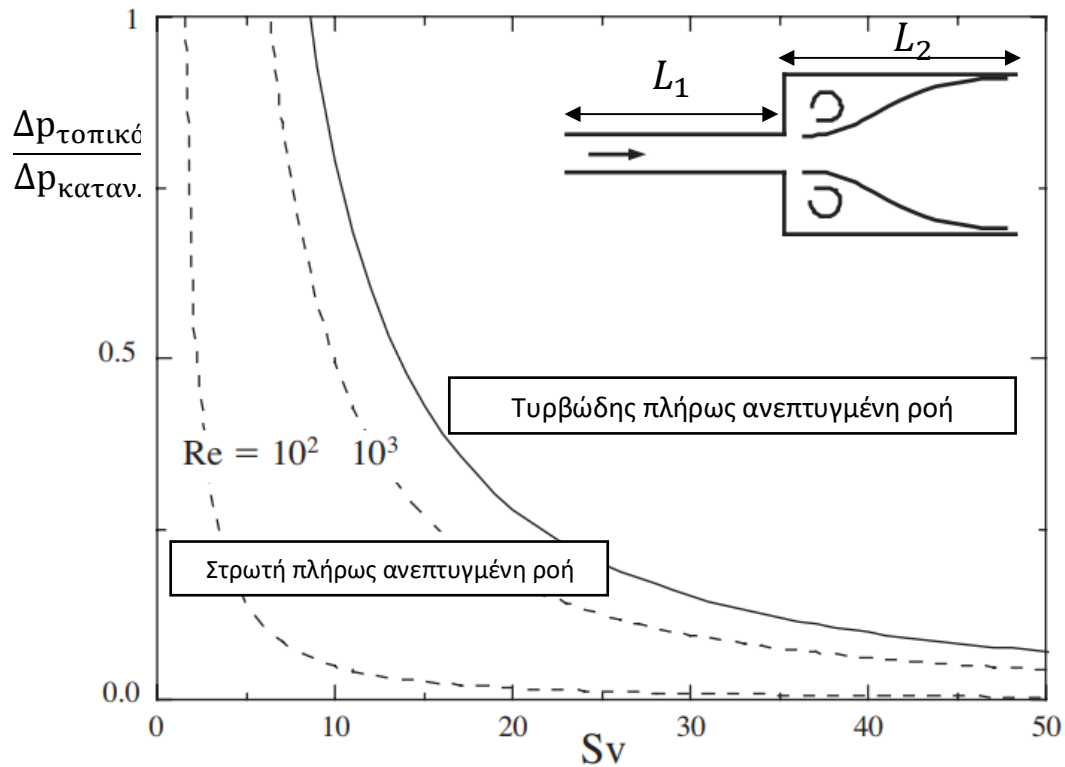
Εξετάζοντας περισσότερο την αρχή του δομικού νόμου, αποκαλύπτονται διατάξεις που έχουν όλο και περισσότερα κοινά με τους ζωντανούς οργανισμούς, και πιο συγκεκριμένα το τρόπο που διατάσσεται το αγγειακό σύστημα στους ιστούς τους. Η τάση για την εμφάνιση τέτοιων διατάξεων ονομάζεται αγγείωση. Κάθε δομή πολλαπλής κλίμακας που πρέπει να ψυχθεί, θερμανθεί, ή να διαπεραστεί από ρεύματα ροής πρέπει να αγγειωθεί. Αυτό σημαίνει δενδριτικές διατάξεις, διαστήματα και στερεά τοιχώματα με ποικίλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τοποθετημένα στις κατάλληλες θέσεις του διαθέσιμου χώρου. Αυτές οι διαμορφώσεις στερεού-ρευστού πολλαπλής κλίμακας, είναι κατανοητές τόσο ανομοιόμορφα στον όγκο ελέγχου, που το σχέδιο τους μπορεί να θεωρηθεί λανθασμένα ως τυχαίο, όπως η ποικιλότητα των ζώων συγγέεται με τυχειότητα ενώ πρόκειται για αποτύπωμα του δομικού νόμου [32].

Η διαμόρφωση ενός συστήματος ροής χαρακτηρίζεται από ένα εξωτερικό μέγεθος που αντιστοιχεί στο συνολικό μήκος της διάταξης και ένα εσωτερικό μέγεθος που αντιστοιχεί στον όγκο των καναλιών και δίνεται από το  $V^{\frac{1}{3}}$ . Μια καθολική γεωμετρική ιδιότητα που συνδυάζει τα δύο μεγέθη είναι η λυγερότητα (sveltiness,  $Sv$ ) που δίνεται από τη σχέση:

$$Sv = \frac{\text{εξωτερικό μήκος ροής}}{\text{εσωτερικό μήκος ροής}} \quad (1.1)$$

Αυτό το μέγεθος είναι σημαντικό διότι περιγράφει τη καθολική αρχιτεκτονική της ροής και όχι τη κινηματική και τη δυναμική της. Στη ροή σε κανάλια, αυτή η ιδιότητα περιγράφει τη σχετική σημασία των απωλειών τριβής που κατανέμονται κατά μήκος του

αγωγού ( $\Delta p_{\text{καταν.}}$ ) ως προς τις τοπικές πτώσεις στη πίεση ( $\Delta p_{\text{τοπικό}}$ ) που εμφανίζονται σε διακλαδώσεις, γωνίες 90°, συστολές, και διαστολές [32].



Σχήμα 1. 20: Λόγος τοπικής προς κατανομημένης πτώσης πίεσης συναρτήσει της λυγερότητας για διάφορους αριθμούς  $Re$  [32]

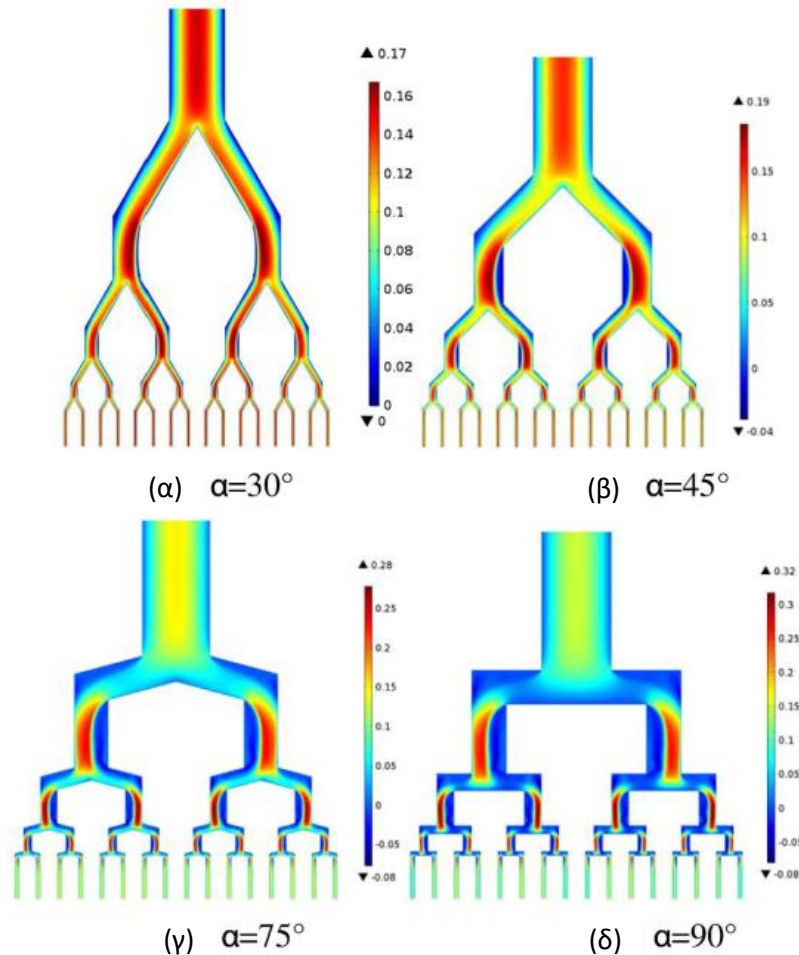
Για την κατανόηση του μεγέθους της λυγερότητας δίνεται η διάταξη που φαίνεται στην άνω δεξιά γωνία του Σχήματος 1. 20. Για τη διάταξη αυτή το  $Sv$  ορίζεται ως εξής:

$$Sv = \frac{(L_1 + L_2)}{V^{\frac{1}{3}}}$$

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα στο Σχήμα 1. 20, για την συγκεκριμένη διάταξη, ο λόγος των απωλειών μειώνεται δραστικά με την αύξηση του μεγέθους  $Sv$ . Όταν το  $Sv$  ξεπεράσει τη τάξη του 10, οι τοπικές απώλειες στις διαμορφώσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως, σε σχέση με αυτές που εμφανίζονται κατά μήκος της ροής γίνονται αμελητέες. Από αυτό το απλό παράδειγμα γίνεται κατανοητό το ότι το μέγεθος αυτό είναι μια καθολική ιδιότητα που εκφράζει το 'απόθεμα' χώρου της ροής και οδηγεί το μηχανικό στην εκτίμηση της απόδοσης της διαμόρφωσης της ροής.

### 1.5.3. Μελέτες με εφαρμογή διακλαδούμενου δικτύου καναλιών

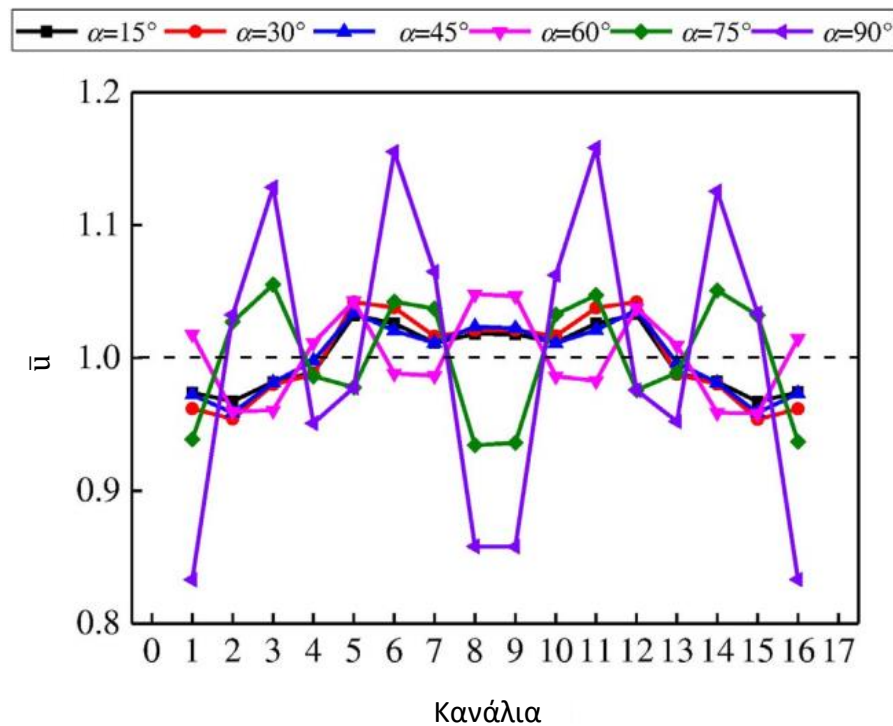
Αρχικά, αξίζει να αναφερθεί ότι ο αριθμός των ερευνών που έχουν διεξαχθεί πάνω στη συγκεκριμένη διαμόρφωση καναλιών είναι αρκετά περιορισμένος. Η πρώτη έρευνα που θα παρουσιαστεί είναι αυτή των Cao et al. [36]. Η συγκεκριμένη έρευνα είχε ως θέμα την αριθμητική ανάλυση της επίδρασης της γωνίας διακλάδωσης και της ταχύτητας εισόδου στην ομοιόμορφη κατανομή της παροχής στα κανάλια εξόδου της διάταξης. Η υπολογιστική έρευνα αφορούσε διδιάστατο μοντέλο ρευστοδυναμικής και εστίαζε μόνο στο πεδίο ταχύτητας της διάταξης. Οι γεωμετρίες που μελετήθηκαν με τα αντίστοιχα πεδία ταχυτήτων φαίνονται στο Σχήμα 1. 18 [36].



Σχήμα 1. 21: Σχηματική αναπαράσταση της κατανομής της ταχύτητας σε διδιάστατη γεωμετρία διακλαδούμενων καναλιών με γωνίες διακλάδωσης (α)  $\alpha=30^\circ$  (β)  $\alpha=45^\circ$  (γ)  $\alpha=75^\circ$  (δ)  $\alpha=90^\circ$  [36]



Το Σχήμα 1. 21 δείχνει το πεδίο ταχύτητας για διαφορετικές γωνίες διακλάδωσης. Όπως γίνεται προφανές, όσο πιο μεγάλη είναι η γωνία διακλάδωσης, τόσο περισσότερο ο κύριος όγκος της ροής τείνει να μένει κοντά στο τοίχωμα όπου προσκρούεται με αποτέλεσμα να υπάρχει ανομοιομορφία στην κατανομή της ταχύτητας στα κανάλια εξόδου. Αυτό συμβαίνει διότι το μήκος του αγωγού μετά της διακλαδώσεις T και Y και τις γωνίες  $(90^\circ - \alpha)$  μοιρών δεν προλαβαίνει να ανακτήσει το γνωστό παραβολικό προφίλ. Αυτή η ανομοιομορφία συνεχίζεται και στις επακόλουθες διακλαδώσεις της ροής, με αποτέλεσμα η ροή στα κανάλια εξόδου να είναι ανομοιομορφη [36].



Σχήμα 1. 22: Αδιάστατη μέση ταχύτητα σε κάθε κανάλι εξόδου για τις διάφορες γωνίες διακλάδωσης [36]

Στο Σχήμα 1. 22 φαίνεται η μέση αδιάστατη ταχύτητα σε κάθε κανάλι εξόδου για όλες της γωνίες διακλάδωσης που έγιναν σε αυτή την έρευνα. Όπως φαίνεται από το σχήμα αυτό η ανομοιομορφία στην ταχύτητα στα κανάλια εξόδου αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η γωνία διακλάδωσης. Για την ποσοτικοποίηση της ομοιομορφίας της ροής εφαρμόζονται δύο αδιάστατες παράμετροι: το  $\beta$  και το  $\xi$ . Οι παράμετροι αυτοί ορίζονται ως εξής:

$$\beta = \frac{\left( \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_i - u_{mean})^2}{n}} \right)}{u_{mean}} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

όπου  $u_i$ : μέση ταχύτητα εξόδου στο κανάλι  $i$

$u_{mean}$ : μέση ταχύτητα εξόδου όλων των καναλιών εξόδου

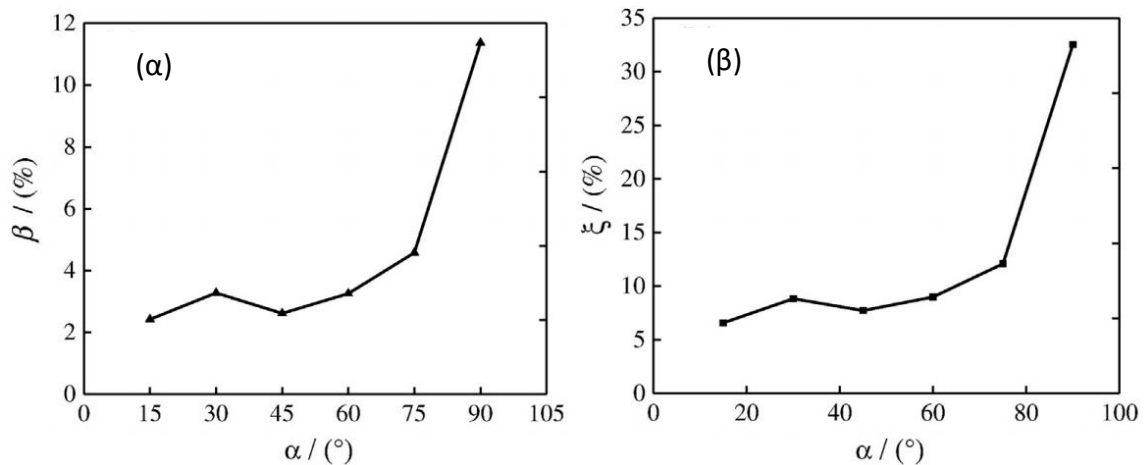
$n$ : πλήθος καναλιών

$$\xi = \frac{u_{max} - u_{min}}{u_{mean}} \quad (1.3)$$

όπου  $u_{max}$ : μέγιστη ταχύτητα εξόδου μεταξύ όλων των καναλιών εξόδου

$u_{min}$ : ελάχιστη ταχύτητα εξόδου μεταξύ όλων των καναλιών εξόδου

$u_{mean}$ : μέση ταχύτητα εξόδου όλων των καναλιών εξόδου



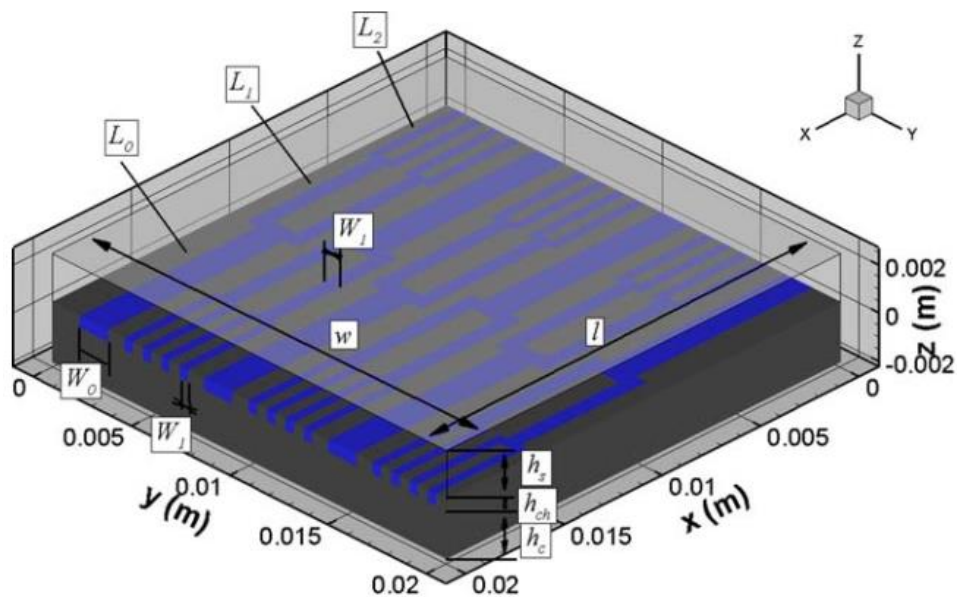
Σχήμα 1. 23: Διαγράμματα  $\beta(\%)$  και  $\xi(\%)$  συναρτήσεως της γωνίας διακλάδωσης ( $\alpha$ ) [36]

Όπως ήταν αναμενόμενο, κοιτάζοντας τη συμπεριφορά του  $\beta$  και του  $\xi$  αποδεικνύεται ξανά η αύξηση της ανομοιομορφίας της ροής στην έξοδο καθώς αυξάνεται η γωνία διακλάδωσης.

Άλλα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτή την έρευνα είναι ότι η μέγιστη πτώση πίεσης προκύπτει για τη γωνία διακλάδωσης των  $90^\circ$  και όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα εισόδου, τόσο πιο πολύ αποκλίνει η μέση ταχύτητα των καναλιών εξόδου από

την μέση ταχύτητα όλων των καναλιών. Πρόταση της έρευνας, είναι η μείωση του πάχους του κάθετου τμήματος του αγωγού και αύξηση του μήκους στο ίδιο τμήμα ώστε για να υπάρχει αρκετό μήκος για την επαναφορά του γνωστού, συμμετρικού, παραβολικού προφίλ ταχύτητας.

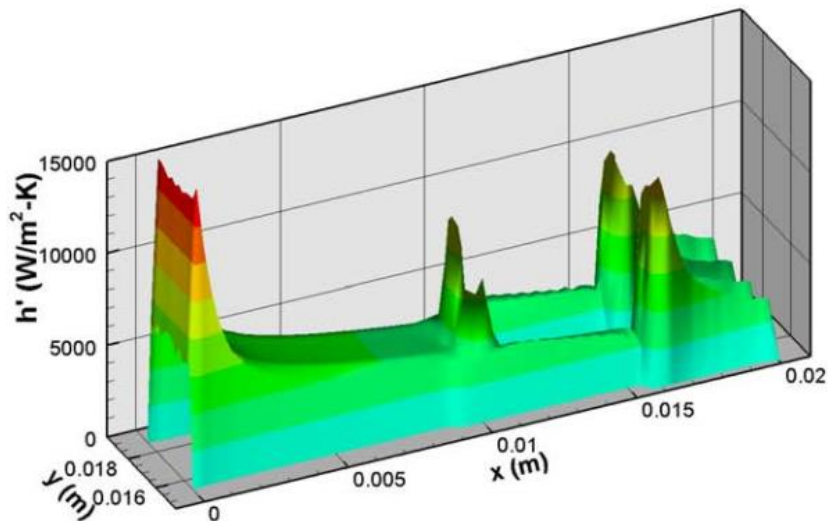
Επόμενη έρευνα που θα αναφερθεί πάνω στη διάταξη του διακλαδούμενου δικτύου καναλιών, είναι αυτή των Wang et. al [37]. Αντίθετα με την προηγούμενη έρευνα, που ασχολείται μόνο με το πεδίο της ταχύτητας και της πίεσης, η συγκεκριμένη μελέτη, διερευνά και τη θερμική συμπεριφορά του συστήματος, όταν υπάρχει θερμοροή. Η συγκεκριμένη έρευνα αφορά την υπολογιστική διερεύνηση των θερμικών χαρακτηριστικών διακλαδούμενου δικτύου μικροκαναλιών για τη ψύξη τετραγωνικής γεωμετρίας. Το μοντέλο που εξετάστηκε φαίνεται στο Σχήμα 1. 24. Η διάταξη του σχήματος δέχεται σταθερή θερμοροή στη βάση του και επιλύεται με μοντέλο συζευγμένης μεταφοράς θερμότητας. Οι διατάξεις που επιλύονται αποτελούνται από 4 και 6 δενδριτικές γεωμετρίες κατανεμημένες κατά πλάτος της γεωμετρίας και με εναλλασσόμενη φορά εισόδου του ρευστού, ενώ καθεμιά έχει 2 και 3 επίπεδα διακλάδωσης.



Σχήμα 1. 24: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης διακλαδούμενου δικτύου καναλιών με πολλαπλές δενδριτικές μονάδες διαταγμένες αντιπαράλληλα [37]

Το αποτέλεσμα για τις γεωμετρίες αυτές συγκρίνονται με τα αντίστοιχα για διατάξεις ευθύγραμμων, παράλληλων καναλιών και για κανάλι τύπου μαιάνδρου 11 περασμάτων. Τα αποτελέσματα συμπεριλαμβάνουν τη κατανομή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας κατά μήκος των καναλιών, την πτώση πίεσης και το πεδίο θερμοκρασίας.

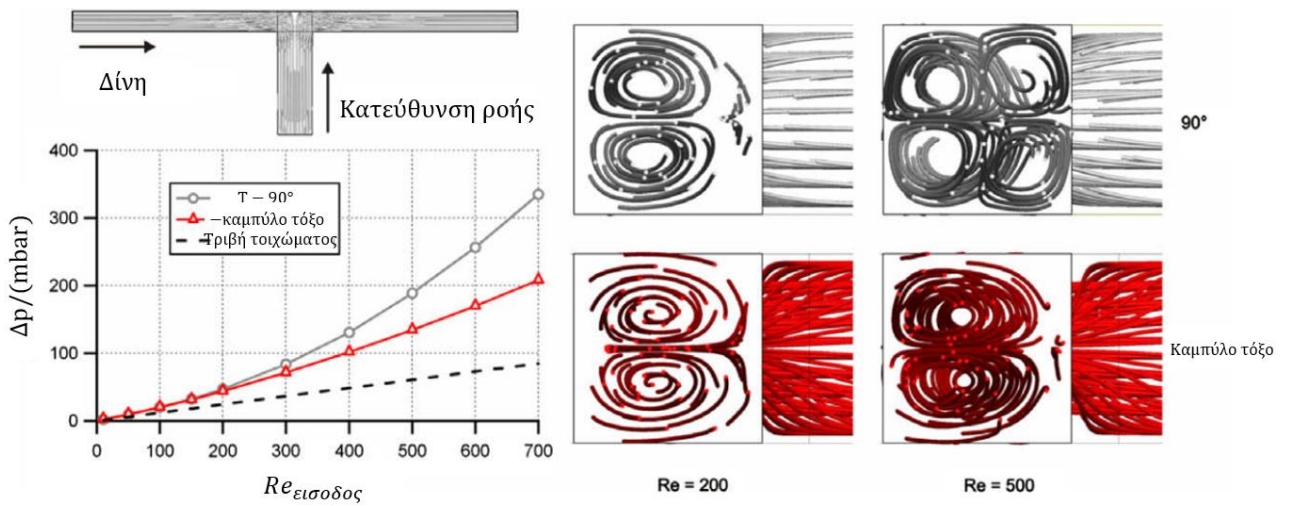
Τα συμπεράσματα της έρευνας είναι ότι οι δενδριτικές διατάξεις πλεονεκτούν ως προς την ομοιομορφία της θερμοκρασίας του στερεού στο οποίο είναι ενσωματωμένα, την πιθανότητα απόφραξης της ροής και την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας. Το πεδίο θερμοκρασίας των διατάξεων που μελετήθηκαν δείχνει ότι η αύξηση του αριθμού των δενδριτικών διατάξεων και των επιπέδων διακλάδωσης οδηγεί σε μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας.



Σχήμα 1. 25: Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της κάτω επιφάνειας και του ρευστού για διάταξη με 2 επίπεδα διακλάδωσης και 4 δενδριτικές διατάξεις [37]

Επόμενη σχετική έρευνα που παρουσιάζεται είναι αυτή των Haller et al. [38]. Η έρευνα τους αφορούσε την υπολογιστική και πειραματική διερεύνηση των απωλειών πίεσης και της μεταφοράς θερμότητας σε δίκτυο διακλαδούμενων καναλιών καθώς και σε διακλαδώσεις τύπου T και γωνίες 90°. Η ροή στις διατάξεις της έρευνας αντιστοιχεί σε αριθμούς Reynolds 10 – 3000, ενώ για το πρόβλημα της μεταφοράς θερμότητας θεωρήθηκε σταθερή θερμοκρασία στα τοιχώματα. Για τις βασικές δομές της

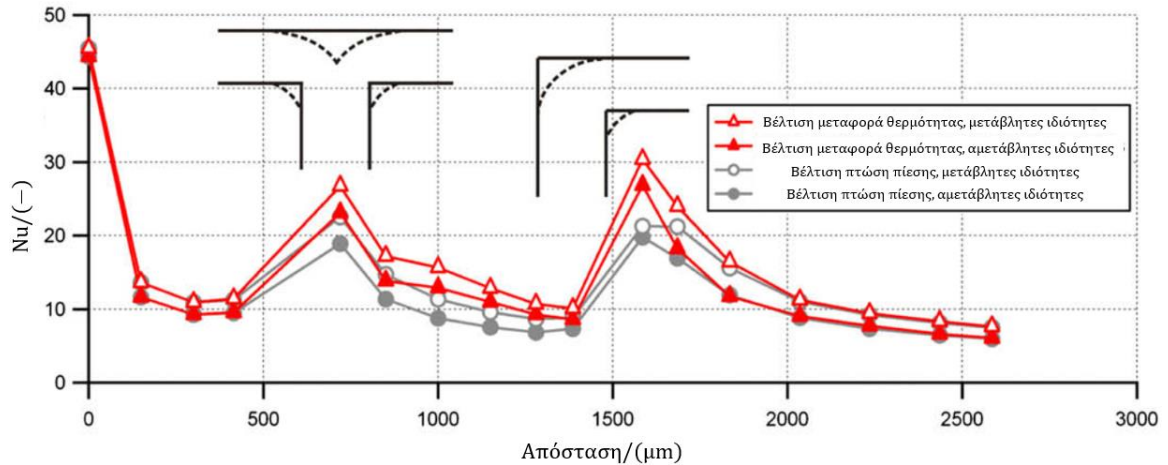
ολοκληρωμένης γεωμετρίας ερευνάται και η επίδραση καμπύλου τόξου (αντί για γωνία  $90^\circ$ ) στην ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας και στη πτώση πίεσης[38].



Σχήμα 1. 26: Πτώση πίεσης σε διακλάδωση T γωνίας  $90^\circ$  και με κύρτωμα για διάφορους αριθμούς  $Re$  και αναπαράσταση της δευτερογενούς ροής που προκύπτει μετά τη διακλάδωση [38]

Στο Σχήμα 1. 26 φαίνεται ότι το καμπύλο τόξο που προστίθεται αντί της απότομης γωνίας  $90^\circ$  έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πίεσης της διακλάδωσης T. Η αλλαγή κατεύθυνσης της ροής γίνεται πιο ομαλή λόγω του καμπύλου τόξου και το ρευστό δεν προσκρούεται στην επιφάνεια που βρίσκεται απέναντι από την είσοδο του ρευστού με αποτέλεσμα τα ροϊκά φαινόμενα που παρατηρούνται να είναι διαφορετικά. Για μικρούς αριθμούς Reynolds παρατηρούνται δύο συμμετρικές δίνες που περιστρέφονται με αντίθετη φορά αλλά στη περίπτωση του καμπύλου τόξου οι δίνες καταλαμβάνουν μεγαλύτερο χώρο στο κανάλι μετά από τη διακλάδωση. Σε μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds, για την γωνία  $90^\circ$  παρατηρούνται 4 δίνες που καταλαμβάνουν όλη τη διατομή του καναλιού ενώ στο κανάλι με το καμπύλο τόξο εξακολουθούν να υπάρχουν μόνο δύο δίνες που καταλαμβάνουν όλη τη διατομή του καναλιού αλλά είναι μεγαλύτερης έντασης ως προς τη στροβιλότητα τους. Παρόμοιο φαινόμενο παρατηρείται και στη πτώση πίεσης του αγωγού γωνίας  $90^\circ$  όμως οι δίνες που εμφανίζονται στη περίπτωση αυτή είναι μόνο δύο. Αναμένεται από την μειωμένη πτώση πίεσης και την εξασθένιση των δινών που δημιουργούνται να μειώνεται η ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας στις

μονάδες που προστίθεται το καμπύλο τόξο. Κοιτάζοντας το Σχήμα 1. 27 παρατηρείται ακριβώς αυτό. Όταν προστίθεται το κύρτωμα για μείωση της πτώσης πίεσης, μειώνεται και η ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας.

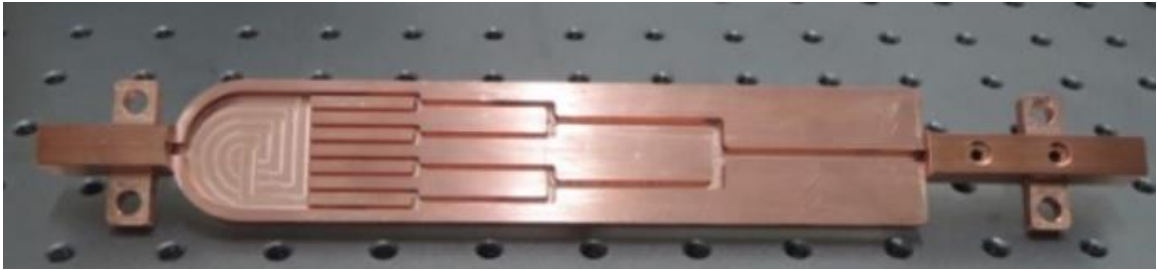


Σχήμα 1. 27: Αριθμός Nusselt κατά μήκος διακλάδωσης  $T$  και συνεχόμενης γωνιάς  $90^\circ$  για βέλτιστη μεταφορά θερμότητας και πτώση πίεσης για μεταβλητές και αμετάβλητες ιδιότητες ρευστού

Όπως και οι προηγούμενες έρευνες, και αυτή καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η διαταραχή της ροής και ανακατεύθυνση της προκαλεί ενίσχυση στη μεταφορά θερμότητας. Συμπεραίνεται επίσης ότι η προσθήκη καμπύλου τόξου στα σημεία όπου γίνεται αλλαγή της κατεύθυνσης προκαλεί μικρότερη πτώση πίεσης θυσιάζοντας όμως την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας.

Τελευταία έρευνα που αξίζει να αναφερθεί είναι αυτή των Shui et al. [39]. Η συγκεκριμένη έρευνα αφορά πειραματική και αριθμητική διερεύνηση της ροής αέρα διαμέσου διακλαδούμενου δικτύου καναλιών και το πως επηρεάζεται η μεταφορά θερμότητας σε αυτή. Η διάταξη που μελετήθηκε αφορούσε γωνίες διακλάδωσης μόνο  $90^\circ$  και το εργαζόμενο ρευστό είναι αέρας και ατμός, ενώ τα υπολογιστικά πειράματα έγιναν σε τριδιάστατες διατάξεις αντί διδιάστατες όπως την προηγούμενη που αναφέρθηκε. Επίσης το υπολογιστικό μοντέλο θεωρεί συζευγμένη μεταφορά θερμότητας, που είναι και αυτή που χαρακτηρίζει τέτοιου είδους προβλήματα, ενώ η

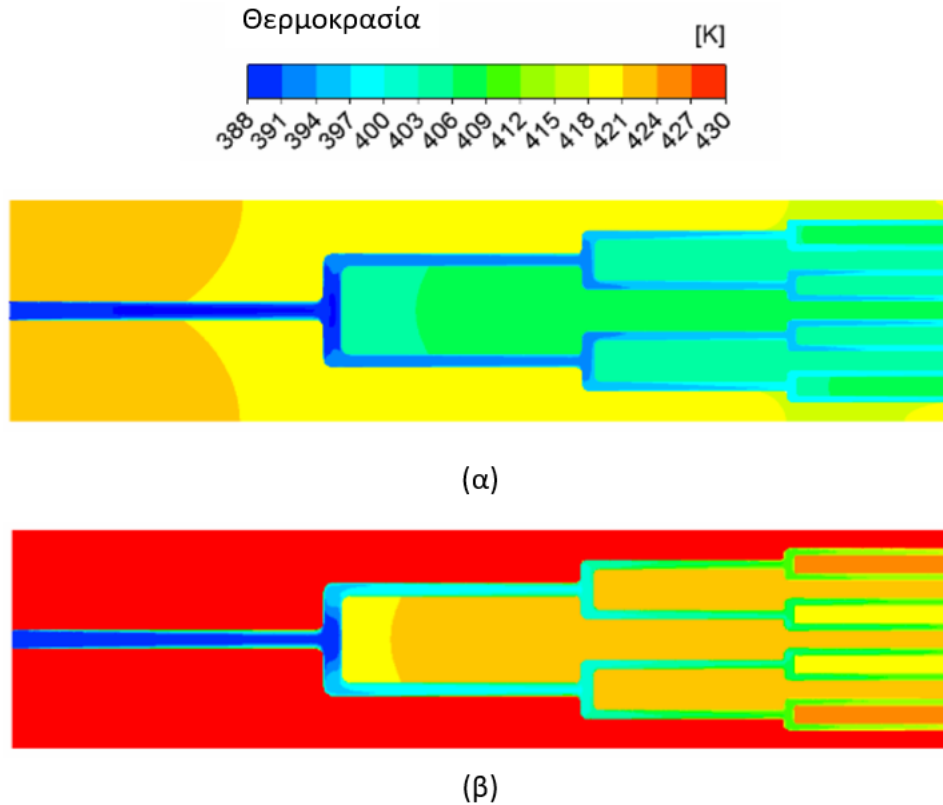
παροχές που επιλέχθηκαν αντιστοιχούν σε αριθμούς Reynolds που φτάνουν μέχρι και 20000 [39].



Σχήμα 1. 28: Πειραματική διάταξη διακλαδούμενων καναλιών χαραγμένα σε πλάκα χαλκού [39]

Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 1. 28 και βάσει αυτής έγινε η σύγκριση μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Οι Shui et. al υπολόγισαν το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, τον αριθμό Nusselt που είναι αντιπροσωπευτικός του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής ως προς αυτόν της αγωγής, το μέγεθος  $f \cdot Re$  που είναι αντιπροσωπευτικό των απωλειών τριβής, καθώς και την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας του συστήματος, χρησιμοποιώντας τον παράγοντα θερμικής ενίσχυσης[39].

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας, η ικανότητα απαγωγής θερμότητα του υδρατμού είναι σημαντικά καλύτερη από αυτή του αέρα. Για ίδιες παροχές μάζας, παρατηρούνται παρόμοιες τάσεις στο πεδίο ροής και θερμοκρασίας, όμως ο υδρατμός αποδίδει καλύτερα κατά 49.2% όσον αφορά τη μεταφορά θερμότητας και κατά 31.8% όσον αφορά τη πτώση πίεσης. Επίσης, σε μικρές παροχές μάζας, η ομοιομορφία στο πεδίο θερμοκρασίας της επιφάνειας όταν εργαζόμενο ρευστό είναι ο υδρατμός, είναι καλύτερη. Στο Σχήμα 1. 29 παρουσιάζεται το πεδίο θερμοκρασίας που προκύπτει πάνω στην απορροφητική επιφάνεια για τα εργαζόμενα ρευστά που μελετώνται. Γίνεται εμφανής λοιπόν, η υπεροχή του υδρατμού ως εργαζόμενου ρευστού έναντι του αέρα[39].



Σχήμα 1. 29: Πεδίο θερμοκρασίας στην πάνω επιφάνεια της τριδιάστατης διάταξης για εργαζόμενο ρευστό (α) υδρατμό (β) αέρα [39]

## 1.6. Διαστασιολόγηση διακλαδούμενου δικτύου καναλιών της παρούσας διερεύνησης

Η ενσωματωμένη σε απορροφητική πλάκα, τριδιάστατη δενδριτική διάταξη που επιλύεται φαίνεται στο Σχήμα 1. 30. Στο ίδιο σχήμα φαίνονται κάποια από τα βασικά μεγέθη που ορίζουν τη γεωμετρία αυτή. Το  $L_{tot}$  αντιστοιχεί στο συνολικό μήκος τη πλάκας και το  $W_{tot}$  στο συνολικό της πλάτος. Τα μεγέθη  $L_i$  αντιστοιχούν στο μήκος των ευθύγραμμων τμημάτων των καναλιών που είναι παράλληλα στην επιφάνεια που ορίζει το μήκος  $L_{tot}$  και υπολογίζονται από την εξίσωση 1.4.

Σε όλες τις γεωμετρίες που επιλύονται, η αρχική υδραυλική διάμετρος επιλέγεται να είναι ίση με  $1\text{ cm}$ , άρα  $D_1 = 1\text{ cm}$ ,  $H_1 = 1\text{ cm}$  και  $W = 1\text{ cm}$ . Ακόμη ένα κοινό όλων των γεωμετριών είναι το πάχος της πλάκας που είναι  $W_{Al} = 2\text{ cm}$  και το κενό μεταξύ των



καναλιών και των πλευρικών τοιχωμάτων που είναι ίσο με  $W_{edge} = 1 \text{ cm}$ . Η πλάκα στην οποία είναι ενσωματωμένη το διακλαδούμενο δίκτυο καναλιών είναι τετράγωνη σε σχήμα με διαστάσεις  $L_{tot} = W_{tot} = 30 \text{ cm}$ .

Οι διαστάσεις επιλέγονται τέτοιες, ώστε να είναι αντιπροσωπευτικές πλάκας που προορίζεται για απορροφητή συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος. Μία εκ των δύο τετράγωνων πλευρών της τριδιάστατης διάταξης δέχεται στην επιφάνεια της σταθερή πυκνότητα θερμοροής και μέσα στα κανάλια που είναι ενσωματωμένα στη πλάκα ρέει ρευστό. Η θερμοροή που προσπίπτει στην επιφάνεια της πλάκας είναι ίση με  $2100 \text{ W/m}^2$  και η ογκομετρική παροχή του ρευστού είναι ίση με  $1.5 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ . Η γωνία διακλάδωσης  $\theta$  βάσει των μοντέλων που έχουν επιλυθεί είναι  $\theta \in \{30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ\}$  και τα επίπεδα διακλάδωσης είναι 2 ή 3.

Τα μοντέλα αυτά φαίνονται πιο αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις πλήρεις γεωμετρίες.

$$\frac{L_{k+1}}{L_k} = n^{-\frac{1}{E}} \quad (1.4)$$

$$\frac{D_{k+1}}{D_k} = n^{-\frac{1}{AC}} \quad (1.5)$$

όπου  $L_i$ : μήκος ευθύγραμμων τμημάτων στο  $i$  επίπεδο

$D_i$ : υδραυλική διάμετρος στο  $i$  επίπεδο

$n$ : αριθμός διακλαδώσεων σε κάθε επίπεδο,  $n = 2$

$E$ : Ευκλείδεια διάσταση γεωμετρίας μορφοκλάσματος,  $E = 2$

$AC$ : αναλογία διαμέτρων υδραυλικών διαδοχικών καναλιών,  $AC = 3$

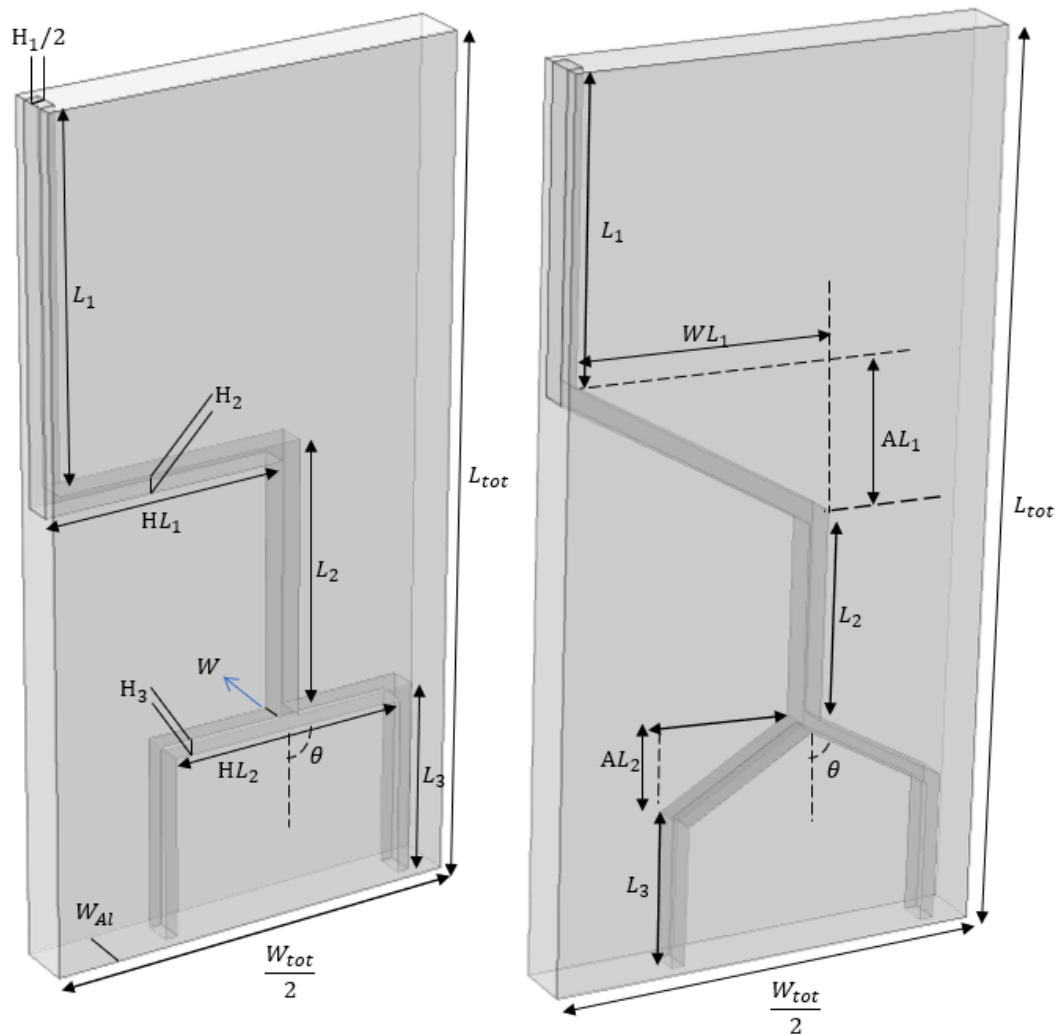
$k$ : επίπεδο διακλάδωσης

Το μέγεθος  $W$  ορίζει το πάχος των καναλιών και παραμένει σταθερό σε όλα τα επίπεδα διακλάδωσης και το  $W_{Al}$  ορίζει το πάχος της πλάκας αλουμινίου στην οποία είναι ενσωματωμένο το διακλαδούμενο δίκτυο καναλιών. Το  $H_i$  ορίζει την εναπομένουσα διάσταση της ορθογωνικής διατομής του καναλιού σε κάθε επίπεδο και

υπολογίζεται με την εξίσωση 1.6 βάσει της υδραυλικής διαμέτρου που προκύπτει από την εξίσωση 1.5.

$$D_i = 4 \cdot \frac{A}{P} = 4 \cdot \frac{W \cdot H}{2 \cdot (H + W)} \rightarrow H_i = D_i \cdot \frac{W}{2 \cdot W - D_i} \quad (1.6)$$

Η ολοκληρωμένη γεωμετρία έχει ως περιορισμό, τα κανάλια εξόδου να έχουν μεταξύ τους ίσες αποστάσεις, δηλαδή να είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στην έξοδο.



Σχήμα 1. 30: Διαστασιολόγηση διάταξης διακλαδούμενων καναλιών

Επίσης, υπάρχει μεταξύ των δύο ακραίων καναλιών εξόδου και της πλάγιας επιφάνειας της πλάκας μια απόσταση που διατηρείται για πρακτικούς λόγους

ακεραιότητας της συσκευής. Αν δεν υπήρχε κάποιο διάστημα μεταξύ τους, ενδεχομένως η κατασκευή της να ήταν αδύνατη ή η ολοκληρωμένη διάταξη να ήταν εύθραυστη στο σημείο αυτό. Τα μεγέθη  $HL_i$  υπολογίζονται βάσει των αποστάσεων μεταξύ των καναλιών εξόδου. Στην περίπτωση των διατάξεων που η γωνία δεν είναι  $90^\circ$  το μέγεθος  $WL_i$  αναγκαστικά θα είναι το ίδιο με το  $HL_i$  λόγω του περιορισμού της ομοιόμορφης κατανομής των καναλιών εξόδου και το μέγεθος  $AL_i$  θα υπολογίζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$AL_i = \frac{WL_i}{\tan(\theta)} \quad (1.7)$$

Σημειώνεται ότι οι εξισώσεις 1.4 και 1.5 που ορίζουν την αλλαγή του μήκους και της υδραυλικής διάμετρου των καναλιών ανά επίπεδο διακλάδωσης, προέκυψαν από τον νόμο των Hess-Murray [32], [37],[38],[40].

Για την κατασκευή των τριδιάστατων γεωμετριών στο COMSOL Multiphysics, κατασκευάζεται κώδικας στο Matlab, ο οποίος υπολογίζει αυτόματα τη διαστασιολόγηση για οποιοδήποτε γωνίες διακλάδωσης και διαστάσεις πλάκας καθώς και για οποιοδήποτε αριθμό επιπέδων. Με τη χρήση του COMSOL with MATLAB οι διαστάσεις εισάγονται αυτόματα στη γεωμετρία του μοντέλου, το οποίο και κατασκευάζεται μέσω του κώδικα όταν οι γωνίες είναι μεταξύ των  $30^\circ$  και  $90^\circ$  και όταν τα επίπεδα διακλάδωσης είναι 3 ή 4.

Για τα επίπεδα διακλάδωσης αξίζει να αναφερθεί, ότι ως πρώτο επίπεδο ορίζεται αυτό στο οποίο ανήκει το πρώτο ευθύγραμμο κανάλι ( $L_1$ ). Για αυτό το λόγο παρόλο που στην περίπτωση των 3 και 4 επιπέδων διακλάδωσης υπάρχουν 2 και 3 διακλαδώσεις αντίστοιχα, θεωρείται ότι τα επίπεδα διακλάδωσης, στο σύνολο είναι 3 και 4.

## Κεφάλαιο 2: Μαθηματική Μοντελοποίηση και Αριθμητικές Μέθοδοι

### 2.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος μεταφοράς μάζας και θερμότητας που ορίζεται από την διάταξη η οποία μελετάται. Γίνεται διατύπωση των εξισώσεων Navier-Stokes, συνέχειας και ενέργειας που αντιστοιχούν στα ισοζύγια ορμής, μάζας και ενέργειας. Η επίλυση των πρώτων δύο εξισώσεων δίνει το προφίλ ταχύτητας και πίεσης εντός των καναλιών που ερευνώνται σε αυτή την εργασία ενώ της τρίτης εξίσωσης δίνει το προφίλ της θερμοκρασίας σε όλη τη γεωμετρία. Αυτές οι διαφορικές εξισώσεις που ορίζουν το παρόν πρόβλημα επιλύονται ταυτόχρονα από το υπολογιστικό πακέτο που.

Το πρόβλημα της ροής και της μεταφοράς θερμότητας γίνεται απαιτητικό, για το συγκεκριμένο πρόβλημα, στις περιοχές όπου υπάρχουν έντονα φαινόμενα δευτερογενούς ροής, όπως οι τριδιάστατες δίνες που θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο. Οι τριδιάστατες δίνες που εμφανίζονται, όταν η αρχική πορεία της ροής διαταράσσεται επειδή στη πορεία βρίσκονται απότομες διακλαδώσεις και στροφές, είναι η αιτία που το πρόβλημα γίνεται ιδιαίτερα απαιτητικό ως προς την υπολογιστική του επίλυση. Η δυσκολία αυτή ενισχύεται ανάλογα με τους αριθμούς Reynolds που αντιστοιχούν στη ροή.

Θα ακολουθήσει μια σύντομη περιγραφή των εξισώσεων του προβλήματος, των παραδοχών που γίνονται για το συγκεκριμένο πρόβλημα, όσον αφορά τις εξισώσεις αυτές, και των συνοριακών συνθηκών που ισχύουν για το συγκεκριμένο πρόβλημα, όσον αφορά την κάθε εξίσωση. Θα παρουσιαστεί επίσης, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, που χρησιμοποιεί το υπολογιστικό πακέτο, COMSOL Multiphysics 5.2, που αξιοποιείται για την επίλυση του προβλήματος.

## 2.2. Μαθηματικό Μοντέλο

### 2.2.1. Εξίσωση Navier-Stokes

Η εξίσωση Navier-Stokes, η οποία επιλύεται μαζί με την εξίσωση συνέχειας, που θα παρουσιαστεί παρακάτω για τον υπολογισμό του πεδίου ταχύτητας και πίεσης εντός των καναλιών της τριδιάστατης γεωμετρίας, φαίνεται στη σχέση 2.1 [41]. Η εξίσωση Navier-Stokes εκφράζει το διαφορικό ισοζύγιο ορμής Νευτωνικού ρευστού με σταθερό ιξώδες και ασυμπίεστη ροή. Αγνοώντας τις σωματικές δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο σώμα του ρευστού και για μόνιμη κατάσταση, η εξίσωση παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2.1)$$

Η επίλυση του προβλήματος, απαιτεί συνοριακές συνθήκες. Αυτές οι συνοριακές συνθήκες, όπως προβλέπει και το όνομα τους, ορίζονται στα σύνορα του υπολογιστικού χωρίου που μελετάται.

Πιο συγκεκριμένα, για τριδιάστατο πρόβλημα, όπως είναι αυτό που μελετάται στη συγκεκριμένη εργασία, ορίζεται στα τοιχώματα του καναλιού, συνθήκη μη ολίσθησης. Αυτή η συνθήκη ορίζει τη συνιστώσα της ταχύτητας που είναι κάθετη (συνθήκη μη διείσδυσης) και παράλληλη στο τοίχωμα, ίση με μηδέν. Δηλαδή, η ταχύτητα του ρευστού στην επιφάνεια του στερεού, έχει την ταχύτητα του ίδιου του στερεού, που στην περίπτωση αυτή είναι μηδενική. Μαθηματικά, η συνθήκη αυτή εκφράζεται στα τοιχώματα του αγωγού ως εξής:

$$\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (2.2)$$

Στην είσοδο του καναλιού ορίζεται το διάνυσμα της ταχύτητας πάνω στην επιφάνεια όπου εισέρχεται το ρευστό. Στο πρόβλημα που μελετάται, θεωρείται ότι η ροή στην είσοδο είναι στρωτή και πλήρως ανεπτυγμένη και για την ταχύτητα λαμβάνεται η μέση αριθμητική τιμή της. Για συνοριακή συνθήκη στην έξοδο των καναλιών της διάταξης, επιλέγονται μηδενικές κάθετες και εφαπτόμενες τάσεις. Για προβλήματα ασυμπίεστης

ροής, ο ορισμός της τιμής της πίεσης σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια, είναι επαρκής για τον υπολογισμό της στο υπολογιστικό χωρίο. Το πεδίο της πίεσης αναπτύσσεται με τέτοιο τρόπο κατά την επίλυση, έτσι ώστε να ικανοποιεί την εξίσωση συνέχειας [41].

### 2.2.2. Εξίσωση Συνέχειας

Αγνοώντας, τις σωματικές δυνάμεις που ασκούνται στο ρευστό, και θεωρώντας ότι αυτό είναι νευτωνικό και ασυμπίεστο, η μορφή της εξίσωσης συνέχειας γίνεται:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.3)$$

### 2.2.3. Εξίσωση Ενέργειας

Η εξίσωση θερμικής ενέργειας του συστήματος που εκφράζει το ισοζύγιο ενέργειας είναι η εξής:

$$\mathbf{u} \cdot \nabla(\rho C_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2.4)$$

όπου  $\mathbf{u}$ : διάνυσμα ταχύτητας

$C_p$ : θερμοχωρητικότητα

$T$ : θερμοκρασία

$k$ : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Για την επίλυση της σχέσης 2.4, χρειάζονται κάποιες συνοριακές συνθήκες. Γενικά υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες συνοριακών συνθηκών στα προβλήματα μεταφοράς θερμότητας. Η πρώτη περίπτωση, είναι η συνθήκη Dirichlet, κατά την οποία ορίζεται η θερμοκρασία ενός συνόρου [41]. Η συνθήκη Dirichlet εφαρμόζεται στην επιφάνεια του καναλιού όπου εισέρχεται το ρευστό. Η δεύτερη συνθήκη, ονομάζεται συνθήκη Neumann και σε αυτή τη περίπτωση, ορίζεται η κάθετη βαθμίδα της θερμοκρασίας σε κάποιο σημείο της περιμέτρου. Αν  $n$  είναι η διεύθυνση της κάθετου που κινείται προς τα έξω, τότε τιμές δίνονται στο  $-k dT/dn$ . Ειδική περίπτωση της συνθήκης Neumann αποτελεί το μονωμένο σύνορο στο οποίο  $dT/dn = 0$ . Αυτή η ειδική συνθήκη μόνωσης, εφαρμόζεται στη συγκεκριμένη εργασία, στα εξωτερικά τοιχώματα της πλάκας αλουμινίου, στην οποία είναι ενσωματωμένα τα διακλαδούμενα κανάλια, με την

εξαίρεση του τοιχώματος όπου προσπίπτει η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία. Στο τοίχωμα όπου προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία, ισχύει  $-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_0$ , όπου  $q_0$  είναι το μέτρο της θερμοροής που αντιστοιχεί στο σύστημα που μελετάται. Η τρίτη συνοριακή συνθήκη, ονομάζεται συνθήκη Robin και σε αυτή τη περίπτωση ορίζεται ρυθμός απώλειας θερμότητας από ένα σύνορο βάσει του νόμου ψύξης του Νεύτωνα. Η συνθήκη αυτή, εκφράζεται μαθηματικά ως  $-k dT/dn = h(T - T_a)$  με  $T_a$  να είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και  $h$  ο συντελεστής συναγωγής. Η τέταρτη και τελευταία συνθήκη, είναι αυτή της ακτινοβολίας. Αυτή η συνθήκη προκύπτει όταν υπάρχει απώλεια θερμότητας λόγω μιας επιφάνειας που ακτινοβολεί [41].

Ακόμη μια σημαντική συνοριακή συνθήκη που αφορά το ενεργειακό ισοζύγιο, είναι αυτή που ορίζεται στη διεπιφάνεια μεταξύ στερεού και ρευστού και αφορά προβλήματα συζευγμένης μεταφοράς θερμότητας (Conjugated Heat Transfer - CHT) [42]. Τα προβλήματα συζευγμένης μεταφοράς θερμότητας είναι αυτά στα οποία υπάρχει μεταφορά θερμότητας μέσα σε ένα στερεό χωρίο μέσω αγωγής και μεταφορά θερμότητας σε κάποιο όγκο ρευστού που ρέει και βρίσκεται σε άμεση επαφή με το στερεό χωρίο [42]. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι μεταφορά θερμότητας στο στερεό χωρίο περιγράφεται από την εξίσωση αγωγής Fourier, ενώ η μεταφορά θερμότητας στο ρευστό περιγράφεται από τις εξισώσεις συνέχειας, ορμής και ενέργειας. Για τη επίλυση ολόκληρου του όγκου ελέγχου που συμπεριλαμβάνει τα δύο χωρία απαιτεί σύζευξη των λύσεων των δύο χωρίων (στερεού και ρευστού) στη διεπιφάνεια τους. Η σύζευξη μεταξύ στερεού και ρευστού χωρίου επιτυγχάνεται εξασφαλίζοντας συνέχεια της θερμοροής και της θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια τους. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η επίλυση τέτοιων προβλημάτων χωρίς τη σύζευξη μεταξύ μεταφοράς θερμότητας στο στερεό και στο ρευστό οδηγεί σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα. Είναι απαραίτητη λοιπόν η επίλυση του προβλήματος της παρούσας εργασίας, ως πρόβλημα συζευγμένης μεταφοράς θερμότητας [42].

## 2.3. Αριθμητικές Μέθοδοι Επίλυσης Διαφορικών Εξισώσεων

### 2.3.1. Αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η πολυπλοκότητα των εξισώσεων που περιγράφουν το προς μελέτη σύστημα είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να καθιστά την αναλυτική επίλυση του προβλήματος αδύνατη. Γι' αυτό το λόγο καταφεύγουμε στην επίλυση τέτοιας κλίμακας προβλημάτων με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων υπολογισμού, όπως τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Για την παρουσίαση της αριθμητικής μεθόδου, διατυπώνεται μαθηματικά ένα πρόβλημα συνοριακών τιμών. Το πρόβλημα αυτό ορίζεται από ένα σύστημα εξισώσεων του τύπου:

$$\mathcal{L}u = f \text{ στο } \Omega \quad (2.5)$$

$$\mathcal{B}u = g \text{ στο } \partial\Omega \quad (2.6)$$

Στις δύο σχέσεις που παρουσιάζονται παραπάνω, με  $\mathcal{L}$  συμβολίζεται ο διαφορικός τελεστής, που δεν είναι απαραίτητα γραμμικός, και δρα στη συνάρτηση  $u$  και  $\mathcal{B}$  ο συνοριακός τελεστής, ορισμένος στο σύνορο  $\partial\Omega$ , του χωρίου  $\Omega$ . Τα  $f$  και  $g$  είναι γνωστές συναρτήσεις θέσης που ορίζονται στο  $\Omega$  και  $\partial\Omega$ . Οι σχέσεις 2.5 και 2.6 αποτελούν σύστημα διαφορικών εξισώσεων, συνήθη ή μερικών και συνοριακών συνθηκών αντίστοιχα. Το  $u$  αποτελεί τη λύση ή λύσεις του συστήματος στο χωρίο  $\Omega$  που είναι μια περιοχή του τριδιάστατου Ευκλείδειου χώρου και είναι συνάρτηση της θέσης  $x$  [43].

Το  $x$  αντιστοιχεί στο διάνυσμα θέσης και για τριδιάστατο σύστημα ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^3 x_i \mathbf{e}_i \quad (2.7)$$

Το  $\mathbf{e}_i$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα που αντιστοιχεί στους άξονες συντεταγμένων του τριδιάστατου ευκλείδειου χώρου. Στη γενική περίπτωση ενός προβλήματος συνοριακών τιμών, η λύση είναι διανυσματική συνάρτηση  $\mathbf{u}$  με συνιστώσες βαθμωτές συναρτήσεις, και οι τελεστές  $\mathcal{L}$  και  $\mathcal{B}$  είναι διανυσματικοί τελεστές.



Όπως, έχει αναφερθεί και στην αρχή του υποκεφαλαίου, όταν η πολυπλοκότητα του προβλήματος δεν επιτρέπει τον προσδιορισμό της λύσης με αναλυτικές μεθόδους καταφεύγουμε σε αριθμητικές μεθόδους. Η εξελικτική πορεία της τεχνολογίας, έχει οδηγήσει στη παραγωγή ηλεκτρονικών υπολογιστών μεγάλης υπολογιστικής μνήμης και ταχύτητας, που επιτρέπει την επίλυση περίπλοκων προβλημάτων συνοριακών συνθηκών σε ικανοποιητικό χρόνο και ακρίβεια. Η προσεγγιστική λύση που προκύπτει με τις αριθμητικές μεθόδους επίλυσης σε πεπερασμένο πλήθος σημείων και με πεπερασμένη ακρίβεια. Λόγω της διακριτότητας του πεπερασμένου πλήθους στοιχείων, η προσεγγιστική επίλυση του προβλήματος συνοριακών τιμών, ονομάζεται «διακριτοποίηση» [43].

Μια από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους διακριτοποίησης προβλημάτων συνοριακών τιμών, είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Στα πλαίσια αυτής της μεθόδου, το χωρίο  $\Omega$  και το σύνορο του  $\partial\Omega$ , υποδιαιρούνται σε επάλληλα υποχωρία πεπερασμένου πλήθους, δημιουργώντας ένα πλέγμα από στοιχεία. Στα όρια των επάλληλων υποχωρίων και στο εσωτερικό τους, ορίζονται οι κόμβοι του πλέγματος. Ο αριθμός των στοιχείων του πλέγματος συμβολίζεται με  $NE$  και το πλήθος των κόμβων με  $N$ .

Στο Σχήμα 2. 1 φαίνεται το πλέγμα που κατασκευάζεται από το λογισμικό με για την περίπτωση της συμμετρικής ενσωματωμένης σε αλουμίνιου διακλάδωσης T που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο και η τριδιάστατη μορφή ενός τετραεδρικού στοιχείου, όπου με κόκκινους κύκλους απεικονίζονται οι κόμβοι του στοιχείου [43].

Η λύση  $\mathbf{u}$  προσεγγίζεται από μια πεπερασμένη σειρά συναρτήσεων:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^N u_j \varphi^j(\mathbf{x}) \quad (2.8)$$

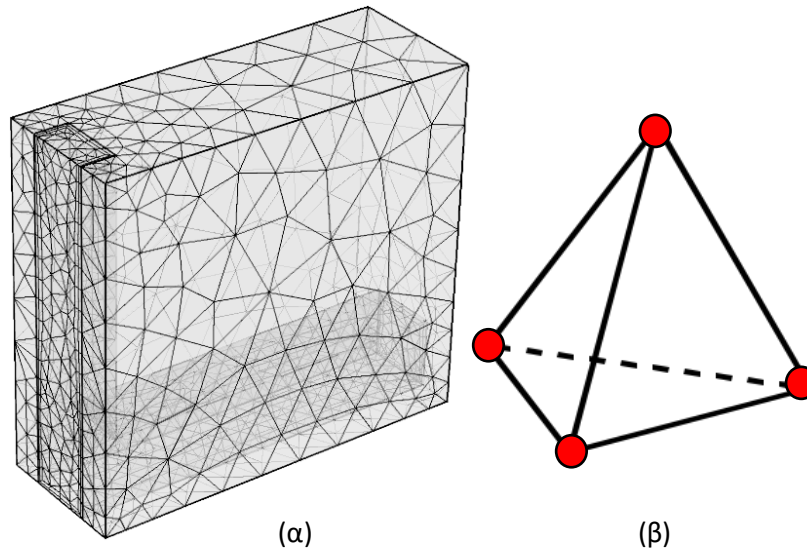
Οι συναρτήσεις  $\varphi^j$  ονομάζονται συναρτήσεις βάσης και είναι πολυώνυμα, συνήθως πρώτου και δεύτερου βαθμού, των συντεταγμένων του διανύσματος θέσης. Στη προκειμένη περίπτωση του προβλήματος που μελετάται, οι συναρτήσεις βάσης,

επιλέγονται να είναι δεύτερης τάξης για τη ταχύτητα και πρώτης τάξης για την πίεση λόγω σύγκλισης σε ακριβέστερη λύση με μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Το πλήθος  $N$  των συναρτήσεων βάσης, είναι ίσο με αυτό των κόμβων του πλέγματος και κάθε μια από αυτές είναι μη μηδενική, μόνο σε ένα συγκεκριμένο υποχωρίο του χώρου  $\Omega$ . Συγκεκριμένα, η  $\varphi^j$ , είναι ίση με μονάδα στο κόμβο με αριθμό  $k$ , και μηδενική στους υπόλοιπους κόμβους. Οι τιμές των  $\varphi^j$  στους κόμβους, έχουν ως εξής:

$$\varphi^j(\mathbf{x}_k) = 1 \text{ για } j = k \quad (2.9\alpha)$$

$$\varphi^j(\mathbf{x}_k) = 0 \text{ για } j \neq k \quad (2.9\beta)$$

όπου  $\mathbf{x}_k$ : θέση του κόμβου με αριθμό  $k$



Σχήμα 2. 1: Αναπαράσταση (α) διακριτοποίησης τριδιάστατης γεωμετρίας με ελεύθερο τετραεδρικό πλέγμα και (β) τετραεδρικού στοιχείου  $i$

Από τις παραπάνω εξισώσεις, προκύπτει ότι οι συντελεστές  $u_j$  (κομβικοί άγνωστοι) είναι οι τιμές της προσεγγιστικής λύσης  $u$  στους κόμβους:

$$u(\mathbf{x}_k) = \sum_{j=1}^N u_j \varphi^j(\mathbf{x}) = u_k \quad (2.10)$$

Για την επίλυση του προβλήματος, απαιτείται η εύρεση αυτών των συντελεστών με δεδομένες συναρτήσεις βάσης. Οι συναρτήσεις βάσης και οι κόμβοι του πλέγματος έχουν

αντιστοιχία 1-1 (δηλ.  $\varphi^j$  αντιστοιχεί στον κόμβο  $j$ ). Επίσης, η  $\varphi^j$  είναι μη μηδενική, μόνο στη περιοχή του  $D$  που υπάρχουν τα στοιχεία, που μοιράζονται τον κόμβο  $j$ . Γίνεται προφανές από τα παραπάνω, ότι οι συναρτήσεις βάσεις είναι μη μηδενικές στον κόμβο που αντιστοιχούν και στα γειτονικά στοιχεία όπου υπάρχει επικάλυψη μεταξύ τους και ότι όταν οι συναρτήσεις βάσεις είναι μακριά η μια από την άλλη, τότε δεν υπάρχει επικάλυψη [43].

Επόμενο κομμάτι της μεθόδου, είναι τα σταθμισμένα υπόλοιπα Galerkin. Η προσεγγιστική λύση  $u$  του προβλήματος συνοριακών τιμών, δεν ικανοποιεί ακριβώς σε κάθε σημείο το σύστημα διαφορικών εξισώσεων που ορίζει το πρόβλημα. Το υπόλοιπο της διαφορικής εξίσωσης 2.5 είναι ίσο με  $\mathcal{L}u - f$ . Η μέθοδος Galerkin επιδιώκει την εύρεση λύσης των διαφορικών 2.5 και 2.6 που να μηδενίζει τα σταθμισμένα υπόλοιπα:

$$R_i \equiv \int_D (\mathcal{L}u - f) \varphi^i dV \quad (2.11)$$

Επιδιώκεται δηλαδή,  $R_i = 0$ , όπου  $i = 1, 2, \dots, N$ . Οι παράγοντες στάθμισης είναι οι ίδιες οι συναρτήσεις βάσεις,  $\varphi_i$  που χρησιμοποιούνται στη κατασκευή της προσεγγιστικής λύσης  $u$  και το πλήθος των υπολοίπων είναι ίσο με αυτό των συναρτήσεων βάσης και του πλήθους των κόμβων του πλέγματος.

Αντικαθιστώντας την 2.8 στη παραπάνω σχέση προκύπτει ότι:

$$R_i \equiv \int_D \varphi^i \left( \mathcal{L} \left( \sum_{j=1}^N u_j \varphi^j \right) \right) dS - \int_D \varphi^i f dS \quad (2.12)$$

Οι παράγωγοι των συναρτήσεων βάσης, προκύπτουν από τη δράση του διαφορικού τελεστή στις συναρτήσεις βάσεις. Τα ολοκληρώματα των υπολοίπων Galerkin είναι συναρτήσεις μόνο των κομβικών αγνώστων  $u_j$  και οι εξισώσεις μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$R_i(u_1, u_2, \dots, u_N) = \mathbf{R}(\mathbf{u}) = \mathbf{0} \quad (2.13)$$

όπου  $\mathbf{R}$ : διάνυσμα υπολοίπων

**u:** διάνυσμα αγνώστων

Από την κατασκευή τους, τα υπόλοιπα Galerkin είναι σε αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία με τους κόμβους του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Το υπόλοιπο  $R_i$  και η εξίσωση  $R_i = 0$  αντιστοιχούν στον κόμβο με αριθμό  $i$  επειδή η συνάρτηση βάσης,  $\varphi^i$ , που γεννά το υπόλοιπο  $R_i$  αντιστοιχεί στον κόμβο  $i$ .

Τα υπόλοιπα Galerkin είναι ένα σύστημα  $N$  αλγεβρικών εξισώσεων, με  $N$  αγνώστους, που είναι οι κομβικές τιμές,  $u_j$ , της λύσης. Η εξίσωση 2.13 είναι η μετατροπή του αρχικού συστήματος διαφορικών εξισώσεων σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων που πρέπει να επιλυθούν για τις τιμές της προσεγγιστικής λύσης σε διακριτά σημεία. Οι εξισώσεις της 2.13, ονομάζονται εξισώσεις διακριτοποίησης [43].

Στη περίπτωση που η διαφορική εξίσωση είναι γραμμική, ισχύει ότι  $\mathcal{L}(\sum_{j=1}^N u_j \varphi^j) = \sum_{j=1}^N u_j \mathcal{L}\varphi^j$  και η σχέση 2.12 γίνεται πλέον:

$$R_i \equiv \int_D u_j \sum_{j=1}^N \varphi^i \mathcal{L}\varphi^j dV - \int_D f \varphi^i dV \quad (2.14)$$

Ο μηδενισμός των υπολοίπων γίνεται το ακόλουθο σύστημα  $N$  γραμμικών εξισώσεων με  $N$  αγνώστους:

$$R_i \equiv \sum_{j=1}^N a_{ij} u_j - b_i = 0, \text{ όπου } i = 1, 2, \dots, N$$
$$a_{ij} \equiv \int_D \varphi^i \mathcal{L}\varphi^j dV \quad (2.15)$$
$$b_i \equiv \int_D f \varphi^i dV$$

Για την περίπτωση, όπου η διαφορική εξίσωση δεν είναι γραμμική, το σύστημα 2.13 μπορεί να λυθεί με την επαναληπτική μέθοδο Newton, κατά την οποία, σε κάθε επανάληψη, επιλύεται ένα γραμμικό σύστημα της μορφής 2.15 [43].

## Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα Βασικών Δομών Προβλήματος

### 3.1. Εισαγωγή

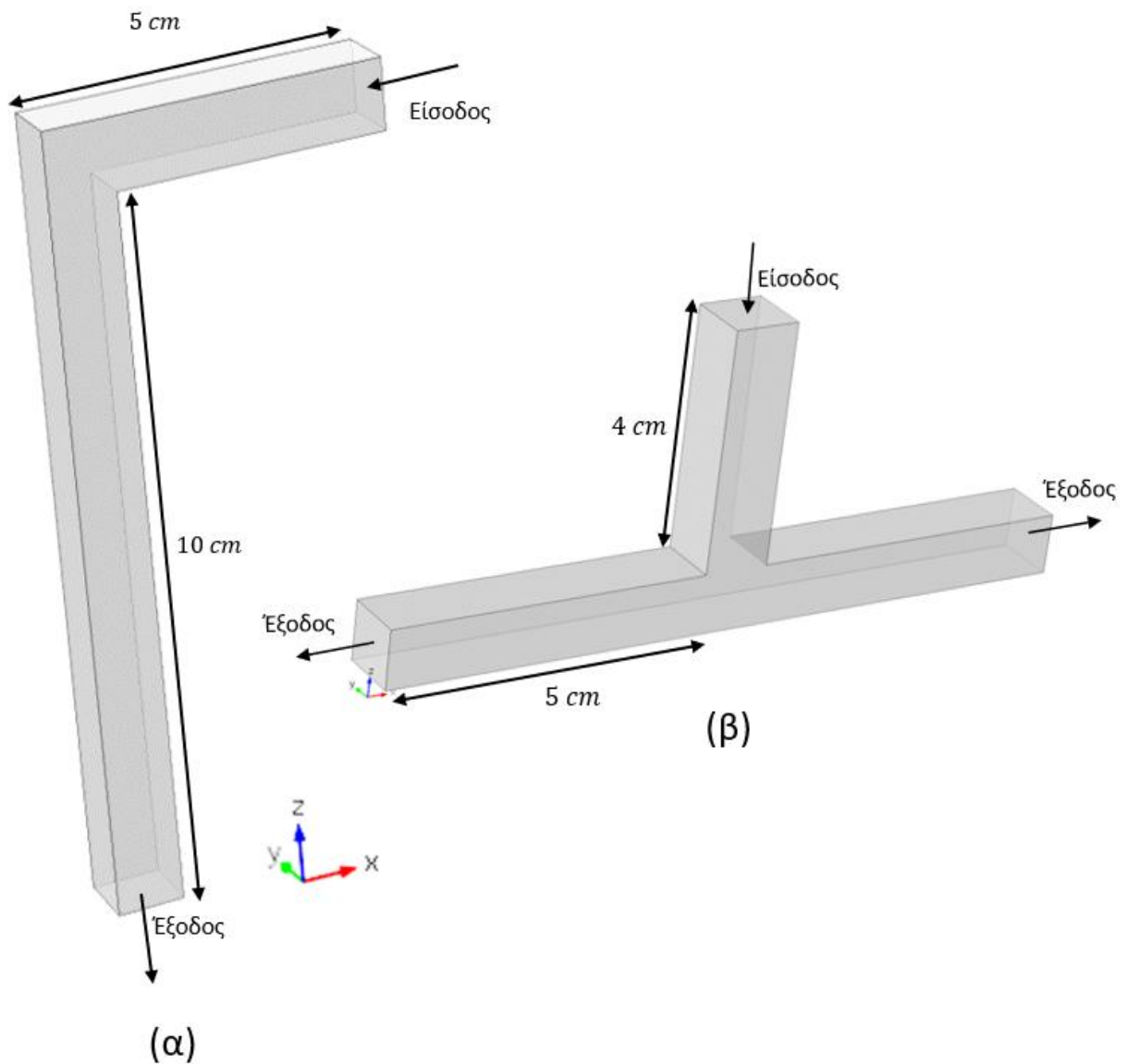
Η πλήρης γεωμετρία που έχει αναφερθεί στο πρώτο κεφάλαιο και της οποίας τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν σε μεταγενέστερο στάδιο αποτελείται από χαρακτηριστικές, τριδιάστατες δομές, οι οποίες συνδυάζονται και επαναλαμβάνονται για να την σχηματίσουν. Θεωρείται σκόπιμο λοιπόν, να παρουσιαστούν αρχικά, οι συγκεκριμένες δομές και να γίνει ανάλυση των φαινομένων μεταφοράς μάζας και θερμότητας που αναπτύσσονται σε αυτές. Συγκεκριμένα, σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθούν αναλυτικά οι δευτερογενείς ροές που αναπτύσσονται σε διακλαδώσεις τύπου T και σε αγωγούς γωνίας  $90^\circ$ , καθώς αυτές επηρεάζουν σημαντικά τόσο τη πτώση πίεσης όσο και την μεταφορά θερμότητας.

Αρχικά θα γίνει μελέτη για την ανεξαρτησία της λύσης από το πλέγμα, έτσι ώστε να επιβεβαιωθεί η εγκυρότητα της λύσης που προκύπτει στην κάθε περίπτωση. Το πρόβλημα ροής και μεταφοράς θερμότητας θα λυθεί για πλέγματα με διαφορετικό αριθμό στοιχείων και για διάφορους αριθμούς Reynolds. Συγκεκριμένα, για τη διακλάδωση τύπου T, το πρόβλημα λύνεται για αριθμούς Reynolds 50 μέχρι και 350 και τον αγωγό γωνίας  $90^\circ$  για αριθμούς Reynolds από 100 μέχρι και 500. Αυτή η ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για την επιλογή παραμέτρων πλέγματος, στη κατασκευή της πλήρους γεωμετρίας.

Αφού γίνει ο παραπάνω έλεγχος, θα αναλυθεί η υδροδυναμική συμπεριφορά του ρευστού εντός του αγωγού. Θα παρουσιαστούν οι διάφορες δομές που αναπτύσσονται (δίνες κλπ.) και θα σχολιαστεί η συμπεριφορά τους συναρτήσει του αριθμού Reynolds. Θα γίνει προσπάθεια οπτικοποίησης με απομόνωση των πυρήνων των δινών με εφαρμογή του κριτηρίου Q και θα σχεδιαστεί η πτώση πίεσης σε διαφορετικές τροχιές κατά μήκος της ροής στις δομές που έχουν αναφερθεί.

Ακολούθως, θα παρουσιαστεί η επίδραση της ύπαρξης των δευτερογενών ροών στη μεταφορά θερμότητας και πως αυτή αλλάζει καθώς μεγαλώνει ο αριθμός Reynolds.

Οι γεωμετρίες που θα μελετηθούν απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα με τις χαρακτηριστικές τους διαστάσεις και αντιστοιχούν στη διακλάδωση τύπου T και στον αγωγό γωνιάς  $90^\circ$ . Και στις δύο διατάξεις που επιλύονται, το εργαζόμενο ρευστό είναι νερό που εισέρχεται στους  $20^\circ\text{C}$  ( $293.15\text{ K}$ ) και οι θερμοφυσικές τους ιδιότητες θεωρούνται συναρτήσει της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο του όγκου ελέγχου.

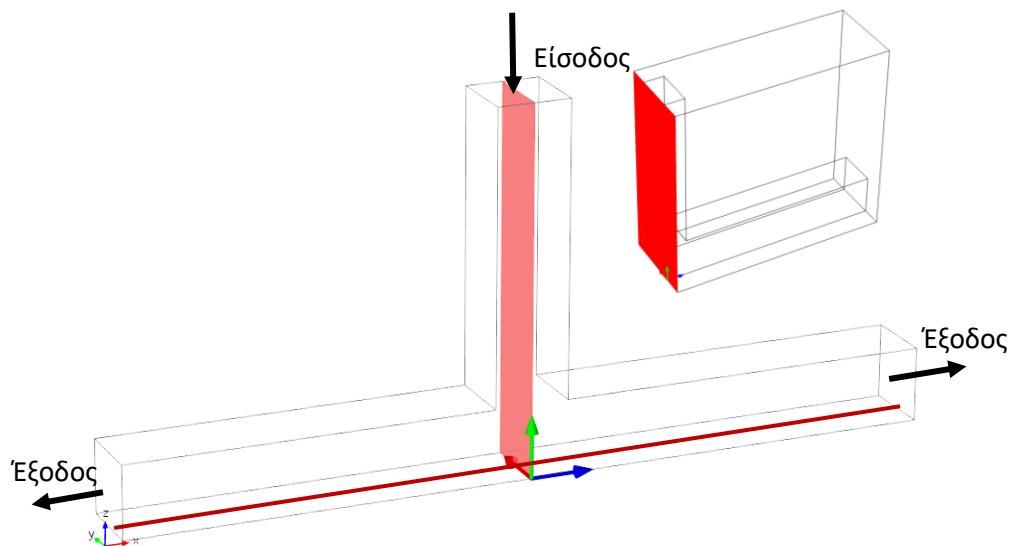


Σχήμα 3. 1: Αγωγός τύπου (α) γωνιάς  $90^\circ$  και (β) διακλάδωσης T

### 3.2. Μελέτη Ανεξαρτησίας Λύσης Από Το Πλέγμα

Για τη μελέτη ανεξαρτησίας της λύσης, επιλύεται το πρόβλημα της ροής για τις βασικές δομές που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 3. 1, πυκνώνοντας σταδιακά το πλέγμα που κατασκευάζεται από το λογισμικό COMSOL Multiphysics 5.2. Για να εντοπισθεί το πλέγμα από το οποίο και μετά η λύση γίνεται ανεξάρτητη από αυτό, υπολογίζεται το μέτρο της ταχύτητας σε σημεία εντός το όγκου της κάθε γεωμετρίας.

Όντας συμμετρική, η γεωμετρία διακλάδωσης τύπου T επιλύεται στο μισό από τον αρχικό όγκο. Το επίπεδο συμμετρίας που αξιοποιείται φαίνεται στο Σχήμα 3. 2. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου επίλυσης καθώς και μείωση στη δέσμευση υπολογιστικής μνήμης. Υπάρχει ακόμα ένα επίπεδο συμμετρίας  $zx$ , το οποίο διέρχεται από την έντονη κόκκινη γραμμή που φαίνεται στο κάτω μέρος της διακλάδωσης, που δεν εφαρμόζεται λόγω του ότι για τη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς όταν υπάρχει συζευγμένη μεταφορά θερμότητας, η διακλάδωση λύνεται ενσωματωμένη σε πλάκα αλουμινίου που θερμαίνεται, όπως φαίνεται στην άνω δεξιά γωνία του Σχήματος 3. 2. Το αλουμίνιο θερμαίνεται, όμοια με την πλήρη διάταξη, μόνο στη μια πλευρά και στη θέση  $y = -0.5 \text{ cm}$ , άρα στο επίπεδο αυτό δεν υπάρχει συμμετρία.



Σχήμα 3. 2: Επίπεδο συμμετρίας διακλάδωσης τύπου T

Στο Σχήμα 3. 3 φαίνεται ενδεικτικά ένα πλήθος σημείων στο οποίο υπολογίζεται το μέτρο της ταχύτητας σε κάθε πλέγμα. Το πλήθος των σημείων που φαίνεται παρακάτω μετακινείται και καλύπτει ολόκληρο τον όγκο ελέγχου με αποτέλεσμα να υπολογίζεται το μέτρο της ταχύτητας σε 891 σημεία. Αφού υπολογιστεί το μέτρο της ταχύτητας σε κάθε σημείο, ακολουθεί ο υπολογισμός της μέσης ποσοστιαίας απόκλιση της ταχύτητας του επόμενου πλέγματος από το προηγούμενο ως εξής:

$$\% M.D = \frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{|\mathbf{u}_i^j| - |\mathbf{u}_i^{j-1}|}{|\mathbf{u}_i^{j-1}|} \right)}{N} \quad (3.1)$$

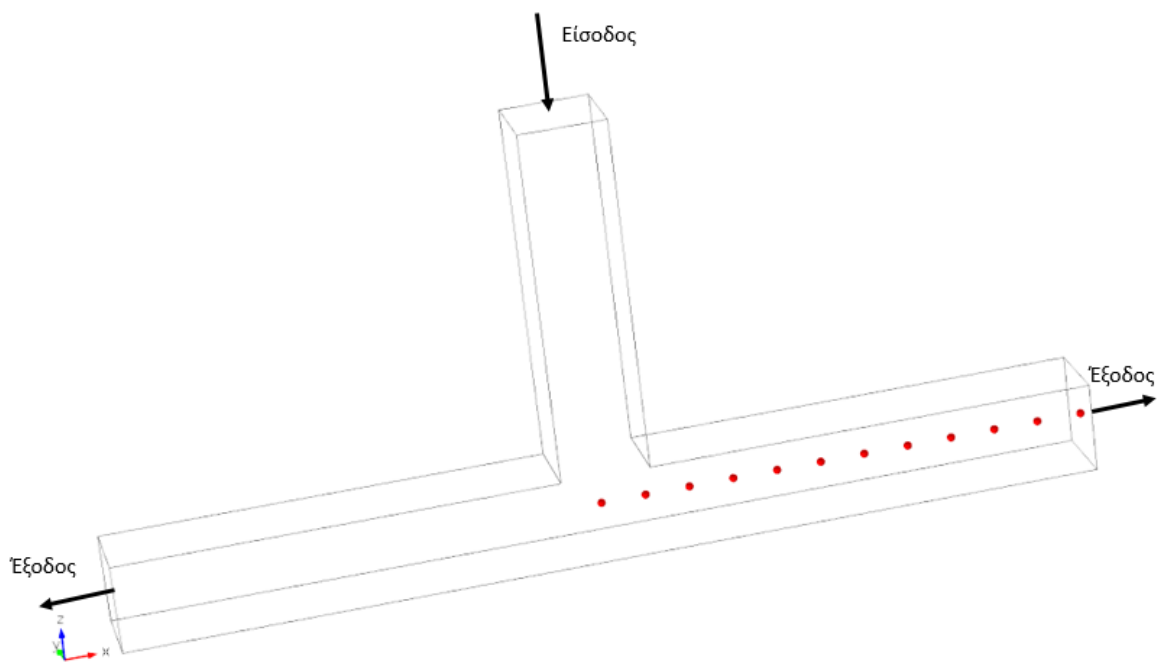
όπου  $\mathbf{u}$ : διάνυσμα ταχύτητας

$i$ : δείκτης για το  $i$  σημείο

$N$ : πλήθος σημείων

$j$ : δείκτης για το πλέγμα

$\% M.D$ : μέση ποσοστιαία απόκλιση



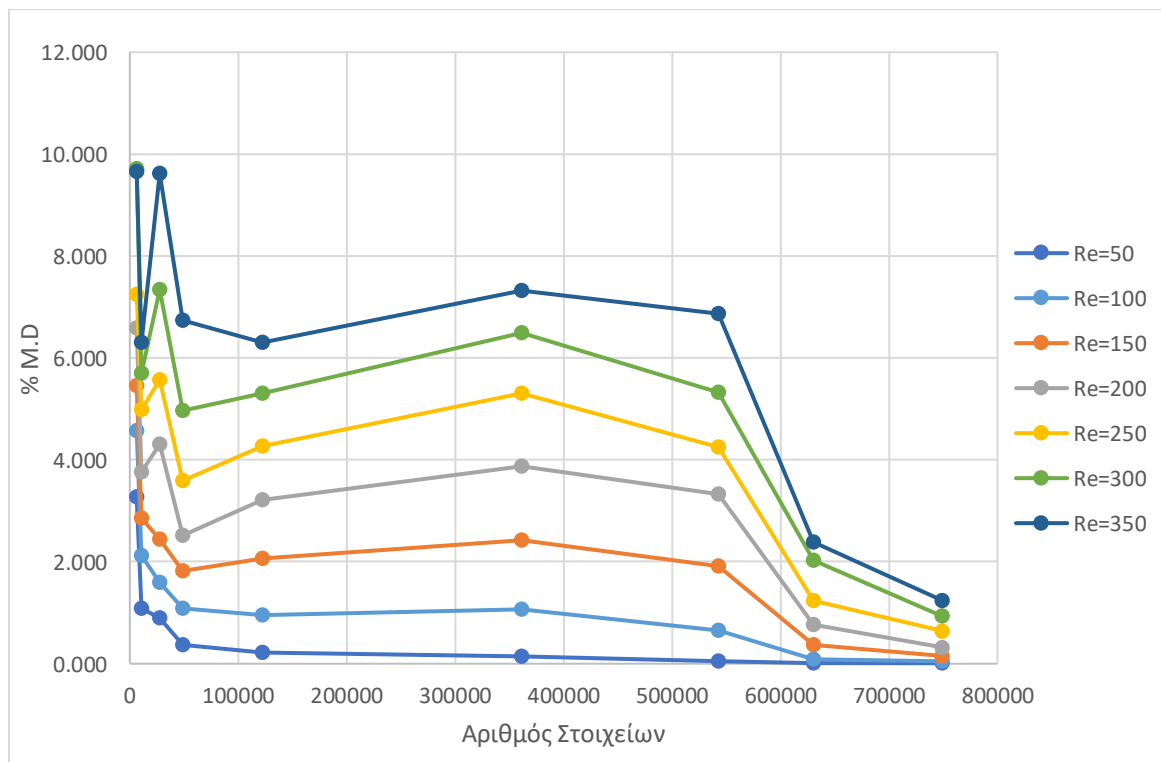
Σχήμα 3. 3: Αναπαράσταση σημείων υπολογισμού ταχύτητας σε κάθε πλέγμα



Πίνακας 3. 1: Μέση ποσοστιαία απόκλιση συναρτήσει αριθμού στοιχείων πλέγματος για εύρος αριθμών Reynolds στη διακλάδωση τύπου T

Αριθμός Reynolds	50	100	150	200	250	300	350
Αριθμός Στοιχείων	M.D (%) Μέτρου ταχύτητας						
6348	3.26	4.58	5.45	6.58	7.26	9.71	9.65
10496	1.09	2.12	2.87	3.77	4.98	5.70	6.31
27340	0.90	1.60	2.44	4.30	5.58	7.35	9.63
48742	0.37	1.09	1.82	2.51	3.59	4.96	6.74
122253	0.22	0.95	2.06	3.22	4.27	5.30	6.31
361491	0.14	1.06	2.42	3.87	5.31	6.50	7.31
542763	0.05	0.66	1.92	3.32	4.24	5.32	6.87
630231	0.02	0.09	0.37	0.77	1.23	2.03	2.39
749353	0.01	0.05	0.15	0.32	0.64	0.93	1.24

Στο Πίνακα 3. 1 φαίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν με χρήση της έκφρασης 3.1. Παρουσιάζεται η μέση ποσοστιαία απόκλιση του μέτρου της ταχύτητας για το εύρος αριθμών Reynolds που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα και στο Σχήμα 3. 4.



Σχήμα 3. 4: Μέση ποσοστιαία απόκλιση (% M.D) συναρτήσει αριθμού στοιχείων πλέγματος για εύρος αριθμών Reynolds στη διακλάδωση τύπου T

Από το Σχήμα 3. 4 γίνεται προφανές ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds τόσο πιο δύσκολα ανεξαρτητοποιείται η λύση από το πλέγμα αλλά ακολουθεί παρόμοια πορεία σύγκλισης σε όλους τους αριθμούς Reynolds για τους οποίους γίνεται ο έλεγχος. Η λύση θεωρείται ικανοποιητικά ανεξάρτητη του πλέγματος όταν το % *M.D* γίνει μικρότερο του 4% έτσι ώστε να υπάρχει ικανοποιητική ακρίβεια λύσης αλλά και λογικό υπολογιστικό κόστος με τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ.

Ακολούθως, παρατίθενται τα δεδομένα για την έρευνα ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα για τον αγωγό γωνίας 90°. Στον Πίνακα 3. 2 φαίνονται καθαρά οι αριθμοί Reynolds για τους οποίους γίνεται η έρευνα ανεξαρτησίας καθώς και το % *M.D* συναρτήσει του αριθμού των στοιχείων του πλέγματος. Όμοια και με την περίπτωση της διακλάδωσης τύπου T, με την αύξηση του αριθμού Reynolds γίνεται πιο δύσκολη η ανεξαρτητοποίηση της λύσης από το πλέγμα αλλά για όλους τους αριθμούς Reynolds το % *M.D* ακολουθεί παρόμοια πορεία σύγκλισης. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση η λύση θεωρείται ανεξάρτητη του αριθμού στοιχείων του πλέγματος όταν το % *M.D* γίνει μικρότερο του 4%.

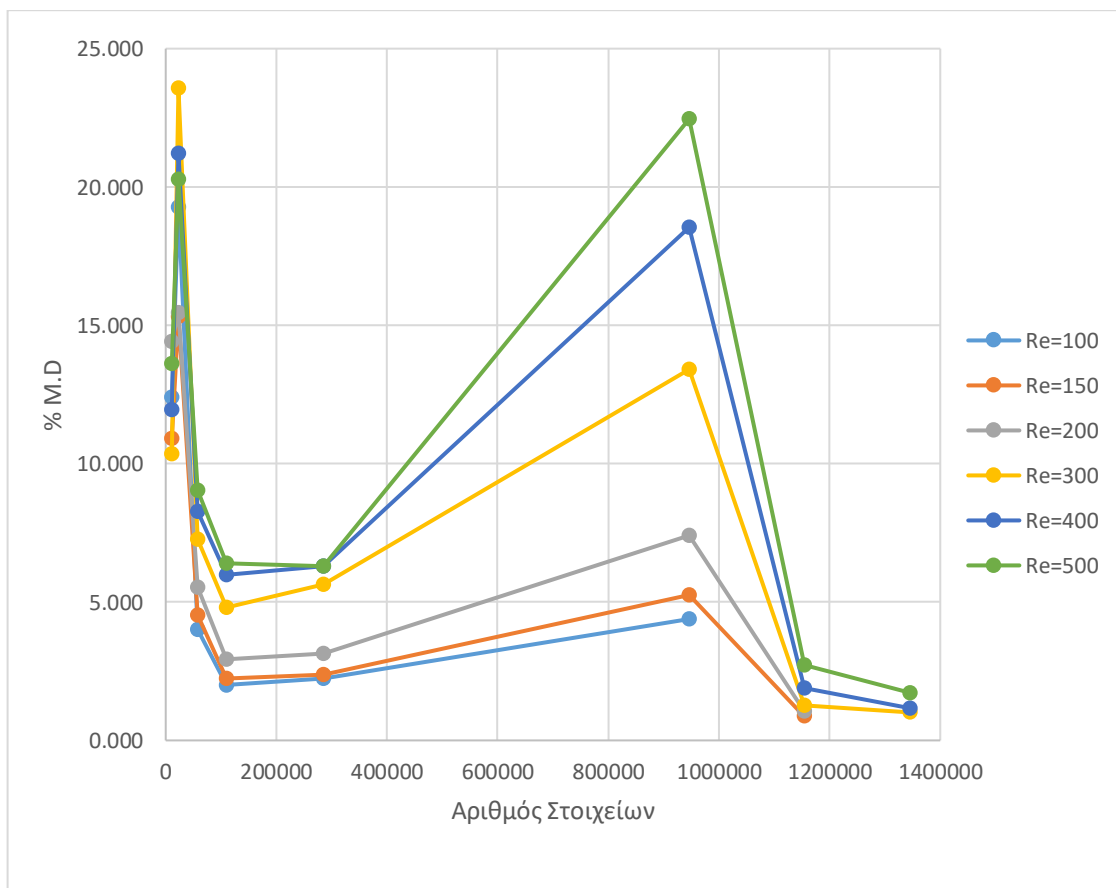
Πίνακας 3. 2: Μέση ποσοστιαία απόκλιση συναρτήσει αριθμού στοιχείων πλέγματος για εύρος αριθμών Reynolds στον αγωγό γωνίας 90°

Αριθμός Reynolds	100	150	200	300	400	500
Αριθμός Στοιχείων	MD (%) Μέτρου ταχύτητας					
10999	12.42	10.91	14.41	10.35	11.95	13.60
22908	19.28	15.32	15.45	23.57	21.21	20.26
57718	4.01	4.54	5.53	7.26	8.28	9.05
109104	2.00	2.24	2.93	4.81	5.97	6.41
285433	2.24	2.38	3.15	5.65	6.28	6.29
946735	4.37	5.25	7.41	13.42	18.54	22.46
1154143	-	0.87	1.06	1.26	1.90	2.73
1345648	-	-	-	1.01	1.16	1.72

Όσον αφορά την υπολογιστική επίλυση της πλήρους γεωμετρίας που κατασκευάζεται με συνδυασμό των παραπάνω βασικών δομικών μονάδων, το πλέγμα που επιλέγεται βασίζεται στην ανάλυση που αφορά τη διακλάδωση τύπου T. Αυτό γίνεται διότι καθώς το ρευστό διέρχεται εντός των διακλαδούμενων καναλιών, η πρώτη

δομική μονάδα που συναντάει είναι διακλάδωση τύπου T. Λόγω αυτού, η ογκομετρική παροχή μοιράζεται στα δύο με αποτέλεσμα ο αριθμός Reynolds της ροής, όταν αυτή διέρχεται από το ακόλουθο αγωγό γωνίας 90°, να είναι μικρότερος από αυτόν στην είσοδο του καναλιού. Για αυτό το λόγο λοιπόν, αντιπροσωπευτική μονάδα για την κατασκευή του πλέγματος της πλήρους γεωμετρίας είναι ο αριθμός Reynolds της πρώτης διακλάδωσης τύπου T, αφού οποιαδήποτε φαινόμενα δευτερογενούς ροής εμφανιστούν σε μεταγενέστερα στάδια διαταραχής της ροής θα είναι λιγότερο έντονα από αυτό που θα εμφανιστεί στη πρώτη διακλάδωση.

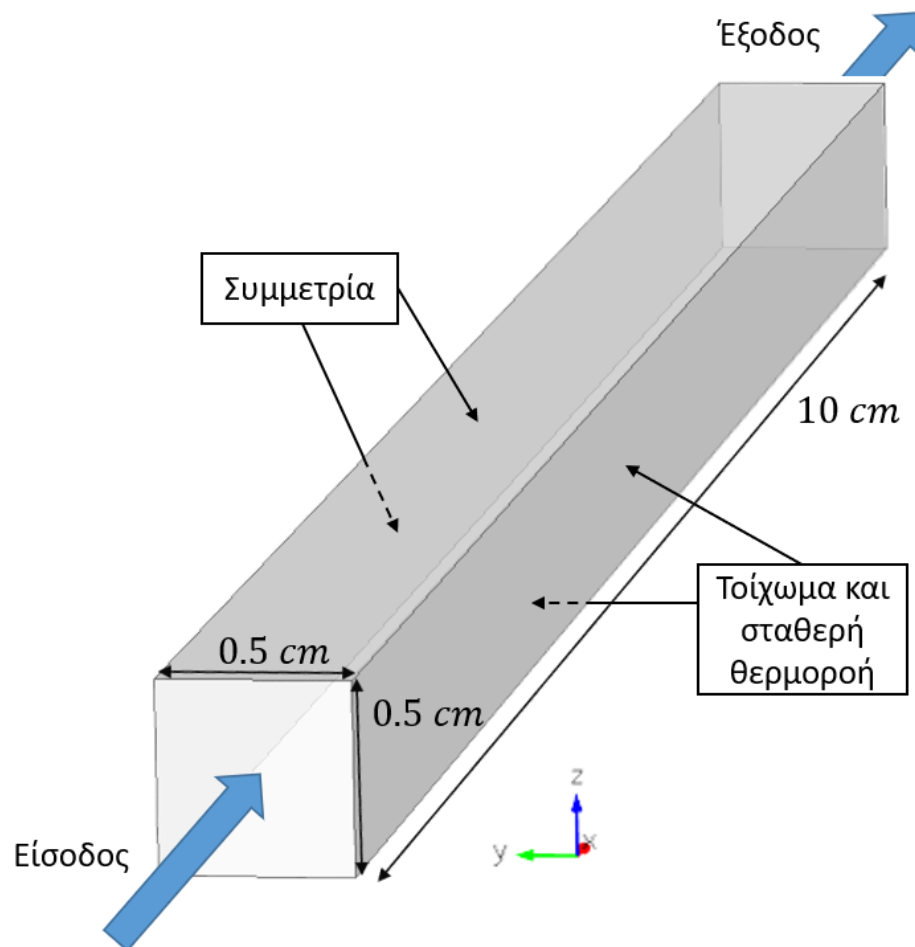
Σημειώνεται επίσης ότι οι γεωμετρίες στις οποίες έγινε ο συγκεκριμένος έλεγχος έχουν τετραγωνική διατομή με πλευρά ίση με 1cm πριν και μετά τη διακλάδωση (για την περίπτωση του T) και μετά την στροφή 90° (για τη περίπτωση γωνίας 90°) .



Σχήμα 3. 5: Μέση ποσοστιαία απόκλιση (% M.D) συναρτήσει αριθμού στοιχείων πλέγματος για εύρος αριθμών Reynolds στον αγωγό γωνίας 90°

### 3.2. Επαλήθευση Αποτελεσμάτων

Πριν παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των βασικών δομικών στοιχείων του προβλήματος και των ολοκληρωμένων διατάξεων διακλαδούμενων καναλιών, είναι απαραίτητη η επαλήθευση του υπολογιστικού μοντέλου που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του προβλήματος ροής και μεταφοράς θερμότητας που μελετάται. Το υπολογιστικό πείραμα που επιλύεται για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιεί τη γεωμετρία που φαίνεται στο Σχήμα 3. 6, όπου νερό εισέρχεται και εξέρχεται από τον ευθύγραμμο αγωγό ορθογωνικής διατομής, οι διαστάσεις του οποίου αναγράφονται πάνω στο ίδιο σχήμα.



Σχήμα 3. 6: Σχηματική αναπαράσταση ευθύγραμμου καναλιού τετραγωνικής διατομής με σταθερή θερμοροή στα τοιχώματα και συμμετρία στα επίπεδα  $xy$  και  $zx$  που περνούν από το κέντρο του αγωγού

Στον αγωγό του σχήματος 3. 6 ορίζεται σταθερή θερμοροή,  $q_A$ , πάνω στα τοιχώματα (συνθήκη H2) και η επιφάνεια στην είσοδο θεωρείται ότι έχει σταθερή θερμοκρασία,  $T_e$ , ίση με τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού. Η ροή που εισέρχεται στον αγωγό είναι στρωτή και πλήρως ανεπτυγμένη ως προς το προφίλ ταχύτητας. Στόχος, είναι ο έλεγχος της ανάπτυξης του προφίλ θερμοκρασίας κατά μήκος της ροής, από την είσοδο μέχρι την έξοδο, του αγωγού και η σύγκριση του με άλλα υπολογιστικά δεδομένα για την επαλήθευση του υπολογιστικού μοντέλου. Ο λόγος που επιλέγεται η συνθήκη H2 για την επαλήθευση, είναι η απουσία βιβλιογραφικών αποτελεσμάτων για τα προβλήματα συζευγμένης μεταφοράς θερμότητας και το ότι η συνθήκη αυτή προσεγγίζει αρκετά καλά το πρόβλημα που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Το πρόβλημα που επιλέγεται για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού μοντέλου έχει επιλυθεί από τους Chandrupatla και Satri [44] για νευτωνικό και μη νευτωνικό ρευστό. Γίνεται σύγκριση με την περίπτωση του Νευτωνικού ρευστού για συνθήκη H2 σταθερής θερμοροής στα τοιχώματα του αγωγού. Το πρόβλημα που ορίζεται από το Σχήμα 3. 6 επιλύεται υπολογιστικά με το εμπορικό λογισμικό COMSOL Multiphysics 5.2 και από το πεδίο ταχύτητας και θερμοκρασίας που προκύπτει, υπολογίζεται ο αριθμός Nusselt ( $Nu$ ) και Graetz ( $Gz$ ) βάση των σχέσεων 3.2 και 3.3 που φαίνονται παρακάτω.

$$Nu_{x,H2} = \frac{2.0}{\theta_w - \theta_b} \quad (3.2)$$

$$Gz = \frac{Re_a Pr}{\frac{x}{2D_h}} \quad (3.3)$$

Ο αριθμός  $Nu_x$  και  $Gz$  υπολογίζεται κατά μήκος της ροής. Η μεταβλητή  $\theta_w$  αντιστοιχεί στη μέση αδιάστατη θερμοκρασία του τοιχώματος σε κάθε τομή κάθετη προς τη κύρια διεύθυνση της ροής. Η μεταβλητή  $\theta_b$ , είναι η μέση τιμή του γινομένου της αδιάστατης θερμοκρασίας επί της αδιάστατης ταχύτητας, στην επιφάνεια  $A$  της διατομής, όπως φαίνεται στη σχέση 3.4 [44].

$$\theta_b = \frac{1}{A} \iint_A U \cdot \theta \cdot dA \quad (3.4)$$

Στην παραπάνω σχέση, το μέγεθος  $U$ , αντιστοιχεί στην αδιάστατη ταχύτητα και είναι ίση με το λόγο της τοπικής ταχύτητας ως προς τη μέση ταχύτητα, σε κάθε διατομή του αγωγού ( $U = u_x/u_m$ ) και το μέγεθος  $\theta$  αντιστοιχεί στην αδιάστατη θερμοκρασία που ορίζεται παρακάτω.

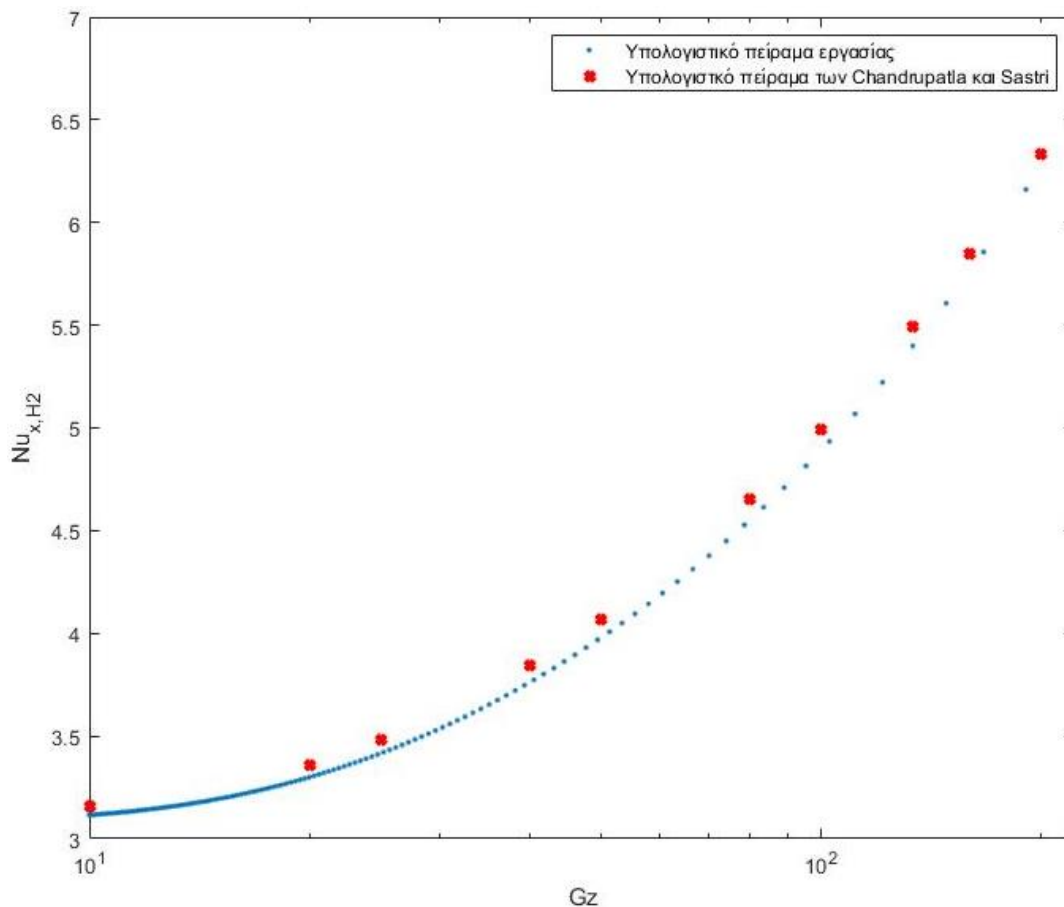
Το αδιάστατο πεδίο θερμοκρασίας,  $\theta$ , υπολογίζεται από τη σχέση 3.5 που αντιστοιχεί στην περίπτωση συνθηκών τύπου H2. Το μέγεθος,  $Re_a$ , αντιστοιχεί στον αριθμό Reynolds, υπολογισμένο βάσει του μισού μήκους της πλευράς του αγωγού,  $a = 0.5 \text{ cm}$ , τετραγωνικής διατομής και το μέγεθος  $Pr$  αντιστοιχεί στον αδιάστατο αριθμό Prandtl. Τα δύο μεγέθη δίνονται από τις σχέσεις 3.6 και 3.7 και υπολογίζονται για σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες, ανεξάρτητες της θερμοκρασίας.

$$\theta = \frac{T - T_e}{\frac{q_A a}{k}} \quad (3.5)$$

$$Re_a = \frac{\rho a u_m}{\mu} \quad (3.6)$$

$$Pr = \frac{\rho c_p u_m a}{k Re_a} \quad (3.7)$$

Όπως γίνεται εμφανές από το Σχήμα 3. 7, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το υπολογιστικό πείραμα που γίνεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, βρίσκονται σε αρκετά καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το υπολογιστικό πείραμα των Chandrupatla και Satri [44]. Ακόμα μια υπολογιστική μελέτη που επιβεβαιώνει τα παραπάνω ευρήματα είναι αυτή των Sriga και Morini [45] οι οποίοι αναφέρουν ότι για πλήρως ανεπτυγμένο θερμοκρασιακό προφίλ, ο αριθμός Nusselt γίνεται ίσος με 3.091 που είναι σχεδόν το ίδιο με αυτό που υπολογίζεται στο παρόν πείραμα όπου ο αριθμός  $Nu$  γίνεται ίσος με 3.092.



Σχήμα 3. 7: Αριθμός Nusselt συναρτήσει του αριθμού Graetz για ευθύγραμμο κανάλι και συνοριακές συνθήκες H2

### 3.3. Υδροδυναμική Συμπεριφορά

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο θα γίνει ανάλυση της συμπεριφοράς της ροής εντός των επιμέρους δομικών στοιχείων που έχουν αναφερθεί. Αρχικά θα υπολογιστεί η αδιάστατη πτώση πίεσης κατά μήκος της ροής στη διακλάδωση T και στον αγωγό γωνίας 90°. Θα παρουσιαστούν κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του ρευστού στους προς ανάλυση αγωγούς και θα γίνει προσπάθεια καλύτερης απεικόνισης των τριδιάστατων χαρακτηριστικών της ροής μέσω της απομόνωσης των πυρήνων των δινών που αναπτύσσονται εντός του όγκου ελέγχου.

Η αδιάστατη πτώση πίεσης υπολογίζεται στο κέντρο του αγωγού και πάνω στο εσωτερικό τοίχωμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. 8. Η συνεχής κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί

στο εσωτερικό τοίχωμα ενώ η διακεκομμένη κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο κέντρο του αγωγού. Η μπλε γραμμή ακολουθεί αρχικά το κέντρο του αγωγού και στη συνέχεια το τοίχωμα στο οποίο γίνεται η πρόσκρουση του ρευστού. Η σχέση που ορίζει την αδιάστατη πτώση ( $DP^*$ ) πίεσης είναι η εξής:

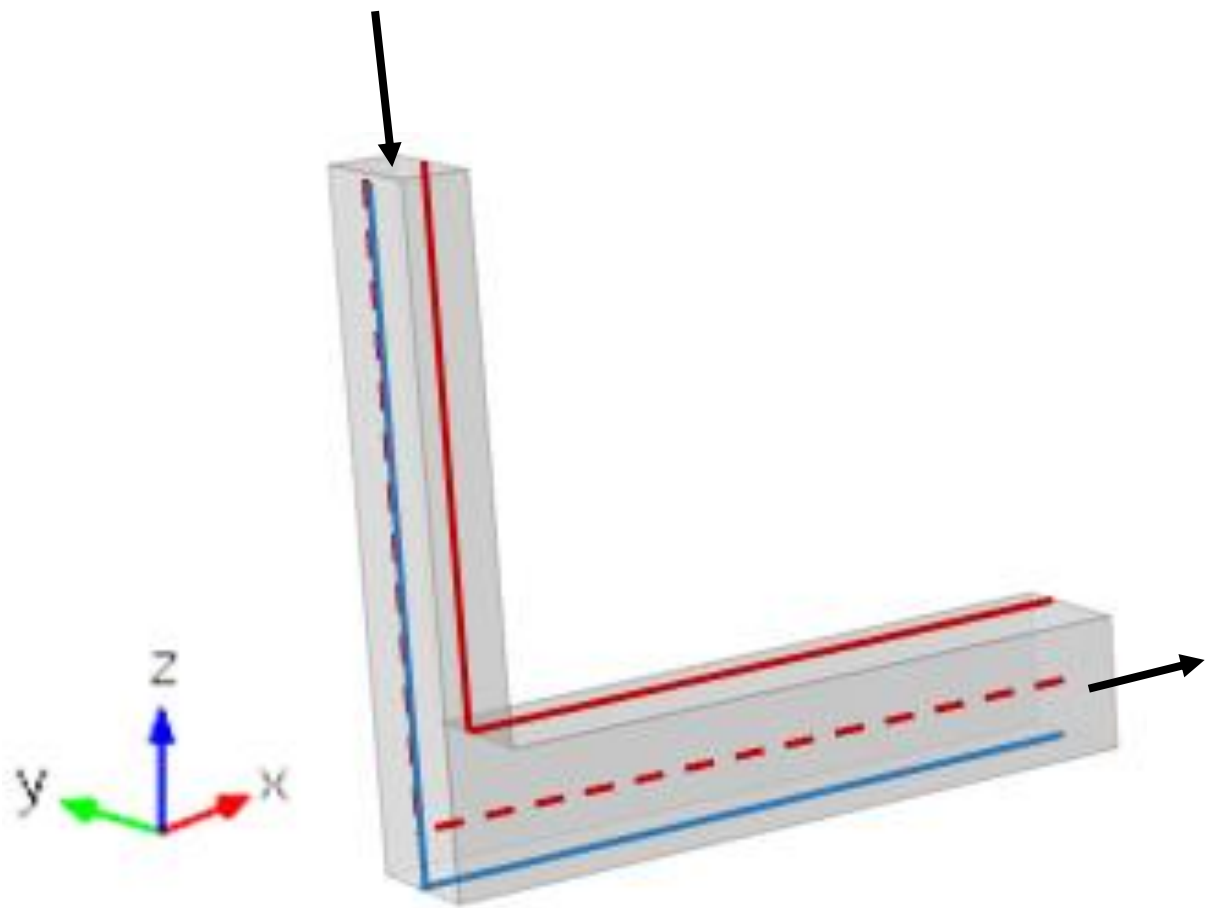
$$DP^* = \frac{p - p_{\infty}}{\frac{1}{2} \cdot u_{in}^2 \cdot \rho} \quad (3.8)$$

όπου  $p$ : πίεση σε κάθε σημείο του αγωγού

$p_{\infty}$ : πίεση στην είσοδο του αγωγού

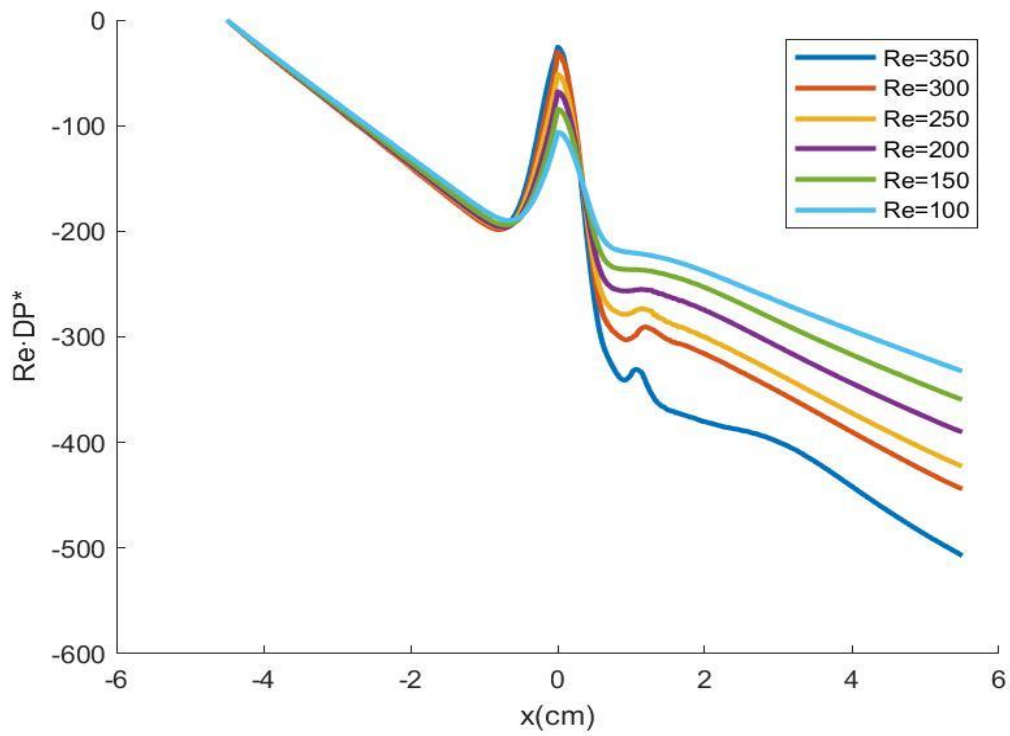
$u_{in}$ : μέση ταχύτητα εισόδου

$\rho$ : πυκνότητα

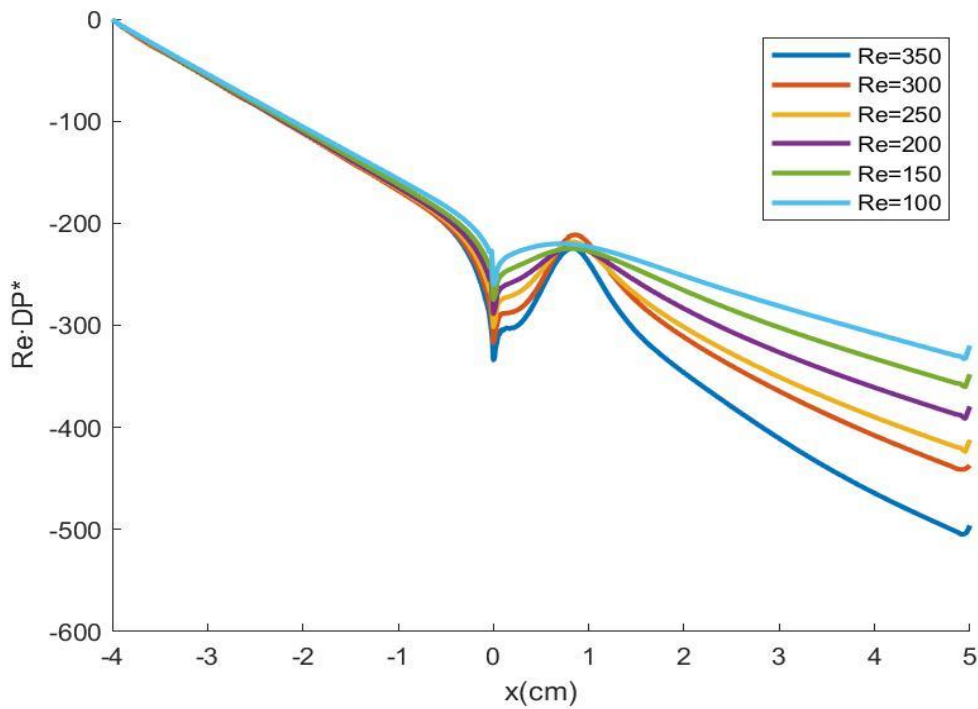


Σχήμα 3. 8: Γραμμές πάνω στις οποίες υπολογίζεται η αδιάστατη πτώση πίεσης



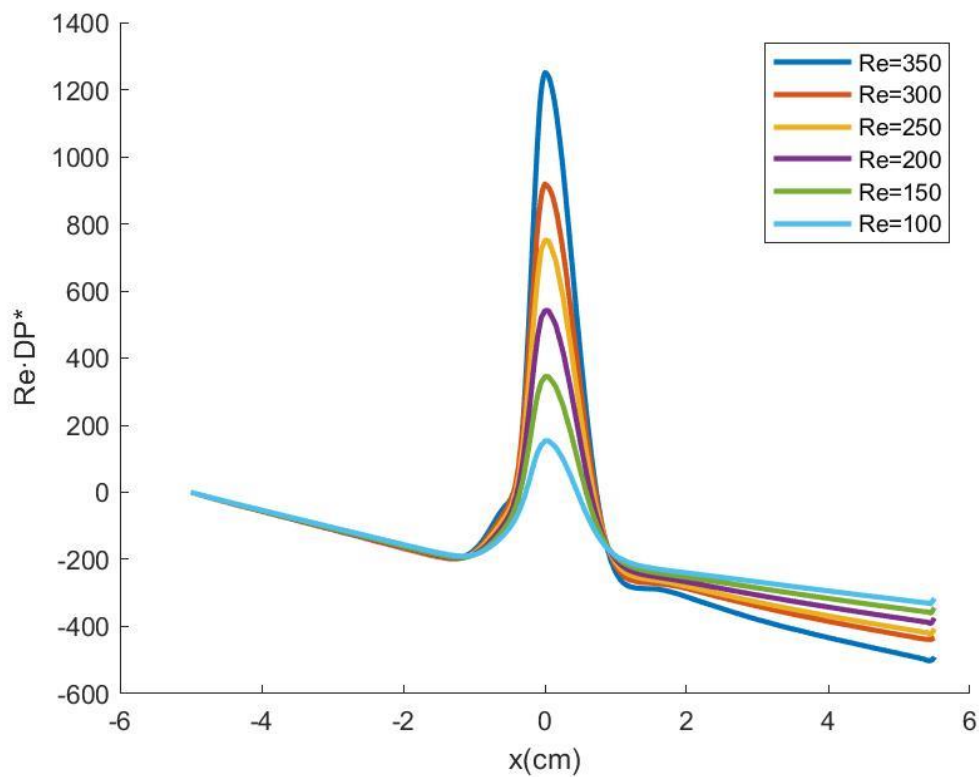


Σχήμα 3. 9: Αδιάστατη πτώση πίεσης στο κέντρο του αγωγού κατά μήκος της ροής



Σχήμα 3. 10: Αδιάστατη πτώση πίεσης στο εσωτερικό τοίχωμα του αγωγού κατά μήκος της ροής

Στα σχήματα 3. 9, 3. 10 και 3. 11 φαίνεται η συμπεριφορά της αδιάστατης πτώσης πίεσης πολλαπλασιασμένης με τον αντίστοιχο αριθμό Reynolds που ορίζεται σε κάθε περίπτωση, ακολουθώντας την πορεία του ρευστού εντός της διακλάδωσης T. Σε αυτά τα σχήματα οι αρνητικές τιμές του άξονα x αντιστοιχούν στη πτώση πίεσης καθώς η ροή έχει κύρια διεύθυνση τον άξονα z της τριδιάστατης δομής, δηλαδή πριν τη διακλάδωση. Οι θετικές τιμές του άξονα x αντιστοιχούν στα σημεία μετά την διακλάδωση όπου η ροή έχει κύρια διεύθυνση τον άξονα x της τριδιάστατης δομής.



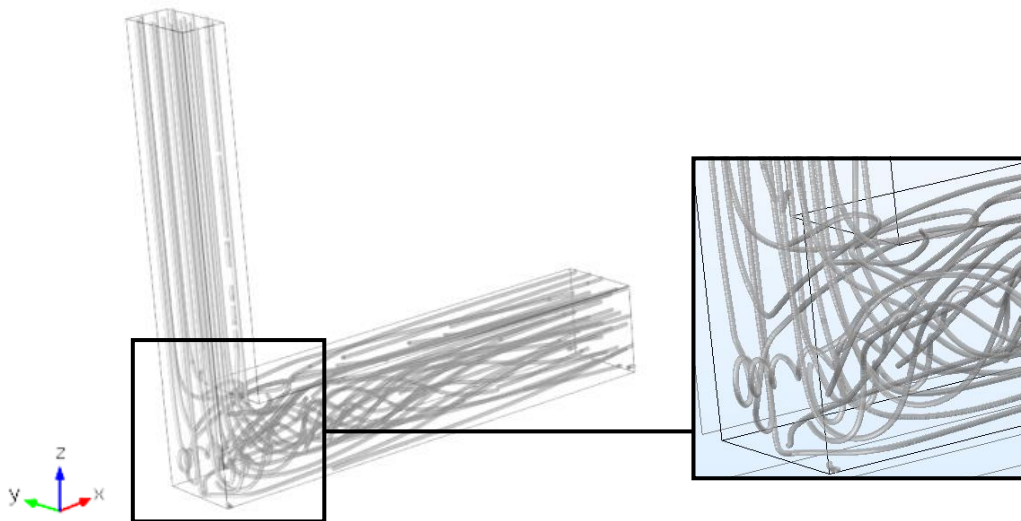
Σχήμα 3. 11: Αδιάστατη πτώση πίεσης στο εξωτερικό τοίχωμα του αγωγού κατά μήκος της ροής

Κοιτάζοντας αρχικά τη συμπεριφορά της πτώσης πίεσης στα τρία παραπάνω σχήματα παρατηρείται ότι ένα μεγάλο μέρος των διαγραμμάτων είναι κοινό. Αυτό ανήκει στο κομμάτι του αγωγού πριν τη διακλάδωση και όπως είναι αναμενόμενο υπάρχει ίδια συμπεριφορά σε όλες τις περιπτώσεις που ελέγχονται. Όντας στρωτή η ροή, για τους συγκεκριμένους αριθμούς Reynolds, η αδιάστατη πτώση πίεσης είναι ευθεία

γραμμή πριν τη διακλάδωση και δίνεται από την παρακάτω σχέση ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.9)$$

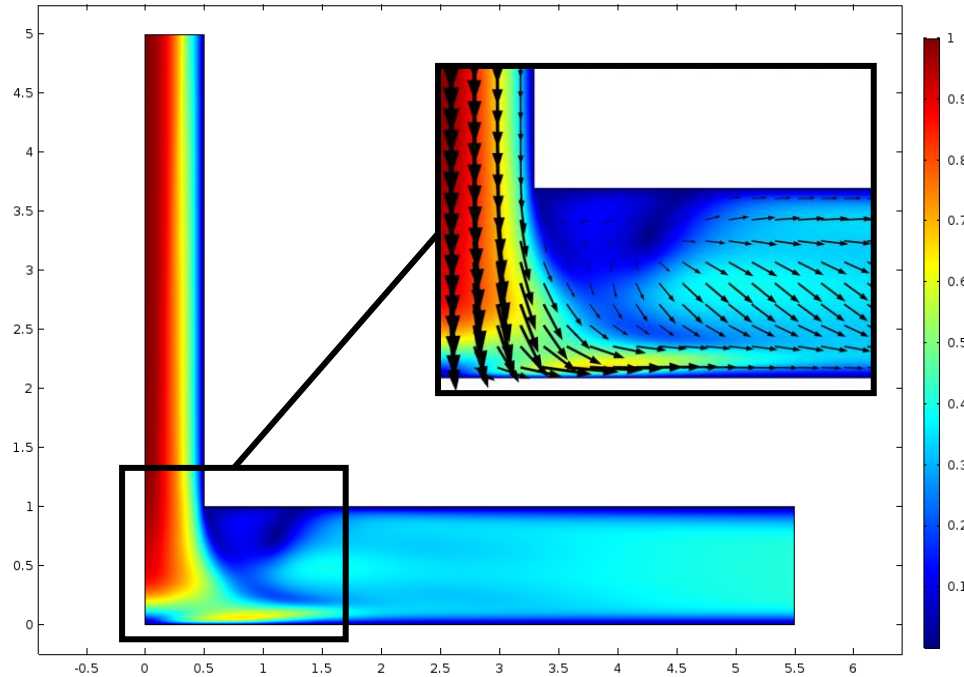
Εφόσον οι αδιάστατη πίεση στα διαγράμματα είναι πολλαπλασιασμένη με τον αριθμό Reynolds στην είσοδο είναι λογικό οι καμπύλες να εφάπτονται στο μέρος του αγωγού πριν τη διακλάδωση. Στο σημείο όπου προσκρούεται το ρευστό με το τοίχωμα του αγωγού (βλ. Σχήμα 3. 12) αρχίζουν να διαφοροποιούνται οι καμπύλες.



Σχήμα 3. 12: Ροϊκές γραμμές στον αγωγό διακλάδωσης  $T$  και μεγέθυνση του σημείου πρόσκρουσης του ρευστού για  $Re=350$

Όσον αφορά τη συμπεριφορά της πίεσης κατά μήκος του κέντρου του αγωγού παρατηρείται μια απότομη αύξηση της πίεσης που οφείλεται στην πρόσκρουση που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα και στη δημιουργία της δευτερογενούς ροής. Η επίδραση της πρόσκρουσης φαίνεται στο Σχήμα 3. 11 όπου αντιστοιχεί στην αδιάστατη πτώση πίεσης στο εξωτερικό τοίχωμα (συνεχής, μπλε γραμμή). Εκεί παρατηρείται η μεγαλύτερη αύξηση της πίεσης ενώ στο εσωτερικό τοίχωμα (συνεχής, κόκκινη γραμμή) παρατηρείται απότομη μείωση της πίεσης. Στο Σχήμα 3. 13 φαίνεται η εξήγηση της απότομης πτώσης πίεσης, που οφείλεται στην αποκόλληση του στρώματος ρευστού από το τοίχωμα. Λόγω της απότομης διακλάδωσης που είναι υπό γωνία  $90^\circ$ , το στρώμα το ρευστού που

κατεβαίνει προς την διακλάδωση αποκολλάται από το τοίχωμα και προσκρούει στην αντίθετη πλευρά. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 3. 10 όπου αμέσως μετά τη διακλάδωση υπάρχει απότομη πτώση της πίεσης και επακόλουθη αύξηση.



Σχήμα 3. 13: Αδιάστατη ταχύτητα και διανυσματικά τόξα των συνιστωσών  $u_x$  και  $u_z$  της ταχύτητας σε επίπεδο  $xz$  στο  $y=0.5$ (μέσο αγωγού) για  $Re=350$

Στο Σχήμα 3. 11 που φαίνεται η πτώση πίεσης στο εξωτερικό τοίχωμα παρατηρείται ότι στο σημείο πρόσκρουσης του ρευστού υπάρχει απότομη αύξηση της πίεσης που οδηγεί στις κορυφές του διαγράμματος. Και στα τρία σχήματα που δείχνουν την πτώση πίεσης υπάρχει παρόμοια συμπεριφορά καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds με τη μόνη διαφορά ότι τα φαινόμενα είναι πιο έντονα όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός αυτός.

Επόμενο μέγεθος που αξίζει να αναφερθεί και είναι αντιπροσωπευτικό της δευτερογενούς ροής που εμφανίζεται στο σύστημα είναι η ελικότητα. Η ελικότητα αποτελεί το εσωτερικό γινόμενο του διανύσματος της ταχύτητας ( $\mathbf{u}$ ) και του διανύσματος της στροβιλότητας ( $\mathbf{w}$ ). Πριν εξηγηθεί ο ορισμός και η σημασία της ελικότητας, θα δοθεί σημασία στην έννοια του στροβιλισμού. Μαθηματικά, ο στροβιλισμός διατυπώνεται ως το εξωτερικό γινόμενο του ανάδελτα και του διανύσματος της ταχύτητας, όπως φαίνεται στην εξίσωση 3.10 [41].

$$\mathbf{w} = \nabla \times \mathbf{u} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u_x & u_y & u_z \end{vmatrix} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{w} = \left( \frac{\partial u_z}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \mathbf{k}$$

Το φυσικό νόημα του μεγέθους αυτού είναι ότι η στροβιλότητα είναι ένα μέτρο της περιστροφής του ρευστού σε ένα οποιοδήποτε σημείο του χώρου [41]. Για την καλύτερη κατανόηση του μεγέθους, έστω ένα στερεό σώμα που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $a$ . Η γωνιακή ταχύτητα μπορεί να οριστεί ως ένα διάνυσμα  $\mathbf{a}$  του οποίου το μέτρο είναι ίσο με τη ταχύτητα περιστροφής σε  $rad/s$  και του οποίου η κατεύθυνση είναι ο άξονας περιστροφής. Το διάνυσμα αυτό είναι:

$$\mathbf{a} = a_1 \cdot \mathbf{i} + a_2 \cdot \mathbf{j} + a_3 \cdot \mathbf{k} \quad (3.11)$$

Η γραμμική ταχύτητα σε μια οποιαδήποτε θέση  $r$  δίνεται από το εξωτερικό γινόμενο της γωνιακής ταχύτητας και του διανύσματος θέσης ( $\mathbf{r}$ ) :

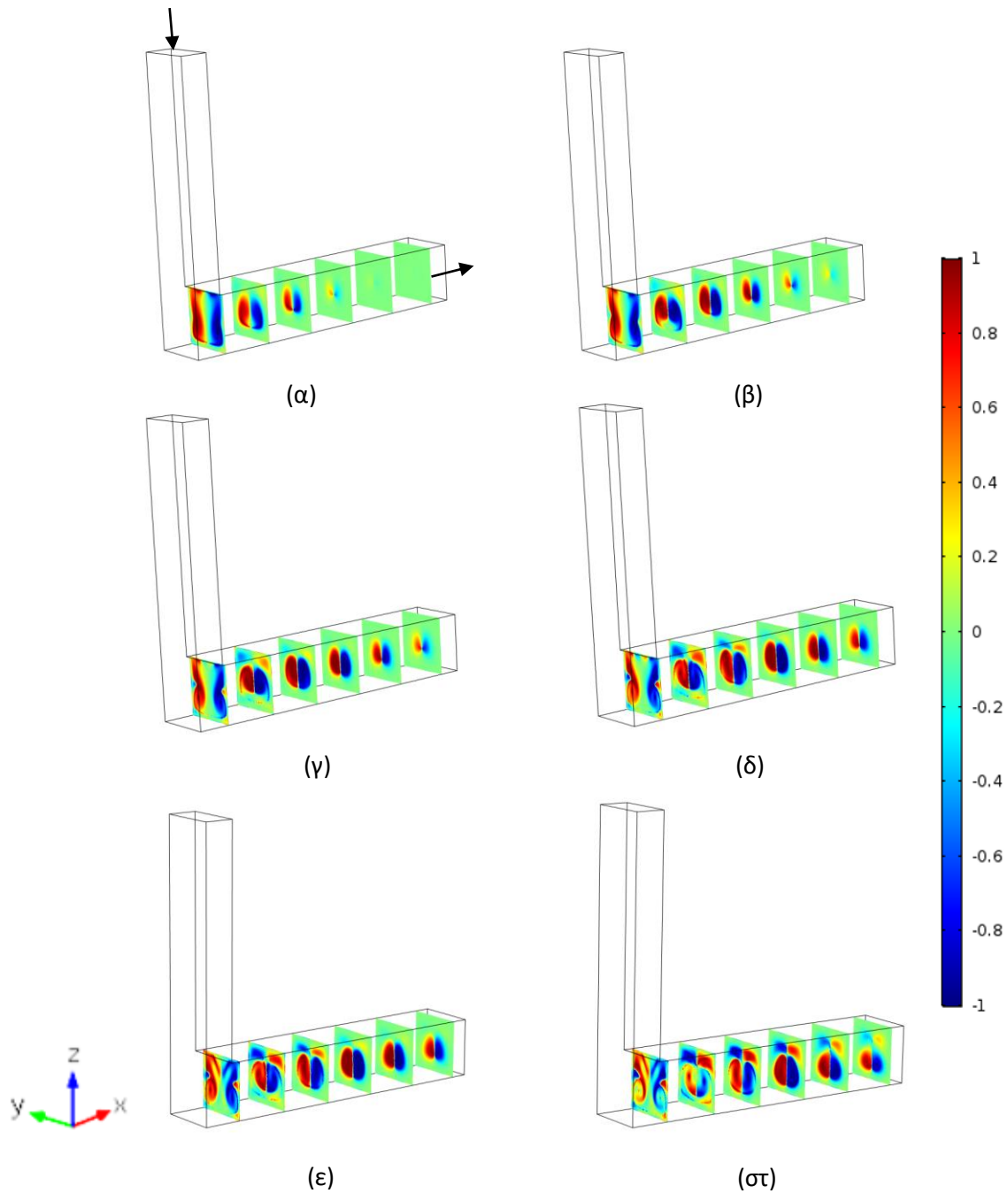
$$\mathbf{u} = \mathbf{a} \times \mathbf{r} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{u} = (a_2 r_3 - a_1 r_2) \cdot \mathbf{i} + (a_3 r_1 - a_1 r_3) \cdot \mathbf{j} + (a_1 r_2 - a_2 r_1) \cdot \mathbf{k}$$

Ο στροβιλισμός του παραπάνω διανύσματος δίνεται παρακάτω ως:

$$\nabla \times \mathbf{u} = \begin{pmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ a_2 r_3 - a_1 r_2 & a_3 r_1 - a_1 r_3 & a_1 r_2 - a_2 r_1 \end{pmatrix} = 2 \cdot \mathbf{a} \quad (3.13)$$

Όπως φαίνεται από τη σχέση 3.13 το διάνυσμα της στροβιλότητας είναι ίσο με το διάνυσμα της διάνυσμα της γωνιακής ταχύτητας. Αν η στροβιλότητα είναι μηδενική, σημαίνει ότι δεν υπάρχει όρος που να συνεισφέρει στην περιστροφική κίνηση του ρευστού σε εκείνο το σημείο. Αν η στροβιλότητα είναι παντού μηδενική, τότε έχουμε μη περιστροφική ροή. Αποδεικνύεται λοιπόν, ότι ο στροβιλισμός του διανύσματος της ταχύτητας είναι ένα μέτρο της περιστροφικής κίνησης ενός σωματιδίου ρευστού.



Σχήμα 3. 14: Κανονικοποιημένη ελικότητα σε επίπεδα yz μετά τη διακλάδωση σε αγωγό  $T$  για αριθμούς Reynolds (α)  $Re=100$  (β)  $Re=150$  (γ)  $Re=200$  (δ)  $Re=250$  (ε)  $Re=300$  (στ)  $Re=350$

Επόμενο βήμα της ανάλυσης της υδροδυναμικής συμπεριφοράς, είναι η ανάλυση της έννοιας της ελικότητας. Όπως έχει αναφερθεί, το μέγεθος αυτό είναι εσωτερικό

γινόμενο του διανύσματος της ταχύτητας και του διανύσματος της στροβιλότητας. Δίνεται από τη παρακάτω εξίσωση [46]:

$$H = \mathbf{u} \cdot \mathbf{w} \quad (3.14)$$

Για να μπορεί να γίνει εύκολα η σύγκριση του μεγέθους αυτού στις βασικές δομικές μονάδες που εξετάζονται, αντί της ελικότητας, απεικονίζεται η κανονικοποιημένη ελικότητα που ορίζεται ως το εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων της ταχύτητας και της στροβιλότητας ως προς το γινόμενο των μέτρων τους και δίνεται από τη σχέση:

$$H = \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{w}}{\|\mathbf{u}\| \|\mathbf{w}\|} = \frac{u_x w_x + u_y w_y + u_z w_z}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \cdot \sqrt{w_x^2 + w_y^2 + w_z^2}} \quad (3.15)$$

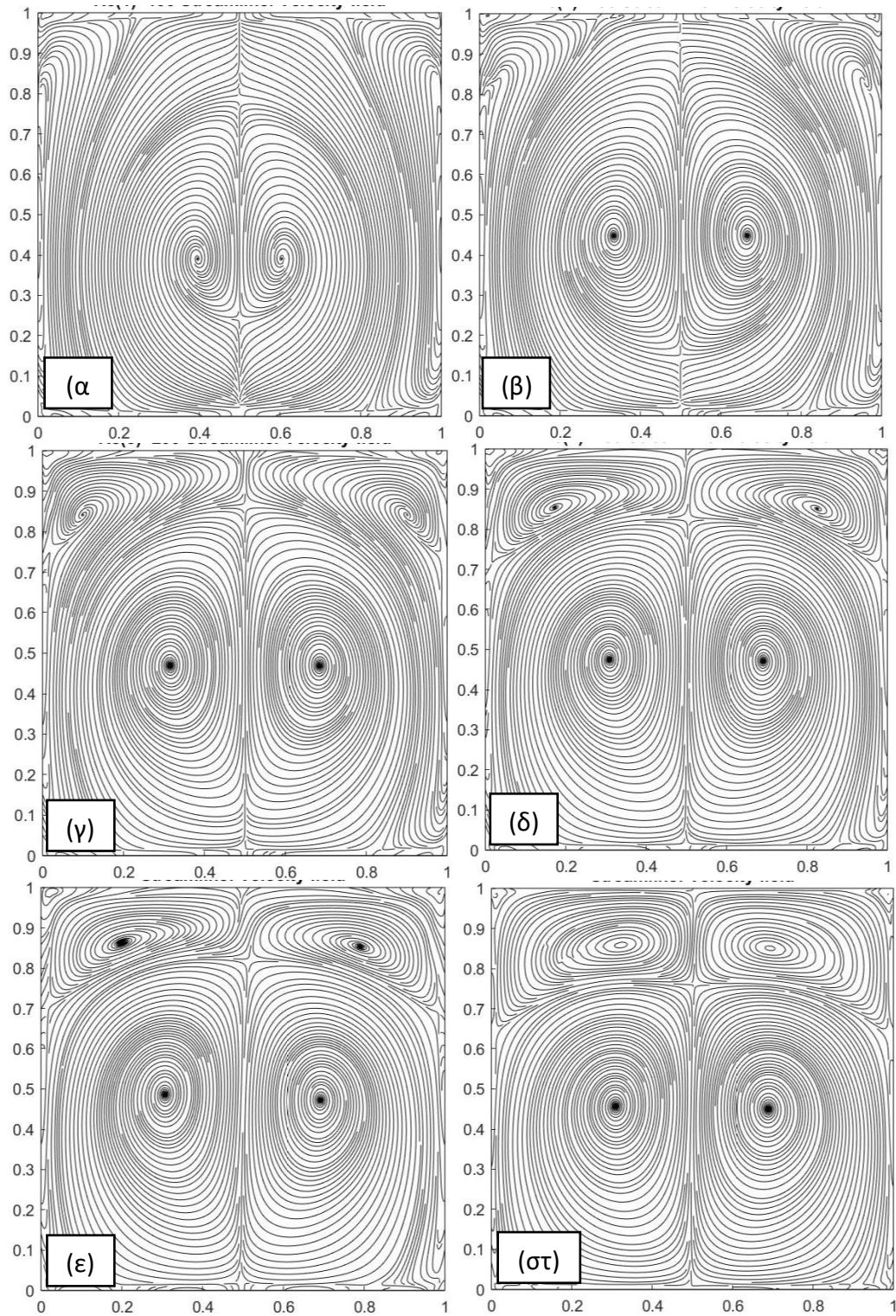
Η ελικότητα επιλέγεται ως ένα από τα χαρακτηριστικά μεγέθη διατύπωσης της δευτερογενούς ροής διότι η στροβιλότητα μεγιστοποιείται στα τοιχώματα του καναλιού. Αυτό συμβαίνει λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης στα τοιχώματα του καναλιού τα οποία αναγκάζουν το ρευστό που περιστρέφεται, σχηματίζοντας τις δίνες, να έρθει σε ακινησία. Η ελικότητα που είναι το εσωτερικό γινόμενο της στροβιλότητας και της ταχύτητας πολλαπλασιάζει τις συνιστώσες του μεγέθους της στροβιλότητας με τις συνιστώσες της ταχύτητας οι οποίες, λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης, είναι μηδενικές κοντά στα τοιχώματα. Έτσι, επιβιώνει η στροβιλότητα που αντιστοιχεί στις δίνες και όχι αυτή που αναπτύσσεται κοντά στα τοιχώματα λόγω τριβής. Η κανονικοποιημένη ελικότητα φαίνεται αναλυτικά στο Σχήμα 3. 14 σε 6 επίπεδα που βρίσκονται κάθετα στη κύρια διεύθυνση της ροής μετά τη διακλάδωση και αντιστοιχούν σε διαφορετικούς αριθμούς Reynolds, όπως αναφέρεται στη λεζάντα του σχήματος. Παρατηρώντας το Σχήμα 3. 14 φαίνεται ότι οι τιμές της κανονικοποιημένης ελικότητας κυμαίνονται από το -1 μέχρι το 1. Αυτό οφείλεται στο ότι οι δύο δίνες είναι συμμετρικές ως προς το επίπεδο  $zx$  που τις χωρίζει και περιστρέφονται προς αντίθετες κατευθύνσεις. Παρατηρείται μέσω του ίδιου σχήματος το μήκος κατά το οποίο διατηρούνται οι δίνες που σχηματίζονται ανάλογα με τον αριθμό Reynolds της ροής. Για το μικρότερο αριθμό Reynolds φαίνεται ότι μέχρι το 4<sup>ο</sup> επίπεδο η δίνη έχει εξασθενήσει και ότι η ελικότητα μηδενίζεται. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds γίνεται προφανές ότι η δίνη επικρατεί σε όλο και

μεγαλύτερο μήκος μέσα στο κανάλι, καταλαμβάνει παραπάνω χώρο στις κάθετες διατομές και έχει μεγαλύτερη ένταση. Επίσης, ήδη για αριθμό Reynolds ίσο με 200 αρχίζει να εμφανίζεται ακόμα ένα ζεύγος δινών, πάνω από το κύριο ζεύγος που είναι κοινό σε όλες τις περιπτώσεις. Το δεύτερο ζεύγος επίσης μεγαλώνει σε μέγεθος και επικρατεί για μεγαλύτερο μήκος μέσα στο κανάλι καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds. Για  $Re = 350$ , η δίνες καταλαμβάνουν ολόκληρη τη διατομή του καναλιού και επικρατεί και το δεύτερο ζεύγος των ασθενέστερων δινών μέχρι την έξοδο.

Στο Σχήμα 3. 16 φαίνονται οι ροϊκές γραμμές σε επίπεδο  $yz$ , κάθετο στη κύρια διεύθυνση της ροής μετά τη διακλάδωση για τους αριθμούς Reynolds που ερευνώνται. Ακριβώς όπως και η απεικόνιση της κανονικοποιημένης ελικότητας, οι ροϊκές γραμμές, δείχνουν το σχηματισμό δεύτερου ζεύγους δινών πάνω από το κύριο ζεύγος που εμφανίζεται από την αρχή. Οι δίνες αυτές καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds μεγαλώνουν σε ένταση και σε μέγεθος. Ωστόσο, οι ροϊκές γραμμές, μας δίνουν μόνο ποιοτική πληροφορία για την μορφή της τροχιάς που διαγράφουν τα σωματίδια του ρευστού στο συγκεκριμένο επίπεδο και δεν είναι αντιπροσωπευτικές της έντασης των ροών ανακυκλοφορίας, η οποία αυξάνεται με τον αριθμό Reynolds. Γι' αυτό το λόγο χρειάζεται ο συνδυασμός των δύο απεικονίσεων της ελικότητας και των ροϊκών γραμμών για να γίνει πλήρως αντιληπτό το φαινόμενο.

Εκτός από την ελικότητα και τις ροϊκές γραμμές, ακόμα μια τεχνική για την διασαφήνιση των δινών είναι το κριτήριο  $Q$ . Η αναγνώριση μιας δίνης, παρόλο που μπορεί να φαίνεται εύκολη υπόθεση, υπό την έννοια ότι ορίζεται ενστικτωδώς ως μια δομή η οποία περιστρέφεται γύρω από κάποιο άξονα, δεν είναι τόσο απλή. Μια ξεκάθαρη μαθηματική σχέση η οποία να ορίζει το τί είναι δίνη, είναι δύσκολο να βρεθεί, κυρίως λόγω της προδιάθεσης που υπάρχει να θεωρείται δίνη οποιαδήποτε αμυδρή περιστροφική κίνηση ρευστού και της έλλειψης καθαρών ορίων σε μια τέτοια δομή. Δηλαδή, θεωρώντας μια δίνη ως πεπερασμένο κατασκεύασμα είναι δύσκολη η συμφωνία όσον αφορά το που τελειώνει αυτό [47], [48]. Εκτός από την εύρεση μιας ξεκάθαρης μαθηματικής σχέσης για τον ορισμό μιας δίνης, δύσκολη είναι και απεικόνιση των αποτελεσμάτων αυτών.





Σχήμα 3. 16: Ροϊκές γραμμές σε επίπεδο  $yz$  κάθετο στη κύρια κατεύθυνση της ροής μετά τη διακλάδωση στο σημείο  $x = 2 \text{ cm}$  για αριθμούς Reynolds (α)  $Re=100$  (β)  $Re=150$  (γ)  $Re=200$  (δ)  $Re=250$  (ε)  $Re=300$  (στ)  $Re=350$  (ποιοτική απεικόνιση : πυκνότητα γραμμών ροής ανεξάρτητη της έντασης της ανακυκλοφορίας)

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, απομονώνεται η δομή που ορίζεται ως δίνη, εφαρμόζοντας το μαθηματικό κριτήριο Q [47], [48], το οποίο προκύπτει από τον τανυστή της κλίσης της ταχύτητας ( $\nabla \mathbf{u}$ , όπου:

$$\mathbf{D} = \nabla \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} & \frac{\partial u_x}{\partial y} & \frac{\partial u_x}{\partial z} \\ \frac{\partial u_y}{\partial x} & \frac{\partial u_y}{\partial y} & \frac{\partial u_y}{\partial z} \\ \frac{\partial u_z}{\partial x} & \frac{\partial u_z}{\partial y} & \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Ο τανυστής της κλίσης της ταχύτητας που φαίνεται παραπάνω, μπορεί να συμβολιστεί και ως  $D_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$  και είναι τανυστής δεύτερης τάξης. Διασπάται σε ένα συμμετρικό και αντισυμμετρικό μέρος ως εξής:

$$D_{ij} = S_{ij} + \Omega_{ij} \quad (3.17)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.18)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.19)$$

Το τανυστής  $S_{ij}$  αντιστοιχεί στο τανυστή ρυθμού παραμόρφωσης και ο  $\Omega_{ij}$  στο τανυστή της στροβιλότητας. Η χαρακτηριστική εξίσωση για το  $\nabla \mathbf{u}$  δίνεται ως εξής:

$$\lambda^3 + P\lambda^2 + Q\lambda + R = 0 \quad (3.20)$$

$$P = -tr(\mathbf{D}) \quad (3.21)$$

$$Q = \frac{1}{2} (tr(\mathbf{D})^2 - tr(\mathbf{D}^2)) = \frac{1}{2} \|\boldsymbol{\Omega}\|^2 - \|\mathbf{S}\|^2 \quad (3.22)$$

$$R = -det(\mathbf{D}) \quad (3.23)$$

Οι σχέσεις των P, Q και R δίνονται στις 3 παραπάνω εξισώσεις, στις οποίες το trace(tr) είναι το ίχνος του πίνακα και det η ορίζουσα του, και ορίζουν τις σταθερές της χαρακτηριστικής εξίσωσης 3.20.

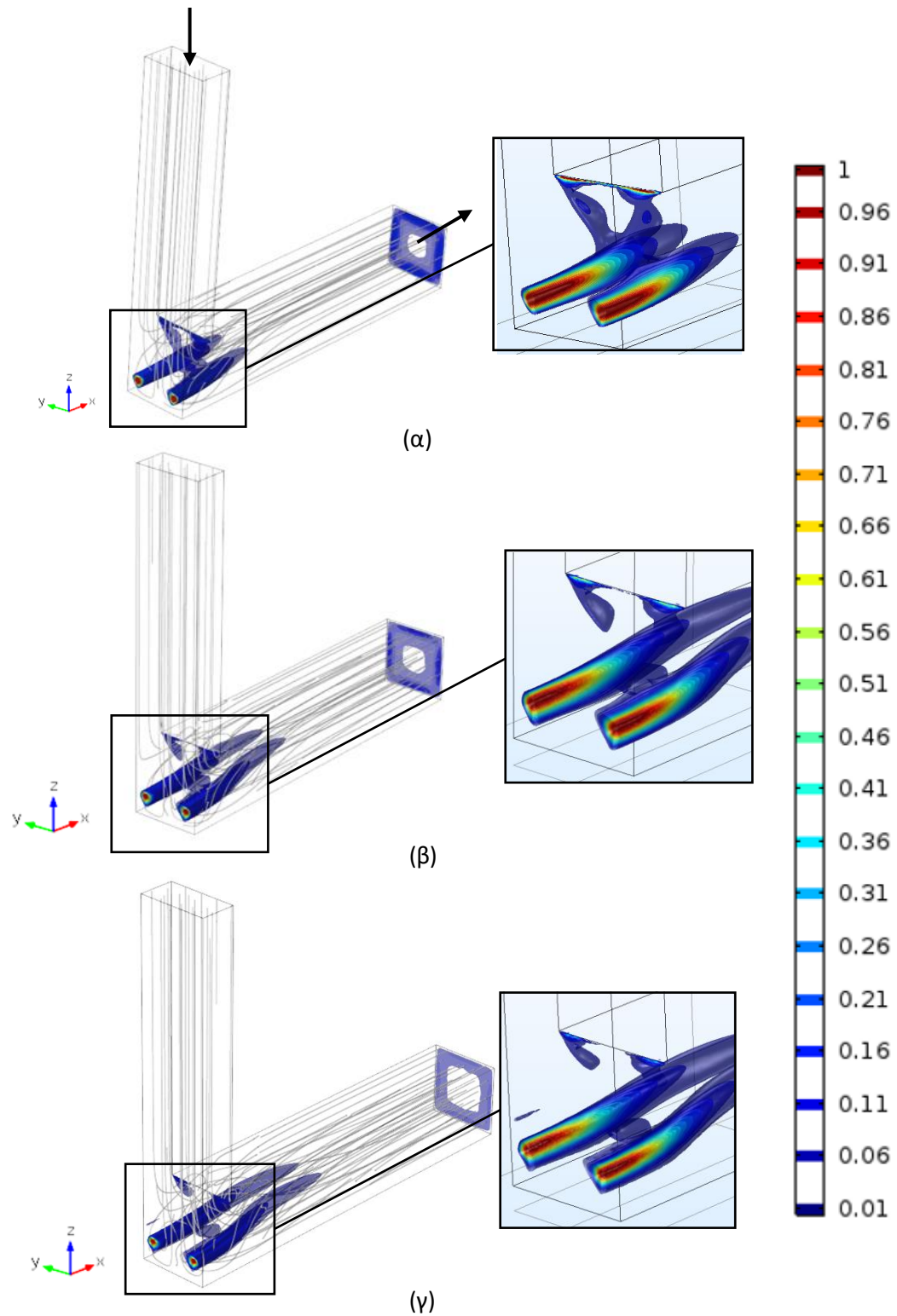
Προτού παρουσιαστεί το κριτήριο αυτό, αναφέρονται περιληπτικά κάποιες άλλες μέθοδοι εντοπισμού δινών που βασίζονται στο τανυστή της κλίσης της ταχύτητας. Οι μέθοδοι αυτοί είναι οι εξής:

- Κριτήριο  $\Delta$ : ο πυρήνας της δίνης είναι ένας χώρος όπου η στροβιλότητα είναι επαρκώς δυνατή ώστε να προκαλέσει το τανυστή του ρυθμού παραμόρφωσης να υπερिσχυθεί από το τανυστή περιστροφής, δηλαδή οι ιδιοτιμές του τανυστή της κλίσης της ταχύτητας να είναι μιγαδικοί αριθμοί [47], [48].
- Κριτήριο  $\lambda_2$ : αυτή η μέθοδος βασίζεται στην εύρεση ελάχιστων της πίεσης κατά μήκος της δίνης, παίρνοντας τη κλίση από την εξίσωση Navier-Stokes και αποσυνθέτοντας την σε ένα συμμετρικό και ένα αντισυμμετρικό κομμάτι [47], [48].
- Κριτήριο δύναμης στροβιλισμού: Χρησιμοποιώντας το φανταστικό μέρος της μιγαδικής ιδιοτιμής του τανυστή της κλίσης της ταχύτητας, απεικονίζονται οι δίνες και ποσοτικοποιείται η δύναμη της τοπικής περιστροφικής κίνησης εντός της δίνης. Η μέθοδος βασίζεται στο κριτήριο  $\Delta$  και εντοπίζει τη τοπική δύναμη στο τοπικό επίπεδο περιδίνησης [38].

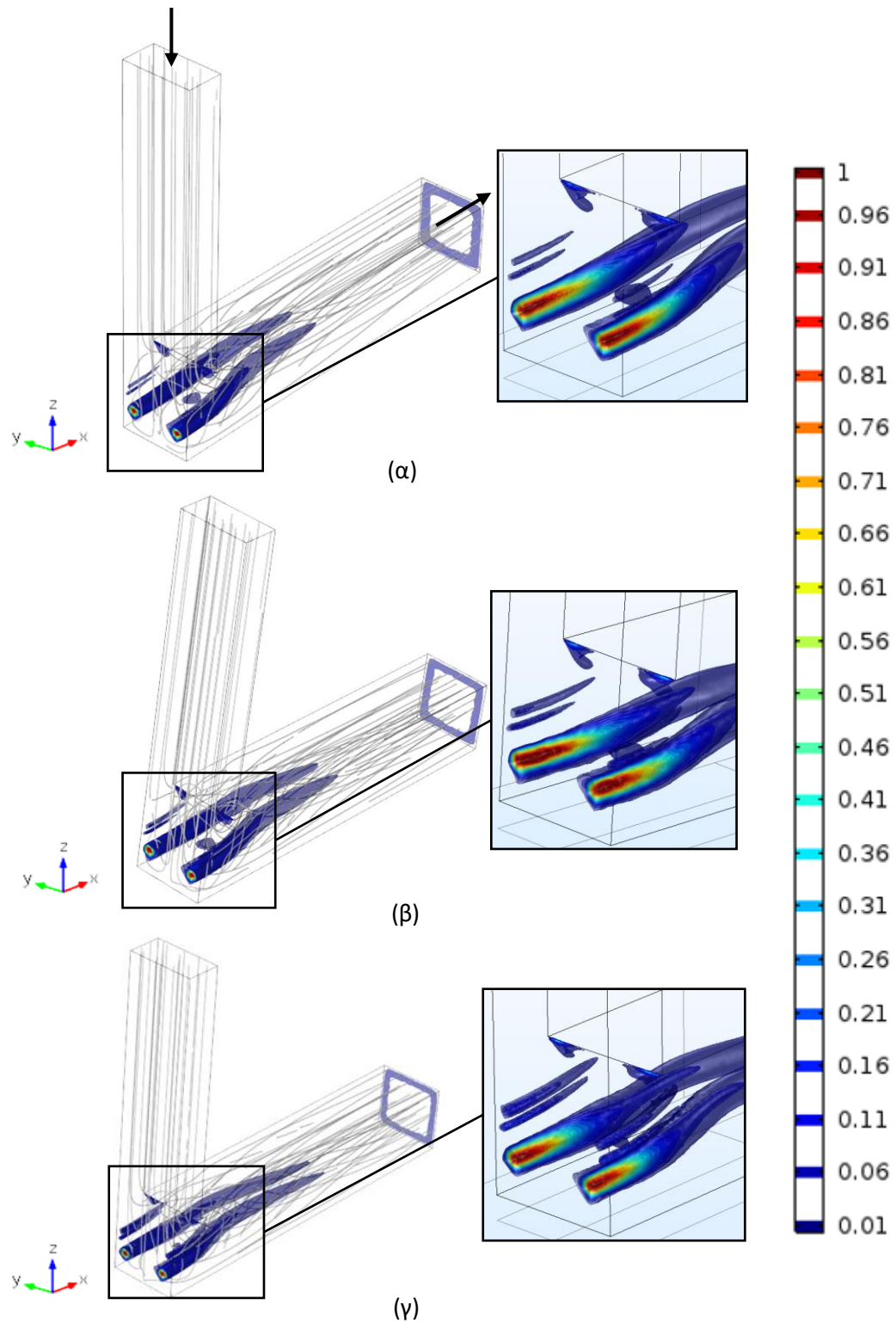
Όπως έχει αναφερθεί, το κριτήριο που έχει χρησιμοποιηθεί σε αυτή την εργασία, είναι το κριτήριο  $Q$ . Το κριτήριο αυτό ορίζει τη δίνη ως μια περιοχή του ρευστού που είναι μη κερματισμένη και έχει θετική τη σταθερά  $Q$  της χαρακτηριστικής εξίσωσης 3.20. Αυτό το κριτήριο προσθέτει ακόμα μια συνθήκη στη πίεση, απαιτώντας να είναι μικρότερη από την πίεση στο άμεσο περιβάλλον μέσα στη δίνη. Κοιτάζοντας τον ορισμό της δεύτερης σταθεράς  $Q$ , παρατηρείται ότι αντιπροσωπεύει την ισορροπία μεταξύ ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης και του μέτρου της στροβιλότητας, ορίζοντας έτσι τις δίνες, ως περιοχές όπου το μέτρο της στροβιλότητας είναι μεγαλύτερο από το μέτρο του ρυθμού παραμόρφωσης. Αναπτύσσοντας τη σχέση 3.22 του  $Q$ , προκύπτει η σχέση 3.24. Η σχέση αυτή εισάγεται στο COMSOL Multiphysics 5.2 για την δημιουργία των ισοεπιφανειών που φαίνονται στα σχήματα 3. 17, 3. 18 και 3. 25 .

$$\begin{aligned}
Q = & \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right]^2 + \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right]^2 + \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\partial u_y}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right]^2 \\
& - \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 - \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 - \left( \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 - 2 \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right]^2 \\
& - 2 \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right]^2 - 2 \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right]^2
\end{aligned} \tag{3.24}$$

Για να είναι πιο εύκολη στη κατανόηση η απεικόνιση των δινών βάσει του κριτηρίου  $Q$ , το μέγεθος κανονικοποιείται ως προς το μέγιστο της κάθε περίπτωσης έτσι ώστε να υπάρχει μια ενιαία κλίμακα που να κυμαίνεται από το 0 μέχρι το 1. Στη λεζάντα των σχημάτων που αναπαρίσταται το κριτήριο  $Q$  αναγράφονται τα  $Q_{max}$  που προκύπτουν για κάθε αριθμό Reynolds. Όπως γίνεται εμφανές, το κριτήριο  $Q$  απομονώνει επιτυχώς τους πυρήνες των δινών που δημιουργούνται. Από τα σχήματα 3. 17 και 3. 18 γίνεται κατανοητό ότι με αύξηση του αριθμού Reynolds οι δίνες που δημιουργούνται επικρατούν σε διαρκώς αυξανόμενο μήκος μέσα στο κανάλι μετά τη διακλάδωση. Παρατηρείται επίσης, ότι για αριθμούς Reynolds πάνω από 250, εμφανίζεται ένα διπλό ζεύγος δινών που είναι μικρό σε ένταση και όγκο. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι ροϊκές γραμμές και η κανονικοποιημένη ελικότητα που έχουν απεικονιστεί προηγουμένως δεν βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με το κριτήριο  $Q$ . Χαρακτηριστικό παράδειγμα, για τη διακλάδωση T, είναι τα αποτελέσματα για αριθμό Reynolds ίσο με 350. Βάσει της κανονικοποιημένης ελικότητας, στο τελευταίο yz επίπεδο ακριβώς πριν την έξοδο του ρευστού από το κανάλι, η κύρια δίνη δεν έχει εξασθενήσει εντελώς και υπάρχει ακόμα περιστροφική κίνηση στο ρευστό. Επίσης, το δεύτερο ζεύγος δινών φαίνεται να καταλαμβάνει μεγαλύτερο χώρο στο κανάλι από ότι παρατηρείται βάσει του κριτηρίου  $Q$  και συνεχίζει να υπάρχει ακόμα και στην έξοδο. Η διαφορά αυτή έγκειται στην ύπαρξη ασάφειας όσον αφορά τη σωστή μαθηματική σχέση που να ορίζει τα όρια της δίνης. Βάσει του κριτηρίου  $Q$  οι πυρήνες των δινών είναι αυτοί που φαίνονται στα σχήματα που έχουν προαναφερθεί, ενώ οτιδήποτε εκτός των ορίων εκείνων, παρόλο που μπορεί να περιέχει σωματίδια που εκτελούν περιστροφική κίνηση γύρω από κάποιο άξονα δεν συνιστά μέρος της δίνης, ίσως, διότι στα σημεία εκείνα του όγκου το μέτρο του τανυστή ρυθμού παραμόρφωσης είναι μεγαλύτερο από αυτό του τανυστή της στροβιλότητας.

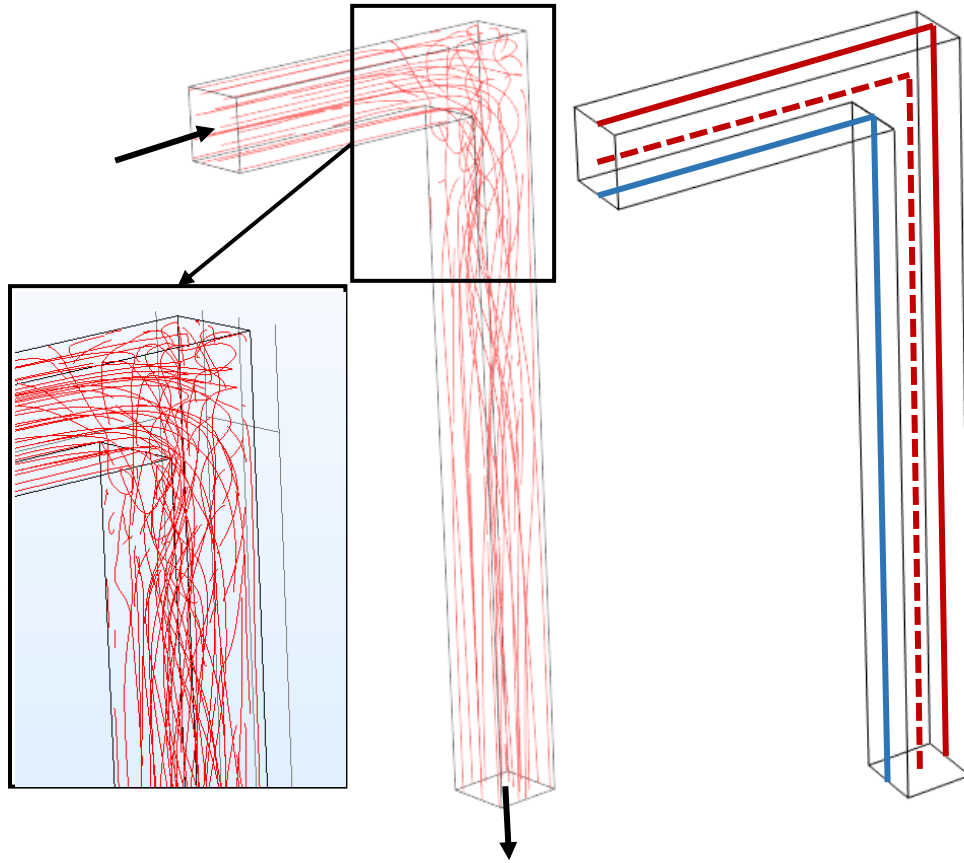


Σχήμα 3. 17: Κανονικοποιημένες ισοεπιφάνειες κριτηρίου  $Q$  και ροϊκές γραμμές για αριθμούς Reynolds: (α)  $Re=100$  και  $Q_{max} = 25 \text{ s}^{-2}$  (β)  $Re=150$  και  $Q_{max} = 126 \text{ s}^{-2}$  (γ)  $Re=200$  και  $Q_{max} = 450 \text{ s}^{-2}$



Σχήμα 3. 18: Κανονικοποιημένες ισοεπιφάνειες κριτηρίου  $Q$  και ροϊκές γραμμές για αριθμούς Reynolds: (α)  $Re=250$  και  $Q_{max} = 1050 \text{ s}^{-2}$  (β)  $Re=300$  και  $Q_{max} = 1500 \text{ s}^{-2}$  (γ)  $Re=350$  και  $Q_{max} = 3000 \text{ s}^{-2}$

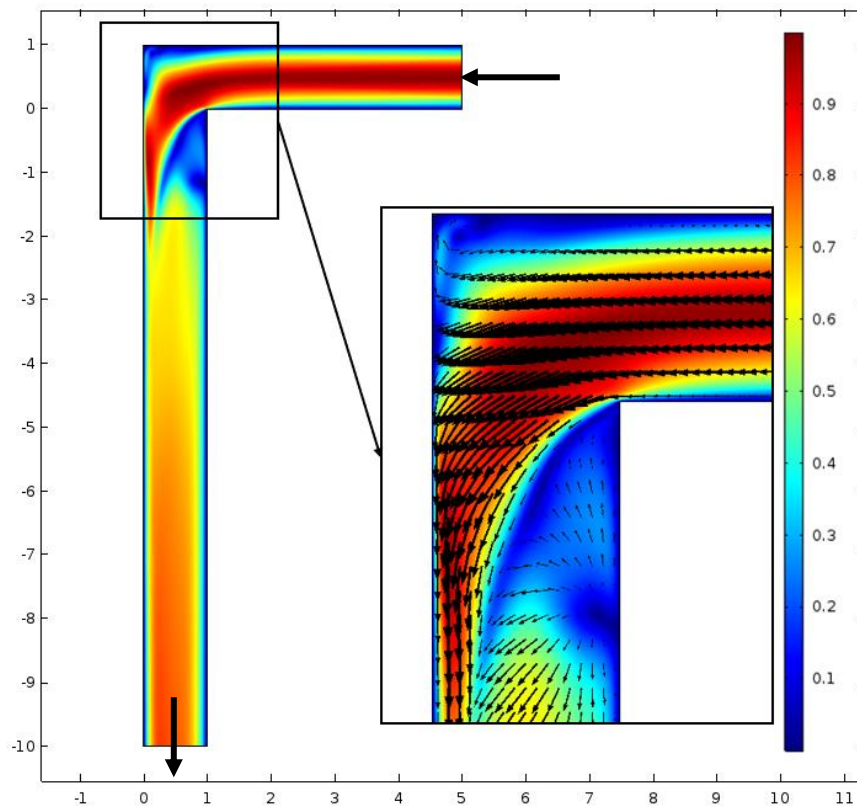
Η ανάλυση που έγινε για τη διακλάδωση τύπου T θα επαναληφθεί για τον αγωγό γωνίας 90°. Αρχικά παρουσιάζεται η αδιάστατη πτώση πίεσης στο εσωτερικό τοίχωμα (μπλε γραμμή), σε γραμμή που ακολουθεί το κέντρο του καναλιού (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) και στο εξωτερικό τοίχωμα του καναλιού (κόκκινη συνεχής γραμμή). Οι γραμμές αυτές φαίνονται ξεκάθαρα στο Σχήμα 3. 19 που ακολουθεί και τα διαγράμματα στα σχήματα 3. 21, 3. 22, και 3. 23.



Σχήμα 3. 19: Ροϊκές γραμμές για  $Re=350$  και γραμμές πάνω στις οποίες υπολογίζεται η αδιάστατη πτώση πίεσης στον αγωγό γωνίας 90°

Αρχικά παρατηρείται ότι το πρώτο κομμάτι και των τριών διαγραμμάτων είναι κοινό, γεγονός που οφείλεται στον ίδιο λόγο που έχει αναφερθεί και για την περίπτωση της διακλάδωσης T. Ακολούθως παρατηρείται στα διαγράμματα που αντιστοιχούν στο κέντρο του αγωγού και στο εσωτερικό τοίχωμα μια απότομη πτώση πίεσης. Αυτό, όμοια και πάλι με τη διακλάδωση, οφείλεται στην αποκόλληση του στρώματος του ρευστού από το εισερχόμενο κανάλι λόγω της απότομης στροφής των 90°. Η στροφή αυτή

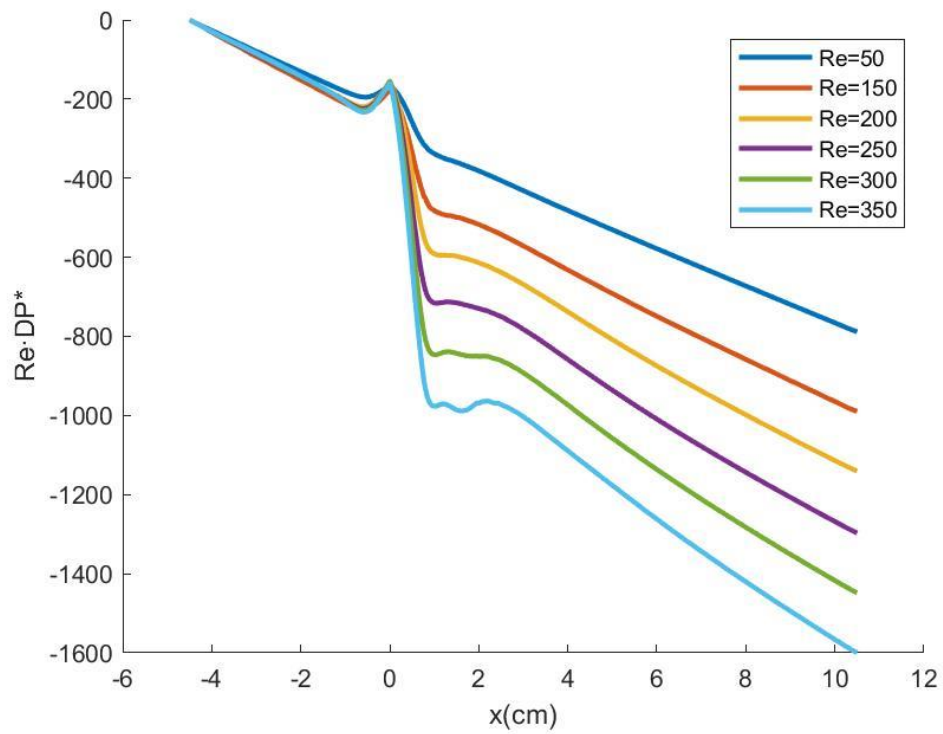
αναγκάζει το ρευστό που εισέρχεται να προσκρούσει στο απέναντι τοίχωμα με αποτέλεσμα το εσωτερικό μέρος και το κέντρο του αγωγού να αντιλαμβάνονται μια απότομη πτώση στη πίεση. Στην περίπτωση του εσωτερικού τοιχώματος καθώς προχωράμε κατά μήκος της ροής μετά τη στροφή, παρατηρείται μια ανάκτηση (αύξηση) της αδιάστατης πτώσης πίεσης που οφείλεται στο ότι η ροή, μετά την αποκόλληση της στην ακμή και την επανακόλληση της, αρχίζει να αποκτά και πάλι το γνωστό παραβολικό προφίλ ταχύτητας της στρωτής ροής.



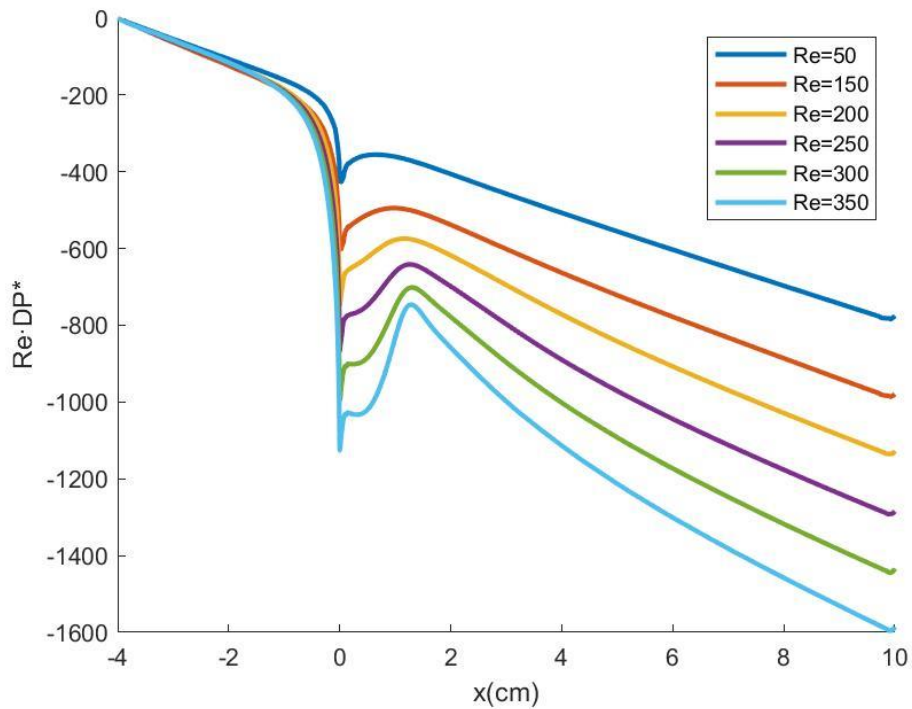
Σχήμα 3. 19: Κανονικοποιημένη ταχύτητα και διανυσματικά τόξα σε  $xz$  επίπεδο στο  $y=0.5$  στον αγωγό γωνίας  $90^\circ$  για  $Re=350$

Στο Σχήμα 3. 19, παρόμοια με τη περίπτωση της διακλάδωσης, φαίνεται η αποκόλληση του οριακού στρώματος του ρευστού που είναι κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα του καναλιού καθώς εισέρχεται το ρευστό στον αγωγό. Φαίνεται επίσης η πρόσκρουση του ρευστού στο εξωτερικό τοίχωμα το που προκαλεί την απότομη αύξηση στην πίεση που φαίνεται στο Σχήμα 3. 23. Η απότομη αύξηση στη πίεση προκαλεί τη δημιουργία αναρροής στην γωνία του εξωτερικού τοιχώματος του καναλιού.

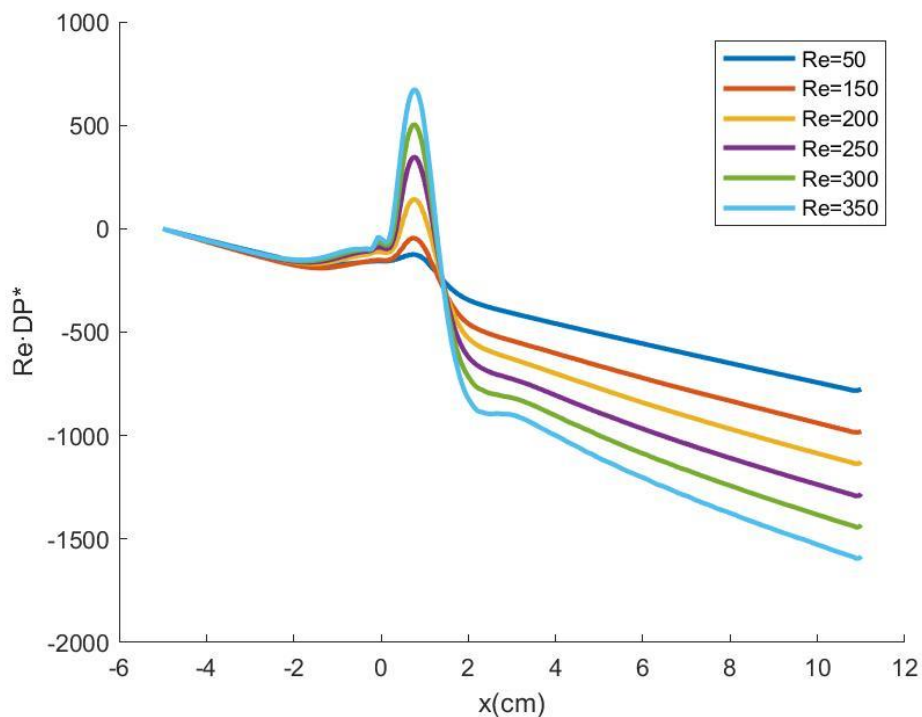




Σχήμα 3. 21: Αδιάστατη πτώση πίεσης στο κέντρο του αγωγού κατά μήκος της ροής



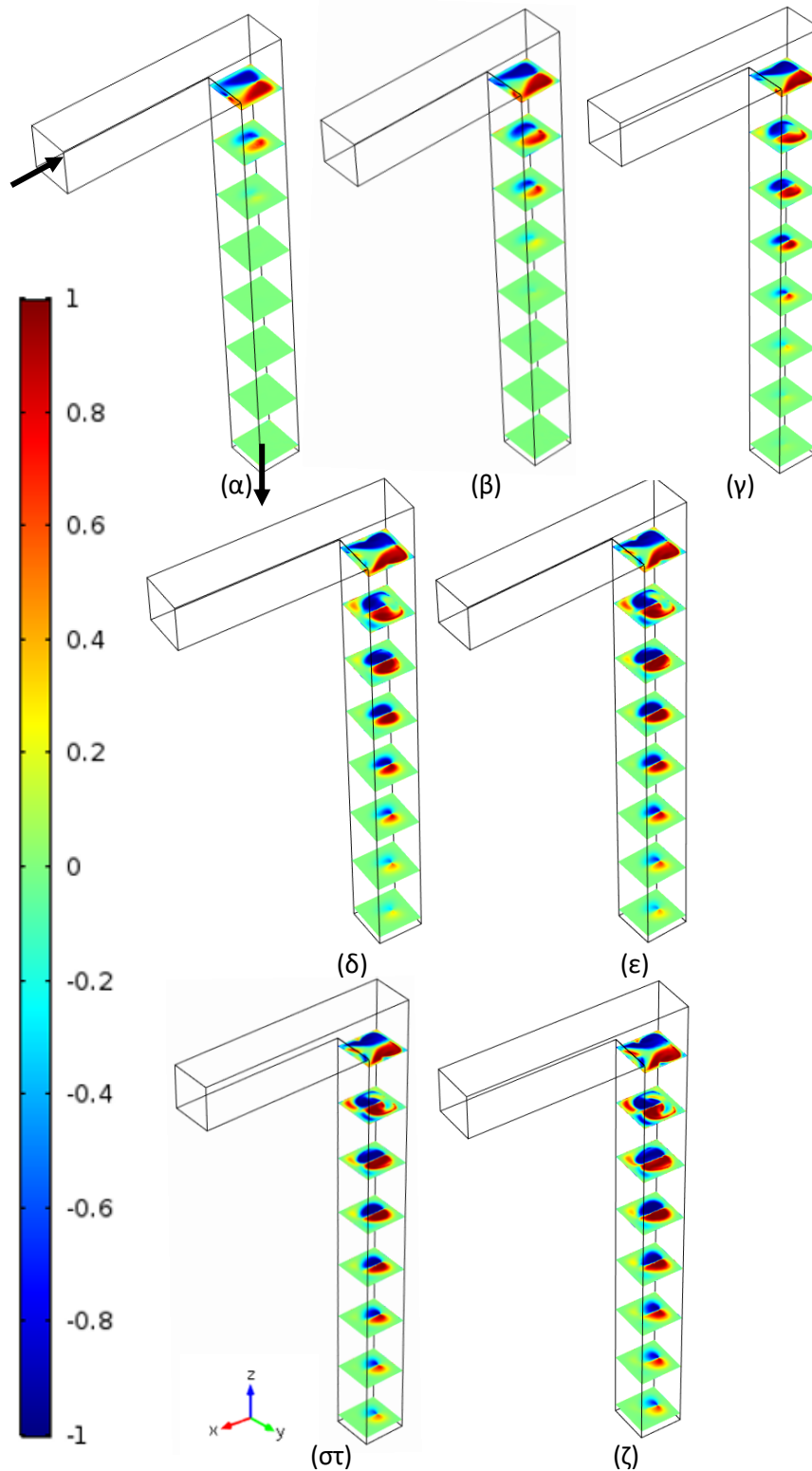
Σχήμα 3. 22: Αδιάστατη πτώση πίεσης στο εσωτερικό τοίχωμα του αγωγού κατά μήκος της ροής



Σχήμα 3. 23: Αδιάστατη πτώση πίεσης στο εξωτερικό τοίχωμα του αγωγού κατά μήκος της ροής

Όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός Reynolds, τόσο πιο μεγάλη είναι η αύξηση στη πίεση στη γωνία του εξωτερικού τοιχώματος του αγωγού και τόσο πιο έντονο το φαινόμενο της αναρροής που παρατηρείται. Η αναρροή στην γωνία θα σχολιαστεί και παρακάτω, όπου παρουσιάζονται οι πυρήνες των δινών που σχηματίζονται βάσει του κριτηρίου  $Q$ .

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η κανονικοποιημένη ελικότητα ακριβώς όπως υπολογίζεται και στη διακλάδωση T για 7 διαφορετικούς αριθμούς Reynolds από 50 μέχρι και 350. Παρατηρείται, ότι βάσει της ελικότητας, η περιστροφική κίνηση του ρευστού δεν φτάνει μέχρι το τέλος του καναλιού για αριθμούς Reynolds μέχρι και 150. Για αριθμό Reynolds πάνω από 200, η περιστροφική κίνηση του ρευστού εκτείνεται μέχρι και το τέλος του αγωγού. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση του αγωγού γωνίας  $90^\circ$ , η παροχή είναι ίδια σε όλο τον όγκο του καναλιού, αντίθετα με τη διακλάδωση T όπου η παροχή μοιράζεται ανάμεσα στις δύο διακλαδώσεις του αγωγού.



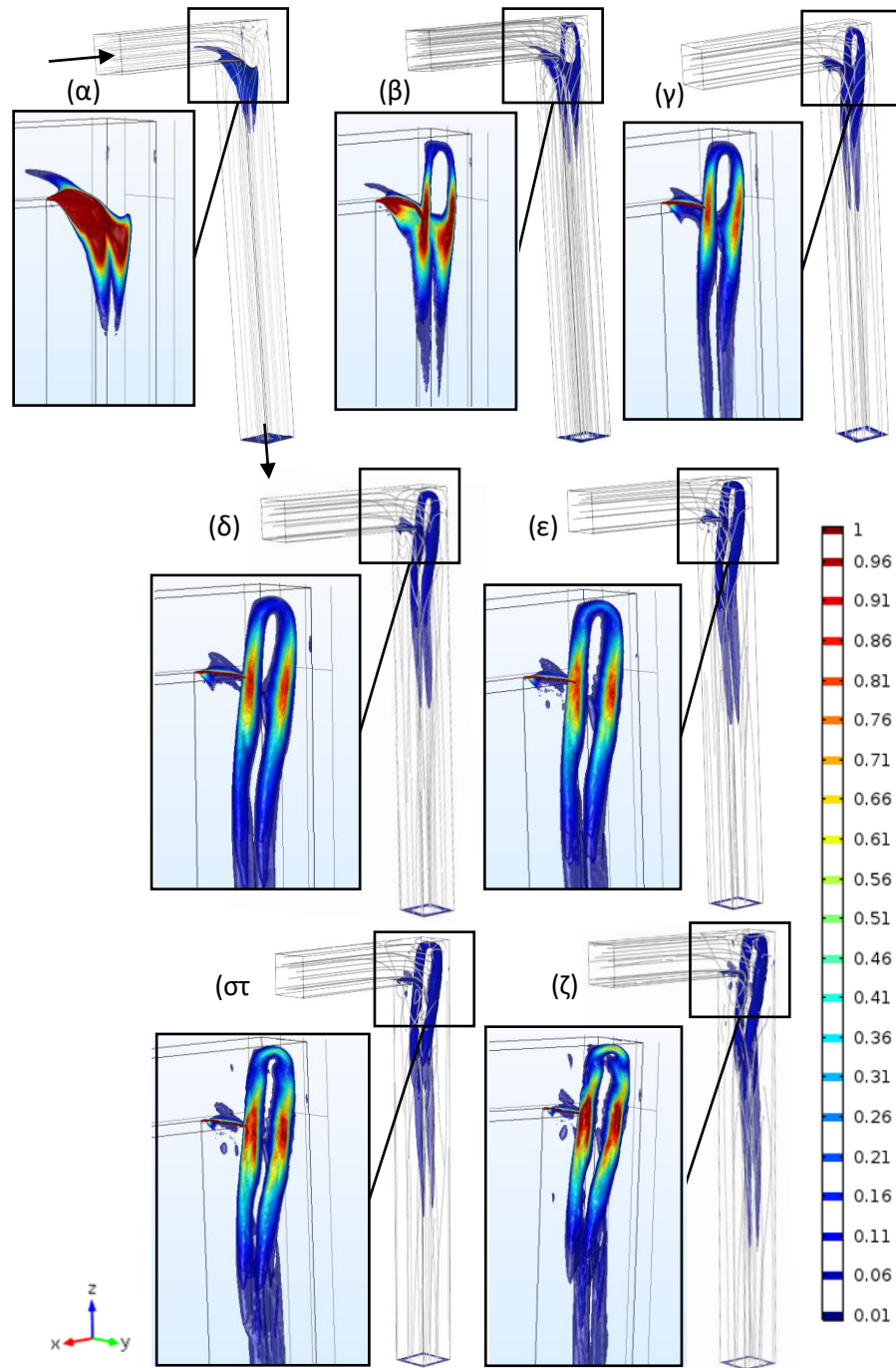
Σχήμα 3. 24: Κανονικοποιημένη ελικότητα σε επίπεδα  $xy$  μετά τη γωνία  $90^\circ$  για αριθμούς Reynolds (α)  $Re=50$  (β)  $Re=100$  (γ)  $Re=150$  (δ)  $Re=200$  (ε)  $Re=250$  (στ)  $Re=300$  (ζ)  $Re=350$

Για αυτό το λόγο, η περιστροφική κίνηση εκτείνεται σε μεγαλύτερη απόσταση σε σύγκριση με την περίπτωση της διακλάδωσης T. Είναι επίσης εμφανές από την ελικότητα, ότι η περιστροφική κίνηση του ρευστού καταλαμβάνει όλη τη διατομή του καναλιού αμέσως μετά τη στροφή και στη συνέχεια συρρικνώνεται. Σημειώνεται επίσης ότι για αριθμούς Reynolds πάνω από 200, δημιουργείται ακόμα ένα ζεύγος περιστρεφόμενης μάζας ρευστού, που δεν διατηρείται όμως για μεγάλη απόσταση και βρίσκεται κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα του καναλιού, όπου υπάρχει ζώνη αποκόλλησης της ροής.

Ακολουθως, στο Σχήμα 3. 25 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες ισοεπιφάνειες του κριτηρίου Q που σχεδιάζονται με τον ίδιο τρόπο, όπως και στη διακλάδωση T. Για αριθμό Reynolds ίσο με 50, είναι προφανές από το σχήμα που προκύπτει και από το μέτρο του  $Q_{max}$  ότι υπάρχει κάποια ελάχιστη περιστροφική κίνηση του ρευστού αλλά η δίνη είναι πολύ ασθενής. Για μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds παρατηρείται ότι σχηματίζεται ένα ζεύγος δινών το οποίο επικρατεί κατά μήκος της ροής και μεγαλώνει σε πάχος διατομής αλλά και σε μήκος. Αξιοσημείωτο επίσης είναι, το ότι το ζεύγος αυτό ενώνεται με ακόμα μια περιοχή του χώρου που επίσης αναγνωρίζεται ως δίνη στο εξωτερικό κομμάτι της απότομης γωνίας των 90°. Το αποτέλεσμα είναι ένας συνεχής όγκος, που θυμίζει ανάποδο γράμμα U (ή φουρκέτα) το οποίο αναγνωρίζεται από το κριτήριο Q ως δίνη. Η δίνη που προκύπτει κοντά στο εξωτερικό τοίχωμα της γωνίας είναι κάθετη προς το ζεύγος δινών που κινείται κατά μήκος της ροής και πιθανόν να οφείλεται στην απότομη αύξηση της πίεσης που προκύπτει όταν προσκρούει το εισερχόμενο ρευστό στο εξωτερικό τοίχωμα καθώς αλλάζει πορεία λόγω της απότομης στροφής. Όμοια με τη συμπεριφορά το ζεύγους, αυτή η δίνη μεγαλώνει σε μέγεθος και αποκτά μεγαλύτερη ένταση καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds.

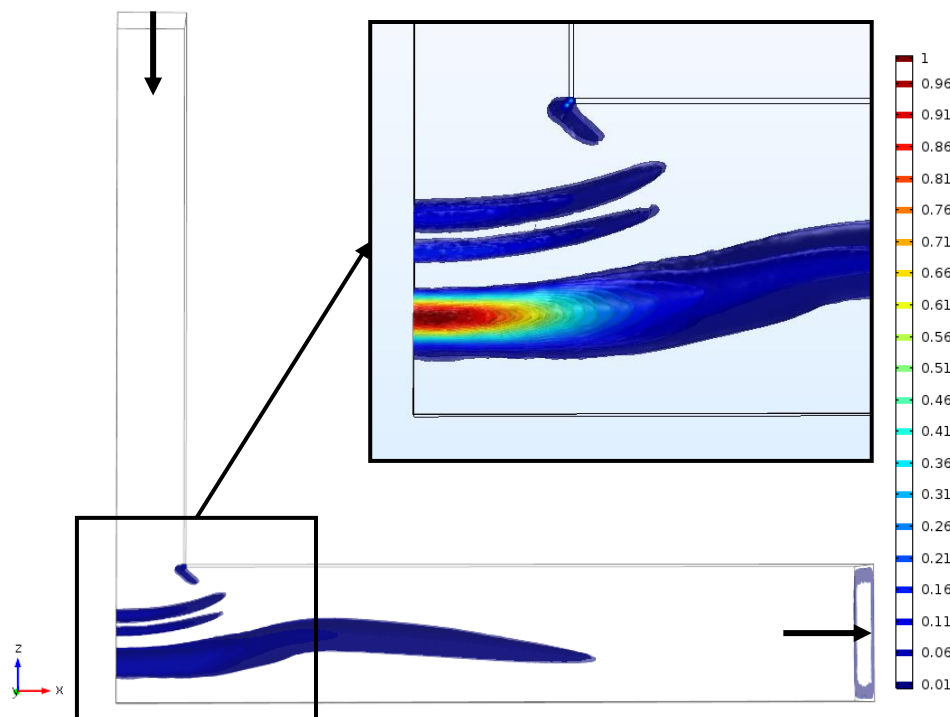
Για αριθμό Reynolds ίσο με 350 η δίνη που προκύπτει από το κριτήριο Q είναι σχεδόν όσο μεγάλη όσο το μήκος του καναλιού. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι η κανονικοποιημένη ελικότητα και το κριτήριο Q και σε αυτή την περίπτωση βρίσκονται σε ασυμφωνία όσον αφορά το τι συνιστά τη δίνη στον όγκο ελέγχου. Παρόλο που η

ελικότητα αναγνωρίζει περιστροφική κίνηση μέχρι το τέλος του καναλιού για  $Re=350$ , το κριτήριο  $Q$  απομονώνει ως δίνη τη μορφή που φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 3. 25: Κανονικοποιημένες ισοεπιφάνειες κριτηρίου  $Q$  και ροϊκές γραμμές για αριθμούς Reynolds: (α)  $Re=50$  και  $Q_{max} = 0.75 \text{ s}^{-2}$  (β)  $Re=100$  και  $Q_{max} = 7.5 \text{ s}^{-2}$  (γ)  $Re=150$  και  $Q_{max} = 80 \text{ s}^{-2}$  : (δ)  $Re=200$  και  $Q_{max} = 240 \text{ s}^{-2}$  (ε)  $Re=250$  και  $Q_{max} = 420 \text{ s}^{-2}$  (στ)  $Re=300$  και  $Q_{max} = 620 \text{ s}^{-2}$  (ζ)  $Re=350$  και  $Q_{max} = 850 \text{ s}^{-2}$

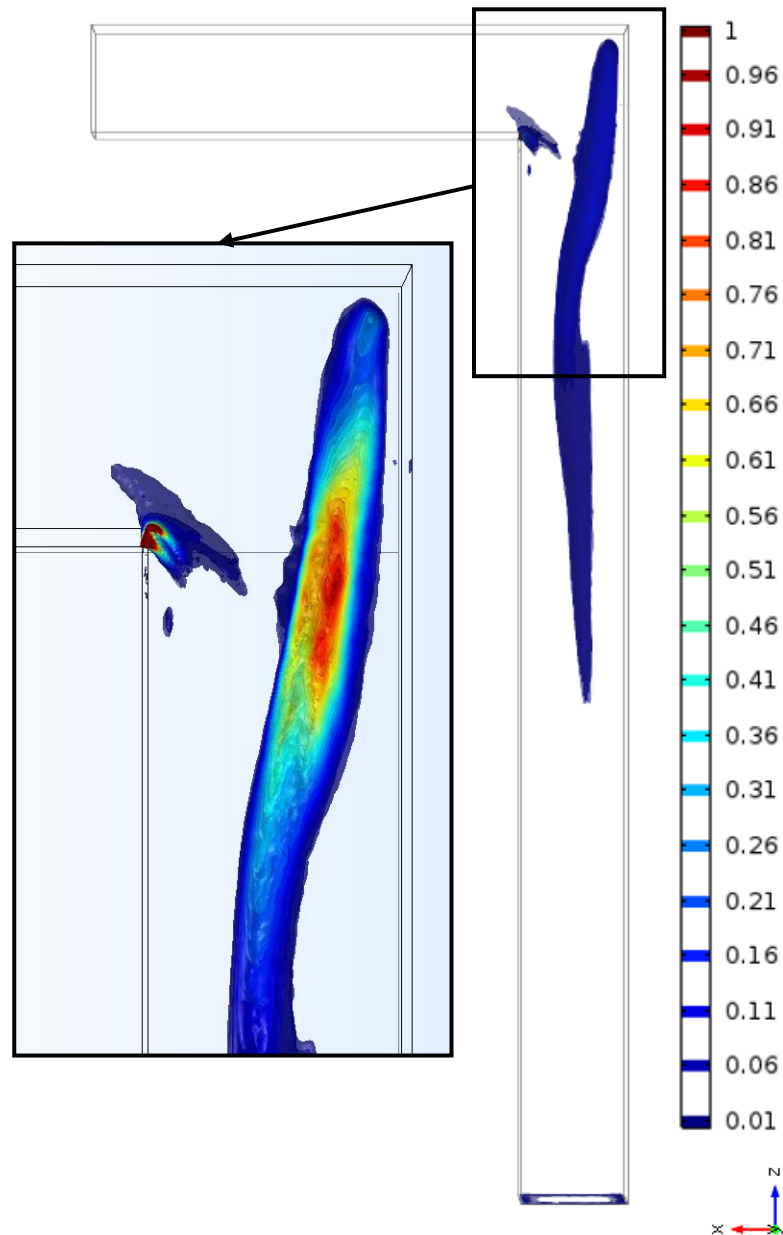
Ακόμα ένα χαρακτηριστικό των δινών που αξίζει να σχολιαστεί είναι η θέση τους στο χώρο του καναλιού κατά μήκος της κύριας κατεύθυνσης της ροής μετά τη διακλάδωση (για διακλάδωση T) και μετά τη στροφή 90° (για αγωγό γωνίας 90°). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. 26, το κύριο ζεύγος δινών αρχικά έχει το κέντρο του κοντά στο εξωτερικό τοίχωμα όπου και γίνεται η πρόσκρουση του ρευστού και η διακλάδωση και για ένα συγκεκριμένο μήκος κινείται προς το εσωτερικό τοίχωμα του καναλιού. Αφού φτάσει ένα μέγιστο ύψος ως προς των άξονα z, οι δίνες αρχίζουν να κατεβαίνουν και πάλι προς το εσωτερικό τοίχωμα του καναλιού όπου και στη συνέχεια εξασθενούν. Για την περίπτωση όπου ο αριθμός Reynolds είναι ίσος 350, εμφανίζονται ακόμα 2 μικρά ζεύγη δινών, πάνω από το κύριο ζεύγος, οι οποίες επίσης κινούνται προς το εσωτερικό τοίχωμα αλλά εξασθενούν πολύ πιο νωρίς συγκριτικά με το κύριο ζεύγος.



Σχήμα 3. 26: Σχηματική αναπαράσταση αλλαγής θέσης της δίνης κατά μήκος της ροής για  $Re=350$  στη διακλάδωση T

Στη περίπτωση του αγωγού γωνίας 90° παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με τη διακλάδωση T. Κοιτάζοντας το Σχήμα 3. 27, η δευτερογενής ροή σχηματίζεται κοντά στο εξωτερικό τοίχωμα, όπου και γίνεται η πρόσκρουση του ρευστού. Λόγω της απότομης

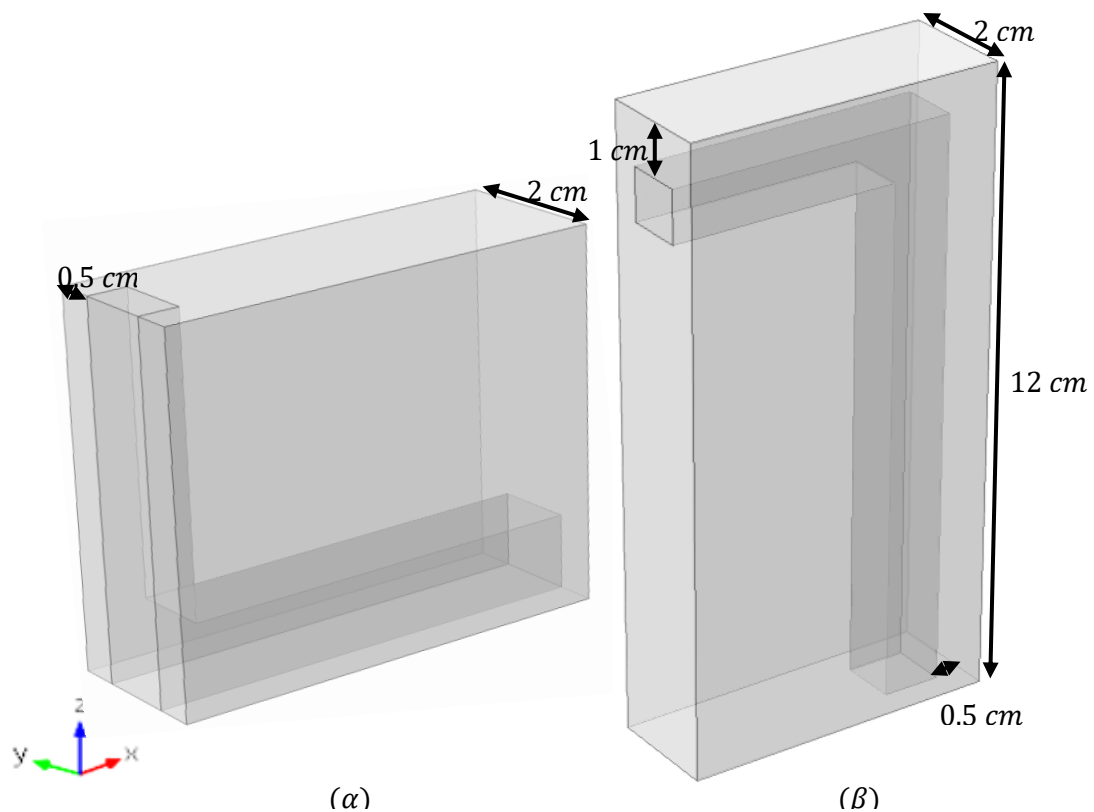
αύξησης της πίεσης στην εξωτερική γωνία σχηματίζεται μια δίνη, κάθετη στις δύο κύριες που κινούνται κατά μήκος της ροής, η οποία ενώνεται με αυτές, αποκτώντας ένα καμπύλο σχήμα που θυμίζει φουρκέτα. Οι κύριες δίνες καθώς κινούνται προς την έξοδο, μετατοπίζονται προς το εσωτερικό τοίχωμα και αφού φτάσουν σε ένα σημείο μετακινούνται ξανά προς το εξωτερικό τοίχωμα.



Σχήμα 3. 27: Σχηματική αναπαράσταση της μετατόπισης της δίνης από το εξωτερικό προς το εσωτερικό τοίχωμα κατά μήκος της ροής βάσει του κριτηρίου Q για  $Re=250$

### 3.4. Θερμική Συμπεριφορά

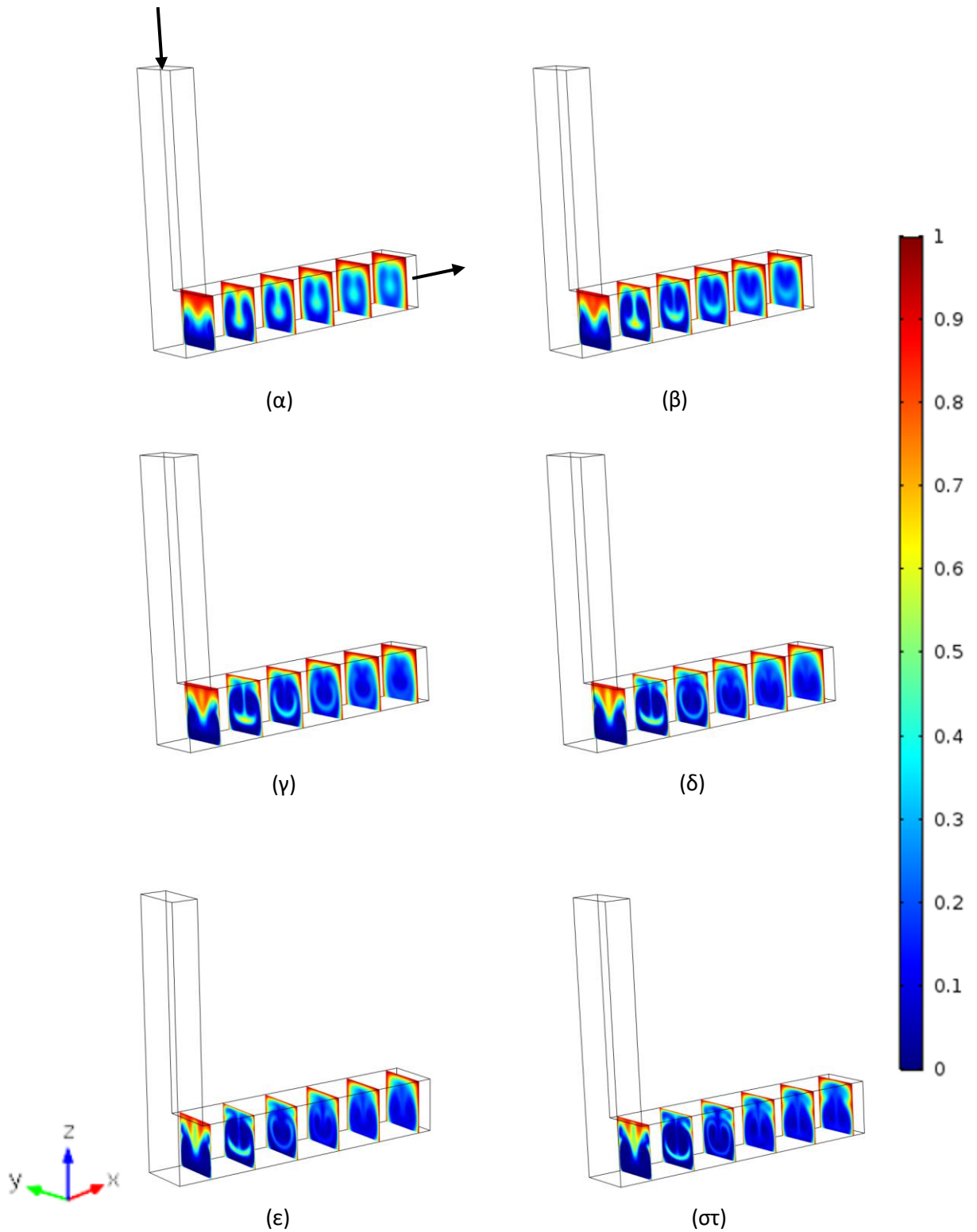
Αφού έχουν αναλυθεί τα ροϊκά φαινόμενα που αναπτύσσονται εντός των βασικών δομικών στοιχείων, έρχεται η σειρά να αναλυθεί και η θερμική συμπεριφορά τους. Για την ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς οι γεωμετρίες που έχουν παρουσιαστεί στο Σχήμα 3. 1 ενσωματώνονται σε πλάκα αλουμινίου όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα, διαμορφώνοντας έτσι ένα συζευγμένο πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας (conjugate heat transfer).



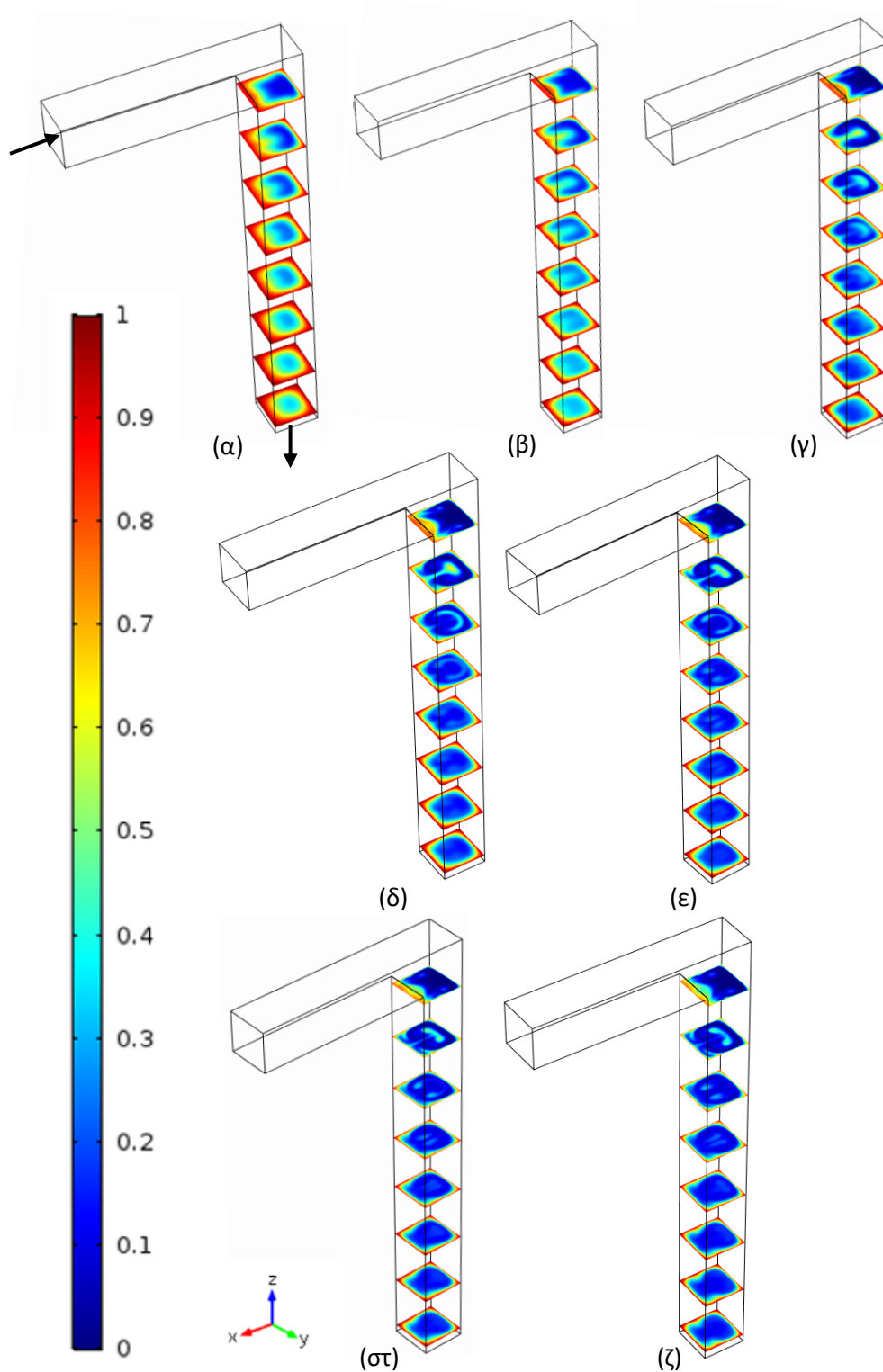
Σχήμα 3. 28: Σχηματική αναπαράσταση βασικών γεωμετρικών δομών, ενσωματωμένων σε πλάκα αλουμινίου

Για τη διασαφήνιση της θερμικής συμπεριφοράς των συστημάτων αυτών και πως αυτή επηρεάζεται από τις δευτερογενείς ροές που δημιουργούνται απεικονίζεται αρχικά η κανονικοποιημένη θερμοκρασία σε 6 και 8 επίπεδα κάθετα στη κύρια διεύθυνση της ροής μετά τη διακλάδωση και τη στροφή για τη διακλάδωση T και τον αγωγό γωνίας 90° αντίστοιχα.





Σχήμα 3. 29: Κανονικοποιημένη θερμοκρασία σε επίπεδα yz μετά τη διακλάδωση σε αγωγό T για αριθμούς Reynolds (α)  $Re=100$  (β)  $Re=150$  (γ)  $Re=200$  (δ)  $Re=250$  (ε)  $Re=300$  (στ)  $Re=350$



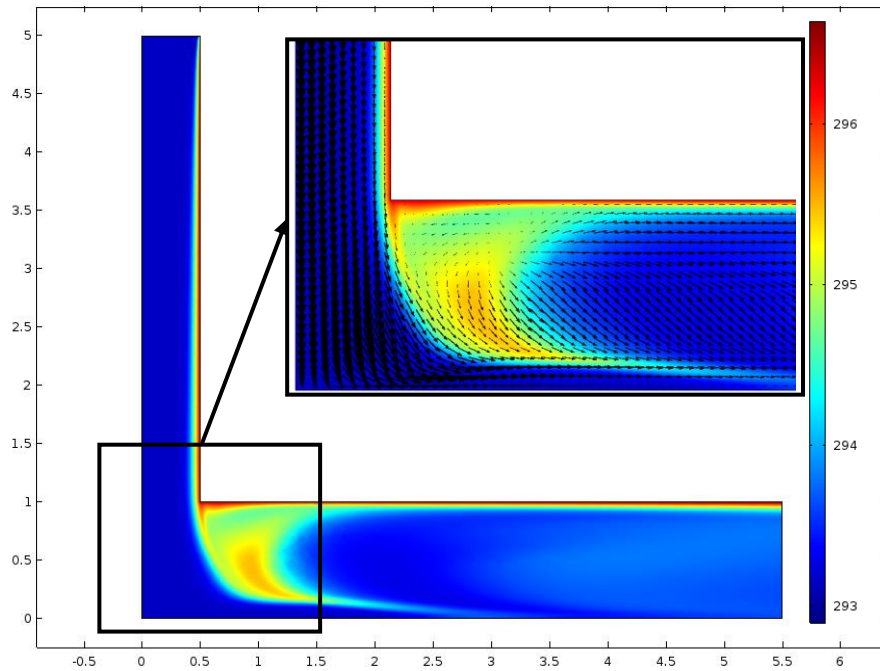
Σχήμα 3. 30: Κανονικοποιημένη θερμοκρασία σε επίπεδα  $xy$  μετά τη γωνία  $90^\circ$  για αριθμούς Reynolds (α)  $Re=50$  (β)  $Re=100$  (γ)  $Re=150$  (δ)  $Re=200$  (ε)  $Re=250$  (σ)  $Re=300$  (ζ)  $Re=350$

Η μελέτη των συγκεκριμένων διατάξεων ξεκινάει από την ιδέα ότι η διαταραχή της ροής και εξαναγκασμένη αλλαγή της κατεύθυνσης της οδηγεί σε δευτερογενείς ροές που ενισχύουν τη μεταφορά θερμότητας του συστήματος. Οι βασικές δομικές μονάδες έχουν τοποθετηθεί μέσα σε πλάκα αλουμινίου η οποία θερμαίνεται από τη μια εκ των δύο  $xz$  επιφανειών της. Οι υπόλοιπες επιφάνειες της πλάκας είναι θερμικά μονωμένες και δεν αλληλοεπιδρούν θερμικά με το περιβάλλον.

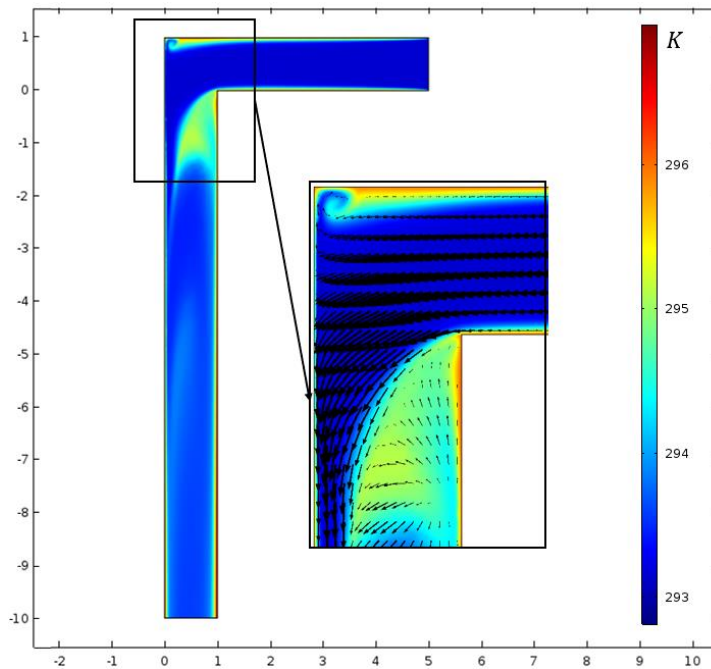
Στα σχήματα 3. 29 και 3. 30, παρατηρείται η κανονικοποιημένη θερμοκρασία του ρευστού στη διακλάδωση  $T$  και στον αγωγό γωνίας  $90^\circ$ . Ο λόγος που επιλέγεται η συγκεκριμένη απεικόνιση είναι ότι δίνει μια καθαρή εικόνα του φαινομένου της ενίσχυσης της μεταφοράς θερμότητας και το πως συμβαίνει αυτό. Λόγω των δευτερογενών ροών που σχηματίζονται, το θερμό ρευστό που στην είσοδο του αγωγού βρίσκεται προσκολλημένο στο τοίχωμα, αποκολλάται και λόγω της περιστροφικής κίνησης που προκαλείται αναμιγνύεται με τη κρύα μάζα στο κέντρο του αγωγού. Καθώς μεγαλώνει ο αριθμός Reynolds το φαινόμενο αυτό της ανάμιξης γίνεται πιο έντονο, αφού το θερμό ρευστό αναμιγνύεται πιο αποτελεσματικά με τη κρύα μάζα και οι δευτερογενείς ροές επικρατούν για μεγαλύτερο μήκος. Εκτός από την αρχική αποκόλληση του ρευστού, οι δίνες που συνεχίζουν κατά μήκος της ροής συνεχίζουν να μεταφέρουν το κρύο ρευστό που βρίσκεται στο κέντρο του αγωγού προς τα τοιχώματα, όπου θερμαίνεται, και το ξαναεπιστρέφουν στο κέντρο του. Αυτή η συνεχής ανάμιξη διαρκεί όσο επικρατεί η δίνη εντός του καναλιού και ενισχύει τη μεταφορά θερμότητας. Καθώς εξασθενούν οι δευτερογενείς ροές και το προφίλ της ταχύτητας αποκτά το σύνηθες πλήρως ανεπτυγμένο σχήμα, εξασθενεί και η ενίσχυση στη μεταφορά θερμότητας, μέχρι η ροή να αναπτυχθεί πλήρως υδροδυναμικά και θερμικά, όπου και η μεταφορά θερμότητας παραμένει σταθερή.

Ακόμη μια απεικόνιση που διευκολύνει τη κατανόηση του φαινομένου αυτού είναι αυτή των σχημάτων 3. 31 και 3. 32. Στα σχήματα αυτά φαίνεται από άλλη οπτική γωνία το πως το θερμό οριακό στρώμα του ρευστού κοντά στο τοίχωμα, που βρίσκεται στο κανάλι εισόδου αποκολλάται λόγω της απότομης γωνίας  $90^\circ$  και στις δύο περιπτώσεις με αποτέλεσμα την ανάμιξη του με τη κρύα μάζα ρευστού. Παράλληλα, με την

πρόσκρουση του κύριου όγκου του ψυχρού ρευστού στο απέναντι τοίχωμα επιτυγχάνονται υψηλοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας.



Σχήμα 3. 31: Θερμοκρασία και μεγέθυνση με διανυσματικά τόξα σε επίπεδο  $xz$  στο  $y=0.5$  cm στη διακλάδωση  $T$  για  $Re=350$



Σχήμα 3. 32: Θερμοκρασία και μεγέθυνση με διανυσματικά τόξα σε  $xz$  επίπεδο στο  $y=0.5$  cm στον αγωγό γωνίας  $90^\circ$  για  $Re=350$

Πέραν των οπτικών δεδομένων που σίγουρα διευκολύνουν τη κατανόηση της ροής και της θερμικής συμπεριφοράς, χρειάζεται και κάποιο μέγεθος για την ποσοτικοποίηση της ενίσχυσης της μεταφοράς θερμότητας σε κάθε περίπτωση αριθμού Reynolds και γεωμετρίας. Γι' αυτό το σκοπό, υπεισέρχεται ο αριθμός Nusselt. Ορίζει το λόγο της μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής, ως προς τη μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής και είναι το πηλίκο των αντίστοιχων συντελεστών πολλαπλασιασμένο με την υδραυλική διάμετρο του αγωγού. Ο αριθμός Nusselt ορίζεται ως εξής:

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad (3.25)$$

όπου  $h$ : συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής

$D$ : υδραυλική διάμετρος

$k$ : συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω αγωγής

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής υπολογίζεται σε διατομές κάθετες στη κύρια διεύθυνση της ροής βάσει της παρακάτω σχέσης:

$$h = \frac{q'_{w,m}}{\Delta T_m} = \frac{q'_{w,m}}{T_{w,m} - T_{b,m}} \quad (3.26)$$

όπου  $q'_{m}$ : μέση θερμοροή στο τοίχωμα του καναλιού ανά μονάδα μήκους

$T_{w,m}$ : μέση θερμοκρασία τοιχώματος καναλιού

$T_{b,m}$ : μέση θερμοκρασία ρευστού σε κάθε διατομή

Για τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών στις διατομές κατά μήκος της διαδρομής που διαγράφει η ροή, εφαρμόζονται οι παρακάτω σχέσεις:

$$q'_{w,m} = \frac{1}{P} \cdot \int q_w \cdot dS \quad (3.27)$$

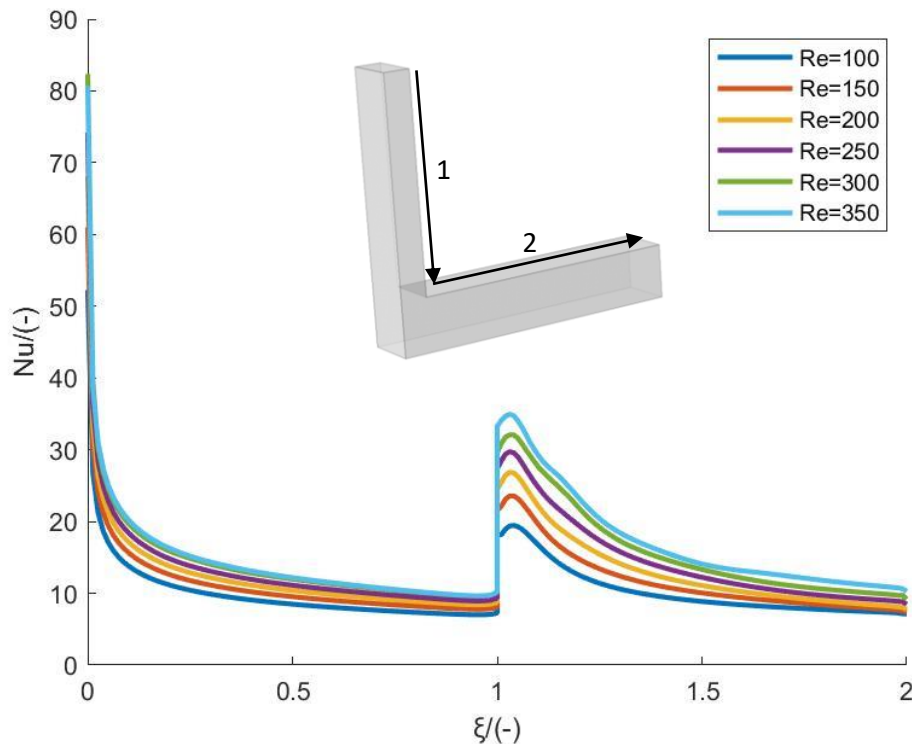
$$T_{w,m} = \frac{1}{P} \cdot \int T_w \cdot dS \quad (3.28)$$

$$T_{b,m} = \frac{1}{A} \iint T_b \cdot dA \quad (3.29)$$

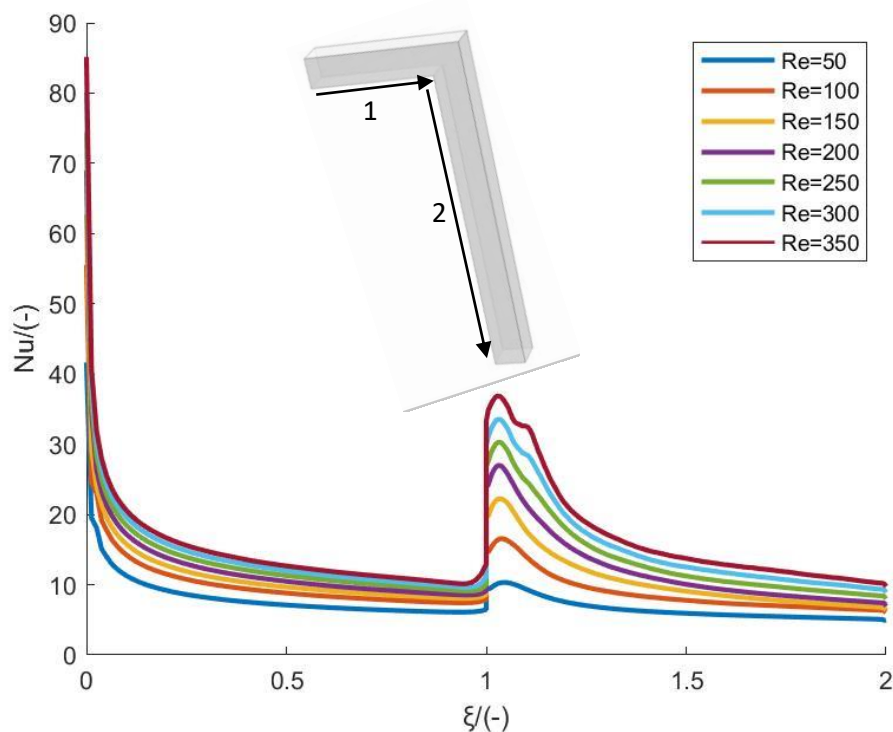
Ακολουθεί ο σχεδιασμός των διαγραμμάτων που δείχνουν την εξέλιξη του αριθμού Nusselt ( $Nu$ ) κατά μήκος της ροής. Στα σχήματα 3. 33 και 3. 34, φαίνεται ακριβώς αυτό. Προτού σχολιαστούν τα διαγράμματα αυτά κρίνεται σκόπιμη η επεξήγηση του άξονα  $x$  των διαγραμμάτων. Αντί το μήκος, χρησιμοποιείται ο αδιάστατος αριθμός  $\xi$ , που είναι η κανονικοποίηση του μήκους του τμήματος του καναλιού και ορίζεται ως το σημείο της θέσης κάθε διατομής ως προς το συνολικό μήκος του συγκεκριμένου τμήματος του καναλιού.

$$\xi = \frac{x_i}{x_{max}} \quad (3.30)$$

Το μέγεθος αυτό κυμαίνεται από 0 μέχρι και 1 και κάθε μονάδα αντιστοιχεί σε ένα τμήμα καναλιού. Σε κάθε διακλάδωση και στροφή το μέγεθος  $\xi$  του καινούριου τμήματος προστίθεται στο προηγούμενο. Το αδιάστατο  $\xi$  θα εφαρμοστεί και στο σχεδιασμό των διαγραμμάτων  $Nu$  των ολοκληρωμένων διατάξεων του επόμενου κεφαλαίου.



Σχήμα 3. 33: Αριθμός Nusselt κατά μήκος της ροής στη διακλάδωση T



Σχήμα 3. 34: Αριθμός Nusselt κατά μήκος της ροής σε αγωγό γωνίας 90°

Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα η συμπεριφορά του αριθμού Nusselt είναι παρόμοια και στις δύο περιπτώσεις. Για το εύρος  $0 < \xi < 1$  που αντιστοιχεί στα ευθύγραμμα κομμάτια πριν τη διακλάδωση και πριν τη στροφή 90° στους αντίστοιχους αγωγούς, ο αριθμός Nusselt παίρνει τη μεγαλύτερη τιμή διότι στην είσοδο η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τοιχώματος και όγκου ρευστού είναι μέγιστη και το δυναμικό μεταφοράς θερμότητας είναι επίσης μέγιστο. Καθώς το ρευστό κινείται προς τη διακλάδωση/γωνία 90°, ο Nusselt φθίνει και τείνει να σταθεροποιηθεί. Πριν προλάβει όμως να φτάσει στην ασυμπτωτική τιμή, η ροή διαταράσσεται λόγω της διακλάδωσης/γωνίας 90° και σχηματίζονται έντονες δευτερογενείς ροές. Οι ροές αυτές όπως γίνεται προφανές και από τα παραπάνω σχήματα ενισχύουν σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας στον όγκο του ρευστού. Η ενίσχυση αυξάνεται ευθέως ανάλογα με τον αριθμό Reynolds και από  $Nu = 10$  που φαίνεται να είναι το όριο του καναλιού πριν τη διαταραχή, επανέρχεται κοντά στο  $Nu = 40$ . Η συμπεριφορά αυτή αναδεικνύει την ευεργετική επίδραση των διακλαδούμενων καναλιών ως προς την μεταφορά θερμότητας σε σχέση με τα ευθύγραμμα κανάλια.

## Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Διάταξης Διακλαδούμενων Καναλιών

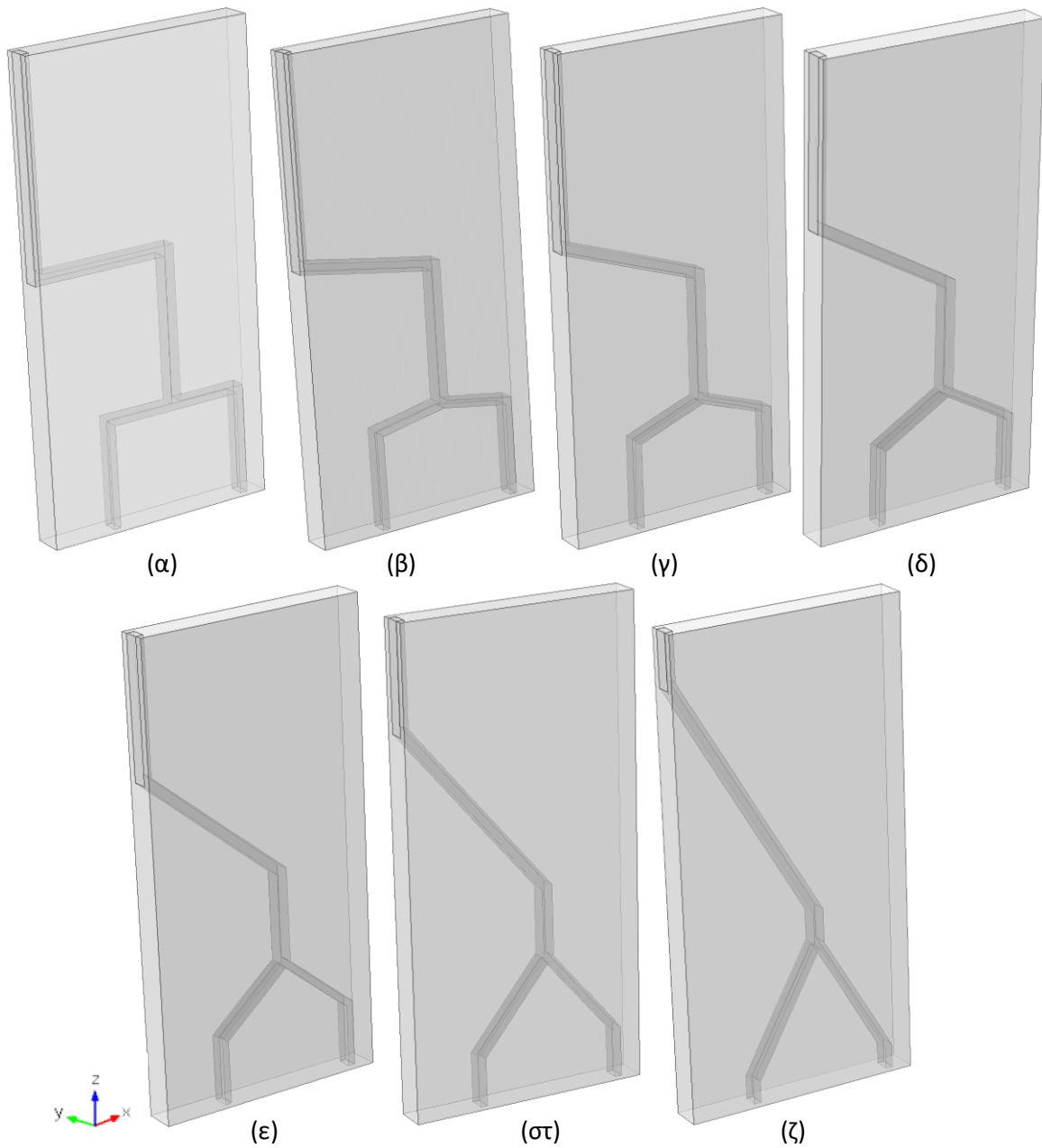
### 4.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθούν οι ολοκληρωμένες διατάξεις διακλαδούμενων καναλιών (δενδριτικές διατάξεις). Αρχικά, παρουσιάζονται οι γεωμετρίες που κατασκευάζονται στο λογισμικό COMSOL Multiphysics στα σχήματα 4. 1 και 4. 2. Οι διατάξεις αυτές αντιστοιχούν σε 3 και 4 επίπεδα διακλάδωσης καθώς και σε γωνίες 30, 40, 50, 60, 70 και 90 μοιρών. Οι δενδριτικές διαμορφώσεις διαστασιολογούνται όπως έχει προαναφερθεί στο υποκεφάλαιο 1.5.4. και ενσωματώνονται στη μέση πλάκας αλουμινίου πάχους 2 εκατοστών.

Η πλάκα θερμαίνεται στη μια πλευρά, στο  $y = -0.5 \text{ cm}$ , με πυκνότητα θερμοροής ίση με  $2100 \text{ W/m}^2$  που αντιστοιχεί στην ενέργεια που προσπίπτει στην απορροφητική επιφάνεια συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά π.χ. έναν φακό Fresnel, ο οποίος συγκεντρώνει την ακτινοβολία πάνω σε μια απορροφητική πλάκα αλουμινίου, διαστάσεων  $30 \times 30 \text{ cm}$ . Η τιμή της πυκνότητας θερμοροής, επιλέχθηκε λόγω του ότι ο φακός Fresnel, έχει τριπλάσια επιφάνεια από την απορροφητική επιφάνεια και λόγο γεωμετρικής συγκέντρωσης,  $C$ , ίσο με 3. Συνυπολογίζοντας τις οπτικές απώλειες, θέτοντας μια οπτική απόδοση,  $n_{opt}$ , ίση με 0.7 και θεωρώντας ότι η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται η επιφάνεια της Γης όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ του ίση με  $1000 \text{ W/m}^2$ , προκύπτει η πυκνότητα θερμοροής που εφαρμόζεται στο συγκεκριμένο πρόβλημα.

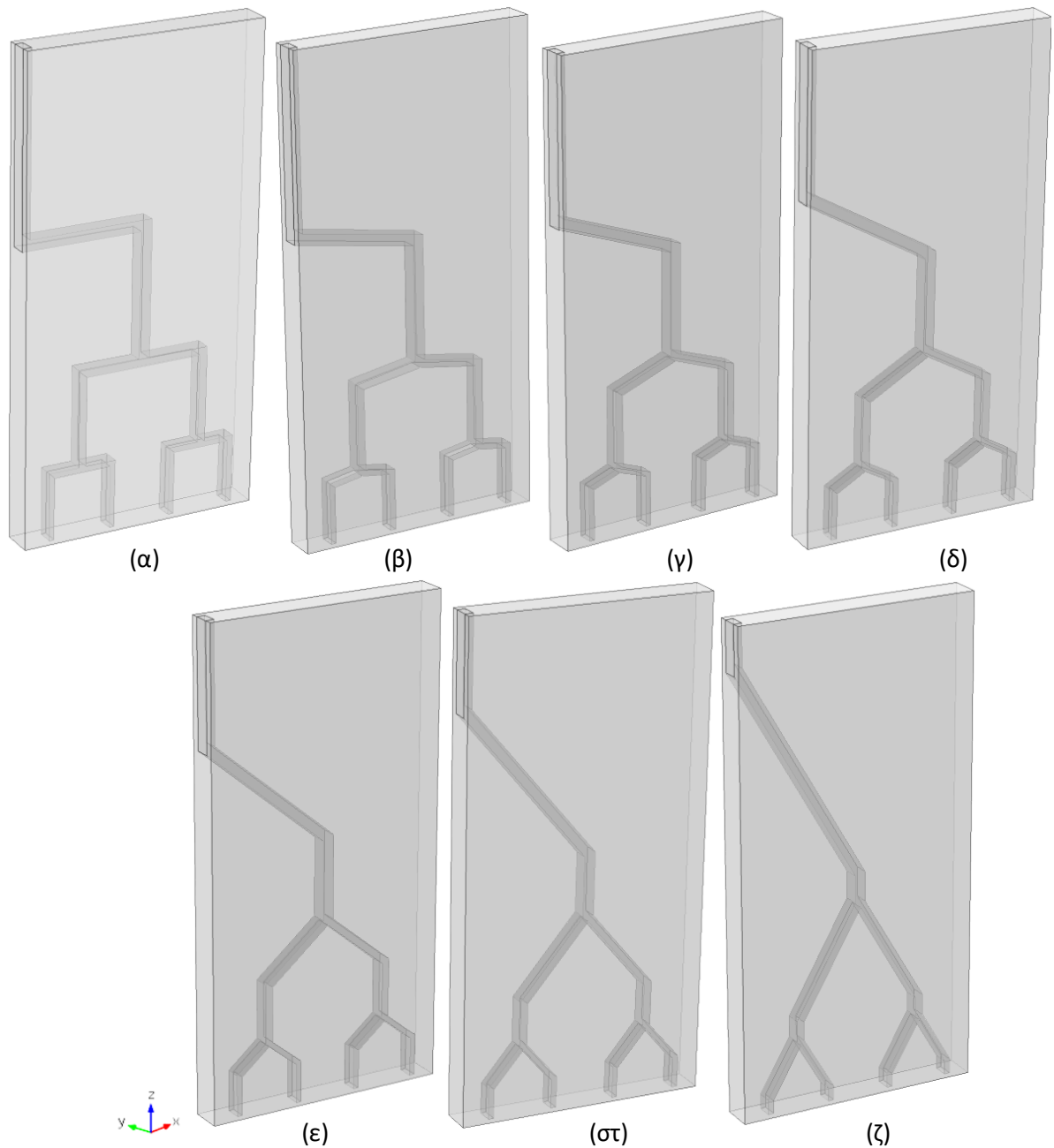
Στις δενδριτικές διατάξεις που επιλύονται, το εργαζόμενο ρευστό είναι νερό που εισέρχεται στους  $20^\circ\text{C}$  ( $293.15 \text{ K}$ ) και με μέση ταχύτητα  $u_{in,m} = 0.0151 \text{ m/s}$  που αντιστοιχεί σε αριθμό Reynolds ίσο με 150. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται στο λογισμικό για την επίλυση των προβλημάτων αυτών είναι συζευγμένης μεταφοράς θερμότητας που λύνει ταυτόχρονα το πεδίο ταχύτητας και θερμοκρασίας.





Σχήμα 4. 1: Τριδιάστατες διατάξεις διακλαδούμενων καναλιών, συμμετρικές ως προς την αριστερή yz επιφάνεια με τρία επίπεδα και γωνία διακλάδωσης: (α)  $\vartheta=90^\circ$  (β)  $\vartheta=80^\circ$  (γ)  $\vartheta=70^\circ$  (δ)  $\vartheta=60^\circ$  (ε)  $\vartheta=50^\circ$  (στ)  $\vartheta=40^\circ$  (ζ)  $\vartheta=30^\circ$

Όπως με την ανάλυση των βασικών δομικών στοιχείων, σε αυτό το κεφάλαιο, θα γίνει μια ανάλυση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των ολοκληρωμένων διατάξεων, εστιάζοντας κυρίως στην αδιάστατη πτώση πίεσης κατά μήκος της ροής μέσα στο κανάλι. Ακολούθως θα παρουσιαστεί η θερμική συμπεριφορά, στο ρευστό κατά μήκος των καναλιών, καθώς και στην υπόλοιπη πλάκα.



*Σχήμα 4. 2: Τριδιάστατες διατάξεις διακλαδούμενων καναλιών, συμμετρικές ως προς την αριστερή yz επιφάνεια με τέσσερα επίπεδα και γωνία διακλάδωσης: (α)  $\theta=90^\circ$  (β)  $\theta=80^\circ$  (γ)  $\theta=70^\circ$  (δ)  $\theta=60^\circ$  (ε)  $\theta=50^\circ$  (στ)  $\theta=40^\circ$  (ζ)  $\theta=30^\circ$*

Αυτό θα επιτευχθεί, απεικονίζοντας γραφικά την εξέλιξη του αριθμού Nusselt κατά μήκος της ροής των καναλιών και αναλύοντας πως αυτή η συμπεριφορά επηρεάζεται για τις διάφορες γωνίες διακλάδωσης που μελετώνται. Αφού εξαχθούν τα σχετικά συμπεράσματα, οι ολοκληρωμένες διατάξεις θα συγκριθούν μεταξύ τους με σκοπό την

εύρεση της βέλτιστης γωνίας διακλάδωσης ανάλογα με τον αριθμό των επιπέδων διακλάδωσης. Για τη σύγκριση των γεωμετριών θα συνυπολογιστούν η ομοιομορφία του πεδίου θερμοκρασίας στη πλάκα, η ενίσχυση στη μεταφορά θερμότητας που θα προκύψει από τον μέσο αριθμό Nusselt και η αδιάστατη πτώση πίεσης που προκύπτει για κάθε περίπτωση. Αυτά τα μεγέθη που υπολογίζονται για κάθε πρόβλημα, θα συνδυαστούν για τον υπολογισμό του δείκτη απόδοσης του συστήματος. Αφού προσδιοριστεί η βέλτιστη γωνία διακλάδωσης για τα 3 και 4 επίπεδα διακλάδωσης, θα κατασκευαστεί σύστημα που περιέχει δύο δενδριτικές διατάξεις αντιπαράλληλα τοποθετημένες και θα βρεθεί η απόδοση του συστήματος βάσει των μεγεθών που έχουν αναφερθεί.

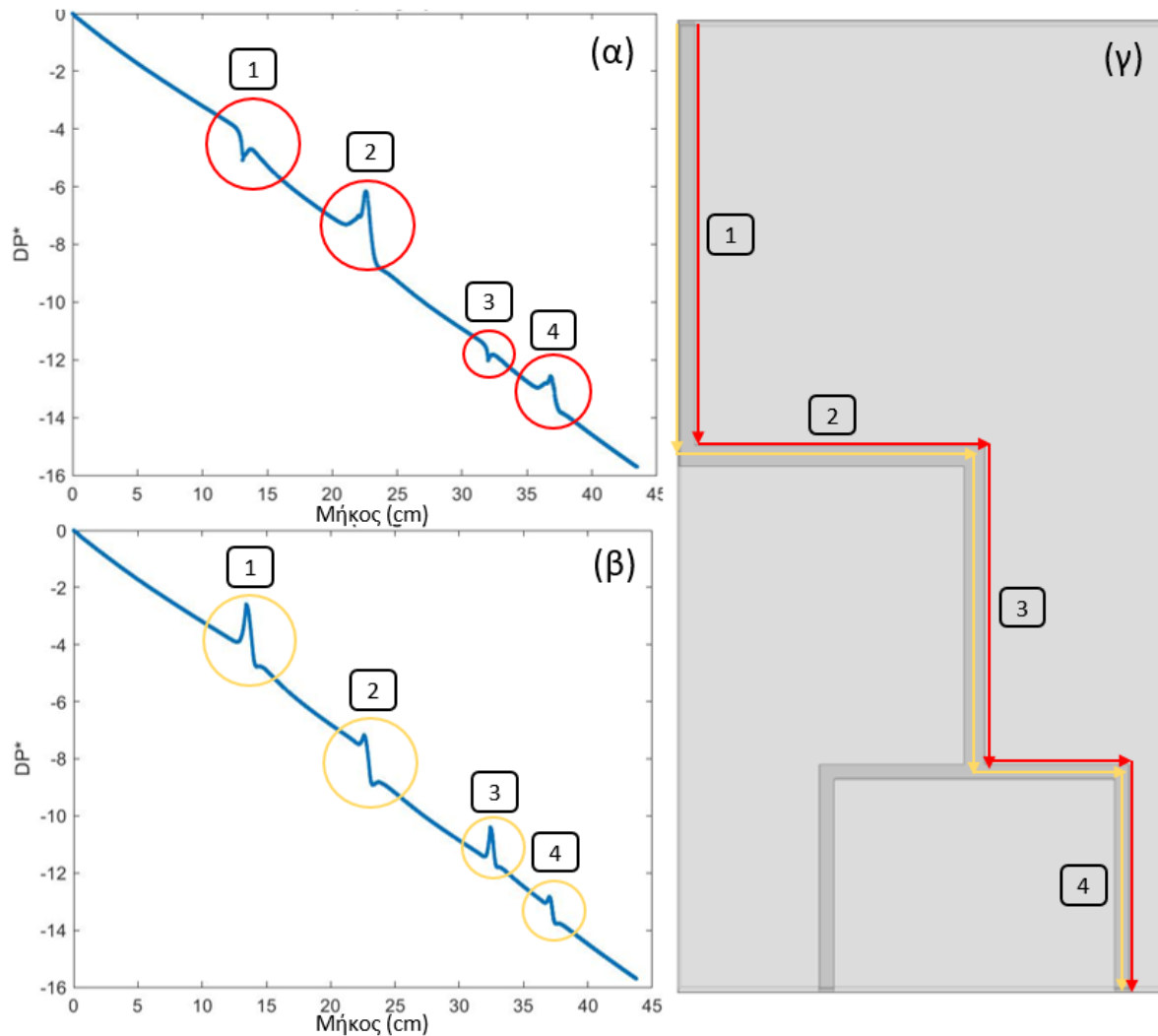
## 4.2. Υδροδυναμική συμπεριφορά

Για την ανάλυση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς στις πλήρεις γεωμετρίες, υπολογίζεται η αδιάστατη πτώση πίεσης σύμφωνα με τη σχέση 3.2. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται, όμοια με τις βασικές δομές του προβλήματος, σε γραμμές που ακολουθούν τη τροχιά του ρευστού στο κέντρο του καναλιού και στο εξωτερικό τοίχωμα. Οι αυξομειώσεις της πίεσης στα σημεία όπου διαταράσσεται η ροή, είναι αντιπροσωπευτικές της έντασης των δευτερογενών ροών που αναπτύσσονται και θα μας δώσουν μια ένδειξη για το πως οι δίνες εξελίσσονται στα κανάλια, όταν η γωνία διακλάδωσης και η στροφή παύουν να είναι  $90^\circ$ . Η αδιάστατη πτώση πίεσης για όλες τις περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί φαίνονται στα σχήματα 4. 5-4. 8.

Για την ευκολότερη κατανόηση των διαγραμμάτων, παρατίθεται το Σχήμα 4. 3. Στο συγκεκριμένο σχήμα, διαγράφεται με κόκκινο και κίτρινο χρώμα η διαδρομή, πάνω στην οποία υπολογίζεται η αδιάστατη πτώση πίεσης που αντιστοιχεί στο εξωτερικό τοίχωμα και στο κέντρο του καναλιού αντίστοιχα. Προστίθεται επίσης αρίθμηση του κάθε κομματιού για περαιτέρω διευκόλυνση στην κατανόηση των σχημάτων.

Αρχικά, στα σχήματα 4. 5 και 4. 6 φαίνεται η αδιάστατη πτώση πίεσης στις περιπτώσεις των 3 επιπέδων για όλες τις γωνίες διακλάδωσης. Σημειώνεται, ότι στον

άξονα x των διαγραμμάτων αυτών, αντιστοιχεί η απόσταση (σε εκατοστά) που έχει διαγράψει η πορεία του ρευστού. Από τα διαγράμματα των σχημάτων αυτών, παρατηρείται ότι η πτώση πίεσης καθώς μειώνεται η γωνία διακλάδωσης αλλάζει σταδιακά συμπεριφορά.



Σχήμα 4.3: Αναπαράσταση της αδιάστατης πτώσης πίεσης κατά μήκος του (α) εξωτερικού τοιχώματος (β) του κέντρου του καναλιού και (γ) της πορείας πάνω στην οποία υπολογίζεται η αδιάστατη πτώση πίεσης σε κάθε περίπτωση

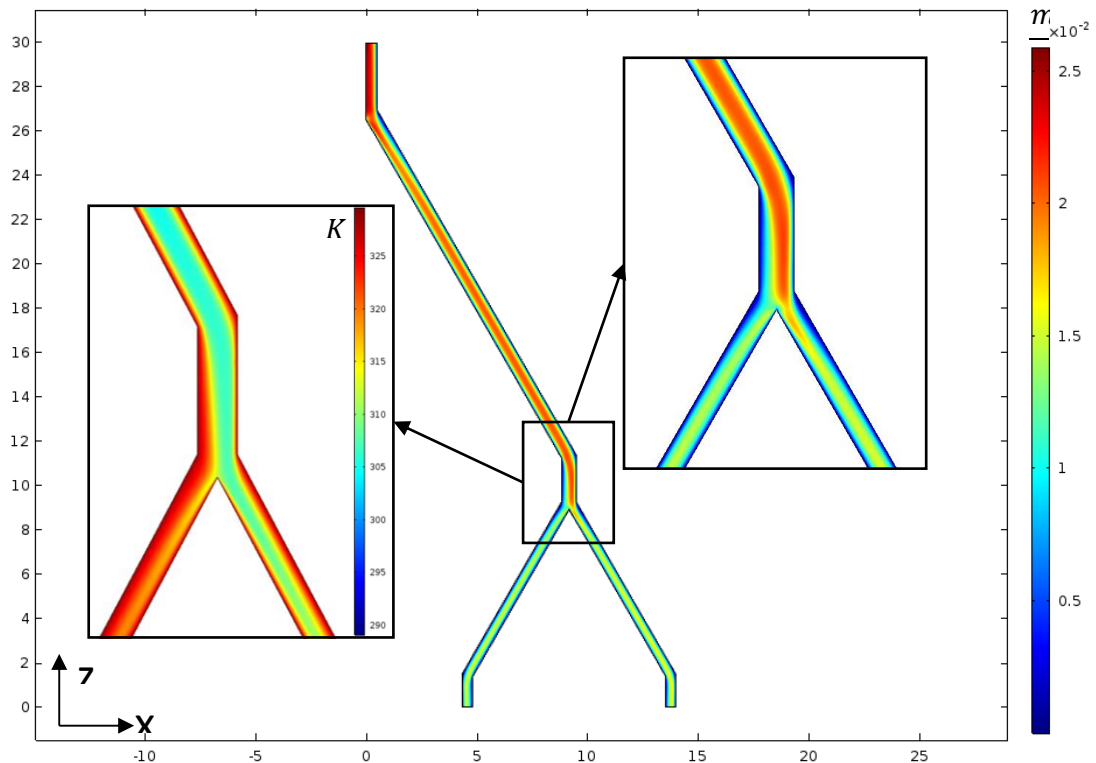
Η πτώση πίεσης που παρατηρείται στο εξωτερικό τοίχωμα του καναλιού λόγω της πρώτης διακλάδωσης είναι μέγιστη (σημείο 1), όπως αναμένεται, όταν η γωνία διακλάδωσης είναι  $90^\circ$ . Αυτή η απότομη πτώση που προκαλείται από την αποκόλληση του οριακού στρώματος του ρευστού από το τοίχωμα από το οποίο εισέρχεται, τείνει να

επιμένει και στις επόμενες γωνίες διακλάδωσης, με τη διαφορά ότι, η ανάκτηση που ακολουθεί λόγω της επαναφοράς του συνήθους προφίλ ταχύτητας είναι μεγαλύτερη και ταχύτερη. Επόμενη διαταραχή της ροής είναι η πρώτη στροφή ( $180^\circ - \theta$ ). Στη περίπτωση που η γωνία είναι  $90^\circ$  έχουμε και πάλι την πιο έντονη αλλαγή στη πτώση πίεσης. Το ρευστό προσκρούεται πάνω στο εξωτερικό τοίχωμα, με αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της πίεσης στο σημείο εκείνο (σημείο 2). Καθώς η γωνία  $\theta$  της διακλάδωσης μειώνεται, η διαφορά ( $180^\circ - \theta$ ) αυξάνεται, με αποτέλεσμα το κανάλι να προσεγγίζει όλο και περισσότερο ένα ενιαίο ευθύ αγωγό. Φυσικό επακόλουθο, είναι η διαταραχή που προκαλείται στη ροή να ελαττώνεται και η πτώση πίεσης να ακολουθεί ανάλογα. Στις μικρότερες γωνίες διακλάδωσης η πτώση πίεσης από τη στροφή της ροής γίνεται σχεδόν αμελητέα σε σύγκριση με αυτή που προκύπτει όταν η γωνία διακλάδωσης είναι  $90^\circ$ .

Καθώς η ροή προχωράει κατά μήκος του καναλιού, συναντάει την επόμενη διακλάδωση και επακόλουθη στροφή. Οι διαταραχές στη ροή που εμφανίζονται είναι ανάλογες των πρώτων δύο αλλά μικρότερης έντασης λόγω της διαμοίρασης της παροχής και της μείωσης του αριθμού Reynolds. Παρόμοια με το τι συμβαίνει και στην πρώτη διακλάδωση και στροφή, η μείωση της γωνίας  $\theta$  οδηγεί σε ελάττωση των αυξομειώσεων της πίεσης και της έντασης των δευτερογενών ροών. Παρόμοιες τάσεις με αυτές του εξωτερικού τοιχώματος, παρατηρούνται και στο κέντρο του αγωγού. Τα πιο έντονα φαινόμενα συμβαίνουν όταν  $\theta = 90^\circ$  και καθώς η γωνία αυτή μειώνεται τα φαινόμενα αυτά εξασθενούν. Το πως εξελίσσεται η πίεση στο κέντρο του καναλιού για την περίπτωση της διακλάδωσης και του στροφής  $90^\circ$ , έχουν αναλυθεί στο υποκεφάλαιο 3.3. και δεν θα σχολιαστούν σε αυτό το κεφάλαιο. Αυτό που αξίζει να αναφερθεί, είναι ότι, παρόμοια με την πτώση πίεσης στο εξωτερικό τοίχωμα, οι αυξομειώσεις που προκαλούνται λόγω των διαταραχών της ροής είναι αμελητέες στη μικρότερη γωνία διακλάδωσης σε σχέση με τη μεγαλύτερη.

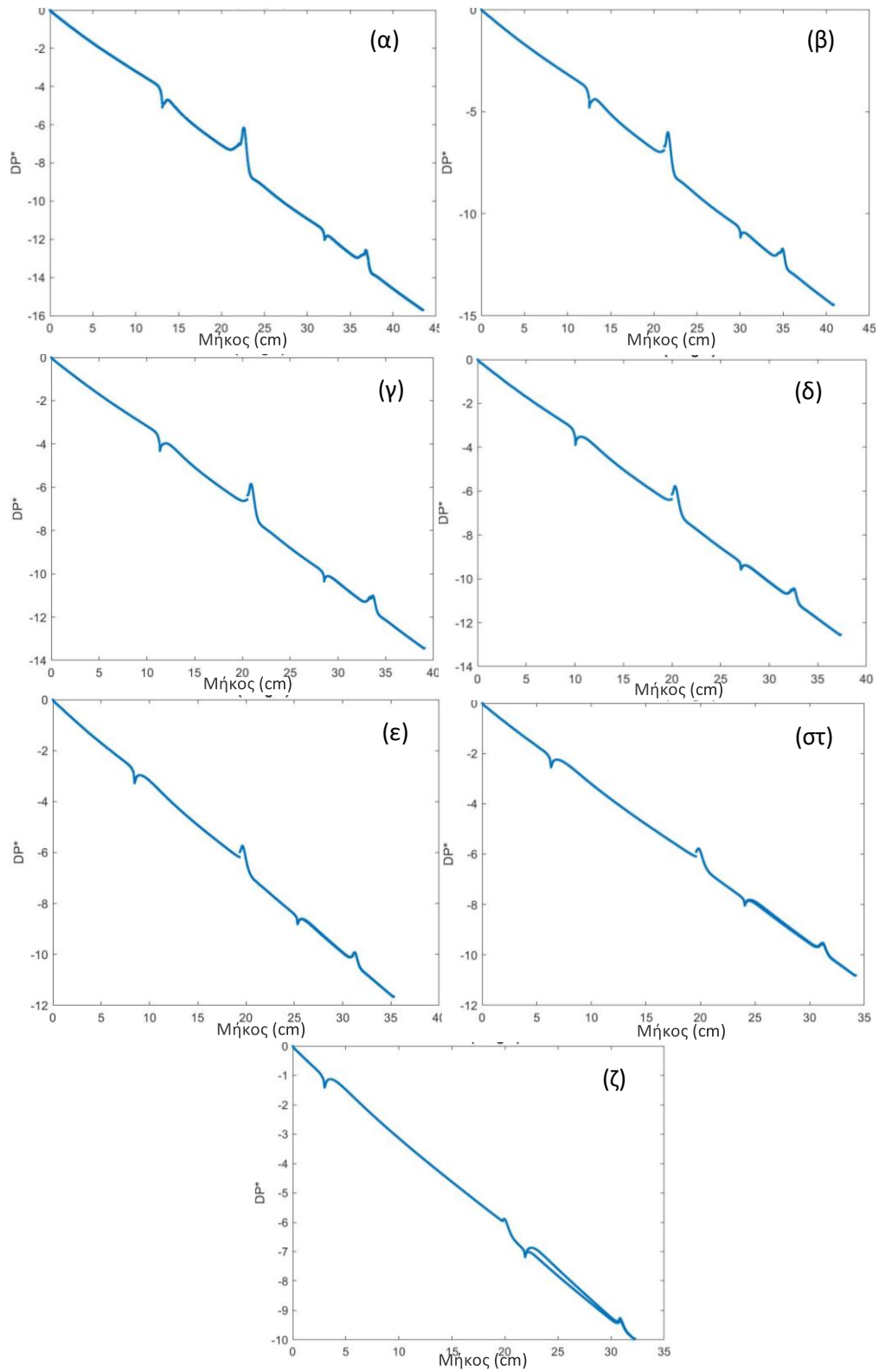
Ακόμα μια ιδιαιτερότητα που αξίζει να αναφερθεί είναι ο διαχωρισμός που παρατηρείται στην πτώση πίεσης, ειδικά στην περίπτωση ( $\zeta$ ) των σχημάτων 4. 5 - 4. 8. Ο διαχωρισμός αυτός, αντιστοιχεί στη δεύτερη διακλάδωση των περιπτώσεων όπου η

γωνία διακλάδωσης είναι  $30^\circ$ . Αυτό ωστόσο, δεν είναι αποτέλεσμα της γωνίας διακλάδωσης αλλά του μήκους των μονάδων των καναλιών που είναι παράλληλα στον άξονα  $z$  του σχήματος 4. 4. Όπως προκύπτει από τις μεγεθύνσεις που φαίνονται στο σχήμα αυτό, λόγω του μικρού μήκους του παράλληλου προς τον άξονα  $z$  αγωγού, η ταχύτητα δεν έχει αρκετό διαθέσιμο μήκος για να ανακτήσει το γνωστό παραβολικό προφίλ, και το ρευστό που προσκρούει στο εξωτερικό τοίχωμα συνεχίζει την πορεία του προς το δεξί κανάλι της επόμενης διακλάδωσης. Με άλλα λόγια η ογκομετρική παροχή που δέχεται το δεξί κανάλι που βρίσκεται στο άκρο της γεωμετρίας είναι μεγαλύτερη από αυτή που δέχεται το αντίθετο της ίδιας διακλάδωσης.

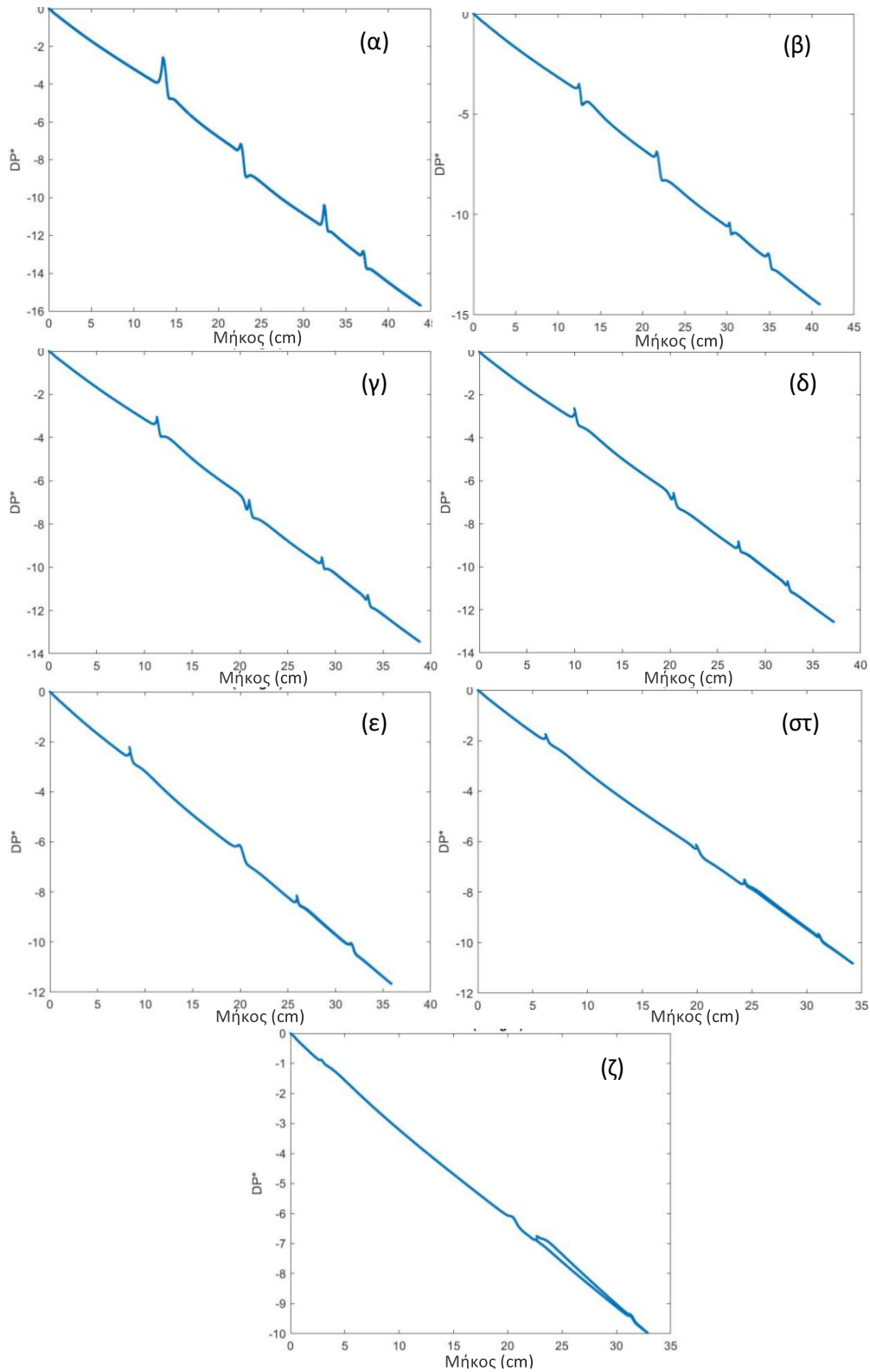


Σχήμα 4. 4: Πεδίο ταχύτητας και μεγέθυνση του πεδίου ταχύτητας (δεξιά) και του πεδίου θερμοκρασίας (αριστερά) στη διάταξη γωνίας διακλάδωσης  $30^\circ$  και τριών επιπέδων

Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου, είναι η μεγαλύτερη ανομοιομορφία στη θερμοκρασία της πλάκα, αφού η παροχή που δέχεται το δεξί κανάλι περιέχει και τη κρύα μάζα ρευστού που βρίσκεται στο κέντρο του αγωγού (βλ. αριστερή μεγέθυνση στο Σχήμα 4. 4).

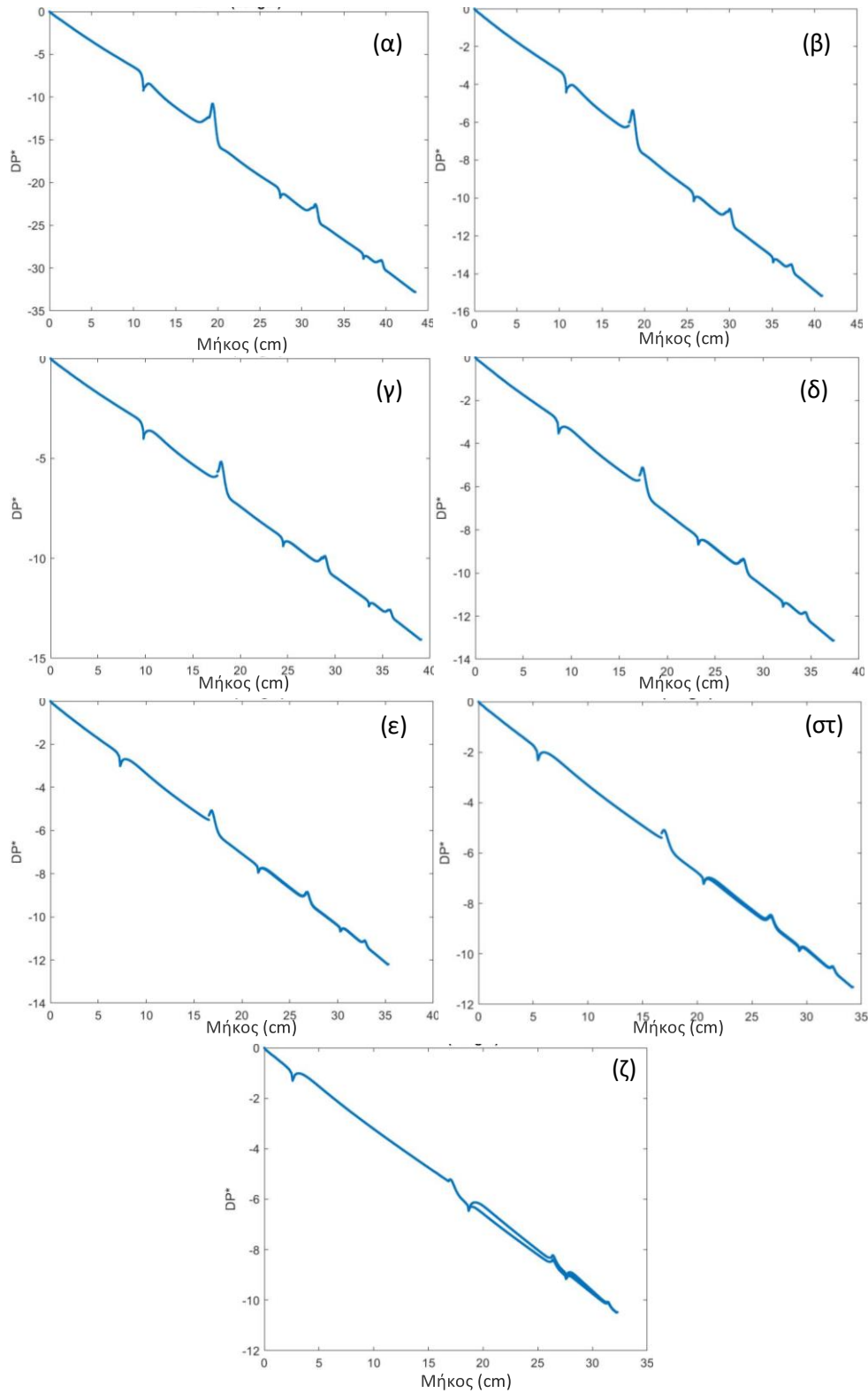


Σχήμα 4. 5: Αδιάστατη πτώση πίεσης κατά μήκος του εξωτερικού τοιχώματος της δενδριτικής διάταξης για 3 επίπεδα και γωνίες διακλάδωσης: (α)  $\theta=90^\circ$  (β)  $\theta=80^\circ$  (γ)  $\theta=70^\circ$  (δ)  $\theta=60^\circ$  (ε)  $\theta=50^\circ$  (στ)  $\theta=40^\circ$  (ζ)  $\theta=30^\circ$

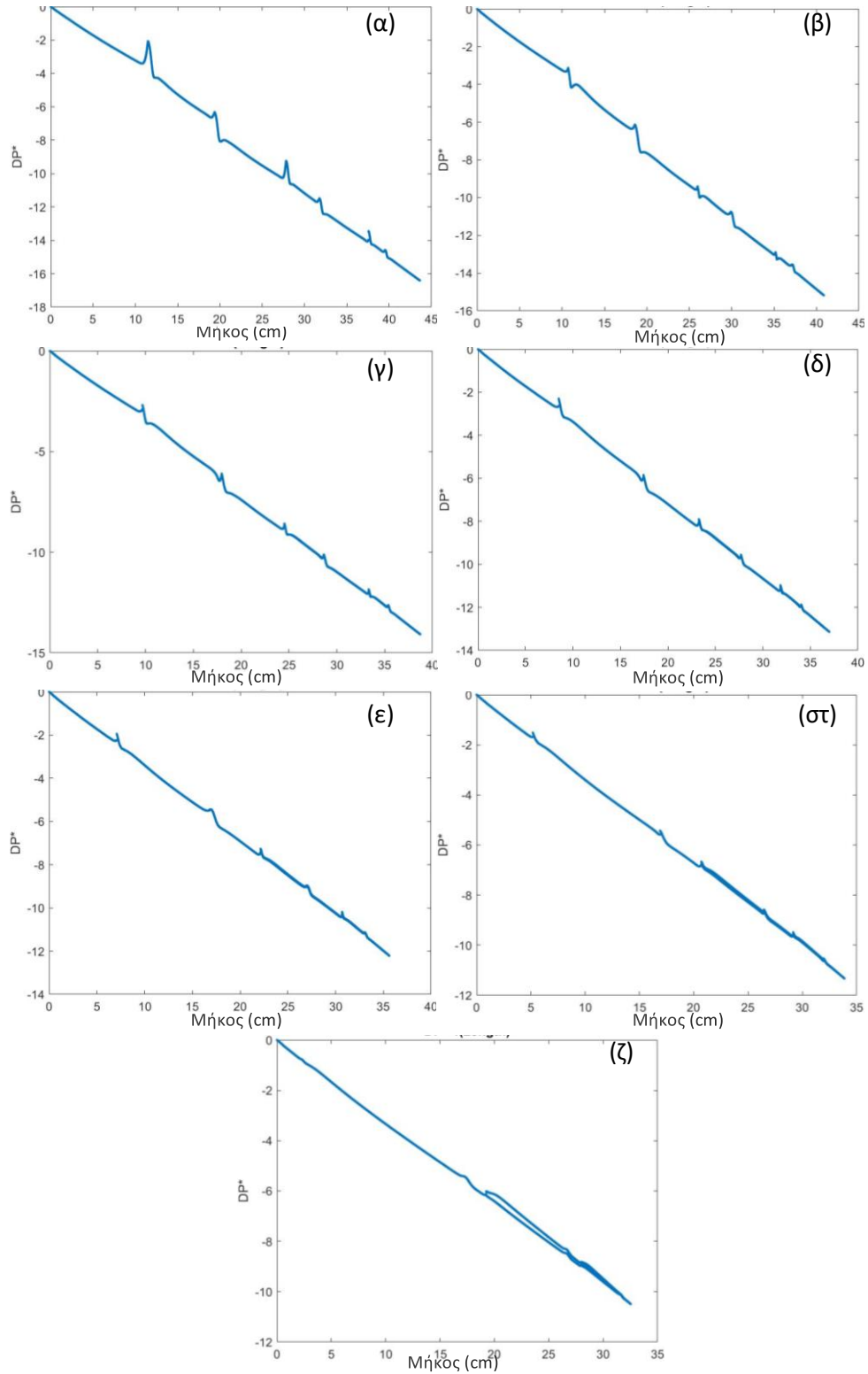


Σχήμα 4. 6: Αδιάστατη πτώση πίεσης κατά μήκος του κέντρου των καναλιών της δενδριτικής διάταξης για 3 επίπεδα και γωνίες διακλάδωσης: (α)  $\theta=90^\circ$  (β)  $\theta=80^\circ$  (γ)  $\theta=70^\circ$  (δ)  $\theta=60^\circ$  (ε)  $\theta=50^\circ$  (στ)  $\theta=40^\circ$  (ζ)  $\theta=30^\circ$





Σχήμα 4. 7: Αδιάστατη πτώση πίεσης κατά μήκος του εξωτερικού τοιχώματος της δενδριτικής διάταξης για 4 επίπεδα και γωνίες διακλάδωσης: (α)  $\theta=90^\circ$  (β)  $\theta=80^\circ$  (γ)  $\theta=70^\circ$  (δ)  $\theta=60^\circ$  (ε)  $\theta=50^\circ$  (στ)  $\theta=40^\circ$  (ζ)  $\theta=30^\circ$



Σχήμα 4. 8: Αδιάστατη πτώση πίεσης κατά μήκος του κέντρου των καναλιών της δενδριτικής διάταξης για 4 επίπεδα και γωνίες διακλάδωσης: (α)  $\theta=90^\circ$  (β)  $\theta=80^\circ$  (γ)  $\theta=70^\circ$  (δ)  $\theta=60^\circ$  (ε)  $\theta=50^\circ$  (στ)  $\theta=40^\circ$  (ζ)  $\theta=30^\circ$

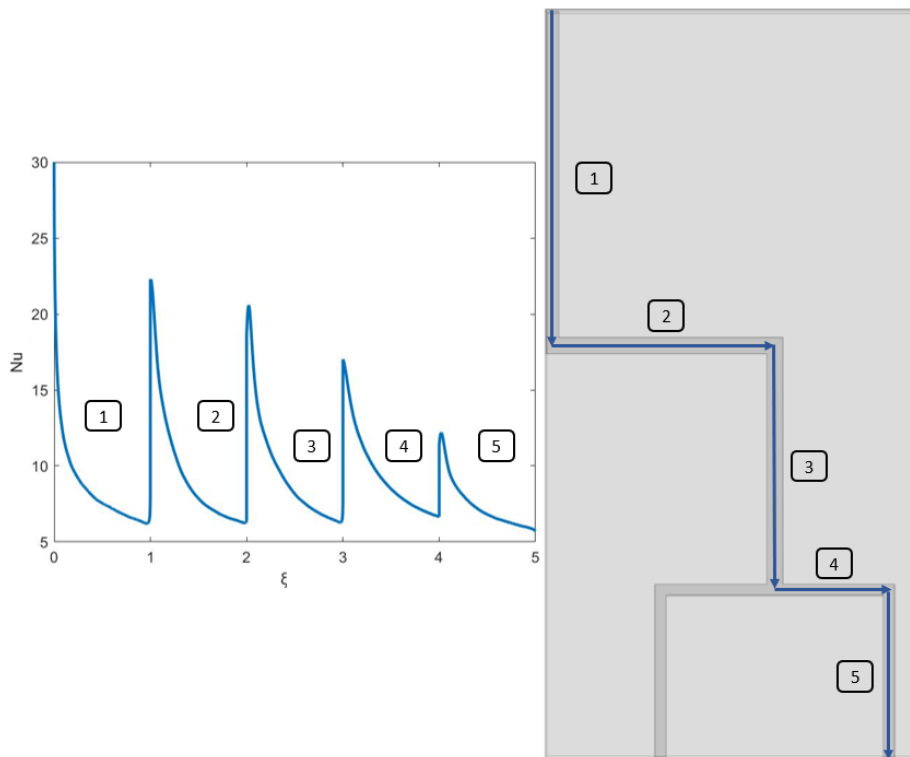
Αυτή η ανομοιομορφία στην κατανομή της ογκομετρικής παροχής, όπως έχει προαναφερθεί, οφείλεται στο μήκος του κάθετου καναλιού και όχι στη γωνία διακλάδωσης. Το μικρό μήκος όμως οφείλεται στους περιορισμούς της κατασκευής της γεωμετρίας που μελετάται. Ο κύριος περιορισμός που οδηγεί σε αυτή τη διάταξη είναι οι ίσες αποστάσεις μεταξύ των καναλιών εξόδου, που οδηγούν σε σταθερές αποστάσεις  $WL_i$  που φαίνονται στο Σχήμα 1. 27. Λόγω αυτής της επιλογής του κριτηρίου των σταθερών αποστάσεων, οι αποστάσεις  $AL_i$  που υπολογίζονται από τη σχέση 1.7, μεγαλώνουν καθώς μειώνεται η γωνία διακλάδωσης  $\theta$ . Αυτό σε συνάρτηση με το γεγονός ότι οι διαστάσεις της πλάκας μένουν πάντα σταθερές, οδηγεί στα ύψη να μειώνονται συνεχώς καθώς μειώνεται η γωνία διακλάδωσης. Για την επίλυση αυτού το προβλήματος και της ελάττωσης οποιασδήποτε τυχόν ομοιομορφίας σε μικρότερες γωνίες διακλάδωσης θα χρειαζόντουσαν άνισες αποστάσεις μεταξύ των καναλιών εξόδου ή απορροφητική επιφάνεια με μεγαλύτερο μήκος  $L_{tot}$ .

### 4.3. Θερμική Συμπεριφορά

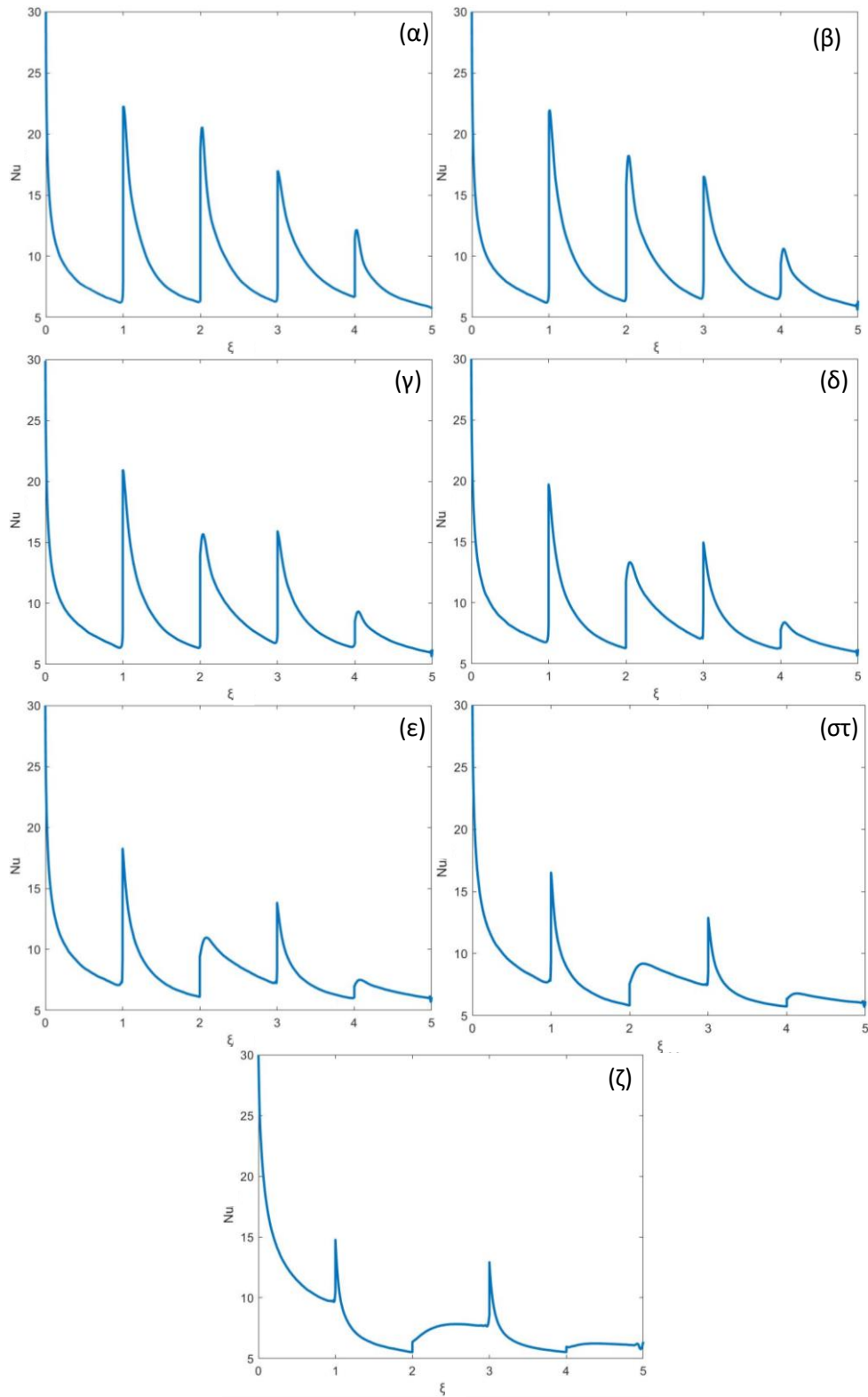
Για την ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς των ολοκληρωμένων διατάξεων, θα γίνει ανάλυση παρόμοια με αυτή που έγινε και στις βασικές δομές του προβλήματος. Υπολογίζεται δηλαδή, ο αριθμός Nusselt κατά μήκος της διαδρομής που διαγράφει η ροή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4. 9. Η ανάλυση αυτή γίνεται για όλες τις διατάξεις που έχουν διερευνηθεί και τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 4. 10 και 4. 11.

Όπως έχει παρατηρηθεί και στην ανάλυση των βασικών δομών του προβλήματος, η διαταραχή της ροής σε κάθε διακλάδωση και στροφή γωνίας  $\theta$  και  $(180 - \theta)$  αντίστοιχα, οδηγεί σε σημαντική ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας λόγω αφενός της διακοπής στην ανάπτυξη του θερμικού οριακού στρώματος αλλά και αφετέρου της δευτερογενούς ροής που αναπτύσσεται και η οποία εξαναγκάζει την ανάμιξη κρύων στρωμάτων ρευστού με άλλα πιο θερμά. Αυτό, γίνεται αντιληπτό στο Σχήμα 4. 9, όπου κάθε φορά που εκτρέπεται η ροή, υπάρχει μια απότομη αύξηση του αδιάστατου αριθμού Nusselt.

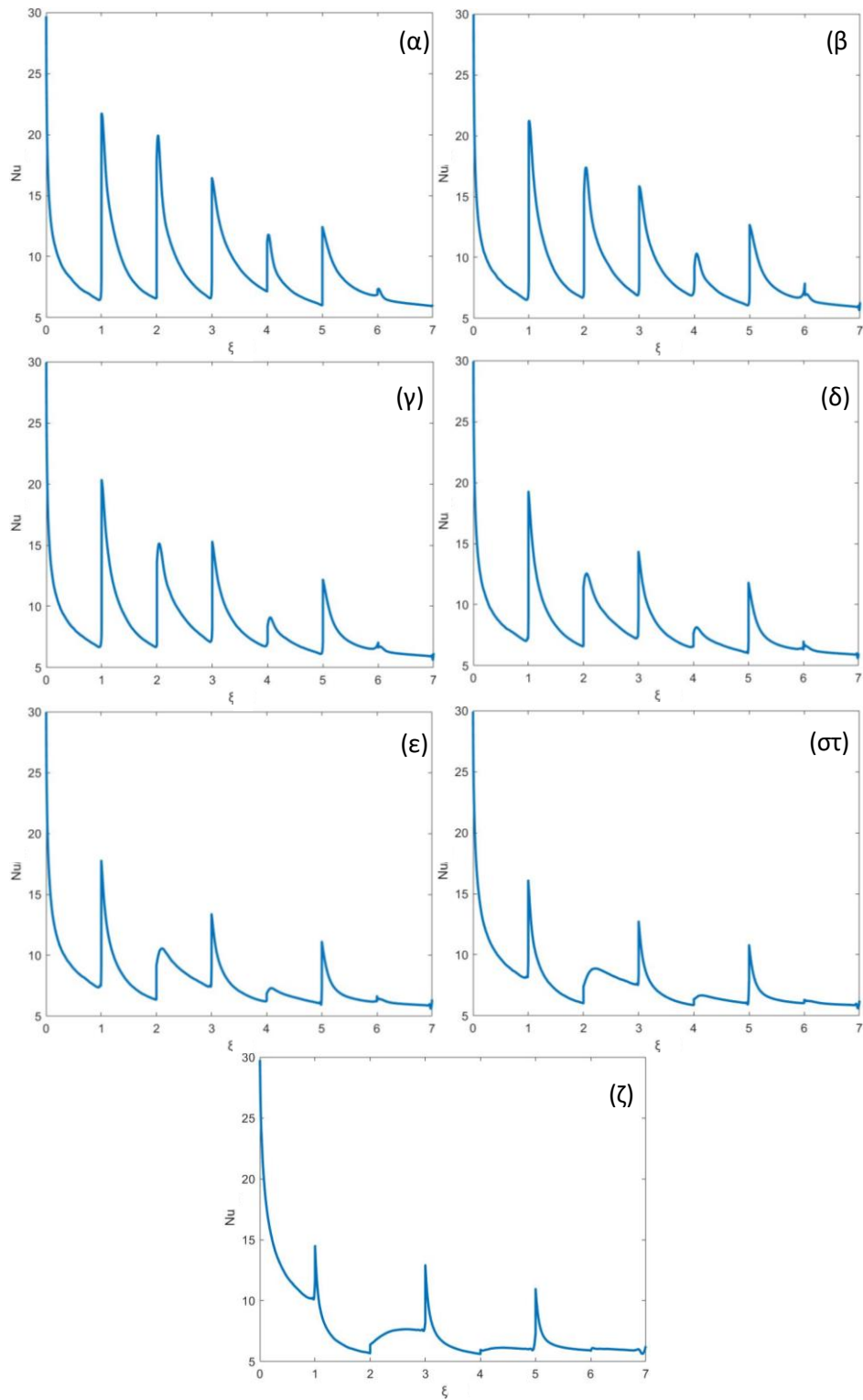
Ο μεγαλύτερος αριθμός Nusselt φαίνεται να είναι πάντα στην αρχή της εισόδου, λόγω του ότι το ρευστό, όταν εισέρχεται στη πλάκα βρίσκεται στη χαμηλότερη του θερμοκρασία και το δυναμικό (διαφορά θερμοκρασίας τοιχώματος, μάζας ρευστού) είναι μέγιστο. Καθώς το ρευστό προχωράει προς την πρώτη διακλάδωση, ο αριθμός Nusselt φθίνει και τείνει να φτάσει σε μια ασυμπτωτική τιμή κοντά στο  $Nu = 5$ . Εκεί όμως, όπου ο αριθμός Nusselt και το θερμοκρασιακό προφίλ τείνουν να σταθεροποιηθούν, η διαταραχή (πρόσκρουση και εκτροπή) της ροής εξαναγκάζει την ενίσχυση μεταφοράς θερμότητας. Μετά τη διακλάδωση, καθώς η δευτερογενής ροής εξασθενεί και το θερμοκρασιακό προφίλ τείνει να σταθεροποιηθεί, το ρευστό συναντά την απότομη στροφή, που στην περίπτωση του σχήματος 4. 9 αντιστοιχεί σε γωνία  $90^\circ$ . Η τάση αυτή διατηρείται σε κάθε σημείο όπου διαταράσσεται η ροή, μέχρι την έξοδο του ρευστού από το κανάλι. Παρατηρείται επίσης, μείωση του πόσο αυξάνεται ο αριθμός Nusselt, σε κάθε διακλάδωση και στροφή, διότι, πέραν του ότι η μέση θερμοκρασία του ρευστού αυξάνεται σταδιακά, ο αδιάστατος αριθμός είναι και ευθέως ανάλογος της υδραυλικής διαμέτρου των καναλιών, η οποία μειώνεται σε κάθε επίπεδο.



Σχήμα 4. 9: Αναπαράσταση διαδρομής κατά την οποία υπολογίζεται και απεικονίζεται ο αριθμός Nusselt στα αντίστοιχα διαγράμματα



Σχήμα 4. 10: Αριθμός Nusselt κατά μήκος της ροής των διακλαδούμενων καναλιών της πλήρους γεωμετρίας για τρία επίπεδα και για γωνίες διακλάδωσης: (α)  $\vartheta=90^\circ$  (β)  $\vartheta=80^\circ$  (γ)  $\vartheta=70^\circ$  (δ)  $\vartheta=60^\circ$  (ε)  $\vartheta=50^\circ$  (σ)  $\vartheta=40^\circ$  (ζ)  $\vartheta=30^\circ$



Σχήμα 4. 11: Αριθμός Nusselt κατά μήκος της ροής των διακλαδούμενων καναλιών της πλήρους γεωμετρία για τέσσερα επίπεδα και για γωνίες διακλάδωσης: (α)  $\theta=90^\circ$  (β)  $\theta=80^\circ$  (γ)  $\theta=70^\circ$  (δ)  $\theta=60^\circ$  (ε)  $\theta=50^\circ$  (σ)  $\theta=40^\circ$  (ζ)  $\theta=30^\circ$

Στα σχήματα που παρατίθενται παραπάνω, φαίνεται το πως εξελίσσεται ο αριθμός Nusselt κατά μήκος της γεωμετρίας για όλες τις περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί. Στον άξονα  $x$ , βρίσκεται ο αδιάστατος αριθμός  $\xi$ , όπως έχει χρησιμοποιηθεί και στο υποκεφάλαιο 3.4 στη σχέση 3.30 και είναι μια κανονικοποιημένη συντεταγμένη που εκφράζει το αθροιστικό μήκος στην κατεύθυνση της ροής. .

Γίνεται άμεσα εμφανές, παρατηρώντας τα διαγράμματα των σχημάτων αυτών, ότι καθώς μειώνεται η γωνία διακλάδωσης, η ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας σε όλα τα σημεία εκτροπής της ροής και διατάραξης των θερμοκρασιακών οριακών στρωμάτων, μειώνεται σταδιακά καθώς τα φαινόμενα αυτά γίνονται λιγότερο έντονα.. Οι κορυφές των διαγραμμάτων που δημιουργούνται από την κάθε διαταραχή μειώνονται καθώς μειώνεται η γωνία διακλάδωσης. Ακόμα μια αλλαγή που παρατηρείται καθώς μειώνεται η γωνία διακλάδωσης, είναι το ότι ο αριθμός Nusselt δεν φτάνει την ασυμπτωτική τιμή του, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις των μεγάλων γωνιών διακλάδωσης. Συγκεκριμένα για τα 3 επίπεδα από τη γωνία διακλάδωσης των  $60^\circ$ , παρατηρείται ότι η απότομη ενίσχυση γίνεται πριν αναπτυχθεί το θερμοκρασιακό προφίλ στη προηγούμενη μονάδα. Αυτό γίνεται ακόμα πιο έντονο σε ακόμα μικρότερες διακλαδώσεις με ιδιαίτερη περίπτωση αυτή των  $30^\circ$  όπου για  $2 < \xi < 3$  και  $4 < \xi < 5$  ο αριθμός Nusselt δεν εμφανίζει κάποια μέγιστη τιμή λόγω της διαταραχής, ώστε να αρχίσει να φθίνει στη συνέχεια. Αντίθετα μάλιστα, παρατηρείται μια ελαφρά αυξητική τάση του  $Nu$  μέχρι κάποια σταθερή τιμή. Αυτό οφείλεται στο ότι τα μήκη των κάθετων καναλιών δεν είναι αρκετά μεγάλα για να αρχίσει να φθίνει ο αριθμός  $Nu$ , αλλά το μήκος τους μειώνεται για τους λόγους που έχουν αναφερθεί και στην ανάλυση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς, όπου παρατηρείται η διαφορά στην αδιάστατη πτώση πίεσης των τελευταίων καναλιών. Όμοια παρατήρηση προκύπτει και στην περίπτωση των διατάξεων με 4 επίπεδα.

#### 4.4. Σύγκριση διατάξεων διακλαδούμενων καναλιών

Πέραν της ανάλυσης της υδροδυναμικής και θερμικής συμπεριφοράς των διατάξεων αυτών, θα αναζητηθεί και η γωνία για την οποία βελτιστοποιείται η απόδοση

του συστήματος, όσον αφορά το συνδυασμό της ενίσχυσης μεταφοράς θερμότητας και της πτώσης πίεσης στη διάταξη. Επίσης, εξετάζεται και η ομοιομορφία στην κατανομή της θερμοκρασίας στην μεταλλική πλάκα.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου γίνονται οι υπολογισμοί που θα αναφερθούν παρακάτω. Αρχικά υπολογίζεται η μέση θερμοκρασία στην απορροφητική πλάκα και στη συνέχεια η τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας σε όλη τη πλάκα. Αυτό το στατιστικό μέγεθος είναι ένα μέτρο της διασποράς ενός συνόλου τιμών γύρω από τον μέσο όρο των τιμών αυτών. Όσο πιο χαμηλή είναι η τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας, τόσο πιο ομοιόμορφο είναι το πεδίο της στον όγκο της απορροφητικής επιφάνειας. Αυτό είναι το πρώτο μέγεθος που υπολογίζεται και το οποίο θα δώσει ένδειξη του πόσο αποκλίνει η θερμοκρασία από τη μέση τιμή και δίνεται από τη σχέση:

$$SD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (T_{m,al} - T_i)^2}}{N} \quad (4.1)$$

Επόμενο μέγεθος που υπολογίζεται είναι ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής, στον όγκο του ρευστού που ρέει στη δενδριτική διάταξη. Για τον υπολογισμό του μέσου συντελεστή θερμότητας  $\bar{h}_m$ , χρησιμοποιείται σχέση 3.20 με τη μόνη διαφορά ότι οι μεταβλητές της εξίσωσης πλέον αντιστοιχούν στις μέσες τιμές όλης της γεωμετρίας  $\bar{T}_{w,m}$ ,  $\bar{T}_{b,m}$  και  $\bar{q}_{w,m}$ , που αντιστοιχούν στη μέση θερμοκρασία όλου του τοιχώματος του καναλιού, τη μέση θερμοκρασία όλου του όγκου του ρευστού και τη μέση θερμοροή σε όλο το τοίχωμα του καναλιού. Έχοντας υπολογίσει το μέσο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, και υπολογίζοντας την συνολική επιφάνεια ( $A$ ) του τοιχώματος του καναλιού, μπορεί να υπολογιστεί και η μέση θερμική αντίσταση συναγωγής από τη παρακάτω σχέση:

$$\bar{R}_{conv,m} = \frac{1}{\bar{h}_m \cdot A} \quad (4.2)$$

Η μέση αντίσταση συναγωγής είναι ένα μέτρο που δείχνει πόσο εύκολα μεταφέρεται θερμότητα εντός της συνολικής διάταξης των καναλιών. Ένα επιπλέον μέγεθος που βοηθά στη σύγκριση των διατάξεων ως προς τη μεταφορά θερμότητας,



είναι ο μέσος αριθμός Nusselt της διάταξης,  $\overline{Nu}_m$ , ο οποίος επίσης παρέχει την ίδια ένδειξη με τη θερμική αντίσταση συναγωγής αλλά είναι αδιάστατος και είναι πιο εύκολη η προσθήκη του σε ένα συνολικό δείκτη που συνυπολογίζει και τη πτώση πίεσης για την ποσοτικοποίηση της συνολικής απόδοσης.

Άλλο μέγεθος που υπολογίζεται για τη σύγκριση, είναι η πτώση πίεσης ( $\Delta P$ ) που απαιτείται για την άντληση του ρευστού διαμέσου των καναλιών, η ισχύς άντλησης και η συνολική αδιάστατη πτώση πίεσης. Η αδιάστατη πτώση πίεσης υπολογίζεται από τη σχέση 3.2 και η δύναμη άντλησης δίνεται από την επόμενη σχέση που παρουσιάζεται.

$$P_{pump} = \dot{V} \cdot \Delta P \quad (4.3)$$

Προτελευταίο μέγεθος που εφαρμόζεται για τη σύγκριση είναι η λυγρότητα ( $Sv$ , svelteness) που υπολογίζεται από τη σχέση 1.1 και η έννοια της οποίας αναφέρεται στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο της εργασίας.

Τελευταίος, αλλά ίσως και ο πιο σημαντικός, είναι ο συνδυαστικός δείκτης απόδοσης των διατάξεων, που συνυπολογίζει τον μέσο αριθμό Nusselt ( $\overline{Nu}_m$ ) και την αδιάστατη πτώση πίεσης για την ποσοτικοποίηση της απόδοσης της κάθε διάταξης. Ο δείκτης αυτός ορίζεται από τη παρακάτω σχέση [39]:

$$\eta = \frac{\overline{Nu}_m}{(Re \cdot DP^*)^{\frac{1}{3}}} \quad (4.4)$$

Ο όρος που αντιστοιχεί στη πτώση πίεσης είναι υψωμένος στο 1/3, επειδή δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στην ενίσχυση της θερμότητας παρά στην ισχύς άντλησης για τον υπολογισμό της απόδοσης του συστήματος. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για κάθε διάταξη όσον αφορά τα μεγέθη που έχουν αναφερθεί, φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν. Όπως γίνεται άμεσα εμφανές, τα μοντέλα απαριθμούνται στην πρώτη στήλη των πινάκων, με συγκεκριμένο τρόπο. Το 3L και 4L αντιστοιχεί στον αριθμό των επιπέδων των διατάξεων και ο διψήφιος αριθμός που ακολουθεί, αντιστοιχεί στη γωνία διακλάδωσης,  $\theta$ . Όλα τα μεγέθη που έχουν προαναφερθεί, παρουσιάζονται στους πίνακες 4. 1 μέχρι και 4. 9.

Από τους προαναφερθέντες πίνακες γίνεται πλέον εμφανές το πως αποδίδουν θερμικά και υδροδυναμικά τα συστήματα που μελετώνται. Από την τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας, προκύπτει η ομοιομορφία του πεδίου θερμοκρασίας πάνω στην απορροφητική πλάκα. Για όλα τα μοντέλα που έχουν εξεταστεί, η τυπική απόκλιση προσεγγίζει τη μονάδα.

Πίνακας 4. 1: Μέση θερμοκρασία πλάκας αλουμινίου και τυπική απόκλιση του πεδίου θερμοκρασίας: σύγκριση όλων των διατάξεων

Μοντέλο	$T_{m,al}$ (K)	$\frac{(T_{m,al} - T_i)^2}{N}$	SD (K)
3L90	324.57	1.22	1.10
3L80	325.10	1.00	1.00
3L70	325.47	1.03	1.01
3L60	325.93	1.09	1.04
3L50	326.57	1.16	1.08
3L40	327.31	1.33	1.16
3L30	328.32	1.60	1.26
4L90	322.96	1.30	1.14
4L80	323.32	1.13	1.06
4L70	323.58	1.08	1.04
4L60	323.93	1.03	1.01
4L50	324.31	0.99	1.00
4L40	324.78	1.00	1.00
4L30	325.41	1.04	1.02

Αυτά τα αποτελέσματα, είναι αρκετά ικανοποιητικά, καθώς μεταφράζονται σε επαρκή θερμοκρασιακή ομοιομορφία πάνω στην πλάκα αλουμινίου. Αν οι τιμές της τυπικής απόκλισης ήταν μεγάλες, θα σήμαινε ότι θα υπήρχαν ζεστά σημεία πάνω στη πλάκα που θα απέκλιναν σημαντικά από τη μέση θερμοκρασία της. Μεγάλες θερμοκρασίες σε συγκεκριμένα σημεία της διάταξης θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε βλάβες του συστήματος, ιδιαίτερα στην περίπτωση ενός φωτοβολταϊκού, όπου η πλάκα θα ήταν ενσωματωμένη σε σύστημα που παρήγαγε παράλληλα και ηλεκτρική ενέργεια. Ακόμα ένα αξιοσημείωτο στοιχείο, όσον αφορά την ομοιομορφία του πεδίου θερμοκρασίας, είναι ότι σε όλες τις διατάξεις προκύπτουν σχεδόν ίδιες τυπικές αποκλίσεις. Παρόλο, που η διαφορές είναι μικρές όμως, αξίζει να αναφερθεί ότι η μικρότερη και καλύτερη τυπική απόκλιση προκύπτει για τα μοντέλα 3L80 και 4L50 και

4L40, με τα χειρότερα να είναι τα μοντέλα 3L30 και 4L90 για 3 και 4 επίπεδα διακλάδωσης αντίστοιχα.

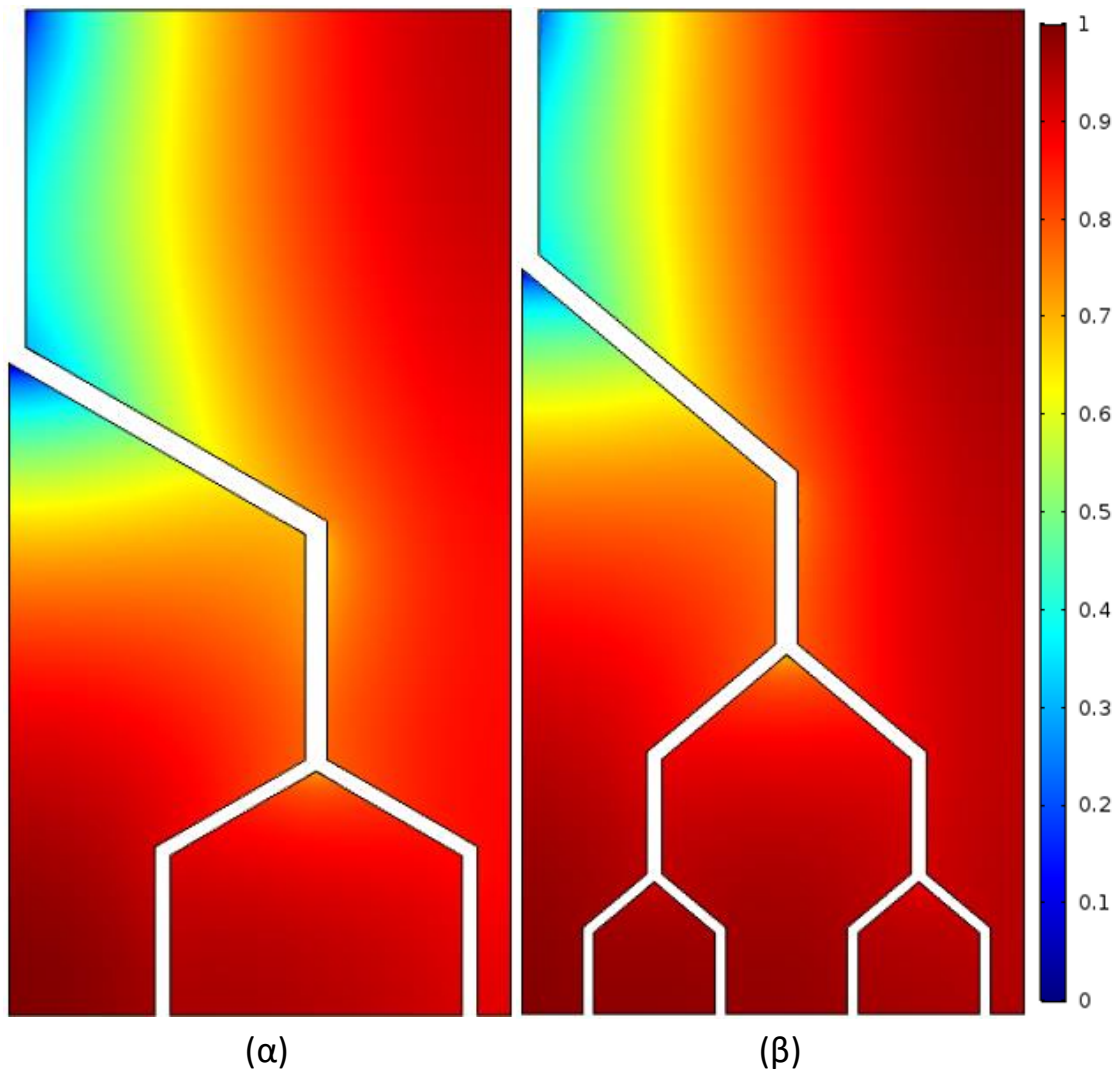
Πίνακας 4. 2: Μέση θερμοκρασία τοιχώματος, όγκου ρευστού, θερμοροής στο τοίχωμα, συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και θερμικής αντίστασης λόγω συναγωγής: σύγκριση όλων των διατάξεων

Μοντέλο	$T_{m,wall}$ (K)	$T_{m,bulk}$ (K)	$Q_{m,wall}$ (W/m <sup>2</sup> )	$h_m \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$	$R_{conv,m} \left( \frac{K}{W} \right)$
3L90	324.04	315.00	7868.70	870.43	0.0422
3L80	324.47	314.52	8176.00	821.71	0.0418
3L70	324.82	314.50	8459.40	819.71	0.0435
3L60	325.26	314.54	8749.10	816.15	0.0450
3L50	325.86	314.65	9079.30	809.93	0.0464
3L40	326.57	314.88	9470.10	810.10	0.0469
3L30	327.52	315.30	9972.00	816.04	0.0462
4L90	322.80	314.98	6466.00	826.85	0.0309
4L80	323.07	314.86	6688.40	814.67	0.0332
4L70	323.29	314.77	6871.90	806.56	0.0349
4L60	323.59	314.72	7077.50	797.91	0.0365
4L50	323.92	314.67	7352.10	794.82	0.0376
4L40	324.32	314.70	7753.70	806.00	0.0379
4L30	324.87	314.81	8350.90	830.11	0.0359

Πίνακας 4. 3: Επιφάνεια, όγκος και λυγρότητα καναλιών – αδιάστατη πτώση πίεσης, αντλητική δύναμη, μέσος αριθμός Nusselt και δείκτης απόδοσης: σύγκριση όλων των διατάξεων

Μοντέλο	$A$ (cm <sup>2</sup> )	$V$ (cm <sup>3</sup> )	$Sv$	$P_{pump}$ (W 10 <sup>-5</sup> )	$DP^*$	$Nu_m$	$\eta$
3L90	272.34	58.67	7.72	0.2702	15.88	8.704	0.652
3L80	291.46	55.71	7.86	0.2463	14.40	8.742	0.675
3L70	280.76	53.47	7.96	0.2288	13.47	8.650	0.685
3L60	272.34	51.61	8.06	0.2138	12.56	8.509	0.689
3L50	266.28	50.11	8.14	0.1985	11.67	8.253	0.685
3L40	263.20	49.02	8.20	0.1841	10.82	7.971	0.678
3L30	264.98	48.55	8.22	0.1698	9.98	7.541	0.659
4L90	391.08	66.53	7.40	0.2793	16.41	8.313	0.616
4L80	369.44	63.00	7.54	0.2582	15.17	8.303	0.631
4L70	355.18	60.41	7.65	0.2395	14.07	8.177	0.637
4L60	343.46	58.24	7.74	0.2236	13.14	8.010	0.639
4L50	334.18	56.43	7.82	0.2078	12.21	7.811	0.638
4L40	327.72	55.02	7.89	0.1927	11.32	7.592	0.636
4L30	336.00	54.16	7.93	0.1785	10.49	7.270	0.625

Από το Σχήμα 4. 12, προκύπτει ότι οι οποιοσδήποτε ανομοιομορφίες στη θερμοκρασία της πλάκας, οφείλονται στα θερμά σημεία (hot spots) που εμφανίζονται στα άκρα της, και στις ιδιαίτερα ψυχρές περιοχές στην είσοδο του καναλιού όπου η θερμοκρασία του νερού είναι η πιο χαμηλή και το δυναμικό μεταφοράς θερμότητας μέγιστο, όπως δείχνει και ο τοπικός αριθμός Nusselt στο κομμάτι της θερμικής ανάλυσης.



Σχήμα 4. 12: Κανονικοποιημένη θερμοκρασία για (α) 3 επίπεδα και  $\theta=60^\circ$  (β) 4 επίπεδα και  $\theta=50^\circ$

Εκτός από την τυπική απόκλιση, ακόμα μια τιμή του Πίνακα 4. 1 που αξίζει να σχολιαστεί, είναι η μέση θερμοκρασία της πλάκας που προκύπτει για το κάθε μοντέλο. Για τα 3 και 4 επίπεδα, καθώς αυξάνεται η γωνία της διακλάδωσης, αυξάνεται και η μέση

θερμοκρασία της πλάκας. Όμως, παρόλο που παρατηρείται η ίδια τάση και στις δύο περιπτώσεις αριθμών επιπέδων, οι θερμοκρασίες των τεσσάρων επιπέδων είναι στη κάθε αντίστοιχη περίπτωση γωνίας διακλάδωσης 2 βαθμούς μικρότερη για τα 4 επίπεδα.

Στον Πίνακα 4. 2, φαίνεται η μέση θερμική αντίσταση, λόγω συναγωγής, που προκύπτει για τη κάθε περίπτωση δενδριτικής διάταξης, καθώς και τα μεγέθη που απαιτούνται για τον υπολογισμό της. Το μέγεθος αυτό, όντας αντίσταση, είναι επιθυμητό να είναι όσο το δυνατό μικρότερο γίνεται. Όπως φαίνεται από τον πίνακα, η θερμική αντίσταση αυξάνεται καθώς μειώνεται η γωνία διακλάδωσης και ότι για τα 4 επίπεδα διακλάδωσης είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τα 3 επίπεδα. Όσον αφορά την αύξηση που προκύπτει καθώς μειώνεται η γωνία διακλάδωσης, αυτή οφείλεται στο ότι η επιφάνεια των τοιχωμάτων των καναλιών μειώνεται καθώς μειώνεται η γωνία διακλάδωσης λόγω των ειδικών περιορισμών που τίθενται από τα σχεδιαστικά κριτήρια κατά τη κατασκευή της γεωμετρίας και στο ότι η ενίσχυση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας εξασθενεί με τη μείωση της γωνίας  $\theta$ . Η μείωση της αντίστασης όταν αυξάνεται ο αριθμός των επιπέδων οφείλεται στη μεγαλύτερη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας των τοιχωμάτων των καναλιών που προκύπτει λόγω των επιπλέον διακλαδώσεων.

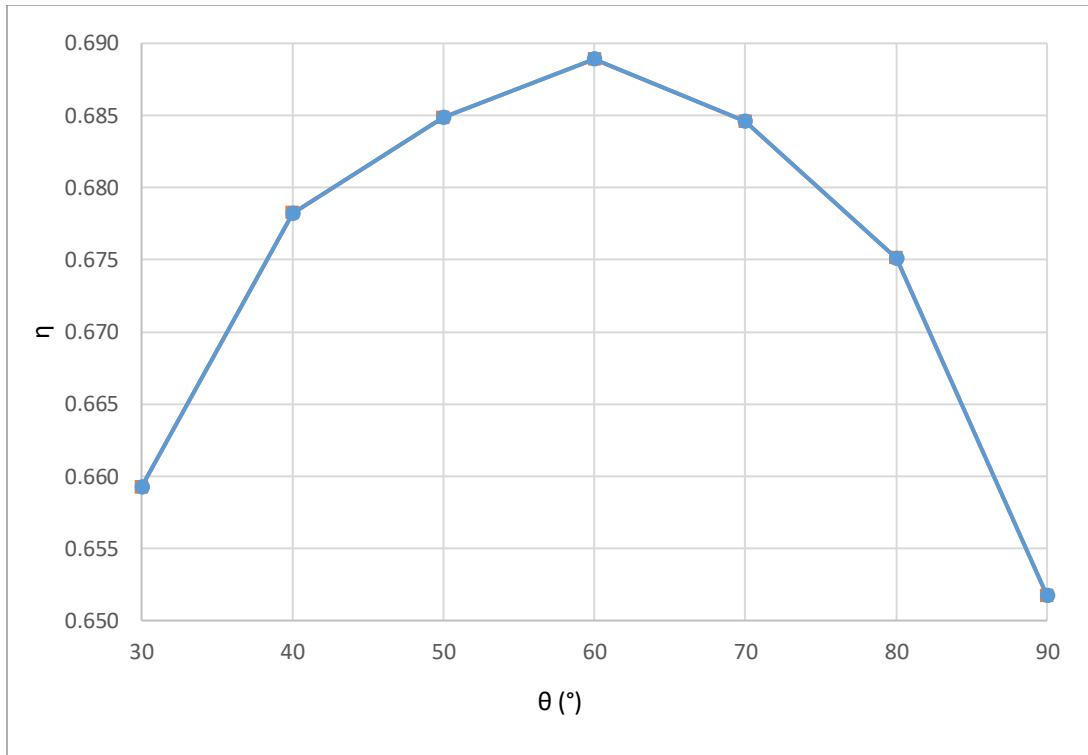
Στο Πίνακα 4. 3 παρουσιάζονται οι επιφάνειες των τοιχωμάτων των καναλιών και ο όγκος τους, καθώς και η λυγρότητα που έχει οριστεί στο πρώτο κεφάλαιο από τη σχέση 1.1. Όπως έχει προσδιοριστεί και από τον Adrian Bejan [31], [33], το αδιάστατο μέγεθος  $Sv$  είναι ένα μέτρο για το πόσο συνεισφέρουν οι τοπικές πτώσεις, που προκύπτουν από τη διαταραχή της ροής και τις δευτερογενείς ροές, στη συνολική πτώση πίεσης στον αγωγό. Έχει προσδιοριστεί ότι για  $Sv > 10$ , η συνεισφορά των διαταραχών της ροής στη συνολική πτώση πίεσης, είναι αμελητέες. Όπως φαίνεται από τον πίνακα αυτό, το μέγεθος  $Sv$  είναι πάντα μικρότερο του 10, που σημαίνει ότι η πτώση πίεσης στα σημεία διαταραχής της ροής δεν μπορεί να αγνοηθεί, όπως διαπιστώνεται και από τα διαγράμματα 4. 5 - 4. 8 που απεικονίζουν τις πτώσεις πίεσης κατά μήκος των καναλιών.

Από τον Πίνακα 4. 1 και τα σχήματα 4. 5 - 4. 8, επιβεβαιώνεται η θεωρία του Bejan που αναφέρει ότι καθώς αυξάνεται το μέγεθος  $Sv$ , ο λόγος  $\Delta P_{local}/\Delta P_{tot}$  προσεγγίζει το μηδέν. Πράγματι για τις μικρότερες γωνίες διακλάδωσης, όπου μειώνεται ο όγκος των καναλιών, οι αυξομειώσεις στη πίεση λόγω της διαταραχής της ροής γίνονται σχεδόν αμελητέες.

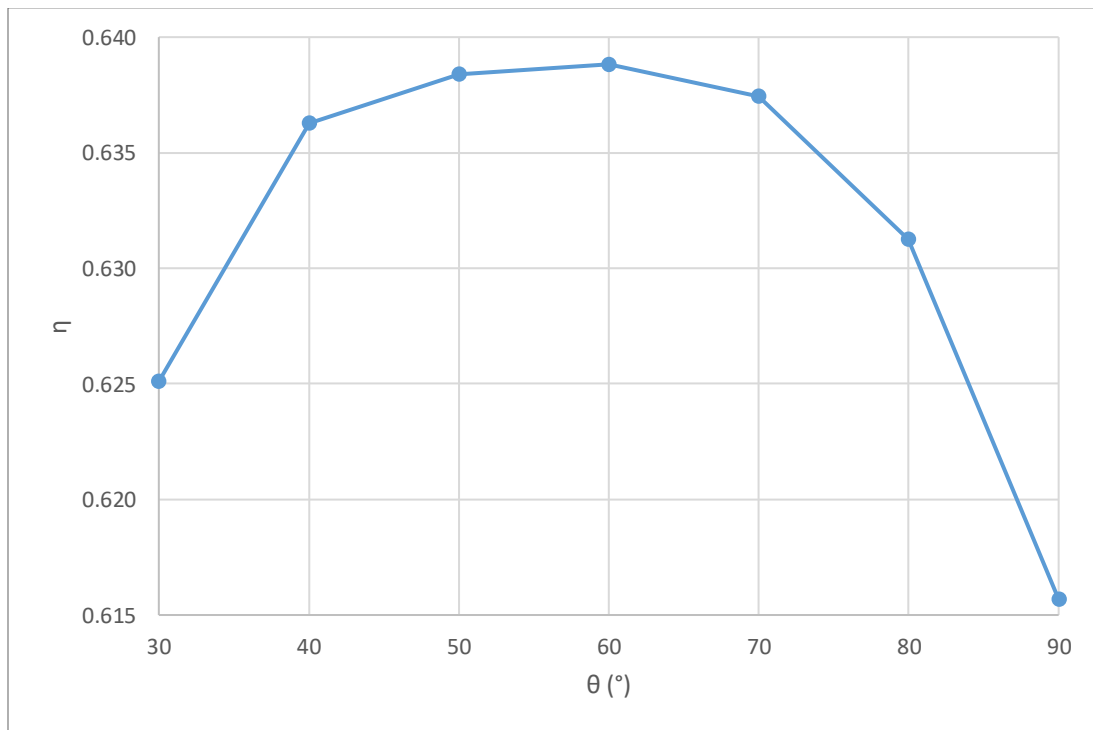
Ακολουθεί η σύγκριση της ισχύος άντλησης που απαιτείται για τη μετακίνηση του ρευστού από το κανάλι εισόδου στα πολλαπλά κανάλια εξόδου των διατάξεων. Γίνεται αμέσως εμφανές, ότι καθώς μειώνεται η γωνία διακλάδωσης, μειώνεται και η απαιτούμενη ισχύς άντλησης. Η πρόσκρουση σε τοιχώματα γίνεται λιγότερο έντονη και έτσι τα φαινόμενα δευτερογενούς ροής εξασθενούν και η επιπλέον ενέργεια που χρειάζεται για την υπερνίκηση των φαινομένων αυτών μειώνεται ανάλογα με τη γωνία  $\theta$ . Όσον αφορά τα επίπεδα διακλάδωσης, για τα 4 επίπεδα χρειάζεται απαιτείται ελαφρώς μόνο πιο αυξημένη ισχύς για τη κάθε γωνία διακλάδωσης σε σχέση με τα 3 επίπεδα.

Υπολογίζεται επίσης, ο μέσος αριθμός Nusselt που προκύπτει από όλους τους επιμέρους αριθμούς  $Nu$  που προκύπτουν κατά μήκος της κάθε διάταξης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στη προτελευταία στήλη του Πίνακα 4. 3. Όμοια με την τάση αρκετών από τα άλλα μεγέθη που έχουν αναλυθεί, ο μέσος αριθμός Nusselt, μειώνεται καθώς μειώνεται η γωνία διακλάδωσης και σε γενικές γραμμές είναι ελαφρώς μεγαλύτερος στη περίπτωση των τριών επιπέδων.

Βάσει της αδιάστατης πτώσης πίεσης και του αριθμού Nusselt υπολογίζεται και ο συνολικός δείκτης απόδοσης που δίνεται από τη σχέση 4.4. Ο δείκτης απόδοσης αποτελεί ένα συνδυαστικό μέτρο για τον υπολογισμό της απόδοσης συναρτήσει της γωνίας διακλάδωσης και η τιμή του για κάθε ομάδα επιπέδων δίνεται διαγραμματικά στα σχήματα 4. 13 και 4. 14. Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται και διαμορφώνεται με το σκεπτικό ότι υπάρχει κάποια βέλτιστη γωνία διακλάδωσης για την οποία η συνδυαστική θερμική και υδροδυναμική απόδοση του συστήματος βελτιστοποιείται.



Σχήμα 4. 13: Δείκτης απόδοσης συναρτήσει της γωνία διακλάδωσης για 3 επίπεδα διακλάδωσης



Σχήμα 4. 14: Δείκτης απόδοσης συναρτήσει της γωνίας διακλάδωσης για 4 επίπεδα διακλάδωσης

Στα δύο προηγούμενα σχήματα φαίνεται καθαρά η γωνία διακλάδωσης για την οποία μεγιστοποιείται η απόδοση του συστήματος, βάσει του δείκτη που χρησιμοποιείται. Για την περίπτωση των τριών επιπέδων διακλάδωσης, η γωνία,  $\theta$ , για την οποία το  $\eta$  είναι μέγιστο αντιστοιχεί στις  $60^\circ$  και για τα 4 επίπεδα διακλάδωσης επίσης στις  $60^\circ$ . Για τα 3 επίπεδα είναι πιο ευκρινής η τιμή της βέλτιστης γωνίας διακλάδωσης καθώς η σχετική διαφορά της απόδοσης της αμέσως μικρότερης γωνίας είναι αρκετά μεγάλη. Στην περίπτωση όμως των 4 επιπέδων η απόδοση των  $60^\circ$  και  $50^\circ$  είναι κοντά αλλά στις  $50^\circ$  υπάρχει μικρότερη πτώση πίεσης. Λόγω αυτού, η βέλτιστη γωνία στα 4 επίπεδα μπορεί να θεωρηθεί αυτή των  $50^\circ$ .

Παρόλο που κάποιες άλλες γωνίες διακλάδωσης έχουν μεγαλύτερη ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας, η ποινή της πτώσης πίεσης είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να μειώσει τη συνολική απόδοση της διάταξης.

Ακόμα μια παράμετρος που τέθηκε προς διερεύνηση για να βρεθεί πως επηρεάζει τη συνολική απόδοση του συστήματος, είναι η τιμή της σταθεράς  $E$ , στη σχέση που προέρχεται από το δομικό νόμο:  $\frac{L_{i+1}}{L_k} = n^{-\frac{1}{E}}$ . Για τις γεωμετρίες που έχουν παρουσιαστεί και αναλυθεί, ως το σημείο αυτό του κεφαλαίου, η σταθερά  $E$  ήταν ίση με 2. Η αλλαγή της τιμής από  $E = 2$  σε  $E = 3$ , οδηγεί σε μεγαλύτερα κάθετα μήκη  $L_i$  στις διατάξεις. Θεωρητικά και αυτή η τιμή έχει βρεθεί ότι είναι ιδανική για τέτοιες δενδριτικές διατάξεις [31].

Οι δενδριτικές διατάξεις που φαίνονται στα σχήματα 4. 1 και 4. 2 κατασκευάζονται και πάλι αλλά αυτή τη φορά με την καινούρια τιμή για τη σταθερά  $E$ . Τα διαγράμματα της αδιάστατης πτώσης πίεσης και του αριθμού Nusselt είναι παρόμοια σε μορφή με τα αυτά που έχουν παρουσιαστεί για τις προηγούμενες διατάξεις και για αυτό το λόγο θα παραληφθεί η παρουσίαση τους. Θα γίνει ωστόσο, εστίαση στα μεγέθη που έχουν παρουσιαστεί στους πίνακες 4. 1 μέχρι και 4. 3 για τις καινούριες διατάξεις με  $E = 3$ . Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται στους πίνακες 4. 4 μέχρι και 4. 6 και περιλαμβάνουν τους δείκτες απόδοσης και τα συμπεράσματα από της σύγκριση των δύο σταθερών  $E$ .



Πίνακας 4. 4: Μέση θερμοκρασία πλάκας αλουμινίου και τυπική απόκλιση του πεδίου θερμοκρασίας για  $E = 3$  : σύγκριση όλων των διατάξεων

Μοντέλο	$T_{m,al}$ (K)	$\frac{(T_{m,al} - T_i)^2}{N}$	SD (K)
3L90	324.37	1.41	1.19
3L80	324.76	1.27	1.13
3L70	325.15	1.26	1.12
3L60	325.65	1.28	1.13
3L50	326.32	1.30	1.14
3L40	327.13	1.41	1.19
3L30	328.23	1.60	1.27
4L90	322.49	1.86	1.36
4L80	322.85	1.54	1.24
4L70	323.15	1.40	1.18
4L60	323.53	1.25	1.12
4L50	323.97	1.14	1.07
4L40	324.51	1.06	1.03
4L30	325.28	1.05	1.02

Πίνακας 4. 5: Μέση θερμοκρασία τοιχώματος, όγκου ρευστού, θερμοροής στο τοίχωμα, συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και θερμικής αντίστασης συναγωγής για  $E = 3$ : σύγκριση όλων των διατάξεων

Μοντέλο	$T_{m,wall}$ (K)	$T_{m,bulk}$ (K)	$Q_{m,wall}$ ( $W/m^2$ )	$h_m \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$	$R_{conv,m} \left( \frac{K}{W} \right)$
3L90	323.91	314.80	7832.20	859.74	0.0369
3L80	324.23	314.61	8057.60	837.59	0.0399
3L70	324.59	314.58	8325.90	831.76	0.0418
3L60	325.05	314.61	8611.50	824.86	0.0435
3L50	325.67	314.70	8938.10	814.78	0.0452
3L40	326.43	314.91	9354.30	812.01	0.0461
3L30	327.44	315.29	9909.20	815.57	0.0460
4L90	322.50	315.08	6336.70	854.00	0.0285
4L80	322.78	314.98	6507.40	834.28	0.0308
4L70	323.02	314.90	6666.10	820.95	0.0326
4L60	323.33	314.83	6852.80	806.21	0.0345
4L50	323.68	314.78	7124.30	800.48	0.0359
4L40	324.12	314.76	7550.80	806.71	0.0367
4L30	324.76	314.83	8241.80	829.99	0.0365

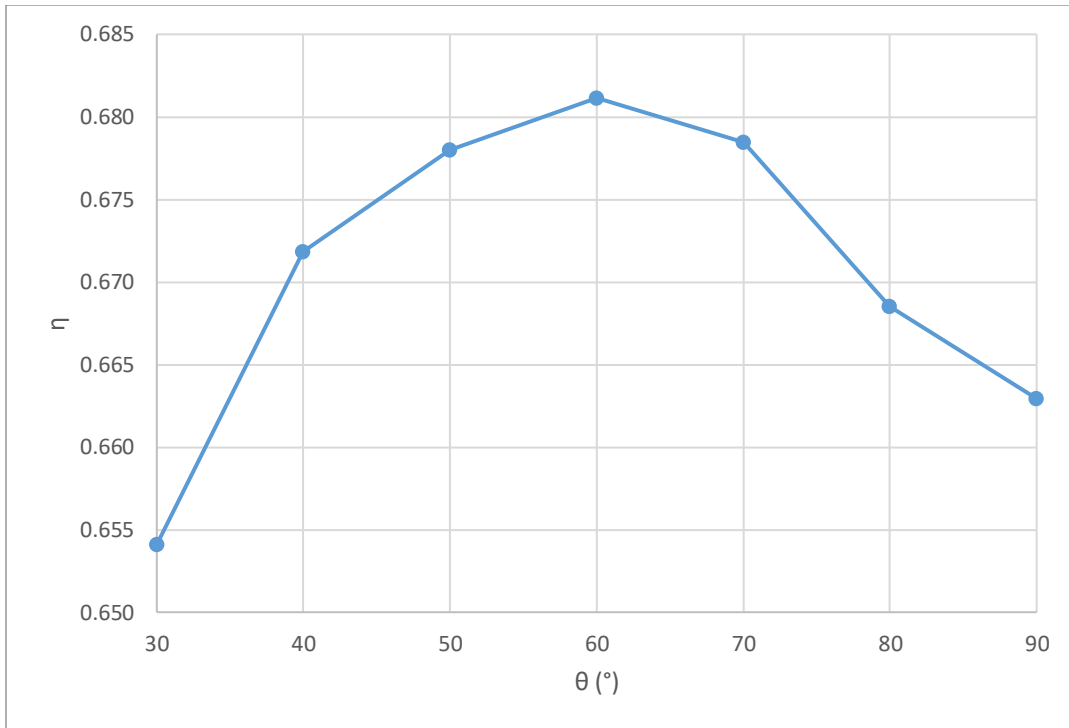
Πίνακας 4. 6: Επιφάνεια, όγκος και λυγρότητα καναλιών – αδιάστατη πτώση πίεσης, αντλητική δύναμη, μέσος αριθμός Nusselt και δείκτης απόδοσης για  $E = 3$ : σύγκριση όλων των διατάξεων

<b>Μοντέλο</b>	<b><math>A</math> (<math>cm^2</math>)</b>	<b><math>V</math> (<math>cm^3</math>)</b>	<b><math>Sv</math></b>	<b><math>P_{pump}</math> (<math>W 10^{-5}</math>)</b>	<b><math>Nu_m</math></b>	<b><math>DP^*</math></b>	<b><math>\eta</math></b>
<b>3L90</b>	315.10	59.55	7.68	0.2687	8.8368	15.790	0.663
<b>3L80</b>	299.06	56.54	7.82	0.2486	8.6835	14.611	0.669
<b>3L70</b>	287.66	54.22	7.93	0.2307	8.5965	13.560	0.678
<b>3L60</b>	278.46	52.28	8.02	0.2157	8.4383	12.675	0.681
<b>3L50</b>	271.42	50.68	8.11	0.1998	8.1878	11.741	0.678
<b>3L40</b>	267.02	49.45	8.17	0.1849	7.9058	10.863	0.672
<b>3L30</b>	266.80	48.75	8.21	0.1700	7.4849	9.989	0.654
<b>4L90</b>	411.46	68.54	7.33	0.2829	8.1773	16.624	0.603
<b>4L80</b>	389.16	64.94	7.46	0.2615	8.1507	15.366	0.617
<b>4L70</b>	373.10	62.18	7.57	0.2424	8.0422	14.247	0.624
<b>4L60</b>	359.32	59.80	7.67	0.2257	7.8697	13.264	0.626
<b>4L50</b>	347.50	57.74	7.76	0.2100	7.6875	12.339	0.626
<b>4L40</b>	337.64	55.99	7.84	0.1944	7.4796	11.424	0.625
<b>4L30</b>	330.32	54.63	7.91	0.1793	7.1845	10.536	0.617

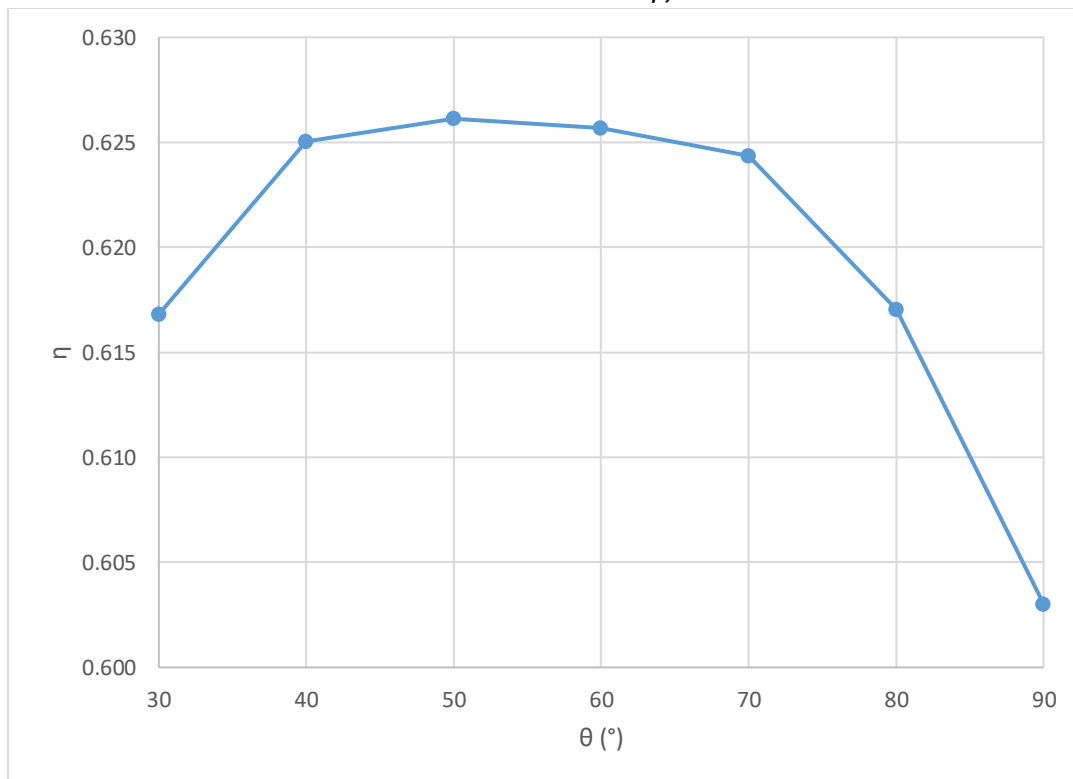
Αρχικά, όσον αφορά τη μέση θερμοκρασία της πλάκας αλουμινίου, παρατηρείται μια ελάχιστη μείωση στη περίπτωση όπου  $E = 3$ , αλλά οι τυπικές αποκλίσεις που ορίζουν την ομοιομορφία της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερες σε όλες τις περιπτώσεις του καινούριου  $E$ .

Η αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας, λόγω συναγωγής, φαίνεται να είναι μικρότερη στην περίπτωση του καινούριου  $E$ , αλλά αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι σε αυτά τα κανάλια η επιφάνεια των τοιχωμάτων είναι αρκετά μεγαλύτερη. Ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι μικρότερος σε κάθε μοντέλο για  $E = 3$  και η ίδια τάση, ισχύει και για τον μέσο αριθμό Nusselt.

Η αδιάστατη πτώση πίεσης είναι ελαφρώς μεγαλύτερη σε κάθε μοντέλο για  $E = 3$  και οι δείκτες απόδοσης που φαίνονται στα σχήματα 4. 15 και 4. 16 είναι επίσης μικρότεροι λόγω του χαμηλότερου μέσου αριθμού Nusselt και της συνολικής αδιάστατης πτώσης πίεσης. Το αδιάστατο μέγεθος  $Sv$  είναι επίσης ελαφρώς μεγαλύτερο, που δικαιολογεί και την ελαφρώς μεγαλύτερη πτώση πίεσης.



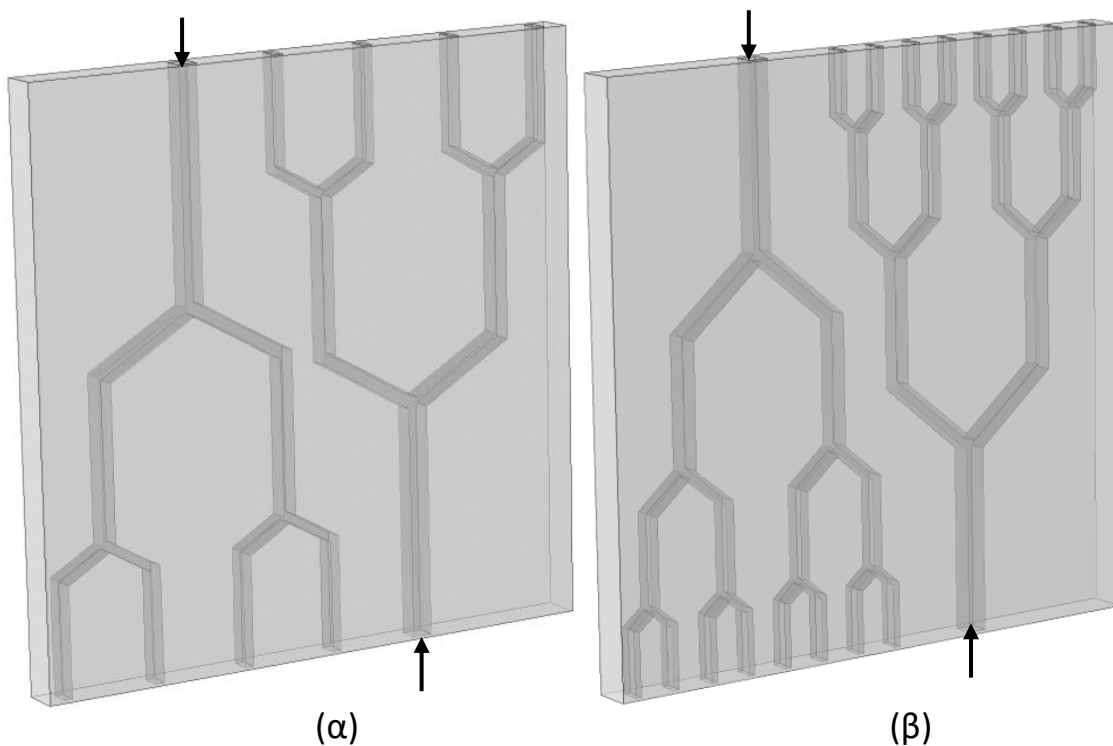
Σχήμα 4. 15: Δείκτης απόδοσης συναρτήσει της γωνία διακλάδωσης για 3 επίπεδα διακλάδωσης και  $E = 3$



Σχήμα 4. 16: Δείκτης απόδοσης συναρτήσει της γωνία διακλάδωσης για 4 επίπεδα διακλάδωσης και  $E = 3$

#### 4.5. Πλήρης γεωμετρία με δύο αντιπαράλληλες δενδριτικές διατάξεις

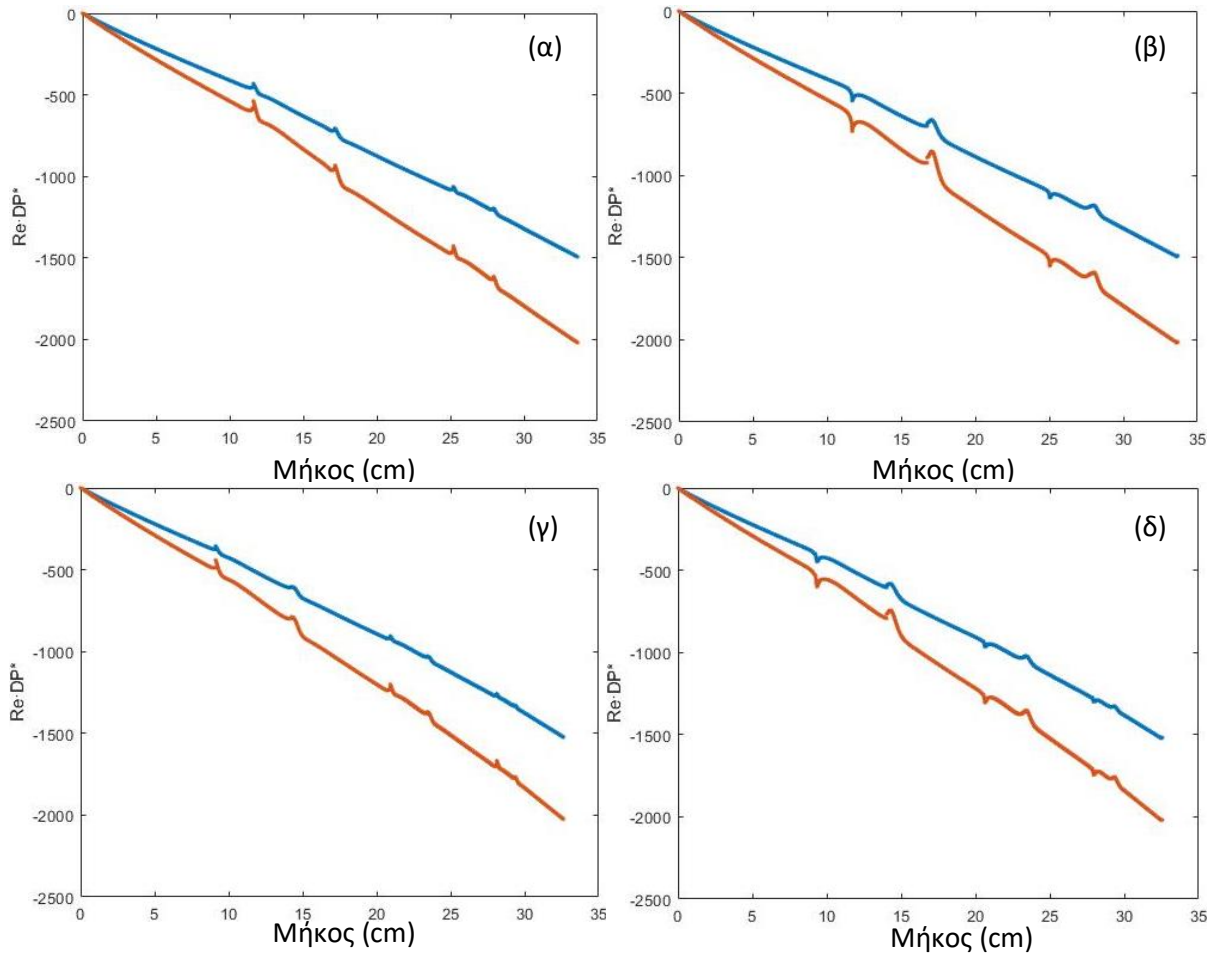
Εφόσον έχουν προσδιοριστεί, βάσει της ανάλυσης του προηγούμενου υποκεφαλαίου, οι βέλτιστες γωνίες διακλάδωσης για κάθε περίπτωση αριθμού επιπέδων, κατασκευάζονται διατάξεις που περιέχουν δύο αντιπαράλληλα τοποθετημένες δενδριτικές διαμορφώσεις, ενσωματωμένες σε τετραγωνική πλάκα αλουμινίου, ίδιων διαστάσεων και συνοριακών συνθηκών με αυτή της ανάλυσης του προηγούμενου υποκεφαλαίου. Οι διατάξεις που κατασκευάζονται φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 4. 17: Σχηματική αναπαράσταση τριδιάστατων αντιπαράλληλων διακλαδούμενων καναλιών με τις βέλτιστες μονάδες για (α) 3 επίπεδα και (β) 4 επίπεδα διακλάδωσης

Οι διατάξεις αυτές λύνονται για την περίπτωση όπου η συνολική παροχή είναι ίδια με την περίπτωση του ενός καναλιού και μοιράζεται στα δύο αντιπαράλληλα κανάλια και για την περίπτωση όπου η παροχή είναι διπλάσια στην όλη διάταξη. Δηλαδή σε κάθε δενδριτική μονάδα, ο αριθμός Reynolds στην είσοδο είναι 75 για την πρώτη περίπτωση

και 150 για τη δεύτερη. Σκοπός της συγκεκριμένης γεωμετρίας είναι να φανεί αν μπορεί να μειωθεί και άλλο η ανομοιομορφία της θερμοκρασίας στη πλάκα αλουμινίου και να αυξηθεί η συνολική απόδοση του συστήματος. Για την κατασκευή της γεωμετρίας αυτής και την προσθήκη δύο δενδριτικών μονάδων στην απορροφητική επιφάνεια που έχει επιλεγεί, το συνολικό πλάτος (βλ. Σχήμα 1. 28) της κάθε μονάδας σχεδόν υποδιπλασιάζεται για να μην υπάρχει συμβολή των αντιπαράλληλων καναλιών.

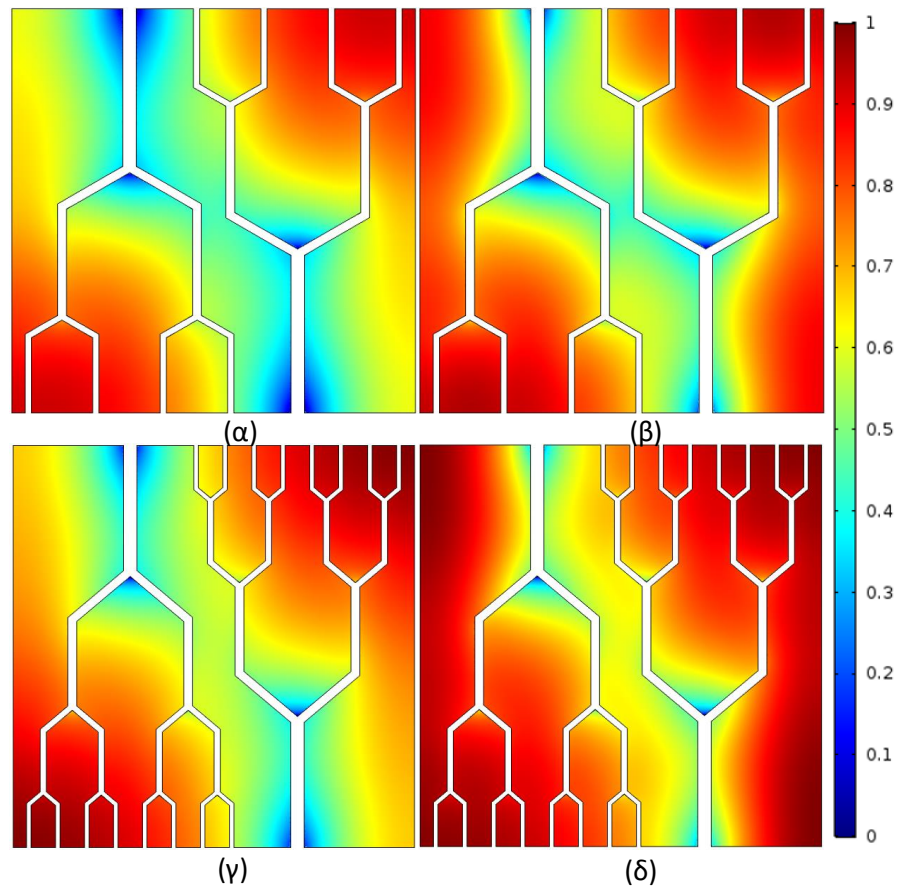


Σχήμα 4. 18: Αδιάστατη πτώση πίεσης πολλαπλασιασμένη με τον αριθμό Reynolds στη διάταξη αντιπαράλληλων διακλαδούμενων καναλιών για αριθμούς Reynolds 75 (μπλε γραμμή) και 150 (πορτοκαλί γραμμή) στο (α) κέντρο του αγωγού – 3 επίπεδα διακλάδωσης (β) εξωτερικό τοίχωμα – 3 επίπεδα διακλάδωσης (γ) κέντρο του αγωγού – 4 επίπεδα διακλάδωσης (δ) εξωτερικό τοίχωμα – 4 επίπεδα διακλάδωσης

Αρχικά, παρουσιάζεται η αδιάστατη πτώση πίεσης πολλαπλασιασμένη με τον αριθμός Reynolds στην είσοδο του καναλιού για την κάθε περίπτωση. Όπως φαίνεται

από το Σχήμα 4. 18, η πτώση πίεσης έχει παρόμοια συμπεριφορά με τις αντίστοιχες περιπτώσεις των διατάξεων που περιέχουν μόνο μια δενδριτική μονάδα, όπως φαίνεται στα σχήματα 4. 6 και 4. 7.

Η πιο σημαντική διαφορά, είναι ότι το συνολικό μήκος που διανύει το ρευστό από την είσοδο μέχρι την έξοδο είναι μικρότερο στις διατάξεις όπου υπάρχουν 2 δενδριτικές διατάξεις, γεγονός που οφείλεται στο ότι τα μήκη  $WL_i$  (βλ. Σχήμα 1. 28) είναι μικρότερα επειδή το συνολικό πλάτος της κάθε δενδριτικής μονάδας είναι μικρότερο.



Σχήμα 4. 19: Κανονικοποιημένη θερμοκρασία σε επίπεδο  $xz$  στο  $y=0.5$  για την περίπτωση (α) 3 επιπέδων και  $Re=75$  (β) 3 επιπέδων και  $Re=150$  (γ) 4 επιπέδων και  $Re=75$  (δ) 4 επιπέδων και  $Re=150$

Στους πίνακες του συγκεκριμένου υποκεφαλαίου, τα μοντέλα έχουν συγκεκριμένες ονομασίες που αντιστοιχούν στη κάθε διάταξη. Το 2B στην αρχή του ονόματος αντιστοιχεί στο ότι υπάρχουν δύο μονάδες διακλαδούμενων καναλιών, το 3L και 4L, όμοια με τις προηγούμενες ονομασίες, αντιστοιχούν στα 3 και 4 επίπεδα διακλάδωσης

και ο επόμενος διψήφιος αριθμός αντιστοιχεί στη γωνία διακλάδωσης,  $\theta$ . Ο αριθμός Reynolds που αντιστοιχεί στην είσοδο κάθε δενδριτικής μονάδας φαίνεται στη δεύτερη στήλη των πινάκων.

Πίνακας 4. 7: Μέση θερμοκρασία πλάκας αλουμινίου και τυπική απόκλιση του πεδίου θερμοκρασίας για 2 αντιπαράλληλα διακλαδούμενα κανάλια

Μοντέλο	Re	$T_{m,al}$ (K)	$\frac{(T_{m,al} - T_i)^2}{N}$	SD (K)
2B_3L60	75	324.30	0.56	0.75
2B_3L60	150	310.56	0.23	0.48
2B_4L50	75	323.07	0.57	0.75
2B_4L50	150	309.32	0.18	0.42

Από τον Πίνακα 4. 7 φαίνεται αρχικά, ότι οι συγκεκριμένες γεωμετρίες, έχουν ακόμα καλύτερη ομοιομορφία, όσον αφορά το πεδίο θερμοκρασίας και στις δύο περιπτώσεις αριθμού Reynolds. Συγκεκριμένα, για αριθμό Reynolds ίσο με 75, και οι δύο βέλτιστες διατάξεις αποδίδουν το ίδιο στην ομοιομορφία της θερμοκρασίας της πλάκας αλουμινίου. Στην περίπτωση που ο αριθμός Reynolds είναι ίσος με 150, η τυπική απόκλιση γίνεται λιγότερη από 0.5, που είναι αρκετά καλύτερα από τις διατάξεις όπου υπάρχει μόνο ένα διακλαδούμενο κανάλι. Η ενισχυμένη ομοιομορφία της θερμοκρασίας της πλάκας φαίνεται επίσης από την κανονικοποιημένη θερμοκρασία που διαγράφεται σε επιφάνεια της πλάκας για κάθε περίπτωση, στο Σχήμα 4. 19. Από το ίδιο σχήμα, αξίζει να αναφερθεί και το ότι οι χαμηλότερες θερμοκρασίες, παρατηρούνται στην είσοδο των καναλιών αλλά και στο σημείο της πρώτης διακλάδωσης, όπου είναι πιο έντονο το φαινόμενο δευτερογενούς ροής στις δενδριτικές διατάξεις.

Πίνακας 4. 8: Μέση θερμοκρασία τοιχώματος, όγκου ρευστού, θερμοροής στο τοίχωμα, συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και θερμικής αντίστασης λόγω συναγωγής για 2 αντιπαράλληλα διακλαδούμενα κανάλια

Μοντέλο	Re	$T_{m,wall}$ (K)	$T_{m,bulk}$ (K)	$Q_{m,wall}$ (W/m <sup>2</sup> )	$h_m \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$	$R_{conv,m} \left( \frac{K}{W} \right)$
2B_3L60	75	324.12	315.67	5778.50	683.85	0.0310
2B_3L60	150	310.31	303.84	5316.80	821.76	0.0258
2B_4L50	75	323.08	315.94	4984.90	698.17	0.0242
2B_4L50	150	309.17	303.80	4421.70	823.41	0.0205

Από τον Πίνακα 4. 8 προκύπτει ότι στην περίπτωση που η συνολική παροχή είναι ίδια (δηλ.  $Re=75$  σε κάθε μονάδα), υπάρχει μια μικρή μείωση στη μέση θερμοκρασία της πλάκας, και της μέσης θερμικής αντίστασης λόγω συναγωγής σε σχέση με τις περιπτώσεις όπου υπάρχει μόνο ένα διακλαδούμενο κανάλι ενσωματωμένο στη πλάκα.

Πίνακας 4. 9: Επιφάνεια, όγκος και λυγρότητα καναλιών – αδιάστατη πτώση πίεσης, αντλητική δύναμη, μέσος αριθμός Nusselt και δείκτης απόδοσης για 2 αντιπαράλληλα διακλαδούμενα κανάλια

Μοντέλο	$Re$	$A (cm^2)$	$V (cm^3)$	$Sv$	$P_{pump} (W 10^{-5})$	$DP^*$	$Nu_m$	$\eta$
<b>2B_3L60</b>	<b>75</b>	472.20	91.03	8.40	0.0847	19.91	6.409	0.561
<b>2B_3L60</b>	<b>150</b>	472.20	91.03	8.40	0.4581	13.46	8.024	0.635
<b>2B_4L50</b>	<b>75</b>	592.74	50.67	8.11	0.0864	20.30	6.021	0.523
<b>2B_4L50</b>	<b>150</b>	592.74	50.67	8.11	0.4591	13.49	7.135	0.564

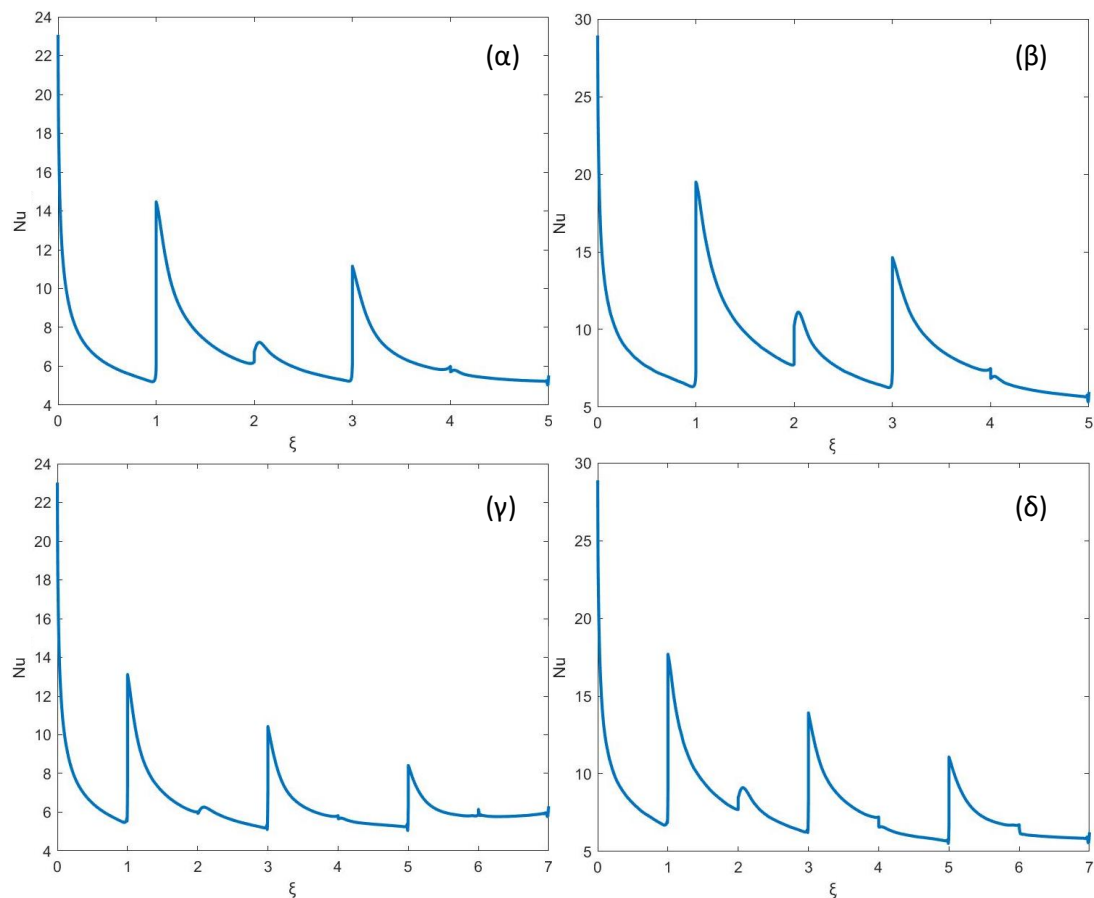
Στον Πίνακα 4. 9, φαίνεται ότι η ισχύς άντλησης είναι μεγαλύτερη στις διατάξεις που υπάρχουν δύο μονάδες διακλαδούμενων καναλιών. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού ακόμα και στη περίπτωση όπου η συνολική παροχή είναι η ίδια με τις διατάξεις του προηγούμενο υποκεφαλαίου, υπάρχει μεγαλύτερη πτώση πίεσης. Ο δείκτης απόδοσης των διατάξεων αυτών φαίνεται να είναι μικρότερος από αυτόν της περίπτωσης όπου υπάρχει μόνο ένα διακλαδούμενο κανάλι ενσωματωμένο στη πλάκα. Αυτή η μείωση που παρατηρείται στο δείκτη απόδοσης, ενδέχεται να οφείλεται στους εξής λόγους:

1. Μείωση του μήκους  $AL_i$  (βλ. Σχήμα 1. 28) μετά τις διακλαδώσεις  $\Upsilon$  η οποία οδηγεί στη μείωση του μέσου αριθμού Nusselt. Αυτό συμβαίνει διότι όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα που παρουσιάζονται οι αριθμοί Nusselt, η πρόσκρουση του ρευστού στις διακλαδώσεις  $T$  και  $\Upsilon$  και οι αντίστοιχες δευτερογενείς ροές ενισχύουν πιο σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας στα κανάλια από τις αντίστοιχες στροφές ( $180^\circ - \theta^\circ$ ). Στη περίπτωση που υπάρχουν δύο δενδριτικές διατάξεις, το μήκος  $AL_i$  γίνεται πιο μικρό διότι προσαρμόζεται στο καινούριο συνολικό πλάτος  $W_{tot}$  του κάθε καναλιού. Αντίθετα, επειδή το συνολικό μήκος του καναλιού  $L_{tot}$  παραμένει σταθερό, οι μονάδες που αντιστοιχούν στις στροφές της ροής, διατηρούν του ίδιο μήκος. Κατά συνέπεια, εξασθενεί η συμβολή των διακλαδώσεων  $T$  και  $\Upsilon$  στο μέσο



αριθμό Nusselt με αποτέλεσμα να είναι μικρότερος από τις αντίστοιχες διατάξεις μιας δενδριτικής μονάδας.

2. Στη περίπτωση όπου η συνολική παροχή είναι η ίδια ( $Re=75$ ), η δευτερογενής ροή που αναπτύσσεται σε κάθε σημείο διαταραχής της ροής είναι ασθενέστερη από την αντίστοιχη περίπτωση που το  $Re=150$  σε κάθε μονάδα. Η μείωση της ενίσχυσης μεταφοράς θερμότητας μειώνει λοιπόν το μέσο αριθμό Nusselt και το όφελος που προκύπτει από τη μικρότερη πτώση πίεσης δεν είναι αρκετό για να καλύψει την πτώση του Nusselt (δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην ενίσχυση μεταφοράς θερμότητας από την πτώση πίεσης). Αυτό μπορεί να φανεί και από το Σχήμα 4. 20, όπου η ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας για  $Re=150$  είναι πιο σημαντική σε σχέση με αυτή των  $Re=75$ .



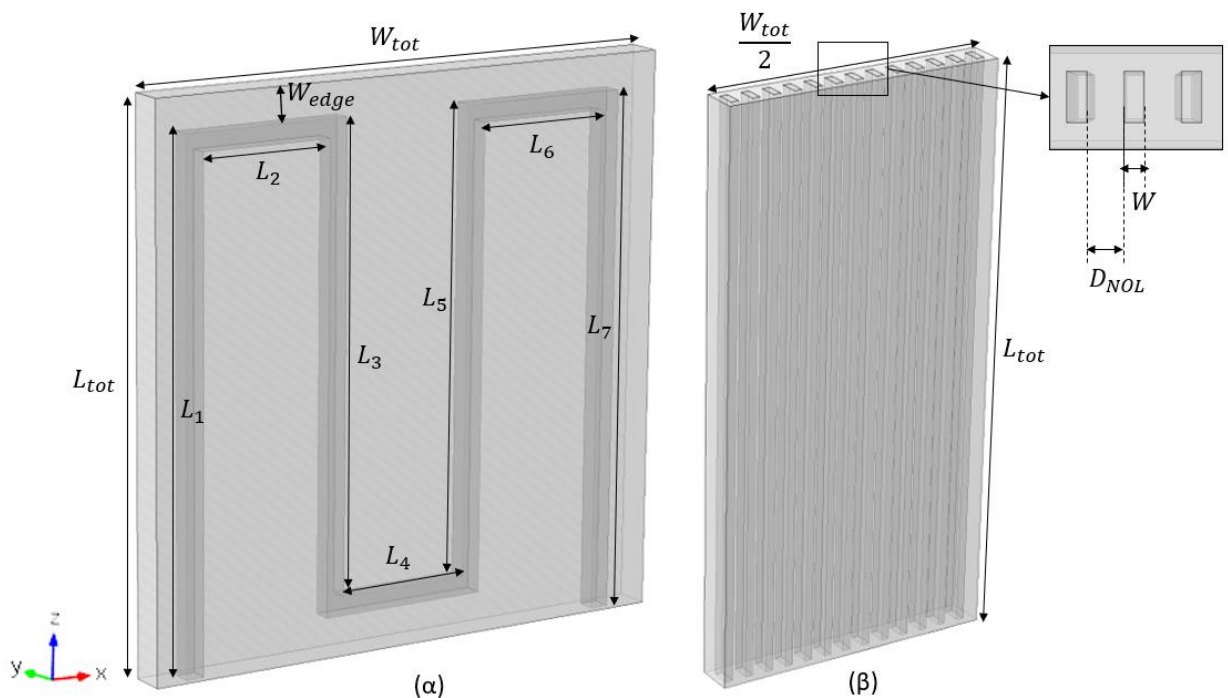
Σχήμα 4. 20: Αριθμός Nusselt κατά μήκος της ροής για (α)  $Re=75$  και 3 επίπεδα διακλάδωσης (β)  $Re=150$  και 3 επίπεδα διακλάδωσης (γ)  $Re=75$  και 4 επίπεδα διακλάδωσης (δ)  $Re=150$  και 4 επίπεδα διακλάδωσης

# Κεφάλαιο 5: Σύγκριση Διάταξης Διακλαδούμενων Καναλιών Με Άλλες Διατάξεις Απαγωγής Θερμότητας

## 5.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η σύγκριση των βέλτιστων διατάξεων που έχουν βρεθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, με τις πιο συνήθεις διατάξεις που έχουν ήδη μελετηθεί και χρησιμοποιούνται στη πράξη, για να προσδιοριστεί κατά πόσο οι συγκεκριμένες γεωμετρικές υπερτερούν ή υστερούν σε σύγκριση με εκείνες. Οι διατάξεις με τις οποίες θα γίνει η σύγκριση, φαίνονται στο Σχήμα 5. 1.

Η πρώτη διάταξη, αντιστοιχεί σε κανάλι τύπου μαιάνδρου με 4 περάσματα, το οποίο και καλύπτει όλη τη πλάκα. Το κανάλι στη διάταξη (α) είναι τετραγωνικής διατομής με διαστάσεις  $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  και είναι φτιαγμένο έτσι ώστε να υπάρχει απόσταση  $W_{edge} = 2\text{ cm}$  μεταξύ του καναλιού και της επιφάνειας τη πλάκας, όπως φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 5. 1: Τριδιάστατη αναπαράσταση των διατάξεων (α) μαιάνδρου 4 περασμάτων και (β) ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών

Τα μεγέθη  $L_1$  και  $L_7$  είναι ίσα μεταξύ τους, όπως επίσης και το  $L_3$  με το  $L_5$ . Οι αποστάσεις  $L_2, L_4$  και  $L_6$  είναι επίσης ίσες μεταξύ τους και η διαμόρφωση του καναλιού βρίσκεται ενσωματωμένη στο κέντρο της πλάκας αλουμινίου, που έχει τις ίδιες διαστάσεις με αυτές της διάταξης των διακλαδούμενων καναλιών. Βάσει αυτών των περιορισμών, κατασκευάζεται η διάταξη μαιάνδρου.

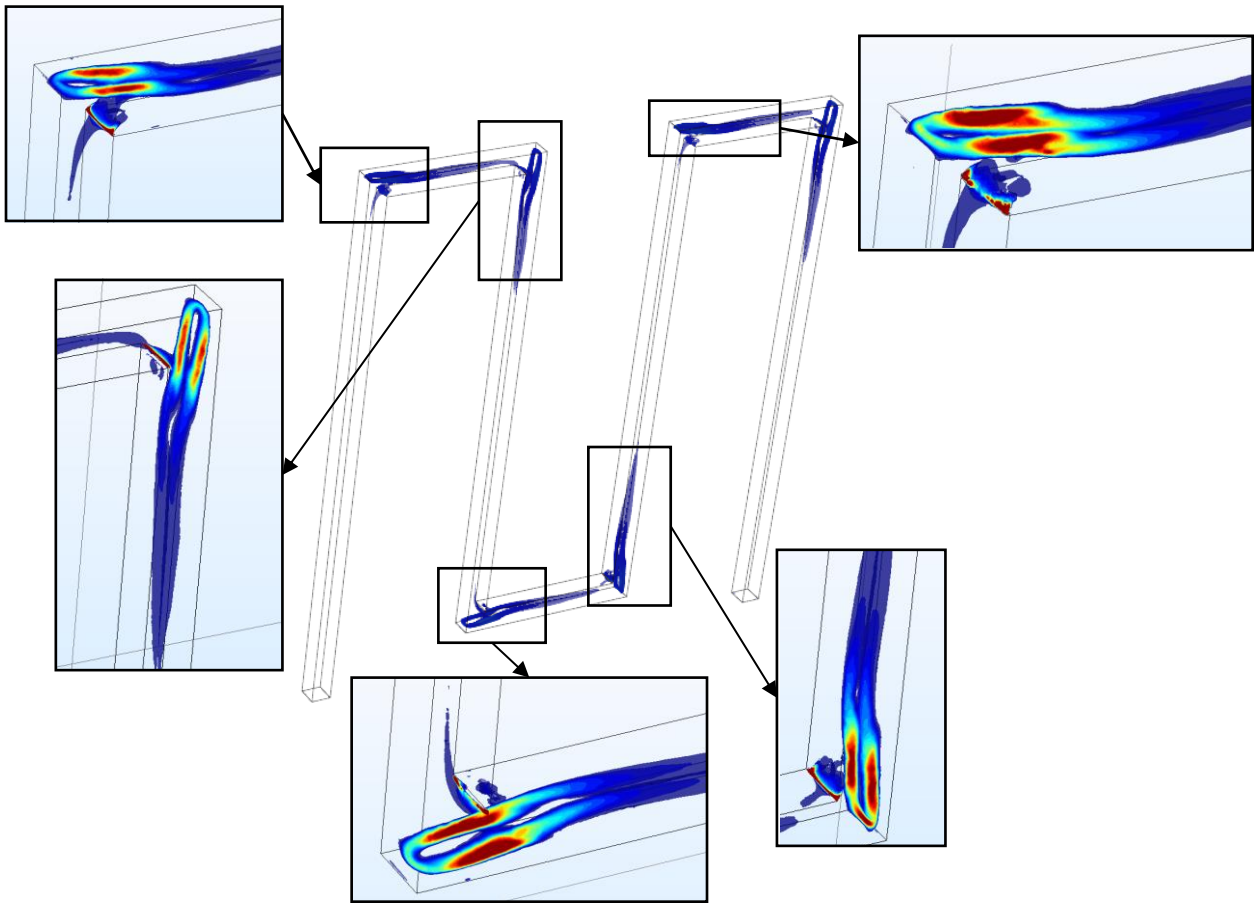
Για τη διάταξη των ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών, εξετάζονται δύο περιπτώσεις, όπου τοποθετούνται αντίστοιχα 26 κανάλια και 16 κανάλια κατά πλάτος και σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Μεταξύ των καναλιών που βρίσκονται στην άκρη της πλάκας και του τοιχώματος της πλάκας, υπάρχει μια απόσταση  $\frac{W_{edge}}{2} = 1 \text{ cm}$ . Οι διαστάσεις των καναλιών είναι  $W \times H = 1 \text{ cm} \times 0.4 \text{ cm}$  και επιλέγονται έτσι, βάσει της διερεύνησης των Gunnasegaran et al. [27] που παρουσιάστηκε στην ανάλυση των διαφόρων διατάξεων καναλιών από τη βιβλιογραφία, στο πρώτο κεφάλαιο. Οι διαστάσεις αυτές, οδηγούν στη βέλτιστη πτώση πίεσης και οι διατομές των καναλιών είναι ορθογωνικές, διότι όπως έχει βρεθεί από την ίδια έρευνα, αυτό το σχήμα αποδίδει καλύτερα θερμικά. Όπως φαίνεται και από το προηγούμενο σχήμα, η διάταξη (β) κατασκευάζεται για τους σκοπούς της προσομοίωσης, λόγω συμμετρίας, στο μισό από το κανονικό της μέγεθος.

Ο λόγος που επιλέγονται αυτές οι διατάξεις προς σύγκριση, είναι η σχετική ευκολία στη κατασκευή τους στο υπολογιστικό πακέτο και την σχετικά εύλογη απαίτηση τους σε υπολογιστικό χρόνο καθώς και το ότι είναι οι πλέον χαρακτηριστικές και βασικές διατάξεις απαγωγής θερμότητας σε ανάλογες εφαρμογές (π.χ. ψύξη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, κυψελών καυσίμου κλπ.).

## 5.2. Υδροδυναμική και θερμική συμπεριφορά διάταξης μαιάνδρου

Για την ανάλυση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των διατάξεων του μαιάνδρου και των ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών παρουσιάζεται αρχικά η πτώση πίεσης κατά μήκος του εσωτερικού και εξωτερικού τοιχώματος του μαιάνδρου, καθώς και του κέντρου του καναλιού. Η διάταξη του μαιάνδρου, όντας μια σειρά από διαδοχικές γωνίες των  $90^\circ$ , παρουσιάζει ανάπτυξη δευτερογενούς ροής, παρόμοιας με αυτής που

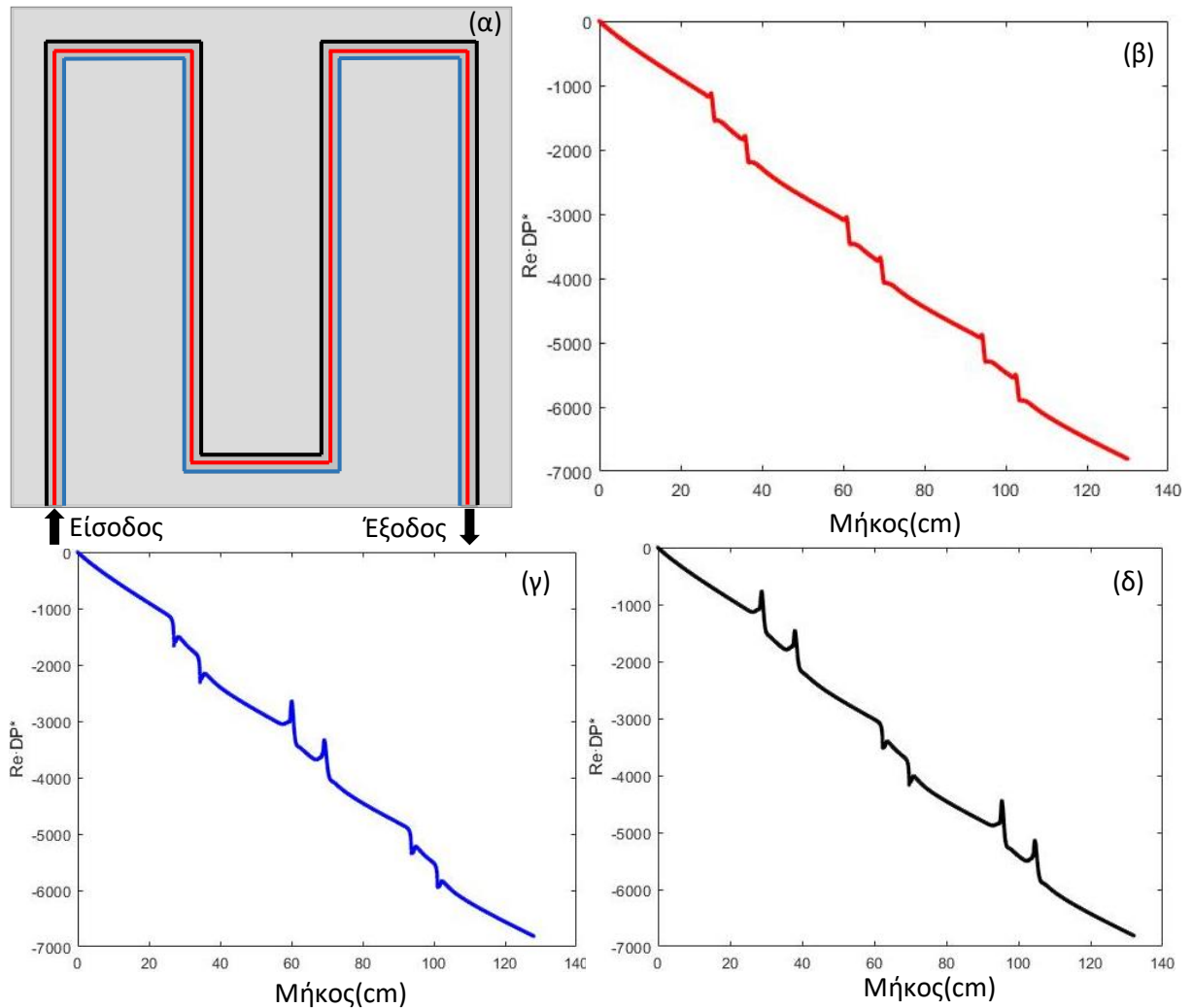
παρουσιάζεται στο υποκεφάλαιο 3.3 για τις απότομες στροφές των  $90^\circ$ . Η ανάπτυξη των δινών αυτών παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. 2 που φαίνεται παρακάτω. Όπως γίνεται εμφανές από τις μεγεθύνσεις του σχήματος, στη διάταξη αυτή, εμφανίζονται μετά από κάθε γωνία  $90^\circ$  οι δευτερογενείς ροές που έχουν σχήμα U και έχουν αναλυθεί εκτενώς στο υποκεφάλαιο 3.3. Λόγω του ότι ο αριθμός Reynolds παραμένει σταθερός, κατά μήκος της ροής, οι δίνες που σχηματίζονται είναι ίδιες μετά από κάθε στροφή και είναι επίσης ίδιες με αυτή που σχηματίζεται στη βασική δομή αγωγού γωνίας  $90^\circ$  για αριθμό Reynolds ίσο με 150 ως προς το μήκος που επιβιώνει μέσα στο κανάλι αλλά και ως προς το  $Q_{max}$  του πυρήνα της δίνης που είναι ίσο με  $80 \frac{1}{s^2}$ .



Σχήμα 5. 2: Σχηματική αναπαράσταση δινών που εμφανίζονται μετά τις απότομες στροφές  $90^\circ$  στη διάταξη του μαιάνδρου

Οι δίνες αυτές έχουν την ίδια επίδραση στη συμπεριφορά της πτώσης πίεσης κατά μήκος του καναλιού, στο εσωτερικό και εξωτερικό τοίχωμα και στο κέντρο του καναλιού,

όπως έχει παρουσιαστεί και στο υποκεφάλαιο 3.3. Στο Σχήμα 5. 3 παρουσιάζεται η αδιάστατη πτώση πίεσης πολλαπλασιασμένη με τον αριθμό Reynolds σε αυτά τα σημεία του καναλιού για την περίπτωση του μαιάνδρου.

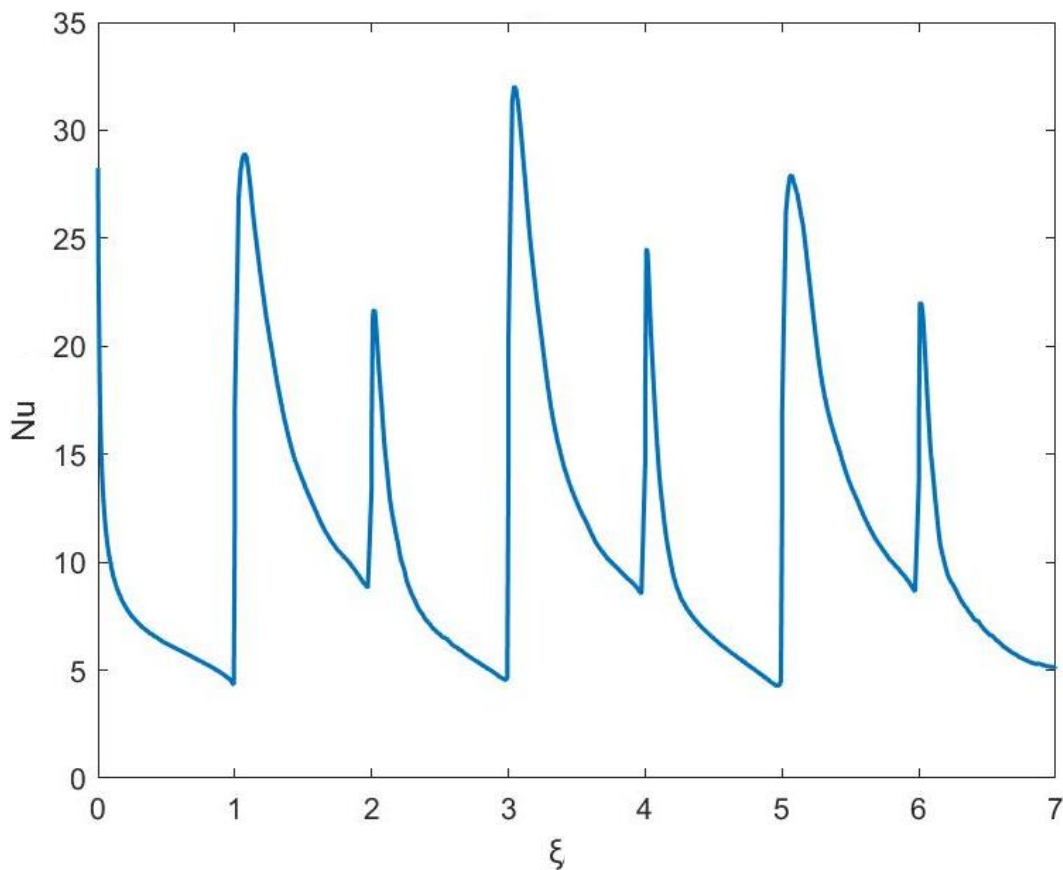


Σχήμα 5. 3: (α) Διάταξη μαιάνδρου και γραμμές υπολογισμού πτώσης πίεσης και αδιάστατη πτώση πίεσης στο (β) κέντρο του αγωγού (γ) στο εσωτερικό τοίχωμα και (δ) στο εξωτερικό τοίχωμα για τη διάταξη του μαιάνδρου

Επειδή η υδραυλική διάμετρος του καναλιού της διάταξης του μαιάνδρου δεν μειώνεται κατά μήκος της ροής και επειδή υπάρχουν 6 συνεχόμενες στροφές της ροής που εκτρέπουν της πορεία του ρευστού κατά 90°, η πτώση πίεσης που προκύπτει από την είσοδο μέχρι την έξοδο, είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή που προκύπτει σε όλες

τις δενδριτικές διατάξεις που έχουν μελετηθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η συνολική πτώση πίεσης και η αντλητική δύναμη, φαίνονται στον Πίνακα 5. 3.

Η εξέλιξη του αριθμού Nusselt κατά μήκος της ροής στη διάταξη του μαιάνδρου, λόγω των συνεχόμενων στροφών 90° έχει την μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 5. 4. Σε κάθε στρόφη, όπου υπάρχει πρόσκρουση και διαταραχή της ροής, ο αδιάστατος αριθμός Nusselt αυξάνεται απότομα, και αρχίζει να μειώνεται μέχρι να συναντήσει την επόμενη στρόφη. Αξιοσημείωτο από την συμπεριφορά του αριθμού Nusselt, είναι το γεγονός ότι όταν το κανάλι έχει αρκετό μήκος, ώστε να μπορεί να επανέλθει το προφίλ της ταχύτητας στο σύνηθες παραβολικό της στρωτής ροής, η αύξηση που ακολουθεί είναι αρκετά πιο έντονη, σε αντίθεση με την περίπτωση των μικρού μήκους καναλιών  $L_2$ ,  $L_4$  και  $L_6$ , όπου η δίνη που αναπτύσσεται διατηρείται μέχρι την είσοδο στο επόμενο κανάλι και η επακόλουθη ενίσχυση στη μεταφορά θερμότητας δεν είναι τόσο έντονη.



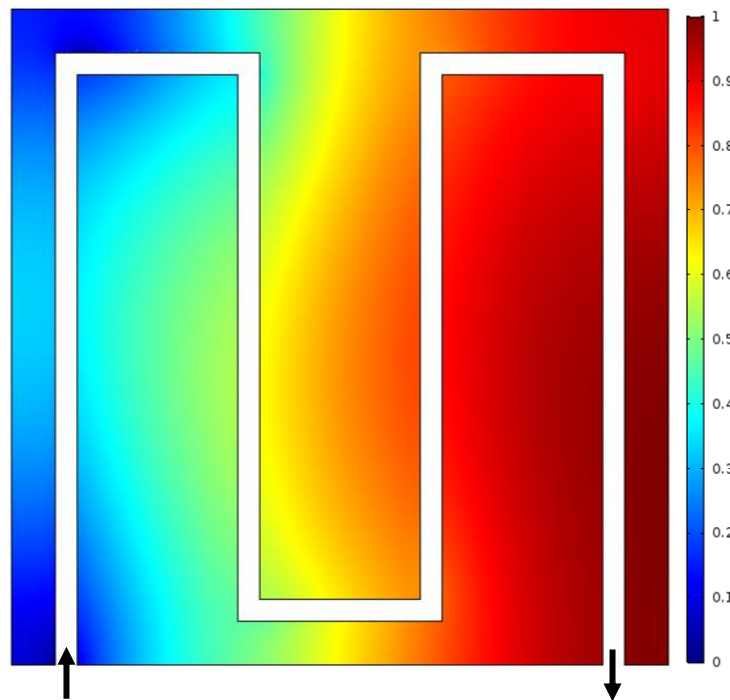
Σχήμα 5. 4: Αριθμός Nusselt συναρτήσει του αδιάστατου αριθμού  $\xi$  στη διάταξη του μαιάνδρου

Το φαινόμενο αυτό ίσως μπορεί να ερμηνευθεί, από το ότι, εφόσον η δίνη διατηρείται μέχρι την επόμενη διαταραχή, τα κρύα και θερμά στρώματα του ρευστού έχουν αναμειχθεί αρκετά με αποτέλεσμα η βαθμίδα της θερμοκρασίας, να μην είναι τόσο μεγάλη και η επακόλουθη δίνη να μην έχει το ίδιο αποτέλεσμα στην ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας.

*Πίνακας 5. 1: Μέση θερμοκρασία πλάκας αλουμινίου και τυπική απόκλιση του πεδίου θερμοκρασίας για μαιάνδρο*

Μοντέλο	$T_{m,al}$ (K)	$\frac{(T_{m,al} - T_i)^2}{N}$	SD (K)
Serp_3B	322.21	8.21	2.87

Στον Πίνακα 5. 1 φαίνεται η μέση θερμοκρασία της πλάκας και η τυπική απόκλιση από αυτή, που προσδιορίζει την ομοιομορφία της θερμοκρασίας στη πλάκα. Όπως παρατηρείται, η μέση θερμοκρασία της πλάκας, είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτή των δενδριτικών διατάξεων, αλλά η ομοιομορφία της θερμοκρασίας σε αυτή, είναι σαφώς χειρότερη από όλες τις περιπτώσεις των διακλαδούμενων καναλιών.



*Σχήμα 5. 5: Κανονικοποιημένη θερμοκρασία σε επίπεδο xz στο  $y=0.5$  για την περίπτωση καναλιού μαιάνδρου με 4 περάσματα*

Η ανομοιομορφία της θερμοκρασίας της πλάκας μπορεί να γίνει εμφανής και από το Σχήμα 5. 5, όπου φαίνεται το κανονικοποιημένο πεδίο θερμοκρασίας σε διατομή της πλάκας. Παρατηρείται, ότι στην αριστερή πλευρά, όπου είναι και η είσοδος του ρευστού, η πλάκα έχει τη χαμηλότερη θερμοκρασία, με τις χαμηλότερες, να εμφανίζονται στην είσοδο και στη πρώτη στροφή 90° όπου υπάρχει η πρώτη εκτροπή της ροής. Καθώς κινούμαστε από αριστερά προς τα δεξιά, κατά τη κίνηση του ρευστού, αυξάνεται η θερμοκρασία της πλάκας, με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία να εμφανίζεται στη δεξιά πλευρά.

*Πίνακας 5. 2: Μέση θερμοκρασία τοιχώματος, όγκου ρευστού, θερμοροής στο τοίχωμα, συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και θερμικής αντίστασης λόγω συναγωγής για μαιάνδρο*

<b>Μοντέλο</b>	$T_{m,wall} (K)$	$T_{m,bulk} (K)$	$Q_{m,wall} (W/m^2)$	$h_m \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$	$R_{conv,m} \left( \frac{K}{W} \right)$
<b>Serp_3B</b>	321.96	315.99	7006.00	1173.53	0.0164

*Πίνακας 5. 3: Επιφάνεια, όγκος και λυγρότητα καναλιών – αδιάστατη πτώση πίεσης, αντλητική ισχύς, μέσος αριθμός Nusselt και δείκτης απόδοσης για μαιάνδρο*

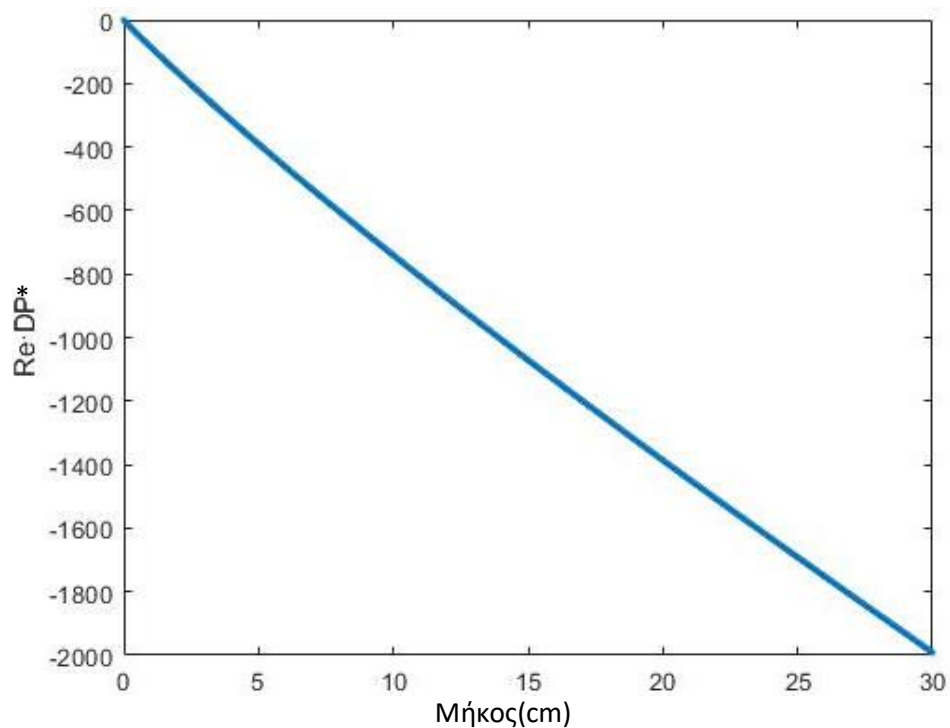
<b>Μοντέλο</b>	$A (cm^2)$	$V (cm^3)$	$Sv$	$\Delta P (Pa)$	$P_{pump} (W \cdot 10^{-5})$	$Nu_m$	$Re \cdot DP^*$	$\eta$
<b>Serp_3B</b>	520	130	5.92	5.132	0.775	9.297	6808	0.491

Από τους πίνακες 5. 2 και 5. 3, μπορούν να φανούν τα μεγέθη που υπολογίζονται και για τις δενδριτικές διατάξεις. Λόγω των συνεχών προσκρούσεων-εκτροπών της ροής με στροφές των 90°, ο μέσος συντελεστής συναγωγής και ο μέσος αριθμός Nusselt είναι μεγαλύτερα στη διάταξη του μαιάνδρου. Ωστόσο, το όφελος αυτό στην ενίσχυση μεταφοράς θερμότητας δεν αντισταθμίζεται από τη πτώση πίεσης και την αντλητική ισχύ που απαιτείται για την κίνηση του ρευστού μέσα στο κανάλι, μεγέθη τα οποία, όπως φαίνεται και στα σχήματα που δείχνουν τη πτώση πίεσης, παρουσιάζουν μεγάλη αύξηση λόγω των στροφών 90° και των επακόλουθων δευτερογενών ροών που αναπτύσσονται. Η μεγαλύτερη πτώση πίεσης, οδηγεί στη μείωση του δείκτη απόδοσης του συστήματος, ο οποίος εν τέλει, είναι μικρότερος από αυτό των δενδριτικών διατάξεων που διερευνώνται στη παρούσα διπλωματική εργασία.



### 5.3. Υδροδυναμική και θερμική συμπεριφορά διάταξης ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών

Το επόμενο είδος διάταξης με το οποίο γίνεται η σύγκριση είναι τα ευθύγραμμα παράλληλα κανάλια. Εξετάζονται δύο διατάξεις 16 και 26 καναλιών με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που έχουν αναφερθεί στην εισαγωγή του κεφαλαίου. Η συνολική ογκομετρική παροχή νερού, που εισέρχεται στις δενδριτικές διατάξεις του προηγούμενου κεφαλαίου, μοιράζεται ομοιόμορφα σε όλα τα ευθύγραμμα κανάλια της κάθε διάταξης. Σε αυτή τη διαμόρφωση καναλιών, δεν υπάρχει καμιά διαταραχή της ροής και το ρευστό ρέει με στρωτή ροή τύπου Poiseuille, ανεπηρέαστο από την είσοδο μέχρι την έξοδο. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η μορφή της πτώσης πίεσης σε ένα από τα κανάλια της διάταξης με 16 κανάλια. Παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η πίεση φθίνει γραμμικά μέχρι την έξοδο του καναλιού.



Σχήμα 5. 6: Αδιάστατη πτώση πίεσης κατά μήκος ευθύγραμμου καναλιού στη διάταξη παράλληλων ευθύγραμμων καναλιών με 16 κανάλια

Στον παραπάνω πίνακα, φαίνεται η μέση θερμοκρασία της πλάκας αλουμινίου στην περίπτωση των ευθύγραμμων, παράλληλων καναλιών. Η ονοματολογία των μοντέλων

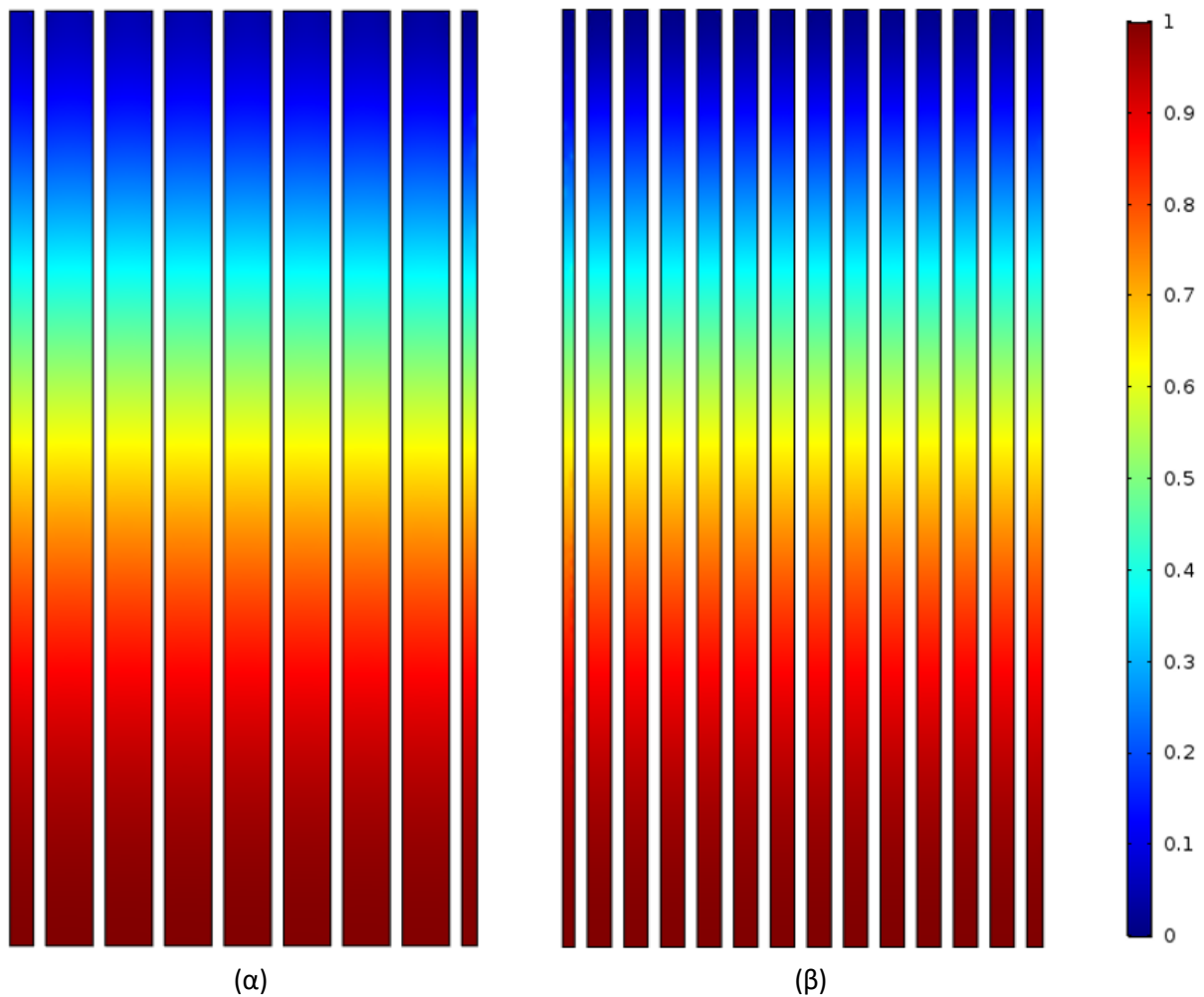
για τα ευθύγραμμα κανάλια, έχει επιλεχθεί ως εξής: το SC υποδηλώνει στο ότι είναι ευθύγραμμα κανάλια και ο διψήφιος αριθμός που ακολουθεί αντιστοιχεί στον αριθμό των καναλιών που έχει η διάταξη. Όπως φαίνεται, η μέση θερμοκρασία είναι περίπου 5-7 βαθμούς μικρότερη από αυτή που προκύπτει για τη διάταξη του μαιάνδρου και των διατάξεων διακλαδούμενων καναλιών. Αυτό ίσως φαίνεται παράξενο εκ πρώτης όψεως, όμως μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: στη προσπάθεια να κατασκευαστούν κατάλληλες διατάξεις ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών για συγκρίσει, επιλέγονται ενδεικτικά βέλτιστες τιμές διαστάσεων καναλιών αλλά και του πλήθους τους από τη βιβλιογραφία (π.χ. Karathanassis et al.). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας μεταξύ καναλιών και πλάκας, να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5. 5, η συνολική επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας είναι 3 ως και 6 φορές μεγαλύτερη στις διατάξεις των ευθύγραμμων καναλιών. Ωστόσο, παρά την μικρότερη μέση θερμοκρασία στη πλάκα αλουμινίου, θα φανεί παρακάτω ότι η διάταξη αυτή, είναι εν τέλει ασύμφορη.

*Πίνακας 5. 4: Μέση θερμοκρασία πλάκας αλουμινίου και τυπική απόκλιση του πεδίου θερμοκρασίας για διάταξη ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών*

<b>Μοντέλο</b>	<b><math>T_{m,al}</math> (K)</b>	<b><math>\frac{(T_{m,al} - T_i)^2}{N}</math></b>	<b>SD (K)</b>
<b>SC26</b>	318.28	18.12	4.26
<b>SC16</b>	318.98	14.57	3.82

Ο πρώτος από τους λόγους για τους οποίους αυτή η διάταξη δεν πλεονεκτεί, είναι η μεγάλη ανομοιομορφία που εμφανίζεται στο πεδίο θερμοκρασίας. Η τυπική απόκλιση που φαίνεται στον Πίνακα 5. 4, είναι 4 φορές μεγαλύτερη από αυτή των δενδριτικών διατάξεων, που σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ διαφορετικών σημείων της πλάκας. Αυτό οφείλεται στο ότι αφενός δεν υπάρχουν οι έντονες αυξήσεις στον αριθμό Nusselt που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο λόγω των προσκρούσεων-εκτροπών της ροής και οι τιμές του φθίνουν συνεχώς κατά μήκος της ροής. Αφετέρου, δεν υπάρχουν ούτε οι δευτερογενείς ροές που να προκαλούν ενίσχυση μεταφοράς θερμότητας στα σημεία όπου παρουσιάζονται μεγάλες θερμοκρασίες. Έτσι, στη διάταξη αυτή, εμφανίζεται μια διαρκής γραμμική αύξηση της

θερμοκρασίας, με μικρή θερμοκρασία στο σημείο της εισόδου και μεγάλη στο σημείο της εξόδου.



*Σχήμα 5. 7: Κανονικοποιημένη θερμοκρασία σε επίπεδο xz στο  $y=0.5$  για την περίπτωση ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών με (α) 16 κανάλια και (β) 26 κανάλια*

Στον Πίνακα 5. 5 εμφανίζεται και η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας των καναλιών, που όπως έχει αναφερθεί είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες διατάξεις που έχουν μελετηθεί. Φαίνεται επίσης η ταχύτητα εισόδου και ο αριθμός Reynolds που προκύπτουν για την είσοδο του κάθε καναλιού αφού μοιραστεί η συνολική ογκομετρική παροχή που έχει επιλεχθεί για τα μοντέλα των δενδριτικών διατάξεων.

Πίνακας 5. 5: Επιφάνεια, όγκος και λυγρότητα καναλιών – ταχύτητα εισόδου στα κανάλια και αριθμός Reynolds για ευθύγραμμα παράλληλα κανάλια

Μοντέλο	$A(cm^2)$	$V(cm^3)$	$Sv$	$u_{in}(\frac{m}{s})$	$Re$
SC26	2184	312	13.1037	0.00145	8.24
SC16	1344	192	15.4056	0.00235	13.40

Στον Πίνακα 5. 6, παρουσιάζονται τα τελευταία μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση των διατάξεων. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η πτώση πίεσης, η οποία όπως είναι αναμενόμενο, είναι μικρότερη λόγω απουσίας διαταραχών της ροής, και ο μέσος αριθμός Nusselt ο οποίος είναι επίσης χαμηλότερος από τις υπόλοιπες διατάξεις για τον ίδιο λόγο. Η μείωση της ισχύος άντλησης, δεν είναι αρκετή για να αντισταθμίσει τη μείωση του χαμηλού μέσου αριθμού Nusselt και για αυτό το λόγο ο δείκτης απόδοσης είναι μικρότερος από τις υπόλοιπες διατάξεις.

Πίνακας 5. 6: Πτώση πίεσης, αντλητική ισχύς, μέσος αριθμός Nusselt και δείκτης απόδοσης για τη διάταξη ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών

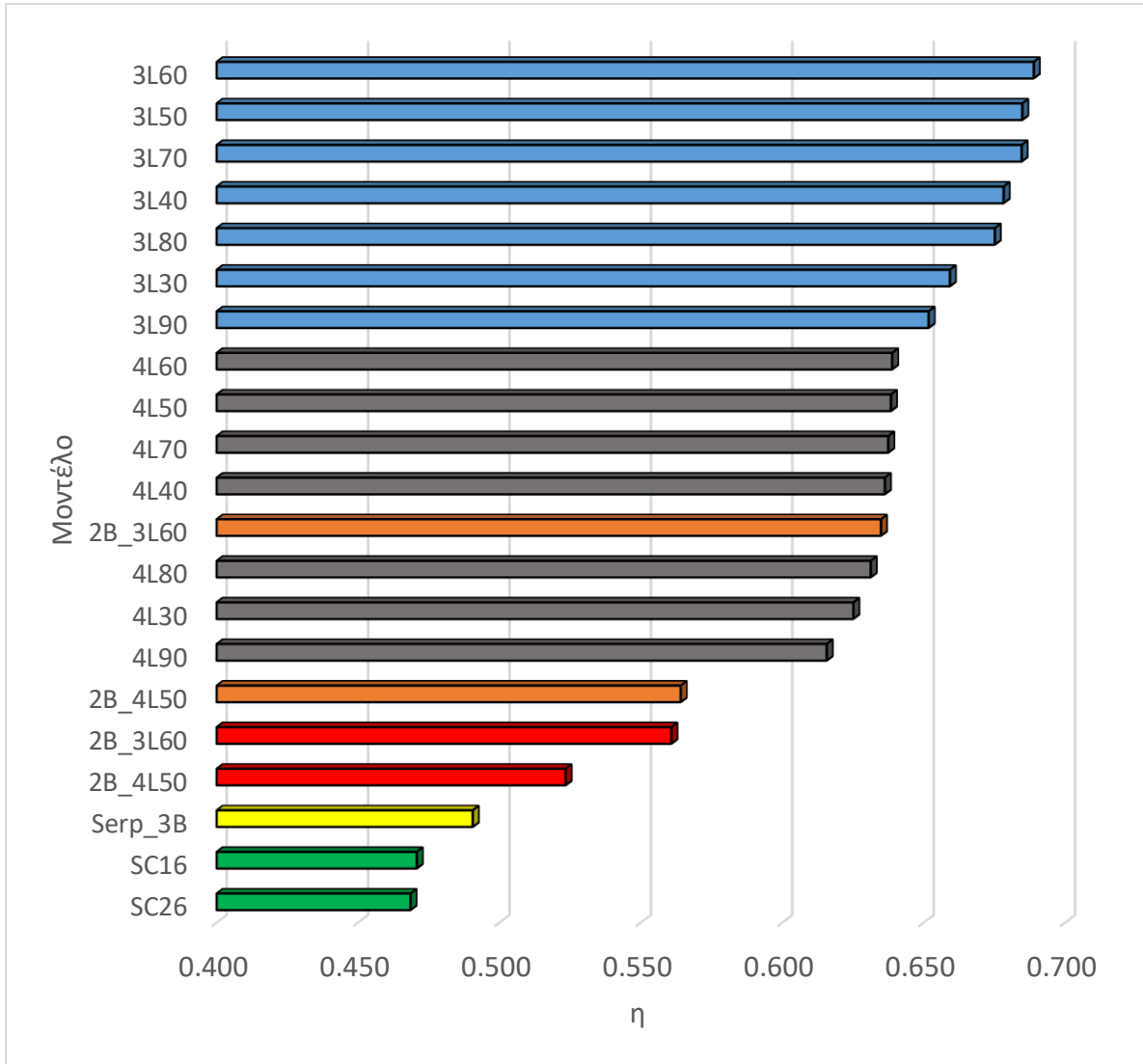
Μοντέλο	$\Delta P (Pa)$	$P_{pump} (W \cdot 10^{-5})$	$Nu_m$	$Re \cdot DP^*$	$\eta$
SC26	0.26436	0.0398	5.9858	2085.475	0.469
SC16	0.42856	0.1049	6.0066	2077.582	0.471

#### 5.4. Σύγκριση δενδριτικών διατάξεων με μαϊανδρο και ευθύγραμμα παράλληλα κανάλια

Καθώς έχει παρουσιαστεί μια πληθώρα διατάξεων στις προηγούμενες ενότητες της διπλωματικής εργασίας, κρίνεται σκόπιμη μια συγκεντρωτική σύγκριση του συνολικού δείκτη απόδοσης,  $\eta$ , που συνυπολογίζει την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας στις διάφορες διαμορφώσεις καναλιών αλλά και την συνολική πτώση πίεσης, δίνοντας όμως παραπάνω έμφαση στην μεταφορά θερμότητας.

Στο Σχήμα 5. 8 που φαίνεται στην επόμενη σελίδα, παρουσιάζονται οι δείκτες απόδοσης όλων των διατάξεων που έχουν διερευνηθεί. Τα ονόματα των διατάξεων όπως έχουν οριστεί στα αντίστοιχα υποκεφάλαια που έχουν παρουσιαστεί, φαίνονται στον άξονα  $y$  του διαγράμματος και στον άξονα  $x$  βρίσκεται η απόδοση. Για την ευκολία ανάγνωσης του διαγράμματος, με μπλε χρώμα αναπαρίστανται οι διατάξεις με 3

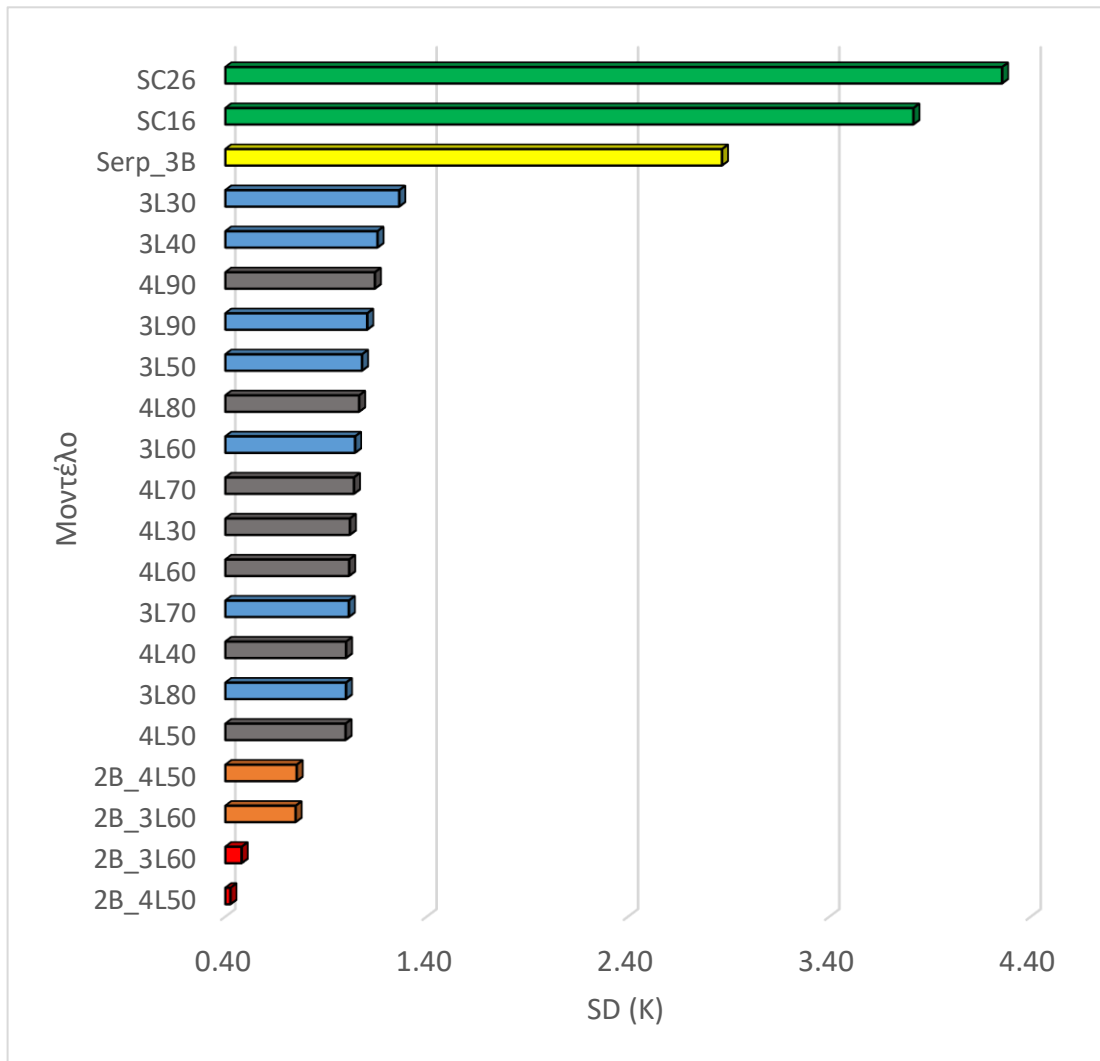
επίπεδα διακλάδωσης και μια μονάδα διακλαδούμενων καναλιών, με γκριζο χρώμα οι αντίστοιχες με 4 επίπεδα διακλάδωσης, με πορτοκαλί και κόκκινο χρώμα είναι οι διατάξεις που έχουν 2 δενδριτικές μονάδες και αριθμό Reynolds στην είσοδο της κάθε μονάδας ίσο με 150 και 75 αντίστοιχα. Τέλος με κίτρινο και πράσινο χρώμα αναπαρίστανται η διάταξη του μαιάνδρου και των ευθύγραμμων καναλιών αντίστοιχα. Η ίδια χρωματική αναπαράσταση ακολουθείται και στο Σχήμα 5. 9.



Σχήμα 5. 8: Σύγκριση όλων των διατάξεων που έχουν μελετηθεί ως προς το συνολικό δείκτη απόδοσης

Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 4 για τα 3 και 4 επίπεδα διακλάδωσης και μια δενδριτική μονάδα, οι βέλτιστες γωνίες διακλάδωσης είναι 60° και 50° αντίστοιχα.

Γενικά, όπως φαίνεται, τις καλύτερες αποδόσεις, παρέχουν οι διατάξεις με μια δενδριτική μονάδα και 3 επίπεδα διακλάδωσής και τη χειρότερη τα ευθύγραμμα παράλληλα κανάλια. Εκτός από το δείκτη απόδοσης, που συμπεριλαμβάνει την ενίσχυση στη μεταφορά θερμότητας και τη πτώση πίεσης, σημαντική είναι και η ομοιομορφία της θερμοκρασίας.



Σχήμα 5. 9: Σύγκριση όλων των διατάξεων που έχουν μελετηθεί ως προς την τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας

Ιδανικά, επιθυμητό είναι, η θερμοκρασία της πλάκας να είναι όσο πιο ομοιόμορφη γίνεται, προς αποφυγή, θερμών σημείων πάνω στην πλάκα, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν ζημιά στο σύστημα. Κοιτάζοντας το παρακάτω σχήμα γίνεται αμέσως

προφανές ότι οι διατάξεις με δύο δενδριτικές μονάδες, έχουν την καλύτερη ομοιομορφία στο πεδίο θερμοκρασίας, και στις δύο περιπτώσεις αριθμών Reynolds. Οι υπόλοιπες δενδριτικές διατάξεις, που περιέχουν μια δενδριτική μονάδα, υστερούν ελαφρώς αλλά μεταξύ τους είναι σχεδόν πανομοιότυπες ως προς την τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας. Σημαντικά υποδεέστερες, είναι οι διατάξεις του μαιάνδρου και των ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών, οι οποίες έχουν αρκετά μεγαλύτερη τυπική απόκλιση και άρα μεγαλύτερη ανομοιομορφία στο πεδίο θερμοκρασίας.

## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των δομικών στοιχείων των γεωμετρικών διατάξεων του προβλήματος, των ολοκληρωμένων διατάξεων διακλαδούμενων καναλιών και από τη σύγκριση τους με άλλες διατάξεις απαγωγής θερμότητας .

Αρχικά, από την ανάλυση των βασικών δομικών στοιχείων, της διακλάδωσης T και του αγωγού γωνίας  $90^\circ$ , προέκυψαν κάποια βασικά συμπεράσματα για την υδροδυναμική και θερμική συμπεριφορά των διατάξεων. Μελετώντας την υδροδυναμική συμπεριφορά των δομών αυτών για ένα συγκεκριμένο εύρος αριθμών Reynolds, από 100 μέχρι και 350, παρατηρείται ότι η απότομη διαταραχή της ροής που προκύπτει από τη διακλάδωση και την εκτροπή της κύριας κατεύθυνσης της ροής, οδηγεί στο σχηματισμό δευτερογενούς ροής που επικρατεί σχεδόν σε όλο το μήκος του καναλιού.

Η απότομη αύξηση της πίεσης στο τοίχωμα όπου προσκρούει το ρευστό, σε συνδυασμό με την απότομη πτώση πίεσης στη μεριά του τοιχώματος που συμβαίνει η αποκόλληση του οριακού στρώματος του ρευστού, έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη δευτερογενούς ροής, που κινείται κατά μήκος της κατεύθυνσης της ροής και γίνεται πιο έντονη καθώς αυξάνεται ο αδιάστατος αριθμός Reynolds. Με την αύξηση του αριθμού Reynolds και της ταχύτητας του ρευστού, αυξάνεται και η συνολική πτώση πίεσης. Παρατηρώντας την κανονικοποιημένη ελικότητα και τις ροϊκές γραμμές, δίνεται επίσης μια εικόνα του μήκους για το οποίο επικρατούν οι δίνες που εμφανίζονται μετά τη διαταραχή της ροής σε κάθε μονάδα. Ανάλογα με την ταχύτητα εισόδου του ρευστού, η ανάλυση της ελικότητας αναδεικνύει ότι η περιστροφική κίνηση του ρευστού, δεν έχει εξασθενήσει μέχρι την έξοδο του ρευστού από τη διακλάδωση T και της στροφής των  $90^\circ$  για  $Re > 200$  και στις δύο περιπτώσεις. Ωστόσο, βάσει του κριτηρίου Q, το οποίο προκύπτει από το τανυστή της κλίσης της ταχύτητας, γίνεται προσπάθεια απομόνωσης του πυρήνα της δίνης, που προκύπτει για κάθε αριθμό Reynolds. Από τα αποτελέσματα, συμπεραίνεται ότι οι δίνες, όπως ορίζονται από το κριτήριο Q επικρατούν για αρκετά



μικρότερο μήκος από ότι φαίνεται με βάση την ελικότητα και ο πυρήνας τους καταλαμβάνει μικρότερο όγκο. Στην περίπτωση της διακλάδωσης T, φαίνεται επίσης ότι σχηματίζονται 2 ακόμα δίνες πάνω από τις δύο κύριες που παραμένουν παρούσες σε όλες τις περιπτώσεις. Οι δίνες αυτές, μεγαλώνουν σε μέγεθος καθώς μεγαλώνει ο αριθμός Reynolds και επικρατούν για μεγαλύτερο μήκος εντός του καναλιού. Αξίζει να σημειωθεί επίσης, ότι ο πυρήνας των δινών, μετατοπίζεται και στις δύο δομικές μονάδες κατά μήκος της ροής. Η δίνη ξεκινάει την ανάπτυξη της κοντά στο εξωτερικό τοίχωμα του καναλιού και στη συνέχεια ανυψώνεται ελαφρώς προς το εσωτερικό τοίχωμα και αφού φτάσει ένα συγκεκριμένο ύψος, επανέρχεται κοντά στο εξωτερικό τοίχωμα.

Όσον αφορά τη θερμική συμπεριφορά στις δομικές μονάδες, έχει παρουσιαστεί και αναλυθεί η εξέλιξη του αδιάστατου αριθμού Nusselt κατά μήκος τη ροής του ρευστού. Από τα αντίστοιχα διαγράμματα, παρατηρείται ότι αμέσως μετά από κάθε απότομη διαταραχή (πρόσκρουση-εκτροπή) της ροής, αυξάνεται απότομα ο αριθμός Nusselt. Η αύξηση που παρατηρείται, είναι ευθέως ανάλογη του αριθμού Reynolds και οφείλεται στην πρόσκρουση αλλά και στη δευτερογενή ροή που αναπτύσσεται στο κανάλι. Οι δίνες μεταφέρουν τα θερμά στρώματα του ρευστού που βρίσκονται κοντά στο τοίχωμα προς στο κρύο εσωτερικό του καναλιού και μεταφέρουν το κρύο ρευστό που βρίσκεται στο κέντρο του καναλιού, κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα. Αυτή η συνεχής ανάμειξη κρύων και ρευστών στρωμάτων ρευστού, οδηγεί σε σημαντική ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας κατά μήκος της ροής.

Για τις πλήρεις διατάξεις διακλαδούμενων καναλιών, εξετάζονται διαμορφώσεις με 3 και 4 επίπεδα διακλάδωσης, που διαστασιολογούνται με αυστηρούς γεωμετρικούς περιορισμούς, και με μεταβαλλόμενες γωνίες διακλάδωσης,  $\theta$ , που κυμαίνονται μεταξύ των  $30^\circ$  και  $90^\circ$ . Για τις διατάξεις αυτές, σχεδιάζεται η εξέλιξη της πτώσης πίεσης κατά μήκος της ροής και του αριθμού Nusselt. Γίνεται προφανές από τα αντίστοιχα διαγράμματα, ότι καθώς μειώνεται η γωνία διακλάδωσης, μειώνεται η πτώση πίεσης, αλλά και η ένταση της δευτερογενούς ροής που αναπτύσσεται, με αποτέλεσμα τη μείωση και της ενίσχυσης μεταφοράς θερμότητας. Για την εύρεση της βέλτιστης γωνίας διακλάδωσης, αξιοποιείται ένας συνδυαστικός δείκτης απόδοσης,  $\eta$ , που

συμπεριλαμβάνει την πτώση πίεσης και το μέσο αριθμό Nusselt της κάθε διάταξης. Έχει βρεθεί ότι για τη διάταξη των 3 και 4 επίπεδων, οι βέλτιστες γωνίες διακλάδωσης, είναι αυτές των 60° και 50° αντίστοιχα, αφού έχουν τους μεγαλύτερους δείκτες απόδοσης.

Βάσει των βέλτιστων αποτελεσμάτων, κατασκευάζονται για τους σκοπούς υπολογιστικών προσομοιώσεων, διατάξεις που περιλαμβάνουν δύο δενδριτικές μονάδες ενσωματωμένες στην πλάκα αλουμινίου. Οι διατάξεις αυτές φαίνεται να αποδίδουν καλύτερα όσον αφορά την ομοιομορφία του πεδίου θερμοκρασίας της απορροφητικής επιφάνειας, αλλά υστερούν όσον αφορά το συνδυασμό της απαγωγής θερμότητας με την πτώση πίεσης ή ισοδύναμα της ισχύος άντλησης.

Για συγκρίσεις με τις διατάξεις των διακλαδούμενων καναλιών, διαμορφώνονται και εξετάζονται επιπλέον διατάξεις που έχουν ενσωματωμένο κανάλι τύπου μαιάνδρου καθώς και ευθύγραμμο παράλληλα κανάλια. Η διάταξη του μαιάνδρου έχει 3 περάσματα και η διάταξη με τα ευθύγραμμο παράλληλα κανάλια έχει 16 κανάλια στη μια περίπτωση και 26 στην άλλη. Η συνολική παροχή που εισέρχεται στις καινούριες διατάξεις, για τους σκοπούς της σύγκρισης, είναι ίδια με αυτή που εισέρχεται στις διατάξεις μιας δενδριτικής μονάδας. Τα αποτελέσματα αυτής της διερεύνησης δείχνουν ότι οι συγκεκριμένες διατάξεις υστερούν ως προς τις δενδριτικές διατάξεις, όσον αφορά το συνδυαστικό δείκτη,  $\eta$ .

Η σύγκριση του δείκτη απόδοσης για κάθε διάταξη, φαίνεται στο Σχήμα 5. 8 και όπως φαίνεται, οι δενδριτικές διατάξεις, είναι σαφώς καλύτερες από τις περιπτώσεις του μαιάνδρου και των ευθύγραμμων παράλληλων καναλιών όσο αφορά την αποδοτική μεταφορά θερμότητας και την πτώση πίεσης. Η σύγκριση της τυπικής απόκλισης της θερμοκρασίας για κάθε διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 5. 9 και είναι προφανές ότι η ομοιομορφία της θερμοκρασίας είναι βέλτιστη στις διατάξεις με δύο μονάδες διακλαδούμενων καναλιών με τις υπόλοιπες διαμορφώσεις μιας δενδριτικής μονάδας να ακολουθούν. Οι λιγότερο ομοιόμορφες διατάξεις, ως προς το πεδίο θερμοκρασίας της πλάκας, είναι τα ευθύγραμμο παράλληλα κανάλια και η διάταξη του μαιάνδρου.

Πιθανές μελλοντικές έρευνες πάνω στο θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μπορούν να ασχοληθούν με τη διερεύνηση του αρχικού λόγου  $\frac{\text{μήκος}}{\text{πλάτος}}$  της διατομής του καναλιού, μιας και όπως έχει βρεθεί από πληθώρα ερευνητών, ο λόγος αυτός επηρεάζει σημαντικά την πτώση πίεσης αλλά και την απαγωγή θερμότητας. Επίσης, αξίζει να διερευνηθεί, πως αυτός ο μεταβλητός λόγος, επηρεάζει τη δευτερογενή ροή που αναπτύσσεται κατά τη διαταραχή της ροής σε διακλαδώσεις T και απότομες στροφές 90°. Τελευταίο κομμάτι, άξιο περαιτέρω διερεύνησης, είναι ο έλεγχος της μεταβολής του συνδυαστικού δείκτη απόδοσης,  $\eta$ , όταν αυξάνεται η ογκομετρική παροχή (άρα και ο αριθμός Re) στις ολοκληρωμένες διατάξεις διακλαδούμενων καναλιών. Εφόσον, η μεταβολή της ογκομετρικής παροχής, επιδρά διαφορετικά στη συνολική πτώση πίεσης και στο μέσο αριθμό Nusselt, ίσως υπάρχει ένας βέλτιστος αριθμός Reynolds, εντός του εύρους της στρωτής ροής, για τον οποίο μεγιστοποιείται ο δείκτης απόδοσης του συστήματος. Ωστόσο, αύξηση του αριθμού Reynolds, συνεπάγεται και αύξηση του υπολογιστικού κόστους και του υπολογιστικού χρόνου, που δυσχεραίνει την υπολογιστική μελέτη και την καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη.



## Βιβλιογραφία

- [1] P. L. Wagner and V. Smil, "General Energetics: Energy in the Biosphere and Civilization," *1st ed. New York John Wiley Sons*, 1991.
- [2] Y. Tian and C. Y. Zhao, "A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications," *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 538–553, 2013.
- [3] B. Hellstrom, M. Adsten, P. Nostell, B. Karlsson, and E. Wackelgard, "The impact of optical and thermal properties on the performance of flat plate solar collectors," *Renew. Energy*, vol. 28, no. 3, pp. 331–344, 2003.
- [4] Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis, and T. Nousia, "Solar collectors with colored absorbers," *Sol. Energy*, vol. 68, no. 4, pp. 343–356, 2000.
- [5] K. Ravi Kumar and K. S. Reddy, "Thermal analysis of solar parabolic trough with porous disc receiver," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1804–1812, 2009.
- [6] K. Sopian, M. A. Alghoul, E. M. Alfegi, M. Y. Sulaiman, and E. A. Musa, "Evaluation of thermal efficiency of double-pass solar collector with porous-nonporous media," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 640–645, 2009.
- [7] N. Aste, G. Chiesa, and F. Verri, "Design, development and performance monitoring of a photovoltaic-thermal (PVT) air collector," *Renew. Energy*, vol. 33, no. 5, pp. 914–927, 2008.
- [8] R. Z. Wang and X. Q. Zhai, "Development of solar thermal technologies in China," *Energy*, vol. 35, no. 11, pp. 4407–4416, 2010.
- [9] G. M. Tina, M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, and P. F. Scandura, "Optical and thermal behavior of submerged photovoltaic solar panel: SP2," *Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 17–26, 2012.
- [10] B. Robles-Ocampo *et al.*, "Photovoltaic/thermal solar hybrid system with bifacial PV module and transparent plane collector," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 91, no. 20, pp. 1966–1971, 2007.
- [11] M. A. Oyinlola, G. S. F. Shire, and R. W. Moss, "Investigating the effects of geometry in solar thermal absorber plates with micro-channels," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 90, pp. 552–560, 2015.
- [12] R. W. Moss, G. S. F. Shire, P. Henshall, P. C. Eames, F. Arya, and T. Hyde, "Optimal passage size for solar collector microchannel and tube-on-plate absorbers," *Sol. Energy*, vol. 153, pp. 718–731, 2017.
- [13] E. Bellos, E. Mathioulakis, C. Tzivanidis, V. Belessiotis, and K. A. Antonopoulos, "Experimental and numerical investigation of a linear Fresnel solar collector with flat plate receiver," *Energy Convers. Manag.*, vol. 130, pp. 44–59, 2016.

- [14] W. T. Xie, Y. J. Dai, R. Z. Wang, and K. Sumathy, "Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 6, pp. 2588–2606, 2011.
- [15] G. C. Bakos, "Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement," *Renew. Energy*, vol. 31, no. 15, pp. 2411–2421, 2006.
- [16] S. Dabiri, "Introduction of solar collectors and energy and exergy analysis of a heliostat plant," *3rd Int. Conf. Exhib. Sol. Energy*, no. July, 2016.
- [17] S. Kalogirou, "Recent Patents in Solar Energy Collectors and Applications," *Recent Patents Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 23–33, 2008.
- [18] K. Battleson, "Solar Power Tower Design Guide: Solar Thermal Central Receiver Power Systems, A Source of Electricity and/or Process Heat," *Tech. Rep.*, 1981.
- [19] N. A. C. Sidik, M. N. A. W. Muhamad, W. M. A. A. Japar, and Z. A. Rasid, "An overview of passive techniques for heat transfer augmentation in microchannel heat sink," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 88, pp. 74–83, 2017.
- [20] I. A. Ghani, N. A. C. Sidik, and N. Kamaruzaman, "Hydrothermal performance of microchannel heat sink: The effect of channel design," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 107, pp. 21–44, 2017.
- [21] P. Gunnasegaran, H. A. Mohammed, N. H. Shuaib, and R. Saidur, "The effect of geometrical parameters on heat transfer characteristics of microchannels heat sink with different shapes," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 37, no. 8, pp. 1078–1086, 2010.
- [22] H. Y. Wu and P. Cheng, "Friction factors in smooth trapezoidal silicon microchannels with different aspect ratios," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 46, no. 14, pp. 2519–2525, 2003.
- [23] F. Hong and P. Cheng, "Three dimensional numerical analyses and optimization of offset strip-fin microchannel heat sinks," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 36, no. 7, pp. 651–656, 2009.
- [24] H. Kamal and A. Dewan, "Analysis of interrupted rectangular microchannel heat sink with high aspect ratio," *J. Appl. Fluid Mech.*, vol. 10, no. 1, pp. 117–126, 2017.
- [25] Y. Sui, C. J. Teo, P. S. Lee, Y. T. Chew, and C. Shu, "Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 53, no. 13–14, pp. 2760–2772, 2010.
- [26] H. A. Mohammed, P. Gunnasegaran, and N. H. Shuaib, "Numerical simulation of heat transfer enhancement in wavy microchannel heat sink," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 38, no. 1, pp. 63–68, 2011.
- [27] H. A. Mohammed, P. Gunnasegaran, and N. H. Shuaib, "Influence of channel

- shape on the thermal and hydraulic performance of microchannel heat sink," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 38, no. 4, pp. 474–480, 2011.
- [28] K. Vafai and L. Zhu, "Analysis of two-layered micro-channel heat sink concept in electronic cooling," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 42, no. 12, pp. 2287–2297, 1999.
- [29] X. Wei and Y. Joshi, "Stacked Microchannel Heat Sinks for Liquid Cooling of Microelectronic Components," *J. Electron. Packag.*, vol. 126, no. 1, pp. 60–66, 2004.
- [30] I. K. Karathanassis, E. Papanicolaou, V. Belessiotis, and G. C. Bergeles, "Flow and temperature fields in cooling devices with embedded serpentine tubes," *Numer. Heat Transf. Part A Appl.*, vol. 66, no. 4, pp. 349–378, 2014.
- [31] A. Bejan, *Shape and Structure, from Engineering to Nature*. 2001.
- [32] A. Bejan and S. Lorente, *Design with Constructal Theory*. 2008.
- [33] A. Bejan and S. Lorente, "The constructal law of design and evolution in nature," *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 8, no. 3, pp. 209–240, 2010.
- [34] A. Bejan, "Constructal theory of pattern formation," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2007.
- [35] A. Bejan and S. Lorente, "Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society," *J. Appl. Phys.*, vol. 113, no. 15, 2013.
- [36] J. Cao, M. Kraut, R. Dittmeyer, L. Zhang, and H. Xu, "Numerical analysis on the effect of bifurcation angle and inlet velocity on the distribution uniformity performance of consecutive bifurcating fluid flow distributors," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 93, pp. 60–65, 2018.
- [37] X. Q. Wang, A. S. Mujumdar, and C. Yap, "Thermal characteristics of tree-shaped microchannel nets for cooling of a rectangular heat sink," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 45, no. 11, pp. 1103–1112, 2006.
- [38] D. Haller, P. Woias, and N. Kockmann, "Simulation and experimental investigation of pressure loss and heat transfer in microchannel networks containing bends and T-junctions," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 52, no. 11–12, pp. 2678–2689, 2009.
- [39] L. Shui, B. Huang, F. Gao, and H. Rui, "Experimental and numerical investigation on the flow and heat transfer characteristics in a tree-like branching microchannel," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 2, pp. 937–946, 2018.
- [40] C. D. Murray, "The Physiological Principle of Minimum Work: I. The Vascular System and the Cost of Blood Volume.," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 12, no. 3, pp. 207–214, 1926.
- [41] P. A. Ramachandran, *Advanced Transport Phenomena*. Cambridge University Press, 2014.
- [42] B. John, P. Senthilkumar, and S. Sadasivan, "Applied and Theoretical Aspects of

Conjugate Heat Transfer Analysis: A Review,” *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 26, no. 2, pp. 475–489, 2019.

- [43] Α. Γ. Μπουντουβής, “Υπολογιστική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων,” *ΕΜΠ*, 1992.
- [44] A. R. Chandrupatla and V. M. K. Sastri, “Laminar forced convection heat transfer of a non-newtonian fluid in a square duct,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 20, no. 12, pp. 1315–1324, 1977.
- [45] M. Spiga and G. L. Morini, “Nusselt numbers in laminar flow for H2 boundary conditions,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 39, no. 6, pp. 1165–1174, 1996.
- [46] D. DEGANI, A. SEGINER, and Y. LEVY, “Graphical visualization of vortical flows by means of helicity,” *AIAA J.*, vol. 28, no. 8, pp. 1347–1352, 2008.
- [47] J. JEong and F. Hussain, “On the identification of a vortex,” *J. Fluid Mech.*, vol. 285, no. February 2015, pp. 69–94, 1995.
- [48] V. Holmén, “Methods for Vortex Identification,” 2006.