



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

*Βέλτιστη δομική ενίσχυση πλαστικών οδοντωτών τροχών με
χρήση προεντεταμένων ανθρακονημάτων*

Διπλωματική Εργασία

Ιωάννης Κανελλόπουλος

Επιβλέπων : Λέκτορας Β. Σπιτάς

ΑΘΗΝΑ 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνεχόμενη αύξηση των απαιτήσεων στα συστήματα μετάδοσης κίνησης και μεταφορά ισχύος οδηγεί στην ανάγκη για σχεδιασμό και κατασκευή πιο στιβαρών αλλά παράλληλα ελαφριών κατασκευών. Όσον αφορά τα στοιχεία μηχανών και ειδικότερα τους οδοντωτούς τροχούς, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες αντικατάστασης των μεταλλικών με αντίστοιχους κατασκευασμένους από σύνθετα υλικά. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η αντοχή τους, μειώνεται το κόστος παραγωγής και βελτιώνεται η μηχανική συμπεριφορά τους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται βέλτιστος σχεδιασμός, μελέτη και κατασκευή πλαστικών μετωπικών οδοντωτών τροχών με ευθεία οδόντωση ενισχυμένους στην επικίνδυνη διατομή ποδός από προεντεταμένες ίνες. Ο σχεδιασμός τους γίνεται στο εμπορικό CAD πρόγραμμα Solidworks ενώ η στατική ανάλυση στο ANSYS WORKBENCH. Η καταπόνηση των οδοντωτών τροχών γίνεται σε στατικό φορτίο που ασκείται στο Υψηλότερο Σημείο Μονής Επαφής. Υπολογίζεται η μέγιστη εφελκυστική τάση στην πόδα του οδόντος, όπου ευρίσκεται η επικίνδυνη διατομή, η οποία τίθεται προς ελαχιστοποίηση. Βάσει αυτού του βέλτιστου σχεδιασμού κατασκευάζεται γύψινος οδοντωτός τροχός ενισχυμένος με λινάρι για να ληφθούν κάποια αρχικά ποιοτικά συμπεράσματα και να διαμορφωθεί η στρατηγική κατασκευής καλούπιού χύτευσης PET από αλουμίνιο. Σε αυτό το τελικό καλούπι που κατασκευάζεται, η γύψινη μήτρα αντικαθίσταται από την πολυεστερική ρητίνη, ενώ η ενίσχυση γίνεται με προεντεταμένα ανθρακονήματα. Στην συνέχεια γίνεται η κατασκευή δύο πλαστικών οδοντωτών τροχών, ενός ενισχυμένου και ενός άνευ ενίσχυσης, ώστε να ελεγχθούν σε δοκιμή στατικής αντοχής.

ABSTRACT

The continuing rise in demands regarding geared powertrains results in the necessity for design and construction of more robust and , simultaneously , lighter systems. With a reference to the machine elements, and more specifically the spur gears, a lot of research has been made for the replacement of metallic spur gears with others constructed by composite materials. In this way there is an increase in their stiffness, a decrease in production cost and an improvement in their mechanical behavior.

This Thesis introduces the optimum design and construction of plastic spur gears reinforced in the root section by prestressed fibers. Their design is made in the commercial CAD platform Solidworks, however the static analysis is investigated in Ansys Workbench FEA platform. The root bending stress field of spur gears is caused by static load applied at the Highest Point of Single Tooth Contact. The maximum tensile stress value is calculated and is subjected to minimization. According to that optimal design a hemp-reinforced plaster-matrix spur gear prototype is manufactured and tested in shear in order to derive some initial quantitative conclusions and also to form a suitable manufacturing strategy for the final mold. In this final mold, which is constructed, the plaster matrix is replaced by polyester resin, as well as, the reinforcement is made by prestressed carbon fibers. Then two plastic spur gears are manufactured, one reinforced and one unreinforced, and tested, therefore validating the numerical simulation results.

Αφιερώνεται,

στους γονείς μου και στα αδέρφια μου

Ευχαριστίες,

Η διπλωματική εργασία αποτελεί το τελευταίο αλλά και πιο σημαντικό κομμάτι στην εκπαίδευση ενός μηχανικού. Μέσα από τις πολλές δυσκολίες και τις μεγάλες απαιτήσεις, ένας σπουδαστής μετατρέπεται σε έναν νέο μηχανικό, ο οποίος έχει ακόμα πολλά να μάθει αλλά είναι πλέον σε θέση να αντιμετωπίσει τα διάφορα προβλήματα βασιζόμενος στις γνώσεις του. Σε αυτό το τελευταίο κομμάτι των σπουδών μου, είχα δίπλα μου τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Β. Σπιτά τον οποίο ευχαριστώ για την υπομονή, τον χρόνο που αφιέρωσε σε μένα και τις γνώσεις που μου έδωσε. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, και ονομαστικά τον Νίκο Γαλάνη για την κατεργασία στο κέντρο κατεργασιών OKUMA καθώς και τον Ιωάννη Πρέσσα για τις μηχανικές δοκιμές στην μηχανή INSTRON. Χωρίς την στήριξη και την βοήθεια από όλη την ομάδα του εργαστηρίου στοιχείων μηχανών δεν θα μπορούσα να ολοκληρώσω την εργασία αυτή. Ονομαστικά επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Γεωργία, την Ειρήνη και τον Κλάιντ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

- 1. Σχεδιασμός μετωπικών οδοντωτών τροχών με ευθεία οδόντωση** **σελ.14**
 - 1.1. Γενικά περί οδοντωτών τροχών
 - 1.2. Γεωμετρία μετωπικών οδοντωτών τροχών με ευθεία οδόντωση
 - 1.3. Βαθμός επικάλυψης ,τροχιά επαφών και Ανώτατο Σημείο Μονής Επαφής (HPSTC)

- 2. Μοντελοποίηση** **σελ.22**
 - 2.1. Τοποθέτηση οπλισμού και ιδιότητες υλικών
 - 2.1.1. Μήτρα
 - 2.1.2 Οπλισμός

2.2. Επίδραση της προέντασης των ινών

2.3. Κρίσιμη ακτίνα καμπυλότητας των ινών

2.4. Φόρτιση και στήριξη μοντέλου

2.5. Δημιουργία πλέγματος

3. Προσομοιώσεις

σελ.51

3.1. Καθορισμός παραμέτρων βελτιστοποίησης

3.2. Βελτιστοποίηση βάση της παραμέτρου P2

3.3. Αδιαστατοποίηση

3.4. Βελτιστοποίηση για μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς ευθείας οδόντωσης με 18, 25, 35 και 50 οδόντες.

3.5. Σύγκριση μεθόδων και συμπεράσματα

4. Πειραματική διερεύνηση με γύψινο μοντέλο

σελ.74

4.1 Κατασκευή μοντέλου από γύψο με λινή ενίσχυση

4.2 Κατασκευή πείρων

4.3 Κατασκευή βελτιωμένου καλουπιού

5. Πειραματική διερεύνηση με πολυεστερικό μοντέλο

σελ.84

5.1 Κατασκευή μοντέλου από πολυεστερική ρητίνη με ενίσχυση ανθρακονημάτων

5.2 Κατασκευή καλουπιού από αλουμίνιο

5.3 Δοκιμή θραύσης και σύγκριση με τα θεωρητικά αποτελέσματα

6. Σχολιασμός αποτελεσμάτων και μελλοντική ανάπτυξη

σελ.98

7. Βιβλιογραφία

σελ.99

1.Σχεδιασμός μετωπικών οδοντωτών τροχών με ευθεία οδόντωση

1.1 . Γενικά περί οδοντωτών τροχών

Οι οδοντωτοί τροχοί , είναι στοιχεία μηχανών που χρησιμοποιούνται για την μετάδοση περιστροφικής κινήσεως και την μεταφορά ισχύος από κινητήρια σε κινούμενη άτρακτο, μέσω διαδοχικής εμπλοκής συνεργαζόμενων οδόντων.

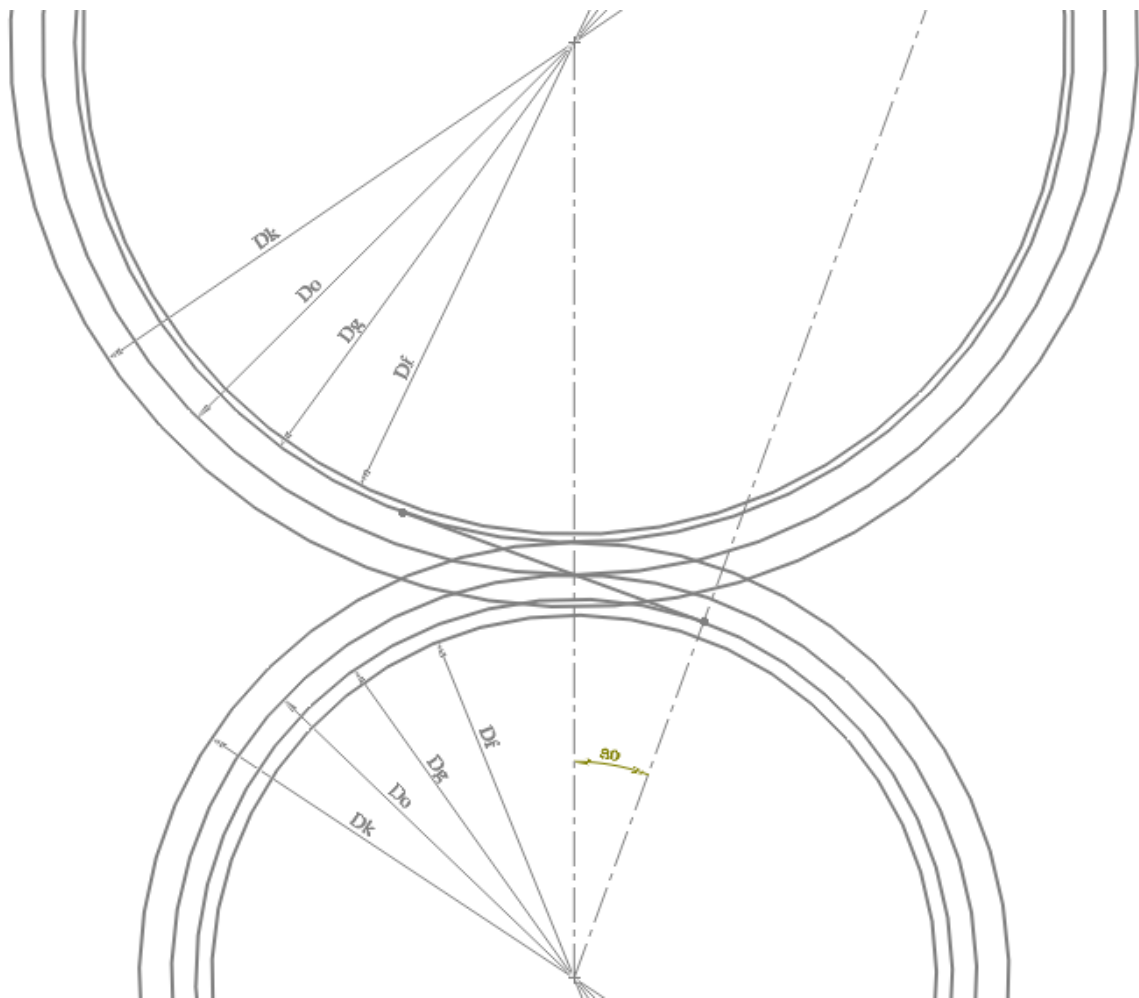
Οι οδόντες είναι σχηματισμοί αλληπάλληλων εσοχών και προεξοχών στην περιφέρεια ενός οδοντωτού τροχού , τέτοιες ώστε να είναι δυνατή η συνεργασία της εσοχής του ενός τροχού με την προεξοχή του συνεργαζόμενου οδοντωτού τροχού υπό σταθερή σχέση των ταχυτήτων και κατασκευάζονται με διάφορα προφίλ κατατομών , όπως αυτό της εξειλιγμένης, της ορθοκυκλοειδούς, της επικυκλοειδούς της περικυκλοειδούς και της υποκυκλοειδούς καμπύλης,ή τόξου κύκλου, ή ακόμα και σπείρας. Συνηθέστερη μεταξύ αυτών είναι η κατατομή της εξειλιγμένης, η οποία είναι η καμπύλη εκείνη που διαγράφει ένα σημείο ευθείας κυλιόμενης χωρίς ολίσθηση επί κύκλου.

Οι άξονες περί τους οποίους περιστρέφονται δύο συνεργαζόμενοι τροχοί μπορεί να είναι: παράλληλοι σε απόσταση a , ή τεμνόμενοι υπό γωνία δ , ή ασύμβατοι σε απόσταση a και υπό γωνία δ . Η σχετική θέση των αξόνων αυτών είναι βασικής σημασίας για την μορφή των τροχών που θα χρησιμοποιηθούν. Έτσι οι τροχοί μπορούν να είναι μετωπικοί (με ευθείς ή ελικοειδείς-κεκλιμένους οδόντες), οι οποίοι είναι κυλινδρικοί, μπορεί να είναι κωνικοί ή υποειδείς, ή ελικοειδείς τροχοί ασυμβάτων αξόνων, ή μπορούν να αποτελούν σύστημα ατέρμονος κοχλία-κορώνας[1].

1.2 . Γεωμετρία μετωπικών οδοντωτών τροχών με ευθεία οδόντωση

Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας ευθέων οδόντων εξειλιγμένης κανονικής οδοντώσεως έγινε στο σχεδιαστικό περιβάλλον του Solidworks. Αρχικά κρίνεται απαραίτητος ο υπολογισμός των βασικών μεγεθών της οδόντωσης.

Από την αρχική διάμετρο (d_0) και τον αριθμό των οδόντων (z) υπολογίζεται το module (m) από την (1.1). Στην εικόνα (1) φαίνονται τα σχετικά μεγέθη.



Εικόνα 1. Κύκλοι πινιόν με συνεργαζόμενο

$$m = \frac{d_0}{z} \quad (1.1)$$

το οποίο λαμβάνει τυποποιημένες τιμές. Υπολογίζονται εκ νέου d_0 και z και στην συνέχεια υπολογίζονται ο βασικός κύκλος, κεφαλής, ποδός και το πάχος από (1.2)-(1.5)

$$r_g = r_0 \cos a_0 \quad (1.2)$$

$$r_k = r_0 + m \quad (1.3)$$

$$r_f = r_0 - c_f m \quad (1.4)$$

$$S_0 = 0.5t_0 \quad (1.5)$$

Για τον υπολογισμό των μεγεθών του κανόνα λαμβάνονται τα κάτωθι τα οποία παρουσιάζονται και στην εικόνα (2).

$$r_c = c_c m \quad (1.6)$$

$$h_f = c_f m \quad (1.7)$$

$$a_t = h_f - r_c (1 - \sin a_0) \quad (1.8)$$

$$\Psi_\Lambda = \Psi_M = -a_t + r_c \sin a_0 \quad (1.9)$$

$$\delta = l_0 - 2(a_t \tan a_0 + r_c \cos a_0) \quad (1.10)$$

$$X_H = 0,5(l_0 - \delta) \quad (1.11)$$

$$X_J = l_0 - a_t \tan a_0 \quad (1.12)$$

Για τον υπολογισμό του κύκλου r_s ο οποίος διαχωρίζει την εξειλιγμένη από το τροχοειδές χρησιμοποιείται η παρακάτω επαναληπτική διαδικασία

$$\chi = X_H - r_c \sin \omega \quad (1.13)$$

$$\psi = \Psi_\Lambda - r_c \cos \omega \quad (1.14)$$

$$K = -\chi - \psi \frac{dF(\chi)}{dx} \quad (1.15)$$

$$\chi_{1K} = (\chi + K) \cos \theta - (\psi + r_0) \sin \theta \quad (1.16)$$

$$\psi_{1K} = (\chi + K) \sin \theta + (\psi + r_0) \cos \theta \quad (1.17)$$

$$\chi_s = \chi_{1k} \cos(-\varphi_0) + \psi_{1k} \sin(-\varphi_0) \quad (1.18)$$

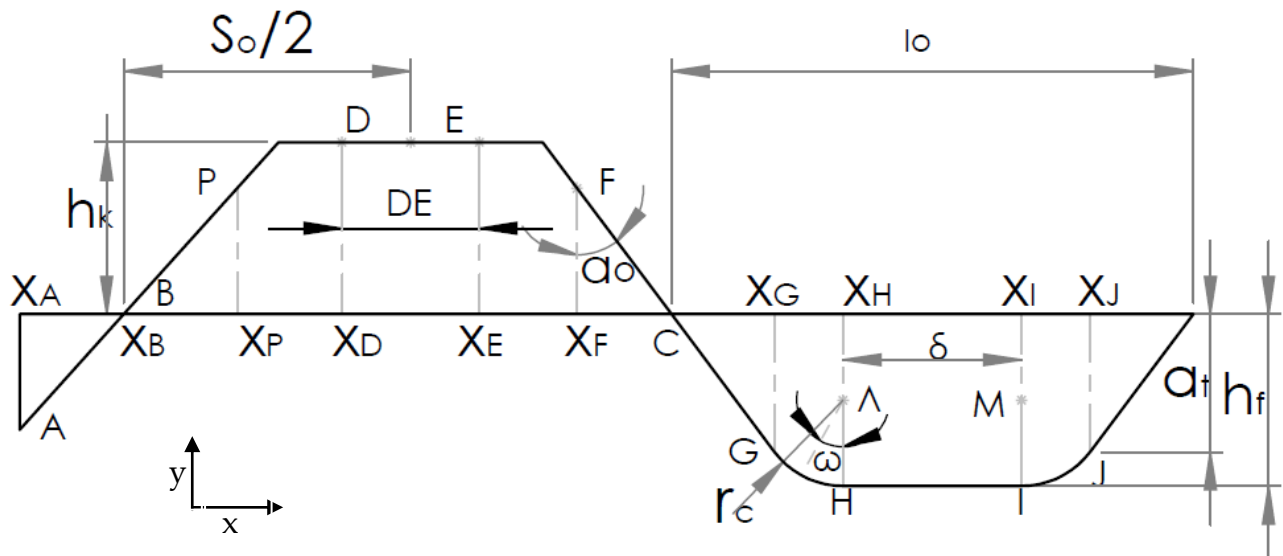
$$\psi_s = -\chi_{1k} \sin(-\varphi_0) + \psi_{1k} \cos(-\varphi_0) \quad (1.19)$$

$$r_s = \sqrt{\chi_s^2 + \psi_s^2} \quad (1.20)$$

Από την ανωτέρω επαναληπτική διαδικασία θα προκύψει $\gamma = \varphi_s$ με $\tan \gamma = -\frac{\chi_s}{\psi_s}$ και

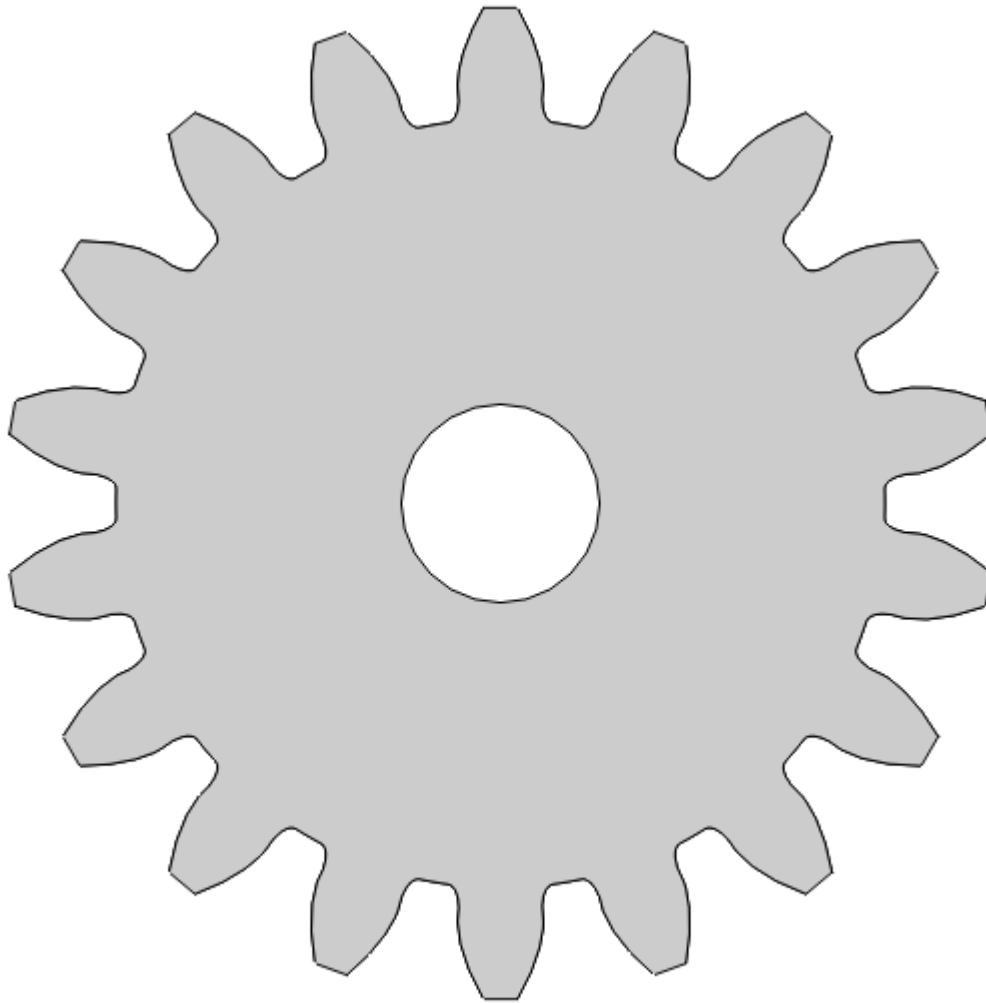
$$\varphi_s = \text{inv}a_s = \tan a_s - a_s \quad (1.21)$$

Όπου $r_g = r_s \cos a_s$



Εικόνα 2. Γεωμετρικά μεγέθη κανόνα

Επαληθεύεται η γεωμετρία από κώδικα στη Matlab και έτσι ένα στερεό μοντέλο με 18 οδόντες έχει την εξής μορφή στο σχεδιαστικό περιβάλλον του Solidworks (εικόνα 3).



Εικόνα 3. Μετωπικός οδοντωτός τροχός με ευθεία οδόντωση

1.3 . Βαθμός επικάλυψης, τροχιά επαφών και Ανώτατο Σημείο Μονής Επαφής

Έχει ορισθεί ότι μήκος επαφών είναι το μήκος τόξου του αρχικού κύκλου το οποίο διατρέχει η εργαζόμενη πλευρά του οδόντος ενός οδοντωτού τροχού από το πρώτο μέχρι και το τελευταίο σημείο επαφής της με την συνεργαζόμενη πλευρά του οδόντος του άλλου τροχού. Οπότε ορίζεται ως βαθμός επικάλυψης ή διάρκεια επαφής ε ο λόγος του μήκους επαφών e_0 προς το βήμα του αρχικού κύκλου t_0 . Τα αντίστοιχα μεγέθη παρουσιάζονται στην εικόνα 3.

$$\varepsilon = \frac{e_0}{t_0} = \frac{AB}{t_0 \cos a_0} = \frac{AB}{t_g} \quad (1.22)$$

Προκύπτει ότι ο βαθμός επικάλυψης εξαρτάται από τους αρχικούς κύκλους των τροχών και από το module για όδοντες δι'εξειλιγμένης 20 μοιρών.

Οπότε γεωμετρικά προκύπτει

$$AB = \sqrt{(r_{02} + m)^2 - r_{02}^2 \cos^2 a_0} + \sqrt{(r_{01} + m)^2 - r_{01}^2 \cos^2 a_0} - (r_{01} + r_{02}) \sin a_0 \quad (1.23)$$

Ένα από τα βασικά κοινά λειτουργικά χαρακτηριστικά για τον σχεδιασμό των οδοντωτών τροχών είναι ο βαθμός επικάλυψης. Τα ζεύγη που επιλέγονται είναι με αριθμούς οδόντων πινιόν και συνεργαζόμενου αντίστοιχα 18-50, 25-33 και 24-35. Τελικά οι οδοντωτοί τροχοί που εξετάζονται έχουν 18, 25, 35 και 50 δόντια με βαθμό επικάλυψης $\varepsilon \approx 1,64$.

Η μεγαλύτερη καμπτική τάση εμφανίζεται όταν η φόρτιση ασκείται σε ένα ειδικό σημείο και όχι στην κεφαλή του δοντιού. Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο μέγιστης φόρτισης κατά την συνεργασία οδόντων ή υψηλότερο σημείο μονής επαφής. Η επαφή, αρχικά, ξεκινά στο σημείο A, εικόνα 3, όπου ο πόδας του πινιόν έρχεται σε επαφή με την κεφαλή του συνεργαζόμενου τροχού και τελειώνει στο σημείο B όπου είναι και το τελευταίο σημείο συνεργασίας τους. Το σημείο B' είναι το HPSTC. Στα διαστήματα AA' και BB', δύο ζεύγη οδόντων μεταφέρουν την φόρτιση, ενώ στο A'B' μόνον ένα ζεύγος οδόντων την

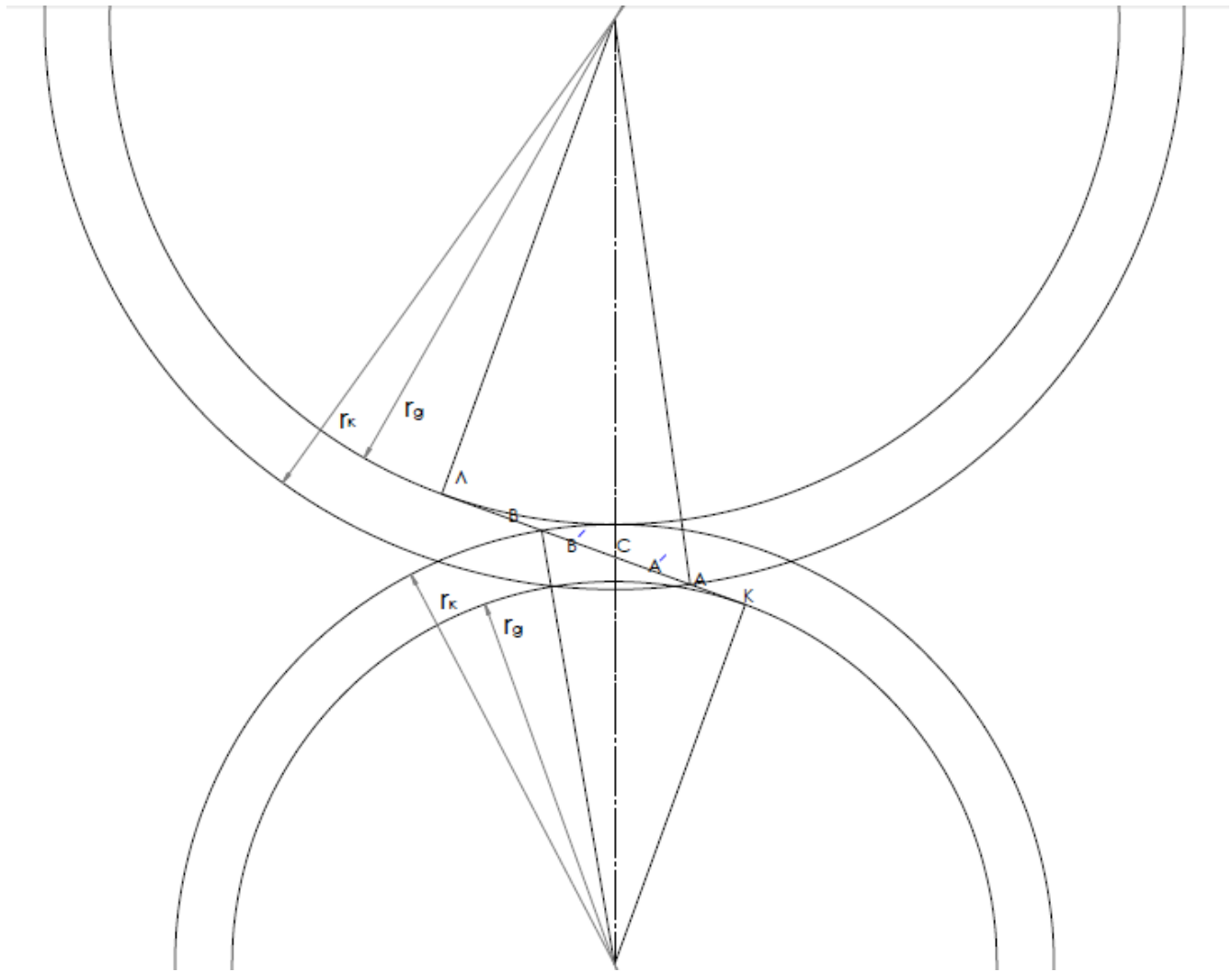
μεταφέρει. Τα μήκη AB' και $A'B$ είναι ίσα με το βήμα της οδοντώσεως στον βασικό κύκλο t_g . Έτσι η θέση του HPSTC προσδιορίζεται ως εξής.

$$AC = \sqrt{(r_{02} + m)^2 - r_{02}^2 \cos^2 a_0} - r_{02} \sin a_0 \quad (1.24)$$

$$CB = AB' - AC = t_g AC = \pi m \cos a_0 - AC \quad (1.25)$$

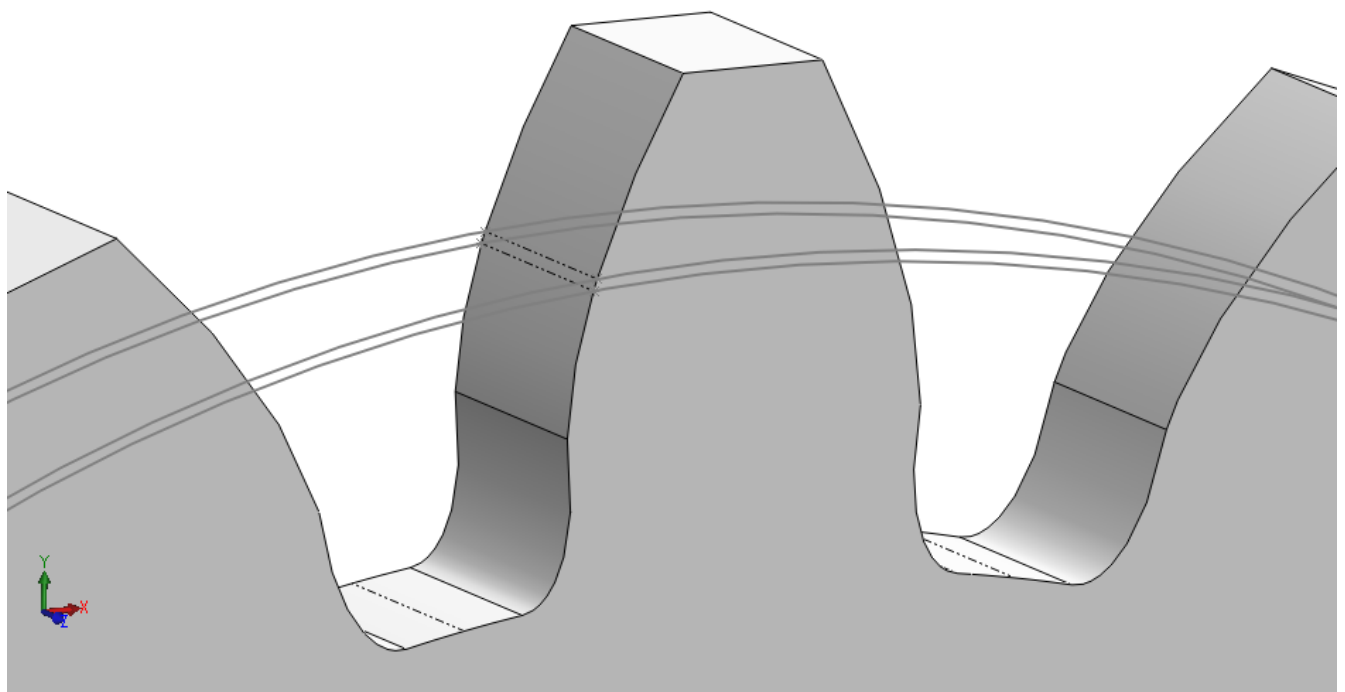
Οπότε μπορεί να προσδιοριστεί η ακτίνα r_B όπου και βρίσκεται το HPSTC.

$$r_B = \sqrt{r_{01}^2 + CB^2 - 2r_{01}CB \cos(a_0 + 90^\circ)}$$



Εικόνα 4. Τροχιά επαφών

Το φορτίο, λοιπόν, ασκείται σε περιοχή 2,5% του module [2] εκατέρωθεν του HPSTC, ως συνήθης περιοχή άσκησης αυτού κατά την συνεργασία δύο μετωπικών τροχών με ευθεία οδόντωση, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.



Εικόνα 5. Περιοχή άσκησης του φορτίου στο HPSTC

2.Μοντελοποίηση

2.1 . Τοποθέτηση οπλισμού και ιδιότητες υλικών

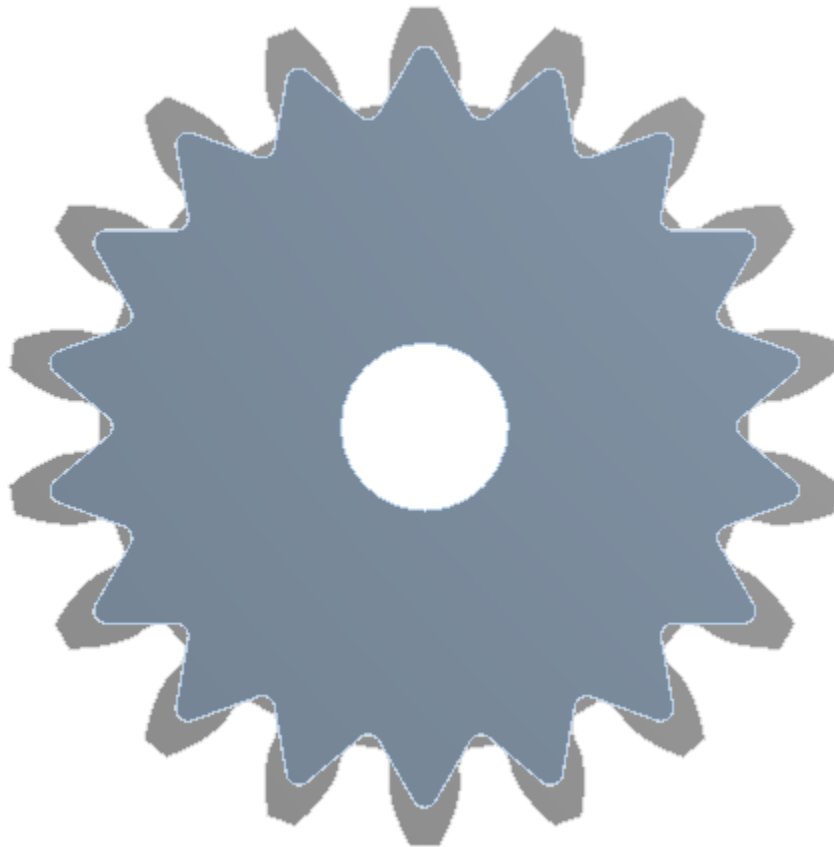
Όσον αφορά τον υπολογισμό της θέσης εμφάνισης της επικίνδυνης διατομής ποδός, η πρώτη συστηματική προσπάθεια έγινε από τον W.Lewis ο οποίος θεώρησε ότι η εγγεγραμμένη ισοσκελής παραβολή που εφάπτεται εσωτερικά της κατατομής στον πόδα του οδόντος ορίζει την επικίνδυνη διατομή ποδός σε αυτό ακριβώς το σημείο επαφής με την κατατομή προς την πλευρά του εφελκυσμού [3]. Αργότερα παρατηρήθηκε ότι η επικίνδυνη διατομή πλέον τοποθετείται χαμηλότερα απ'ότι προβλέπει η μέθοδος της εγγεγραμμένης παραβολής, παρατήρηση η οποία συμφωνεί και με τα αποτελέσματα πειραμάτων φωτοελαστικότητας [4]. Τέλος, μια άλλη μέθοδος είναι αυτή της εφάπτομενης των 30° που υποστηρίζει ότι η επικίνδυνη διατομή δεν εξαρτάται από την θέση του φορτίου, αλλά εμφανίζεται σε σταθερή θέση στον πόδα του οδόντος. Πλέον, με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί κάποιος να υπολογίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια την περιοχή εμφάνισης της επικίνδυνης διατομής.

Για να αυξηθεί, λοιπόν, η αντοχή σε θραύση μελετάται μία μέθοδος που θα προσδώσει στους πλαστικούς τροχούς μεγαλύτερη αντοχή, δίχως όμως η λύση αυτή να είναι ασύμφορη οικονομικά αλλά κυρίως να είναι υλοποιήσιμη κατασκευαστικά. Η μέθοδος αυτή είναι η ενίσχυση του πολυμερούς υλικού με ίνες υψηλότερης αντοχής και μέτρου ελαστικότητας και συγκεκριμένα με την χρήση ανθρακονημάτων (carbon fibers). Η τεχνική αυτή έχει ως βάση τη θεωρία των συνθέτων υλικών, σύμφωνα με την οποία η σύνθεση ενός αρχικού υλικού με ένα δεύτερο διαφορετικής σύστασης από τη μία και διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων από την άλλη, ισχυρότερο βέβαια κατά βάσει, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός συνθέτου υλικού, το οποίο θα είναι ανθεκτικότερο

από το αρχικό μοντέλο, το πλαστικό δηλαδή. Όπως είναι γνωστό, οι ίνες άνθρακα έχουν πολύ υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) κατά την αξονική διεύθυνση έναντι του πλαστικού. Επομένως, η σύνθεση-ενίσχυση του πλαστικού με ίνες άνθρακα θα αυξήσει σημαντικά το μέτρο ελαστικότητας του οδοντωτού τροχού στην περιοχή τοποθέτησης αυτών αλλά και την εν γένει αντοχή του, καθώς ο ινώδης οπλισμός θα είναι αυτός ο οποίος θα παραλαμβάνει σχεδόν εξ'ολοκλήρου τα αναπτυσσόμενα φορτία.

Με βάση προηγούμενη διπλωματική εργασία [5], η ενίσχυση από CF's τοποθετείται εφαπτομενικά στην επικίνδυνη διατομή ποδός και πράγματι η αντοχή τους βελτιώθηκε σημαντικά.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η περαιτέρω βελτίωση της στατικής αντοχής των πλαστικών οδοντωτών τροχών, μέσω βελτιστοποίησης αυτής της περιοχικής ενίσχυσης. Στις εικόνες 6 και 7 παρουσιάζεται μία διάταξη τοποθέτησης του οπλισμού σε έναν οδοντωτό τροχό με 18 όδοντες.

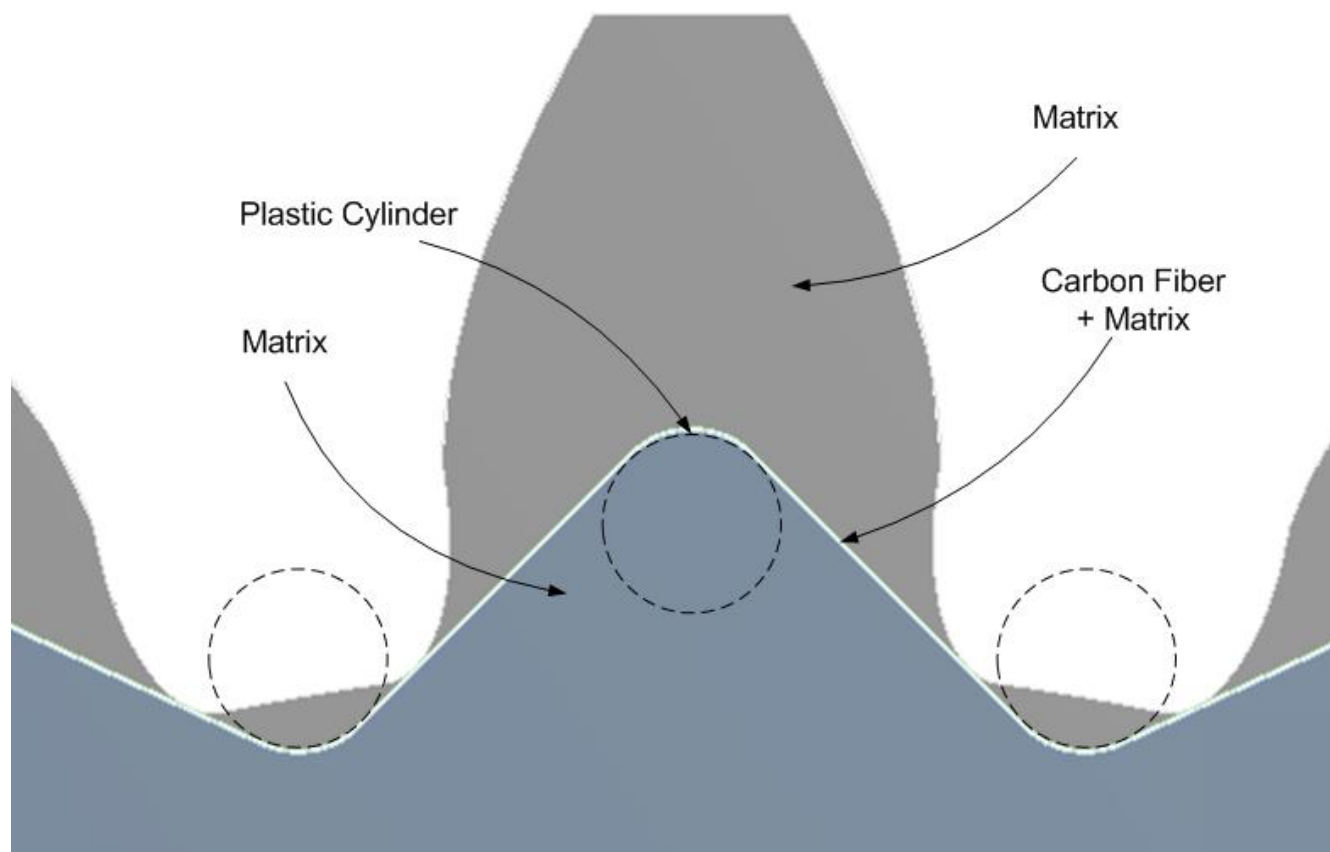


Εικόνα 6. Αναπαράσταση της διάταξης του οπλισμού στον οδοντωτό τροχό

Στην εικόνα 6 παρουσιάζεται ένας μετωπικός οδοντωτός τροχός με ευθεία οδόντωση ο οποίος έχει ενισχυθεί σε όλους τους οδόντες από οπλισμό πάχους $t = 0,138mm$ [5]. Ο κύκλος που διακρίνεται εσωτερικά του οπλισμού είναι για διαχώριση των επιφανειών και σχετίζεται με την επιλογή των μεγεθών των πεπερασμένων στοιχείων. Πιο λεπτομερής περιγραφή για τον οπλισμό και τη μήτρα γίνεται στο επόμενο εδάφιο.

2.1.1 . Μήτρα

Λεπτομερέστερα στην εικόνα 7 παρατηρείται ότι το μοντέλο αποτελείται από τρία μέρη, δύο αμιγώς πλαστικά και ένα τρίτο που αποτελεί την ενίσχυση από carbon fibers



Εικόνα 7. Αναπαράσταση κάθε υλικού του συνθέτου ξεχωριστά

Η μήτρα (Matrix) αποτελείται από πλαστικό. Το πλαστικό είναι οποιοδήποτε οργανικό υλικό, το οποίο έχει την δυνατότητα να ρέει σε μια επιθυμητή μορφή, κατά την εφαρμογή θερμότητας και πίεσης και κατόπιν να διατηρεί την μορφή αυτή. Το πλαστικό αποτελείται από ένα συνδυασμό πλαστικοποιητών, υλικών πληρώσεως, χρωστικών ουσιών και άλλων πρόσθετων ουσιών. Ο συνδυασμός των ουσιών αυτών προσδίδει στο πλαστικό τα κύρια χαρακτηριστικά του και συνήθως το όνομα του. Οι ουσίες που συνδυάζονται μπορεί να είναι φυσικά υλικά, όπως παράγωγα κυτταρίνης, καζεΐνης άλλα και συνθετικές ρητίνες.

Οι δύο βασικοί τύποι πλαστικών είναι τα θερμοπλαστικά και τα θερμοσκληρυνόμενα [6-7].

Τα θερμοπλαστικά (thermoplastics) αποτελούνται από κυρίως γραμμικά μακρομόρια που με την θέρμανση μαλακώνουν και ρέουν, λόγω χαλάρωσης των μοριακών δεσμών και αφού μορφοποιηθούν, ψύχονται και στερεοποιούνται. Η διεργασία αυτή είναι σχεδόν πλήρως αντιστρεπτή. Τα θερμοπλαστικά είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και στους διαλύτες. Στα θερμοπλαστικά ευρείας και βιομηχανικής χρήσεως περιλαμβάνονται το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυστυρένιο (PS), το πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), τα πολυαμίδια (PA), καθώς επίσης και η οικογένεια των φθοροπολυμερών, παραδείγματος χάριν το πολυτετραφθοροαιθυλενιο (PTFE) και οι πολυκετόνες π.χ η πολυαιθερο-αιθερο κετόνη(PEEK).

Από την άλλη, τα θερμοσκληρυνόμενα (thermosets ή thermosetting plastics). Πρόκειται για διδιάστατα ή τρισδιάστατα δίκτυα αποτελούμενα από μικρά, σχετικά μακρομόρια που προέρχονται από την επανάληψη του μονομερούς μερικές εκατοντάδες φορές. Κατά την ανάμιξη των συστατικών του πολυμερούς (ρητίνη με το αντίστοιχο σκληρυντικό), με ή χωρίς θέρμανση, το πολυμερές σκληραίνει και μορφοποιείται κατά αναντίστροφο τρόπο. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή δεν επιδέχονται περαιτέρω κατεργασία, διότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας διασπώνται οι δευτερεύοντες δεσμοί, αν και το πολυμερές δεν τήκεται λόγω της ιδιαίτερης δικτυωτής κατανομής των μακρομορίων του και συνήθως είναι άμορφα. Τα κυριότερα θερμοσκληρυνόμενα είναι τα φαινολικά πολυμερή (παινοπλάστες ή βακελίτες) οι εποξειδικές ρητίνες, οι αμινοπλάστες (ρητίνες ουρίας ή μελαμίνης με φορμαλδεύδη, διαλυτικά), οι πολυεστέρες, κ.λ.π.(2 μανωλακος εκπαιδευτικο υλικο)

Το πλαστικό υλικό της μήτρας που χρησιμοποιήθηκε για όλα τα μοντέλα είναι ισότροπο με μέτρο ελαστικότητας $E_{xx} = 3,6GPa$ και λόγο Poisson $\nu = 0,4$.

2.1.2 . Οπλισμός

Ο οπλισμός είναι ένα ανισότροπο υλικό που αποτελείται από πλαστική μήτρα ενισχυμένη με ίνες άνθρακα σε ποσοστό 70%. Ο υπολογισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του ανισότροπου υλικού έγινε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μέσω του εμπορικού λογισμικού ANSYS Mechanical APDL, ενώ τα αποτελέσματα ελέχθησαν και επαληθεύτηκαν με αυτά, τα οποία προέκυψαν μέσω της αναλυτικής μεθόδου (ref βασιλειου)

Αρχικά έγινε υπολογισμός του μητρώου δυσκαμψίας (stiffness matrix) του ισότροπου υλικού, δηλαδή του αμιγώς πλαστικού υλικού με μέτρο ελαστικότητας $E_{xx} = 3,6GPa$ και λόγο Poisson $\nu = 0,4$. Τα αποτελέσματα ελέχθησαν και ταυτίστηκαν με αυτά του θεωρητικού μοντέλου. Στο υλικό αυτό έγινε ανάλυση παραμορφώσεων (strain analysis) και εξετάστηκε η συμπεριφορά του σε εφελκυστική και διατμητική παραμόρφωση. Ακολούθως ευρέθηκε το μητρώο δυσκαμψίας του ανισότροπου υλικού, δηλαδή της πλαστικής μήτρας ενισχυμένης με ίνες άνθρακα σε ποσοστό 70%. Οι ίνες άνθρακα μοντελοποιήθηκαν με μέτρο ελαστικότητας $E_x = 230GPa$ και λόγο Poisson $\nu = 0,25$. Για την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων έγινε επαλήθευση του μητρώου αυτού τόσο με το αντίστοιχο, το οποίο προέκυψε από παρόμοιου ποσοστού μοντέλο, μικρότερων όμως διαστάσεων, όσο και με τα αποτελέσματα που ελήφθησαν μέσω του θεωρητικού κανόνα του μοχλού.

Από τα παραπάνω υπολογίζεται το μητρώο δυσκαμψίας του ανισότροπου υλικού το οποίο θα προσδώσει τις μηχανικές ιδιότητες του οπλισμού.

$$D = \begin{bmatrix} 41.338 & 10.352 & 14.727 & 0 & 0 & 0 \\ 10.352 & 41.338 & 14.727 & 0 & 0 & 0 \\ 14.707 & 14.708 & 171.440 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17.264 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 17.264 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.904 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Στην εικόνα 8 υπάρχει μία απεικόνιση των εμποτισμένων με πλαστικό ινών, με ποσοστό ινών 70%. Η παρακάτω εικόνα έχει ληφθεί με κατάλληλο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. παρατηρείται ότι καθώς οι ίνες τείνουν να στοιβάζονται η μία μέσα στην άλλη, σχηματίζουν τα κέντρα αυτών, καθ'αυτόν τον τρόπο, είτε ισόπλευρα τρίγωνα ανά τρεις ίνες είτε κανονικά εξάγωνα γωνίας 60° και ακτίνα ίσης με τη μεταξύ των κέντρων απόσταση, ανά έξι ίνες.



Εικόνα 8. Απεικόνιση ινών με χρήση μικροσκοπίου

Κατά τη μοντελοποίηση του συνθέτου υλικού και τη προσθήκη του στους πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς, αρχικά μετρήθηκε το πάχος των ινών οι οποίες απεικονίζονται στην εικόνα 9 με χρήση μικρομέτρου. Ακολούθως για ποσοστό ινών σε πλαστική μήτρα 70% υπολογίσθηκαν οι τελικές διαστάσεις του μοντέλου, για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος και για ακριβέστερους υπολογισμούς πραγματοποιήθηκαν 50 μετρήσεις με χρήση του μικρομέτρου μετρητικής ικανότητας 0-10 (mm) και διακριτικής ικανότητας

0.0001 (mm) και στην συνέχεια υπολογίσθηκε η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση αυτών. Έτσι, βρέθηκε ότι το πάχος του σπλισμού ήταν 0.138 (mm).

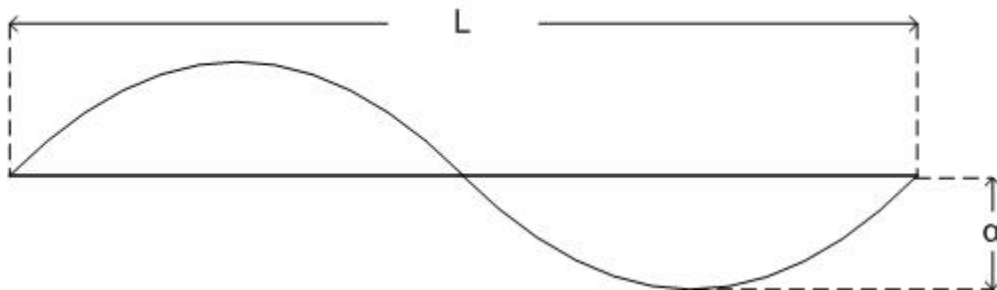


Εικόνα 9. Τύμπανο ινών άνθρακα

2.2 . Επίδραση της προέντασης των ινών

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας ήταν απαραίτητο να διερευνηθεί η επίδραση της προέντασης στο ανθρακόνημα και έτσι ένα σχεδιάζεται ένας αντιπροσωπευτικός όγκος στοιχείου RVE (Representative volume element). που συνίσταται από μία μονή ίνα CF η οποία έχει μία δεδομένη καμπυλότητα τοποθετημένη σε θερμοπλαστική ορθογώνια παραλληλεπίπεδη μήτρα προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση της καμπυλότητας αυτής στην μηχανική συμπεριφορά του υλικού. Έτσι για να ποσοτικοποιηθεί αυτή η επίδραση και η μη γραμμική ελαστική συμπεριφορά έγινε ανάλυση παραμορφώσεων με πεπερασμένα στοιχεία.

Αρχικά έχει παρατηρηθεί ότι οι τιμές που λαμβάνει η καμπυλότητα, η οποία είναι ένα αδιάστατο μέγεθος (2.2), είναι μεταξύ 0.023 και 0.077 [8-10]. Από την εικόνα 10 παρατηρούμε ότι το a είναι το μήκος της καμπύλης ενώ το L είναι το συνολικό μήκος και έτσι ορίζεται το αδιάστατο μέγεθος της κυμάτωσης, όπως φαίνεται στην (2.2)

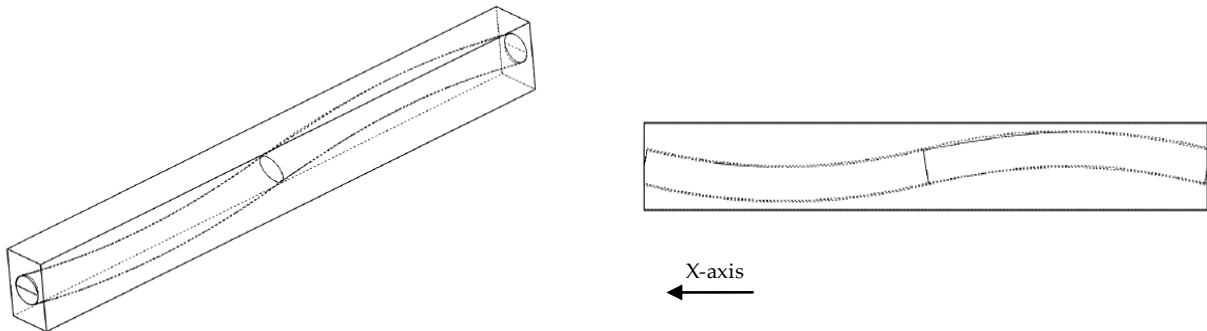


Εικόνα 10. Απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μιας καμπύλης ίνας

$$w = \frac{2a}{L} \quad (2.2)$$

Σε αυτή την μελέτη, η αρχική τιμή για την καμπυλότητα μίας μονής ίνας επιλέχθηκε ως μέση τιμή του ανωτέρω εύρους το $w=0.05$ και το αρχικό μήκος της ίνας $L=120\text{mm}$. επομένως η αρχική καμπυλότητα της ίνας παίρνει την τιμή $a=3.00\text{mm}$. Στην συνέχεια ο προσδιορισμός των διαστάσεων της απαραμόρφωτης ορθογώνιας μήτρας δεν βασίστηκε σε κάποια ογκομετρική αναλογία του σύνθετου υλικού, αλλά αντίθετα ώστε να

επιτευχθεί η πλήρης ενσωμάτωσης της ίνας στην θερμοπλαστική μήτρα. Ως εκ τούτου, αφού η αρχική καμπυλότητα της ίνας είναι 3.00mm, και για μία μονή κυλινδρική ίνα διαμέτρου 6.00mm, επιλέχθηκε το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο της πλαστικής μήτρας να έχει διαστάσεις 15x9mm².



Εικόνα 11. Σχηματική απεικόνιση του αρχικού απαράμορφωτου συνθέτου μοντέλου σε ισομετρική και πρόοψη

Από τις δύο όψεις της εικόνας 11 μπορεί να παρατηρηθεί ότι η διατομή του ενισχυμένου πλαστικού στην εξωτερική άκρη, λόγω της καμπυλότητας του ανθρακονήματος, δεν είχε το σχήμα που αναμενόταν, δηλαδή ορθογώνιο με έναν κύκλο στο εσωτερικό του, ο οποίος κύκλος αντιπροσωπεύει την ίνα. Ως εκ τούτου, προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, το προς ανάλυση μοντέλο μειώθηκε στο κατάλληλο μήκος, χωρίς να επηρεάζονται οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του μοντέλου. Ωστόσο, το συνολικό αρχικό μήκος της μήτρας διαφέρει από το αντίστοιχο μήκος ίνας λόγω της αρχικής καμπυλότητας. Είναι κοινώς αποδεκτό ότι ο όγκος της ίνας ($V_{f,RVE}$) [11] του RVE ικανοποιεί την εξίσωση:

$$V_{f,RVE} = \left(\frac{a_f}{1-a_f} \right) V_{M,RVE} \quad (2.3)$$

Όπου $V_{M,RVE}$ είναι ο όγκος της ορθογώνιας παραλληλεπίπεδης θερμοπλαστικής μήτρας, μη λαμβάνοντας υπ' όψιν ασφαλώς τον όγκο που καταλαμβάνει η καμπύλη ίνα και το a_f

μας δείχνει το ποσοστό της ίνας στην μήτρα. Ο όγκος κάθε ξεχωριστού στοιχείου του σύνθετου υλικού δίνεται από τις κάτωθι εξισώσεις:

$$V_{M,RVE} = bcL_{M,RVE} \quad (2.4)$$

Και

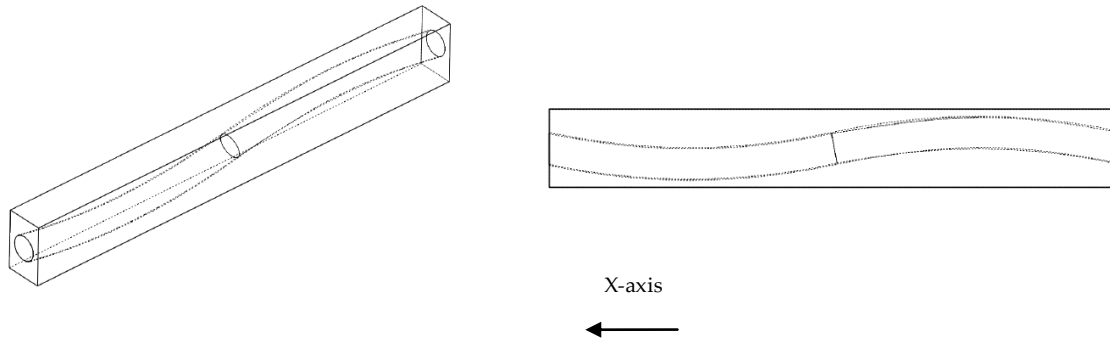
$$V_{f,RVE} = A_{f,RVE}L_{f,RVE} = \pi \frac{d_{f,RVE}^2}{4} L_{f,RVE} \quad (2.5)$$

Όπου $A_{f,RVE}$ η επιφάνεια της κυκλικής διατομής της ίνας, που ισούται με 28.27 mm^2 για μία 6mm διαμέτρου καμπύλη ίνα ($d_{f,RVE}$).

Στην συνέχεια, συνδυάζοντας τις τρεις ανωτέρω εξισώσεις και υποθέτοντας ότι το κατάλληλο αρχικό μήκος της ορθογωνικής μήτρας είναι 111mm , το συνολικό μήκος της καμπύλης ίνας είναι ίσο με

$$L_{f,RVE} = 121.2\text{mm} \quad (2.6)$$

Κατά συνέπεια, το αρχικό μοντέλο παρουσιάζεται κάτωθι στην εικόνα 12 σε ισομετρική και πρόοψη.



Εικόνα 12. Τελική σχηματική απεικόνιση του αρχικού απαράμορφωτου σύνθετου μοντέλου σε ισομετρική και πρόοψη

Το πιο σημαντικό αποτέλεσμα σχετικά με την καμπύλη ίνα είναι η μη-γραμμική συμπεριφορά της που χαρακτηρίζει το κατασκευασμένο μοντέλο σε αξονικά και όχι μόνο εφελκυστικά φορτία. Ως εκ τούτου, προκειμένου αυτή η συμπεριφορά να ποσοτικοποιηθεί και να μελετηθεί και ταυτοχρόνως για να αποφευχθεί μία περίπλοκη ανάλυση μεγάλων μετατοπίσεων, προτείνεται μία ισοδύναμη μικρών μετατοπίσεων ανάλυση παραμόρφωσης, όπου το ανισότροπο μοντέλο που εξετάζεται θα επιμηκυνθεί μέχρι η καμπύλη ίνα τελικά να γίνει ευθύγραμμη. Επίσης, δείχνει τη μέγιστη

επιτρεπόμενη τάση στην πλαστική μήτρα. Η συνολική παραμόρφωση υπολογίζεται ως εξής:

$$\sum_{i=1}^n U_x \cdot i = 1.20mm \quad (2.7)$$

Και προκειμένου μία ανάλυση μικρών μετατοπίσεων να πραγματοποιηθεί, η συνολική παραμόρφωση χωρίζεται σε 8 ίσα τμήματα στοιχειώδους αξονικής παραμόρφωσης που είναι ίσα με:

$$U_x \cdot \frac{1}{8} = 0.15mm \quad (2.8)$$

Είναι ζωτικής σημασίας να αναφερθεί ότι η μηχανική συμπεριφορά δεν αναμένεται να είναι γραμμική και λόγω της μη-γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς, η στιβαρότητα του μοντέλου θα αλλάζει και πιο συγκεκριμένα η σταθερά του ελατηρίου K . Η σταθερά του ελατηρίου για κάθε για κάθε βήμα της ανάλυσης δίνεται από αυτήν την εξίσωση:

$$K = \lim_{U_x \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta U_x} \quad (2.9)$$

Έτσι το συνολικό αξονικό φορτίο ισούται με το άθροισμα των φορτίων κάθε ξεχωριστού βήματος παραμόρφωσης και ικανοποιεί την εξής εξίσωση:

$$F = \sum_{i=1}^n K \cdot U_x \quad (2.10)$$

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του αρχικού ανισότροπου μοντέλου στο Solidworks D.S. 3D Design Software Program [12], έγινε ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία όπου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Ansys Workbench v 14.0 [13].

Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών που συνθέτουν το ανισότροπο περιγράφονται στο κάτωθι πίνακα. Το σύνθετο μοντέλο επιλέχθηκε να αποτελείται από PEEK πλαστική μήτρα και μονή καμπύλη CF ενίσχυση.

Πίνακας 1 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Υλικά	Μέτρο Ελαστικότητας E _x (GPa)	Poisson ν	Μέγιστη Αντοχή σ _{UTS} (MPa)
PEEK	3.6	0.40	100
Carbon Fibre	350	0.12	6000

Για την δημιουργία του πλέγματος έπρεπε να επιλεχθούν διαφορετικοί τύποι πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, για τα δύο μέρη του συνθέτου χρησιμοποιήθηκε το πεπερασμένο με κωδικό SOLID186 και για τις διεπιφάνειες τα CONTA174 και TARGE170.

Ο αριθμός των στοιχείων, καθώς και η κατανομή και το μέγεθος τους, υπολογίσθηκαν από προεπιλογή του προγράμματος σε κάθε βήμα της ανάλυσης με μικρή διαφοροποίηση κάθε φορά λόγω της συνολικής ογκομετρικής παραμόρφωσης του μοντέλου.

Συνεχίζοντας με την ανάλυση παραμόρφωσης, θεωρήθηκε απαραίτητο να περιγραφούν οι οριακές συνθήκες που ασκήθηκαν στο μοντέλο. Το ανισότροπο μοντέλο, όπως περιγράφηκε παραπάνω, επιμηκύνθηκε στην διεύθυνση που φαίνεται στην εικόνα 12. Ταυτόχρονα, στην αντίθετη περιοχή, το μοντέλο συγκρατήθηκε στον x-άξονα, ενώ στις διεπιφάνειες, ο συντελεστής τριβής θεωρήθηκε ίσος με το 1.0. Επιπλέον, η περιστροφή γύρω από τον x-άξονα αφαιρέθηκε.

Όπως προαναφέρθηκε, η συνολική παραμόρφωση χωρίστηκε σε 8 ίσα βήματα. Ως εκ τούτου, η νέα καμπυλότητα του μοντέλου υπολογίσθηκε μέσω της συνολικής παραμόρφωσης στο x-άξονα, που δίνεται από την εξίσωση (2.11) και της αντίστοιχης παραμόρφωσης στον y-άξονα, όπως φαίνεται στην εικόνα 13.

$$\lambda(i) = \lambda(i-1) + U_x \quad (2.11)$$

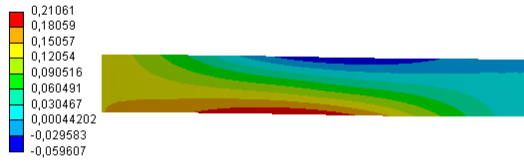
B: Strain analysis (step 1)
Directional Deformation
Type: Directional Deformation(Y Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
Custom
Max: 0,55764
Min: -0,55772



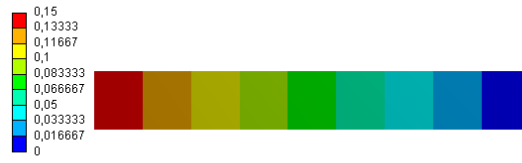
Εικόνα 13. Αποτελέσματα παραμόρφωσης στον Y-άξονα
μίας καμπύλης ίνας CF στο πρώτο βήμα της ανάλυσης

Λόγω της κυμάτωσης των ινών, η εγκάρσια παραμόρφωση της πλαστικής μήτρας ήταν παρόμοια με την παραμόρφωση της ίνας. Αυτό το φαινόμενο, το οποίο γίνεται εμφανές στην εικόνα 14α,β, είναι συνέπεια του μεγαλύτερου επιπέδου στιβαρότητας της ίνας. Ενώ η καμπυλότητα της ίνας μειωνόταν, η συνολική παραμόρφωση στον Y-άξονα της πλαστικής μήτρας περιοριζόταν και η διαμήκης παραμόρφωση της πλαστικής μήτρας γινόταν πιο ομοιόμορφη. Λόγω αυτής της 'κυματιστής' παραμόρφωσης της πλαστικής μήτρας, οι αναπτυσσόμενες ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises, όπου παρουσιάζονται στην εικόνα 15 ήταν εξίσου μη-ομοιόμορφες. Όπως παρατηρήθηκε, αυτές οι επιφανειακές τάσεις γίνονταν πιο ομοιόμορφες καθώς η καμπυλότητα των ινών μειωνόταν.

B: Strain analysis (step 1)
 Directional Deformation 2
 Type: Directional Deformation(X Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1
 Custom
 Max: 0,21061
 Min: -0,059607

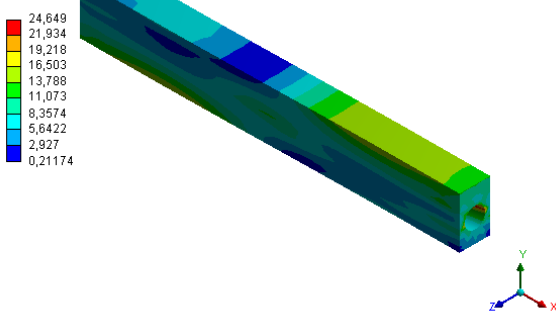


B: Strain analysis (final step-strait)
 Directional Deformation 2
 Type: Directional Deformation(X Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1
 Custom
 Max: 0,15
 Min: 0

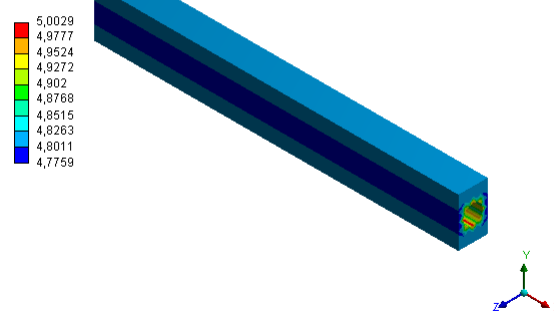


Εικόνα 14.α) Αποτελέσματα παραμόρφωσης στον x-άξονα του σύνθετου υλικού στο πρώτο βήμα της ανάλυσης (αριστερά) και β) στο οδόδο βήμα για ευθύγραμμη ίνα (δεξιά)

B: Strain analysis (step 1)
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 Custom
 Max: 24,649
 Min: 0,21174



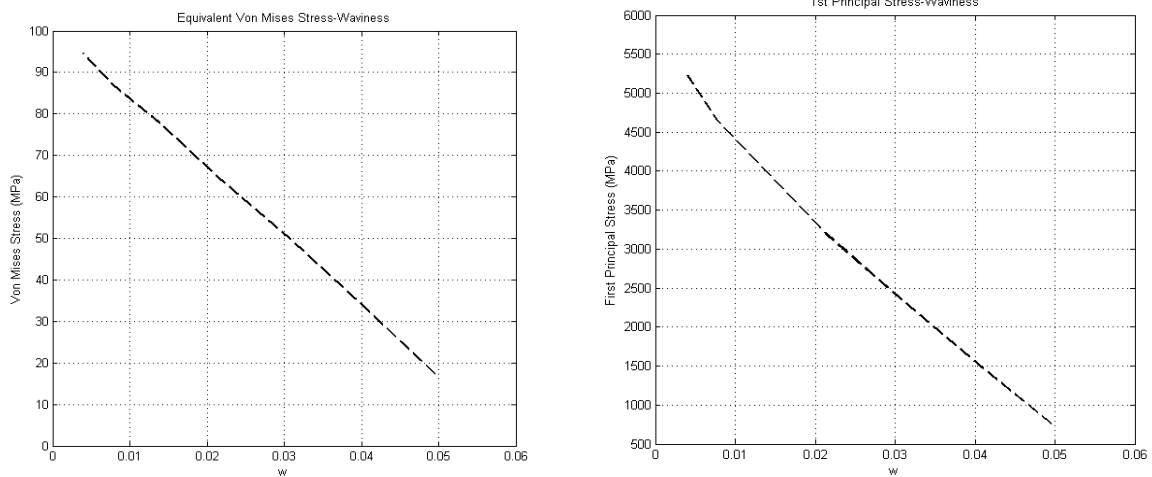
B: Strain analysis (final step-straight)
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 Custom
 Max: 5,0029
 Min: 4,7759



Εικόνα 15. α) Αποτελέσματα ισοδύναμης κατά Von Mises τάσης στη μήτρα στο πρώτο βήμα της ανάλυσης (αριστερά) και β) στο οδόδο βήμα (δεξιά)

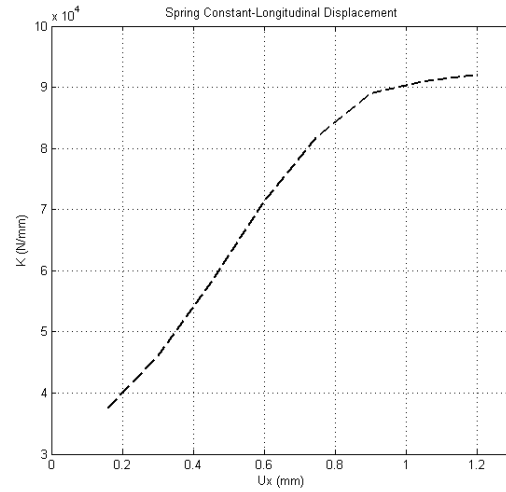
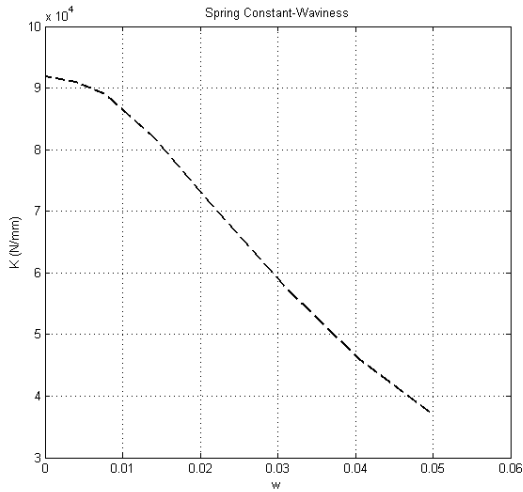
Ως αποτέλεσμα αυτών, ο βαθμός ανάπτυξης ισοδύναμων τάσεων στην θερμοπλαστική ορθογώνια παραλληλεπίπεδη μήτρα αυξανόταν στα δύο πρώτα βήματα της ανάλυσης και στην συνέχεια μειωνόταν. Η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων που σχετίζονται με την καμπυλότητα της ίνας παρουσιάζονται στην εικόνα 16α). Επιπλέον, ο βαθμός ανάπτυξης της πρώτης κύριας τάσης στην καμπύλη ίνα αυξανόταν στα τρία πρώτα

βήματα της ανάλυσης και στην συνέχεια μειωνόταν. Η σχέση μεταξύ της καμπυλότητας της ίνας και της αναπτυσσόμενης πρώτης κύριας τάσης παρουσιάζεται στην εικόνα 16β)



Εικόνα 16. α) Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises της θερμοπλαστικής μήτρας σε σχέση με την καμπυλότητα της ίνας (αριστερά) και β) Αναπτυσσόμενη πρώτη κύρια τάση στην ίνα από CF σε σχέση με την καμπυλότητα της ίνας (δεξιά)

Ως συμπέρασμα, η δύναμη αντίδρασης που προέκυψε για ίσες μετατοπίσεις αυξανόταν. Κατά συνέπεια, συνολικά το ανισότροπο μοντέλο γινόταν πιο στιβαρό, όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την κατανομή της σταθεράς του ελατηρίου K σε σχέση με την αντίστοιχη καμπυλότητα της ίνας και την διαμήκη παραμόρφωση, όπως φαίνεται στην εικόνα 17α),β)

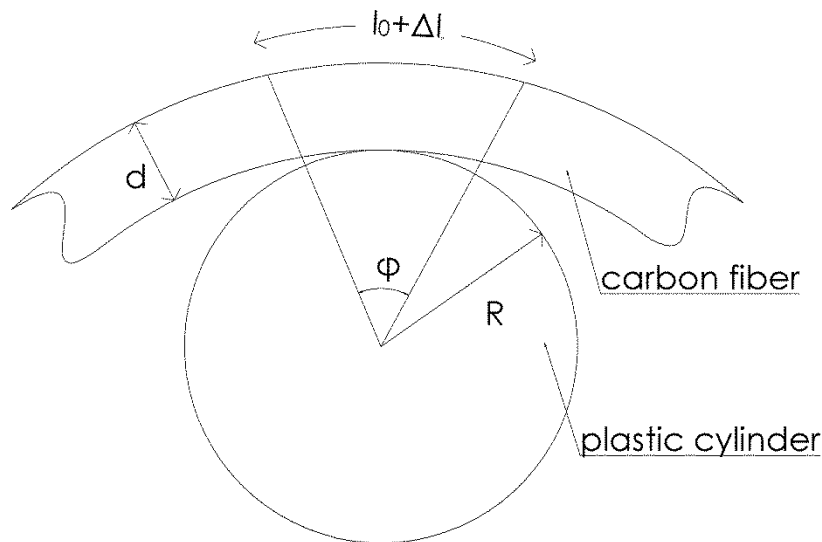


Εικόνα 17. Διάγραμμα της σταθεράς του ελατηρίου σε σχέση με α) την καμπυλότητα της ίνας (αριστερά) και β) την διαμήκη παραμόρφωση της ίνας στον x-άξονα (δεξιά)

Συμπερασματικά, από αυτήν την ανάλυση αποδεικνύεται ότι, η χρήση συνεχόμενων προεντεταμένων ινών σε σχέση με τις μη-προενταμένες προσδίδει στο ανισότροπο μοντέλο καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, όπως δυνατότητα παραλαβής μεγαλύτερων φορτίων και βελτιωμένη συμπεριφορά ως προς την στιβαρότητα. Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την επίδοση πολλών στοιχείων μηχανών, όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση των οδοντωτών τροχών. Έτσι, για τους οδοντωτούς τροχούς δεν θα δημιουργηθεί μόνο η δυνατότητα παραλαβής μεγαλύτερων φορτίων, αλλά επίσης και η παραμορφωσιμότητα, με μείωση και απορρόφηση των αναπτυσσόμενων τάσεων.

2.3 Κρίσιμη ακτίνα καμπυλότητας των ινών

Σε αυτό το σημείο τίθεται το πρόβλημα της εύρεσης της κρίσιμης ακτίνας των ινών. Όπως φαίνεται στην εικόνα 7, η τοποθέτηση των ινών γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται περιοχές όπου αυτές δεν είναι σε ευθεία διάταξη αλλά σχηματίζουν καμπύλα τμήματα. Για αυτά τα τμήματα, λοιπόν, πρέπει να υπολογιστεί η κρίσιμη ακτίνα καμπυλότητας. Αυτή καθορίζει και τις διαστάσεις του πείρου, στον οποίο θα περιελιχθούν οι ίνες ανθρακονήματος κατά την κατασκευή, η διαδικασία της οποίας περιγράφεται εκτενέστερα σε επόμενο εδάφιο.



Εικόνα 18. Διάταξη ίνας-πείρου

Επομένως, όπως φαίνεται και στην εικόνα 18, για ανθρακόνημα με μέτρο ελαστικότητας $E=310\text{GPa}$ (επιλέγεται για ασφάλεια ανθρακόνημα με μικρότερη δυσκαμψία), όριο διαρροής $\sigma_B=3000\text{GPa}$ και διάμετρο $d=6\mu\text{m}$ ισχύει

$$\sigma_x = \frac{dE}{2R} \quad (2.12)$$

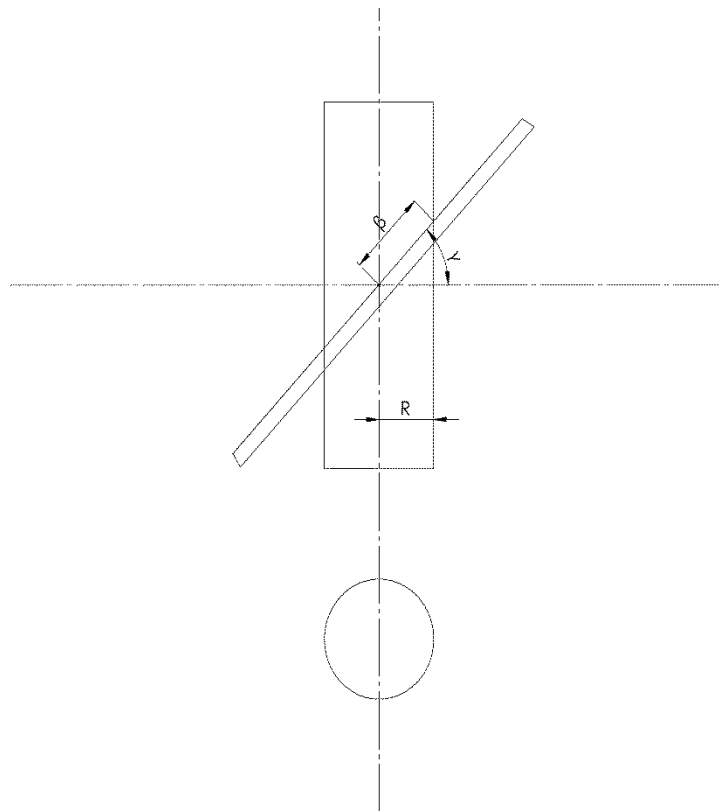
Με

$$l_0 = \varphi R \quad (2.13)$$

Και

$$l_0 + \Delta l = \varphi(R + d) \quad (2.14)$$

Οπότε $R_{\min} = 0.31mm$ η κρίσιμη ακτίνα για το ανθρακόνημα. Από οπτική παρατήρηση προκύπτει ότι δεν είναι όλες οι ίνες κάθετες με τον πείρο που θα περιελιχθούν. Αυτές θα σχηματίζουν μία γωνία γ , η οποία εικονίζεται και στο παρακάτω σχήμα.



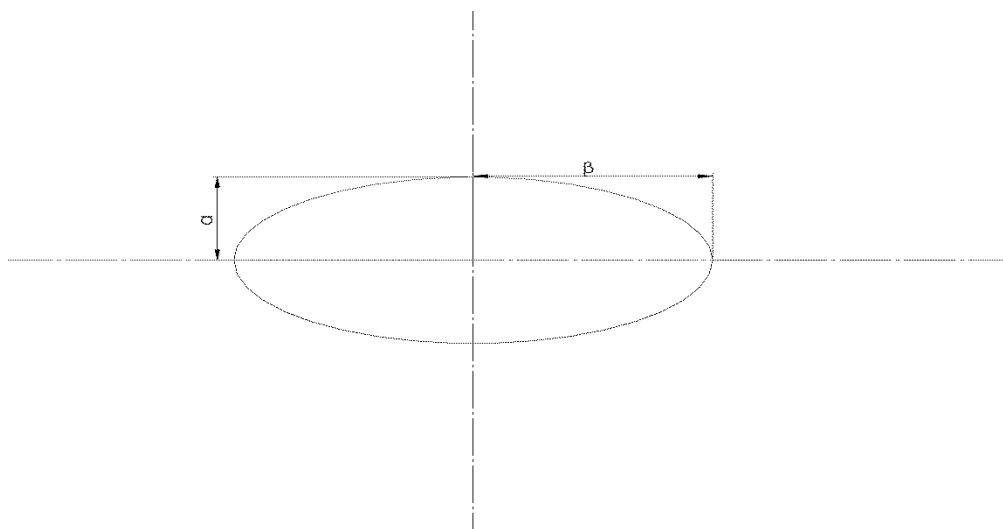
Εικόνα 19. Διάταξη ίνας πείρου υπό γωνία

Έτσι για το ανθρακόνημα πρέπει να μελετηθεί η καμπυλότητα σε όλα τα σημεία της έλλειψης που σχηματίζεται λόγω της στροφής των ινών.

Η έλλειψη που θα σχηματίζεται περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\vec{r}(t) = a \cos(t) + b \sin(t) \quad (2.15)$$

Με μικρό ημιάξονα $a=0,31\text{mm}$ και μεγάλο ημιάξονα $b=0,31/\cos(\gamma)$ όπως φαίνεται στην εικόνα 20



Εικόνα 20. Απεικόνιση μεγεθών a, b

Επομένως, γεωμετρικά προκύπτει ότι η καμπυλότητα της έλλειψης στα άκρα του μικρού άξονα είναι

$$R_1 = \frac{b^2}{a} = \frac{0,31}{\cos^2(\gamma)} \quad (2.16)$$

Το οποίο τοποθετεί τις τιμές στην ασφαλή περιοχή και του μεγάλου άξονα

$$R_2 = \frac{a^2}{b} = 0,31 \cos(\gamma) \quad (2.17)$$

Όπου βρίσκονται τιμές κάτω από την κρίσιμη.

Πιο αναλυτικά, για την καμπυλότητα ισχύει

$$\kappa = \left| \frac{\hat{T}'}{r'} \right| \quad (2.18)$$

Όπου

$$T(s) = \frac{dr}{dt} \quad (2.19)$$

Και γίνεται

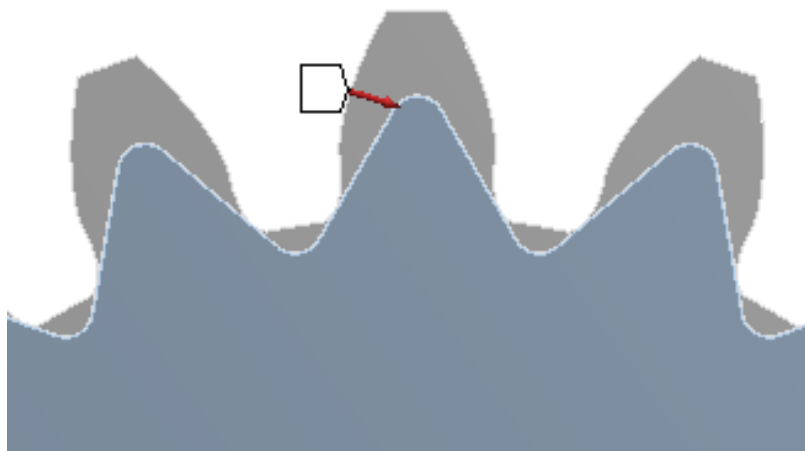
$$|\vec{r}'| = \frac{-0,31 \sin(t)i + \frac{0,31}{\cos(\gamma)} \sin(t)j}{\sqrt{(0,31 \sin t)^2 + \left(\frac{0,31}{\cos(\gamma)} \sin(t)\right)^2}} \quad (2.20)$$

Αρκεί, λοιπόν, να δοθεί η γωνία στροφής των ινών γ ώστε να υπολογιστεί η καμπυλότητα $\kappa(t)$ για $0 \leq t \leq \frac{\pi}{2}$ με χειρότερη την περίπτωση για $\frac{\pi}{2}$.

Μία συνήθης τιμή είναι $\cos(\gamma) = 0.5$ [14] οπότε προκύπτει $R_{t=0} = 0.155mm$ και $R_{t=\pi/2} = 1.24mm$.

2.4 Φόρτιση και στήριξη μοντέλου

Η φόρτιση των οδοντωτών τροχών γίνεται στην θέση του HPSTC , όπως έχει ήδη περιγραφεί. Το φορτίο είναι κάθετο στην κατατομή και φαίνεται στην εικόνα 21.



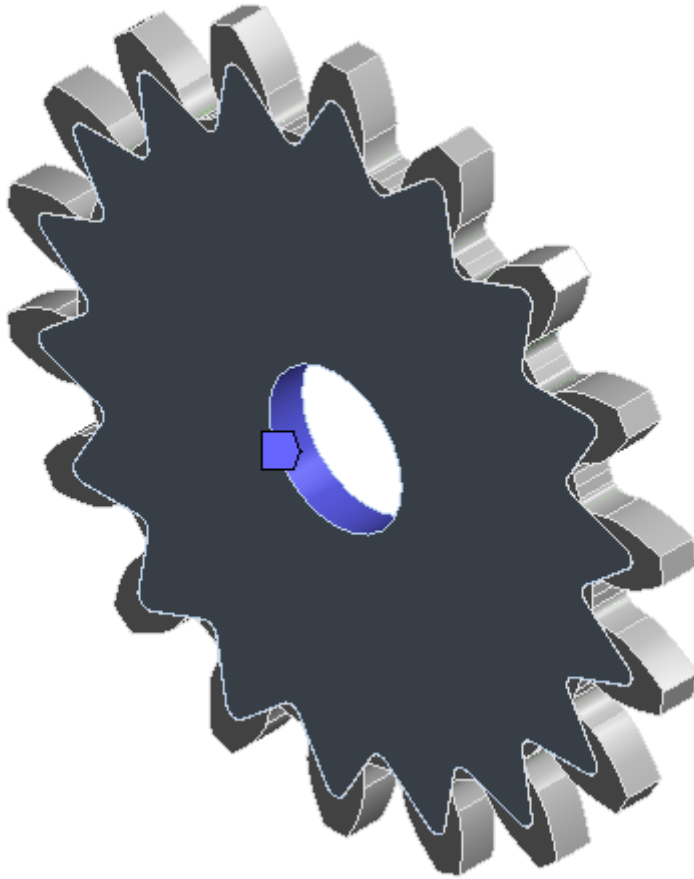
Εικόνα 21. Σχηματική απεικόνιση της δύναμης

Κατά την μοντελοποίηση, για να μπορούν να γενικευθούν τα αποτελέσματα, χρησιμοποιείται η εξίσωση (2.21) όπου σ η αναπτυσσόμενη τάση στο κάθε μοντέλο, σ_u η τάση που προκύπτει στο αδιάστατο μοντέλο, P_N το κάθετο φορτίο στην κατατομή, b το πλάτος του οδόντα και m το module της οδόντωσης.

$$\sigma = \sigma_u \frac{P_N}{bm} \quad (2.21)$$

Επομένως, για έναν οδοντωτό τροχό με $b=10mm$ και $m=10mm$ το φορτίο που θα ασκηθεί είναι $P_N = 100N$, όπως φαίνεται στην εικόνα 21.

Ο κάθε οδοντωτός τροχός που εξετάστηκε, εδράζεται στην κεντρική κυλινδρική επιφάνεια με πάκτωση, όπως φαίνεται στην εικόνα 22.

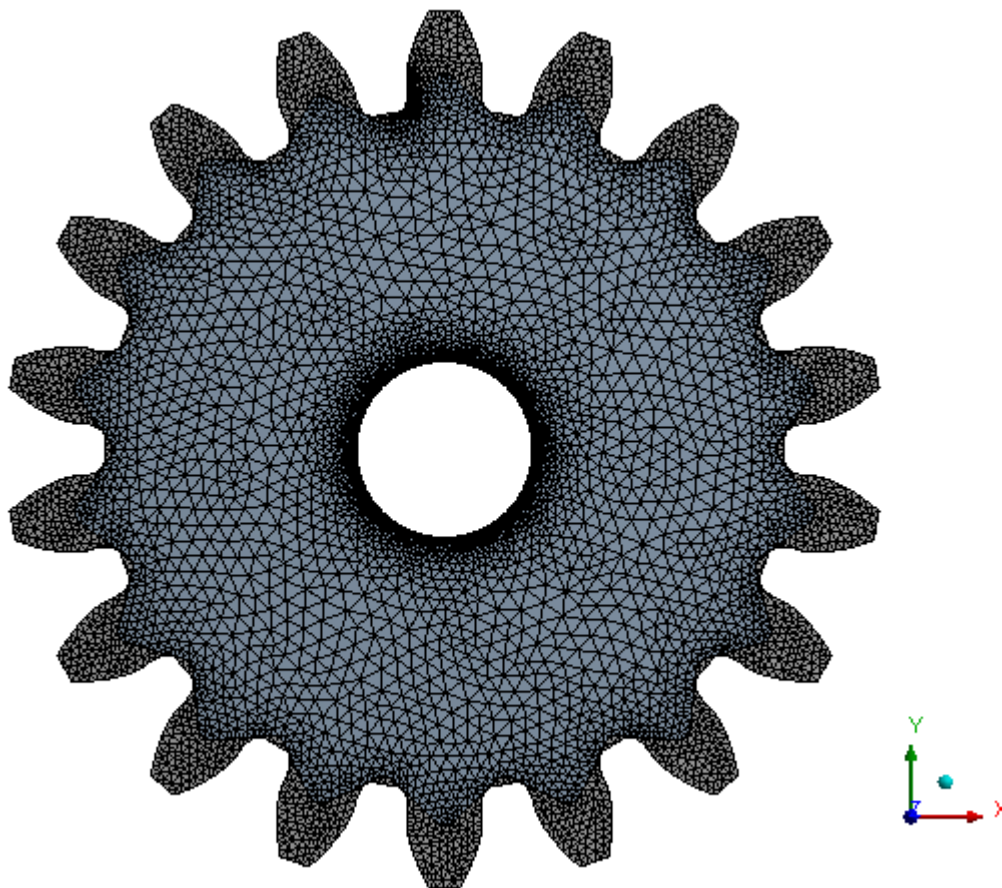


Εικόνα 22. Πάκτωση στην κυλινδρική επιφάνεια

Επειδή αλλάζουν οι διάμετροι σε κάθε οδοντωτό τροχό, λαμβάνεται υπόψιν η διαστατική ακρίβεια της κυλινδρικής επιφάνειας όπου ασκείται η πάκτωση. Αυτό επαληθεύεται στο κεφάλαιο 3, όπου σε μελέτη αμιγώς πλαστικών οδοντωτών τροχών με διαφορετικό module, ίδια όμως φόρτιση, τα αποτελέσματα των τάσεων είναι κοινά.

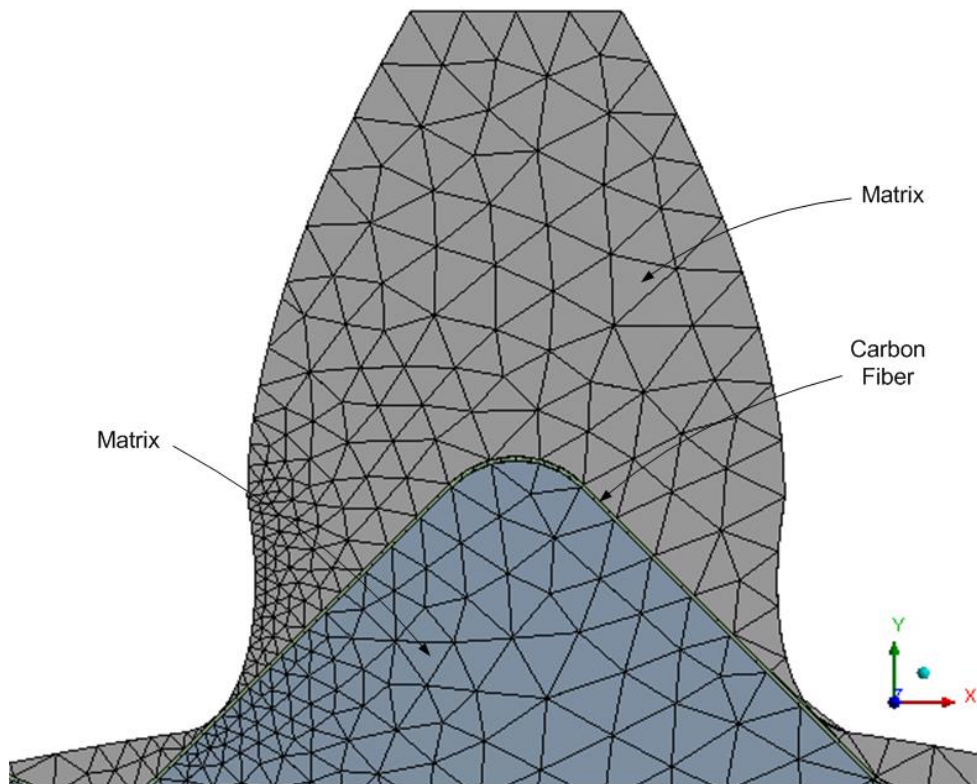
2.5 Δημιουργία πλέγματος

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου. Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για το ιστροπικό υλικό της μήτρας έχουν την ονομασία SOLID187, ενώ αυτά του ανισότροπου υλικού της ενίσχυσης SHELL181. Όσον αφορά τις μεταξύ τους διεπιφάνειες, χρησιμοποιούνται τα CONTA174 και τα TARGE170. Στην εικόνα 23 φαίνεται το πλέγμα ενός οδοντωτού τροχού με 18 οδόντες, πάχους $b=10mm$ και module $m=10mm$.



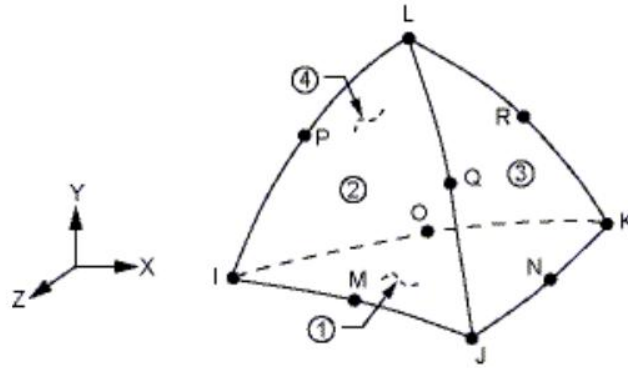
Εικόνα 23. Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

Πιο συγκεκριμένα, στην εικόνα 24 φαίνεται η διάταξη των πεπερασμένων πάνω στον οδοντωτό τροχό.



Εικόνα 24. Απεικόνιση πεπερασμένων στοιχείων μήτρας και σπλισμού

Το SOLID187, που χρησιμοποιείται λόγω της ιστροπίας της πλαστικής μήτρας, είναι ένα τρισδιάστατο στοιχείο. Αποτελείται από 4 έδρες διατασσόμενες στο χώρο κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να αποκτά πυραμδικό σχήμα με 10 κόμβους συνολικά (I,J,K,L,M,N,O,P,Q,R) στα σημεία τομής και στα κέντρα των ακμών. Έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο και το σχήμα του φαίνεται στην εικόνα 25.



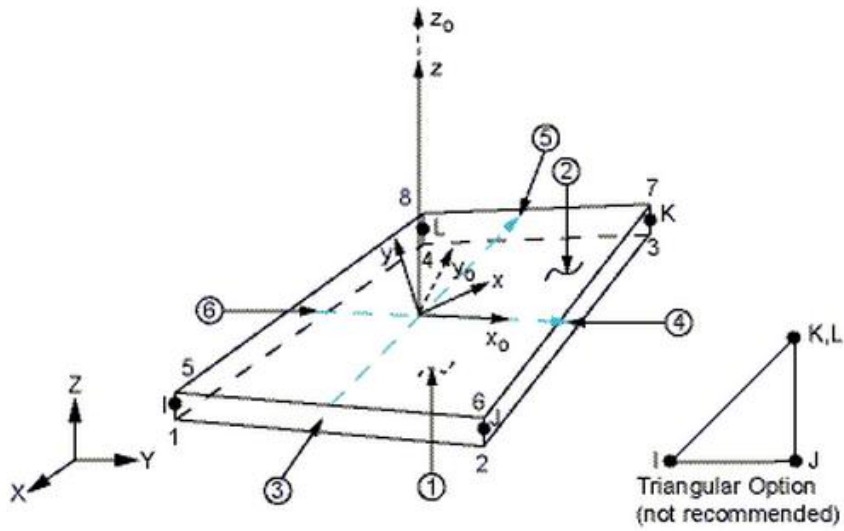
Εικόνα 25. Στοιχείο SOLID187

Σε αυτό το σημείο πρέπει να εξηγηθεί ο λόγος της επιλογής των SHELL στοιχείων για τον οπλισμό. Ως γνωστόν, το ανθρακόνημα ως υλικό μπορεί να παραλάβει τεράστια εφελκυστικά φορτία συγκριτικά με την διάτμηση. Λόγω της ανισοτροπίας της ενίσχυσης, πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος προσανατολισμού των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω τοπικών συστημάτων συντεταγμένων από το λογισμικό ANSYS APDL. Παρόλα αυτά, είναι μία χρονοβόρα διαδικασία με μεγάλο περιθώριο λάθους λόγω της περίπλοκης γεωμετρίας. Χρησιμοποιώντας SHELL στοιχεία επιτυγχάνεται αυτός ο προσανατολισμός. Τα SHELL στοιχεία είναι τετρακομβικά, έχουν έξι βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο και παρουσιάζονται στην εικόνα 26. Οπότε, λόγω της γεωμετρίας του στοιχείου το μητρώο δυσκαμψίας από την μορφή

$$D = \begin{bmatrix} 41.338 & 10.352 & 14.727 & 0 & 0 & 0 \\ 10.352 & 41.338 & 14.727 & 0 & 0 & 0 \\ 14.707 & 14.708 & 171.440 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17.264 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 17.264 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.904 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

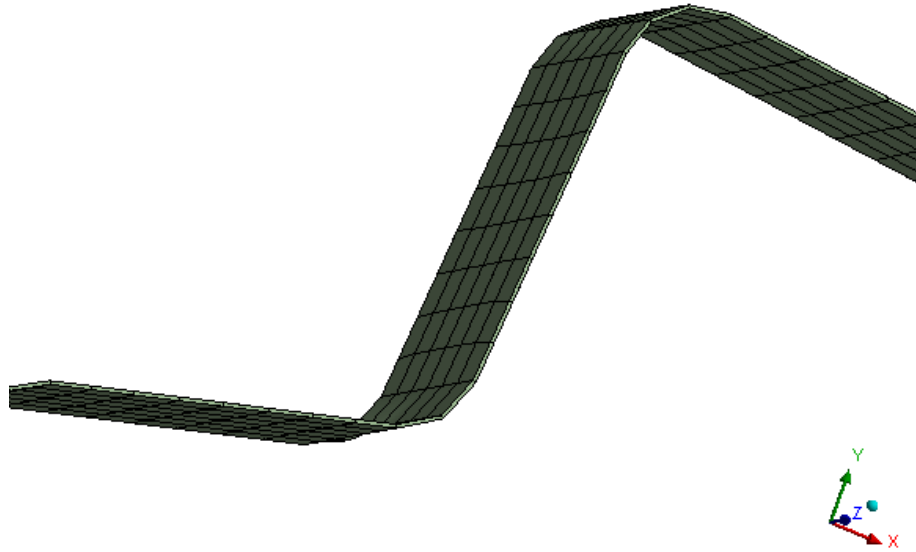
Γίνεται

$$D = \begin{bmatrix} 171.440 & 14.727 & 14.707 & 0 & 0 & 0 \\ 14.727 & 41.338 & 10.352 & 0 & 0 & 0 \\ 14.727 & 10.352 & 41.338 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10.904 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 17.264 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 17.264 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$



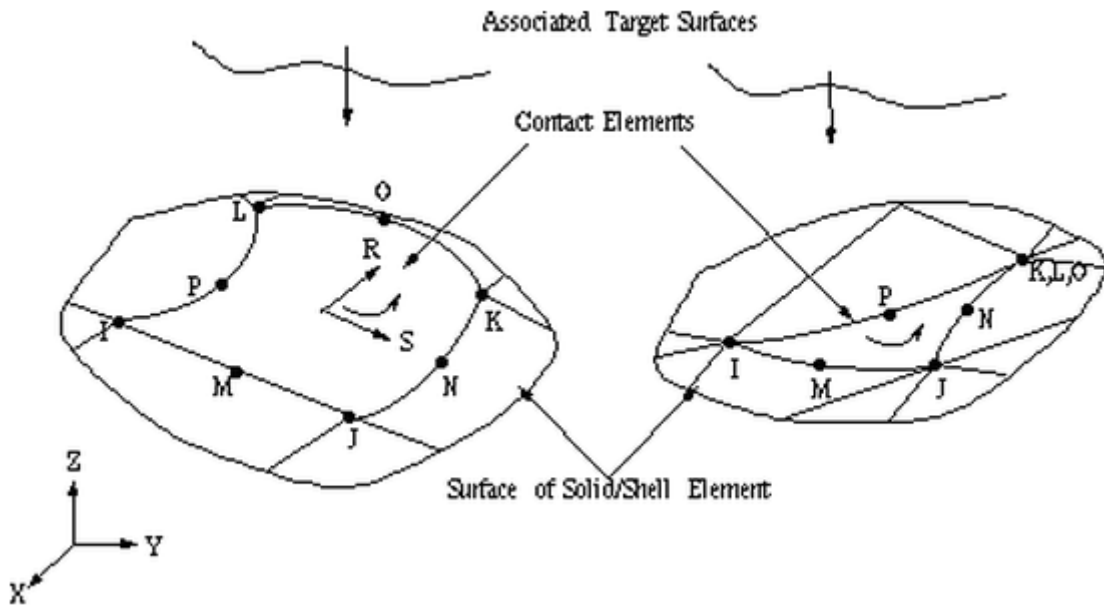
Εικόνα 26. Στοιχείο SHELL181

Στην εικόνα 27 παρουσιάζονται με περισσότερη λεπτομέρεια τα SHELL στοιχεία που έχουν δημιουργηθεί, τα οποία, λόγω του μικρού πάχους του οπλισμού, δεν είναι ευδιάκριτα στην εικόνα 24.



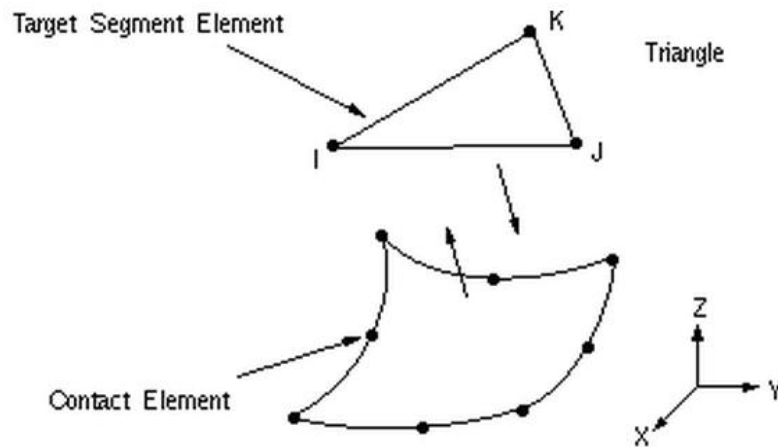
Εικόνα 27. Διάταξη των SHELL στοιχείων σε Global Coordinate System

Όσον αφορά το CONTA174, αυτό χρησιμοποιείται για την επαφή τρισδιάστατων επιφανειών. Είναι οκτακομβικό στοιχείο και έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο. Η διάταξή του φαίνεται στην εικόνα 28.



Εικόνα 28. Στοιχείο CONTACT174

Το στοιχείο TARGET170 συνεργάζεται ουσιαστικά με το CONTACT174 του λογισμικού ANSYS και αντιπροσωπεύει τις επιφάνειες που θα έρθουν σε επαφή με αυτές που έχουν επιλεγθεί από τον χρήστη με στοιχεία TARGET170. Εκείνο απεικονίζεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην εικόνα 29.



Εικόνα 29. Στοιχείο TARGET170

3.Προσομοιώσεις

3.1 . Καθορισμός παραμέτρων βελτιστοποίησης

Για την εύρεση της βέλτιστης γωνίας του ανθρακονήματος στον πλαστικό πλαστικό οδοντωτό τροχό, σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα Solidworks, 24 μοντέλα με διαφορετικές κλίσεις. Τα χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

$$m = 1mm$$

$$\alpha_0 = 20^\circ$$

$$b = 1mm$$

$$r_c = 0mm$$

$$z = 20 \text{όδοντες}$$

$$d_0 = 20mm$$

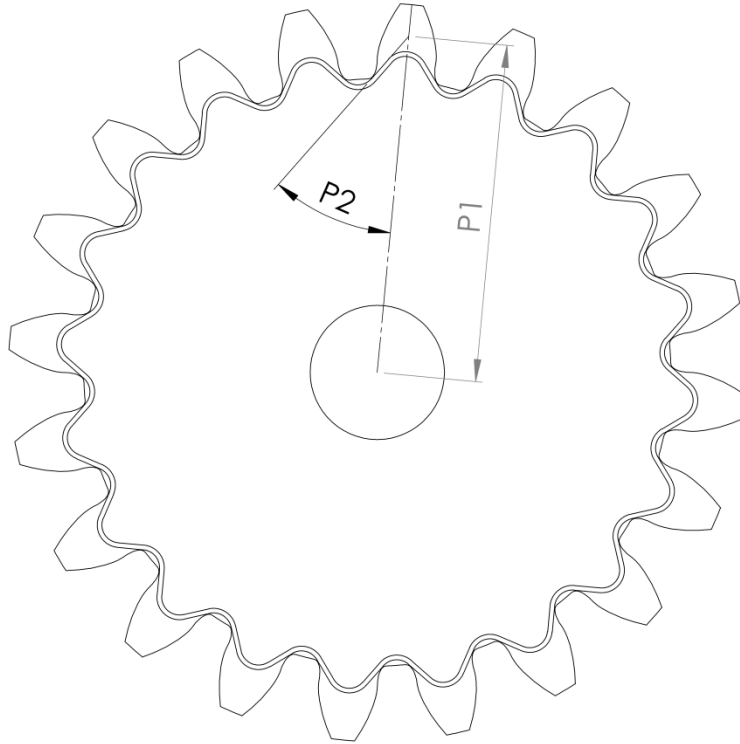
$$r_g = 9.397mm$$

$$r_k = 11mm$$

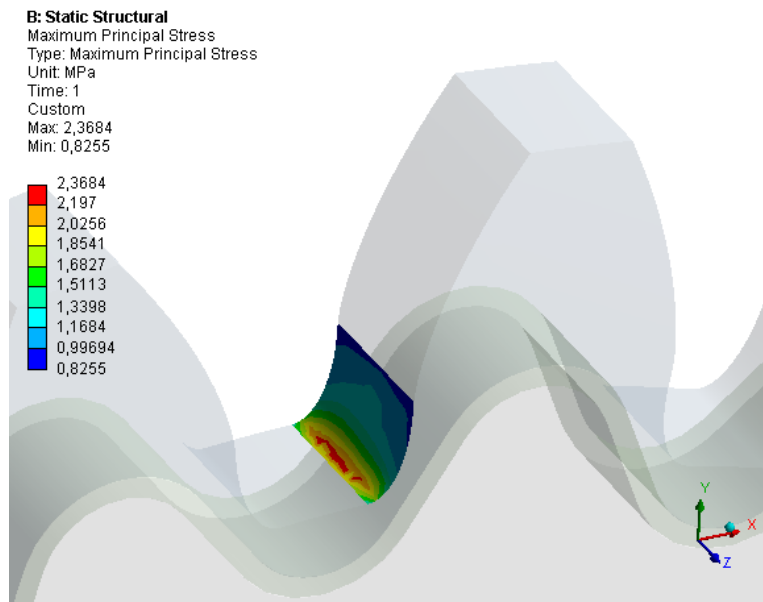
$$r_f = 8.75mm$$

Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν είναι δύο, η απόσταση από το κέντρο του γραναζιού (P1) και η γωνία με τον άξονα συμμετρίας του οδόντα (P2), όπως φαίνεται και στην εικόνα 30. Η παράμετρος P1 έλαβε τέσσερις τιμές 9,55mm, 9,75mm, 9,95mm και 10,15mm. Για κάθε τιμή της P1 επιλέχθηκαν 6 γωνίες, ξεκινώντας πάντα από την γωνία που τοποθετούσε το ανθρα-κόνημα στην οριακή θέση με τον πόδα.

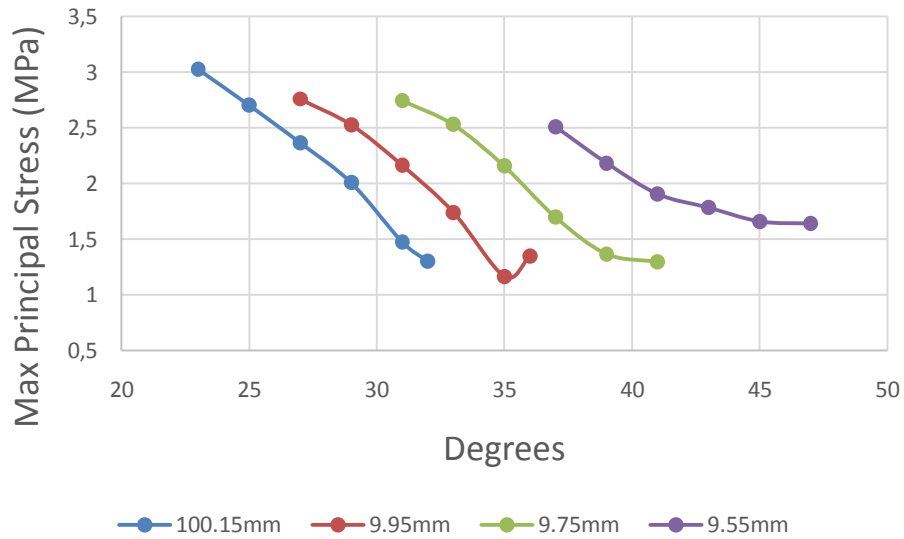
Στην εικόνα 31 διακρίνεται η περιοχή υπολογισμού των τάσεων, δηλαδή ο πόδας. Εκεί υπολογίζονται η πρώτη κύρια τάση, η οποία είναι εφελκυστική, και η μέγιστη διατμητική, όπως φαίνονται και από τα διαγράμματα στις εικόνες 32,33 αντίστοιχα.



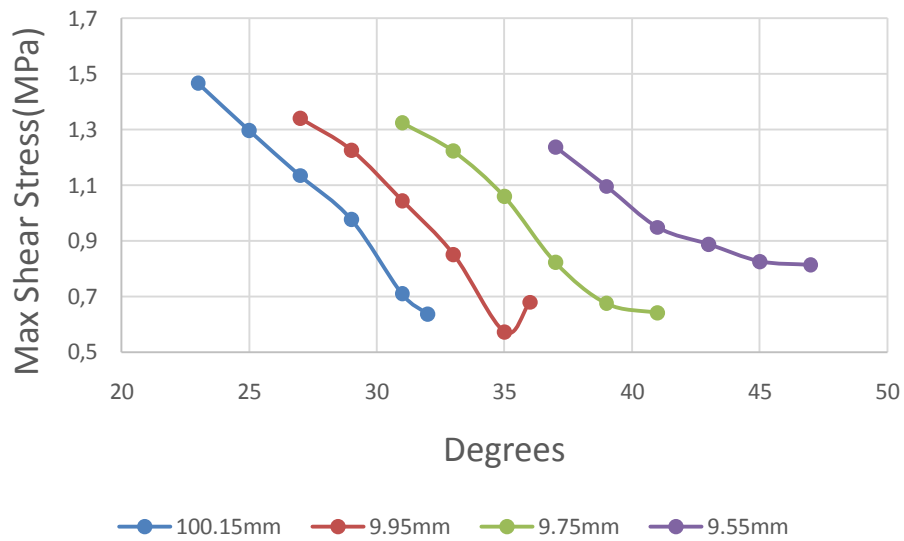
Εικόνα 30. Παράμετροι βελτιστοποίησης



Εικόνα 31 Περιοχή υπολογισμού τάσεων



Εικόνα 32. Διάγραμμα μέγιστης κύριας τάσης-κλίσης



Εικόνα 33. Διάγραμμα μέγιστης διατμητικής τάσης-κλίσης

Από τα διαγράμματα στις εικόνες 32 και 33 προκύπτει μία σημαντική παρατήρηση. Για τις ίδιες γωνίες, δηλαδή για P2 σταθερό παρατηρείται διαφορά στις τάσεις. Πιο

συγκεκριμένα, όσο μικραίνει η P1 (για κοινή P2), οι αναπτυσσόμενες τάσεις στον πόδα αυξάνονται. Αυτό συμβαίνει λόγω της αύξησης της απόστασης μεταξύ οπλισμού και τροχοειδούς, το οποίο οδηγεί σε μη-άμεση ενεργοποίηση του οπλισμού. Πιο αναλυτικά φαίνεται στην εικόνα 34, όπου ο εν λόγω ισχυρισμός επαληθεύεται για κάθε γωνία που μελετήθηκε.

<u>P1(mm)</u>	<u>P2(deg)</u>	<u>Max Principal(MPa)</u>	<u>Max Shear(MPa)</u>
100,15	27	2,37	1,13
9,95	27	2,76	1,34
100,15	29	2,01	0,98
9,95	29	2,53	1,23
100,15	31	1,48	0,71
9,95	31	2,16	1,04
9,95	33	1,74	0,85
9,75	33	2,53	1,22
9,95	35	1,17	0,57
9,75	35	2,16	1,06
9,75	37	1,70	0,82
9,55	37	2,51	1,24
9,75	39	1,37	0,68
9,55	39	2,18	1,10
9,75	41	1,29	0,64
9,55	41	1,91	0,95

Εικόνα 34. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι είναι απαραίτητο ο οπλισμός να βρίσκεται στην πλησιέστερη απόσταση από το τροχοειδές, και επομένως από την επικίνδυνη διατομή ποδός.

Από τις παραπάνω προσομοιώσεις, το καλύτερο αποτέλεσμα το λαμβάνουμε για P1=9.95mm και P2=35°. Σε αυτή την προσομοίωση ο οπλισμός ήταν πολύ κοντά με το τροχοειδές. Γενικά, παρατηρείται ότι η περιοχή καλύτερης λειτουργίας και μεγαλύτερης ενεργοποίησης του οπλισμού είναι από 30 έως 39 μοίρες.

3.2 . Βελτιστοποίηση βάσει της παραμέτρου P2

Στην δεύτερη ανάλυση, για την βελτιστοποίηση που έγινε, πλέον η μόνη παράμετρος είναι η γωνία. Αυτό διότι έχει ευρεθεί ότι παρουσιάζεται καλύτερη μηχανική συμπεριφορά και μικρότερη καταπόνηση στον πόδα όσο ο οπλισμός βρίσκεται πλησιέστερα σε αυτόν. Σε κάθε περίπτωση τοποθετείται σε μία κοινή ελάχιστη, ασφαλή απόσταση από το τροχοειδές. Πραγματοποιούνται 8 προσομοιώσεις από 21 έως 56 μοίρες (μετά από τις 36 μοίρες και μετά αυξάνονται οι τάσεις με μεγάλο ρυθμό στον πόδα).

Τα design points που επιλέχθηκαν απεικονίζονται αναλυτικά στον πίνακα της εικόνας 35. Από το διάγραμμα της εικόνας 36, λοιπόν, παρατηρείται σύγκλιση σε μία βέλτιστη λύση κοντά στις 36 μοίρες. Αυτή η λύση είναι κοντά στην καλύτερη λύση της προηγούμενης ανάλυσης με διαφορά 0,4%.

Degrees	Max Principal(Mpa)	Max Shear(Mpa)
21	1,91	0,93
26	1,54	0,75
31	1,35	0,66
36	1,17	0,58
41	1,34	0,66
46	1,61	0,80
51	1,90	0,95
56	2,19	1,09

Εικόνα 35. Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Χρησιμοποιώντας μία πολυωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού προσεγγίζονται τα σημεία με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης για την πρώτη κύρια και την μέγιστη διατμητική κοντά στο 98%.

Οι εξίσωση για την πρώτη κύρια είναι

$$f_1(x) = -0.00004532x^3 + 0.00778808x^2 - 0.37652162x + 6.82834120 \quad (3.1)$$

Και για την μέγιστη διατμητική

$$f_2(x) = -0.00002062x^3 + 0.00363267x^2 - 0.17714266x + 3.25062712 \quad (3.2)$$

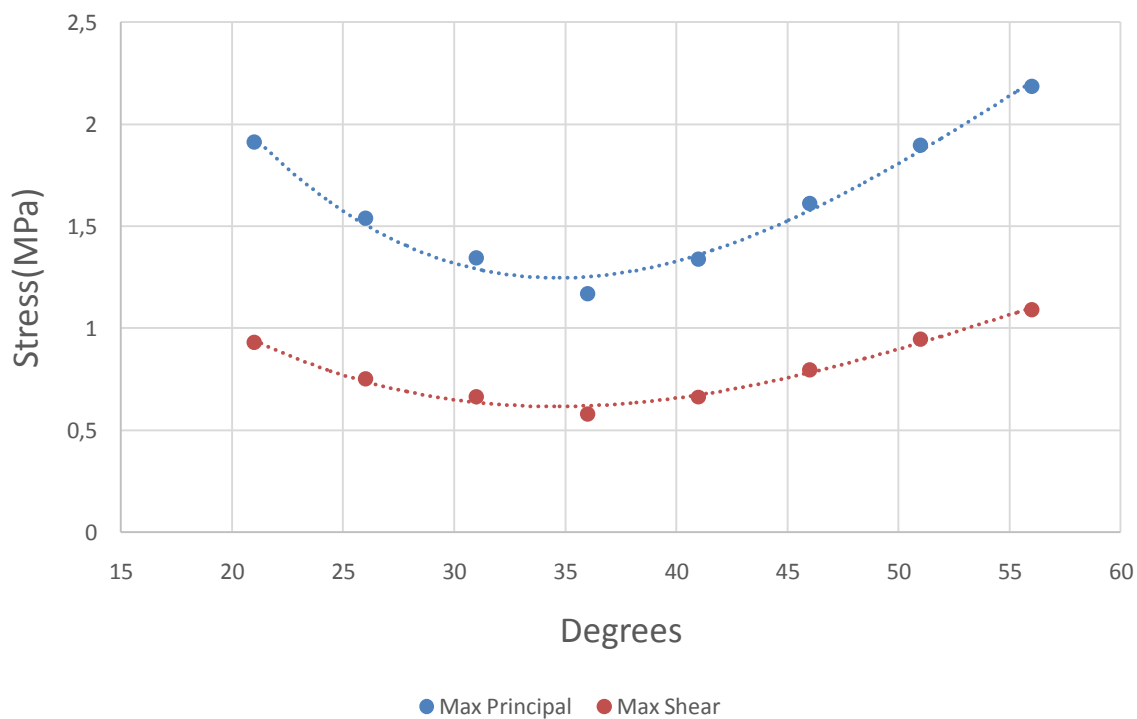
Επομένως για να βρω τα ελάχιστα των (3.1) και (3.2) υπολογίζω

$$\frac{d(f_1(x))}{dx} = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{d(f_2(x))}{dx} = 0 \quad (3.4)$$

Για την (3.3) η βέλτιστη γωνία είναι για $x_1 = 34.6572^\circ$ με τάση $f_1(x_1) = 1.2470 \text{MPa}$

Για την (3.4) η βέλτιστη γωνία είναι για $x_2 = 34.5392^\circ$ με τάση $f_2(x_2) = 0.616257 \text{MPa}$



Εικόνα 36. Διάγραμμα των σημείων της εικόνας 35 και πολωνυμικές εξισώσεις

Η προσομοίωση για τον αμιγώς πλαστικό οδοντωτό τροχό βγάζει τα εξής αποτελέσματα:

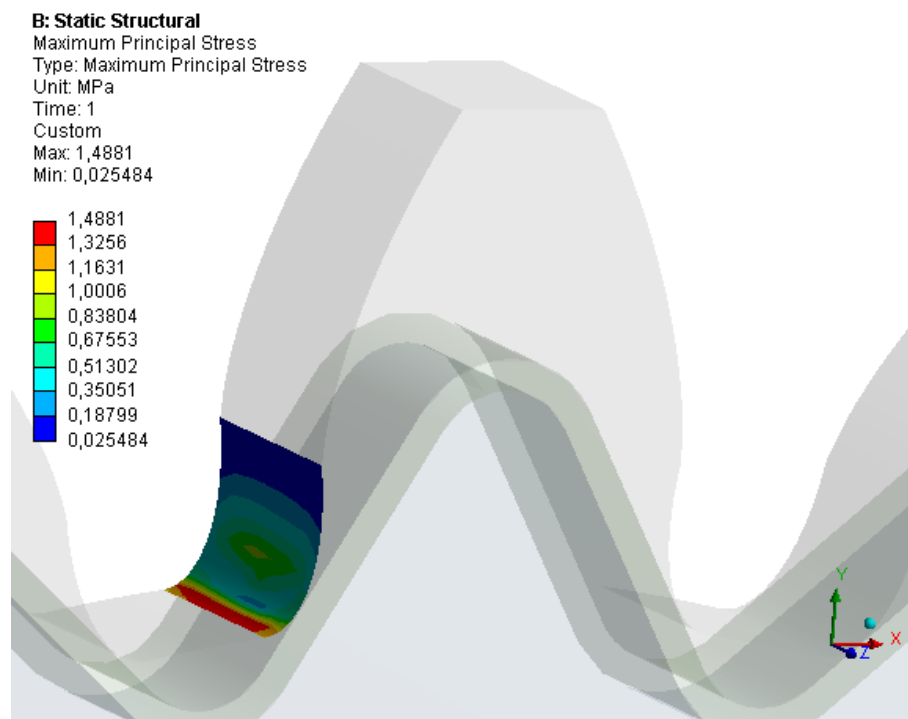
Max Principal(MPa)	Max Shear(MPa)
3,1803	1,4511

Εικόνα 37. Αποτελέσματα τάσεων πλαστικού οδοντωτού τροχού

Η βελτίωση για την πρώτη κύρια τάση είναι 60,79%, ενώ για την μέγιστη διατμητική είναι 57,53%.

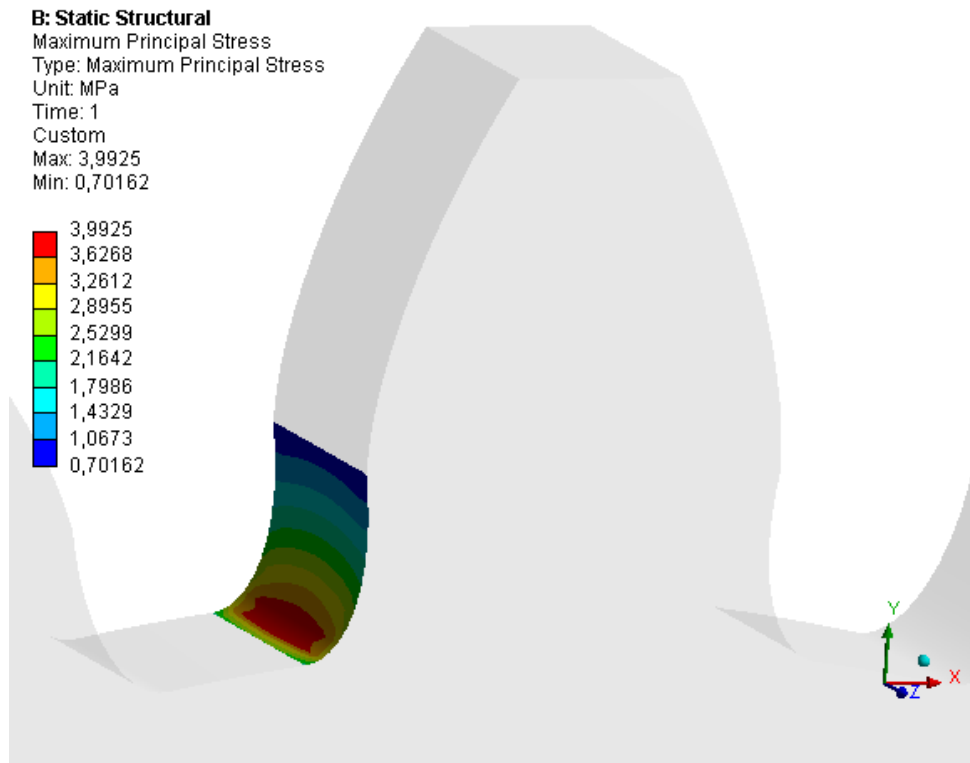
3.3. Αδιαστατοποίηση

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνονται τρεις προσομοιώσεις για ενισχυμένους οδοντωτούς τροχούς με 18 οδόντες διαφορετικών module. Το πάχος του σπλισμού παρέμεινε κοινό για όλες τις προσομοιώσεις ώστε να ελεγχθεί η επίδραση του για οδοντωτούς τροχούς με διαφορετικό module. Τα module που μελετήθηκαν είναι 1mm, 10mm και 20mm. Από τον τύπο (2.21), τα πάχη προέκυψαν 1mm, 10mm και 20mm, ενώ το επιβαλλόμενο φορτίο 1N, 100N και 400N αντίστοιχα. Οι φόρτιση και η στήριξη περιγράφονται εκτενώς στο κεφάλαιο 2 και ισχύουν για όλους τους οδοντωτούς τροχούς που μελετήθηκαν. Στο παρακάτω σχήμα της εικόνας 38 φαίνεται η περιοχή εμφάνισης της πρώτης κύριας τάσης για οδοντωτό τροχό με module 1.



Εικόνα 38. -Επικίνδυνη διατομή ποδός ενισχυμένου οδοντωτού τροχού

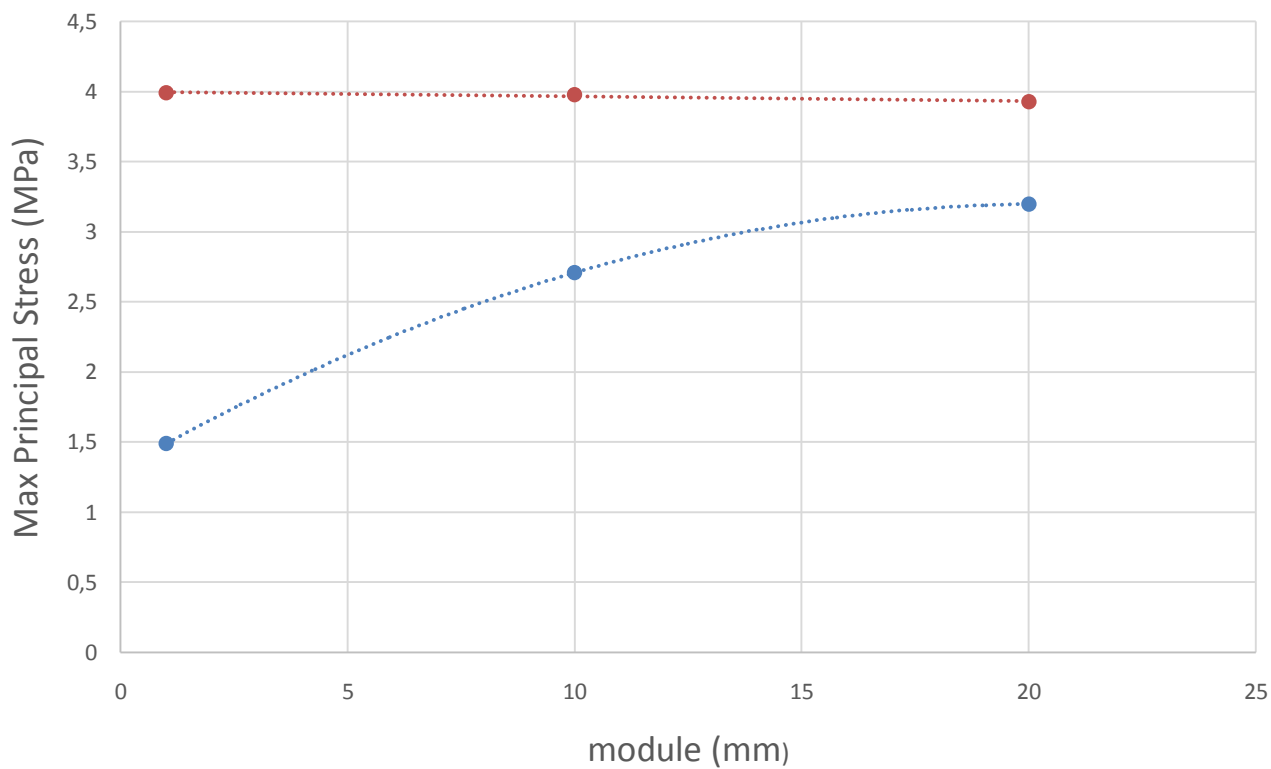
Επιπλέον, έγιναν άλλες τρεις προσομοιώσεις για τους ίδιους οδοντωτούς τροχούς χωρίς ενίσχυση. Η μέτρηση της τάσης γίνεται στην ίδια περιοχή όπως φαίνεται στην εικόνα 39.



Εικόνα 39. Επικίνδυνη διατομή ποδός μη ενισχυμένου οδοντωτού τροχού

Τα αποτελέσματα για την πρώτη κύρια τάση στο πόδα του οδόντος έχουν μέγιστη απόκλιση 2,5%, το οποίο αποδίδεται σε αριθμητικό σφάλμα της αριθμητικής ανάλυσης. Παρατηρείται προοδευτική αύξηση της απόκλισης, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 40, όσο μεγαλώνουν οι διαστάσεις των οδοντωτών τροχών. Από αυτό συμπεραίνεται ότι η αδιαστατοποίηση δίνει ομαλά αποτελέσματα που μπορούν με αξιοπιστία να συγκριθούν μεταξύ τους. Συγκρίνοντας τις εικόνες 38 και 39 παρατηρούμε μετακίνηση της μέγιστης τάσης σε μικρότερη ακτίνα στον ενισχυμένο οδοντωτό τροχό.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 40, η επίδραση του πάχους του οπλισμού είναι μέγιστη στην αντοχή του οδοντωτού τροχού. Καθώς αυξάνεται το module άρα και οι διαστάσεις των οδοντωτών τροχών αυξάνονται οι τάσεις στον πόδα του οδόντα για σταθερό πάχος οπλισμού στα 0,138mm. Επομένως, με μεγαλύτερο πάχος οπλισμού επιτυγχάνεται μεγαλύτερη στιβαρότητα. Το κατασκευαστικό πρόβλημα για μεγάλα πάχη οπλισμών είναι η δυσκολία του εμποτισμού των ινών ανθρακονήματος με ρητίνη.



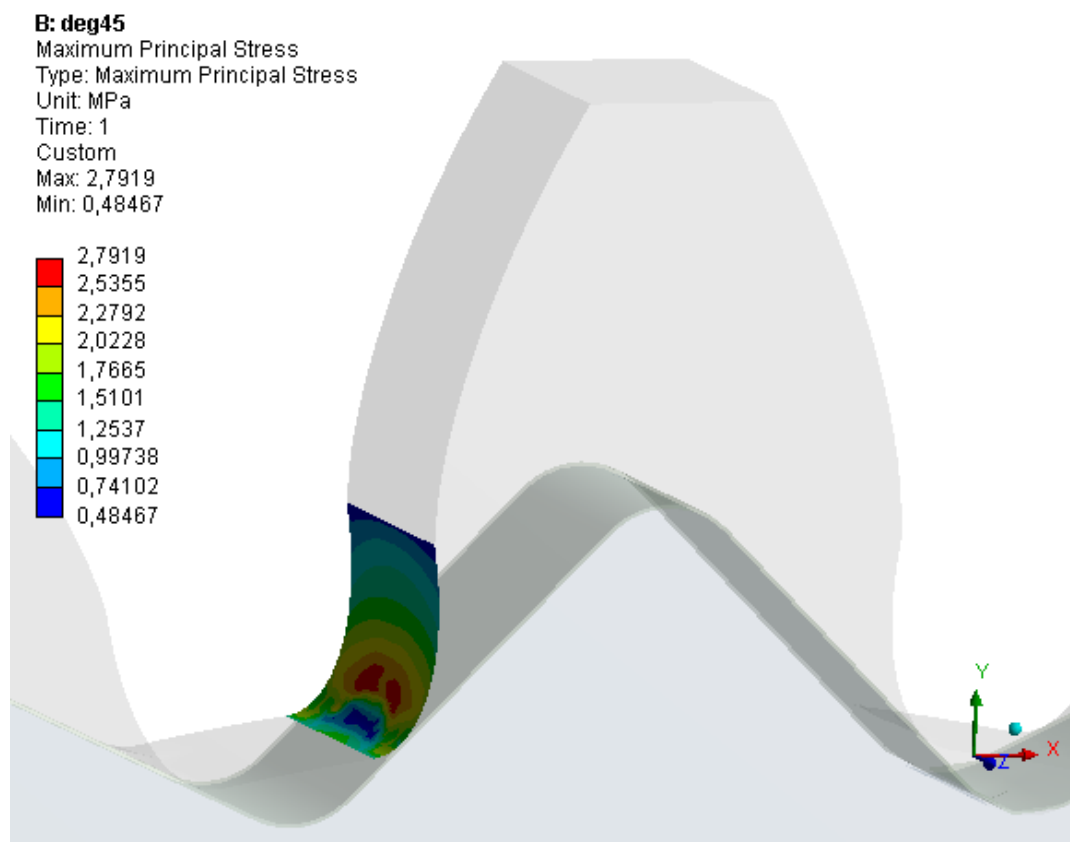
Εικόνα 40. Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων ενισχυμένων και μη οδοντωτών τροχών

Αναλυτικότερα , από το διάγραμμα της εικόνας 40, παρατηρούμε βελτίωση των ενισχυμένων οδοντωτών τροχών σε σχέση με τους πλαστικούς, στην στατική αντοχή για module 1mm, 10mm και 20mm είναι 62,7%, 32,0% και 18,6% αντίστοιχα.

3.4. Βελτιστοποίηση για μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς ευθείας οδόντωσης με 18, 25, 35 και 50 οδόντες.

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνονται προσομοιώσεις για μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς ευθείας οδόντωσης με 18, 25, 35 και 50 οδόντες με module 10mm. Επομένως, το πάχος για όλα τα μοντέλα είναι $b=10mm$ και το φορτίο που ασκείται $P_N=100N$. Σε αυτούς υπολογίζεται η μέγιστη τιμή της πρώτης κύριας τάσης.

Αρχικά μελετούνται οι τροχοί με τους 18 οδόντες, των οποίων η περιοχή των αναπτυσσόμενων τάσεων φαίνεται στην εικόνα 41.



Εικόνα 41. Πεδίο τάσεων στις 45 μοίρες για οδοντωτό τροχό με 18 οδόντες

Το συνολικά αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα της εικόνας 42. Χρησιμοποιώντας μία πολυωνμική εξίσωση τρίτου βαθμού προσεγγίζονται τα σημεία με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης για την μέγιστη κύρια τάση μεγαλύτερο από 98%.

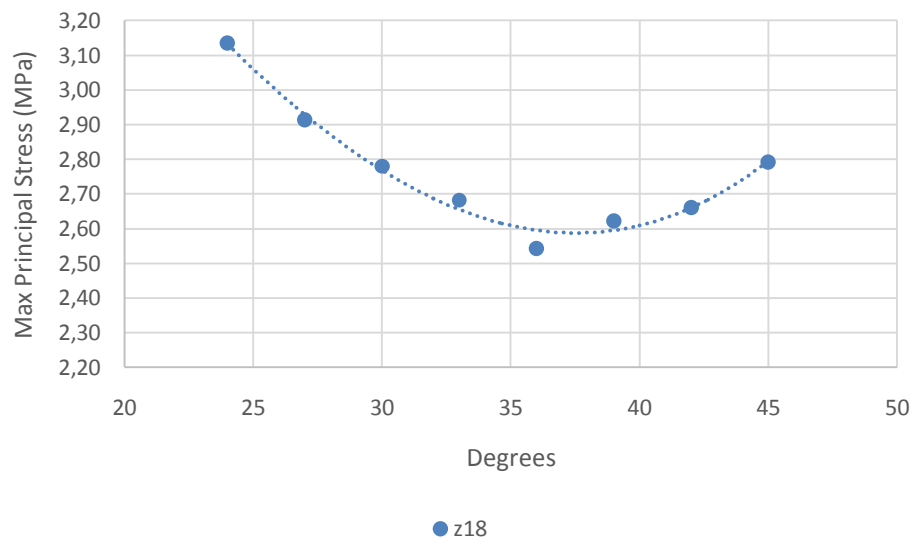
Η εξίσωση παρεμβολής για την πρώτη κύρια τάση είναι

$$\sigma_{18}(P_2) = -0.35 \times 10^{-4} P_2^3 - 0.54 \times 10^{-3} P_2^2 - 0.10 P_2 + 5.57 \quad (3.5)$$

Άρα, για να βρω το ελάχιστο της (3.5)

$$\frac{d(\sigma_{18}(P_2))}{dx} = 0 \quad (3.6)$$

Για την (3.5), η βέλτιστη γωνία είναι για $P_2 = 37.5^\circ$ με τάση $\sigma_{18}(P_2) = 2.59 \text{MPa}$



Εικόνα 42. Μέγιστη ορθή τάση στον πόδα συναρτήσει της γωνίας τοποθέτησης του σπλισμού για αριθμό οδόντων $z=18$

Στην συνέχεια μελετούνται οι τροχοί με τους 25 όδοντες, των οποίων η περιοχή των αναπτυσσόμενων τάσεων φαίνεται στην εικόνα 43.

Το συνολικά αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα της εικόνας 44. Τα σημεία προσεγγίζονται με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης για την μέγιστη κύρια 99,07%.

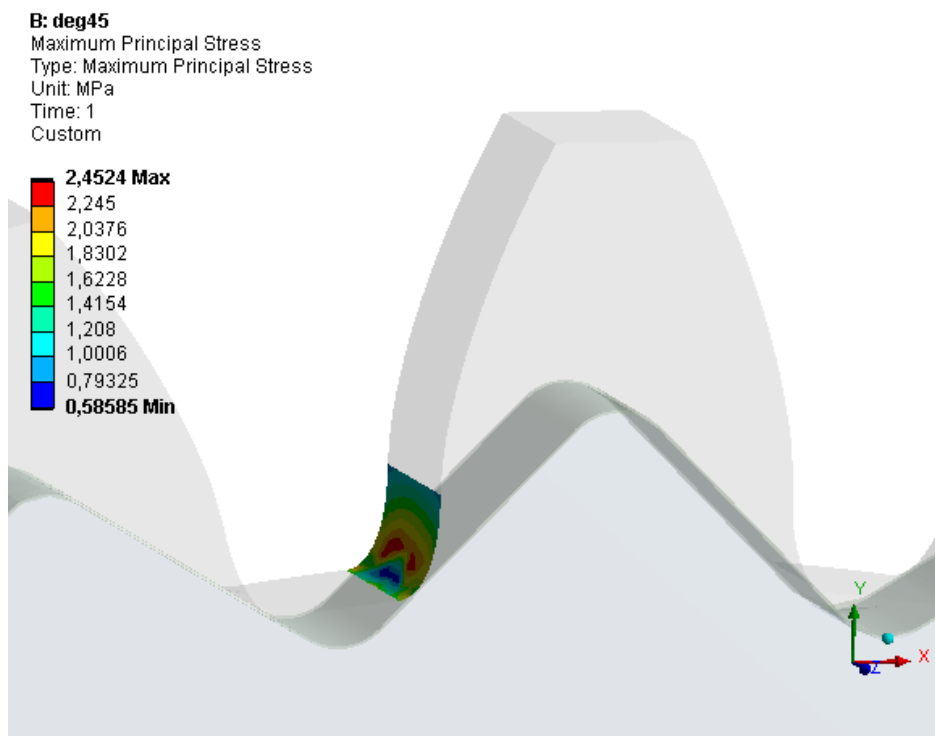
Η εξίσωση για την πρώτη κύρια είναι

$$\sigma_{25}(P_2) = 0.35 \times 10^{-4} P_2^3 - 0.22 \times 10^{-2} P_2^2 - 0.27 \times 10^{-2} P_2 + 0.39 \times 10^1 \quad (3.7)$$

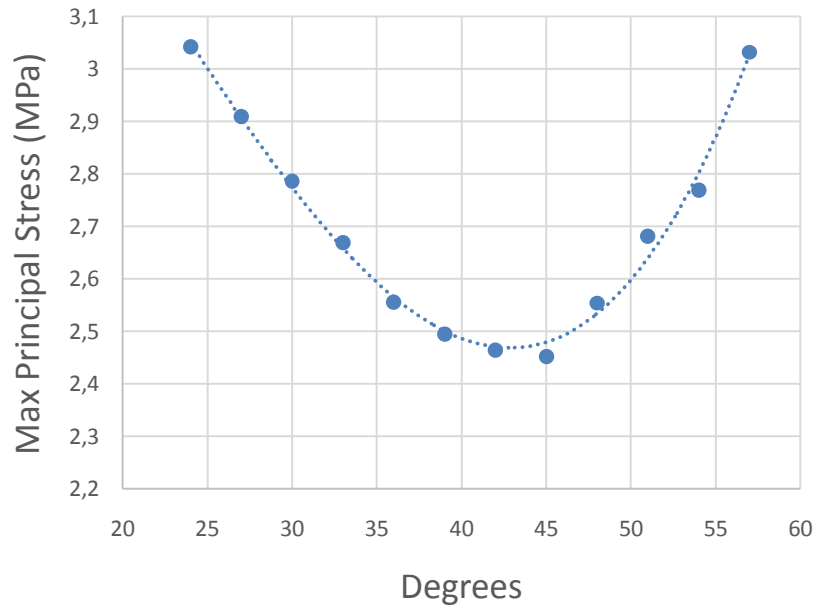
Άρα, για να βρω το ελάχιστο της (3.7)

$$\frac{d(\sigma_{25}(P_2))}{dx} = 0 \quad (3.8)$$

Για την (3.7), η βέλτιστη γωνία είναι για $P_2 = 42.8^\circ$ με τάση $\sigma_{25}(P_2) = 2.47 \text{ MPa}$

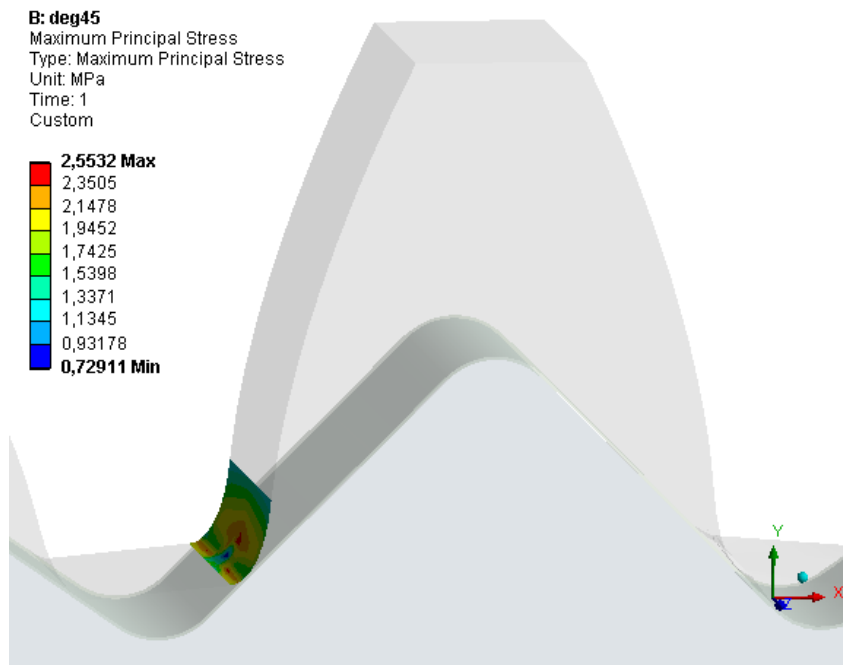


Εικόνα 43 Πεδίο τάσεων στις 45 μοίρες για οδοντωτό τροχό με 25 οδόντες

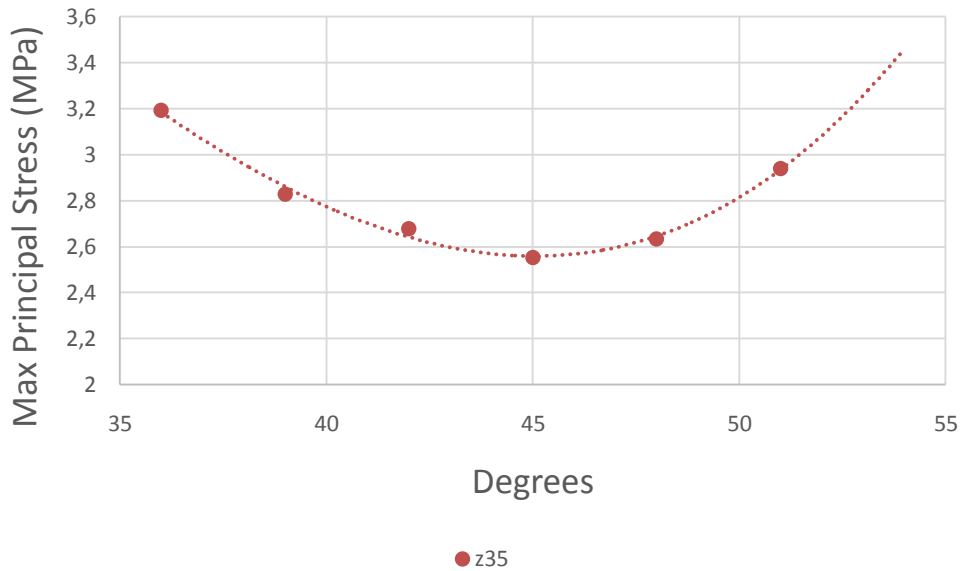


Εικόνα 44. Μέγιστη ορθή τάση στον πόδα συναρτήσει της γωνίας τοποθέτησης του σπλισμού για αριθμό οδόντων $z=25$

Για τους τροχούς με 35 οδόντες, η περιοχή των αναπτυσσόμενων τάσεων φαίνεται στην εικόνα 45



Εικόνα 45. Πεδίο τάσεων στις 45 μοίρες για οδοντωτό τροχό με 35 οδόντες



Εικόνα 46. Μέγιστη ορθή τάση στον πόδα συναρτήσει της γωνίας τοποθέτησης του σπλισμού για αριθμό οδόντων $z=35$

Το συνολικά αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα της εικόνας 46. Τα σημεία προσεγγίζονται με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης για την μέγιστη κύρια 99,04%.

Η εξίσωση για την πρώτη κύρια είναι

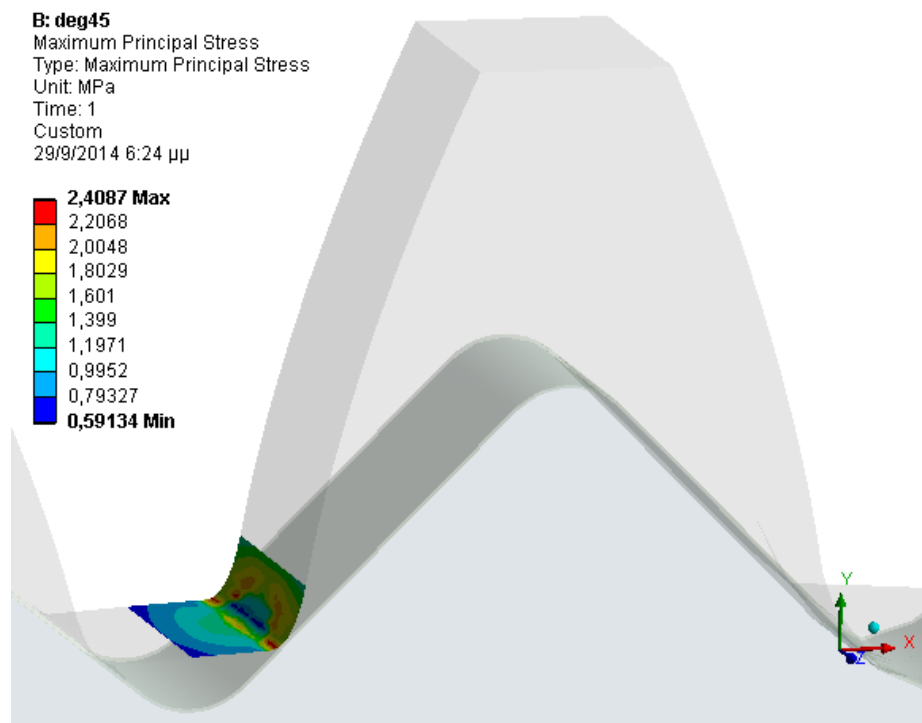
$$\sigma_{35}(P_2) = 0.20 \times 10^{-3} P_2^3 - 0.18 \times 10^{-1} P_2^2 + 0.38 \times 10^0 P_2 + 0.31 \times 10^1 \quad (3.9)$$

Επομένως για να βρω το ελάχιστο της (3.9)

$$\frac{d(\sigma_{35}(P_2))}{dx} = 0 \quad (3.10)$$

Για την (3.9) η βέλτιστη γωνία είναι για $P_2 = 45.6^\circ$ με τάση $\sigma_{35}(P_2) = 2.56 \text{ MPa}$

Τέλος, για τους τροχούς με 50 οδόντες, η περιοχή των αναπτυσσόμενων τάσεων φαίνεται στην εικόνα 47



Εικόνα 47. Πεδίο τάσεων στις 45 μοίρες για οδοντωτό τροχό με 50 οδόντες

Το συνολικά αποτελέσματα αποτυπώνονται στο διάγραμμα της εικόνας 48. Τα σημεία προσεγγίζονται με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης για την μέγιστη κύρια 98,05%.

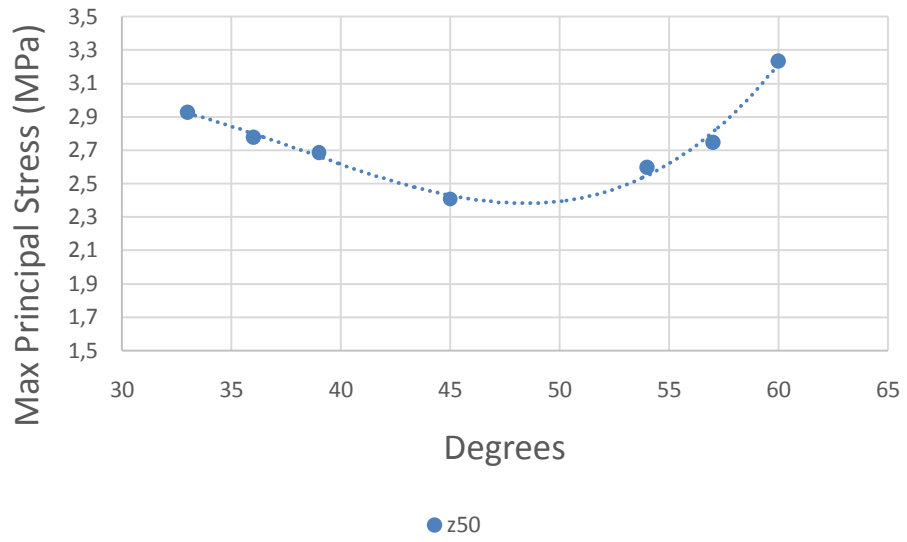
Η εξίσωση για την πρώτη κύρια είναι

$$\sigma_{50}(P_2) = 0.14 \times 10^{-3} P_2^3 - 0.16 \times 10^{-1} P_2^2 + 0.59 \times 10^0 P_2 - 0.36 \times 10^1 \quad (3.11)$$

Συνεπώς, για να βρω το ελάχιστο της (3.11)

$$\frac{d(\sigma_{50}(P_2))}{dx} = 0 \quad (3.12)$$

Για την (3.11), η βέλτιστη γωνία είναι για $P_2 = 48.4^\circ$ με τάση $\sigma_{50}(P_2) = 2.38 \text{ MPa}$

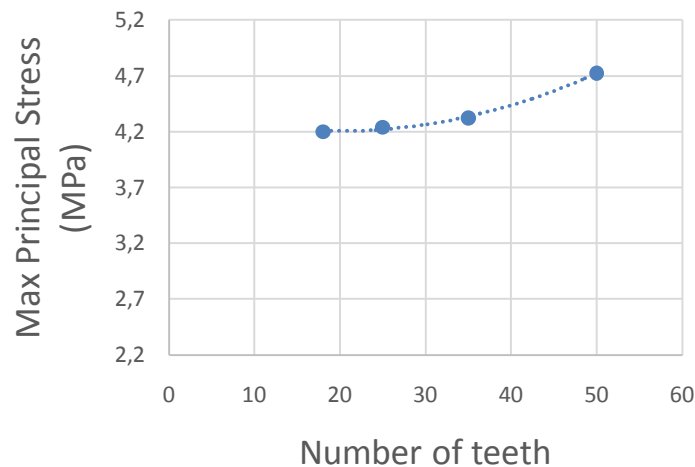


Εικόνα 48. Μέγιστη ορθή τάση στον πόδα συναρτήσει της γωνίας τοποθέτησης του σπλισμού για αριθμό οδόντων $z=50$

3.5. Σύγκριση μεθόδων-Συμπεράσματα

Ως κατακλείδα για το θεωρητικό μέρος της διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζεται η σύγκριση της βελτιστοποιημένης αυτής σχεδίασης σε σχέση με δύο άλλες τεχνικές ενίσχυσης οδοντωτών τροχών οι οποίες προϋπήρχαν. Πιο συγκεκριμένα, η μία από αυτές είναι η εξωτερική ενίσχυση των πλαστικών οδοντωτών τροχών στην κατατομή των οδόντων, ενώ η άλλη η τοποθέτηση της επαπτομενικά στην επικίνδυνη διατομή. Η ενίσχυση σε όλες τις περιπτώσεις αποτελείται από μονοδιευθυντικές ίνες ανθρακονήματος. Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων έχει ληφθεί υπ' όψιν ο τύπος (2.21) καθώς και σχεδίαση των μοντέλων βάσει του κεφαλαίου 2.

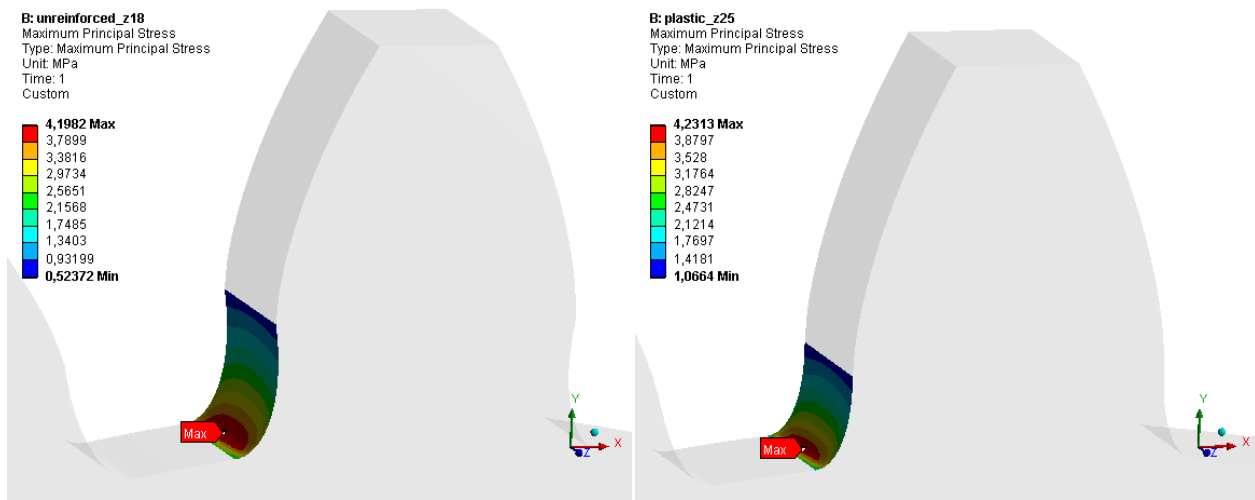
Αρχικά, γίνονται τέσσερις προσομοιώσεις για πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς χωρίς ενίσχυση. Το module $m=10mm$ για όλα τα μοντέλα. Οι αριθμοί οδόντων που μελετήθηκαν είναι ίδιοι με του κεφαλαίου 3.4, δηλαδή για 18, 25, 35 και 50 οδόντες. Έτσι, η στήριξη και η περιοχή άσκησης του φορτίου διαφέρει για κάθε μία από τις τέσσερις οικογένειες οδόντων. Επίσης, από την στατική μελέτη που πραγματοποιήθηκε για τους πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς βρέθηκε η επικίνδυνη διατομή αυτών.



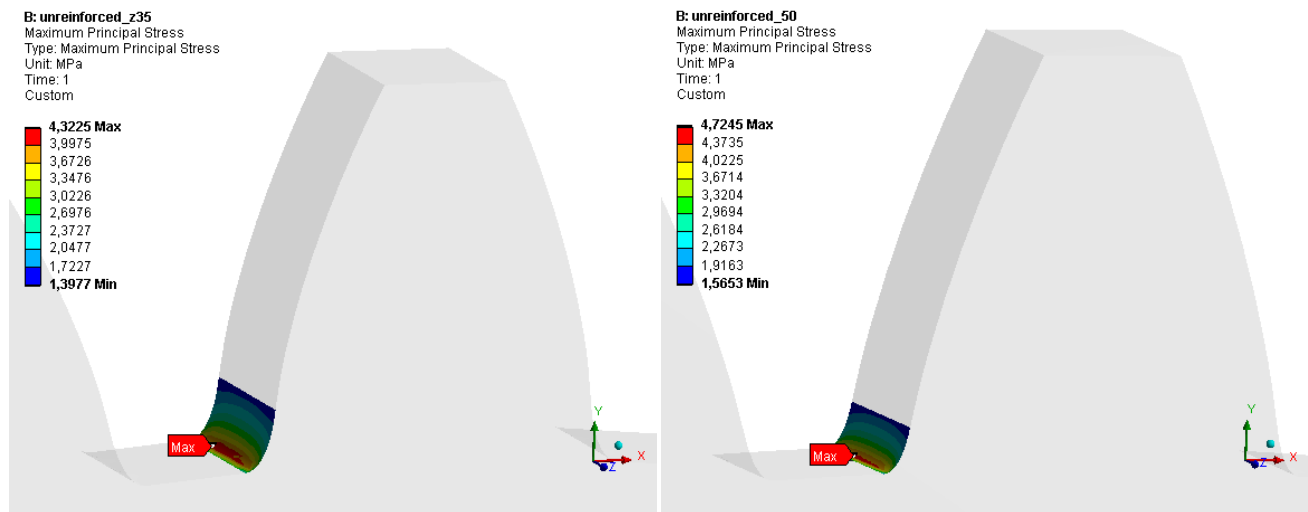
Εικόνα 49. Αποτελέσματα τάσεων μη ενισχυμένων πλαστικών οδοντωτών τροχών για 18, 25, 35 και 50 οδόντες

Στο διάγραμμα της εικόνας 49 παρατηρούνται τα αποτελέσματα της μέγιστης τιμής της πρώτης κύριας τάσης στον πόδα του οδόντος. Παρατηρείται αύξηση των

αναπτυσσόμενων τάσεων καθώς αυξάνεται ο αριθμός των οδόντων. Στις εικόνες 50α,β και 51α,β παρουσιάζονται τα προφίλ των τάσεων για 18, 25, 35 και 50 οδόντες.



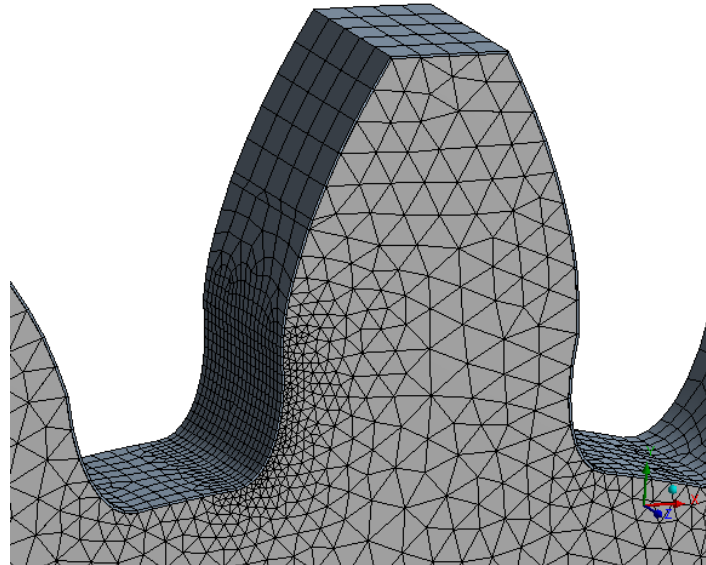
Εικόνα 50. Μη ενισχυμένοι πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί με α)18 οδόντες (αριστερά) και β)25 οδόντες (δεξιά)



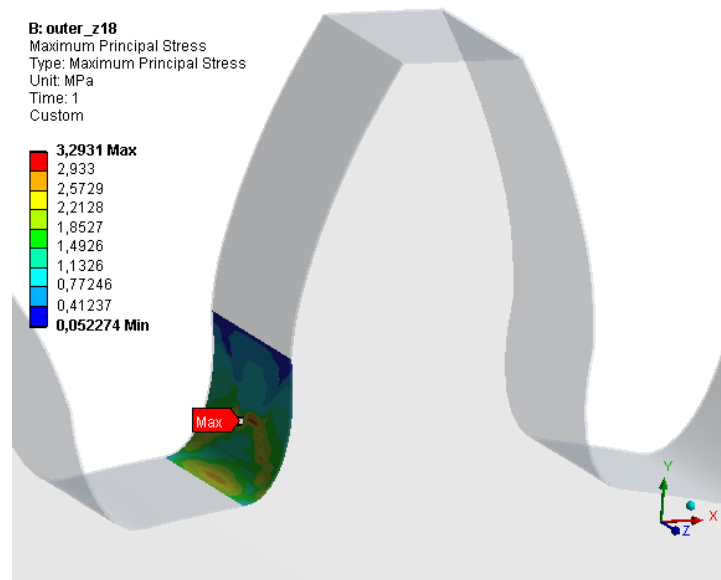
Εικόνα 51. Μη ενισχυμένοι πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί με α)35 οδόντες (αριστερά) και β)50 οδόντες (δεξιά)

Στην συνέχεια πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις για την τοποθέτηση της εξωτερικής ενίσχυσης. Κατά την κατασκευή αυτών, χυτεύεται πλαστικό υπό πίεση σε

καλούπι με μορφή αυτή της οδόντωσης και στο οποίο είναι τοποθετημένες από πριν οι ίνες ανθρακονήματος. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των διαστάσεων των συνεργαζόμενων κατατομών καθώς και προβλήματα επαφής κατά την συνεργασία. Στην εικόνα 52 φαίνεται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων ενός τέτοιου οδοντωτού τροχού με 18 οδόντες ενώ στην εικόνα 53 το προφίλ των τάσεων.

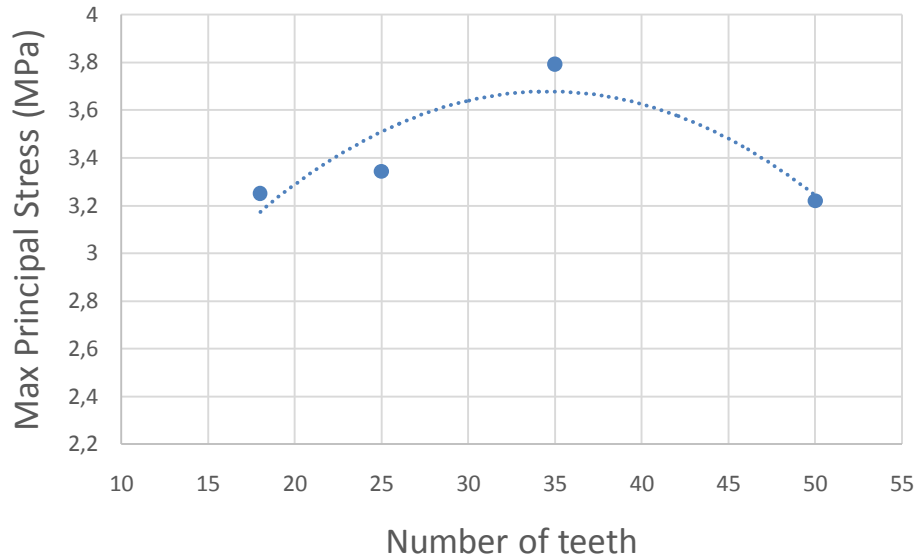


Εικόνα 52. Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για οδοντωτό τροχό με 18 οδόντες και εξωτερική ενίσχυση



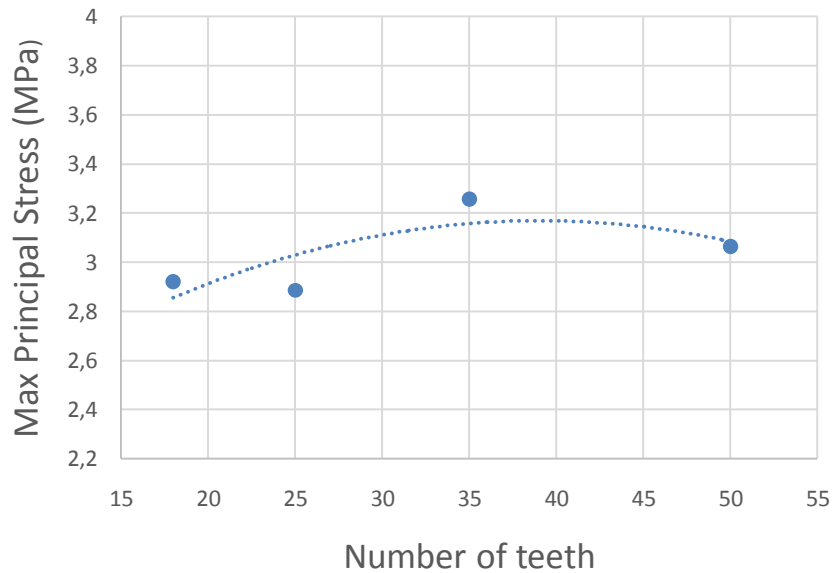
Εικόνα 53. Προφίλ τάσεων για οδοντωτό τροχό με 18 οδόντες και εξωτερική ενίσχυση

Στο διάγραμμα της εικόνας 54 παρατίθενται τα αποτελέσματα για την μέγιστη τιμή της πρώτης κύριας τάσης



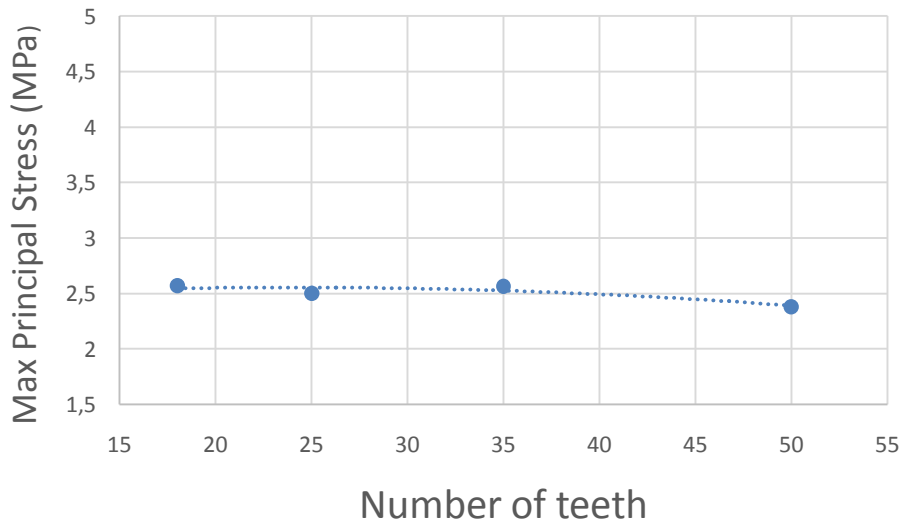
Εικόνα 54. Αποτελέσματα τάσεων για οδοντωτούς τροχούς με 18,25,35,50 οδόντες και εξωτερική ενίσχυση

Η επόμενη τεχνική που μελετάται είναι η τοποθέτηση του σπλισμού εφαπτομενικά της επικίνδυνης διατομής ποδός, όπως αυτή προσδιορίζεται χωρίς την ενίσχυση. Αφού το σημείο της επικίνδυνης διατομής έχει ευρεθεί, από τις πρώτες προσομοιώσεις για τον αμιγώς πλαστικό οδοντωτό τροχό, γίνεται η μοντελοποίηση για τις συγκεκριμένες γωνίες. Τα αποτελέσματα της μέγιστης τιμής της πρώτης κύριας τάσης παρουσιάζονται στο διάγραμμα της εικόνας 55.



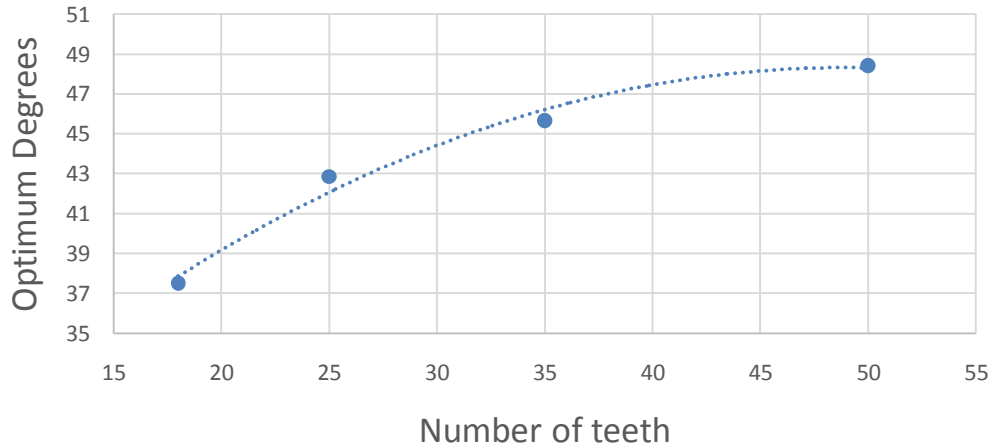
Εικόνα 55. Αποτελέσματα τάσεων για οδοντωτούς τροχούς με 18,25,35,50 οδόντες και εφαπτομενική ενίσχυση

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βέλτιστα αποτελέσματα του κεφαλαίου 3.4. Στο διάγραμμα της εικόνας 56 διακρίνεται η βελτιωμένη μηχανική συμπεριφορά με κριτήριο την μέγιστη πρώτη κύρια τάση, για ενισχυμένους μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς βάσει του νέου σχεδιασμού.



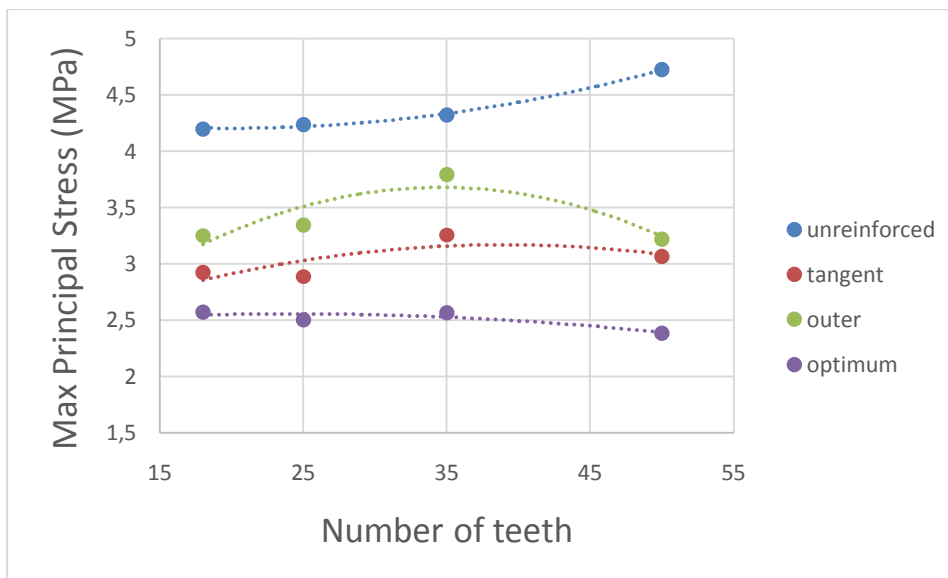
Εικόνα 56. Αποτελέσματα τάσεων για βέλτιστους οδοντωτούς τροχούς με 18,25,35,50 οδόντες

Στο διάγραμμα της εικόνας 57 δίνεται η βέλτιστη γωνία για κάθε αριθμό οδόντων ξεχωριστά. Παρατηρείται αύξηση της βέλτιστης γωνίας καθώς αυξάνεται ο αριθμός οδόντων.



Εικόνα 57. Σύγκριση βέλτιστων γωνιών για βέλτιστους οδοντωτούς τροχούς με 18,25,35,50 οδόντες

Τέλος ,στο διάγραμμα της εικόνας 58 παρουσιάζεται η σύγκριση των μέγιστων τιμών της πρώτης κύριας τάσης για οδοντωτό τροχό χωρίς ενίσχυση, με εξωτερική ενίσχυση, με οπλισμό τοποθετημένο εφαπτομενικά στην επικίνδυνη διατομή ποδός συγκριτικά με την βελτιστοποιημένη λύση, προϊόν της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Εικόνα 58. Σύγκριση τάσεων για οδοντωτούς τροχούς με 18,25,35,50 οδόντες

Σε αυτό το σημείο τελειώνει το θεωρητικό μέρος της διπλωματικής εργασίας, καταλήγοντας ότι με την νέο μοντέλο επιτυγχάνεται βελτιωμένη μηχανική συμπεριφορά

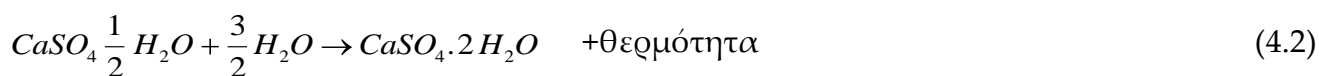
4. Πειραματική διερεύνηση με γύψινο μοντέλο

4.1 . Κατασκευή μοντέλου από γύψο και λινή ενίσχυση

Πριν την κατασκευή του πλαστικού γραναζιού, με ενίσχυση από σπλισμό ανθρακονήματος, προηγήθηκε ένα προπαρασκευαστικό στάδιο. Αυτό γίνεται για τον εντοπισμό δυσκολιών της κατασκευής αλλά και τον σχεδιασμό του πλάνου που θα ακολουθηθεί για αυτήν. Αρχικά, κατασκευάζεται μοντέλο με μήτρα από γύψο στην θέση του πλαστικού και ίνες λινού ως σπλισμός. Το μοντέλο που θα μελετηθεί είναι το εξής:

$$\begin{aligned} m &= 20mm \\ z &= 20\delta\acute{o}\nu\tau\iota\alpha \\ r_0 &= 200mm \\ r_g &= 187,94mm \\ r_g &= 220mm \\ r_g &= 175mm \\ S_0 &= 31,42mm \\ b &= 30mm \end{aligned} \tag{4.1}$$

Όσον αφορά το υλικό της μήτρας, πρόκειται για πλαστική γύψο (εν μέρει άνυδρη) η οποία όταν αναμιχθεί με το νερό μετατρέπεται σε φυσική γύψο (πλήρως ένυδρη) με έκλυση θερμότητας κατά την αντίδραση:

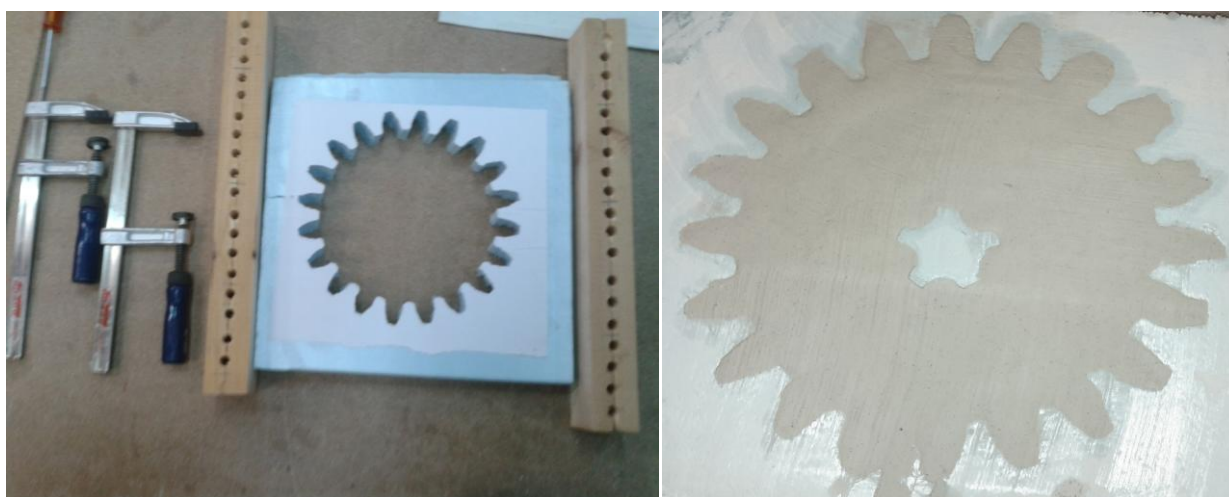


Η πήξη και η σκλήρυνση εξαρτάται από την ποσότητα νερού που θα προστεθεί στο διάλυμα αλλά και από την υγρασία της γύψου. Ο χρόνος πήξης κυμαίνεται, βάσει αυτών,

από 5 έως 30 λεπτά. Μετά την ξήρανση της γύψου, η αντοχή του υλικού σε θλίψη είναι 8 MPa, ενώ σε κάμψη 3 MPa. Συγκεκριμένα για την κάμψη, η αντοχή μετά από 2 ώρες πρέπει να είναι 2 MPa, ενώ στην συνέχεια αυξάνεται μέχρι τα 3 MPa. Αυτό σημαίνει ότι ο οδοντωτός τροχός πρέπει να μείνει για κάποιες ώρες στο καλούπι πριν αφαιρεθεί ή δοκιμαστεί.

Για το καλούπι χρησιμοποιήθηκε το υλικό dow (εξηλασμένη πολυστερίνη) το οποίο είναι θερμομονωτικό υλικό. Η επιλογή του έγινε λόγω της ευκολίας κοπής του με πριόνι χειρός, της ομοιομορφίας του, ώστε να μην αφήνει σημάδια στην γύψο, καθώς και της καλής στεγανότητας του.

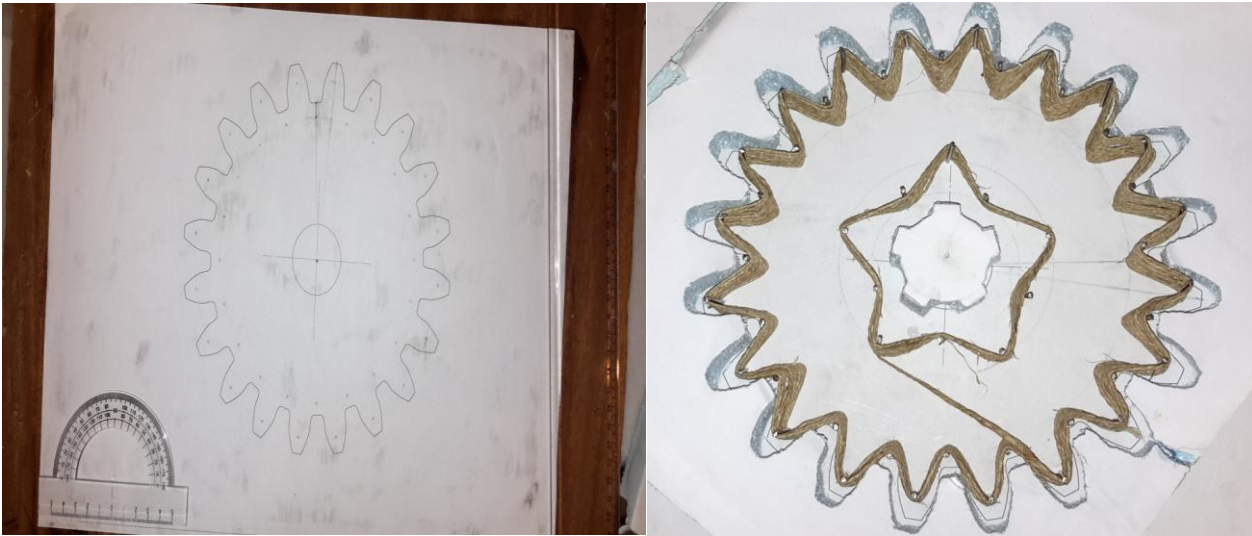
Κόβονται, λοιπόν, δύο καλούπια από dow στις διαστάσεις του γραναζιού όπως φαίνεται στην εικόνα 59.



Εικόνα 59. Καλούπι από dow

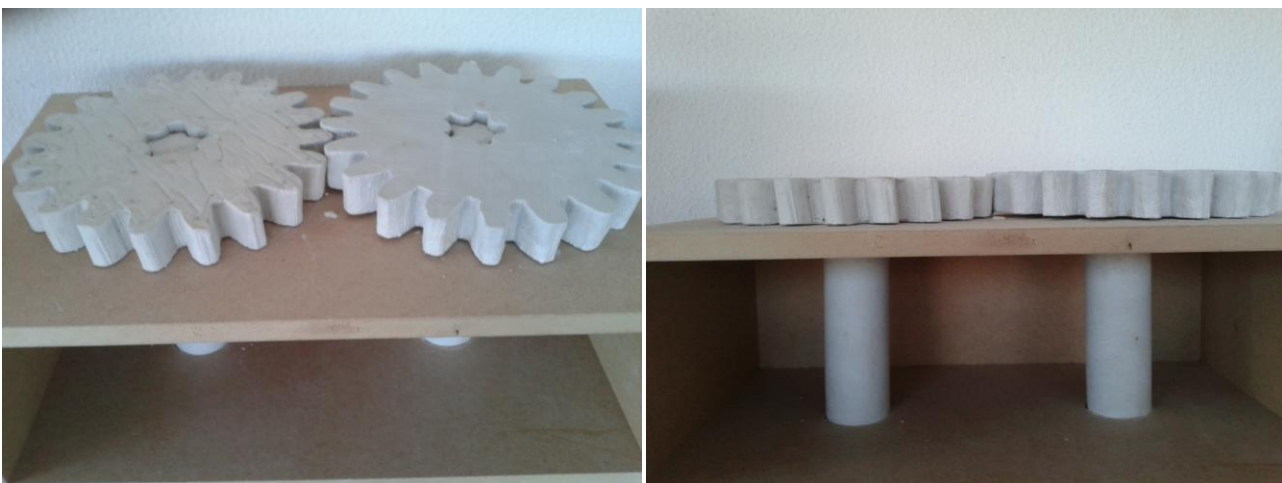
Στο ένα τοποθετείται η ενίσχυση στην βέλτιστη γωνία των 36 μοιρών, όπως και έχει υπολογισθεί, και μία δεύτερη ενίσχυση στο πολύσφηνο όπως φαίνεται στην εικόνα 60α). Στο άλλο δεν τοποθετείται καμία ενίσχυση. Για τον οπλισμό χρησιμοποιείται ξύλινη πλάκα στην οποία τοποθετούνται ήλοι (ως πείροι περιέλιξης), των οποίων οι σωστές θέσεις έχουν ευρεθεί όπως φαίνεται στην εικόνα 60α).

Στην συνέχεια τοποθετείται η γύψος, και αφού εκείνη στερεοποιηθεί, αφαιρούνται τα καρφιά. Οι τρύπες που έχουν δημιουργηθεί με την αφαίρεση των καρφιών γεμίζονται με γύψο. Όπως περιγράφεται και στην συνέχεια, οι τρύπες διαμέτρου 2mm (όσο και το πάχος των καρφιών) και ύψους 30mm (πάχος δοντιού) είναι δύσκολο να γεμίσουν και δημιουργούνται κενά. Έχουν, δηλαδή, δημιουργηθεί περιοχές χωρίς υλικό στην περιοχή που θα εφαρμοσθεί το φορτίο.



Εικόνα 60. Κατασκευή καλουπιού α) εύρεση κέντρων και β) τοποθέτηση οπλισμού

Για τα δύο γρανάζια κατασκευάζονται άξονες με πολύσφηνο για λόγους πληρότητας (δεν θα χρησιμοποιηθούν στο αρχικό αυτό στάδιο). Τα γρανάζια τοποθετούνται σε ξύλινο πλαίσιο όπως φαίνεται στην εικόνα 61. Το γρανάζι με την ενίσχυση βρίσκεται εκ των δεξιών, ενώ αυτό χωρίς την ενίσχυση εκ των αριστερών. Πλέον τα γρανάζια έχουν στερεοποιηθεί πλήρως και είναι έτοιμα για το πείραμα αντοχής. Το πρώτο πείραμα που γίνεται είναι με εφαρμογή δύναμης από το ένα γρανάζι στο άλλο. Κρατώντας, δηλαδή, το ένα σταθερό περιστρέφεται το άλλο, με γραμμή επαφής κοντά στον αρχικό κύκλο. Έγιναν 5 δοκιμές και κάθε φορά το ενισχυμένο δόντι σημείωνε θραύση στο ύψος τοποθέτησης του καρφιού. Αυτό συνέβαινε λόγω του κενού που είχε δημιουργηθεί από το καρφί.



Εικόνα 61. Ζεύγος ενισχυμένου και μη-ενισχυμένου γύψινου οδοντωτού τροχού

Στο δεύτερο πείραμα το φορτίο ήταν κρουστικό (με ένα σφυρί). Τα δόντια χωρίς ενίσχυση έσπαγαν όλα στην επικίνδυνη διατομή ποδός, όπως και ήταν αναμενόμενο. Τα δόντια με την ενίσχυση έσπαγαν στο ίδιο σημείο με το πρώτο πείραμα. Με εφαρμογή πολύ μεγαλύτερου κρουστικού φορτίου (πάλι με το σφυρί) παρατηρείται ότι το δόντι με την ενίσχυση δεν σπάει στην επικίνδυνη διατομή ποδός και εμφανίζει μεγάλη αντοχή. Στην εικόνα 62 παρουσιάζεται η θραύση σε δύο οδόντες μη ενισχυμένους. Στην εικόνα 63 παρατηρείται το σημείο διάδοσης της ρωγμής στο ύψος του πείρου.



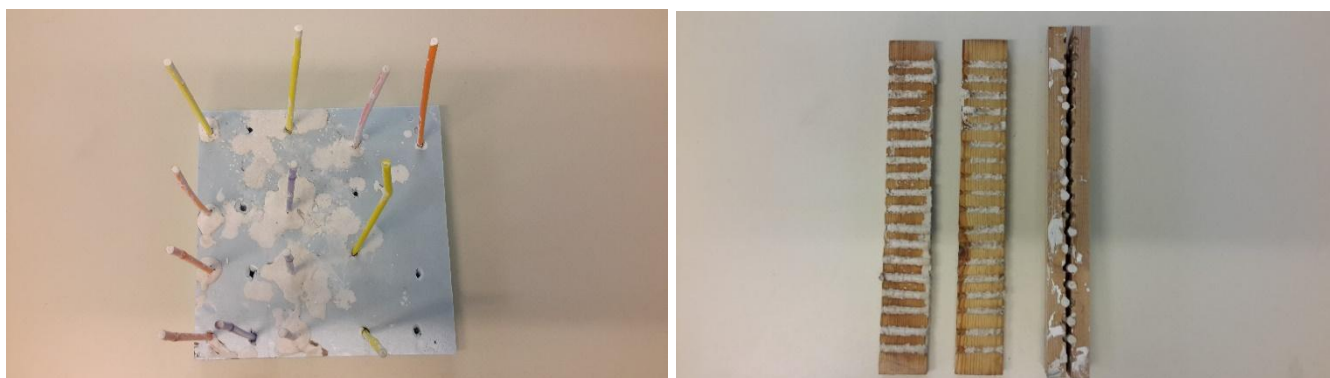
Εικόνα 62. Θραύση μη ενισχυμένου οδοντωτού τροχού



Εικόνα 63. Θραύση ενισχυμένου οδοντωτού τροχού

4.2. Κατασκευή πείρων

Για την αποφυγή των διακενώσεων που έγιναν λόγω του καρφιού επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί έναντι του καρφιού γύψινος πείρος, ο οποίος θα τοποθετηθεί στις αντίστοιχες θέσεις. Με αυτόν τον τρόπο, αφού ο γύψινος πείρος θα ενσωματωθεί στη γύψινη μήτρα, εκτός από την αποφυγή των διακενώσεων, προσομοιάζεται καλύτερα και οι καμπυλότητες των ινών του αρχικού μοντέλου.



Εικόνα 64. Κατασκευή πείρων από α)καλαμάκια και β) από ξύλινο καλούπι

Αρχικά για την κατασκευή των πείρων χρησιμοποιούνται καλαμάκια στα οποία και τοποθετείται ο γύψος όπως φαίνεται στην εικόνα 64α). Σε αυτή την περίπτωση οι ελεύθερες επιφάνειες του καλουπιού ήταν πολύ μικρές και έτσι δεν μπορούσε να στεγνώσει η μήτρα. Ακόμα και μετά από πέντε μέρες η υγρασία μέσα στα καλαμάκια ήταν μεγάλη και δεν μπορούσε να στερεοποιηθεί ο πείρος. Σε μία δεύτερη φάση, για την κατασκευή τους, δημιουργήθηκε καλούπι από ξύλο όπως φαίνεται στην εικόνα 64β). Σε αυτήν την περίπτωση το ξύλο απορρόφησε την υγρασία αλλά δημιουργήθηκαν άλλα προβλήματα. Οι τρύπες έγιναν με τρυπάνι και έτσι οι επιφάνειες τους είχαν μεγάλη τραχύτητα που προκάλεσε ρηγματώσεις στους πείρους και επιφάνεια μη αποδεκτή.

Σε τρίτο στάδιο, για επίτευξη λείας επιφάνειας αλλά γρήγορης και επιτυχημένης στερεοποίησης, χρησιμοποιείται καλούπι από χαρτί. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 65 και είναι ικανοποιητικό.



Εικόνα 65. Πείροι κατασκευασμένοι με χάρτινο καλούπι

Σε αυτό το σημείο γίνεται κάμψη τριών σημείων σε τρεις πείρους και η αστοχία συμβαίνει στα 613gr, 630gr και 625gr. Οπότε η αντοχή τους υπολογίστηκε ως εξής:

$$\sigma_f = \frac{FL}{\pi R^3} = \frac{6 \times 30}{\pi \times 3^3} = 2,1 \text{MPa} \quad (4.3)$$

όπου $F(N)$ η δύναμη, $L(mm)$ το μήκος της δοκού και $R(mm)$ η ακτίνα του πείρου. Η τάση αυτή εμφανίζεται στις κάτω και πάνω ίνες όπου θα ξεκινήσει και η αστοχία. Το αποτέλεσμα είναι αποδεκτό και βρίσκεται στην περιοχή των αρχικών ορίων. Εμφανίζεται σε αυτό το σημείο πρόβλημα σχετικά με την κάμψη που θα λαμβάνουν οι πείροι καθώς θα προεντείνεται ο οπλισμός στο γρανάζι. Ο πείρος, όπως και αναμενόταν από την βιβλιογραφία, έχει χαμηλή αντοχή που δεν αντέχει τα φορτία. Σε αυτό το σημείο λαμβάνεται μία άλλη τακτική ώστε να ενισχυθούν οι πείροι. Στο κέντρο ακριβώς του πείρου τοποθετείται προεντεταμένος οπλισμός (λινάρι). Στην συνέχεια, κατά τα γνωστά, τοποθετείται η μήτρα. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 66.



Εικόνα 66. Κατασκευή ενισχυμένων πείρων με λινή ενίσχυση στο κέντρο

Στην συνέχεια γίνεται κάμψη τριών σημείων για να ελεγχθεί η αντοχή τους. Η αστοχία παρατηρείται στα 2600gr, 2890gr και 2350gr. Επομένως η αντοχή τους υπολογίζεται:

$$\sigma_f = \frac{FL}{\pi R^3} = \frac{26 \times 30}{\pi \times 3^3} = 9,19 \text{MPa} \quad (4.4)$$

Η αντοχή εμφανίζεται 4 με 5 φορές μεγαλύτερη. Στο μέλλον αυτή η αντοχή μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο με χρήση επιπρόσθετων οπλισμών αλλά και τοποθέτηση της θέσης της ενίσχυσης στις άνω ίνες όπου ασκείται η μεγαλύτερη καταπόνηση.

4.3. Κατασκευή βελτιωμένου καλουπιού

Οι πείροι που μελετήθηκαν στο κεφάλαιο 4.2 τοποθετήθηκαν σε καινούργιο καλούπι, το οποίο στην βάση του φέρει τρύπες ώστε να εδράζονται οι πείροι όπως φαίνεται στην εικόνα 67α).

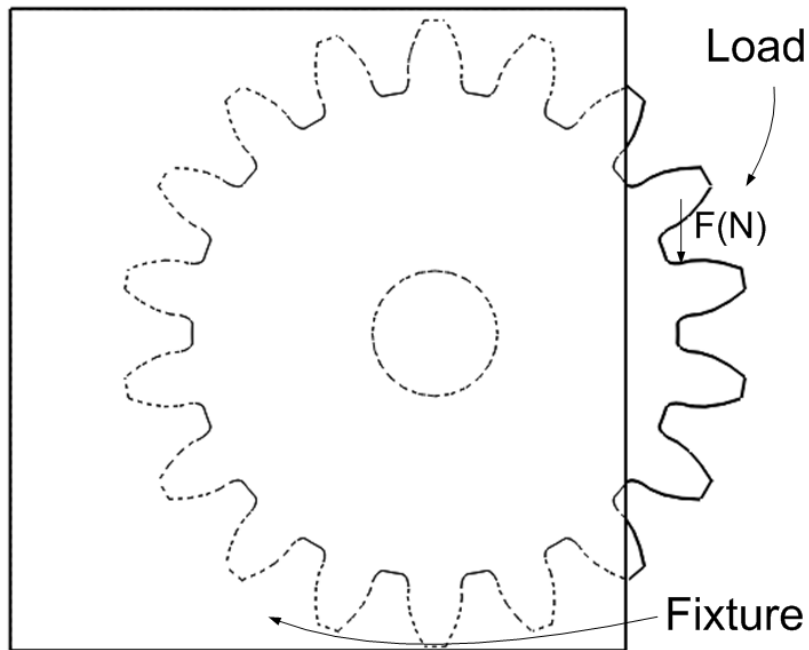


Εικόνα 67. Κατασκευή νέου καλουπιού α)καλούπι από dow (αριστερά) και β) ενίσχυση (δεξιά)

Στην συνέχεια τοποθετούνται οι πείροι στο καλούπι της εικόνας 67α) και τοποθετείται ο καινούργιος σπλισμός, όπως φαίνεται στην εικόνα 67β). Το υλικό του καινούργιου σπλισμού είναι από λεπτές λινές ίνες ώστε να επιτευχθεί καλύτερος εμποτισμός.

Για την διεξαγωγή του πειράματος αντοχής συγκρατείται το τεμάχιο με λάστιχα στην μέγγενη ώστε να μην τραυματιστεί και η εφαρμογή του φορτίου γίνεται με βαθμονομημένα βάρη, κατά τον τρόπο της εικόνας 68. Τα βάρη εφαρμόζονται με συρματόσχοινο σε περιοχή κοντά στο τροχοειδές και όχι στο υψηλότερο σημείο μονής επαφής για αποφυγή ολίσθησης αυτού. Κατά αυτό τον τρόπο ο οδόντας σημειώνει θραύση από διάτμηση. Η ρωγμή και το είδος της θραύσης παρουσιάζεται στην εικόνα 69. Η ενίσχυση αστοχεί σε κάθε περίπτωση μαζί με την μήτρα από γύψο. Ο οδόντας χωρίς ενίσχυση αστοχεί σε φορτίο 62,5kg ενώ αυτός με την ενίσχυση αστοχεί στα 90kg, έχοντας έτσι βελτίωση 44%.

Παρατηρείται θραύση στην επικίνδυνη διατομή, παρ' όλα αυτά η ρωγμή διαδίδεται στην ευθεία όπου βρίσκονται οι πείροι. Αυτά είναι σημεία πιθανών διακενώσεων από κακή ενσωμάτωση των πείρων στην μήτρα από γύψο που εγχύθηκε στο καλούπι.



Εικόνα 68. Παρουσίαση συγκράτησης και εφαρμογής του φορτίου



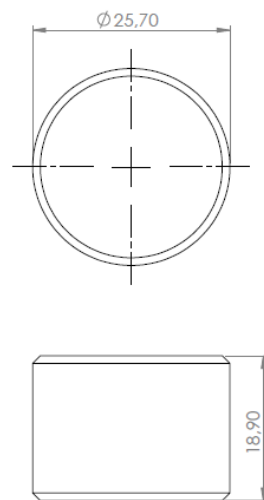
Εικόνα 69. Παρουσίαση θραύσης γύψινου μοντέλου με τη νέα ενίσχυση

5. Πειραματική διερεύνηση με πολυεστερικό μοντέλο

5.1 . Κατασκευή μοντέλου από πολυεστερική ρητίνη με ενίσχυση ανθρακονημάτων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η κατασκευή καλουπιού από αλουμίνιο μέσα στο οποίο θα εγχυθεί θερμοσκληρυνόμενο πλαστικό και πιο συγκεκριμένα πολυεστερική ρητίνη τύπου ΝΕΟΤΕΧ ΡΕ-6/ΤC. Ως ενίσχυση θα χρησιμοποιηθούν ίνες ανθρακονήματος T-300, οι οποίες θα τοποθετηθούν στην βέλτιστη γωνία όπως έχει υπολογιστεί στο κεφάλαιο 3.

Για την εύρεση του μέτρου ελαστικότητας της μήτρας E(MPa) κατασκευάζεται δοκίμιο θλίψης, οι διαστάσεις του οποίου μετρώνται σε mm και παρουσιάζονται στην εικόνα 70.



Εικόνα 70. Διαστάσεις δοκιμίου θλίψης

Για την λείανση των επιφανειών οι οποίες θα έρθουν σε επαφή με την μηχανή δοκιμών, χρησιμοποιούνται διαδοχικά σμυριδόπανα με μεγέθη P100, P200, P400, P600 και P1200. Το δοκίμιο περιτυλίγεται με τεφλόν και είναι έτοιμο προς δοκιμή. Η τελική μορφή του, πριν την θλίψη, παρουσιάζεται στις εικόνες 71α) και 72β).



Εικόνα 71. Δοκίμιο θλίψης α)χωρίς τεφλόν και β)με τεφλόν

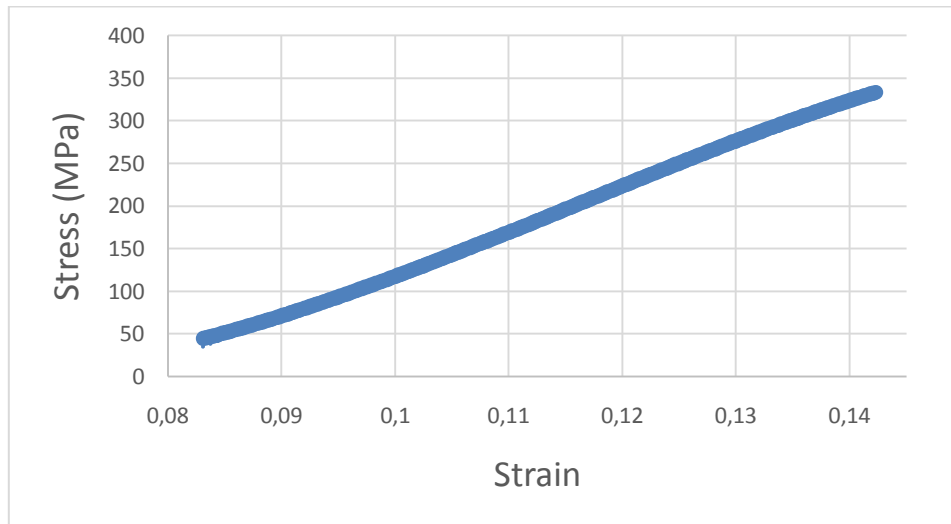
Η μηχανή είναι τύπου INSTRON 4482 και τα δεδομένα που λαμβάνονται από αυτήν είναι τα σημεία του διαγράμματος φορτίου μετατόπισης. Έτσι από νόμο του Hook

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5.1)$$

Και

$$\sigma = \frac{F(N)}{A(\text{mm}^2)} \quad (5.2)$$

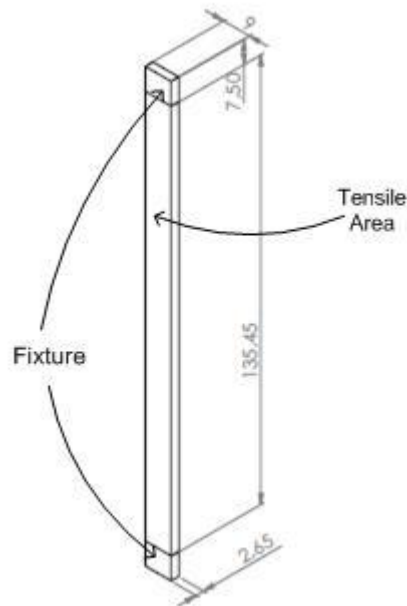
$$\varepsilon = \frac{\Delta l(\text{mm})}{l_0(\text{mm})} \quad (5.3)$$



Εικόνα 72. Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας E (MPa) από το διάγραμμα σ-ε

Στην εικόνα 72 παρατίθεται το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, όπως υπολογίσθηκε για την ελαστική περιοχή του πειράματος. Το μέτρο ελαστικότητας είναι η κλίση της παραπάνω ευθείας και βρέθηκε ίσο με $E=5,093\text{GPa}$. Το υλικό θεωρείται ισότροπο.

Στην συνέχεια γίνεται δοκιμή εφελκυσμού για την εύρεση του ορίου θραύσης. Οι διαστάσεις σε mm φαίνονται στην εικόνα 73 καθώς και η περιοχή συγκράτησης. Σε αυτό το σημείο πρέπει να παρατηρηθεί για το συγκεκριμένο δοκίμιο κακή επιπεδότητα με το πλάτος σε ορισμένα σημεία να κυμαίνεται από 8 έως 9 mm. Αυτό έχει επίδραση στον υπολογισμό της τάσης λόγω του (5.2) με το μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο να ανέρχεται στα 566N για την συγκεκριμένη διατομή. Το όριο θραύσης υπολογίζεται στο εύρος $24,55\pm 0,6\text{MPa}$.



Εικόνα 73. Δοκίμιο εφελκυσμού

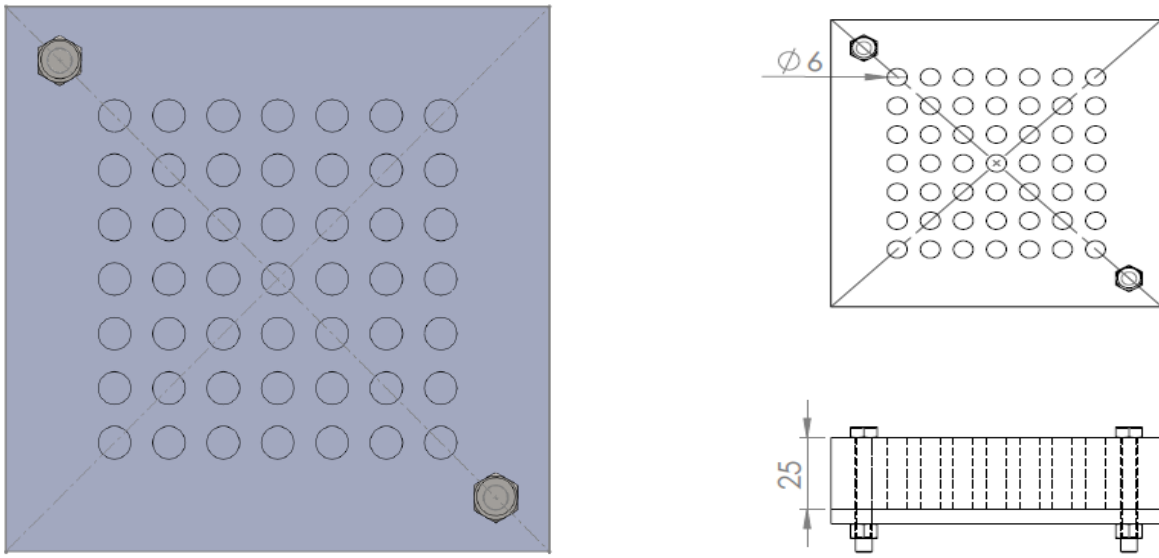
Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες του ανισότροπου υλικού, λαμβάνεται ο ίδιος πίνακας για το μητρώο δυσκαμψίας. Δεν αλλάζουν οι ιδιότητες του ανθρακονήματος, αλλάζει όμως το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας, το οποίο διαφοροποιεί στο μητρώο δυσκαμψίας. Από τα αποτελέσματα των θεωρητικών προσομοιώσεων ευρίσκεται το μέγεθος της επίδρασης αυτής στις τάσεις.

5.2. Κατασκευή καλουπιού από αλουμίνιο

Σε πρώτο στάδιο κατασκευάζεται το καλούπι για την χύτευση των πείρων. Σχεδιάζεται στο λογισμικό Solidworks και, στην συνέχεια, μέσω της επέκτασης του Solidcam, δημιουργείται ο G-κώδικας για την κατεργασία του. Το κέντρο κατεργασιών είναι τύπου OKUMA CNC MX-45VAE. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και με το κυρίως καλούπι.

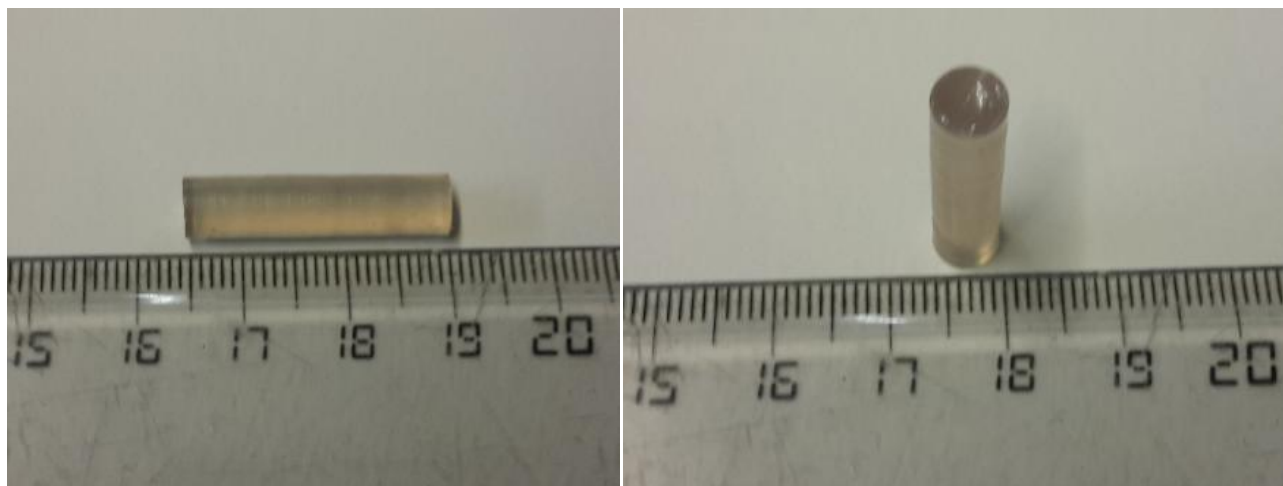
Το τρισδιάστατο μοντέλο που προκύπτει παρουσιάζεται στην εικόνα 74α). Αποτελείται από το κυρίως μέρος στο οποίο εγχύεται ρητίνη και από μία υποστηρικτική κάτω πλάκα.

Μεταξύ τους συνδέονται με δύο κοχλίες M5 και οι διαστάσεις σε mm παρουσιάζονται στην εικόνα 74β).

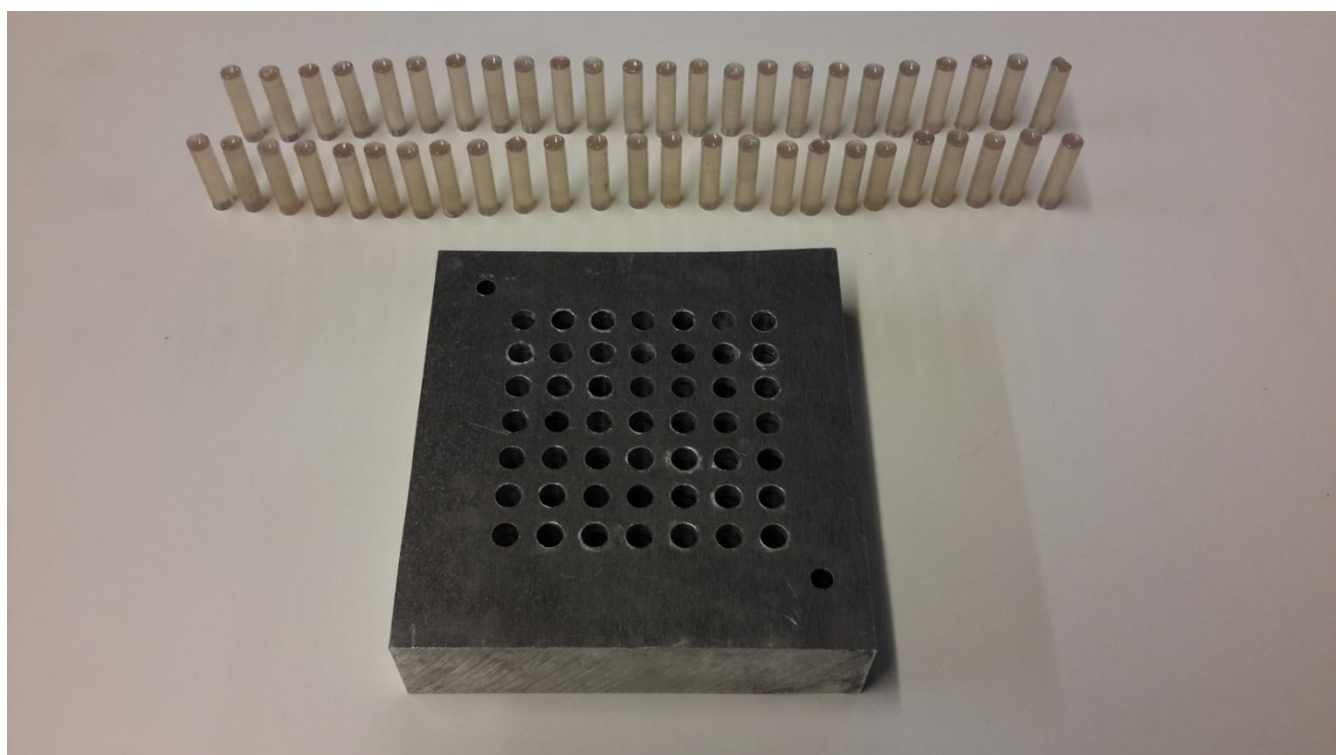


Εικόνα 74. Καλούπι πείρων α)τριδιάστατο μοντέλο Solidworks (αριστερά) και β)διαστάσεις μοντέλου (δεξιά)

Οι πείροι από πολυεστερική ρητίνη έχουν αποδεκτή επιφάνεια, οι διαστάσεις των οποίων φαίνονται στις εικόνες 75α) και 75β). Αυτοί οι πείροι χρησιμοποιούνται για την περιέλιξη της ενίσχυσης αλλά και την στήριξη του πλαστικού κυλινδρικού δοκιμίου κατά την κοπή των οδόντων στην CNC. Το καλούπι που προέκυψε μαζί με τους πείρους παρουσιάζεται στην εικόνα 76.

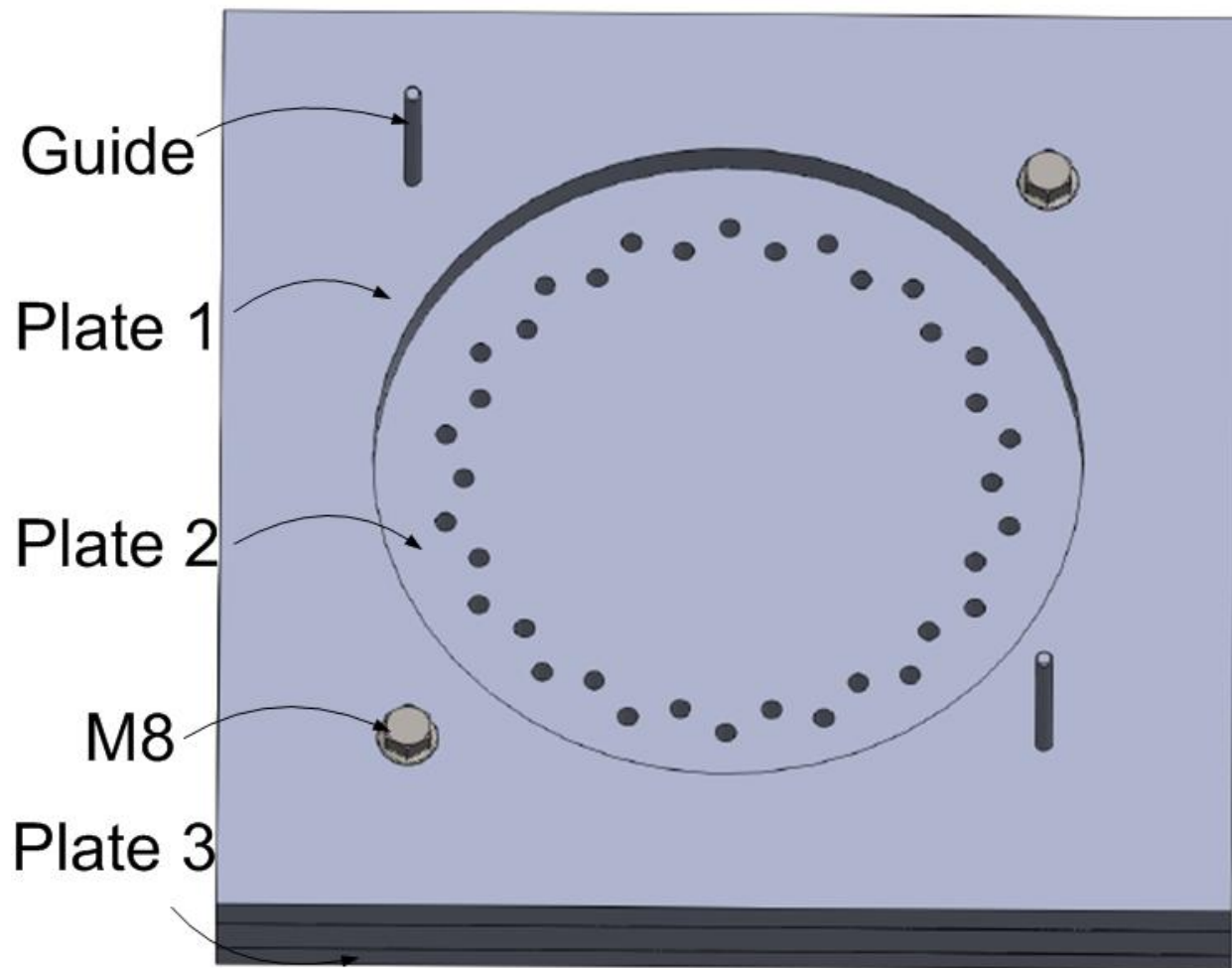


Εικόνα 75. Διαστάσεις πείρων α) μήκος και β)διάμετρος



Εικόνα 76. Καλούπι πείρων και πλαστικοί πείροι

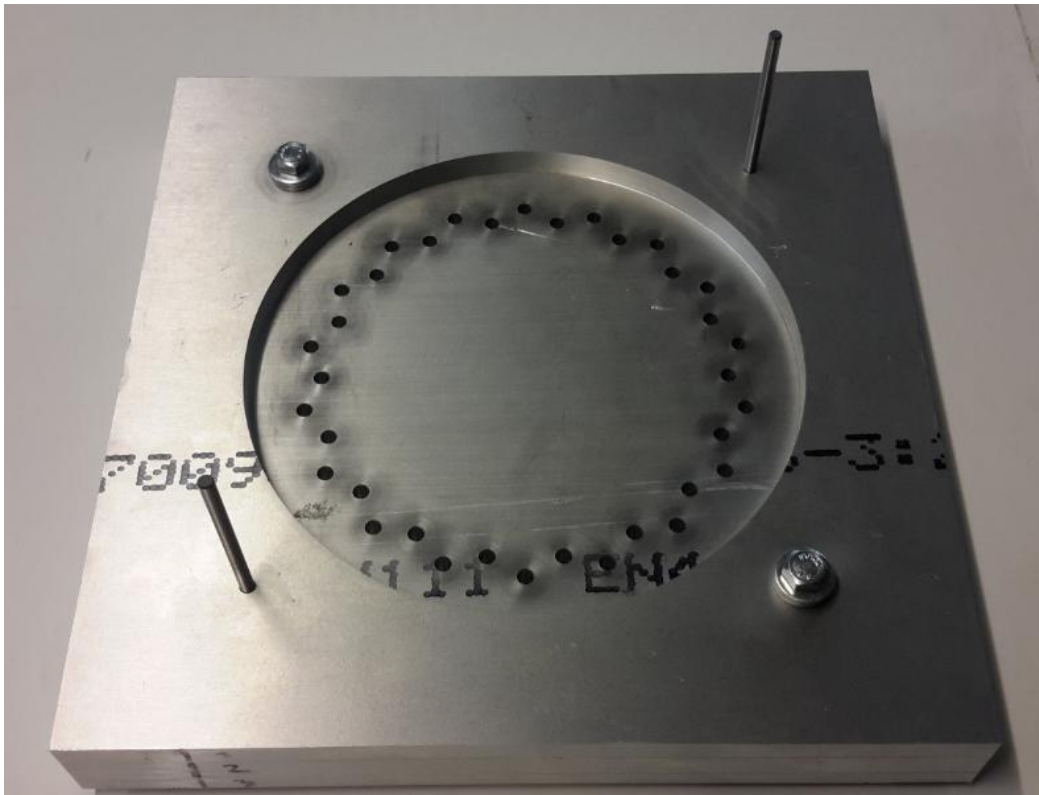
Στην συνέχεια κατασκευάζεται καλούπι για τους οδοντωτούς τροχούς. Σε αυτό πρόκειται να τοποθετηθούν οι πείροι στις αντίστοιχες τρύπες, να γίνει η πλέξη και κατόπιν θα εγχυθεί η πολυεστερική ρητίνη. Το τρισδιάστατο σχέδιο του καλουπιού παρουσιάζεται στην εικόνα 77 και αποτελείται από τρεις πλάκες. Στο εσωτερικό της πλάκας 1 γίνεται η έγχυση, ενώ οι πείροι εδράζονται στην πλάκα 2. Το αλουμινένιο καλούπι μετά, από την κατεργασία, παρουσιάζεται στην εικόνα 78 και οι διαστάσεις του στην εικόνα 79.



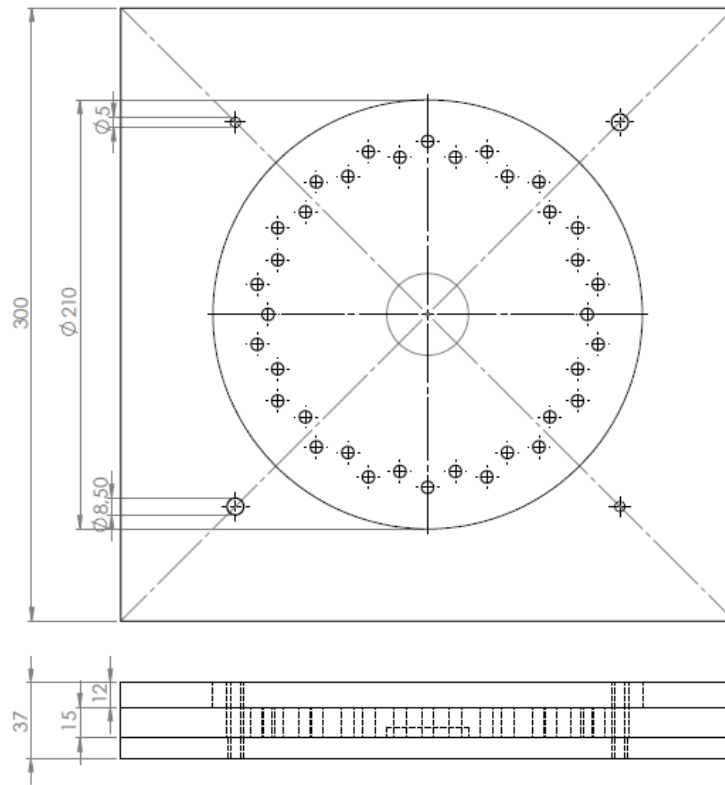
Εικόνα 77. Τρισδιάστατο μοντέλο του καλουπιού

Για την δημιουργία του πλαστικού οδοντωτού τροχού χωρίς ενίσχυση γίνεται η έγχυση στην πλάκα 1, αφού έχουν τοποθετηθεί οι πείροι στην πλάκα 2, χωρίς να έχουν περιελιχθεί ίνες ανθρακονήματος. Στην συνέχεια, τοποθετείται σε επιφάνεια με καλή στάθμιση ώστε να επιτευχθεί παραλληλία της ελεύθερης επιφάνειας της υγρής ρητίνης με τη βάση λόγω βαρύτητας, όπως η τράπεζα μίας φρέζας-εικόνα 80. Έπειτα, αφαιρείται

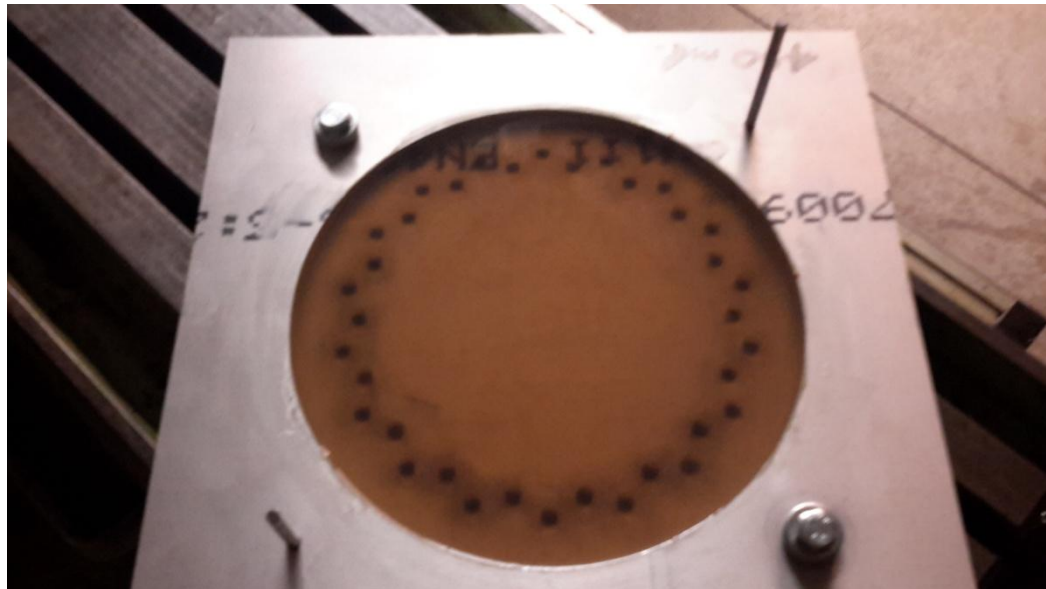
η πλάκα 1 και κατεργάζεται ο πλαστικός κύλινδρος στην τελική μορφή οδοντωτού τροχού με module 10mm, 18 οδόντες και πιο συγκεκριμένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που έχουν υπολογιστεί στο κεφάλαιο 3 για αυτούς. Ο οδοντωτός τροχός χωρίς ενίσχυση παρουσιάζεται στην εικόνα 81 κατά την διαδικασία της κατεργασίας. Στον ενισχυμένο οδοντωτό τροχό με ενίσχυση, πριν την έγχυση, τοποθετείται ο οπλισμός με προένταση, η οποία εφαρμόζεται διά χειρός. Σκοπός της προέντασης είναι όχι η άσκηση φορτίου στις ίνες αλλά η επίτευξη τεντωμένων ινών χωρίς ρυτιδώσεις που θα προκαλούσαν την μειωμένη αντοχή που περιγράφηκε στην παράγραφο (2.2). Ο ενισχυμένος οδοντωτός τροχός παρουσιάζεται στην εικόνα 82, καθώς και το ζεύγος ενισχυμένου με μη-ενισχυμένο στην εικόνα 83.



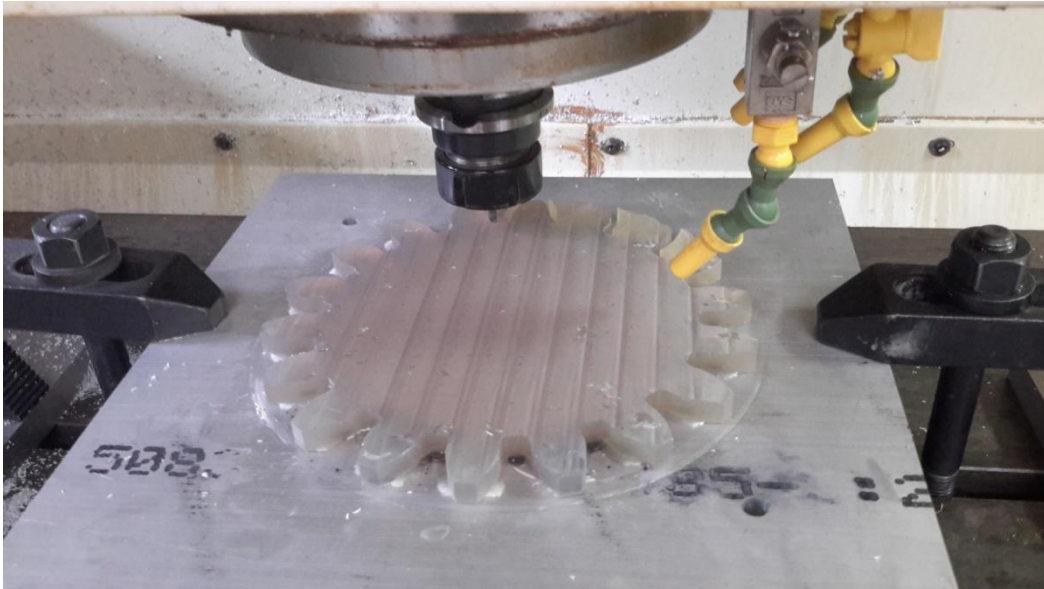
Εικόνα 78. Καλούπι από αλουμίνιο



Εικόνα 79. Μηχανολογικό σχέδιο καλουπιού και διαστάσεις



Εικόνα 80. Καλούπι για μη-ενισχυμένο οδοντωτό τροχό



Εικόνα 81. Μη-ενισχυμένος πλαστικός οδοντωτός τροχός κατά την κατεργασία του



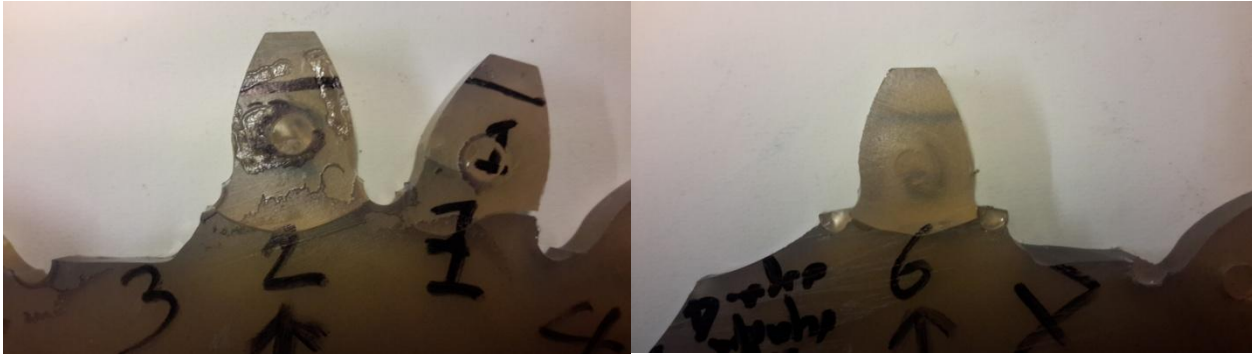
Εικόνα 82. Ενισχυμένος πλαστικός οδοντωτός τροχός



Εικόνα 83. Ζεύγος ενισχυμένου και μη-ενισχυμένου πλαστικού οδοντωτού τροχού

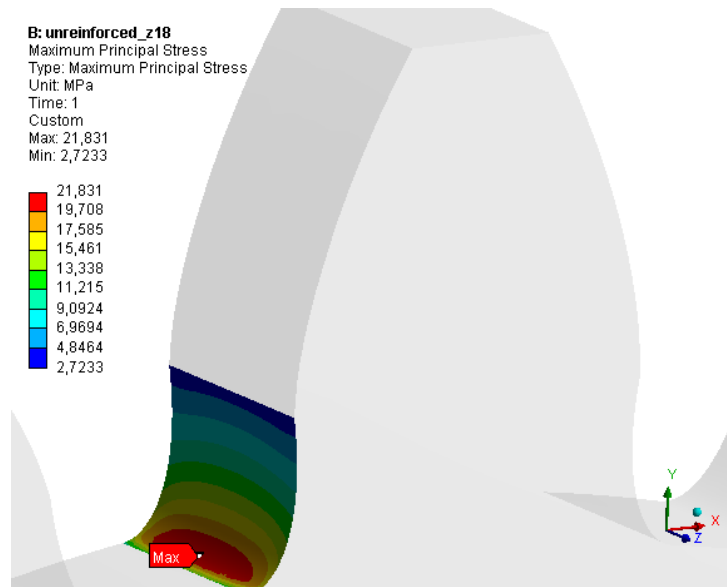
5.3. Δοκιμή θραύσης και σύγκριση με τα θεωρητικά αποτελέσματα

Σε αυτό σημείο γίνεται η δοκιμή θραύσης των οδόντων ώστε να βρεθεί η διαφορά στο φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο ενισχυμένος έναντι του μη-ενισχυμένου οδόντα. Η δοκιμή γίνεται στην μηχανή INSTRON που χρησιμοποιήθηκε και στο 5.1. Η θραύση στους οδόντες 6 και 2 είναι αποδεκτή αφού η ρωγμή διαδίδεται στις γραμμές ίσης και μέγιστης διατμητικής τάσης, όπως φαίνεται στις εικόνες 84α) και β).



Εικόνα 84. Θραύση οδόντων 2 και 6 χωρίς ενίσχυση με αποδεκτή τροχιά θραύσης

Το φορτίο στο οποίο σημειώνουν θραύση οι οδόντες είναι τα 520N και 480N αντίστοιχα. Η στήριξη γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως στην εικόνα 68. Το φορτίο εφαρμόζεται με μεταλλικό πείρο στο HPSTC ώστε να προσομοιωθεί φυσικότερα η περιοχή καταπόνησης. Γίνεται προσομοίωση για τον αντίστοιχο οδοντωτό τροχό και το φορτίο που ασκείται είναι 520N. Η μέγιστη τάση στην επικίνδυνη διατομή ποδός ανέρχεται στα 21,83 MPa (εικόνα 85) και, αφού το όριο διαρροής έχει υπολογιστεί στα $24,55 \pm 0,6$ MPa, η απόκλιση κυμαίνεται από 8 έως 13%. Ένας λόγος είναι ότι οφείλεται στην διεύθυνση άσκησης του φορτίου. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια αυτής πρέπει να κατασκευαστεί μηχανισμός στήριξης που θα προσανατολίζει τον οδοντωτό τροχό καλύτερα. Άλλος σημαντικός λόγος είναι οι παραμένουσες τάσεις λόγω της συστολής του πλαστικού κατά την στερεοποίηση του.



Εικόνα 85. Μέγιστη τάση για φορτίο 520N

Στον οδοντωτό τροχό με ενίσχυση λαμβάνονται δύο είδη θραύσεων. Στο ένα είδος καταρρέει η μήτρα χωρίς να αστοχήσει ο οπλισμός. Αυτό δεν αποτελεί έγκυρη μέτρηση διότι ο οπλισμός δεν ενεργοποιείται λόγω της κακής ενσωμάτωσής του με την ρητίνη. Αυτού του είδους η θραύση φαίνεται στους οδόντες Νο 10 και Νο 3 της εικόνας 86.



Εικόνα 86. Θραύση για τους οδόντες Νο10 και Νο3 με κατάρρευση μόνο της μήτρας

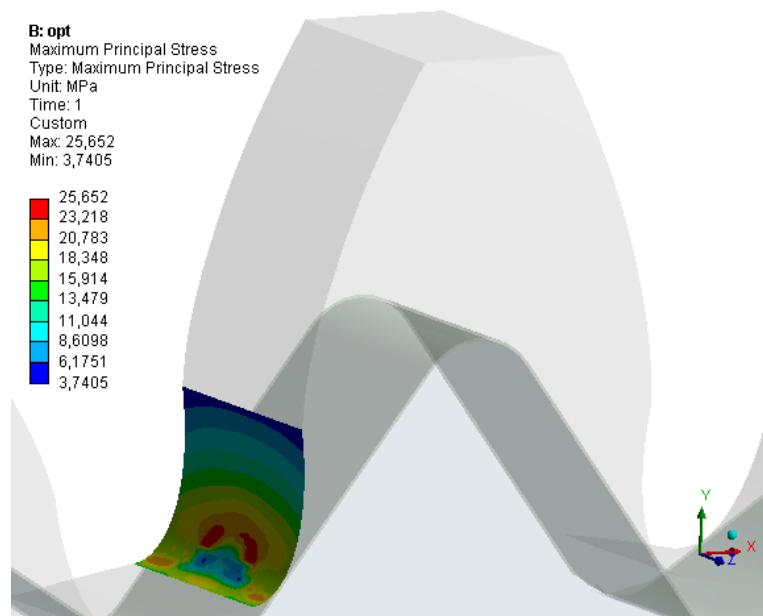
Για να θεωρηθεί έγκυρη η μέτρηση πρέπει να καταρρεύσει και ο οπλισμός, το οποίο το παρατηρούμε στο δεύτερο είδος θραύσης. Ο οδόντας αποκολλάται πλήρως από τον οδοντωτό τροχό και καταρρέουν μήτρα και ενίσχυση. Αυτού του είδους η θραύση

παρουσιάζεται στους οδόντες Νο 8 και Νο 4 της εικόνας 87. Σε αυτούς τους οδόντες σημειώνονται ρωγμές από τα 850N, ενώ η πλήρης αποκόλληση γίνεται στα 1000N. Οι πρώτες ρωγμές που σημειώνονται διακρίνονται τόσο οπτικά όσο και ακουστικά.

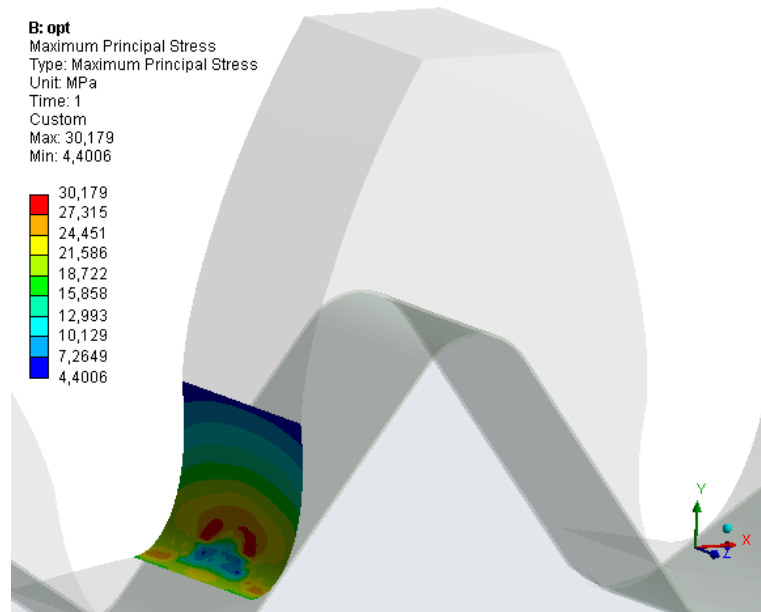


Εικόνα 87. Θραύση για τους οδόντες Νο 8 και Νο 4 με πλήρη κατάρρευση της μήτρας και της ενίσχυσης

Στην συνέχεια γίνονται δύο προσομοιώσεις για 850N (εικόνα 88) και για 1000N (εικόνα 89) ώστε να ευρεθεί ένα εύρος αναπτυσσόμενων τάσεων. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μεταξύ 25,7 και 30,2 MPa. Η απόκλιση από το όριο διαρροής μπορεί να οφείλεται στους λόγους που προαναφέρθηκαν.



Εικόνα 88. Μέγιστη τάση για φορτίο 850N



Εικόνα 89. Μέγιστη τάση για φορτίο 1000N

6.Σχολιασμός αποτελεσμάτων και μελλοντική ανάπτυξη

Τα θεωρητικά αποτελέσματα ταυτίζονται με αυτά των μηχανικών δοκιμών με αποδεκτή απόκλιση. Αυτή η απόκλιση οφείλεται τόσο στον τρόπο διεξαγωγής του πειράματος όσο και στο μικρό δείγμα δοκιμίων προς θραύση (πρώτον οδόντες και δεύτερον δοκίμια για εύρεση ορίου διαρροής). Το εκάστοτε πλαστικό που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι της ίδιας ποιότητας για όλα τα πειράματα και αν πρόκειται για πολυεστερική ρητίνη, η σκλήρυνση της να έχει γίνει υπό τις ίδιες συνθήκες. Η πλέξη των ινών ανθρακονήματος θα πρέπει να γίνει με μηχανισμό που θα ελέγχει την προένταση τους με σημαντικό παράγοντα να μην τραυματίζονται κατά αυτήν την διαδικασία, καθώς είναι επιρρεπή σε διάτμηση.

Με αυτή την περιοχική ενίσχυση ένας πλαστικός οδοντωτός τροχός, ανάλογα με το πάχος του οπλισμού του, μπορεί να αυξήσει την στατική αντοχή του ακόμα σε σημείο να φτάσει την αντοχή ενός μεταλλικού. Η περιοχική ενίσχυση μπορεί να έχει τη μορφή που μελετήθηκε, χωρίς να αποκλείει την βελτίωση των οδοντωτών τροχών με προσθήκη επιπροσθέτων οπλισμών, όπως για παράδειγμα ενίσχυση στην περιοχή του πολύσφηνου. Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί με ευθεία οδόντωση οι οποίοι κατασκευάστηκαν, δίνουν έναυσμα για την μελέτη και κατασκευή περαιτέρω οδοντωτών τροχών, όπως για παράδειγμα ελικοειδών μετωπικών τροχών με ευθεία οδόντωση για επίτευξη μεγαλύτερου βαθμού επικάλυψης.

7.Βιβλιογραφία

- [1] Θ.Ν. Κωστόπουλος, «Οδοντώσεις και Μειωτήρες Στροφών», εκδόσεις Συμμεών, Αθήνα 1991
- [2] Διπλωματική εργασία, Ιωάννης Κίτσος, Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών, Αθήνα 2014
- [3] Lewis W. "Investigation of Strength of Gear Teeth", *Proceedings of the Engineering Club No. 1*, Philadelphia, 1882
- [4] Niemann G., *Maschinelemente*, Band 2, Springer-Verlag, New York, 1992
- [5] Διπλωματική εργασία, Ιωάννης Βασιλείου, Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών, Αθήνα 2012
- [6] Δ.Μανωλάκος, εκπαιδευτικό υλικό μαθήματος «Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών»
- [7] Callister, *Material Science and Engineering*
- [8] Adams D. (1993), Effects of layer waviness on the compression strength of thermoplastic composite laminates, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **12**, 415-429.
- [9] Adams D. and Hyer M. W. (1994), Effects of layer waviness on the compression response of laminates, *Compression Response of Composite Structures*, ASTM, STP 1185, 65-77
- [10]. Adams D and Hyer M. (1996), Analysis of layer waviness in flat compression-loaded thermoplastic composite laminates, *Journal of Engineering Materials and Technology*, **118**, 63-70
- [11]. Spitas V., Spitas C. and Michelis P. (2013), Modeling of the elastic damping response of a carbon nanotube-polymer nanocomposite in the stress-strain domain using an elastic energy release approach based on stick-slip, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, **20**(10), 791-800
- [12] Solidworks Educational Edition, 2012-2013, Solidworks user manual, Dassault Systèmes SolidWorks Corp.
- [13] Ansys 2014, Inc, Ansys Workbench user's guide
- [14] Mandell J.F., Samborsky D.D. and Wang L., "Effects of Fiber Waviness on Composites for Wind Turbine Blades, Sampe Symposium, 2003, Montana