

ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΦΥΣΑΛΙΔΑΣ ΣΕ ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ ΚΟΝΤΑ ΣΕ ΓΕΙΤΟΝΙΚΟ ΤΟΙΧΩΜΑ

Κωνσταντίνος Ευθυμίου & Νικόλαος Πελεκάσης

Εργαστήριο Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος
Αφίσα δημοσιευμένη στο 9^ο Πανελλήνιο Συνέδριο «Φαινόμενα Ροής Ρευστών», 12-13 Δεκεμβρίου 2014, Αθήνα

Κίνητρο

- Διαγνωστική ιατρική \Rightarrow Μέθοδος υπερήχων \Rightarrow Εκπομπή ισχυρού σήματος πίεσης από τη μικροφουσαλίδα, όταν διαταραχθεί το περιβάλλον ρευστό (Sboros et al. 2002, Frinking & de Jong, Postema et al., Ultrasound Med. Bio. 1998, 2004)
- Γονιδιακή Θεραπεία \Rightarrow Μέθοδος Sonoporation \Rightarrow Δημιουργία πόρων στην επιφάνεια γειτονικών κυττάρων εξαιτίας του ροϊκού πεδίου που δημιουργεί η ταλαντούμενη μικροφουσαλίδα (Marmottant & Hilgenfeldt, Nature 2003)
- Θεραπεία ασθενειών εσωτερικών οργάνων \Rightarrow Μεταφορά φαρμάκων στους ιστούς από τις μικροφουσαλίδες (Klibanov et al., adv. Drug Delivery Rev., 1999, Ferrara et al., Annu. Rev. Biomed., 2007)

Αξονοσυμμετρικές ταλαντώσεις μικροφουσαλίδας κοντά σε τοίχωμα

- Πειράματα έχουν δείξει ότι η παρουσία γειτονικού τοιχώματος επηρεάζει τις ταλαντώσεις της μικροφουσαλίδας, ιδιαίτερα τη μέγιστη διαστολή της
- Παρατηρούνται αξονοσυμμετρικές ταλαντώσεις και δημιουργία υγρής δέσμης υψηλής ταχύτητας «jet» που οδηγεί σε σχηματισμό φουσαλίδων τοροειδούς γεωμετρίας
- Η φουσαλίδα ταλαντώνεται ασύμμετρα στο επίπεδο κάθετα στο τοίχωμα, ενώ η ταλάντωση είναι συμμετρική στο επίπεδο παράλληλα στο τελευταίο (η παραμόρφωση εμφανίζει προσανατολισμό κάθετα στο τοίχωμα) (H. J. Vos et al., Ultrasound in Med. & Biol., 2008) (S. Zhao et al., Applied Physics, 2005)

Υποθέσεις

- 1) Αξονική συμμετρία, 2) Ιδανική, αστρόβιλη ροή υψηλού αριθμού Reynolds, 3) Ασυμπίεστο περιβάλλον ρευστό με ημιτονοειδή αλλαγή στο πεδίο της πίεσης, 4) Ιδανικό αέριο εντός της φουσαλίδας που υπόκειται σε αδιαβατική μεταβολή, 5) Πολύ λεπτό ιξωδοελαστικό κέλυφος του οποίου η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από καταστατικό νόμο (π.χ. Hooke, Mooney-Rivlin or Skalak), 6) Το κέλυφος εμφανίζει μέτρο δυσκαμψίας το οποίο καθορίζει τις καμπτικές τάσεις μαζί με τις μεταβολές καμπυλότητας, 7) Παράμετροι κελύφους: μέτρο επιφανειακής διαστολής $\chi=3G_s\delta$, διασταλτικό ιξώδες μ_s , βαθμός μη γραμμικότητας b για ψευδοπλαστικά και C για διασταλτικά κελύφη αντίστοιχα, μέτρο δυσκαμψίας k_B

Μεθοδολογία

- Καθορισμός γενικού κυλινδρικού συστήματος συντεταγμένων (ρ, z) με αρχή των αξόνων την τομή του τοιχώματος με τον άξονα συμμετρίας z καθώς επίσης και ενός τοπικού σφαιρικού συστήματος (r, θ) με αρχή των αξόνων το κέντρο μάζας της μικροφουσαλίδας
- Οι συντεταγμένες της διεπιφάνειας υπολογίζονται από την κινηματική συνθήκη στην r -διεύθυνση και το επαπτομενικό ισοζύγιο δυνάμεων στη διεπιφάνεια μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων
- Το δυναμικό της ταχύτητας υπολογίζεται από τη δυναμική συνθήκη πάνω στη διεπιφάνεια με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων ενώ η κάθετη ταχύτητα της διεπιφάνειας προκύπτει επιλύοντας την συνοριακή ολοκληρωτική εξίσωση μέσω της μεθόδου των συνοριακών στοιχείων
- Η ολοκλήρωση στο χρόνο της κινηματικής και δυναμικής συνθήκης γίνεται μέσω της μεθόδου Runge – Kutta 4^{ης} τάξης

Αποτελέσματα

Μικροφουσαλίδα με περίβλημα – Στερεό σύνορο

Βηματική αλλαγή της πίεσης

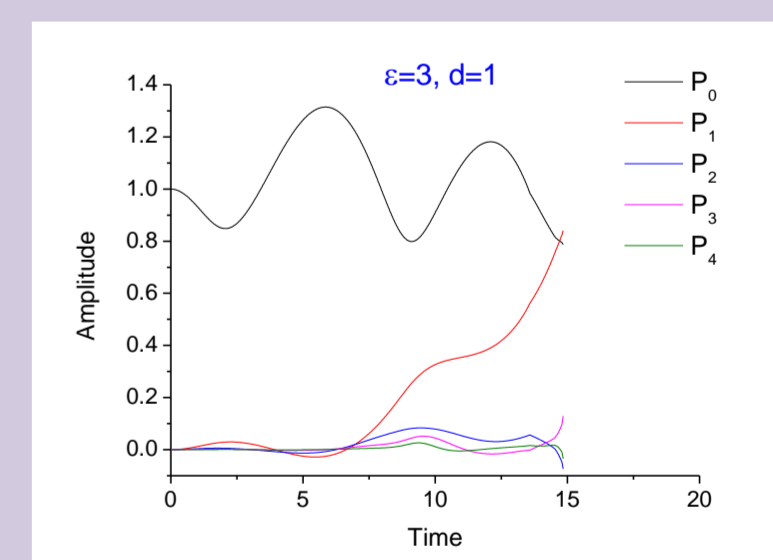
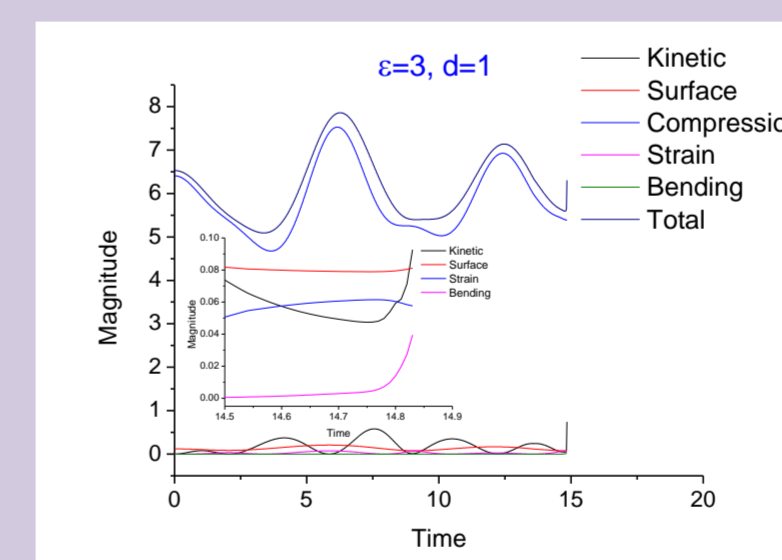
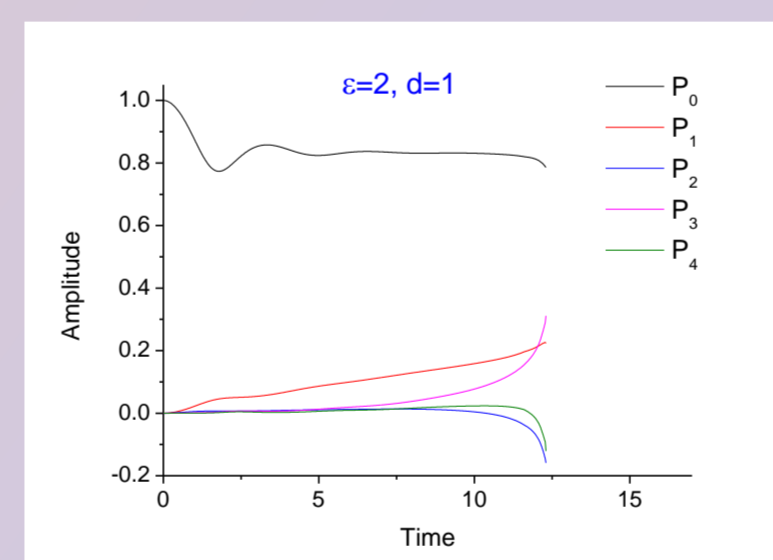
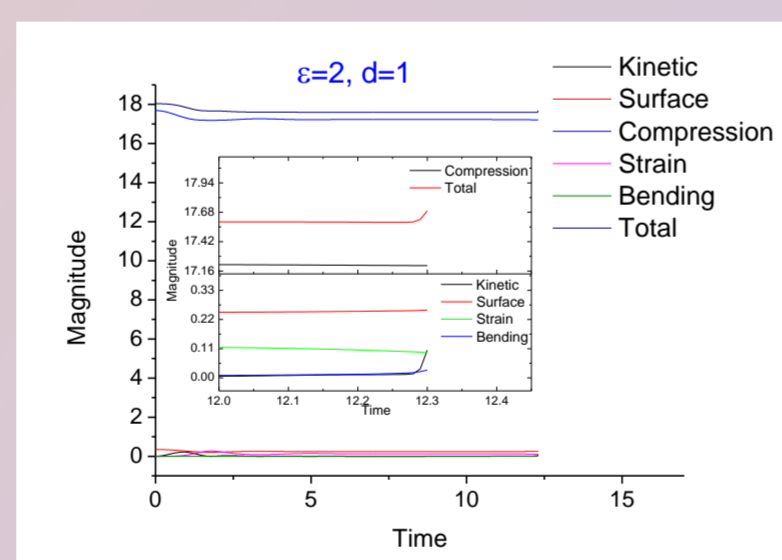
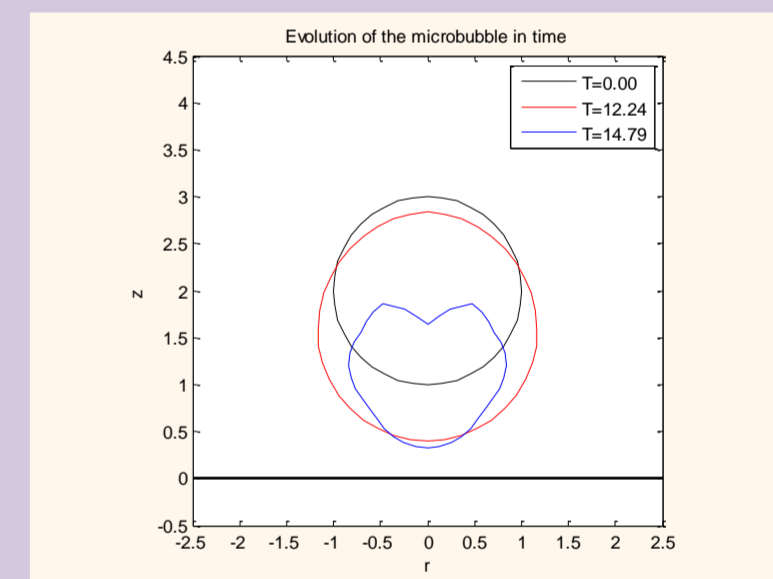
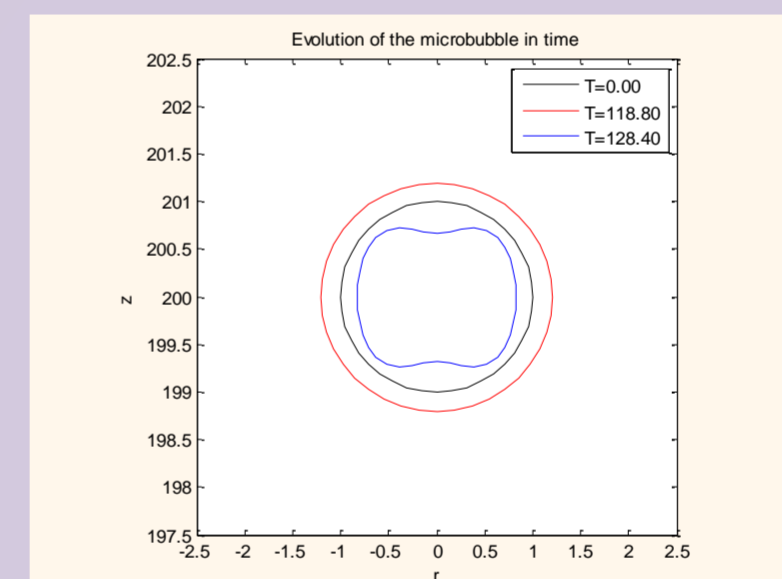
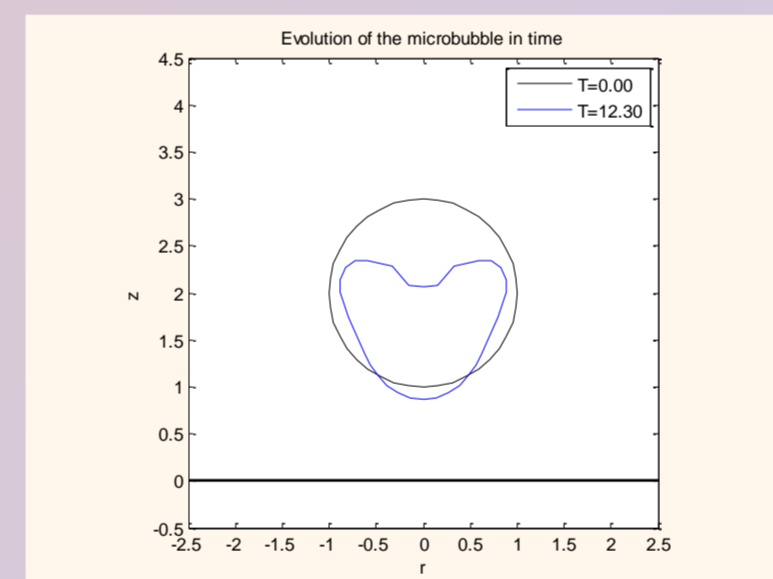
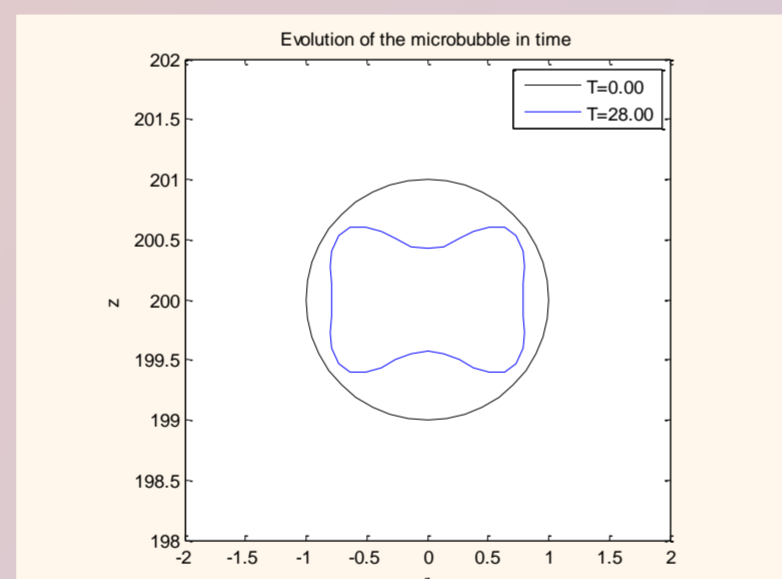
Ημιτονοειδής αλλαγή της πίεσης

Μακριά από το τοίχωμα

Πολύ κοντά στο τοίχωμα

Μακριά από το τοίχωμα

Πολύ κοντά στο τοίχωμα



Παράμετροι για φουσαλίδα με περίβλημα (κέλυφος από φωσφολιπίδιο):

$$R_0 = 3.6 \mu m, \mu_s = 20 Pa \cdot s, G_{3D} = 80 MPa,$$

$$\sigma = 0.051 \frac{N}{m}, k_B = 3 \cdot 10^{-14} N \cdot m,$$

$$b = 0 \text{ (neo-Hookean)}, \nu_f = 1.7 MHz, \gamma = 1.07,$$

$$P_{st} = 101325 Pa, \mu_l = 0, \delta = 1 nm$$

Παράμετροι για φουσαλίδα χωρίς περίβλημα:

$$R_0 = 3.6 \mu m, \sigma = 0.075 \frac{N}{m}, \nu_0 = 1 MHz,$$

$$\nu_f = 1.7 MHz, \gamma = 1.4, P_{st} = 101325 Pa, \mu_l = 0$$

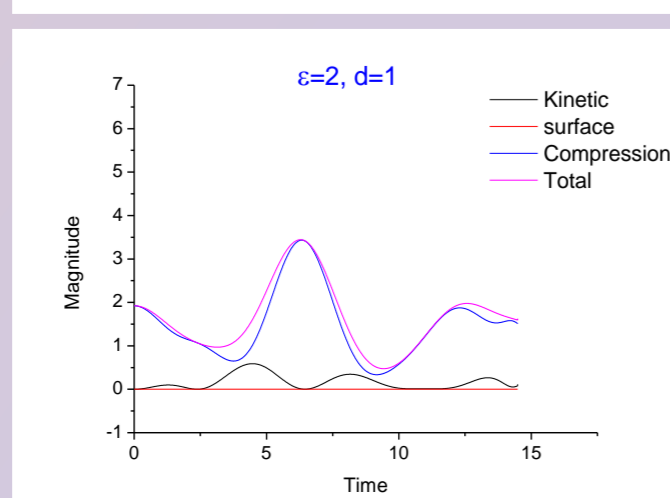
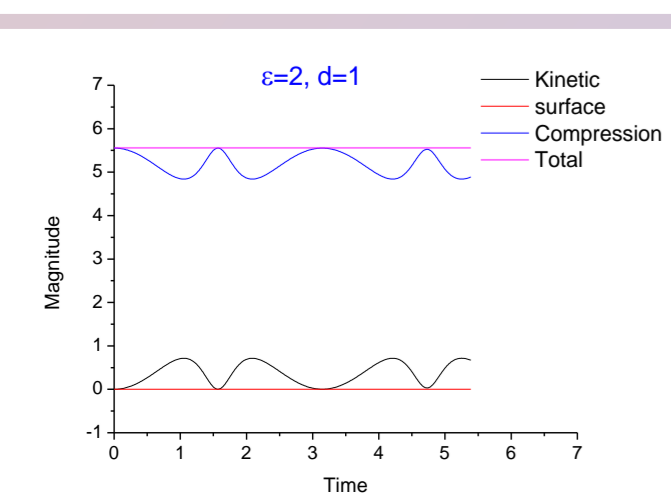
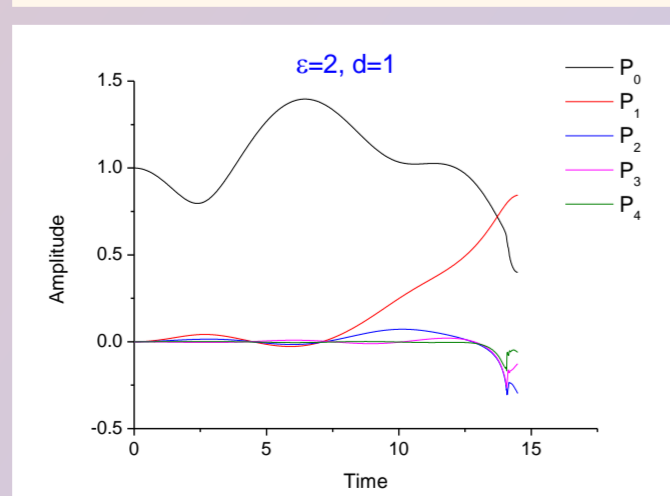
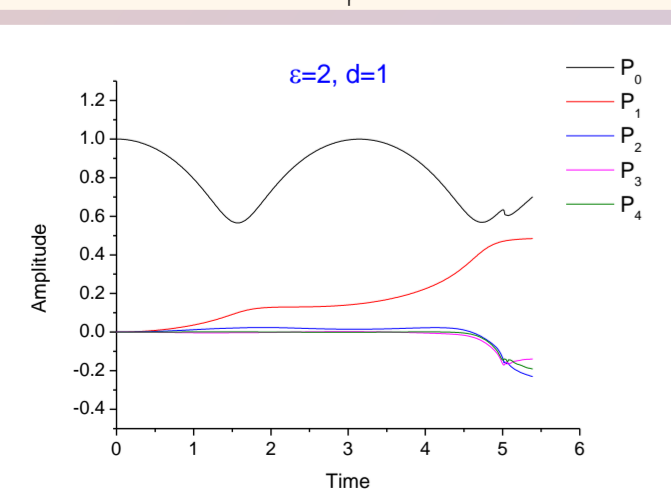
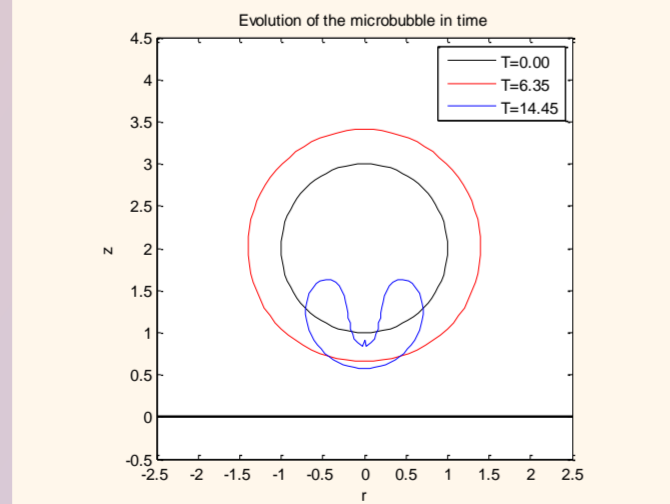
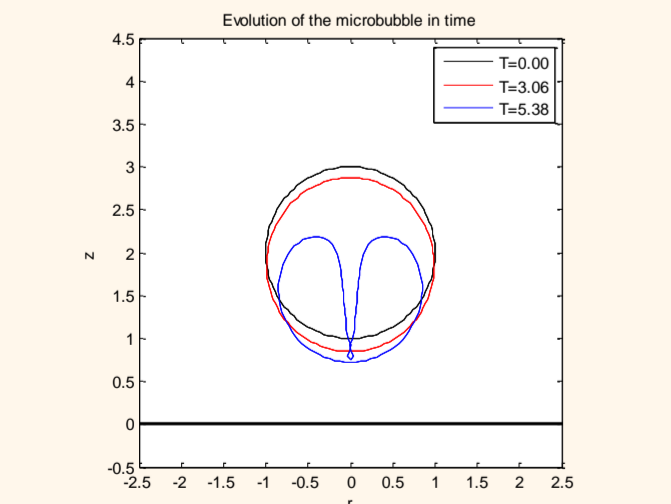
Φουσαλίδα χωρίς περίβλημα – Στερεό σύνορο

Βηματική αλλαγή της πίεσης

Πολύ κοντά στο τοίχωμα

Ημιτονοειδής αλλαγή της πίεσης

Πολύ κοντά στο τοίχωμα



- Σε όλες τις περιπτώσεις η μικροφουσαλίδα προσεγγίζει το τοίχωμα, λόγω της επίδρασης των δευτερογενών δυνάμεων Bjerknes. Για μικρότερη αρχική απόσταση μεταξύ τους η έλξη γίνεται εντονότερη.

- Για βηματική αλλαγή της πίεσης οι ταλαντώσεις φουσαλίδας με περίβλημα αποσβένουν λόγω του διασταλτικού ιξώδους του κελύφους – Για την αντίστοιχη φουσαλίδα χωρίς περίβλημα η συνολική ενέργεια διατηρείται, ενώ για ημιτονοειδή αλλαγή της πίεσης ταλαντώνεται με περίοδο ίση με αυτή της εξωτερικής διαταραχής.

- Η μεταφορική ταχύτητα της μικροφουσαλίδας με περίβλημα παραμένει σταθερή, μετά το πέρας των ταλαντώσεων, για βηματική αλλαγή της πίεσης λόγω απουσίας ιξώδους στο περιβάλλον ρευστό, ενώ για ημιτονοειδή αλλαγή αυξάνεται λόγω αλληλεπίδρασης με το τοίχωμα

- Η αρχική απόσταση μεταξύ φουσαλίδας και τοιχώματος επηρεάζει την ανάπτυξη ιδιομορφών σχήματος της πρώτης

- Για την περίπτωση της φουσαλίδας χωρίς περίβλημα, στα τελευταία στάδια της κίνησης, η μεγάλη κινητικότητα του ρευστού στην περιοχή της φουσαλίδας μακριά από το τοίχωμα προκαλεί την κατάρρευση της διεπιφάνειας στο σημείο εκείνο πιο γρήγορα απ' ότι αλλού, οδηγώντας σε σχηματισμό υγρής δέσμης υψηλής ταχύτητας (jet), η οποία διασχίζει τη φουσαλίδα κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της σχηματίζοντας φουσαλίδα τοροειδούς γεωμετρίας

- Για την περίπτωση της φουσαλίδας με περίβλημα, στα τελευταία στάδια της κίνησης, ο σχηματισμός jet αναστέλλεται λόγω του ιξωδοελαστικού κελύφους, ενώ η φουσαλίδα επιδεικνύει παραμορφώσεις σχήματος χωρίς να επιτρέπει περαιτέρω επιμηκύνσεις

- Με την πάροδο του χρόνου η καμπτική ενέργεια αυξάνεται ακολουθούμενη από την κινητική ενέργεια – Στα τελευταία στάδια της προσομοίωσης δημιουργούνται περιοχές πολύ μεγάλης καμπυλότητας κυρίως στη φάση συμπίεσης – Η ελαστική ενέργεια μετατρέπεται σε καμπτική μέχρις ότου σχηματιστεί τοπικά κωνική γωνία σε πεπερασμένο χρόνο προκαλώντας τον τερματισμό της προσομοίωσης