



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ  
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Υπολογιστική ανάλυση αλληλεπιδράσεων  
ηλεκτρικών, μαγνητικών και τριχοειδών  
δυνάμεων σε στάσιμα ρευστά**

**ΠΕΤΡΟΣ ΒΑΣΙΛΑΚΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:**

**ΑΝΔΡΕΑΣ ΜΠΟΥΝΤΟΥΒΗΣ**

**ΑΘΗΝΑ 2012**

## Περιεχόμενα

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	<b>3</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>5</b>
<b>1. ΘΕΩΡΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΟΧΗΣ</b> .....	<b>8</b>
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1.2 ΠΕΡΙ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ .....	9
1.3 ΔΙΑΒΡΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	11
1.4 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΟΧΗ.....	14
1.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	17
1.5.1 Μετακίνηση / Καθοδήγηση Σταγόνων.....	18
1.5.2 Ανάμιξη και Διαμελισμός Σταγόνων .....	19
1.5.3 Φακοί Μεταβλητής και Ελεγχόμενης Εστίασης.....	20
1.5.4 Ηλεκτρονικό Χαρτί.....	22
1.5.5 Οθόνες Ηλεκτροδιαβροχής.....	24
<b>2 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΟΧΗΣ</b> .....	<b>26</b>
2.1 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ .....	26
2.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.....	30
2.2.1 Εξίσωση Young-Laplace .....	31
2.2.2 Ηλεκτροστατικό πεδίο .....	32
2.2.3 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian method) και επίλυση προβλημάτων μεταβλητής γεωμετρίας.....	32
<b>3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ COMSOL</b> .....	<b>34</b>
3.1 ΕΠΙΛΥΣΗ ΕΞΙΣΩΣΗΣ YOUNG-LAPLACE .....	34
3.2 ΕΠΙΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	38
3.3 ALE (ARBITRARY LAGRANGIAN EULERIAN METHOD).....	38
<b>4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ</b> .....	<b>42</b>
<b>5 ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ</b> .....	<b>46</b>
5.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ .....	46
5.2 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ .....	49
5.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	53
5.3.1 Επίλυση εξίσωσης Young-Laplace .....	54
5.3.2 Επίλυση μαγνητοστατικού πεδίου .....	55
5.3.3 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian method).....	55
<b>6 ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ COMSOL</b> .....	<b>57</b>
6.1 ΕΠΙΛΥΣΗ ΕΞΙΣΩΣΗΣ YOUNG-LAPLACE .....	57
6.2 ΕΠΙΛΥΣΗ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ .....	61
6.3 ALE (ARBITRARY LAGRANGIAN EULERIAN METHOD).....	61

<b>7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....</b>	<b>64</b>
<b>8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....</b>	<b>67</b>
8.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	67
8.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	68
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>69</b>

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Ανδρέα Μπουντουβή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση ενός πρωτότυπου προβλήματος, όπως είναι η ηλεκτροδιαβροχή για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και για την ανιδιοτελή και συνεχή συμπαράσταση που μου παρείχε στο να αποφασίσω τι θα κάνω στην μετά Πολυτεχνείο εποχή. Τα λόγια του και οι συμβουλές του θα αποτελέσουν τους άξονες αναφοράς μου για όλη την μετέπειτα ακαδημαϊκή μου πορεία και όχι μόνο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον Δρα Μιχάλη Καβουσανάκη, του οποίου οι εύστοχες παρατηρήσεις και οι ατέλειωτες ώρες που “επένδυσε” πάνω μου ήταν απαραίτητες για τη ομαλή ολοκλήρωση της διπλωματικής. Στο πρόσωπο του Δρα Καβουσανάκη πιστεύω πως βρήκα όχι μόνο τον μέντορά μου σε θέματα έρευνας, αλλά και έναν πραγματικό φίλο.

Ευχαριστώ επίσης τον Καθηγητή Α. Παπαϊωάννου και τον Λέκτορα Α. Καραντώνη για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Στην “ζωντανή μηχανή” που κρύβεται πίσω από το Ηλιακό Εργαστήριο στο οποίο εργάστηκα, δηλαδή στους κυρίους Παπαγεωργίου, Χαμάκο, Γαρνέλη και Αβιζιώτη θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για τις επικοδομητικές συζητήσεις που είχαμε καθ’ όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας, για την αρμονική συνεργασία που είχαμε, την φιλοξενία που μου έδειξαν για όσο καιρό εργάστηκα στο εργαστήριο, και κυρίως για τις στιγμές που μοιραστήκαμε όχι μόνο σαν ακαδημαϊκοί συνεργάτες, αλλά και σαν φίλοι.

θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου Νίκο Βασιλάκο και την μητέρα μου Κριάρη Εριφύλη για τα είκοσι δύο και κάτι χρόνια που με συμβουλεύουν, μου συμπαραστέκονται, και κυρίως, με ανέχονται. Η αγάπη τους αποτελεί το καύσιμο που δίνει ώθηση στις κινήσεις μου.

Τις ευχαριστίες μου έχει επίσης ο κύριος Νικόλαος Καραμπάτσος, ο οποίος αν και δεν είχε άμεση σχέση για με την διπλωματική μου, είναι από τους λίγους ανθρώπους που μου χαρίζουν έμπνευση και αισιοδοξία για το μέλλον, κάνοντάς με να δουλεύω σκληρότερα και μεθοδικότερα για να βελτιωθώ.

Κλείνοντας την λίστα των προσώπων που μου στάθηκαν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Δημήτρη Ποζάρσκι και Μιχάλη Βλυσίδα για την ειλικρινή και ανιδιοτελή φιλία που μοιραζόμαστε, και η οποία μου έδινε δύναμη και υπομονή να συνεχίζω να δουλεύω με τον ίδιο ενθουσιασμό και όρεξη, όπως την πρώτη μέρα που έπιασα στα χέρια μου τον γλυκό Γολγοθά που λέγεται ηλεκτροδιαβροχή.

## Περίληψη

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η υπολογιστική διερεύνηση της αλληλεπίδρασης τριχοειδών και ηλεκτρικών ή μαγνητικών δυνάμεων σε στάσιμα ρευστά μικρού όγκου με χρήση του λογισμικού COMSOL Multiphysics.

Συγκεκριμένα μελετάται το φαινόμενο της ηλεκτροδιαβροχής το οποίο έχει πληθώρα εφαρμογών σε διατάξεις Lab-on-a-Chip, σε υγρούς φακούς μεταβλητής εστίασης, και σε οθόνες (e-paper) (Greenberg 2008), ενώ τα μαγνητικά ρευστά αξιοποιούνται στην ιατρική στους μαγνητικούς τομογράφους καθώς και ως μονωτικά σε σκληρούς δίσκους .

Η εφαρμογή τάσης επιφέρει την συσσώρευση φορτίων στη διεπιφάνεια σταγόνας-διηλεκτρικού, κάτι που ενισχύει το φαινόμενο της διαβροχής του διηλεκτρικού από την σταγόνα λόγω της ελάττωσης της διεπιφανειακής ενέργειας. Συνέπεια του παραπάνω φαινομένου είναι η μείωση της φαινόμενης γωνίας επαφής, με αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης. Μια απλουστευμένη έκφραση της φαινόμενης γωνίας επαφής της σταγόνας πάνω στο διηλεκτρικό ως συνάρτησης της εφαρμοζόμενης ηλεκτρικής τάσης δίνεται από την εξίσωση Lippmann. Αύξηση της γωνίας επαφής παρατηρείται μέχρι ενός κρίσιμου ορίου κορεσμού (saturation), όπου και η περαιτέρω αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης δεν επιφέρει μεταβολή στη γωνία επαφής. Το φαινόμενο του κορεσμού οφείλεται πιθανόν στο γεγονός ότι λόγω της εφαρμοζόμενης τάσης, όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου υπερβεί μία κρίσιμη τιμή ( $E_{BD}$ ) στην γραμμή επαφής αέρα-διηλεκτρικού-σταγόνας εμφανίζεται διαρροή φορτίων (ηλεκτρονίων), καθώς το διηλεκτρικό τοπικά υφίσταται “κατάρρευση” (breakdown), δηλαδή τα διαρρέοντα

φορτία συγκρούονται με ουδέτερα άτομα ή μόρια και απελευθερώνουν επιπλέον ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα το διηλεκτρικό να μετατρέπεται τοπικά σε αγωγό κάτι που αλλοιώνει τις διηλεκτρικές του ιδιότητες (Δρυγιαννάκης 2009).

Στην συγκεκριμένη διπλωματική μελετήθηκε η επίδραση της τάσης, καθώς και των σταθερών ιδιοτήτων του συστήματος (επιφανειακή τάση, αρχική γωνία επαφής, πάχος διηλεκτρικού) στην φαινόμενη γωνία επαφής. Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που διέπουν την ηλεκτροδιαβροχή επιλύθηκαν με την χρήση του λογισμικού COMSOL Multiphysics το οποίο βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η υπολογιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για την περίπτωση σταγόνας νερού που επικάθεται σε τρία (3) διαφορετικά διηλεκτρικά με διαφορετικά πάχη.

Τα αποτελέσματα από την υπολογιστική ανάλυση επιβεβαιώνουν την ισχύ της εξίσωσης Lippmann για χαμηλές εφαρμοζόμενες τάσεις, ενώ συμφωνούν ικανοποιητικά με τα πειραματικά (Λιγνός 2009) και για τις τρεις περιπτώσεις.

Επίσης μελετήθηκε η περίπτωση μίας μαγνητικής σταγόνας, η οποία παραμορφώνεται υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου, όπου η παραμόρφωση έχει την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Το πρόβλημα αυτό διέπεται από την ίδια εξίσωση όπως και το ηλεκτροστατικό πρόβλημα (Young-Laplace), η οποία εκφράζει το ισοζύγιο των μαγνητικών, βαρυτικών και τριχοειδών δυνάμεων στην επιφάνεια της σταγόνας.

Και στην περίπτωση του μαγνητικού προβλήματος, τα αποτελέσματα συμφωνούν με τα πειραματικά (Boudounis et al. 1987) μέχρι μίας έντασης μαγνητικού πεδίου, όπου και η εξάρτηση της μαγνήτισης του υγρού από το μαγνητικό πεδίο παύει να είναι γραμμική.

Και τα δύο προβλήματα είναι προβλήματα ελεύθερης επιφάνειας, δηλαδή το σχήμα της μελετώμενης σταγόνας και στις δύο περιπτώσεις είναι άγνωστο και αποτελεί συνάρτηση των μεταβλητών του συστήματος και του εξωτερικά επιβαλλόμενου ηλεκτρικού δυναμικού – μαγνητικού πεδίου. Το παραπάνω συνεπάγεται ότι το άγνωστο σχήμα της σταγόνας πρέπει να επιλύεται ταυτόχρονα με την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στο πρόβλημα της ηλεκτροδιαβροχής, και ταυτόχρονα με την κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο μαγνητικό πρόβλημα, κάτι που επιτυγχάνεται με την χρήση της λειτουργίας ALE του Comsol η οποία επιτρέπει την επίλυση προβλημάτων μεταβλητού συνόρου.



# 1. Θεωρία ηλεκτροδιαβροχής

## 1.1 Εισαγωγή

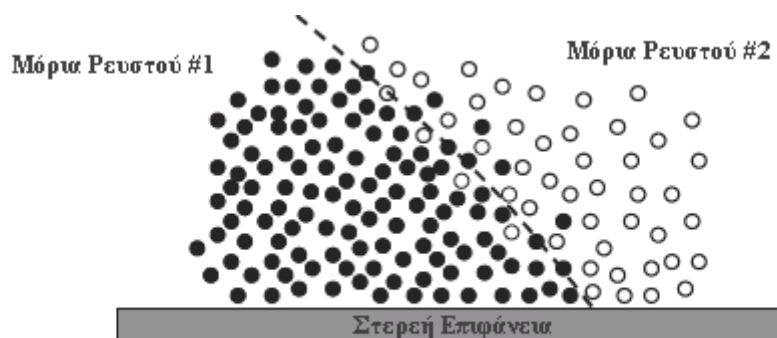
Σε αντίθεση με τα μακροσκοπικά συστήματα, στα συστήματα μικρορευστομηχανικής οι τριχοειδείς και επιφανειακές δυνάμεις έχουν σημαντική επίδραση, ενώ δυνάμεις όπως η βαρύτητα εμφανίζουν αμελητέα επίδραση. Πολλά παραδείγματα της σημασίας των τριχοειδών φαινομένων μπορούν να βρεθούν στα υπάρχοντα μικροσυστήματα για τους τομείς της βιοτεχνολογίας και της μικροχημείας.

Στόχος του κεφαλαίου είναι η περιγραφή των συστημάτων μικρορευστομηχανικής και των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτά, κυρίως από την πλευρά των μικροσταγόνων. Θα γίνει μία εισαγωγή στην έννοια της διαβροχής και της ηλεκτροδιαβροχής, δηλαδή της ενίσχυση της διαβρεκτικότητας στερεών διηλεκτρικών από αγώγιμα υγρά στα οποία επιβάλλεται ηλεκτρική τάση. Τέλος, θα γίνει αναφορά στις εφαρμογές της ηλεκτροδιαβροχής.

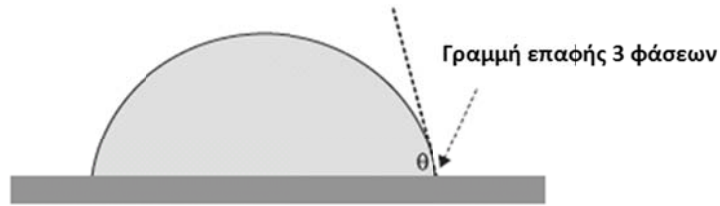
## 1.2 Περί διεπιφανειών

Ως διεπιφάνεια ορίζεται η γεωμετρική επιφάνεια που διαχωρίζει δύο ρευστά. Αυτή η απλουστευμένη ερμηνεία υποδηλώνει ότι μια διεπιφάνεια δεν έχει πάχος και τραχύτητα. Όμως στην πραγματικότητα, ο διαχωρισμός μεταξύ των ρευστών (π.χ νερού – αέρα, νερού – λαδιού, κτλ.) εξαρτάται από της μοριακές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων του κάθε ρευστού (Israelachvili 1992) και από τη κίνηση Brown. Μια μικροσκοπική προβολή της διεπιφάνειας μεταξύ δύο ρευστών απεικονίζεται στο σχήμα 1.1.

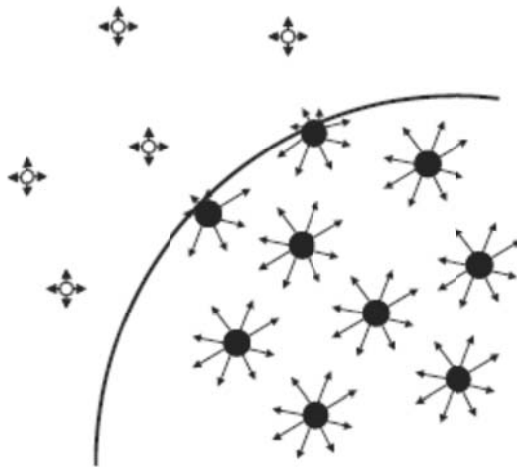
Εντούτοις, σε εφαρμογές της μηχανικής, ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην μακροσκοπική συμπεριφορά της διεπιφάνειας και έτσι πλέον η μαθηματική αντίληψη έχει μεγάλη χρησιμότητα. Σε μακροσκοπική κλίμακα, (βλ. σχήμα 1.2), όπου η διεπιφάνεια δεν έχει πάχος, η γωνία επαφής  $\theta$  είναι μοναδικά ορισμένη από την εφαπτομένη στη γραμμή επαφής της σταγόνας με την επιφάνεια.



**Σχήμα 1. 1:** Σχηματική αναπαράσταση μιας διεπιφάνειας σε μοριακή κλίμακα.



**Σχήμα 1. 2:** Μακροσκοπική αναπαράσταση της διεπιφάνειας μιας σταγόνας.

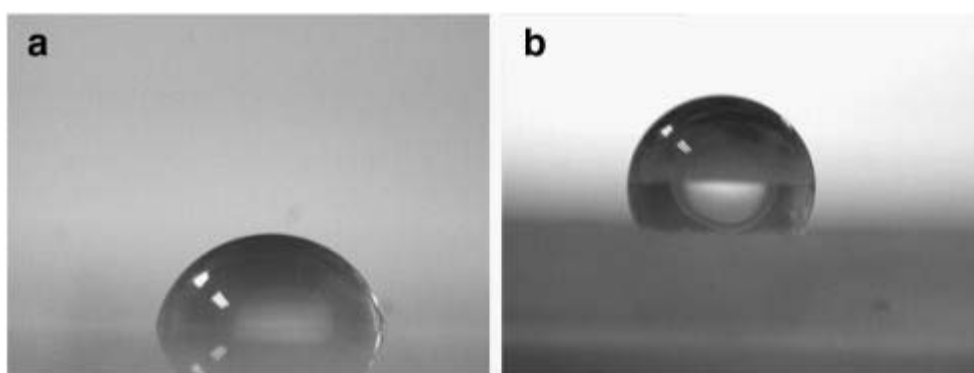


**Σχήμα 1. 3:** Απλοποιημένο σχήμα των μορίων κοντά στη διεπιφάνεια αέρα/νερού. Στο εσωτερικό του νερού, τα μόρια δέχονται ελκτικές δυνάμεις μόνο από τα γειτονικά μόρια νερού, ενώ στην διεπιφάνεια αλληλεπιδρούν και με μόρια νερού αλλά και με τα μόρια του αέρα.

Τα μόρια στο εσωτερικό ενός υγρού δέχονται ελκτικές δυνάμεις από άλλα γειτονικά μόρια από όλες τις διευθύνσεις. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές για τα οργανικά υγρά είναι Van der Waals και για τα πολικά υγρά, όπως το νερό, δεσμοί υδρογόνου (Israelachvili 1992). Αντίθετα, τα επιφανειακά μόρια δέχονται ελκτικές δυνάμεις από τα μόρια προς το εσωτερικό τη μάζας του υγρού, αλλά και από τα μόρια του γειτονικού ρευστού ή του αέρα. (σχήμα 1.3).

### 1.3 Διαβρεκτικότητα

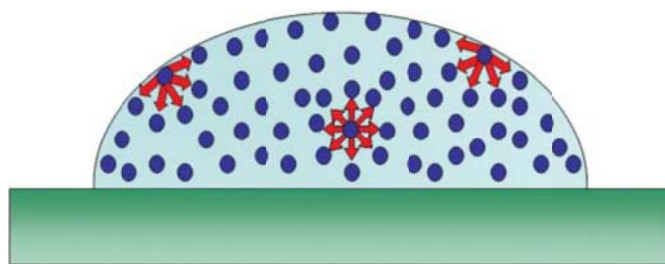
Μία σταγόνα νερού εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά όταν επικάθεται σε στερεά από διαφορετικά υλικά. Μία σταγόνα νερού που επικάθεται σε Teflon και μία σταγόνα νερού ίδιου όγκου που επικάθεται σε γυαλί εμφανίζουν διαφορετικές καταστάσεις ισορροπίας. Στο σχήμα 1.4 εμφανίζεται η διαφορά που εμφανίζεται στην διαβρεκτικότητα για νερό σε γυαλί και σε Teflon.



**Σχήμα 1.4** - α) σταγόνα νερού πάνω σε γυαλί (ZnO), b) σταγόνα νερού πάνω σε Teflon (Wu et al. 2010)

Στο γυαλί η σταγόνα “απλώνεται”, ενώ στο Teflon τείνει να γίνει σφαιρική. Η σταγόνα λοιπόν διαβρέχει το γυαλί, ενώ σε υδρόφοβη επιφάνεια όπως το Teflon η διαβρεκτικότητα είναι μικρότερη.

Το σφαιρικό σχήμα μιας σταγόνας είναι αποτέλεσμα των ενδομοριακών δυνάμεων μεταξύ των μορίων που την αποτελούν. Όπως αναφέρθηκε, τα μόρια στο εσωτερικό ενός υγρού δέχονται ελκτικές δυνάμεις από άλλα γειτονικά μόρια από όλες τις διευθύνσεις. Τα επιφανειακά μόρια δέχονται ελκτικές δυνάμεις από τα μόρια προς το εσωτερικό τη μάζας του υγρού, αλλά και από τα μόρια του γειτονικού ρευστού ή του αέρα.



**Σχήμα 1.5:** Οι δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των μορίων μιας σταγόνας

Καθώς η σφαίρα έχει την μικρότερη επιφάνεια ανά δεδομένο όγκο, συνεπάγεται ότι το σχήμα της σφαίρας εμφανίζει και τη μικρότερη επιφανειακή ενέργεια. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την υδροφοβικότητα της επιφάνειας στην περίπτωση του Teflon, είναι ο λόγος που η σταγόνα παίρνει σφαιρικό σχήμα.

Σε διαφορετικά ρευστά, οι ενδομοριακές δυνάμεις έχουν διαφορετικό χαρακτήρα και ένταση. Στα οργανικά ρευστά, όπως το λάδι, οι ελκτικές δυνάμεις είναι αποτέλεσμα στιγμιαίας ηλεκτρικής πόλωσης των ηλεκτρονίων (δυνάμεις Van der Waals). Η επιφανειακή τάση μεταξύ λαδιού και αέρα, η οποία είναι αποτέλεσμα των δυνάμεων αυτών, είναι περίπου  $20\text{--}50 \text{ millijoule/m}^2$  ( $\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Οι δεσμοί υδρογόνου και το γεγονός ότι τα μόρια του νερού είναι μεγάλα δίπολα, προσδίδουν στο νερό κάποια ειδικά χαρακτηριστικά. Εκτός των άλλων οδηγεί και σε σχετικά υψηλή τιμή της επιφανειακής τάσης μεταξύ νερού και αέρα:  $72 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ . Στον υδράργυρο, ο οποίος είναι ένα μεταλλικό υγρό σε θερμοκρασία δωματίου, οι ελκτικές δυνάμεις είναι αποτέλεσμα της ελεύθερης αγωγής ηλεκτρονίων, όπως συμβαίνει στα στερεά μέταλλα, και η επιφανειακή τάση φτάνει τα  $485 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Η επιφανειακή τάση στη διεπιφάνεια δύο υλικών εξαρτάται από τον συνδυασμό των ιδιοτήτων αυτών. Για παράδειγμα, η επιφανειακή τάση μιας σταγόνας νερού στον αέρα είναι διαφορετική από την επιφανειακή τάση της ίδιας σταγόνας μέσα σε κάποιο άλλο ρευστό όπως το λάδι. Επίσης, όταν τοποθετούμε μια σταγόνα

σε μια επιφάνεια, η συμπεριφορά της σταγόνας εξαρτάται όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά του υγρού, αλλά και από τα χαρακτηριστικά του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η επιφάνεια (σχήμα 1.4).

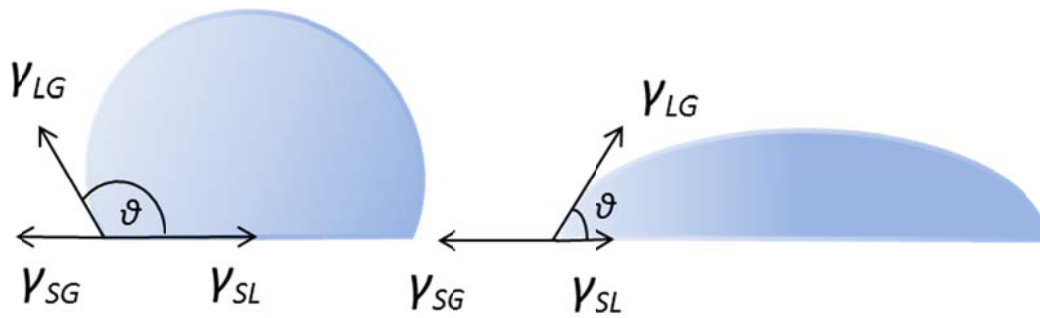
Η γωνία επαφής  $\theta$ , δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της επιφάνειας του υγρού και της επιφάνειας πάνω στην οποία τοποθετείται το υγρό εξαρτάται από τρεις διεπιφανειακές τάσεις: αυτής μεταξύ του υγρού και του στερεού  $\gamma_{SL}$ , μεταξύ του στερεού και του αέρα  $\gamma_{SG}$ , και μεταξύ του υγρού και του αέρα  $\gamma_{LG}$ . Σε κατάσταση ισορροπίας το αλγεβρικό άθροισμα των τριών αυτών διεπιφανειακών τάσεων είναι μηδέν, καθώς η σταγόνα δεν μετακινείται (Israelachvili 1992) (σχήμα 1.5). Δηλαδή:

$$\gamma_{LG} \cos \theta + \gamma_{SL} - \gamma_{SG} = 0 \quad (1.2)$$

Η ακόλουθη εξίσωση Young σχετίζει το συνημίτονο της γωνίας  $\theta$  με τις τρεις διεπιφανειακές τάσεις:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \quad (1.3)$$

Όταν η διαβρεκτικότητα είναι μηδενική ( $\theta = 180^\circ$ ) η σταγόνα αποκτά σφαιρικό σχήμα. Όταν είναι πλήρης ( $\theta = 0^\circ$ ) η σταγόνα απλώνεται ομοιόμορφα πάνω στην επιφάνεια και δημιουργεί ένα λεπτό υγρό στρώμα.



**Σχήμα 1.6**-Διαφορετικές περιπτώσεις διαβροχής. Στα αριστερά, η διαβροχή είναι χαμηλή καθώς η γωνία επαφής είναι μεγάλη. Στα δεξιά, η διαβρεκτικότητα είναι υψηλή και η γωνία επαφής μικρή.

## 1.4 Ηλεκτροδιαβροχή

Η πρώτη περιγραφή της ηλεκτροδιαβροχής προέρχεται από τον Gabriel Lippmann το 1875, ο οποίος παρατήρησε την τριχοειδή αναρρίχηση υδραργύρου ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με ηλεκτρολύτες υπό την επίδραση ηλεκτρικής τάσης. Το πρόβλημα που εμφανίστηκε στην ανάπτυξη εφαρμογών του παραπάνω φαινομένου, ήταν η ηλεκτρόλυση του νερού για τάσεις μερικών εκατοντάδων mV. Στις αρχές του 1990, ο Berge (1993) πρότεινε την χρήση ενός λεπτού διηλεκτρικού στρώματος, ώστε να υπάρχει διαχωρισμός του αγωγίμου υγρού από το μεταλλικό ηλεκτρόδιο και να αποφεύγεται η ηλεκτρόλυση. Ένα τυπικό σύστημα ηλεκτροδιαβροχής αποτελείται από μία αγωγή σταγόνα, η οποία επικάθεται στη διηλεκτρική επικάλυψη ενός επίπεδου μεταλλικού ηλεκτροδίου, ενώ η τάση εφαρμόζεται μεταξύ ενός ηλεκτροδίου βυθισμένου στη σταγόνα και του επίπεδου μεταλλικού ηλεκτροδίου. Το παραπάνω σύστημα συνιστά τη λεγόμενη διαβροχή σε διηλεκτρικό (electrowetting on dielectrics – EWOD) (Berge 1993). Με τον όρο ηλεκτροδιαβροχή σε διηλεκτρικό (EWOD, Electrowetting on Dielectric), εννοούμε την ηλεκτροστατική ενίσχυση της

διαβρεκτικότητα στερεών διηλεκτρικών από αγωγή υγρά και σχετίζεται με την ελεγχόμενη συσσώρευση ηλεκτρικών φορτίων στη διεπιφάνεια υγρού/ στερεού λόγω της εφαρμογής μιας ηλεκτρικής τάσης μεταξύ του υγρού και ενός ηλεκτροδίου σε επαφή με το διηλεκτρικό. Η συσσωρευμένη ηλεκτροστατική ενέργεια μειώνει τη διεπιφανειακή ενέργεια υγρού/στερεού και έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της διαβροχής του στερεού, με μείωση της γωνίας επαφής.

Το σύστημα αγωγίμο υγρό – διηλεκτρικό – ηλεκτρόδιο θεωρείται ως ένας ιδανικός πυκνωτής παράλληλων πλακών. Μια απλοποιημένη περιγραφή του φαινομένου της ηλεκτροδιαβροχής δίνεται από την εξίσωση Lippmann, η οποία ισχύει με ικανοποιητική ακρίβεια για χαμηλές εφαρμοζόμενες τάσεις. Η εξίσωση Lippmann δίνει την εξάρτηση της φαινόμενης γωνίας επαφής από την τάση:

$$\cos\theta_v = \cos\theta_y + \frac{\epsilon_0\epsilon_r V^2}{2\delta\gamma} , \quad (1.4)$$

όπου:

- $\theta_v$  η φαινόμενη γωνία επαφής
- $\theta_y$  η πραγματική γωνία επαφής, όπως προκύπτει από την εξίσωση Young (εξ. 1.3)
- $\epsilon_0$  η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού
- $\epsilon_r$  η σχετική ηλεκτρική διαπερατότητα του διηλεκτρικού
- $V$  η εφαρμοζόμενη τάση
- $\delta$  το πάχος του διηλεκτρικού
- $\gamma = \gamma_{LG}$  η επιφανειακή τάση της σταγόνας



Η εξίσωση Lippmann προβλέπει ότι όσο αυξάνει η τιμή της τάσης τόσο μειώνεται και η φαινόμενη γωνία επαφής, η οποία μπορεί και να μηδενιστεί. Πειραματικά όμως κάτι τέτοιο δεν έχει παρατηρηθεί, καθώς υπάρχει μία τιμή τάσης κορεσμού (Berge 1993, Vallet et al. 1999, Verheijen and Prins 1999, Saeki et al. 2001, Papathanasiou and Boudouvis 2005, Papathanasiou et al. 2008, Drygiannakis 2009) πέραν της οποίας η διαβρεκτικότητα (μείωση της φαινόμενης γωνίας επαφής) δεν ενισχύεται. Το φαινόμενο του κορεσμού δεν έχει εξηγηθεί ακόμα πλήρως, αλλά έχει παρατηρηθεί ότι ο κορεσμός συνοδεύεται με απότομη αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στη γραμμή επαφής της σταγόνας και διαρροή φορτίων προς το διηλεκτρικό το οποίο τοπικά μετατρέπεται σε αγωγό (Drygiannakis et al. 2009).

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$  είναι πολύ μικρότερη από τη σχετική διηλεκτρική σταθερά του υγρού  $\epsilon_l$ . Από αυτό υποθέτουμε ότι η χωρητικότητα του διπλού στρώματος (double layer), που είναι σε σειρά με την χωρητικότητα του διηλεκτρικού στρώματος, είναι αμελητέα. Μια τέτοια υπόθεση δεν είναι αυθαίρετη, καθώς το πάχος του διπλού στρώματος (double layer) είναι πολύ μικρότερο από εκείνο του διηλεκτρικού, τουλάχιστον για τα αγώγιμα υγρά. Σε κάθε περίπτωση, η μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για την ηλεκτροδιαβροχή, λόγω της παρουσίας του διηλεκτρικού στρώματος, απαιτεί μεγαλύτερη εφαρμοζόμενη τάση για να επιτευχθεί το ίδιο αποτέλεσμα με εκείνο που θα είχε ληφθεί απουσία του διηλεκτρικού. Εντούτοις, είναι αδύνατη η απεριόριστη αύξηση της τάσης καθώς περιορίζεται από μια οριακή τιμή της. Αν η τάση υπερβεί αυτό το όριο παρατηρείται κατάρρευση του διηλεκτρικού (κορεσμός γωνίας επαφής – contact angle saturation).

## 1.5 Εφαρμογές

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω με τον όρο ηλεκτροδιαβροχή εννοούμε την ενίσχυση της διαβρεκτικότητας στερεών διηλεκτρικών με τη χρήση ηλεκτρικού πεδίου. Η ηλεκτροδιαβροχή έχει ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών που έχουν αναπτυχθεί πρόσφατα. Βασίζονται όλες στο γεγονός ότι κάνοντας χρήση ηλεκτρικών πεδίων και χωρίς τη χρήση μηχανικών μέσων, είναι δυνατός ο έλεγχος της κίνησης ή της γρήγορης μεταβολής (σε εκατοστά του δευτερολέπτου) μεταξύ των καταστάσεων του συστήματος. Είναι πολύ σημαντικό το ότι μπορούν πλέον να κατασκευαστούν συστήματα σε πολύ μικρό μέγεθος, μικρότερα της τάξης των μικρομέτρων.

Οι εφαρμογές της ηλεκτροδιαβροχής περιλαμβάνουν: μετακίνηση υγρών με σκοπό τη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών των οπτικών συσκευών (Wan et al. 2006, Mach et al. 2002), όπως μικρότερος χρόνος αντίδρασης, υψηλή ανακλαστικότητα και καλύτερη εστίαση, ψύξη των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων με μεταφορά ψυχρών σταγόνων στο εσωτερικό τους (Paik et al. 2008), έλεγχος των φυσικών χαρακτηριστικών των σταγόνων που ψεκάζονται σε έναν εκτυπωτή έτσι ώστε να μην επηρεάζεται ο όγκος τους από την επιφάνεια εκτύπωσης ή το περιβάλλον μέσο (Mugele et al. 2006), αναρρόφηση υγρών σε μικροσωληνίσκους (Chen et al. 2005), και εφαρμογές για ανάλυση χημικής σύστασης υγρών και ειδικότερα βιολογικών υγρών όπως π.χ αίμα και ουρία (Fair 2007).

### 1.5.1 Μετακίνηση / Καθοδήγηση Σταγόνων

Όταν μια σταγόνα βρίσκεται στο σύνορο μεταξύ μιας υδρόφοβης και μιας υδρόφιλης περιοχής, μετακινείται προς την υδρόφιλη περιοχή. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στην περίπτωση της ηλεκτροδιαβροχής (σχήμα 1.7). Αν μια αγώγιμη σταγόνα βρίσκεται στο σύνορο μεταξύ ενός ενεργοποιημένου και ενός μη ενεργοποιημένου ηλεκτροδίου, μια δύναμη ηλεκτροδιαβροχής ασκείται στη γραμμική επαφή που βρίσκεται πάνω από το ενεργοποιημένο ηλεκτρόδιο και μια τριχοειδής δύναμη ασκείται στη γραμμική επαφή στη υδροφοβική επιφάνεια. Η συνισταμένη των δυνάμεων παράλληλα με την επιφάνεια, έχει κατεύθυνση προς την ηλεκτρικά ενεργοποιημένη περιοχή. Η σταγόνα πλέον δεν βρίσκεται σε ισορροπία, και αν η συνισταμένη των δυνάμεων είναι αρκετή έτσι ώστε να ξεπεράσει την υστέρηση της γωνίας επαφής (Sandre et al. 1999, Pollack et al. 2000-2002, Cho et al. 2003, Mugele & Baret 2005, Dolatabadi et al 2006) η σταγόνα κινείται.

Η σταγόνα λοιπόν μπορεί να καθοδηγηθεί σε προκαθορισμένα μονοπάτια με τη χρήση ηλεκτρικών πεδίων. Η πορεία της σταγόνας καθορίζεται από τη χρήση κατάλληλα διατεταγμένων και ενεργοποιημένων ηλεκτροδίων. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 1.7.

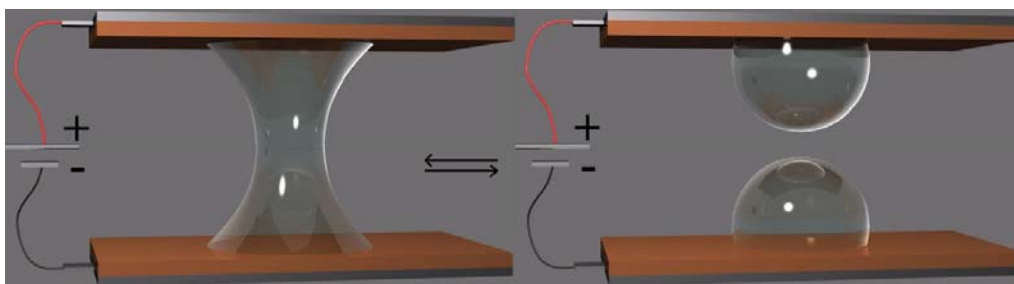


**1. 7:** Ανάλυση της κίνησης σταγόνας: μέσα σε 10 ms η σταγόνα παραμορφώνεται μόνο προς τη μια πλευρά. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεταβολής της γωνίας επαφής, έτσι ολόκληρη η σταγόνα μετακινείται τελικά προς το κέντρο των ενεργοποιημένων ηλεκτροδίων.

### 1.5.2 Ανάμιξη και Διαμελισμός Σταγόνων

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα συστήματα ηλεκτροδιαβροχής, όπου σταγόνες είναι παγιδευμένες μεταξύ δύο παράλληλων επίπεδων ηλεκτροδίων γεφυρώνοντας το μεταξύ τους κενό. Οι υγρές μικρογέφυρες (σταγόνες της τάξης των μικρολίτρων, που καλύπτουν το κενό μεταξύ των παράλληλων ηλεκτροδίων) που σχηματίζονται μπορούν με την κατάλληλη εφαρμογή ηλεκτρικών τάσεων να διαμελιστούν σε δύο σταγόνες. Οι δύο σταγόνες που προκύπτουν από το διαμελισμό έλκονται όταν η τάση συνεχίζει να εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια και σε μια κρίσιμη τιμή της οι σταγόνες είναι δυνατόν να συνενωθούν και να επανασχηματίσουν την υγρή γέφυρα (Klingner et al. 2003-2004, Λιγνός et al. 2009, Δρυγιαννάκης 2009).

Είναι πολύ σημαντικό λοιπόν να ελεγχθεί η σταθερότητα τέτοιων μικρογεφυρών ως συνάρτηση της τάσης που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια.



**Σχήμα 1. 8:** Περιπτώσεις μικρογέφυρας και διαμελισμένων σταγόνων.

### 1.5.3 Φακοί Μεταβλητής και Ελεγχόμενης Εστίασης

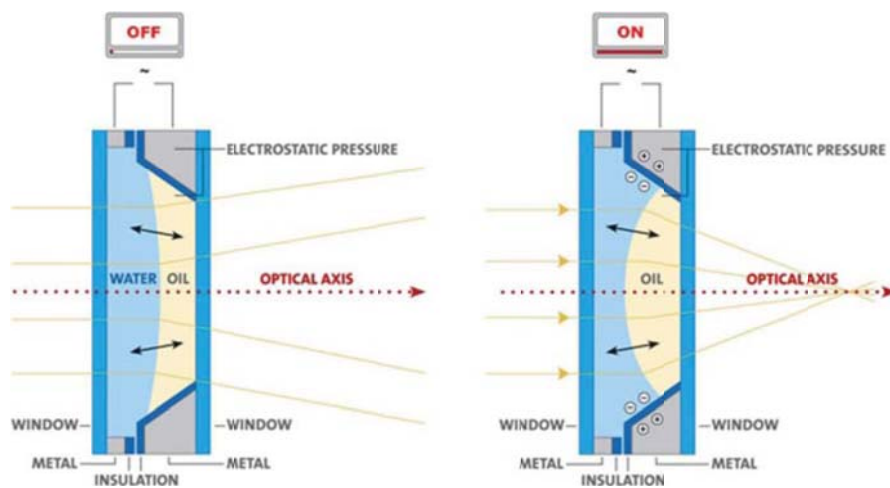
Μια πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή της ηλεκτροδιαβροχής η οποία έχει αναπτυχθεί πρόσφατα, είναι η δημιουργία οπτικού φακού με μεταβλητό εστιακό μήκος (Berge and Peseux 2000, Kuiper and Hendriks 2004). Σε αυτήν την εφαρμογή μια μικρή σταγόνα λαδιού τοποθετείται σε ένα αεροστεγές κελί γυαλιού, το οποίο είναι γεμάτο με νερό. Η σταγόνα η οποία έχει μέγεθος μερικών χιλιοστών, έχει σχεδόν σφαιρικό σχήμα και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν φακός (Σχήματα 1.9 και 1.10).



**Σχήμα 1.9:** Απεικόνιση σταγόνας νερού που χρησιμοποιείται για εστίαση. Τον 17ο αιώνα ο Άγγλος επιστήμονας Stephen Gray χρησιμοποίησε μια σταγόνα νερού σαν φακό για ένα μικροσκόπιο που κατασκεύασε.

Εφαρμόζοντας χαμηλή τάση, το σχήμα της σταγόνας μπορεί να αλλάξει μέσα σε εκατοστά του δευτερολέπτου, ενώ παράλληλα μπορεί να ρυθμιστεί και το εστιακό μήκος της σταγόνας. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η φωτογράφιση αντικειμένων

σε μεγάλο εύρος αποστάσεων που κυμαίνονται μεταξύ μερικών εκατοστών και του “απείρου”, ενώ παράλληλα διατηρείται η εστίαση. Η νέα αυτή εφαρμογή επιτρέπει τη χαμηλότερη ευαισθησία σε μηχανικά σφάλματα και είναι έτοιμη προς χρήση σε μικροσκοπικές ψηφιακές κάμερες που είναι τοποθετημένες στα κινητά τηλέφωνα. Άλλες εφαρμογές των φακών μεταβλητής εστίασης αναπτύσσονται προς όφελος των καταναλωτικών προϊόντων αλλά και για ένα μεγάλο εύρος βιομηχανικών και ιατρικών συσκευών.



**Σχήμα 1. 10:** Αριστερά: Μια κάθετη τομή σε έναν οπτικό φακό που αποτελείται από μια σταγόνα λαδιού σε ένα υδατικό μέσο. Εδώ δεν εφαρμόζεται τάση και έτσι η κοίλη σταγόνα λαδιού διαχέει το φως εξαιτίας του δείκτη διάθλασης του λαδιού, ο οποίος είναι μεγαλύτερος από αυτόν του νερού. Δεξιά: Όταν εφαρμόζεται τάση, η διαβρεκτικότητα από το νερό ενισχύεται, εκτοπίζεται η σταγόνα λαδιού και προκύπτει κυρτό σχήμα υδατικής σταγόνας.

Στο σχήμα 1.11 φαίνεται ένα παράδειγμα ενός υγρού φακού που είναι τοποθετημένος σε μια κάμερα. Αυτός ο υγρός φακός που βασίζεται στην τεχνολογία της ηλεκτροδιαβροχής, επιτρέπει τη δημιουργία μικροσκοπικής κάμερας χωρίς

κινούμενα μέρη. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα για τη διάρκεια ζωής των καμερών μέσα σε κινητές εφαρμογές.

Άλλο πλεονέκτημα των υγρών φακών είναι η υψηλή οπτική ποιότητα, παρόλο που τα στερεά υποστηρικτικά μέρη του μηχανισμού λειτουργούν χρησιμοποιώντας συμβατικές μηχανικές τεχνικές.



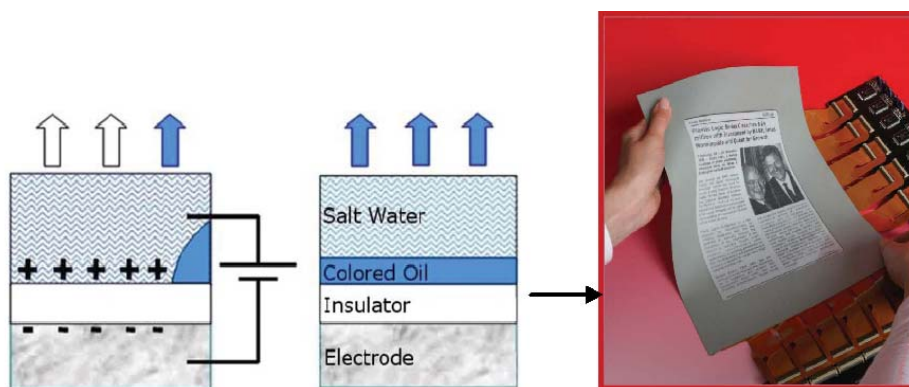
**Σχήμα 1. 11:** Υγρός φακός μεταβλητής και ελεγχόμενης εστίασης. Αριστερά: Ένας υγρός φακός μέσα σε μια μεταλλική θήκη. Η θήκη έχει διάμετρο 10.5mm. Δεξιά: Ο ίδιος φακός με το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου, όπως δηλαδή χρησιμοποιείται στις ψηφιακές κάμερες των κινητών τηλεφωνικών συσκευών. Φακός της εταιρείας Varioptic.

#### 1.5.4 Ηλεκτρονικό Χαρτί

Άλλη μία ιδιαίτερα υποσχόμενη εφαρμογή της ηλεκτροδιαβροχής είναι η ανάπτυξη του ηλεκτρονικού χαρτιού (Mugele and Baret 2005). Το ηλεκτρονικό χαρτί (e-paper) είναι μια επίπεδη οθόνη όμοια με ένα χαρτί, εμφανίζοντας εικόνες όπως ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής ή μια οθόνη τηλεόρασης.

Είναι αναμενόμενο πως αυτά τα χαρακτηριστικά θα μετατρέψουν το ηλεκτρονικό χαρτί σε υποκατάστατο του κανονικού χαρτιού στο μέλλον. Αντί για εφημερίδες και βιβλία, θα μπορούμε να έχουμε μαζί μας μόνο μια ευέλικτη επιφάνεια, όσο μεγάλη επιθυμούμε, στην οποία θα μπορούμε να διαβάσουμε μια

εφημερίδα ή ένα βιβλίο (Berthier 2008). Μεταξύ των εικονογραφήσεων του ηλεκτρονικού χαρτιού, θα εμφανίζονται παράλληλα και βιντεοσκοπημένα άρθρα και στιγμιότυπα ταινιών.



**Σχήμα 1. 12:** Δεξιά: Απεικόνιση των δύο μονοχρωματικών καταστάσεων που βασίζονται στην ηλεκτροδιαβροχή. Στην πρώτη εικόνα το ανακλώμενο φως είναι μπλε (το χρώμα του στρώματος του λαδιού) πριν την εφαρμογή της τάσης, ενώ στη δεύτερη εικόνα μετά την εφαρμογή της τάσης, το φως είναι λευκό (το χρώμα του μονωτικού στρώματος)

Στα εργαστήρια της Phillips έχουν καταφέρει να δημιουργήσουν πολύ λεπτές επίπεδες οθόνες. Αυτές οι οθόνες είναι μοναδικές καθώς ανακλούν το φως, σε αντίθεση με οθόνες που εκπέμπουν φως όπως η τηλεόραση και ο ηλεκτρονικός υπολογιστής. Το να διαβάζει κανείς μια οθόνη η οποία ανακλά το φως είναι το ίδιο με το να διαβάζει ένα απλό εκτυπωμένο χαρτί, όπου φυσικό ή τεχνητό φως πέφτει στο χαρτί και ανακλάται στα μάτια μας. Με αυτή τη μέθοδο το μάτι δεν είναι εκτεθειμένο στο λαμπερό φως που εκπέμπεται από την οθόνη, αλλά σε εκείνο που φτάνει από το φως του περιβάλλοντος. Επομένως, μια οθόνη που ανακλά φως είναι λιγότερο κουραστική για το μάτι. Ένα άλλο πλεονέκτημα εντοπίζεται σε περιπτώσεις όπου το φως της ημέρας είναι πολύ δυνατό, τότε οι οθόνες που εκπέμπουν φως έχουν



δυσκολία στο να συναγωνιστούν την ένταση του ηλιακού φωτός, σε αντίθεση με τις οθόνες που ανακλούν το φως οι οποίες κάνουν χρήση αυτού.

### **1.5.5 Οθόνες Ηλεκτροδιαβροχής**

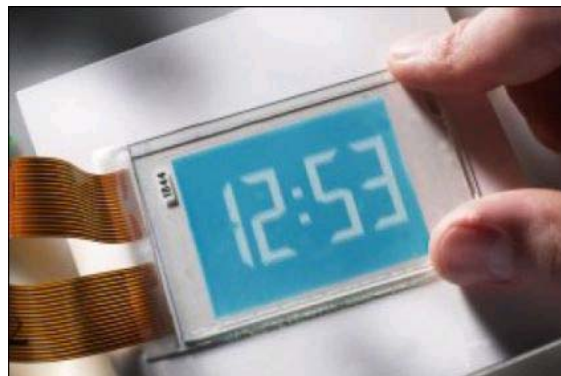
Μια οθόνη ηλεκτροδιαβροχής έχει σημαντικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Εφόσον η εικόνα είναι στατική, δεν υπάρχει καμία κίνηση φορτίων όπως επίσης και μηδενική κατανάλωση ενέργειας, επειδή το χρώμα δημιουργείται από εξωτερική πηγή φωτός το οποίο αντανακλάται (Shamai et al. 2008). Σε σύγκριση με τις οθόνες που εκπέμπουν φως, όπως οι LCD οθόνες, η ηλεκτρική κατανάλωση μια οθόνης ηλεκτροδιαβροχής είναι στην πραγματικότητα πέντε φορές χαμηλότερη.

Μια επιπλέον εφαρμογή της οθόνης ηλεκτροδιαβροχής σε σχέση με μια οθόνη LCD είναι το μεγάλο οπτικό πεδίο, το οποίο είναι αποτέλεσμα του ότι το φως αντανακλάται προς όλες τις κατευθύνσεις. Σε μια οθόνη LCD, το φως εκπέμπεται μόνο σε μια κατεύθυνση, από το κέντρο, και έτσι η εικόνα δεν μπορεί να είναι ορατή από μεγάλη γωνία. Αυτό είναι και ένα βασικό πρόβλημα πολλών οθονών φορητών υπολογιστών. Εντούτοις, με μια οθόνη ηλεκτροδιαβροχής μπορούμε να κοιτάμε την οθόνη μας από τα πλάγια και να έχουμε και πάλι πολύ υψηλή ποιότητα εικόνας με υψηλή συχνότητα αντίθεσης χρωμάτων.

Τα βασικά πλεονεκτήματα μιας οθόνης ηλεκτροδιαβροχής σε σχέση με άλλες τεχνολογίες, παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1.

**Πίνακας 1. 1: Σύγκριση μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών κατασκευής οθονών**

Τεχνολογία	Χρήση	Μέγεθος Pixel	Γωνία Ορατότητας	Πάχος	Εκπομπή ή Αντανάκλαση Φωτός	Κατανάλωση Ενέργειας
CRT	Συνήθεις Οθόνες Τηλεόρασης	0.21mm	Ευρεία	~50cm	Εκπομπή	Μεγάλη
LCD	Επίπεδες Οθόνες Υπολογιστών	0.28mm	Περιορισμένη	Μερικά mm	Εκπομπή	Μεσαία
EWOD	Επίπεδες εικόνες και έγχρωμο ηλεκτρονικό Χαρτί	0.16mm	Ευρεία	< 1mm	Αντανάκλαση	Πολύ Χαμηλή

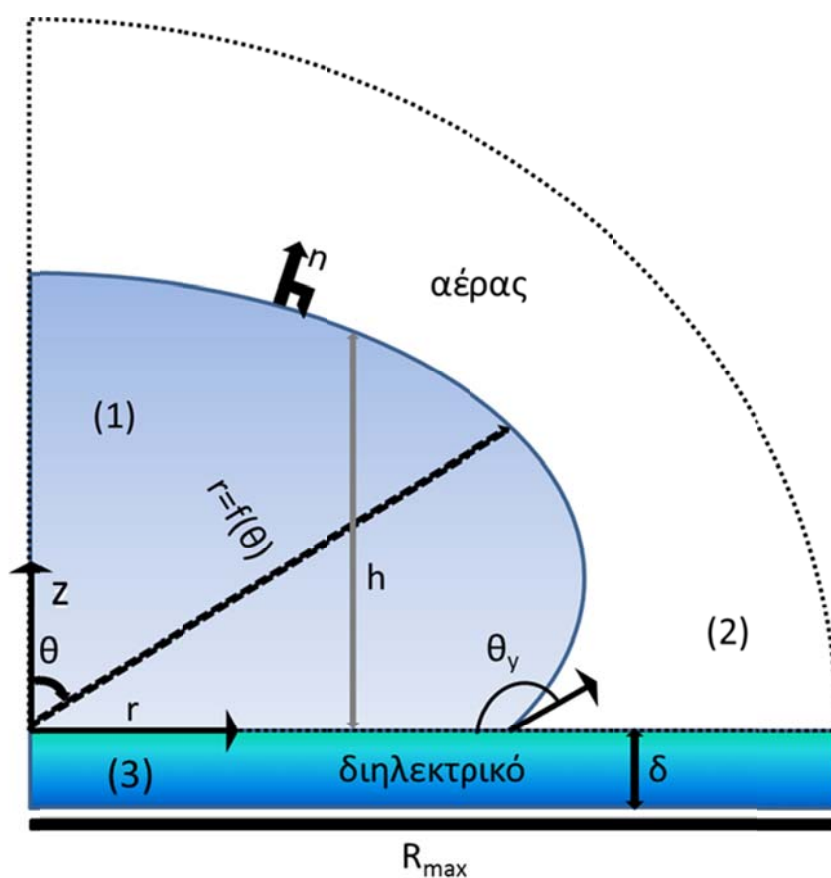


**Σχήμα 1. 13:** Παράδειγμα οθόνης ηλεκτροδιαβροχής

## 2 Το πρόβλημα της ηλεκτροδιαβροχής

### 2.1 Το σύστημα

Το μελετώμενο σύστημα αποτελείται από μια σταγόνα υγρού, η οποία τοποθετείται πάνω στην οριζόντια επιφάνεια ενός διηλεκτρικού. Το όλο σύστημα περιβάλλεται από αέρα, ενώ η επιβολή της τάσης γίνεται με ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο που εμβαπτίζεται στη σταγόνα. Η σταγόνα εμφανίζει αξονική συμμετρία, και το σχήμα της ορίζεται από την ακτίνα  $r=f(\theta)$  αυτής σε πολικές συντεταγμένες συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  που σχηματίζει η ακτίνα με τον άξονα συμμετρίας (βλ. Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2. 1-Σχηματική αναπαράσταση της μελετώμενης γεωμετρίας

Στην επιφάνεια της σταγόνας ισχύει η εξίσωση Young-Laplace (Y-L) (Basaran & Scriven 1989) :

$$-N_g h - \frac{N_e E^2}{2} + C = K \quad (2.1) ,$$

όπου:

- $N_g$  ο βαρυτικός αριθμός Bond ίσος με  $N_g = \frac{g \Delta \rho R_0^2}{\gamma}$
- $h$  η κατακόρυφη απόσταση της επιφάνειας της σταγόνας από τη διεπιφάνεια υγρού-διηλεκτρικού
- $N_e$  ο ηλεκτρικός αριθμός Bond ίσος με  $N_e = \frac{\epsilon_0 V^2}{\gamma R_0}$
- $E$  το μέτρο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου
- $C$  η τοπική καμπυλότητα της σταγόνας
- $K$  πίεση αναφοράς
- $R_0$  το χαρακτηριστικό μήκος, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ίσο με την ακτίνα μίας σφαίρας όγκου ίσου με αυτού της σταγόνας
- $\Delta \rho$  η διαφορά πυκνότητας μεταξύ της σταγόνας και του αέρα

Ο όρος της καμπυλότητας ορίζεται για  $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$  και είναι ίσος με (Δρυγιαννάκης 2009):

$$C = \frac{1}{f^2 \sin \theta} \left[ \frac{2f^2 \sin^2 \theta + f_\theta^2 \sin^2 \theta}{\sqrt{(f^2 + f_\theta^2) \sin^2 \theta}} - \frac{\partial}{\partial \theta} \frac{f f_\theta \sin^2 \theta}{\sqrt{(f^2 + f_\theta^2) \sin^2 \theta}} \right] \quad (2.2)$$

Στον χώρο που περιβάλλει τη σταγόνα (αέρα) καθώς και στο διηλεκτρικό, ισχύει ο νόμος του Gauss για τον ηλεκτρισμό

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla u) = 0 \quad (2.3),$$

όπου:

- $\epsilon_r$  η σχετική διηλεκτρική σταθερά (1 για τον αέρα,  $\epsilon_d$  για το διηλεκτρικό)
- $u$  το ηλεκτρικό δυναμικό ( $\nabla u \equiv \mathbf{E}$ )

Το ηλεκτρικό δυναμικό είναι σταθερό σε όλη την σταγόνα, καθώς γίνεται η παραδοχή ότι είναι τέλειος αγωγός. Το  $u$  αποτελεί συνάρτηση των  $z$ ,  $r$  και στο διηλεκτρικό και στον αέρα.

Το ρευστό είναι ασυμπίεστο και συνεπώς ο όγκος αυτού είναι σταθερός. Η μαθηματική έκφραση διατήρησης του όγκου σε σφαιρικές συντεταγμένες είναι :

$$\int_0^{\pi/2} f^3 \sin \theta \, d\theta = 2 \quad (2.4)$$

Οι συνοριακές συνθήκες που διέπουν το αδιαστατοποιημένο πρόβλημα είναι οι:

- $u_2 = 1$  στην επιφάνεια της σταγόνας ( $r=f(\theta)$ )
- $u_3 = 1$  στη γραμμική επαφής σταγόνας-διηλεκτρικού ( $0 \leq r \leq f(\frac{\pi}{2})$ )
- $u_3 = 0$  στην κάτω επιφάνεια του διηλεκτρικού ( $z = -\delta$ )
- $u_2 = u_3$ ,  $\epsilon_d \frac{\partial u_3}{\partial z} = \frac{\partial u_2}{\partial z}$  για  $r_0 \equiv f(\frac{\pi}{2}) \leq r \leq R_{max}$
- $\frac{\partial u_2}{\partial r} = \frac{\partial u_3}{\partial r} = 0$  για  $r=R_{max}$  και  $r=0$
- $\frac{\partial f}{\partial \theta} = 0$  για  $\theta=0$
- $\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_z = \cos\theta_y$  για  $\theta = \frac{\pi}{2}$

Τα διανύσματα  $\mathbf{e}_z$ ,  $\mathbf{e}_r$ ,  $\mathbf{e}_\theta$  είναι τα μοναδιαία διανύσματα κατά τις κατευθύνσεις  $z$ ,

$r$ ,  $\theta$  αντίστοιχα, ενώ το  $\mathbf{n} = \frac{f\mathbf{e}_r - f_\theta\mathbf{e}_\theta}{\sqrt{f^2 + f_\theta^2}}$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα, κάθετο στην

επιφάνεια της σταγόνας.

## 2.2 Μεθοδολογία επίλυσης

Το πρόβλημα της επίλυσης της αδιαστατοποιημένης εξίσωσης Young-Laplace

$$-N_g h - \frac{N_e E^2}{2} + C = K$$

προσεγγίζεται ως επαλληλία δύο (2) επιμέρους προβλημάτων :

- Του ηλεκτροστατικού πεδίου που εμπεριέχεται στον όρο

$$\frac{\epsilon_0 V^2 E^2}{\gamma R_0}, \quad (2.5)$$

- Της επιφανειακής τάσης που εκφράζεται από τον όρο

$$C = \frac{1}{f^2 \sin \theta} \left[ \frac{2f^2 \sin^2 \theta + f_\theta^2 \sin^2 \theta}{\sqrt{(f^2 + f_\theta^2) \sin^2 \theta}} - \frac{\partial}{\partial \theta} \frac{f f_\theta \sin^2 \theta}{\sqrt{(f^2 + f_\theta^2) \sin^2 \theta}} \right] \quad (2.6)$$

Ο βαρυντικός όρος παραλείπεται λόγω του μικρού όγκου της σταγόνας ( $1 \leq \mu\text{L}$ ) που κάνει την επίδραση αυτού στο σχήμα της αμελητέα. Το ηλεκτροστατικό πεδίο επιλύεται σε δύο διαστάσεις με κυλινδρικές συντεταγμένες δεδομένου ότι το πρόβλημα εμφανίζει αξονική συμμετρία, ενώ η επιφανειακή τάση επιλύεται σε μονοδιάστατο χωρίο καθώς ο όρος  $C$  αποτελεί συνάρτηση μόνο της γωνίας  $\theta$ . Η λύση του ηλεκτρικού πεδίου τροφοδοτείται έπειτα στο μονοδιάστατο χωρίο και έτσι

εξάγεται το σχήμα της σταγόνας το οποίο προβάλλεται ταυτόχρονα στο δι-διάστατο χωρίο ώστε να οριστεί η κατανομή του πεδίου με βάση το νέο σχήμα της σταγόνας.

Οι οριζόμενες μεταβλητές του συστήματος (παράμετροι) είναι οι εξής:

- Η επιφανειακή τάση
- Η γωνία επαφής Young,  $\theta_y$
- Η επιβαλλόμενη τάση
- Το πάχος του διηλεκτρικού

### 2.2.1 Εξίσωση Young-Laplace

Στο μονοδιάστατο χωρίο επιλύεται η απλουστευμένη έκφραση της εξίσωσης Young-Laplace (δηλ. χωρίς επιβολή διαφοράς δυναμικού) :

$$C = K$$

μαζί με την ολοκληρωτική εξίσωση που εκφράζει την διατήρηση του όγκου της σταγόνας:

$$\int_0^{\pi/2} f^3 \sin\theta \, d\theta = 2$$

Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται είναι μορφής Neumann ( $-\mathbf{n} \cdot \nabla \Gamma = G$ ) και είναι οι εξής:

1.  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_z = \cos\theta_y$  για  $\theta = \frac{\pi}{2}$  με  $\mathbf{n}$  το διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια της σταγόνας και  $\mathbf{e}_z$  το μοναδιαίο διάνυσμα στην κατεύθυνση z
2.  $\frac{df}{d\theta} = 0$  για  $\theta=0$



### 2.2.2 Ηλεκτροστατικό πεδίο

Στο δι-διάστατο χωρίο επιλύεται ο νόμος του Gauss για την χωρική κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου:

$$\nabla \cdot (\varepsilon_r \nabla u) = 0$$

Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται είναι μορφής Dirichlet και είναι οι εξής:

- $u = 1$  για  $r=f(\theta)$  (στην επιφάνεια δηλαδή της σταγόνας)
- $u = 1$  για  $z=0$  και  $r \leq f(\frac{\pi}{2})$  (στην επιφάνεια επαφής της σταγόνας με το διηλεκτρικό)
- $u = 0$  για  $z = -\delta$

Στα όρια του χωρίου του αέρα θεωρείται ότι το ηλεκτρικό φορτίο είναι μηδέν.

### 2.2.3 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian method) και επίλυση προβλημάτων μεταβλητής γεωμετρίας

Το ALE στην Comsol Multiphysics επιτρέπει την επίλυση προβλημάτων όπου τα σύνορα της γεωμετρίας δεν παραμένουν σταθερά, καθώς για την επίλυση του προβλήματος δεν χρειάζεται να δημιουργήσει καινούριο πλέγμα, αλλά μετατοπίζει το ήδη υπάρχον κατά την φορά της μετατόπισης του συνόρου.

Για την ένωση των δύο (2) διαφορετικών γεωμετριών ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Από το δι-διάστατο χωρίο υπολογίζεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου
- Ο υπολογισμός της έντασης  $E$  χρησιμοποιείται στο να επαυξηθεί η εξίσωση Young-Laplace στο μονοδιάστατο χωρίο
- Η πληροφορία από την επαυξημένη Young-Laplace μεταφέρεται στο δι-διάστατο χωρίο όπου με την χρήση του ALE εξάγεται το σχήμα της σταγόνας υπό την επιβολή τάσης

Η προσθήκη του ALE δημιουργεί δύο (2) συστήματα συντεταγμένων; ένα με συντεταγμένες  $X, Y$  που είναι το αρχικό και ένα με συντεταγμένες  $\chi, y$  που είναι το μετατοπισμένο μετά την προσθήκη του ALE.

## 3 Επίλυση του προβλήματος της ηλεκτροδιαβροχής σε περιβάλλον COMSOL

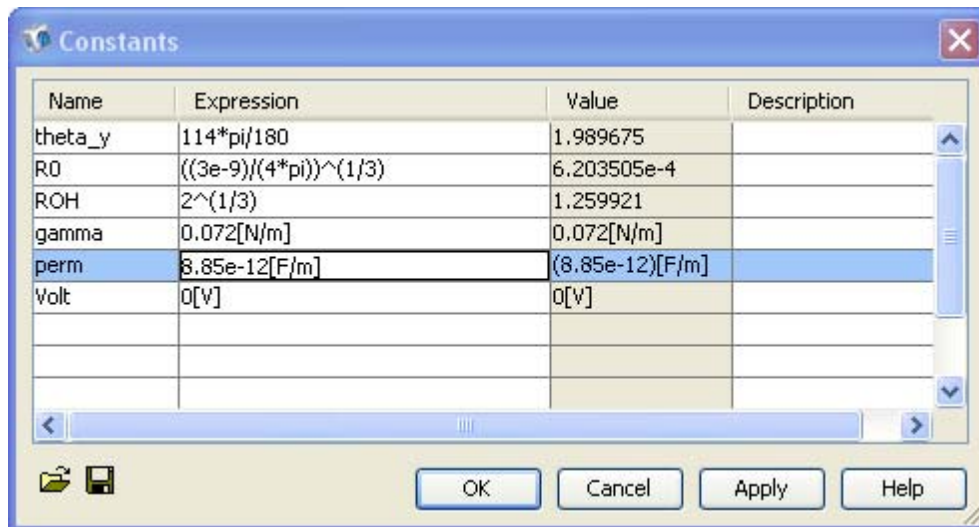
### 3.1 Επίλυση εξίσωσης Young-Laplace

Το σχήμα της σταγόνας  $f$  ορίζεται σαν μεταβλητή  $u$  στο Comsol, ενώ η γωνία  $\theta$  ορίζεται ως  $x$ . Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του προβλήματος εισάγονται στο μοντέλο ως εξής:

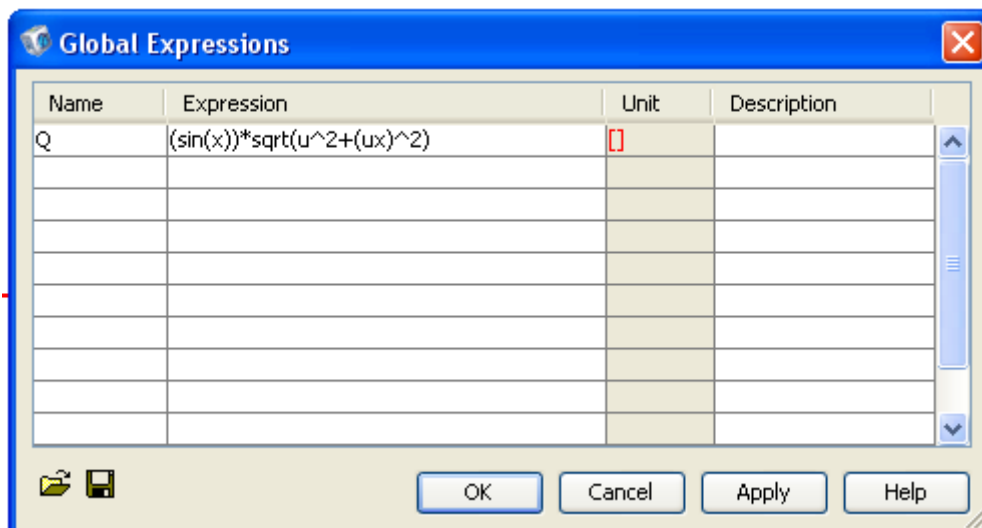
Η γωνία επαφής Young  $\theta_{y}$ , η οποία είναι ανεξάρτητη του πεδίου, καθώς και οι υπόλοιπες σταθερές του συστήματος:

- $\Gamma$ -επιφανειακή τάση
- $\theta_{y}$  – αρχική γωνία επαφής
- $R_0$  – ακτίνα σταγόνας όγκου 2 ml
- $\epsilon_{perm}$  – ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού
- $V_{app}$  – επιβαλλόμενη τάση
- $R_{OH}$  – ακτίνα σταγόνας ώστε να ικανοποιεί την ολοκληρωτική έκφραση διατήρησης του όγκου

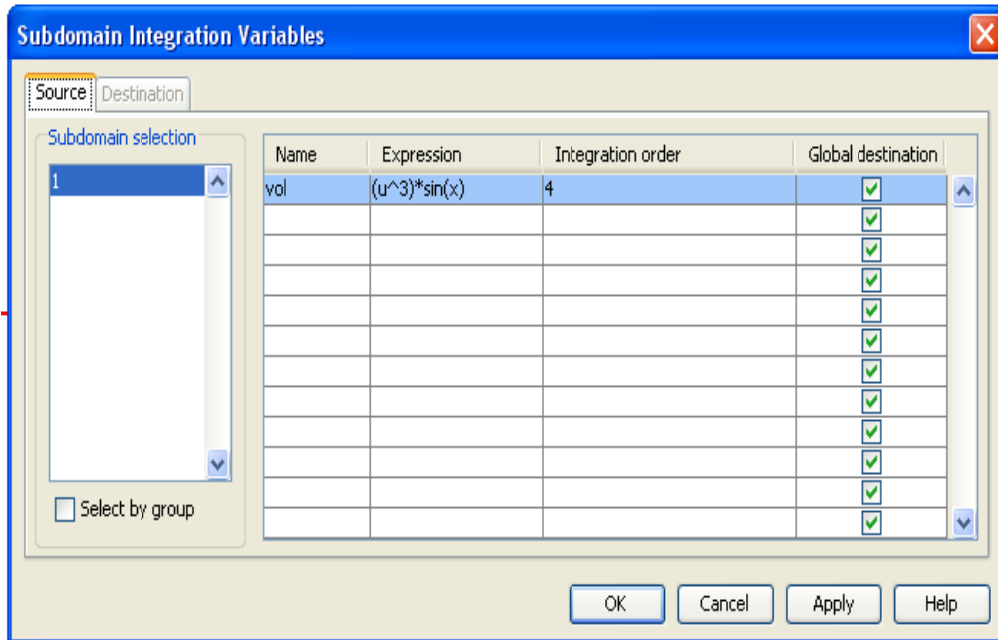
εισάγονται στο μοντέλο μέσω των Options→Constants



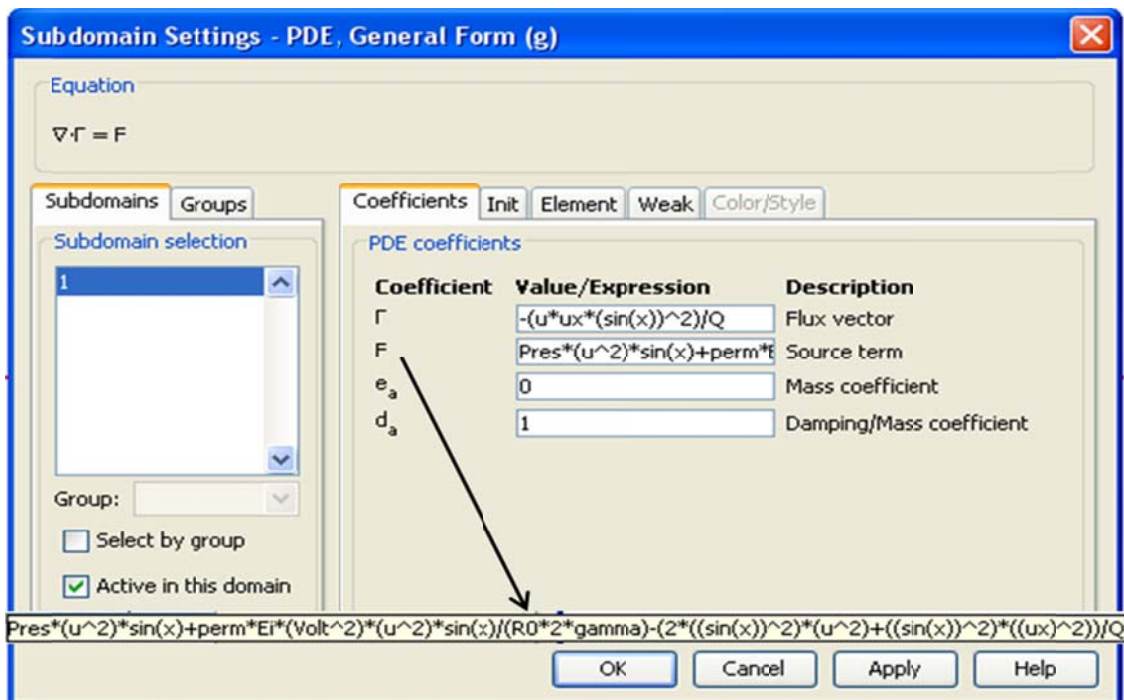
Στην συνέχεια ορίζεται η συνάρτηση  $Q = \sin x \sqrt{f^2 + f_{\theta}^2}$  από τα Options→Expressions→Global Expressions (η συγκεκριμένη έκφραση ορίζεται καθώς εμφανίζεται αρκετές φορές στην δημιουργία του μοντέλου καθώς εμφανίζεται πάνω από μία φορά)



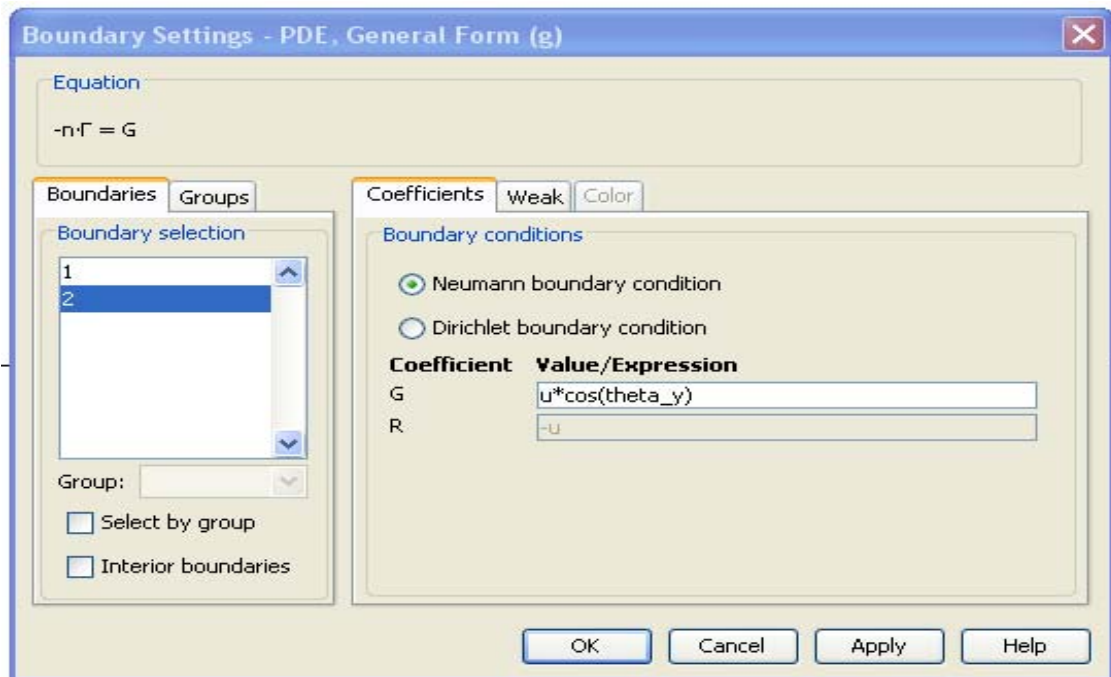
Ορίζεται η έκφραση vol , που είναι η συνάρτηση προς ολοκλήρωση για την εξαγωγή του όγκου της σταγόνας της, μέσω των Options→Integration Coupling Variables→Subdomain Variables



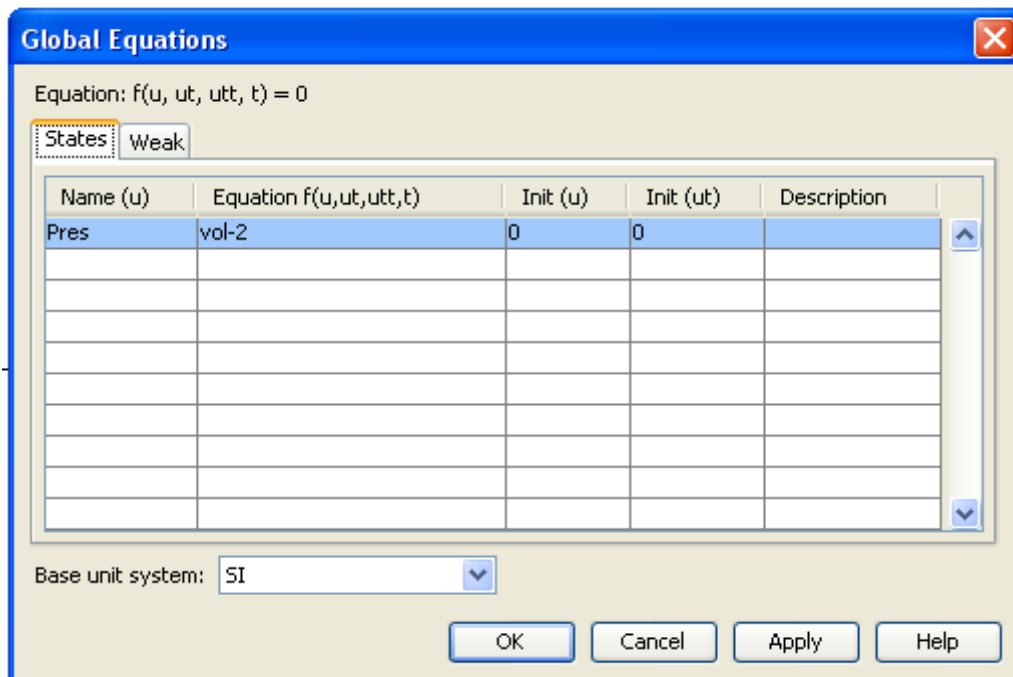
Η απλοποιημένη (μη επαυξημένη) Young-Laplace που περιέχει μόνο τον όρο της επιφανειακής τάσης εισάγεται από Physics→Subdomain Settings



Οι συνοριακές συνθήκες ορίζονται από τα Physics→Boundary Conditions ( για το boundary 1 ο όρος G είναι 0)



Τέλος, ορίζεται η εξίσωση Pres, που αποτελεί την έκφραση της πίεσης αναφοράς K που ορίζεται στην εξίσωση Y-L



### 3.2 Επίλυση ηλεκτροστατικού προβλήματος

Στο δι-διάστατο χωρίο επιλύεται η εξίσωση του Gauss για τη χωρική κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου:

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla u) = 0$$

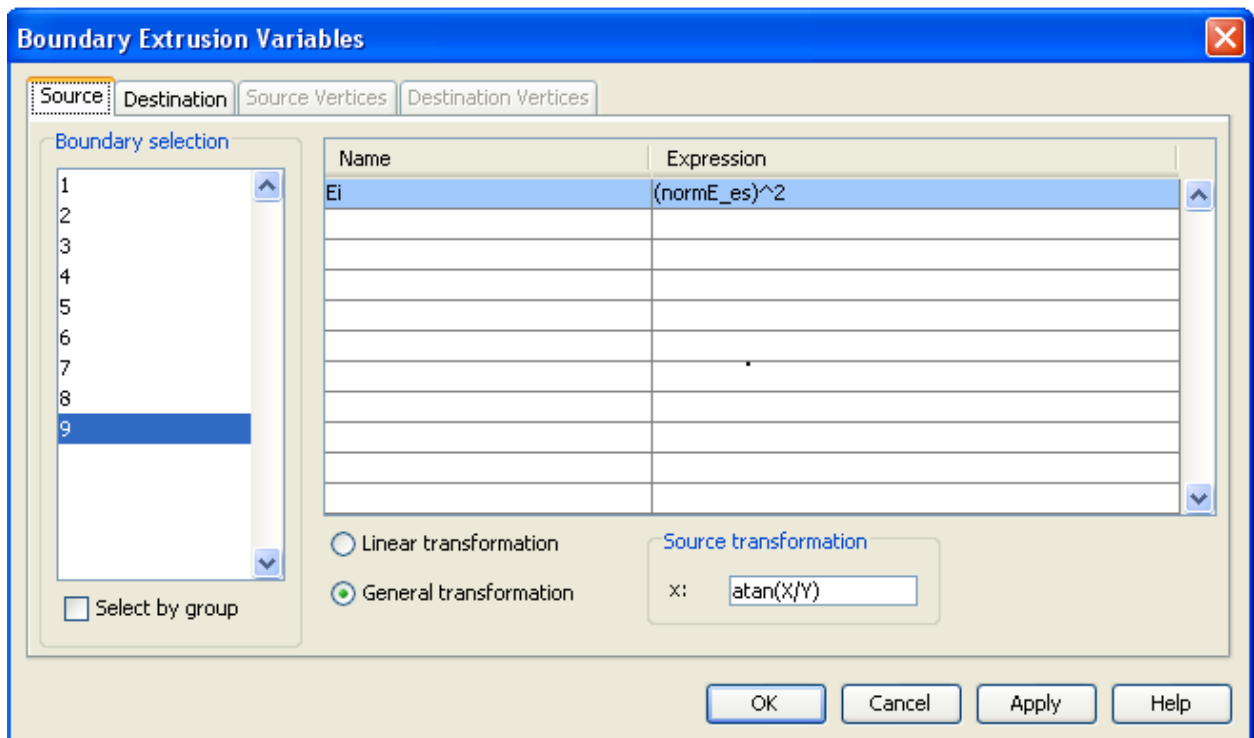
Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται είναι μορφής Dirichlet ( $-n \cdot \Gamma = G$ ) και είναι οι εξής:

- $u = 1$  για  $r=f(\theta)$  (στην επιφάνεια δηλαδή της σταγόνας)
- $u = 1$  για  $z=0$  και  $r \leq f(\frac{\pi}{2})$  (στην επιφάνεια επαφής της σταγόνας με το διηλεκτρικό)
- $u = 0$  για  $z = -\delta$

Στα όρια του χωρίου του αέρα θεωρείται ότι το ηλεκτρικό φορτίο είναι μηδέν.

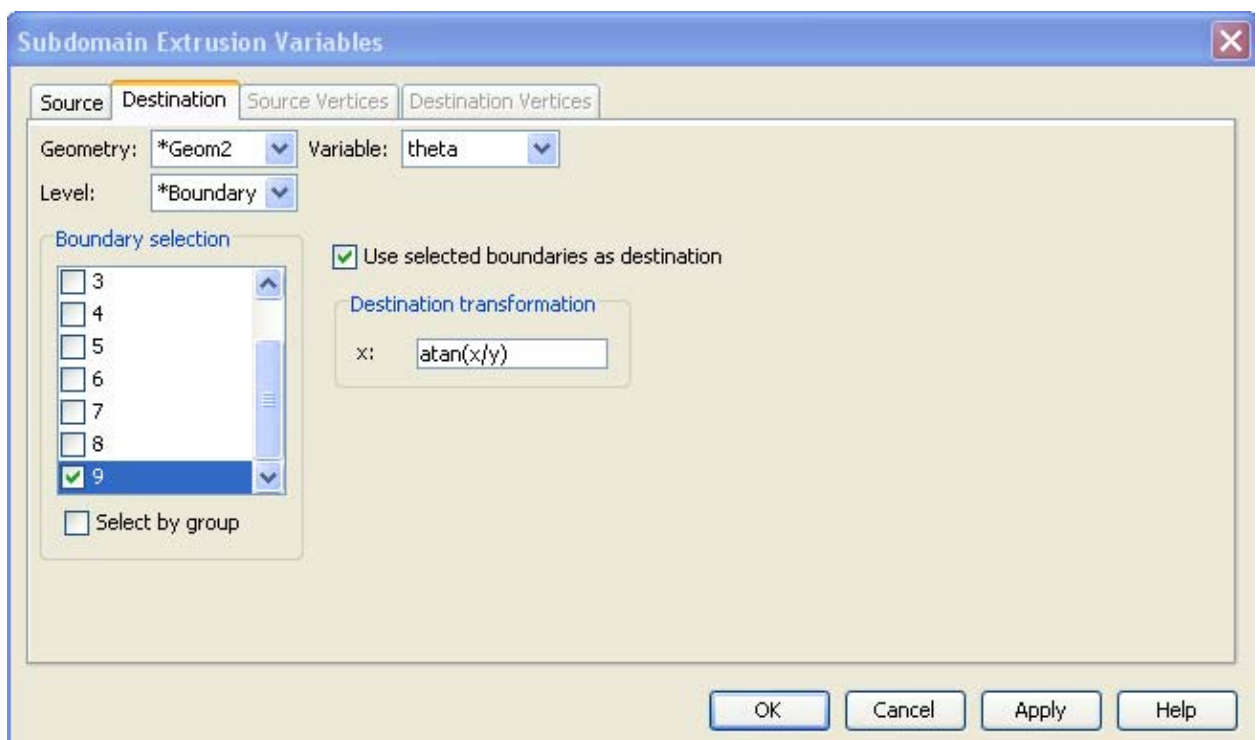
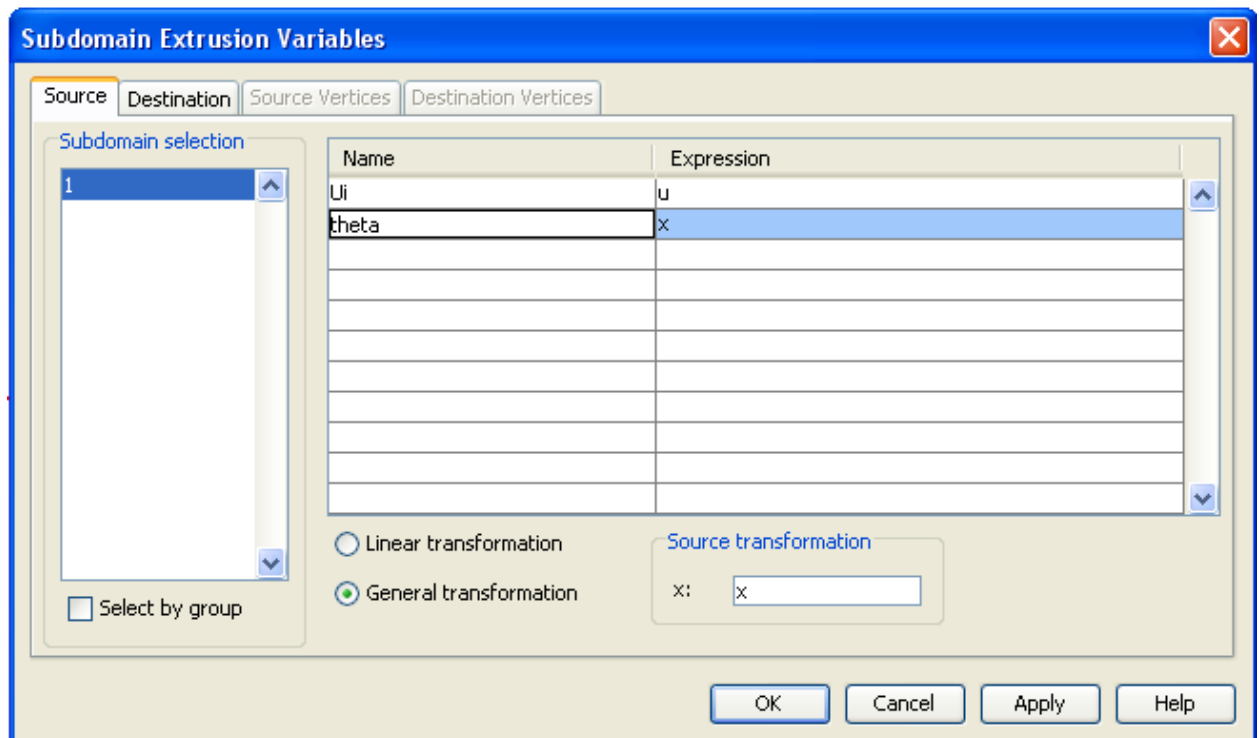
### 3.3 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian method)

Για την εξαγωγή της έντασης στο μονοδιάστατο χωρίο ορίζεται η μεταβλητή  $E_i$  (extrusion variable) στο σύνορο σταγόνας-αέρα η οποία ορίζεται ως το τετράγωνο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Ο μετασχηματισμός για την προβολή της έντασης από 2D συντεταγμένες σε 1D είναι  $\arctan(x/y)$ .



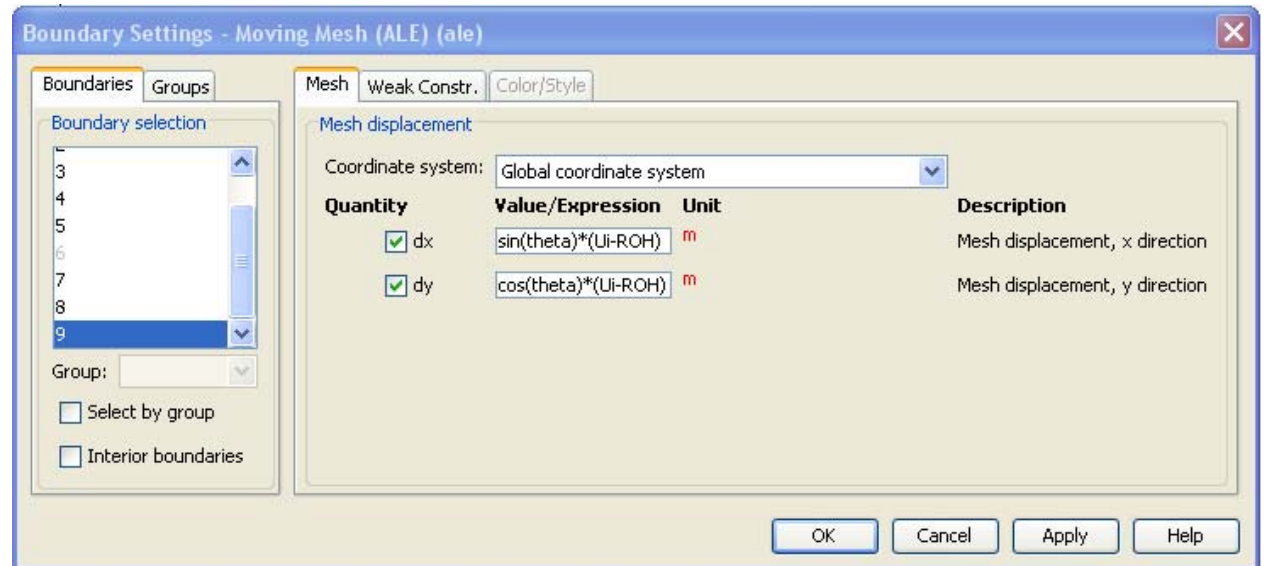
Η ένταση του πεδίου επηρεάζει το σχήμα της σταγόνας και συνεπώς αλλάζει σε σχέση με το αρχικό. Η πληροφορία για την αλλαγή του σχήματος της σταγόνας από το μονοδιάστατο χωρίο μεταφέρεται στο δι-διάστατο χωρίο μέσω δύο μεταβλητών (extrusion variables)  $U_i$  και  $\theta$ . Ο μετασχηματισμός για την προβολή των μεταβλητών είναι  $\arctan(x/y)$ :





Η πληροφορία για την ένταση του πεδίου προέρχεται από τις συντεταγμένες αναφοράς (X,Y), ενώ η πληροφορία για το σχήμα της σταγόνας προβάλλεται στις μετατοπισμένες συντεταγμένες (x,y). Για το ALE ορίζεται ότι το σύνορο το οποίο

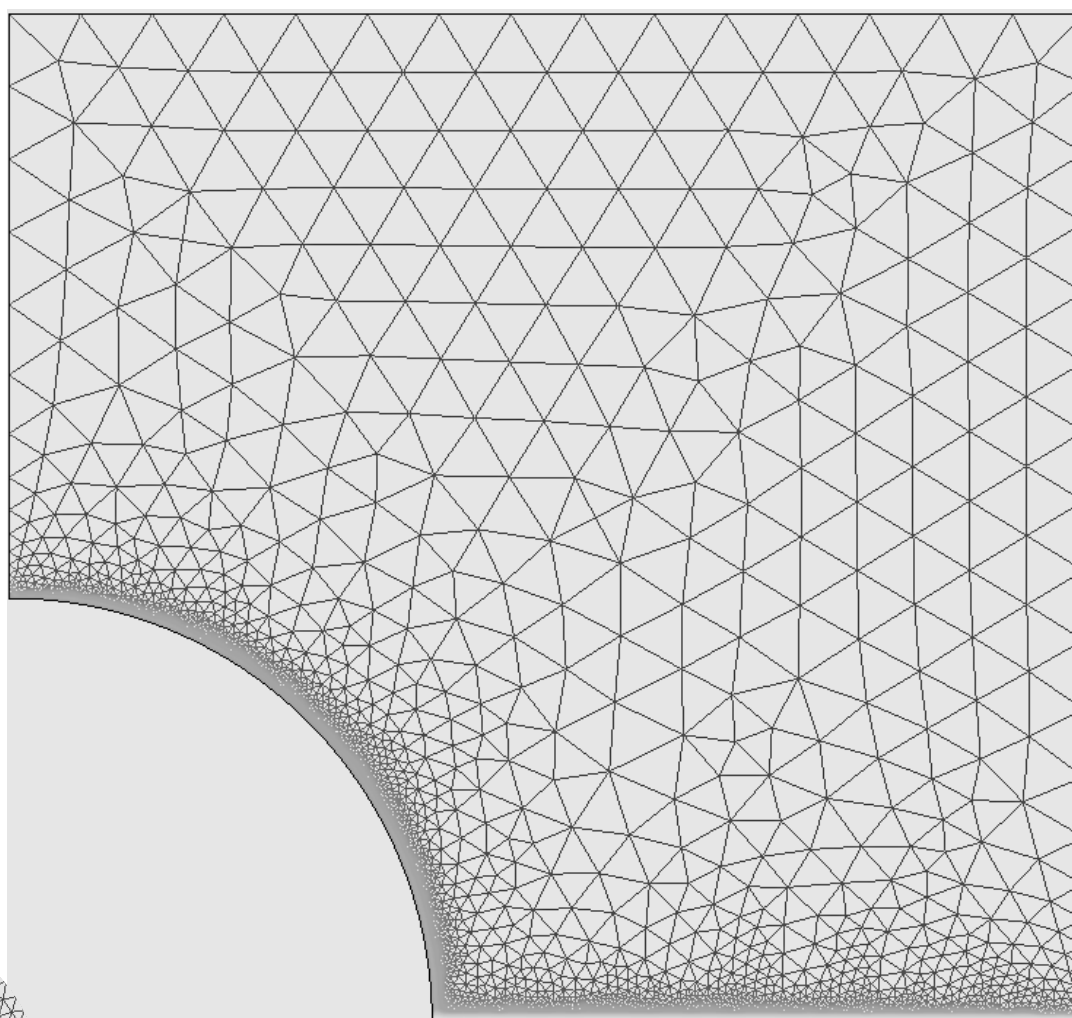
μετατοπίζεται είναι αυτό της διεπιφάνειας σταγόνας-αέρα. Η μετατόπιση κατά τους άξονες X,Y είναι η εξής:



όπου  $R_{OH}$  είναι η ακτίνα της σταγόνας ώστε να ικανοποιεί την ολοκληρωτική έκφραση διατήρησης του όγκου.

#### 4 Αποτελέσματα ηλεκτροστατικού προβλήματος

Η επίλυση του προβλήματος έγινε για 324000 βαθμούς ελευθερίας και 30500 elements με μη δομημένο πλέγμα (βλ. Σχήμα 4.1). Δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην πύκνωση του πλέγματος πάνω στην επιφάνεια της σταγόνας και στην γραμμή επαφής, καθώς σε αυτή η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται απότομα και μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια της λύσης.



Σχήμα 4.1-Μορφή πλέγματος

Για τον υπολογισμό της φαινόμενης γωνίας επαφής, θεωρήθηκε ότι η επιφάνεια της σταγόνας αποτελεί τμήμα κύκλου άγνωστης ακτίνας και κέντρου, και συνεπώς ικανοποιεί την εξίσωση του κύκλου

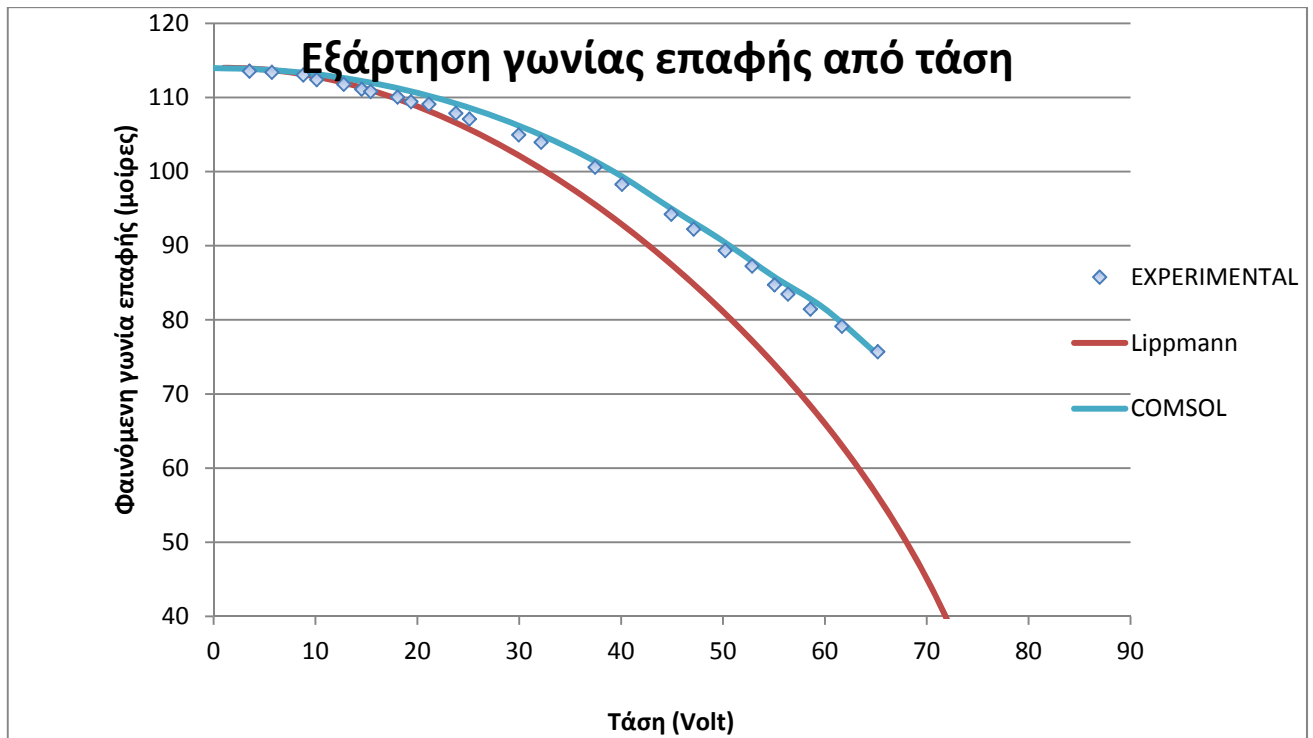
$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = (r - r_0)^2$$

όπου  $x_0 = 0$  (το κέντρο του κύκλου βρίσκεται πάνω στον άξονα  $y-y'$ ) και  $y_0, r_0$  άγνωστοι. Οι υπολογισμοί γι' αυτήν ολοκληρώθηκαν με την χρήση του λογισμικού MATLAB.

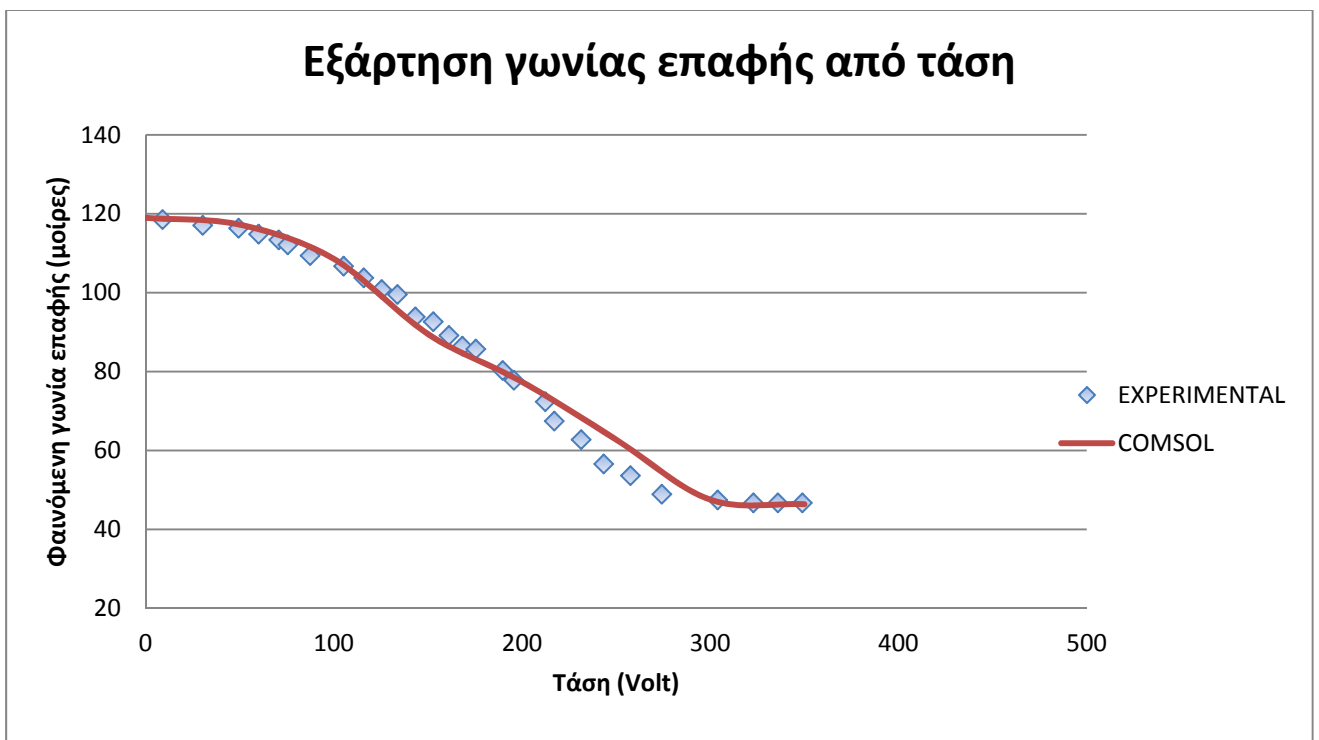
Τα αποτελέσματα των υπολογισμών συγκρίθηκαν με πειραματικά δεδομένα για τρεις (3) περιπτώσεις:

- I. Διηλεκτρικό  $\text{SiO}_2$  πάχους 1  $\mu\text{m}$ ,  $\epsilon_d=3.8$  και  $\theta_y=114^\circ$
- II. Διηλεκτρικό Parylene πάχους 10  $\mu\text{m}$ ,  $\epsilon_d=2.65$  και  $\theta_y=119^\circ$
- III. Διηλεκτρικό PTFE πάχους 50  $\mu\text{m}$ ,  $\epsilon_d=2.00$  και  $\theta_y=120^\circ$

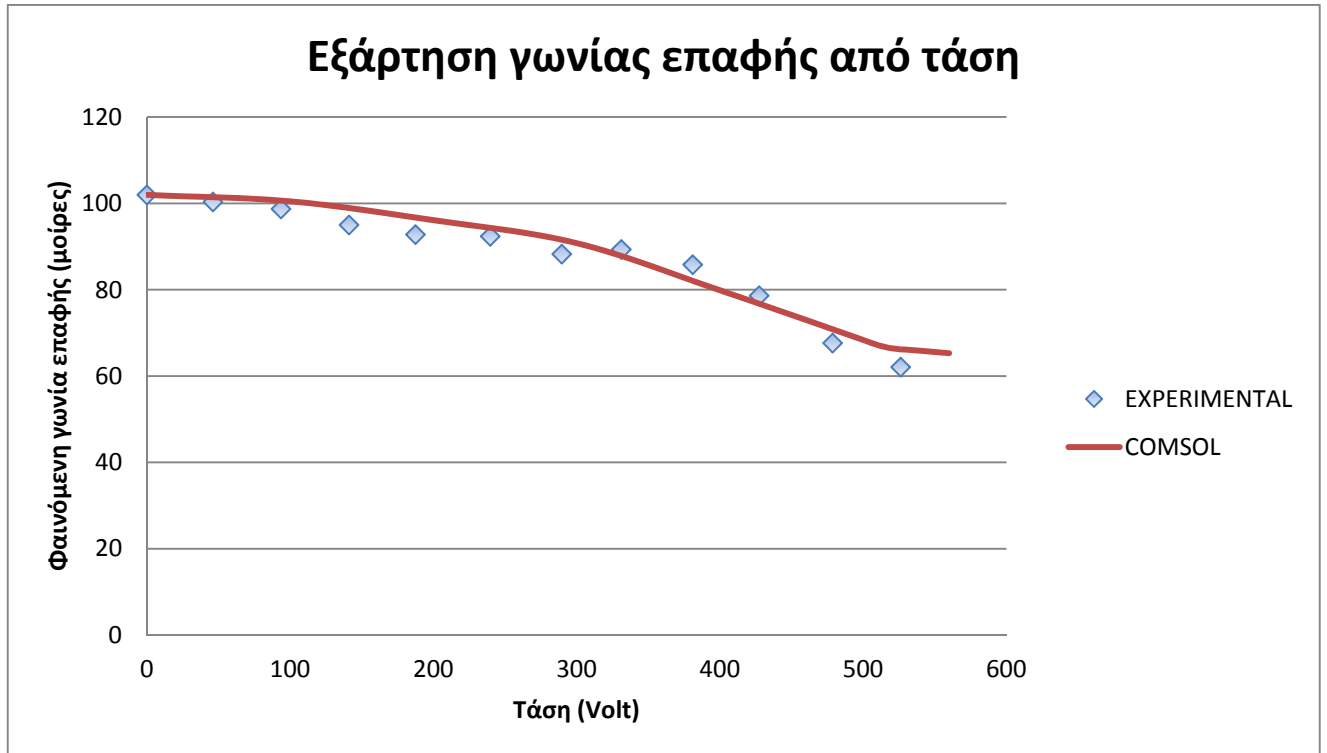
Τα παρακάτω διαγράμματα δείχνουν την εξάρτηση της φαινόμενης γωνίας επαφής από την επιβαλλόμενη τάση για τις αναφερθείσες περιπτώσεις.



**Διάγραμμα 4.1**-Εξάρτηση γωνίας επαφής από την τάση για διηλεκτρικό SiO<sub>2</sub> πάχους 1 μm, ε<sub>d</sub>=3.8 και θ<sub>g</sub>=114° (πηγή πειραματικών δεδομένων: Λιγνός 2009)



**Διάγραμμα 4.2**-Εξάρτηση γωνίας επαφής από την τάση για διηλεκτρικό Parylene πάχους 10μm, ε<sub>d</sub>=2.65 και θ<sub>g</sub>=119° (πηγή πειραματικών δεδομένων: Λιγνός 2009)



**Διάγραμμα 4.3-**Εξάρτηση της γωνίας επαφής από την τάση για διηλεκτρικό PTFE πάχους 50  $\mu\text{m}$ ,  $\epsilon_d=2.00$  και  $\theta_g=120^\circ$  (πηγή πειραματικών δεδομένων: Λιγνός 2009)

Εμφανίζεται καλή συμφωνία μεταξύ των υπολογισμών και των πειραματικών αποτελεσμάτων και κατά συνέπεια η προσομοίωση είναι ικανοποιητική.

## 5 Το μαγνητοστατικό πρόβλημα

### 5.1 Μαγνητικά ρευστά

Η μαγνητο-υδροστατική διεπιφανειών μαγνητικών υγρών διέπεται από θεμελιώδεις αρχές της φυσικής. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα σε συνδυασμό με τις εξισώσεις της μαγνητοστατικής (εξισώσεις του Maxwell προσαρμοσμένες σε στατικά προβλήματα μαγνητισμού για μη-αγώγιμα μέσα) συνθέτουν ένα σύνολο μη-γραμμικών διαφορικών εξισώσεων οι οποίες πρέπει να επιλυθούν σε δι-διάστατα και τρι-διάστατα χωρία με ελεύθερα και έντονα παραμορφωμένα σύνορα.

Τα μαγνητικά υγρά (ferrofluids) είναι συνθετικά κολλοειδή τα οποία μέσα σε μαγνητικό πεδίο παρουσιάζουν μαγνητική πόλωση. Συνήθως, το φέρον υγρό είναι υδρογονάνθρακας ή μίγμα υδρογονανθράκων π.χ. κηροζίνη, ενώ τα διεσπαρμένα σωματίδια είναι οξείδια του σιδήρου (μαγνητίτης) σε διαστάσεις μερικών μικρών (Rosensweig 1985). Τα υγρά αυτά συνδυάζουν τις ιδιότητες ενός συνηθισμένου υγρού (ασυμπιεστότητα, συνεχή παραμόρφωση στην επιβολή οσοδήποτε μικρής διατμητικής τάσης) και επιπλέον τις μαγνητικές ιδιότητες ενός στερεού.

Στα μαγνητικά υγρά η μαγνητική πόλωση (μαγνήτιση) οφείλεται στην ευθυγράμμιση των μαγνητικών σωματιδίων με τη διεύθυνση ενός εξωτερικά εφαρμοζόμενου πεδίου. Αναπτύσσονται έτσι δυνάμεις τόσο από την αλληλεπίδραση του εξωτερικού πεδίου με τις διπολικές ροπές των σωματιδίων όσο και από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων. Οι δυνάμεις αυτές μεταφέρονται στο υγρό και το παραμορφώνουν ή

ενδεχομένως το εξαναγκάζουν σε ροή (ανάλογα με τη μορφή του εξωτερικού πεδίου). Απουσία εξωτερικού πεδίου τα δίπολα είναι τυχαία προσανατολισμένα (εξαιτίας θερμικών κινήσεων) και έτσι τα μαγνητικά υγρά δεν παρουσιάζουν παραμένουσα μαγνήτιση. Επιπλέον τα περισσότερα μαγνητικά υγρά είναι μη-αγώγιμα.

Κατασκευάστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του '60 στα ερευνητικά εργαστήρια της NASA (συγκεκριμένα στο Lewis Research Center) σε συνδυασμό με ανάπτυξη μεθόδων ελέγχου υγρών σε συνθήκες έλλειψης βαρύτητας για τις διαστημικές πτήσεις. Ένα άλλο κίνητρο που ώθησε στην σύνθεση και μελέτη της συμπεριφοράς τέτοιων υγρών ήταν η μετατροπή θερμότητας σε έργο χωρίς τη χρήση μηχανικών μερών (Rosensweig 1985). Καθώς τα πλεονεκτήματά τους έγιναν αμέσως αντιληπτά τα μαγνητικά υγρά χρησιμοποιήθηκαν, και χρησιμοποιούνται, σε πολυάριθμες τεχνολογικές και εμπορικές εφαρμογές των οποίων ο αριθμός συνεχώς αυξάνεται. Η θέση μιας ποσότητας μαγνητικού υγρού μπορεί ελεγχθεί με ακρίβεια με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου. Το υγρό επίσης μπορεί να ακολουθήσει την κλίση ενός ανομοιογενούς πεδίου ή να τεθεί σε κίνηση από ένα χρονομεταβλητό πεδίο κατάλληλου προσανατολισμού (Elias et al. 1996) χωρίς τη χρήση μηχανικών μερών.

Μερικές από τις δημοφιλείς εμπορικές εφαρμογές συμπεριλαμβάνουν την ερμητική στεγανοποίηση με ταυτόχρονη λίπανση περιστρεφόμενων αξόνων (Kim et al. 1999, Bisio et al. 1999) καθώς και τη βελτίωση της απόδοσης μεγαφώνων υψηλής πιστότητας με την απαγωγή θερμότητας και απόσβεση συντονισμών που παρέχει το μαγνητικό υγρό στο πηνίο του μεγαφώνου. Τελευταία έχει αναπτυχθεί έντονη ερευνητική δραστηριότητα σε ιατρικές εφαρμογές (Nethe et al. 1998, Hiergeist et al. 1999, Dailey et al. 1999). Πιο χαρακτηριστική είναι αυτή της μεταφοράς φαρμακευτικών ουσιών στο ανθρώπινο σώμα με τη βοήθεια μαγνητικού υγρού (magnetic drug – targeting) το οποίο καθοδηγείται από μαγνητικό πεδίο και



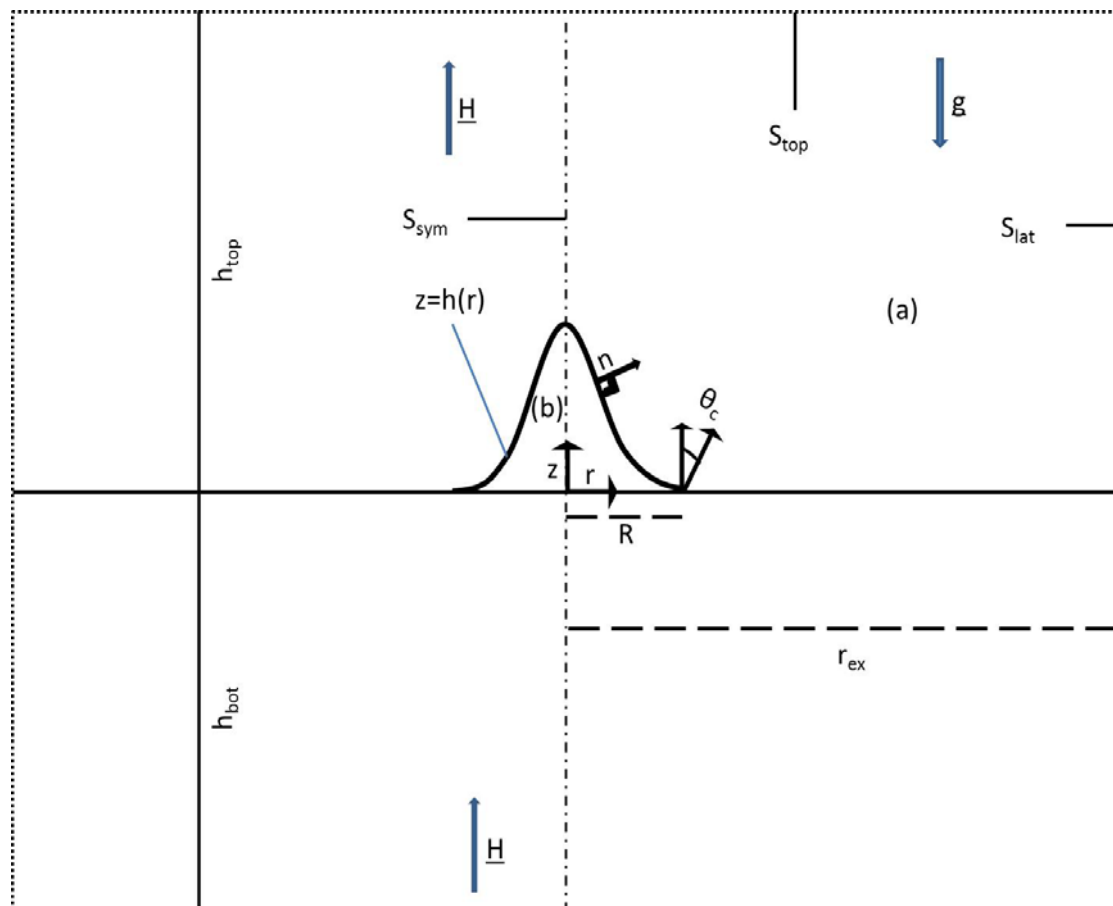
χρησιμοποιείται ως φορέας του φαρμάκου (Lubbe et al. 1999). Για άλλες εφαρμογές των μαγνητικών υγρών μπορεί κανείς να ανατρέξει τόσο στο βιβλίο του Rosensweig (1985) όσο και στα πρακτικά του 8th International Conference on Magnetic Fluids που δημοσιεύθηκαν σε ειδικό τόμο του περιοδικού *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (Τόμος 201 (1999)).

Το ενδιαφέρον για τη μελέτη των μαγνητικών υγρών, δεν περιορίζεται μόνο στις διάφορες εμπορικές και τεχνολογικές εφαρμογές τους. Η ισχυρή απόκριση τους σε μαγνητικά πεδία έχει ως αποτέλεσμα την εκδήλωση εντυπωσιακών φαινομένων. Σ' αυτά τα φαινόμενα συμπεριλαμβάνονται:

- η λεγόμενη αστάθεια κάθετου μαγνητικού πεδίου (normal field instability, Cowley and Rosensweig 1967, Boudouvis et al. 1987) κατά την οποία η ελεύθερη επιφάνεια ενός ρηχού στρώματος μαγνητικού υγρού παραμορφώνεται στατικά σχηματίζοντας αιχμές διατεταγμένες σε κανονικά πολυγωνικά μορφώματα (συνήθως εξάγωνικά ή και τετραγωνικά).
- ο αυθόρμητος σχηματισμός στατικών λαβυρινθωδών μορφωμάτων σε σταγόνες μαγνητικού υγρού περιορισμένες ανάμεσα σε δύο πλάκες (Romankiw et al. 1975, Dickstein et al. 1993).

## 5.2 Το σύστημα

Το μελετώμενο σύστημα αποτελείται από μια σταγόνα υγρού, η οποία τοποθετείται πάνω στην οριζόντια επιφάνεια ενός μη-μαγνητικού υλικού. Το όλο σύστημα περιβάλλεται από αέρα. Η σταγόνα εμφανίζει αξονική συμμετρία, και το σχήμα της ορίζεται από το ύψος αυτής  $z=h(r)$  αυτής σε πολικές συντεταγμένες συναρτήσει της ακτίνας της  $r$ .



Σχήμα 5.1 - Γεωμετρία μαγνητικού προβλήματος

Σε αντιπαράβολή με το ηλεκτροστατικό σύστημα μελετήθηκε και η περίπτωση μίας μαγνητικής σταγόνας, η οποία παραμορφώνεται υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου. Το πρόβλημα είναι και αυτό ελεύθερης επιφάνειας όπως το ηλεκτροστατικό πρόβλημα, και επιλύεται με την εξίσωση Y-L. Σε αντίθεση με το ηλεκτροστατικό πρόβλημα όμως, απαιτείται επίλυση του πεδίου σε όλο τον όγκο της σταγόνας, καθώς η σταγόνα δεν εμφανίζει σταθερή μαγνητική διαπερατότητα.

Στο πρόβλημα το μαγνητικό πεδίο  $H$  είναι αστρόβιλο καθώς δεν υπάρχουν ελεύθερα ρεύματα, και εκφράζεται ως προς το μαγνητοστατικό δυναμικό  $u$  από την σχέση (Reitz et al. 1979):

$$\mathbf{H} = \nabla u \quad (5.1)$$

Το μαγνητικό πεδίο είναι σταθερού μέτρου και παράλληλο ως προς τον άξονα συμμετρίας της σταγόνας μακριά από αυτή. Το μαγνητοστατικό δυναμικό ικανοποιεί τη σχέση (Παπαθανασίου 2000):

$$\nabla \cdot (\mu \nabla u) = 0 \quad (5.2)$$

όπου  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα (ίση με  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$  για το κενό και τον αέρα).

Εντός της σταγόνας η διαπερατότητα είναι συνάρτηση της έντασης του πεδίου  $\mu = f(H)$  (για τις ανάγκες της διπλωματικής έχει θεωρηθεί σταθερή).

Επί της επιφάνειας της σταγόνας ισχύει η εξίσωση Y-L. Κατ' αντιστοιχία με το ηλεκτροστατικό πρόβλημα, όπου το σχήμα της σταγόνας επηρεάζεται και από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, το σχήμα της μαγνητικής σταγόνας επηρεάζεται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου (Bacri and Salin 1983). Σε αντίθεση όμως με την ηλεκτροδιαβροχή, η βαρύτητα συνεισφέρει στην Y-L λόγω του μεγαλύτερου όγκου

της σταγόνας και η επίδραση αυτής δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Η αδιάστατη εξίσωση Y-L, επαυξημένη με τον μαγνητικό όρο είναι (Arkhipenko et al. 1978):

$$-N_g h + N_m \left\{ \frac{1}{2} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{M})^2 + \int_0^{H_B} M(H') dH' \right\} + 2T = K \quad (5.3),$$

όπου:

- $N_g$  ο βαρυτικός αριθμός Bond ίσος με  $N_g = \frac{g \Delta \rho R_0^2}{\sigma}$
- $h$  η κατακόρυφη απόσταση της επιφάνειας της σταγόνας από τη διεπιφάνεια υγρού-διηλεκτρικού
- $N_m$  ο μαγνητικός αριθμός Bond ίσος με  $N_m = \frac{\mu_0 H_0^2}{\sigma R_0}$  όπου  $H_0$  το επιβαλλόμενο πεδίο
- $H$  το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου
- $\mathbf{n}$  το κάθετο στην επιφάνεια της σταγόνας διάνυσμα
- $\mathbf{M}$  το διάνυσμα της μαγνήτισης,  $\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} = ((\mu/\mu_0) - 1) \mathbf{H}$
- $\sigma$  η διεπιφανειακή τάση μεταξύ αέρα και υγρού
- $2T$  η τοπική καμπυλότητα της σταγόνας
- $K$  η πίεση αναφοράς
- $R_0$  το χαρακτηριστικό μήκος, που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ίσο με την ακτίνα ενός ημισφαιρίου όγκου ίσου με αυτού της σταγόνας
- $\Delta \rho$  η διαφορά πυκνότητας μεταξύ της σταγόνας και του αέρα
- $H_b$  το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια της σταγόνας

Ο όρος της καμπυλότητας  $2T$  είναι ίσος με:

$$2T = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( \frac{r h_r}{\sqrt{1+h_r^2}} \right) \quad (5.4)$$

Ο όγκος της σταγόνας παραμένει σταθερός ανεξάρτητα από την παραμόρφωση αυτής, και η μαθηματική διατύπωση της διατήρησης του όγκου είναι:

$$\int_0^R h(r) r dr = \frac{1}{3} \quad (5.5)$$

Οι συνοριακές συνθήκες που διέπουν το σύστημα είναι:

- $h_r = u_r = 0$  στον άξονα συμμετρίας ( $r=0$ )
- $u_a = u_b$ ,  $\mu \mathbf{n} \cdot \nabla u_b = \mu_0 \mathbf{n} \cdot \nabla u_a$
- $u_a = u_b$ ,  $\mu u_{b,z} = \mu_0 u_{a,z}$  για  $z=0$  και  $0 \leq r \leq R$
- $h_r + \tan \theta_c = 0$  για  $r=R$  ( $\theta_c$  η γωνία επαφής Young)
- $u_a = 0$  για  $z=-h_{bot}$
- $u_{a,z} = 1$  για  $z=h_{top}$  και  $u_{a,r} = 0$  για  $r=r_{ex}$

Οι δείκτες  $r$ ,  $z$  υποδηλώνουν παραγωγή ως προς τις κατευθύνσεις  $r$  και  $z$  αντίστοιχα. Το μοναδιαίο διάνυσμα  $\mathbf{n}$  είναι ίσο με:

$$\mathbf{n} = \frac{-h_r \mathbf{e}_r + \mathbf{e}_z}{\sqrt{1+h_r^2}} \quad (5.6)$$

με  $\mathbf{e}_z$ ,  $\mathbf{e}_r$  τα μοναδιαία διανύσματα κατά τις κατευθύνσεις z και r αντίστοιχα.

### 5.3 Μεθοδολογία

Το πρόβλημα της επίλυσης της αδιαστατοποιημένης εξίσωσης Young-Laplace

$$-N_g h + N_m \left\{ \frac{1}{2} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{M})^2 + \int_0^{H_B} M(H') dH' \right\} + 2T = K$$

προσεγγίζεται ως επαλληλία δύο (2) επιμέρους προβλημάτων :

- Του μαγνητοστατικού πεδίου που εκφράζεται από τον όρο

$$N_m \left\{ \frac{1}{2} (\chi \mathbf{n} \cdot \mathbf{H})^2 + \chi \frac{H^2}{2} \right\}$$

$$\text{όπου } \chi = \frac{\mu}{\mu_0} - 1 = \text{σταθερό}$$

- Της επιφανειακής τάσης και της βαρύτητας που εκφράζονται από τον όρο

$$2T - N_g h$$

Το μαγνητικό πεδίο επιλύεται σε δύο διαστάσεις με κυλινδρικές συντεταγμένες δεδομένου ότι το πρόβλημα εμφανίζει αξονική συμμετρία, ενώ η επιφανειακή τάση

και η βαρύτητα επιλύονται σε μονοδιάστατο χωρίο καθώς ο όρος  $2T$  αποτελεί συνάρτηση μόνο της ακτίνας  $r$ , ενώ η δύναμη της βαρύτητας είναι σταθερή. Η λύση του μαγνητικού πεδίου τροφοδοτείται έπειτα στο μονοδιάστατο χωρίο και έτσι εξάγεται το σχήμα της σταγόνας το οποίο προβάλλεται ταυτόχρονα στο δι-διάστατο χωρίο ώστε οριστεί η κατανομή του πεδίου με βάση το νέο σχήμα της σταγόνας. Οι παράμετροι του συστήματος είναι οι εξής:

- Η επιφανειακή τάση
- Η αρχική γωνία επαφής (γωνία επαφής Young)
- Το μαγνητικό πεδίο αναφοράς ( $H_0$ ) το οποίο υπεισέρχεται στον μαγνητικό αριθμό Bond
- Η μαγνητική διαπερατότητα της σταγόνας

### 5.3.1 Επίλυση εξίσωσης Young-Laplace

Στο μονοδιάστατο χωρίο επιλύεται η απλουστευμένη έκφραση της εξίσωσης Young-Laplace:

$$2T - N_g h = K$$

μαζί με την ολοκληρωτική εξίσωση που εκφράζει την διατήρηση του όγκου της σταγόνας:

$$\int_0^R h(r)rdr = \frac{1}{3}$$

### 5.3.2 Επίλυση μαγνητοστατικού πεδίου

Στο δι-διάστατο χωρίο επιλύεται η εξίσωση του Gauss για τη χωρική κατανομή του μαγνητικού πεδίου:

$$\nabla \cdot (\mu \nabla u) = 0$$

Όπου  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$  για τον αέρα και τη μη μαγνητική επιφάνεια πάνω στην οποία επικάθεται η σταγόνα, ενώ  $\mu = \mu_d$  εντός της σταγόνας.

### 5.3.3 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian method)

Για τη σύζευξη των δύο (2) διαφορετικών γεωμετριών ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Από το δι-διάστατο χωρίο υπολογίζεται η κατανομή του μαγνητικού πεδίου
- Υπολογίζεται η ένταση του πεδίου στην επιφάνεια της σταγόνας για να επαυξηθεί η εξίσωση Young-Laplace στο μονοδιάστατο χωρίο
- Η πληροφορία από την επαυξημένη Young-Laplace μεταφέρεται στο δι-διάστατο χωρίο όπου με τη χρήση του ALE εξάγεται το σχήμα της σταγόνας υπό την επίδραση του μαγνητικού πεδίου



Η προσθήκη του ALE δημιουργεί δύο (2) συστήματα συντεταγμένων; ένα με συντεταγμένες  $X, Y$  που είναι το αρχικό και ένα με συντεταγμένες  $x, y$  που είναι το μετατοπισμένο μετά την προσθήκη του ALE.

## 6 Επίλυση μαγνητικού προβλήματος στο περιβάλλον COMSOL

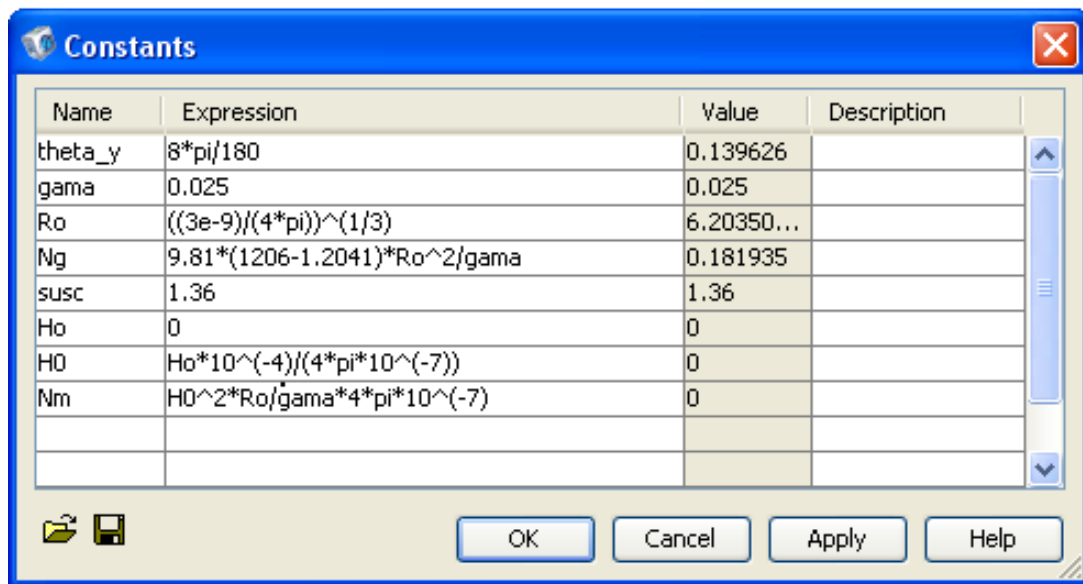
### 6.1 Επίλυση εξίσωσης Young-Laplace

Το σχήμα της σταγόνας  $h$  ορίζεται σαν μεταβλητή  $u$  στο Comsol, ενώ η ακτίνα ορίζεται ως  $x$ . Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του προβλήματος εισάγονται στο μοντέλο ως εξής:

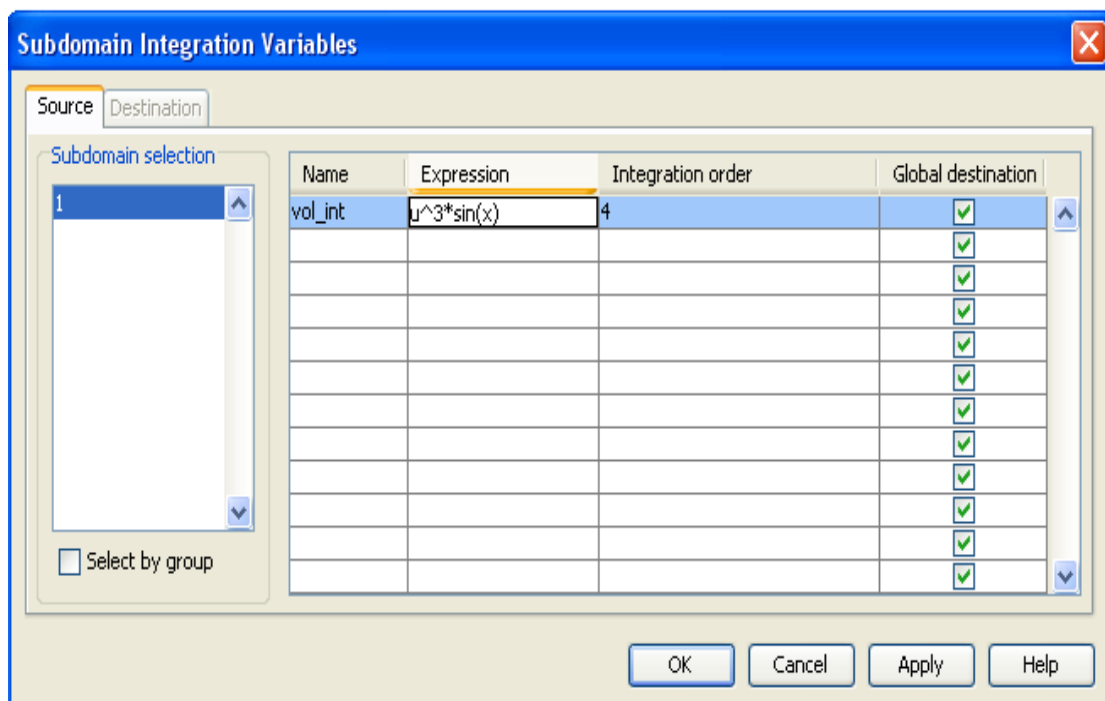
Η γωνία επαφής Young  $\theta_{y}$ , η οποία είναι ανεξάρτητη του πεδίου, καθώς και οι υπόλοιπες σταθερές του συστήματος:

- $\Gamma$ -επιφανειακή τάση
- $\theta_{y}$  – γωνία επαφής Young
- $R_0$  – ακτίνα σταγόνας όγκου 1 ml
- $\mu_{\text{susc}}$  – η σχετική μαγνητική διαπερατότητα
- $H_0$  – το μαγνητικό πεδίο σε B σε Tesla
- $N_g$  - ο βαρυτικός αριθμός Bond
- $N_m$  – ο μαγνητικός αριθμός Bond
- $H_0$  - το μαγνητικό πεδίο H σε Gauss

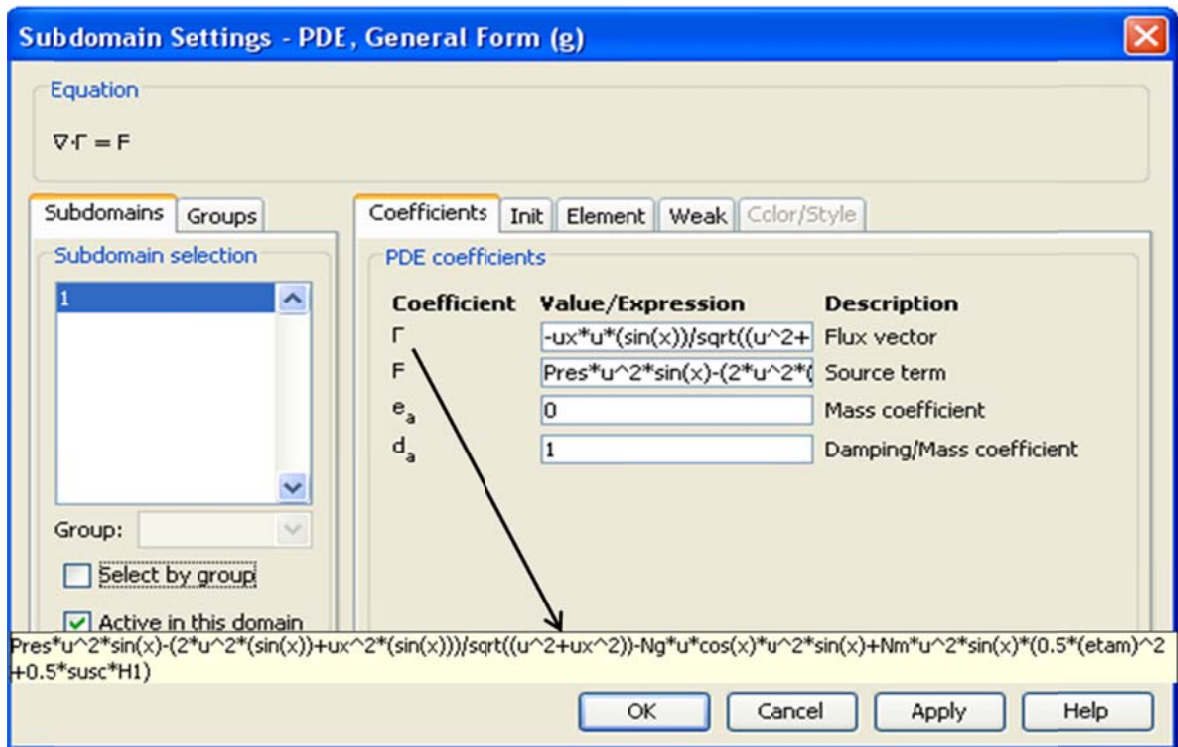
τροφοδοτούνται στο μοντέλο μέσω των Options→Constants



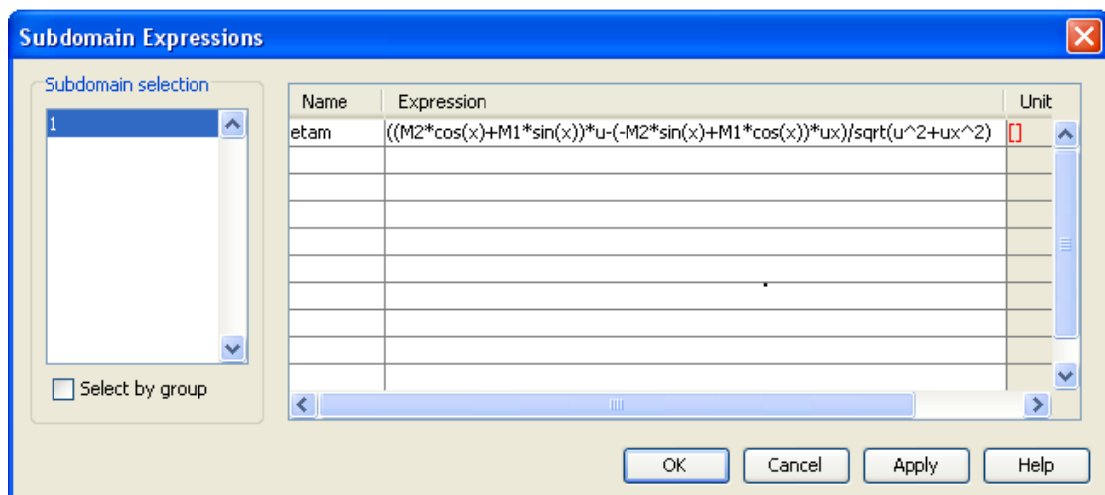
Ορίζεται η έκφραση vol\_int , που είναι η συνάρτηση προς ολοκλήρωση για την εξαγωγή του όγκου της σταγόνας της, μέσω των Options→Integration Coupling Variables→Subdomain Variables



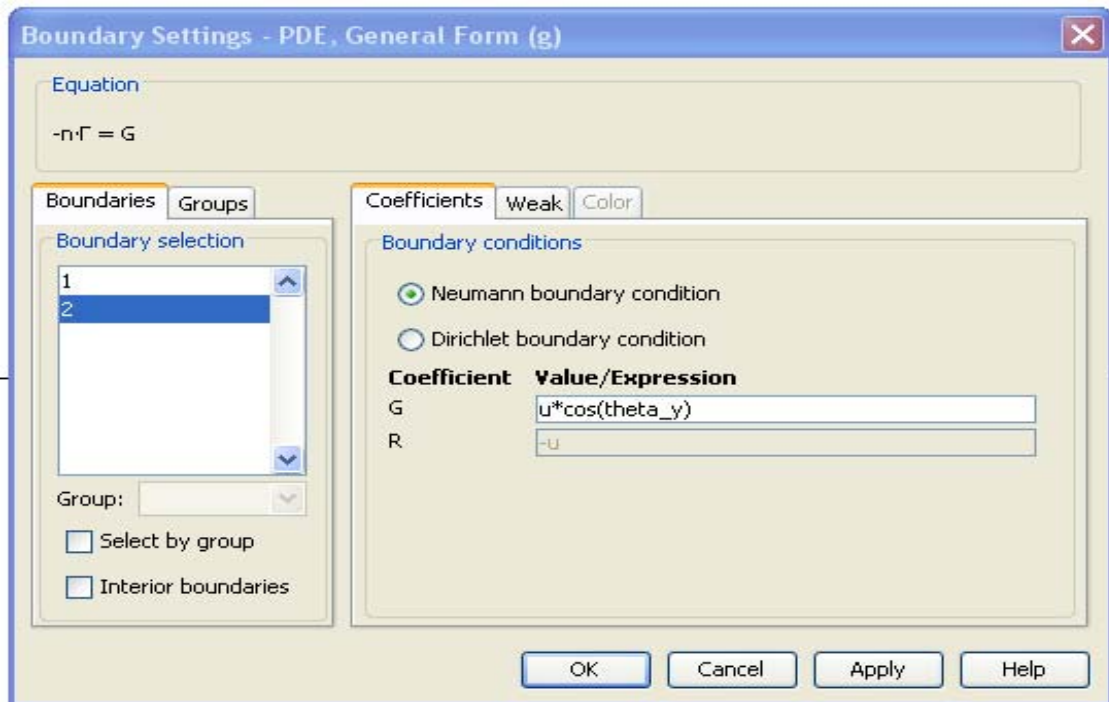
Η εξίσωση Young-Laplace εισάγεται από Physics→Subdomain Settings



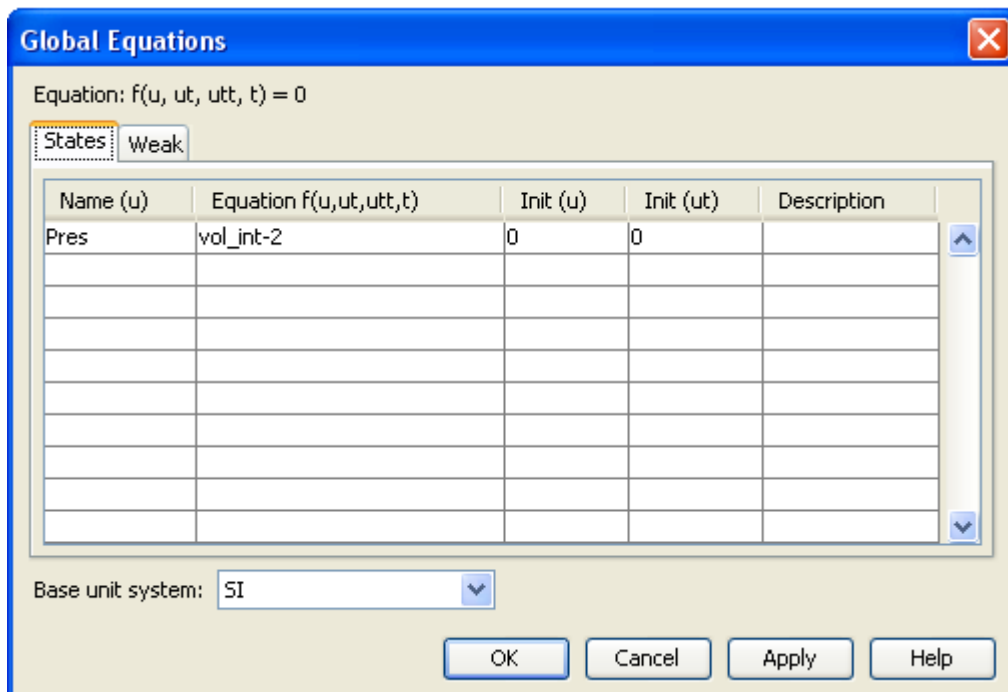
Η έκφραση etam που εμφανίζεται στην έκφραση του  $\Gamma$  ορίζεται από Options→Expressions→Subdomain expressions:



Οι συνοριακές συνθήκες ορίζονται από τα Physics→Boundary Conditions ( για το boundary 1 ο όρος G είναι 0)



Τέλος, ορίζεται η εξίσωση Pres, που αποτελεί την έκφραση της πίεσης αναφοράς K που ορίζεται στην εξίσωση Y-L



## 6.2 Επίλυση εξίσωσης μαγνητικού πεδίου

Στο δι-διάστατο χωρίο επιλύεται η εξίσωση του Gauss για τη χωρική κατανομή του μαγνητικού πεδίου:

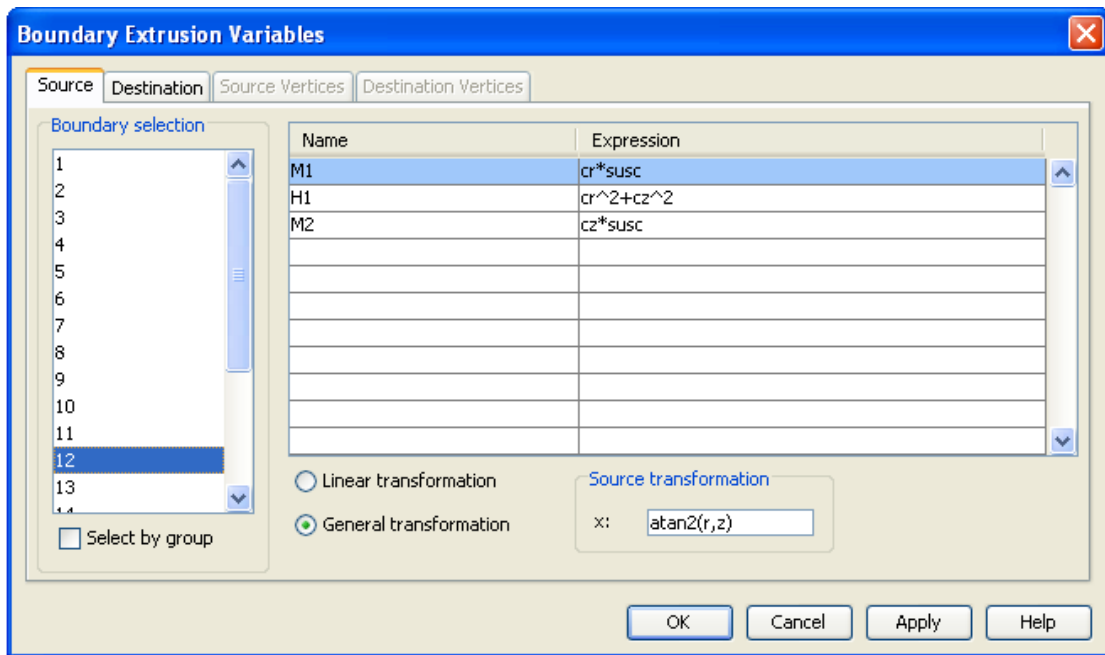
$$\nabla \cdot (\mu \nabla u) = 0$$

Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται είναι μορφής Dirichlet ( $-n \cdot \Gamma = G$ ) και είναι οι εξής:

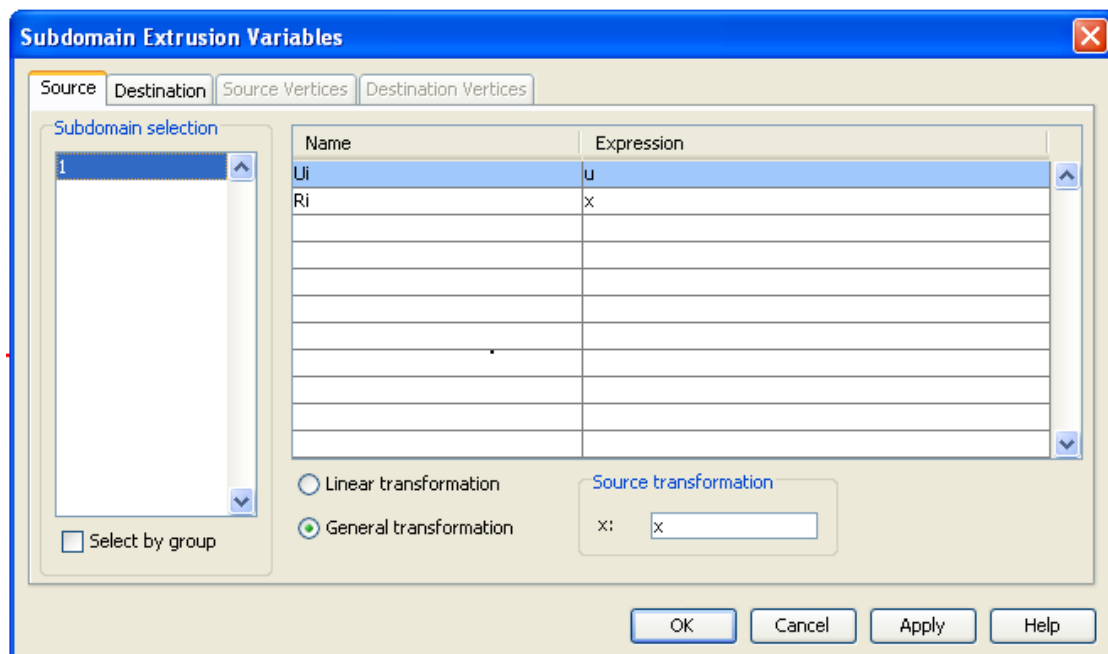
- $u = 1$  για  $r=f(\theta)$  (στην επιφάνεια δηλαδή της σταγόνας)
- $u = 1$  για  $z=0$  και  $r \leq f(\frac{\pi}{2})$  (στην επιφάνεια επαφής της σταγόνας με το διηλεκτρικό)
- $u = 0$  για  $z = -\delta$

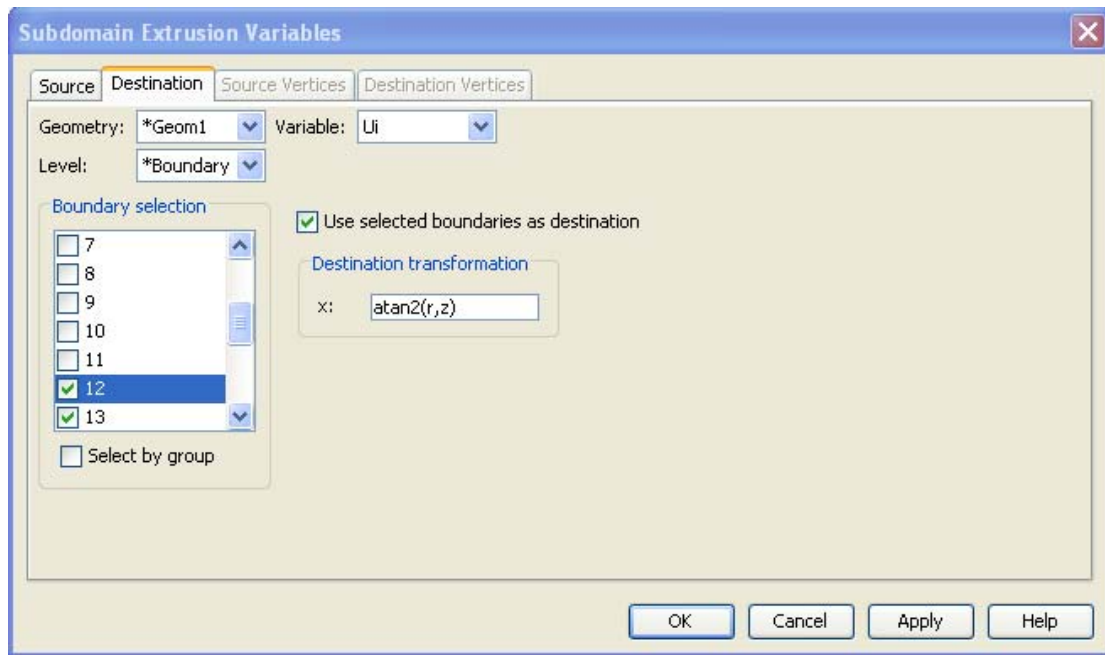
## 6.3 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian method)

Για την προβολή του μαγνητικού πεδίου στο μονοδιάστατο χωρίο ορίζονται οι μεταβλητές  $H1$ ,  $M1$  και  $M2$  (extrusion variables) στο σύνορο σταγόνας-αέρα. Ο μετασχηματισμός για την προβολή της έντασης από 2D συντεταγμένες σε 1D είναι  $\text{atan2}(r/z)$ .

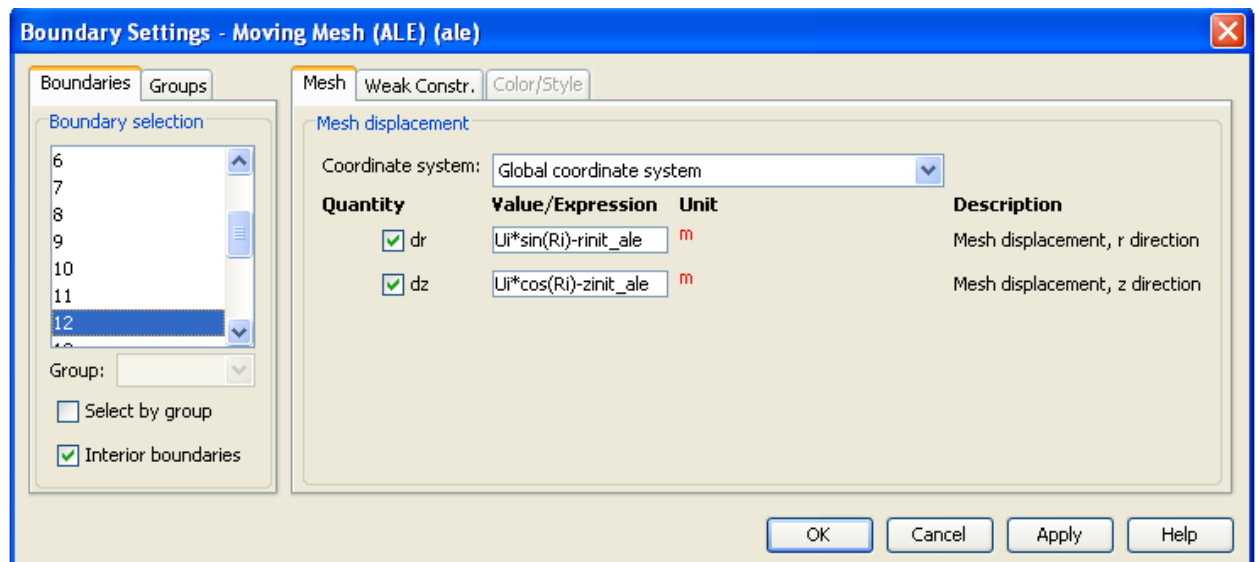


Η ένταση του πεδίου επηρεάζει το σχήμα της σταγόνας και συνεπώς αλλάζει σε σχέση με το αρχικό. Η πληροφορία για την αλλαγή του σχήματος της σταγόνας από το μονοδιάστατο χωρίο μεταφέρεται στο δι-διάστατο χωρίο μέσω δύο μεταβλητών (extrusion variables)  $U_i$  και  $R_i$ . Ο μετασχηματισμός για την προβολή των μεταβλητών είναι  $atan2(r,z)$ :





Η πληροφορία για την ένταση του πεδίου προέρχεται από τις συντεταγμένες αναφοράς (R,Z), ενώ η πληροφορία για το σχήμα της σταγόνας προβάλλεται στις μετατοπισμένες συντεταγμένες (r,z). Για το ALE ορίζεται ότι το σύνορο το οποίο μετατοπίζεται είναι αυτό της διεπιφάνειας σταγόνας-αέρα. Η μετατόπιση κατά τους άξονες R,Z είναι η εξής:

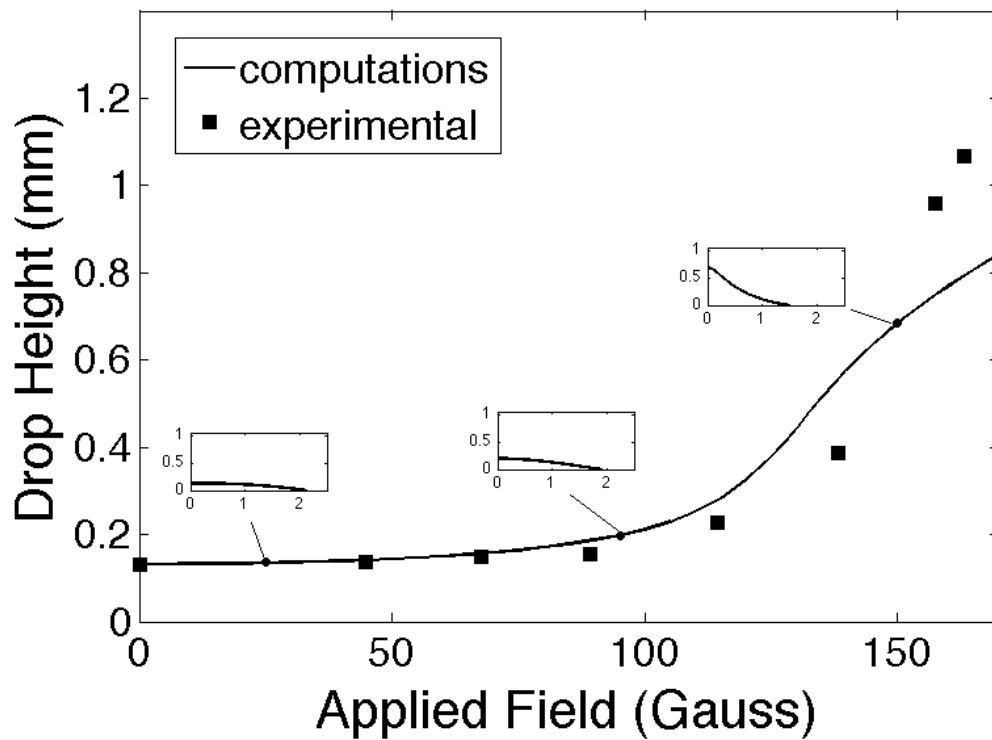


όπου ROH είναι η ακτίνα της σταγόνας ώστε να ικανοποιεί την ολοκληρωτική έκφραση διατήρησης του όγκου.



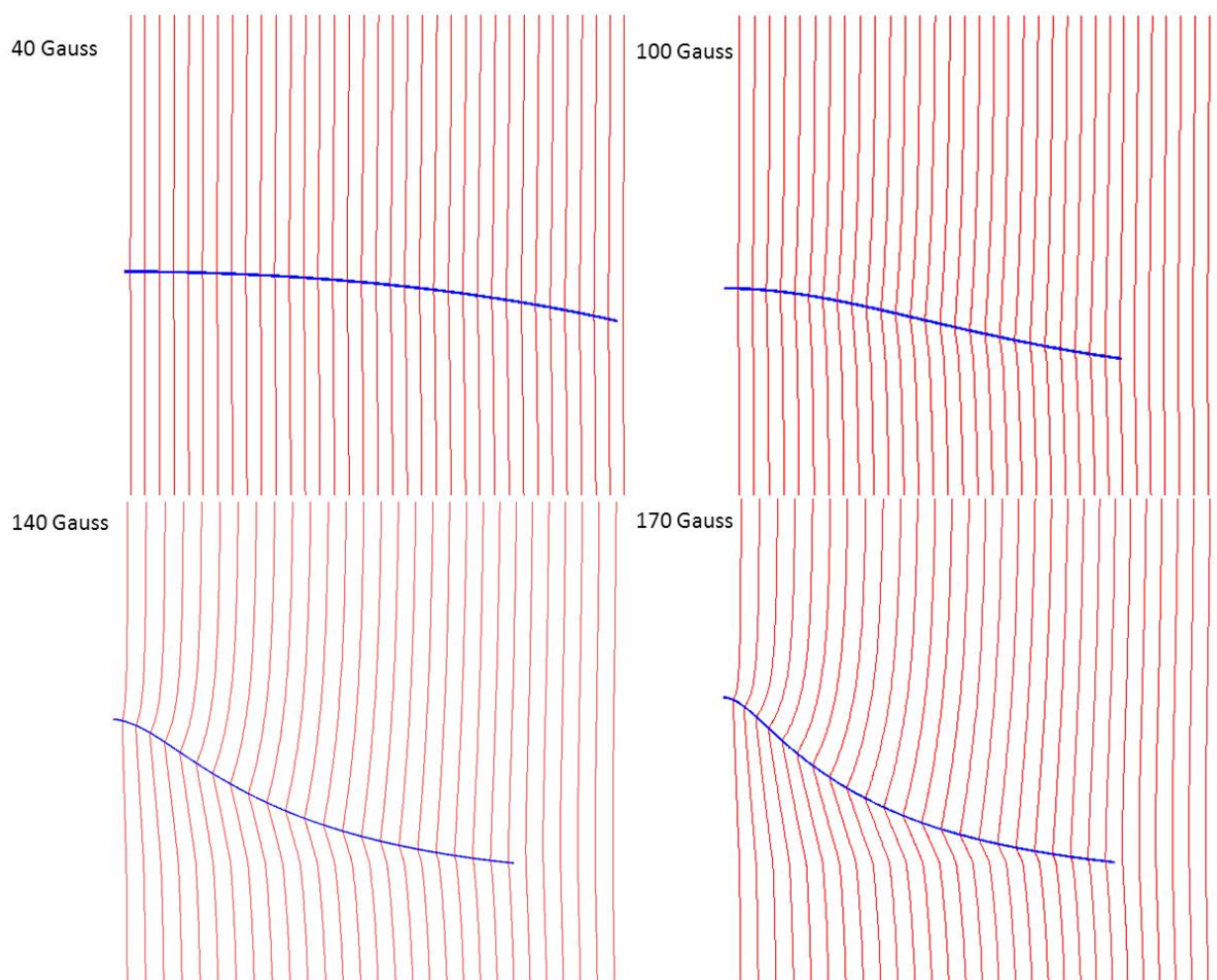
## 7 Αποτελέσματα μαγνητικού προβλήματος

Οι υπολογισμοί για το σχήμα της σταγόνας, για σταθερή σχετική μαγνητική διαπερατότητα ίση με 2.36 και γωνία επαφής Young ίση με  $8^\circ$  παρατίθενται στο διάγραμμα 7.1.



**Διάγραμμα 7.1** - Πειραματικά (Boudounis et al 1988) και θεωρητικά ύψη σταγόνας για διάφορες τιμές μαγνητικού πεδίου (Gauss) και σταθερή διαπερατότητα (2.36).

Οι ροικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου (κόκκινες γραμμές) για ένταση πεδίου 40, 100, 140 και 170 Gauss φαίνεται στο σχήμα 7.2. Το σχήμα της σταγόνας απεικονίζεται με την μπλε γραμμή:



**Σχήμα 7.2** - Γραμμές του πεδίου για ένταση πεδίου 40, 100, 140 και 170 Gauss.

Η σύγκριση των υπολογισμών με τα πειραματικά δεδομένα είναι καλή για τις αρχικές τιμές του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή μέχρι τα 120 Gauss. Η απόκλιση που παρατηρείται σε μεγαλύτερες τιμές πεδίου οφείλεται στο ότι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα της μαγνητικής σταγόνας δεν είναι σταθερή, αλλά αποτελεί συνάρτηση της έντασης του πεδίου  $H$ . Η εξάρτηση αυτή δίνεται από μία εξίσωση Langevin (Rosenweig 1985):

$$M = p \{ \coth(\tau H) - 1/\tau H \}$$

7.1

όπου  $p, \tau$  αδιάστατες σταθερές του συστήματος οι οποίες προσδιορίζονται από την προσαρμογή πειραματικών δεδομένων.

## 8 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

### 8.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αντιμετωπίστηκαν υπολογιστικά δύσκολα προβλήματα λόγω της αμφίδρομης σχέσης μεταξύ σχήματος σταγόνας και ηλεκτρικού/μαγνητικού πεδίου, με τη χρήση του εμπορικού υπολογιστικού πακέτου Comsol Multiphysics, το οποίο επιλύει μερικές διαφορικές εξισώσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Απεδείχθη ότι το συγκεκριμένο λογισμικό είναι ικανό να αντιμετωπίζει με μεγάλη ακρίβεια σύνθετα προβλήματα ελεύθερης επιφάνειας, τα οποία επιλύονται συνήθως με τη χρήση πηγαίου κώδικα, με την απλότητα και την ευχρηστία να αποτελούν σημαντικό πλεονέκτημα έναντι του κώδικα.

Η κύρια δυσκολία στην ολοκλήρωση της εργασίας ήταν η σύζευξη δυο (2) γεωμετρικά και φυσικά διαφορετικών προβλημάτων – ενός μονοδιάστατου όπου επιλύονταν η εξίσωση Y-L για την εύρεση του σχήματος της σταγόνας και ενός διδιάστατου όπου επιλύονταν οι εξισώσεις του ηλεκτρισμού/μαγνητισμού για τον υπολογισμό του πεδίου - τα οποία απάρτιζαν ένα ολοκληρωμένο πρόβλημα. Η σύζευξη πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του ALE mode (Arbitrary Lagrangian Eulerian) του Comsol.

Τα μοντέλα που εξήχθησαν, είναι σχεδιασμένα ώστε να μπορούν να κάνουν υπολογισμούς υψηλής ακρίβειας για πληθώρα περιπτώσεων, και έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για απαιτητικούς υπολογισμούς από χειριστές που δεν έχουν ιδιαίτερη εμπειρία στην εκτέλεση αυτών. Ταυτόχρονα, προσφέρονται για τη σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα, καθώς όλα τα αποτελέσματα που βρέθηκαν από τους υπολογισμούς έχουν συγκριθεί με πειραματικά δεδομένα, και η απόκλιση υπολογισμών-δεδομένων είναι μικρή.

## 8.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας προέκυψαν τα εξής ερωτήματα που μπορούν να αποτελέσουν υλικό για τη συνέχεια αυτής της διπλωματικής εργασίας:

1. Στην περίπτωση του ηλεκτροστατικού προβλήματος δεν μελετήθηκε η περίπτωση όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  στην γραμμή επαφής ξεπερνά το  $E_{BD}$  (Drygiannakis et al. 2009). Το υπάρχον μοντέλο μπορεί να τροποποιηθεί κατά τρόπο ώστε να προβλέπει το φαινόμενο του κορεσμού.
2. Στην περίπτωση του μαγνητικού προβλήματος η σύγκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα θεωρητικά θα μπορούσε να βελτιωθεί αν η σχέση Langevin (Rosenweig 1985) εισαγόταν στο μοντέλο.

## Βιβλιογραφία

1. V.I Arkhipenko, Yu.D Barkov, and V.G. Bashtovoi, "Shape of a drop of a magnetic fluid in a homogeneous magnetic field," *Magnetohydrodynamics*, 14, 373, 1978
2. J.C. Bacri, and D. Salin, "Dynamics of the shape transition of a magnetic ferrofluid drop," *J. Phys. Lett.*, 44, 415, 1983
3. B. Berge, and J. Peseux, "Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting", *Eur. Phys. J. E.*, 3, 159, 2000
4. J. Berthier, "Microdrops and Digital Microfluidics", Norwich, NY: William Andrew Pub., 2008.
5. G. Bisio, G. Rubatto, and P. Schiapparelli, "Magnetic systems depending on three or two variable; thermodynamic analysis and some existing and possible applications" *Energy Conversion & Management*, 40, 1267, 1999
6. A.G. Boudouvis , J.L. Puchalla& L.E. Scriven, "Magnetohydrostatic equilibria of ferrofluid drops in external magnetic fields", *Chem. Eng. Comm.* 67, 129 1988a
7. A.G. Boudouvis, J.L. Puchalla& L.E. Scriven, "Interaction of capillary wetting and fringing magnetic field in ferrofluid systems", *Journal of Colloid and Interface Science* 124, 677, 1988b
8. A.G. Boudouvis , J.L. Puchalla & L.E. Scriven, "Shape instabilities of captive ferrofluid drops in magnetic field: Routes to labyrinthine pattern formation", *Journal of Colloid and interface Science* 124, 288, 1988c
9. J.Y. Chen, A. Kutana, C.P. Collier, and K.P. Giapis, "Electrowetting in carbon nanotubes", *Science*, 310, 1480, 2005

10. S.K. Cho, H.J. Moon, and C.J. Kim, "Creating, transporting, cutting, and merging liquid droplets by electrowetting-based actuation for digital microfluidic circuits", *J. Microelectromech. Syst.*, 12, 70, 2003
11. M.D. Cowley, and R.E. Rosensweig, "The interfacial instability of a ferromagnetic fluid" *J. Fluid Mech.*, 30, 671, 1967
12. J.P. Dailey, J.P. Phillips, C.Li, and J.S. Riffle, "Synthesis of silicone magnetic fluid for use in eye surgery" *J. Magn. Magn. Mater.*, 194, 140, 1999
13. A.J. Dickstein, S. Erramilli, R.E. Goldstein, D.P. Jackson, and S. Langer, "Labyrinthine pattern formation in magnetic fluids" *Science*, 261, 1012, 1993
14. A. Dolatabadi, K. Mohseni, and A. Arzpeyma, "Behaviour of a moving droplet under electrowetting actuation: Numerical simulation": *Canadian Soc Chemical Engineering*, 84, 17, 2006
15. A. I. Drygiannakis, A. G. Papathanasiou, A. G. Boudouvis, "On the connection between dielectric breakdown strength, trapping of charge, and contact angle saturation in electrowetting", *Langmuir* 25, 147, 2009
16. A. I. Drygiannakis, A. G. Papathanasiou, A. G. Boudouvis, "Manipulating equilibrium shape transitions of microdroplets in electrowetting – A computational analysis", *Microelectronic Engineering*, 8, 1356, 2009b
17. F. Elias, C. Flament, and J.C. Bacri, "Motion of an asymmetric ferrofluid drop under a homogeneous time-dependent magnetic field" *Phys. Rev. Lett.*, 77, 643, 1996
18. "Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics": Springer US, 2008
19. R.B. Fair, "Digital microfluidics: is a true lab-on-a-chip possible?", *Microfluid. Nanofluid.*, 3, 245, 2007

20. R. Hiergeist, W. Andra, N. Buske, R. Hergt, I. Hilgner, U. Richter and W. Kaiser, "Application of magnetic ferrofluids for hyperthermia" *J. Magn. Magn. Mater.*, 201, 420, 1999
21. J. Israelachvili, "INTERFACIAL FORCES": Amer Inst Physics, 2961, 1992
22. Y.S Kim, K. Nakatsuka, T. Fujita and T. Atarashi, "Application of hydrophilic magnetic fluid to oil seal" *J. Magn. Magn. Mater.*, 201, 361, 1999
23. A. Klingner, S. Herminghaus, and F. Mugele, "Self-excited oscillatory dynamics of capillary bridges in electric fields", *Appl. Phys. Lett.*, 82, 4187, 2003
24. A. Klingner, J. Buehrle, and F. Mugele, "Capillary bridges in electric fields", *Langmuir*, 20, 6770, 2004
25. S. Kuiper, and B.H.W. Hendriks, "Variable-focus liquid lens for miniature cameras", *Appl. Phys. Lett.*, 85, 1128, 2004
26. A.S Lubbe, C. Bergemann, J. Brock, and D.G McClure, "Physiological aspects in magnetic drug-targeting" *J. Magn. Magn. Mater.*, 194, 149, 1999
27. P. Mach, T. Krupenkin, S. Yang, and J.A. Rogers, "Dynamic tuning of optical waveguides with electrowetting pumps and recirculating fluid channels", *Appl. Phys. Lett.*, 81, 202, 2002
28. A. Nethe, T. Schoppe, and H. Stahlmann, "Ferrofluid driven actuator for a left ventricular assist device" *J. Magn. Magn. Mater.*, 201, 423, 1999
29. F. Mugele, and J.C. Baret, "Electrowetting: From basics to applications", *J. Phys.-Condes. Matter*, 17, 705, 2005
30. F. Mugele, J.C. Baret, and D. Steinhauser, "Microfluidic mixing through electrowetting-induced droplet oscillations", *Appl. Phys. Lett.*, 88, 3, 2006



31. P.Y. Paik, K. Chakrabarty, and V.K. Pamula, "A digital-microfluidic approach to chip cooling", *IEEE Des. Test Comput.*, 25, 372, 2008
32. M.G. Pollack, R.B. Fair, and A.D. Shenderov, "Electrowetting-based actuation of liquid droplets for microfluidic applications", *Appl. Phys. Lett.*, 77, 1725, 2000
33. M.G. Pollack, A.D. Shenderov, and R.B. Fair, "Electrowetting-based actuation of droplets for integrated microfluidics", *Lab Chip*, 2, 96, 2002
34. A.G. Papathanasiou and A.G. Boudouvis, "Three-dimensional instabilities of ferromagnetic liquid bridges." *Computational Mechanics* 21, 403, 1998
35. A.G. Papathanasiou and A.G. Boudouvis, "Manifestation of the connection between dielectric breakdown strength and contact angle saturation in electrowetting.", *Applied Physics Letters* 86, 16, 2005
36. A.G. Papathanasiou, A.T. Papaioannou and A.G. Boudouvis "Illuminating the connection between contact angle saturation and dielectric breakdown in electrowetting through leakage current measurements" , *Journal of Applied Physics* 103, 034901, 2008
37. J.R Reitz, F.J Milford, and R.W Christy, "Foundations of Electromagnetic Theory" Third edition, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1979
38. L.T. Romankiw, M.M.G. Slusarczuk, and D.A. Thompson, "Liquid magnetic bubbles" *IEEE Transactions on Magnetics*, 11, 25, 1975
39. R.E. Rosensweig, "Ferrohydrodynamics," Cambridge University Press, New York 1985.
40. F.Saeki, J.Baum, H. Moon, J.Y.Yoon, C.J.Kim and R.L.Garrell "Electrowetting on dielectrics: Reducing voltage requirements for microfluidics", *Polym. Mater. Sci. Eng. Phys. Lett.* 85, 12, 2001

41. O. Sandre, L. Gorre-Talini, A. Ajdari, J. Prost, and P. Silberzan, "Moving droplets on asymmetrically structured surfaces", *Phys. Rev. E* Vol. 60, 2964, 1999
42. R. Shamaï, D. Andelman, B. Berge, and R. Hayes, "Water, electricity, and between ... On electrowetting and its applications", *Soft Matter.*, 4, 38, 2008
43. M. Vallet, M. Vallade, and B. Berge, "Limiting phenomena for the spreading of water on polymer films by electrowetting", *Eur. Phys. J. B.*, 11, 583, 1999
44. H.J.J Verheijen, and M.W.J. Prins, "Reversible electrowetting and trapping of charge: Model and experiments", *Langmuir*, 15, 6616, 1999
45. Z.L. Wan, H.J. Zeng, and A. Feinerman, "Area-tunable micromirror based on electrowetting actuation of liquid-metal droplets", *Appl. Phys. Lett.*, 89, 3, 2006
46. U.C. Yi, and C.J. Kim, "Soft printing of droplets pre-metered by electrowetting": *Sensors and Actuators A: Physical*, 114, 347, 2004
47. Α. Ι. Δρυγιαννάκης, "Διερεύνηση φαινομένων αλληλεπίδρασης τριχοειδών και ηλεκτροστατικών δυνάμεων στη μικρο-ρευστομηχανική", Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009
48. Ι.Γ. Λιγνός, Α.Ι. Δρυγιαννάκης., Α.Γ. Παπαθανασίου, Α.Γ. Μπουντουβής, "Ηλεκτροδιαβροχή σε Υγρές Μικρογέφυρες. Διερεύνηση Ασταθειών σχηματισμού και διαμελισμού τους", Στα πρακτικά του 7ου Πανελληνίου Επιστημονικού Συνεδρίου Χημικής Μηχανικής, Πάτρα, 3 - 5 Ιουνίου 2009
49. Ι.Γ. Λιγνός "Πειραματική διερεύνηση φαινομένων ηλεκτροδιαβροχής", Διπλωματική εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009

50. Α.Γ. Παπαθανασίου, “Μηχανισμοί μαγνητο-υδροστατικών ασταθειών: πειραματική και υπολογιστική ανάλυση”, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000
51. Jun Wu, Jun Xia, Wei Lei, Bao-ping Wang "Fabrication of superhydrophobic surfaces with double-scale roughness" Materials Letters 64, 1251, 2010
52. <http://www.liquavista.com>