



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ
Δ.Π.Μ.Σ.: «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ
ΣΠΗΛΛΙΩΣΗΣ ΣΕ ΕΔΡΑΝΑ
ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΛΙΠΑΝΣΗΣ

Μηζύθρας Παναγιώτης

Επιβλέπων: Λ. Καϊκτσής, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Μέλη Επιτροπής: Χρ. Παπαδόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Χρ. Φραγκόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΙΟΥΛΙΟΣ 2015

Η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής έγινε στο πλαίσιο της υλοποίησης του μεταπτυχιακού προγράμματος το οποίο συγχρηματοδοτήθηκε μέσω της πράξης «Πρόγραμμα χορήγησης υποτροφιών ΙΚΥ με διαδικασία εξαστομικευμένης αξιολόγησης Ακαδ. Έτους 2012-2013» από πόρους του Ε.Π. «Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση» του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού ταμείου (ΕΚΤ) και του ΕΣΠΑ (2007-2013).

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	i
Κατάλογος Εικόνων.....	iv
Κατάλογος Πινάκων	xviii
Ευχαριστίες.....	1
Σύνοψη	2
Abstract.....	3
1 Εισαγωγή.....	4
2 Χρήση και ιδιότητες λιπαντικών	7
2.1 Γενικά	7
2.2 Βασικά συστατικά λιπαντικών	7
2.3 Βελτιωτικά λιπαντικών.....	8
2.4 Ιδιότητες λιπαντικών	9
2.4.1 Κατηγοριοποίηση λιπαντικών	9
2.4.2 Ιξώδες λιπαντικών	11
2.4.3 Πυκνότητα λιπαντικού.....	14
2.4.4 Θερμοφυσικές ιδιότητες	14
2.4.5 Σημείο ροής και θόλωσης - Θερμοκρασίες έναυσης λιπαντικού	15
2.4.6 Λοιπές ιδιότητες λιπαντικών	15
2.5 Καθορισμός ιδιοτήτων λιπαντικού	17
2.6 Χρήση λιπαντικών σε έδρανα αξονικών συστημάτων πλοίων.....	20
3 Έδρανα υδροδυναμικής λίπανσης	22
3.1 Υδροδυναμική Λίπανση	22
3.2 Μαθηματική ανάλυση του φαινομένου	23
3.2.1 Υπολογισμός ροϊκού πεδίου	23
3.2.2 Εξίσωση συνέχειας	25
3.2.3 Εξίσωση πάχους υδροδυναμικού φιλμ	27
3.2.4 Παροχή λιπαντικού σε ακτινικό έδρανο	30
4 Σπηλαιώση σε ακτινικά έδρανα υδροδυναμικής λίπανσης	33
4.1 Το φαινόμενο της σπηλαιώσης.....	33
4.2 Προσομοίωση του φαινομένου της σπηλαιώσης σε ακτινικά έδρανα υδροδυναμικής λίπανσης.....	34
4.3 Συνθήκες έναρξης σπηλαιώσης.....	37
4.4 Δυναμική σφαιρικών φυσαλίδων	39

4.5	Κατάρρευση φυσαλίδας.....	41
4.6	Έκρηξη φυσαλίδας	44
4.7	Αέριος σπηλαίωση.....	46
4.8	Μοντελοποίηση της σπηλαίωσης στο λογισμικό ANSYS – CFX	46
4.8.1	Πολυφασική ροή.....	46
4.8.2	Υπολογιστική προσομοίωση του φαινομένου της σπηλαίωσης.....	49
5	Μοντελοποίηση εδράνου υδροδυναμικής λίπανσης	53
5.1	Γενικά	53
5.2	Μοντέλο εφαρμογής	53
5.3	Παραμετρική σχεδίαση.....	54
5.4	Προσδιορισμός πλέγματος.....	56
5.5	Απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς.....	58
6	Υπολογιστική προσομοίωση σπηλαίωσης λόγω εξάτμισης.....	60
6.1	Γενικά	60
6.2	Ορισμός προβλήματος στο λογισμικό ANSYS-CFX.....	60
6.3	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	62
6.3.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογιστικής προσομοίωσης και αλγορίθμου Elrod.....	62
6.3.2	Περίπτωση $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$	67
6.3.3	Περίπτωση $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.5$	69
6.3.4	Περίπτωση $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.7$	72
6.3.5	Περίπτωση $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.9$	74
6.3.6	Περίπτωση $L/D=1$ και $\varepsilon=0.3$	77
6.3.7	Περίπτωση $L/D=1$ και $\varepsilon=0.5$	79
6.3.8	Περίπτωση $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$	82
6.3.9	Περίπτωση $L/D=1$ και $\varepsilon=0.9$	84
6.3.10	Περίπτωση $L/D=2$ και $\varepsilon=0.3$	87
6.3.11	Περίπτωση $L/D=2$ και $\varepsilon=0.5$	89
6.3.12	Περίπτωση $L/D=2$ και $\varepsilon=0.7$	92
6.3.13	Περίπτωση $L/D=2$ και $\varepsilon=0.9$	94
6.4	Συμπεράσματα.....	96
7	Υπολογιστική προσομοίωση αέριας και ατμώδους σπηλαίωσης.....	100
7.1	Γενικά	100
7.2	Ορισμός προβλήματος αέριας και ατμώδους σπηλαίωσης στο ANSYS-CFX	101

7.3	Μελέτη φαινομένου αέριας και ατμώδους σπηλαίωσης για $L/D=1$	102
7.3.1	Περίπτωση $L/D=1$ και $\varepsilon=0.5$	104
7.3.2	Περίπτωση $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$	106
7.3.3	Συμπεράσματα	109
7.4	Επίδραση μεγέθους κυκλικής οπής εισαγωγής λιπαντικού στο φαινόμενο της σπηλαίωσης	112
7.4.1	Διάμετρος οπής εισόδου $0.1L$	115
7.4.2	Διάμετρος οπής εισόδου $0.3L$	116
7.4.3	Συμπεράσματα	118
7.5	Επίδραση μεγέθους ορθογωνικής οπής εισαγωγής λιπαντικού στο φαινόμενο της σπηλαίωσης	118
7.5.1	Διάσταση ορθογωνικής διατομής $0.1L \times 0.3L$	120
7.5.2	Διάσταση ορθογωνικής διατομής $0.15L \times 0.5L$	122
7.5.3	Διάσταση ορθογωνικής διατομής $0.2L \times 0.7L$	123
7.5.4	Συμπεράσματα	125
7.6	Επίδραση γεωμετρίας οπής εισαγωγής λιπαντικού	125
7.7	Επίδραση της πίεσης εισαγωγής λιπαντικού στο φαινόμενο της σπηλαίωσης	127
7.7.1	Πίεση εισαγωγής $P_{in}=0.5\text{bar}$	130
7.7.2	Πίεση εισαγωγής $P_{in}=2 \text{ bar}$	131
7.7.3	Πίεση εισαγωγής $P_{in}=3 \text{ bar}$	133
7.7.4	Συμπεράσματα	134
7.8	Μελέτη του φαινομένου της σπηλαίωσης λόγω απευθυγράμμισης του άξονα	135
7.8.1	Γωνία $\psi=0.01 \text{ rad}$	139
7.8.2	Γωνία $\psi=0.02 \text{ rad}$	140
7.8.3	Γωνία $\psi=0.03 \text{ rad}$	142
7.8.4	Συμπεράσματα	143
8	Θερμο-υδροδυναμική ανάλυση φαινομένου σπηλαίωσης σε ακτινικό έδρανο υδροδυναμικής λίπανσης.....	154
8.1	Ορισμός προβλήματος.....	154
8.2	Αποτελέσματα ανάλυσης.....	155
9	Συμπεράσματα.....	159
10	Βιβλιογραφία	163

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1: Αντιστοίχιση κλασμάτων λιπαντικού ελαίου.	11
Εικόνα 2-2: Μεταβολή ιξώδους συναρτήσει του ρυθμού παραμόρφωσης για μη Νευτώνεια ρευστά (Frene et al., 1997).	13
Εικόνα 2-3: Καμπύλη διύλισης λιπαντικού υπό ατμοσφαιρική πίεση (Cho, 2005). ...	18
Εικόνα 2-4: Ευθύγραμμη αλυσίδα αλκανίου	19
Εικόνα 2-5: Διάταξη στεγανωτικών δακτυλίων εδράνου άξονα με χρήση αέρα (Yamajo & Matsuoka, 2003).....	21
Εικόνα 3-1: Μεταβολή πάχους σε γεωμετρία συγκλίνουσας/αποκλίνουσας σφήνας.	28
Εικόνα 3-2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ακτινικού εδράνου υδροδυναμικής λίπανσης.	28
Εικόνα 3-3: Σχηματική απεικόνιση μη παραλληλότητας του άξονα ως προς το έδρανο.	30
Εικόνα 4-1: Μεταβολή πίεσης εντός σφαιρικής φυσαλίδας συναρτήσει της ακτίνας.	39
Εικόνα 4-2: Ορισμός τάσης στην επιφάνεια φυσαλίδας.....	40
Εικόνα 4-3: Μεταβολή του πεδίου πίεσης κατά τη διάρκεια κατάρρευσης της φυσαλίδας (Franc και Michel, 2005)	43
Εικόνα 5-1: Σχέδιο εδράνου αξονικού συστήματος του πλοίου AMFITRITI (DSME, 2010).....	53
Εικόνα 5-2: Απεικόνιση μοντέλου εδράνου με εκκεντρότητα $\varepsilon=0.3$	55
Εικόνα 5-3: Απεικόνιση μοντέλου εδράνου με εκκεντρότητα $\varepsilon=0.9$	55
Εικόνα 5-4: Απεικόνιση μοντέλου εδράνου με εκκεντρότητα $\varepsilon=0.9$ και απόκλιση κατά τη διεύθυνση x	56
Εικόνα 5-5: Απεικόνιση μοντέλου εδράνου με εκκεντρότητα $\varepsilon=0.9$ και απόκλιση κατά τη διεύθυνση y	56
Εικόνα 5-6: Απεικόνιση ραφών μοντέλου εδράνου.	56
Εικόνα 5-7: Υπολογισθέν φορτίο και μέγιστη πίεση συναρτήσει του αριθμού στοιχείων του πλέγματος.	57
Εικόνα 5-8: Σχετική ταχύτητα επεξεργασίας συναρτήσει του αριθμού των χρησιμοποιούμενων πυρήνων για την επίλυση της ροής σε ακτινικό έδρανο με παρουσία σπηλαίωσης.	58
Εικόνα 6-1: Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και αλγορίθμου Elrod συναρτήσει του λόγου εκκεντρότητας και για λόγο μήκους προς διάμετρο $L/D=0.5$, για τα μεγέθη: Α) Ολικό φορτίο, Β) Μέγιστη πίεση, Γ) Αδιάστατος συντελεστής τριβής, Δ) Αριθμός Sommerfeld, Ε) Γωνία συμπεριφοράς άξονα, ΣΤ) Γωνία μέγιστης πίεσης.	63
Εικόνα 6-2: Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και αλγορίθμου Elrod συναρτήσει του λόγου εκκεντρότητας και για λόγο μήκους προς διάμετρο $L/D=1$, για τα μεγέθη: Α) Ολικό φορτίο, Β) Μέγιστη πίεση, Γ) Αδιάστατος συντελεστής τριβής, Δ) Αριθμός Sommerfeld, Ε) Γωνία συμπεριφοράς άξονα, ΣΤ) Γωνία μέγιστης πίεσης	64
Εικόνα 6-3: Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και αλγορίθμου Elrod συναρτήσει του λόγου εκκεντρότητας και για λόγο	

- μήκους προς διάμετρο $L/D=2$ για τα μεγέθη: Α) Ολικό φορτίο, Β) Μέγιστη πίεση, Γ) Αδιάστατος συντελεστής τριβής, Δ) Αριθμός Sommerfeld, Ε) Γωνία συμπεριφοράς άξονα, ΣΤ) Γωνία μέγιστης πίεσης.65
- Εικόνα 6-4: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.67
- Εικόνα 6-5: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.67
- Εικόνα 6-6: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.68
- Εικόνα 6-7: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού και Γ) διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$68
- Εικόνα 6-8: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$68
- Εικόνα 6-9: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes.69
- Εικόνα 6-10: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.69
- Εικόνα 6-11: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.70
- Εικόνα 6-12: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.70
- Εικόνα 6-13: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διατμητικών τάσεων, Γ) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχής έναρξης φαινομένου σπηλαιώσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.5$71

- Εικόνα 6-14: Κατανομές Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού για αποτελέσματα επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγόριθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.5$ 71
- Εικόνα 6-15: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.5$, βάσει της επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes. 71
- Εικόνα 6-16: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου. 72
- Εικόνα 6-17: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου. 72
- Εικόνα 6-18: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου. 73
- Εικόνα 6-19: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διατμητικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλκίωσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.7$ 73
- Εικόνα 6-20: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.7$ 74
- Εικόνα 6-21: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.7$ βάσει της επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes. 74
- Εικόνα 6-22: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου. 74
- Εικόνα 6-23: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου. 75
- Εικόνα 6-24: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου. 75
- Εικόνα 6-25: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διατμητικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλκίωσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.9$ 76

Εικόνα 6-26: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.9$	76
Εικόνα 6-27: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.9$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes.....	76
Εικόνα 6-28: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.....	77
Εικόνα 6-29: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.....	77
Εικόνα 6-30: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.....	78
Εικόνα 6-31: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διατμητικών τάσεων, Γ) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, και Δ) περιοχής έναρξης φαινομένου σπηλαίωσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.3$	78
Εικόνα 6-32: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.3$	79
Εικόνα 6-33: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.3$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes.....	79
Εικόνα 6-34: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.....	79
Εικόνα 6-35: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.....	80
Εικόνα 6-36: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.....	80

- Εικόνα 6-37: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διατμητικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλαίωσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.5$ 81
- Εικόνα 6-38: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.5$ 81
- Εικόνα 6-39: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes..... 81
- Εικόνα 6-40: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου..... 82
- Εικόνα 6-41: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου..... 82
- Εικόνα 6-42: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου..... 83
- Εικόνα 6-43: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διατμητικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλαίωσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$ 83
- Εικόνα 6-44: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$ 84
- Εικόνα 6-45: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.3$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes..... 84
- Εικόνα 6-46: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου..... 84
- Εικόνα 6-47: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου..... 85
- Εικόνα 6-48: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου..... 85

- Εικόνα 6-49: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διατμητικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλαίωσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.9$ 86
- Εικόνα 6-50: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.9$ 86
- Εικόνα 6-51: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes..... 86
- Εικόνα 6-52: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου..... 87
- Εικόνα 6-53: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου..... 87
- Εικόνα 6-54: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου..... 88
- Εικόνα 6-55: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διατμητικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλαίωσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.3$ 88
- Εικόνα 6-56: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.3$ 89
- Εικόνα 6-57: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.3$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes..... 89
- Εικόνα 6-58: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου..... 89
- Εικόνα 6-59: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου..... 90
- Εικόνα 6-60: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου..... 90

- Εικόνα 6-61: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διατμητικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλαιώσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.5$ 91
- Εικόνα 6-62: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.5$ 91
- Εικόνα 6-63: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.5$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes. 91
- Εικόνα 6-64: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου. 92
- Εικόνα 6-65: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου. 92
- Εικόνα 6-66: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου. 93
- Εικόνα 6-67: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διατμητικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλαιώσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.7$ 93
- Εικόνα 6-68: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.7$ 94
- Εικόνα 6-69: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.7$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes. 94
- Εικόνα 6-70: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου. 94
- Εικόνα 6-71: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου. 95
- Εικόνα 6-72: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου. 95

- Εικόνα 6-73: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διατμητικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλαιώσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.9$ 96
- Εικόνα 6-74: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.9$ 96
- Εικόνα 6-75: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.9$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes. 96
- Εικόνα 6-76: Μεταβολή της κατανομής του υγρού λιπαντικού κατά το πάχος του φιλμ και κατά την περιφερειακή διεύθυνση, στη μέση τομή του εδράνου με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$ 99
- Εικόνα 7-1: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 104
- Εικόνα 7-2: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 105
- Εικόνα 7-3: Κατανομή Α) απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για τις περιπτώσεις αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης και ατμώδους σπηλαιώσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται στο μέσο του εδράνου κατά το διάμηκες, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης. 106
- Εικόνα 7-4: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 107
- Εικόνα 7-5: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 108
- Εικόνα 7-6: Κατανομή Α) απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για τις περιπτώσεις αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης και ατμώδους σπηλαιώσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται στο μέσο του εδράνου κατά το διάμηκες, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης. 109

- Εικόνα 7-7: Έξοδος λιπαντικού και είσοδος αέρα κατά Α) το συγκλίνον τμήμα, Β) το σημείο πλησίον του ελάχιστου πάχους και Γ) το αποκλίνον τμήμα του εδράνου 109
- Εικόνα 7-8: Απεικόνιση ροής αέρα, κατανομής πίεσης του λιπαντικού και αποτύπωση της περιοχής σπηλαίωσης σε ακτινικό έδρανο γεωμετρίας $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$. Με το βέλος απεικονίζεται η φορά περιστροφής του εδράνου. 110
- Εικόνα 7-9: Απεικόνιση πεδίου ταχύτητας Α) στη ζώνη σπηλαίωσης και Β) στην περιοχή σύγκλισης των επιφανειών άξονα-εδράνου..... 111
- Εικόνα 7-10: Τοπικός αριθμός Reynolds για τη ροή του λιπαντικού κατά τη μελέτη αέριας και ατμώδους σπηλαίωσης για έδρανο με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$ 111
- Εικόνα 7-11: Σύγκριση Α) ολικού φορτίου, Β) μέγιστης πίεσης, Γ) αδιάστατου συντελεστή τριβής και Δ) γωνία συμπεριφοράς μεταξύ αέριας-ατμώδους και ατμώδους σπηλαίωσης μεταβάλλοντας τη διάμετρο της οπής για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, $P_{in}=1\text{bar}$ 113
- Εικόνα 7-12: Κατανομή Α) απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για τις περιπτώσεις αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης και ατμώδους σπηλαίωσης, σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, $\psi_y=0.0\text{rad}$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται στο μέσο του εδράνου κατά το διάμηκες, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, μεταβάλλοντας την διάμετρο της κυκλικής οπής εισαγωγής..... 114
- Εικόνα 7-13: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.1L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 115
- Εικόνα 7-14: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.1L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 116
- Εικόνα 7-15: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.3L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 117
- Εικόνα 7-16: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=3\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 117
- Εικόνα 7-17: Σύγκριση Α) ολικού φορτίου, Β) μέγιστης πίεσης, Γ) αδιάστατου συντελεστή τριβής και Δ) γωνία συμπεριφοράς μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης μεταβάλλοντας το μέγεθος της ορθογωνικής οπής για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, $P_{in}=1\text{bar}$ 119

- Εικόνα 7-18: Κατανομή Α) απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για τις περιπτώσεις αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης και ατμώδους σπηλαίωσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, $\psi_y=0.0\text{rad}$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται στο μέσο του εδράνου κατά το διάμηκες, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για διάφορες διαστάσεις ορθογωνικής διατομής. 120
- Εικόνα 7-19: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, ορθογωνική οπή διαστάσεων $0.1L \times 0.3L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 121
- Εικόνα 7-20: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, ορθογωνική οπή διαστάσεων $0.1L \times 0.3L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 121
- Εικόνα 7-21: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, ορθογωνική οπή διαστάσεων $0.15L \times 0.5L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 122
- Εικόνα 7-22: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, ορθογωνική οπή διαστάσεων $0.15L \times 0.5L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 123
- Εικόνα 7-23: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, ορθογωνική οπή διαστάσεων $0.2L \times 0.7L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 124
- Εικόνα 7-24: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, ορθογωνική οπή διαστάσεων $0.2L \times 0.7L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 124
- Εικόνα 7-25: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης και μεταξύ ορθογωνικής και κυκλικής διατομής, για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, $P_{in}=1\text{bar}$, $\psi_y=0.0\text{rad}$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται στο μέσο του εδράνου κατά το διάμηκες, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης. 126

- Εικόνα 7-26: Σύγκριση Α) ολικού φορτίου, Β) μέγιστης πίεσης, Γ) αδιάστατου συντελεστή τριβής και Δ) γωνία συμπεριφοράς μεταξύ ατμών/αέρας-ατμών σπηλαίωσης μεταβάλλοντας την πίεση εισαγωγής για χαρακτηριστικά γεωμετρίας εδράνου $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$ 128
- Εικόνα 7-27: Κατανομή Α) απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για τις περιπτώσεις αέρας-ατμών σπηλαίωσης και ατμών σπηλαίωσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται στο μέσο του εδράνου κατά το διάμηκες, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για διάφορες τιμές πίεσης εισαγωγής λιπαντικού.... 129
- Εικόνα 7-28: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμών/αέρας-ατμών σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=0.5\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 131
- Εικόνα 7-29: Φαινόμενο αέρας-ατμών σπηλαίωσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=0.5\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 131
- Εικόνα 7-30: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμών/αέρας-ατμών σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=2\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 132
- Εικόνα 7-31: Φαινόμενο αέρας-ατμών σπηλαίωσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=2\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 133
- Εικόνα 7-32: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμών/αέρας-ατμών σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=3\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 134
- Εικόνα 7-33: Φαινόμενο αέρας-ατμών σπηλαίωσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=3\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$ 134
- Εικόνα 7-34: Σύγκριση Α) ολικού φορτίου, Β) μέγιστης πίεσης, Γ) αδιάστατου συντελεστή τριβής και Δ) γωνία συμπεριφοράς μεταξύ ατμών/αέρας-ατμών σπηλαίωσης μεταβάλλοντας τη γωνία ψ_y για χαρακτηριστικά γεωμετρίας εδράνου $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$ 136

- Εικόνα 7-35: Διαγράμματα απόλυτης πίεσης (Α, Δ), ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού (Β, Ε), διατμητικής τάσης (Γ, ΣΤ), συναρτήσεως της γωνιακής θέσης, για χαρακτηριστικά γεωμετρίας εδράνου $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλικής οπής διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.3\text{rad}$. Οι κατανομές αντιστοιχούν σε τομές κατά την αξονική διεύθυνση σε απόσταση κατά 25%, 50% και 75% του μήκους του εδράνου, σύμφωνα με την απεικόνιση της αντίστοιχης κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσεως της γωνιακής θέσης. 138
- Εικόνα 7-36: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.01\text{rad}$ 140
- Εικόνα 7-37: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.01\text{rad}$ 140
- Εικόνα 7-38: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.02\text{rad}$ 141
- Εικόνα 7-39: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.02\text{rad}$ 142
- Εικόνα 7-40: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.03\text{rad}$ 143
- Εικόνα 7-41: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.03\text{rad}$ 143
- Εικόνα 7-42: Διανύσματα κατεύθυνσης της ταχύτητας του λιπαντικού σε υγρή μορφή σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.03\text{rad}$ 144
- Εικόνα 7-43: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, για την περίπτωση ατμώδους σπηλαίωσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται σε εγκάρσιο επίπεδο τοποθετημένο στη θέση 25% του μήκους του εδράνου, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσεως της γωνιακής θέσης, και για διάφορες γωνίες απευθυγράμμισης ψ_y 146

- Εικόνα 7-44: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, για την περίπτωση ατμώδους σπηλαίωσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται σε εγκάρσιο επίπεδο τοποθετημένο στη θέση 50% του μήκους του εδράνου, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, και για διάφορες γωνίες απευθυγράμμισης ψ_y 147
- Εικόνα 7-45: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, για την περίπτωση ατμώδους σπηλαίωσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται σε εγκάρσιο επίπεδο τοποθετημένο στη θέση 75% του μήκους του εδράνου, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, και για διάφορες γωνίες απευθυγράμμισης ψ_y 149
- Εικόνα 7-46: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, για την περίπτωση αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται σε εγκάρσιο επίπεδο τοποθετημένο στη θέση 25% του μήκους του εδράνου, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, και για διάφορες γωνίες απευθυγράμμισης ψ_y 150
- Εικόνα 7-47: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, για την περίπτωση αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται σε εγκάρσιο επίπεδο τοποθετημένο στη θέση 50% του μήκους του εδράνου, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, και για διάφορες γωνίες απευθυγράμμισης ψ_y 152
- Εικόνα 7-48: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, για την περίπτωση αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται σε εγκάρσιο επίπεδο τοποθετημένο στη θέση 75% του μήκους του εδράνου, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, και για διάφορες γωνίες απευθυγράμμισης ψ_y 153
- Εικόνα 8-1: Έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$, $P_{in}=1\text{bar}$: Σύγκριση Α) απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, συναρτήσει της γωνιακής θέσης εδράνου, λαμβάνοντας υπόψη ή όχι την εξίσωση διατήρησης ενέργειας – Δ) Κατανομή θερμοκρασίας λιπαντικού κατά την περιφέρεια και την επιφάνεια του άξονα. Όλες οι κατανομές

αναφέρονται στο μέσο του εδράνου κατά το διάμηκες, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης. 157

Εικόνα 8-2: Περιφερειακή κατανομή Α) απόλυτης πίεσης, Β) διατμητικής τάσης, Γ) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) θερμοκρασίας για ατμώδη σπηλαίωση λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση ενέργειας, για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\epsilon=0.7$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.00\text{rad}$ 158

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1: Κατηγοριοποίηση λιπαντικών κατά ISO.	10
Πίνακας 2-2: Σχέσεις δυναμικού ιξώδους – θερμοκρασίας (Stachowiak και Batchelor, 2005, Cornelissen και Waterman, 1955).	12
Πίνακας 2-3: Ποσοτικοποίηση των κλασμάτων μάζας και των σημείων εξάτμισης του ορυκτέλαιου βάσει της αντίστοιχης καμπύλης που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-3.	18
Πίνακας 4-1: Σύγκριση μεθόδων υπολογιστικής προσομοίωσης κατά Euler και κατά Lagrange.	48
Πίνακας 5-1: Στοιχεία πλοίου AMFITRITI (Havenfoto's, n.d.), (Liquimar, n.d.).	53
Πίνακας 5-2: Παράμετροι σχεδίασης του υπολογιστικού μοντέλου.	54
Πίνακας 6-1: Ιδιότητες λιπαντικού.	61
Πίνακας 7-1: Ιδιότητες αέρα στους 25°C όπως προσδιορίστηκαν στο λογισμικό ANSYS-CFX.	101
Πίνακας 7-2: Υπολογισμοί χαρακτηριστικών μεγεθών για έδρανο με $L/D=1$ και $\varepsilon=0.5$ και 0.7. Σύγκριση των αποτελεσμάτων για μοντελοποίηση (α) της ατμώδους σπηλαίωσης, και (β) της αέριας και ατμώδους σπηλαίωσης.	103
Πίνακας 8-1: Ιδιότητες λιπαντικού σε αέρια φάση.	154
Πίνακας 8-2: Υπολογισμοί χαρακτηριστικών μεγεθών για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, κυκλική οπή εισαγωγής και πίεση εισαγωγής $P_{in}=1\text{bar}$. Σύγκριση των αποτελεσμάτων για μοντελοποίηση λαμβάνοντας υπόψη ή αμελώντας την εξίσωση ενέργειας.	155

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας στον Τομέα Ναυτικής Μηχανολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Ειδίκευσης «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη». Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Λ. Καϊκτσή, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με την επιστημονική περιοχή της Τριβολογίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Χ. Παπαδόπουλο για την καθοδήγησή του και τις καθοριστικές συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας μελέτης. Οι γνώσεις του στο πεδίο της Τριβολογίας ήταν ιδιαίτερα σημαντικές για την πλήρη κατανόηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων της εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταδιδακτορικό ερευνητή κ. Δ. Φούφλια για την καθοδήγηση και υποστήριξή του στη μοντελοποίηση του προβλήματος, όπως επίσης και για τη μεγάλη προθυμία που έδειξε στο να προσφέρει τη βοήθειά του όποτε αυτή ήταν αναγκαία. Τέλος, ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Χ. Φραγκόπουλο για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Σύνοψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Ειδίκευσης «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στην εργασία μελετάται το φαινόμενο της σπηλαίωσης σε αντιπροσωπευτικό ακτινικό έδρανο υδροδυναμικής λίπανσης που χρησιμοποιείται για την παραλαβή των φορτίων από τον άξονα πλοίου. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής ANSYS-CFX. Αρχικά, γίνεται παρουσίαση του θεωρητικού υπόβαθρου των ιδιοτήτων των λιπαντικών και των βασικών αρχών λειτουργίας των ακτινικών εδράνων υδροδυναμικής λίπανσης. Επιπλέον, αναλύεται το φυσικό φαινόμενο της σπηλαίωσης, δίνοντας λεπτομέρειες αναφορικά με τον σχηματισμό, την ανάπτυξη και την πιθανή κατάρρευση των φυσαλίδων ατμοποιημένου λιπαντικού, καθώς και για τις επιπτώσεις της διάλυσης αέρα μέσα στην υγρή φάση του λιπαντικού.

Στο πλαίσιο της μελέτης, έγινε μοντελοποίηση του προβλήματος, ορίζοντας τις τιμές των γεωμετρικών μεγεθών και τις οριακές συνθήκες που πλησιάζουν κατά το δυνατόν αυτές των ακτινικών εδράνων που χρησιμοποιούνται σε πραγματικές εφαρμογές πλοίων. Για την πληρέστερη δυνατή προσέγγιση του προβλήματος, έγινε μελέτη για διάφορες τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων με χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes, και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με σύγκριση με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου Elrod, κάνοντας χρήση λογισμικού που αναπτύχθηκε στον Τομέα Ναυτικής Μηχανολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. Τα αποτελέσματα της σύγκλισης ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά, αποδεικνύοντας ότι ο αλγόριθμος Elrod είναι κατάλληλος για την περιγραφή του φαινομένου της σπηλαίωσης σε ακτινικά έδρανα υδροδυναμικής λίπανσης.

Επίσης, μελετήθηκε η επίπτωση της διεύθυνσης του περιβάλλοντος αέρα στη λειτουργία του εδράνου και στο φαινόμενο της σπηλαίωσης. Εν προκειμένω, η μελέτη περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση για διάφορα σχήματα και μεγέθη οπών εισαγωγής του λιπαντικού, για διάφορες πιέσεις εισαγωγής, καθώς και για διάφορες γωνίες απευθυγράμμισης του άξονα συμμετρίας του εδράνου ως προς τον άξονα του πλοίου. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι οι παραπάνω παράμετροι επηρεάζουν σημαντικά τη διεύθυνση του αέρα μέσα στον όγκο του λιπαντικού ελαίου, μεταβάλλοντας τις περιοχές όπου εμφανίζεται η σπηλαίωση λόγω εξάτμισης του λιπαντικού.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε θερμο-υδροδυναμική ανάλυση της λειτουργίας του εδράνου, με στόχο την ποσοτικοποίηση της επίδρασης της θέρμανσης του λιπαντικού λόγω τριβών. Διαπιστώθηκε ότι η εν λόγω θέρμανση του λιπαντικού επηρεάζει τη θερμοκρασιακή κατανομή, ιδιαίτερα στην περιοχή της σπηλαίωσης, και τροποποιεί την κατανομή της πίεσης στο έδρανο.

Abstract

This thesis was carried out in the frame of the Postgraduate Program "Marine Technology and Science" of the National Technical University of Athens. It examines the phenomenon of cavitation in a representative hydrodynamic journal bearing used to support a marine vessel's shaft. The present computational study has utilized the Computational Fluid Dynamics code ANSYS-CFX. First, the theoretical background regarding lubricant properties and operation of journal bearings is briefly presented. Further, the physical phenomenon of cavitation is analysed, with details regarding the formation, development and collapse of vapour bubbles and the entrainment of air in the lubricant liquid phase.

In the frame of the present study, modelling of the bearing operation has been performed for various values of the geometry parameters and for boundary conditions representative of those of actual journal bearings used in marine applications. Simulations have been performed for a wide range of operational parameters using the Navier-Stokes equations, and validated against results based on the Elrod algorithm, utilizing software tools developed at the Division of Marine Engineering of the Department of Naval Architecture and Marine Engineering. The results have demonstrated a satisfactory agreement between the two approaches, illustrating that the Elrod algorithm is appropriate to model the phenomenon of cavitation in journal bearings.

Further, the entrainment of the surrounding air was studied for different geometrical and operational parameters, investigating the effect of air as a third fluid on bearing performance. The investigation has included various shapes and sizes of the inlet oil groove, different values of oil inlet pressure, as well as different values of the misalignment angle between the shaft and the bearing shell. The results have demonstrated that modification of these parameters affects the air entrainment and the cavitation region.

Finally, a thermo-hydrodynamic study was performed in order to quantify the effects of oil heating due to friction losses. It was found that oil heating affects the oil temperature distribution, especially in the cavitation region, and modifies the bearing pressure distribution.

1 Εισαγωγή

Η πλειονότητα των κινήσεων που συναντώνται στις μηχανολογικές εφαρμογές χαρακτηρίζεται από τη σχετική περιστροφή ή ολίσθηση μεταξύ δύο μηχανολογικών εξαρτημάτων. Η σχετική κίνηση δύο σωμάτων τα οποία συνεργάζονται για τη παραγωγή ωφέλιμου έργου συντελεί στην απώλεια ενέργειας του συστήματος αλλά και στη φθορά των εξαρτημάτων, με πιθανή συνέπεια την αστοχία της κατασκευής. Η μείωση των φαινομένων απωλειών ενέργειας, αλλά και η παραλαβή των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια περιστροφής ή σχετικής κίνησης ενός εξαρτήματος, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω τη χρήσης εδράνων.

Ο άξονας μετάδοσης κίνησης του πλοίου αποτελεί ένα σημαντικό επιμέρους σύστημα για την πρόωση του πλοίου. Το βάρος του άξονα καθορίζεται από τις διαστάσεις του πλοίου, την ισχύ μετάδοσης του άξονα στην έλικα, καθώς και την απόσταση της κύριας μηχανής από την έλικα. Ανάλογα με την εφαρμογή, το βάρος του άξονα είναι σημαντικός παράγοντας για τον υπολογισμό των εδράνων αυτού. Η περιστροφή του άξονα καθιστά αναγκαία τη χρήση ακτινικών εδράνων για την παραλαβή των εξωτερικών φορτίων. Τα έδρανα που χρησιμοποιούνται για τις συγκεκριμένες εφαρμογές είναι έδρανα υδροδυναμικής λίπανσης. Ο κύριος λόγος της επιλογής του συγκεκριμένου τύπου εδράνων είναι το μέγεθος του άξονα και των φορτίων που θα πρέπει να παραληφθούν για τη εύρυθμη λειτουργία του συστήματος μετάδοσης κίνησης.

Το φαινόμενο της υδροδυναμικής λίπανσης βασίζεται στη σχετική κίνηση δύο επιφανειών και την ανάπτυξη πίεσης μέσω του ρευστού σε αυτές τις επιφάνειες. Συνήθως, για την επίτευξη της υδροδυναμικής λίπανσης χρησιμοποιείται κάποιο λιπαντικό. Η επιλογή του κατάλληλου λιπαντικού εξαρτάται από την εφαρμογή, διασφαλίζοντας την σωστή λειτουργία του εδράνου. Η αύξηση όμως των περιβαλλοντικών κινδύνων που μπορεί να εμπεριέχει η αποδέσμευση λιπαντικού σε θαλάσσια ύδατα οδήγησε τη διεθνή κοινότητα στον περιορισμό των επιτρεπτών επιπέδων της διαρροής λιπαντικού σε μη ανιχνεύσιμες ποσότητες, ειδικά σε καθορισμένες περιοχές (Μεσόγειος, Βαλτική και Μαύρη Θάλασσα). Λόγω της ανάγκης περιορισμού του φαινομένου της διαρροής λιπαντικών, έχει διαδοθεί πλέον και η χρήση θαλασσινού νερού ως λιπαντικού μέσου για το τελευταίο έδρανο πριν την έλικα.

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των ακτινικών εδράνων και λόγω του προφίλ της πίεσης που αναπτύσσεται στον όγκο του λιπαντικού, υπάρχει ο κίνδυνος μείωσης της πίεσης κάτω από το όριο της πίεσης ατμοποίησης του λιπαντικού. Στην περιοχή που η πίεση είναι πολύ χαμηλή, δημιουργούνται φυσαλίδες ατμών του λιπαντικού στην επιφάνεια του άξονα λόγω ατμοποίησης, με αποτέλεσμα την εμφάνιση του φαινομένου της σπηλαίωσης. Επίσης, η ύπαρξη αέρα στα άκρα του εδράνου, σε συνδυασμό με τη χαμηλή πίεση που επικρατεί σε μερικές περιοχές του εδράνου, δίνει τη δυνατότητα διείσδυσης του συγκεκριμένου ρευστού μέσα στον χώρο του εδράνου.

Για τη μελέτη του φαινομένου της υδροδυναμικής λίπανσης έχουν γίνει πολλές προσπάθειες με σκοπό την ακριβή προσομοίωση της ροής του λιπαντικού εντός του εδράνου. Η λύση επηρεάζεται σημαντικά από τις οριακές συνθήκες που επιβάλλονται για τη περιγραφή του. Σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία, το φαινόμενο της

σπηλαίωσης, καθώς και η ροή εντός της αντίστοιχης περιοχής, πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη για τον ακριβή προσδιορισμό των λειτουργικών παραμέτρων (αναπτυσσόμενο φορτίο, ροπή τριβής) που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του εδράνου.

Ο πλέον γνωστός αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος της υδροδυναμικής λίπανσης στα ακτινικά έδρανα είναι ο αλγόριθμος του Elrod (Elrod & Adams, 1974). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, κάνοντας χρήση της εξίσωσης Reynolds, εξασφαλίζει τη συνέχεια της μάζας καθ' όλη την περιφέρεια του εδράνου, υπολογίζοντας στην περιοχή της σπηλαίωσης τις περιοχές όπου υπάρχει υγρό ή αέριο με χρήση κατάλληλα ορισμένης μεταβλητής. Με βάση τη βιβλιογραφία, τα αποτελέσματα από τη χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου επαληθεύουν ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα σε εφαρμογές ακτινικών εδράνων ολίσθησης.

Παρόλο που το μοντέλο του Elrod δίνει την καλύτερη δυνατή επίλυση για το πεδίο πίεσης που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του άξονα όπως επίσης και για την περιοχή που αναπτύσσεται η σπηλαίωση, δεν παρέχει τη δυνατότητα να αναπαριστά ακριβώς πώς αναπτύσσεται η σπηλαίωση κατά το προφίλ του πάχους του λιπαντικού. Πρόσφατα, η αύξηση της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος έχει επιτρέψει τη χρήση τρισδιάστατων μοντέλων για την επίλυση του ροϊκού πεδίου εντός του εδράνου, με χρήση μεθόδων Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, αξιοποιώντας τη χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes και του μοντέλου περιγραφής του φαινομένου της σπηλαίωσης (εξίσωση Rayleigh – Plesset). Έτσι, καθίσταται εφικτή η πλήρης αναπαράσταση του ροϊκού πεδίου στον όγκο του λιπαντικού εντός του εδράνου, συμπεριλαμβανομένων των περιοχών που εμφανίζεται η σπηλαίωση.

Συνεπώς, η πλήρης μοντελοποίηση της λειτουργίας του εδράνου θα δώσει όχι μόνο τη δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής εφαρμογής, αλλά θα αποτελέσει και αναφορά για τη σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου του Elrod. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, που έχει ως στόχο τον λεπτομερή χαρακτηρισμό της λειτουργίας ενός ακτινικού εδράνου υδροδυναμικής λίπανσης, θα χρησιμοποιηθούν στοιχεία από τη γεωμετρία ενός πραγματικού εδράνου πλοίου, ενώ θα γίνουν υπολογισμοί για διάφορες τιμές του λόγου μήκους/διαμέτρου άξονα, καθώς επίσης και για διάφορες τιμές της εκκεντρότητας, ώστε να καταστεί σαφές κάτω υπό ποιες συνθήκες εμφανίζεται το φαινόμενο της σπηλαίωσης.

Τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης με τη χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes, συγκρίνονται και αξιολογούνται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του αλγορίθμου Elrod, ώστε να ποσοτικοποιηθούν οι τυχόν αποκλίσεις που προκύπτουν από τη χρήση των δύο μοντέλων, αλλά και η ταχύτητα σύγκλισης της κάθε μεθόδου. Επιπλέον, μελετάται η παρουσία αέρα στα άκρα του εδράνου στη λειτουργία αυτού, και η επίδραση αυτού τόσο στη λειτουργία του εδράνου, όσο και στη περιοχή σπηλαίωσης λόγω εξάτμισης του λιπαντικού. Εν προκειμένω, εκτός από την αλληλεπίδραση του αέρα στον όγκο του λιπαντικού, μελετάται η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στη λειτουργία του εδράνου και στην κατανομή του κλάσματος αέρα στην περιφέρεια αυτού, καθώς και περιπτώσεις που ο άξονας δεν είναι πλήρως ευθυγραμμισμένος με το έδρανο. Τέλος, μελετάται η μεταβολή της θερμοκρασίας κατά την επιφάνεια του άξονα στην περίπτωση που υπάρχει σπηλαίωση λόγω ατμοποίησης.

Η δομή της εργασίας είναι η ακόλουθη: Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται στοιχεία αναφορικά με τα συστατικά και τις ιδιότητες των λιπαντικών. Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στη λειτουργία και μοντελοποίηση των εδράνων υδροδυναμικής λίπανσης. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται αναφορά στο φαινόμενο της σπηλαίωσης σε έδρανα υδροδυναμικής λίπανσης, και στη μοντελοποίηση αυτού. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται στοιχεία αναφορικά με τη μοντελοποίηση του παρόντος προβλήματος με χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται υπολογιστικά αποτελέσματα για τη λειτουργία του εδράνου με παρουσία ατμών σπηλαίωσης. Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται υπολογιστικά αποτελέσματα για τη λειτουργία του εδράνου με παρουσία ατμών και αέριας σπηλαίωσης. Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται υπολογιστικά αποτελέσματα της λειτουργίας του εδράνου με παρουσία σπηλαίωσης στο πλαίσιο πλήρους θερμο-υδροδυναμικής ανάλυσης. Τέλος, στο Κεφάλαιο 9 συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη.

2 Χρήση και ιδιότητες λιπαντικών

2.1 Γενικά

Το λιπαντικό αποτελεί το κύριο και μοναδικό μέσο το οποίο είναι υπεύθυνο για την εύρυθμη λειτουργία ενός εδράνου υδροδυναμικής λίπανσης λόγω της ικανότητάς του να προστατεύει τις συνεργαζόμενες επιφάνειες στις μηχανολογικές εφαρμογές και να περιορίζει ανεπιθύμητα φαινόμενα όπως είναι η τριβή και η φθορά. Οι ιδιότητες του λιπαντικού που χρησιμοποιείται σε ένα έδρανο υδροδυναμικής λίπανσης συντελούν στην παραλαβή των φορτίων για τα οποία το έδρανο είναι σχεδιασμένο, και στην αποτελεσματική λειτουργία του λιπαντικού υπό τις συνθήκες λειτουργίας του εδράνου. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαία η πλήρης γνώση της σύστασης και των ιδιοτήτων των λιπαντικών για τον ορθό ορισμό του προβλήματος της υδροδυναμικής λίπανσης που μελετάται στην παρούσα εργασία.

Τα λιπαντικά έλαια αποτελούνται κυρίως από ένα βασικό συστατικό το οποίο μπορεί να είναι ορυκτέλαιο ή οποιοδήποτε άλλο λάδι συνθετικής προέλευσης. Εκτός από το κύριο συστατικό, προστίθεται πληθώρα βελτιωτικών με σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων του λιπαντικού ελαίου, ανάλογα με τη χρήση και τις επιθυμητές ιδιότητες που αυτό θα πρέπει να έχει. Η έρευνα πλέον επικεντρώνεται στην ανάπτυξη των κατάλληλων βελτιωτικών που θα προσδώσουν τις επιθυμητές ιδιότητες στο λιπαντικό, όπως επίσης και στην αναβάθμιση της χημικής σύστασης και των ιδιοτήτων του κατά τη χρήση του λιπαντικού.

2.2 Βασικά συστατικά λιπαντικών

Τα ορυκτέλαια αποτελούν προϊόν απόσταξης και διύλισης του πετρελαίου. Η μέθοδος της υδροπυρόλυσης χρησιμοποιείται συνήθως για τη διαμόρφωση υδρογονανθράκων με μικρότερο ποσοστών βενζολικών ενώσεων, αυξάνοντας τον δείκτη ιξώδους και την αντοχή τους σε οξείδωση. Τα ορυκτέλαια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με τη μορφή της αλυσίδας των υδρογονανθράκων από τα οποία αποτελούνται: παραφίνες (ευθύγραμμη αλυσίδα) και ναφθενικοί υδρογονάνθρακες (κυκλική αλυσίδα). Οι παραφίνες παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή έναντι της οξείδωσης, μικρή φθορά έναντι των ελαστομερών υλικών, ενώ διαθέτουν υψηλό δείκτη ιξώδους (viscosity index). Λόγω όμως του μεγάλου μοριακού βάρους τους, υπάρχει κίνδυνος κρυσταλλοποίησης του μορίου, ακόμα και σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Σε αντίθεση με τις παραφίνες, οι ναφθενικοί υδρογονάνθρακες έχουν εξαιρετικές ιδιότητες ροής σε χαμηλές θερμοκρασίες, χωρίς όμως να διαθέτουν τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα των παραφινών.

Η αύξηση των απαιτήσεων σε ορισμένες εφαρμογές λίπανσης και η μη ικανοποίησή τους από τους υφιστάμενους υδρογονάνθρακες οδήγησε στην εξέλιξη λιπαντικών με συνθετική βάση. Κατηγορίες ενώσεων που χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση αυτών των λιπαντικών είναι:

- Αλειφατικοί εστέρες: Διαθέτουν υψηλό δείκτη ιξώδους, χαμηλή πτητικότητα, εξαιρετικές λιπαντικές ιδιότητες.

- Φωσφορικοί εστέρες: Χρησιμοποιούνται και ως πρόσθετα για αντι-διαβρωτική προστασία, με χαμηλό σημείο ροής.
- Πολυφαινυλεστέρες: Παρουσιάζουν εξαιρετική σταθερότητα υπό υψηλές θερμοκρασίες (> 450 °C) και λίπανση. Ωστόσο, διαθέτουν χαμηλό δείκτη ιξώδους και παρουσιάζουν υψηλό κόστος.
- Πολυπροπυλενογλυκόλες: Χαρακτηρίζονται από υψηλό δείκτη ιξώδους, καλές αντι-διαβρωτικές ιδιότητες, σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες και μέτρια αντοχή έναντι οξείδωσης.
- Πολυολεφίνες: Διαθέτουν υψηλό δείκτη ιξώδους και εξαιρετικά χαμηλό δείκτη ροής.

2.3 Βελτιωτικά λιπαντικών

Οι ιδιότητες των υλικών βάσης για τα λιπαντικά μεταβάλλονται με την προσθήκη πρόσθετων ουσιών. Τα υλικά αυτά προστίθενται συνήθως για τη διαμόρφωση των ιδιοτήτων αυτών των ουσιών ανάλογα με την εφαρμογή τους. Η επίτευξη ικανοποιητικής απόδοσης αναφορικά με μια ιδιότητα του λιπαντικού ελαίου μπορεί να έχει αρνητική επίπτωση στις υπόλοιπες ιδιότητες αυτού.

Ο δείκτης ιξώδους ενός λιπαντικού ελαίου μπορεί μόνο να αυξηθεί με την προσθήκη σε μικρό ποσοστό πολυμεθακρυλικού μεθυλίου, πολυακρυλικού μεθυλίου ή μερικών πολυμερών ολυφένης. Αυτές οι χημικές ενώσεις συνήθως έχουν μεγάλο μοριακό βάρος, αυξάνοντας τον κίνδυνο αποσύνθεσής τους σε περίπτωση υψηλών διατμητικών τάσεων ή λόγω θερμικής καταπόνησης. Το ιξώδες του λιπαντικού εξαρτάται από τον προσανατολισμό της χημικής αλυσίδας των μορίων του προσθετικού, σε συνάρτηση με την κατεύθυνση της ροής του λιπαντικού.

Σε περίπτωση που το λιπαντικό έχει ως βάση κάποια παραφίνη, τότε υπάρχει ο κίνδυνος κρυσταλλοποίησης αυτής σε χαμηλές θερμοκρασίες, με κίνδυνο τη στερεοποίησή της και τη μείωση της παροχής του λιπαντικού. Η χρήση βελτιωτικών, τα οποία έχουν ως σκοπό τη μείωση του μεγέθους ή την αλλαγή της μορφής του κρυστάλλου, μειώνει τις δυνάμεις προσκόλλησης που αναπτύσσονται μεταξύ των κρυστάλλων. Τα υλικά που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να μεταβάλλουν τη δομή και τη σύσταση των λιπαντικών είναι αλκυλιωμένες αρωματικές ενώσεις, πολυεστέρες, πολυαμίδια και πολυολεφίνες.

Η χρήση των αλάτων ως βελτιωτικών ενδείκνυται για την απομάκρυνση των ιζημάτων που μπορεί να έχουν συλλεχθεί κατά τη λειτουργία της μηχανολογικής διάταξης ή για τη διατήρηση της καθαρότητας του λιπαντικού. Η δράση των βελτιωτικών αυτών είναι συνήθως αλκαλική. Άλλα βελτιωτικά μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την επιβράδυνση ή ακόμα και την εξάλειψη της οξείδωσης που μπορεί να υποστεί το λιπαντικό. Η δράση τους μπορεί να διακριθεί σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες, ανάλογα με το προσθετικό που θα χρησιμοποιηθεί. Οι αμίνες και οι φαινόλες τείνουν να μειώσουν τις ελεύθερες ρίζες που εμφανίζονται στις αλυσίδες των μορίων του λιπαντικού, τα διθειοφωσφορικά και διθειοκαρβαμικά βελτιωτικά δεσμεύουν τα υπεροξειδία που μπορούν να εμφανιστούν λόγω της αλλοίωσης της σύστασης του λιπαντικού, ενώ οι φαινόλες και

οι φαινολικές ενώσεις δημιουργούν μια προστατευτική μεμβράνη επί των μεταλλικών επιφανειών, με σκοπό τη μείωση της επαφής τους με το λιπαντικό και συνεπώς την αποφυγή προβλημάτων οξείδωσης.

Η χρήση βελτιωτικών δεν σκοπεύει μόνο στην αποφυγή αρνητικών συνεπειών που μπορούν να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια της χρήσης του λιπαντικού, αλλά επιμελείται και την προστασία της συναρμογής. Στις επιφάνειες που έρχονται σε άμεση επαφή με το λιπαντικό θα πρέπει να διαμορφωθεί κάποια προστατευτική μεμβράνη, έτσι ώστε να μειωθεί η φθορά της επιφάνειας. Η διάκριση των βελτιωτικών που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν εξαρτάται από τη θερμοκρασία λειτουργίας της συναρμογής (διθειοφωσφορικές ενώσεις) και το pH του λιπαντικού (φωσφορικοί εστέρες).

Τέλος, άλλα βελτιωτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση της τριβής μεταξύ των μεταλλικών επιφανειών της συναρμογής ή για την καταπολέμηση εμφάνισης οξείδωσης του μετάλλου λόγω κάποιου διαβρωτικού συστατικού του λιπαντικού ή λόγω της ύπαρξης αέρα ή σωματιδίων νερού στην περιοχή που θα βρίσκεται το λιπαντικό. Σε περίπτωση που υπάρχει νερό, θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη για τη δημιουργία γαλακτώματος και μείωση των ιδιοτήτων του λιπαντικού.

2.4 Ιδιότητες λιπαντικών

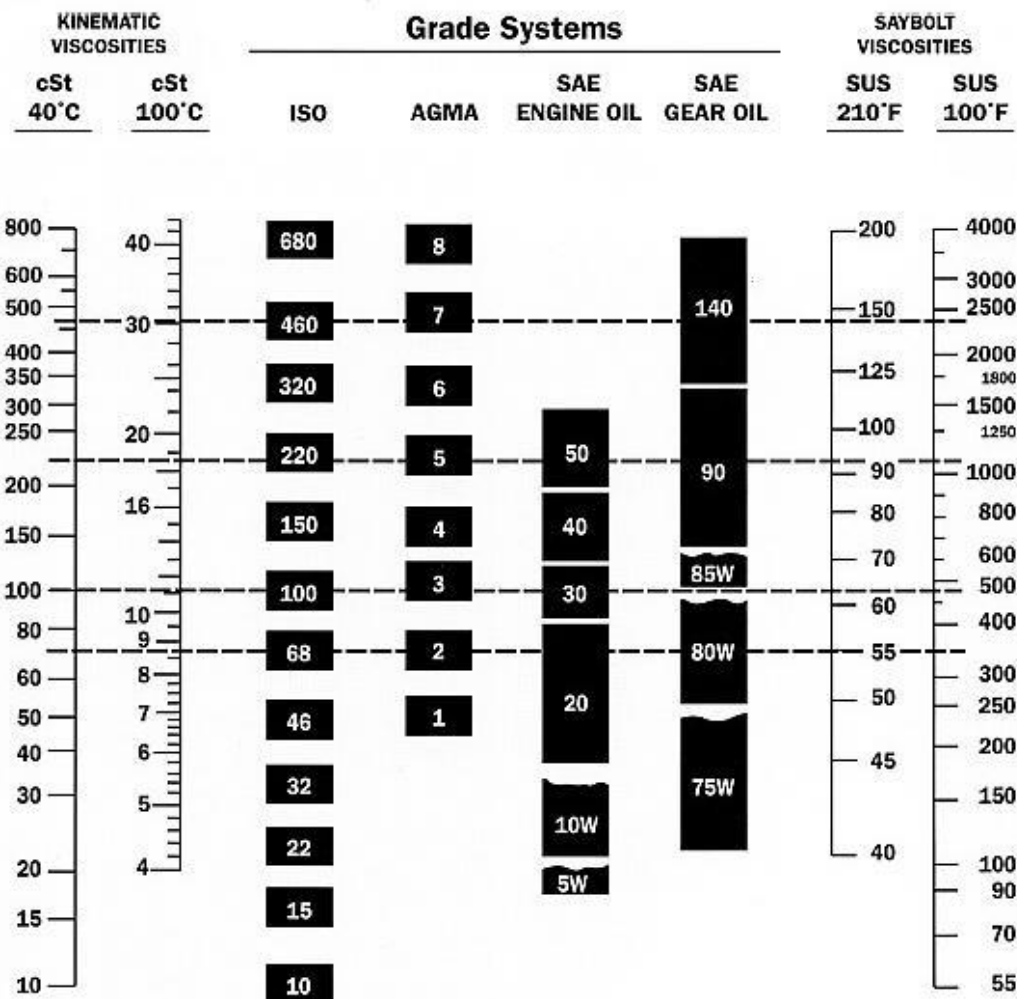
2.4.1 Κατηγοριοποίηση λιπαντικών

Η βαθμονόμηση των λιπαντικών γίνεται βάσει του ιξώδους του λιπαντικού. Η βαθμονόμηση αυτή χρησιμεύει στην κατάταξη του λιπαντικού σε κάποια κατηγορία, αλλά και στη διευκόλυνση για την επιλογή του. Η κατηγοριοποίηση του λιπαντικού θα πρέπει να ακολουθεί τη διεθνή πιστοποίηση ISO, στο πλαίσιο της οποίας η κάθε κλάση αντιστοιχεί σε κάποιον ακέραιο αριθμό, που αντιστοιχεί στο μέσο ιξώδες του λιπαντικού σε θερμοκρασία 40 °C. Ενδεικτικά, στον Πίνακα 2-1 αναφέρονται οι κατηγορίες των λιπαντικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα έδρανο υδροδυναμικής λίπανσης. Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν διάφορα συστήματα βαθμονόμησης λιπαντικών, ανάλογα με τα πρότυπα που ακολουθούνται για τη μέτρηση του ιξώδους του λιπαντικού και την εφαρμογή για την οποία αυτά προορίζονται (Εικόνα 2-1).

Πίνακας 2-1: Κατηγοριοποίηση λιπαντικών κατά ISO.

Κατηγοριοποίηση λιπαντικών κατά ISO	Μέσο κινηματικό ιξώδες σε θερμοκρασία 40 °C [cSt]	Εύρος τιμών κινηματικού ιξώδους σε θερμοκρασία 40 °C [cSt]	
		Ελάχιστο	Μέγιστο
ISO VG 2	2.2	1.98	2.42
ISO VG 3	3.2	2.88	3.52
ISO VG 5	4.6	4.14	5.06
ISO VG 7	6.8	6.12	7.48
ISO VG 10	10	9.00	11.0
ISO VG 15	15	13.5	16.5
ISO VG 22	22	19.8	24.2
ISO VG 32	32	28.8	35.2
ISO VG 46	46	41.4	50.6
ISO VG 68	68	61.2	74.8
ISO VG 100	100	90	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1000	1000	900	1100
ISO VG 1500	1500	1350	1650

Όπως αναφέρθηκε, η κατηγοριοποίηση γίνεται με βάση τη μέτρηση του ιξώδους του λιπαντικού σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, χωρίς να διασφαλίζεται ότι τα λιπαντικά που ανήκουν στην ίδια κατηγορία θα έχουν την ίδια καμπύλη ιξώδους-θερμοκρασίας. Η ανάγκη χρήσης μιας παραμέτρου που θα αποτελεί ένδειξη για τη μεταβολή του ιξώδους, συναρτήσει της θερμοκρασίας, πραγματοποιήθηκε στο τέλος της δεκαετίας του 1920 από τους Dean και Davis, συγκρίνοντας τις τιμές ιξώδους του λιπαντικού σε θερμοκρασία 40 °C και 100 °C με αντίστοιχες πρότυπες τιμές, όπως αυτές έχουν ταξινομηθεί σε αντίστοιχα πρότυπα (βλ. ISO 2909, ASTM D2270). Η αρχική βαθμονόμηση της κλίμακας ήταν από το 0 έως το 100, όμως η βελτίωση των ιδιοτήτων των λιπαντικών με τη χρήση βελτιωτικών οδήγησε στην αύξηση του εύρους δείκτη σε τιμές άνω του 100. Αύξηση του δείκτη αντιστοιχεί σε μείωση της κλίσης της καμπύλης μεταβολής του ιξώδους συναρτήσει της θερμοκρασίας στο αντίστοιχο ημι-λογαριθμικό γράφημα. Συνήθως, λιπαντικά που έχουν ως βάση το ορυκτέλαιο έχουν δείκτη κοντά στο 100, ενώ τα συνθετικά λιπαντικά έχουν δείκτη που είναι μεγαλύτερος του 100.



Εικόνα 2-1: Αντιστοίχιση κλασμάτων λιπαντικού ελαίου.

2.4.2 Ιξώδες λιπαντικών

Το ιξώδες του λιπαντικού αποτελεί ίσως τη σημαντικότερη ανάμεσα στις φυσικές και χημικές ιδιότητες αυτού. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω ιξώδους είναι συνήθως υπαίτιες για πιθανές απώλειες που μπορεί να υπάρχουν λόγω τριβής, για το φορτίο που μπορεί να παραλάβει το λιπαντικό και για το πάχος του στρώματος του λιπαντικού. Το ιξώδες επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και την πίεση που ασκείται σε αυτό. Η αύξηση του ιξώδους του λιπαντικού ελαίου, συνεπάγεται την αύξηση του πάχους αυτού κατά τη λειτουργία του εδράνου, και τη δυνατότητα παραλαβής υψηλότερων φορτίων.

Ως ιξώδες ορίζεται η ιδιότητα της αντίστασης ενός ρευστού στη σχετική κίνηση λόγω των διατμητικών τάσεων (τ) που ασκούνται σε αυτό. Η διατμητική δύναμη που ασκείται σε ένα ρευστό είναι ανάλογη της ταχύτητας (u) και της επιφάνειας που ασκείται η δύναμη στο ρευστό, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη του πάχους (h) της ροής που εξετάζεται. Συνεπώς, το δυναμικό ιξώδες (μ) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ο συντελεστής που θα εκφράσει τη σύνδεση των διατμητικών τάσεων του ρευστού με τη ταχύτητα και το πάχος του ρευστού:

$$\mu = \frac{\tau}{u/h} \quad (2-1)$$

Για την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης ιξώδους σε προβλήματα μεταφοράς ορμής και μάζας, χρησιμοποιείται το κινηματικό ιξώδες (ν), που αποτελεί τον λόγο του δυναμικού ιξώδους προς την πυκνότητα του ρευστού:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-2)$$

Η θερμοκρασία που επικρατεί εντός του εδράνου επηρεάζει άμεσα το ιξώδες του λιπαντικού. Με αύξηση της θερμοκρασίας ενός υγρού, το ιξώδες του μειώνεται κατακόρυφα. Σχέσεις της βιβλιογραφίας που εκφράζουν την επίδραση της θερμοκρασίας στο δυναμικό ιξώδες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-2.

Πίνακας 2-2: Σχέσεις δυναμικού ιξώδους – θερμοκρασίας (Stachowiak και Batchelor, 2005, Cornelissen και Waterman, 1955).

Όνομασία	Εξίσωση
Guzman – Andrade	$\log \mu = \frac{A}{T} + B$
Souders	$\log \nu = \frac{A}{T} + B$
Cornelissen - Waterman	$\log \nu = \frac{A}{T^c} + B$
Poiseuille	$\mu = \mu_o(1 + A \cdot t + B \cdot t^2)$
Reynolds	$\mu = B \cdot e^{-AT}$
Slotte	$\mu = \frac{A}{(B + T)^c}$
Walther	$(\nu + A) = B \cdot D \frac{1}{T^c}$
Vogel	$\mu = A \cdot e^{\frac{B}{T-c}}$
Umstätter	$\text{arc sinh} \ln \frac{\mu}{A} = B + C \cdot \ln T$

Στις σχέσεις του Πίνακα 2-2, οι συντελεστές A, B, C και D αποτελούν σταθερές που μπορούν να υπολογιστούν από πειραματικές τιμές του συντελεστή ιξώδους για συγκεκριμένες θερμοκρασίες, ενώ T και t είναι η θερμοκρασία σε [K] και σε [°C], αντίστοιχα. Η σχέση που εφαρμόζεται ευρέως και χρησιμοποιείται επίσης από τον κανονισμό ASTM D341 είναι η εμπειρική σχέση του Walther, θεωρώντας ότι η σταθερά ‘D’ είναι ίση με 10. Συνεπώς, η σχέση του Walther μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$\log_{10} \log_{10}(\nu_{cS} + A) = \log_{10} \log_{10} B - C \log_{10} T \quad (2-3)$$

Η σταθερά A στη σχέση (2-3) λαμβάνει τιμή ίση με 0.6 όταν το κινηματικό ιξώδες εκφράζεται σε centistokes [cSt]. Η σταθερά $\log_{10} \log_{10} B$ μπορεί να αντικατασταθεί με μία σταθερά B’, δίνοντας στη σχέση τη τελική μορφή:

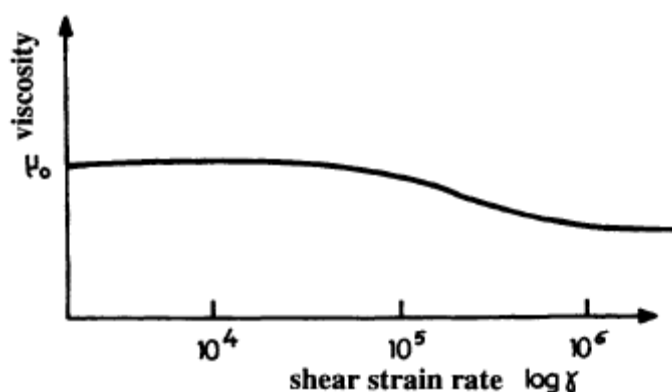
$$\log_{10} \log_{10}(\nu_{cS} + 0.6) = B' - C \log_{10} T \quad (2-4)$$

Εκτός από τη θερμοκρασία, το ιξώδες του λιπαντικού εξαρτάται άμεσα και από την πίεση που αναπτύσσεται σε αυτό. Ανάλογα με την αύξηση της πίεσης, η αύξηση του ιξώδους του υγρού μπορεί να είναι τόσο σημαντική ώστε το υγρό να συμπεριφέρεται σαν στερεό. Μια εμπειρική σχέση που προτάθηκε από τον Barus (Barus, 1893) η οποία εκφράζει το δυναμικό ιξώδες ενός υγρού υπό σταθερή θερμοκρασία συναρτήσει της πίεσης είναι η εξής:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{-\alpha P} \quad (2-5)$$

όπου μ_0 είναι το δυναμικό ιξώδες του υγρού σε ατμοσφαιρική πίεση, εκφρασμένη σε [Pa·s], P είναι η πίεση στην οποία θα υπολογιστεί το νέο ιξώδες μ , εκφρασμένη σε [Pa], ενώ ο συντελεστής α [m^2/N] χαρακτηρίζει τη σχέση μεταξύ του ρευστού και της πίεσης, ανάλογα με τις ιδιότητες του ρευστού και τη θερμοκρασία του. Ο προσδιορισμός της παραμέτρου α γίνεται βάσει πειραματικών δεδομένων, υπολογίζοντας την κλίση της ευθείας του ιξώδους συναρτήσει της πίεσης σε ημι-λογαριθμικό διάγραμμα. Επιπλέον, έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι για τον υπολογισμό του συντελεστή α συναρτήσει της θερμοκρασίας (So & Klaus, 1980), (Cameron, 1981). Ο συνυπολογισμός της θερμοκρασίας στη σχέση του Barus προτάθηκε από τον Roelands (Roelands, 1966), υπολογίζοντας τη μεταβολή του γινομένου της παραμέτρου α και της πίεσης, ανάλογα με τη θερμοκρασία, την τιμή του ιξώδους υπό ατμοσφαιρική πίεση και την πίεση υπολογισμού.

Οι σχέσεις της συνεκτικής ροής του Νεύτωνα μπορούν να εφαρμοσθούν μόνο ως προσεγγιστική μέθοδος για την περιγραφή των ιδιοτήτων των λιπαντικών οι οποίες δεν μπορούν να εφαρμοσθούν πλέον όταν οι τιμές του ρυθμού παραμόρφωσης είναι πολύ υψηλές (άνω των 10^6 s^{-1}). Επιπλέον, η συνεχής βελτίωση της χημικής σύστασης των λιπαντικών τα κατηγοριοποιεί ως μη Νευτώνεια ρευστά. Λόγω των υψηλών διατμητικών τάσεων που ασκούνται στο υγρό, το υγρό υποβάλλεται σε λέπτυνση, με τα μόρια μεγάλου μήκους του ρευστού να προσανατολίζονται προς την κατεύθυνση της ροής του υγρού, με αποτέλεσμα τη μείωση του ιξώδους, προσδίδοντας στο υγρό ψευδοπλαστικές ιδιότητες.



Εικόνα 2-2: Μεταβολή ιξώδους συναρτήσει του ρυθμού παραμόρφωσης για μη Νευτώνεια ρευστά (Frene et al., 1997).

2.4.3 Πυκνότητα λιπαντικού

Η πυκνότητα του λιπαντικού δίνεται από τους κατασκευαστές για συγκεκριμένη θερμοκρασία (15.6 °C). Ο υπολογισμός της πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{\theta} = \rho_{15,6} \cdot [1 - \alpha(\theta - 15,6)] \quad (2-6)$$

όπου θ είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου, ενώ α είναι ο συντελεστής διαστολής του λιπαντικού, που για ορυκτέλαια είναι ίσος με $\alpha = 0.00063 \text{ K}^{-1}$. Επίσης, για ορυκτέλαια, η επίδραση της πίεσης στην πυκνότητα του λιπαντικού μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση των Dowson και Higginson (Hamrock et al., 2004):

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1 + \frac{0.6P}{1 + 1.7P} \quad (2-7)$$

Στη σχέση 2-7, η πυκνότητα ρ_0 αντιστοιχεί σε ατμοσφαιρική πίεση, ενώ P είναι η σχετική (μανομετρική) πίεση (σε [atm]) στην οποία υπολογίζεται η πυκνότητα ρ εκφρασμένη σε $[\text{kg/m}^3]$.

2.4.4 Θερμοφυσικές ιδιότητες

Η ειδική θερμοχωρητικότητα του λιπαντικού υπό σταθερή πίεση αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας του λιπαντικού. Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι η θερμοχωρητικότητα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $1800 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ στους $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και $3300 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ στους $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Για συγκεκριμένη θερμοκρασία, η θερμοχωρητικότητα μπορεί να βρεθεί προσεγγιστικά με χρήση γραμμικής παρεμβολής μεταξύ των παραπάνω τιμών, όπως περιγράφεται από τη σχέση (Hamrock et al., 2004):

$$c_p = 1800[1 + 0.002\theta] \quad (2-8)$$

Εναλλακτικά, για τον ακριβέστερο προσδιορισμό ανάλογα με την ειδική πυκνότητα (specific gravity) του λιπαντικού, s , η θερμοχωρητικότητα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (Cameron, 1981):

$$c_p = \frac{(1.63 + 0.0034 \cdot \theta)}{s^{0.5}} \quad (2-9)$$

Η ειδική θερμοχωρητικότητα στις συγκεκριμένες ημι-εμπειρικές σχέσεις εκφράζεται σε $[\text{J/kg} \cdot \text{K}]$, ενώ η θερμοκρασία θ σε βαθμούς Κελσίου $[^{\circ}\text{C}]$

Η θερμική αγωγιμότητα του λιπαντικού μεταβάλλεται επίσης γραμμικά συναρτήσει της θερμοκρασίας, και επηρεάζεται κυρίως από την πολικότητα και τους δεσμούς υδρογόνου των μορίων του λιπαντικού. Το εύρος της θερμικής αγωγιμότητας για ένα λιπαντικό κυμαίνεται από $0.14 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ στους $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $0.11 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ στους $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Η μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας δίνεται από τη σχέση (Hamrock et al., 2004):

$$k = 0.1312[1 - 6.3 \cdot 10^{-4} \cdot \theta] \quad (2-10)$$

Συγκεκριμένα, η θερμική αγωγιμότητα ενός λιπαντικού, ανάλογα με την ειδική πυκνότητα αυτού, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (Cameron, 1981):

$$k = \frac{0.12 \cdot (1 - 1.667 \cdot 10^{-4} \cdot \theta)}{s} \quad (2-11)$$

Η θερμική αγωγιμότητα στις σχέσεις (2-10) και (2-11) εκφράζεται σε μονάδες [W/m·K], ενώ η θερμοκρασία θ σε βαθμούς Κελσίου [°C].

2.4.5 Σημείο ροής και θόλωσης - Θερμοκρασίες έναυσης λιπαντικού

Σημείο ροής (pour point) ορίζεται ως η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία ένα λάδι μπορεί να ρέει υπό την επίδραση του βάρους του. Για τον καθορισμό του σημείου ροής, το λιπαντικό θερμαίνεται μέχρι τη θερμοκρασία όπου όλα τα συστατικά του βρίσκονται σε υγρή κατάσταση, και στη συνέχεια ψύχεται σταδιακά ανά 3 °C. Η θερμοκρασία στην οποία το λιπαντικό σε υγρή μορφή αδυνατεί να μετακινηθεί καταγράφεται ως το σημείο ροής του λιπαντικού. Κάτω από αυτή τη θερμοκρασία, το ιξώδες του λιπαντικού αυξάνεται σημαντικά, ενώ εμφανίζεται κρυστάλλωση της περιεχόμενης παραφίνης. Αντίστοιχα, ορίζεται ως σημείο θόλωσης η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει η αποβολή των κρυστάλλων παραφίνης από το λιπαντικό. Ο καθορισμός του σημείου θόλωσης βασίζεται στην παρατήρηση της αλλαγής του χρώματος του λιπαντικού, περιορίζεται δε στα λιπαντικά ανοιχτού χρώματος, όπου είναι δυνατή η παρατήρηση των κρυστάλλων του λιπαντικού (διάμετρος $d \geq 0.5 \mu\text{m}$) (Luque & Melero, 2012).

Τα όρια εκρηκτικότητας των λιπαντικών κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 1% με 7% κατ' όγκον στον αέρα (Παραδεισιάδης, 2012). Η παρουσία ατμών λιπαντικού σε συγκέντρωση ανάμεσα στις δύο αυτές τιμές εγκυμονεί τον κίνδυνο ανάφλεξης. Για τον χαρακτηρισμό της έναυσης του λιπαντικού καθορίζονται τρεις θερμοκρασίες:

- Σημείο ανάφλεξης (flash point): Στη συγκεκριμένη θερμοκρασία υπάρχει η δυνατότητα ανάφλεξης των ατμών του λιπαντικού. Το σημείο καθορίζεται θερμαίνοντας το λιπαντικό υπό συνθήκες σταθερής πίεσης ώστε να παραχθούν σημαντικές ποσότητες ατμών στο λιπαντικό, ικανές για την ανάφλεξή του μίγματος με την παρουσία κάποιας εστίας φωτιάς. Η θερμοκρασία αυτή δεν εγγυάται τη συνεχή παραγωγή ατμών για τη διατήρηση της φλόγας.
- Σημείο καύσης (fire point): Σε αντίθεση με το σημείο ανάφλεξης, όταν το λιπαντικό βρεθεί στη συγκεκριμένη θερμοκρασία υπάρχει επαρκής ποσότητα παραγωγής ατμών ώστε να διατηρηθεί η φλόγα.
- Σημείο αυτανάφλεξης (SIT, Self Ignition Temperature): Το λιπαντικό στη συγκεκριμένη θερμοκρασία έχει τη δυνατότητα αυτανάφλεξης, χωρίς την ανάγκη κάποιας εξωτερικής πηγής θερμότητας.

Ο καθορισμός των συγκεκριμένων σημείων είναι απαραίτητος για τη σωστή εφαρμογή των λιπαντικών. Οι θερμοκρασίες υπό τις οποίες το λιπαντικό έχει τη δυνατότητα να αναφλεγεί αποτελούν σημαντικό δείκτη για την ασφάλεια του λιπαντικού κατά τη χρήση του. Γενικώς, η αύξηση του μοριακού βάρους του λιπαντικού οδηγεί σε αύξηση των θερμοκρασιών ανάφλεξης και καύσης του λιπαντικού.

2.4.6 Λοιπές ιδιότητες λιπαντικών

Εκτός από τις θερμοφυσικές ιδιότητες, λόγω της ποικιλίας των εφαρμογών του λιπαντικού, εμφανίζεται η ανάγκη προσδιορισμού επιπλέον ιδιοτήτων. Συγκεκριμένα:

- Αντοχή σε οξείδωση: Η έκθεση του λιπαντικού σε υψηλές θερμοκρασίες στον ατμοσφαιρικό αέρα δύναται να οξειδώσει το λιπαντικό μέσω διάσπασης ή αναδιάταξης των χημικών δεσμών των μορίων του. Ο ρυθμός οξείδωσης του λιπαντικού επηρεάζεται από τις συνθήκες λειτουργίας του λιπαντικού, τις μεταλλικές επιφάνειες των εδράνων, αλλά και από τη διαδικασία απόσταξης που θα χρησιμοποιηθεί. Ο περιορισμός της οξείδωσης μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω χρήσης βελτιωτικών ή μέσω επαναδιύλισης του λιπαντικού για αναμόρφωση των αρωματικών υδρογονανθράκων και περιορισμό της συγκέντρωσης ανόργανων συστατικών. Σε περίπτωση που το λιπαντικό υποστεί οξείδωση, τότε το ιξώδες και η οξύτητά του αυξάνεται. Ως συνέπεια, προκαλείται φθορά και επικάλυψη υπολειμμάτων στις μεταλλικές επιφάνειες, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η αποτελεσματική χρήση του λιπαντικού.
- Οξύτητα: Η οξύτητα ενός λιπαντικού αναπαρίσταται μέσω των mg βασικού διαλύματος (KOH) που απαιτούνται για την εξουδετέρωση ενός γραμμαρίου λιπαντικού. Σε περίπτωση που το λιπαντικό έχει αλκαλικές ιδιότητες, τότε ως αριθμός οξύτητας ορίζονται τα mg του όξινου διαλύματος που απαιτούνται για την εξουδετέρωση του μίγματος του λιπαντικού, ενώ η τιμή αναγράφεται με αρνητικό πρόσημο, υποδηλώνοντας την αλκαλικότητα του λιπαντικού.
- Εξανθράκωμα ή υπόλειμμα άνθρακα: Η εμφάνιση υπολειμμάτων άνθρακα γίνεται σε θερμοκρασίας άνω των 300°C υπό απουσία αέρα, όπου διασπώνται οι μεγάλες ανθρακικές αλυσίδες. Η μη σωστή επανένωση των ανθρακικών αλυσίδων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ασφαλτενίων και ανθρακικών υπολειμμάτων. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στα έλαια που έχουν ως βάση κάποιο ορυκτέλαιο, καθώς οι χημικές ενώσεις παρουσιάζονται πιο ασταθείς σε υψηλές θερμοκρασίες με απουσία αέρα.
- Πτητικότητα: Η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στην επιφάνεια του λιπαντικού έχει ως αποτέλεσμα την εξάτμιση μερικών πτητικών συστατικών του λιπαντικού ή όλης της μάζας αυτού. Η εξάτμιση των περισσότερο πτητικών συστατικών του λιπαντικού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ιξώδους της υγρής φάσης του λιπαντικού, και συνεπώς την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας του λιπαντικού εξαιτίας της αύξησης των απωλειών ενέργειας λόγω τριβής.
- Αντιαφριστική ιδιότητα: Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του λιπαντικού ενδέχεται να δημιουργηθεί αφρός που μπορεί να οδηγήσει σε διακοπή της ομαλής λειτουργίας λόγω της αδυναμίας του λιπαντικού να καλύψει τις επιφάνειες, καθώς και στη φθορά της συναρμογής. Η δημιουργία του αφρού εξαρτάται από τη χημική σύσταση, την επιφανειακή τάση, τη πυκνότητα και τις βισκοελαστικές ιδιότητες του λιπαντικού, καθώς επίσης και από τις συνθήκες λειτουργίας. Η μείωση του αφρού μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της χρήσης βελτιωτικών (Kichkin, 1966).
- Αριθμός σαπωνοποίησης: Κατά τη διάρκεια της χρήσης του λιπαντικού, μερικά συστατικά αυτού (κυρίως εστέρες) υδρολύονται υπό την παρουσία NaOH ή

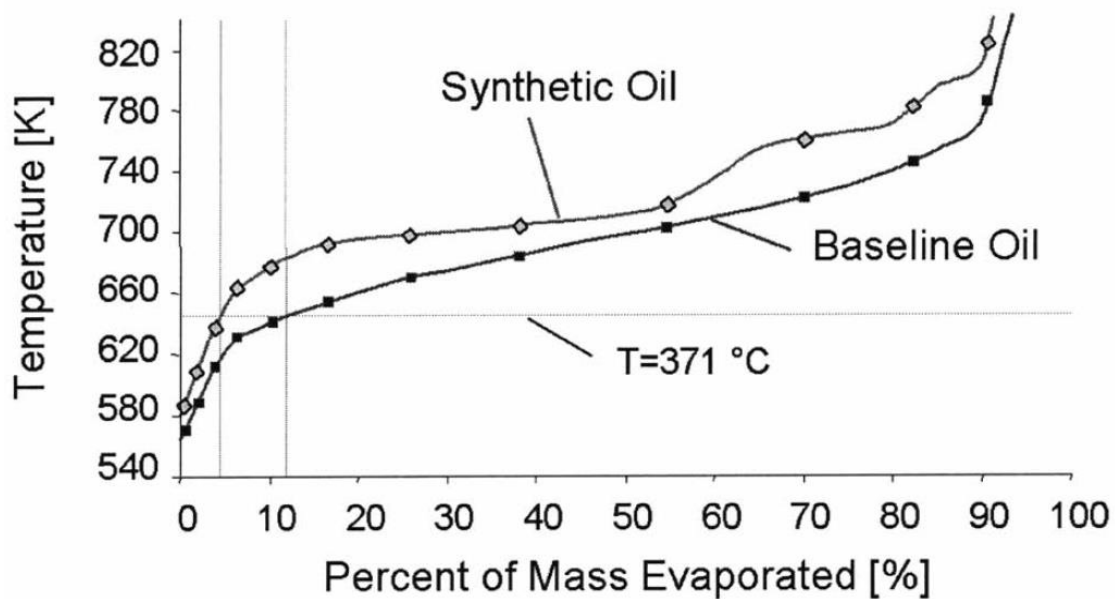
KOH, με αποτέλεσμα την εμφάνιση λιπαρών οξέων στο λιπαντικό. Ο αριθμός των mg KOH που απαιτούνται για τον σχηματισμό των λιπαρών οξέων ενός γραμμαρίου λιπαντικού ονομάζεται αριθμός σαπωνοποίησης. Η αύξηση του μεγέθους της ανθρακικής αλυσίδας μειώνει τον αριθμό σαπωνοποίησης.

2.5 Καθορισμός ιδιοτήτων λιπαντικού

Η παρούσα μελέτη αφορά στη μελέτη ακτινικού εδράνου υδροδυναμικής λίπανσης. Λόγω της ποικιλίας των εφαρμογών των συγκεκριμένων εδράνων και της ποικιλίας των λιπαντικών που υπάρχουν στην αγορά, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των απαιτήσεων της συγκεκριμένης εφαρμογής και των λιπαντικών που είναι κατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν. Σε ακτινικά έδρανα που χρησιμοποιούνται για την παραλαβή των φορτίων του περιστρεφόμενου άξονα και της έλικας του πλοίου, χρησιμοποιούνται συνήθως λιπαντικά που αντιστοιχούν στην κατηγορία 85W – 90 SAE Gear Oil. Βάσει της Εικόνας 2-1, το συγκεκριμένο λιπαντικό αντιστοιχεί σε ιζώδες με ISO μεγαλύτερο του 100 ή σε SAE Engine Oil άνω του 30.

Λόγω του φαινομένου της σπηλαιώσης, απαιτείται ο ακριβής προσδιορισμός των ιδιοτήτων του λιπαντικού τόσο σε υγρή όσο και σε αέρια φάση. Φυσικά, λόγω της φύσης ενός λιπαντικού και του σκοπού της χρήσης αυτού, οι εταιρίες παραγωγής λιπαντικών και οι βιβλιογραφικές πηγές δίνουν πάντα στοιχεία μόνο για την υγρή φάση του λιπαντικού, χωρίς να καθορίζονται λεπτομέρειες για τις αντίστοιχες ιδιότητές του στην αέρια φάση. Συνεπώς, ο προσδιορισμός των εν λόγω ιδιοτήτων θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μέσω του προσδιορισμού της αναλυτικής σύνθεσης των συστατικών του λιπαντικού.

Μια μέθοδος για τον προσδιορισμό της σύστασης του λιπαντικού είναι ο υπολογισμός του μοριακού βάρους του κάθε συστατικού, βάσει της καμπύλης απόσταξης (Cho, 2005). Μέσω του μοριακού βάρους του λιπαντικού μπορούν να προσδιορισθούν οι ιδιότητες του λιπαντικού τόσο σε υγρή όσο και σε αέρια φάση για κάθε συστατικό. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το λιπαντικό βάσης που θα χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη του υδροδυναμικού εδράνου είναι ορυκτέλαιο, μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι αποτελείται από διακεκριμένα κλάσματα παραφινών (C_nH_{2n+2}), ευθύγραμμης αλυσίδας. Για τη χάραξη της καμπύλης απόσταξης ακολουθείται η τεχνική της προσομοιωμένης απόσταξης, ενώ ο ακριβής προσδιορισμός των συστατικών του λιπαντικού γίνεται βάσει της θερμοκρασίας στην οποία το κάθε συστατικό εξατμίζεται (Εικόνα 2-3). Το λιπαντικό που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα μελέτη ανήκει στην κατηγορία 10W-30 SAE Engine oil, οι ιδιότητες του οποίου είναι πολύ κοντά στις ιδιότητες των λιπαντικών που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές για τα έδρανα αξονικών συστημάτων πλοίου, όπως προαναφέρθηκε. Στον Πίνακα 2-2 αναπαρίσταται το γραμμομοριακό κλάσμα που καταλαμβάνει το κάθε συστατικό του λιπαντικού, καθώς και η θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα η εξάτμισή του, όπως προκύπτουν από την αντίστοιχη καμπύλη απόσταξης.



Εικόνα 2-3: Καμπύλη δύλισης λιπαντικού υπό ατμοσφαιρική πίεση (Cho, 2005).

Πίνακας 2-3: Ποσοτικοποίηση των κλασμάτων μάζας και των σημείων εξάτμισης του ορυκτέλαιου βάσει της αντίστοιχης καμπύλης που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-3.

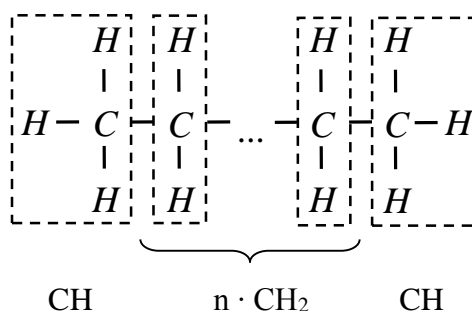
Αριθμός συστατικού λιπαντικού	Κλάσμα μάζας (%)	Σημείο εξάτμισης (K)
1	1	560
2	1.5	585
3	2.5	610
4	5	625
5	5	640
6	5	650
7	5	660
8	5	670
9	10	682.5
10	5	690
11	20	702.5
12	5	720
13	10	727.5
14	5	740
15	5	750
16	5	770

Βάσει πειραματικών τιμών για παραφίνες (Wilhoit & Zwolinski, 1971) και του Πίνακα 2-3, μπορεί να γίνει μία προσέγγιση του μοριακού βάρους του εκάστοτε συστατικού του λιπαντικού ανάλογα με το σημείο εξάτμισής του, σύμφωνα με τη σχέση:

$$MW_i = (6.28 \cdot 10^{-6}) \cdot T_{bp}^3 + (-4.61 \cdot 10^{-3}) \cdot T_{bp}^2 + 1.953 \cdot T_{bp} - 99.93 \quad (2-12)$$

Στη σχέση (2-12), δίνεται το μοριακό βάρος του κάθε συστατικού MW_i εκφρασμένη σε [kg/kmol], ενώ με T_{bp} ορίζεται η θερμοκρασία εξάτμισης του κάθε συστατικού σε

βαθμούς Kelvin [K]. Η συγκεκριμένη σχέση εφαρμόζεται για θερμοκρασίες εξάτμισης μεταξύ 460 K και 900 K. Για την αύξηση της ακρίβειας στην προσέγγιση του μοριακού βάρους του κάθε συστατικού, λαμβάνεται υπόψη ότι κάθε συστατικό ανήκει στη κατηγορία των παραφινών (αλκάνια ευθύγραμμης αλυσίδας). Η συγκεκριμένη παραδοχή είναι αρκετά ρεαλιστική, καθώς, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα ορυκτέλαια έχουν ως βάση κάποιο μείγμα παραφινών. Με βάση τη μοριακή δομή της Εικόνας 2-4, θεωρείται ότι η παραφίνη αποτελείται από n ομάδες CH_2^{-2} και από δύο ομάδες CH_3^{-1} . Συνεπώς, ο υπολογισμός του μοριακού βάρους των συστατικών θα πρέπει να βασιστεί στο μοριακό βάρος αυτών των ομάδων, μεταβάλλοντας τον αριθμό n συναρτήσει του μοριακού βάρους που υπολογίστηκε από τη προσεγγιστική σχέση $MW_i = (6.28 \cdot 10^{-6}) \cdot T_{bp}^3 + (-4.61 \cdot 10^{-3}) \cdot T_{bp}^2 + 1.953 \cdot T_{bp} - 99.93$ (2-12).



Εικόνα 2-4: Ευθύγραμμη αλυσίδα αλκανίου

Ο υπολογισμός του μοριακού βάρους του λιπαντικού υπολογίζεται βάσει των γραμμομοριακών κλασμάτων του κάθε συστατικού, με συντελεστή βαρύτητας το αντίστοιχο μοριακό κλάσμα:

$$MW = \sum_i x_i \cdot MW_i \quad (2-13)$$

Η γνώση του μοριακού βάρους και των συστατικών του λιπαντικού είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό των υπόλοιπων θερμοφυσικών ιδιοτήτων του λιπαντικού, τόσο σε υγρή όσο και σε αέρια φάση. Λόγω της μη πρακτικής εφαρμογής του λιπαντικού στην αέρια φάση, η συλλογή των αντίστοιχων θερμοδυναμικών και φυσικών ιδιοτήτων του λιπαντικού είναι εξαιρετικά δυσχερές, και είναι εφικτή μόνο με τη χρήση καταστατικών εξισώσεων, με την εφαρμογή υπολογιστικών σχέσεων προσδιορισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων για διάφορους υδρογονάνθρακες βάσει της θερμοκρασίας (Yaws, 2008), (Dykyj et al., 1999), (Yaws, 1999), (Yaws, 2009), καθώς επίσης και μέσω χρήση μεθόδων συνεισφοράς ομάδων – Μέθοδος Joback (Joback & Reid, 1987).

Εναλλακτικός τρόπος προσδιορισμού της τάσης ατμών (πίεση ατμοποίησης) του κάθε συστατικού γίνεται βάσει της εξίσωσης του Antoine:

$$\log_{10} p_i = A_i - \frac{B_i}{C_i + \theta} \quad (2-14)$$

όπου p_i είναι η τάση ατμών εκφρασμένη σε [mmHg], θ είναι η θερμοκρασία του ρευστού [°C], ενώ οι αδιάστατοι συντελεστές A , B και C μπορούν να υπολογιστούν μέσω των προσεγγιστικών σχέσεων (Cho, 2005):

$$A_i = (4.4 \cdot 10^{-10}) \cdot MW_i^3 + (-1.1 \cdot 10^{-6}) \cdot MW_i^2 + (1.04 \cdot 10^{-3}) \cdot MW_i - 6.85 \quad (2-15)$$

$$B_i = (1.91 \cdot 10^{-6}) \cdot MW_i^3 + (-4.78 \cdot 10^{-3}) \cdot MW_i^2 + (4.51) \cdot MW_i - 1.06 \cdot 10^3 \quad (2-16)$$

$$C_i = (-1.15 \cdot 10^{-7}) \cdot MW_i^3 + (4.03 \cdot 10^{-4}) \cdot MW_i^2 + (-6.02 \cdot 10^{-1}) \cdot MW_i - 2.72 \cdot 10^2 \quad (2-17)$$

Οι παραπάνω σχέσεις για τον προσδιορισμό των συντελεστών A, B και C έχουν προκύψει πειραματικά για αλκάνια με μοριακό βάρος από 310 kg/kmol έως 842 kg/kmol. Η γνώση της καμπύλης της τάσης ατμών του λιπαντικού είναι απαραίτητη για τη μελέτη του φαινομένου της σπηλαιώσης σε υδροδυναμικά έδρανα.

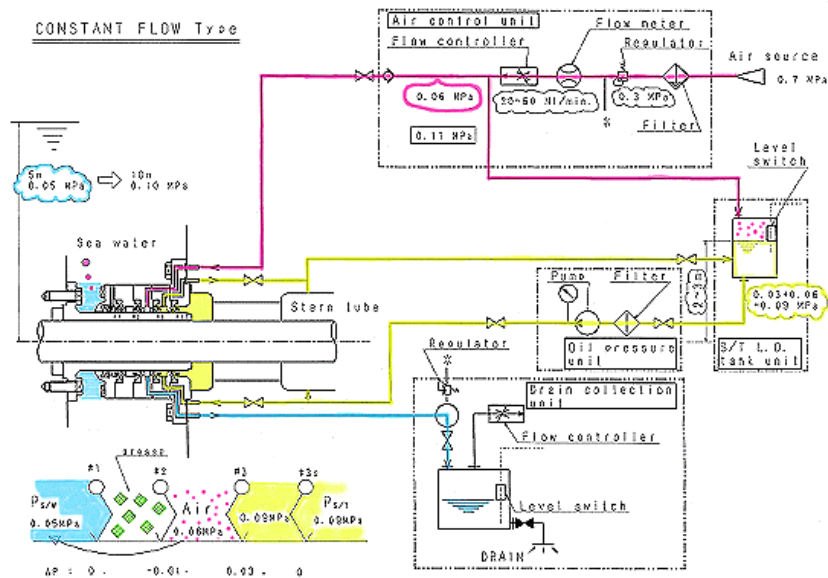
2.6 Χρήση λιπαντικών σε έδρανα αξονικών συστημάτων πλοίων

Συνήθως, τα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται στα ακτινικά έδρανα του πλοίου, και συγκεκριμένα στο έδρανο που υποστηρίζει τον άξονα μετάδοσης κίνησης προς την έλικα, ανήκουν στην κατηγορία 85W-90 και άνω, ανάλογα με την εφαρμογή και το πλοίο. Σε περίπτωση που στα έδρανα χρησιμοποιείται κάποιο λιπαντικό έλαιο, τότε το πλοίο οφείλει να λάβει κάποια μέτρα ώστε να διατηρηθούν οι συνθήκες ασφαλείας, και το λιπαντικό να λειτουργεί εντός συγκεκριμένων ορίων θερμοκρασίας και σύστασης.

Συγκεκριμένα, το έδρανο του άξονα θα πρέπει να φέρει αισθητήρες θερμοκρασίας στη μεταλλική επιφάνεια, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ανάγνωση της θερμοκρασίας λειτουργίας του λιπαντικού. Σύμφωνα με τους κανονισμούς, η θέση των αισθητήρων θα πρέπει να βρίσκεται στο κάτω μέρος της περιοχής του εδράνου, δηλαδή στην περιοχή όπου αναπτύσσεται το πεδίο της πίεσης, ενώ η θερμοκρασία δε θα πρέπει να ξεπερνά τους 65 °C (DNV Rules, January 2015).

Επιπλέον, δείγματα λιπαντικού θα πρέπει να λαμβάνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του εδράνου έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα του λιπαντικού. Ο έλεγχος των δειγμάτων γίνεται είτε πάνω στο πλοίο μέσω ειδικής συσκευής, είτε από διαπιστευμένο Εργαστήριο. Συγκεκριμένα, το ποσοστό του θαλασσινού νερού στο λιπαντικό δε θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 2% κ.ο. Σε περίπτωση που η συγκέντρωση του νερού είναι μεγαλύτερη, τότε το έδρανο και η στεγανότητά του θα πρέπει να ελεγχθούν.

Εκτός όμως από τις συνθήκες λειτουργίας του λιπαντικού, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το μεγαλύτερο πρόβλημα των εδράνων που χρησιμοποιούν λιπαντικό είναι η διαρροή του λιπαντικού στη θάλασσα. Πέρα της απώλειας σημαντικής ποσότητας λιπαντικού, η διαρροή αποτελεί σημαντικό οικολογικό κίνδυνο, και θα πρέπει να αντιμετωπιστεί. Για την σωστή απομόνωση του λιπαντικού και τη μη απελευθέρωσή του στο θαλάσσιο περιβάλλον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλοί στεγανωτικοί δακτύλιοι, είτε δακτύλιοι με πεπιεσμένο αέρα που διαχωρίζουν εντελώς τις περιοχές του λιπαντικού και του θαλασσινού νερού.



Εικόνα 2-5: Διάταξη στεγανωτικών δακτυλίων εδράνου άξονα με χρήση αέρα (Yamao & Matsuoka, 2003).

Παράλληλα με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των στεγανωτικών δακτυλίων, η έρευνα συνεχίζεται και για την ανάπτυξη βιοδιασπώμενων λιπαντικών, τα οποία θα έχουν ισοδύναμες ιδιότητες με τα κοινά ορυκτέλαια, αποτρέποντας όμως ταυτόχρονα τον κίνδυνο της θαλάσσιας μόλυνσης. Φυσικά, εναλλακτική λύση της χρήσης λιπαντικού είναι η χρήση θαλασσινού νερού. Σε αυτή την περίπτωση, δεν απαιτείται η περιοδική συλλογή δειγμάτων για την ποιότητα του λιπαντικού μέσου, ενώ η μόλυνση του περιβάλλοντος πλέον είναι μηδενική καθώς δεν υπάρχει ρυπαίνον λιπαντικό.

3 Έδρανα υδροδυναμικής λίπανσης

3.1 Υδροδυναμική Λίπανση

Η χρήση λιπαντικού για τη λίπανση δύο συνεργαζόμενων επιφανειών εκμεταλλεύεται τις δυνάμεις ιξώδους του λιπαντικού για την παραλαβή των φορτίων μεταξύ των δύο σωμάτων, χωρίς να αφήνει τις δύο επιφάνειες να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους. Η λίπανση μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κύριες κατηγορίες (Szeri, 2011):

- Λίπανση λεπτής στρώσης (thin-film lubrication), η οποία συναντάται σε γρανάζια και σε έδρανα με πάχος το οποίο δεν ξεπερνάει το 1 μm . Οι συνθήκες που επικρατούν στο έδρανο είναι τέτοιες ώστε να επηρεάζουν το ιξώδες του λιπαντικού αλλά και να προκαλούν ελαστική παραμόρφωση στις συνεργαζόμενες επιφάνειες. Το λιπαντικό σε αυτήν την περίπτωση συντελεί στη μείωση των τριβών που συναντώνται στις συνεργαζόμενες επιφάνειες.
- Λίπανση στρώσης μεγάλου πάχους (thick-film lubrication) η οποία συναντάται σε έδρανα υγρής λίπανσης. Οι πιέσεις που αναπτύσσονται στο λιπαντικό είναι σημαντικά χαμηλότερες από την προηγούμενη περίπτωση, ενώ, σε περίπτωση που το ιξώδες του λιπαντικού περιγράφεται από γραμμική σχέση, τότε οι κλασσικές εξισώσεις Reynolds μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή της ροής του ρευστού.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όταν η στρώση του λιπαντικού ανάμεσα στις δύο επιφάνειες είναι σημαντικού πάχους, τότε η λίπανση χαρακτηρίζεται ως υγρή. Σε περίπτωση που το στρώμα μεταξύ των επιφανειών επιτυγχάνεται με τη βοήθεια αντλίας, η λίπανση χαρακτηρίζεται ως υδροστατική, και η αναγκαία πίεση μεταξύ των δύο επιφανειών αναπτύσσεται από την αντλία. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν το στρώμα του λιπαντικού δημιουργείται μέσω αναρρόφησης λόγω της σχετικής κίνησης των δύο επιφανειών, η λίπανση χαρακτηρίζεται ως υδροδυναμική. Συνεπώς, η αναπτυσσόμενη πίεση του λιπαντικού είναι το αποτέλεσμα των συνθηκών ροής που αναπτύσσονται μεταξύ των δύο επιφανειών (Παραδεισιάδης, 2012).

Η θεωρία της υδροδυναμικής λίπανσης εισήχθη πρώτη φορά από τον Osborne Reynolds το 1886, ενώ τα πρώτα πειράματα για την πρακτική μελέτη του φαινομένου πραγματοποιήθηκαν από τον Beauchamp Tower (Reynolds, 1886). Τα πρώτα υδροδυναμικά έδρανα λίπανσης ήταν τα ωστικά έδρανα των Michell και Kingsburry που κατασκευάστηκαν στις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες είναι δυνατό να αναπτυχθεί υδροδυναμική λίπανση μεταξύ δύο επιφανειών απαιτούν την σχετική κίνηση των δύο επιφανειών με ικανοποιητική ταχύτητα ώστε να δημιουργηθεί ένα επαρκές στρώμα λιπαντικού για την παραλαβή φορτίων. Οι συνεργαζόμενες επιφάνειες θα πρέπει να είναι τοποθετημένες υπό κλίση μεταξύ τους, σχηματίζοντας τη γεωμετρία μιας «σφήνας». Η ύπαρξη της κλίσης αυτής, συντελεί στη δημιουργία πεδίου πίεσης στο στρώμα του λιπαντικού. Σε διαφορετική περίπτωση, αν οι επιφάνειες είναι παράλληλες μεταξύ τους, θα πρέπει να υπάρχουν κατάλληλες αυλακώσεις τουλάχιστον στη μία από τις συνεργαζόμενες επιφάνειες, ή οι δύο επιφάνειες να πλησιάζουν η μία την άλλη, συμπιέζοντας με αυτόν τον τρόπο το υγρό λιπαντικό. Λόγω της γεωμετρίας που διαμορφώνεται στον κλειστό όγκο ανάμεσα στις

δύο επιφάνειες και λόγω της σχετικής τους ταχύτητας, αναπτύσσεται πεδίο πιέσεων μεταξύ των δύο επιφανειών. Το πεδίο πιέσεων που αναπτύσσεται αναγκάζει τις δύο επιφάνειες να διαχωριστούν και να υποστηρίξει τυχόν φορτίο που μεταφέρεται από αυτές.

Η υποστήριξη των περιστρεφόμενων αξόνων αποτελούσε μία από τις κύριες εφαρμογές των εδράνων υδροδυναμικής λίπανσης. Το φορτίο σε αυτές τις εφαρμογές μπορεί να είναι κάθετο ως προς τη διεύθυνση του άξονα ή παράλληλο ως προς αυτόν. Στην πρώτη περίπτωση το έδρανο ονομάζεται ακτινικό έδρανο, ενώ στην άλλη περίπτωση καλείται αξονικό έδρανο (ωστικό έδρανο). Το ακτινικό έδρανο αποτελείται από ένα κυλινδρικό σώμα το οποίο παραμένει ακίνητο (κέλυφος) γύρω από έναν περιστρεφόμενο άξονα. Η εφαρμογή του συγκεκριμένου εδράνου ενδείκνυται για την παραλαβή ακτινικών φορτίων ή απλά ως οδηγού για την ομαλή περιστροφή του άξονα. Το σταθερό τμήμα του εδράνου αποτελεί στην πραγματικότητα ένα κουζινέτο που στην εσωτερική του επιφάνεια έχει υποστεί ειδική επεξεργασία μέσω επίστρωσης κάποιου μετάλλου μικρότερης σκληρότητας για χαμηλότερη τριβή (κασσίτερος, μόλυβδος, χαλκός, ή ακόμα και πλαστικό). Η τροφοδοσία του λιπαντικού ανάμεσα στις δύο επιφάνειες μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω μιας οπής που θα βρίσκεται στο άνω μέρος και στη μέση του κουζινέτου, μέσω ειδικής περιφερειακής εγκοπής που δύναται να υπάρχει κοντά σε ένα από τα δύο του άκρα (ελικοειδούς ή κυκλικής διαμόρφωσης) ή μέσω εσωτερικής διαμόρφωσης του άξονα όπου το λάδι θα διοχετεύεται από την εσωτερική πλευρά της στρώσης (Khonsari & Booser, 2008).

Η λειτουργία του ακτινικού εδράνου υδροδυναμικής λίπανσης βασίζεται στη θέση του άξονα ως προς το έδρανο, η οποία είναι έκκεντρη, με σκοπό τη δημιουργία ενός συγκλίνοντος-αποκλίνοντος αγωγού. Λόγω της συγκεκριμένης γεωμετρίας, αναπτύσσεται ένα πεδίο πιέσεων, ικανό να υποστηρίξει το φορτίο του άξονα. Λόγω της εκκεντρότητας που παρουσιάζει ο άξονας ως προς το έδρανο, η απόσταση μεταξύ του άξονα και του εδράνου μεταβάλλεται κατά τη περιφερειακή διεύθυνση του εδράνου.

3.2 Μαθηματική ανάλυση του φαινομένου

3.2.1 Υπολογισμός ροϊκού πεδίου

Για τη μαθηματική περιγραφή του φαινομένου της υδροδυναμικής λίπανσης, θεωρείται ένας στοιχειώδης όγκος ρευστού που αντιστοιχεί στο λιπαντικό που υπάρχει μεταξύ των δύο επιφανειών του εδράνου, και ο οποίος χαρακτηρίζεται από ισορροπία δυνάμεων κατά τον άξονα x . Οι δυνάμεις που ασκούνται σε αυτή τη διεύθυνση είναι οι διατμητικές δυνάμεις από τις επιφάνειες του εδράνου και από τη πίεση του ρευστού:

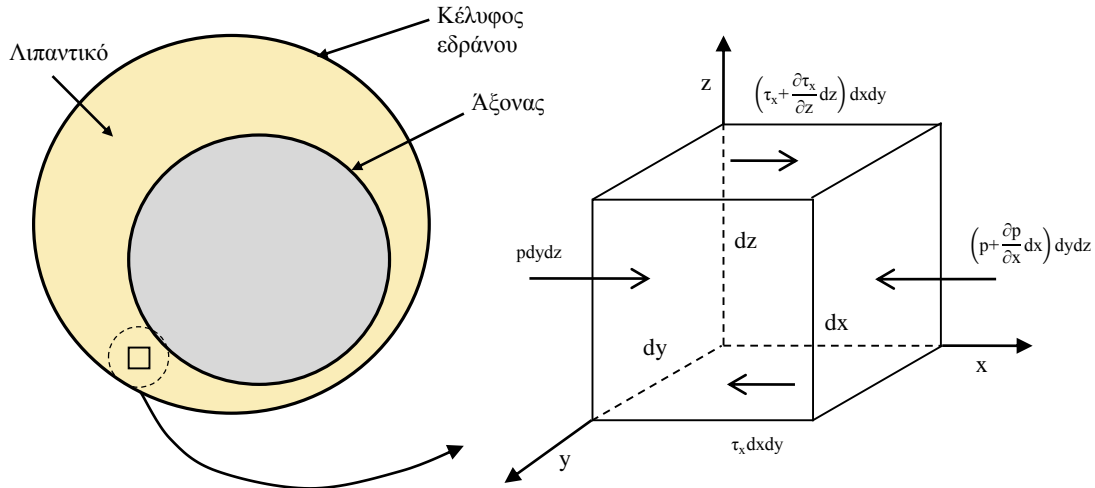
$$pdydz + \left(\tau_x + \frac{\partial \tau_x}{\partial z} dz \right) dx dy = \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dy dz + \tau_x dx dy \quad (3-1)$$

Με απλοποίηση των όρων και θεωρώντας ότι $dx dy dz \neq 0$, οι δυνάμεις που ασκούνται κατά τη κατεύθυνση x δίνονται από τη σχέση:

$$\frac{\partial \tau_x}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3-2)$$

Ομοίως, κατά τον άξονα y ισχύει:

$$\frac{\partial \tau_y}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3-3)$$



Θεωρώντας ότι το πάχος του στρώματος του λιπαντικού είναι πολύ μικρό, μπορεί να θεωρηθεί ότι η πίεση που αναπτύσσεται κατά την κατεύθυνση z παραμένει σταθερή, οπότε:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (3-4)$$

Η διατμητική τάση κατά την αξονική διεύθυνση, δύναται να εκφραστεί συναρτήσει της μεταβολής της ταχύτητας στην αντίστοιχη διεύθυνση, μέσω του ορισμού του δυναμικού ιξώδους. Η χρήση του ιξώδους, μετασχηματίζει τις σχέσεις (3-2) και (3-3) στις ακόλουθες:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3-5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3-6)$$

Θεωρώντας ότι η θερμοκρασία του ρευστού στην προκειμένη περίπτωση παραμένει σταθερή όπως επίσης και οι ιδιότητες του λιπαντικού, τότε το δυναμικό ιξώδες, μ , μπορεί να θεωρηθεί επίσης σταθερό. Η ολοκλήρωση των σχέσεων (3-5) και (3-6) ως προς z δίνει τις ακόλουθες σχέσεις για τη μεταβολή της πίεσης ως προς τον άξονα x:

$$\frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{z^2}{2} + c_1 z + c_2 = \mu \cdot u \quad (3-7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} \cdot \frac{z^2}{2} + c_3 z + c_4 = \mu \cdot v \quad (3-8)$$

Για την απλοποίηση της διαδικασίας υπολογισμών των σταθερών γίνεται χρήση της παραδοχής της μη ολίσθησης του λιπαντικού ως προς τις επιφάνειες του εδράνου, όπως επίσης και ότι δεν υπάρχει κάποια ασυνέχεια στο προφίλ των ταχυτήτων κατά το πάχος του φιλμ του λιπαντικού. Οι οριακές συνθήκες της μεταβολής τη πίεσης σε αυτή την περίπτωση είναι οι εξής:

- Για την εξίσωση (3-7): $u = U_1$ για $z = 0$ και $u = U_2$ για $z = h$
- Για την εξίσωση (3-8): $v = V_1$ για $z = 0$ και $v = V_2$ για $z = h$

Εφαρμόζοντας αυτές τις οριακές συνθήκες στις αντίστοιχες σχέσεις, η ταχύτητα ανά διεύθυνση μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του πάχους του λιπαντικού στρώματος, h , του ύψους z , στο οποίο θα υπολογιστεί η αντίστοιχη συνιστώσα της ταχύτητας, και των ταχυτήτων των επιφανειών:

$$u = \left(\frac{z^2 - zh}{2 \cdot \mu} \right) \frac{\partial p}{\partial x} + (U_1 - U_2) \frac{z}{h} + U_2 \quad (3-9)$$

$$v = \left(\frac{z^2 - zh}{2 \cdot \mu} \right) \frac{\partial p}{\partial y} + (V_1 - V_2) \frac{z}{h} + V_2 \quad (3-10)$$

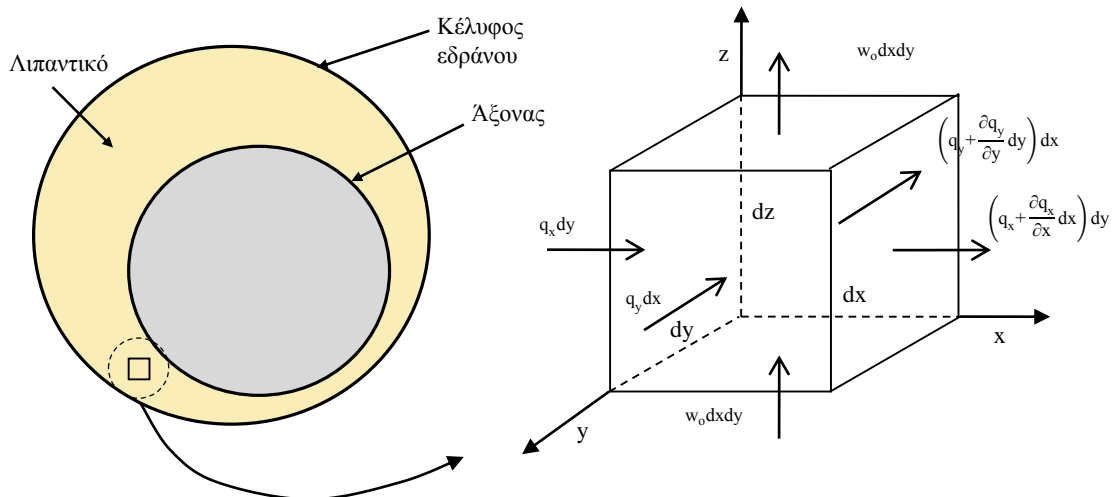
Όπως φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις, η ταχύτητα αναλύεται σε τρεις συνιστώσες:

- Παραβολικό πεδίο ταχυτήτων λόγω του διαφορικού της πίεσης $\frac{\partial p}{\partial x}$
 $\left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)$ αντίστοιχα)
- Γραμμική κατανομή του πεδίου ταχυτήτων λόγω της ροής Couette (κίνηση ρευστού ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες που έχουν σχετική ταχύτητα διάφορη του μηδενός)
- Την ταχύτητα της επιφάνειας U_2

3.2.2 Εξίσωση συνέχειας

Εφαρμόζοντας την εξίσωση συνέχειας στον στοιχειώδη όγκο ρευστού που ορίστηκε στην ενότητα 3.2.1, προκύπτει ότι:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + (w_h - w_o) = 0 \quad (3-11)$$



Οι όροι q_x και q_y αντιστοιχούν στις παροχές του ρευστού στις διευθύνσεις x και y αντίστοιχα, και υπολογίζονται βάσει ολοκλήρωσης της αντίστοιχης ταχύτητας του λιπαντικού κατά μήκος του πάχους του στρώματος (ενδεικτικά, $q_x = \int_0^h u \, dy$ αν y είναι ο άξονας κατά τη διεύθυνση του ύψους του λιπαντικού). Αντίστοιχα, οι όροι w_h και w_0 αντιστοιχούν στην κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού.

Υπολογίζοντας τις παροχές του ρευστού για κάθε κατεύθυνση βάσει των εξισώσεων (3-9) και (3-10), και υποθέτοντας ότι οι ταχύτητες των επιφανειών δεν μεταβάλλονται κατά την αξονική διεύθυνση, η εξίσωση συνέχειας (3-11) παίρνει τη μορφή:

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

όπου $U=U_1+U_2$ και $V=V_1+V_2$. Η εξίσωση μπορεί να μεταβληθεί αναλόγως με τις παραδοχές του προβλήματος. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει μετατόπιση των επιφανειών κατά τον άξονα x (συνεπώς $V_1=V_2=0$), τότε ο όρος $V \frac{dh}{dy}$ αμελείται. Επίσης, σε περίπτωση που δεν υπάρχουν ταλαντώσεις του άξονα ως προς το έδρανο, τότε δεν θα υπάρχουν δυνάμεις στο υγρό κατά τον άξονα z , οπότε η ταχύτητα w θα παραμείνει σταθερή και αμετάβλητη, θέτοντας τον όρο $(w_h - w_0)=0$. Τέλος η σχέση (3-12) μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω αν αμεληθεί η μεταβολή της θερμοκρασίας στο έδρανο, διατηρώντας σταθερό το δυναμικό ιξώδες του λιπαντικού. Κάνοντας χρήση αυτών των παραδοχών, η σχέση (3-12) λαμβάνει την τελική μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6U\mu \frac{dh}{dx} \quad (3-13)$$

Ο πρώτος όρος στην παραπάνω εξίσωση μπορεί να αμεληθεί αν το μήκος του εδράνου θεωρηθεί αρκετά μικρό ($B \gg D$, $L/D < 1$). Αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψη την παραδοχή ότι το έδρανο είναι απείρου μήκους, η μεταβολή της πίεσης κατά τον άξονα y μπορεί να αμεληθεί, απλοποιώντας ακόμα περισσότερο την εξίσωση (3-13). Η συγκεκριμένη παραδοχή μπορεί να εφαρμοσθεί όταν ο λόγος μήκους προς διάμετρο του εδράνου είναι $L/D > 2$. Θέτοντας ότι η μέγιστη πίεση αναπτύσσεται σε μια συγκεκριμένη τιμή πάχους του λιπαντικού ίση με $h = \bar{h}$, η μεταβολή της πίεσης κατά τον άξονα x παίρνει τη μορφή:

$$\frac{dp}{dx} = 6U\mu \frac{h-\bar{h}}{h^3} \quad (3-14)$$

Από την εξίσωση του Reynolds, προκύπτουν οι σχέσεις που αναπαριστούν την κατανομή της πίεσης συναρτήσει του πάχους της στρώσης του λιπαντικού, του ιξώδους αυτού και της ταχύτητας στην εκάστοτε διεύθυνση. Η μεταβολή τους ιξώδους του λιπαντικού, η επίδραση της θερμοκρασίας, η ελαστική παραμόρφωση των επιφανειών, όπως επίσης και η επίδραση διαφόρων φαινομένων κατά τη λειτουργία του εδράνου (π.χ. σπηλαίωση), μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη μεταβολή του πεδίου της πίεσης στο λιπαντικό. Για τον ακριβή προσδιορισμό της κατανομής της πίεσης στο λιπαντικό, είναι απαραίτητη η γνώση του πάχους του λιπαντικού κατά μήκος και πλάτος του εδράνου.

Η γνώση του πεδίου πίεσης είναι απολύτως απαραίτητη για τον υπολογισμό του φορτίου που μπορεί να υποστηρίξει το έδρανο, ολοκληρώνοντας την πίεση στους δύο άξονες:

$$W = \int_0^L \int_0^B p \, dx \, dy \quad (3-15)$$

Ομοίως, μπορεί να υπολογιστεί η δύναμη τριβής που ασκείται στο έδρανο, ολοκληρώνοντας τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται από το υγρό στις επιφάνειες του εδράνου $\tau = \mu_f \frac{du}{dz}$:

$$F = \int_0^L \int_0^B \tau \, dx \, dy \quad (3-16)$$

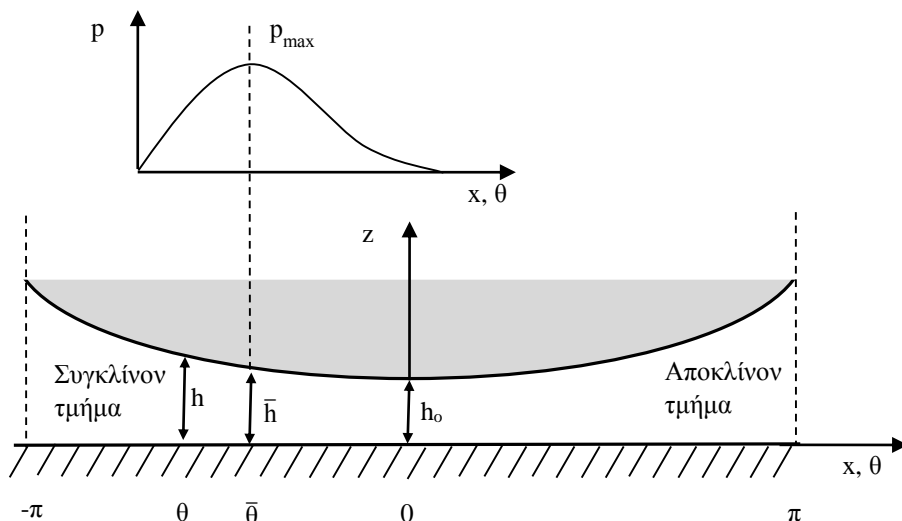
Συνεπώς, γνωρίζοντας τη δύναμη τριβής, καθώς και την κάθετη δύναμη που ασκείται στην επιφάνεια του εδράνου, μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής τριβής του λιπαντικού στις μεταλλικές επιφάνειες:

$$\mu_f = \frac{F}{W} \quad (3-17)$$

Ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εδράνου, η τιμή του συντελεστή τριβής διαφέρει. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται συνήθως ο αδιάστατος συντελεστής τριβής $\bar{\mu}_f = \mu_f \frac{D}{2c}$, όπου D, c αντιστοιχούν στη διάμετρο και στην ακτινική χάρη του εδράνου όπως ορίζονται στην ενότητα 3.2.3. Ο συντελεστής τριβής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αντικειμενική συνάρτηση στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης του εδράνου, ώστε να μειωθούν οι διαστάσεις του εδράνου, μειώνοντας την τιμή του συντελεστή τριβής για σταθερά επίπεδα του παραλαμβανόμενου φορτίου.

3.2.3 Εξίσωση πάχους υδροδυναμικού φιλμ

Αρχικά, προς διευκόλυνση ανεύρεσης της σχέσης που περιγράφει το πάχος του λιπαντικού στρώματος, η εξωτερική επιφάνεια του εδράνου αναπτύσσεται ώστε να γίνει η προβολή του δακτυλιοειδούς στρώματος του λιπαντικού σε ευθύγραμμο τμήμα. Η παραδοχή αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί σε έδρανα απείρου μήκους όπου η μεταβολή του πάχους κατά την ακτινική διεύθυνση θεωρείται αμελητέα. Το ανάπτυγμα του διάκενου που υπάρχει μεταξύ του άξονα και του κελύφους έχει τη μορφή μιας συγκλίνουσας-αποκλίνουσας σφήνας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-1.

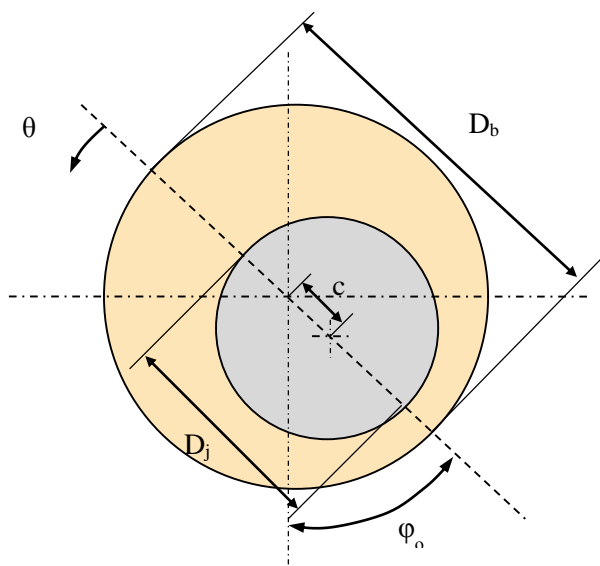


Εικόνα 3-1: Μεταβολή πάχους σε γεωμετρία συγκλίνουσας/αποκλίνουσας σφήνας.

Το ύψος της στρώσης του λιπαντικού περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$h=C+e \cdot \cos\theta \quad (3-18)$$

Στην σχέση (3-18), με c συμβολίζεται η ακτινική χάρη του εδράνου με τον άξονα ($R_b - R_j$, όπου με R_b, R_j συμβολίζονται η ακτίνα του εδράνου και του άξονα αντίστοιχα), ενώ με e χαρακτηρίζεται η εκκεντρότητα που έχει ο άξονας με το έδρανο και θ η γωνιακή θέση υπολογισμού του πάχους του λιπαντικού. Η γωνία φ_0 της Εικόνας 3-2, ονομάζεται γωνία συμπεριφοράς και αντιστοιχεί στη γωνία, στην οποία ισορροπεί ο άξονας, ανάλογα του ακτινικού φορτίου που ασκείται στο έδρανο.



Εικόνα 3-2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ακτινικού εδράνου υδροδυναμικής λίπανσης.

Ως σημείο έναρξης υπολογισμού της γωνιακής θέσης ($\theta=0$) ορίζεται το σημείο όπου το πάχος του λιπαντικού είναι μέγιστο ($h_{max}= C+e$) στην προέκταση της ευθείας που ενώνει τα δύο κέντρα, ενώ ως θετική φορά ορίζεται η φορά περιστροφής του άξονα. Στη συνέχεια, οι δύο επιφάνειες αποκλίνουν, η πίεση μειώνεται, ενώ ταυτόχρονα νέο

λιπαντικό εισέρχεται από την οπή που υπάρχει στο άνω μέρος του εδράνου. Καθώς το πάχος του λιπαντικού μειώνεται λόγω της σύγκλισης των επιφανειών του άξονα και του εδράνου, η μέγιστη πίεση εμφανίζεται πριν το ελάχιστο πάχος του λιπαντικού στρώματος. Ταυτόχρονα, καθώς ο άξονας περιστρέφεται, το λιπαντικό εξέρχεται από τις μετωπικές επιφάνειες στα άκρα του εδράνου, και αφού συλλεχθεί, καθαριστεί μέσω φίλτρων και ψυχθεί, επανατροφοδοτείται στο έδρανο.

Αντικαθιστώντας τη σχέση (3-18) στη σχέση (3-14), με τους αντίστοιχους μετασχηματισμούς ($x = R \cdot \theta$ και $U = R \cdot \omega$), η μεταβολή της πίεσης κατά τη διεύθυνση θ ορίζεται ως:

$$\frac{dP}{d\theta} = 6\mu\omega \left(\frac{R_j}{C}\right)^2 \left[\frac{1}{(1+\varepsilon \cdot \cos\theta)^2} - \frac{\bar{h}}{(1+\varepsilon \cdot \cos\theta)^3} \right] \quad (3-19)$$

Για την καλύτερη μελέτη της μεταβολής της πίεσης, ορίζεται η αδιάστατη πίεση \bar{P} , λαμβάνοντας υπόψη και την πίεση παροχής λιπαντικού στο έδρανο, P_s :

$$\bar{P} = \frac{(P-P_s)}{\mu \cdot \omega} \cdot \left(\frac{C}{R_j}\right)^2 \quad (3-20)$$

Ο υπολογισμός της μεταβολής της πίεσης κατά τη περιφερειακή διεύθυνση επηρεάζεται από τις οριακές συνθήκες που επικρατούν στο έδρανο. Οι οριακές συνθήκες που μπορούν να ληφθούν υπόψη σε ακτινικά έδρανα δίνονται στην παράγραφο 4.2, όπου επισημαίνεται και η συμβολή του φαινομένου της σπηλαιώσης.

Για τον ακριβή προσδιορισμό της κατανομής πίεσης, είναι απαραίτητη η αριθμητική επίλυση της εξίσωσης (3-13), υποθέτοντας ότι η ροή είναι στρωτή και ότι το ρευστό είναι ασυμπύεστο και υπόκειται στον νόμο του Νεύτωνα, αμελώντας ταυτόχρονα τυχόν περιοδικά φαινόμενα. Κάνοντας χρήση αδιάστατων μεταβλητών, η εξίσωση λαμβάνει τη μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{4\lambda^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} \right) = 12\pi\bar{\mu} \frac{d\bar{h}}{d\theta} \quad (3-21)$$

όπου:

$$\theta = \frac{x}{R}, \quad \lambda = \frac{L}{D}, \quad \bar{y} = \frac{y}{L}, \quad \bar{h} = \frac{h}{C}, \quad \bar{\eta} = \frac{\mu}{\mu_i}, \quad \varepsilon = \frac{e}{C}, \quad \bar{P} = \frac{(P-P_s)}{\mu_i \cdot N_s} \cdot \left(\frac{C}{R_j}\right)^2$$

Ως περιφερειακή συχνότητα περιστροφής του εδράνου ορίζεται η μεταβλητή N_s (rev/s) αντί για τη μεταβλητή ω (rad/s). Για την καλύτερη περιγραφή του φαινομένου και τον συσχετισμό του φορτίου που αναπτύσσεται στο έδρανο με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτού, ορίζεται ο αδιάστατος αριθμός Sommerfeld:

$$S = \frac{\mu \cdot N_s}{P_L} \cdot \left(\frac{R_j}{C}\right)^2 \quad (3-22)$$

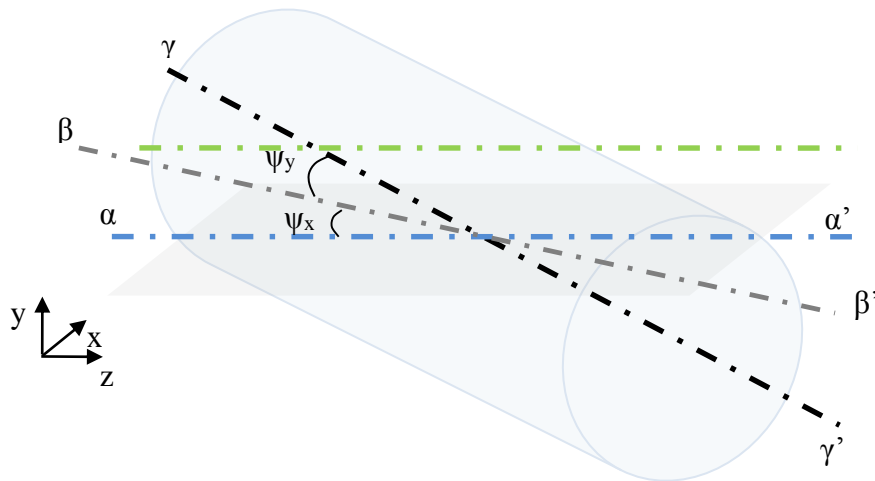
Στη σχέση (3-22), με P_L συμβολίζεται η προβολή του φορτίου στην παράπλευρη επιφάνεια του εδράνου:

$$P_L = \frac{W}{2LR_j} \quad (3-23)$$

Κατά τον υπολογισμό του πάχους, εκτός από την εκκεντρότητα του άξονα ως προς το κέντρο του εδράνου, ο άξονας ενδέχεται να μη βρίσκεται σε πλήρη ευθυγράμμιση με τον άξονα συμμετρίας του εδράνου (misalignment). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-3,

αν η αξονική γραμμή α-α' αντιστοιχεί στη θέση που έχει ο άξονας συμμετρίας στη περίπτωση πλήρους ευθυγράμμισης, η αξονική γραμμή β-β' αντιστοιχεί στην περιστροφή του άξονα στο επίπεδο yz κατά γωνία ψ_x , ενώ η αξονική γραμμή γ-γ' αντιστοιχεί στην πραγματική θέση του άξονα, καθώς αυτός έχει περιστραφεί και στο επίπεδο xz κατά γωνία ψ_y . Η γωνία περιστροφής ενδέχεται να λάβει τιμές έως $\tan(\psi_x) = 0.002$ (Khonsari & Booser, 2008). Η απευθυγράμμιση του άξονα οφείλεται σε διάφορους λόγους όπως είναι η μη σωστή κατεργασία του άξονα, η ασυμμετρία της θέσης της οπής παροχής λιπαντικού, ή η μεταβολή των συνθηκών ή των ιδιοτήτων του λιπαντικού κατά την αξονική διεύθυνση. Εξαιτίας αυτών των συνθηκών, το πάχος του λιπαντικού θα μεταβάλλεται σημαντικά κατά μήκος του εδράνου. Συνεπώς, η συνάρτηση πάχους του λιπαντικού θα έχει τη μορφή (Nikolakopoulos & Papadopoulos, 1994):

$$h(\theta, z) = C + e \cdot \cos\theta + z \left[\psi_y \cdot \cos(\theta + \phi_0) + \psi_x \cdot \sin(\theta + \phi_0) \right] \quad (3-24)$$



Εικόνα 3-3: Σχηματική απεικόνιση μη παραλληλότητας του άξονα ως προς το έδρανο.

Στην σχέση (3-24), με ϕ_0 συμβολίζεται η γωνία συμπεριφοράς (ισορροπίας) του άξονα σε σχέση με την κατακόρυφο, στο μέσο επίπεδο του εδράνου. Προς διευκόλυνση ορισμού των συγκεκριμένων γωνιών και λόγω της πολύ μικρής τιμής που αυτές λαμβάνουν, οι γωνίες απόκλισης κανονικοποιούνται ως προς την ακτινική χάρη του άξονα και το μήκος του εδράνου:

$$\bar{\psi}_x = \psi_x \frac{L}{c} \quad \bar{\psi}_y = \psi_y \frac{L}{c} \quad (3-25)$$

3.2.4 Παροχή λιπαντικού σε ακτινικό έδρανο

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.1, το λιπαντικό εξέρχεται από τις άκρες του εδράνου και εισάγεται ξανά από την οπή ή τις οπές εισαγωγής του λιπαντικού. Η ποσότητα του λιπαντικού που εξέρχεται μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση συνέχειας που ισχύει κατά μήκος του εδράνου, τη στιγμή που είναι γνωστή η συνάρτηση περιγραφής του πάχους του λιπαντικού:

$$Q_x = \int_0^L \int_0^h u dz dy = \int_0^L \frac{U h}{2} dy = \frac{U h L}{2} \quad (3-26)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση περιγραφής του πάχους του λιπαντικού στην παραπάνω σχέση, προκύπτει ότι:

$$Q_{\theta} = \frac{U L}{2} \cdot C(1 + \varepsilon \cdot \cos \theta) \quad (3-27)$$

Υπολογίζοντας τις παροχές στο σημείο περιοδικότητας της ροής του ρευστού ($\theta = -\pi, \pi$), προκύπτει ότι:

$$Q_{\theta=-\pi} = \frac{U L}{2} \cdot C(1 - \varepsilon)$$

$$Q_{\theta=\pi} = \frac{U L}{2} \cdot C(1 + \varepsilon)$$

Συνεπώς, η παροχή του ρευστού που διαρρέει από τα δύο άκρα του εδράνου θα είναι ίση με:

$$Q_{\text{leak}} = Q_{\theta=\pi} - Q_{\theta=-\pi}$$

$$Q_{\text{leak}} = U C L \varepsilon \quad (3-28)$$

Η παροχή του λιπαντικού θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με την παροχή διαρροής του λιπαντικού ώστε να είναι ικανή η λίπανση, διαφορετικά θα παρατηρηθεί φαινόμενο έλλειψης λιπαντικού. Η παροχή του λιπαντικού στο έδρανο έχει καθοριστεί από εμπειρικές σχέσεις (Martin & Lee, 1982) (Cameron, 1981) βάσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οπής και της πίεσης εισαγωγής του ρευστού. Ενδεικτικά, σε περίπτωση που η τροφοδοσία λιπαντικού στο έδρανο γίνεται μέσω οπής, η αντίστοιχη παροχή υπολογίζεται βάσει των ακόλουθων σχέσεων:

$$\text{Martin και Lee: } Q_p = 0.675 \frac{C^3 P_s}{\mu} \cdot \left(\frac{h_h}{C}\right)^3 \cdot \left(\frac{d_h}{L} + 0.4\right)^{1.75} \quad (3-29)$$

$$\text{Cameron: } Q_p = \frac{1}{12} \frac{C^3 P_s}{\mu} \cdot \left(\frac{h_h}{C}\right)^3 \cdot \left(1.12 + 11 \cdot \frac{d_h}{L}\right) \quad (3-30)$$

Στις σχέσεις (3-29) και (3-30), με P_s συμβολίζεται η πίεση παροχής του λιπαντικού [Pa], d_h είναι η διάμετρος της οπής, ενώ h_h αντιστοιχεί στο ύψος του λιπαντικού στο σημείο που βρίσκεται η οπή. Εκτός από την παροχή που προκύπτει λόγω της γεωμετρίας και της πίεσης εισαγωγής του λιπαντικού, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η παροχή λόγω της ροής Couette που αναπτύσσεται στο διάκενο του εδράνου. Η ροή του ρευστού αναπτύσσεται προς αυτήν την κατεύθυνση λόγω της σχετικής κίνησης του άξονα προς το σταθερό κέλυφος του εδράνου, ακόμα και στην περίπτωση που δεν υπάρχει πίεση τροφοδοσίας του λιπαντικού. Η ταχύτητα της ροής Couette, υποθέτοντας ότι το υγρό είναι ασυμπίεστο και ότι η ροή έχει αναπτυχθεί πλήρως κατά μήκος του διακένου, δίνεται από τη σχέση:

$$u(z) = U \frac{z}{h} \quad (3-31)$$

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω σχέση για το πλάτος της οπής παροχής του λιπαντικού, η παροχή λόγω της ροής Couette δίνεται από τη σχέση:

$$Q_c = \int_0^{w_h} \int_{h_d}^{h_u} u(z) dz dy$$

$$Q_c = U w_h \frac{(h_u - h_d)}{2} \quad (3-32)$$

όπου w_h είναι το πλάτος της οπής ή του αυλακιού παροχής του λιπαντικού, ενώ με h_u και h_d συμβολίζεται το ύψος του πάχους του λιπαντικού ανάντι και κατάντι της οπής, κατά τη διεύθυνση περιστροφής του άξονα. Άρα, η παροχή του λιπαντικού στο έδρανο, Q_s , δίνεται από τη σχέση:

$$Q_s = Q_p + Q_c \quad (3-33)$$

Η παροχή λιπαντικού υπό πίεση προσφέρει την ευκολία επιλογής τοποθέτησης του σημείου παροχής λιπαντικού κοντά στο σημείο που θα δημιουργηθεί η μέγιστη φόρτιση, έτσι ώστε να μειωθούν οι απώλειες λόγω τριβών στη ροή. Επίσης, η ύπαρξη στρώματος λιπαντικού ικανής πίεσης μέσα στο διάκενο περιορίζει την επαφή του άξονα με το έδρανο, αποσβένει τυχόν ταλαντώσεις που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία, και μειώνει φθορές που προκαλούνται κατά την εκκίνηση ή τη διακοπή λειτουργίας. Τέλος, η κατάλληλη τοποθεσία της οπής παροχής μπορεί να περιορίσει την έκταση του φαινομένου της σπηλαίωσης. Αντίθετα, η λίπανση του άξονα μόνο με τη βοήθεια της βαρύτητας και της υποπίεσης που αναπτύσσεται λόγω της περιστροφής του λιπαντικού εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που τα φορτία είναι μικρά και οι απαιτήσεις σε λιπαντικό μειωμένες.

4 Σπηλαιώση σε ακτινικά έδρανα υδροδυναμικής λίπανσης

4.1 Το φαινόμενο της σπηλαιώσης

Σπηλαιώση (cavitation) ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο διαταράσσεται η ομοιομορφία του ρευστού λόγω της ύπαρξης φυσαλίδων αερίου ή ατμού εντός αυτού. Η ύπαρξη φυσαλίδων αέρα μέσα σε κινούμενο υγρό μελετήθηκε αρχικά από τον Reynolds, υποθέτοντας τη διεξόδουση ποσοτήτων αέρα στη ροή του ρευστού όταν μια έλικα κινείται με μεγάλη ταχύτητα. Η επίδραση της ατμοποίησης του ίδιου του υγρού λόγω μείωσης της πίεσης αναγνωρίστηκε από τον Parsons, ενώ ο όρος 'cavitation' δόθηκε από τον Froude. Οι τρεις μορφές σπηλαιώσης που μπορούν να εκδηλωθούν είναι οι ακόλουθες:

- **Αέριος σπηλαιώση (Gaseous cavitation):** Το φαινόμενο αυτό συναντάται σε περιοχές όπου η πίεση του ρευστού είναι χαμηλότερη από την πίεση του περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα τη διεξόδουση αέρα από το περιβάλλον προς τη συγκεκριμένη περιοχή. Ακόμα, το φαινόμενο μπορεί να εμφανιστεί σε περίπτωση που αέριο το οποίο έχει ήδη αναμιχθεί με το υγρό συγκεντρώνεται σε περιοχές που η πίεση του υγρού είναι χαμηλότερη από την πίεση κορεσμού. Συνήθως, η ποσότητα διαλυμένου αερίου μέσα σε ορυκτέλαιο δεν υπερβαίνει το 15% κ.ο. (Groper & Etsion, 2001).
- **Ψευδο-σπηλαιώση (Pseudo-cavitation):** Σχετίζεται με τη μεταβολή του μεγέθους των φυσαλίδων αέριας φάσης που υπάρχουν εντός του υγρού, εξαιτίας της μεταβολής της πίεσης.
- **Ατμώδης σπηλαιώση (Vaporous cavitation):** Κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου φαινομένου, η πίεση που επικρατεί στο υγρό είναι χαμηλότερη της πίεσης ατμοποίησης, με αποτέλεσμα ποσότητα του υγρού να ατμοποιείται. Η ατμοποίηση οδηγεί συνήθως σε δυναμικά φαινόμενα, ιδιαίτερα όταν ακολουθείται από επανυγροποίηση του ρευστού.

Εκτός από την κατηγοριοποίηση της σπηλαιώσης με βάση τη μορφή εκδήλωσης του φαινομένου, η σπηλαιώση μπορεί να διακριθεί και ανάλογα με το μέγεθος και τη μορφή που έχουν οι φυσαλίδες. Συγκεκριμένα, οι φυσαλίδες μπορεί να είναι παροδικές και απομονωμένες ή προσκολλημένες σε κάποια επιφάνεια της γεωμετρίας.

Για την περιγραφή του φαινομένου της σπηλαιώσης, συνήθως χρησιμοποιείται ο αριθμός σπηλαιώσης, συνδέοντας την πίεση ατμοποίησης (p_v) με την πίεση (p_∞) και την ταχύτητα (U_∞) του υγρού:

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v(T_\infty)}{\frac{1}{2}\rho_L U_\infty^2} \quad (4-1)$$

Όπως φαίνεται και από τον ορισμό του αριθμού σπηλαιώσης, ο συγκεκριμένος δείκτης ισούται με την αρνητική τιμή που μπορεί να έχει ο συντελεστής πίεσης, r_p , σε κάποιο σημείο του υγρού:

$$r_p(x_i) = \frac{p(x_i) - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho_L U_\infty^2} \quad (4-2)$$

Στην υποθετική περίπτωση όπου το υγρό ατμοποιείται άμεσα όταν η πίεση φτάσει στην πίεση ατμοποίησης, τότε:

$$\sigma = -\Gamma_{P,\min} \quad (4-3)$$

Συνεπώς, όταν η τιμή του αριθμού σπηλαιώσης σε κάποιο σημείο της ροής του υγρού είναι μικρότερη της ελάχιστης τιμής της κλίσης της πίεσης ($\sigma < -\Gamma_{P,\min}$), τότε στοιχειώδης ποσότητα υγρού ατμοποιείται. Στην πραγματικότητα, η δημιουργία ορισμένων φυσαλίδων ατμών απαιτεί την ύπαρξη επιπλέον τάσης, μειώνοντας έτσι την τιμή στην οποία εμφανίζεται η σπηλαιώση σύμφωνα με της σχέση:

$$\sigma_i = -\Gamma_{P,\min} - \frac{\Delta p_c}{2\rho_L U_\infty^2} \quad (4-4)$$

Σε περίπτωση που υπάρχουν ήδη μικρές ποσότητες αέριας μάζας μέσα στο υγρό, η επιπλέον τάση που απαιτείται θα είναι αρνητική ($\Delta p_c < 0$), αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την τιμή του απαιτούμενου αριθμού για την εκκίνηση του φαινομένου της σπηλαιώσης.

4.2 Προσομοίωση του φαινομένου της σπηλαιώσης σε ακτινικά έδρανα υδροδυναμικής λίπανσης

Η συγκλίνουσα-αποκλίνουσα γεωμετρία του ακτινικού εδράνου υδροδυναμικής λίπανσης, ενισχύει τη πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της σπηλαιώσης. Σε περίπτωση εμφάνισης αυτού του φαινομένου, οι φυσαλίδες που υπάρχουν στη ροή μπορεί να οφείλονται είτε σε εξάτμιση του λιπαντικού φιλμ είτε στην είσοδο αερίων μέσα στο έδρανο. Ανεξάρτητα του λόγου εμφάνισης, η ύπαρξη φυσαλίδων διακόπτει την ομαλή ροή του λιπαντικού, με άμεση επίδραση στην επίλυση της εξίσωσης Reynolds. Για την επίλυση της εξίσωσης είναι αναγκαίος ο καθορισμός των οριακών συνθηκών.

Η οριακή συνθήκη που προτάθηκε από τον Sommerfeld δεν λαμβάνει υπόψη τη διακοπή της ροής στην περιφέρεια του εδράνου, καθώς η συνθήκη Full-Sommerfeld είναι περιοδική και επιτρέπει πιέσεις πολύ μικρότερης της ατμοσφαιρικής ή ακόμα και αρνητικές (Dowson & Taylor, 1974). Η πρώτη παραδοχή διακοπής της ροής λόγω του φαινομένου της σπηλαιώσης έγινε από τον Gumbel, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή του πρόσημου της πίεσης κατά την περιφερειακή διεύθυνση (Gumbel, 1914). Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, η ροή του λιπαντικού διακόπτεται όταν η πίεση του λιπαντικού γίνει αρνητική, χρησιμοποιώντας μόνο το θετικό τμήμα των πιέσεων στο εύρος $0 \leq \theta \leq \pi$. Συνεπώς, όλες οι πιέσεις μετά από αυτό το σημείο μηδενίζονται, διαταράσσοντας ταυτόχρονα την αρχή διατήρησης της μάζας. Λόγω της υπόθεσης αυτής η συνθήκη αυτή χαρακτηρίζεται και ως Half-Sommerfeld.

Λαμβάνοντας υπόψη την αδυναμία εφαρμογής της εξίσωσης της συνέχειας κατά την παραδοχή της οριακής συνθήκης Half – Sommerfeld, ο Reynolds¹, έχοντας υπόψη τα φαινόμενα σπηλαιώσης που μπορούν να αναπτυχθούν στην περιοχή της αποκλίνουσας σφήνας, πρότεινε την ιδέα ότι η πίεση θα πρέπει να παραμένει σταθερή καθώς το

¹ Μπορεί να συναντηθεί και ως οριακή συνθήκη Swift-Stieber, καθώς, ανεξάρτητα μεταξύ τους, απέδειξαν την πρόταση του Reynolds για σταθερή κλίση της πίεσης όταν $\theta > \theta_{cav}$.

λιπαντικό εισέρχεται στην περιοχή που υπάρχει σπηλαιώση ($\frac{dp}{d\theta}=0$ για $\theta \geq \theta_{cav}$). Η γωνία που εμφανίζεται η σπηλαιώση δεν μπορεί να προσδιορισθεί επακριβώς παρά μόνο με τη χρήση υπολογιστικής ανάλυσης. Η παραπάνω συνθήκη δεν επιτρέπει την ύπαρξη πίεσης μικρότερη της πίεσης ατμοποίησης, ενώ η περιφερειακή και η αξονική ταχύτητα του υγρού μηδενίζονται. Ο μόνος όρος που είναι υπεύθυνος για τη μεταφορά του ρευστού ανάμεσα στις περιοχές σπηλαιώσης είναι ο όρος της ταχύτητας που αντιστοιχεί στη ροή Couette. Παρόλο που οι συνθήκες αυτές αποδίδουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μεσαία φορτία (Brewer et al., 1988) και προβλέπουν σε ικανοποιητικό βαθμό την περιοχή που εμφανίζεται σπηλαιώση, στο αποκλίνον τμήμα του εδράνου δεν έχουν τη δυνατότητα να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για την αποκατάσταση του φιλμ του λιπαντικού, ούτε επίσης και στην περίπτωση των δυναμικά φορτιζόμενων εδράνων (Brewer et al., 1988), (Brewer, 1986).

Κατόπιν μελέτης πειραματικών αποτελεσμάτων, ο Floberg διαπίστωσε ότι το υγρό στην περιοχή που εμφανίζεται η σπηλαιώση σχηματίζει ‘κανάλια’ ροής λιπαντικού (streaks) ανάμεσα στις φυσαλίδες ή γενικότερα στις περιοχές όπου το λιπαντικό έχει ατμοποιηθεί. Τα συγκεκριμένα ‘κανάλια’ λιπαντικού ακολουθούν τη φορά περιστροφής του εδράνου, έως ότου το φιλμ του λιπαντικού αποκατασταθεί ξανά. Ταυτόχρονα, αμελητέες ποσότητες υγρού εισέρχονται ή εξέρχονται από τις περιοχές που υπάρχει αέριο. Η πίεση στην περιοχή της σπηλαιώσης πλέον δεν είναι η χαμηλότερη καθώς η πίεση ατμοποίησης του αερίου είναι διαφορετική και σε μερικές περιπτώσεις μεγαλύτερη από τις τάσεις που αναπτύσσονται στο αποκλίνον τμήμα του εδράνου. Το μοντέλο Jakobsson – Floberg – Olsson (JFO) λαμβάνει υπόψη την εξίσωση διατήρησης της μάζας, αμελώντας ταυτόχρονα την επίδραση των φυσαλίδων στο πεδίο ροής. Στην περίπτωση ενός απείρου μήκους υδροδυναμικού εδράνου λίπανσης, οι ζώνες που εμφανίζονται τα ‘κανάλια’ ροής του υγρού μπορεί να θεωρηθούν επαναλαμβανόμενες και να παραμετροποιηθούν συναρτήσει των ιδιοτήτων του ρευστού.

Το μοντέλο JFO, λόγω της καλύτερης προσέγγισης του φαινομένου, έγινε άμεσα αποδεκτό από την ευρύτερη κοινότητα. Λόγω όμως, της μεταβατικότητας του φαινομένου στην περιοχή του αποκλίνοντος τμήματος, είναι δύσκολος ο επακριβής καθορισμός των οριακών συνθηκών, και αντίστοιχα ο υπολογιστικός προγραμματισμός της συγκεκριμένης θεωρίας. Το 1974, οι Elrod και Adams (Elrod & Adams, 1974), πρότειναν τη χρήση μιας νέας συνάρτησης έτσι ώστε να παραλείπεται ο ακριβής υπολογισμός των οριακών συνθηκών. Σε ένα συμπίεστο ρευστό, η πυκνότητα σχετίζεται με την πίεση σύμφωνα με τη σχέση:

$$\kappa = \rho \frac{\partial \rho}{\partial p} \quad (4-5)$$

όπου κ είναι το μέτρο ελαστικότητας του υγρού. Ορίζοντας ως $\alpha = \rho / \rho_{cav}$ τον λόγο της πυκνότητας του υγρού σε κάθε θέση προς την πυκνότητα του υγρού στην πίεση ατμοποίησης, όπως επίσης και τη βηματική συνάρτηση:

$$g = \begin{cases} 1 & P > P_{cav} \\ 0 & P < P_{cav} \end{cases} \quad (4-6)$$

Η εξίσωση (4-5) παίρνει τη μορφή:

$$gk=a \frac{\partial P}{\partial a} \quad (4-7)$$

Ολοκληρώνοντας την σχέση (4-7), προκύπτει ότι η πίεση ισούται με:

$$P=P_{cav}+gk \ln(a) \quad (4-8)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παράμετρος a στην περίπτωση μελέτης της περιοχής της σπηλαιώσης αντιπροσωπεύει το κλάσμα του υγρού, ενώ αντίστοιχα το μέγεθος $(1-a)$ το κλάσμα όγκου του αερίου (Vijayaraghavan & Keith, 1989).

Αντικαθιστώντας την σχέση (4-8) στην εξίσωση διατήρησης μάζας του Reynolds, διαμορφώνεται η ακόλουθη εξίσωση η οποία περιγράφει τις ιδιότητες του ρευστού κατά μήκος της περιφέρειας του εδράνου:

$$\frac{\partial(\rho_{cav}ha)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\rho_{cav}hU}{2} - gk \frac{\rho_{cav}h^3}{12\mu} \frac{\partial a}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(gk \frac{\rho_{cav}h^3}{12\mu} \frac{\partial a}{\partial z} \right) = 0 \quad (4-9)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το υγρό λιπαντικό μεταφέρεται εντός της περιοχής σπηλαιώσης μόνο λόγω του φαινομένου Couette (όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις της συνθήκης Reynolds και του μοντέλου JFO), ενώ στην περιοχή σπηλαιώσης ισχύει $p=p_{cav}$, τότε η εξίσωση Reynolds για την περιοχή σπηλαιώσης απλοποιείται στην ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial(\rho_{cav}ha)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\rho_{cav}hU}{2} \right) = 0 \quad (4-10)$$

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε από τους Vijayaraghavan και Keith βάσει του αλγορίθμου του Elrod έδειξε ότι υπάρχει πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. (Jakobson & Floberg, 1957)

Η μεγάλη ταχύτητα και τα μεγάλα φορτία που μπορούν να αναπτυχθούν στο έδρανο, μπορούν να οδηγήσουν σε εμφάνιση σπηλαιώσης που θα έχει ως αποτέλεσμα ακόμα και την εμφάνιση αστοχίας στο έδρανο. (Brewer, 1986) Επίσης, η εμφάνιση δυναμικών φορτίων πάνω στο έδρανο μπορεί να οδηγήσει στην μετατόπιση του άξονα σε μία νέα θέση ισορροπίας και τη δημιουργία περιοχών σπηλαιώσης (Wilson, n.d.). Για την επίλυση των δυναμικών φαινομένων είναι απαραίτητη η μεταβολή του πάχους του φιλμ του λιπαντικού, ανάλογα με τη θέση ισορροπίας του άξονα. Κατά τη διάρκεια των μελετών αποδείχτηκε ότι, ενώ ο αλγόριθμος του Elrod προσεγγίζει ικανοποιητικά το φαινόμενο σε στατική ανάλυση, σε περιπτώσεις δυναμικής ανάλυσης θα πρέπει να εφαρμοσθεί η κινηματική μέθοδος του Booker, έτσι ώστε να προσομοιωθεί η μεταβολή της περιοχής της σπηλαιώσης κατά τη διάρκεια του φαινομένου (Booker, 1971).

Επιπλέον, η αναλυτική λύση της εξίσωσης του Reynolds απέδειξε ότι προσομοιώνονται με μεγάλη επιτυχία τόσο η ελαστική παραμόρφωση του εδράνου όσο και η μεταβολή της πίεσης και της ροής του λιπαντικού, λαμβάνοντας όμως υπόψη την τραχύτητα της επιφάνειας και τις δυνάμεις αδράνειας του υγρού. (Boedo & Booker, 1997). Παρόλο που οι αδρανειακές δυνάμεις έχουν σημαντική συμβολή στη μελέτη του φαινομένου, η τραχύτητα της επιφάνειας έχει ελάσσονα σημασία στην προσομοίωση.

Στο σύνολο των παραπάνω μοντέλων γίνεται χρήση της εξίσωσης του Reynolds, ορίζοντας συγκεκριμένες οριακές συνθήκες. Όμως, η εξίσωση του Reynolds αμελεί

τους αδρανειακούς όρους και την τρισδιάστατη απεικόνιση του προβλήματος. Η ραγδαία αύξηση της υπολογιστικής ισχύος κατά τα τελευταία έτη έχει επιτρέψει τη χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes για την επίλυση του φαινομένου.

Ωστόσο, η χρήση αλγορίθμων σπηλαιώσης για την επίλυση του φαινομένου έχει σημαντικές δυσκολίες λόγω του μεγάλου λόγου των πυκνοτήτων μεταξύ της αέριας και της υγρής φάσης², όπως επίσης και στη δυσκολία προσομοίωσης της αέριας σπηλαιώσης όπου δεν υπάρχει κάποιο ικανοποιητικό μοντέλο περιγραφής του φαινομένου. Η μελέτη του φαινομένου της αέριας σπηλαιώσης πραγματοποιείται ορίζοντας το κλάσμα όγκου του αερίου στις οριακές συνθήκες του εδράνου και στη συνέχεια μελετάται η κατανομή του στο φιλμ του λιπαντικού ανάλογα με την κατανομή της πίεσης που συναντάται σε αυτό.

Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί και η δυσκολία της τρισδιάστατης μελέτης του φαινομένου, καθώς η ύπαρξη πολύ μικρών διαστάσεων της τάξης των μm σε σύγκριση με τις υπόλοιπες διαστάσεις, απαιτεί τη δημιουργία πολλών κόμβων για τη σωστή μελέτη του φαινομένου. Τέλος, η χρήση των αδρανειακών δυνάμεων και της εξίσωσης της ενέργειας, δυσκολεύουν ακόμα περισσότερο τη μελέτη του φαινομένου της σπηλαιώσης.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του τρισδιάστατου προβλήματος έχουν τη μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_j) + \nabla \cdot (\rho u_j \bar{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \nabla \cdot (\mu \nabla u_j) + S_j \quad (4-11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \bar{V}) = 0 \quad (4-12)$$

όπου S_j αντιστοιχεί τους όρους πηγής που εμφανίζονται στη ροή. Σε περίπτωση σπηλαιώσης είναι αναγκαία η χρήση μιας επιπρόσθετης εξίσωσης μεταφοράς μάζας, η οποία θα περιλαμβάνει το κλάσμα όγκου του αερίου ως μεταβλητή f :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho f) + \nabla \cdot (\rho f \bar{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \nabla \cdot (\mu \nabla f) + R_e - R_c \quad (4-13)$$

4.3 Συνθήκες έναρξης σπηλαιώσης

Η εμφάνιση του φαινομένου της σπηλαιώσης γίνεται λόγω των μικρών ποσοτήτων αερίου ή/και ατμού που υπάρχουν στο υγρό και οι οποίες διασπών την ομοιογένειά του. Τα σημεία αυτά ονομάζονται πυρήνες σπηλαιώσης (nuclei) ή μικροφουσαλίδες (microbubbles). Οι συγκεκριμένες εστίες βρίσκονται σε διάφορα σημεία του υγρού όπου υπάρχει παγιδευμένο αέριο ή δημιουργούνται όταν η πίεση είναι μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού. Η ανάπτυξη των μικροφουσαλίδων επηρεάζεται από τις συνθήκες του υγρού. Σε περίπτωση που αυτές δεν είναι προσκολλημένες, μπορούν να ανέλθουν στην επιφάνεια λόγω της άνωσης, διαφορετικά παραμένουν σταθερές ή αναπτύσσονται μέσω της διάχυσης του αερίου. Για την καλύτερη μελέτη του

² Σε ροές όπου υπάρχει εξάτμιση ή συμπύκνωση ρευστού, ο λόγος μέγιστης προς ελάχιστης πυκνότητας (ρ_{\max}/ρ_{\min}) είναι τάξεως $O(10^2)$, ενώ σε ροές με σπηλαιώση, ο λόγος είναι τάξεις μεγέθους $O(10^4)$.

φαινομένου της σπηλαιώσης, είναι απαραίτητη η μελέτη της αύξησης και της μείωσης του μεγέθους μιας φυσαλίδας αερίου μέσα στο υγρό.

Το μέγεθος της φυσαλίδας εξαρτάται από την ισορροπία των πιέσεων που ασκούνται στην επιφάνεια του υγρού. Η σχέση που συνδέει την πίεση του υγρού p_{∞} με την πίεση που επικρατεί εντός της φυσαλίδας, p_B , είναι η εξής:

$$p_B - p_{\infty} = \frac{2S}{R} \quad (4-14)$$

όπου με S συμβολίζεται η επιφανειακή τάση του υγρού και με R η ακτίνα της φυσαλίδας. Σε περίπτωση που στο υγρό υπάρχουν ήδη μικρές ποσότητες αερίου, η μερική πίεση αυτού θα πρέπει να ληφθεί υπόψη. Συνεπώς, σε περίπτωση που δεν υπάρχει συναλλαγή μάζας μέσω της επιφάνειας της φυσαλίδας, η πίεση εντός της φυσαλίδας είναι:

$$p_B(t) = p_V(T_B) + p_{G0} \left(\frac{T_B}{T_{\infty}} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \quad (4-15)$$

όπου με p_V συμβολίζεται η πίεση του ρευστού που μελετάται σε αέρια φάση και στη θερμοκρασία που επικρατεί εντός της φυσαλίδας, ενώ p_{G0} αντιστοιχεί στη μερική πίεση του αερίου που έχει παγιδευτεί εντός της φυσαλίδας. Υποθέτοντας ότι η μεταβολή γίνεται υπό σταθερή θερμοκρασία, η εξίσωση (4-14) λαμβάνει τη μορφή:

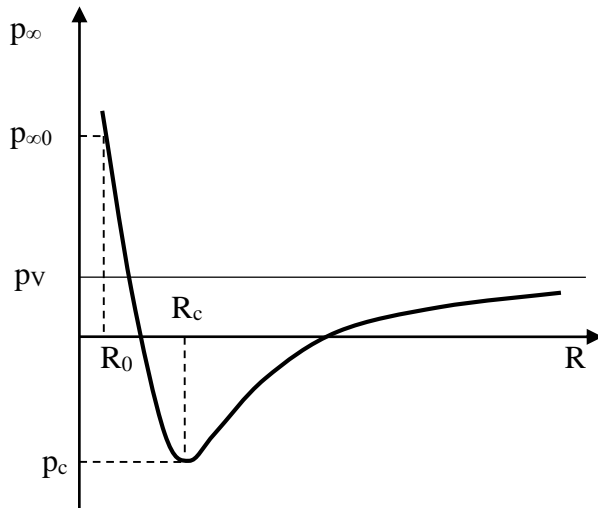
$$p_{\infty} = p_V + p_{G0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - \frac{2S}{R} \quad (4-16)$$

Βάσει της εξίσωσης (4-14), προκύπτει ότι δύο αντίθετοι μηχανισμοί επηρεάζουν την ισορροπία της φυσαλίδας. Ο πρώτος έγκειται στην αύξηση της ακτίνας λόγω της πίεσης που επικρατεί εντός αυτής, και ο δεύτερος στη μείωση της ακτίνας λόγω της επιφανειακής τάσης. Από τη σχέση (4-16) προκύπτει ότι το ελάχιστο της καμπύλης εμφανίζεται στο σημείο (p_c , R_c):

$$R_c = R_0 \sqrt{\frac{3p_{G0}}{\frac{2S}{R}}} \quad (4-17)$$

$$p_c = p_V - \frac{4S}{3R_c} \quad (4-18)$$

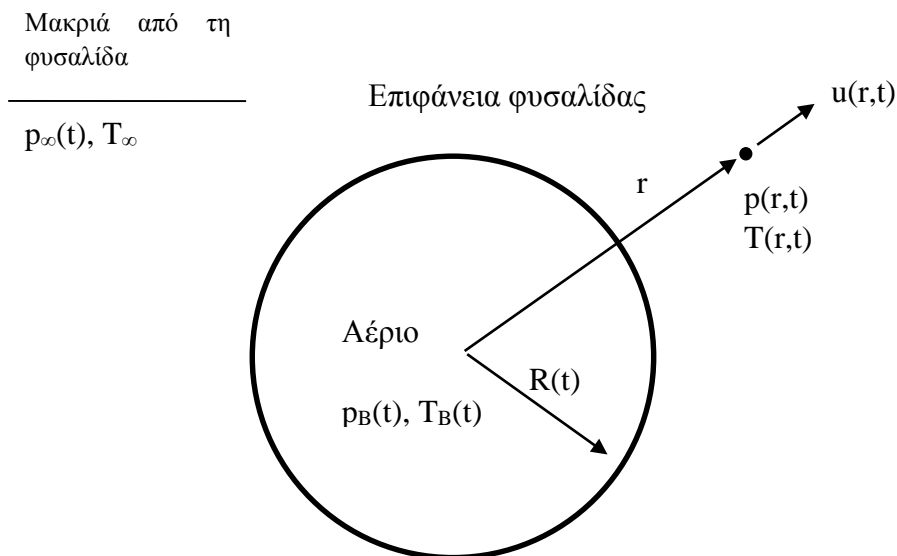
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-1, όταν μειώνεται η πίεση πέραν της πίεσης ατμοποίησης, p_V , τότε η ακτίνα της φυσαλίδας αυξάνεται ώστε να επικρατήσει ισορροπία στην επιφάνεια αυτής. Η διαφορά μεταξύ της πίεσης ατμοποίησης του υγρού p_V και της ελάχιστης πίεσης όπου μπορεί να διατηρηθεί η επιφάνεια της φυσαλίδας, ονομάζεται στατική καθυστέρηση για την εμφάνιση της σπηλαιώσης. Σε περίπτωση που η πίεση μειωθεί πέρα της ελάχιστης πίεσης, p_c , τότε η φυσαλίδα οδηγείται σε ασταθή κατάσταση.



Εικόνα 4-1: Μεταβολή πίεσης εντός σφαιρικής φυσαλίδας συναρτήσει της ακτίνας.

4.4 Δυναμική σφαιρικών φυσαλίδων

Για τη διευκόλυνση της περιγραφής των εξισώσεων, γίνεται η χρήση του μοντέλου μιας σφαιρικής φυσαλίδας σε μία άπειρη ποσότητα υγρού. Το υγρό θεωρείται ότι έχει σταθερή θερμοκρασία T_∞ και μεταβλητή πίεση $p_\infty(t)$, γνωστή κάθε φορά, σε απόσταση μακριά από τη φυσαλίδα. Η πυκνότητα του υγρού (ρ_L) θεωρείται σταθερή, ενώ η θερμοκρασία ($T_B(t)$) και η πίεση ($p_B(t)$) που επικρατεί στο χώρο εντός της φυσαλίδας θεωρείται ομοιόμορφη. Επίσης, το φαινόμενο της διάχυσης μπορεί να αμεληθεί, καθώς ο ρυθμός με τον οποίο διαχέεται το αέριο εντός της φυσαλίδας είναι πολύ μικρός ($\sim s$) σε σχέση με το χρόνο που απαιτεί η κατάρρευση μιας φυσαλίδας ($\sim ms$). Συνεπώς, η μάζα του αερίου εντός της φυσαλίδας μπορεί να θεωρηθεί ότι παραμένει σταθερή, όπως επίσης και η παραδοχή της σφαιρικής φυσαλίδας. Ακόμα, η ποσότητα του αερίου εντός του υγρού είναι εξαιρετικά μικρή, με αποτέλεσμα η πυκνότητα του υγρού να παραμένει αναλλοίωτη από την ποσότητα του αερίου που βρίσκεται εντός του υγρού.



Από την εξίσωση της συνέχειας για ασυμπίεστο ρευστό, προκύπτει ότι $\text{div}(\vec{u}(r,t))=0$. Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης του υγρού για σφαιρικές συντεταγμένες δίνει την ακόλουθη λύση για το πεδίο ταχύτητας:

$$\vec{u}(r,t)=\frac{f(t)}{r^2} \quad (4-19)$$

Υποθέτοντας ότι η ταχύτητα του υγρού είναι ίση με τη ταχύτητα με την οποία κινείται η διεπιφάνεια ($\vec{u}(r,t)=\frac{dR}{dt}$), η ταχύτητα του υγρού περιγράφεται από τη σχέση:

$$\vec{u}(r,t)=\dot{R}\frac{R^2}{r^2} \quad (4-20)$$

Αντίστοιχα, από την εξίσωση ορμής μη συνεκτικού ρευστού, προκύπτει ότι:

$$-\frac{1}{\rho_L}\frac{\partial p}{\partial r}=\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial r} \quad (4-21)$$

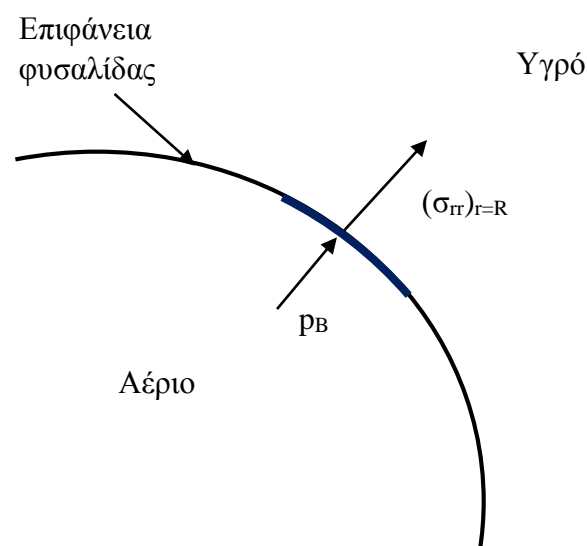
Αντικαθιστώντας την ταχύτητα του υγρού από την εξίσωση (4-15), προκύπτει:

$$-\frac{1}{\rho_L}\frac{\partial p}{\partial r}=\ddot{R}\frac{R^2}{r^2}+2\dot{R}^2\left(\frac{R}{r^2}-\frac{R^4}{r^5}\right) \quad (4-22)$$

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση ως προς το r και λαμβάνοντας υπόψη τις ορισθείσες συνθήκες στο άπειρο, προκύπτει:

$$\frac{p(r,t)-p_\infty(t)}{\rho_L}=\ddot{R}\frac{R^2}{r}+2\dot{R}^2\left(\frac{R}{r}-\frac{R^4}{4r^4}\right) \quad (4-23)$$

Για τη συσχέτιση της πίεσης που επικρατεί εντός της φυσαλίδας με την πίεση p_∞ , είναι απαραίτητη η εύρεση των δυνάμεων που ασκούνται στην επιφάνεια αυτής (Εικόνα 4-2).



Εικόνα 4-2: Ορισμός τάσης στην επιφάνεια φυσαλίδας.

Συγκεκριμένα, η τάση στην επιφάνεια της φυσαλίδας προς την ακτινική κατεύθυνση είναι ίση με:

$$(\sigma_{\pi})_{r=R}=-p(R,t)+2\mu_L\frac{du}{dr} \quad (4-24)$$

Η συνισταμένη των τάσεων που ασκούνται σε ένα τμήμα της φυσαλίδας θα ισούται με

$$\sum \sigma_r = (\sigma_{rr})_{r=R} + p_B(t) - \frac{2S}{R} \quad (4-25)$$

Θεωρώντας ότι δεν υπάρχει μεταφορά υγρού μεταξύ της επιφάνειας της φυσαλίδας και ότι δεν ασκείται καμία εξωτερική δύναμη σε αυτήν, η συνισταμένη των τάσεων της εξίσωσης (4-25) θα πρέπει να θεωρηθεί ίση με μηδέν. Αντικαθιστώντας τη σχέση (4-16) και τη σχέση (4-23) για $r=R$ (λαμβάνοντας υπόψη την υπόθεση ότι $p(r,t) = p(R,t)$), στη σχέση (4-25), προκύπτει η εξίσωση Rayleigh – Plesset, που περιγράφει τη δυναμική της φυσαλίδας:

$$\frac{p_B(t) - p_\infty(t)}{\rho_L} = R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + 4 \cdot v_L \frac{\dot{R}}{R} + \frac{2S}{\rho_L \cdot R} \quad (4-26)$$

Η πίεση που επικρατεί εντός της φυσαλίδας συμβολίζεται με $p_B(t)$ και έχει οριστεί ήδη στη σχέση (4-15). Σε περίπτωση που αμεληθεί η μεταφορά θερμότητας και η διαδικασία θεωρηθεί αδιαβατική, η πίεση που επικρατεί εντός της φυσαλίδας είναι ίση με:

$$p_B(t) = p_V(T_B) + p_{G0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \quad (4-27)$$

όπου γ αντιστοιχεί στον λόγο των ειδικών θερμοχωρητικοτήτων του αερίου.

Η δυναμική μεταβολή της πίεσης της φυσαλίδας έχει επίδραση στη διατήρηση ενέργειας του συστήματος. Η κινητική ενέργεια του ρευστού εντός της φυσαλίδας ορίζεται από τη σχέση:

$$E_{\text{kinetic}} = \frac{M \cdot v^2}{2} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \rho_L \cdot R^3 \cdot \dot{R}^2 \quad (4-28)$$

Καθώς το φαινόμενο είναι δυναμικό, είναι απαραίτητη η μελέτη της χρονικής μεταβολής της κινητικής ενέργειας. Η χρονική μεταβολή του όρου $R^3 \cdot \dot{R}^2$ δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{d}{dt} (R^3 \dot{R}^2) = 3R^2 \dot{R}^3 + 2R^3 \dot{R} \ddot{R} \leftrightarrow \frac{1}{2\dot{R}R^2} \frac{d}{dt} (R^3 \dot{R}^2) = R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \quad (4-29)$$

Παρατηρείται ότι το δεξί μέλος της εξίσωσης (4-29) αποτελεί τμήμα της εξίσωσης Rayleigh – Plesset. Συνεπώς, αντικαθιστώντας την εξίσωση (4-27) έως (4-29) στην εξίσωση (4-26) προκύπτει η μεταβολή της κινητικής ενέργειας της φυσαλίδας συναρτήσει των δυνάμεων πίεσης, της επιφανειακής τάσης του υγρού και του ρυθμού διάχυσης λόγω συνεκτικών δυνάμεων:

$$\frac{dE_{\text{kinetic}}}{dt} = \frac{8}{3} \pi R^2 \dot{R} \left[p_V(T_B) + p_{G0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - p_\infty(t) \right] - \frac{16}{3} \pi S R \dot{R} - \frac{32}{3} \pi \mu_L R \dot{R}^2 \quad (4-30)$$

4.5 Κατάρρευση φυσαλίδας

Αμελώντας τις συνεκτικές δυνάμεις και την επιφανειακή τάση που ασκούνται στην επιφάνεια του υγρού, όπως επίσης και την ύπαρξη παγιδευμένου αερίου εντός της φυσαλίδας, η εξίσωση Rayleigh – Plesset, κάνοντας χρήση της σχέσης (4-29), μετατρέπεται στη σχέση:

$$\rho_L \frac{d}{dt} (R^3 \dot{R}^2) = -2R^2 \dot{R} (p_\infty(t) - p_V(t)) \quad (4-31)$$

Η κατάρρευση της φυσαλίδας θα συμβεί στην περίπτωση που η πίεση του περιβάλλοντος υγρού p_∞ είναι μεγαλύτερη από την πίεση του ατμού που υπάρχει εντός της φυσαλίδας, p_v . Υποθέτοντας ότι οι πιέσεις είναι σταθερές και ότι η ακτίνα της φυσαλίδας συμβολίζεται με R_0 τη χρονική στιγμή $t=0$ όπου η πίεση εντός της φυσαλίδας ισούται με την πίεση του υγρού, τότε μπορεί να υπολογιστεί ο χαρακτηριστικός χρόνος που απαιτείται για την κατάρρευση της φυσαλίδας (έως ότου δηλαδή $R=0$). Ο χρόνος αυτός συμβολίζεται με τ , και ορίζεται ως χρόνος Rayleigh. Ολοκληρώνοντας τη σχέση (4-31) και εφαρμόζοντας τις αρχικές συνθήκες που ορίστηκαν προηγουμένως, η χρονική μεταβολή της ακτίνας της φυσαλίδας δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{R} = -\sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_\infty - p_v}{\rho_L} \left(\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right)} \quad (4-32)$$

Ο χαρακτηριστικός χρόνος κατάρρευσης της φυσαλίδας δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{\rho_L}{p_\infty - p_v}} \int_0^{R_0} \frac{dR}{\sqrt{\frac{R_0^3}{R^3} - 1}} \cong 0.915 R_0 \sqrt{\frac{\rho_L}{p_\infty - p_v}} \quad (4-33)$$

Η μέση ταχύτητα κατάρρευσης της φυσαλίδας ορίζεται ως ο λόγος:

$$\bar{R} = R_0 / \tau \quad (4-34)$$

Όταν η φυσαλίδα τείνει να εξαφανιστεί, η ταχύτητα κατάρρευσης θα δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{R} = -\left(\frac{R_0}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_\infty - p_v}{\rho_L}} \cong 0,747 \frac{R_0}{\tau} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4-35)$$

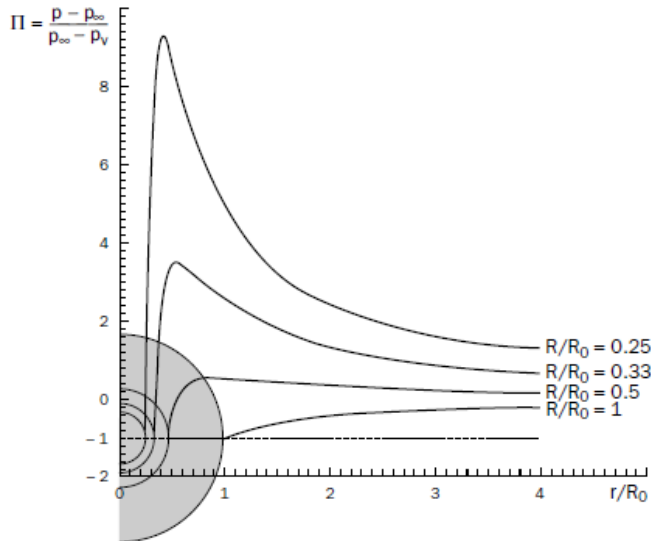
Η ανάπτυξη του πεδίου πίεσης κατά τη διάρκεια του φαινομένου της κατάρρευσης μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση(4-23). Η δεύτερη χρονική παράγωγος \ddot{R} υπολογίζεται βάσει της σχέσης (4-32):

$$\ddot{R} = -\frac{p_\infty - p_v}{\rho} \frac{R_0^3}{R^4} \quad (4-36)$$

Αντικαθιστώντας τις παραγώγους \ddot{R} και \dot{R} στη σχέση(4-23), προκύπτει η αδιάστατη πίεση $\Pi(r,t)$:

$$\Pi(r,t) = \frac{p(r,t) - p_\infty}{p_\infty - p_v} = \frac{R}{3r} \left[\frac{R_0^3}{R^3} - 4 \right] - \frac{R^4}{R^3} \left[\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right] \quad (4-37)$$

Όπως φαίνεται και από τον τύπο, η μεταβολή της αδιάστατης πίεσης Π επηρεάζεται από το λόγο R/R_0 (Εικόνα 4-3).



Εικόνα 4-3: Μεταβολή του πεδίου πίεσης κατά τη διάρκεια κατάρρευσης της φυσαλίδας (Franc και Michel, 2005)

Η μέγιστη τιμή της αδιάστατης πίεσης εμφανίζεται σε απόσταση:

$$\frac{r_{\max}}{R} = \left[\frac{\frac{R_0^3}{R^3} - 1}{\frac{R_0^3}{4R^3} - 1} \right]^{1/3} \quad (4-38)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (4-38) στην εξίσωση της αδιάστατης πίεσης, προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή ισούται με:

$$\Pi_{\max} = \frac{p_{\max} - p_v}{p_{\infty} - p_v} = \frac{\left[\frac{R_0^3}{4R^3} - 1 \right]^{4/3}}{\left[\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right]^{1/3}} \quad (4-39)$$

Σε περίπτωση που ο λόγος R/R_0 γίνει πολύ μικρός, τότε η μέγιστη πίεση ισούται περίπου με $\Pi_{\max} \approx \frac{1}{4^{4/3}} \left[\frac{R_0}{R} \right]^3 \cong 0.157 \left[\frac{R_0}{R} \right]^3$, και εμφανίζεται σε απόσταση $\frac{r_{\max}}{R} \approx \sqrt[3]{4} \cong 1.59$. Κατά συνέπεια, η μέγιστη πίεση αναπτύσσεται κοντά στην διεπιφάνεια της φυσαλίδας με το περιβάλλον υγρό. Λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις δυνάμεις πίεσης και αδράνειας, το κύμα πίεσης που ασκείται στη φυσαλίδα θεωρείται ως αποτέλεσμα των δυνάμεων αδράνειας. Το βίαιο φαινόμενο της κατάρρευσης οφείλεται κυρίως στην παραδοχή ότι η πίεση εντός της φυσαλίδας παραμένει σταθερή, χωρίς να προσφέρει κάποια αντίσταση στο περιρρέον υγρό, ενώ, λόγω της σφαιρικής συμμετρίας και του όγκου της φυσαλίδας, η κίνηση του υγρού τείνει να συγκεντρωθεί σε ολοένα και μικρότερη περιοχή.

Θα πρέπει να σημειωθεί ακόμα, ότι στην πραγματικότητα, οι συνθήκες κατάρρευσης της φυσαλίδας θα είναι διαφορετικές λόγω των φαινομένων που αμελήθηκαν κατά τη διάρκεια των παραπάνω υπολογισμών. Η κατάρρευση της επιφάνειας της φυσαλίδας μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη μεγάλων ταχυτήτων και πιέσεων στην επιφάνεια της φυσαλίδας, με αποτέλεσμα η πίεση εντός της φυσαλίδας να μη μπορεί πλέον να θεωρηθεί ομοιόμορφη, επηρεάζοντας ταυτόχρονα τη σφαιρική δομή της φυσαλίδας, πάνω στην οποία στηρίζεται η εν λόγω θεωρία. Ωστόσο, το μοντέλο Rayleigh

προσεγγίζει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά της φυσαλίδας κατά τη διάρκεια του φαινομένου της κατάρρευσης και ειδικότερα το σύντομο χρόνο εξέλιξης και την υψηλή ταχύτητα του φαινομένου.

Η επιφανειακή τάση της επιφάνειας της φυσαλίδας έχει τη δυνατότητα να αντισταθμίσει τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτή λόγω της πίεσης του υγρού. Σε περίπτωση που ληφθεί υπόψη η επιφανειακή τάση στην εξίσωση Rayleigh-Plesset, η πρώτη χρονική παράγωγος μεταβολής της ακτίνας δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dR}{dt} = -\sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_{\infty} - p_v}{\rho_L} \left(\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right) + \frac{2S}{\rho R_0} \frac{R_0^3}{R^3} \left[1 - \frac{R^2}{R_0^2} \right]} \quad (4-40)$$

Η επιφανειακή τάση της φυσαλίδας συμβάλλει στην κατάρρευση της φυσαλίδας μόνο στην περίπτωση που:

$$\frac{2S}{\rho R_0} > \frac{2}{3} \frac{p_{\infty} - p_v}{\rho} \Leftrightarrow R_0 < \frac{3S}{p_{\infty} - p_v} \quad (4-41)$$

Θεωρώντας ότι η επιφανειακή τάση των λιπαντικών κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.030 – 0.046 N/m (Jones & Wedeven, September 1971) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και με την υπόθεση ότι η διαφορά της πίεσης είναι ίση με 1 bar, τότε η επιφανειακή τάση συμβάλλει σημαντικά στην αντίσταση έναντι του φαινομένου κατάρρευσης για φυσαλίδες μεγέθους μικρότερο των 0.9 – 1.38 μm . Λαμβάνοντας υπόψη ότι η τιμή της ακτίνας θα μειωθεί ακόμα περισσότερο σε μεγαλύτερες διαφορές πίεσης, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επίδραση της επιφανειακής τάσης στο φαινόμενο της κατάρρευσης είναι αμελητέα σε πραγματικές εφαρμογές.

4.6 Έκρηξη φυσαλίδας

Η φυσαλίδα μπορεί να αυξομειωθεί ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο περιρρέον υγρό. Σε περίπτωση που η πίεση του περιβάλλοντος υγρού είναι μικρότερη από την πίεση ισορροπίας κατά τη διάρκεια δημιουργίας της φυσαλίδας, θα προκύψει αύξηση του μεγέθους της φυσαλίδας. Κατά τη διάρκεια μελέτης της εξίσωσης Rayleigh-Plesset, η πίεση p_{∞} θεωρείται σταθερή, ενώ οι συνεκτικές δυνάμεις μπορούν να αμεληθούν. Αντίθετα, λόγω της μεταβολής του μεγέθους της φυσαλίδας, η επιφανειακή τάση της φυσαλίδας θα πρέπει να ληφθεί υπόψη. Ολοκληρώνοντας την εξίσωση (4-29), προκύπτει ότι:

$$\dot{R}^2 = \frac{2}{3} \frac{p_v - p_{\infty}}{\rho} \left[1 - \frac{R_0^3}{R^3} \right] + \frac{2}{3(\gamma-1)} \frac{p_{g0}}{\rho} \frac{R_0^3}{R^3} \left[1 - \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3(\gamma-1)} \right] - \frac{2S}{\rho R} \left[1 - \frac{R_0^2}{R^2} \right] \quad (4-42)$$

Ο δεύτερος όρος του δεξιού μέλους της εξίσωσης αντιστοιχεί σε αδιαβατική μεταβολή του αερίου. Σε περίπτωση που η μεταβολή του αερίου κατά τη διάρκεια της εξάπλωσης της φυσαλίδας θεωρηθεί ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση, τότε ο δεύτερος όρος περιγράφεται από τη σχέση:

$$2 \frac{p_{g0}}{\rho} \frac{R_0^3}{R^3} \ln \frac{R}{R_0} \quad (4-43)$$

Η εξίσωση (4-42) είναι μία συνάρτηση της μορφής $\dot{R}^2 = f(R)$ και διαθέτει λύσεις μόνο όταν $f(R_0) \geq 0$, διαφορετικά δεν θα υπήρχε εξάπλωση της φυσαλίδας. Στην περίπτωση που η συνάρτηση έχει μία διπλή ρίζα στο R_0 , τότε θα πρέπει να ισχύει $f(R_0) = f'(R_0) = 0$.

Η πρώτη περίπτωση ικανοποιείται από τις αρχικές συνθήκες, ενώ η συνθήκη $\dot{f}(R_0)=0$ ισχύει σε περίπτωση που ισχύει η ισορροπία δυνάμεων μεταξύ του εγκλωβισμένου αερίου της φυσαλίδας και του περιβάλλοντος υγρού (σχέση(4-16)). Αντίθετα, στην περίπτωση που η συνάρτηση έχει δύο ρίζες, όπου $R_1 > R_0$, τότε η ακτίνα της φυσαλίδας θα ταλαντώνεται μεταξύ αυτών των δύο τιμών και η δυναμική ευστάθεια της φυσαλίδας επηρεάζεται άμεσα από την ελαστική συμπεριφορά του εγκλωβισμένου αερίου και από το λόγο των δύο ριζών. Σε περίπτωση που ο λόγος των δύο ριζών είναι κοντά στη μονάδα, τότε η περιοδικότητα της ταλάντωσης είναι αρμονική, η περίοδος και η συχνότητα της οποίας δίνεται από τις σχέσεις:

$$T_0 = \frac{2\pi\sqrt{2}}{\sqrt{-\ddot{f}(R_0)}} \quad (4-44)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{1}{\rho} \left[3\gamma p_{g0} - \frac{2S}{R_0} \right]} \quad (4-45)$$

Σε περίπτωση που ο λόγος R_1/R_0 αυξάνεται, τότε το εύρος της ταλάντωσης θα αυξηθεί σημαντικά. Το δυναμικό κριτήριο της ευστάθειας της φυσαλίδας καθορίζεται στην περίπτωση που η διπλή ρίζα βρίσκεται στην τιμή $R_1 > R_0$ όπου σε αυτή την περίπτωση η φυσαλίδα βρίσκεται στο στάδιο μεταξύ της συνεχούς αύξησης του μεγέθους της και της ταλάντωσης. Σε περίπτωση που πλέον δεν υπάρχει ρίζα R_1 που να ικανοποιεί τη λύση της συνάρτησης, τότε η φυσαλίδα θα εξαπλώνεται με τη ταχύτητα της διεπιφάνειας να πλησιάζει τη τιμή:

$$\dot{R}_\infty = \sqrt{\frac{2 p_v - p_\infty}{3 \rho}} \quad (4-46)$$

Η εξίσωση που περιγράφει τη μεταβολή της ακτίνας της φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της εξάπλωσης καθορίζεται κυρίως από τις αρχικές και τις οριακές συνθήκες. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει εγκλωβισμένο αέριο εντός της φυσαλίδας εκτός από το ατμοποιηθέν υγρό ($p_{g0}=0$), όπως επίσης και αν αμεληθεί η επιφανειακή τάση ατμών και οι συνεκτικές δυνάμεις του υγρού ($S=0$, $\mu=0$), τότε η μεταβολή της ακτίνας θα επηρεάζεται αποκλειστικά από τη διαφορά πίεσης στην επιφάνεια της φυσαλίδας. Σε περίπτωση που υπάρχει ισορροπία δυνάμεων ($p_\infty(t)=p_v$), τότε η ακτίνα της φυσαλίδας μεταβάλλεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{R}{R_0} = \left[1 + \frac{5}{2} \frac{\dot{R}_0 t}{R_0} \right]^{2/5} \quad (4-47)$$

Αντίθετα, αν υποθεθεί ότι η διαφορά της πίεσης μειώνεται γραμμικά με τον χρόνο σύμφωνα με τη σχέση:

$$p_\infty(t) - p_v = -m \frac{t}{\tau} \quad (4-48)$$

όπου m θετική σταθερά, ενώ τ ο χαρακτηριστικός χρόνος, η ακτίνα της φυσαλίδας θα περιγράφεται από τη σχέση:

$$R = \sqrt{\frac{8}{33} \frac{m \tau^2}{\rho}} \left(\frac{t}{\tau} \right)^{3/2} \quad (4-49)$$

4.7 Αέριος σπηλαίωση

Όπως διατυπώθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, η σπηλαίωση λόγω εξάτμισης οφείλεται στο ρυθμό εξάτμισης και συμπίκνωσης του ρευστού. Συνεπώς, η πυκνότητα του μείγματος καθορίζεται από την εξής σχέση:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{f}{\rho_v} + \frac{1-f}{\rho_l} \quad (4-50)$$

όπου οι συντελεστές v , l αντιστοιχούν στην αέρια και στην υγρή φάση του λιπαντικού, ενώ f είναι το κλάσμα όγκου του αερίου.

Αντίθετα, στην περίπτωση που υπάρχει διάχυση αερίου εντός του εδράνου, η μάζα του αερίου καθορίζεται συνήθως από την αρχή και παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια υπολογισμού του φαινομένου (φαινόμενο ψευδο-σπηλαίωσης). Σε αυτή την περίπτωση, αν ορισθεί με τον δείκτη g το κλάσμα αερίου που εγκλωβίζεται εντός του υγρού, η πυκνότητα του μείγματος δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{f_v}{\rho_v} + \frac{f_g}{\rho_g} + \frac{1-f_v-f_g}{\rho_l} \quad (4-51)$$

4.8 Μοντελοποίηση της σπηλαίωσης στο λογισμικό ANSYS – CFX

Το λογισμικό ANSYS-CFX προσφέρει τη δυνατότητα υπολογιστικής προσομοίωσης πολλών προβλημάτων της ρευστομηχανικής. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Navier-Stokes της ρευστομηχανικής (Munson et al., 2009) και πληθώρα εργαλείων και μοντέλων, δίνει τη δυνατότητα επίλυσης της ροής σύνθετων φαινομένων. Η τρισδιάστατη μελέτη του φαινομένου της σπηλαίωσης σε ένα έδρανο υδροδυναμικής λίπανσης, καθώς και η αλληλεπίδραση των φάσεων του λιπαντικού με τον αέρα, κάνει απαραίτητη τη χρήση τέτοιων εργαλείων για την εκτίμηση αυτών των φαινομένων.

Όπως ορίστηκε προηγουμένως, σπηλαίωση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο αναπτύσσονται φυσαλίδες εντός του υγρού λόγω εξάτμισης ή εισροής άλλου αερίου εντός αυτού. Επομένως, για την πλήρη ανάπτυξη του μοντέλου είναι απαραίτητη η μελέτη μιας πολυφασικής ροής που θα εξετάζει την αλληλεπίδραση μεταξύ των φάσεων.

4.8.1 Πολυφασική ροή

Ως πολυφασική ροή ορίζεται η ροή στην οποία υπάρχει ταυτόχρονη παρουσία διαφορετικών συστατικών που μπορεί να οφείλεται, είτε λόγω διαφορετικής χημική σύστασης (π.χ. αέρας – νερό), είτε λόγω διαφορετικών θερμοδυναμικών φάσεων (στερεά, υγρή και αέρια), με τους αντίστοιχους συνδυασμούς μεταξύ τους. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η πολυφασική ροή είναι διαφορετική από τη μελέτη της ροής ενός πολυσύνθετου ρευστού. Στη τελευταία περίπτωση, τα συστατικά είναι αναμεμειγμένα σε μοριακό επίπεδο και επομένως υπάρχει ενιαίο πεδίο ταχύτητας, πιέσεων και θερμοκρασίας για όλο το πεδίο της ροής. Αντίθετα, στην πολυφασική ροή, τα συστατικά είναι αναμεμειγμένα σε μακροσκοπικό επίπεδο, όπου το κάθε συστατικό αναπτύσσει ξεχωριστό πεδίο ταχυτήτων και θερμοκρασιών. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των συστατικών γίνεται είτε μέσω των δυνάμεων που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια,

είτε μέσω των συναρτήσεων μεταφοράς θερμότητας και μάζας κατά την επιφάνεια επαφής των συστατικών.

Επιπλέον, κατηγοριοποίηση της ροής μπορεί να πραγματοποιηθεί βάσει του μοτίβου ανάμειξης των φάσεων κατά τη διάρκεια του φαινομένου. Γενικώς, το μοτίβο της ροής περιγράφει συνήθως τη γεωμετρική αλληλεπίδραση των φάσεων εντός του ρευστού, και επηρεάζει άμεσα τον τρόπο μελέτης των καταστάσεων του ρευστού, καθώς και τη μελέτη των ρευστοδυναμικών χαρακτηριστικών (πεδία ταχύτητας, πιέσεων). Ανάλογα με τον βαθμό ανάμειξης των ροών και το είδος των συστατικών, μία ροή μπορεί να χαρακτηριστεί ως ομοιογενής ή ανομοιογενής. Η διάκριση μεταξύ των δύο ροών καθορίζεται κυρίως από το αν υπάρχει σχετική ροή μεταξύ των σωματιδίων των δύο ή και παραπάνω φάσεων που μπορούν να υπάρξουν στο ρευστό. Τα μοτίβα που συνήθως συναντώνται είναι τα εξής:

- Μοτίβο διασποράς (disperse flow pattern)
- Μοτίβο διαχωρισμού (separated flow pattern)
- Μοτίβο ανάμειξης (mixed flow pattern)

Στο μοτίβο διασποράς, το ένα συστατικό ή η μία φάση του υλικού είναι διασκορπισμένη μέσα στο άλλο υλικό σε μορφή φυσαλίδων, σταγονιδίων ή σωματιδίων, ανάλογα της κατάστασης του υλικού. Σε περίπτωση που το μέγεθος αυτών των σωματιδίων είναι πολύ μικρό, τόσο ώστε να μην εμφανίζεται σχετική ροή μεταξύ των σωματιδίων και του ρευστού, η ροή μπορεί να χαρακτηριστεί ως ομοιογενής. Σε αντίθετη περίπτωση η ροή θα πρέπει να χαρακτηριστεί ως ανομοιογενής.

Αντίθετα, το μοτίβο διαχωρισμού εμφανίζεται σε περίπτωση που τα δύο (ή και περισσότερα) συστατικά είναι πλήρως διαχωρισμένα κατά τη διάρκεια του φαινομένου, σχηματίζοντας διαφορετικές στρώσεις. Η ροή σε αυτή την περίπτωση χαρακτηρίζεται ως ανομοιογενής. Τέλος, το μοτίβο πλήρους ανάμειξης εμφανίζεται μόνο σε ομοιογενείς ροές όπου τα συστατικά της ροής είναι πλήρως αναμεμειγμένα μεταξύ τους.

Το μοτίβο που αναπτύσσεται στη ροή και η διάκριση των φάσεων μεταξύ τους επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, ανάμεσα στους οποίους περιλαμβάνονται:

- i. Η ισορροπία μεταξύ των ρευστομηχανικών δυνάμεων διασποράς και διαχωρισμού που αναπτύσσονται στο ρευστό,
- ii. Οι αρχικές συνθήκες ή το φαινόμενο το οποίο προκαλεί την εμφάνιση δύο ή και παραπάνω φάσεων ή συστατικών στη ροή του ρευστού
- iii. Συνδυασμός των παραπάνω

Ο βαθμός διαχωρισμού των συστατικών ή των φάσεων χαρακτηρίζεται ως το πρώτο κριτήριο ανομοιογένειας μιας ροής. Εκτός όμως από τον διαχωρισμό των συστατικών, μια ανομοιογενής ροή μπορεί να παρουσιάσει διαλείπουσα συμπεριφορά, εμφανίζοντας περιοδικές διακοπές στη ροή. Οι εν λόγω διακοπές είναι αποτέλεσμα της αστάθειας της ροής, οδηγώντας ταυτόχρονα στη δημιουργία κυμάτων και στην περαιτέρω αύξηση του διαχωρισμού των φάσεων (Brennen, 2005).

Για την περιγραφή των πολυφασικών ροών στη ρευστοδυναμική υπάρχουν δύο μέθοδοι ανάλυσης. Η πρώτη είναι η μέθοδος κατά Euler και βασίζεται στην αρχή του

πεδίου. Στη μέθοδο αυτή, το πεδίο ροής περιγράφεται πλήρως μέσω της έκφρασης όλων των παραμέτρων ως συναρτήσεις του χώρου και του χρόνου, μελετώντας τη ροή για συγκεκριμένα σημεία του χώρου καθώς το ρευστό ρέει διαμέσου αυτών. Η δεύτερη μέθοδος, αυτή κατά Lagrange, στηρίζεται στην παρακολούθηση συγκεκριμένων σωματιδίων ρευστού καθώς αυτά κινούνται, περιγράφοντας τη μεταβολή των παραμέτρων της ροής πάνω στα σωματίδια αυτά, συναρτήσει του χρόνου. Η σύγκριση των δύο μεθόδων, μαζί με τα όποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μπορούν να έχουν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1 (ANSYS, Inc., 2013):

Πίνακας 4-1: Σύγκριση μεθόδων υπολογιστικής προσομοίωσης κατά Euler και κατά Lagrange.

Μέθοδος κατά Euler	Μέθοδος κατά Lagrange
Ολοκληρωμένη πληροφόρηση για τη ροή των σωματιδίων στο γενικευμένο σύστημα συντεταγμένων	Ολοκληρωμένη πληροφόρηση για τη συμπεριφορά και τον χρόνο παραμονής του κάθε σωματιδίου ξεχωριστά
Αυξημένο υπολογιστικό κόστος σε περίπτωση που απαιτείται η επίλυση πολλών εξισώσεων ή στην περίπτωση που υπάρχει μεγάλο πλήθος μεγέθους σωματιδίων. Συγκεκριμένα, υπάρχει έλλειψη ακρίβειας για ένα συγκεκριμένο εύρος σωματιδίων κατά τη μελέτη φαινομένων καύσης.	Αυξημένο υπολογιστικό κόστος σε περίπτωση που υπάρχει μεγάλος αριθμός σωματιδίων που πρέπει να παρακολουθηθεί. Ουσιαστικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σαν επεξεργασία των δεδομένων μετά τη διαδικασία επίλυσης
Εφαρμογή ανεξαρτήτου του κλάσματος όγκου των συστατικών που συμμετέχουν στο φαινόμενο.	Μεγαλύτερη ακρίβεια προσομοίωσης μόνο στις περιπτώσεις που το κλάσμα όγκου των σωματιδίων είναι πολύ μικρό έως αμελητέο
Δυνατότητα μελέτης τυρβώδους ροής στο μοντέλο.	Μεγάλο υπολογιστικό κόστος σε περίπτωση μελέτης τυρβώδους ροής.
Η αύξηση των εξισώσεων δεν επηρεάζει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος της λύσης	Η ποικιλία του μεγέθους των εξεταζόμενων σωματιδίων δεν επηρεάζει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος της λύσης
Αδυναμία γνώσης των συντελεστών διάχυσης	Παροχή περισσότερων λεπτομερειών για τη μεταφορά μάζας και θερμότητας εντός της ροής
Σε περίπτωση που υπάρχει αλλαγή φάσης, το μέγεθος των σωματιδίων θα πρέπει να καθορίζεται από τον χρήστη και όχι αυτόματα, διαφορετικά η ακρίβεια της επίλυσης θα μειωθεί.	Μεγαλύτερη ευκολία στον προσδιορισμό του πεδίου ταχύτητας των σωματιδίων σε περίπτωση που υπάρχει μεγάλο εύρος μεταβολής του μεγέθους αυτών. Αντίθετα, στη μέθοδο κατά Euler, είναι απαραίτητη η επίλυση της εξίσωσης της διατήρησης ορμής για κάθε μέγεθος, αυξάνοντας το κόστος επίλυσης.

Βάσει των ιδιοτήτων του Πίνακα 4-1, η καλύτερη μέθοδος για την προσομοίωση της σπηλαιώσης σε υδροδυναμικό έδρανο λίπανσης είναι η μέθοδος κατά Euler, λόγω της αλλαγής φάσης που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια του φαινομένου και της συνύπαρξης υγρής και αέριας φάσης. Η μέθοδος κατά Euler μπορεί να εφαρμοσθεί για ομοιογενή και για ανομοιογενή ροή. Η πρώτη μέθοδος αποτελεί μία οριακή περίπτωση

εφαρμογής της μεθόδου κατά Euler, καθώς ο ρυθμός μεταφοράς μέσω της διεπιφάνειας είναι αρκετά μεγάλος, χρησιμοποιώντας ενιαίο πεδίο συναρτήσεων για την περιγραφή του φαινομένου. Η χρήση της ομοιόμορφης ροής μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο σε περιπτώσεις που υπάρχει μία αρκετά μεγάλη ελεύθερη επιφάνεια, πλήρως καθορισμένη (π.χ. ροή ελεύθερης επιφάνειας).

Αντιθέτως, στην περίπτωση που υπάρχει ανομοιογενής ροή, κάθε συστατικό ή φάση του ρευστού μελετάται ξεχωριστά. Η αλληλεπίδραση των εξισώσεων μεταξύ τους γίνεται μέσω των εξισώσεων μεταφοράς μάζας και των εξισώσεων διατήρησης ενέργειας και ορμής που πρέπει να επικρατούν στη διεπιφάνεια των συστατικών. Για τη μελέτη της ανομοιογενούς ροής υπάρχουν τρία διαφορετικά μοντέλα, ενώ η διάκριση μεταξύ τους γίνεται βάσει των συνθηκών που επικρατούν στη διεπιφάνεια και τη μορφολογία των συστατικών. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:

- **Μοντέλο σωματιδίων:** Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να εφαρμοσθεί σε περίπτωση που το ένα συστατικό είναι συνεχές ενώ το άλλο είναι διασκορπισμένο μέσα σε αυτό. Η γεωμετρία των σωματιδίων που είναι διάσπαρτα μέσα στο συνεχές πεδίο θεωρείται ότι είναι σφαιρική, και το μοντέλο ενδείκνυται για τη διασπορά φυσαλίδων μέσα σε ρευστό, υγρών φυσαλίδων σε αέριο ή στερεών σωματιδίων σε ρευστό.
- **Μοντέλο ανάμειξης:** Σε αυτή την περίπτωση, όλες οι φάσεις της ροής θεωρούνται συμμετρικά συνεχείς. Χρησιμοποιείται συνήθως για την προσομοίωση περίπλοκων ροών όπως είναι η ανάμεικτη ροή.
- **Μοντέλο ελεύθερης επιφάνειας:** Το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε περίπτωση που το ένα ρευστό εμφανίζει ελεύθερη επιφάνεια σε σύγκριση με το άλλο. Σε περίπτωση που υπάρχει ανάμειξη του ενός συστατικού στο άλλο, τότε ενδείκνυται η χρήση κάποιου από τα προηγούμενα μοντέλα.

4.8.2 Υπολογιστική προσομοίωση του φαινομένου της σπηλαίωσης

Το φαινόμενο της σπηλαίωσης περιλαμβάνει τη μεταφορά μάζας από τη μία φάση στην άλλη. Η μεταφορά μάζας σε μια πολυφασική ροή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε αυτή είναι ομοιογενής, είτε ανομοιογενής. Στις περισσότερες υπολογιστικές προσεγγίσεις χρησιμοποιείται η μελέτη ομοιογενούς ροής, καθώς θεωρείται ότι το πεδίο ταχυτήτων του αερίου που είναι εγκλωβισμένο στο υγρό είναι ίδιο με αυτό του υγρού. Παρόλα αυτά, η ανομοιογενής ροή μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπου αυτό είναι επιθυμητό. Για την επίλυση του προβλήματος σπηλαίωσης μέσω υπολογιστικής προσομοίωσης, είναι απαραίτητο να έχει πραγματοποιηθεί η επίλυση προβλήματος χωρίς να είναι επιλεγμένη η δυνατότητα μελέτης του φαινομένου της σπηλαίωσης. Με αυτόν τον τρόπο εντοπίζονται οι περιοχές και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες είναι πιθανόν να υπάρξει σπηλαίωση στην εν λόγω εφαρμογή.

Κατόπιν, γίνεται η επιλογή της δυνατότητας χρήσης του μοντέλου περιγραφής του φαινομένου της σπηλαίωσης. Ως οριακές συνθήκες θα πρέπει να προσδιορισθούν τα κλάσματα όγκου (volume fractions) που καταλαμβάνει αρχικά το κάθε συστατικό. Συνήθως η αρχική εκτίμηση γίνεται υποθέτοντας ότι το υγρό καταλαμβάνει αρχικά όλο τον όγκο, ενώ το ποσοστό του αερίου θεωρείται μηδενικό. Σε περίπτωση που υποτεθεί κάποιο αρχικό ποσοστό αερίου μέσα στον όγκο που εξετάζεται, τότε τα αποτελέσματα

δεν θα είναι ακριβή, καθώς υπάρχει η πιθανότητα υπερεκτίμησης της σπηλαιώσης στο υπό εξέταση πεδίο.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η βασική αιτία εμφάνισης σπηλαιώσης είναι η διαφορά μεταξύ της τοπικής πίεσης και της πίεσης εξάτμισης του υγρού. Η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών απεικονίζεται και στον αριθμό σπηλαιώσης, όπως αυτός είχε οριστεί στην εξίσωση (4-1). Καθώς ο αριθμός σπηλαιώσης μειώνεται, υπάρχει μεγαλύτερος κίνδυνος σπηλαιώσης της ροής. Συνεπώς, κατά τη μελέτη των φαινομένων σπηλαιώσης μέσω υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της πίεσης ως οριακή συνθήκη. Θα πρέπει να επισημανθεί επίσης ότι σε περίπτωση που δεν υπάρχει εισροή αερίου, τότε το κλάσμα όγκου του αερίου είναι μηδενικό.

Για τη μελέτη του φαινομένου της σπηλαιώσης στο υπολογιστικό περιβάλλον “Ansys – CFX” γίνεται χρήση της εξίσωσης Rayleigh – Plesset, όπως περιγράφεται στη σχέση (4-26), χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι συνεκτικές δυνάμεις που ασκούνται στο υγρό (ANSYS, Inc., 2013):

$$\frac{p_B(t)-p_\infty(t)}{\rho_L} = R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + \frac{2\sigma}{\rho_L R} \quad (4-52)$$

Αμελώντας στη συνέχεια τους όρους δεύτερης τάξης (που είναι απαραίτητοι μόνο για χαμηλές συχνότητες ταλάντωσης) και την επιφανειακή τάση ατμών, η εξίσωση απλοποιείται στην ακόλουθη μορφή:

$$\dot{R} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_B(t)-p_\infty(t)}{\rho_L}} \quad (4-53)$$

Η μεταβολή του όγκου της φυσαλίδας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) = 4\pi R^2 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_B(t)-p_\infty(t)}{\rho_L}} \quad (4-54)$$

Αντίστοιχα, η μεταβολή της μάζας του αερίου εντός της φυσαλίδας, εάν ρ_g είναι η πυκνότητα της φυσαλίδας, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dm}{dt} = \rho_g \frac{dV}{dt} = 4\pi R^2 \rho_g \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_B(t)-p_\infty(t)}{\rho_L}} \quad (4-55)$$

Σε περίπτωση που υπάρχουν N φυσαλίδες ανά μονάδα όγκου, το κλάσμα όγκου r_g υπολογίζεται από τη σχέση:

$$r_g = N \cdot V = \frac{4}{3} \pi R^3 N \quad (4-56)$$

Η συνολική μεταφορά μάζας ανά μονάδα όγκου δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{m}_{lg} = N \frac{dm}{dt} = \frac{3r_g \rho_g}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_B(t)-p_\infty(t)}{\rho_L}} \quad (4-57)$$

Η σχέση (4-57) εφαρμόζεται μόνο στην περίπτωση που υπάρχει ατμοποίηση του υγρού και αντίστοιχη ανάπτυξη και εξάπλωση των φυσαλίδων. Σε περίπτωση που είναι απαραίτητο να συμπεριληφθεί και το φαινόμενο της συμπύκνωσης, η εξίσωση λαμβάνει τη μορφή:

$$\dot{m}_{lg} = F \cdot N \cdot \frac{dm}{dt} = \frac{3r_g \rho_g}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_B(t) - p_\infty(t)|}{\rho_L}} \operatorname{sgn}(p_B(t) - p_\infty(t)) \quad (4-58)$$

όπου F είναι ένας εμπειρικός δείκτης του ρυθμού εξέλιξης του φαινομένου. Συγκεκριμένα, το φαινόμενο της ατμοποίησης εξελίσσεται πιο γρήγορα σε σύγκριση με το φαινόμενο της συμπύκνωσης. Πέρα από τη χρήση του εμπειρικού δείκτη που σκοπό έχει την ακριβέστερη προσέγγιση της ταχύτητας εξέλιξης των φυσικών φαινομένων, θα πρέπει να προσομοιωθεί ταυτόχρονα και η διαδικασία γέννησης των φυσαλίδων στην περίπτωση της ατμοποίησης. Κατά τη διάρκεια εκκίνησης της εξάτμισης του υγρού, δημιουργούνται μικροί πυρήνες γέννησης των φυσαλίδων. Καθώς εξελίσσεται το φαινόμενο, το κλάσμα όγκου σε αυτούς του πυρήνες αυξάνεται, ενώ η πυκνότητα του συγκεκριμένου τμήματος της ροής μειώνεται, καθώς μειώνεται η παρουσία υγρού σε αυτό. Σε αυτήν την περίπτωση, το κλάσμα όγκου r_f που ορίστηκε στην εξίσωση (4-56) και εφαρμόζεται στην εξίσωση μεταφοράς μάζας (4-58), αντικαθίσταται από τον όρο $r_{nuc}(1-r_g)$:

$$\dot{m}_{lg} = \frac{3r_{nuc}(1-r_g)\rho_g}{R_{nuc}} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_B(t) - p_\infty(t)|}{\rho_L}} \operatorname{sgn}(p_B(t) - p_\infty(t)) \quad (4-59)$$

όπου r_{nuc} και R_{nuc} είναι το κλάσμα όγκου και η ακτίνα της περιοχής του πυρήνα. Κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης του αερίου, η εξίσωση (4-59) τροποποιείται αντίστοιχα.

Οι παράμετροι που είναι απαραίτητες για την επίλυση ενός προβλήματος σπηλαιώσης είναι η πίεση ατμοποίησης και η μέση διάμετρος των πυρήνων δημιουργίας των φυσαλίδων (R_{nuc}). Η πίεση ατμοποίησης καθορίζεται σαν απόλυτη τιμή, και μπορεί να εισαχθεί είτε ως τιμή, είτε ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Η προκαθορισμένη τιμή του μεγέθους R_{nuc} είναι $1 \div 2 \mu\text{m}$. Προαιρετικά, μπορούν να επιλεγθούν οι ακόλουθες παράμετροι για την επίλυση του προβλήματος³:

- οι εμπειρικοί δείκτες του μοντέλου F_{vap}, F_{cond} , (50, 0.01)
- ο μέγιστος λόγος πυκνοτήτων (1000) που έχει ως σκοπό τον καθορισμό ενός ορίου μεταβολής της πυκνότητας κάτω υπό οποιοσδήποτε συνθήκες, χωρίς να επηρεάζει τη μεταβολή της πυκνότητας στους πυρήνες δημιουργίας των φυσαλίδων, όπου λαμβάνεται η πραγματική τιμή.
- το κλάσμα όγκου των πυρήνων δημιουργίας φυσαλίδων εντός του υγρού ($5 \cdot 10^{-4}$)
- Συντελεστής ρυθμού υπο-χαλάρωσης (0.25)

Φυσικά, εκτός από το μοντέλο Rayleigh – Plesset, επιπρόσθετα μοντέλα προσομοίωσης της σπηλαιώσης μπορούν να προσδιορισθούν από τον χρήστη. Στα συγκεκριμένα μοντέλα θα πρέπει να περιγράφεται ο ρυθμός μεταφοράς μάζας από το υγρό προς το αέριο ανά μονάδα όγκου, ενώ θα πρέπει να καθορίζεται και η πίεση ατμοποίησης του υγρού. Προαιρετικά μπορούν να ορισθούν ο μέγιστος λόγος πυκνοτήτων αλλά και ο συντελεστής του ρυθμού υπο-χαλάρωσης. Στην παρούσα

³ Οι τιμές που προκαθορίζονται από το πρόγραμμα αναφέρονται εντός παρενθέσεως.

εργασία χρησιμοποιείται το μοντέλο Rayleigh – Plesset, που είναι ήδη ενσωματωμένο στο λογισμικό υπολογιστικής προσομοίωσης ANSYS-CFX.

Κατά τη διάρκεια υπολογισμού βάσει των μοντέλων που έχουν ορισθεί από τον χρήστη, το πρόγραμμα εκτελεί γραμμικοποιήσεις του κλάσματος όγκου και των εξισώσεων συνέχειας, ώστε το πρόγραμμα να συγκλίνει σε μια ευσταθή λύση. Η γραμμικοποίηση του ρυθμού σπηλαίωσης συναρτήσει της πίεσης γίνεται μέσω της πίεσης ατμοποίησης του ρευστού.

5 Μοντελοποίηση εδράνου υδροδυναμικής λίπανσης

5.1 Γενικά

Για τη μοντελοποίηση του υδροδυναμικού εδράνου λίπανσης έγινε χρήση των υπολογιστικών προγραμμάτων Autodesk Inventor και Ansys CFX 15.0, ενώ για την απεικόνιση της κατανομής πίεσης, ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού και διατμητικών τάσεων, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Mathworks Matlab. Στο παρόν κεφάλαιο δίνονται αναλυτικά στοιχεία για τη σχεδίαση του μοντέλου, καθώς και για τη διαμόρφωση του υπολογιστικού πλέγματος (mesh) που απαιτείται για την υπολογιστική προσομοίωσή του.

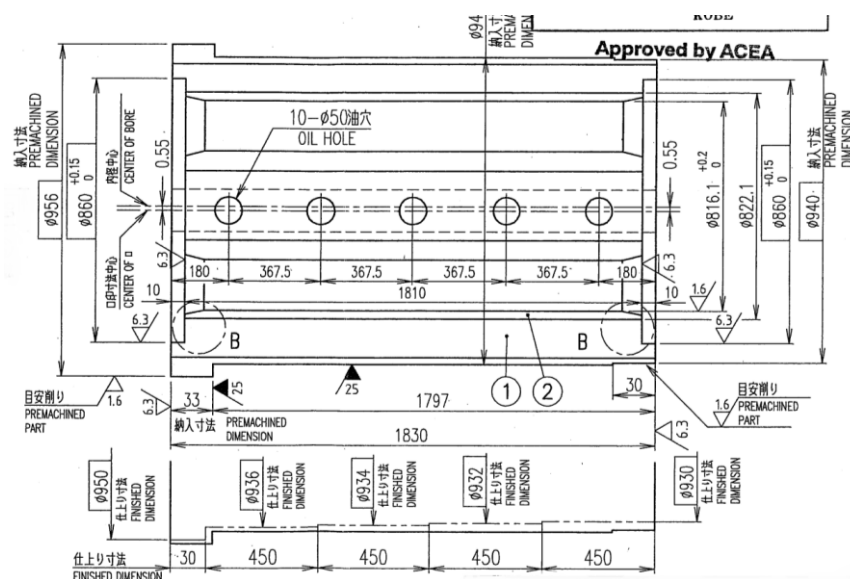
5.2 Μοντέλο εφαρμογής

Το μοντέλο που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία αφορά στο έδρανο του αξονικού συστήματος του πλοίου AMFITRITI, κατασκευής DSME (Daewoo Shipbuilding και Marine Engineering). Τα χαρακτηριστικά του πλοίου δίνονται στον Πίνακα 5-1, ενώ το έδρανο απεικονίζεται στην Εικόνα 5-1.

Πίνακας 5-1: Στοιχεία πλοίου AMFITRITI (Havenfoto's, n.d.), (Liquimar, n.d.).



IMO No:	9419369
Flag:	Liberia
Manager:	Liquimar Tankers Management
DWT:	115048.8 t
Speed:	17.2 kn
Year built:	2009
LxBxD:	249.99m x 44.00m x 21.00m



Εικόνα 5-1: Σχέδιο εδράνου αξονικού συστήματος του πλοίου AMFITRITI (DSME, 2010).

Το μέγεθος των ακτινικών εδράνων που χρησιμοποιείται στα αξονικά συστήματα απεικονίζεται στο σχέδιο της Εικόνας 5-1. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την εν λόγω εργασία βασίζεται στις χαρακτηριστικές διαστάσεις (διάμετρος, ακτινική χάρη) του συγκεκριμένου εδράνου. Λόγω της ανάγκης αξιολόγησης του μοντέλου, η μελέτη θα πραγματοποιηθεί για διάφορες τιμές εκκεντρότητας και λόγου μήκους προς διάμετρο, διατηρώντας όμως σταθερή τη διάμετρο του εδράνου σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Επίσης, για την παρούσα μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε μόνο μία οπή εισαγωγής λιπαντικού στο άνω μέρος του εδράνου, ως αρχική προσέγγιση της πραγματικής γεωμετρίας η οποία χαρακτηρίζεται από περισσότερες οπές.

5.3 Παραμετρική σχεδίαση

Παρόλο που η σύγχρονη τεχνολογία προσφέρει τα εργαλεία που διευκολύνουν σημαντικά τη σχεδίαση τρισδιάστατων αντικειμένων, η ανάγκη εύκολης προσαρμογής των μοντέλων στις ανάγκες της μελέτης απαιτεί τη χρήση παραμέτρων για τη μεταβολή των μεγεθών του μοντέλου. Για τις ανάγκες σχεδίασης του μοντέλου, έγινε εφαρμογή των παραμέτρων που έχουν οριστεί στο κεφάλαιο 3 (Πίνακας 5-2). Η παρούσα μοντελοποίηση επικεντρώνει στον υπολογισμό της ροής του λιπαντικού. Κατά συνέπεια, το υπολογιστικό μοντέλο που δημιουργείται περιλαμβάνει μόνο τον όγκο του λιπαντικού, συμβάλλοντας στον περιορισμό του απαιτούμενου αριθμού κόμβων και του αντίστοιχου υπολογιστικού κόστους. Η παραμετρική σχεδίαση της γεωμετρίας του εδράνου έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού Autodesk Inventor.

Πίνακας 5-2: Παράμετροι σχεδίασης του υπολογιστικού μοντέλου.

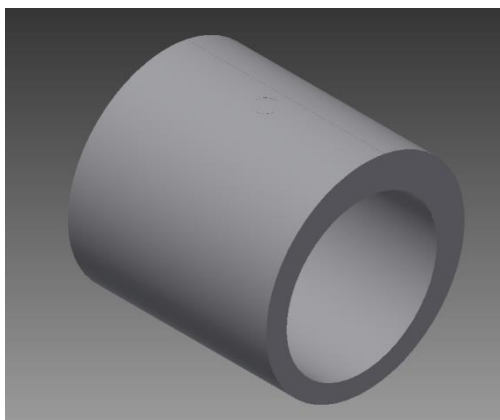
Παράμετρος σχεδίασης	Περιγραφή	Εξίσωση/ Παράμετρος	Διαστάσεις
DS_Db	Εξωτερική διάμετρος εδράνου	D	mm
DS_c	Ακτινική χάρη της ακτίνας του άξονα με την ακτίνα του εδράνου	c	mm
DS_ecc	Αδιάστατη παράμετρος της εκκεντρότητας του άξονα σε σχέση με το κέλυφος του εδράνου	$\epsilon = \frac{e}{c}$	Αδιάστατη
DS_attAngle	Απόκλιση της ευθείας που ενώνει τα δύο κέντρα από τη κατακόρυφο	ϕ	Degrees
DS_psi_x	Κανονικοποιημένη γωνία απευθυγράμμισης του άξονα ως προς τη κατεύθυνση x	$\bar{\psi}_x = \psi_x \frac{L}{c}$	Αδιάστατη
DS_psi_y	Κανονικοποιημένη γωνία απευθυγράμμισης του άξονα ως προς τη κατεύθυνση y	$\bar{\psi}_y = \psi_y \frac{L}{c}$	Αδιάστατη
DS_L_over_D	Αδιάστατος λόγος μήκους προς διάμετρο εδράνου	$\frac{L}{D}$	Αδιάστατη

Στον Πίνακα 5-2, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά που περιγράφουν τη γεωμετρία του εδράνου. Η γεωμετρία χαρακτηρίζεται κυρίως από δύο βασικά μεγέθη περιγραφής της συναρμογής άξονα – εδράνου, και είναι η διάμετρος και η ακτινική χάρη. Για το μοντέλο που αναφέρθηκε προηγουμένως, οι τιμές αυτές έχουν ορισθεί σταθερές και ίσες με $D=822.1\text{mm}$ και $c=0.55\text{mm}$.

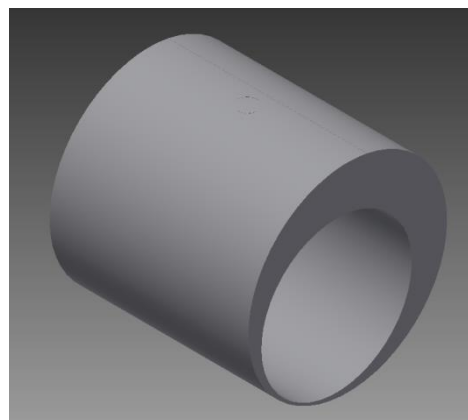
Σε συμπλήρωση αυτών, έχουν ορισθεί διάφορες παράμετροι για τη μεταβολή βασικών δεδομένων της γεωμετρίας του εδράνου, όπως είναι ο αδιάστατος λόγος μήκους προς διάμετρο, οι γωνίες απευθυγράμμισης, καθώς και η εκκεντρότητα του άξονα συναρτήσει του φορτίου.

Για την εισαγωγή του λιπαντικού έχει διαμορφωθεί μία κατάλληλη οπή στο άνω μέρος του εδράνου. Η διάμετρος της οπής μεταβάλλεται ανάλογα με το μήκος του εδράνου, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητική παροχή. Παρόλο που όπως φαίνεται από το σχέδιο του πραγματικού εδράνου χρησιμοποιούνται πάνω από μία οπές για την εισαγωγή του λιπαντικού, λόγω παραμετροποίησης της σχεδίασης, κρίθηκε ως προτιμότερη λύση η χρησιμοποίηση μίας μόνο οπής στο κέντρο του εδράνου.

Μεταβάλλοντας τις παραπάνω παραμέτρους, καθορίζεται η θέση ισορροπίας του άξονα και υπολογίζεται το φορτίο που παραλαμβάνει το έδρανο, το προφίλ της πίεσης κατά την επιφάνεια του άξονα, όπως επίσης και η μελέτη της ροής κατά τη διάρκεια της σπηλαίωσης. Στην Εικόνα 5-2 και την Εικόνα 5-3 εμφανίζεται το μοντέλο που έχει δημιουργηθεί προς μελέτη για δύο ενδεικτικούς λόγους εκκεντρότητας ($\varepsilon=0.3$ και $\varepsilon=0.9$). Για τη καλύτερη απεικόνιση, έχει εφαρμοσθεί ακτινική χάρη $c=100\text{mm}$, ώστε να εμφανισθεί καλύτερα η επίδραση που έχει η μεταβολή των γεωμετρικών παραμέτρων στη θέση του άξονα.

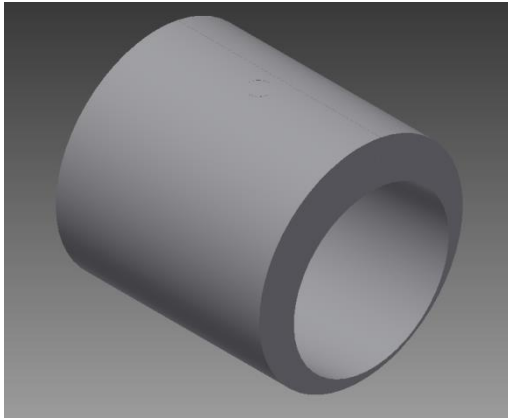


Εικόνα 5-2: Απεικόνιση μοντέλου εδράνου με εκκεντρότητα $\varepsilon=0.3$.

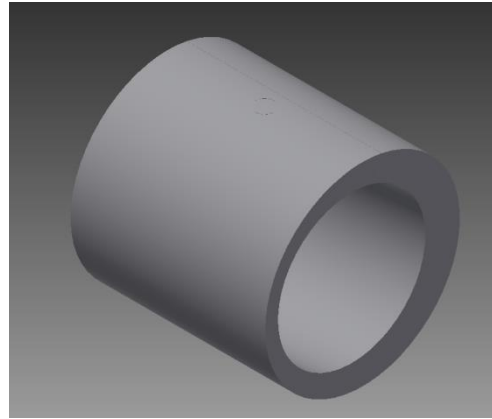


Εικόνα 5-3: Απεικόνιση μοντέλου εδράνου με εκκεντρότητα $\varepsilon=0.9$.

Αντίστοιχα, στην Εικόνα 5-4 απεικονίζεται η μεταβολή της γωνίας απευθυγράμμισης κατά τη διεύθυνση x , ενώ στην Εικόνα 5-5 απεικονίζεται η μεταβολή της γωνίας απευθυγράμμισης κατά τη διεύθυνση y . Και οι δύο απεικονίσεις έχουν γίνει για αδιάστατη εκκεντρότητα $\varepsilon=0.9$.



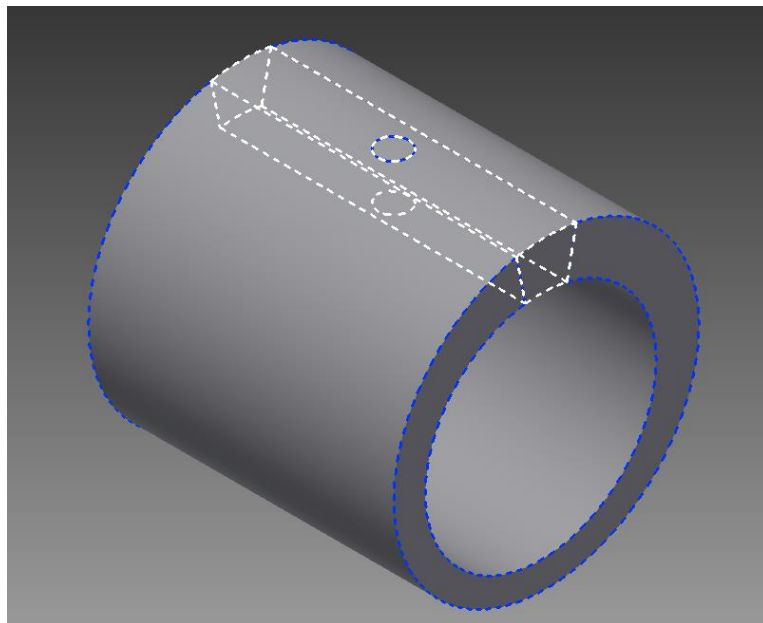
Εικόνα 5-4: Απεικόνιση μοντέλου εδράνου με εκκεντρότητα $\varepsilon=0.9$ και απόκλιση κατά τη διεύθυνση x.



Εικόνα 5-5: Απεικόνιση μοντέλου εδράνου με εκκεντρότητα $\varepsilon=0.9$ και απόκλιση κατά τη διεύθυνση y.

5.4 Προσδιορισμός πλέγματος

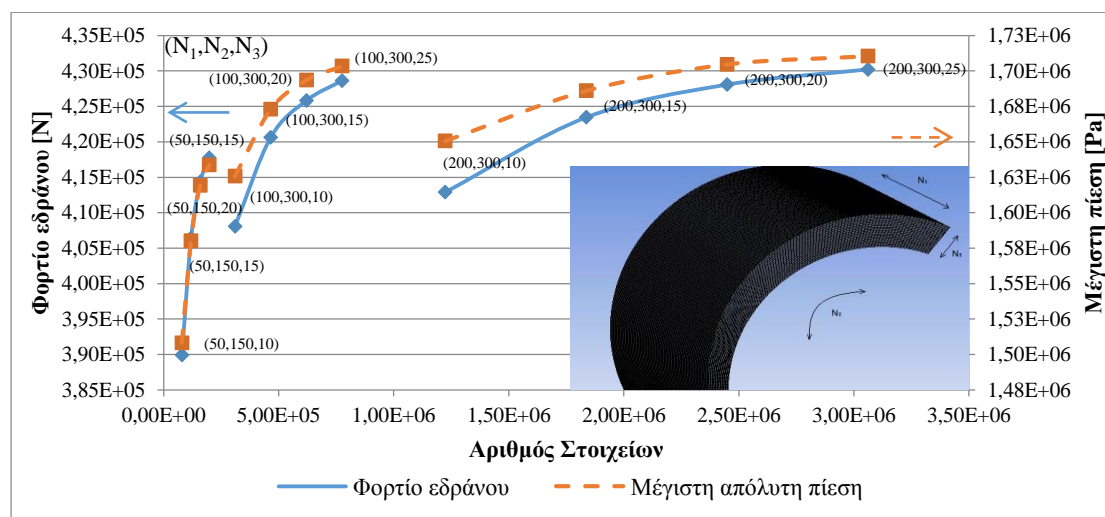
Λόγω της τρισδιάστατης απεικόνισης του μοντέλου, είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός ικανοποιητικού πλέγματος όπου θα μπορεί να προσομοιώσει όσο το δυνατό καλύτερα τη ροή που αναπτύσσεται μέσα στο έδρανο. Για την καλύτερη δυνατή παραμετροποίηση του πλέγματος, ήταν απαραίτητη η δημιουργία ραφών σε συγκεκριμένα σημεία του εδράνου (Εικόνα 5-6). Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ο διαχωρισμός του εδράνου σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα αφορά το κύριο μέρος του εδράνου όπου αναπτύσσεται το προφίλ της πίεσης και απαιτείται η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια κατά τον υπολογισμό, ενώ το δεύτερο τμήμα αποτελεί το τμήμα εισόδου του λιπαντικού. Φυσικά, το συγκεκριμένο τμήμα αποτελεί απλώς μία μικρή λωρίδα του εδράνου, σε σημείο όπου δεν υπάρχει μεγάλη επίδραση στην ακρίβεια της τελικής λύσης.



Εικόνα 5-6: Απεικόνιση ραφών μοντέλου εδράνου.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5-6, για τη δημιουργία του πλέγματος επιλέχθηκε η διαμερισματοποίηση του εδράνου σε τμήματα ως προς τις κυλινδρικές συντεταγμένες. Συγκεκριμένα, το μήκος του εδράνου χωρίστηκε σε N_1 τμήματα, η περιφέρεια του εδράνου σε N_2 τμήματα, ενώ το πάχος του εδράνου σε N_3 τμήματα. Λόγω της γεωμετρίας του εδράνου και της προσπάθειας για να διατηρηθεί η αναλογία των διαστάσεων των στοιχείων κατά την περιφερειακή κατεύθυνση ίση με 1:1, ο λόγος του αριθμού των τμημάτων N_2 προς τον αριθμό των τμημάτων N_1 είναι πάντα ίσος με 3.

Για τη εύρεση του πλέον κατάλληλου πλέγματος για την επίλυση του προβλήματος, έγινε παραμετρική διερεύνηση για τις τιμές N_1 , N_2 και N_3 που ορίστηκαν προηγουμένως για γεωμετρία του εδράνου με διάμετρο $D=822.1$ mm, ακτινική χάρη $c=0.55$ mm, λόγο μήκους προς διάμετρο, $L/D=1$, και αδιάστατη εκκεντρότητα $\epsilon=0.7$. Οι οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν για τον προσδιορισμό του βέλτιστου αριθμού πλέγματος είναι αυτές που αναφέρονται στο κεφάλαιο 6.2. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας διερεύνησης για τις διάφορες τιμές των συντελεστών (N_1 , N_2 , N_3) εμφανίζονται στην Εικόνα 5-7. Σε κάθε σημείο αναγράφεται ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν ανά διεύθυνση, ενώ χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικές ομάδες καμπύλων για τη καλύτερη αναπαράσταση των αποτελεσμάτων, με βάση τον αριθμό των στοιχείων $N_1 \times N_2$ που χρησιμοποιήθηκαν.



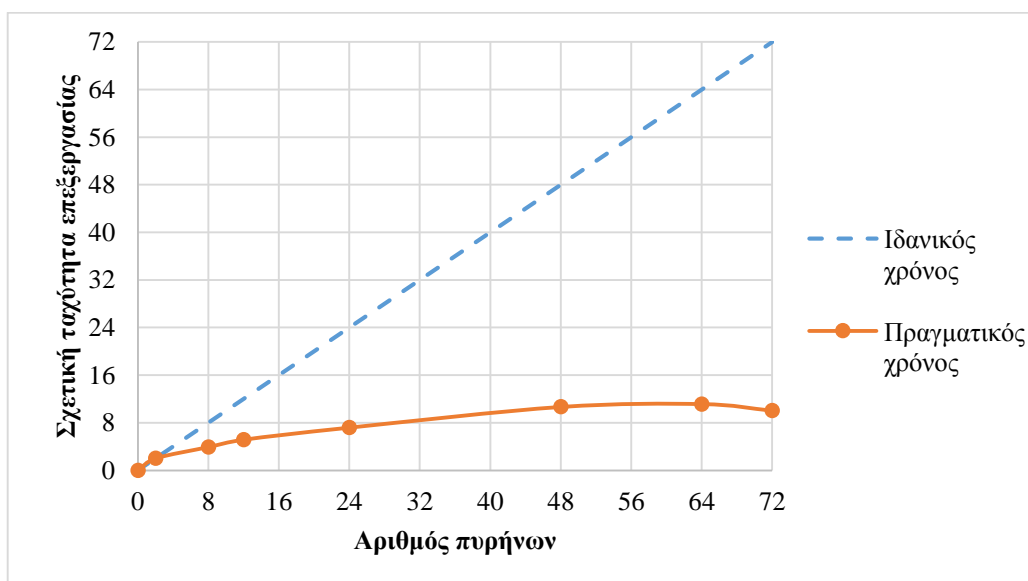
Εικόνα 5-7: Υπολογισθέν φορτίο και μέγιστη πίεση συναρτήσει του αριθμού στοιχείων του πλέγματος.

Σύμφωνα με την Εικόνα 5-7, παρατηρείται ότι κύρια επίδραση στην επίλυση του προβλήματος έχει ο αριθμός των στρώσεων (N_3) που απαιτούνται για τη διαμερισματοποίηση του πάχους του εδράνου. Αντίθετα, ο αριθμός του πλέγματος κατά την περιφέρεια δεν έχει σημαντική επίδραση μετά από κάποια τιμή (100x300). Όταν ο αριθμός των κόμβων κατά την περιφέρεια και κατά το μήκος του εδράνου είναι μικρός, τότε παρατηρείται μία απόκλιση της τάξης του 6-13%, ανάλογα με τον αριθμό των στρώσεων που έχουν επιλεγεί για τη μοντελοποίηση. Αντίστοιχα, αυξάνοντας τον αριθμό των κόμβων κατά την περιφέρεια πέρα της τιμής $N_2=300$, ο αριθμός των στοιχείων και το υπολογιστικό κόστος αυξάνεται σημαντικά, χωρίς κάποια εμφανή βελτίωση στα τελικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, η απόκλιση μεταξύ των σημείων (100,300,15) και (200,600,15), για τον ίδιο αριθμό στρώσεων είναι της τάξης του 0.8%.

Τελικά, για τη συγκεκριμένη μελέτη επιλέχθηκε η περίπτωση όπου απαιτούνται 100 κόμβοι κατά το μήκος του εδράνου, 300 κόμβοι κατά την περιφέρεια και 20 στρώσεις για τη μοντελοποίηση του πάχους του εδράνου. Ο αριθμός στοιχείων που αντιπροσωπεύει αυτή την περίπτωση είναι 620540 στοιχεία. Όπως φαίνεται και στο γράφημα της Εικόνας 5-7, η απόκλιση από την περίπτωση χρήσης του ιδεατού πλέγματος (200, 600, 25), είναι κάτω από 1%, ενώ η σύγκλιση επιτυγχάνεται στο 20% του χρόνου που απαιτείται για την περίπτωση με το μέγιστο αριθμό στοιχείων. Το συγκεκριμένο πλέγμα εφαρμόζεται σε όλες τις περιπτώσεις σταθερής διαμέτρου, ανεξαρτήτως του λόγου μήκους προς διάμετρο που εφαρμόζεται. Ο λόγος είναι ότι η μεταβολή της κλίσης της πίεσης κατά την διεύθυνση του μήκους είναι μικρότερη από τη μεταβολή της κλίσης κατά την περιφερειακή ή την ακτινική διεύθυνση. Συνεπώς ο αριθμός των κόμβων κατά αυτή την διεύθυνση δεν έχει σημαντική επίδραση στην τελική λύση του προβλήματος.

5.5 Απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς

Λόγω της τρισδιάστατης μορφής του προβλήματος, του αυξημένου αριθμού κόμβων, καθώς και λόγω της ύπαρξης τουλάχιστον δύο ρευστών, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός του βέλτιστου αριθμού πυρήνων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Όπως φαίνεται στο γράφημα της Εικόνας 5-8, η ιδανική περίπτωση θα ήταν η ταχύτητα να αυξάνεται ανάλογα με τον αριθμό πυρήνων που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη μιας λύσης.



Εικόνα 5-8: Σχετική ταχύτητα επεξεργασίας συναρτήσει του αριθμού των χρησιμοποιούμενων πυρήνων για την επίλυση της ροής σε ακτινικό έδρανο με παρουσία σπηλαιώσης.

Στην πραγματικότητα όμως, η ταχύτητα εύρεσης τη λύσης δεν γίνεται να ακολουθήσει τον συγκεκριμένο ρυθμό. Σύμφωνα με την καμπύλη της Εικόνας 5-8, που αντιστοιχεί στον πραγματικό χρόνο που απαιτείται για τον υπολογισμό του φαινομένου για τη συγκεκριμένη μελέτη, η ταχύτητα αυξάνεται σημαντικά μέχρι τη χρήση 48 πυρήνων επεξεργασίας, ενώ στη συνέχεια παραμένει αμετάβλητη ή ακόμα μειώνεται με τη χρήση επιπλέον επεξεργαστών.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στο γράφημα της Εικόνας 5-8 έγινε υπολογισμός βάσει του συνολικού χρόνου που χρειάστηκε ο επιλυτής του προγράμματος. Αυτός ο χρόνος περιλαμβάνει το χρόνο ανάγνωσης των δεδομένων και των οριακών συνθηκών που επιβάλλονται στο μοντέλο, το χρόνο για την αναγνώριση των πυρήνων και την ταξινόμηση της επίλυσης σε καθένα από αυτούς, το χρόνο επεξεργασίας και το χρόνο συγκέντρωσης των αποτελεσμάτων. Κατά τη διάρκεια των διάφορων δοκιμών και τρεξιμάτων, κρίνεται αναγκαία η αναφορά της επίδραση που έχει ο αριθμός των πυρήνων σε κάθε χρόνο ξεχωριστά.

Η ανάγνωση των δεδομένων του προβλήματος και ο επιμερισμός της εργασίας σε καθένα πυρήνα μπορεί να θεωρηθεί γενικά σταθερός, χωρίς να επηρεάζεται από τον αριθμό των πυρήνων που τελικά χρησιμοποιήθηκαν. Αντίθετα, ο χρόνος επεξεργασίας της κάθε επανάληψης επηρεάζεται σημαντικά από τον αριθμό των πυρήνων και μπορεί να θεωρηθεί ότι η σχέση είναι ανάλογη του αριθμού των επεξεργαστών. Φυσικά, όταν έχει επέλθει η σύγκλιση της λύσης του προβλήματος, ο χρόνος μειωνόταν ακόμα περισσότερο για τον ίδιο αριθμό πυρήνων.

Τέλος, ο αριθμός πυρήνων είχε επίδραση στον χρόνο συλλογής και καταγραφής των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, και μέχρι τους 48 πυρήνες επεξεργασίας, ο χρόνος συλλογής και καταγραφής των δεδομένων μπορεί να θεωρηθεί σταθερός ή ελαφρά αυξανόμενος. Αυξάνοντας όμως τον αριθμό των πυρήνων πάνω από τη συγκεκριμένη τιμή, η ταχύτητα καταγραφής μειώθηκε σημαντικά, κάτι που αποτυπώνεται και στην πτώση της καμπύλης του χρόνου υπολογισμού από τους 64 προς τους 72 πυρήνες. Ο χρόνος υπολογισμού έγινε για ενδεικτικό χρόνο επαναλήψεων. Αυξάνοντας τον αριθμό των επαναλήψεων, η επίδραση που έχει ο χρόνος καταγραφής των αποτελεσμάτων στον συνολικό χρόνο υπολογισμού θα μειώνεται σημαντικά.

6 Υπολογιστική προσομοίωση σπηλαίωσης λόγω εξάτμισης

6.1 Γενικά

Για τη μελέτη του φαινομένου της σπηλαίωσης λόγω εξάτμισης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του κεφαλαίου 5. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αξιολογήθηκαν σύμφωνα με τον αλγόριθμο του Elrod και το αντίστοιχο λογισμικό που έχει αναπτυχθεί από τον Τομέα Ναυτικής Μηχανολογίας του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Raptis, March 2014), τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου λογισμικού είναι αρκετά ικανοποιητικά, περιγράφοντας επιτυχώς το ροϊκό πεδίο του ακτινικού εδράνου υδροδυναμικής λίπανσης.

Για τη μεγαλύτερη ακρίβεια κατά τη διάρκεια της σύγκρισης των αποτελεσμάτων, έγινε πρώτα η προσομοίωση βάσει του αλγορίθμου του Elrod και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSYS-CFX. Ο κύριος λόγος που ακολουθήθηκε αυτή η διαδικασία είναι ο ρυθμός σύγκλισης του κάθε μοντέλου. Ο αλγόριθμος του Elrod επιλύει το δισδιάστατο πρόβλημα της ροής μέσα στο έδρανο με μεγάλη ακρίβεια, και με μικρό αριθμό κόμβων πλέγματος. Συνεπώς, η ταχύτητα με την οποία επιτυγχάνεται η λύση του προβλήματος είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν του ANSYS-CFX⁴. Λόγω αυτού του ρυθμού σύγκλισης, είναι δυνατόν να γίνει η γρήγορη και ακριβής εύρεση της θέσης ισορροπίας του άξονα (αδιάστατος ρυθμός εκκεντρότητας και γωνία συμπεριφοράς, ϕ_0) βάσει του επιθυμητού φορτίου.

Επομένως, για διάφορες τιμές του φορτίου και έχοντας ως κριτήριο σύγκλισης τις αδιάστατες τιμές εκκεντρότητας, μπορεί να βρεθεί η γωνία συμπεριφοράς του άξονα και υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας του εδράνου. Η συγκεκριμένη γωνία χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θέσης ισορροπίας του άξονα για το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί στο λογισμικό ANSYS-CFX.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των φυσικών μοντέλων, των οριακών συνθηκών καθώς και των παραμέτρων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια γίνεται αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων του λογισμικού ANSYS-CFX με τον αλγόριθμο του Elrod, ενώ γίνεται αναπαράσταση του πεδίου ροής για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε.

6.2 Ορισμός προβλήματος στο λογισμικό ANSYS-CFX

Για τη σωστή επίλυση του προβλήματος, είναι απαραίτητος ο ακριβής προσδιορισμός των οριακών συνθηκών, καθώς και των τιμών των θερμοφυσικών ιδιοτήτων που θα χρησιμοποιηθούν. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στο πλαίσιο της αξιολόγησης του μοντέλου στην παρούσα ενότητα, δεν έχει ληφθεί υπόψη η εξίσωση της ενέργειας κατά τη διάρκεια υπολογισμού του πεδίου της ροής, αμελώντας πλήρως την επίδραση της θερμοκρασίας, όπως συμβαίνει και στον αλγόριθμο του Elrod. Συνεπώς, για την

⁴ Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι για το φαινόμενο της ατμώδους σπηλαίωσης, ο υπολογιστικός χρόνος σύγκλισης της υπολογιστικής προσομοίωσης βάσει του αλγορίθμου Elrod ήταν μικρότερη του ενός λεπτού, δίνοντας ταυτόχρονα και τη θέση ισορροπίας του εδράνου για δεδομένο φορτίο λειτουργίας, ενώ ο υπολογιστικός χρόνος σύγκλισης του λογισμικού ANSYS-CFX για δεδομένη θέση ισορροπίας, ξεπερνούσε τις 4 ώρες.

επίλυση του προβλήματος στο ANSYS-CFX, χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις Navier-Stokes για τη διατήρηση της συνέχειας και της ορμής στις τρεις διευθύνσεις.

Η περιγραφή του φαινομένου της σπηλαιώσης απαιτεί τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του λιπαντικού τόσο σε υγρή όσο και σε αέρια κατάσταση, αλλά και την πίεση ατμοποίησης του ρευστού στη θερμοκρασία όπου πραγματοποιείται η μελέτη. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, το λιπαντικό που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη έχει δομή παραπλήσια με τη δομή του λιπαντικού 10W-30, ενώ οι ιδιότητές του υπολογίστηκαν βάσει των συστατικών, όπως αυτά προέκυψαν από τη καμπύλη προσομοιωμένης απόσταξης (παράγραφος 2.5). Οι ιδιότητες του λιπαντικού, τόσο για την υγρή, όσο και για την αέρια φάση, που αντιστοιχούν σε θερμοκρασία 40°C και ατμοσφαιρική πίεση, δίνονται στον Πίνακα 6-1.

Πίνακας 6-1: Ιδιότητες λιπαντικού

Λιπαντικό 10W-30	
Μοριακό Βάρος:	383.92 kg/kmol
Πίεση ατμοποίησης	0.1 Pa
Υγρή φάση:	
Πυκνότητα:	847 kg/m ³
Δυναμικό ιξώδες	6.66828·10 ⁻² kg/m s
Αέρια φάση:	
Πυκνότητα:	0.0335 kg/m ³
Δυναμικό ιξώδες	4.05·10 ⁻⁶ kg/m s

Ως πίεση αναφοράς έχει ορισθεί η ατμοσφαιρική πίεση, ενώ στις οριακές συνθήκες έχει ορισθεί ότι η σχετική πίεση εισαγωγής του λιπαντικού από την οπή είναι ίση με 100 Pa. Ως σχετική πίεση ορίζεται η διαφορά πίεσης που ορίζεται σε μία συγκεκριμένη επιφάνεια ρευστού, σε σύγκριση με την πίεση αναφοράς του προβλήματος. Στα άκρα του λιπαντικού υπάρχει μηδενική σχετική πίεση (δηλαδή η πίεση ισούται με την ατμοσφαιρική). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο ορισμός μίας χαμηλής πίεσης εισαγωγής γίνεται με σκοπό την καλύτερη εκτίμηση των αποτελεσμάτων της ροής που αναπτύσσεται εντός του εδράνου, χωρίς αυτή να επηρεάζεται από την πίεση εισαγωγής του λιπαντικού. Επίσης, το διάνυσμα της πίεσης θεωρείται ότι βρίσκεται πάντα κάθετα στην επιφάνεια της οπής.

Τόσο στην εισαγωγή όσο και στα άκρα του εδράνου θεωρείται ότι υπάρχει μόνο λιπαντικό, χωρίς την παρουσία αέρα. Η διάμετρος της οπής εισαγωγής έχει ορισθεί ίση με το 10% του μήκους του εδράνου για όλες τις περιπτώσεις που θα εξεταστούν, ενώ θεωρείται ότι μέσω αυτής μπορεί να εισέλθει μόνο ποσότητα λιπαντικού, χωρίς τη δυνατότητα να εξέρχεται ρευστό. Αντιθέτως, τα άκρα του εδράνου χαρακτηρίζονται ως ανοιχτά με αποτέλεσμα η κυκλοφορία του λιπαντικού σε υγρή ή αέρια μορφή, στις συγκεκριμένες περιοχές, να οφείλεται στη διαφορά της πίεσης.

Το έδρανο και ο άξονας χαρακτηρίζονται ως τοιχώματα, χωρίς να αναπτύσσεται ολίσθηση στην επιφάνειά τους. Η επιφάνεια του εδράνου θεωρείται σταθερή και ακίνητη, ενώ η επιφάνεια του άξονα περιστρέφεται. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα έχει τεθεί σταθερή και ίση με 76 RPM. Λόγω της χαμηλής ταχύτητας περιστροφής, η ροή θεωρείται στρωτή ($Re = \frac{\rho n_s R_j c}{\mu_l} = 45.69$), οπότε δεν εφαρμόζεται κάποιο μοντέλο τυρβώδους ροής. Τέλος, για την επίλυση του προβλήματος αμελούνται οι χρονικοί όροι των εξισώσεων, θεωρώντας πλέον ότι το σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση (steady state).

Το μοντέλο της σπηλαιώσης χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη μεταφορά μάζας μεταξύ της υγρής και της αέριας φάσης λόγω του φαινομένου της σπηλαιώσης. Το μέγεθος των φυσαλίδων που δημιουργούνται κατά τη μελέτη του φαινομένου της σπηλαιώσης σε νερό κυμαίνεται από 2 έως 50 μm , ενώ, φυσαλίδες μικρότερες των 7 μm αντιστοιχούν σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50% (Brujan, 2011). Λαμβάνοντας υπόψη την ακτινική χάρη του εδράνου ($c=0.55 \text{ mm}$), η τιμή της μέσης διαμέτρου των φυσαλίδων, η οποία απαιτείται από το λογισμικό για τον προσδιορισμό του μεγέθους των φυσαλίδων που αναμένονται να σχηματιστούν, ορίστηκε ίση με 2 μm . Οι υπόλοιπες παράμετροι που ορίζονται από το λογισμικό για τη χρήση του μοντέλου σπηλαιώσης είναι στις προκαθορισμένες τιμές τους. Λόγω της χρήσης δύο ρευστών εντός ενός όγκου ελέγχου, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός της φύσης αυτών. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 4.8, σε φαινόμενα σπηλαιώσης, η υγρή φάση θεωρείται ως συνεχές μέσο ενώ η αέρια φάση είναι διασκορπισμένη εντός του συνεχούς ρευστού. Για τον υπολογισμό της ροής εντός του εδράνου, θεωρείται ότι η ροή είναι πλήρως ομοιογενής.

Όσον αφορά στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό βάσει του αλγορίθμου Elrod, αυτό έχει τις ίδιες ακριβώς γεωμετρικές διαστάσεις για κάθε περίπτωση, ενώ και οι οριακές συνθήκες στα άκρα του εδράνου και στην οπή εισαγωγής είναι ακριβώς οι ίδιες. Η μόνη διαφορά, έγκειται στον αριθμό των κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της κάθε περίπτωσης, που είναι αρκετά χαμηλότερος από αυτόν του CFX (81x61) και στην γεωμετρία της οπής εισαγωγής του λιπαντικού που είναι ορθογωνικής μορφής.

6.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

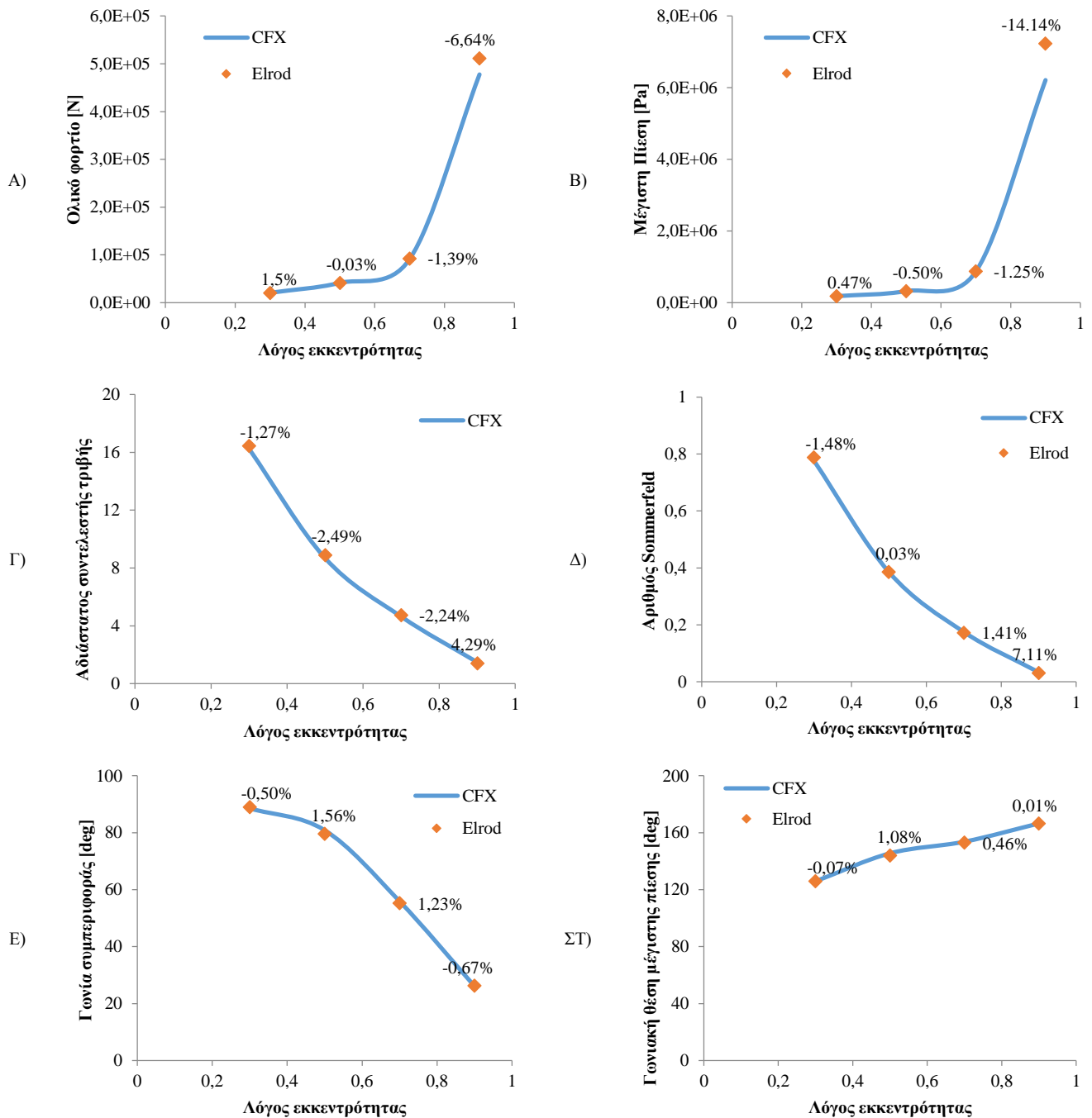
6.3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογιστικής προσομοίωσης και αλγορίθμου Elrod

Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν για την υπολογιστική προσομοίωση του ακτινικού εδράνου υδροδυναμικής λίπανσης, είναι οι εξής:

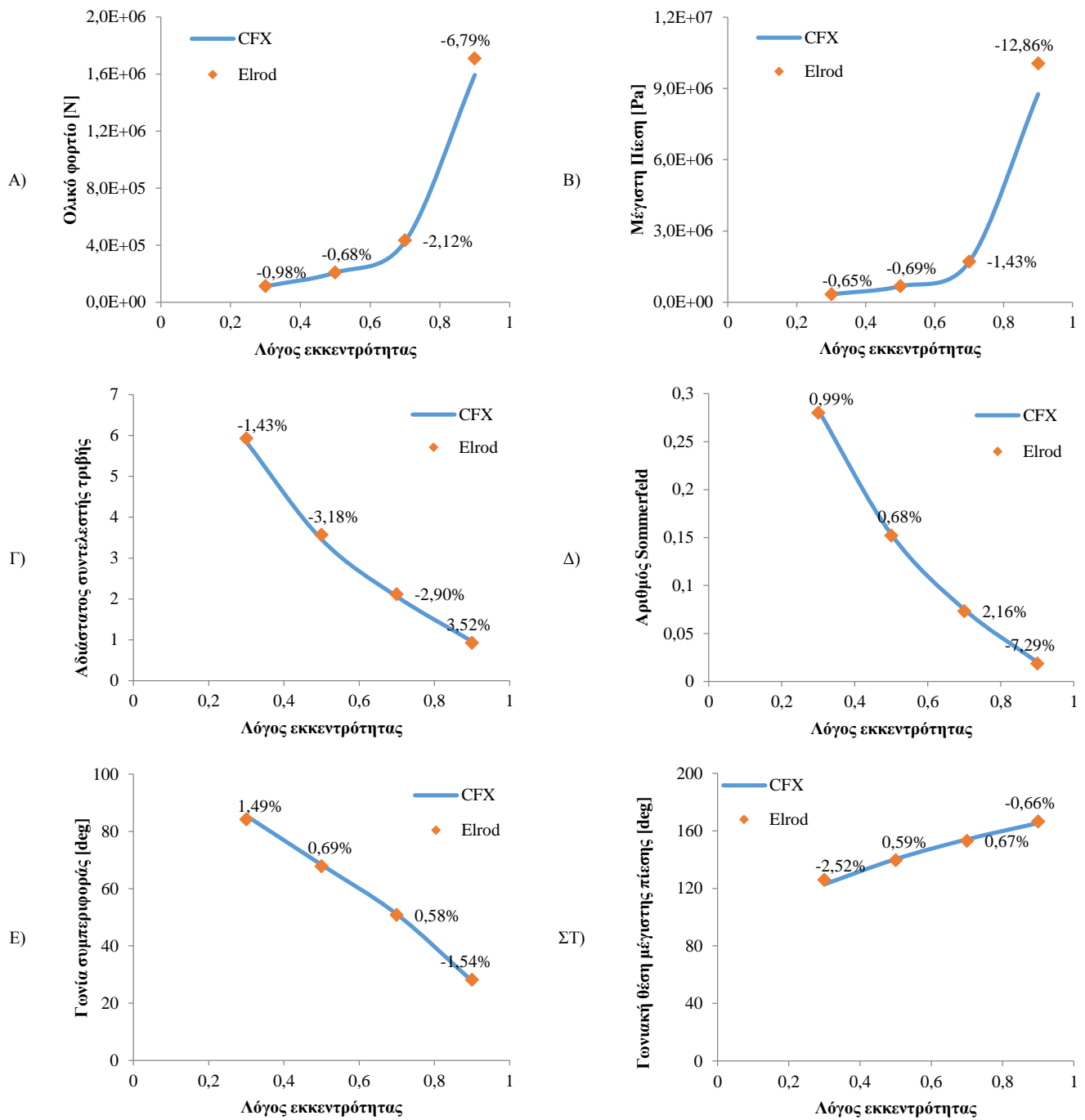
- $L/D=0.5, \varepsilon=0.3$
- $L/D=0.5, \varepsilon=0.5$
- $L/D=0.5, \varepsilon=0.7$
- $L/D=0.5, \varepsilon=0.9$
- $L/D=1, \varepsilon=0.3$
- $L/D=1, \varepsilon=0.5$
- $L/D=1, \varepsilon=0.7$
- $L/D=1, \varepsilon=0.9$
- $L/D=2, \varepsilon=0.3$
- $L/D=2, \varepsilon=0.5$
- $L/D=2, \varepsilon=0.7$
- $L/D=2, \varepsilon=0.9$

Στα ακόλουθα γραφήματα γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων για το ολικό φορτίο, τη μέγιστη πίεση, τη γωνιακή θέση μέγιστης πίεσης στο μέσο του μήκους του εδράνου,

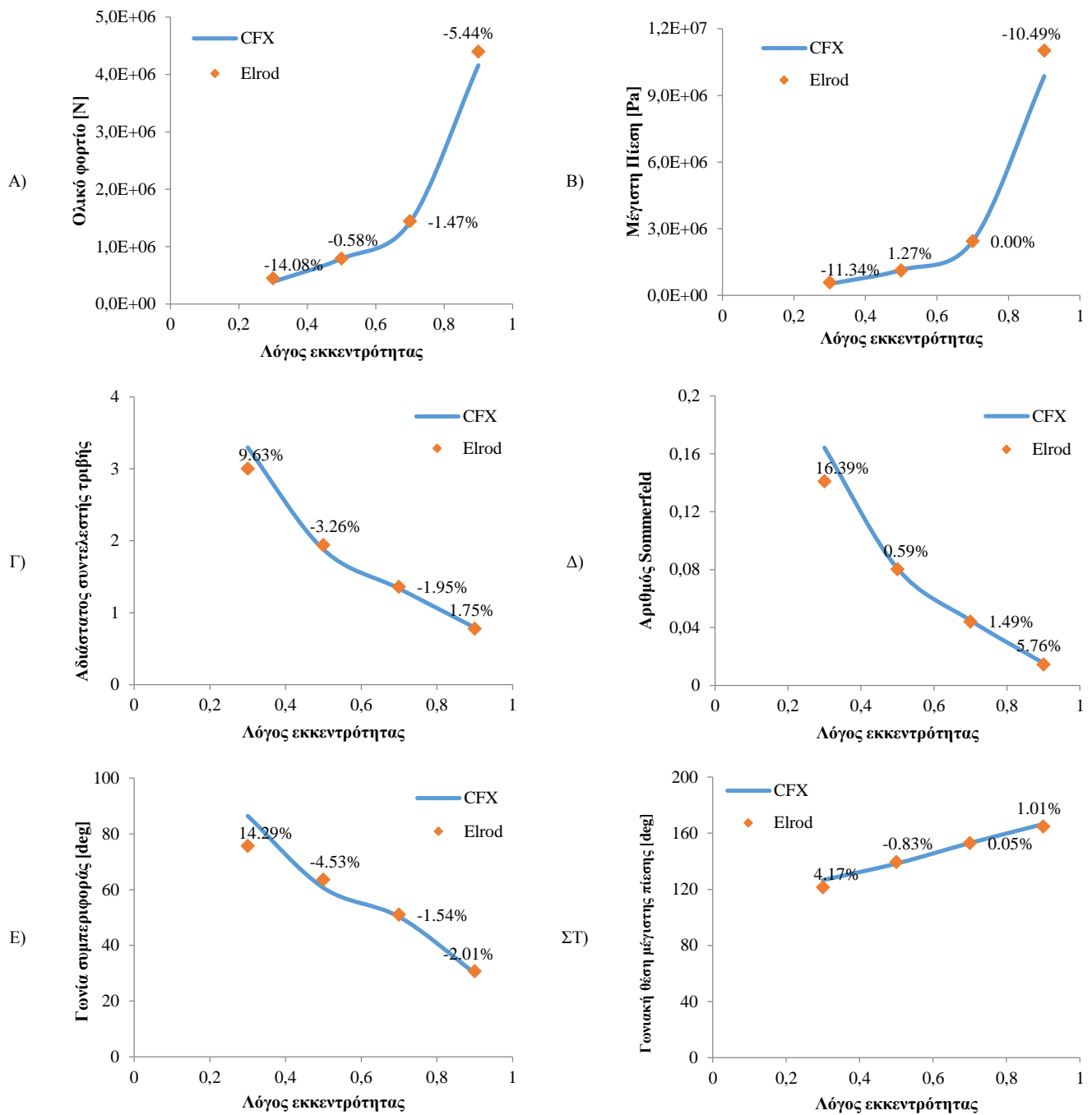
τον αδιάστατο συντελεστή τριβής, τον αδιάστατο αριθμό Sommerfeld, αλλά και της γωνίας συμπεριφοράς του άξονα. Επίσης, σε κάθε σημείο αναγράφεται για κάθε περίπτωση το σφάλμα που έχει η λύση της προσομοίωσης στο λογισμικό ANSYS-CFX, σε σχέση με τη λύση του αλγορίθμου Elrod.



Εικόνα 6-1: Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και αλγορίθμου Elrod συναρτήσει του λόγου εκκεντρότητας και για λόγο μήκους προς διάμετρο $L/D=0.5$, για τα μεγέθη: A) Ολικό φορτίο, B) Μέγιστη πίεση, Γ) Αδιάστατος συντελεστής τριβής, Δ) Αριθμός Sommerfeld, E) Γωνία συμπεριφοράς άξονα, ΣΤ) Γωνία μέγιστης πίεσης.



Εικόνα 6-2: Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και αλγορίθμου Elrod συναρτήσει του λόγου εκκεντρότητας και για λόγο μήκους προς διάμετρο $L/D=1$, για τα μεγέθη: Α) Ολικό φορτίο, Β) Μέγιστη πίεση, Γ) Αδιάστατος συντελεστής τριβής, Δ) Αριθμός Sommerfeld, Ε) Γωνία συμπεριφοράς άξονα, ΣΤ) Γωνία μέγιστης πίεσης



Εικόνα 6-3: Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και αλγορίθμου Elrod συναρτήσει του λόγου εκκεντρότητας και για λόγο μήκους προς διάμετρο $L/D=2$ για τα μεγέθη: Α) Ολικό φορτίο, Β) Μέγιστη πίεση, Γ) Αδιάστατος συντελεστής τριβής, Δ) Αριθμός Sommerfeld, Ε) Γωνία συμπεριφοράς άξονα, ΣΤ) Γωνία μέγιστης πίεσης.

Από τα γραφήματα των εικόνων 6-1 έως 6-3 παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες μεταβολές σε σχέση με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου Elrod, εκτός από τις περιπτώσεις όπου ο αδιάστατος αριθμός εκκεντρότητας είναι αρκετά μεγάλος. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που ο λόγος εκκεντρότητας είναι ίσος με 0.9, τότε το σφάλμα υπολογισμού της μέγιστης απόλυτης πίεσης είναι μεγαλύτερο του 10%. Μεγαλύτερη ανάλυση του σφάλματος που παρατηρείται στη μέγιστη τιμή της πίεσης για τις συγκεκριμένες τιμές εκκεντρότητας θα δοθεί στις ακόλουθες υπο-ενότητες, που παρουσιάζεται το προφίλ της πίεσης στη μέση τομή.

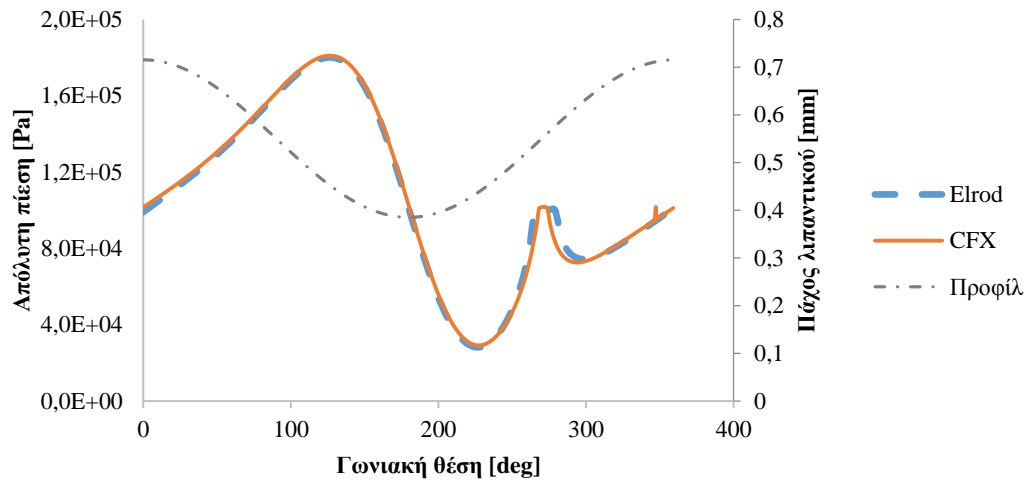
Το ποσοστό του σφάλματος για κάθε τιμή εκκεντρότητας αυξάνεται καθώς ο λόγος μήκος προς διάμετρο του εδράνου αυξάνεται επίσης. Η μεταβολή αυτή οφείλεται κυρίως στον τρόπο εισαγωγής του λιπαντικού μέσα στο έδρανο, καθώς αυτό γίνεται μόνο μέσω μίας οπής από το άνω μέρος του εδράνου, η διάμετρος της οποίας μεταβάλλεται ανάλογα με το μήκος. Συνεπώς, όταν το μήκος του εδράνου είναι σημαντικά μεγάλο σε σχέση με τη διάμετρο της οπής, τότε το προφίλ της ροής δε προλαβαίνει να αναπτυχθεί σωστά στην εισαγωγή με τις όποιες συνέπειες μπορεί να έχει αυτό στην τελική λύση του προβλήματος. Το πρόβλημα της εισαγωγής του λιπαντικού στο έδρανο γίνεται εμφανές κυρίως στην περίπτωση υπολογισμού εδράνου με λόγο μήκους προς διάμετρο $L/D=2$ και εκκεντρότητα ίση με 0.3, όπου δηλαδή υπάρχει μεγάλο μήκος για το έδρανο και οι πιέσεις που αναπτύσσονται είναι σχετικά χαμηλές λόγω της γεωμετρίας του εδράνου.

Στη συνέχεια, αναπαρίστανται τα συγκριτικά γραφήματα για το προφίλ της πίεσης και των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του περιστρεφόμενου άξονα, καθώς και το ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού, σε συνάρτηση της γωνιακής θέσης του άξονα. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η γωνιακή θέση του άξονα έχει μετασχηματιστεί ανάλογα με τη γωνία συμπεριφοράς ϕ_0 , έτσι ώστε στη θέση των 180° να βρίσκεται το ελάχιστο πάχος του φιλμ του λιπαντικού όπως φαίνεται και στα αντίστοιχα γραφήματα.

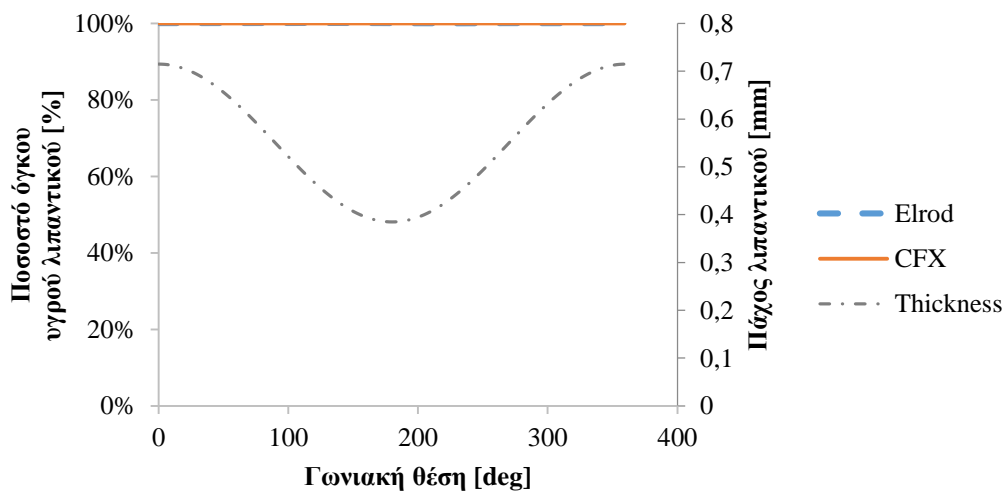
Για κάθε περίπτωση επισυνάπτονται και οι τρισδιάστατες εικόνες του μοντέλου οι οποίες απεικονίζουν τη διαμόρφωση του προφίλ της πίεσης, του ποσοστού όγκου του υγρού λιπαντικού και της διατμητικής τάσης κατά την επιφάνεια του άξονα. Ειδικά για την περίπτωση του φαινομένου της σπηλαιώσης, επισυνάπτεται και εικόνα υπό μεγέθυνση έτσι ώστε να παρουσιαστεί καλύτερα το φαινόμενο έναρξης της σπηλαιώσης και η αλληλεπίδραση του υγρού λιπαντικού με τους ατμούς μέσα στη συγκεκριμένη περιοχή. Επίσης, συγκρίνεται η κατανομή της πίεσης και του κλάσματος όγκου του λιπαντικού στην ανεπτυγμένη επιφάνεια του εδράνου μεταξύ των περιπτώσεων του αλγορίθμου Elrod και των αποτελεσμάτων του λογισμικού 'Ansys-CFX'.

6.3.2 Περίπτωση $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$

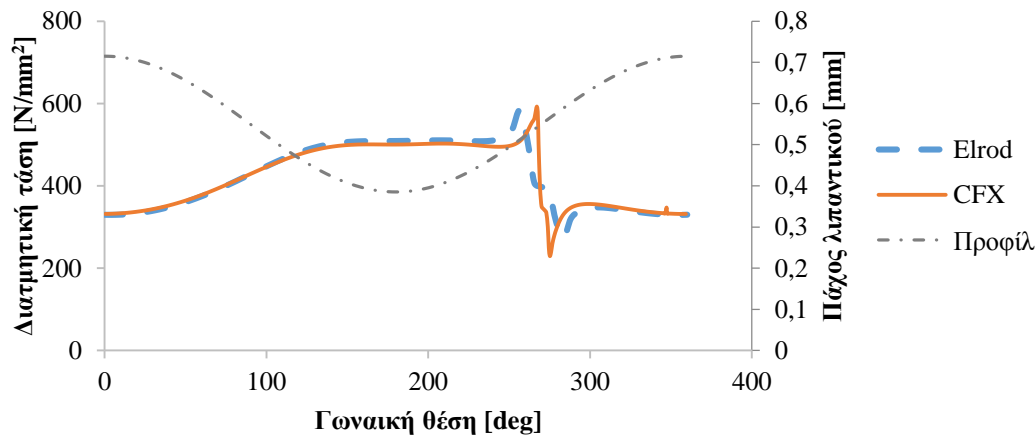
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους σπηλαιώσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$



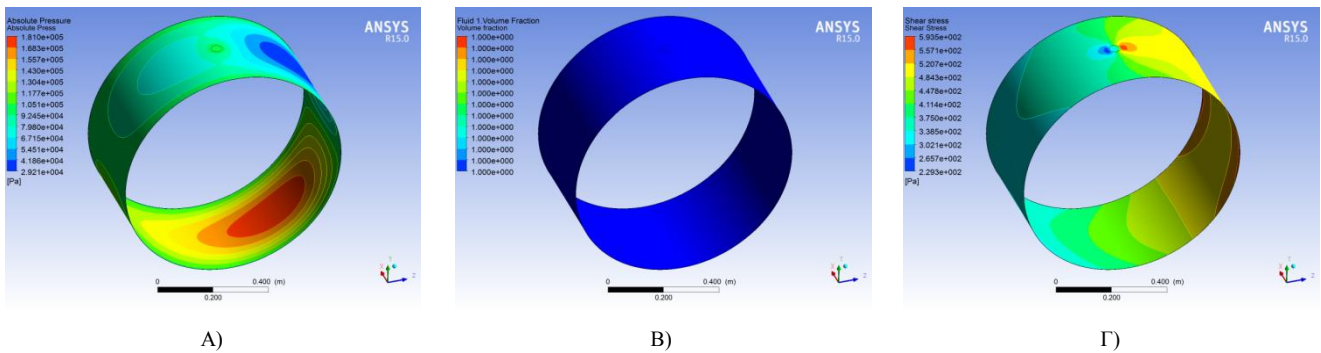
Εικόνα 6-4: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.



Εικόνα 6-5: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.



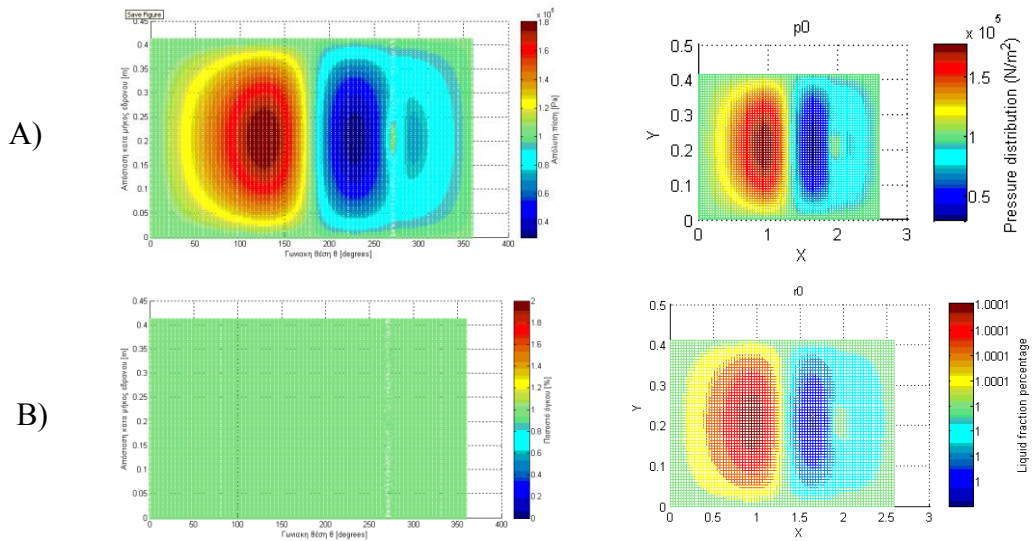
Εικόνα 6-6: Υπολογισθείσα συνισταμένη διαμητρική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\epsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.



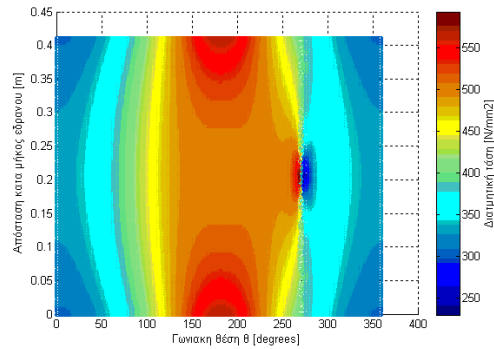
Εικόνα 6-7: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού και Γ) διαμητρικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\epsilon=0.3$.

Εξισώσεις Navier Stokes

Αλγόριθμος Elrod



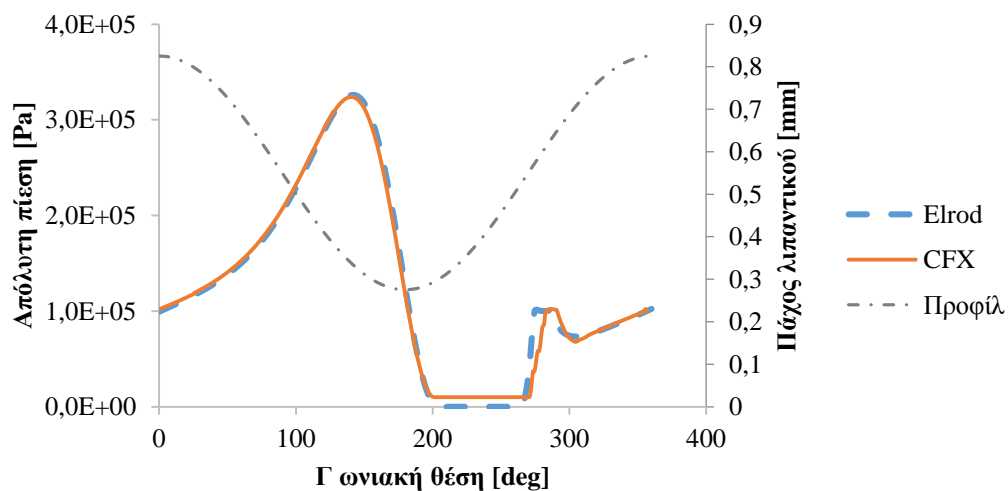
Εικόνα 6-8: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=0.5$ και $\epsilon=0.3$.



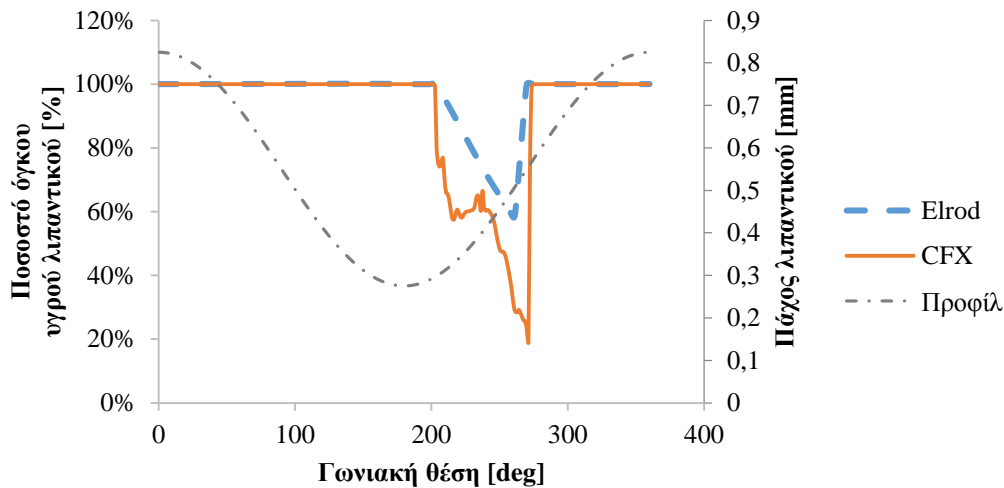
Εικόνα 6-9: Κατανομή διαμηθικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes.

6.3.3 Περίπτωση $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.5$

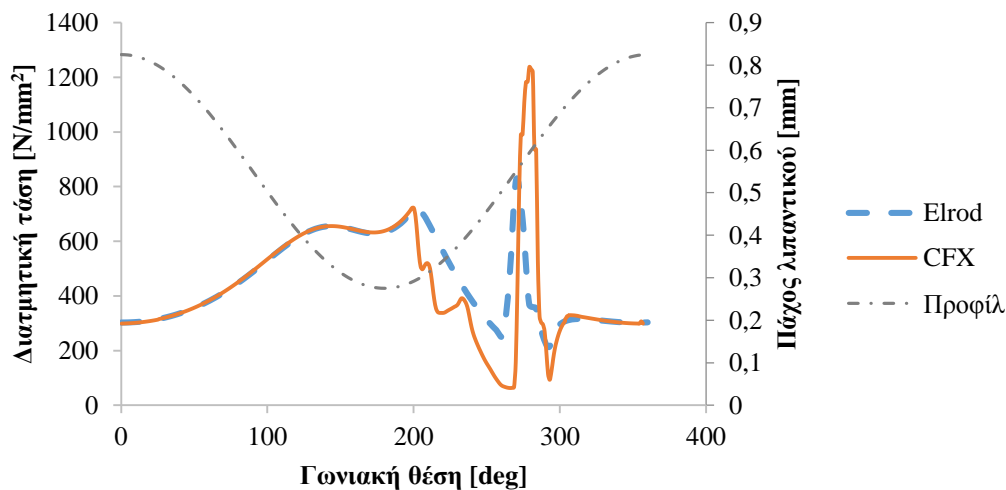
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους σπηλαιώσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.5$



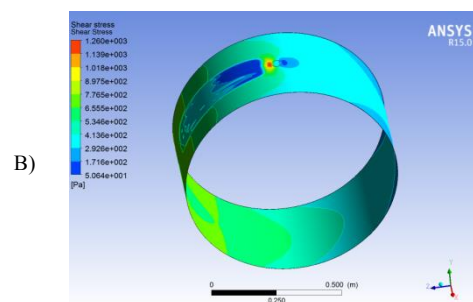
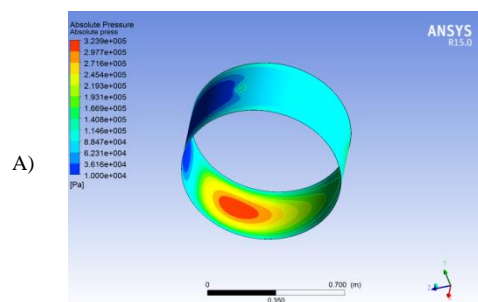
Εικόνα 6-10: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

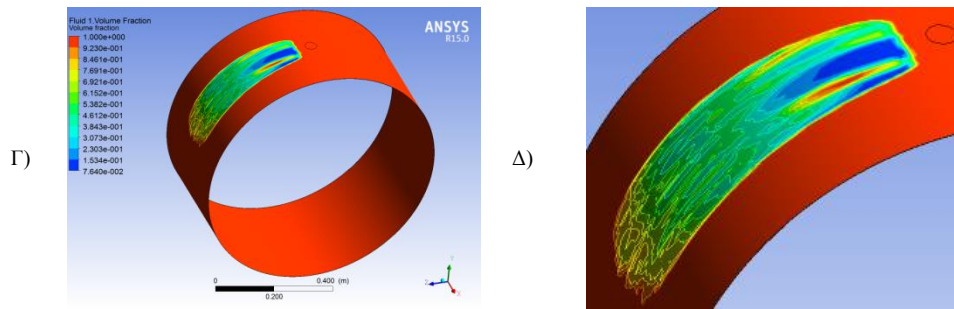


Εικόνα 6-11: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

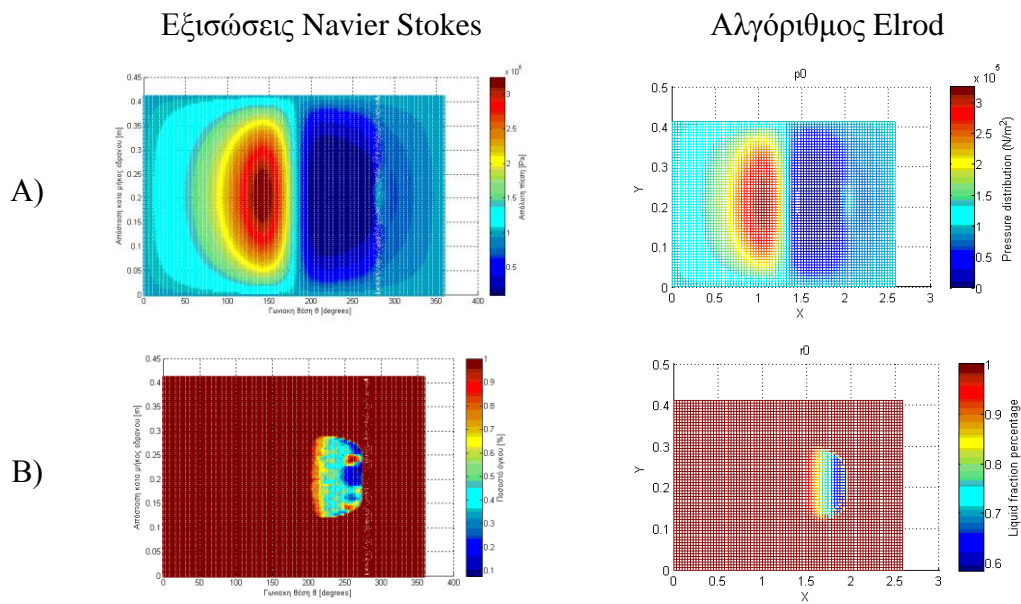


Εικόνα 6-12: Υπολογισθείσα συνισταμένη διαμημητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

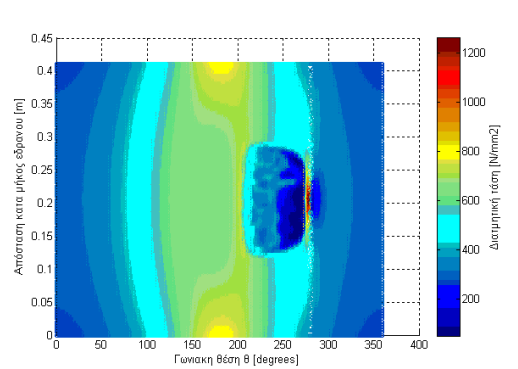




Εικόνα 6-13: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διατμητικών τάσεων, Γ) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχής έναρξης φαινομένου σπηλαίωσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.5$.



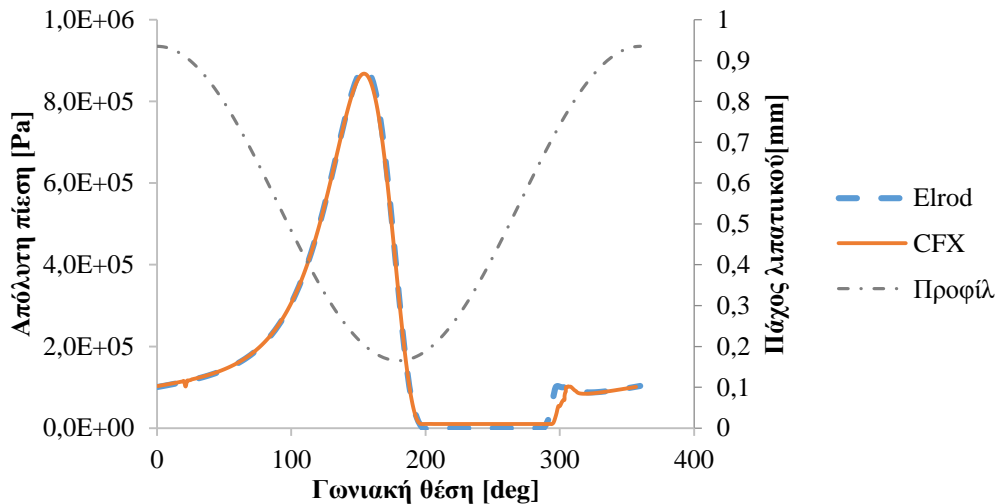
Εικόνα 6-14: Κατανομές Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού για αποτελέσματα επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.5$.



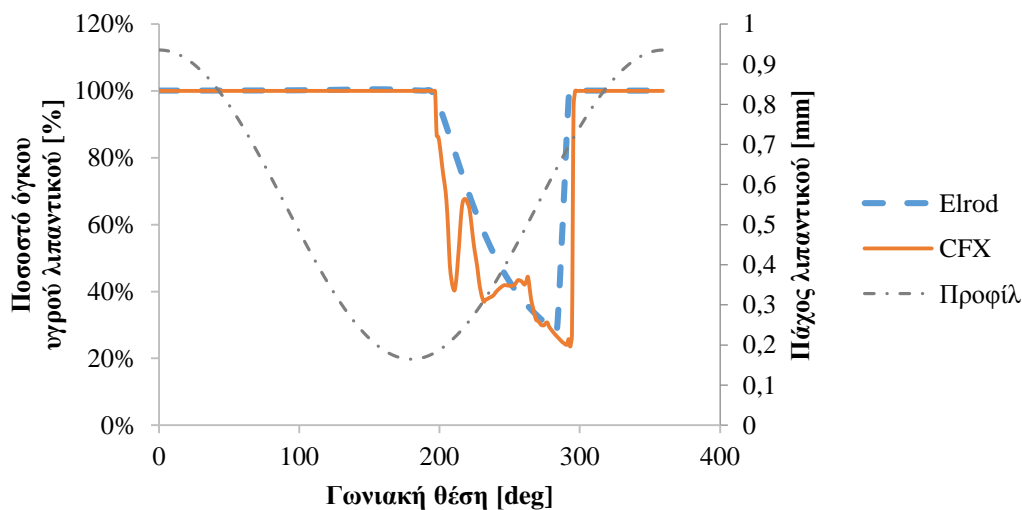
Εικόνα 6-15: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.5$, βάσει της επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes.

6.3.4 Περίπτωση $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.7$

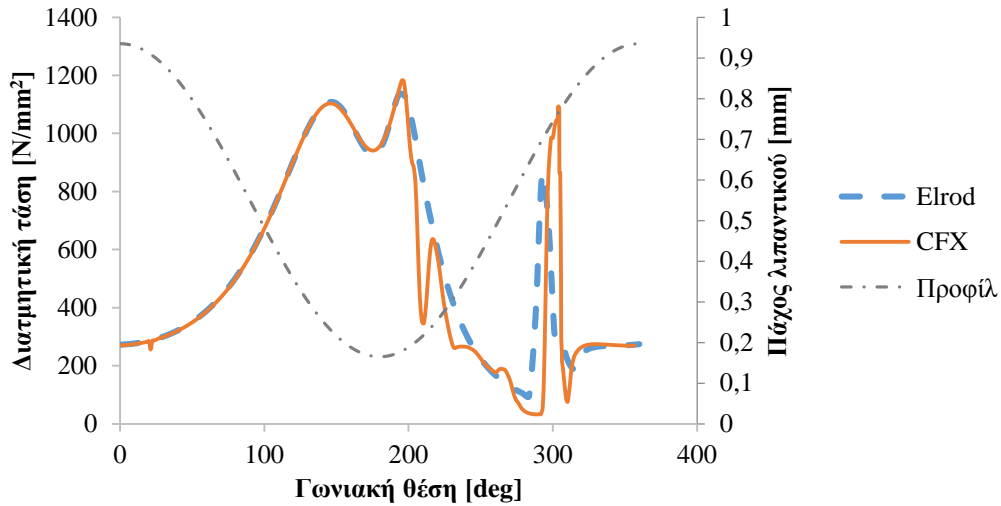
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους σπηλαιώσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.7$



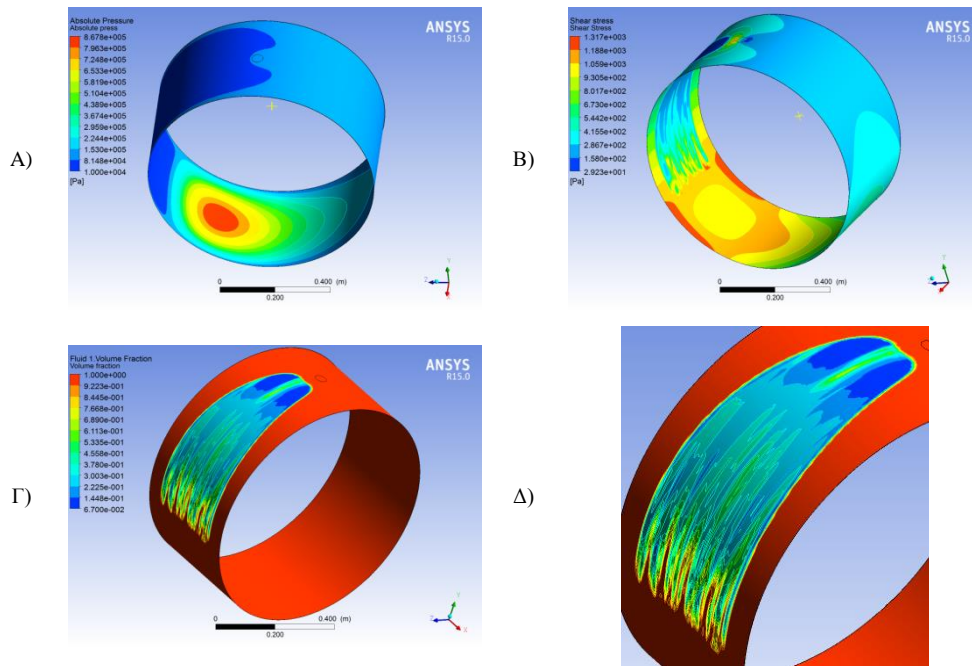
Εικόνα 6-16: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.



Εικόνα 6-17: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

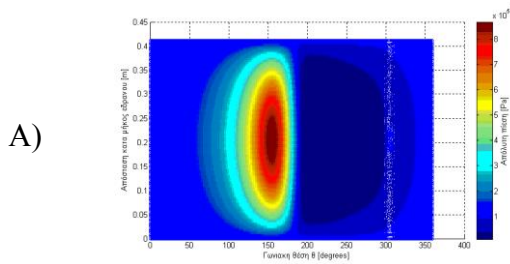


Εικόνα 6-18: Υπολογισθείσα συνισταμένη διαμητρική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

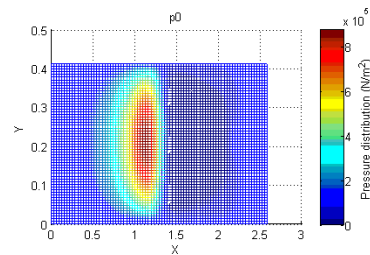


Εικόνα 6-19: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διαμητρικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλαιώσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.7$.

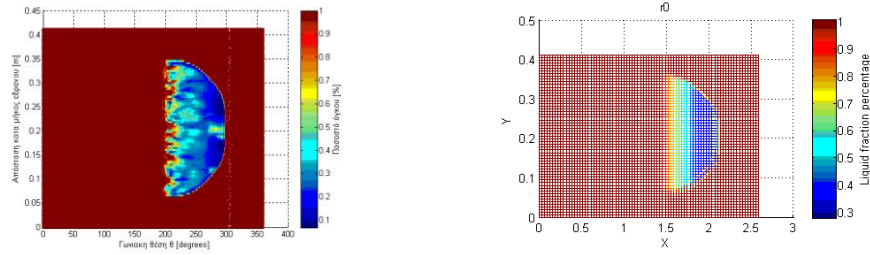
Εξισώσεις Navier Stokes



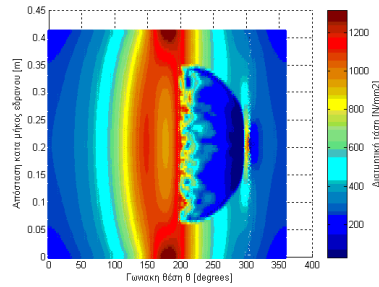
Αλγόριθμος Elrod



B)



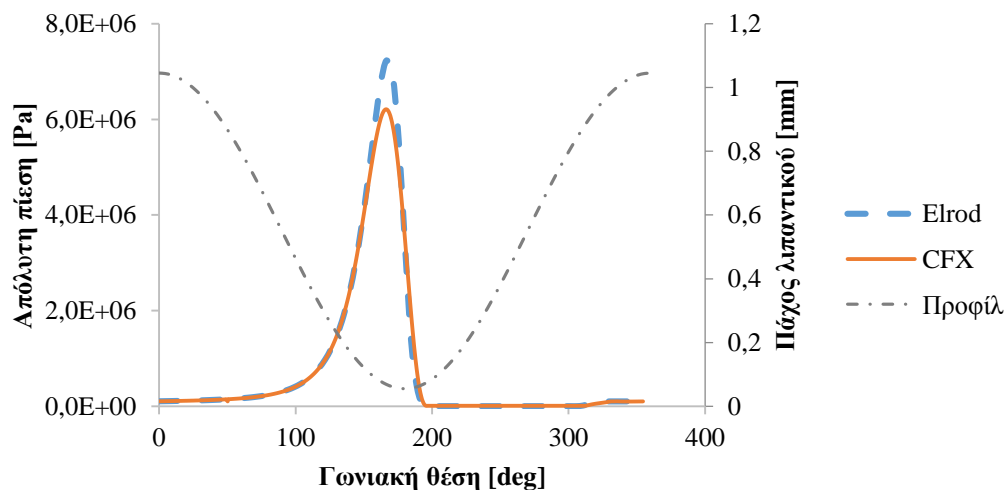
Εικόνα 6-20: Σύγκριση κατανομής A) πίεσης και B) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.7$.



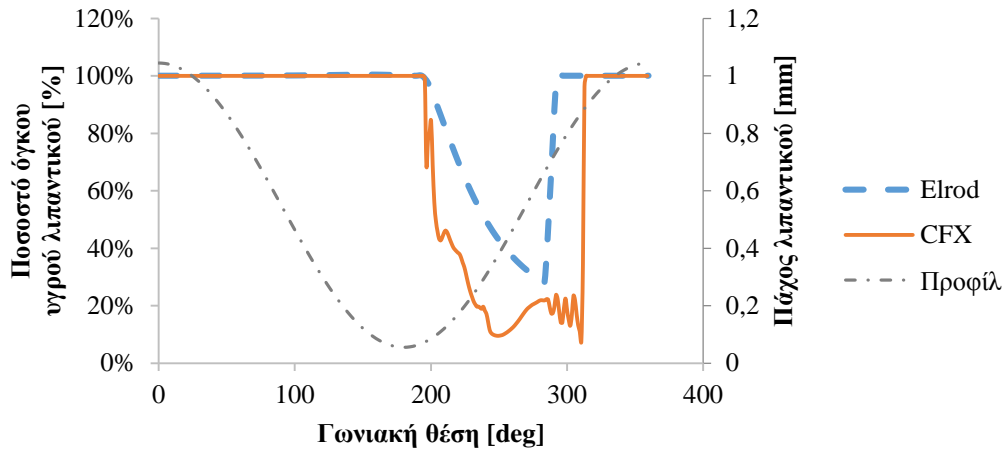
Εικόνα 6-21: Κατανομή διαμητρικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.7$ βάσει της επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes.

6.3.5 Περίπτωση $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.9$

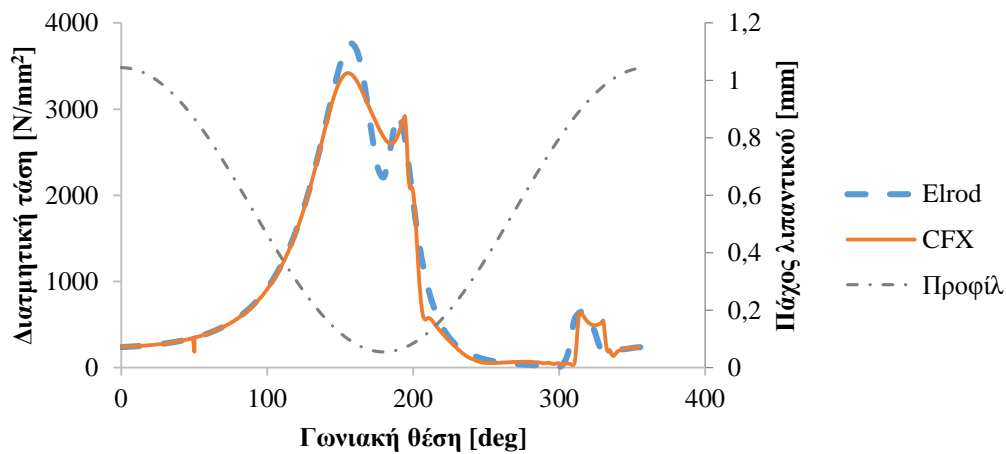
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους σπηλαιώσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.9$.



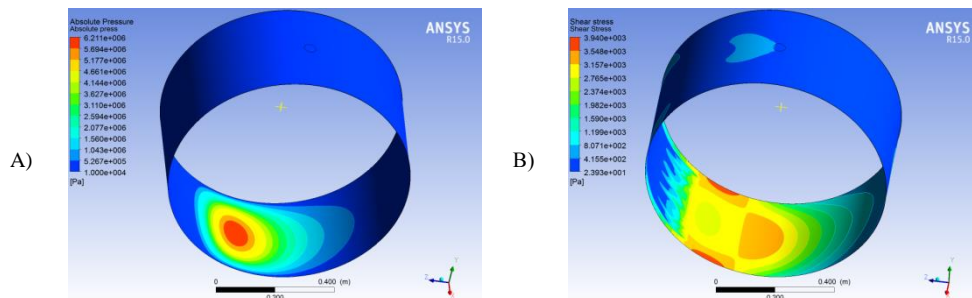
Εικόνα 6-22: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

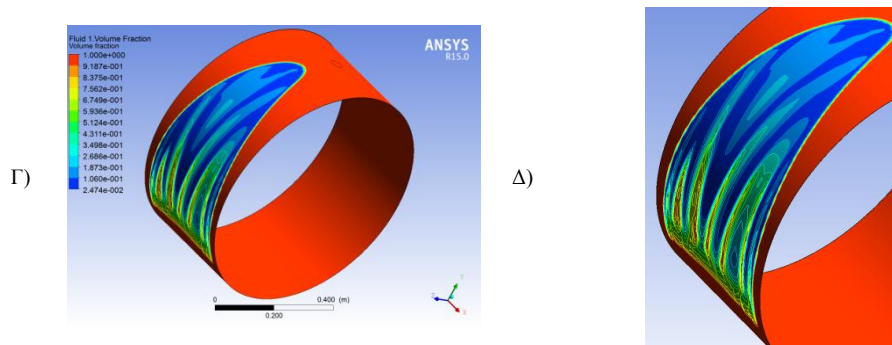


Εικόνα 6-23: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

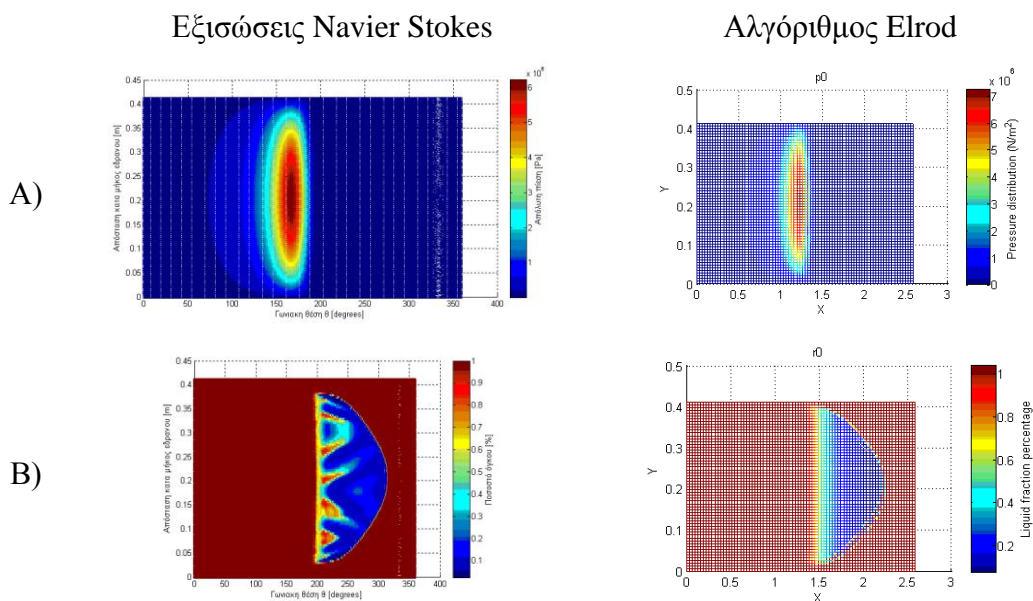


Εικόνα 6-24: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

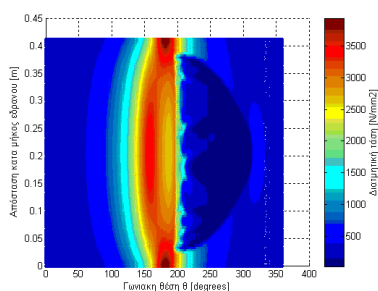




Εικόνα 6-25: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διαμητικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλαίωσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\epsilon=0.9$.



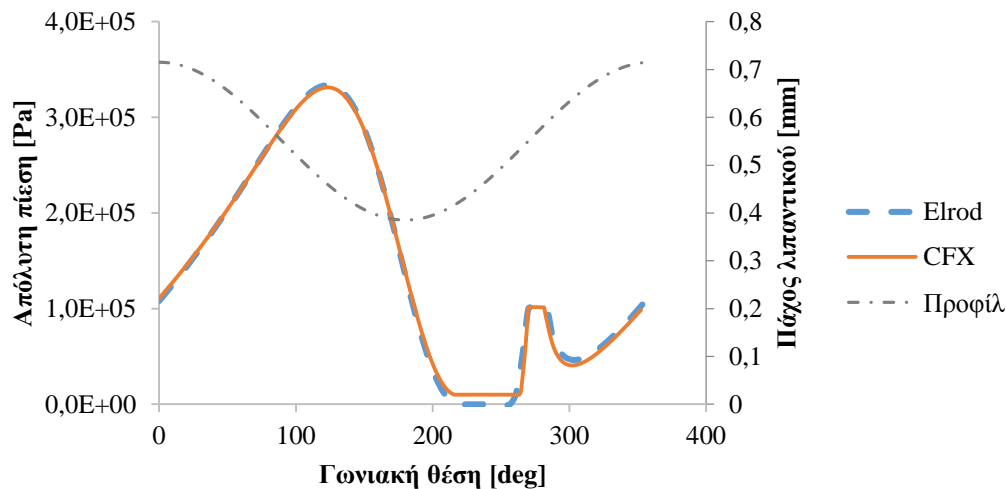
Εικόνα 6-26: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=0.5$ και $\epsilon=0.9$.



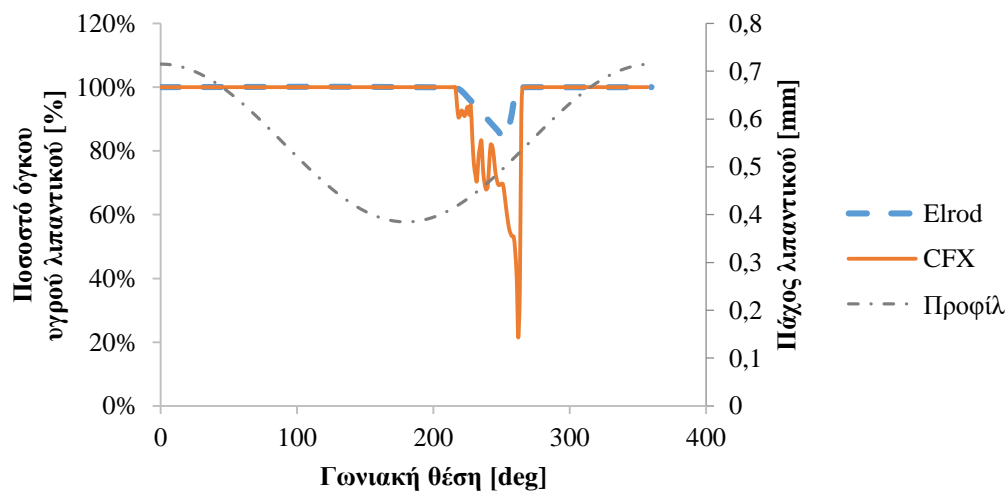
Εικόνα 6-27: Κατανομή διαμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\epsilon=0.9$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes.

6.3.6 Περίπτωση $L/D=1$ και $\varepsilon=0.3$

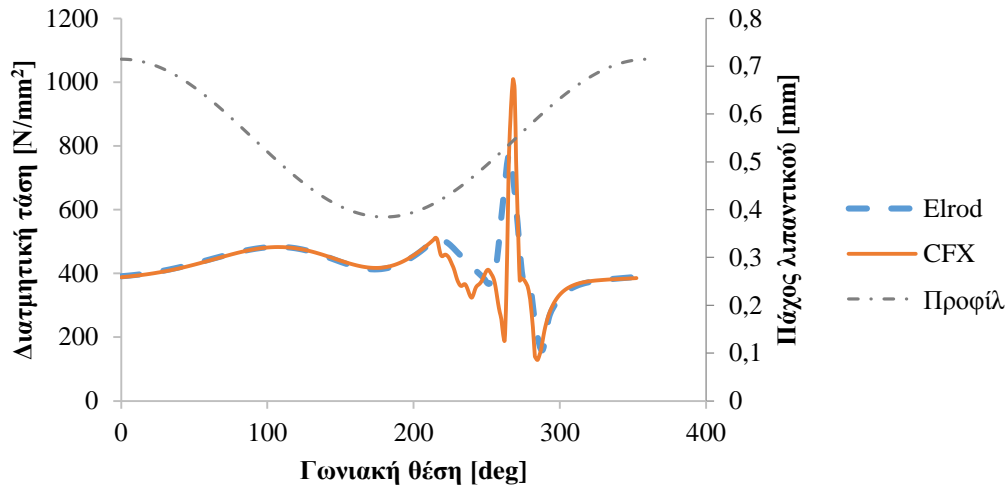
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους σπηλαίωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\varepsilon=0.3$



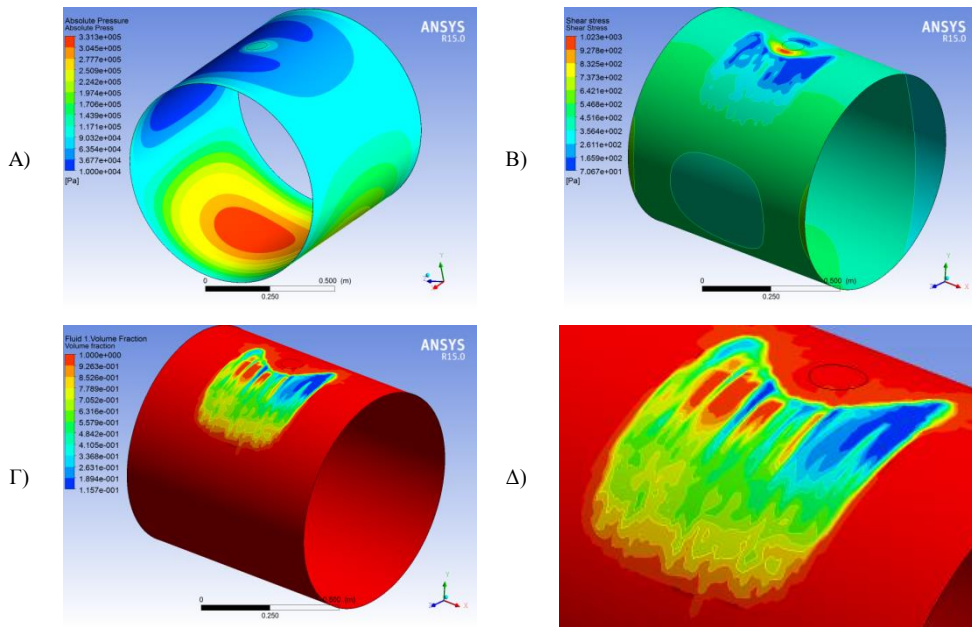
Εικόνα 6-28: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.



Εικόνα 6-29: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

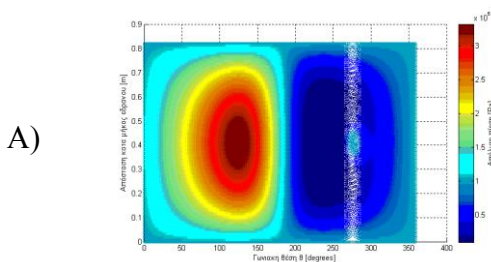


Εικόνα 6-30: Υπολογισθείσα συνισταμένη διαμητρική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

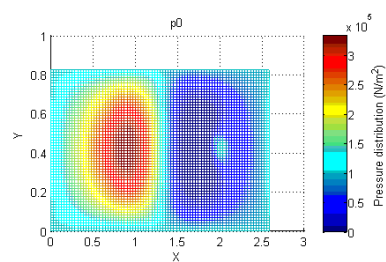


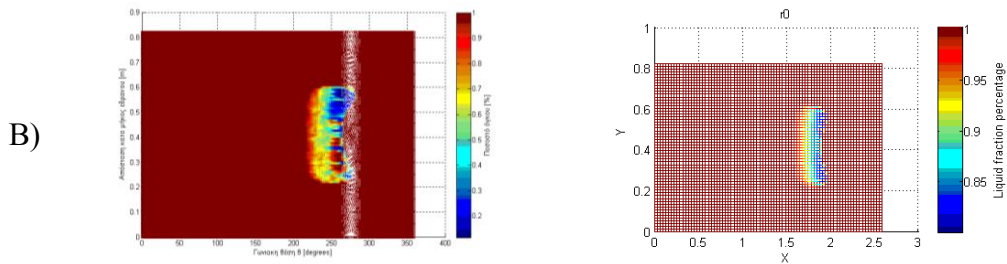
Εικόνα 6-31: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διαμητρικών τάσεων, Γ) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, και Δ) περιοχής έναρξης φαινομένου σπηλαίωσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.3$

Εξισώσεις Navier Stokes

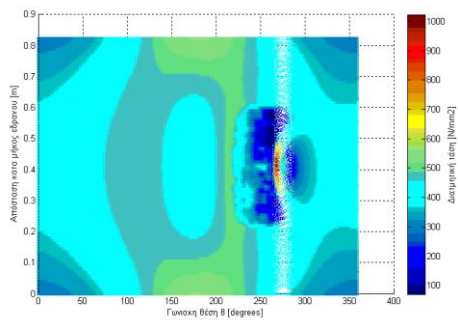


Αλγόριθμος Elrod





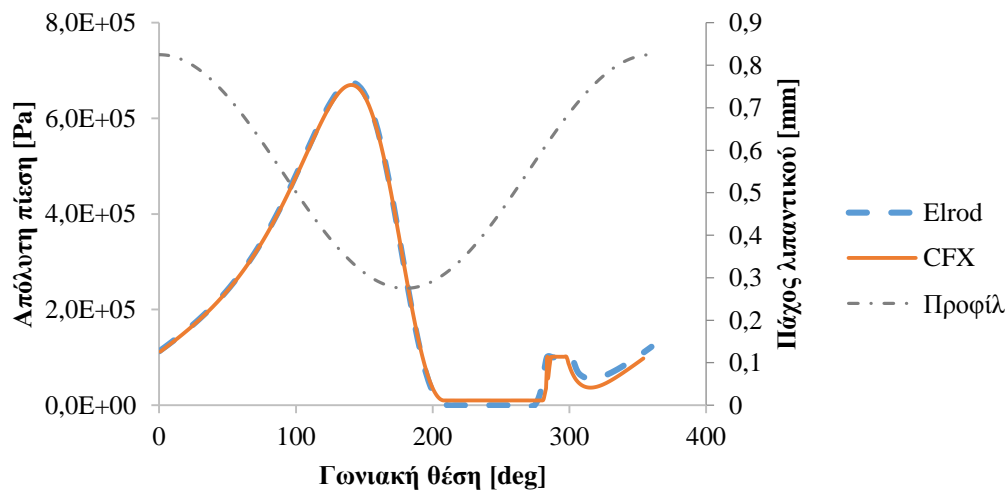
Εικόνα 6-32: Σύγκριση κατανομής A) πίεσης και B) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=1$ και $\epsilon=0.3$.



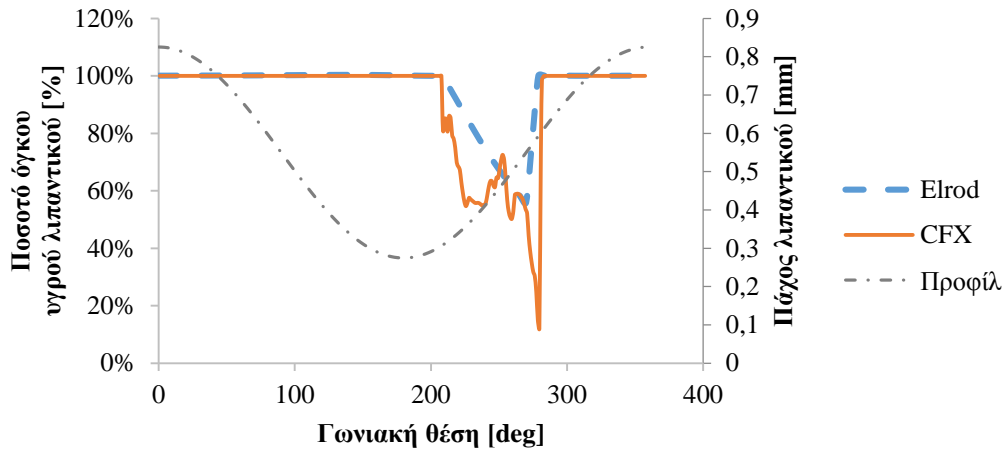
Εικόνα 6-33: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=1$ και $\epsilon=0.3$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes.

6.3.7 Περίπτωση $L/D=1$ και $\epsilon=0.5$

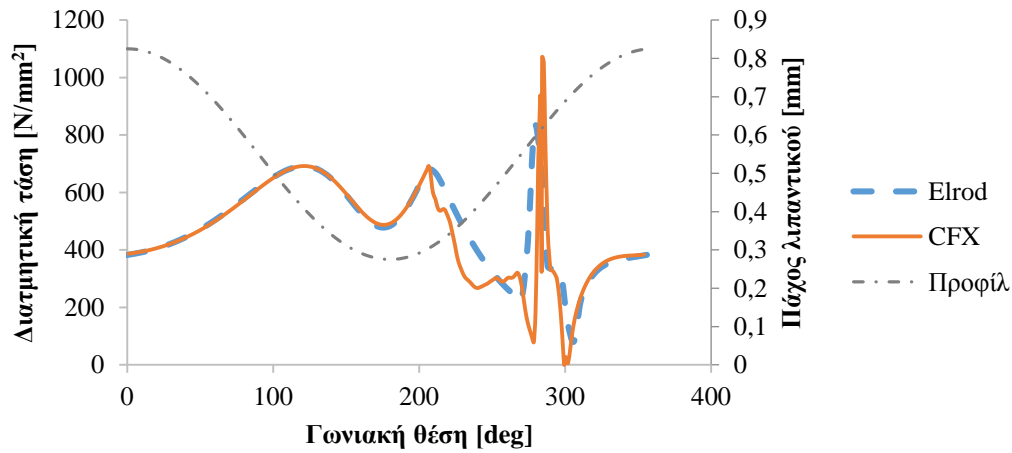
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους σπηλαίωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\epsilon=0.5$



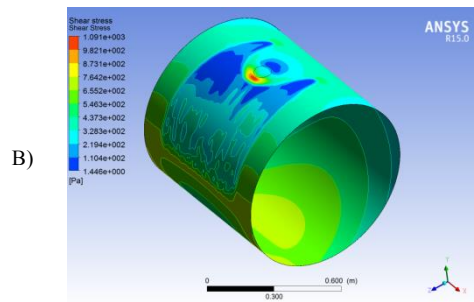
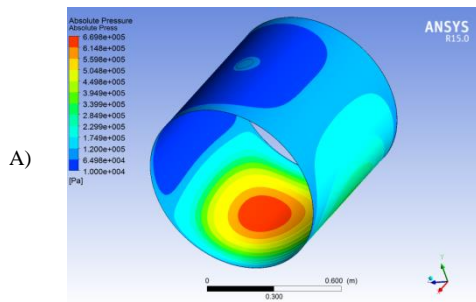
Εικόνα 6-34: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\epsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

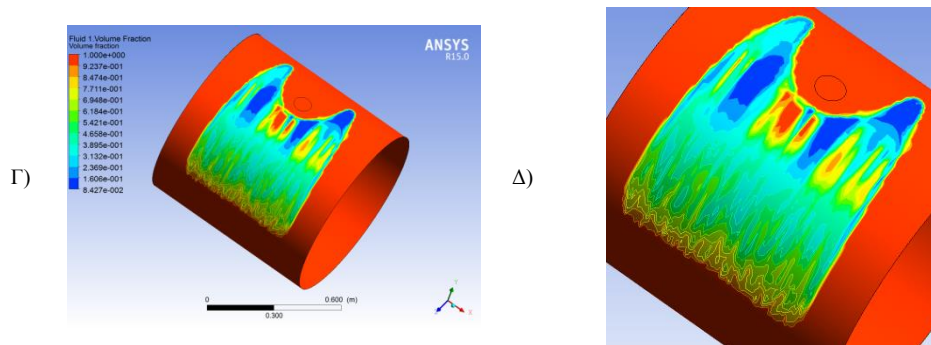


Εικόνα 6-35: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

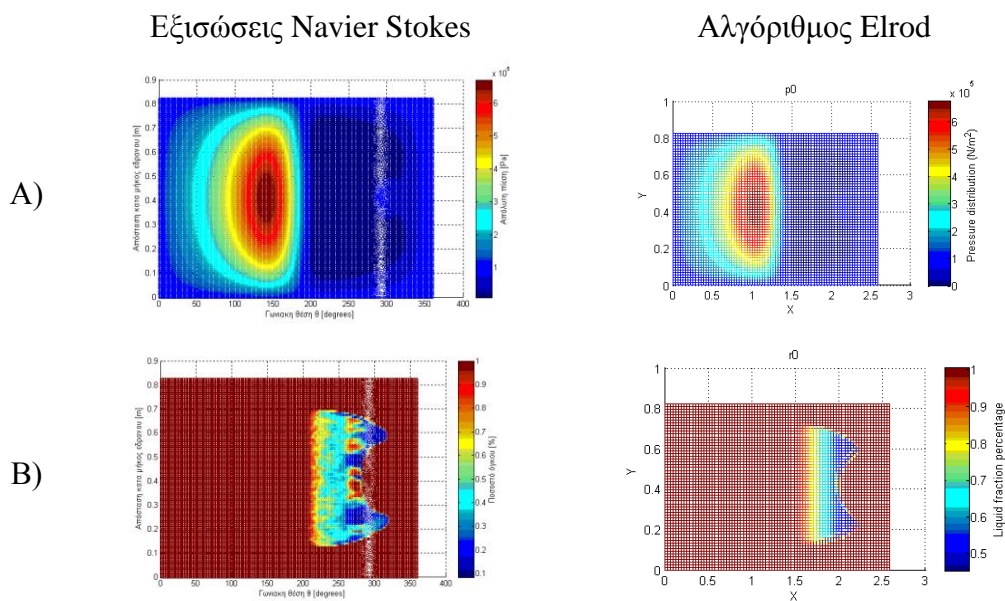


Εικόνα 6-36: Υπολογισθείσα συνισταμένη διαμητητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

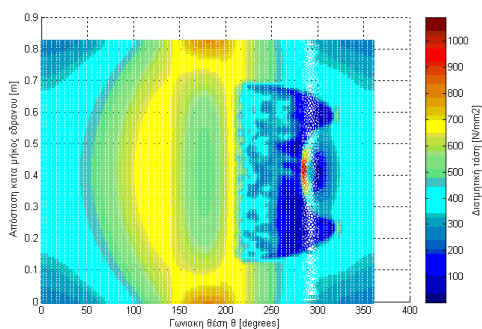




Εικόνα 6-37: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διαμητικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλαίωσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.5$



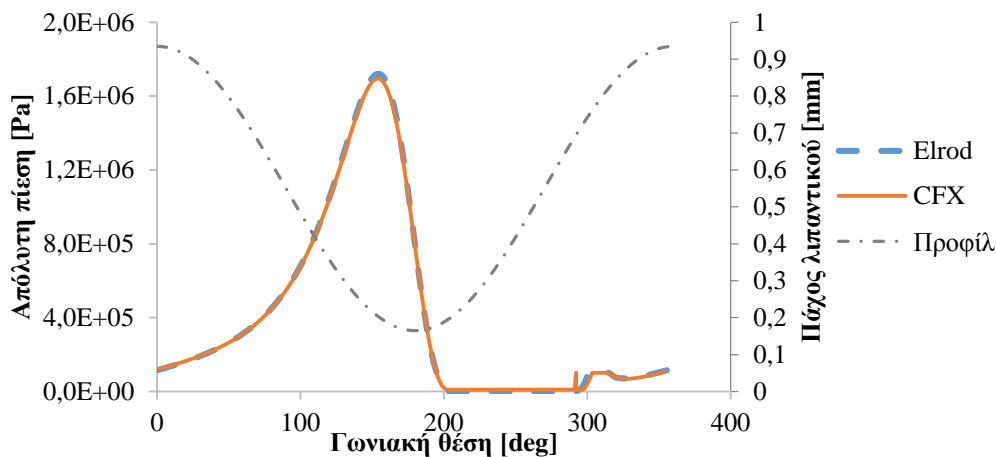
Εικόνα 6-38: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.5$.



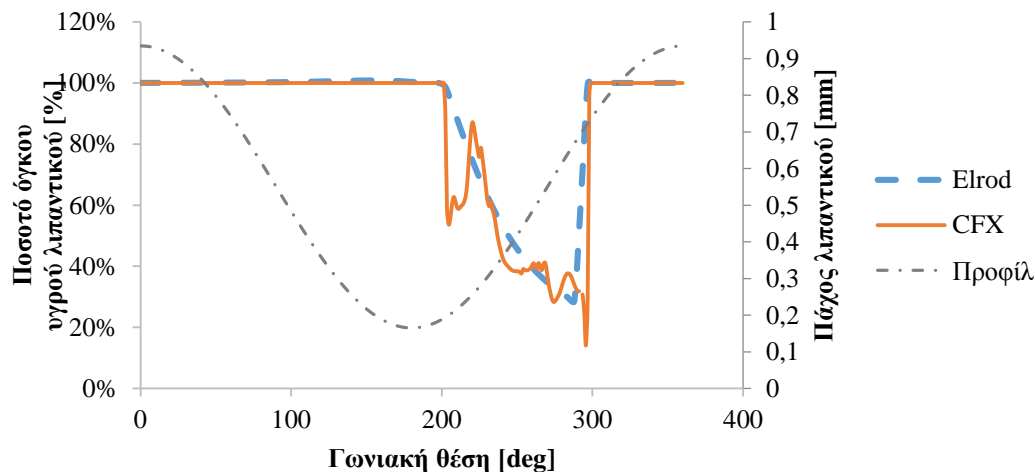
Εικόνα 6-39: Κατανομή διαμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes.

6.3.8 Περίπτωση $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$

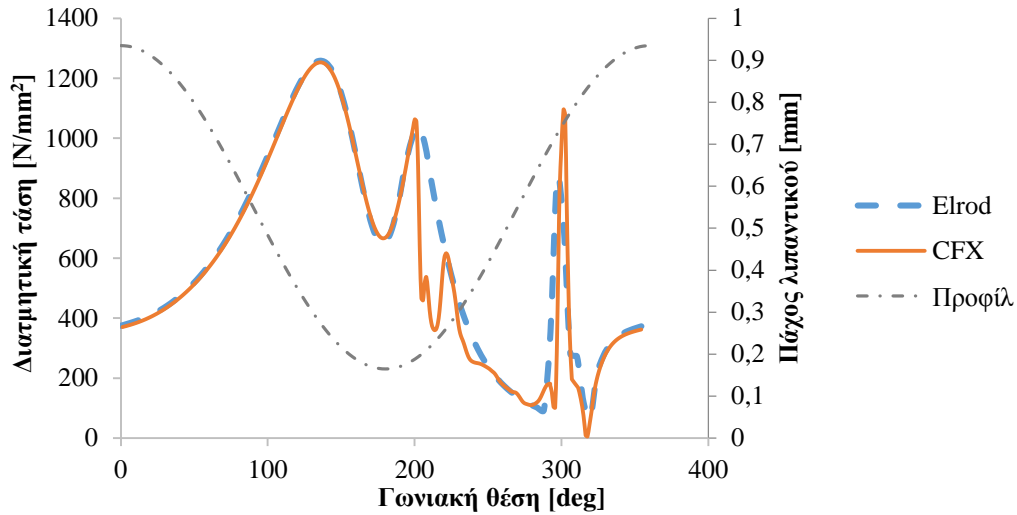
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους σπηλαίωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$



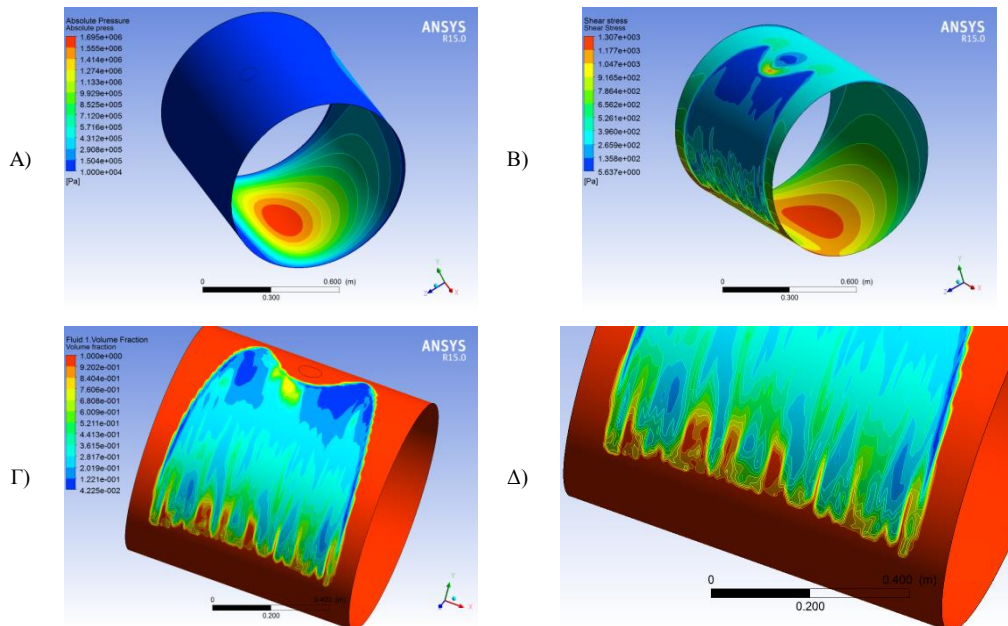
Εικόνα 6-40: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.



Εικόνα 6-41: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

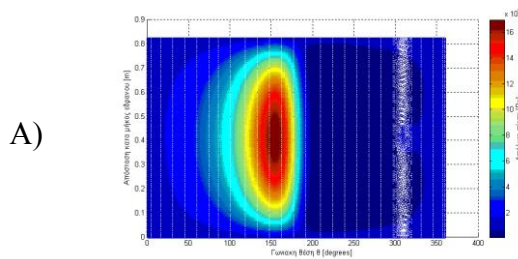


Εικόνα 6-42: Υπολογισθείσα συνισταμένη διαμητρική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

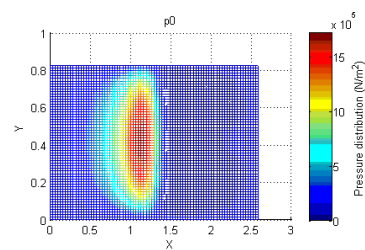


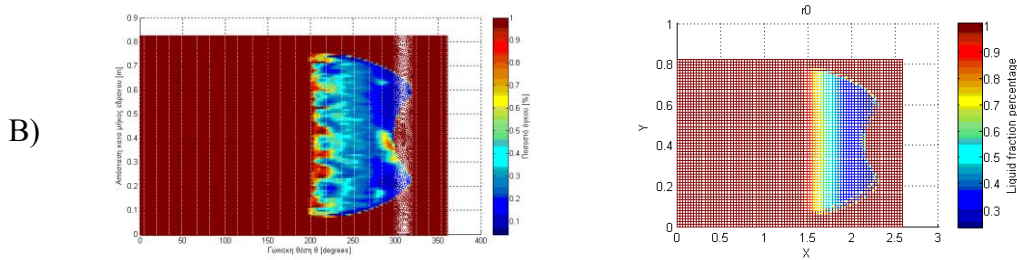
Εικόνα 6-43: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διαμητρικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλαίωσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$

Εξισώσεις Navier Stokes

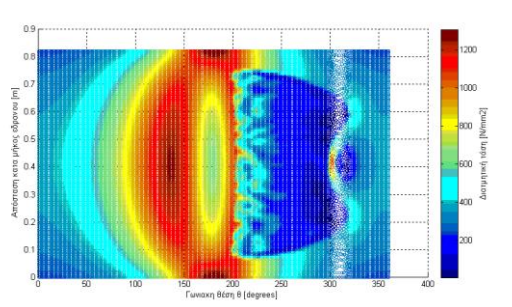


Αλγόριθμος Elrod





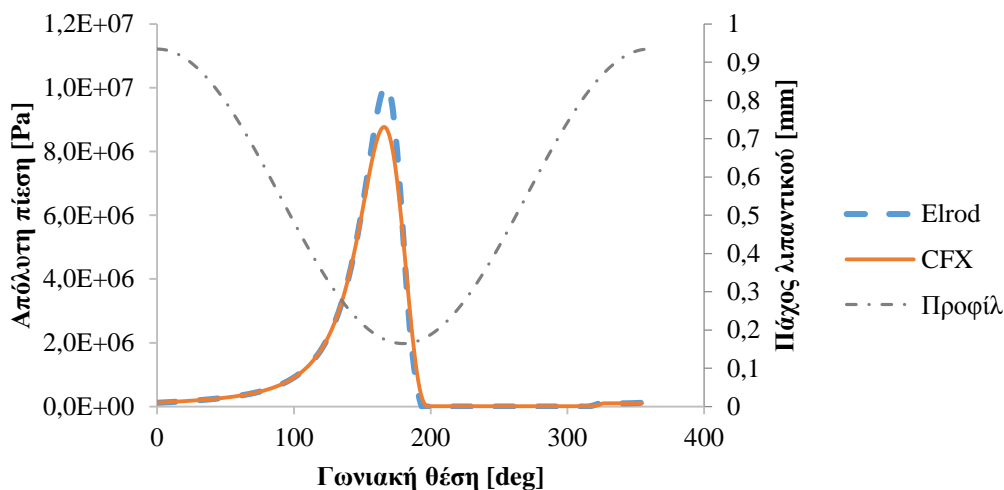
Εικόνα 6-44: Σύγκριση κατανομής A) πίεσης και B) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$.



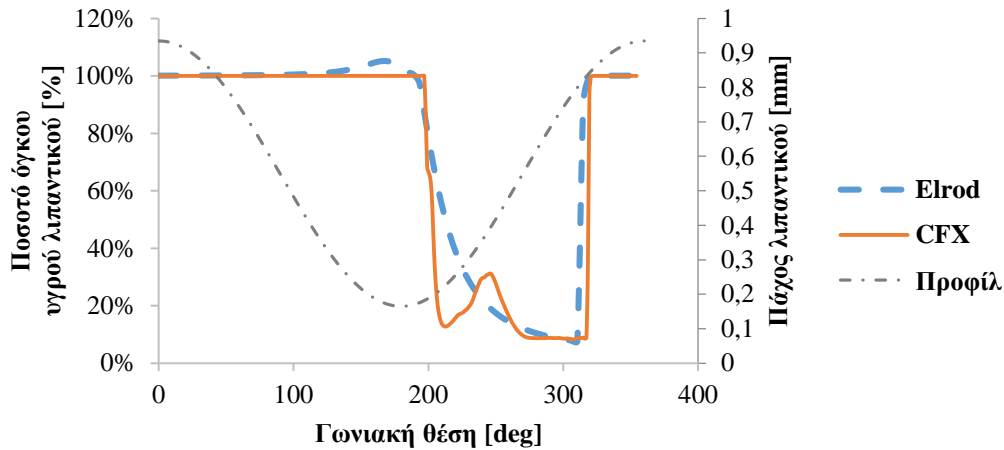
Εικόνα 6-45: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.3$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes.

6.3.9 Περίπτωση $L/D=1$ και $\varepsilon=0.9$

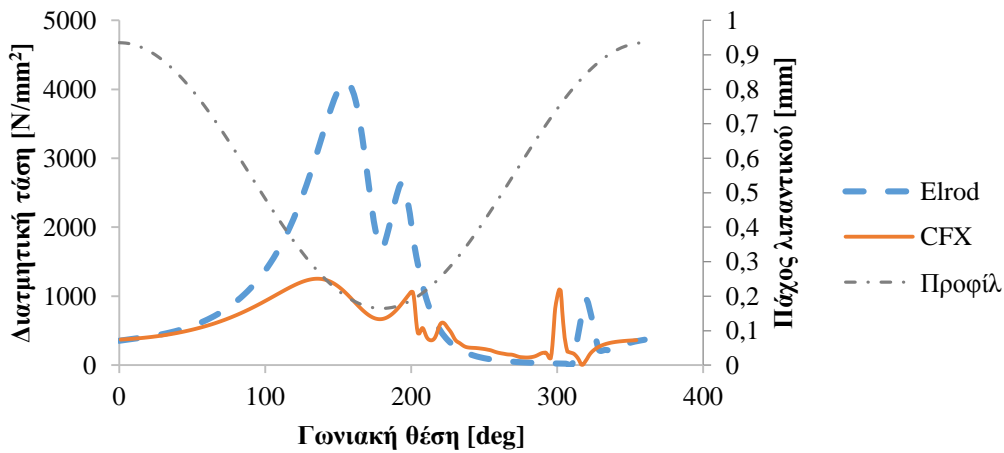
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους σπηλαίωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\varepsilon=0.9$



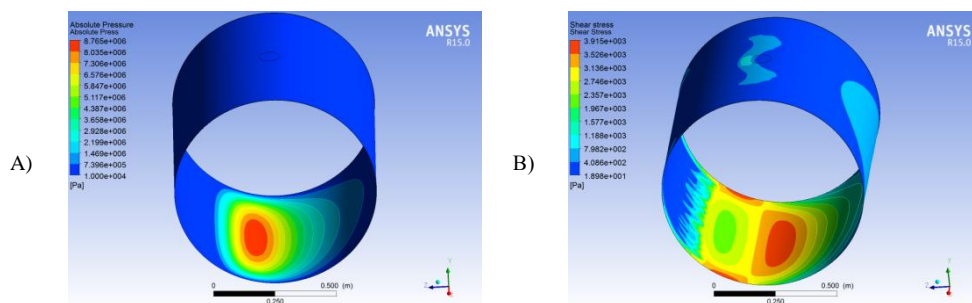
Εικόνα 6-46: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

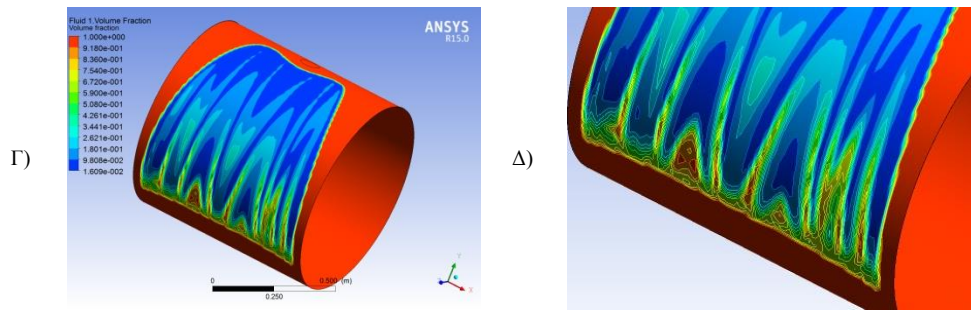


Εικόνα 6-47: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

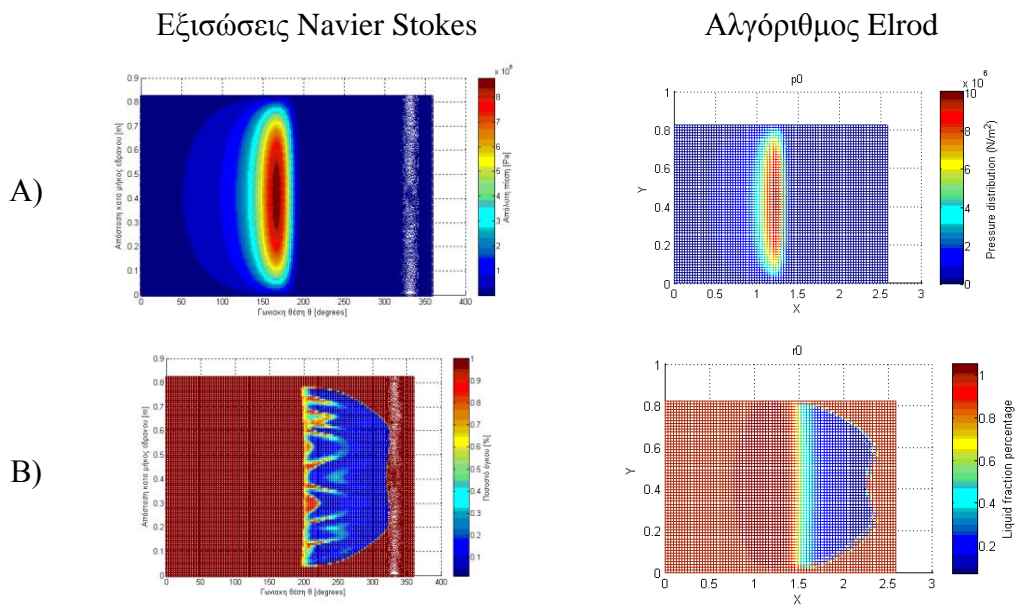


Εικόνα 6-48: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

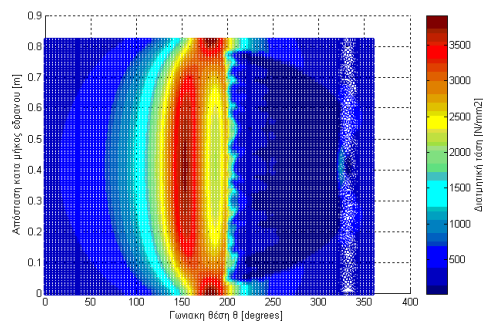




Εικόνα 6-49: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διαμηθικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλαίωσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.9$



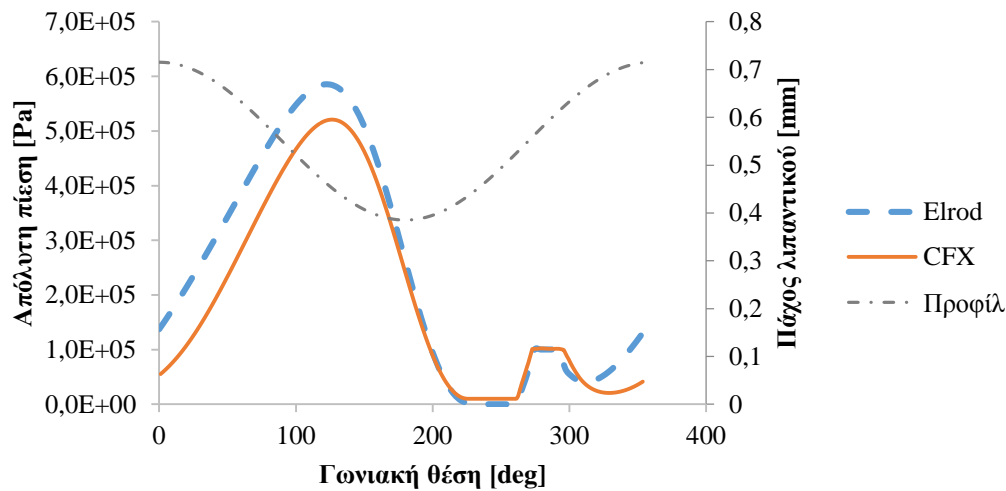
Εικόνα 6-50: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=1$ και $\varepsilon=0.9$.



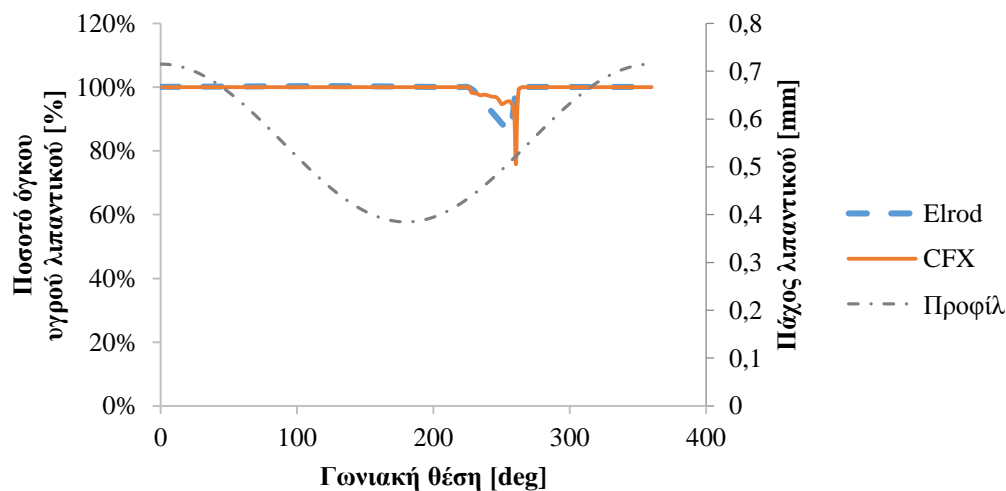
Εικόνα 6-51: Κατανομή διαμηθικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes.

6.3.10 Περίπτωση $L/D=2$ και $\varepsilon=0.3$

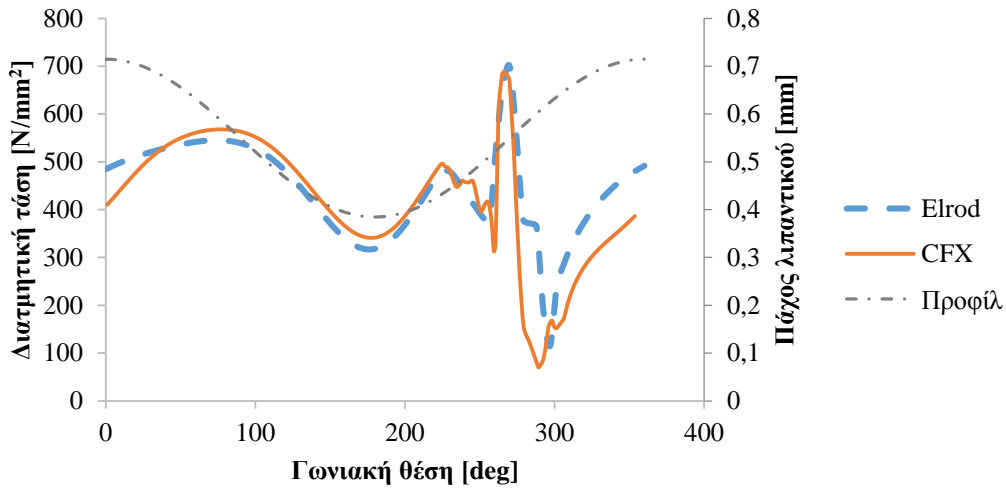
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους σπηλαίωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=2$ και $\varepsilon=0.3$



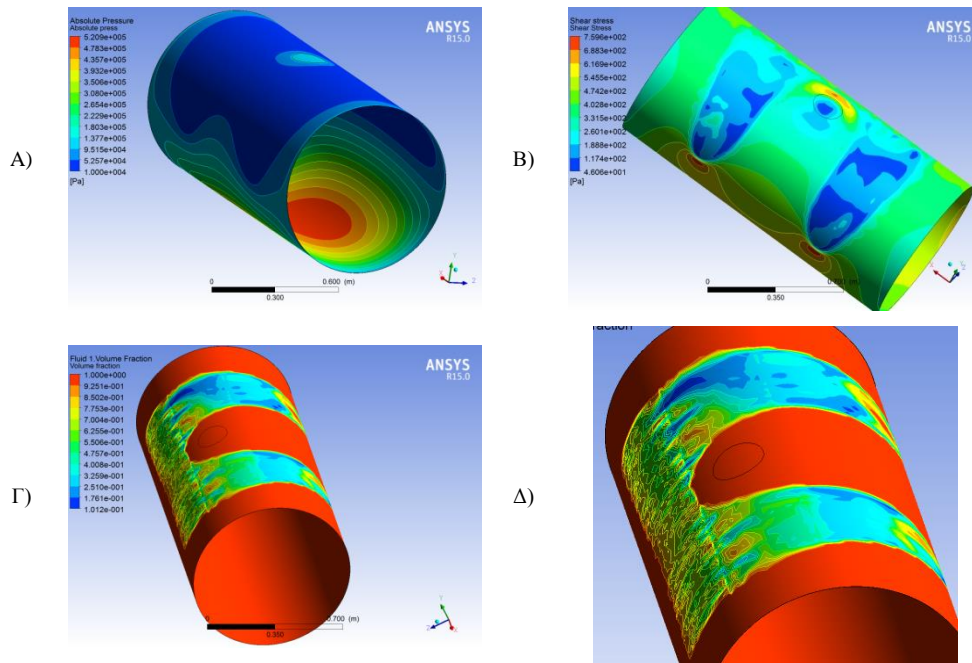
Εικόνα 6-52: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.



Εικόνα 6-53: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

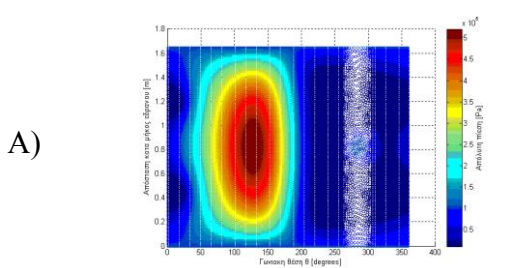


Εικόνα 6-54: Υπολογισθείσα συνισταμένη διαμητρική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.3$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

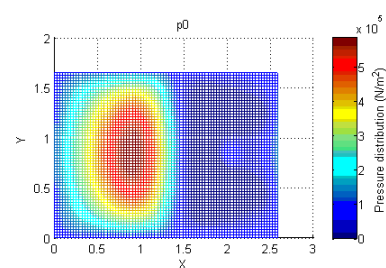


Εικόνα 6-55: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διαμητρικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλαιώσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.3$

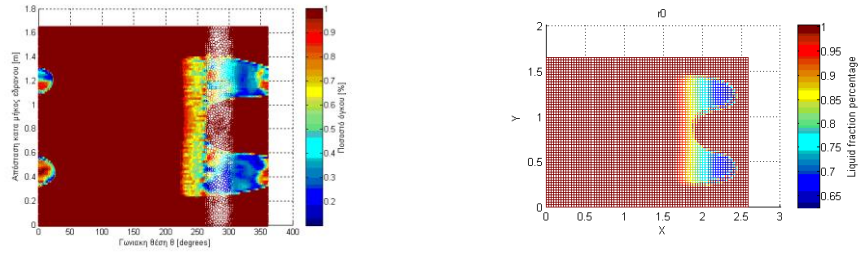
Εξισώσεις Navier Stokes



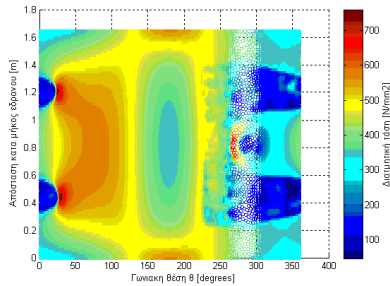
Αλγόριθμος Elrod



B)



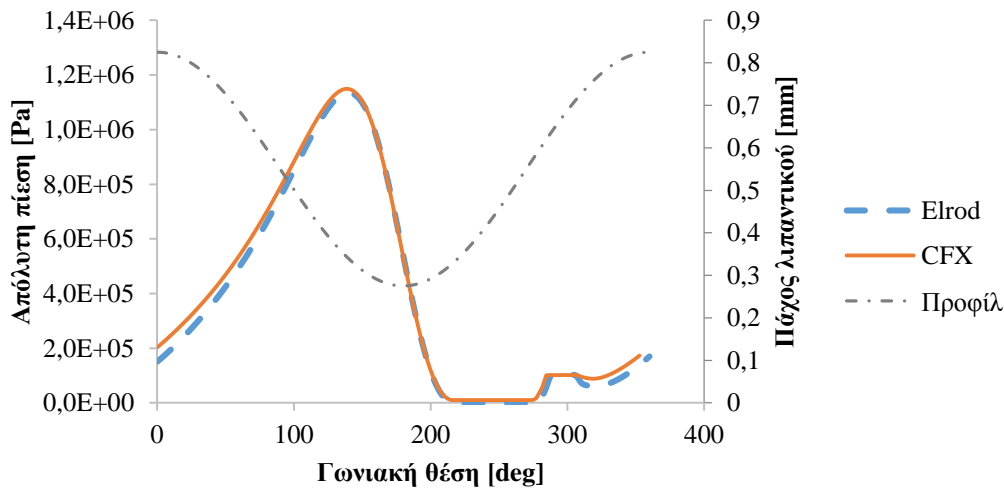
Εικόνα 6-56: Σύγκριση κατανομής A) πίεσης και B) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.3$.



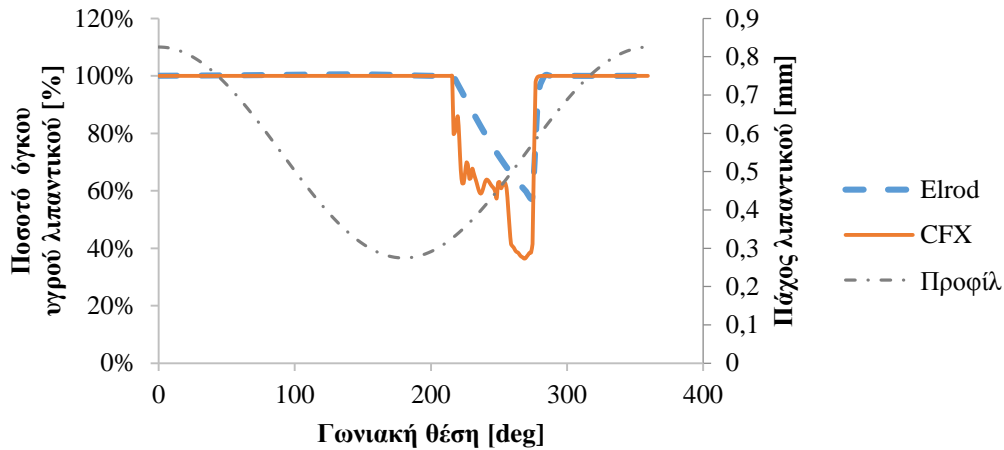
Εικόνα 6-57: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.3$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes.

6.3.11 Περίπτωση $L/D=2$ και $\varepsilon=0.5$

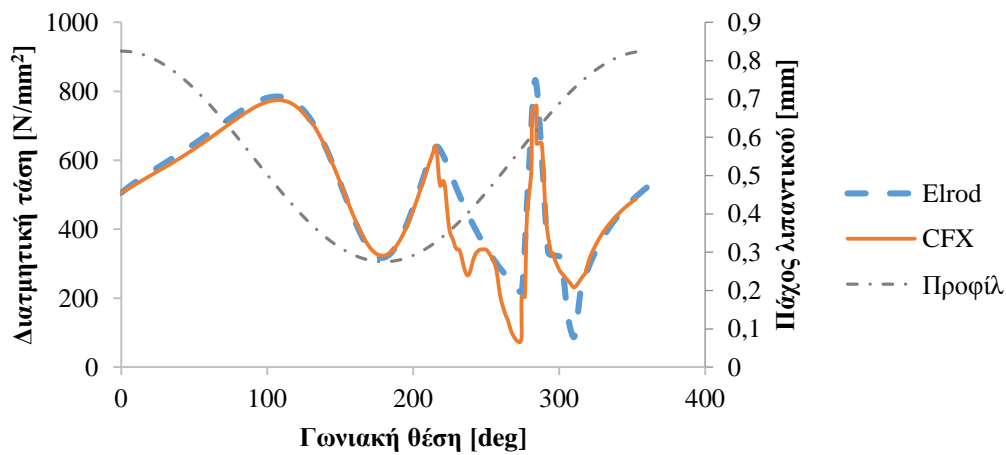
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους σπηλαίωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=2$ και $\varepsilon=0.5$



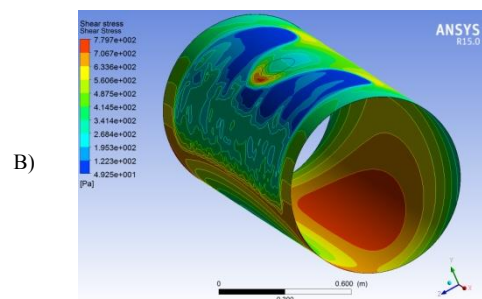
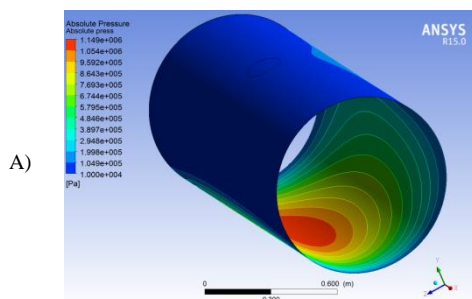
Εικόνα 6-58: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

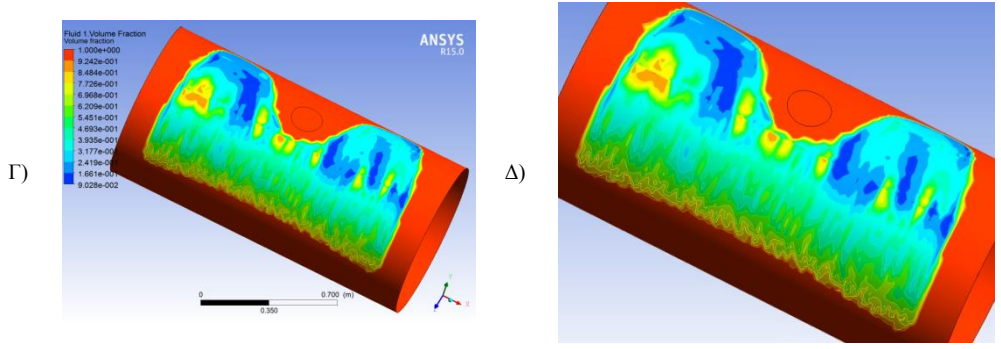


Εικόνα 6-59: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

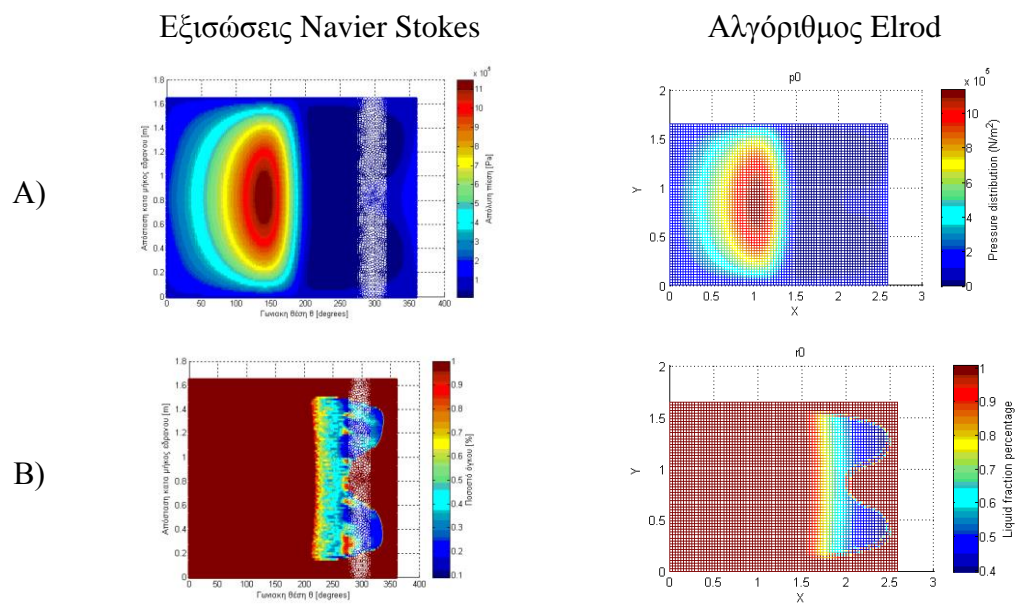


Εικόνα 6-60: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.5$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

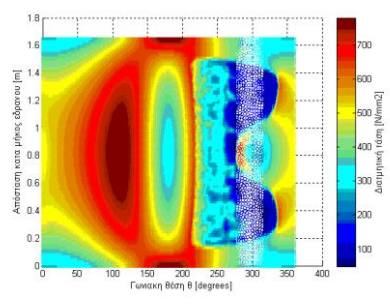




Εικόνα 6-61: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διαμητικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλαίωσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.5$



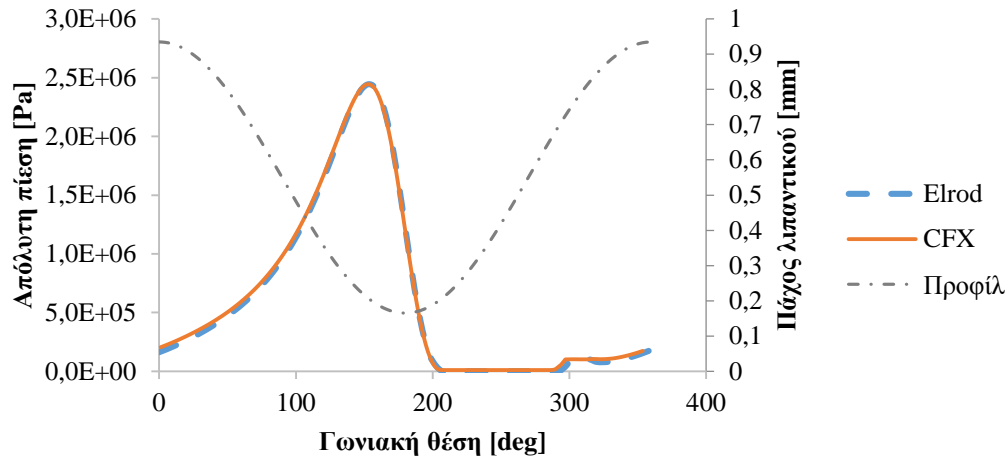
Εικόνα 6-62: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.5$.



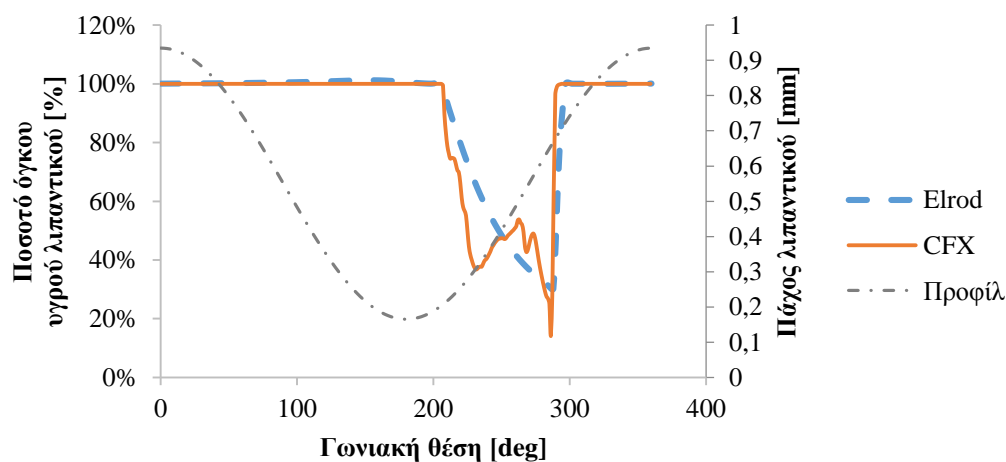
Εικόνα 6-63: Κατανομή διαμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.5$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes.

6.3.12 Περίπτωση $L/D=2$ και $\varepsilon=0.7$

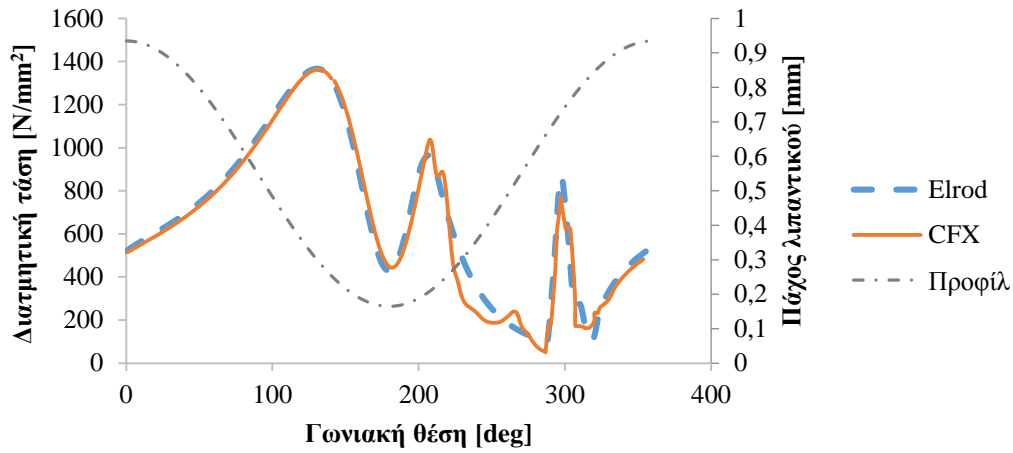
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους σπηλαιοίωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=2$ και $\varepsilon=0.7$



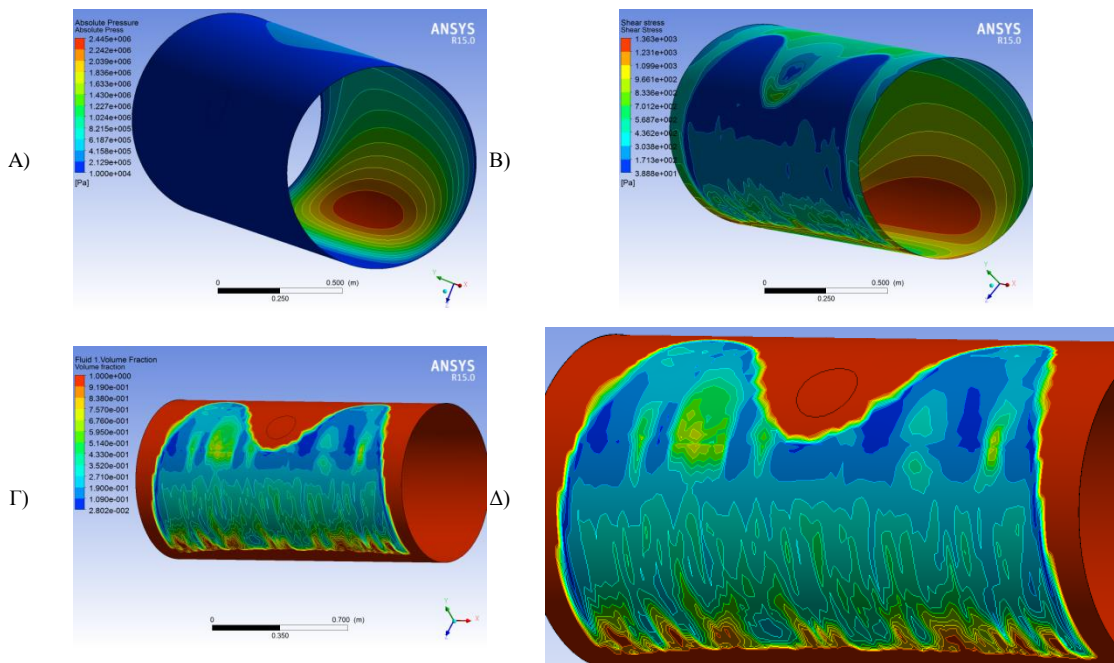
Εικόνα 6-64: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.



Εικόνα 6-65: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

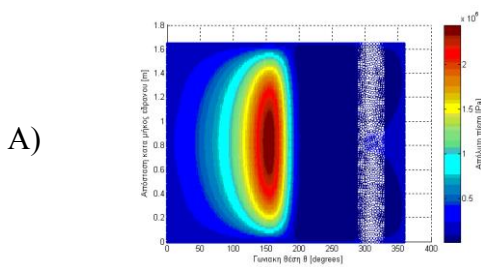


Εικόνα 6-66: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.7$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

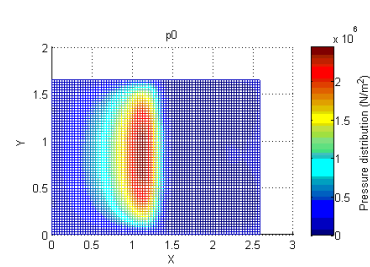


Εικόνα 6-67: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διατμητικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπληαίωσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.7$.

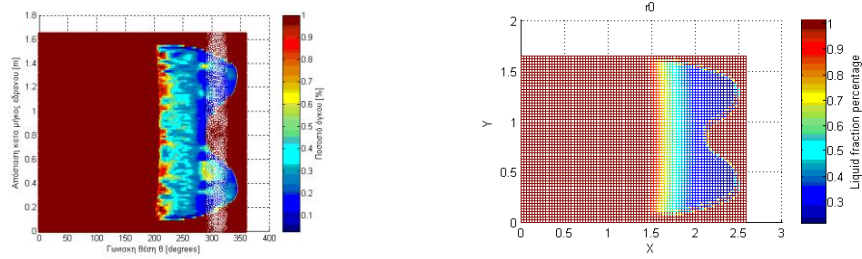
Εξισώσεις Navier Stokes



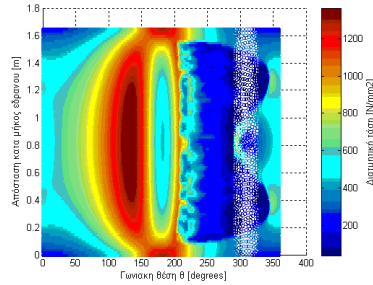
Αλγόριθμος Elrod



B)



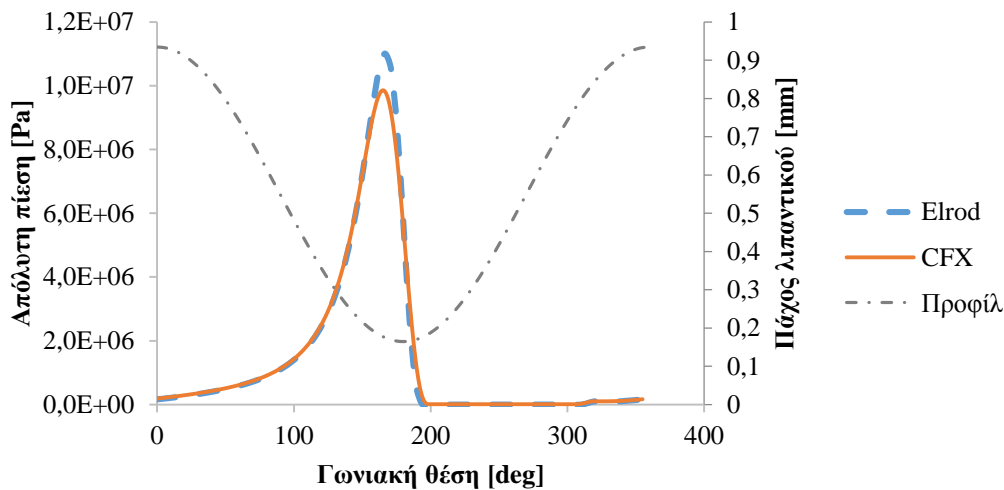
Εικόνα 6-68: Σύγκριση κατανομής A) πίεσης και B) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.7$.



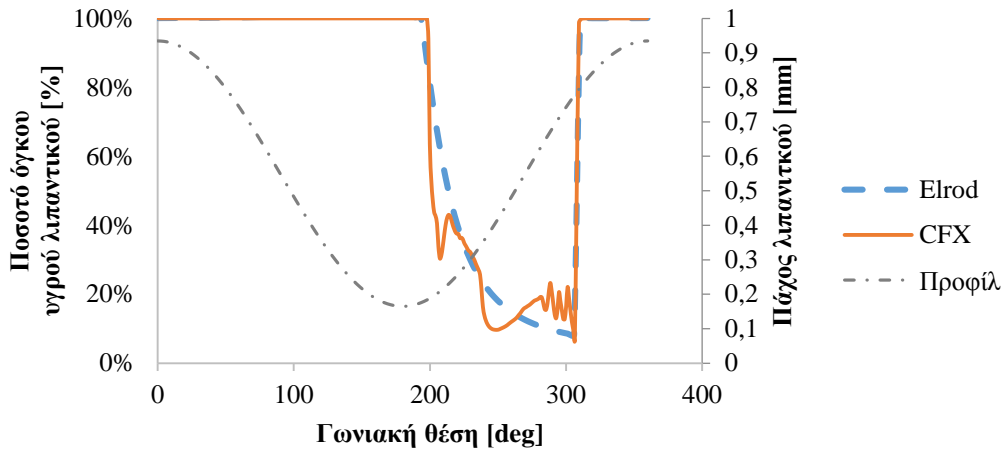
Εικόνα 6-69: Κατανομή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.7$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes.

6.3.13 Περίπτωση $L/D=2$ και $\varepsilon=0.9$

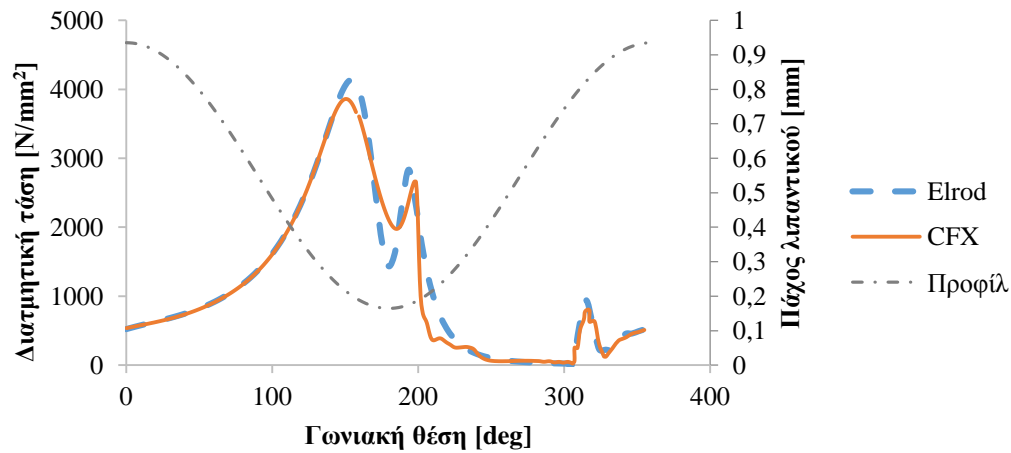
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους σπηλαίωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=2$ και $\varepsilon=0.9$



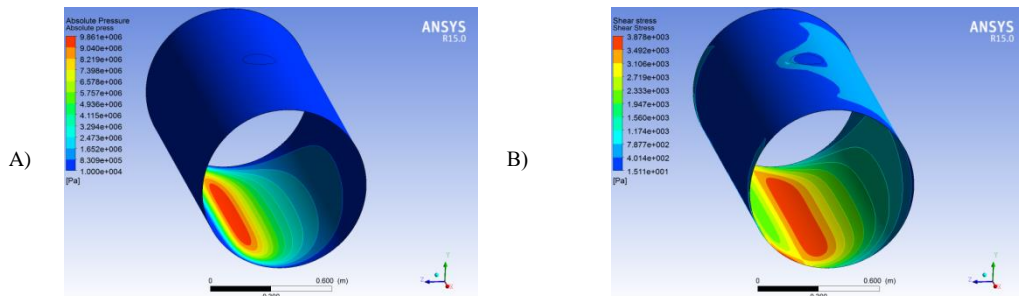
Εικόνα 6-70: Υπολογισθείσα απόλυτη πίεση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

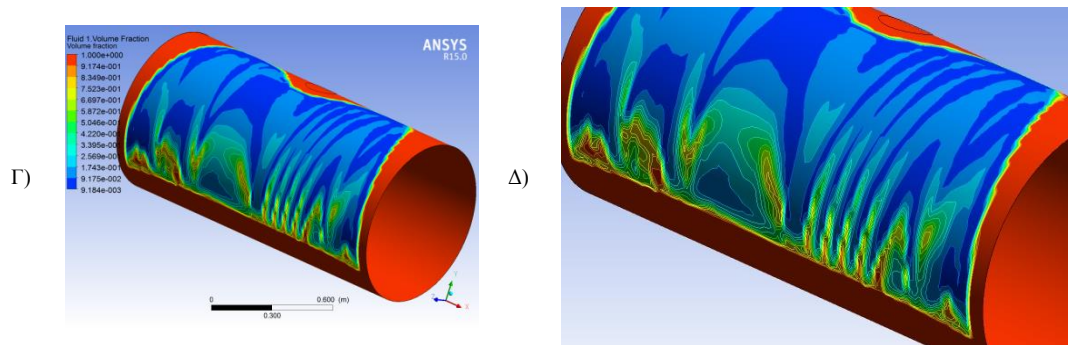


Εικόνα 6-71: Υπολογισθέν ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

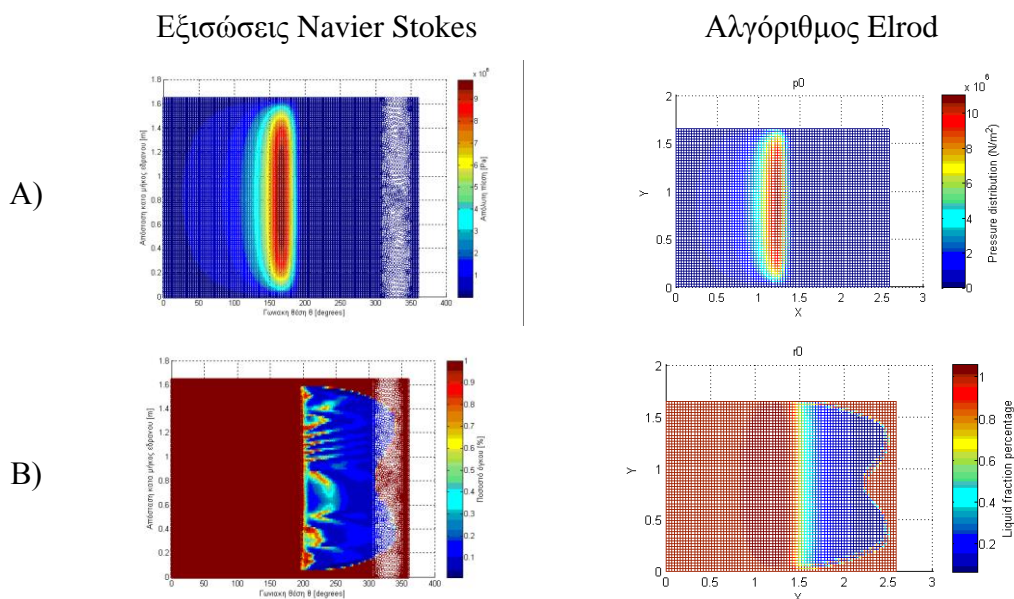


Εικόνα 6-72: Υπολογισθείσα συνισταμένη διατμητική τάση συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και χρήση του αλγορίθμου Elrod, για $L/D=2$ και $\varepsilon=0.9$. Στην Εικόνα παρίσταται επίσης το προφίλ του πάχους του λιπαντικού φιλμ συναρτήσει της γωνιακής θέσης στο μέσο του εδράνου.

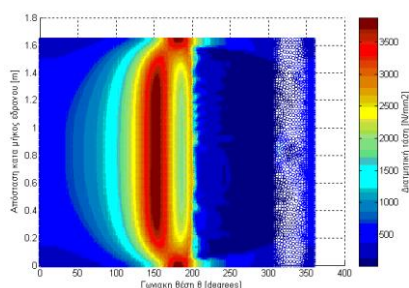




Εικόνα 6-73: Τρισδιάστατη απεικόνιση Α) απόλυτης πίεσης, Β) διαμηθικών τάσεων, Γ) ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού και Δ) περιοχή έναρξης φαινομένου σπηλαίωσης στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=2$ και $\epsilon=0.9$



Εικόνα 6-74: Σύγκριση κατανομής Α) πίεσης και Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού μεταξύ αποτελεσμάτων επίλυσης εξισώσεων Navier-Stokes και αλγορίθμου Elrod για $L/D=2$ και $\epsilon=0.9$.



Εικόνα 6-75: Κατανομή διαμηθικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα για $L/D=2$ και $\epsilon=0.9$ βάσει επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes.

6.4 Συμπεράσματα

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα και στις τρισδιάστατες απεικονίσεις της ενότητας 6.3, τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης με χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και του αλγορίθμου Elrod συγκλίνουν αρκετά ικανοποιητικά. Συγκεκριμένα, το πεδίο της πίεσης που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του εδράνου είναι σχεδόν πανομοιότυπο με το πεδίο πίεσης που υπολογίζεται από τον αλγόριθμο

του Elrod. Η ανάλυση των γραφημάτων απόλυτης πίεσης αναδεικνύει τη μεταβολή της πίεσης λόγω της συγκλίνουσας-αποκλίνουσας γεωμετρίας του εδράνου. Στην περιοχή που βρίσκεται η οπή εισαγωγής του λιπαντικού, η πίεση είναι σταθερή και ισούται με την πίεση εισαγωγής. Μικρές διαφορές που υπάρχουν στο εύρος που καλύπτει η πίεση στο σημείο παροχής, οφείλονται στην ελαφρώς διαφορετική γεωμετρία της μορφής εισόδου του λιπαντικού μέσα στο έδρανο, καθώς στο μοντέλο που αναλύθηκε με το υπολογιστικό πακέτο ANSYS-CFX η οπή είναι κυκλικής μορφής, ενώ στο μοντέλο του αλγορίθμου του Elrod η οπή είναι ορθογωνικής μορφής.

Η ελάχιστη πίεση των κατανομών πίεσης είναι η πίεση ατμοποίησης, όπως αναμενόταν. Για πιέσεις μικρότερης της πίεσης ατμοποίησης, το υγρό ατμοποιείται, και στη συγκεκριμένη περιοχή αναπτύσσεται το φαινόμενο της σπηλαιώσης λόγω εξάτμισης του υγρού. Η κλίση της καμπύλης απόλυτης πίεσης και η μέγιστη τιμή της κατανομής πίεσης μεταξύ των δύο μεθόδων ταυτίζονται πλήρως για τις αδιάστατες τιμές εκκεντρότητας $\varepsilon = 0.3, 0.5$ και 0.7 . Όταν όμως η εκκεντρότητα αυξάνεται ($\varepsilon = 0.9$), υπάρχει αδυναμία προσέγγισης της μέγιστης τιμής της απόλυτης πίεσης από το λογισμικό ANSYS-CFX. Πιθανή αιτία για τη συγκεκριμένη απόκλιση είναι ο αριθμός των κόμβων που χρησιμοποιήθηκε κατά την περιφέρεια του εδράνου και ο οποίος θα έπρεπε να αυξηθεί ώστε να υπολογιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η αύξηση της κλίσης μεταβολής της πίεσης σε τιμές μεγάλης εκκεντρότητας.

Ειδική αναφορά θα πρέπει να γίνει στο προφίλ της πίεσης για την περίπτωση $L/D=2$ και $\varepsilon=0.3$ όπου διαπιστώνεται ότι η κατανομή της πίεσης που υπολογίζεται από το λογισμικό ANSYS-CFX, διαφέρει από την αντίστοιχη κατανομή του αλγορίθμου Elrod. Συγκεκριμένα η πίεση σε όλη την επιφάνεια του άξονα είναι μικρότερη κατά $\sim 10\%$, ακολουθώντας όμως παράλληλα το προφίλ της πίεσης που δίνει ο αλγόριθμος, τόσο στην περιοχή όπου εμφανίζεται το φαινόμενο της σπηλαιώσης, όσο και στη γωνία όπου συναντάται η μέγιστη πίεση. Η απόκλιση αυτή πιθανώς να οφείλεται στην αδυναμία της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής να περιγράψει το ροϊκό πεδίο για μικρούς λόγους εκκεντρότητας σε έδρανα με μεγάλο λόγο μήκους προς διάμετρο και τα οποία διαθέτουν μόνο μία οπή εισαγωγής λιπαντικού, τοποθετημένη στο μέσο του εδράνου.

Ήδη από τα διαγράμματα της απόλυτης πίεσης, είναι εμφανής η περιοχή όπου θα υπάρχει σπηλαιώση κατά την περιφέρεια του εδράνου. Το φαινόμενο της σπηλαιώσης εμφανίζεται σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από την περίπτωση $L/D=0.5$ και $\varepsilon=0.3$ κατά την οποία η πίεση στην περιφέρεια του άξονα είναι πάντα μεγαλύτερη από την πίεση ατμοποίησης που είχε οριστεί για το συγκεκριμένο λιπαντικό.

Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, καθώς το λιπαντικό εισέρχεται στην περιοχή της σπηλαιώσης, δηλαδή για γωνίες όπου η πίεση αναμένεται να είναι χαμηλότερη από την πίεση ατμοποίησης, το λιπαντικό εξατμίζεται, μειώνοντας το ποσοστό όγκου υγρού λιπαντικού. Για την εκτίμηση του ποσοστού όγκου του υγρού που ατμοποιείται στην περιοχή της σπηλαιώσης γίνεται το αντίστοιχο γράφημα σε συνάρτηση με τη γωνιακή θέση του εδράνου. Καί στις δύο μεθόδους προσομοίωσης, υπολογίζεται ο μέσος όρος του ποσοστού του λιπαντικού που υπάρχει σε όλο το πάχος του φιλμ για κάθε γωνία θ . Σύμφωνα με την κατανομή του ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, μετά από τη γωνία όπου υπάρχει το ελάχιστο πάχος του φιλμ του λιπαντικού, ξεκινά η ατμοποίηση του υγρού. Κατά τη διάρκεια του φαινομένου της σπηλαιώσης, η ατμοποίηση ξεκινά

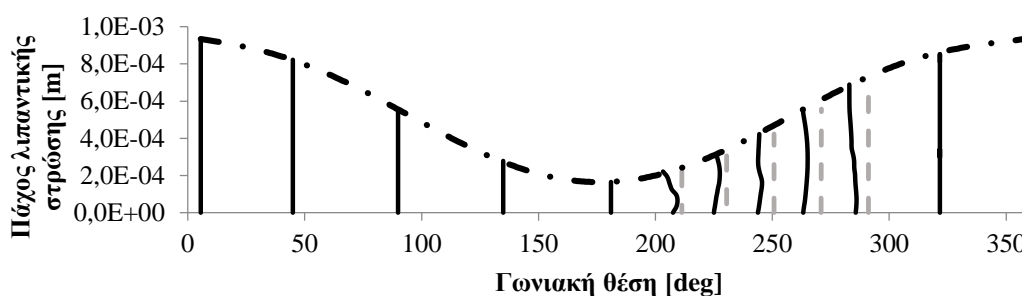
ομαλά. Ταυτόχρονα, όπως φαίνεται και από τις τρισδιάστατες απεικονίσεις του εδράνου, δημιουργούνται κανάλια όπου ρέει το λιπαντικό εντός της ζώνης ατμοποίησης. Η διεύθυνση ροής αυτών των καναλιών είναι παράλληλη προς τη ταχύτητα περιστροφής του υγρού λιπαντικού.

Σε όλες τις περιπτώσεις, η περιοχή της σπηλαιώσης διακόπτεται πριν την οπή εισαγωγής του λιπαντικού, λόγω της εισόδου υγρού λιπαντικού μέσα στο έδρανο. Καθώς το μήκος του άξονα αυξάνεται, η ζώνη της σπηλαιώσης επεκτείνεται και μετά τη γωνιακή θέση της οπής εισόδου για τομές κατά το μήκος του εδράνου, μακριά από την οπή εισαγωγής του λιπαντικού. Αυτό γίνεται εμφανές κυρίως για υψηλού λόγους μήκους προς διάμετρο του εδράνου ($L/D=2$) όπου υπάρχουν ατμοί σε περιοχές που βρίσκονται αρκετά μετά από τη γωνιακή θέση εισόδου του λιπαντικού. Ο τρόπος αντιμετώπισης αυτού του φαινομένου είναι είτε η χρήση περισσότερων οπών, ώστε να αποκαταστήσουν τη ροή στα συγκεκριμένα σημεία, είτε η χρήση άλλης γεωμετρίας οπής εισαγωγής λιπαντικού (π.χ. κάποιου ορθογώνιου καναλιού).

Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους που εφαρμόστηκαν, το γράφημα που προκύπτει από τον αλγόριθμο του Elrod έχει ομαλή μορφή ενώ το αντίστοιχο γράφημα που προκύπτει από τα αποτελέσματα του λογισμικού ANSYS-CFX παρουσιάζει να έχει μία διακύμανση, ακολουθώντας όμως την μεταβολή του ποσοστού υγρού λιπαντικού όπως αυτή υπολογίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο του Elrod. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται κυρίως στη τρισδιάστατη λύση του προβλήματος, καθώς οι πραγματικές συνθήκες ροής και εξάτμισης του υγρού λιπαντικού προσομοιώνονται όσο το δυνατό καλύτερα. Όπως διατυπώθηκε και στη θεωρία, μέσα στην περιοχή της σπηλαιώσης υπάρχουν μερικές περιοχές όπου υπάρχει λιπαντικό σε υγρή μορφή, δημιουργώντας κανάλια κυκλοφορίας υγρού λιπαντικού (streaks), φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί στην πραγματικότητα μέσω πειραμάτων. Κατά συνέπεια, η προσομοίωση με το λογισμικό ANSYS-CFX αναπαριστά τη ρεαλιστική κατανομή του υγρού λιπαντικού εντός της περιοχής σπηλαιώσης, αποδεικνύοντας ότι η εξάτμιση του υγρού λιπαντικού δεν είναι τόσο ομαλή όσο υπολογίζεται από τον αλγόριθμο του Elrod, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με τα κανάλια κυκλοφορίας που δημιουργούνται στην περιοχή ατμοποίησης.

Σε πολλά από τα σημεία της προσομοίωσης παρατηρείται ακόμα ότι το ποσοστό του λιπαντικού σε υγρή μορφή είναι χαμηλότερο από αυτό που προβλέπεται κατά τον Elrod, ενώ σε μερικές περιπτώσεις, η περιοχή ατμοποίησης του υγρού λιπαντικού είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη περιοχή που προβλέπεται από τον αλγόριθμο του Elrod. Οι συγκεκριμένες αποκλίσεις οφείλονται κυρίως στο τρόπο επίλυσης του προβλήματος. Ο αλγόριθμος Elrod, όπως αναφέρθηκε, επιλύει το δισδιάστατο πρόβλημα της ροής κατά την περιφέρεια του άξονα, χρησιμοποιώντας μικρότερο αριθμό κόμβων για την ικανοποιητική λύση του προβλήματος. Αντίθετα, η τρισδιάστατη επίλυση του προβλήματος στο λογισμικό ANSYS-CFX δίνει καλύτερη αναπαράσταση η αναπαράσταση της κυκλοφορίας του λιπαντικού στην περιοχή της σπηλαιώσης, με το μειονέκτημα της χρήσης μεγαλύτερου αριθμού κόμβου και υψηλότερου υπολογιστικού κόστους.

Καθ' όλη την περιοχή της σπηλαιώση, το λιπαντικό υπάρχει τόσο σε υγρή όσο και σε αέρια φάση. Καλύτερη απεικόνιση της ροής της υγρής και της αέριας φάσης του λιπαντικού κατά την περιφέρεια του λιπαντικού στο μέσο του μήκους του εδράνου δίνεται στην Εικόνα 6-76. Καθώς το λιπαντικό κινείται στο συγκλίνον τμήμα της γεωμετρίας, δεν υπάρχει καθόλου εξάτμιση. Αντίθετα, μόλις το λιπαντικό εισέλθει στην περιοχή που οι επιφάνειες του άξονα και του εδράνου αποκλίνουν, τότε υπάρχει σημαντική μεταβολή του ποσοστού του υγρού λιπαντικού, τόσο κατά την περιφερειακή διεύθυνση, όσο και κατά το πάχος του λιπαντικού. Στην Εικόνα 6-76, με τη διακεκομμένη γκρι γραμμή απεικονίζεται η ιδεατή περίπτωση εάν υπήρχε λιπαντικό σε υγρή μορφή στη συγκεκριμένη θέση, ενώ αριστερά αυτής απεικονίζεται το πραγματικό ποσοστό υγρού λιπαντικού. Παρατηρώντας το γράφημα, καθώς οι επιφάνειες αρχίζουν και αποκλίνουν (200°), ποσότητα ατμού σχηματίζεται κοντά στην επιφάνεια του εδράνου, ενώ στη συνέχεια και καθώς η απόκλιση αυξάνεται (210° - 260°), το ποσοστό των ατμών μετακινείται κοντά στην επιφάνεια του άξονα, μέχρι να υπάρχει πλήρης ανάμειξη της υγρής και της αέριας φάσης (270°). Μετά από αυτή τη θέση, νέες ποσότητες υγρού λιπαντικού εισέρχονται από την οπή εισαγωγής, αυξάνοντας την πίεση και συμπυκνώνοντας τους ατμούς του λιπαντικού που είχαν εμφανιστεί.



Εικόνα 6-76: Μεταβολή της κατανομής του υγρού λιπαντικού κατά το πάχος του φιλμ και κατά την περιφερειακή διεύθυνση, στη μέση τομή του εδράνου με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$.

Τέλος, αναφορικά με τα διαγράμματα των διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του άξονα, αυτά επηρεάζονται κυρίως από τη μεταβολή της πίεσης και του ποσοστού του λιπαντικού σε υγρή μορφή. Όταν υπάρχει μεγάλη απόκλιση στην πίεση τότε, η απόκλιση αυτή γίνεται εμφανής και στο διάγραμμα των τάσεων. Αντίστοιχα, στην περιοχή όπου υπάρχουν ατμοί λιπαντικού, το διάγραμμα των τάσεων εμφανίζει διακυμάνσεις, ακολουθώντας όμως τη γενικότερη τάση μεταβολής που παρατηρείται βάσει των αποτελεσμάτων του Elrod.

Γενικώς, η σύγκλιση των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού μοντέλου ANSYS-CFX και του αλγορίθμου του Elrod είναι παραπάνω από ικανοποιητική. Διαφορές που υπάρχουν στη σύγκλιση σε ορισμένες περιπτώσεις οφείλονται κυρίως στη γεωμετρία του μοντέλου που επιλέχθηκε και στον αριθμό των κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν για την αριθμητική επίλυση του μοντέλου στο CFX. Η σύγκλιση των προφίλ της πίεσης, του ποσοστού υγρής φάσης του λιπαντικού και των διατμητικών τάσεων επαληθεύεται και από τη σύγκλιση στα μεγέθη λειτουργίας του εδράνου, όπως είναι ο φορτίο και ο αδιάστατος συντελεστής τριβής.

7 Υπολογιστική προσομοίωση αέριας και ατμόδους σπηλαιώσης

7.1 Γενικά

Κατά τη λειτουργία ενός ακτινικού εδράνου, το πεδίο της πίεσης στο λιπαντικό το οποίο διαχωρίζει άξονα και έδρανο μεταβάλλεται. Στις περιοχές που οι επιφάνειες άξονα-εδράνου συγκλίνουν η πίεση αυξάνεται, ενώ, αντίστοιχα, η πίεση μειώνεται στις περιοχές που σχηματίζεται αποκλίνουσα γεωμετρία. Η ανάλυση που διεξήχθη στο κεφάλαιο 6 προσομοιώνει το φαινόμενο της υδροδυναμικής λίπανσης θεωρώντας, ότι δεν υπάρχει καθόλου αέρα εντός του υγρού (λιπαντικού μέσου) αλλά ούτε και στα άκρα αυτού. Λόγω της απουσίας αέρα, το φαινόμενο της σπηλαιώσης οφείλεται αποκλειστικά στην ατμοποίηση του υπάρχοντος λιπαντικού στις περιοχές χαμηλής πίεσης.

Στην πράξη, τα ακτινικά έδρανα δεν είναι συνήθως εμβαπτισμένα σε λιπαντικό έλαιο, επομένως στα άκρα των εδράνων υπάρχει συνήθως αέρας σε ατμοσφαιρική πίεση. Σε περιοχές του εδράνου με υψηλή πίεση του λιπαντικού, το λάδι εξέρχεται από τα άκρα του εδράνου, ενώ σε περιοχές υποπίεσης, ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται εντός του χώρου μεταξύ άξονα και εδράνου, δημιουργώντας τη λεγόμενη αέρια σπηλαιώση.

Για την ακριβή ανάλυση του παραπάνω φαινομένου, είναι αναγκαία η προσομοίωση της παρουσίας αέρα στα άκρα του εδράνου, έτσι ώστε να μπορεί να διαπιστωθεί η επίδραση του στη συμπεριφορά του εδράνου, καθώς και ο τρόπος με τον οποίον διεισδύει εντός του εδράνου. Η μελέτη αυτή παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον καθώς περιλαμβάνει την επίδραση της ύπαρξης ενός άλλου αερίου μέσα στο έδρανο. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η αλληλεπίδραση που πιθανώς έχει ο αέρας με τη ζώνη των ατμών του λιπαντικού. Ταυτόχρονα, η συγκεκριμένη μελέτη σκοπό έχει να δείξει τη ροή του λιπαντικού σε υγρή μορφή, όταν αυτό διέρχεται μέσα από τη ζώνη σπηλαιώσης. Αρχικά, η μελέτη θα πραγματοποιηθεί ενδεικτικά για έδρανο με λόγο μήκους προς διάμετρο $L/D=1$, για δύο διαφορετικές τιμές της απόστασης εκκεντρότητας, $\epsilon=0.5$ και 0.7 .

Λόγω του φαινομένου της σπηλαιώσης, πολλές παράμετροι όπως η γεωμετρία και το μέγεθος της οπής εισόδου λιπαντικού, καθώς και η πίεση εισαγωγής του λιπαντικού, επηρεάζουν την συμπεριφορά του εδράνου. Για την επίδραση αυτών των παραμέτρων στη τελική λύση του προβλήματος θα γίνει παραμετρική διερεύνηση των συγκεκριμένων μεγεθών για συγκεκριμένη γεωμετρία εδράνου ($L/D=1$ και $\epsilon=0.7$). Εκτός από την παραμετρική διερεύνηση, θα μελετηθεί και η επίδραση της γωνίας ευθυγράμμισης του άξονα εντός του εδράνου.

Η διαδικασία της μελέτης που ακολουθείται περιλαμβάνει, σε πρώτο στάδιο τη διαδικασία που ακολουθήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έτσι ώστε να προσομοιωθεί το φαινόμενο της υδροδυναμικής λίπανσης και της σπηλαιώσης λόγω εξάτμισης τμήματος του λιπαντικού. Στη συνέχεια, στα άκρα του εδράνου επιβάλλεται κατάλληλη οριακή συνθήκη, σύμφωνα με την οποία θεωρείται ύπαρξη αέρα εκτός του εδράνου, ενώ είναι δυνατή είτε η είσοδος αέρα εντός του χώρου του λιπαντικού, είτε η έξοδος του λιπαντικού προς το περιβάλλον. Βάσει αυτών των οριακών συνθηκών,

προσομοιώνεται το πεδίο της ροής εντός του εδράνου για διάφορες παραμέτρους, ενώ τα αποτελέσματα συγκρίνονται και με τις αντίστοιχες περιπτώσεις όπου απουσιάζει ο αέρας από το έδρανο, ώστε να αναδειχθεί η επίδραση του αέρα.

7.2 Ορισμός προβλήματος αέριας και ατμώδους σπηλαιώσης στο ANSYS-CFX

Η αέριος σπηλαιώση διαφοροποιεί το πρόβλημα όπως αυτό είχε οριστεί στο κεφάλαιο 6.2. Για την επίλυση του προβλήματος, εκτός από τις ιδιότητες του λιπαντικού σε υγρή και σε αέρια μορφή οι οποίες έχουν ήδη ορισθεί προηγουμένως, είναι αναγκαίος ο ορισμός των ιδιοτήτων του τρίτου ρευστού (αέρας) που συμμετέχει στην επίλυση του προβλήματος (Πίνακας 7-1). Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, η εξίσωση ενέργειας αμελείται, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης ορμής, για τον προσδιορισμό της ροής των τριών ρευστών μέσα στο μείγμα.

Πίνακας 7-1: Ιδιότητες αέρα στους 25°C όπως προσδιορίστηκαν στο λογισμικό ANSYS-CFX

Μοριακό βάρος:	28.96 kg/kmol
Πυκνότητα:	1.185 kg/m ³
Ειδική θερμοχωρητικότητα:	1000.44 J/kg·K
Δυναμικό ιξώδες:	1.831·10 ⁻⁵ kg/m·s
Θερμική αγωγιμότητα:	2.61 W/m·K

Όπως είναι κατανοητό, η χρήση τριών ρευστών μέσα σε ένα όγκο ελέγχου απαιτεί τον πλήρη προσδιορισμό του τρόπου αλληλεπίδρασης των ρευστών μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, είναι απαραίτητο να προσδιορισθεί πιο ρευστό είναι αυτό που θεωρείται ως συνεχές μέσο και ποιο ρευστό είναι αυτό που διαλύεται μέσα στο συνεχές μέσο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, υπάρχει ένα ρευστό σε υγρή φάση (το λιπαντικό) και δύο σε αέρια (αέρας και ατμοί λιπαντικού). Το υγρό λιπαντικό θεωρείται ότι είναι το συνεχές μέσο ενώ τα άλλα δύο διαλύονται -ή σχηματίζονται στην περίπτωση των ατμών του λιπαντικού- εντός του λιπαντικού. Η τιμή της μέσης διαμέτρου των φυσαλίδων, η οποία απαιτείται από το λογισμικό για τον προσδιορισμό του μεγέθους των φυσαλίδων που αναμένονται να σχηματιστούν στο υγρό, διατηρήθηκε ίση με 2μm, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Η ροή εντός του εδράνου θεωρείται επίσης ομοιογενής, ενώ οι χρονικοί όροι των εξισώσεων αμελούνται, θεωρώντας πλέον ότι το σύστημα έχει επέλθει σε φάση ισορροπίας (steady state)

Όσον αφορά τις οριακές συνθήκες του προβλήματος, ως πίεση αναφοράς έχει ορισθεί η ατμοσφαιρική πίεση, η οποία προδιαγράφεται στα άκρα του εδράνου. Αντίθετα, η πίεση εισαγωγής κατά την επίλυση των συγκεκριμένων περιπτώσεων αυξήθηκε, έτσι ώστε να αντιστοιχεί σε αυτή πραγματικών εδράνων. Η τιμή της σχετικής πίεσης εισόδου για την πληθώρα των περιπτώσεων που εξετάστηκαν ισούται με 1bar, εκτός

από την περίπτωση όπου εξετάστηκε η επίπτωση της πίεσης εισαγωγής στη κατανομή της πίεσης και στο φαινόμενο της σπηλαιώσης.

Στην οπή εισαγωγής ορίστηκε ότι μόνο λιπαντικό σε υγρή μορφή μπορεί να εισέλθει μέσω αυτής, λόγω της σχετικής πίεσης που ορίστηκε προηγουμένως. Αντίθετα, στα άκρα του εδράνου θεωρείται ότι υπάρχει αέρας ατμοσφαιρικής πίεσης. Στην πραγματικότητα, βέβαια, τμήματα του άκρου του εδράνου φέρουν λιπαντικό ενώ τα υπόλοιπα συναντούν αέρα. Παρόλο που η συγκεκριμένη παραδοχή δεν αντιστοιχεί ακριβώς στην πραγματικότητα και εμπεριέχει κίνδυνο υπερεκτίμησης της ποσότητας του αέρα η οποία θα εισέλθει στο έδρανο, αποτελεί μία ικανοποιητική παραδοχή στο πλαίσιο μιας προκαταρκτικής μελέτης για την προσομοίωση της επίδρασης της αέριας σπηλαιώσης στη συμπεριφορά του εδράνου. Λόγω αδυναμίας επαλήθευσης των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων, μία πληρέστερη και καλύτερη εκτίμηση των οριακών συνθηκών βάσει των ακόλουθων αποτελεσμάτων, μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη ακρίβεια προσέγγισης του φαινομένου.

Η ταχύτητα περιστροφής θεωρείται σταθερή και ίση με 76 RPM για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Η ροή εντός του εδράνου θεωρείται στρωτή. Η εξωτερική επιφάνεια του ρευστού θεωρείται ότι είναι τοίχωμα μηδενικής ταχύτητας, ενώ δεν υπάρχει ολίσθηση μεταξύ του ρευστού και των τοιχωμάτων.

Για την επίλυση του προβλήματος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ήταν αναγκαία η υπόθεση ότι υπάρχει κάποια μικρή ποσότητα αέρα μέσα στο έδρανο κατά την εκκίνηση της επίλυσης (~20%), ώστε να επιτευχθεί σύγκλιση. Κατά τη διάρκεια επίλυσης του προβλήματος, ο αέρας που είχε οριστεί αρχικά κατανέμεται μέσα στον όγκο του εδράνου, ενώ ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης που επικρατούν μέσα στο έδρανο, ποσότητες αέρα μπορούν να εισέλθουν και να εξέλθουν, ενώ αντίστοιχα το λιπαντικό μπορεί να εξατμιστεί, διαμορφώνοντας περιοχές με ατμούς λιπαντικού. Με αυτό τον τρόπο, λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα και το φαινόμενο της σπηλαιώσης λόγω εξάτμισης του υγρού σε πολύ χαμηλή πίεση, αλλά και λόγω διάχυσης του αέρα μέσα στο έδρανο.

Στη συνέχεια αναλύεται το φαινόμενο της αέριας και ατμώδους σπηλαιώσης, για ακτινικά έδρανα με διαφορετικές γεωμετρικές παραμέτρους. Αρχικά, γίνεται απλή σύγκριση των διαφορετικών προσεγγίσεων για δύο από τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν στο κεφάλαιο 6 ($L/D=1$, $\varepsilon=0.5$ και 0.7), ενώ στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση του μεγέθους και της γεωμετρίας της οπής εισαγωγής λιπαντικού, της πίεσης εισόδου του λιπαντικού, καθώς και της γωνίας απευθυγράμμισης του άξονα.

7.3 Μελέτη φαινομένου αέριας και ατμώδους σπηλαιώσης για $L/D=1$

Εδώ, γίνεται μελέτη της επίδρασης του φαινομένου σπηλαιώσης στη λειτουργία του ακτινικού εδράνου υδροδυναμικής λίπανσης για λόγους εκκεντρότητας $\varepsilon=0.5$ και $\varepsilon=0.7$. Η σχετική πίεση εισόδου του λιπαντικού για τη συγκεκριμένη περίπτωση έχει οριστεί ίση με 1 bar, ενώ η διαμόρφωση της γεωμετρίας της οπής εισαγωγής είναι κυκλική, με διάμετρο ίση με 20% του μήκους του εδράνου. Στην παρούσα ενότητα, ο άξονας θεωρείται πλήρως ευθυγραμμισμένος με το έδρανο (μηδενική γωνία απευθυγράμμισης).

Στον Πίνακα 7-2 παρουσιάζονται υπολογισμοί του φορτίου που μπορεί να παραλάβει το έδρανο για κάθε μία από τις προαναφερθείσες μεθόδους μοντελοποίησης (με ατμώδη, ή με αέρια και ατμώδη σπηλαίωση).

Πίνακας 7-2: Υπολογισμοί χαρακτηριστικών μεγεθών για έδρανο με $L/D=1$ και $\varepsilon=0.5$ και 0.7 . Σύγκριση των αποτελεσμάτων για μοντελοποίηση (α) της ατμώδους σπηλαίωσης, και (β) της αέριας και ατμώδους σπηλαίωσης

	L/D= 1, $\varepsilon=0.5$		L/D= 1, $\varepsilon=0.7$	
	Αέριος-Ατμώδης σπηλαίωση	Ατμώδης σπηλαίωση	Αέριος-Ατμώδης σπηλαίωση	Ατμώδης σπηλαίωση
Συνολικό φορτίο [N]	110712.75	184600.07	238229.32	406856.21
Γωνία συμπεριφοράς [deg]	71.33	71.54	50.02	52.55
Αδιάστατος συντελεστής τριβής	4.920	4.117	2.530	2.177
Μέγιστη πίεση [Pa]	539237	671002	1282350	1698680

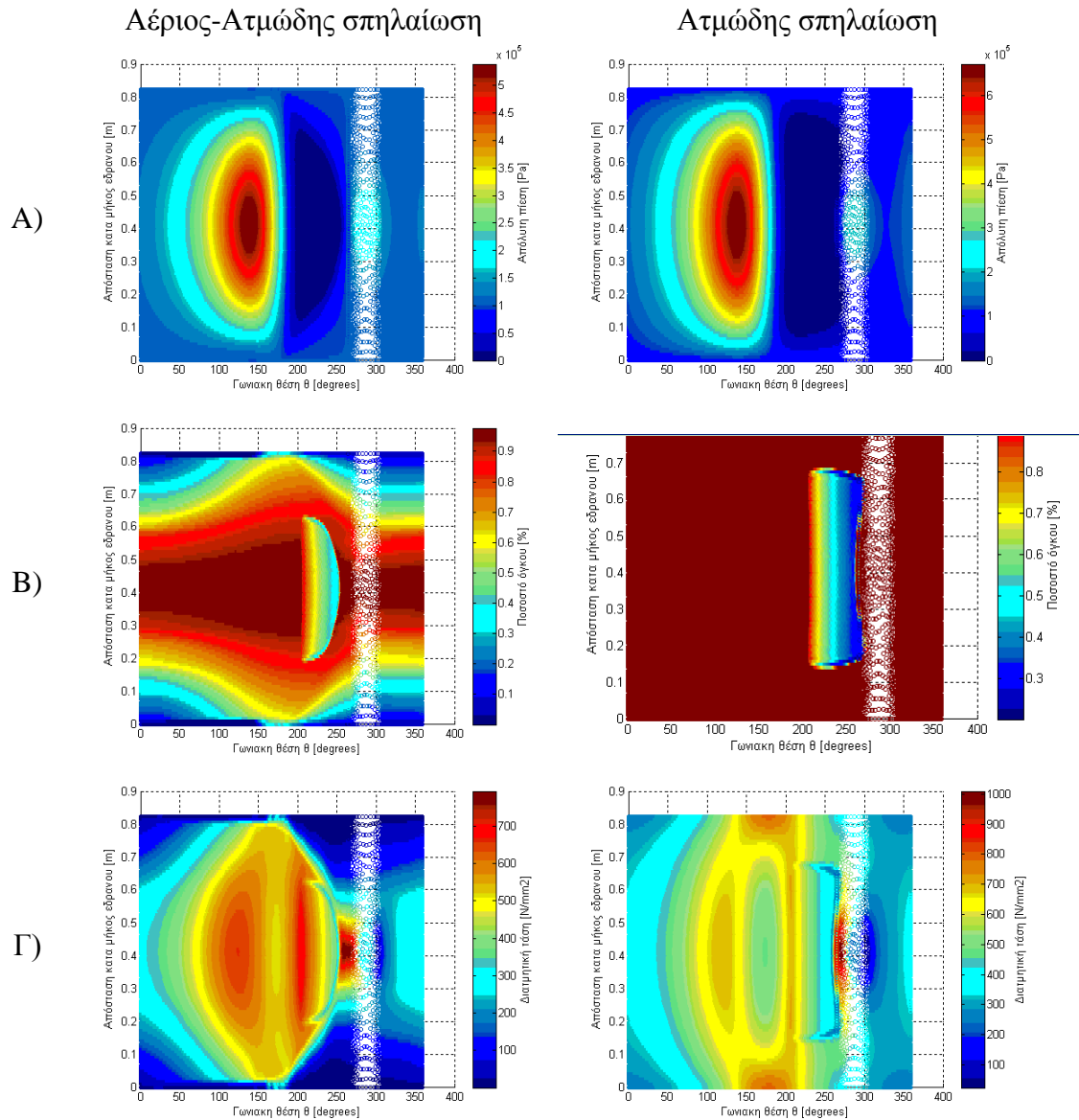
Βάσει του Πίνακα 7-2 παρατηρείται ότι, για δεδομένη θέση ισορροπίας του εδράνου (εκκεντρότητα, γωνία συμπεριφοράς), στην περίπτωση αέριας και ατμώδους σπηλαίωσης, μειώνεται σημαντικά το ολικό φορτίο του εδράνου (-40%), όπως επίσης και η μέγιστη πίεση, σε σύγκριση με την περίπτωση αποκλειστικά ατμώδους σπηλαίωσης. Τέλος, η ύπαρξη του αέρα οδηγεί σε αύξηση του αδιάστατου συντελεστή τριβής, μεταβολή που θα εξηγηθεί αναλυτικότερα στη συνέχεια, αξιολογώντας τα γραφήματα κατανομών της διατμητικής τάσης στην επιφάνεια του εδράνου.

Στις ακόλουθες υπο-ενότητες, παρουσιάζονται οι κατανομές της πίεσης, του ποσοστού όγκου του λιπαντικού σε υγρή μορφή και των διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του εδράνου. Επίσης, στην περίπτωση που υπάρχει αέριος και ατμώδης σπηλαίωση, παρουσιάζονται επιπλέον κατανομές του ποσοστού όγκου που καταλαμβάνει κάθε ένα από τα τρία ρευστά. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να κατανοηθεί η αλληλεπίδραση των τριών ρευστών κατά τη λειτουργία του εδράνου και να καταδειχθούν οι περιοχές αέριας και ατμώδους σπηλαίωσης του εδράνου.

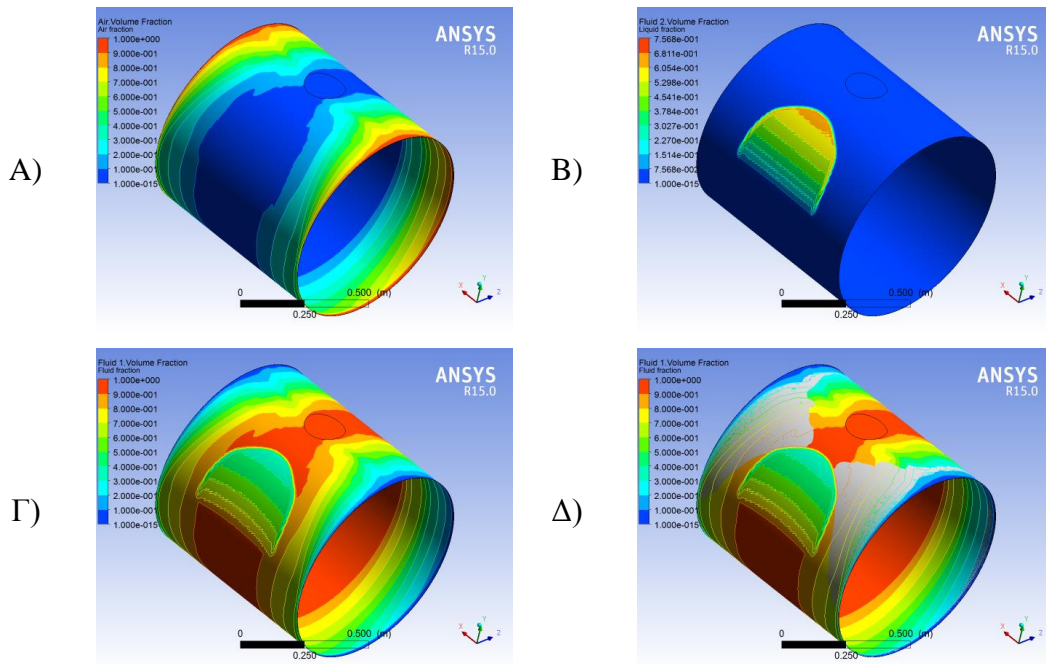
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα κατανομής της απόλυτης πίεσης, του ποσοστού όγκου του υγρού λιπαντικού, αλλά και της διατμητικής τάσης στο μέσο του εδράνου. Στα συγκεκριμένα διαγράμματα απεικονίζεται για λόγους πληρότητας και η κατανομή του πάχους του λιπαντικού.

7.3.1 Περίπτωση $L/D=1$ και $\varepsilon=0.5$

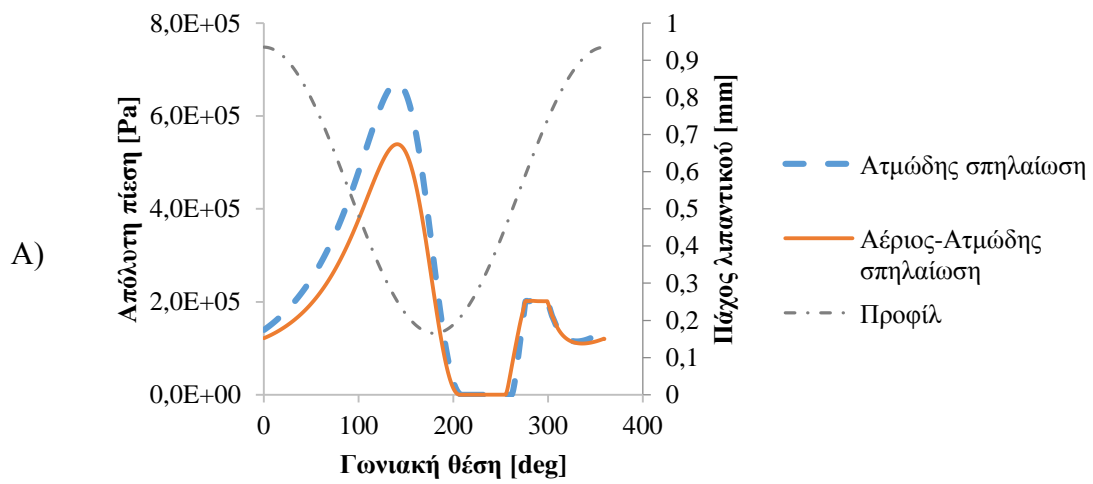
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους και αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\varepsilon=0.5$, για σχετική πίεση εισαγωγής $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή εισαγωγής λιπαντικού, διαμέτρου $D=0.2L$ και για γωνία απευθυγράμμισης $\bar{\psi}_y=0.0\text{ rad}$.

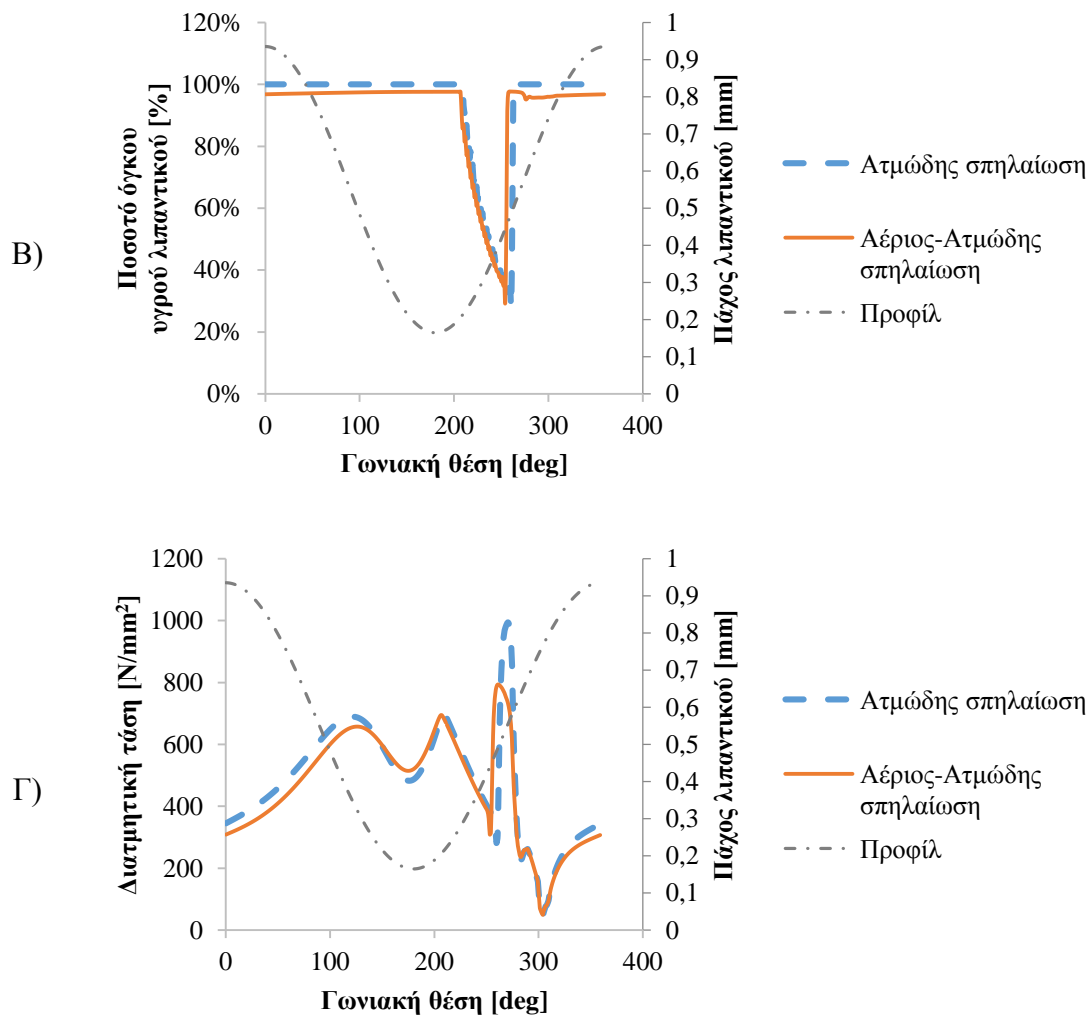


Εικόνα 7-1: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$



Εικόνα 7-2: Φαινόμενο αέριος-ατμώδους σπηλαιώσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1bar$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_s=0.0rad$





Εικόνα 7-3: Κατανομή Α) απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για τις περιπτώσεις αέριος-ατμώδους σπηλαίωσης και ατμώδους σπηλαίωσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται στο μέσο του εδράνου κατά το διάμηκες, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης.

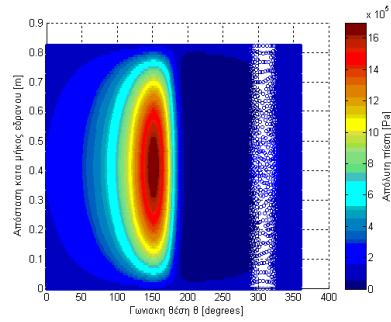
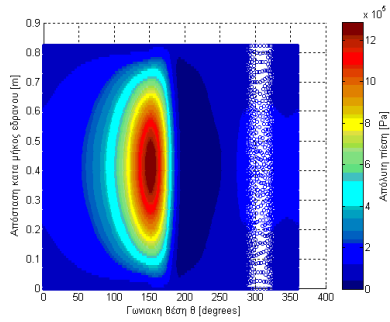
7.3.2 Περίπτωση $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους και αέριος-ατμώδους σπηλαίωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$, για σχετική πίεση εισαγωγής $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή εισαγωγής λιπαντικού, διαμέτρου $D=0.2L$ και για γωνία απευθυγράμμισης $\bar{\psi}_y=0.0\text{rad}$.

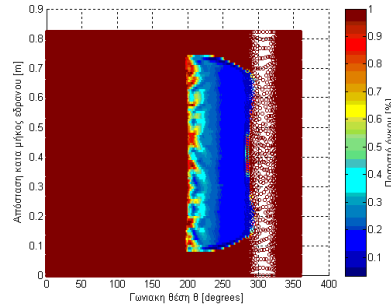
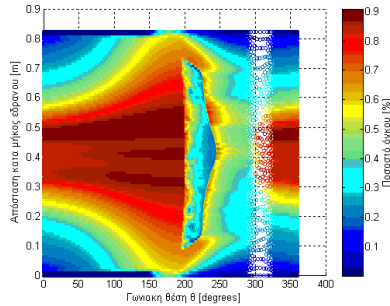
Αέριος-Ατμώδης σπηλαιώση

Ατμώδης σπηλαιώση

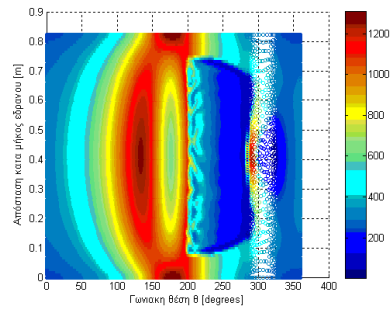
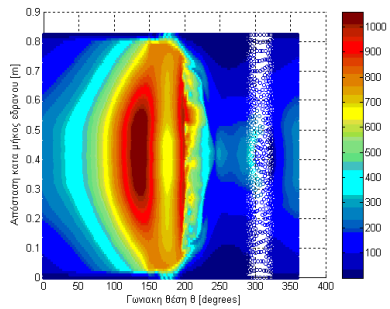
A)



B)

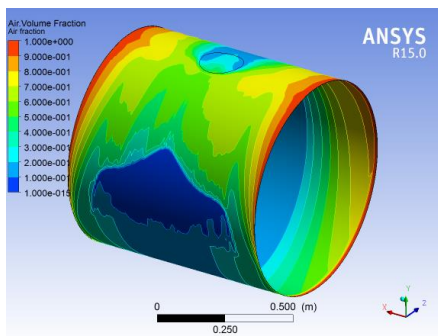


Γ)

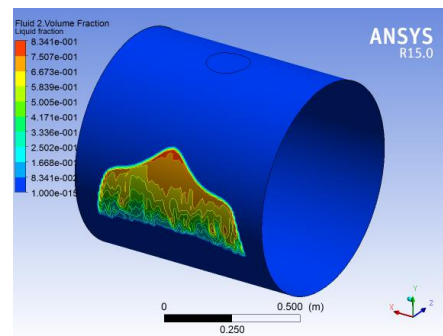


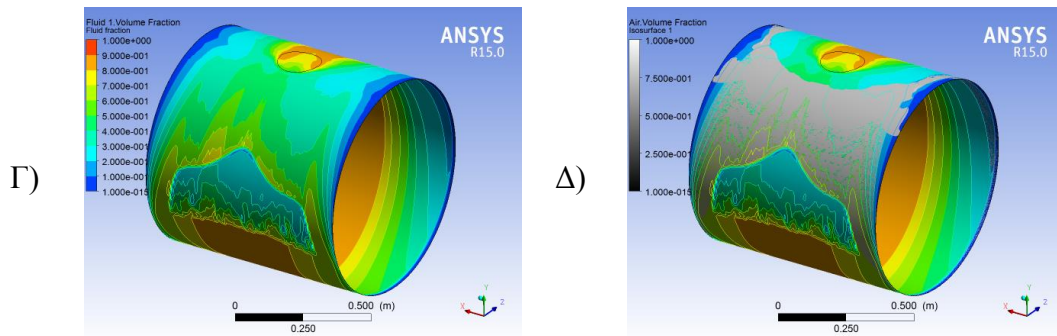
Εικόνα 7-4: Σύγκριση A) κατανομής απόλυτης πίεσης, B) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διαμετρικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριος-ατμώδους σπηλαιώσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\epsilon=0.7$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_\gamma=0.0\text{rad}$

A)

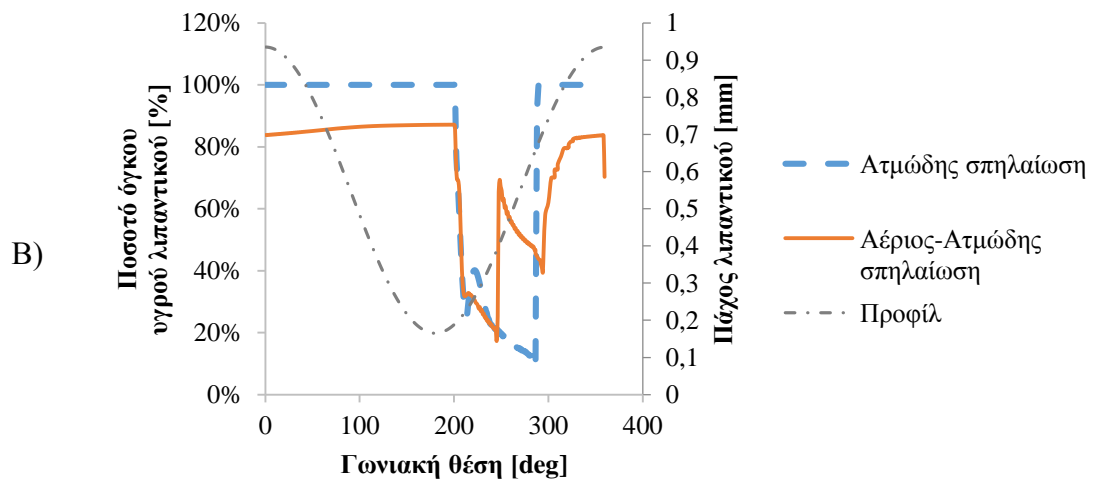
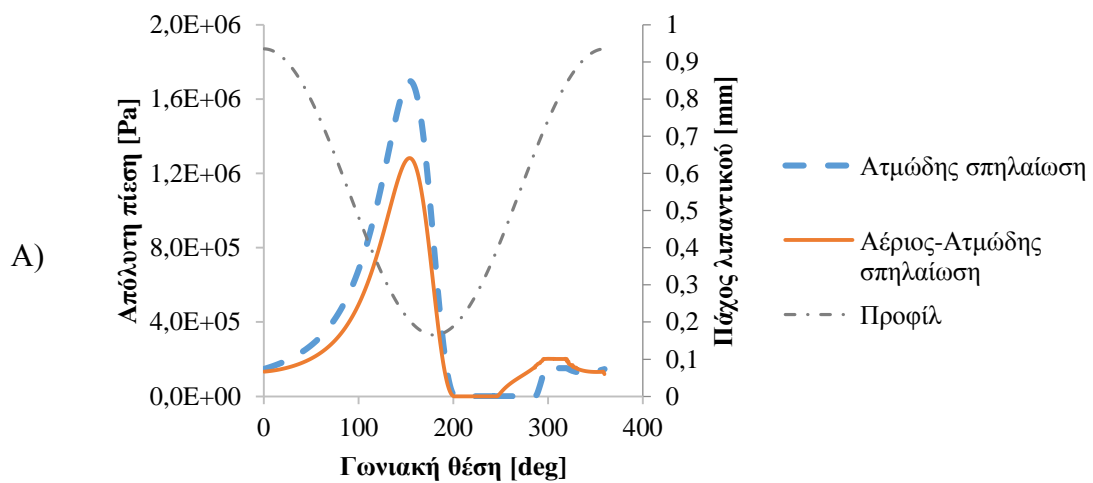


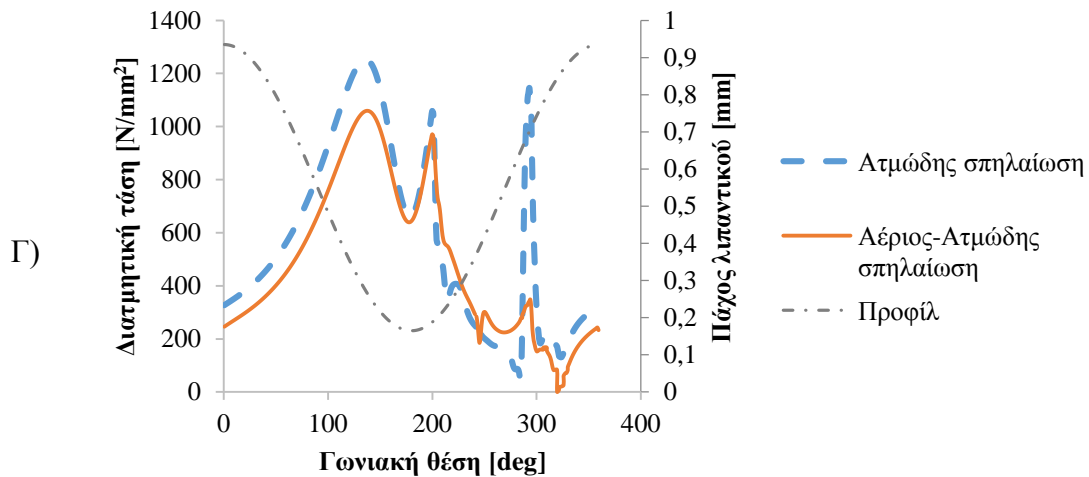
B)





Εικόνα 7-5: Φαινόμενο αέριος-ατμώδους σπηλαιώσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, $P_{in}=1bar$, κυκλική σπή $D=0.2L$, $\psi=0.0rad$



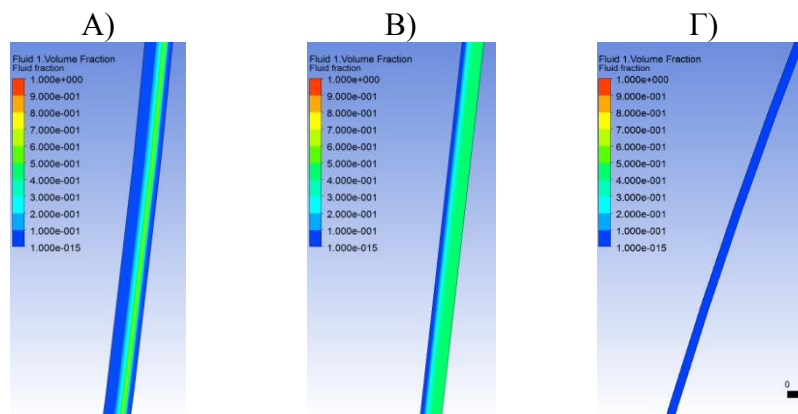


Εικόνα 7-6: Κατανομή Α) απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για τις περιπτώσεις αέριος-ατμώδους σπηλαιώσης και ατμώδους σπηλαιώσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi\gamma=0.0\text{rad}$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται στο μέσο του εδράνου κατά το διάμηκες, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης.

7.3.3 Συμπεράσματα

Αναλύοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 7.3.1 και 7.3.2, είναι εμφανές ότι η παρουσία αέρα διαφοροποιεί σημαντικά τη συμπεριφορά του εδράνου. Καθώς η πίεση του λιπαντικού μειώνεται στο αποκλίνον τμήμα του εδράνου, εισέρχεται αέρας ο οποίος καλύπτει τμήμα της περιοχής αυτής

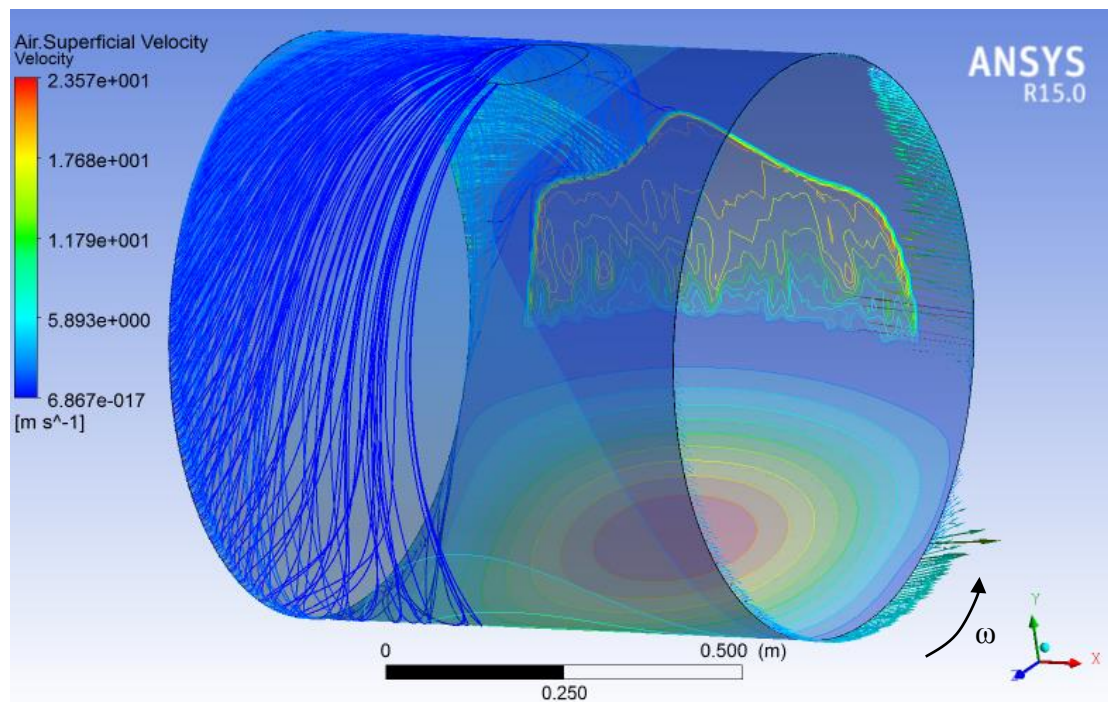
Η είσοδος αέρα και η έξοδος υγρού λιπαντικού από τα άκρα του εδράνου, γίνεται ακόμα πιο εμφανής στην Εικόνα 7-7. Εκεί, παρατηρείται ότι στο συγκλίνον τμήμα του εδράνου, μέρος του λιπαντικού εξέρχεται από το μέσο τμήμα του πάχους, ενώ κοντά στα τοιχώματα του εδράνου και του άξονα υπάρχει μόνο αέρας. Καθώς αυξάνεται η πίεση στην επιφάνεια του άξονα, η περιοχή καλύπτεται από μεγαλύτερο ποσοστό υγρού λιπαντικού, ενώ μικρές ποσότητες αέρας παραμένουν στο κέλυφος του εδράνου. Τέλος, καθώς το λιπαντικό έχει περάσει πλέον τη θέση ελάχιστου πάχους και η πίεση είναι πολύ μικρή (μικρότερη της ατμοσφαιρικής), στα άκρα του εδράνου υπάρχει μόνο αέρας που εισέρχεται στο έδρανο.



Εικόνα 7-7: Έξοδος λιπαντικού και είσοδος αέρα κατά Α) το συγκλίνον τμήμα, Β) το σημείο πλησίον του ελάχιστου πάχους και Γ) το αποκλίνον τμήμα του εδράνου

Όσον αφορά τη κίνηση του αέρα εντός του εδράνου, λεπτομερής αναπαράσταση δίνεται στην Εικόνα 7-8. Στη συγκεκριμένη απεικόνιση παρουσιάζεται το πεδίο πίεσης της ροής που αναπτύσσεται εντός του εδράνου, όπως επίσης και η περιοχή σπηλαιώσης που αναπτύσσεται λόγω ατμοποίησης του λιπαντικού. Λόγω συμμετρίας της ροής στα άκρα του εδράνου, η ροή του αέρα προσομοιώνεται με δύο διαφορετικές τεχνικές. Στην πρώτη περίπτωση, απεικονίζονται οι γραμμές της ροής του αέρα μέσα στο έδρανο ως προς το ένα άκρο του εδράνου, ενώ, αντίστοιχα, στο άλλο άκρο εμφανίζεται μέσω διανυσμάτων, σε ποιες περιοχές εισέρχεται αέρας και σε ποιες εξέρχεται. Όπως είναι εμφανές από την πρώτη περίπτωση, ο αέρας δύναται να φτάσει στη συγκεκριμένη γεωμετρία εδράνου μέχρι το μέσο του εδράνου. Όμως, στην περιοχή υψηλής πίεσης λιπαντικού, καθώς και στην περιοχή σπηλαιώσης, ο αέρας δε δύναται να εισέλθει λόγω των συνθηκών που επικρατούν εντός των συγκεκριμένων περιοχών.

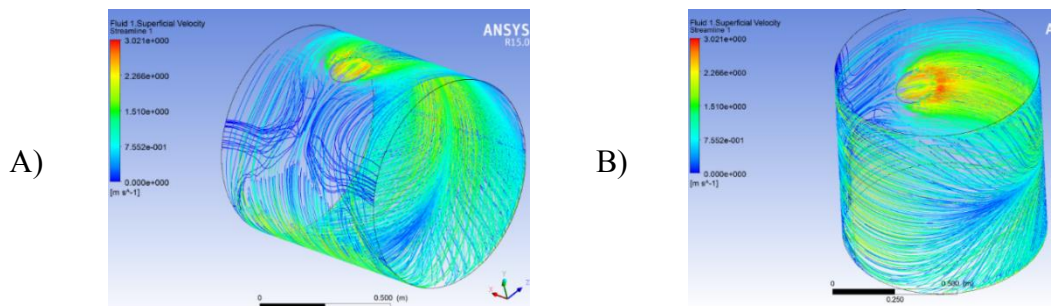
Επίσης, βάσει των διανυσμάτων της ροής του αέρα στο άκρο του λιπαντικού, ο αέρας εμφανίζεται να εισέρχεται στη γωνιακή θέση όπου υπάρχει χαμηλή πίεση του λιπαντικού και εντός του εδράνου αναπτύσσεται ατμώδης σπηλαιώση, ενώ εξέρχεται από την περιοχή όπου υπάρχει λιπαντικό σε υγρή μορφή, και η πίεση είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Συνεπώς, ο αέρας καλύπτει μία μεγάλη περιοχή κοντά στα άκρα του εδράνου, σε περιοχές όπου η πίεση του λιπαντικού είναι χαμηλή, ενώ σε περιοχές αυξημένης πίεσης λιπαντικού, αέρας εξέρχεται του εδράνου από τα άκρα του.



Εικόνα 7-8: Απεικόνιση ροής αέρα, κατανομής πίεσης του λιπαντικού και αποτύπωση της περιοχής σπηλαιώσης σε ακτινικό έδρανο γεωμετρίας $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$. Με το βέλος απεικονίζεται η φορά περιστροφής του εδράνου.

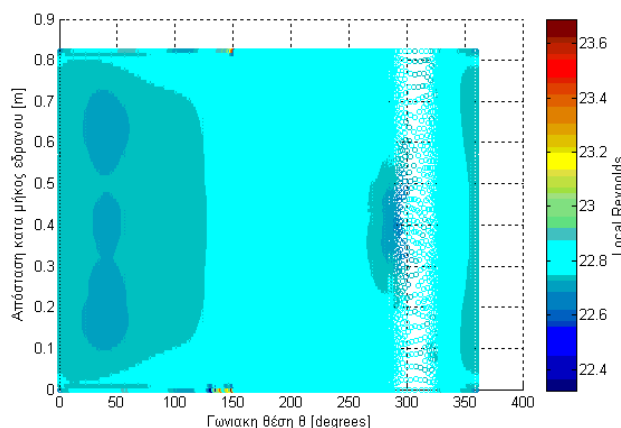
Ενδιαφέρουσα είναι επίσης η κίνηση του λιπαντικού σε υγρή φάση, καθώς εισέρχεται αέρας στο έδρανο. Στην Εικόνα 7-9 απεικονίζεται η ταχύτητα του υγρού λιπαντικού, υπολογισμένη με την υπόθεση ότι το συγκεκριμένο ρευστό είναι το μοναδικό που διαρρέει μία συγκεκριμένη διατομή (Q_i/A_s). Καθώς το λιπαντικό εισέρχεται από την

οπή στο μέσο του εδράνου με τη μέγιστη ταχύτητα, αρχίζει και διαχέεται σε όλο το μήκος, μειώνοντας ταυτόχρονα τη ταχύτητά του. Κατά τη διάρκεια της διάχυσής του, ποσότητα λιπαντικού εκρέει από τα άκρα του εδράνου. Καθώς μειώνεται το πάχος του λιπαντικού, το λιπαντικό κινείται σχεδόν παράλληλα με τα άκρα του εδράνου, φτάνοντας τη μέγιστη ταχύτητά του καθώς διέρχεται από τη θέση ελάχιστου πάχους. Στη συνέχεια, καθώς οι επιφάνειες εδράνου – άξονα αποκλίνουν και η πίεση μειώνεται απότομα, μικρές ποσότητες λιπαντικού συνεχίζουν να κινούνται κατά τη διεύθυνση περιστροφής μέσα στη ζώνη σπηλαιώσης όπου υπάρχουν ατμοί λιπαντικού. Καθώς όμως το υγρό λιπαντικό εισέρχεται στη ζώνη όπου υπάρχει αέρας, τότε μικρές ποσότητες λιπαντικού κινούνται με πολύ μικρή ταχύτητα κατά τη διεύθυνση περιστροφής του εδράνου και κοντά στην επιφάνεια του άξονα, ενώ παρατηρούνται και περιοχές όπου το λιπαντικό παραμένει στάσιμο με μηδενική ταχύτητα, κοντά στην επιφάνεια του κελύφους του εδράνου. Στη συνέχεια, καθώς το λιπαντικό έχει ολοκληρώσει την περιστροφή και συναντά ξανά τη διατομή της οπής εισόδου του λιπαντικού, η ροή αποκαθίσταται.



Εικόνα 7-9: Απεικόνιση πεδίου ταχύτητας Α) στη ζώνη σπηλαιώσης και Β) στην περιοχή σύγκλισης των επιφανειών άξονα-εδράνου

Όσον αφορά τον τοπικό αριθμό Reynolds του ρευστού στην επιφάνεια του εδράνου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7-10, δεν παρουσιάζει σημαντική μεταβολή, ακόμα και στην περίπτωση όπου το λιπαντικό εισέρχεται στην περιοχή ελάχιστου πάχους ή στις περιοχές σπηλαιώσης.



Εικόνα 7-10: Τοπικός αριθμός Reynolds για τη ροή του λιπαντικού κατά τη μελέτη αέρας και ατμώδους σπηλαιώσης για έδρανο με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$, $\epsilon=0.7$

Η επίδραση του αέρα είναι πολύ σημαντική στο εύρος ανάπτυξης της ζώνης ατμώδους σπηλαιώσης. Καθώς εισέρχεται αέρας, η ζώνη όπου υπάρχουν ατμοί μειώνεται σημαντικά, ενώ το υγρό λιπαντικό κυκλοφορεί μόνο στο μέσο του εδράνου, ανάμεσα

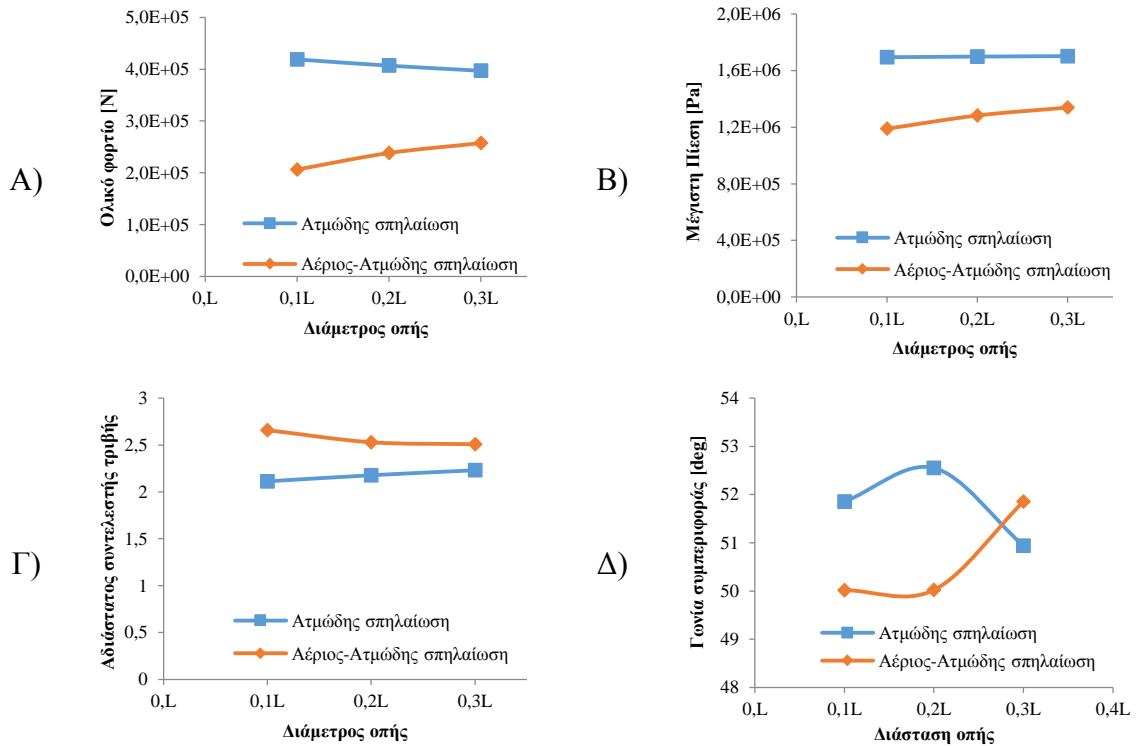
στις δύο περιοχές αέρα που σχηματίζονται στα άκρα του εδράνου. Επίσης, ο αέρας μειώνει τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο πεδίο της ροής, λόγω της απουσίας ύπαρξης υγρού λιπαντικού. Αντίθετα, στην περιοχή όπου αναπτύσσεται πίεση στην επιφάνεια του άξονα, οι διατμητικές τάσεις αυξάνονται. Σε συνδυασμό με τη μείωση του φορτίου, ο αδιάστατος συντελεστής τριβής αυξάνεται, καθώς η συνολική διατμητική δύναμη παραμένει σταθερή ή και αυξάνεται.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που δίνονται για δύο διαφορετικές εκκεντρότητες, παρατηρείται επίσης ότι η αύξηση της εκκεντρότητας αυξάνει την επίδραση του αέρα μέσα στο έδρανο. Λόγω της μεγαλύτερης εκκεντρότητας, μεγαλύτερες ποσότητες αέρα εισέρχονται μέσα στο έδρανο, μειώνοντας την περιοχή σπηλαιώσης λόγω ατμοποίησης. Πλέον, το τμήμα που δεν καταλαμβάνεται από ατμούς λιπαντικού, καταλαμβάνεται τόσο από ένα ποσοστό όγκου αέρα, αλλά και από ένα ποσοστό υγρού λιπαντικού. Η συγκεκριμένη ιδιομορφία δικαιολογείται από το γεγονός ότι στην περιοχή πλέον που υπάρχει αέρας, η πίεση ισούται με την ατμοσφαιρική πίεση που είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την πίεση ατμοποίησης που θα υπήρχε κανονικά στην περιοχή. Ως αποτέλεσμα αυτής της μεταβολής, και επειδή η πίεση είναι μεγαλύτερη της πίεσης ατμοποίησης, το λιπαντικό πλέον βρίσκεται σε υγρή μορφή, δικαιολογώντας την αύξηση του ποσοστού όγκου υγρού στη συγκεκριμένη ζώνη. Φυσικά, η παραπάνω προσομοίωση γίνεται με την παραδοχή ότι υπάρχει μόνο μία οπή εισαγωγής λιπαντικού και ότι στα άκρα του λιπαντικού υπάρχει μόνο αέρας ατμοσφαιρικής πίεσης.

7.4 Επίδραση μεγέθους κυκλικής οπής εισαγωγής λιπαντικού στο φαινόμενο της σπηλαιώσης

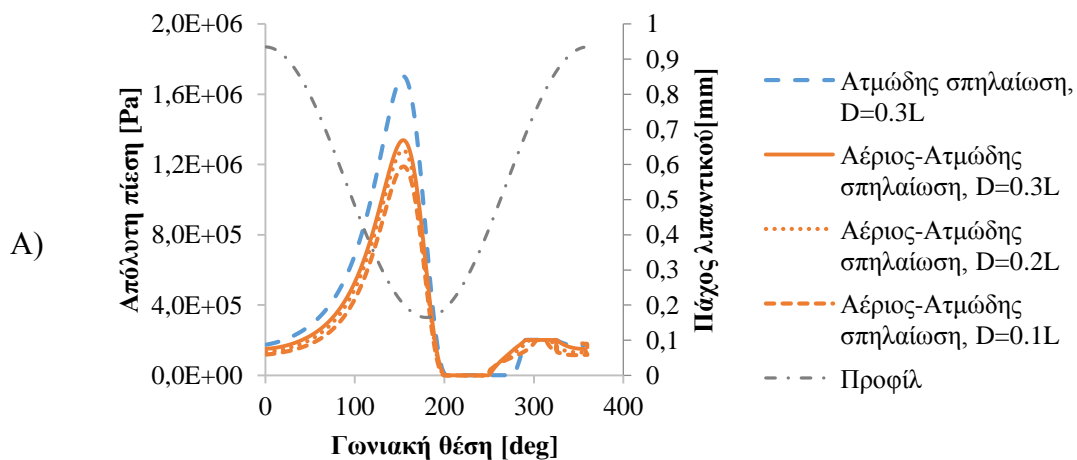
Σύμφωνα με τα προηγούμενα αποτελέσματα, το λιπαντικό που εισέρχεται από την οπή εισαγωγής, καταλαμβάνει το μέσο του εδράνου και στη συνέχεια η ροή του υγρού επεκτείνεται προς τα άκρα. Συνεπώς, το μέγεθος της οπής αποτελεί μία σημαντική παράμετρο για τη λειτουργία του εδράνου. Ακόμα, είναι αναγκαία η εξέταση της επίδρασης που έχει η οπή εισαγωγής λιπαντικού στο φαινόμενο της σπηλαιώσης και στην ποσότητα αέρα που εισέρχεται στο έδρανο.

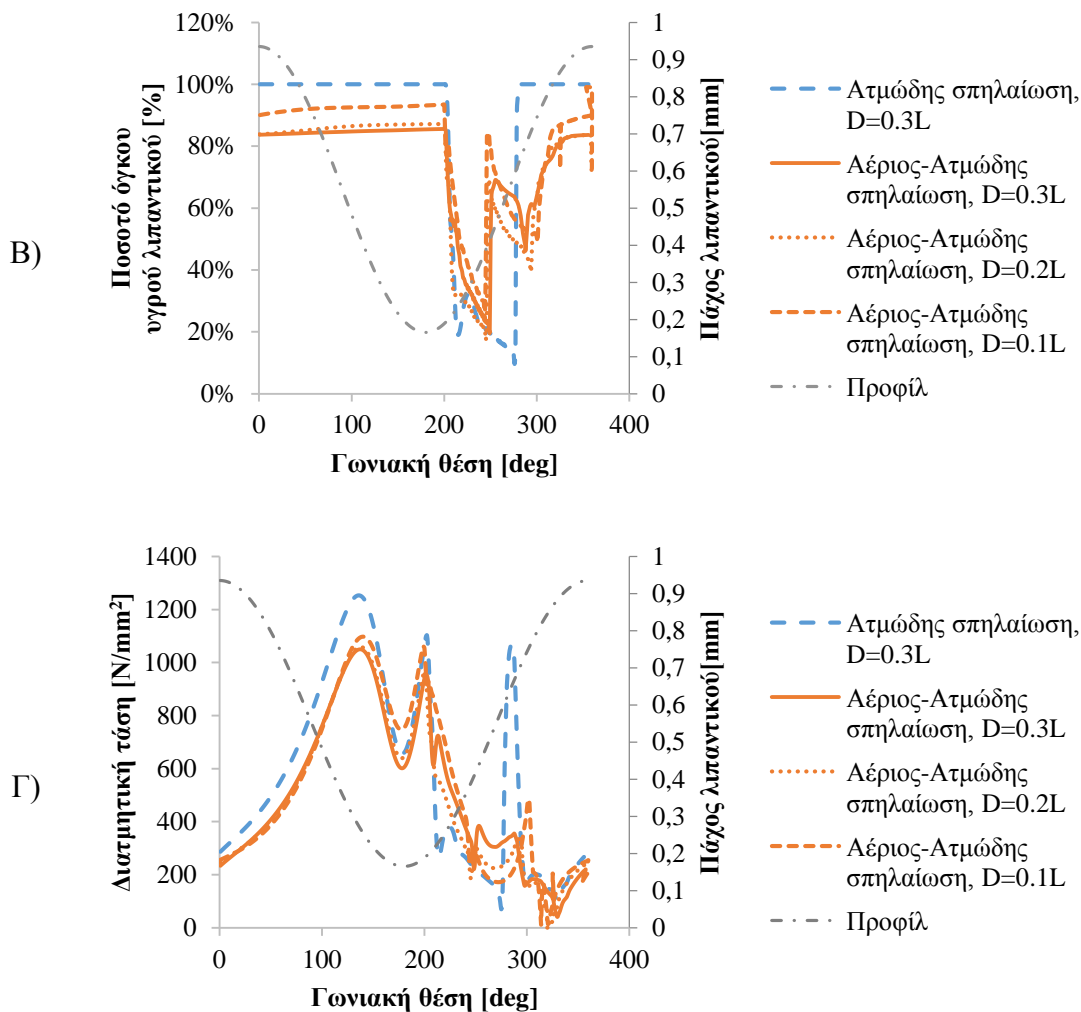
Για το συγκεκριμένο σκοπό γίνεται παραμετρική διερεύνηση του μεγέθους της οπής εισαγωγής του λιπαντικού, μεταβάλλοντας τη διάμετρο συναρτήσει του μήκους. Διατηρώντας σταθερά τα υπόλοιπα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά για την περίπτωση μελέτης του εδράνου με εκκεντρότητα $\varepsilon=0.7$, στο παρόν κεφάλαιο μεταβάλλεται η διάμετρος της οπής για τις τιμές $D=0.1L$, $0.2L$ και $0.3L$. Στην Εικόνα 7-11 εμφανίζεται η επίδραση που έχει η μεταβολή της διαμέτρου σε τέσσερα βασικά μεγέθη του εδράνου όπως είναι η μέγιστη πίεση, το φορτίο λειτουργίας, η γωνία συμπεριφοράς και ο αδιάστατος συντελεστής τριβής.



Εικόνα 7-11: Σύγκριση Α) ολικού φορτίου, Β) μέγιστης πίεσης, Γ) αδιάστατου συντελεστή τριβής και Δ) γωνία συμπεριφοράς μεταξύ αέριος-ατμώδους και ατμώδους σπηλαιώσης μεταβάλλοντας τη διάμετρο της οπής για την περίπτωση $L/D=1$, $\epsilon=0.7$, $P_{in}=1bar$

Σύμφωνα με τα γραφήματα της Εικόνας 7-11, η μεταβολή της μεγέθους της οπής δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου το πεδίο της ροής όταν μελετάται μόνο το φαινόμενο της ατμώδους σπηλαιώσης. Αντίθετα, το μέγεθος της οπής επηρεάζει το πεδίο της πίεσης όταν μελετάται επιπροσθέτως η επίδραση της διάχυσης του αέρα στο έδρανο. Συνεπώς, βάσει αυτών των παρατηρήσεων, στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η επίδραση της διαμέτρου της κυκλικής οπής εισαγωγής, στο προφίλ της πίεσης, της διατμητικής τάσης και του ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, στο μέσο του μήκους του εδράνου.



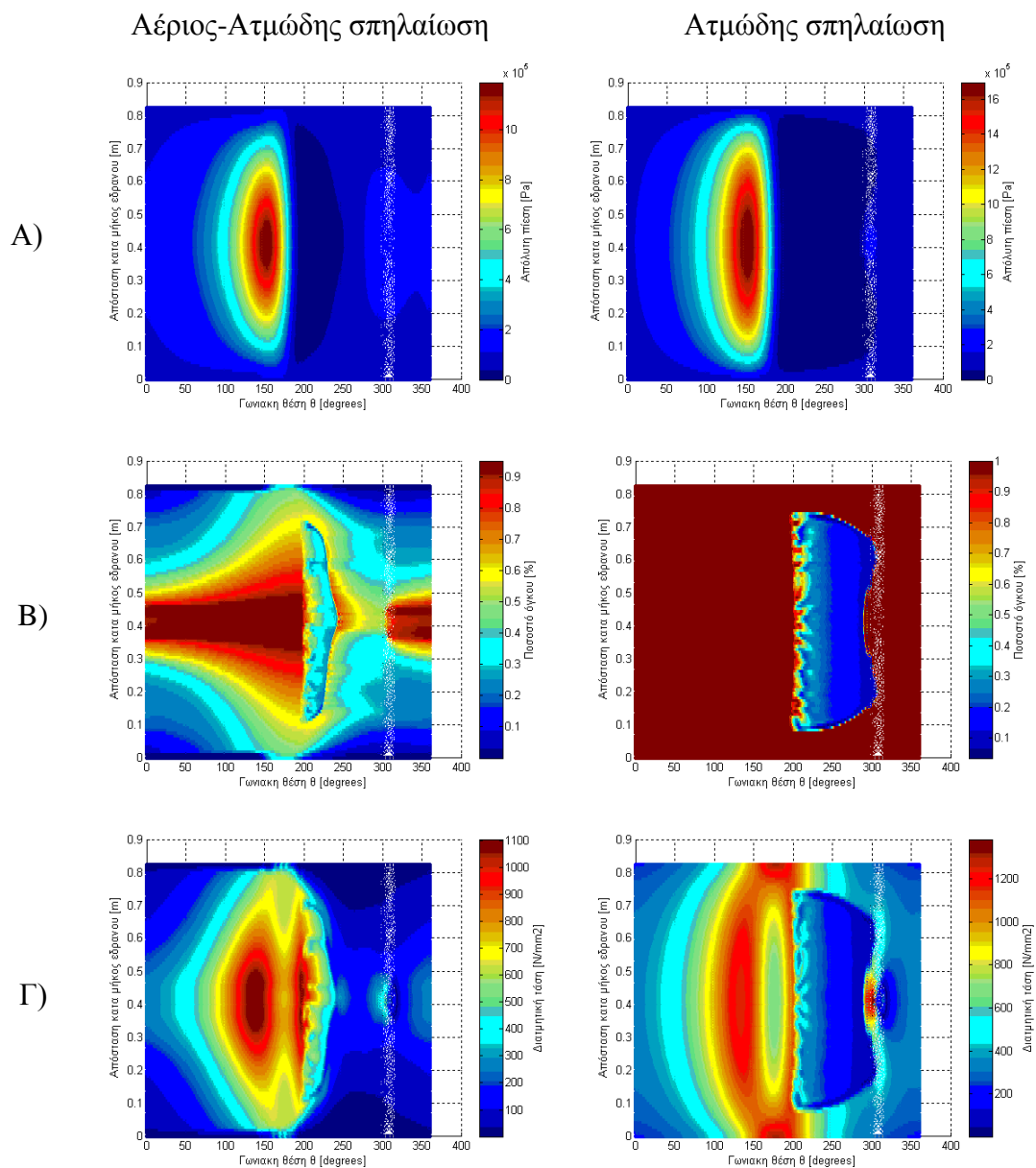


Εικόνα 7-12: Κατανομή Α) απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διαμητρικής τάσης συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για τις περιπτώσεις αέριος-ατμώδους σπηλαίωσης και ατμώδους σπηλαίωσης, σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, $\psi=0.0\text{rad}$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται στο μέσο του εδράνου κατά το διάμηκες, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, μεταβάλλοντας την διάμετρο της κυκλικής οπής εισαγωγής.

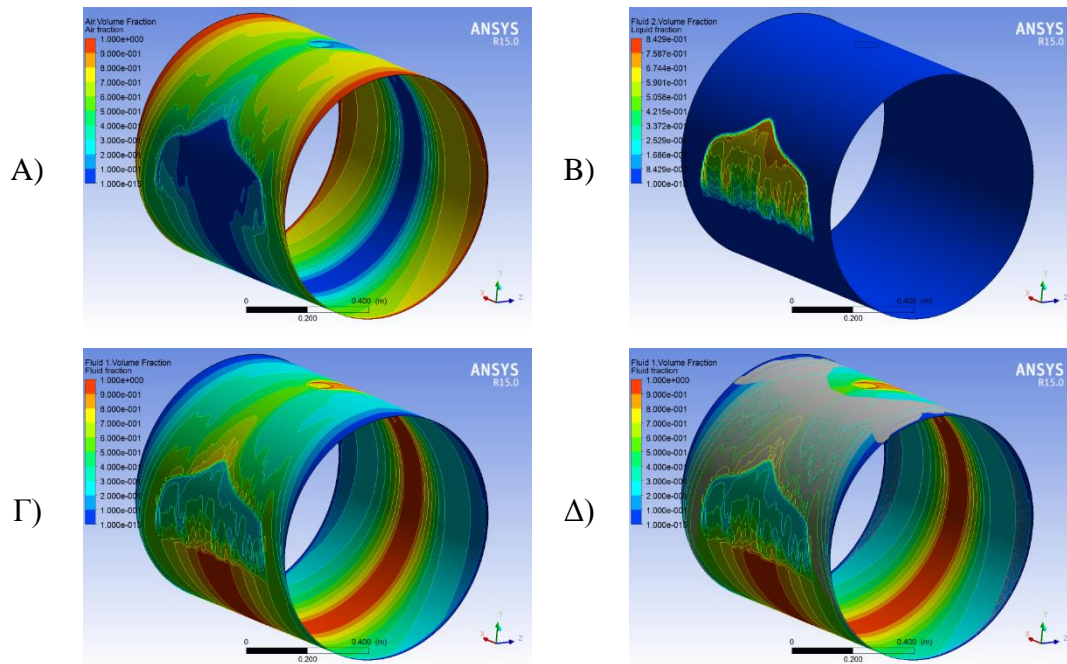
Για καλύτερη εκτίμηση των αποτελεσμάτων, στις επόμενες υπο-ενότητες, παρουσιάζεται η κατανομή των αντίστοιχων μεγεθών στην επιφάνεια του άξονα, αντιπαραβάλλοντας την επίπτωση που έχει η μεταβολή της διαμέτρου από 0.1L σε 0.3L σε κάθε φαινόμενο. Επίσης αναπαρίσταται και η επίδραση που έχει ο αέρας κατά τη διάρκεια του φαινομένου.

7.4.1 Διάμετρος οπής εισόδου 0.1L

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομιώσεις ατμώδους και αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$, για σχετική πίεση εισαγωγής $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή εισαγωγής λιπαντικού, διαμέτρου $D=0.1L$ και για γωνία απευθυγράμμισης $\bar{\psi}_y=0.0\text{ rad}$.



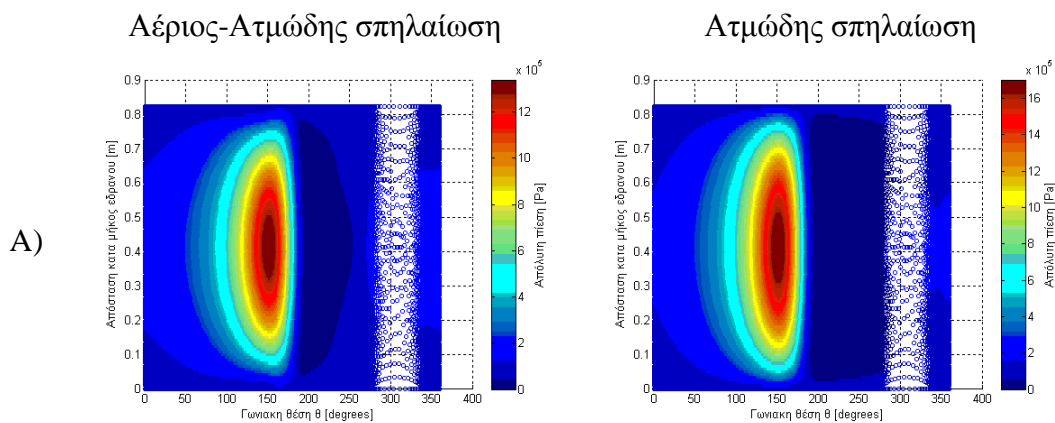
Εικόνα 7-13: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.1L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$.

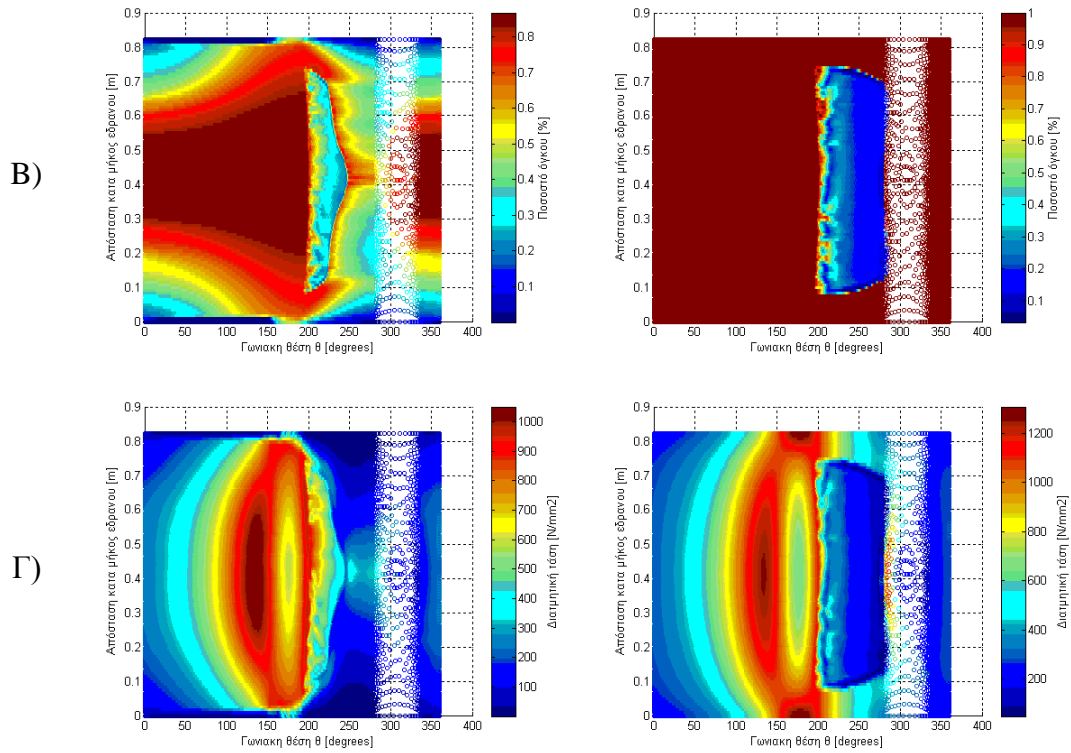


Εικόνα 7-14: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.1L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$.

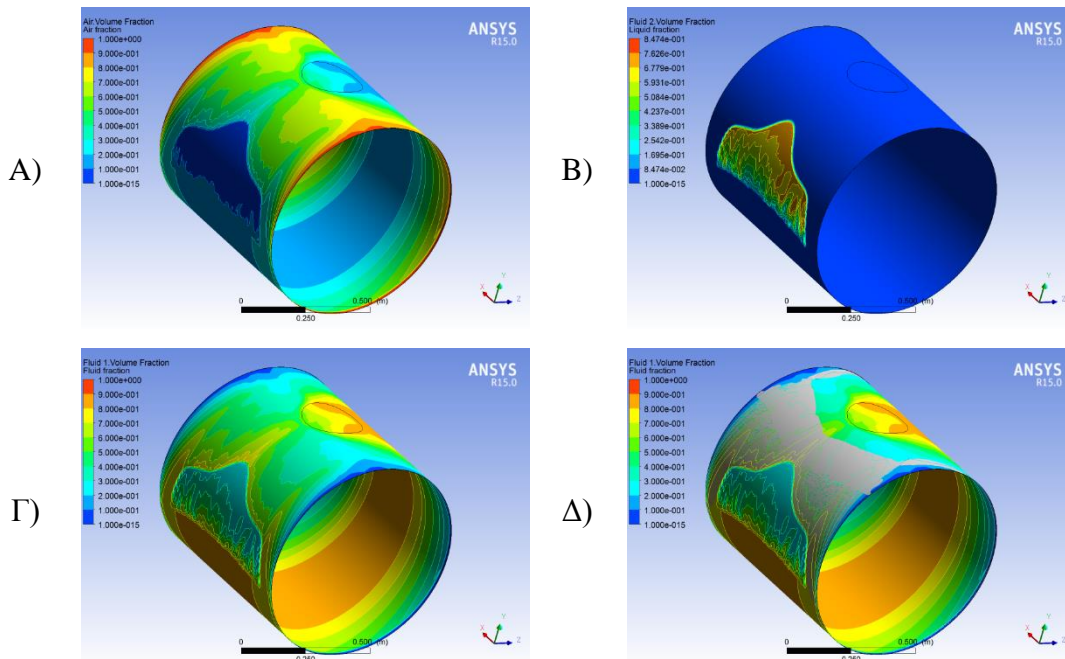
7.4.2 Διάμετρος οπής εισόδου 0.3L

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους και αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$, για πίεση εισαγωγής $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή εισαγωγής λιπαντικού, διαμέτρου $D=0.3L$ και για γωνία απευθυγράμμισης $\bar{\psi}_y=0.0\text{ rad}$.





Εικόνα 7-15: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.3L$, $\psi\gamma=0.0\text{rad}$.



Εικόνα 7-16: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=3\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi\gamma=0.0\text{rad}$.

7.4.3 Συμπεράσματα

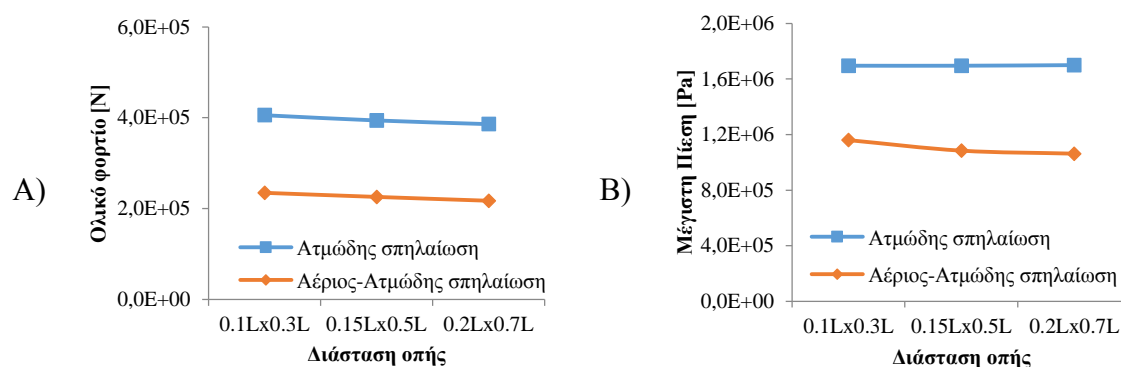
Όπως φαίνεται από τα προηγούμενα γραφήματα στην περίπτωση της αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης, καθώς αυξάνεται η διάμετρος της οπής, η περιοχή που καταλαμβάνει το λιπαντικό σε υγρή μορφή αυξάνεται. Λόγω της αύξησης της συγκεκριμένης περιοχής, το πεδίο κατανομής της πίεσης διευρύνεται σε όλη την επιφάνεια του εδράνου. Αντίθετα, στην περίπτωση της ατμώδους σπηλαιώσης, η επίδραση στην κατανομή της πίεσης είναι μηδενική.

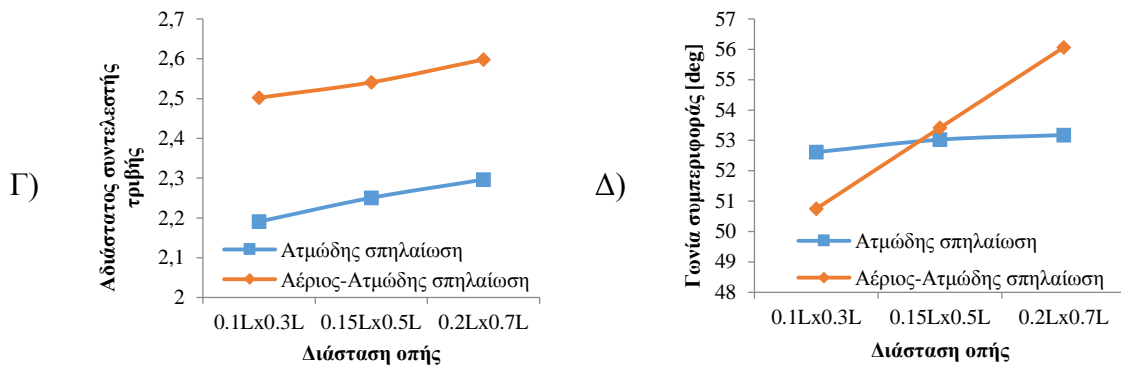
7.5 Επίδραση μεγέθους ορθογωνικής οπής εισαγωγής λιπαντικού στο φαινόμενο της σπηλαιώσης

Εκτός από την κυκλική διατομή που μπορεί να τοποθετηθεί στο άνω μέρος του εδράνου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οπή ορθογωνικής διατομής μέσω της οποίας θα γίνεται είσοδος του λιπαντικού στο έδρανο. Η ορθογωνική διατομή προσφέρει άμεσα το πλεονέκτημα της κάλυψης μεγάλου μήκους του εδράνου με λιπαντικό. Για αυτό το σκοπό, στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η επίδραση που έχουν διάφορες ορθογωνικές διατομές στο φαινόμενο της σπηλαιώσης. Οι ορθογωνικές διατομές που θα εξεταστούν είναι οι εξής (πλάτος x μήκος):

- 0.1L x 0.3L
- 0.15L x 0.5L
- 0.2L x 0.7L

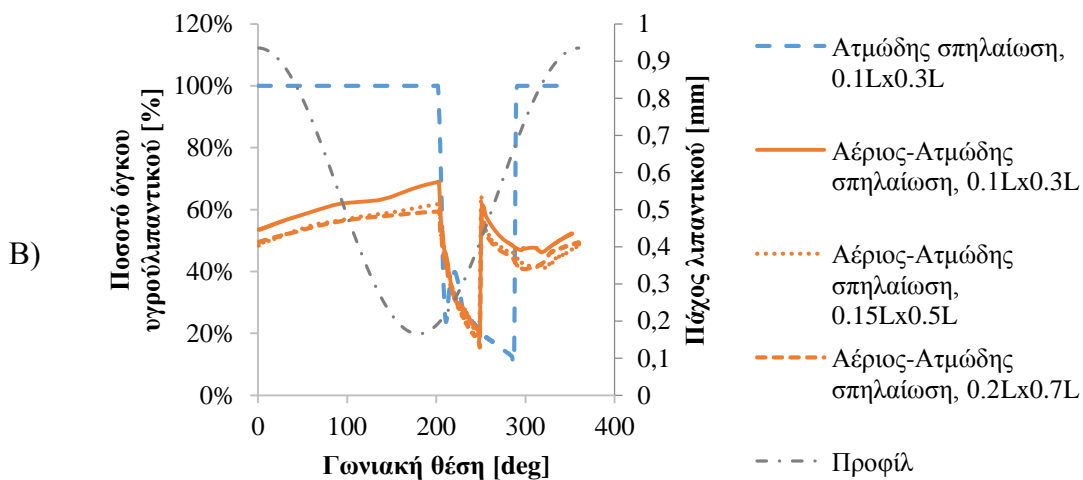
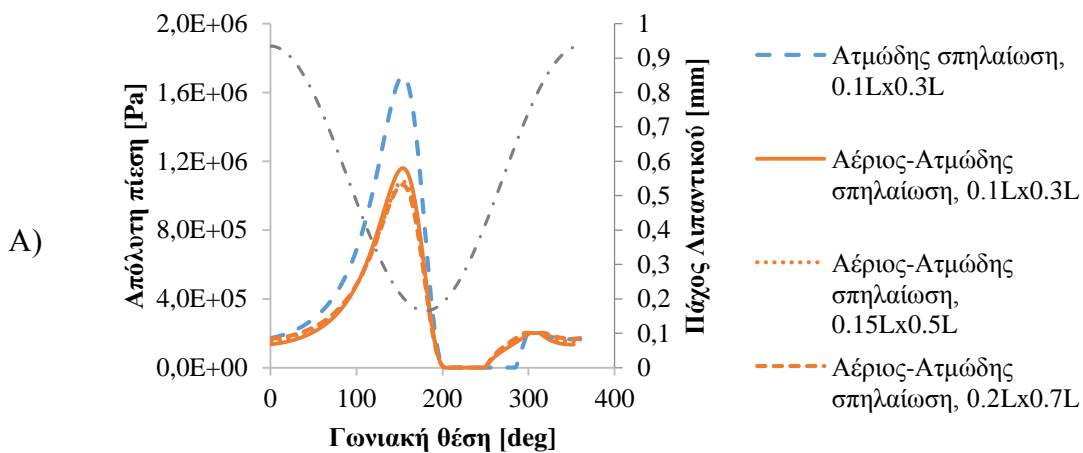
Στην Εικόνα 7-17 δίνεται η μεταβολή των μεγεθών της μέγιστης πίεσης, του ολικού φορτίου, του αδιάστατου συντελεστή τριβής και της γωνίας συμπεριφοράς για κάθε περίπτωση, συναρτήσει των παραπάνω μεγεθών.

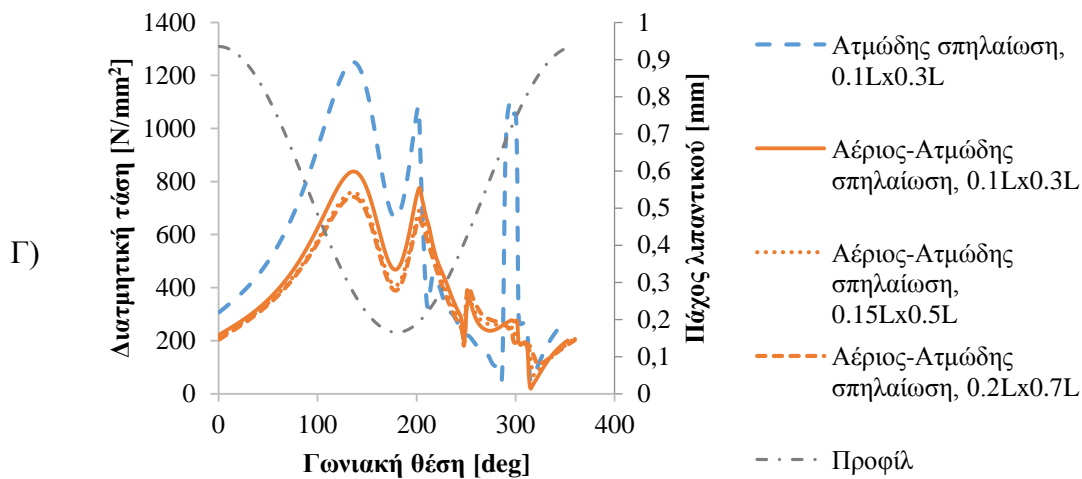




Εικόνα 7-17: Σύγκριση Α) ολικού φορτίου, Β) μέγιστης πίεσης, Γ) αδιάστατου συντελεστή τριβής και Δ) γωνία συμπεριφοράς μεταξύ ατμώδους/αέριος-ατμώδους σπηλαιώσης μεταβάλλοντας το μέγεθος της ορθογωνικής οπής για την περίπτωση $L/D=1$, $\epsilon=0.7$, $P_m=1\text{bar}$.

Σύμφωνα με τα γραφήματα της Εικόνας 7-17, η μεταβολή της μεγέθους της οπής δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου το πεδίο της ροής, ανεξάρτητα αν έχει οριστεί αέρας ή υγρό λιπαντικό στα άκρα του εδράνου. Στα διαγράμματα της Εικόνας 7-18 παρουσιάζεται πως επιδρά το μέγεθος της ορθογωνικής οπής στο προφίλ της πίεσης, της διατημητικής τάσης και του ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, στο μέσο του μήκους του εδράνου.



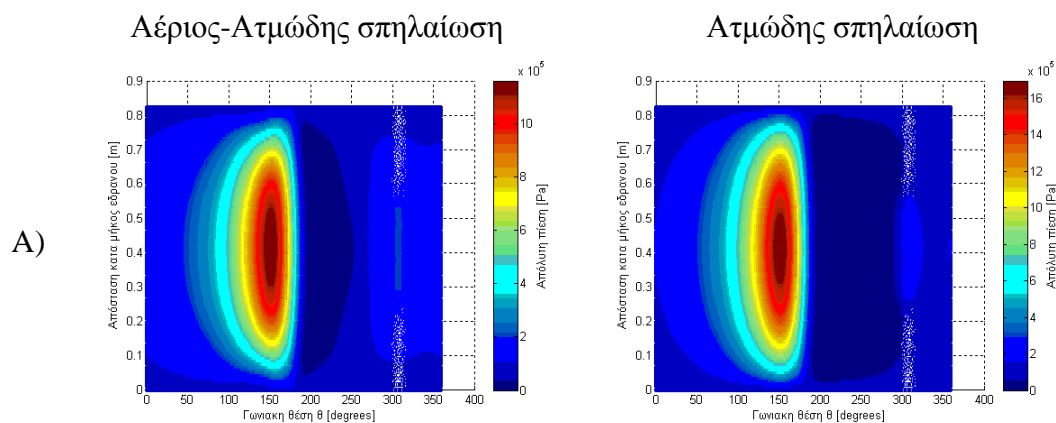


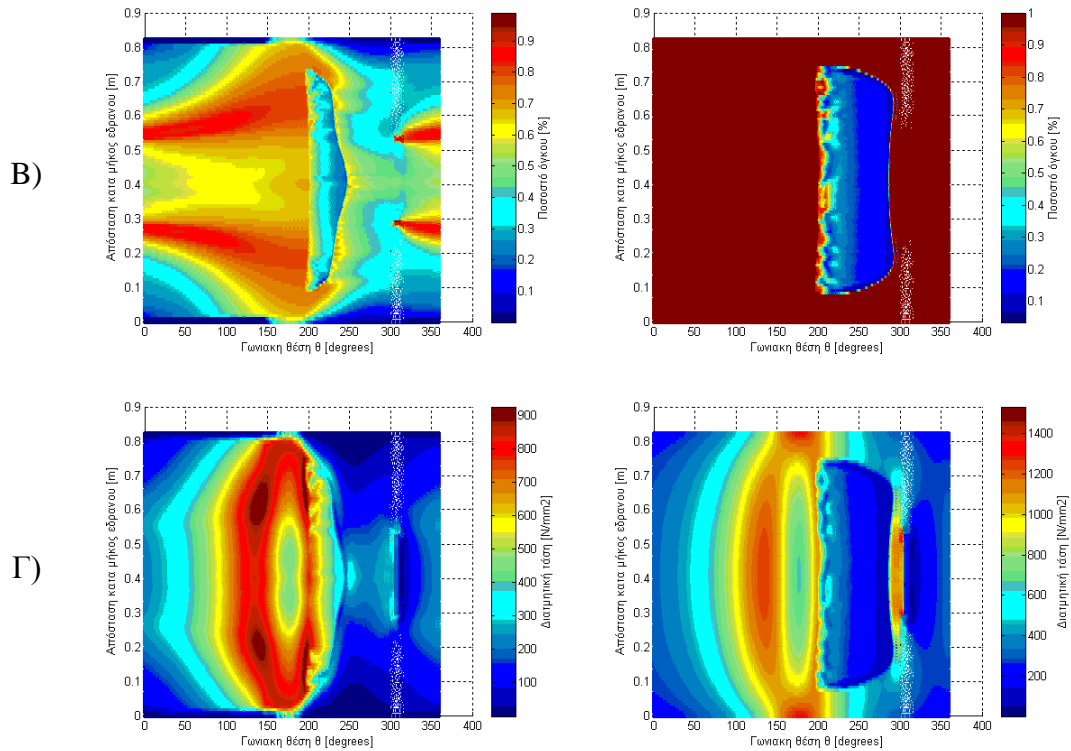
Εικόνα 7-18: Κατανομή Α) απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για τις περιπτώσεις αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης και ατμώδους σπηλαίωσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρικά $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, $\psi_y=0.0\text{rad}$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται στο μέσο του εδράνου κατά το διάμηκες, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για διάφορες διαστάσεις ορθογωνικής διατομής.

Παρατηρώντας τα γραφήματα της Εικόνας 7-18, η μεταβολή του μεγέθους της ορθογωνικής οπής δεν έχει σημαντική επίδραση στο προφίλ της πίεσης κατά το μέσο του εδράνου. Η μόνη μεταβολή που παρατηρείται είναι η μικρή αύξηση της διατμητικής τάσης και του κλάσματος όγκου του υγρού λιπαντικού για το μικρότερο μέγεθος της οπής. Περισσότερα συμπεράσματα για το προφίλ του λιπαντικού προκύπτουν από τη μελέτη της κατανομής της πίεσης, της διατμητικής τάσης και του κλάσματος όγκου υγρού στην επιφάνεια του εδράνου στις υπο-ενότητες 7.5.1 έως 7.5.3.

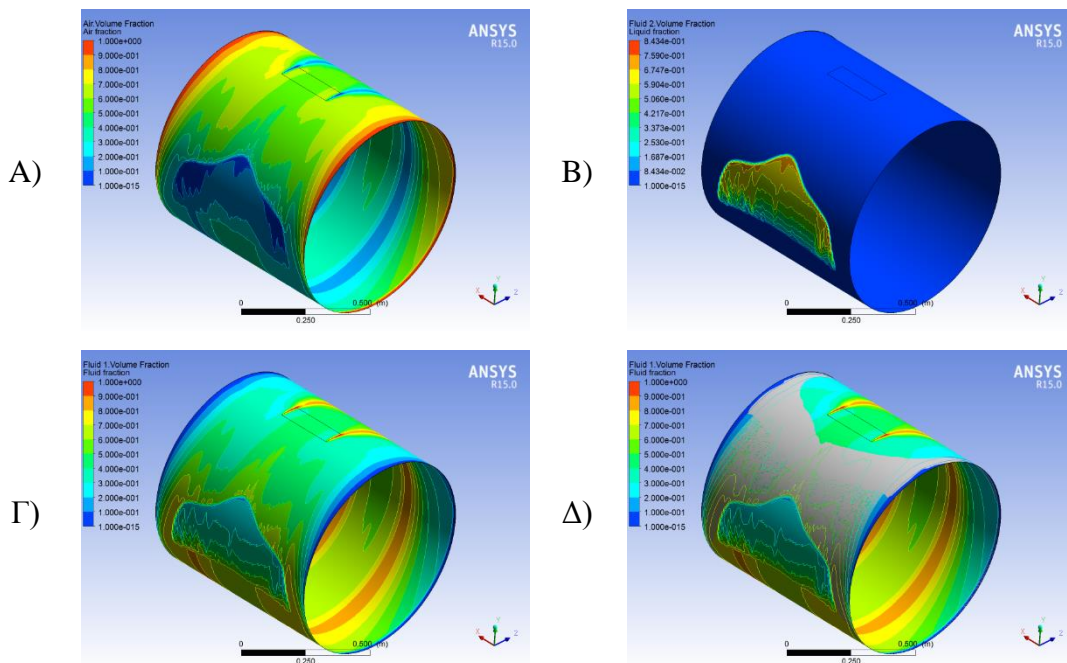
7.5.1 Διάσταση ορθογωνικής διατομής 0.1L x 0.3L

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους και αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$, για σχετική πίεση εισαγωγής $P_{in}=1\text{bar}$, ορθογωνική οπή εισαγωγής λιπαντικού, διαστάσεων 0.1L x 0.3L και για γωνία απευθυγράμμισης $\bar{\psi}_y=0.0\text{ rad}$.





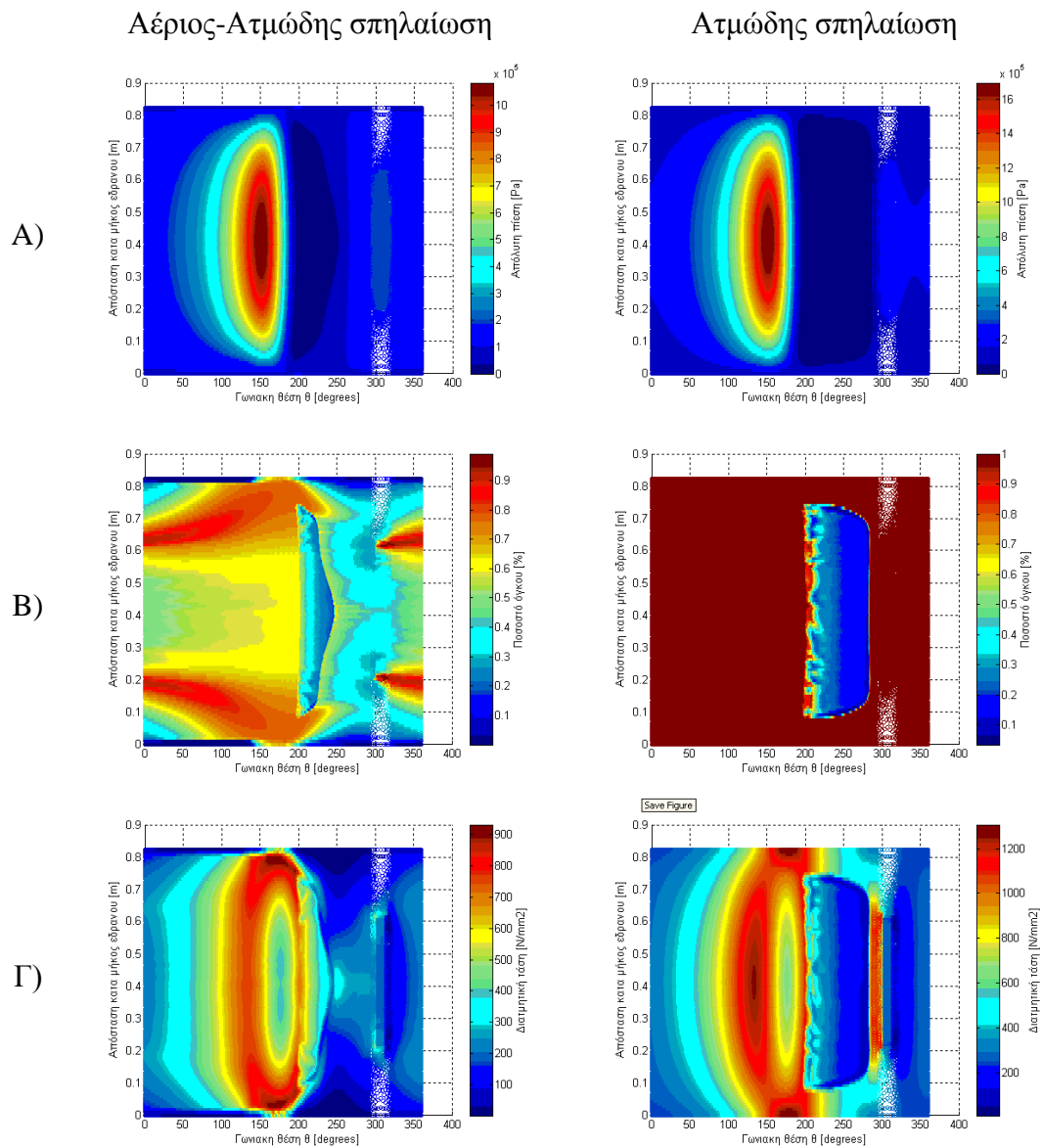
Εικόνα 7-19: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατιμώδους/αερίως-ατιμώδους σπηλαιώσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1bar$, ορθογωνική οπή διαστάσεων $0.1L \times 0.3L$, $\psi_y=0.0rad$



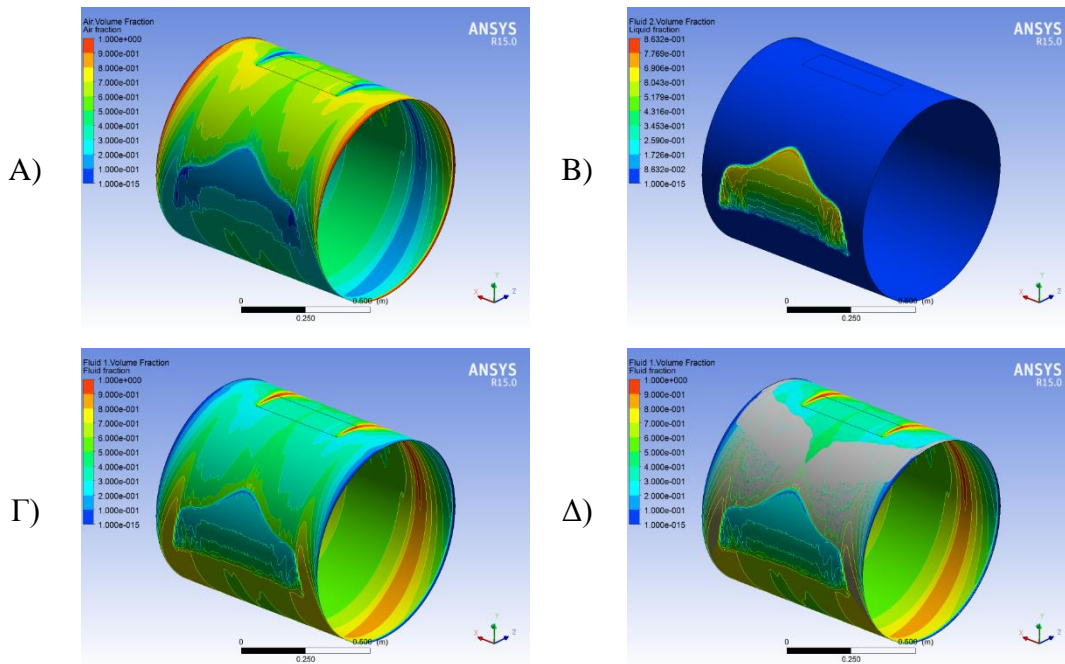
Εικόνα 7-20: Φαινόμενο αερίως-ατιμώδους σπηλαιώσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατιμώδους λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1bar$, ορθογωνική οπή διαστάσεων $0.1L \times 0.3L$, $\psi_y=0.0rad$.

7.5.2 Διάσταση ορθογωνικής διατομής 0.15L x 0.5L

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους και αερίας-ατμώδους σπηλαίωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$, για σχετική πίεση εισαγωγής $P_{in}=1\text{bar}$, ορθογωνική οπή εισαγωγής λιπαντικού, διαστάσεων 0.15L x 0.5L και για γωνία απευθυγράμμισης $\bar{\psi}_y=0.0\text{ rad}$.



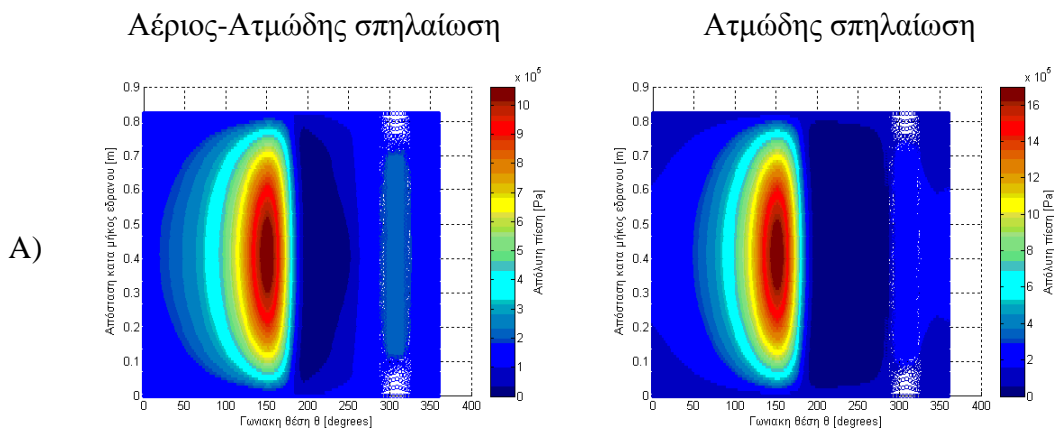
Εικόνα 7-21: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατημητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αερίας-ατμώδους σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, ορθογωνική οπή διαστάσεων 0.15L x 0.5L, $\psi_y=0.0\text{rad}$

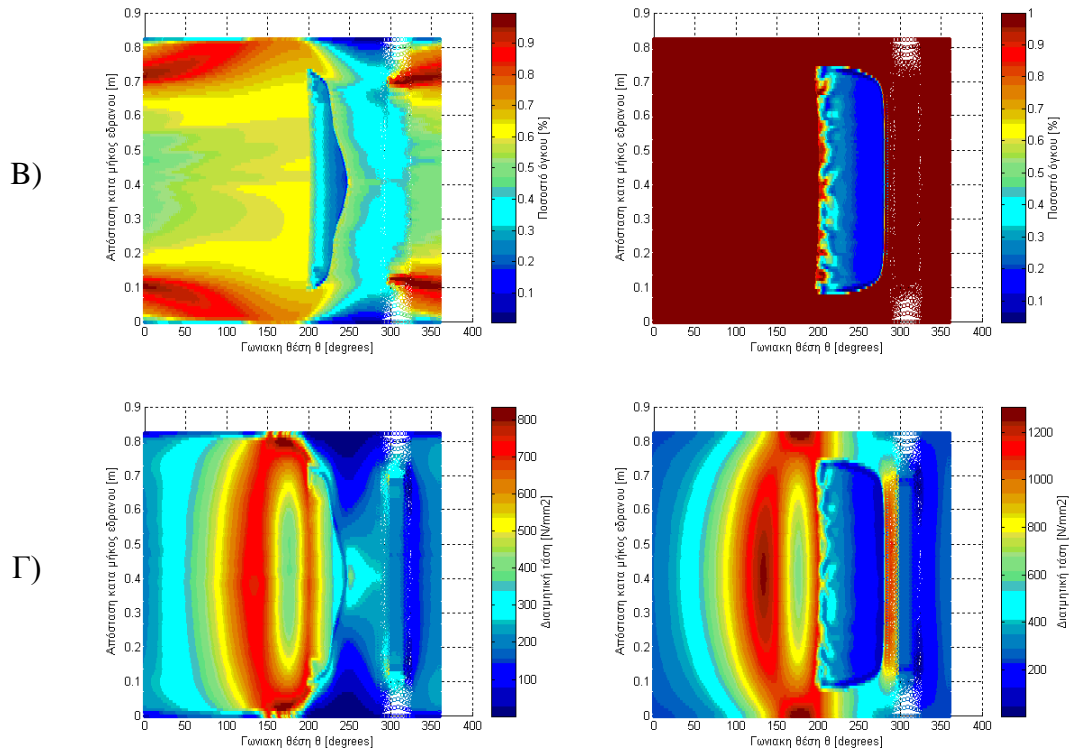


Εικόνα 7-22: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, ορθογωνική οπή διαστάσεων $0.15L \times 0.5L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$.

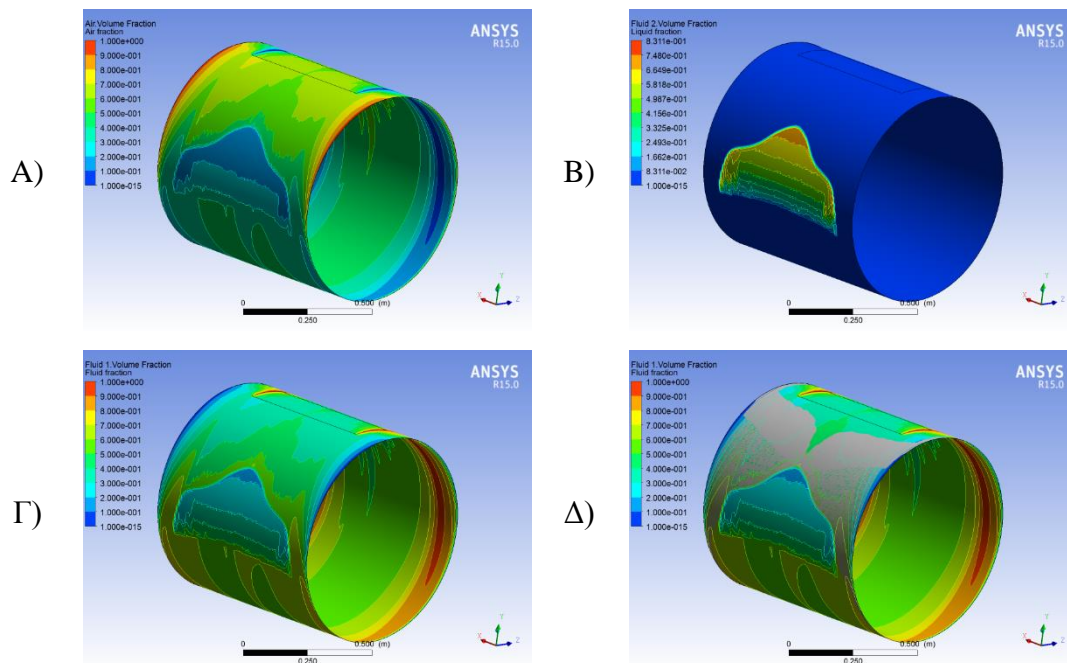
7.5.3 Διάσταση ορθογωνικής διατομής $0.2L \times 0.7L$

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους και αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$, για σχετική πίεση εισαγωγής $P_{in}=1\text{bar}$, ορθογωνική οπή εισαγωγής λιπαντικού, διαστάσεων $0.2L \times 0.7L$ και για γωνία απευθυγράμμισης $\bar{\psi}_y=0.0\text{ rad}$.





Εικόνα 7-23: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατιμώδους/αέριας-ατιμώδους σπηλαιώσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\epsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, ορθογωνική οπή διαστάσεων $0.2L \times 0.7L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$



Εικόνα 7-24: Φαινόμενο αέριας-ατιμώδους σπηλαιώσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατιμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\epsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, ορθογωνική οπή διαστάσεων $0.2L \times 0.7L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$.

7.5.4 Συμπεράσματα

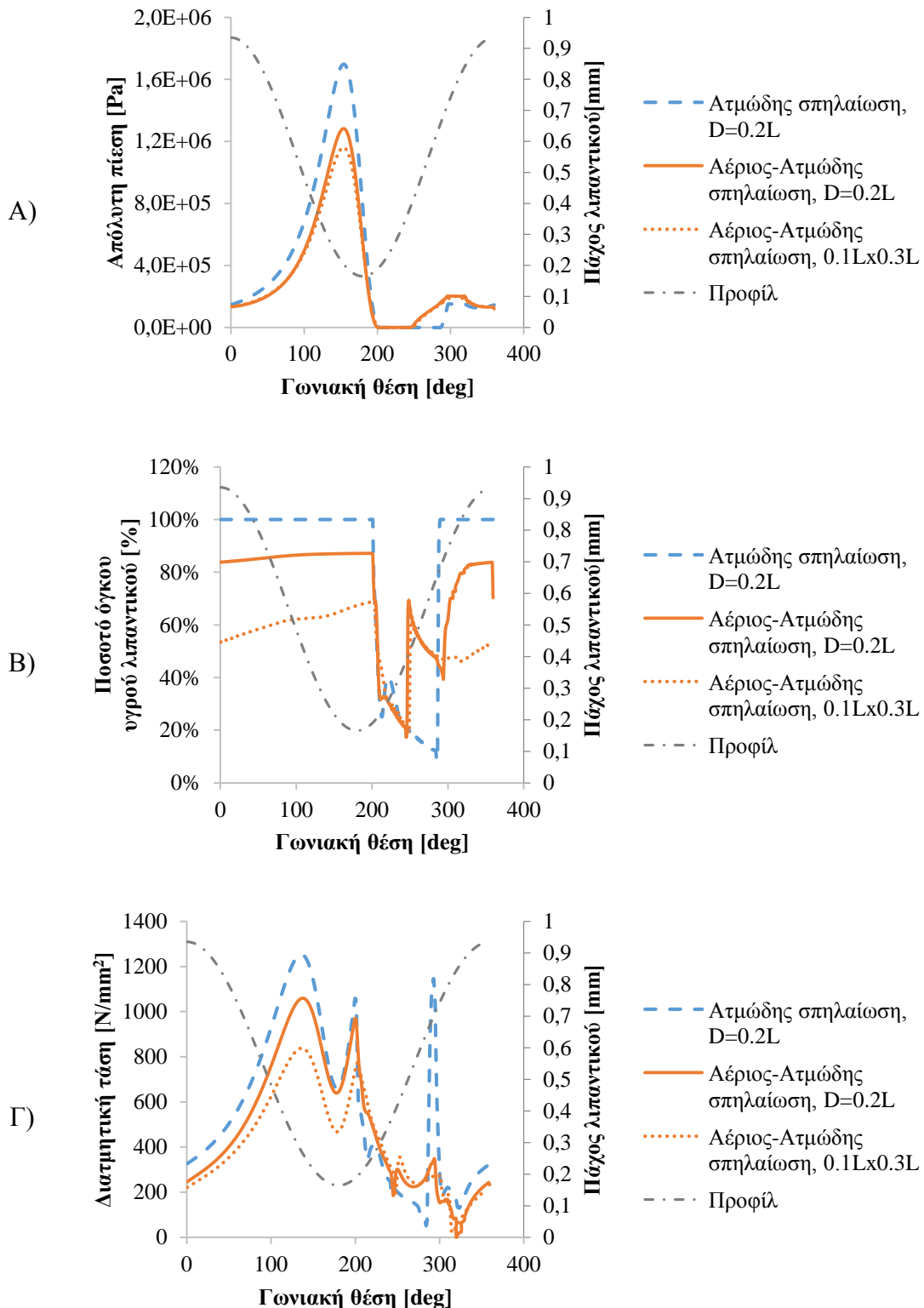
Η χρήση μίας ορθογωνικής διατομής έχει επίπτωση στη διαμόρφωση της ζώνης σπηλαίωσης αλλά και στην κατανομή του υγρού στην επιφάνεια του εδράνου, όταν στα άκρα αυτού υπάρχει αέρας. Όταν μελετάται αποκλειστικά το φαινόμενο της ατμώδους σπηλαίωσης, η ζώνη σπηλαίωσης εμφανίζεται να είναι πλέον πιο ομοιόμορφη λόγω της μεγαλύτερης παροχής λιπαντικού κατά το μήκος του εδράνου. Αντίθετα, ιδιαίτερη εντύπωση προκαλεί η κατανομή του υγρού λιπαντικού στην επιφάνεια του άξονα κατά την περιφερειακή διεύθυνση, όταν χρησιμοποιείται οπή εισαγωγής ορθογωνικής διατομής.

Συγκεκριμένα, κοντά στις ακμές της οπής εισαγωγής και κατά το πλάτος αυτής, το λιπαντικό εισέρχεται με μεγαλύτερη παροχή, προσπίπτοντας πάνω στην επιφάνεια του άξονα. Αντίθετα, στο μέσο του άξονα δεν υπάρχει τόσο μεγάλο ποσοστό λιπαντικού όπως είχε παρατηρηθεί στην κυκλική διατομή, πιθανόν λόγω της έκτασης που καταλαμβάνει η ορθογωνική οπή στην επιφάνεια του εδράνου. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου, διακρίνεται ότι το υγρό λιπαντικό απομακρύνεται με αυτό τον τρόπο ταχύτερα από τα άκρα του εδράνου. Καθώς αυξάνεται το μήκος της ορθογωνικής οπής και τα άκρα της οπής απομακρύνονται, τότε αυξάνεται και η παροχή που εκρέει προς τα άκρα του εδράνου.

Αντίθετα με το κλάσμα όγκου του υγρού λιπαντικού, η περιοχή όπου ατμοποιείται το λιπαντικό, επηρεάζεται μόνο από το πλάτος της ορθογωνικής διατομής. Καθώς αυτό αυξάνεται, το μέτωπο υγροποίησης των ατμών του λιπαντικού μετακινείται πλησιέστερα προς το μέτωπο ατμοποίησης, μειώνοντας ελαφρώς την περιοχή σπηλαίωσης. Το φαινόμενο της διάχυσης του αέρα μέσα στο έδρανο επηρεάζεται από τον τρόπο με τον οποίο εκρέει το λιπαντικό προς τα άκρα, ενώ η ζώνη που καλύπτει ο αέρας στην περιφέρεια του εδράνου, φαίνεται ότι παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα του μήκους της οπής. Τέλος, το πεδίο ανάπτυξης της πίεσης, φαίνεται ότι παραμένει αμετάβλητο, ανεξάρτητα του μεγέθους της οπής και του φαινομένου που εξετάζεται.

7.6 Επίδραση γεωμετρίας οπής εισαγωγής λιπαντικού

Στα προηγούμενα δύο κεφάλαια έγινε ανάλυση της επίδρασης του μεγέθους της οπής στα φαινόμενα της σπηλαίωσης και στην κατανομή της πίεσης και του κλάσματος όγκου του λιπαντικού. Στα παρακάτω διαγράμματα γίνεται η σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών γεωμετριών. Για σύγκριση έχουν επιλεγθεί δύο ενδεικτικές περιπτώσεις, μιας και όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως, το μέγεθος για κάθε μία γεωμετρία έχει μικρή επίπτωση στην ανάπτυξη του φαινομένου.



Εικόνα 7-25: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διαμητρικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριος-ατμώδους σπηλαίωσης και μεταξύ ορθογωνικής και κυκλικής διατομής, για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, $P_m=1bar$, $\psi_y=0.0grad$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται στο μέσο του εδράνου κατά το διάμηκες, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7-25, στο μέσο του εδράνου αναπτύσσεται μεγαλύτερη πίεση όταν τοποθετείται μία κυκλική διατομή σε αντίθεση με τη τοποθέτηση μιας

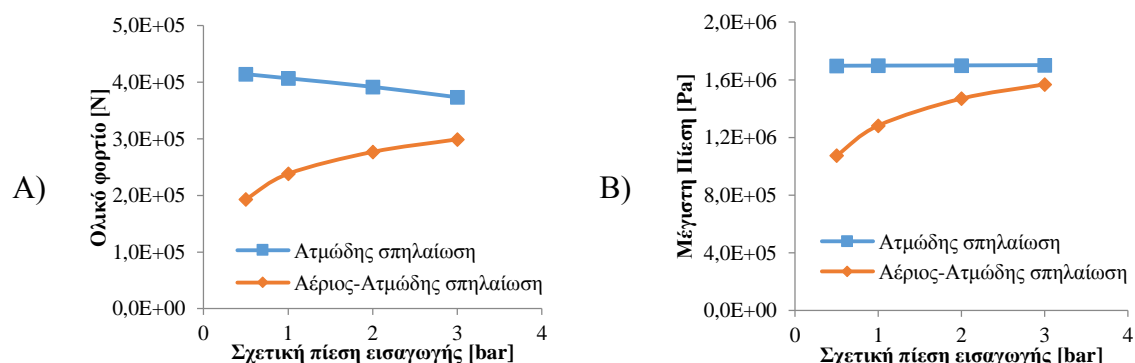
ορθογωνικής διατομής. Επιπλέον, το ποσοστό του υγρού λιπαντικού που υπάρχει στη μέση τομή είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σύγκριση με την αντίστοιχη περίπτωση. Αποτέλεσμα αυτής της αύξησης είναι η ανάπτυξη μεγαλύτερου φορτίου, καθώς υπάρχει περισσότερη ποσότητα λιπαντικού στο μέσο του εδράνου όπου και υπάρχει μεγαλύτερη κατανομή πίεσης, αλλά και η ανάπτυξη μεγαλύτερων διατμητικών τάσεων.

Επίσης, η γεωμετρία της ορθογωνικής διατομής επηρεάζει σημαντικά την παροχή λιπαντικού εντός του εδράνου, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 7.5. Αντίθετα, η ομαλή ακμή της κυκλικής οπής προσφέρει μία πιο ομαλή κατανομή του πεδίου της ροής στην επιφάνεια του εδράνου, διατηρώντας το μεγαλύτερο ποσοστό του υγρού λιπαντικού στο μέσο του εδράνου, εκεί δηλαδή που αναμένεται μεγαλύτερο φορτίο. Φυσικά, η πιθανή χρήση της ορθογωνικής διατομής σε έδρανα αρκετού μεγάλου μήκους, να προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα, εκμεταλλεύοντας τη μεγαλύτερη εξάπλωση της στρώσης του υγρού λιπαντικού προς τα άκρα του εδράνου.

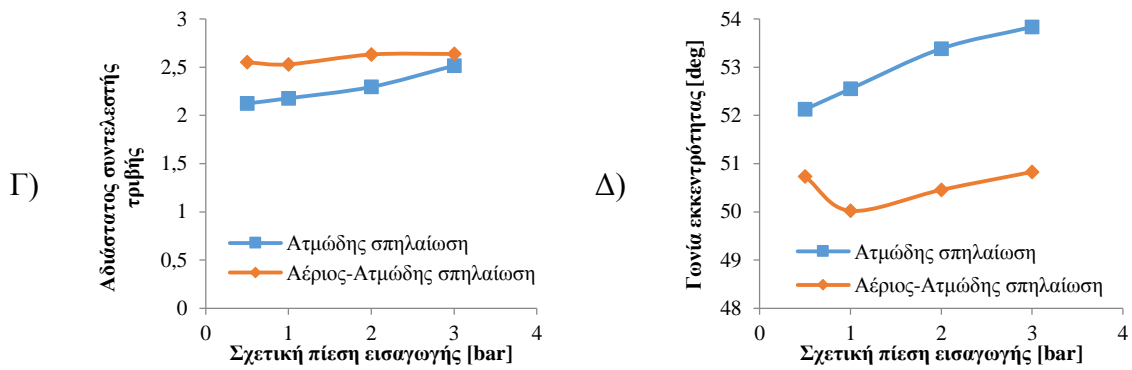
7.7 Επίδραση της πίεσης εισαγωγής λιπαντικού στο φαινόμενο της σπηλαιώσης

Στη συνέχεια της διερεύνησης της επίπτωσης των διαφόρων παραμέτρων στο φαινόμενο της σπηλαιώσης των ακτινικών εδράνων, μελετάται η επίδραση της πίεσης εισαγωγής του λιπαντικού μέσα στο έδρανο. Ως γεωμετρία της οπής επιλέχθηκε η κυκλική, μιας και δίνει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα, ενώ ως διάμετρος της οπής επιλέχθηκε το 20% του μήκους του εδράνου. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά παραμένουν σταθερά, ήτοι $L/D=1$, $\epsilon=0.7$, ενώ οι άξονες είναι πλήρως ευθυγραμμισμένοι.

Οι σχετικές⁵ πιέσεις στις οποίες εξετάστηκε το συγκεκριμένο μοντέλο μεταβάλλονται από 0.5bar έως 3 bar. Ακολουθώς εμφανίζεται η μεταβολή της μέγιστης πίεσης, του ολικού φορτίου, του αδιάστατου συντελεστή τριβής και της γωνίας συμπεριφοράς συναρτήσει της πίεσης εισαγωγής.

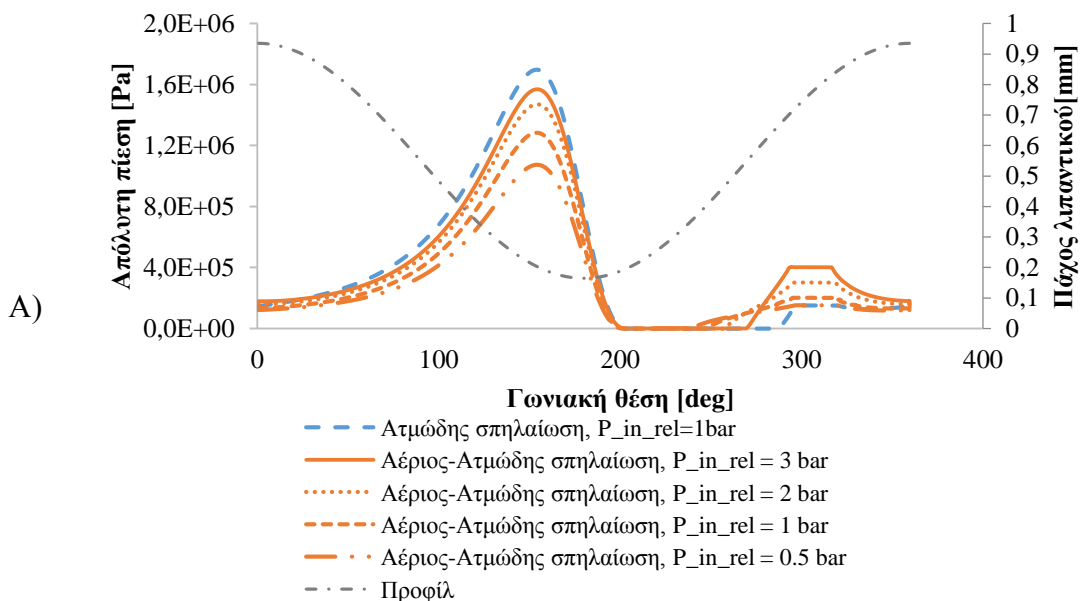


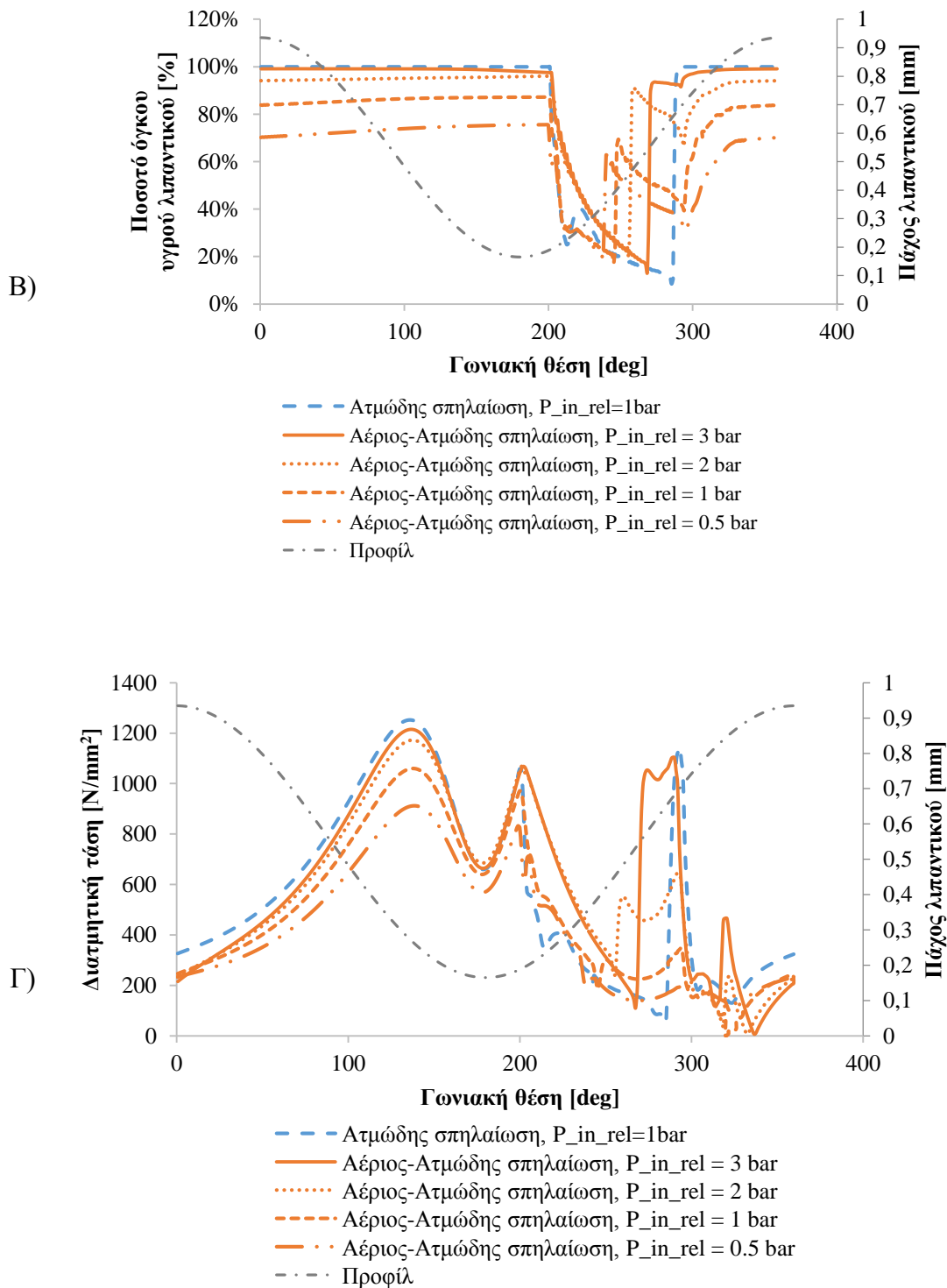
⁵ Υπενθυμίζεται ότι ως σχετική πίεση ορίζεται η διαφορά πίεσης που ασκείται στην εισαγωγή του λιπαντικού σε σχέση πάντα με την πίεση αναφοράς, η οποία στην περίπτωση της συγκεκριμένης μελέτης είναι ίση με την ατμοσφαιρική.



Εικόνα 7-26: Σύγκριση Α) ολικού φορτίου, Β) μέγιστης πίεσης, Γ) αδιάστατου συντελεστή τριβής και Δ) γωνία συμπεριφοράς μεταξύ ατμώδους/αέριος-ατμώδους σπηλαιώσης μεταβάλλοντας την πίεση εισαγωγής για χαρακτηριστικά γεωμετρίας εδράνου $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$

Βάσει των διαγραμμάτων της Εικόνας 7-26, η αποκλειστική μελέτη του φαινομένου της ατμώδους σπηλαιώσης δεν επιδρά στην πίεση εισαγωγής κατά τη λειτουργία του εδράνου. Αντίθετα, όταν μελετάται η επίδραση της διάχυσης του αέρα εντός του εδράνου, είναι ξεκάθαρο ότι το φορτίο και η πίεση αυξάνεται, έως ότου προσεγγιστεί η περίπτωση στην οποία δεν λαμβάνεται υπόψη ο αέρας για τη μελέτη του φαινομένου. Για τη καλύτερη προσέγγιση, στην Εικόνα 7-27 δίνονται ενδεικτικά τα διαγράμματα κατανομής πίεσης, ποσοστού όγκου και τάσεων συναρτήσει της περιφερειακής γωνιακής θέσης.





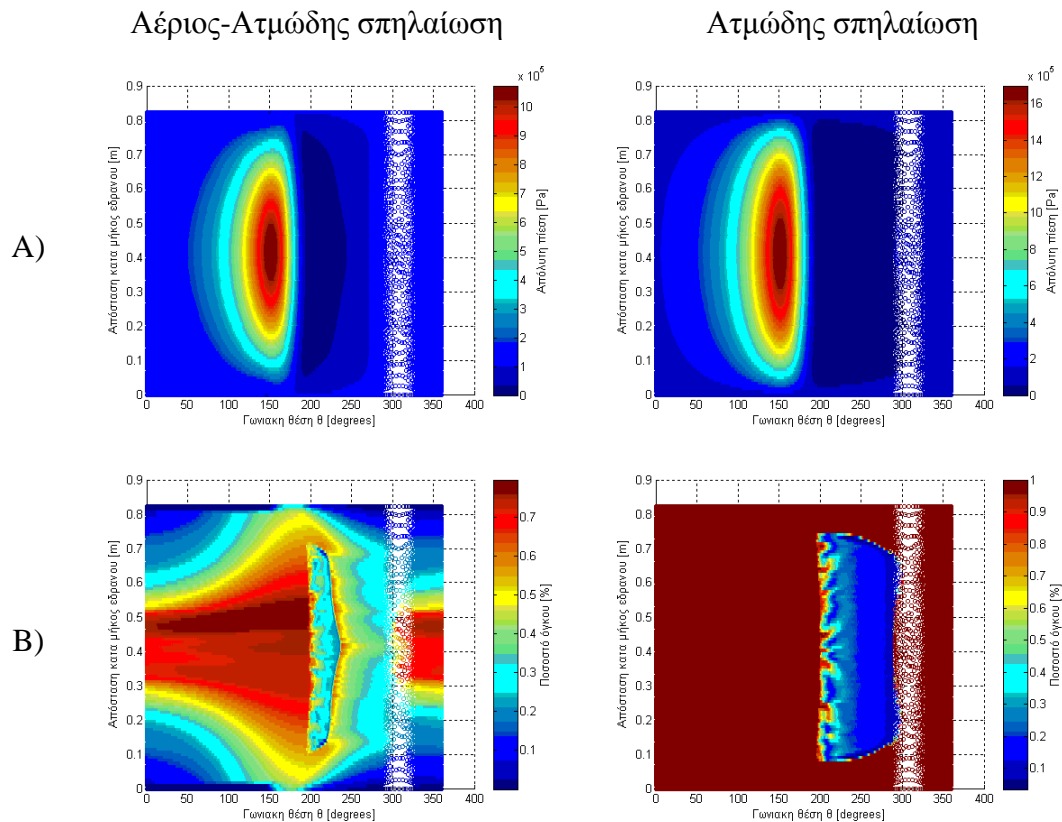
Εικόνα 7-27: Κατανομή Α) απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για τις περιπτώσεις αέριος-ατμώδους σπηλαίωσης και ατμώδους σπηλαίωσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi=0.0\text{rad}$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται στο μέσο του εδράνου κατά το διάμηκες, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για διάφορες τιμές πίεσης εισαγωγής λιπαντικού.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στα γραφήματα της Εικόνας 7-27 απεικονίζεται μόνο μία ενδεικτική περίπτωση για την αποκλειστική μελέτη του φαινομένου της ατμώδους σπηλαίωσης (για $P_{in}=1\text{bar}$), καθώς δεν υπάρχει απόκλιση στα αποτελέσματα όταν μεταβάλλεται η πίεση εισαγωγής, παρά μόνο στα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στη γωνιακή θέση όπου βρίσκεται η οπή εισαγωγής του λιπαντικού. Οι διαφορές αυτές είναι πάντα αναμενόμενες, λόγω της ανάμειξης της υπάρχουσας ροής με το νέο λιπαντικό που εισέρχεται στο έδρανο και της διαφορετικής πίεσης εισαγωγής.

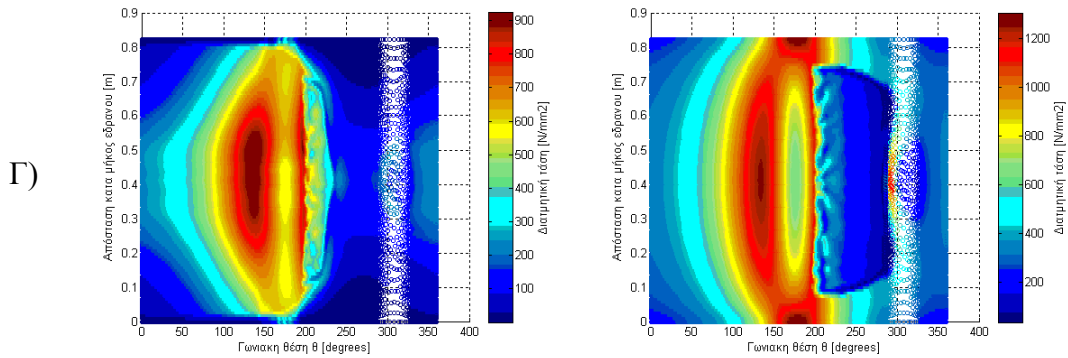
Όταν η σχετική πίεση εισόδου γίνει ίση με 3 bar, τότε το προφίλ της πίεσης μεταξύ της αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης και της ατμώδους σπηλαίωσης, σχεδόν ταυτίζεται. Για καλύτερη αξιολόγηση των δεδομένων, στις ακόλουθες υπο-ενότητες απεικονίζονται οι μεταβολές των παραπάνω μεγεθών στην επιφάνεια του άξονα για τις διάφορες τιμές πίεσης εισαγωγής⁶, όπως επίσης και λεπτομερής προβολή των ποσοστών του καθενός ρευστού κατά τη μελέτη του συνδυασμένου φαινομένου της αέριας και ατμώδους σπηλαίωσης.

7.7.1 Πίεση εισαγωγής $P_{in}=0.5\text{bar}$

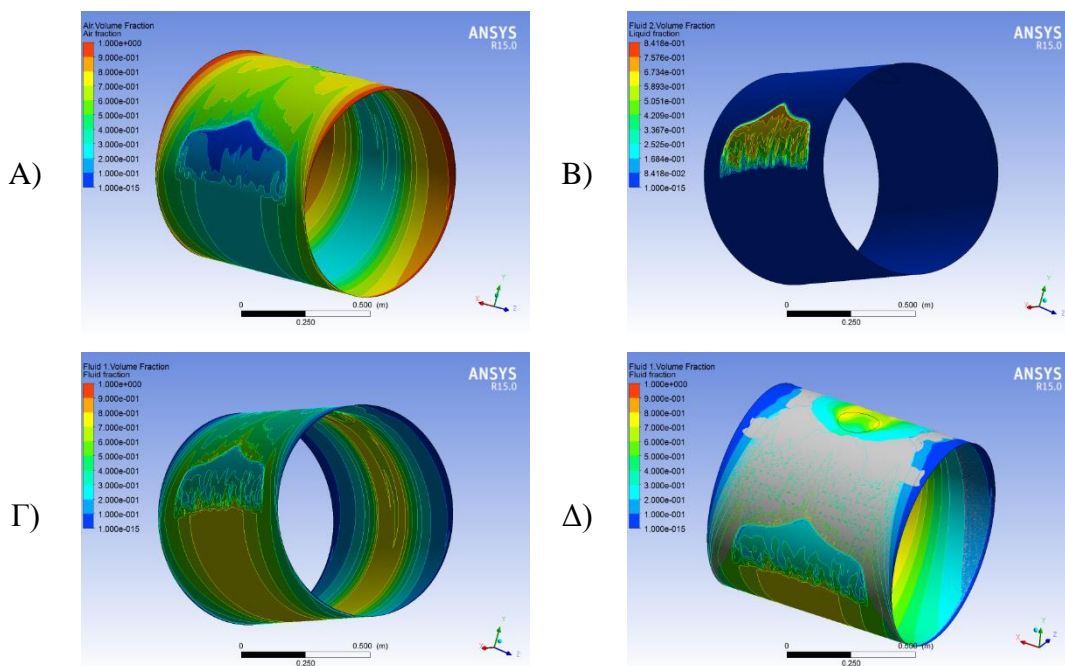
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους και αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$, για σχετική πίεση εισαγωγής $P_{in}=0.5\text{bar}$, κυκλική οπή εισαγωγής λιπαντικού, διαμέτρου $D=0.2L$ και για γωνία απευθυγράμμισης $\bar{\psi}_y=0.0$ rad.



⁶ Εξαιρείται η περίπτωση για πίεση εισαγωγής $P_{in}=1$ όπου παρουσιάστηκε στην παράγραφο 7.3.2



Εικόνα 7-28: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\epsilon=0.5$, $P_{in}=0.5\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$.



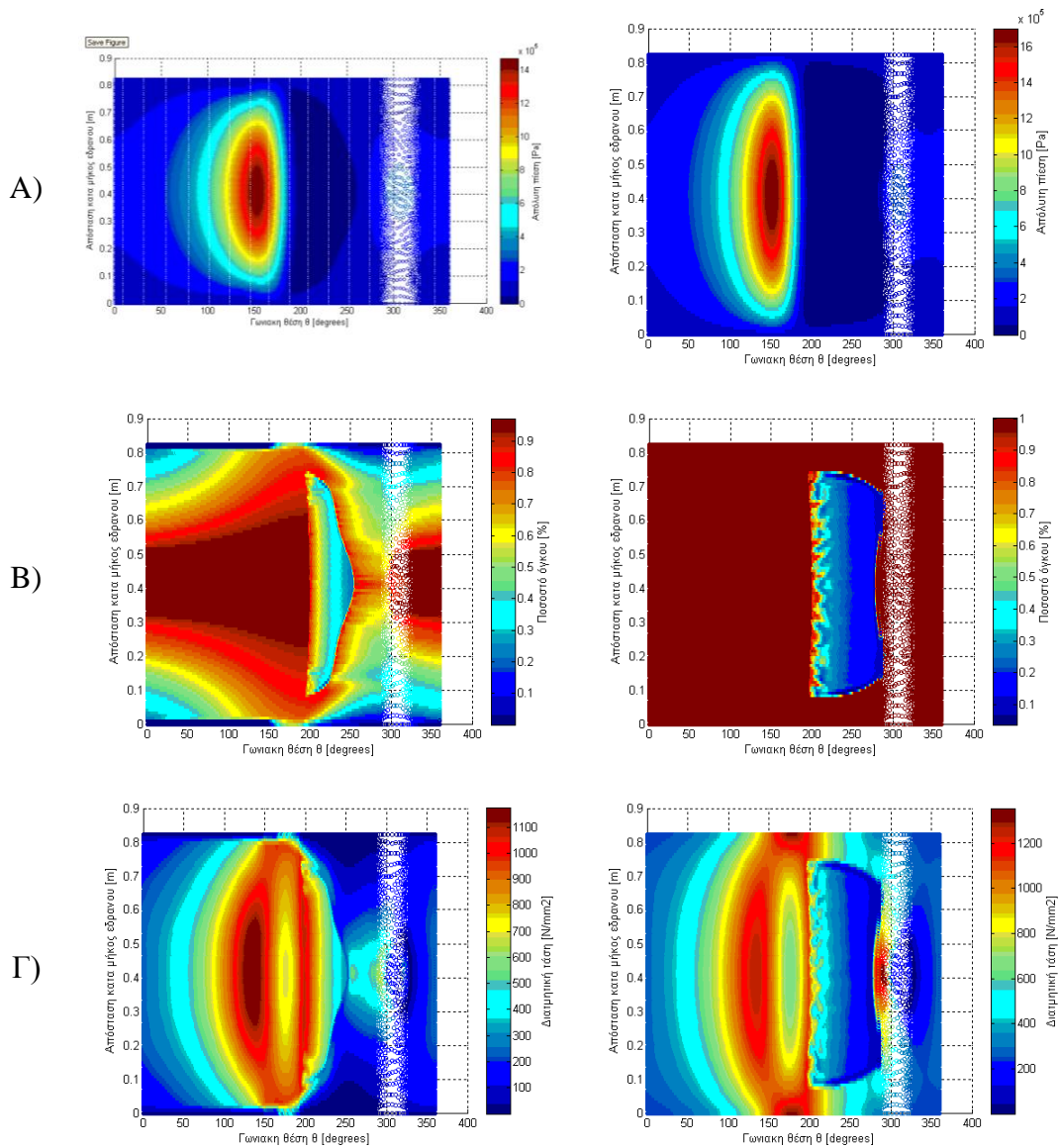
Εικόνα 7-29: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το γργό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\epsilon=0.5$, $P_{in}=0.5\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$.

7.7.2 Πίεση εισαγωγής $P_{in}=2\text{ bar}$

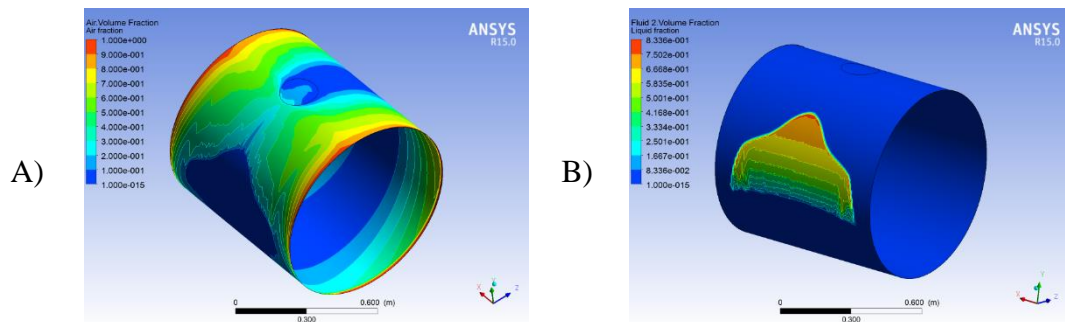
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους και αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\epsilon=0.7$, για σχετική πίεση εισαγωγής $P_{in}=2\text{bar}$, κυκλική οπή εισαγωγής λιπαντικού, διαμέτρου $D=0.2L$ και για γωνία απευθυγράμμισης $\bar{\psi}_y=0.0\text{ rad}$.

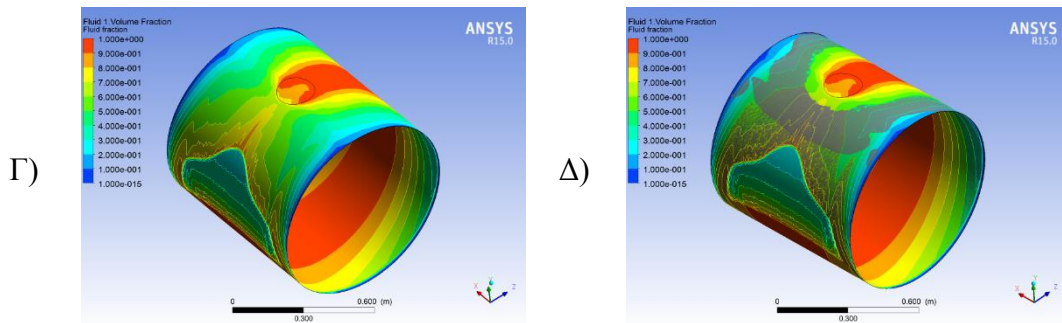
Αέριος-Ατμώδης σπηλαιώση

Ατμώδης σπηλαιώση



Εικόνα 7-30: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\epsilon=0.5$, $P_{in}=2\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$.

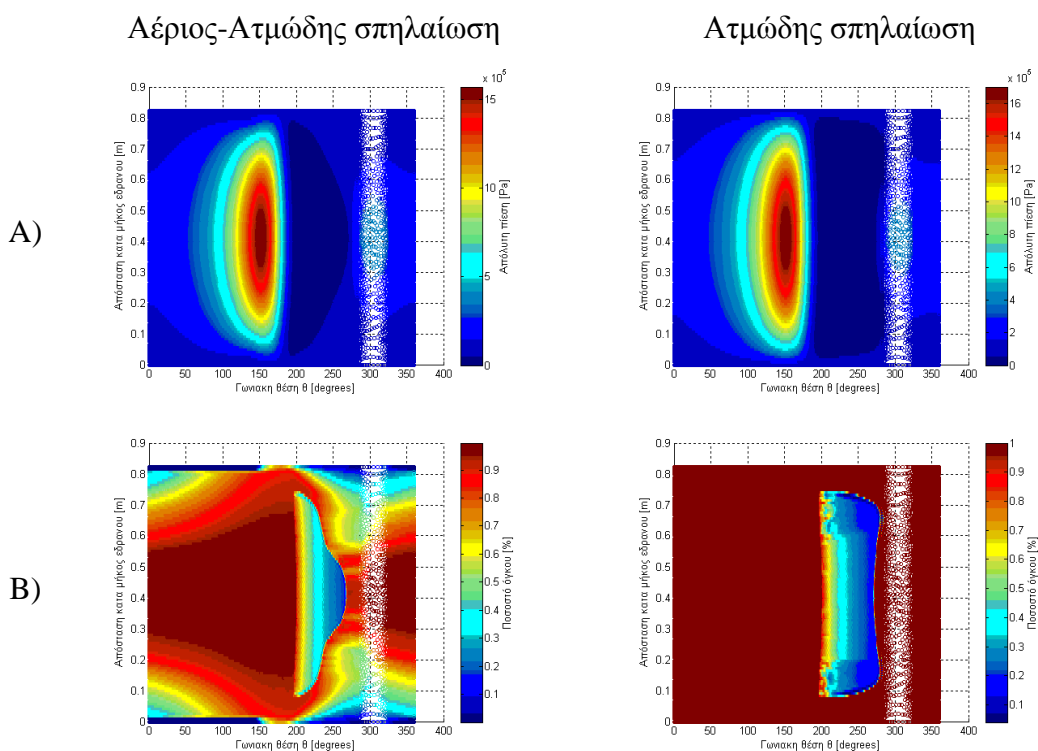


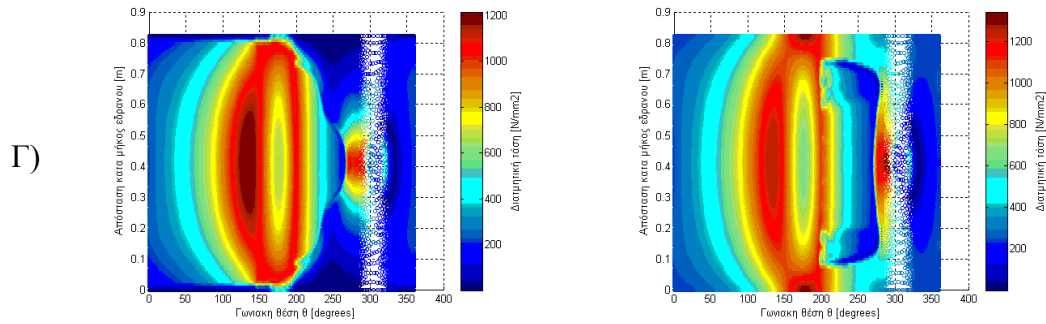


Εικόνα 7-31: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=2\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.0\text{rad}$.

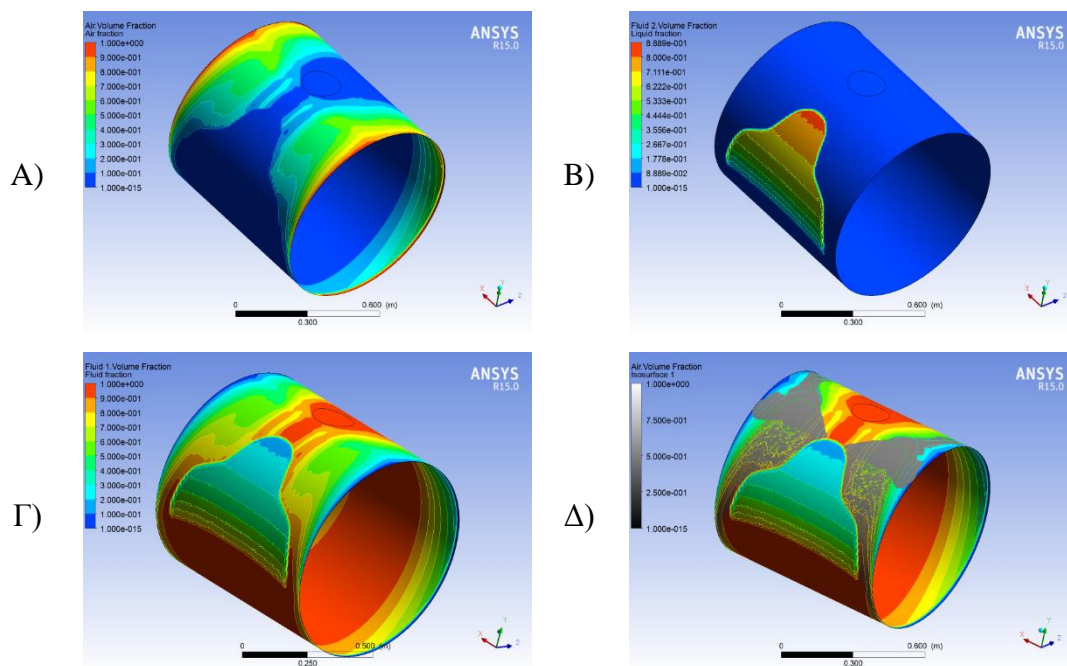
7.7.3 Πίεση εισαγωγής $P_{in}=3\text{ bar}$

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους και αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$, για σχετική πίεση εισαγωγής $P_{in}=3\text{bar}$, κυκλική οπή εισαγωγής λιπαντικού, διαμέτρου $D=0.2L$ και για γωνία απευθυγράμμισης $\bar{\psi}_y=0.0\text{ rad}$.





Εικόνα 7-32: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\epsilon=0.5$, $P_{in}=3\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_g=0.0\text{rad}$.



Εικόνα 7-33: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\epsilon=0.5$, $P_{in}=3\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_g=0.0\text{rad}$.

7.7.4 Συμπεράσματα

Η αύξηση της πίεσης εισαγωγής στην οπή του εδράνου έχει άμεση επίδραση στο φαινόμενο της αέριας σπηλαιώσης. Καθώς η πίεση αυξάνεται, παρατηρείται ότι μεγαλύτερες ποσότητες λιπαντικού καλύπτουν την επιφάνεια του άξονα. Ειδικά στην περίπτωση όπου η σχετική πίεση εισόδου είναι ίση με 3 bar, σχεδόν το 50% του μήκους του άξονα καλύπτεται με λιπαντικό σε υγρή μορφή, προσεγγίζοντας την περίπτωση όπου μελετάται το έδρανο χωρίς την παρουσία αέρα στα άκρα.

Λόγω της μεγαλύτερης πίεσης εισόδου του λιπαντικού, ο αέρας πλέον δεν μπορεί να καλύψει μεγάλο εύρος της περιοχής σπηλαιώσης. Συνεπώς η ποσότητα όγκου αέρα που

υπάρχει μέσα στο έδρανο μειώνεται σημαντικά, επηρεάζοντας με αυτό το τρόπο το πεδίο της πίεσης που αναπτύσσεται μέσα στο έδρανο.

Ταυτόχρονα, παρατηρείται ότι καθώς αυξάνει η πίεση εισαγωγής, το υγρό λιπαντικό καταλαμβάνει μεγαλύτερη επιφάνεια, ενώ μικρότερες ποσότητες αέρα εισέρχονται από τα άκρα του εδράνου. Κατά συνέπεια, η επίδραση της διάχυσης του αέρα στην περιοχή ατμοποίησης του λιπαντικού μειώνεται, με αποτέλεσμα την εξάπλωση της περιοχής ατμώδους σπηλαίωσης. Σε αυτή την περίπτωση, το προφίλ της πίεσης, όπως επίσης και η κατανομή του ποσοστού όγκου του υγρού λιπαντικού τείνουν να προσεγγίσουν τη λύση όπου μελετάται αποκλειστικά το φαινόμενο της ατμώδους σπηλαίωσης. Φυσικά, κάποιες μικρές ποσότητες αέρα συνεχίζουν να εμφανίζονται στα άκρα του εδράνου, αλλά όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, η επίδραση στο τελικό προφίλ της πίεσης είναι αμελητέα.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι και οι διατμητικές τάσεις για πίεση εισαγωγής ίση με 3 bar ταυτίζονται μεταξύ της ατμώδους και αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης, με αποτέλεσμα ο αδιάστατος συντελεστής τριβής του εδράνου και για τις δύο περιπτώσεις να είναι σχεδόν ο ίδιος. Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω παρατηρήσεων, θα μπορούσε να σημειωθεί ότι όταν το υγρό λιπαντικό καταλαμβάνει ποσοστό ίσο ή μεγαλύτερο του 50% του μήκους του άξονα σε ολόκληρη την περιφέρεια, τότε η επίδραση του φαινομένου της διάχυσης του αέρα στο έδρανο είναι ελάχιστη, μειώνοντας ταυτόχρονα την περιοχή ατμοποίησης του λιπαντικού.

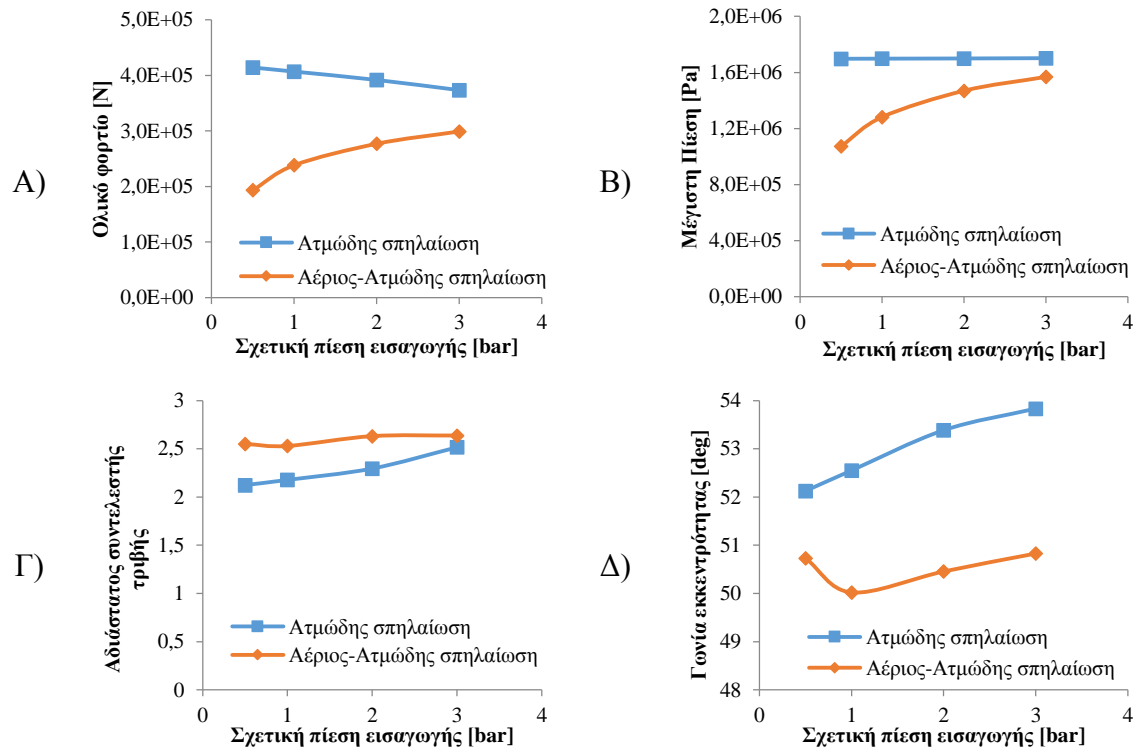
7.8 Μελέτη του φαινομένου της σπηλαίωσης λόγω απευθυγράμμισης του άξονα

Καθώς ο άξονας περιστρέφεται εντός του εδράνου, η ευθυγράμμιση του άξονα περιστροφής με τον άξονα του εδράνου είναι η πλέον επιθυμητή κατάσταση. Σε μερικές εφαρμογές όμως, λόγω των δυναμικών φορτίων που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία του άξονα ή της μεταβολής των ιδιοτήτων του λιπαντικού κατά την αξονική διεύθυνση, η θέση ισορροπίας του άξονα με το έδρανο διαφέρει κατά μήκος του εδράνου, λόγω της απευθυγράμμισης του άξονα. Η απευθυγράμμιση του άξονα έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του πάχους του λιπαντικού, όπως έχει ήδη διατυπωθεί στη θεωρία (παράγραφος 3.2.3).

Για τη μελέτη της επίδρασης της απόκλισης των αξόνων συμμετρίας στο φαινόμενο της σπηλαίωσης πραγματοποιήθηκε η υπολογιστική προσομοίωση σε έδρανο γεωμετρίας $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$, με κυκλική οπή εισαγωγής λιπαντικού, διαμέτρου $D=0.2L$, ενώ η σχετική πίεση εισαγωγής τέθηκε ίση με $P_{in}=1\text{bar}$. Κατά τη διάρκεια της μελέτης έγινε μεταβολή μόνο της γωνίας ψ_y που αντιστοιχεί στην περιστροφή του εγκάρσιου επιπέδου xz κατά τον άξονα z αν θεωρηθεί ότι ο άξονας z αντιστοιχεί στην αξονική διεύθυνση. Οι τιμές της γωνίας απευθυγράμμισης για τις οποίες έγιναν οι υπολογισμοί είναι οι εξής:

- $\bar{\psi}_y=0.01$ rad
- $\bar{\psi}_y=0.02$ rad
- $\bar{\psi}_y=0.03$ rad

Όπου $\bar{\psi}_y$ αντιστοιχεί στην κανονικοποιημένη γωνία συναρτήσεως της ακτινικής χάρης και του μήκους του εδράνου. Η επίδραση της μεταβολής της γωνίας $\bar{\psi}_y$ στο ολικό φορτίο, στη μέγιστη πίεση, στον αδιάστατο συντελεστή τριβής και στην γωνία συμπεριφοράς, απεικονίζεται στην Εικόνα 7-34.



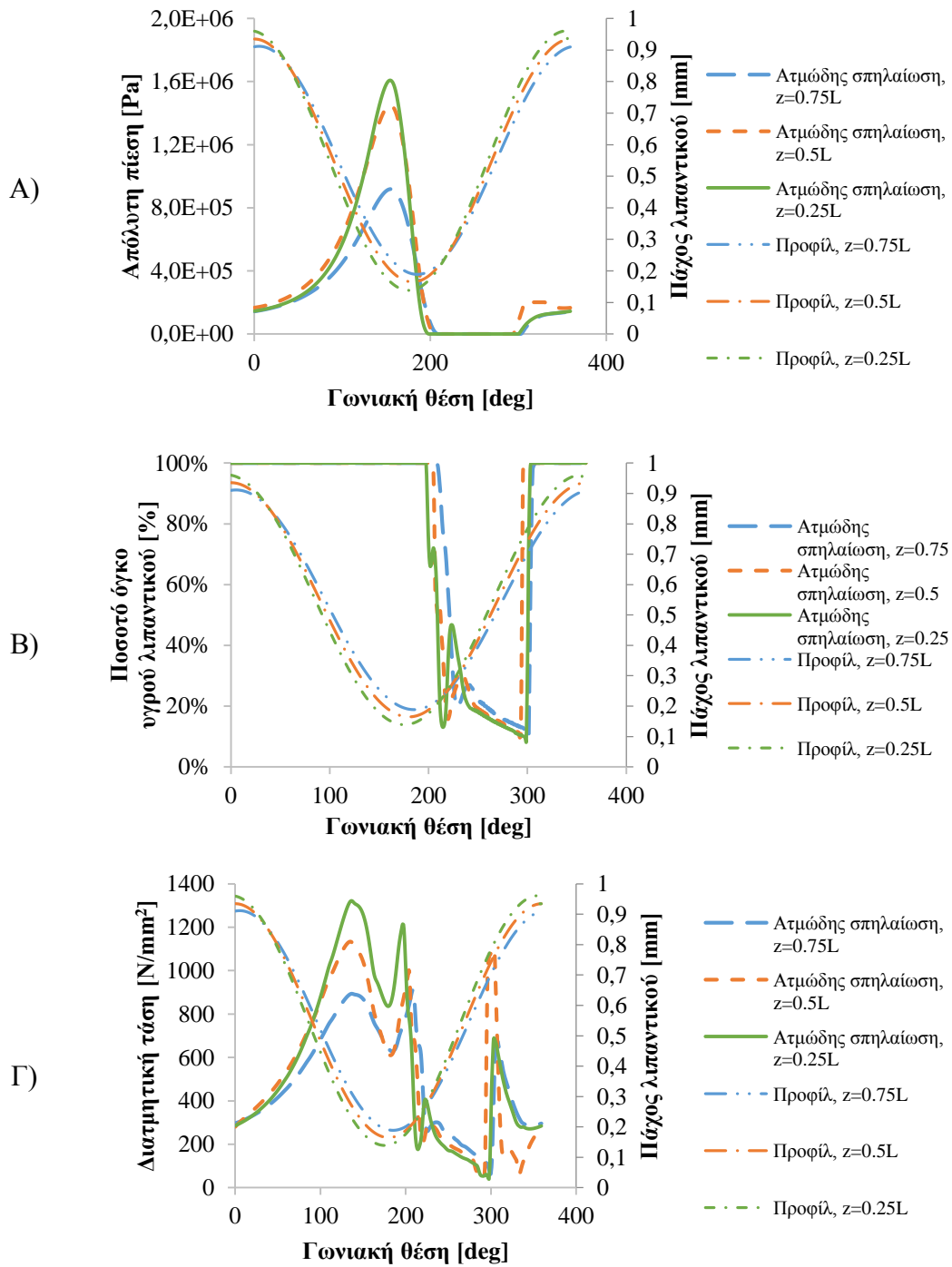
Εικόνα 7-34: Σύγκριση Α) ολικού φορτίου, Β) μέγιστης πίεσης, Γ) αδιάστατου συντελεστή τριβής και Δ) γωνία συμπεριφοράς μεταξύ ατμώδους/αέριος-ατμώδους σπηλαιώσεως μεταβάλλοντας τη γωνία $\bar{\psi}_y$ για χαρακτηριστικά γεωμετρίας εδράνου $L/D=1$, $\epsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$

Καθώς η γωνία $\bar{\psi}_y$ μεταβάλλεται, τα μεγέθη του φορτίου και του αδιάστατου συντελεστή τριβής δεν μεταβάλλονται σημαντικά. Επίσης δεν παρατηρείται κάποια σημαντική μεταβολή στη γωνία συμπεριφοράς του άξονα. Συνεπώς, η μεταβολή της γωνίας δεν έχει κάποια άμεση επίδραση στη μεταβολή του φορτίου του εδράνου. Όμως, στην πραγματικότητα, η μεταβολή της γωνίας έχει άμεση επίδραση στην κατανομή της πίεσης και αντίστοιχα του ποσοστού όγκου του υγρού λιπαντικού.

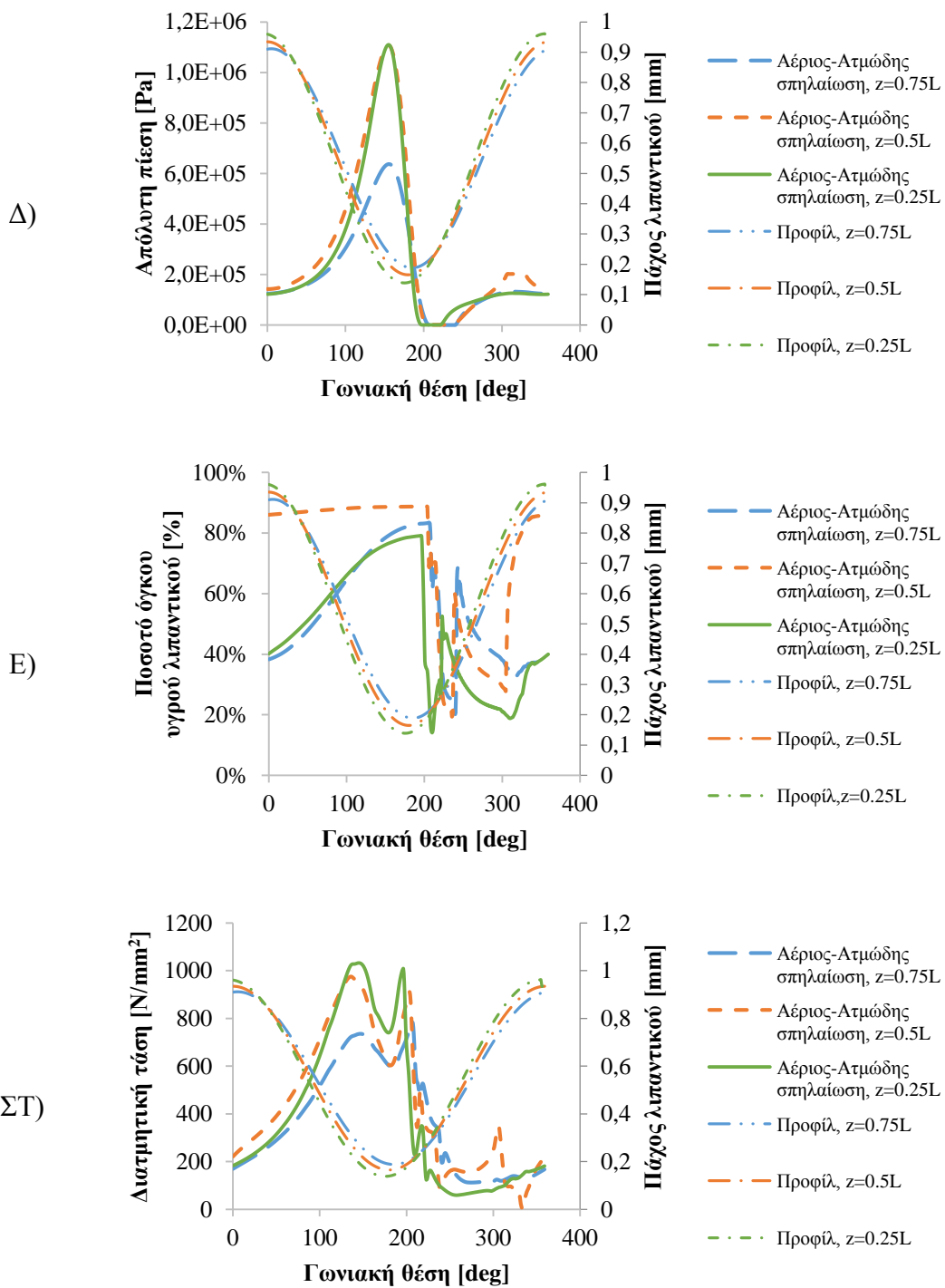
Για την πληρέστερη παρουσίαση των προφίλ κατά την περιφέρεια του εδράνου, στα διαγράμματα της Εικόνας 7-35 γίνεται η απεικόνιση του πεδίου της πίεσης, του ποσοστού όγκου του υγρού λιπαντικού και των διατμητικών τάσεων για τρεις ενδεικτικές θέσεις του εδράνου ($z=0.25L$, $0.5L$ και $0.75L$) και για γωνία $\bar{\psi}_y=0.03$ rad. Ταυτόχρονα, αναπαρίσταται και η μεταβολή του προφίλ του πάχους του λιπαντικού για κάθε μία από αυτές τις θέσεις.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη θέση $z=0$, το πάχος του λιπαντικού θα λάβει τις πλέον ακραίες τιμές (μέγιστο και ελάχιστο πάχος), στη θέση $z=L/2$ η κατανομή του πάχους θα είναι ίδια με την περίπτωση όπου ο άξονας και το έδρανο είναι σε πλήρη ευθυγράμμιση, ενώ στη θέση $z=L$, το πάχος θα έχει μία πιο ομαλή κατανομή.

Ατμώδης Σπηλαιώση



Αέριος-Ατμώδης σπηλαίωση



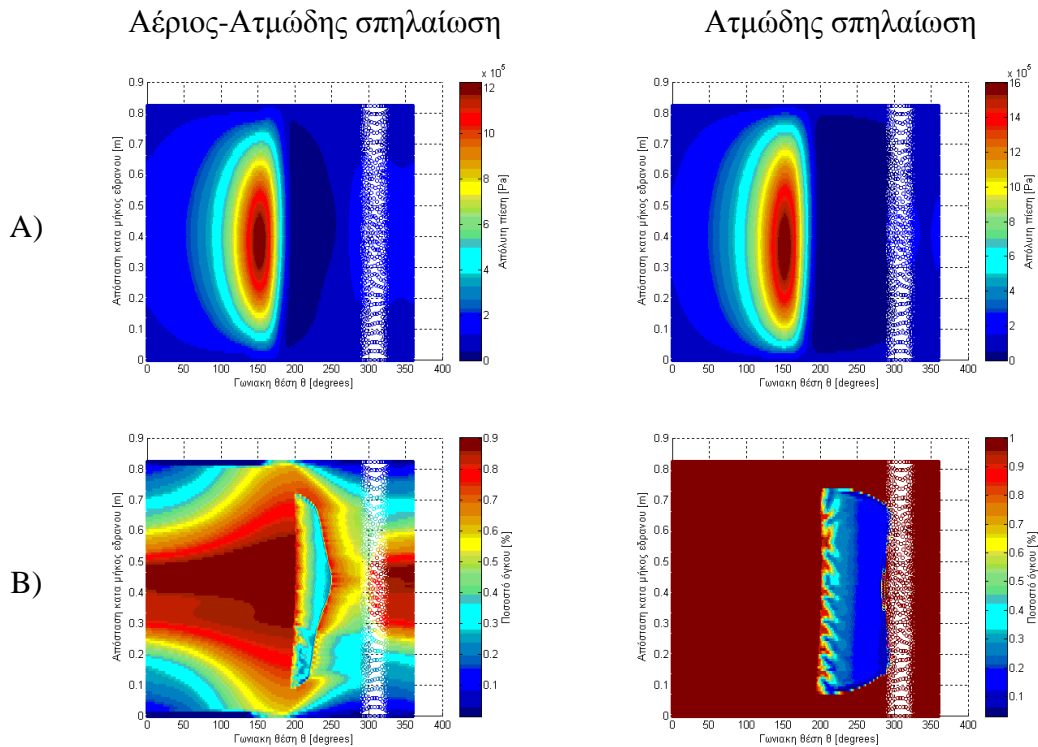
Εικόνα 7-35: Διαγράμματα απόλυτης πίεσης (Α, Δ), ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού (Β, Ε), διατμητικής τάσης (Γ, ΣΤ), συναρτήσει της γωνιακής θέσης, για χαρακτηριστικά γεωμετρίας εδράνου $L/D=1$, $\epsilon=0.7$, $P_{in}=1bar$, κυκλικής οπής διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_s=0.3rad$. Οι κατανομές αντιστοιχούν σε τομές κατά την αξονική διεύθυνση σε απόσταση κατά 25%, 50% και 75% του μήκους του εδράνου, σύμφωνα με την απεικόνιση της αντίστοιχης κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης.

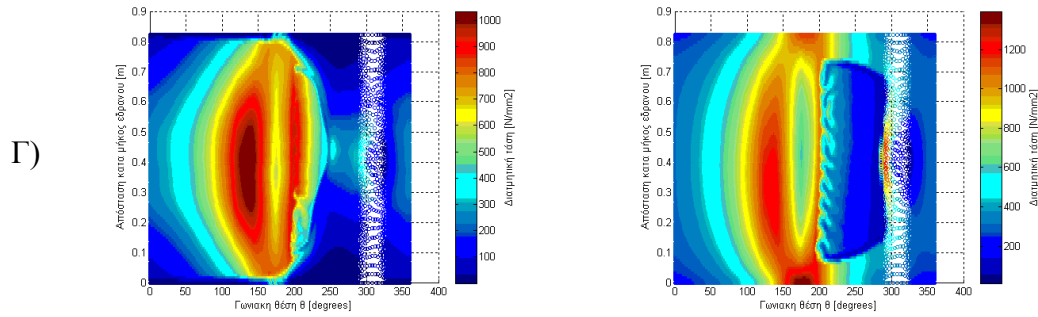
Παρατηρώντας τα γραφήματα της Εικόνας 7-35 , και ειδικότερα αυτά που αντιστοιχούν στην αποκλειστική μελέτη του φαινομένου της ατμώδους σπηλαίωσης, είναι εμφανής η διαφορά στην κατανομή της πίεσης λόγω της γωνίας απευθυγράμμισης. Παρόλο που οι θέσεις εκατέρωθεν του μέσου του άξονα είναι συμμετρικές, το προφίλ του πάχους διαφέρει από το αντίστοιχο της μέσης τομής. Συνεπώς, η μεταβολή του πάχους κατά μήκος του εδράνου επηρεάζει το ροϊκό πεδίο του εδράνου, με κύρια επίδραση στην αύξηση της πίεσης, όταν το πάχος μειώνεται.

Συγκεκριμένα, στην πλευρά όπου ο άξονας προσεγγίζει την επιφάνεια του εδράνου ($z=0.25L$), το προφίλ της πίεσης είναι σχεδόν το ίδιο με το προφίλ που αναμένεται στο μέσο του εδράνου, ενώ το ίδιο συμβαίνει και για τη διατημητική τάση. Αντίθετα, η κατανομή του ποσοστού όγκου του υγρού λιπαντικού εκατέρωθεν του μέσου του εδράνου, εμφανίζει την αναμενόμενη συμμετρία. Για μεγαλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων, στις υπο-ενότητες 7.8.1 έως 7.8.3 δίνονται οι κατανομές των πιέσεων και των τάσεων, καθώς και τα ποσοστά όγκου των ρευστών στην επιφάνεια του εδράνου.

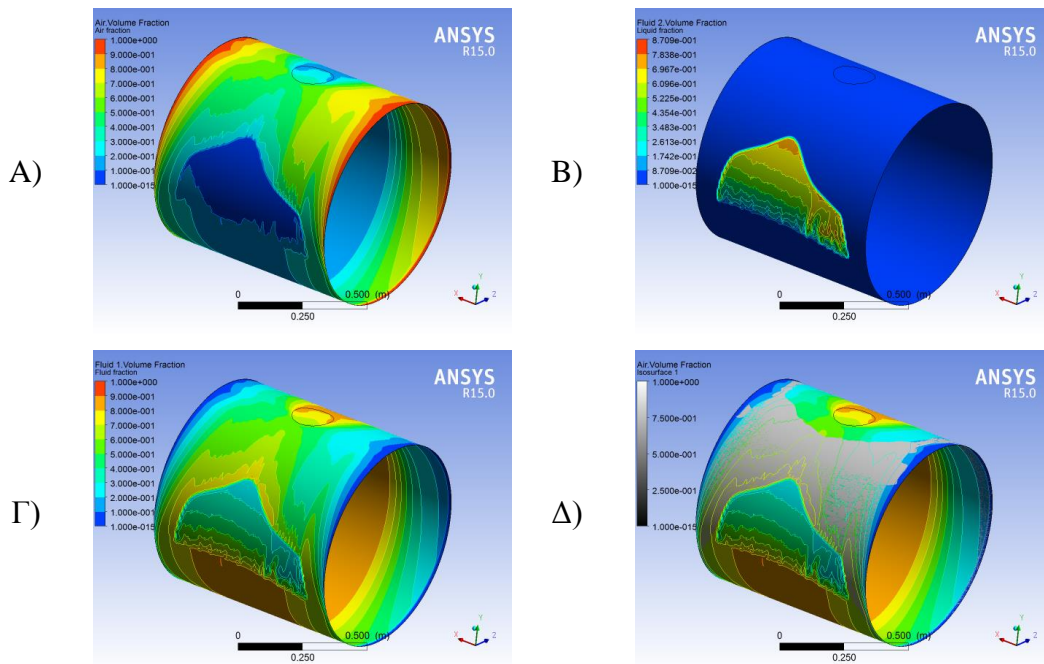
7.8.1 Γωνία $\bar{\psi}_y=0.01$ rad

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους και αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$, για σχετική πίεση εισαγωγής $P_{in}=1$ bar, κυκλική οπή εισαγωγής λιπαντικού, διαμέτρου $D=0.2L$ και για γωνία απευθυγράμμισης $\bar{\psi}_y=0.01$ rad.





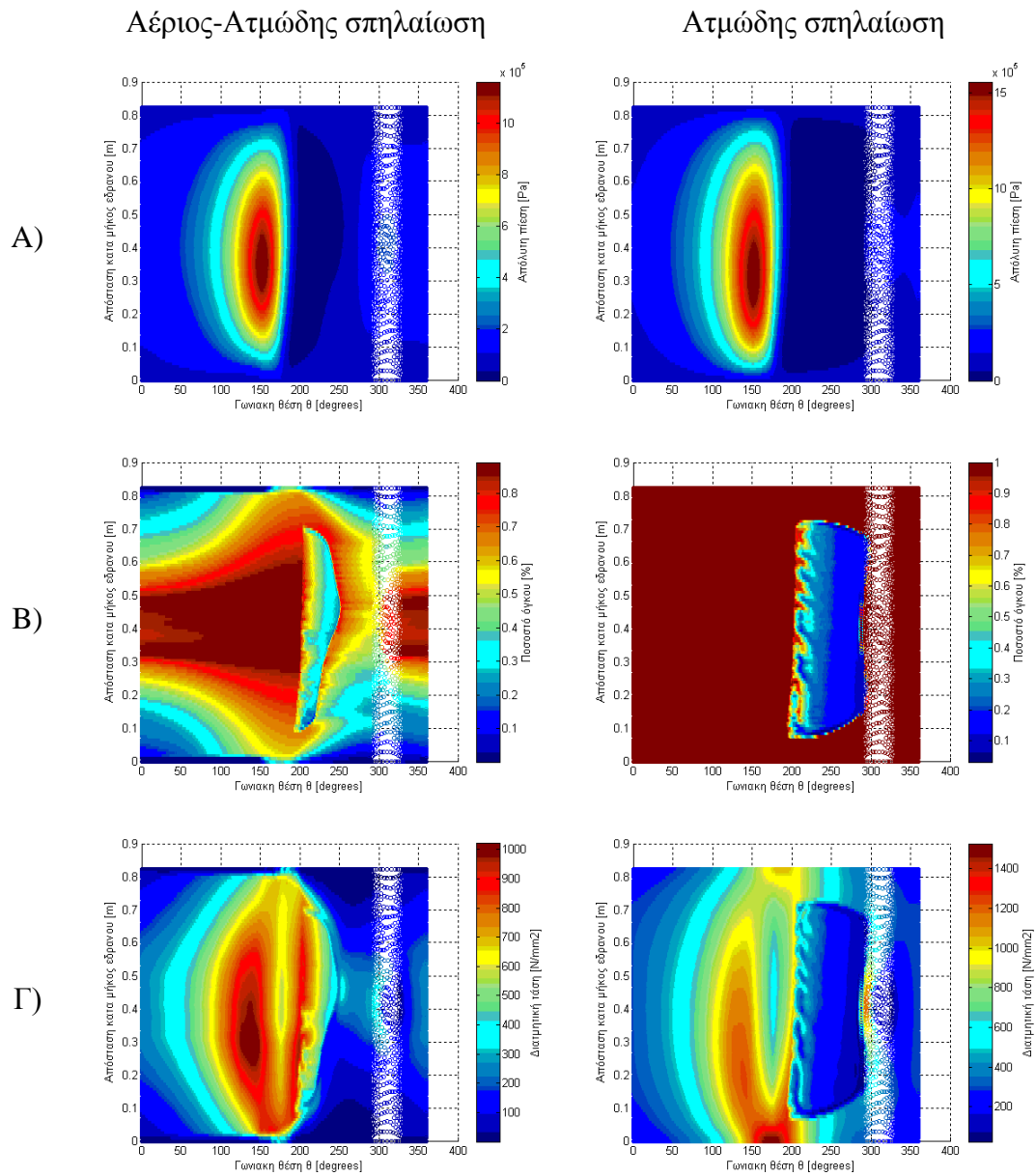
Εικόνα 7-36: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\epsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.01\text{rad}$.



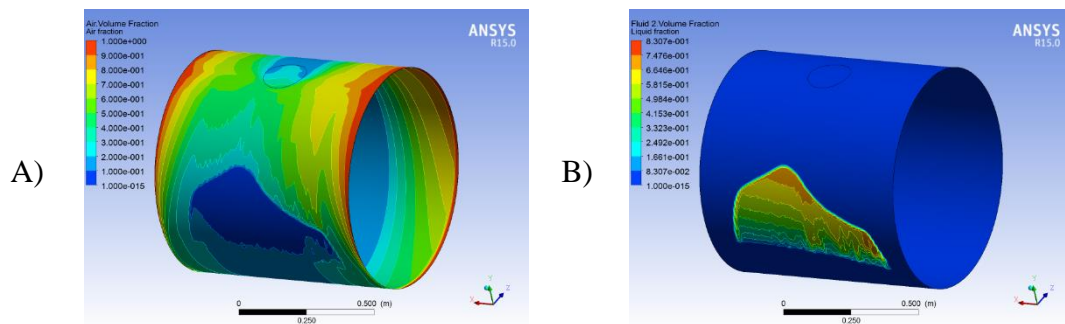
Εικόνα 7-37: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\epsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.01\text{rad}$.

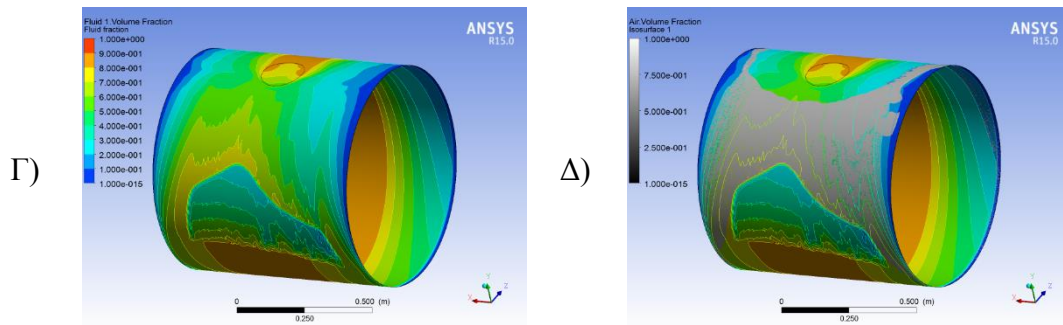
7.8.2 Γωνία $\bar{\psi}_y=0.02\text{ rad}$

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους και αέριας-ατμώδους σπηλαιώσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\epsilon=0.7$, για σχετική πίεση εισαγωγής $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή εισαγωγής λιπαντικού, διαμέτρου $D=0.2L$ και για γωνία απευθυγράμμισης $\bar{\psi}_y=0.02\text{ rad}$.



Εικόνα 7-38: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_s=0.02\text{rad}$.

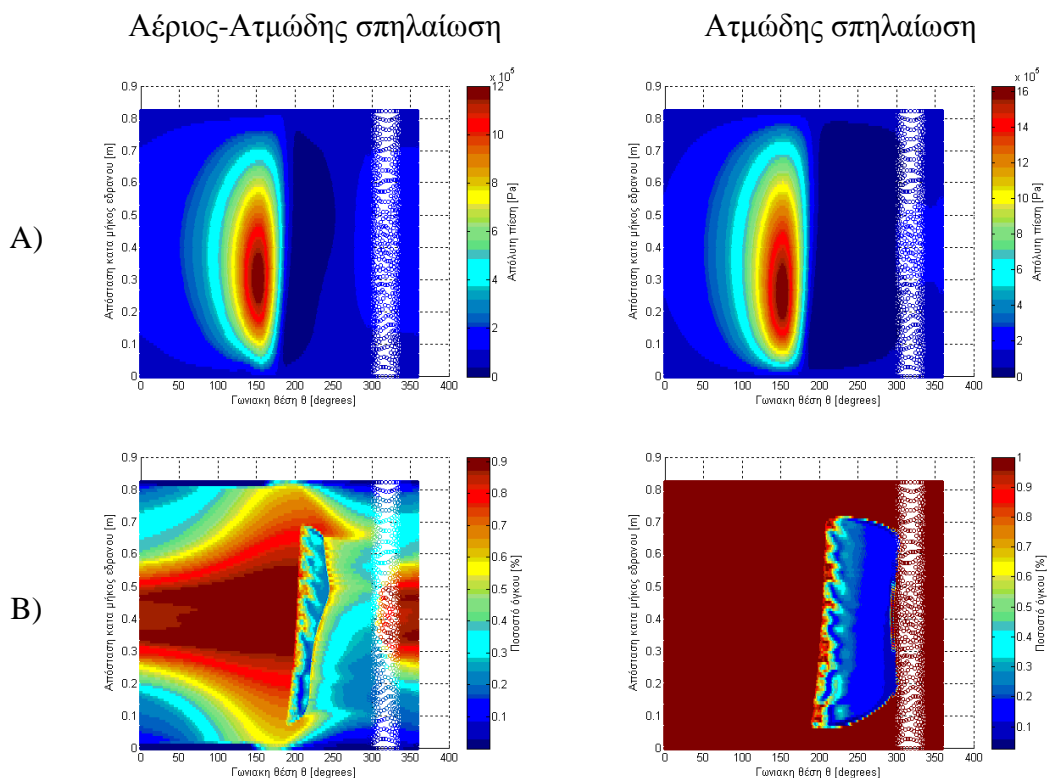


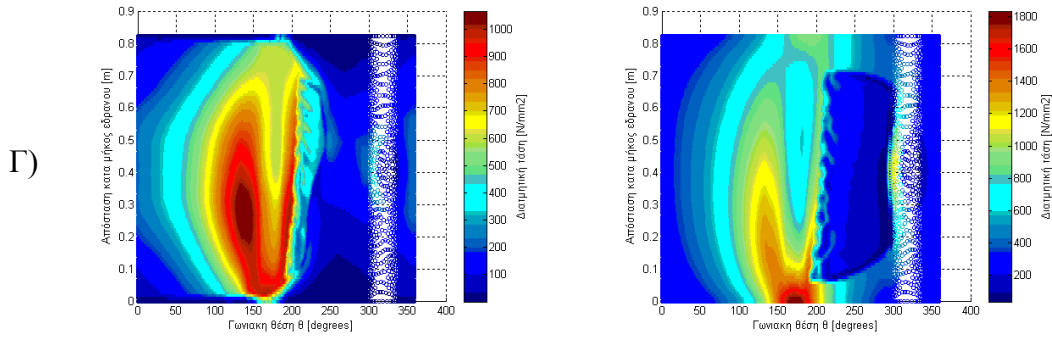


Εικόνα 7-39: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.02\text{rad}$.

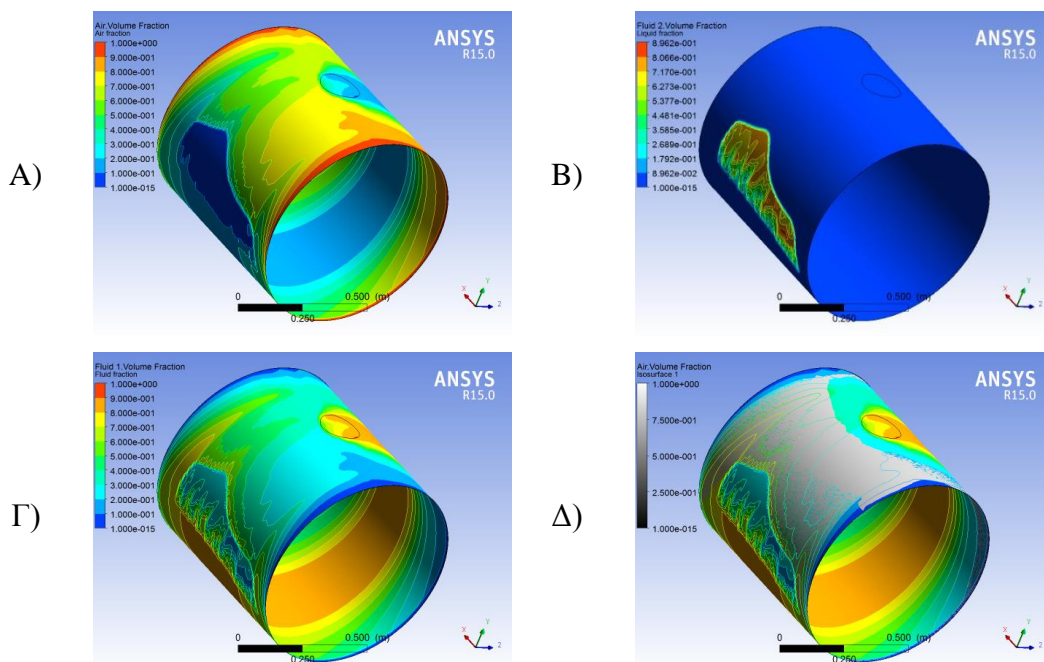
7.8.3 Γωνία $\bar{\psi}_y=0.03\text{ rad}$

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις ατμώδους και αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $L/D=1$ και $\varepsilon=0.7$, για σχετική πίεση εισαγωγής $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή εισαγωγής λιπαντικού, διαμέτρου $D=0.2L$ και για γωνία απευθυγράμμισης $\bar{\psi}_y=0.03\text{ rad}$.





Εικόνα 7-40: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, μεταξύ ατμώδους/αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης για την περίπτωση $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi=0.03\text{rad}$.

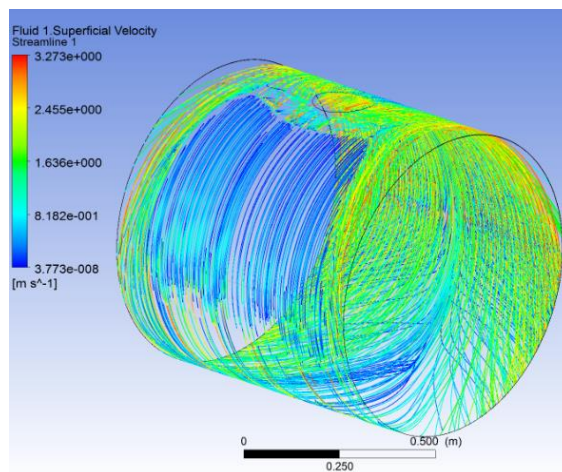


Εικόνα 7-41: Φαινόμενο αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης: Απεικόνιση ποσοστού όγκου Α) αέρα, Β) ατμών λιπαντικού, Γ) υγρού λιπαντικού, Δ) αλληλεπίδραση του αέρα (γκρι ζώνη) με το υγρό λιπαντικό (κατανομή ποσοστού όγκου) κατά την περιφέρεια για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, $P_{in}=1\text{bar}$, κυκλική οπή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi=0.03\text{rad}$.

7.8.4 Συμπεράσματα

Η μη ικανοποίηση της συνθήκης ευθυγράμμισης μεταξύ των αξόνων δίνει αξιόλογα αποτελέσματα για τη συμπεριφορά του εδράνου. Για την περίπτωση όπου αμελείται το φαινόμενο της διάχυσης του αέρα, η μείωση του πάχους του λιπαντικού οδηγεί σε αύξηση της πίεσης, ενώ το κλάσμα όγκου των ατμών του λιπαντικού αυξάνεται επίσης, επεκτείνοντας την περιοχή της σπηλαίωσης. Επιπλέον, οι διατμητικές τάσεις εμφανίζουν τη μέγιστη τιμή στο σημείο του ελάχιστου πάχους. Καθώς ο άξονας τείνει να πλησιάσει το έδρανο, τα κανάλια του υγρού λιπαντικού που δημιουργούνται μέσα στη ζώνη της σπηλαίωσης φαίνεται ότι δεν κινούνται πλέον παράλληλα προς την περιφερειακή διεύθυνση του εδράνου, αλλά εμφανίζουν μία κλίση, κατευθυνόμενα προς το ελάχιστο πάχος του λιπαντικού. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στη μεταβολή του

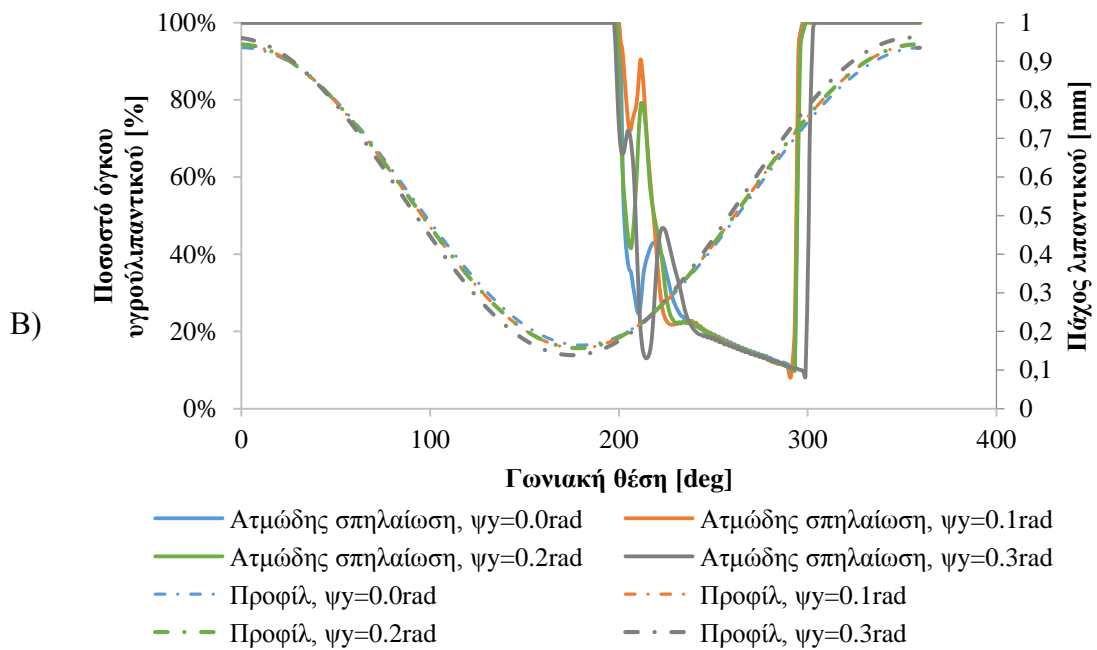
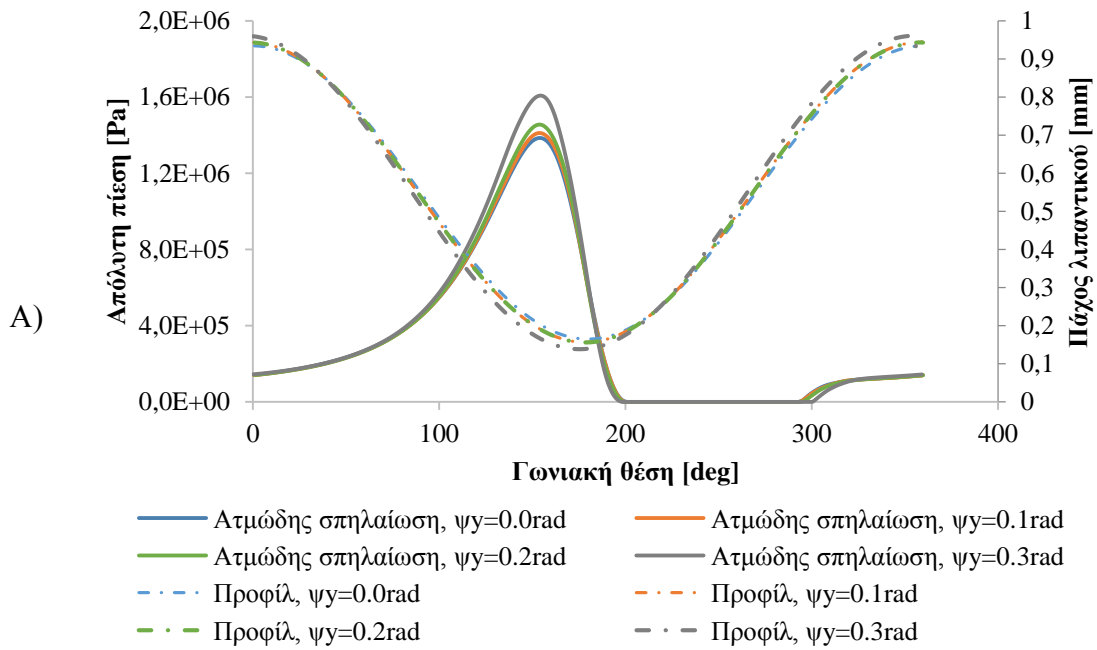
πάχους του λιπαντικού κατά την αξονική διεύθυνση, επιταχύνοντας τη ροή καθώς προσπαθεί να διέλθει από επιφάνεια μικρότερης διατομής. Η συγκεκριμένη κλίση που εμφανίζει η ροή του υγρού λιπαντικού γίνεται πλέον εμφανής στην Εικόνα 7-42, όπου φαίνεται η ταχύτητα του υγρού λιπαντικού μέσα στο έδρανο.

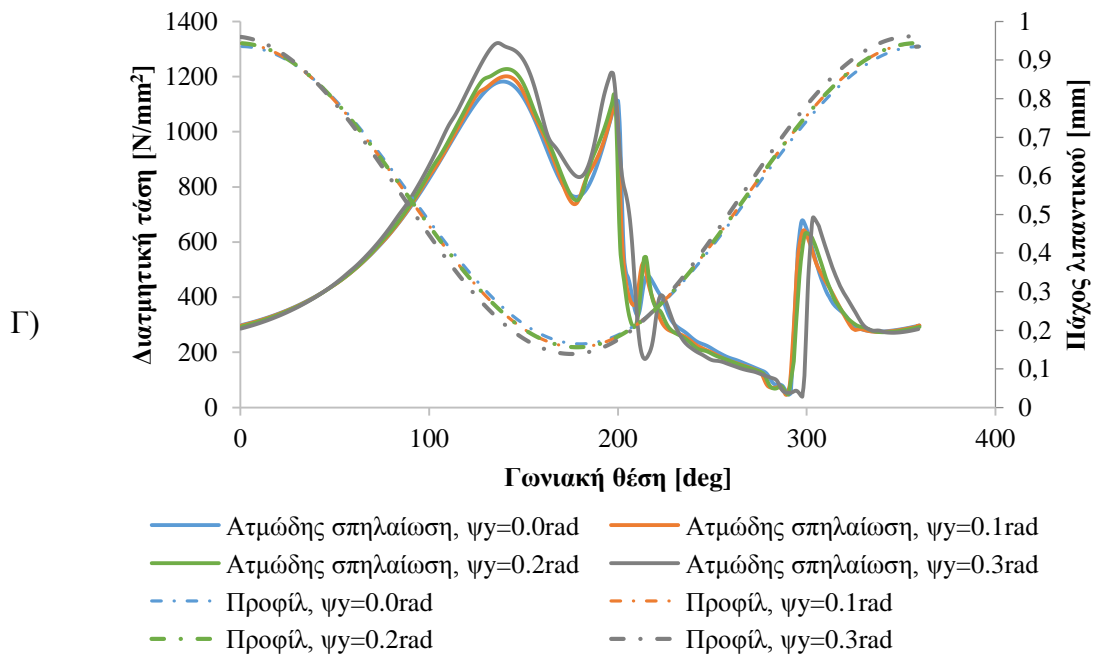


Εικόνα 7-42: Διανύσματα κατεύθυνσης της ταχύτητας του λιπαντικού σε υγρή μορφή σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.03\text{rad}$

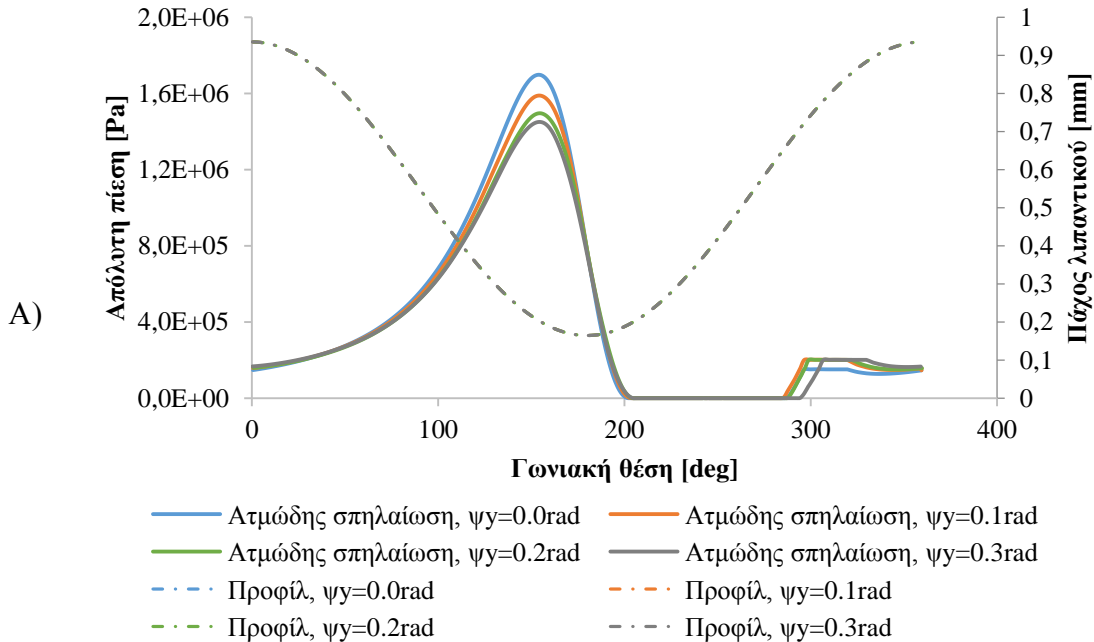
Αντίθετα, στην περίπτωση που υπάρχει αέρας στις άκρες του εδράνου, τότε οι περιοχές της σπηλαιώσης μεταβάλλονται πλήρως. Λόγω της μεταβολής του πάχους του λιπαντικού, στη θέση όπου υπάρχει το ελάχιστο πάχος και αναπτύσσεται η μέγιστη πίεση, στο αντιδιαμετρικό της σημείο το πάχος γίνεται μέγιστο. Αποτέλεσμα αυτής της κατανομής του προφίλ είναι η εισαγωγή μεγαλύτερης μάζας αέρα, περιορίζοντας σημαντικά το φαινόμενο της σπηλαιώσης στο συγκεκριμένο σημείο. Ενώ σε όλες τις περιπτώσεις όπου υπάρχει μόνο ατμώδης σπηλαιώση η μέγιστη διατμητική τάση εμφανίζεται στο ελάχιστο πάχος, η παρουσία του φαινομένου διάχυσης αέρα στις υπόλοιπες περιπτώσεις απομακρύνει αυτό το κίνδυνο, εκτός από την τελευταία περίπτωση όπου η γωνία είναι αρκετά μεγάλη.

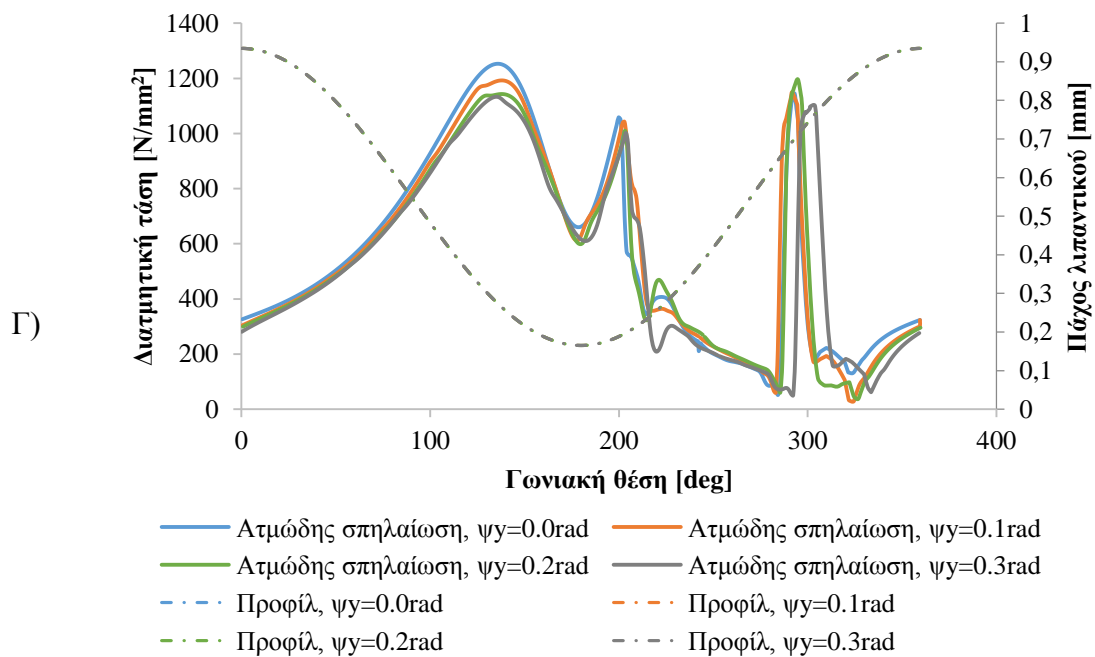
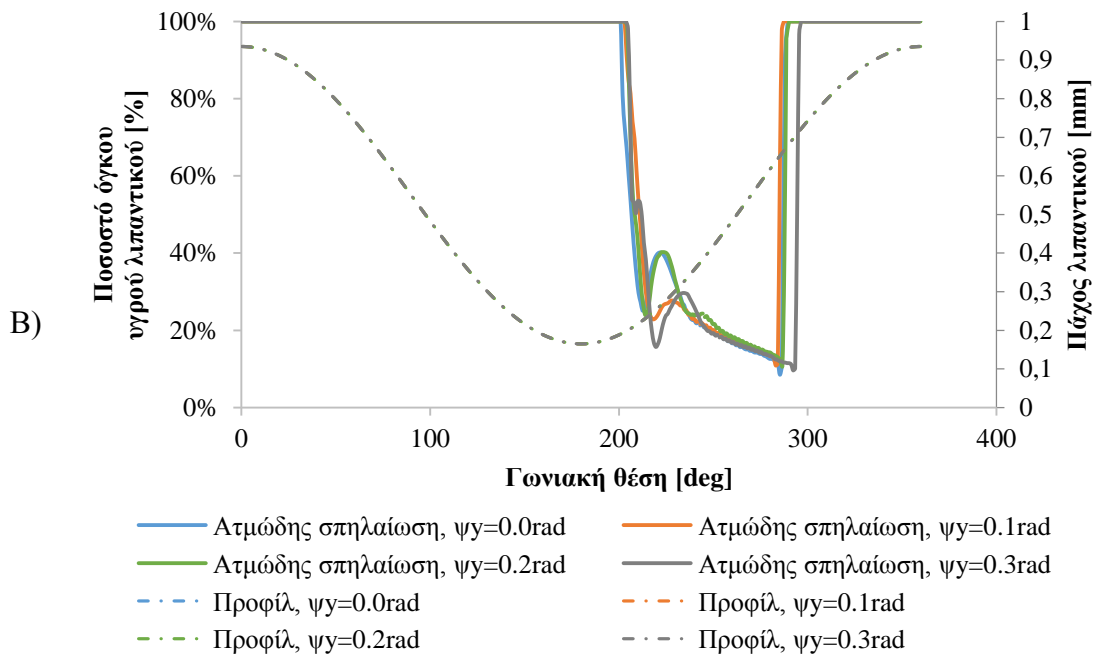
Στις εικόνες 7-43 έως 7-48 δίνονται τα διαγράμματα του προφίλ της πίεσης, του ποσοστού όγκου του υγρού λιπαντικού και της διατμητικής τάσης σε διάφορες θέσεις του εδράνου ($z=0.25L$, $0.5L$ και $0.75L$) και γωνίες $\bar{\psi}_y$ για την κάθε περίπτωση



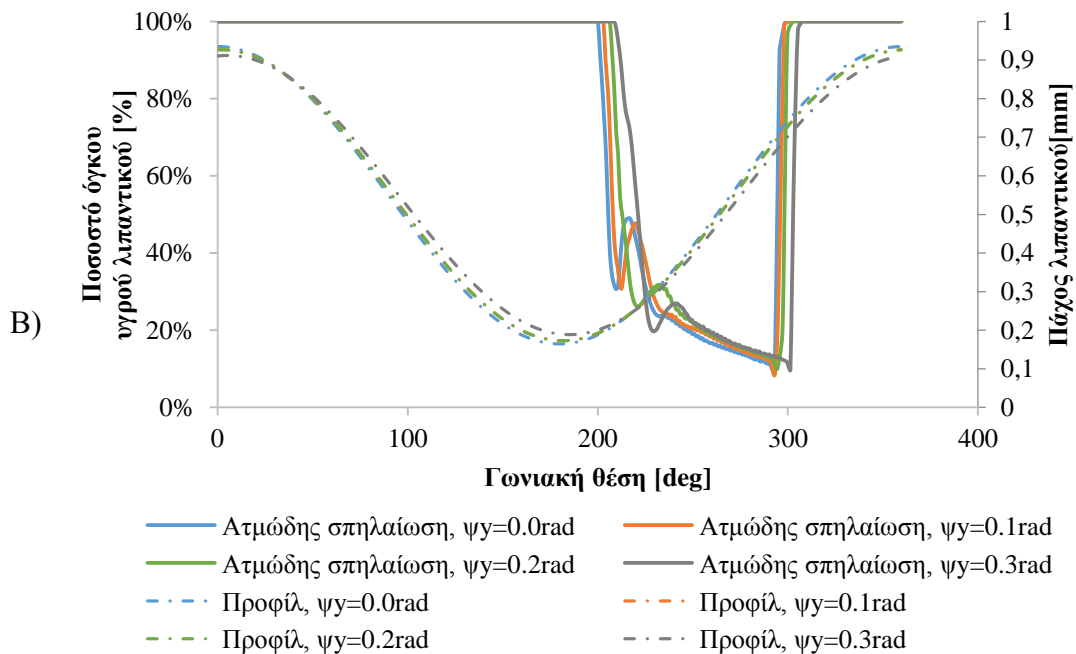
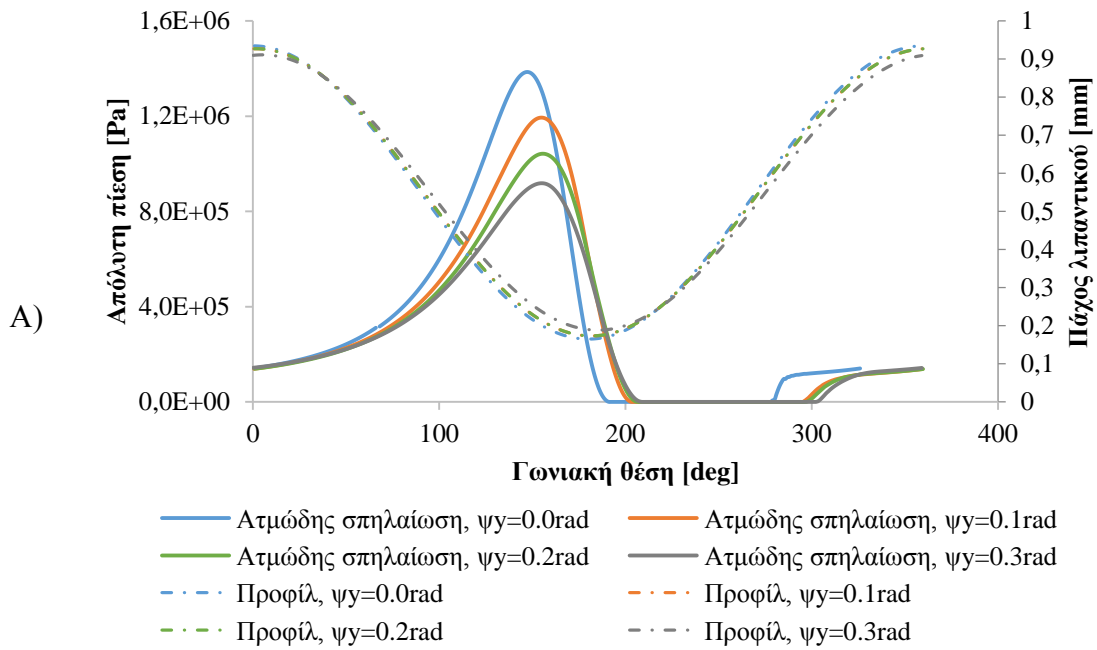


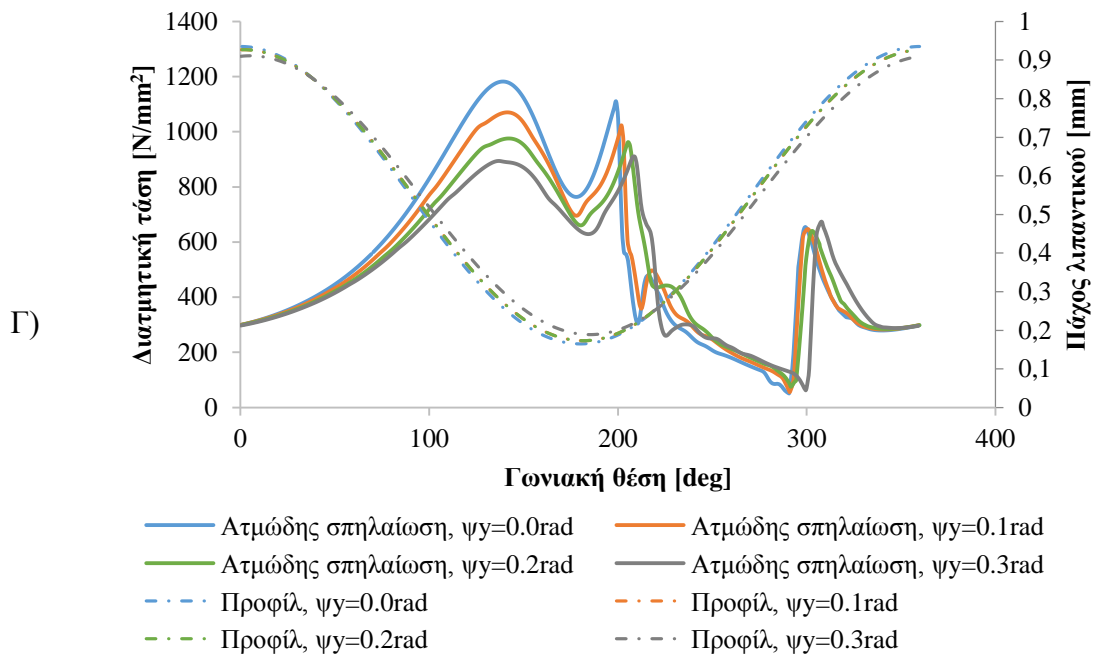
Εικόνα 7-43: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, για την περίπτωση ατμώδους σπηλαιώσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\epsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται σε εγκάρσιο επίπεδο τοποθετημένο στη θέση 25% του μήκους του εδράνου, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, και για διάφορες γωνίες απευθυγράμμισης $\psi\gamma$



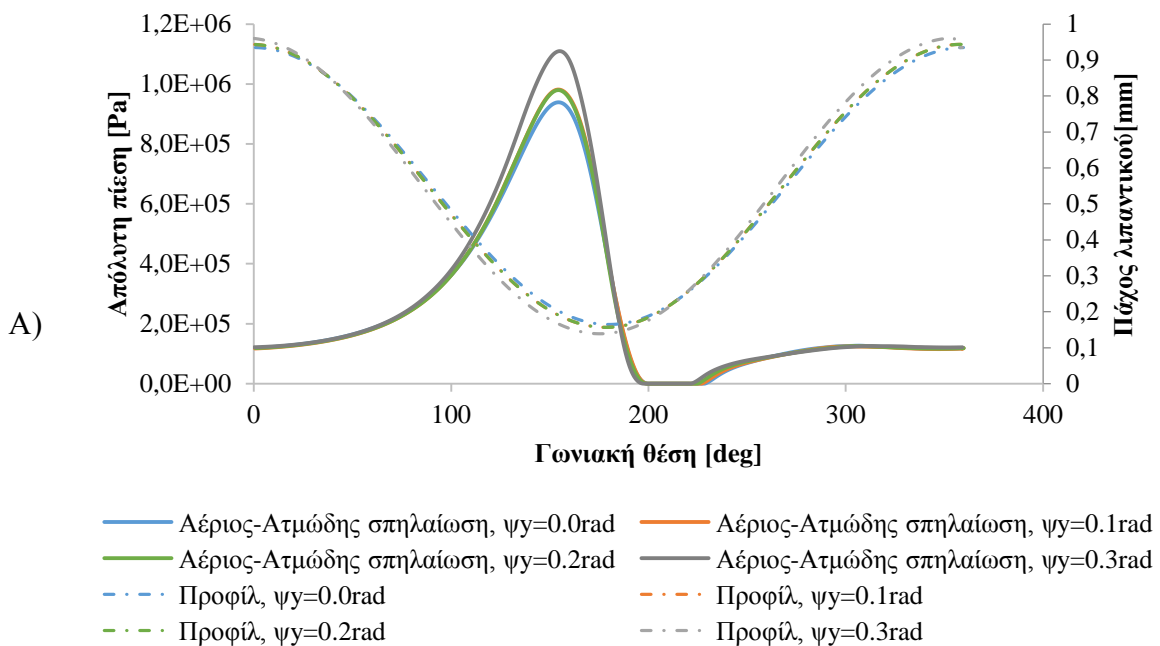


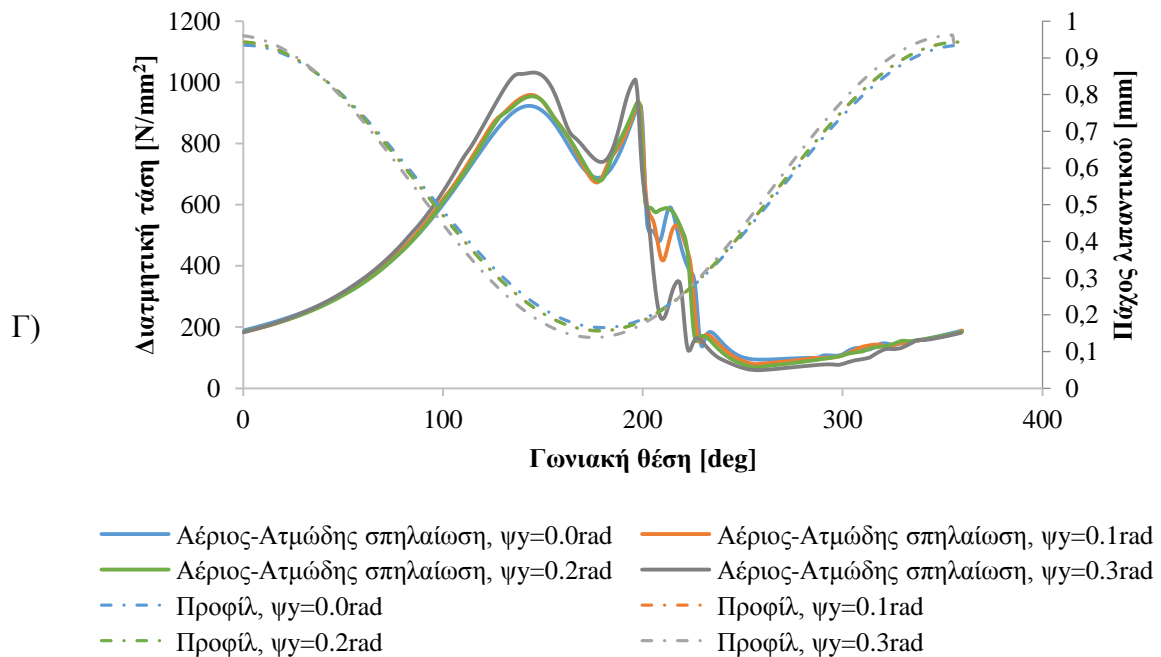
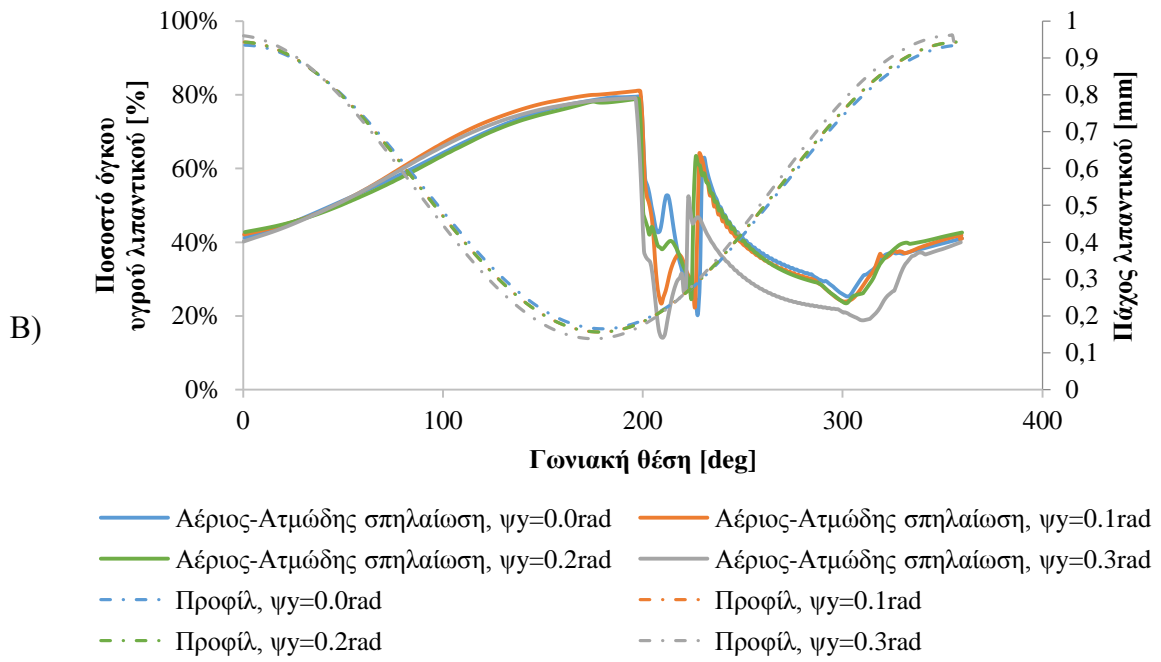
Εικόνα 7-44: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διαμητικής τάσης, για την περίπτωση ατμώδους σπηλαίωσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\epsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται σε εγκάρσιο επίπεδο τοποθετημένο στη θέση 50% του μήκους του εδράνου, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, και για διάφορες γωνίες απευθυγράμμισης ψ_y



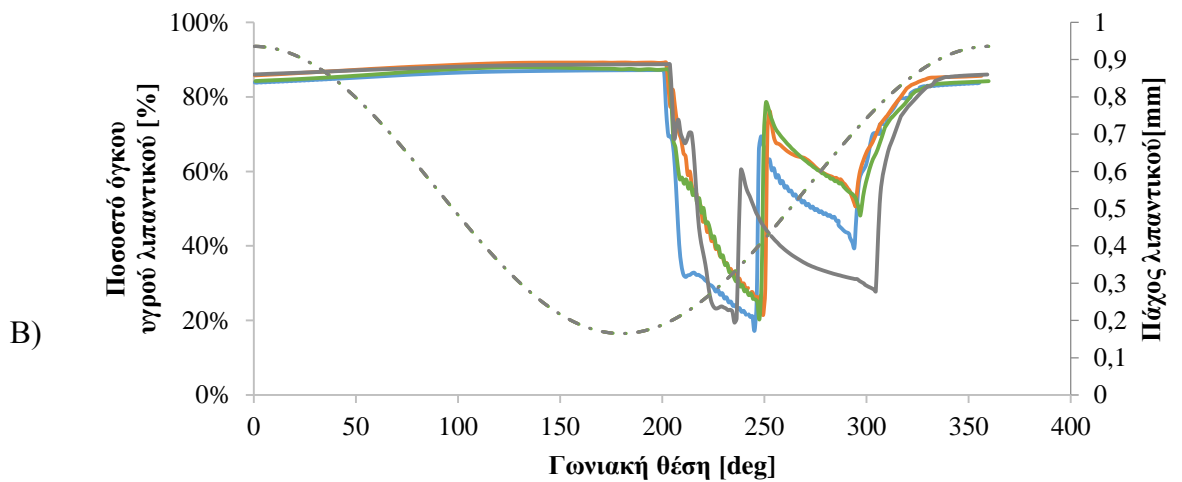
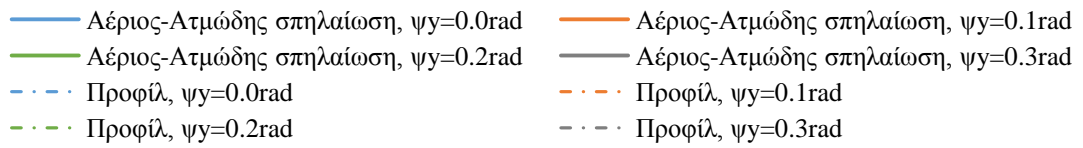
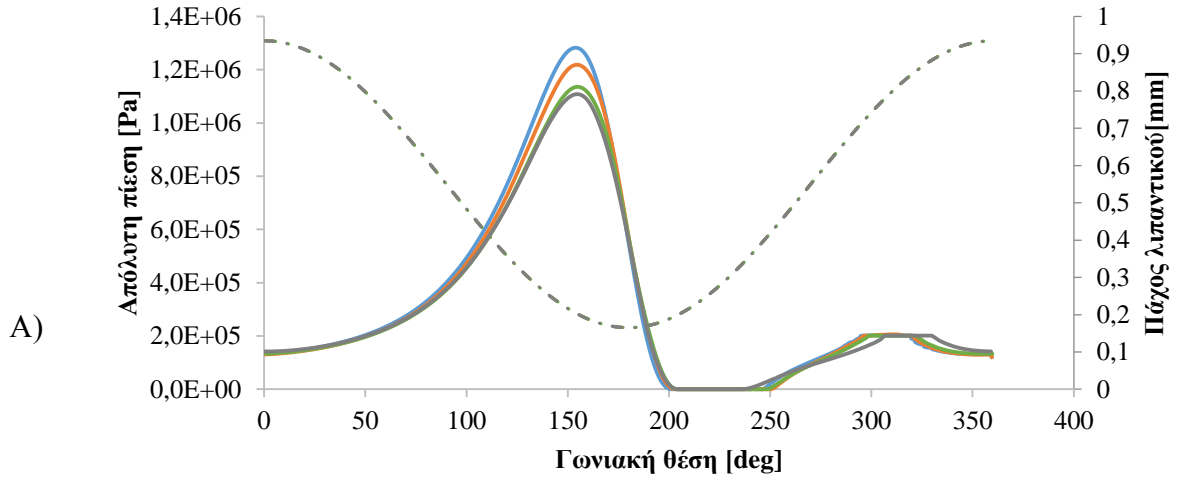


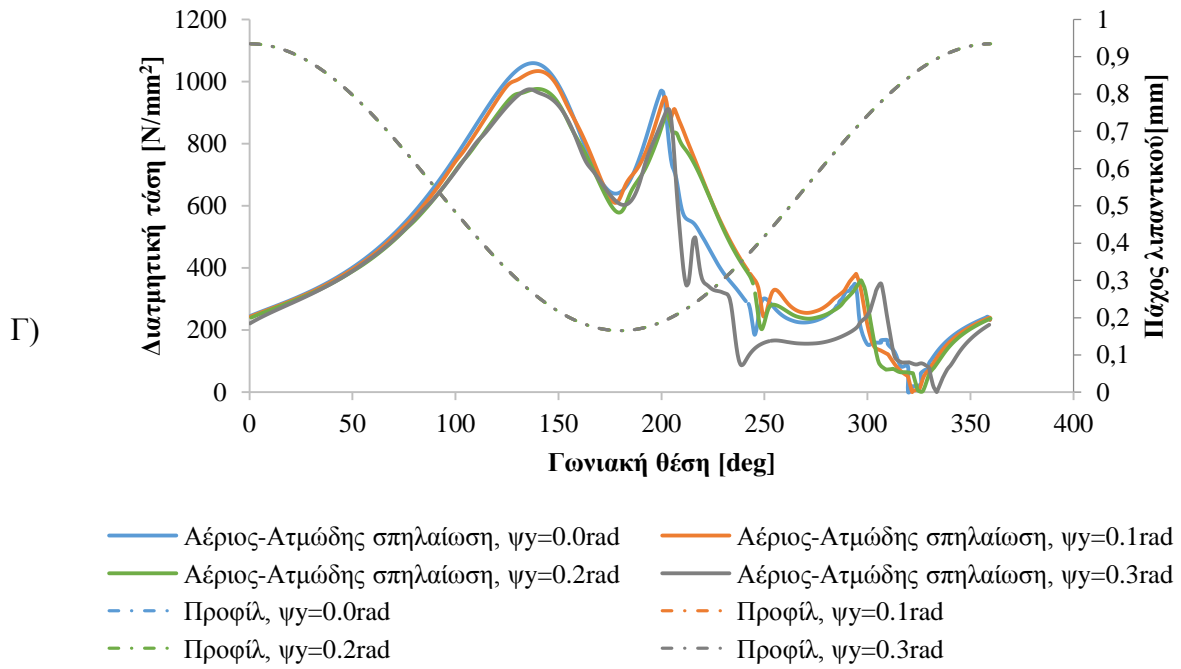
Εικόνα 7-45: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατηρητικής τάσης, για την περίπτωση ατμώδους σπηλαίωσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\epsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται σε εγκάρσιο επίπεδο τοποθετημένο στη θέση 75% του μήκους του εδράνου, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, και για διάφορες γωνίες απευθυγράμμισης $\psi\gamma$



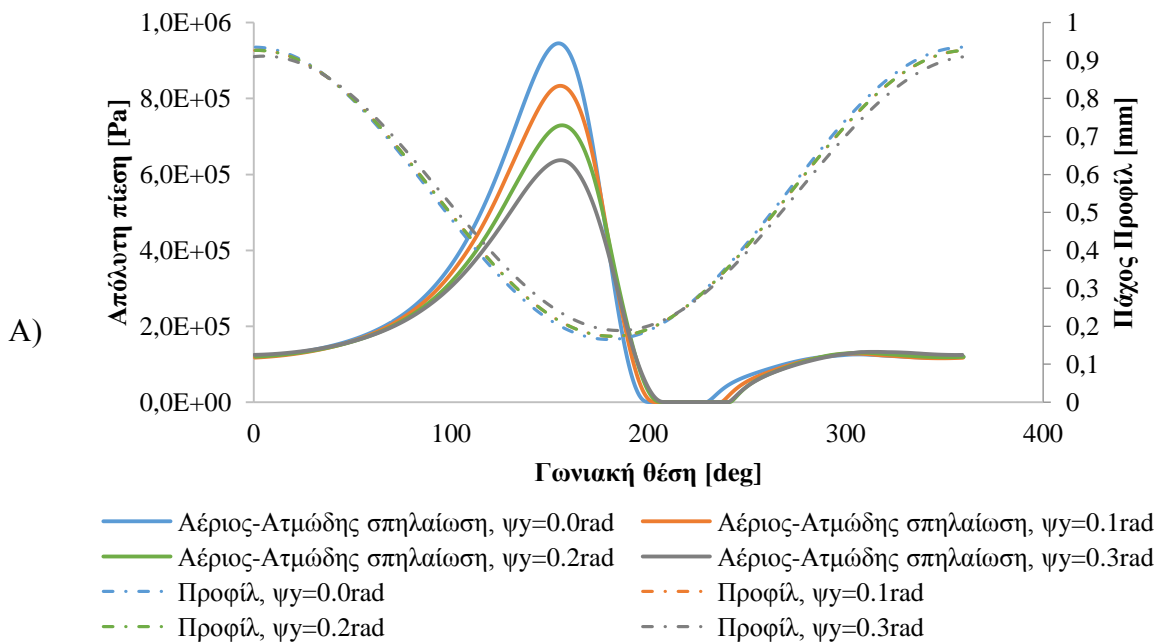


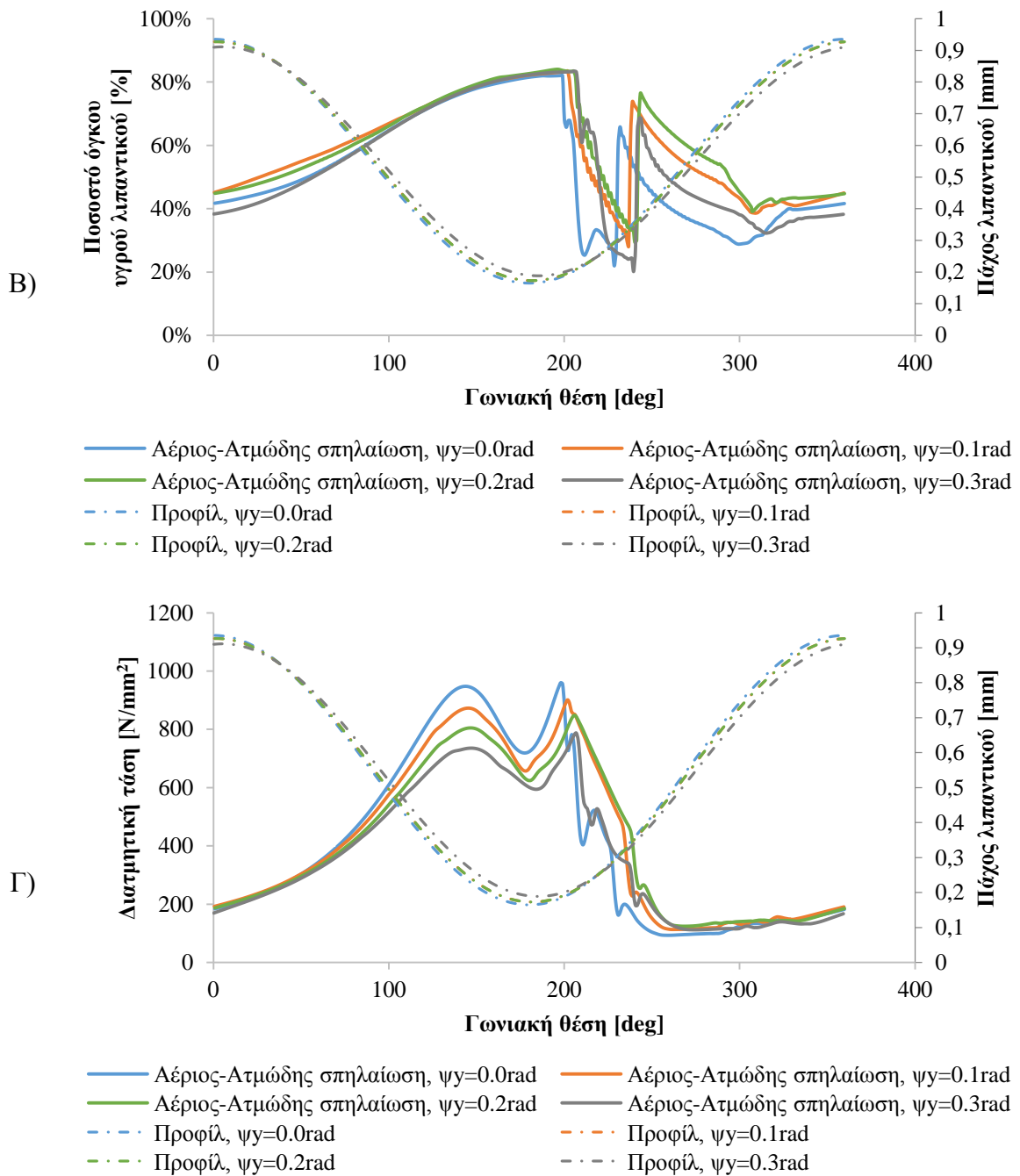
Εικόνα 7-46: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, για την περίπτωση αέριος-ατμώδους σπηλαίωσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται σε εγκάρσιο επίπεδο τοποθετημένο στη θέση 25% του μήκους του εδράνου, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, και για διάφορες γωνίες απευθυγράμμισης ψ_y





Εικόνα 7-47: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, για την περίπτωση αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται σε εγκάρσιο επίπεδο τοποθετημένο στη θέση 50% του μήκους του εδράνου, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, και για διάφορες γωνίες απευθυγράμμισης $\psi\gamma$





Εικόνα 7-48: Σύγκριση Α) κατανομής απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, για την περίπτωση αέριας-ατμώδους σπηλαίωσης σε έδρανο με χαρακτηριστικά γεωμετρίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$. Όλες οι κατανομές αναφέρονται σε εγκάρσιο επίπεδο τοποθετημένο στη θέση 75% του μήκους του εδράνου, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης, και για διάφορες γωνίες απευθυγράμμισης ψ_y

Η μεταβολή του προφίλ της πίεσης καθώς μεταβάλλεται η γωνία του άξονα ψ_y είναι εμφανής. Καθώς το πάχος του φιλμ του λιπαντικού μειώνεται κατά την αξονική διεύθυνση, η περιοχή μέγιστης πίεσης μετατοπίζεται προς το σημείο που υπάρχει το ελάχιστο πάχος λιπαντικού. Αντίθετα, η μεταβολή του ποσοστού του όγκου το λιπαντικού σε υγρή μορφή επηρεάζεται σημαντικά στην περίπτωση που υπάρχει αέρας στα άκρα του εδράνου.

8 Θερμο-υδροδυναμική ανάλυση φαινομένου σπηλαιώσης σε ακτινικό έδρανο υδροδυναμικής λίπανσης

8.1 Ορισμός προβλήματος

Το φαινόμενο που εξετάστηκε στις προηγούμενες ενότητες λάμβανε υπόψη μόνο τις εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της ορμής, αμελώντας την εξίσωση ενέργειας κατά τον υπολογισμό του ροϊκού πεδίου. Συνεπώς, οι όροι της ενέργειας παραλείπονταν, χωρίς τη δυνατότητα εκτίμησης της μεταβολής της θερμοκρασίας.

Επίσης, λόγω της παράλειψης των όρων της ενέργειας, οι ιδιότητες των ρευστών ορίζονταν βάσει συγκεκριμένων τιμών πίεσης και θερμοκρασίας (40°C, 1atm). Λαμβάνοντας υπόψη τους ενεργειακούς όρους των εξισώσεων Navier-Stokes, είναι απαραίτητος ο καθορισμός επιπρόσθετων ιδιοτήτων των λιπαντικών όπως είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση και η θερμική αγωγιμότητα που έχει το λιπαντικό, τόσο σε υγρή, αλλά και σε αέρια φάση, όπως επίσης και ο ορισμός των θερμοφυσικών συναρτήσεων της θερμοκρασίας.

Συγκεκριμένα, για το λιπαντικό σε υγρή φάση, οι ιδιότητές του όπως είναι το δυναμικό ιξώδες, η θερμοχωρητικότητα και η θερμική αγωγιμότητα υπολογίστηκαν συναρτήσει της θερμοκρασίας, έτσι ώστε να μελετηθεί η μεταβολή των ιδιοτήτων συναρτήσει της θερμοκρασίας. Ο υπολογισμό των ιδιοτήτων του λιπαντικού σε υγρή φάση έγινε με βάση τη θεωρία της ενότητας 2.4. Οι συντελεστές της εξίσωσης του Walther για τη μεταβολή του ιξώδους του υγρού λιπαντικού συναρτήσει της θερμοκρασίας όπως δίνεται από την εξίσωση (2-4) είναι ίσοι με $B=8.06$ και $C=3.12$, ενώ οι σχέσεις που δίνουν τη μεταβολή της θερμοχωρητικότητας και της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν αυτούσιες. Το μοριακό βάρος του λιπαντικού σε υγρή φάση θεωρήθηκε ίσο με 383,92 kg/kmol και η πυκνότητα του υγρού λιπαντικού θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 847 kg/m³.

Αντίστοιχα, οι ιδιότητες των ατμών του λιπαντικού και του αέρα θεωρήθηκαν σταθερές για συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας και πίεσης, όπως φαίνονται στον Πίνακα 8-1. Λόγω της μικρής μεταβολής των τιμών των ιδιοτήτων της αέριας φάσης για το θερμοκρασιακό εύρος που μελετάται, το σφάλμα στα τελικά αποτελέσματα μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο.

Πίνακας 8-1: Ιδιότητες λιπαντικού σε αέρια φάση

	Λιπαντικό σε αέρια φάση
Μοριακό βάρος	383.92 kg/kmol
Πυκνότητα	0.0335 kg/m ³
Δυναμικό ιξώδες	4.05·10 ⁻⁶ kg/m s
Ειδική θερμοχωρητικότητα	1349.24 J/kg K
Θερμική αγωγιμότητα	0.00689457 W/m K

Για την απλοποίηση του προβλήματος, εξετάστηκε μόνο το φαινόμενο της ατμώδους σπηλαιώσης, θέτοντας ότι στα άκρα του εδράνου υπάρχει λιπαντικό. Η σχετική πίεση εισόδου του λιπαντικού μέσα στο έδρανο ισούται με 1 bar, ενώ η ταχύτητα περιστροφής του εδράνου είναι ίση με 76RPM. Η ροή θεωρείται ότι είναι ομοιογενής, ενώ το λιπαντικό σε υγρή φάση αποτελεί το συνεχές μέσο και οι ατμοί του λιπαντικού βρίσκονται διασκορπισμένοι μέσα στο υγρό. Λόγω της αναμενόμενης μικρής μεταβολής της θερμοκρασίας, ως πίεση ατμοποίησης ορίστηκε μία μέση τιμή, ίση με 0.1 Pa. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του λιπαντικού (~40°C), η πίεση ατμοποίησης είναι εξαιρετικά χαμηλή σε σχέση με την πίεση που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του άξονα ($10^5 - 10^5$ Pa), συνεπώς δεν υπάρχει σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό της ποσότητας του λιπαντικού που ατμοποιείται, και, γενικότερα, στην εικόνα των τελικών αποτελεσμάτων.

Οι υπόλοιπες οριακές συνθήκες του προβλήματος είναι ίδιες με αυτές που εξετάστηκαν στις προηγούμενες περιπτώσεις μελέτης του κεφαλαίου 7. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου που εξετάστηκε ήταν: λόγος μήκους προς διάμετρο $L/D=1$, εκκεντρότητα $\varepsilon=0.7$, ενώ η οπή εισαγωγής λιπαντικού ήταν κυκλικής διατομής και διαμέτρου ίση με 20%L. Για την επίλυση του προβλήματος αμελούνται οι χρονικοί όροι των εξισώσεων, θεωρώντας πλέον ότι το σύστημα έχει επέλθει σε φάση ισορροπίας (steady state).

Επιπλέον των οριακών συνθηκών που είναι αναγκαίες για τη σωστή περιγραφή του προβλήματος, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των θερμοκρασιών του λιπαντικού που εισέρχεται και εξέρχεται από το έδρανο. Για την πλήρη ανάδειξη της κατανομής της θερμοκρασίας μέσα στο έδρανο, η θερμοκρασία εισόδου του λιπαντικού ορίστηκε ίση με τη θερμοκρασία που επικρατεί στα άκρα του εδράνου. Ως θερμοκρασία λειτουργίας του εδράνου ορίστηκε η τιμή των 40°C, τιμή που αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά την πραγματικότητα, χωρίς να προσεγγίζει τα όρια συναγερμού όπως αυτά ορίζονται από τους κανονισμούς ασφαλείας (65°C)

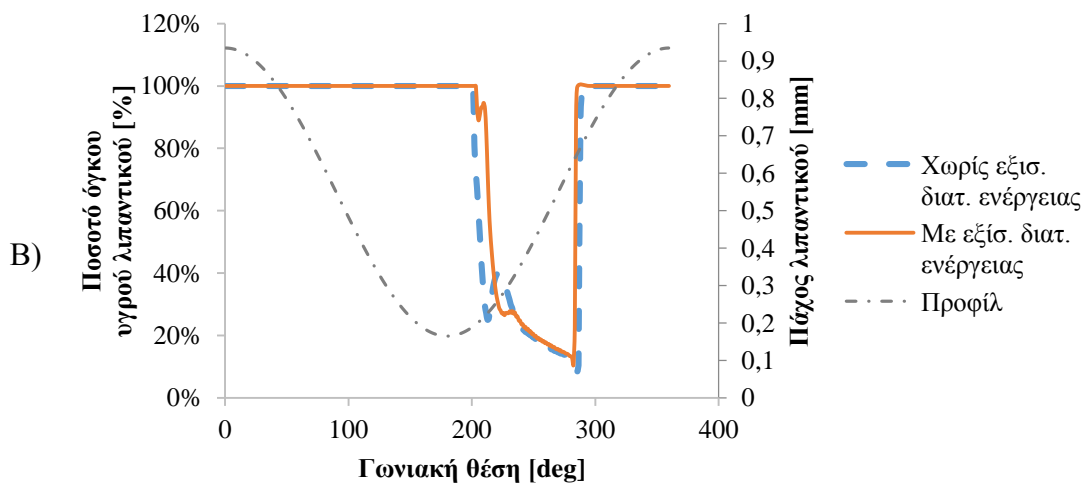
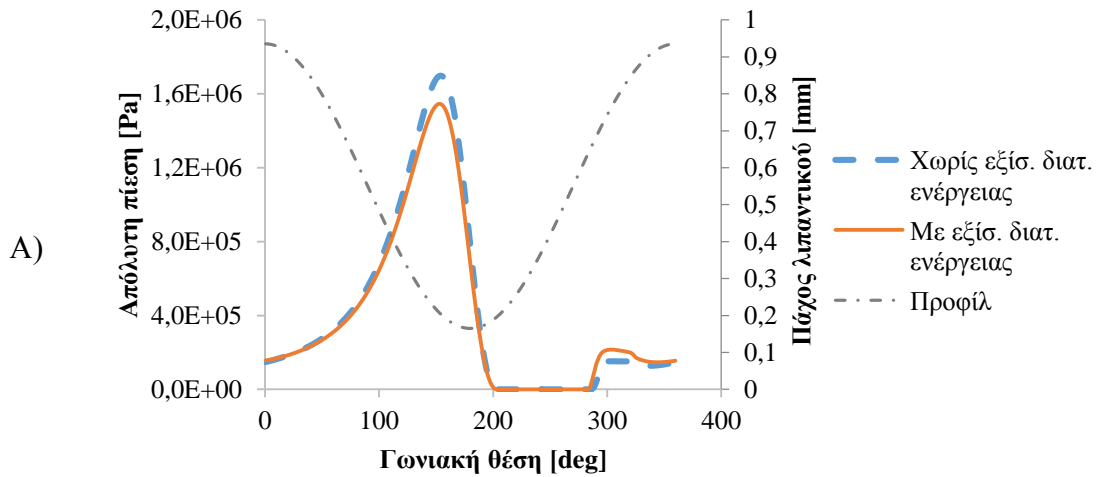
8.2 Αποτελέσματα ανάλυσης

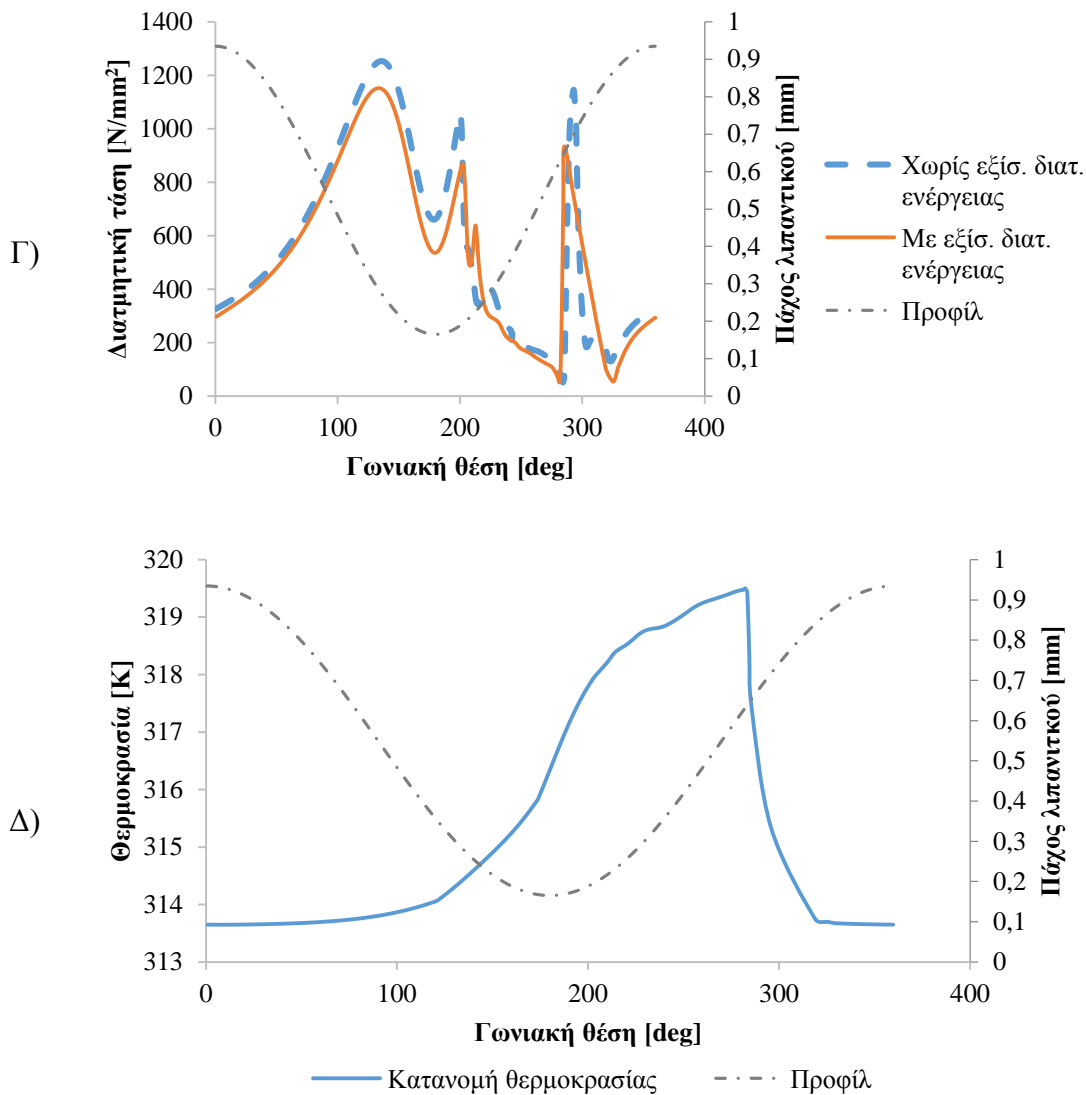
Στον Πίνακα 8-2, δίνεται η επίδραση της εξίσωσης ενέργειας στην εκτίμηση του ολικού φορτίου, της γωνίας συμπεριφοράς του άξονα, του αδιάστατου συντελεστή τριβής και της μέγιστης πίεσης.

Πίνακας 8-2: Υπολογισμοί χαρακτηριστικών μεγεθών για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.5$, κυκλική οπή εισαγωγής και πίεση εισαγωγής $P_{in}=1bar$. Σύγκριση των αποτελεσμάτων για μοντελοποίηση λαμβάνοντας υπόψη ή αμελώντας την εξίσωση ενέργειας.

	Υπολογισμός βάσει εξίσωσης συνέχειας και ορμής.	Υπολογισμός βάσει εξίσωσης συνέχειας, ορμής και ενέργειας.
Ολικό φορτίο [N]	406856.21	369028.11
Μέγιστη πίεση [Pa]	1698680	1545560
Γωνία συμπεριφοράς [deg]	52.55	53.96
Αδιάστατος συντελεστής τριβής	2.177	2.161

Σύμφωνα με τον Πίνακα 8-2, είναι εμφανές ότι λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση ενέργειας, το ολικό φορτίο και η μέγιστη πίεση μειώνονται, ενώ ο αδιάστατος συντελεστής τριβής και η γωνία συμπεριφοράς μεταβάλλονται επίσης ελαφρώς. Συγκεκριμένα, το φορτίο φαίνεται να μειώνεται σχεδόν κατά 9%, αποδεικνύοντας την επίδραση που έχει η μεταβολή της θερμοκρασίας στο ιξώδες του λιπαντικού και κατά συνέπεια στη λειτουργία του εδράνου. Για καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων, στην Εικόνα 8-1 δίνονται τα συγκριτικά διαγράμματα κατανομής πίεσης, ποσοστού όγκου λιπαντικού και διατμητικών τάσεων στο μέσο του εδράνου, όπως επίσης και η κατανομή της θερμοκρασίας κατά την περιφέρεια, στο μέσο του εδράνου.

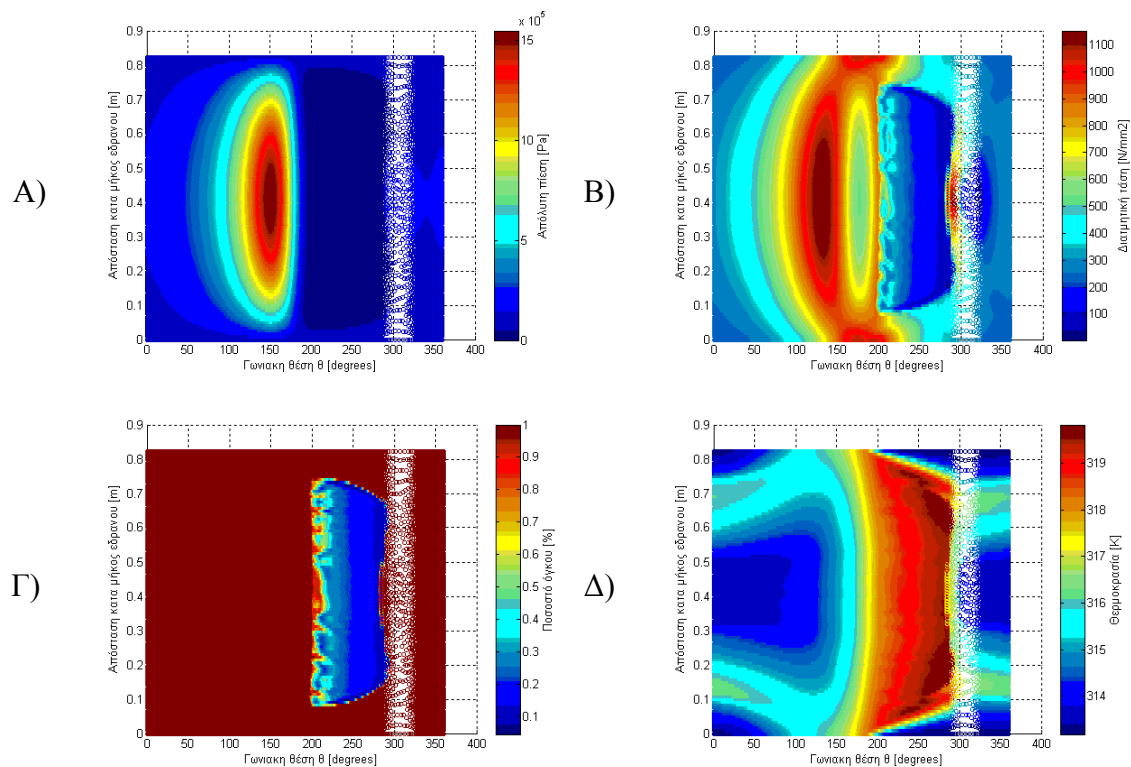




Εικόνα 8-1: Έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\varepsilon=0.7$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_s=0.0\text{rad}$, $P_{in}=1\text{bar}$: Σύγκριση Α) απόλυτης πίεσης, Β) ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού, Γ) διατμητικής τάσης, συναρτήσει της γωνιακής θέσης εδράνου, λαμβάνοντας υπόψη ή όχι την εξίσωση διατήρησης ενέργειας – Δ) Κατανομή θερμοκρασίας λιπαντικού κατά την περιφέρεια και την επιφάνεια του άξονα. Όλες οι κατανομές αναφέρονται στο μέσο του εδράνου κατά το διάμηκες, σύμφωνα με την απεικόνιση της κατανομής του πάχους του λιπαντικού συναρτήσει της γωνιακής θέσης.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα της Εικόνας 8-1, όταν λαμβάνεται υπόψη η θερμοκρασία για τον υπολογισμό του φαινομένου, τότε η πίεση που ασκείται στην επιφάνεια του άξονα μειώνεται ελαφρώς, όπως αντίστοιχα και το ποσοστό του λιπαντικού που ατμοποιείται, αλλά και οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο έδρανο. Συνεπώς, η μεταβολή των ιδιοτήτων του λιπαντικού συναρτήσει της θερμοκρασίας επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία του εδράνου.

Αντίστοιχα, η αύξηση τη θερμοκρασίας στο μέσο του εδράνου συμβαίνει κυρίως στην περιοχή όπου αναμένεται ατμάδης σπηλαίωση του λιπαντικού. Λόγω των αυξημένων απωλειών τριβής στη συγκεκριμένη περιοχή, το λιπαντικό θερμαίνεται, αυξάνοντας αντίστοιχα τη θερμοκρασία στη συγκεκριμένη περιοχή. Επιπλέον, στην Εικόνα 8-2 απεικονίζεται η μεταβολή της πίεσης, του ποσοστού όγκου του λιπαντικού σε υγρή φάση, των διατμητικών τάσεων και της θερμοκρασίας σε όλη την έκταση του εδράνου.



Εικόνα 8-2: Περιφερειακή κατανομή **A)** απόλυτης πίεσης, **B)** διατμητικής τάσης, **Γ)** ποσοστού όγκου υγρού λιπαντικού και **Δ)** θερμοκρασίας για ατμώδη σπηλαιώση λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση ενέργειας, για έδρανο με χαρακτηριστικά λειτουργίας $L/D=1$, $\epsilon=0.7$, $P_{in}=1bar$, κυκλική διατομή διαμέτρου $D=0.2L$, $\psi_y=0.00rad$

Λόγω του φαινομένου της σπηλαιώσης, παρατηρείται ότι η θερμοκρασία στην περιοχή της σπηλαιώσης αυξάνεται. Αναλυτικότερα, καθώς το λιπαντικό ατμοποιείται, η θερμοκρασία του υγρού αυξάνεται μέχρι τη στιγμή όπου οι ατμοί του λιπαντικού συμπυκνώνονται λόγω αύξησης της πίεσης και η υγρή φάση του λιπαντικού αποκαθίσταται σε όλη την επιφάνεια του άξονα. Η αύξηση της θερμοκρασίας στη συγκεκριμένη περιοχή οφείλεται λόγω της μεγάλης διαφοράς πίεσης που παρατηρείται στα δύο ‘μέτωπα’ του φαινομένου της σπηλαιώσης, η οποία συντελεί στην δημιουργία (ή κατάρρευση) των φυσαλίδων ατμών λιπαντικού.

Η θερμοκρασία στην περιοχή της σπηλαιώσης αυξάνεται περίπου κατά $6^{\circ}C$ σε σύγκριση με τη θερμοκρασία εισαγωγής του λιπαντικού, ενώ η περιοχή αύξησης της θερμοκρασίας συμπίπτει με την αντίστοιχη περιοχή σπηλαιώσης, καλύπτοντας όλο το μήκος του εδράνου. Εντός του εδράνου παρατηρείται ακόμα ότι καθώς εισέρχεται νέο λιπαντικό, η θερμοκρασία που επικρατεί εντός του εδράνου και στο μέσο αυτού αποκαθίσταται.

Βάσει της κατανομής θερμοκρασίας, η πλέον ευαίσθητη θέση στην οποία θα πρέπει να γίνεται έλεγχος για τη θερμοκρασία λειτουργίας του λιπαντικού βρίσκεται στη γωνία όπου οι ατμοί του λιπαντικού επανυγροποιούνται, δηλαδή στην περιοχή όπου το λιπαντικό έχει το μέγιστο πάχος. Επίσης, η περιοχή στην οποία θα πρέπει να γίνεται η μέτρηση της θερμοκρασίας θα πρέπει να βρίσκεται μακριά από την οπή εισόδου, διαφορετικά, σε περίπτωση που οι οπές εισόδου του λιπαντικού είναι περισσότερες από μία, ο αισθητήρας θερμοκρασίας θα πρέπει να βρίσκεται στην πλέον δυσμενή θέση όσον αφορά σε σχέση με την οπή εισαγωγής του λιπαντικού.

9 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το φαινόμενο της σπηλαιώσης σε ακτινικά έδρανα υδροδυναμικής λίπανσης, καθώς και η επίδραση διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν το φαινόμενο κατά τη λειτουργία του εδράνου. Όπως ήταν γνωστό, το φαινόμενο της σπηλαιώσης εμφανίζεται στις περιοχές όπου η πίεση είναι αρκετά χαμηλή και υπάρχει δυνατότητα ατμοποίησης του ίδιου του υγρού, ή διείσδυσης κάποιου άλλου αερίου μέσα στη συγκεκριμένη περιοχή.

Καθώς το έδρανο περιστρέφεται και μεταβάλλεται το πάχος του λιπαντικού, η πίεση μεταβάλλεται αντίστοιχα. Η απόκλιση της επιφάνειας του άξονα από την επιφάνεια του εδράνου έχει ως συνέπεια την μείωση της πίεσης στη συγκεκριμένη θέση και την εμφάνιση του φαινομένου της σπηλαιώσης. Για τη καλύτερη προσέγγιση του φαινομένου, μελετήθηκε αρχικά το φαινόμενο λόγω ατμοποίησης του υπάρχοντος λιπαντικού, ενώ στη συνέχεια μελετήθηκε η επίπτωση που έχει η διείσδυση του αέρα σε αυτό.

Κατά την ατμοποίηση του λιπαντικού μέσα στην περιοχή της σπηλαιώσης, η τρισδιάστατη επίλυση του φαινομένου έκανε αισθητή την παρουσία καναλιών (streaks) του λιπαντικού μέσα στην περιοχή της σπηλαιώσης. Καθώς ξεκινά η σπηλαιώση, σχηματίζονται ζώνες (streaks) εντός των οποίων υπάρχει λιπαντικό σε υγρή μορφή. Στη συνέχεια, και καθώς το φαινόμενο της σπηλαιώσης εξελίσσεται, το πλάτος των αντίστοιχων ζωνών μειώνεται μέχρι να εξαφανιστεί, ενώ αυξάνεται το κλάσμα όγκου του ατμού στη συγκεκριμένη περιοχή.

Η περιοχή της σπηλαιώσης επηρεάζεται σημαντικά από το προφίλ της πίεσης που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του εδράνου. Καθώς ο αδιάστατος λόγος εκκεντρότητας αυξάνεται σημαντικά, η πίεση που αναπτύσσει το έδρανο αυξάνεται ανάλογα. Συνεπώς, το φαινόμενο της σπηλαιώσης γίνεται εντονότερο για μεγάλους λόγους εκκεντρότητας, αυξάνοντας την περιοχή όπου εμφανίζεται η ατμοποίηση του λιπαντικού ανάλογα με την κατανομή της πίεσης κατά την περιφέρεια και κατά το μήκος του εδράνου.

Μία σημαντική παρατήρηση με βάση τα αποτελέσματα σχετίζεται με την επίδραση της θέσης και του μεγέθους της οπής εισόδου του λιπαντικού μέσα στο έδρανο. Καθώς εξελίσσεται το φαινόμενο της σπηλαιώσης, η περιοχή ύπαρξης ατμών λιπαντικού περιορίζεται από την οπή εισαγωγής του λιπαντικού. Σε έδρανα μεγάλου μήκους (π.χ. $L/D > 1$) όπου υπάρχει είσοδος λιπαντικού μόνο στο μέσο του μήκους του εδράνου, η περιοχή της σπηλαιώσης αναπτύσσεται ακόμα και μετά τη θέση εισόδου του λιπαντικού. Συνεπώς, η σωστή επιλογή της θέσης εισόδου και μεγέθους της οπής εισόδου του λιπαντικού προσφέρει τη δυνατότητα περιορισμού της έκτασης της περιοχής σπηλαιώσης.

Στην πραγματικότητα, το έδρανο της υδροδυναμικής λίπανσης λειτουργεί μέσα στο περιβάλλον. Έτσι, στα άκρα του δεν υπάρχει λιπαντικό σε υγρή μορφή αλλά συναντάται αέρας ατμοσφαιρικής πίεσης. Η διαμόρφωση του πεδίου πίεσης και του ποσοστού όγκου του υγρού λιπαντικού που υπάρχει στην επιφάνεια του άξονα όπως αυτά απεικονίζονται στο κεφάλαιο 7, παρουσιάζουν την επίδραση που έχει ο αέρας στη λειτουργία του εδράνου.

Γενικά παρατηρείται ότι, καθώς η πίεση μεταβάλλεται κατά την περιφέρεια του εδράνου, δίνεται η δυνατότητα στον αέρα να καταλάβει τις συγκεκριμένες περιοχές, περιορίζοντας ταυτόχρονα την περιοχή όπου ατμοποιείται το λιπαντικό. Αντίστοιχα, καθώς το υγρό λιπαντικό εισέρχεται από την οπή, όση ποσότητα δεν έχει διαρρεύσει από τα άκρα του εδράνου, διέρχεται από τη θέση ελάχιστου πάχους του λιπαντικού και στη συνέχεια, η μεγαλύτερη ποσότητα αυτού ατμοποιείται. Το υπόλοιπο λιπαντικό που παραμένει σε υγρή μορφή, συνεχίζει να κινείται προς την οπή μόνο μέσω της μέσης τομής του εδράνου. Ταυτόχρονα, καθώς το λιπαντικό εξέρχεται από τα άκρα του εδράνου, ο αέρας εισέρχεται καταλαμβάνοντας τις παρειές των άκρων του εδράνου.

Η ποσότητα του αέρα αυξάνεται στην περιοχή όπου λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της ατμώδους σπηλαίωσης, και η πίεση καθίσταται εξαιρετικά χαμηλή. Σε αυτήν την περίπτωση ο αέρας μειώνει την περιοχή ανάπτυξης των ατμών, ενώ κατευθύνει το υγρό λιπαντικό που έχει απομείνει να κυκλοφορεί μόνο στο μέσο του μήκους του εδράνου.

Η ύπαρξη του αέρα έχει άμεση επίπτωση στο προφίλ της πίεσης που αναπτύσσεται στο έδρανο. Πλέον, στην περιοχή της σπηλαίωσης η πίεση δεν είναι κοντά στην πίεση ατμοποίησης, αλλά η παρουσία αέρα αυξάνει την πίεση στις συγκεκριμένες περιοχές, κοντά στην ατμοσφαιρική. Το γεγονός αυτό μειώνει το συνολικό φορτίο που μπορεί να έχει το έδρανο, ενώ επίπτωση έχει και στη μέγιστη πίεση που αναπτύσσεται κατά την περιφέρεια του εδράνου. Φυσικά, το φαινόμενο αυτό μπορεί να οφείλεται και στην οριακή συνθήκη που έχει οριστεί στα άκρα του εδράνου για την προσομοίωση της ύπαρξης του αέρα, οδηγώντας σε υπερεκτίμηση της ποσότητας αέρα που εισέρχεται και εξέρχεται από αυτό. Μια διαφοροποίηση στη συγκεκριμένη συνθήκη μπορεί πιθανόν να δώσει μεγαλύτερη σύγκλιση μεταξύ των δύο φαινομένων.

Σημαντική μεταβολή στο φαινόμενο της σπηλαίωσης έχει η γεωμετρία και η πίεση εισαγωγής του λιπαντικού στο έδρανο. Όπως παρατηρήθηκε, η διαμόρφωση της ορθογωνικής διατομής προσφέρει ευρεία κατανομή του λιπαντικού στον άξονα, αλλά η ύπαρξη έντονων ακμών δημιουργεί συγκέντρωση του λιπαντικού σε αυτές τις θέσεις, και στη συνέχεια την πιο γρήγορη απομάκρυνσή του από το έδρανο. Συνεπώς, σκοπός της διατομής εισόδου του λιπαντικού είναι η παρουσία μίας κύριας διατομής στο κέντρο του εδράνου που θα έχει ως στόχο την παροχή του απαραίτητου λιπαντικού για τη διαμόρφωση του πεδίου της πίεσης στο μέσο του εδράνου όπως είναι φυσιολογικό, ενώ η ύπαρξη μικρότερων οπών ή η παροχή μικρότερης ποσότητας λιπαντικού κοντά στα άκρα θα έχει ως κύριο στόχο την αποφυγή ύπαρξης του φαινομένου της σπηλαίωσης κοντά στα άκρα του εδράνου, αλλά και την απομάκρυνση του αέρα. Η συγκεκριμένη λύση εφαρμόζεται συχνά σε πραγματικά έδρανα, αυξάνοντας τον αριθμό των οπών εισαγωγής λιπαντικού που φέρει το έδρανο έτσι ώστε να επιτευχθεί πλήρης κάλυψη του εδράνου.

Η αύξηση της πίεσης εισόδου του λιπαντικού έχει θετικά αποτελέσματα στην αντιμετώπιση του φαινομένου της σπηλαίωσης λόγω διεύθυνσης του περιβάλλοντος αέρα. Εξαιτίας της θέσης της οπής κοντά στο μέγιστο πάχος του λιπαντικού, η αύξηση της πίεσης εισόδου διευρύνει την περιοχή όπου η πίεση είναι μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική, με αποτέλεσμα να εκτοπίζονται ποσότητες αέρα, και να καλύπτονται με λιπαντικό. Σε αυτήν την περίπτωση, ο αέρας εμφανίζεται μόνο στα άκρα, ενώ κυριαρχεί κυρίως το φαινόμενο της ατμώδους σπηλαίωσης.

Εκτός από την επίδραση των γεωμετρικών και των λειτουργικών στοιχείων του εδράνου στην περιοχή της σπηλαίωσης, σημαντικές παρατηρήσεις προκύπτουν στην περίπτωση που δεν υπάρχει ευθυγράμμιση του άξονα με το έδρανο. Λόγω της μεταβολής του πάχους του λιπαντικού, μεγαλύτερες ποσότητες αέρα εισέρχονται εκεί που υπάρχει μεγαλύτερο διάκενο, ενώ στο αντιδιαμετρικό σημείο η πίεση αυξάνεται σημαντικά λόγω του ελάχιστου πάχους. Η μεταβολή αυτή αυξάνει τη διατμητική τάση που παρατηρείται στο συγκεκριμένο σημείο, ενώ και η περιοχή της σπηλαίωσης μεταβάλλεται ανάλογα. Επίσης, χωρίς την παρουσία αέρα, το ποσοστό εξάτμισης του υγρού λιπαντικού αυξάνεται σε αυτή τη θέση, ενώ στην περίπτωση που εισάγεται αέρας στο έδρανο από τα άκρα, το εύρος της συγκεκριμένης περιοχής μειώνεται σημαντικά.

Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση ενέργειας στην προσομοίωση του φαινομένου της σπηλαίωσης, καθίσταται εμφανής η αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή ατμοποίησης του λιπαντικού. Παρόλο που η ατμοποίηση οφείλεται καθαρά στην πολύ χαμηλή πίεση που παρουσιάζεται στη συγκεκριμένη περιοχή, λόγω των απωλειών τριβής η θερμοκρασία αυξάνεται. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι ακόμα πιο ραγδαία στην περιοχή όπου οι ατμοί του λιπαντικού συμπυκνώνονται και η πίεση αυξάνεται από την πίεση ατμοποίησης στην πίεση εισαγωγής του λιπαντικού, όπως αυτή έχει ορισθεί από τις οριακές συνθήκες.

Όπως είναι εμφανές, το φαινόμενο της σπηλαίωσης έχει άμεση επίδραση στη λειτουργία του εδράνου. Η παρουσία του αέρα στα άκρα του εδράνου συντελεί στη μεταβολή της περιοχής αυτής, ανάλογα με τις συνθήκες που έχουν τεθεί. Φυσικά, τα θέματα μελέτης που καλύφθηκαν στην παρούσα εργασία σκοπό έχουν να αναδείξουν το φαινόμενο της σπηλαίωσης στη συγκεκριμένη εφαρμογή, και την επίδραση που έχουν διαφορετικοί παράγοντες.

Βάσει των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, μπορούν να προταθούν τα ακόλουθα σημαντικά θέματα, ως αντικείμενα περαιτέρω έρευνας:

- Η βελτιστοποίηση της πίεσης παροχής του λιπαντικού ανάλογα με τη θέση ευστάθειας του άξονα.
- Ο σχεδιασμός της κατάλληλης γεωμετρίας και της θέσης της οπής, με σκοπό τη συγκράτηση του λιπαντικού στο μέσο του εδράνου, και τον περιορισμό του φαινομένου της σπηλαίωσης σε όσο το δυνατό μικρότερη περιοχή.
- Ο σχεδιασμός του εδράνου για αριθμό οπών τροφοδοσίας μεγαλύτερο του ένα. Στο πραγματικό εν λειτουργία έδρανο, ο αριθμός των οπών εισαγωγής του λιπαντικού ισούται με δέκα. Στο πλαίσιο υπολογιστικής βελτιστοποίησης του σχεδιασμού του εδράνου, μπορεί να γίνει βελτιστοποίηση του αριθμού και της γεωμετρίας των οπών.
- Η επίδραση της πίεσης του αέρα στη λειτουργία του εδράνου. Σε εφαρμογές ωστικών εδράνων, με χρήση στεγανωτικών δακτυλίων, επιτυγχάνεται επανακυκλοφορία του αέρα σε πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής.
- Η εκτενής θερμοϋδροδυναμική ανάλυση της λειτουργίας του εδράνου, με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης των απωλειών τριβής στη λειτουργία του εδράνου (αύξηση της θερμοκρασίας και της τάσης ατμών του λιπαντικού), και κατά συνέπεια στο φαινόμενο της σπηλαίωσης.

- Η μελέτη σπηλαίωσης του εδράνου το οποίο λειτουργεί με κάποιο εναλλακτικό ρευστό ως λιπαντικό. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις εδράνων αξονικών συστημάτων πλοίων που χρησιμοποιείται πλέον το θαλασσινό νερό ως λιπαντικό, με σκοπό τον περιορισμό του κινδύνου της θαλάσσιας ρύπανσης.
- Η εύρεση της θέσης ισορροπίας του άξονα για δεδομένο φορτίο εδράνου. Η διαδικασία της υπολογιστικής προσομοίωσης στη παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε για δεδομένη θέση ισορροπίας του άξονα, η οποία προσδιορίζεται με χρήση του αλγορίθμου Elrod-Adams. Ωστόσο, η δυνατότητα προσδιορισμού της θέσης ισορροπίας του άξονα για δεδομένο ακτινικό φορτίο κατά τη διάρκεια της υπολογιστικής προσομοίωσης θα βελτιώνει την ακρίβεια υπολογισμών του παρόντος μοντέλου.
- Η επίπτωση της μεταβολής των στροφών του άξονα στη λειτουργία του εδράνου, για διάφορα ζεύγη ταχυτήτων-φορτίου.

Επίσης, εκτός από την απλή γεωμετρία ακτινικού εδράνου που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία, ενδιαφέρον θα έχει η μελέτη του φαινομένου της σπηλαίωσης σε έδρανα βελτιωμένου σχεδιασμού, χαρακτηριζόμενα από την παρουσία ειδικών κοιλοτήτων (grooves) κατά το μήκος του εδράνου. Η υπολογιστική μελέτη και βελτιστοποίηση των εν λόγω εδράνων θα καταδείξει το δυναμικό βελτίωσης σε σχέση με τα απλά έδρανα, αναφορικά με τις βασικές παραμέτρους λειτουργίας (ικανότητα παραλαβής φορτίου και συντελεστής τριβής), καθώς και αναφορικά με την ανάπτυξη του φαινομένου της σπηλαίωσης.

10 Βιβλιογραφία

- (1) Anaya-Duffresne, M. & Sinclair, G.B., 1995. Some Exact Solutions of Reynolds Equation. *ASME Journal of Tribology*, (117), pp.560-62.
- (2) ANSYS, Inc., 2013. *ANSYS CFX-Solver Modeling Guide*. Southpointe: ANSYS, Inc.
- (3) ANSYS, Inc., 2013. *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. Southpointe: ANSYS, Inc.
- (4) Barus, C., 1893. Isothermals, Isopiestic and Isometrics Relative to Viscosity. *American Journal of Science*, 45, pp.87-96.
- (5) Boedo, S. & Booker, J.F., 1997. Surface roughness and structural inertia in a mode-based mass-converging elastohydrodynamic lubrication model. *Tribology*, 119(2), pp.449-55.
- (6) Booker, J.F., 1971. Dynamically Loaded Journal Bearings: Numerical Application of Mobility Method. *Journal of Lubrication Technology*, 1, pp.168-76.
- (7) Brennen, C.E., 2005. *Fundamentals of Multiphase Flows*. California: Cambridge University Press.
- (8) Brewe, D.E., 1986. Theoretical modeling of the vapor cavitation in dynamically loaded journal bearings. *Tribology*, 108(4), pp.628-38.
- (9) Brewe, D.E., Ball, J.H. & Khonsari, M.M., 1988. Introduction. Part 2: Current Research in cavitation fluid films. *STLE Annual meeting*, pp.25-26.
- (10) Brujan, E.-A., 2011. *Cavitation in Non-Newtonian Fluids with biomedical and Bioengineering Applications*. Bucharest, Romania: Springer.
- (11) Cameron, A., 1981. *Basic Lubrication Theory*.
- (12) Cho, Y., 2005. *Modeling Engine Oil Vaporization and Transport of the Oil Vapor in the Piston Ring Pack of Internal Combustion Engines*. Thesis. Massachusetts: M.I.T. Massachusetts Institute of Technology.
- (13) DNV Rules, January 2015. *Rotating Machinery, Power Transmission*. Rules for classification of Ships/High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft. DNV.
- (14) Dowson, D. & Taylor, C.M., 1974. Fundamental aspects of cavitation in bearings. In Cavitation and related phenomena in lubrication. *Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, (1st), pp.15-25.
- (15) DSME, 2010. *Shafting Plan*. Plan. DSME.
- (16) Dykyj, J. et al., 1999. *Vapor Pressure of Chemicals*. Texas, U.S.A.: Springer.
- (17) Elrod, H.G. & Adams, M.L., 1974. Cavitation and related phenomena in lubrication. In *1 st Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. Leeds, UK, 1974.

- (18) Groper, M. & Etsion, I., 2001. The Effect of Shear Flow and Dissolved Gas Diffusion on Cavitation in a Submerged Journal bearing. *Transactions of ASME*, 123, pp.494-500.
- (19) Gumbel, L., 1914. Das Problem der Lagerrettung. *V.D.I.*, pp.87-104, 109-120.
- (20) Hamrock, B.J., Schmid, S.R. & Jacobson, B.O., 2004. *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, inc.
- (21) Havenfoto's, n.d. *Havenfoto's*. [Online] Available at: <http://www.havenfoto.nl/en/> [Accessed 02 July 2015].
- (22) Jakobson, B. & Floberg, L., 1957. The finite journal bearing vaporization. *Transactions of Chalmers University Technology*, 190, pp.1-119.
- (23) Joback, K.G. & Reid, R.C., 1987. Estimation of Pure-Component Properties from Group-Contributions. *Chem. Eng. Commun.*, 57, pp.233-43.
- (24) Jones, W.R. & Wedeven, L.D., September 1971. *Surface-Tension Measurements in Air of Liquid Lubricants to 200oC by the Differential-maximum-bubble-pressure technique*. NASA Technical Note. Cleveland, Ohio: NASA.
- (25) Khonsari, M.M. & Booser, R.E., 2008. *Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication*. 2nd ed. Chicester: John Wiley 7 Sons Ltd.
- (26) Kichkin, G.I., 1966. Foam formation in lubricating oils. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2(4), pp.272-75.
- (27) Liquimar, n.d. *Liquimar Tanker Management Inc*. [Online] Available at: <http://www.liquimar.gr/?Fleet:AMFITRITI%A0> [Accessed 2015].
- (28) Luque, R. & Melero, J.A., 2012. *Advances in Biodiesel Production: Processes and Technologies*. Philadelphia: Woodhead Publishing.
- (29) Martin, F.A. & Lee, C.S., 1982. Feed Pressure Flow in Plain Journal Bearings. *ASLE Annual Meeting*.
- (30) Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T.H. & Huebsch, W.W., 2009. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 6th ed. USA: John Wiley & Sons. Inc.
- (31) Nikolakopoulos, P.G. & Papadopoulos, C.A., 1994. Non-linearities in misaligned journal bearings. *Tribology International*, 27(4), pp.243-57.
- (32) Raptis, L., March 2014. *Software development for the solution of hydrodynamic lubrication problems in main bearings of marine Diesel engines*. Diploma Thesis. Athens: NTUA National Technical University of Athens.
- (33) Reynolds, O., 1886. On the Theory of Lubrication and its Application to Mr Beauchamp Tower's experiments Includingan Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil. In *Royal Society of London*. London, 1886.
- (34) Roelands, C.J.A., 1966. *Correlational Aspects of the Viscosity - Temperature - Pressure Relationship of Lubricating oils*. PhD Thesis. Bibliotheek Technische Universiteit te Delft.

- (35) So, B.Y.C. & Klaus, E.E., 1980. Viscosity - Pressure Correlation of Liquids. *ASLE Transactions*, 23, pp.409-21.
- (36) Szeri, A.Z., 2011. *Fluid Film Lubrication*. New York: Cambridge University press.
- (37) Vijayaraghavan, D. & Keith, T.G., 1989. Development and Evaluation of a Cavitation Algorithm. *STLE Tribology Transactions*, 32, pp.612-15.
- (38) Wilhoit, R.C. & Zwolinski, B.J., 1971. *Handbook of Vapor Pressures and Heats of Vaporization of Hydrocarbons and Related Compounds*. Texas: Thermodynamis Research Center, Texas A&M University.
- (39) Wilson, R.W., n.d. Cavitation damage in plain bearings. In *Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. Leeds, UK University of Leeds.
- (40) Yamajo, S. & Matsuoka, I., 2003. *Advanced Technology of Propeller Shaft Stern Tube Seal*. Japan: KOBELCO KOBELCO, Marine Engineering.
- (41) Yaws, C.L., 1999. *Chemical Properties Handbook*. Beaumont, Texas.
- (42) Yaws, C.L., 2008. *Thermophysical Properties of Chemicals and Hydrocarbons*. Texas, U.S.A.: William Andrew.
- (43) Yaws, C.J., 2009. *Transport Properties of Chemicals and Hydrocarbons (Viscosity, Thermal Conductivity, and Diffusivity of C1 to C100 Organics and AC to Zr Inorganics)*. Texas, U.S.A.: William Andrew Inc.
- (44) Παραδεισιάδης, Γ., 2012. *Τριβολογία (Σημειώσεις)*. Θεσσαλονίκη: Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών - Α.Τ.Ε.Ι.Θ.