Αριθμητική Μελέτη της Αλληλεπίδρασης Μικροφυσαλίδας με Ελαστική Επίστρωση με Στερεό Τοίχωμα μέσα σε Ιξώδη Ροή

Βλαχομήτρου Μαρία & Πελεκάσης Νίκος

Εργαστήριο Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Βόλος, 38334, Email: mavlacho@uth.gr , pel@uth.gr

Η κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς των μικροφυσαλίδων με ελαστικό τοίχωμα (τύπου contrast agent) είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς αφορά σε αρκετές τεχνολογικές εφαρμογές (π.χ. στοχευμένη χορήγηση φαρμάκων, ιατρική απεικόνιση ζωτικών οργάνων κ.α.). Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε αριθμητική μεθοδολογία για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς φυσαλίδας όταν λαμβάνονται υπόψη οι ιξώδεις δυνάμεις του υγρού που την περιβάλλει. Αρχικά, μελετήθηκε φυσαλίδα που βρίσκεται μέσα σε μη περιορισμένη ροή και στη συνέχεια η μεθοδολογία επεκτάθηκε ώστε να μελετηθεί η αλληλεπίδραση της με στερεό τοίχωμα και να διευκρινιστεί ο ρόλος των ιξωδών τάσεων του υγρού που αναπτύσσονται κοντά στο τοίχωμα.

Για την αριθμητική προσομοίωση της ροής επιλύονται σε αξονική συμμετρία οι εξισώσεις συνέχειας και Navier-Stokes, ενώ στη διεπιφάνεια της φυσαλίδας εφαρμόζονται το ισοζύγιο δυνάμεων και η κινηματική συνθήκη. Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά των μικροφυσαλίδων τύπου contrast agent περιγράφεται μέσω του καταστατικού νόμου Mooney-Rivlin, ενώ το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την περιγραφή τους συμπεριλαμβάνει, εκτός από τις ιξοδωελαστικές τάσεις, και τις δυνάμεις καμπτικής αντίστασης του κελύφους.

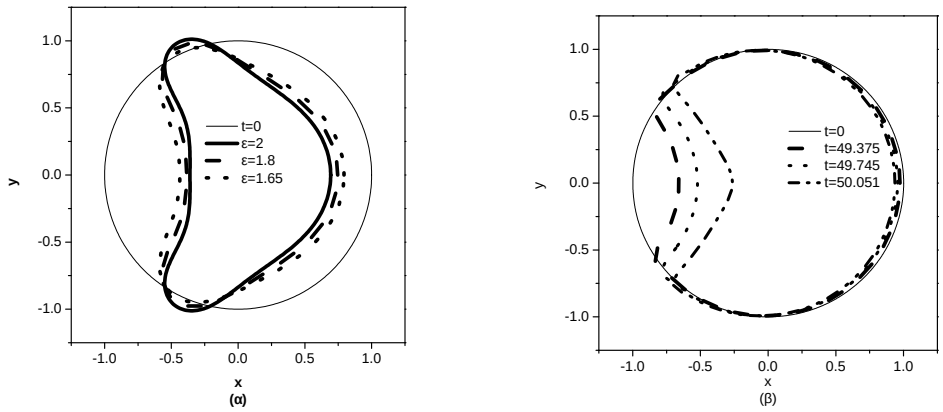
Η αριθμητική επίλυση του προβλήματος βασίζεται στη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων χρησιμοποιώντας ένα υβριδικό σχήμα που συνδυάζει τη χρήση διδιάστατων λαγκρανζιανών συναρτήσεων για την προσομοίωση του υγρού και μονοδιάστατων κυβικών συναρτήσεων splines για την περιγραφή του σχήματος της διεπιφάνειας. Για τη μελέτη των φυσαλίδων με ελαστική μεμβράνη, η χρήση των συναρτήσεων splines είναι αναγκαία αφού στο ισοζύγιο δυνάμεων υπεισέρχεται παράγωγος τέταρτης τάξης μέσω του όρου που αντιστοιχεί στην αντίσταση κάμψης. Το αριθμητικό πλέγμα κατασκευάζεται με τη βοήθεια της μεθόδου spine η οποία βασίζεται στην εισαγωγή κατάλληλων μετασχηματισμών με στόχο να μετατραπεί το πολύπλοκο φυσικό πεδίο σε ένα ορθογώνιο υπολογιστικό πεδίο.

Αρχικά, μελετώνται contrast agents που βρίσκονται μέσα σε μη περιορισμένη ροή και διαπιστώνεται ο σταθεροποιητικός ρόλος του ιξώδους του υγρού. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι όταν οι ιξώδεις δυνάμεις του υγρού λαμβάνονται υπόψη απαιτείται μεγαλύτερο πλάτος ακουστικής διαταραχής για να παρατηρηθεί κατάρρευση της φυσαλίδας. Επιπλέον, παρατηρείται ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι εφικτή μια μόνιμη κατάσταση μη σφαιρικού σχήματος, καθώς το ιξώδες απορροφά ενέργεια που διαφορετικά θα αποδιδόταν στις ιδιοτιμές σχήματος και με τον τρόπο αυτό συμβάλει στον κορεσμό τους (Σχήμα 1α). Επίσης, διερευνάται ο τρόπος κατάρρευσης των μικροφυσαλίδων και παρατηρείται ότι κατά τα τελευταία στάδια και για μεγάλο πλάτος διαταραχής παρατηρείται σχηματισμός κωνικής γωνίας στο πόλο της φυσαλίδας (Σχήμα 1β). Η ταχύτητα του πόλου αυξάνεται πάρα πολύ καθώς αυτός κινείται προς το εσωτερικό της φυσαλίδας και παράλληλα παρατηρείται μεγάλη αύξηση στην ενέργεια κάμψης. Το γεγονός αυτό, αποτελεί μια ένδειξη ότι οι δυνάμεις

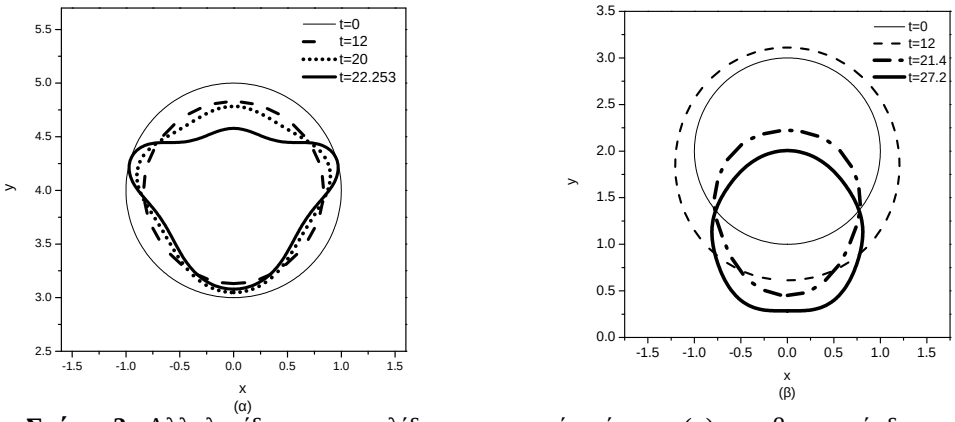
που κυριαρχούν στα τελευταία στάδια της κατάρρευσης είναι η αδράνεια και οι δυνάμεις κάμψεις.

Όσον αφορά στην αλληλεπίδραση της φυσαλίδας με στερεό τοίχωμα διαπιστώνεται ότι το τοίχωμα δρα αποσταθεροποιητικά και επιταχύνει την εμφάνιση των ιδιομορφών σχήματος. Για βηματικές διαταραχές (Σχήμα 2α) παρατηρείται αρχικά κίνηση της φυσαλίδας προς το τοίχωμα, λόγω των δευτερογενών δυνάμεων Bjerknes, η οποία όμως γρήγορα σταματά λόγω του ιξώδους του υγρού. Τελικά, με την πάροδο του χρόνου, και πάνω από ένα κατώφλι πλάτους, καταγράφεται στατικός λυγισμός και διαπιστώνεται ότι η παρουσία του τοιχώματος αφενός επιταχύνει την εμφάνιση του λυγισμού και αφετέρου μεταβάλει ελαφρώς την σειρά εμφάνισης των ιδιομορφών σχήματος. Μειώνοντας την απόσταση μεταξύ της φυσαλίδας και του τοιχώματος παρατηρούμε τόσο την γρηγορότερη εμφάνιση του στατικού λυγισμού, όσο και την επικράτηση διαφορετικής ιδιομορφής σχήματος. Για ακουστικές διαταραχές (Σχήμα 2β) η φυσαλίδα ταλαντώνεται με τη συχνότητα της εξωτερικής διαταραχής, η οποία επικρατεί έναντι της ιδιοσυχνότητας της φυσαλίδας ενώ παραμορφώνεται λόγω υποαρμονικού συντονισμού. Όταν η φυσαλίδα πλησιάζει αρκετά κοντά στο τοίχωμα το ιξώδες του υγρού αντιστέκεται στην κίνηση της και το σχήμα της γίνεται ευθύγραμμο και πλατύ στον κάτω πόλο σαν αποτέλεσμα της τοπικής αύξησης της πίεσης λόγω λίπανσης. Η προσομοίωση σταματά σε αυτό το σημείο λόγω της εμφάνισης συνθηκών λυγισμού.

.



Σχήμα 1: (α) Μόνιμη κατάσταση μη σφαιρικού σχήματος για διαφορετικά πλάτη διαταραχής και (β) πιθανή δημιουργία κωνικής γωνίας κατά τη κατάρρευση ελαστικής μικροφυσαλίδας.



Σχήμα 2: Αλληλεπίδραση φυσαλίδας με στερεό τοίχωμα (α) για βηματική διαταραχή και (β) για ακουστική διαταραχή.