



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής
& Βελτιστοποίησης

Ενσωμάτωση Γυροειδών Δομών στο Σχεδιασμό Στατικού Αναμίκτη δύο ρευστών

Διπλωματική Εργασία

Δημήτριος Ζήσης Κατμερίδης

Επιβλέπων: Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2024

Ευχαριστίες

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κυριάκο Γιαννάκογλου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Από το καιρό που παρακολουθούσα τα μαθήματα που δίδασκε στο ΕΜΠ, μέχρι και την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, είμαι βαθύτατα ευγνώμων για την εμπιστοσύνη, την υπομονή και την στήριξη που παρείχε προς το πρόσωπό μου. Στη διάρκεια των σπουδών μου, οι γνώσεις και οι συμβουλές του υπήρξαν καθοριστικές για τη διεύρυνση γνώσεων και ενδιαφερόντων μου.

Επιθυμώ, επίσης, να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ΜΠΥΡ&B/ΕΜΠ που συνέλαβαν στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Διδάκτορα Morteza Monfaredi και τον υποψήφιο Διδάκτορα Νικόλαο Γαλανό, οι οποίοι αφιέρωσαν χρόνο για να μου προσφέρουν βοήθεια και καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια της διπλωματικής. Η βοήθειά τους έκανε την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας σαφώς πιο εύκολη.

Τέλος, δεν θα μπορούσα μην ευχαριστήσω τους γονείς μου, Δώρα και Γιώργο, για την στήριξη, την υπομονή και τις θυσίες που μου παρείχαν σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα κοντινά μου πρόσωπα που ήταν δίπλα μου στη διάρκεια αυτών των χρόνων.



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής
& Βελτιστοποίησης

Ενσωμάτωση Γυροειδών Δομών στο Σχεδιασμό Στατικού Αναμίκτη δύο ρευστών

Διπλωματική Εργασία

Δημήτριος Ζήσης Κατμερίδης

Επιβλέπων: Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2024

Περίληψη

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των τριπλά περιοδικών ελάχιστων επιφανειών (Triple Periodic Minimum Surfaces - TPMS), εστιάζοντας στη δομή του γυροειδούς ως πιθανής γεωμετρίας για τον σχεδιασμό στατικού αναμίκτη δύο διαφορετικών ρευστών. Μέσα από μια σειρά παραμετρικών μελετών εντοπίζονται οι παράμετροι σχεδιασμού της δομής του γυροειδούς με την μεγαλύτερη επίδραση στην απόδοση του αναμίκτη, με αυτήν να ποσοτικοποιείται με την πτώση της ολικής πίεσης και τον συντελεστή ανομοιογένειας στην έξοδο του, όπου και τα δύο οφείλουν να ελαχιστοποιηθούν. Η ροή θεωρείται στρωτή, ενώ τα δύο ρευστά αντιμετωπίζονται ως ασυμπύεστα και πλήρως αναμίξιμα, χωρίς να συμβαίνουν χημικές αντιδράσεις μεταξύ τους. Για την επίλυση της ροής χρησιμοποιείται ο επιλύτης `twoLiquidMixingFoam` που βασίζεται στη μέθοδο κλάσματος όγκου (Volume of Fluid Method - VoF) του λογισμικού `OpenFOAM`.

Η εργασία χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες παραμετρικών μελετών. Στην πρώτη κατηγορία, αναλύονται αναμίκτες που περιλαμβάνουν πολλαπλά εμπόδια από γυροειδή, εστιάζοντας σε παραμέτρους σχεδιασμού όπως ο αριθμός και η σχετική θέση των εμποδίων, καθώς και το πάχος και το μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου της δομής του γυροειδούς. Στη δεύτερη κατηγορία, εξετάζονται αναμίκτες όπου η δομή του γυροειδούς εκτείνεται σε όλο το μήκος του κύριου αγωγού, εστιάζοντας σε παραμέτρους όπως η μεταβολή του μεγέθους του βασικού δομικού στοιχείου κατά μήκος του αγωγού και η συστροφή της γεωμετρίας. Ο κύριος στόχος αυτών των παραμετρικών μελετών είναι η ανάλυση και κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η δομή του γυροειδούς επηρεάζει τη ροή και, κατ' επέκταση, την ανάμιξη των δύο ρευστών. Μέσω αυτής της ανάλυσης, επιδιώκεται ο εντοπισμός των κρίσιμων παραμέτρων σχεδιασμού που θα οδηγήσουν στην ανάπτυξη αναμίκτη με απόδοση εφάμιλλη των βιομηχανικών προτύπων που υπάρχουν σήμερα.

Η εργασία λειτουργεί επίσης ως ένας τύπος μελέτης σκοπιμότητας για τη χρήση των γυροειδών σε στατικούς αναμίκτες, θέτοντας τη βάση για περαιτέρω έρευνα και βελτιστοποίηση του σχεδιασμού μέσω εξελιγμένων μεθόδων, όπως η βελτιστοποίηση μορφής (shape optimization). Οι μέθοδοι αυτές αναμένεται να οδηγήσουν σε πιο ακριβή και αποδοτικά αποτελέσματα, λαμβάνοντας υπόψη τις σύνθετες αλληλεπιδράσεις των παραμέτρων σχεδιασμού. Επειδή, όμως οι σχετικοί υπολογισμοί με κώδικες Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής είναι αρκετά ακριβοί, η μελέτη σκοπιμότητας έχει σκοπό να περιορίσει την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης σε συγκεκριμένα, πολλά υποσχόμενα, πεδία ανίχνευσης.



National Technical University of Athens
School of Mechanical Engineering
Fluid Section
Parallel CFD & Optimization Unit

Incorporation of Gyroid Structures in the Design of a Static Mixing Device

Diploma Thesis

Dimitrios Zisis Katmeridis

Advisor: Kyriakos C. Giannakoglou, Professor NTUA

Athens, 2024

Abstract

The subject of this thesis is the study of Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS), focusing on the gyroid structure as a potential geometry for the design of a static mixer for two different fluids. Through a series of parametric studies, the design parameters of the gyroid structure with the greatest impact on the mixer's performance are identified, with performance being quantified by the total pressure drop and the non-homogeneity coefficient, both to be minimized. The flow is considered laminar, and the two fluids are treated as incompressible and fully miscible, without any chemical reactions occurring between them. The flow is solved using the twoLiquidMixingFoam solver, which is based on Volume of Fluid (VoF) method of the OpenFOAM software.

The diploma thesis is divided in two main categories of parametric studies. In the first category, mixers with multiple obstacles made of gyroids are analyzed, focusing on design parameters such as the number and relative position of the obstacles, as well as the thickness

and size of the basic structural element of the gyroid. In the second category, mixers are examined where the gyroid structure extends along the entire length of the main pipe, focusing on design parameters such as the variation of the unit cell size of the gyroid (unit cell size grading) along the length of the pipe and the twisting of the geometry. The main goal of these parametric studies is to analyze and understand how the gyroid affects the flow and, consequently, the mixing of the two fluids. Through this analysis, the critical design parameters that lead to the development of a mixer with performance comparable to the industrial standards in use today are identified.

This work also serves as a feasibility study for the use of gyroids in static mixers, laying the groundwork for further research and optimization of the design through the advanced methods such as shape optimization. These methods are expected to lead to more precise and efficient results, taking the complex interactions of the design parameters into account. Since, however, the relevant calculations with Computational Fluid Dynamics (CFD) codes are quite expensive, the feasibility study aims to limit the search for the optimal solution to specific, promising detection fields.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή.....	4
1.1 Στατικοί Αναμίκτες Ρευστών	4
1.2 Τριπλά Περιοδικές Ελάχιστες Επιφάνειες – Γυροειδές	6
1.3 Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας	8
1.4 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	9
Κεφάλαιο 2 - Σχεδιασμός Στατικού Αναμίκτη.....	10
2.1 Εξωτερική Γεωμετρία Αναμίκτη	10
2.2 Παράμετροι Σχεδιασμού της Δομής του Γυροειδούς.....	12
2.2.1 Μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου της δομής του γυροειδούς	12
2.2.2 Πάχος της δομής του γυροειδούς	13
2.2.3 Γυροειδές με μεταβλητό μέγεθος βασικού δομικού στοιχείου	15
2.3 Ενσωμάτωση της δομής του γυροειδούς στο στατικό αναμίκτη	17
Κεφάλαιο 3 - Διφασικό Μοντέλο Ροής.....	19
3.1 Μαθηματική Διατύπωση Εξισώσεων Ροής.....	19
3.2 Το λογισμικό OpenFOAM	20
Κεφάλαιο 4 - Γένεση Υπολογιστικού Πλέγματος και Ανάλυση της Ροής	22
4.1 Γένεση Υπολογιστικού Πλέγματος	22
4.2 Οριακές Συνθήκες	23
4.3 Κριτήρια Αξιολόγησης της Απόδοσης του Αναμίκτη	25
Κεφάλαιο 5 - Αναμίκτες Πολλών Εμποδίων	26
5.1 Βασική Περίπτωση Αναμίκτη	26
5.1.1 Περίπτωση 1 ^η – Αναμίκτης με ένα εμπόδιο.....	27
5.1.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	28
5.2 Παράμετροι Σχεδιασμού Γυροειδούς.....	31
5.3 Εισαγωγή δεύτερου εμποδίου.....	31
5.3.1 Περίπτωση 2 ^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια μικρού πάχους.....	31
5.3.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	33

5.4 Πάχος της δομής του Γυροειδούς.....	33
5.4.1 Περίπτωση 3 ^η – Αναμίκτης με δυο εμπόδια μεσαίου πάχους.....	33
5.4.2 Περίπτωση 4 ^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια μεγάλου πάχους.....	35
5.4.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	36
5.5 Στροφή του 2ου εμποδίου.....	37
5.5.1 Περίπτωση 5α – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του δεύτερου κατά 90°.....	37
5.5.2 Περίπτωση 5β – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του δεύτερου κατά 180° ...	38
5.5.3 Περίπτωση 5γ – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του δεύτερου κατά 270°....	39
5.5.4 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	41
5.6 Προοδευτική μείωση μεγέθους βασικού δομικού στοιχείου γυροειδούς.....	41
5.6.1 Περίπτωση 6 ^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και μείωση του μεγέθους του βασικού δομικού στοιχείου.....	42
5.6.2 Περίπτωση 7 ^η - Αναμίκτης με τρία εμπόδια και μείωση του μεγέθους του βασικού δομικού στοιχείου.....	44
5.6.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	45
5.7 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα.....	47
Κεφάλαιο 6 - Αναμίκτες με Γυροειδή σε όλο το Μήκος του Αγωγού.....	50
6.1 Σχεδιασμός αναμίκτη με γυροειδή σε όλο το μήκος του.....	50
6.1.1 Περίπτωση 8 ^η – Αναμίκτης με γυροειδές σε όλο το μήκος του αγωγού.....	50
6.1.2 Περίπτωση 9 ^η – Αναμίκτης με γυροειδές μειωμένου μεγέθους βασικού δομικού στοιχείου σε όλο το μήκος του αγωγού.....	52
6.1.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	53
6.2 Σχεδιασμός αναμίκτη με μεταβλητό μέγεθος βασικού δομικού στοιχείου γυροειδούς... ..	54
6.2.1 Περίπτωση 10 ^η – Αναμίκτης με γυροειδές μεταβλητού μεγέθους βασικού δομικού στοιχείου γυροειδούς.....	54
6.2.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	56
6.3 Συστροφή της γεωμετρίας του εμποδίου.....	56
6.3.1 Περίπτωση 11 ^η - Αναμίκτης με γυροειδές σε όλο το μήκος του αγωγού και συστροφή 180°.....	57
6.3.2 Περίπτωση 12 ^η - Αναμίκτης με γυροειδές μεταβλητού μεγέθους βασικού δομικού στοιχείου γυροειδούς και συστροφή 180°.....	58
6.3.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	60

6.4 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα	61
Κεφάλαιο 7 - Σχεδιασμός Αποδοτικότερου Αναμίκτη	63
7.1 Παράμετροι Σχεδιασμού Αποδοτικότερου Αναμίκτη	63
7.1.1 Περίπτωση 13 ^η – Αποδοτικότερος Αναμίκτης με ένα εμπόδιο	64
7.1.2 Περίπτωση 14 ^η – Αποδοτικότερος Αναμίκτης με δύο εμπόδια.....	65
7.1.3 Περίπτωση 15 ^η – Αποδοτικότερος Αναμίκτης με δύο εμπόδια και συστροφή εμποδίων κατά 180°	66
7.1.4 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	68
7.2 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα & Προτάσεις για Αποδοτικότερο Αναμίκτη	69
Κεφάλαιο 8 - Ανακεφαλαίωση	72
Βιβλιογραφία	74

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

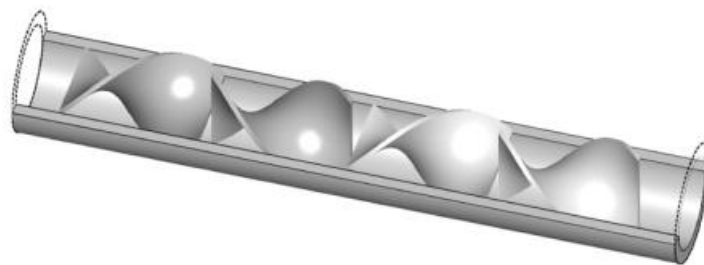
1.1 Στατικοί Αναμίκτες Ρευστών

Οι στατικοί αναμίκτες είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την ανάμιξη ρευστών διαφορετικών φάσεων. Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τους δυναμικούς αναμίκτες (dynamic mixers) οι οποίοι χρησιμοποιούν κινητά μέρη για την ανάδευση των ρευστών υποκινούμενα συνήθως από κάποιο ηλεκτροκινητήρα, και τους στατικούς αναμίκτες (static mixers) οι οποίοι αναδεύουν τη ροή με τη χρήση κατάλληλα διαμορφωμένης γεωμετρίας στο εσωτερικό τους. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται εμπόδια τοποθετημένα κατά μήκος του αγωγού, τα οποία προκαλούν συστροφή της ροής, ευνοώντας την ανάμιξη των ρευστών μέσω διάτμησης και διάχυσης.

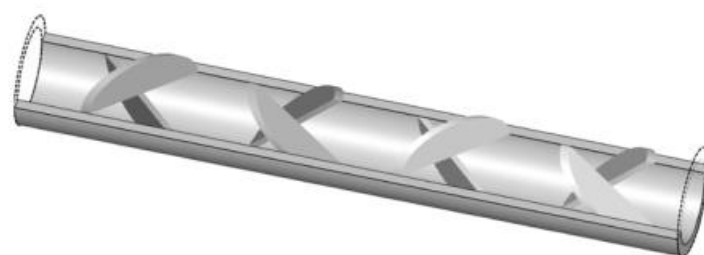
Η πρώτη μορφή στατικών αναμικτών εμφανίζεται το 1874 με τον William S. Sutherland, που κατοχύρωσε την ευρεσιτεχνία για ένα ενιαίο, πολυστρωματικό στατικό αναμικτή, που χρησιμοποιείται για την ανάμιξη αέρα με αέριο καύσιμο [1]. Με τον καιρό, πιο εξελιγμένες μορφές στατικών αναμικτών άρχισαν να εμφανίζονται στη βιομηχανία. Από τη δεκαετία του 1970, αναπτύχθηκαν στατικοί αναμίκτες με σκοπό να λειτουργούν ως χημικοί αντιδραστήρες όπως φαίνεται στη μελέτη [2]. Αρχικά, η πληθώρα αυτών των πρώτων διατάξεων είχε σκοπό την ανάμιξη ρευστών σε στρωτές ροές [3], με τη πάροδο του χρόνου επεκτάθηκε και σε προβλήματα μεταφοράς θερμότητας, τυρβώδους ροής και πολυφασικών ροών [4] [5]. Σήμερα, οι στατικοί αναμίκτες έχουν ευρύτατη χρήση στη βιομηχανία σε μεγάλο φάσμα προβλημάτων, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων υγρού-υγρού (λ.χ. εξαγωγή υγρού-υγρού), συστημάτων αερίου-υγρού (λ.χ. απορρόφηση), συστημάτων στερεού-υγρού (λ.χ. πολτούς χαρτοπολτού) και συστημάτων στερεού-στερεού (λ.χ. ανάμιξη στερεών), ενώ η χρήση τους είναι πολλές φορές προτιμότερη έναντι των δυναμικών αναμικτών, όπως αναφέρεται στη μελέτη [6].

Στο **Σχήμα 1.1**, παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα στατικών αναμικτών που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιομηχανία. Είναι εμφανές ότι η ανάδευση της ροής επιτυγχάνεται κατά την αξονική ροή του αναμικτή με τη χρήση κατάλληλα διαμορφωμένων εμποδίων. Η απόδοση ενός στατικού αναμικτή καθορίζεται με δύο κύρια κριτήρια:

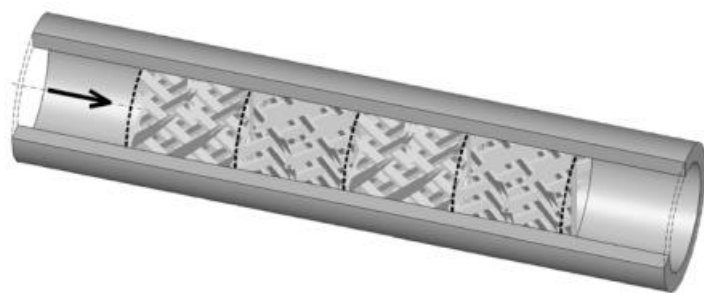
- Την ομοιογένεια του μίγματος που επιτυγχάνεται στην έξοδο του.
- Την ισχύ που απαιτείται για την υπέρβαση των τριβών και άλλων φαινομένων της ροής που καταναλώνουν ενέργεια κατά μήκος του αναμικτή. Η ισχύς αυτή αντιστοιχεί στην πτώση ολικής πίεσης στη διαδρομή των ρευστών.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 1.1: Στατικοί αναμίκτης του εμπορίου και εφαρμογές που χρησιμοποιούνται [6]: (α) Kenics – Εφαρμογές που απαιτείται καλή ανάμιξη με σχετικά μικρή απαιτούμενη ενέργεια (Χημικές διεργασίες, επεξεργασία νερού κλπ.), (β) Ross LPD – Εφαρμογές που απαιτείται χαμηλή πτώση πίεσης (επεξεργασία τροφίμων, φαρμάκων κλπ.), (γ) Sulzer SMX – Εφαρμογές που απαιτείται πολύ καλή ομοιομορφία του μίγματος (Χημικές διεργασίες, παραγωγή πολυμερών κλπ).

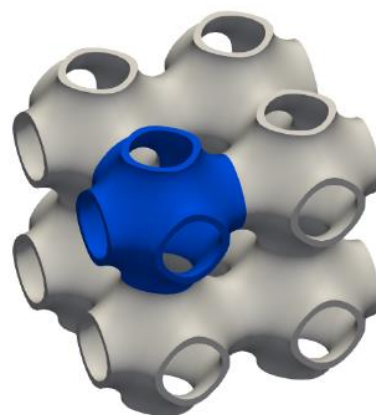
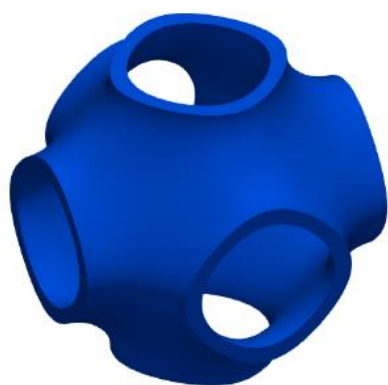
1.2 Τριπλά Περιοδικές Ελάχιστες Επιφάνειες – Γυροειδές

Μέσα από τη μελέτη και την έρευνα που πραγματοποιήθηκε για την προετοιμασία αυτής της εργασίας, έγινε αντιληπτή η ανάγκη εύρεσης κατάλληλων γεωμετρικών δομών για τη κατασκευή εμποδίων που θα ενσωματωθούν σε στατικούς αναμίκτες. Αναλυτικότερα, αναζητήθηκαν σύνθετες γεωμετρικές δομές που επαναλαμβάνονται στο χώρο και αποτελούνται από συνεχείς επιφάνειες, με πολλές διακλαδώσεις. Τα κριτήρια αυτά πληρούν οι ελάχιστες επιφάνειες.

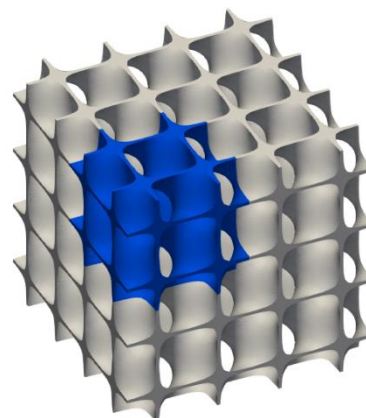
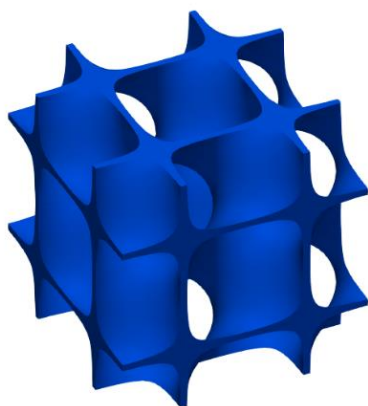
Οι ελάχιστες επιφάνειες μελετήθηκαν για πρώτη φορά τον 18ο αιώνα από τον μαθηματικό Joseph L. Lagrange, ο οποίος διατύπωσε την εξίσωση που τις περιγράφει. Ο όρος "ελάχιστη επιφάνεια" προέκυψε από το γεγονός ότι ελαχιστοποιούν την επιφάνεια, υπό κάποιο περιορισμό, όπως ο συνολικός όγκος που περικλείεται από κάποιο σταθερό όριο. Ένα κλασικό παράδειγμα είναι η επιφάνεια μιας σαπουνόφουσκας, η οποία σχηματίζει μια ελάχιστη επιφάνεια προσπαθώντας να καλύψει το μικρότερο δυνατό εμβαδόν. Σε πιο αυστηρή διατύπωση ο όρος "ελάχιστη επιφάνεια" αναφέρεται σε επιφάνειες που η μέση καμπυλότητα H ισούται με μηδέν, με τη διατύπωση αυτή να επεκτείνεται και σε επιφάνειες που διατηρούν σταθερή μέση καμπυλότητα διάφορη του μηδενός.

Η μελέτη μιας ιδιαίτερης κατηγορίας ελάχιστων επιφανειών ξεκίνησε από το μαθηματικό Hermann A. Schwarz, ο οποίος το 1865, διατύπωσε τα πρώτα παραδείγματα τριπλά περιοδικών ελάχιστων επιφανειών (Triple Periodic Minimal Surfaces – TPMS) με τις επιφάνειες Primitive (P) και Diamond (D) [7]. Ενώ το έργο του συνέχισε το 1883 ο μαθητής του Edvard R. Neovius, με την εισαγωγή της TPMS επιφάνειας Neovius [8], **Σχήμα 1.2**. Οι γεωμετρίες αυτές χωρίζουν το χώρο σε δύο διακριτές αλλά μη-επικαλυπτόμενες περιοχές, εμφανίζοντας υψηλή αναλογία επιφάνειας προς όγκο, καθιστώντας τις ιδανικές για διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές.

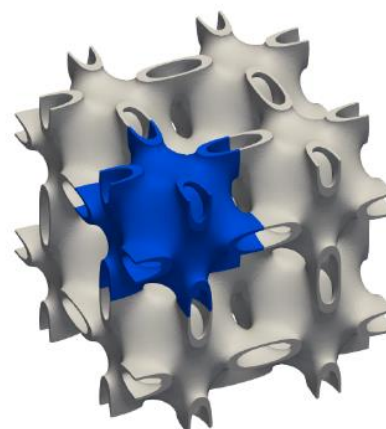
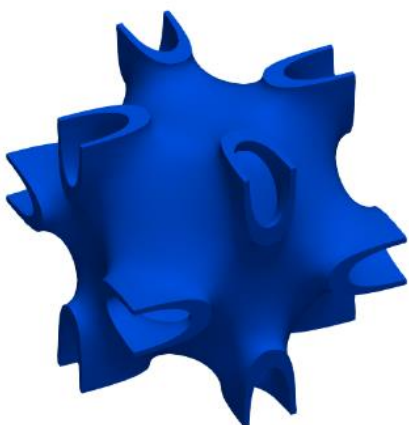
Μια τριπλά περιοδική ελάχιστη επιφάνεια που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και είναι και το αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής εργασίας είναι το γυροειδές (Gyroid), **Σχήμα 1.3**. Το γυροειδές (Gyroid) είναι μια TPMS που ανακαλύφθηκε από το φυσικό και επιστήμονα υπολογιστών Alan Schoen το 1970 κατά τη διάρκεια της ερευνάς του στη NASA [9]. Χαρακτηρίζεται από τη σύνθετη, λαβυρινθώδη γεωμετρία που χωρίζει το χώρο σε δύο συνεχείς περιοχές οι οποίες δεν τέμνονται και δεν περιέχουν ευθείες γραμμές. Αυτή η δομή σε συνδυασμό με τη υψηλή αναλογία επιφάνειας ανά μονάδα όγκου, καθιστά τη δομή του γυροειδούς κατάλληλη για διάφορες εφαρμογές της μηχανολογίας. Τα γυροειδή έχουν βρει ευρεία χρήση σε διάφορους τομείς λόγω των προαναφερθεισών ιδιοτήτων. Στην κατασκευή προηγμένων υλικών με χρήση τεχνικών της προσθετικής μηχανικής όπως η τριδιάστατη εκτύπωση, χρησιμοποιείται ως γεωμετρία πλήρωσης για τη ανάπτυξη ελαφρών και ισχυρών υλικών που βρίσκουν εφαρμογή στην αεροδιαστημική και την αυτοκινητοβιομηχανία [10] [11] [12].



(α)



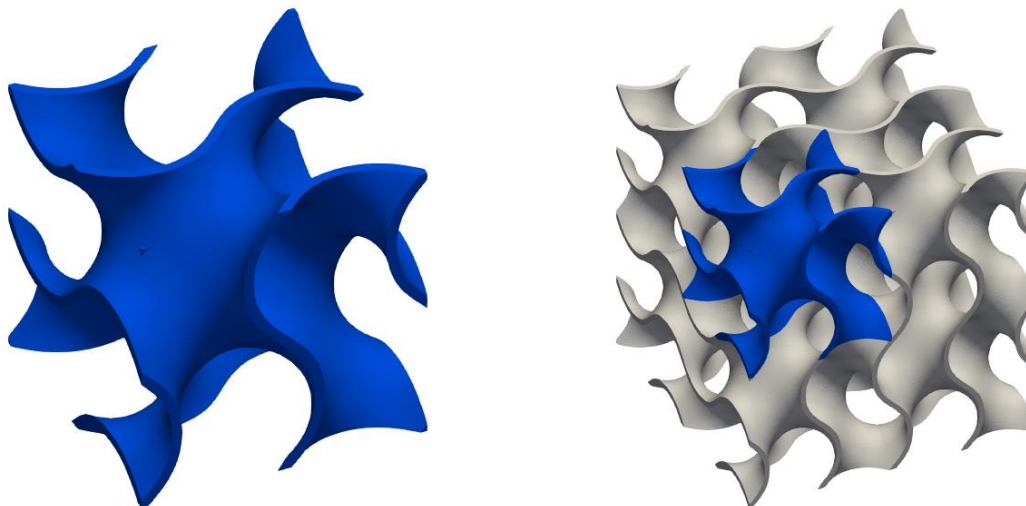
(β)



(γ)

Σχήμα 1.2: Τριπλά Περιοδικές Ελάχιστες Επιφάνειες (TPMS) – Βασικό δομικό στοιχείο (αριστερά) και Δομή πλέγματος (δεξιά): (α) Primitive (P), (β) Diamond (D), (γ) Neovius.

Στις εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας, τα γυροειδή χρησιμοποιούνται ευρέως ως τα κύρια δομικά στοιχεία σε εναλλάκτες θερμότητας και ψήκτρες [13]. Ακόμη χρησιμοποιούνται ευρύτατα, λόγω της μεγάλης αναλογίας επιφάνειας προς όγκο σε καταλύτες, βελτιώνοντας την απόδοσή τους [14].



Σχήμα 1.3: Γυροειδές (Gyroid) – Βασικό δομικό στοιχείο (αριστερά) και Δομή πλέγματος (δεξιά).

1.3 Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Τις βάσεις για το αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής εργασίας έθεσαν προηγούμενες ερευνητικές προσπάθειες, που ολοκληρώθηκαν στη Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης (ΜΠΥΡΒ) του ΕΜΠ, συγκεκριμένα στη διπλωματική εργασία του Ν. Γαλανού [15] και τη διδακτορική διατριβή του Π. Αλεξιά [16]. Οι μελέτες αυτές ανέπτυξαν υπολογιστικό μοντέλο το οποίο εφαρμόζει τη συνεχή συζυγή μέθοδο (continuous adjoint method) σε προβλήματα διαφασικών ροών με αναμίξιμα ρευστά, και η εφαρμογή του στη βελτιστοποίηση ενός στατικού αναμίκτη με πολύ απλούστερους σχηματισμούς, με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ολικής πίεσης και τη μεγιστοποίηση της ομοιομορφίας στην έξοδο του. Το λογισμικό της [15] χρησιμοποιείται σε αυτήν την εργασία, αυτή τη φορά σε περιπτώσεις με γυροειδή.

Στη διπλωματική αυτή εργασία πραγματοποιείται παραμετρική μελέτη, η οποία στοχεύει να διερευνήσει τη δυνατότητα χρήσης και ενσωμάτωσης των γυροειδών στο σχεδιασμό στατικού αναμίκτη. Ειδικότερα η εργασία εξετάζει και αξιολογεί τις διάφορες σχεδιαστικές παραμέτρους της δομής του γυροειδούς που επηρεάζουν την απόδοση των υπό εξέταση αναμικτών, ώστε να εντοπισθούν τα πιθανά διαστήματα ανίχνευσης της βέλτιστης λύσης από πιο προηγμένους μεθόδους βελτιστοποίησης, περιορίζοντας έτσι το υπολογιστικό κόστος.

1.4 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Η διπλωματική εργασία δομείται ως εξής:

- Στο κεφάλαιο 2 καθορίζονται οι βασικές διαστάσεις του αναμίκτη και αναλύεται ο τρόπος ενσωμάτωσης του γυροειδούς για τη κατασκευή του αναμίκτη, καθώς και ο τρόπος κατά τον οποίο μετασχηματίζεται η εξίσωση του γυροειδούς για να τροποποιηθούν οι διάφορες παράμετροι σχεδιασμού του.
- Στο κεφάλαιο 3 αναλύονται οι εξισώσεις του διφασικού μοντέλου ροής και παρουσιάζεται ο επιλύτης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής που χρησιμοποιείται.
- Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η γένεση του υπολογιστικών πλεγμάτων και οι οριακές συνθήκες στις διάφορες οριακές επιφάνειες του χωρίου.
- Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η πρώτη κατηγορία παραμετρικών μελετών, στην οποία εξετάζεται η επιρροή των βασικών παραμέτρων σχεδιασμού του γυροειδούς για αναμίκτη με πολλαπλά εμπόδια από γυροειδή κατά μήκος του.
- Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η δεύτερη κατηγορία περιπτώσεων υπό μελέτη, στην οποία εξετάζεται η επιρροή των παραμέτρων σχεδιασμού του γυροειδούς στις περιπτώσεις που αυτό καλύπτει όλο το μήκος του αναμίκτη.
- Στο κεφάλαιο 7 γίνεται χρήση όλων των συμπερασμάτων από τα ανωτέρω και με τη χρήση αυτών προκύπτει ο σχεδιασμός νέου αποδοτικότερου αναμίκτη. Ακολουθεί η συγκεντρωτική παρουσίαση όλων των αποτελεσμάτων.
- Στο κεφάλαιο 8 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας και εξάγονται συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 2 - Σχεδιασμός Στατικού

Αναμίκτη

Το κεφάλαιο ανατρέπει τη γεωμετρία και τις βασικές διαστάσεις του στατικού αναμίκτη που χρησιμοποιείται στην εργασία. Αναλύονται οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού της δομής του γυροειδούς και πως αυτές τροποποιούνται μέσα από την εξίσωση που την περιγράφει. Ακόμη παρουσιάζεται ο τρόπος ενσωμάτωσης του γυροειδούς στην κατασκευή του αναμίκτη.

2.1 Εξωτερική Γεωμετρία Αναμίκτη

Η πλειοψηφία των στατικών αναμικτών που συναντάται στη βιομηχανία έχουν κυλινδρική μορφή. Αυτό συμβαίνει διότι η μορφή αυτή επιτρέπει την ομοιόμορφη κατανομή της ροής, την αποφυγή δημιουργίας περιοχών στασιμότητας και κυριότερα διευκολύνει την ενσωμάτωση σε ήδη υπάρχοντα συστήματα σωληνώσεων. Επομένως, ο αναμίκτης που μελετάται είναι κυλινδρικής μορφής.

Το αδιάστατο μήκος του κυρίου μέρους ενός στατικού αναμίκτη αποτελεί μια από τις κύριες σχεδιαστικές παραμέτρους και ορίζεται ως εξής:

$$L' = \frac{L}{D} \quad (2.1)$$

όπου L το μήκος του κύριου αγωγού του αναμίκτη και D η εσωτερική διάμετρος του.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η βασική γεωμετρία του αγωγού περιορίζεται σε ένα αγωγό σταθερού μήκους και διαμέτρου. Η εσωτερική διάμετρος του αγωγού επιλέχθηκε να είναι 100 mm , που αντιστοιχεί σε μια μέση τιμή στατικού αναμίκτη μικρού μεγέθους σύμφωνα με παραδείγματα που εφαρμόζονται στη βιομηχανία. Η τιμή του αδιάστατου μήκους επιλέχθηκε να είναι $L' = 3.85$, το οποίο αντιστοιχεί σε μια ρεαλιστική τιμή για στατικό αναμίκτη μικρού μήκους. Επομένως, σύμφωνα με την **εξ. (2.1)** το πραγματικό μήκος του αγωγού είναι:

$$L = L' \cdot D = 385 \text{ mm}$$

Ακόμη, σχεδιάζεται κατάλληλη γεωμετρία εισόδου και εξόδου. Η είσοδος αποτελείται από δύο διαφορετικούς αγωγούς εσωτερικής διαμέτρου 50 mm , από τις οποίες εισέρχονται τα δύο ρευστά με διαφορετικές ιδιότητες. Οι δύο είσοδοι είναι πλήρως ευθυγραμμισμένες με τον κύριο άξονα του αναμίκτη και σταδιακά προσαρμόζονται στο σχήμα του κύριου

αγωγού. Επίσης, ο αναμίκτης διαθέτει ενιαία έξοδο εσωτερικής διαμέτρου 50mm και ευθυγραμμισμένη με το κυρίως σώμα του αγωγού. Η διαμόρφωση του αγωγού εξόδου λογίζεται ως ενεργό τμήμα του αναμίκτη, καθώς το επιπλέον μήκος που προσδίδει στον αγωγό δίνει τη δυνατότητα στα φαινόμενα στροβιλότητας της ροής κατάντι των εμποδίων να εξελιχθούν και η στένωση της διατομής ευνοούν περαιτέρω την ανάμιξη των δύο ρευστών. Ο **Πίνακας 2.1** παρουσιάζει τις βασικές διαστάσεις του αναμίκτη, με την εξωτερική γεωμετρία να φαίνεται στο **Σχήμα 2.1** που παραμένει σταθερή σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται στην εργασία, εστιάζοντας έτσι μόνο στις παραμέτρους σχεδιασμού της δομής του γυροειδούς για τη βελτίωση της απόδοσης του αναμίκτη.

Ο σχεδιασμός της εξωτερικής γεωμετρίας του αναμίκτη έγινε σε περιβάλλον λογισμικού τύπου CAD, με τη χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος SolidWorks.



Σχήμα 2.1: Η εξωτερική γεωμετρία του αναμίκτη: Αριστερά, οι δύο εισοδοί που εισέρχονται τα δύο ρεύματα ρευστών με διαφορετικές ιδιότητες. Δεξιά, η ενιαία έξοδος του ομογενοποιημένου μείγματος. Στη μέση, το κυλινδρικό σώμα του αναμίκτη.

Διάσταση	Τιμή (mm)
Εσωτερική διάμετρος κυρίου σώματος	100
Μήκος αγωγού κυρίως σώματος	385
Μήκος αγωγού εισόδου και εξόδου	100
Εσωτερική διάμετρος εισόδου και εξόδου	50

Πίνακας 2.1: Βασικές διαστάσεις γεωμετρίας αναμίκτη.

2.2 Παράμετροι Σχεδιασμού της Δομής του Γυροειδούς

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω και τα διάφορα παραδείγματα στατικών αναμικτών που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία, στο εσωτερικό του κυρίου σώματος του αναμίκτη είναι απαραίτητη η ύπαρξη κατάλληλων διαμορφωμένων εμποδίων που ενισχύουν τα φαινόμενα συστροφής και ανακυκλοφορίας της ροής, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.1**. Εδώ χρησιμοποιούνται κατάλληλες διαμορφώσεις της δομής του γυροειδούς που επέχουν θέση εμποδίων. Στην ενότητα αυτή, αναλύονται οι βασικοί παράμετροι σχεδιασμού της δομής του γυροειδούς και πώς αυτές τροποποιούνται μέσω της εξίσωσης που το περιγράφει. Η επιφάνεια του γυροειδούς περιγράφεται από την εξίσωση:

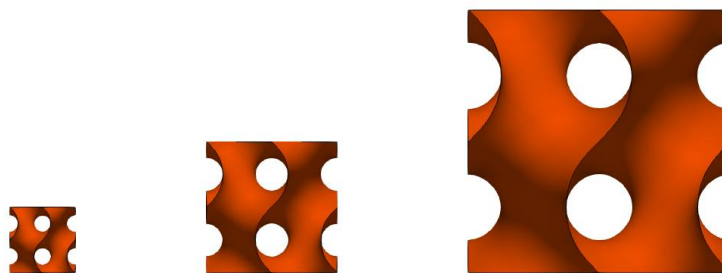
$$\sin(X) \cos(Y) + \sin(Y) \cos(Z) + \sin(Z) \cos(X) = 0 \quad (2.2)$$

όπου $X = 2\alpha\pi x$, $Y = 2\beta\pi y$ και $Z = 2\gamma\pi z$ με τα α , β και γ θετικές σταθερές και $x, y, z \in [0,1]$.

Αναλυτικότερα οι παράμετροι σχεδιασμού που τροποποιούνται είναι το μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου και το πάχος του γυροειδούς, καθώς γίνεται και ανάλυση για το τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνονται γυροειδή με μεταβλητό μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου κατά μήκος του αγωγού. Σύμφωνα με αυτές τις παραμέτρους κατασκευάζονται όλες οι διαφορετικές περιπτώσεις αναμίκτη που εξετάζονται στην εργασία.

2.2.1 Μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου της δομής του γυροειδούς

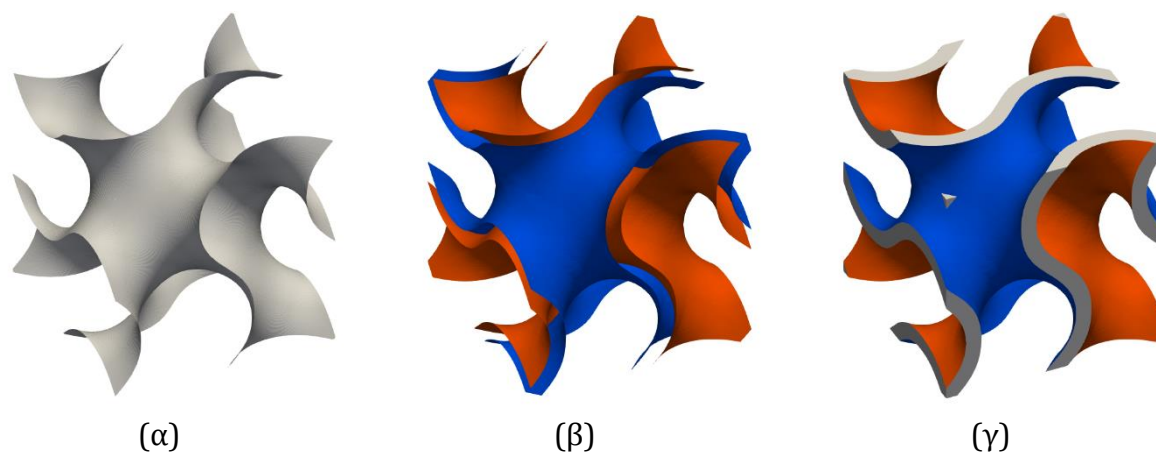
Η πρώτη παράμετρος σχεδιασμού που αναλύεται είναι αυτή του μεγέθους του βασικού δομικού στοιχείου του γυροειδούς. Αυτό καθορίζεται από τις θετικές σταθερές α , β και γ της **εξ. (2.2)**, οι οποίες επηρεάζουν το μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου στις διευθύνσεις x , y και z αντίστοιχα. Αναλυτικότερα, η αύξηση των τιμών των α , β και γ μειώνει, ενώ η μείωση των τιμών αυτών αυξάνει το μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.2**:



Σχήμα 2.2: Βασικό δομικό στοιχείο της επιφάνειας του γυροειδούς - Αριστερά $\alpha = \beta = \gamma = 2$, Κέντρο $\alpha = \beta = \gamma = 1$, Δεξιά $\alpha = \beta = \gamma = 0.5$

2.2.2 Πάχος της δομής του γυροειδούς

Η δεύτερη παράμετρος σχεδιασμού που αναλύεται είναι το πάχος της δομής του γυροειδούς. Η εξ. (2.2) στη μορφή $F(x, y, z) = 0$, περιγράφει μια επιφάνεια μηδενικού πάχους, επομένως γίνεται αντιληπτό πως χρειάζεται να προστεθεί ένα σχετικό πάχος για την κατασκευή κατάλληλου εμποδίου που θα ενσωματωθεί στον αναμίκτη. Χρησιμοποιώντας την εξ. (2.2) ως μέση επιφάνεια προστίθεται πάχος, μετατοπίζοντας την επιφάνεια κατά την κάθετη και την αντίθετη αυτής κατεύθυνσης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.3**:



Σχήμα 2.3: Διαδικασία παραγωγής της στερεής δομής του γυροειδούς: Αριστερά η μέση επιφάνεια που περιγράφεται από την εξ. (2.2). Στη μέση, οι κάθετα μετατοπισμένες επιφάνειες που προσδίδουν το πάχος. Δεξιά το τελικό στερεό σχήμα.

Αυτό επιτυγχάνεται γράφοντας την εξ. (2.2) στη μορφή:

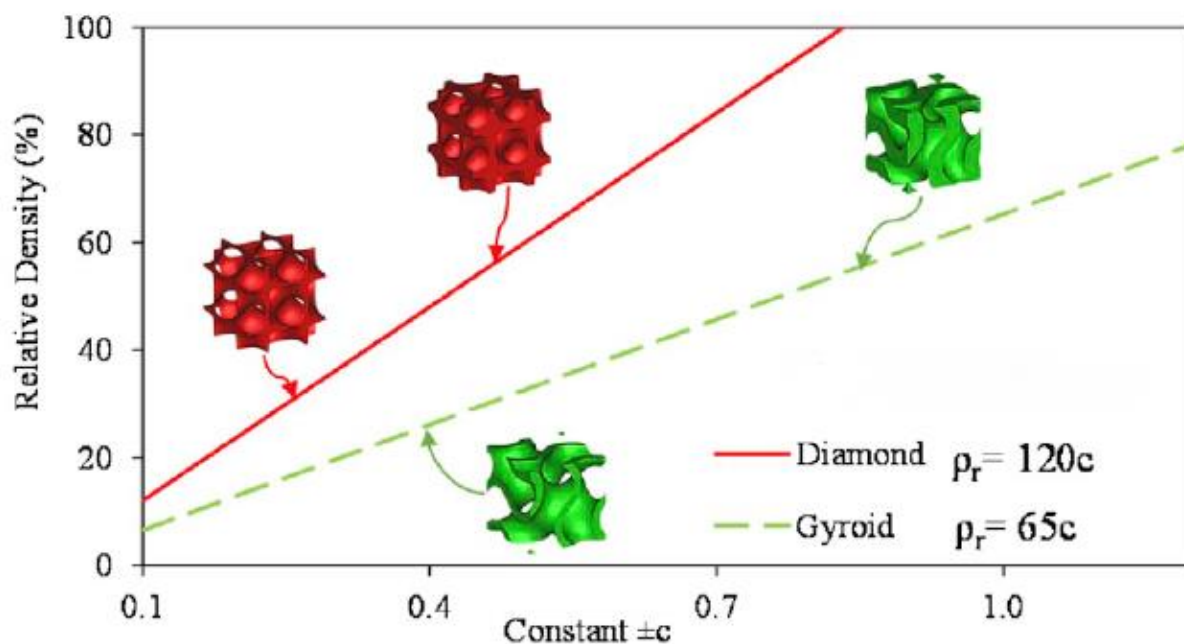
$$\sin(X) \cos(Y) + \sin(Y) \cos(Z) + \sin(Z) \cos(X) = \pm c \quad (2.3)$$

Αυτή η μορφή περιγράφει τις δύο μετατοπισμένες επιφάνειες, οι οποίες περικλείουν τον όγκο που αντιστοιχεί στο τελικό στερεό γυροειδές. Η σταθερά c ποσοτικοποιεί τη σχετική πυκνότητα όγκου του γυροειδούς, δηλαδή τη σχέση του όγκου του βασικού δομικού στοιχείου προς τον όγκο του κελιού που το περικλείει και παίρνει τιμές μεταξύ του 0 και 1, **Σχήμα 2.4**. Από δοκιμές για διάφορες τιμές του c , υπολογίζεται η προσεγγιστική σχέση που συνδέει τη σχετική πυκνότητα με τη σταθερά c :

$$\rho_{relative} = 65c \quad (2.4)$$



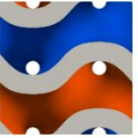


Το τελικό πάχος t της επιφάνειας προκύπτει ομοίως από την προσεγγιστική σχέση:

$$t = 0.00354\rho_{relative} = 0.23c \quad (2.5)$$



Σχήμα 2.4: Σχετική πυκνότητα όγκου σε σχέση με τη σταθερά c [17].

Ο **Πίνακας 2.2** παρουσιάζει τις τιμές των συντελεστών α, β, γ και c , και τη συσχέτιση τους προς το τελικό μήκος L του βασικού δομικού στοιχείου και το τελικό πάχος t για τις διατάξεις της δομής του γυροειδούς που χρησιμοποιούνται:

									
α, β, γ	1.0825	α, β, γ	1.0825	α, β, γ	1.0825	α, β, γ	2.165	α, β, γ	4.33
c	0.133	c	0.348	c	0.568	c	0.133	c	0.133
L (mm)	92.5	L (mm)	92.5	L (mm)	92.5	L (mm)	46.25	L (mm)	23.125
t (mm)	3	t (mm)	8	t (mm)	13	t (mm)	3	t (mm)	3

Πίνακας 2.2: Τιμές για τις βασικές παραμέτρους σχεδιασμού της δομής του γυροειδούς.

2.2.3 Γυροειδές με μεταβλητό μέγεθος βασικού δομικού στοιχείου

Η τρίτη και τελευταία παράμετρος σχεδιασμού που αναλύεται είναι η κατασκευή γυροειδούς με μεταβλητό μέγεθος βασικού δομικού στοιχείου κατά τη μία διεύθυνσή του.

Η **εξ. (2.2)** εκφράζει μια τριπλά περιοδική ελάχιστη επιφάνεια με σταθερό μήκος του βασικού στοιχείου και σταθερού πάχους [18]. Για να επιτευχθεί γυροειδές με μεταβλητό μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου, η **εξ. (2.2)** γράφεται στη μορφή:

$$\sin(u_{(x)}) \cos(v_{(y)}) + \sin(v_{(y)}) \cos(w_{(z)}) + \sin(w_{(z)}) \cos(u_{(x)}) = c \quad (2.6)$$

όπου

$$u_{(x)} = a_{(x,y,z)}x, v_{(x)} = \beta_{(x,y,z)}y \text{ και } w_{(x)} = \gamma_{(x,y,z)}z$$

Συγχρόνως, για να διατηρηθεί η ομοιομορφία του σχήματος και να αποφευχθούν τυχόν παραμορφώσεις, επιβάλλεται σε κάθε σημείο η συνθήκη :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.7)$$

η οποία εξασφαλίζει ότι η μεταβολή του μεγέθους του βασικού δομικού στοιχείου είναι ισοδύναμη προς όλες τις κατευθύνσεις, ώστε να διατηρείται η συμμετρία και η γεωμετρική ακεραιότητα της δομής του γυροειδούς.

Δίνεται το παράδειγμα γραμμικής βαθμιαίας αλλαγής κατά μήκος του άξονα z, από το z_{min} ως το z_{max} με αλλαγή του μεγέθους του κελιού από c_{min} σε $c_{max} = mc_{min}$. Από τις οριακές συνθήκες προκύπτει:

$$\text{Αν } z = z_{min} \text{ τότε } a_{(x,y,z)} = \beta_{(x,y,z)} = \gamma_{(x,y,z)} = 1$$

$$\text{Αν } z = z_{max} \text{ τότε } a_{(x,y,z)} = \beta_{(x,y,z)} = \gamma_{(x,y,z)} = m$$

Η μεταβολή του βασικού μήκους μόνο κατά τη διεύθυνση του άξονα z, έχει ως αποτέλεσμα οι μεταβλητές α, β, γ να εξαρτώνται μόνο από το z. Επομένως η **εξ. (2.7)** γίνεται:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = a_{(z)} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \beta_{(z)} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial \gamma(z)}{\partial x} + \gamma(z) \quad (2.10)$$

Από τη γραμμική συσχέτιση μεταξύ των σημείων $A(z_{min}, 1)$ και $B(z_{max}, m)$, και τις εξ. (2.8) και (2.9), προκύπτει:

$$a_{(z)} = \beta_{(z)} = k_1 z + C_1 \quad (2.11)$$

όπου

$$k_1 = \frac{m - 1}{z_{max} - z_{min}}, \quad C_1 = 1 - C_1 k_1$$

Ενώ, από τις εξ. (2.6) και (2.10), προκύπτει:

$$\frac{\partial \gamma(z)}{\partial x} + \gamma(z) = k_1 z + C_1 \quad (2.12)$$

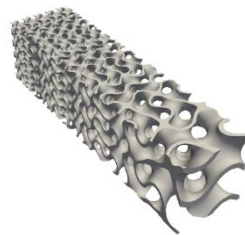
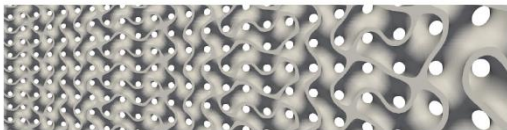
η οποία είναι μια μη-ομογενής γραμμική διαφορική εξίσωση που έχει λύση της μορφής:

$$\gamma(z) = \frac{k_1}{2} \cdot z + C_1 + \frac{C_0}{2} \quad (2.13)$$

όπου

$$C_0 = \frac{1}{2} k_1 z_{min}^2$$

Στο **Σχήμα 2.5** παρουσιάζεται η γεωμετρία γυροειδούς με μεταβλητό μήκος βασικού δομικού στοιχείου. Πιο συγκεκριμένα από $z_{min} = 0 \text{ mm}$ ως $z_{max} = 800 \text{ mm}$ και για $c_{min} = 1$ και $c_{max} = 3c_{min} = 3$

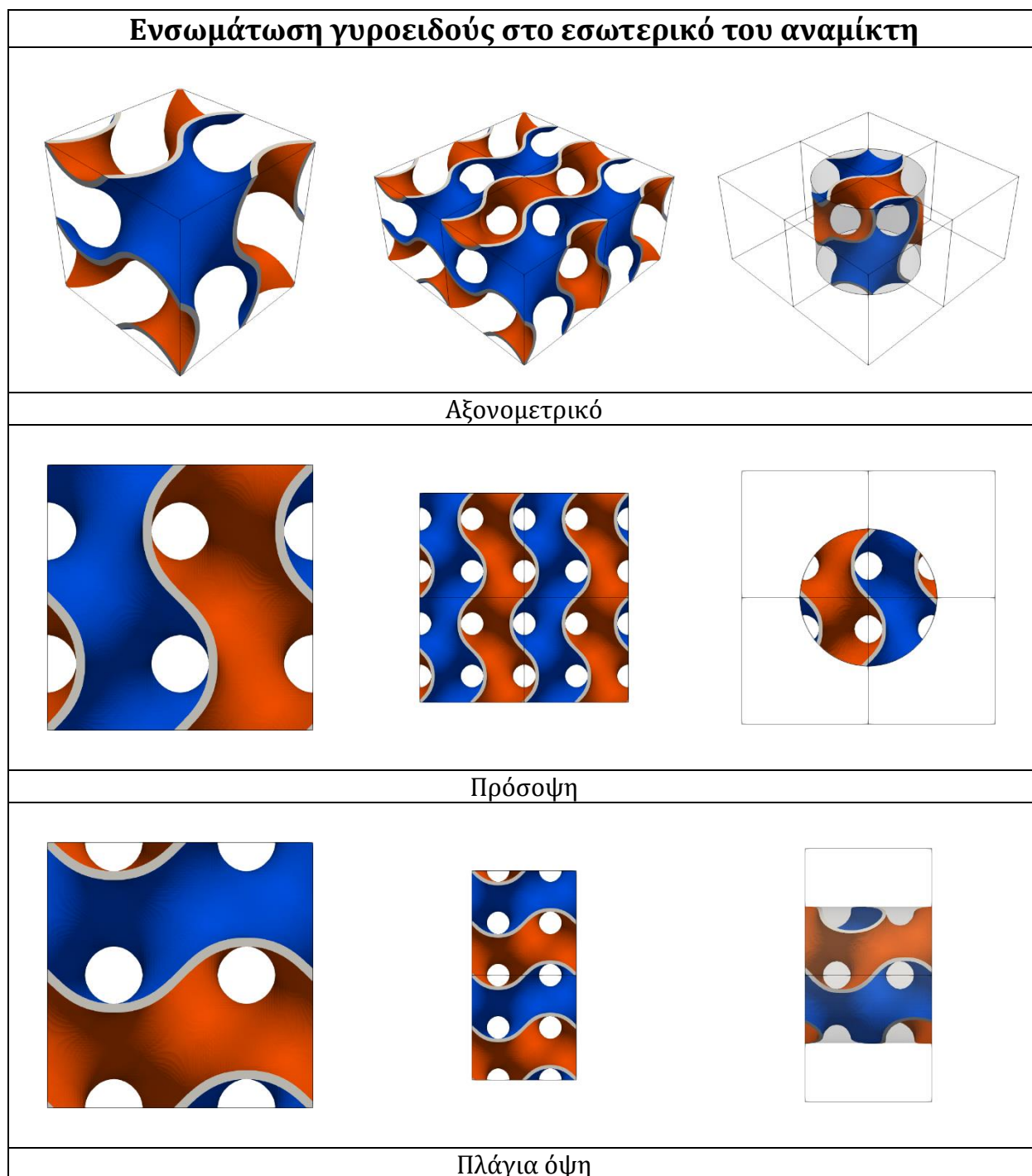


Σχήμα 2.5: Γυροειδές με μεταβλητό μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου.

2.3 Ενσωμάτωση της δομής του γυροειδούς στο στατικό αναμίκτη

Για τη δημιουργία των επιφανειών που περιγράφονται στο **Σχήμα 2.3**, χρησιμοποιήθηκε το MSLattice [19], το οποίο αποτελεί ελεύθερο λογισμικό βασισμένο στη MATLAB που δίνει τη δυνατότητα γένεσης τριπλά περιοδικών ελάχιστων επιφανειών (TPMS), σε στερεολιθογραφική μορφή (STL), κατάλληλη για περαιτέρω επεξεργασία σε κάποιο σχεδιαστικό πακέτο. Η επεξεργασία και οι απαραίτητοι μετασχηματισμοί των επιφανειών που περιγράφονται στις περιπτώσεις που εξετάζονται στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν με το Blender [20], λογισμικό ανοιχτού κώδικα που χρησιμοποιείται ευρύτατα για τριδιάστατη μοντελοποίηση αρχείων αυτής της μορφής.

Η τριπλή περιοδικότητα που εμφανίζουν τα γυροειδή, δίνει τη δυνατότητα της κατασκευής ενός πλέγματος από 4 βασικά δομικά στοιχεία μήκους $L_{GYROID} = 92.5 \text{ mm}$, τα οποία αποκόπτονται στο επιθυμητό κυλινδρικό σχήμα διαμέτρου $D = 100 \text{ mm}$, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.6**. Όσο για την επιλογή του πάχους του γυροειδούς, επιλέχθηκε να είναι στα 3 mm . Η επιλογή αυτή αντιστοιχεί στο κάτω όριο του πάχους που συναντάται στα εμπόδια στατικών αναμικτών παρόμοιου μεγέθους που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιομηχανία. Το πάχος αυτό εξασφαλίζει πως ο αναμίκτης είναι ικανός να ανταπεξέλθει στις μηχανικές απαιτήσεις του προβλήματος, χωρίς να υφίσταται παραμορφώσεις ή στρεβλώσεις της γεωμετρίας του. Όσον αφορά τη δομή του γυροειδούς, η μείωση του πάχους έχει ως αποτέλεσμα τη μικρότερη στένωση της διατομής, αποφεύγοντας έτσι την αύξηση των απωλειών ολικής πίεσης.



Σχήμα 2.6: Κατασκευή εμποδίου αναμίκτη με χρήση γυροειδούς: Αριστερά το βασικό δομικό στοιχείο μήκους 92.5 mm που επαναλαμβάνεται στο χώρο. Στη μέση το πλέγμα από 4 βασικά δομικά στοιχεία, Δεξιά η αποκοπή και η προσαρμογή στο κυλινδρικό σχήμα του αναμίκτη. Ο διαφορετικός χρωματισμός των επιφανειών έγινε για την ευκολότερη κατανόηση του σχήματος.

Κεφάλαιο 3 - Διφασικό Μοντέλο Ροής

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι εξισώσεις χρονικά μόνιμες Navier-Stokes για το μοντέλο διφασικής ροής. Ακόμη παρουσιάζεται ο επιλύτης της ροής twoLiquidMixingFoam που χρησιμοποιείται στην εργασία, ο οποίος βασίζεται στο μοντέλο κλάσματος όγκου (VoF Method) [21] [22] [23]

3.1 Μαθηματική Διατύπωση Εξισώσεων Ροής

Το μοντέλο διφασικής ροής περιλαμβάνει της εξισώσεις διατήρησης της συνέχειας και ορμής. Υποθέτοντας στρωτή ροή διατυπώνονται ως:

$$R^p = -\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$R_i^u = \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial(\mu \varepsilon_{ij})}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0, i = 1, 2, 3 \quad (3.2)$$

όπου

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.3)$$

είναι ο τανυστής παραμορφώσεων. Ενώ, οι εξισώσεις γράφονται σύμφωνα με τη σύμβαση του Einstein, σύμφωνα με την οποία επαναλαμβανόμενοι δείκτες στον ίδιο όρο υποδηλώνουν άθροιση.

Ακολουθείται η μέθοδος κλάσματος όγκου (Volume Fraction Method – VoF), κατά την οποία εισάγεται το βαθμωτό μέγεθος α (το κλάσμα όγκου που καταλαμβάνει ένα από τα δύο ρευστά προς τον όγκο του αντίστοιχου υπολογιστικού κελιού). Το μέγεθος α , το οποίο θα αναφέρεται ως κλάσμα όγκου στο υπόλοιπο της εργασίας, φράσσεται μεταξύ των τιμών 0 και 1. Η τιμή 0 σημαίνει ότι ο όγκος του αντίστοιχου υπολογιστικού κελιού καταλαμβάνεται εξ ολοκλήρου από το δεύτερο ρευστό, ενώ η τιμή 1 σημαίνει ότι το κελί καταλαμβάνεται εξ ολοκλήρου από το πρώτο ρευστό. Η εξίσωση μεταφοράς του κλάσματος όγκου έχει τη μορφή:

$$R^\alpha = \frac{\partial \alpha}{\partial \tau} + u_i \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (3.4)$$

όπου D ο συντελεστής διάχυσης μάζας. Αυτός λαμβάνει σταθερή τιμή μέσα στο χωρίο ολοκλήρωσης, με την τιμή του να εξαρτάται από χαρακτηριστικά της ροής, όπως η θερμοκρασία, η συνεκτικότητα και το μέγεθος των σωματιδίων των φάσεων και μπορεί να προσδιορισθεί και πειραματικά, όπως φαίνεται και στους αντίστοιχους πίνακες [24]. Είναι προφανές ότι μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή διάχυσης ευνοούν την ανάμιξη μεταξύ των δύο ρευστών. Η εξ. (3.4) είναι ισοδύναμη με τον Νόμο Διάχυσης του Fick.

Εδώ να σημειωθεί ότι, παρόλο που τα δύο ρευστά είναι ασυμπίεστα, η πυκνότητα του μείγματος δεν είναι σταθερή μέσα στο χώρο ολοκλήρωσης. Για ρευστά διαφορετικής πυκνότητας, υπάρχει μια μη-ομοιόμορφη κατανομή της πυκνότητας, η οποία εξαρτάται από την κατανομή του κλάσματος όγκου. Άρα, δεν μπορεί να αγνοηθεί η επίδραση της χωρικής παραγωγού $\frac{\partial \rho}{\partial x_i}$, όπως συμβαίνει στην περίπτωση μονοφασικής ροής ενός ρευστού, με το ίδιο να ισχύει για τις χρονικές παραγωγούς της δυναμικής συνεκτικότητας μ . Η τιμή της πυκνότητας και της συνεκτικότητας του μείγματος προκύπτει ως συνάρτηση του κλάσματος όγκου και των σταθερών τιμών πυκνότητας και συνεκτικότητας των δύο φάσεων:

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (3.5)$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \quad (3.6)$$

όπου οι δείκτες 1,2 υποδηλώνουν το πρώτο και δεύτερο ρευστό αντίστοιχα. Με τις εξ. (3.5) και (3.6) ολοκληρώνεται το σύστημα εξισώσεων της ροής.

3.2 Το λογισμικό OpenFOAM

Το OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation) είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα που έχει σχεδιαστεί για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων μηχανικής, με ιδιαίτερη έμφαση στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics, CFD). Δημιουργήθηκε αρχικά το 1989 από τον Henry Weller με την ονομασία "FOAM" και κυκλοφόρησε επίσημα ως OpenFOAM το 2004 από τον Weller, τον Chris Greenshields και τον Mattijs Janssens. Από την κυκλοφορία του, το OpenFOAM έχει εξελιχθεί σημαντικά, με συνεχή ανάπτυξη και νέες εκδόσεις που κυκλοφορούν ετησίως. Το 2014, η γραμμή ανάπτυξης του OpenFOAM, γνωστή ως "OpenFOAM-dev," έγινε διαθέσιμη στο κοινό μέσω της πλατφόρμας GitHub.

Το OpenFOAM περιλαμβάνει περίπου 250 εφαρμογές σε περισσότερες από 100 βιβλιοθήκες λογισμικού, προσφέροντας εργαλεία για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων. Οι επιλύτες

του καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα θεμάτων, όπως η ροή ρευστών, χημικές αντιδράσεις, μηχανική των στερεών σωμάτων, και ηλεκτρομαγνητικές προσομοιώσεις.

Το OpenFOAM υποστηρίζει την εκτέλεση προσομοιώσεων σε παράλληλους επεξεργαστές, γεγονός που επιταχύνει την επίλυση σύνθετων προβλημάτων. Ο κώδικας του είναι προγραμματισμένος σε C++, ενώ δίνεται η δυνατότητα στους χρήστες να τροποποιήσουν τον κώδικα για να τον προσαρμόσουν στις απαιτήσεις του εκάστοτε προβλήματος.

Στο OpenFOAM χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων (Finite Volume Method, FVM), όπου οι τιμές των μεταβλητών ροής υπολογίζονται στα κέντρα των κελιών του υπολογιστικού πλέγματος. Επιπλέον, το OpenFOAM παράγει αρχεία που είναι συμβατά με το ParaView, ελεύθερο λογισμικό που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε γραφικό περιβάλλον, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί και στη διπλωματική αυτή εργασία, για την απεικόνιση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Στη παρούσα εργασία, για την επίλυση του υπολογιστικού προβλήματος της ροής χρησιμοποιείται ο επιλύτης `twoLiquidMixingFoam` του OpenFOAM. Ο επιλύτης `twoLiquidMixingFoam` είναι ειδικά σχεδιασμένος για την προσομοίωση ροής ασυμπίεστων, αναμίξιμων υγρών, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Volume of Fluid (VoF) για τη μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της διεπιφάνειας των δύο ρευστών. Βασίζεται στον αλγόριθμο PIMPLE, ο οποίος είναι ένας υβριδικός συνδυασμός των αλγορίθμων Pressure-Implicit with Splitting of Operators (PISO) και Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations (SIMPLE). Αυτός ο υβριδικός αλγόριθμος συνδυάζει τα πλεονεκτήματα και των δύο μεθόδων, επιτρέποντας πιο σταθερές και αποδοτικές προσομοιώσεις, ειδικά για μεταβαλλόμενα προβλήματα ροής με μεγάλα χρονικά βήματα. Παρά το γεγονός ότι ο επιλύτης αυτός χρησιμοποιείται για χρονικά μεταβαλλόμενα προβλήματα, εδώ χρησιμοποιείται για την επίλυση ενός χρονικά μόνιμου προβλήματος, με τη μόνιμη λύση να επιτυγχάνεται ασυμπτωτικά στο χρόνο.

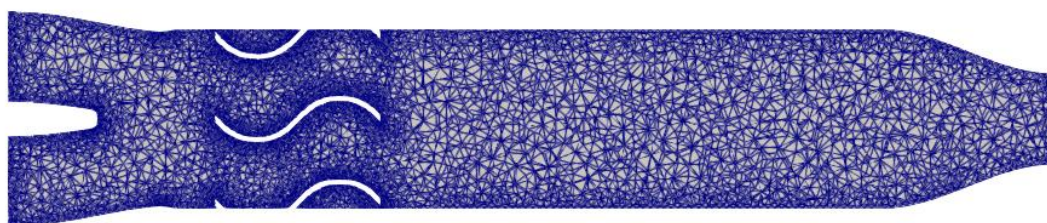
Κεφάλαιο 4 - Γένεση Υπολογιστικού

Πλέγματος και Ανάλυση της Ροής

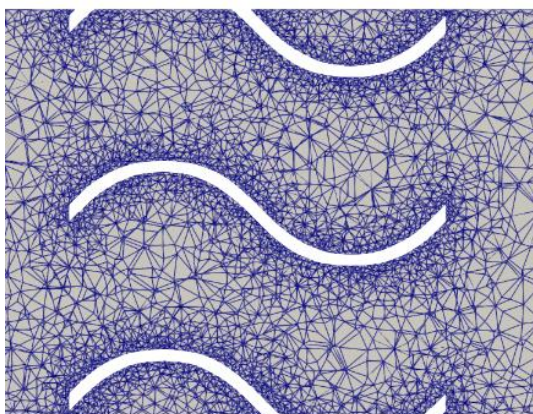
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία γένεσης του υπολογιστικού πλέγματος για τις περιπτώσεις που αναλύονται στην εργασία, οι οριακές συνθήκες του προβλήματος, καθώς και τα κριτήρια που αξιολογούν την απόδοση του αναμίκτη.

4.1 Γένεση Υπολογιστικού Πλέγματος

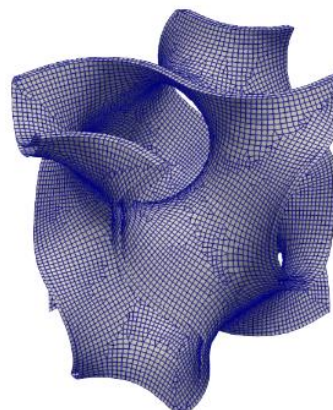
Η γεωμετρία του εν λόγω αναμίκτη έχει παρουσιαστεί στο κεφ. 2. Προκειμένου να επιλυθούν οι εξισώσεις ροής που διέπουν το πρόβλημα, είναι απαραίτητη η γένεση υπολογιστικού πλέγματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση του λογισμικού Fidelity Pointwise. Το πλέγμα που δημιουργήθηκε αποτελείται από κυψέλες-όγκου ελέγχου, μεταξύ των οποίων τετράεδρα και πυραμίδες. Το μέγεθος των πλεγμάτων κυμαίνεται μεταξύ 261.000 κυψελών για την περίπτωση της βασικής γεωμετρίας του αναμίκτη χωρίς εμπόδια στο εσωτερικό του, έως και 2.925.000 κυψελών για περιπτώσεις αναμικτών με εμπόδια που εξετάζονται στη συνέχεια της εργασίας. Ενδεικτικά παρουσιάζεται το υπολογιστικό πλέγμα της περίπτωσης του αναμίκτη που παρουσιάστηκε στο **Σχήμα 4.1**.



(α) Διαμήκης τομή του πλέγματος



(β) Λεπτομέρεια γύρω από την περιοχή του γυροειδούς



(γ) Επιφανειακό πλέγμα γυροειδούς

Σχήμα 4.1: Υπολογιστικό πλέγμα του στατικού αναμίκτη που παρουσιάστηκε στο κεφ. 2.

4.2 Οριακές Συνθήκες

Οι δύο διαφορετικές υγρές φάσεις εισέρχονται από δύο διαφορετικές εισόδους στο κυρίως μέρος του αναμίκτη, υπό σταθερή κατανομή ταχύτητας μέτρου 0.1 m/s . Ο αριθμός Reynolds της ροής μπορεί να εκτιμηθεί, λαμβάνοντας υπόψη τη μέση τιμή των ν κινηματικών συνεκτικότητων των δύο φάσεων, ως εξής:

$$Re = \frac{vD}{\nu} \cong 715$$

όπου v η ταχύτητα και D η εσωτερική διάμετρος της βασικής γεωμετρίας του αναμίκτη.

Ο **Πίνακας 4.1** παρουσιάζει τις ιδιότητες των δύο ρευστών εντός του στατικού αναμίκτη που χρησιμοποιούνται σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις:

	Ρευστό 1	Ρευστό 2
Πυκνότητα (kg/m^3)	1500	1300
Κινηματική Συνεκτικότητα (m^2/s)	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-5}$
Παροχή μάζας στη διατομή εισόδου (kg/s)	0.295	0.255

Πίνακας 4.1: Ιδιότητες ρευστών προς ανάμιξη.

Ο συντελεστής διάχυσης των δύο φάσεων λαμβάνει τη τιμή $D = 1.5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/s$

Θεωρώντας ότι ο κύριος άξονας του του αναμίκτη είναι ευθυγραμμισμένος με τον άξονα x , προκύπτει η διατύπωση των οριακών συνθηκών του προβλήματος σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν στο κεφ. 3:

Στην είσοδο της πρώτης φάσης:

- Ταχύτητα: $\mathbf{v} = (0.1, 0, 0) \text{ m/s}$
- Πίεση: $\frac{\partial p}{\partial x_j} n_j = 0$
- Κλάσμα όγκου: $\alpha = 1$

Στην είσοδο της δεύτερης φάσης:

- Ταχύτητα: $\mathbf{v} = (0.1, 0, 0) \text{ m/s}$
- Πίεση: $\frac{\partial p}{\partial x_j} n_j = 0$
- Κλάσμα όγκου: $\alpha = 0$

Στην έξοδο του αναμίκτη:

- Ταχύτητα: $\frac{\partial v}{\partial x_j} n_j = 0$
- Πίεση: $p = 0$
- Κλάσμα όγκου: $\frac{\partial \alpha}{\partial x_j} n_j = 0$

Στα στερεά τοιχώματα του αναμίκτη:

- Ταχύτητα: $\mathbf{v} = (0, 0, 0) \text{ m/s}$
- Πίεση: $\frac{\partial p}{\partial x_j} n_j = 0$
- Κλάσμα όγκου: $\frac{\partial \alpha}{\partial x_j} n_j = 0$

4.3 Κριτήρια Αξιολόγησης της Απόδοσης του Αναμίκτη

Τέλος, όπως αναφέρθηκε, τα δύο κριτήρια που αξιολογούν την απόδοση του αναμίκτη, είναι η πτώση της ολικής πίεσης στο εσωτερικό του αναμίκτη και ο συντελεστής ανομοιογένειας του μίγματος στην έξοδό του. Οι ποσότητες αυτές, που και οι δύο πρέπει να ελαχιστοποιηθούν, υπολογίζονται ως εξής:

$$P_{t,losses} = \frac{1}{2A_{inlet}} \sum_{k=1}^2 \int_{A_{outlet}} \left(p_k + \frac{1}{2} \rho_k v_{i,k}^2 \right) dA - \frac{1}{A_{outlet}} \int_{A_{outlet}} \left(p + \frac{1}{2} \bar{\rho} v_i^2 \right) dA \quad (4.1)$$

όπου ο δείκτης $k = 1,2$ αντιστοιχεί στα δύο διαφορετικά ρευστά και $\bar{\rho}$ στη μέση πυκνότητα του μίγματος στην έξοδο του αναμίκτη

$$CoV = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\frac{1}{A_{outlet}} \int_{A_{outlet}} (a - \bar{a})^2 dA}}{\frac{1}{A_{outlet}} \int_{A_{outlet}} a dA} \quad (4.2)$$

Από την **εξ. (4.2)**, γίνεται αντιληπτό πως μικρότερες τιμές του συντελεστή ανομοιογένειας (Coefficient of Variance – CoV), αντιπροσωπεύουν καλύτερη ομογενοποίηση του μείγματος. Με την τιμή αυτή να θεωρείται ικανοποιητική για τιμές κάτω του 0.05 και τη πτώση ολικής πίεσης να κυμαίνεται από 50 έως 500 Pa για αναμίκτες στρωτής ροής μικρού μεγέθους που λειτουργούν σε αντίστοιχους αριθμούς Reynolds.

Κεφάλαιο 5 - Αναμίκτες Πολλαπλών

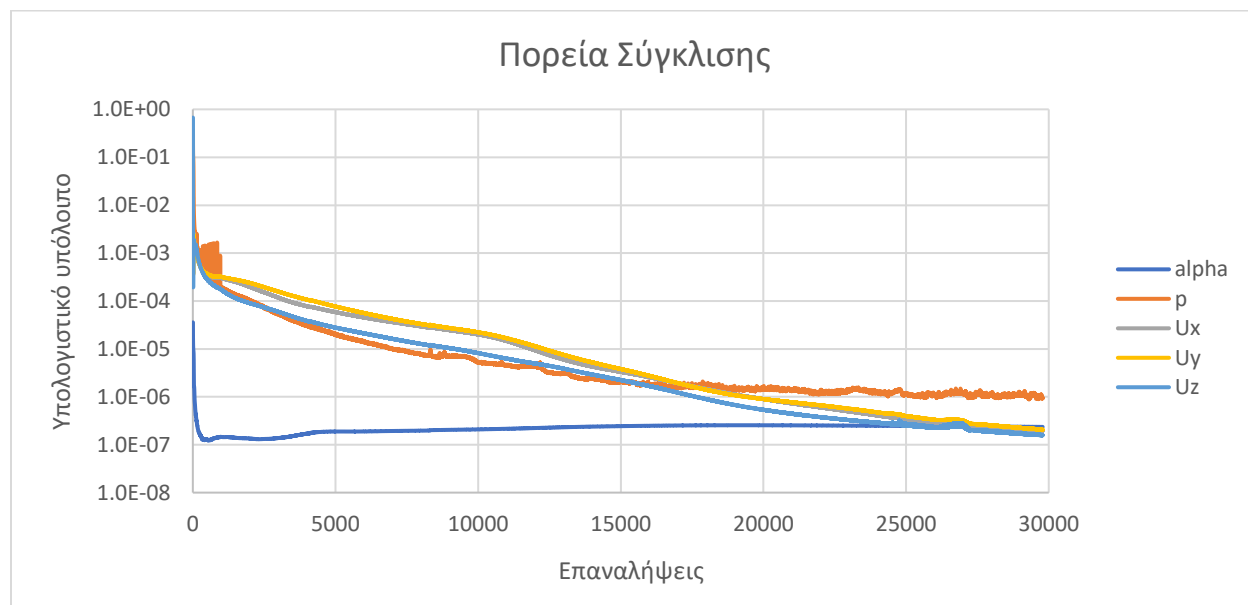
Εμποδίων

Στην ενότητα αυτή εξετάζονται οι διάφορες διαμορφώσεις αναμικτών με πολλά εμπόδια από γυροειδή στο εσωτερικό τους. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις διάφορες παραμέτρους σχεδιασμού του γυροειδούς και την επιρροή τους στην απόδοση του αναμικτή.

5.1 Βασική Περίπτωση Αναμίκτη

Η πρώτη περίπτωση αναμίκτη που εξετάζεται, είναι αυτή που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.2**. Ο αναμίκτης υπό εξέταση αποτελείται από ένα εμπόδιο, πανομοιότυπο με αυτό που παρουσιάστηκε στο **Σχήμα 2.6**. Το εμπόδιο τοποθετείται στην αρχή του αγωγού του κυρίου σώματος του αναμικτή, ενώ καλύπτει περίπου το 25% του αγωγού.

Ο σκοπός της μελέτης αυτής, είναι η ανάλυση και κατανόηση της ροής γύρω από τη δομή του γυροειδούς, με στόχο τον εντοπισμό των κρίσιμων παραμέτρων σχεδιασμού, καθώς και της κατάλληλης διαμόρφωσης, ώστε να κατασκευαστεί αναμίκτης με καλύτερη απόδοση στις επόμενες περιπτώσεις που θα εξετασθούν.

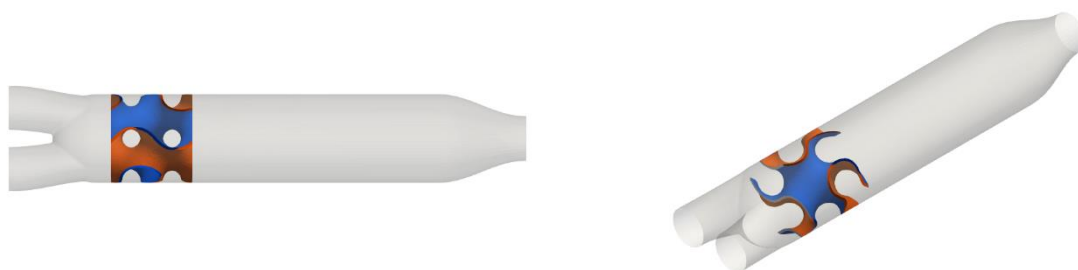


Σχήμα 5.1: Περίπτωση 1^η – Αναμίκτης με ένα εμπόδιο: Σύγκλιση υπολογιστικού κώδικα.

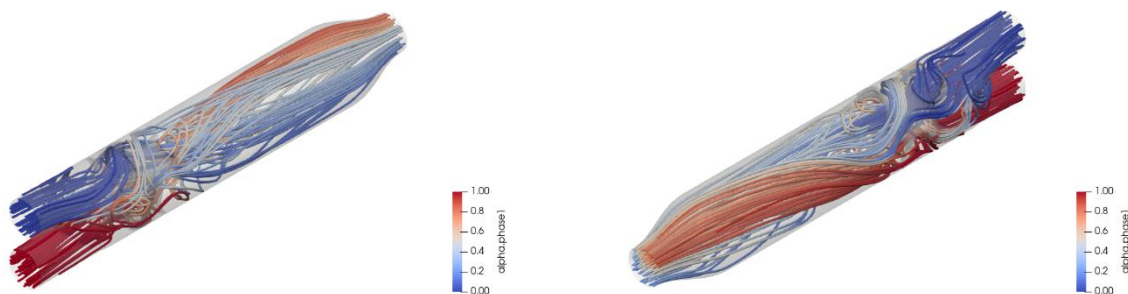
Για τη επίλυση του υπολογιστικού προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ο επιλύτης twoLiquidMixingFoam που αναλύθηκε στο κεφ. 3, ενώ ως κριτήριο σύγκλισης για τη πίεση, τη ταχύτητα και το κλάσμα όγκου ορίστηκε η τιμή $1 \cdot 10^{-6}$. Η διαδικασία επίλυσης χρειάστηκε περίπου 15 ώρες για να ολοκληρωθεί στο υπολογιστικό σύστημα velos της ΜΠΥΡΒ, αξιοποιώντας 24 επεξεργαστές τύπου Intel Xeon CPU E5-2630 v4 στα 2.2 GHz. Στο **Σχήμα 5.1** φαίνεται η πορεία σύγκλισης.

5.1.1 Περίπτωση 1^η – Αναμίκτης με ένα εμπόδιο

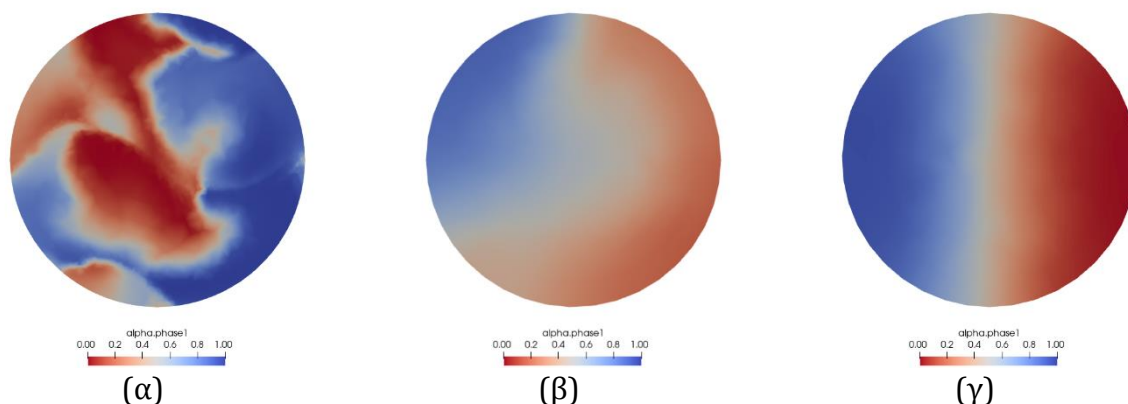
Μήκος βασικού δομικού στοιχείου	92.5 mm
Πάχος δομής γυροειδούς	3 mm



Σχήμα 5.2: Περίπτωση 1^η – Αναμίκτης με ένα εμπόδιο: Γεωμετρία αναμίκτη.



Σχήμα 5.3: Περίπτωση 1^η – Αναμίκτης με ένα εμπόδιο: Γραμμές ροής χρωματισμένες με το κλάσμα όγκου.



Σχήμα 5.4: Περίπτωση 1^η – Αναμίκτης με ένα εμπόδιο: Κατανομή κλάσματος όγκου (α) Κατάντι του εμποδίου, (β) Στην έξοδο του αναμίκτη, (γ) Στην έξοδο του αναμίκτη χωρίς εμπόδια για λόγους σύγκρισης με το (β).

Περίπτωση 1^η – Αναμίκτης με ένα εμπόδιο

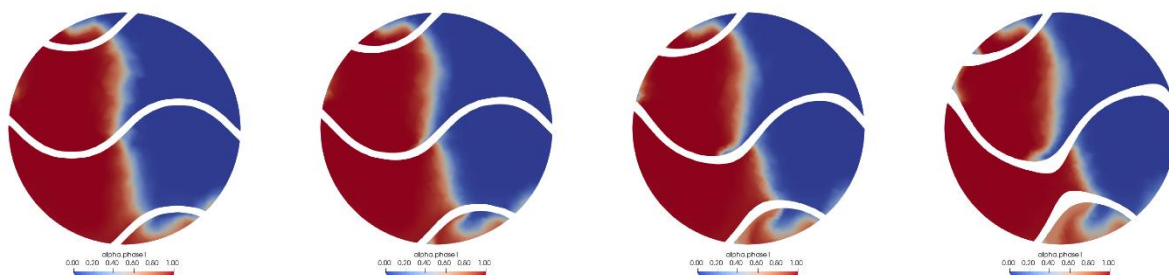
Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses}$ [Pa]	40.71
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.385

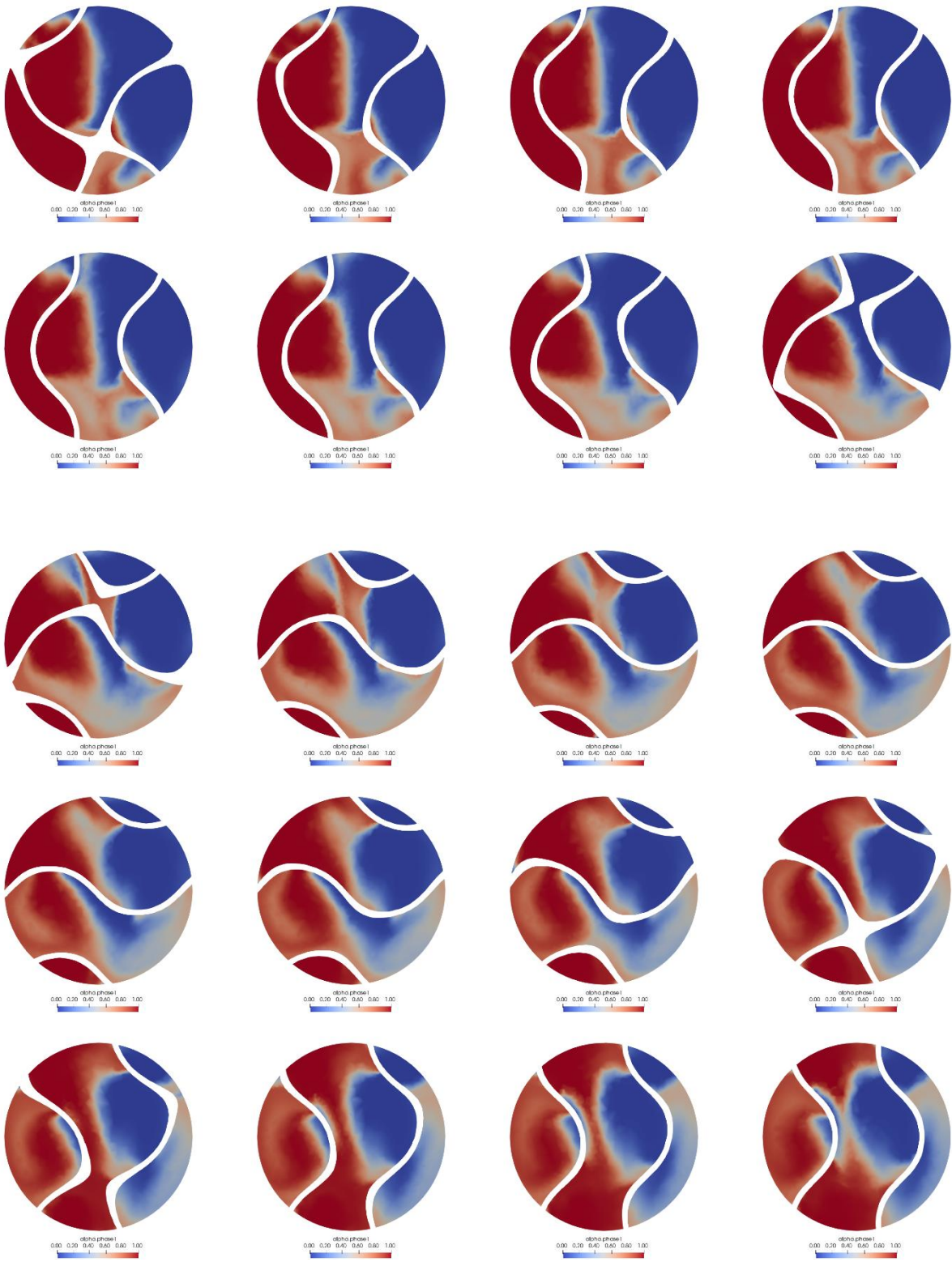
Πίνακας 5.1: Περίπτωση 1^η – Πίνακας Αποτελεσμάτων.

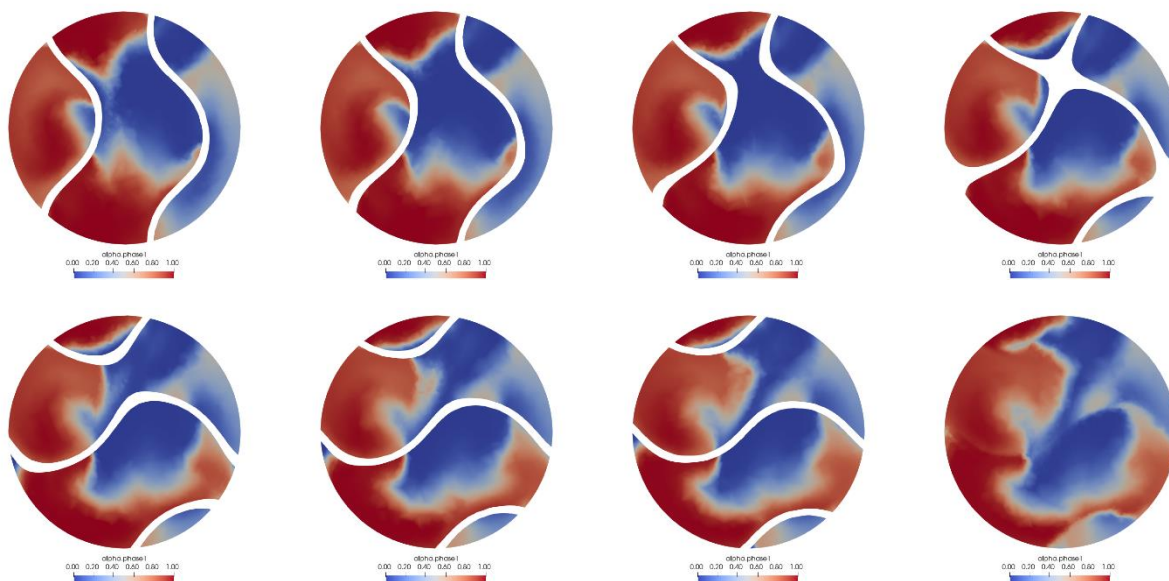
5.1.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα 5.1.1, παρατηρείται ότι η παρουσία της γυροειδούς δομής ως εμπόδιο προκαλεί συστροφή στη ροή, η οποία κατ'επέκταση συμβάλλει στην ανάμιξη των δύο ρευστών. Ωστόσο, γίνεται αντιληπτό ότι η ανάμιξη που προκαλείται από το ένα εμπόδιο δεν είναι η επιδιωκόμενη, όσον αφορά την ομοιογένεια στην έξοδό του.

Για αναλυτικότερη αναπαράσταση της ροής γύρω από τη γεωμετρία του εμποδίου και ο τρόπος που επηρεάζει τη ροή και κατ'επέκταση την ανάμιξή της παρατίθεται το **Σχήμα 5.5:**







Σχήμα 5.5: Τομές κατά μήκος εμποδίου από γυροειδή, ανά περίπου 3 mm – Χρωματισμένες με το κλάσμα όγκου.

5.2 Παράμετροι Σχεδιασμού Γυροειδούς

Από τα αποτελέσματα της ενότητας 5.1, διαπιστώνεται ότι η απόδοση του αναμίκτη με ένα εμπόδιο δεν είναι ικανοποιητική όσον αφορά την ομοιογένεια του μίγματος στην έξοδό του.

Ως πρώτη κατηγορία παραμετρικών μελετών εξετάζεται η τροποποίηση των βασικών παραμέτρων σχεδιασμού του γυροειδούς. Ειδικότερα, παράμετροι όπως το πάχος του γυροειδούς, η εισαγωγή πολλαπλών εμποδίων και η σχετική θέση τους στο εσωτερικό του αναμίκτη, καθώς και το μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου του γυροειδούς.

Ο στόχος αυτής της ενότητας είναι να αναδειχθεί ο τρόπος με τον οποίο οι παράμετροι σχεδιασμού επηρεάζουν την απόδοση του αναμίκτη, ώστε να κατανοηθεί καλύτερα ο μηχανισμός ανάμιξης και να εντοπισθούν οι παράμετροι εκείνοι που μπορούν να οδηγήσουν σε αποδοτικότερο αναμίκτη. Αυτό επιτυγχάνεται με μια σειρά παραμετρικών μελετών, στις οποίες γίνεται δοκιμή διαφορετικών συνδυασμών αυτών των παραμέτρων και την αξιολόγησή τους. Η ανάλυση αυτή συμβάλλει στη δημιουργία κατευθυντήριων γραμμών για τον σχεδιασμό του αναμίκτη, και εν τέλει οδηγεί στο σχεδιασμό ενός αποδοτικότερου αναμίκτη του κεφ. 7.

5.3 Εισαγωγή δεύτερου εμποδίου

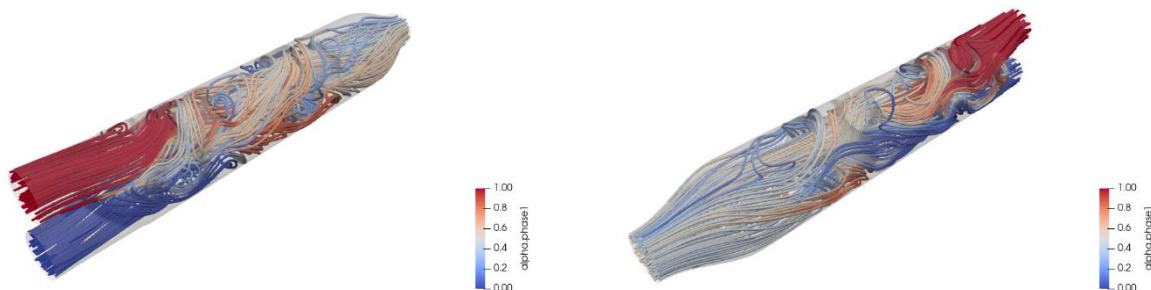
Από τα αποτελέσματα της ενότητας 5.1, διαπιστώθηκε πως η χρήση ενός μόνο εμποδίου δεν ήταν επαρκής για την επίτευξη της επιθυμητής ομοιογένειας στην έξοδο του αναμίκτη, υποδεικνύοντας την ανάγκη για την εισαγωγή δεύτερου εμποδίου στο εσωτερικό του αναμίκτη, πανομοιότυπης γεωμετρίας με αυτό της 1^{ης} περίπτωσης που τοποθετείται χωρίς αλλαγή στο προσανατολισμό του σε απόσταση 92.5 mm, από το τέλος του πρώτου. Δηλαδή το κενό μεταξύ των δύο εμποδίων ταυτίζεται με το μήκος τους, **Σχήμα 5.6**. Η προσθήκη του δεύτερου εμποδίου αναμένεται να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του αναμίκτη, εισάγοντας παραπάνω συστροφή στη ροή, ευνοώντας έτσι τη διάχυση μεταξύ των δύο ρευστών.

5.3.1 Περίπτωση 2^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια μικρού πάχους

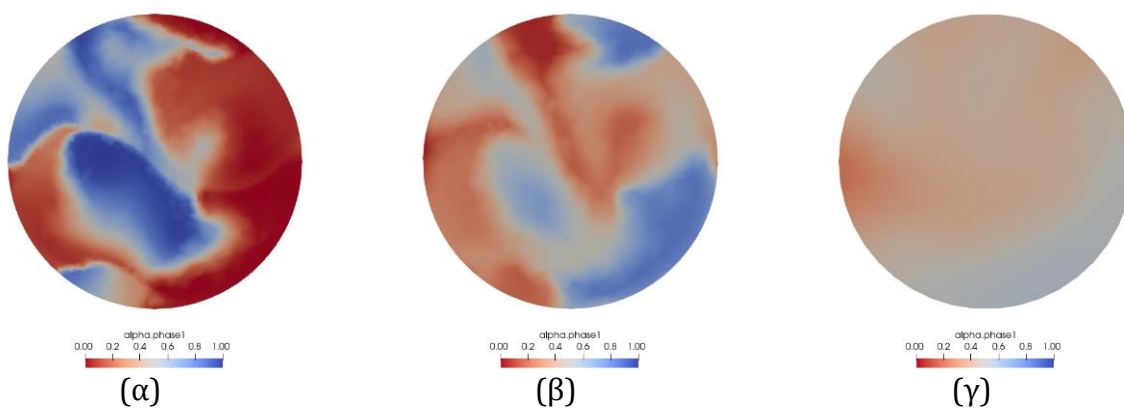
Μήκος βασικού δομικού στοιχείου	92.5 mm
Απόσταση μεταξύ των εμποδίων	92.5 mm
Πάχος δομής γυροειδούς	3 mm



Σχήμα 5.6: Περίπτωση 2^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια μικρού πάχους: Γεωμετρία αναμίκτη.



Σχήμα 5.7: Περίπτωση 2^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια μικρού πάχους: Γραμμές ροής χρωματισμένες με το κλάσμα όγκου.



Σχήμα 5.8: Περίπτωση 2^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια μικρού πάχους: Κατανομή κλάσματος όγκου (α) Κατάντι του πρώτου εμποδίου, (β) Κατάντι του δεύτερου εμποδίου, (γ) Στην έξοδο του αναμίκτη.

Περίπτωση 2^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια

Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses}$ [Pa]	65.55
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.151

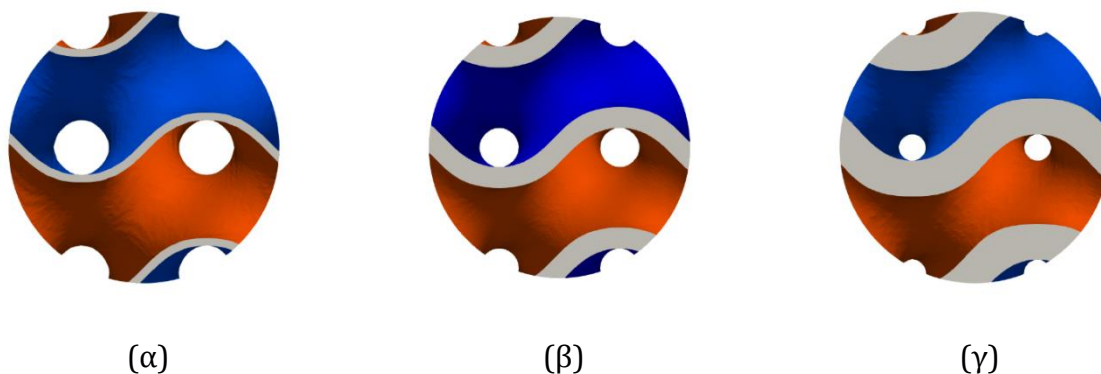
Πίνακας 5.2: Περίπτωση 2^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια μικρού πάχους: Πίνακας Αποτελεσμάτων.

5.3.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα της ενότητας 5.3, γίνεται εμφανές ότι η εισαγωγή του δεύτερου εμποδίου ήταν επιτυχημένη, επιφέροντας τα επιθυμητά αποτελέσματα στη ροή. Το δεύτερο εμπόδιο δημιουργεί επιπλέον στροβιλισμούς, οι οποίοι ενισχύουν την ανάμιξη των δύο ρευστών, όπως αποδεικνύεται από τη σημαντική βελτίωση του συντελεστή ανομοιογένειας στην έξοδο του αναμίκτη, ο οποίος είναι περίπου 2,5 φορές χαμηλότερος σε σύγκριση με τον αναμίκτη που διαθέτει μόνο ένα εμπόδιο. Παράλληλα, παρατηρήθηκε μια μικρή αύξηση στην πτώση της ολικής πίεσης, γεγονός που είναι αναμενόμενο. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων, κρίθηκε σκόπιμο να διατηρηθεί το δεύτερο εμπόδιο και στις επόμενες περιπτώσεις που εξετάζονται στο κεφάλαιο αυτό, ώστε να διασφαλιστεί καλύτερη ανάμιξη.

5.4 Πάχος της δομής του Γυροειδούς

Η παράμετρος σχεδιασμού που εξετάζεται σε αυτήν τη νέα διαμόρφωση είναι η αύξηση του πάχους της δομής του γυροειδούς, με αυτό να μεταβάλλεται από το αρχικό πάχος των 3 mm έως και το πάχος των 13 mm, **Σχήμα 5.9**. Η αύξηση του πάχους της δομής του γυροειδούς αναμένεται να προκαλέσει σημαντική στένωση της διατομής του αναμίκτη. Αυτό προκαλεί αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας για τη διέλευση της ροής, αλλά οδηγεί σε μεγαλύτερη ανάμιξη. Η αύξηση του πάχους που επιλέχθηκε είναι ακραία τιμή, αλλά κρίνεται απαραίτητη για την καλύτερη αξιολόγηση της επιρροής του πάχους στην απόδοση του αναμίκτη. Παράλληλα, η αύξηση του πάχους πρέπει να αξιολογηθεί προσεκτικά, ώστε να διασφαλιστεί ότι τα κέρδη στην ανάμιξη δεν θα συνοδεύονται από ανεπιθύμητη αύξηση της πτώσης ολικής πίεσης.



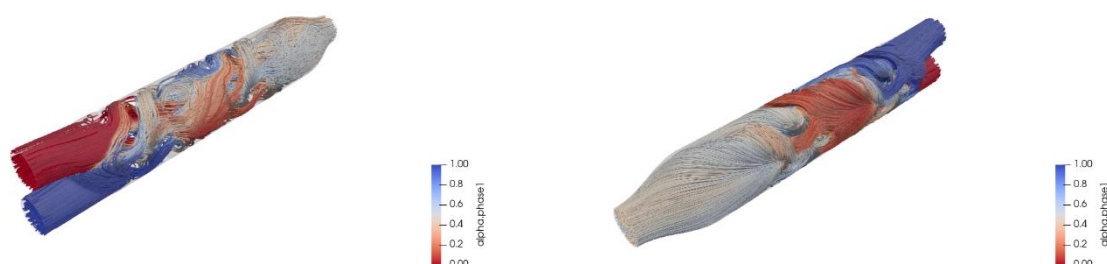
Σχήμα 5.9: Εμπόδιο αναμίκτη με γυροειδές πάχους: (α) 3 mm, (β) 8 mm, (γ) 13 mm.

5.4.1 Περίπτωση 3^η – Αναμίκτης με δυο εμπόδια μεσαίου πάχους

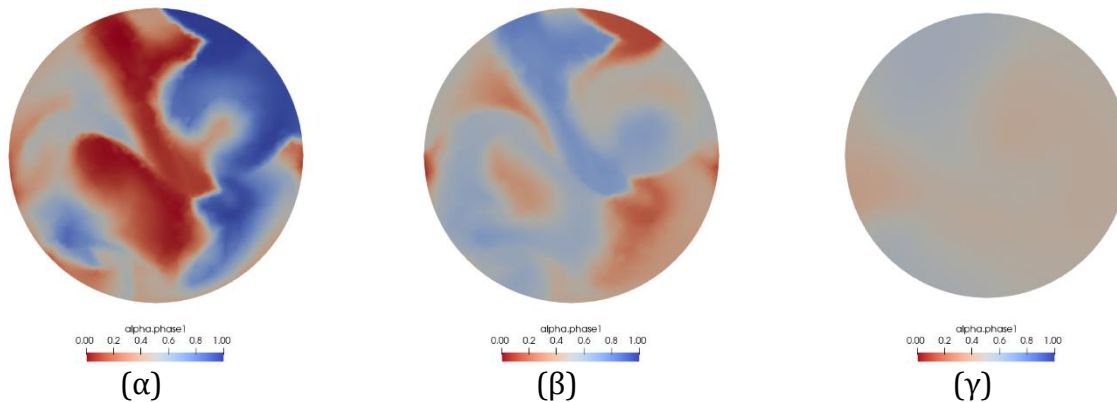
Μήκος βασικού δομικού στοιχείου	92.5 mm
Απόσταση μεταξύ των εμποδίων	92.5 mm
Πάχος δομής γυροειδούς	8 mm



Σχήμα 5.10: Περίπτωση 3^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια μεσαίου πάχους: Γεωμετρία αναμίκτη.



Σχήμα 5.11: Περίπτωση 3^η – Αναμίκτης με ένα εμπόδιο μεσαίου πάχους: Γραμμές ροής χρωματισμένες με το κλάσμα όγκου.



Σχήμα 5.12: Περίπτωση 3^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια μεσαίου μεγέθους: Κατανομή κλάσματος όγκου (α) Κατάντι του πρώτου εμποδίου, (β) Κατάντι του δεύτερου εμποδίου, (γ) Στην έξοδο του αναμίκτη.

Περίπτωση 3^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια μεσαίου μεγέθους

Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses}$ [Pa]	111.70
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.083

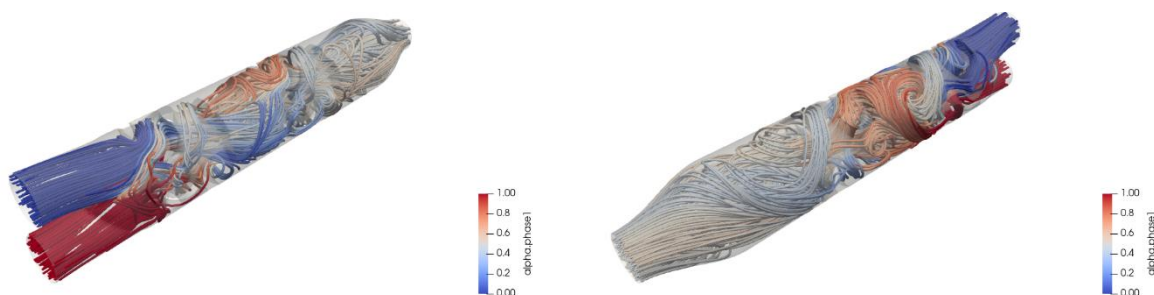
Πίνακας 5.3: Περίπτωση 3^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια μεσαίου μεγέθους: Πίνακας Αποτελεσμάτων.

5.4.2 Περίπτωση 4^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια μεγάλου πάχους

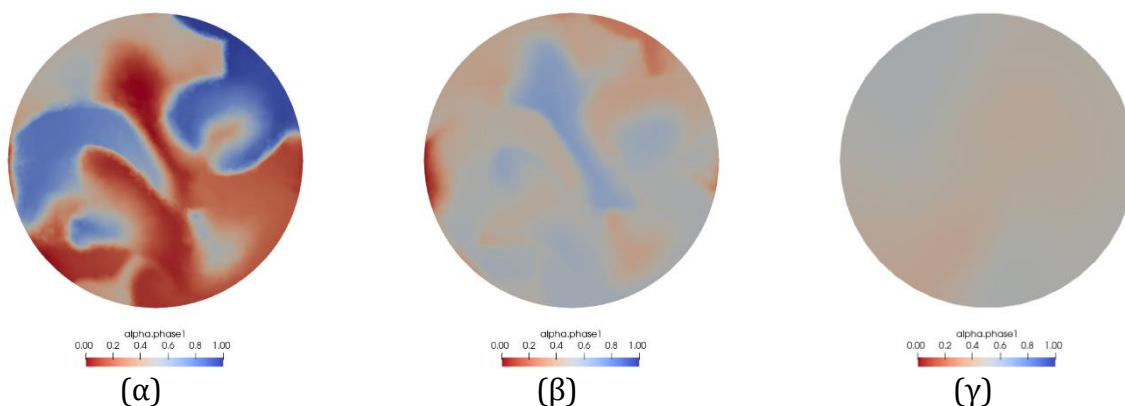
Μήκος βασικού δομικού στοιχείου	92.5 mm
Απόσταση μεταξύ των εμποδίων	92.5 mm
Πάχος δομής γυροειδούς	13 mm



Σχήμα 5.13: Περίπτωση 4^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια μεγάλου πάχους: Γεωμετρία αναμίκτη.



Σχήμα 5.14: Περίπτωση 4^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια μεγάλου πάχους: Γραμμές ροής χρωματισμένες με το κλάσμα όγκου.



Σχήμα 5.15: Περίπτωση 4^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια μεγάλου πάχους: Κατανομή κλάσματος όγκου (α) Κατάντι του πρώτου εμποδίου, (β) Κατάντι του δεύτερου εμποδίου, (γ) Στην έξοδο του αναμίκτη.

Περίπτωση 4^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια μεγάλου πάχους

Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses} [Pa]$	212.28
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.059

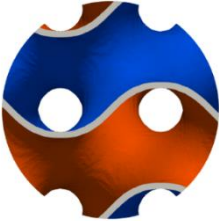
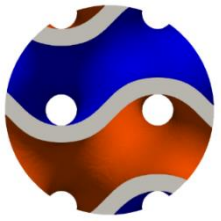

Πίνακας 5.4: Περίπτωση 4 – Πίνακας Αποτελεσμάτων.

5.4.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα των περιπτώσεων της ενότητας 5.4, καθώς και αυτών της ενότητας 5.3, γίνεται εμφανές ότι το πάχος επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του αναμίκτη, όπως φαίνονται και στα συγκεντρωτικά αποτελέσματα, Πίνακας 5.5.

Συγκεκριμένα, η αύξηση του πάχους και κατ' επέκταση η μείωση της συνολικής διατομής εξαναγκάζει το μίγμα να περάσει από μικρότερες διατομές, ευνοώντας την ανάμιξη του. Ακόμη παρατηρούνται πιο έντονοι στροβιλισμοί κατάντι των εμποδίων που με τη σειρά τους ευνοούν την ανάμιξη των δύο ρευστών περαιτέρω, όπως φαίνεται και από το συντελεστή ανομοιογένειας στην έξοδο του αναμίκτη. Ωστόσο, παρατηρείται ταυτόχρονα και σημαντική αύξηση στην πτώση ολικής πίεσης.

Η ανάλυση αυτή αναδεικνύει πως το πάχος της δομής του γυροειδούς αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τον σχεδιασμό αναμίκτη καλύτερης απόδοσης, αλλά ταυτόχρονα είναι σημαντική η εύρεση ισορροπίας μεταξύ της βελτίωσης της ανάμιξης και της αύξησης των απωλειών ενέργειας.

Περίπτωση 2 ^η Πάχος 3 mm		Περίπτωση 3 ^η Πάχος 8 mm		Περίπτωση 4 ^η Πάχος 13 mm	
					
Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses} [Pa]$	65.55	Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses} [Pa]$	111.70	Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses} [Pa]$	212.28
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.151	Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.083	Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.059

Πίνακας 5.5: Παράμετρος υπό διερεύνηση: Πάχος γυροειδούς – Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα.

5.5 Στροφή του 2ου εμποδίου

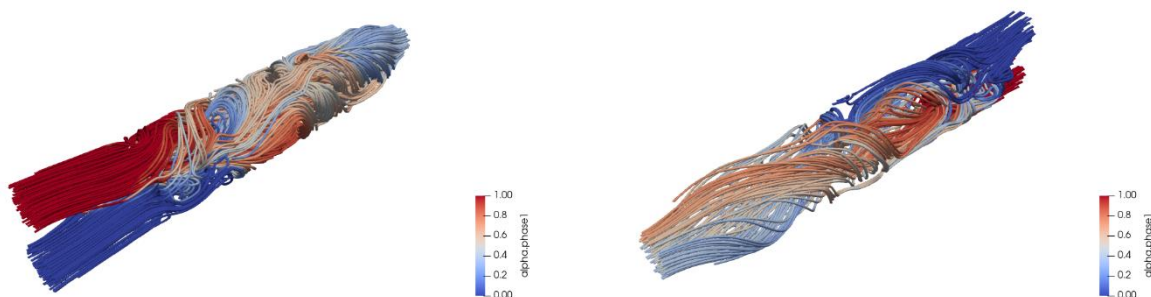
Στην ενότητα αυτή η παράμετρος σχεδιασμού που εξετάζεται είναι αυτή της σχετικής θέσης των δύο εμποδίων, και συγκεκριμένα η στροφή του δεύτερου εμποδίου γύρω από τον κύριο άξονα του αναμίκτη. Η μελέτη επικεντρώνεται στο κατά πόσο η στροφή του δεύτερου εμποδίου μπορεί να εισάγει επιπλέον συστροφή στη ροή του ρευστού και κατά συνέπεια να ενισχύσει την ανάμιξη μεταξύ των δύο ρευστών του μίγματος, σε σχέση με την αρχική περίπτωση του δεύτερου εμποδίου χωρίς στροφή. Η γεωμετρία του αναμίκτη είναι πανομοιότυπη με αυτή που εξετάστηκε στην ενότητα 5.3.1, με τη διαφορά πως στρέφεται το δεύτερο εμπόδιο κατά 90° , 180° και 270° κατά τον άξονα του αναμίκτη. Αξίζει να σημειωθεί πως επιλέχθηκε η περίπτωση αναμίκτη με το μικρότερο πάχος εμποδίων των 3 mm , ώστε η μελέτη να εστιάσει στη βελτίωση της απόδοσης που προέρχεται από την στροφή του δεύτερου εμποδίου και όχι από αυτήν της αύξησης του πάχους.

5.5.1 Περίπτωση 5α - Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του δεύτερου κατά 90°

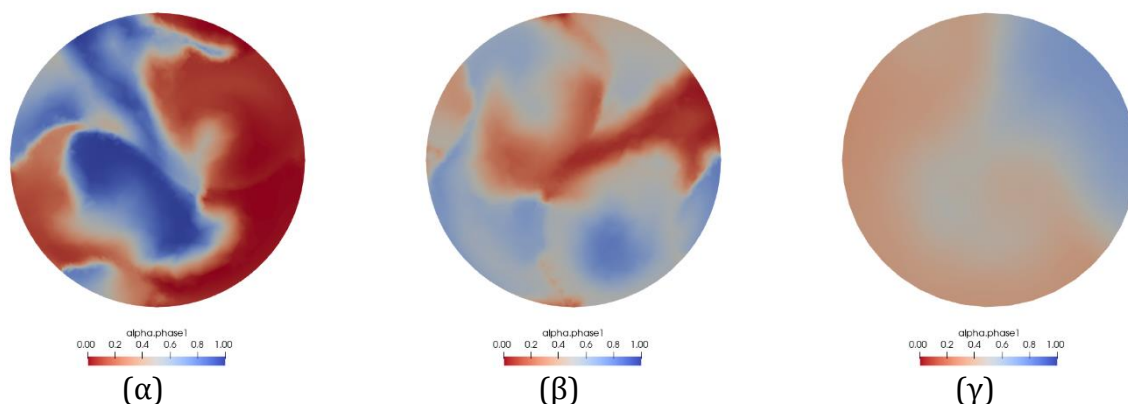
Μήκος βασικού δομικού στοιχείου	92.5 mm
Απόσταση μεταξύ των εμποδίων	92.5 mm
Πάχος δομής γυροειδούς	3 mm
Στροφή 2 ^{ου} εμποδίου	90°



Σχήμα 5.16: Περίπτωση 5α - Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του 2^{ου} κατά 90° : Γεωμετρία αναμίκτη.



Σχήμα 5.17: Περίπτωση 5α - Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του 2^{ου} κατά 90° : Γραμμές ροής χρωματισμένες με το κλάσμα όγκου.



Σχήμα 5.18: Περίπτωση 5α – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του 2^{ου} κατά 90°: (α) Κατάντι του πρώτου εμποδίου, (β) Κατάντι του δεύτερου εμποδίου, (γ) Στην έξοδο του αναμίκτη.

Περίπτωση 5α – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του 2^{ου} κατά 90°

Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses}$ [Pa]	66.60
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.259

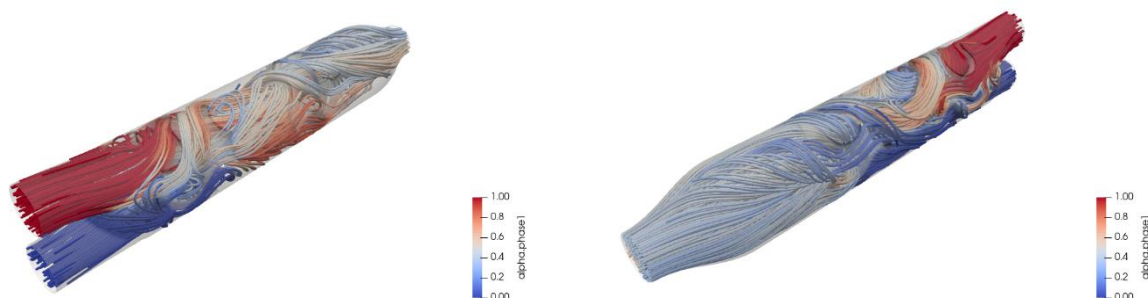
Πίνακας 5.6: Περίπτωση 5α – Πίνακας Αποτελεσμάτων.

5.5.2 Περίπτωση 5β – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του δεύτερου κατά 180°

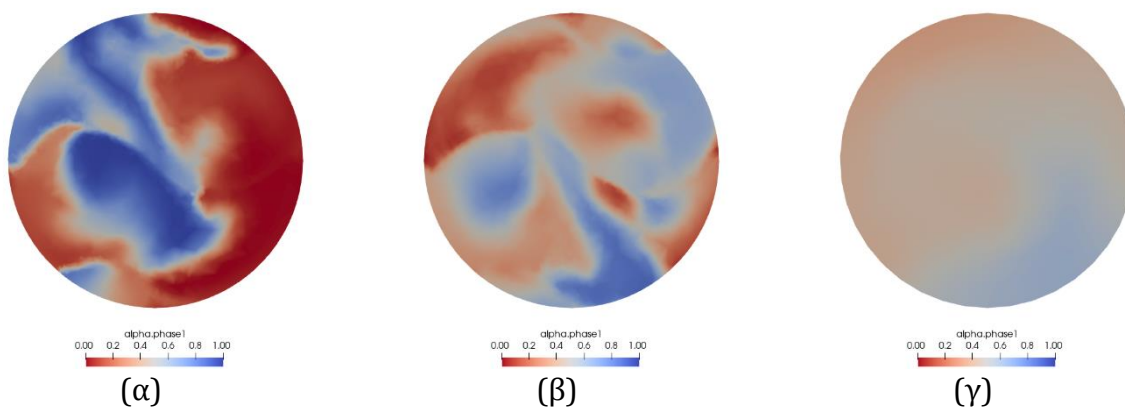
Μήκος βασικού δομικού στοιχείου	92.5 mm
Απόσταση μεταξύ των εμποδίων	92.5 mm
Πάχος δομής γυροειδούς	3 mm
Στροφή 2 ^{ου} εμποδίου	180°



Σχήμα 5.19: Περίπτωση 5β – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του 2^{ου} κατά 180°: Γεωμετρία αγωγού.



Σχήμα 5.20: Περίπτωση 5β – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του 2^{ου} κατά 180°: Γραμμές ροής χρωματισμένες με το κλάσμα όγκου.



Σχήμα 5.21: Περίπτωση 5β – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του 2^{ου} κατά 180°: Κατανομή κλάσματος όγκου, (α) Κατάντι του πρώτου εμποδίου, (β) Κατάντι του δεύτερου εμποδίου, (γ) Στην έξοδο του αναμίκτη.

Περίπτωση 5β – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του 2^{ου} κατά 180°

Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses}$ [Pa]	66.39
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.154

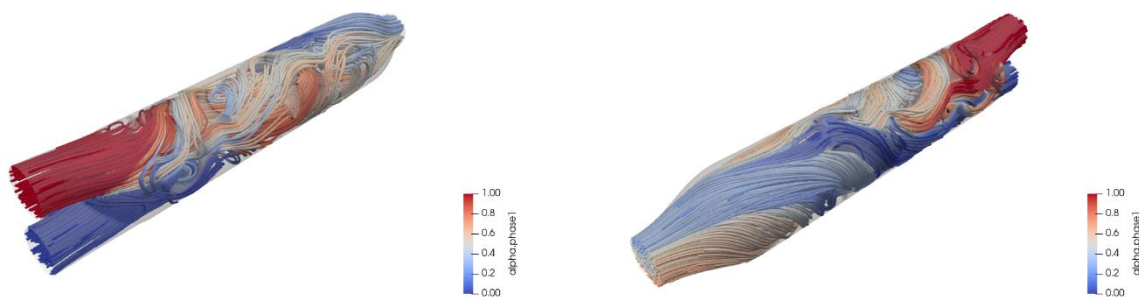
Πίνακας 5.7: Περίπτωση 5β – Πίνακας Αποτελεσμάτων.

5.5.3 Περίπτωση 5γ – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του δεύτερου κατά 270°

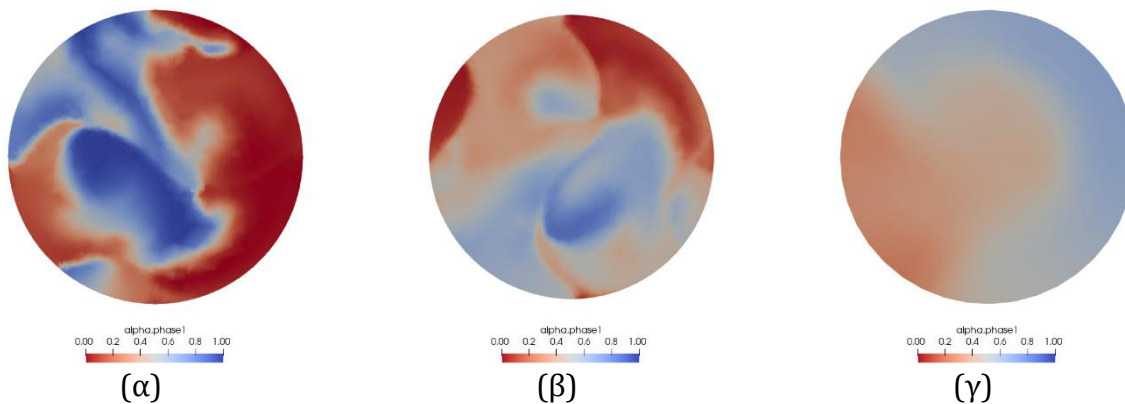
Μήκος βασικού δομικού στοιχείου	92.5 mm
Απόσταση μεταξύ των εμποδίων	92.5 mm
Πάχος δομής γυροειδούς	3 mm
Στροφή 2 ^{ου} εμποδίου	270°



Σχήμα 5.22: Περίπτωση 5γ – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του 2^{ου} κατά 270°: Γεωμετρία αγωγού.



Σχήμα 5.23: Περίπτωση 5γ – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του 2^{ου} κατά 270°: Γραμμές ροής χρωματισμένες με το κλάσμα όγκου.



Σχήμα 5.24: Περίπτωση 5γ – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του 2^{ου} κατά 270°: Κατανομή κλάσματος όγκου, (α) Κατάντι του πρώτου εμποδίου, (β) Κατάντι του δεύτερου εμποδίου, (γ) Στην έξοδο του αναμίκτη.

Περίπτωση 5γ – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και στροφή του δεύτερου κατά 270°

Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses}$ [Pa]	65.63
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.268

Πίνακας 5.8: Περίπτωση 5γ – Πίνακας Αποτελεσμάτων.

5.5.4 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα 5.5, γίνεται αντιληπτό πως η στροφή του δεύτερου εμποδίου δεν απέδωσε τα επιθυμητά αποτελέσματα, καθώς η ομοιογένεια της ροής στην έξοδο του αναμίκτη ήταν σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση με την αρχική διαμόρφωση χωρίς στροφή του δεύτερου εμποδίου της ενότητας 5.3.1.

Συγκεκριμένα, η στροφή δεν κατάφερε να εισάγει την απαιτούμενη τυχαιότητα και κατ' επέκταση, συστροφή στη ροή που θα ευνοούσε την ανάμιξη των δύο ρευστών. Αντίθετα, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις 90° και 270° , η ροή που εξέρχεται από το πρώτο εμπόδιο τείνει να ευθυγραμμίζεται με τη γεωμετρία του δεύτερου, οδηγώντας σε ανεπαρκή ανάμιξη όπως φαίνεται στα **Σχήμα 5.17** και **Σχήμα 5.23**.

Το φαινόμενο αυτό ήταν λιγότερο έντονο στην περίπτωση 180° , όπου η ομοιογένεια στην έξοδο του αναμίκτη ήταν πιο κοντά στην απόδοση της αρχικής περίπτωσης, αν και πάλι είχαμε αρνητικά αποτελέσματα ως προς την ομοιογένεια. Παρά τα μη ενθαρρυντικά αποτελέσματα αυτής της προσέγγισης, η στροφή της δομής του γυροειδούς θα εξεταστεί περαιτέρω σε διαφορετική μορφή σε επόμενο κεφάλαιο, με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης του αναμίκτη.

5.6 Προοδευτική μείωση μεγέθους βασικού δομικού στοιχείου γυροειδούς

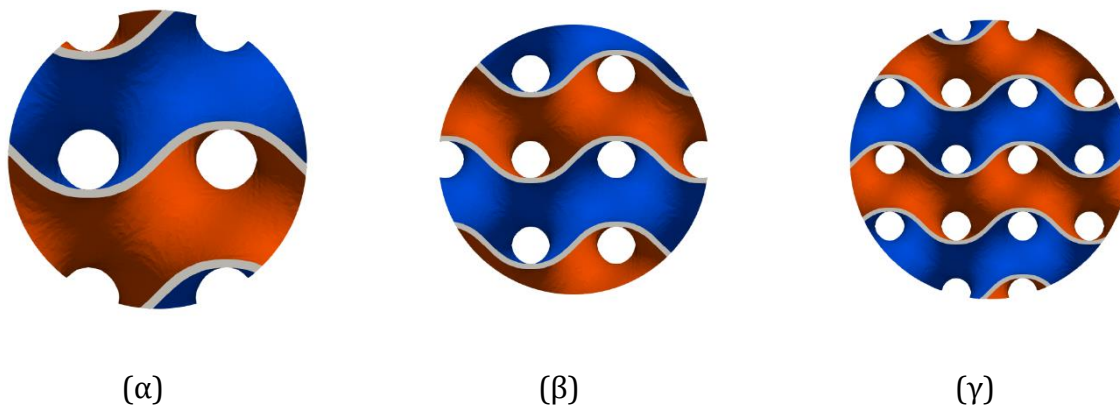
Η τρίτη παράμετρος σχεδιασμού που εξετάζεται, είναι το μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου του γυροειδούς. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η προοδευτική μείωση του μεγέθους του βασικού δομικού στοιχείου κατά το μισό με κάθε εμπόδιο του αναμίκτη, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.25**.

Ο στόχος αυτής της διαμόρφωσης είναι η σταδιακή μείωση της διατομής του αναμίκτη, η οποία, όπως αποδείχθηκε στην ενότητα 5.4, ενισχύει την ανάμιξη μεταξύ των δύο φάσεων του μίγματος. Η μελέτη εστιάζει στην αξιολόγηση του κατά πόσο αυτή η στένωση της διατομής μπορεί να επιτύχει την ίδια βελτίωση στην ομοιογένεια του μίγματος, διατηρώντας παράλληλα την πτώση ολικής πίεσης σε χαμηλότερα επίπεδα από αυτά που παρατηρήθηκαν στην ενότητα 5.3.

Ακόμη, η μείωση του μεγέθους του γυροειδούς αυξάνει τις διακλαδιζόμενες διαδρομές μέσα από τις οποίες μπορεί να περάσει η ροή. Αυτό το χαρακτηριστικό προάγει την τυχαιότητα στη διαδρομή της ροής, ενισχύοντας περαιτέρω την ανάμιξη των δύο ρευστών.

Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι η μείωση του μεγέθους του βασικού δομικού στοιχείου του γυροειδούς έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία περιοχών, μεταξύ του τοιχώματος του αναμίκτη και του γυροειδούς, που το διάκενο μεταξύ το δύο επιφανειών γίνεται πολύ μικρό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αρνητικών φαινομένων ως προς τη λειτουργία του αναμίκτη, όπως η εμφάνιση περιοχών που έχουμε ανακοπή της ροής και τη δημιουργία επικαθίσεων. Για να αντιμετωπισθεί το φαινόμενο αυτό εισάγεται ένα μικρό διάκενο

πάχους 1.5 mm , έτσι ώστε να διαφεύγει από εκεί χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η απόδοση του αναμίκτη.



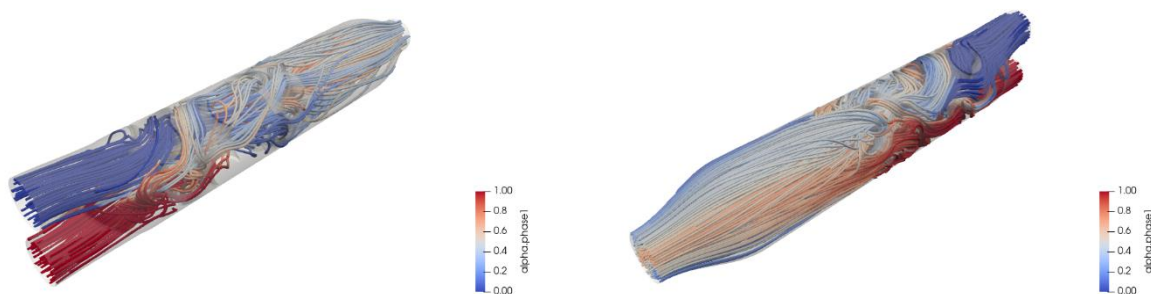
Σχήμα 5.25: Εμπόδιο από γυροειδές – Μήκος βασικού δομικού στοιχείου (α) $92,5\text{ mm}$, (β) $46,25\text{ mm}$, (γ) $23,125\text{ mm}$.

5.6.1 Περίπτωση 6^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και μείωση του μεγέθους του βασικού δομικού στοιχείου

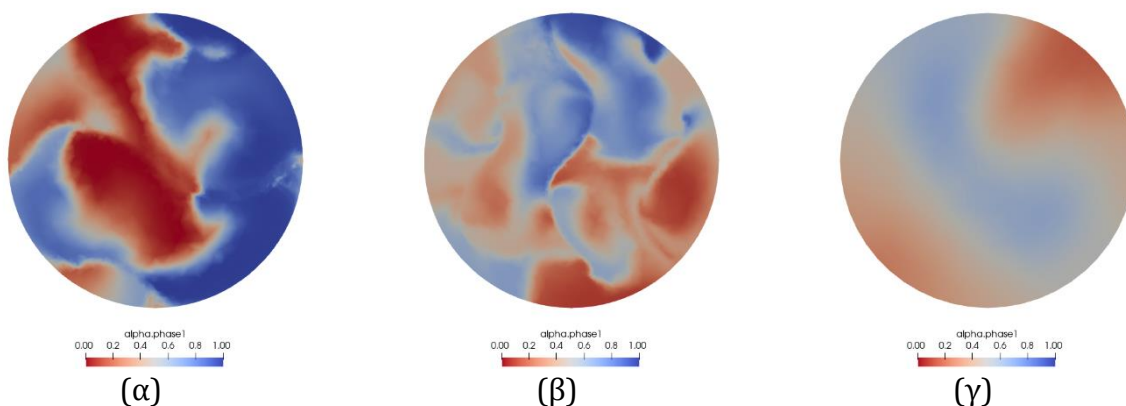
Μήκος βασικού δομικού στοιχείου 1 ^{ου} εμποδίου	92.5 mm
Μήκος βασικού δομικού στοιχείου 2 ^{ου} εμποδίου	46.25 mm
Απόσταση μεταξύ των εμποδίων	92.5 mm
Πάχος δομής γυροειδούς	3 mm



Σχήμα 5.26: Περίπτωση 6^η - Αναμίκτης με δύο εμπόδια και μείωση του βασικού μήκους γυροειδούς: Γεωμετρία αναμίκτη.



Σχήμα 5.27: Περίπτωση 6^η - Αναμίκτης με δύο εμπόδια και μείωση του βασικού μήκους γυροειδούς: Γραμμές ροής χρωματισμένες με το κλάσμα όγκου.



Σχήμα 5.28: Περίπτωση 6^η - Αναμίκτης με δύο εμπόδια και μείωση του βασικού μήκους γυροειδούς: Κατανομή κλάσματος όγκου: (α) Κατάντι του πρώτου εμποδίου, (β) Κατάντι του δεύτερου εμποδίου, (γ) Στην έξοδο του αναμίκτη.

Περίπτωση 6^η – Αναμίκτης με δύο εμπόδια και μείωση του βασικού μήκους γυροειδούς

Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses}$ [Pa]	61.38
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.278

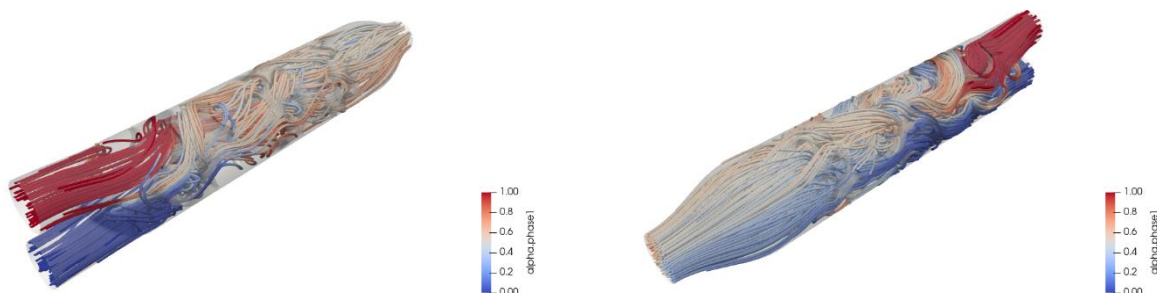
Πίνακας 5.9: Περίπτωση 6^η – Πίνακας Αποτελεσμάτων.

5.6.2 Περίπτωση 7^η - Αναμίκτης με τρία εμπόδια και μείωση του μεγέθους του βασικού δομικού στοιχείου

Μήκος δομικού στοιχείου 1 ^{ου} εμποδίου	92.5 mm
Μήκος δομικού στοιχείου 2 ^{ου} εμποδίου	46.25 mm
Μήκος δομικού στοιχείου 3 ^{ου} εμποδίου	23.125 mm
Απόσταση μεταξύ των εμποδίων 1&2	46.25 mm
Απόσταση μεταξύ των εμποδίων 2&3	23.125 mm
Πάχος δομής γυροειδούς	3 mm



Σχήμα 5.29: Περίπτωση 7^η – Αναμίκτης με τρία εμπόδια και μείωση του βασικού μήκους γυροειδούς - Γεωμετρία αναμίκτη.

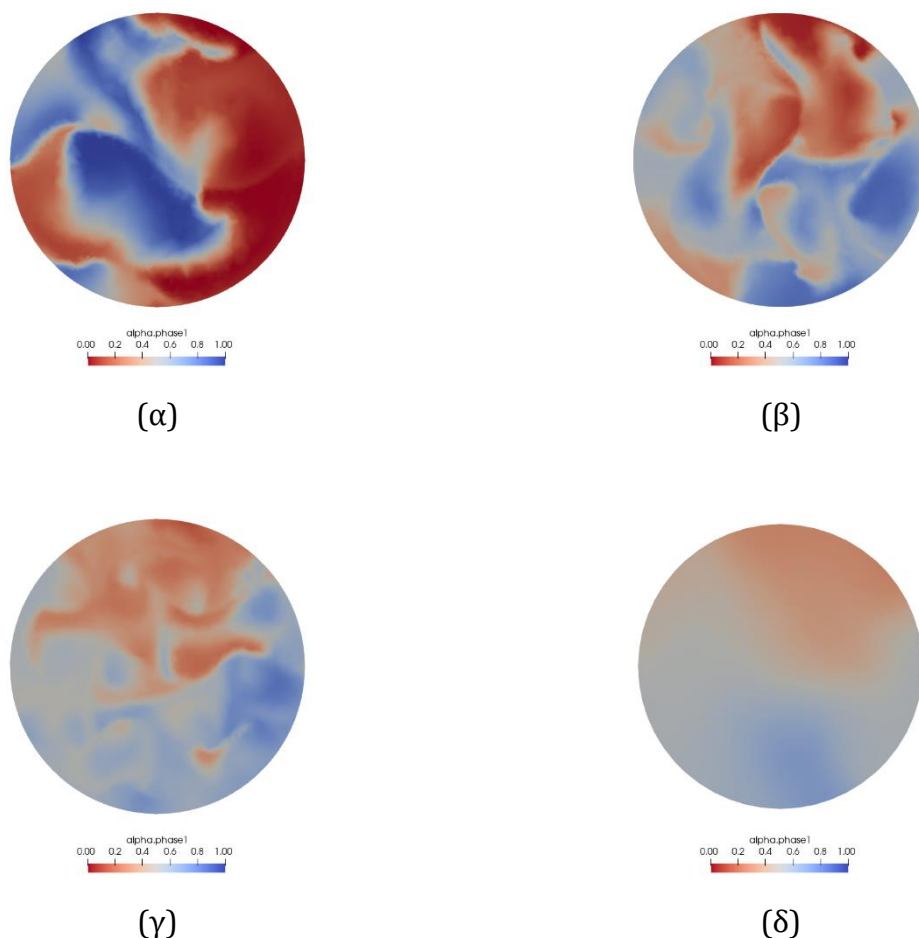


Σχήμα 5.30: Περίπτωση 7^η – Αναμίκτης με τρία εμπόδια και μείωση του βασικού μήκους γυροειδούς: Γραμμές ροής χρωματισμένες με το κλάσμα όγκου.

Περίπτωση 7^η – Αναμίκτης με τρία εμπόδια και μείωση του βασικού μήκους γυροειδούς

Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses}$ [Pa]	81.70
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.234

Πίνακας 5.10: Περίπτωση 7^η – Πίνακας Αποτελεσμάτων.



Σχήμα 5.31: : Περίπτωση 7^η – Αναμίκτης με τρία εμπόδια και μείωση του βασικού μήκους γυροειδούς - Κατανομή κλάσματος όγκου: (α) Κατάντι του πρώτου εμποδίου, (β) Κατάντι του δεύτερου εμποδίου, (γ) Κατάντι του τρίτου εμποδίου, (δ) Στην έξοδο του αναμίκτη

5.6.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα της ενότητας 5.6, γίνεται σαφές ότι ο αναμίκτης με προοδευτική μείωση του μεγέθους του βασικού δομικού στοιχείου δεν παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση σε σύγκριση με τον αναμίκτη της περίπτωσης 2, ο οποίος διαθέτει δύο εμπόδια μικρού πάχους και πανομοιότυπης γεωμετρίας. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να αποδοθεί σε δύο κύριους παράγοντες.

Πρώτον, το μικρό διάκενο μεταξύ των εμποδίων και του τοιχώματος του αγωγού φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά την απόδοση του αναμίκτη. Το περιορισμένο διάκενο επιτρέπει στο ρευστό να περάσει ελεύθερα από αυτό χωρίς να αναμιγνύεται με το υπόλοιπο μίγμα, με αποτέλεσμα η ανάμιξη να είναι ανεπαρκής. Δεύτερον, η μείωση του μεγέθους του βασικού δομικού στοιχείου του γυροειδούς οδηγεί σε μια πυκνότερη γεωμετρία των εμποδίων, η οποία, αν και αναμενόταν να αυξήσει την ανάμιξη, στην πράξη δημιουργεί στροβιλισμούς μικρότερης έντασης. Αυτοί οι ασθενέστεροι στροβιλισμοί διαχέονται γρήγορα και δεν

επιτυγχάνουν την απαιτούμενη δυναμική για να διασπάσουν και να αναμίξουν αποτελεσματικά τις δύο φάσεις του ρευστού.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί πως εξετάζοντας ξεχωριστά τις περιπτώσεις 6 και 7, γίνεται αντιληπτό πως η προοδευτική μείωση του πάχους έχει τη τάση να αυξάνει την ομοιογένεια του μίγματος, χωρίς να προσδίδει σημαντική αύξηση της πτώσης ολικής πίεσης. Η χρησιμότητα αυτού μελετάται σε επόμενο κεφάλαιο, όπου η προοδευτική μείωση του μεγέθους του βασικού δομικού στοιχείου θα είναι βασικό χαρακτηριστικό της γεωμετρίας του αναμίκτη.

5.7 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

Σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν στο κεφάλαιο αυτό και τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της 1^{ης} κατηγορίας παραμετρικών μελετών, **Σχήμα 5.32** και **Πίνακας 5.11**, εξάγονται τα παρακάτω θετικά (+) και αρνητικά (-) συμπεράσματα για τις διάφορες παραμέτρους σχεδιασμού που μελετήθηκαν:

Εισαγωγή δεύτερου εμποδίου:

- + Επιφέρει σημαντική βελτίωση στην απόδοση του αναμίκτη ως προς την ομοιογένεια του μίγματος στην έξοδό του
- + Ταυτόχρονα, δεν επιφέρει σημαντική αύξηση στην πτώση ολικής πίεσης.

Αύξηση του πάχους του γυροειδούς:

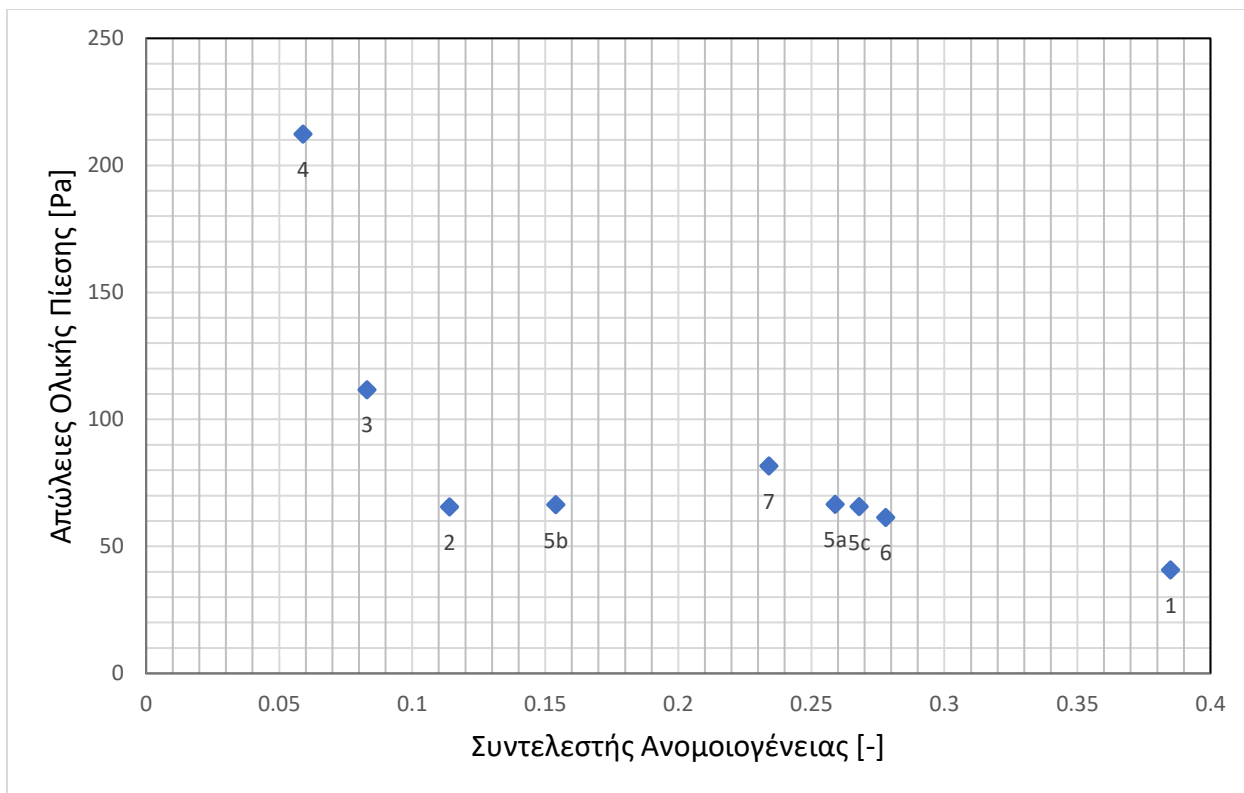
- + Επιφέρει τη μεγαλύτερη βελτίωση ως προς την ομοιογένεια του μίγματος στην έξοδό του
- Συνοδεύεται από τη μεγαλύτερη αύξηση της πτώσης ολικής πίεσης.

Στροφή του δεύτερου εμποδίου:










- Δεν επιφέρει θετικά αποτελέσματα στην απόδοση του αναμίκτη και εγκαταλείπεται ως ιδέα.

Προοδευτική μείωση μεγέθους βασικού δομικού στοιχείου γυροειδούς του:

- Δεν επιφέρει θετικά αποτελέσματα στην απόδοση του αναμίκτη.



Σχήμα 5.32: Κατηγορία 1^η: Αναμίκτες με πολλαπλά εμπόδια - Απεικόνιση πιθανών λύσεων στο επίπεδο των δύο στόχων.

Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα - Κατηγορία 1 ^η : Αναμίκτες με πολλαπλά εμπόδια					
Περίπτωση 1		Περίπτωση 2		Περίπτωση 3	
					
$P_{t,losses}$ [Pa]	40.71	$P_{t,losses}$ [Pa]	65.55	$P_{t,losses}$ [Pa]	111.7
CoV [-]	0.385	CoV [-]	0.114	CoV [-]	0.083
Περίπτωση 4		Περίπτωση 5α		Περίπτωση 5β	
					
$P_{t,losses}$ [Pa]	212.28	$P_{t,losses}$ [Pa]	66.60	$P_{t,losses}$ [Pa]	65.63
CoV [-]	0.059	CoV [-]	0.259	CoV [-]	0.154
Περίπτωση 5γ		Περίπτωση 6		Περίπτωση 7	
					
$P_{t,losses}$ [Pa]	65.63	$P_{t,losses}$ [Pa]	61.38	$P_{t,losses}$ [Pa]	81.7
CoV [-]	0.268	CoV [-]	0.278	CoV [-]	0.234

Πίνακας 5.11: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα - Κατηγορία 1^η: Αναμίκτες με πολλαπλά εμπόδια.

Κεφάλαιο 6 - Αναμίκτες με Γυροειδή σε

όλο το Μήκος του Αγωγού

Το έκτο κεφαλαίο εστιάζει στη εξέταση αναμικτών, όπου το γυροειδές επεκτείνεται σε όλο το μήκος του αγωγού. Ενώ αξιολογούνται εκ νέου παράμετροι σχεδιασμού ως προς την αύξηση της απόδοσης του αναμίκτη.

6.1 Σχεδιασμός αναμίκτη με γυροειδή σε όλο το μήκος του

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάσθηκε η ενσωμάτωση της δομής του γυροειδούς ως εμπόδιο στον αναμίκτη, με συγκεκριμένες τροποποιήσεις για να κατανοηθεί πώς ορισμένες βασικές παράμετροι σχεδιασμού επηρεάζουν την αποδοτικότητά του. Στην ενότητα αυτή, η μελέτη επικεντρώνεται σε διαμορφώσεις αναμίκτη, που η δομή του γυροειδούς καλύπτει όλο το μήκος του κύριου αγωγού.

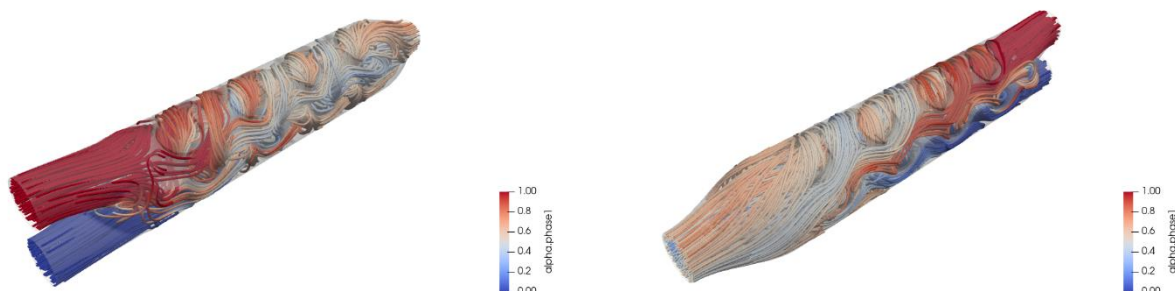
Εξετάζονται δύο διαμορφώσεις αναμίκτη, όπου η διαφορά έγκειται στο μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου της γυροειδούς μορφής. Συγκεκριμένα, κατασκευάζονται δύο αναμίκτες με επαναλαμβανόμενη δομή γυροειδούς κατά το κύριο άξονά του, όπου στην πρώτη περίπτωση το μήκος του βασικού δομικού στοιχείου διατηρείται στα 92,5 mm, ενώ στη δεύτερη περίπτωση περιορίζεται στα 46,25 mm, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.25**. Σκοπός της μελέτης αυτής είναι να αξιολογηθεί αν η εισαγωγή του γυροειδούς σε ολόκληρο το μήκος του αναμίκτη μπορεί να ενισχύσει την απόδοσή του, διατηρώντας παράλληλα την πτώση ολικής πίεσης σε χαμηλά επίπεδα.

6.1.1 Περίπτωση 8^η - Αναμίκτης με γυροειδές σε όλο το μήκος του αγωγού

Μήκος βασικού δομικού στοιχείου	92.5 mm
Συνολικό μήκος εμποδίου	370 mm
Πάχος δομής γυροειδούς	3 mm



Σχήμα 6.1: Περίπτωση 8^η – Αναμίκτης με γυροειδές κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού - Γεωμετρία αγωγού.



Σχήμα 6.2: : Περίπτωση 8^η – Αναμίκτης με γυροειδές κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού - Γραμμές ροής χρωματισμένες με το κλάσμα όγκου.



Σχήμα 6.3: Περίπτωση 8^η – Αναμίκτης με γυροειδές κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού - Κατανομή κλάσματος όγκου: (α) Κατάντι του πρώτου εμποδίου, (β) Στην έξοδο του αναμίκτη.

Περίπτωση 8^η – Αναμίκτης με γυροειδές κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού

Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses}$ [Pa]	95.55
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.272

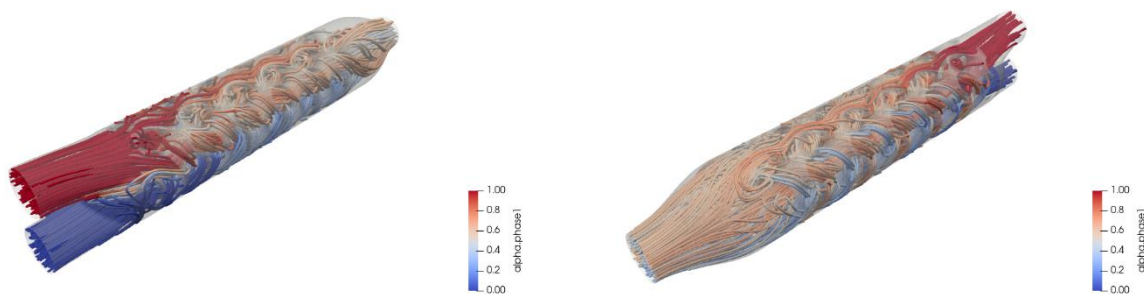
Πίνακας 6.1: Περίπτωση 8^η – Πίνακας Αποτελεσμάτων.

6.1.2 Περίπτωση 9^η - Αναμίκτης με γυροειδές μειωμένου μεγέθους βασικού δομικού στοιχείου σε όλο το μήκος του αγωγού

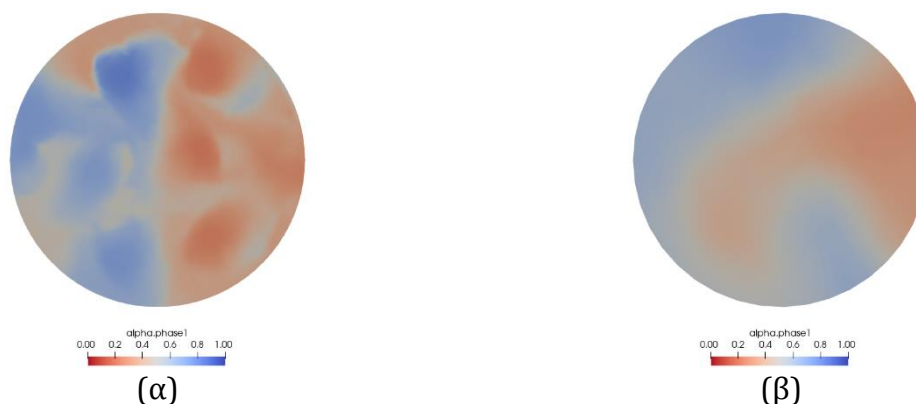
Μήκος βασικού δομικού στοιχείου	46.25 mm
Συνολικό μήκος εμποδίου	370 mm
Πάχος δομής γυροειδούς	3 mm



Σχήμα 6.4: Περίπτωση 9^η - Αναμίκτης με γυροειδές μειωμένου βασικού μήκους κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού - Γεωμετρία αναμίκτη.



Σχήμα 6.5 : Περίπτωση 9^η - Αναμίκτης με γυροειδές μειωμένου βασικού μήκους κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού - Γραμμές ροής χρωματισμένες με το κλάσμα όγκο.



Σχήμα 6.6: Περίπτωση 9^η - Αναμίκτης με γυροειδές μειωμένου βασικού μήκους κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού - Κατανομή κλάσματος όγκου, (α) Κατάντι του εμποδίου, (β) Στην έξοδο του αναμίκτη.

Περίπτωση 9^η – Αναμίκτης με γυροειδές μειωμένου βασικού μήκους κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού

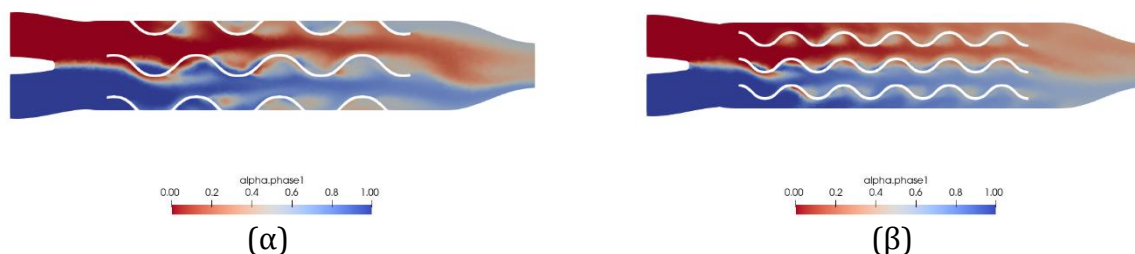
Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses}$ [Pa]	149.79
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.228

Πίνακας 6.2: Περίπτωση 9^η – Πίνακας Αποτελεσμάτων.

6.1.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα της ενότητας 6.1, είναι φανερό ότι η απόδοση των νέων αναμικτών δεν είναι η επιθυμητή. Συγκεκριμένα, ενώ η ροή φαίνεται να ακολουθεί την περίπλοκη γεωμετρία του γυροειδούς και να παρατηρούνται έντονα φαινόμενα στροβιλισμών, αυτά τα φαινόμενα περιορίζονται εντός των διαφορετικών φάσεων των ρευστών.

Από το **Σχήμα 6.7**, παρατηρείται ότι παρά τη διέλευση της ροής από την περίπλοκη γεωμετρία της δομής του γυροειδούς, δημιουργούνται διαδρομές όπου η ροή περνά ανεμπόδιση χωρίς να έχουμε αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο ρευστών, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ομοιογένεια στην έξοδό του. Παρόλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί πως παρά την εισαγωγή εμποδίου καθ' όλο το μήκος του αναμίκτη και την επακόλουθη στένωση της διατομής, οι απώλειες ολικής πίεσης δεν αυξήθηκαν σημαντικά.



Σχήμα 6.7: Τομή κατά μήκος του αναμίκτη χρωματισμένες με το κλάσμα όγκου: (α) Περίπτωση 8, (β) Περίπτωση 9.

6.2 Σχεδιασμός αναμίκτη με μεταβλητό μέγεθος βασικού δομικού στοιχείου γυροειδούς

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο προηγούμενο κεφάλαιο, γίνεται εμφανές ότι η αύξηση του πάχους και η συνακόλουθη στένωση της διατομής του αναμίκτη έχουν την πιο σημαντική επίδραση στη βελτίωση της ομοιογένειας του μίγματος. Παράλληλα από την ενότητα 6.1.3, παρατηρήθηκε ότι η εισαγωγή της δομής του γυροειδούς σε όλο το μήκος του αναμίκτη παρόλο που δεν επιφέρει πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα, έχει τη τάση να παρουσιάζει καλύτερη ανάμιξη μεταξύ των δύο ρευστών όσο μειώνεται το μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου της δομής του γυροειδούς. Ωστόσο, αυτή η τροποποίηση αυξάνει αντίστοιχα την απαιτούμενη ενέργεια, καθιστώντας την υπερβολική αύξηση του πάχους ή τη μείωση του μεγέθους του βασικού δομικού στοιχείου της δομής του γυροειδούς πρακτικά αδύνατη πέρα από ορισμένα όρια.

Για τον λόγο αυτό, εξετάζεται η εισαγωγή μιας διαμόρφωσης γυροειδούς με μεταβλητό μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου. Αυτή η διαμόρφωση εξαναγκάζει τη ροή να διέλθει μέσα από στενότερες διατομές, οι οποίες ενισχύουν την ανάμιξη των δύο φάσεων. Ταυτόχρονα, η γεωμετρία αυτή χαρακτηρίζεται από την επαναλαμβανόμενη μείωση του μεγέθους της δομής του γυροειδούς, δημιουργώντας έτσι μια διαμόρφωση με πολλές διακλαδώσεις όμοιες με αυτές μιας μορφοκλασματικής γεωμετρίας (fractal). Με αποτέλεσμα η ροή να κατευθύνεται μέσα από συνεχώς διακλαδιζόμενες διαδρομές, προάγοντας την ανάμιξη των δύο ρευστών. Με στόχο να επιτευχθεί σημαντική βελτίωση ως προς την απόδοση του αναμίκτη, συνδυάζοντας τα θετικά των δύο παραπάνω παραμέτρων σχεδιασμού.

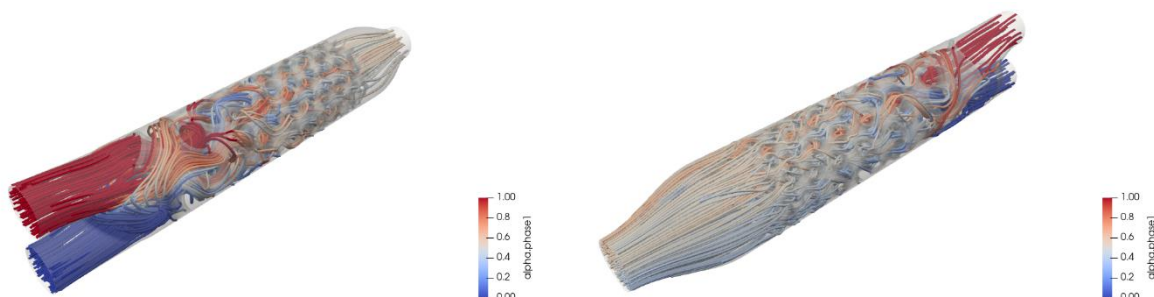
Σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν στην ενότητα 2.2.3, διαμορφώθηκε και η αντίστοιχη γεωμετρία αναμίκτη με γυροειδές μεταβλητού μεγέθους βασικού δομικού στοιχείου γυροειδούς, **Σχήμα 6.8**, με το αρχικό μήκος να είναι 180 mm και το τελικό να είναι 20 mm.

6.2.1 Περίπτωση 10^η - Αναμίκτης με γυροειδές μεταβλητού μεγέθους βασικού δομικού στοιχείου γυροειδούς

Μήκος αρχικού βασικού δομικού στοιχείου	180 mm
Μήκος τελικού βασικού δομικού στοιχείου	20 mm
Πάχος δομής γυροειδούς	3 mm



Σχήμα 6.8: Περίπτωση 10^η – Αναμίκτης με γυροειδές μεταβλητού μεγέθους βασικού δομικού στοιχείου γυροειδούς – Γεωμετρία αναμίκτη.



Σχήμα 6.9: : Περίπτωση 10^η – Αναμίκτης με γυροειδές μεταβλητού μεγέθους βασικού δομικού στοιχείου γυροειδούς – Γραμμές ροής χρωματισμένες με το κλάσμα όγκου.



Σχήμα 6.10: Περίπτωση 10^η – Αναμίκτης με γυροειδές μεταβλητού μεγέθους βασικού δομικού στοιχείου γυροειδούς - Κατανομή κλάσματος όγκου, (α) Κατάντι του πρώτου εμποδίου, (β) Στην έξοδο του αναμίκτη.

Περίπτωση 10^η – Αναμίκτης με ένα εμπόδιο

Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses}$ [Pa]	202.17
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.123

Πίνακας 6.3: Περίπτωση 10^η – Πίνακας Αποτελεσμάτων.

6.2.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα της ενότητας **6.2.1**, παρατηρείται ότι η ροή διέρχεται μέσω των πολλαπλών διακλαδιζόμενων διαδρομών της γεωμετρίας του γυροειδούς, γεγονός που αυξάνει την αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο ρευστών και κατά συνέπεια, ενισχύει την ανάμιξή τους. Η πτώση της ολικής πίεσης παρουσιάζει και αυτή αύξηση, κάτι που είναι αναμενόμενο λόγω της σημαντικής στένωσης της διατομής.

Επιπλέον, παρατηρείται, αν και σε μικρότερο βαθμό, το αρνητικό φαινόμενο που περιγράφεται στο **Σχήμα 6.7**, όπου εμφανίζονται περιοχές χαμηλής ανάμιξης. Αυτές οι περιοχές είναι προβληματικές καθώς αποτελούν ζώνες όπου η ροή δεν αναμειγνύεται επαρκώς, γεγονός που μπορεί να μειώσει την ομοιογένεια του τελικού μίγματος. Παρόλο που η εμφάνιση αυτών των ζωνών είναι λιγότερο έντονη σε σχέση με προηγούμενες διατάξεις, η ύπαρξή τους υποδεικνύει ότι, παρότι η συνολική διαμόρφωση είναι βελτιωμένη, δεν έχει ακόμη επιτευχθεί η πλήρης εξάλειψη των σημείων της γεωμετρίας που έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση του αναμίκτη.

6.3 Συστροφή της γεωμετρίας του εμποδίου

Από την ανάλυση των ενοτήτων **6.1** και **6.2**, προκύπτει ότι η διαμόρφωση του αναμίκτη με εμπόδιο που εκτείνεται σε όλο το μήκος του αγωγού μπορεί να συμβάλλει θετικά στην απόδοση του συστήματος. Ωστόσο, ένα από τα βασικά προβλήματα που αναδύονται είναι η δημιουργία διαδρομών χαμηλής ανάμιξης, όπως περιγράφεται στο **Σχήμα 6.7**, γεγονός που περιορίζει την αποδοτικότητα της ανάμιξης.

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα, προτείνεται η εισαγωγή συστροφής 180° στη γεωμετρία του εμποδίου, όπως φαίνεται στο παράδειγμα κυλινδρικής γεωμετρίας, **Σχήμα 6.11**. Ο στόχος αυτής της τροποποίησης είναι η διάσπαση των περιοχών χαμηλής ανάμιξης, προωθώντας μια εντονότερη αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο ρευστών. Με τη συστροφή αυτή, αναμένεται ότι οι ροές θα αποτρέπονται από το να ακολουθούν ανεμπόδιστες διαδρομές χωρίς ουσιαστική ανάμιξη, αυξάνοντας έτσι την συνολική αποτελεσματικότητα του αναμίκτη.



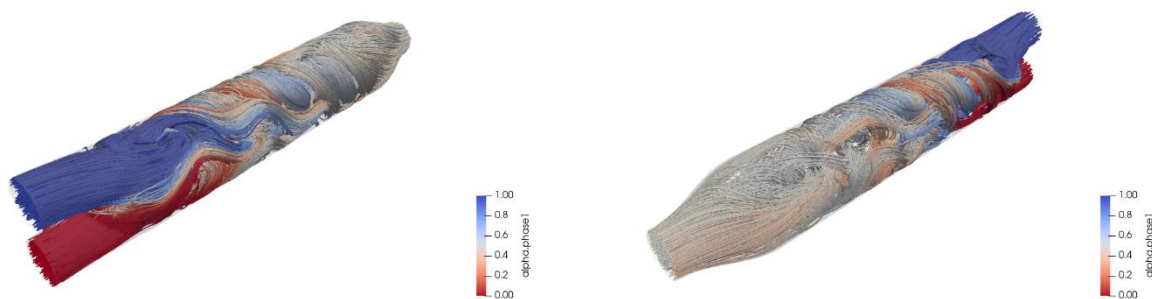
Σχήμα 6.11: Πάνω – Αρχική γεωμετρία, Κάτω – Γεωμετρία με τροπή κατά 180° .

6.3.1 Περίπτωση 11^η - Αναμίκτης με γυροειδές σε όλο το μήκος του αγωγού και συστροφή 180°

Μήκος βασικού δομικού στοιχείου	92.5 mm
Συνολικό μήκος εμποδίου	370 mm
Συστροφή γεωμετρίας εμποδίου	180°
Πάχος δομής γυροειδούς	3 mm



Σχήμα 6.12: Περίπτωση 11^η - Αναμίκτης με γυροειδές κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού και συστροφή 180° - Γεωμετρία αγωγού.



Σχήμα 6.13: Περίπτωση 11^η - Αναμίκτης με γυροειδές κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού και συστροφή 180° - Γραμμές χρωματισμένες ροής με το κλάσμα όγκου.



Σχήμα 6.14: Περίπτωση 11^η - Αναμίκτης με γυροειδές κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού και συστροφή 180° - Κατανομή κλάσματος όγκου, (α) Κατάντι του εμποδίου, (β) Στην έξοδο του αναμίκτη.

Περίπτωση 11^η - Αναμίκτης με γυροειδές κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού και συστροφή 180°

Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses}$ [Pa]	96.69
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.078

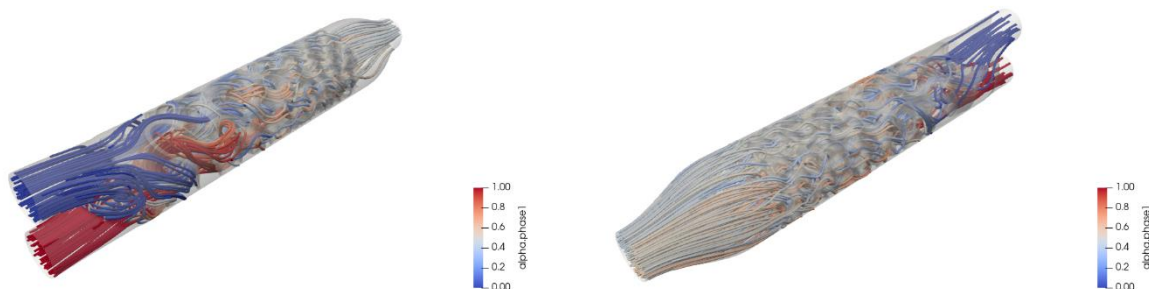
Πίνακας 6.4: Περίπτωση 11^η - Πίνακας Αποτελεσμάτων.

6.3.2 Περίπτωση 12^η - Αναμίκτης με γυροειδές μεταβλητού μεγέθους βασικού δομικού στοιχείου γυροειδούς και συστροφή 180°

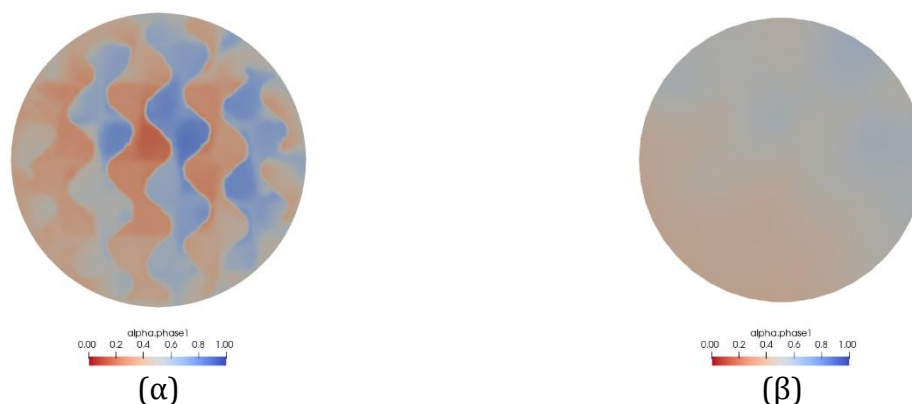
Μήκος αρχικού δομικού στοιχείου	180 mm
Μήκος τελικού δομικού στοιχείου	20 mm
Συνολικού μήκος εμποδίου	370 mm
Συστροφή γεωμετρίας εμποδίου	180°
Πάχος δομής γυροειδούς	3 mm



Σχήμα 6.15: Περίπτωση 12^η - Αναμίκτης με γυροειδές μεταβλητού μεγέθους βασικού δομικού στοιχείου γυροειδούς και συστροφή 180°- Γεωμετρία αγωγού.



Σχήμα 6.16: Περίπτωση 12^η - Αναμίκτης με γυροειδές μεταβλητού μεγέθους βασικού δομικού στοιχείου γυροειδούς και συστροφή 180°- Γραμμές ροής χρωματισμένες με το κλάσμα όγκου.



Σχήμα 6.17: Περίπτωση 12^η – Αναμίκτης με γυροειδές μεταβλητού μεγέθους βασικού δομικού στοιχείου γυροειδούς και συστροφή 180° - Κατανομή κλάσματος όγκου, (α) Κατάντι του πρώτου εμποδίου, (β) Στην έξοδο του αναμίκτη.

Περίπτωση 12^η – Αναμίκτης με γυροειδές διαβαθμισμένου βασικού μήκους και συστροφή 180°

Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses}$ [Pa]	208.41
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [–]	0.091

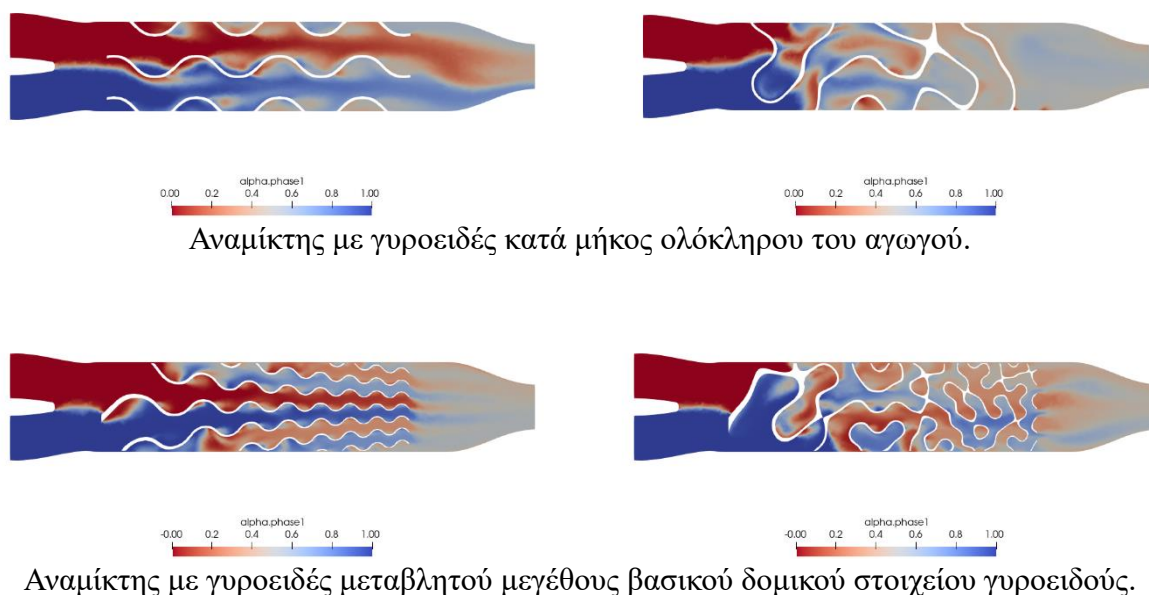
Πίνακας 6.5: Περίπτωση 12^η – Πίνακας Αποτελεσμάτων.

6.3.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα της ενότητας 6.3, είναι σαφές ότι η εισαγωγή συστροφής στη γεωμετρία του γυροειδούς είχε σημαντική θετική επίδραση στην απόδοση του αναμίκτη. Η συστροφή που εφαρμόστηκε επέτυχε το επιθυμητό αποτέλεσμα, διαταράσσοντας τις ευθύγραμμες διαδρομές όπου η ροή ακολουθούσε χωρίς ουσιαστική ανάμιξη μεταξύ των δύο ρευστών. Αυτή η τροποποίηση οδήγησε σε σημαντική βελτίωση της απόδοσης του αναμίκτη, καθώς αναγκάζει τη ροή να ακολουθήσει πιο εκτεταμένες και πολύπλοκες διαδρομές, οι οποίες ενθαρρύνουν την αποτελεσματική ανάμιξη μεταξύ των δύο ρευστών, **Σχήμα 6.18**.

Το αποτέλεσμα αυτό ήταν ιδιαίτερα έντονο στην περίπτωση του γυροειδούς με σταθερό μέγεθος βασικού δομικού στοιχείου, καθώς η γεωμετρία σε αυτή την περίπτωση είναι πιο απλή και η δράση της συστροφής πιο άμεσα αντιληπτή. Αντίθετα, στην περίπτωση του γυροειδούς με μεταβλητό μέγεθος βασικού στοιχείου, η γεωμετρία είναι ήδη εξαιρετικά πολύπλοκη, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τη συνεισφορά της συστροφής στην περαιτέρω βελτίωση της ανάμιξης.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η σημαντική βελτίωση στην ομοιογένεια της ροής στην έξοδο του αναμίκτη επιτυγχάνεται με μόνο μια μικρή αύξηση της πτώσης ολικής πίεσης, καθιστώντας αυτήν την παράμετρο σχεδιασμού κρίσιμη για τη βελτίωση του αναμίκτη.



Σχήμα 6.18: Τομές αναμίκτη χρωματισμένες με το κλάσμα όγκου: Αριστερά – Περίπτωση χωρίς συστροφή, Δεξιά – Περίπτωση με συστροφή.

6.4 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

Σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν στο κεφάλαιο αυτό και τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της 1ης κατηγορίας παραμετρικών μελετών, **Σχήμα 6.19** και **Πίνακας 6.6**, εξάγονται τα παρακάτω θετικά (+) και αρνητικά (-) συμπεράσματα για τις διάφορες παραμέτρους σχεδιασμού που μελετήθηκαν:

Γυροειδές σε όλο το μήκος του αγωγού:

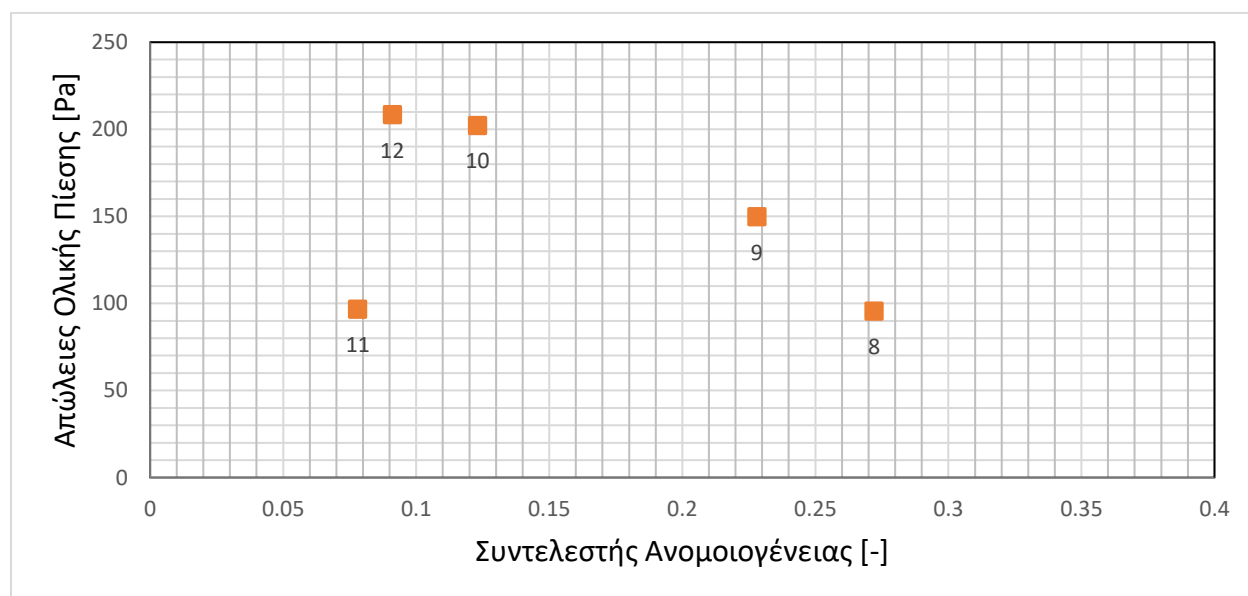
- + Επιφέρει σχετικά καλή ανάμιξη μεταξύ των δύο ρευστών, που γίνεται καλύτερη με τη μείωση του μεγέθους του βασικού δομικού στοιχείου (πιο πυκνή γεωμετρία)
- Συνοδεύεται από αύξηση της πτώσης ολικής πίεσης, που αυξάνει σε απαγορευτικό βαθμό όσο γίνεται πιο πυκνή η γεωμετρία

Γυροειδές με μεταβλητό μέγεθος βασικού δομικού στοιχείου:






- + Επιφέρει σημαντική βελτίωση στην απόδοση του αναμίκτη ως προς την ομοιογένεια της ροής στην έξοδο του
- Συνοδεύεται και από σημαντική αύξηση της πτώσης ολικής πίεσης

Συστροφή της γεωμετρίας:

- + Επιφέρει βελτίωση επί της αρχικής γεωμετρίας όσον αφορά την ομοιογένεια της ροής στην έξοδο του αναμίκτη
- + Η αύξηση της πτώσης ολικής πίεσης είναι αμελητέα



Σχήμα 6.19: Κατηγορία 2^η: Αναμίκτης με εμπόδιο σε όλο το μήκος - Απεικόνιση πιθανών λύσεων στο επίπεδο δύο στόχων: Με την περίπτωση 11 να κυριαρχεί όλων των υπόλοιπων, δείχνοντας πως ο συνδυασμός του γυροειδούς σε όλο το μήκος του αγωγού και της συστροφής του, επιφέρει σημαντική βελτίωση στην απόδοση του αναμίκτη.

Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα – Κατηγορία 2 ^η : Αναμίκτες με εμπόδιο σε όλο το μήκος					
Περίπτωση 8		Περίπτωση 9		Περίπτωση 10	
					
$P_{t,losses}$ [Pa]	95.55	$P_{t,losses}$ [Pa]	149,79	$P_{t,losses}$ [Pa]	202,17
CoV [-]	0.272	CoV [-]	0.228	CoV [-]	0.123
Περίπτωση 11			Περίπτωση 12		
					
$P_{t,losses}$ [Pa]	96.69	$P_{t,losses}$ [Pa]	208.41		
CoV [-]	0.078	CoV [-]	0.091		

Πίνακας 6.6: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα – Κατηγορία 2^η: Αναμίκτες με εμπόδιο σε όλο το μήκος.

Κεφάλαιο 7 - Σχεδιασμός

Αποδοτικότερου Αναμίκτη

7.1 Παράμετροι Σχεδιασμού Αποδοτικότερου Αναμίκτη

Όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, εξετάστηκαν διάφορες παράμετροι σχεδιασμού της δομής του γυροειδούς με στόχο την κατανόηση και αξιολόγηση της επιρροής τους στην απόδοση του αναμίκτη. Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις αναμικτών, οι οποίες σχεδιάστηκαν λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα των προηγούμενων κεφαλαίων.

Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι παράμετροι σχεδιασμού που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη επίδραση στη βελτίωση της ομοιογένειας του μίγματος στην έξοδο του αναμίκτη, ενώ ταυτόχρονα επιφέρουν τη μικρότερη πτώση ολικής πίεσης. Οι παράμετροι που κρίθηκαν καταλληλότερες περιλαμβάνουν τη χρήση πολλαπλών εμποδίων εντός του αναμίκτη, την εισαγωγή γυροειδούς δομής με μεταβλητό μέγεθος βασικού δομικού στοιχείου, καθώς και την εφαρμογή συστροφής 180° στη γεωμετρία των εμποδίων. Στην ενότητα αυτή, οι τροποποιήσεις στις παραμέτρους σχεδιασμού εισάγονται σταδιακά, ωστόσο να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη διαμόρφωση αναμίκτη με ικανοποιητική απόδοση.

Στην πρώτη περίπτωση που εξετάζεται στην ενότητα **7.1.1**, ο αναμίκτης αποτελείται από ένα εμπόδιο γυροειδούς με μεταβλητό μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου. Το μήκος του βασικού στοιχείου μειώνεται προοδευτικά από αρχικό μήκος 180 mm σε τελικό μήκος 45 mm, ενώ το συνολικό μήκος του εμποδίου είναι 160 mm, **Σχήμα 7.1**. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, διατηρείται το διάκενο των 1,5 mm, για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην ενότητα 5.4.

Στη δεύτερη περίπτωση που εξετάζεται στην ενότητα **7.1.2**, εισάγεται ένα δεύτερο εμπόδιο, πανομοιότυπης γεωμετρίας με αυτό της πρώτης περίπτωσης με στόχο την περαιτέρω ανάμιξη της ροής. Το κενό μεταξύ των δύο εμποδίων ανέρχεται σε περίπου 55 mm, **Σχήμα 7.4**.

Στην τρίτη και τελευταία περίπτωση της ενότητας **7.1.3**, εφαρμόζεται συστροφή στη γεωμετρία των εμποδίων κατά 180°, με την πρώτη συστροφή να εφαρμόζεται αντιστροφικά και τη δεύτερη ωρολογιακά. Αυτή η διαμόρφωση εμπνέεται από τους στατικούς αναμίκτης τύπου Kenics, **Σχήμα 1.1**, με στόχο τη βελτίωση της ανάμιξης μέσω της αναγκαστικής ανακατεύθυνσης της ροής.

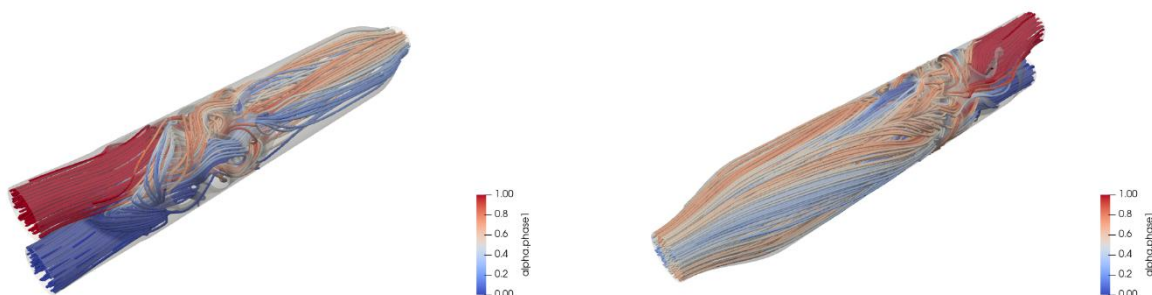
Με αυτές τις διαμορφώσεις, επιδιώκεται η βελτιστοποίηση της απόδοσης του αναμίκτη, διατηρώντας την ενεργειακή κατανάλωση σε αποδεκτά επίπεδα, ενώ παράλληλα εξετάζεται η επίδραση κάθε παραμέτρου σχεδιασμού στην τελική απόδοση.

7.1.1 Περίπτωση 13^η – Αποδοτικότερος Αναμίκτης με ένα εμπόδιο

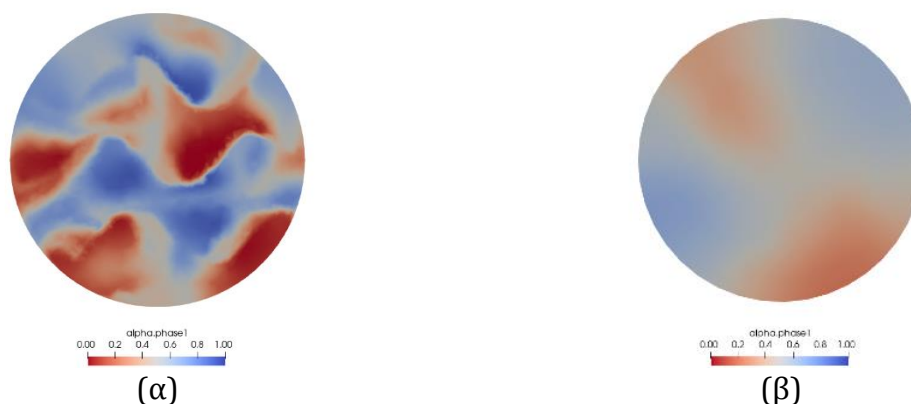
Μήκος αρχικού βασικού δομικού στοιχείου	180 mm
Μήκος τελικού βασικού δομικού στοιχείου	45 mm
Μήκος συνολικού εμποδίου	185 mm
Πάχος δομής γυροειδούς	3 mm



Σχήμα 7.1: Περίπτωση 13^η – Αποδοτικότερος αναμίκτης με ένα εμπόδιο: Γεωμετρία αναμίκτη.



Σχήμα 7.2: Περίπτωση 13^η – Αποδοτικότερος αναμίκτης με ένα εμπόδιο: Γραμμές χρωματισμένες ροής με το κλάσμα όγκου.



Σχήμα 7.3: Περίπτωση 13^η – Αποδοτικότερος αναμίκτης με ένα εμπόδιο: Κατανομή κλάσματος όγκου, (α) Κατάντι του πρώτου εμποδίου, (β) Στην έξοδο του αναμίκτη.

Περίπτωση 13^η – Αποδοτικότερος αναμίκτης με ένα εμπόδιο

Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses} [Pa]$	60.68
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [-]	0.248

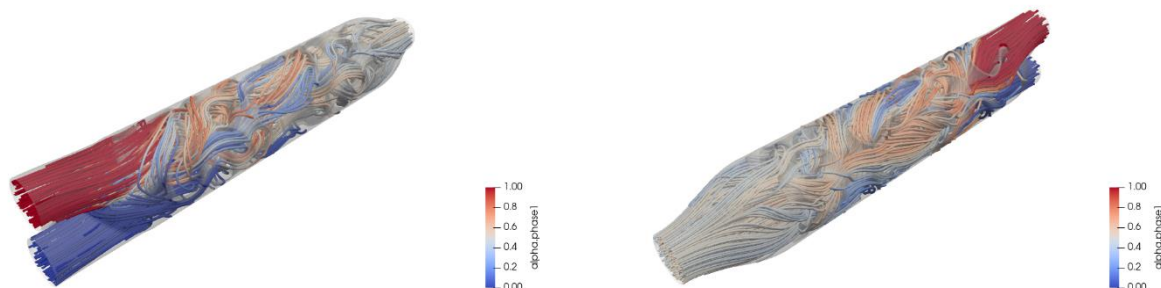
Πίνακας 7.1: Περίπτωση 13^η – Πίνακας Αποτελεσμάτων.

7.1.2 Περίπτωση 14^η – Αποδοτικότερος Αναμίκτης με δύο εμπόδια

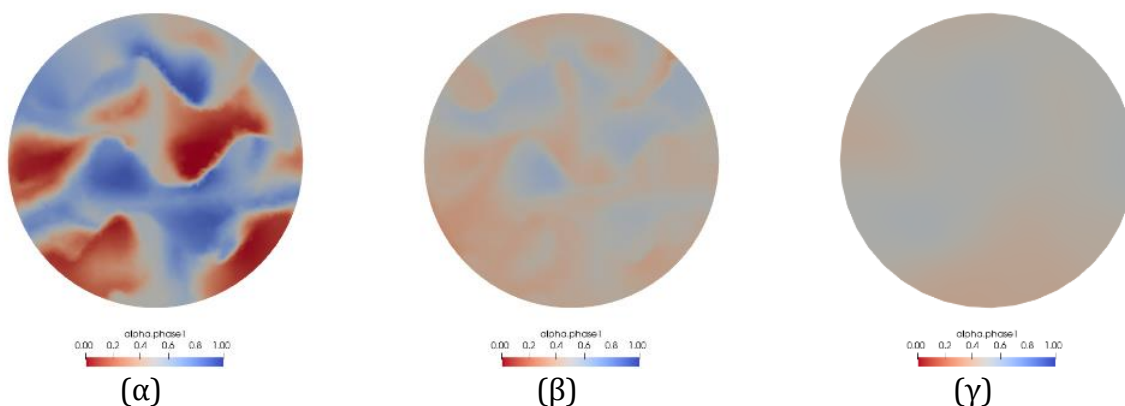
Μήκος αρχικού βασικού δομικού στοιχείου	180 mm
Μήκος τελικού βασικού δομικού στοιχείου	45 mm
Μήκος συνολικού εμποδίου	185 mm
Απόσταση μεταξύ των εμποδίων	50 mm
Πάχος δομής γυροειδούς	3 mm



Σχήμα 7.4: Περίπτωση 14^η – Αποδοτικότερος αναμίκτης με δύο εμπόδια: Γεωμετρία αναμίκτη.



Σχήμα 7.5: Περίπτωση 14^η – Αποδοτικότερος αναμίκτης με δύο εμπόδια: Γραμμές χρωματισμένες ροής με το κλάσμα όγκου.



Σχήμα 7.6: Περίπτωση 14^η – Αποδοτικότερος αναμίκτης με δύο εμπόδια: Κατανομή κλάσματος όγκου: (α) Κατάντι του πρώτου εμποδίου, (β) Κατάντι του δεύτερου εμποδίου, (γ) Στην έξοδο του αναμίκτη.

Περίπτωση 14^η – Αποδοτικότερος αναμίκτης με δύο εμπόδια

Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses} [Pa]$	105.49
Συντελεστής ανομοιογένειας $CoV [-]$	0.065

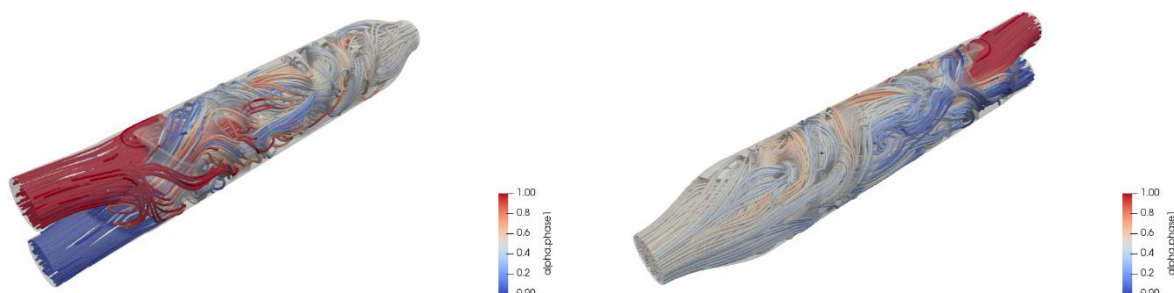
Πίνακας 7.2: Περίπτωση 14^η – Πίνακας Αποτελεσμάτων.

7.1.3 Περίπτωση 15^η – Αποδοτικότερος Αναμίκτης με δύο εμπόδια και συστροφή εμποδίων κατά 180°

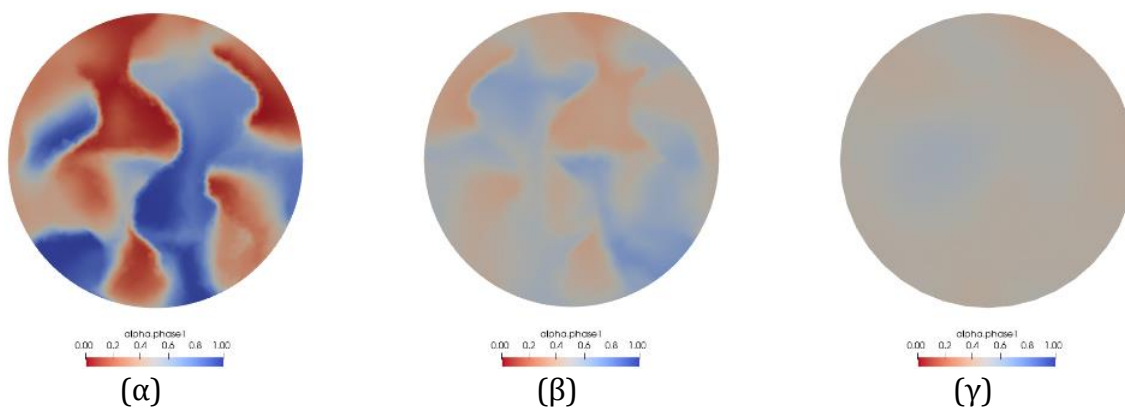
Μήκος αρχικού βασικού δομικού στοιχείου	180 mm
Μήκος τελικού βασικού δομικού στοιχείου	45 mm
Μήκος συνολικού εμποδίου	185 mm
Απόσταση μεταξύ των εμποδίων	50 mm
Συστροφή 1 ^{ου} εμποδίου	+ 180°
Συστροφή 2 ^{ου} εμποδίου	- 180°
Πάχος δομής γυροειδούς	3 mm



Σχήμα 7.7: Περίπτωση 15^η – Αποδοτικότερος αναμίκτης με δύο εμπόδια και συστροφή τους κατά 180°: Γεωμετρία αναμίκτη.



Σχήμα 7.8: Περίπτωση 15^η – Αποδοτικότερος αναμίκτης με δύο εμπόδια και συστροφή τους κατά 180°: Γραμμές χρωματισμένες ροής με το κλάσμα όγκου.



Σχήμα 7.9: Περίπτωση 15^η – Αποδοτικότερος αναμίκτης με δύο εμπόδια και συστροφή τους κατά 180°: Κατανομή κλάσματος όγκου: (α) Κατάντι του πρώτου εμποδίου, (β) Κατάντι του δεύτερου εμποδίου, (γ) Στην έξοδο του αναμίκτη.

Περίπτωση 15^η –Αποδοτικότερος αναμίκτης με δύο εμπόδια και συστροφή τους κατά 180°

Απώλειες ολικής πίεσης $P_{t,losses}$ [Pa]	108.09
Συντελεστής ανομοιογένειας CoV [–]	0.047

Πίνακας 7.3: Περίπτωση 15^η – Πίνακας Αποτελεσμάτων.

7.1.4 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα της ενότητας 7.1, γίνεται σαφές ότι η εφαρμογή των συμπερασμάτων που συγκεντρώθηκαν στα κεφάλαια 5 και 6, επιτρέπει την κατασκευή ενός αναμίκτη με δομή γυροειδούς, ο οποίος επιτυγχάνει περισσότερο ικανοποιητική απόδοση.

Συγκεκριμένα, ο αναμίκτης με ένα μόνο εμπόδιο παρουσιάζει σχεδόν δύο φορές καλύτερο συντελεστή ομοιογένειας σε σύγκριση με τον αντίστοιχο αναμίκτη της ενότητας 5.1. Παρά το γεγονός ότι ένα εμπόδιο δεν είναι αρκετό για την κατασκευή αναμίκτη με συντελεστή ανομοιογένειας κάτω του ορίου των 0.05, η μικρή αύξηση των απωλειών ολικής πίεσης δείχνει πως η συγκεκριμένη γεωμετρία εμποδίου είναι αποδοτικότερη.

Η προσθήκη ενός δεύτερου εμποδίου στον αναμίκτη οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της απόδοσής του, με τον συντελεστή ανομοιογένειας να πλησιάζει το όριο των 0.05, το οποίο θεωρείται ικανοποιητικό στη πράξη. Αυτή η βελτίωση υποδηλώνει ότι η ενίσχυση της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας του αναμίκτη μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποτελεσματική ανάμιξη, ενώ πάλι η πτώση ολικής πίεσης παραμένει σε αποδεκτά επίπεδα.

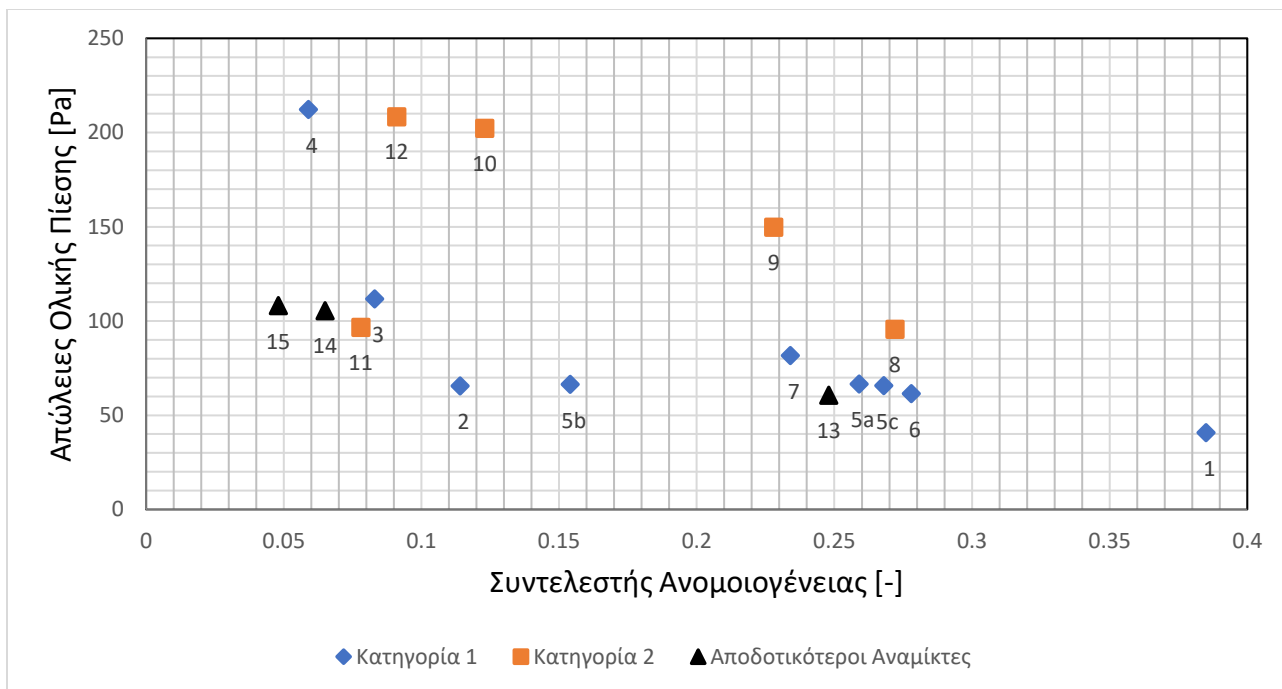
Τέλος, με την εισαγωγή συστροφής και στα δύο εμπόδια, η απόδοση του αναμίκτη φτάνει σε επίπεδα που αντιστοιχούν στα βιομηχανικά πρότυπα, με τον συντελεστή ανομοιογένειας να μειώνεται κάτω από το όριο του 0,05. Παράλληλα, οι απώλειες ολικής πίεσης παραμένουν σε ικανοποιητικά επίπεδα για αναμίκτη τέτοιου μεγέθους. Δείχνοντας έτσι πως η δομή του γυροειδούς μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την κατασκευή στατικών αναμικτών.

7.2 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα & Προτάσεις για Αποδοτικότερο Αναμίκτη

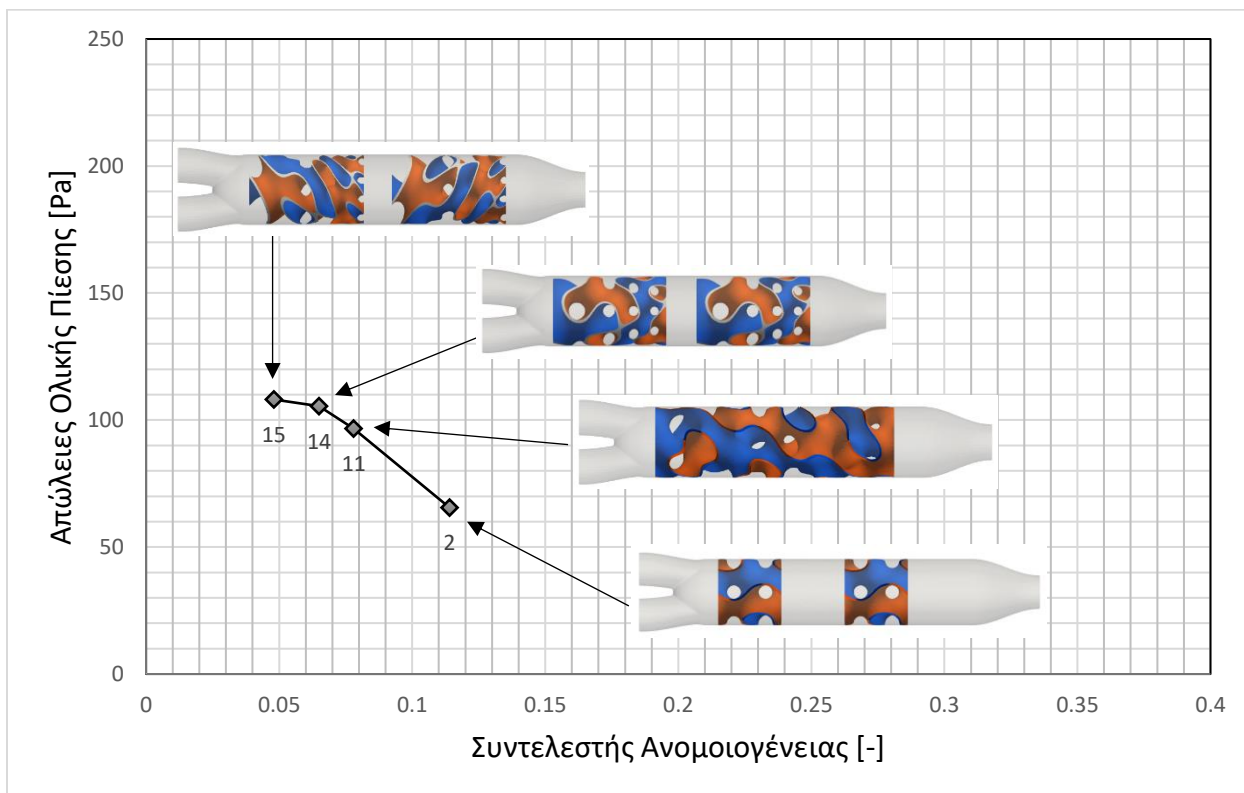
Από τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα, **Σχήμα 7.10** και **Πίνακας 7.4**, διαπιστώνεται ότι η επίτευξη ισορροπίας μεταξύ της ομοιογένειας του μίγματος στην έξοδο του αναμίκτη και της απαιτούμενης ενέργειας αποτελεί τον βασικό στόχο του σχεδιασμού. Η βελτίωση της ομοιογένειας είναι καθοριστικής σημασίας, αλλά πρέπει να συνδυάζεται με την ελαχιστοποίηση της πτώσης πίεσης και, κατ' επέκταση, του ενεργειακού κόστους απαραίτητο για την πραγματοποίηση της ροής.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα, προκύπτει ότι οι σημαντικότερες παράμετροι σχεδιασμού για τη βελτίωση της απόδοσης του αναμίκτη είναι η εισαγωγή πολλών εμποδίων και η μεταβλητότητα στο μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου του γυροειδούς. Ο συνδυασμός αυτών των δύο παραμέτρων οδήγησε σε σημαντική βελτίωση της ομοιογένειας χωρίς να προκαλέσει δραματική αύξηση της πτώσης πίεσης. Η εισαγωγή συστροφής στη γεωμετρία των εμποδίων ενίσχυσε περαιτέρω την απόδοση, συμβάλλοντας σε καλύτερη ανάμιξη χωρίς με την επιβάρυνση στην ενεργειακή απόδοση να είναι πολύ μικρή. Αντίθετα, η αύξηση του πάχους του γυροειδούς, ενώ βελτίωσε την ομοιογένεια του μίγματος, οδήγησε σε σημαντική αύξηση της πτώσης πίεσης, καθιστώντας αυτή την προσέγγιση λιγότερο αποδοτική για αυτό και απορρίφθηκε.











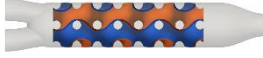




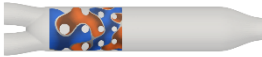


Συνεπώς, προτείνεται ως βέλτιστη σχεδιαστική προσέγγιση η χρήση πολλών εμποδίων με μεταβλητό μέγεθος και συστροφή της γεωμετρίας, καθώς αυτός ο συνδυασμός προσφέρει τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ ομοιογένειας και ενεργειακής αποδοτικότητας, διατηρώντας την πτώση ολικής πίεσης σε αποδεκτά επίπεδα.



Σχήμα 7.10: Παραμετρική βελτίωση στατικού αναμίκτη από γυροειδή – Απεικόνιση πιθανών λύσεων στο επίπεδο δύο στόχων.



Σχήμα 7.11: Μέτωπο Pareto Βέλτιστων Λύσεων.

Αναμίκτης χωρίς εμπόδια		Περίπτωση 1 ^η		Περίπτωση 2 ^η	
					
$P_{t,losses}$ [Pa]	40.71	$P_{t,losses}$ [Pa]	40.71	$P_{t,losses}$ [Pa]	65.55
CoV [-]	0.385	CoV [-]	0.385	CoV [-]	0.114
Περίπτωση 3 ^η		Περίπτωση 4 ^η		Περίπτωση 5 ^α	
					
$P_{t,losses}$ [Pa]	113.22	$P_{t,losses}$ [Pa]	212.28	$P_{t,losses}$ [Pa]	66.60
CoV [-]	0.213	CoV [-]	0.059	CoV [-]	0.259
Περίπτωση 5 ^β		Περίπτωση 5 ^γ		Περίπτωση 6 ^η	
					
$P_{t,losses}$ [Pa]	66.39	$P_{t,losses}$ [Pa]	65.63	$P_{t,losses}$ [Pa]	61.38
CoV [-]	0.154	CoV [-]	0.268	CoV [-]	0.278
Περίπτωση 7 ^η		Περίπτωση 8 ^η		Περίπτωση 9 ^η	
					
$P_{t,losses}$ [Pa]	81.7	$P_{t,losses}$ [Pa]	95.55	$P_{t,losses}$ [Pa]	149.79
CoV [-]	0.234	CoV [-]	0.272	CoV [-]	0.228
Περίπτωση 10 ^η		Περίπτωση 11 ^η		Περίπτωση 12 ^η	
					
$P_{t,losses}$ [Pa]	202.17	$P_{t,losses}$ [Pa]	96.69	$P_{t,losses}$ [Pa]	208.41
CoV [-]	0.123	CoV [-]	0.078	CoV [-]	0.091
Περίπτωση 13 ^η		Περίπτωση 14 ^η		Περίπτωση 15 ^η	
					
$P_{t,losses}$ [Pa]	60.68	$P_{t,losses}$ [Pa]	105.49	$P_{t,losses}$ [Pa]	108.09
CoV [-]	0.248	CoV [-]	0.065	CoV [-]	0.048

Πίνακας 7.4: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 8 - Ανακεφαλαίωση

Η διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη των τριπλά περιοδικών ελάχιστων επιφανειών (Triple Periodic Minimal Surfaces - TPMS), επικεντρώνοντας στη δομή του γυροειδούς ως πιθανή γεωμετρία για τη κατασκευή στατικού αναμίκτη δύο ρευστών.

Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από παραμετρικές μελέτες που εστίασαν στις διάφορες παραμέτρους σχεδιασμού της δομής του γυροειδούς και πως αυτές επηρεάζουν τη ροή στο εσωτερικό του αναμίκτη, και κατ' επέκταση, την απόδοση του αναμίκτη. Αυτή, ποσοτικοποιείται με δύο κριτήρια απόδοσης, αυτό της πτώσης ολικής πίεσης στη διαδρομή της ροής και του συντελεστή ανομοιογένειας στην έξοδο του αναμίκτη. Ο επιλύτης που χρησιμοποιήθηκε είναι ο `twoLiquidMixingFoam` του `OpenFOAM`.

Από τις παραπάνω παραμετρικές μελέτες, συγκεντρώθηκαν οι κρίσιμες παράμετροι σχεδιασμού που έχουν θετική επίδραση στην απόδοση του αναμίκτη, δηλαδή την ελαχιστοποίηση του συντελεστή ανομοιογένειας στην έξοδο του αναμίκτη με τη ταυτόχρονη διατήρηση της πτώσης ολικής πίεσης σε ικανοποιητικά επίπεδα. Αναλυτικότερα οι τελικές παράμετροι σχεδιασμού που επιλέχθηκαν, είναι η εισαγωγή δεύτερου εμποδίου, το μεταβλητό μέγεθος του βασικού δομικού στοιχείου της δομής του γυροειδούς κατά το μήκος του αναμίκτη, η συστροφή των εμποδίων και η σχετική τους θέση. Με αυτή τη διαμόρφωση επιτυγχάνεται η κατασκευή αναμίκτη εφάμιλλης απόδοσης με αναμίχτες που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιομηχανία, αντίστοιχου μεγέθους που λειτουργούν σε κοντινό αριθμό Reynolds.

Είναι σημαντικό να υπογραμμιστεί ότι αυτή η διπλωματική εργασία αποτελεί μια προκαταρκτική παραμετρική μελέτη, με στόχο να επιβεβαιώσει τη χρήση της δομής του γυροειδούς ως κατάλληλης γεωμετρίας για στατικούς αναμίχτες. Η χρήση του επιλύτη `twoLiquidMixingFoam` είναι υπολογιστικά ακριβή και χρονοβόρα, γεγονός που καθιστά αυτήν τη μελέτη σημαντική για τη μετέπειτα έρευνα. Βάσει αυτής της ανάλυσης, προτείνεται η εφαρμογή προηγμένων μεθόδων βελτιστοποίησης, όπως η βελτιστοποίηση μορφής (*shape optimization*), οι οποίες έχοντας αρχικές λύσεις κοντά σε κάποιο τοπικό ακρότατο, μπορούν γρήγορα να εντοπίσουν τη βέλτιστη.

Σε μελλοντικές μελέτες, προτείνεται να διερευνηθούν περαιτέρω παράμετροι, όπως το μήκος και η διάμετρος του αναμίκτη, καθώς και η γεωμετρία των εισόδων και εξόδων. Η ανάλυση αυτών των παραμέτρων μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη βέλτιστων γεωμετρικών διαμορφώσεων που θα μεγιστοποιούν την ανάμιξη και θα ελαχιστοποιούν την ενεργειακή κατανάλωση.

Τέλος, εκτός από η δομή του γυροειδούς, αξίζει να εξετασθούν και άλλες ελάχιστες επιφάνειες (λ.χ. Fischer Koch S), ενώ υπάρχει και η δυνατότητα δημιουργίας νέων τέτοιων επιφανειών ή συνδυασμός προ-υπαρχουσών. Αυτές οι επιφάνειες μπορεί να προσφέρουν διαφορετικά πλεονεκτήματα και να βελτιώσουν περαιτέρω την αποδοτικότητα των

στατικών αναμικτών. Ακόμη, παρόλο που η χρήση των TPMS σε προβλήματα μεταφορά θερμότητας δεν εξετάζεται στην εργασία, η εκτεταμένη χρήση τους σε εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας υποδεικνύει ότι θα μπορούσε να συνδυαστεί με τον στατικό αναμικτή. Η ενσωμάτωση της μεταφοράς θερμότητας μπορεί να οδηγήσει σε συστήματα με διπλή λειτουργία, προσφέροντας τόσο ανάμιξη όσο και αποτελεσματική διαχείριση της θερμότητας.

Βιβλιογραφία

- [1] W. Sutherland, "Improvement in apparatus for preparing gaseous fuel". UK 1784–1874.
- [2] T. Bor, "The static mixer as a chemical reactor," *Br Chem Eng*, 1971.
- [3] H. Grace, "Dispersion phenomena in high viscosity immiscible fluid systems," *Chem*, vol. 14, no. Eng Commun, p. 225–77, 1982.
- [4] E. Nauman, "Enhancement of heat transfer and thermal homogeneity with," *AIChE J*, vol. 25, p. 246–58, 1979.
- [5] R.K. Thakur, C.H. Vial, K.D.P. Nigam, E.B. Nauman, G. Djelveh, "Static mixers in the process industries: a review," *Chem Eng Res Des*, vol. 81, 787–826.
- [6] H. Meijer, M.K. Singh, P.D. Anderson, "On the the performance of static mixers: A quantitative comparison," *Progress in Polymer Science*, vol. 37, pp. 1333-1349, 2003.
- [7] H.A. Schwarz, "Gesammelte Mathematische Abhandlungen," *Springer*, 1933.
- [8] R.E. Neovius , "Bestimmung zweier spezieller periodischer Minimalflächen," *Akad. Abhandlungen*, 1883.
- [9] A.H. Schoen, "Infinite periodic minimal surfaces without self-intersections," *NASA Technical Note TN D-5541*, 1970.
- [10] F. Caiazzo, V. Alfieri, D. Gonzalo Guillen, A. Fabricatore, "Metal functionally graded gyroids: additive manufacturing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, no. 123, p. 2501–2518, 2022.
- [11] B. Hao, Z. Zhu, L. Zhang, "Network-based and sheet-based Gyroid lattice structures with different gradient directions: manufacture, mechanical response and energy absorption," *Meccanica*, 2024.
- [12] M. Pelanconi, Al. Ortona, "Nature-Inspired, Ultra-Lightweight Structures with Gyroid Cores Produced by Additive Manufacturing and Reinforced by Unidirectional Carbon Fiber Ribs," *Mechanical Engineering and Materials Technology Institute*, 2019.

- [13] U. Sajjad, T. Rehman, M. Ali, C. W. Park, "Manufacturing and potential applications of lattice structures in thermal systems: A comprehensive review of recent advances," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, no. 198, 2022.
- [14] M. González-Castaño, F. Baena-Moreno, J.C.N. de Miguel, K.U.M. Miah, F. Arroyo-Torralvo, R. Ossenbrink, J.A. Odriozola, W. Benzinger, A. Hensel, A. Wenka, H. Arellano-García, "3D-printed structured catalysts for CO₂ methanation reaction: Advancing of gyroid-based geometries," *Energy Conversion and Management*, vol. 258, 2022.
- [15] Ν. Γαλανός, «Ανάπτυξη-Προγραμματισμός της Συνεχούς Συζυγούς Μεθόδου για Διφασικές Ροές & Εφαρμογή στη Βελτιστοποίηση Στατικού Αναμίκτη Δύο Ρευστών,» *Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2020.*
- [16] Π. Αλεξιάς, «Συνεισφορά στη βελτιστοποίηση μορφής μέσω της συζυγούς μεθόδου, σε ροές ενός και περισσοτέρων ρευστών,» *Διδακτορική Διατριβή, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2022.*
- [17] O. Al-Ketan, D.W. Lee, R. Rowshan, R.K. Abu Al-Rub, "Functionally graded and multi-morphology sheet TPMS lattices: Design, manufacturing, and mechanical properties," *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, no. 102, 2020.
- [18] F. Liu, Z. Mao, P. Zhang, D.Z. Zhang, J. Jiang, Z. Ma, "Functionally graded porous scaffolds in multiple patterns: new design method, physical and mechanical properties," *Materials & Design*, vol. 156, pp. 108-121, Oct. 2018.
- [19] O. Al-Ketan, R.K. Abu Al-Rub, "MSLattice: A free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces," *Material Design & Processing Communications*, vol. 3, no. 6, 2021.
- [20] Blender Development Team, «Blender, Version 4.1,» Blender Foundation, 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.blender.org>.
- [21] M.M. Francois, S.J. Cummins, E.D. Dendy, D.B. Kothe, J.M. Sicilian, M.W. Williams, "A balanced-force algorithm for continuous and sharp interfacial surface tension models within a volume tracking framework," *Comput. Physics*, no. 213, pp. 141-173, 2006.
- [22] S. Popinet, "An accurate adaptive solver for surface-tension-driven interfacial flows," *Comput. Physics*, no. 228, pp. 5838-5866, 2009.
- [23] S.S. Deshpande, L. Anumolu, M.F. Trujillo, "Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam," *Computational Science & Discovery* 5, p. 36, 2012.

[24] E. Cussler, "Values of diffusion coefficients. Cambridge series in chemical engineering," *Cambridge University Press*, pp. 117-60, 2009.