



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

*Σχεδιασμός συστήματος οδοντωτών κυλίνδρων διπλής
ημιτονοειδούς κατατομής για βελτιωμένο συνεχή εμποτισμό
ινωδών υλικών μέσω μικροδιαχωρισμού των ινών.*

Διπλωματική εργασία

ΒΑΙΟΣ ΑΡΑΜΠΙΑΤΖΗΣ

Επιβλέπων : Λέκτορας Β. Σπιτάς

Αθήνα 2013

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ενισχυμένα με ίνες πολυμερή έχουν ευρεία χρήση σε ένα πολύ μεγάλο κομμάτι των σύγχρονων τεχνολογικών εφαρμογών, αποτέλεσμα της ικανότητάς τους να συνδυάζουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες και χαμηλό βάρος. Για το λόγο αυτό, σήμερα, χρησιμοποιούνται κατά κόρον από πολύ απαιτητικούς κλάδους της Εφαρμοσμένης Μηχανικής.

Ένα σημαντικό, ωστόσο, πρόβλημα που απαντάται έχει να κάνει με την παραγωγή τους. Οι μέχρι σήμερα μέθοδοι παραγωγής σύνθετων πολυμερών δεν έχουν τη δυνατότητα να εκμεταλλευτούν στο έπακρο τις ιδιότητες των συνιστώντων υλικών των. Συγκεκριμένα, παρατηρούνται δυσκολίες στον εμποτισμό του ενισχυτικού υλικού από το υλικό της μήτρας, γεγονός που εμποδίζει τη χρησιμοποίησή τους σε ακόμα πιο απαιτητικές εφαρμογές.

Στη διπλωματική αυτή εργασία εξετάζεται μια βελτιωμένη μέθοδος συνεχούς παραγωγής σύνθετων πολυμερών, βασισμένη στη μέθοδο pultrusion.

Παρουσιάζονται εκτενώς η διαδικασία δημιουργίας των οδοντωτών κυλίνδρων, η ρευστομηχανική ανάλυση του προβλήματος για απλούς και οδοντοτούς κυλίνδρους, καθώς και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

ABSTRACT

In this thesis, a continuous method of producing Fibre-reinforced polymers (FRPs) is considered, using a pair of co-rotated toothed rollers, which resembles to the pultrusion method. The method resembles pultrusion in the sense that a UD or 2D fibre reinforcement (glass, carbon) is co-processed with the molten polymer through a pair of co-rotating toothed rollers to produce a continuously reinforced 3D sheet. The surface of the rollers is double-sinusoidal, which imposes differential sliding of the fibres and facilitates the fibre wetting.

A dimensional analysis is being carried out during the impregnation process and for typical and toothed rollers. The comparative results demonstrate that using toothed rollers with diameter of 50 mm can impregnate 2D fabrics of 2.5 mm thickness.

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα της εργασίας Δρ. Βασίλη Σπιτά για την καθοδήγηση και τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, όλους τους συναδέλφους στο Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών και, κυρίως, τους φίλους Γιάννη Βασιλείου, Τρύφωνα Λαμπρόπουλο και Νίκο Παρασκευόπουλο για την πολύ καλή παρέα και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχαν, την οικογένειά μου για τη διαρκή στήριξη όλα τα χρόνια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και, τέλος, τη Ράνια για την υπομονή που επέδειξε, ειδικά τον τελευταίο πολύ δύσκολο μήνα της εργασίας αυτής.

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 Εφαρμογές των ενισχυμένων με ίνες πολυμερών στη σύγχρονη τεχνολογία	σελ.11
1.1 Εισαγωγή	σελ.11
1.2 Μέθοδοι παραγωγής ενισχυμένων με ίνες πολυμερών	σελ.13
2 Εντοπισμός του προβλήματος	σελ.17
3 Δημιουργία οδοντωτών κυλίνδρων με διπλή ημιτονοειδή κατατομή	σελ.20
3.1. Εισαγωγή	σελ.20
3.2 Δημιουργία ημιτονοειδούς κατατομής οδοντωτού τροχού με τη χρήση οδοντωτού κανόνα (rack generation)	σελ.23
3.3.Δημιουργία οδοντωτού κυλίνδρου διπλής ημιτονοειδούς κατατομής	σελ.25
4 Ρευστομηχανική ανάλυση της ροής ανάμεσα στις ίνες	σελ.27
4.1 Προσδιορισμός ροής	σελ.27
4.2 Μια πρώτη ανάλυση της διαδικασίας εμποτισμού των ινών	σελ.27
4.3 Υπολογισμός χαρακτηριστικών της ροής	σελ.29
4.3.1. Υπολογισμός απόστασης μεταξύ των ινών	σελ.30
4.3.2. Υπολογισμός μήκους διεργασίας	σελ.31
4.3.3. Υπολογισμός συντελεστή αντίστασης	σελ.33
4.4. Πλήρης ανάλυση της ροής	σελ.35

4.4.1.Υπολογισμός βάθους εμποτισμού	σελ.36
4.4.2.Υπολογισμός της πίεσης του ρευστού	σελ.38
4.4.3.Έλεγχος αντοχής των ινών στην ασκούμενη από το ρευστό πίεση	σελ.40
4.4.4. Υπολογισμός απαιτήσεων ροπής στους κυλίνδρους	σελ.42
5 Ανάλυση της ροής σε σύστημα με οδοντωτούς κυλίνδρους διπλής ημιτονοειδούς κατατομής	σελ.45
5.1.Αρχικές συνθήκες	σελ.46
5.1.1 Υπολογισμός της νέας απόστασης μεταξύ των ινών	σελ.46
5.2. Υπολογισμός των υπολοίπων μεγεθών της ροής	σελ.49
6 Αριθμητικά αποτελέσματα και σύγκρισή τους	σελ.53
6.1. Εισαγωγή	σελ.53
6.2. Αρχικές συνθήκες	σελ.53
6.2.1.Επιλογή τιμών για τα βήματα του οδόντα	σελ.55
6.3. Αριθμητικά Αποτελέσματα	σελ.57
6.3.1. Κανονικοί κύλινδροι	σελ.58
6.3.2. Οδοντωτοί κύλινδροι	σελ.60
7 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων	σελ.68
7.1. Περαιτέρω έρευνα	σελ.70
8 Βιβλιογραφία	σελ.71

1. Εφαρμογές των ενισχυμένων με ίνες πολυμερών στη σύγχρονη τεχνολογία

1.1 Εισαγωγή

Από τα πρώτα χρόνια της εφεύρεσης των ενισχυμένων πλαστικών, στις πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα, ήταν πρόδηλες οι πολύ μεγάλες δυνατοτητές τους σε πολλές εφαρμογες της Μηχανολογίας, αλλά και γενικότερα της Μηχανικής. Το πρώτο αεροσκάφος στην ιστορία με μέρη αποτελούμενα από πλαστικά ενισχυμένα με υαλονήματα ήταν το Vultee BT-15 Valiant που κατασκευάστηκε το 1943. Ο λόγος είναι οι πολύ καλές θερμο-μηχανικές ιδιότητες που προσφέρουν στον κατασκευαστή, σε συνδυασμό την καλή τους κατεργασιμότητα και την υψηλή τους ανθεκτικότητα, αλλά και το σχετικά χαμηλό κόστος τους.

Ειδικότερα, τα πολυμερή ενισχυμένα με ινώδη υλικά (fiber-reinforced plastics-FRPs) απαντώνται σήμερα σε πλείστες απαιτητικές τεχνολογικές εφαρμογές.

- Στην αυτοκίνηση: Τα FRP, και ειδικότερα τα ενισχυμένα με ίνες άνθρακα πολυμερή, έχουν ευρεία εφαρμογή στην αυτοβιομηχανία αιχμής και, ειδικότερα, στα αγωνιστικά αυτοκίνητα. Το αρκετά μεγάλο κόστος τους αντισταθμίζεται από τον ασυναγώνιστα υψηλό λόγο αντοχής-βάρους που προσφέρουν, με αποτέλεσμα να έχουν εκτοπίσει σε μεγάλο βαθμό τα μεταλλικά κράματα. Έτσι,



Εικόνα 1.1 Εφαρμογές των FRPs

λοιπόν, για παράδειγμα, το μεγαλύτερο μέρος του πλαισίου, τμήματα της ανάρτησης και το κάλυμμα του κινητήρα ενός αγωνιστικού αυτοκινήτου της Formula 1 αποτελούνται σχεδόν αποκλειστικά από CFRPs (Carbon-fiber reinforced polymers). Παράλληλα, καινούριες τεχνολογίες παραγωγής των CFRPs έχουν μειώσει το κόστος κατασκευής τους σημαντικά, ώστε, πλέον, να βρίσκουν εφαρμογή και στα αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής.

- Στην αεροναυπηγική: Το πολύ χαμηλό βάρος των FRPs έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν ραγδαία το συνολικό βάρος ενός αεροσκάφους, οδηγώντας σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση καυσίμου. Παράλληλα, η ευκολία με την οποία κατεργάζονται συμβάλλει στην απλούστερη κατασκευή του αεροσκάφους, άρα και σε μείωση του κόστους κατασκευής του. Επιπροσθέτως, τμήματα των διαστημικών λεωφορείων, καθώς επίσης και σχεδόν ολόκληρα μη επανδρωμένα οχήματα που χρησιμοποιούνται για διαστημικές αποστολές αποτελούνται από FRPs.
- Στη δομική μηχανική: Τα πολυμερή ενισχυμένα με ινώδη υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα για τη μετασκευή (retrofitting) δομικών κατασκευών, όπως στις γέφυρες. Η υψηλή τους αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη καθιστά την, σε συγκεκριμένα σημεία, τοποθέτησή τους ιδανική για την αύξηση του ωφέλιμου φορτίου κατασκευών από σκυρόδεμα που είχαν σχεδιαστεί για εξυπηρέτηση φορτίων αρκετά μικρότερη από τη σημερινή, καθώς επίσης και για την επιδιόρθωσή δομικών κατασκευών. Επιπλέον, τύλιξη μερών από FRPs σε σημεία που υφίστανται υψηλές διατμητικές φορτίσεις (κόμβοι) συμβάλλει σημαντικά στη αντοχή των κατασκευών σε σεισμούς. Ακόμα, ειδικά FRPs με πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας (της τάξης των 420 Gpa ή και μεγαλύτερου)

χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση δοκών από χυτό σίδηρο. Τέλος, λόγω του χαμηλού τους βάρους και της ανθεκτικότητάς τους σε διάβρωση, βρίσκουν εφαρμογή και ως υλικά προ-φόρτισης (prestressing materials) σε διάφορες κατασκευές.

- Στα αθλητικά είδη: Το χαμηλό βάρος, η υψηλή ανθεκτικότητα και η καλύτερη κατεργασιμότητα, συγκριτικά με το αλουμίνιο, το ατσάλι και το τιτάνιο, των ενισχυμένων με ίνες άνθρακα πολυμερών, έχουν οδηγήσει την ευρεία χρήση τους στην κατασκευή αγωνιστικών ποδηλάτων. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται και για την κατασκευή ρακετών, βελών τοξοβολίας, σανίδων και βαρκών κωπηλασίας.

Μια κατηγορία ενισχυμένων πολυμερών είναι τα πλαστικά ενισχυμένα με νανοσωλήνες άνθρακα (Carbon Nanotube-Reinforced Polymer-CNRPs).

Οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν διάμετρο από 5 έως 20 nm και είναι, από μηχανικής απόψεως, το ισχυρότερο υλικό που έχει δημιουργηθεί μέχρι σήμερα, με το μέτρο ελαστικότητάς τους να είναι της τάξεως του 1TPa, ενώ ορισμένες δομές τους θεωρητικά μπορεί να φτάσουν τα 100 GPa σε εφελκυστική αντοχή. Ωστόσο, λόγω του απειροστικά μικρού μεγέθους τους, είναι αρκετά δύσκολο να διαταχθούν σε σειρά, με αποτέλεσμα να έχουν ακόμα πολύ περιορισμένη πρακτική εφαρμογή. Παρ'όλα αυτά, στα επόμενα χρόνια αναμένεται να εφαρμοστούν μέθοδοι διάταξής τους (φερ' ειπείν, προσανατολισμός τους με εφαρμογή θετικών-αρνητικών ηλεκτρικών φορτίων στα άκρα τους) σε ευρεία κλίμακα και οι εξαιρετικές τους ιδιότητες να βρουν εφαρμογή σε πληθώρα κατασκευών.

1.2 Μέθοδοι παραγωγής των ενισχυμένων με ίνες πολυμερών

Για την παραγωγή τεμαχίων ενισχυμένων πολυμερών με ινώδη υλικά, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Τα περισσότερα τεμάχια

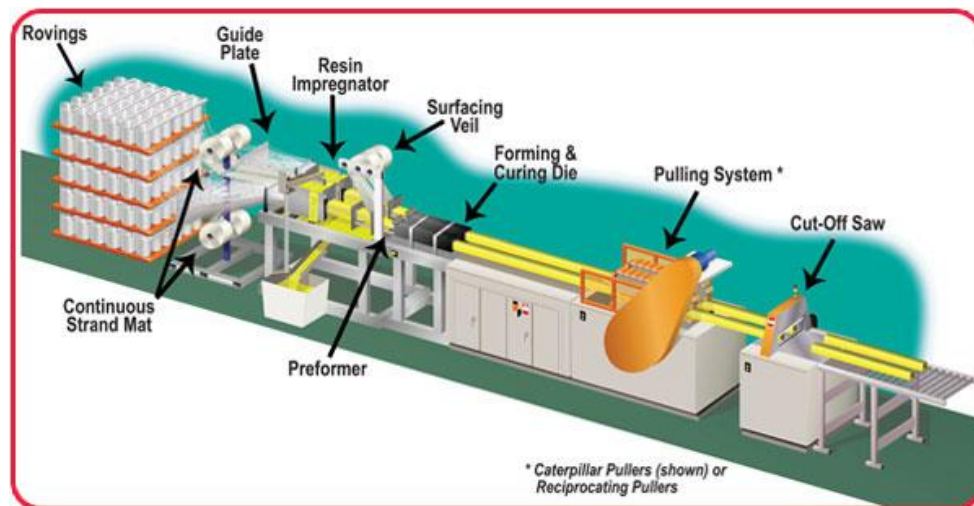
κατασκευάζονται με τη χρήση μήτρας (moulding process), μέσα στο οποίο είναι τοποθετημένα τα φύλλα του ενισχυτικού υλικού και στη συνέχεια εγχύεται το πολυμερές. Εφόσον είναι επιθυμητή η κατασκευή κυλινδρικών τεμαχίων, τα ενισχυτικά φύλλα τοποθετούνται πάνω σε διαμορφωτικό κύλινδρο (mandrel). Στην αρχή, το φύλλο των ινών μπορεί είναι είτε ήδη μερικώς εμποτισμένο (pre-preg fibres) είτε πλήρως στεγνό. Οι βασικότερες μέθοδοι παραγωγής είναι οι εξής:

- **Bladder moulding:** Προεμποτισμένα φύλλα ινών τοποθετούνται μέσα σε μήτρα θηλυκής μορφής μαζί με μια φούσκα που ομοιάζει με μπαλόνι, ενώ εγχύεται το πολυμερές στην περιοχή γύρω από τη φούσκα. Η μήτρα κλείνει και υπόκειται σε πίεση από θερμαινόμενη πρέσα. Παράλληλα, αύξάνεται η πίεση της φούσκας, με αποτέλεσμα οι ίνες και το πολυμερές να ωθούνται προς τα τοιχώματα της μήτρας. Το τεμάχιο αφήνεται για σκλήρυνση και αφαιρείται από τη ζεστή μήτρα. Η διαδικασία αυτή είναι μη συνεχής, με σχετικά μικρό χρόνο σκλήρυνσης του πολυμερούς (cure cycle) της τάξης των 15 με 60 λεπτών και χρησιμοποιείται για την παραγωγή περίπλοκων κοίλων γεωμετριών σε ανταγωνιστικά κόστη.
- **Compression moulding:** Αφορά κυρίως ήδη ενισχυμένα με υαλονήματα πολυμερή, είτε σε μορφή φύλλων είτε με μορφή απλών μη σχηματισμένων όγκων υλικού, τα οποία τοποθετούνται σε θερμαινόμενη μήτρα. Η μήτρα, καθώς κλείνει, συμπιέζει το υλικό και το αναγκάζει να πάρει το σχήμα της. Η μέθοδος αυτή δίνει εξαιρετικά λεπτομερείς γεωμετρίες, με τη διαδικασία της σκλήρυνσης του πολυμερούς να διαρκεί μέχρι 20 λεπτά. Ωστόσο, η λεπτομερής γεωμετρία της μήτρας ανεβάζει αρκετά το κόστος κατασκευής της και, συνεπώς, το κόστος της διαδικασίας.
- **Autoclave/vacuum bag:** Προεμποτισμένα φύλλα ινών τοποθετούνται σε ανοιχτό καλούπι, τα οποία καλύπτονται από υλικό που βοηθά στην απαερίωση και από μια σακούλα κενού (vacuum bag) και τοποθετούνται σε θερμαινόμενο λέβητα πίεσεως (autoclave). Με τη χρήση αντλίας κενού, αφαιρείται όλος ο αέρας από τα φύλλα των ινών και, παράλληλα, το υλικό σκληραίνεται. Είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται κατά κόρον από την αεροδιαστημική, καθώς επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της όλης διαδικασίας λόγω του πολύ μεγάλου χρόνου σκλήρυνσης του

υλικού, που μπορεί να διαρκέσει αρκετές ώρες. Το αποτέλεσμα είναι πολύ λεπτομερείς γεωμετρικές ελασμάτων. Η μέθοδος αυτή, όμως, περιορίζεται στην αεροδιαστημική, επειδή είναι πολύ αργή και πολύ απαιτητική διαδικασία, ενώ και η αγορά των απαιτούμενων λεβήτων ανεβάζει το κόστος σε πολύ υψηλές τιμές.

- **Wet layup:** Είναι η απλούστερη παραγωγής ενισχυμένων με ίνες υλικών, κατά την οποία το ύφασμα των ινών τοποθετείται σε ανοιχτή μήτρα και κορεννύεται με πολυμερές χειροκίνητα. Το διαβρεγμένο ύφασμα σκληραίνεται συνήθως σε θερμοκρασία δωματίου, αν και, σε ορισμένες περιπτώσεις, προσδίδεται θερμότητα για αποτελεσματικότερη σκλήρυνση.
- **Chopper gun:** Συνεχή νήματα από ενισχυτικό υλικό (συνήθως υαλονήματα) οδηγούνται σε ένα πιστόλι χειρός, το οποίο κόβει τα νήματα και, ταυτόχρονα, τα συνενώνει με καταλελυμένο πολυμερές. Έπειτα, οι εμποτισμένες ίνες εκτοξεύονται στην επιφάνεια μιας ανοιχτής μήτρας. Το ποσοστό ινών/πολυμερούς εξαρτάται αποκλειστικά από τον χειριστή του πιστολιού. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται για τεμάχια μεγάλου όγκου και χαμηλού κόστους, με μικρότερη, όμως αντοχή και φτωχές ανοχές διαστάσεων.
- **Mandrel wrapping:** Προεμποτισμένα φύλλα ινών τυλίγονται γύρω από χαλύβδινο ή αλουμινένιο κύλινδρο και, έπειτα, συμπυκνώνονται όλα μαζί με τη χρήση νάυλον ή σελοτέιπ από πολυπροπυλένιο. Το συμπυκνωμένο υλικό αφήνεται για σκλήρυνση μέσα σε ειδικό φούρνο. Με το τέλος της διαδικασίας, αφαιρούνται ο κύλινδρος και το σελοτέιπ και το τελικό αποτέλεσμα είναι κοίλοι σωλήνες ενισχυμένου πολυμερούς.
- **Filament Winding:** Ειδικά μηχανήματα τραβούν δέσμες ενισχυτικών ινών, και, αφού αυτές διαβραχούν από το πολυμερές, τις τυλίγουν με συγκεκριμένο προσανατολισμό γύρω από έναν περιστρεφόμενο κύλινδρο από χάλυβα. Έπειτα, τα τεμάχια αφήνονται για σκλήρυνση, είτε σε θερμοκρασία δωματίου είτε τους προσδίδεται θερμότητα. Ο κύλινδρος, στη συνέχεια, αφαιρείται. Πρόκειται για ημι-αυτόματη μέθοδο παραγωγής, η οποία χρησιμοποιεί υλικά χαμηλού κόστους, με περιορισμένη, όμως, παραγωγικότητα.
- **Pultrusion:** Δέσμες ή φύλλα ινών, με τη βοήθεια περιστρεφόμενων κυλίνδρων, οδηγούνται σε θάλαμο που περιέχει το πολυμερές, από

το οποίο εμποτίζονται και, στη συνέχεια, εισέρχονται σε θερμαινόμενο καλούπι, όπου το υλικό σκληραίνεται και λαμβάνει το επιθυμητό σχήμα. Πρόκειται για μια συνεχή διαδικασία, με την οποία παράγονται δοκοί, γωνίες, αγωγοί και επίπεδα φύλλα από ενισχυμένο πλαστικό. Η μέθοδος αυτή παρατίθενται στο ακόλουθο σχήμα:



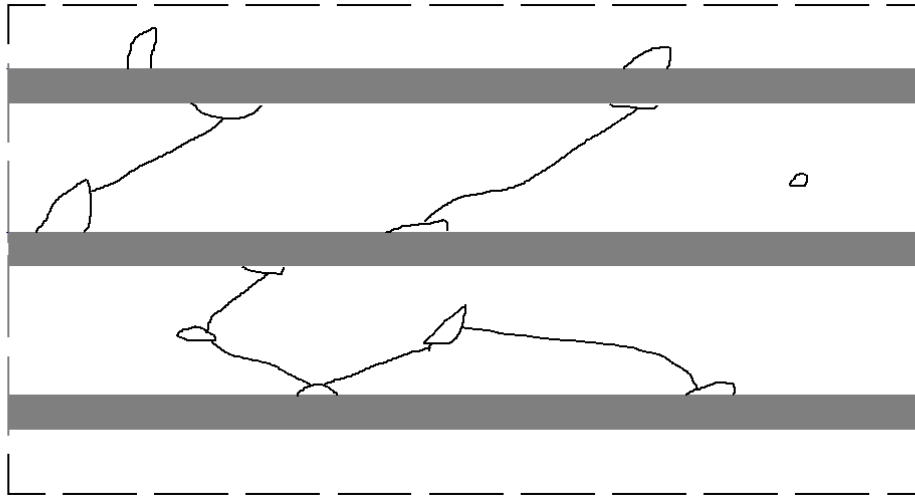
Εικόνα 1.2 Μέθοδος παραγωγής Pultrusion

- Resin infusion: Το ύφασμα των ινών τοποθετείται στη μήτρα και, αφού αφαιρεθεί ο υπάρχων αέρας, εγχέεται το πολυμερές σε συνθήκες κενού. Με τη μέθοδο αυτή, μπορούν να επιτευχθούν ακριβείς γεωμετρίες και ανοχές, ωστόσο, ελλοχεύει ο κίνδυνος το ύφασμα να μην εμποτιστεί πλήρως από το πολυμερές και, κατ' επέκταση, να αυξάνονται οι πιθανότητες αστοχίας του τελικού προϊόντος.

2. Εντοπισμός του προβλήματος

Ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα που υπάρχει για την παραγωγή πολυμερών ενισχυμένων με ινώδη υλικά αφορά την ικανότητα του υλικού της μήτρας να διαποτίσει ικανώς τις ίνες. Τα ινώδη υλικά αποτελούνται από χιλιάδες μικροσκοπικές ίνες (filaments), με διάμετρο και απόσταση μεταξύ τους μερικά μm . Παράλληλα, τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά αποτελούνται από μακρομόρια πολύ μεγάλου μήκους. Μια τυπική μοριακή αλυσίδα του πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (high-density polyethylene - HDPE), φερ'ειπείν, αποτελείται από 10000 δομικές μονάδες αιθυλενίου, έχει μήκος περί τα $2\mu\text{m}$. Συνεπώς, είναι ιδιαίτερος δύσκολο και χρονοβόρο τα μακρομόρια να εισχωρήσουν ανάμεσα από τις ίνες και να τις εμποτίσουν πλήρως.

Το πρόβλημα αυτό είναι ακόμα σημαντικότερο στις συνεχείς μεθόδους παραγωγής (π.χ. pultrusion), καθώς, παρότι είναι δυνατό να παραχθούν μεγάλα τεμάχια συνθετου υλικού με σταθερή διατομή, το πλαστικό δεν προλαβαίνει να διαβρέξει αποτελεσματικά τις ίνες καθ'όλη την περιφέρειά τους και το μήκος τους. Επιπροσθέτως, στο τελικό προϊόν, θύλακες αέρα παραμένουν εγκλωβισμένοι σε περιοχές γύρω από τις ίνες, με συνέπεια, κατά την καταπόνηση του υλικού, τοπικά, να ανεβάζουν ραγδαία την αναπτυσσόμενη τάση στην διεπαφή ιών-πλαστικού (stress raisers). Η πολύ υψηλή αυτή τάση προκαλεί ρωγμές μεταξύ των θυλάκων



Εικόνα 2.1 Θύλακες αέρα και δημιουργούμενες ρωγμές στη μήτρα του σύνθετου υλικού

του αέρα, με αποτέλεσμα τοπικά όλο το φορτίο να παραλαμβάνεται από τις ίνες, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει το υλικό σε αστοχία.

Άρα, ο πλήρης εμποτισμός των ινών από το πολυμερές είναι παράγοντας κρίσιμης σημασίας για την αντοχή του σύνθετου υλικού. Ο εμποτισμός των ινών είναι συνδεδεμένος με την ικανότητα του ρευστού πολυμερούς να διαπεράσει τη δομή του υφάσματος και να διαβρέξει αποτελεσματικά τις ίνες. Η συνεκτικότητα του ρευστού δε μπορεί να επηρεαστεί ικανώς με χημικά μέσα χωρίς επιπτώσεις στις ιδιότητες του πολυμερούς, οπότε ο μόνος τρόπος είναι να αυξηθεί η θερμοκρασία του τήγματος, πράγμα, όμως, το οποίο μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στην όλη διαδικασία, εφόσον η θερμοκρασία αγγίξει μια συγκεκριμένη τιμή πάνω από το σημείο τήξεως. Ακόμα, αύξηση της πίεσης του ρευστού μπορεί να προκαλέσει καταστροφή των ινών. Συνεπώς, ο μόνος τρόπος να βελτιωθεί η διαδικασία του εμποτισμού είναι να προκληθεί μηχανικός μικροδιαχωρισμός των ινών μεταξύ τους (fiber-splitting).

Στην παρούσα διπλωματική, εξετάζεται ο σχεδιασμός συστήματος οδοντωτών κυλίνδρων με ειδικά διαμορφωμένη ημιτονοειδή επιφάνεια, με σκοπό τον ικανό μικροδιαχωρισμό των ινών μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, μελετάται ο σχεδιασμός των οδοντωτών κυλίνδρων, η χρησιμοποίηση κανονικών και των οδοντωτών κυλίνδρων για τη βελτίωση του εμποτισμού, το ρευστομηχανικό φαινόμενο που λαμβάνει χώρα κατά τη

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

διαρκεία της διεργασίας των ινών από τους κυλίνδρους και, τέλος, η αξιολόγηση της τελικής χρηστικότητας των οδοντωτών κυλίνδρων.

3. Δημιουργία οδοντωτών κυλίνδρων με διπλή ημιτονοειδή κατατομή

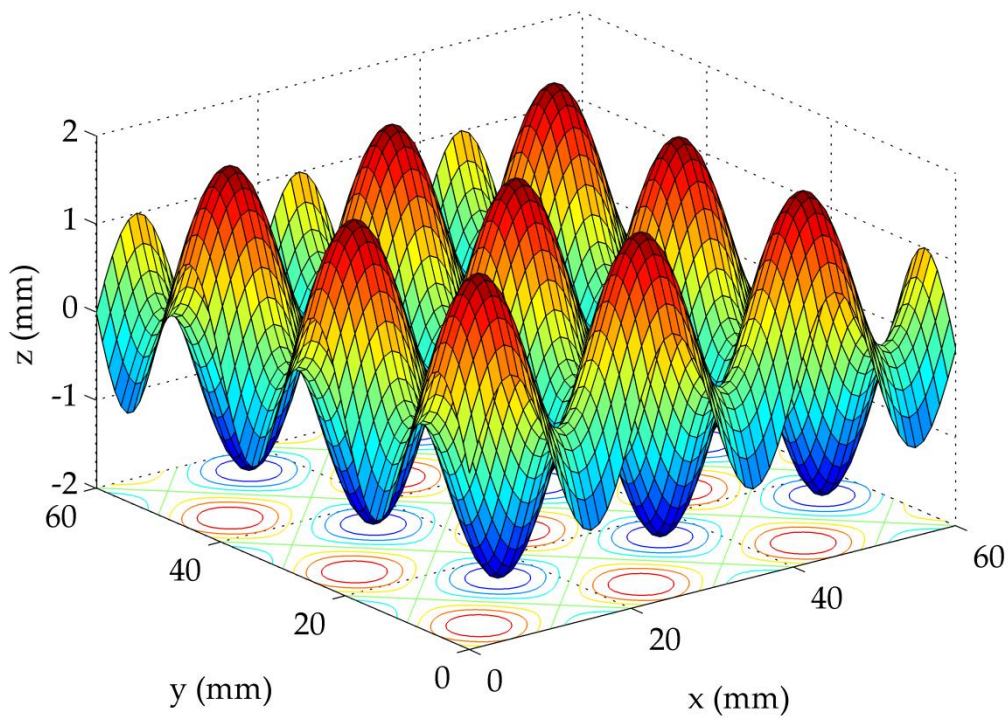
3.1 Εισαγωγή

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής αφορά την κατασκευή των οδοντωτών κυλίνδρων. Οι κύλινδροι αυτοί έχουν διπλή ημιτονοειδή κατατομή, γεγονός το οποίο μπορεί να ευνοήσει την αύξηση του διακένου μεταξύ των ινών και, κατά συνέπεια, τη βελτίωση της διαδικασίας του εμποτισμού.

Συγκεκριμένα, η δημιουργία της κατατομής βασίστηκε στη συνάρτηση σε μια επαλληλία ημιτονικών συναρτήσεων

$$z(x, y) = A_x \sin\left(\frac{2\pi}{l_x} x + \varphi_x\right) + A_y \sin\left(\frac{2\pi}{l_y} y + \varphi_y\right) \quad (3.1)$$

όπου οι τριάδες μεγεθών $\{A_x, l_x, \varphi_x\}$ και $\{A_y, l_y, \varphi_y\}$ αντιστοιχούν στο πλάτος, το μήκος κύματος, που αντιστοιχούν στο ύψος κεφαλής και το βήμα, και τη διαφορά φάσης που χαρακτηρίζει τη συνάρτηση κατά μήκος του x-άξονα και του y-άξονα, αντίστοιχα.



Σχήμα 3.1 Η συνάρτηση

$$z(x, y) = A_x \sin\left(\frac{2\pi}{l_x}x + \varphi_x\right) + A_y \sin\left(\frac{2\pi}{l_y}y + \varphi_y\right)$$

Από την Εξίσωση (3.1) προκύπτει ότι η οικογένεια των καμπυλών κατά μήκος του άξονα Χ, για μια δεδομένη τιμή του y είναι της μορφής:

$$g_k(x) = A_x \sin\left(\frac{2\pi}{l_x}x + \varphi_x\right) + Y_k \quad (3.2)$$

όπου

$$Y_k = A_y \sin\left(\frac{2\pi}{l_y}y + \varphi_y\right) \quad (3.3)$$

Ομοίως, η οικογένεια των καμπυλών κατά μήκος του άξονα Υ είναι της μορφής:

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

$$h_k(x) = A_y \sin\left(\frac{2\pi}{l_y} y + \varphi_y\right) + X_k \quad (3.4)$$

όπου

$$X_k = A_x \sin\left(\frac{2\pi}{l_x} x + \varphi_x\right) \quad (3.5)$$

Το μήκος της καμπύλης g_k μεταξύ δύο σημείων a και b ισούται:

$$S_x = \int_a^b \sqrt{1 + \left(\frac{dg_k(x)}{dx}\right)^2} dx \quad (3.6)$$

Αντικαθιστώντας την Εξίσωση (3.2) προκύπτει:

$$S_x = \int_a^b \sqrt{1 + k_x^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{l_x} x + \varphi_x\right)} dx \quad (3.7)$$

όπου

$$k_x = \frac{2\pi}{l_x} A_x \quad (3.8)$$

Ομοίως προκύπτει για την h_k :

$$S_y = \int_a^b \sqrt{1 + k_y^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{l_y} y + \varphi_y\right)} dy \quad (3.9)$$

όπου

$$k_y = \frac{2\pi}{l_y} A_y \quad (3.10)$$

Από τις ανωτέρω Εξισώσεις, προκύπτει ότι:

- Τα μήκη S_x, S_y είναι ανεξάρτητα των σχέσεων Y_k, X_k , αντίστοιχα.
- Τα μήκη S_x, S_y είναι τα ίδια για όλες τις καμπύλες g_k, h_k αντίστοιχα, για δεδομένα σημεία a,b.

Επιπλέον, επιλέγοντας $A_x = A_y = h, l_x = l_y = l$ και $\varphi_x = \varphi_y = 0$, προκύπτει μια συμμετρική μορφή της Εξίσωσης (3.1):

$$z(x, y) = A \left(\sin\left(\frac{2\pi}{l} x\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{l} y\right) \right) \quad (3.11)$$

Η συμμετρική αυτή σχέση επιτρέπει την ομοιόμορφη σχετική μετατόπιση των ινών μεταξύ τους και την αποφυγή τοπικών συγκεντρώσεων τάσεων στο πλέγμα των ινών.

Η Εξίσωση (3.11) θα χρησιμοποιηθεί ως κανόνας για την κοπή του οδοντωτού κυλίνδρου.

3.2 Δημιουργία ημιτονοειδούς κατατομής οδοντωτού τροχού με τη χρήση οδοντωτού κανόνα (rack generation)

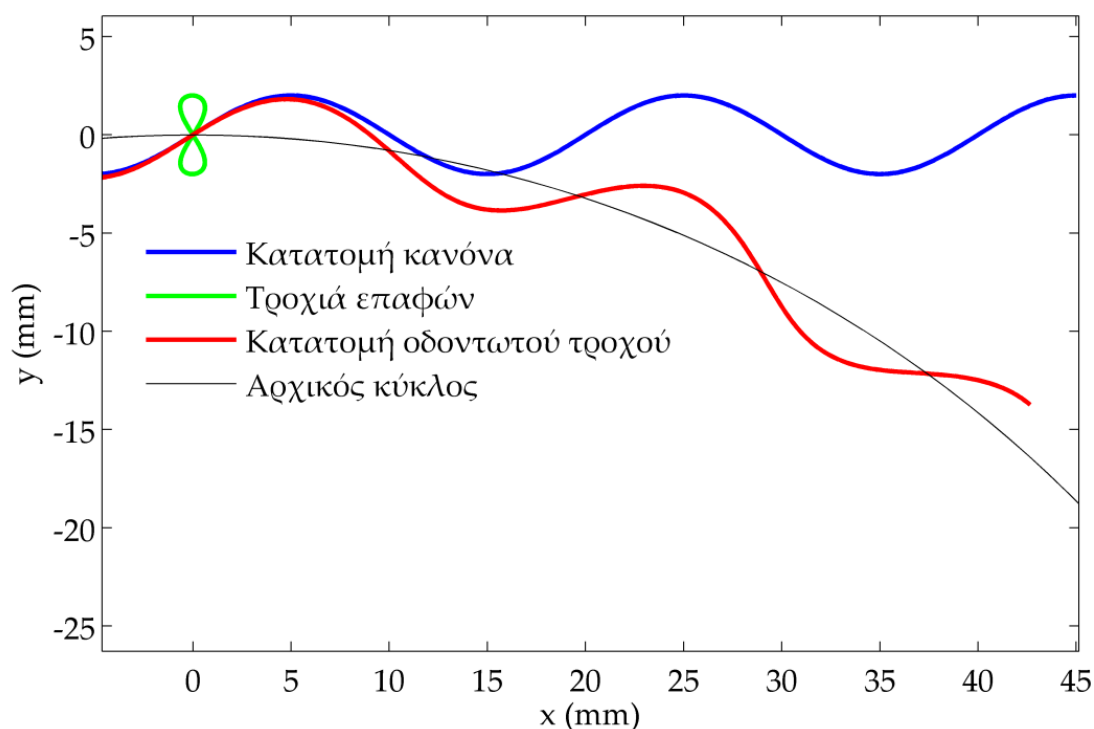
Οι συντεταγμένες ενός σημείου της κατατομής του κανόνα είναι (x, y) , η οποία ακολουθεί την καμπύλη της σχέσης

$$y = h \sin \frac{2\pi}{l} x \quad (3.12)$$

και το σημείο αυτό θα έρθει σε επαφή με το σημείο (x_{gear}, y_{gear}) της κατατομής του τροχού στο σημείο (x_{path}, y_{path}) της τροχιάς επαφών.

Η ζητούμενη κατατομή, η εύρεση δηλαδή της οικογένειας των σημείων (x_{gear}, y_{gear}) , παρήχθη με τον κώδικα Matlab, για τη δημιουργία κατατομών οδοντωτών τροχών, του Εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών του ΕΜΠ.

Τελικά, η προκύπτουσα κατατομή έχει τη μορφή του Σχήματος 3.2.



Σχήμα 3.2 Δημιουργία ημιτονοειδούς κατατομής

Έχοντας υπολογίσει τα σημεία της κατατομής, για την κατασκευή του οδοντωτού τροχού, θα ακολουθηθεί η εξής διαδικασία, με τη χρήση του σχεδιαστικού λογισμικού Autodesk Inventor 2013:

- Μέσω του προαναφερθέντος κώδικα, σχεδιάζεται ο αρχικός κύκλος του οδόντα και η κατατομή που αντιστοιχεί στο μισό βήμα της οδόντωσης.
- Υπολογίζεται η γωνία, η οποία σχηματίζεται μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου σημείου της κατατομής. Η γωνία αυτή θα πρέπει να επαληθεύει τη σχέση

$$\theta = \frac{K}{r_0} \quad (3.13)$$

όπου K η γραμμική μετακίνηση του κανόνα και r_0 η ακτίνα του αρχικού κύκλου.

- Στη συνέχεια, κατασκευάζεται ο υπόλοιπος οδόντας και, συνακόλουθα, ο υπόλοιπος τροχός.



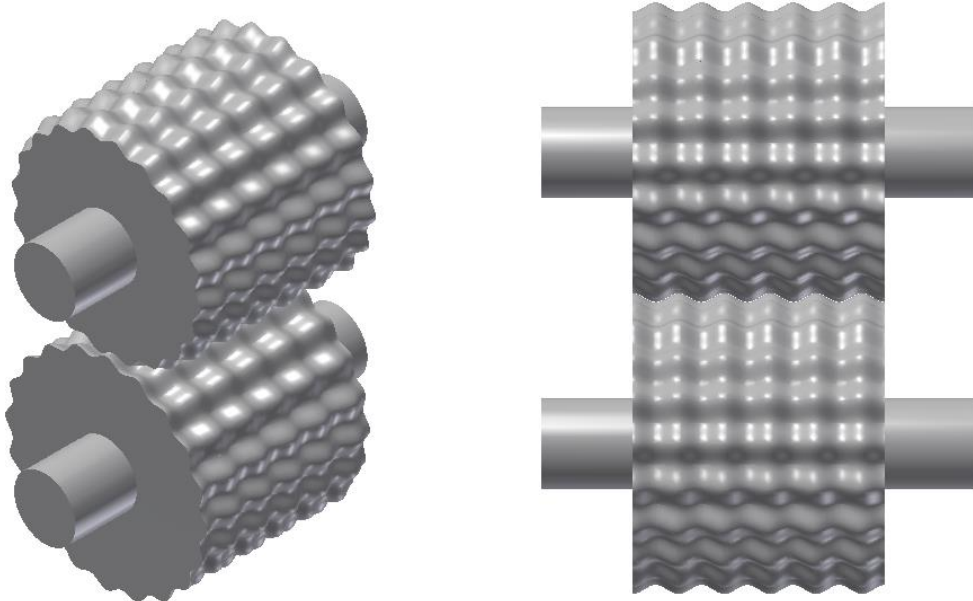
Σχήμα 3.3 Κατασκευή τροχού ημιτονοειδούς κατατομής

3.3. Δημιουργία οδοντωτού κυλίνδρου διπλής ημιτονοειδούς κατατομής

Η διαδικασία της Παραγράφου αποτέλεσε τη βάση για τη δημιουργία των κυλίνδρων με την επιθυμητή κατατομή. Η διπλή ημιτονοειδής κατατομή του οδοντωτού κυλίνδρου σχηματίζεται σε δύο επίπεδα, με την κατατομή του τροχού να σχηματίζεται στο επίπεδο XY , ενώ στο επίπεδο YZ η γεωμετρία ακολουθεί την κατατομή του κοπτικού κανόνα. Πιο συγκεκριμένα, αφού εισαχθούν στο λογισμικό σχεδίασης τα σημεία για το μισό βήμα της κατατομής του τροχού στο επίπεδο XY , στο επίπεδο YZ εισάγονται τα σημεία για το μισό βήμα της κατατομής του κανόνα. Το πρώτο σημείο της κατατομής του κανόνα πρέπει να ταυτίζεται με το πρώτο σημείο της κατατομής του οδόντα. Έπειτα, κατασκευάζεται ο μισός οδόντας και στις τρεις διαστάσεις. Από κει και έπειτα, χρησιμοποιώντας απλές εντολές του σχεδιαστικού προγράμματος, σχηματίζεται ο

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

κύλινδρος με τη ζητούμενη ημιτονοειδή κατατομή. Είναι εμφανής η συμμετρία των κατατομών και κατά περιφέρεια και κατά τη γενέτειρα του κυλίνδρου, γεγονός που εξασφαλίζει τον ομοιόμορφο διαχωρισμό των ινών κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Η συμμετρία των κατατομών έχει ιδιαίτερη σημασία στην περίπτωση που το ύφασμα ενίσχυσης που επιλεγεί είναι προσανατολισμένο σε δύο διαστάσεις (0° - 90° fabric).



Σχήμα 3.4 Ισομετρική και πλάγια όψη του ζεύγους οδοντωτών κυλίνδρων

4. Ρευστομηχανική ανάλυση της ροής ανάμεσα στις ίνες

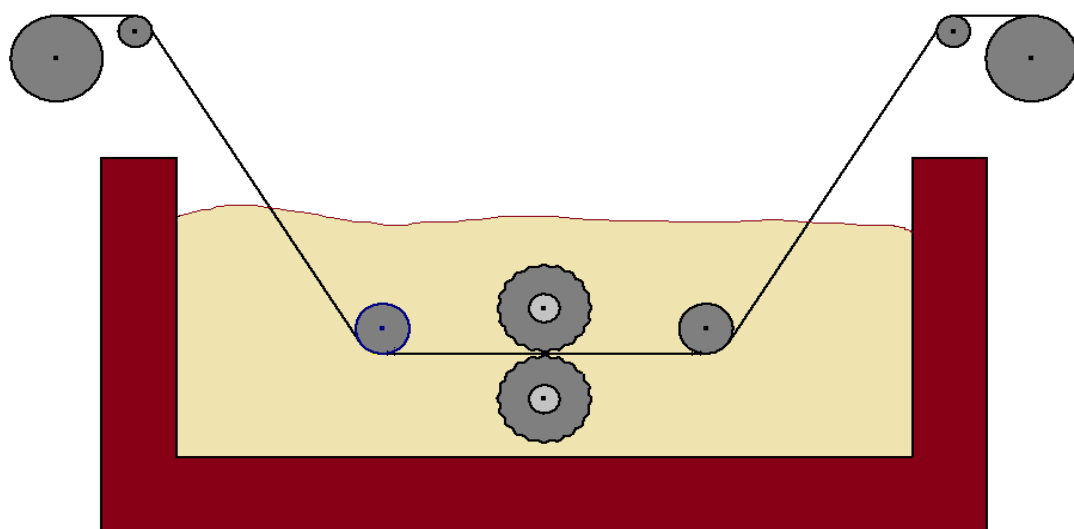
4.1 Προσδιορισμός ροής

Η ροή που μελετάται αφορά τη μόνιμη κίνηση ενός θερμοπλαστικού ή θερμοσκληρυνόμενου ρευστού διαμέσου των ινών ενός υφάσματος αποτελούμενο από ίνες άνθρακα. Αν περιοριστεί ο εξεταζόμενος χώρος γύρω από μία ίνα, το πεδίο είναι παράλληλη ροή γύρω από κύλινδρο. Τα ρευστά αυτά έχουν πολύ μεγάλο ιξώδες που κυμαίνεται από 3000 έως 15000 Pas, ενώ και οι επιβαλλόμενες ταχύτητες στο πεδίο είναι της τάξης του 1mm/s. Σε συνδυασμό με τη διάμετρο μιας ίνας άνθρακα που ισούται περίπου με 6μm, ο τοπικός αριθμός Reynolds είναι $Re = \frac{ud}{\nu} \ll 1$. Δηλαδή, οι δυνάμεις λόγω συνεκτικότητας του ρευστού είναι κατά πολύ μεγαλύτερες των αδρανειακών δυνάμεων, με αποτέλεσμα η εξεταζόμενη ροή μπορεί να χαρακτηριστεί ως έρπουσα ροή.

4.2. Μια πρώτη ανάλυση της διαδικασίας εμποτισμού των ινών

Η μέθοδος, η οποία μελετάται στην παρούσα εργασία βασίζεται στη διαδικασία που πραγματοποιείται στο θάλαμο εμποτισμού των ινών μιας τυπικής μηχανής pultrusion. Το φύλλο των ινών οδηγείται, με τη χρήση ενός οδηγού κυλίνδρου, στη δεξαμενή όπου βρίσκεται το υλικό της μήτρας και διαποτίζεται από αυτό. Στη συνέχεια, το διαβρεγμένο φύλλο υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία μέχρις ότου να παραχθεί το τελικό προϊόν.

Στη διπλωματική αυτή, εξετάζεται η χρησιμοποίηση δυο επιπρόσθετων κυλίνδρων, τοποθετημένων μέσα στη δεξαμενή με το ρευστό, εκατέρωθεν και στις δυο επιφάνειες του φύλλου ινών. Οι κύλινδροι αυτοί εφάπτονται, στην κορυφή τους, των ινών και έχουν ίση γραμμική ταχύτητα, κατά διεύθυνση και φορά, με αυτές. Με τη βοήθειά τους, είναι δυνατόν να επιβληθεί πίεση στο ρευστό που βρίσκεται στην περιοχή ανάμεσα στους κυλίνδρους και τις ίνες, με αποτέλεσμα καλύτερο εμποτισμό των ινών από το υλικό της μήτρας. Επιπρόσθετα, η χρήση οδοντωτών κυλίνδρων με διπλή ημιτονοειδή κατατομή, περίπτωση που θα μελετηθεί στο επόμενο κεφάλαιο, επιτρέπει το άνοιγμα των ινών του ενισχυτικού υλικού μεταξύ τους (μικροδιαχωρισμός των ινών), γεγονός που οδηγεί σε ακόμα μεγαλύτερο βάθος εμποτισμού. Μια σχηματική απεικόνιση της εξεταζόμενης διάταξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1 Σχηματική απεικόνιση της διάταξης

Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση πραγματοποιείται στο βασικό σημείο ενδιαφέροντος, ήτοι στην περιοχή κυλίνδρων και φύλλου ινών. Το φύλλο των ινών κινείται οριζόντια μέσα στο θάλαμο εμποτισμού με μια σταθερή γραμμική ταχύτητα. Οι κύλινδροι έχουν ίδια διάμετρο μεταξύ τους και την ίδια, κατά διεύθυνση και φορά, με το φύλλο των ινών, γραμμική ταχύτητα και, με την περιστροφή τους, πιέζουν το ρευστό να περάσει μέσα από το ύφασμα και να το διαβρέξει. Η επιβαλλόμενη πίεση θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε το πολυμέρες να αναγκάζεται να κινηθεί κάθετα προς τις ίνες και να μην έχει την τάση να πάει προς διαφορετική κατεύθυνση και, ταυτόχρονα, να μην υπάρχει κίνδυνος να σπάσουν οι ίνες του υλικού ενίσχυσης.

4.3. Υπολογισμός χαρακτηριστικών της ροής

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της ροής παίζουν μείζονα ρόλο στην επίλυση του εξεταζόμενου ζητήματος της εργασίας αυτής. Παραδείγματος χάριν, το διάκενο μεταξύ των ινών επηρεάζει σημαντικά την ταχύτητα με την οποία το ρευστό διαπερνά το ύφασμα ανθρακονημάτων και, κατά συνέπεια, το χρόνο και το βάθος εμποτισμού του από το υλικό της μήτρας.

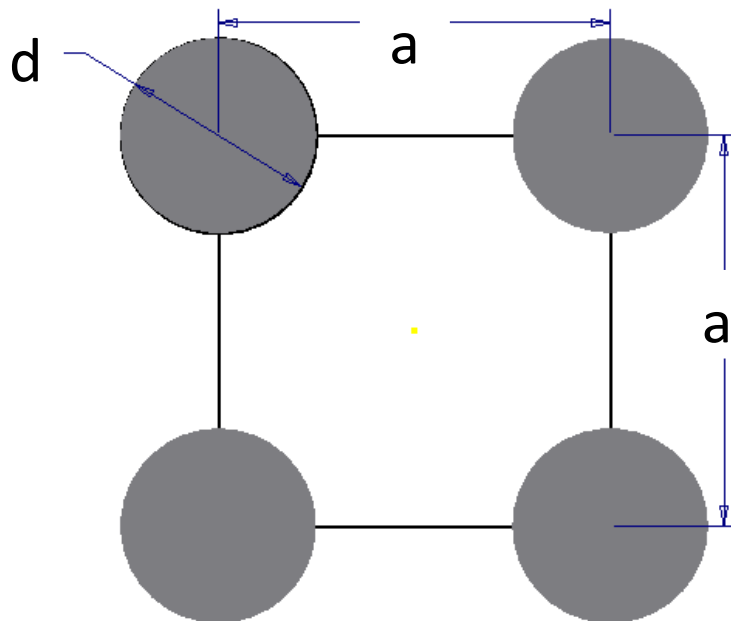
Ορισμένες βασικές παράμετροι μπορούν να προκαθοριστούν, με τη χρήση των οποίων υπολογίζονται και τα υπόλοιπα μεγέθη της ροής. Οι παράμετροι αυτές είναι οι εξής:

- Η διάμετρος και η πυκνότητα των ινών άνθρακα.
- Η πυκνότητα του ρευστού.
- Η ακτίνα και η κοινή γραμμική ταχύτητα των κυλίνδρων διεργασίας και του φύλλου των ινών.

Με βάση τα ανωτέρω μεγέθη, υπολογίζονται καταρχάς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροής, δηλαδή η απόσταση μεταξύ των ινών και το μήκος διεργασίας.

4.3.1 Υπολογισμός απόστασης μεταξύ των ινών.

Στο φύλλο του άνθρακα έχει γίνει η παραδοχή ότι οι ίνες ισαπέχουν μεταξύ τους και οριζόντια και κάθετα. Ο χώρος, δηλαδή, που εξετάζεται είναι ένα τετράγωνο με πλευρά a την απόσταση ανάμεσα στις ίνες και κορυφές τα κέντρα των διατομών των ινών με διάμετρο d .



Σχήμα 4.2 Διάταξη των ινών στο ύφασμα

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι εξισώσεις των επιμέρους όγκων, οι οποίοι θα εξεταστούν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Στις παρακάτω εξισώσεις όπου z είναι το μήκος των ινών.

Μεγέθη	Εξισώσεις
Συνολικός όγκος	$V_{tot} = a^2 z$
Όγκος ινών	$V_{fib} = \frac{\pi d^2}{4} z$
Όγκος αέρα	$V_{air} = \left(a^2 - \frac{\pi d^2}{4} \right) z$

Πρέπει τώρα να γίνει ένας διαχωρισμός ανάμεσα στην πραγματική πυκνότητα και τη φαινόμενη πυκνότητα του υλικού.

Η *πραγματική πυκνότητα των ινών* (fiber density) είναι ο λόγος της μάζας των ινών προς τον όγκο του, δηλαδή

$$\rho_{fib} = \frac{m}{V_{fib}} \quad (4.1)$$

Η *φαινόμενη πυκνότητα του υφάσματος* (fabric bulk density) αφορά την πυκνότητα που περιλαμβάνει όλο τον αέρα ή τα κενά διαστήματα που σχηματίζονται εντός του υλικού, είναι, δηλαδή, ο λόγος της μάζας του υλικού προς το συνολικό όγκο που περικλείεται, δηλαδή

$$\rho_{bulk} = \frac{m}{V_{tot}} \quad (4.2)$$

Εφ' όσον η μάζα των ινών είναι σταθερή, ισχύει:

$$V_{tot}\rho_{bulk} = V_{fib}\rho_{fib} \Rightarrow a^2\rho_{bulk} = \frac{\pi d^2}{4}\rho_{fib} \Rightarrow a = \sqrt{\frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_{fib}}{\rho_{bulk}}} \quad (4.3)$$

Από την τελευταία σχέση, προκύπτει η απόσταση των κεντρών μεταξύ δύο ινών.

4.3.2. Υπολογισμός μήκους διεργασίας

Το εξεταζόμενο πρόβλημα είναι συμμετρικό ως προς τις ίνες, καθώς και οι δύο κύλινδροι έχουν ίδια διάμετρο και γραμμική ταχύτητα. Ορίζοντας ως σημείο (0,0) το σημείο επαφής κυλίνδρου-ινών, ο χώρος όπου το ρευστό πιέζεται προς τις ίνες ορίζεται από τα σημεία (0,0), (x, 0) και (x, δ), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Αυτό το άγνωστο μήκος x είναι το μήκος διεργασίας και αποτελεί μια αρκετά σημαντική παράμετρος της ανάλυσης του προβλήματος.

Με βάση το Σχήμα 4.3, προκύπτει ότι

$$\delta = R - \sqrt{R^2 - x^2} \quad (4.4)$$

Επιπλέον είναι απαραίτητη μια ακόμα σχέση συναρτήσεως του x, η οποία προκύπτει από την παροχή του ρευστού που διαπερνά τις ίνες.

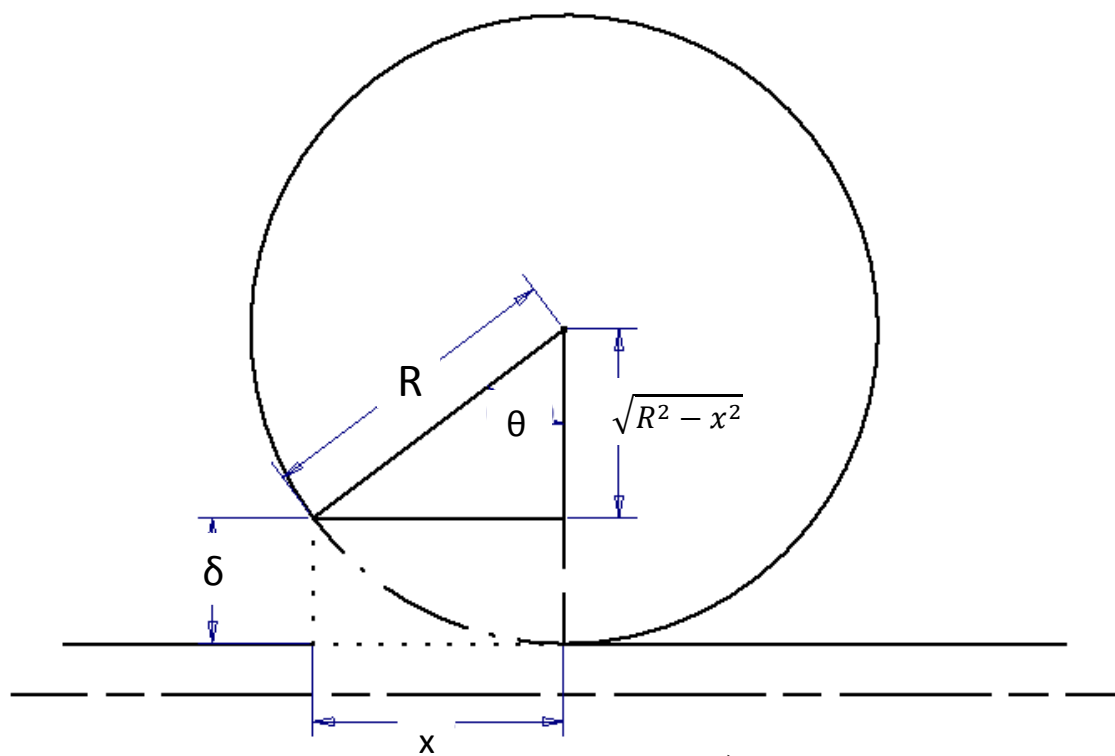
Το εργαζόμενο ρευστό είναι ασυμπίεστο και στον εξεταζόμενο χώρο ο κύλινδρος είναι αδιαπεραστο όριο. Συνεπώς, ολόκληρη η μάζα του πολυμερούς θα έχει κατεύθυνση είτε προς τα κάτω (διέλευση από τις ίνες-δρόμος (1)) είτε προς τα αριστερά (έξοδος από τη διεργασία-δρόμος (2)), ενώ έχει αποκτήσει πίεση p . Η παροχή, λοιπόν, του ρευστού για καθέ ένα από τους δύο διαφορετικούς δρόμους είναι:

$$L_{\varepsilon\sigma} = \theta R_{curv} \quad (4.5)$$

όπου:

$$A_1 = n(a - d) = \frac{x}{a}(a - d) \quad (4.6)$$

$$A_2 = \delta \quad (4.7)$$



Σχήμα 4.3 Υπολογισμός μήκους διεργασίας

Το ρευστό, διερχόμενο από τους δυο αυτούς δρόμους, υφίσταται δυο διαφορετικές απώλειες πίεσης Δp_1 και Δp_2 . Επειδή θεωρείται ότι το ρευστό ουσιαστικά προτιμά να περάσει μέσα από τις ίνες και όχι να διαφύγει της διεργασίας, $\Delta p_1 < \Delta p_2$, άρα οι πτώσεις πίεσης θα είναι

$$\frac{\Delta p_1}{p} < \frac{\Delta p_2}{p} \quad (4.8)$$

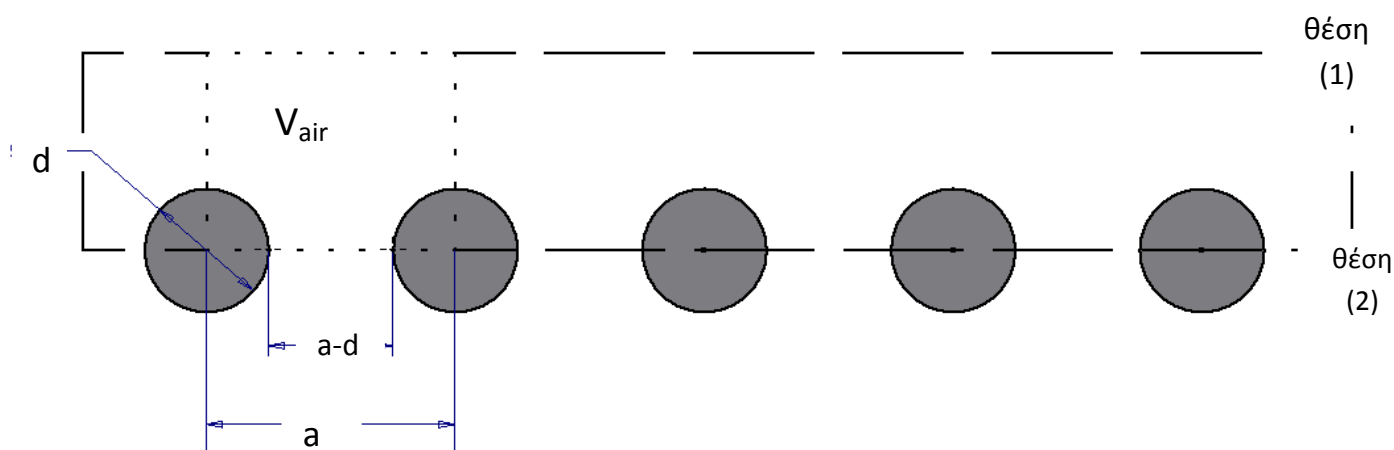
Έχοντας προκαθορίσει ότι οι απώλειες πίεσης για τη διαφυγή του ρευστού είναι το 95% της αρχικής πίεσης, ότι οι ταχύτητες διέλευσης και διαφυγής είναι ίσες, ενώ, επιπλέον, είναι γνωστό ότι η παροχή είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας των απωλειών πίεσης, διαιρώντας τις δύο παροχές κατά μέλη, προκύπτει:

$$\begin{aligned} \frac{Q_1}{Q_2} &= \sqrt{\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2}} = \frac{u_1 A_1}{u_2 A_2} = \frac{A_1}{A_2} \Rightarrow \frac{\frac{x}{a}(a-d)}{\delta} = \sqrt{\frac{0,95p}{0,05p}} \Rightarrow \delta = \sqrt{\frac{0,05x}{0,95a}}(a-d) \Rightarrow \\ &\Rightarrow R - \sqrt{R^2 - x^2} = 0,2294 \frac{x}{a}(a-d) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Επιλύοντας αριθμητικά την ανωτέρω πεπλεγμένη σχέση ως προς x , προκύπτει το μήκος διεργασίας.

4.3.3. Υπολογισμός συντελεστή αντίστασης

Με βάση τα ανωτέρω μεγέθη, θα υπολογιστεί ο συντελεστής αντίστασης των ινών (C_D), για τον οποίο πρέπει να πραγματοποιηθεί κινηματική και ρευστομηχανική ανάλυση του ρευστού στον χώρο που περικλείεται από τις διακεκομμένες γραμμές του κάτωθι σχήματος.



Σχήμα 4.4 Υπολογισμός συντελεστή αντίστασης

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

Ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Ο χρόνος της διαδικασίας είναι:

$$t_{proc} = \frac{\text{μήκος διεργασίας}}{\text{γραμμική ταχύτητα}} \quad (4.10)$$

- Η παροχή του ρευστού είναι:

$$Q = \frac{\text{όγκος αέρα}}{\text{χρόνος διαδικασίας}} = \frac{\left(a^2 - \frac{\pi d^2}{4}\right)z}{t_{proc}} \quad (4.11)$$

- Η ταχύτητα του ρευστού στο διάκενο μεταξύ των ινών είναι:

$$u_2 = \frac{Q}{(a-d)z} \quad (4.12)$$

- Λόγω της διατήρησης της μάζας, ισχύει:

$$u_1 a = u_2 (a-d) \quad (4.13)$$

- Η μέση ταχύτητα του ρευστού είναι:

$$u_m = \frac{u_1 + u_2}{2} \quad (4.14)$$

- Η πίεση που ασκείται από το ρευστό σε μια ίνα είναι:

$$p_{fib} = \frac{1}{2} c_d u_m^2 \quad (4.15)$$

- Τέλος, λόγω της διατήρησης της ενέργειας:

$$\begin{aligned} p_2 a z + p_{fib} d z + \frac{1}{2} \rho u_2^2 (a-d) z &= p_1 a z + \frac{1}{2} \rho u_1^2 a z \Rightarrow \\ \Rightarrow p_2 (a-d) + p_{fib} d + \frac{1}{2} \rho u_2^2 (a-d) &= p_1 a + \frac{1}{2} \rho u_1^2 a \end{aligned} \quad (4.16)$$

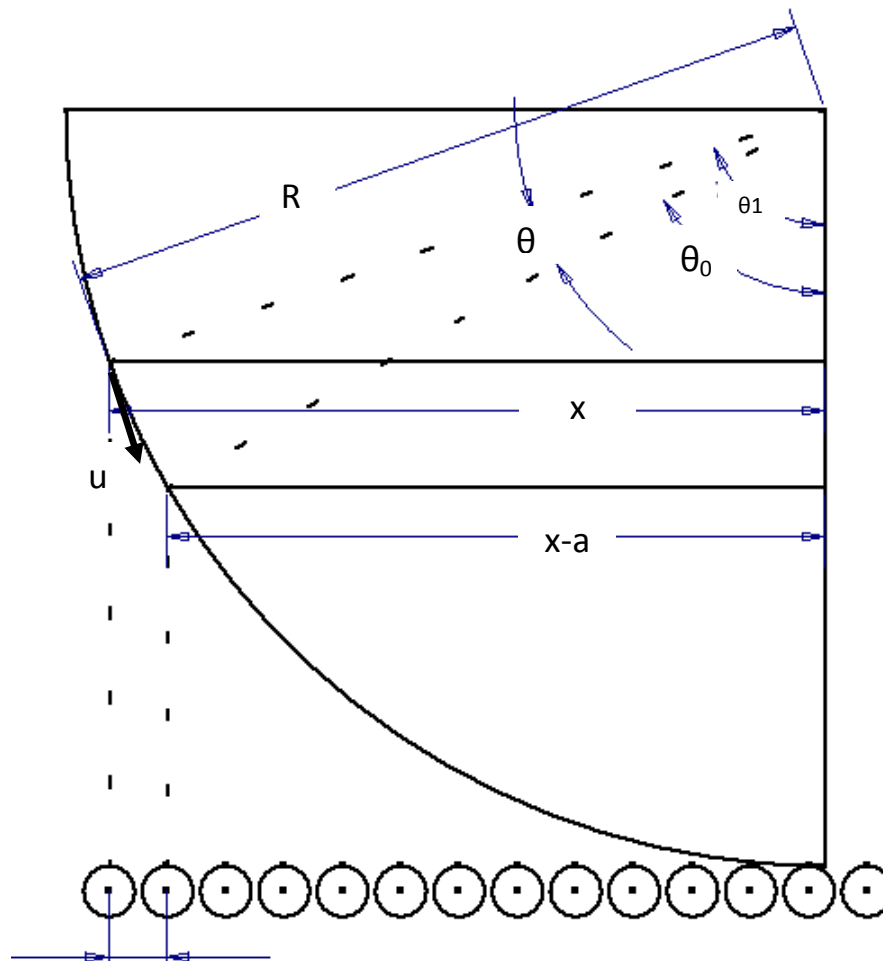
Τα άγνωστα μεγέθη στις παραπάνω σχέσεις είναι, εκτός του συνελεστή αντίστασης, οι πιέσεις p_1 και p_2 . Προκειμένου να γίνει η εκτίμηση του C_D , θα προϋποτεθεί ότι ο θάλαμος εμποτισμού επιβάλλει ο

ίδιος πίεση στη θέση (1) στο ρευστό (pressurized chamber), η οποία κυμαίνεται μεταξύ 10 και 100 MPa. Παράλληλα, προκαθορίζεται ότι η πίεση χάνεται πλήρως ως τη θέση (2), δηλαδή $p_2 = 0$.

Επιλύοντας τη σχέση (4.15) με τα παραπάνω δεδομένα, μετράται η p_{fib} και από τη σχέση (4.16) υπολογίζεται ο συντελεστής αντίστασης των ινών για κάθε τιμή της p_1 , και η μέση τιμή των αποτελεσμάτων λαμβάνεται ως ο τελικός συντελεστής αντίστασης της ανάλυσης.

4.4. Πλήρης ανάλυση της ροής

Έχοντας υπολογίσει παραπάνω τα γεωμετρικά μεγέθη της ροής, το χρόνο της διεργασίας και το συντελεστή αντίστασης των ινών, θα γίνει εκ νέου υπολογισμός των κινηματικών μεγεθών της ροής του πολυμερούς, χρησιμοποιώντας τη κοινή γραμμική ταχύτητα των κυλίνδρων και του φυλλου ανθρακονημάτων. Σκοπός είναι ο προσδιορισμός της ταχύτητας του ρευστού, το βάθος του εμποτισμού των ινών και η πίεση που ασκεί το πολυμερές στους κυλίνδρους, από την οποία θα προκύψει οι συνολικές απαιτήσεις σε ροπή σε κάθε κύλινδρο.



Σχήμα 4.5 Υπολογισμός κινηματικών μεγεθών της ροής

4.4.1. Υπολογισμός βάθους εμποτισμού

Η ανάλυση βασίζεται στη στιγμιαία μετακίνηση ινών και κυλίνδρων σε κάθε χρονικό βήμα dt και συνολικό χρόνο το χρόνο διεργασίας t_{proc} , η οποία είναι σταθερή καθώς η γραμμική ταχύτητα παραμένει σταθερή και είναι ίση με την απόσταση μεταξύ δύο ινών. Άρα, το πρόβλημα μπορεί να μελετηθεί με βήμα τις χωρικές διαμοιράσεις, οι οποίες είναι:

$$dx = \frac{\text{μήκος διεργασίας}}{\text{απόσταση ινών}} = \frac{x}{a} \quad (4.17)$$

- Τη χρονική στιγμή $t=0$, οι ίνες και ο κύλινδρος είναι αμετακίνητοι, συνεπώς σχηματίζεται ένα ορθογώνιο τρίγωνο με υποτείνουσα την

ακτίνα R του κυλίνδρου και τη μια κάθετη του ίση με το μήκος διεργασίας x . Δημιουργείται, λοιπόν, η γωνία απέναντι από το μήκος x :

$$\theta_0 = \arcsin \frac{x}{a} \quad (4.18)$$

- Την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή $t=dt$, οι ίνες έχουν μετακινηθεί κατά a , οπότε στο σχηματισθέν ορθογώνιο τρίγωνο η ζητούμενη γωνία είναι:

$$\theta_1 = \arcsin \frac{x - a}{a} \quad (4.19)$$

- Κατά συνέπεια, ο κύλινδρος έχει μετακινηθεί γωνιακά κατά:

$$\theta = \theta_0 - \theta_1 \quad (4.20)$$

- Η ταχύτητα που αποκτά το ρευστό είναι ίση με την κάθετη συνιστώσα της γραμμικής ταχύτητας του κυλίνδρου u :

$$u_1 = u \sin \theta \quad (4.21)$$

- Σύμφωνα με την αρχή της διατήρησης της παροχής, η ταχύτητα με την οποία το ρευστό διαπερνά μέσα από τις ίνες ισούται με:

$$u_1 a = u_2 (a - d) \Rightarrow u_2 = u_1 \frac{a}{a - d} \quad (4.22)$$

- Συνεπώς, η μέση ταχύτητα του ρευστού με την οποία διαβρέχει το φύλλο των ανθρακονημάτων είναι:

$$u_m = \frac{u_1 + u_2}{2} \quad (4.22)$$

Κάνοντας την επαναληπτική αυτή διαδικασία μέχρι την ολοκλήρωση του αριθμού των διαμοιράσεων n_0 του μήκους διεργασίας, υπολογίζεται η ταχύτητα εμποτισμού των ινών σε κάθε θέση του κυλίνδρου.

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

- Στη συνέχεια, υπολογίζεται το βάθος εμποτισμού των ινών σε κάθε θέση του κυλίνδρου, με βάση το χρόνο t , ο οποίος αυξάνεται κατά dt σε κάθε μετακίνηση a των ινών:

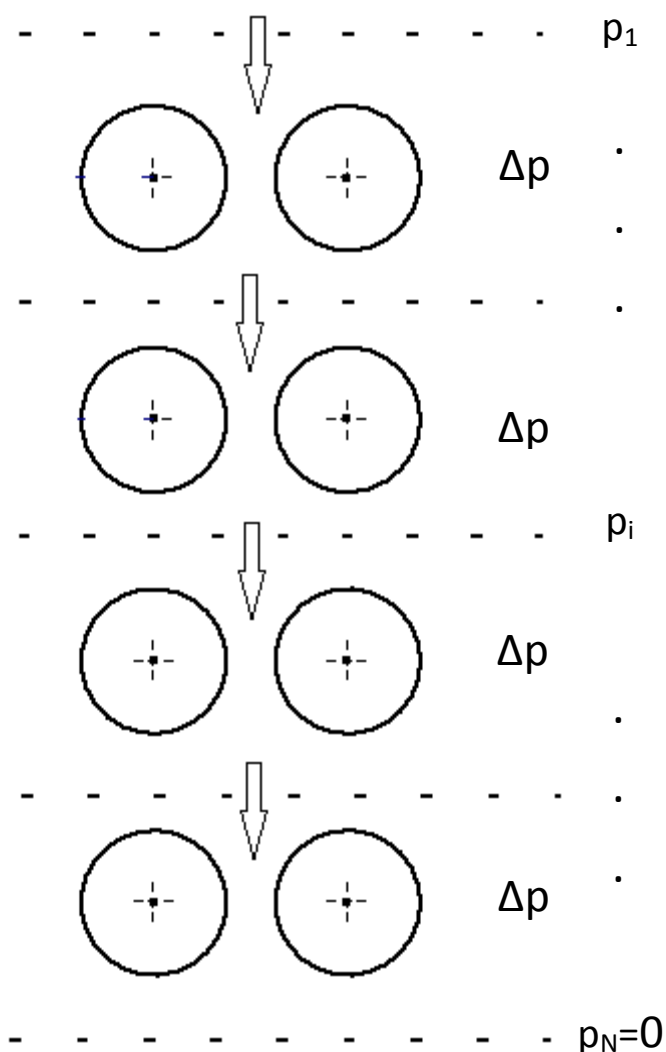
$$d_y = u_m t \quad (4.23)$$

- Αθροίζοντας τα d_y , προκύπτει το συνολικό βάθος εμποτισμού y_{impreg} .
- Τελικά, ο αριθμός των ινών που διαποτίστηκαν είναι:

$$N = \frac{y_{impreg}}{d} \quad (4.24)$$

4.4.2 Υπολογισμός της πίεσης του ρευστού

Στην προηγούμενη παράγραφο, υπολογίστηκε το βάθος εμποτισμού των ινών σε κάθε διαμέριση του μήκους διεργασίας. Το ρευστό ωθείται να διέλθει μέσα από το φύλλο των ανθρακονημάτων εξαιτίας της πίεσης που του επιβάλλει ο κινούμενος κύλινδρος. Η πίεση αυτή, σε κάθε διαμοίραση, είναι μέγιστη στη θέση πριν τις ίνες (p_1 – θέση (1)) και μειώνεται μέχρις ότου το πολυμερές να φτάσει στο υπολογισμένο βάθος, όπου και μηδενίζεται ($p_2=0$ – θέση (2)).



Σχήμα 4.6 Υπολογισμός πίεσης του ρευστού κατά τον εμποτισμό

Ο τρόπος με τον οποίο η πίεση μειώνεται κάθε φορά που το ρευστό περνά από ένα στρώμα ινών προσομοιάζει με τις απώλειες πίεσης ενός ρευστού όταν διέρχεται μέσω μίας σωλήνωσης:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho \zeta_1 u_1^2 + \frac{1}{2} \rho \zeta_2 u_2^2 \quad (4.25)$$

όπου u_1, u_2 οι ταχύτητες εισόδου και εξόδου στη σωλήνωση και ζ_1, ζ_2 οι συντελεστές απώλειων εισόδου και εξόδου της ροής, με $\zeta_2=1$.

Ομοίως, για κάθε στρώμα ινών, ισχύει:

$$p_i - p_{i+1} = \frac{1}{2} \rho \zeta u_i^2 + \frac{1}{2} \rho u_{i+1}^2 \quad (4.26)$$

όπου $i, i+1$ οι θέσεις πριν και μετά τις ίνες.

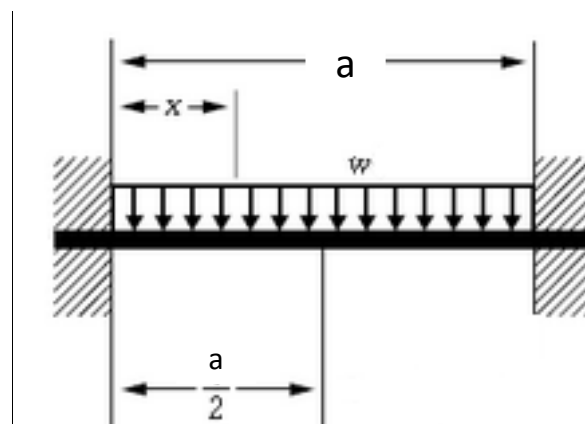
Τελικά, για N στρώματα ινών, οι ανωτέρω διαφορές πίεσης αθροίζονται και, θέτοντας για το πρώτο στρώμα $p_i = p_1$, για το τελευταίο $p_N = p_2 = 0$, και $\zeta_1 = c_d$, προκύπτει η εξής σχέση υπολογισμού της p_i :

$$p_1 = N\left(\frac{1}{2}\rho c_d u_1^2 + \frac{1}{2}\rho u_2^2\right) \quad (4.27)$$

4.4.3 Έλεγχος αντοχής των ινών στην ασκούμενη από το ρευστό πίεση

Η πίεση του ρευστού που απέκτησε κατά τη διάρκεια της διεργασίας είναι μέγιστη στη θέση 1, δηλαδή το πρώτο στρώμα των ινών δέχεται το μεγαλύτερο φορτίο. Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαίο να γίνει έλεγχος της αντοχής των ινών στην ασκούμενη πίεση.

Οι ίνες είναι προσανατολισμένες σε δύο διαστάσεις (0° - 90° fabric), συνεπώς η διάταξη των ινών είναι όπως στο Σχήμα 4.2. Εξετάζεται λοιπόν η αντοχή των ινών του πρώτου στρώματος του υφάσματος που εδράζεται στις ίνες του δεύτερου στρώματος στο χαρακτηριστικό μήκος της απόστασης a . Οι εδράσεις θεωρούνται πακτώσεις, οπότε το πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως αμφίπακτη δοκός υπό κατανεμημένο φορτίο στην επιφάνειά της.



Σχήμα 4.7 Μοντελοποίηση προβλήματος κάμψης της ίνας

- Το φορτίο προκαλεί βέλος κάμψης στην ίνα, το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση $M(x) = -EI \frac{d^2z}{dx^2}$, ενώ η διάτμηση δε λαμβάνεται υπόψη. Η ροπή αδράνειας της διατομής της ίνας είναι

$$I = \pi \frac{(d/2)^4}{4} \quad (4.28)$$

- Η σχέση της ροπής κάμψης ως προς το μήκος είναι:

$$M(x) = \frac{W}{12} (6ax - a^2 - 6x^2) \quad (4.29)$$

όπου w το κατανεμημένο φορτίο που επιβάλλει η πίεση του ρευστού.

- Το κατανεμημένο φορτίο ισούται με

$$w = p_1 A \quad (4.29)$$

όπου A η μισή επιφάνεια της ίνας. Συνεπώς

$$w = p_1 \frac{(2\pi r/2)a}{2} = p_1 \frac{\pi da}{2} \quad (4.30)$$

- Προκύπτει η σχέση που υπολογίζει το βέλος κάμψης είναι:

$$z = \frac{wx^2}{24EI} (a - x)^2 \quad (4.31)$$

- Το μέγιστο βέλος κάμψης προκαλείται στο κέντρο της δοκού, το οποίο ισούται με

$$z_{max} = z(x = \frac{a}{2}) = \frac{wa^4}{384EI} \quad (4.32)$$

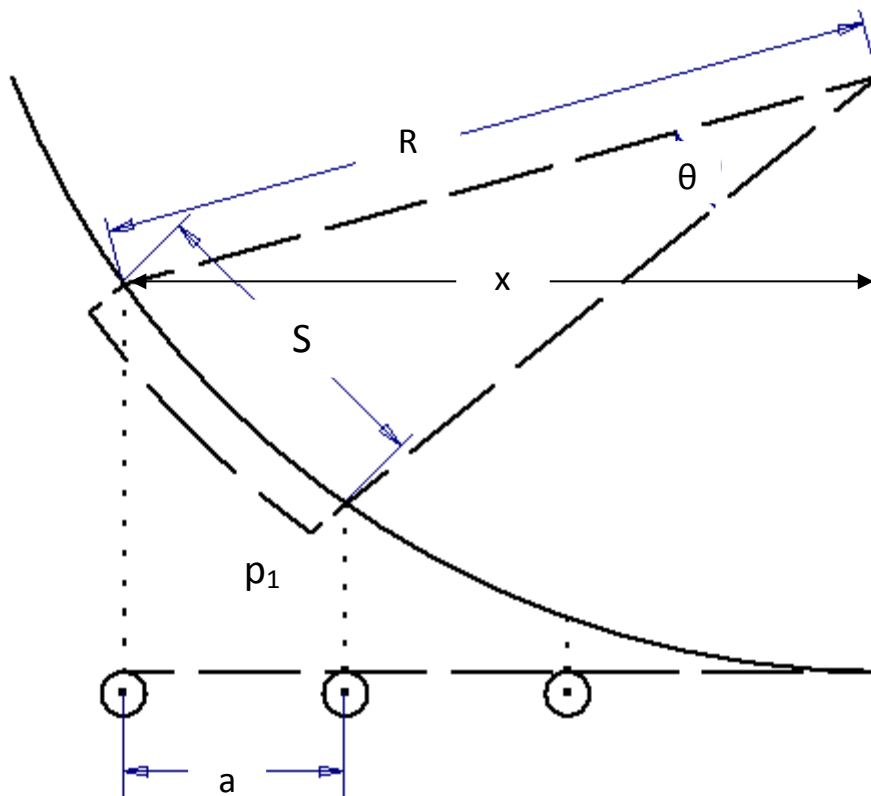
- Η μέγιστη ροπή ασκείται στα σημεία όπου εδράζεται η ίνα και ισούται με

$$M_{max}(x = 0, a) = \frac{wa^2}{12} \quad (4.33)$$

- Τελικά, η μέγιστη τάση λόγω κάμψης στην ίνα είναι

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} \frac{d}{2}}{I} \quad (4.34)$$

η οποία πρέπει να είναι μικρότερη του όριου θραύσης των ίνων (ultimate tensile strength-UTS).



Σχήμα 4.8 Υπολογισμός απαιτήσεων ροπής στους κυλίνδρους

4.4.4. Υπολογισμός απαιτήσεων ροπής στους κυλίνδρους

Η ασκούμενη δύναμη από το ρευστό στον κύλινδρο είναι, λόγω του 3^{ου} νόμου του Νεύτωνα, ίση και αντίθετη, κατά μέτρο και φορά, με τη δύναμη που ασκεί ο κύλινδρος στο ρευστό και είναι κάθετη στην επιφάνεια του

κυλίνδρου. Η ζητούμενη δύναμη θα υπολογιστεί με βάση την πίεση p_1 που μετρήθηκε ανωτέρω, η οποία, σε κάθε διαμέριση i του μήκους διεργασίας, είναι:

$$F = p_1 A \quad (4.35)$$

όπου A το εμβαδό του κυλινδρικού τομέα του κυλίνδρου, το οποίο ισούται με $R\theta z$, με θ τη γωνία που μετρήθηκε προηγουμένως, και z το πλάτος το οποίο επιλέγεται ίσο με δύο φορές τη διάμετρο του κυλίνδρου, δηλαδή

$$z = 4R \quad (4.36)$$

Η δύναμη αυτή ασκείται στον κύλινδρο υπό γωνία θ'

$$\theta' = \theta_1 + \frac{\theta}{2} \quad (4.36)$$

Τελικά, η δυναμική προκύπτει ίση με

$$F = 4p_1 \theta^2 \quad (4.37)$$

Με βάση τη γωνία θ' , προκύπτουν οι συνιστώσες της δύναμης F :

$$F_x = F \cos \theta' \quad (4.38)$$

$$F_y = F \sin \theta' \quad (4.39)$$

Οι απαιτήσεις του κυλίνδρου σε ροπή ως προς τους άξονες X και Y είναι το γινόμενο της αντίστοιχης συνιστώσας της δύναμης επί την κάθετη απόσταση του σημείου στο οποίο ασκείται η δύναμη από τον ουδέτερο άξονα του κυλίνδρου. Οι συνιστώσες της ροπής μεγιστοποιούνται όταν η γωνία θ γίνει μέγιστη, ενώ η κάθετη απόσταση ισούται με το μήκος διεργασίας. Συνεπώς, οι εκφράσεις των μέγιστων συνιστωσών της ροπής είναι:

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

$$M_{x_{max}} = F_{x_{max}}x \quad (4.40)$$

$$M_{y_{max}} = F_{y_{max}}x \quad (4.41)$$

5. Ανάλυση της ροής σε σύστημα με οδοντωτούς κυλίνδρους διπλής ημιτονοειδούς κατατομής

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπολογίστηκαν όλα τα γεωμετρικά και ρευστομηχανικά μεγέθη της ροής του πολυμερούς ανάμεσα στις ίνες του φύλλου άνθρακα για σύστημα με απλούς κυλίνδρους. Στο παρόν κεφάλαιο, θα γίνει εκ νέου υπολογισμός των ανωτέρω μεγεθών για το σύστημα των οδοντωτών κυλίνδρων.

Στο σύστημα αυτό, το ύφασμα των ινών κινείται με σταθερή γραμμική ταχύτητα οι ίνες συνεχίζουν να παραμένουν ισοδιατεταγμένες με απόσταση a μεταξύ των κεντρών τους, μέχρι να φτάσουν στο χώρο διεργασίας κυλίνδρων και ινών. Τότε, οι ίνες εφάπτονται πάνω στην ημιτονοειδή επιφάνεια των κυλίνδρων. Οι κύλινδροι κινούνται και οι δύο με την ίδια γραμμική ταχύτητα με αυτή των ινών, προκειμένου στο σημείο επαφής τους να μην προκαλείται μεταφορά ισχύος μεταξύ τους, αλλά και προς τις ίνες, γεγονός που θα μπορούσε να τις οδηγήσει σε αστοχία. Αποτέλεσμα των ανωτέρω είναι να επιτυγχάνεται ο μικροδιαχωρισμός των ινών, να μεγαλώνει, δηλαδή, η απόσταση μεταξύ των κεντρών τους, γεγονός που ευνοεί τον εμποτισμό τους από το πολυμερές.

5.1. Αρχικές συνθήκες

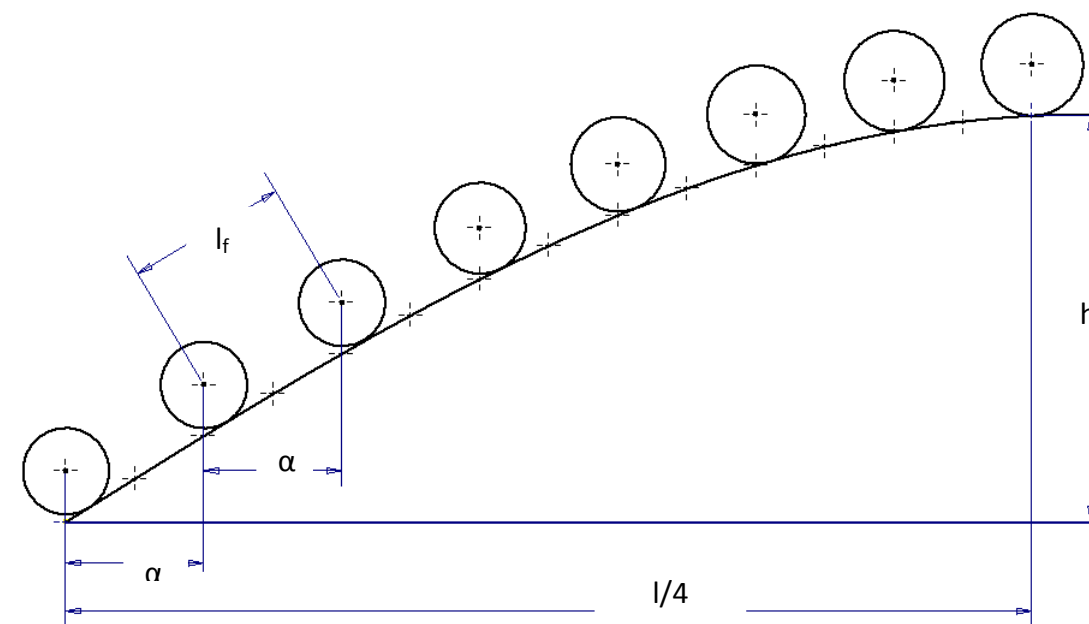
Στη νέα περίπτωση που εξετάζεται, ορισμένες συνθήκες παραμένουν ίδιες με την προηγούμενη περίπτωση. Αυτές αφορούν:

- Τα χαρακτηριστικά του φύλλου άνθρακα, δηλαδή την διάμετρο των ινών, την πραγματική πυκνότητά τους, καθώς και τη φαινόμενη πυκνότητα του υφάσματος. Επίσης, μελετάται η ροή του ίδιου πολυμερούς. Συνεπώς, και η οριζόντια απόσταση μεταξύ των ινών a θα είναι σταθερή.
- Επιπλέον, για λόγους απλότητας, η ανάλυση θα γίνει για σταθερή γραμμική ταχύτητα των ανθρακονημάτων και του αρχικού κύκλου των οδοντωτών κυλίνδρων, ο οποίος έχει την ίδια ακτίνα με την ακτίνα των κανονικών κυλίνδρων.
- Τέλος, ο συντελεστής αντίστασης της ροής μεταξύ των ινών λαμβάνεται ίσος με την προηγούμενη περίπτωση.

Τα υπόλοιπα μεγέθη υπολογίζονται σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία, προϋποθέτοντας το βήμα και το ύψος κεφαλής του οδόντα.

5.1.1. Υπολογισμός της νέας απόστασης μεταξύ των ινών

Όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα, οι ίνες, φτάνοντας στο χώρο διέργασίας, τοποθετούνται εφαπτομενικά πάνω στη διπλή ημιτονοειδή κατατομή του κυλίνδρου, με συνέπεια να αλλάζει η απόσταση μεταξύ των κεντρών τους. Στο χώρο διεργασίας, θεωρείται ότι η κατατομή του κυλίνδρου είναι ίδια με την κατατομή του κοπτικού κανόνα από τον οποίο παρήχθη ο κύλινδρος. Άρα, ουσιαστικά, οι ίνες είναι παρατεταγμένες πάνω σε μια καμπύλη της μορφής της Εξίσωσης (3.12).



Σχήμα 5.1 Διάταξη ινών πάνω στην ημιτονοειδή κατατομή

Για λόγους πληρότητας, αναφέρεται ότι οι ίνες τοποθετούνται και επί της καμπύλης

$$y = h \sin \frac{2\pi}{l} z$$

Ωστόσο, λόγω της συμμετρίας των κατατομών, η ανάλυση κατά τον άξονα z είναι ίδια με αυτή κατά τον x . Για τον υπολογισμό της νέας απόστασης των ινών μεταξύ τους ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Οι ίνες που βρίσκονται πάνω στην καμπύλη του ημιτόνου ισαπέχουν μεταξύ τους κατά α ως προς τον άξονα x . Επιπλέον, σε κάθε ζεύγος ινών, σχηματίζεται ένα ορθογώνιο τρίγωνο με υποτείνουσα τη νέα απόσταση των κεντρών τους l_f , το άθροισμα των οποίων ισούται με το μήκος της καμπύλης του ημιτόνου, δηλαδή:

$$\sum l_f = \int_0^l \sqrt{1 + \left(h \sin \frac{2\pi}{l} x\right)'} dx = \int_0^l \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 h^2}{l^2} \cos^2 \left(\frac{2\pi}{l} x\right)} dx$$

Άρα

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

$$\sum l_f = \int_0^l \sqrt{1 + k^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{l}x\right)} dx \quad (5.1)$$

Όπου

$$k = \frac{4\pi^2 h^2}{l^2} \quad (5.2)$$

- Κάνοντας την αλλαγή μεταβλητής $u = \frac{2\pi}{l}x$ η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$\begin{aligned} \sum l_f &= \frac{l}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{1 + k^2 \cos^2(u)} du = \frac{l}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{1 + k^2(1 - \sin^2(u))} du = \\ &= \frac{l}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{(1 + k^2) - k^2 \sin^2(u)} du \end{aligned} \quad (5.3)$$

- Επειδή το ημίτονο μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα ίσα τόξα, προκύπτει:

$$\begin{aligned} \sum l_f &= \frac{2l}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sqrt{(1 + k^2) - k^2 \sin^2(u)} du = \\ &= \frac{2l\sqrt{1 + k^2}}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \frac{k^2}{1 + k^2} \sin^2(u)} du \end{aligned} \quad (5.4)$$

- Το τελευταίο ολοκλήρωμα είναι το ελλειπτικό ολοκλήρωμα κλειστού τύπου δευτέρου είδους

$$E(m) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - m^2 \sin^2(u)} du \quad (5.5)$$

Όπου,

$$m = \frac{k^2}{1 + k^2} \quad (5.6)$$

Συνεπώς, προκύπτει

$$\sum l_f = \frac{2l\sqrt{1+k^2}}{\pi} E\left(\frac{k^2}{1+k^2}\right) \quad (5.7)$$

Επιλύοντας την προηγούμενη σχέση για δεδομένα μήκη και πλάτη του κύματος του ημιτόνου, λαμβάνεται το μήκος της καμπύλης.

- Σε ένα μήκος κύματος l , βρίσκονται N ίνες που ισαπέχουν κατά a στον άξονα των x . Άρα,

$$N = \frac{l}{a} \quad (5.8)$$

- Τελικά η μέση νέα απόσταση μεταξύ των ινών ισούται:

$$\bar{l}_f = \frac{\sum l_f}{N} \quad (5.9)$$

5.2. Υπολογισμός των υπολοίπων μεγεθών της ροής

Έχοντας υπολογίσει το νέο μέσο διάκενο μεταξύ των ινών, για τον υπολογισμό όλων των υπολοίπων γεωμετρικών, κινηματικών και ρευστομηχανικών μεγεθών της ροής για το σύστημα των οδοντωτών ραούλων, ακολουθούνται τα ίδια βήματα με την περίπτωση για κανονικούς κυλίνδρους, με μόνη διαφοροποίηση την αντικατάσταση της απόστασης a μεταξύ των ινών από τη νέα απόσταση \bar{l}_f που προέκυψε εξαιτίας του μικροδιαχωρισμού τους.

Τα βήματα, λοιπόν, είναι τα ακόλουθα:

- Το νέο μήκος διεργασίας είναι:

$$R - \sqrt{R^2 - x_{sin}^2} = 0,2294 \frac{x_{sin}}{\bar{l}_f} (\bar{l}_f - d) \quad (5.10)$$

- Η ανάλυση βασίζεται στη στιγμιαία μετακίνηση ινών και κυλίνδρων σε κάθε χρονικό βήμα dt_{sin} και συνολικό χρόνο το χρόνο διεργασίας $t_{proc_{sin}}$, η οποία είναι σταθερή καθώς η γραμμική ταχύτητα παραμένει σταθερή και είναι ίση με την απόσταση μεταξύ δύο ινών. Άρα, το πρόβλημα μπορεί να μελετηθεί με βήμα τις χωρικές διαμοιράσεις, οι οποίες είναι:

$$dx_{sin} = \frac{\text{μήκος διεργασίας}}{\text{απόσταση ινών}} = \frac{\bar{l}_f}{a} \quad (5.11)$$

- Η γωνία που σχηματίζεται απέναντι από το μήκος x_{sin} τη χρονική στιγμή $t=0$ είναι:

$$\theta_{0sin} = \arcsin \frac{x_{sin}}{\bar{l}_f} \quad (5.12)$$

- Την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή το φύλλο έχει μετακινηθεί κατά \bar{l}_f , άρα η σχηματιζόμενη γωνία είναι:

$$\theta_{1sin} = \arcsin \frac{x_{sin} - \bar{l}_f}{\bar{l}_f} \quad (5.13)$$

- Κατά συνέπεια, ο κύλινδρος έχει μετακινηθεί γωνιακά κατά:

$$\theta_{sin} = \theta_{0sin} - \theta_{1sin} \quad (5.14)$$

- Η ταχύτητα που αποκτά το ρευστό είναι ίση με την κάθετη συνιστώσα της γραμμικής ταχύτητας του ραούλου u :

$$u_{1sin} = u \sin \theta_{sin} \quad (5.15)$$

- Σύμφωνα με την αρχή της διατήρησης της παροχής, η ταχύτητα με την οποία το ρευστό διαπερνά μέσα από τις ίνες ισούται με:

$$u_{1sin} \bar{l}_f = u_{2sin} (\bar{l}_f - d) \Rightarrow u_{2sin} = u_{1sin} \frac{\bar{l}_f}{\bar{l}_f - d} \quad (5.16)$$

- Συνεπώς, η μέση ταχύτητα του ρευστού με την οποία διαβρέχει το φύλλο των ανθρακονημάτων είναι:

$$u_{msin} = \frac{u_{1sin} + u_{2sin}}{2} \quad (5.17)$$

Η επαναληπτική διαδικασία πραγματοποιείται μέχρι την πλήρωση των χωρικών ή χρονικών βημάτων και υπολογίζεται η ταχύτητα διαβροχής των ινών από το ρευστό.

- Στη συνέχεια, υπολογίζεται το βάθος εμποτισμού των ινών σε κάθε θέση του κυλίνδρου, με βάση το χρόνο t_{sin} , ο οποίος αυξάνεται κατά dt_{sin} σε κάθε μετακίνηση a των ινών:

$$d_{y_{sin}} = u_{msin} t_{sin} \quad (5.18)$$

- Αθροίζοντας τα $d_{y_{sin}}$, προκύπτει το συνολικό βάθος εμποτισμού $y_{impreg_{sin}}$.
- Τελικά, ο αριθμός των ινών που διαποτίστηκαν είναι:

$$N_{sin} = \frac{y_{impreg_{sin}}}{d} \quad (5.19)$$

- Ομοίως υπολογίζεται και η ασκούμενη πίεση από το πολυμερές στις ίνες:

$$p_{1sin} = N_{sin} \left(\frac{1}{2} \rho c_d u_{1sin}^2 + \frac{1}{2} \rho u_{2sin}^2 \right) \quad (5.20)$$

- Η μέγιστη ροπή που ασκείται στις ίνες από την πίεση του ρευστού ισούται με

$$M_{max_{sin}} = \frac{w \bar{l}_f^2}{12} \quad (5.21)$$

όπου

$$w = p_{1sin} \frac{(2\pi r/2)\bar{l}_f}{2} = p_{1sin} \frac{\pi d\bar{l}_f}{2} \quad (5.22)$$

ενώ το μέγιστο βέλος κάμψης είναι

$$z_{maxsin} = \frac{w\bar{l}_f^2}{384EI} \quad (5.23)$$

- Η μέγιστη τάση λόγω κάμψης στην ίνα είναι

$$\sigma_{maxsin} = \frac{M_{maxsin} \frac{d}{2}}{I} \quad (5.24)$$

- Η ασκούμενη δύναμη από το ρευστό στον οδοντωτό κύλινδρο ισούται με

$$F_{sin} = 4p_{1sin} \theta_{sin}^2 \quad (5.25)$$

- Η δύναμη αυτή ασκείται στον κύλινδρο υπό γωνία

$$\theta'_{sin} = \theta_{1sin} + \frac{\theta_{sin}}{2} \quad (5.26)$$

- Με βάση τη γωνία θ'_{sin} , προκύπτουν οι συνιστώσες της δύναμης F_{sin} :

$$F_{xsin} = F_{sin} \cos \theta'_{sin} \quad (5.27)$$

$$F_{ysin} = F_{sin} \sin \theta'_{sin} \quad (5.28)$$

- Τέλος, οι απαιτήσεις του κυλίνδρου σε ροπή είναι:

$$M_{xsinmax} = F_{xsinmax} x_{sin} \quad (5.29)$$

$$M_{ysinmax} = F_{ysinmax} x_{sin} \quad (5.30)$$

6. Αριθμητικά αποτελέσματα της ανάλυσης

6.1.Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει αριθμητική εφαρμογή της ανάλυσης που παρουσιάστηκε εκτενώς στα προηγούμενα κεφάλαια. Πρωτίστως, θα προκαθοριστούν οι αρχικές (σταθερές και μεταβαλλόμενες) συνθήκες της ανάλυσης, στη συνέχεια θα παρατεθούν τα αριθμητικά αποτελέσματα και, τέλος, θα γίνει σύγκριση της αποτελεσματικότητας των δύο εξεταζόμενων μεθόδων.

6.2.Αρχικές συνθήκες

Οι σταθερές ποσότητες της ανάλυσης αφορούν τα χαρακτηριστικά του φύλλου ινών και του πολυμερούς, τη γραμμική ταχύτητα της διεργασίας. Επιπλέον, καθ'ότι η ανάλυση προϋποθέτει πως η ακτίνα των απλών κυλίνδρων είναι ίση με αυτή του αρχικού κύκλου των οδοντωτών κυλίνδρων, προδιαγράφεται ο αριθμός των οδόντων που υπάρχουν στην περιφέρεια των κυλίνδρων για κάθε μήκος κύματος κατά την έννοια του μήκους του κυλίνδρου.

Οι παράμετροι ευαισθησίας του προβλήματος αφορούν το βήμα και το ύψος κεφαλής του οδόντα. Συγκεκριμένα, έχουν υποτεθεί πέντε διαφορετικές τιμές του μήκους κύματος, ενώ σε κάθε διαδικασία επίλυσης προκαταβάλλεται μια τιμή του ύψους. Οι τιμές του ύψους κεφαλής

προκύπτουν από την ανάλυση που παρουσιάζεται στην Παράγραφο. Από τα διάφορα μήκη του κύματος και τον αριθμό των οδόντων, προκύπτουν οι κοινές ακτίνες των απλών και των οδοντωτών κυλίνδρων.

Αναλυτικά, οι αρχικές συνθήκες της ανάλυσης είναι οι εξής:

- Το ύφασμα του ενισχυτικού υλικού είναι το ύφασμα ανθρακονημάτων T300-3K της Toray, ενώ το υλικό της μήτρας είναι μια εποξεική ρητίνη, με πυκνότητα ίση με 1.3 g/cm^3 . Οι ιδιότητες του υφάσματος παρατίθενται στον Πίνακα.

Μηχανικές Ιδιότητες Ινών Άνθρακα	Τιμές
Όριο θράυσης (MPa)	3530
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	230
Μεγιστη παραμόρφωση (%)	1.5%
Πυκνότητα ινών (g/cm^3)	1.76
Φαινόμενη πυκνότητα υφάσματος(g/cm^3)	0.6
Διάμετρος ινών (μm)	7.0
Πάχος υφάσματος (mm)	0.25

Πίνακας 6.1 Μηχανικές ιδιότητες ινών άνθρακα

- Η γραμμική ταχύτητα της διεργασίας είναι $u = 1 \text{ m/s}$.
- Ο αριθμός των οδόντων είναι $Z = 20$.
- Τα βήματα της κατατομής l (mm) ισούνται
 $l = [8,12,15,20,25]$
- Από την Εξίσωση (4.3), προκύπτει η τιμή της οριζόντιας απόστασης μεταξύ των κέντρων των ινών:

$$a = 10.625 \mu\text{m}$$

- Οι ακτίνες που προκύπτουν με βάση την τιμή του βήματος, σύμφωνα με την Εξίσωση (3.13), είναι:

l (mm)	8	12	15	20	25
R (mm)	25.465	38.197	47.745	63.662	79.578

- Τέλος, για την εκλογή του συντελεστή αντίστασης της ροής του ρευστού γύρω από τις ίνες, λαμβάνεται μια τιμή της ακτίνας των κυλίνδρων και ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφει στην Παράγραφο. Συνεπώς, για $R = 63.662 \text{ mm} \Rightarrow C_d = 6 * 10^{10}$.

6.2.1. Επιλογή τιμών για τα ύψη κεφαλής του οδόντα

Οι ίνες, κατά τη φάση της διεργασίας τους από τους οδοντωτούς κυλίνδρους, καθ'ότι είναι εύκαμπτοι φορείς, ουσιαστικά αποκτούν το σχήμα της ημιτονοειδούς κατατομής των κυλίνδρων, καθόλο το μήκος τους. Λόγω του γεγονότος αυτού, στα σημεία μέγιστης καμπυλότητας του οδόντα, δηλαδή στα σημεία όπου $|\sin(x)| = 1$, οι ίνες παραμορφώνονται τόσο ώστε να ελλοχεύει ο κίνδυνος να αστοχήσουν. Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαία η πραγματοποίηση μιας ανάλυσης που θα δείξει τα επιτρεπτά και μη επιτρεπτά ζεύγη τιμών βήματος και ύψους της κατατομής και, μέσω αυτής, θα επιλεγούν οι τελικές τιμές του ύψους.

- Η ακτίνα καμπυλότητας για ένα σημείο όπου εμφανίζεται ακρότατο (λ.χ. $x = l/4$) προκύπτει από τη σχέση

$$R_{curv} = \frac{(1 + y'^2)^{3/2}}{|y''|} \xrightarrow{y=h \sin \frac{2\pi x}{l}} R_{curv} = \frac{l^2 \left[\frac{4\pi^2 h^2}{l^2} \cos^2 \left(\frac{2\pi x}{l} \right) + 1 \right]^{3/2}}{\left| -4\pi^2 h \sin \left(\frac{2\pi x}{l} \right) \right|} \xrightarrow{x=l/4} \Rightarrow R_{curv} = \frac{l^2}{4\pi^2 h} \quad (6.1)$$

- Το μήκος τόξου της μέσης γραμμής της ίνας είναι

$$L_0 = \theta \left(R_{curv} + \frac{d}{2} \right) \quad (6.2)$$

όπου d η διάμετρος της ίνας.

- Αντίστοιχα, η άνω και η κάτω ίνα της κάθε ίνας έχουν μήκη τόξου

$$L_{\xi} = \theta (R_{curv} + d) \quad (6.3)$$

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

$$L_{\varepsilon\sigma} = \theta R_{curv} \quad (6.4)$$

- Η άνω ίνα εφελκύεται και η παραμόρφωση της είναι:

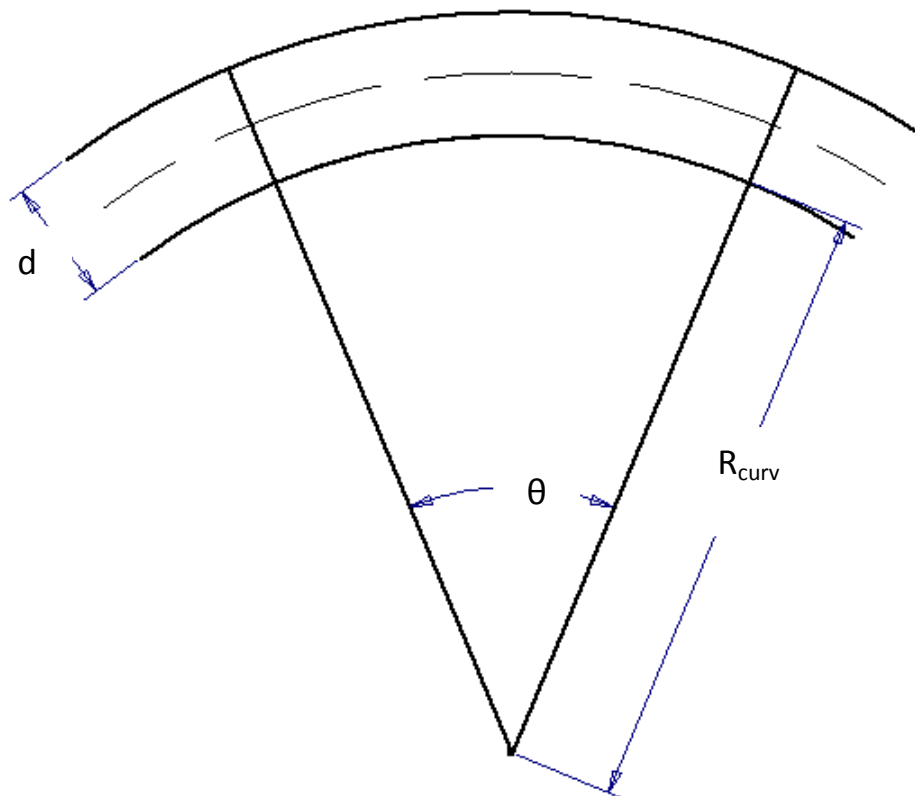
$$\varepsilon_{\varepsilon\xi} = \frac{L_{\varepsilon\xi} - L_0}{L_0} = \frac{\theta(R_{curv} + d) - \theta(R_{curv} + d/2)}{\theta(R_{curv} + d/2)} = \frac{d}{2R_{curv} + d} \quad (6.5)$$

Επίσης, η κάτω ίνα θλίβεται και η παραμόρφωση της είναι:

$$\varepsilon_{\varepsilon\sigma} = \frac{L_{\varepsilon\sigma} - L_0}{L_0} = \frac{\theta(R_{curv} + d) - \theta R_{curv}}{\theta(R_{curv} + d/2)} = \frac{d}{2R_{curv} + d} \quad (6.6)$$

Προκύπτει, δηλαδή,

$$\varepsilon_{\varepsilon\xi} = \varepsilon_{\varepsilon\sigma} = \varepsilon$$



Σχήμα 6.1 Υπολογισμός παραμόρφωσης της ίνας στο σημείο μέγιστης καμπυλότητας του οδόντα

- Η τάση που αναπτύσσεται στην ίνα ισούται με

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{Ed}{2R_{curv} + d} = \frac{Ed}{\frac{l^2}{2\pi^2h} + d} \quad (6.7)$$

η οποία θεωρείται ίση με το όριο θραύσης των ινών, προκειμένου να υπολογιστεί μια σχέση επιτρεπτών ζευγών τιμών βήματος και ύψους κεφαλής του οδόντα.

- Αντικαθιστώντας από τον Πίνακα τις μηχανικές ιδιότητες των ινών, προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$h = 112.81l^2 \text{ (m)} \quad (6.8)$$

Τα μέγιστα επιτρεπτά ύψη για κάθε τιμή του l είναι:

l (mm)	8	12	15	20	25
h_{max} (mm)	7.22	16.24	25.38	45.13	70.5

Ωστόσο, η κατασκευή των κυλίνδρων των οποίων η κατατομή έχει τόσο μεγάλα ύψη κεφαλής είναι πολύ δύσκολη. Για το λόγο αυτό, τα ύψη επιλέγονται ίσα με 0.8, 1, 1.5, 2, 2.5 (mm).

6.3.Αριθμητικά Αποτελέσματα

Έχοντας εκλέξει στην προηγούμενη Παράγραφο όλες τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος, ακολουθεί η παράθεση των αποτελεσμάτων για τις δύο περιπτώσεις κανονικών και οδοντωτών κυλίνδρων.

Εξαιτίας του γεγονότος ότι οι κύλινδροι είναι πανομοιότυποι, και οι δύο διεργάζονται καθ'ίδιο τρόπο τις ίνες, δηλαδή το πρόβλημα είναι συμμετρικό ως προς τον οριζόντιο άξονα που διέρχεται από το μέσο του υφάσματος. Για το λόγο αυτό, τα ακόλουθα αποτελέσματα αφορούν τη μία μεριά του υφάσματος των ινών, δηλαδή τη διεργασία από τον ένα κύλινδρο.

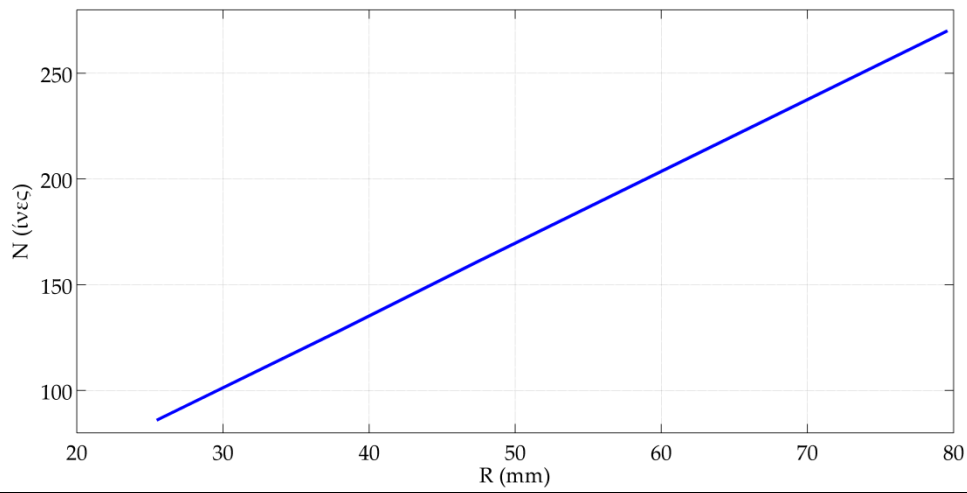
6.3.1 Κανονικοί κύλινδροι

Με βάση τα αποτελέσματα του ανωτέρω πίνακα, αλλά και τα ακόλουθα διαγράμματα, η αύξηση του μήκους κύματος του ημιτόνου, που, στην περίπτωση των κανονικών κυλίνδρων, μεταβάλλει μόνο την ακτίνα τους, προκαλεί ανάλογη αύξηση του μήκους και του χρόνου διεργασίας και των εμποτιζόμενων ινών και, κατά συνέπεια, βελτιώνει τον εμποτισμό των ινών. Την ίδια στιγμή, η πίεση που αποκτά το ρευστό κατά την είσοδό του στο ύφασμα, άρα και η τάση λόγω της κάμψης των ινών και οι αναπτυσσόμενες ροπές στους κυλίνδρους μειώνονται με την αύξηση του μήκους κύματος. Ειδικότερα, η τάση στις ίνες σε κάθε μήκος κύματος παραμένει σημαντικά μικρότερη του ορίου θραύσης των ινών, ενώ το βέλος κάμψης που προκαλείται είναι ανεπαίσθητο. Επιπλέον, οι απαιτήσεις σε ροπή είναι πολύ χαμηλότερες της ροπής που μπορούν οι βιομηχανικοί κύλινδροι να ανταπεξέλθουν.

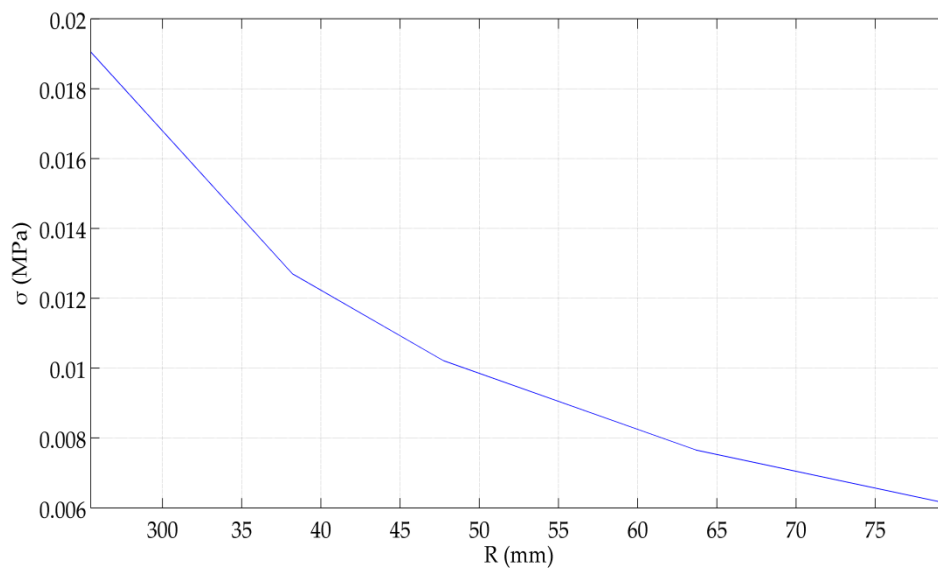
I(mm)	8.0	12.0	15.0	20.0	25.0
R(mm)	25.465	38.197	47.745	63.662	79.578
a(μm)	10.625	10.625	10.625	10.625	10.625
x_{proc}(mm)	3.962	5.943	7.429	9.905	12.381
t_{proc}(s)	0.0198	0.0297	0.0371	0.0495	0.0619
y_{impreg}(mm)	0.6025	0.9078	1.136	1.515	1.894
N(ίνες)	86	129	162	216	270
p_{1,max} (GPa)	0.584	0.389	0.313	0.235	0.188
σ_{max}(MPa)	0.019	0.013	0.01	0.008	0.006
z_{max}(μm)	8.3E-8	5.6E-8	4.5E-8	3.3E-8	2.7E-8
M_{xmax} (Nm)	76.40	33.96	21.83	12.28	7.860
M_{ymax} (Nm)	1.76	0.789	0.505	0.285	0.182

Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα ανάλυσης για κανονικούς κυλίνδρους

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

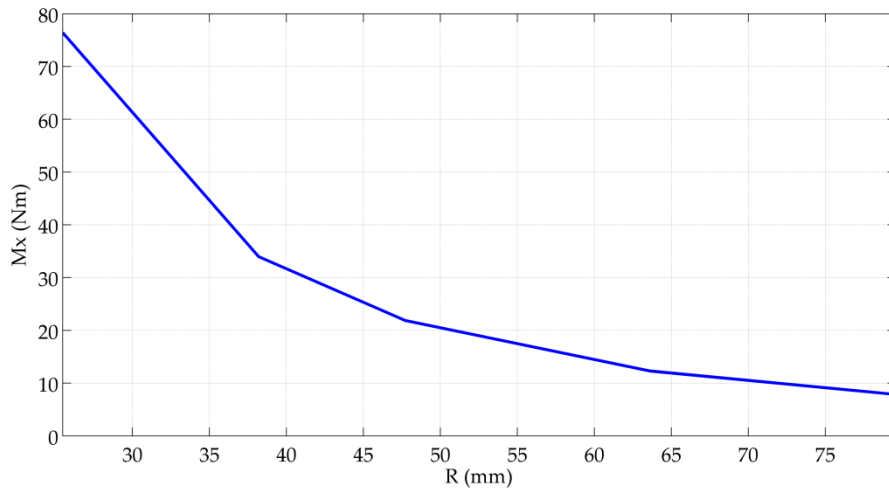


Σχήμα 6.2 Αριθμός εμποτισμένων ινών ως προς την ακτίνα

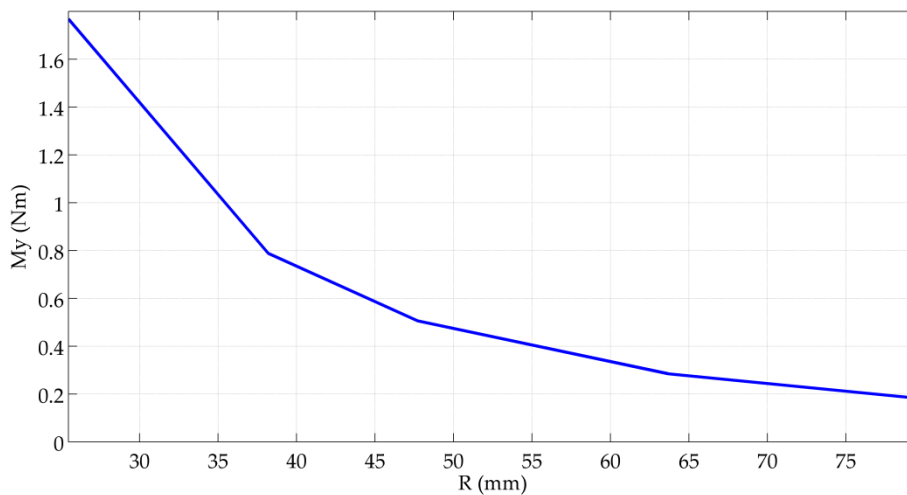


Σχήμα 6.3 Αναπτυσσόμενη τάση στις ίνες ως προς την ακτίνα

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμπότισμό ινωδών υλικών



Σχήμα 6.4 Αναπτυσσόμενη ροπή στον κύλινδρο κατά τον άξονα Χ ως προς την ακτίνα



Σχήμα 6.5 Αναπτυσσόμενη ροπή στον κύλινδρο κατά τον άξονα Υ ως προς την ακτίνα

6.3.2. Οδοντωτοί κύλινδροι

Όπως προκύπτει από τους Πίνακες που ακολουθούν, για κάθε τιμή του ύψους κεφαλής του οδόντα, η αύξηση του μήκους κύματος, παρά το ότι προκαλεί μείωση του νέου διακένου μεταξύ των ινών, προκαλεί μεγάλη αύξηση του μήκους διέργασιας, με αποτέλεσμα όλα τα παραγόμενα μεγέθη να είναι ανάλογα της περίπτωσης των κανονικών κυλίνδρων.

Παράλληλα, η αύξηση του μήκους κύματος οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές όλων των μεγεθών. Παρόλα αυτά, οι τιμές της αναπτυσσόμενης τάσης, καθώς και του βέλους κάμψης στις ίνες παραμένουν πολύ χαμηλότερες από τις μέγιστες επιτρεπτές. Τα ανωτέρω αποτυπώνονται γραφικά στα επόμενα διαγράμματα.

l(mm)	8.0	12.0	15.0	20.0	25.0
R(mm)	25.47	38.19	47.75	63.66	79.58
l_f(μm)	11.61	11.08	10.92	10.79	10.73
x_{proc}(mm)	4.599	6.405	7.808	10.19	12.62
t_{proc}(s)	0.0229	0.0320	0.0390	0.0509	0.0630
y_{impreg}(mm)	0.7301	0.9978	1.209	1.569	1.939
N(ίνες)	104	142	172	224	276
p_{1,max} (GPa)	0.843	0.466	0.351	0.251	0.196
σ_{max}(MPa)	0.036	0.017	0.012	0.008	0.007
z_{max}(μm)	1.8E-7	8.2E-8	5.7E-8	3.9E-8	2.9E-8
M_{xmax} (Nm)	122.7	43.15	25.62	13.59	8.454
M_{ymax} (Nm)	3.31	1.08	0.626	0.325	0.199

Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα ανάλυσης για οδοντωτούς κυλίνδρους με h=0.8mm

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

l(mm)	8.0	12.0	15.0	20.0	25.0
R(mm)	25.47	38.19	47.75	63.66	79.58
l_f(μm)	12.11	11.32	11.08	10.88	10.79
x_{proc}(mm)	4.885	6.637	8.006	10.35	12.74
t_{proc}(s)	0.0244	0.0332	0.0400	0.0518	0.0637
y_{impreg}(mm)	0.7885	1.044	1.246	1.601	1.965
N(ίνες)	112	149	177	228	280
p_{1,max} (GPa)	0.988	0.510	0.371	0.259	0.201
σ_{max}(MPa)	0.048	0.020	0.014	0.009	0.007
z_{max}(μm)	2.7E-7	1.0E-7	6.5E-8	4.2E-8	3.1E-8
M_{xmax} (Nm)	151.7	48.82	27.82	14.34	8.789
M_{ymax} (Nm)	4.36	1.26	0.698	0.348	0.209

Πίνακας 6.4 Αποτελέσματα ανάλυσης για οδοντωτούς κυλίνδρους με h=1mm

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

l(mm)	8.0	12.0	15.0	20.0	25.0
R(mm)	25.47	38.19	47.75	63.66	79.58
l_f(μm)	13.68	12.11	11.61	11.19	10.99
x_{proc}(mm)	5.634	7.327	8.623	10.86	13.17
t_{proc}(s)	0.0282	0.0366	0.0431	0.0543	0.0659
y_{impreg}(mm)	0.9473	1.186	1.368	1.701	2.048
N(ίνες)	135	169	195	242	292
p_{1,max} (GPa)	1.519	0.663	0.449	0.292	0.217
σ_{max}(MPa)	0.11	0.032	0.019	0.011	0.008
z_{max}(μm)	7.7E-7	1.8E-7	1.0E-7	5.4E-8	3.7E-8
M_{xmax} (Nm)	272.2	70.08	36.44	17.11	10.02
M_{ymax} (Nm)	9.05	2.01	0.985	0.437	0.247

Πίνακας 6.5 Αποτελέσματα ανάλυσης για οδοντωτούς κυλίνδρους με h=1.5mm

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

l(mm)	8.0	12.0	15.0	20.0	25.0
R(mm)	25.47	38.19	47.75	63.66	79.58
l_f(μm)	15.55	13.11	12.29	11.61	11.27
x_{proc}(mm)	6.324	8.078	9.345	11.49	13.72
t_{proc}(s)	0.0316	0.0403	0.0467	0.0575	0.0686
y_{impreg}(mm)	1.106	1.346	1.518	1.828	2.158
N(ίνες)	158	192	216	261	308
p_{1,max} (GPa)	2.29	0.883	0.559	0.338	0.241
σ_{max}(MPa)	0.24	0.054	0.028	0.014	0.009
z_{max}(μm)	2.2E-6	3.6E-7	1.7E-7	7.5E-8	4.6E-8
M_{xmax} (Nm)	487.9	105.3	50.02	21.44	11.85
M_{ymax} (Nm)	18.18	3.332	1.468	0.578	0.305

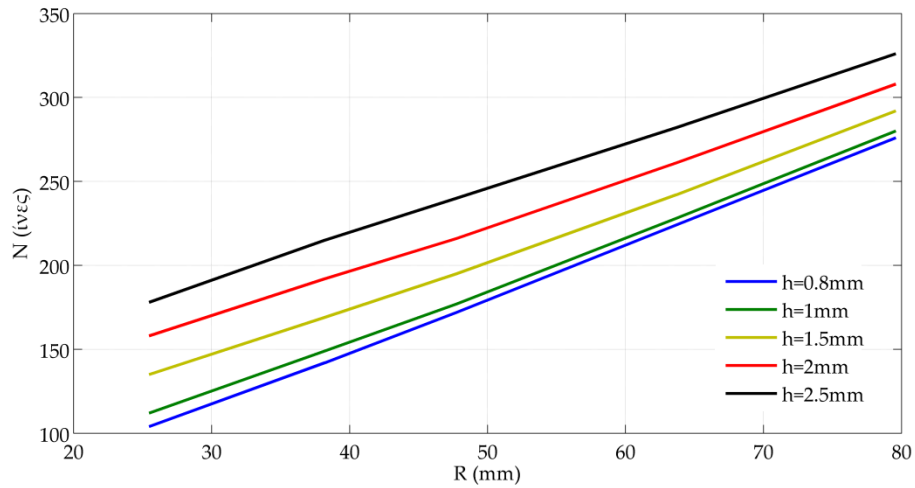
Πίνακας 6.6 Αποτελέσματα ανάλυσης για οδοντωτούς κυλίνδρους με h=2mm

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

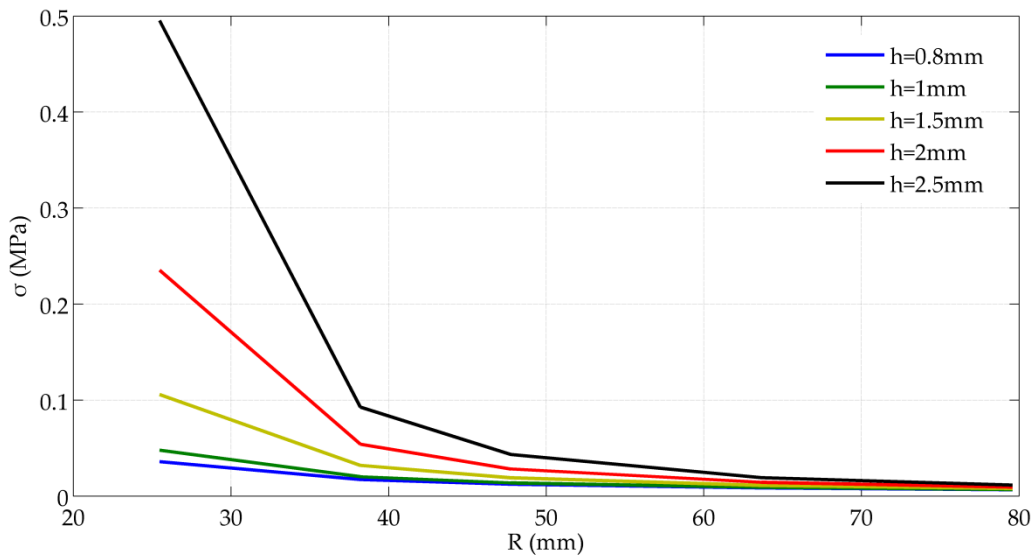
l(mm)	8.0	12.0	15.0	20.0	25.0
R(mm)	25.47	38.19	47.75	63.66	79.58
l_f(μm)	17.62	14.27	13.11	12.11	11.61
x_{proc}(mm)	6.911	8.811	10.09	12.21	14.37
t_{proc}(s)	0.0346	0.0441	0.0505	0.0611	0.0719
y_{impreg}(mm)	1.250	1.508	1.683	1.976	2.287
N(ίνες)	178	215	240	282	326
p_{1,max} (GPa)	3.33	1.17	0.706	0.398	0.270
σ_{max}(MPa)	0.49	0.093	0.043	0.019	0.015
z_{max}(μm)	5.9E-6	7.3E-7	2.9E-7	1.1E-7	6.0E-8
M_{xmax} (Nm)	837.8	159.3	70.59	27.56	14.36
M_{ymax} (Nm)	34.2	5.52	2.23	0.790	0.388

Πίνακας 6.7 Αποτελέσματα ανάλυσης για οδοντωτούς κυλίνδρους με h=2.5mm

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών

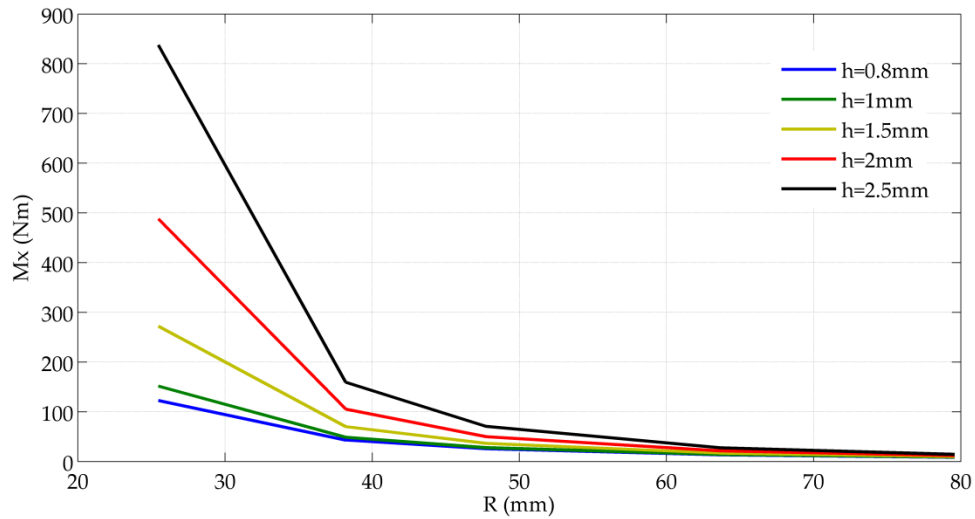


Σχήμα 6.6 Εμποτισμένες ίνες ως προς την ακτίνα για διάφορα ύψη οδόντων

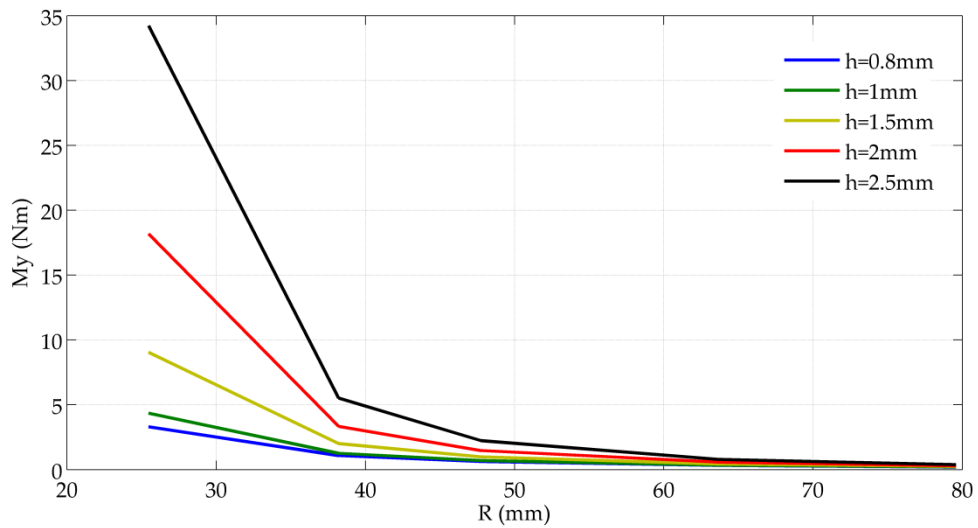


Σχήμα 6.7 Αναπτυσσόμενη τάση στις ίνες ως προς την ακτίνα για διάφορα ύψη οδόντων

Σύστημα οδοντωτών κυλίνδρων για εμποτισμό ινωδών υλικών



Σχήμα 6.8 Αναπτυσσόμενη ροπή στον κύλινδρο κατά τον άξονα Χ ως προς την ακτίνα για διάφορα ύψη οδόντων



Σχήμα 6.9 Αναπτυσσόμενη ροπή στον κύλινδρο κατά τον άξονα Υ ως προς την ακτίνα για διάφορα ύψη οδόντων

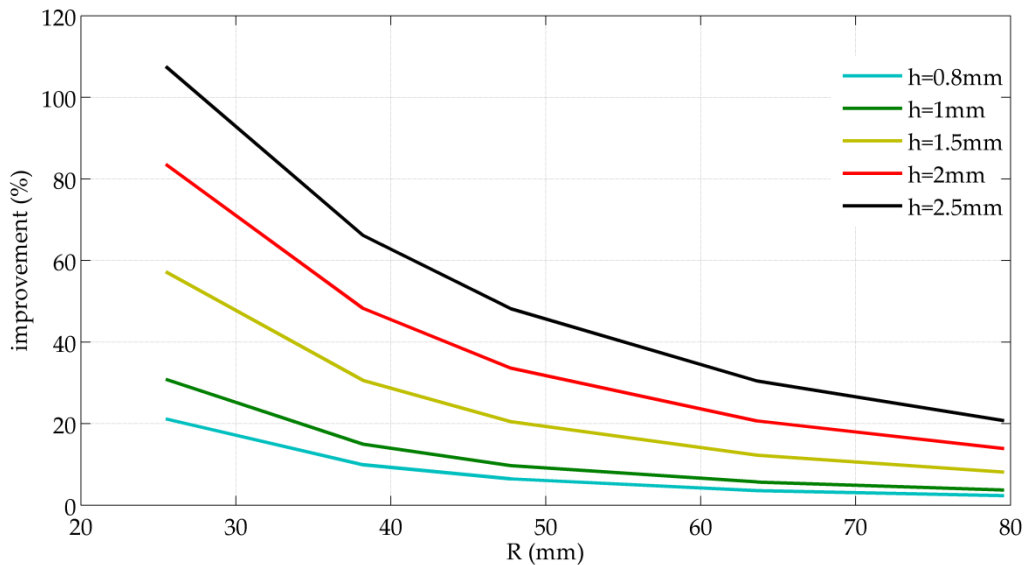
7. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Με βάση τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου, είναι φανερό πως η χρήση συστήματος ζεύγους κυλίνδρων, είτε κανονικών είτε οδοντωτών με διπλή ημιτονοειδή κατανομή, εκατέρωθεν των πλευρών του υφάσματος ινών άνθρακα, τοποθετημένου εντός του θαλάμου του εμποτισμού τους από το ρευστό πολυμερές οδηγεί σε βελτίωση της διαδικασίας του εμποτισμού τους. Αυτό συμβαίνει επειδή, κατά το μήκος διεργασίας, αναπτύσσεται πολύ μεγάλη πίεση στο ρευστό που το ωθεί να διέλθει των ινών. Μάλιστα, για μεγαλύτερα βήματα και ημιύψη του οδόντα, το πλήθος των ινών που είναι πλήρως εμποτισμένες αυξάνει εντυπωσιακά, καθώς μεγαλώνει το μήκος διεργασίας. Παράλληλα, οι ίνες του ενισχυτικού υλικού δεν εμφανίζουν κίνδυνο αστοχίας, αφού οι τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτές λόγω της πίεσης του ρευστού είναι ιδιαίτερος μικρές.

Η τοποθέτηση συστήματος οδοντωτών κυλίνδρων οδηγεί σε μεγαλύτερα βάθη εμποτισμού σε σχέση με τους κανονικούς κυλίνδρους, για κάθε τιμή του μήκους κύματος και, κατ'επέκταση, της ακτίνας τους. Στο Σχήμα 6.10 παρουσιάζεται η ποσοστιαία βελτίωση του εμποτισμού με τη χρήση οδοντωτών κυλίνδρων σε σχέση με τη χρήση κανονικών κυλίνδρων ως προς την ακτίνα, για κάθε τιμή του ύψους κεφαλής.

Από το Σχήμα αυτό, είναι εμφανές ότι για το μέγιστο θεωρηθέν ύψος $h=2.5$ mm, για τη μικρότερη τιμή της ακτίνας $R=25.47$ mm, εμφανίζεται βελτίωση του εμποτισμού κατά 110%, ενώ για τη μέγιστη

ακτίνα $R=79.58$ mm κατά 20%. Δηλαδή, όσο μεγαλώνει η ακτίνα τόσο μικρότερη βελτίωση παρατηρείται με τη χρήση οδοντωτών κυλίνδρων σε σχέση με τους κανονικούς.



Σχήμα 6.10 Βελτίωση του αριθμού των εμπότισιμων ινών με τη χρήση οδοντωτών κυλίνδρων σε σχέση με τους κανονικούς

Με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα, προκύπτει ότι, εν τέλει, ίσως δεν είναι αναγκαία η κατασκευή οδοντωτών κυλίνδρων. Ωστόσο, η χρήση μεγάλων κύλινδρων στο θάλαμο εμπότισμού παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:

- Η διεργασία γίνεται με σταθερή γραμμική ταχύτητα κυλίνδρων και ινών, οπότε κύλινδροι με μεγάλη διάμετρο χρειάζονται, για τη σταθερή περιστροφική τους κίνηση, μειωτήρες που να μπορούν να τους προσδώσουν την αντίστοιχη απαιτούμενη ροπή.
- Κατά τη διάρκεια της διεργασίας δεν καταναλώνεται ολόκληρο το πολυμερές που χρησιμοποιείται, οπότε το μη χρησιμοποιούμενο υλικό παραμένει εντός του θαλάμου. Κύλινδροι μεγάλης διαμέτρου συνεπάγεται αντίστοιχα μεγάλου μεγέθους θάλαμο, άρα, μετά το πέρας της διαδικασίας, υπάρχει μεγάλη ποσότητα εναπομείναντος υλικού, το οποίο πρέπει να αφαιρεθεί προτού σκληρύνει προκειμένου να μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί.
- Οι κύλινδροι εντός του θαλάμου περιβάλλονται από το τηγμένο πολυμερές πολύ υψηλής θερμοκρασίας, οπότε, εφόσον έχουν μεγάλο μέγεθος, καταναλώνουν οι ίδιοι μεγάλο θερμικό φορτίο, με

αποτέλεσμα να μειώνεται ο χρόνος της διαδικασίας. Επιπροσθέτως, μεγάλοι κύλινδροι συνεπάγεται και μεγάλος χρόνος απόψυξης τους.

- Τέλος, οι κύλινδροι, προκειμένου να αντέξουν την υψηλή θερμοότητα του ρευστού, πρέπει να είναι κατασκευασμένοι από ειδικό ανοξείδωτο χάλυβα με επιφανειακή βαφή και επιφάνεια με τιμές σκληρότητας από 48 μέχρι 54 HRC. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται πολύ υψηλό κόστος κατασκευής για κυλίνδρους μεγάλης διαμέτρου.

Συνεπώς, από τα προηγούμενα, προκύπτει ότι η τοποθέτηση συστήματος οδοντωτών κυλίνδρων εντός του θαλάμου εμποτισμού μπορεί να επιτύχει τον πλήρη εμποτισμό υφασμάτων ινωδών υλικών με ένα συνεχή τρόπο. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα του Σχήματος 6.6, ένα ζεύγος οδοντωτών κυλίνδρων με ακτίνα ίση με 25.47mm μπορεί να εμποτίσει πλήρως από 208 έως 356 ίνες, δηλαδή υφάσματα με πάχος από 1.4 ως και 2.5 mm.

7.1 Περαιτέρω έρευνα

Στη διπλωματική αυτή εργασία, πραγματοποιήθηκε μια διαστατική ανάλυση του προβλήματος του εμποτισμού ινωδών υλικών, μέσω μηχανικού μικροδιαχωρισμού των ινών, όσον αφορά τη ροή του ρευστού πολυμερούς διαμέσου των ινών. Η ανάλυση αυτή έδειξε ότι η χρήση οδοντωτών τροχών διπλής ημιτονοειδούς κατατομής μπορεί να αυξήσει εντυπωσιακά τον εμποτισμό ενός δισδιάστατου φύλλου ινών. Ωστόσο, κρίνεται απαραίτητο να πραγματοποιηθεί ανάλυση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics – CFD), προκειμένου να μελετηθεί ενδελεχώς το πεδίο ταχυτήτων και πιέσεων γύρω από τις ίνες. Επιπλέον, είναι ιδιαίτερος σημαντικό να κατασκευαστεί μια πρωτότυπη διάταξη συνεχούς διεργασίας με το σύστημα των οδοντωτών κυλίνδρων, προκειμένου να ελεγχθεί πειραματικά η αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

8. Βιβλιογραφία

- [1] Θ.Ν Κωστόπουλος, «Οδοντώσεις και Μειωτήρες Στροφών», εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1991
- [2] Γ.Τ. Τσαμασφύρος, «Μηχανική Παραμορφώσιμου Σώματος Ι», εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991
- [3] Σωκράτης Τσαγγάρης, «Μηχανική των Ρευστών», εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2005
- [4] Learning Matlab 7, Release 14, The MathWorks, 2005
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon-fiber-reinforced_polymer
- [6] <http://www.toraycfa.com/pdfs/T300DataSheet.pdf>
- [7] <http://wikihelp.autodesk.com/enu>