

## ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΦΥΣΑΛΙΔΑΣ ΣΕ ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ ΚΟΝΤΑ ΣΕ ΓΕΙΤΟΝΙΚΟ ΤΟΙΧΩΜΑ

Ευθυμίου Κωνσταντίνος<sup>1,α</sup>, Πελεκάσης Νικόλαος<sup>2,α</sup>

<sup>1</sup>Υποψήφιος Διδάκτορας, <sup>2</sup>Καθηγητής

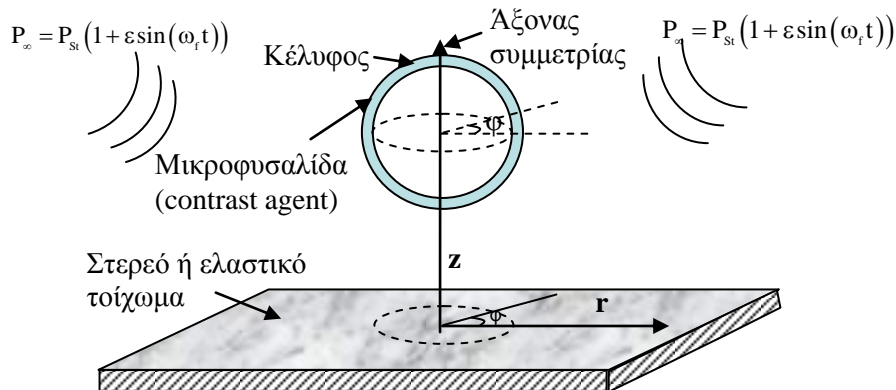
<sup>α</sup>Εργαστήριο Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών,  
 Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας,  
 Πεδίον Άρεως, 38334, Βόλος  
 E-mails: [konefthim@mie.uth.gr](mailto:konefthim@mie.uth.gr), [pel@mie.uth.gr](mailto:pel@mie.uth.gr)

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ (Παρουσίαση Νέας Εργασίας)

Γίνονται προσομοιώσεις, με χρήση συνοριακών στοιχείων, της αλληλεπίδρασης μικροφυσαλίδας με ελαστικό περίβλημα (Contrast Agent ή CA) με γειτονικό τοίχωμα παρουσία ακουστικών διαταραχών. Γίνεται υπόθεση αξονικής συμμετρίας θεωρώντας ελαστικό λεπτότοιχο κέλυφος για τη φυσαλίδα. Μελετάται η επίδραση της απόστασης μεταξύ φυσαλίδας και τοιχώματος, καθώς επίσης και του πλάτους της εξωτερικής διαταραχής, στις ταλαντώσεις και στον τρόπο κατάρρευσης της μικροφυσαλίδας. Για το ελαστικό περίβλημα (πάχος ~1nm), λαμβάνονται υπ' όψιν δύο καταστατικοί νόμοι: Mooney-Rivlin (ψευδοπλαστικό υλικό) και Skalak (διασταλτικό υλικό). Το ιξώδες του κελύφους παρέχει τον κύριο μηχανισμό απόσβεσης, ενώ γίνεται θεώρηση δυναμικής ροής για το περιβάλλον ρευστό. Το κάθετο και εφαπτομενικό ισοζύγιο δυνάμεων στη διεπιφάνεια περιλαμβάνει τη σύζευξη της δυναμικής υπερπίεσης με τις εφελκυστικές και καμπτικές ελαστικές τάσεις μαζί με την ιξώδη απόσβεση στο κέλυφος. Κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς της μικροφυσαλίδας κοντά σε γειτονική επιφάνεια και η διερεύνηση ενδεχόμενης έναρξης ταλαντώσεων σχήματος της πρώτης ή δημιουργίας υγρής δέσμης υψηλής ταχύτητας «jet» που μπορεί να επηρεάσει την ακουστική της υπογραφή ή ακόμα και να προκαλέσει ζημιά στη γειτονική επιφάνεια.

### 2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Αναπτύχθηκε αριθμητική μεθοδολογία συνοριακών στοιχείων για την επίλυση της αλληλεπίδρασης με στερεό ή ελαστικό τοίχωμα, διατηρώντας την υπόθεση της αξονικής συμμετρίας και θεωρώντας ελαστικό λεπτότοιχο κέλυφος για τη φυσαλίδα (σχήμα 1).



Σχήμα 1: Σχηματικό διάγραμμα πεδίου ροής και αλληλεπίδρασης

Για το σκοπό αυτό γίνεται διακριτοποίηση του κελύφους της μικροφυσαλίδας και του γειτονικού τοιχώματος. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η υπάρχουσα σχετική βιβλιογραφία δε λαμβάνει υπ' όψιν την ελαστικότητα [Klaseboer & Khoo (2004)] ή την αντίσταση σε κάμψη [Qin & Ferrara (2006)] του κελύφους. Στην παρούσα εργασία θεωρούμε το γειτονικό τοίχωμα στερεό και άκαμπτο, ότι έχει άπειρο μήκος σε σχέση με την ακτίνα της φυσαλίδας και γίνεται εξέταση του βέλτιστου αριθμού στοιχείων ώστε να ανακτηθεί με ακρίβεια η συμπεριφορά του δυναμικού ταχύτητας για μεγάλες αποστάσεις [Wang et al. (1996)], [Boulton-Stone & Blake (1993)]. Στην περίπτωση αυτή η ολοκληρωτική εξίσωση σε κυλινδρικές συντεταγμένες γράφεται:

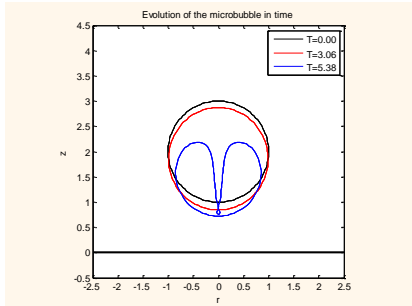
$$\begin{aligned} \Phi(r_0, z_0, t) = & \int_{S_b} \frac{\partial \Phi}{\partial n}(r, z, t) G(r_0, z_0, r, z) dS_b - \int_{S_b} [\Phi(r, z, t) - \Phi(r_0, z_0, t)] \frac{\partial G}{\partial n}(r_0, z_0, r, z) dS_b + \\ & + \int_{S_w} \frac{\partial \Phi}{\partial n}(r, z, t) G(r_0, z_0, r, z) dS_w - \int_{S_w} \Phi(r, z, t) \frac{\partial G}{\partial n}(r_0, z_0, r, z) dS_w \end{aligned} \quad (1)$$

Στην παραπάνω σχέση τα  $S_b$  και  $S_w$  συμβολίζουν τις διεπιφάνειες της μικροφουσαλίδας και του τοιχώματος, αντίστοιχα, με το περιβάλλον ρευστό. Επιπλέον έχει θεωρηθεί ότι το πεδιακό σημείο  $(r_0, z_0)$  βρίσκεται στην επιφάνεια της μικροφουσαλίδας, ώστε να εξομαλυνθεί η ολοκλήρωση του πυρήνα διπλής στοιβάδας,  $\partial G/\partial n$ , της ιδιόμορφης λύσης πάνω στην εν λόγω επιφάνεια  $S_b$ . Ανάλογη διαδικασία χρησιμοποιείται και για την περίπτωση που το πεδιακό σημείο βρεθεί στη διεπιφάνεια του τοιχώματος  $S_w$ .

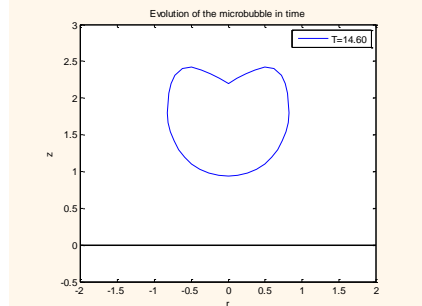
Προκειμένου να πιστοποιηθεί η αξιοπιστία του κώδικα, διεξήχθησαν αριθμητικές προσομοιώσεις αλληλεπίδρασης φουσαλίδας χωρίς περίβλημα με γειτονικό στερεό τοίχωμα ούτως ώστε να ανακτηθεί η συμπεριφορά της πρώτης σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία [Blake et al. (1986)]. Πράγματι, οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι η φουσαλίδα καθώς πλησιάζει στο τοίχωμα, λόγω της επίδρασης δευτερογενών δυνάμεων Bjerknes, εμφανίζει υγρή δέσμη υψηλής ταχύτητας «jet» στο τμήμα της διεπιφάνειάς της με το περιβάλλον ρευστό μακριά από το τοίχωμα. Το jet διασχίζει τη φουσαλίδα κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της, δημιουργώντας τελικά φουσαλίδα τοροειδούς σχήματος (σχήμα 2).

### 3. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

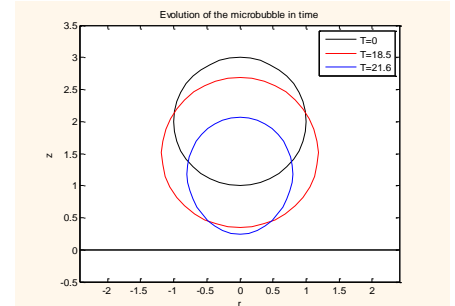
Διεξήχθησαν αντίστοιχες προσομοιώσεις αλληλεπίδρασης φουσαλίδας με ελαστικό περίβλημα με γειτονικό τοίχωμα, οι οποίες έδειξαν ότι η ύπαρξη του κελύφους δρα σταθεροποιητικά αποτρέποντας τη δημιουργία jet, είτε πρόκειται για βηματική αλλαγή (σχήμα 3), είτε για αλλαγή ημιτονοειδούς μορφής του πεδίου πίεσης του περιβάλλοντος ρευστού (σχήμα 4). Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση βηματικής αλλαγής της πίεσης, η φουσαλίδα αρχικά ταλαντώνεται με τη φυσική της συχνότητα, καθώς πλησιάζει στο τοίχωμα. Το ιξώδες του κελύφους δρα ως μηχανισμός απόσβεσης αποσβένοντας τελικά τις ταλαντώσεις. Ωστόσο, η μεταφορική κίνηση της φουσαλίδας διατηρείται λόγω αδράνειας. Η φουσαλίδα διατηρεί το σφαιρικό της σχήμα υπό συμπίεση και, για ικανή συμπίεση, παρουσιάζει τελικά λυγισμό καθώς πλησιάζει στο τοίχωμα και παραμορφώνεται στο πίσω μέρος της, χωρίς να δείχνει σημάδια δημιουργίας jet (σχήμα 3). Στα τελευταία στάδια της προσομοίωσης παρατηρείται δημιουργία περιοχών πολύ μεγάλης καμπυλότητας κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, στις οποίες η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε καμπτική, εκφράζοντας έτσι την αντίσταση του κελύφους σε λυγισμό, οδηγώντας τοπικά σε σχηματισμό κωνικής γωνίας προκαλώντας τον τερματισμό της προσομοίωσης (σχήμα 3). Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, καθώς και για την ακριβή διερεύνηση του μηχανισμού κατάρρευσης της φουσαλίδας γίνεται προσπάθεια προσομοίωσης με δημιουργία ανομοιομορφου πλέγματος, πυκνώνοντας στις περιοχές μεγάλης καμπυλότητας. Για την περίπτωση ημιτονοειδούς αλλαγής της πίεσης, η φουσαλίδα πλησιάζει σημαντικά το τοίχωμα ταλαντούμενη με τη συχνότητα της εξωτερικής διαταραχής επιδεικνύοντας παραμορφώσεις σχήματος κυρίως στη φάση συμπίεσης, λόγω αρμονικού συντονισμού (σχήμα 4) [Tsiglifis & Pelekasis (2013)]. Οι παραμορφώσεις αυτές έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό, ο οποίος είναι κάθετος ως προς το τοίχωμα. Η παραπάνω συμπεριφορά έχει παρατηρηθεί σε πειράματα μικροφουσαλίδων σε επαφή με στερεό τοίχωμα [Vos et al. (2008)]. Καθώς το πλάτος διαταραχής αυξάνει, η εμφάνιση αρμονικού συντονισμού και η επακόλουθη παραμόρφωση του κελύφους επιταχύνονται, με αποτέλεσμα την εμφάνιση περιοχών μεγάλης καμπυλότητας παρόμοιων με αυτήν του σχήματος (3).



Σχήμα 2: Φουσαλίδα χωρίς περίβλημα με στερεό τοίχωμα



Σχήμα 3: Φουσαλίδα με ελαστικό περίβλημα με στερεό τοίχωμα (βηματική αλλαγή της πίεσης)



Σχήμα 4: Φουσαλίδα με ελαστικό περίβλημα με στερεό τοίχωμα (ημιτονοειδής αλλαγή της πίεσης)

### 4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Blake J. R., Taib B. B. and Doherty G., Transient cavities near boundaries, part 1. Rigid Boundary, *J. Fluid Mech.* **170**, 479-497, 1986.
- Boulton-Stone J. M. and J. R. Blake J. R., Gas bubbles bursting at a free surface, *J. Fl. Mech.*, **254**, 437-466, 1993.
- Klaseboer E. & Khoo B. C., An oscillating bubble near an elastic material, *J. Ap. Phys.*, **96**(10), 5808-5818, 2004.
- Qin S. P. & Ferrara K. W., Acoustic response of compliant microvessels containing ultrasound contrast agents, *Phys. Med. Biol.* **51**, 5065-88, 2006.
- Tsiglifis K. & Pelekasis N. A., Simulations of insonated contrast agents: Saturation and transient break-up, *Phys. Fluids* **25**, 032109, 2013.
- Vos H., Dollet B., Bosch J. G., Versluis M. and de Jong N., Nonspherical vibrations of microbubbles in contact with a wall – a pilot study at low mechanical index, *Ultr. in Med. & Biol.*, vol. **34**(4), pp. 685-688, 2008.
- Wang Q.X., Yeo K.S., Khoo B.C. and Lam K. Y., Strong interaction between a buoyancy bubble and a free surface, *Theoretical and computational fluid dynamics*, **8**, 73-88, 1996.