



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

**Προσομοίωση των Μεταβατικών Αποκρίσεων Κατά τη
Σύμπλεξη και την Απεμπλοκή Συμπλέκτη Δίσκων Υγρής
Τριβής με Επιφανειακές Διαμορφώσεις**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΔΕΣΠΟΙΝΑΣ ΑΛΜΠΑΝΗ

Επιβλέπων : Βασίλειος Σπιτάς
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω ορισμένους ανθρώπους για την υποστήριξη και τη βοήθειά τους. Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω το *Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών* γενικότερα, και τον κύριο Β. Σπιτά ειδικότερα για την ανάθεση του θέματος και την υποστήριξη σε οποιοδήποτε ζήτημα προς επίλυση. Ακόμη, τον Ν. Ρόγκα που αυτή τη στιγμή βρίσκεται στο στάδιο εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής του με θέμα τον συμπλέκτη υγρής τριβής για τη συνεχή του διαθεσιμότητα και υποστήριξη καθώς και τη γεμάτη προθυμία μετάδοση των προσωπικών του εμπειριών και γνώσεων επί του θέματος. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ι. Τσαυλίδη, τεχνικό της *Simtec* με ειδικότητα στα CFD προβλήματα, για την επιμονή και την υπομονή του αλλά και για την ιδιαίτερα ευγενική συμπεριφορά του σχετικά με την επίλυση των δυσκολιών που αντιμετωπίστηκαν σε επίπεδο μοντελοποίησης στο ANSYS. Σημαντική ήταν και η συνεισφορά του κυρίου Α. Μαρκόπουλου για τη λήψη των μετρήσεων τραχύτητας στον δίσκο συμπλέκτη, κάτι για το οποίο τον ευχαριστώ πολύ. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μητέρα μου και όλους εκείνους τους φίλους που μπορεί να μην ήταν καθόλου σχετικοί με το αντικείμενο της μηχανολογίας, όμως στάθηκαν καθόλη τη διαδρομή αυτή των τελευταίων μηνών αλλά και των τελευταίων χρόνων στο πλάι μου δείχνοντας συνεχώς ενδιαφέρον για τις δυσκολίες αλλά και τις επιτυχίες μου.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται διερεύνηση της επίδρασης γεωμετρικών διαμορφώσεων δίσκων συμπλέκτη υγρής τριβής σε κρίσιμα μεγέθη ενδιαφέροντος κατά το μεταβατικό στάδιο της σύμπλεξης, καθώς και στην κατάσταση αποσύμπλεξης. Τα μεγέθη αυτά είναι συγκεκριμένα για τη σύμπλεξη η απαιτούμενη δύναμη (ή το αντίστοιχο έργο) επενέργειας και η προσδιδόμενη ροπή, ενώ για την κατάσταση αποσύμπλεξης η ροπή αντίστασης. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα ANSYS με χρήση της δυνατότητας FSI (Fluid Structure Interaction). Η αναφερόμενη διερεύνηση δεν αφορά μόνο τις εναλλακτικές διαμορφώσεις, αλλά και τον προσδιορισμό εκείνων των γεωμετρικών παραμέτρων που βελτιστοποιούν κάθε μία από αυτές. Για την πρόβλεψη των μεγεθών ενδιαφέροντος σε κάθε διαφορετική περίπτωση διαμορφώσεων γίνεται χρήση ΤΝΔ (Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων) με είσοδο τις ανεξάρτητες παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την εκάστοτε διαμόρφωση και έξοδο το μέγεθος ενδιαφέροντος ή κάποιο μέτρο αυτού. Η βελτιστοποίηση γίνεται αξιοποιώντας τα ΤΝΔ και κάνοντας χρήση γενετικών αλγορίθμων. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται τόσο μεταξύ των διαφορετικών παραμέτρων για κάθε διαμόρφωση, όσο και μεταξύ των βέλτιστων διαμορφώσεων με γνώμονα πάντα την περίπτωση των απλών επίπεδων δίσκων. Τέλος, γίνεται λόγος για την επίδραση της τραχύτητας σε διάκενα χαμηλότερα των 100 μm (μικτή λίπανση) εξάγοντας επιφάνειες τραχύτητας από πραγματικές μετρήσεις και έναν κώδικα – γεννήτρια τυχαίων επιφανειών, κάνοντας χρήση συντελεστών διόρθωσης ροής.

Λέξεις Κλειδιά: Συμπλέκτης υγρής τριβής, σύμπλεξη, κατάσταση αποσύμπλεξης, μοντελοποίηση, προσομοίωση, πεπερασμένα στοιχεία, γεωμετρικές διαμορφώσεις, δύναμη επενέργειας, αποδιδόμενη ροπή, ροπή αντίστασης, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, βελτιστοποίηση γεωμετρικών παραμέτρων, γενετικοί αλγόριθμοι, τραχύτητα, μικτή λίπανση, συντελεστές ροής

Abstract

In the present diploma thesis research is being conducted into what impact different geometrical features of discs in a wet clutch can have on critical magnitudes of interest both during the transitional stage of engagement and on the disengagement state. To be specific, in the case of engagement the magnitudes in question are the required force (or the equivalent work) that is exerted and the torque provided while for the disengagement state it is the drag torque. The results are obtained via FEA (Finite Element Analysis) and the appropriate modeling on the ANSYS software program by using the FSI (Fluid – Structure Interaction) components. The present research does not involve only the alternative features but also aims at defining which geometrical parameters optimize each of them. In order to anticipate the magnitudes of interest in each different case of features ANNs (Artificial Neural Networks) are used where the input is the independent parameters that characterize each feature while the output is the magnitude of interest or some measure referring to it. The optimization is conducted by exploiting the ANNs and making use of genetic algorithms. Comparison of the results is being made both among the different parameters for each configuration and among the optimum configurations always in accordance with the case of plain flat discs. Finally, the present study deals with the impact roughness can have for gaps shorter than 100 μm (mixed lubrication regime) by code-generating random rough surfaces following statistical characteristics of real measurements and in the end estimating and making use of flow correction factors.

Keywords: *Wet disc clutch, engagement, disengagement state, modeling, simulation, finite element analysis (FEA), grooves, reaction force, torque, drag torque, artificial neural networks (ANN), optimization of geometrical parameters, genetic algorithms (GA), roughness, mixed lubrication regime, flow factors*

Πίνακας Σχημάτων, Διαγραμμάτων, Πινάκων & Εικόνων

Σχήματα		
Σχήμα	Τίτλος	Σελ.
1.1.1	Κύρια μέρη πολύδισκου συμπλέκτη	15
2.1.1	Τα τρία καθεστώτα λίπανσης και η καμπύλη Stribeck	19
2.1.1.1	Ισορροπία δυνάμεων σε πεπερασμένο όγκο ρευστού - διεύθυνση x	20
2.1.1.2	Διατήρηση της συνέχειας σε πεπερασμένο όγκο στήλης ρευστού	22
2.1.2.1	Εκτίμηση φαινομένου συντελεστή τριβής με βάση τα ποσοστά συμμετοχής	32
2.1.2.2	Θεώρηση προβλήματος μικτής λίπανσης	33
2.1.2.3	Όγκος ελέγχου προβλήματος	34
2.1.2.4	Προσδιορισμός συντελεστή φx	35
2.1.2.5	Προσδιορισμός συντελεστή φxy	38
2.3.1	Σχηματική αναπαράσταση μοντέλων προσομοίωσης	42
2.3.2	Σύνδεση υποσυστημάτων – FSI Analysis	42
2.4.1	(α) Αρχικό απαραμόρφωτο πλέγμα (β), (γ), (δ) Πορεία παραμόρφωσης	44
2.4.2	Overset Meshing Methodology	45
2.5.1	Τελική μοντελοποίηση ρευστού/στερεού	47
2.5.2	Περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς	48
4.2.1	Παραγωγή τυχαίας επιφάνειας εισάγοντας μόνο τυχαίες τιμές	69
4.2.2	Παραγωγή τυχαίας επιφάνειας με υψηλή αυτοσυσχέτιση	70
4.2.3	Εμπλουτισμός αρχικού μητρώου υψών τραχύτητας	71
4.2.4	Πρώτο σενάριο διάταξης σημείων στην περίπτωση $h > h_{nom}$	72
4.2.5	Δεύτερο σενάριο διάταξης σημείων στην περίπτωση $h > h_{nom}$	73
4.2.6	Τελικό χωρίο υπολογισμού ίδιας επιφάνειας τραχύτητας (α) $h_{nom} > 3\sigma$, (β) $h_{nom} < \sigma$	74
4.3.1	Αρχικά ύψη επιφανειών τραχύτητας (α) αρνητική τραχύτητα, (β) θετική τραχύτητα	75
5.1.1	Τυπικό διάγραμμα νευρωνικού δικτύου	80
5.1.2	Αρχιτεκτονική ΤΝΔ – Ακτινικές Διαμορφώσεις (α) πρόβλεψης ροπής, (β) πρόβλεψης δύναμης, (γ) πρόβλεψης ροπής αντίστασης	81
5.1.3	Αρχιτεκτονική ΤΝΔ – Τοξοειδείς Διαμορφώσεις (α) πρόβλεψης ροπής, (β) πρόβλεψης δύναμης, (γ) πρόβλεψης ροπής αντίστασης	82
5.1.4	Αρχιτεκτονική ΤΝΔ – Διαμορφώσεις Μέσης Εκτόνωσης (α) πρόβλεψης ροπής, (β) πρόβλεψης δύναμης, (γ) πρόβλεψης ροπής αντίστασης	82
5.2.1	Πορεία εξέλιξης λύσεων – Τοξοειδείς Διαμορφώσεις	84
6.1.1	Επίπεδοι δίσκοι: Ισοϋψείς πίεσης	88
6.1.2	Επίπεδοι δίσκοι: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων (εσωτερικό χωρίο)	88
6.1.3	Επίπεδοι δίσκοι: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων άνω δίσκου	89
6.1.4	Υπολογιστικά υπόλοιπα περίπτωσης «κατάσταση αποσύμπλεξης»	90
6.1.5	Εξέλιξη μέσης πίεσης συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης περίπτωσης «κατάσταση αποσύμπλεξης»	90
6.2.1	Ακτινικές διαμορφώσεις: Ισοϋψείς πίεσης	97
6.2.2	Ακτινικές διαμορφώσεις: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων (εσωτερικό χωρίο)	97
6.2.3	Ακτινικές διαμορφώσεις: Λεπτομέρεια διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων στη διαμόρφωση (εσωτερικό χωρίο)	98
6.3.1	Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Ισοϋψείς πίεσης	105
6.3.2	Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων (εσωτερικό χωρίο)	105
6.3.3	Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Λεπτομέρεια διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων	106

6.4.1	στη διαμόρφωση (εσωτερικό χωρίο)	113
6.4.2	Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Ισοϋψείς πίεσης	113
6.4.3	Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων (εσωτερικό χωρίο) Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Λεπτομέρεια διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων στη διαμόρφωση (εσωτερικό χωρίο)	114
Διαγράμματα		
Διάγραμμα	Τίτλος	Σελ.
2.1.1.1	Σύγκριση εξίσωσης Reynolds με εξισώσεις Navier – Stokes	25
2.1.1.2	Μέση πίεση λαδιού συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής $\Delta\omega$ (Ταχ. Συμπίεσης 100mm/s)	27
2.1.1.3	Μέση πίεση λαδιού συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής $\Delta\omega$ (Ταχ. Συμπίεσης 50mm/s)	28
2.1.1.4	Μέση πίεση λαδιού συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής $\Delta\omega$ (Ταχ. Συμπίεσης 10mm/s)	30
2.1.1.5	Δείκτης έντασης τύρβης συναρτήσει των ταχυτήτων περιστροφής και συμπίεσης	31
2.1.2.1	Συντελεστής ροής ισότροπης επιφάνειας συναρτήσει του ονομαστικού διακένου και της τυπικής απόκλισης της τραχύτητας	37
2.1.2.2	Σύγκριση συντελεστών ϕ_x , ϕ_y , ϕ_{xy}	38
2.1.2.3	Σύγκριση πειραματικής, θεωρητικής και διορθωμένης παροχής (α) διεύθυνση x, (β) διεύθυνση y, (γ) διεύθυνση xy	40
2.3.1	Αλγόριθμος επίλυσης 2-Way FSI Analysis	43
3.1.1	Εξάρτηση πλήθους στοιχείων από τη διάμετρο των δίσκων	51
3.3.2.1	Σύγκριση προσομοιώσεων ομοιότητας – Μέση πίεση	57
3.3.2.2	Σύγκριση προσομοιώσεων ομοιότητας – Μέγιστη πίεση	58
3.3.2.3	Σύγκριση προσομοιώσεων ομοιότητας – Μέτρο ταχύτητας	58
3.3.2.4	Σύγκριση προσομοιώσεων ομοιότητας – Συνιστώσες ταχύτητας	59
3.4.1	Πείραμα περιστροφικής αδράνειας – Ροπή εισόδου και επιθυμητή ταχύτητα εξόδου	62
3.4.2	Ομοιότητα στερεών – Σύγκριση τελικής γωνιακής ταχύτητας	62
3.4.3	Ομοιότητα στερεών – Σύγκριση βέλους κάμψης δίσκων	63
4.2.1	Εξάρτηση της Ra από τις παραμέτρους k, λ	68
4.2.2	Εξάρτηση της Rs από τις παραμέτρους k, λ	69
4.3.1	Συντελεστές ροής για τις περιπτώσεις αρνητικής και θετικής τραχύτητας	77
6.1.1	Επίπεδοι δίσκοι: \square έση πίεση και δύναμη επενέργειας συναρτήσει του διακένου	87
6.1.2	Επίπεδοι δίσκοι: Αναπτυσσόμενη (ωφέλιμη) ροπή συναρτήσει του διακένου	87
6.2.1	Ακτινικές διαμορφώσεις: Μέση πίεση στη μεταβατική κατάσταση σύμπλεξης	93
6.2.2	Ακτινικές διαμορφώσεις: Δύναμη αντίδρασης στη μεταβατική κατάσταση σύμπλεξης	94
6.2.3	Ακτινικές διαμορφώσεις: Ωφέλιμη ροπή στη μεταβατική κατάσταση σύμπλεξης	94
6.2.4	Ακτινικές διαμορφώσεις: Μέση πίεση στην κατάσταση αποσύμπλεξης	95
6.2.5	Ακτινικές διαμορφώσεις: Ροπή αντίστασης στην κατάσταση αποσύμπλεξης	95
6.3.1	Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Μέση πίεση $\sigma \square$ η μεταβατική κατάσταση σύμπλεξης	101
6.3.2	Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Δύναμη αντίδρασης στη μεταβατική κατάσταση σύμπλεξης	101
6.3.3	Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Ωφέλιμη ροπή στη μεταβατική κατάσταση σύμπλεξης	102
6.3.4	Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Μέση πίεση στην κατάσταση αποσύμπλεξης	103
6.3.5	Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Ροπή αντίστασης στην κατάσταση αποσύμπλεξης	104
6.4.1	Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Μέση πίεση στη μεταβατική κατάσταση σύμπλεξης	109
6.4.2	Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Δύναμη αντίδρασης στη μεταβατική κατάσταση σύμπλεξης	109

6.4.3	Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Ωφέλιμη ροπή στη μεταβατική κατάσταση σύμπλεξης	110
6.4.4	Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Μέση πίεση στην κατάσταση αποσύμπλεξης	111
6.4.5	Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Ροπή αντίστασης στην κατάσταση αποσύμπλεξης	112
6.5.1	Συνδυασμένα βάρη – Σύγκριση δύναμης επενέργειας	114
6.5.2	Συνδυασμένα βάρη – Σύγκριση αναπτυσσόμενης ροπής	115
6.5.3	Ελάχιστη δύναμη – Σύγκριση δύναμης επενέργειας	115
6.5.4	Ελάχιστη δύναμη – Σύγκριση αναπτυσσόμενης ροπής	116
6.5.5	Μέγιστη ροπή – Σύγκριση δύναμης επενέργειας	116
6.5.6	Μέγιστη ροπή – Σύγκριση αναπτυσσόμενης ροπής	117
6.6.1	Επίδραση τραχύτητας στην πίεση	118
6.6.2	Επίδραση τραχύτητας στη δύναμη επενέργειας	118
6.6.3	Επίδραση τραχύτητας στην παροχή	119

Πίνακες

Πίνακας	Τίτλος	Σελ.
2.1.1.1	Παραδοχές εξίσωσης Reynolds	20
2.5.1	Οριακές συνθήκες επιφανειών Fluent/Structural	47
3.3.1.1	Πίνακας διαστάσεων των παραμέτρων	53
3.3.1.2	Εκλογή αδιάστατων παραμέτρων	54
3.3.2.1	Παράμετροι προσομοιώσεων επαλήθευσης ομοιότητας	57
3.3.2.2	Λόγοι ομοιότητας προσομοιώσεων επαλήθευσης	57
3.3.2.3	Μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα κρίσιμων μεγεθών	59
3.4.1	Παράμετροι ομοιότητας στερεών δίσκων	61
4.1.1	Αποτελέσματα μετρήσεων τραχύτητας	66
4.3.1	Μέση πίεση συναρτήσει των ονομαστικών διακένων	76
4.3.2	Εξαγωγή συντελεστών ροής κατά Patir & Cheng	77
5.1.1	Αποτελέσματα εκπαίδευσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων – Ακτινικές Διαμορφώσεις	81
5.1.2	Αποτελέσματα εκπαίδευσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων – Τοξοειδείς Διαμορφώσεις	81
5.1.3	Αποτελέσματα εκπαίδευσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων – Διαμορφώσεις Μέσης Εκτόνωσης	82
6.1.1	Τελικές τιμές μεγεθών περίπτωσης «κατάσταση αποσύμπλεξης»	90
6.2.1	Συνδυασμοί ανεξάρτητων παραμέτρων προσδιορισμού γεωμετρίας ακτινικών διαμορφώσεων – Ελάχιστα/Μέγιστα όρια	93
6.2.2	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης ακτινικών διαμορφώσεων	96
6.3.1	Συνδυασμοί ανεξάρτητων παραμέτρων προσδιορισμού γεωμετρίας τοξοειδών διαμορφώσεων – Ελάχιστα/Μέγιστα όρια	100
6.3.2	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης τοξοειδών διαμορφώσεων	104
6.4.1	Συνδυασμοί ανεξάρτητων παραμέτρων προσδιορισμού γεωμετρίας διαμορφώσεων μέσης εκτόνωσης – Ελάχιστα/Μέγιστα όρια	108
6.4.2	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης διαμορφώσεων μέσης εκτόνωσης	108

Εικόνες

Εικόνα	Τίτλος	Σελ.
4.1.1	Προφίλομετρο	65
4.1.2	Μετρούμενος δίσκος τριβής	66
4.1.3	Λεπτομέρεια δίσκου τριβής	66
4.1.4	Στιγμιότυπο μέτρησης τραχύτητας	67
6.1.1	Γεωμετρία ρευστού επίπεδων δίσκων	85

6.1.2	Λεπτομέρειες πλεγματοποίησης χωρίου ρευστού	86
6.2.1	Δίσκος ακτινικών διαμορφώσεων	91
6.2.2	Λεπτομέρεια πλέγματος υπολογισμού στερεού δίσκου	92
6.2.3	Λεπτομέρεια πλέγματος υπολογισμού χωρίου ρευστού	92
6.3.1	Παράδειγμα δίσκου τοξοειδών διαμορφώσεων	99
6.3.2	Ορισμός παραμέτρων πλάτους και ακτίνας τοξοειδών διαμορφώσεων	99
6.3.3	Μεταβολή τοξοειδούς διαμόρφωσης για τις οριακές τιμές ακτίνας	99
6.3.4	Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Λεπτομέρεια πλέγματος στερεού δίσκου	100
6.3.5	Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Λεπτομέρεια πλέγματος ρευστού χωρίου	100
6.4.1	Παράδειγμα δίσκου διαμορφώσεων μέσης εκτόνωσης	106
6.4.2	Ορισμός παραμέτρων διαμορφώσεων μέσης εκτόνωσης	107
6.4.3	Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Λεπτομέρεια πλέγματος στερεού δίσκου	107
6.4.4	Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Λεπτομέρεια πλέγματος ρευστού χωρίου	107
7.1	Πρόταση γεωμετρίας σπειροειδών διαμορφώσεων (α) $k=0.3$, (β) $k=0.4$, (γ) $k=0.9$	123

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες	3
Περίληψη.....	5
Abstract	7
Πίνακας Σχημάτων, Διαγραμμάτων, Πινάκων & Εικόνων	9
1.Εισαγωγή.....	15
1.1 Ο υγρός συμπλέκτης στη βιομηχανία του σήμερα	15
1.2 Περιγραφή προβλήματος – Αντικείμενο διπλωματικής	16
1.3 Σκιαγράφηση κεφαλαίων	17
2. Μοντελοποίηση.....	19
2.1 Μοντελοποίηση υδροδυναμικού φαινομένου.....	19
2.1.1 Υδροδυναμική λίπανση – Η εξίσωση Reynolds.....	22
2.1.2 Μικτή λίπανση – Εισαγωγή συντελεστών Patir & Cheng.....	32
2.2 Μοντελοποίηση στερεών σωμάτων.....	39
2.3 Σύζευξη επιλυτών – FSI	42
2.4 Ειδικά θέματα: Διαχείριση πλέγματος.....	43
2.5 Τελική μοντελοποίηση	46
3. Ομοιότητα	51
3.1 Ανάγκη χρήσης.....	51
3.2 Εισαγωγικές έννοιες	52
3.3 Ομοιότητα στα ρευστά	52
3.3.1 Μέθοδος π του Buckingham	52
3.3.2 Αδιαστατοποίηση διαφορικών εξισώσεων.....	54
3.4 Ομοιότητα στα στερεά.....	59
4. Τραχύτητα	65
4.1 Τραχυμέτρηση υλικού φθοράς	65
4.2 Ανάπτυξη κώδικα – γεννήτρια επιφανειών	68
4.3 Εξαγωγή συντελεστών Patir & Cheng.....	74
5. Βελτιστοποίηση.....	79
5.1 Προσέγγιση αποτελεσμάτων μέσω νευρωνικών δικτύων	79
5.2 Βελτιστοποίηση γεωμετρικών παραμέτρων μέσω γενετικών αλγορίθμων	82
6. Αποτελέσματα	85
6.1 Περίπτωση επίπεδων δίσκων.....	85
6.2 Περίπτωση ακτινικών διαμορφώσεων.....	90
6.3 Περίπτωση τοξοειδών διαμορφώσεων	97
6.4 Περίπτωση διαμορφώσεων μέσης εκτόνωσης.....	104

6.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων	112
6.6 Επίδραση τραχύτητας	115
7. Συμπεράσματα – Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	119
Παράρτημα.....	123
<i>Συνάρτηση παραμόρφωσης πλέγματος UDF</i>	<i>123</i>
<i>Συνάρτηση κίνησης τοιχωμάτων UDF</i>	<i>123</i>
<i>Συνάρτηση μεταβολής ιζώδους UDF</i>	<i>123</i>
<i>Κώδικας εξαγωγής εντολών APDL – Κινηματικά μεγέθη στερεών</i>	<i>125</i>
<i>Επεξεργασία αποτελεσμάτων – Εκπαίδευση TNA – Βελτιστοποίηση</i>	<i>125</i>
<i>Συνάρτηση Βελτιστοποίησης (Αντικειμενική Συνάρτηση)</i>	<i>140</i>
<i>Κώδικας – γεννήτρια τυχαίων επιφανειών</i>	<i>140</i>
<i>Συναρτήσεις διαθέσιμες στην κοινότητα Mathworks/MatLab</i>	<i>145</i>
Βιβλιογραφία.....	146

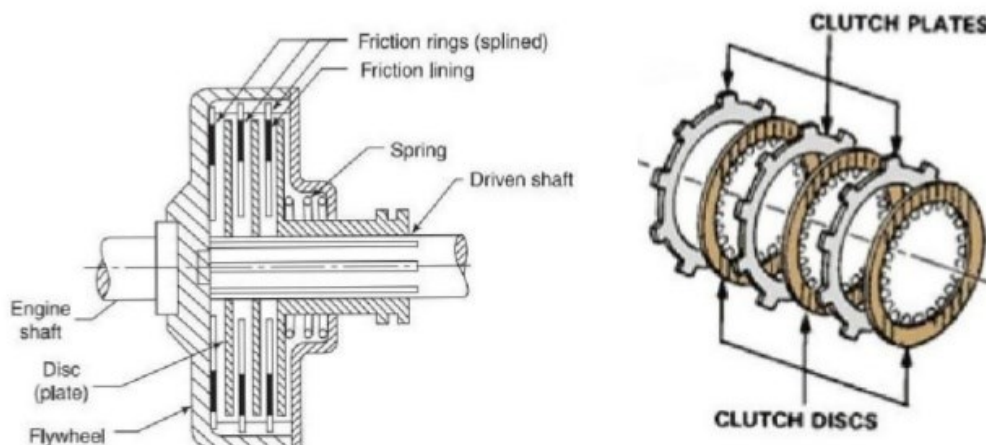
1

Εισαγωγή

1.1 Ο υγρός συμπλέκτης στη βιομηχανία του σήμερα

Σε κάθε σύστημα μετάδοσης κίνησης όπου υπάρχει κάποιου είδους μειωτήρας στροφών μεταξύ του κινητήρα και του μειωτήρα παρεμβάλλεται στοιχείο μετάδοσης της ισχύος ικανό να συμπλέκει και να αποσυμπλέκει τα δύο συστήματα μεταξύ τους. Κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο για λόγους ομαλής μετάδοσης της ισχύος και κατά συνέπεια προστασίας του κινητήριου συστήματος από κραδασμούς και απότομες αλλαγές φορτίου. Το πιο συνηθισμένο στοιχείο σύμπλεξης στη βιομηχανία οχημάτων αλλά και όχι μόνο είναι ο *συμπλέκτης* και μάλιστα ο συμπλέκτης ξηρής τριβής.

Πολύδισκος ή όχι τα κύρια μέρη του συμπλέκτη είναι οι δίσκοι τριβής (friction discs/rings), οι δίσκοι πίεσης (separation discs/plates), το κέλυφος (housing) και το σύστημα συμπίεσης των δίσκων. Το τελευταίο συνήθως υλοποιείται με κάποιας μορφής ελατήριο (διαφραγματικό ή ελικοειδές), καθώς και με κάποιο εξωτερικό σύστημα επενέργειας πλήρως μηχανικό ή ημιαυτόματο. Οι δίσκοι τριβής επικαλύπτονται με κάποιο υλικό φθοράς και συνδέονται με την κινούμενη άτρακτο (driven shaft), ενώ το κέλυφος και οι υπόλοιποι μεταλλικοί δίσκοι συνδέονται με την κινητήρια άτρακτο (engine shaft) μέσω του βολάν (flywheel) ή με άλλο τρόπο. Έτσι, όταν οι δίσκοι βρίσκονται σε σύμπλεξη, δηλαδή σε ισχυρή επαφή μεταξύ τους με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη κίνησή τους λόγω ανάπτυξης δυνάμεων τριβής, επιτυγχάνεται η μεταφορά της ισχύος από το κινητήριο σύστημα στο κινούμενο. Όταν η εξωτερική επενέργεια παύει να ασκεί φορτίο, τότε οι δίσκοι αποσυμπλέκονται και κατά συνέπεια τα δύο συστήματα κινούνται ανεξάρτητα. Στο Σχήμα 1.1.1 παρουσιάζονται απλουστευμένα τα παραπάνω στοιχεία και η διάταξή τους καθώς και το σύνηθες σχήμα των δίσκων.



Σχήμα 1.1.1: Κύρια μέρη πολύδισκου συμπλέκτη¹

Στην περίπτωση του υγρού συμπλέκτη οι βασικές αρχές και τα εξαρτήματα παραμένουν τα ίδια. Η κύρια διαφοροποίηση έγκειται στη βύθιση των δίσκων εντός λιπαντικού υγρού. Η εισαγωγή του λιπαντικού βελτιώνει τον συμπλέκτη με δύο κύριους τρόπους: Πρώτον επιτυγχάνει την ομαλότερη μετάδοση της κίνησης, αφού ποσοστό της ωφέλιμης ροπής μεταδίδεται ήδη από το μεταβατικό στάδιο της σύμπλεξης μέσω της

¹ mechanicalbooster.com

κίνησης του ρευστού, και δεύτερον εξασφαλίζει τη μακροβιότητα των δίσκων. Το τελευταίο αποτελεί μάλλον και το σημαντικότερο πλεονέκτημα του υγρού συμπλέκτη, καθώς πλέον δεν απαιτείται η συχνή αλλαγή των δίσκων και των μηχανικών μερών. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς λόγω της παρουσίας του λιπαντικού αφενός τα επίπεδα φθοράς μειώνονται στο ελάχιστο και αφαιτέρου είναι δυνατή η αποδοτικότερη ψύξη του συστήματος.

Ο υγρός συμπλέκτης σήμερα βρίσκεται ακόμα σε επίπεδο ανάπτυξης και έρευνας, γεγονός που αποτελεί και την αφορμή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ωστόσο, βρίσκει ήδη εφαρμογή στον χώρο της βιομηχανίας οχημάτων με τη γενικότερη έννοια και ειδικότερα σε μοτοσυκλέτες. Λόγω του τρόπου λειτουργίας του μπορεί να υποκαταστήσει κάθε περίπτωση εφαρμογής ξηρού συμπλέκτη. Παρόλα αυτά κάτι τέτοιο δεν έχει συμβεί ακόμα, καθώς κάθε νέο πλεονέκτημα εισάγει και κάποιο καινούργιο μειονέκτημα.

1.2 Περιγραφή προβλήματος – Αντικείμενο διπλωματικής

Κάποια από τα βασικά προβλήματα που εισάγει η παρουσία του λιπαντικού στον συμπλέκτη είναι η εμφάνιση ροπής αντίστασης (drag torque) όσο οι δίσκοι δεν είναι σε επαφή, η ανάγκη χρήσης ισχυρότερων επενεργητών για τη γρήγορη σύμπλεξη λόγω της ανάπτυξης πίεσης του ρευστού και η μείωση του φαινομένου συντελεστή τριβής των επιφανειών κατά τη σύμπλεξη. Επιπλέον, φαινόμενα αναρρόφησης του ρευστού σε μεγάλα διάκενα μεταξύ των δίσκων και σε ορισμένες ταχύτητες περιστροφής μπορούν να οδηγήσουν σε ταλαντωτική συμπεριφορά των δίσκων καθώς και σε επιπλέον αντίσταση. Κατά συνέπεια η μελέτη της συμπεριφοράς του υγρού συμπλέκτη είναι ιδιαίτερα σημαντική και κρίσιμη για την περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωσή του έτσι ώστε τα ωφέλη που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα να μην επισκιάζονται από δυσλειτουργικά φαινόμενα όπως τα παραπάνω.

Το αναπτυσσόμενο πεδίο πίεσης και ταχυτήτων του ρευστού που τελικά διαμορφώνει τη συμπεριφορά του συμπλέκτη επηρεάζεται από πλήθος παραμέτρων όπως οι ιδιότητες του ρευστού, η γεωμετρία του προβλήματος και οι εξωτερικά επιβαλλόμενες συνθήκες. Τα παραπάνω διαμορφώνουν τελικά ένα φαινόμενο που άπτεται σε μία ευρεία γκάμα προβλημάτων φυσικής και μηχανικής (multiphysics problem) και η πλήρης περιγραφή του είναι αδύνατη σε αναλυτικό επίπεδο. Για το λόγο αυτό έχουν γίνει διάφορες απόπειρες μελέτης [1],[2],[3],[4],[5],[6],[7] σε αναλυτικό, αριθμητικό και πειραματικό επίπεδο ενός ή συνδιασμού μερικών από τα επιμέρους φαινόμενα που λαμβάνουν μέρος. Σε κάθε περίπτωση, όμως, γίνεται πλήθος παραδοχών και απλουστεύσεων και η εκάστοτε μελέτη έχει σαφή και εξειδικευμένο στόχο.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση της επίδρασης μορφολογικών χαρακτηριστικών επί των δίσκων σε βασικά μεγέθη του προβλήματος όπως η μέση πίεση και κατά συνέπεια η απαιτούμενη δύναμη επενέργειας, η ροπή αντίστασης και η ροπή λόγω ιξώδους (ωφέλιμη ροπή) υπό τις κατά το δυνατό ρεαλιστικότερες συνθήκες λειτουργίας. Η μοντελοποίηση γίνεται σε επίπεδο πεπερασμένων στοιχείων και μόνο για τους δίσκους και το ρευστό ανάμεσά τους. Γίνεται χρήση του προγράμματος ANSYS και πιο συγκεκριμένα των επιλυτών *Transient Structural* και *Fluent* του *Workbench*. Οι δύο επιλύτες βρίσκονται σε σύζευξη μεταξύ τους (*Fluid – Structure Interaction*).

Ο χαρακτηρισμός «ρεαλιστικές συνθήκες» αφορά γεωμετρίες, ιδιότητες υλικών και κινηματικά μεγέθη που πράγματι μπορούν να περιγράψουν έναν κοινό συμπλέκτη μικρού μεγέθους. Επιπλέον, γίνεται προσπάθεια εισαγωγής της επίδρασης της τραχύτητας κατά το μεταβατικό στάδιο της σύμπλεξης. Σημαντικότερη έλλειψη από την μοντελοποίηση που ακολουθεί αποτελεί η απώλεια των θερμικών φαινομένων.

1.3 Σκιαγράφηση κεφαλαίων

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι βασικές αρχές στις οποίες στηρίχθηκε η μοντελοποίηση του γενικότερου προβλήματος. Αρχικά γίνεται αναφορά στην εξίσωση *Reynolds* η οποία αποτελεί τη πλέον καλύπτερη προσέγγιση της συμπεριφοράς λεπτόπαχων φιλμ λιπαντικού. Στην ίδια ενότητα παρουσιάζονται τα τρία καθεστώτα λίπανσης (υδροδυναμική – μικτή – οριακή λίπανση) που εμφανίζονται στην πορεία σύμπλεξης και αναφέρεται με ποιον τρόπο μοντελοποιείται το καθένα στην παρούσα μελέτη. Επίσης, γίνεται αναφορά στην ταύτιση των αποτελεσμάτων της εξίσωσης *Reynolds* με τις *Navier – Stokes*, καθώς επίσης και αναφορά σε θέματα στροβιλότητας του ρευστού. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο ρόλος των στερεών δίσκων στο πρόβλημα και ο τρόπος με τον οποίο αυτοί αντιμετωπίζονται και μοντελοποιούνται, καθώς και ο τρόπος ζεύξης μεταξύ του υδροδυναμικού και του καθαρά μηχανικού (στερεοί δίσκοι) φαινομένου. Στο ίδιο κεφάλαιο αναλύεται σε ξεχωριστή ενότητα το πρόβλημα διαχείρισης της παραμόρφωσης του πλέγματος υπολογισμού του ρευστού και η τελική αντιμετώπισή του.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται ο τρόπος αλλαγής των διαστάσεων του προβλήματος προκειμένου να γίνει εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων μέσω της ομοιότητας. Η ομοιότητα εφαρμόζεται με δύο τρόπους για την περίπτωση του ρευστού, μέσω της μεθόδου *Buckingham π* και μέσω της αδιαστατοποίησης των εξισώσεων *Navier – Stokes*. Όσον αφορά το στερεό η ομοιότητα δεν αποτελεί τίποτα περισσότερο παρά τη διατήρηση της αδράνειας και της στιβαρότητας των δίσκων. Συγκρίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων για γεωμετρικά όμοια μοντέλα παρουσιάζονται για όλες τις περιπτώσεις.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται παρουσίαση του τρόπου δημιουργίας τυχαίων επιφανειών δεδομένης τραχύτητας. Οι παράμετροι που αφορούν τα στατιστικά μεγέθη των επιφανειών λαμβάνονται από μετρήσεις σε υλικό φθοράς και στη συνέχεια παράγονται αντίστοιχες επιφάνειες μέσω κώδικα *MatLab* με λιγότερο ή περισσότερο έντονη τραχύτητα. Έπειτα, εξάγονται οι συντελεστές f_x , f_y κατά *Patir & Cheng*, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή της τραχύτητας στα μοντέλα προσομοίωσης. Στην ίδια ενότητα γίνεται σύγκριση των συντελεστών αυτών καθαυτών και της ισχύος τους.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται αναφορά στη χρήση νευρωνικών δικτύων για την πρόβλεψη των βασικών μεγεθών ροπή αντίστασης, έργο επενέργειας και ωφέλιμο έργο ροπής συναρτήσει των ελεύθερων γεωμετρικών παραμέτρων των διαφόρων διαμορφώσεων. Επίσης, γίνεται αναφορά στη χρήση γενετικών αλγορίθμων για την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας ως προς τα επιθυμητά κριτήρια βελτιστοποίησης.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα τελικά μοντέλα προσομοίωσης και τα σχετικά αποτελέσματά τους καθώς και η σύγκρισή τους. Οι γεωμετρίες αφορούν επίπεδους δίσκους, δίσκους με ακτινικές και τοξοειδείς διαμορφώσεις καθώς και δίσκους μέσης εκτόνωσης με μεταβλητό βάθος. Παρουσιάζεται η επίδραση της τραχύτητας και των μορφολογικών χαρακτηριστικών των δίσκων σε μεγέθη όπως η ροπή αντίστασης στη μόνιμη ανοιχτή θέση των δίσκων, η απαιτούμενη δύναμη επενέργειας για το κλείσιμο αυτών και η αναπτυσσόμενη (ωφέλιμη) ροπή.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 διατυπώνονται ορισμένα συμπεράσματα για τα μορφολογικά χαρακτηριστικά και την επίδοση του συμπλέκτη αλλά και για τον τρόπο μοντελοποίησης του προβλήματος αυτού καθαυτού. Γίνονται προτάσεις για περαιτέρω βελτίωση καθώς και σχολιασμός των σημείων έλλειψης της εργασίας.

2

Μοντελοποίηση

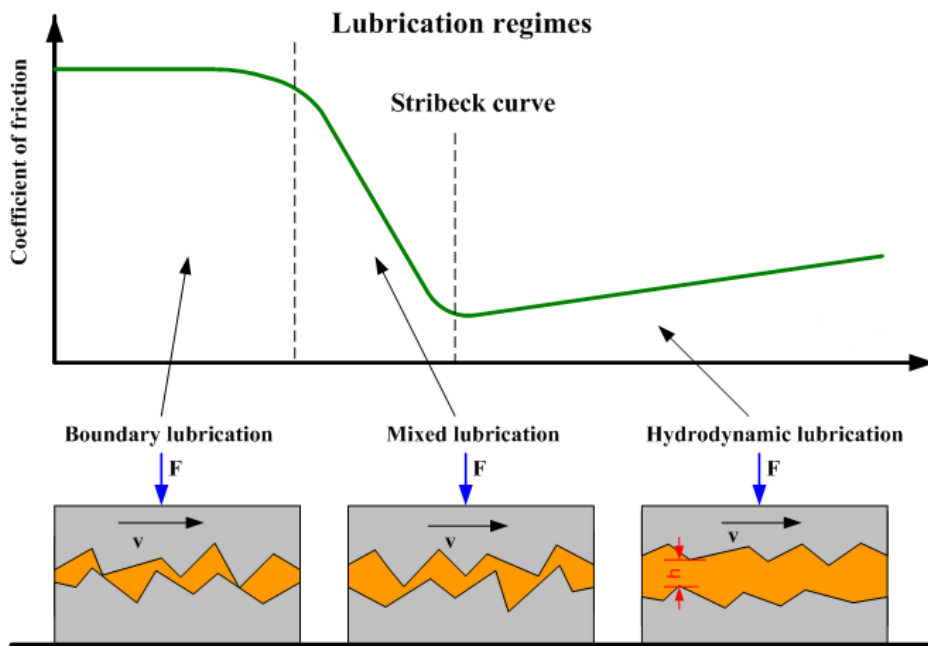
2.1 Μοντελοποίηση υδροδυναμικού φαινομένου

Κατά τη μεταβατική περίοδο της σύμπλεξης το υδροδυναμικό φαινόμενο περιγράφεται διαδοχικά από τα εξής τρία καθεστάτα: την υδροδυναμική, την μικτή και την οριακή λίπανση. Στην υδροδυναμική λίπανση το ρευστό αναπτύσσει πλήρη και συνεχή ροή η οποία προκύπτει από το διαμορφούμενο πεδίο πίεσης. Ειδικά για περιπτώσεις όπου το πάχος του ρευστού είναι πολύ μικρό σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις του προβλήματος, το πρόβλημα προσεγγίζεται επαρκώς από τη λεγόμενη εξίσωση *Reynolds*. Η εξίσωση αυτή δεν είναι τίποτα άλλο παρά η απλοποίηση των εξισώσεων *Navier – Stokes* εισάγοντας κάποιες παραδοχές που προκύπτουν από το μικρό πάχος του φιλμ λιπαντικού.

Στη συνέχεια, όταν το διάκενο μεταξύ των δίσκων γίνεται τέτοιο ώστε οι κατά τόπους προεξοχές των υλικών των δίσκων να έρχονται σε επαφή το καθεστώς λίπανσης ονομάζεται *μικτό*. Η ροή πλέον επηρεάζεται σημαντικά από την τραχύτητα των επιφανειών και εμποδίζεται. Το πεδίο πίεσης και ταχύτητων τοπικά παύει να είναι ομαλό και συνεχές, ενώ μακροσκοπικά παρουσιάζεται μείωση της παροχής. Στην πραγματικότητα η μικτή λίπανση δεν εμφανίζεται μόνο κατά την τοπική επαφή των επιφανειών, αλλά σε απόσταση αρκετών τυπικών αποκλίσεων της τραχύτητας. Το τελευταίο είναι συνέπεια της επίδρασης που παρουσιάζουν οι τοπικές διαμορφώσεις των επιφανειών στο οριακό στρώμα της ροής του ρευστού.

Στο τελευταίο καθεστώς της οριακής λίπανσης οι δύο επιφάνειες βρισκονται πρακτικά σε πλήρη επαφή μεταξύ τους. Όμως, ακριβώς λόγω των τοπικών διακυμάνσεών τους αλυσίδες μορίων ρευστού εγκλωβίζονται ανάμεσα σε αυτές. Πλέον ρόλο παίζουν οι διαμοριακές δυνάμεις μεταξύ των μορίων του ρευστού και των μορίων των στερεών επιφανειών. Έτσι, επηρεάζεται ο φαινόμενος συντελεστής τριβής. Τελικά δύο ζεύγη επιφανειών ίδιων υλικών και γεωμετρίας το ένα παρουσία λιπαντικού και το άλλο όχι, αλλά κατά τα άλλα κλειστών αναπτύσσουν διαφορετικές δυνάμεις τριβής για την ίδια εξωτερική φόρτιση. Αυτό είναι και ένα από τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν στο εισαγωγικό κεφάλαιο για τον υγρό συμπλέκτη έναντι του συμπλέκτη ξηρής τριβής. Ωστόσο, αξ σημειωθεί ότι το μειονέκτημα αυτό δεν είναι σημαντικό καθώς διορθώνεται με τη προσθήκη περισσότερων δίσκων στο σύστημα.

Στο Σχήμα 2.1.1 παρουσιάζεται η λεγόμενη καμπύλη του *Stribeck* η οποία αναπαριστά τη διαμόρφωση του συντελεστή τριβής μεταξύ δύο επιφανειών συναρτήσει κάποιου χαρακτηριστικού μεγέθους της ροής. Το μέγεθος αυτό μπορεί να είναι συνδιασμός παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τη λίπανση όπως κάποια χαρακτηριστική γεωμετρία, το ιξώδες, η σχετική ταχύτητα των επιφανειών κ.α. Στην ίδια εικόνα παρουσιάζονται σχηματικά οι επιφάνειες σε επίπεδο τραχύτητας προκειμένου να γίνουν κατανοητά τα τρία καθεστάτα λίπανσης.



Σχήμα 2.1.1: Τα τρία καθεστώτα λίπανσης και η καμπύλη Stribeck²

Όπως φαίνεται και από το σχήμα, ο συντελεστής τριβής παραμένει χαμηλός για επαρκές πάχος λιπαντικού, ενώ μάλιστα είναι ο ελάχιστος για ένα διάκενο μεταξύ της οριακής και της υδροδυναμικής λίπανσης. Όταν οι δύο επιφάνειες έρχονται πρακτικά σε πλήρη επαφή μεταξύ τους ο συντελεστής τριβής αποκτά τη μέγιστη τιμή του.

Στην παρούσα εργασία δεν έχει μοντελοποιηθεί το καθεστώς της οριακής λίπανσης καθώς κάτι τέτοιο απαιτεί προσέγγιση σε επίπεδο διαμοριακών δυνάμεων με συνυπολογισμό της στοχαστικότητας του φαινομένου. Επομένως, βρίσκεται αρκετά έξω από το επίπεδο της μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία. Επιπλέον, ο φαινόμενος συντελεστής τριβής μπορεί να υπολογιστεί πολύ ορθότερα από πειραματικά δεδομένα. Στις επόμενες δύο ενότητες γίνεται αναλυτικότερη αναφορά στα υπόλοιπα δύο καθεστώτα λίπανσης και στον τρόπο που τελικά αυτά μοντελοποιούνται στην ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων.

2.1.1 Υδροδυναμική λίπανση – η εξίσωση Reynolds

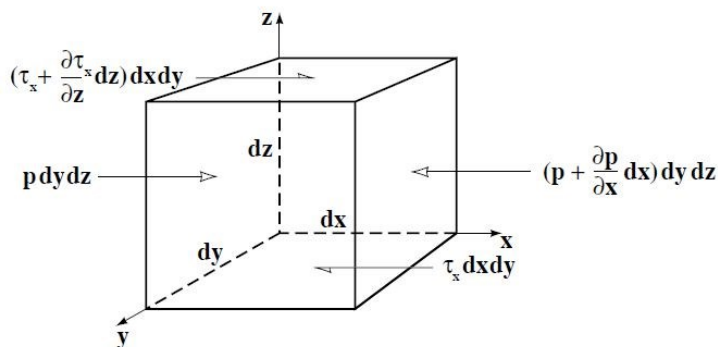
Όπως ήδη αναφέρθηκε, η εξίσωση Reynolds αποτελεί στην πραγματικότητα απλοποίηση των εξισώσεων Navier – Stokes και εκφράζει πλέον τη ροή σε διδιάστατο επίπεδο θεωρώντας την τρίτη διάσταση, αυτή του πάχους, αμελητέα. Οι βασικές παραδοχές που γίνονται προκειμένου να ληφθεί η έκφρασή της συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1.1.1. Η εξαγωγή της Reynolds μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, ενώ η τελική διατύπωσή της μπορεί να εμφανίσει διάφορες παραλλαγές κυρίως ανάλογα το σύστημα συντεταγμένων και την εισαγωγή ή όχι κλίσης στις επιφάνειες που συμμετέχουν. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η πιο απλή μορφή της και η εξαγωγή αυτής μέσω της αρχής διατήρησης της μάζας σε πεπερασμένο όγκο ρευστού.

² substech.com

Πίνακας 2.1.1.1: Παραδοχές εξίσωσης Reynolds

Παραδοχή	Σχολιασμός Ισχύος
$\frac{\partial p}{\partial z} = 0$: όχι μεταβολή της πίεσης κατά την έννοια του πάχους	Συνήθως ισχύει λόγω των πολύ μικρών παχών (μερικές δεκάδες μm)
Όχι ολίσθηση του ρευστού στα τοιχώματα	Συνήθης παραδοχή σε όλες τις αναλυτικές εκφράσεις πεδίων πίεσης - ταχύτητας
Στρωτή ροή (Laminar flow)	Συνήθως ισχύει λόγω των πολύ μικρών παχών
Απλοποίηση όρων αδράνειας	Συνήθως ισχύει λόγω των πολύ μικρών παχών
Σταθερή πυκνότητα ρευστού	Μικρές μεταβολές πυκνότητας κυρίως λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας
Σταθερό ιξώδες	Η μεγαλύτερη ίσως παραδοχή, αφού επηρεάζεται πολύ έντονα από τη θερμοκρασία και παράλληλα αποτελεί σημαντικότερη παράμετρο

Στο Σχήμα 2.1.1.1 παρουσιάζεται ένας πεπερασμένος όγκος ρευστού και η ισορροπία των δυνάμεων επί των πλευρών του κατά την διεύθυνση x . Ως p συμβολίζεται η πίεση του ρευστού και ως τ_x η διατμητική τάση στη διεύθυνση x .



Σχήμα 2.1.1.1: Ισορροπία δυνάμεων σε πεπερασμένο όγκο ρευστού – διεύθυνση x [8]

Δεδομένου ότι $dx \cdot dy \cdot dz \neq 0$ (διαφορετικά θα σήμαινε ότι ο όγκος είναι μηδενικός) προκύπτει από την ισορροπία στη διεύθυνση x ότι

$$\frac{\partial \tau_x}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.1.1.1)$$

Με αντίστοιχο τρόπο για τη διεύθυνση y προκύπτει ότι

$$\frac{\partial \tau_y}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.1.1.2)$$

ενώ για τη διεύθυνση z έχει ήδη γίνει η παραδοχή ότι $\frac{\partial p}{\partial z} = 0$.

Επιπλέον ισχύει για τις διατμητικές τάσεις σε Νευτώνιο ρευστό ότι

$$\tau_x = \eta \frac{u}{h} = \eta \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.1.1.3)$$

και

$$\tau_y = \eta \frac{v}{h} = \eta \frac{\partial v}{\partial z} \quad (2.1.1.4)$$

όπου

η : το δυναμικό ιξώδες του ρευστού

h : το διάκενο μεταξύ των στερεών επιφανειών

u, v : οι συνιστώσες της ταχύτητας κατά x και y αντίστοιχα

Αντικαθιστώντας τις (2.1.1.3),(2.1.1.4) στις (2.1.1.1) και (2.1.1.2) αντίστοιχα προκύπτει για τη μεταβολή της πίεσης στις δύο διευθύνσεις

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.1.1.5)$$

και

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.1.1.6)$$

Ολοκληρώνοντας την (2.1.1.5) ως προς z προκύπτει

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{z^2}{2} + c_1 z + c_2 &= \eta u \xrightarrow[z=h \Rightarrow u=U_2]{z=0 \Rightarrow u=U_1} \\ \frac{\partial p}{\partial x} \frac{z^2}{2} + (U_1 - U_2) \frac{\eta z}{h} - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{hz}{2} + \eta U_2 &= \eta u \Rightarrow \\ u &= \left(\frac{z^2 - zh}{2\eta} \right) \frac{\partial p}{\partial x} + (U_1 - U_2) \frac{z}{h} + U_2 \end{aligned} \quad (2.1.1.7)$$

όπου

U_1 : η ταχύτητα κατά x της επιφάνειας όπου $z = 0$

U_2 : η ταχύτητα κατά x της επιφάνειας όπου $z = h$

Αντίστοιχα προκύπτει για την v συνιστώσα της ταχύτητας

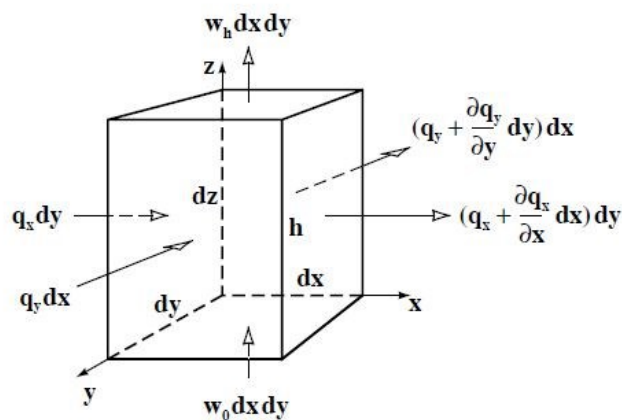
$$v = \left(\frac{z^2 - zh}{2\eta} \right) \frac{\partial p}{\partial y} + (V_1 - V_2) \frac{z}{h} + V_2 \quad (2.1.1.8)$$

όπου

V_1 : η ταχύτητα κατά y της επιφάνειας όπου $z = 0$

V_2 : η ταχύτητα κατά y της επιφάνειας όπου $z = h$

Προκειμένου να εξαχθεί η πλήρης περιγραφή του υδροδυναμικού φαινομένου κατά Reynolds εισάγεται η εξίσωση της συνέχειας. Στο Σχήμα 2.1.1.2 παρουσιάζονται οι ειδικές παροχές που εισέρχονται και εξέρχονται από πεπερασμένο όγκο στήλης ρευστού.



Σχήμα 2.1.1.2: Διατήρηση της συνέχειας σε πεπερασμένο όγκο στήλης ρευστού [8]

Στο παραπάνω σχήμα σημειώνονται ως q_i οι ειδικές παροχές στις διευθύνσεις i και ως w_0 και w_h η ταχύτητα των επιφανειών κατά τη διεύθυνση z στα σημεία $z = 0$ και $z = h$ αντίστοιχα.

Επομένως προκύπτει ότι

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial x} dx dy + \frac{\partial q_y}{\partial y} dx dy + (w_h - w_0) dx dy = 0 \Rightarrow \\ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + (w_h - w_0) = 0 \end{aligned} \quad (2.1.1.9)$$

Επιπλέον ισχύει ότι

$$q_x = \int_0^h u dz \quad \text{και} \quad q_y = \int_0^h v dz \quad (2.1.1.10)$$

Αντικαθιστώντας τις εκφράσεις των u, v από τις (2.1.1.7) και (2.1.1.8) προκύπτει τελικά

$$q_x = -\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} + (U_1 + U_2) \frac{h}{2} \quad (2.1.1.11)$$

και

$$q_y = -\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} + (V_1 + V_2) \frac{h}{2} \quad (2.1.1.12)$$

Θέτοντας $U_1 + U_2 = U$ και $V_1 + V_2 = V$ και αναδιατάσσοντας τους όρους στην εξίσωση (2.1.1.9) προκύπτει τελικά η εξίσωση του Reynolds

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6 \left(U \frac{dh}{dx} + V \frac{dh}{dy} \right) + 12(w_h - w_0) \quad (2.1.1.13)$$

ή στην ακόμα πιο γνωστή μορφή της

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{U}{2} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{V}{2} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.1.1.14)$$

Η μορφή της εξίσωσης αυτής φανερώνει την επαλληλία των δύο βασικών ροών που παρατηρούνται στις περιπτώσεις λίπανσης, δηλαδή τη ροή *Couette* και τη λεγόμενη *Squeeze Flow* που οφείλεται στον τελευταίο όρο $\frac{\partial h}{\partial t}$ όταν αυτός είναι αρνητικός.

Η πλήρης γενικευμένη μορφή της εξίσωσης *Reynolds* δίδεται στην (2.1.1.15) και συμπεριλαμβάνει όρους που εκφράζουν τη μεταβολή της ταχύτητας των δύο επιφανειών κατά τις κύριες διευθύνσεις (x, y) . Επιπλέον, λαμβάνεται υπόψη και η μεταβολή της πυκνότητας. Η απόδειξή της μπορεί να βρεθεί στη σχετική βιβλιογραφία [8].

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h (U_0 + U_h)}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h (V_0 + V_h)}{2} \right) + \\ + \rho (W_h - W_0) - \rho U_h \frac{\partial h}{\partial x} - \rho V_h \frac{\partial h}{\partial y} + h \frac{\partial \rho}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.1.1.15)$$

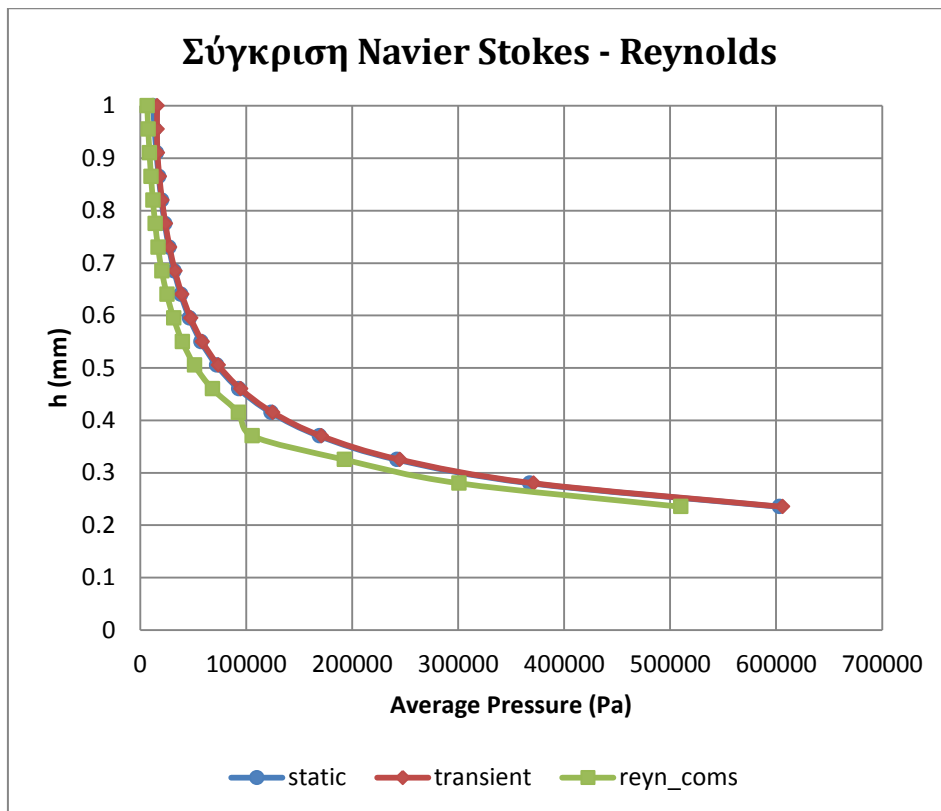
Για την περίπτωση προβλημάτων όπως το παρόν του συμπλέκτη χρήσιμη είναι η διατύπωση της Reynolds σε κυλινδρικές συντεταγμένες. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν είναι όσο εύκολο θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει ότι είναι. Στις (2.1.1.16) και (2.1.1.17) παρουσιάζονται οι αντίστοιχες διατυπώσεις των (2.1.1.15) και (2.1.1.14) όπως έχουν προκύψει έπειτα από κατάλληλη μαθηματική επεξεργασία των κυλινδρικών Navier – Stokes [9]. Παρατηρείται ότι από αυτές τις διατυπώσεις λείπει ο όρος της *Squeeze Flow* και η εισαγωγή του δεν μπορεί να προκύψει με την αναφερόμενη μέθοδο. Επιπλέον η πυκνότητα θεωρείται και πάλι σταθερή.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = -V_{rh} r \frac{\partial h}{\partial r} - V_{\theta h} \frac{\partial h}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{V_{r0} + V_{rh}}{2} rh \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{V_{\theta0} + V_{\theta h}}{2} h \right) \quad (2.1.1.16)$$

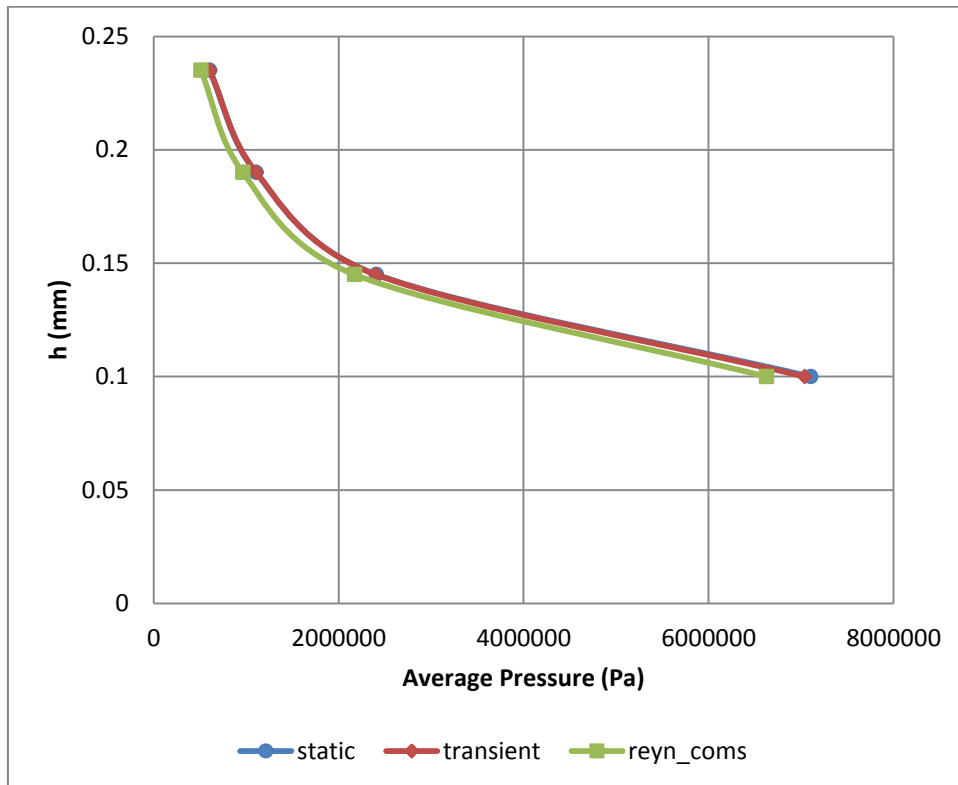
$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = \frac{V_{r0} + V_{rh}}{2} \frac{\partial}{\partial r} (rh) + \frac{V_{\theta0} + V_{\theta h}}{2} \frac{\partial}{\partial \theta} (h) \quad (2.1.1.17)$$

Σε επίπεδο πεπερασμένων στοιχείων η επίλυση γίνεται υποχρεωτικά μέσω των εξισώσεων Navier – Stokes. Από τα γνωστά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, μόνο το *Comsol Multiphysics* παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης της Reynolds σε πλέγμα διδιάστατων στοιχείων (*shell elements*). Παρόλα αυτά, η χρήση του συγκεκριμένου επιλύτη, όπως φάνηκε στην πορεία της μοντελοποίησης, προσθέτει αρκετούς περιορισμούς όσον αφορά τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ του ρευστού και των στερεών, για αυτό το λόγο και δεν προτιμήθηκε. Κατά συνέπεια, μοντελοποιώντας το πρόβλημα στο ANSYS η χρήση τρισδιάστατων στοιχείων είναι αναπόφευκτη και οι Navier – Stokes αποτελούν την περιγραφή του προβλήματος.

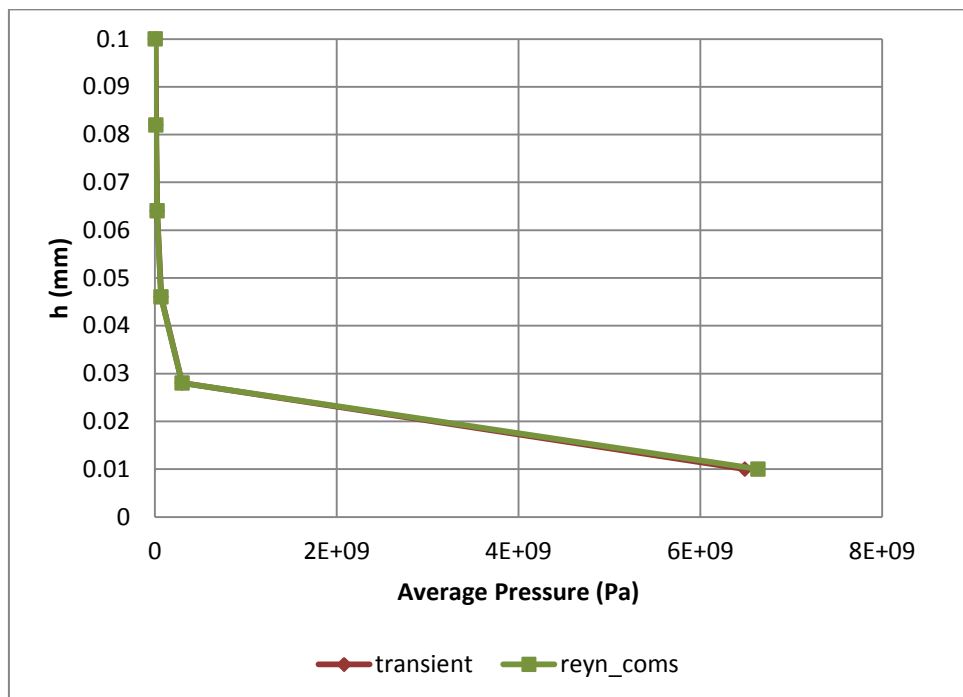
Ένα ερώτημα που μπορεί εύλογα να τεθεί σχετικά με τις δύο αυτές διατυπώσεις είναι το σε ποιες περιπτώσεις, δηλαδή σε ποια διάκενα, οι λύσεις τους συγκλίνουν. Στα Διαγράμματα 2.1.1.1(α),(β) και (γ) παρουσιάζεται η μέση πίεση που αναπτύσσεται σε λιπαντικό φιλμ πυκνότητας $\rho = 800 \frac{kg}{m^3}$ και ιξώδους $\eta = 0.01 Pa \cdot s$ το οποίο βρίσκεται μεταξύ δίσκων διαμέτρου $D = 115 mm$ και συμπιέζεται με ταχύτητα $V_{squeeze} = \frac{dh}{dt} = 50 \frac{mm}{s}$. Οι τρεις καμπύλες αντιστοιχούν σε επίλυση στο ANSYS Fluent στατικών μοντέλων για πλήθος διακένων [10], επίλυση στο ANSYS Fluent συνολικού χρονικά μεταβλητού μοντέλου (transient analysis) και επίλυση της Reynolds στο Comsol Multiphysics.



(α)



(β)



(γ)

Διάγραμμα 2.1.1.1: Σύγκριση εξίσωσης Reynolds με εξισώσεις Navier – Stokes

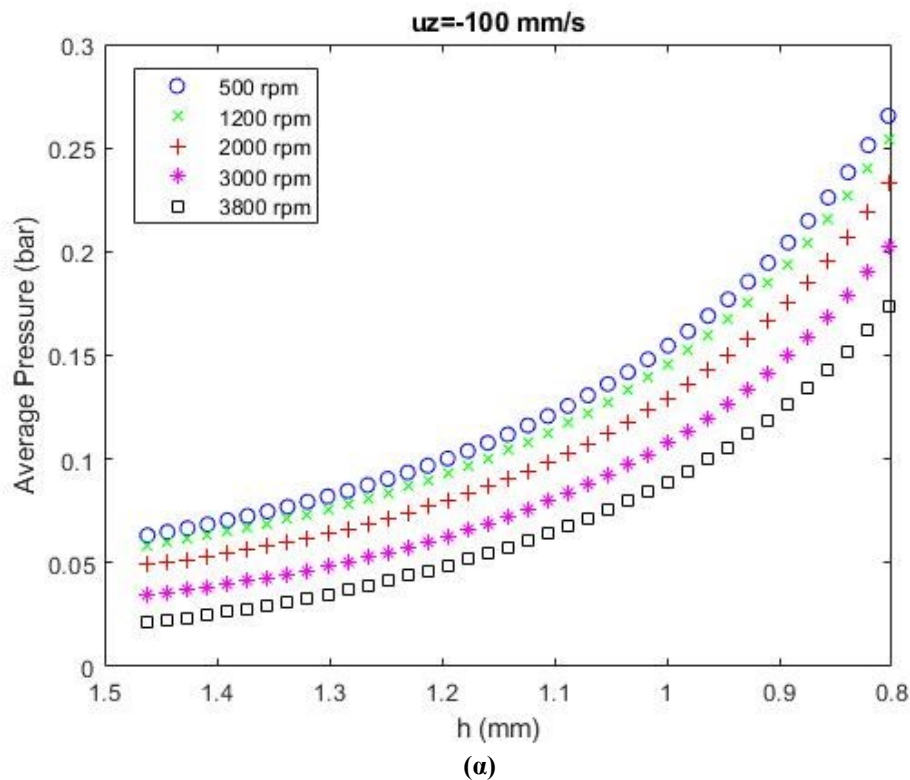
Φαίνεται λοιπόν ότι πράγματι τα μοντέλα συγκλίνουν επαρκώς για διάκενα μικρότερα του $1mm$, ενώ πρακτικά ταυτίζονται για διάκενα μικρότερα των $100\mu m$.

Σε επίπεδο μοντελοποίησης στο ANSYS Fluent κύριο ζήτημα υπήρξε η διαχείριση της παραμόρφωσης του υπολογιστικού πλέγματος. Για την ακρίβεια, το ζήτημα αυτό είναι και το μείζων στο παρόν πρόβλημα από τη σκοπιά των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό προκύπτει τόσο από τους βαθμούς ελευθερίας κίνησης όσο και από τις βασικές διαστάσεις του προβλήματος. Έτσι, η ύπαρξη του δυσανάλογα πολύ μικρού διακένου ($< 1mm$) σε σχέση με τη διάμετρο των δίσκων (λαμβάνεται περί τα $115mm$ και μάλιστα αντιστοιχεί σε μικρό δίσκο)

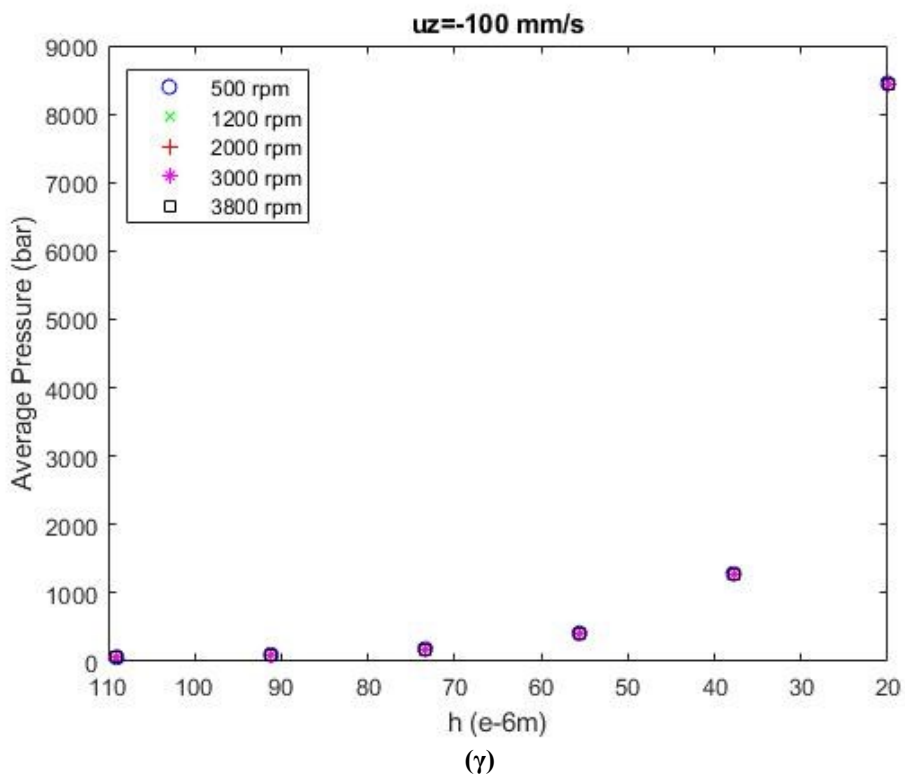
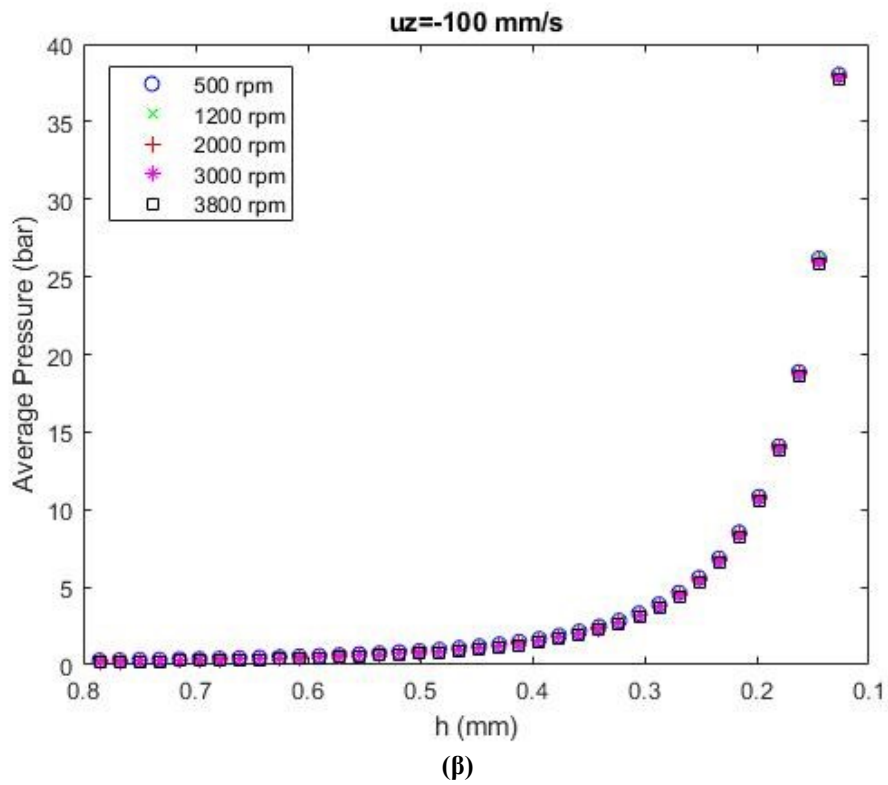
οδηγεί στη δημιουργία μεγάλων σε πλήθος στοιχείων πλεγμάτων με πολύ χαμηλή αντοχή σε παραμορφωσιμότητα. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με το ζήτημα αυτό παρατίθενται παρακάτω στη σχετική ενότητα.

Κατά συνέπεια, η λύση που τελικά επιλέχθηκε είναι η χειροκίνητη ανανέωση του πλέγματος ανά πολύ τακτά χρονικά διαστήματα και η αρχικοποίηση κάθε νέας προσομοίωσης με τα δεδομένα της αμέσως προηγούμενης. Η διαδικασία αυτή καθιστά όλη τη μοντελοποίηση εξαιρετικά χρονοβόρα, ενώ παράλληλα εισάγει την αναγκαιότητα επιβολής τέτοιων εξωτερικών ταχυτήτων περιστροφής και συμπίεσης, ώστε ο συνολικός αριθμός των επί μέρους προσομοιώσεων να είναι διαχειρίσιμος.

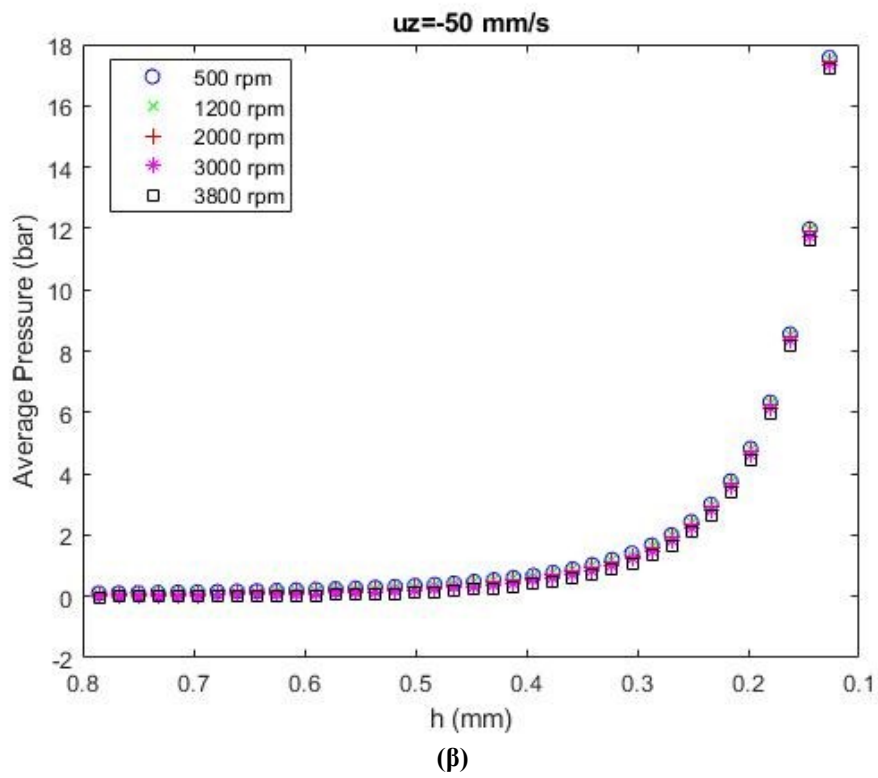
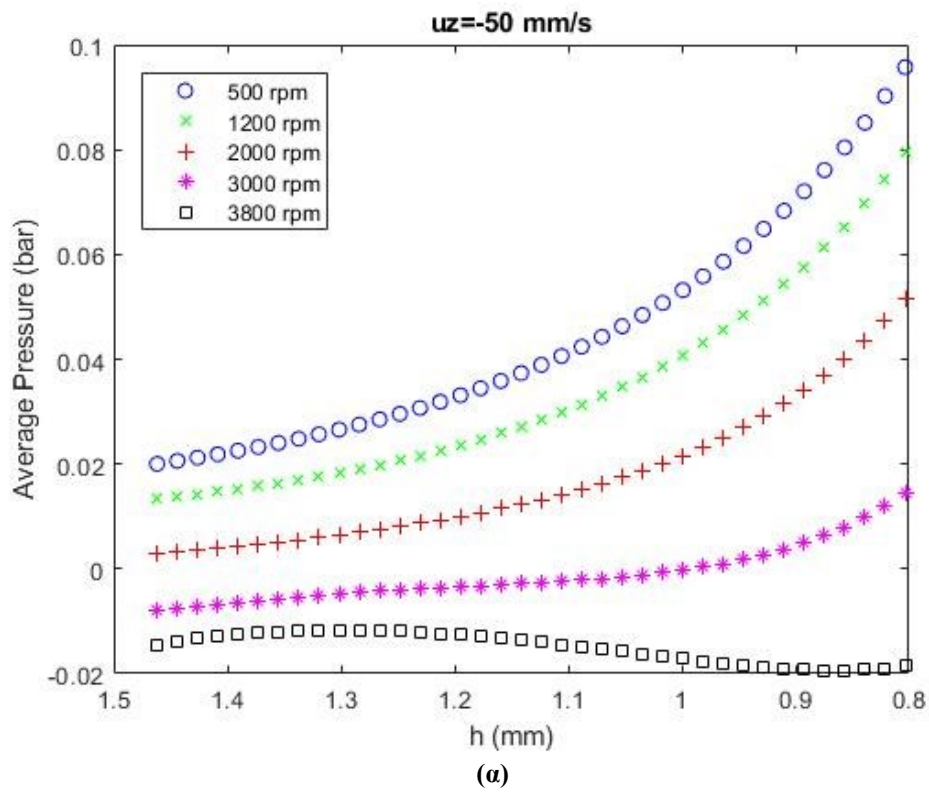
Όσον αφορά το ρευστό και τις ιδιότητές του αποδίδονται σε αυτό τιμές πυκνότητας και ιξώδους που αντιστοιχούν σε πραγματικό ATF (Automatic Transmission Fluid) θερμοκρασίας περί των $80^{\circ}C$ ³. Η ροή τίθεται στρωτή και σε αυτό το σημείο δεδομένης της ύπαρξης περιστροφικής ταχύτητας επισημαίνεται το ερώτημα χρήσης ή όχι μοντέλων τυρβώδους ροής. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε ξεχωριστό διδιάστατο αξονοσυμμετρικό μοντέλο (2D Axisymmetric) ίδιας γεωμετρίας και χαρακτηριστικών ρευστού με το προηγούμενο στο οποίο διερευνήθηκε αφενός το κατά πόσο η ταχύτητα περιστροφής επηρεάζει την αναπτυσσόμενη πίεση και αφετέρου το κατά πόσο τα μοντέλα στρωτής και τυρβώδους ροής αποκλίνουν μεταξύ τους. Οι δοκιμές έγιναν για διάφορους συνδυασμούς περιστροφικής και ταχύτητας συμπίεσης. Σημειώνεται ότι η ταχύτητα περιστροφής τίθεται ως *διαφορά* των ταχυτήτων περιστροφής των δύο δίσκων $\Delta\omega$. Επομένως σε επίπεδο προσομοίωσης ο ένας δίσκος τίθεται ακίνητος και ο άλλος με ταχύτητα ίση με τη $\Delta\omega$. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα. Σημειώνεται ότι στα συγκεκριμένα μοντέλα όντας διδιάστατα η παραμόρφωση του πλέγματος είναι μόνο αυτή λόγω συμπίεσης και διαχειρίζεται εύκολα μέσω συνάρτησης UDF.

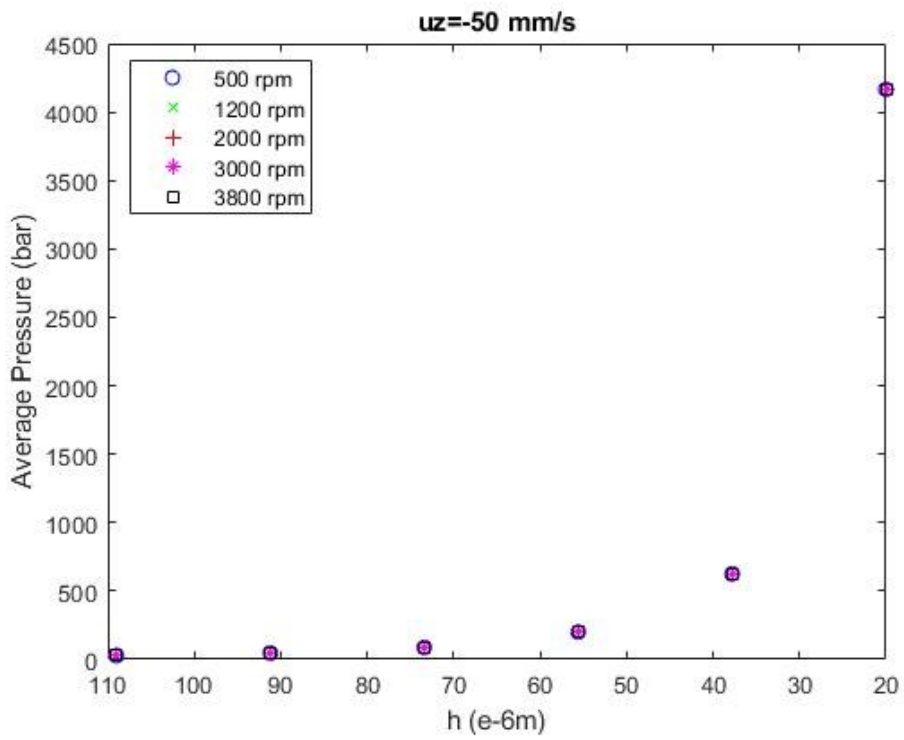


³ wiki.anton-paar.com

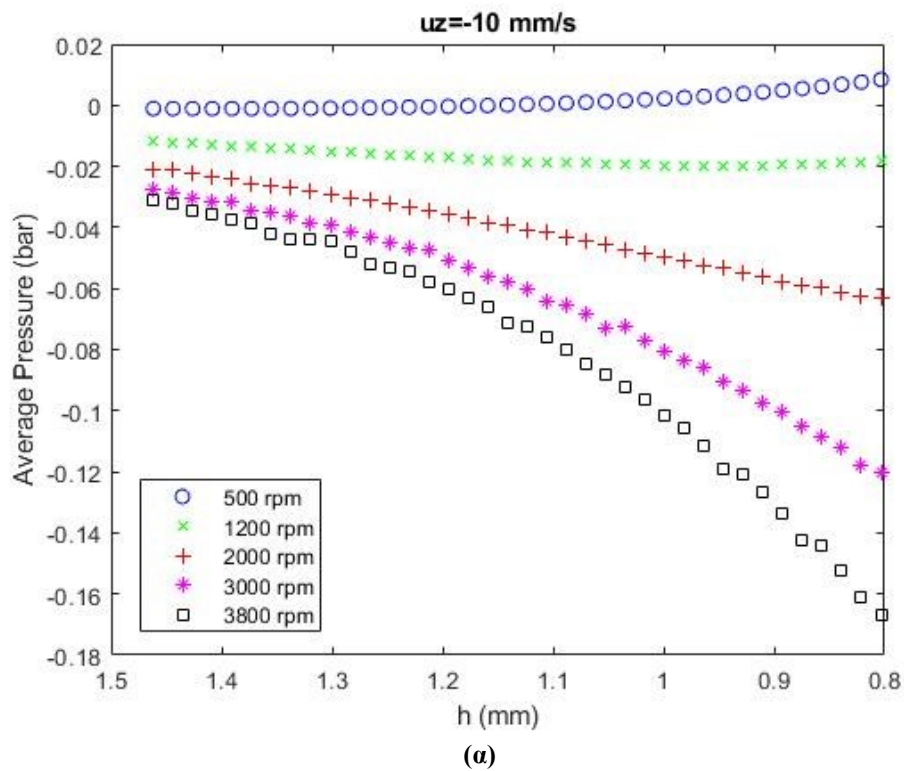


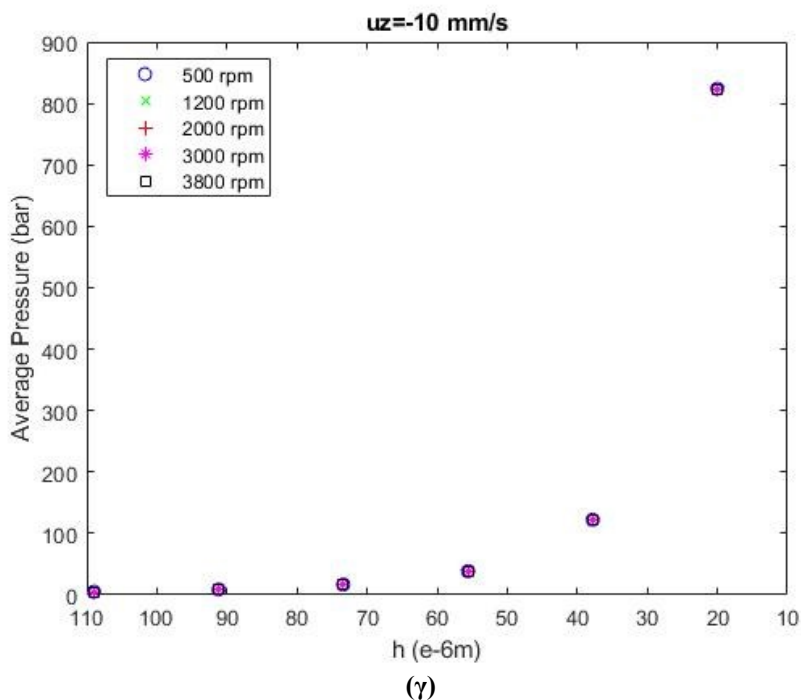
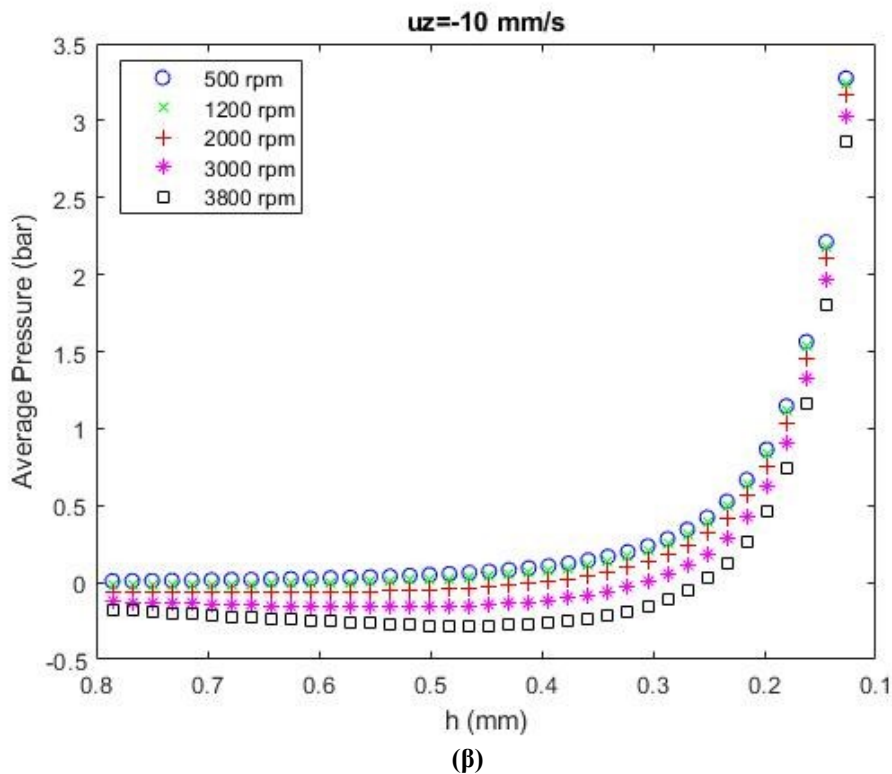
Διάγραμμα 2.1.1.2: Μέση πίεση λαδιού συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής $\Delta\omega$ (Ταχ. Συμπίεσης 100mm/s)





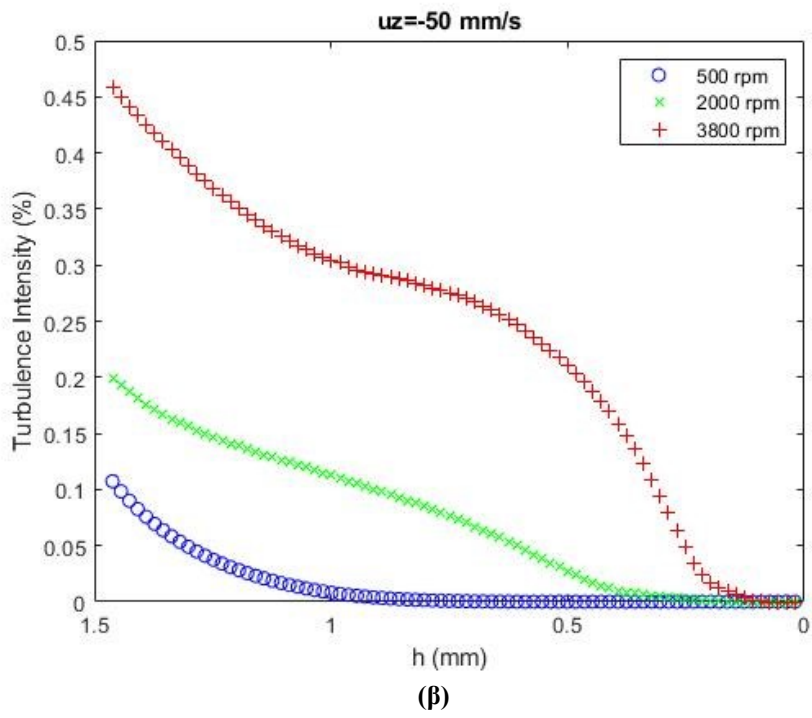
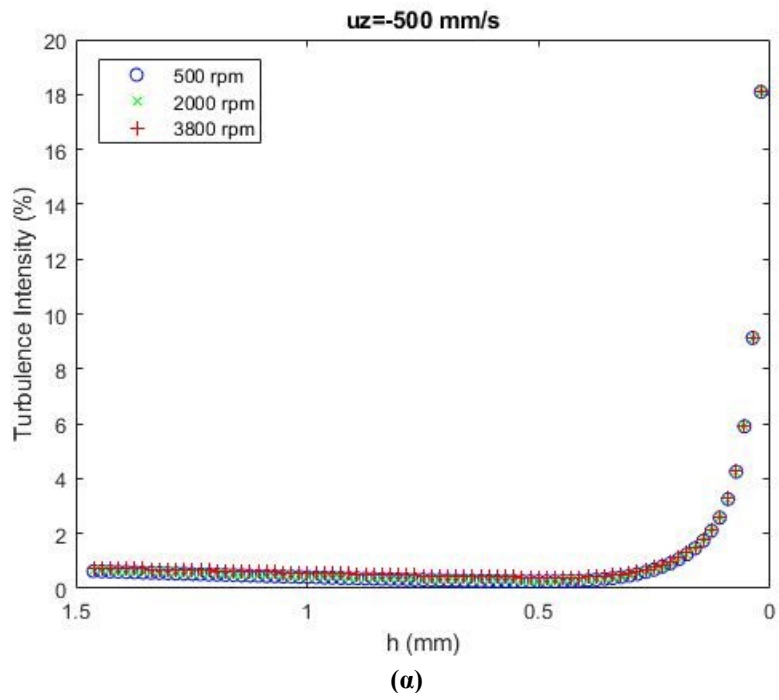
(γ)
Διάγραμμα 2.1.1.3: Μέση πίεση λαδιού συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής $\Delta\omega$
 (Ταχ. Συμπίεσης 50mm/s)

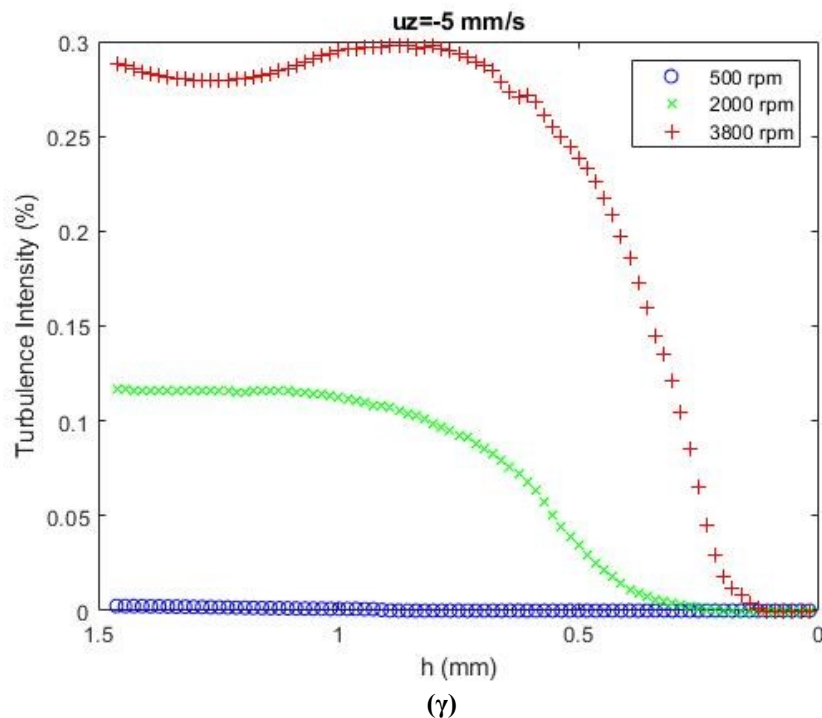




Διάγραμμα 2.1.1.4: Μέση πίεση λαδιού συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής $\Delta\omega$ (Ταχ. Συμπίεσης 10mm/s)

Από τα Διαγράμματα 2.1.1.2-4 παρατηρείται ότι η συνεισφορά της ταχύτητας περιστροφής στη διαμόρφωση της πίεσης στο λιπαντικό φιλμ εξαρτάται αφενός από την αναλογία της ως προς την ταχύτητα συμπίεσης και αφετέρου από το διάκενο μεταξύ των δίσκων. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα συμπίεσης ή αντίστοιχα όσο μικρότερο είναι το διάκενο μεταξύ των δίσκων, τόσο υπερσχύει ο όρος της *squeeze flow* στη διαμόρφωση του πεδίου πίεσης και η συνεισφορά της περιστροφικής ταχύτητας είναι μικρή. Αντίθετα, σε μεγάλα διάκενα και για μικρές ταχύτητες συμπίεσης η περιστροφική ταχύτητα είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στη διαμόρφωση της πίεσης. Επιπλέον παρατηρούνται περιπτώσεις υποπίεσης σε μεγάλα διάκενα και μεγάλες ταχύτητες περιστροφής. Γενικά, η επίδραση της ταχύτητας περιστροφής είναι η μείωση της πίεσης.





Διάγραμμα 2.1.1.5: Δείκτης έντασης τύρβης συναρτήσει των ταχυτήτων περιστροφής και συμπίεσης

Όσον αφορά τα φαινόμενα τύρβης είναι αναμενόμενο αυτά να είναι πιο έντονα σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής. Τα Διαγράμματα 2.1.1.5(α),(β) και (γ) φανερώνουν όμως ότι υπάρχει εξάρτηση και από την ταχύτητα συμπίεσης. Έτσι, σε πολύ μεγάλες ταχύτητες συμπίεσης όπως τα $500 \frac{mm}{s}$ και ιδιαίτερα σε πολύ μικρά διάκενα η ένταση της τύρβης φαίνεται να αυξάνει. Κάτι τέτοιο μπορεί να αποδοθεί στην πολύ απότομη μεταβολή του διανύσματος της ταχύτητας ιδιαίτερα σε πολύ μικρό χώρο.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στα γενικά χαρακτηριστικά των μοντέλων της εργασίας η ροή θεωρείται στρωτή. Κάτι τέτοιο όμως δεν μπορεί να θεωρηθεί με ασφάλεια αληθές στην περίπτωση ύπαρξης διαμορφώσεων. Προσομοιώσεις έδειξαν ότι στις περιπτώσεις σχετικά μεγάλου ελεύθερου όγκου των διαμορφώσεων και στα αρχικά μεγάλα διάκενα εμφανίζονται προβλήματα σύγκλισης στην περίπτωση της στρωτής ροής. Η εισαγωγή μοντέλων τύρβης διορθώνει το πρόβλημα φανερώνοντας πεδία πίεσης ιδιαίτερα χαμηλού μέτρου ή ακόμα και σημεία υποπίεσης. Επομένως κρίνεται απαραίτητη για την περίπτωση ύπαρξης διαμορφώσεων. Σε επίπεδο προσομοίωσης στο ANSYS Fluent επιλέγεται το μοντέλο *Standard k-ε Turbulence Model* όπως υποδεικνύεται από το σχετικό εγχειρίδιο για περιπτώσεις σχετικά χαμηλών δινών κοντά σε τοιχώματα.

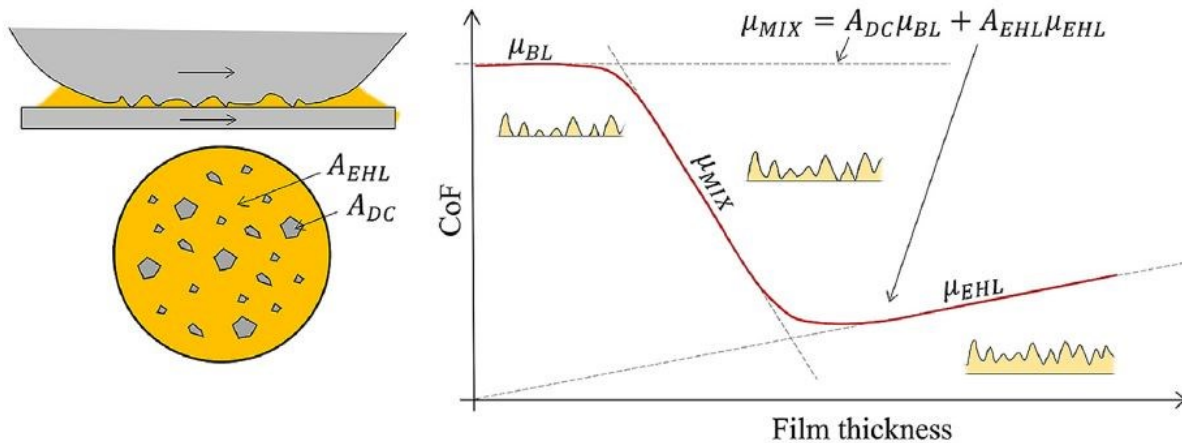
2.1.2 Μικτή λίπανση – Εισαγωγή συντελεστών Patir & Cheng

Η έννοια της μικτής λίπανσης εμπεριέχει τη συνεισφορά της επίδρασης της τραχύτητας των επιφανειών στη διαμόρφωση της ροής ανάμεσα σε αυτές. Το ζήτημα αυτό χρήζει ιδιαίτερης αντιμετώπισης και αποτελεί πρόβλημα που δεν έχει γενικά μοντελοποιηθεί πλήρως. Οι περισσότερες προσπάθειες προσεγγίζουν το ζήτημα με κάποια στοχαστική – στατιστική μέθοδο. Άλλωστε η ίδια η τραχύτητα μίας επιφάνειας έχει έντονα στατιστικό χαρακτήρα.

Δεδομένου ότι η τραχύτητα γίνεται εμφανής σε επίπεδο μερικών μm ενώ η επιφάνεια ενδιαφέροντος είναι στην καλύτερη των περιπτώσεων διάστασης αρκετών mm γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι η εισαγωγή τραχύτητας σε ολόκληρη την επιφάνεια και η δημιουργία πλέγματος σε αυτήν είναι αδύνατη. Ανταυτού οι μέθοδοι που προτείνονται και από τη βιβλιογραφία είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων σε ειδικό επίπεδο, δηλαδή στο επίπεδο της τραχύτητας σε μία μικρή περιοχή, και στη συνέχεια η γενίκευση αυτών με μαθηματικά ορθό τρόπο σε συνολικό επίπεδο, δηλαδή στις πραγματικές διαστάσεις του προβλήματος.

Μία ενδιαφέρουσα προσέγγιση αλλά κατά τα άλλα αρκετά απλοϊκή είναι αυτή των ποσοστών συμμετοχής [11]. Στο Σχήμα 2.1.2.1 παρουσιάζεται η καμπύλη του Stribeck και η συνεισφορά του ρευστού και

των σημείων επαφής στη διαμόρφωση του φαινομένου συντελεστή τριβής. Η θεώρηση είναι αρκετά απλή, παρόλα αυτά ουσιαστική, ότι το αποτέλεσμα οφείλεται κατά ποσοστό $\frac{A_{EHL}}{A_{tot}}$ (EHL: Elastohydrodynamic Lubrication, tot: total area) στις διαμητικές τάσεις λόγω της αναπτυσσόμενης ροής και κατά ποσοστό $\frac{A_{DC}}{A_{tot}}$ (DC: Direct Contact) στη δύναμη τριβής που προκύπτει από την άμεση επαφή των δύο επιφανειών. Στην επαφή των δύο επιφανειών ο συντελεστής τριβής αντιστοιχεί σε αυτόν της οριακής λίπανσης.



Σχήμα 2.1.2.1: Εκτίμηση φαινομένου συντελεστή τριβής με βάση τα ποσοστά συμμετοχής [11]

Ενώ ο υπολογισμός αυτών των ποσοστών για γνωστή τραχύτητα (δηλαδή για γνωστά στατιστικά χαρακτηριστικά αυτής) είναι αρκετά εύκολος, ο προσδιορισμός των συντελεστών τριβής δεν είναι προφανής και απαιτεί στην πραγματικότητα πλήθος πειραματικών μετρήσεων.

Μία άλλη προσέγγιση είναι αυτή της εισαγωγής τεχνητών συντελεστών, των λεγόμενων *flow factors*, που πρώτοι πρότειναν οι *Nadir Patir & H.S. Cheng* [12]. Η προσέγγιση αυτή έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί για την εισαγωγή της επίδρασης της τραχύτητας είτε αυτούσια με τα δεδομένα αυτής της πρώτης δημοσίευσης είτε με παραλλαγές και προσπάθειες γενίκευσης και ενσωμάτωσής της σε ελαφρώς διαφοροποιούμενες μορφές της εξίσωσης Reynolds [13],[14],[15]. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις η μετέπειτα επίλυση του προβλήματος γίνεται μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών πάνω στην τελική έκφραση που προτείνεται. Στην παρούσα εργασία έχει γίνει ήδη σαφές ότι σε επίπεδο πεπερασμένων στοιχείων η επίλυση γίνεται μέσω των Navier – Stokes. Κατά συνέπεια η εισαγωγή των συντελεστών πρέπει να γίνει με τρόπο που να έχει νόημα για αυτές τις εξισώσεις. Έχοντας αποδείξει ότι οι Navier – Stokes και η εξίσωση Reynolds πράγματι δίνουν ταυτόσημα πεδία ροής για διάκενα μικρότερα των $100\mu m$ η εισαγωγή των συντελεστών γίνεται όπως ακριβώς προτάθηκε από τους Patir & Cheng, δηλαδή τροποποιώντας το ιξώδες του ρευστού. Το τελευταίο αποτελεί ένα τέχνασμα που μπορεί να προσαρμοστεί στη διατύπωση της εξίσωσης Reynolds και η βασική πορεία απόδειξής του, καθώς και ορισμένες προσομοιώσεις επαλήθευσης παρουσιάζονται παρακάτω.

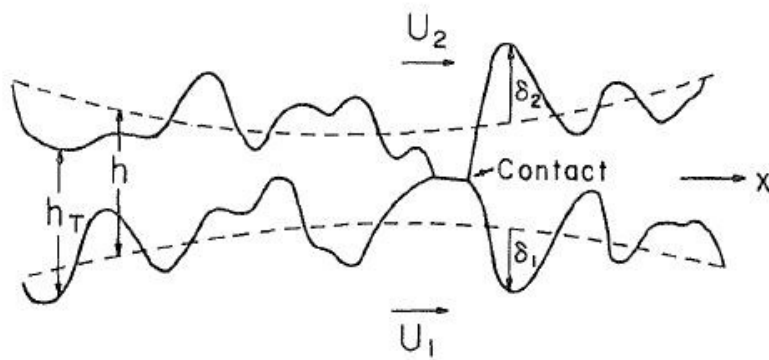
Θεωρώντας τη γεωμετρία του προβλήματος σε επίπεδο τραχύτητας να μοιάζει με αυτή του Σχήματος 2.1.2.2 το συνολικό πάχος του λιπαντικού φιλμ εκφράζεται από τη σχέση

$$h_r = h + \delta_1 + \delta_2 \quad (2.1.2.1)$$

όπου

h : το ονομαστικό διάκενο μεταξύ των δύο επιφανειών

δ_1, δ_2 : οι αποκλίσεις από αυτό λόγω της τραχύτητας των επιφανειών. Οι αποκλίσεις αυτές δεν μπορούν να περιγραφούν από κλειστή αναλυτική μορφή συνάρτησης και εξαρτώνται από την τοπολογία των επιφανειών. Έχουν έντονα στατιστικό χαρακτήρα.



Σχήμα 2.1.2.2: Θεώρηση προβλήματος μικτής λίπανσης [12]

Ξεκινώντας από την εξίσωση Reynolds στην απλοποιημένη μορφή της και εισάγοντας πλέον το πραγματικό πάχος του φιλμ προκύπτει η διατύπωση

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h_r^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h_r^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{U_1 + U_2}{2} \frac{\partial h_r}{\partial x} + \frac{V_1 + V_2}{2} \frac{\partial h_r}{\partial y} + \frac{\partial h_r}{\partial t} \quad (2.1.2.2)$$

Είναι γνωστό από τον τρόπο εξαγωγής της Reynolds ότι οι παροχές εκφράζονται από τις σχέσεις

$$q_x = \int_0^h u dz = -\frac{h_r^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{U_1 + U_2}{2} h_r \quad (2.1.2.3)$$

και

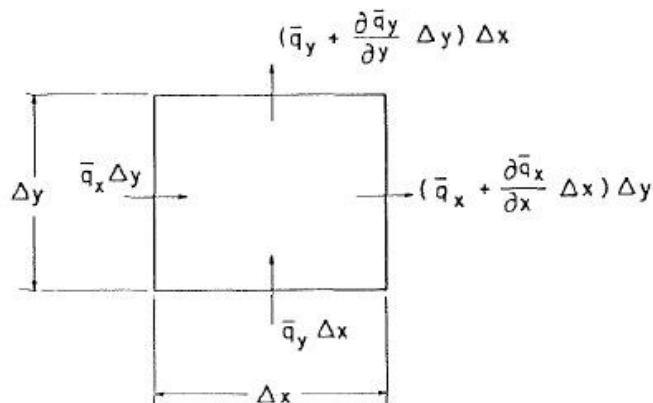
$$q_y = \int_0^h v dz = -\frac{h_r^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{V_1 + V_2}{2} h_r \quad (2.1.2.4)$$

Ενώ για τις μέσες παροχές ισχύει

$$\bar{q}_x = \frac{1}{\Delta y} \int_y^{y+\Delta y} q_x dy \quad (2.1.2.5)$$

και

$$\bar{q}_y = \frac{1}{\Delta x} \int_x^{x+\Delta x} q_y dx \quad (2.1.2.6)$$



Σχήμα 2.1.2.3: Όγκος ελέγχου προβλήματος [12]

Εισάγοντας τους συντελεστές ροής $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_{sx}, \varphi_{sy}$ τέτοιους ώστε να ισχύει

$$\bar{q}_x = -\varphi_x \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{U_1 + U_2}{2} \bar{h}_r + \frac{U_1 - U_2}{2} \sigma \varphi_{sx} \quad (2.1.2.7)$$

και

$$\bar{q}_y = -\varphi_y \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{V_1 + V_2}{2} \bar{h}_T + \frac{V_1 - V_2}{2} \sigma \varphi_{sy} \quad (2.1.2.8)$$

όπου

$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$: η συνδυασμένη τυπική απόκλιση της τραχύτητας των δύο επιφανειών

και εφαρμόζοντας τη διατήρηση της συνέχειας στον όγκο ελέγχου του Σχήματος 2.1.2.3 προκύπτει η

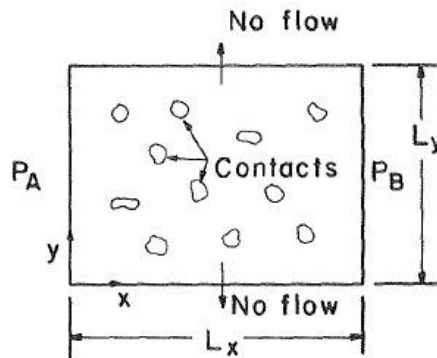
$$\frac{\partial \bar{q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{q}_y}{\partial y} = -\frac{\partial \bar{h}_T}{\partial t} \quad (2.1.2.9)$$

Αντικαθιστώντας τις (2.1.2.7),(2.1.2.8) στην (2.1.2.9) προκύπτει η τροποποιημένη έκφραση της Reynolds

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\varphi_x \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varphi_y \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right) = & \frac{U_1 + U_2}{2} \bar{h}_T + \frac{V_1 + V_2}{2} \bar{h}_T + \\ & + \frac{U_1 - U_2}{2} \sigma \varphi_{sx} + \frac{V_1 - V_2}{2} \sigma \varphi_{sy} \end{aligned} \quad (2.1.2.10)$$

Γίνεται πλέον σαφές πώς από το ειδικό, δηλαδή την ακριβή περιγραφή της επιφάνειας μέσω του h_T , έγινε μετάβαση στο γενικό όπου η επιφάνεια εκφράζεται από το ονομαστικό διάκενο h (για κανονική κατανομή ισχύει και $\bar{h}_T = h$), ενώ η πίεση εκφράζεται ως μέσο μέγεθος.

Επόμενο ζήτημα είναι ο προσδιορισμός των συντελεστών ροής. Αυτός γίνεται εξετάζοντας επιμέρους διακριτά προβλήματα. Έτσι, για τον συντελεστή φ_x εξετάζεται το πρόβλημα του Σχήματος 2.1.2.4 για συγκεκριμένο ονομαστικό διάκενο h .



Σχήμα 2.1.2.4: Προσδιορισμός συντελεστή φ_x

Για τις ταχύτητες των δύο επιφανειών τίθεται $U_1 = U_2 = U$ και $V_1 = V_2 = V$ επομένως το δεύτερο μέλος της (2.1.2.2) γίνεται

$$\begin{aligned} U \frac{\partial h_T}{\partial x} + V \frac{\partial h_T}{\partial y} + \frac{\partial h_T}{\partial t} \xrightarrow{h=ct.} \\ U \frac{\partial (\delta_1 + \delta_2)}{\partial x} + V \frac{\partial (\delta_1 + \delta_2)}{\partial y} + \frac{\partial (\delta_1 + \delta_2)}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.1.2.11)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τον γνωστό κανόνα της αλυσίδας για μία συνάρτηση $f(x(t), y(t))$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} \quad (2.1.2.12)$$

καθώς και ότι για κάθε απόκλιση δ_i ισχύει

$$\delta_i = \delta_i(x - Ut, y - Vt) \quad (2.1.2.13)$$

η (2.1.2.11) γίνεται

$$U \left\{ \frac{\partial \delta_1}{\partial x} + \frac{\partial \delta_2}{\partial x} \right\} + V \left\{ \frac{\partial \delta_1}{\partial y} + \frac{\partial \delta_2}{\partial y} \right\} + \frac{\partial \delta_1}{\partial x} \{-U\} + \frac{\partial \delta_1}{\partial y} \{-V\} + \frac{\partial \delta_2}{\partial x} \{-U\} + \frac{\partial \delta_2}{\partial y} \{-V\} = 0 \quad (2.1.2.14)$$

Τελικά το πρόβλημα του Σχήματος 2.1.2.4 περιγράφεται από την

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h_T^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h_T^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.1.2.15)$$

και ο συντελεστής ροής της διεύθυνσης x προκύπτει από τον λόγο της πραγματικής προς την θεωρητική μέση παροχή, δηλαδή

$$\varphi_x = \frac{\frac{1}{L_y} \int_0^{L_y} \frac{h_T^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} dy}{\frac{h^3}{12\eta} \frac{p_B - p_A}{L_x}} = \frac{\overline{q_x}}{\frac{h^3}{12\eta} \frac{p_B - p_A}{L_x}} \quad (2.1.2.16)$$

όπου η μέση παροχή $\overline{q_x}$ προκύπτει επιλύοντας αριθμητικά την (2.1.2.15) σε ένα πολύ μικρό χωρίο διαστάσεων $L_x \times L_y$, όπου οι επιφάνειες δεν είναι λείες, υπάρχει δηλαδή τραχύτητα.

Με όμοιο τρόπο προκύπτει και η διατύπωση του συντελεστή φ_y με τη διαφορά ότι η ροή επιβάλλεται κατά την y διεύθυνση.

$$\varphi_y = \frac{\frac{1}{L_x} \int_0^{L_x} \frac{h_T^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} dx}{\frac{h^3}{12\eta} \frac{p_B - p_A}{L_y}} = \frac{\overline{q_y}}{\frac{h^3}{12\eta} \frac{p_B - p_A}{L_y}} \quad (2.1.2.17)$$

Αποδεικνύεται από τους Patir & Cheng ότι για ισότροπες επιφάνειες ισχύει

$$\varphi_x = \varphi_y \quad (2.1.2.18)$$

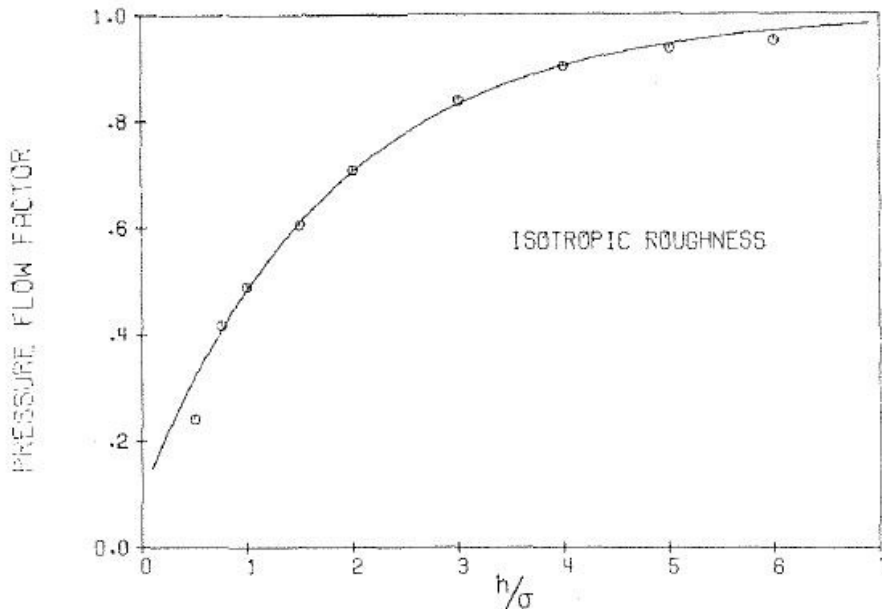
Η παραπάνω μεθοδολογία παρουσιάζει πολλά θολά σημεία, όπως το γιατί επιλέχθηκαν αυτές οι εκφράσεις των σχέσεων (2.1.2.7), (2.1.2.8), το ποια είναι η έκφραση υπολογισμού των διατμητικών συντελεστών $\varphi_{xx}, \varphi_{yy}$, καθώς και το κατά πόσο υπάρχει γενικότητα της ισχύος των συντελεστών στις περιπτώσεις όπου $U_1 \neq U_2$ και $V_1 \neq V_2$. Επιπλέον, η ίδια δημοσίευση παρουσιάζει κλειστές εκφράσεις των συντελεστών για την περίπτωση όπου η τραχύτητα των επιφανειών ακολουθεί κανονική κατανομή. Τι συμβαίνει όμως σε μία άλλη περίπτωση; Ακόμη, κατά πόσο η θεώρηση ότι το ονομαστικό διάκενο μετράται από το σημείο όπου η μέση τιμή της κατανομής είναι μηδενική είναι ορθή; Τέλος, τι σημασία έχει η διαφορά πίεσης που επιβάλλεται για τον προσδιορισμό των συντελεστών;

Όσον αφορά τον προσδιορισμό των διατμητικών συντελεστών ροής μία γρήγορη εξέταση περιπτώσεων όπου $U_1 - U_2 \neq 0$ και $V_1 - V_2 \neq 0$ (οπότε οι συντελεστές δεν εξαλείφονται στην (2.1.2.10))

οδηγεί τελικά σε μη απλοποίηση των $\frac{\partial \delta_i}{\partial x}, \frac{\partial \delta_i}{\partial y}$ ακόμη και σε ειδικές περιπτώσεις όπου αυτά λαμβάνονται ίσα.

Τελικά, οι προβληματικοί όροι είναι οι κλίσεις των αποκλίσεων της τραχύτητας ως προς τις χωρικές συντεταγμένες (x, y) οι οποίες σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να περιγραφούν από αναλυτικές εξισώσεις και πρακτικά οι μόνοι συντελεστές που μπορούν να προσδιοριστούν είναι οι φ_x, φ_y . Σχετικά με την κατανομή

πυκνότητας πιθανότητας υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής αντίστοιχων σχέσεων κάνοντας χρήση άλλων συναρτήσεων πέραν της κανονικής κατανομής. Αναφορικά με το σημείο μέτρησης του ονομαστικού διακένου, αυτό σε καμία περίπτωση δεν είναι ορθό να τεθεί στο σημείο όπου η μέση τιμή της κατανομής (κανονική εν προκειμένω) είναι μηδενική, καθώς κάτι τέτοιο θα σήμαινε πλήρη παραμόρφωση των προεξοχών. Στην πραγματικότητα ο προσδιορισμός του σημείου αυτού αποτελεί ζήτημα από μόνος του καθώς εξαρτάται από το εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο και το απορροφούμενο ελαστικό και πλαστικό έργο από την επιφάνεια. Τέλος, η διαφορά πίεσης που επιβάλλεται στον προσδιορισμό των συντελεστών όπως φάνηκε από προσομοιώσεις έχει σημασία. Η επιβαλλόμενη πίεση πρέπει να είναι ίδιας τάξης μεγέθους με την πραγματική.



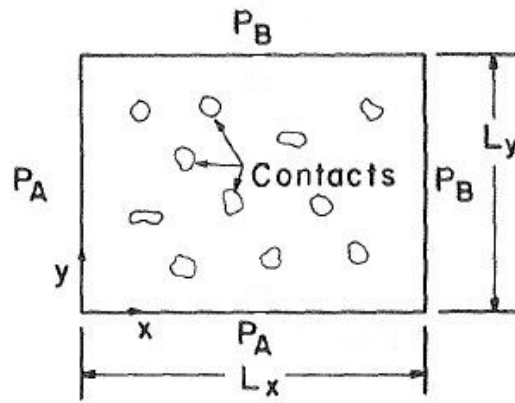
Διάγραμμα 2.1.2.1: Συντελεστής ροής ισότροπης επιφάνειας συναρτήσει του ονομαστικού διακένου και της τυπικής απόκλισης της τραχύτητας [12]

Από την παραπάνω ανάλυση διακρίνονται ορισμένες ιδέες που τελικά επιλέγεται να εφαρμοστούν στην παρούσα εργασία, παρά το σύνολο των τύπων και των σχέσεων αυτών καθαυτών. Οι συντελεστές ροής τελικά εκφράζουν τη διαφορά που εμφανίζει η πραγματική παροχή του ρευστού παρουσία της τραχύτητας ως προς την αντίστοιχη θεωρητική για την περίπτωση λείων επιφανειών. Όσο το ονομαστικό διάκενο μεγαλώνει σε σχέση με την τραχύτητα των επιφανειών, οι συντελεστές τείνουν στην μονάδα, δηλαδή η τραχύτητα παύει να επηρεάζει μακροσκοπικά το φαινόμενο. Οι συντελεστές αυτοί δεν πρέπει για την περίπτωση ισότροπων επιφανειών να εξαρτώνται από τη φορά τη ροής, καθώς η έννοιά τους είναι να περιγράψουν την αντίσταση που προσθέτει η τοπολογία των επιφανειών. Επιπλέον, παρουσιάζει ενδιαφέρον το πώς συμμετέχουν οι συντελεστές αυτοί στην έκφραση του Reynolds. Εάν ήταν επιθυμητή η πλήρης ενσωμάτωσή τους στην εξίσωση, τότε αυτό θα γινόταν πρακτικά μεταβάλλοντας το ιξώδες του ρευστού.

Τελικά, στόχος είναι η εξαγωγή ενός συντελεστή ροής για δεδομένη τραχύτητα επιφάνειας του υλικού φθοράς (η επιφάνεια του μεταλλικού δίσκου θεωρείται πολύ πιο λεία σε σχέση με αυτή του δίσκου τριβής) και η εισαγωγή του στο συνολικό πρόβλημα μέσω του ιξώδους του ρευστού. Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται από τον λόγο πραγματικής προς θεωρητική παροχή όπως προκύπτει ύστερα από προσομοίωση σε πολύ μικρό χωρίο διαστάσεων περί των $1mm \times 1mm$ παρουσία της τραχύτητας στη μία εκ των δύο επιφανειών. Η δημιουργία της επιφάνειας με την τραχύτητα γίνεται μέσω κώδικα και παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Έτσι, δημιουργείται για ένα πλήθος διακένων μία σειρά συντελεστών ροής και επομένως αναλόγως το στάδιο επίλυσης εφαρμόζεται και ο κατάλληλος.

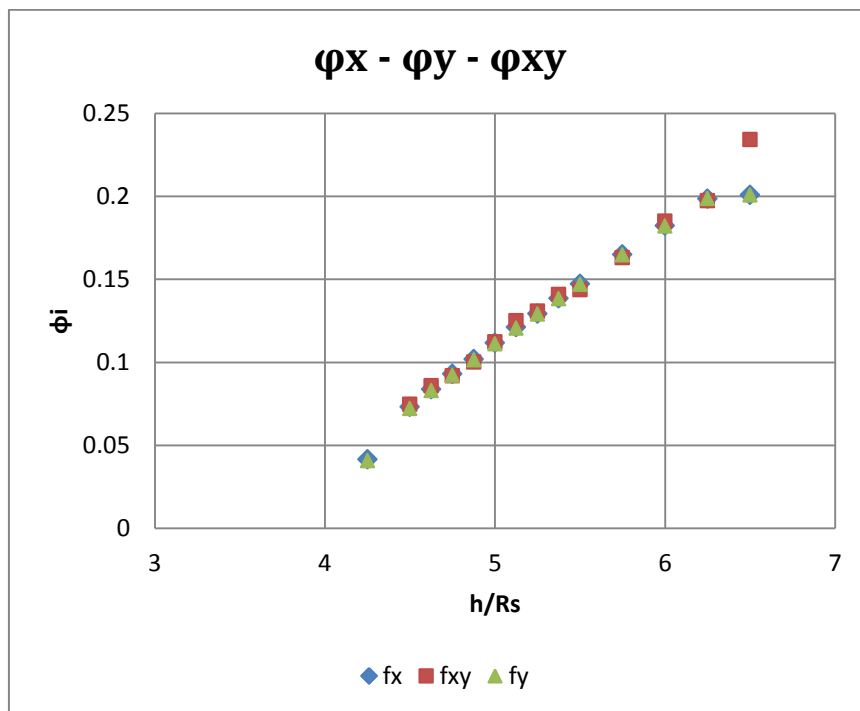
Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των συντελεστών που προκύπτουν από προσομοίωση ροής σε επιφάνεια τραχύτητας που προσεγγίζεται από κατανομή Weibull και αντιστοιχεί σε $R_a = 6\mu m$ και $R_s = 8\mu m$. Το σημείο από το οποίο μετράται το ονομαστικό διάκενο έχει ληφθεί ως το κατώτερο των τυχαίων τιμών (θεώρηση μη αληθής αλλά αβλαβής για τις συγκεκριμένες συγκρίσεις). Εξετάζονται τρεις περιπτώσεις εφαρμογής ίδιας διαφοράς πίεσης για τα ίδια ονομαστικά διάκενα αλλάζοντας μόνο την κατεύθυνση στην οποία επιτρέπεται ροή. Έτσι ο συντελεστής ϕ_x υπολογίζεται για επιτρεπόμενη ροή

μόνο κατά τη διεύθυνση x (περίπτωση ίδια με αυτήν του Σχήματος 2.1.2.4), ο συντελεστής φ_y για ροή μόνο κατά τη διεύθυνση y και ο συντελεστής φ_{xy} για την περίπτωση του Σχήματος 2.1.2.5.

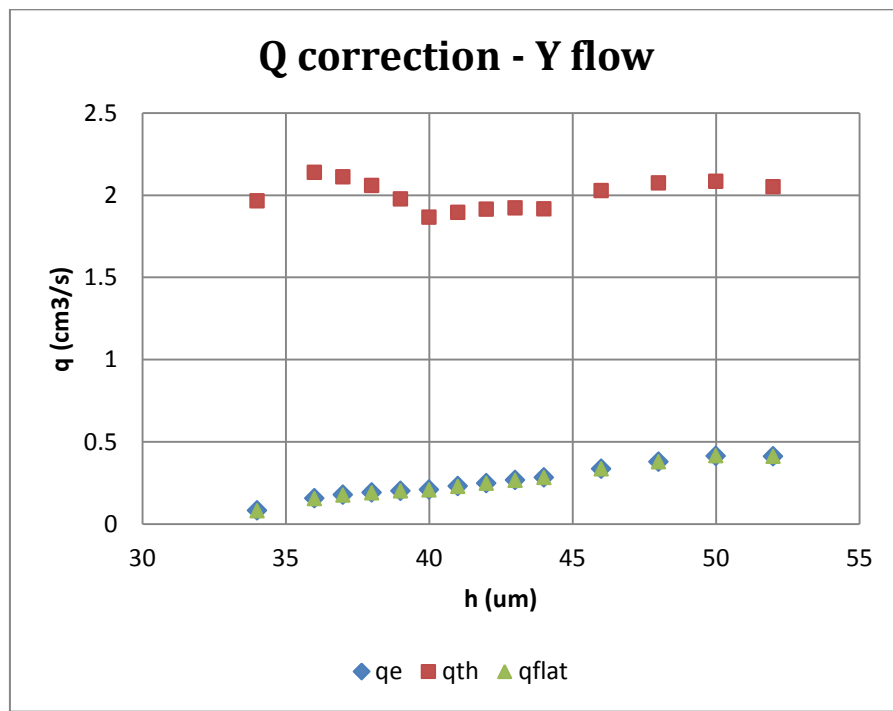
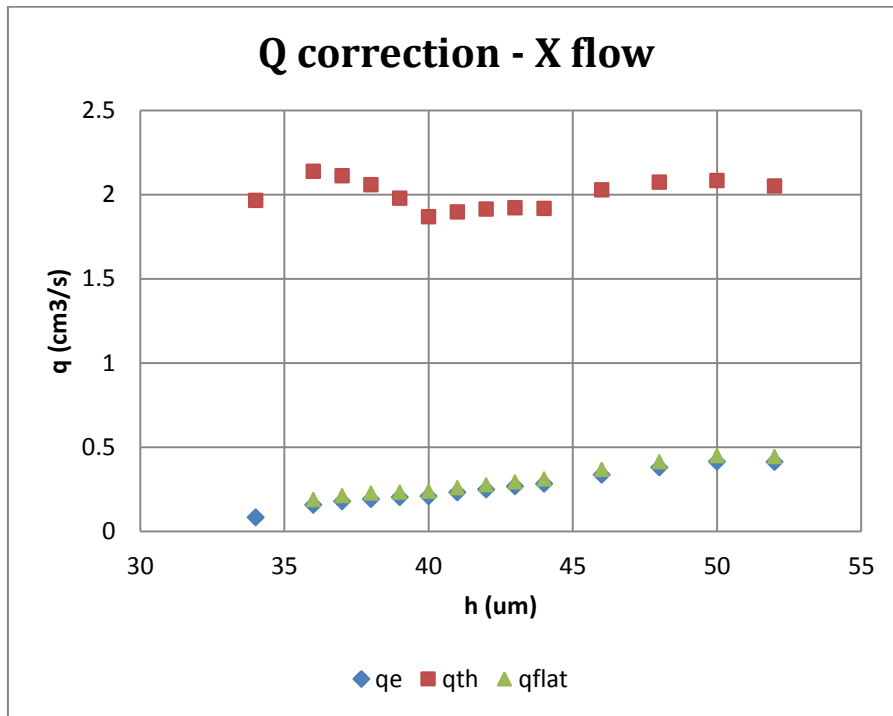


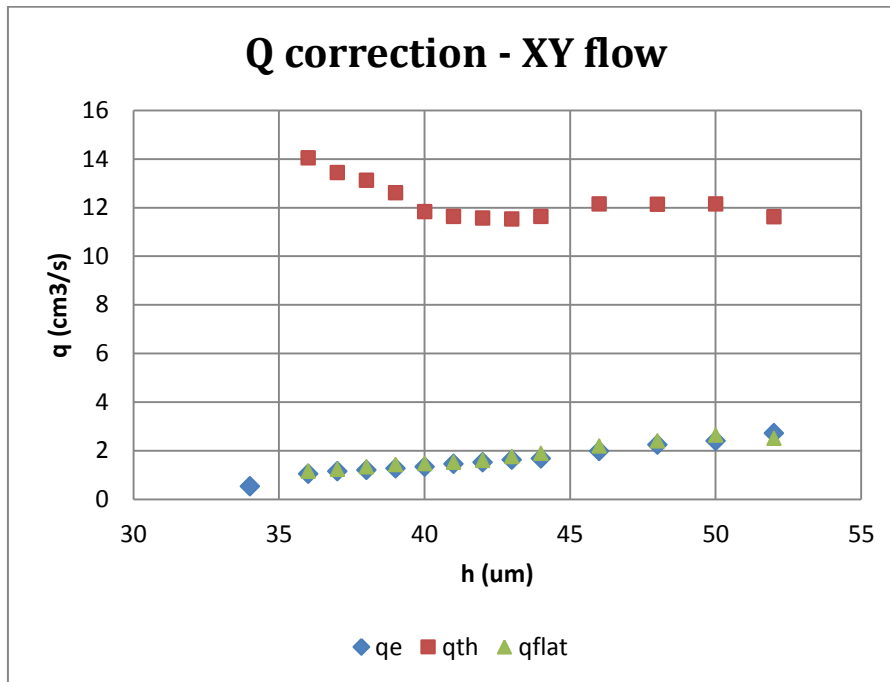
Σχήμα 2.1.2.5: Προσδιορισμός συντελεστή φ_{xy}

Στα διαγράμματα που ακολουθούν συμβολίζεται ως q_{th} η θεωρητική παροχή, αυτή που προκύπτει από την εξίσωση Reynolds για λείες επιφάνειες, ως q_e η παροχή της προσομοίωσης παρουσία τραχύτητας και ως q_{flat} η διορθωμένη παροχή έχοντας πλέον εισάγει τον συντελεστή φ_x στο ιζώδες προσομοίωσης κατά τα άλλα λείων επιφανειών.



Διάγραμμα 2.1.2.2: Σύγκριση συντελεστών φ_x , φ_y , φ_{xy}





(γ)
Διάγραμμα 2.1.2.3: Σύγκριση πειραματικής, θεωρητικής και διορθωμένης παροχής (α) διεύθυνση x, (β) διεύθυνση y, (γ) διεύθυνση xy

Επισημαίνεται ότι στις διορθωμένες παροχές έχει εισαχθεί ανεξαρτήτως διεύθυνσης ροής ο συντελεστής φ_x προκειμένου να αποδειχθεί η καθολική ισχύ του.

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται σαφές λοιπόν ο χαρακτήρας των συντελεστών, καθώς εξαρτώνται μόνο από τα χαρακτηριστικά της τραχύτητας και όχι από τη διεύθυνση της ροής, εφόσον η επιφάνεια είναι ισότροπη. Κατά συνέπεια είναι δυνατή η χρήση τους και στην περίπτωση του συμπλέκτη όπου τα διανύσματα των ταχυτήτων μπορούν να έχουν οποιαδήποτε διεύθυνση. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί στο σημείο αυτό ότι η εξαγωγή των συντελεστών αποτελεί εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία και για τον λόγο αυτό η εξαγωγή θα γίνει για χαρακτηριστικά επιφάνειας όπως θα ληφθούν από μέτρηση και για το πολύ δύο ακόμα παραλλαγές αυτής και όχι για μεγαλύτερο πλήθος περιπτώσεων.

2.2 Μοντελοποίηση στερεών σωμάτων

Η μοντελοποίηση των στερεών σωμάτων δεν απαιτεί κάποια ιδιαίτερη προεργασία σε θεωρητικό επίπεδο. Καθώς τα μοντέλα προσομοίωσης απαρτίζονται από μόνο δύο στερεούς δίσκους ο επιλύτης του ANSYS Structural υπολογίζει κανονικά τα μητρώα ελαστικότητας και αδράνειας των δίσκων θεωρώντας ως εξωτερικά φορτία τα πεδία πίεσης του ρευστού που παρεμβάλλεται. Το αποτέλεσμα των υπολογισμών είναι αφενός καθαρά κινηματικά μεγέθη, δηλαδή οι μετατοπίσεις και η ταχύτητα των δίσκων, και αφετέρου τα πεδία τάσεων επί αυτών. Έτσι, αποκαθίσταται μία αρκετά καλή εικόνα της επίδρασης του ρευστού στους δίσκους και ως εκ τούτου και των σημείων στα οποία αυτοί καταπονούνται περισσότερο, καθώς και το μέγεθος των καταπονήσεων αυτών.

Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην περιστροφική αδράνεια των δίσκων και συγκεκριμένα του παθητικού δίσκου, δηλαδή αυτού που φέρει τις διαμορφώσεις και στον οποίο επιθυμείται να μεταφερθεί η ροπή του κινητήρα (εν προκειμένω η κινηματική κατάσταση του ενεργητικού δίσκου). Εάν η πυκνότητα του παθητικού δίσκου τεθεί ίση με μία τυπική τιμή χάλυβα, δηλαδή περί τα $7800 \frac{kg}{m^3}$, τότε ένας απλός υπολογισμός δίνει για έναν δίσκο διαστάσεων:

$$R_{in} = 37.5mm, R_{out} = 57.5mm, t = 3mm \quad (2.2.1)$$

ροπή αδράνειας περιστροφής ίση με

$$I_z = \frac{\pi \rho t}{2} (R_{out}^4 - R_{in}^4) = 0.00033 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (2.2.2)$$

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό η παραπάνω ροπή αδράνειας δεν είναι σε καμία περίπτωση αντιπροσωπευτική της αδράνειας που καλείται να αντιμετωπίσει ένας κινητήρας. Το φορτίο που «βλέπει» ο κινητήρας εξαρτάται από πολλούς εξωτερικούς παράγοντες του συστήματος, από την κινητική κατάσταση στην οποία ήδη βρίσκεται το σύστημα καθώς και από το κιβώτιο ταχυτήτων. Επομένως, η τιμή αυτή είναι εν γένει άγνωστη. Παρόλα αυτά, επειδή στην παρούσα εργασία ενδιαφέρει η σύγκριση των αποτελεσμάτων για διάφορες παραλλαγές των μορφολογικών χαρακτηριστικών των δίσκων και όχι αυτά καθαυτά τα αποτελέσματα, αρκεί να τεθεί μία τιμή της ροπής αδράνειας που να είναι σχετικά ρεαλιστική. Για το λόγο αυτό, επιλέγεται οι δίσκοι να έχουν ροπή αδράνειας ίση με

$$I_z = 0.001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (2.2.3)$$

Για να επιτευχθεί αυτό υπολογιστικά, εφόσον τα μόνα στοιχεία που μοντελοποιούνται είναι οι δίσκοι και το λιπαντικό φιλμ, αποδίδεται στον παθητικό δίσκο πυκνότητα ικανή να προκαλέσει τη συγκεκριμένη ροπή αδράνειας. Σημειώνεται ότι η αδρανειακή συμπεριφορά της μεταφορικής κίνησης δεν ενδιαφέρει καθώς στον ενεργητικό δίσκο η μεταφορική κίνηση είναι προκαθορισμένη και στον παθητικό τίθεται μηδενική.

Όσον αφορά τις υπόλοιπες παραμέτρους των δίσκων επιλέγονται καταρχάς οι κύριες διαστάσεις της σχέσης (2.2.1) για όλες τις προσομοιώσεις του Κεφαλαίου 6. Στη συνέχεια επιλέγονται οι βασικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν υλικό χάλυβα, δηλαδή μέτρο ελαστικότητας $E = 200 \text{ GPa}$ και λόγο Poisson $\nu = 0.3$. Οι υπόλοιπες παράμετροι προκύπτουν για ισότροπο υλικό από τις δύο πρώτες.

Τέλος, σε ό,τι αφορά τα κινηματικά μεγέθη δύο είναι οι είσοδοι του προβλήματος: Μία περιστροφική και μία μεταφορική ταχύτητα. Η περιστροφική αντιστοιχεί στη διαφορά ταχυτήτων $\Delta\omega$ των δύο δίσκων και λαμβάνει μία τιμή περί τις 1000 rpm (συγκεκριμένα $\Delta\omega = 105 \text{ rad/s}$). Η τιμή αυτή θεωρείται μέγιστη σε ένα φυσικό πρόβλημα αφού, είτε πρόκειται για σύμπλεξη από την πλήρη ακινησία σε μία χαμηλή ταχύτητα όπως είναι η 1^η είτε πρόκειται για μεταβίβαση από μία ανώτερη ταχύτητα σε μία άλλη, η μέγιστη διαφορά περιστροφικών ταχυτήτων δεν αναμένεται να ξεπερνά κατά πολύ μία τέτοια τιμή. Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι η υλοποίηση της απόδοσης περιστροφικής ταχύτητας καθώς και η σωστή αρχικοποίηση αυτής γίνεται μέσω εντολών APDL, καθώς δεν παρέχεται εναλλακτικός τρόπος.

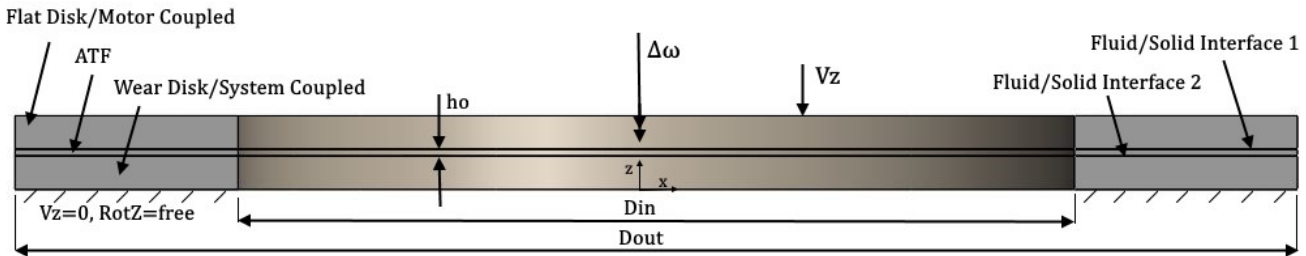
Η μεταφορική ταχύτητα αντιστοιχεί στον χρόνο που χρειάζεται από την στιγμή που ξεκινά η επενέργεια επί το σύστημα των δίσκων μέχρι την πλήρη σύμπλεξη αυτών και εξαρτάται από το αρχικό διάκενο μεταξύ κάθε ζεύγους. Ζητούμενο είναι ο χρόνος αυτός να είναι ο ελάχιστος χωρίς ταλαντωτική συμπεριφορά. Προκειμένου όμως να ελεγχθεί αυτό πρέπει να δοθεί ως είσοδος στο πρόβλημα κάποια δύναμη ή πίεση. Η παρούσα εργασία δεν εξετάζει τον χρόνο σύμπλεξης. Επομένως η ταχύτητα αυτή λαμβάνεται αυθαίρετα τέτοια ώστε να διευκολύνει τους υπολογισμούς υπό ρεαλιστικές συνθήκες. Στην πραγματικότητα ο χρόνος σύμπλεξης αναμένεται να είναι της τάξεως των μερικών δεκάδων ή ίσως λίγων εκατοντάδων ms για ένα καλό σύστημα σύμπλεξης. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το διάστημα από αρχικό διάκενο $h_o = 0.2 \text{ mm}$

μέχρι το διάκενο $h_f = 0.08 \text{ mm}$ σε χρονικό διάστημα $T = 1.2 \text{ ms}$ και επομένως μία ταχύτητα $V_z = 100 \text{ mm/s}$

. Η ταχύτητα αυτή είναι πράγματι μεγάλη, αλλά αφενός διευκολύνει τον συνολικό χρόνο υπολογισμού καθώς απαιτούνται σχετικά λίγα χρονικά βήματα και αφετέρου αποδίδει έντονες συνθήκες στο σύστημα, όπως θα συνέβαινε στα διάκενα κάτω των $100 \mu\text{m}$, χωρίς να προκύπτουν οι δυσκολίες του πλέγματος σε υπερβολικά μικρό διάκενο.

2.3 Σύζευξη επιλυτών – FSI

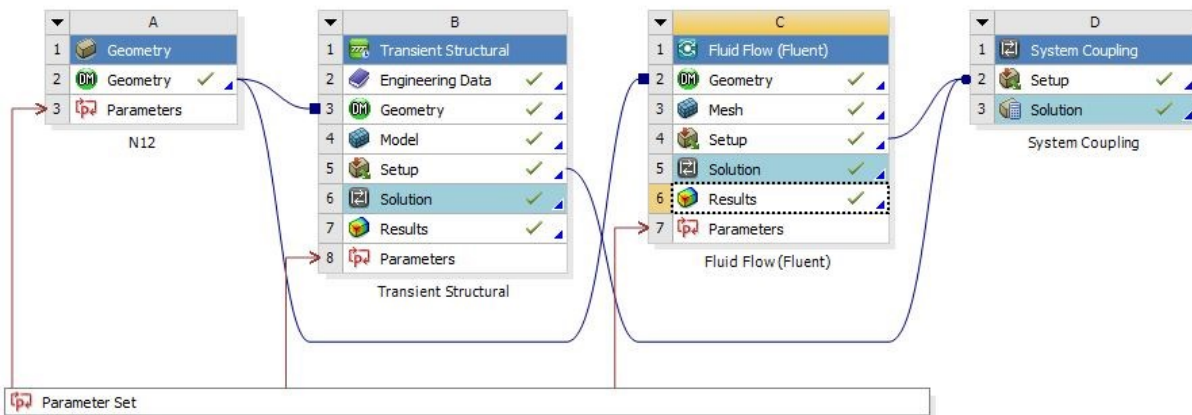
Βασικό χαρακτηριστικό των προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας αποτελεί η σύζευξη των επιλυτών του *Transient Structural* και του *Fluent*. Το συνολικό μοντέλο προς επίλυση για την περίπτωση δύο επίπεδων δίσκων παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3.1. Οι δίσκοι και το ρευστό παρουσιάζονται σε τομή.



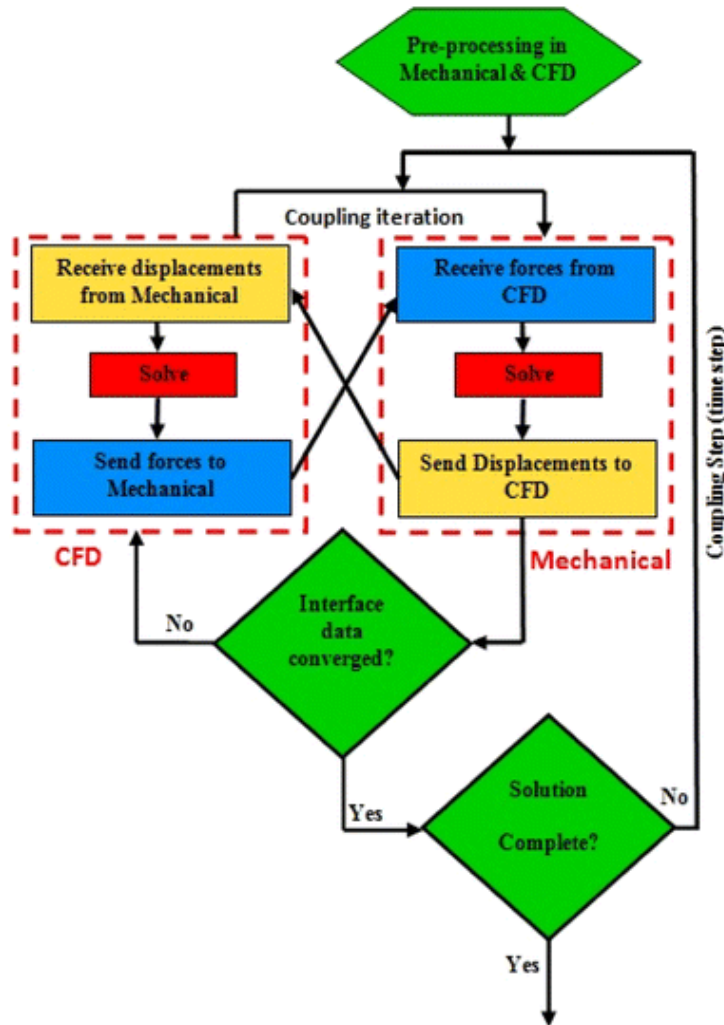
Σχήμα 2.3.1: Σχηματική αναπαράσταση μοντέλων προσομοίωσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ως είσοδοι στο σύστημα δίνονται στον επίπεδο δίσκο περιστροφική ταχύτητα $\Delta\omega$ καθώς και μεταφορική ταχύτητα $V_z = \frac{dh}{dt}$ ίσες για όλα τα μοντέλα προσομοίωσης. Οι δύο στερεοί δίσκοι εισάγονται στο *Structural*, ενώ ο όγκος του ρευστού που παρεμβάλλεται εισάγεται στο *Fluent*. Σημειώνεται επίσης ότι υπό πραγματικές συνθήκες ρευστό υπάρχει και γύρω από τους δίσκους. Στην παρούσα εργασία όμως γίνεται εστίαση στα πεδία πίεσης και ταχύτητας ανάμεσα από τους δίσκους και έτσι η στατική πίεση στα όρια των ακτίνων για το ρευστό τίθεται ίση με $p_{st} = 0$.

Εντός του *Structural* οι επιφάνειες των στερεών με τις οποίες έρχεται σε επαφή το ρευστό και κατά συνέπεια αλληλεπιδρά μαζί τους ορίζονται ως *Fluid Solid Interfaces*. Οι αντίστοιχες επιφάνειες του ρευστού εντός του *Fluent* ορίζονται ως *Coupled Walls*. Τη μεταφορά των δεδομένων μεταξύ των επιλυτών και το συντονισμό τους αναλαμβάνει ένα τρίτο στοιχείο, το λεγόμενο *System Coupling*. Στη σύζευξη των υποσυστημάτων ορίζεται ποιες μεταφορές δεδομένων είναι οι επιθυμητές, με ποια σειρά, τα κριτήρια σύγκλισης αυτών καθώς και ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης και των επιμέρους χρονικών βημάτων που θα είναι κοινός για τα δύο υποσυστήματα. Έτσι, από το στερεό στο ρευστό υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς μετατοπίσεων, ενώ από το ρευστό στο στερεό υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς δυνάμεων. Στην περίπτωση που μόνο μία από τις δύο μεταφορές μοντελοποιείται, τότε πρόκειται για *1-Way FSI Analysis*. Αντίστοιχα, εάν και οι δύο μεταφορές μοντελοποιούνται, τότε πρόκειται για *2-Way FSI Analysis*. Στην παρούσα εργασία γίνονται μεταφορές δεδομένων και από τα δύο υποσυστήματα. Στο Διάγραμμα 2.3.1 παρουσιάζεται ο βασικός αλγόριθμος επίλυσης μίας *2-Way FSI Analysis*, ενώ στο Σχήμα 2.3.2 τα υποσυστήματα που συμμετέχουν σε κάθε μοντέλο προσομοίωσης καθώς και οι απαραίτητες συνδέσεις μεταξύ τους.



Σχήμα 2.3.2: Σύνδεση υποσυστημάτων – FSI Analysis



Διάγραμμα 2.3.1: Αλγόριθμος επίλυσης 2-Way FSI Analysis

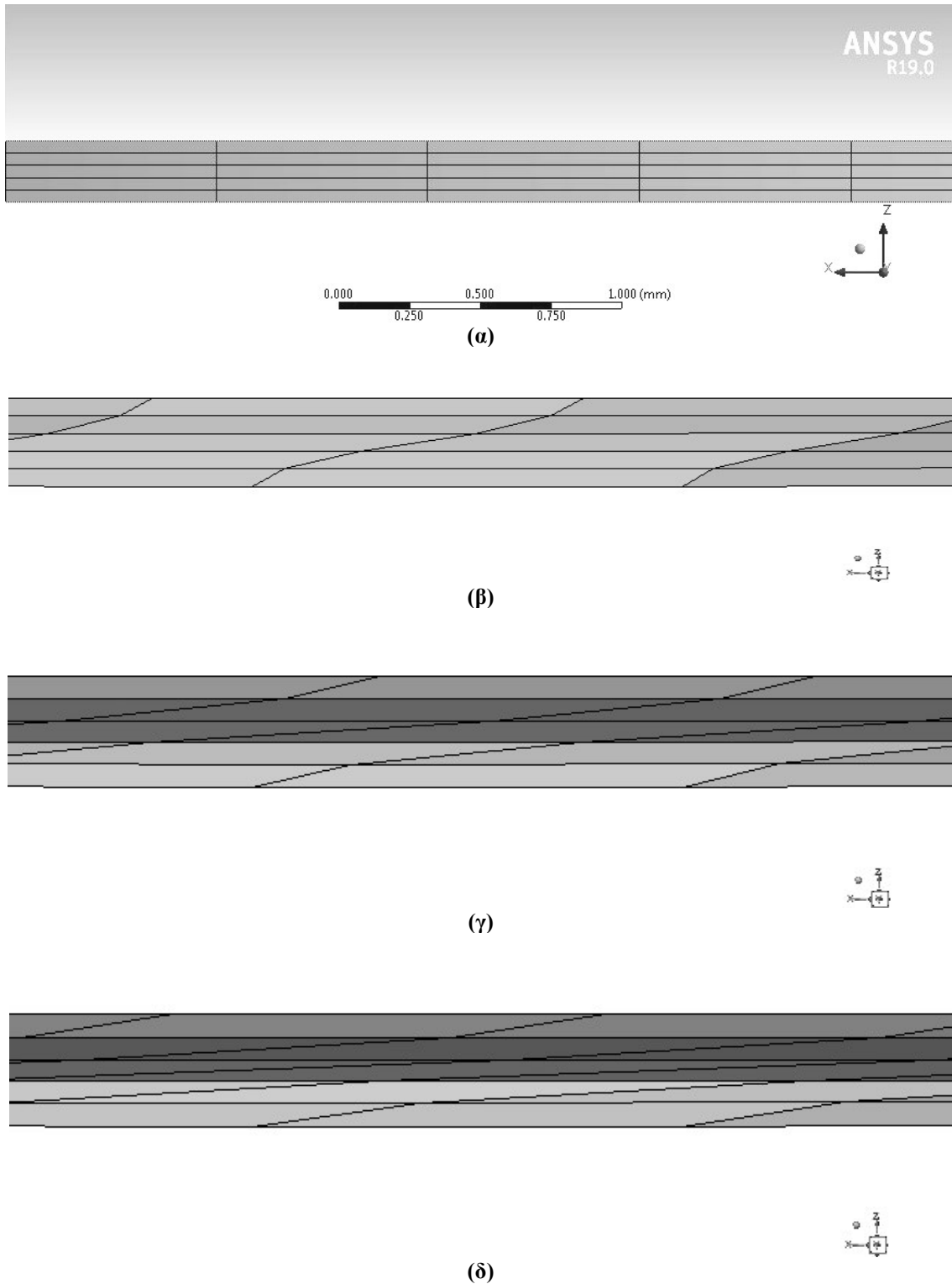
Σημειώνεται ότι η μεταφορά δεδομένων γίνεται μέσω παρεμβολής αυτών στους κόμβους κάθε πλέγματος λαμβάνοντας υπόψη τις συντεταγμένες τους. Επομένως, κάθε σώμα που συμμετέχει στην ανάλυση πρέπει να βρίσκεται στη σωστή θέση και με τον σωστό προσανατολισμό. Επίσης, η ανάλυση είναι δυνατό να ξεκινάει από το Structural και να συνεχίζει με το Fluent ή το ανάποδο. Στην παρούσα εργασία κάθε προσομοίωση δίνει προτεραιότητα στο Structural.

Κύριο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε στην παρούσα εργασία είναι η διαχείριση της παραμόρφωσης του υπολογιστικού πλέγματος του ρευστού. Τα αίτια και τα διαθέσιμα εργαλεία αναφέρονται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα. Μετά από πλήθος προσπαθειών και εναλλακτικών τρόπων μοντελοποίησης δεν βρέθηκε τελικά τρόπος διαχείρισης που ταυτόχρονα να επιτρέπει τη σύζευξη των επιλυτών, να παρέχει σχετική ευελιξία σε μορφολογικές παραλλαγές των δίσκων και να εξασφαλίζει τη λήψη αποτελεσμάτων σε εύλογο χρονικό διάστημα. Για το λόγο αυτό η τακτική που ακολουθήθηκε ήταν αυτή της μοντελοποίησης μόνο εντός του Fluent και της χρήσης του Structural μόνο για την εκτίμηση της ροπής. Περισσότερες λεπτομέρειες αναφέρονται στην ενότητα *Τελική Μοντελοποίηση*.

2.4 Ειδικά θέματα: Διαχείριση πλέγματος

Όπως έχει γίνει ήδη αντιληπτό, το παρόν πρόβλημα χαρακτηρίζεται από δύο βασικούς βαθμούς ελευθερίας κίνησης: τον περιστροφικό και τον μεταφορικό κατά την αξονική διεύθυνση. Οι δύο αυτές συνιστώσες κίνησης αποτελούν συνδιαστικά το αίτιο ανάπτυξης των πεδίων πίεσης και ταχύτητας στο ρευστό, καθώς και το συνεπαγόμενο πεδίο παραμορφώσεων στους στερεούς δίσκους. Κατά τη μοντελοποίηση του συνολικού προβλήματος σε επίπεδο πεπερασμένων στοιχείων, όπου πλέον ο επιλύτης των στερεών (Structural Analysis) έρχεται σε σύζευξη με τον επιλύτη των ρευστών (Fluid Flow Analysis), τα στοιχεία όγκου του ρευστού μετακινούνται όπως ακριβώς ορίζει η κίνηση και η παραμόρφωση των συζευγμένων επιφανειών των στερεών. Κατά συνέπεια λαμβάνουν ισχυρές παραμορφώσεις και στρεβλώσεις, ιδιαίτερα αν ληφθεί υπόψη η

υψηλή περιστροφική ταχύτητα σε συνδιασμό με το μικρό διαστασιολογικά διάκενο μεταξύ των δίσκων. Αποτέλεσμα τέτοιας παραμόρφωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4.1. Έτσι, σε μόλις λίγα χρονικά βήματα οι όγκοι έχουν εκμηδενιστεί και το υπολογιστικό πλέγμα καθίσταται προβληματικό.

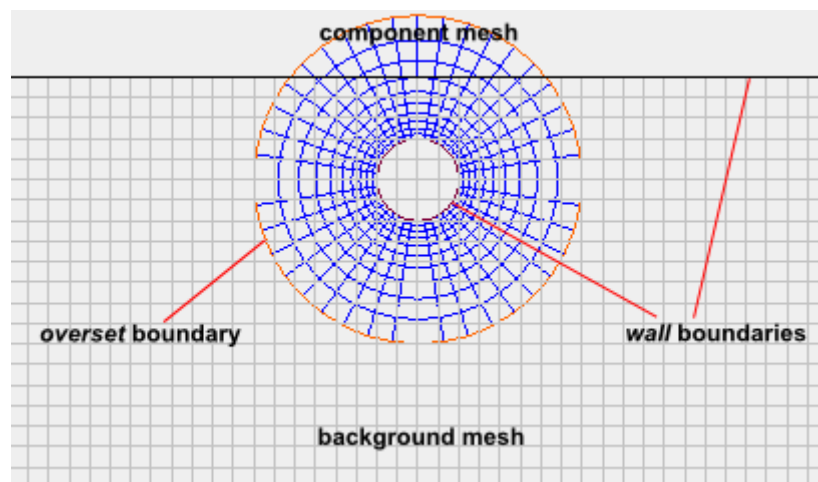


Σχήμα 2.4.1: (α) Αρχικό απαραμόρφωτο πλέγμα (β), (γ), (δ) Πορεία παραμόρφωσης

Όπως διαπιστώθηκε μετά από πλήθος δοκιμών, κανένα από τα διαθέσιμα εργαλεία διαχείρισης τέτοιων παραμορφώσεων δεν ήταν κατάλληλο για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα εργαλεία όπως:

- **Remeshing:** Η πιο απλή και ταυτόχρονα χρονοβόρα επιλογή, δηλαδή η δημιουργία νέου πλέγματος σε κάθε χρονική επανάληψη τηρώντας τις αναλογίες του αρχικού ή κάποιες επιθυμητές διαστάσεις, είναι λειτουργική εν γένει αποκλειστικά για τετράεδρα στοιχεία. Ενώ εντός του Fluent η μέθοδος αυτή λειτουργεί, κατά τη σύζευξη με το Structural φαίνεται να εμποδίζεται από τη «δέσμευση» των συνοριακών κόμβων και αποτυγχάνει.
- **Deforming:** Πολλές παραλλαγές για τον τρόπο παραμόρφωσης των στοιχείων είναι διαθέσιμες, αλλά αποτελούν μόνο προσωρινή λύση καθώς σύντομα το πλέγμα καταλήγει στην κατάσταση του Σχήματος 2.4.1(δ).
- **Sliding Mesh:** Παρουσία διεπιφανειών (interfaces) είναι δυνατή η ολίσθηση ενός χωρίου ως προς το άλλο αποφεύγοντας οποιαδήποτε παραμόρφωση. Η μεθοδολογία αυτή όμως διαθέτει ως προϋπόθεση αφενός την άκαμπτη μετακίνηση των συνόρων (rigid motion) και αφετέρου την κίνηση μόνο κατά μήκος των συνόρων και όχι εγκάρσια ως προς αυτά. Κατά συνέπεια είναι λειτουργική μόνο παρουσία άκαμπτων σωμάτων ή για περιπτώσεις μετακίνησης πλέγματος (moving mesh). Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι η FSI μεθοδολογία δεν συνάδει με τη θεώρηση των στερεών ως άκαμπτα, αφού κάτι τέτοιο αναιρεί τον τρόπο μεταφοράς των δεδομένων (απαραίτητο το πεδίο παραμορφώσεων).
- **Overset Mesh:** Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί και την πιο πρόσφατη προσθήκη στην εργαλειοθήκη του ANSYS (υπάρχει από την έκδοση του 18 και έπειτα) και αποτελεί άλλον έναν τρόπο διαχείρισης δύσκολων προβλημάτων αποφεύγοντας τις παραμορφώσεις του πλέγματος. Ωστόσο, το υπολογιστικό της κόστος είναι πολύ μεγαλύτερο έναντι των υπολοίπων και απαγορευτικό για το παρόν πρόβλημα. Λόγω του ενδιαφέροντος που παρουσιάζει περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω.

Στο Σχήμα 2.4.2 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία ενός Overset Mesh, όπως επιλέγει η ίδια η ANSYS να τα απεικονίσει στα εγχειρίδιά της.



Σχήμα 2.4.2: Overset Meshing Methodology

Το αντικείμενο ενδιαφέροντος, για παράδειγμα εδώ ο κυκλικός δίσκος στο κέντρο της εικόνας, περιβάλλεται από επαρκώς πυκνό πλέγμα (component mesh) το οποίο μπορεί να κινείται μαζί με το αντικείμενο ενδιαφέροντος χωρίς απαραίτητα να παραμορφώνεται. Ταυτόχρονα, ένα άλλο ανεξάρτητο, απαραμόρφωτο και σταθερό στον χώρο πλέγμα (background mesh) καθίσταται υπεύθυνο για την αποθήκευση των υπολογιστικών δεδομένων κάθε στιγμή καθώς και για τους νέους υπολογισμούς σε κάθε χρονικό βήμα εξασφαλίζοντας τη συνέχεια μεταξύ των αποτελεσμάτων. Η επικοινωνία μεταξύ των δύο πλεγμάτων γίνεται σε κάθε χρονικό βήμα μέσω παρεμβολής των πεπερασμένων όγκων που αλληλοεπικαλύπτονται ενώ παράλληλα παρεμβάλλονται και τα δεδομένα που φέρουν. Σημειώνεται επίσης ότι περισσότερα του ενός αντικείμενα (components) μπορούν να εισαχθούν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο.

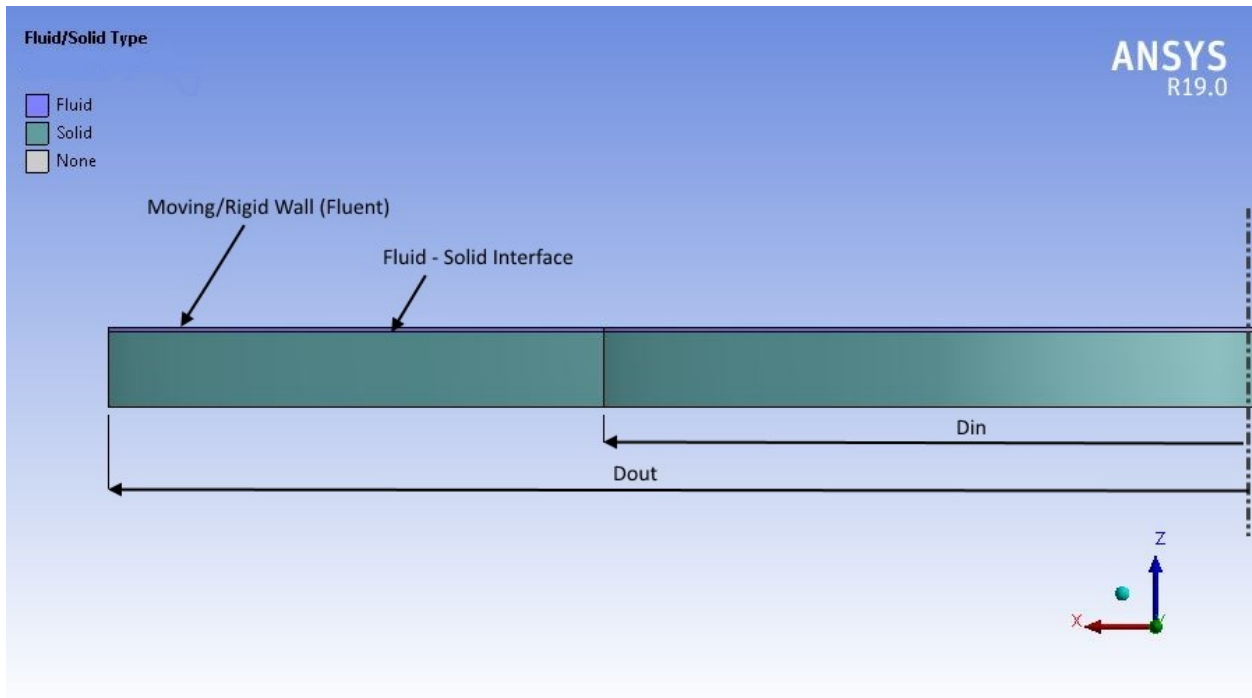
Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η παραμόρφωση των στοιχείων, όμως υπεισέρχεται ένα νέο πρόβλημα, αυτό του υπολογιστικού κόστους καθώς πλέον ο συνολικός αριθμός των κελιών αυξάνεται σημαντικά. Ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου εισάγει τον περιορισμό ύπαρξης τουλάχιστον τεσσάρων κελιών

μεταξύ του αντικειμένου και του overset ορίου προκειμένου να διασφαλιστεί η επιτυχής επικοινωνία με το σταθερό πλέγμα, ενώ συνίσταται η χρήση περισσότερων των τεσσάρων κελιών. Επιπρόσθετα επιζητείται παρόμοια ακρίβεια μεταξύ των στοιχείων του component και του background. Τα παραπάνω λαμβάνοντας υπόψη και το αρχικό διάκενο μεταξύ των δίσκων διάστασης μικρότερης του 1 mm, καθιστούν αναγκαία τη δημιουργία εξαιρετικά μικρών στοιχείων καθόλη τη διάμετρο των δίσκων οδηγώντας σε ένα υπερογκώδες και πρακτικά μη διαχειρίσιμο υπολογιστικό πλέγμα. Ένας πρόχειρος υπολογισμός θεωρώντας ωφέλιμη απόσταση από τα τοιχώματα του δίσκου 0.1 mm και πλήθος στοιχείων 5, οδηγεί σε μία διάσταση κελιού 0,02 mm. Η διάσταση αυτή καλείται να καλύψει μία επιφάνεια διαμέτρου $D=115$ mm επί τουλάχιστον 4 φορές (δύο επιφάνειες για κάθε δίσκο θεωρώντας την πιο απλή περίπτωση των δύο δίσκων) αγνοώντας την περιμετρική επιφάνεια. Το αποτέλεσμα δίνει μόνο για τις επιφάνειες των δίσκων ένα πλήθος περί των 2.077.378 στοιχείων. Το νούμερο αυτό πρέπει στη συνέχεια να πολλαπλασιαστεί επί 5 (θεωρήθηκαν 5 στοιχεία σε κάθε περιθώριο) και το αποτέλεσμα περιγράφει μόνο τα στοιχεία των components. Το background mesh πρέπει να διαθέτει παρόμοια ακρίβειας στοιχεία καθόλο το μήκος του.

Με αφορμή τα παραπάνω έγινε αναζήτηση τρόπου μείωσης του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων. Μεθοδολογίες τύπου Sweep/Multizone και με κατάλληλη προεπεξεργασία των γεωμετριών βελτιώνουν σημαντικά το πλήθος των στοιχείων. Επιπλέον, έγινε προσπάθεια μείωσης των διαστάσεων του προβλήματος μέσω της ομοιότητας, όπως αναλύεται στην επόμενη ενότητα. Παρά τις προσπάθειες διαχείρισης της κατάστασης, ένα μοντέλο 4 φορές μικρότερο του αρχικού με ύπαρξη εσωτερικής διαμέτρου όπως στο Σχήμα 2.3.1 και μεθοδολογίες πλεγματοποίησης που οριοθετούν την πολύ μικρή διάσταση κελιών μόνο στις ζητούμενες διαστάσεις, το συνολικό πλήθος στοιχείων ξεπερνούσε κατά πολύ τα 3.500.000 στοιχεία.

2.5 Τελική μοντελοποίηση

Η δυσκολία πλεγματοποίησης και αντιμετώπισης των σχετικών παραμορφώσεων αποτέλεσε ίσως και το κυριότερο πρόβλημα στη μοντελοποίηση του φαινομένου. Ο συνδυασμός της περιστροφής με την συμπίεση προκαλεί αδυναμία στη χρήση ενός και μόνο εργαλείου αντιμετώπισης, ενώ για τα πιο γενικά εργαλεία (remeshing) η απαίτηση τετράεδρων στοιχείων καθιστά αδύνατη τη πλεγματοποίηση του χωρίου ρευστού λόγω διαστάσεων. Τελικά, προκειμένου να απλοποιηθεί το πρόβλημα και εφόσον πρόκειται μόνο για δύο δίσκους και το ενδιάμεσο χωρίο, η περιστροφική κίνηση του άνω δίσκου αντικαταστάθηκε από κίνηση του ίδιου του συστήματος αναφοράς εντός του Fluent (frame motion). Επιπλέον, οι δίσκοι λαμβάνονται πλέον ως *άκαμπτοι* και επομένως ο άνω δίσκος που είναι και ο κινητήριος δεν έχει λόγο μοντελοποίησης εντός του Structural. Για αυτό, μοντελοποιείται ως *άκαμπτο τοίχωμα* εντός του Fluent με *μηδενική σχετική ταχύτητα* ως προς το γεινιάζον χωρίο (επομένως το τοίχωμα στρέφεται και αυτό στο απόλυτο σύστημα αναφοράς) και με αποδιδόμενη ταχύτητα συμπίεσης μέσω εξωτερικών εντολών UDF. Όσον αφορά τον δεύτερο δίσκο (τον παθητικό), αυτός τελικά μοντελοποιείται στο Structural προκειμένου να εκτιμηθεί σωστά η αποδιδόμενη ροπή σε αυτόν. Επομένως, η οριακή συνθήκη που τον χαρακτηρίζει εντός του Fluent είναι αυτή του συζευγμένου τοιχώματος (system coupling wall) με ορισμό ως προς το απόλυτο σύστημα αναφοράς, δεδομένου ότι τα αποτελέσματα και οι είσοδοι του Structural είναι ως προς το απόλυτο σύστημα αναφοράς. Στο Σχήμα 2.5.1 παρουσιάζεται η νέα και τελική εκδοχή του Σχήματος 2.3.1 ενώ στον Πίνακα 2.5.1 παρουσιάζονται οι συνοριακές συνθήκες ανά επιφάνεια εντός των Fluent και Structural.



Σχήμα 2.5.1: Τελική μοντελοποίηση ρευστού/στερεού

Πίνακας 2.5.1: Οριακές συνθήκες επιφανειών Fluent/Structural

Fluent		Οριακή Συνθήκη
Τοποθεσία	Ονομασία	
Συνολικό Χωρίο	fluid	Frame Motion around Z-Axis: 105rad/s
Άνω Επιφάνεια	wall_up	Wall – Rigid Body Motion (UDF) Relative to Adjacent Cell Zone: Rotation: 0, Z-Movement: 100mm/s
Κάτω Επιφάνεια	wall_down	Wall – System Coupling Absolute Frame
Εσωτερική Ακτίνα	outlet_in	Pressure Outlet (0 Pa)
Εξωτερική Ακτίνα	outlet_out	Pressure Outlet (0 Pa)
Structural		Οριακή Συνθήκη
Τοποθεσία	Ονομασία	
Άνω Επιφάνεια	wall_fluid	Fluid – Structure Interaction Z-Displacement: 0

Οι παραπάνω συνθήκες εφαρμόζονται ίδιες σε όλες τις γεωμετρίες ανεξαρτήτως των διαμορφώσεων που φέρουν. Επιπλέον, φαίνεται από την οριακή συνθήκη στο συνορεύον τοίχωμα του Structural ότι δεν επιτρέπεται η παραμόρφωση κατά την αξονική διεύθυνση. Αυτό γίνεται για λόγους απλοποίησης και επιτάχυνσης της σύγκλισης της λύσης. Η ύπαρξη αυτής της οριακής καθιστά τη συμπεριφορά του δίσκου άκαμπτη, τουλάχιστον ως προς τα καμπτικά φορτία, και είναι ο λόγος που δεν λαμβάνονται αποτελέσματα τάσεων – παραμορφώσεων στο στερεό ως αξιόπιστα για εξαγωγή συμπερασμάτων. Τονίζεται, λοιπόν, ότι η ύπαρξη του στερεού και η σύζευξή του με το ρευστό σε επίπεδο μοντελοποίησης γίνεται *μόνο* για την εκτίμηση της αναπτυσσόμενης ροπής σε αυτό. Η τελευταία γίνεται μέσω της αναπτυσσόμενης γωνιακής ταχύτητας του δίσκου η οποία μετράται από την περιφερειακή ταχύτητά του σε κάθε χρονικό βήμα στη μεγαλύτερη διάμετρο (Dout). Επομένως, η ροπή προκύπτει από την ακόλουθη σειρά σχέσεων

$$\omega_i = \frac{2\sqrt{V_{x,i}^2 + V_{y,i}^2}}{D_{out}} \quad (2.5.1)$$

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_i = \frac{\omega_i - \omega_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (2.5.2)$$

$$T_i = I_z \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_i \quad (2.5.3)$$

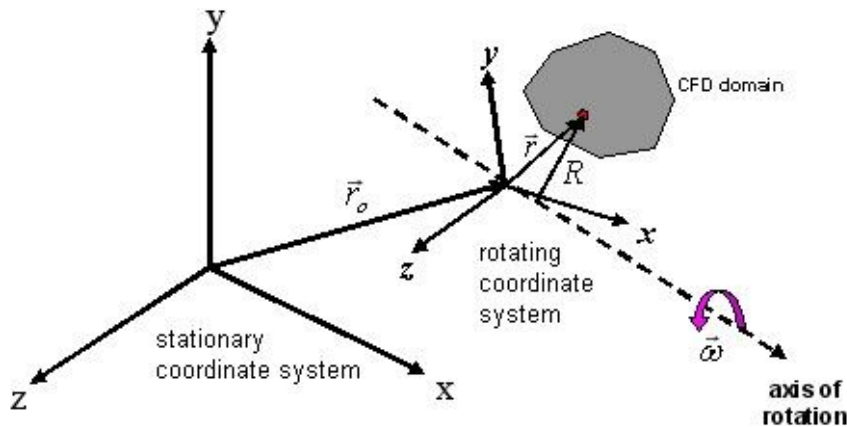
όπου

i : αναφέρεται στο συγκεκριμένο χρονικό βήμα

I_z : η ροπή αδράνειας όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα

T_i : η αναπτυσσόμενη ροπή στο δίσκο από δυνάμεις ιξώδους και πίεσης (στην περίπτωση ύπαρξης διαμορφώσεων)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σχέσεις επίλυσης δεδομένης της ύπαρξης περιστρεφόμενου συστήματος αναφοράς. Στο Σχήμα 2.5.2 παρουσιάζεται το περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς ως προς το απόλυτο (αδρανειακό) σύστημα.



Σχήμα 2.5.2: Περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς

Οι σχέσεις επίλυσης ως προς το απόλυτο σύστημα αναφοράς διατυπώνονται πλέον ως εξής

Διατήρηση μάζας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u}_r = 0 \quad (2.5.4)$$

Διατήρηση ορμής:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{u}_r + \nabla \cdot (\rho \vec{u}_r \vec{u}_r) = \rho \vec{f} + \nabla \cdot \vec{\tau} + \vec{F} \quad (2.5.5)$$

Διατήρηση ενέργειας:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho E + \nabla \cdot (\rho \vec{u}_r E) = \rho \vec{u}_r \cdot \vec{f} + \nabla \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{u}_r) + \dot{q} \quad (2.5.6)$$

όπου πλέον εμφανίζονται και οι όροι επιτάχυνσης Coriolis και κεντρομόλου μέσω του εξωτερικού γινομένου $\vec{\omega} \times \vec{r}$. Περαιτέρω διευκρινίσεις για τους παραπάνω όρους μπορούν να βρεθούν στο σχετικό εγχειρίδιο του ANSYS (Fluent Theory Guide).

Με τη μέθοδο αυτή αποφεύγεται η παραμόρφωση του πλέγματος λόγω περιστροφής και μένει να αντιμετωπιστεί μόνο η παραμόρφωση λόγω συμπίεσης. Το τελευταίο είναι εύκολο ζήτημα, εφόσον το χωρίο αποτελείται από εξάεδρα στοιχεία, μέσω της δυνατότητας *layering* που παρέχεται από το *Dynamic Mesh* εντός του Fluent. Δοσμένου του επιθυμητού ύψους κάθε στρώσης κελιών ή των επιθυμητών αναλογιών τους, τα κελιά είτε συνενώνονται όταν συμπιέζονται επαρκώς είτε διασπώνται στην αντίθετη περίπτωση. Έτσι με την

πάροδο του χρόνου και καθώς η συμπίεση αυξάνεται, μειώνεται το πλήθος των διαμερίσεων κατά την έννοια του πάχους χωρίς περαιτέρω παραμορφώσεις ή στρεβλώσεις, ενώ οι καταστατικές τιμές του ρευστού παρεμβάλλονται και τελικά διατηρούνται.

Είναι σαφές ωστόσο ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για σταθερή ταχύτητα περιστροφής και μόνο για δύο δίσκους – και κατά συνέπεια ένα χωρίο ρευστού. Στην περίπτωση του πολύδισκου συμπλέκτη, που ήταν και ο αρχικός στόχος της εργασίας, οι ενδιάμεσοι δίσκοι αποκτούν περιστροφική ταχύτητα ανάλογα με τις αδρανειακές τους ιδιότητες και την αναπτυσσόμενη ροπή σε αυτούς. Επομένως, ακόμη και αν οριστεί frame motion αλλά τα όρια του ρευστού είναι συζευγμένα με στερεούς δίσκους ορισμένους στο απόλυτο σύστημα αναφοράς, οι περιστροφικές παραμορφώσεις θα εμφανιστούν και πάλι. Εάν από την άλλη η επίλυση γίνει χωρίς την παρουσία στερεών δίσκων (με την έννοια του FSI), τότε δεν θα είναι γνωστή η πραγματική κινητική κατάσταση των δίσκων.

3

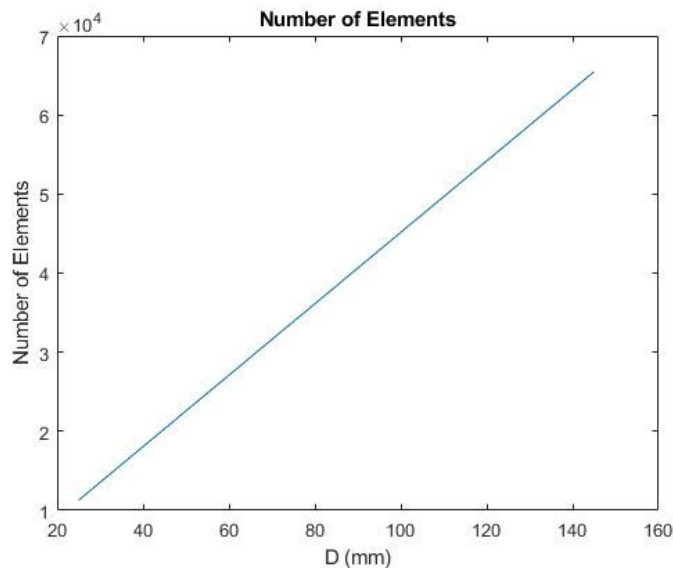
Ομοιότητα

3.1 Ανάγκη χρήσης

Από το τέλος της προηγούμενης ενότητας έγινε φανερό το τεράστιο υπολογιστικό κόστος που υπεισέρχεται στο πρόβλημα λόγω της αναπόφευκτα υψηλής ακρίβειας των στοιχείων του πλέγματος. Η γεωμετρία του προβλήματος δεν επιτρέπει τη χρήση τεχνασμάτων ώστε τουλάχιστον κατά την ακτινική διεύθυνση τα στοιχεία του πλέγματος να είναι μεγαλύτερης διάστασης. Παράλληλα, δεν είναι δυνατή και η αξιοποίηση συμμετριών, ιδιαίτερα αφότου εισαχθούν μορφολογικά χαρακτηριστικά επί των δίσκων.

Μία ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα μπορεί να δοθεί μέσω της λεγόμενης *ομοιότητας* ή της *αδιαστατοποίησης* των παραμέτρων. Μέσω της αλλαγής των καθολικών διαστάσεων της γεωμετρίας του προβλήματος με νόμους που ορίζει η ομοιότητα είναι δυνατή η μείωση του πλήθους των πεπερασμένων στοιχείων χωρίς απώλεια ακρίβειας, αφού σε κάθε περίπτωση τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι αναγκαστικά πολύ μικρά. Επομένως, δεν υφίσταται πρόβλημα αδυναμίας της προσέγγισης κάποιου χαρακτηριστικού λόγω μεγέθους. Τέλος σημειώνεται ότι ενώ ενδέχεται να προκύψουν σφάλματα αριθμητικής φύσης λόγω της αδιαστατοποίησης, δεν λαμβάνονται σοβαρά υπόψη αφού δεν ενδιαφέρει το ακριβές αποτέλεσμα κάθε προσομοίωσης αλλά η *σύγκριση* αυτού με τα υπόλοιπα σε *περιβάλλον ρεαλιστικών συνθηκών*.

Στο Διάγραμμα 3.1.1 παρουσιάζεται η εξάρτηση του πλήθους των στοιχείων του πλέγματος από την κύρια διάσταση του προβλήματος, δηλαδή τη διάμετρο των δίσκων. Ο υπολογισμός γίνεται ενδεικτικά θεωρώντας διαμέριση του διακένου μεταξύ των δίσκων σε πέντε ίσα διαστήματα. Το αποτέλεσμα της διαμέρισης αυτής λαμβάνεται ως ενδεικτικό μέγεθος της διάστασης κάθε στοιχείου και στη συνέχεια υπολογίζεται το πλήθος των απαιτούμενων στοιχείων για την κάλυψη ενός προσώπου του δίσκου. Το αποτέλεσμα φανερώνει γραμμική εξάρτηση του πλήθους των στοιχείων από τη διάμετρο, γεγονός που αναμενόταν καθώς ενώ το διάκενο μεταβάλλεται γραμμικά με τη διάμετρο, όπως θα φανεί στη συνέχεια από τους λόγους ομοιότητας, το εμβαδόν των δίσκων μεταβάλλεται με το τετράγωνο της διαμέτρου.



Διάγραμμα 3.1.1: Εξάρτηση πλήθους στοιχείων από τη διάμετρο των δίσκων

3.2 Εισαγωγικές έννοιες

Η αρχή της ομοιότητας, όπως φανερώνει και το όνομά της, βασίζεται στην εξαγωγή συμπερασμάτων για κάποια μεταβλητά μεγέθη ενδιαφέροντος σε κάποιο μοντέλο εφαρμόζοντας τις συνθήκες που το διεγείρουν όχι όμως στο ίδιο, αλλά σε ένα όμοιό του. Η ομοιότητα αυτή είναι συνήθως γεωμετρική αλλά όχι αποκλειστικά, αφού οι παράμετροι που υπεισέρχονται σε ένα φυσικό φαινόμενο είναι ποικίλοι και οι λόγοι που τους ομαδοποιούν προέρχονται μέσα από τη διαδικασία της αδιαστατοποίησης. Η ομοιότητα βρίσκει κύρια εφαρμογή στο πεδίο της ρευστομηχανικής ιδιαίτερα σε ζητήματα αεροδυναμικής συμπεριφοράς όπου για παράδειγμα η συμπεριφορά μιας αεροτομής ή ενός κτηρίου σε ένα πεδίο ροής εξετάζεται σε πολύ μικρότερο του πραγματικού μεγέθους εργαστηριακά.

Υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες αδιαστατοποίησης [16]. Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση της μεθόδου π του Buckingham και επαλήθευσή της μέσω των διαφορικών εξισώσεων για την περίπτωση των ρευστών, ενώ για την περίπτωση των στερεών η ομοιότητα εξασφαλίζεται μέσω των δύο βασικών απαιτήσεων αδράνειας και παραμόρφωσης, όπως θα αναλυθεί στη σχετική παράγραφο. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται τελικά η εύρεση εκείνων των λόγων ομοιότητας οι οποίοι εφόσον διατηρηθούν ίδιοι εξασφαλίζουν πεδία πίεσης και ταχύτητας για το ρευστό και παραμόρφωσης για το στερεό όμοια μεταξύ των κατά τα άλλα διαφορετικών μοντέλων.

3.3 Ομοιότητα στα ρευστά

3.3.1 Μέθοδος π του Buckingham

Για την εφαρμογή της μεθόδου π του Buckingham απαιτείται καταρχάς η εύρεση των παραμέτρων εκείνων που επηρεάζουν και καθορίζουν πλήρως το πρόβλημα προς εξέταση. Αυτές οι παράμετροι για την απλή περίπτωση δύο δίσκων διαμέτρου D αγνοώντας για αρχή την επίδραση του διακένου με το κέλυφος του συμπλέκτη μπορούν να είναι οι παρακάτω:

$Q_1 = h$: Το αρχικό διάκενο μεταξύ των δύο δίσκων

$Q_2 = R = D/2$: Η ακτίνα κάθε δίσκου

$Q_3 = T$: Ο χρόνος που απαιτείται για να κλείσει πλήρως το διάκενο

$Q_4 = P_o$: Η εξωτερική πίεση (στα όρια των δίσκων)

$Q_5 = \eta$: Το ιξώδες του ρευστού

$Q_6 = \rho$: Η πυκνότητα του ρευστού

$Q_7 = \omega \cdot h$: Το γινόμενο της γωνιακής ταχύτητας με το διάκενο των δίσκων

$Q_8 = \omega \cdot R$: Το γινόμενο της γωνιακής ταχύτητας με την ακτίνα των δίσκων

Οι τελευταίες δύο παράμετροι διατυπώνονται με αυτόν τον τρόπο για λόγους που θα γίνουν σαφέστεροι με την επόμενη μεθοδολογία. Σε κάθε περίπτωση δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και για το λόγο αυτό αναμένεται το πλήθος των εξαγόμενων λόγων ομοιότητας να μην είναι το ελάχιστο.

Στη συνέχεια κατασκευάζεται ο πίνακας διαστάσεων των παραμέτρων. Οι στήλες M, L, T αντιστοιχούν στα θεμελιώδη μεγέθη της διαστατικής ανάλυσης, δηλαδή την μάζα, το μήκος και τον χρόνο αντίστοιχα. Για κάθε παράμετρο σημειώνεται η δύναμη στην οποία είναι υψωμένη η αντίστοιχη μονάδα μέτρησης προκειμένου να προκύψει το γινόμενο των θεμελιωδών μεγεθών που περιγράφει τη διάσταση της παραμέτρου.

Πίνακας 3.3.1.1: Πίνακας διαστάσεων των παραμέτρων

	M	L	T
$Q_1 = h [m]$	0	1	0
$Q_2 = R [m]$	0	1	0
$Q_3 = T [s]$	0	0	1
$Q_4 = P_o [kg/m \cdot s^2]$	1	-1	-2
$Q_5 = \eta [kg/m \cdot s]$	1	-1	-1
$Q_6 = \rho [kg/m^3]$	1	-3	0
$Q_7 = \omega \cdot h [m/s]$	0	1	-1
$Q_8 = \omega R [m/s]$	0	1	-1

Ο πίνακας των διαστάσεων είναι τρίτου βαθμού και κατά συνέπεια από το θεώρημα του Buckingham προκύπτει ότι οι αδιάστατες παράμετροι θα είναι ο αριθμός των χαρακτηριστικών παραμέτρων του προβλήματος μείον τον βαθμό του πίνακα διαστάσεων, δηλαδή $8 - 3 = 5$ αδιάστατες παράμετροι. Για την εύρεση αυτών επιλύεται το σύστημα των εκθετών k_i όπως ορίζει η μέθοδος και επιλέγεται το μέγιστο των ανεξάρτητων εναλλακτικών λύσεων για τους ελεύθερους εκθέτες. Επομένως

$$\left\{ \begin{array}{l} k_4 + k_5 + k_6 = 0 \\ k_1 + k_2 - k_4 - k_5 - 3k_6 + k_7 + k_8 = 0 \\ k_3 - 2k_4 - k_5 - k_7 - k_8 = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k_4 = -k_5 - k_6 \\ k_1 + k_2 - 2k_6 + k_7 + k_8 = 0 \\ k_3 + k_5 + 2k_6 - k_7 - k_8 = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k_4 = -k_5 - k_6 \\ k_1 = -k_2 + 2k_6 - k_7 - k_8 \\ k_3 = -k_5 - 2k_6 + k_7 + k_8 \end{array} \right\} \quad (3.3.1.1)$$

Στον Πίνακα 3.3.1.2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα και οι τελικές αδιάστατες παράμετροι. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό η παράμετρος Π_5 δεν είναι άλλη παρά το γινόμενο των Π_1 και Π_4 . Επομένως δεν είναι ανεξάρτητη. Αυτό είναι αποτέλεσμα των δύο παραμέτρων Q_7 και Q_8 .

Πίνακας 3.3.1.2: Εκλογή αδιάστατων παραμέτρων

i	k_2	k_5	k_6	k_7	k_8	k_1	k_3	k_4	Π_i
1	-1	0	0	0	0	1	0	0	h/R
2	0	1	0	0	0	0	-1	-1	η/P_oT
3	0	0	1	0	0	2	-2	-1	$\rho h^2/P_oT^2$
4	0	0	0	-1	0	1	-1	0	$1/\omega T$
5	0	0	0	0	-1	1	-1	0	$h/\omega RT$

Για την περίπτωση που οι δίσκοι διαθέτουν και εσωτερική διάμετρο $R_m \neq 0$ καθώς και διάκενο d με το κέλυφος του συμπλέκτη προκύπτει εύκολα από την παραπάνω μέθοδο ότι θα εισαχθούν δύο νέες αδιάστατες παράμετροι, από μία για κάθε νέο μέγεθος υποχρεωτικά αδιαστατοποιημένη με ένα εκ των μεγεθών με μονάδα μέτρησης το μήκος, δηλαδή είτε το διάκενο h είτε την εξωτερική ακτίνα R . Όποιος συνδυασμός και αν επιλεγεί το αποτέλεσμα θα είναι μία γραμμική εξάρτηση από την εξωτερική ακτίνα R . Επομένως κάθε νέο χαρακτηριστικό που αφορά διάσταση είναι ευθέως ανάλογο της εξωτερικής διαμέτρου και ως εκ τούτου η συνολική γεωμετρία αρκεί να μεγεθύνεται ή να σμικρύνεται ολόκληρη με τον ίδιο συντελεστή αναλογίας.

3.3.2 Αδιαστατοποίηση διαφορικών εξισώσεων

Δεδομένου ότι ο επιλύτης του ANSYS διαχειρίζεται τις εξισώσεις *Navier – Stokes* σε τρεις διαστάσεις και σε καρτεσιανές συντεταγμένες, και όχι την απλοποιημένη εξίσωση του *Reynolds* που έχει προαναφερθεί, η αδιαστατοποίηση οφείλει να γίνει στις *N-S* καθώς και στην εξίσωση της συνέχειας. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν το παρακάτω σύστημα διαφορικών.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1) \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\eta}{\rho} \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right\} \quad (2) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\eta}{\rho} \left\{ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right\} \quad (3) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho} \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right\} \quad (4) \end{array} \right. \quad (3.3.2.1)$$

Στο παραπάνω σύστημα η ροή έχει ληφθεί ως χρονικά μεταβαλλόμενη και ασυμπίεστη με σταθερό ιξώδες. Ως (u, v, w) συμβολίζονται οι συνιστώσες του πεδίου ταχύτητας του ρευστού κατά τους κύριους άξονες του καρτεσιανού χώρου (x, y, z) αντίστοιχα. Η εξίσωση (1) αποτελεί την εξίσωση της συνέχειας για τη δεδομένη ροή, ενώ οι εξισώσεις (2),(3) και (4) τις εξισώσεις *N-S*.

Η αδιαστατοποίηση των μεταβλητών μεγεθών του προβλήματος γίνεται εισάγοντας τις παραμέτρους Q_i που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Κατά συνέπεια οι νέες αδιάστατες μεταβλητές είναι οι παρακάτω:

$$x' = \frac{x}{R}, \quad y' = \frac{y}{R}, \quad z' = \frac{z}{R}, \quad t' = \frac{t}{T}, \quad u' = \frac{u}{\omega R}, \quad v' = \frac{v}{\omega R}, \quad w' = \frac{w}{\omega h}, \quad p' = \frac{p}{P_o}$$

Εφαρμόζοντας κανόνες παραγωγίσης οι διαφορικές του παραπάνω συστήματος διαμορφώνονται ως εξής:

$$(1): \frac{\partial u'}{\partial x'} \cdot \frac{\omega R}{R} + \frac{\partial v'}{\partial y'} \cdot \frac{\omega R}{R} + \frac{\partial w'}{\partial z'} \cdot \frac{\omega h}{h} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{\partial v'}{\partial y'} + \frac{\partial w'}{\partial z'} = 0 \quad (3.3.2.2)$$

$$(2): \frac{\partial u'}{\partial t'} \cdot \frac{\omega R}{T} + \omega R u' \cdot \frac{\partial u'}{\partial x'} \cdot \frac{\omega R}{R} + \omega R v' \cdot \frac{\partial u'}{\partial y'} \cdot \frac{\omega R}{R} + \omega h w' \cdot \frac{\partial u'}{\partial z'} \cdot \frac{\omega R}{h} =$$

$$= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p'}{\partial x'} \cdot \frac{P_o}{R} + \frac{\eta}{\rho} \left\{ \frac{\partial^2 u'}{\partial x'^2} \cdot \frac{\omega R}{R^2} + \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} \cdot \frac{\omega R}{R^2} + \frac{\partial^2 u'}{\partial z'^2} \cdot \frac{\omega R}{h^2} \right\} \Rightarrow$$

$$\frac{\partial u'}{\partial t'} \cdot \frac{\omega R}{T} + \omega^2 R \left\{ u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + v' \frac{\partial u'}{\partial y'} + w' \frac{\partial u'}{\partial z'} \right\} =$$

$$= -\frac{P_o}{\rho R} \frac{\partial p'}{\partial x'} + \frac{\eta \omega R}{\rho} \left\{ \frac{\partial^2 u'}{\partial x'^2} \frac{1}{R^2} + \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} \frac{1}{R^2} + \frac{\partial^2 u'}{\partial z'^2} \frac{1}{h^2} \right\} \Rightarrow$$

$$\frac{\partial u'}{\partial t'} \frac{1}{\omega T} + \left\{ u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + v' \frac{\partial u'}{\partial y'} + w' \frac{\partial u'}{\partial z'} \right\} = -\frac{P_o}{\rho \omega^2 R^2} \frac{\partial p'}{\partial x'} + \frac{\eta}{\omega R} \frac{1}{h^2} \left\{ \frac{\partial^2 u'}{\partial x'^2} \left(\frac{h}{R} \right)^2 + \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} \left(\frac{h}{R} \right)^2 + \frac{\partial^2 u'}{\partial z'^2} \right\} \quad (3.3.2.3)$$

Η εξίσωση (3.3.2.3) με λίγη περαιτέρω επεξεργασία και εισάγοντας τις αδιάστατες παραμέτρους Π_i της προηγούμενης ενότητας καταλήγει τελικά στην:

$$\frac{\partial u'}{\partial t'} \cdot \Pi_4 + \left\{ u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + v' \frac{\partial u'}{\partial y'} + w' \frac{\partial u'}{\partial z'} \right\} =$$

$$- \Pi_3 (\Pi_1 \Pi_4)^2 \frac{\partial p'}{\partial x'} + \Pi_2 \Pi_3 \Pi_4 \left\{ \frac{\partial^2 u'}{\partial x'^2} \cdot \Pi_1^2 + \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} \cdot \Pi_1^2 + \frac{\partial^2 u'}{\partial z'^2} \right\} \quad (3.3.2.4)$$

Με εντελώς όμοιο τρόπο η (3) από το αρχικό σύστημα καταλήγει στην:

$$\frac{\partial v'}{\partial t'} \cdot \Pi_4 + \left\{ u' \frac{\partial v'}{\partial x'} + v' \frac{\partial v'}{\partial y'} + w' \frac{\partial v'}{\partial z'} \right\} =$$

$$- \Pi_3 (\Pi_1 \Pi_4)^2 \frac{\partial p'}{\partial y'} + \Pi_2 \Pi_3 \Pi_4 \left\{ \frac{\partial^2 v'}{\partial x'^2} \cdot \Pi_1^2 + \frac{\partial^2 v'}{\partial y'^2} \cdot \Pi_1^2 + \frac{\partial^2 v'}{\partial z'^2} \right\} \quad (3.3.2.5)$$

Τέλος, εφαρμόζεται η ίδια διαδικασία για την (4) του αρχικού συστήματος:

$$(4): \frac{\partial w'}{\partial t'} \cdot \frac{\omega h}{T} + \omega R u' \cdot \frac{\partial w'}{\partial x'} \cdot \frac{\omega h}{R} + \omega R v' \cdot \frac{\partial w'}{\partial y'} \cdot \frac{\omega h}{R} + \omega h w' \cdot \frac{\partial w'}{\partial z'} \cdot \frac{\omega h}{h} =$$

$$= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p'}{\partial z'} \cdot \frac{P_o}{h} + \frac{\eta}{\rho} \left\{ \frac{\partial^2 w'}{\partial x'^2} \cdot \frac{\omega h}{R^2} + \frac{\partial^2 w'}{\partial y'^2} \cdot \frac{\omega h}{R^2} + \frac{\partial^2 w'}{\partial z'^2} \cdot \frac{\omega h}{h^2} \right\} \Rightarrow$$

$$\frac{\partial w'}{\partial t'} \frac{\omega h}{T} + \omega^2 h \left\{ u' \frac{\partial w'}{\partial x'} + v' \frac{\partial w'}{\partial y'} + w' \frac{\partial w'}{\partial z'} \right\} =$$

$$= -\frac{P_o}{\rho h} \frac{\partial p'}{\partial z'} + \frac{\eta \omega h}{\rho h^2} \left\{ \frac{\partial^2 w'}{\partial x'^2} \frac{h^2}{R^2} + \frac{\partial^2 w'}{\partial y'^2} \frac{h^2}{R^2} + \frac{\partial^2 w'}{\partial z'^2} \frac{h^2}{h^2} \right\} \Rightarrow$$

$$\frac{\partial w'}{\partial t'} \frac{1}{\omega T} + \left\{ u' \frac{\partial w'}{\partial x'} + v' \frac{\partial w'}{\partial y'} + w' \frac{\partial w'}{\partial z'} \right\} = - \frac{P_o}{\rho \omega^2 h^2} \frac{\partial p'}{\partial z'} + \frac{\eta}{\rho} \frac{1}{\omega h^2} \left\{ \frac{\partial^2 w'}{\partial x'^2} \left(\frac{h}{R} \right)^2 + \frac{\partial^2 w'}{\partial y'^2} \left(\frac{h}{R} \right)^2 + \frac{\partial^2 w'}{\partial z'^2} \right\} \quad (3.3.2.6)$$

Και τελικά εισάγοντας τις αδιάστατες παραμέτρους και ομαδοποιώντας κατάλληλα τους όρους:

$$\frac{\partial w'}{\partial t'} \cdot \Pi_4 + \left\{ u' \frac{\partial w'}{\partial x'} + v' \frac{\partial w'}{\partial y'} + w' \frac{\partial w'}{\partial z'} \right\} = - \Pi_3 \Pi_4^2 \frac{\partial p'}{\partial z'} + \Pi_2 \Pi_3 \Pi_4 \left\{ \frac{\partial^2 w'}{\partial x'^2} \cdot \Pi_1^2 + \frac{\partial^2 w'}{\partial y'^2} \cdot \Pi_1^2 + \frac{\partial^2 w'}{\partial z'^2} \right\} \quad (3.3.2.7)$$

Συνοψίζοντας, το αδιαστατοποιημένο πλέον σύστημα διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει το πρόβλημα είναι το

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{\partial v'}{\partial y'} + \frac{\partial w'}{\partial z'} = 0 \\ \frac{\partial u'}{\partial t'} \cdot \Pi_4 + \left\{ u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + v' \frac{\partial u'}{\partial y'} + w' \frac{\partial u'}{\partial z'} \right\} = - \Pi_3 (\Pi_1 \Pi_4)^2 \frac{\partial p'}{\partial x'} + \Pi_2 \Pi_3 \Pi_4 \left\{ \frac{\partial^2 u'}{\partial x'^2} \cdot \Pi_1^2 + \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} \cdot \Pi_1^2 + \frac{\partial^2 u'}{\partial z'^2} \right\} \\ \frac{\partial v'}{\partial t'} \cdot \Pi_4 + \left\{ u' \frac{\partial v'}{\partial x'} + v' \frac{\partial v'}{\partial y'} + w' \frac{\partial v'}{\partial z'} \right\} = - \Pi_3 (\Pi_1 \Pi_4)^2 \frac{\partial p'}{\partial y'} + \Pi_2 \Pi_3 \Pi_4 \left\{ \frac{\partial^2 v'}{\partial x'^2} \cdot \Pi_1^2 + \frac{\partial^2 v'}{\partial y'^2} \cdot \Pi_1^2 + \frac{\partial^2 v'}{\partial z'^2} \right\} \\ \frac{\partial w'}{\partial t'} \cdot \Pi_4 + \left\{ u' \frac{\partial w'}{\partial x'} + v' \frac{\partial w'}{\partial y'} + w' \frac{\partial w'}{\partial z'} \right\} = - \Pi_3 \Pi_4^2 \frac{\partial p'}{\partial z'} + \Pi_2 \Pi_3 \Pi_4 \left\{ \frac{\partial^2 w'}{\partial x'^2} \cdot \Pi_1^2 + \frac{\partial^2 w'}{\partial y'^2} \cdot \Pi_1^2 + \frac{\partial^2 w'}{\partial z'^2} \right\} \end{array} \right. \quad (3.3.2.8)$$

όπου οι λόγοι ομοιότητας είναι οι

$$\Pi_1 = \frac{h}{R}, \Pi_2 = \frac{\eta}{P_o T}, \Pi_3 = \frac{\rho h^2}{P_o T^2}, \Pi_4 = \frac{1}{\omega T} \quad (3.3.2.9)$$

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές πώς οι δύο μέθοδοι συμφωνούν. Έτσι, για δύο διαφορετικά μεταξύ τους μοντέλα με ίδιους όμως λόγους ομοιότητας Π_i το αδιάστατο σύστημα διαφορικών εξισώσεων (3.3.2.8) έχει την ίδια λύση. Κατά συνέπεια, τα πεδία ροής είναι όμοια.

Προκειμένου να επαληθευτούν τα παραπάνω και σε επίπεδο προσομοίωσης έγινε σύγκριση των βασικών αποτελεσμάτων για πέντε διαφορετικά μοντέλα. Στους Πίνακες 3.3.2.1 και 3.3.2.2 παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι κάθε εξεταζόμενου μοντέλου καθώς και οι τιμές των λόγων ομοιότητας Π_i . Ως αρχικό μοντέλο θεωρείται αυτό της διαμέτρου $D = 115 \text{ mm}$.

Πίνακας 3.3.2.1: Παράμετροι προσομοιώσεων επαλήθευσης ομοιότητας

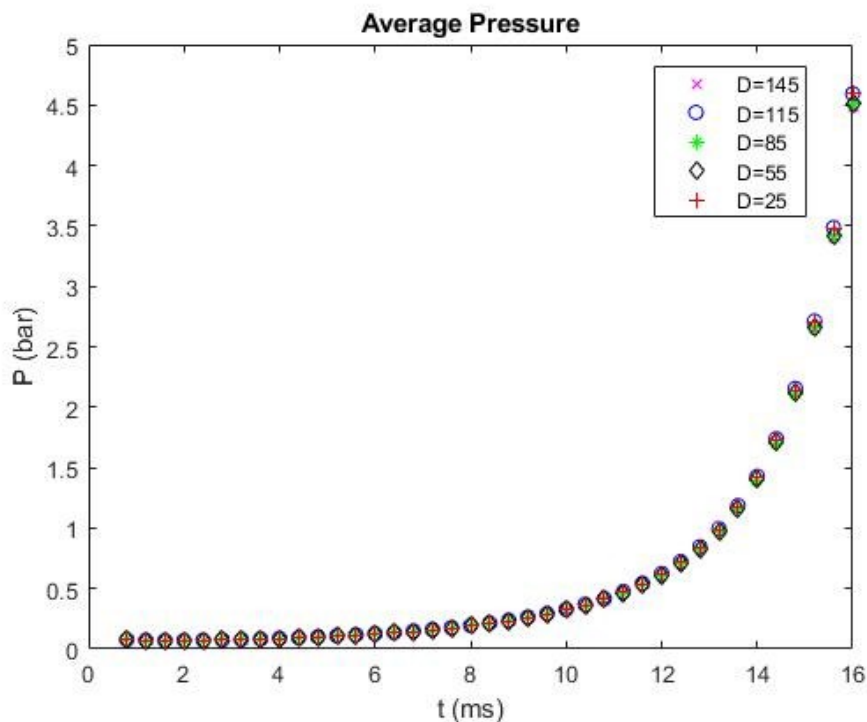
Πείραμα <i>i</i>	D [mm]	h [mm]	ω [rad/s]	T [ms]	dh/dt [mm/s]	v [m ² /s]	P _o [Pa]
1	145	1.261	115	20	63.04	1.987e-5	1*
2	115	1.000	115	20	50	1.250e-5	1*
3	85	0.739	115	20	36.96	6.83e-6	1*
4	55	0.478	115	20	23.91	2.86e-6	1*
5	25	0.217	115	20	10.87	5.9e-7	1*

*Η τιμή 1 αποδίδεται τυπικά για την κατάστροψη των λόγων ομοιότητας. Η πραγματική εξωτερική συνθήκη είναι $P_o = 0$.

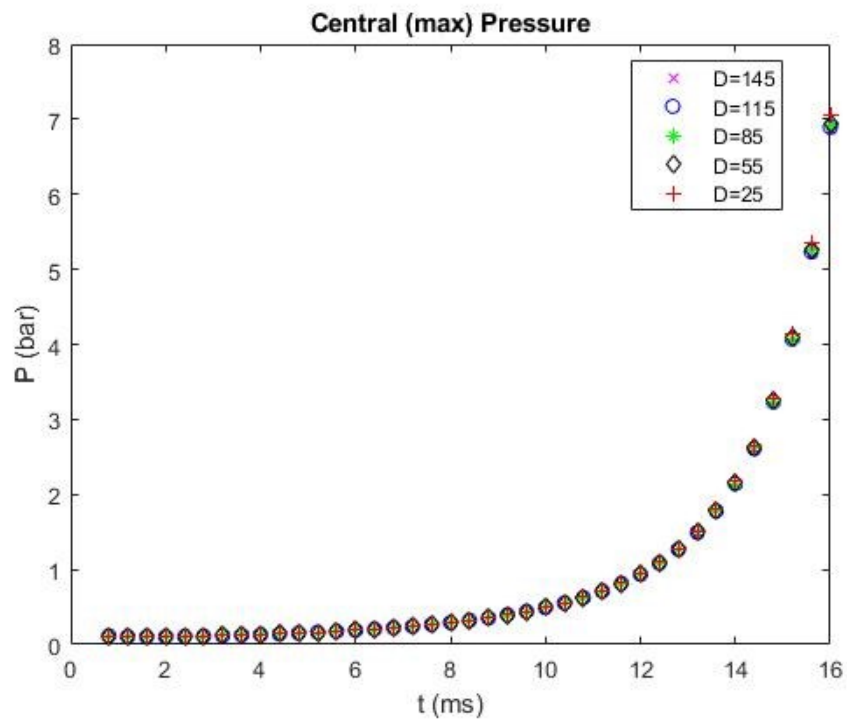
Πίνακας 3.3.2.2: Λόγοι ομοιότητας προσομοιώσεων επαλήθευσης

Πείραμα i	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4
1,2,3,4,5	0.0174	0.5	0.5	0.435

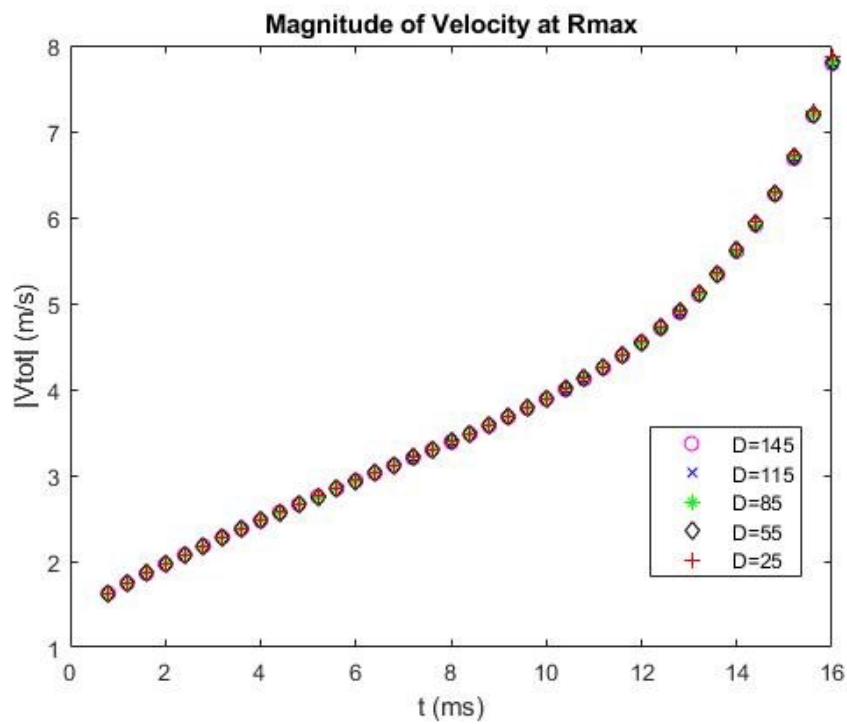
Σημειώνεται ότι το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ως καταλληλότερη προσέγγιση είναι το διδιάστατο αξονοσυμμετρικό με περιστροφική ταχύτητα (2D Axisymmetric Swirl). Η προσέγγιση αυτή εμπεριέχει σφάλματα καθώς η επίλυση γίνεται σε κυλινδρικές συντεταγμένες, σε αντίθεση με την αδιαστατοποίηση που έγινε σε καρτεσιανές. Επιπλέον, ο συνδυασμός περιστροφικής με αξονική κίνηση για το σύστημα στερεών δίσκω - ρευστού καθιστά την αξονική συμμετρία υπό αμφισβήτηση. Παρά αυτές τις ανακρίβειες η χρήση αυτού του μοντέλου αποτελεί πράγματι την καλύτερη επιλογή, αφού αφενός η χρήση τρισδιάστατων μοντέλων είναι προβληματική – για αυτό άλλωστε χρειάζεται και η ομοιότητα – και αφετέρου κρίσιμα μεγέθη όπως η κεντρική πίεση και η ταχύτητα εξώθησης του ρευστού οφείλουν να είναι ίδια καθώς αποτελούν χαρακτηριστικά ποσά του προβλήματος. Τέλος, υπενθυμίζεται ότι στην παρούσα εργασία δεν ενδιαφέρει το ακριβές αποτέλεσμα αυτό καθαυτό αλλά η σύγκριση των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον ρεαλιστικών συνθηκών. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων σε μορφή διαγραμμάτων.



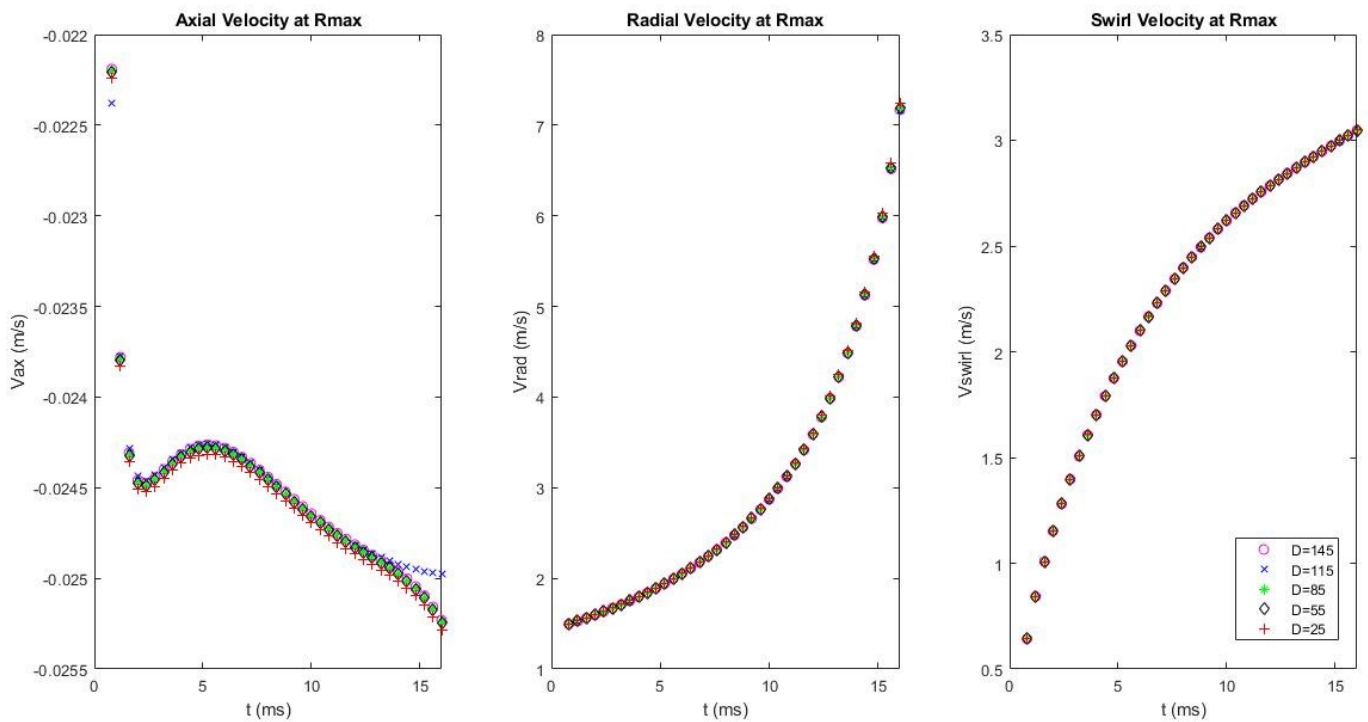
Διάγραμμα 3.3.2.1: Σύγκριση προσομοιώσεων ομοιότητας – Μέση πίεση



Διάγραμμα 3.3.2.2: Σύγκριση προσομοιώσεων ομοιότητας – Μέγιστη πίεση



Διάγραμμα 3.3.2.3: Σύγκριση προσομοιώσεων ομοιότητας – Μέτρο ταχύτητας



Διάγραμμα 3.3.2.4: Σύγκριση προσομοιώσεων ομοιότητας – Συνιστώσες ταχύτητας

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορεί εύκολα να διαπιστευθεί ότι τα πεδία πίεσης και ταχύτητας που προκύπτουν μεταξύ των μοντέλων διατηρώντας τους ίδιους λόγους ομοιότητας πράγματι ταυτίζονται. Τέλος, για λόγους πληρότητας στον Πίνακα 3.3.2.3 παρατίθενται τα μέγιστα σφάλματα για κάθε υπολογιζόμενο μέγεθος. Κάθε σφάλμα υπολογίζεται ποσοστιαία σε σύγκριση με το αρχικό μοντέλο μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$err(\%) = \left| \frac{val_{Dx} - val_{D115}}{val_{D115}} \right| \cdot 100\%$$

Πίνακας 3.3.2.3: Μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα κρίσιμων μεγεθών

	Pave	Pmax	Qout	Vaxial	Vradial	Vswirl
$err(\%)_{max}$	1.97	2.39	0.18	1.24	1.01	0.08

3.4 Ομοιότητα στα στερεά

Όσον αφορά τα στερεά που συμμετέχουν στο πρόβλημα, δηλαδή τους δίσκους, η ομοιότητα δεν είναι ο ακριβώς «δόκιμος» όρος για την πορεία που ακολουθήθηκε. Δύο είναι οι βασικές απαιτήσεις μεταξύ των γεωμετρικά όμοιων μοντέλων: Η διατήρηση της αδράνειας και η διατήρηση της στιβαρότητας σε κάμψη. Η αδράνεια των δίσκων αφορά αφενός την μεταφορική κίνηση κατά την αξονική διεύθυνση και αφαιτέρου την περιστροφική κίνηση. Σε ό,τι αφορά τη στιβαρότητα και γενικότερα τη συμπεριφορά των δίσκων ως ελαστικά – παραμορφώσιμα σώματα δίνεται προτεραιότητα στην κάμψη, καθώς αυτή αποτελεί την κύρια καταπόνηση λόγω της μορφής του πεδίου πίεσης του ρευστού αλλά και λόγω της γενικότερης γεωμετρίας του προβλήματος.

Ξεκινώντας από την αδρανειακή συμπεριφορά των στερεών δίσκων αυτή εξαρτάται από τη μάζα κάθε δίσκου για τη μεταφορική κίνηση και από την ροπή αδράνειας για την περιστροφή. Αυτές δίνονται κατά αντιστοιχία από τις παρακάτω σχέσεις:

$$M = \rho t \pi R^2 \quad (3.4.1)$$

και

$$I_z = \frac{\pi \rho t}{2} R^4 \quad (3.4.2)$$

όπου

ρ : Η πυκνότητα κάθε δίσκου

t : Το πάχος κάθε δίσκου

R : Η ακτίνα κάθε δίσκου

Εάν συμβολιστεί ως τονούμενο το νέο μέγεθος μετά από κάποια γεωμετρική αλλαγή, τότε η αδρανειακή απαίτηση εκφράζεται ως εξής

$$\begin{aligned} M' = M \quad \text{και} \quad I_z' = I_z &\Rightarrow \\ \rho' t' R'^2 = \rho t R^2 \quad \text{και} \quad \rho' t' R'^4 = \rho t R^4 &\end{aligned} \quad (3.4.3)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις δύο εξισώσεις προκύπτει τελικά

$$\left(\frac{R'}{R}\right)^2 = \left(\frac{R'}{R}\right)^4 \quad (3.4.4)$$

Η παραπάνω συνθήκη ικανοποιείται μόνο για αμετάβλητη ακτίνα και επομένως δεν είναι δυνατή. Κατά συνέπεια δεν είναι δυνατό να τηρηθούν ταυτόχρονα η απαίτηση για διατήρηση της μεταφορικής και της περιστροφικής αδράνειας. Το ποια από τις δύο επιλέγεται κάθε φορά να διατηρηθεί εξαρτάται από τη χρονική στιγμή και τις συνθήκες του προβλήματος. Έτσι κατά τα πρώτα στάδια της προσομοίωσης όπου το διάκενο είναι μεγάλο για να προκαλέσει ουσιαστική μεταβολή στη γωνιακή ταχύτητα των παθητικών δίσκων, δίνεται έμφαση στην μεταφορική αδράνεια. Αντίστοιχα, στο τελευταίο στάδιο όπου οι δίσκοι έχουν πλέον σχεδόν κλείσει, δίνεται έμφαση στην περιστροφική αδράνεια. Αναλόγως λοιπόν ποια μεταβολή της κίνησης θεωρείται η σημαντικότερη εφαρμόζεται η σχέση

$$\frac{\rho' t'}{\rho t} = \left(\frac{R}{R'}\right)^2 \quad \acute{\eta} \quad \left(\frac{R}{R'}\right)^4 \quad (3.4.5)$$

Για την κάμψη ισότροπης και ομογενούς πλάκας πάχους t το βέλος κάμψης δίνεται από τη σχέση των *Kirchhoff* – *Love*:

$$\frac{\partial^4 w_o}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w_o}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w_o}{\partial y^4} = \frac{p}{D} \quad (3.4.6)$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3.4.7)$$

όπου

w_o : Το βέλος κάμψης

p : Το εφαρμοζόμενο καταναμημένο φορτίο

E : Το μέτρο του ελαστικότητας του Young

ν : Ο λόγος Poisson του υλικού

Σημειώνεται ότι η παραπάνω σχέση προσεγγίζει ικανοποιητικά *λεπτότοιχες* πλάκες και έχει ληφθεί για την περίπτωση που η περίπτωση της πλάκας είναι πακτωμένη. Κατά συνέπεια, για τη διατήρηση της ισχύος της σχέσης επιλέγεται στην (3.4.5) να τεθεί

$$t' = t \quad (3.4.8)$$

διαφορετικά για μείωση της ακτίνας θα προέκυπταν μεγαλύτερα πάχη δίσκων και επομένως η σχέση του *Kirchhoff* θα απέκλινε από την πραγματικότητα. Επιπλέον η διατήρηση μικρών παχών διευκολύνει και στην κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος ρευστού γύρω από τους δίσκους.

Αδιαστατοποιώντας την (3.4.6) με τις εξής μετατροπές

$$w_o' = \frac{w_o}{t}, \quad x' = \frac{x}{R}, \quad \text{και} \quad y' = \frac{y}{R}$$

προκύπτει η διαφορική

$$\frac{\partial^4 w_o'}{\partial x'^4} \frac{t}{R^4} + 2 \frac{\partial^4 w_o'}{\partial x'^2 \partial y'^2} \frac{t}{R^2 R^2} + \frac{\partial^4 w_o'}{\partial y'^4} \frac{t}{R^4} = \frac{p}{D} \Rightarrow$$

$$\frac{\partial^4 w_o'}{\partial x'^4} + 2 \frac{\partial^4 w_o'}{\partial x'^2 \partial y'^2} + \frac{\partial^4 w_o'}{\partial y'^4} = p \frac{R^4}{tD} \quad (3.4.9)$$

Επομένως μεταξύ δύο διαφορετικά γεωμετρικών μοντέλων στα οποία όμως εφαρμόζεται το ίδιο φορτίο αρκεί να ισχύει μεταξύ τους

$$\frac{R'^4}{t'D'} = \frac{R^4}{tD} \quad (3.4.10)$$

Αντικαθιστώντας στην (3.4.10) την (3.4.7) και την (3.4.8) προκύπτει τελικά η συνθήκη

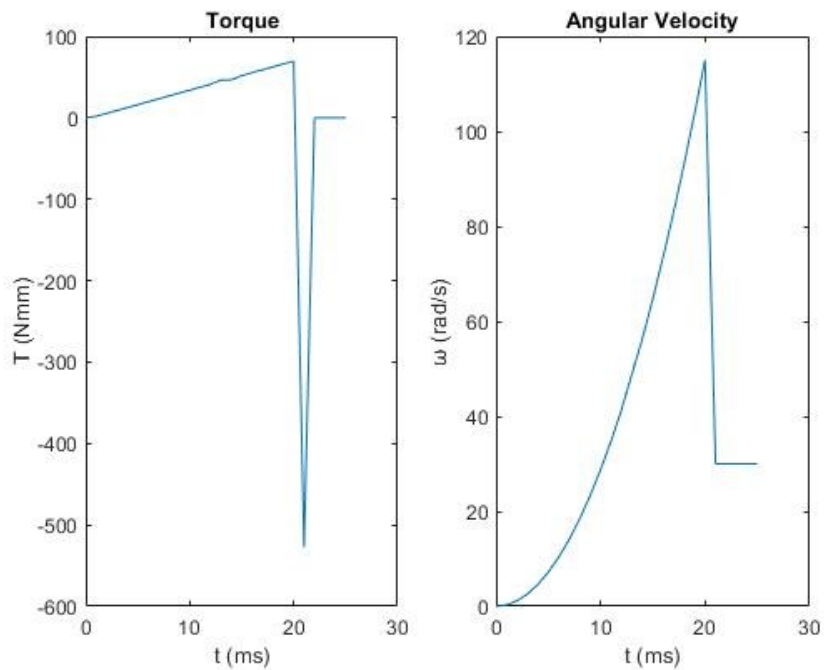
$$\frac{R'^4}{E'} (1-\nu'^2) = \frac{R^4}{E} (1-\nu^2) \xrightarrow{\nu'=\nu} \frac{E'}{E} = \left(\frac{R'}{R} \right)^4 \quad (3.4.11)$$

Προκειμένου να επαληθευτεί η ομοιότητα και στα στερεά καταστρώνονται δύο ανεξάρτητα πειράματα, ένα για τον έλεγχο της αδράνειας και ένα για τον έλεγχο της στιβαρότητας σε κάμψη. Για τον έλεγχο της αδράνειας των δίσκων εξετάζεται η απόκριση μεταξύ διαφορετικών γεωμετρικά μοντέλων που πληρούν τις παραπάνω αναλογίες μεταξύ τους σε μεταβλητό φορτίο ροπής. Το φορτίο αυτό τίθεται μεταβλητό ώστε να προκύπτει μεταβολή της γωνιακής επιτάχυνσης και επομένως να έχει νόημα η αδρανειακή συμπεριφορά. Στο Διάγραμμα 3.4.1 παρουσιάζεται η είσοδος ροπής στο σύστημα καθώς και η επιθυμητή απόκριση γωνιακής ταχύτητας, όπως προκύπτει για τον αρχικό δίσκο διαμέτρου $D=115mm$ και μάζας $m=3.75kg$.

Στον Πίνακα 3.4.1 συνοψίζονται οι παράμετροι που καθορίζουν τη συμπεριφορά των δίσκων για τα γεωμετρικά όμοια μοντέλα.

Πίνακας 3.4.1: Παράμετροι ομοιότητας στερεών δίσκων

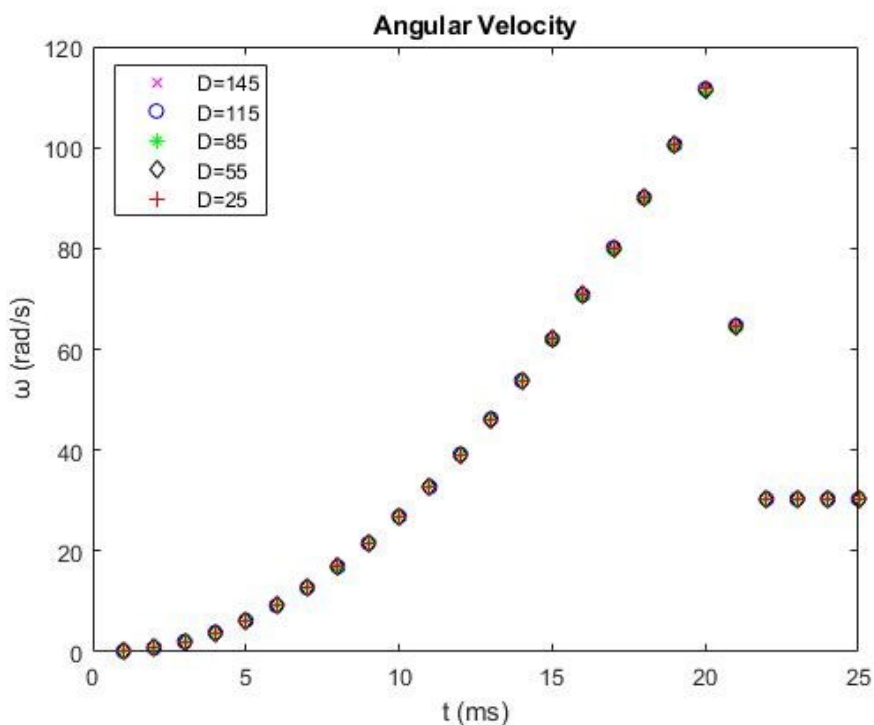
Μοντέλο <i>i</i>	R [mm]	T [mm]	M [kg]	E [GPa]	ν [-]	Iz [kgmm ²]
1	72.5	3	2.36	505.488	0.3	6.207
2	57.5	3	3.75	200.000	0.3	6.207
3	42.5	3	6.87	59.692	0.3	6.207
4	27.5	3	16.42	10.987	0.3	6.207
5	12.5	3	79.45	0.514	0.3	6.207



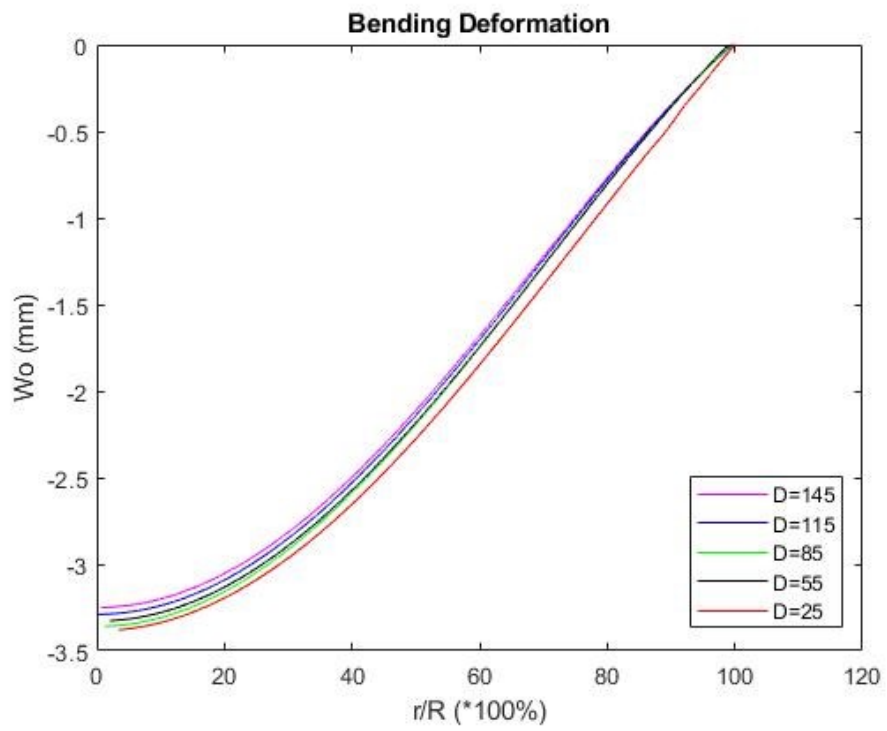
Διάγραμμα 3.4.1: Πείραμα περιστροφικής αδράνειας – Ροπή εισόδου και επιθυμητή ταχύτητα εξόδου

Στο δεύτερο πείραμα που εκτελείται σε στατική ανάλυση, εξετάζεται το μέγιστο βέλος κάμψης κάθε δίσκου υπό ίδιες συνθήκες φόρτισης: Πάκτωση στην περιμέτρου του και φορτίο πίεσης σταθερό σε όλη του την επιφάνεια μέτρου $50MPa$.

Τα αποτελέσματα των δύο πειραμάτων παρουσιάζονται κατά αντιστοιχία στα Διαγράμματα 3.4.2 και 3.4.3.



Διάγραμμα 3.4.2: Ομοιότητα στερεών – Σύγκριση τελικής γωνιακής ταχύτητας



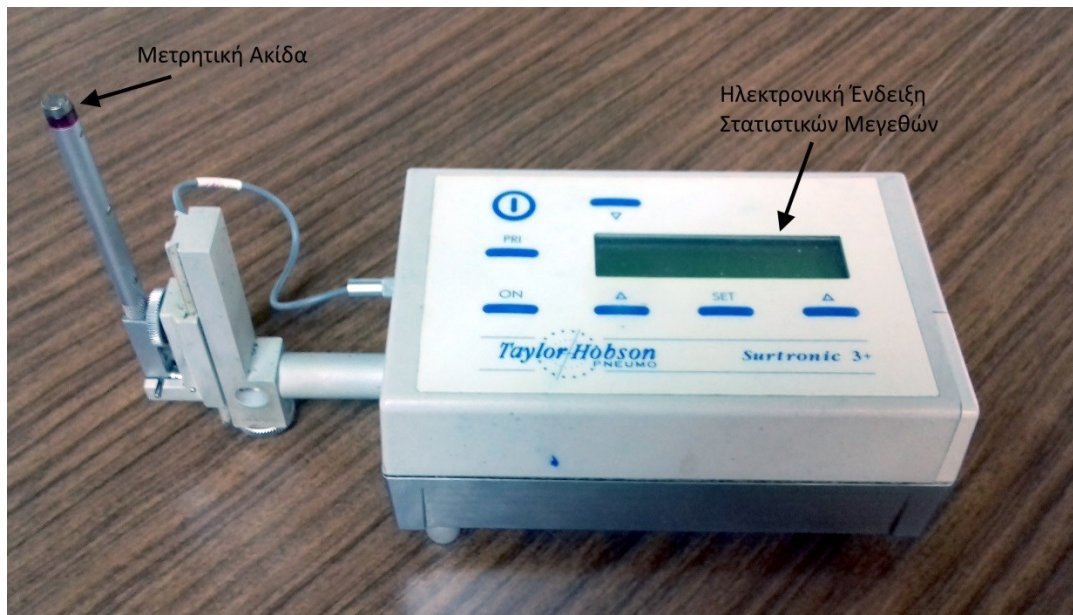
Διάγραμμα 3.4.3: Ομοιότητα στερεών – Σύγκριση βέλους κάμψης δίσκων

4

Τραχύτητα

4.1 Τραχυμέτρηση υλικού φθοράς

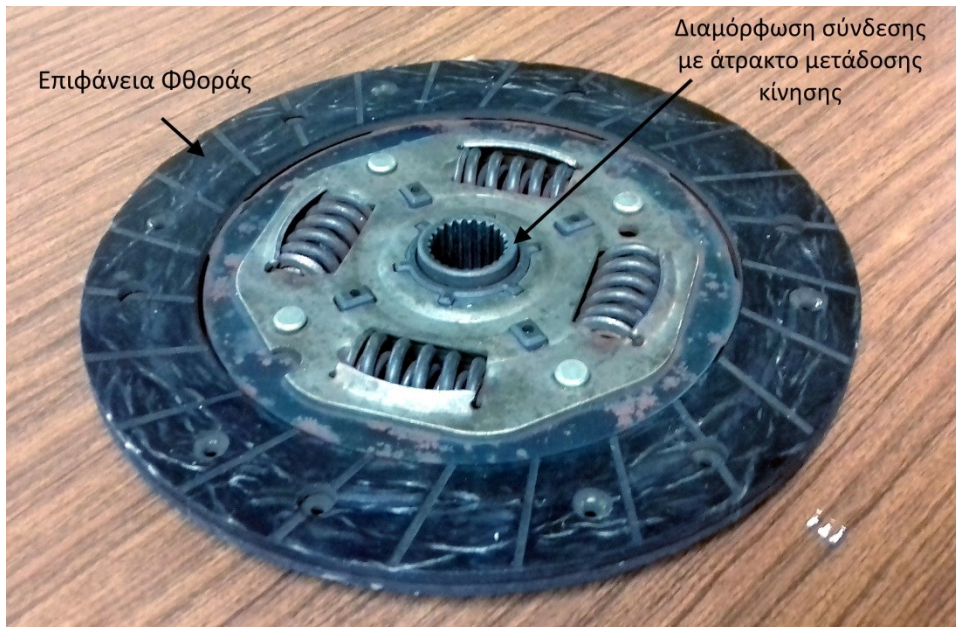
Η περιγραφή της τραχύτητας μίας επιφάνειας αποτελεί αρκετά δύσκολο ζήτημα λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα της. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί πλήθος μετρικών [17] οι οποίες όμως και πάλι δεν επαρκούν για την απόλυτη περιγραφή της. Δύο επιφάνειες μπορεί να διαθέτουν ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά και παρόλα αυτά να είναι διαφορετικές. Ωστόσο, σε μακροσκοπικό επίπεδο δεν ενδιαφέρει συνήθως η ακριβής τοπολογία αλλά η μέση επίδρασή της ως σύνολο χαρακτηριστικών. Η λήψη της ακριβούς μορφής μίας επιφάνειας είναι πλέον δυνατή μέσω μετρήσεων τύπου AFM, αλλά στην παρούσα εργασία δεν έγινε κάτι τέτοιο. Αντ'αυτού έγινε χρήση κοινού προφιλόμετρου όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1.1.



Εικόνα 4.1.1: Προφιλόμετρο

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου μέτρησης είναι ότι τα στατιστικά μεγέθη παρέχονται απευθείας από το μετρητικό και η πρόσβαση στις αρχικές ανεπεξέργαστες μετρήσεις δεν είναι εφικτή. Έτσι, η εύρεση της αυτοσυσχέτισης των μετρήσεων και επομένως της ύπαρξης ή όχι επαναλαμβανόμενων μορφών – κάτι του οποίου η σημασία επεξηγείται στην επόμενη ενότητα – δεν ήταν δυνατή. Για αυτό, στη δημιουργία των τεχνητών επιφανειών χρησιμοποιήθηκε εν γένει χαμηλή αυτοσυσχέτιση. Από τις μετρήσεις αξιοποιήθηκαν τα στατιστικά μεγέθη όπως προέκυψαν, ενώ όποιο άλλο στοιχείο δεν μπόρεσε να βρεθεί από αυτές λήφθηκε από τη βιβλιογραφία [4].

Στην Εικόνα 4.1.2 παρουσιάζεται ο δίσκος τριβής του οποίου η επιφάνεια μετρήθηκε, ενώ στην Εικόνα 4.1.3 παρουσιάζεται λεπτομέρεια της αναφερόμενης επιφάνειας. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό ο παρόν δίσκος παρουσιάζει αρκετά μεγάλη φθορά, ιδιαίτερα σε ορισμένα σημεία, και για το λόγο αυτό οι προκύπτουσες μετρήσεις ανά περιοχή παρουσίασαν αποκλίσεις.



Εικόνα 4.1.2: Μετρούμενος δίσκος τριβής



Εικόνα 4.1.3: Λεπτομέρεια δίσκου τριβής

Στην Εικόνα 4.1.4 παρουσιάζεται στιγμιότυπο κατά τη μέτρηση των παραμέτρων τραχύτητας ενώ στον Πίνακα 4.1.1 οι αναφερόμενες μετρήσεις.

Πίνακας 4.1.1: Αποτελέσματα μετρήσεων τραχύτητας

Μέτρηση	1	2	3	4	5	6
Ra (μm)	0.8	0.4	1.6	1.4	1.2	1.2
Rq (μm)	1.0	0.6	2.0	1.8	2.2	2.0
Rz,DIN (μm)	4	3	6	8	9	11
Rt (μm)	7	5	12	9	18	16
Ry (μm)	6	3	12	9	18	15
Sm (μm)	769	332	234	292	161	122



Εικόνα 4.1.4: Στιγμιότυπο μέτρησης τραχύτητας

Για τις παραπάνω μετρήσεις το μήκος αποκοπής είναι κοινό για όλες και ίσο με $L_c = 0.8 \mu m$. Στη συνέχεια γίνεται επεξήγηση των αναφερόμενων στατιστικών παραμέτρων.

- Αριθμητικός μέσος των υψών: $Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$
- Ο δείκτης RMS των υψών: $Rq = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}$
- Η μέγιστη απόσταση κορυφής – κοιλάδας εντός του μήκους αποκοπής: Rt_i
- Η μέγιστη απόσταση κορυφής – κοιλάδας από όλα τα μήκη αποκοπής: Ry
- Η μέση τιμή των μέγιστων αποστάσεων κορυφής – κοιλάδας: $Rz_{DIN} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Rt_i$
- Η μέση απόσταση μεταξύ διαδοχικών κορυφών: $Sm = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i$

Από τις παραπάνω μετρήσεις γίνεται σαφές ότι η τραχύτητα παρουσιάζει έντονη διακύμανση στις διάφορες περιοχές του δίσκου. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται από τον βαθμό φθοράς του δίσκου και την ύπαρξη περιοχών καλύτερης κατάστασης έναντι άλλων. Επιλέγεται λοιπόν να εξετασθούν δύο περιπτώσεις, μία χαμηλής και μία υψηλής τραχύτητας. Επομένως θα δημιουργηθούν επιφάνειες χαμηλής αυτοσυσχέτισης, με πυκνότητα σημείων $600/mm^2 (= 2*300/mm^2$ [4] λόγω της ύπαρξης και αρνητικών τιμών) και χαρακτηριστικά της πιο έντονης τραχύτητας

$$(Ra, Rq) = (1.6, 2.0) \mu m$$

Επιπλέον, λόγω των βαθμών ελευθερίας που προσφέρει η κατανομή Weibull όπως εξηγείται στην επόμενη ενότητα σε συνδυασμό με την έλλειψη δεδομένων από τις μετρήσεις, επιλέγεται ως πιο ωφέλιμο να

εξετασθούν οι εξείς δύο περιπτώσεις: μία περίπτωση πολύ αρνητικής τραχύτητας και μία περίπτωση πολύ θετικής τραχύτητας, και οι δύο με τις ίδιες τιμές R_a, R_q .

4.2 Ανάπτυξη κώδικα – γεννήτρια επιφανειών

Η ανάπτυξη ενός λογισμικού ικανού να παράγει τυχαία επιφάνειες οι οποίες όμως εμφανίζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τραχύτητας αποτελεί από μόνη της ένα ιδιαίτερο θέμα. Διάφορες απόπειρες παραγωγής τέτοιων επιφανειών έχουν γίνει [18] με κάθε μία από αυτές να λαμβάνει τις δικές της παραδοχές. Οι περισσότερες προσπάθειες είτε στην ίδια τη δημιουργία των επιφανειών είτε στην εισαγωγή της τραχύτητας μέσω υπολογιστικών τεχνασμάτων θεωρούν ότι η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας των υψών μίας τραχιάς επιφάνειας είναι η κανονική. Στην παρούσα εργασία αυτή η θεώρηση αμφισβητείται και αντί της κανονικής επιλέγεται η κατανομή Weibull ως πιο ευέλικτη και γενική στις παραμέτρους που την επηρεάζουν.

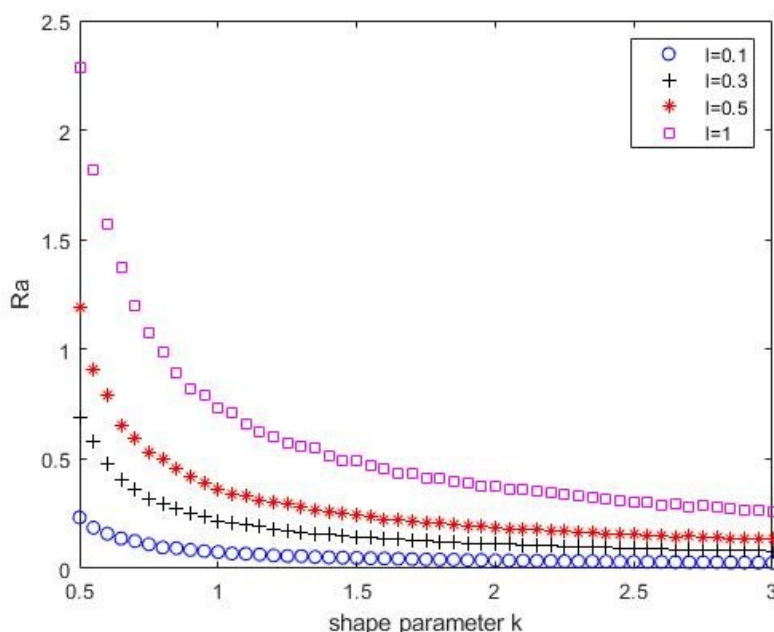
Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Weibull περιγράφεται από τη σχέση (4.2.1) και εξαρτάται όπως φαίνεται από δύο παραμέτρους, τις k, λ . Στις σχέσεις (4.2.2) και (4.2.3) παρουσιάζονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση αντίστοιχα. Κλειστές σχέσεις για την λοξότητα (Skewness) και την κυρτότητα (Kurtosis) της κατανομής υπάρχουν επίσης.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (4.2.1)$$

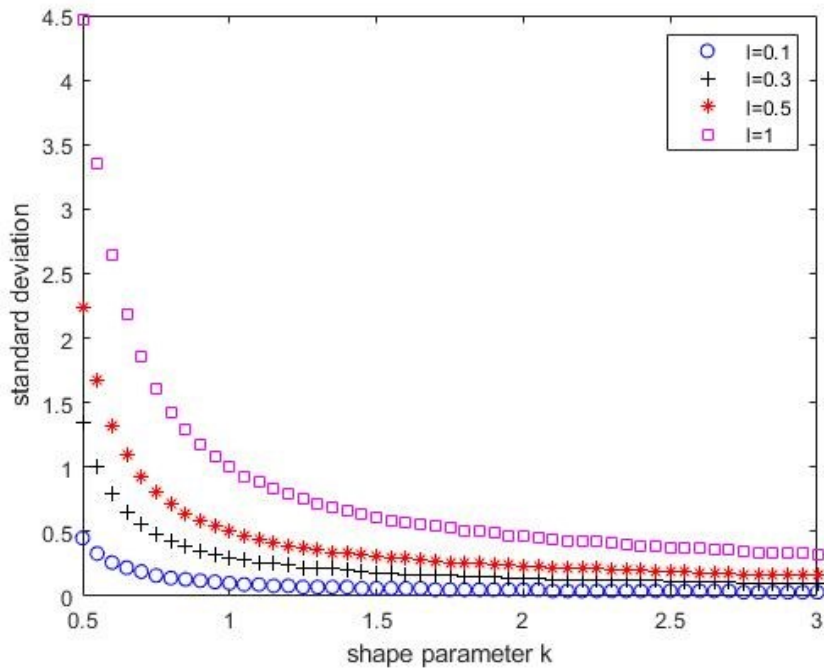
$$\mu = \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4.2.2)$$

$$\sigma = \lambda^2 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^2 \right\} \quad (4.2.3)$$

Το γεγονός ότι λαμβάνει μόνο θετικές τιμές δεν είναι πρόβλημα καθώς μετά την παραγωγή τιμών που ανήκουν σε αυτήν αρκεί μία μετατόπιση για να λάβουν ορισμένες από αυτές και αρνητικό πρόσημο. Στο Διάγραμμα 4.2.1 παρουσιάζονται οι τιμές της R_a καθώς και της R_s συναρτήσει των παραμέτρων k, λ .



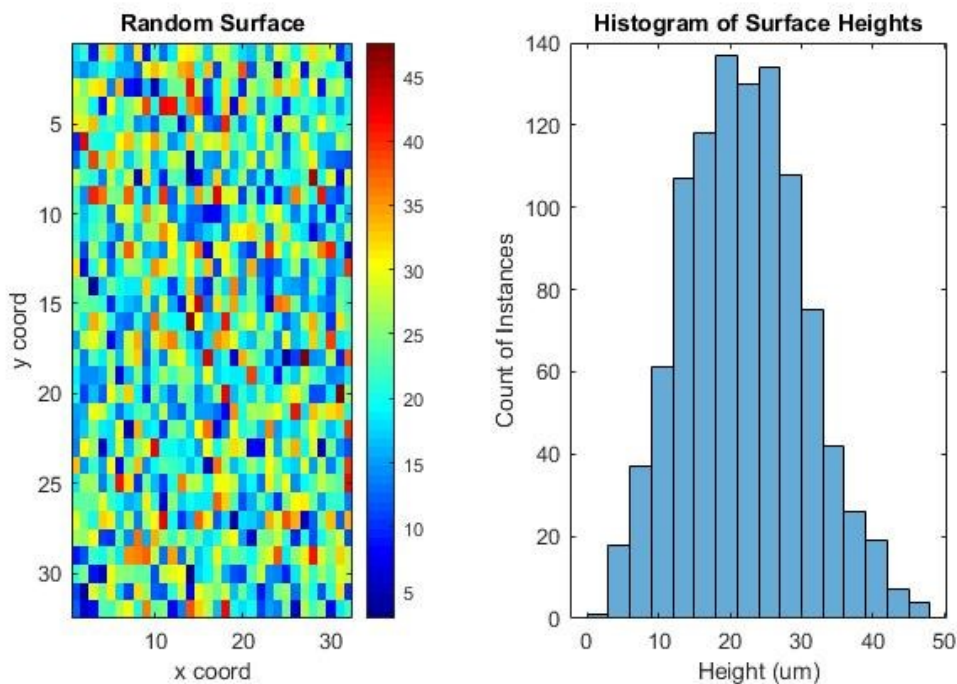
Διάγραμμα 4.2.1: Εξάρτηση της R_a από τις παραμέτρους k, λ



Διάγραμμα 4.2.2: Εξάρτηση της R_s από τις παραμέτρους k, λ

Σημειώνεται ότι στα παραπάνω διαγράμματα οι τιμές μετατοπίστηκαν κατά τη μέση τιμή του συνόλου τους έτσι ώστε η νέα μέση τιμή να είναι πάντα η μηδενική. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις σχέσεις της ενότητας 4.1 τα χαρακτηριστικά της τραχύτητας που ενδιαφέρουν. Οι παράμετροι λοξότητας και κύρτωσης επίσης μπορούν να καθοριστούν μέσω των k, λ .

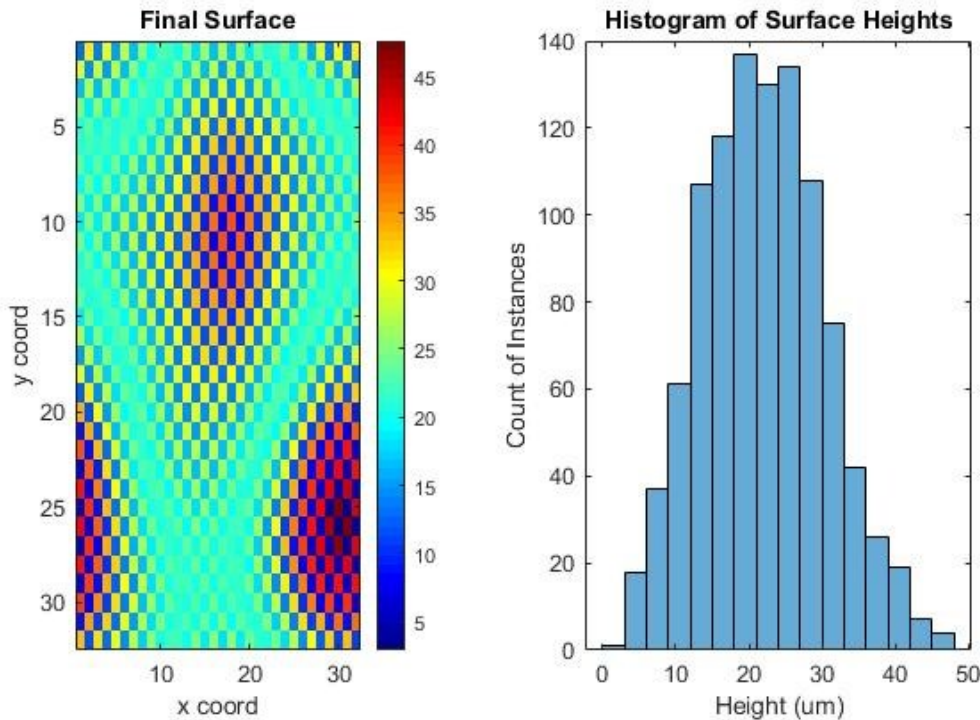
Από τα παραπάνω γίνεται λοιπόν σαφές πώς είναι δυνατό μέσω των παραμέτρων k, λ να ορισθεί η κατανομή εκείνη που σε μεγάλο πλήθος τυχαίων αριθμών δίνει τις επιθυμητές τιμές R_a, R_s, R_k και R_{sk} . Ωστόσο, η περιγραφή μίας επιφάνειας μόνο μέσω στατιστικών παραμέτρων όπως οι παραπάνω και η απλή εξαγωγή τυχαίων αριθμών οδηγεί σε μία περιγραφή σαν αυτή του Σχήματος 4.2.1.



Σχήμα 4.2.1: Παραγωγή τυχαίας επιφάνειας εισάγοντας μόνο τυχαίες τιμές

Όπως γίνεται αντιληπτό οι τυχαίες τιμές, εν προκειμένω τα τυχαία ύψη της επιφάνειας, ακολουθούν μεν την επιθυμητή κατανομή αλλά είναι διαμοιρασμένα με εντελώς ακανόνιστο τρόπο κάτι που δεν συνάδει με την πραγματικότητα. Κάθε επιφάνεια προέρχεται από κάποιον τύπο κατεργασίας. Επομένως, ίχνη αυτής είναι

αναμενόμενο να υπάρχουν και κατά συνέπεια να εμφανίζεται μικρή ή μεγάλη κανονικότητα. Η κανονικότητα αυτή περιγράφεται από παραμέτρους όπως η *αυτοσυσχέτιση*. Στο Σχήμα 4.2.2 παρουσιάζεται η ίδια επιφάνεια με αναδιάταξη των σημείων έτσι ώστε να παρουσιάζουν υψηλή αυτοσυσχέτιση. Διατηρώντας την ίδια κατανομή πιθανότητας η επιφάνεια πλέον χάνει τον αυστηρά τυχαίο της χαρακτήρα και αποκτά προσανατολισμό και περιοδικότητα. Σημειώνεται ότι το αποτέλεσμα του Σχήματος 4.2.2 προέρχεται από τη βοήθεια εξωτερικού κώδικα που παρατίθεται στο Παράρτημα εισάγοντας τον συντελεστή Hurst. Το παράδειγμα αυτό παρουσιάζεται μόνο για λόγους κατανόησης του ζητήματος και όχι για την αναπαράσταση πραγματικής επιφάνειας.



Σχήμα 4.2.2: Παραγωγή τυχαίας επιφάνειας με υψηλή αυτοσυσχέτιση

Στα πλαίσια δημιουργίας τυχαίων επιφανειών απαιτούνται λοιπόν δύο κύρια χαρακτηριστικά: Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και η αυτοσυσχέτιση των μετρήσεων. Ο βασικός κώδικας υλοποίησης γίνεται σε περιβάλλον MatLab και αποτελεί παραλλαγή ήδη διαθέσιμου κώδικα ελεύθερου στο σχετικό Forum της MatLab. Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι ελεύθεροι κώδικες προερχόμενοι από αυτό το Forum για ζητήματα όπως η μετατροπή της επιφάνειας σε αρχείο .stl και η καταγραφή και εξαγωγή αυτής.

Η βασική ιδέα υλοποίησης καθώς και ο αρχικός κώδικας προέρχονται από σχετική δημοσίευση [19]. Η βασική ιδέα είναι η παραγωγή μίας επιφάνειας που ακολουθεί την επιθυμητή κατανομή πιθανότητας χωρίς απαραίτητα να διαθέτει όποια κανονικότητα και η παραγωγή μίας επιφάνειας που έχει την επιθυμητή αυτοσυσχέτιση χωρίς απαραίτητα να ακολουθεί τη συγκεκριμένη κατανομή πιθανότητας. Στη συνέχεια οι δύο επιφάνειες συγκρίνονται και ορίζεται το σφάλμα της μίας ως προς την άλλη και μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας γίνεται προσπάθεια προσαρμογής των χαρακτηριστικών της επιφάνειας αυτοσυσχέτισης στην επιφάνεια με την επιθυμητή κατανομή πιθανότητας. Το αποτέλεσμα αποτελεί τελικά επαλληλία των δύο καταστάσεων με σχετικά μικρή απόκλιση από κάθε μία.

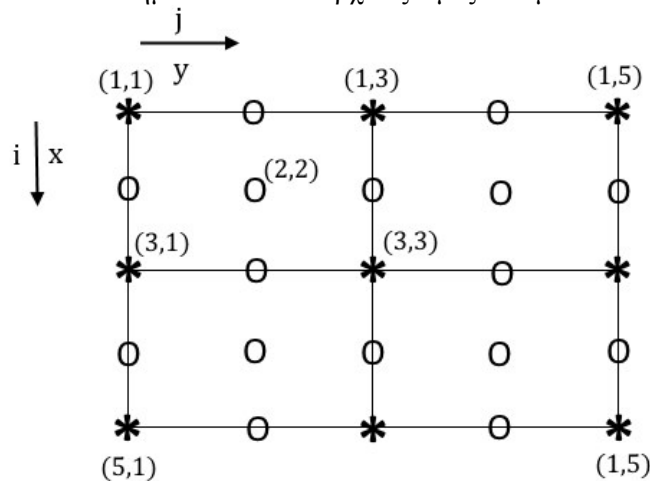
Στην παρούσα εργασία ως επιφάνεια δεδομένης αυτοσυσχέτισης εισάγονται τα δεδομένα των μετρήσεων. Ως επιφάνεια δεδομένης πιθανότητας δημιουργείται με τυχαίο τρόπο επιφάνεια σαν αυτή του Σχήματος 4.2.1 η οποία μπορεί να ακολουθεί τα στατιστικά δεδομένα όπως μετρήθηκαν ή κάποια παραλλαγή αυτών για την εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων.

Ένα άλλο ζήτημα που αφορά τη δημιουργία τυχαίων επιφανειών είναι ο αριθμός των σημείων που λαμβάνονται για χωρίο δεδομένων διαστάσεων. Ο αριθμός αυτός μπορεί να περιγραφεί από μία παράμετρο που ονομάζεται *Surface Asperity Density* [20] η οποία λαμβάνει υπόψη με στατιστικό τρόπο τον όγκο που καταλαμβάνει κάθε προεξοχή και τελικά εκφράζει αυτό που φανερώνει και η ονομασία της, δηλαδή την πυκνότητα των προεξοχών. Γνωρίζοντας αυτήν τη τιμή μέσω των μετρήσεων είναι δυνατό να προσδιοριστεί τελικά ο αριθμός των τυχαίων τιμών που θα ληφθούν σε ένα δεδομένο χωρίο.

Στη συνέχεια, αφού σχηματιστεί το τελικό μητρώο το οποίο περιλαμβάνει τα ύψη της επιφάνειας συναρτήσει συντεταγμένων (x, y) επιθυμείται ο μετασχηματισμός αυτού σε πραγματική επιφάνεια. Με άλλα λόγια επιθυμείται η μετατροπή ενός νέφους σημείων σε επιφάνεια. Η επιφάνεια αυτή όντας εν γένει ακανόνιστη μπορεί να περιγραφεί μόνο από αρχείο τύπου .stl. Επιπλέον, επιζητείται η μετατροπή της επιφάνειας σε όγκο, καθώς τελικός στόχος είναι ο υπολογισμός των συντελεστών ροής μέσω προσομοίωσης της ροής σε όγκο ρευστού που παρεμβάλλεται μεταξύ της τραχιάς επιφάνειας και μίας λείας. Η μετατροπή της επιφάνειας σε όγκο γίνεται μέσω ελεύθερα διατιθέμενου κώδικα MatLab που παρατίθεται στο Παράρτημα. Μέσω του κώδικα αυτού δίνοντας ως είσοδο μία επιφάνεια σχηματίζεται όγκος συγκεκριμένου ύψους κάτω από αυτήν. Η απέναντι επιφάνεια της τραχιάς είναι επίπεδη και ο ορισμός του ύψους αποτελεί παράμετρο εισόδου στον κώδικα.

Υπενθυμίζεται ότι οι συντελεστές ροής υπολογίζονται για στατικά προβλήματα συγκρίνοντας την πραγματική μέση παροχή, αυτήν δηλαδή που θα προκύψει στο χωρίο που κατασκευάστηκε, με τη θεωρητική, αυτήν δηλαδή που προβλέπεται σε χωρίο ίδιου ονομαστικού ύψους και εξωτερικών διαστάσεων αλλά μεταξύ επίπεδων κατά τα άλλα επιφανειών. Στη συνέχεια δημιουργείται βάση δεδομένων των συντελεστών ροής συναρτήσει των ονομαστικών διακένων. Κατά συνέπεια, για την ίδια επιφάνεια τραχύτητας πρέπει να δημιουργηθούν τόσο όγκοι όσα και τα ονομαστικά διάκενα προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες προσομοιώσεις.

Η περιπλοκότητα του ζητήματος δεν τελειώνει εδώ. Πρώτο ζήτημα που αντιμετωπίστηκε ήταν η πλεγματοποίηση των παραπάνω χωρίων. Τα χωρία αυτά, εκτός του ότι απαιτούν στοιχεία λίγων mm για να προσεγγισθεί καλά η επιφάνεια της τραχύτητας, όντας από περιγραφή .stl παρουσίασαν ιδιαίτερες δυσκολίες. Η περιγραφή αυτή και οι σχετικά απότομες αλλαγές των υψών είναι το αίτιο δημιουργίας αιχμηρών ακμών δύσκολα προσεγγίσιμων. Το πρόβλημα αυτό ξεπεράστηκε με την υποβοήθηση της δημιουργίας της επιφάνειας μέσω του εμπλουτισμού του αρχικού νέφους σημείων με άλλα ενδιάμεσα. Στο Σχήμα 4.2.3 παρουσιάζεται το νέο εμπλουτισμένο μητρώο. Με * σημειώνονται οι αρχικές τιμές ενώ με ο οι νέες πρόσθετες τιμές.



Σχήμα 4.2.3: Εμπλουτισμός αρχικού μητρώου υψών τραχύτητας

Τα σημεία που αντιστοιχούν σε αρχική τιμή διατηρούνται ως έχουν. Τα νέα εισερχόμενα σημεία σε κάθε στήλη αποτελούν τον μέσο όρο του αμέσως προηγούμενου και του αμέσως επόμενου, δηλαδή για το σημείο $(2,1)$ θα ισχύει

$$h_{2,1} = \frac{h_{1,1} + h_{3,1}}{2} \quad (4.2.4)$$

Με αντίστοιχο τρόπο εισάγονται και τα σημεία κάθε γραμμής, επομένως για το σημείο $(1,2)$ θα ισχύει

$$h_{1,2} = \frac{h_{1,1} + h_{1,3}}{2} \quad (4.2.5)$$

Τα ενδιάμεσα σημεία όπως το $(2,2)$ επηρεάζονται και από τις τέσσερις κορυφές που το περιβάλλουν, δηλαδή

$$h_{2,2} = \frac{h_{1,1} + h_{1,3} + h_{3,3} + h_{3,1}}{4} \quad (4.2.6)$$

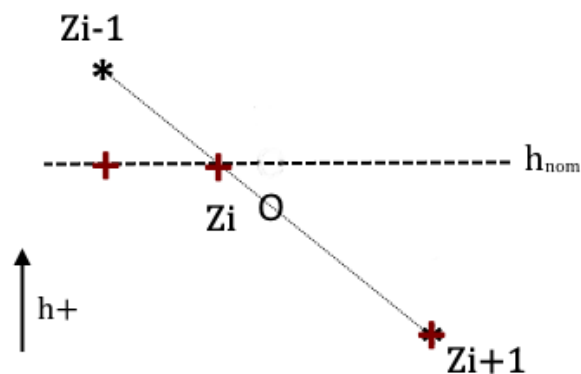
Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ομαλότερη μετάβαση από κορυφή σε κορυφή, τεχνική που πράγματι βοηθά στην πλεγματοποίηση των τελικών χωρίων. Σημειώνεται ότι όσον αφορά τις συντεταγμένες (x, y) των εισαγόμενων σημείων, αυτές τίθενται τέτοιες ώστε να ισαπέχουν από τα γειτονικά σημεία.

Το επόμενο και τελευταίο ζήτημα που τίθεται είναι η δημιουργία των σωστών όγκων όταν πλέον τα ονομαστικά διάκενα λαμβάνουν τιμές ίσες με ορισμένα από τα ύψη της τραχύτητας. Αυτό σημαίνει ότι οι δύο επιφάνειες έρχονται πλέον σε επαφή και τοπικά τα σημεία εκείνα της τραχύτητας για τα οποία ισχύει

$$h > h_{nom} \quad (4.2.7)$$

παραμορφώνονται. Η σχέση (4.2.7) αποτελεί λοιπόν συνθήκη που εξετάζεται για το αρχικό μητρώο τιμών, πριν από τον εμπλουτισμό, για κάθε νέο εξαγόμενο χωρίο. Για τα στοιχεία παρεμβολής των γραμμών και των στηλών εξετάζονται πλέον τρία νέα σενάρια.

Το πρώτο σενάριο είναι αυτό του Σχήματος 4.2.4 και αναπαριστά την περίπτωση όπου ένα εκ των δύο διαδοχικών σημείων του αρχικού πίνακα ικανοποιεί την (4.2.7) ενώ το άλλο όχι. Στο Σχήμα αναπαριστώνται με * τα αρχικά σημεία, με O το σημείο που θα εισαγόταν σύμφωνα με τον προηγούμενο αλγόριθμο και με + τα σημεία που τελικά εισάγονται για το δεδομένο ονομαστικό διάκενο.



Σχήμα 4.2.4: Πρώτο σενάριο διάταξης σημείων στην περίπτωση $h > h_{nom}$

Προκειμένου να δοθεί η έννοια της παραμόρφωσης γίνεται προσπάθεια απόδοσης μίας τοπικής επιπεδότητας για τα σημεία που ξεπερνούν το ονομαστικό διάκενο διατηρώντας παράλληλα την κλίση των «λόφων» που αρχικά δημιουργήθηκαν. Έτσι, για το σημείο $i-1$ με αρχικό ύψος Z_{i-1} πλέον θα ισχύει $Z'_{i-1} = h_{nom}$ διατηρώντας τις συντεταγμένες του (x, y) . Το πρόσθετο σημείο i θα αποκτήσει ύψος ίσο με $Z_i = h_{nom}$, ενώ η νέα του συντεταγμένη δεν θα είναι αυτή που αρχικά ορίστηκε με το κριτήριο των ίσων αποστάσεων, αλλά θα είναι τέτοια ώστε να διατηρείται η κλίση μεταξύ των $(i-1, i+1)$ και επομένως για αυτήν θα ισχύει

$$x'_i = \frac{Z_i - b}{a} = \frac{h_{nom} - b}{a} \quad (4.2.8)$$

όπου

$$a = \frac{Z_{i+1} - Z_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \text{ και } b = Z_{i+1} - ax_{i+1} \quad (4.2.9)$$

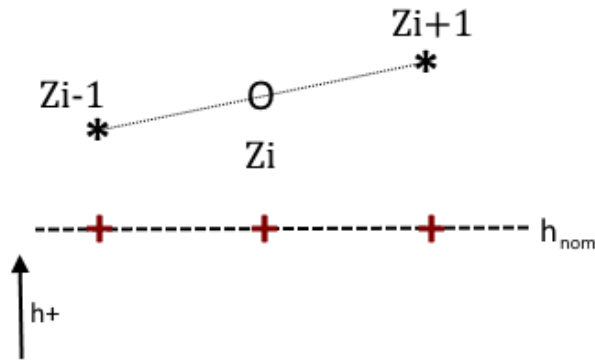
Τα αντίστοιχα ισχύουν εάν το σημείο που ξεπερνά το ονομαστικό διάκενο είναι το επόμενο και όχι το προηγούμενο του σημείου i . Προφανώς οι σχέσεις αυτές ισχύουν και για την περίπτωση των συντεταγμένων y με πλήρη αντιστοιχία.

Το δεύτερο σενάριο είναι αυτό του Σχήματος 4.2.5 και αποτελεί στην ουσία την περίπτωση όπου και το προηγούμενο και το επόμενο σημείο έχουν ύψος μεγαλύτερο του ονομαστικού διακένου. Στην περίπτωση αυτή αλλάζουν μόνο τα ύψη αυτών και όχι οι συντεταγμένες τους και επομένως ισχύει

$$Z'_{i-1} = Z_i = Z'_{i+1} = h_{nom} \quad (4.2.10)$$

και

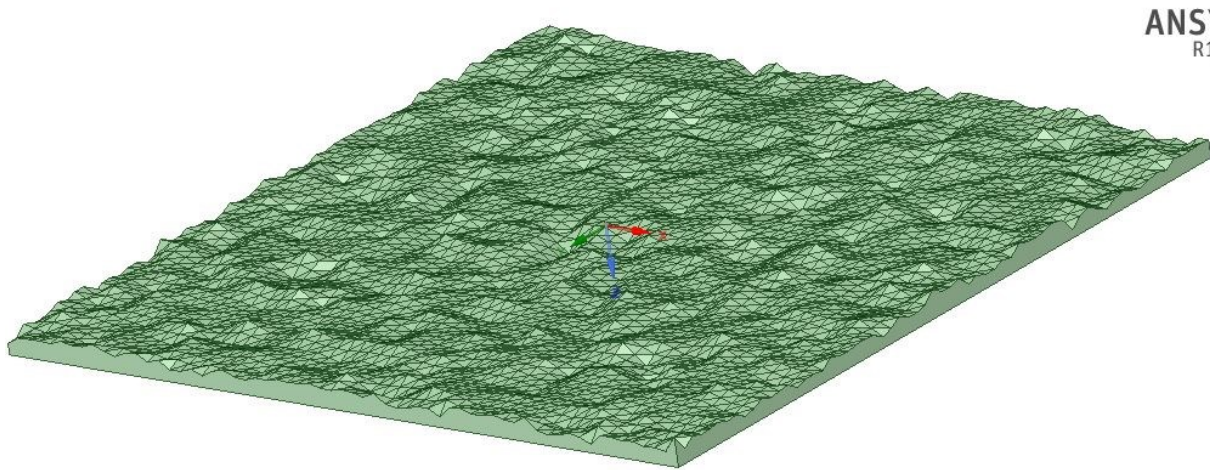
$$x'_i = x_i \quad (4.2.11)$$



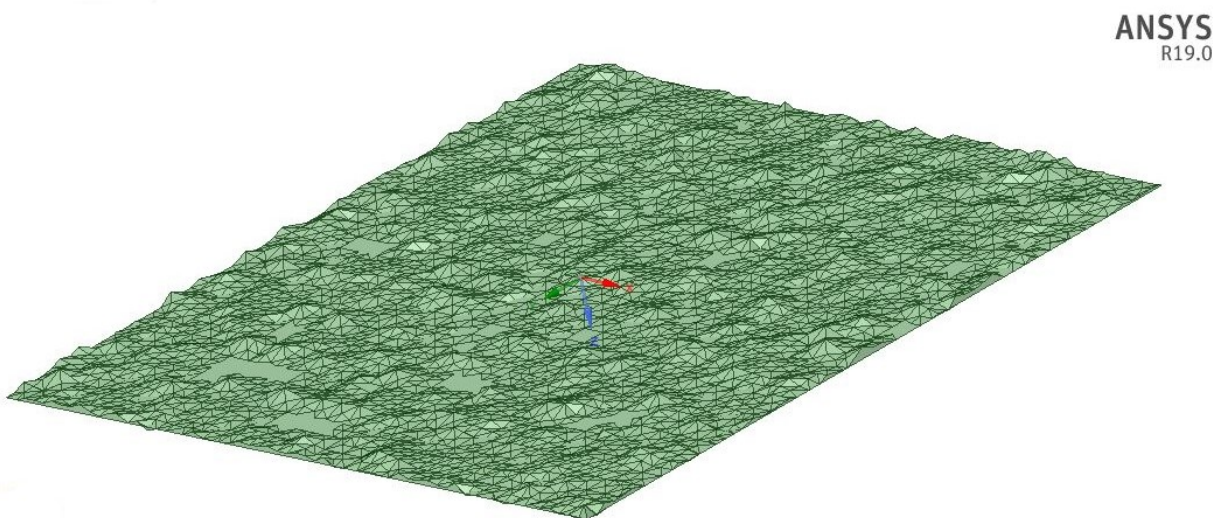
Σχήμα 4.2.5: Δεύτερο σενάριο διάταξης σημείων στην περίπτωση $h > h_{nom}$

Το τρίτο και τελευταίο σενάριο είναι αυτό όπου και τα δύο σημεία έχουν ύψος χαμηλότερο του ονομαστικού διακένου και επομένως και αυτά και το ενδιάμεσο που προστίθεται αντιμετωπίζονται με τον αρχικό αλγόριθμο.

Οι παραπάνω έλεγχοι γίνονται πρώτα για τις γραμμές, στη συνέχεια για τις στήλες και τέλος για τα ενδιάμεσα σημεία εφαρμόζεται η σχέση (4.2.6) λαμβάνοντας υπόψη τα νέα ύψη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε ονομαστικό διάκενο πριν τελικά εξαχθεί ο όγκος σε μορφή .stl. Στο Σχήμα 4.2.6 (α) και (β) παρουσιάζεται το τελικό χωρίο υπολογισμού για την ίδια επιφάνεια τραχύτητας αλλά για διαφορετικά ονομαστικά διάκενα.



(α)



(β)

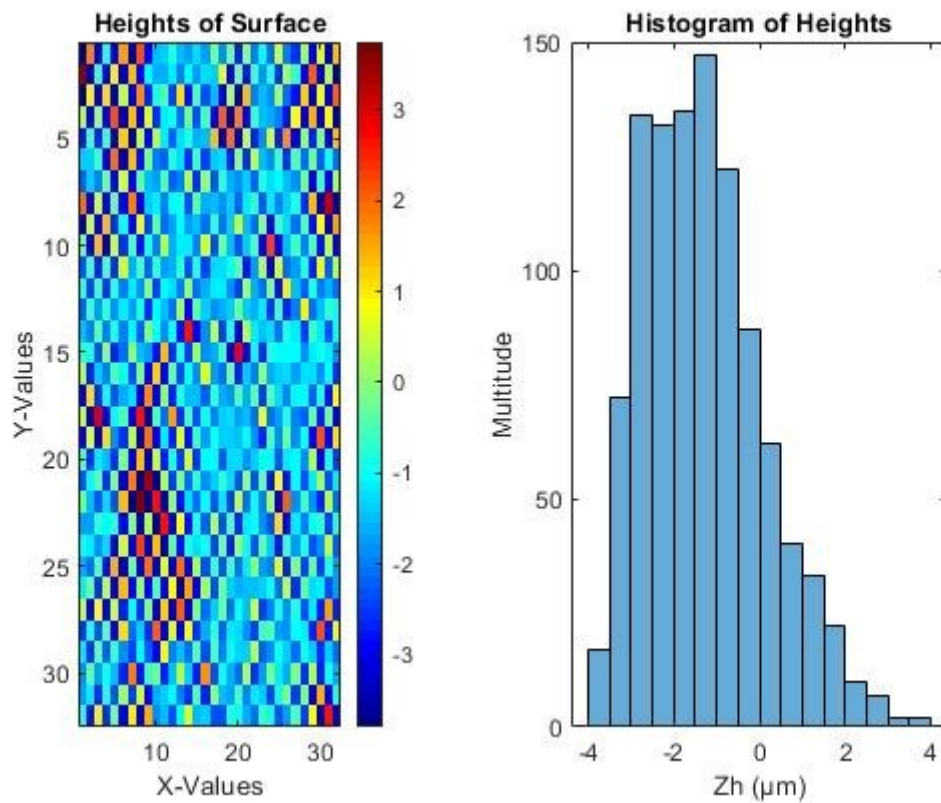
Σχήμα 4.2.6: Τελικό χωρίο υπολογισμού ίδιας επιφάνειας τραχύτητας

(α) $h_{nom} > 3\sigma$, (β) $h_{nom} < \sigma$

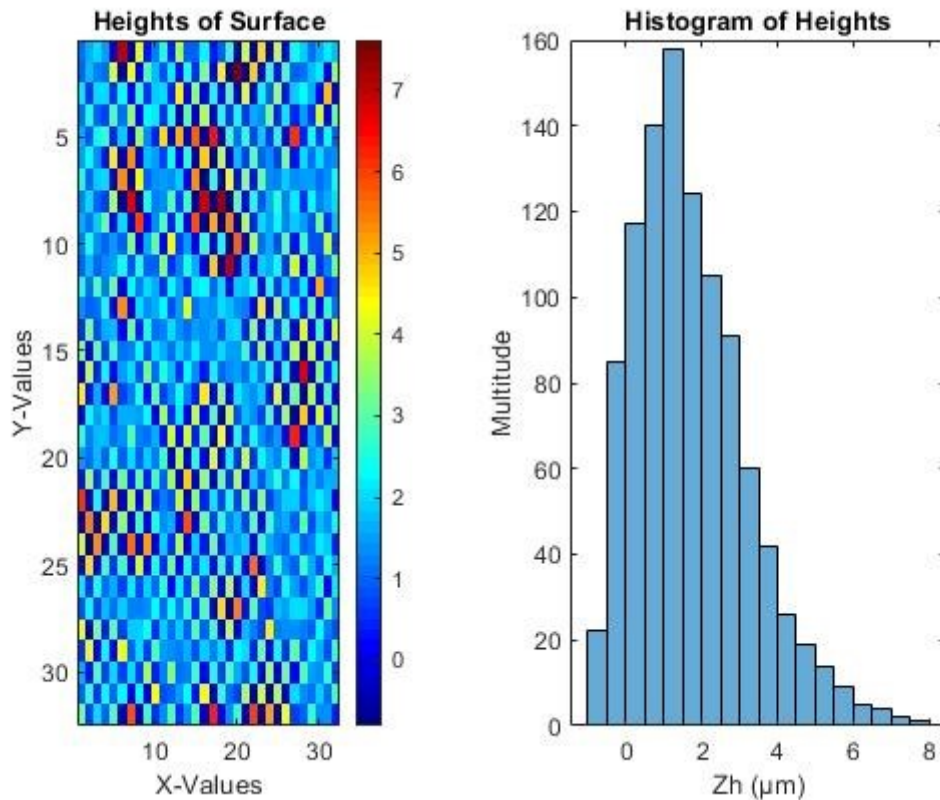
Στο Σχήμα 4.2.6(α) φαίνεται πλήρως η αρχική επιφάνεια καθώς το ονομαστικό διάκενο είναι αρκετά μεγαλύτερο της τραχύτητας και επομένως δεν υπάρχουν σημεία παραμόρφωσης, ενώ στο Σχήμα 4.2.6(β) παρατηρείται αφενός το πολύ μικρό ονομαστικό διάκενο και αφετέρου περιοχές τελείως επίπεδες. Οι περιοχές αυτές αντιστοιχούν σε ύψη μεγαλύτερα του ονομαστικού διακένου και κατά συνέπεια έχουν πλέον «παραμορφωθεί» μη επιτρέποντας τη διέλευση ρευστού μέσα από αυτές.

4.3 Εξαγωγή συντελεστών Patir & Cheng

Για την εξαγωγή των συντελεστών ροής κατά Patir & Cheng ακολουθείται η εξής διαδικασία. Καταρχάς δημιουργούνται οι επιφάνειες και ως εκ τούτου και οι αντίστοιχοι όγκοι ρευστού που πρόκειται να εξετασθούν ως προς την τραχύτητά τους και την επίδραση αυτής. Τα χωρία είναι τετραγωνικά διαστάσεων $1.3mm \times 1.3mm$ και ονομαστικού ύψους $h \in [5, 100] \mu m$. Δύο περιπτώσεις εξετάζονται, η μία έχοντας πολύ αρνητική τραχύτητα – δηλαδή πολλές κοιλάδες – και η άλλη έχοντας πολύ θετική τραχύτητα – δηλαδή πολλές κορυφές. Και οι δύο φέρουν χαρακτηριστικά $Ra \approx$ και $Rq \approx$. Τα ιστογράμματα των αρχικών υψών (πριν τον εμπλουτισμό των ενδιάμεσων σημείων) παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.3.1 (α) και (β).



(α)



(β)

Σχήμα 4.3.1: Αρχικά ύψη επιφανειών τραχύτητας (α) αρνητική τραχύτητα, (β) θετική τραχύτητα

Στη συνέχεια, με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα παράγονται τα διάφορα χωρία για τα διάφορα ονομαστικά διάκενα. Παράλληλα, λαμβάνεται η μέση πίεση για την περίπτωση κινητήριου – ακίνητου δίσκου (επίλυση μόνο μέσω Fluent) από αρχικό διάκενο $h_o = 100\mu m$ μέχρι τελικό διάκενο $h_f = 5\mu m$ με τις συνθήκες: $D_{in} = 75mm$, $D_{out} = 115mm$, $\Delta\omega = 105rad/s$, $\frac{dh}{dt} = -10mm/s$, $\rho = 800kg/m^3$ και $\eta = 0.01Pas$. Οι τιμές πυκνότητας και ιξώδους λαμβάνονται για θερμοκρασία περί τους $80^\circ C$.

Στον Πίνακα 4.3.1 παρουσιάζονται οι τιμές της μέσης πίεσης για τα διάφορα ονομαστικά διάκενα όπως προέκυψαν από την παραπάνω προσομοίωση.

Πίνακας 4.3.1: Μέση πίεση συναρτήσει των ονομαστικών διακένων

h_{nom} (μm)	P_m (bar)	h_{nom} (μm)	P_m (bar)	h_{nom} (μm)	P_m (bar)	h_{nom} (μm)	P_m (bar)
100	0.437	75	1.001	50	3.373	25	24.606
95	0.494	70	1.262	45	4.554	20	40.714
90	0.599	65	1.534	40	6.367	15	105.084
85	0.689	60	1.985	35	9.453	10	268.414
80	0.850	55	2.520	30	14.088	5	1072.100

Από τις παραπάνω τιμές φαίνεται η ραγδαία αύξηση της πίεσης στα πολύ μικρά διάκενα το οποίο συνάδει με τον απειρισμό της πίεσης για το μηδενικό διάκενο σύμφωνα με την εξίσωση του Reynolds, ενώ καθιστά φανερή την ανάγκη ύπαρξης διαμορφώσεων για την εκτόνωση του φαινομένου.

Αφού έχουν προσδιοριστεί οι τιμές της μέσης πίεσης για τα διάφορα διάκενα εισάγονται ως οριακή συνθήκη (pressure inlet) κατά αντιστοιχία στις διάφορες γεωμετρικές τραχύτητας. Η επίλυση γίνεται σε Steady State μοντέλα εντός του Fluent, όπου όλες οι επιφάνειες τίθενται ως ακίνητα τοιχώματα, εκτός από μία επιφάνεια εισόδου (pressure inlet) και μία εξόδου (pressure outlet P=0) του ρευστού οι οποίες έχουν επιλεγεί κατά τη διεύθυνση y. Υπενθυμίζεται ότι για ισότροπες επιφάνειες τα αποτελέσματα δεν εξαρτώνται από τη

διεύθυνση της ροής. Έτσι, για κάθε ονομαστικό διάκενο και για την αντίστοιχη διαφορά πίεσης λαμβάνεται η πραγματική μέση παροχή q_{real} . Στον Πίνακα 4.3.2 παρουσιάζεται η θεωρητική μέση παροχή $q_{th} = \frac{h^3}{12\eta} \frac{2p_m}{L_y}$, η πραγματική για την περίπτωση (α) της αρνητικής τραχύτητας και η πραγματική για την περίπτωση (β) της θετικής τραχύτητας συναρτήσει των ονομαστικών διακένων. Στις τελευταίες στήλες παρουσιάζεται η τιμή του συντελεστή ροής $f = \frac{q_{real}}{q_{th}}$ και η προκύπτουσα τιμή του νέου ιξώδους κατά Patir & Cheng $\eta' = \frac{1}{f} \eta$.

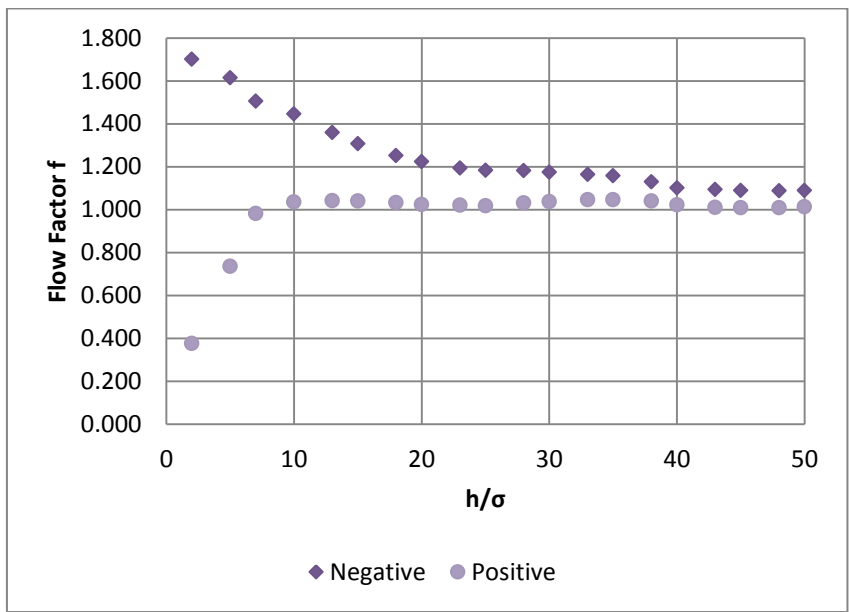
Σημειώνεται ότι η πραγματική παροχή υπολογίζεται για διαφορά πίεσης $\Delta p = 2p_m$ ώστε η μέση πίεση εντός του χωρίου να είναι ίση με p_m . Οι συντελεστές ροής παρουσιάζονται και στο Διάγραμμα 4.3.1.

Όπως φαίνεται από τις τιμές τους για την περίπτωση της αρνητικής τραχύτητας οι συντελεστές ροής αυξάνονται πάνω από τη μονάδα με το κλείσιμο των δίσκων, κάτι που είναι αντίθετο στην καμπύλη του Σχήματος 2.1.2.1. Επιπλέον παρατηρείται ότι γενικά οι συντελεστές που αφορούν την αρνητική τραχύτητα βρίσκονται ψηλότερα της μονάδας ακόμα και για διάκενα πολύ μεγαλύτερα των τριών τυπικών αποκλίσεων 3σ. Αντιθέτως, για την περίπτωση της θετικής τραχύτητας η καμπύλη που περιγράφει τους συντελεστές ροής σε σχέση με το διάκενο μοιάζει αρκετά με αυτήν του Σχήματος 2.1.2.1. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την εξαγωγή των συντελεστών ροής οι Patir & Cheng θεώρησαν μόνο τις κορυφές της τραχύτητας που διακόπτουν τη ροή, όχι όμως και την ύπαρξη κοιλάδων, το οποίο είναι σημαντικό λάθος για την θεωρούμενη κανονική κατανομή μηδενικής μέσης τιμής που χρησιμοποιήθηκε από τους ίδιους. Στην περίπτωση ύπαρξης κοιλάδων η ροή ευνοείται και τελικά η φαινόμενη παροχή αυξάνεται. Επιπλέον, δεν είναι δυνατό να θεωρηθεί ότι υπάρχουν μόνο κορυφές καθώς αυτό θα σήμαινε ολική παραμόρφωση του υλικού και επαναφορά του σε κάθε σύμπλεξη. Αντιθέτως η ύπαρξη μόνο κοιλάδων είναι δυνατή και ίσως μπορεί να αποτελέσει σχεδιαστικό στόχο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Πάντως, η πραγματική τοποθεσία του νοητού μηδενικού άξονα, από εκεί δηλαδή που θεωρούνται οι κοιλάδες και οι κορυφές και μετράται η παράμετρος Ra δεν είναι εν γένει γνωστή καθώς εξαρτάται από τον βαθμό παραμόρφωσης των κορυφών, και κατά συνέπεια το εξωτερικά ασκούμενο έργο και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού φθοράς.

Στη συνέχεια για τη διόρθωση της ροής εξάγεται η σχέση $\eta' = f(t)$ για τη δεδομένη ταχύτητα συμπίεσης και το αρχικό διάκενο η οποία μέσω εντολών UDF που παρατίθενται στο Παράρτημα εισάγει τους συντελεστές ροής για κάθε διάκενο μεταβάλλοντας ουσιαστικά το ιξώδες του ρευστού σε κάθε χρονικό βήμα. Η επίδραση της τραχύτητας παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6 μαζί με τα υπόλοιπα αποτελέσματα της εργασίας.

Πίνακας 4.3.2: Εξαγωγή συντελεστών ροής κατά Patir & Cheng

h (μm)	q_{th} (cm^3/s)	$q_{real, negative}$ (cm^3/s)	$q_{real, positive}$ (cm^3/s)	$f_{negative}$ (-)	$f_{positive}$ (-)	$\eta'_{negative}$ (Pas)	$\eta'_{positive}$ (Pas)
100	0.599	0.653	0.608	1.090	1.014	0.0092	0.0099
95	0.589	0.641	0.595	1.088	1.009	0.0092	0.0099
90	0.610	0.665	0.617	1.090	1.010	0.0092	0.0099
85	0.600	0.656	0.607	1.094	1.011	0.0091	0.0099
80	0.621	0.684	0.636	1.102	1.024	0.0091	0.0098
75	0.611	0.690	0.636	1.130	1.041	0.0088	0.0096
70	0.631	0.731	0.661	1.158	1.047	0.0086	0.0096
65	0.623	0.725	0.652	1.165	1.046	0.0086	0.0096
60	0.640	0.751	0.664	1.174	1.038	0.0085	0.0096
55	0.634	0.751	0.655	1.183	1.032	0.0085	0.0097
50	0.646	0.765	0.659	1.185	1.019	0.0084	0.0098
45	0.646	0.772	0.660	1.195	1.021	0.0084	0.0098
40	0.645	0.789	0.661	1.224	1.024	0.0082	0.0098
35	0.654	0.819	0.676	1.253	1.033	0.0080	0.0097
30	0.630	0.825	0.657	1.308	1.041	0.0076	0.0096
25	0.657	0.894	0.686	1.360	1.042	0.0074	0.0096
20	0.589	0.852	0.611	1.446	1.037	0.0069	0.0096
15	0.700	1.056	0.689	1.506	0.983	0.0066	0.0102
10	0.658	1.063	0.485	1.614	0.737	0.0062	0.0136
5	0.658	1.120	0.248	1.701	0.377	0.0059	0.0266



Διάγραμμα 4.3.1: Συντελεστές ροής για τις περιπτώσεις αρνητικής και θετικής τραχύτητας

5

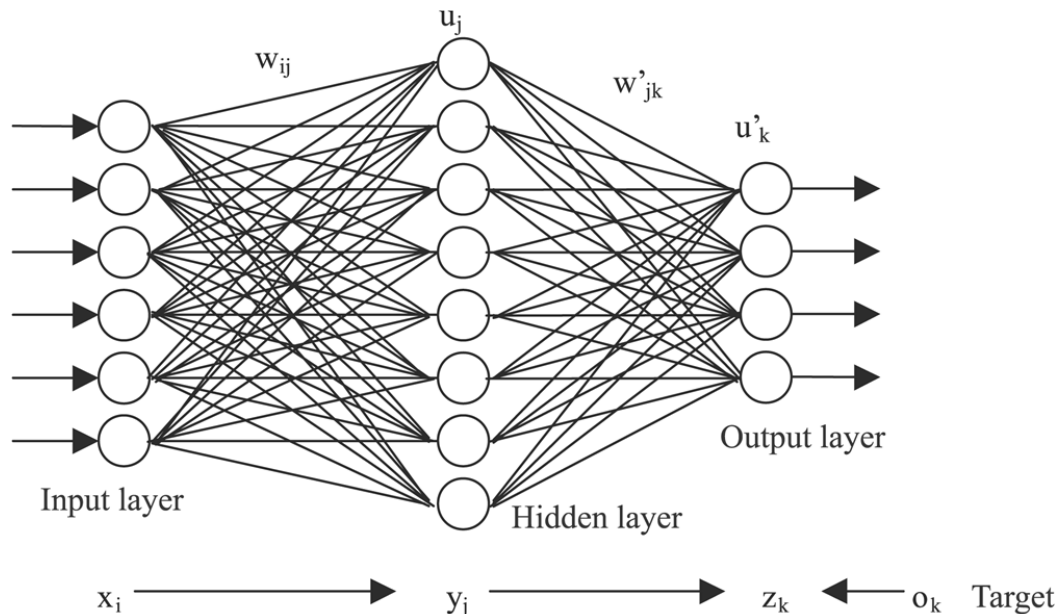
Βελτιστοποίηση

5.1 Προσέγγιση αποτελεσμάτων μέσω νευρωνικών δικτύων

Τα νευρωνικά δίκτυα αν και δεν αποτελούν καινούργια ιδέα έχουν βρει ιδιαίτερη ανάπτυξη και εφαρμογή τα τελευταία λίγα χρόνια κυρίως λόγω της αύξησης της υπολογιστικής δύναμης των υπολογιστών αλλά και του πλήθους των διαθέσιμων δεδομένων (Big Data). Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές στην αρχιτεκτονική και την μαθηματική μοντελοποίηση των νευρωνικών δικτύων, όμως η βασική αρχή όλων εμπνέεται από τον τρόπο λειτουργίας των βιολογικών νευρώνων, εξού και η ονομασία τους. Σε έναν βιολογικό οργανισμό εκπέμπονται διάφορα σήματα κατά την αλληλεπίδρασή του με το περιβάλλον μέσω των συνάψεων των νευρώνων και ανάλογα με το αποτέλεσμα αυτών των συνάψεων ενισχύεται ή όχι ο εκάστοτε δρόμος που ακολουθήθηκε. Μεγάλο ρόλο σε αυτήν την διαδικασία παίζει και η συχνότητα έκθεσης ή επανάληψης. Έτσι, ένα μικρό παιδί που μόλις ανακαλύπτει τον κόσμο θα χρειαστεί κάποιο πλήθος παραδειγμάτων διαφορετικών αυτοκινήτων έως ότου αποκτήσει την ικανότητα να κατατάσσει όλα τα αυτοκίνητα σε μία κοινή κατηγορία βάση κοινών χαρακτηριστικών, ενώ ένα άτομο που μαθαίνει κάποιο μουσικό όργανο θα χρειαστεί αρκετές επαναλήψεις έως ότου τα χέρια να ακολουθούν αβίαστα τις κινήσεις που πρέπει. Σε κάθε περίπτωση αυτό που έχει συμβεί είναι η ενίσχυση των δρόμων εκείνων που οδηγούν στο σωστό αποτέλεσμα και ως εκ τούτου η διευκόλυνση μεταβίβασης σημάτων μέσω αυτών των συγκεκριμένων διαδρομών.

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για διάφορες εφαρμογές όπως η αναγνώριση χαρακτηριστικών (pattern recognition), η ομαδοποίηση (classification / clustering) καθώς και η προσέγγιση συναρτήσεων ή μοτίβων (regression). Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση των τελευταίων. Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο τέτοιου τύπου μοιάζει με αυτό του Σχήματος 5.1.1. Αποτελεί από τρία ή περισσότερα στρώματα (layers), το στρώμα εισόδου (input layer), το στρώμα εξόδου (output layer) και ένα ενδιάμεσο στρώμα (hidden layer) νευρώνων (neurons). Κάθε νευρώνας αποτελείται από κάποια συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function) η οποία συνήθως είναι κάποια γραμμική ή σχεδόν γραμμική συνάρτηση (identity, sigmoid, ReLU κ.α.). Κάθε νευρώνας συνδέεται με όλες τις εισόδους και με όλες τις εξόδους μέσω σταθμισμένων οδών. Κατά την αρχικοποίηση του νευρωνικού δικτύου τα παραπάνω βάρη αποδίδονται τυχαία ή σχεδόν τυχαία. Μετά από τη διαδικασία της εκπαίδευσης (training) εφόσον αυτή είναι επιτυχής, προσδιορίζονται τόσο τα βάρη όσο και τα σταθερό σφάλμα (bias error) που τελικά συνδέουν τις εισόδους με τους νευρώνες και τους νευρώνες με τις εξόδους. Τελικά, για κάθε συνδυασμό εισόδων οι εξόδοι είναι το άθροισμα των αποτελεσμάτων όλων των νευρώνων με διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας. Ο προσδιορισμός των βαρών που είναι και το ζητούμενο κάθε εκπαίδευσης υλοποιείται από έτοιμο αλγόριθμο στο περιβάλλον της MatLab στη σχετική εργαλειοθήκη και είναι αυτός της οπισθοδιάδοσης (backpropagation) σφαλμάτων των Levenberg – Marquardt.

Τέλος, σημειώνεται ότι κάθε νευρωνικό δίκτυο μπορεί να αποτελείται από πολλαπλά στρώματα και διαφορετικούς αριθμούς νευρώνων και συναρτήσεων ενεργοποίησης και ότι ο εκάστοτε τέτοιος συνδυασμός αποτελεί τη λεγόμενη αρχιτεκτονική του δικτύου. Κατά την εκπαίδευση απαιτούνται τρία σύνολα εισόδων – εξόδων, ένα για την εκπαίδευση αυτή καθαυτή (training set), ένα για τον έλεγχο σε «άγνωστα» δεδομένα προκειμένου να αποφανθεί ο αλγόριθμος εάν το σφάλμα πρόβλεψης είναι μικρό (validation set) και ένα σύνολο πραγματικά άγνωστων εισόδων με το οποίο ελέγχεται το σφάλμα του τελικού δικτύου (test set).



Σχήμα 5.1.1: Τυπικό διάγραμμα νευρωνικού δικτύου⁴

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσονται τρία ανεξάρτητα νευρωνικά δίκτυα κάθε ένα από τα οποία λαμβάνει ως είσοδο τις εκάστοτε γεωμετρικές παραμέτρους και εκπαιδεύεται σε μία μόνο έξοδο η οποία είναι η ωφέλιμη ροπή κατά τη σύμπλεξη, η δύναμη που απαιτείται για το κλείσιμο των δίσκων και η ροπή αντίστασης όταν οι δίσκοι απλά περιστρέφονται αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η δυναμικότητα του προβλήματος ως έξοδος στις δύο πρώτες περιπτώσεις λαμβάνεται το *εμβαδόν* των διαγραμμάτων Ροπή – Χρόνος και Δύναμη – Χρόνος ως ενδεικτικά των αντίστοιχων έργων. Έτσι, η πορεία που έχει ακολουθηθεί από το αρχικό μέχρι το τελικό διάκενο προσομοίωσης (ίδια διάκενα για όλες τις περιπτώσεις) δεν χάνεται πίσω από την τελική τιμή. Αλλωστε και σε πραγματικό επίπεδο το εκάστοτε έργο είναι αυτό που ενδιαφέρει και όχι μία συγκεκριμένη στιγμιαία τιμή.

Η εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου απαιτεί ικανό πλήθος εισόδων – εξόδων. Έτσι, προκειμένου να ληφθούν τα απαραίτητα δεδομένα γίνεται προσομοίωση του ίδιου προβλήματος για διαφορετικές τιμές γεωμετρικών παραμέτρων μέσω του ANSYS και στη συνέχεια τα αποτελέσματα εισάγονται σε κώδικα MatLab που παρατίθεται στο Παράρτημα όπου και επεξεργάζονται κατάλληλα και τελικά χρησιμοποιούνται στην εκπαίδευση και τον έλεγχο των νευρωνικών δικτύων. Επειδή για τα νευρωνικά δίκτυα αυτά ενδιαφέρει ιδιαίτερα η ικανότητα γενίκευσης, δηλαδή η πρόβλεψη σε οποιαδήποτε άγνωστη είσοδο εντός κάποιων ορίων, αφού πρόκειται να χρησιμοποιηθούν τελικά για τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας, το σύνολο ελέγχου διαμορφώνεται από εντελώς άγνωστα σημεία προκειμένου να μην υπάρχει αλληλεπικάλυψη με τα σημεία εκπαίδευσης.

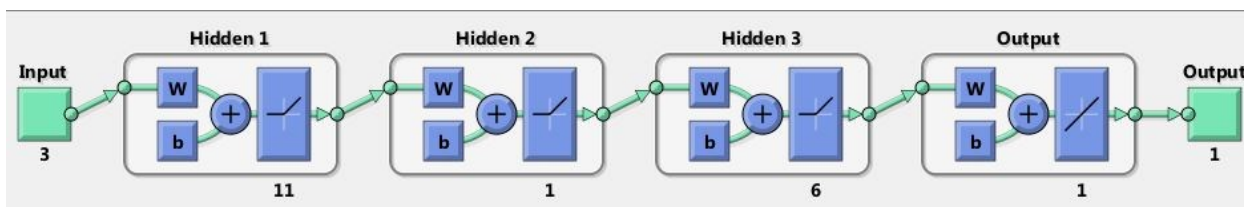
Από τη φύση των νευρωνικών δικτύων είναι αδύνατη η εκ των προτέρων γνώση της αρχιτεκτονικής εκείνης που θα επιφέρει τα καλύτερα αποτελέσματα. Επιπλέον, μπορεί μία αρχικοποίηση βαρών να επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα έναντι μίας άλλης καθώς μέσω μίας «κακής» αρχικοποίησης μπορεί το πρόβλημα να εγκλωβιστεί σε κάποιο τοπικό ελάχιστο το οποίο όμως δεν είναι το ολικό. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω διαμορφώνεται επαναληπτικός έλεγχος εντός του κώδικα MatLab ο οποίος αφενός ελέγχει την απόδοση διαφορετικών αρχιτεκτονικών μέχρι και τριών κρυμμένων επιπέδων και αφετέρου αρχικοποιεί κάθε αρχιτεκτονική πλήθος φορών προκειμένου να αποφευχθεί ο εγκλωβισμός σε τοπικά ελάχιστα. Μετά το πέρας της επαναληπτικής διαδικασίας αυτής φυλάσσεται το δίκτυο εκείνο που απέδωσε το μικρότερο μέσο σφάλμα γενίκευσης.

Τέλος, σημειώνεται ότι για διευκόλυνση της μετέπειτα βελτιστοποίησης τα νευρωνικά δίκτυα δεν εκπαιδεύονται με έξοδο τα δύο έργα και τη ροπή ανεπεξέργαστα, αλλά στην αντιστοίχιση αυτών εντός του ίδιου διαστήματος (π.χ. 1 – 10) προκειμένου τελικά αυτά να είναι εύκολα και δίκαια συγκρίσιμα για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Στους Πίνακες 5.1.1-3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αρχιτεκτονικών και τα μέσα σφάλματα γενίκευσης για τις διάφορες περιπτώσεις. Σημειώνεται ότι ως συνάρτηση ενεργοποίησης χρησιμοποιείται η θετικά γραμμική (positive linear) καθώς αφενός όλες οι εισοδοί είναι θετικές και επομένως δεν απαιτείται αρνητικό τμήμα και αφετέρου δεν περιορίζει τα αποτελέσματα για τιμές μεγαλύτερες της μονάδας (έναντι της σιγμοειδούς).

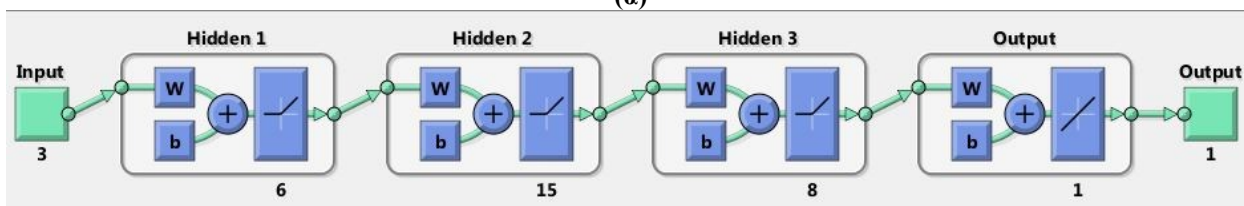
⁴ extremetech.com

Πίνακας 5.1.1: Αποτελέσματα εκπαίδευσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων – Ακτινικές Διαμορφώσεις

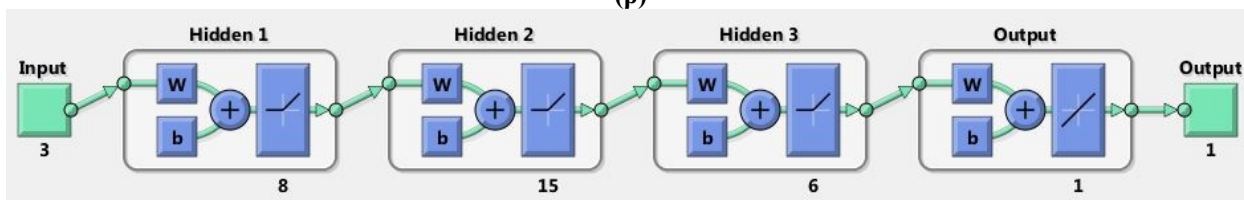
Ακτινικές Διαμορφώσεις			
TNA	Αρχιτεκτονική	Μέσο Σφάλμα Γενίκευσης (%)	Μέγιστο Σφάλμα Γενίκευσης (%)
Beneficial Torque	3x11x1x6x1	1.60	3.29
Reaction Force	3x6x15x8x1	2.12	4.62
Drag Torque	3x8x15x6x1	2.47	5.20



(α)



(β)

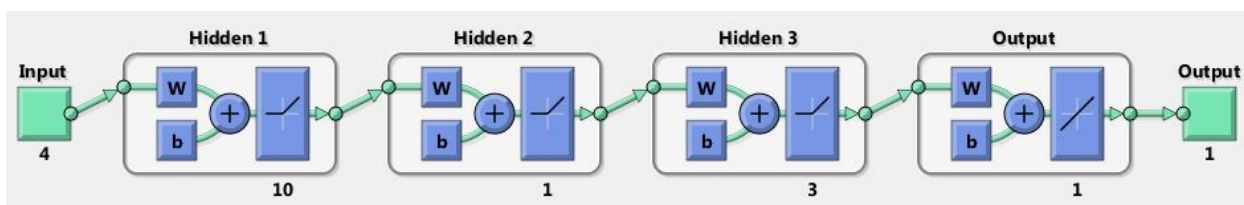


(γ)

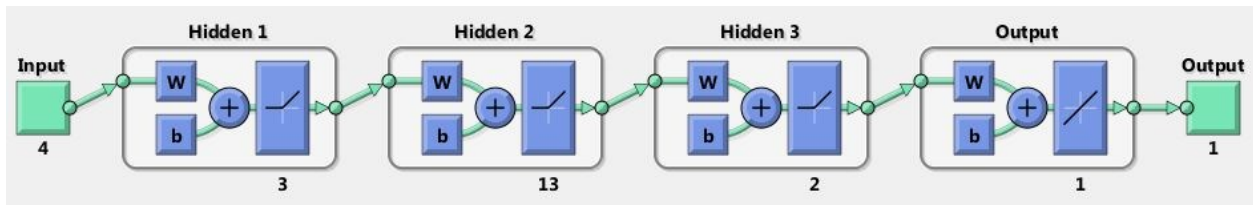
Σχήμα 5.1.2: Αρχιτεκτονική ΤΝΔ – Ακτινικές Διαμορφώσεις
(α) πρόβλεψης ροπής, (β) πρόβλεψης δύναμης, (γ) πρόβλεψης ροπής αντίστασης

Πίνακας 5.1.2: Αποτελέσματα εκπαίδευσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων – Τοξοειδείς Διαμορφώσεις

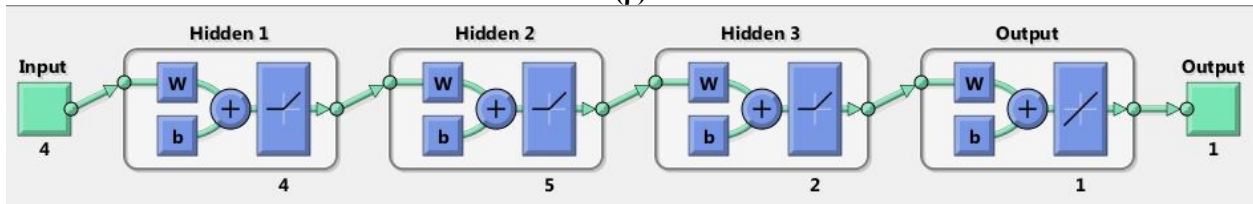
Τοξοειδείς Διαμορφώσεις			
TNA	Αρχιτεκτονική	Μέσο Σφάλμα Γενίκευσης (%)	Μέγιστο Σφάλμα Γενίκευσης (%)
Beneficial Torque	4x10x1x3x1	2.13	5.55
Reaction Force	4x3x13x2x1	1.73	2.69
Drag Torque	4x4x5x2x1	1.79	3.77



(α)



(β)

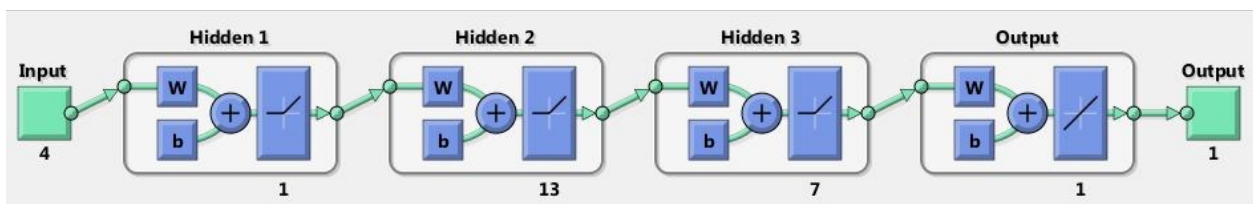


(γ)

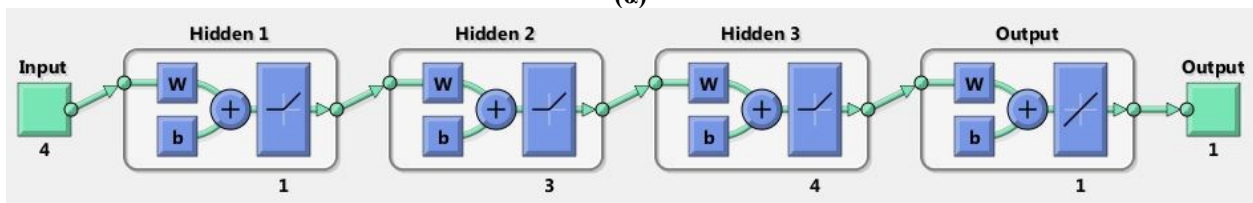
Σχήμα 5.1.3: Αρχιτεκτονική ΤΝΔ – Τοξοειδείς Διαμορφώσεις
 (α) πρόβλεψης ροπής, (β) πρόβλεψης δύναμης, (γ) πρόβλεψης ροπής αντίστασης

Πίνακας 5.1.3: Αποτελέσματα εκπαίδευσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων – Διαμορφώσεις Μέσης Εκτόνωσης

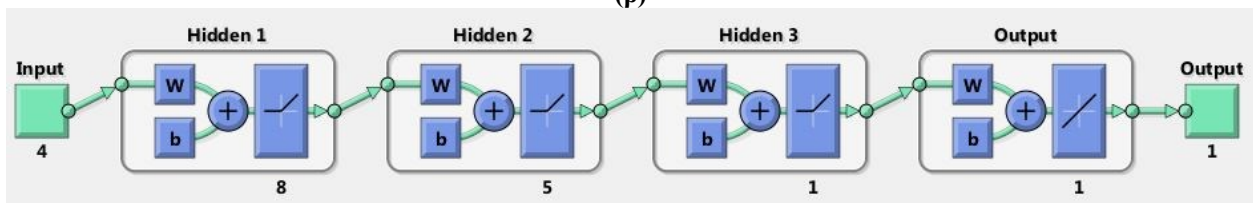
ΤΝΔ	Διαμορφώσεις Μέσης Εκτόνωσης		
	Αρχιτεκτονική	Μέσο Σφάλμα Γενίκευσης (%)	Μέγιστο Σφάλμα Γενίκευσης (%)
Beneficial Torque	4x1x13x7x1	3.62	6.98
Reaction Force	4x1x3x4x1	3.49	5.81
Drag Torque	4x8x5x1x1	3.37	8.62



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 5.1.4: Αρχιτεκτονική ΤΝΔ – Διαμορφώσεις Μέσης Εκτόνωσης
 (α) πρόβλεψης ροπής, (β) πρόβλεψης δύναμης, (γ) πρόβλεψης ροπής αντίστασης

5.2 Βελτιστοποίηση γεωμετρικών παραμέτρων μέσω γενετικών αλγορίθμων

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (genetic algorithms) αποτελούν ένα εργαλείο βελτιστοποίησης το οποίο βασίζεται στην ιδέα της εξέλιξης μέσω της φυσικής επιλογής και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε πολυπαραμετρικά προβλήματα, όπου η αναζήτηση αναλυτικής λύσης είναι πολύ δύσκολη ή και αδύνατη. Η λογική των γενετικών αλγορίθμων είναι η δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού λύσεων και η μέσω βασικών ενεργειών (μετάλλαξη, διασταύρωση, επιλογή) μεταβολή των λύσεων αυτών, ώστε να προκρίνονται κάθε φορά λύσεις που ελαχιστοποιούν μια συνάρτηση (objective function). Ο αλγόριθμος τελειώνει με βάση κριτήρια τερματισμού

όπως ο μέγιστος αριθμός γενεών, ο ρυθμός μεταβολής της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, ο ρυθμός μεταβολής των γονιδίων κ.α. και επιλέγεται η καλύτερη λύση που έχει βρεθεί ως εκείνη την στιγμή. Πρόκειται για μια στοχαστική διαδικασία η οποία μπορεί να μην καταλήγει πάντα στην εύρεση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος, αλλά συνήθως σε μια πολύ κοντινή σε αυτήν. Όπως και για την περίπτωση των νευρωνικών δικτύων, έτσι και για τους γενετικούς αλγόριθμους χρησιμοποιείται η σχετική εργαλειοθήκη της MatLab χωρίς εν γένει να γίνει παρεμβολή στα κριτήρια τερματισμού, διασταύρωσης, ελιτισμού και επιλογής.

Η διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης αποτελεί καθαρά υποκειμενικό ζήτημα καθώς η μορφή της και τα ορίσματά της μπορεί να είναι οποιαδήποτε. Υπενθυμίζεται ότι στόχος της βελτιστοποίησης είναι η εύρεση εκείνων των γεωμετρικών παραμέτρων που μεγιστοποιούν την ωφέλιμη ροπή σύμπτυξης και ελαχιστοποιούν τη δύναμη που απαιτείται για το κλείσιμο των δίσκων, καθώς και την ροπή αντίστασης όταν οι δίσκοι είναι ανοιχτοί και απλά περιστρέφονται. Η αντικειμενική συνάρτηση λοιπόν επιλέγεται να είναι της μορφής

$$ObjFcn = -\{-w_{drag} NNDrag \{[param.]\} + w_{torque} NNTorque \{[param.]\} - w_{force} NNForce \{[param.]\}\}$$

όπου

NNDrag : το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που προβλέπει την ροπή αντίστασης

NNTorque : το ΤΝΔ που προβλέπει την ωφέλιμη ροπή

NNForce : το ΤΝΔ που προβλέπει τη δύναμη αντίδρασης

param. : οι εκάστοτε γεωμετρικές παράμετροι (είσοδοι ΤΝΔ – παράμετροι προς βελτιστοποίηση)

$w_{drag}, w_{torque}, w_{force}$: συντελεστές στάθμισης

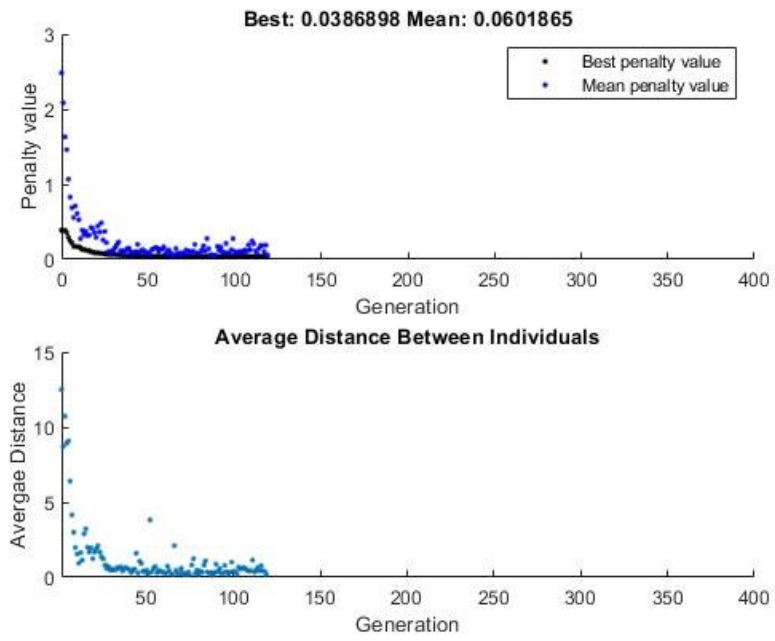
Δεδομένου ότι αναζητείται η μέγιστη τιμή του εσωτερικού της αγκύλης και η ελάχιστη της αντικειμενικής συνάρτησης, τοποθετείται το αρνητικό πρόσημο εξωτερικά της αγκύλης. Οι συντελεστές στάθμισης τίθενται οι επιθυμητοί ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις και τηρούν την σχέση

$$w_{drag} + w_{torque} + w_{force} = 1$$

Σημειώνεται ότι η παραπάνω σχέση μπορεί να τηρηθεί χωρίς να δημιουργείται προτίμηση σε κάποιο από τα μεγέθη λόγω της κανονικοποίησης των δεδομένων που έχει προηγηθεί ήδη πριν την εκπαίδευση των ΤΝΔ. Έτσι, με καθαρά υποκειμενικά κριτήρια επιλέγεται για το συνδυαστικό αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθούν οι συντελεστές

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{drag} = 0.2 \\ w_{torque} = 0.3 \\ w_{force} = 0.5 \end{array} \right\}$$

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για κάθε περίπτωση επιλέγεται να παρουσιασθούν μαζί με τα υπόλοιπα αποτελέσματα για λόγους σχολιασμού και καλύτερης κατανόησης. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 5.2.1 παρουσιάζεται η βασική πορεία εξέλιξης των λύσεων για την περίπτωση των τοξοειδών διαμορφώσεων. Στον οριζόντιο άξονα τοποθετούνται οι γενεές, ενώ στον κατακόρυφο άξονα το μέγεθος που ενδιαφέρει. Το άνω διάγραμμα εκ των δύο δείχνει την πορεία της μέσης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για όλα τα γονίδια, καθώς και της καλύτερης που έχει βρεθεί μέχρι στιγμής. Στις πρώτες γενεές η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει υψηλές τιμές, ενώ με την πάροδο των γενεών τα γονίδια τείνουν να γίνουν τα βέλτιστα προσεγγίζοντας τη βέλτιστη τιμή. Στο κάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μέση απόσταση των τιμών των γονιδίων και η εξέλιξη αυτής. Ξεκινώντας τον αλγόριθμο η απόσταση είναι μεγάλη, ενώ με την πάροδο των γενεών μικραίνει μέσω των διαδικασιών μετάλλαξης, διασταύρωσης και ελιτισμού συγκλίνοντας στα βέλτιστα γονίδια.



Σχήμα 5.2.1: Πορεία εξέλιξης λύσεων – Τοξοειδείς Διαμορφώσεις

6

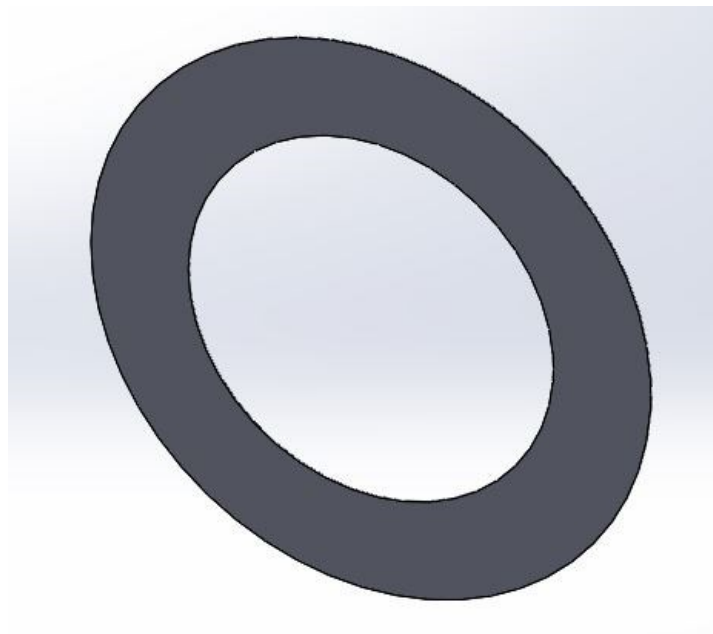
Αποτελέσματα

6.1 Περίπτωση επίπεδων δίσκων

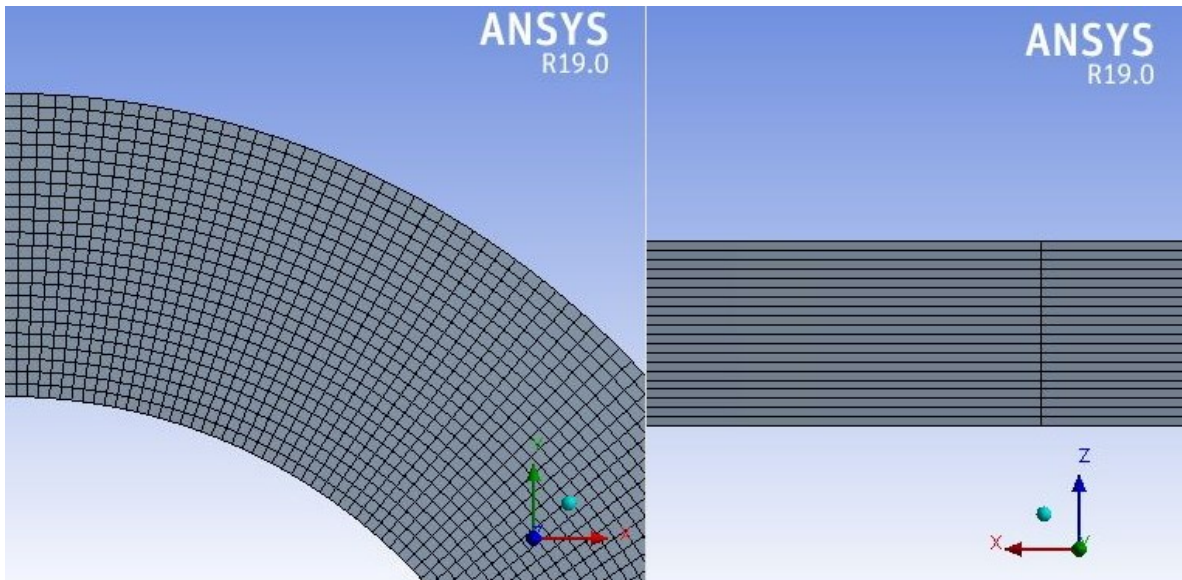
Η περίπτωση των επίπεδων δίσκων αποτελεί την πιο κοινή περίπτωση αλλά και την πιο βασική για την επιτυχή μοντελοποίηση του φαινομένου. Στην Εικόνα 6.1.1 παρουσιάζεται η γεωμετρία του ρευστού, δηλαδή του χωρίου που παρεμβάλλεται μεταξύ των δίσκων, ενώ στην Εικόνα 6.1.2 παρουσιάζεται η πλεγματοποίηση αυτού. Σε αυτήν, αλλά και στις επόμενες περιπτώσεις με διαμορφώσεις τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας και της ροής είναι

- $D_{in}=75\text{ mm}$, $D_{out}=115\text{ mm}$
- $H_{disk}=3\text{ mm}$, $I_z=0.001\text{ kg/m}^2$
- $h_o=200\text{ }\mu\text{m}$, $h_f=80\text{ }\mu\text{m}$
- $V_z=-100\text{ mm/s}$
- $\Delta\omega=105\text{ rad/s}$
- *Turbulent Flow (Realizable $k-\epsilon$ Model)*
- *Fluid density $\rho=820\text{ kg/m}^3$*
- *Fluid viscosity $\eta=0.03\text{ Pas}$*

Περισσότερες λεπτομέρειες έχουν ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2.



Εικόνα 6.1.1: Γεωμετρία ρευστού επίπεδων δίσκων

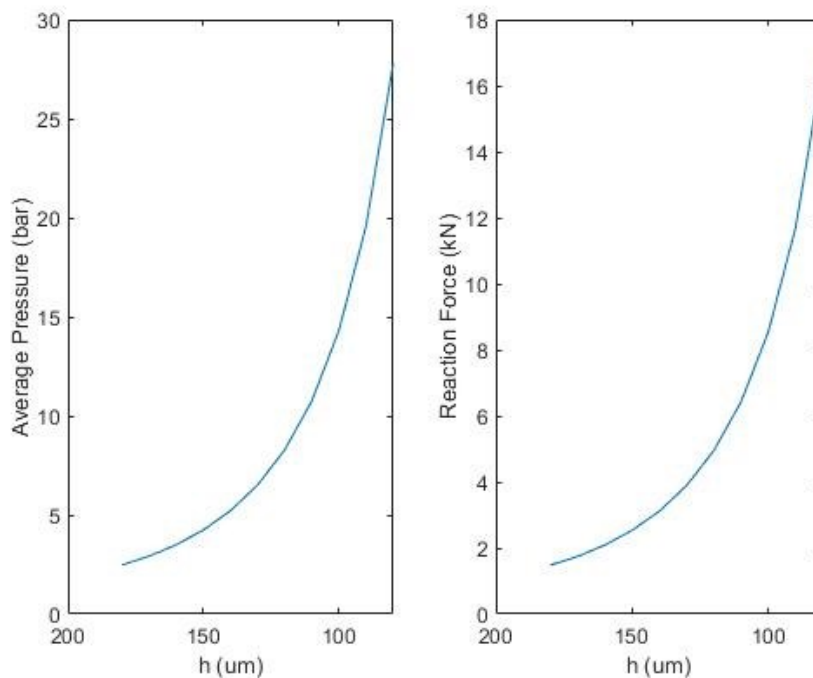


Εικόνα 6.1.2: Λεπτομέρειες πλεγματοποίησης χωρίου ρευστού

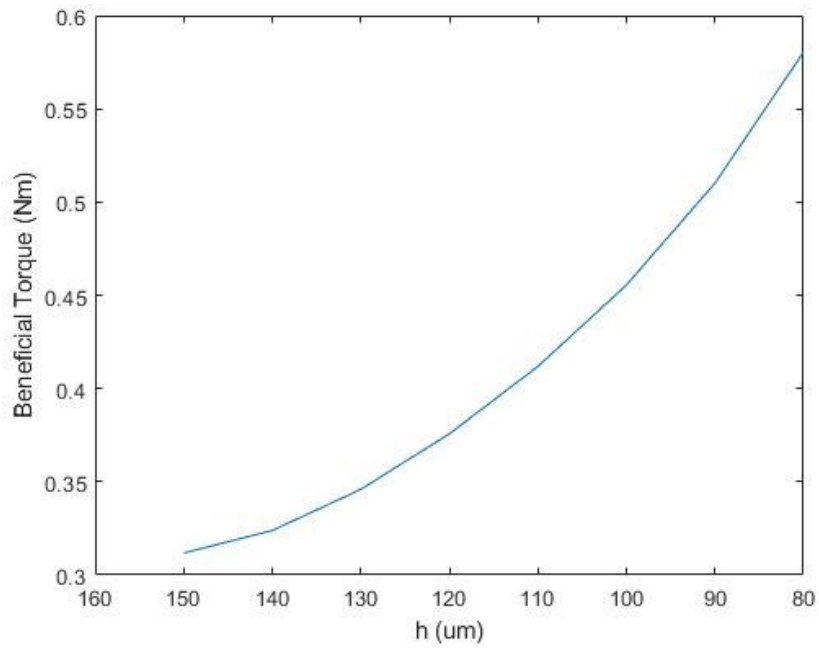
Εξετάζονται δύο διαφορετικές περιπτώσεις, μία όπου υπάρχει ταχύτητα συμπίεσης Vz και επομένως ενδιαφέρει κυρίως η απαιτούμενη δύναμη επενέργειας και προσδιδόμενη ροπή στον στερεό δίσκο, και μία όπου υπάρχει μόνο η διαφορά ταχυτήτων $\Delta\omega$ και επομένως ενδιαφέρει η αναπτυσσόμενη ροπή (ροπή αντίστασης) στον δίσκο. Σε κάθε περίπτωση εξάγονται από το Fluent τα αρχεία μέσης κατ' όγκο πίεσης, δύναμης επενέργειας (ολοκλήρωμα της στατικής πίεσης στον κινητήριο δίσκο) και παροχής όγκου στις δύο διαμέτρους συναρτήσει του χρόνου (ή κατά αντιστοιχία του διακένου) προσομοίωσης. Επιπλέον μέσω του Structural λαμβάνεται η τιμή της περιφερειακής ταχύτητας του παθητικού δίσκου και στη συνέχεια εξάγεται η αναπτυσσόμενη ροπή με τις σχέσεις του Κεφαλαίου 2.

Ξεκινώντας από την περίπτωση επαλληλίας των δύο κινήσεων στα Διαγράμματα 6.1.1 και 6.1.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πίεσης, δύναμης και ροπής. Και για τα τρία μεγέθη παρατηρείται η αυξητική πορεία τους όσο το διάκενο ελαττώνεται, κάτι που αναμένεται λόγω της ανάπτυξης ισχυρότερων όρων πίεσης και διάτμησης στο ρευστό. Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι για την περίπτωση της ροπής έχουν παραληφθεί οι πρώτοι 4 όροι λόγω παρουσίας υπολογιστικών σφαλμάτων. Μπορεί εύκολα όμως να εννοηθεί η πορεία της καμπύλης μέχρι το ανώτερο διάκενο ως ομαλή συνεχής συνάρτησή του.

Η μορφή των καμπύλων αυτών παραμένει ουσιαστικά αναλλοίωτη για όλες τις περιπτώσεις των διαμορφώσεων. Αυτό που αλλάζει σε κάθε περίπτωση είναι το μέτρο των μετρούμενων μεγεθών.

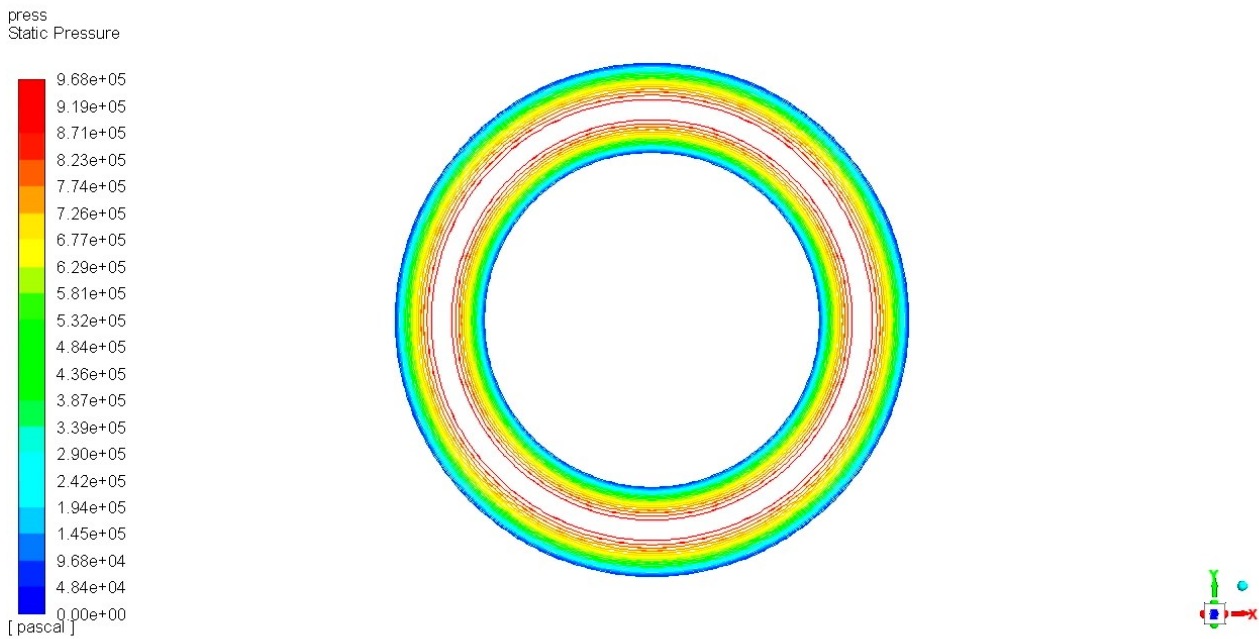


Διάγραμμα 6.1.1: Επίπεδοι δίσκοι: Μέση πίεση και δύναμη επενέργειας συναρτήσει του διακένου

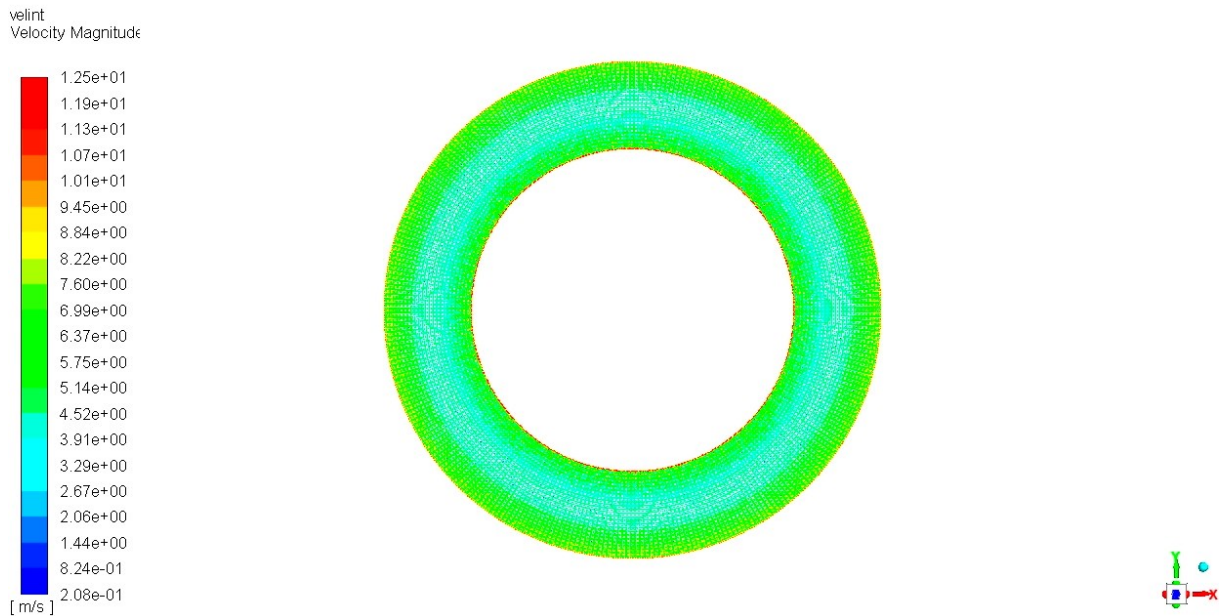


Διάγραμμα 6.1.2: Επίπεδοι δίσκοι: Αναπτυσσόμενη (ωφέλιμη) ροπή συναρτήσει του διακένου

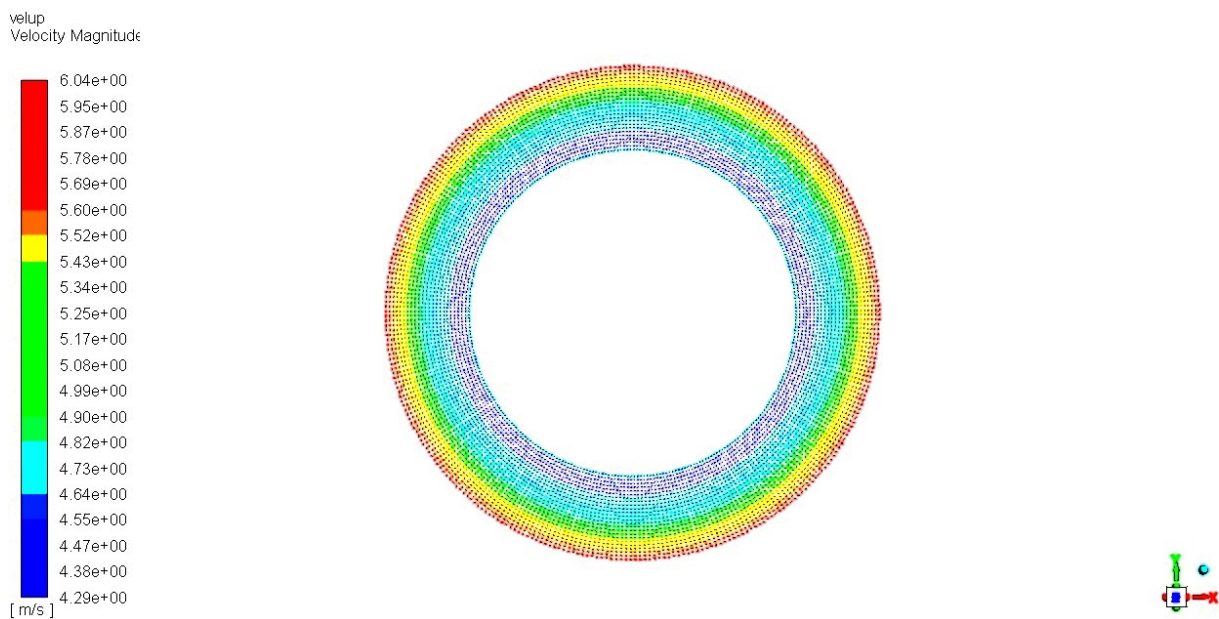
Στα Σχήματα 6.1.1, 6.1.2 και 6.1.3 παρουσιάζονται στιγμιότυπα των ισοϋψών πίεσης και του διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων αντίστοιχα για την περίπτωση των επίπεδων δίσκων.



Σχήμα 6.1.1: Επίπεδοι δίσκοι: Ισοϋψείς πίεσης



Σχήμα 6.1.2: Επίπεδοι δίσκοι: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων (εσωτερικό χωρίο)

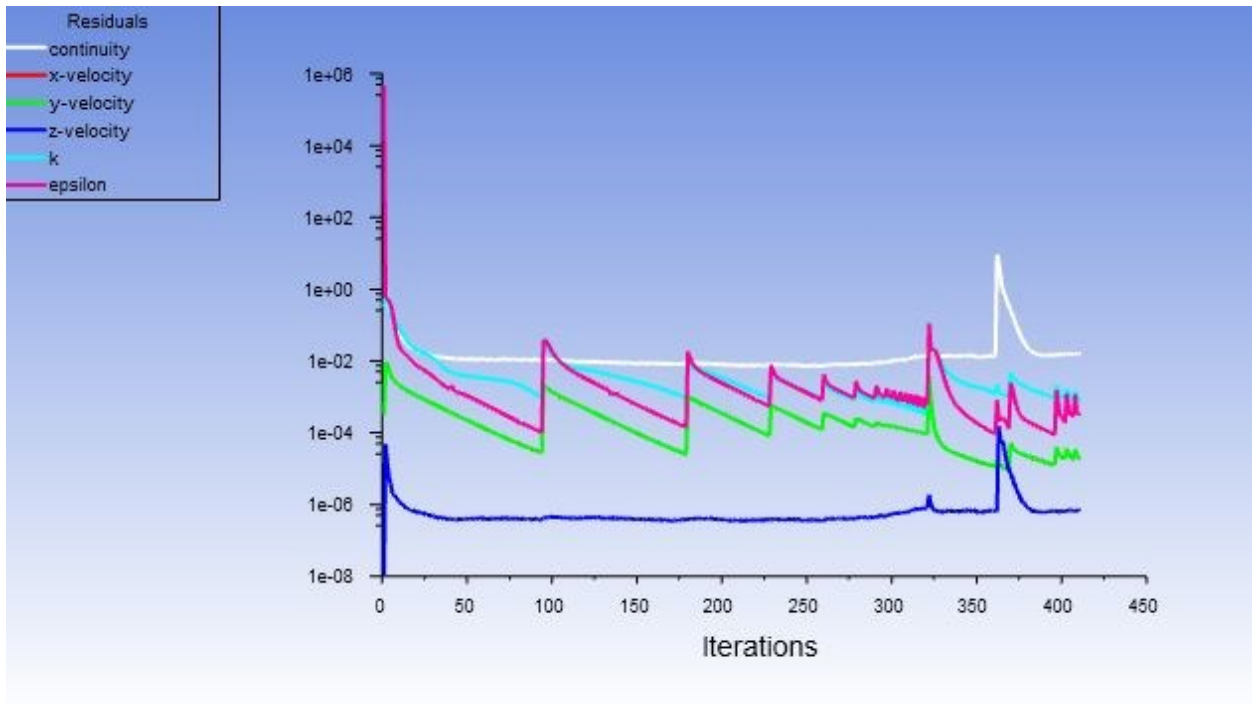


Σχήμα 6.1.3: Επίπεδοι δίσκοι: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων άνω δίσκου

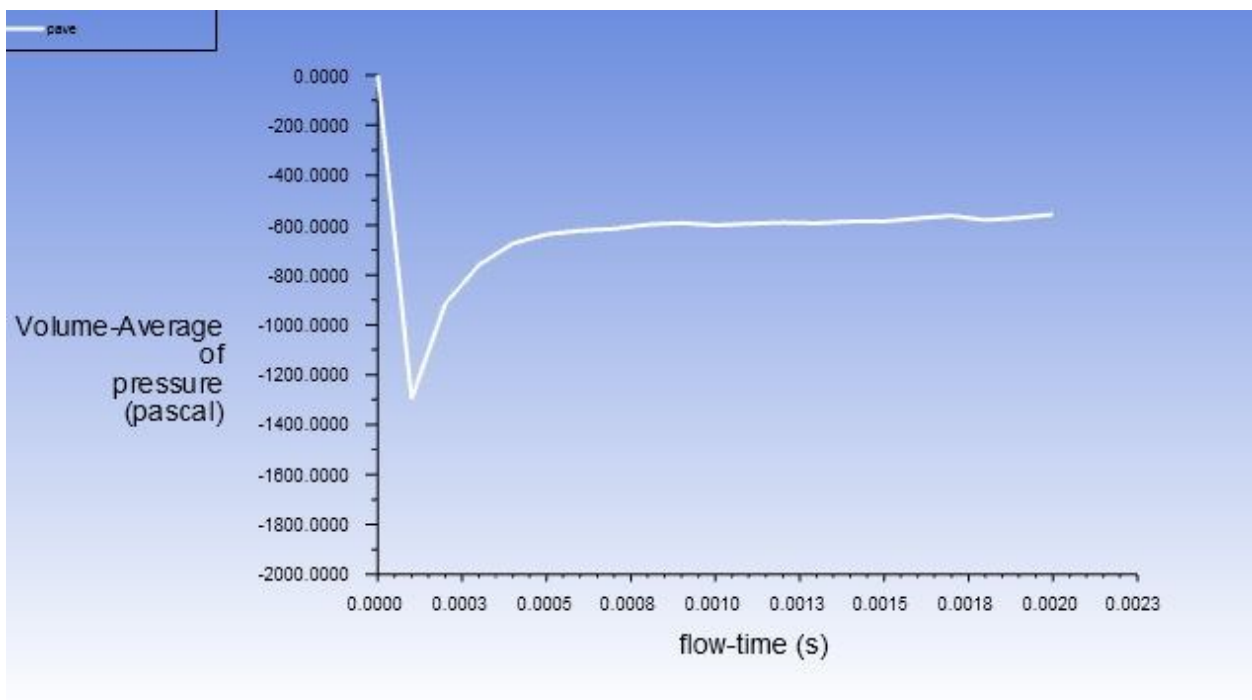
Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρείται η ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης και της ταχύτητας στο χωρίο του ρευστού με μέγιστη πίεση στη μέση διάμετρο των δίσκων. Κατά αντιστοιχία η ταχύτητα παίρνει την ελάχιστη τιμή της στην περιοχή της μέγιστης πίεσης και μεγιστοποιείται στην εσωτερική και εξωτερική διάμετρο, εκεί από όπου δηλαδή εξωθείται το ρευστό. Στο Σχήμα 6.1.3 παρουσιάζεται το διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων του άνω δίσκου (κινητήριου) όπου φαίνεται με σαφήνεια η περιστροφική ταχύτητα $\Delta\omega$. Τα διανύσματα χρωματίζονται με βάση το μέτρο τους και ο προσανατολισμός τους είναι αυτός της θετικής (αριστερόστροφη) φοράς. Το Σχήμα 6.1.3 παραμένει αναλλοίωτο για κάθε περίπτωση διαμορφώσεων, αφού αποτελεί την είσοδο (κοινή για όλες τις περιπτώσεις) του προβλήματος. Οι διαφορές εντοπίζονται στα άλλα δύο Σχήματα και παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Όσον αφορά τη ροπή αντίστασης ο υπολογισμός της παρουσιάζει ιδιαιτερότητα ως προς τη σύγκλιση της λύσης. Στο Σχήμα 6.1.4 παρουσιάζονται τα υπολογιστικά υπόλοιπα στην πορεία επίλυσης. Σημειώνεται για λόγους κατανόησης ότι σε κάθε κορυφή αντιστοιχίει καινούργια επαναληπτική διαδικασία επίλυσης σε

καινούργιο χρονικό βήμα. Όπως φαίνεται ιδιαίτερα για την περίπτωση της συνέχειας το υπόλοιπο είναι ιδιαίτερα υψηλό (εδώ της τάξης μεγέθους $1e-2$ έναντι του επιθυμητού $1e-6$) αλλά παρόλα αυτά σταθερό. Η εν γένει σταθερή αυτή τάση δεν οδηγεί ξεκάθαρα στη σύγκλιση ή στην απόκλιση του προβλήματος. Στο Σχήμα 6.1.5 παρουσιάζεται η πορεία της μέσης πίεσης συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Παρατηρείται από αυτήν ότι μετά την πάροδο λίγων χρονικών βημάτων η τιμή της μέσης πίεσης σταθεροποιείται. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται και στα υπόλοιπα μεγέθη ενδιαφέροντος ανεξαρτήτως του συνολικού χρόνου προσομοίωσης. Κατά συνέπεια, παρά το υψηλό υπόλοιπο συνέχειας (τα υπόλοιπα συγκλίνουν κανονικά) εάν η προσομοίωση διαρκεί επαρκώς ώστε να ξεπεραστεί το μεταβατικό φαινόμενο, όλα τα μεγέθη συγκλίνουν σε κάποια σταθερή τιμή η οποία και θεωρείται η τελική. Η ίδια ακριβώς συμπεριφορά εμφανίζεται για οποιαδήποτε γεωμετρία και ανεξαρτήτως συνθηκών, αρκεί να πρόκειται για σταθερό διάκενο με επιβολή ταχύτητας $\Delta\omega$. Στον Πίνακα 6.1.1 παρουσιάζονται οι τελικές τιμές για την περίπτωση της αποσύμπλεξης.



Σχήμα 6.1.4: Υπολογιστικά υπόλοιπα περίπτωσης «κατάσταση αποσύμπλεξης»



Σχήμα 6.1.5: Εξέλιξη μέσης πίεσης συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης περίπτωσης «κατάσταση αποσύμπλεξης»

Πίνακας 6.1.1: Τελικές τιμές μεγεθών περίπτωσης «κατάσταση αποσύμπλεξης»

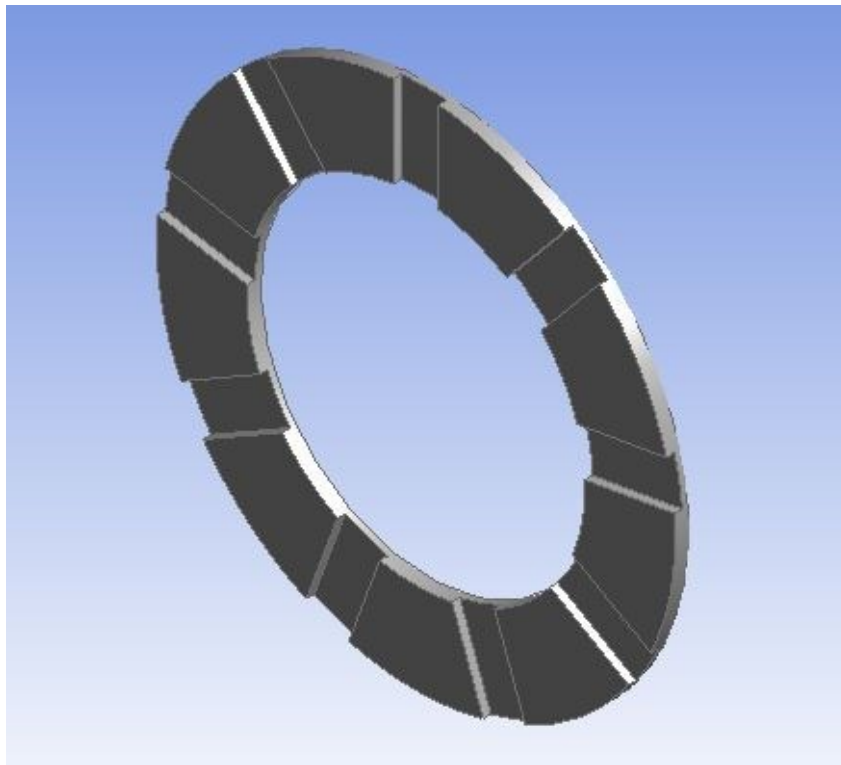
Μέγεθος	Τιμή
Μέση Πίεση	-569 Pa
Αναπτυσσόμενη Δύναμη στον κινητήριο δίσκο	-3.4 kN
Αναπτυσσόμενη Ροπή (Ροπή Αντίστασης)	0.236 Nm

Παρατηρείται λοιπόν ανάπτυξη υποπίεσης, κάτι που είναι αναμενόμενο για περιστροφικές ταχύτητες τέτοιου μεγέθους, καθώς και ανάπτυξη ροπής λόγω ιξώδους σχετικά χαμηλής.

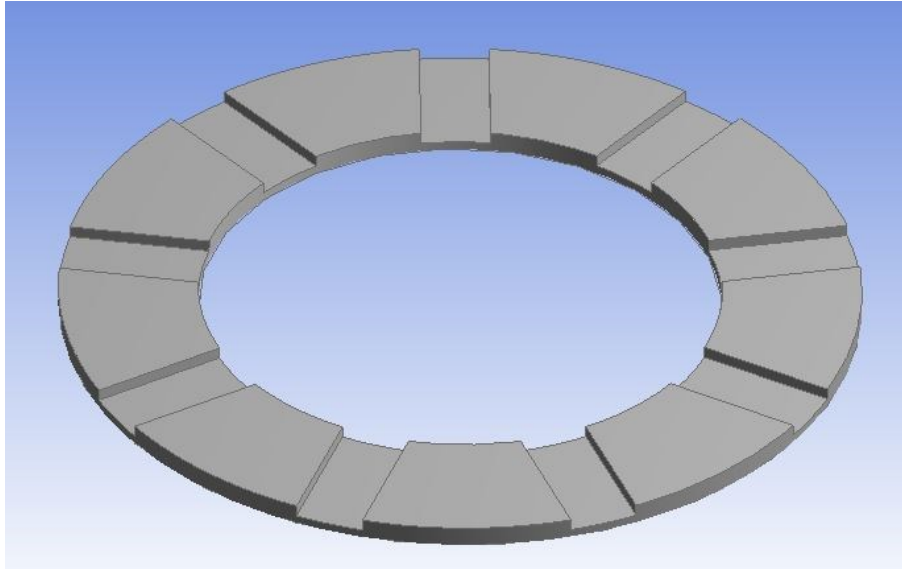
Τα αποτελέσματα των επίπεδων δίσκων παρουσιάζονται παράλληλα με τα αποτελέσματα κάθε περίπτωσης διαμόρφωσης στις επόμενες ενότητες προκειμένου να είναι πιο εύκολη η σύγκριση και η εξαγωγή συμπερασμάτων.

6.2 Περίπτωση ακτινικών διαμορφώσεων

Η περίπτωση των ακτινικών διαμορφώσεων αποτελεί μάλλον την πιο κοινή περίπτωση διαμορφώσεων σε δίσκους συμπλέκτη. Στην Εικόνα 6.2.1(α) και (β) παρουσιάζεται ο βέλτιστος δίσκος ακτινικών διαμορφώσεων για τους συντελεστές βαρύτητας του Κεφαλαίου 5.



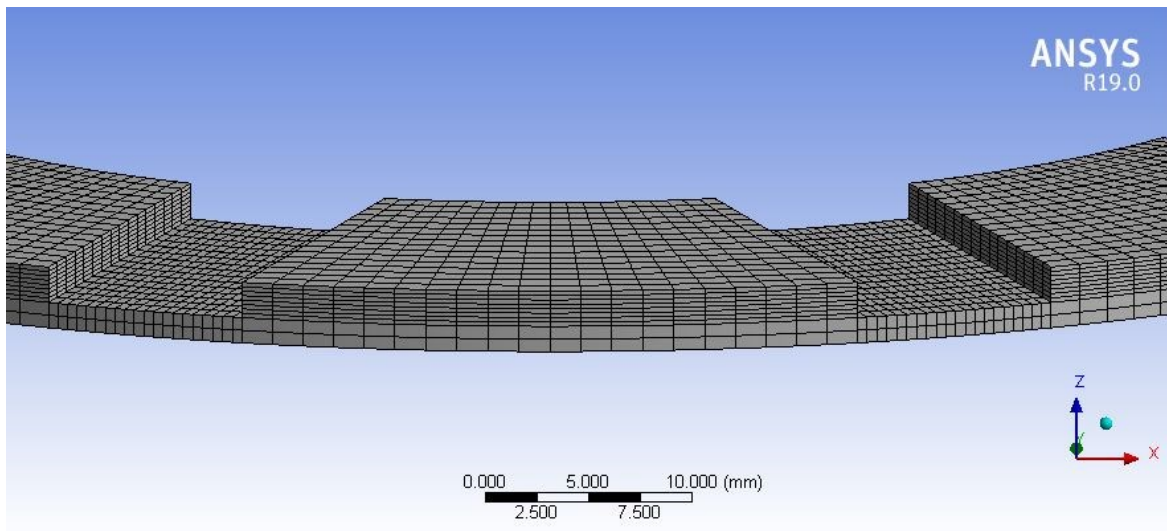
(α)



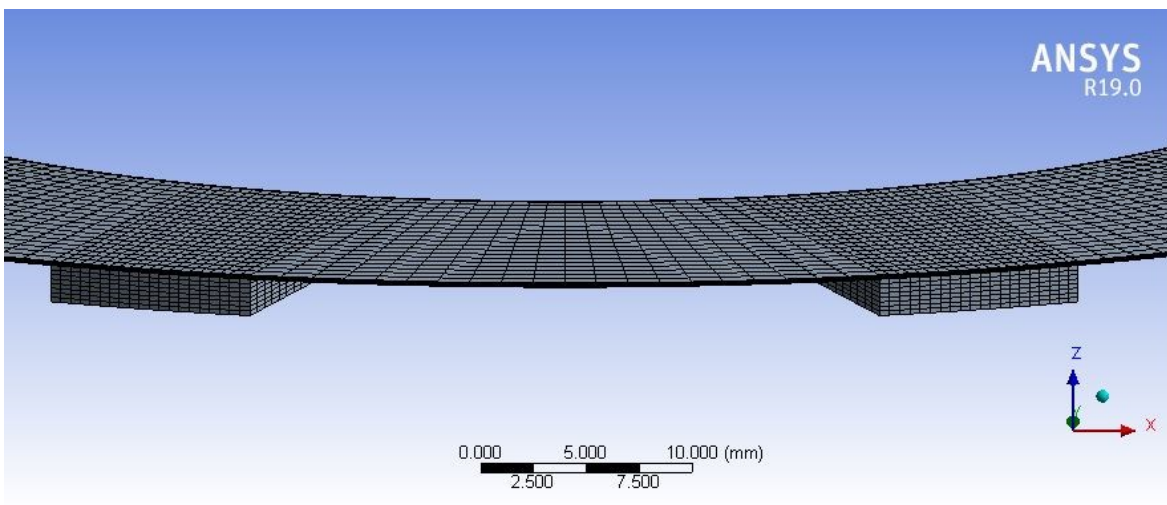
(β)

Εικόνα 6.2.1 (α),(β): Δίσκος ακτινικών διαμορφώσεων

Στις Εικόνες 6.2.2 και 6.2.3 παρουσιάζονται λεπτομέρειες του πλέγματος υπολογισμού για τον στερεό δίσκο και το χωρίο του ρευστού αντίστοιχα.



Εικόνα 6.2.2: Λεπτομέρεια πλέγματος υπολογισμού στερεού δίσκου



Εικόνα 6.2.3: Λεπτομέρεια πλέγματος υπολογισμού χωρίου ρευστού

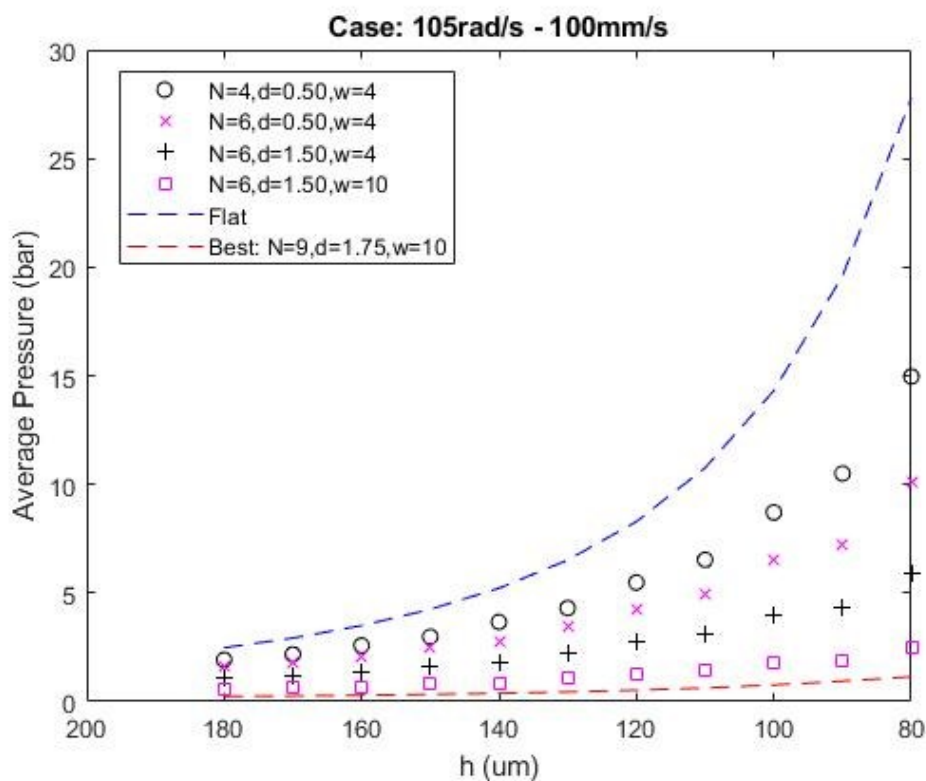
Οι συνθήκες προσομοίωσης είναι ίδιες με αυτές της περίπτωσης επίπεδων δίσκων και κοινές για όλες τις περιπτώσεις διαμορφώσεων.

Για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων χρειάστηκαν δύο σύνολα γνωστών εισόδων – εξόδων, ένα για την εκπαίδευση και ένα για την εξαγωγή του σφάλματος γενίκευσης. Οι συνδυασμοί πλήθους διαμορφώσεων (N), βάθους (d) και πλάτους (w) για κάθε σύνολο συνοψίζονται στον Πίνακα 6.2.1. Στον ίδιο πίνακα σημειώνονται τα αποδεκτά όρια για λόγους χωροταξίας στα οποία επιτράπηκε στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης να αναζητήσει τις βέλτιστες λύσεις.

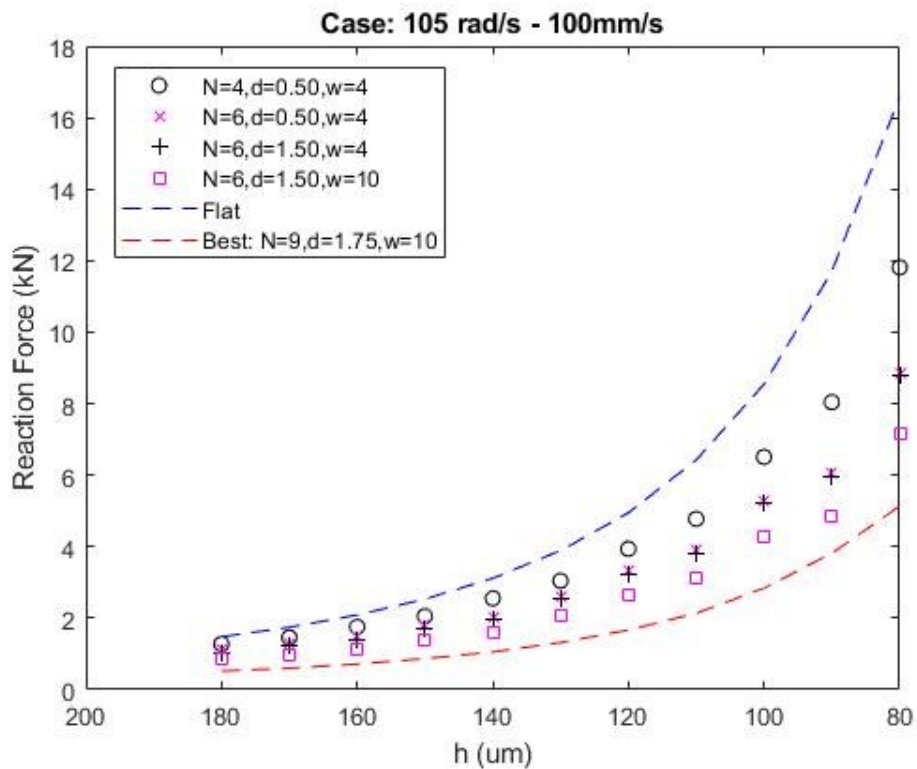
Πίνακας 6.2.1: Συνδυασμοί ανεξάρτητων παραμέτρων προσδιορισμού γεωμετρίας ακτινικών διαμορφώσεων – Ελάχιστα/Μέγιστα όρια

Training Dataset		
N	d (mm)	w (mm)
4	0.50	4
6	1.00	10
10	1.50	
Testing Dataset		
3	0.75	6
8	1.25	
Lower Bounds		
2	0.25	2
Upper Bounds		
10	1.75	10

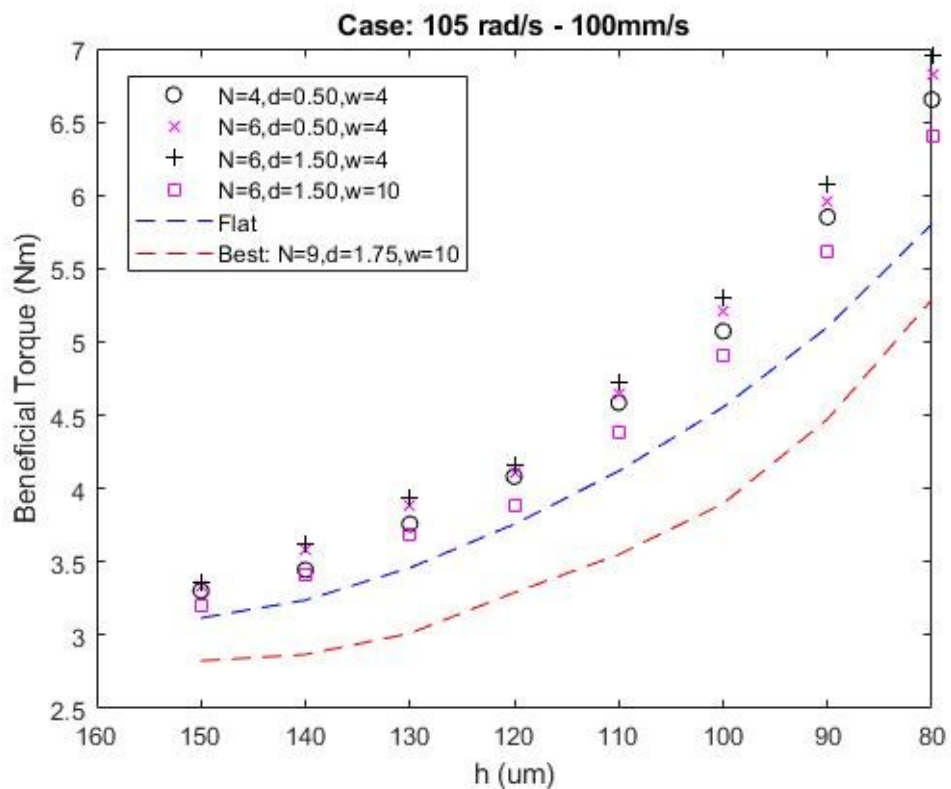
Στη συνέχεια παρουσιάζονται για διάφορα σημεία παραμέτρων τα αποτελέσματα πίεσης και ροπής στην μεταβατική και την κατάσταση αποσύμπλεξης. Στον Πίνακα 6.2.2 παρουσιάζονται οι βέλτιστοι συνδυασμοί που επέστρεψε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σύμφωνα με το εκάστοτε κριτήριο.



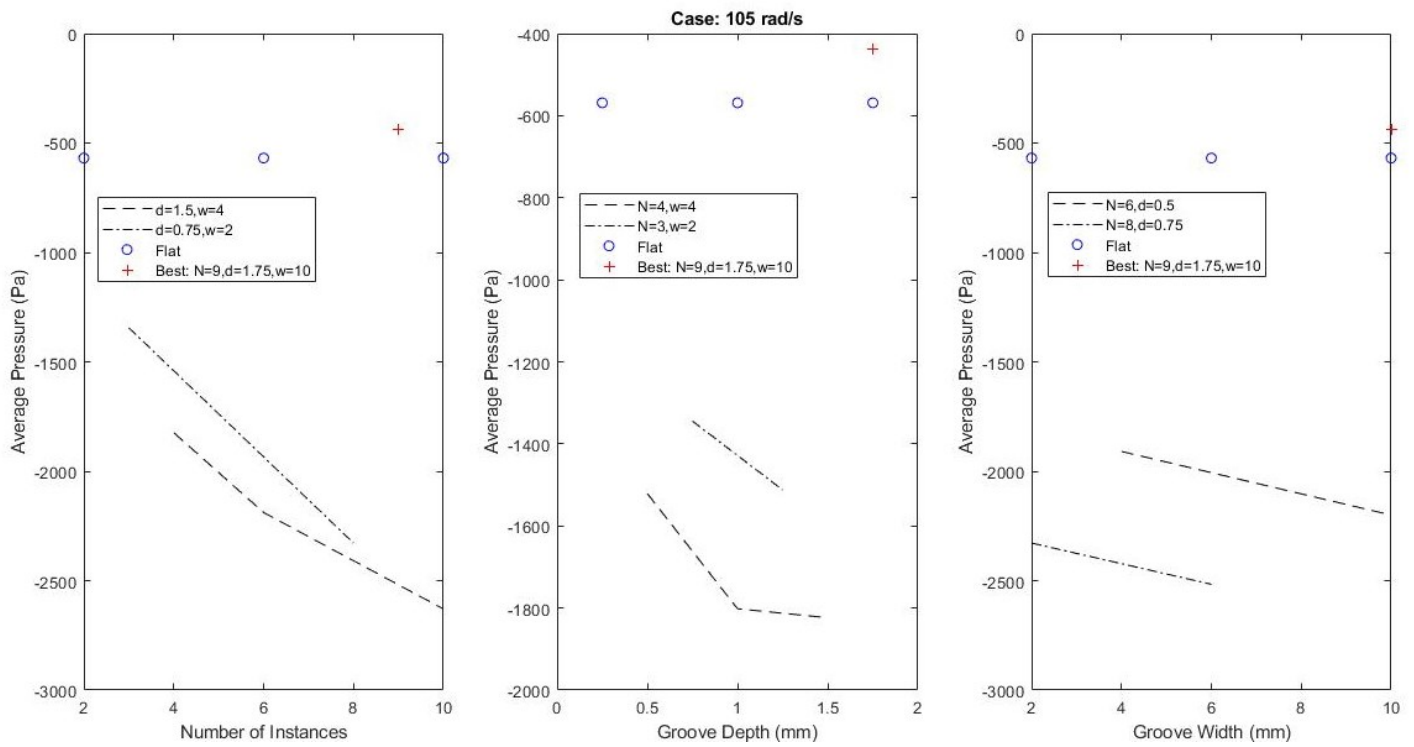
Διάγραμμα 6.2.1: Ακτινικές διαμορφώσεις: Μέση πίεση στη μεταβατική κατάσταση σύμπλεξης



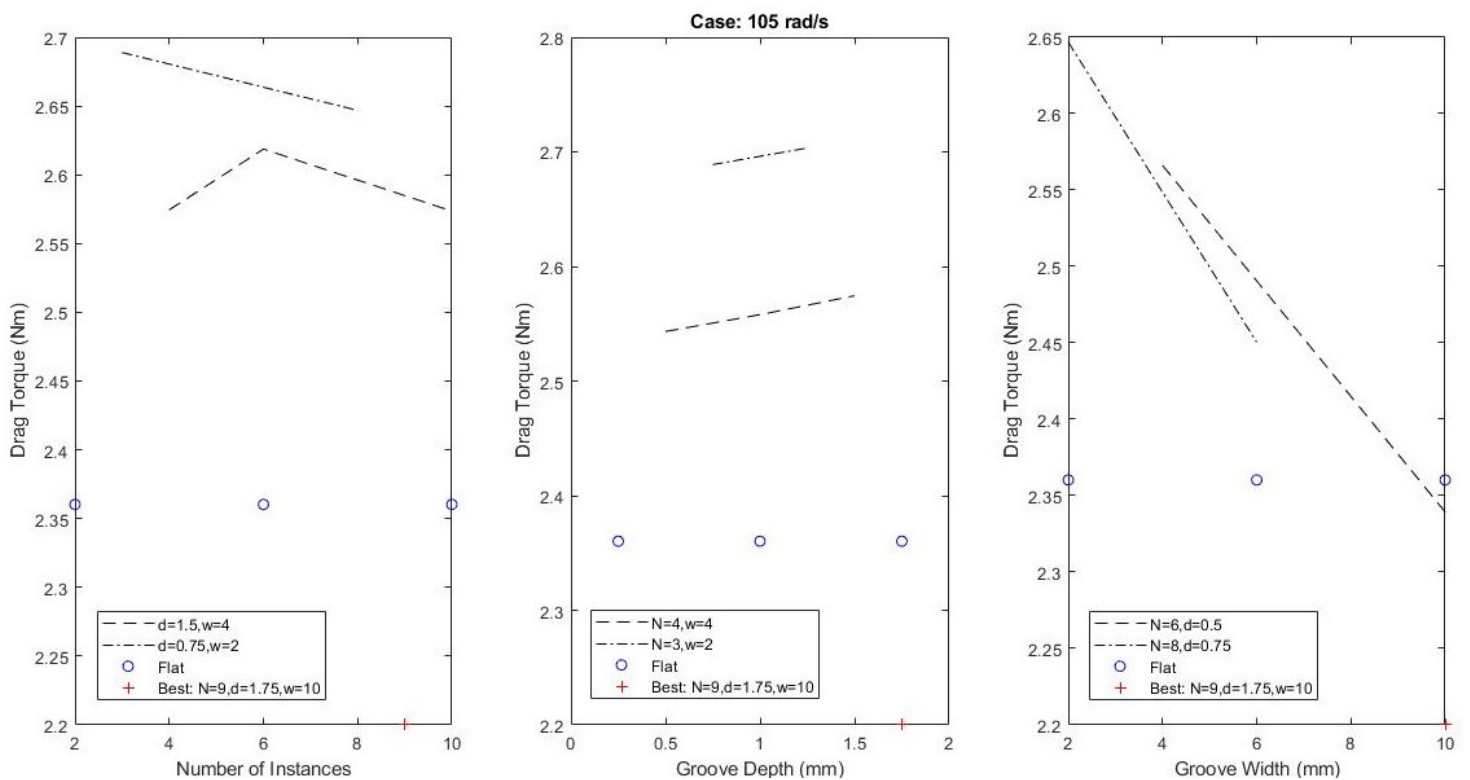
Διάγραμμα 6.2.2: Ακτινικές διαμορφώσεις: Δύναμη αντίδρασης στη μεταβατική κατάσταση σύμπτωσης



Διάγραμμα 6.2.3: Ακτινικές διαμορφώσεις: Ωφέλιμη ροπή στη μεταβατική κατάσταση σύμπτωσης



Διάγραμμα 6.2.4: Ακτινικές διαμορφώσεις: Μέση πίεση στην κατάσταση αποσύμπλεξης



Διάγραμμα 6.2.5: Ακτινικές διαμορφώσεις: Ροπή αντίστασης στην κατάσταση αποσύμπλεξης

Πίνακας 6.2.2: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης ακτινικών διαμορφώσεων

Κριτήριο Βελτιστοποίησης	{N d(mm) w(mm)}
Σύμπλεξη: Ελάχιστη Δύναμη	{10 1.00 10}
Σύμπλεξη: Μέγιστη Ροπή	{2 1.75 2}
Αποσύμπλεξη: Ελάχιστη Ροπή	{10 0.25 10}
Συνδυασμός Κριτηρίων	{9 1.75 10}

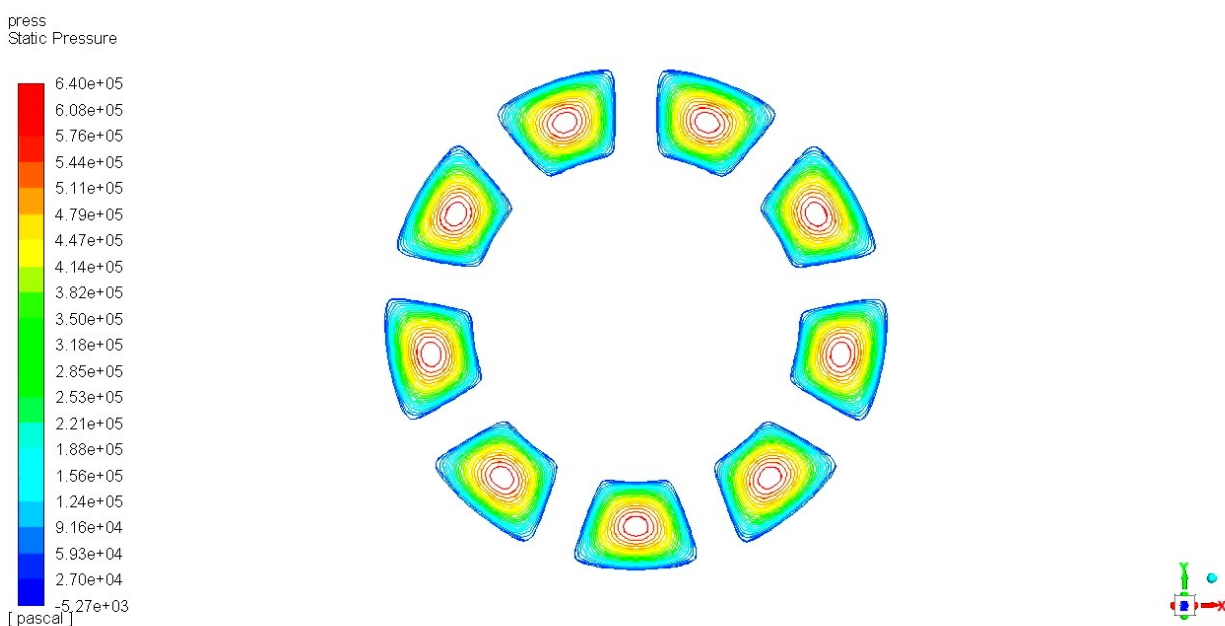
Όπως φαίνεται τόσο από τα διαγράμματα όσο και από τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης η μεγιστοποίηση της ροπής είναι εν γένει αντικρουόμενη στην ελαχιστοποίηση της δύναμης. Για αυτό το λόγο και η τελική επιλογή των κριτηρίων βελτιστοποίησης αποτελεί υποκειμενικό ζήτημα και εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή και τους εκάστοτε στόχους.

Συγκρίνοντας με τους επίπεδους δίσκους, η γεωμετρία των ακτινικών διαμορφώσεων αποδίδει καλύτερα τόσο στη δύναμη όσο και στην ροπή κατά τη σύμπλεξη και χειρότερα στην κατάσταση αποσύμπλεξης οδηγώντας σε εντονότερα φαινόμενα υποπίεσης και ροπής αντίστασης, κάτι που είναι αναμενόμενο. Η βέλτιστη γεωμετρία από τον συνδυασμό των κριτηρίων με τα βάρη του Κεφαλαίου 5 αποδίδει πράγματι χαμηλότερη δύναμη επενέργειας στη σύμπλεξη καθώς και χαμηλότερη ροπή αντίστασης στην αποσύμπλεξη, όχι όμως υψηλότερη ωφέλιμη ροπή κατά τη σύμπλεξη, ενώ όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6.2.3 υπάρχουν συνδυασμοί ικανοί για αυτήν. Τα συγκεκριμένα βάρη λοιπόν δίνουν προτεραιότητα στην μείωση της δύναμης επενέργειας, κάτι που προκύπτει και από τον Πίνακα 6.2.2 αφού τα αποτελέσματα του συνδυασμού κριτηρίων είναι πλησιέστερα σε αυτά της ελάχιστης δύναμης και ροπής αντίστασης, παρά σε αυτά της μέγιστης ροπής.

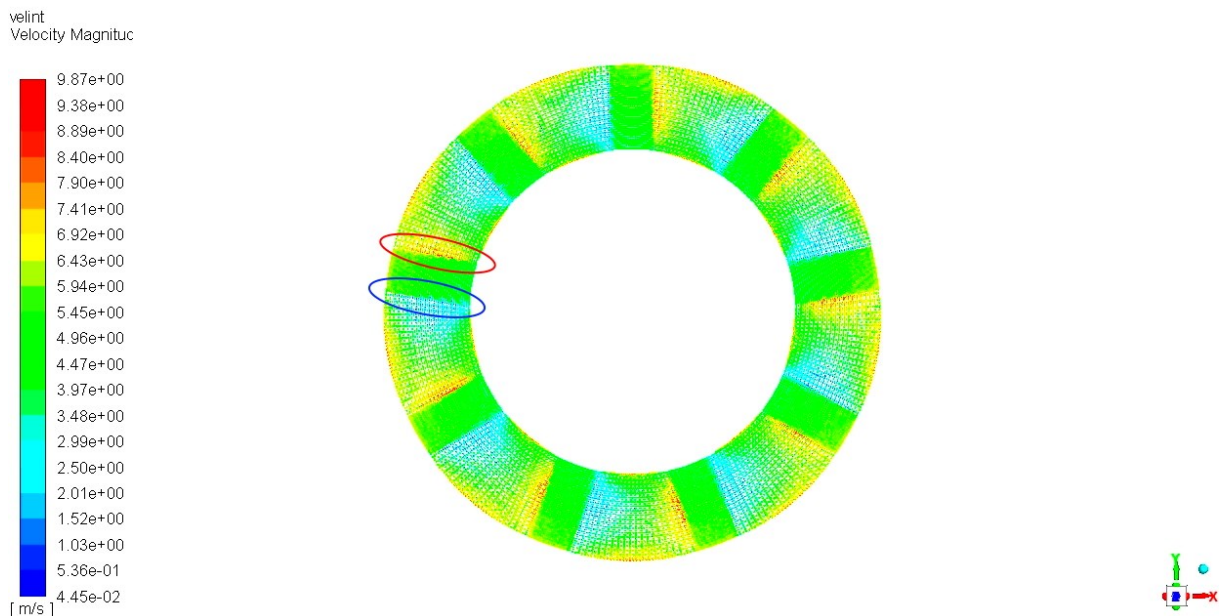
Παρατηρώντας λίγο περισσότερο τα Διαγράμματα 6.2.1-5 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για τις ακτινικές διαμορφώσεις:

- Η ύπαρξή τους φαίνεται γενικά να συνεισφέρει στην ανάπτυξη ροπής, κάτι που αναμένεται καθώς πλέον πέρα από τις διατμητικές τάσεις του ρευστού στα τοιχώματα του δίσκου συνεισφέρει και η πίεση στα εγκάρσια τοιχώματα αναπτύσσοντας και πλευρικά ζεύγη δυνάμεων. Επιπλέον, η αφαίρεση στερεού όγκου ανακουφίζει το φαινόμενο της συμπίεσης οδηγώντας σε χαμηλότερες τιμές πίεσης και επομένως δύναμης επενέργειας.
- Η αύξηση του πλήθους των διαμορφώσεων οδηγεί σε μείωση της πίεσης, όχι όμως μονοσήμαντα και σε αύξηση της ροπής. Η τελευταία έχει μεγάλη εξάρτηση και από τους όρους ιξώδους (τις διατμητικές τάσεις του ρευστού) και επομένως ο βέλτιστος αριθμός διαμορφώσεων είναι αυτός στον οποίο επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ των όρων ιξώδους και των όρων πίεσης. Κατά συνέπεια δεν ταυτίζεται με τον μέγιστο και εξαρτάται και από τις υπόλοιπες παραμέτρους.
- Όσον αφορά το βάθος των διαμορφώσεων, μεγαλύτερο βάθος οδηγεί τόσο σε ανακούφιση της πίεσης όσο και σε εν γένει αύξηση της ροπής.
- Σχετικά με το πλάτος των διαμορφώσεων, μεγαλύτερο πλάτος ανακουφίζει την ανάπτυξη πίεσης καθώς συνεισφέρει στην απώλεια όγκου, ενώ μάλλον δυσχεραίνει την ανάπτυξη ροπής ακριβώς επειδή τοπικά η πίεση πέφτει και δεν είναι αρκετά ισχυρή για να συνεισφέρει στις πλευρικές δυνάμεις.

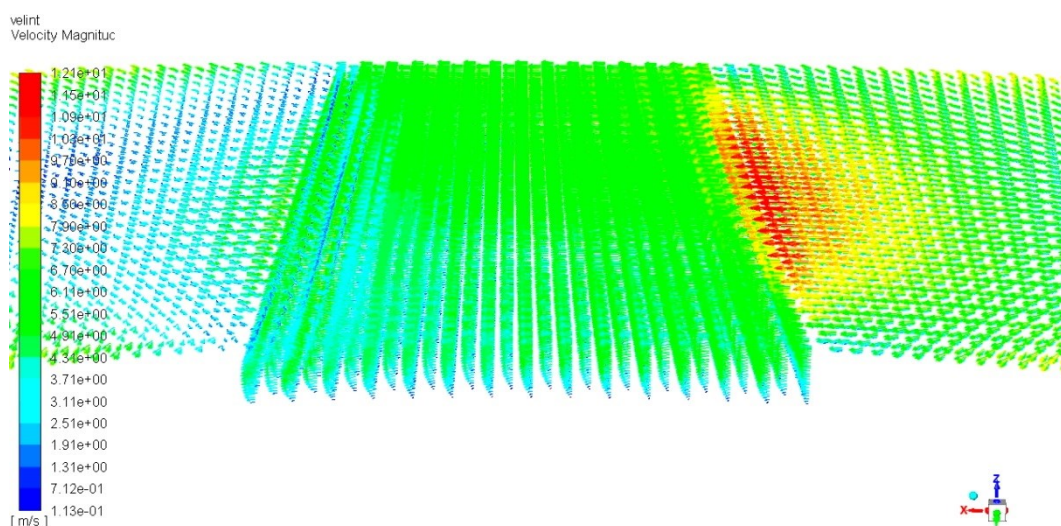
Στα Σχήματα 6.2.1, 6.2.2 και 6.2.3 παρουσιάζονται στιγμιότυπα των ισοϋψών της πίεσης και του διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων αντίστοιχα για την περίπτωση των ακτινικών διαμορφώσεων.



Σχήμα 6.2.1: Ακτινικές διαμορφώσεις: Ισοϋψείς πίεσης



Σχήμα 6.2.2: Ακτινικές διαμορφώσεις: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων (εσωτερικό χωρίο)



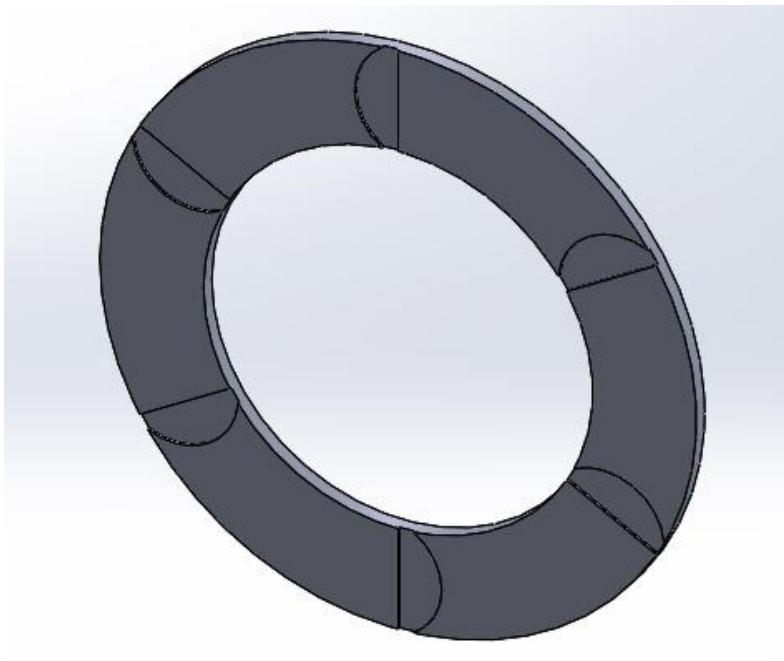
Σχήμα 6.2.3: Ακτινικές διαμορφώσεις: Λεπτομέρεια διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων στη διαμόρφωση (εσωτερικό χωρίο)

Στα παραπάνω σχήματα παρατηρείται η διαφορετική μορφή τόσο των ισούψων πίεσης όσο και των διανυσμάτων ταχυτήτων σε σχέση με τα αντίστοιχα των Σχημάτων 6.1.1-2. Ξεκινώντας από την πίεση φαίνεται καθαρά αυτό που έχει ήδη σχολιαστεί, ότι δηλαδή η ύπαρξη διαμορφώσεων λόγω της αφαίρεσης στερεού όγκου ανακουφίζει την πίεση. Έτσι, οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται με μεγάλη διαφορά στα σημεία όπου το διάκενο είναι το ελάχιστο, ενώ στις ίδιες τις διαμορφώσεις είναι πολύ χαμηλότερες. Όσον αφορά το διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων, παρατηρείται η επίδραση των διαμορφώσεων αφού η ταχύτητα αποκτά τη μέγιστη τιμή της στην «είσοδο» κάθε διαμόρφωσης (κόκκινη έλλειψη) και στη συνέχεια ανακόπτεται αυξάνοντας τοπικά τη στατική πίεση στην «έξοδο» κάθε διαμόρφωσης (μπλε έλλειψη). Υπενθυμίζεται ότι η φορά περιστροφής είναι η θετική, δηλαδή η αριστερόστροφη.

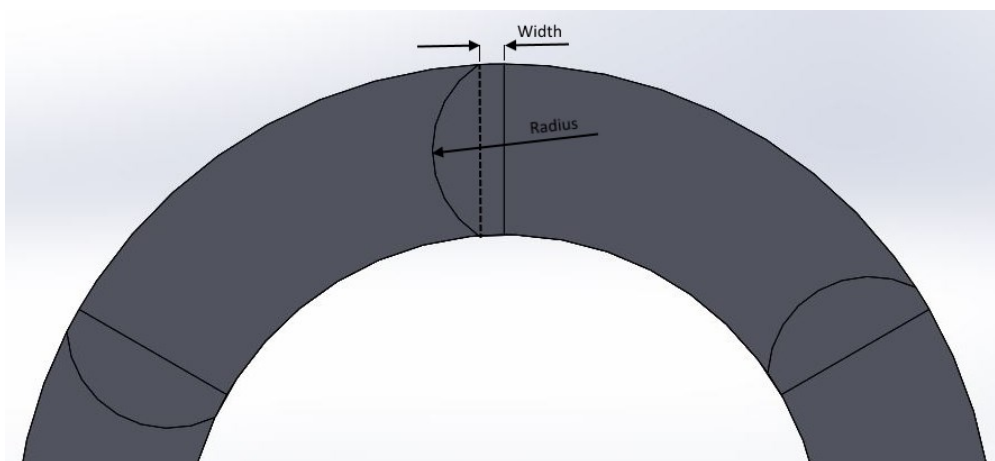
6.3 Περίπτωση τοξοειδών διαμορφώσεων

Οι τοξοειδείς διαμορφώσεις αποτελούν ουσιαστικά παραλλαγή των ακτινικών με στόχο την αύξηση της εγκάρσιας επιφάνειας ανάπτυξης ροπής. Έτσι δημιουργούνται λαμβάνοντας υπόψη τη φορά περιστροφής διαμορφώσεις τοξοειδούς μορφής όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.3.1. Στην Εικόνα 6.3.2 παρουσιάζεται ο τρόπος ορισμού των ανεξάρτητων παραμέτρων πλάτους και καμπυλότητας κάθε διαμόρφωσης, ενώ στην Εικόνα 6.3.3 παρουσιάζονται οι οριακές περιπτώσεις καμπυλότητας. Σημειώνεται ότι λόγω της εξωτερικής διαμέτρου των 115 mm και της εσωτερικής των 75 mm οι δίσκοι έχουν ζώνη πλάτους 20 mm, γεγονός που εξηγεί τις οριακές τιμές της ακτίνας των διαμορφώσεων.

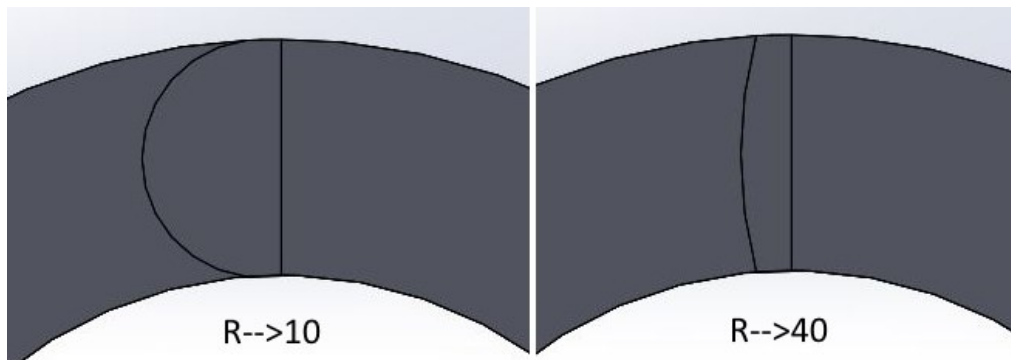
Στις Εικόνες 6.3.4 και 6.3.5 παρουσιάζονται λεπτομέρειες του πλέγματος υπολογισμού του στερεού και του ρευστού αντίστοιχα. Για το στερεό, καθώς δεν απαιτείται ιδιαίτερη ακρίβεια, δεν έχει γίνει η κατάλληλη προεπεξεργασία προκειμένου για πλέγμα εξάεδρων στοιχείων. Ανταυτού έχει δοθεί έμφαση μόνο στην επιφάνεια επικοινωνίας με το ρευστό. Όσον αφορά το χωρίο του ρευστού, αυτό λόγω παραμόρφωσης ενδιαφέρει ιδιαίτερα να αποτελείται από στρώσεις στοιχείων προκειμένου να είναι υλοποιήσιμη η τεχνική layering. Για να επιτευχθεί αυτό, εισηγήθησαν ξεχωριστά υποχωρία (για αυτό και τα διαφορετικά χρώματα) καθένα από τα οποία πλεγματοποιείται αυτόνομα με κοινούς κόμβους μόνο στις διεπιφάνειές τους προκειμένου για τελικά ενιαίο πλέγμα.



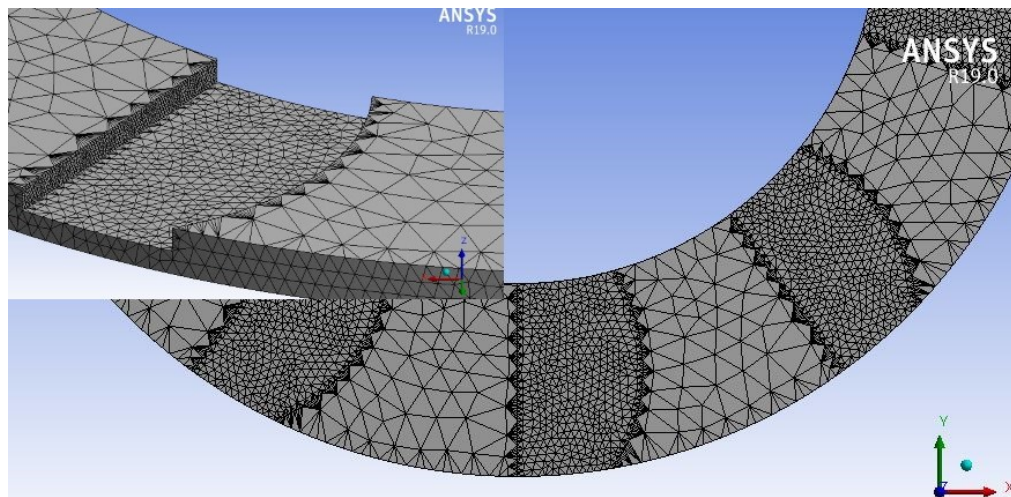
Εικόνα 6.3.1: Παράδειγμα δίσκου τοξοειδών διαμορφώσεων



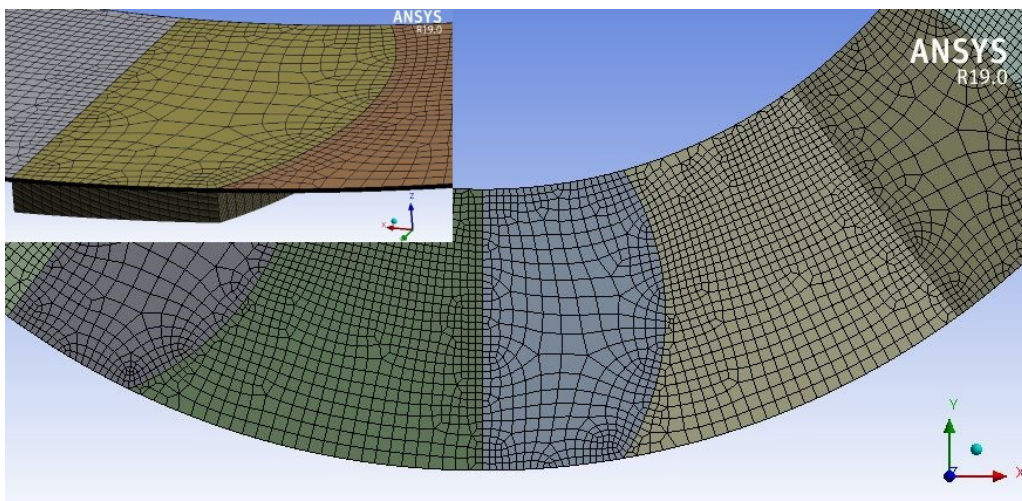
Εικόνα 6.3.2: Ορισμός παραμέτρων πλάτους και ακτίνας τοξοειδών διαμορφώσεων



Εικόνα 6.3.3: Μεταβολή τοξοειδούς διαμόρφωσης για τις οριακές τιμές ακτίνας



Εικόνα 6.3.4: Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Λεπτομέρεια πλέγματος στερεού δίσκου



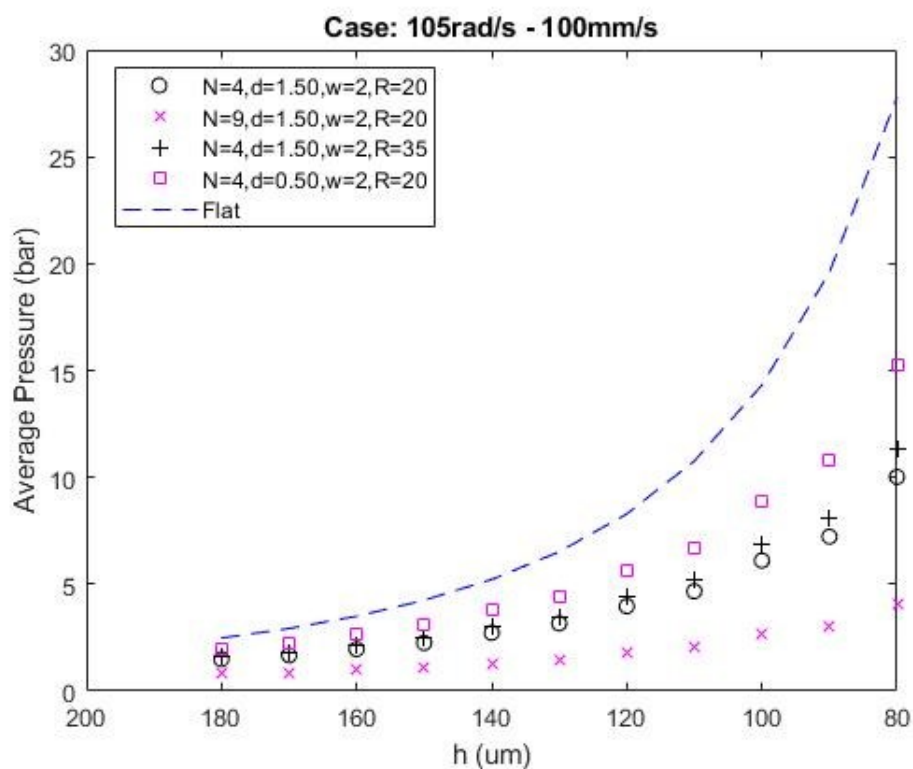
Εικόνα 6.3.5: Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Λεπτομέρεια πλέγματος ρευστού χωρίου

Οι ανεξάρτητες παράμετροι που προσδιορίζουν πλήρως τη συγκεκριμένη γεωμετρία επιλέχθηκαν να είναι το πλήθος των διαμορφώσεων (N), το βάθος (d), το πλάτος (w) και η ακτίνα τόξου (R). Οι συνδυασμοί τους για κάθε σύνολο εκπαίδευσης και επαλήθευσης συνοψίζονται στον Πίνακα 6.3.1. Στον ίδιο πίνακα σημειώνονται τα αποδεκτά όρια για λόγους χωροταξίας στα οποία επιτράπηκε στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης να αναζητήσει τις βέλτιστες λύσεις.

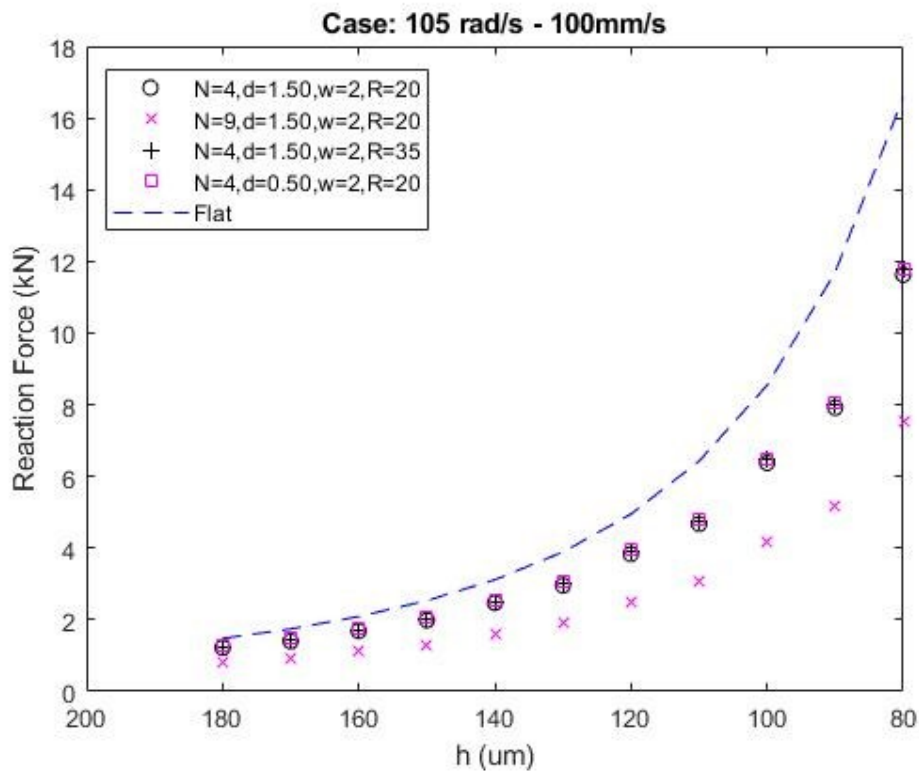
Πίνακας 6.3.1: Συνδυασμοί ανεξάρτητων παραμέτρων προσδιορισμού γεωμετρίας τοξοειδών διαμορφώσεων – Ελάχιστα/Μέγιστα όρια

Training Dataset			
N	d (mm)	w (mm)	R (mm)
4	0.50	2	12
6	1.50	8	20
9			35
Testing Dataset			
3	0.75	3	18
8	1.25	9	26
Lower Bounds			
2	0.25	2	10
Upper Bounds			
10	1.75	10	40

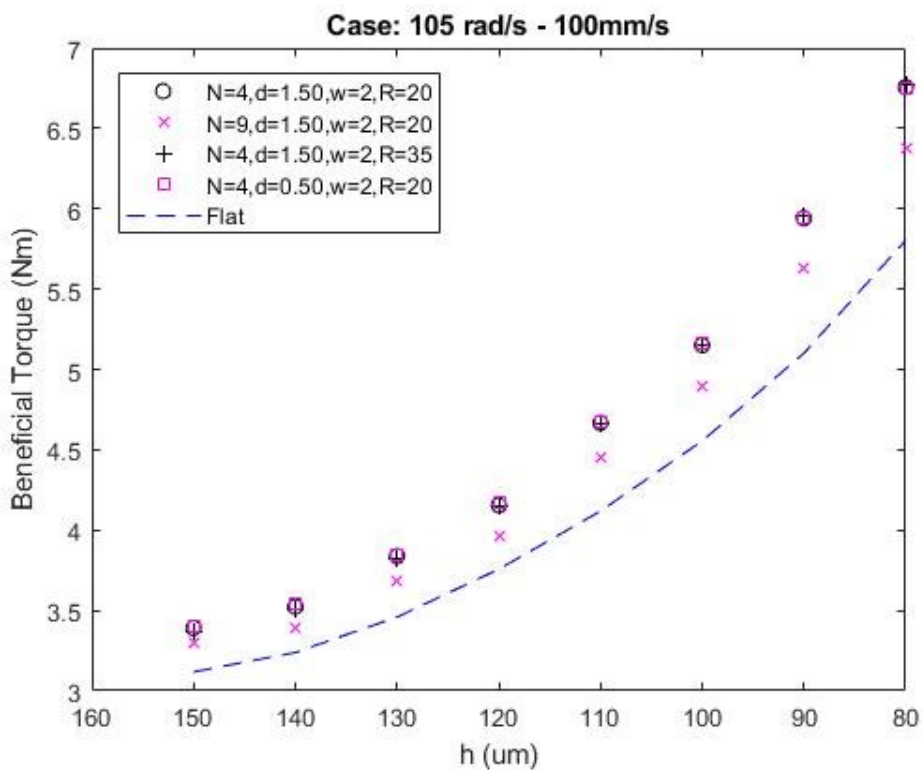
Στη συνέχεια παρουσιάζονται για διάφορα σημεία παραμέτρων τα αποτελέσματα πίεσης και ροπής στην μεταβατική και την κατάσταση αποσύμπλεξης. Στον Πίνακα 6.3.2 παρουσιάζονται οι βέλτιστοι συνδυασμοί που επέστρεψε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σύμφωνα με το εκάστοτε κριτήριο.



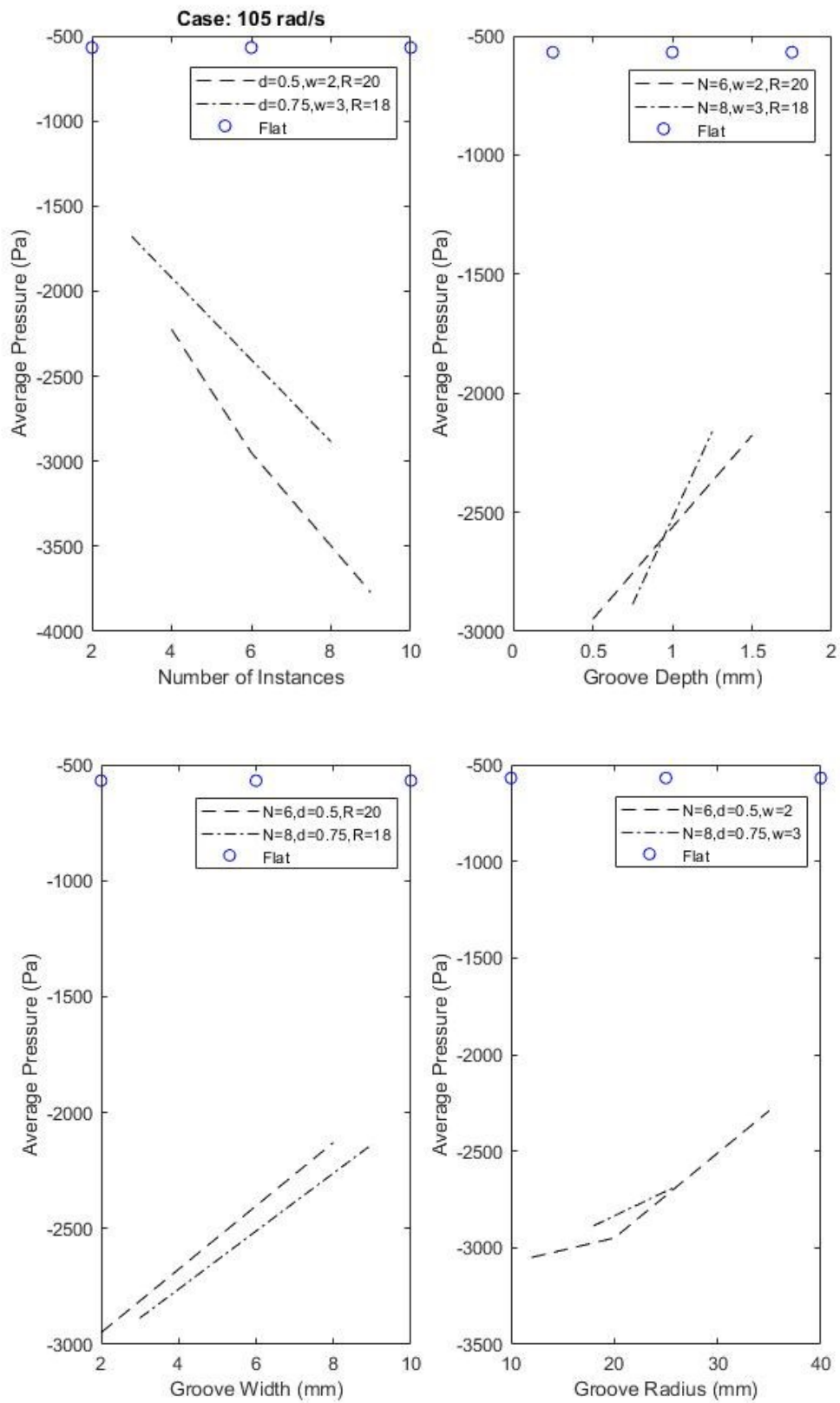
Διάγραμμα 6.3.1: Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Μέση πίεση στη μεταβατική κατάσταση σύμπλεξης



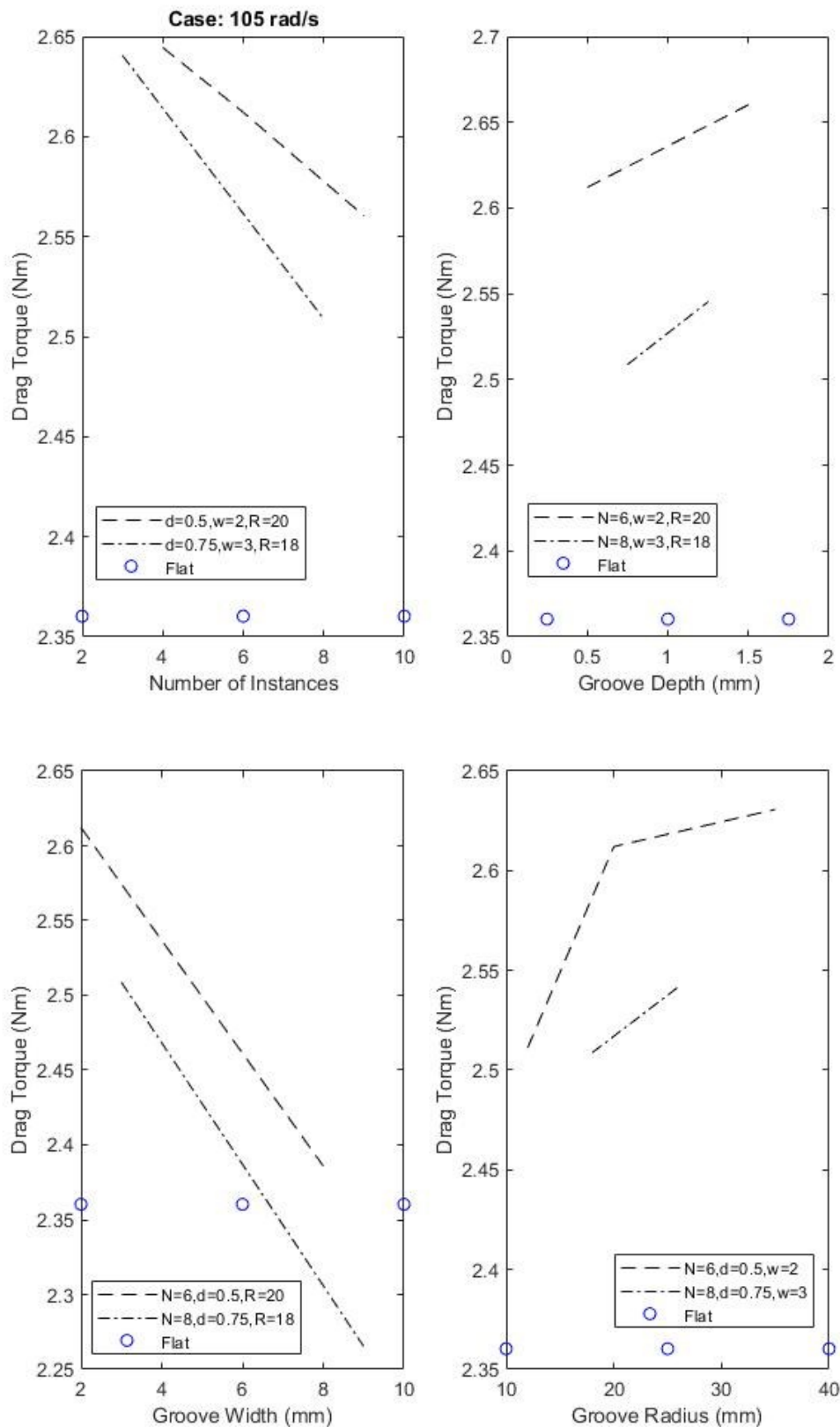
Διάγραμμα 6.3.2: Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Δύναμη αντίδρασης στη μεταβατική κατάσταση σύμπτυξης



Διάγραμμα 6.3.3: Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Ωφέλιμη ροπή στη μεταβατική κατάσταση σύμπτυξης



Διάγραμμα 6.3.4: Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Μέση πίεση στην κατάσταση αποσύμπλεξης



Διάγραμμα 6.3.5: Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Ροπή αντίστασης στην κατάσταση αποσύμπλεξης

Πίνακας 6.3.2: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης τοξοειδών διαμορφώσεων

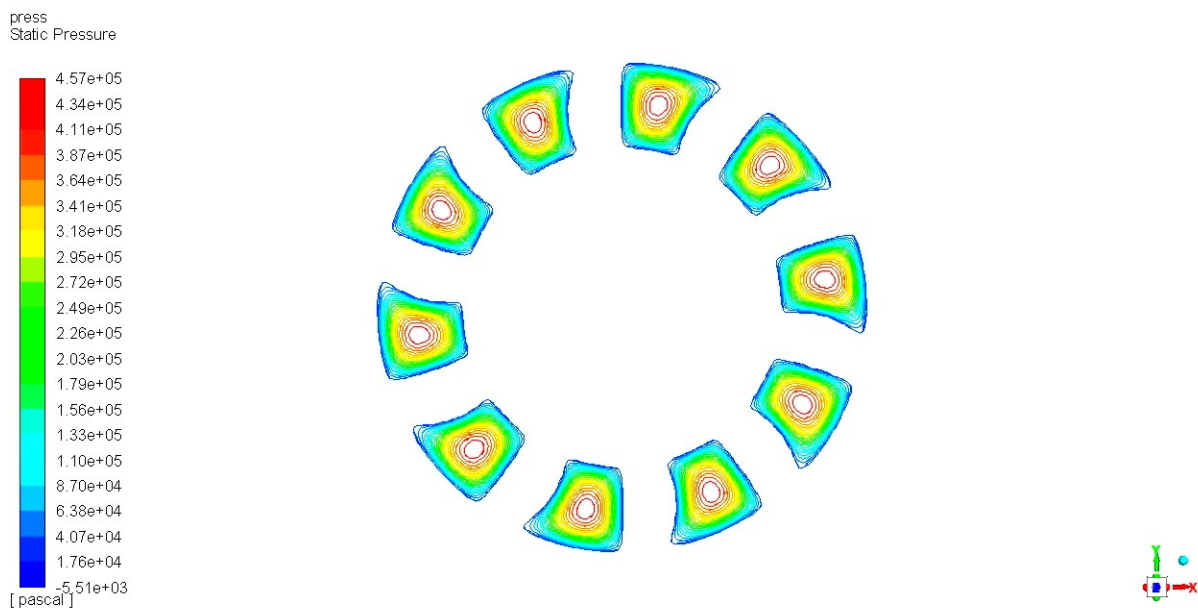
Κριτήριο Βελτιστοποίησης	{N d(mm) w(mm) R(mm)}
Σύμπλεξη: Ελάχιστη Δύναμη	{10 1.50 10 19}
Σύμπλεξη: Μέγιστη Ροπή	{3 1.15 5 35}
Αποσύμπλεξη: Ελάχιστη Ροπή	{8 0.30 10 20}
Συνδυασμός Κριτηρίων	{9 1.75 7 38}

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι πράγματι αυτές οι διαμορφώσεις συμπεριφέρονται παρόμοια με τις ακτινικές, ενώ στη συνδυαστική βελτιστοποίηση προκύπτει ένα πάρα πολύ ενδιαφέρον αποτέλεσμα: Η βέλτιστη γεωμετρία ταυτίζεται με ακτινική διαμόρφωση ($R \rightarrow 40$) και μάλιστα στο συγκεκριμένο βέλτιστο της προηγούμενης ενότητας ($\{9,1.75,10\}$). Αυτός είναι και ο λόγος που στα παραπάνω διαγράμματα δεν εμφανίζεται το βέλτιστο σημείο, καθώς αυτό δεν υπολογίστηκε για αυτή τη γεωμετρία (ταυτίζεται με το βέλτιστο των ακτινικών διαμορφώσεων). Παρόλα αυτά, σύγκριση της δύναμης και της ροπής για όλες τις διαμορφώσεις γίνεται στην ενότητα 6.5.

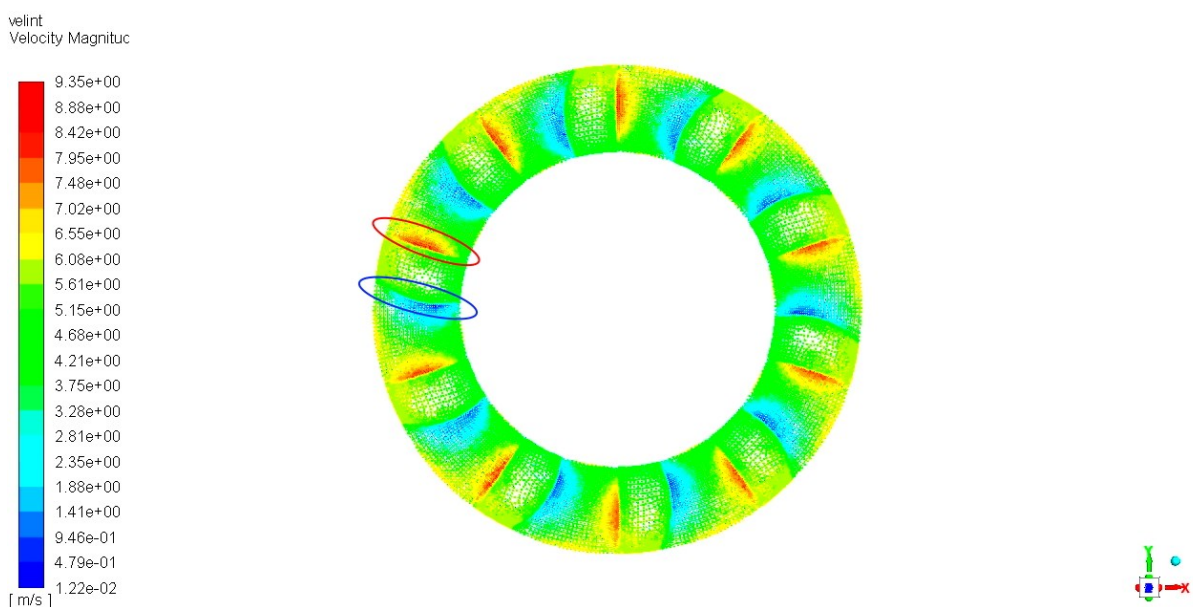
Σε ό,τι αφορά την ακτίνα των εν λόγω διαμορφώσεων, αυτή φαίνεται να επηρεάζει με τον παρακάτω τρόπο:

- Μείωση της πίεσης και της δύναμης επενέργησης με μείωσή της (αύξηση της απώλειας όγκου στερεού)
- Αύξηση της ροπής με αύξησή της (αύξηση της ενεργής επιφάνειας ανάπτυξης πλευρικής δύναμης)

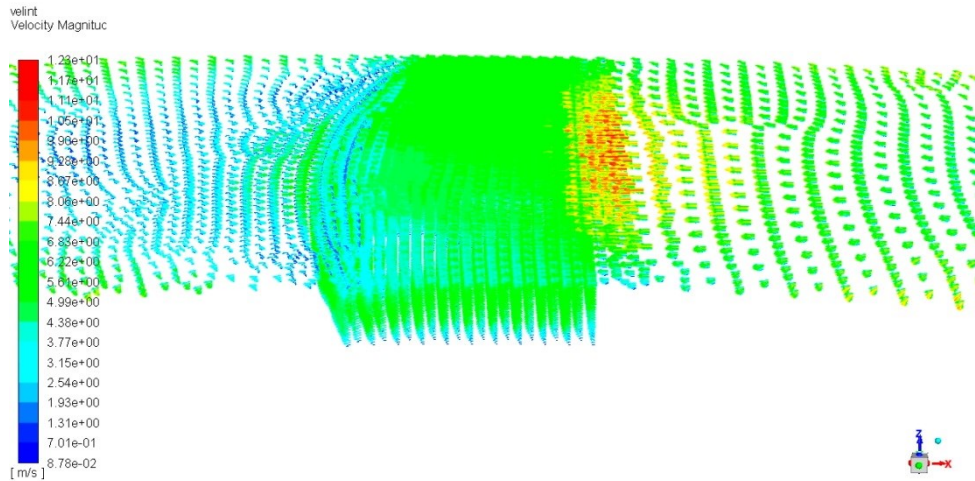
Τέλος, στα Σχήματα 6.3.1, 6.3.2 και 6.3.3 παρουσιάζονται οι ισοΰψεις πίεσης και το διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων του ρευστού.



Σχήμα 6.3.1: Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Ισοΰψεις πίεσης



Σχήμα 6.3.2: Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων (εσωτερικό χωρίο)

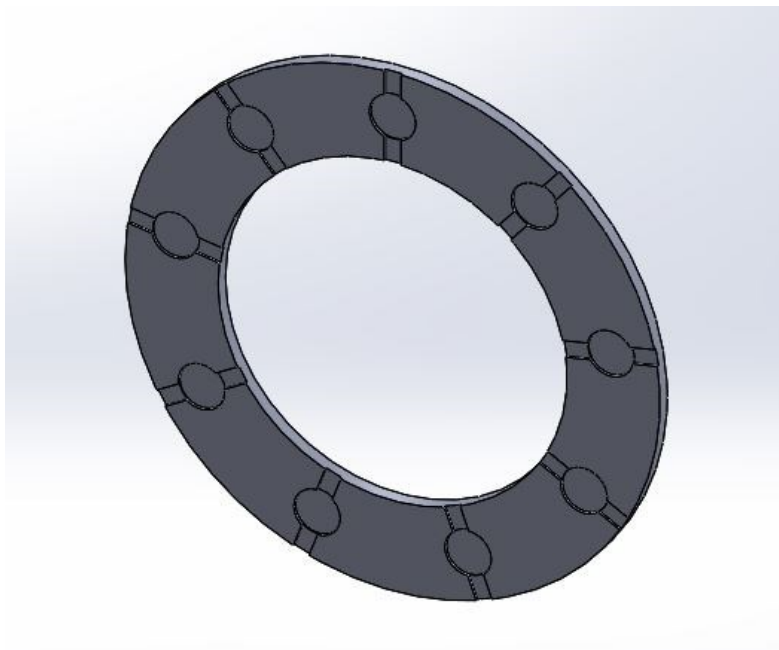


Σχήμα 6.3.3: Τοξοειδείς διαμορφώσεις: Λεπτομέρεια διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων στη διαμόρφωση (εσωτερικό χωρίο)

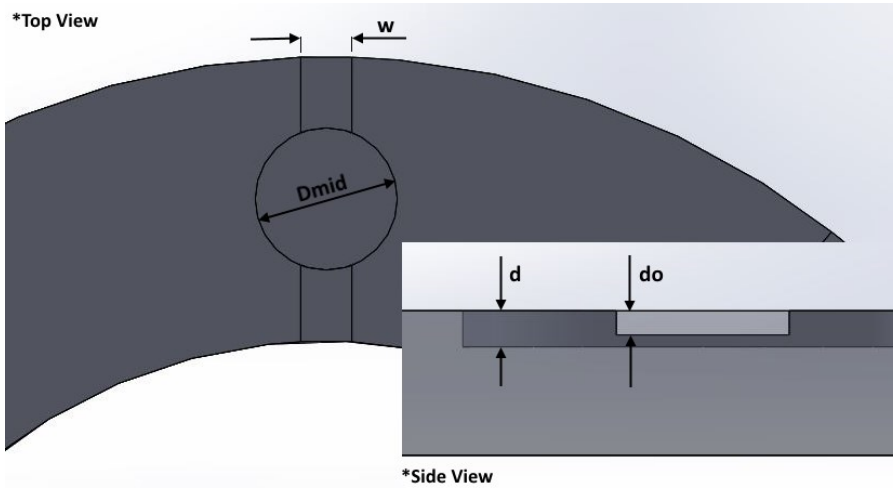
Και εδώ παρατηρείται όμοια συμπεριφορά τόσο στο πεδίο πίεσης όσο και στο πεδίο ταχυτήτων κοντά και πέρα από τις διαμορφώσεις, όπως και στις ακτινικές διαμορφώσεις.

6.4 Περίπτωση διαμορφώσεων μέσης εκτόνωσης

Μία άλλη πρόταση διαμορφώσεων που έχει γίνει ήδη από το *Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών* είναι αυτή της μέσης εκτόνωσης. Η ονομασία αυτή δίνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία για να συνοψίσει την ιδέα πίσω από τη διαμόρφωση αυτή. Πρόκειται για συνδυασμό ακτινικών διαμορφώσεων με κυκλική (ή άλλου σχήματος) διαμόρφωση στο κέντρο αυτών, εκεί δηλαδή όπου και αναμένεται η μέγιστη πίεση. Η κεντρική αυτή διαμόρφωση έχει εν γένει μεγαλύτερο βάθος με στόχο την εκτόνωση του φαινομένου ακριβώς στο σημείο όπου μεγιστοποιείται. Για λόγους απλοποίησης στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται κυκλικό σχήμα στη κεντρική διαμόρφωση. Παράδειγμα τέτοιου δίσκου παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.4.1, ενώ στην Εικόνα 6.4.2 γίνεται επεξήγηση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για τη συνολική περιγραφή των διαμορφώσεων.

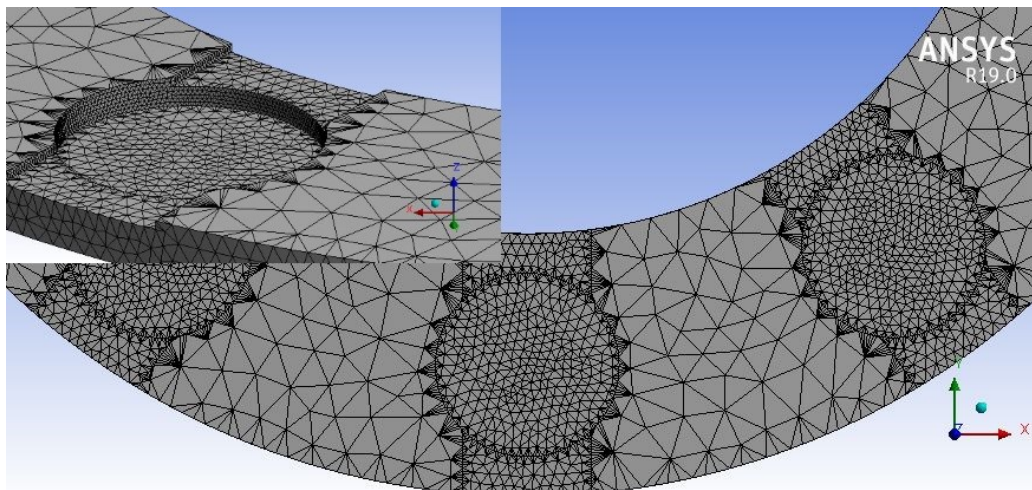


Εικόνα 6.4.1: Παράδειγμα δίσκου διαμορφώσεων μέσης εκτόνωσης

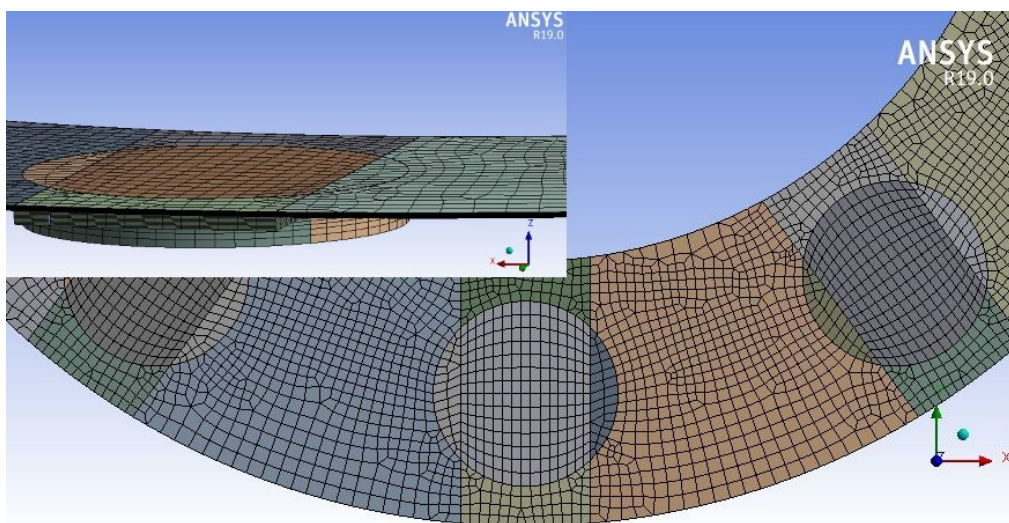


Εικόνα 6.4.2: Ορισμός παραμέτρων διαμορφώσεων μέσης εκτόνωσης

Στις Εικόνες 6.4.3 και 6.4.4 παρουσιάζονται λεπτομέρειες του πλέγματος υπολογισμού του στερεού και του ρευστού αντίστοιχα. Ο τρόπος πλεγματοποίησης είναι όμοιος με αυτόν των τοξοειδών διαμορφώσεων.



Εικόνα 6.4.3: Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Λεπτομέρεια πλέγματος στερεού δίσκου



Εικόνα 6.4.4: Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Λεπτομέρεια πλέγματος ρευστού χωρίου

Σε αυτήν την περίπτωση διαμορφώσεων οι ανεξάρτητες παράμετροι μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι το πλήθος (N), το βάθος των αυλακιών (d_o), το βάθος των κυκλικών διαμορφώσεων (d), το πλάτος των αυλακιών (w) και η διάμετρος των κυκλικών διαμορφώσεων (D_{mid}). Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, το πλήθος των δυνατών συνδυασμών αυξάνει εκθετικά για κάθε νέα ανεξάρτητη παράμετρο. Επομένως, για

λόγους απλοποίησης επιχειρήθηκε η εισαγωγή ορισμένων συνθηκών και η εισαγωγή δύο νέων ανεξάρτητων παραμέτρων. Έτσι, το βάθος των κυκλικών διαμορφώσεων εξαρτάται από το βάθος των αυλακιών μέσω της σχέσης $d = k_d d_o$ και το πλάτος των αυλακιών εξαρτάται από τη διάμετρο μέσω της σχέσης $w = k_w D_{mid}$. Έτσι, οι νέες ανεξάρτητες παράμετροι είναι οι N, kd, kw, Dmid. Το βάθος d_o επιλέγεται σταθερό και ίσο με 0.5 mm. Επομένως αυτό που τελικά ενδιαφέρει είναι πέρα από το πλήθος, η κεντρική διάμετρος και οι αναλογίες αυτής σε σχέση με τα χαρακτηριστικά των αυλακιών. Επιπλέον με την εισαγωγή των συντελεστών αναλογίας και των ελάχιστων/μέγιστων ορίων τους έγινε δυνατός ο έλεγχος της γεωμετρίας έτσι ώστε τα αυλάκια να είναι πάντα στενότερα της διαμέτρου και το κεντρικό βάθος να είναι πάντα μεγαλύτερο ή ίσο του βάθους των αυλακιών.

Οι συνδυασμοί τους για κάθε σύνολο εκπαίδευσης και επαλήθευσης συνοψίζονται στον Πίνακα 6.4.1. Στον ίδιο πίνακα σημειώνονται τα αποδεκτά όρια για λόγους χωροταξίας στα οποία επιτράπηκε στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης να αναζητήσει τις βέλτιστες λύσεις.

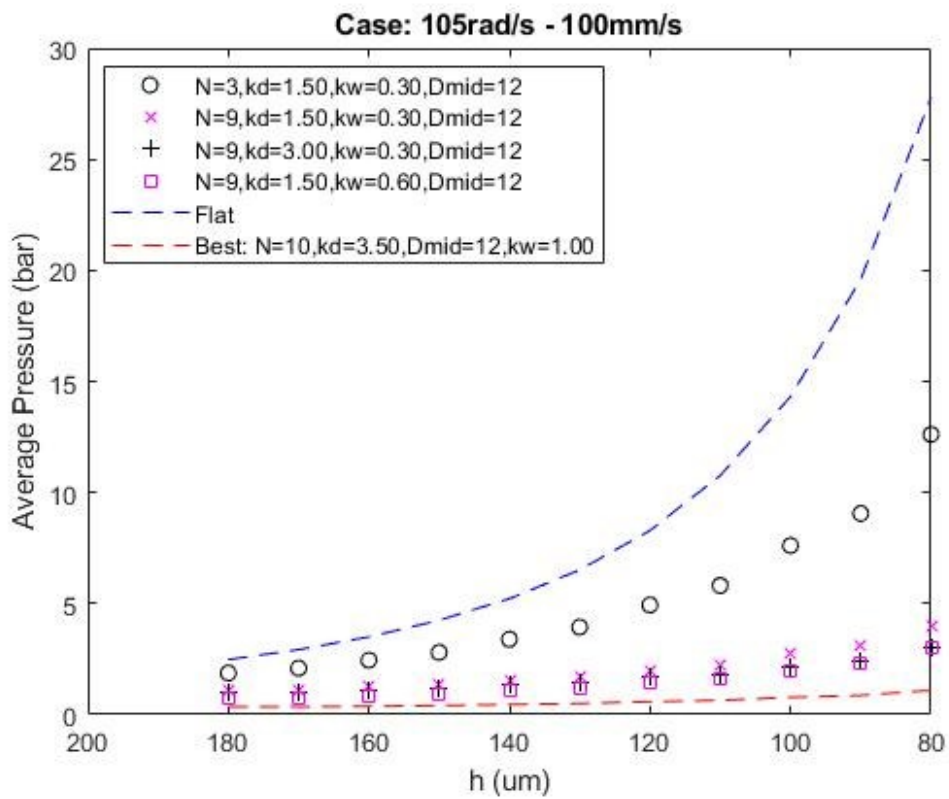
Πίνακας 6.4.1: Συνδυασμοί ανεξάρτητων παραμέτρων προσδιορισμού γεωμετρίας διαμορφώσεων μέσης εκτόνωσης – Ελάχιστα/Μέγιστα όρια

Training Dataset			
N	kd	kw	Dmid (mm)
3	1.50	0.30	12
6	3.00	0.60	16
9			
Testing Dataset			
4	2.00	0.25	10
8	3.50	0.75	17
Lower Bounds			
2	1.00	0.00	8
Upper Bounds			
10	3.50	1.00	18

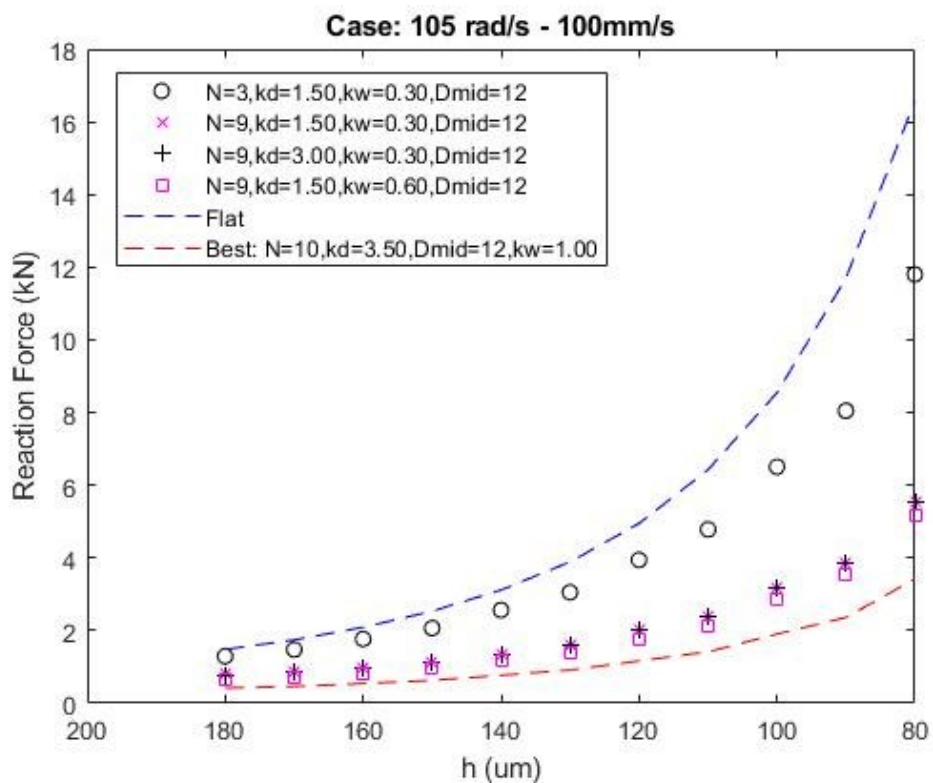
Στη συνέχεια παρουσιάζονται για διάφορα σημεία παραμέτρων τα αποτελέσματα πίεσης και ροπής στην μεταβατική και την κατάσταση αποσύμπλεξης. Στον Πίνακα 6.4.2 παρουσιάζονται οι βέλτιστοι συνδυασμοί που επέστρεψε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σύμφωνα με το εκάστοτε κριτήριο.

Πίνακας 6.4.2: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης διαμορφώσεων μέσης εκτόνωσης

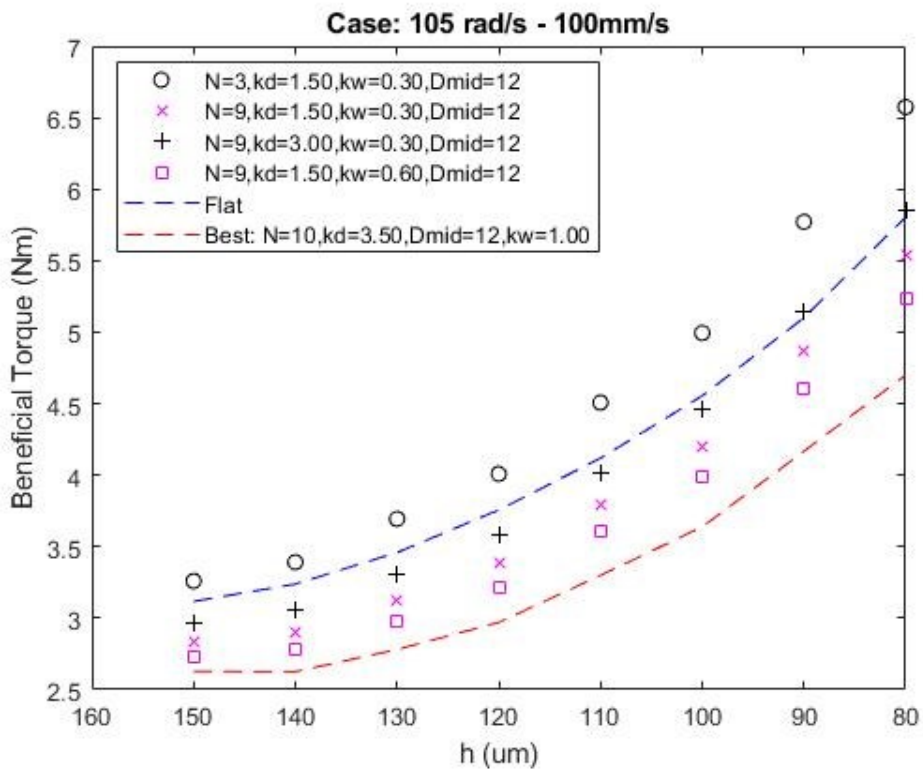
Κριτήριο Βελτιστοποίησης	{N kd kw Dmid(mm)}
Σύμπλεξη: Ελάχιστη Δύναμη	{10 3.20 0.70 14}
Σύμπλεξη: Μέγιστη Ροπή	{2 3.50 0.00 8}
Αποσύμπλεξη: Ελάχιστη Ροπή	{10 1.00 1.00 18}
Συνδυασμός Κριτηρίων	{10 3.50 1.00 12}



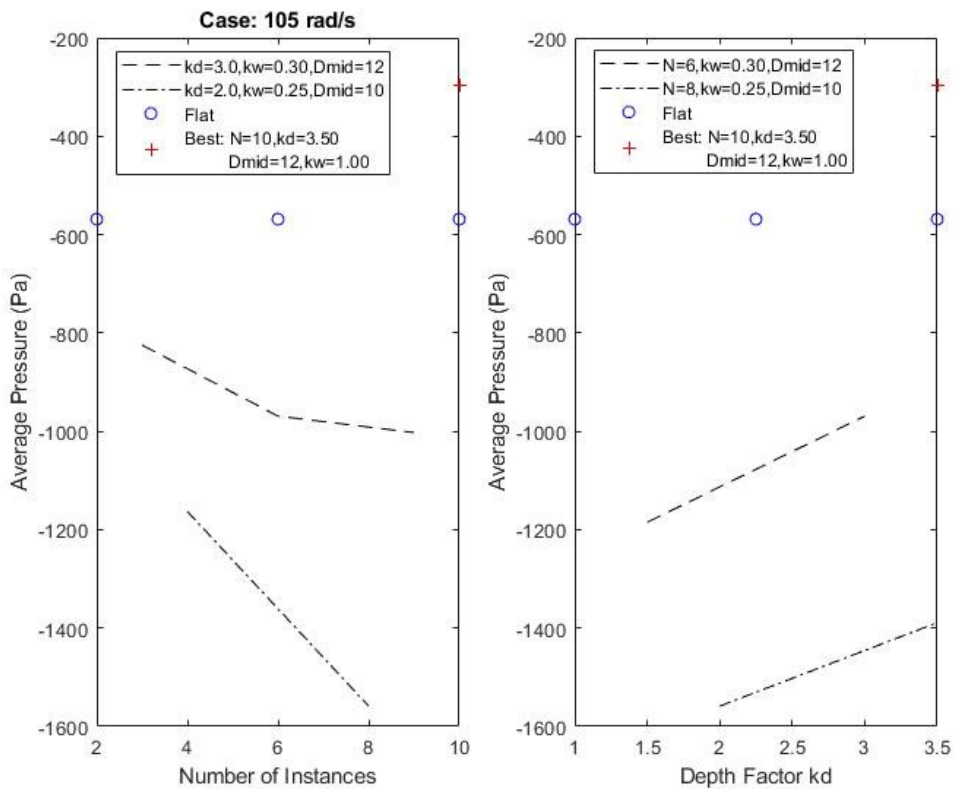
Διάγραμμα 6.4.1: Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Μέση πίεση στη μεταβατική κατάσταση σύμπλεξης

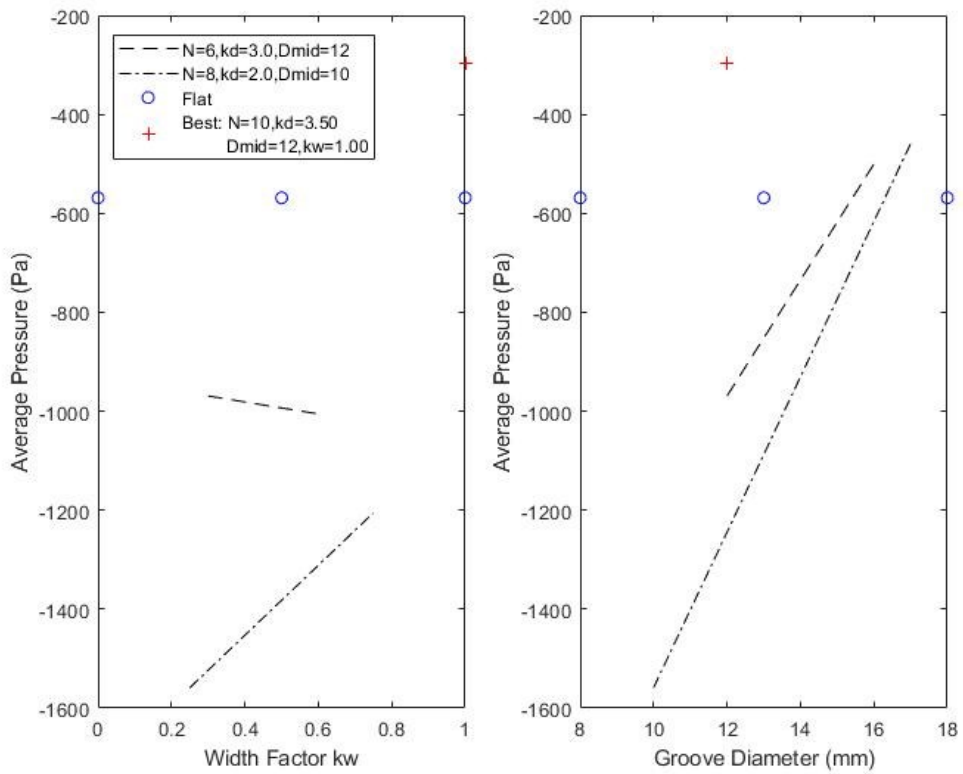


Διάγραμμα 6.4.2: Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Δύναμη αντίδρασης στη μεταβατική κατάσταση σύμπλεξης

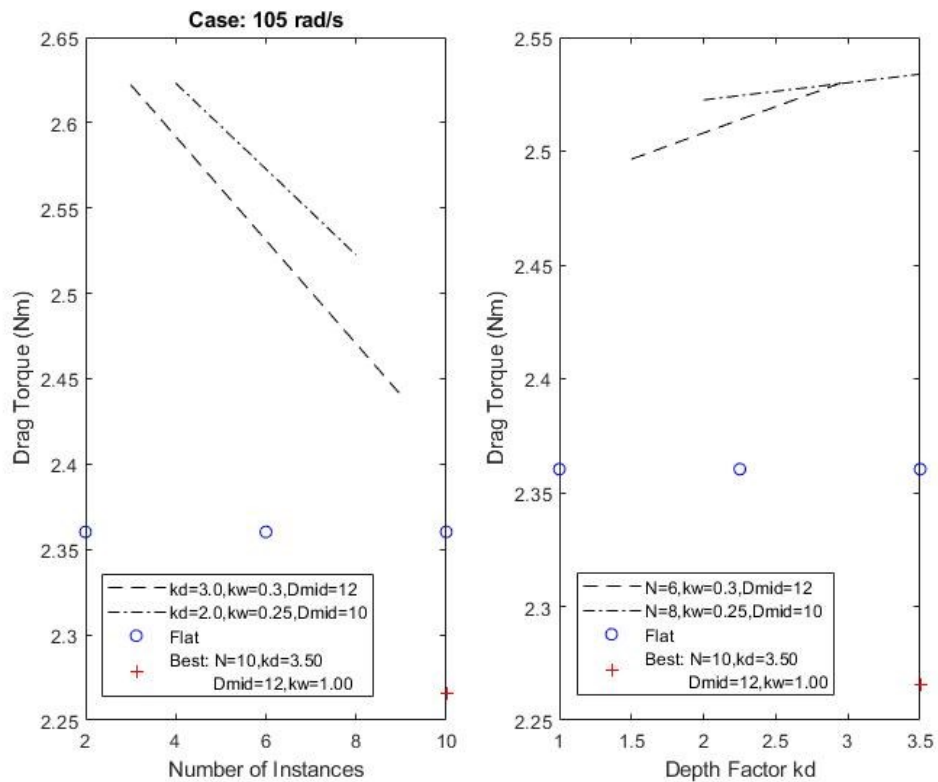


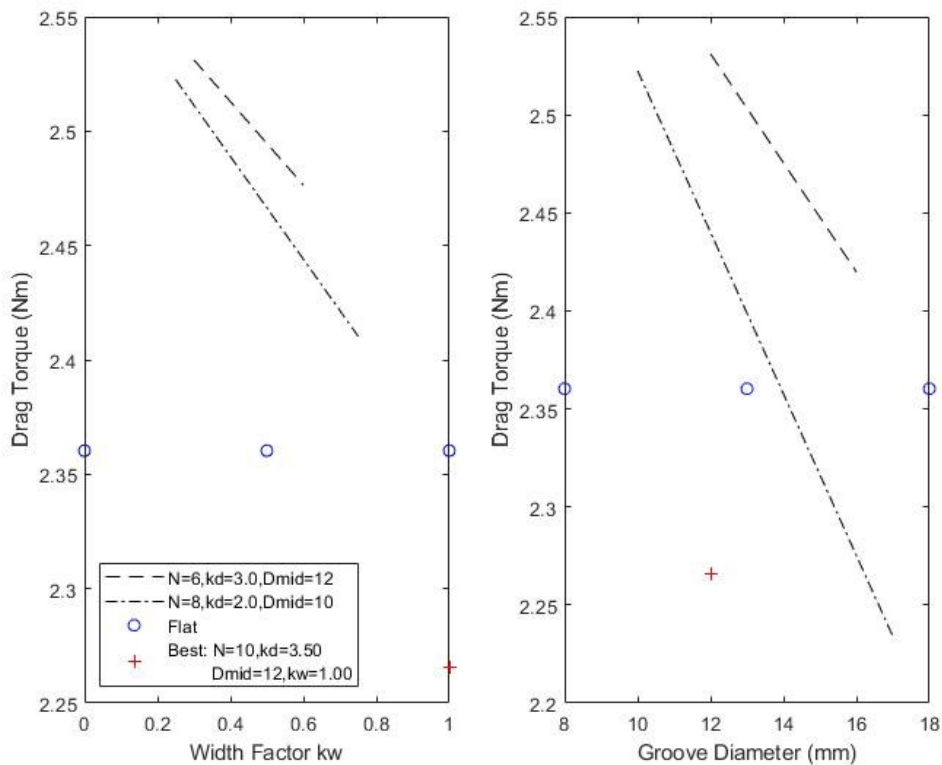
Διάγραμμα 6.4.3: Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Ωφέλιμη ροπή στη μεταβατική κατάσταση σύμπλεξης





Διάγραμμα 6.4.4: Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Μέση πίεση στην κατάσταση αποσύμπλεξης





Διάγραμμα 6.4.5: Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Ροπή αντίστασης στην κατάσταση αποσύμπλεξης

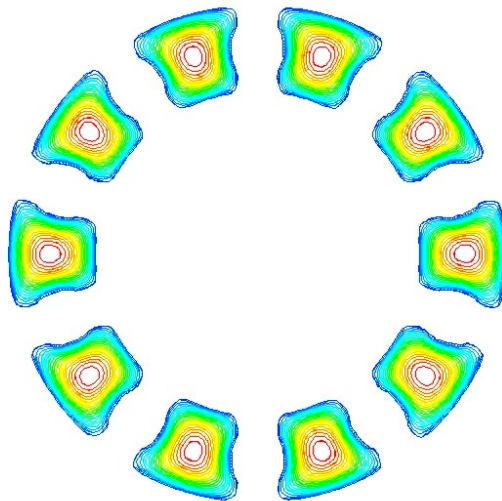
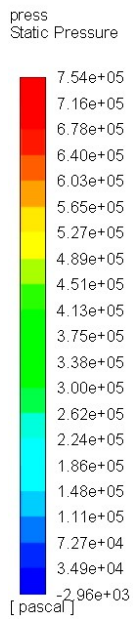
Από τα παραπάνω προκύπτουν γενικές τάσεις που έχουν παρατηρηθεί και στις προηγούμενες διαμορφώσεις, όπως το ότι η απώλεια όγκου στερεού εν γένει συνεισφέρει στη μείωση της πίεσης και ότι η συνεισφορά των όρων ιξώδους στην ανάπτυξη της ροπής είναι πολλή σημαντική και μάλλον σημαντικότερη από τη συνεισφορά των όρων πίεσης. Ενδιαφέρον παρατηρείται στις βέλτιστες διαμορφώσεις όπου οι συντελεστές αναλογίας φτάνουν σε οριακές τιμές.

Για την περίπτωση της μέγιστης ροπής το πλάτος μηδενίζεται, ενώ η διάμετρος αποκτά την ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή της. Αυτό, σε συνδυασμό με το ελάχιστο επιτρεπόμενο πλήθος διαμορφώσεων φανερώνει ακριβώς τη σημασία των όρων ιξώδους έναντι των όρων πίεσης για την ανάπτυξη ροπής. Επομένως, ο αλγόριθμος τείνει να εξαλλείψει τις διαμορφώσεις και να «κερδίσει» όσο περισσότερο εμβαδό γίνεται για τους όρους ιξώδους. Όσον αφορά το βάθος, αυτό παίρνει τη μέγιστη τιμή του ώστε οι εναπομείναντες όροι πίεσης να μεγιστοποιηθούν.

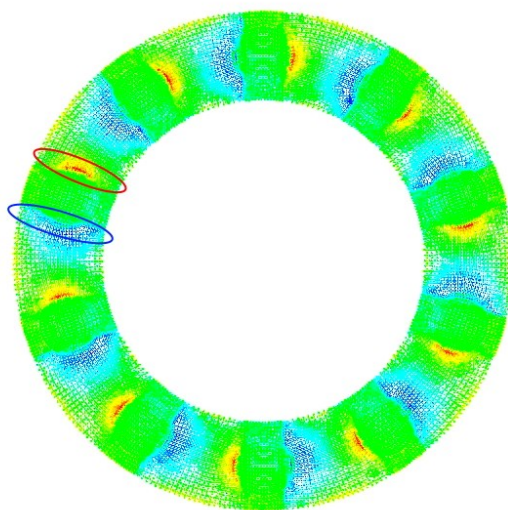
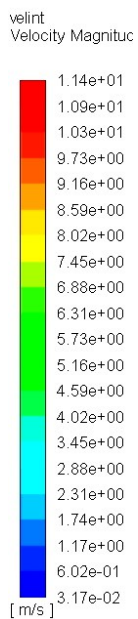
Για την περίπτωση ελαχιστοποίησης της ροπής αντίστασης προκύπτουν γενικά τα μέγιστα όρια των παραμέτρων. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει πιθανώς ότι αφενός η πίεση εκτονώνεται τόσο που δεν συνεισφέρουν οι όροι πίεσης και αφαιτέρου ο ωφέλιμος χώρος για τους όρους ιξώδους καταστρέφεται. Και ενώ αυτό το αποτέλεσμα εκ πρώτης όψεως προβληματίζει, στο Διάγραμμα 6.4.5 όπου οι κόκκινοι σταυροί τοποθετούνται για το συνδυαστικό βέλτιστο, το οποίο δεν διαφέρει πολύ από το βέλτιστο της ροπής αντίστασης, προκύπτει ότι πράγματι η ροπή αντίστασης κινείται στις χαμηλότερες τιμές της.

Τέλος, το συνδυαστικό βέλτιστο εμφανίζει συντελεστή πλάτους ίσο με 1.00 που σημαίνει πλάτος αυλακιού ίσο με τη διάμετρο. Η μόνη διαφοροποίηση έγκειται στη διαφορά βάθους μεταξύ των δύο η οποία είναι σχετικά μεγάλη. Το αποτέλεσμα αυτών των παραμέτρων δίνει πράγματι χαμηλότερη δύναμη και ροπή αντίστασης, όχι όμως μέγιστη ωφέλιμη ροπή, όπως έχει συμβεί και στις προηγούμενες διαμορφώσεις για τα συγκεκριμένα βάρη βελτιστοποίησης.

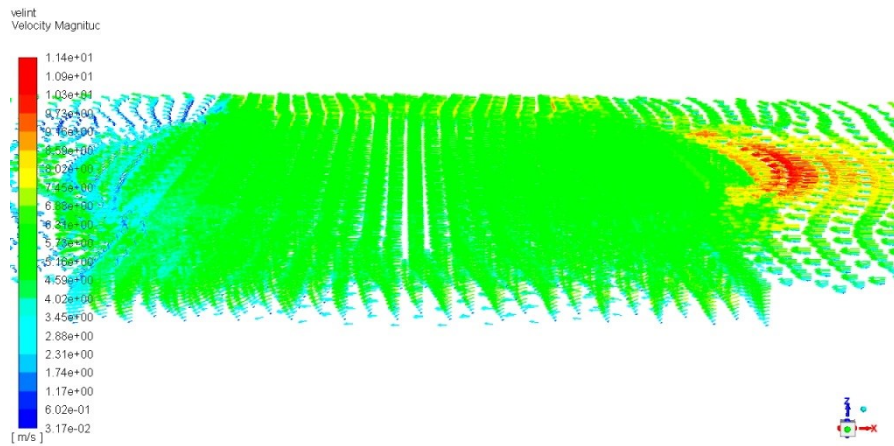
Στα Σχήματα 6.4.1, 6.4.2 και 6.4.3 παρουσιάζονται οι ισούψεις πίεσης και το διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων του ρευστού.



Σχήμα 6.4.1: Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Ισοψείς πίεσης



Σχήμα 6.4.2: Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων (εσωτερικό χωρίο)



Σχήμα 6.4.3: Διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης: Λεπτομέρεια διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων στη διαμόρφωση (εσωτερικό χωρίο)

Και εδώ παρατηρείται όμοια συμπεριφορά τόσο στο πεδίο πίεσης όσο και στο πεδίο ταχυτήτων κοντά και πέρα από τις διαμορφώσεις, όπως και στις προηγούμενες διαμορφώσεις.

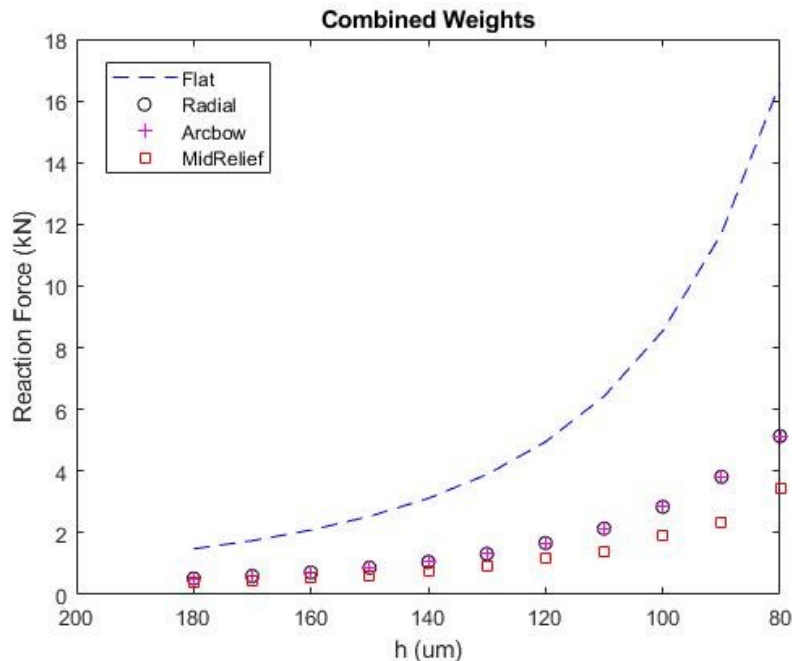
6.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στο σημείο αυτό έχει πράγματι ενδιαφέρον να συγκριθούν οι γεωμετρίες μεταξύ τους με γνώμονα πάντα την περίπτωση των επίπεδων δίσκων. Η σύγκριση θα γίνει

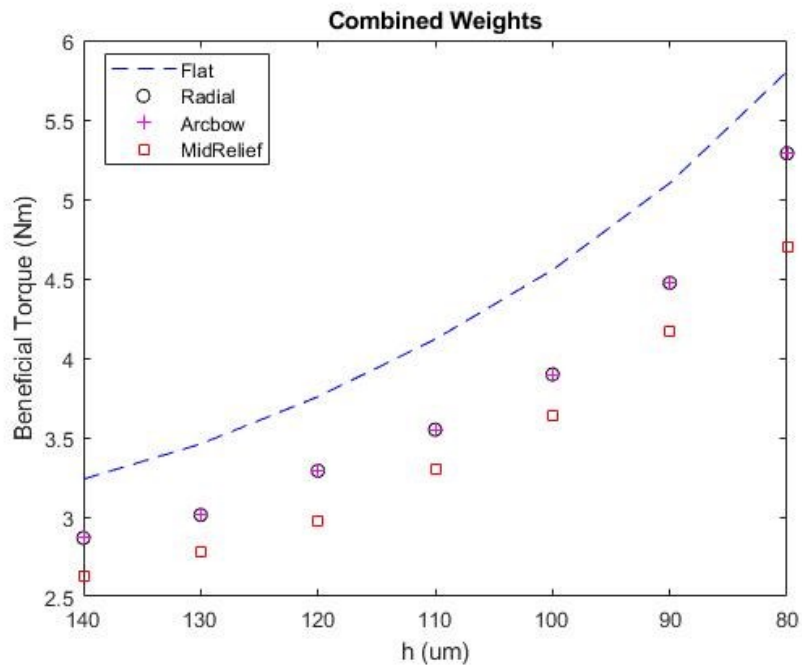
- 1) για τα συνδυαστικά βέλτιστα
- 2) για τις γεωμετρίες ελάχιστης δύναμης επενέργειας
- 3) για τις γεωμετρίες μέγιστης ωφέλιμης ροπής

Τα μεγέθη που συγκρίνονται για όλες τις περιπτώσεις είναι η δύναμη επενέργειας και η αναπτυσσόμενη ροπή.

Συνδυαστικά Βέλτιστα



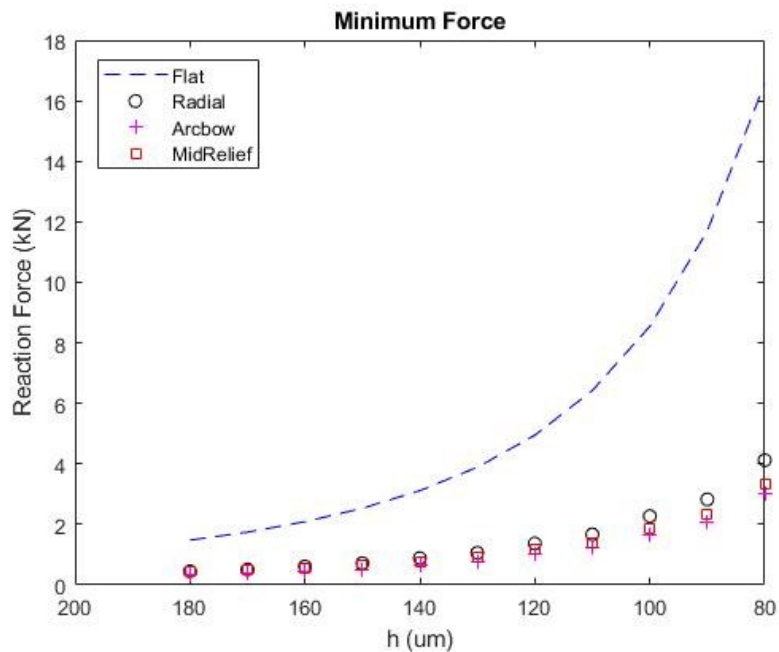
Διάγραμμα 6.5.1: Συνδυασμένα βάρη – Σύγκριση δύναμης επενέργειας



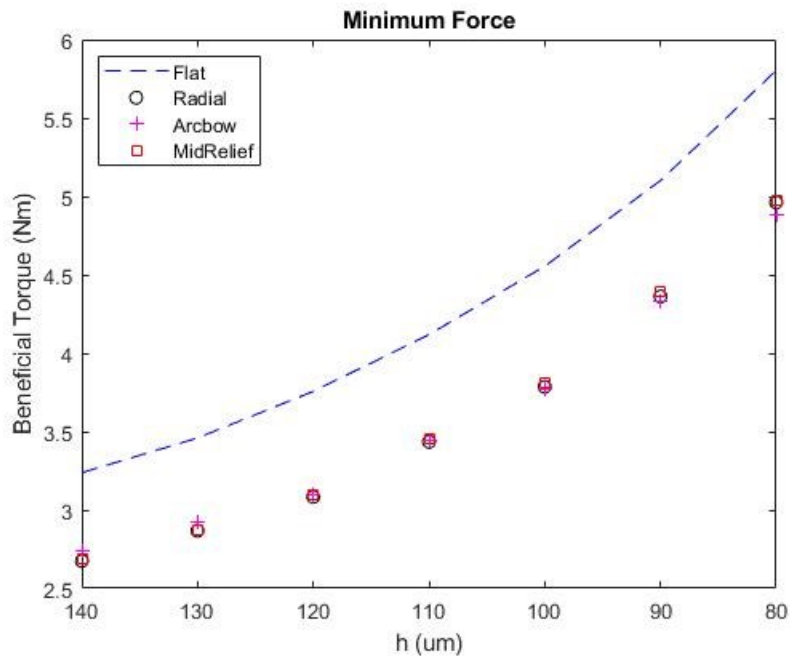
Διάγραμμα 6.5.2: Συνδυασμένα βάρη – Σύγκριση αναπτυσσόμενης ροπής

Όπως έγινε φανερό και από τις προηγούμενες ενότητες, τα βάρη που επιλέχθηκαν ευνοούν περισσότερο την ελαχιστοποίηση της δύναμης και της ροπής αντίστασης. Επομένως, και οι τρεις γεωμετρίες πετυχαίνουν μικρότερη δύναμη επενέργειας με μεγαλύτερη επιτυχία στις διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης, ενώ όσον αφορά τη ροπή οι επίπεδοι δίσκοι αποδίδουν καλύτερα, ενώ οι μέσης εκτόνωσης χειρότερα.

Ελάχιστη Δύναμη



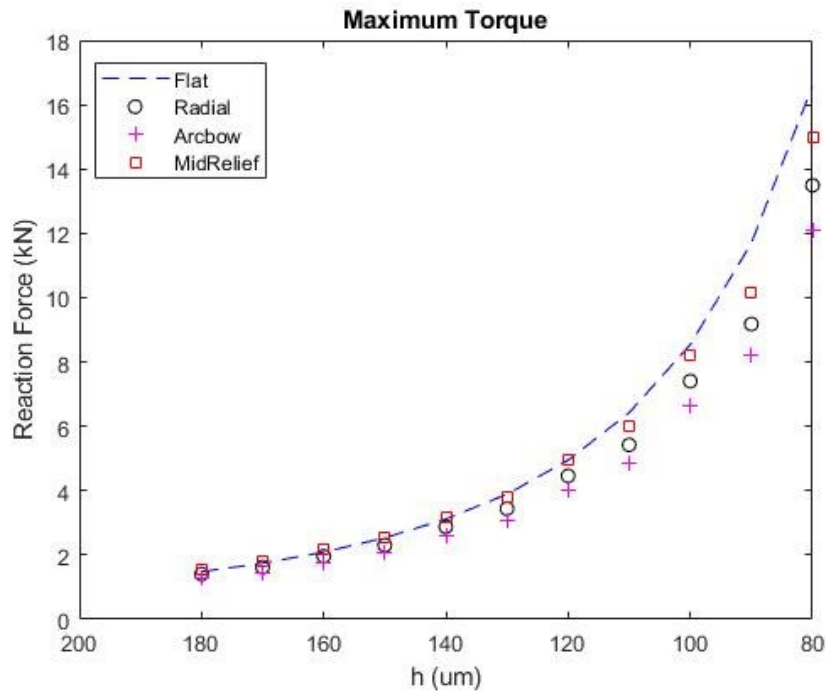
Διάγραμμα 6.5.3: Ελάχιστη δύναμη – Σύγκριση δύναμης επενέργειας



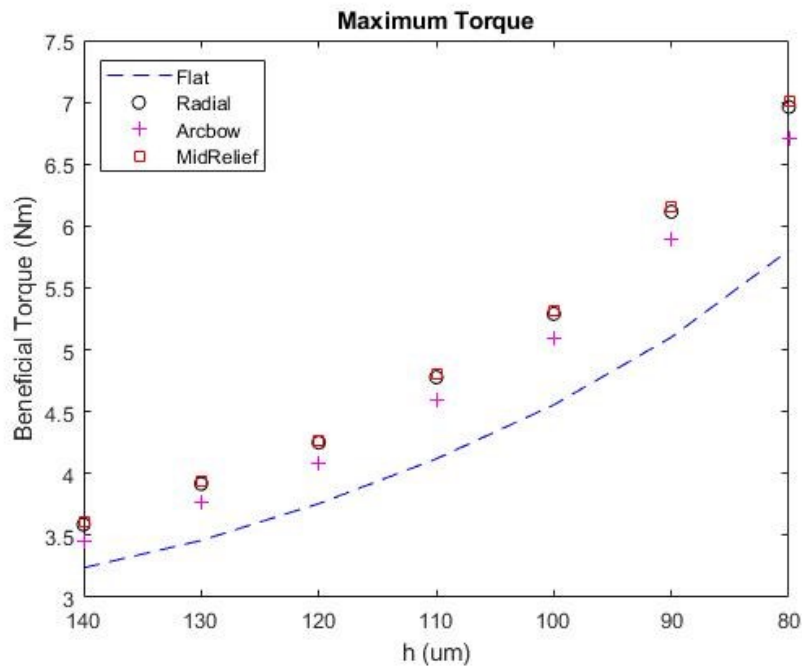
Διάγραμμα 6.5.4: Ελάχιστη δύναμη – Σύγκριση αναπτυσσόμενης ροπής

Στην ελαχιστοποίηση της δύναμης επενέργησης και οι τρεις γεωμετρίες φαίνεται να αποδίδουν εξίσου καλά με ίσως καλύτερη συμπεριφορά των τοξοειδών διαμορφώσεων. Επίσης η αναπτυσσόμενη ροπή, αν και πάλι μικρότερη σε σύγκριση με αυτήν των επίπεδων δίσκων, κυμαίνεται σε ίδιες τιμές και για τις τρεις γεωμετρίες.

Μέγιστη Ροπή



Διάγραμμα 6.5.5: Μέγιστη ροπή – Σύγκριση δύναμης επενέργησης



Διάγραμμα 6.5.6: Μέγιστη ροπή – Σύγκριση αναπτυσσόμενης ροπής

Κατά τη μεγιστοποίηση της ροπής η δύναμη αντίδρασης και των τριών γεωμετριών πλησιάζει αυτή των επίπεδων δίσκων, γεγονός που υποδεικνύει εάν παρατηρήσουμε και τα χαρακτηριστικά αυτών των γεωμετριών στις προηγούμενες ενότητες, ότι τείνουν να προσεγγίσουν και σε μορφή τους επίπεδους δίσκους. Η αναπτυσσόμενη ροπή πράγματι πλέον ξεπερνά αυτή των επίπεδων δίσκων, αφού πλέον συνεισφέρουν και οι όροι πίεσης με παρόμοια απόδοση και για τις τρεις περιπτώσεις, ίσως καλύτερη για τις ακτινικές και τις διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης.

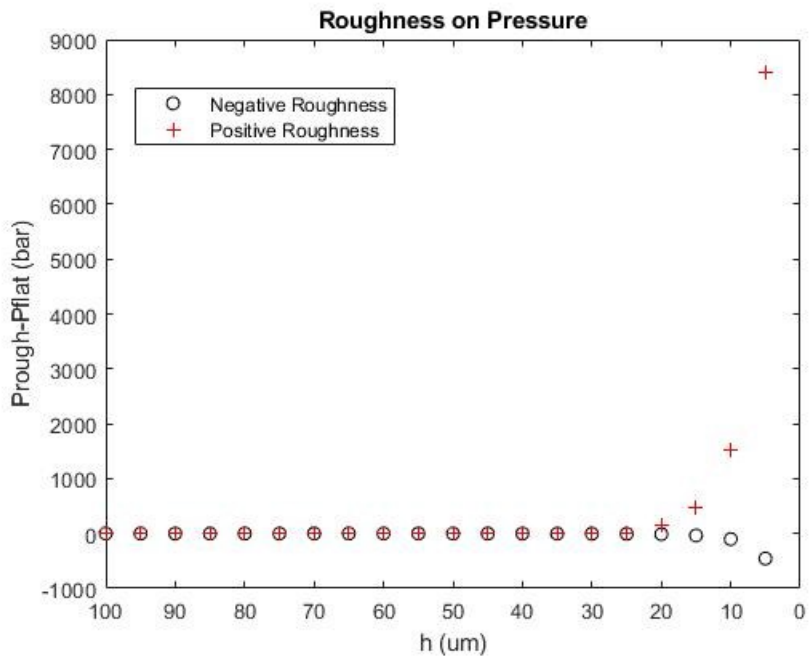
6.6 Επίδραση τραχύτητας

Το σενάριο που εξετάστηκε για την επίδραση της τραχύτητας είναι αυτό των επίπεδων δίσκων (α) σε μία θεώρηση ονομαστικά επίπεδων επιφανειών, (β) σε μία θεώρηση με κυρίως αρνητική τραχύτητα και (γ) σε μία θεώρηση με κυρίως θετική τραχύτητα. Στις περιπτώσεις (β) και (γ) οι μετρικές R_a, R_q καθώς και η αυτοσυσχέτιση των επιφανειών λήφθηκαν ίδες με μόνη διαφορά τη θεώρηση ως προς τη μηδενική επιφάνεια. Και στις τρεις περιπτώσεις η υλοποίηση έγινε μόνο εντός του Fluent με χαρακτηριστικά ροής:

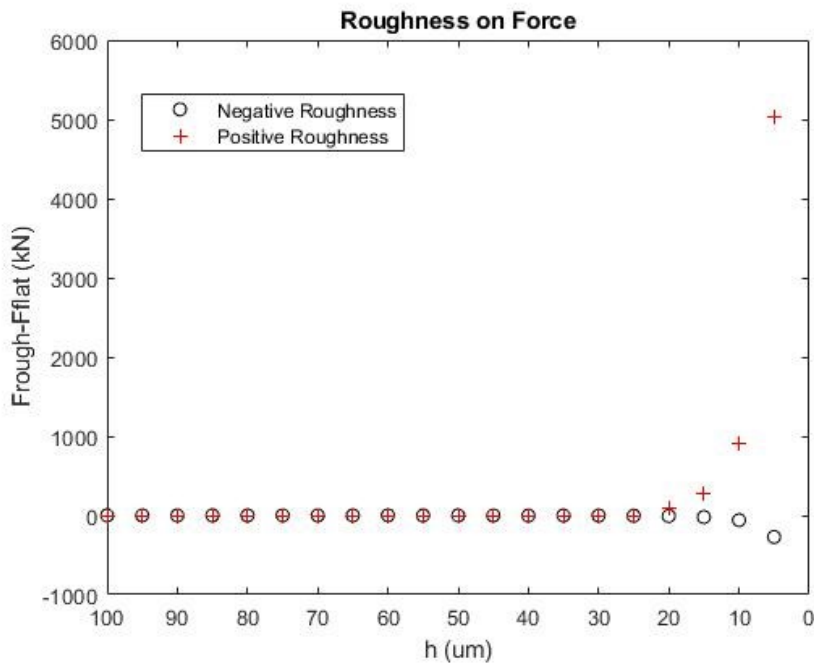
- *Laminar Flow*
- $h_o = 100 \mu\text{m}$
- $h_f = 5 \mu\text{m}$
- $V_z = -10 \text{ mm/s}$
- $\Delta\omega = 105 \text{ rad/s}$
- *Fluid density* $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$
- *Fluid viscosity (nominal)* $\eta = 0.01 \text{ Pas}$

Για τις περιπτώσεις τραχύτητας έγινε χρήση των συντελεστών κατά Patir & Cheng όπως εξήχθησαν στην σχετική ενότητα.

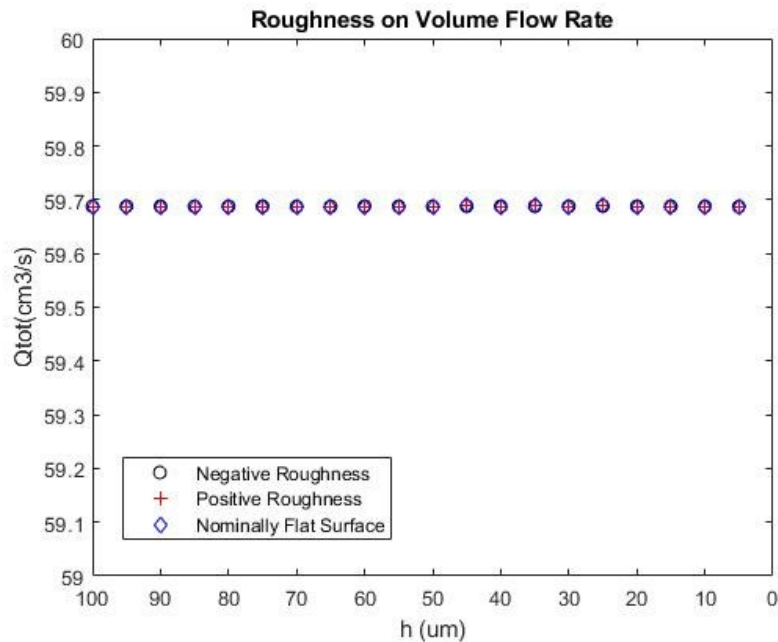
Στο Διάγραμμα 6.6.1 παρουσιάζεται η προσημασμένη διαφορά $P_{rough} - P_{flat}$, στο Διάγραμμα 6.6.2 η προσημασμένη διαφορά $F_{rough} - F_{flat}$, ενώ στο Διάγραμμα 6.6.3 η συνολική παροχή για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις. Σημειώνεται ότι για τα πρώτα δύο μεγέθη επιλέχθηκε να παρουσιαστεί η διαφορά καθώς η εξέλιξη των απόλυτων μεγεθών συναρτήσει του ονομαστικού διακένου είναι ραγδαία καθιστώντας μη εύκολα απεικονίσιμη την πορεία σε όλα τα στάδια του φαινομένου. Αντιθέτως για την περίπτωση της παροχής αυτή διατηρείται εν γένει σταθερή και η διαφορά τείνει στο μηδενικό αποτέλεσμα για λόγους που σχολιάζονται παρακάτω. Επίσης σημειώνεται ότι η παροχή για κάθε περίπτωση παρουσιάζεται ως το απόλυτο άθροισμα των επιμέρους παροχών στην εξωτερική και την εσωτερική ακτίνα.



Διάγραμμα 6.6.1: Επίδραση τραχύτητας στην πίεση



Διάγραμμα 6.6.2: Επίδραση τραχύτητας στη δύναμη επενέργειας



Διάγραμμα 6.6.3: Επίδραση τραχύτητας στην παροχή

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα πίεσης και δύναμης που πρακτικά ταυτίζονται, η ύπαρξη τραχύτητας δυσχεραίνει την ανάπτυξη ροής και επομένως οδηγεί σε άυξηση της πίεσης σε συνολικό επίπεδο. Για υπερβολικά μεγάλη τραχύτητα ή σε διάκενο που τείνει στο 0 η πίεση τείνει να απειριστεί, ενώ στην πραγματικότητα δεν υφίσταται πρακτικά ροή και οι δίσκοι έρχονται σε πλήρη επαφή. Αντίθετα, η ύπαρξη κοιλάδων και γενικότερα εσωτερικών διαμορφώσεων όπως έχει φανεί και από τα προηγούμενα αποτελέσματα, ανακουφίζει το φαινόμενο οδηγώντας σε χαμηλότερες τιμές πίεσης και δύναμης.

Όσον αφορά την παροχή αυτή προκύπτει ίδια πέραν ορισμένων αριθμητικών αποκλίσεων και για τις τρεις περιπτώσεις, κάτι που είναι αναμενόμενο καθώς εξαρτάται από το squeeze φαινόμενο και κατά συνέπεια την ταχύτητα συμπίεσης η οποία διατηρήθηκε ίδια. Εάν αντί για ίδια ταχύτητα τεθεί ως είσοδος ίδια δύναμη επενέργειας, τότε αυτό που αναμένεται να συμβεί είναι η διευκόλυνση της ροής και κατά συνέπεια η μεγαλύτερη παροχή για την αρνητική τραχύτητα και το αντίθετο για την θετική.

Στο σημείο αυτό μπορεί να γίνει πιο εύκολα κατανοητό πόσο σημαντική είναι η γνώση της πραγματικής τοπολογίας της επιφάνειας καθώς και του ορισμού της ονομαστικά μηδενικής. Οι Patir & Cheng σε εκείνη την πρώτη δημοσίευσή τους [12] λύνοντας μόνο διδιάστατα όπως προβλέπει η εξίσωση του Reynolds θεώρησαν μόνο την επίδραση των κορυφών της τραχύτητας στο φαινόμενο της μικτής λίπανσης, κάτι που είναι εν μέρει αληθές. Σε μεγάλο βαθμό σε μετέπειτα δημοσιεύσεις οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται αυτούσιοι ή με μικρές παραλλαγές χωρίς να αίρουν την ανακρίβεια αυτή. Επιπλέον, η επίδραση της τραχύτητας παρατηρείται και σε διάκενα πολύ μεγαλύτερα των τριών ή των έξι τυπικών αποκλίσεων. Πέραν, όμως, από τους συντελεστές και τη γενικότερη ισχύ αυτού του τρόπου μοντελοποίησης της μικτής λίπανσης, γίνεται σαφές ότι η ύπαρξη κοιλάδων μπορεί εν γένει να συνεισφέρει στην ανακούφιση του φαινομένου και να αποτελέσει παράμετρο σχεδιασμού. Άλλωστε μετά από αρκετή χρήση αναμένεται η εξάλειψη των κορυφών, ή τουλάχιστον των μεγαλύτερων από αυτές, λόγω φαινομένων φθοράς και επομένως η τάση της δημιουργίας επιφάνειας με μάλλον αρνητική τραχύτητα.

7

Συμπεράσματα – Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από την παρούσα διπλωματική εργασία είναι ποικίλα και αφορούν τόσο την πορεία μοντελοποίησης και τα διάφορα σημεία δυσκολίας που παρουσίασε, όσο και τα τελικά αποτελέσματα και τη συμπεριφορά που αυτά υποδεικνύουν.

Καταρχάς, παρακολουθώντας τη ροή της εργασίας τόσο σε επίπεδο κειμένου όσο και σε πραγματικό επίπεδο υλοποίησης έχει γίνει από νωρίς φανερό ότι η μοντελοποίηση ενός υγρού συμπλέκτη και της συμπεριφοράς του στα μεταβατικά φαινόμενα της σύμπλεξης και της αποσύμπλεξης αποτελεί ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα. Το γεγονός αυτό συνίσταται στον συνδυασμό διαφορετικών φυσικών φαινομένων τα οποία αλληλοεπηρεάζονται και η προσπάθεια απομόνωσής τους και ξεχωριστής μελέτης τους εγκυμονεί κινδύνους εξαγωγής εσφαλμένων ή μη αξιοποιήσιμων αποτελεσμάτων. Στα πρώτα στάδια της παρούσας εργασίας ο στόχος ήταν η αποφυγή παραδοχών και η κατασκευή ενός μοντέλου αρκετά γενικευμένου. Στη συνέχεια όμως έγινε φανερό πόσο δύσκολα υλοποιήσιμο ήταν κάτι τέτοιο, ακόμη και με τη χρήση ενός τόσο αξιόπιστου και ανεπτυγμένου προγράμματος όπως το ANSYS. Πολλές από τις δυσκολίες που οδήγησαν τελικά στη θεώρηση άκαμπτων δίσκων και μόνο ενός ζεύγους αυτών, προήλθαν ακριβώς από αδυναμίες του προγράμματος να διαχειριστεί συνδυαστικά τα κινηματικά μεγέθη του προβλήματος (περιστροφή και συμπίεση), καθώς και τις διαστάσεις του (διάκενα πολύ μικρότερα σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις). Η κατασκευή ενός γενικευμένου μοντέλου, ενός μοντέλου που μπορεί να απαρτίζεται από πολλούς δίσκους, καθώς και άλλα μηχανικά εξαρτήματα όπως την άτρακτο και το κέλυφος του συμπλέκτη, αποτελεί λοιπόν ακόμα ανοιχτό ζήτημα, το πιθανότερο υλοποιήσιμο μέσω της μεθοδολογίας Overset Meshing.

Ακόμη, όμως, και εντός του ίδιου του ρευστομηχανικού φαινομένου χωρίς καμία επιπλέον θεώρηση στερεών σωμάτων ή θερμικών φαινομένων, συχνή ήταν η αδυναμία σύγκλισης σε λύση, ιδιαίτερα για την περίπτωση υψηλών περιστροφικών ταχυτήτων. Τα αίτια της αδυναμίας αυτής δεν είναι εν γένει γνωστά, ενώ πιθανολογείται ότι σχετίζονται με τη γεωμετρία (κυκλική) των δίσκων και την ενδεχόμενη διαφορά εισερχόμενης και εξερχόμενης παροχής από την εσωτερική και την εξωτερική διάμετρο αντίστοιχα. Οι εν λόγω παροχές προκύπτουν από τις περιφερειακές συνιστώσες της ταχύτητας, ενώ στην πραγματικότητα το ρευστό στροβιλίζεται μαζί με τον κινούμενο δίσκο χωρίς να γίνεται λόγος για ποσοτική αύξηση ή μειωσή του, δηλαδή διαφορά σε κάποια παροχή.

Σε ό,τι αφορά τις παραδοχές που έγιναν, η σημαντικότερη είναι μάλλον η έλλειψη μοντελοποίησης των θερμικών φαινομένων. Η επίδραση του ιξώδους έχει τεράστια σημασία στη διαμόρφωση της πίεσης και της ροπής και γενικότερα των σχετικών πεδίων πίεσης και ταχύτητας στο ρευστό και, ως γνωστόν, το ιξώδες εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία όσο και από την πίεση. Επομένως, η θεώρησή του ως σταθερό είναι εξαιρετικά λάθος, καθώς σε έναν συμπλέκτη αναπτύσσονται εν γένει υψηλές θερμοκρασίες από τα φαινόμενα τριβής, ενώ οι πολύ μεγάλες πιέσεις στα μικρά διάκενα προφανώς και δεν αφήνουν ανεπηρέαστο το ιξώδες. Κατά συνέπεια, σε περαιτέρω μελέτη η εξάρτηση αυτή πρέπει οπωσδήποτε να ληφθεί υπόψη.

Η θεώρηση άκαμπτων δίσκων είναι επίσης λανθασμένη, αν και αναπόφευκτη στην παρούσα μοντελοποίηση. Στην πραγματικότητα οι δίσκοι όντας λεπτοί και δέχοντας πεδία πίεσης ανομοιόμορφα κατά την ακτινική τους διεύθυνση κάμπτονται δημιουργώντας περιοχές μικρότερου ονομαστικού διακένου και επομένως υψηλότερης πίεσης και περιοχές μεγαλύτερου ονομαστικού διακένου και επομένως χαμηλότερης πίεσης. Το φαινόμενο αυτό ισορροπεί σε κάποιο σημείο ή προκαλεί ταλαντωτικές συμπεριφορές και εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες των δίσκων και τα εξωτερικά μεγέθη επενέργειας.

Σε ό,τι αφορά τα τελευταία, ενώ στην αρχή η είσοδος σταθερής ταχύτητας φαινόταν λογική με την έννοια ότι σε έναν επενεργητή θα δινόταν η εντολή «ανοιχτή θέση» ή «κλειστή θέση» η οποία μεταφράζεται σε όρους ελέγχου σε είσοδο ταχύτητας, στην πορεία της εργασίας η θεώρηση αυτή καταρίφθηκε. Αυτό συνέβη διότι όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα της πίεσης για σταθερή ταχύτητα κλεισίματος, αυτή παρουσιάζει πολύ μεγάλη διακύμανση ανάλογα με το ονομαστικό διάκενο. Έτσι, στην ίδια ταχύτητα σε μεγάλα διάκενα η πίεση είναι χαμηλή και επομένως το κλείσιμο των δίσκων είναι αργό χωρίς ουσιαστικό λόγο, ενώ σε μικρά διάκενα η πίεση είναι εξαιρετικά υψηλή οδηγώντας σε επίσης υψηλή απαιτούμενη δύναμη επενέργειας. Κατά

συνέπεια, κάνοντας λόγω για την ταχύτητα κλεισίματος, αυτή έχει νόημα να είναι μεγάλη στα μεγάλα διάκενα, όπου η αντίσταση που αναπτύσσει το ρευστό δεν είναι σημαντική, και μικρή στα μικρά διάκενα, ώστε ο επενεργητής ή το μηχανικό σύστημα να μπορούν να αποδώσουν το απαιτούμενο έργο. Ως εκ τούτου, θεωρείται ότι η είσοδος δύναμης είναι εν γένει ορθότερη και εκκρεμεί ο τρόπος εισαγωγής της σε μοντέλα FEA. Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι δεν είναι γνωστό ακόμα πώς μπορεί να μοντελοποιηθεί η είσοδος δύναμης στο ANSYS καθώς στο μηχανικό μοντέλο δεν οδηγεί σε κίνηση αλλά μόνο σε παραμόρφωση, ενώ στο ρευστομηχανικό μοντέλο μπορεί να γίνει μόνο έμμεσα εκτιμώντας την αναμενόμενη ταχύτητα από την ισορροπία των δυνάμεων.

Παρά τις παραπάνω (σημαντικές) ελλείψεις, μέσω της τελικής μοντελοποίησης της εργασίας μπορούν πράγματι να προκύψουν ωφέλιμα συμπεράσματα ως προς τη συμπεριφορά των εξεταζόμενων γεωμετριών, όχι τόσο για τα απόλυτα μεγέθη της δύναμης και της ροπής, όσο για τη συγκριτική απόδοση των γεωμετριών ως προς αυτά. Έτσι, έχοντας ως κοινή βάση τον ίδιο χρόνο σύμπλεξης (λόγω της εφαρμογής ίδιας ταχύτητας κλεισίματος) που αποτελεί εν γένει σημαντικό χαρακτηριστικό ενός συμπλέκτη, προκύπτει καταρχάς ότι η εισαγωγή διαμορφώσεων ανακουφίζει την αναπτυσσόμενη πίεση οδηγώντας σε χαμηλότερο απαιτούμενο έργο επενέργειας. Και οι τρεις εξεταζόμενες γεωμετρίες φαίνεται να τα πηγαίνουν τελικά εξίσου καλά στην ελαχιστοποίηση της δύναμης επενέργειας. Σε ο,τι αφορά τη μεγιστοποίηση της ροπής οι ακτινικές και οι διαμορφώσεις μέσης εκτόνωσης φαίνεται να αποδίδουν καλύτερα, αλλά με μικρές εν γένει διαφορές. Ένα ακόμα συμπέρασμα που προκύπτει από τα παραπάνω είναι ότι στην αναπτυσσόμενη ροπή για το δεδομένο ρευστό και τις δεδομένες διαστάσεις, οι όροι ιξώδους έχουν πολύ σημαντικότερη επίδραση σε σχέση με τους όρους πίεσης. Φυσικά, τα αποτελέσματα αναμένεται να είναι άλλα και οι διαφορές μεταξύ των γεωμετριών εντονότερες για μία περίπτωση λεπτότερου (χαμηλότερου ιξώδους) ρευστού και κάνοντας χρήση μεγαλύτερων (επομένως και με βαθύτερα και πλατύτερα αυλάκια) δίσκων.

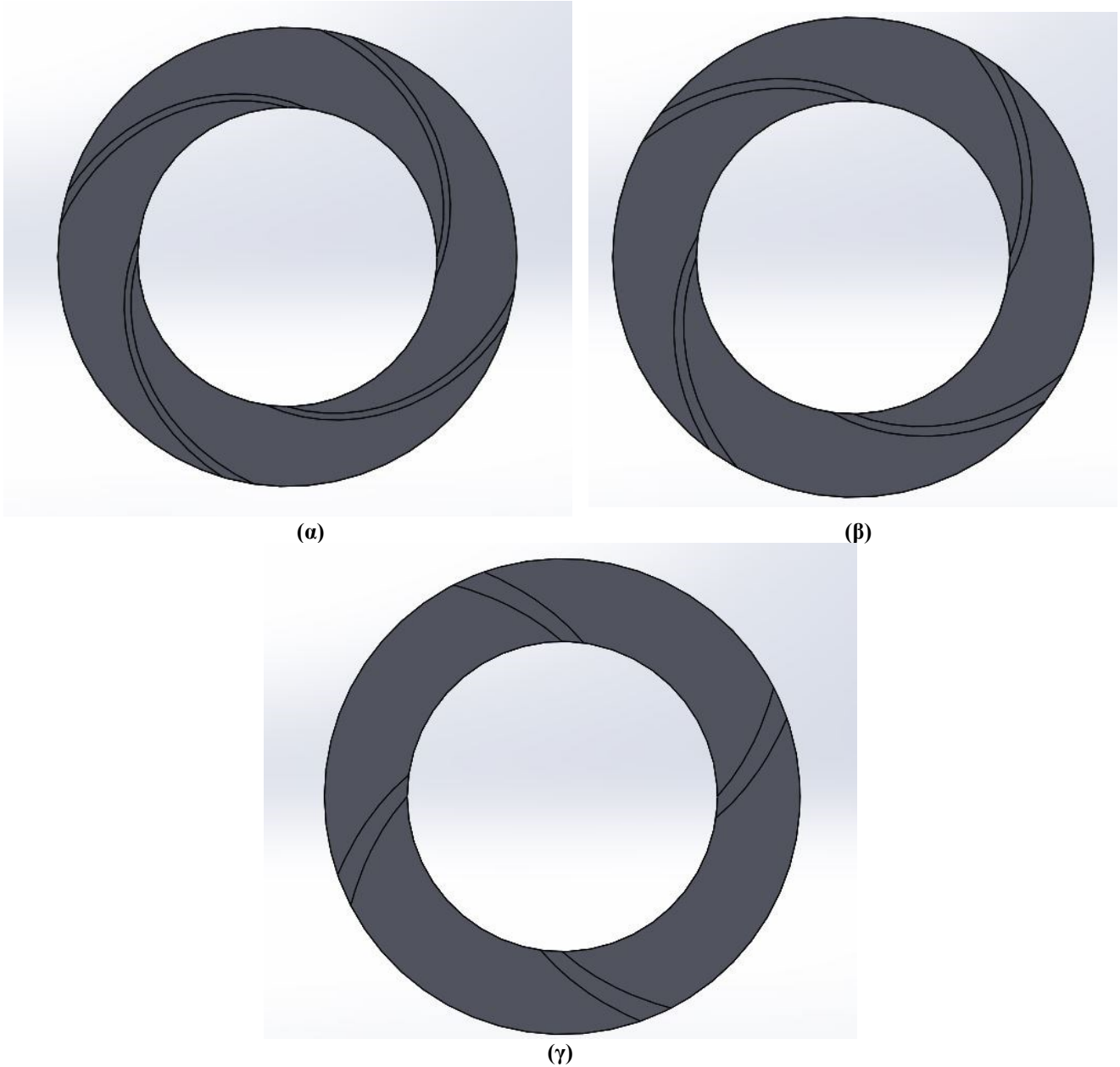
Η βελτιστοποίηση ενός και μόνο μεγέθους δεν είναι όμως η ορθή αντιμετώπιση που πρέπει να κάνει ένας μηχανικός που σχεδιάζει ένα τέτοιο σύστημα. Αντιθέτως, η εύρεση εκείνου του συνδυασμού που αποδίδει τόσο όσο αρκεί για τις δεδομένες λειτουργικές απαιτήσεις, καθώς και των εν γένει ιδανικών αναλογιών αποτελεί τον πραγματικά επιθυμητό (και δύσκολο) στόχο. Η χρήση συντελεστών στάθμισης ακολουθεί αυτή τη λογική σχεδιασμού, η ακριβής επιλογή αυτών όμως δεν εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Επιπλέον, κατά τον σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος πρέπει να ληφθούν υπόψη όλα τα στάδια λειτουργίας του. Επομένως, η εισαγωγή διαμορφώσεων με στόχο τη μείωση της πίεσης μπορεί κατά το μεταβατικό στάδιο της σύμπλεξης να είναι ιδανική, αλλά κατά το στάδιο της ίδιας της σύμπλεξης, όπου η ροπή μεταφέρεται από τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις τριβής και κατά συνέπεια εξαρτάται από τις επιφάνειες που έρχονται σε πλήρη επαφή μεταξύ τους, οι διαμορφώσεις μειώνουν την ικανότητα μετάδοσης μεγάλων ροπών. Ακόμη και από μηχανικής άποψης, οι διαμορφώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε συγκεντρώσεις τάσεων στους δίσκους και γρηγορότερη αστοχία τους. Γίνεται, λοιπόν, σαφές πως ο σωστός σχεδιασμός αποτελεί εξαιρετικά περίπλοκο ζήτημα καθώς πρέπει να λάβει υπόψη πολλά και αντικρουόμενα κριτήρια.

Σε ό,τι αφορά τις διαμορφώσεις, αυτές στην παρούσα εργασία για λόγους πλεγματοποίησης σχεδιάστηκαν με κάθετα τοιχώματα ως προς το επίπεδο των δίσκων. Ένας τέτοιος σχεδιασμός είναι λανθασμένος τόσο σε επίπεδο μηχανικής για τους στερούς δίσκους, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, όσο και σε επίπεδο ρευστομηχανικής καθώς είναι γνωστό ότι η ύπαρξη κάθετων τοιχωμάτων οδηγεί σε φαινόμενα τύρβης και αποκόλλησης ροής. Μπορεί μεν το εν λόγω ρευστό να μην είναι τόσο λεπτό όσο ένα αέριο, στο οποίο τα κάθετα τοιχώματα θα ήταν απαγορευτικά, όμως ακόμη και σε αυτήν την περίπτωση η ύπαρξη καμπύλων τοιχωμάτων και η ομαλή μετάβαση από διαμόρφωση σε διαμόρφωση ωφελεί τη ροή.

Οι διαμορφώσεις που εξετάστηκαν αποτελούν ελάχιστο δείγμα των διαμορφώσεων που θα μπορούσαν να έχουν εξετασθεί. Ο κύριος λόγος περιορισμού σε αυτές είναι καθαρά χρονικός, αφού ο σχεδιασμός, η μοντελοποίηση, η εξαγωγή αποτελεσμάτων σε ικανό πλήθος σημείων, η εκπαίδευση των ΤΝΔ και τελικά η βελτιστοποίηση μίας γεωμετρίας σχετικά απλού σχήματος, όπως αυτές που εξετάστηκαν, διαρκεί αρκετά 24ωρα. Η παρούσα εργασία, δεδομένης και της προθεσμίας υποβολής της, μετά την εύρεση της τελικής μοντελοποίησης αποτέλεσε ουσιαστικά πρόβλημα σωστής οργάνωσης και επιλογών ερχόμενη συνεχώς σε διλήμματα κέρδους – κόστους, όπου κέρδος ήταν το πλήθος των αποτελεσμάτων και κόστος ο απαιτούμενος χρόνος για αυτά. Συχνά έγιναν θυσιές ακρίβειας των αποτελεσμάτων προκειμένου να αυξηθεί ο όγκος αυτών, έχοντας πάντα κατά νου ότι η σύγκριση θα γινόταν σε επίπεδο μέσων μεγεθών και όχι σε επίπεδο επιμέρους κατανομών και προφίλ ταχυτήτων ή πίεσης. Επομένως, επιδιώχθηκε η επίτευξη του *αρκετού* και όχι του *τέλειου*, κάτι που εν γένει διέπει τις αποφάσεις ενός μηχανικού και στην επαγγελματική του ζωή.

Τέλος, επιθυμητή ήταν η εξέταση της συμπεριφοράς σπειροειδών διαμορφώσεων όπως αυτές της Εικόνας 7.1. Ωστόσο, οι δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν τόσο σε επίπεδο πλεγματοποίησης όσο και σε επίπεδο παραμετροποίησης και αυτόματης μεταβολής των παραμέτρων στα διάφορα σημεία υπολογισμού που θα απαιτούνταν για την εκπαίδευση των ΤΝΔ, οδήγησαν στην αποφυγή μοντελοποίησής της. Παρόλα αυτά,

προτείνεται στο σημείο αυτό για μετέπειτα έρευνα της συμπεριφοράς της καθώς συνδυάζει τόσο την ακτινική όσο και την περιφερειακή διεύθυνση της ροής, με μεγάλη διαφορά μάλιστα ανάλογα με τις επιλεγόμενες τιμές των παραμέτρων. Σημειώνεται ότι οι σπείρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι εκθετικές, ενώ το πλάτος των αυλακιών είναι κοινό για τις τρεις περιπτώσεις και ίσο με 8° . Στις γεωμετρίες αυτές αναμένεται τόσο μείωση της δύναμης όσο και αύξηση της ροπής, καθώς η ωφέλιμη επιφάνεια (εγκάρσια ως προς το επίπεδο του δίσκου) ιδίως για τους χαμηλούς εκθετικούς συντελεστές k είναι μεγάλη χωρίς να απαιτείται και μεγάλο πλάτος ή απώλεια στην επιφάνεια των όρων ιξώδους.



Εικόνα 7.1: Πρόταση γεωμετρίας σπειροειδών διαμορφώσεων (α) $k=0.3$, (β) $k=0.4$, (γ) $k=0.9$

Παράρτημα

Συνάρτηση παραμόρφωσης πλέγματος UDF [10]

```
#include"udf.h"
#define velocity 0.05 // [m/s]
#define ymax 0.001 // [m]
DEFINE_GRID_MOTION(mesh_deform,domain,dt,time,dtime)
{
    Thread *tf = DT_THREAD(dt);
    face_t f;
    Node *node;
    real disp,posi,y,y_new;
    int n;

    disp=velocity*dtime;
    posi=velocity*time;

    Message("disp=%0.10lf, posi=%0.10lf\n",disp,posi);
    begin_f_loop(f,tf)
    {
        f_node_loop(f,tf,n)
        {
            node = F_NODE(f,tf,n);
// Update node if the current node has not been previously visited when looping through previous faces
            if ( NODE_POS_NEED_UPDATE (node))
            {
// Indicate that node position has been updated so that it's not updated more than once
                NODE_POS_UPDATED(node);
                y=NODE_Y(node);
                Message("y_old=%0.10lf\n",y);
                y=y*(posi-ymax)/(posi-ymax-disp);
                Message("y_new=%0.10lf\n",y_new);
                NODE_Y(node)=y;
            }
        }
    }
    end_f_loop(f,tf);
}
```

Συνάρτηση κίνησης τοιχωμάτων UDF

```
#include "udf.h"
#include "dynamesh_tools.h"
DEFINE_CG_MOTION(wall_move,dt,vel,omega,time,dtime)
{
    vel[2]=4*0.103*pow(time,3)-3*0.087*pow(time,2)+2*0.0277*time-0.00426;
    omega[2]=95;
}
```

Συνάρτηση μεταβολής ιξώδους UDF

```
#include "udf.h"
#define mu 0.01 //real viscosity [Pas]
#define ho 110 //initial gap [um]
#define vel -10 //z velocity [mm/s]

DEFINE_PROPERTY(ff_positive,c,thr)
{
    real mu_new;
```

```

real t;

t=CURRENT_TIME;
if (t<0.009)
{
    mu_new=mu; //viscosity doesn't change
}
if (t>=0.009)
{
    mu_new=9*pow(10,6)*pow(t,3)-249235*pow(t,2)+2314.9*t-7.1583; //new viscosity [Pas]
}

return mu_new;
}

```

Κώδικας εξαγωγής εντολών APDL – Κινηματικά μεγέθη στερεών “Nodal Velocities Generator”

```

clear all
%%%%% IMPORTANT!
%%%%% check unit system of ansys model
%%%%% erase first row in original txt before inserting
%%%%% origin is assumed to be at (x,y)=(0,0)

omega=-95; %%% angular velocity [rad/s]
vz=-40; %%% translational velocity [mm/s]

nodes=importdata('C:\\..\\upper_nodes.txt');
nodescount=size(nodes);

%%%%%%%%%% columns of variables %%%%%%%%%%%
nodevar=1;
xvar=2;
yvar=3;
zvar=4;

fname=fopen('APDLCommandsFile.txt','w');

fprintf(fname,'KBC,1\n'); %%% setting the loads as stepped

%% setting the movement constraints %%

for i=1:nodescount(1)
    fprintf(fname,'D,%d,OMGZ,%f\n',nodes(i,nodevar),omega);
    fprintf(fname,'D,%d,VELZ,%f\n',nodes(i,nodevar),vz);
end

%% initialization %%%

fprintf(fname,'TIMINT,OFF\nTRNOPT,FULL\n');

for i=1:nodescount(1)
    r=sqrt(nodes(i,xvar)^2+nodes(i,yvar)^2); %%% radius of node i
    th=atan2(nodes(i,yvar),nodes(i,xvar)); %%% angular coord of node i

    vx=-sin(th)*omega*r;
    vy=cos(th)*omega*r;
    fprintf(fname,'IC,%d,VELX,%f\n',nodes(i,nodevar),vx);
    fprintf(fname,'IC,%d,VELY,%f\n',nodes(i,nodevar),vy);
    fprintf(fname,'IC,%d,VELZ,%f\n',nodes(i,nodevar),vz);

    ax=-cos(th)*omega^2*r;
    ay=-sin(th)*omega^2*r;

```

```

        fprintf(fname, 'IC, %d, ACCX, %f\n', nodes(i, nodevar), ax);
        fprintf(fname, 'IC, %d, ACCY, %f\n', nodes(i, nodevar), ay);
end

fprintf(fname, 'TIMINT, ON\nLSWRITE');

fclose(fname);

omega=-0.012; %%% angular velocity [rad/s]
dmg=-7.358; %%% angular acceleration [rad/s^2]

nodes=importdata('C:\\..\\lower_nodes.txt');
nodescount=size(nodes);

%%%%%% columns of variables %%%%%%%
nodevar=1;
xvar=2;
yvar=3;
zvar=4;

fname=fopen('APDLCommandsFile.txt', 'w');

fprintf(fname, 'KBC, 1\n'); %%% setting the loads as stepped

%% setting the movement constraints %%

%% initialization %%

fprintf(fname, 'TIMINT, OFF\nTRNOPT, FULL\n');

for i=1:nodescount(1)
    r=sqrt(nodes(i, xvar)^2+nodes(i, yvar)^2); %%% radius of node i
    th=atan2(nodes(i, yvar), nodes(i, xvar)); %%% angular coord of node i

    vx=-sin(th)*omega*r;
    vy=cos(th)*omega*r;
    fprintf(fname, 'IC, %d, VELX, %f\n', nodes(i, nodevar), vx);
    fprintf(fname, 'IC, %d, VELY, %f\n', nodes(i, nodevar), vy);
    fprintf(fname, 'IC, %d, VELZ, %f\n', nodes(i, nodevar), vz);

    %    ax=-cos(th)*omega^2*r;
    %    ay=-sin(th)*omega^2*r;
    %    fprintf(fname, 'IC, %d, ACCX, %f\n', nodes(i, nodevar), ax);
    %    fprintf(fname, 'IC, %d, ACCY, %f\n', nodes(i, nodevar), ay);
    fprintf(fname, 'IC, %d, DMGZ, %f\n', nodes(i, nodevar), dmg);
end

```

Επεξεργασία αποτελεσμάτων – Εκπαίδευση ΤΝΔ – Βελτιστοποίηση γεωμετριών (εδώ: Ακτινικές Διαμορφώσεις)

```

clear all

%% Note: First check indexes from matrix param for normal - drag plots

regression=0; %evaluate neural networks (0=no evaluation)
ga=0; %optimise parameters via genetic algorithm
plotbest=1; %best results available to plot
flat=0; %flat disks results available to plot

%% Grooves %%
N=[4;6;10]; %number of features

```

```

d=[5;1;15]; %depth
dreal=[0.5;1;1.5]; %real depth
w=[4;10]; %width
lb=[2;0.25;2]; %lower bounds for optimization [Nmin;dmin;wmin]
ub=[10;1.75;10]; %upper bounds for optimization [Nmax;dmax;wmax]
%%

%%% Wear Disk %%%
Rout=115/2/1000; %[m] Outer radius
Rin=75/2/1000; %[m] Inner radius
rho=237000; %[kg/m^3] Density
hdisk=3/1000; %[m] Thickness
Iz=pi*rho*hdisk/2*(Rout^4-Rin^4); %[kgm^2] Inertia around z-axis (=0.001)
ho=0.2; %[mm] initial gap
Vz=100; %[mm/s] compression velocity
%%

varplot_N1=4; varplot_N2=6;
varplot_d1=0.5; varplot_d2=1.5;
varplot_w1=4; varplot_w2=10;
%param(N1,d1,w1)=param(:,1)
%param(N2,d1,w1)=param(:,7)
%param(N2,d2,w1)=param(:,11)
%param(N2,d2,w2)=param(:,12)

vp=[1;7;11;12]; %% !!!!!!!! check from matrix param - plot normal

lgd1=sprintf('N=%d,d=%.2f,w=%d',varplot_N1,varplot_d1,varplot_w1);
lgd2=sprintf('N=%d,d=%.2f,w=%d',varplot_N2,varplot_d1,varplot_w1);
lgd3=sprintf('N=%d,d=%.2f,w=%d',varplot_N2,varplot_d2,varplot_w1);
lgd4=sprintf('N=%d,d=%.2f,w=%d',varplot_N2,varplot_d2,varplot_w2);

dtvar=1; %column of time step
dvar=2; %column of data
tvar=3; %column of time
omgvar=5; %column of average circumferential velocity
counter=0;

for Ni=1:size(N)
    for di=1:size(d)
        for wi=1:size(w)

            %declaring file names

f_pave_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\N%d_results\\normal\\d%dw%d\\pave-rfile.out',N(Ni),d(di),w(wi));

f_pave_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\N%d_results\\drag\\d%dw%d\\pave-rfile.out',N(Ni),d(di),w(wi));

f_freact_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\N%d_results\\normal\\d%dw%d\\freact-rfile.out',N(Ni),d(di),w(wi));

f_freact_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\N%d_results\\drag\\d%dw%d\\freact-rfile.out',N(Ni),d(di),w(wi));

f_omg_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\N%d_results\\normal\\d%dw%d\\omg.txt',N(Ni),d(di),w(wi));

```

```

f_omg_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\N%d_results
\\drag\\d%dw%d\\omg.txt',N(Ni),d(di),w(wi));

f_qin_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\N%d_resul
ts\\normal\\d%dw%d\\qin-rfile.out',N(Ni),d(di),w(wi));

f_qin_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\N%d_results
\\drag\\d%dw%d\\qin-rfile.out',N(Ni),d(di),w(wi));

f_qout_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\N%d_resu
lts\\normal\\d%dw%d\\qout-rfile.out',N(Ni),d(di),w(wi));

f_qout_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\N%d_result
s\\drag\\d%dw%d\\qout-rfile.out',N(Ni),d(di),w(wi));
    %%%

    %Storing data
    counter=counter+1;

    temp=importdata(f_pave_normal,' ',3);
    pave_normal(:,counter)=temp.data(3:end,dvar);
    temp=importdata(f_pave_drag,' ',3);
    pave_drag(:,counter)=temp.data(end-4:end,dvar);

    temp=importdata(f_freact_normal,' ',3);
    freact_normal(:,counter)=temp.data(3:end,dvar);
    temp=importdata(f_freact_drag,' ',3);
    freact_drag(:,counter)=temp.data(end-4:end,dvar);

    temp=importdata(f_omg_normal);
    omg_normal(:,counter)=temp(2:end,omgvar)/1000/Rout; %converting
mm/s to m/s
    temp=importdata(f_omg_drag);
    omg_drag(:,counter)=temp(end-4:end,omgvar)/1000/Rout; %and then to
angular velocity (v=?R)

    temp=importdata(f_qin_normal,' ',3);
    qin_normal(:,counter)=temp.data(3:end,dvar);
    temp=importdata(f_qin_drag,' ',3);
    qin_drag(:,counter)=temp.data(end-4:end,dvar);

    temp=importdata(f_qout_normal,' ',3);
    qout_normal(:,counter)=temp.data(3:end,dvar);
    tnormal(:,counter)=temp.data(3:end,tvar);
    temp=importdata(f_qout_drag,' ',3);
    qout_drag(:,counter)=temp.data(end-4:end,dvar);
    tdrag(:,counter)=temp.data(end-4:end,tvar);
    %%%

    %storing parameters as inputs
    param(1,counter)=N(Ni);
    param(2,counter)=dreal(di);
    param(3,counter)=w(wi);
end
end
end

%%%Estimating Torque out of disk velocity
for i=1:counter

```

```

    for j=1:size(omg_normal)
        if j==1
            mreact_normal(j,i)=omg_normal(j,i)/tnormal(j,i)*Iz;
%Torque=Iz*(angular acceleration)
        else
            mreact_normal(j,i)=(omg_normal(j,i)-omg_normal(j-
1,i))/(tnormal(j,i)-tnormal(j-1,i))*Iz;
        end
    end

    for j=1:size(omg_drag)
        if j==1
            mreact_drag(j,i)=omg_drag(j,i)/tdrag(j,i)*Iz;
        else
            mreact_drag(j,i)=(omg_drag(j,i)-omg_drag(j-1,i))/(tdrag(j,i)-
tdrag(j-1,i))*Iz;
        end
    end
end

%%Estimating work and mean value
for i=1:counter

    Fnormal(i)=0;
    Tvisc(i)=0;
    Tdrag(i)=0;

    for j=1:(size(tnormal)-1)

Fnormal(i)=Fnormal(i)+(freact_normal(j,i)+freact_normal(j+1,i))*(tnormal(j+1,i)
-tnormal(j,i))/2; %calculating area under freact

Tvisc(i)=Tvisc(i)+(mreact_normal(j,i)+mreact_normal(j+1,i))*(tnormal(j+1,i)-
tnormal(j,i))/2; %area under mreact
        end

        Tdrag(i)=mean(mreact_drag(:,i)); %average of drag torque

    end

%mapping outputs so they are normalised for genetic algorithms
[Fnormal_mapped,PS_F]=mapminmax(Fnormal,1,10);
[Tvisc_mapped,PS_Tv]=mapminmax(Tvisc,1,10);
[Tdrag_mapped,PS_Td]=mapminmax(Tdrag,1,10);
%%%% Y = mapminmax('apply',X,PS)
%%%% X = mapminmax('reverse',Y,PS)

%%Importing Testing Data and applying same processing
Ntest=[3;8];
dtest=[75;125];
dtest_real=[0.75;1.25];
wtest=[2;6];

ctest=0;

for Ni=1:size(Ntest)
    for di=1:size(dtest)
        for wi=1:size(wtest)

            %declaring file names

```

```

f_pave_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\TestingData_results\\normal\\N%dd%d\\pave-rfile.out',Ntest(Ni),dtest(di),wtest(wi));

f_pave_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\TestingData_results\\drag\\N%dd%d\\pave-rfile.out',Ntest(Ni),dtest(di),wtest(wi));

f_freact_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\TestingData_results\\normal\\N%dd%d\\freact-rfile.out',Ntest(Ni),dtest(di),wtest(wi));

f_freact_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\TestingData_results\\drag\\N%dd%d\\freact-rfile.out',Ntest(Ni),dtest(di),wtest(wi));

f_omg_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\TestingData_results\\normal\\N%dd%d\\omg.txt',Ntest(Ni),dtest(di),wtest(wi));

f_omg_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\TestingData_results\\drag\\N%dd%d\\omg.txt',Ntest(Ni),dtest(di),wtest(wi));

f_qin_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\TestingData_results\\normal\\N%dd%d\\qin-rfile.out',Ntest(Ni),dtest(di),wtest(wi));

f_qin_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\TestingData_results\\drag\\N%dd%d\\qin-rfile.out',Ntest(Ni),dtest(di),wtest(wi));

f_qout_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\TestingData_results\\normal\\N%dd%d\\qout-rfile.out',Ntest(Ni),dtest(di),wtest(wi));

f_qout_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\TestingData_results\\drag\\N%dd%d\\qout-rfile.out',Ntest(Ni),dtest(di),wtest(wi));
    %%%

    %Storing data
    ctest=ctest+1;

    temp=importdata(f_pave_normal,' ',3);
    pave_normal_test(:,ctest)=temp.data(3:end,dvar);
    temp=importdata(f_pave_drag,' ',3);
    pave_drag_test(:,ctest)=temp.data(end-4:end,dvar);

    temp=importdata(f_freact_normal,' ',3);
    freact_normal_test(:,ctest)=temp.data(3:end,dvar);
    temp=importdata(f_freact_drag,' ',3);
    freact_drag_test(:,ctest)=temp.data(end-4:end,dvar);

    temp=importdata(f_omg_normal);
    omg_normal_test(:,ctest)=temp(2:end,omgvar)/1000/Rout; %converting
mm/s to m/s
    temp=importdata(f_omg_drag);
    omg_drag_test(:,ctest)=temp(end-4:end,omgvar)/1000/Rout; %and then
to angular velocity (v=?R)

    temp=importdata(f_qin_normal,' ',3);
    qin_normal_test(:,ctest)=temp.data(3:end,dvar);
    temp=importdata(f_qin_drag,' ',3);
    qin_drag_test(:,ctest)=temp.data(end-4:end,dvar);

```



```

temp=importdata(f_qout_normal, ' ',3);
qout_normal_test(:,ctest)=temp.data(3:end,dvar);
tnormal_test(:,ctest)=temp.data(3:end,tvar);
temp=importdata(f_qout_drag, ' ',3);
qout_drag_test(:,ctest)=temp.data(end-4:end,dvar);
tdrag_test(:,ctest)=temp.data(end-4:end,tvar);
%%%

%storing parameters as inputs
paramtest(1,ctest)=Ntest(Ni);
paramtest(2,ctest)=dtest_real(di);
paramtest(3,ctest)=wtest(wi);
end
end
end

%%%Estimating Torque out of disk velocity
for i=1:ctest
    for j=1:size(omg_normal_test)
        if j==1
            mreact_normal_test(j,i)=omg_normal_test(j,i)/tnormal_test(j,i)*Iz;
%Torque=Iz*(angular acceleration)
        else
            mreact_normal_test(j,i)=(omg_normal_test(j,i)-omg_normal_test(j-1,i))/(tnormal_test(j,i)-tnormal_test(j-1,i))*Iz;
        end
    end

    for j=1:size(omg_drag_test)
        if j==1
            mreact_drag_test(j,i)=omg_drag_test(j,i)/tdrag_test(j,i)*Iz;
        else
            mreact_drag_test(j,i)=(omg_drag_test(j,i)-omg_drag_test(j-1,i))/(tdrag_test(j,i)-tdrag_test(j-1,i))*Iz;
        end
    end
end

%%%Estimating work and mean value
for i=1:ctest

    Fnormal_test(i)=0;
    Tvisc_test(i)=0;
    Tdrag_test(i)=0;

    for j=1:(size(tnormal_test)-1)

Fnormal_test(i)=Fnormal_test(i)+(freact_normal_test(j,i)+freact_normal_test(j+1,i))*(tnormal_test(j+1,i)-tnormal_test(j,i))/2; %calculating area under freact

Tvisc_test(i)=Tvisc_test(i)+(mreact_normal_test(j,i)+mreact_normal_test(j+1,i))*(tnormal_test(j+1,i)-tnormal_test(j,i))/2; %area under mreact
    end

    Tdrag_test(i)=mean(mreact_drag_test(:,i)); %average of drag torque

end

%Mapping outputs so they are normalised for genetic algorithms
Fnormal_test_mapped=mapminmax('apply',Fnormal_test,PS_F); %using same
normalization function as it was

```

```

Tvisc_test_mapped=mapminmax('apply',Tvisc_test,PS_Tv); %previously used on
training data
Tdrag_test_mapped=mapminmax('apply',Tdrag_test,PS_Td);
%%%%% Y = mapminmax('apply',X,PS)
%%%%% X = mapminmax('reverse',Y,PS)

if regression == 1
    inet=0; jnet=0; nnet=0;
    %%Neural Network Training
    maxinit=30; %maximum initializations
    imax=16; jmax=16; nmax=8; %maximum neurons per layer
    errormin=1000; %minimum error found initialized
    errormax=1; %maximum error less than 100%

    for i=1:imax
        for j=1:jmax
            for n=0:nmax
                if n==0
                    NNForce=feedforwardnet([i j]);
                else
                    NNForce=feedforwardnet([i j n]);
                    NNForce.layers{3}.transferFcn='poslin';
                end
                NNForce.divideFcn='dividerand';
                NNForce.divideParam.trainRatio = 0.7;
                NNForce.divideParam.valRatio= 0.3;
                NNForce.divideParam.testRatio=0;
                NNForce.trainParam.max_fail=12;
                NNForce.layers{1}.transferFcn='poslin';
                NNForce.layers{2}.transferFcn='poslin';

                for k=1:maxinit
                    NNForce=init(NNForce);
                    Force_input=param;
                    Force_target=Fnormal_mapped;
                    [NNForce,netForce]=train(NNForce,Force_input,Force_target);
                    Force_test=Fnormal_test_mapped;
                    error=abs((Force_test-NNForce(paramtest))./(Force_test));

                    if (mean(error)<errormin && max(error)<errormax)
                        NNForce_final=NNForce;
                        errormin=mean(error);
                        errormaxmin=max(error);
                        errormax=max(error);
                        inet=i; jnet=j; nnet=n;
                    end
                end
            end
        end
    end

    fprintf('\nCurrent best: 3x%dx%dx%dx1',inet,jnet,nnet)
    fprintf('\nMean Error: %.2f%%, Max Error:
%.2f%%',errormin*100,errormaxmin*100)
end

fprintf('\n\nNNForce: 3x%dx%dx%dx1',inet,jnet,nnet)
fprintf('\nMean Generalization Error: %.2f%%',errormin*100)
fprintf('\nMax Generalization Error: %.2f%%\n\n',errormaxmin*100)

meanfinalerror_Force=errormin;
maxfinalerror_Force=errormaxmin;
errormin=1000; errormax=1;
inet=0; jnet=0; nnet=0;

```

```

for i=1:imax
    for j=1:jmax
        for n=0:nmax
            if n==0
                NNTorque=feedforwardnet([i j]);
            else
                NNTorque=feedforwardnet([i j n]);
                NNTorque.layers{3}.transferFcn='poslin';
            end
            NNTorque.divideFcn='dividerand';
            NNTorque.divideParam.trainRatio = 0.7;
            NNTorque.divideParam.valRatio= 0.3;
            NNTorque.divideParam.testRatio=0;
            NNTorque.trainParam.max_fail=12;
            NNTorque.layers{1}.transferFcn='poslin';
            NNTorque.layers{2}.transferFcn='poslin';

            for k=1:maxinit
                NNTorque=init(NNTorque);
                Torque_input=param;
                Torque_target=Tvisc_mapped;
                [NNTorque,netTorque]=train(NNTorque,Torque_input,Torque_target);
                Torque_test=Tvisc_test_mapped;
                error=abs((Torque_test-NNTorque(paramtest))./(Torque_test));

                if (mean(error)<errormin && max(error)<errormax)
                    NNTorque_final=NNTorque;
                    errormin=mean(error);
                    errormaxmin=max(error);
                    errormax=max(error);
                    inet=i; jnet=j; nnet=n;
                end
            end
        end
        end
        end
        fprintf('\nCurrent best: 3x%dx%dx%dx1',inet,jnet,nnet)
        fprintf('\nMean Error: %.2f%%, Max Error:
%.2f%%',errormin*100,errormaxmin*100)
    end

    fprintf('\n\nNNTorque: 3x%dx%dx%dx1',inet,jnet,nnet)
    fprintf('\nMean Generalization Error: %.2f%%',errormin*100)
    fprintf('\nMax Generalization Error: %.2f%%\n\n',errormaxmin*100)

    meanfinalerror_Torque=errormin;
    maxfinalerror_Torque=errormaxmin;
    errormin=1000; errormax=1;
    inet=0; jnet=0; nnet=0;

    for i=1:imax
        for j=1:jmax
            for n=0:nmax
                if n==0
                    NNDrag=feedforwardnet([i j]);
                else
                    NNDrag=feedforwardnet([i j n]);
                    NNDrag.layers{3}.transferFcn='poslin';
                end
                NNDrag.divideFcn='dividerand';
                NNDrag.divideParam.trainRatio = 0.7;
                NNDrag.divideParam.valRatio= 0.3;
                NNDrag.divideParam.testRatio=0;
                NNDrag.trainParam.max_fail=12;
            end
        end
    end

```

```

NNDrag.layers{1}.transferFcn='poslin';
NNDrag.layers{2}.transferFcn='poslin';

for k=1:maxinit
    NNDrag=init(NNDrag);
    Drag_input=param;
    Drag_target=Tdrag_mapped;
    [NNDrag,netDrag]=train(NNDrag,Drag_input,Drag_target);
    Drag_test=Tdrag_test_mapped;
    error=abs((Drag_test-NNDrag(paramtest))./(Drag_test));

    if (mean(error)<errormin && max(error)<errormax)
        NNDrag_final=NNDrag;
        errormin=mean(error);
        errormaxmin=max(error);
        errormax=max(error);
        inet=i; jnet=j; nnet=n;
    end
end
end
end
fprintf('\nCurrent best: 3x%dx%dx%dx1',inet,jnet,nnet)
fprintf('\nMean Error: %.2f%%, Max Error:
%.2f%%',errormin*100,errormaxmin*100)
end

fprintf('\n\nNNDrag: 3x%dx%dx%dx1',inet,jnet,nnet)
fprintf('\nMean Generalization Error: %.2f%%',errormin*100)
fprintf('\nMax Generalization Error: %.2f%%\n\n',errormaxmin*100)

meanfinalerror_Drag=errormin;
maxfinalerror_Drag=errormaxmin;
save('NNDrag.mat','NNDrag_final')
save('NNForce.mat','NNForce_final')
save('NNTorque.mat','NNTorque_final')
end

if ga == 1
    ObjFcn=@NNFcn;
    IntCon=1; %integer type: the number of instances
    load optimprob_Radial.mat
    fprintf('Open Optimization Toolbox and import problem
optimprob_Radial.mat')
end

if plotbest==1

f_pave_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Best_Radial_results\\normal\\pave-rfile.out');

f_pave_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Best_Radial_results\\drag\\pave-rfile.out');

f_freact_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Best_Radial_results\\normal\\freact-rfile.out');

f_freact_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Best_Radial_results\\drag\\freact-rfile.out');

f_omg_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Best_Radial_results\\normal\\omg.txt');

```

```

f_omg_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Best_Radial
_results\\drag\\omg.txt');

f_qin_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Best_Radi
al_results\\normal\\qin-rfile.out');

f_qin_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Best_Radial
_results\\drag\\qin-rfile.out');

f_qout_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Best_Rad
ial_results\\normal\\qout-rfile.out');

f_qout_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Best_Radia
l_results\\drag\\qout-rfile.out');

temp=importdata(f_pave_normal, ' ', 3);
Bestpave_normal=temp.data(3:end, dvar);
temp=importdata(f_pave_drag, ' ', 3);
Bestpave_drag=temp.data(end-4:end, dvar);

temp=importdata(f_freact_normal, ' ', 3);
Bestfreact_normal=temp.data(3:end, dvar);
temp=importdata(f_freact_drag, ' ', 3);
Bestfreact_drag=temp.data(end-4:end, dvar);

temp=importdata(f_omg_normal);
Bestomg_normal=temp(2:end, omgvar)/1000/Rout;
temp=importdata(f_omg_drag);
Bestomg_drag=temp(end-4:end, omgvar)/1000/Rout;

temp=importdata(f_qin_normal, ' ', 3);
Bestqin_normal=temp.data(3:end, dvar);
temp=importdata(f_qin_drag, ' ', 3);
Bestqin_drag=temp.data(end-4:end, dvar);

temp=importdata(f_qout_normal, ' ', 3);
Bestqout_normal=temp.data(3:end, dvar);
tnormal_best(:)=temp.data(3:end, tvar);
temp=importdata(f_qout_drag, ' ', 3);
Bestqout_drag=temp.data(end-4:end, dvar);
tdrag_best(:)=temp.data(end-4:end, tvar);

%%%

for j=1:size(Bestomg_normal)
    if j==1
        Bestmreact_normal(j)=Bestomg_normal(j)/tnormal_best(j)*Iz;
%Torque=Iz*(angular acceleration)
    else
        Bestmreact_normal(j)=(Bestomg_normal(j)-Bestomg_normal(j-
1))/(tnormal_best(j)-tnormal_best(j-1))*Iz;
    end
end

for j=1:size(Bestomg_drag)
    if j==1
        Bestmreact_drag(j)=Bestomg_drag(j)/tdrag_best(j)*Iz;
    else

```

```

        Bestmreact_drag(j)=(Bestomg_drag(j)-Bestomg_drag(j-
1))/(tdrag_best(j)-tdrag_best(j-1))*Iz;
    end
end
end

if flat==1

f_pave_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Flat_res
ults\\normal\\pave-rfile.out');

f_pave_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Flat_resul
ts\\drag\\pave-rfile.out');

f_freact_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Flat_r
esults\\normal\\freact-rfile.out');

f_freact_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Flat_res
ults\\drag\\freact-rfile.out');

f_omg_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Flat_resu
lts\\normal\\omg.txt');

f_omg_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Flat_result
s\\drag\\omg.txt');

f_qin_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Flat_resu
lts\\normal\\qin-rfile.out');

f_qin_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Flat_result
s\\drag\\qin-rfile.out');

f_qout_normal=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Flat_res
ults\\normal\\qout-rfile.out');

f_qout_drag=sprintf('C:\\Users\\Deppy\\Desktop\\Simulations\\Radial\\Flat_resul
ts\\drag\\qout-rfile.out');

    temp=importdata(f_pave_normal,' ',3);
    flatpave_normal=temp.data(3:end,dvar);
    temp=importdata(f_pave_drag,' ',3);
    flatpave_drag=temp.data(end-4:end,dvar);

    temp=importdata(f_freact_normal,' ',3);
    flatfreact_normal=temp.data(3:end,dvar);
    temp=importdata(f_freact_drag,' ',3);
    flatfreact_drag=temp.data(end-4:end,dvar);

    temp=importdata(f_omg_normal);
    flatomg_normal=temp(2:end,omgvar)/1000/Rout;
    temp=importdata(f_omg_drag);
    flatomg_drag=temp(end-4:end,omgvar)/1000/Rout;

    temp=importdata(f_qin_normal,' ',3);
    flatqin_normal=temp.data(3:end,dvar);
    temp=importdata(f_qin_drag,' ',3);
    flatqin_drag=temp.data(end-4:end,dvar);

    temp=importdata(f_qout_normal,' ',3);
    flatqout_normal=temp.data(3:end,dvar);
    tnormal_flat(:)=temp.data(3:end,tvar);
    temp=importdata(f_qout_drag,' ',3);

```

```

flatqout_drag=temp.data(end-4:end,dvar);
tdrag_flat(:)=temp.data(end-4:end,tvar);

%%%

for j=1:size(flatomg_normal)
    if j==1
        flatmreact_normal(j)=flatomg_normal(j)/tnormal_flat(j)*Iz;
%Torque=Iz*(angular acceleration)
    else
        flatmreact_normal(j)=(flatomg_normal(j)-flatomg_normal(j-1))/(tnormal_flat(j)-tnormal_flat(j-1))*Iz;
    end
end

for j=1:size(flatomg_drag)
    if j==1
        flatmreact_drag(j)=flatomg_drag(j)/tdrag_flat(j)*Iz;
    else
        flatmreact_drag(j)=(flatomg_drag(j)-flatomg_drag(j-1))/(tdrag_flat(j)-tdrag_flat(j-1))*Iz;
    end
end

end

figure(1)
plot((ho-Vz.*tnormal(:,vp(1)))*1000,pave_normal(:,vp(1))/10^5,'ko')
hold on
plot((ho-Vz.*tnormal(:,vp(2)))*1000,pave_normal(:,vp(2))/10^5,'mx')
plot((ho-Vz.*tnormal(:,vp(3)))*1000,pave_normal(:,vp(3))/10^5,'k+')
plot((ho-Vz.*tnormal(:,vp(4)))*1000,pave_normal(:,vp(4))/10^5,'ms')
if flat==1
    plot((ho-Vz.*tnormal_flat(:))*1000,flatpave_normal(:)/10^5,'b--')
end
if plotbest==1
    plot((ho-Vz.*tnormal_best(:))*1000,Bestpave_normal(:)/10^5,'r--')
end
set(gca, 'XDir','reverse')
xlabel('h (um)')
ylabel('Average Pressure (bar)')
title('Case: 105rad/s - 100mm/s')
if (plotbest==1 && flat==1)
    legend(lgd1,lgd2,lgd3,lgd4,'Flat','Best: N=9,d=1.75,w=10');
elseif (plotbest==1)
    legend(lgd1,lgd2,lgd3,lgd4,'Best: N=9,d=1.75,w=10');
elseif (flat==1)
    legend(lgd1,lgd2,lgd3,lgd4,'Flat');
else
    legend(lgd1,lgd2,lgd3,lgd4);
end

figure(2)
plot((ho-Vz.*tnormal(:,vp(1)))*1000,freact_normal(:,vp(1))/1000,'ko')
hold on
plot((ho-Vz.*tnormal(:,vp(2)))*1000,freact_normal(:,vp(2))/1000,'mx')
plot((ho-Vz.*tnormal(:,vp(3)))*1000,freact_normal(:,vp(3))/1000,'k+')
plot((ho-Vz.*tnormal(:,vp(4)))*1000,freact_normal(:,vp(4))/1000,'ms')
if flat==1
    plot((ho-Vz.*tnormal_flat(:))*1000,flatfreact_normal(:)/1000,'b--')
end
if plotbest==1
    plot((ho-Vz.*tnormal_best(:))*1000,Bestfreact_normal(:)/1000,'r--')
end

```

```

end
set(gca, 'XDir','reverse')
xlabel('h (um)')
ylabel('Reaction Force (kN)')
title('Case: 105 rad/s - 100mm/s')
if (plotbest==1 && flat==1)
    legend(lgd1,lgd2,lgd3,lgd4, 'Flat', 'Best: N=9,d=1.75,w=10');
elseif (plotbest==1)
    legend(lgd1,lgd2,lgd3,lgd4, 'Best: N=9,d=1.75,w=10');
elseif (flat==1)
    legend(lgd1,lgd2,lgd3,lgd4, 'Flat');
else
    legend(lgd1,lgd2,lgd3,lgd4);
end

figure(3)
plot((ho-Vz.*tnormal(4:end, vp(1)))*1000, mreact_normal(4:end, vp(1)), 'ko')
hold on
plot((ho-Vz.*tnormal(4:end, vp(2)))*1000, mreact_normal(4:end, vp(2)), 'mx')
plot((ho-Vz.*tnormal(4:end, vp(3)))*1000, mreact_normal(4:end, vp(3)), 'k+')
plot((ho-Vz.*tnormal(4:end, vp(4)))*1000, mreact_normal(4:end, vp(4)), 'ms')
if flat==1
    plot((ho-Vz.*tnormal_flat(4:end))*1000, flatmreact_normal(4:end), 'b--')
end
if plotbest==1
    plot((ho-Vz.*tnormal_best(4:end))*1000, Bestmreact_normal(4:end), 'r--')
end
set(gca, 'XDir','reverse')
xlabel('h (um)')
ylabel('Beneficial Torque (Nm)')
title('Case: 105 rad/s - 100mm/s')
if (plotbest==1 && flat==1)
    legend(lgd1,lgd2,lgd3,lgd4, 'Flat', 'Best: N=9,d=1.75,w=10');
elseif (plotbest==1)
    legend(lgd1,lgd2,lgd3,lgd4, 'Best: N=9,d=1.75,w=10');
elseif (flat==1)
    legend(lgd1,lgd2,lgd3,lgd4, 'Flat');
else
    legend(lgd1,lgd2,lgd3,lgd4);
end

figure(4)
subplot(1,3,1)
temp=[N, [mean(pave_drag(:,5)); mean(pave_drag(:,11)); mean(pave_drag(:,17))]];
plot(temp(:,1), temp(:,2), 'k--')
hold on
temp=[Ntest, [mean(pave_drag_test(:,1)); mean(pave_drag_test(:,5))]];
plot(temp(:,1), temp(:,2), 'k-.')
if flat==1
    m=mean(flatpave_drag(:));
    min=lb(1); max=ub(1);
    plot([min, (min+max)/2, max], [m, m, m], 'bo');
end
if plotbest==1
    plot(9, mean(Bestpave_drag), 'r+')
end
lgd=sprintf('d=1.5,w=4');
lgdt=sprintf('d=0.75,w=2');
if (plotbest==1 && flat==1)
    legend(lgd,lgdt, 'Flat', 'Best: N=9,d=1.75,w=10');
elseif (plotbest==1)
    legend(lgd,lgdt, 'Best: N=9,d=1.75,w=10');
elseif (flat==1)
    legend(lgd,lgdt, 'Flat');
end

```



```

else
    legend(lgd, lgt);
end
xlabel('Number of Instances')
ylabel('Average Pressure (Pa)')

subplot(1,3,2)
temp=[dreal, [mean(pave_drag(:,1));mean(pave_drag(:,3));mean(pave_drag(:,5))]];
plot(temp(:,1),temp(:,2), 'k--')
hold on
temp=[dtest_real, [mean(pave_drag_test(:,1));mean(pave_drag_test(:,3))]];
plot(temp(:,1),temp(:,2), 'k-.')
if flat==1
    m=mean(flatpave_drag(:));
    min=lb(2); max=ub(2);
    plot([min, (min+max)/2, max], [m, m, m], 'bo');
end
if plotbest==1
    plot(1.75, mean(Bestpave_drag), 'r+')
end
lgd=sprintf('N=4, w=4');
lgdt=sprintf('N=3, w=2');
if (plotbest==1 && flat==1)
    legend(lgd, lgdt, 'Flat', 'Best: N=9, d=1.75, w=10');
elseif (plotbest==1)
    legend(lgd, lgdt, 'Best: N=9, d=1.75, w=10');
elseif (flat==1)
    legend(lgd, lgdt, 'Flat');
else
    legend(lgd, lgdt);
end
xlabel('Groove Depth (mm)')
ylabel('Average Pressure (Pa)')
title('Case: 105 rad/s')

subplot(1,3,3)
temp=[w, [mean(pave_drag(:,7));mean(pave_drag(:,8))]];
plot(temp(:,1),temp(:,2), 'k--')
hold on
temp=[wtest, [mean(pave_drag_test(:,5));mean(pave_drag_test(:,6))]];
plot(temp(:,1),temp(:,2), 'k-.')
if flat==1
    m=mean(flatpave_drag(:));
    min=lb(3); max=ub(3);
    plot([min, (min+max)/2, max], [m, m, m], 'bo');
end
if plotbest==1
    plot(10, mean(Bestpave_drag), 'r+')
end
lgd=sprintf('N=6, d=0.5');
lgdt=sprintf('N=8, d=0.75');
if (plotbest==1 && flat==1)
    legend(lgd, lgdt, 'Flat', 'Best: N=9, d=1.75, w=10');
elseif (plotbest==1)
    legend(lgd, lgdt, 'Best: N=9, d=1.75, w=10');
elseif (flat==1)
    legend(lgd, lgdt, 'Flat');
else
    legend(lgd, lgdt);
end
xlabel('Groove Width (mm)')
ylabel('Average Pressure (Pa)')

figure(5)

```

```

subplot(1,3,1)
temp=[N,[mean(mreact_drag(:,5));mean(mreact_drag(:,11));mean(mreact_drag(:,17))
]];
plot(temp(:,1),temp(:,2),'k--')
hold on
temp=[Ntest,[mean(mreact_drag_test(:,1));mean(mreact_drag_test(:,5))]];
plot(temp(:,1),temp(:,2),'k-.')
if flat==1
    m=mean(flatmreact_drag(:));
    min=lb(1); max=ub(1);
    plot([min,(min+max)/2,max],[m,m,m],'bo');
end
if plotbest==1
    plot(9,mean(Bestmreact_drag),'r+')
end
lgd=sprintf('d=1.5,w=4');
lgdt=sprintf('d=0.75,w=2');
if (plotbest==1 && flat==1)
    legend(lgd,lgdt,'Flat','Best: N=9,d=1.75,w=10');
elseif (plotbest==1)
    legend(lgd,lgdt,'Best: N=9,d=1.75,w=10');
elseif (flat==1)
    legend(lgd,lgdt,'Flat');
else
    legend(lgd,lgdt);
end
xlabel('Number of Instances')
ylabel('Drag Torque (Nm)')

subplot(1,3,2)
temp=[dreal,[mean(mreact_drag(:,1));mean(mreact_drag(:,3));mean(mreact_drag(:,5)
)]];
plot(temp(:,1),temp(:,2),'k--')
hold on
temp=[dtest_real,[mean(mreact_drag_test(:,1));mean(mreact_drag_test(:,3))]];
plot(temp(:,1),temp(:,2),'k-.')
if flat==1
    m=mean(flatmreact_drag(:));
    min=lb(2); max=ub(2);
    plot([min,(min+max)/2,max],[m,m,m],'bo');
end
if plotbest==1
    plot(1.75,mean(Bestmreact_drag),'r+')
end
lgd=sprintf('N=4,w=4');
lgdt=sprintf('N=3,w=2');
if (plotbest==1 && flat==1)
    legend(lgd,lgdt,'Flat','Best: N=9,d=1.75,w=10');
elseif (plotbest==1)
    legend(lgd,lgdt,'Best: N=9,d=1.75,w=10');
elseif (flat==1)
    legend(lgd,lgdt,'Flat');
else
    legend(lgd,lgdt);
end
xlabel('Groove Depth (mm)')
ylabel('Drag Torque (Nm)')
title('Case: 105 rad/s')

subplot(1,3,3)
temp=[w,[mean(mreact_drag(:,7));mean(mreact_drag(:,8))]];
plot(temp(:,1),temp(:,2),'k--')
hold on
temp=[wtest,[mean(mreact_drag_test(:,5));mean(mreact_drag_test(:,6))]];

```

```

plot(temp(:,1),temp(:,2),'k-.')
if flat==1
    m=mean(flatmreact_drag(:));
    min=lb(3); max=ub(3);
    plot([min,(min+max)/2,max],[m,m,m],'bo');
end
if plotbest==1
    plot(10,mean(Bestmreact_drag),'r+')
end
lgd=sprintf('N=6,d=0.5');
lgdt=sprintf('N=8,d=0.75');
if (plotbest==1 && flat==1)
    legend(lgd,lgdt,'Flat','Best: N=9,d=1.75,w=10');
elseif (plotbest==1)
    legend(lgd,lgdt,'Best: N=9,d=1.75,w=10');
elseif (flat==1)
    legend(lgd,lgdt,'Flat');
else
    legend(lgd,lgdt);
end
xlabel('Groove Width (mm)')
ylabel('Drag Torque (Nm)')

fprintf('\nSave current workspace at Radial_Grooves.mat')

```

Συνάρτηση Βελτιστοποίησης (Αντικειμενική Συνάρτηση)

```

function val=NNFcn(x)

    N=x(1); %Number of instances
    d=x(2); %depth of feature
    w=x(3); %width of feature

    wDrag=0.2; %weight for Drag Torque
    wTorque=0.3; %weight for Beneficial Torque
    wForce=0.5; %weight for Reaction Force

    load('NNDrag.mat');
    load('NNForce.mat');
    load('NNTorque.mat');

    val=-(-wDrag*NNDrag_final([N;d;w])+wTorque*NNTorque_final([N;d;w])-
    wForce*NNForce_final([N;d;w]));
    %maximizing Beneficial Torque and minimizing Drag and Force
end

```

Κώδικας – γεννήτρια τυχαίων επιφανειών (εδώ: Θετική τραχύτητα)

```

clear all

write_topography=1;
M=32; N=32;
sad=600; %surface asperity density [# /mm^2]
H=-0.4; %Hurst exponent
k=1.8; l=2.8; %weibull parameters
Zh=wb1rnd(l,k,M,N); %random values
Rm=mean(Zh(:)); %mean value
Zh=Zh-1/3*Rm;
Rs=std(Zh(:)); %standard deviation
Rsk=skewness(Zh(:));
Rku=kurtosis(Zh(:));
Sum=0;
for i=1:M

```

```

        for j=1:N
            %Sum=Sum+abs(Zh(i,j));
            Sum=Sum+abs(Zh(i,j)-Rm);
        end
    end
end
Ra=Sum/(M*N);
Lx=sqrt(M*N/sad)/1000; %m
figure(1)
subplot(1,2,1)
imagesc(Zh)
colormap jet
colorbar
subplot(1,2,2)
histogram(Zh(:))

[z , PixelWidth , PSD] = artificial_surf(Rs, H, Lx, M , N);
PS=PSD.Cq;

max_it=40;
min_err=0.04;
min_speed=-1;
[Zh,Zs,err] = fractal_surf_generator(PS,Zh,max_it,min_speed,min_err);

figure(2)
subplot(1,2,1)
imagesc(Zh)
colormap jet
colorbar
subplot(1,2,2)
imagesc(Zs)
colormap jet
colorbar

%final metrics
Sum=0;
for i=1:M
    for j=1:N
        Sum=Sum+abs(Zh(i,j));
    end
end
Raf=Sum/(M*N)
Rmf=mean(Zh(:));
Rsf=std(Zh(:))
Rskf=skewness(Zh(:));
Rkuf=kurtosis(Zh(:));
%Hf=estimate_hurst_exponent(Zh(:));

figure(3)
subplot(1,2,1)
imagesc(Zh)
colormap jet
colorbar
subplot(1,2,2)
histogram(Zh(:))

if write_topography
    Zho=Zh;
    x=linspace(-Lx/2,Lx/2,2*M-1); y=linspace(-Lx/2,Lx/2,2*N-1); %[SI]
    x=x*10^3; y=y*10^3; %[mm]
    [X,Y]=meshgrid(x,y);

    %%%Adding more points%%
    Z=zeros(2*M-1,2*N-1);

```

```

%%%% 1st column %%%
m=1; n=1; j=1;
for i=1:2:(2*M-3)
    Z(i,j)=Zh(m,n);
    m=m+1;
    if m<M
        Z(i+1,j)=(Zh(m,n)+Zh(m+1,n))/2;
    else
        Z(i+1,j)=Zh(m,n);
    end
end

%%%% 1st row %%%
m=1; i=1;
for j=1:2:(2*N-3)
    Z(i,j)=Zh(m,n);
    n=n+1;
    if n<N
        Z(i,j+1)=(Zh(m,n)+Zh(m,n+1))/2;
    else
        Z(i,j+1)=Zh(m,n);
    end
end

%%%% last row %%%
n=1; j=1;
i=(2*M-1); m=M;
for j=1:2:(2*N-3)
    Z(i,j)=Zh(m,n);
    n=n+1;
    if n<N
        Z(i,j+1)=(Zh(m,n)+Zh(m,n+1))/2;
    else
        Z(i,j+1)=Zh(m,n);
    end
end

%%%% last column %%%
n=N; j=2*N-1;
m=1;
for i=1:2:(2*M-3)
    Z(i,j)=Zh(m,n);
    m=m+1;
    if m<M
        Z(i+1,j)=(Zh(m,n)+Zh(m+1,n))/2;
    else
        Z(i+1,j)=Zh(m,n);
    end
end

%%%% inner points %%%
m=2; n=2;
for i=2:2:(2*M-4)
    n=2;
    for j=2:2:(2*N-4)
        Z(i+1,j+1)=Zh(m,n);
        Z(i,j)=(Zh(m-1,n-1)+Zh(m-1,n)+Zh(m,n)+Zh(m,n-1))/4;
        Z(i,j+1)=(Zh(m-1,n)+Zh(m,n))/2;
        Z(i,j+2)=(Zh(m-1,n)+Zh(m-1,n+1)+Zh(m,n+1)+Zh(m,n))/4;
        Z(i+1,j+2)=(Zh(m,n)+Zh(m,n+1))/2;
        Z(i+2,j+2)=(Zh(m,n)+Zh(m,n+1)+Zh(m+1,n+1)+Zh(m+1,n))/4;
        Z(i+2,j+1)=(Zh(m,n)+Zh(m+1,n+1))/2;
    end
end

```

```

        Z(i+2,j)=(Zh(m,n-1)+Zh(m,n)+Zh(m+1,n)+Zh(m+1,n-1))/4;
        Z(i+1,j)=(Zh(m,n-1)+Zh(m,n))/2;
        n=n+1;
    end
    m=m+1;
end
Zh=zeros(2*M-1,2*N-1);

%%%%% Z[2M-1,2N-1]: Matrix with inner points
%%%%% Zho[M,N]: Initial matrix as a result of PHD and PS
%%%%% Zh[2M-1,2N-1]: Temporary matrix depending on current gap h
%%%%% X,Y[2M-1,2N-1]: Coordinates out of linspace
%%%%% Xh,Yh[2M-1,2N-1]: Temporary coordinates depending on current gap h

for h=5:5:100

    fname=sprintf('topography_h%d.stl',h);
    fname2=sprintf('topography_solidh%d.stl',h);
    offset=0; %% offset [um] to be used when Z>h
    Yh=Y; Xh=X;
    %%%% 1st Loop: Adjusting Y spacing
    for j=1:2:(2*N-1)
        for i=1:(2*M-1)
            a=1; b=0;
            if mod(i,2)==0 %% corresponding to artificially added point of
matrix
                if Z(i-1,j)>=h %% previous height exceeds h (thus needs to be
cut)
                    Zh(i,j)=h-offset; %% current height at same level with Zi-1
off)
                    if Z(i+1,j)<h %% next point doesn't exceed h (won't be cut
off)
                        a=(Z(i+1,j)-Z(i-1,j))/(Y(i+1,j)-Y(i-1,j)); %% initial
slope of points
                        b=Z(i+1,j)-a*Y(i+1,j); %% initial offset of points
                        Yh(i,j)=(Zh(i,j)-b)/a; %% adjusting Y spacing to
maintain initial slope
                        %
                        if (Yh(i,j)>=Y(i+1,j)) %% avoiding case of Inf
                            Yh(i,j)=Y(i+1,j)-1/(5*M);
                        elseif (Yh(i,j)<=Y(i-1,j))
                            Yh(i,j)=Y(i-1,j)+1/(5*M);
                        end
                        %% case Z>=h: all prev, mid and next points cut, so
coordinate at mid (same with linspace)
                        end
                    else
                        if Z(i+1,j)>=h %% previous height <h but next >h, thus
spacing needs to be changed
                            a=(Z(i+1,j)-Z(i-1,j))/(Y(i+1,j)-Y(i-1,j)); %% initial
slope of points
                            b=Z(i+1,j)-a*Y(i+1,j); %% initial offset of points
                            Zh(i,j)=h-offset; %% adjusting current height
                            Yh(i,j)=(Zh(i,j)-b)/a; %% adjusting X spacing to
maintain initial slope
                            %
                            if (Yh(i,j)>=Y(i+1,j)) %% avoiding case of Inf
                                Yh(i,j)=Y(i+1,j)-1/(5*M);
                            elseif (Yh(i,j)<=Y(i-1,j))
                                Yh(i,j)=Y(i-1,j)+1/(5*M);
                            end
                        else
                            Zh(i,j)=Z(i,j); %% case Z<h: no changes need to be made
                        end
                    end
                else %% case mod(i,2)=1: initial point (thus only height needs
to be adjusted)

```

```

        if Z(i,j)>=h
            Zh(i,j)=h-offset;
        else
            Zh(i,j)=Z(i,j);
        end
    end
end
end
end
%%% 2nd Loop: Adjusting X spacing
for i=1:2:(2*M-1)
    for j=2:2:(2*N-1) %%% looping only for the artificial points of each
row
        a=1; b=0;
        if Z(i,j-1)>=h
            Zh(i,j)=h-offset;
            if Z(i,j+1)<h
slope of points
                a=(Z(i,j+1)-Z(i,j-1))/(X(i,j+1)-X(i,j-1)); %%% initial
                b=Z(i,j+1)-a*X(i,j+1); %%% initial offset of points
                Zh(i,j)=h-offset;
                Xh(i,j)=(Zh(i,j)-b)/a;
                %         if (Xh(i,j)>=X(i,j+1)) %%% avoiding case of inf
                %             Xh(i,j)=X(i,j+1)-1/(5*N);
                %         elseif (Xh(i,j)<=X(i,j-1))
                %             Xh(i,j)=X(i,j-1)+1/(5*N);
                %         end
                %%% case Zj+1>=h: only height of Zhj needs to be changed.
Coordinate stays at mid
            end
        else
            Zh(i,j)=Z(i,j); %%% both prev,next heights lower than h, thus
no changes need to be made
        end
    end
end
end

%%% 3rd Loop: Adjusting heights of the inner points
for i=2:2:(2*M-1)
    for j=2:2:(2*N-1)
        Zh(i,j)=(Zh(i-1,j-1)+Zh(i-1,j+1)+Zh(i+1,j+1)+Zh(i+1,j-1))/4;
    end
end

if h>=3*Rsf
    figure(4)
    subplot(1,2,1)
    imagesc(Zh)
    colormap jet
    colorbar
    subplot(1,2,2)
    histogram(Zh(:))
end

Zh=Zh*10^(-6); %[SI]
Xh=Xh*10^(-3);
Yh=Yh*10^(-3);
surf2stl(fname,Xh,Yh,Zh,'ascii');
hc=h*10^(-6);
[F,V]=surf2solid(Xh,Yh,Zh,'triangulation','delaunay','elevation',hc);
stlwrite(fname2,F,V);
end
end

```

Συναρτήσεις διαθέσιμες στην κοινότητα Mathworks/MatLab

Μετατροπή νέφους σημείων σε επιφάνεια

```
function surf2stl(filename,x,y,z,mode)
% Author: Bill McDonald, 02-20-04
```

Δημιουργία όγκου από επιφάνεια

```
function varargout = surf2solid(varargin)
% Author: Sven Holcombe, 07-20-2013
% 1.3 (2014-02) Added optional face normals input.
```

Εξαγωγή αρχείου .stl

```
function stlwrite(filename, varargin)
% Author: Sven Holcombe, 11-24-11
```

Radially averaged power spectral density

```
function raPsd2d(img, res)
% (C) E. Ruzanski, RCG, 2009
```


Βιβλιογραφία

- [1] *Wet clutch under limited slip conditions – simplified testing and simulation*, P. Marklund and R. Larsson, Applied Physics and Mechanical Engineering, Division of Machine Elements, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 2007.
- [2] *Simulation of the engagement of carbon fabric wet clutch: Analytical and experimental comparison*, Li Wenbin, Huang Jianfeng, Fei Jie, Cao Liyun, Yao Chunyan and Wang Wenjing, Tribology International, 2015 Elsevier Ltd.
- [3] *Wet clutch friction characteristics obtained from simplified pin on disc test*, P. Marklund and R. Larsson, Applied Physics and Mechanical Engineering, Division of Machine Elements, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 2007 Elsevier Ltd.
- [4] *A Multi-Physics model for wet clutch dynamics*, Jungdon Cho PhD in Mechanical Engineering, The University of Michigan, 2012.
- [5] *Parametric analysis for a paper-based wet clutch with groove consideration*, M. Li, M.M. Khonsari, D.M.C. McCarthy, Joakim Lundin, Tribology International, 2014 Elsevier Ltd.
- [6] *Finite element modeling of engagement of rough and grooved wet clutches*, E.J. Berger, F. Sadeghi, C.M. Krousgrill, School of Mechanical Engineering, Purdue University, 1996 ASME.
- [7] *Numerical simulation of engagement of paper based wet clutch facing*, Shinichi Natsumeda, Tatsuro Miyoshi, 1994 ASME.
- [8] *Engineering tribology*, Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor, Butterworth Heinemann.
- [9] *Derivation of Reynolds equation in cylindrical coordinates applicable to pin-on-disk and CMP*, K.E. Beschorner, C.F. Higgs III, M.R. Lovell, 2008 ASME.
- [10] *Μοντελοποίηση και παραμετρική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς πολύδισκου συμπλέκτη υγράς τριβής με αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους*, Διπλωματική Εργασία του Ν. Ρόγκα, Επιβλέπων: Β. Σπιτάς, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ, Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου, Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών, Αθήνα 2017.
- [11] *The effect of surface roughness on friction and film thickness in transition from EHL to mixed lubrication*, T. Zapletal, P. Sperka, I. Krupka, M. Hartl, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology, Czech Republic, 2018 Elsevier Ltd.
- [12] *An average flow model for determining effects of three – dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication*, Nadir Patir, H.S. Cheng, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, 1978 ASME.
- [13] *Modelling the effect of surface roughness on lubrication in all regimes*, R. Larsson, Lulea University of Technology, Division of Machine Elements, Lulea, Sweden, 2008 Elsevier Ltd.
- [14] *Rough surface flow factors in full film lubrication based on a homogenization technique*, Fredrik Sahlin, Andreas Almqvist, Roland Larsson, Sergei Glavatskih, Division of Machine Elements, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 2006 Elsevier Ltd.
- [15] *Mixed lubrication analysis by a macro – micro approach and a full – scale mixed EHL model*, Q. Jane Wang, Dong Zhu, Herbert S. Cheng, Tonghui Yu, Xiaofei Jiang, Shuangbiao Liu, Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, 2004 ASME.
- [16] *Μηχανική των ρευστών – Θεωρία & ασκήσεις*, Σ. Τσαγγάρης, καθηγητής Ε.Μ.Π., Εκδ. ΤΣΟΤΡΑΣ, Αθήνα 2015.
- [17] *Roughness parameters*, E.S. Gadelmawla, M.M. Koura, T.M.A. Maksoud, I.M. Elewa, H.H. Soliman, 2002 Elsevier Ltd.
- [18] *A numerical procedure for random generation of rough surfaces*, N. Patir, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, Illinois, 1977 Elsevier Ltd.
- [19] *Generating randomly rough surfaces with given height probability distribution and power spectrum*, F.P. Rafols, A. Almqvist, Machine Elements, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 2018 Elsevier Ltd.
- [20] *Statistical analysis of asperities on a rough surface*, F. R. Valloire, 2001 Elsevier Ltd.