



Προσομοίωση και χαρακτηρισμός
μηχανισμών φθοράς σε σύστημα
εμβόλου-χιτωνίου αντλίας
καυσίμου diesel ηλεκτρομηχανής

Τομέας: Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου
Ελέγχου

Επιβλέπων: Βασίλειος Σπιτάς, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2021

--- κενή σελίδα ---

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Νικηφόρου Ζαμπία

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια ολοκλήρωσης των σπουδών μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Β. Σπιτά για την καθοδήγηση κατά τη διάρκεια της εργασίας μου. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την εταιρεία Karathanos Bros και συγκεκριμένα τον κύριο Ν. Παπαδημητρίου για την βοήθεια του. Επιπλέον, ευχαριστώ τον κύριο Ν. Ρόγκα, υποψήφιο Διδάκτορα για τη συνεργασία και τη βοήθεια του στα πλαίσια της εργασίας μου. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου που με στήριξε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Σύνοψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαπραγματεύεται τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην αντλία υψηλής πίεσης του καυσίμου συσχετίζοντας τα με πιθανά αίτια φθοράς που εμφανίζονται στα συγκεκριμένα στοιχεία. Αφορμή αποτέλεσε η παρατήρηση εκτεταμένων φθορών σε ζεύγη εμβόλων χιτωνίων σε αντλίες υψηλής πίεσης ναυτικών μηχανών από την εταιρεία Karathanos Bros. Ο στόχος που επιδιώκεται είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης θερμοκρασιακών μεταβολών του καυσίμου στο μέγεθος του διακένου ανάμεσα στις επιφάνειες των στοιχείων, μεταξύ των οποίων υπάρχει σχετική κίνηση, και η μελέτη των ταχυτήτων και των πιέσεων που αναπτύσσονται στο ρευστό. Τα δεδομένα που εξάγονται από το ρευστοδυναμικό μοντέλο συμβάλλουν στην κατανόηση της φθοράς από σκληρά σωματίδια. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο για το θερμικό όσο και για το ρευστοδυναμικό μοντέλο συσχετίζονται με περιπτώσεις φθοράς που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία. Στην πρώτη περίπτωση, αναδείχθηκε η σημασία του ρυθμού θερμοκρασιακής μεταβολής και ο ρόλος των στηρίξεων του χιτωνίου στη μείωση του διακένου. Στην περίπτωση του ρευστοδυναμικού μοντέλου επιτεύχθηκε ο ακριβής υπολογισμός των πιέσεων και των ταχυτήτων που αναπτύσσονται καθώς και η περιγραφή των δυναμικών φαινομένων του ρευστού. Η φθορά από σκληρά σωματίδια ερμηνεύτηκε με βάση την ταχύτητα που αναπτύσσεται στο διάκενο και την υπερίσχυση της ροής Hagen-Poiseuille ενώ υπολογίζεται και η φθορά με τη χρήση του νόμου του Archard στην περίπτωση της θερμοκρασιακής μεταβολής με εξαιρετικά υψηλό ρυθμό. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS.

Abstract

The present diploma thesis investigates the wear mechanisms of a high pressure fuel pump which were observed in a plunger-barrel assembly of a pump owned by Karathanos Bros SA. The goal of the thesis is to assess the effect of the fuel temperature changes on the decrease of the film thickness between the two components and also to investigate the characteristics of the flow since very high pressures are developed during the operation of the pump (in the order of 1000 bar). The analysis is conducted using the Finite Element and Finite Volume Method for the heat transfer, flow dynamics, and contact mechanics, using the commercial software ANSYS. Especially for the contact mechanics problem, the Archard's equations was used. The results obtained aid the understanding of the wear mechanisms due to hard particles, large pressures, rapid temperature changes of the fuel and the dynamic response of the cam-follower mechanism of the pump.

Πίνακας περιεχομένων

1.	Εισαγωγή	8
1.1	Αντλία υψηλής πίεσης καυσίμου	8
1.1.1	Σύστημα προσαγωγής και έγχυσης καυσίμου κινητήρων ντίζελ	8
1.1.2	Αντλία τύπου Bosch	10
1.1.3	Ιδιότητες των καυσίμων	10
1.1.4	Φθορές στην αντλία καυσίμου	13
1.2	Σκοπός εργασίας.....	16
1.3	Οριοθέτηση.....	16
2.	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	17
3.	Αποτελέσματα μετρήσεων	22
4.	Μεθοδολογία.....	27
4.1	Καθορισμός του προβλήματος.....	27
4.2	Εξισώσεις υπολογισμού της φθοράς	30
5.	Δομική Μελέτη	32
5.1	Γεωμετρία και μηχανικές ιδιότητες.....	32
5.2	Ορισμός του μοντέλου	32
5.3	Αποτελέσματα	34
6.	Θερμική μελέτη	44
6.1	Γεωμετρία και θερμικές ιδιότητες.....	44
6.2	Ορισμός του μοντέλου	44
6.3	Αποτελέσματα	47
7.	Ρευστοδυναμική Μελέτη	57
7.1	Γεωμετρία	57
7.2	Πλέγμα και χρονικό βήμα.....	58
7.3	Ορισμός του μοντέλου	59
7.4	Αποτελέσματα	61
8.	Συμπεράσματα και προτάσεις.....	70
9.	Κατάλογος Πινάκων.....	71
10.	Κατάλογος Διαγραμμάτων	72
11.	Κατάλογος Εικόνων	73
12.	Κατάλογος Αναφορών	76

1. Εισαγωγή

1.1 Αντλία υψηλής πίεσης καυσίμου

Οι αντλίες υψηλής πίεσης καυσίμου χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία κινητήρων ντίζελ με την απαραίτητη ποσότητα καυσίμου. Αποτελούν σημαντικό τμήμα της τροφοδοσίας και εξασφαλίζουν την έγχυση του καυσίμου στην κατάλληλη πίεση και το σωστό χρονισμό ώστε να επιτευχθούν οι απαραίτητες συνθήκες για την καύση. Αποτελούνται από παλινδρομικά τμήματα οι επιφάνειες των οποίων διαχωρίζονται με την παρουσία καυσίμου. Το καύσιμο λειτουργεί ως λιπαντικό, διαχωρίζει τις επιφάνειες και τα χαρακτηριστικά του επηρεάζουν τη λειτουργία της αντλίας. Η σχετική κίνηση μεταξύ των τμημάτων έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση φθορών.

1.1.1 Σύστημα προσαγωγής και έγχυσης καυσίμου κινητήρων ντίζελ

Ένα τυπικό σύστημα προσαγωγής καυσίμου κινητήρα ντίζελ αποτελείται από την αντλία καυσίμου, τον σωλήνα καταθλίψεως και τον εγχυτήρα. Η λειτουργία του κινητήρα ντίζελ βασίζεται στην μετατροπή θερμικής ενέργειας σε μηχανική ισχύ. Η μεταβολή της ενεργειακής κατάστασης του εργαζόμενου μέσου πραγματοποιείται με την αξιοποίηση της χημικής ενέργειας που απελευθερώνεται μέσω της διεργασίας της καύσης.

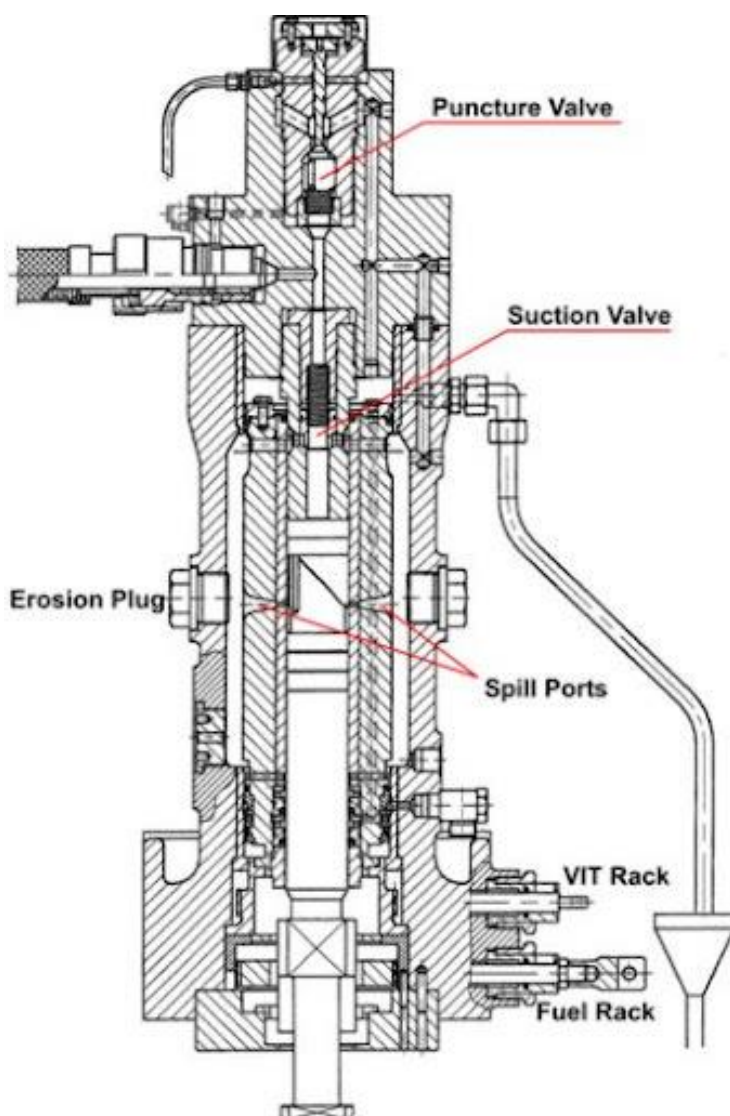
Στους κινητήρες ντίζελ η ρύθμιση του φορτίου βασίζεται στην μεταβολή της εγχεόμενης ποσότητας του καυσίμου (ποιοτική ρύθμιση)[1]. Το καύσιμο εγχέεται σε υγρή κατάσταση με μηχανικό τρόπο μέσω του εγχυτήρα στο θάλαμο καύσης όπου αναμειγνύεται με το οξυγόνο και αυτοαναφλέγεται. Το μείγμα καυσίμου-αέρα που δημιουργείται είναι ετερογενές και απαιτείται περίσσεια αέρα για επίτευξη τέλει καύσης. Το τμήμα του συστήματος προσαγωγής που είναι υπεύθυνο για την έγχυση του υγρού καυσίμου στον θάλαμο καύσης είναι ο εγχυτήρας.

Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της καύσης είναι η ταχύτητα της ατμοποίησης και η ανάμειξη του καυσίμου με τον αέρα του κυλίνδρου. Ο σχεδιασμός των οπών και τα χαρακτηριστικά του ελατηρίου της βελόνας του εγχυτήρα επιλέγονται με κριτήριο την έγχυση σε υψηλή πίεση και το διασκορπισμό σε σταγονίδια (εκκνέφωση) του καυσίμου ώστε να επιτυγχάνονται οι βέλτιστες συνθήκες καύσης.

Οι αντλίες καυσίμου συνήθως είναι παλινδρομικές αντλίες θετικής εκτοπίσεως. Ρόλος της αντλίας είναι η διαμόρφωση της απαραίτητης πίεσης και η παροχή κατάλληλης ποσότητας του καυσίμου στον εγχυτήρα. Τον βασικό κορμό της αντλίας απαρτίζουν το χιτώνιο και το έμβολο. Το χιτώνιο είναι το σταθερό τμήμα και το έμβολο παλινδρομεί στο εσωτερικό του χιτωνίου κινούμενο από ένα έκκεντρο. Απαραίτητο στοιχείο για να διασφαλίζεται η συνεχής επαφή και μετάδοση της κίνησης μεταξύ των στοιχείων είναι το ελατήριο. Η κίνηση μεταδίδεται από το έκκεντρο στο κάτω μέρος του εμβόλου μέσω ακόλουθου (roller).

Οι τρεις βασικοί τύποι αντλιών είναι:

- Ατομικές αντλίες τύπου Bosch (Εικόνα 1). Σε κάθε κύλινδρο αντιστοιχεί μια αντλία η οποία τροφοδοτεί τον εγχυτήρα. Το καύσιμο οδηγείται στον εγχυτήρα μέσω σωλήνα καταθλίψεως.
- Ενιαίο Συγκρότημα Αντλίας-Εγχυτήρα. Το σύστημα της αντλίας και του εγχυτήρα είναι ενιαίο και τοποθετημένο στην κεφαλή του κάθε κυλίνδρου.
- Αντλίες διανομής τύπου Bosch. Όλοι οι κύλινδροι της μηχανής τροφοδοτούνται από μία κοινή αντλία. Ο διανομέας επιφορτίζεται με την παροχή στο σωστό χρόνο του κάθε κυλίνδρου.



Εικόνα 1: Αντλία υψηλής πίεσης καυσίμου τύπου Bosch. Πηγή: Man B&W Diesel.

1.1.2 Αντλία τύπου Bosch

Η λειτουργία της αντλίας βασίζεται στην παλινδρομική κίνηση του εμβόλου. Όταν το έμβολο βρίσκεται στην χαμηλότερη θέση, η θυρίδα εισαγωγής είναι ανοιχτή και το καύσιμο εισέρχεται από αυτή. Καθώς το έμβολο ανυψώνεται καλύπτονται οι θυρίδες και συμπιέζεται το καύσιμο. Η αύξηση της πίεσης του ρευστού έχει ως επακόλουθο το άνοιγμα της βαλβίδας καταθλίψεως. Το καύσιμο, οδηγείται μέσω του σωλήνα καταθλίψεως προς τον εγχυτήρα. Με την αύξηση της πίεσης η δύναμη του ελατηρίου της βαλβίδας υπερνικάται και έτσι η βαλβίδα ανυψώνεται με αποτέλεσμα τον ψεκασμό του καυσίμου στον κύλινδρο. Η ποσότητα του καυσίμου που παρέχεται καθορίζεται από τη θέση του ελικοειδή άυλακα και ρυθμίζεται μέσω της περιστροφής του εμβόλου με τη βοήθεια ρυθμιστικού οδοντωτού κανόνα. Η έγχυση τερματίζεται με την αποκάλυψη της θυρίδας υπερχειλίσεως που συνεπάγεται την πτώση της πίεσης του ρευστού. Η διαδρομή που διανύει το έμβολο μέχρι την αποκάλυψη της θυρίδας υπερχειλίσεως ονομάζεται ενεργός διαδρομή και αντιστοιχεί σε ένα μέρος μόνο της συνολικής διαδρομής του εμβόλου[2].

Η απαίτηση της σχετικής κίνησης μεταξύ των στοιχείων με την ταυτόχρονη παραγωγή υψηλής πίεσης επιτυγχάνεται με την ύπαρξη κατάλληλου ακτινικού διάκενου και την εξασφάλιση αυστηρών ανοχών μεταξύ των κυλινδρικών επιφανειών. Το διάκενο ανάλογα με το μέγεθος της αντλίας κυμαίνεται σε 4-20 μm. Μεγαλύτερο διάκενο από το κατασκευαστικά προβλεπόμενο θα έχει ως αποτέλεσμα την διαρροή καυσίμου και την δυσκολία παραγωγής της απαραίτητης πίεσης για το άνοιγμα της βαλβίδας που μπορεί να οδηγήσει στην καθυστέρηση ή αποτυχία της έγχυσης. Σε περίπτωση μικρότερου διάκενου αναπτύσσεται ο κίνδυνος επαφής και φθοράς των επιφανειών. Οι επιφάνειες διαχωρίζονται με την παρουσία καυσίμου που δημιουργεί ένα λιπαντικό φιλμ. Οι ιδιότητες του καυσίμου σχετίζονται με την ικανότητα ή την αδυναμία να παραμένουν οι επιφάνειες διαχωρισμένες και να διατηρείται το απαραίτητο, για τη σωστή λειτουργία του μηχανισμού, διάκενο.

1.1.3 Ιδιότητες των καυσίμων

Τα είδη των υγρών καυσίμων των ναυτικών πετρελαιοκινητήρων είναι κυρίως προϊόντα της αποστάξεως του αργού πετρελαίου και χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Το ναυτιλιακό Αεριέλαιο (Marine Gas Oil) αποτελεί απόσταγμα του φυσικού πετρελαίου (distillate) ενώ το πετρέλαιο μαζούτ προκύπτει ως υπόλειμμα της αποστάξεως (residual fuel). Το πετρέλαιο μαζούτ είναι χαμηλότερης ποιότητας και έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε θείο. Συνήθης μέθοδος είναι η ανάμειξη των δύο κατηγοριών για να επιτευχθούν ορισμένες προδιαγραφές.

Το μέχρι πρότινος καθιερωμένο κριτήριο για την σύνθεση ενός καυσίμου σχετιζόταν με την επίτευξη ιξώδους και άλλων χαρακτηριστικών με βάση τα οποία τα καύσιμα κατηγοριοποιούνταν στο σύστημα του ISO 8217. Οι κατηγορίες του ISO έχουν δημιουργηθεί με δεδομένο το ρυθμιστικό πλαίσιο που ορίζει το IMO (International Maritime Organization) και όλα τα καύσιμα πρέπει να συμμορφώνονται σε αυτό το πλαίσιο.

Οι νέοι κανονισμοί για τις εκπομπές από τον Διεθνή Οργανισμό Ναυσιπλοΐας (ΙΜΟ) μετατόπισαν το κριτήριο που αφορούσε αυτού του είδους τα χαρακτηριστικά στην κατεύθυνση της ικανοποίησης των ορίων περιεκτικότητας σε θείο που έχουν τεθεί. Ως επακόλουθο αναδιατάσσονται οι διαδικασίες σύνθεσης των καυσίμων δημιουργώντας απαιτήσεις για πιο εκτεταμένη έρευνα σε πεδία που αφορούν την συμβατότητα και τη σταθερότητα των καυσίμων που προκύπτουν, τις ιδιότητες και την ποικιλία στην οποία τα παραπάνω εμφανίζονται πλέον μέσα σε ένα μεγαλύτερο εύρος χρησιμοποιούμενων καυσίμων .

Ανάμεσα στις κυλινδρικές επιφάνειες του εμβόλου και του χιτωνίου παρεμβάλλεται το καύσιμο ως «τρίτο σώμα». Το καύσιμο διαχωρίζει και προστατεύει τις επιφάνειες σχηματίζοντας φιλμ λιπαντικού πολύ μικρού πάχους. Ορισμένα χαρακτηριστικά του καυσίμου επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα του στις παραπάνω λειτουργίες. Αναμενόμενες τιμές των βασικών χαρακτηριστικών του καυσίμου φαίνονται στον Πίνακας 1 και αφορούν τις δύο κατηγορίες των αποσταγμάτων και των υπολειμματικών καυσίμων.

Η πυκνότητα (ρ) του καυσίμου επηρεάζει τη θερμογόνο δύναμη και την ποιότητα της καύσης. Όπως φαίνεται στον Πίνακας 1 η πυκνότητα του μαζούτ είναι υψηλότερη από αυτή του ναυτιλιακού αεριέλαιου.

Το δυναμικό ιξώδες (η) είναι η αναλογία μεταξύ της εφαρμοζόμενης διατμητικής τάσης και της ταχύτητας διάτμησης (dv/dx) όπως φαίνεται στη σχέση:

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \left(\frac{dv}{dx} \right).$$

Το κινηματικό ιξώδες (ν) επικρατεί στον χαρακτηρισμό των καυσίμων και δίνεται:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} .$$

Πίνακας 1: Ιδιότητες καυσίμου

	Μονάδες Μέτρησης	Marine Gas Oil (DMA, DMZ, DMB)	Heavy Fuel Oil (RMA10, RMB30, RMD80)
Πυκνότητα	kg/m ³	890-900	920-975
Κινηματικό Ιξώδες¹	cSt ²	2-11	10-80
Περιεκτικότητα σε θείο	%m/m	1.5-2 (max)	1.0-3.5
Περιεκτικότητα σε αργίλιο και πυρίτιο	ppm m/m	-	25-40

Πηγή: [3]

Το ιξώδες σχετίζεται με την αντίσταση που παρουσιάζει ένα ρευστό κατά τη ροή του ως αποτέλεσμα της εσωτερικής τριβής των μορίων του. Η τιμή του κινηματικού ιξώδους των καυσίμων που προέρχονται από αποστάγματα κυμαίνεται πολύ χαμηλότερα από αυτή των υπολειμματικών καυσίμων όπως φαίνεται στον Πίνακας 1.

Εξαιτίας του υψηλού ιξώδους του HFO και προβλημάτων που μπορεί να προκύπτουν στην εκκνέφωση (atomization) κατά την έγχυση σε πολλές περιπτώσεις το καύσιμο θερμαίνεται για να επιτευχθεί το βέλτιστο ιξώδες. Αυτό οφείλεται στη σχέση μεταξύ ιξώδους και θερμοκρασίας, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο μειώνεται το ιξώδες του καυσίμου. Αντίθετα, στην περίπτωση του ναυτιλιακού ντίζελ που το ιξώδες κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα η προθέρμανση του καυσίμου σε υψηλότερες θερμοκρασίες από 40°C θα είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του ιξώδους σε μη αποδεκτά επίπεδα. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται μεταβολή της θερμοκρασίας στην είσοδο της αντλίας όταν υπάρχει εναλλαγή μεταξύ διαφορετικών ειδών καυσίμου ώστε να προσαρμόζεται το ιξώδες στις αποδεκτές τιμές 2-20cSt. Η σχέση του Walther συνδέει το κινηματικό ιξώδες με τη θερμοκρασία του καυσίμου ως εξής:

$$\log \log(v + 0.7) = A + B \log(T)$$

¹ Το ιξώδες που αναγράφεται στον Πίνακας 1 υπολογίζεται στους 50°C στην περίπτωση των υπολειμματικών καυσίμων και στους 40°C για αποστάγματα.

² Μονάδα μέτρησης που συνήθως χρησιμοποιείται για το κινηματικό ιξώδες είναι τα centistokes όπου 1cSt ισούται με 1mm²/s.

Οι σταθερές A,B υπολογίζονται με βάση την τιμή του ιξώδους σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες και αντιστοιχούν σε ένα συγκεκριμένο καύσιμο. Η θερμοκρασία (T) είναι σε βαθμούς Kelvin(K) και το κινηματικό ιξώδες σε cSt.

1.1.4 Φθορές στην αντλία καυσίμου

Φθορά είναι η απώλεια ή παραμόρφωση υλικού που προκύπτει εξαιτίας της σχετικής κίνησης μεταξύ των στοιχείων ενός μηχανισμού. Επιφάνειες μεταξύ των οποίων υπάρχει σχετική κίνηση και προκύπτει επαφή ορίζουν ένα τριβολογικό ζεύγος. Βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την έκταση και τον ρυθμό εξέλιξης της φθοράς είναι η λίπανση ανάμεσα στις δύο επιφάνειες, τα υλικά που χρησιμοποιούνται και τα φορτία που αναπτύσσονται. Είδη φθοράς που συναντώνται συχνά στο έμβολο της αντλίας υψηλής πίεσης είναι η διάβρωση εξαιτίας σπηλαιώσης, η πρόσφυση και η εκτριβή.

• Σπηλαιώση

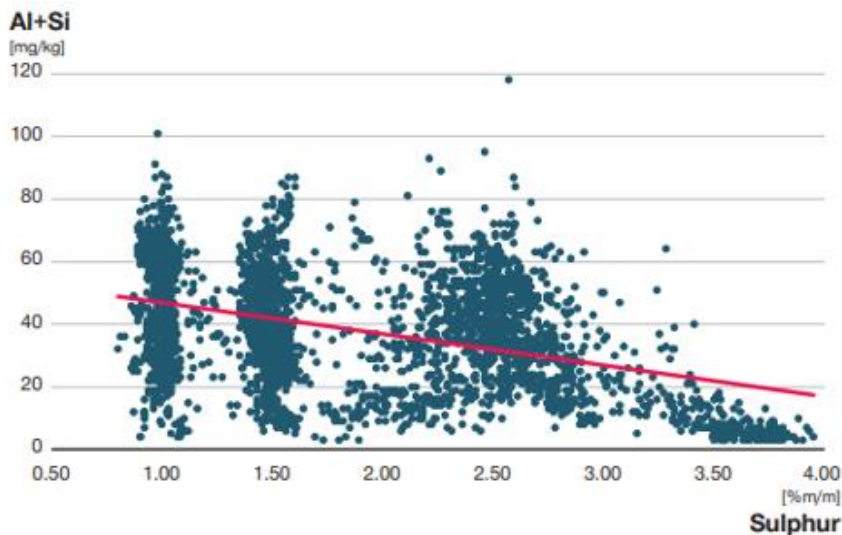
Η σπηλαιώση είναι ένα αναμενόμενο φαινόμενο στις αντλίες υψηλής πίεσης καυσίμου. Εμφανίζεται συνήθως στη θυρίδα υπερχειλίσης και στο έμβολο στο σημείο πάνω από την ελικοειδή ακμή. Ως μέθοδος αντιμετώπισης έχει επικρατήσει να χρησιμοποιούνται αναλώσιμα προστατευτικά εξαρτήματα (baffle screw) στην θυρίδα υπερχειλίσεως που εμφανίζεται σπηλαιώση για να αποφεύγεται η αστοχία όλου του στοιχείου. Παρόμοια προστασία για το έμβολο δεν υπάρχει με αποτέλεσμα σε ορισμένες περιπτώσεις να προκύπτει εκτεταμένη φθορά. Η έκταση του φαινομένου εξαρτάται βασικά από την ποιότητα και τα χαρακτηριστικά του καυσίμου. Το ιξώδες, η περιεκτικότητα σε νερό και το φορτίο στο οποίο λειτουργεί η μηχανή είναι ορισμένοι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα και την ένταση της φθοράς. Η σπηλαιώση είναι αποτέλεσμα της μεγάλης πτώσης πίεσης σε σημεία που επικρατούν υψηλές ταχύτητες. Οι πιέσεις που δημιουργούνται με την ανοδική κίνηση του εμβόλου και το κλείσιμο των θυρίδων (εισαγωγής και υπερχειλίσης) κυμαίνονται σε αρκετές εκατοντάδες bar. Η σπηλαιώση εμφανίζεται με την ολοκλήρωση της έγχυσης του καυσίμου όποτε το καύσιμο που βρίσκεται πάνω από το έμβολο κατευθύνεται προς τις θυρίδες διαρροής. Η πτώση της πίεσης έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία (τοπικής) σπηλαιώσης. Η σπηλαιώση ορίζεται ως το φαινόμενο δημιουργίας θυλάκων ατμοποιημένου καυσίμου (φουσαλίδες) οι οποίες όταν βρεθούν σε περιοχή υψηλότερης πίεσης μετατρέπονται σε υγρό με ενδόρρηξη και ταυτόχρονη αύξηση της πίεσης στο σημείο που προϋπήρξαν με αποτέλεσμα την απομάκρυνση μικρών ποσοτήτων υλικού

• Φθορά εκτριβής

Κατά τη διύλιση του, το αργό πετρέλαιο, στα στάδια που ακολουθούν το φυσικό διαχωρισμό στα διάφορα κλάσματα υπόκεινται σε διάφορες χημικές διεργασίες. Σε πολλές από αυτές η επεξεργασία γίνεται με τη συμμετοχή καταλυτών (καταλυτικές διεργασίες). Ιδιαίτερα σε καταλυτικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται αργιλοπυριτικές ενώσεις ενδέχεται κατάλοιπα αυτών των ενώσεων να παραμείνουν στο καύσιμο και να

αποτελέσουν απειλή ως προς την λειτουργία δικτύων, βοηθητικών εξαρτημάτων και της κύριας μηχανής. Όσον αφορά τα νέα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο καύσιμα που χρησιμοποιούνται ευρέως μετά την 1 Ιανουαρίου 2020 εκτιμάται ότι η παρουσία αυτής της απειλής παραμένει. Παρουσιάζεται στο

Σχήμα 1 η σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε θείο και της παρουσίας των σωματιδίων καταλύτη.



Σχήμα 1: Περιεκτικότητα σωματιδίων καταλύτη στα καύσιμα. Δεδομένα 2010. Άντληση δεδομένων: VPS (Veritas Petroleum Services), επεξεργασία: MAN ES.

Οι λόγοι που τα συγκεκριμένα σωματίδια αποτελούν απειλή για τις ναυτικές μηχανές σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά τους. Οι καταλύτες είναι ιδιαίτερα σκληρά σωματίδια (8.2 στην κλίμακα Mohs που το διαμάντι είναι 10) που διασπώνται αποκτώντας διάμετρο από 1-75 μm και ένα ποσοστό αυτών περνάνε στο καύσιμο. Στο καύσιμο εντοπίζονται σκληρές κεραμικές ενώσεις από αργίλιο και πυρίτιο (Al+Si). Χαρακτηριστικά όπως ο αριθμός (ppm), το μέγεθος και η σκληρότητα τους παίζουν σημαντικό ρόλο. Η αντίφαση έγκειται στο γεγονός ότι ενώ οι κατασκευαστικές προτείνουν όριο 10-15ppm για την σωστή λειτουργία και περιορισμένη φθορά το όριο από του ISO είναι 60 ppm. Η ευθύνη για την μείωση της τάξης του 75% επιπλέον μετακυλιέται στις διαδικασίες καθαρισμού που λαμβάνουν χώρα πάνω στο πλοίο αμέσως πριν την κατανάλωση του καυσίμου. Σε διαφορετική περίπτωση σε όλη την πορεία του καυσίμου από την αντλία έως τις οπές του εγχυτήρα και στο θάλαμο καύσης της μηχανής αναμένεται ταχύτατα εξελισσόμενη φθορά (third body abrasive wear) που μπορεί να θέσει εκτός λειτουργίας τον κινητήρα μέσα σε λίγες εκατοντάδες ώρες λειτουργίας. Ιδιαίτερα επιβλαβή είναι τα σωματίδια με διάμετρο από 10 έως 25 μm τα οποία εγκλωβίζονται ανάμεσα σε επιφάνειες που ολισθαίνουν μεταξύ τους και παράγουν εκτεταμένες φθορές. Υπολείμματα των συγκεκριμένων σωματιδίων συναντώνται στις κατηγορίες των καυσίμων VLSFO και HSHFO. Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι οποιαδήποτε

παράλειψη ή δυσλειτουργία που αφορά τον καθαρισμό από τα συγκεκριμένα σωματίδια έχει καταστρεπτικά αποτελέσματα για το χρόνο ζωής της μηχανής και κατ' επέκταση τεράστιες οικονομικές επιπτώσεις. Η σωστή λειτουργία του φυγοκεντρικού διαχωριστή και των φίλτρων, ο επαρκής έλεγχος και καθαρισμός τους είναι επιτακτικά για τον έλεγχο και τον περιορισμό των συγκεκριμένων σωματιδίων. Σημαντικοί παράγοντες για τη σωστή λειτουργία του διαχωριστή είναι η ροή του καυσίμου και η θερμοκρασία του καθώς διέρχεται από αυτόν. Τέλος είναι απαραίτητοι η διεξαγωγή συχνών ελέγχων των διαρροών του καυσίμου ή των αποξέσεων του λιπαντικού λαδιού της μηχανής διότι παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την ποσότητα καταλυτικών σωματιδίων όσο και για τον ρυθμό απόσπασης υλικού και άρα για την ταχύτητα εξέλιξης της φθοράς στο έμβολο και στο χιτώνιο.

• Πρόσφυση

Η φθορά πρόσφυσης παρακωλύει την παλινδρομική κίνηση του εμβόλου και δημιουργεί καθυστερήσεις στην έγχυση του καυσίμου. Η ελλιπής λίπανση εξαιτίας της οποίας προκύπτει επαφή μετάλλου με μέταλλο σε συνδυασμό με υψηλές θερμοκρασίες που συνοδεύουν τον υψηλό συντελεστή τριβής έχουν ως αποτέλεσμα την τοπική προσκόλληση των δύο επιφανειών που παρεμποδίζει την απρόσκοπτη λειτουργία του μηχανισμού. Η θερμική διαστολή και η μεταβολή του διάκενου ανάμεσα στα δύο στοιχεία σχετίζεται με την εναλλαγή μεταξύ καυσίμων. Αυτό το φαινόμενο προκύπτει από τη θερμοκρασιακή μεταβολή στην είσοδο της αντλίας καυσίμου ως ανάγκη ρύθμισης του ιξώδους. Η εναλλαγή από βαρύ καύσιμο σε καύσιμο με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο έχει ως αποτέλεσμα και την εναλλαγή της θερμοκρασίας του καυσίμου που διαρρέει τους αγωγούς και εισάγεται στην αντλία. Απότομες τέτοιες αλλαγές δύναται να μεταβάλλουν εξαιτίας της θερμικής διαστολής τις (αυστηρές) γεωμετρικές ανοχές μεταξύ εξαρτημάτων όπως το έμβολο και το χιτώνιο που θα προκαλέσει το φαινόμενα αστάθειας και παρακώλησης της λειτουργίας της αντλίας υψηλής πίεσης. Η μεταβολή που διαμορφώνεται μεταξύ VLSFO και ULSFO (Ultra-low 0.01Smax) είναι αρκετά μικρότερη και άρα ο κίνδυνος εμφάνισης του παραπάνω φαινομένου μειωμένος. Οι ανεπιθύμητες συνέπειες αποφεύγονται εφόσον διατηρείται ελεγχόμενος ρυθμός θερμοκρασιακής διαφοράς μικρότερος του 20C/min και η μετάβαση γίνεται σε χαμηλό φορτίο όπως προβλέπεται και συνίσταται από τις κατασκευαστικές εταιρίες.

1.2 Σκοπός εργασίας

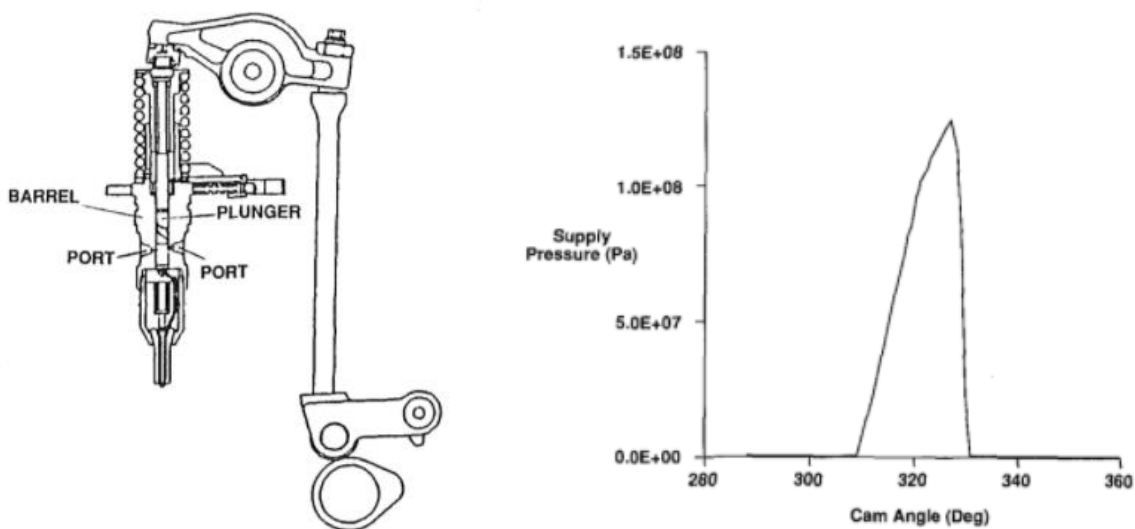
Αφορμή για την παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε η παρατήρηση εκτεταμένων φθορών σε ζεύγη εμβόλων χιτωνίων σε αντλίες υψηλής πίεσης ναυτικών μηχανών. Ο στόχος που επιδιώκεται είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης θερμοκρασιακών μεταβολών του καυσίμου στο διάκενο ανάμεσα στις επιφάνειες των στοιχείων μεταξύ των οποίων υπάρχει σχετική κίνηση και ο προσδιορισμός των πιέσεων και των ταχυτήτων του ρευστού στο διάκενο. Η επίδραση αυτών των παραγόντων μελετάται με τη βοήθεια λογισμικού (ANSYS) πεπερασμένων στοιχείων για τα στερεά και τη θερμική μελέτη και πεπερασμένων όγκων για το ρευστό. Στόχος είναι να προκύψουν συμπεράσματα που να συμβάλλουν στην ερμηνεία των φθορών και να σκιαγραφήσουν ένα χάρτη ευαισθησίας ανάμεσα στα διάφορα φαινόμενα και τις διάφορες περιοχές του εμβόλου σε συνδυασμό με την υπάρχουσα βιβλιογραφία ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί ένα πλαίσιο αναφοράς για την αναγνώριση της αιτίας της φθοράς σε συσχέτιση με την περιοχή στην οποία εμφανίζεται και την ένταση της.

1.3 Οριοθέτηση

Η λειτουργία της αντλίας υψηλής πίεσης επιτυγχάνεται με τη σχετική κίνηση μεταξύ του εμβόλου και του χιτωνίου, η ύπαρξη του ρευστού, των παραμορφώσεων των στερεών και των θερμοκρασιακών μεταβολών δεν μπορούν να μελετηθούν ταυτόχρονα εξαιτίας της περιπλοκότητας των αλληλεπιδράσεων, του υπολογιστικού κόστους και της περιπλοκότητας της γεωμετρίας και του πλέγματος του ρευστού. Σημειώνεται, επίσης ότι τα φαινόμενα αυτά εξελίσσονται σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Η απλοποιήσεις στη γεωμετρία ήταν απαραίτητη σε όλα τα μοντέλα ώστε να εξοικονομηθεί πλέγμα και υπολογιστικός χρόνος καθώς ο προσδιορισμός του διάκενου ανάμεσα στις επιφάνειες απαιτεί πολύ πυκνό πλέγμα στις γειτονικές επιφάνειες. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, τα φαινόμενα μελετήθηκαν κατά κύριο λόγο ανεξάρτητα και διακριτά, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συνέργεια τους. Όσον αφορά τα φαινόμενα της φθοράς πρόκειται για περίπλοκα και μη-γραμμικά φαινόμενα, η πολυκλίμακη φυσιογνωμία τους δυσχεραίνει την διερεύνηση τους με αναλυτικές λύσεις και η συνέργεια πολλών διαφορετικών παραγόντων δημιουργεί δυσκολία στην απομόνωση και εξέταση ενός μηχανισμού. Ο ποσοτικός προσδιορισμός θα απαιτούσε πειραματικά δεδομένα για το συντελεστή φθοράς του Archard και για την πρόσδοση αξιοπιστίας στα αποτελέσματα. Σχετικά με το ρευστό ένας παράγοντας που έχει αμεληθεί από την παρούσα μελέτη είναι η εξάρτηση του ιξώδους από την πίεση και τη θερμοκρασία, ωστόσο έχουν γίνει αναφορές στο Κεφάλαιο 2 σε σχέση με την επίδραση του ιξώδους σε μελέτες που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία. Φαινόμενα φθοράς, όπως η χημική διάβρωση που παρατηρήθηκε στα δοκίμια δεν είναι δυνατόν να μελετηθούν, ενώ η βάσεις για την μελέτη της φθοράς εξαιτίας σκληρών σωματιδίων θέτονται με την εκτεταμένη ρευστοδυναμική μελέτη χωρίς αυτή να περιλαμβάνει την προσομοίωση των σωματιδίων στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

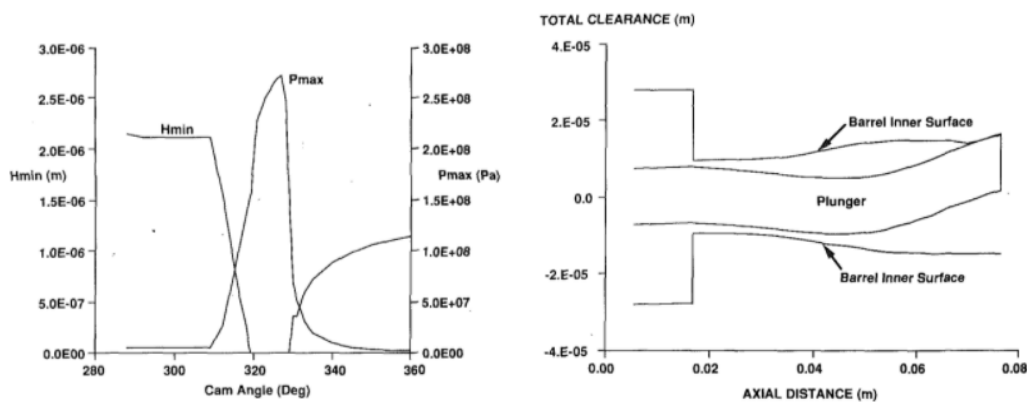
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η παραμόρφωση του εμβόλου και χιτωνίου εξαιτίας των υψηλών πιέσεων που αναπτύσσονται στο ρευστό έχουν μελετηθεί από τους Gibson, Dionne και Singhal στο [4]. Στην συγκεκριμένη μελέτη αναφέρονται πιέσεις που φτάνουν και ξεπερνούν τα 140 MPa, η διάρκεια έγχυσης 20-30° του στροφαλοφόρου ενώ το διάκενο διαμετρικά αναφέρεται ότι κυμαίνεται στα 3 με 10 μm . Δημιουργείται ένα αριθμητικό μοντέλο που με βάση την εξίσωση του Reynolds για το ρευστό και την γραμμική θεωρία της ελαστικότητας για τα στερεά εξετάζει την αλληλεπίδραση τους προβλέποντας την παραμόρφωση των στερεών στοιχείων και την εξέλιξη του ελάχιστου διακένου και της μέγιστης πίεσης του λιπαντικού φιλμ. Η ανάγκη να επιλυθεί το ρευστοδυναμικό σκέλος του προβλήματος μαζί με την παραμόρφωση των στερεών προκύπτει από το γεγονός ότι μία μεταβολή στο διάκενο έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική μεταβολή της κατανομής της πίεσης. Παράλληλα, η μεταβολή στην κατανομή της πίεσης έχει άμεση επίδραση στο διάκενο, συμπεριλαμβανομένης και της παραμόρφωσης του εμβόλου. Η επίδραση της μεταβολής της πίεσης σε μία περιοχή δεν έχει αντίκτυπο μόνο στα γειτονικά στοιχεία αλλά στο σύνολο του υπολογιστικού χωρίου. Παρά τη δυναμική φύση του προβλήματος οι εξισώσεις επιλύθηκαν στη στατική τους μορφή σε κάθε χρονικό βήμα (pseudo-steady). Η μελέτη αφορά ενιαίο σύστημα αντλίας εγχυτήρα όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Οι τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στη συγκεκριμένη μελέτη ήταν αντλία δύο θυρίδων, αντλία μίας θυρίδας και αντλία μίας θυρίδας με αρχική γεωμετρική ανομοιομορφία. Επιδίωξη των συγγραφέων αποτελεί ο προσδιορισμός της αλληλεπίδρασης της παραμόρφωσης των στερεών σωμάτων και των υψηλών πιέσεων του ρευστού με αφορμή τα φαινόμενα φθοράς λείανσης (απόξεσης) μεταξύ των επιφανειών του χιτωνίου και του εμβόλου.



Εικόνα 2: Σύστημα αντλίας-εγχυτήρα (αριστερά) και το διάγραμμα της πίεσης (δεξιά) από προγενέστερη δημοσίευση του Gibson (1986). Πηγή: [4, 5]

Τα αποτελέσματα για το εμβολοχιτώνιο με δύο θυρίδες παρουσιάζονται στην Εικόνα 3. Σημειώνεται ότι η παραμόρφωση και το διάκενο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3 (δεξιά) είναι μεγεθυμένα κατά 750 φορές σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις σύμφωνα με τους συγγραφείς της δημοσίευσης. Στην περίπτωση αντλίας με δύο θυρίδες υπολογίζεται επαφή για διάρκεια περίπου 8 μοιρών του στροφάλου όπως φαίνεται στην Εικόνα 3 στα αριστερά. Στο μοντέλο έχει οριστεί ότι υπάρχει επαφή όταν το διάκενο μειώνεται σε μία προκαθορισμένη τιμή (h_{contact}) μεγαλύτερη από το μηδέν. Στην περίπτωση της αντλίας με μία θυρίδα, η μελέτη καταλήγει στην απουσία επαφής και σε σημαντικά λιγότερη κάμψη του εμβόλου σε σχέση με την περίπτωση των δύο θυρίδων. Στην περιπτώσεις της μίας θυρίδας με γεωμετρική ανομοιομορφία ο χρόνος επαφής και η πίεση επαφής κυμαίνονται υψηλότερα με την πίεση επαφής να μεγιστοποιείται όταν η ανομοιομορφία του εμβόλου σχετίζεται με την απομάκρυνση της επιφάνειας του από τη θυρίδα.



Εικόνα 3: Μέγιστη πίεση και ελάχιστο διάκενο συναρτήσει της γωνίας του εκκεντροφόρου (δεξιά) και η παραμόρφωση του εμβόλου και του χιτωνίου για δύο θυρίδες (αριστερά). Πηγή: [4]

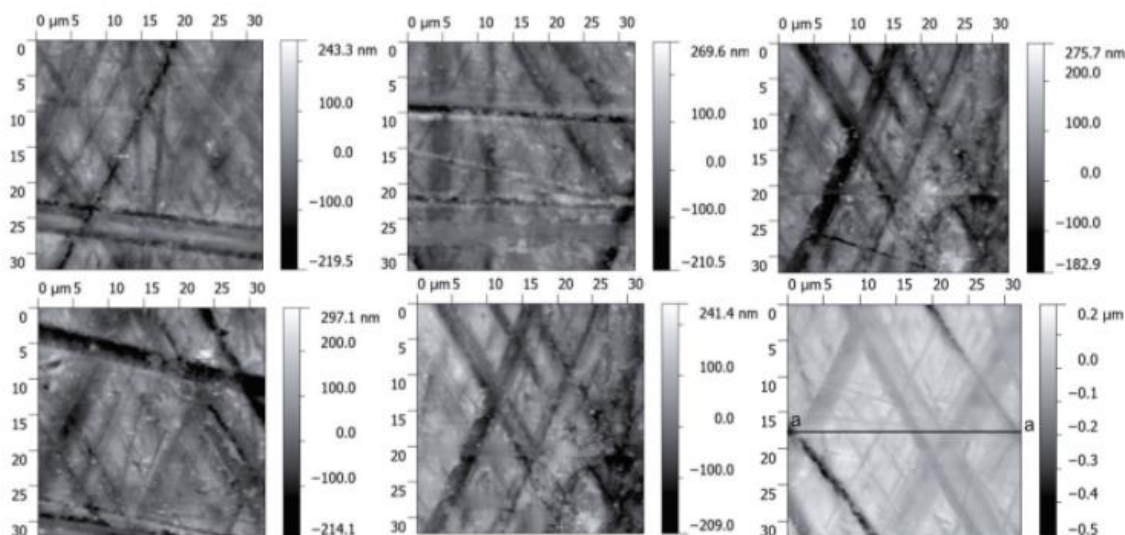
Στόχος των [6], [7] είναι η μελέτη της επίδρασης του ιξώδους, του αρχικού διακένου και της γεωμετρίας της επιφάνειας του εμβόλου στο ελάχιστο διάκενο που διαμορφώνεται μεταξύ των επιφανειών του εμβόλου και του χιτωνίου. Η ροή στις μελέτες των Οι Sung-Ho Hong, Bora Lee και Yongjoo Cho που αναφέρθηκαν θεωρείται ασυμπίεστη, μη μόνιμη και στρωτή. Η ελαστική παραμόρφωση των στερεών σωμάτων εξαιτίας των υψηλών πιέσεων δεν λαμβάνεται υπόψη.

Τα συμπεράσματα της μελέτης σχετίζονται με την επίδραση της γεωμετρίας που αφορά την πάνω ακμή του κυλινδρικού μέρους του εμβόλου στην αύξηση του ελάχιστου διακένου. Μεγαλύτερη βελτίωση προκύπτει στην περίπτωση συνθηκών χαμηλού ιξώδους με την μετατροπή της γεωμετρίας της πάνω ακμής του κυλινδρικού μέρους. .

Αντίστοιχα μελετήθηκε η παρουσία αυλακώσεων περιμετρικά του κυλινδρικού μέρους, καθώς και ο συνδυασμός των δύο παραπάνω περιπτώσεων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παρουσία μέχρι δύο αυλακώσεων βελτιώνουν τη λιπαντική συνθήκη, στην περίπτωση

περισσότερων η απόδοση δεν βελτιώνεται σημαντικά. Ο συνδυασμός των δύο παραλλαγών στην περίπτωση χαμηλού ιξώδους παρέχει τη βέλτιστη συνθήκη όπως φαίνεται.

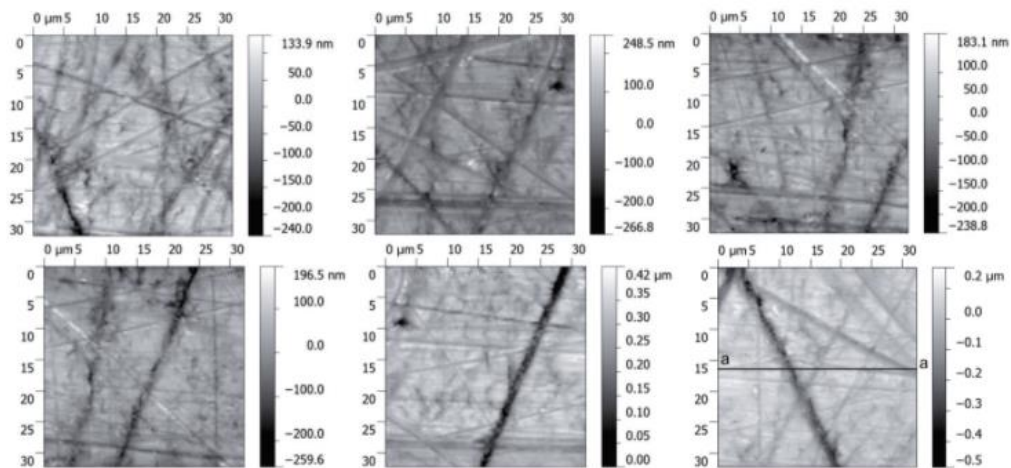
Σχετικά με την επιφάνεια του εμβόλου χρήσιμα στοιχεία παρουσιάζονται στο [8]. Παρουσιάζονται αποτελέσματα σχετικά με την αρχική επιφάνεια του εμβόλου και την επιφάνεια μετά από 1000 ώρες λειτουργίας. Δίνεται σχηματικά το προφίλ της τραχύτητας που προέκυψε μετά τη λειτουργία και ενδεικτικές εικόνες από μικροσκόπιο στις δύο περιπτώσεις. Το διάκενο ανάμεσα στην επιφάνεια του εμβόλου και την επιφάνεια του χιτωνίου που αναφέρεται στην συγκεκριμένη μελέτη είναι 1-3 μm . Κατ' αντιστοιχία και για την επιφάνεια του χιτωνίου πριν και μετά τη λειτουργία έχουν καταγραφεί η τραχύτητα και η απεικόνιση με μικροσκόπιο της επιφάνειας.



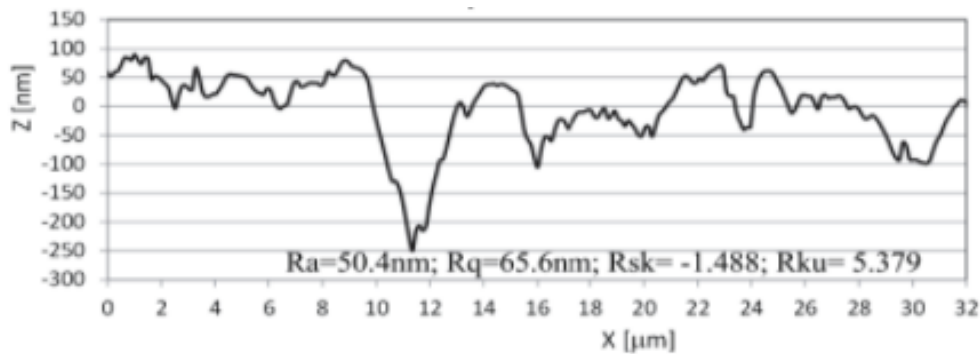
Εικόνα 4: Δισδιάστατη απεικόνιση της επιφάνειας του εμβόλου πριν τη λειτουργία. Πηγή:

Στην αρχική επιφάνεια έχει καταγραφεί όσον αφορά την τραχύτητα της επιφάνειας $R_a=56.9\text{nm}$. Επιπλέον παρατηρούνται αυλακώσεις στην επιφάνεια που σχετίζονται με την κατεργασία που έχει υποστεί και εμφανίζουν ένα μοτίβο, τέμνονται σχηματίζοντας γωνία που καθορίζεται από τη γωνιακή ταχύτητα και την πρόωση του εργαλείου της κατεργασίας.

Στην περίπτωση του εμβόλου μετά τη λειτουργία, σύμφωνα με τα συμπεράσματα της δημοσίευσης εμφανίζονται τυχαίες αυλακώσεις (Εικόνα 5) μεγαλύτερου βάθους εξαιτίας της ύπαρξης σκληρών σωματιδίων που προκαλούν φθορά εκτριβής. Το πλάτος των αυλακώσεων που δημιουργούν τα σωματίδια κυμαίνεται στα 1-3 μm . Τα συμπεράσματα που προκύπτουν αφορούν και τις μετρήσεις που παρουσιάζονται στη δημοσίευση και αφορούν το χιτωνίο που εδώ παραλείπονται. Η τραχύτητα του εμβόλου μετά τη λειτουργία παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 5: Δισδιάστατη απεικόνιση της επιφάνειας του εμβόλου μετά από 1000 ώρες λειτουργίας. Πηγή:



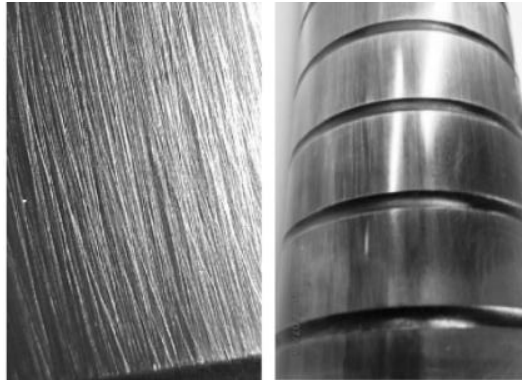
Εικόνα 6: Απεικόνιση επιλεγμένου προφίλ τραχύτητας της επιφάνειας του εμβόλου μετά από 1000 ώρες λειτουργίας. Πηγή:

Ορισμένες από τις φθορές που εμφανίζονται στο ζεύγος εμβόλου-χιτωνίου και έχουν καταγραφεί παρουσιάζονται παρακάτω με αναφορά στις πηγές και στις αιτίες που αποδίδονται από τις πηγές.



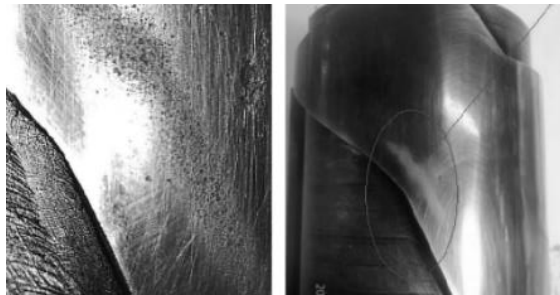
Εικόνα 7: Φθορά εξαιτίας απώλειας λιπαντικού φιλμ εξαιτίας χαμηλού ιξώδους. Πηγή: [6]

Η απώλεια του λιπαντικού φιλμ μπορεί να οδηγήσει σε επαφή μέταλλο με μέταλλο οδηγώντας σε υψηλές θερμοκρασίες και πρόσφυση των επιφανειών παρακλύοντας την παλινδρομική κίνηση της αντλίας. Το ιξώδες αποτελεί χαρακτηριστικό του καυσίμου που εξαρτάται από τη θερμοκρασία.



Εικόνα 8: Φθορά εκτριβής από καταλυτικά σωματίδια. Στα δεξιά μεγέθυνση x1 και στα αριστερά μεγέθυνση x10. Πηγή: [9]

Στην Εικόνα 8 φαίνεται φθορά εκτριβής στην επιφάνεια του εμβόλου. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται η σπηλαιώση που εμφανίζεται για τους λόγους που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 1.1.4 στο τμήμα του εμβόλου ακριβώς επάνω από την ελικοειδή ακμή.



Εικόνα 9: Φθορά σπηλαιώσης. Στα δεξιά μεγέθυνση x1 και στα αριστερά μεγέθυνση x10. Πηγή: [9]



Εικόνα 10: Έμβολο με φθορά από χημική διάβρωση. Πηγή: MAN Diesel.

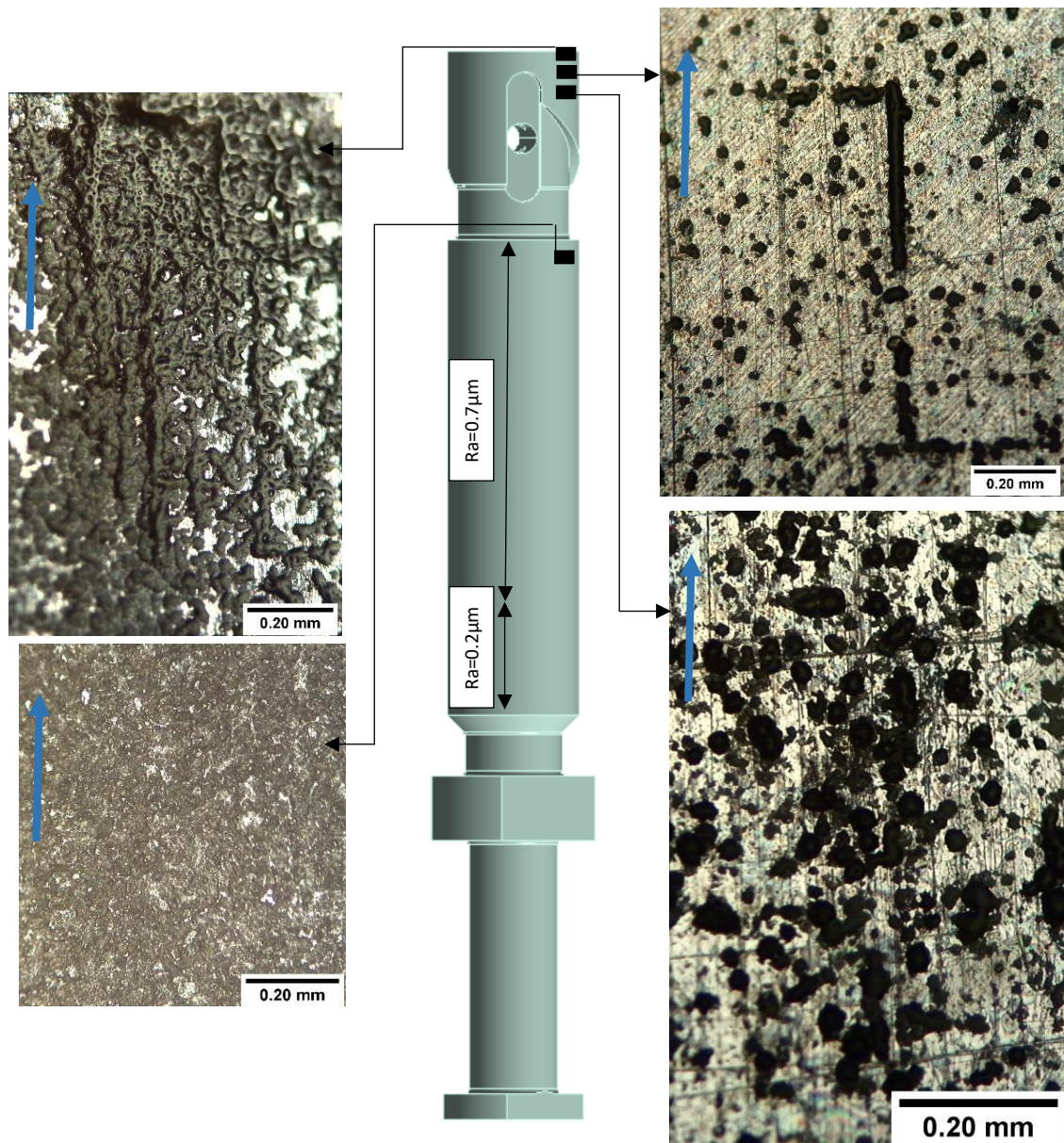
3. Αποτελέσματα μετρήσεων

Η χρήση μικροσκοπίου κρίθηκε απαραίτητη για την απόσπαση εικόνων που θα παρέχουν πληροφορίες για την επιφάνεια. Οι πληροφορίες θα αξιοποιηθούν για να προκύψουν συμπεράσματα για το είδος της φθοράς. Το εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών έχει στην κατοχή του ένα οπτικό μικροσκόπιο της Leica Microsystems, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις. Πάρθηκαν συνολικά 35 εικόνες με χρήση μεγεθύνσεων 50x, 100x, 200x και 500x. Η καμπύλη επιφάνεια των δοκιμίων αλλοιώνει τις εικόνες στις μεγάλες μεγεθύνσεις και επιβάλλει την επεξεργασία τους. Οι μεγεθύνσεις που κρίνονται περισσότερο χρήσιμες είναι 100x. Η διάταξη φαίνεται στη Εικόνα 11.



Εικόνα 11: Διάταξη από μικροσκόπιο.

Τα κομμάτια του εμβόλου που εξετάστηκαν ήταν τρία. Τα δύο προέκυψαν από το ελικοειδές τμήμα του εμβόλου και ήταν αντιδιαμετρικά. Κάθε κομμάτι χωρίστηκε σε τέσσερις ζώνες, για κάθε μία από τις οποίες τραβήχτηκαν τρεις φωτογραφίες με διαφορετικές μεγεθύνσεις. Στην Εικόνα 12 φαίνονται ορισμένες από τις φωτογραφίες που τραβήχτηκαν που κρίθηκαν περισσότερο χρήσιμες.



Εικόνα 12: Επιφάνεια του εμβόλου από μικροσκόπιο.

Τα βέλη στις εικόνες καταδεικνύουν την φορά κίνησης του εμβόλου στην διάρκεια της ανόδου του. Στην Εικόνα 12 (επάνω αριστερά) φαίνεται η εκτεταμένη φθορά στην ανώτερη περιοχή του ελικοειδούς μέρους του εμβόλου. Η αιτία που οδήγησε στη διαμόρφωση της επιφάνειας με φθορά εκτιμώμενου βάθους 35µm είναι η επαφή με την γειτονική επιφάνεια του χιτωνίου. Οι λόγοι για τους οποίους μπορεί να εμφανιστεί επαφή έχουν περιγραφεί παραπάνω με βασικούς την απώλεια λιπαντικού φιλμ εξαιτίας χαμηλού ιξώδους και τη διαστολή εξαιτίας θερμικών φορτίων.

Στις φωτογραφίες στη δεξιά πλευρά της Εικόνα 12 φαίνονται οι "κρατήρες" ή μαύρες κολίδες που εμφανίζονται ως αποτέλεσμα της σπηλαιώσης. Η περιοχή που εμφανίζονται δεν είναι τυχαία και αντιστοιχεί στην ζώνη πάνω από την ελικοειδή εγκοπή όπου και αναμένεται το φαινόμενο. Εμφανίζονται επίσης αυλακώσεις με διάφορες κατευθύνσεις, ορισμένες από τις οποίες οφείλονται στην κατεργασία της επιφάνειας. Με δεδομένες τις εικόνες από το μικροσκόπιο δεν είναι δυνατό να προκύψουν συμπεράσματα για το αν ορισμένες από τις αυλακώσεις οφείλονται σε φθορά λείανσης (abrasive wear) εξαιτίας σκληρών σωματιδίων.

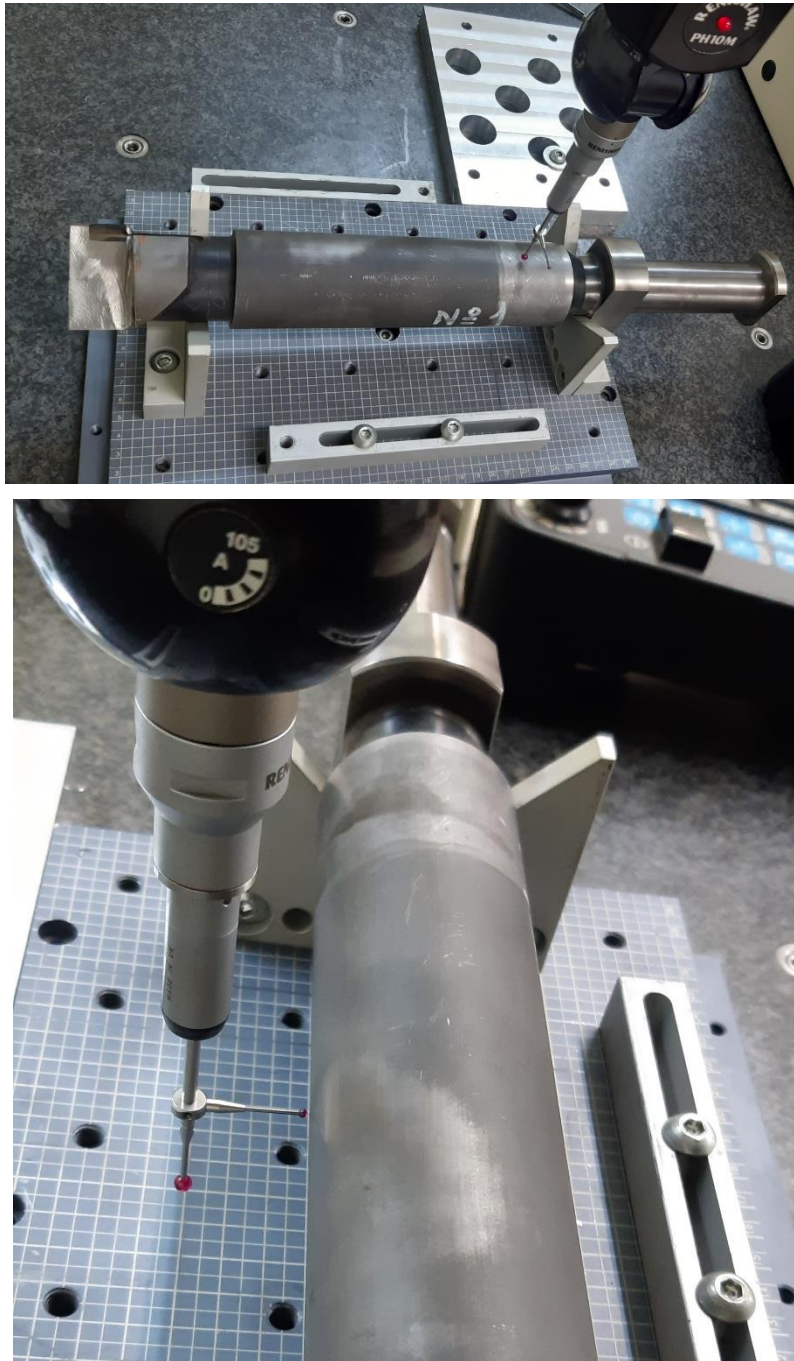
Στην Εικόνα 12 (κάτω αριστερά) παρουσιάζεται η επιφάνεια της ανώτερης περιοχής του κυλινδρικού τμήματος του εμβόλου. Θεωρώντας τις ανοιχτόχρωμες περιοχές ως την αρχική επιφάνεια παρατηρείται ότι στην μεγαλύτερη έκταση δεν έχει μείνει μεγάλο μέρος από την αρχική επιφάνεια.

Για τη μέτρηση της φθαρμένης διαμέτρου του εμβόλου και του χιτωνίου έγινε χρήση μηχανής μέτρησης συντεταγμένων (CMM). Ο τρόπος με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις και η διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 13. Οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων χρησιμοποιούνται για μετρήσεις η ακρίβεια των οποίων φτάνει μέχρι την τάξη του 1μm. Αποτελούν ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στην περίπτωση επιφανειών που παρουσιάζουν δυσκολίες στη μέτρηση με άλλα όργανα εξαιτίας της γεωμετρίας τους για παράδειγμα με την παρουσία καμπυλών. Για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις απαιτείται ο ορισμός ενός συστήματος συντεταγμένων. Η μηχανή διαθέτει σύστημα συντεταγμένων που προσδιορίζει τη θέση της κεφαλής του αισθητήρα. Απαιτείται ο ορισμός ενός συστήματος του τεμαχίου με τον προσδιορισμό ενός μηδενικού σημείου. Στη συνέχεια τα δύο συστήματα πρέπει να ταυτιστούν για να δημιουργηθεί ένα πλαίσιο αναφοράς για την καταγραφή των συντεταγμένων των σημείων επαφής.

Η λειτουργία της CMM βασίζεται στην επαφή ενός υπερευαίσθητου αισθητήρα πάνω στο τεμάχιο. Καθώς ο αισθητήρας έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια καταγράφονται οι συντεταγμένες, είτε των σημείων που έχουν οριστεί, είτε στην περίπτωση αισθητήρα συνεχούς επαφής καταγράφονται οι μετρήσεις σημείων ανά καθορισμένη διακριτή απόσταση καθώς διατρέχει την επιφάνεια.

Στην περίπτωση του εμβόλου, η ονομαστική (nominal) διάμετρος που δόθηκε από τη γεωμετρία του εμβόλου μέσω τρισδιάστατης αποτύπωσης ήταν 52mm. Στην πραγματικότητα η διάμετρος του εμβόλου είναι 51.98mm και η εσωτερική διάμετρος του χιτωνίου 52.00mm. Το έμβολο χωρίστηκε σε ορισμένες ζώνες. Τα αποτελέσματα για τη διάμετρο προέκυψαν με τη μέθοδο του ελάχιστου περιγεγραμμένου κυλίνδρου. Προέκυψαν έτσι οι κύλινδροι που η διάμετρος τους περικλείει όλα τα δεδομένα (meas).

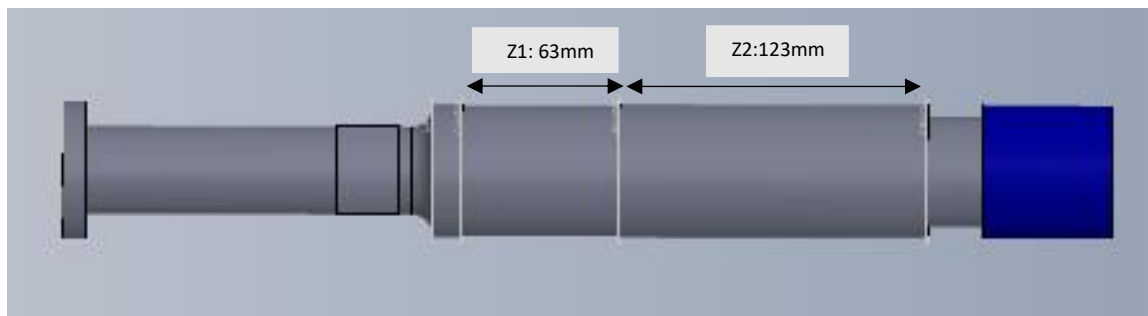
Οι διάμετροι που προέκυψαν είναι 51.98 και 51.984. Η κυλινδρικήτητα (λ) ορίζει την απόσταση μεταξύ των δύο ομοαξονικών κυλίνδρων ανάμεσα στους οποίους πρέπει να βρίσκονται όλα τα δεδομένα σημεία.



Εικόνα 13: Διάταξη μετρήσεων CMM.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα CMM εμβόλου.

Έμβολο	Dmeas	σ
Ζώνη 1	51.984	0.008
Ζώνη 2	51.980	0.013



Στην περίπτωση του χιτωνίου οι μετρήσεις έγιναν σε διάφορες διατομές εφαρμόζοντας την μέθοδο του ελάχιστου περιγεγραμμένου κύκλου για τον προσδιορισμό της διαμέτρου σε κάθε διατομή . Η ονομαστική διάμετρος με βάση τη γεωμετρία σε αρχείο STEP που δόθηκε είναι 52mm. Η διάμετρος που καταγράφηκε κυμαίνεται από 52.023 έως 52.007 . Ανοχή μορφής σε αυτή την περίπτωση είναι η κυκλικότητα (\circ) , ορίζονται δύο ομόκεντροι κύκλοι με ορισμένη απόσταση μεταξύ των οποίων πρέπει να συναντώνται όλα τα δεδομένα σημεία.

Πίνακας 3:Αποτελέσματα CMM χιτωνίου.

Χιτώνιο	Dmeas	\circ
Τομή 1	52.012	0.006
Τομή 2	52.013	0.007
Τομή 3	52.016	0.007
Τομή 4	52.007	0.009
Τομή 5	52.010	0.023
Τομή 6	52.023	0.009

4. Μεθοδολογία

4.1 Καθορισμός του προβλήματος

Οι παράγοντες που καθορίζουν την διαμόρφωση του διακένου είναι ποικίλοι. Η περιπλοκότητα του προβλήματος αυξάνεται όταν το φαινόμενο που πρέπει να μελετηθεί επηρεάζεται από ένα συνδυασμό φαινομένων που εξελίσσονται ταυτόχρονα αλλά σε διαφορετικές κλίμακες χρόνου και η περιγραφή τους απαιτεί διαφορετικά μοντέλα.

Αφητηρία για τη συγκεκριμένη μελέτη αποτέλεσε η παρατήρηση εκτεταμένων φθορών σε ορισμένα έμβολα και χιτώνια από την εταιρεία Karathanos Bros . Η αναζήτηση για τις αιτίες που δύναται να οδηγήσουν σε φθορές στην αντλία οδήγησαν στις περιπτώσεις που φαίνονται στο Κεφάλαιο 2. Με βάση τις εικόνες από το μικροσκόπιο (Κεφάλαιο 3) , τις περιοχές και την έκταση της φθοράς που παρατηρήθηκαν ορίστηκαν τα φαινόμενα που αρχικά έπρεπε να μελετηθούν. Αρχικά, θεωρήθηκε σημαντική η διερεύνηση της λειτουργίας σε κανονικές συνθήκες, μίας αντλίας υψηλής πίεσης, δηλαδή οι παραμορφώσεις των στερεών ως αποτέλεσμα των μεγάλων πιέσεων από το ρευστό καύσιμο θεωρώντας τιμές για τα χαρακτηριστικά του ενδεικτικές για βαρύ πετρέλαιο. Ταυτόχρονα, εξαιτίας των θερμοκρασιακών μεταβολών που επισυμβαίνουν όταν πραγματοποιείται εναλλαγή μεταξύ διαφορετικών καυσίμων ορίστηκε μελέτη βασισμένη στην επίδραση στο διάκενο αυτών των θερμοκρασιακών μεταβολών θεωρώντας περιπτώσεις στις οποίες δεν ακολουθείται ο ρυθμός μεταβολής που συνίσταται από τις κατασκευαστικές που είναι 2K/min ως ο μέγιστος για την ασφαλή λειτουργία.

Πίνακας 4: Αξιολόγηση αριθμητικών μεθόδων

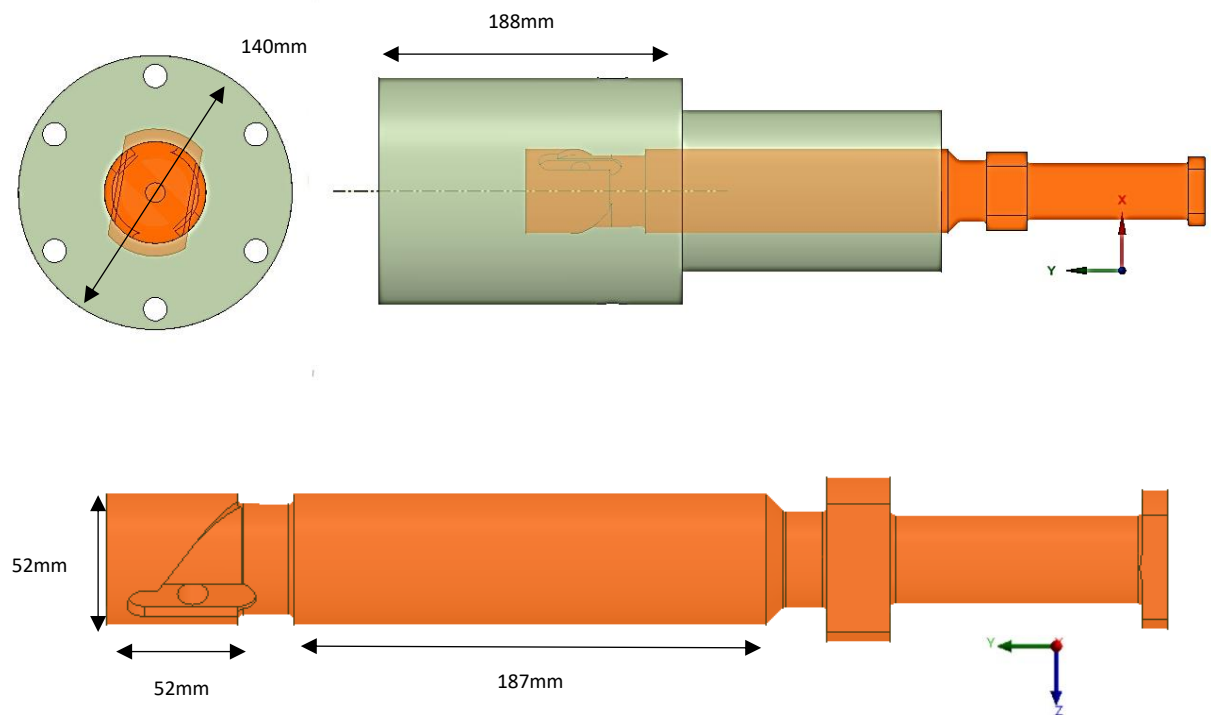
	FEM	BEM	DEM	ALE	EFG	MD	SPH
Δυναμικά φαινόμενα	●●	●●	●●●	●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις	●●	●●	●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Τυχαία διάδοση ρωγμής, θρυμματισμός υλικού	●	●●●	●●●	χ	●●●●	●●●●●	●●●●
Αριθμητική σύγκλιση	●●●●	●●●●	●	●	●●●	●●	●●●
Υπολογιστικό κόστος	●●●	●●●	●●	●	●●	●	●●
Αφαίρεση υλικού και δημιουργία αποβλήτου	●	●	●●●●	●	●●●	●●●●●	●●●●
Διαθέσιμα πακέτα λογισμικού	●●●●●	●●	●●	●●	●●	●	●●●
Δημοτικότητα, βιβλιογραφία, επιστημονικό ενδιαφέρον	●●●●	●●	●●	●●	●●●	●●●●	●●●●
Φθορά μηχανικής διάβρωσης	χ	χ	●●	●	χ	●●●●●	●●●
Φθορά εκτριβής	●●	●●	●●●●	●●●	●●●	●●●●	●●
Φθορά συνάφειας	●	χ	●	●●	●●●	●●●●●	●●
Φθορά κόπωσης	●●●	●●	●	●●●	●●	●	●●●●

Πηγή: [10]

Η επιλογή της αριθμητικής μεθόδου που χρησιμοποιείται σε μια εφαρμογή εξαρτάται από την φυσική του προβλήματος και την κλίμακα στην οποία εξελίσσεται το φαινόμενο που μελετάται. Το υπολογιστικό κόστος και ο χρόνος που απαιτείται σε συνάρτηση με την αριθμητική σύγκλιση και ακρίβεια είναι σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή της μεθόδου. Κριτήριο αποτελούν και τα υπάρχοντα λογισμικά σε συνδυασμό με τη διαθέσιμη βιβλιογραφία. Η καταλληλότητα διάφορων αριθμητικών μεθόδων με βάση τους παραπάνω παράγοντες και έμφαση στα διάφορα είδη φθοράς φαίνονται στον Πίνακα 4.

Με τη βοήθεια του λογισμικού ANSYS, που επιλύει αλγόριθμους πεπερασμένων στοιχείων για τα μηχανικά μοντέλα και πεπερασμένων όγκων για τα ρευστοδυναμικά, προέκυψαν αρχικά το θερμικό μοντέλο και η μελέτη των πιέσεων και των ταχυτήτων που αναπτύσσονται στο ρευστό.

Οι πιέσεις που δημιουργούνται στο ρευστό δεν μπορούσαν να εκτιμηθούν με βεβαιότητα αλλά ούτε και να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία στο βαθμό που το είδος της αντλίας, μέγεθος της αντλίας, το μήκος του σωλήνα καταθλίψεως και άλλοι παράγοντες επηρεάζουν τη διαμόρφωση (build-up) της πίεσης. Βρέθηκαν πληροφορίες που αφορούσαν ενιαίο σύστημα αντλίας εγχυτήρα όπως φαίνεται στο Κεφάλαιο 2 στην Εικόνα 3 χωρίς όμως αντιστοιχία στο είδος και τις διαστάσεις της αντλίας με αποτέλεσμα να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μελέτη που αφορά τα συγκεκριμένα εμβολοχιτώνια.



Εικόνα 14: Γεωμετρία και βασικές διαστάσεις εμβόλου και χιτωνίου.

Ως εκ τούτου, προέκυψε η ανάγκη να δημιουργηθεί ένα μοντέλο που να παρέχει πληροφορίες για τις πιέσεις και τις ταχύτητες που δημιουργούνται στο σύστημα. Οι πληροφορίες που αρχικά αξιοποιήθηκαν σε ένα δισδιάστατο μοντέλο αφορούσαν τη γεωμετρία του εμβόλου και του χιτωνίου με την απλοποίηση του εμβόλου σε ένα κύλινδρο για να μπορεί να μειωθεί η περιπλοκότητα με ένα δισδιάστατο αξονοσυμμετρικό μοντέλο καθώς τέτοιου είδους συμμετρία στην πραγματικότητα δεν υπάρχει όπως φαίνεται στην Εικόνα 14. Σημειώνεται ότι στη γεωμετρία που παρουσιάζεται στην παραπάνω εικόνα έχουν γίνει ορισμένες απλοποιήσεις στο χιτώνιο για λόγους εξοικονόμησης πλέγματος. Πληροφορίες για τη βαλβίδα του εγχυτήρα ήταν επίσης διαθέσιμες καθώς και για την ταχύτητα του εμβόλου. Η ύπαρξη του σωλήνα καταθλίψεως καθώς και της βαλβίδας (με ενσωματωμένη την προένταση και τη σταθερά του ελατηρίου) ήταν απαραίτητα όπως και η παρουσία του κυλίνδρου με τον αέρα. Σε διαφορετική περίπτωση, οι πιέσεις που προκύπταν καθορίζονταν μονοσήμαντα από την πίεση εξόδου ή κάποια άλλη συνθήκη εξόδου που πρέπει να εισαχθεί χωρίς όμως να υπάρχει εκ των προτέρων πληροφορία για την έξοδο του ρευστού. Οι οριακές στα άκρα-εξόδους της αντλίας και του εγχυτήρα δεν είναι εκ των προτέρων γνωστές. Για τους παραπάνω λόγους δημιουργήθηκε το απλοποιημένο δισδιάστατο μοντέλο που περιλαμβάνει το καύσιμο και τον αέρα για να εξαχθούν τα αποτελέσματα πιέσεων και ταχυτήτων στις διάφορες περιοχές της αντλίας. Με το δισδιάστατο μοντέλο επιτυγχάνεται και η εξοικονόμηση πλέγματος και υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται.

Μία μελέτη που θα αφορούσε αποκλειστικά το διάκενο ανάμεσα στις δύο επιφάνειες θα έδινε τη δυνατότητα εφόσον το μήκος του διάκενου είναι πολύ μικρότερο από την ακτίνα ($h/R < 0.001$) και εξαιτίας του μικρού αριθμού Reynolds να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση Reynolds από τη θεωρία λίπανσης για την επίλυση του προβλήματος. Αντίθετα επιλέχθηκε το λογισμικό ANSYS που επιλύει τις εξισώσεις Navier-Stokes, με συνέπεια μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος, γιατί κρίθηκε απαραίτητο να περιγράψει όλο το σύστημα για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται από το ANSYS για το δισδιάστατο αξονοσυμμετρικό μοντέλο δίνονται παρακάτω [11],

Εξίσωση διατήρησης της μάζας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{\rho v_r}{r} = S_m$$

όπου x η αξονική κατεύθυνση, r η ακτινική κατεύθυνση, v_x η αξονική ταχύτητα και v_r η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας.

Εξίσωση διατήρησης της ορμής:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \vec{v}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x ,$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) \\ = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \vec{v}) \right) \right] - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} \\ + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \vec{v}) + \frac{\rho v_z^2}{r} + F_r . \end{aligned}$$

$$\text{όπου } \nabla \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} .$$

4.2 Εξισώσεις υπολογισμού της φθοράς

Η σχετική κίνηση μεταξύ δύο επιφανειών έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση φθοράς. Η αποβολή υλικού σε τέτοιες περιπτώσεις είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει σταδιακά και εξελίσσεται προοδευτικά με το χρόνο μέχρι το μηχανικό στοιχείο να φτάσει σε μία κατάσταση που δεν είναι πλέον λειτουργικό με βάση το σκοπό για τον οποίο σχεδιάστηκε.

Η εξέλιξη της φθοράς δεν εξαρτάται μονοσήμαντα από το φορτίο και τις τάσεις που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια. Το υλικό των σωμάτων, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται εξαιτίας της τριβής, οι χημικές αντιδράσεις (οξειδωση, χημική διάβρωση) και αλληλεπιδράσεις είναι επιπρόσθετοι παράγοντες που καθορίζουν το είδος της φθοράς και τον ρυθμό εξέλιξης της. Η περιπλοκότητα της μοντελοποίησης τέτοιων φαινομένων οφείλεται στους ποικίλους παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξη και δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν ο ένας ανεξάρτητα από τον άλλο.

Ένα σημαντικό εργαλείο για τον ποσοτικό προσδιορισμό της φθοράς που προκύπτει από την ολίσθηση μιας επιφάνειας πάνω σε μία άλλη είναι ο νόμος του Archard. Πρόκειται για μια απλή μαθηματική σχέση που περιλαμβάνει τους κυρίαρχους παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξη της φθοράς ολίσθησης και αναπτύχθηκε αρχικά για την περίπτωση της φθοράς που αναπτύσσεται μεταξύ μετάλλων.

Αφετηρία της μαθηματικής σχέσης αποτέλεσε η θεώρηση ότι η πραγματική επιφάνεια επαφής διαφέρει από την εμφανή επιφάνεια. Η πραγματική επιφάνεια επαφής αποτελείται από το άθροισμα των επαφών τραχυτήτων και είναι ανάλογη του φορτίου W (N). Καθώς η μία επιφάνεια ολισθαίνει πάνω στην άλλη το φορτίο μεταφέρεται σε άλλες κορυφές. Η φθορά προκαλείται από την αποκοπή υλικού από τις επαφές που συμβαίνουν διαδοχικά. Ο όγκος φθοράς είναι ανάλογος προς την απόσταση που διανύει η μία επιφάνεια ολισθαίνοντας πάνω στην άλλη s .

Η μαθηματική σχέση που διατύπωσε ο Archard χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του όγκου φθοράς:

$$w = K \frac{Ws}{H}$$

όπου $H(N/m^2)$ η σκληρότητα της επιφάνειας που φθείρεται και K ο αδιάστατος συντελεστής φθοράς. Ο συντελεστής φθοράς μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει την πιθανότητα η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο τραχυτήτων να παράγει απώλεια υλικού, συνήθως ο καθορίζεται πειραματικά.

Η εξίσωση που παρουσιάστηκε παραπάνω διαφορισμένη ως προς το χρόνο διατυπώνεται:

$$\dot{w} = K \frac{Wv}{H}$$

όπου v η σχετική ταχύτητα μεταξύ των δύο επιφανειών και \dot{w} ο ρυθμός αποβολής φθαρμένου όγκου.

Η εξίσωση που χρησιμοποιεί το Ansys για τον ποσοτικό προσδιορισμό της φθοράς είναι:

$$\dot{w} = \frac{K}{H} p^m v^n$$

Οι εκθέτες της πίεσης και της ταχύτητας (m, n) και ο συντελεστής φθοράς αποτελούν εισόδους που δεν μπορούν να υπολογιστούν παρά μόνο πειραματικά. Η πίεση (p) υπολογίζεται από το λογισμικό και αναφέρεται στην πίεση επαφής μεταξύ των επιφανειών ενώ η ταχύτητα (v) αντιπροσωπεύει την σχετική ταχύτητα ολίσθησης μεταξύ των σωμάτων.

5. Δομική Μελέτη

5.1 Γεωμετρία και μηχανικές ιδιότητες

Το δομικό μοντέλο αποτελείται από τέσσερα στοιχεία, το έμβολο, το χιτώνιο, το έκκεντρο και έναν ακόλουθο. Οι επαφές ανάμεσα στο έμβολο και τον ακόλουθο καθώς και μεταξύ του ακόλουθου και του έκκεντρου ορίστηκαν ως επαφές χωρίς τριβή. Η ύπαρξη ελατηρίου διασφαλίζει τη συνεχή επαφή των στοιχείων για να επιτυγχάνεται η μετάδοση της κίνησης. Η γεωμετρία του εμβόλου και του χιτωνίου σχεδιάστηκε με τη βοήθεια του Solidworks αλλαγές και απλοποιήσεις για λόγους εξοικονόμησης πλέγματος έγιναν μέσω του Design Modeler και του Space Claim.

Το υλικό που επιλέχθηκε είναι κοινό για όλα τα στοιχεία, χρησιμοποιείται το προκαθορισμένο (default) υλικό του ANSYS ο δομικός χάλυβας (Structural Steel), τροποποιώντας ορισμένες ιδιότητες όπου χρειάστηκε. Τα βασικά χαρακτηριστικά του υλικού φαίνονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Μηχανικές Ιδιότητες

	Μέγεθος	Μονάδες Μέτρησης
Πυκνότητα	7850	kg*m ⁻³
Μέτρο ελαστικότητας του Young	2e+11	Pa
Λόγος Poisson	0.3	
Όριο διαρροής	2.5e+08	Pa

Η γεωμετρία του εκκέντρου δημιουργήθηκε με βάση την ανύψωση σε συνάρτηση με τις μοίρες του εκκεντροφόρου σε ορισμένες θέσεις. Χρησιμοποιήθηκε το SpaceClaim του Ansys, η ένωση των σημείων έγινε με Spline. Οι μοίρες του εκκεντροφόρου που διαρκεί η παλινδρομική κίνηση είναι 80° και ο χρόνος στον οποίο αντιστοιχούν για ταχύτητα του εκκεντροφόρου 120 RPM είναι 0.11111 s.

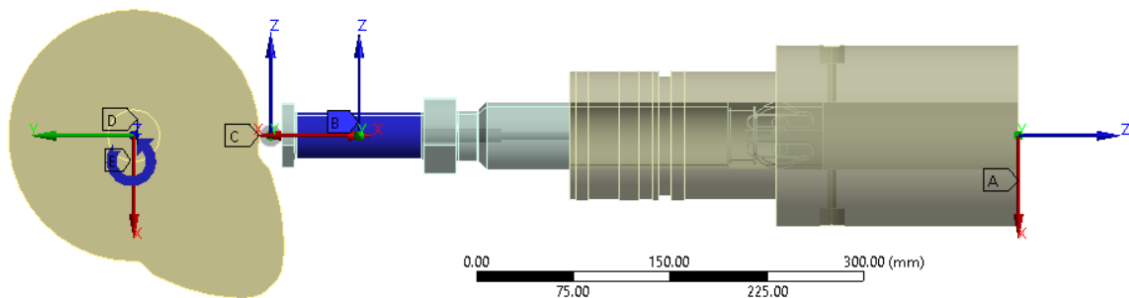
5.2 Ορισμός του μοντέλου

Ο χρόνος ο οποίος εξετάστηκε ήταν 0.2s. Το χρονικό βήμα που επιλέχθηκε ήταν 0.002 s και ο αριθμός των βημάτων που απαιτήθηκαν ήταν 100. Τα στοιχεία που χρειάστηκαν για την δημιουργία πλέγματος για την δομική ανάλυση ήταν 15308 και οι κόμβοι που προέκυψαν ήταν 36361. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην πυκνότητα του πλέγματος της επιφάνειας του εκκέντρου, την επιφάνεια του ακόλουθου και της βάσης του εμβόλου. Αντίθετα, στο χιτώνιο δεν χρησιμοποιήθηκαν πολλά στοιχεία εφόσον κρίνεται ότι η ποιότητα του πλέγματος του δεν παίζει ρόλο στη συγκεκριμένη ανάλυση.

Το έκκεντρο αποτελεί το κινητήριο στοιχείο του μηχανισμού και κινείται για τις μελέτες που διεξήχθησαν με γωνιακή ταχύτητα 120 RPM. Η κίνηση του ακόλουθου περιορίζεται σε παλινδρομική. Η κίνηση μεταφέρεται στο έμβολο από τη βάση του. Το έμβολο παλινδρομεί μέσα στο χιτώνιο που παραμένει ακίνητο. Η συνεχής επαφή των στοιχείων διασφαλίζεται με την ύπαρξη ελατηρίου ανάμεσα στο σταθερό μέρος και το έμβολο. Για την ολοκλήρωση του δομικού μοντέλου θεωρήθηκε πάκτωση στο χιτώνιο όπως φαίνεται στην **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** με το έμβολο στην χαμηλότερη θέση και τις θυρίδες εισαγωγής/υπερχειλίσεως ανοικτές. Η στήριξη του χιτωνίου δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα στην συγκεκριμένη ανάλυση.

Joint - Rotational Velocity
Time: 0.2 s

- A Fixed - Ground To BARELL
- B Translational - Ground To Plunger.step
- E Joint - Rotational Velocity: -120, RPM
- C Translational - Ground To FOLLOWER!
- D Revolute - Ground To newcamsia



Εικόνα 15: Βαθμοί ελευθερίας δομικού μοντέλου.

Σημαντικός παράγοντας για την παραμόρφωση του χιτωνίου και κατ' επέκταση τη διαμόρφωση του διάκενου είναι οι συνοριακές συνθήκες του χιτωνίου. Το χιτώνιο συνδέεται με το σώμα (housing) της αντλίας με τη χρήση 6 κοχλιών τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον Πίνακας 1. Σκοπός της μελέτης είναι να εξεταστεί αν η δύναμη σύσφιξης των κοχλιών είναι ικανή να οδηγήσει σε υπολογίσιμη παραμόρφωση του χιτωνίου στην ακτινική κατεύθυνση. Σημειώνεται ότι αυτό κρίθηκε σκόπιμο με δεδομένο ότι η μελέτη του διακένου γίνεται σε κλίμακα μικρομέτρων. Ταυτόχρονα, εξετάζεται αν η επαφή μεταξύ της επιφάνειας του χιτωνίου και αυτής του σώματος της αντλίας πρέπει να θεωρηθεί ως επαφή με τριβή ή αν μπορεί να απλοποιηθεί με την δημιουργία πάκτωσης στη συγκεκριμένη επιφάνεια του χιτωνίου.

Η εφαρμογή της δύναμης σύσφιξης έγινε μέσω του εργαλείου Bolt Pretension του ANSYS ενώ παράλληλα υπολογίστηκε με βάση τα δεδομένα η επιμήκυνση του κοχλία για να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το ANSYS.

Η σταθερά ελατηρίου του κοχλία δίνεται από τη σχέση:

$$k_b = \frac{A_b E_b}{L_b}.$$

Η αρχική επιμήκυνση εξαιτίας της πρότασης F_i δίνεται από τη μαθηματική σχέση[12]:

$$F_i = k_i \delta_{ib} .$$

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά κοχλιών.

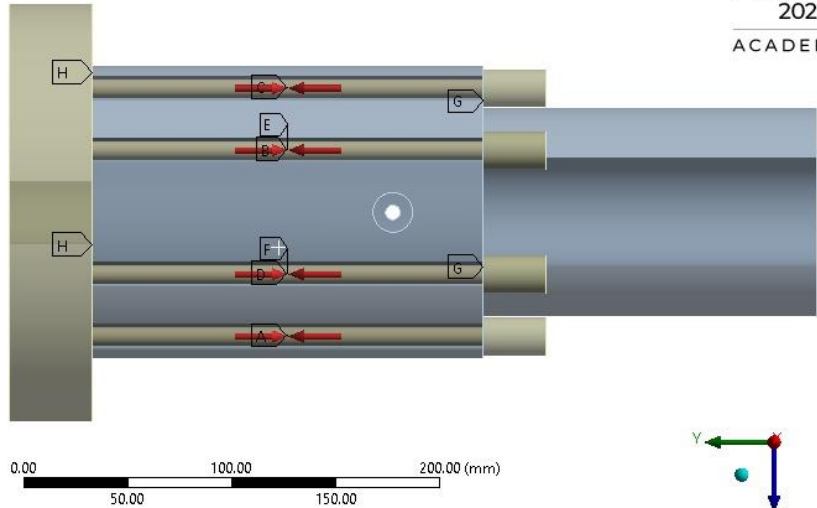
	Τιμή	Μονάδες Μέτρησης
Τύπος κοχλία	M 10x1.25	mm
Βήμα σπειρώματος (P)	1.25	mm
Κύρια διάμετρος (d=D)	10	mm
Μέση διάμετρος(d ₂ =D ₂)	9.188	mm
Εσωτερική διάμετρος κοχλία(d ₃)	8.466	mm
Καταπονούμενη επιφάνεια(A)	61.2	mm ²
Δύναμη σύσφιξης	29424.41	N
Μήκος εφελκόμενου τμήματος κοχλία	188	mm
Μέτρο ελαστικότητας του Young	2e+11	Pa
Αριθμός κοχλιών	6	

Η γεωμετρία που δημιουργήθηκε για τη μελέτη της επίδρασης των κοχλιωτών συνδέσεων αποτελείται από δύο σώματα, το χιτώνιο και ένα ενιαίο σώμα που περιλαμβάνει το κέλυφος, τους κοχλίες και τα περικόχλια. Οι δοκιμές σχετικά με τις επαφές ανάμεσα στο χιτώνιο και τα περικόχλια και το χιτώνιο και το σώμα της αντλίας και τα αποτελέσματα σχετικά με την ακτινική παραμόρφωση που προκύπτει σε κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στις Εικόνα 16, Εικόνα 17 .

5.3 Αποτελέσματα

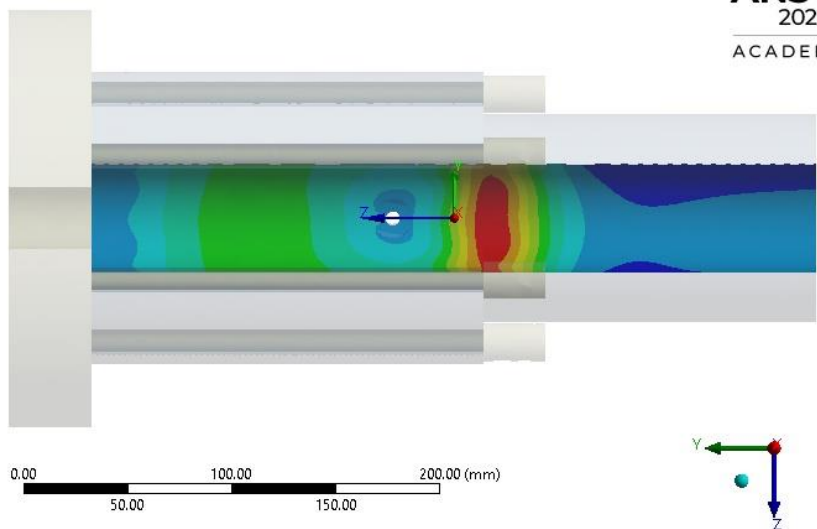
Με μία μαθηματική εφαρμογή με βάση τα δεδομένα από τον Πίνακα 6 προκύπτει επιμήκυνση $\delta_{ib} = 0.452mm$. Η αντίστοιχη τιμή για την επιμήκυνση που προέκυψε με εισαγωγή της πρότασης στο ANSYS ήταν $\delta_{ib(ANSYS)} = 0.499mm$. Το σχετικό σφάλμα, της τάξεως του 8% κρίθηκε αποδεκτό. Εφαρμόστηκε και η αντίστροφη λογική, η εισαγωγή στο ANSYS της επιμήκυνσης με κριτήριο ελέγχου την πρόταση που θα προκύψει. Τα αποτελέσματα της τελευταίας περίπτωσης είναι $F_{i(ANSYS)} = 27068N$ για $\delta_{ib(ANSYS)} = 0.45194mm$.

- A** Bolt Pretension 5: 29424 N
- B** Bolt Pretension 3: 29424 N
- C** Bolt Pretension 2: 29424 N
- D** Bolt Pretension 4: 29424 N
- E** Bolt Pretension: 29424 N
- F** Bolt Pretension 6: 29424 N
- G** Bonded - BARELL To BARELL (Contact Bodies)
- G** Bonded - BARELL To BARELL (Target Bodies)
- H** Bonded - BARELL To BARELL (Contact Bodies)
- H** Bonded - BARELL To BARELL (Target Bodies)



Type: Directional Deformation(X Axis)
Unit: mm
Cylindrical Coordinate System

- 0.0010389 Max**
- 0.00091312
- 0.00078736
- 0.00066159
- 0.00053582
- 0.00041005
- 0.00028429
- 0.00015852
- 3.2753e-5
- 9.3014e-5 Min**



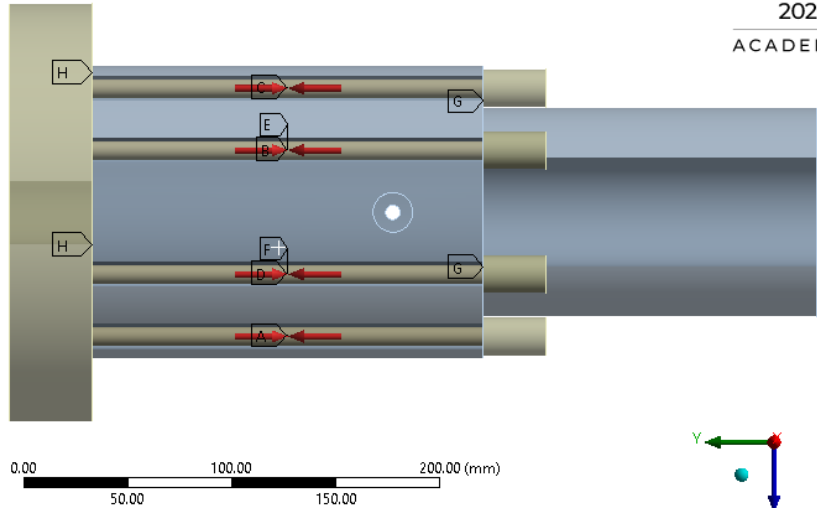
Εικόνα 16: Ακτινική παραμόρφωση χιτωνίου εξαιτίας κοχλιωτών συνδέσεων (bonded contacts). Επιμήκυνση: $\delta_{(ANSYS)}=0.493\text{mm}$

Η επαφή που θα επιλεγεί επιδρά στην ακτινική παραμόρφωση όπως φαίνεται στις Εικόνα 16 και Εικόνα 17 στη σύγκριση μεταξύ των περιπτώσεων. Η μέγιστη ακτινική παραμόρφωση και στις δύο περιπτώσεις κυμαίνεται περίπου στο 1 μm . Κοντά στις οπές, όσον αφορά την ακτινική παραμόρφωση, συγκριτικά με τις γύρω ζώνες, υπάρχει μείωση. Μέγιστη παραμόρφωση εντοπίζεται στην περιοχή που υπάρχει αλλαγή της διατομής και η οποία οριοθετεί και την άσκηση του φορτίου σύσφιξης.

F: Bolt Pretension Frictional connections

Bolt Pretension 6
Time: 0.5 s

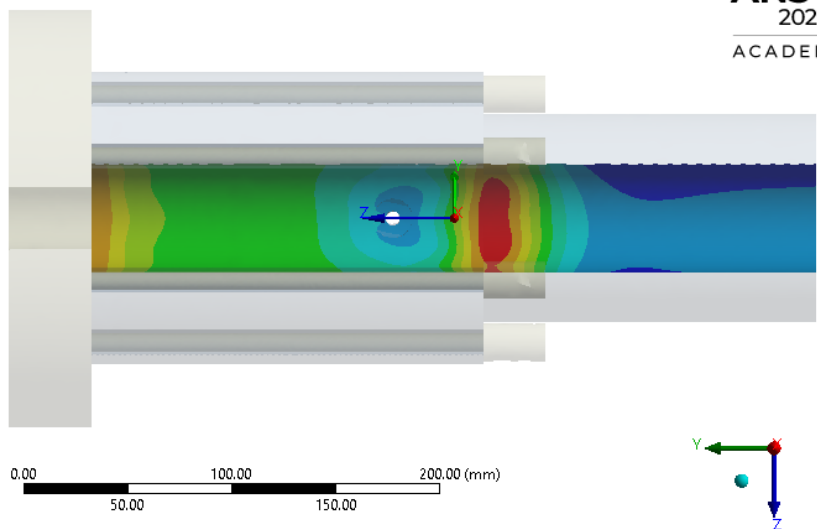
- A** Bolt Pretension 5: 29424 N
- B** Bolt Pretension 3: 29424 N
- C** Bolt Pretension 2: 29424 N
- D** Bolt Pretension 4: 29424 N
- E** Bolt Pretension: 29424 N
- F** Bolt Pretension 6: 29424 N
- G** Frictional - BARELL To BARELL (Contact Bodies)
- G** Frictional - BARELL To BARELL (Target Bodies)
- H** Frictional - BARELL To BARELL (Contact Bodies)
- H** Frictional - BARELL To BARELL (Target Bodies)



F: Bolt Pretension Frictional connections

Directional Deformation 3
Type: Directional Deformation(X Axis)
Unit: mm
Cylindrical Coordinate System
Time: 0.5

- 0.00097212 Max**
- 0.00085381
- 0.0007355
- 0.0006172
- 0.00049889
- 0.00038058
- 0.00026227
- 0.00014396
- 2.5654e-5
- 9.2654e-5 Min**

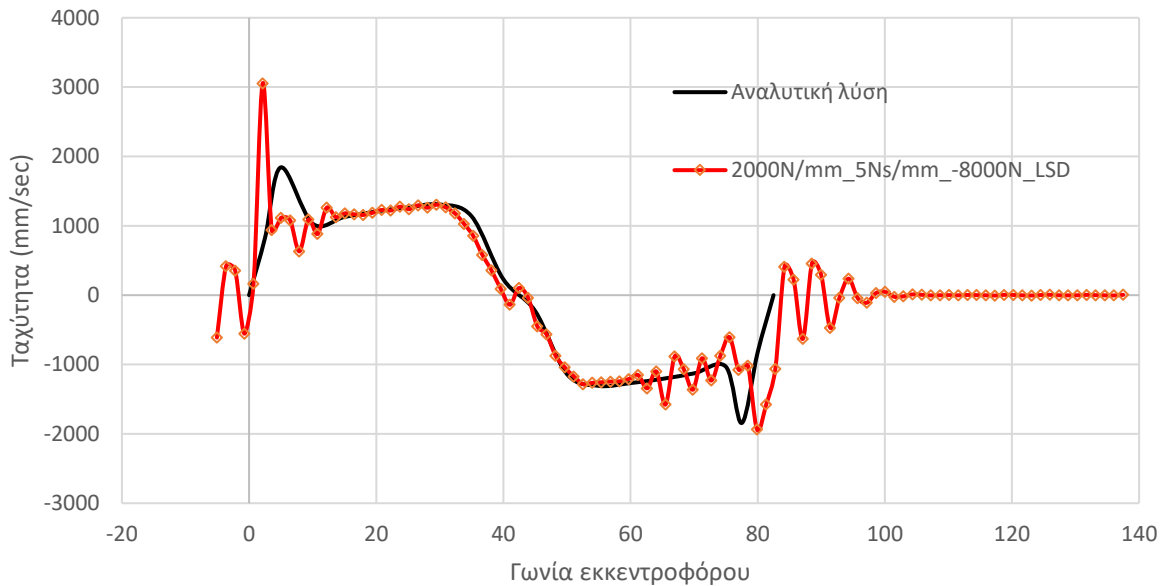


Εικόνα 17: Ακτινική παραμόρφωση χιτωνίου εξαιτίας κοχλιωτών συνδέσεων, επαφές με τριβή. Επιμήκυνση: $\delta_{(ANSYS)}=0.499\text{mm}$.

Η αλλαγή στις επαφές φαίνεται να επηρεάζει κατά κύριο λόγο την παραμόρφωση στο ανώτερο μέρος του χιτωνίου. Η μεταβολή στις υπόλοιπες περιοχές κυμαίνεται σε κάποια εκατοντάδες nm και θεωρείται ασήμαντη.

Επισημαίνεται ότι για λόγους εξοικονόμησης πλέγματος έγιναν ορισμένες απλοποιήσεις στη γεωμετρία του χιτωνίου σε σχέση με την Εικόνα 14 όπου αναπαρίσταται περισσότερο αντιπροσωπευτικά η γεωμετρία του. Οι απλοποιήσεις αυτές διατηρήθηκαν και στις θερμικές μελέτες.

Το δεύτερο σκέλος της δομικής μελέτης αφορά την ταχύτητα του που ανακύπτει από τη μετάδοση της κίνησης μέσω του εκκέντρου στο έμβολο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν κάποιες αποκλίσεις σε σχέση με τους αναλυτικούς υπολογισμούς που ενδεχομένως οφείλονται στην διακριτοποίηση των σημείων του προφίλ του εκκέντρου. Τα διαγράμματα της ταχύτητας και της μετατόπισης του εμβόλου συναρτήσει της γωνίας του εκκεντροφόρου παρουσιάζονται στα



και Διάγραμμα 3. Επιπλέον, το μοντέλο έτρεξε μόνο για μια παλινδρομική κίνηση υπολογίζοντας την μεταβατική απόκριση του μηχανισμού. Το προφίλ της ταχύτητας εξαρτάται επίσης από την μέθοδο εντοπισμού της επαφής ανάμεσα στα στοιχεία, τη δυσκαμψία της επαφής και τη σταθερά του ελατηρίου που δεν ήταν γνωστή αλλά προσαρμόστηκε ώστε να μην χάνεται η επαφή, για μεγάλο διάστημα, στην κάθοδο του εμβόλου και να μην προκύπτει διείσδυση στις επαφές.

Με δεδομένο το προφίλ του εκκέντρου και τις σχέσεις που φαίνονται παρακάτω υπολογίστηκαν, η μετατόπιση και η ταχύτητα του ακόλουθου και η γωνία πίεσης.

Η χρονική στιγμή που αντιστοιχεί σε κάθε γωνία του εκκεντροφόρου:

$$t = \frac{\theta}{\omega},$$

$$\omega = \frac{\eta}{60} 2\pi$$

όπου ω (rad/sec) η γωνιακή ταχύτητα του εκκέντρου, θ (rad) η γωνία του εκκεντροφόρου και η ταχύτητα περιστροφής του εκκεντροφόρου η (RPM) .

Θεωρώντας ότι η μετατόπιση του ακόλουθου αντιστοιχεί στην ανύψωση του προφίλ του εκκέντρου y και με δεδομένο την ανύψωση του προφίλ της κάμας συναρτήσει της γωνίας του εκκεντροφόρου, η ταχύτητα του ακόλουθου δίνεται από τη σχέση:

$$y' = dy/d\theta \quad \text{ή} \quad \dot{y} = \frac{dy}{dt} = \left(\frac{d\theta}{dt}\right) \left(\frac{dy}{d\theta}\right) = \omega \left(\frac{dy}{d\theta}\right) = \omega y'$$

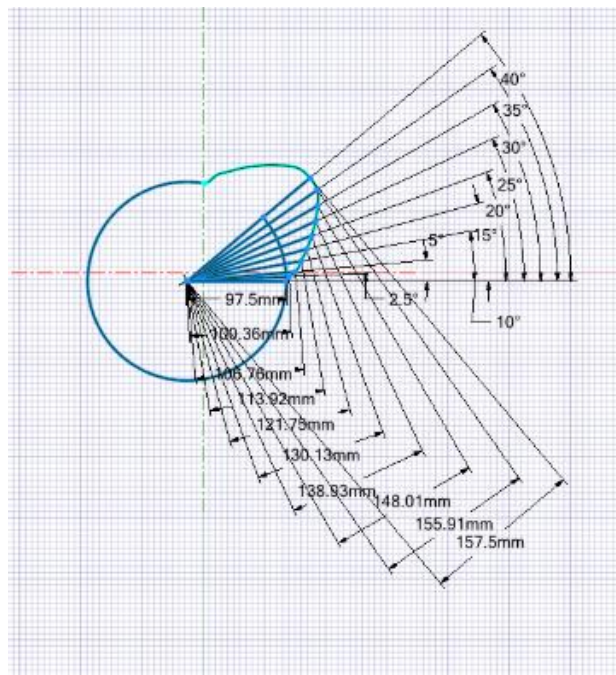
και η επιτάχυνση:

$$y'' = \frac{d^2y}{d\theta^2} \quad \text{ή} \quad \ddot{y} = \frac{d^2y}{dt^2} = \omega^2 y'$$

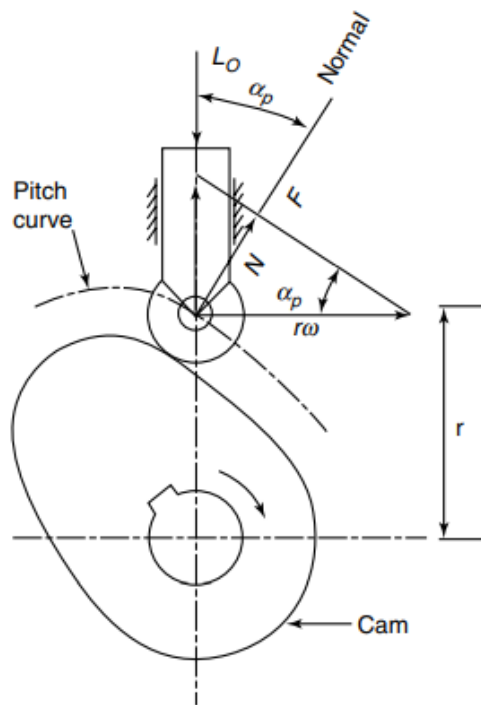
Η γωνία πίεσης του εκκέντρου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\tan(a) = \frac{dr}{rd\theta},$$

όπου r η απόσταση μεταξύ του κέντρου του εκκέντρου και του κέντρου του ακόλουθου.



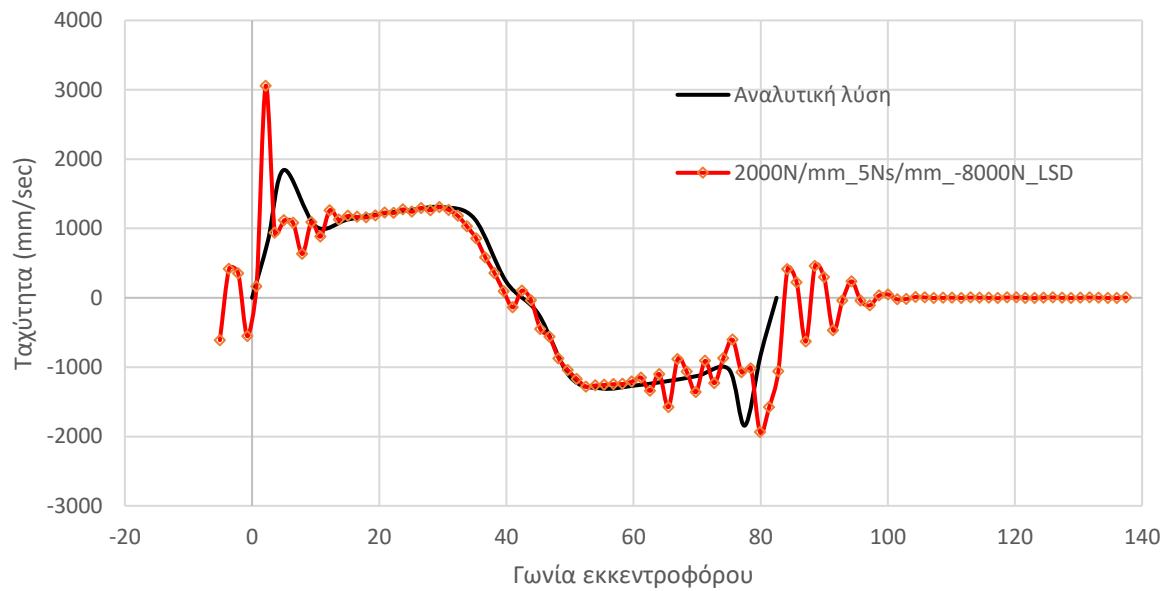
Εικόνα 18: Σχεδιασμός εκκέντρου στο SpaceClaim.



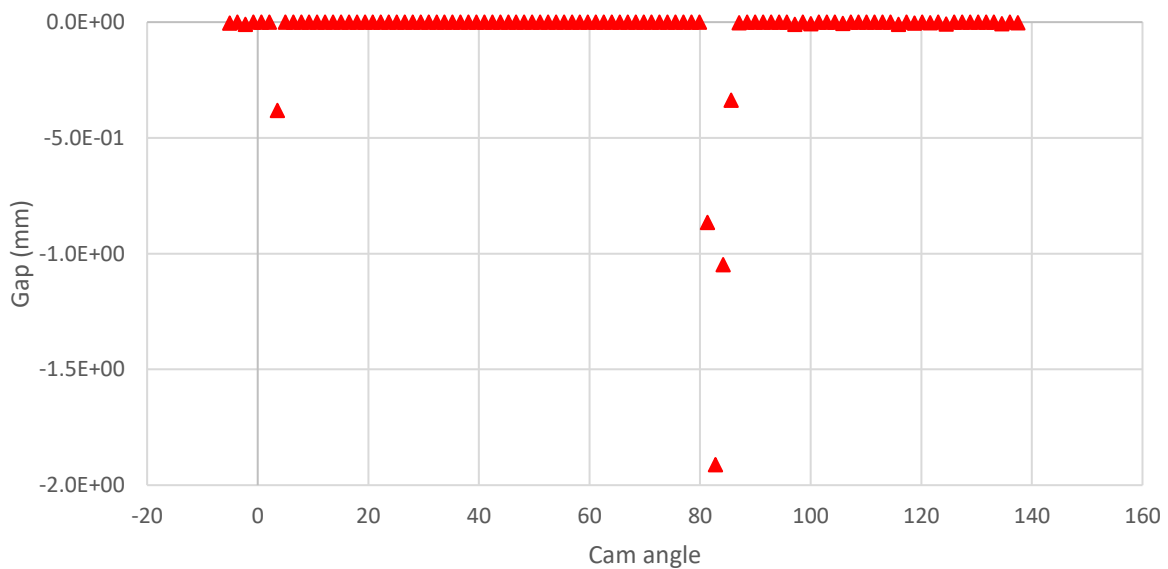
Εικόνα 19: Γωνία πίεσης. Πηγή: Cam design handbook, Harold A. Rothbart, McGraw-Hill Handbooks.

Πίνακας 7: Γωνία εκκέντρου, ανύψωση και ταχύτητα εμβόλου για ταχύτητα 120RPM.

angle		time	dh	dt	velocity
0	0	0	0		0
2.5	2.86	0.0035	2.86	0.003472	823.68
5	9.26	0.0069	6.4	0.003472	1843.2
10	16.42	0.0139	7.16	0.006944	1031.04
15	24.25	0.0208	7.83	0.006944	1127.52
20	32.63	0.0278	8.38	0.006944	1206.72
25	41.43	0.0347	8.8	0.006944	1267.2
30	50.51	0.0417	9.08	0.006944	1307.52
35	58.41	0.0486	7.9	0.006944	1137.6
40	60	0.0556	1.59	0.006944	228.96
45	58.41	0.0625	-1.59	0.006944	-228.96
50	50.51	0.0694	-7.9	0.006944	-1137.6
55	41.43	0.0764	-9.08	0.006944	-1307.52
60	32.63	0.0833	-8.8	0.006944	-1267.2
65	24.25	0.0903	-8.38	0.006944	-1206.72
70	16.42	0.0972	-7.83	0.006944	-1127.52
75	9.26	0.1042	-7.16	0.006944	-1031.04
77.5	2.86	0.1077	-6.4	0.003472	-1843.2
80	0	0.1111	-2.86	0.003472	-823.68
82.5		0.1146	0	0	0



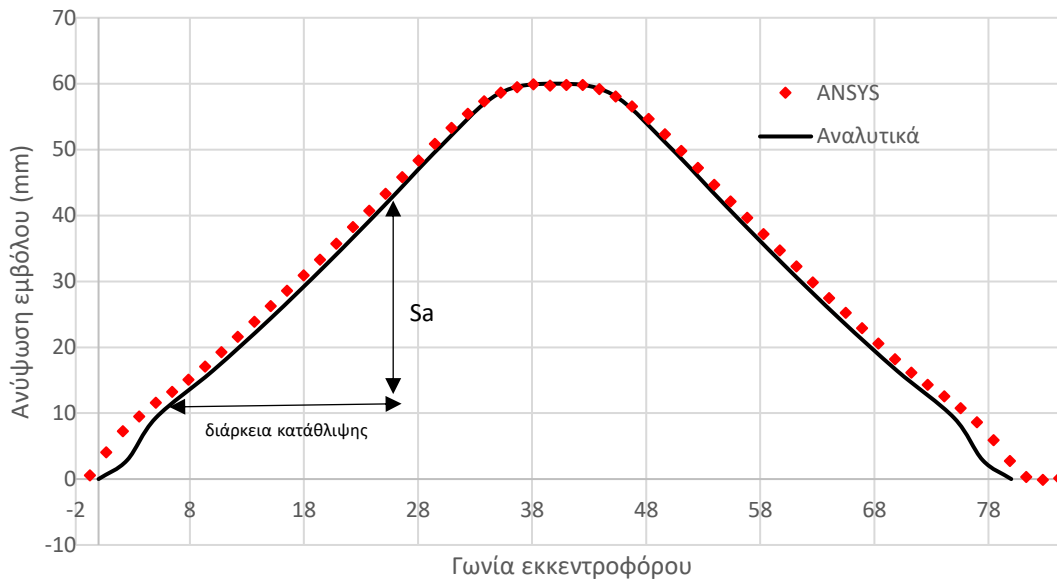
Διάγραμμα 1: Ταχύτητα εμβόλου συναρτήσει της γωνίας του εκκεντροφόρου.



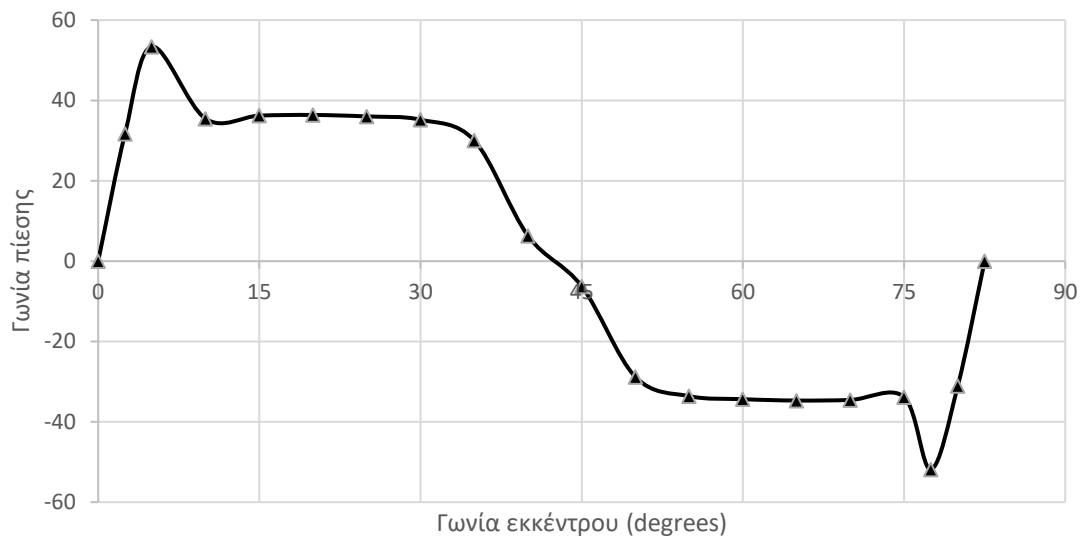
Διάγραμμα 2: Απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του εκκέντρου και του ακόλουθου.

Στο Διάγραμμα 2 παρατηρείται ότι στην κάθοδο του εμβόλου χάνεται η επαφή με τον ακόλουθο για κάποιες μοίρες. Η προσαρμογή των χαρακτηριστικών του ελατηρίου μπορεί να περιορίσει αυτό το φαινόμενο. Οι ταλαντώσεις που εμφανίζονται στο Διάγραμμα 1 μετά τις 80 μοίρες οφείλονται σε αυτό το φαινόμενο και η διάρκεια και το πλάτος της ταλάντωσης σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του ελατηρίου και την απόσβεση.

Η διάρκεια κατάθλιψης της αντλίας καυσίμου θεωρείται $(\Delta\phi_\alpha)_e=19.5^\circ$ γωνίας του εκκεντροφόρου. Η ενεργός διαδρομή σύμφωνα με την αναλυτική προσέγγιση είναι $S_\alpha=29.43\text{mm}$ και η ολική διαδρομή που ισούται με το μέγιστο ύψος του λωβού του εκκέντρου είναι $S=60\text{mm}$ όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 3.



Διάγραμμα 3: Μετατόπιση του εμβόλου της γωνίας του εκκεντροφόρου.



Διάγραμμα 4: Γωνία πίεσης εκκέντρου και ακόλουθου συναρτήσει γωνίας εκκέντρου.

Το Διάγραμμα 4 δείχνει τη γωνία του επιπέδου κάθετα στο επίπεδο επαφής του εκκέντρου και του ακόλουθου σε σχέση με τον άξονα γ που είναι ο άξονας κίνησης του εμβόλου. Τα δεδομένα του παραπάνω διαγράμματος προέκυψαν μετά από αναλυτικούς υπολογισμούς. Μεγάλες γωνίες πίεσης αποφεύγονται γιατί δημιουργούν το ενδεχόμενο πλευρικής κίνησης που είναι ανεπιθύμητη στο βαθμό που πρόκειται για έναν μηχανισμό που χρησιμοποιείται για την μετατροπή περιστροφικής κίνησης σε παλινδρομική με τη διατήρηση του διάκενου να αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Οι γωνίες πίεσης, γενικά που θεωρούνται ασφαλείς για να μην υπάρχει πλευρική κίνηση πρέπει να κυμαίνονται κάτω από 30-35 μοίρες. Η γωνία πίεσης που προέκυψε στο Διάγραμμα 4 κυμαίνεται σε υψηλότερα επίπεδα αλλά πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι δεν είναι γνωστό το πραγματικό προφίλ του εκκέντρου αλλά μόνο η ανύψωση του λωβού σε ορισμένες μοίρες, η ακτίνα του ακόλουθου αποτελεί επίσης μία μεταβλητή που παίζει ρόλο στην γωνία πίεσης και δεν είναι γνωστή αλλά θεωρήθηκε για να προχωρήσει η μελέτη. Συμπερασματικά, το προφίλ του εκκέντρου και η ακτίνα του ακόλουθου αποτελούν μεταβλητές στο πρόβλημα βελτιστοποίησης του μηχανισμού ως προς το ζήτημα της γωνίας πίεσης και της αποφυγής πλευρικής κίνησης. Το προφίλ του εκκέντρου προκύπτει μέσα από το συμβιβασμό δύο παραγόντων, της γωνίας πίεσης και της ελάχιστης ακτίνας καμπυλότητας.

6. Θερμική μελέτη

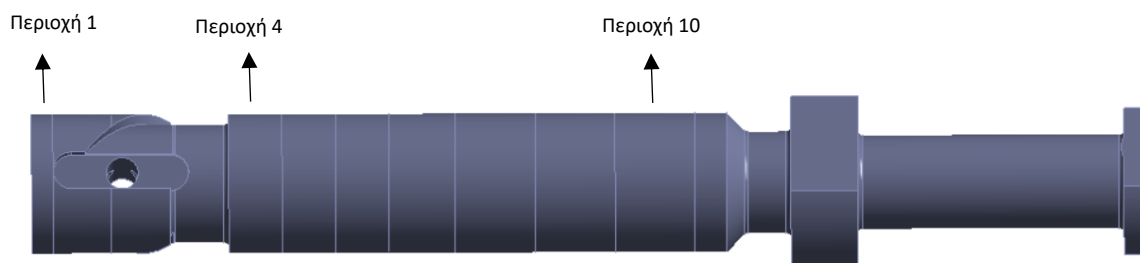
6.1 Γεωμετρία και θερμικές ιδιότητες

Για την μοντελοποίηση του θερμικού μοντέλου επιπρόσθετα στις ιδιότητες του Πίνακα 5 συμπληρώνονται και οι θερμικές ιδιότητες του υλικού που φαίνονται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8: Θερμικές Ιδιότητες

	Μέγεθος	Μονάδα Μέτρησης
Συντελεστής θερμικής διαστολής	$12.1 \cdot 10^{-6}$	K ⁻¹
Θερμική αγωγιμότητα	33.7	W/m-K

Οι επιφάνειες του εμβόλου που κινούνται στο εσωτερικό του χιτωνίου διαχωρίστηκαν σε έντεκα διαφορετικές ζώνες για να προκύψουν τα απαραίτητα συμπεράσματα για το πως εξελίσσεται το διάκενο ανά ζώνη. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 20 και ξεκινώντας από τα αριστερά η κεφαλή του εμβόλου έχει χωριστεί σε τρεις ζώνες η πρώτη έχει ύψος 8mm και οι δύο επόμενες 22mm κάθε μία. Στο κυλινδρικό μέρος που ακολουθεί οι τρεις πρώτες ζώνες έχουν ύψος 20mm, η τέταρτη ζώνη είναι 25mm, οι τρεις επόμενες 30mm. Απομένουν 12mm κάτω μέρος του εμβόλου



Εικόνα 20: Ζώνες του εμβόλου.

6.2 Ορισμός του μοντέλου

Η αρχική θερμοκρασία του ρευστού θεωρήθηκε 313.15 K . Η θερμοκρασία έχει οριστεί να μεταβάλλεται με βάση την εξίσωση $T = 313.15 + \Delta T \cdot \text{time} / 60$, όπου (ΔT) η μεταβολή της θερμοκρασίας. Το εξωτερικό του χιτωνίου πλέει μέσα σε καύσιμο η θερμοκρασία του

οποίου αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό. Ο χρόνος καθορίζεται από την μεταβλητή ΔT , η μεταβολή της θερμοκρασίας που πρέπει να επιτευχθεί είναι 50K και ο χρόνος καθορίζεται από τη σχέση $step_end_time=50[K]/((\Delta T/\Delta t)[K/min])\times 60[s]$. Το θερμικό φορτίο με τη χρήση συντελεστή συναγωγής εφαρμόστηκε σε όλες τις επιφάνειες με κοινό συντελεστή συναγωγής εσωτερικά και εξωτερικά με εξαίρεση την πάνω επιφάνεια του χιτωνίου που δεν βρίσκεται σε επαφή με το ρευστό αλλά με το σώμα της αντλίας.

Τα αποτελέσματα από το θερμικό μοντέλο μεταφέρθηκαν σε δομικό μοντέλο που υπολογίζει τις παραμορφώσεις και κατ' επέκταση την μεταβολή του διακένου ανάμεσα στα δύο στοιχεία για διάφορες ζώνες που έχουν οριστεί. Στο κάτω μέρος της

Εικόνα 21 φαίνονται τα στοιχεία που πρέπει να οριστούν για τη συναγωγή θερμότητας, η εξίσωση για τη μεταβολή της θερμοκρασίας που φαίνεται στο κάτω μέρος αριστερά εφαρμόζεται για το χρόνο που χρειάζεται για να φτάσει η θερμοκρασία στους 363.15K μετά απενεργοποιείται και ορίζεται συναγωγή με σταθερή θερμοκρασία. Ο συντελεστής συναγωγής θεωρήθηκε $5e-4 \text{ W/mm}^2\text{K}$ για όλες τις επιφάνειες που βρέχονται από το ρευστό. Για να υπάρχει μια εκτίμηση της τάξης μεγέθους του συντελεστή συναγωγής υπολογίστηκε με την σχέση Dittus-Boelter ο συντελεστής συναγωγής που αντιστοιχεί στο διάκενο με τη βοήθεια των σχέσεων:

$$\bar{v} = \frac{2Ln}{60}$$

$$Re = D\bar{v}\rho/\mu$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$$

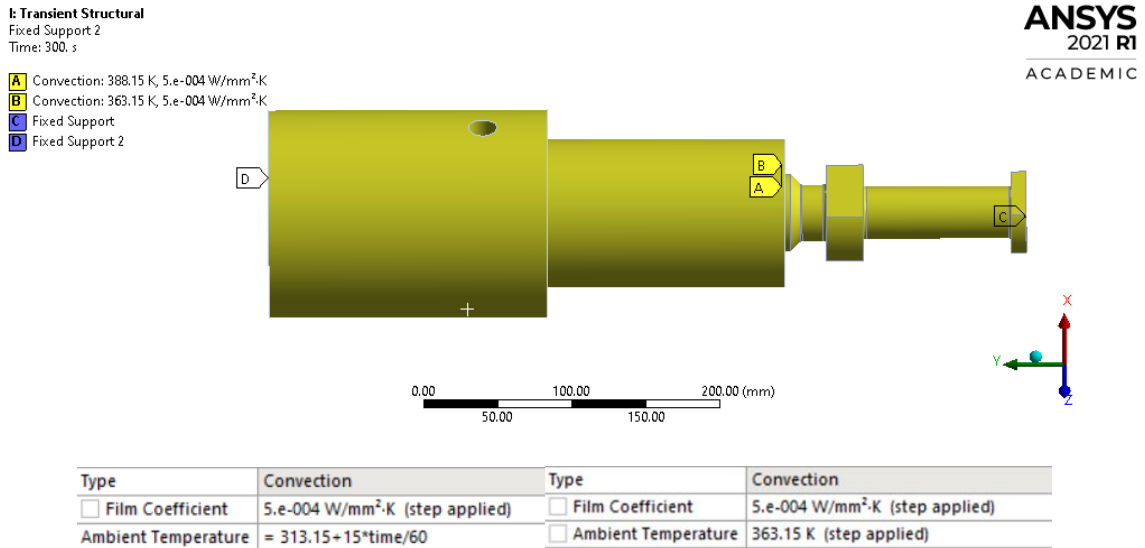
$$h = \frac{NuK}{D}$$

όπου με αντικατάσταση διάκενο $D=0.00001\text{m}$, πυκνότητα ρευστού $\rho=940\text{kg/m}^3$, κινηματικό ιξώδες $\mu=\nu\cdot\rho$, δυναμικό ιξώδες $\nu=12\text{m}^2/\text{s}$, $c_p=1,9665 \text{ kJ/kgK}$, αγωγιμότητα $k=0.12\text{W/mK}$ προκύπτει $h=614\text{W/m}^2\text{K}$.

Η παραδοχή για $h=5e-4\text{W/mK}$ θεωρήθηκε για λόγους απλοποίησης σε όλες τις επιφάνειες εξαιτίας της δυσκολίας να υπολογιστεί ο συντελεστής συναγωγής στις υπόλοιπες περιοχές.

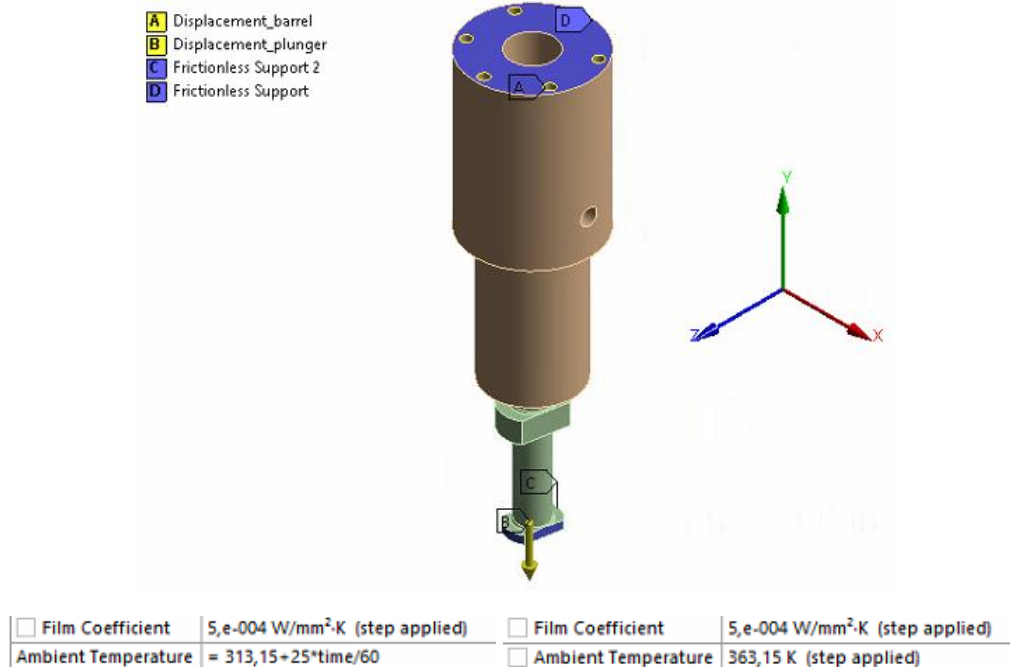
Ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας που επιλέχθηκε (10-25K/min) είναι μεγάλος σε σχέση με τα προβλεπόμενα (2K/min) με στόχο να εξεταστεί το ενδεχόμενο εναλλαγής μεταξύ των καυσίμων έξω από τις κατευθύνσεις που δίνονται από τις κατασκευαστικές. Η θέση που βρίσκεται το έμβολο έχει επιλεχθεί να είναι το ανώτερο σημείο στη μελέτη που παραμένει σταθερό το έμβολο. Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν ήταν δύο. Στην πρώτη η γεωμετρία δεν περιλαμβάνει τις σπές από τους κοχλίες και το έμβολο είναι σταθερό στην

ανώτερη θέση, η στήριξη που χρησιμοποιήθηκε είναι πάκτωση στο ανώτερο μέρος του χιτωνίου όπως φαίνεται στην Εικόνα 21.



Εικόνα 21: Φορτία και στηρίξεις θερμικού μοντέλου (περίπτωση 1).

Στη δεύτερη περίπτωση που παρουσιάζεται ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας είναι 25K/min, στο χιτώνιο υπάρχουν οι οπές στις οποίες περνάνε οι κοχλίες, οι στηρίξεις του χιτωνίου φαίνονται στην Εικόνα 22, το έμβολο σε αυτή την περίπτωση κινείται.

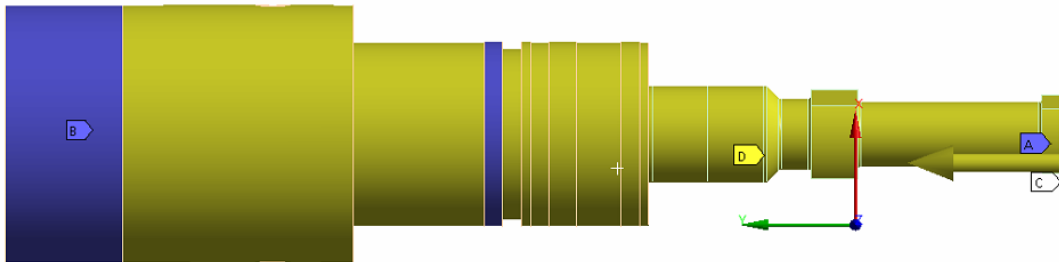


Εικόνα 22: Φορτία και στηρίξεις θερμικού μοντέλου (περίπτωση 2).

Τέλος, εξετάστηκε η περίπτωση όπου υπάρχει στήριξη στην κυλινδρική επιφάνεια του χιτωνίου για να εξεταστεί η επίδραση των στηρίξεων στο πρόβλημα της εξέλιξης του διακένου όσον αφορά τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Το έμβολο και σε αυτή την περίπτωση κινείται και η μετατόπιση του καθορίζεται από την εξίσωση $y=30*\sin(15*time)$.

Οι στηρίξεις και τα φορτία αυτής της περίπτωσης φαίνονται στην Εικόνα 23. Σε αυτή την περίπτωση έχουν αμεληθεί οι οπές των κοχλιών για λόγους εξοικονόμησης πλέγματος αλλά έχει αναπαρασταθεί η γεωμετρία του κυλινδρικού μέρους του χιτωνίου με περισσότερη λεπτομέρεια.

A Frictionless Support 2
B Frictionless Support
C Displacement
D Convection: 363,15 K, 5, e-004 W/mm²·K



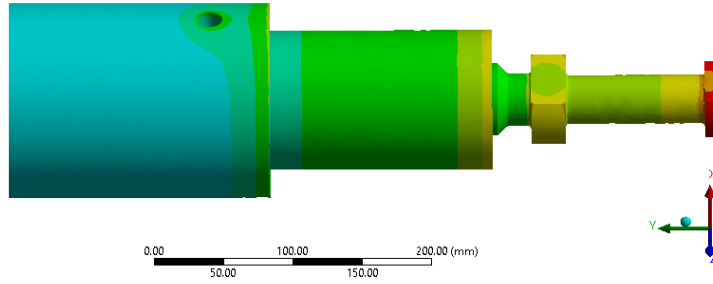
Εικόνα 23: Φορτία και στηρίξεις θερμικού μοντέλου (περίπτωση 3)

6.3 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα από ο θερμικό μοντέλο που παρουσιάζονται στις Εικόνα 21 και Εικόνα 26 δείχνουν ότι το πάνω μέρος του εμβόλου με την ελικοειδή εγκοπή θερμαίνεται γρηγορότερα. Εξαιτίας της γεωμετρίας του βρέχεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια και έχει λιγότερο υλικό από ότι το υπόλοιπο μέρος του εμβόλου και το πάνω μέρος του χιτωνίου που έχει μεγαλύτερη εξωτερική διάμετρο. Το πάνω μέρος του εμβόλου κινείται κατά κύριο λόγο στο πιο «παχύ» μέρος του χιτωνίου το οποίο όπως παρουσιάζεται θερμαίνεται με πιο αργό ρυθμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κατά τη μεταβατική συνθήκη η διαστολή που εμφανίζεται στο έμβολο στη συγκεκριμένη περιοχή να «προηγείται» με αποτέλεσμα την μείωση του διακένου μέχρι να επέλθει ισορροπία σε ορισμένο χρόνο μετά την σταθεροποίηση της θερμοκρασία.

H: 10Kmin
Temperature
Type: Temperature
Unit: K
Time: 99

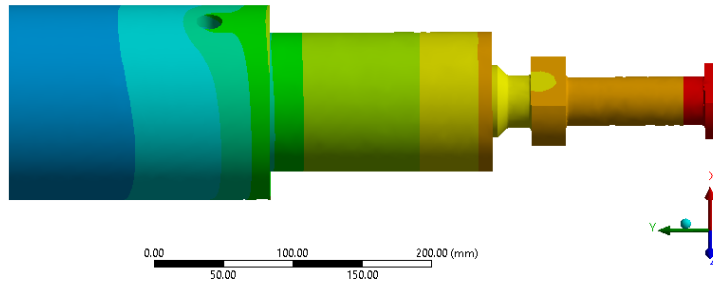
330.62 Max
329.25
327.87
326.5
325.13
323.76
322.39
321.02
319.64
318.27 Min



ANSYS
2021 R1
ACADEMIC

H: 10Kmin
Temperature
Type: Temperature
Unit: K
Time: 250

360.27 Max
358.04
355.81
353.58
351.35
349.12
346.89
344.66
342.43
340.2 Min



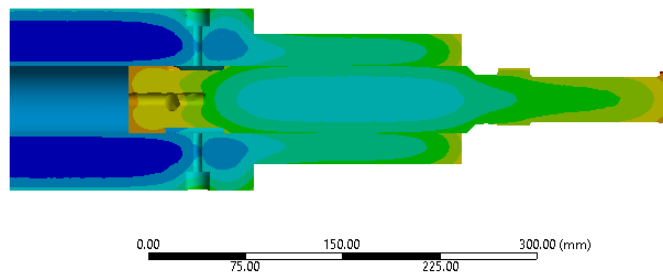
ANSYS
2021 R1
ACADEMIC

Εικόνα 24: Θερμοκρασία της επιφάνειας του χιτωνίου (περίπτωση1).

Το τμήμα του χιτωνίου με μικρότερη εξωτερική διάμετρο θερμαίνεται περίπου με τον ίδιο ρυθμό που θερμαίνεται το κυλινδρικό μέρος του εμβόλου με αποτέλεσμα τη διατήρηση του διακένου. Ειδικότερα, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5 για την περιοχή 10 το διάκενο κατά τη μεταβατική κατάσταση παρουσιάζει αύξηση κατά 50nm. Ο κίνδυνος εκεί δεν σχετίζεται με την δημιουργία επαφής εξαιτίας μείωσης του διακένου αλλά με την αύξηση των διαρροών εξαιτίας της αύξησης του διακένου.

H: 10Kmin
Temperature
Type: Temperature
Unit: K
Time: 100

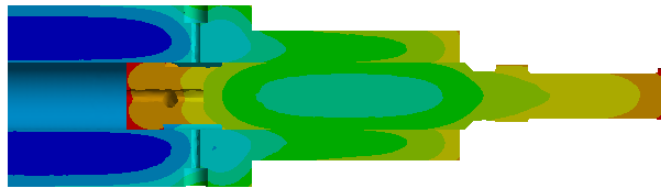
330.85 Max
329.46
328.07
326.69
325.3
323.92
322.53
321.15
319.76
318.38 Min



ANSYS
2021 R1
ACADEMIC

H: 10Kmin
Temperature
Type: Temperature
Unit: K
Time: 214

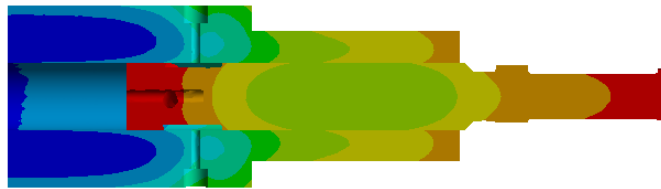
357.21 Max
354.72
352.22
349.73
347.23
344.74
342.25
339.75
337.26
334.76 Min



0.00 75.00 150.00 225.00 300.00 (mm)

H: 10Kmin
Temperature
Type: Temperature
Unit: K
Time: 300

362.01 Max
360.24
358.48
356.71
354.94
353.17
351.41
349.64
347.87
346.11 Min

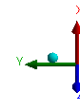
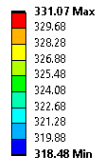


0.00 75.00 150.00 225.00 300.00 (mm)

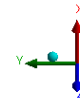
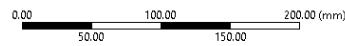
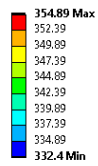
Εικόνα 25: Θερμοκρασία σε τομή της γεωμετρίας των στοιχείων (περίπτωση 1).

Στην Εικόνα 25 έχουν επιλεγθεί τρεις χρόνοι για να παρουσιαστεί η κατανομή της θερμοκρασίας στο έμβολο και το χιτώνιο σε τομή. Καθώς οι επιφάνειες των στοιχείων που βρίσκονται σε επαφή με το ρευστό θερμαίνονται, στο κυλινδρικό μέρος του εμβόλου (Περιοχή 4- Περιοχή 11) η αύξηση της θερμοκρασίας «συμβαδίζει» περισσότερο με την αύξηση της θερμοκρασίας στο τμήμα του χιτωνίου με την μικρότερη εξωτερική διάμετρο οπότε αναμένεται μικρότερη μεταβολή του διακένου σε αυτή τη περιοχή. Αντίθετα, επειδή στο πάνω μέρος το χιτώνιο δεν βρέχεται στην επιφάνεια παράλληλα στο επίπεδο xz και ταυτόχρονα το πάχος του υλικού είναι μεγαλύτερο η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά προκύπτει ανάμεσα στο ανώτερο μέρος του εμβόλου και που κινείται στο τμήμα του χιτωνίου με την μεγαλύτερη εξωτερική διάμετρο. Η διαφορά στη διαμόρφωση της θερμοκρασίας και κατ' επέκταση του διάκένου σχετίζεται με το πάχος του υλικού, τη θερμική αντίσταση και την επιφάνεια με την οποία έρχεται σε επαφή το ρευστό.

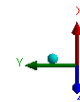
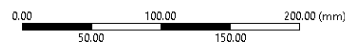
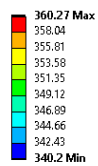
H: 10Kmin
Temperature
Type: Temperature
Unit: K
Time: 101



H: 10Kmin
Temperature
Type: Temperature
Unit: K
Time: 200

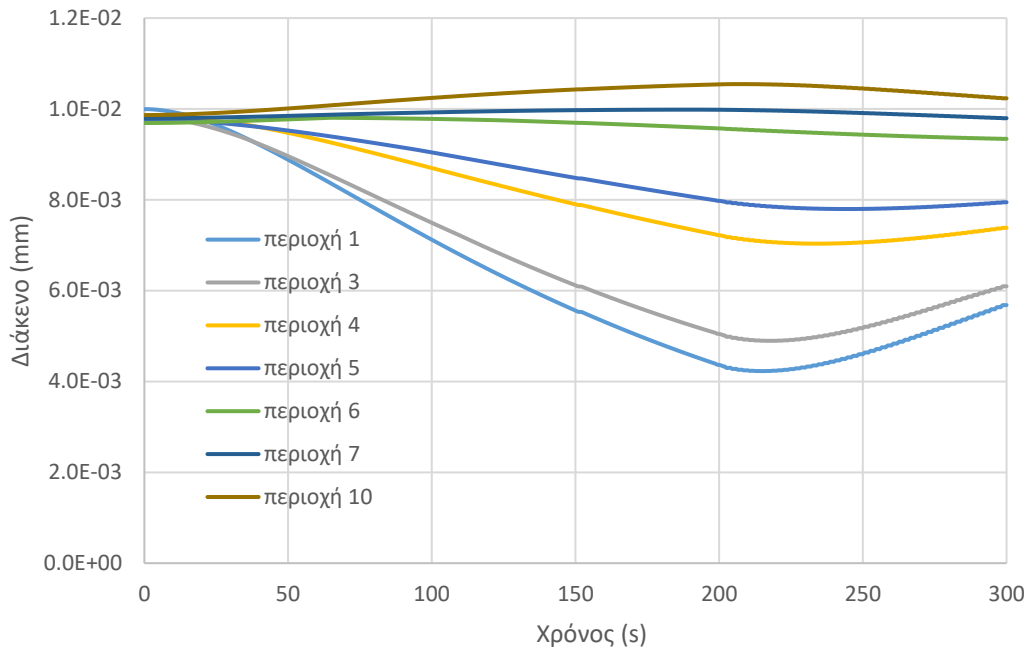


H: 10Kmin
Temperature
Type: Temperature
Unit: K
Time: 250

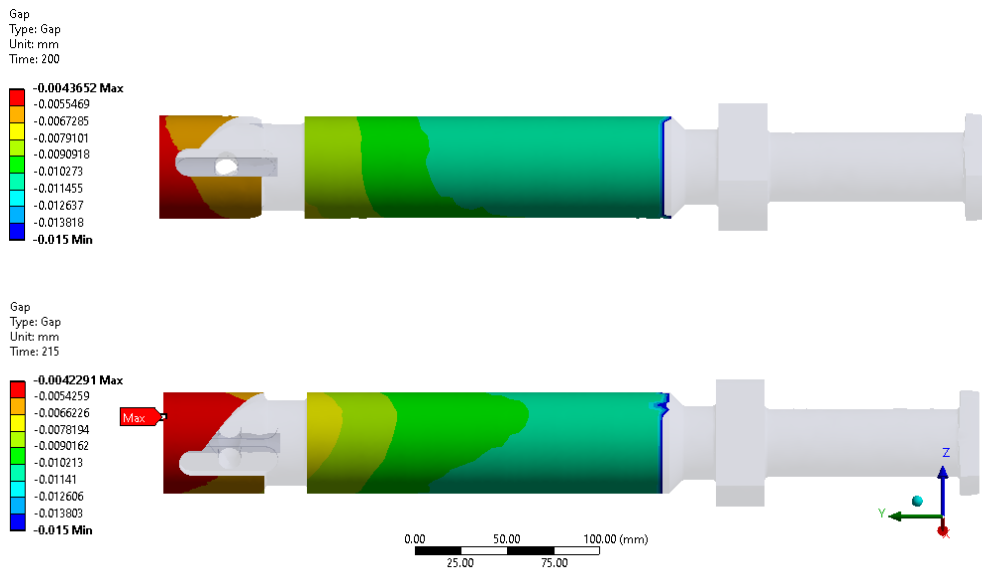


Εικόνα 26: Θερμοκρασία της επιφάνειας του εμβόλου (περίπτωση 1).

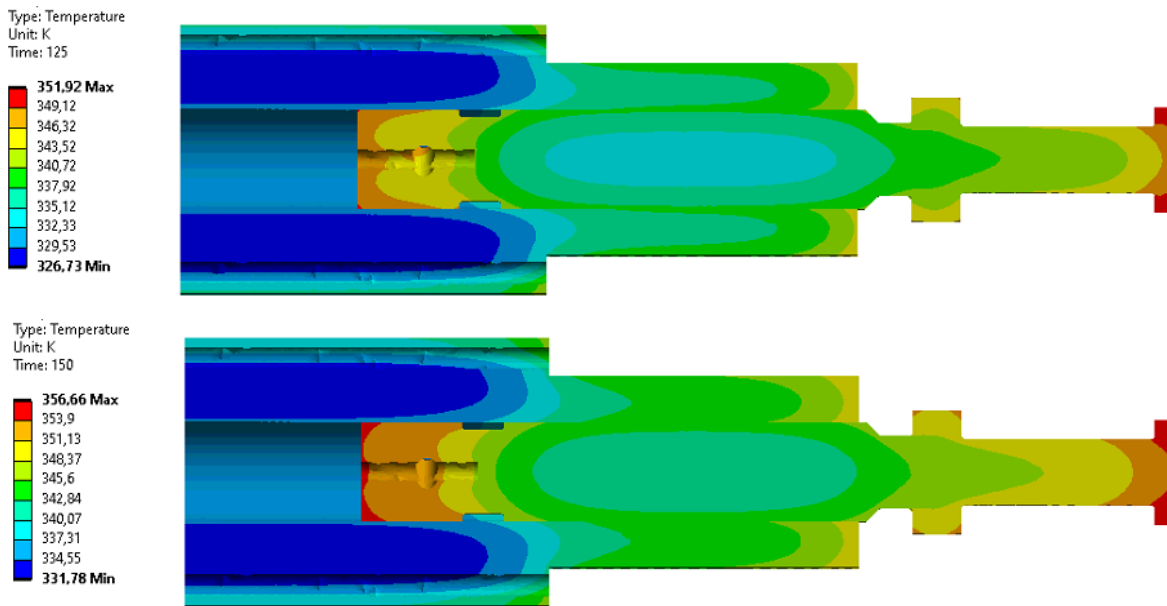
Το μέγιστο διάκενο εμφανίζεται στο ανώτερο μέρος του εμβόλου (όπως φαίνεται στην Εικόνα 27) σε χρόνο 15s μετά την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας στα 363.15K. Το χρονικό διάστημα είναι μεγαλύτερο από αυτό που διαρκεί η αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού για να αποτυπωθεί η σταδιακή επαναφορά του διάκενου όπως και φαίνεται στο Διάγραμμα 5 μετά το $t=215s$ όπου το διάκενο σε όλες τις ζώνες ξεκινάει να προσεγγίζει το αρχικό.



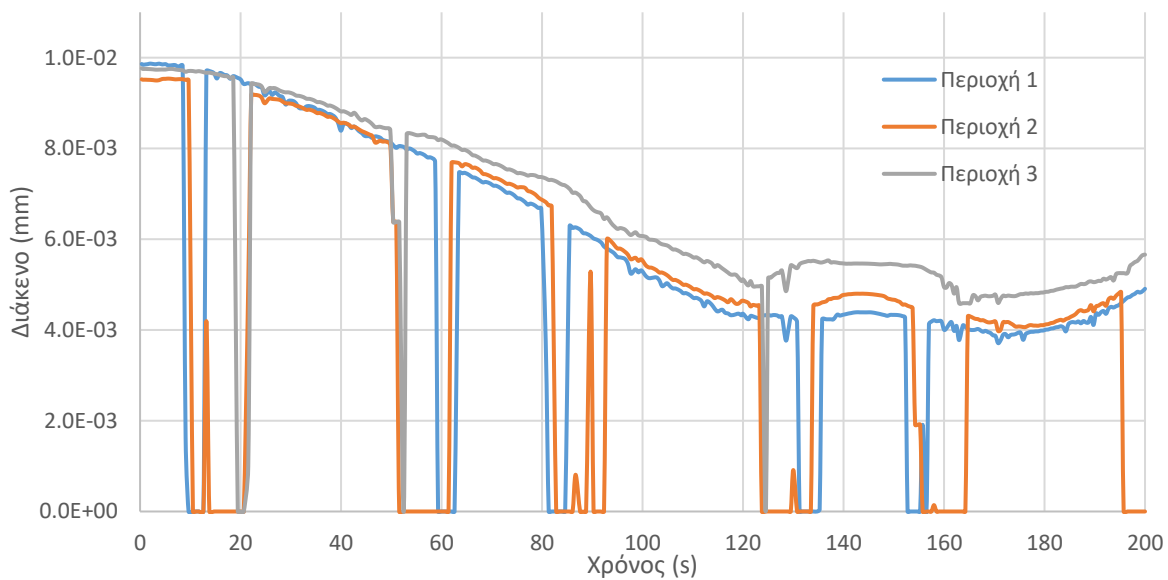
Διάγραμμα 5: Διάκενο συναρτήσει του χρόνου σε διάφορες ζώνες του εμβόλου. $\Delta T=15K/min$ (περίπτωση 1).



Εικόνα 27: Διάκενο ανάμεσα στις επιφάνειες του εμβόλου και του χιτωνίου (περίπτωση 1).



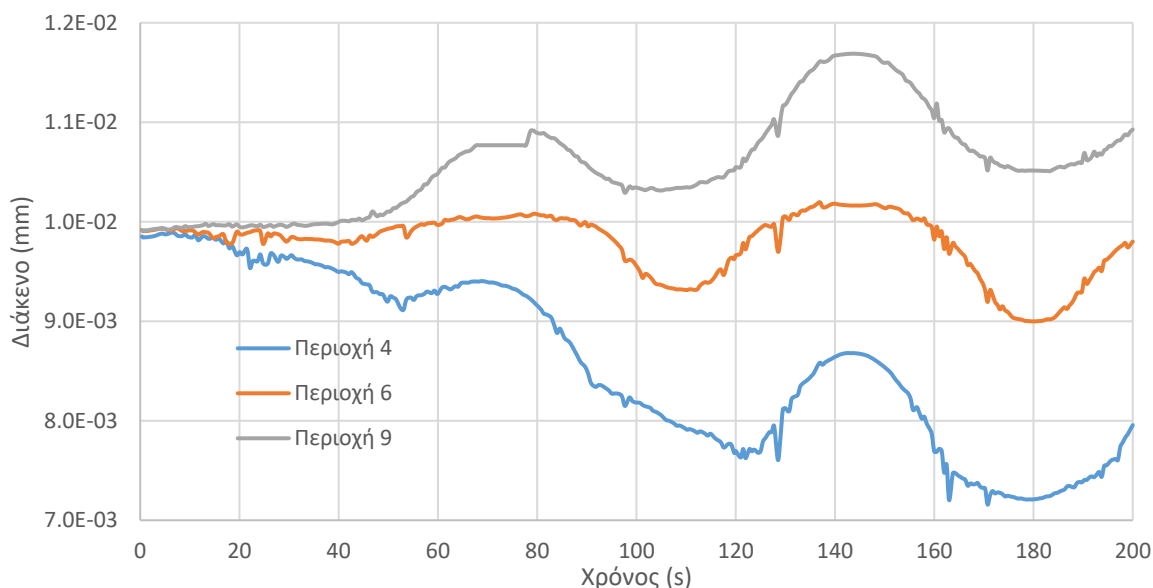
Εικόνα 28: Θερμοκρασία σε τομή, 25K/min (περίπτωση 2)



Διάγραμμα 6: Διάκενο συναρτήσει του χρόνου στο πάνω μέρος του εμβόλου, 25K/min (περίπτωση 2).

Η εξέλιξη του διακένου που φαίνεται στο Διάγραμμα 6 και Διάγραμμα 7 αναφέρεται σε γεωμετρία του χιτωνίου που περιλαμβάνει τις 6 σπές με βαθμούς ελευθερίας που φαίνονται στην Εικόνα 22. Η μεταβολή της θερμοκρασίας διαρκεί 120s. Στο Διάγραμμα 6 παρουσιάζεται η εξέλιξη του διακένου για τις τρεις ζώνες του ελικοειδούς τμήματος του

εμβόλου. Το ελάχιστο διάκενο εμφανίζεται στο ανώτερο τμήμα. Στη χρονική διάρκεια που το διάκενο μηδενίζεται διαπιστώθηκε ότι συμπίπτει με τις χρονικές στιγμές στις οποίες η περιοχή, στην οποία ελαχιστοποιείται το διάκενο, διέρχεται από τις θυρίδες του χιτωνίου. Για να διαπιστωθεί αν η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην παραμόρφωση του χιτωνίου ή είναι αποτέλεσμα του πλέγματος, στην περίπτωση 3 έγινε πύκνωση του πλέγματος στις θυρίδες.

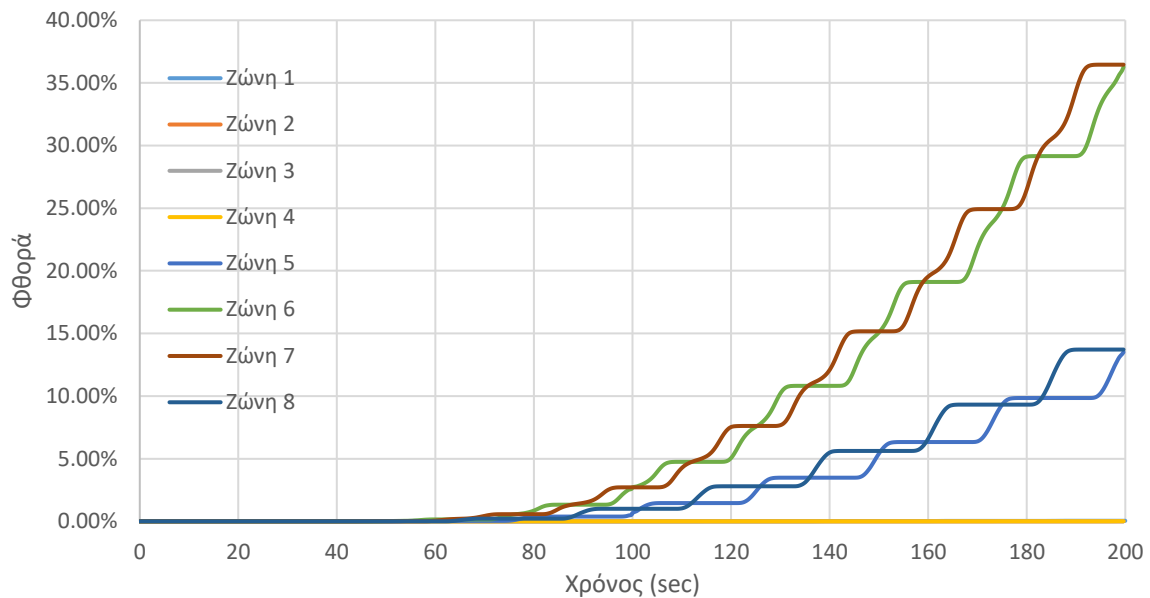


Διάγραμμα 7: Διάκενο συναρτήσεως του χρόνου στο κυλινδρικό μέρος του εμβόλου, $\Delta T=25K/min$ (περίπτωση 2).

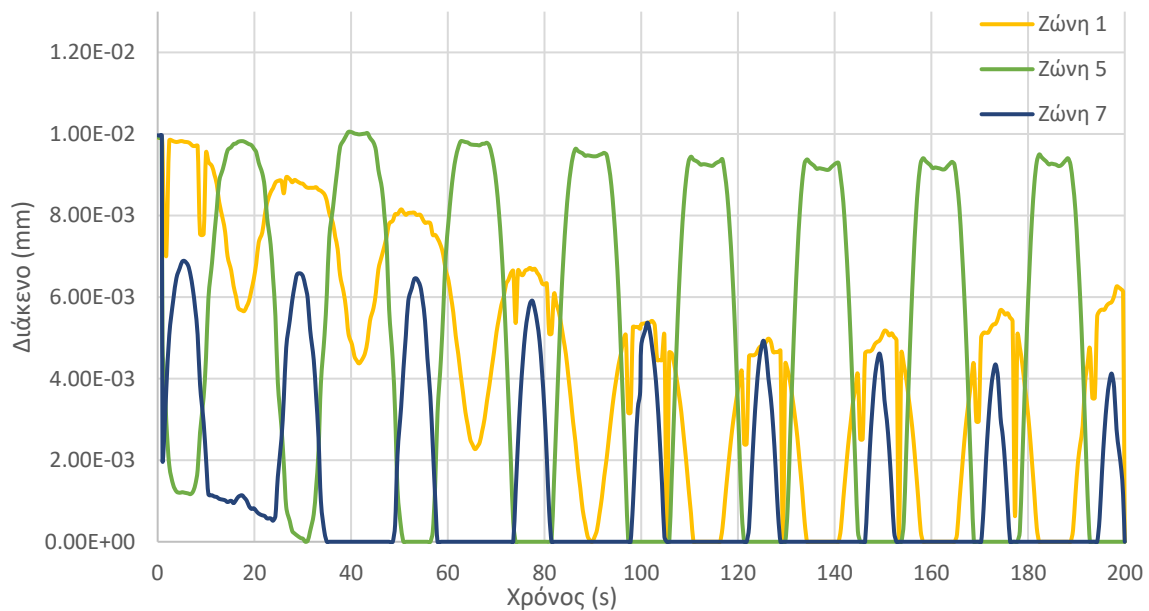
Στο Διάγραμμα 7 φαίνεται η εξέλιξη του διακένου για υψηλό ρυθμό θερμοκρασιακής μεταβολής στις περιοχές του εμβόλου στο κάτω κυλινδρικό μέρος. Η επίδραση της θέσης του εμβόλου που μεταβάλλεται με την επιβολή μετατόπισης στο κάτω μέρος είναι περισσότερο εμφανής σε αυτές τις περιοχές και η μεταβολή του διακένου κυμαίνεται σε μικρότερα επίπεδα. Παρατηρείται, σε συνέπεια με την περίπτωση 1 που εξετάστηκε, η αύξηση του διακένου στις χαμηλότερες περιοχές (Περιοχή 5-10). Οι περιοχές που παρουσιάζονται στα διαγράμματα είναι ενδεικτικές και αποτυπώνουν την τάση μεταβολής που ισχύει και για τις ενδιάμεσες ζώνες που δεν παρουσιάζονται.

Το θερμικό μοντέλο και η επίδραση του στο διάκενο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις στηρίξεις του χιτωνίου και τη δυνατότητα του υλικού να «κινηθεί» προς διάφορες κατευθύνσεις καθώς διαστέλλεται. Η περίπτωση 3 αναδεικνύει ακριβώς το ρόλο των στηρίξεων του χιτωνίου. Επιβάλλοντας υψηλό ρυθμό θερμοκρασιακής μεταβολής και στηρίξεις του χιτωνίου που φαίνονται στην Εικόνα 23 προκύπτει η φθορά ως ποσοστό της συνολικής φθοράς που φαίνεται στο . Η επιλογή να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα ως ποσοστό της συνολικής φθοράς έγινε με δεδομένο ότι ο συντελεστής φθοράς που

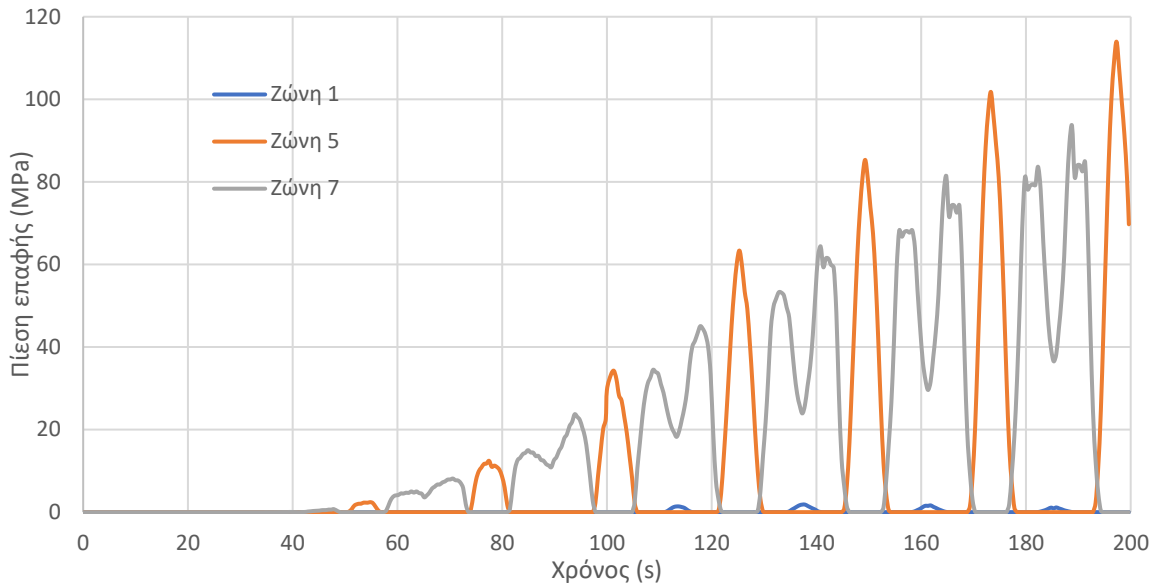
επιλέχθηκε για το νόμο του Archard δεν έχει προκύψει πειραματικά οπότε τα αποτελέσματα έχουν ποιοτική αξία και όχι ποσοτική.



Διάγραμμα 8: Φθορά στις διάφορες ζώνες του εμβόλου ως ποσοστό της συνολικής (περίπτωση 3).



Διάγραμμα 9: Διάκενο σε ορισμένες ζώνες του εμβόλου συναρτήσεως του χρόνου (περίπτωση 3).



Διάγραμμα 10: Πίεση επαφής συναρτήσει του χρόνου σε ορισμένες ζώνες του εμβόλου (περίπτωση 3).

Ο περιορισμός του χιτωνίου στις κυλινδρικές εξωτερικές επιφάνειες του έχει ως αποτέλεσμα ακόμα και σε μικρές θερμοκρασιακές μεταβολές την μεγάλη μείωση του διακένου, ταυτόχρονα θα αναπτύσσονταν θερμικές τάσεις στο σώμα του χιτωνίου. Μικρότερος ρυθμός θερμοκρασιακής μεταβολής συνεπάγεται μικρότερη επίδραση στο διάκενο και για αυτό συνίσταται και από τις οδηγίες των κατασκευαστικών ώστε να μειώνεται ο κίνδυνος φθοράς. Η μελέτη αφορά αποκλειστικά το θέμα της θερμοκρασιακής μεταβολής με παραδοχή για τον συντελεστή συναγωγής, απλοποιήσεις για τις στηρίξεις των στερεών στοιχείων και θεωρώντας πολύ υψηλό ρυθμό θερμοκρασιακής μεταβολής σε σχέση με τον προτεινόμενο. Σε κάθε περίπτωση, καταδεικνύεται ότι στις περιοχές 1 και 2 του εμβόλου εμφανίζεται το ελάχιστο διάκενο και διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο να υπάρξει επαφή αν τα θερμικά φορτία συνεπικουρήσουν σε άλλους παράγοντες μείωσης του διακένου (εκκεντρότητα, χαμηλό ιξώδες, παραμόρφωση του εμβόλου εξαιτίας μεγάλων πιέσεων) που έχουν αναφερθεί και έχουν παρουσιασθεί στο Κεφάλαιο 2. Το παραπάνω συμπέρασμα, διαφοροποιείται εφόσον υπάρχει στήριξη σε κάποιο σημείο της κυλινδρικής επιφάνειας όπως παρουσιάστηκε στην περίπτωση 3 σε αυτήν την περίπτωση η περιοχή που θα εμφανιστεί η φθορά επηρεάζεται στο μέγιστο βαθμό από την θέση της στήριξης.

Σημαντική επίσης παρατήρηση αποτελεί ότι το ελάχιστο διάκενο εμφανίζεται χρονικά μετά την ολοκλήρωση της θερμοκρασιακής μεταβολής, ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τον συντελεστή συναγωγής που έχει εκτιμηθεί και από το ΔT που εφαρμόζεται. Παρά την επιβολή υψηλού $\Delta T/\Delta t$ και την ποσοτική απόκλιση σε περιπτώσεις μικρότερου ρυθμού θερμοκρασιακής μεταβολής, τα αποτελέσματα ποιοτικά δεν διαφοροποιούνται. Επίσης ο

κοινός συντελεστής συναγωγής που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις επιφάνειες εκτιμάται ότι έχει ως αποτέλεσμα την υποτίμηση της επίδρασης, καθώς στην εξωτερική επιφάνεια του χιτωνίου η ταχύτητα του ρευστού θα είναι μικρότερη και η διάμετρος μεγαλύτερη και άρα δεν θα θερμαίνεται με τον ίδιο ρυθμό όπως το εσωτερικό του χιτωνίου και το έμβολο με αποτέλεσμα μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά από αυτή που παρουσιάζεται.

7. Ρευστοδυναμική Μελέτη

7.1 Γεωμετρία

Η γεωμετρία του δισδιάστατου μοντέλου του ρευστού αποτελείται από το εσωτερικό του χιτωνίου, τα κινούμενα τοιχώματα του εμβόλου, μια επιφάνεια που αντιπροσωπεύει τον σωλήνα καταθλίψεως, μία περιοχή που περιλαμβάνει τα τοιχώματα βαλβίδας με έναν βαθμό ελευθερίας που αντιπροσωπεύει την ανύψωση της. Όλες οι επιφάνειες που αναφέρθηκαν περιέχουν καύσιμο ενώ η τελευταία επιφάνεια θεωρείται το εσωτερικό του κυλίνδρου που περιέχει αέρα. Το δισδιάστατο μοντέλο είναι αξονοσυμμετρικό, για χάρη της απλοποίησης ώστε να επιτευχθεί η αναπαράσταση στις δύο διαστάσεις, το έμβολο έχει θεωρηθεί ως ένας ενιαίος κύλινδρος. Το δισδιάστατο μοντέλο στερεί τη δυνατότητα ύπαρξης των θυρίδων εισαγωγής/υπερχειλίσεως με αποτέλεσμα να μελετάται το χρονικό διάστημα που ανταποκρίνεται στην κατάθλιψη του καυσίμου. Το χρονικό αυτό διάστημα ξεκινά από τη στιγμή που κλείνουν οι θυρίδες και ολοκληρώνεται με το άνοιγμα τους. Με τις παραπάνω απλοποιήσεις επιτεύχθηκε η σημαντική μείωση του υπολογιστικού κόστους.

Πίνακας 9: Γεωμετρία του δισδιάστατου μοντέλου.

	Μέγεθος	Μονάδες Μέτρησης
Συνολικός όγκος ρευστού στο χιτώνιο	333.440	mm ³
Όγκος ρευστού στο διάκενο	217,31	mm ³
Ακτινικό διάκενο εμβόλου-χιτωνίου	10	μm
Μήκος διακένου	133	mm
Ακτίνα σωλήνα καταθλίψεως	10	mm
Μήκος σωλήνα καταθλίψεως	2000	mm
Όγκος κυλίνδρου	752.376,19	mm ³

Οι επιφάνειες στο εσωτερικό του χιτωνίου και το διάκενο δημιουργήθηκαν με κριτήριο να υπάρχει αντιστοίχιση στον όγκο του ρευστού. Η στιγμή που ξεκινάει η μελέτη είναι η στιγμή που μόλις έχουν κλείσει οι θυρίδες και ξεκινάει η συμπίεση, η ταχύτητα του εμβόλου με την οποία ξεκινάει το προφίλ που γράφτηκε και ενσωματώθηκε στο μοντέλο είναι η ταχύτητα που έχει το έμβολο όταν φτάνει στη θέση όπου κλείνει τις θυρίδες. Στον Πίνακα 9 αναγράφονται τα στοιχεία που καθόρισαν την γεωμετρία που σχεδιάστηκε για το δισδιάστατο μοντέλο. Οι όγκοι έχουν υπολογιστεί για τη θέση του εμβόλου όπου ξεκινάει η συμπίεση μέσω του Design Modeler. Η εσωτερική διάμετρος του χιτωνίου, η εξωτερική διάμετρος του εμβόλου, καθώς και το αρχικό ύψος του διακένου δεν μεταβλήθηκαν. Η προσαρμογή αφορά το ύψος του χιτωνίου. Η ταχύτητα του εμβόλου τη στιγμή που κλείνουν

οι θυρίδες είναι 1.759,26 m/s, η διαδρομή που έχει διανύσει το έμβολο είναι 10mm. Αυτό προέκυψε από ο δεδομένο ότι η διαδρομή του εμβόλου ξεκινάει 3mm κάτω από την ακμή των θυρίδων εξυπηρετώντας την αναρρόφηση του ρευστού κατά την κάθοδο του εμβόλου.

Πίνακας 10: Ταχύτητα του εμβόλου

Cam degrees	Time(s)	Velocity(m/s)
0	0	0
2.5	0.00347	823.68
5	0.00694	1843.2
5.5	0.00766	1759.26
10	0.01389	1031.04
15	0.02083	1127.52
20	0.02778	1206.72
25	0.03472	1267.2

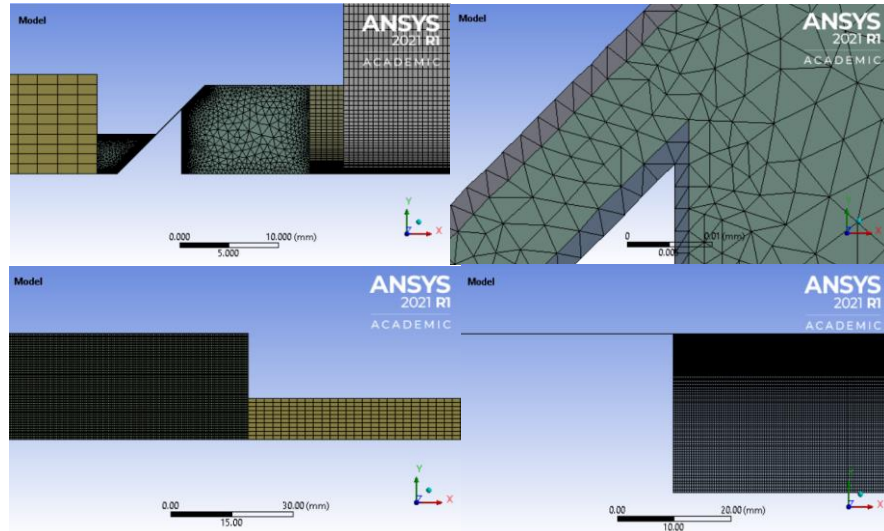
Σημειώνεται ότι τα αρχικά μοντέλα του ρευστού δεν συμπεριλάμβαναν τον σωλήνα καταθλίψεως ούτε τον κύλινδρο με τον αέρα. Στην πορεία έγινε αισθητό ότι το ρευστό κατάντι της αντλίας καθώς και ο κύλινδρος με τον αέρα ήταν απαραίτητα για να μελετηθεί η ανάπτυξη της πίεσης με το χρόνο. Δεν υπάρχει εναλλακτική ώστε να μοντελοποιηθούν οι επιδράσεις αυτών των παραγόντων. Δοκιμάστηκαν μοντέλα που περιλάμβαναν την αντλία καυσίμου και τη βαλβίδα με ορισμό πίεσης εξόδου από το χιτώνιο και η προσθήκη του σωλήνα καταθλίψεως χωρίς τον κύλινδρο με τον αέρα αλλά η πίεση εξόδου που οριζόταν ήταν σχετικά αυθαίρετη τα αποτελέσματα δεν κρίθηκαν ικανοποιητικά στην περιγραφή ανάπτυξης πίεσης στο σύστημα. Το μοντέλο βελτιώθηκε και συμπληρώθηκε σταδιακά μέχρι να καταλήξει στη μορφή που παρουσιάζεται.

7.2 Πλέγμα και χρονικό βήμα

Στην Εικόνα 29 παρουσιάζεται το πλέγμα στις διάφορες περιοχές του ρευστού, στις εικόνες στο πάνω μέρος φαίνεται το τέλος του αγωγού καταθλίψεως, η βαλβίδα και μια περιοχή του κυλίνδρου που περιέχει τον αέρα. Στην εικόνα πάνω δεξιά παρουσιάζεται το διάκενο ανάμεσα στη βαλβίδα και το κάθισμα της το οποίο είναι 0.0152mm με ύπαρξη ξεχωριστών ζωνών κοντά στα τοιχώματα. Εξαιτίας περιορισμού των στοιχείων έγινε πύκνωση του πλέγματος όπου θεωρήθηκε απαραίτητο (κοντά σε τοιχώματα, στην περιοχή της βαλβίδας εξαιτίας του διάκενου, σε περιοχές μεταβολής της διαμέτρου). Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά ήταν 184618 και οι κόμβοι 147031, η χρήση δυναμικού πλέγματος και η αύξηση των στοιχείων της κίνησης της βαλβίδας είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση αυτού του αριθμού. Στο κάτω μέρος της Εικόνα 29 παρουσιάζεται το πλέγμα στην περιοχή του χιτωνίου και την είσοδο στον σωλήνα καταθλίψεως, ενώ στην εικόνα κάτω αριστερά φαίνεται και η περιοχή του διακένου ανάμεσα στο έμβολο και το χιτώνιο. Απαιτήθηκαν υπολογισμοί ώστε στις μέγιστες ταχύτητες του εμβόλου και

δεδομένο χρονικό βήμα η μετακίνηση του να μην ξεπερνάει το ύψος των κελιών που δημιουργήθηκαν στην περιοχή του διάκενου και του χιτωνίου, σε διαφορετική περίπτωση προκύπτει σφάλμα αρνητικού όγκου κελιών.

Το χρονικό βήμα κατά το 25% του χρόνου ήταν $3.5e-5$ και στον υπόλοιπο χρόνο μειώθηκε στο $1e-5$ εξαιτίας υψηλού αριθμού Courant.



Εικόνα 29: Πλέγμα δισδιάστατου μοντέλου ρευστού.

7.3 Ορισμός του μοντέλου

Εξαιτίας των εξαιρετικά υψηλών πιέσεων που αναπτύσσονται στο σύστημα έγχυσης του καυσίμου δεν μπορεί να αμεληθεί η ελαστικότητα του υγρού καυσίμου. Το χωρικό μέτρο ελαστικότητας ορίζεται από τη σχέση:

$$E_x = \frac{dp}{-dV} = \frac{dp}{d\rho}.$$

Η ταχύτητα του ήχου με την οποία μεταδίδονται οι μεταβολές της πίεσης είναι:

$$\alpha = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\frac{E_x}{\rho}}.$$

Η αύξηση της πίεσης στο σύστημα εγχύσεως δεν είναι ενιαία αλλά χαρακτηρίζεται από δυναμικά φαινόμενα. Το κύμα πίεσης που δημιουργείται από την κίνηση του εμβόλου και κινείται προς τον εγχυτήρα, καταλαμβάνει μήκος στον σωλήνα καταθλίψεως:

$$L = \alpha(\Delta t_a)_e,$$

όπου που $(\Delta t_a)_e$ ο πραγματικός χρόνος καταθλίψεως της αντλίας.

Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά καυσίμου.

	Μέγεθος	Μονάδες Μέτρησης
Πυκνότητα (ρ_0)	960	kg/m ³
Χωρικό μέτρο ελαστικότητας (E_x)	1.5e+09	Pa
Δυναμικό ιξώδες (η)	0.012	kg/(m s)

Στις δύο ακμές που αντιπροσωπεύουν την επιφάνεια του εμβόλου έχει προσδοθεί ταχύτητα με την εισαγωγή προφίλ με δεδομένα αυτά που φαίνονται στον Πίνακας 11. Σε όλες τις ενδιάμεσες χρονικές στιγμές η ταχύτητα που χρησιμοποιείται προκύπτει από γραμμική παρεμβολή των δεδομένων που εισήχθησαν. Το πλέγμα στο διάκενο κινείται με την ίδια ταχύτητα και κατεύθυνση, ενώ το ύψος των στοιχείων του πλέγματος πάνω από το έμβολο μειώνεται μέχρι ένα μήκος και μετά συγχωνεύονται με τα κελιά ακριβώς από πάνω (layering). Η επιφάνεια στην έξοδο ορίζεται ως σταθερή. Τη μεγαλύτερη περιπλοκότητα στην ρύθμιση του πλέγματος έχει η περιοχή της βαλβίδας. Απαιτείται δημιουργία σταθερών ζωνών γύρω από τα τοιχώματα. Στη βαλβίδα που αποτελείται από δύο ακμές η πάνω οριζόντια έχει θεωρηθεί παθητική, η πίεση που ασκείται σε αυτή από το ρευστό που έρχεται σε επαφή με τον αέρα στον κύλινδρο αγνοείται και δεν επηρεάζει την ανύψωση της βαλβίδας.

Πίνακας 12: Προφίλ ταχύτητας για τις επιφάνειες του εμβόλου.

Χρόνος (s)	Ταχύτητα (mm/s)
0	1759.26
0.00623	1031.04
0.01317	1127.52
0.02012	1206.72
0.02706	1267.2

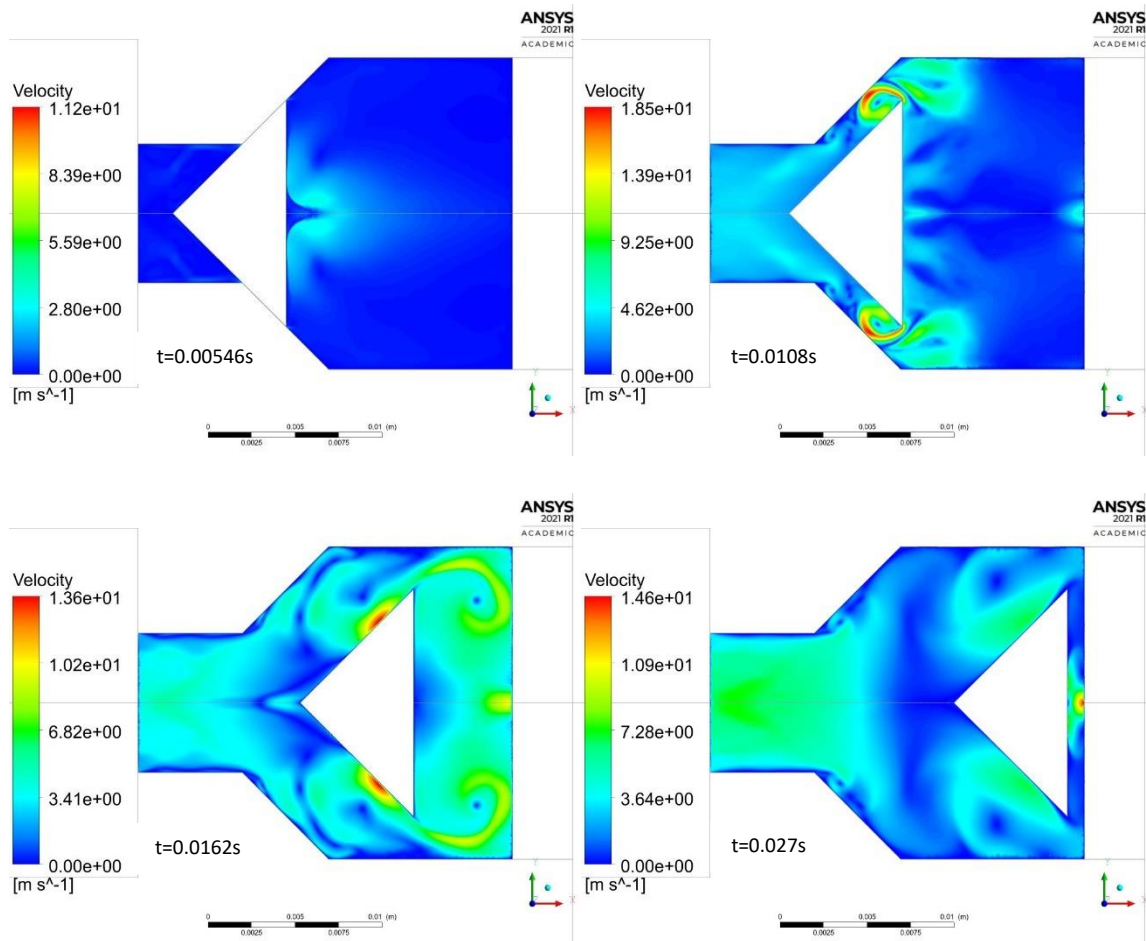
Πίνακας 13: Χαρακτηριστικά ελατηρίου της βαλβίδας.

	Μέγεθος	Μονάδες Μέτρησης
Μάζα	0.895	kg
Προένταση	3795.75	N
Σταθερά ελατηρίου	562000	N/m
Μέγιστη δυνατή συμπίεση	0.012	m

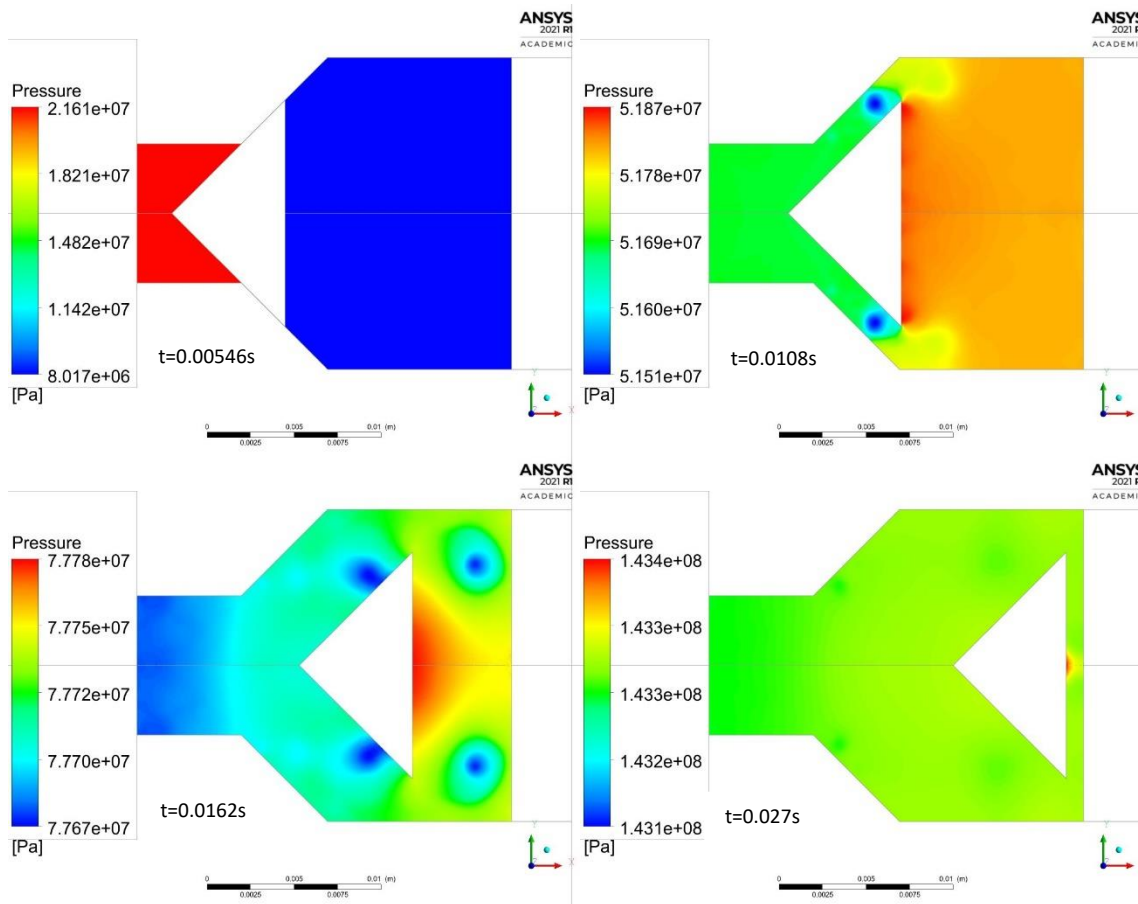
Στην περιοχή της βαλβίδας έχει χρησιμοποιηθεί δυναμικό πλέγμα με ενεργοποίηση και των τριών μεθόδων που παρέχονται (smoothing, layering, remeshing).

7.4 Αποτελέσματα

Η ανύψωση της βαλβίδας καθορίζεται από τα δεδομένα της προέντασης και της σταθεράς του ελατηρίου που φαίνονται στον Πίνακας 13. Η προένταση υπολογίστηκε με βάση την πληροφορία ότι η βαλβίδα ξεκινάει να ανυψώνεται όταν στο καύσιμο έχει αναπτυχθεί πίεση 380bar. Η θέση της βαλβίδας και η ταχύτητες που διαμορφώνονται στη συγκεκριμένη περιοχή φαίνονται στην Εικόνα 30 . Ο χρόνος $t=0.27$ (Εικόνα 30 κάτω δεξιά) αντιστοιχεί στην τελευταία χρονική στιγμή πριν αποκαλυφθούν οι θυρίδες υπερχειλίσεως και τερματιστεί η κατάθλιψη του ρευστού. Η θέση της βαλβίδας που παρουσιάζεται τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή ισοδυναμεί με τη μέγιστη μετατόπιση $dx=12\text{mm}$.

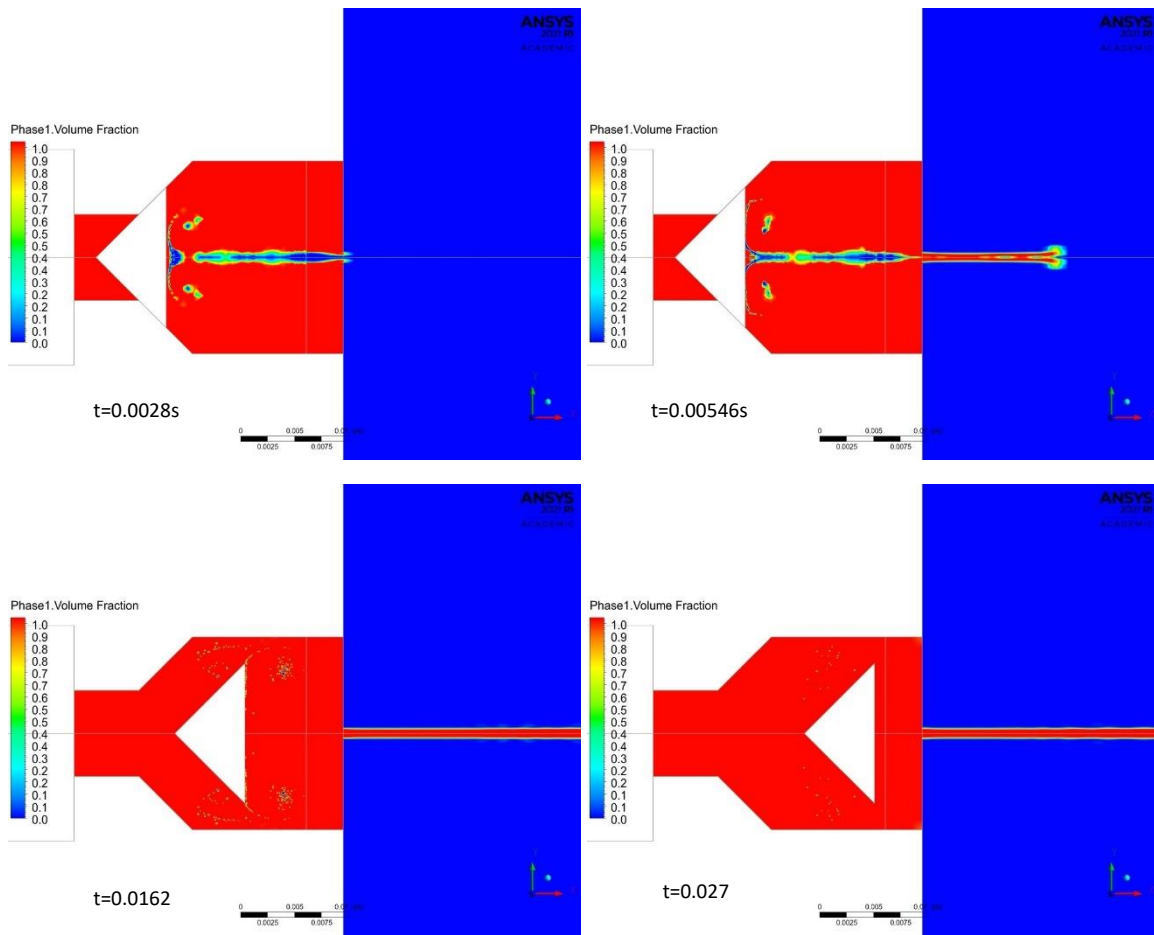


Εικόνα 30: Ταχύτητα στην περιοχή της βαλβίδας σε διάφορους χρόνους.



Εικόνα 31: Πίεση στην περιοχή της βαλβίδας σε διάφορους χρόνους.

Στις Εικόνα 30 και Εικόνα 31 φαίνεται ότι σε περιοχές όπου η πίεση είναι μικρή, η ταχύτητα είναι μεγάλη και αντιστρόφως. Η παρατήρηση αυτή βρίσκεται σε συνέπεια με την αρχή διατήρησης της ενέργειας ή το θεώρημα του Bernoulli για τα υγρά.

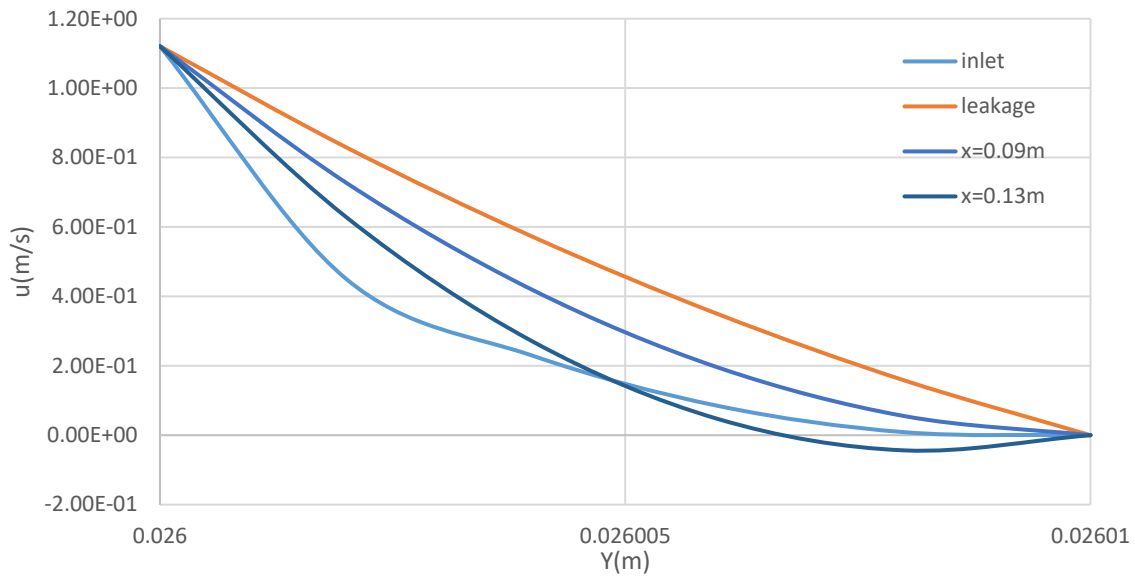


Εικόνα 32: Περιοχή των δύο ρευστών.

Στην Εικόνα 32 παρουσιάζεται η περιοχή στην οποία συνυπάρχουν ο αέρας και το καύσιμο. Η απουσία κάποιου διαχωριστικού έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζεται μια μετατόπιση από την μία στην άλλη περιοχή των ρευστών πριν την ανύψωση της βαλβίδας. Η μελέτη δεν αφορούσε την ανάμιξη των δύο ρευστών και την έγχυση στον κύλινδρο του καυσίμου, για αυτό το λόγο επιλέχθηκαν ορισμένες απλοποιητικές διαμορφώσεις της γεωμετρίας.

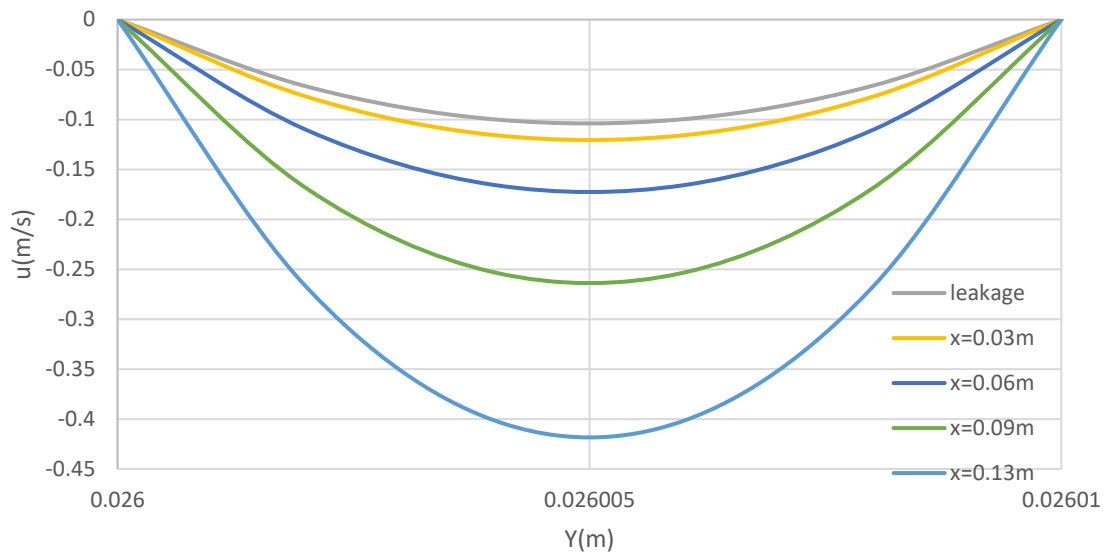
Η ταχύτητα στο διάκενο καθορίζεται από τη ροή Couette που σχετίζεται με την ταχύτητα του εμβόλου και τη ροή Hagen-Poiseuille που προκύπτει εξαιτίας της διαφοράς πίεσης στην είσοδο και την έξοδο του ρευστού στο διάκενο. Στην έξοδο η πίεση θεωρείται ατμοσφαιρική, ενώ η πίεση στην είσοδο καθορίζεται από την κατάθλιψη εξαιτίας της κίνησης του εμβόλου.

Τη χρονική στιγμή $t=0.00546s$, η πίεση στην είσοδο στο διάκενο είναι 312 bar. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 11 στο οποίο αποτυπώνεται το άθροισμα των ρών Couette και Poiseuille δεν υπάρχουν διαρροές τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.



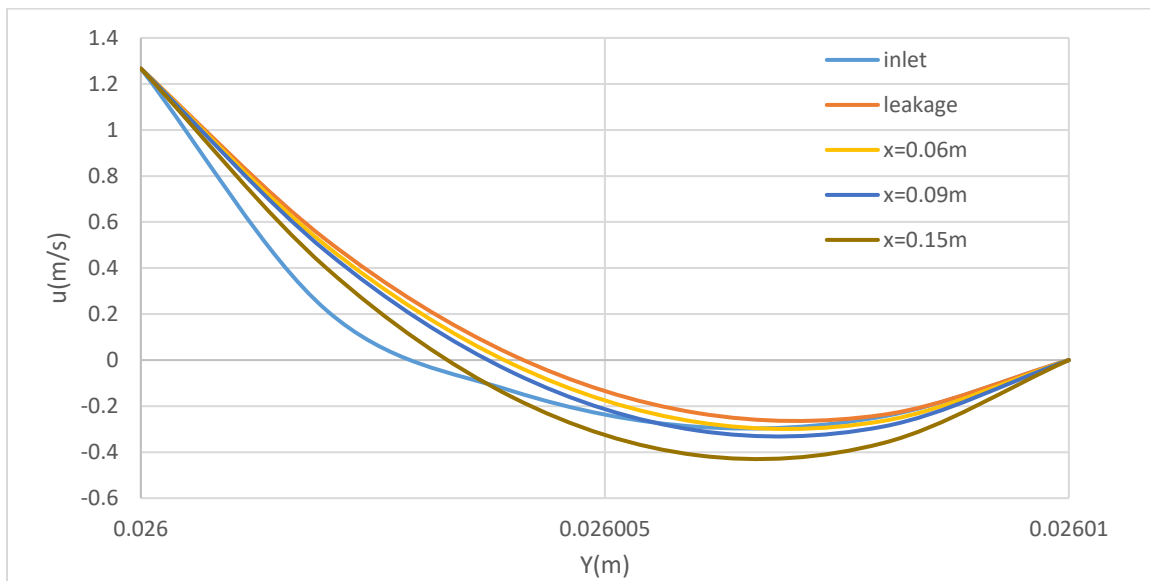
Διάγραμμα 11: Ταχύτητα σε διάφορες τομές του διακένου, $t=0.00546$ s.

Η ταχύτητα εξαιτίας ροής Couette μειώνεται με την αύξηση της απόστασης από τον κινούμενο τοίχο που αναπαριστά την επιφάνεια του εμβόλου και μηδενίζεται καθώς προσεγγίζει τον σταθερό τοίχο που ανταποκρίνεται στην επιφάνεια του χιτωνίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι αρνητικές ταχύτητες να εμφανίζονται σε μικρή απόσταση από τον σταθερό τοίχο με την ροή Hagen-Poiseuille να καθορίζει τη φορά.



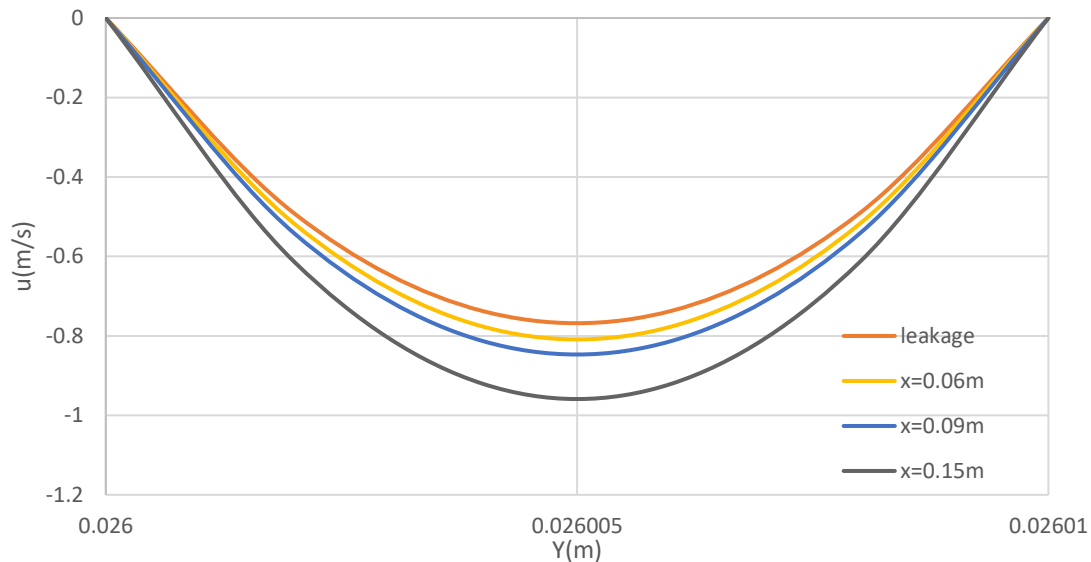
Διάγραμμα 12: Ταχύτητα εξαιτίας ροής Poiseuille σε διάφορες τομές, $t=0.00546$ s.

Αντίθετα πλησιέστερα στον κινούμενο τοίχο έχουμε θετικές ταχύτητες με τη ροή Couette να κυριαρχεί. Η ροή μεταβάλλεται με το χρόνο εξαιτίας της ανάπτυξης της πίεσης, της αύξησης του μήκους (x) του διακένου και της μεταβολής της ταχύτητας του εμβόλου.

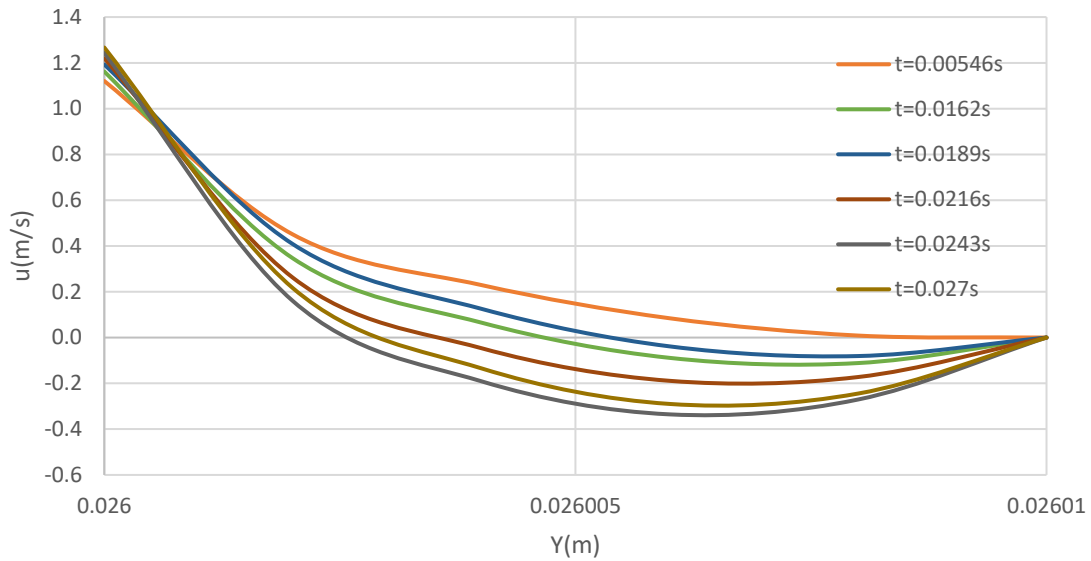


Διάγραμμα 13: Ταχύτητα σε διάφορες τομές του διακένου, $t=0.27$ s.

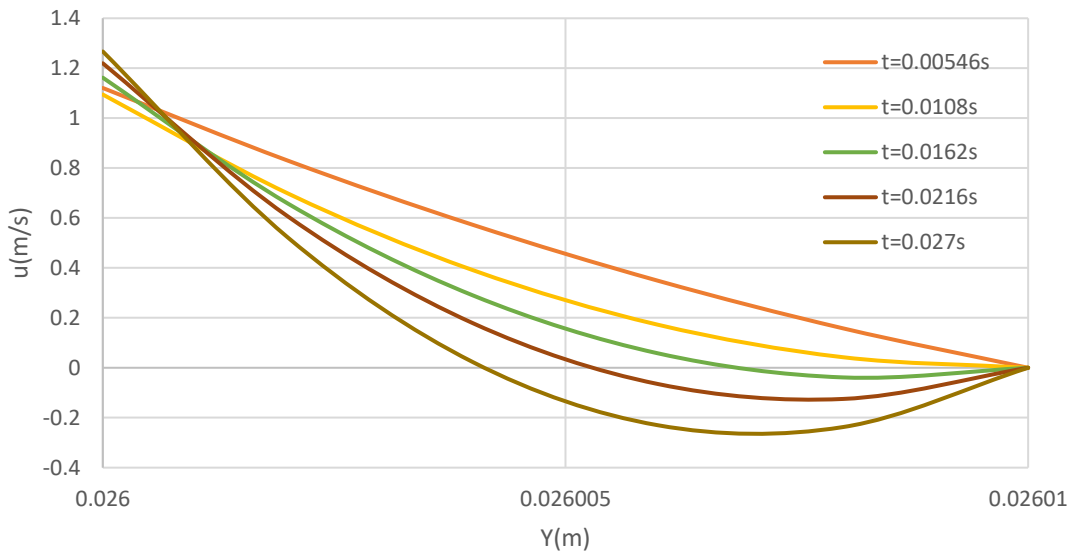
Στο Διάγραμμα 13 αποτυπώνονται οι ταχύτητες σε διάφορες τομές στο διάκενο τη χρονική στιγμή ακριβώς πριν ανοίξουν οι θυρίδες. Η πίεση στην είσοδο στο διάκενο αυτή τη χρονική στιγμή είναι 1350 bar. Στην έξοδο έχουμε διαρροές με μέγιστη ταχύτητα περίπου $u=0.23$ m/s και κατεύθυνση αντίθετη από αυτή της κίνησης του εμβόλου.



Διάγραμμα 14: Ταχύτητα εξαιτίας ροής Poiseuille σε διάφορες τομές, $t=0.27$ s .



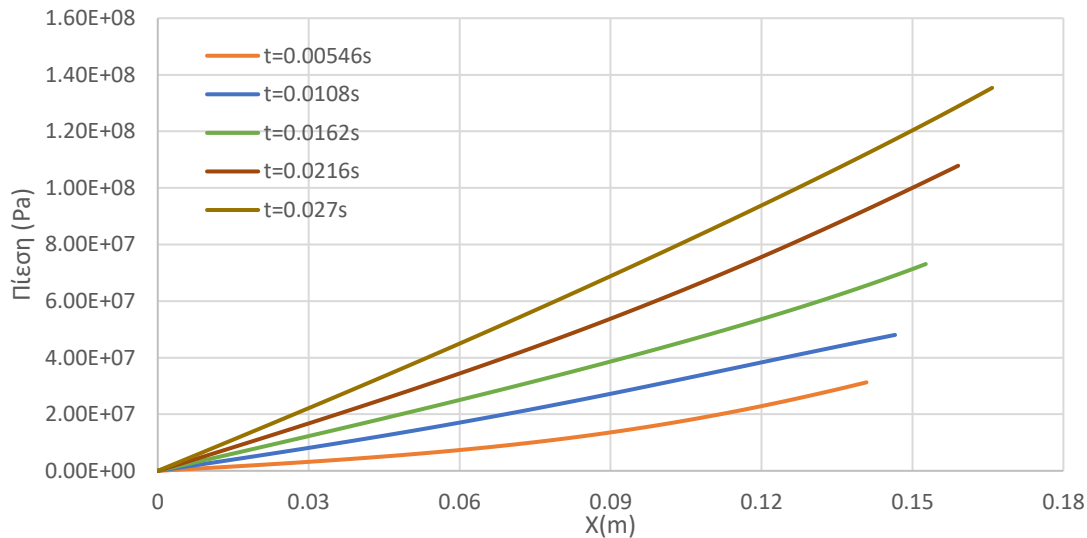
Διάγραμμα 15: Ταχύτητα στην είσοδο στο διάκενο σε διάφορους χρόνους



Διάγραμμα 16: Ταχύτητα στην έξοδο από το διάκενο σε διάφορους χρόνους.

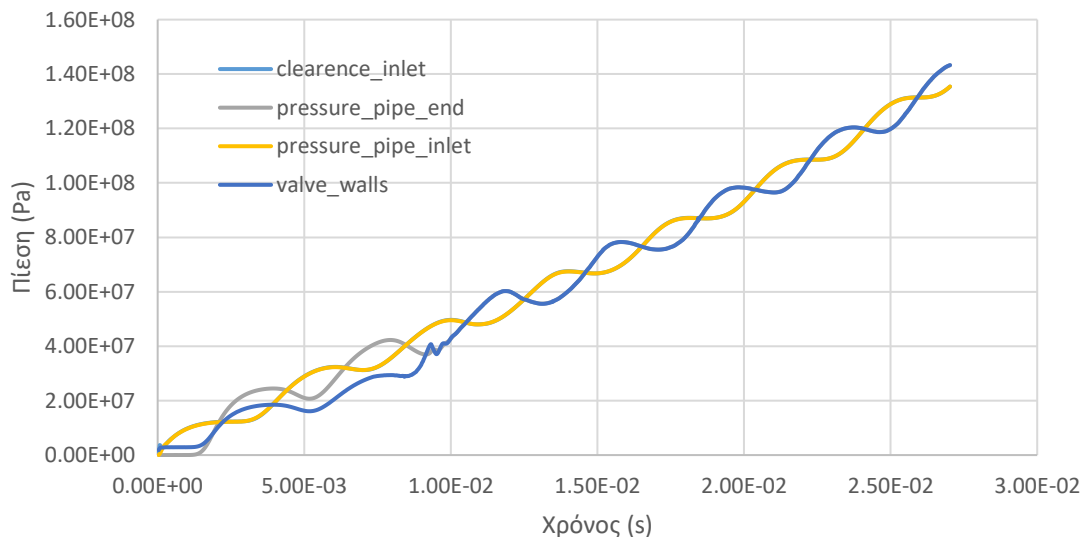
Στα Διάγραμμα 15 και Διάγραμμα 16 παρουσιάζονται οι ταχύτητες στην είσοδο και την έξοδο για διάφορες χρονικές στιγμές. Στην έξοδο φαίνεται η ταχύτητα εξαιτίας της ροής Poiseuille συνεχώς αυξάνεται με το χρόνο, με αποτέλεσμα να αυξάνονται και οι διαρροές ακολουθώντας την κλίση πίεσης. Αντίθετα στην είσοδο μεταγενέστερες χρονικές στιγμές δεν αντιστοιχούν απαραίτητα σε μεγαλύτερη απόλυτη τιμή της ταχύτητας κοντά στον σταθερό τοίχο.

Στο Διάγραμμα 16 παρουσιάζεται η ταχύτητα στην έξοδο από το διάκενο, η ταχύτητα από τα δεδομένα που έχουν εξαχθεί παρατηρείται να είναι αρνητική για πρώτη φορά τη χρονική στιγμή $t=0.0135s$. Στο Διάγραμμα 16 η χρονική στιγμή που παρουσιάζονται διαρροές είναι την $t=0.0162s$ με αύξηση της ταχύτητας και κατ' επέκταση των διαρροών με το χρόνο.



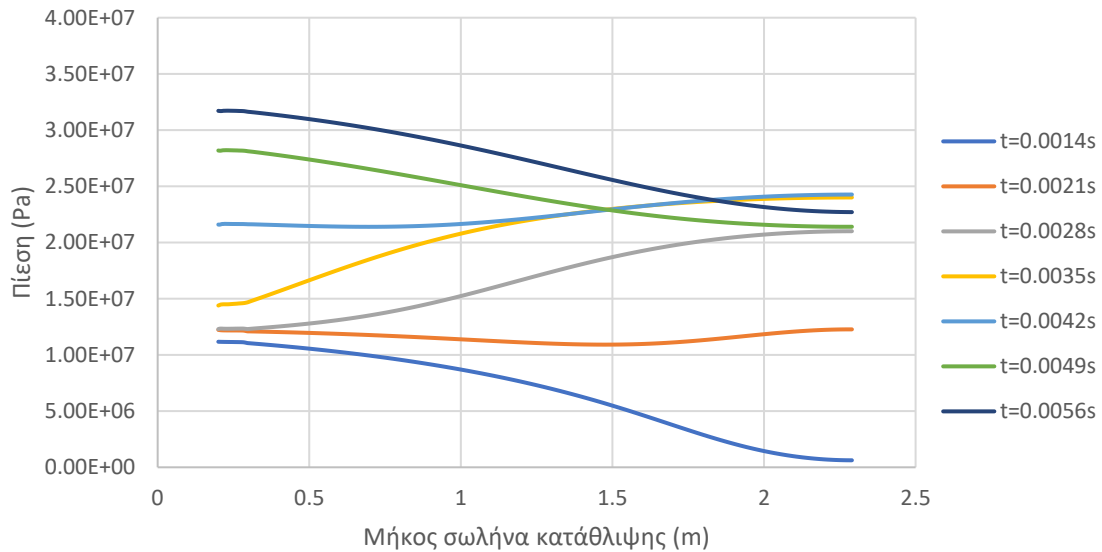
Διάγραμμα 17: Πίεση στο διάκενο διάφορες χρονικές στιγμές.

Στο Διάγραμμα 17 φαίνεται η πίεση με το χρόνο κατά μήκος (x) του διακένου. Όσο αυξάνεται ο χρόνος και αναπτύσσεται η πίεση στο σύστημα της αντλίας η πίεση στην είσοδο στο διάκενο αυξάνεται ενώ στην έξοδο παραμένει ατμοσφαιρική.

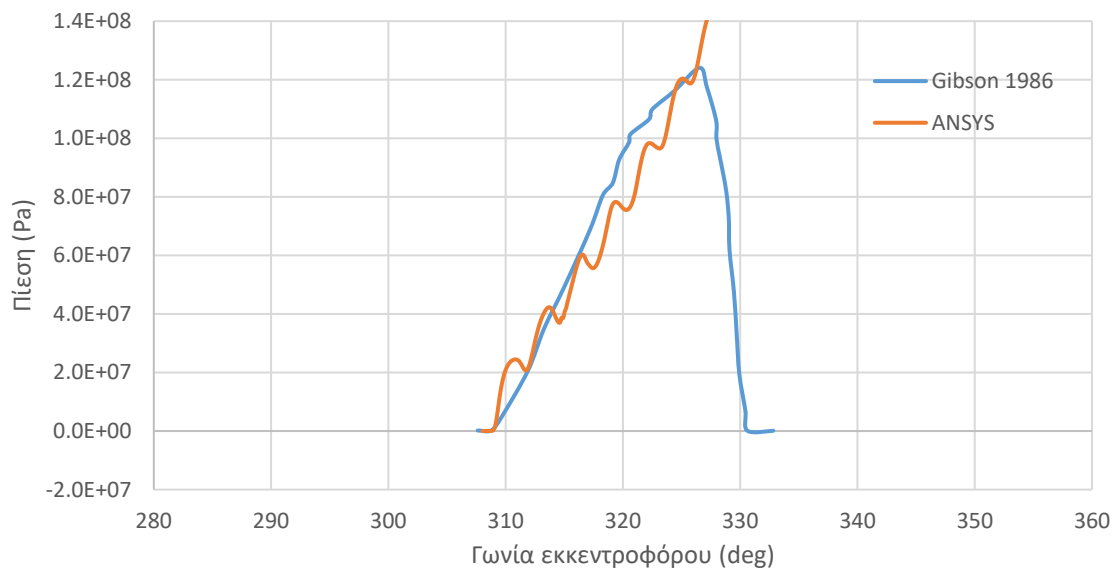


Διάγραμμα 18: Πίεση συναρτήσει του χρόνου.

Στο Διάγραμμα 18 παρουσιάζεται η πίεση με το χρόνο σε διάφορες τομές μέσα στην αντλία και στον σωλήνα καταθλίψεως. Είναι εμφανής η παρουσία κύματος πίεσης που αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου. Η βαλβίδα ανοίγει κοντά στα 9 ms επιβεβαιώνοντας την προένταση του ελατηρίου που υπολογίστηκε με βάση τη γεωμετρία της και τις οριακές συνθήκες ανάντι και κατάντι της βαλβίδας.



Διάγραμμα 19: Κύμα πίεσης κατά μήκος του σωλήνα καταθλίψεως σε διάφορες χρονικές στιγμές.



Διάγραμμα 20: Σύγκριση της πίεσης στο τέλος του σωλήνα καταθλίψεως με πίεση από βιβλιογραφία.

Στο Διάγραμμα 20 φαίνονται συγκριτικά τα αποτελέσματα της πίεσης με το χρόνο προσαρμοσμένα σε μοίρες του εκκεντροφόρου άξονα σε σχέση με δεδομένα από την Εικόνα 2 στην οποία δίνεται η πίεση στην περίπτωση ενιαίου συστήματος αντλίας-εγχυτήρα. Τα δεδομένα από το διάγραμμα του Κεφαλαίου 2 εξήχθησαν με τη βοήθεια Plot Digitizer με βάση ορισμένο αριθμό σημείων οι συντεταγμένες των οποίων υπολογίστηκαν από την εφαρμογή αφού προηγήθηκε η βαθμονόμηση με βάση δύο σημεία για κάθε άξονα. Η πίεση στην παρούσα μελέτη φτάνει μέχρι περίπου τα 140 MPa ενώ στην περίπτωση της μελέτη που αφορά την ενιαία αντλία (Gibson 1986) η πίεση που καταγράφηκε είναι 124 MPa. Οι καμπύλες είναι προσαρμοσμένες ώστε να συμπίπτει η έναρξη της κατάθλιψης.

8. Συμπεράσματα και προτάσεις

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, ορισμένα από τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στις αντλίες υψηλής πίεσης διερευνήθηκαν σε μεγάλο βαθμό και άλλα παρέμειναν ανοιχτά και αναδείχθηκε η περιπλοκότητα και η δυσκολία να προσεγγιστούν. Η μελέτη των θερμοκρασιακών μεταβολών που συνοδεύει την εναλλαγή μεταξύ αποσταγμάτων και υπολειμματικών καυσίμων οδήγησε στην πρωτοκαθεδρία δύο παραγόντων που καθορίζουν την περιοχή της εμφάνισης και την ένταση της φθοράς. Ο πρώτος παράγοντας, που εμφανίζεται και στις οδηγίες που δίνονται από τις κατασκευαστικές, είναι ο ρυθμός της θερμοκρασιακής μεταβολής του καυσίμου. Ο δεύτερος παράγοντας είναι οι στηρίξεις του χιτωνίου, συγκεκριμένα η παρουσία στηρίξεων στις εξωτερικές επιφάνειες εμποδίζει τη διαστολή του υλικού στην ακτινική κατεύθυνση με αποτέλεσμα την ανάπτυξη θερμικών τάσεων και την μείωση του διάκενου στην περιοχή που υπάρχει η στήριξη. Η φθορά εντοπίζεται στις περιοχές του εμβόλου που κινούνται σε ένα εύρος γύρω από την κυλινδρική επιφάνεια του χιτωνίου στην οποία εφαρμόζεται η στήριξη με μείωση της φθοράς όσο απομακρυνόμαστε από αυτό το εύρος. Η μελέτη του ρευστού κατέληξε σε πίεσης που κινούνται αρκετά υψηλότερα από τις αρχικά εκτιμώμενες, χωρίς να ξεπερνούν τα όρια των μέγιστων πιέσεων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Οι πληροφορίες για τις ταχύτητες που αναπτύσσονται στο διάκενο ως αποτέλεσμα της επαλληλίας των ροών Hagen-Poiseuille και Couette παρέχουν πληροφορίες που επιβεβαιώνουν ότι στην περίπτωση που υπάρχει παρουσία σκληρών σωματιδίων στο καύσιμο εξαιτίας της υπερίσχυσης της ροής Hagen-Poiseuille θα εμφανιστεί φθορά στις επιφάνειες του εμβόλου και του χιτωνίου καθ' όλο το μήκος των στοιχείων ανάμεσα στο οποίο σχηματίζεται το διάκενο. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή στο ενδεχόμενο που η ταχύτητα της κίνησης του εμβόλου υπερίσχυε σε σύγκριση με την ταχύτητα εξαιτίας της κλίσης πίεσης δεν θα αναμενόταν τα σωματίδια να διέρχονται από το διάκενο και άρα δεν θα μπορούσε να δικαιολογηθεί φθορά στις επιφάνειες. Σημαντικό ρόλο όσον αφορά τη φθορά από σκληρά σωματίδια έχει και η διάμετρος τους. Το ζήτημα των φθορών σε όλα τα στοιχεία των ναυτικών μηχανών συμπεριλαμβανομένης της αντλίας υψηλής πίεσης είναι κάτι που απασχολεί διεθνώς τις εταιρίες που συσχετίζονται με τον συγκεκριμένο κλάδο. Η συνέχιση της διερεύνησης πάνω στα ζητήματα που αφορούν τη λειτουργία της αντλίας υψηλής πίεσης δύναται να δώσει ακόμα περισσότερες και χρήσιμες πληροφορίες. Ορισμένες προτάσεις που για μελλοντική έρευνα περιλαμβάνουν αλλά δεν περιορίζονται στην δημιουργία ενός μοντέλου που λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά του καυσίμου MDO για να διερευνηθεί αν υπάρχει διαφοροποίηση στις πιέσεις και τις ταχύτητες που αναπτύσσονται. Επισημαίνεται ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία τα χαρακτηριστικά του καυσίμου που χρησιμοποιήθηκαν ανταποκρίνονται στην περίπτωση καυσίμου HFO. Η ενσωμάτωση εξίσωσης που να περιγράφει την εξάρτηση του ιξώδους από την πίεση, καθώς η ανάπτυξη των εξαιρετικά μεγάλων πιέσεων συνεπάγεται υπολογίσιμη μεταβολή στο ιξώδες. Εξαιρετικής σημασίας και συμβολής θα είναι και η δημιουργία ενός μοντέλου αλληλεπίδρασης (2-way FSI) του ρευστού με το στερεό.

9. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Ιδιότητες καυσίμου	12
Πίνακας 2: Αποτελέσματα CMM εμβόλου.	26
Πίνακας 3: Αποτελέσματα CMM χιτωνίου.	26
Πίνακας 4: Αξιολόγηση αριθμητικών μεθόδων.....	27
Πίνακας 5: Μηχανικές Ιδιότητες	32
Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά κοχλιών.	34
Πίνακας 7: Γωνία εκκέντρου, ανύψωση και ταχύτητα εμβόλου για ταχύτητα 120RPM.....	40
Πίνακας 8: Θερμικές Ιδιότητες.....	44
Πίνακας 9: Γεωμετρία του δισδιάστατου μοντέλου.....	57
Πίνακας 10: Ταχύτητα του εμβόλου	58
Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά καυσίμου.....	60
Πίνακας 12: Προφίλ ταχύτητας για τις επιφάνειες του εμβόλου.	60
Πίνακας 13: Χαρακτηριστικά ελατηρίου της βαλβίδας.	60

10. Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Ταχύτητα εμβόλου συναρτήσει της γωνίας του εκκεντροφόρου.....	41
Διάγραμμα 2: Απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του εκκέντρου και του ακόλουθου.....	41
Διάγραμμα 3: Μετατόπιση του εμβόλου της γωνίας του εκκεντροφόρου.	42
Διάγραμμα 4: Γωνία πίεσης εκκέντρου και ακόλουθου συναρτήσει γωνίας εκκέντρου. ...	42
Διάγραμμα 5: Διάκενο συναρτήσει του χρόνου σε διάφορες ζώνες του εμβόλου. ΔΤ=15K/min (περίπτωση 1).....	51
Διάγραμμα 6: Διάκενο συναρτήσει του χρόνου στο πάνω μέρος του εμβόλου, 25K/min (περίπτωση 2).....	52
Διάγραμμα 7: Διάκενο συναρτήσει του χρόνου στο κυλινδρικό μέρος του εμβόλου, ΔΤ=25K/min (περίπτωση 2).....	53
Διάγραμμα 8: Φθορά στις διάφορες ζώνες του εμβόλου ως ποσοστό της συνολικής (περίπτωση 3).....	54
Διάγραμμα 9: Διάκενο σε ορισμένες ζώνες του εμβόλου συναρτήσει του χρόνου (περίπτωση 3).....	54
Διάγραμμα 10: Πίεση επαφής συναρτήσει του χρόνου σε ορισμένες ζώνες του εμβόλου (περίπτωση 3).....	55
Διάγραμμα 11: Ταχύτητα σε διάφορες τομές του διακένου, $t=0.00546$ s.....	64
Διάγραμμα 12: Ταχύτητα εξαιτίας ροής Poiseuille σε διάφορες τομές, $t=0.00546$ s.	64
Διάγραμμα 13: Ταχύτητα σε διάφορες τομές του διακένου, $t=0.27$ s.....	65
Διάγραμμα 14: Ταχύτητα εξαιτίας ροής Poiseuille σε διάφορες τομές, $t=0.27$ s	65
Διάγραμμα 15: Ταχύτητα στην είσοδο στο διάκενο σε διάφορους χρόνους	66
Διάγραμμα 16: Ταχύτητα στην έξοδο από το διάκενο σε διάφορους χρόνους.....	66
Διάγραμμα 17: Πίεση στο διάκενο διάφορες χρονικές στιγμές.....	67
Διάγραμμα 18: Πίεση συναρτήσει του χρόνου.	67
Διάγραμμα 19: Κύμα πίεσης κατά μήκος του σωλήνα καταθλίψεως σε διάφορες χρονικές στιγμές.....	68
Διάγραμμα 20: Σύγκριση της πίεσης στο τέλος του σωλήνα καταθλίψεως με πίεση από βιβλιογραφία.....	68

11. Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Αντλία υψηλής πίεσης καυσίμου τύπου Bosch. Πηγή: Man B&W Diesel.	9
Εικόνα 2: Σύστημα αντλίας-εγχυτήρα (αριστερά) και το διάγραμμα της πίεσης (δεξιά) από προγενέστερη δημοσίευση του Gibson (1986). Πηγή: [...].....	17
Εικόνα 3: Μέγιστη πίεση και ελάχιστο διάκενο συναρτήσει της γωνίας του εκκεντροφόρου (δεξιά) και η παραμόρφωση του εμβόλου και του χιτωνίου για δύο θυρίδες (αριστερά). Πηγή: [...]	18
Εικόνα 4: Δισδιάστατη απεικόνιση της επιφάνειας του εμβόλου πριν τη λειτουργία. Πηγή:	19
Εικόνα 5: Δισδιάστατη απεικόνιση της επιφάνειας του εμβόλου μετά από 1000 ώρες λειτουργίας. Πηγή:	20
Εικόνα 6: Απεικόνιση επιλεγμένου προφίλ τραχύτητας της επιφάνειας του εμβόλου μετά από 1000 ώρες λειτουργίας. Πηγή:	20
Εικόνα 7: Φθορά εξαιτίας απώλειας λιπαντικού φιλμ εξαιτίας χαμηλού ιξώδους. Πηγή: []	20
Εικόνα 8: Φθορά εκτριβής από καταλυτικά σωματίδια. Στα δεξιά μεγέθυνση x1 και στα αριστερά μεγέθυνση x10. Πηγή: [30]	21
Εικόνα 9: Φθορά σπηλαιώσης. Στα δεξιά μεγέθυνση x1 και στα αριστερά μεγέθυνση x10. Πηγή: [30]	21
Εικόνα 10: Έμβολο με φθορά από χημική διάβρωση. Πηγή: MAN Diesel.	21
Εικόνα 11: Διάταξη από μικροσκόπιο.	22
Εικόνα 12: Επιφάνεια του εμβόλου από μικροσκόπιο.	23
Εικόνα 13: Διάταξη μετρήσεων CMM.	25
Εικόνα 14: Γεωμετρία και βασικές διαστάσεις εμβόλου και χιτωνίου.	28
Εικόνα 15: Βαθμοί ελευθερίας δομικού μοντέλου.	33
Εικόνα 16: Ακτινική παραμόρφωση χιτωνίου εξαιτίας κοχλιωτών συνδέσεων (bonded contacts). Επιμήκυνση: $\delta_{(ANSYS)}=0.493\text{mm}$	35
Εικόνα 17: Ακτινική παραμόρφωση χιτωνίου εξαιτίας κοχλιωτών συνδέσεων, επαφές με τριβή. Επιμήκυνση: $\delta_{(ANSYS)}=0.499\text{mm}$	36
Εικόνα 18: Σχεδιασμός εκκέντρου στο SpaceClaim.	38
Εικόνα 19: Γωνία πίεσης. Πηγή: Cam design handbook, Harold A. Rothbart, McGraw-Hill Handbooks.....	39
Εικόνα 20: Ζώνες του εμβόλου.	44
Εικόνα 21: Φορτία και στηρίξεις θερμικού μοντέλου (περίπτωση 1).	46
Εικόνα 22: Φορτία και στηρίξεις θερμικού μοντέλου (περίπτωση 2).	46
Εικόνα 23: Φορτία και στηρίξεις θερμικού μοντέλου (περίπτωση 3).....	47
Εικόνα 24: Θερμοκρασία της επιφάνειας του χιτωνίου (περίπτωση 1).....	48
Εικόνα 25: Θερμοκρασία σε τομή της γεωμετρίας των στοιχείων (περίπτωση 1).	49
Εικόνα 26: Θερμοκρασία της επιφάνειας του εμβόλου (περίπτωση 1).....	50

Εικόνα 27: Διάκενο ανάμεσα στις επιφάνειες του εμβόλου και του χιτωνίου (περίπτωση 1).	51
Εικόνα 28: Θερμοκρασία σε τομή, 25K/min (περίπτωση 2).....	52
Εικόνα 29: Πλέγμα δισδιάστατου μοντέλου ρευστού.....	59
Εικόνα 30: Ταχύτητα στην περιοχή της βαλβίδας σε διάφορους χρόνους.....	61
Εικόνα 31: Πίεση στην περιοχή της βαλβίδας σε διάφορους χρόνους.....	62
Εικόνα 32: Περιοχή των δύο ρευστών.....	63

12. Κατάλογος Αναφορών

- [1] Κ. Ρακόπουλος, Δ. Χουντάλας, Καύση Ρύπανση Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ, Αθήνα: Εκδόσεις Φούντας, 1999.
- [2] Κ. Ρακόπουλος, Μηχανές Εσωτερικής Καύσης Ι, Εμβολοφόρες και Αεριοστρόβιλοι, Αθήνα: Εκδόσεις Φούντας, 2013.
- [3] MAN Diesel and Turbo, Guidelines for Operation on Fuels with less than 0.1% Sulphur.
- [4] D. H. Gibson, P. J. Dionne, A. K. Singhal, «A numerical model for elasto-hydrodynamic analysis of plunger and barrel clearances in fuel injection equipment», Journal of Tribology, τομ. 116, αρ. 3, pp. 597-605, 1994.
- [5] D. H. Gibson, «A flexible fuel injection simulation», SAE Transactions, τόμ. 95, αρ. 6, pp. 896-906, 1986.
- [6] Sung-Ho Hong, Bora Lee και Yongjoo Cho, «Improvement of lubrication characteristics in the reciprocating fuel pump of marine diesel engines», Journal of Mechanical Science and Technology, τομ. 30, αρ. 11, pp. 5225-5232, 2016.
- [7] S. H. Hong, «Improvement of lubrication characteristics in fuel injection pump for medium-speed diesel engines: Part I – Application of profile shape», J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng., τομ. 31, αρ. 5, pp. 205-212, 2015.
- [8] A. Miszczac, «Structure analysis of the surface of plunger and barrel assembly in the injection pump pumping section», Journal of KONES Powertrain and Transport, τομ. 21, αρ. 3, pp 227-234, 2014.
- [9] A. Bejger και J. Drzewieniecki, «Analysis of tribological processes occurring in precision pairs bases on example of fuel injection pumps of marine diesel engines», Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, τομ. 41, αρ. 113, pp. 9-16, 2015.
- [10] Βορτσέλας, Αχιλλεύς, 2011, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μοντελοποίηση της φθοράς των μεταλλικών και κεραμικών επιφανειών με τη συνδυασμένη χρήση αριθμητικών προσομοιώσεων και στοχαστικών μοντέλων σε μικροκλίμακα και μακροκλίμακα.
- [11] Ansys fluent theory guide 15, 2013
- [12] Χ. Α. Παπαδόπουλος, Στοιχεία Μηχανών, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2012.