



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

**Προσδιορισμός της διαπερατότητας υφασμάτων στη τεχνική
κατασκευής σύνθετων υλικών V.A.R.I. με αντίστροφη
μέθοδο**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΔΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων : Γ.-Χ. Βοσνιάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017

Στους γονείς μου

Δημήτρη

Έλλη

Στη μνήμη του αγαπημένου μου καθηγητή

Θανάση Πλατή

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Έγινε δε χρήση του εργαστηρίου σύνθετων υλικών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Γ.Χ. Βοσνιάκο για την εποικοδομητική συνεργασία που πραγματοποιήθηκε στη διάρκεια εκτέλεσης της διπλωματικής εργασίας, και την αμέριστη υποστήριξη τόσο όσον αφορά την καθοδήγηση μου σε σχεδόν άγνωστα μονοπάτια, όσο και για τη συμβολή του στη σωστή συγγραφή του παρόντος έργου, διαθέτοντας πολύτιμο χρόνο.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την μεταδιδακτορικό ερευνήτρια κ. Α. Βασιλείου για την καθοδήγηση και υποστήριξη που μου παρείχε στην υλοποίηση της εργασίας και στην εξοικείωση με τους γενετικούς αλγορίθμους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τους διδακτορικούς, κ. Γ. Σερέτη για την πλήρη ενημέρωση και καθοδήγηση που μου παρείχε σε θέματα Vacuum Infusion και κ. Γ. Παπαζέτη για την βοήθεια και καθοδήγηση, καθώς και το τεχνικό προσωπικό του τομέα κ Κ. Κερασιώτη και κ. Ν Μελισσά για τη βοήθειά τους στα τεχνικά θέματα της εργασίας και για την άμεση διευθέτηση των ζητημάτων που αφορούν τους χώρους των εργαστηρίων του τομέα.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ κ Ι. Γκόνο για την έμπρακτη και ουσιαστική υποστήριξη που μου παρείχε σε θέματα γενετικών αλγορίθμων.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στη μέθοδο Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI) που ανήκει στις τεχνικές Liquid Composite Molding (LCM) με τις οποίες κατασκευάζονται τεμάχια από πολύστρωτα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας. Η εν λόγω μέθοδος κάνει χρήση καλουπιού πάνω στο οποίο εναποτίθεται αριθμός στρώσεων τεχνικού υφάσματος το οποίο στη συνέχεια εμποτίζεται με ρητίνη υπό την επενέργεια κενού. Η εργασία έχει στόχο τον προσδιορισμό της διαπερατότητας των υφασμάτων έτσι ώστε να είναι δυνατή η χρήση της τιμής της σε προσομοιώσεις για τον προσδιορισμό της διάδοσης του μετώπου εμποτισμού.

Η η τιμή της διαπερατότητας προσδιορίζεται με χρήση γενετικού αλγορίθμου, και αποτελεί το χρωμόσωμα του και υλοποιήθηκε στο λογισμικό MATLAB. Ο γενετικός αλγόριθμος καλείται να προσδιορίσει την βέλτιστη διαπερατότητα εκλέγοντας την μέσα από ένα σύνολο διακριτών τιμών. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μοντέλο προσομοίωσης του εμποτισμού με βάση το οποίο υπολογίζει τη διάδοση του μετώπου εμποτισμού του υφάσματος. Το μοντέλο προσομοίωσης κάνει χρήση του νόμου Darcy και η υλοποίηση του έγινε στο λογισμικό COMSOL το οποίο συνδέθηκε με το λογισμικό MATLAB μέσω εξειδικευμένης εφαρμογής (LIVELINK). Σε πρώτη φάση, στον σχεδιασμό του μοντέλου θεωρήθηκε απλή-ορθογωνική γεωμετρία τεμαχίου που θεωρεί σταθερό και ομοιογενές μέγεθος πόρων κάτι που αποτελεί προσέγγιση. Στη συνέχεια, ο γενετικός αλγόριθμος συγκρίνει την εξέλιξη του μετώπου εμποτισμού χωρο-χρονικά με το αντίστοιχο αποτέλεσμα πραγματικού πειράματος εμποτισμού, έως ότου ικανοποιηθούν οι συνθήκες σύγκλισης. Συμπερασματικά αναφέρεται πως το κόστος της αντικειμενικής συνάρτησης επηρεάζεται σημαντικά από παράγοντες όπως είναι το είδος του πλέγματος, η περιοχή μελέτης στην επιφάνεια του υφάσματος και οι στρώσεις υαλουφάσματος που χρησιμοποιούνται, όπως επιβεβαιώθηκε και βιβλιογραφικά. Η επίδραση της μεταβολής του ιξώδους στη διαδικασία αγνοήθηκε λόγω της μικρής διάρκειας του εμποτισμού.

Το υπολογιστικό κόστος της μεθόδου είναι εξαιρετικά χαμηλό, και μαζί με το επίσης χαμηλό κόστος του ενός και μόνο πειράματος που απαιτείται, κάνουν την προτεινόμενη μέθοδο να υπερτερεί του πειραματικού προσδιορισμού της διαπερατότητας με χρήση ακριβών συσκευών όπως τα διαπερατόμετρα.

Λέξεις Κλειδιά: Σύνθετα υλικά; Εμποτισμός; Vacuum Assisted Resin Infusion; Διαπερατότητα; Γενετικοί αλγόριθμοι; ανάστροφη μέθοδος

Abstract

The present Diploma thesis refers to Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI) method which belongs to the Liquid Composite Molding (LCM) techniques used to make parts of multilayer composite materials with a polymeric resin matrix. VARI uses a mold on top of which a number of technic fabric pieces are laid up. These are impregnated by resin drawn by vacuum. The project aims to determine the permeability of fabrics in order to use its value in simulations aiming to define the propagation of the flow/impregnation front.

Permeability value is being determined using a genetic algorithm, representing its chromosome, as implemented in MATLAB software. Genetic Algorithm is employed in order to define the optimum value of permeability as chosen by a set of discrete values. The algorithm uses an impregnation simulation model to compute the flow front propagation inside the fabric. The simulation model is based on Darcy's Law and its implementation is carried out in COMSOL software. The latter was connected with the MATLAB software through a specialized application (LIVELINK). At first, in order to design the model a simple rectangular shaped part is considered that adopts a constant and homogenous porous size, which is clearly a first assumption. The genetic algorithm compares the evolution (propagation) of the impregnation front, in a space and time dimension, with the corresponding result of the actual impregnation experiment, until the convergence conditions are satisfied. In summary, it is noted that the objective function cost is significantly influenced by factors such as the finite element mesh type, the study area on the fabric's surface and the number of layers of the fabric, as was also verified in literature. The influence of viscosity in the procedure is ignored due to the short duration of the impregnation process.

The computational cost of the method is extremely low, which, together with the low cost of the single experiment which is required, indicate that the proposed method is superior to the experimental determination of the permeability typically conducted with expensive custom-made devices.

Keywords: Composite materials; Infusion; Vacuum Assisted Resin Infusion; Permeability; Genetic Algorithms; inverse method

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ABSTRACT	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ	9
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 ΠΛΑΙΣΙΟ.....	10
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ.....	11
1.3 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΕΙΜΕΝΟΥ	12
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	13
3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ	16
3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΜΕ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΡΗΤΙΝΗ.....	16
3.1.1 <i>Resin Transfer Molding (RTM)</i>	16
3.1.2 <i>Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI)</i>	16
3.2 ΝΟΜΟΣ DARCY	17
3.3 ΌΡΟΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ (SINK TERM).....	18
3.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ	21
4 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ	24
4.1 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ COMSOL.....	24
4.2 ΕΞΟΙΚΕΙΩΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ COMSOL	25
4.3 LIVELINK: ΣΥΝΔΕΣΗ COMSOL – MATLAB.....	28
5 ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ	33
5.1 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	33
5.1.1 <i>Εισαγωγή</i>	33
5.1.2 <i>Βιολογικές έννοιες</i>	33
5.1.3 <i>Από τη βιολογία στην πληροφορική</i>	34
5.1.3.1 Κωδικοποίηση (Encoding)	35
5.1.3.2 Φυσική επιλογή (Natural Selection) και Ζευγάρισμα (Pairing).....	35
5.1.3.3 Διασταύρωση (crossover)	35
5.1.3.4 Μετάλλαξη	36
5.2 Ο ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ	37
5.2.1 <i>Σχεδιασμός</i>	37
5.2.1.1 Κωδικοποίηση χρωμοσώματος	38
5.2.1.2 Αντικειμενική συνάρτηση.....	39
5.2.1.3 Πληθυσμός.....	39
5.2.1.4 Ζευγάρισμα.....	39
5.2.1.5 Διασταύρωση	40

5.2.1.6	Μετάλλαξη	40
5.2.2	Υλοποίηση	40
5.2.2.1	Κώδικας MAIN εισαγωγής των παραμέτρων εκτέλεσης του γενετικού και των επιλογών.....	41
5.2.2.2	Κώδικας περιέχων την αντικειμενική συνάρτηση και υπολογισμού του κόστους	43
5.2.2.3	Κώδικας υπολογισμού δεδομένων για την τροφοδότηση του πληθυσμού.	44
5.2.3	Εκτέλεση.....	44
6	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ	47
6.1	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	47
6.2	ΥΛΙΚΑ	48
6.3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ LAYUP	49
6.4	ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΕΓΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΕΝΟΥ.....	51
6.5	ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ	51
7	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	55
7.1	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ	55
7.2	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΡΟΗΣ	56
7.2.1	Πλέγμα	56
7.2.2	Γραμμικοποίηση του πειραματικού μετώπου ροής.....	59
7.2.3	Διακριτοποίηση του μετώπου ροής.....	60
7.3	ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ.....	63
7.3.1	Η μεταβολή του ιξώδους της ρητίνης	63
7.3.2	Συμπεριφορά του υφάσματος κατά τον εμποτισμό	64
8	3D ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	65
8.1	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΕΥΡΕΘΕΙΣΑΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΕ 3D ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ.	65
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	69
9.1	ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	69
9.2	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	70
10	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	72
11	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 2D ΣΤΟ COMSOL.....	76

Κατάλογος Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 3-1 (Α) RTM (Β) VARI.....	17
ΕΙΚΟΝΑ 3-2 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΡΟΗ ΡΗΤΙΝΗΣ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΤΟΥ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ	18
ΕΙΚΟΝΑ 3-3 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΡΟΗΣ.....	19
ΕΙΚΟΝΑ 3-4 ΜΕΤΩΠΟ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΖΩΝΗ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ ΠΙΣΩ ΑΠΟ ΑΥΤΟ ([26])	20
ΕΙΚΟΝΑ 4-1 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ ΣΤΟ COMSOL ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ.....	26
ΕΙΚΟΝΑ 4-2 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ 5Χ5 ΜΕ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ 3.6×10^{-8} [M2]	27
ΕΙΚΟΝΑ 4-3 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ (Α) ΔΙΑΔΟΣΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΡΟΗΣ (Β) ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ (Γ) ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΜΕΓΕΘΩΝ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ ΓΙΑ $\gamma=0$ (Δ) ΣΗΜΕΙΟ (3.14, 0) ΣΤΟ ΜΕΤΩΠΟ ΡΟΗΣ	28
ΕΙΚΟΝΑ 4-4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ LIVELINK (Α) ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ CONSOLE (Β) ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ CLIENT-SERVER (Γ) ΣΥΝΔΕΣΗ	29
ΕΙΚΟΝΑ 5-1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ.....	34
ΕΙΚΟΝΑ 5-2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ	38
ΕΙΚΟΝΑ 6-1 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ VARI ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΤΟΥ ΤΟΜΕΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ (Α) ΑΝΤΛΙΑ (Β) ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ ΡΗΤΙΝΗΣ (Γ) ΔΟΧΕΙΟ ΑΝΤΛΗΣΗΣ (Δ) ΜΑΝΟΜΕΤΡΟ (Ε) ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΚΕΝΟΥ.....	47
ΕΙΚΟΝΑ 6-2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ LAYUP (Α) ΚΟΠΗ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ (Β) ΚΟΠΗ REELPLY (Γ) ΕΠΑΛΕΙΨΗ ΑΠΟΚΟΛΛΗΤΙΚΟΥ - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΑΙΝΙΑΣ (Δ) ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΟΥΣ (Ε) ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΟΥΣ 'Π' (ΣΤ) ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΥΑΛΟΥΦΑΣΜΑΤΟΣ (Ζ) ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ REEL PLY (Η) ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΔΙΧΤΥΟΥ (Θ) ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΔΙΑΤΡΗΤΗΣ ΣΑΚΟΥΛΑΣ (Ι) ΣΑΚΟΥΛΑΣ ΚΕΝΟΥ.....	50
ΕΙΚΟΝΑ 6-3(Α) ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΕΝΟΥ (Β) ΜΕΤΩΠΟ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ ΣΤΑ ΟΡΙΑ ΤΟΥ ΥΑΛΟΥΨΦΑΣΜΑΤΟΣ.....	51
ΕΙΚΟΝΑ 6-4 ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΤΗΣ ΡΟΗΣ.	52
ΕΙΚΟΝΑ 6-5 ΤΑ ΜΕΡΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ (Α) ΨΥΦΙΑΚΗ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ (Β) ΤΡΙΠΟΔΑΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	52
ΕΙΚΟΝΑ 6-6 ΤΑ 22 ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΑ ΛΗΦΘΕΝΤΑ ΑΝΑ 1 SEC.....	53
ΕΙΚΟΝΑ 6-7 ΔΙΑΤΑΞΗ LAY UP ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΟ ΚΑΝΟΝΑ.....	54
ΕΙΚΟΝΑ 6-8 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΤΩΝ ΤΡΟΧΙΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΟΠΟΙΑ ΑΥΤΕΣ ΔΙΕΡΧΟΝΤΑΙ.	54
ΕΙΚΟΝΑ 7-1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΟΥΜΕΝΟ ΜΕΤΩΠΟ ΡΟΗΣ (Α) QUADRIC FINE (Β) SEXTIC EXTRA FINE.....	57
ΕΙΚΟΝΑ 7-2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΑΠΟ ΤΑ ΔΙΑΚΡΙΤΑ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΑ	58
ΕΙΚΟΝΑ 7-3 ΤΟ ΜΕΤΩΠΟ ΡΟΗΣ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑ ΜΕ 5 ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ.....	59
ΕΙΚΟΝΑ 7-4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΟΥ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ (Α) ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤΟ ΠΡΩΤΟ ΜΙΣΟ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ (Β) ΣΥΜΠΤΩΣΗ ΣΤΟ ΜΕΣΟ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ. ΣΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΤΟ ΜΕΤΩΠΟ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΕΠΙΣΗΜΑΙΝΕΤΑΙ ΜΕ ΛΕΥΚΗ ΓΡΑΜΜΗ.....	61
ΕΙΚΟΝΑ 7-5 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΞΩΔΟΥΣ – ΧΡΟΝΟΥ ΡΗΤΙΝΗΣ.....	63
ΕΙΚΟΝΑ 7-6 ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΕΙΑ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΥΑΛΟΥΨΦΑΣΜΑΤΟΣ [27].....	64
ΕΙΚΟΝΑ 8-1 ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ (13 SEC) ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ 3Δ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΙΟΥ FRANCIS	65
ΕΙΚΟΝΑ 8-2 Η ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΗ ΑΚΜΗ (ΚΟΚΚΙΝΗ) ΓΙΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΡΟΗΣ	66
ΕΙΚΟΝΑ 8-3 2Δ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ (ΜΠΛΕ) ΚΟΜΒΩΝ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΗΣ ΑΚΜΗΣ.....	67
ΕΙΚΟΝΑ 8-4 3Δ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ ΤΗΣ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΗΣ ΑΚΜΗΣ.....	67

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1 ΒΗΜΑΤΑ ΔΙΣΥΝΔΕΣΗΣ COMSOL-MATLAB ΜΕΣΩ LIVELINK.....	30
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΥΠΙΚΗΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΤΟΥ ΓΑ	45
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2 ΤΜΗΜΑ ΤΩΝ 1000 ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΚΟΣΤΗ	45
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΩΝ ΜΕΤΩΠΩΝ ΡΟΗΣ.....	46
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-1ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΝΑΛΩΣΙΜΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-1 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΓΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ 2 ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ.....	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΓΑ ΓΙΑ 2,3 ΚΑΙ 4 ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗ 0,8 BAR	56
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΣΤΟ 1 ^ο ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΡΩΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ 2 ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΚΕΝΟ 0.8 BAR ΣΥΜΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ.	60
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΜΗΚΟΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ- ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ 2 ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ	62
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΩΝ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΩΝ ΣΤΟ ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΤΟΥ ΓΑ ΤΗΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ 2 ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ	63
ΠΙΝΑΚΑΣ 8-1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΑ ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ Χ-Υ.....	65

Κατάλογος Εξισώσεων

ΕΞ. 3-1.....	17
ΕΞ.3-2.....	20
ΕΞ.3-3.....	20
ΕΞ.3-4.....	20
ΕΞ.3-5.....	21
ΕΞ.3-6.....	21
ΕΞ.3-7.....	21
ΕΞ.3-8.....	21
ΕΞ.3-9.....	22
ΕΞ.3-10.....	22
ΕΞ.3-11.....	23
ΕΞ. 5-1.....	39

1

Εισαγωγή

1.1 Πλαίσιο

Η χρήση υφασμάτων υαλονήματος και ανθρακονήματος ως ενισχύσεων στα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας τις τελευταίες δεκαετίες είναι γεγονός και αξιοποιείται σε χώρους που ως τώρα θεωρείτο απίθανο. Η ευρεία χρήση τους έγκειται στο γεγονός πως έχουν υψηλή αντοχή είναι ευέλικτα στον σχεδιασμό της κατασκευής. Αυτά τα υλικά μπορούν να αναμιχθούν σε ελεγχόμενη σύσταση προκειμένου να επιτευχθούν οι βέλτιστες ιδιότητες, που είναι καλύτερες από την ιδιότητα του καθενός στοιχείου ξεχωριστά. Ένας τομέας στον οποίο ακόμη δεν έχει γίνει μεγάλη χρήση τέτοιων υλικών είναι οι υδροδυναμικές μηχανές, ιδιαίτερα δε οι υδροστροβίλοι.

Οι δρομείς, τα σταθερά πτερύγια, αλλά και τα κελύφη των υδροστροβίλων κατασκευάζονται συνήθως ως μεταλλικά, από υλικά όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας και ο ορείχαλκος με κατεργασίες όπως η χύτευση, η διαμόρφωση ελάσματος και η συγκόλληση [1]. Παρά το ότι αυτή η προσέγγιση σχεδιασμού και η κατασκευής είναι πρακτικά παγιωμένη, σε μια κατεύθυνση περαιτέρω ανάπτυξης έχει προταθεί η αντικατάσταση των μεταλλικών μερών υδροστροβίλων από πολύστρωτα σύνθετα υλικά, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται άκαμπτες κατασκευές μικρότερου βάρους και καλύτερης συμπεριφοράς σε εναλλασσόμενη φόρτιση, σε διάβρωση, αλλά και σε σπηλαίωση [2]. Επιπλέον, θεωρητικά υπάρχει η δυνατότητα με τη χρήση πολύστρωτων σύνθετων υλικών να δημιουργηθούν εύκαμπτα πτερύγια, έτσι ώστε να προσαρμόζει η υδροτομή το σχήμα της στις συνθήκες λειτουργίας του υδροστροβίλου προς επίτευξη καλύτερου βαθμού απόδοσης.

Σε κάθε περίπτωση, η κατασκευή τεμαχίων από πολύστρωτα σύνθετα υλικά είναι πολύ φθηνότερη εάν χρησιμοποιούνται όχι προεμποτισμένα υφάσματα, αλλά υφάσματα και ρητίνη ξεχωριστά, έτσι ώστε ο εμποτισμός των υφασμάτων υπό συνθήκες κενού να αποτελεί διακριτό βήμα, που ονομάζεται ‘Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI)’. Η διαδικασία VARI, όμως, χρειάζεται προσομοίωση σε ειδικό λογισμικό, που είναι μεν από πολλά χρόνια εμπορικά διαθέσιμο, αλλά απαιτεί ως δεδομένα τιμές για τη διαπερατότητα των υφασμάτων από τη ρητίνη.

1.2 Αντικείμενο

Η παρούσα εργασία φιλοδοξεί να προσφέρει μια ευέλικτη λύση στην εύρεση της διαπερατότητας υφασμάτων από ρητίνη χωρίς τη χρήση ειδικού πειραματικού εξοπλισμού (διαπερατομέτρου) που είναι ακριβός, αλλά μόνο μιας κάμερας χαμηλού κόστους και ενός μοντέλου προσομοίωσης της ροής της ρητίνης κατά τον εμποτισμό των υφασμάτων (VARI) με το λογισμικό COMSOL.

Η εργασία εμπλέκει διάφορες μεθόδους και εργαλεία προκειμένου να προκύψει ο βέλτιστος συνδυασμός μεταξύ δύο λογισμικών με σκοπό την πρόγνωση και εποπτεία της κατασκευής του κομματιού με την τεχνική εμποτισμού VARI. Η κατασκευή του κομματιού γίνεται στα πλαίσια ενός κύκλου πειραματικών διαδικασιών με αυστηρές προδιαγραφές. Η συμμόρφωση με τις εν λόγω προδιαγραφές είναι υψίστης σημασίας γιατί μικρή απόκλιση από αυτές μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Η βασική μέθοδος η οποία θα αποτελέσει συνδυαστικό κρίκο μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και της προσομοίωσης στο λογισμικό COMSOL είναι η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων, που επιλέχθηκε λόγω της σημαντικής μείωσης υπολογιστικού κόστους που προσφέρει στην όλη μελέτη και υλοποιήθηκε σε λογισμικό Matlab.

Το λογισμικό COMSOL προτιμήθηκε λόγω της απλότητας χειρισμού που προσφέρει παρότι συγχρόνως αποτελεί αρκετά σύνθετη εφαρμογή προσομοίωσης κατεργασιών που υποστηρίζει πολλές παραμέτρους και έχει χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενες παρόμοιες εφαρμογές.

Η συνεργασία των δύο προαναφερθέντων λογισμικών MATLAB και COMSOL επιτυγχάνεται εύκολα χάρη σε μια εφαρμογή που έχει αναπτυχθεί για την δεύτερη και ονομάζεται LiveLink.

Η πειραματική διαδικασία VARI όπως προαναφέρθηκε αποτελεί μια αρκετά ‘λεπτή’ διαδικασία. Το κενό δημιουργούμενο από εργαστηριακή αντλία ελαττώνει την πίεση στο ένα άκρο του υφάσματος επιτρέποντας στην ατμοσφαιρική πίεση να αντλήσει τη ρητίνη δια μέσου του πολύστρωτου. Έτσι εμποτίζονται τα ενισχυμένα νήματα από τα οποία αποτελείται το ύφασμα [1.3]. Στην παρούσα εργασία χρειαζόταν αρκετή προσοχή γιατί το αποτέλεσμα θα έπρεπε να συγκριθεί με αυτό της προσομοίωσης και η παραμικρή απόκλιση του πειραματικού αποτελέσματος από το αναμενόμενο ενισχύει τον παράγοντα αβεβαιότητας. Το προϊόν είναι λεπτή πλάκα από ύφασμα υαλονημάτων.

1.3 Οργάνωση κειμένου

Το Κεφάλαιο 2 παρουσιάζει βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικών εργασιών με το αντικείμενο τα διπλωματικής εργασίας.

Το Κεφάλαιο 3 παρουσιάζει τη διαδικασία του εμποτισμού υφάσματος με ρητίνη και το σχετικό μαθηματικό μοντέλο.

Το Κεφάλαιο 4 περιγράφει το λογισμικό COMSOL κατασκευής του μοντέλου και εκτέλεσης της προσομοίωσης καθώς και την υπό-εφαρμογή LIVELINK που υποστηρίζει την σύνδεση COMSOL – MATLAB.

Στο Κεφάλαιο 5 εκτίθεται η μέθοδος του γενετικού αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας.

Στο Κεφάλαιο 6 παρατίθεται η πειραματική διάταξη και ο τρόπος καταγραφής της ανάπτυξης του μετώπου της ροής

Το Κεφάλαιο 7 παρουσιάζει τα αποτελέσματα και την αξιολόγηση της μεθόδου εύρεσης της διαπερατότητας του υφάσματος.

Το Κεφάλαιο 8 αναφέρεται στη σύνδεση της μελέτης με την προσομοίωση VARI σε καλούπια 3D.

Το κεφάλαιο 9 εκθέτει τα βασικότερα συμπεράσματα από την εργασία και μελλοντικά βήματα.

Το Κεφάλαιο 10 παρουσιάζει τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

Το Παράρτημα παρουσιάζει τη διαδικασία κατασκευής του μοντέλου, την εκτέλεση της προσομοίωσης καθώς και την ανάκτηση των αποτελεσμάτων από το COMSOL.

2

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στην εργασία [3] χαρακτηρίζεται η διαπερατότητα συγκρίνοντας πειραματικά αποτελέσματα RTM και προσομοίωση βασισμένη σε αλγορίθμους καταγραφής (FASTER της MATLAB) και επεξεργασίας εικόνας των υφασμάτων.

Στην εργασία [4] διερευνήθηκαν τα μοντέλα διαπερατότητας διεξάγοντας πειραματικές διαδικασίες. Εκτελείται 3D μοντελοποίηση του πειράματος. Ο υπολογισμός των μεταβολών της γεωμετρίας υπολογίζεται με τη μέθοδο ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian). Το πλέγμα-δίχτυ μοντελοποιείται ως 2D επίπεδη στρώση. Η διαδικασία VARI προσομοιώθηκε σε περιβάλλον COMSOL και τα αποτελέσματα συνέπεσαν με τα πειραματικά.

Στην εργασία [5] χαρακτηρίζεται η διαπερατότητα προεμποτισμένων υφασμάτων. Στην πειραματική διάταξη τοποθετούνται αισθητήρες (τρεις) πίεσης κατάλληλα προσαρμοσμένοι που παρακολουθούν τη διάδοση του μετώπου κατά τη διάρκεια του εμποτισμού (πρώτος ποιοτικός έλεγχος). Η ένδειξη των αισθητήρων συγκρίνεται εντός ενός βρόχου βελτιστοποίησης με την αναλυτική. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης [6] μόνιμης παροχής συγκρίνονται με αυτά των αισθητήρων (ως αναφορά). Οι προσομοιώσεις εκτελούνται επαναληπτικά έως ότου οι τιμές των πιέσεων συμπίσουν.

Στην εργασία [7] μελετάται η συμπίεση και η μεταφορά φυσαλίδων αέρα. Προσομοιώνεται αριθμητικά η διαδικασία LCM και διερευνάται ο σχηματισμός voids. Η προσομοίωση βασίζεται σε συνδυασμό των εξισώσεων Darcy – συνέχειας για κάθε φάση (resin/air). Το μοντέλο εντάσσει την μη γραμμική Advection-Diffusion εξίσωση για τον κορεσμό (μεταφορά) και μια ελλειπτική εξίσωση για την πίεση και την ταχύτητα (ροή).

Στην εργασία [8] μελετάται η ενεργός διαπερατότητα τόσο με αναλυτική επίλυση όσο και ευρισκόμενη μέσω αναλυτικών εκφράσεων Carman – Kozeny και την μελέτη των Khajeh και Maijer, και συν. Έχει κατασκευαστεί, δοκίμιο πλεγμένου δικτύου κυλινδρικών υπερτιθέμενων (overlaid) από δίκτυο σφαιρικών σωματιδίων, μέσω τεχνικής ταχείας προτυποποίησης. Η διαπερατότητα του μοντέλου καθορίστηκε με επίλυση εξισώσεων Navier Stokes για ασυμπίεστη ροή και των εξισώσεων συνέχειας. Το μοντέλο ροής σχεδιάζεται με μέθοδο πεπερασμένων όγκων 2ου βαθμού μέσω λογισμικού Ansys CFX.

Στην εργασία [9] διερευνάται η τιμή της διαπερατότητας μιας ακτινικής διάταξης ροής και επικυρώνεται μέσω ακτινικού πειράματος σε καλούπι κυκλικής διατομής. Καταγράφονται οι χρόνοι άφιξης μέσω προσαρμοσμένων κατανεμημένων αισθητήρων. Οι χρόνοι άφιξης συγκρίνονται από αντίστοιχους 3D προσομοιώσεις σε περιβάλλον LIMS, εντός ενός βρόχου βελτιστοποίησης Golden Section Search

Minimization Technique (G2SMT). Η προσομοίωση τροφοδοτείται με τιμές διαπερατότητας για την εύρεση του καλύτερου συνδυασμού χρόνων άφιξης, ώστε να προκύψει η τιμή της βέλτιστης διαπερατότητας.

Στην εργασία [10] εξασφαλίζεται η μέθοδος της πρόγνωσης της in-plane διαπερατότητας για την επαλήθευση πειράματος μέσω προσομοίωσης. Για την προσομοίωση χρησιμοποιείται το λογισμικό RTM-work. Η προσομοίωση εκτελείται με δύο διαφορετικά σενάρια ροής. Τελικά η πρόγνωση της διαπερατότητας ήταν επιτυχής.

Στην εργασία [11] διερευνάται η τιμή της διαπερατότητας πειραματικά και αριθμητικά σε επίπεδο μακροκλίμακας. Τα υφάσματα μοντελοποιούνται με δύο τρόπους με διαπερατά (και μη) yarns. Το λογισμικό που αξιοποιείται για την προσομοίωση (επίλυση των Navier-Stokes) είναι το NaSt3DGP. Για την 2η περίπτωση αξιοποιείται ο νόμος Darcy ενώ χρησιμοποιείται μια εναλλαγή πλεγμάτων με την διακριτοποίηση των πεπερασμένων διαφορών και την μέθοδο προβολής. Η διαπερατότητα βρέθηκε με επίλυση των εξισώσεων Stokes και Darcy. Η 1η περίπτωση διπλού πορώδους προσεγγίζεται με τις εξισώσεις Stokes/Darcy

Στην εργασία [12] διενεργείται ανάστροφος προσδιορισμός της διαπερατότητας με τη βοήθεια τεχνιτών νευρωνικών δικτύων. Μετράται η πρόοδος της ροής κατά την εκτέλεση του πειράματος με χρήση αισθητήρων. Η κατασκευή του μοντέλου λαμβάνοντας υπόψη την αλλαγή που υφίσταται το πορώδες στις περιοχές που το ύφασμα μορφοποιείται διαφορετικά. Με τη βοήθεια των νευρωνικών δικτύων προβλέπεται ο χρόνος επαναληπτικής ροής και μέσω επικύρωσης των εξόδων του δικτύου με της προσομοίωσης (PAM-RTM) βρίσκεται η διαπερατότητα στην διαφορετικά μορφοποιούμενη περιοχή.

Στην εργασία [13] διενεργείται πρόγνωση της διαπερατότητας υποστηριζόμενη από τις τεχνικές Stream surface και Grid Average. Κατασκευή του μοντέλου πραγματοποιείται με χρήση λογισμικού texGen. Αναπτύχθηκε στοχαστική τεχνική ανάλυσης για την επίδραση της ποικιλομορφίας των υφασμάτων στην διαπερατότητα.

Στην εργασία [14] διερευνάται ο προσδιορισμός της τιμής της διαπερατότητας με χρήση νευρωνικών δικτύων. Αυτά τροφοδοτούνται με τα αποτελέσματα πειραματικών (RTM) διαδικασιών που καταγράφονται με τη μορφή βιντεοσκόπησης. Εκτελούνται προσομοιώσεις βασισμένες στα προαναφερθέντα πειράματα βάση κάποιων παραμέτρων εισόδου (είδος υφάσματος, πορώδες, πίεση εισόδου). Το δίκτυο στην έξοδο του δίνει την διαπερατότητα, μετά από επικύρωση του μετώπου της ροής.

Στην εργασία [15] καταγράφεται η εικόνα υφάσματος και βάση αυτού εκτελείται προσομοίωση κρυσταλλικής δομής Boltzmann για την πρόβλεψη της διαπερατότητας. Η προσομοίωση βασίζεται στις εξισώσεις Brinkman/Stokes ενώ η μοντελοποίηση γίνεται σε επίπεδο μικροκλίμακας.

Στην εργασία [16] συγκρίνεται αριθμητική μέθοδος αναπαράστασης διαδικασίας RTM με πειραματική. Η προσομοίωση υποβοηθείται από εμπορικό κώδικα PAM-RTM. Η παρακολούθηση εξελίσσεται με χρήση οπτικών ινών πλεγμένων στο προσχηματισμένο για λόγους σταθερότητας.

Στην εργασία [17] προσδιορίζεται η τιμή της διαπερατότητας με έναν συνδυασμό πειραματικής και αναλυτικής διαδικασίας (RTMFLOT software) που μεθοδεύεται σε έναν βρόχο βελτιστοποίησης (Porous Media Permeability Identification). Οι τιμές της διαπερατότητας ρυθμίζονται επαναληπτικά ώστε τα πειραματικά αποτελέσματα να συμπίπτουν με τα πειραματικά. Ο πυρήνας της διαδικασίας υποστηρίζεται από ένα ορθοτροπικό ακτινικό in-plane μοντέλο ροής ελλειπτικών συντεταγμένων.

Στην εργασία [18] διερευνάται η τιμή της διαπερατότητας με χρήση πειραμάτων και δύο μεθόδων (CFD και Grid2D) και συγκρίνεται. Το μοντέλο σχεδιάζεται με τη βοήθεια των λογισμικών TexGen και WiseTex. Και οι δύο μέθοδοι μπορούν να ερμηνεύσουν το πορώδες στα intra yarn και να συμπεριλάβουν στους υπολογισμούς τη ροή στα yarns.

Σκοπός της μελέτης [19] είναι ο καθορισμός της διαπερατότητας πειράματος μέσω αναλυτικής επικύρωσης. Χρησιμοποιείται πολυπλεγματικός αλγόριθμος προς αναπαράσταση ακριβώς της ίδιας γεωμετρίας του υφάσματος. Το μοντέλο υποστηρίζεται από επίλυση εξισώσεων ροής Stokes ενώ η προσομοίωση βασίζεται στο λογισμικό Ansys CFX.

Στην εργασία [20] καθορίζεται ο τελεστής διαπερατότητας μέσω ροικής ανάλυσης υποστηριζόμενης από το λογισμικό Ansys/CFX, βασισμένο σε μοντέλα voxel TexGen και συγκρίνεται με πειραματικά αποτελέσματα.

Στην εργασία [21] ερευνάται η συσχέτιση της πειραματικά προσδιορισμένης διαπερατότητας με την εύρεση της αναλυτικά. Σε αυτή την προσέγγιση η αναλυτική μέθοδος βασίζεται στη χρήση της μεθόδου οριακών στοιχείων (BEM). Όσον αφορά την ανάπτυξη του μοντέλου μελετάται ένα μέσο αποτελούμενο από ίνες που συντίθεται από μακριές κυλινδρικές ίνες που ο άξονας τους προσανατολίζεται κάθετα στην κατεύθυνση της bulk flow. Οι ίνες έχουν κοινό μέγεθος. Επιπρόσθετα μελετάται η επίδραση του μεγέθους του μοναδιαίου στοιχείου στην τιμή της διαπερατότητας.

Στην εργασία [22] επιβεβαιώνεται η 1D διαπερατότητα πειραματικά ευρεθείσα μέσω εκτέλεσης προσομοίωσης σε περιβάλλον PORE-FLOW. Το μοντέλο διπλής κλίμακας σχεδιάζεται με τη μέθοδο 'two-stage-volume-averaging'.

Στη μελέτη [23] εκτελείται πειραματική διαδικασία VARI vacuum assisted resin infusion (flexible mold) σε εργοστασιακό χώρο με αντικείμενο την κατασκευή οροφής (ambulance roof). Η αριθμητική προσομοίωση εκτελέστηκε κάνοντας χρήση του LCMFlot. Το πλέγμα της γεωμετρίας δημιουργήθηκε βάση 6991 (triangular shell elements) τριγωνικών πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα δείχνουν καλή συμφωνία και κατά τόπους διαφορές μπορούν να αποδοθούν στην ανομοιογένεια του πάχους της πολυστρωματικής διάταξης κάτω από την μεμβράνη κενού κατά τη διάρκεια εμποτισμού.

3

Μοντελοποίηση της ροής ρητίνης διαμέσου υφάσματος

3.1 Κατασκευή σύνθετων με εμποτισμό υφάσματος από ρητίνη

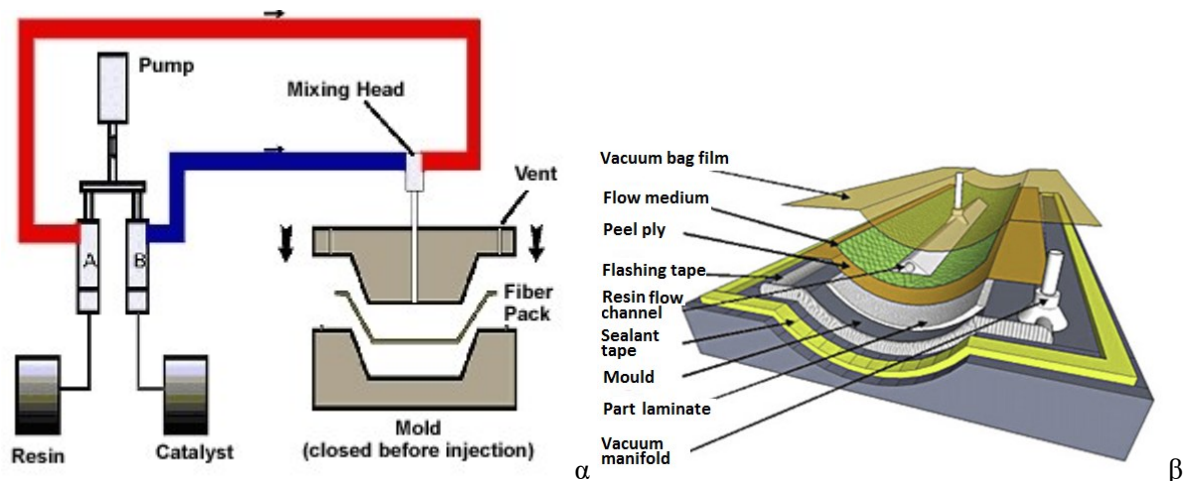
Στην ενότητα αυτή γίνεται συνοπτική παρουσίαση ορισμένων σημαντικών στοιχείων των μεθόδων Resin Transfer Molding (RTM) και Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI) ή Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) που μας απασχολεί στην παρούσα εργασία.

3.1.1 Resin Transfer Molding (RTM)

Η RTM είναι κατάλληλη μέθοδος για γραμμή παραγωγής για την κατασκευή κομματιών σύνθετου υλικού με σχετικά μικρό μέγεθος και με δυνατότητα υποστήριξης πολύπλοκων γεωμετριών, βλ. **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** (α). Αρχικά εναποτίθεται αποκολλητική αλοιφή (release agent) για εύκολη απομάκρυνση του προϊόντος. Επιπρόσθετο gel coat βελτιώνει την ποιότητα επιφανείας. Στη συνέχεια τοποθετούνται τα υφάσματα (ενίσχυση). Η διάταξη του ζεύγους καλουπιών θερμαίνεται. Η ρητίνη μαζί με τον καταλύτη (σκληρυντή) στη συνέχεια εγχέεται στο καλούπι μέσω των θυρίδων εισόδου. Μετά τη σκλήρυνση το καλούπι αποχωρίζεται από το κομμάτι. Υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα που καθιστούν την μέθοδο ιδανική. Μεταξύ αυτών είναι το σχετικά χαμηλό κόστος του εξοπλισμού καθώς και η καλή διαστατική ακρίβεια, η καλή ποιότητα επιφανείας και στις δύο όψεις, ο επιτυγχανόμενος υψηλός λόγος όγκου ινών FVC και η χαμηλή πτητικότητα λόγω της κλειστής διάταξης του καλουπιού. Η μέθοδος χρησιμοποιεί είτε ενσωματωμένα σε ένα στάδιο με την έγχυση της ρητίνης είτε σε περισσότερα στάδια σχετικά υψηλή πίεση και ένα κύκλο θέρμανσης, με χρήση διάταξης auto-clave ή αντίστοιχης.

3.1.2 Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI)

Τα βασικά σημεία της μεθόδου VARI μοιάζουν με αυτά της RTM, όμως αντί για την μεταλλική άνω επιφάνεια του καλουπιού χρησιμοποιείται ελαστική μεμβράνη και χρησιμοποιεί κενό για να τραβήξει το οποίο εντοπίζεται στην έξοδο της ρητίνης από την διάταξη εμποτισμού, βλ. Εικόνα 3-1(β). Τοποθετείται το στεγνό ύφασμα ενίσχυσης προς εμποτισμό. Ένας αγωγός κατάλληλα τοποθετημένος στην είσοδο της ροής εισάγει υποστηριζόμενος από το κενό την εποξική ρητίνη αναμιγμένη με ορισμένη ποσότητα σκληρυντή στην κατάλληλη αναλογία μεταξύ τους. Το μέτωπο της ροής της ρητίνης συμπαρασύρει τον αέρα που συναντά, και αυτός οδηγείται προς την θυρίδα κενού – εξόδου. Η ρητίνη αφού εμποτίσει την ενίσχυση αφήνεται να σκληρυνθεί σε διάστημα χρόνου που ορίζει ο παραγωγός. Στην συνέχεια το καλούπι ανοίγει και το κομμάτι αφαιρείται. Στο διάστημα εμποτισμού η παραμικρή διαρροή μπορεί να οδηγήσει σε κενές περιοχές στο καλούπι. Επίσης, το καλούπι έχει επαφή μόνο με την μια επιφάνεια του υφάσματος και συνεπώς, μόνο η μια επιφάνεια έχει καλή ποιότητα. Η μέθοδος όμως, είναι απλή, φθηνή και ιδανική για γραμμή παραγωγής μικρών και μεγάλων τεμαχίων σε μικρές, γενικά, ποσότητες.



Εικόνα 3-1 (α) RTM (β) VARI

3.2 Νόμος Darcy

Ο Henry Darcy μέσα από πειραματικές διαδικασίες ροής νερού σε άμμο κατέληξε στον ομώνυμο νόμο. Ο νόμος αυτός χρησιμοποιείται, κυρίως στον τομέα της εδαφομηχανικής, για να περιγράψει τη ροή ασυμπίεστου ρευστού μέσα σε πορώδες υλικό. Σύμφωνα με τον νόμο Darcy υπάρχει ευθεία αναλογία ανάμεσα στις πιέσεις (μεταβολές) που δέχεται το ρευστό και στις ταχύτητες της ροής. Ο νόμος του Darcy περιγράφεται από την Εξ. 3-1:

$$v = \frac{k}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad \text{Εξ. 3-1}$$

v = ταχύτητα του ρευστού (m/s)

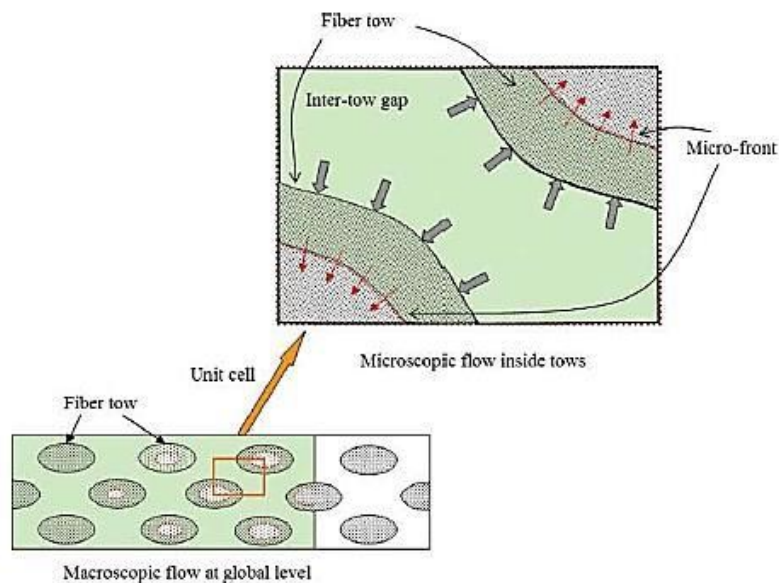
K = διαπερατότητα του πορώδους μέσου (m^2)

μ = ιξώδες του ρευστού ($Pa \cdot s$)

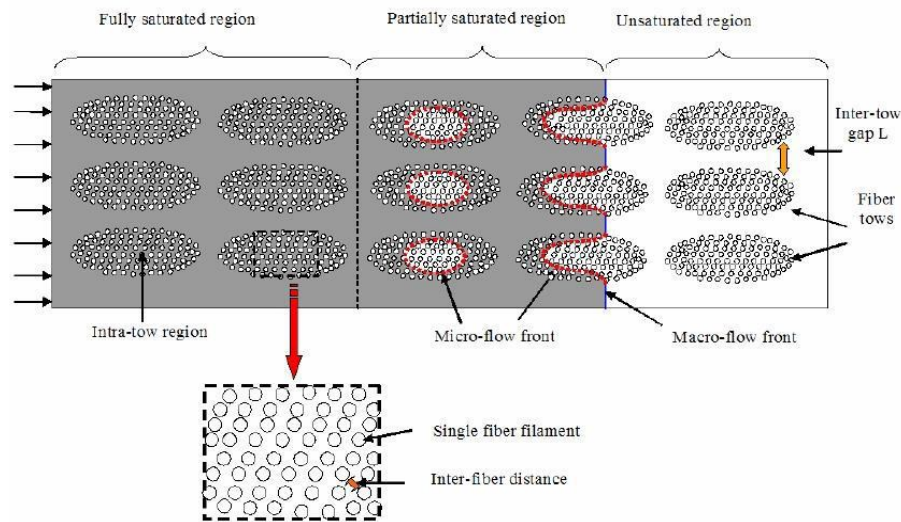
p = πίεση (Pa)

3.3 Όρος κορεσμού (*Sink term*)

Τα υφάσματα έχουν την δυνατότητα να μοντελοποιηθούν με δύο τρόπους. Η διάκριση μεταξύ αυτών των δύο διαφορετικών τεχνικών βασίζεται στα κενά που δημιουργούν οι πλέξεις του υφάσματος και στο μέγεθος τους. Η μοντελοποίηση με δύο μεγέθη κενών προσεγγίζει ποιο πιστά την πραγματικότητα. Ειδικότερα, έχει παρατηρηθεί στην πράξη πως οι ίνες είναι ομαδοποιημένες σε δέσμες και καθώς πλέκονται κάθετα μεταξύ τους δημιουργούν κενά οπτικά αντιληπτά της τάξης των mm. Οι δέσμες των ινών αφήνουν κενά απειροελάχιστου μεγέθους της τάξης των 1-10 μm . [2] Αυτά τα κενά έχουν σημαντικά μικρότερο μέγεθος. Η μοντελοποίηση της διάκρισης μεταξύ των κενών έχει άμεση σχέση τόσο με την κατασκευή του μοντέλου όσο και με τον βαθμό στον οποίο θέλουμε να προσεγγίσουμε τις συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος. Αυτές οι ανομοιομορφίες μεγέθους στην βιβλιογραφία εντοπίζονται με τους όρους μονής ή διπλής κλίμακας, λόγω της διαφοράς τάξεων μεγέθους ανάμεσα στα δύο είδη κενών, βλ. Εικόνα 3-2



Εικόνα 3-2 Μακροσκοπική και μικροσκοπική ροή ρητίνης διαμέσου του υφάσματος

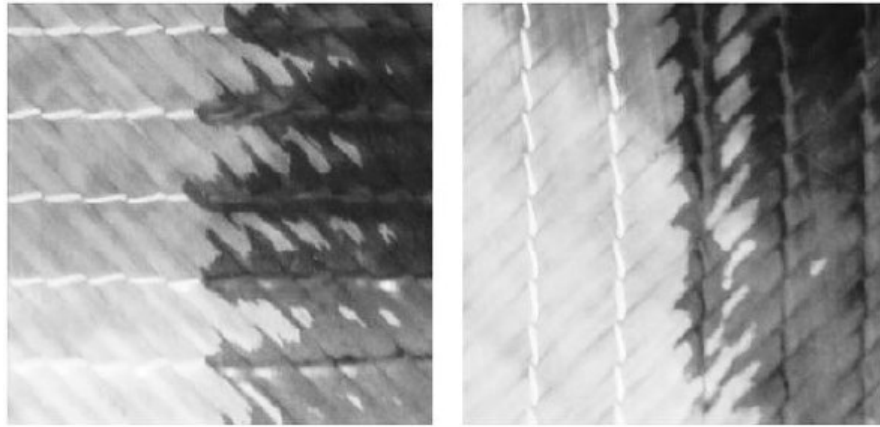


Εικόνα 3-3 Περιοχές κορεσμού υφάσματος και χαρακτηριστικά της ροής

Για να συνδεθεί αυτή η διάκριση μεγεθών με την εφαρμογή του νόμου Darcy, αναφέρεται πως η χρήση του νόμου είναι κατάλληλη για πορώδη μέσα που είναι κορεσμένα και η ροή θεωρείται ομοιόμορφα κατανομημένη καθ' όλη την επιφάνεια. Θεωρώντας πορώδες μέσο μονής κλίμακας είμαστε πλήρως ευθυγραμμισμένοι με τα απαιτούμενα εφαρμογής του νόμου Darcy γιατί στα υφάσματα μονής κλίμακας όλες οι περιοχές πίσω από το μέτωπο της ροής έρχονται σε κορεσμό στον ίδιο βαθμό.

Στην πράξη παρατηρείται η συνύπαρξη οπών διαφορετικής τάξης μεγέθους (dual scale fabrics – υφάσματα διπλής κλίμακας). Αυτή η ανομοιογένεια σε συνδυασμό με την αντίσταση παρεμπόδισης της ροής που εφαρμόζουν τα κενά (εντός των δεσμών ινών), προκαλεί την ταχύτερη κάλυψη της περιοχής που αποτελείται από τις οπές των πλέξεων (της μεγάλης κλίμακας). Αυτή η καθυστέρηση στη διαβροχή των μικροκενών σε σχέση με τα μακροκενά οδηγεί στο σχηματισμό μερικώς κορεσμένης ροής πίσω από το μέτωπο της μακροσκοπικής ροής και σχετίζεται με την επίδραση της βύθισης που εισάγουν οι μικροί πόροι μεταξύ των ινών. Τα μακροκενά στη διεθνή βιβλιογραφία συναντώνται με τον όρο inter-tow gaps ενώ τα μικροκενά με τον όρο intra-tow gaps [24]. Η καθυστέρηση στον πλήρη εμποτισμό του προσηματισμένου προκαλεί την εμφάνιση μη γραμμικότητας. Αυτές οι μη γραμμικότητες στο μοντέλο και η μη συμμόρφωση στα προαπαιτούμενα του νόμου Darcy αποτελούν τις αιτίες που ο νόμος Darcy πρέπει να υποστηριχθεί από μια επιπρόσθετη υπολογιστική διαδικασία προκειμένου να υποστηριχθεί υπολογιστικά πιστότερα η διαδικασία εκτέλεσης της LCM (Liquid Composite Molding).

Τα αποτελέσματα της σύνθετης αυτής ροής είναι ορατά και μετρήσιμα με χαρακτηριστικά παραδείγματα της δημιουργία εγκλεισμάτων, περιοχών μη κορεσμένης ροής, βλ. Εικόνα 3-3, καθώς και πτωτικό προφίλ πίεσης από την είσοδο προς την έξοδο της ροής[24]. Η ταχύτητα του μετώπου της ροής μειώνεται καθ' όσο το μέτωπο της ροής μετακινείται κατα την κατεύθυνση της ροής απομακρυνόμενο από την θυρίδα εισόδου [25].



Εικόνα 3-4 Μέτωπο ροής και ζώνη μη κορεσμένης ροής πίσω από αυτό ([26])

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα μοντέλο που δεν ακολουθείται στην παρούσα μελέτη αλλά εντάσσει τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά που συναντώνται και σε άλλα μαθηματικά μοντέλα με σκοπό την αριθμητική επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ή/και όγκων.

Παρουσιάζεται ένα στοιχείο εντός του οποίου υπάρχει η οπή μικρής κλίμακας (μεταξύ των ινών). Η μέση ταχύτητα ροής μπορεί να περιγραφεί από τον νόμο Darcy με την εξίσωση Εξ.3-2.

$$\langle u \rangle = \frac{k \partial^2 P}{\mu \partial x^2} \quad \text{Εξ.3-2}$$

Στην εικόνα φαίνεται ότι η ροή της ρητίνης μεταξύ των ινών μοντελοποιείται με έναν όρο κορεσμού που περιγράφει την παροχή του ρευστού γύρω από το κενό που δημιουργείται. Στο μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται η εξίσωση Εξ.3-3

$$\frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} = -v_t \phi_{tf} \frac{\partial s}{\partial t} \quad \text{Εξ.3-3}$$

Αναφέρεται πως το διαφορικό του όρου κορεσμού γνωστό και ως moisture capacity $c(p)$ χωρητικότητα υγρού, είναι συνάρτηση της πίεσης. Αυτή είναι μια απλοποιητική παραδοχή που οφείλεται στην υπόθεση μοντέλου μονοδιάστατης ροής δια μέσου πορώδους μονής κλίμακας. Μόλις τα μικροκενά κορεστούν πλήρως μπορεί να εφαρμοστεί η εξίσωση Darcy για πορώδη μέσα μονής κλίμακας (παρότι στην εν λόγω μελέτη [25] γίνεται λόγος δύο διαπερατοτήτων εμείς θα θεωρήσουμε μια – μονή κλίμακα).

Θεωρώντας ασυμπίεστο ρευστό και μελετώντας αποκλειστικά το πλήρες κορεσμένο ρευστό εισάγουμε την σχέση Darcy στην εξίσωση συνέχειας Εξ.3-4

$$\nabla v = 0 \quad \text{Εξ.3-4}$$

Και οδηγούμαστε σε μια ελλειπτική ΜΔΕ με άγνωστη μεταβλητή την πίεση p . Απαιτούνται κατάλληλα ορισμένες οριακές συνθήκες, ώστε μέσω της εξίσωσης Laplace να βρεθεί η πίεση και κατ' επέκταση η ταχύτητα από το νόμο του Darcy.

Τα μοντέλα προσομοίωσης της μακροσκοπικής ροής για να αναπαραστήσουν την ανταλλαγή μάζας ανάμεσα στις περιοχές ανάμεσα στα νήματα και μέσα στα νήματα απαιτούν έναν βοηθητικό όρο μοντελοποίησης ώστε να αποφευχθεί η αναλυτική επίλυση της ροής σε αυτό το επίπεδο (νήμα-ίνας). Έτσι, προτάθηκε μία νέα μορφή της εξίσωσης συνέχειας, η Εξ.3-5:

$$\nabla v = -S \quad \text{Εξ.3-5}$$

Ο όρος S είναι ο όρος βύθισης (ή κορεσμού) ο οποίος αντιπροσωπεύει την εξαφάνιση της ρητίνης από τα κενά γύρω από τα νήματα μέσα στα νήματα [24]. Το αρνητικό πρόσημο του όρου βύθισης στην εξίσωση συνέχειας (1) υπαγορεύει πως η ταχύτητα της ροής της ρητίνης ελαττώνεται στην περιοχή των μη κορεσμένων μικροκενών μεταξύ των νημάτων λόγω της απορρόφησης της από αυτά [27].

Ακολουθεί το ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο που εφαρμόζεται στην COMSOL.

3.4 Μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της ροής

Ο συνδυασμός των σχέσεων Darcy που ερμηνεύει την κορεσμένη ροή δια μέσου πορώδους και της εξίσωσης της συνέχειας [28] (Εξ.3-6,Εξ.3-7)

$$v = -\frac{K}{\mu} \nabla(p) \quad \text{Εξ.3-6}$$

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \nabla(v\rho) = 0 \quad \text{Εξ.3-7}$$

Καθώς και η υπόθεση πως η ρητίνη είναι ασυμπίεστη και το ύφασμα των ινών είναι πορώδες μέσο πορώδους φ που δεν μπορεί να παραμορφωθεί, μας επιτρέπει την διαμόρφωση μιας απλοποιημένης εκδοχής της έκφρασης της εξίσωσης συνέχειας. Αυτή η έκφραση συμπεριλαμβάνει το διαφορικό της πίεσης και όχι της ταχύτητας, όπως συμβαίνει με την αρχική μορφή της εξίσωσης της συνέχειας. Η χρήση του όρου κορεσμού φέρνει την εξίσωση στη μορφή Εξ.3-8

$$\varphi \frac{\partial S}{\partial t} - \nabla \left(\frac{K}{\mu} \nabla(p) \right) = 0 \quad \text{Εξ.3-8}$$

που είναι η απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης Richard που κανονικά χρησιμοποιείται για πολυφασικές ροές. Η σχετικά μεγάλη τιμή που χαρακτηρίζει το λόγο ιξώδους ρητίνης προς αέρα ($10^4 \sim 10^6$) μας επιτρέπει να υποθέσουμε πως υπάρχει μηδενική απώλεια πίεσης λόγω της ροής αέρα στο μη κορεσμένο τμήμα του κομματιού (domain). Έτσι απλοποιούμε το πρόβλημα και θεωρούμε ίδια πίεση στο μέτωπο της ροής και στην έξοδο ($p_f = p_a$, κάτι που ισχύει μόνο προσεγγιστικά).

Ο όρος $\partial S/\partial t$ θα προκύψει ορίζοντας κατάλληλη συνάρτηση S με σκοπό να την διαφορίσουμε. Τη μέθοδο που θα ακολουθηθεί χαρακτηρίζει ομαλή μετάβαση από κορεσμένη σε μη κορεσμένη περιοχή καθώς και υπολογισμός της πίεσης σε όλο το πεδίο.

Το μειονέκτημα που αντιμετωπίζεται είναι ότι πρέπει να λυθεί μια μη γραμμική, παραβολική μερική διαφορική εξίσωση που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σύγκλισης, παράλληλα όμως υπάρχουν και σημαντικά πλεονεκτήματα. Συγκεκριμένα λόγω ανεξαρτησίας του χρονικού βήματος από το μέγεθος πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων, μπορεί να συνδεθεί με τη δυναμική του προβλήματος. Η πραγματοποίηση των παραπάνω και η εκτέλεση της προσομοίωσης επιτυγχάνεται ορίζοντας την S με την έκφραση (Εξ.3-9):

$$S(p) = \frac{2}{\pi} \tan^{-1}(ap) \quad \text{Εξ.3-9}$$

αλυσίδας οδηγεί στην σχέση Εξ.3-10:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} = \left(\frac{2}{\pi} \frac{a}{1 + (ap)^2} \right) \frac{\partial p}{\partial t} \quad \text{Εξ.3-10}$$

Ο συντελεστής $\partial S/\partial p$ ορίζεται ως (moisture capacity) χωρητικότητα της υγρασίας και συμβολίζεται $C(p)$ που απεικονίζει την εξάρτηση από την τιμή της πίεσης. [29]

Χωρητικότητα της υγρασίας είναι το ποσό υγρασίας που μπορεί να συγκρατήσει ο αέρας σε συγκεκριμένη θερμοκρασία: Γίνεται προσπάθεια να συγκρατηθεί κατά το δυνατόν περισσότερη υγρασία σε δοθείσα τιμή θερμοκρασίας. Ζεστός αέρας θα συγκρατεί πολύ μεγαλύτερη ποσότητα υγρασίας από τον κρύο αέρα. Ο αέρας στα 80 F έχει 4 φορές χωρητικότητα σε υγρασία απ' ότι στους 40 F. [30]

Η ικανότητα του πορώδους προς διαβροχή περιγράφεται ικανοποιητικά από το μοντέλο του van Genuchten [31] που χρησιμοποιεί την ιδέα της χωρητικότητας της υγρασίας. Αν και στο εν λόγω μοντέλο υπάρχει εξάρτηση της διαπερατότητας από την πίεση που οφείλεται στη συμπιεστότητα του πορώδους, στην εφαρμογή που έχουμε, χρησιμοποιούμε την εξίσωση $\partial S/\partial t$ που αποτελεί μια προσέγγιση παρόμοια με το μοντέλο του van Genuchten και ο πορώδης χώρος ορίζεται σταθερός καθώς το ύφασμα υποτίθεται πως είναι ασυμπίεστο.

Συμβολίζοντας με a τον αριθμητικό συντελεστή μορφής [1/Pa], που καθορίζει το μήκος της αλλαγής φάσης. Βλέποντας την κάθε διάσταση, ο συντελεστής μορφής a μπορεί να ερμηνευθεί ως το αντίστροφο

της πίεσης αναφοράς P_{ref} , που περιγράφει την “ένδειξη της συμπιεστότητας” του αέρα στην μεταβατική φάση. Ο συντελεστής α επηρεάζει τη λύση για την εύρεση της πίεσης p : Υψηλότερη τιμή του α μειώνει την απόκλιση από την αναλυτική λύση. Αυτό προκαλείται από την μείωση της απόκλισης στην αλλαγή της ασυνεχούς φάσης που υποτίθεται στις αναλυτικές λύσεις, που αντιστοιχεί σε τιμή του $\alpha \rightarrow \infty$.

Η μέθοδος που θα εφαρμόζεται για να προσδιοριστεί η θέση που το ρευστό αλλάζει φάση, είναι η σύγκριση της πίεσης που βρίσκω ως αποτέλεσμα λύσης της μη γραμμικής ΜΔΕ και της πίεσης που εντοπίζεται στη θέση αλλαγής φάσης. Η μέθοδος αυτή μπορεί να διατυπωθεί με τη βοήθεια της Εξ.3-11:

$$F(\alpha) = \begin{cases} 1, & p > p_c a \\ 0, & p \leq p_c a \end{cases} \quad \text{Εξ.3-11}$$

Το μέτωπο της ροής καθορίζεται σε πίεση αλλαγής φάσης $p_c = 1000 \text{ Pa}$.

4

Λογισμικό προσομοίωσης εμποτισμού

4.1 Δυνατότητες COMSOL

Η εμπορική εφαρμογή COMSOL Multiphysics είναι λογισμικό που επιτρέπει στον χρήστη την μοντελοποίηση, επεξεργασία και επίλυση και γενικά την προσομοίωση οποιουδήποτε πραγματικού προβλήματος που βασίζεται στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με μεγάλη ποικιλία: μόνιμης ή μεταβατικής, γραμμικής ή μη, στατικής ή δυναμικής (ιδιοσυχνοτήτων) κλπ.

Πρόκειται για μια ιδιαίτερα φιλική εφαρμογή προς τον χρήστη καθώς του επιτρέπει να έχει πλήρη αντίληψη της διαδικασίας, χάρη στους εργονομικούς διαμεσολαβητές που διαθέτει. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα που διακρίνουν την εφαρμογή είναι η δυνατότητα που παρέχει για την διεξαγωγή πολλαπλών μελετών εντός του ίδιου προβλήματος με τη μορφή επιπέδων (layers) τα οποία μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους αρμονικά.

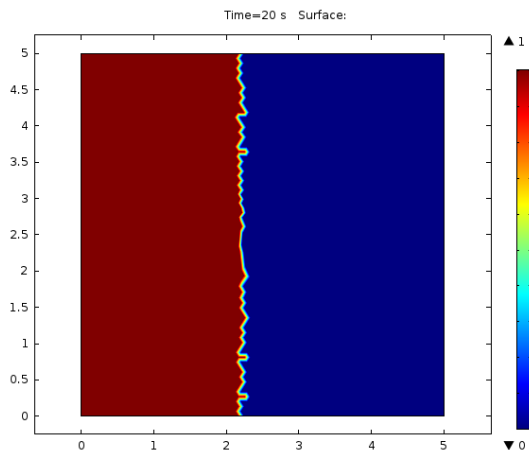
Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων παρέχει τα βασικά εργαλεία διακριτοποίησης των μοναδιαίων στοιχείων του πλέγματος αναλόγως την περίπτωση επιλέγοντας μέσα από μια ευρεία γκάμα (Linear, Quadratic, Qubic, Quartic, Quintic, Sextic, Septic). Επιπλέον το μέγεθος του πλέγματος μπορεί να κυμαίνεται αναλόγως της επιθυμητής ανάλυσης από Extra Course έως Extra Fine.

Η κατασκευή του μοντέλου δίνει τη δυνατότητα καθορισμού της γεωμετρίας της φυσικής του προβλήματος από ένα παρεχόμενο σύνολο που εντάσσει ροϊκά προβλήματα, προβλήματα μεταφοράς θερμότητας, δομικής μηχανικής και ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης. και συνδυασμός αυτών των τομέων. Επιπρόσθετα η προσοχή εστιάζεται και στον καθορισμό φυσικών ποσοτήτων και παραμέτρων που σχετίζονται με ιδιότητες υλικών, φορτία, περιορισμούς, πηγές και ροές. Το λογισμικό έχει το πλεονέκτημα πως βάσει καθορισμού προτιμήσεων από τον χρήστη διαμορφώνονται κατάλληλα και απεικονίζονται οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που διέπουν το εκάστοτε πρόβλημα προς επίλυση.

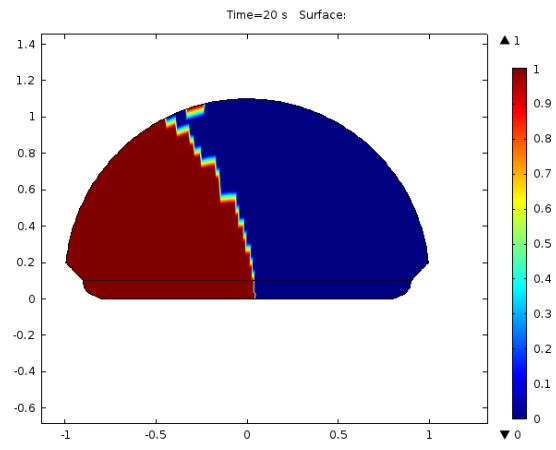
Συνεπώς, επαρκεί βασική γνώση των μαθηματικών από το χρήστη για να επεξεργαστεί οποιοδήποτε πρόβλημα. Παράλληλα ο χρήστης μπορεί να παρέμβει στην μορφή και φυσικά στην τιμή των συντελεστών, με τρόπο που του δίνει την ευκαιρία να δημιουργήσει τις δικές του διαφορικές εξισώσεις ανάλογα με τις ανάγκες του.

4.2 Εξοικείωση με τη χρήση του λογισμικού *comsol*

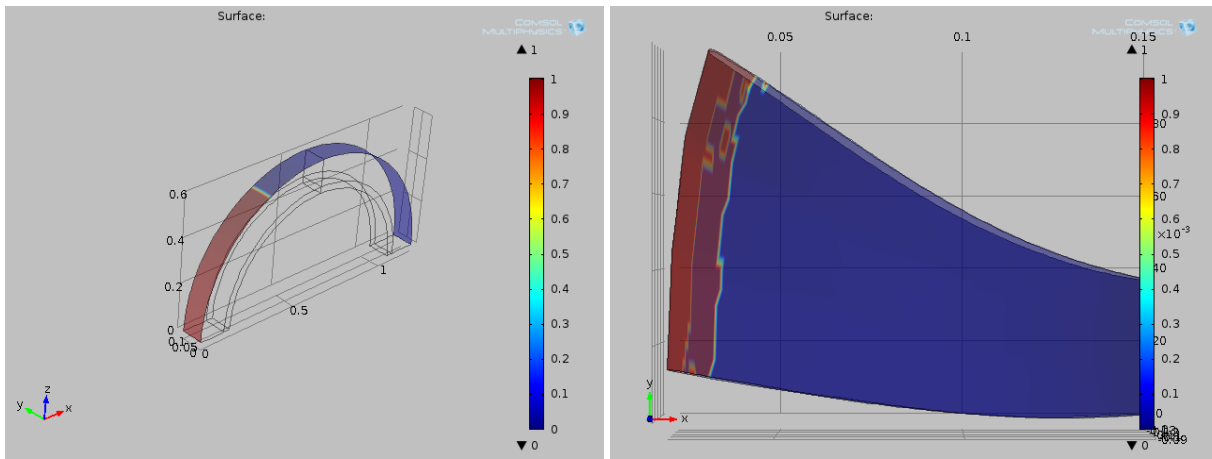
Διερευνήθηκε το λογισμικό για λόγους εξοικείωσης σχετικά με τις δυνατότητες που μπορεί να παρέχει στην υπό μελέτη εφαρμογή. Μελετήθηκαν διάφορες γεωμετρίες, βλ. Εικόνα 4-1. Η επιλογή ήταν στοχευμένη για τις ανάγκες που αφορούσαν το κάθε στάδιο. Συνολικά επιλέχθηκαν τρεις γεωμετρίες. Αρχικά μας απασχόλησε η πιο απλή που ήταν μια επίπεδη τετραγωνική επιφάνεια 5mx5m. Στη συνέχεια εξετάστηκε επίπεδη γεωμετρία διαστάσεων ικανοποιητικών για την πειραματική διαδικασία. Θεωρήθηκε ικανοποιητική επιλογή επιφάνεια σχήματος ορθογωνίου παραλληλογράμμου διαστάσεων 75x200[mm²]. Στη συνέχεια και πριν την διερεύνηση της 3D γεωμετρίας θεωρήθηκε καλό να μελετηθεί γεωμετρία επίπεδη που αποτελείται και από καμπύλα τμήματα. Αυτή η επιλογή πραγματοποιήθηκε με στόχο την εξήγηση και απλοποίηση κάποιων αποτελεσμάτων που έδινε το λογισμικό. Ως γεωμετρία χρησιμοποιήθηκε ημικυκλικό τμήμα. Στην πορεία χρησιμοποιήθηκε 3D γεωμετρία του ανωτέρω ημικυκλικού τμήματος με κάποιο πάχος. Τελικά καταλήγουμε στην 3D γεωμετρία πτερυγίου υδροστροβίλου francis.



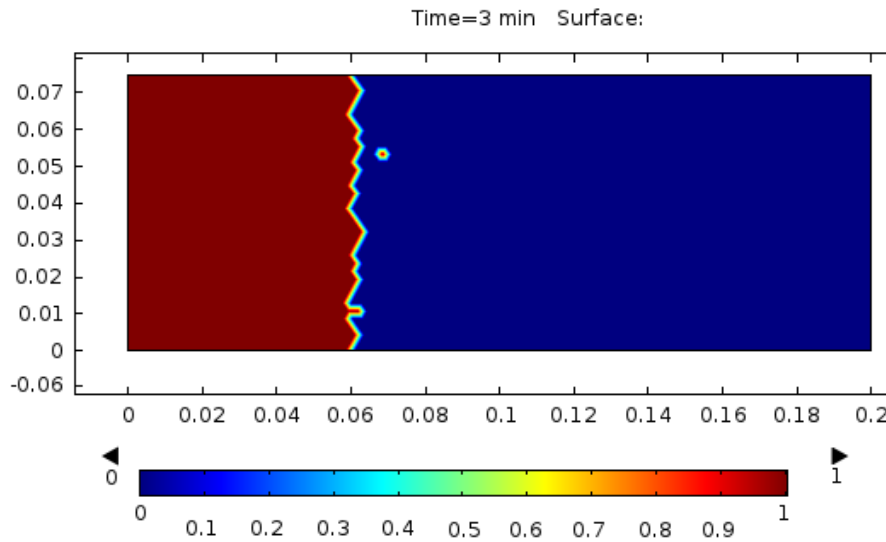
Διαπερατότητα=36e-9



Διαπερατότητα=1e-8



Διαπερατότητα μεγάλου όγκου= $1.5\text{e}-08$, μικρού όγκου= $1\text{e}-11$ (Το κομμάτι είναι assembly 2 όγκων, ενός μεγάλου και ενός μικρότερου) Διαπερατότητα μεγάλου όγκου= $1\text{e}-12$, μικρού όγκου= $1\text{e}-10$ (Το κομμάτι είναι assembly 2 όγκων)

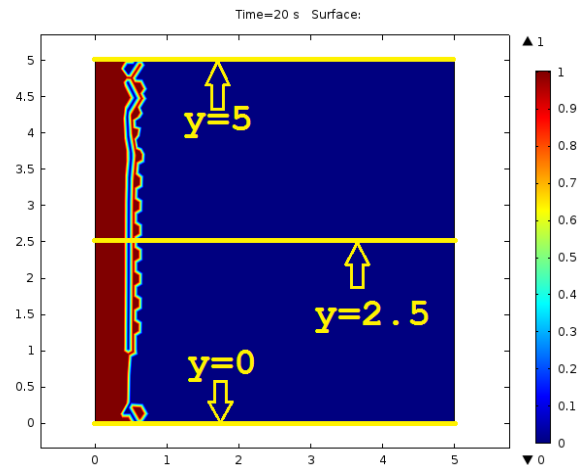


Διαπερατότητα= $3.2\text{E}-12$ – Διαστάσεις $120\text{mm}\times 75\text{mm}$

Εικόνα 4-1 Πρόβλεψη μετώπου εμποτισμού στο comsol σε διάφορες περιπτώσεις

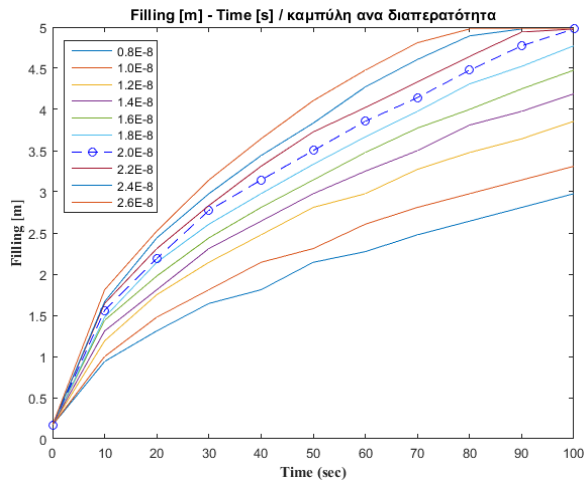
Το κύριο θέμα που μας αφορά πρακτικά, και που το COMSOL είναι σε θέση να υποστηρίξει, είναι η δυνατότητα καταγραφής του μετώπου της ροής κατά μήκος παράλληλων ευθειών στην επιμήκη διεύθυνση $y = k$, όπου $k \in [0 \div 5]$ για το ύφασμα διαστάσεων 5×5 . Στην **Σφάλμα!** Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε. φαίνεται ένα από τα 11 στιγμιότυπα στα 20 [sec] και η καταγραφή της ροής σε τρεις διαμήκεις ευθείες $y = 0, 2.5$ και 5 [m] αντίστοιχα. Η διαπερατότητα είναι σταθερή στα 3.6×10^{-8} [m^2]. Αριστερά φαίνονται οι τιμές της κάλυψης της επιφάνειας για τρεις εγκάρσιες (y) θέσεις σε 11 στιγμιότυπα (0-100). Δεξιά παρουσιάζεται το στιγμιότυπο της προσομοίωσης στα 20 [sec]. Οι τροχιές y που διέρχονται από τα σημεία των αντίστοιχων τριών στηλών είναι οριζόντιες ευθείες παράλληλες με τη ροή.

Time (s)	Filling (m)		
	(y = 0 m)	(y = 2,5 m)	(y = 5 m)
0	0,16667	0,13335	0,16667
10	0,33333	0,26784	0,31019
20	0,52315	0,44462	0,52315
30	0,56019	0,53328	0,53704
40	0,66667	0,73868	0,64352
50	0,85648	0,77542	0,66667
60	0,83333	0,77905	0,81019
70	0,83333	0,80099	0,87037
80	0,93981	0,99041	0,93981
90	0,97685	0,94696	0,97685
100	0,97685	1,01787	1,00000



Εικόνα 4-2 Καταγραφή μετώπου της ροής για διαστάσεις 5X5 με διαπερατότητα 3.6×10^{-8} [m²]

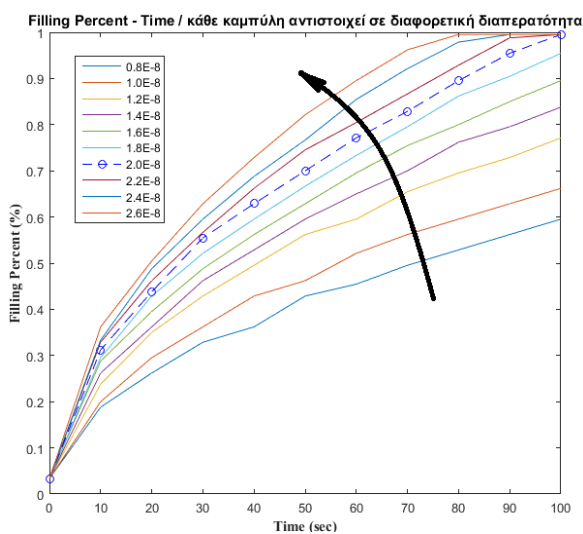
Το ποσοστό πλήρωσης (Filling) μας αφορά καταρχάς ως κριτήριο τερματισμού της προσομοίωσης. Στην **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** απεικονίζεται η σχέση των καμπυλών του Filling για τις διάφορες τιμές της διαπερατότητας. Οι καμπύλες του Filling χαράσσονται κάνοντας χρήση των σημείων που κείνται επί της διαμήκου ευθείας ($y = 0$) παράλληλης στη ροή της ρητίνης. Εκτός από την εξέλιξη του ‘μετώπου ροής’ είμαστε σε θέση να απεικονίσουμε και το ποσοστό πλήρωσης, κάτι που είναι δυνατό να επιτευχθεί μέσα στον κώδικα της matlab, αλλά, επιπροσθέτως μπορεί να προκύψει και με χρήση της μεθόδου Derived Values \rightarrow Average \rightarrow line Average από το ίδιο το COMSOL. Η διαπερατότητα που χαρακτηρίζει το μέσο της παρακάτω προσομοίωσης είναι στα 2.0×10^{-8} [m²]. Η τομή των ευθειών $y = 0$ και της $x = 3,14$ ορίζει το σημείο από το οποίο διέρχεται το μέτωπο ροής στο 5ο στιγμιότυπο και στα 40 [sec]. Στην Εικόνα 4-3(α) και (β) έχουν χαραχθεί πάνω από μια καμπύλες κάνοντας χρήση βοηθήματος του κώδικα των διακριτοποιήσεων, που εκτενέστερη χρήση του πραγματοποιήθηκε κατά την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου, και περαιτέρω αναφορά ξεφεύγει από τους σκοπούς του κεφαλαίου. Αναφέρεται απλώς ότι, όπως απεικονίζεται και με το βέλος στο διάγραμμα ποσοστού πλήρωσης με το χρόνο, όσο μεγαλύτερη είναι η διαπερατότητα τόσο νωρίτερα τερματίζει η πλήρωση. Το αν η διάδοση του μετώπου της ροής τερματισθεί πριν αυτό αγγίξει το δεξιό άκρο του υφάσματος, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Σε κάθε περίπτωση, αν η διαπερατότητα είναι πολύ μικρή τότε το ρευστό δυσκολεύεται να φέρει εις πέρας την πλήρωση ολόκληρης της επιφανείας.



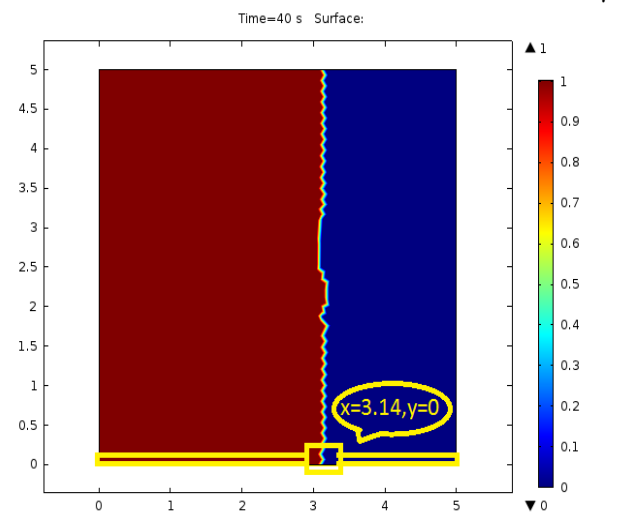
α

time[s]	Filling[%]	Filling[m]
0	0,033333	0,166667
10	0,312037	1,560185
20	0,437963	2,189815
30	0,55463	2,773148
40	0,628704	3,143519
50	0,7	3,5
60	0,771296	3,856481
70	0,828704	4,143519
80	0,89537	4,476852
90	0,95463	4,773148
100	0,99537	4,976852

γ



β



δ

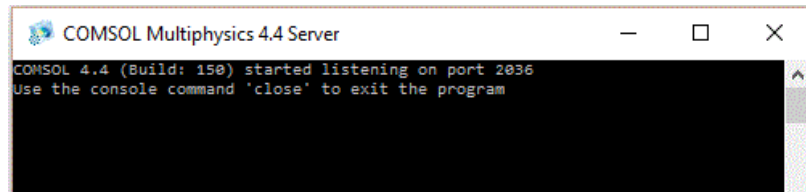
Εικόνα 4-3 Ενδεικτική περίπτωση προσομοίωσης εμποτισμού (α) διάδοση μετώπου ροής (β) εξέλιξη ποσοστού εμποτισμού (γ) Καταγραφή μεγεθών με το χρόνο για $y=0$ (δ) Σημείο (3.14, 0) στο μέτωπο ροής.

Στο Παράρτημα 1 δίνεται με λεπτομέρεια η διαδικασία δημιουργίας στο comsol τυπικού διδιάστατου μοντέλου, όπως τα παραπάνω.

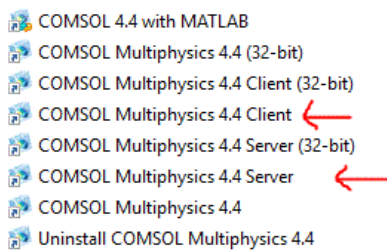
4.3 Livelink: Σύνδεση comsol – matlab

Η επικοινωνία των λογισμικών COMSOL MATLAB επιτυγχάνεται χάρη σε μια εφαρμογή που έχει αναπτύξει η COMSOL, την LIVELINK [32]. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται το LIVELINK for MATLAB. Η σύνδεση χρειάζεται στην διαδικασία εύρεσης της τιμής της διαπερατότητας από γενετικό αλγόριθμο που είναι γραμμένος σε matlab και καλεί το comsol κάθε φορά που υπολογίζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, βλ. Κεφάλαιο 5. Αυτή η μεταφορά δεδομένων βασίζεται σε μια σειρά εντολών που έχει γραφτεί κυρίως σε java αλλά με τις κατάλληλες μετατροπές χρησιμοποιείται στη MATLAB.

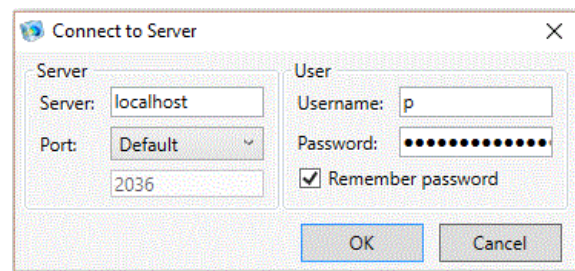
Για να τεθεί σε λειτουργία η εφαρμογή LiveLink πρέπει να γίνει χρήση του server. Αρχικά πρέπει να ανοίξει το παράθυρο *COMSOL Multiphysics 4.4 Server* και στη συνέχεια το *COMSOL Multiphysics 4.4 Client* και τελικά σε πρώτο επίπεδο να υπάρξει σύνδεση, που στη συνέχεια πρέπει να επικυρωθεί από την MATLAB, βλ. Εικόνα 4-4.



α



β



γ

Εικόνα 4-4 Δημιουργία σύνδεσης livelink (α) ενεργοποίηση console (β) εντοπισμός client-server (γ) σύνδεση

Αφού ανοίξει η MATLAB πρέπει αρχικά να βρεθεί ο Current Folder mli που στην δική μου περίπτωση βρίσκεται στην παρακάτω διεύθυνση

C:\Program Files\COMSOL\COMSOL44_copy1\mli

Στη συνέχεια πρέπει να πληκτρολογηθούν στο παράθυρο Command Window οι παρακάτω εντολές με τη σειρά.

```
>> ModelUtil.clear
```

```
>> mphstart
```

```
>> import com.comsol.model.*
```

```
>> import com.comsol.model.util.*
```

Στη συνέχεια και αφού η σύνδεση έχει επιτευχθεί ικανοποιητικά μπορεί να περάσει οποιαδήποτε πληροφορία τόσο από τη MATLAB στο COMSOL όσο και το αντίστροφο. Εν προκειμένω, Η κλήση του COMSOL από τη MATLAB χρειάστηκε για να μεταφέρεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης, δηλαδή την τιμή της διαπερατότητας και το 'διάνυσμα' του μετώπου ροής που απεικονίζει τη θέση x στην οποία έχει φτάσει η ρευστή ρητίνη για 11 χρονικές στιγμές (0 ως 10), βλ. Εικόνα 4-3 (γ) και (δ).

Ο Πίνακας 4-1 καταγράφει τα βήματα της διαδικασίας διασύνδεσης με τις αντίστοιχες εντολές και τον κώδικα που γράφτηκε.

Επιμέρους σημειώσεις και παρατηρήσεις επι της διαδικασίας έχουν ως εξής:

Εισαγωγή της τοποθεσίας του LiveLink στο πλαίσιο Current Folder.

C:\Program Files\COMSOL\COMSOL44_copy1\mli

Καθαρισμός από προηγούμενα μοντέλα

Προκειμένου να διεξαχθεί με επιτυχία η σύνδεση COMSOL και MATLAB πρέπει να καθαριστεί το ιστορικό από τα τυχόν εναπομένοντα μοντέλα

ModelUtil.clear(); removes all models.

ModelUtil.clear

Πίνακας 4-1 Βήματα δισύνδεσης Comsol-Matlab μέσω Livelink

a/a	Εντολές και Κώδικας
1	$e = [0.021552003;0.093097954;0.143462934;0.163500277;... \\ 0.186424169;0.208868842;0.223734259;0.235650097;... \\ 0.265037265;0.268543608;0.294610193];$ <p>Το διάνυσμα των πειραματικών δεδομένων του μετώπου της ροής που θα συγκριθούν με τα υπολογιζόμενα από το COMSOL</p>
2	$k = xx(ic,2)$ <p>Η τιμή της παραμέτρου (του πορώδους μέσου υαλονήματος) της διαπερατότητας που θα δοθεί ως είσοδος στο υπό μελέτη πρόβλημα του οποίου θα γίνει η προσομοίωση.</p>
3	$model = mphload('ETH_115_2');$ <p>Η έκφραση 3 συμπεριλαμβάνει την εντολή mphload. Αυτή η εντολή καλεί το αρχείο προσομοίωσης COMSOL μορφής (*.mph) που βρίσκεται στο φάκελο Current Folder.</p>
4	$model.param.set('Permeability', k);$ <p>Η εντολή param.set ορίζει τις μεταβλητές του προβλήματος. Η λέξη model πριν από το param ορίζει το μοντέλο στο οποίο απευθύνεται η απόδοση της μεταβλητής και υπάρχει σχεδόν σε κάθε εντολή που αφορά το LiveLink</p>
5	$model.study('std1').run;$ <p>Η εντολή study(' ').run λύνει το υπό μελέτη πρόβλημα</p>
6	$[Filling, m] = mphint2(model,'Filling','line','dataset','c1n1')$ <p>Η εν λόγω εντολή λαμβάνει δεδομένα από τον αντίστοιχο κόμβο (του αποθηκευμένου αρχείου) με όνομα Cut Line 2D 1 {c1n1} του Model Builder Window καθώς και τις επιλογές που εκτελέστηκαν στην διεπιφάνεια του COMSOL.</p>
7	$Fill = transpose(Filling);$ <p>Μετατροπή του [1,1] σε διάνυσμα [1,11]</p>
8	$a = Fill;$
9	$fval = \text{sqrt}(\text{sum}((e(:) - a(:)).^2))$ <p>Υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης και σύγκριση των τιμών του μετώπου ροής πειράματος και προσομοίωσης</p>

Σύνδεση της MATLAB στον COMSOL Server

1) Στην MATLAB, προσθέτω την τοποθεσία path στην οποία βρίσκεται ο φάκελος COMSOL4.4/mli.

2) Πληκτρολογώ την παρακάτω εντολή στο MATLAB prompt:

```
mphstart(<portnumber>)
```

```
mphstart
```

- Όπου <portnumber> είναι η (port used) που χρησιμοποιείται από τον COMSOL server.
- Αν ο COMSOL server υπακούει στην αρχική θύρα default port, 2036, ο αριθμός θυρίδας port number δεν χρειάζεται να καθορισθεί.

Εισαγωγή της κλάσης Comsol

Μόλις συνδεθούν με μη αυτοματοποιημένο τρόπο (manually) η MATLAB με τον server του COMSOL, the COMSOL class needs to be imported. Γράφεται η παρακάτω εντολή στο MATLAB prompt:

```
import com.comsol.model.*
```

```
import com.comsol.model.util.*
```

Φόρτωση του μοντέλου στον υποβολέα της MATLAB, MATLAB PROMPT

Για να φορτωθεί ένα υπάρχον μοντέλο αποθηκευμένο ως MPH-file χρησιμοποιείται η συνάρτηση mphload.

```
model = mphload(<filename>);
```

Για παράδειγμα, για να εγκατασταθεί το μοντέλο ETH_115_2.mph γράφω:

```
model = mphload('ETH_115_2');
```

Αυτή δημιουργεί ένα model object Model στον sever του COMSOL που είναι προσβάσιμο κάνοντας χρήση του MATLAB variable model.

Ορισμός των παραμέτρων

Καθορίζει τις παραμέτρους <param> και τους εκχωρεί τις τιμές ή κάποια έκφραση <expr> ενώ μπορεί να προστεθεί και κάποια αντίστοιχη περιγραφή <descr>.

```
model.param().set(<param>,<expr>,<descr>);
```

```
model.param.set('Permeability', k);
```

Εκτέλεση μελέτης study που είναι αποθηκευμένη σε αρχείο εκτελέσιμης μορφής.

model.study(<tag>).run() υπολογίζει την μελέτη study.

```
model.study('std1').run;
```

όπου το `<tag>` είναι string(στοιχειοσειρά) που αναγνωρίζει τον κόμβο study.

Αυτή η εντολή ενεργοποιεί την αρχική δομή επίλυσης που σχετίζεται με την φυσική που λύνεται στο μοντέλο.

Η συνάρτηση `mphint2` υπολογίζει το ολοκλήρωμα μιας έκφρασης.

```
[data,unit] = mphint2(model,<expr>,edim,'dataset',<dsettag>);
```

```
[Filling, m] = mphint2 (model,'Filling','line','dataset','c1n1');
```

Unit: Για την απόσπαση των μονάδων μέτρησης της υπολογιζόμενης έκφρασης πρέπει να καθοριστεί μια επιπλέον μεταβλητή output.

`<dsettag>`: είναι η ετικέτα (tag) του (data set) της λύσης. Η αρχική τιμή αποτελεί το τρέχον data set του μοντέλου

`<dataset>`, και καθορίζει το data set της λύσης που θα χρησιμοποιηθεί στην ολοκλήρωση.

`edim` είναι η διάσταση της ολοκλήρωσης, μπορεί να είναι 'line', 'surface' ή 'volume' ή ακέραια τιμή που καθορίζει τις διαστάσεις στο χώρο (1,2, or 3).

5

Γενετικός αλγόριθμος

προσδιορισμού διαπερατότητας

5.1 Γενετικοί αλγόριθμοι

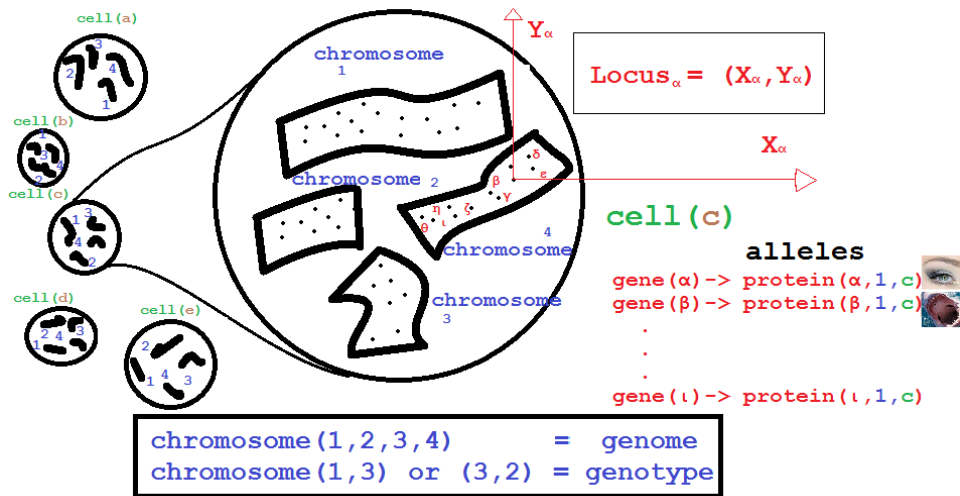
5.1.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων είναι υποκατηγορία του εξελικτικού υπολογισμού (evolutionary computing), που είναι ένας ταχέως αναπτυσσόμενος χώρος. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε χάρη στη θεωρία του Δαρβίνου περί της εξέλιξης. Ο άγγλος φιλόσοφος Herbert Spencer στην πορεία αντιλήφθηκε την μορφή της θεωρίας της εξέλιξης ως την ‘Επιβίωση του ισχυρότερου προσάρμοστη (Survival Of The Fittest). Η ιδέα του εξελικτικού υπολογισμού (evolutionary computing) εισήχθη τη δεκαετία του 60’ από τον I.Rosenberg και το έργο του ‘Evolution Strategies’. Η θεωρία των γενετικών αλγορίθμων επινοήθηκε από τον Holland αρχικά μεν για την μελέτη του φαινομένου της «φυσικής προσαρμογής», και στην πορεία για την επίλυση υφιστάμενων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η νεωτερικότητα της μεθόδου των γενετικών αλγορίθμων έγκειται στην παραδοχή πως το πρόβλημα δεν λύνεται με μαθηματικό τρόπο αλλά με τρόπο που ομοιάζει στον βιολογικό[33].

5.1.2 Βιολογικές έννοιες

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-1 τα κύτταρα είναι συστατικό στοιχείο κάθε οργανισμού, και κάθε ένα από αυτά αποτελείται από κοινό αριθμό χρωμοσωμάτων. Αυτά είναι αλληλουχίες του DNA. Το χρωμόσωμα αποτελείται από γονίδια (genes), κομμάτια DNA. Κάθε γονίδιο κωδικοποιεί μια ιδιαίτερη πρωτεΐνη. Συγκεκριμένα, μπορεί να ειπωθεί ότι κάθε γονίδιο κωδικοποιεί ένα κληρονομούμενο χαρακτηριστικό, για παράδειγμα το χρώμα των ματιών. Πιθανές επιλογές για ένα κληρονομικό χαρακτηριστικό (για παράδειγμα μαύρα, γαλάζια) καλούνται alleles (διαφορετικές μορφές του ίδιου γονιδίου - αλλήλιο). Κάθε γονίδιο έχει τη δική του θέση στο χρωμόσωμα. Αυτή η θέση ονομάζεται ‘locus’. Το

ολοκληρωμένο σύνολο του γενετικού υλικού (όλα τα χρωμοσώματα) ονομάζεται genome. Ένα υποσύνολο γονιδίων (genes) στο genome ονομάζεται γενότυπος (genotype).



Εικόνα 5-1 Βασικές έννοιες γενετικών αλγορίθμων

Κατά τη διάρκεια της αναπαραγωγής, πρώτα συντελείται ο ανα-συνδυασμός γονιδίων (recombination) ή διασταύρωση (crossover). Τα γονίδια των γονέων ανασχηματίζουν κατά τρόπο τινά ένα νέο χρωμόσωμα. Ο νεο-σχηματιζόμενος απόγονος μπορεί τότε να μεταλλαχθεί. Μετάλλαξη σημαίνει, πως τα στοιχεία του DNA αλλάζουν κατά ένα ψηφίο. Αυτές οι αλλαγές κυρίως συμβαίνουν λόγω ανωμαλιών στην γονιδιακή αντιγραφή από τους γονείς. Η υγεία ενός οργανισμού μετριέται από την επιτυχή πορεία του οργανισμού στη ζωή.

5.1.3 Από τη βιολογία στην πληροφορική

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν μια σημαντική υποκατηγορία των ευρετικών αλγορίθμων και υπάρχουν πολλοί λόγοι να υποστηρίξουν αυτό τον ισχυρισμό. Αυτή η μέθοδος μπορεί να αντιπροσωπεύσει προβλήματα που υποστηρίζουν αρκετές μεταβλητές προς εύρεση, παράλληλα τα τοπικά ελάχιστα που εμφανίζουν συνήθως είναι αρκετά. Αυτή η πρόκληση δεν αποτελεί μειονέκτημα καθώς με απλή ρύθμιση κάποιων επιλογών που διαθέτει ο γενετικός αλγόριθμος είναι σε θέση να τα αντιμετωπίσει ικανοποιητικά. Ένα κύριο πλεονέκτημα του είναι ότι μπορεί να διερευνά πολλές λύσεις παράλληλα. Η βελτίωση κάποιες φορές έχει υποκειμενική έννοια καθώς έγκειται στην απόδοση κάποιων χαρακτηριστικών του στην επόμενη γενεά, τιμές ένεκεν. Οι ονομασίες της βιολογικής λειτουργίας έχουν υιοθετηθεί από την εν λόγω μέθοδο. Συγκεκριμένα, επιλέγεται ένας αριθμός χρωμοσωμάτων που αντιπροσωπεύει τον πληθυσμό, καθένα από τα χρωμοσώματα απαρτίζεται από ένα σύνολο τιμών που αντικατοπτρίζουν τις μεταβλητές του προβλήματος. Η προσέγγιση είναι βασισμένη σε αλγορίθμους στοχαστικής έρευνας που βελτιώνουν επαναληπτικά, τυχαία επιλεγόμενες τιμές, αντί να διερευνάται ο χώρος όλων των δυνατών λύσεων. Χρησιμοποιείται ένας αριθμός επιλογών που σκοπό έχει να δημιουργήσει τα νέα άτομα του επόμενου πληθυσμού από τα άτομα που επιλέγονται (selection) από τον πληθυσμό της τρέχουσας επανάληψης. Ειδικότερα η επιλογή του συνδυασμού (crossover) αναδιατάσσει

την γενετική πληροφορία. Αυτή η αναδιάταξη συνδυάζεται με μια πιθανότητα προτίμησης έτσι ώστε κάποια άτομα να παραμείνουν अपαράλλακτα εάν επιίπτουν στο σύνολο διαλογής για την αναπαραγωγή. Ακολουθεί η λειτουργία της τροποποίησης (mutation) που εγγυάται ότι τυχόν περιοχές που παρέμειναν ανερεύνητες θα εξετασθούν στην πορεία μεταβάλλοντας την τιμή ενός εκ των ατόμων με τυχαία τροποποίηση της τιμής του. Ο αλγόριθμος τερματίζει με κατάλληλα διαμορφωμένο κριτήριο.

5.1.3.1 Κωδικοποίηση (Encoding)

Είναι η μέθοδος βάση της οποίας επιλέγεται να αναπαρασταθούν τα γονίδια του χρωμοσώματος (μεταβλητές σχεδίασης). Υπάρχουν επίσης τα παρακάτω είδη κωδικοποιήσεων:

1. Σε δυαδικούς αριθμούς (binary)
2. Πραγματικούς αριθμούς (reals/double)
3. Ακέραιοι αριθμοί που εμφανίζονται αποκλειστικά μια φορά σε ένα χρωμόσωμα (permutation)

5.1.3.2 Φυσική επιλογή (Natural Selection) και Ζευγάρισμα (Pairing)

Αφού τα άτομα του πληθυσμού καταταγούν με σειρά προτεραιότητας διαμορφούμενης βάσει κόστους ακολουθεί το ‘ξεσκαρτάρισμα’ χάρη στο οποίο απαλλασσόμαστε από τα περιττά άτομα που θεωρούνται υπεύθυνα για την απομάκρυνση του γενετικού αλγορίθμου από την βέλτιστη λύση. Πρακτικά αφαιρούνται τα N_{keep} άτομα από το συνολικό πληθυσμό N_{pop} τα οποία είναι τα ικανότερα και ως εκ τούτου απορρίπτονται τα ελλειμματικά άτομα.

Αυτά τα άτομα που παραμένουν αποτελούν σύνολο εντός ‘δεξαμενής ζευγαρώματος’ που όπως προδίδει το όνομα της θα τροφοδοτεί τα νέα ζεύγη πληθυσμών με υποψήφια ελιτιστικά άτομα.

Στην πορεία ακολουθεί η διαδικασία του ζευγαρώματος. Το ζευγάρισμα είναι η διαδικασία επιλογής ζεύγους πληθυσμών, που θα αποτελέσουν τους γονείς βάσει των οποίων θα προκύψουν απόγονοι. Η επιλογή αυτών των ζευγών θα εκτελεστεί σε περιορισμένο εύρος διακριτών τιμών επί του συνόλου λόγω της διαδικασίας ‘φυσικής επιλογής’ που προηγήθηκε. Αναφέρονται κάποιες βασικές συναρτήσεις δημιουργίας ζευγαριών ‘pairing’:

‘Pairing from top to bottom’ Ζευγάρισμα από το ανώτερο ως το κατώτερο άτομο: Αφού τα άτομα καταταγούν βάση κόστους ο κώδικας ταιριάζει τις ζυγές και τις μονές τιμές. Άρα οι μονές γραμμές διαμορφώνουν ένα διάνυσμα που αποκαλείται m και οι ζυγές αντίστοιχα ένα διάνυσμα ονόματι pa .

‘Random Pairing’ Τυχαίο ζευγάρισμα: Η επιλογή των ατόμων των πληθυσμών των γονέων επιλέγεται τυχαία και τροφοδοτείται από γεννήτρια που προσφέρει ένα σύνολο ομοιόμορφα τυχαίων αριθμών.

5.1.3.3 Διασταύρωση (crossover)

Αναπαραγωγή είναι η δημιουργία ενός ή δύο απογόνων από τους γονείς που επιλέχθηκαν στην διαδικασία ζευγαρώματος. Η αναπαραγωγή εφαρμόζεται στην πράξη δημιουργώντας σημεία διασταύρωσης (κινετοχώρος – kinetochore). Αυτά χωρίζουν τους πληθυσμούς των γονέων σε σύνολα τα οποία με τη σειρά τους θα δημιουργήσουν νέους πληθυσμούς. Στην φάση της διασταύρωσης γίνεται η πρώτη απόπειρα ανίχνευσης της επιφάνειας κόστους. Το κόστος θα εξερευνηθεί μεταξύ των ατόμων του πληθυσμού γιατί καθένα από αυτά αντιστοιχεί σε διαφορετικό κόστος.

Αναφορικά με την διασταύρωση της αναπαραγωγής υπάρχουν διάφορα είδη συναρτήσεων ή τελεστών διασταύρωσης ('crossover functions'). Παρατίθενται επί παραδείγματι [34],[35]:

1. Διασταύρωση ενός σημείου: Το σημείο διασταύρωσης είναι επιλεγμένο κατά τυχαίο τρόπο και σ' αυτό το σημείο η γενετική πληροφορία διακόπτεται. Το ένα τμήμα κάθε γονέα κληρονομείται από το παιδί ούτως ώστε να διατηρήσει την ίδια μορφή χρωμοσώματος όπως των γονέων.
2. Διασταύρωση δύο σημείων: Η φιλοσοφία παραμένει όπως στην διασταύρωση ενός σημείου αλλά οι πληθυσμοί των γονέων διακόπτονται σε τρία σημεία. Ο απόγονος θα λάβει δύο τμήματα από τον ένα γονέα και ένα από τον δεύτερο. Γενικά υπάρχει η διασταύρωση με πολλά σημεία διακοπής.
3. Η διασταύρωση των τριών γονέων: Συγκρίνεται κάθε άτομο του πρώτου γονέα με τον δεύτερο γονέα και αν τα άτομα είναι ίδια, τότε η πληροφορία περνάει στον απόγονο, εάν όχι τότε ο απόγονος θα κληρονομήσει την πληροφορία του τρίτου γονέα.
4. Scattered Crossover: Δημιουργείται ένα τυχαίο δυαδικό βοηθητικό διάνυσμα, με αριθμό ατόμων όσα είναι και τα άτομα των πληθυσμών των γονέων. Οι θέσεις που αντιστοιχούν σε '1' θα καλυφθούν από τα στοιχεία των αντιστοίχων θέσεων του ενός γονέα. Οι θέσεις που αντιστοιχούν σε '0' θα καλυφθούν από τα στοιχεία των αντιστοίχων θέσεων του άλλου γονέα. Ο δεύτερος απόγονος θα διαμορφωθεί με τον ίδιο τρόπο αλλά το δυαδικό διάνυσμα θα διαμορφωθεί αλλάζοντας τα στοιχεία του $1 \rightarrow 0$ και τα $0 \rightarrow 1$.
5. 'Κυκλική διασταύρωση' ('Cyclic Crossover (CX)': Έχει προταθεί από τον [Gordberg 1989]. Μια γνωστή εφαρμογή χρήσης της κυκλικής διασταύρωσης είναι Το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή 'Traveling Salesman Problem – TSP'. Το συγκεκριμένο πρόβλημα αποτελεί υποκατηγορία του τομέα 'Permutation Problems' και χαρακτηριστικό γνώρισμα του είναι πως το χρωμόσωμα που συνήθως αποτελείται από ακεραίους δεν μπορεί να επαναλαμβάνει τα στοιχεία, εντός αυτού.

5.1.3.4 Μετάλλαξη

Η διαδικασία της μετάλλαξης διενεργείται προς το τέλος των διαδικασιών του γενετικού αλγορίθμου. Αυτή αποτελεί ένα ανάλογο της διαδικασίας που εμφανίζεται στη βιολογία. Στη φύση η αλλαγή εκτελείται σε ένα ποσοστό του συνολικού πληθυσμού με την μορφή γονιδιακών μεταλλάξεων και χρωμοσωματικών ανωμαλιών. Η διαδικασία της εξέλιξης θα διαχειριστεί με τέτοιο τρόπο το νεοεμφανιζόμενο άτομο έτσι ώστε να επικρατήσει σε περίπτωση που θεωρηθεί ικανό ή να απορριφθεί εάν κριθεί πως είναι αδύναμο.

Η σπουδαιότητα αυτής της λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου αναφαίνεται αν αναλογιστεί κανείς ότι κατά κάποιο τρόπο με τυχαίο τρόπο προβλέπεται πως δεν θα εγκλωβιστεί ο γενετικός σε μια ειδική περιοχή του χώρου λύσεων, αλλά θα εξακολουθήσει να διερευνά. Την ικανότητα αυτής της πρόβλεψης την προσφέρει η εξαναγκασμένη μετατροπή κάποιων ατόμων με τυχαίο τρόπο. Με αυτό τον τρόπο παρεμποδίζεται η προσκόλληση σε μια συγκεκριμένη λύση και προωθείται η διερεύνηση επιπλέον

χώρων. Κατά κάποιο τρόπο η μετάλλαξη εξασφαλίζει πως δεν θα αποκλειστεί κανένα σημείο από την εξέταση.

Τα άτομα που θεωρούνται κατάλληλα κατέχοντας τις μικρότερες τιμές του κόστους της αντικειμενικής συνάρτησης από τις ήδη εξετασθείσες είναι σαφές πως πρέπει να ληφθούν υπόψη και αν δεν ‘καταπολεμηθούν’ από άλλα ανταγωνιστικά άτομα να επικρατήσουν. Γι’ αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διαιωνίζονται ως ‘elite’ άτομα καθώς αυξάνονται οι επαναλήψεις του γενετικού αλγορίθμου.

ο αριθμός των μεταλλάξεων δίνεται ως:

$$\text{αριθμός μεταλλάξεων} = \mu \times (N_{\text{pop}} - 1) \times N_t$$

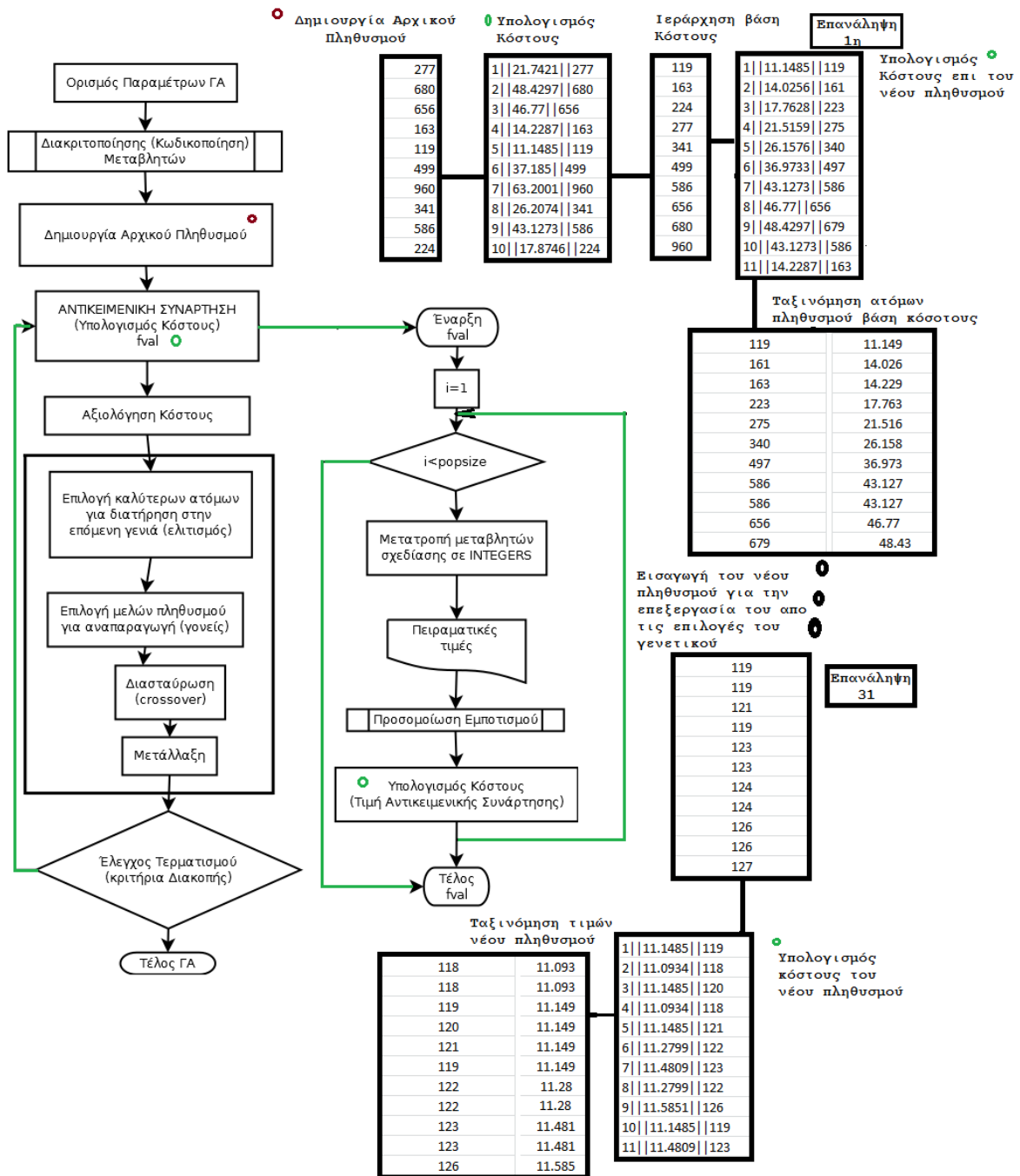
5.2 Ο γενετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε

Ο αλγόριθμος στόχευε στον προσδιορισμό της διαπερατότητας του υφάσματος, χρησιμοποιώντας ως μέτρο σύγκλισης την πειραματικά προσδιορισμένη διάδοση του μετώπου ροής, όπως εκτίθεται σε επόμενο κεφάλαιο.

5.2.1 Σχεδιασμός

Μελετήθηκαν αρκετοί υποψήφιοι κώδικες μέχρις ότου τελικά καταλήξαμε στον ιδανικό που αρμόζει καλύτερα στην περίπτωση. Μεταξύ αυτών ήταν η εφαρμογή της Matlab `optimtool` (‘ga’), ο κώδικας του Γ.Γκόνου [36] και ο κώδικας των Haupt[37]. Οι δύο τελευταίοι εκτελούν κωδικοποίηση του πληθυσμού σε δυαδική μορφή. Οποιαδήποτε περίπτωση γενετικού αλγορίθμου κι αν εξετάστηκε ήταν αρκετά χρονοβόρα και αποτρεπτική προς την εφαρμογή της. Προτάθηκε η ιδέα, ο πληθυσμός να λαμβάνει τιμές από σύνολο διακριτών τιμών πριν υποβληθεί σε δυαδική κωδικοποίηση. Παρότι ο αλγόριθμος έτρεξε, τελικά απορρίφθηκε λόγω ανεπαρκούς ακρίβειας. Η τελική μορφή του γενετικού βασίστηκε στην επεξεργασία του γενετικού αλγορίθμου των Haupt από την Α. Βασιλείου [35] όπου παρακάμφθηκε η κωδικοποίηση σε δυαδικά στοιχεία, και οι πληθυσμοί επεξεργάστηκαν περαιτέρω και μετατράπηκαν σε μορφή ακεραίων ενώ παρακάμφθηκε η διαδικασία διασταύρωσης των πληθυσμών και αντικαταστάθηκε η διαδικασία μετάλλαξης με άλλη αποτελεσματικότερη.

Ακολουθεί το σχετικό διάγραμμα ροής στην Εικόνα 5-2. Στα αριστερά είναι το κύριο μέρος που εμπλέκει την εισαγωγή των παραμέτρων του γενετικού και στα δεξιά φαίνεται το τμήμα του γενετικού που έχει σχέση με τον υπολογισμό του κόστους βάσει της αντικειμενικής συνάρτησης, και την χορήγηση των αντίστοιχων τιμών κόστους στα άτομα του πληθυσμού κάθε επανάληψης.



Εικόνα 5-2 Διάγραμμα ροής του γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε

5.2.1.1 Κωδικοποίηση χρωμοσώματος

Ο αλγόριθμος κωδικοποίησης χρωμοσώματος που εφαρμόζεται εν προκειμένω είναι ο παρακάτω:

vm=1000;

VALUES=zeros (vm, 3, 1) ;

i=1 ;

VALUES (i, 2, 1)= 0.0000000038; %Τυπική τάξη μεγέθους διαπερατότητας

VALUES (i, 1, 1)=i;

for i=2:vm

VALUES (i, 1, 1)=i;

VALUES (i, 2, 1)=VALUES (i-1, 2, 1)*0.999; %λόγος μετάβασης επόμενη τιμή

End

5.2.1.2 Αντικειμενική συνάρτηση

Κάθε άτομο αντιστοιχεί σε μια τιμή κόστους που υπολογίζεται μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος

```
fval = sqrt( sum( ( e(:) - a(:) ).^2/22 ) ); % objective fcn
```

$$fval = \sqrt{\frac{\sum_0^T (e - a)^2}{T}} \quad \text{Εξ. 5-1}$$

Όπου T το σύνολο των στιγμιότυπων. Στο εν λόγω μοντέλο το σύνολο των στιγμιότυπων αντιστοιχεί στον συνολικό χρόνο εμποτισμού του δοκιμίου υαλουφάσματος, καθώς μελετάται η θέση (έστω ενός τυχαίου σημείου επί του μετώπου της ροής καθώς κινείται επί της τροχιάς από την αφετηρία προς τον τερματισμό) ανά δευτερόλεπτο.

5.2.1.3 Πληθυσμός

Ο (αρχικός) πληθυσμός καταγράφεται με τη βοήθεια της συνάρτησης randi η οποία δίνει τιμές στα άτομα του διανύσματος πληθυσμού. Αυτές οι τιμές κυμαίνονται από 0 ως 1000 που επιλέχθηκε να είναι το διάστημα ακέραιων διακριτών τιμών. Το διάνυσμα που θα διαμορφωθεί και θα περιέχει αυτούς τους ακεραίους θα αντιστοιχεί σε κάποιο άλλο διάνυσμα κάθε μια από τις γραμμές του θα παίρνει μια τιμή διαπερατότητας τάξης μεγέθους [m²]. Το μέγεθος του διανύσματος θα καθορίζεται από την τιμή της μεταβλητής popsize δηλαδή το μέγεθος του πληθυσμού. Στην παρούσα περίπτωση το μέγεθος του πληθυσμού N_{pop} επιλέχθηκε να παίρνει την τιμή 10.

```
pop1(iz, :) = randi([1,1000],npar,1); % random population
```

5.2.1.4 Ζευγάρισμα

Στον κώδικα που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία το ζεύγος αναπτύσσεται βάση των κάτωθι εντολών

```
ma=ceil(Nkeep*rand(1, Nkeep))
pa=ceil(Nkeep*rand(1, Nkeep))
```

Όπου ceil είναι εντολή που στρογγυλοποιεί προς τον επόμενο ανώτερο ακέραιο αριθμό και rand γεννήτρια τυχαίων αριθμών της MATLAB.

5.2.1.5 Διασταύρωση

Το τμήμα του κώδικα που σχετίζεται με την αναπαραγωγή και διασταύρωση είναι το παρακάτω:

```
for ic=1:M
    mate1=pop(ma(ic),:);
    mate2=pop(pa(ic),:);
    indx=2*(ic-1)+1; % starts at one and skips every other one
    xp=ceil(rand*npar); % random value between 1 and N
    temp=mate1;
    x0=xp;
    while mate1(xp)~=temp(x0)
        mate1(xp)=mate2(xp);
        mate2(xp)=temp(xp);
        xs=find(temp==mate1(xp));
        xp=xs;
    end
    pop(keep+indx,:)=mate1;
    pop(keep+indx+1,:)=mate2;
end
```

5.2.1.6 Μετάλλαξη

Ο υπολογιστικός κώδικας εύρεσης των γραμμών και στηλών των μεταλλαγμένων διάδικων αριθμών είναι

```
nmut=ceil((popsize-1)*Nt*μ)
mrow=ceil(rand(1,μ)*(Npop-1))+1;
mcol=ceil(rand(1,μ)*Nt);
pop(mrow,mcol)=abs(pop(mrow,mcol)-1);
```

5.2.2 Υλοποίηση

Οι επιλογές των ιδιοτήτων του γενετικού ήταν οι εξής:

- Popsize =10; % set population size
- Mutrate =0.4; % set mutation rate
- selection=0.9; % fraction of population kept

Στο υπολογιστικό κόστος μπορεί να ανταπεξέλθει ακόμα και ένα κοινό υπολογιστικό σύστημα. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε υπολογιστής με επεξεργαστή Intel® Core™ i7-5500U CPU@2.40GHz 2.40GHz και σε αυτόν οι 800 επαναλήψεις ολοκληρώθηκαν σε 23h & 15min ενώ η βέλτιστη λύση βρέθηκε ανιχνεύθηκε στις 20h & 20min. Η προσομοίωση της επίπεδης επιφάνειας ολοκληρωνόταν σε διάστημα 8 - 10 [sec]

5.2.2.1 Κώδικας MAIN εισαγωγής των παραμέτρων εκτέλεσης του γενετικού και των επιλογών.

```

clear all
clc
%% Define GLOBAL variables
global e a
global VALUES
global vm vn vp
global iga
global Diakr
%% Load and Plot Experimental Data
%% Setup the GA
ff='ga_fun'; % objective function
npar=1; % # optimization variables
Nt=npar; % # columns in population matrix
%
% Stopping criteria
maxit=800; % max number of iterations

%% GA parameters
popsize = 10; % set population size
mutrate =.4; % set mutation rate
selection=.9; % fraction of population kept
keep=floor(selection*popsize); % #population members that survive

%% preparation of matting by Vasileiou
M=ceil((popsize-keep)/2); % number of mattings
odds=1;
for ii=2:keep
odds=[odds ii*ones(1,ii)];
end
Nodds=length(odds);

%% Create the INITIAL Population
iga=0; % generation counter initialized

% Scenario 3:
% There is neither previous Population "pop0" nor values for "cost0".
pop0=[];
cost0=[];
for iz=1:popsize % !
pop1(iz,:) = randi([1,1000],npar,1); % random population
end
cost1=zeros(popsize,1);
%_____ and finally, production of __pop-cost_____
pop = [pop0;pop1]; %
cost=[cost0;cost1];

name=['popINI_' int2str(iga) '.txt']; % write Initial Pop to FILE
dlmwrite(name, pop, 'delimiter', '\t')
%
%% DIAKRITOPOIHS (150 Values - 3 diakritopoihseis)
run Diakritop_1_100values % Call Diakritop_1_100values script

%% calculate COST for the INITIAL Population
cost=feval(ff,pop); % calculates population cost, using ff

%% Sort costs & Statistics
[costs,ind]=sort(cost); % min cost in element 1
pops=pop(ind,:); % sort population with lowest cost first

cost=costs;

```

```

pop=pops;

while iga<maxit
iga=iga+1; % increments generation counter
%
% Pair and mate
% ma and pa contain the indices of the chromosomes that will mate
pick1=ceil(Nodds*rand(1,M)); % mate #1 Coding by Vasileiou
pick2=ceil(Nodds*rand(1,M)); % mate #2
% ma and pa contain the indices of the parents
ma=odds(pick1);
pa=odds(pick2);
% Performs mating Coding by vasileiou
for ic=1:M
matel=pop(ma(ic),:);
mate2=pop(pa(ic),:);
indx=2*(ic-1)+1; % starts at one and skips every other one
xp=ceil(rand*npar); % random value between 1 and N
temp=matel;
x0=xp;
while matel(xp)~=temp(x0)
matel(xp)=mate2(xp);
mate2(xp)=temp(xp);
xs=find(temp==matel(xp));
xp=xs;
end
pop(keep+indx,:)=matel;
pop(keep+indx+1,:)=mate2;
end
%
% Mutate the population Coding by Haupt
nmut=ceil((popsize-1)*Nt*mutrate); % total number of mutations
mrow=ceil(rand(1,nmut)*(popsize-1))+1; % row to mutate
mcol=ceil(rand(1,nmut)*Nt); % column to mutate
for ii=1:nmut
pop(mrow(ii),mcol(ii))=abs(pop(mrow(ii),mcol(ii))-1);
% toggles bits
end % ii
% ok...new population is now selected

cost=feval(ff,pop);
%
%% Sort the costs and associated parameters
part=pop; costt=cost;
[cost,ind]=sort(cost);
pop=pop(ind,:); % auto emfanizetai sto Command Window

%
disp(num2str(iga))
%*****Writing Results to FILES*****%
end %iga
%%
%
%% Displays the output
day=clock;
disp(datestr(datum(day(1),day(2),day(3),day(4),day(5),day(6)),0))
disp(['optimized function is ' ff])
format short g
disp(['popsize = ' num2str(popsize) ' mutrate = ' num2str(mutrate) ' # par =
' num2str(npar)])
disp([' best cost=' num2str(cost(1))])
%//////////%%
disp(['best solution']) %%

```

```

disp([num2str(pop(1,:))])           %%% siglinousa timi
disp([num2str(VALUES(Diakr(1,:),2))]) %%% siglinousa diaperatotita

5.2.2.2 Κώδικας περιέχων την αντικειμενική συνάρτηση και υπολογισμού του κόστους
function fvalF = ga_fun( pop )
% The Objective Function it calculates costs for the population
% it is called from MAIN.m
% cases: GA_(TEMP)
% Define GLOBAL variables
global e a % thelw na tywnontai oi times sto Command Window
global VALUESS % thelo simple presition / ksepernaei kapoies
                % yperakodiseis stis times tou kostous
global vm vn vp
global iga % generation counter
global Diakr % Number Of Discretization
global fval
global xx % population matrix
% population size
[Npop,Nnvar]=size(pop);           % Nnvar=(Ncity)

% Initialize parameters
A=zeros(Npop,1);           % matrix pre-allocation for the A-matrix
% Metatroph tou POPulation apo INTEGER [0-1000] se INTEGER 'XX'
% VALUES

% Loop XX
for isis=1:Npop           % FOR LOOP (ic)
    fvalF(isis,1)=0;
    % Metatroph apo INTEGER [0-150] se INTEGER 'XX' VALUES
    % me range timwn [LB-UB], symfwna me th diakritopoihsh
        for i=1:vp           % Nnvar - vp
[vm,vn,vp]=size(VALUESS);
            for j=1:vm
                if pop(isis)== VALUESS(j,1)
                    xx(isis) = VALUESS(j,2);
                Diakr(isis) = VALUESS(j,1); %Command Window - Current discreet Value
                else
                    end
            end
        end
    end %isis
% end of Loop XX

disp(Diakr)
[x,y] = size(Diakr);
if iga == 0
fid=fopen('Diakr1.dat','a');
% fprintf(fid,'# Diakr \n');
    stan=[iga Diakr(1) Diakr(2) Diakr(3) Diakr(4) Diakr(5)];
fprintf(fid,'%i %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f \n', stan);
fclose(fid);
else
fid=fopen('Diakr1.dat','a');
% fprintf(fid,'# Diakr \n');
    stan=[iga Diakr(1) Diakr(2) Diakr(3) Diakr(4) Diakr(5) Diakr(6)];
fprintf(fid,'%i %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f \n',
stan);
fclose(fid);
end

for isis=1:Npop % AN PROKIPSI THEMA NA TO ANTIKATASTISW ME y % ic -
                % ARXH FOR Loop for Each Chromosome
    filename = 'expval.xlsx';sheet = 1;Range = 'D2:D23';
    e = xlsread(filename,sheet,Range); % Read Experimental Values from
                                        % Excel

```

```

k = xx(isis); % read permeability
o = Diakr(isis); % read the discrete value
model = mphload('ETH_289_1');
model.param.set('Permeability', k);
model.study('std1').run;
[filling, m] = mphint2(model, 'filling', 'line', 'dataset', 'c1n1');
fill = transpose(filling);
a = fill; % simulation results
fval = sqrt( sum( ( e(:) - a(:) ).^2/22 ) ); % objective fcn
[num2str(isis), '||', num2str(fval), '||', num2str(o)] % write in
                                                    % Command Window

% Apodosh timhs sthn fvalF
fvalF(isis,1)=fval;
end % isis - TELOS FOR Loop for Each Chromosome
end % function

```

5.2.2.3 Κώδικας υπολογισμού δεδομένων για την τροφοδότηση του πληθυσμού.

```

%% Code Modification: AV's modification for PD's Diploma Thesis, June 2016
%% Original: Anastasia's GA code, for PhD Thesis, 2012-2013.
% functon "Diakritop_3_150values.m"
%
%% Define GLOBAL variables
global VALUESS
global vm vn vp
%% DIAKRITOPOIHSH (1000 Values - 1 diakritopoihseis)
% Diakritop_1_1000values.m
% vm=1000;
%%
vm=1000;
VALUES=zeros(vm,3,1);
i=1
;
VALUES(i,2,1)= 1e-08
VALUES(i,1,1)=i;
for i=2:vm
    VALUES(i,1,1)=i;
    VALUES(i,2,1)=VALUES(i-1,2,1)*0.9975;
end
VALUESS = single(VALUES); % single precision gia na dioksw tyxon
                        % yperakontiseis stis times tou kostous
[vm,vn,vp]=size(VALUESS); % ορισμός διαστάσεων πίνακα διακριτοποίησης

```

5.2.3 Εκτέλεση

Ο Πίνακας 5-1 παρουσιάζει μια τυπική εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου. Οι ακέραιοι που παρουσιάζονται στον πίνακα αντιστοιχούν σε διακριτές τιμές διαπερατότητας αριθμημένες από 0 έως 1000 σε ένα εύρος τιμών που ορίζει ο χρήστης. Κάθε τιμή διαπερατότητας αντιστοιχεί και σε μια τιμή αντικειμενικής συνάρτησης. Ένα τμήμα αυτών των τιμών παρουσιάζει ο Πίνακας 5-2, που κυμαίνονται σε κόστη μικρότερα του 10 και αντιστοιχούν σε διαπερατότητες από $[7 - 9] \times 10^{-10}$. Συνεπώς, όπως δείχνει ο

στην 693η επανάληψη η $126^{\text{η}}$ διακριτή τιμή αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή κόστους, που είναι **8,3413658** (διαπερατότητα **8,94E-10**) σύμφωνα με το περιεχόμενο που εντάσσει ο Πίνακας 5-2.

Εάν διαλέξω μεγαλύτερη ανάλυση διατηρώντας όμως το εύρος των τιμών διαπερατότητας σταθερό, τότε εντοπίζεται πολλαπλή επανάληψη των ίδιων τιμών κόστους πράγμα που κάνει τον γενετικό να περνάει με δυσκολία από τα εμφανιζόμενα τοπικά ελάχιστα. Η αποκτηθείσα εμπειρία έχει δείξει ότι η βελτίωση που

προσδίδει η χρήση μεγαλύτερης ανάλυσης πέραν κάποιου σημείου έχει μικρό αντίκτυπο στην αύξηση των πιθανόν τιμών που μπορεί να πάρει η διαπερατότητα.

Πίνακας 5-1 Εξέλιξη αποτελεσμάτων τυπικής εκτέλεσης του ΓΑ

επανάληψη	# άτομου										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	400	400	326	556	350	367	350	631	400	993	
1	326	350	350	367	399	400	400	554	630	400	631
459	189	188	188	202	195	189	190	191	191	190	191
460	189	187	186	189	202	190	190	191	190	190	189
461	187	189	188	189	202	186	189	190	189	189	202
462	187	188	187	189	188	188	189	202	202	189	189
463	187	187	188	188	188	187	188	189	188	189	188
491	187	180	185	185	183	183	183	183	179	179	179
492	187	180	184	185	179	179	178	182	182	185	185
493	178	187	180	184	185	185	183	179	179	183	184
494	178	186	180	184	185	184	182	179	179	180	184
495	178	180	180	184	184	183	183	185	179	184	184
535	178	175	175	168	164	166	166	168	168	168	165
536	178	165	166	166	167	168	168	168	162	163	164
537	163	177	165	165	166	168	168	168	160	165	168
538	163	159	165	164	164	176	166	168	168	165	177
539	159	162	175	164	164	177	166	168	168	165	168
691	159	133	156	127	132	132	132	132	131	134	132
692	159	156	133	132	126	132	132	132	132	131	132
693	126	159	156	133	131	132	132	131	130	133	132
694	126	159	155	132	131	130	132	132	132	130	156
695	126	157	156	130	130	132	132	130	132	130	132

Πίνακας 5-2 Τμήμα των 1000 διακριτών τιμών διαπερατότητας και αντίστοιχα κόστη

α/α	διαπερατότητα	Κόστος	187	8,51E-10	8,515983	265	8,00E-10	11,33806
126	8,94E-10	8,341366	188	8,51E-10	8,613768	266	7,99E-10	11,35128
127	8,93E-10	8,925268	189	8,50E-10	8,613768	267	7,99E-10	11,35128
128	8,93E-10	9,13905	223	8,27E-10	8,91678	268	7,98E-10	10,66192
129	8,92E-10	8,997616	224	8,27E-10	9,303095	285	7,87E-10	10,36133
130	8,91E-10	8,997616	225	8,26E-10	9,950232	286	7,87E-10	11,23369
131	8,90E-10	9,149448	226	8,25E-10	9,239813	287	7,86E-10	11,0367
157	8,72E-10	9,221933	227	8,25E-10	9,765282	288	7,85E-10	11,49121
158	8,71E-10	8,890045	248	8,11E-10	10,80505	289	7,85E-10	10,19396
159	8,71E-10	8,435478	249	8,10E-10	10,80505	396	7,20E-10	15,68142
160	8,70E-10	8,657828	250	8,10E-10	10,64627	397	7,20E-10	15,68142
161	8,69E-10	9,003827	251	8,09E-10	10,63841	398	7,19E-10	15,88754
185	8,53E-10	8,737225	252	8,08E-10	9,905932	399	7,19E-10	15,89604
186	8,52E-10	8,81147	264	8,01E-10	10,08756	400	7,18E-10	15,94619

Δεδομένου ότι η διεξαγωγή του πειράματος έγινε μετά την προετοιμασία του γενετικού αλγορίθμου, επιλέχθηκε αρχικά αντί των πειραματικών σημείων μια υποθετική σειρά σημείων – στιγμιστύπων που προέκυψαν από αριθμητική επίλυση του προβλήματος στο COMSOL με γνωστή διαπερατότητα. Στον παρακάτω συγκριτικό πίνακα είναι αντιληπτό ότι ο γενετικός αλγόριθμος προσεγγίζει αυτά τα σημεία αρκετά πιστά.

Πίνακας 5-3 Σύγκριση θεωρητικών – προσομοιωμένων μετώπων ροής

Στιγμιότυπα	Time	Σημεία Εμποτισμού (Filling)			Διακριτές Τιμές	
		Στόχος	Προσομοίωση			
1	0	9.55166	9,55165	9,55165	3,71E-07	65,5368
2	2	60.62378	60,62378	64,13255	3,71E-08	64,56738
3	4	85.18519	85,18518	90,25341	3,71E-09	0,554473
4	6	104.2885	104,28849	111,30604	3,71E-10	89,5426
5	8	119.29825	120,27290	128,84990	3,71E-11	116,4518
6	10	134.30799	134,30799	142,88499	3,71E-12	124,6363
7	12	144.83431	146,39376	156,92007	3,71E-13	124,6363
8	14	158.8694	158,86939	169,39571	3,71E-14	124,6363
9	16	169.39571	169,39571	178,94736	3,71E-15	124,6363
10	18	178.94737	178,94736	185,96491	3,71E-16	124,6363
11	20	185.96491	185,96491	188,49902	3,71E-17	124,6363
Διαπερατότητα		3,70E-09	3,71E-09	4,20E-09	best cost=0,554473	
Κόστος			0,554473	7,7213699		

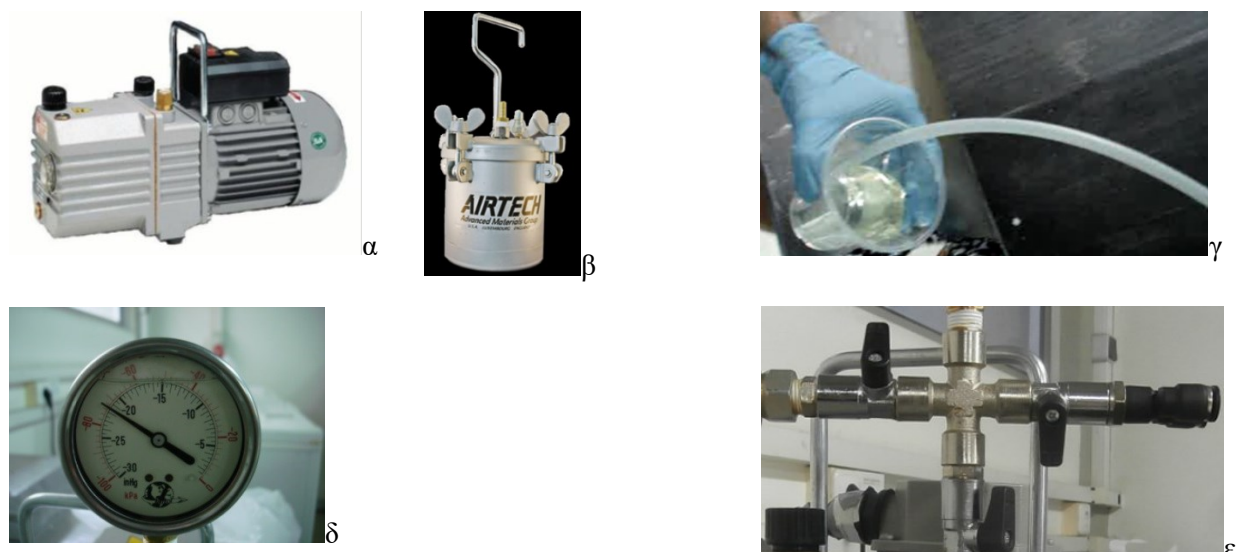
6

Πειραματική καταγραφή μετώπου εμποτισμού

Η καταγραφή του μετώπου εμποτισμού έγινε για επίπεδο δοκίμιο χρησιμοποιώντας Καλούπι αλουμινίου επιφάνειας 340 X 220 mm, πάχους 1 mm, σύμφωνα με την διαδικασία VARI, βλ. Κεφάλαιο 3.

6.1 Εξοπλισμός

Αντλία κενού DVP RC.8D δύο σταδίων, ονομαστικής πίεσης 0.01 mbar, παροχής 10.2-9.5 m³/h και ισχύος 0.37 kW, βλ. Εικόνα 6-1. Για τη μέτρηση του επιτυγχανόμενου κενού χρησιμοποιείται μανόμετρο εύρους 0 έως -100 KPa (0 έως -1 bar) που νοείται ως σχετική πίεση ως προς την ατμοσφαιρική. Για τη ρύθμιση/διατήρηση του κενού χρησιμοποιείται σύστημα βαλβίδων χειρός.






Εικόνα 6-1 Εγκατάσταση VARI εργαστηρίου του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών (α) αντλία (β) ταμιευτήρας ρητίνης (γ) δοχείο άντλησης (δ) Μανόμετρο (ε) Βαλβίδες ρύθμισης κενού

6.2 Υλικά

Τα υλικά των αναλωσίμων που χρησιμοποιήθηκαν απεικονίζει ο Πίνακας 6-1:

Πίνακας 6-1 Χαρακτηριστικά των αναλώσιμων που χρησιμοποιήθηκαν

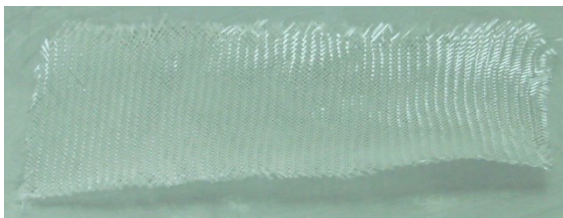
Υαλοϋφασμα Glass Fiber σε στρώσεις διαστάσεων 20x75 mm		
Τεχνικά Στοιχεία	Χαρακτηριστικά	
Βάρος ανά m ²	25 gr	
Πλέξη	Plain	
Πάχος	0,02 mm	↑ 0.02 [mm]
Peel Ply διαστάσεων 26.5x12.5 mm		
Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Στοιχεία	
Αντοχή στη θερμοκρασία	190oC	
Βάρος	88gr/m ²	
Πάχος	0,15mm	
Χρώμα	Λευκό με κόκκινες ρίγες	↓ 0.15 [mm]
Πλέγμα διαστάσεων 30x16 mm		
Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Στοιχεία	
Αντοχή στη θερμοκρασία	125oC	
Βάρος	172gr/m ²	
Πάχος	1,2mm	↑ 1.2 [mm]
Κάτω (διάτρητη) σακούλα διαστάσεων 26.5x15.5 mm		
Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Στοιχεία	
Αντοχή στη θερμοκρασία	140oC	
Αντοχή στον εφελκυσμό	65 Mpa	
Μέγιστη Ελαστικότητα	400%	
Σακούλα κενού SBF 130B διαστάσεων 50x35 mm		
Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Στοιχεία	
Αντοχή στη θερμοκρασία	195oC	
Αντοχή στον εφελκυσμό	45 Mpa	
Μέγιστη Ελαστικότητα	500%	
Πάχος	0,075mm	↓ 0.075 [mm]
Σπιράλ διαμέτρου 10 [mm]		
ταινία σφράγισης-στεγανοποίησης		

Ρητίνη ALPHA EPOXY HX-3 (VIVACITY ENGINEERING)	
Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Στοιχεία
Ιξώδες (ρευστότητα) 25 °C	325-375
Σχέση ανάμειξης A/B	3/1 κατ'ογκον
Χρόνος χρήσης ετοιμού μείγματος (25 °C)	45-60 min
Πλήρης σκλήρυνση	24 hr
Θερμική αντοχή	60°C ή 140°C (post cured)

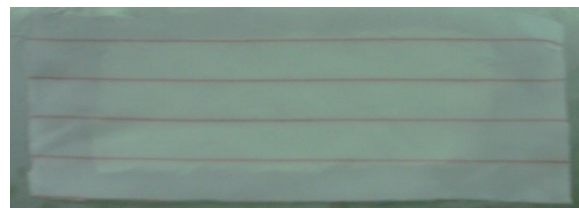


6.3 Διαδικασία layup

Κόβονται το υαλούφασμα στις επιθυμητές διαστάσεις 75x200 [mm²] ακολουθώντας το ‘ψαροκόκαλο’ δηλαδή τη νοητή ευθεία που σχηματίζουν οι ραφές του υαλουφάσματος, το peel-ply σε διαστάσεις μεγαλύτερες από αυτές του υαλουφάσματος κατά 2 cm ενώ το flow media λίγο πιο φαρδύ. Τοποθετείται στη θέση του το καλούπι στο οποίο θα εγκατασταθούν οι στρώσεις του lay up. Το καλούπι αλείφεται με αποκολλητική ουσία (release wax) μόνο στην περιοχή που θα έρθει σε επαφή με τη ρητίνη και όχι στα σημεία που θα κολληθεί η στεγανοποιητική ταινία. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η ταινία σφράγισης (sealant tape -τσιμούχα) στα όρια του καλουπιού διατηρώντας μια λεπτή ζώνη ακάλυπτη στο άκρο. Το βήμα αυτό πρέπει να ολοκληρωθεί σχετικά γρήγορα πριν σκληρύνει το κολλώδες αυτό υλικό. Εντός της ταινίας περιφερειακά του πολύστρωτου στρώνεται το σπιράλ, που τα άκρα του εκτείνονται σχεδόν στο 1/5 της διαμήκους πλευράς του υαλουφάσματος. Αυτή θεωρείται η καλύτερη λύση τροφοδοσίας της ρητίνης. Στην ακμή εισαγωγής της ρητίνης το σπιράλ πρέπει να καλύπτεται από το Peel-ply. Κατόπιν, χρησιμοποιούνται μερικά εκατοστά ταινίας σφράγισης για να τυλιχθούν οι γραμμές αναρρόφησης και τροφοδοσίας ρητίνης στεγανοποιώντας τες έως κάποιο βαθμό. Εφαρμόζονται στο κέντρο της εγκάρσιας ακμής εισόδου και εξόδου αντίστοιχα όπου έχει τοποθετηθεί ταινία και συγκρατούνται εκεί. Τοποθετείται το υαλούφασμα, στην συνέχεια το peel-ply προκειμένου να είναι εφικτή η αποκόλληση του υαλουφάσματος από το καλούπι και μετά το πλέγμα ροής (flow mesh). Πριν τοποθετηθεί η σακούλα κενού που είναι η τελική στρώση εναποτίθεται μια διάτρητη σακούλα για να μειωθεί το πορώδες περαιτέρω αποβάλλοντας την περίσσεια αέρα από το πολύστρωτο. Χρησιμοποιείται μόνο για πρότυπα εργαστηριακά δοκιμιά με σκοπό να μειωθεί παραπάνω το πορώδες της ρητίνης που θα πάρουμε μετά τη στερεοποίηση. Στην συνέχεια κόβεται η σακούλα κενού (VACCUM BAG SBF 130B) σε διαστάσεις μεγαλύτερες από τις διαστάσεις του καλουπιού πέραν δηλαδή του περιφερειακά τοποθετημένου tape. Σταθεροποιείται η γραμμή αναρρόφησης τοπικά στη βάση που είναι τοποθετημένο το καλούπι.



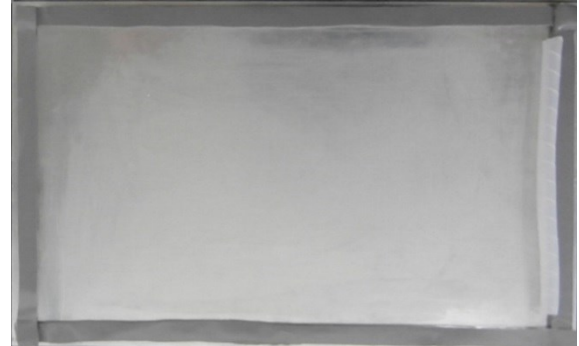
α



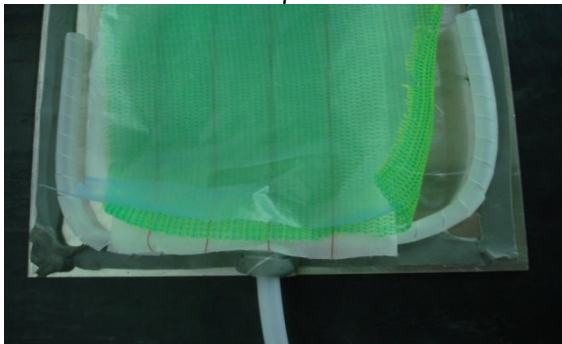
β



γ



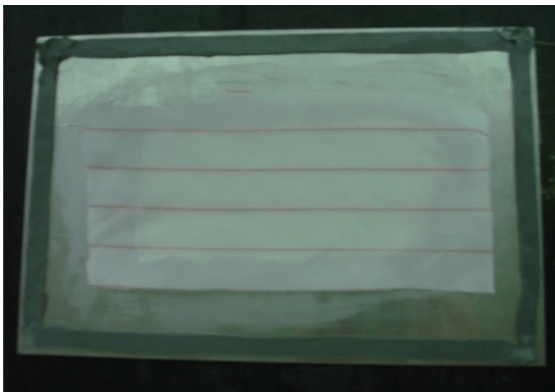
δ



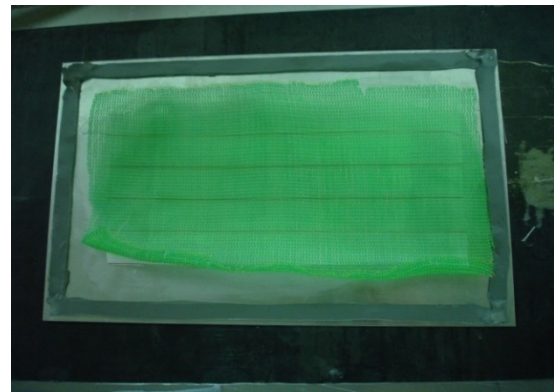
ε



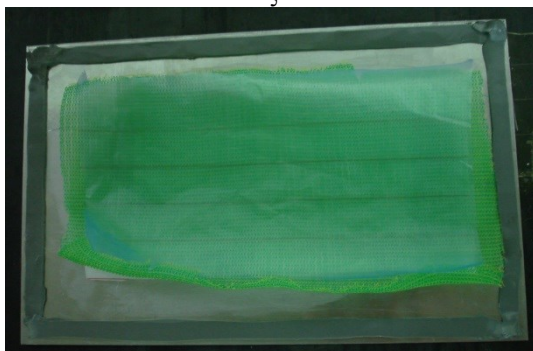
στ



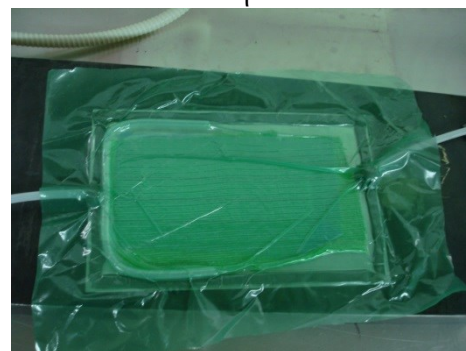
ζ



η



θ



ι

Εικόνα 6-2 Διαδικασία layup (α) Κοπή υφάσματος (β) Κοπή peelply (γ) Επάλειψη αποκολλητικού - εφαρμογή ταινίας (δ) Προσθήκη σπειροειδούς (ε) Τοποθέτηση σπειροειδούς 'Π' (στ) Τοποθέτηση βαλουφάσματος (ζ) Τοποθέτηση Peel ply (η) Τοποθέτηση διχτυού (θ) Τοποθέτηση διάτρητης σακούλας (ι) Σακούλας κενού

6.4 Δοκιμή στεγανότητας και εφαρμογή κενού

Σφραγίζεται η γραμμή εισαγωγής ρητίνης με ταινία σφράγισης, τίθεται σε λειτουργία η αντλία κενού και παρατηρείται το μανόμετρο. Εν προκειμένω, αρχικά η ένδειξη σταθεροποιήθηκε σε σχετική πίεση -0.72 , δηλαδή λόγω διαρροής δεν συμμορφωνόταν με την υποπίεση 1 bar που είναι η επιθυμητή.

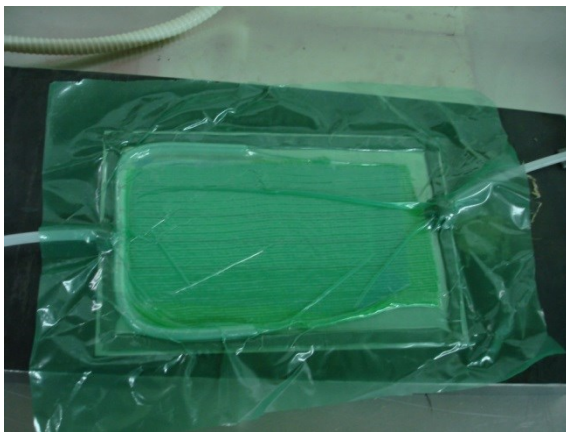
Με ρύθμιση της σακούλας η απώλεια πίεσης αποκαταστάθηκε και το μανόμετρο τελικά έδειξε σχετική πίεση -0.8 bar που θεωρήθηκε ικανοποιητική ένδειξη, δηλ. απόλυτη πίεση 0.2 bar.

Σημειώνεται πως τα όρια του υαλοϋφάσματος καθώς και το ίδιο το υαλοϋφασμα δεν ήταν εύκολα αντιληπτά από την κάμερα στη μονή στρώση, όμως σε περισσότερες στρώσεις γινόταν αντιληπτό όπως στην Εικόνα 6-3(β) που έχουμε δύο στρώσεις.

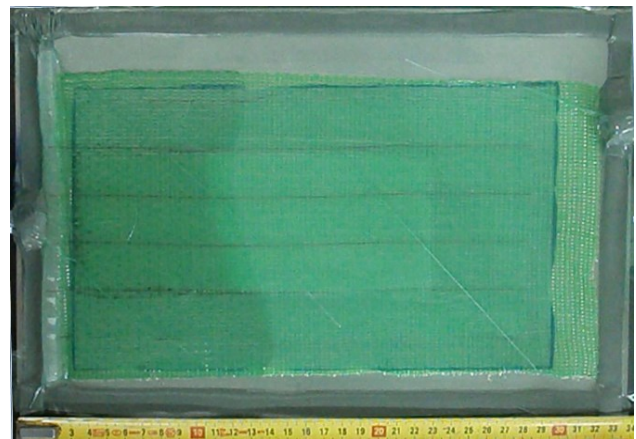
Τοποθετούμε την μάσκα που είναι κατάλληλη για ρητίνες καθώς έχει προδιαγραφές A1B1E1K1 και τα γυαλιά προστασίας από εκτόξευση ρητίνης και γάντια από latex.

Ακολουθεί η διαδικασία ανάμιξης ρητίνης και σκληρυντή (catalyst) με την κατάλληλη αναλογία. Χρησιμοποιούμε ζυγαριά ακριβείας. Εν προκειμένω τοποθετούνται 90 gr εποξικής ρητίνης και 30 gr σκληρυντή. Στη συνέχεια αναδεύουμε το μείγμα καθ' όλη τη διάρκεια έως την στιγμή που θα γίνει αναρρόφηση από την διάταξη, καθώς αναφέρεται πως η ρητίνη πήζει αρκετά γρήγορα.

Στη συνέχεια αποσφραγίζεται το στόμιο εισόδου και βυθίζεται στο δοχείο του μείγματος για την εκτέλεση της αναρρόφησης.



α



β

Εικόνα 6-3(α) Εφαρμογή κενού (β) Μέτωπο εμποτισμού στα όρια του υαλοϋφάσματος

6.5 Καταγραφή μετώπου εμποτισμού

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή απεικονίζεται στην Εικόνα 6-4.



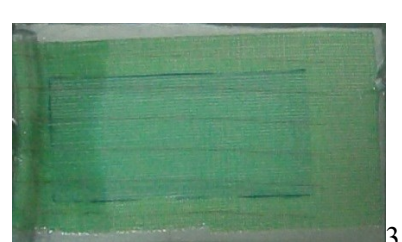
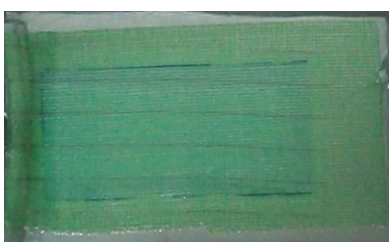
Εικόνα 6-4 Διάταξη καταγραφής της ανάπτυξης του μετώπου της ροής.

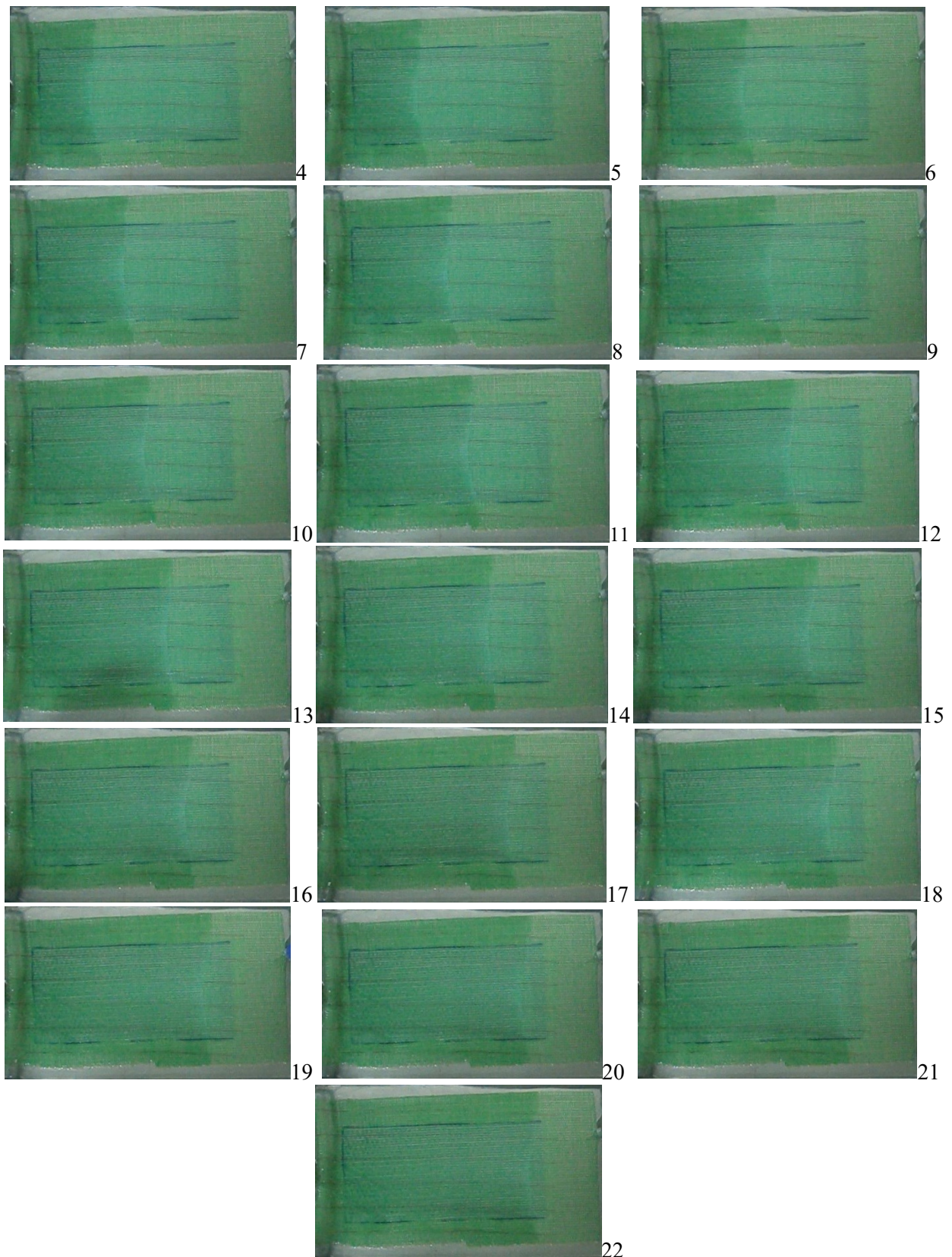
Πρόκειται για έναν συνδυασμό κοινών καθημερινά χρησιμοποιούμενων μερών που όμως φαίνεται να έχουν καλή εφαρμογή για τον σκοπό που τα χρησιμοποιούμε. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται το μοντέλο OLYMPUS VR-360 ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής της εταιρείας OLYMPUS (Εικόνα 6-5). Με χαρακτηριστικά (με ανάλυση οθόνης 460K dots, οπτικό και ψηφιακό ζουμ 12.5x/4x/50x, εστιακό μήκος 24-300mm, μέγεθος και τύπο αισθητήρα 1/ 2.3'' και CCD αντίστοιχα. Η ανάλυση της φωτογραφικής είναι 16 Megapixel (4608x3456pixels). Η κάμερα σταθεροποιείται σε κοινό τρίποδα (BILORA 259-N). (Εικόνα 6-5) Η διάταξη βιντεοσκόπησης αλφαδιάζεται κατάλληλα ώστε να καταγράφονται όσο το δυνατό πιστότερα τα σημεία.



Εικόνα 6-5 Τα μέρη της καταγραφικής διάταξης (α) ψηφιακή φωτογραφική μηχανή (β) τρίποδας σταθεροποίησης

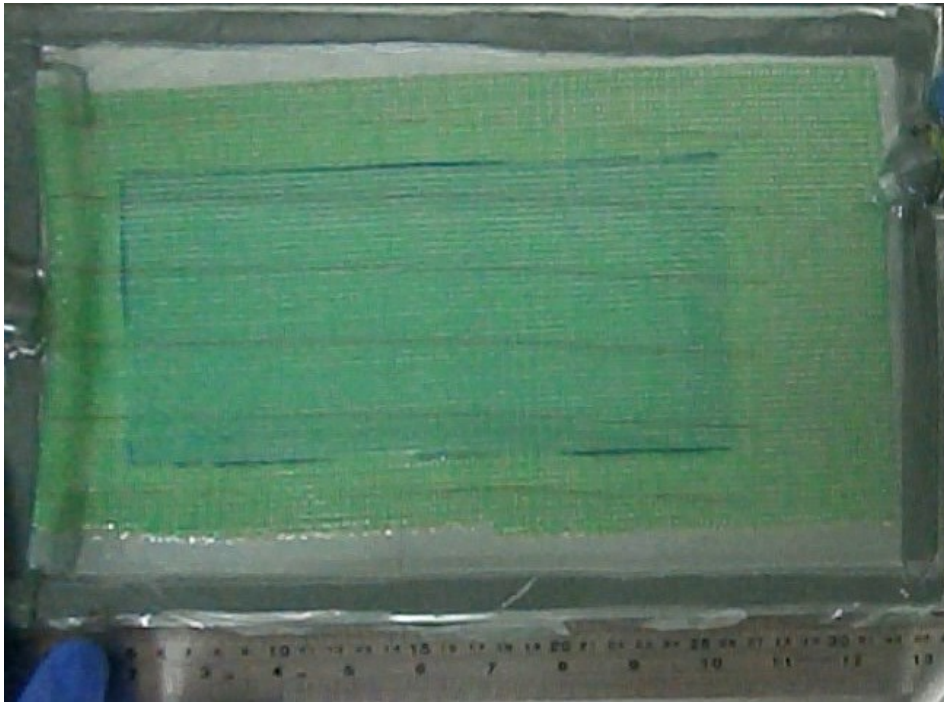
Τα σημεία που καταγράφηκαν ελήφθησαν από τα απεικονιζόμενα στην (Εικόνα 6-6) ληφθέντα 22 στιγμιότυπα.





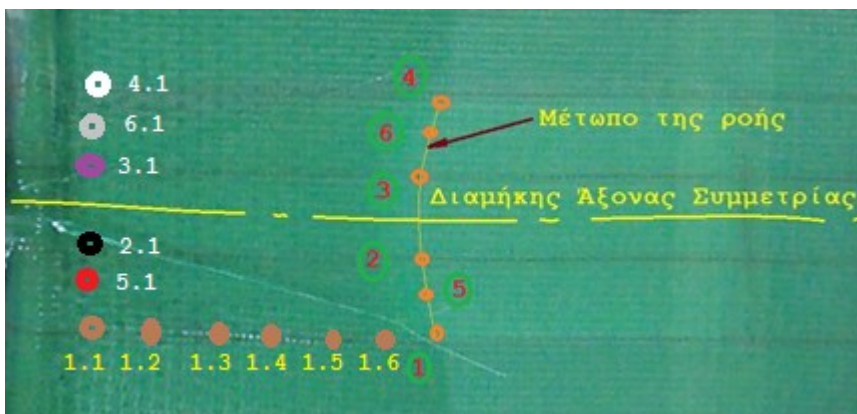
Εικόνα 6-6 Τα 22 στιγμιότυπα ληφθέντα ανά 1 sec.

Κατάλληλα προσαρμοσμένος υπάρχει κανόνας στην μια εκ των πλευρών για οπτική παρατήρηση της θέσης των σημείων επί του αναπτυσσόμενου μετώπου ροής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-7.



Εικόνα 6-7 Διάταξη Lay Up με προσαρμοσμένο κανόνα

Για κάθε στιγμιότυπο λαμβάνονται 6 σημεία. Αυτά είναι τρία ζεύγη σημείων (1.1,4.1), (5.1,6.1), (2.1,3.1) συμμετρικά ως προς τον διαμήκη άξονα όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-8. Τα 22 σημεία που λαμβάνονται για κάθε ένα από τα 6 στιγμιότυπα ορίζουν 6 ακμές τις οποίες θα αποκαλούμε τροχιές. Για το παράδειγμα της 1^{ης} τροχιάς έχουμε τα σημεία: 1.1, 1.2, 1.3,..., 1.7, 1.8, 1.9,..., 1.20, 1.21, 1.22. Σημειώνεται ότι τα σημεία στην Εικόνα 6-8 έχουν απεικονισθεί ποιοτικά και όχι ποσοτικά. Έτσι τελικά κατασκευάζουμε έναν πίνακα 22x6 τιμών ο οποίος στη συνέχεια υποβαθμίζεται σε έναν 22x1 υπολογίζοντας τους 22 μέσους όρους των 3 ζευγών των συμμετρικά καταγεγραμμένων εγγάρσιων στον διαμήκη άξονα σημείων. Για παράδειγμα, για τα σημεία 1.1,5.1,2.1,3.1,6.1,4.1 έχουμε τον μέσο όρο 1. Έτσι λαμβάνουμε τα ισοδύναμα 22 σημεία, τα οποία είναι έτοιμα να εισαχθούν στο λογισμικό βελτιστοποίησης με χρήση γενετικών αλγορίθμων.



Εικόνα 6-8 Απεικόνιση των σημείων των τροχιών από τα οποία αυτές διέρχονται.

7

Αποτελέσματα και συζήτηση

7.1 Προσδιορισμός της διαπερατότητας

Εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου για τις συνθήκες του πειράματος, βλ. Κεφ. 5, δηλαδή για 2 στρώσεις υαλοϋφάσματος και λαμβάνοντας υπόψη όλα τα στιγμιότυπα κατά μήκος της τροχιάς του μετώπου ροής της ρητίνης έδωσε ως αποτέλεσμα διαπερατότητα $8,94E-10^{-10}$ που αντιστοιχεί σε κόστος 8,3413658.

Περαιτέρω, αυτές οι τιμές εξαρτώνται από τον αριθμό των στιγμιότυπων που λαμβάνονται υπόψη κατά τη σύγκριση του πειράματος και της προσομοίωσης του, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 7-1. Γενικά, οι διαφορετικές τιμές της διαπερατότητας δεν διαφέρουν τόσο πολύ μεταξύ τους. Παρόλα αυτά, φαίνεται ότι ο μεγάλος αριθμός στιγμιότυπων αυξάνει το κόστος, δηλαδή χειροτερεύει την προσέγγιση προσομοίωσης-πειράματος.

Πίνακας 7-1 διαπερατότητα υπολογισμένη από τον ΓΑ για το πείραμα 2 στρώσεων υφάσματος

	αριθμός στιγμιότυπων				Πίεση
	6	8	11	22	
Διαπερατότητα	9,37E-10	9,43E-10	9,12E-10	8,94E-10	0,8 bar
Κόστος	6,142746	6,627601	7,563594	8,3413658	

Ακόμη έγιναν πειράματα με αύξηση των στρώσεων (2,3 και 4) και αντίστοιχη προσομοίωση όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 7-2**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** Φαίνεται καθαρά η μείωση της διαπερατότητας με την αύξηση του αριθμού των στρώσεων. Αυτό επιβεβαιώνεται και σε δημοσίευση, αν και αυτή αφορά τη μέθοδο RTM, [38]. Φαίνεται, επίσης, η αύξηση του κόστους δηλ. η χειροτέρευση της προσέγγισης του πειραματικού μετώπου από το προσομοιωμένο.

Πίνακας 7-2 Αποτελέσματα του ΓΑ για 2,3 και 4 στρώσεις υφάσματος και πίεση 0,8 bar

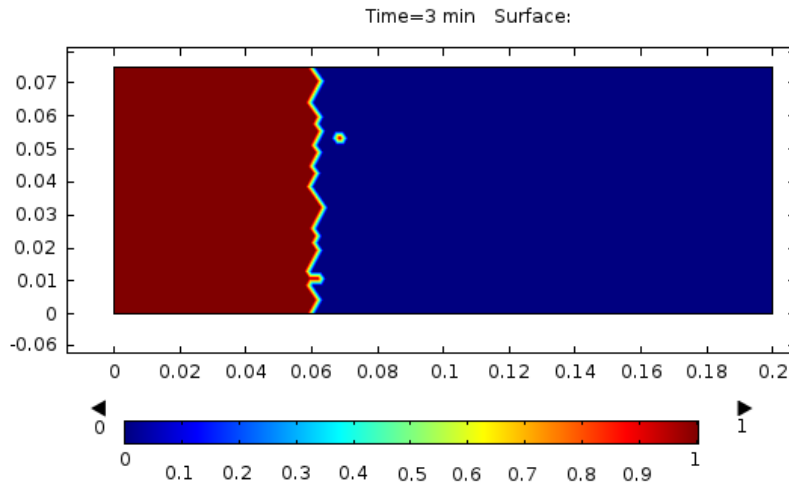
Αριθμός στρώσεων								
2			3			4		
Διαπερατότητα								
9,12E-10			3,59E-10			1,07E-10		
Κόστος ΓΑ								
7,56			13,16			27,45		
Χρόνος (sec)	Απόσταση (mm)		Χρόνος (sec)	Απόσταση (mm)		Χρόνος (sec)	Απόσταση (mm)	
	Πείραμα	Προσομ.		Πείραμα	Προσομ.		Πείραμα	Προσομ.
0	10,5	10,53	0	2,5	2,74	0	3,5	3,97
2	42,5	60,62	5	34	59,99	9	14	42,87
4	72,5	83,24	10	61,5	82,97	18	23	61,10
6	97	102,73	15	85,5	102,18	27	37	73,10
8	114	120,27	20	108,5	117,83	36	51	85,11
10	134	133,33	25	130	132,81	45	65	97,11
12	146,5	144,83	30	146,7	144,81	54	82,5	106,89
14	159	156,92	35	165	156,59	63	103	114,89
16	172,5	167,45	40	176	168,60	72	120	124,01
18	185	177,97	45	187,5	180,02	81	142,5	133,12
20	192,5	186,94	50	197	189,62	90	155	140,01
						99	172,5	146,90
						108	190	153,13
						117	200	158,90
Μέγεθος και διακριτοποίηση πλέγματος								
Linear & Fine			Cubic & Extra Fine			Linear & Extra Fine		

7.2 Παρατηρήσεις επί της προσομοίωσης του μετώπου ροής

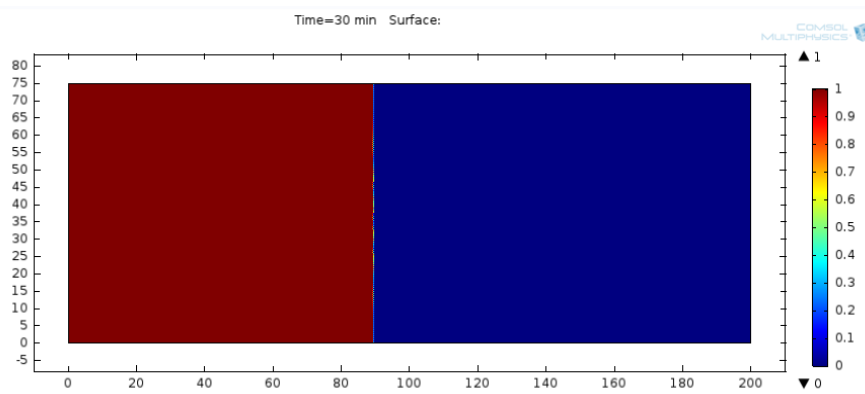
7.2.1 Πλέγμα

Ο σχεδιασμός του μοντέλου όπως υλοποιήθηκε στο λογισμικό COMSOL έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη μετώπου ροής, που κάθε σημείο του έχει κοινή απόσταση από την αφετηρία. Τα στοιχεία του πλέγματος του μοντέλου επηρεάζουν, όμως, το μέτωπο ροής. Για παράδειγμα με πλέγμα Quadratic (Fine)

δημιουργείται εμφανής ανομοιομορφία του μετώπου ροής, ενώ με πλέγμα element order Sextic και Extra Fine Mesh το μέτωπο είναι εμφανώς ευθύγραμμο, βλ. Εικόνα 7-1(β)**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**



α



β

Εικόνα 7-1 Επίδραση του πλέγματος στο προσομοιούμενο μέτωπο ροής (α) quadric fine (β) sextic extra fine

Συστηματικότερα, μελετήθηκε ένα σύνολο συνδυασμών μορφών και μεγέθους πλέγματος. Η αλλαγή μεγέθους και τύπου πλέγματος από Linear σε Septic Discretization φαίνεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, μειώνεται αισθητά η τιμή απόστασης (διάδοσης) του μετώπου κατά το 1ο στιγμιότυπο (Πίνακας 7-1). Αυτό εν μέρει, γίνεται αντιληπτό πως οφείλεται στην επίδραση που έχει η διάταξη του πλέγματος στις θέσεις των κόμβων επηρεάζοντας έτσι και τα σημεία που αποτελούν την τροχιά των σημείων του μετώπου ροής. Μετά από μέτρηση της απόκλισης της πειραματικής 1^{ης} τιμής (10.50[mm]) από τις αναγραφόμενες αποστάσεις που αναγράφει ο Πίνακας 7-3 πάρθηκαν ορισμένες αποφάσεις. Συγκεκριμένα προτιμώνται, Fine Mesh και Linear Discretization επιλογές που φαίνεται να μειώνουν το κόστος μεταξύ πειραματικής και αναλυτικής λύσης.

Αναφορικά με τους συνδυασμούς του Extra Fine Mesh με τις Quintic, Sextic και Septic διακριτοποιήσεις το COMSOL ήταν αδύνατο να δώσει λύση λόγω εμφάνισης αντίστοιχου σφάλματος μη σύγκλιουσας λύσης (Last time step is not converged).

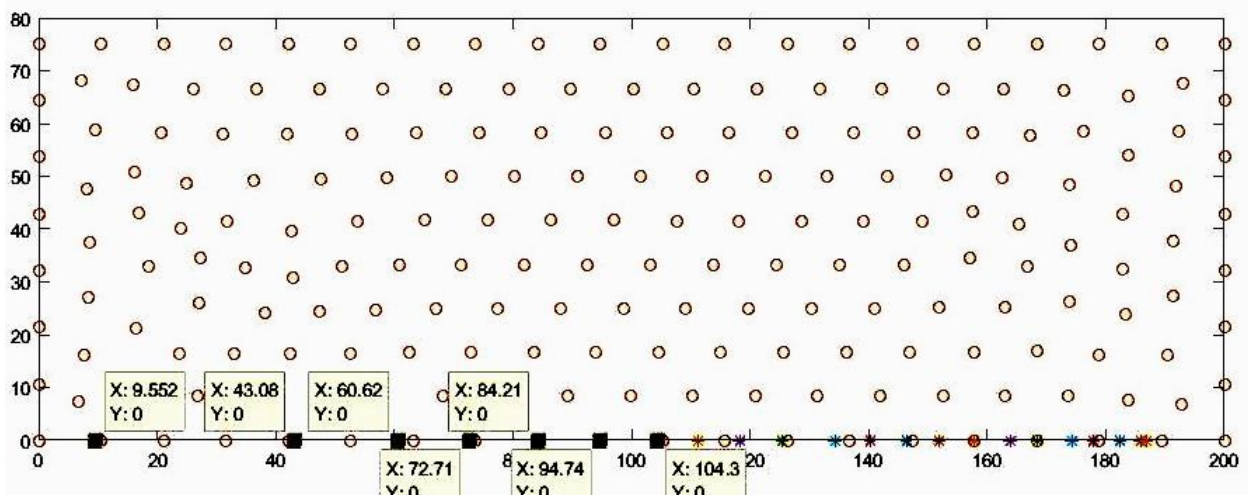
Αναφέρεται πως οι επόμενοι κόμβοι επηρεάζονται μεν αλλά όχι με τέτοιο τρόπο που να προσεγγίζονται καλύτερα τα αντίστοιχα πειραματικά σημεία. Ενδεικτικά αναφέρεται πως κατά τη διαχείριση 11 στιγμιότυπων, το 2ο πειραματικό σημείο κινείται γύρω από την τιμή 40 όταν το αντίστοιχο της

προσομοίωσης, γύρο από την τιμή 60. Στα 22 δε στιγμιότυπα η 2^η θέση του αντίστοιχου πειραματικού στιγμιότυπου κινείται γύρο από την τιμή 30 ενώ η πειραματική θέση, γύρο από την τιμή 30. Φαίνεται ότι μεταβάλλοντας παραμέτρους πλέγματος οι θέσεις πέρα της 1^{ης} δεν είναι αξιοποιήσιμες για την ελαχιστοποίηση του κόστους.

Πίνακας 7-3 Μεταβολή στην απόσταση του μετώπου στο 1^ο στιγμιότυπο

Διακριτοποίηση	Extra Fine		Fine		Normal	
	Απόσταση (mm)	Κόστος	Απόσταση (mm)	Κόστος	Απόσταση (mm)	Κόστος
Linear	3,97	6,52	10,53	0,03	12,96	2,46
Quadratic	1,69	8,81	4,80	5,70	5,90	4,60
Cubic	2,74	7,76	6,85	3,65	8,43	2,07
Quartic	1,70	8,80	4,19	6,34	5,12	5,38
Quintic			3,30	7,20	4,06	6,44
Sextic			1,62	8,88	1,99	8,51
Septic			2,11	8,39	2,59	7,91

Για οπτική αναπαράσταση η Εικόνα 7-2 **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** παρουσιάζει τη διάταξη των κόμβων ενός από τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα αυτό το μοντέλο σχεδιάστηκε με μέγεθος πλέγματος Fine και τύπο διακριτοποίησης πλέγματος Linear. Η γεωμετρία είναι 2Δ με διαστάσεις 200x75. Η κάτω οριζόντια ακμή αντιπροσωπεύει και την τροχιά, του μετώπου της ροής ($y = 0$). Τονίζεται πως οι κόμβοι δεν συμπίπτουν αναγκαστικά με τα στιγμιότυπα.



Εικόνα 7-2 Παράδειγμα διάταξης κόμβων και απόκλισης από τα διακριτά στιγμιότυπα

Σημειώνεται ότι θα ήταν δόκιμο, ως μελλοντική εργασία, να μεταβάλουμε την μορφή και το μέγεθος του πλέγματος αξιοποιώντας τον γενετικό αλγόριθμο. Αν δημιουργήσουμε ένα επιπλέον χρωμόσωμα δίνοντας του διακριτές τιμές που χαρακτηρίζουν τις δύο επιλογές του πλέγματος δημιουργούμε έναν

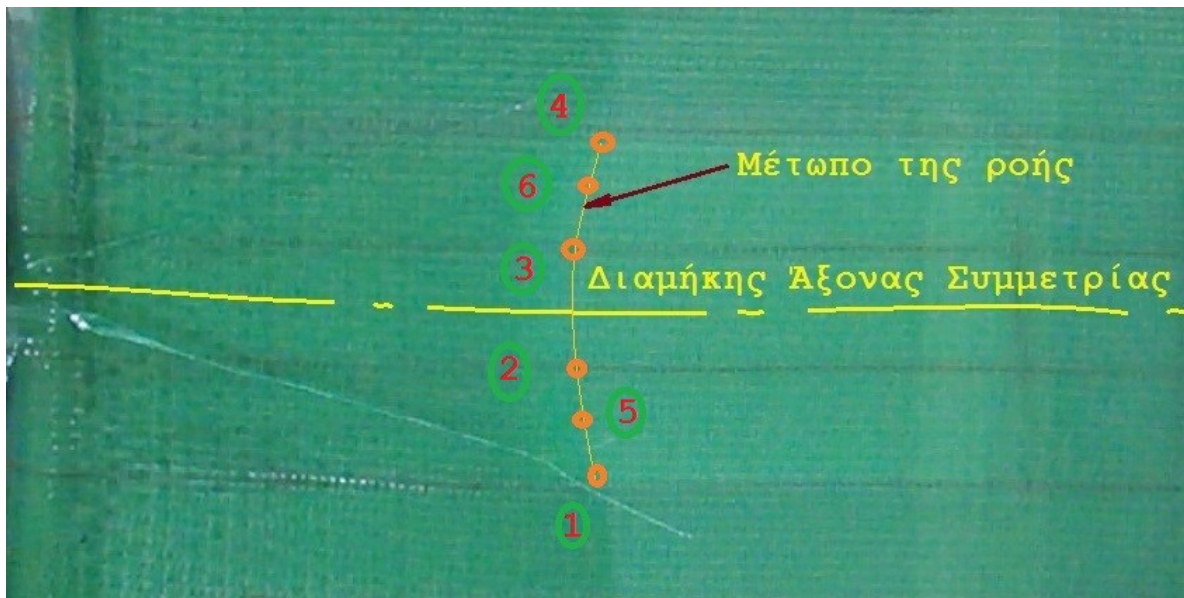
ακόμα βαθμό ελευθερίας του συστήματος που αναμένεται να επηρεάσει το κόστος της αντικειμενικής συνάρτησης.

Ενδεικτικές τιμές που αντιστοιχούν στις διακριτές αυτές τιμές είναι οι παρακάτω:

- | | | |
|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1. Linear – Extra Fine | 8. Cubic – Fine | 15. Quintic – Normal |
| 2. Linear – Fine | 9. Cubic – Normal | 16. Sextic – Extra Fine |
| 3. Linear – Normal | 10. Quatric – Extra Fine | 17. Sextic – Fine |
| 4. Quadratic – Extra Fine | 11. Quatric – Fine | 18. Sextic – Normal |
| 5. Quadratic – Fine | 12. Quatric – Normal | 19. Septic – Extra Fine |
| 6. Quadratic – Normal | 13. Quintic – Extra Fine | 20. Septic – Fine |
| 7. Cubic – Extra Fine | 14. Quintic – Fine | 21. Septic – Normal |

7.2.2 Γραμμικοποίηση του πειραματικού μετώπου ροής

Στο πείραμα παρατηρήθηκε υστέρηση των σημείων του μετώπου της ροής που είναι κοντά στον διαμήκη άξονα συμμετρίας του υφάσματος. Αντίθετα όσο απομακρυνόμαστε από τον διαμήκη άξονα τόσο τα σημεία φαίνεται να προπορεύονται κατά τη διάδοση του μετώπου. Το μοτίβο αυτό φαίνεται καθαρά στο 6ο από τα 12 στιγμιότυπα του μετώπου της ροής 5 στρώσεων, βλ. Εικόνα 7-3.



Εικόνα 7-3 Το μέτωπο ροής σε πείραμα με 5 στρώσεις υφάσματος

Προκειμένου τα αποτελέσματα πειράματος και προσομοίωσης να είναι συγκρίσιμα υπολογίστηκε ο μέσος όρος 6 σημείων, που θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικό δείγμα, επί του πειραματικού μετώπου της ροής. Για παράδειγμα, η εξέλιξη του μετώπου ροής με αυτό τον προσεγγιστικό υπολογισμό φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 7-4).

Πίνακας 7-4 Παράδειγμα υπολογισμού της πρόωσης του μετώπου ροής στο πείραμα εμποτισμού 2 υφασμάτων με κενό 0.8 bar συμπεριλαμβανομένων και των απωλειών.

t	Σημείο						M.O.
	1	5	2	3	6	4	
0	9,5	8	9,5	11	10	11	9,83
1	27,5	22,5	24,5	24,5	24	29,5	25,42
2	42,5	41,5	39,5	41,5	41,5	45	41,92
3	58	54	54,2	56,5	56,5	56,5	55,95
4	72	67,5	67	65,5	67,5	70,5	68,33
5	83	79,5	81	80	81,5	80	80,83
6	94,5	91,5	92,5	89,5	91,5	94,5	92,33
7	104,5	101	99,5	99,5	102,5	102,5	101,58
8	114,5	112	110	110	112	114,5	112,17
9	122	120	119	117	121,5	122	120,25
10	133,5	129,5	125,5	125,5	129,5	129	128,75
11	138	135	134,5	134,5	137,5	138	136,25
12	145,5	144,5	142	142	144,5	146,5	144,17
13	153	152	149,5	149,5	152	151,5	151,25
14	157,5	156	155,5	154	156	160	156,50
15	167	162,5	160	162,5	164	165,5	163,58
16	172	171,5	169	169	171,5	174,5	171,25
17	179	175	175	175	177	181	177,00
18	183	182,5	180	181,5	182,5	188	182,92
19	186,5	188	186,5	186,5	188	191	187,75
20	194	193,5	191	188	193,5	197,2	192,87
21	199	195	196	196	195	202,5	197,25

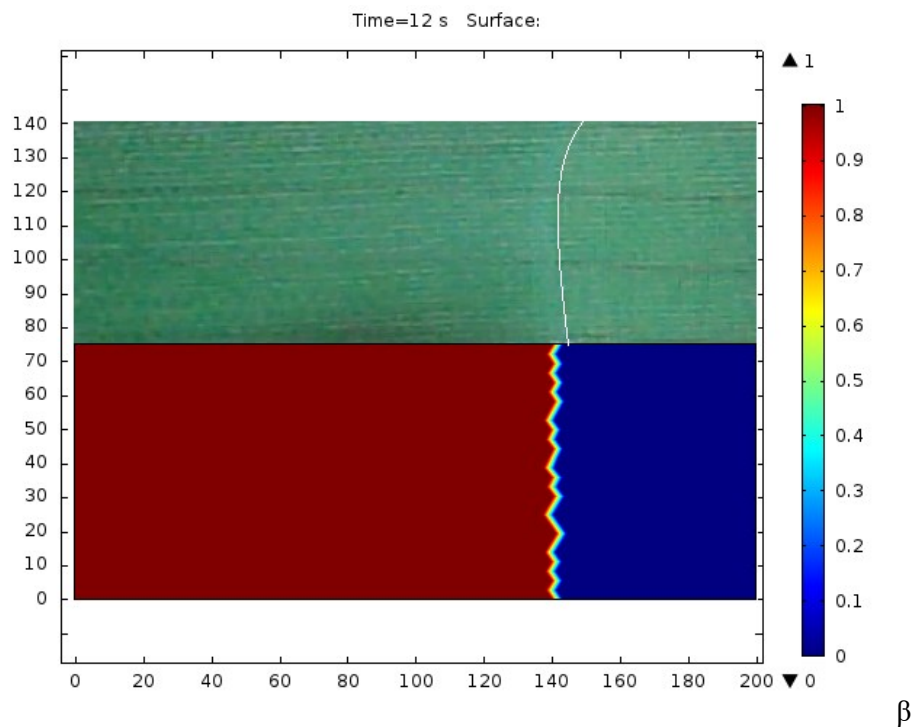
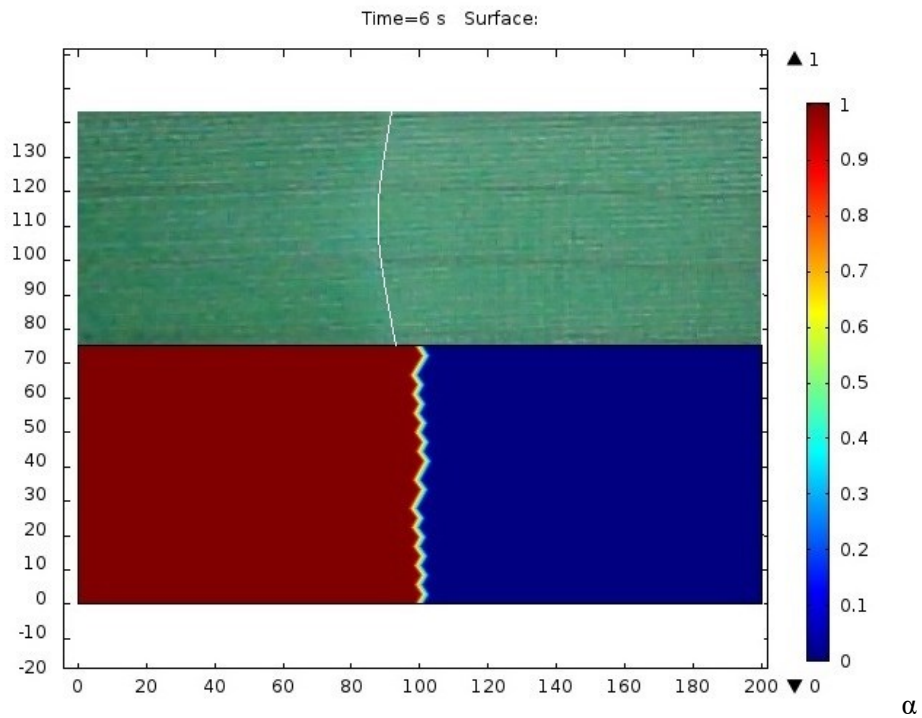
7.2.3 Διακριτοποίηση του μετώπου ροής

Περαιτέρω, διερευνήθηκε αν η επιλογή σημείων επηρεάζει το αποτέλεσμα, δηλαδή το πόσο κοντά στην διάδοση του πειραματικού μετώπου ροής προκύπτει να είναι το προσομοιούμενο. Αυτό που παρατηρήθηκε είναι πως το κόστος, και άρα η διαφοροποίηση του πειράματος από την εικόνα που μας δίνει η προσομοίωση, επηρεάζεται διαφορετικά. Η διαφορά είναι πιο ανεπαίσθητη όταν λαμβάνουμε υπόψη αποκλειστικά τα σημεία των ακραίων τροχιών (1,4). Αυτή γίνεται εντονότερη καθώς προσθέτουμε επιπλέον τροχιές τις (5,6) αρχικά και στη συνέχεια τις (2,3). Τα παραπάνω παρουσιάζει ο Πίνακας 7-5.

Μια επιπλέον διερεύνηση που έγινε αφορά τον αριθμό και τις περιοχές των στιγμιότυπων που έχει νόημα να λαμβάνονται για τη σύγκριση πειράματος-προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, εάν επιλέξουμε να αφαιρέσουμε τα πρώτα 9 στιγμιότυπα (στοιχεία των πειραματικών διανυσμάτων) τότε το κόστος

μειώνεται σχεδόν στο μισό. Εάν αφαιρέσουμε και τα τελευταία 2 στοιχεία των εν λόγω διανυσμάτων το κόστος μειώνεται περαιτέρω κατά 2-3 μονάδες, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 7-6.

Αυτή η ανομοιομορφία αποδίδεται μάλλον σε αδυναμία της προσομοίωσης να αποτυπώσει ιδιαιτερότητες της πειραματικής διάταξης, πχ σπινάλ, που εμφανίζονται στα άκρα της τροχιάς, Εικόνα 6-3(β).



Εικόνα 7-4 Σύγκριση προσομοιωμένου – πειραματικού μετώπου (α) διαφορά στο πρώτο μισό της τροχιάς (β) σύμπτωση στο μέσο της τροχιάς. Στα πειράματα το μέτωπο της ροής επισημαίνεται με λευκή γραμμή.

Πίνακας 7-5 Επίδραση του αριθμού αντιπροσωπευτικών σημείων του μετώπου ροής στο μήκος τροχιάς προσομοίωσης-πειράματος 2 στρώσεων υφάσματος

Χρόνος t(s)	Μήκος τροχιάς (mm)							
	Πείραμα (τροχιές 1, 4)	Προσομοίωση	Πείραμα (τροχιές 1, 4, 5, 6)	Προσομοίωση	Πείραμα (1, 2, 3, 4)	Προσομοίωση	Πείραμα (1,2,3,4,5,6)	Προσομοίωση
0	10,25	10,53	9,63	8,43	10,25	10,53	9,83	8,43
1	28,50	42,11	25,88	42,18	26,50	41,13	25,42	42,18
2	43,75	60,62	42,63	59,40	42,13	60,62	41,92	59,40
3	57,25	72,71	56,25	72,26	56,30	72,71	55,95	72,26
4	71,25	83,24	69,38	82,36	68,75	83,24	68,33	82,36
5	81,50	93,76	81,00	92,77	81,00	93,76	80,83	92,77
6	94,50	104,29	93,00	101,49	92,75	102,73	92,33	101,49
7	103,50	113,26	102,63	109,99	101,50	113,26	101,58	109,99
8	114,50	121,83	113,25	118,17	112,25	121,83	112,17	118,17
9	122,00	126,32	121,38	124,44	120,00	125,34	120,25	124,44
10	131,25	134,31	130,38	131,03	128,38	134,31	128,75	131,03
11	138,00	142,88	137,13	137,30	136,25	142,88	136,25	137,30
12	146,00	146,39	145,25	143,57	144,00	146,39	144,17	143,57
13	152,25	154,39	152,13	150,16	150,88	153,41	151,25	150,16
14	158,75	158,87	157,38	156,97	156,75	157,89	156,50	156,97
15	166,25	165,89	164,75	162,71	163,75	164,91	163,58	162,71
16	173,25	169,40	172,38	169,29	171,13	169,40	171,25	169,29
17	180,00	176,41	178,00	173,65	177,50	175,44	177,00	173,65
18	185,50	181,48	184,00	178,01	183,13	178,95	182,92	178,01
19	188,75	185,96	188,38	182,69	187,63	184,99	187,75	182,69
20	195,60	189,47	194,55	187,56	192,55	188,50	192,87	187,56
21	200,75	195,52	197,88	192,08	198,38	193,96	197,25	192,08
Διαπερατότητα		9,35E-10		8,94E-10		9,20E-10		8,94E-10
Κόστος		8,0366182		8,1542959		8,8370399		8,3413658

Πίνακας 7-6 Επίδραση της επιλογής περιοχής στιγμασιότυπων και σημείων στο ελάχιστο κόστος του ΓΑ της πρόβλεψης διαπερατότητας πειράματος 2 στρώσεων υφάσματος

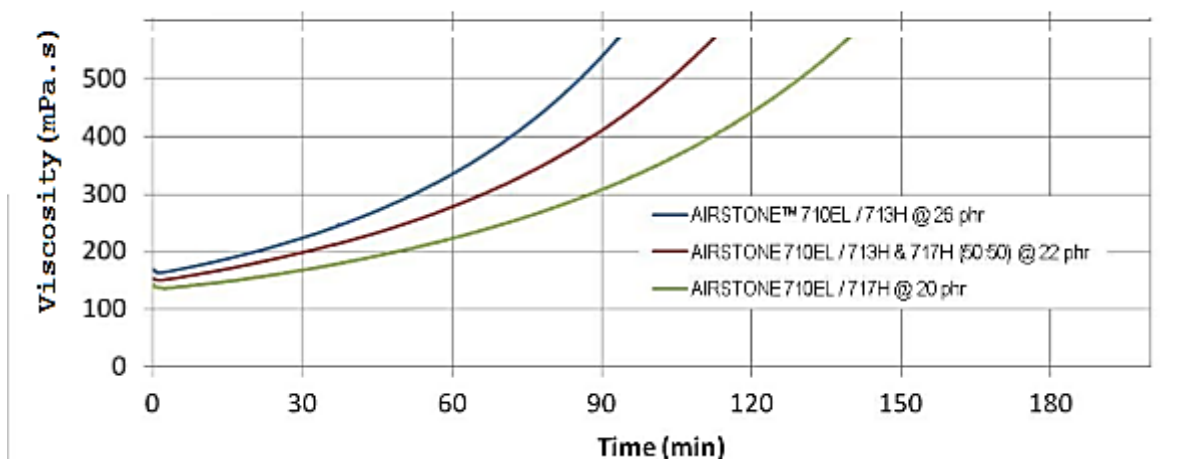
Σημεία για τον υπολογισμό Μ.Ο	Στιγμασιότυπα		
	(10-22)	(11-19)	(1-22)
(1,4)	3,529	2,995	8,037
(1,4,5,6)	3,963	3,288	8,154
(1,2,3,4,5,6)	3,521	2,713	8,341
(1,2,3,4)	3,696	3,545	8,837

7.3 Συζήτηση των αποκλίσεων

7.3.1 Η μεταβολή του ιξώδους της ρητίνης

Μεταβολή του ιξώδους της ρητίνης δεν μοντελοποιήθηκε στο λογισμικό προσομοίωσης λόγω έλλειψης στοιχείων, αλλά και διότι εκτιμήθηκε ότι για τη χρονική διάρκεια εμποτισμού η μεταβολή του ιξώδους δεν αναμένονταν σημαντική. Το ιξώδες της ρητίνης επηρεάζεται σημαντικά από την μεταβολή της τιμής της θερμοκρασίας. Μία δυνατότητα να συμβεί αυτό έχει σχέση με την εξώθερμη αντίδραση της ρητίνης που συμβαίνει εντός 30 λεπτών (τυπικά στα 45 με 60 min), καθώς αυτό είναι το κρίσιμο χρονικό εύρος μετά το οποίο το μείγμα αρχίζει να θερμαίνεται απαγορευτικά. Η αύξηση στην θερμοκρασία των αντιδρώντων συστατικών του σκληρυντή και της ρητίνης οδηγεί στην αύξηση του ιξώδους και άρα στην παρεμπόδιση της ροής της ρητίνης. Δεύτερη δυνατότητα επίδρασης στο ιξώδες της ρητίνης προέρχεται από την περίπτωση που η θερμοκρασία του κυπέλλου αναρρόφησης της ρητίνης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του καλουπιού, πράγμα που εν προκειμένω δεν συνέβαινε.

Σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή που παρουσιάζει ο Πίνακας 6-1, παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-5 γράφημα ιξώδους – χρόνου παρόμοιας ρητίνης του εμπορίου (AIRSTONE 710EL Epoxy Resin με σκληρυντή AIRSTONE 713H Hardener).

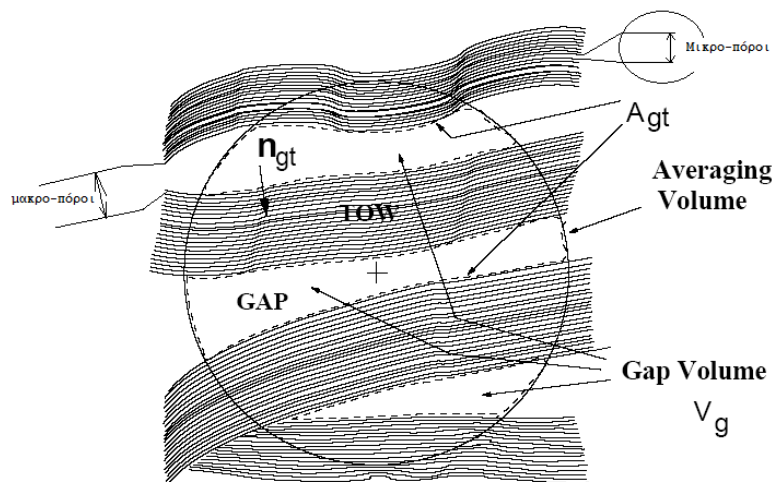


Εικόνα 7-5 Καμπύλη ιξώδους – χρόνου ρητίνης

Στο γράφημα, η *πάνω* καμπύλη δείχνει την συμπεριφορά του ιξώδους της ρητίνης σε διάστημα 3^{ων} ωρών. Είναι εμφανές ότι μόλις στα 30 λεπτά αρχίζει να γίνεται αισθητή η μεταβολή στο ιξώδες, συνεπώς για τα 20 δευτερολέπτων που διήρκησε το τρέχον πείραμα κρίνεται άνευ ουσίας να γίνει νύξη για σημαντική μεταβολή του ιξώδους.

7.3.2 Συμπεριφορά του υφάσματος κατά τον εμποτισμό

Η πράξη έχει δείξει ότι ο τρόπος με τον οποίο είναι πλεγμένο το ύφασμα υαλονήματος επηρεάζει τη ροή της ρητίνης δια μέσου του υφάσματος. Συγκεκριμένα η ύπαρξη των μικροπόρων εντός των δεσμών των ινών επιβραδύνει σημαντικά τη ροή κατά τον εμποτισμό λόγω διαφοράς της τιμής της διαπερατότητας αυτών των περιοχών συγκριτικά με το υπόλοιπο ύφασμα συμπεριλαμβάνοντας τις περιοχές μεταξύ των δεσμών των ινών (μακροπόροι), βλ. Εικόνα 7-6. Το μοντέλο που επιλέχθηκε δεν εμφανίζει τις ιδιομορφίες του πραγματικού υφάσματος. Συγκεκριμένα αποτελεί μια ομοιογενή επιφάνεια και συνεπώς το πλέγμα που δημιουργήθηκε κατά την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων δεν παρουσιάζει κάποια ανομοιομορφία που συνδέεται με την φύση του υφάσματος. Συνεπώς, η επιφάνεια επιλέχθηκε να περιγραφεί ολόκληρη με την ίδια τιμή διαπερατότητας.



Εικόνα 7-6 Ανομοιογένεια κλίμακας πόρων στη δομή του υαλοϋφάσματος [27]

Επιπρόσθετα, με επίκληση της δημοσίευσης [23] υποστηρίζεται ο ισχυρισμός πως ο παράγοντας της πλαστικής μεμβράνης κενού (vacuum bag) επηρεάζει την ομοιογένεια της συμπίεσης της ενίσχυσης. Απόρροια του γεγονότος αυτού είναι η κατά τόπους διαφορετική κατανομή του μετώπου ροής ανάλογα με το στιγμιότυπο. Αυτός ο ισχυρισμός γίνεται για να διερευνηθεί η υστέρηση του μετώπου της ροής προσεγγίζοντας τον νοητό άξονα συμμετρίας.

8

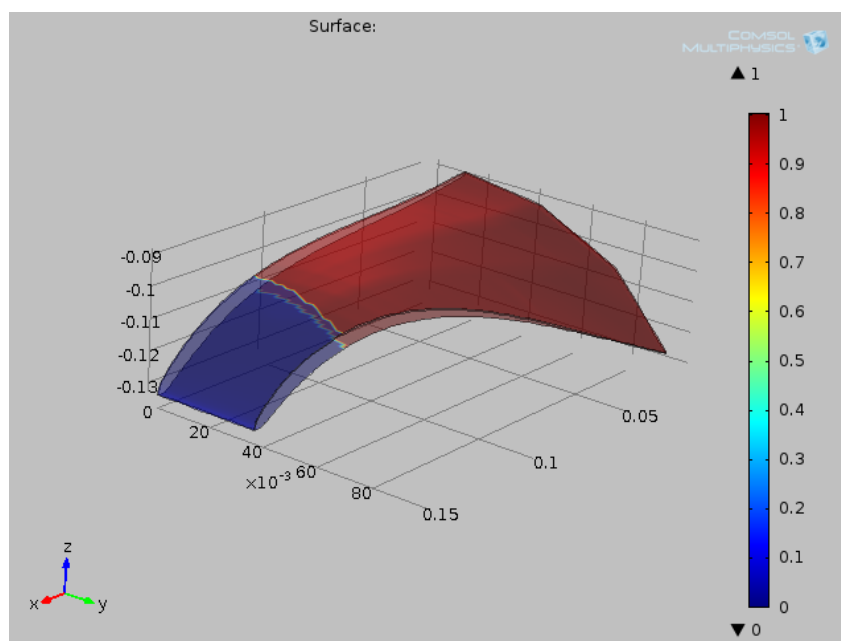
3D γεωμετρία και επεκτάσεις

8.1 Εφαρμογή της ευρεθείσας διαπερατότητας σε 3D γεωμετρία.

Το αποτέλεσμα της χρήσης της διαπερατότητας $8,9399416E-10$ του εμποτισμού επίπεδης επιφάνειας είναι αυτό που εμφανίζει ο Πίνακας 8-1 και ενδεικτικά παρουσιάζεται το 7^ο στιγμιότυπο από τον εμποτισμό της 3D γεωμετρίας στην Εικόνα 8-1. Η απόσταση μετράται στην επίπεδη προβολή του περυγίου.

Πίνακας 8-1 Προσομοιωμένα σημεία επί του επιπέδου x-y

Time(s)	Distance(m)	Time(s)	Distance(m)	Time(s)	Distance(m)
0	0	5	0,103147	15	0,150109
0,5	0,030995	6	0,110306	16	0,150109
1	0,05358	7	0,110306	26	0,150109
1,5	0,067334	8	0,117207	36	0,150109
2	0,074319	9	0,123725	46	0,150109
2,5	0,081405	10	0,129768
3	0,088598	11	0,135238
3,5	0,088598	12	0,140369	976	0,150109
4	0,095871	13	0,140369	986	0,150109
4,5	0,103147	14	0,145163	996	0,150109



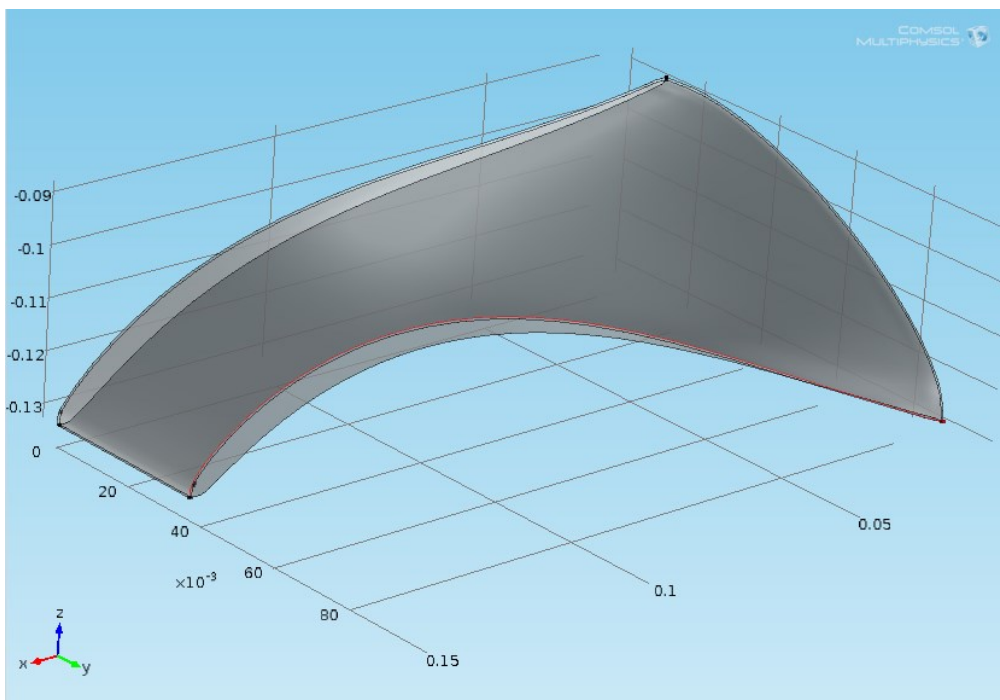
Εικόνα 8-1 Στιγμιότυπο (13 sec) προσομοίωσης εμποτισμού 3D περυγίου υδροστροβίλου Francis

Ουσιαστικά το τεμάχιο καλύπτεται ολόκληρο σχετικά σύντομα από την έναρξη του εμποτισμού, αλλά δεδομένου ότι δεν έγινε αντίστοιχο πείραμα, η προσομοίωση παρατίθεται απλά για στοχοθέτηση και αναφορά στον τελικό σκοπό.

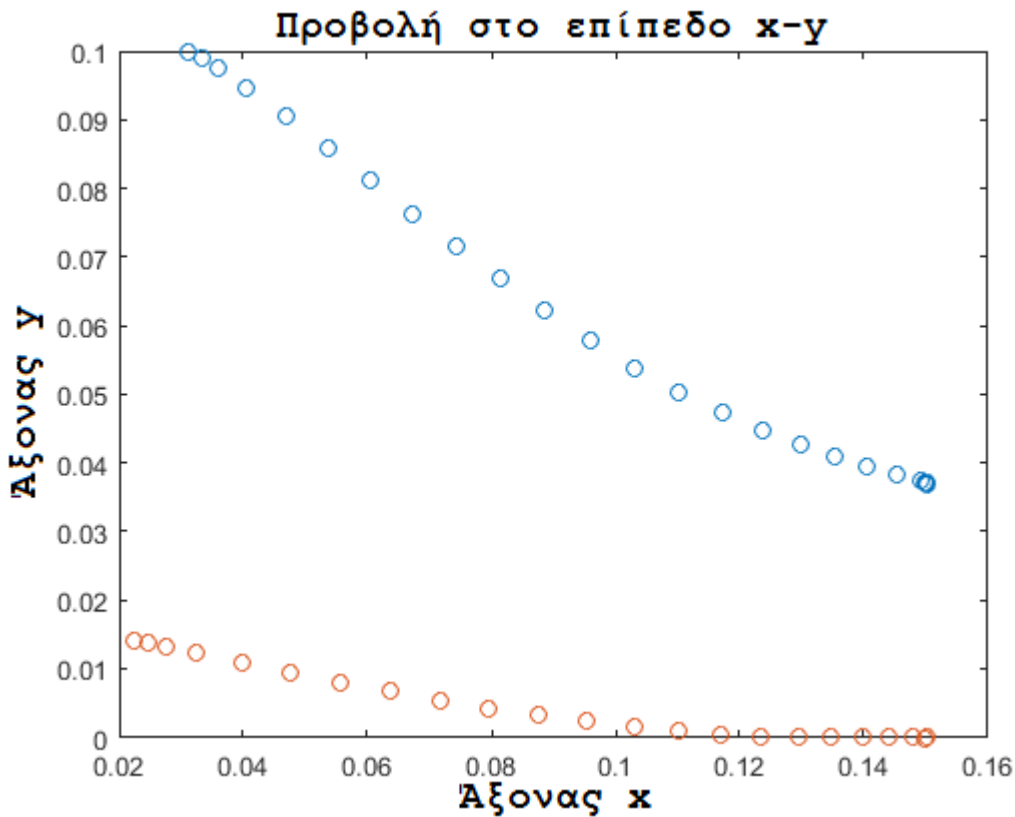
Δημιουργήθηκε κώδικας για την διαχείριση της 3D γεωμετρίας και την παραγωγή των σημείων από τα οποία διέρχεται η τροχιά του μετώπου ροής σε μια επιλεγμένη ακμή. Η προβολή των αντίστοιχων σημείων (ευρισκόμενων επί μιας καμπύλης ακμής του περυγίου) στην x διεύθυνση πραγματοποιήθηκε εντός του COMSOL. Υλοποιήθηκε κάνοντας χρήση ενός εργαλείου ανάκτησης (Data Export που βρίσκεται στον κόμβο Results του Model Builder Window του COMSOL) υπολογιζόμενων τιμών πίεσης στα διάφορα σημεία της τρισδιάστατης γεωμετρίας.

Στη συνέχεια έγινε διαχωρισμός των τιμών των πιέσεων ανάλογα με το εάν έχουν ξεπεράσει ή όχι την τιμή πίεσης 1000 που ορίστηκε ως συνθήκη αλλαγής φάσης [27]. Έτσι διασταυρώθηκε η οπτική παρουσίαση της προσομοίωσης του 3D εμποτισμού με την ακριβή ανάγνωση των αντίστοιχων τιμών θέσης του μετώπου της ροής (Filling).

Επισημαίνεται ότι τα προκύπτοντα σημεία θέσης του μετώπου ροής αφορούν αποκλειστικά μια ακμή όπως παρουσιάζει η Εικόνα 8-2. Οι κόμβοι που αναπαρίστανται με μπλε χρώμα στην Εικόνα 8-3 και η Εικόνα 8-4 αντίστοιχα παρουσιάζουν τους κόμβους που ορίζουν την εν λόγω καμπύλη ακμή – τροχιά. Οι κόμβοι αυτοί ανήκουν στα πεπερασμένα στοιχεία του πλέγματος. Το COMSOL προκομμένου να βρεθεί η λύση της μερική διαφορικής εξίσωσης του κεφαλαίου 3.4 βασίζεται σε αυτούς του κόμβους και παράγει τις τιμές της πίεσης σε όλα τα σημεία της επιλεγείσας ακμής.

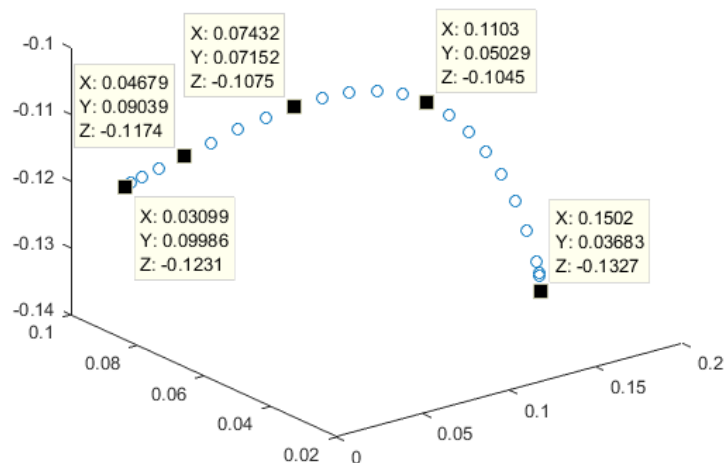


Εικόνα 8-2 Η επιλεγμένη ακμή (κόκκινη) για παρακολούθηση του μετώπου ροής



Εικόνα 8-3 2Δ αναπαράσταση των (μπλε) κόμβων του πλέγματος της επιλεγμένης ακμής

Οι κόκκινοι και οι μπλε κόμβοι που φαίνονται στην Εικόνα 8-3 αντιστοιχούν στην πάνω αριστερή και τη πάνω δεξιά ακμή του περυγίου. Στην Εικόνα 8-2 φαίνεται η δεξιά πάνω ακμή του περυγίου. Αυτές οι διαφορετικές ακμές κόμβων μπορούν να επιλεγούν στην προσομοίωση του εμποτισμού για να προκύψει η θέση του μετώπου ροής.



Εικόνα 8-4 3Δ αναπαράσταση των κόμβων της επιλεγμένης ακμής.

Οι κόμβοι που αναπαρίστανται στην Εικόνα 8-4 αντιπροσωπεύουν την ακμή στην Εικόνα 8-2.

Ο κώδικας αναπαραγωγής των σημείων της τροχιάς κατά την ανάπτυξη του μετώπου ροής είναι ο παρακάτω.

```
k = 0.00000000089399416;
model = mphload('blade2_flowm_inj_idial_(model)');
model.param.set('Permeability', k);
model.study('std1').run % χρησιμοποιώ το study που ήδη υπάρχει στο
                        % μοντέλο COMSOL

edg1 = model.result.dataset.create('edg1', 'Edge3D');

    edg1.set('data', 'dset1');
    edg1.selection.set(10);

da = model.result.export.create('da', 'edg1', 'Data');
% % model.result().export(<ftag>).set(property, <value>);
da.set('expr', 'p');
da.set('filename', 'dat.txt');
da.run;
    mphsave(model, 'buckup')

%-----
filename = 'dat.txt';
delimiterIn = ' ';
headerlinesIn = 9;
B = importdata(filename, delimiterIn, headerlinesIn);
subsetA = B.data;

save('test3.mat', 'subsetA')
load('test3', '-mat')

%% Ανάγνωση χρονικών τιμών
load('time_range', '-mat')

Filling = zeros(120,2);
for i = 1:120 % Pressure Table Rows
Filling(i,1) = subsetB(i);
end
%%

for i=1:24      % Pressure Table Rows
    for j=4:123 % Pressure Table Columns
        if subsetA(i,j)>=1000 % Filling Condision
            subsetA(i,j)=0;
        else
            subsetA(i,j)=1;
        end
    end
end
for j = 4:122 % Pressure Table Columns statements;
goto_here = false;
for i = 1:122 % Pressure Table Rows statements;
    if subsetA(i,j)==0
        Filling(j-2,2) = subsetA(i,1);
        goto_here = true;
        break;
    end
end
    if ~goto_here
%         statements;
    end
%here:
end
%%
```


9

Συμπεράσματα

9.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Μελετήθηκε μια έμμεση μέθοδος καθορισμού της διαπερατότητας της ροής της ρητίνης δια μέσου πορώδους υλικού και συγκεκριμένα ναλοϋφάσματος στα πλαίσια διεξαγωγής πειραματικής διαδικασίας VARI που εμπίπτει στον χώρο των μεθόδων liquid composite molding (LCM). Αυτή η μέθοδος συνδυάζει πειραματική και αριθμητική ανάλυση του ίδιου πειράματος και πραγματοποιήθηκε σε ορθογωνικό επίπεδο φύλλο. Αποτελεί εναλλακτικό τρόπο πρόβλεψης της διαπερατότητας καθώς κατά την άμεση μέθοδο γίνεται χρήση διαπερατόμετρου και η μέτρηση της διαπερατότητας γίνεται απευθείας. Το κόστος της μετρητικής διάταξης ήταν σχετικά μεγάλο και έτσι επιλέχθηκε μια πιο οικονομική μέθοδος, αλλά παράλληλα πιο ευφυής. Στα πλαίσια της μεθόδου χρησιμοποιείται ευρετικής φύσης στοχαστική διερεύνηση της τιμής της διαπερατότητας στο πεδίο των πιθανών διακριτών λύσεων. Η τιμή της διαπερατότητας όπως επίσης το πορώδες το ιξώδες οι πιέσεις εισαγωγής και εξαγωγής του ρευστού ο βαθμός σκλήρυνσης (α) και ο λόγος του περιεχόμενου όγκου εισέρχεται σε σχεδιασμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων κάνοντας χρήση μερικών διαφορικών εξισώσεων σε περιβάλλον COMSOL. Η λύση παρέχει ένα πεδίο πιέσεων εντοπισμένων σε σημεία του πλέγματος του domain της γεωμετρίας σε σχέση με το χρόνο. Οι τιμές αυτού του πεδίου πιέσεων φιλτράρονται σύμφωνα με κάποιο κριτήριο στερεοποίησης υπό μορφή ανισοτικού περιορισμού. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνονται τα σημεία της τροχιάς του μετώπου της ροής. Αυτά τα σημεία συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που έχουν καταγραφεί από την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας και ο γενετικός αλγόριθμος προσδιορίζει τη βέλτιστη ενιαία τιμή διαπερατότητας για την οποία προκύπτει η βέλτιστη συμφωνία πειράματος-προσομοίωσης.

Οι διάφορες διακριτές θέσεις της τροχιάς που έχουν επιλεγεί παρουσιάζουν ορισμένες ιδιομορφίες. Συγκεκριμένα προκύπτει ότι τα σημεία της τροχιάς σε ενδιάμεσες χρονικές και χωρικές περιοχές παρουσιάζουν καλύτερη συμφωνία συγκριτικά με τις περιοχές στην έναρξη και στο πέρας της διαδικασίας έγχυσης.

Ως προς τη μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία, μελετήθηκε η ακρίβεια της προσομοίωσης με μεταβολή στο είδος και το μέγεθος του πλέγματος, κυρίως με παρατήρηση του πρώτου σημείου – στιγμιότυπου από το οποίο περνάει η τροχιά του μετώπου της ροής, δεδομένου ότι τα άλλα σημεία δεν ήταν δυνατό να επηρεάσουν ιδιαίτερα τη μείωση του κόστους της αντικειμενικής συνάρτησης του γενετικού αλγόριθμου.

Κρίθηκε άνευ ουσίας να ενταχθεί στο μοντέλο η αύξηση του ιξώδους της ρητίνης με το πέρασμα του χρόνου καθώς το διάστημα εμποτισμού ήταν πολύ μικρό.

Επιβεβαιώθηκε τόσο πειραματικά (για δύο, τρεις, και τέσσερις στρώσεις) όσο και βιβλιογραφικά πως η αύξηση του αριθμού των στρώσεων προκαλεί μείωση της διαπερατότητας της ενίσχυσης.

Για λόγους απλότητας του μοντέλου κρίθηκε σκόπιμη η απλοποιητική παραδοχή πως το ύφασμα χαρακτηρίζεται ως μονής κλίμακας (single scale) δηλαδή αναγνωρίζοντας μόνο τους πόρους μεταξύ των πλέξεων των δεσμών των ινών. Μια πιο πιστή προσέγγιση της πραγματικότητας θεωρεί πως πόροι υπάρχουν και μεταξύ των δεσμών των ινών που είναι μικρότεροι σε μέγεθος. Αν λαμβάναμε υπόψη την ανομοιομορφία στο μέγεθος των πόρων θα μελετούσαμε το ύφασμα ως διπλής κλίμακας (dual scale) με μοντέλο αυξημένης πολυπλοκότητας.

Ο γενετικός αλγόριθμος φάνηκε να φτάνει πολύ ταχύτερα στη βέλτιστη λύση αντλώντας τις, υποψήφιας για τη λύση, τιμές από ένα σύνολο διακριτών τιμών, παρά από ένα σύνολο που η μεταβλητή σχεδίασης λαμβάνει συνεχείς τιμές. Όσον αφορά το σύνολο των διακριτών τιμών από τις οποίες αντλεί ο γενετικός αλγόριθμος τις υποψήφιας λύσεις του, επιλογή μεγαλύτερης ανάλυσης, διατηρώντας όμως το εύρος των τιμών διαπερατότητας σταθερό, πέραν κάποιου σημείου έχει μικρό αντίκτυπο στην ακρίβεια της λύσης.

Συνολικά, η μέθοδος εκτίμησης της διαπερατότητας μέσω της παρατήρησης του εμποτισμού είναι φθηνή, δεδομένου ότι θεωρητικά απαιτεί μόνο ένα πείραμα. Το μειονέκτημα της είναι η αδυναμία να παρατηρηθεί η ροή στις εσωτερικές στρώσεις και άρα υποθέτει ότι όλες οι στρώσεις εμποτίζονται ταυτόχρονα, πράγμα που δεν είναι πάντα σωστό.

9.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

- 1) Θα μπορούσε να επεκταθεί ο γενετικός αλγόριθμος προσθέτοντας μεγαλύτερη πολυπλοκότητα. Συγκεκριμένα προτείνεται να προστεθούν επιπλέον μεταβλητές σχεδίασης (άτομα) στο χρωμόσωμα που στην παρούσα κατάσταση περιέχει μόνο ένα άτομο δηλαδή την τιμή της διαπερατότητας. Η επιπλέον αυτή πληροφορία θα μπορούσε να είναι ο συνδυασμός είδους και μεγέθους πλέγματος, αλλά και παράμετροι του μοντέλου που ελήφθησαν ως σταθερές, όπως το ιξώδες το πορώδες η μεταβολή της διαπερατότητας κατά την έννοια του πάχους (εάν αναλυθεί η τρισδιάστατη ροή)
- 2) Ελήφθη ως δεδομένο [28] ότι κριτήριο για την αλλαγή φάσης του μείγματος αποτελεί η τιμή πίεσης 1000 [Pa], αλλά αυτό μπορεί να διαφέρει σημαντικά κατά τόπους ή γενικά σε σχέση με την πράξη. Μελλοντικά θα μπορούσε να διερευνηθεί περαιτέρω.
- 3) Θα ήταν ωφέλιμο να δοθεί ακόμα μεγαλύτερη έμφαση στην κατασκευή της αντικειμενικής συνάρτησης, με τρόπο που ίσως να δίνει μεγαλύτερη υπεροχή σε κάποιες περιοχές της τροχιάς του μετώπου της ροής. Πχ να υπάρχει κάποιος συντελεστής βάρους που θα παίρνει διαφορετική τιμή για τις ακριανές τιμές απ' ότι θα παίρνει στις κεντρικές τιμές των σημείων από τα οποία διέρχεται η τροχιά του μετώπου ροής.
- 4) Να διερευνηθεί περαιτέρω το φαινόμενο της αύξησης του ιξώδους (έστω και απειροελάχιστα), δοκιμάζοντας π.χ. να συνδυαστούν παραπάνω από ένα φαινόμενα. Συγκεκριμένα, θα ήταν

ενδιαφέρον να εφαρμοσθούν εξισώσεις ροής και εξώθερμης αντίδρασης της ρητίνης, που έτσι κι' αλλιώς υποστηρίζονται από την πλατφόρμα COMSOL.

- 5) Επίσης θα ήταν ενδιαφέρον να φανεί η επίδραση των διατμητικών τάσεων κατά την διάρκεια ανάπτυξης του μετώπου της ροής, κάτι που είναι εφικτό με το λογισμικό COMSOL.
- 6) Θα μπορούσε να γίνει νέο μοντέλο αναφορικά με τον σχεδιασμό της γεωμετρίας του υφάσματος. Συγκεκριμένα ενδιαφέρει η επίδραση της ανομοιομορφίας των πόρων και άρα της ύπαρξης περισσότερων διαπερατοτήτων εντός της ίδιας γεωμετρίας και η επίδραση που έχουν στην καταγραφόμενη διάδοση του μετώπου ροής της ρητίνης.
- 7) Έχει ενδιαφέρον να δοκιμαστεί η χρήση αισθητήρων πίεσης κατά μήκος της ροής της ρητίνης, με την κατασκευή διαπερατόμετρου, με σκοπό την σύγκριση με το αποτέλεσμα της παρούσας μελέτης. Συνακόλουθα, θα ήταν σημαντικό να βρεθεί τρόπος παρατήρησης της ροής στις διάφορες στρώσεις της πολύστρωτης διάταξης.

10

Βιβλιογραφία

- [1] E.A. Avallone, T.B. Iii, A.L.I.M. Sadegh, Marks' standard handbook for mechanical engineers, 11th ed., McGraw Hill, New York, 2007. http://ase.sbu.ac.ir/FA/Staff/abbasrahi/DownLoad/Eugene_A._Avallone,_Theodore_Baumeister,_Ali_Sade-Marks'_Handbook.pdf.
- [2] R. J.M., V. G., F. M., Development of New Composite Material solutions for Pelton Wheels, Indian Journals. 14 (2004) 119–127. <http://www.indianjournals.com/%2Fijor.aspx?target=ijor:wea&volume=14&issue=1&article=024>.
- [3] C. Hahn, A Simulation Approach of Permeability Prediction for RTM Process Simulation, Technical University of Munich, 2014.
- [4] F. Klunker, S. Aranda, G. Ziegmann, P. Fideu, P. Baisch, A. Herrmann, Permeability and Compaction Models 3D Filling Simulations of, 9 (2008).
- [5] C. Di Fratta, F. Klunker, P. Ermanni, INNOVATIVE APPROACH TO TRACK FLOW-FRONT IN LCM-PROCESSES THROUGH PRESSURE SENSORS FOR IN-LINE QUALITY CONTROL, Conf. Elev. Int. Process. Flow Mater. Compos. Zealand, New Centre, Mater. Adv. Compos. Zealand, New Fpcm,. (2012) 204–211.
- [6] F. Zhang, B. Cosson, S. Comas-Cardona, C. Binetruy, Efficient stochastic simulation approach for RTM process with random fibrous permeability, Compos. Sci. Technol. 71 (2011) 1478–1485. doi:10.1016/j.compscitech.2011.06.006.
- [7] L. Gascón, J.A. García, F. LeBel, E. Ruiz, F. Trochu, Numerical prediction of saturation in dual scale fibrous reinforcements during Liquid Composite Molding, Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 77 (2015) 275–284. doi:10.1016/j.compositesa.2015.05.019.
- [8] R.J. Millington, J.P. Quirk, Permeability of Dual-Structured Porous Media, Nature. 183 (1959) 387–388. doi:10.1038/183387a0.
- [9] K. Okonkwo, P. Simacek, S.G. Advani, R.S. Parnas, Characterization of 3D fiber preform permeability tensor in radial flow using an inverse algorithm based on sensors and simulation, Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 42 (2011) 1283–1292. doi:10.1016/j.compositesa.2011.05.010.
- [10] Y.-J. Lee, Y.-T. Jhan, C.-H. Chung, Y. Hsu, A Prediction Method for In-Plane Permeability and Manufacturing Applications in the VARTM Process, Engineering. 3 (2011) 691–699. doi:10.4236/eng.2011.37082.

-
- [11] M. Griebel, M. Klitz, Homogenization and Numerical Simulation of Flow in Geometries with Textile Microstructures, *SIAM Multiscale Model. Simul.* 8 (2010) 1439–1460. doi:10.1137/09077059X.
- [12] S. Konstantopoulos, C. Hueber, E. Mühlbachler, R. Schledjewski, Identification of the effect of typical curvatures encountered in RTM parts on localized permeability of fibrous preforms, *Adv. Manuf. Polym. Compos. Sci.* 2 (2016) 57–66. doi:10.1080/20550340.2016.1229829.
- [13] C.C. Wong, Modelling the effects of textile preform architecture on permeability . PhD thesis , Modelling the Effects of Textile Preform Architecture on Permeability, The University of Nottingham, 2006. <http://eprints.nottingham.ac.uk/10294/1/Thesispdf.pdf%0ACopyright>.
- [14] H. Golestanian, M. Poursina, Neural Network Analysis Application To Permeability Determination of Fiberglass and Carbon Preforms, *Chinese J. Polym. Sci.* 27 (2009) 221–229. doi:10.1142/S0256767909003856.
- [15] J.P. Dunkers, F.R. Phelan, C.G. Zimba, K.M. Flynn, D.P. Sanders, R.C. Peterson, R.S. Parnas, X. Li, J.G. Fujimoto, The prediction of permeability for an epoxy/E-glass composite using optical coherence tomographic images, *Polym. Compos.* 22 (2001) 803–814. doi:10.1002/pc.10582.
- [16] V. Antonucci, M. Esposito, M.R. Ricciardi, M. Raffone, M. Zarrelli, M. Giordano, Permeability characterization of stitched carbon fiber preforms by fiber optic sensors, *Express Polym. Lett.* 5 (2011) 1075–1084. doi:10.3144/expresspolymlett.2011.105.
- [17] G. Morren, H. Sol, B. Verleye, S.V. Lomov, Permeability Identification of a Reference Specimen Using an Inverse Method Department of Mechanics of Material and Construction , Vrije Universiteit Brussel , Pleinlaan 2 , Department of Computer Science , Katholieke Universiteit Leuven , Celestijnenlaan, Conf. 2007 2007 SEM Annu. Conf. Expo. Exp. Appl. Mec. (2007). <https://sem.org/permeability-identification-of-a-reference-specimen-using-an-inverse-method-8-pages/>.
- [18] B. Verleye, S. Lomov, A. Long, D. Roose, C.C. Wong, Permeability of Textile Reinforcements : Efficient Prediction and Validation, *Polymer (Guildf)*. (2007) 2–3.
- [19] W.J.B. Grouve, R. Akkerman, R. Loendersloot, S. van den Berg, Transverse permeability of woven fabrics, *Int. J. Mater. Form.* 1 (2008) 859–862. doi:10.1007/s12289-008-0271-1.
- [20] X. Zeng, A. Endruweit, L.P. Brown, A.C. Long, Numerical prediction of in-plane permeability for multilayer woven fabrics with manufacture-induced deformation, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 77 (2015) 266–274. doi:10.1016/j.compositesa.2015.03.027.
- [21] X. Chen, T.D. Papathanasiou, The transverse permeability of disordered fiber arrays: A statistical correlation in terms of the mean nearest interfiber spacing, *Transp. Porous Media.* 71 (2008) 233–251. doi:10.1007/s11242-007-9123-6.
- [22] H. Tan, K.M. Pillai, Multiscale modeling of unsaturated flow of dual-scale fiber preform in liquid composite molding II: Non-isothermal flows, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* (2010) 1–13.

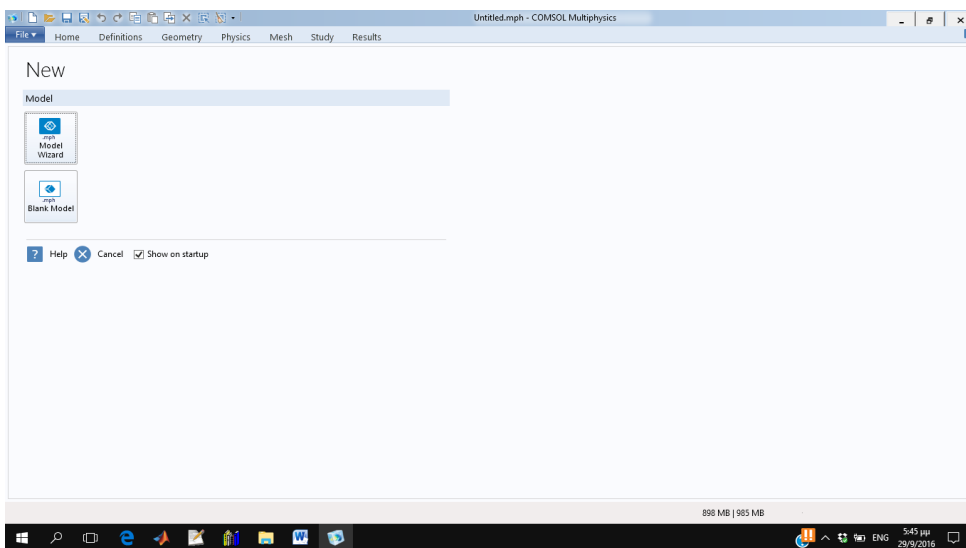
-
- [23] L. Joubaud, F. Trochu, J. Le Corvec, Analysis of resin flow under flexible cover in Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI), *J. Adv. Mater.* 37 (2005) 3–10.
- [24] G. Kretsis, A. Vosniakos, Investigation of Francis turbine blade manufacturing, by multilayer composite materials, and the Vacuum Infusion technic, support, National Technical University of Athens, 2013.
- [25] F. Zhou, J. Alms, S.G. Advani, A closed form solution for flow in dual scale fibrous porous media under constant injection pressure conditions, *Compos. Sci. Technol.* 68 (2008) 699–708. doi:10.1016/j.compscitech.2007.09.010.
- [26] A. George, K. Drechsler, S. Lundström, Rudolf Voit-Nitschmann, Optimization of Resin Infusion Processing for Composite Materials: Simulation and Characterization Strategies, University of Stuttgart, 2011.
- [27] M.S. Munagavalasa, K.M. Pillai, Deviation From Darcy ' S Law : an Implication of Unsaturated Flow in Dual-Scale Fiber Mats in Lcm, 8th Int. Conf. Flow Process. Compos. Mater. Douai, Fr. - 11 – 13 July 2006. (2006) 131–138. http://www.tech.plym.ac.uk/sme/FPCM/FPCM08/FPCM8/papers/FPCM8_36.pdf.
- [28] F. Klunker, S. Aranda, W. Surjoseputro, W. Wu, G. Ziegmann, C. Elsenhans, H. Behnke, Modelling the resin infusion process, Part I: Flow modelling and numerical investigation for constant geometries, *Zeitschrift Kunststofftechnik/Journal Plast. Technol.* 7 (2011) 178–201. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-80755137039&partnerID=40&md5=725127fdc683b759c8550c11571cb21c>.
- [29] L. Guarracino, F. Quintana, A third order accurate time scheme for variably saturated groundwater flow modelling, *Commun. Numer. Methods Eng.* 20 (2004) 379–389. doi:10.1002/cnm.680.
- [30] P. Carey, Core Processes The Effects of Humidity On Modern Core, *ASK Chem.* (2012) 1–4.
- [31] M. van Genuchten, A closed-form Equation for Predictiong the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 (1980) 8.
- [32] LiveLinkForMATLABUsersGuide 4.3, 4.3. (2012) 1–260. doi:CM020008.
- [33] V.G. Kontolatis N, N. Kontolatis metal bending process plans using genetic algorithms, National Technical University of Athens, 2006.
- [34] W.T. Self, J.A. Chatman, OPTIMAL FUZZY PID CONTROL TUNED WITH GENETIC ALGORITHMS, *Res. Organ. Behav.* (2013) 415–417.
- [35] N. Vasileiou, D. Pantelis, N.G. Tsouvalis, V.J. Papazoglou, Study of precision casting with emphasis in the optimal determination of heat transfer coefficient, PhD Thesis, National Technical University of Athens, 2013.
- [36] I.F. Gonos, N.C. Ilia, V.T. Kontargyri, I.A. Stathopoulos, Application of a genetic algorithm for calculating the capacitances on an insulator string, *Comput. Methods Circuits Syst. Appl.* (2003) 457–468.

-
- [37] R.L. Haupt, S.E. Haupt, Algorithms Practical Genetic Algorithms, 2004.
doi:10.1198/jasa.2005.s45.
- [38] P. Mitschang, M. Glawe, D. Kreutz, G. Rieber, D. Becker, INFLUENCE OF TEXTILE
PARAMETERS ON THE THROUGH-THE-THICKNESS PERMEABILITY OF WOVEN
TEXTILES, Proc. FPCM11 Conf. (n.d.) 37–45.

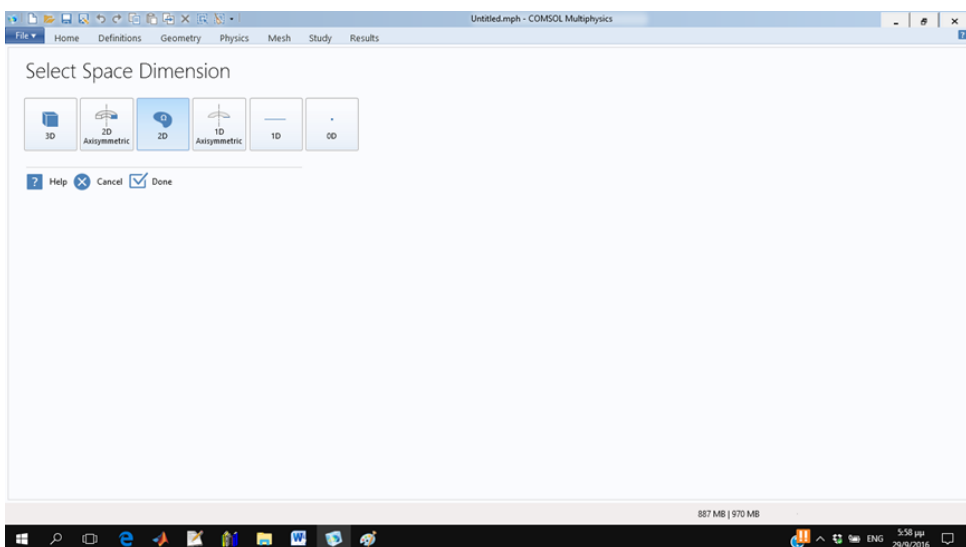
11

Παράρτημα 1: Κατασκευή μοντέλου 2D στο Comsol

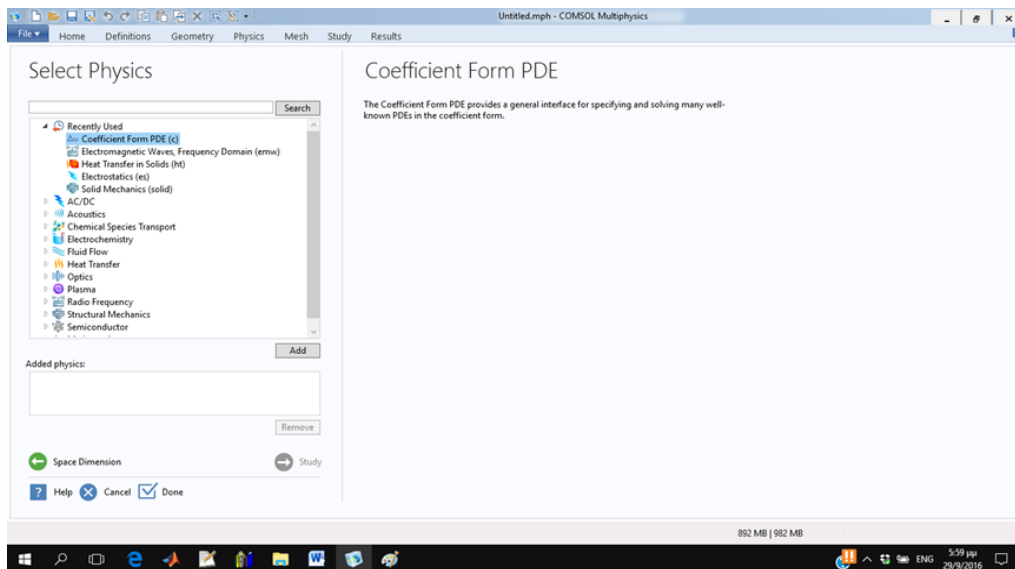
01) Πατάω στο Model Wizard



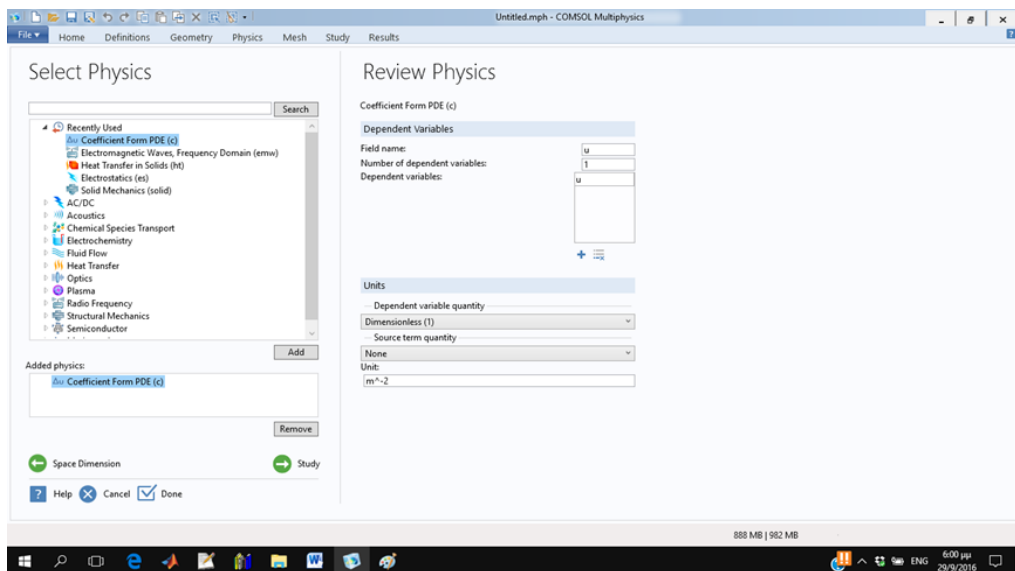
02) Πατάω στο 2D και Done



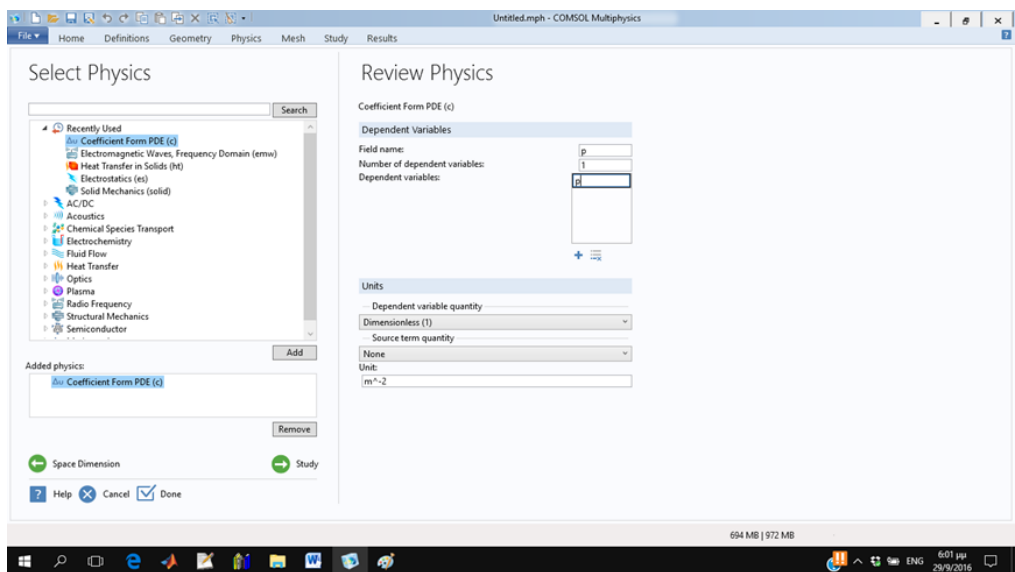
03) Επιλέγω Coefficient From PDE (c), Add



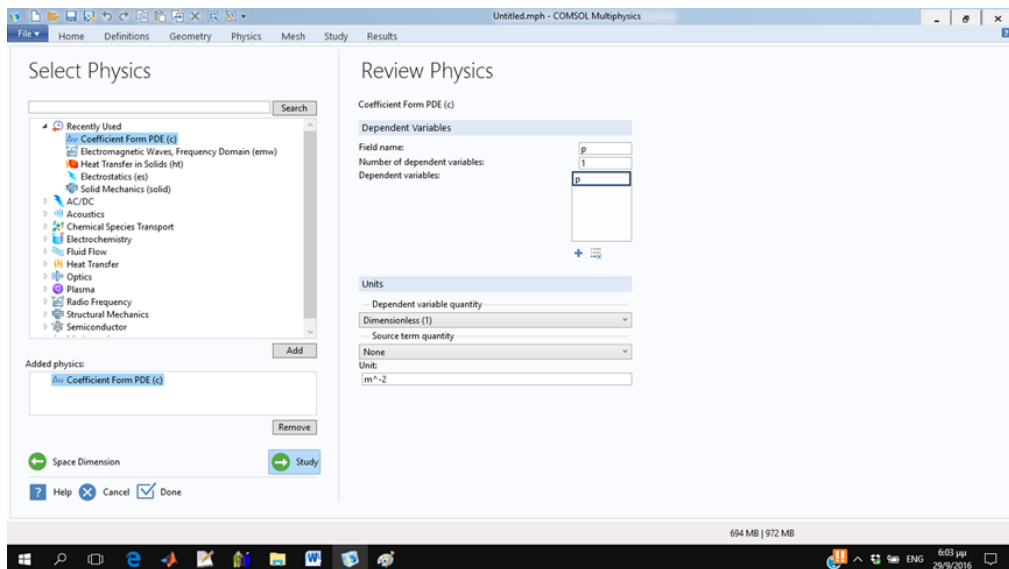
04) Στο πεδίο Dependent Variables βλέπω u



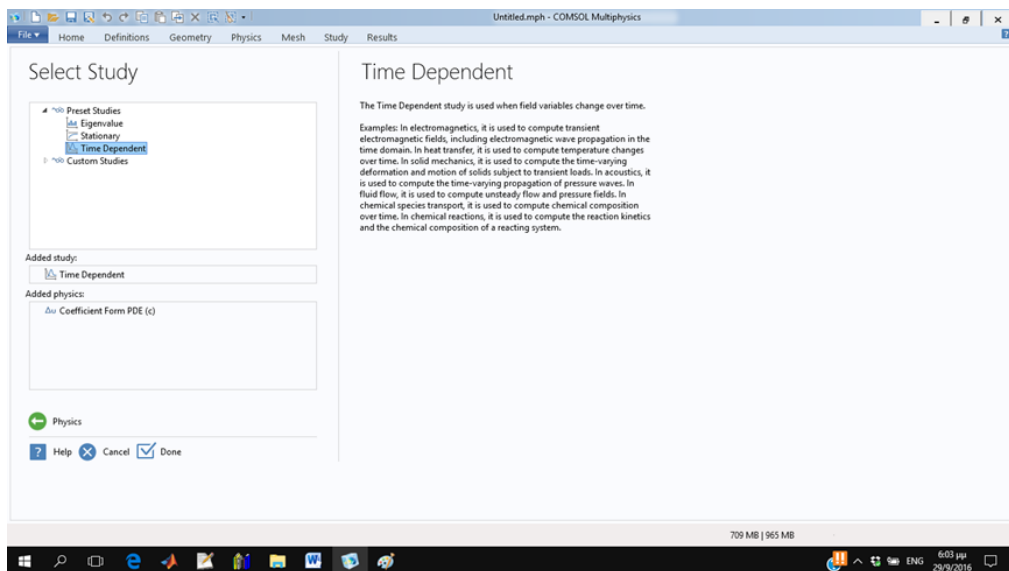
05) Αντικαθιστώ με p



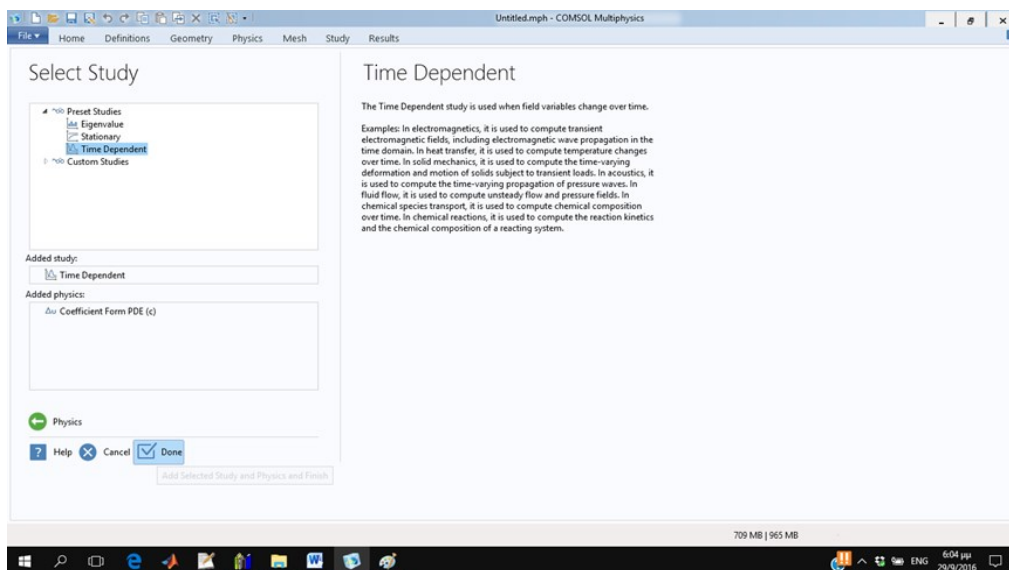
06) Πατάω στο πλαίσιο Study



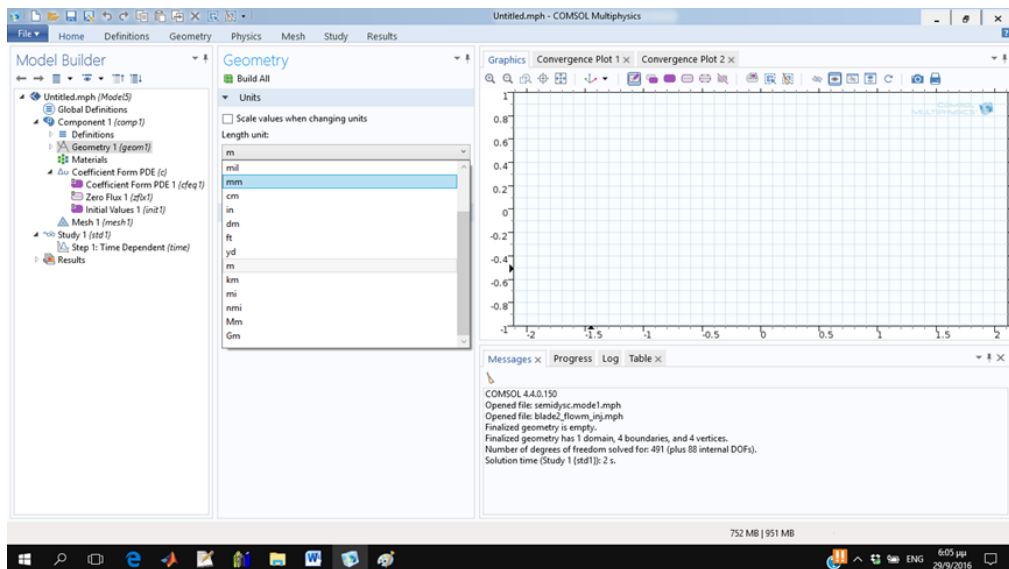
07) Στο πλαίσιο Select Study επιλέγω Time Dependent



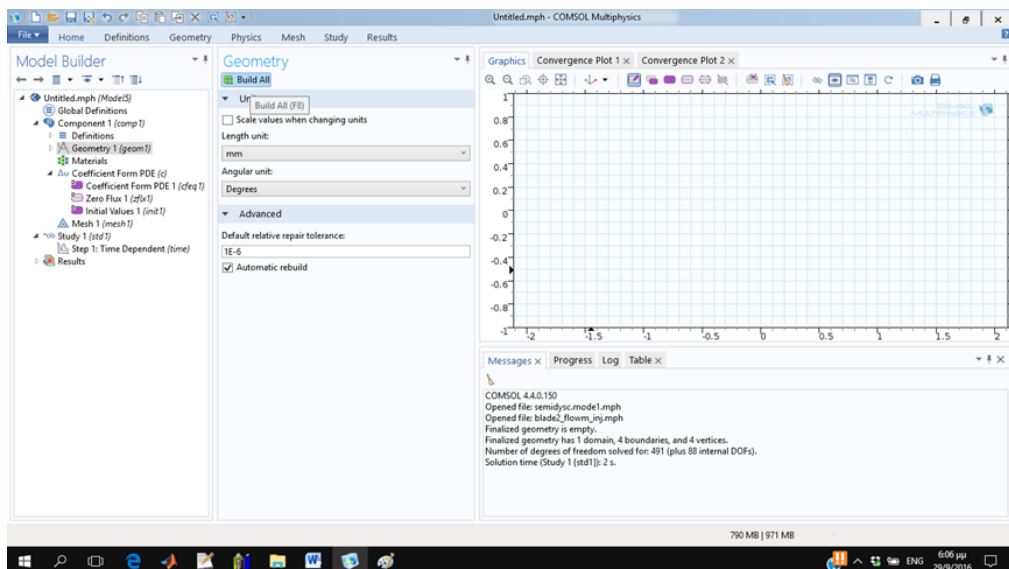
08) Πατάω Done



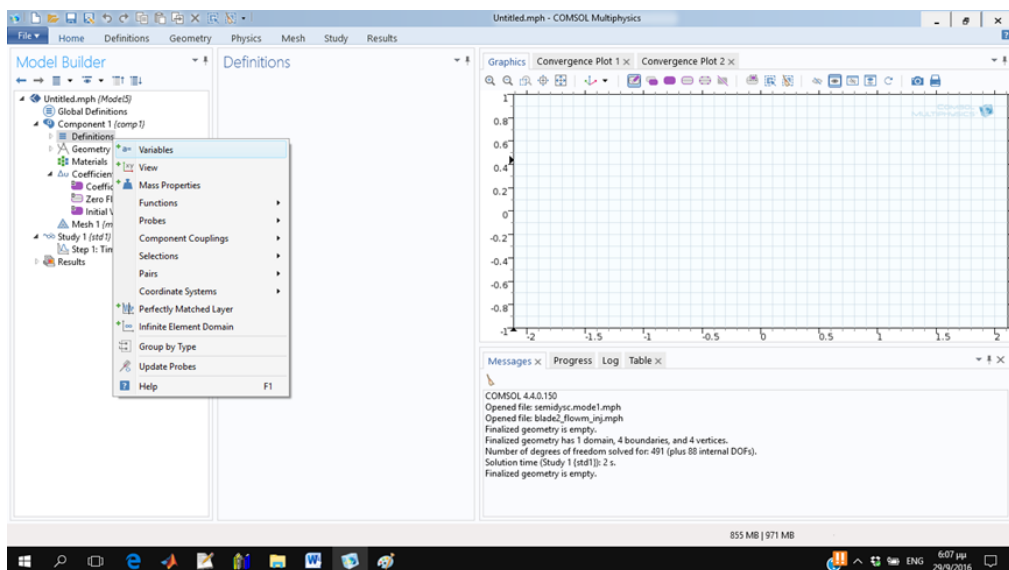
09) Στην νέα οθόνη που θα εμφανισθεί επιλέγω διαστάσεις [mm]



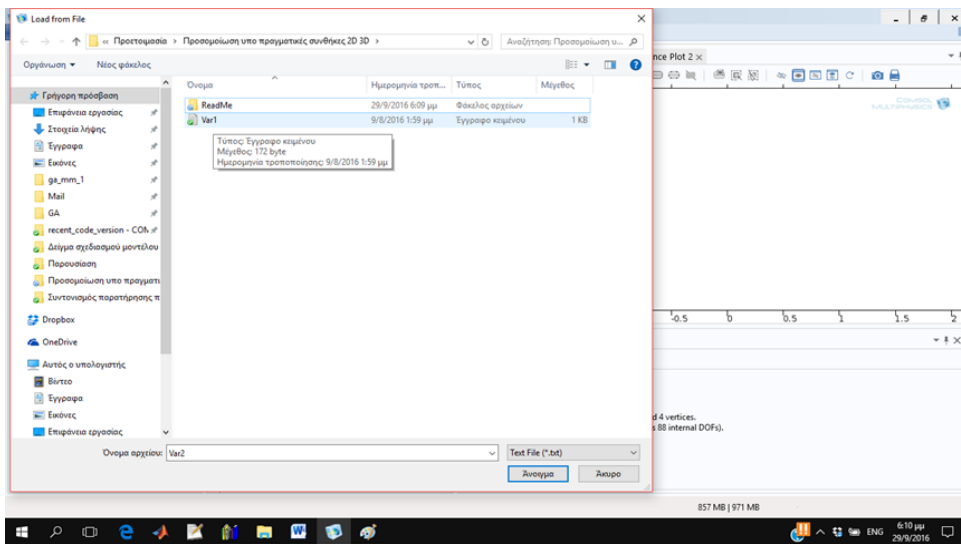
10) Επιλέγω Build All



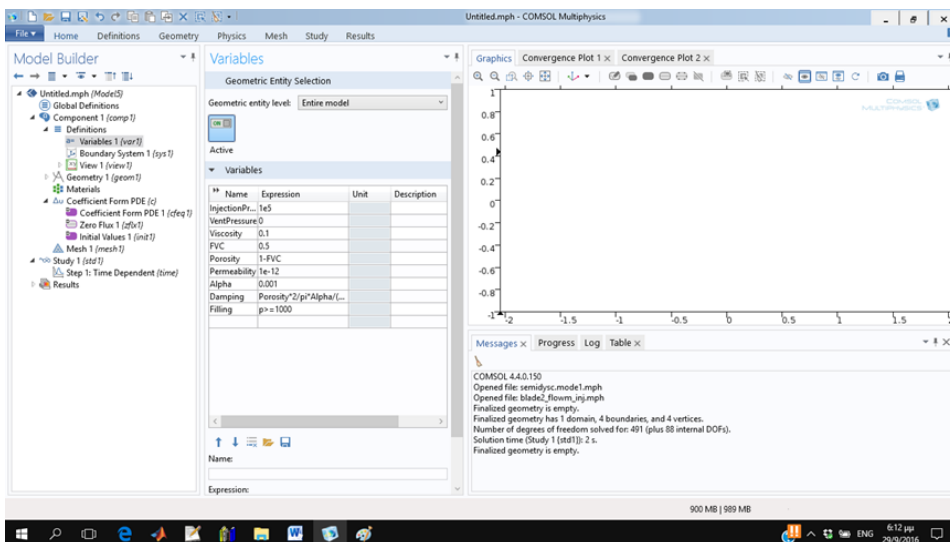
11) Στον κόμβο Definitions πατάω δεξί click και επιλέγω Variables



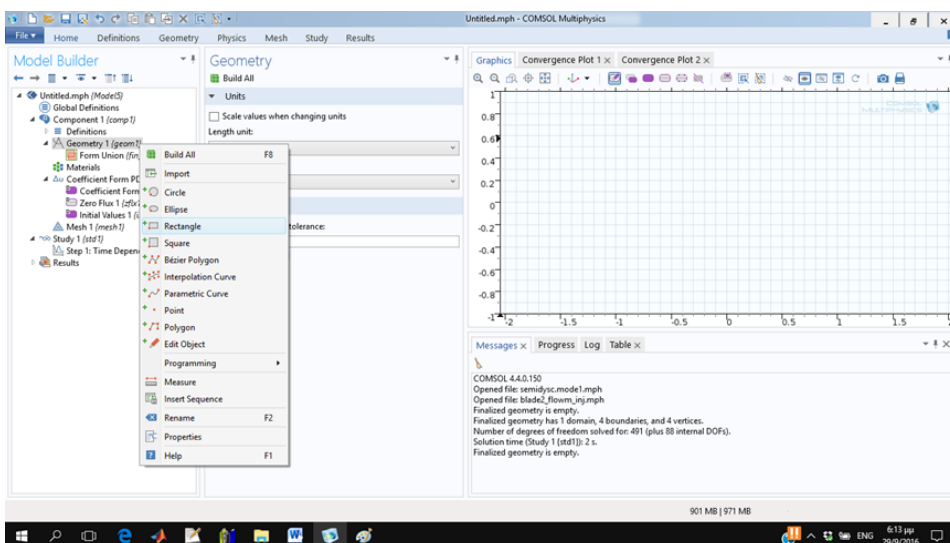
12) Στο πλαίσιο που θα εμφανιστεί θα κάνω load το txt αρχείο με τις extra μεταβλητές

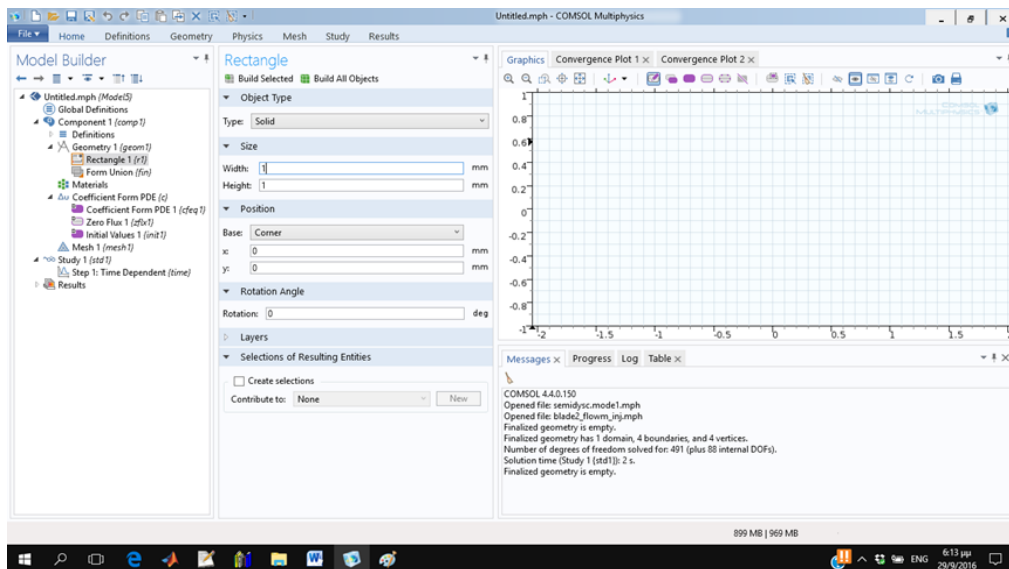


13) Εμφανίζεται ο πίνακας με τις αντίστοιχες μεταβλητές: InjectionPressure 1,00E+05, VentPressure 0, Viscosity 0.1, FVC 0.5, Porosity 1-FVC, Alpha 0.001, Filling $p \geq 1000$, Permeability 3.2E-12, Damping, $\text{Porosity} \cdot 2/\pi \cdot \text{Alpha}/(1+(\text{Alpha} \cdot p)^2)$

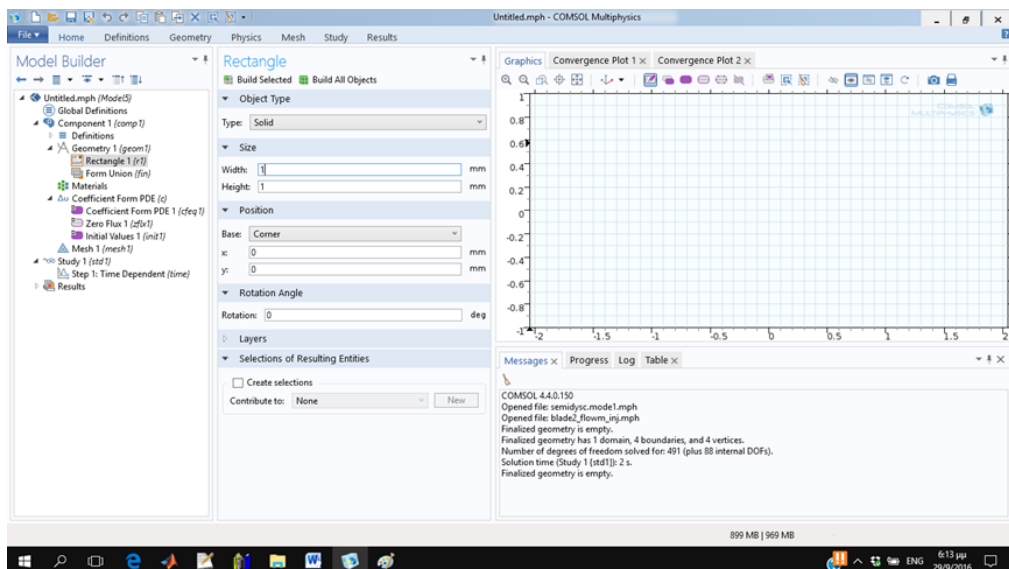


14) Στον κόμβο Geometry πατάω δεξί click και επιλέγω Rectangle

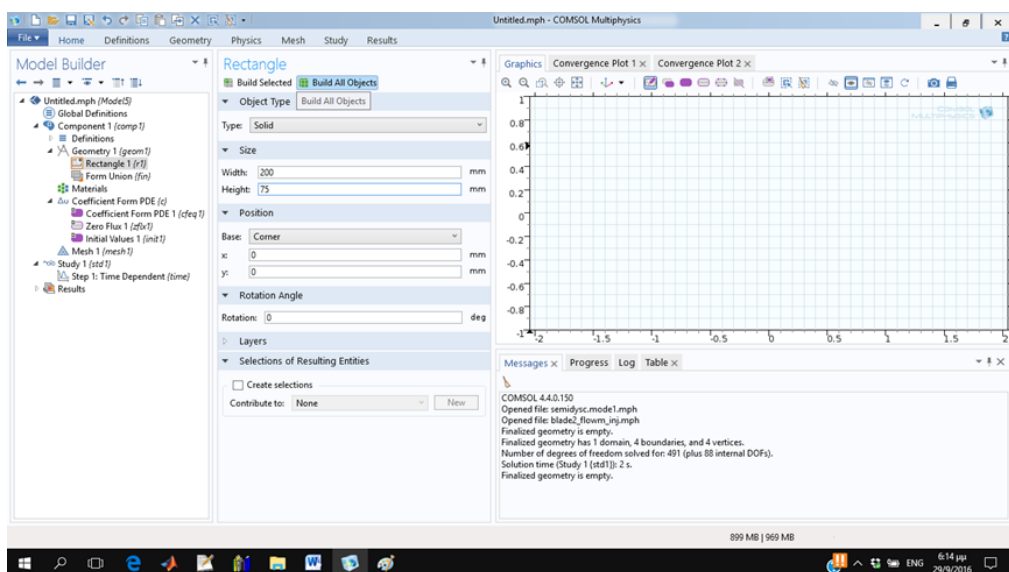




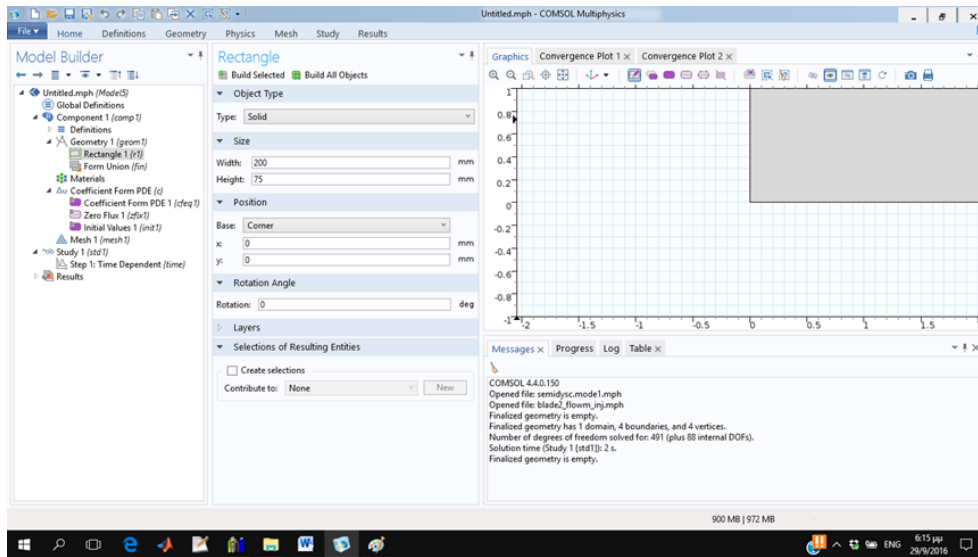
15) Στα πλαίσια Width, Height γράφω 200,75 αντίστοιχα



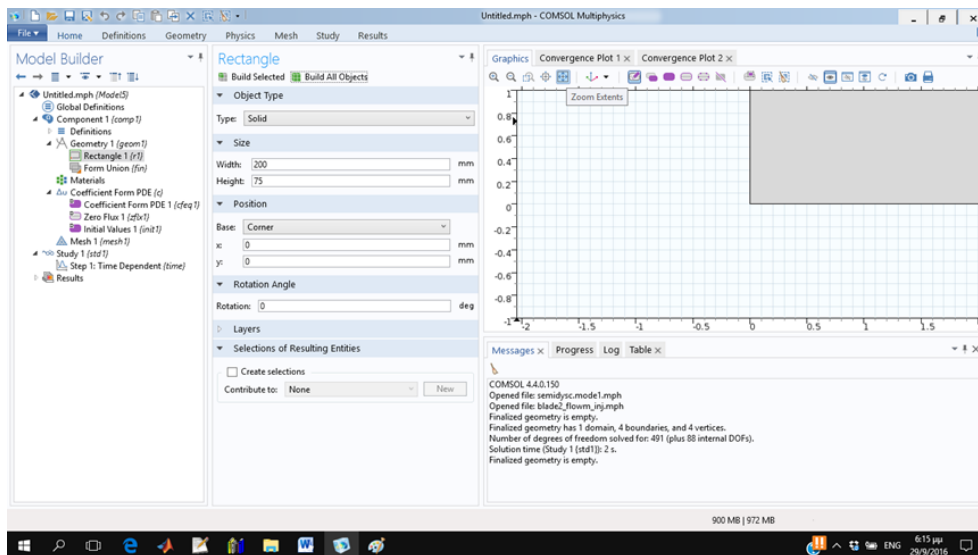
16) Πατάω Build All Objects



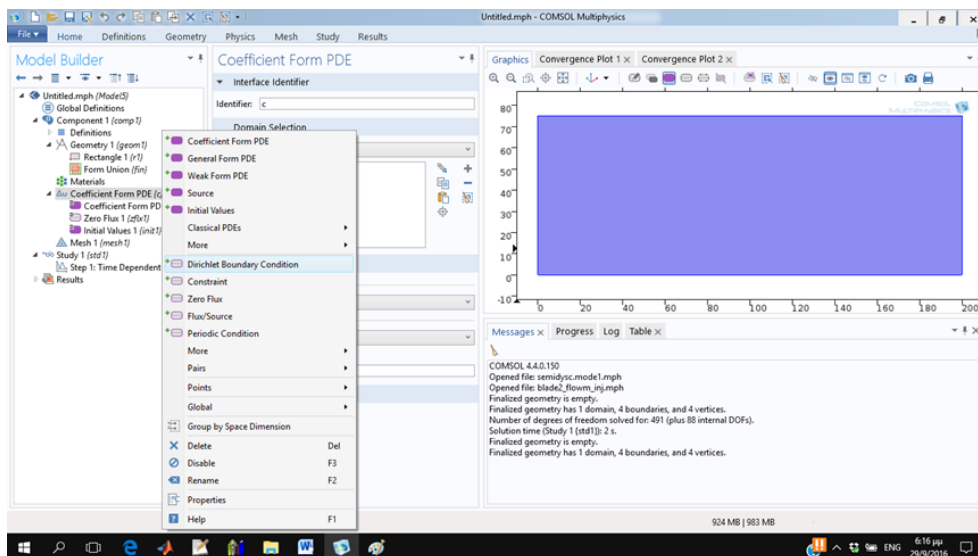
17) Εμφανίζεται το κομμάτι στην οθόνη



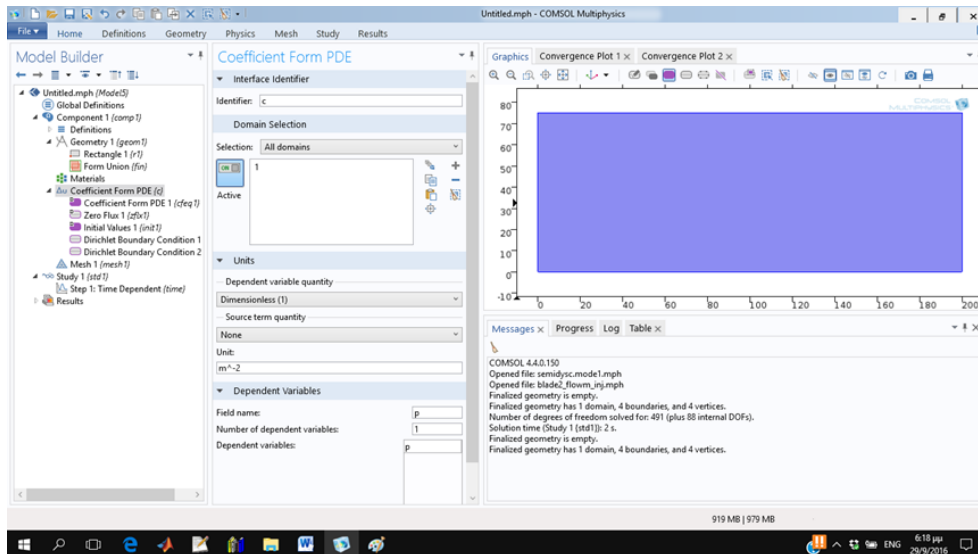
18) Στο πλαίσιο Graphics που απεικονίζεται η γεωμετρία επιλέγω Zoom Extents (εικονίδιο)



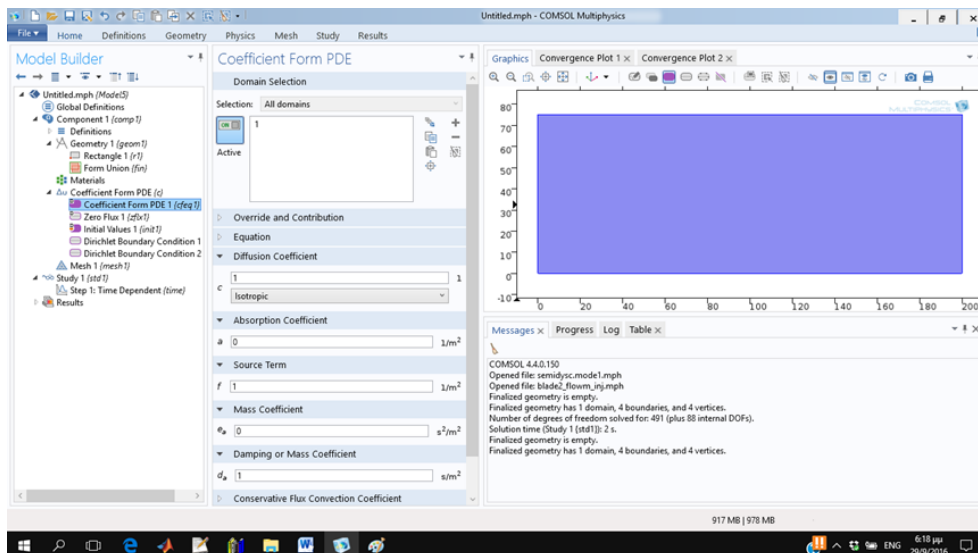
19) Εντοπίζω τον κόμβο Coefficient From PDE {c} πατάω δεξί click και μετά Dirichlet Boundary Condition δύο φορές.



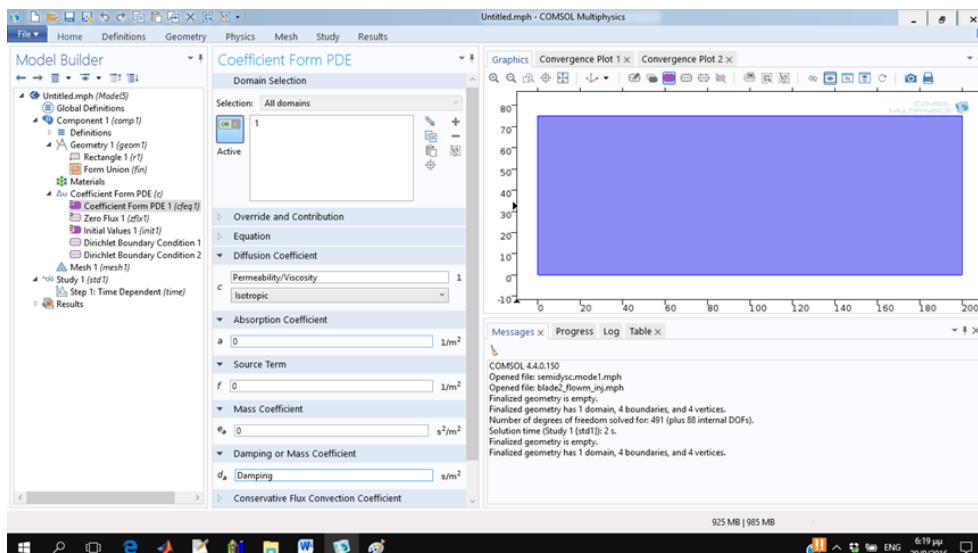
20) Στο τμήμα Dependent Variables φαίνεται η κύρια μεταβλητή του προβλήματος



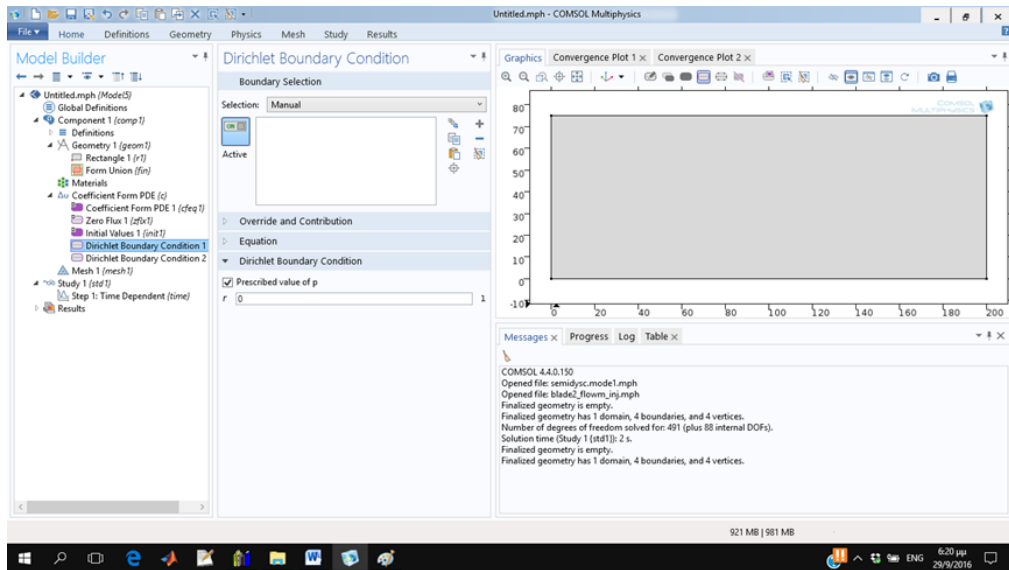
21) Κάνω click στην 1η επιλογή Coefficient Form PDE



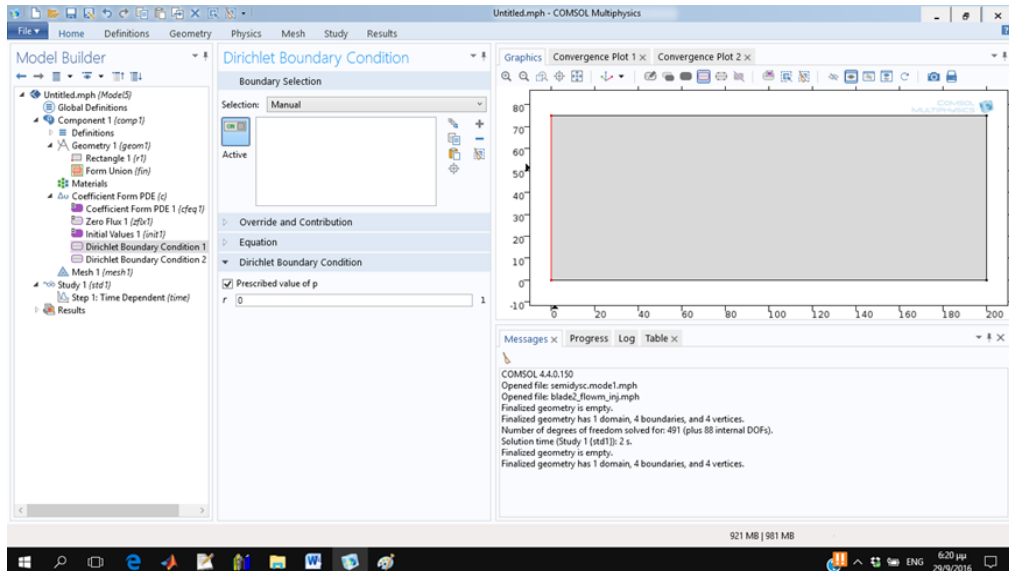
22) Στο τμήμα Diffusion Coefficient αλλάζω τις τιμές των c,a,f,ea,da σε Permeability/Viscosity,0,0,0,Damping



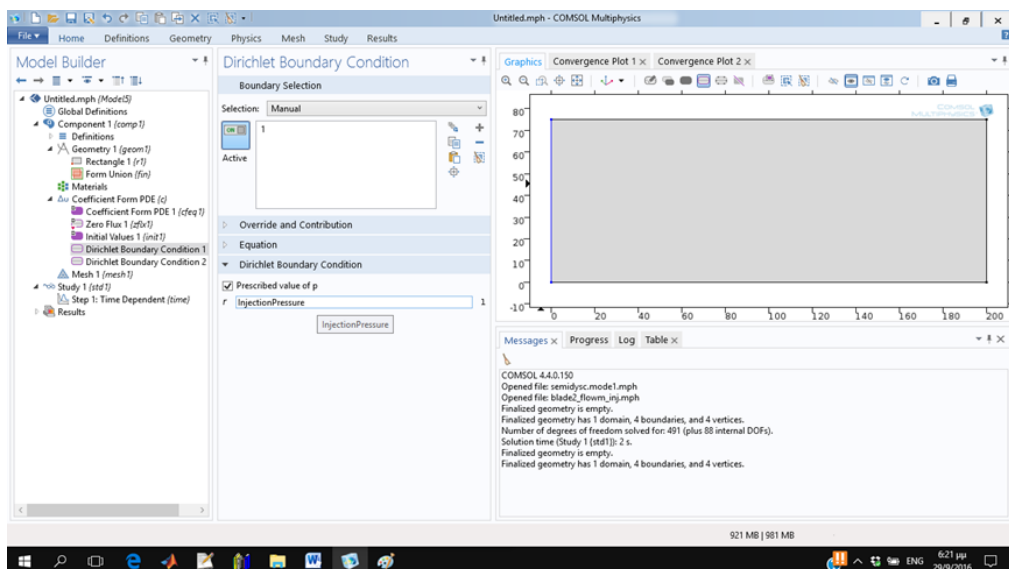
23) Επιλέγω Dirichlet Boundary Condition 1



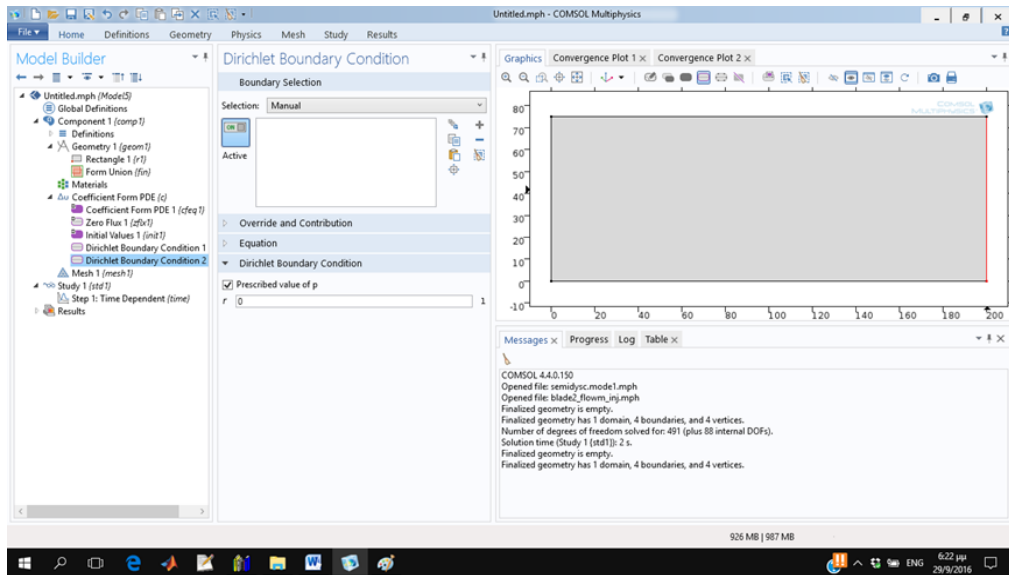
24) Στο πλαίσιο Boundary Selection επιλέγω την ακμή 1



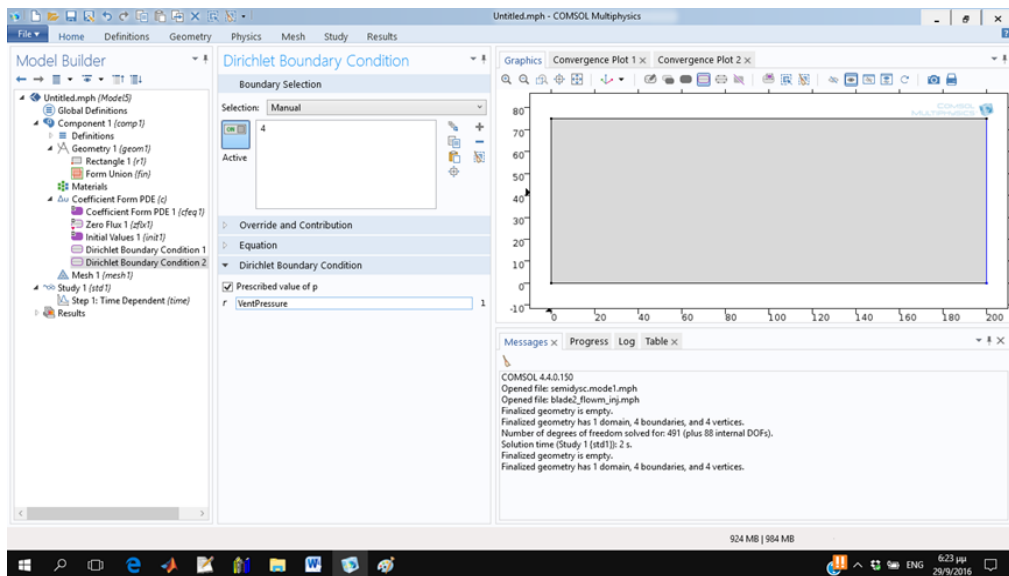
25) Στο πλαίσιο r γράφω InjectionPressure



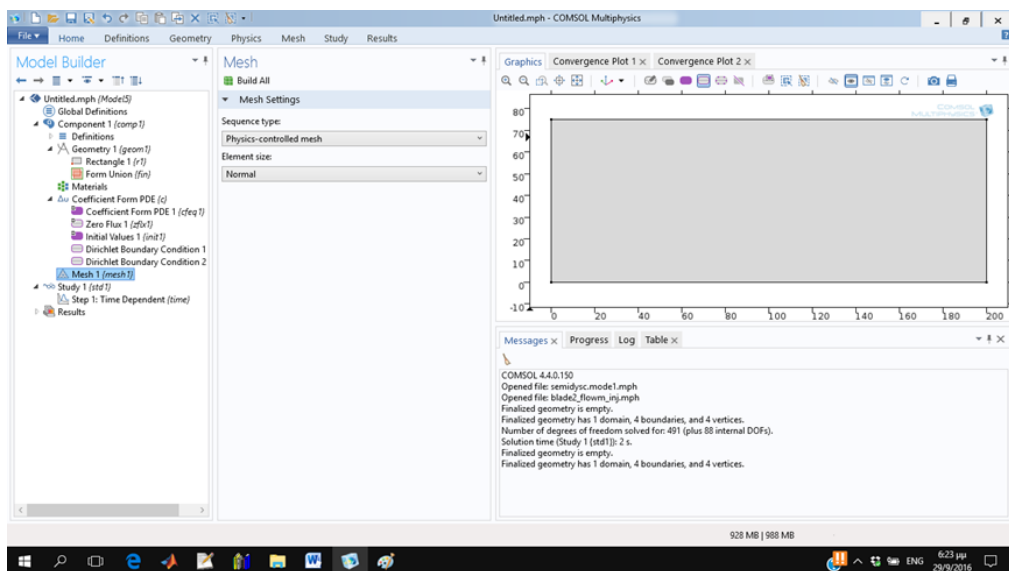
26) Στο πλαίσιο Boundary Selection επιλέγω την ακμή 4



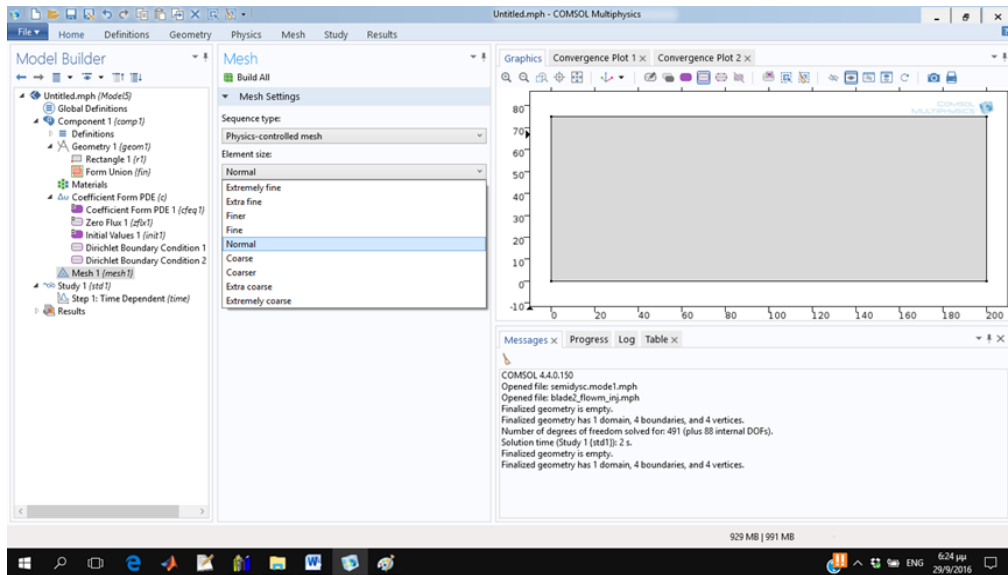
27) Στο πλαίσιο r γράφω VentPressure



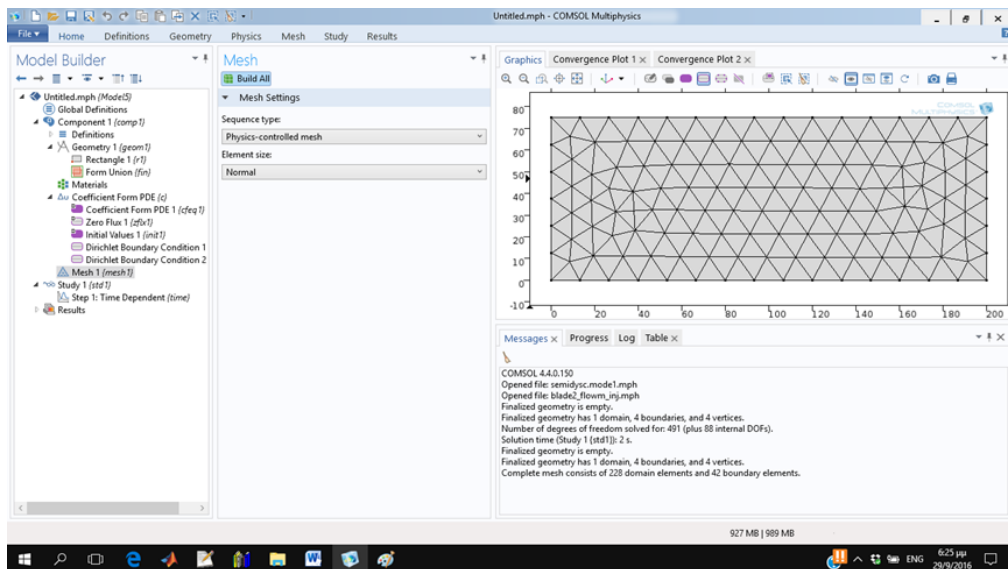
28) κάνω click στον κόμβο Mesh



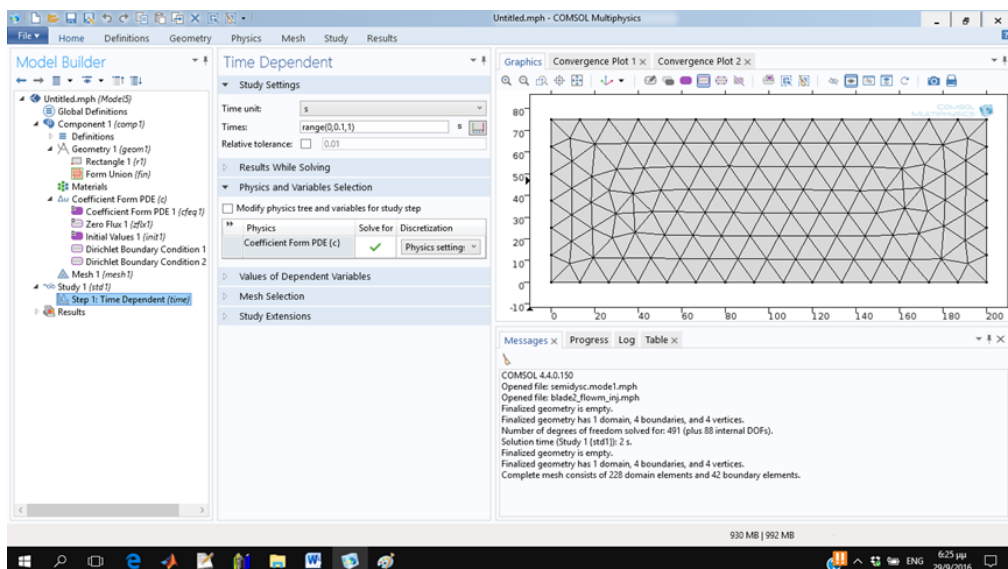
29) Στο τμήμα Element Size μπορώ να επιλέξω το μέγεθος του πλέγματος (αφήνω το default) Normal



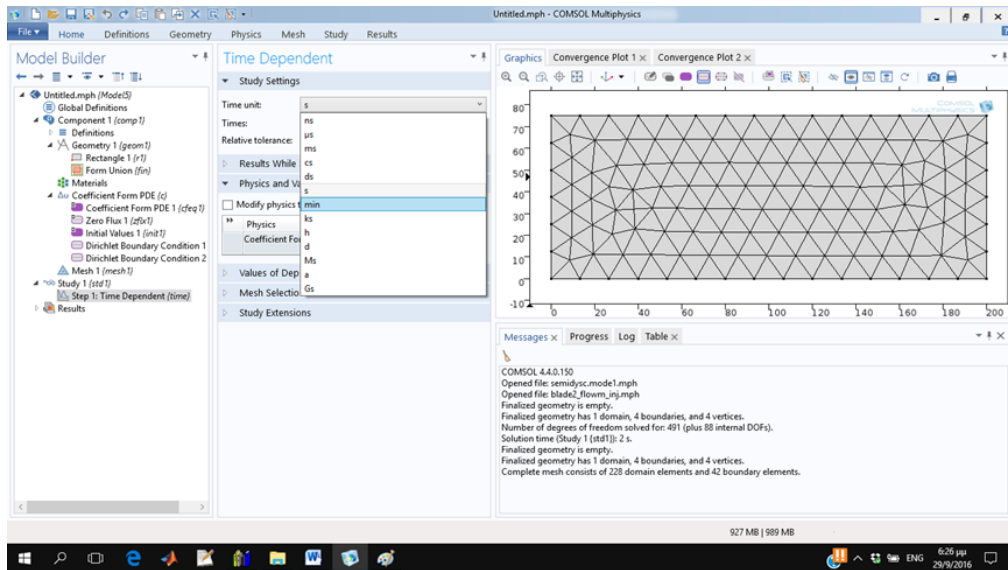
30) Κάνω click στο Build All



31) Στον κόμβο Study επιλέγω το Step 1: Time Dependent {time}

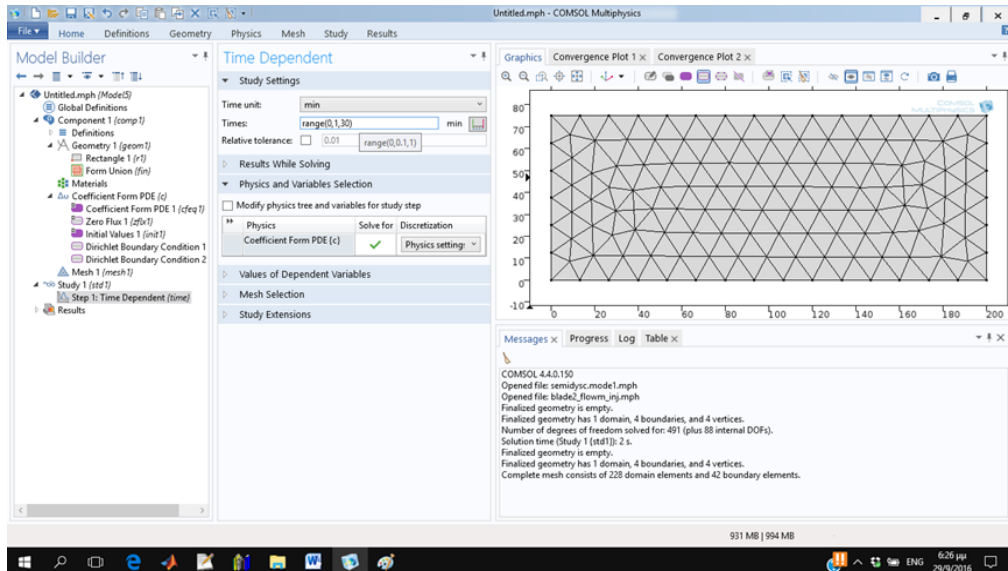


32) Στο τμήμα Study Settings και συγκεκριμένα στο [Time unit] επιλέγω [min]



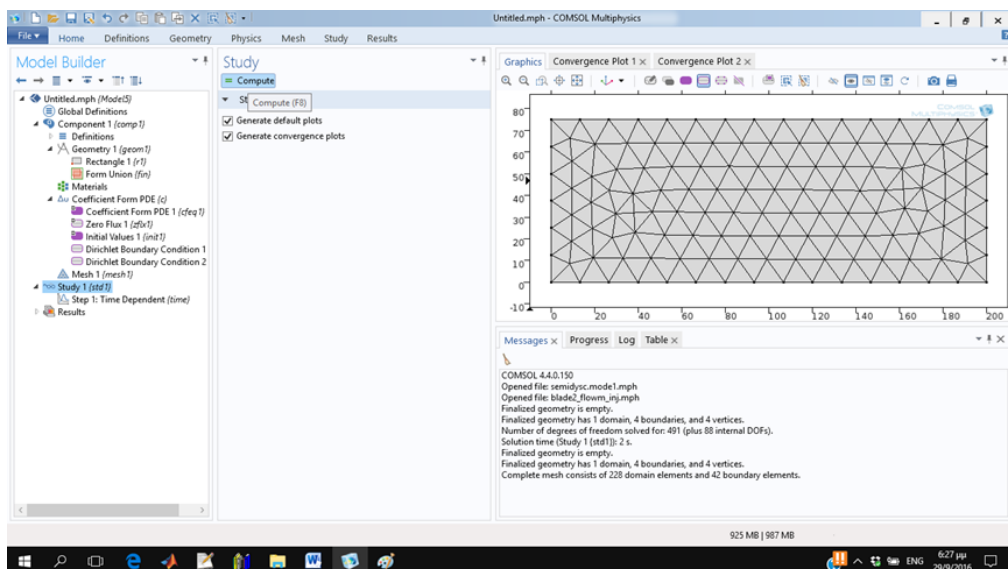
COMSOL 4.4.0.150
 Opened file: semidisc.model1.mph
 Opened file: blade2_flowm_inj.mph
 Finalized geometry is empty.
 Finalized geometry has 1 domain, 4 boundaries, and 4 vertices.
 Number of degrees of freedom solved for: 491 (plus 88 internal DOFs).
 Solution time (Study 1 [stdf]): 2 s.
 Finalized geometry is empty.
 Finalized geometry has 1 domain, 4 boundaries, and 4 vertices.
 Complete mesh consists of 228 domain elements and 42 boundary elements.

33) Στο [Times] επιλέγω range(0:1:30)



COMSOL 4.4.0.150
 Opened file: semidisc.model1.mph
 Opened file: blade2_flowm_inj.mph
 Finalized geometry is empty.
 Finalized geometry has 1 domain, 4 boundaries, and 4 vertices.
 Number of degrees of freedom solved for: 491 (plus 88 internal DOFs).
 Solution time (Study 1 [stdf]): 2 s.
 Finalized geometry is empty.
 Finalized geometry has 1 domain, 4 boundaries, and 4 vertices.
 Complete mesh consists of 228 domain elements and 42 boundary elements.

34) Κάνω click στο Compute



COMSOL 4.4.0.150
 Opened file: semidisc.model1.mph
 Opened file: blade2_flowm_inj.mph
 Finalized geometry is empty.
 Finalized geometry has 1 domain, 4 boundaries, and 4 vertices.
 Number of degrees of freedom solved for: 491 (plus 88 internal DOFs).
 Solution time (Study 1 [stdf]): 2 s.
 Finalized geometry is empty.
 Finalized geometry has 1 domain, 4 boundaries, and 4 vertices.
 Complete mesh consists of 228 domain elements and 42 boundary elements.

35)Εντοπίζω τον κόμβο 2D Plot Group 1

The screenshot shows the COMSOL Multiphysics interface. In the Model Builder, the 2D Plot Group 1 is selected. The 'Data' section is set to 'Solution 1 [dset1]' and 'Time (min): 30'. The 'Plot Settings' section is set to 'Automatic' view. The 'Color Legend' is set to 'Material (x, y, z)'. The plot area shows a 2D surface plot of the dependent variable p (1) at Time=30 min, with a color scale from -389 to 1×10^5 .

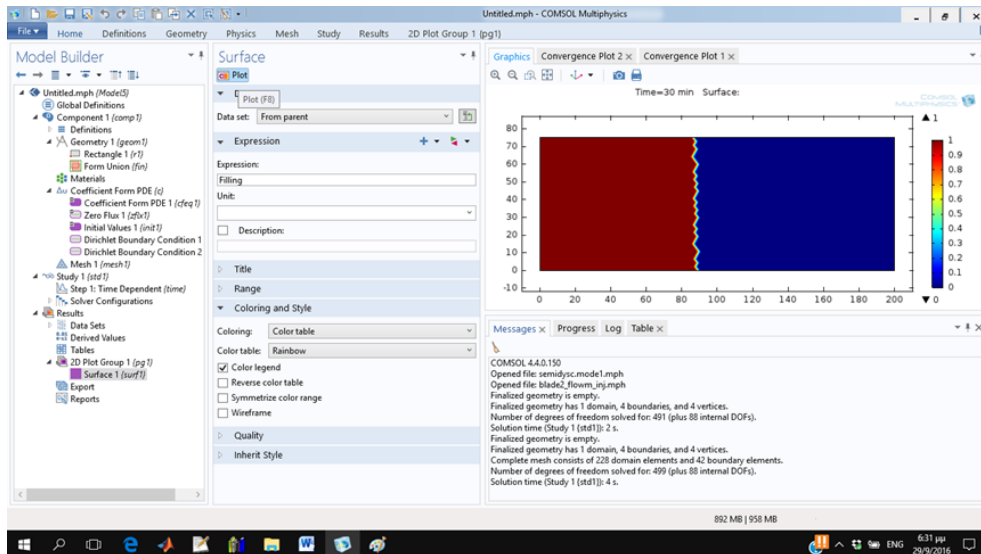
36)Κάνω click στην επιλογή Surface

The screenshot shows the COMSOL Multiphysics interface. In the Model Builder, the Surface is selected. The 'Expression' is set to 'p' and 'Unit' is '1'. The 'Coloring and Style' section is set to 'Color table' and 'Rainbow'. The plot area shows a 2D surface plot of the dependent variable p (1) at Time=30 min, with a color scale from -389 to 1×10^5 .

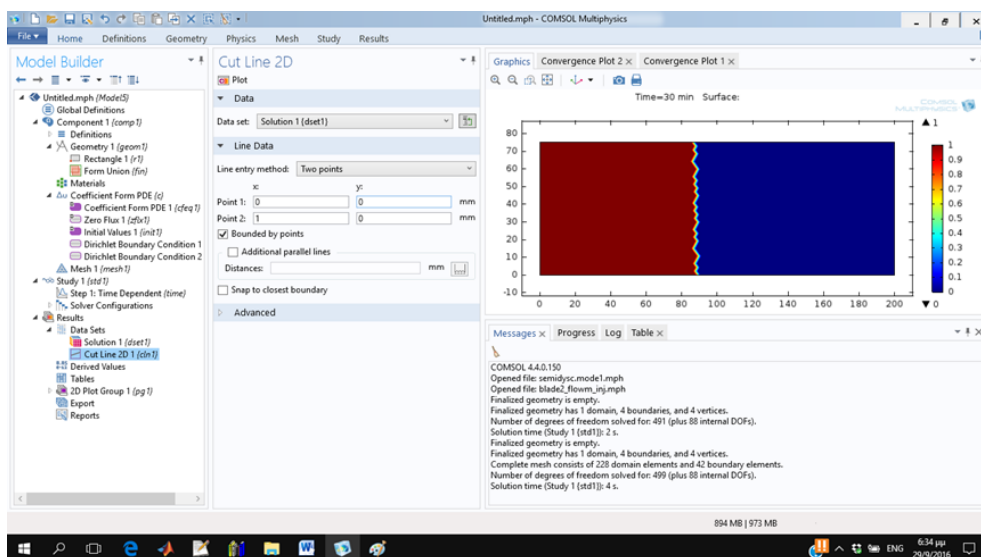
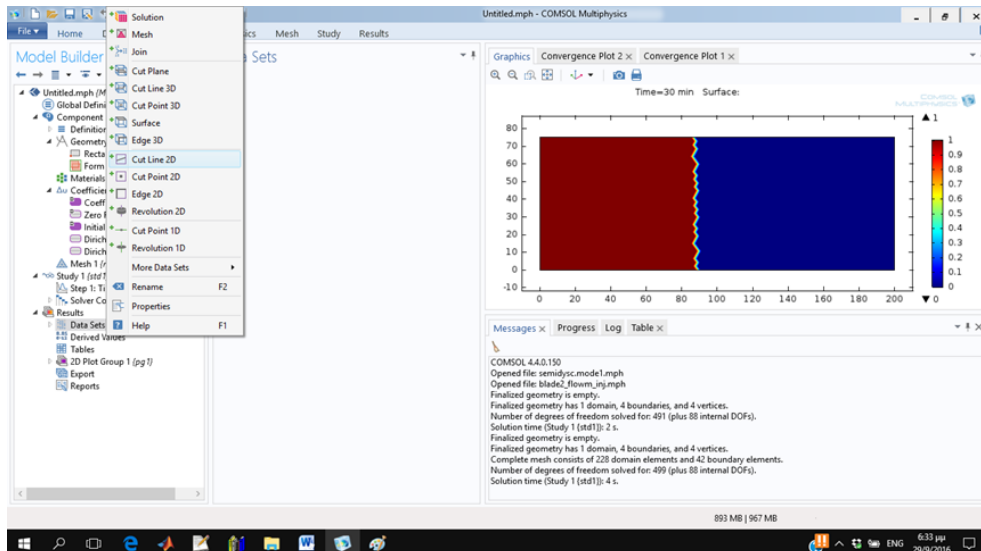
37)Στο πλαίσιο Expression αντικαθιστώ το p με Filling

The screenshot shows the COMSOL Multiphysics interface. In the Model Builder, the Surface is selected. The 'Expression' is set to 'Filling' and 'Unit' is '1'. The 'Coloring and Style' section is set to 'Color table' and 'Rainbow'. The plot area shows a 2D surface plot of the dependent variable p (1) at Time=30 min, with a color scale from -389 to 1×10^5 .

38) Κάνω click στο Plot



39) Στον κόμβο Data Sets κάνω δεξί click και επιλέγω Cut Line 2D (το κάνω 3 φορές)



41) Στο Cut Line 2D 2 στο πεδίο Line Data επιλέγω Point 1(0,0), Point 2(200,0)

COMSOL 4.4.0.150
 Opened file: semidisc.model1.mph
 Opened file: blade2_flowm_inj.mph
 Finalized geometry is empty.
 Finalized geometry has 1 domain, 4 boundaries, and 4 vertices.
 Number of degrees of freedom solved for: 491 (plus 88 internal DOFs).
 Solution time (Study 1 (std1)): 2 s.
 Finalized geometry is empty.
 Finalized geometry has 1 domain, 4 boundaries, and 4 vertices.
 Complete mesh consists of 228 domain elements and 42 boundary elements.
 Number of degrees of freedom solved for: 499 (plus 88 internal DOFs).
 Solution time (Study 1 (std1)): 4 s.

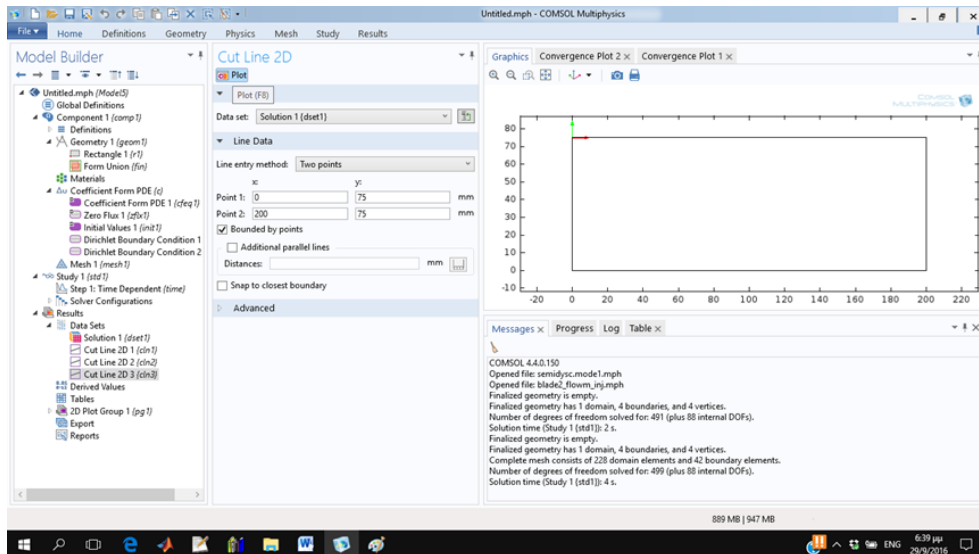
42) Κάνω click στο Plot

COMSOL 4.4.0.150
 Opened file: semidisc.model1.mph
 Opened file: blade2_flowm_inj.mph
 Finalized geometry is empty.
 Finalized geometry has 1 domain, 4 boundaries, and 4 vertices.
 Number of degrees of freedom solved for: 491 (plus 88 internal DOFs).
 Solution time (Study 1 (std1)): 2 s.
 Finalized geometry is empty.
 Finalized geometry has 1 domain, 4 boundaries, and 4 vertices.
 Complete mesh consists of 228 domain elements and 42 boundary elements.
 Number of degrees of freedom solved for: 499 (plus 88 internal DOFs).
 Solution time (Study 1 (std1)): 4 s.

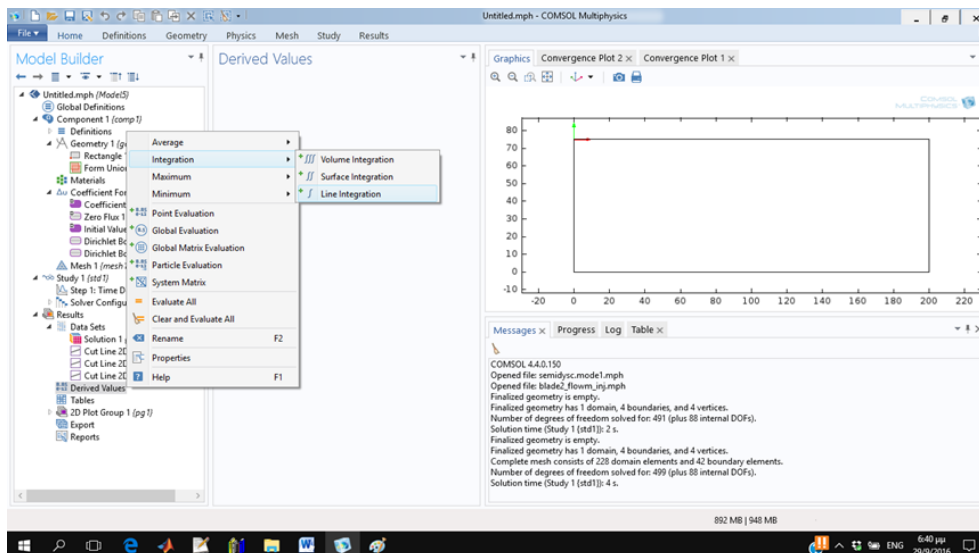
43) Στο Cut Line 2D 2 στο πεδίο Line Data επιλέγω Point 1(0,37.5), Point 2(200,37.5), Κάνω click στο Plot

COMSOL 4.4.0.150
 Opened file: semidisc.model1.mph
 Opened file: blade2_flowm_inj.mph
 Finalized geometry is empty.
 Finalized geometry has 1 domain, 4 boundaries, and 4 vertices.
 Number of degrees of freedom solved for: 491 (plus 88 internal DOFs).
 Solution time (Study 1 (std1)): 2 s.
 Finalized geometry is empty.
 Finalized geometry has 1 domain, 4 boundaries, and 4 vertices.
 Complete mesh consists of 228 domain elements and 42 boundary elements.
 Number of degrees of freedom solved for: 499 (plus 88 internal DOFs).
 Solution time (Study 1 (std1)): 4 s.

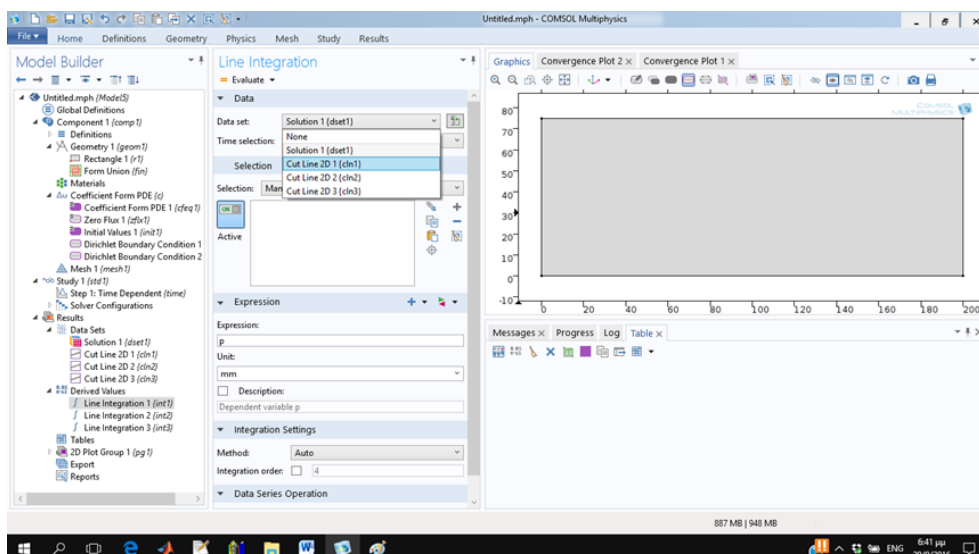
44) Στο Cut Line 2D 3 στο πεδίο Line Data επιλέγω Point 1(0,75), Point 2(200,75), Κάνω click στο Plot

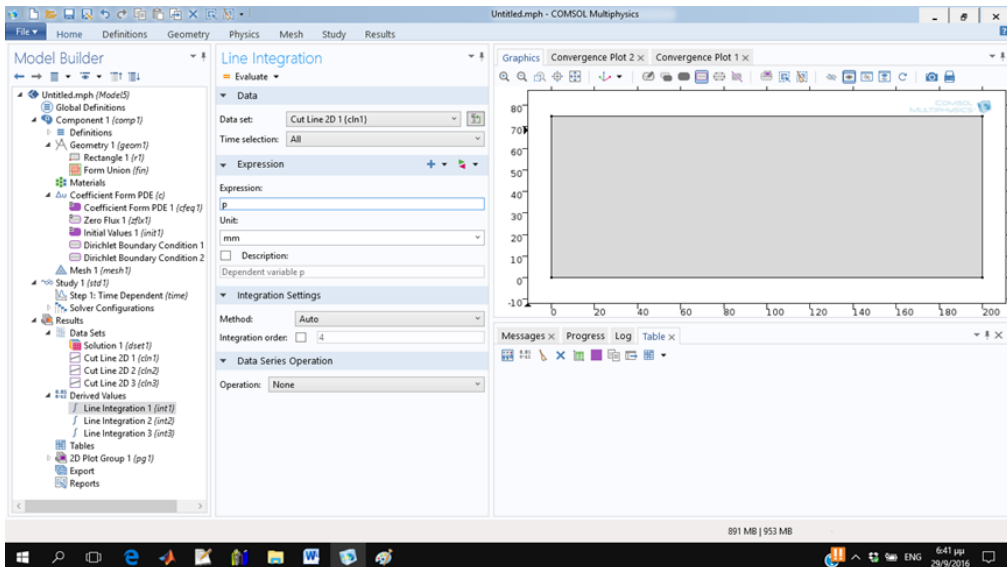


45) Στον κόμβο Derived Values με δεξί click πατάω Integration --> Line Integration

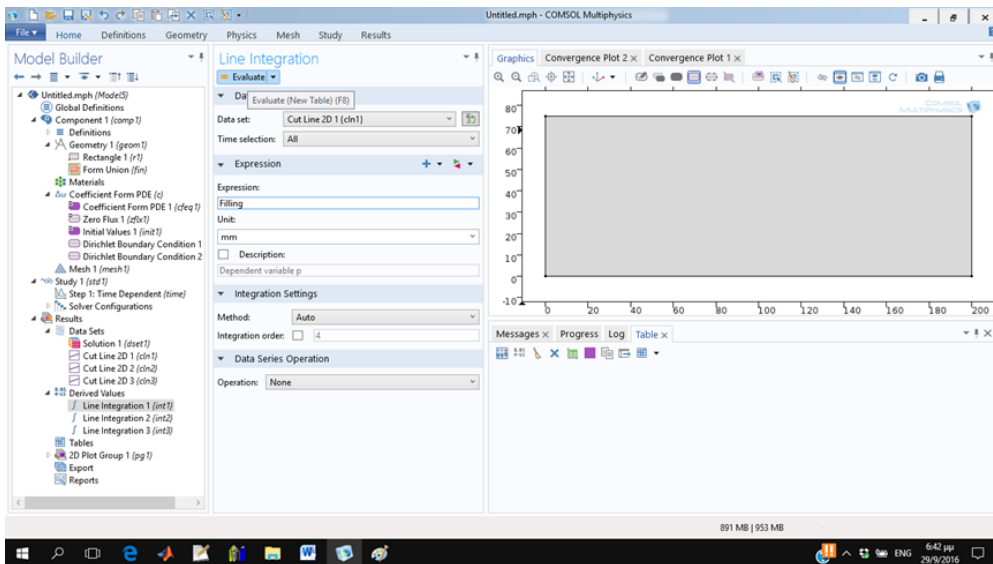


46) Στο πεδίο Data και συγκεκριμένα στο πλαίσιο Data Set αντικαθιστώ την Solution με Cut Line 2D 1

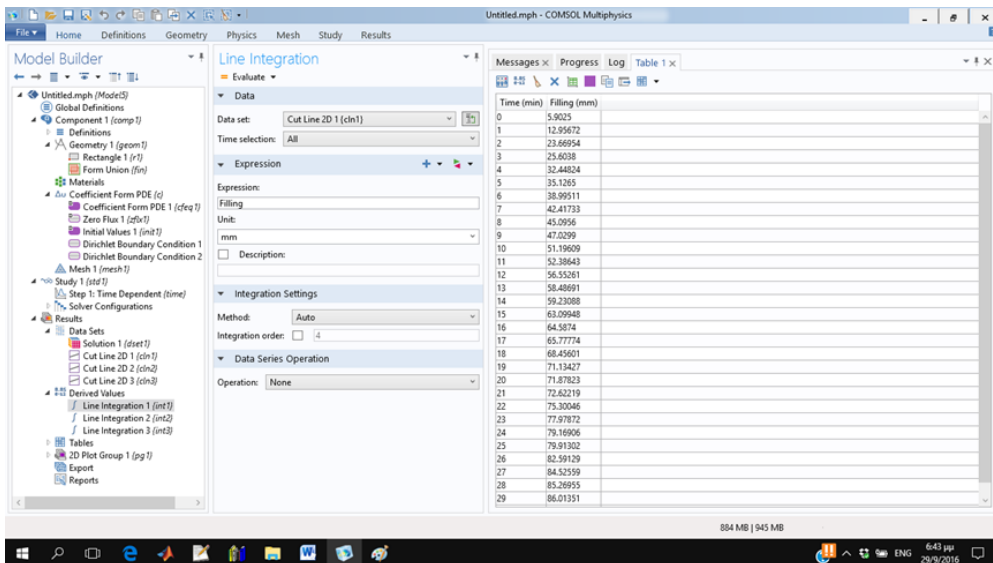




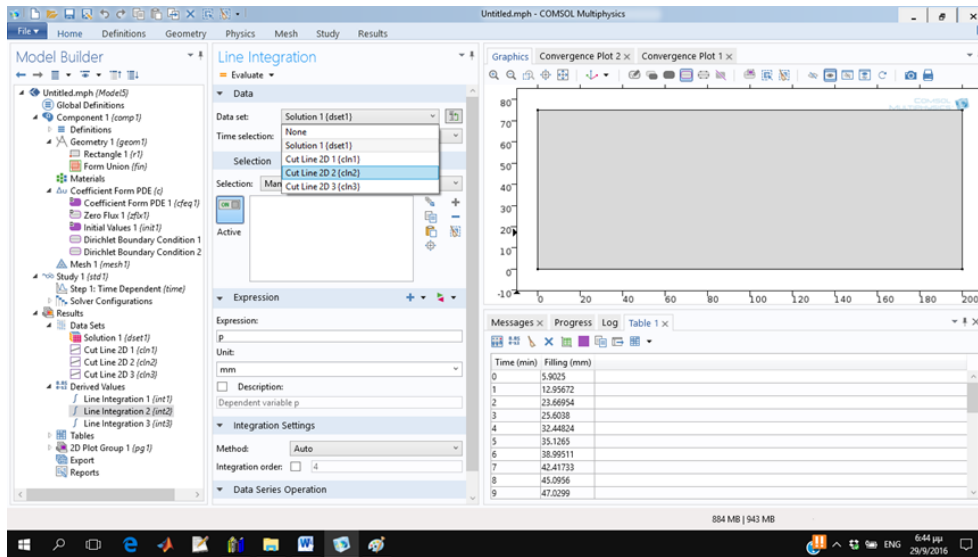
48) Αλλάζω το p σε Filling και κάνω click στο Evaluate



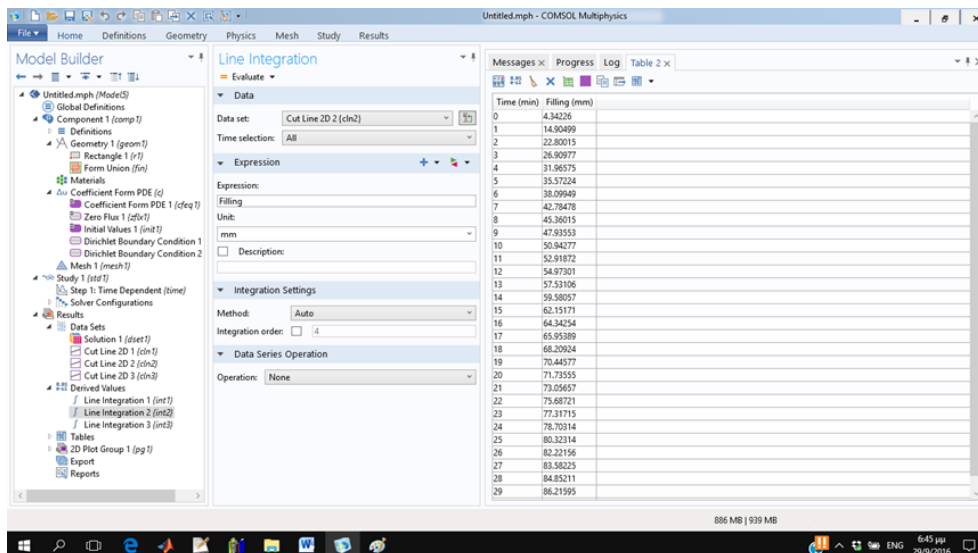
49) Εμφανίζονται οι τιμές της διάδοσης του μετώπου της ροής (Filling) για $t=0-30$



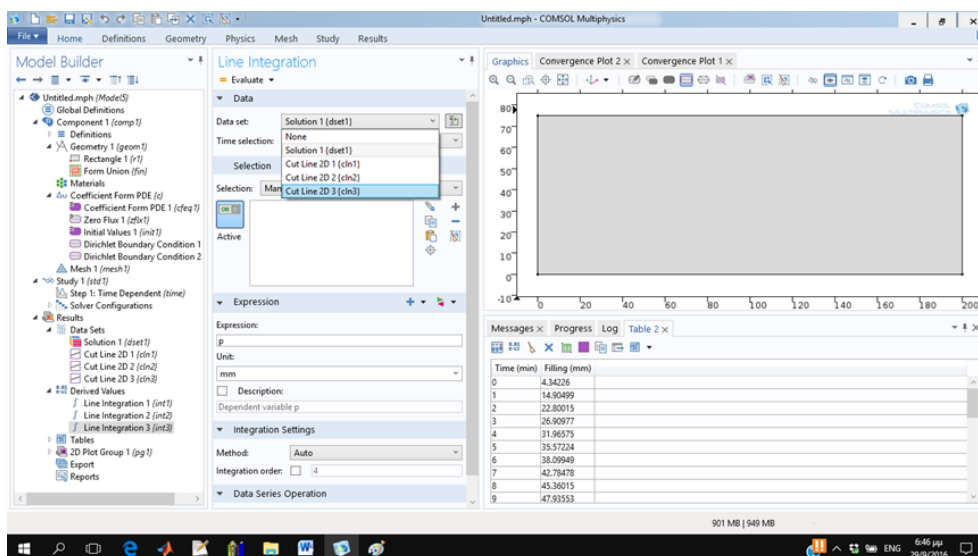
50) Στα 50-53 κάνω το ίδιο και για τις υπόλοιπες Cut Line(2,3)



51) Στα 50-53 κάνω το ίδιο και για τις υπόλοιπες Cut Line(2,3)



52) Στα 50-53 κάνω το ίδιο και για τις υπόλοιπες Cut Line(2,3)



53) Στα 50-53 κάνω το ίδιο και για τις υπόλοιπες Cut Line(2,3)

Time (min)	Filling (mm)
0	5.9025
1	12.95672
2	21.73528
3	25.6038
4	32.44824
5	35.1265
6	38.99511
7	43.16129
8	45.83956
9	47.0299
10	51.19609
11	52.38643
12	56.55261
13	58.48691
14	59.23988
15	63.09948
16	64.5874
17	65.77774
18	68.45601
19	71.13427
20	71.87823
21	72.62219
22	74.5565
23	77.97872
24	79.16906
25	79.91302
26	82.59129
27	84.52559
28	85.26955
29	86.01351

55) Στον κόμβο Export με δεξί click επιλέγω Player

Time (min)	Filling (mm)
0	5.9025
1	12.95672
2	23.66954
3	25.6038
4	32.44824
5	35.1265
6	38.99511
7	42.41733
8	45.0956
9	47.0299

56) Πατώντας το play στο πλαίσιο Graphics εκτελείται αναπαράσταση της προσομοίωσης

Time (min)	Filling (mm)
0	5.9025
1	12.95672
2	23.66954
3	25.6038
4	32.44824
5	35.1265
6	38.99511
7	42.41733
8	45.0956
9	47.0299

57) Αναφέρεται ότι μπορούν να εμφανιστούν οι τρεις προαναφερθέντες πίνακες χρησιμοποιώντας ένα Line Integration σε ένα Table.

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics interface. On the left, the Model Builder tree shows a 'Line Integration' object under 'Derived Values'. The central 'Line Integration' settings panel is visible, showing 'Data set: Cut Line 2D 3 (cIn3)', 'Expression: [empty]', 'Unit: mm', and 'Integration Settings' set to 'Auto'. On the right, the 'Table 4' window displays a data table with 30 rows and 4 columns: Time (min), Filling (mm), Filling (mm), and Filling (mm). The data shows a steady increase in filling over time.

Time (min)	Filling (mm)	Filling (mm)	Filling (mm)
1	12.95672	14.90499	12.95672
2	23.66954	22.80015	21.73328
3	25.6038	26.90977	25.6038
4	32.44824	31.96575	32.44824
5	35.1265	35.57224	35.1265
6	38.99511	38.09949	38.99511
7	42.41733	42.78478	43.16129
8	45.0956	45.36015	45.83956
9	47.0299	47.93553	47.0299
10	51.19609	50.94277	51.19609
11	52.38643	52.91872	52.38643
12	56.55261	54.97301	56.55261
13	58.48691	57.53106	58.48691
14	59.23088	59.58057	59.23088
15	63.09948	62.15171	63.09948
16	64.5874	64.34254	64.5874
17	65.77774	65.95389	65.77774
18	68.45601	68.20924	68.45601
19	71.13427	70.44577	71.13427
20	71.87823	71.73555	71.87823
21	72.62219	73.05657	72.62219
22	75.30046	75.68721	74.5565
23	77.97872	77.31715	77.97872
24	79.16906	78.70314	79.16906
25	79.91302	80.32314	79.91302
26	82.59129	82.32156	82.59129
27	84.52559	83.58225	84.52559
28	85.26955	84.85211	85.26955
29	86.01351	86.21595	86.01351
30	87.94781	88.21741	87.94781