

ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΔΙΑΒΡΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΥΠΕΡΥΔΡΟΦΟΒΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Ν. Χαμάκος¹, Μ. Καβουσανάκης¹, Κ. Έλληνας², Α. Τσερέπη², Α. Γ. Παπαθανασίου^{1*}

¹Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

²Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας, ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, Αθήνα, Ελλάδα

(*[pathan@chemeng.ntua.gr](mailto:athanas@chemeng.ntua.gr))

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάμε την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου στη διαβρεκτικότητα στερεών επιφανειών (φαινόμενο ηλεκτροδιαβροχής). Συγκεκριμένα, η εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης μεταξύ μιας αγώγιμης σταγόνας νερού και ενός ηλεκτροδίου κάτω από την διηλεκτρική επιφάνεια που επικάθεται η σταγόνα, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διαβρεκτικότητας του στερεού. Στην περίπτωση που η επιφάνεια είναι υπερυδρόφοβη (υδρόφοβο υλικό με επιφανειακή τραχύτητα), η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου οδηγεί σε μία πολύ μεγάλη μεταβολή στη φαινόμενη διαβρεκτικότητα. Παρά τη χρησιμότητα της, η ηλεκτροδιαβροχή έχει περιορισμένη απόδοση σε τέτοιου είδους τραχιές επιφάνειες καθώς η μεταβολή της διαβρεκτικότητας είναι μη-αντιστρεπτή: η σταγόνα δεν επιστρέφει στην αρχική της κατάσταση με το μηδενισμό (αναίρεση) της τάσης. Στην εργασία αυτή παρουσιάζουμε για πρώτη φορά το πώς μπορεί να πετύχει κάποιος αντιστρεπτή ηλεκτροδιαβροχή, μέσω της επίτευξης κατάλληλης κατανομής των ηλεκτρικών δυνάμεων στην επιφάνεια του υγρού. Αναδεικνύεται ο ρόλος του πάχους της διηλεκτρικής επίστρωσης στο σχήμα της επιφάνειας υγρών ειδικά στα σημεία επαφής με στερεές επιφάνειες. Δείχνεται και υπολογιστικά αλλά και πειραματικά η δυνατότητα αντιστρεπτής μεταβολής της διαβρεκτικότητας όταν η διηλεκτρική επίστρωση είναι κατάλληλου πάχους.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πολύτιμες διαβρεκτικές ιδιότητες επιφανειών πολλών έμβιων οργανισμών ή φυτών οφείλονται κυρίως στη μικρο- ή νανο-δομή της επιφάνειας και όχι στο υλικό τους^[1]. Ενδεικτικά αναφέρουμε το φύλλο του λωτού (*Nelumbo nucifera*) που έχει τη δυνατότητα αυτοκαθαρισμού με το νερό της βροχής και το σκαθάρι της ερήμου (*Stenocara gracilipes*) που συλλέγει πόσιμο νερό αξιοποιώντας την πρωινή ομίχλη. Ο σχεδιασμός τεχνητών μικρο- και νανο-δομημένων επιφανειών, με πρότυπο τις φυσικές μορφολογίες, είναι πολύ σημαντικός σε επίπεδο τεχνολογικών εφαρμογών όπως, μεταξύ άλλων, για τη μείωση της αντίστασης τριβής του νερού στο κύτος πλοίων, για τη διαχείριση υγρών σε μικρο-συσκευές αναλύσεων (*lab-on-a-chip*)^[2]. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυναμική μεταβολή των διαβρεκτικών ιδιοτήτων των παραπάνω στερεών με τη χρήση ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης μεταξύ μιας αγώγιμης σταγόνας νερού και ενός ηλεκτροδίου κάτω από την διηλεκτρική επιφάνεια που επικάθεται η σταγόνα, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διαβρεκτικότητας του στερεού (φαινόμενο ηλεκτροδιαβροχής)^[3]. Η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου σε μία υπερυδρόφοβη επιφάνεια (υδρόφοβο υλικό με επιφανειακή τραχύτητα) οδηγεί σε μία πολύ μεγάλη μεταβολή στη φαινόμενη διαβρεκτικότητα (π.χ. από μία αρχική γωνία επαφής, που σχηματίζεται στο σημείο τομής του υγρού με το στερεό, $\sim 160^\circ$ μπορεί να οδηγήσει σε μία τελική γωνία $\sim 60^\circ$). Το παραπάνω φαινόμενο, παρά τη μεγάλη χρησιμότητα του για τη μετακίνηση σταγόνων σε μικρο-συσκευές αναλύσεων (*lab-on-a-chip*), είναι μη-αντιστρεπτό, δηλαδή η σταγόνα δεν επιστρέφει στην αρχική της κατάσταση με το μηδενισμό (αναίρεση) της τάσης.

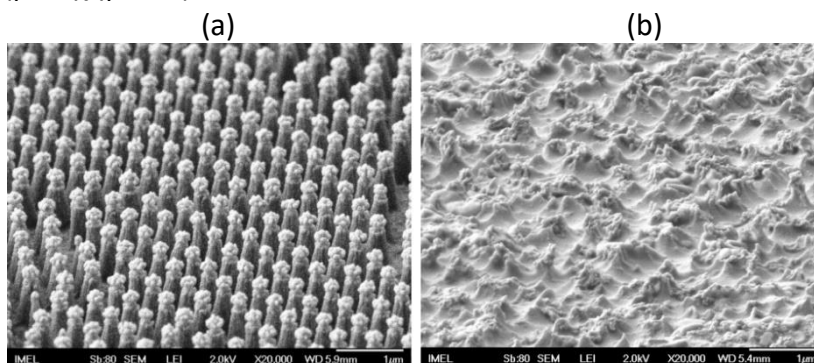
Στην εργασία αυτή παρουσιάζουμε για πρώτη φορά τη μεθοδολογία πραγματοποίησης αντιστρεπτής ηλεκτροδιαβροχής σε υπερυδρόφοβες επιφάνειες. Συγκεκριμένα

πραγματοποιώντας πειράματα και αντίστοιχους υπολογισμούς καταλήξαμε στο ότι το πάχος της διηλεκτρικής επίστρωσης είναι η κρίσιμη παράμετρος για την επίτευξη αντιστρεπτής ηλεκτροδιαβροχής. Η προσομοίωση του φαινομένου της ηλεκτροδιαβροχής σε τραχιές στερεές επιφάνειες πραγματοποιείται με μια προσφάτως προταθείσα μεθοδολογία συνεχούς μέσου. Συγκεκριμένα, οι εξισώσεις που επιλύουμε διέπουν τόσο τη διεπιφάνεια αέρα/ υγρού όσο και τη διεπιφάνεια υγρού/ στερεού ενσωματώνοντας τις αλληλεπιδράσεις υγρού/ στερεού μέσω ενός όρου πίεσης (πίεση Derjaguin ή Disjoining), καθιστώντας μή αναγκαία τη εφαρμογή της συνοριακής συνθήκης της γωνίας επαφής Young. Η παραπάνω προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δυναμικές προσομοιώσεις, τροποποιώντας ουσιαστικά τις εξισώσεις ροής (Navier-Stokes) στο υδροδυναμικό μοντέλο ^[4,5].

Στην παρούσα εργασία αρχικά παρουσιάζουμε τη πειραματική διαδικασία καθώς και τη μαθηματική μοντελοποίηση του φαινομένου της ηλεκτροδιαβροχής. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν πειράματα, καθώς και αντίστοιχους υπολογισμούς, ηλεκτροδιαβροχής σε υπερυδροφώβες επιφάνειες με διαφορετικά πάχη διηλεκτρικού, καταλήγοντας ότι η αντιστρεπτή μεταβολή της διαβρεκτικότητας είναι εφικτή σε περιπτώσεις μεγάλου πάχους του διηλεκτρικού.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Τα πειράματα ηλεκτροδιαβροχής πραγματοποιήθηκαν σε μικρο-δομημένες επιφάνειες που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο της κολλοειδούς λιθογραφίας ^[6]. Συγκεκριμένα κατασκευάστηκαν επιφάνειες φωτοευαίσθητου πολυμερούς (SU8) σε διάφορα πάχη: 1.4, 12, 57 και 75 μm (βλ. Σχήμα 1a) καθώς και τυχαία δομημένες επιφάνειες πολυμερούς COP (cyclo-olefin polymer) με πάχος 188 μm (βλ. Σχήμα 1b).



Σχήμα 1. Εικόνες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscopy – SEM) των επιφανειών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ηλεκτροδιαβροχής. (α) Μικρο-δομημένη επιφάνεια φωτοευαίσθητου πολυμερούς (SU8) σε διάφορα πάχη: 1.4, 12, 57 και 75 μm. (β) Τυχαία δομημένο πολυμερές COP (cyclo-olefin polymer) με πάχος 188 μm.

Η υψηλή ηλεκτρική τάση εφαρμόζεται με τη χρήση ενισχυτή τάσης EMCO 4200, ενώ για την αποτύπωση του σχήματος των σταγόνων χρησιμοποιείται η κάμερα DFK 41BF02 της 'Imaging Source'.

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Για την μελέτη των δυναμικών φαινομένων διαβροχής επιλύονται οι εξισώσεις Navier-Stokes στο εσωτερικό της σταγόνας ^[4,5] (βλ. Σχήμα 2):

$$\rho(\partial_t \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}, \quad (1a)$$

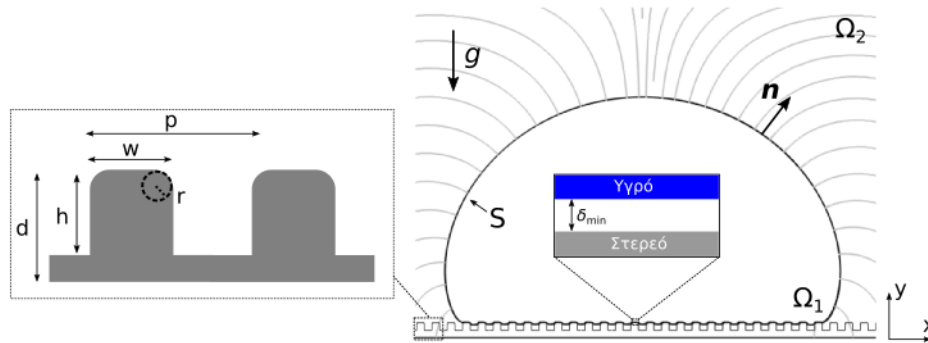
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1b)$$

όπου \mathbf{u} , p η ταχύτητα και η πίεση του υγρού, αντίστοιχα. Το ιξώδες και η πυκνότητα του υγρού συμβολίζονται με μ και ρ , αντίστοιχα. Παράλληλα με τις εξισώσεις Navier-Stokes επιλύονται και οι εξισώσεις Winslow για την κίνηση του υπολογιστικού πλέγματος:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = 0 \quad (2a)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} = 0 \quad (2b)$$

όπου ξ, η : συντεταγμένες που ακολουθούν την κίνηση του πλέγματος.



Σχήμα 2. Σχηματική απεικόνιση του υπολογιστικού προβλήματος για την προσομοίωση του φαινομένου της ηλεκτροδιαβροχής. Παρουσιάζονται επίσης οι λεπτομέρειες της γεωμετρίας του στερεού.

Για τις διαφορικές εξισώσεις Navier-Stokes, σαν συνοριακή συνθήκη εφαρμόζεται ένα τοπικό ισοζύγιο δυνάμεων στην ενιαία διεπιφάνεια της σταγόνας, που συσχετίζει τις τάσεις που ασκούνται στην διεπιφάνεια με την τοπική μεταβολή της καμπυλότητας^[4, 5]:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_1 = \mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_2 + \gamma_{LV} (\nabla_s \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}, \quad (3)$$

όπου \mathbf{n} το κάθετο διάνυσμα στην διεπιφάνεια υγρού/ αέρα, \mathbf{T}_1 ο τανυστής τάσεων της σταγόνας, \mathbf{T}_2 ο τανυστής τάσεων του περιβάλλοντος μέσου, γ_{LV} η επιφανειακή τάση και ∇_s η τοπική κλίση της επιφάνειας. Ο τανυστής τάσεων \mathbf{T}_2 μπορεί να γραφτεί ως:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_2 = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} + (\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{t}) \mathbf{t}, \quad (4)$$

όπου $(\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{n})$ η κάθετη στην διεπιφάνεια συνιστώσα των τάσεων και $(\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{t})$ η εφαπτόμενη στην διεπιφάνεια συνιστώσα των τάσεων. Η κάθετη στην διεπιφάνεια συνιστώσα περιλαμβάνει τις αλληλεπιδράσεις στερεού/υγρού που εκφράζονται μέσω ενός όρου πίεσης Derjaguin (ή Disjoining) p^{LS} :

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{n} = -p_A \mathbf{I} + p^{LS}. \quad (5)$$

Ο όρος της πίεσης Derjaguin περιέχει τις ελκτικές και απωστικές αλληλεπιδράσεις που οφείλονται σε δυνάμεις Van der Waals καθώς και τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις λόγω της επικάλυψης ηλεκτρικών διπλοστοιβάδων^[7]. Η αδιάστατη πίεση Derjaguin έχει τη μορφή^[4, 5]:

$$\frac{R_0}{\gamma_{LV}} p^{LS}(\delta) = w^{LS} \left[\left(\frac{\sigma}{\delta + \varepsilon} \right)^{C_1} - \left(\frac{\sigma}{\delta + \varepsilon} \right)^{C_2} \right], \quad (6)$$

όπου R_0 είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος (εδώ η αρχική ακτίνα της σταγόνας). Οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης που εκφράζονται μέσω της πίεσης p^{LS} είναι συνάρτηση της απόστασης δ του στερεού από το υγρό. Στην περίπτωση λείων στερεών επιφανειών η απόσταση δ ορίζεται ως η κατακόρυφη απόσταση του υγρού από το στερεό. Όμως, στην περίπτωση στερεής επιφάνειας με τραχύτητα, ο ορισμός της απόστασης δ δεν είναι τόσο προφανής. Για αυτό το λόγο ως απόσταση δ ορίζεται η Ευκλείδεια απόσταση του σημείου του υγρού από το στερεό, όπως αυτή προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης Eikonal^[4, 5]. Η παράμετρος w^{LS} είναι μια αδιάστατη παράμετρος

που καθορίζει τις διαβρεκτικές ιδιότητες του στερεού (υδρόφιλη ή υδρόφοβη επιφάνεια) και αντικαθιστά πλέον την γωνία Young. Οι παράμετροι C_1 , C_2 ελέγχουν το εύρος των δυνάμεων αλληλεπίδρασης υγρού/ στερεού και οι παράμετροι σ , ε ελέγχουν την ελάχιστη απόσταση μεταξύ υγρού και στερεού. Οι τιμές των παραμέτρων στους συγκεκριμένους υπολογισμούς είναι: $C_1 = 12$, $C_2 = 10$, $\sigma = 9 \times 10^{-3}$, $\varepsilon = 8 \times 10^{-3}$.

Σαν εφαπτομενική συνιστώσα των τάσεων (βλ. Εξ. 4), νοείται μια συνθήκη ολίσθησης Navier (Navier slip) του υγρού στο στερεό, ουσιαστικά προσομοιάζοντας μια τριβή μεταξύ του υγρού και στερεού. Η τριβή αυτή είναι ανάλογη της ταχύτητας του υγρού στη στερεή επιφάνεια και δίνεται από την εξίσωση ^[6]:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{t} = \beta_{eff} (\mathbf{t} \cdot \mathbf{u}), \quad (7)$$

με β_{eff} τον συντελεστή ολίσθησης:

$$\beta_{eff} = \beta_{sl} \cdot \frac{\mu_L}{R_0} \left(1 - \tanh \left[5 \left(\frac{z}{\delta_{min}} - 1 \right) \right] \right), \quad (8)$$

όπου η παράμετρος β_{sl} ποσοτικοποιεί την τριβή του υγρού στο στερεό. Η τριβή αυτή είναι «ενεργοποιημένη» όταν το υγρό είναι πολύ κοντά στο στερεό ενώ δεν ισχύει για την υπόλοιπη διεπιφάνεια. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση της συνάρτησης (tanh). Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να προσομοιάσουμε μια τραχύτητα νανο-κλίμακας στο επίπεδο στερεό, χωρίς να είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός της μικροδομής της επιφάνειας.

Η επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου ενσωματώνεται στην κάθετη στην διεπιφάνεια συνιστώσα των τάσεων μέσω ενός όρου ηλεκτροστατικής πίεσης, p_{el} . Συγκεκριμένα $p_{el} = \varepsilon_0 E^2 / 2$ όπως ε_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού (8.854×10^{-12} F/m) και E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου υπολογίζεται με την επίλυση των εξισώσεων Gauss τόσο στο περιβάλλον μέσο της σταγόνας όσο και στο διηλεκτρικό (βλ. Σχήμα 2):

$$\nabla \cdot (\varepsilon_r \nabla \varphi) = 0, \quad (9)$$

όπου φ είναι η τιμή του ηλεκτρικού δυναμικού και ε_r η ηλεκτρική διαπερατότητα του διηλεκτρικού. Οι συνοριακές συνθήκες για το ηλεκτρικό δυναμικό είναι $\varphi = V$ (η εφαρμοζόμενη τάση) για την διεπιφάνεια της σταγόνας (S στο Σχήμα 2) και $\varphi = 0$ στο κάτω μέρος του διηλεκτρικού. Ως μέτρο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ορίζεται επίσης ο αδιάστατος

αριθμός ηλεκτροδιαβροχής, $\eta = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r V^2}{2d\gamma_{LV}}$, ο οποίος εκφράζει τον λόγο ηλεκτροστατικών και

τριχοειδών δυνάμεων ^[3]. Στα παραπάνω το d εκφράζει το πάχος του διηλεκτρικού.

Επιπρόσθετα, για τις εξισώσεις Winslow (Εξ. 2), η κινηματική συνοριακή συνθήκη στην διεπιφάνεια είναι:

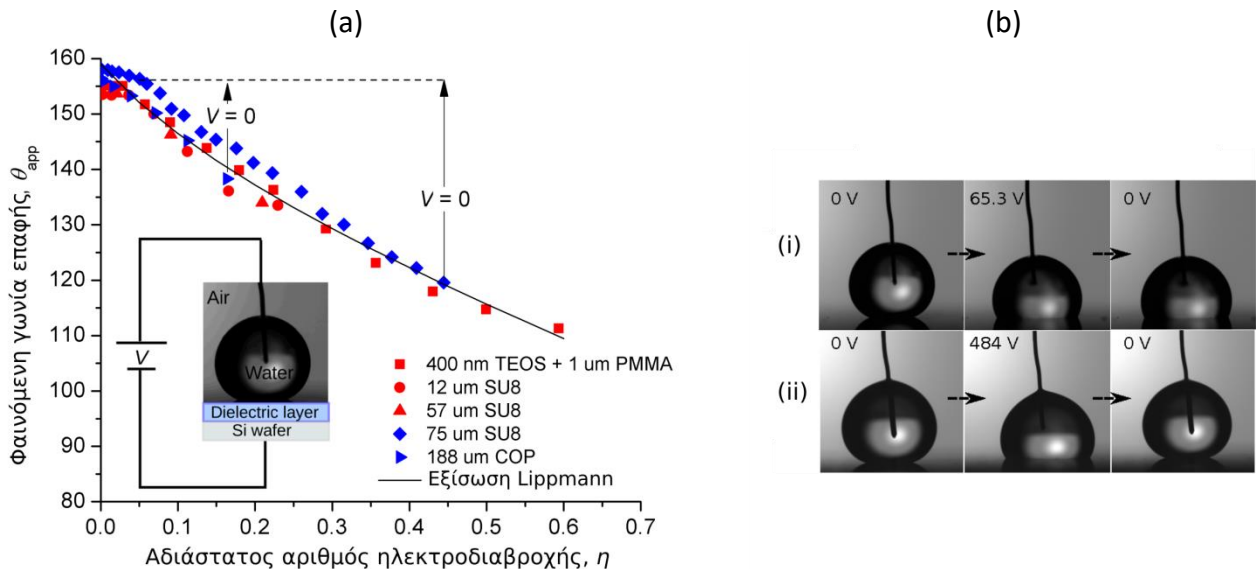
$$(\mathbf{u}_{mesh} - \mathbf{u}) \cdot \mathbf{n} = 0, \quad (10)$$

με \mathbf{u}_{mesh} την ταχύτητα του πλέγματος στην διεπιφάνεια και \mathbf{u} την ταχύτητα της διεπιφάνειας. Ακολουθώντας την παραπάνω μεθοδολογία, αποφεύγεται η ανάγκη εφαρμογής οποιασδήποτε συνοριακής συνθήκης για την γωνία επαφής επιτρέποντας την προσομοίωση του φαινομένου της ηλεκτροδιαβροχής σε τραχιές επιφάνειες οποιασδήποτε γεωμετρίας. Το παραπάνω πρόβλημα επιλύεται στο εμπορικό λογισμικό COMSOL Multiphysics®.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στα αποτελέσματα παρουσιάζουμε πειράματα ηλεκτροδιαβροχής χρησιμοποιώντας διάφορα στερεά υποστρώματα. Συγκεκριμένα στο Σχήμα 3α παρουσιάζεται η φαινόμενη (μακροσκοπική)

γωνία επαφής των σταγόνων συναρτήσει του αδιάστατου αριθμού ηλεκτροδιαβροχής, η . Τα πειράματα πραγματοποιούνται ως εξής: Μία συνεχής (DC) τάση, V , εφαρμόζεται μεταξύ της σταγόνας και του κάτω μέρους του στερεού υποστρώματος. Στη συνέχεια η τάση αυξάνεται, μετράται η γωνία επαφής, και η τάση αναιρείται. Στο επόμενο βήμα η αύξηση της τάσης είναι μεγαλύτερη και ακολουθείται η ίδια διαδικασία. Τα κόκκινα σημεία στο Σχήμα 3a αντιστοιχούν σε περιπτώσεις όπου η μεταβολή της γωνία επαφής είναι μη-αντιστρεπτή: η σταγόνα δεν επιστρέφει στην αρχική της κατάσταση με την ανίχνευση της τάσης. Τα μπλε σημεία αντιστοιχούν σε αντιστρεπτή μεταβολή της διαβρεκτικότητας. Τα πειράματα αυτά αναδεικνύουν τον ρόλο του πάχους του διηλεκτρικού στην αντιστρεπτή ηλεκτροδιαβροχή, καθώς η αντιστρεπτή μεταβολή της γωνίας επαφής επιτυγχάνεται μόνο για τα διηλεκτρικά με πάχος 75 (SU8) και 188 (COP) μm .

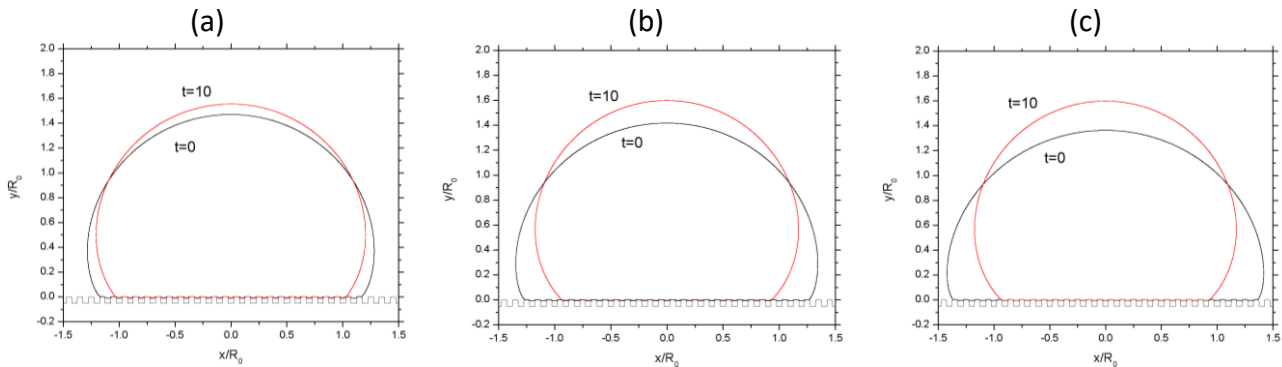


Σχήμα 3. (α) Φαινόμενη γωνία επαφής της σταγόνας συναρτήσει του αδιάστατου αριθμού ηλεκτροδιαβροχής για μικρο-δομημένα διηλεκτρικά διαφορετικού πάχους. Τα διηλεκτρικά μεγάλου πάχους (75 μm SU8 και 188 μm COP) επιτρέπουν την αντιστρεπτή μεταβολή της διαβρεκτικότητας. Παρουσιάζεται επίσης η θεωρητική εξίσωση Lippmann που προβλέπει την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου στη φαινόμενη γωνία επαφής. (b)(i) Μη-αντιστρεπτή μεταβολή διαβρεκτικότητας σε λεπτό διηλεκτρικό (1.4 μm TEOS + PMMA). (b)(ii) Αντιστρεπτή μεταβολή διαβρεκτικότητας σε παχύ διηλεκτρικό (75 μm SU8).

Στο Σχήμα 3b παρουσιάζονται και εικόνες σταγόνων στην περίπτωση (i) μη-αντιστρεπτής, σε διηλεκτρικό πάχους 1.4 μm (TEOS+PMMA), και (ii) αντιστρεπτής μεταβολής της διαβρεκτικότητας, σε διηλεκτρικό πάχους 75 μm (SU8). Σημειώνεται ότι τα δύο αυτά διηλεκτρικά έχουν διαμορφωθεί με τις ίδιες μικρο-δομές (βλ. Σχήμα 1a).

Το φαινόμενο της αντιστρεπτής ηλεκτροδιαβροχής είναι αποτέλεσμα της πιο ομοιόμορφης κατανομής της ηλεκτροστατικής δύναμης στις περιπτώσεις παχίων διηλεκτρικών. Αυτό επιτρέπει την μεγάλη μεταβολή της φαινόμενη διαβρεκτικότητας, χωρίς να προκαλεί υψηλές συγκεντρώσεις ηλεκτροστατικών τάσεων που επιφέρουν αύξηση της τριβής μεταξύ στερεού και υγρού ή ακόμα και τοπική εισχώρηση του υγρού στις μικροδομές του στερεού^[8]. Για να κατανοηθεί καλύτερα ο παραπάνω μηχανισμός, στη συνέχεια πραγματοποιούμε προσομοιώσεις του φαινομένου της ηλεκτροδιαβροχής σε τραχιές επιφάνειες. Χρησιμοποιούμε μία μικρο-δομημένη επιφάνεια με τις εξής γεωμετρικές παραμέτρους $h = 75 \mu\text{m}$, $w = 75 \mu\text{m}$, $p = 150 \mu\text{m}$, $r = 15 \mu\text{m}$ (βλ. Σχήμα 2). Επίσης θεωρούμε ότι η διαπερατότητα του στερεού διηλεκτρικού είναι: $\epsilon_r = 3.8$ ενώ η διαβρεκτικότητα της επιφάνειας αντιστοιχεί σε $\theta_Y = 120^\circ$. Το υγρό που χρησιμοποιούμε είναι ένα μίγμα γλυκερίνης/νερού (85% γλυκερίνη) με πυκνότητα: $\rho = 1275 \text{ kg/m}^3$, ιξώδες: $\mu = 116 \text{ mPa s}$ και επιφανειακή τάση: $\gamma_{LV} = 0.07 \text{ N/m}$. Επίσης η σταγόνα έχει αρχική ακτίνα $R_0 = 1.5 \text{ mm}$.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζουμε αποτελέσματα προσομοιώσεων σε μικρο-δομημένα διηλεκτρικά διαφορετικού πάχους: (4a) $d = 90 \mu\text{m}$, (4b) $d = 150 \mu\text{m}$ και (4c) $d = 300 \mu\text{m}$ (βλ. επίσης Σχήμα 2). Συγκεκριμένα η αρχική κατάσταση ($t/t_c = 0$) αντιστοιχεί σε μία κατάσταση ισορροπίας της σταγόνας όπου έχει εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο (με αδιάστατο αριθμό ηλεκτροδιαβροχής $\eta = 1$). Στη συνέχεια η εφαρμοζόμενη τάση αναιρείται και η σταγόνα φτάνει σε μία νέα κατάσταση ισορροπίας ($t/t_c = 10$). Σημειώνεται ότι το t_c είναι ένας χαρακτηριστικός χρόνος που ορίζεται ως $t_c = (R_0/g)^{1/2}$, όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας.



Σχήμα 4. Αρχική ($t/t_c = 0$) και τελική ($t/t_c = 10$) κατάσταση διαβροχής σταγόνων (με την αναίρεση της τάσης) σε μικρο-δομημένα διηλεκτρικά διαφορετικού πάχους (a) $90 \mu\text{m}$, (b) $150 \mu\text{m}$ και (c) $300 \mu\text{m}$. Παρατηρείται μεγαλύτερη μεταβολή της διαβρεκτικότητας στο παχύτερο διηλεκτρικό (c).

Παρατηρείται ότι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μεταβολή της φαινόμενης διαβρεκτικότητας, και συνεπώς μικρότερη τριβή μεταξύ στερεού και υγρού, καθώς το πάχος του στερεού διηλεκτρικού, d , αυξάνεται (βλ. Σχήμα 4c). Η ελαχιστοποίηση της τριβής, που οφείλεται στην βέλτιστη κατανομή των ηλεκτροστατικών τάσεων λόγω του μεγάλου πάχους του διηλεκτρικού, οδηγεί με μεγιστοποίηση της κινητικότητας της σταγόνας και συνεπώς σε καλύτερη αντιστρεπτότητα της γωνίας επαφής, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα ^[8].

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, στην εργασία αυτή παρουσιάζουμε για πρώτη φορά το πώς μπορεί να επιτευχθεί η αντιστρεπτή ηλεκτροδιαβροχή σε υπερυδρόφοβες επιφάνειες. Τα παραπάνω πειράματα υποστηρίχτηκαν από αντίστοιχους υπολογισμούς ^[4,5]. Το εύρημα της εργασίας, ότι η αναστρεψιμότητα της γωνίας επαφής στην ηλεκτροδιαβροχή σχετίζεται άμεσα με το πάχος του στερεού διηλεκτρικού και όχι με τη ακριβή μορφολογία της επιφάνειας, ανοίγει νέες δυνατότητες για την κατασκευή υπερυδρόφοβων επιφανειών χαμηλού κόστους για χρήση σε καινοτόμες εφαρμογές.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «HYDROPHO-CHEAP: COMMERCIALIZATION OF A NOVEL METHOD FOR FABRICATING CHEAP TAILOR-MADE SUPERHYDROPHOBIC SURFACES» του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου Έρευνας (ERC) (grant agreement No. 755412). Ευχαριστούμε επίσης τον Επικ. Καθ. της Σχολής Χημ. Μηχ. του ΑΠΘ, Γ. Καραπέτσα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Bhushan, B. (2009). *Phil. Trans. R. Soc. A*, 367(1893): 1445-1486.
- [2] Fair, R. (2007). *Microfluid Nanofluidics*, 3(3): 245-281.
- [3] Mugele, F., & Baret, J.-C. (2005). *J. Phys. Condens. Matter*, 17(28): R705.
- [4] Chamakos, N., Kavousanakis, M., Boudouvis, A., Papatthasiou, A. (2016). *Phys. Fluids*, 28(2): 022105.
- [5] Karapetsas, G., Chamakos, N., Papatthasiou, A. (2016). *J. Phys. Condens. Matter*, 28(8): 085101.
- [6] Ellinas, K., Tserepi, A., Gogolides, E. (2011). *Langmuir*, 27 (7): 3960-3969.
- [7] Starov, V., (2010). *Adv. Colloid Interface Sci.*, 161(1): 139-152.
- [8] Papatthasiou, A. (2018). *Curr. Opin. Colloid Interface*. 36: 70-77.