



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων επαφής με τριβή και προσκόλληση βιο-εμπνευσμένων από τη σαύρα Gecko μικροπτερυγίων από PDMS με σφαιρική επιφάνεια SiO₂

Του Φοιτητή

Σκόνδρα-Γιούσιου Δημητρίου

Επιβλέπων

Μαρκόπουλος Άγγελος, Επίκουρος Καθηγητής
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ

In nature, nothing is lacking and nothing is superfluous

Leonardo da Vinci

Look deep into nature and you will understand everything

Albert Einstein

Πρόλογος-Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το γενικότερο θέμα που ασχολείται η παρούσα εργασία είναι η υπολογιστική υλοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία της μηχανικής των επαφών μιας εξαιρετικά ενδιαφέρουσας βιομιμητικής περίπτωσης, όπως είναι η μοναδική προσκολλητική δυνατότητα των πελμάτων της σαύρας Gecko. Είναι γεγονός ότι η φύση αποτελεί και θα αποτελεί μια αστείρευτη πηγή μελέτης και έμπνευσης, που βοηθάει στην προσαρμογή και εξέλιξη του ανθρώπου.

Η παρούσα εργασία ξεκινάει με μια γενική ανάλυση στα σχετικά τριβολογικά φαινόμενα. Παρουσιάζονται οι κλασικές θεωρίες της μηχανικής των επαφών, αναλύεται η έννοια και τα χαρακτηριστικά της προσκόλλησης με έμφαση στη μοριακή προσκόλληση, η έννοια της τριβής πολλαπλής κλίμακας, και στο τέλος γίνεται μια ανασκόπηση βιομιμητικών παραδειγμάτων στην τριβολογία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται λεπτομερώς η περίπτωση της σαύρας Gecko. Αρχικά περιγράφονται τα βασικά μορφολογικά και προσκολλητικά χαρακτηριστικά της. Στη συνέχεια γίνεται ανασκόπηση μοντέλων τριβής, προσκόλλησης και αποκόλλησης και υπολογιστικών μοντέλων, που έχουν αναπτυχθεί για την περιγραφή του φαινομένου. Επίσης πραγματοποιείται μια ανασκόπηση για βιομιμητικά συγκολλητικά που έχουν αναπτυχθεί, και εφαρμογές τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της υπολογιστικής μοντελοποίησης της διάταξης δίσκου-περυγίων. Περιγράφονται η κατασκευή της γεωμετρίας, η επιλογή των υλικών, οι επιλογές των φυσικών παραμέτρων με έμφαση στην μοντελοποίηση της τριβής και της προσκόλλησης. Επιπλέον περιγράφεται η κατασκευή του πλέγματος, καθώς και οι ρυθμίσεις που τέθηκαν για την επίλυση του προβλήματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο μοντέλο που δημιουργήθηκε. Συνοπτικά, μελετήθηκε η επίδραση της καμπυλότητας του δίσκου, της πυκνότητας τοποθέτησης των περυγίων, της κίνησης του δίσκου προς την αντίθετη κατεύθυνση, της αλλαγής του ύψους τοποθέτησης του δίσκου, της αλλαγής του συντελεστή τριβής και της χρήσης υπερελαστικών μοντέλων υλικού.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο, γίνεται μια ανακεφαλαίωση των κύριων ευρημάτων της εργασίας, καθώς και κάποιες προτάσεις για την εξέλιξη των μοντέλων.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας τον κ. Μαρκόπουλο Άγγελο για τη σπάνια δυνατότητα που μου έδωσε να εργαστώ σε ένα αντικείμενο ιδιαίτερου προσωπικού ενδιαφέροντος, που προέκυψε από την σχετική εργασία μου στο μάθημά του Μικρονανοκατεργασίες, και τη γενικότερη βοήθειά του σε κρίσιμα στάδια της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Νίκο Κάρκαλο, για τη συνεχή, ουσιαστική και μεθοδική βοήθεια που μου παρείχε σε όλα τα στάδια δημιουργίας της εργασίας αυτής, η οποία υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωσή της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, την κοπέλα και τους φίλους μου, που μου συμπαράσταθηκαν σε όλα τα χρόνια φοίτησής μου.

Πρόλογος-Ευχαριστίες.....	iii
Περίληψη	ix
Abstract.....	xi
1 Βασικές έννοιες της ξηρής τριβής (dry friction) και της προσκόλλησης (adhesion)	1
1.1 Ορισμός.....	1
1.2 Ιστορικό σημείωμα	1
1.3 Μηχανική των επαφών	1
1.3.1 Η θεωρία του Hertz.....	2
1.3.2 Η θεωρία JKR (Johnson-Kendall-Roberts).....	2
1.3.3 Θεωρία DMT (Derjaguin-Muller-Toporov).....	3
1.3.4 Θεωρία MD (Maugis-Dugdale).....	3
1.4 Προσκόλληση (adhesion).....	4
1.4.1 Ορισμός.....	4
1.4.2 Προσκολλητικοί μηχανισμοί.....	4
1.4.3 Μοριακή προσκόλληση	5
1.4.4 Βασικά χαρακτηριστικά της μοριακής προσκόλλησης.....	6
1.5 Τριβή πολλαπλής κλίμακας.....	8
1.5.1 Μηχανισμοί της ξηρής τριβής.....	9
1.5.2 Η τριβή ως γραμμικό φαινόμενο	11
1.5.3 Η τριβή ως μη γραμμικό φαινόμενο.....	12
1.5.4 Ανομοιογένεια και διάχυση ενέργειας σε διάφορα επίπεδα ιεραρχίας.....	13
1.6 Βιομιμητική στην τριβολογία	14
1.6.1 Συστήματα με μειωμένη τριβή.....	14
1.6.2 Συστήματα με αυξημένη ή μειωμένη προσκόλληση	15
2 Η περίπτωση της σαύρας Γκέκο (Gecko)	17
2.1 Μορφολογικά χαρακτηριστικά.....	17
2.2 Προσκολλητικά χαρακτηριστικά της σαύρας γκέκο	18
2.3 Μοντέλα προσκόλλησης, τριβής και αποκόλλησης	23
2.3.1 Μοντέλα προσκόλλησης	23
2.3.2 Μοντέλα τριβής	28
2.3.3 Μοντέλο αποκόλλησης κολλητικής ταινίας (tape peeling model)	31
2.3.4 Υπολογιστικά μοντέλα προσκόλλησης.....	32
2.4 Συνθετικά συγκολλητικά εμπνευσμένα από τη σαύρα γκέκο	35
2.4.1 Δομές ενός επιπέδου τραχύτητας.....	35
2.4.2 Πολυεπίπεδες ιεραρχικές δομές.....	40
2.4.3 Εφαρμογές των βιομιμητικών συγκολλητικών.....	41
2.5 Μελλοντικές κατευθύνσεις.....	43
3 Υλοποίηση υπολογιστικού μοντέλου δίσκου-βιομιμητικών πτερυγίων στο Comsol.	45
3.1 Το πακέτο λογισμικού Comsol Multiphysics.....	45
3.2 Σχεδιασμός της γεωμετρίας του μοντέλου	45
3.2.1 Σχεδιασμός του μπλοκ και των βιομιμητικών μικρο-πτερυγίων.....	46
3.2.2 Σχεδιασμός του δίσκου.....	47
3.3 Επιλογή υλικών	49
3.4 Ρυθμίσεις φυσικών μοντέλων.....	49
3.4.1 Επιλογή φυσικής	50
3.4.2 Μοντέλο υλικού.....	50
3.4.3 Κινητικοί περιορισμοί.....	52
3.4.4 Μοντελοποίηση συνθηκών επαφής.....	52

3.5	Κατασκευή πλέγματος διακριτοποίησης (meshing)	59
3.6	Ρυθμίσεις επίλυσης.....	60
3.6.1	Ρυθμίσεις για το χρονικό βήμα (time stepping).....	61
3.6.2	Υποκόμβοι του χρονικά εξαρτώμενου επιλύτη.....	62
3.6.3	Λοιπά χαρακτηριστικά σχετικά τη διαδικασία της επίλυσης.....	62
4	Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	65
4.1	Μελέτη της επίδρασης καμπυλότητας δίσκου και πυκνότητας τοποθέτησης πτερυγίων.....	67
4.1.1	Καμπυλότητα ακτίνας $R=200 \mu\text{m}$	68
4.1.2	Καμπυλότητα ακτίνας $R=400 \mu\text{m}$	72
4.1.3	Καμπυλότητα ακτίνας $R=800 \mu\text{m}$	74
4.1.4	Καμπυλότητα ακτίνας $R=1600 \mu\text{m}$	75
4.1.5	Καμπυλότητα ακτίνας $R=3200 \mu\text{m}$	76
4.2	Προσομοίωση με την αντίθετη φορά.....	81
4.3	Επίδραση της κάθετης απόστασης τοποθέτησης του δίσκου.....	83
4.4	Επίδραση του συντελεστή τριβής	84
4.5	Επίδραση υπερελαστικού μοντέλου υλικού.....	88
5	Σύνοψη και μελλοντικές κατευθύνσεις.....	93
	Βιβλιογραφία:	97

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η δημιουργία, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, μοντέλου επαφής με τριβή και προσκόλληση δίσκου από SiO_2 με βιοεμπνευσμένα από τη σαύρα Gecko πτερύγια από PDMS. Στόχος είναι η όσο το δυνατόν ρεαλιστική απόκριση του μοντέλου υπό διάφορες συνθήκες. Για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πακέτο Comsol Multiphysics. Αρχικά κατασκευάστηκε η δισδιάστατη γεωμετρία της διάταξης δίσκου-πτερυγίων, μιμούμενη ιεραρχικές δομές ενός επιπέδου στη μικροκλίμακα, βασισμένη σε πραγματική διάταξη από τη βιβλιογραφία. Το μοντέλο υλικού που χρησιμοποιήθηκε ήταν το γραμμικό ελαστικό. Η μοντελοποίηση της επαφής έγινε με τρόπο που να περιλαμβάνει τις τριβικές και προσκολλητικές συνθήκες κατά την προσομοίωση, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ποινής. Επίσης, οι ρυθμίσεις του επιλύτη τροποποιήθηκαν έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκλιση και επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας μοντελοποίησης, το μοντέλο προσομοιώθηκε για διαφορετικές συνθήκες. Η προσομοίωση έγινε στο πεδίο του χρόνου για σταθερή οριζόντια ταχύτητα του δίσκου. Αρχικά, έγινε μελέτη της επίδρασης της ακτίνας του δίσκου και της πυκνότητας τοποθέτησης πτερυγίων, για 15 ξεχωριστές περιπτώσεις. Στη συνέχεια, εξετάστηκαν επιπλέον περιπτώσεις όπως η αντίθετη κίνηση του δίσκου, διαφορετικά ύψη τοποθέτησής του, περιπτώσεις με διαφορετικό συντελεστή τριβής και χωρίς τη συνθήκη προσκόλλησης. Τέλος, εξετάστηκαν άλλες δυο περιπτώσεις με δυο υπερελαστικά μοντέλα υλικού στα πτερύγια. Τα αποτελέσματα των παραπάνω έδειξαν την αύξηση της συνολικής δύναμης επαφής με την αύξηση της ακτίνας του δίσκου, της πυκνότητας τοποθέτησης πτερυγίων και τη μείωση του ύψους τοποθέτησης του δίσκου, αλλά και δημιουργία ασταθειών στη δύναμη λόγω της προσκόλλησης. Επιπλέον, φάνηκε ανταπόκριση των δυνάμεων σε διαφορετικούς συντελεστές τριβής, και ρεαλιστικότερη προσαρμογή στα υπερελαστικά μοντέλα υλικού.

Abstract

In this diploma thesis, the finite element method was developed for the friction and adhesion attributed contact of a SiO_2 disk with Gecko-mimetic flaps from PDMS. The aim is as far as possible realistic response of the model under various conditions. The Comsol Multiphysics computational package was used for the current modeling. Initially, the 2D geometry of the disk and flaps arrangement was constructed, mimicking one-level hierarchical structures at the micro scale, based on an experimental setup described in bibliography. The linear elastic material model was used. The modeling of the contact was done in a way that includes the frictional and adhesive conditions in the simulation, using the penalty method. Also, the solver settings have been modified to allow convergence and resolution of the non-linear problem.

After completing the modeling process, the model was simulated for different conditions. The simulation was done in the time domain for steady horizontal disk speed. Initially, a study of the effect of the disk radius and the density of the flap positioning was studied for 15 individual cases. Next, the opposite movement of the disk was examined, as well as different mounting heights, cases with different coefficient of friction and an adhesion-free condition were examined. Finally, two other cases with the use of two hyperelastic material models for the flaps were examined. The results of the above showed the increase of the total contact force with the increase of the disc radius, the density of the flap positioning and the decrease of the height of the disk, as well as the creation of force unsteadiness due to adhesion. In addition, the response of forces to different coefficients of friction appeared, and there was a more realistic adaptation to the hyperelastic material models.

1 Βασικές έννοιες της ξηρής τριβής (dry friction) και της προσκόλλησης (adhesion)

1.1 Ορισμός

Η λέξη τριβολογία (tribology) προέρχεται από την αρχαία ελληνική λέξη τρίβος, και ορίζεται ως η επιστήμη και τεχνολογία των αλληλοεπιδρώντων επιφανειών που βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους, και είναι κλάδος της μηχανολογίας και της επιστήμης των υλικών. Οι επιφανειακές αλληλεπιδράσεις σε μια διεπαφή είναι περίπλοκες, και απαιτείται γνώση διαφόρων κλάδων συμπεριλαμβανομένης της φυσικής, χημείας, εφαρμοσμένων μαθηματικών, μηχανικής των στερεών και ρευστών, θερμοδυναμικής, μεταφοράς θερμότητας, μηχανικής των υλικών, ρεολογίας, λίπανσης και σχεδιασμού, απόδοσης και αξιοπιστίας μηχανών.

1.2 Ιστορικό σημείωμα

Είναι γνωστό ότι από την παλαιολιθική εποχή, τρυπάνια και μύλοι αλέσματος είχαν απαίτηση για ύπαρξη υποτυπώδους μορφής ρουλεμάν. Από το 3500 π.Χ., υπάρχουν στοιχεία για ύπαρξη τροχών, που αποδεικνύουν την προσπάθεια των προγόνων μας για μείωση των τριβών στη μεταφορική κίνηση[1]. Ο πρώτος όμως που προσέγγισε επιστημονικά την τριβή ήταν ο αναγεννησιακός μηχανικός-καλλιτέχνης Λεονάρντο ντα Βίντσι (1452-1519), ο οποίος εισήγαγε πρώτος την έννοια του συντελεστή τριβής, ως το πηλίκο της δύναμης τριβής προς τη κάθετη δύναμη, καθώς και το γεγονός ότι για το ίδιο βάρος παραμένει ανεπηρέαστος από την επιφάνεια επαφής, ευρήματα που παρέμειναν ανέκδοτα για εκατοντάδες χρόνια.

Το 1699 ο Γάλλος φυσικός Γουλιέλμος Αμόντονς [2] επανεφεύρε τους νόμους της τριβής, που αργότερα πιστοποιήθηκαν [3] από τον Τσαρλς Ογκουστίν Κουλόμπ (1736-1806), ο οποίος πρόσθεσε ένα τρίτο νόμο, ότι η δύναμη τριβής είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας, όταν η κίνηση έχει ξεκινήσει, καθώς και το διαχωρισμό μεταξύ στατικής και δυναμικής τριβής. Από τη βιομηχανική επανάσταση (1750-1850) και μετά, οι γνώσεις μας στο πεδίο της τριβολογίας έχουν αυξηθεί τρομερά. Το 1969 αναπτύχθηκε για πρώτη φορά η συσκευή επιφανειακών δυνάμεων (surface force apparatus, SFA) [4], ενώ από το 1985 [5] εμφανίστηκαν τα μικροσκόπια ατομικών δυνάμεων (atomic force microscope, AFM) και η παραλλαγή τους για μέτρηση δυνάμεων τριβής (friction force microscope, FFM).

Έτσι, έγινε εφικτή η εμφάνιση του κλάδου της μικρο/νανο-τριβολογίας καθώς και της μοριακής/ατομικής κλίμακας τριβολογίας, αλλά και η κατανόηση διεπιφανειακών φαινομένων στις μακροδομές, παρέχοντας μια γέφυρα μεταξύ επιστήμης και μηχανικής. Τέλος, τα τελευταία χρόνια, η σημαντική πρόοδος των υπολογιστικών και προσομοιωτικών μεθόδων υλοποιημένων σε υπολογιστές, έχει βοηθήσει σημαντικά την έρευνα επάνω στο αντικείμενο.

1.3 Μηχανική των επαφών

Όταν δύο σώματα έρθουν σε επαφή σημειακά ή σε γραμμή, η δράση των θλιπτικών δυνάμεων οδηγεί σε παραμόρφωση. Κατά συνέπεια αλλάζει η περιοχή της πραγματικής

επαφής, έχοντας αντίκτυπο στην τριβή και την προσκόλληση. Οι θεωρίες μηχανικής των επαφών συνδυάζουν τη θεωρία ελαστικότητας, τη μηχανική θραύσης και την επιστήμη των επιφανειών υλοποιημένες στη μηχανική της συνέχειας, αμελώντας όμως λεπτομέρειες ατομικής κλίμακας.

1.3.1 Η θεωρία του Hertz

Το 1882, η επαφή μεταξύ δύο λείων ελαστικών σφαιρικών σωμάτων διερευνήθηκε από τον Hertz που έδειξε ότι το μέγεθος και το σχήμα της ζώνης επαφής σχετίζονται με την ελαστική παραμόρφωση τους, αμελώντας την προσκόλληση. Η κατανομή των τάσεων στη ζώνη επαφής είναι [6]:

$$p(r) = \frac{2E^*}{\pi R} \sqrt{a^2 - r^2} \quad r \leq a \quad (1.1)$$

όπου a είναι η ακτίνα επαφής, R η συνδυασμένη ακτίνα: $1/R=1/R_1+1/R_2$ των δυο ακτινών R_1 και R_2 των σφαιρών, και E^* το συνδυασμένο μέτρο του Young: $1/E^*=(1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2$, όπου E_i και ν_i τα μέτρα του Young και οι λόγοι Poisson για κάθε σφαίρα. Η σχέση που συνδέει την ακτίνα επαφής και την εξωτερική δύναμη P είναι:

$$\alpha^3 = \frac{3PR}{4E^*} \quad (1.2)$$

Δεδομένου εξωτερικού φορτίου P , η σχετική μετατόπιση στο κέντρο της περιοχής επαφής εκφράζεται ως εξής:

$$\delta = \frac{\alpha^2}{R} \quad (1.3)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις, προκύπτει η ελαστική παραμόρφωση του κάθε σώματος. Η θεωρία του Hertz εφαρμόζεται κυρίως σε προβλήματα μακρο-επαφών, καθώς πειραματικές μετρήσεις [7] δείχνουν ότι επαληθεύεται σε σχετικά μεγάλα φορτία, ενώ σε χαμηλά φορτία η επιφάνεια επαφής είναι μεγαλύτερη από αυτή που προβλέπεται από τον Hertz.

1.3.2 Η θεωρία JKR (Johnson-Kendall-Roberts)

Το 1971, ο Johnson[8] χρησιμοποιώντας το κριτήριο ενεργειακής ισορροπίας του Griffith εξέτασε την επαφή μεταξύ δυο ελαστικών σφαιρών λαμβάνοντας υπ' όψιν την διεπιφανειακή έλξη. Το ασκούμενο εξωτερικό φορτίο και η ελκτική δύναμη μεταξύ των επιφανειών των δυο σφαιρών δημιουργούν μια πεπερασμένη ακτίνα επαφής a . Κατά την αποκόλληση των δυο σφαιρών η απώλεια της επιφανειακής ενέργειας είναι:

$$U_s = -\pi a^2 \Delta\gamma \quad (1.4)$$

όπου $\Delta\gamma$ είναι η ενέργεια προσκόλλησης ανά μονάδα επιφάνειας (εξίσωση Duprè): $\Delta\gamma=\gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}$, για τις επιφανειακές ενέργειες της κάθε σφαίρας και της διεπαφής αντίστοιχα. Ισορροπία έχουμε όταν $\frac{dU_T}{da} = 0$, και η σχέση μεταξύ της ακτίνας επαφής και του εξωτερικού φορτίου είναι:

$$\alpha^3 = \frac{R}{K} \left(P + 3\pi R \Delta\gamma + \sqrt{6\pi R P \Delta\gamma + (3\pi R \Delta\gamma)^2} \right) \quad (1.5)$$

όπου $K=4E^*/3$. Για μηδενική τιμή διεπιφανειακής ενέργειας $\Delta\gamma$, η επιφάνεια επαφής είναι αυτή της θεωρίας του Hertz. Σε μηδενικά φορτία η ακτίνα επαφής είναι $\alpha_0^3=6\pi R^2\Delta\gamma/K$. Για τη δύναμη αποχωρισμού των δυο σφαιρών ισχύει:

$$P_{pull-off} = -\frac{3}{2}\pi R \Delta\gamma \quad (1.6)$$

στην οποία η ακτίνα επαφής είναι πεπερασμένη και ίση με

$$a = \left(\frac{9\pi R^2 \Delta\gamma}{8E^*} \right)^{1/3} \quad (1.7)$$

1.3.3 Θεωρία DMT (Derjaguin-Muller-Toporov)

Στο μοντέλο των DMT[9] είναι ένα εναλλακτικό μοντέλο από των JKR, που λαμβάνει υπ' όψιν τις διεπιφανειακές αλληλεπιδράσεις, υποθέτοντας ότι το προφίλ επαφής είναι ίδιο με αυτό του Hertz, αλλά συνυπολογίζει ελκτικές αλληλεπιδράσεις έξω από την επιφάνεια επαφής. Οι εφελκυστικές τάσεις είναι πεπερασμένες στη συνεκτική ζώνη έξω από την επιφάνεια επαφής, αλλά μηδέν εντός αυτής. Η ακτίνα της περιοχής επαφής εκφράζεται εδώ ως:

$$\alpha^3 = \frac{R}{K} (P + 2\pi R \Delta\gamma) \quad (1.8)$$

Όταν το εξωτερικό φορτίο μηδενιστεί, η (πεπερασμένη) ακτίνα επαφής καθώς και η δύναμη αποκόλλησης των δυο σφαιρών είναι αντίστοιχα:

$$\alpha_0^3 = \frac{2\pi R^2 \Delta\gamma}{K} \quad (1.9)$$

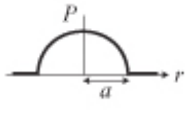



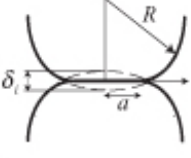
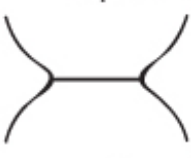

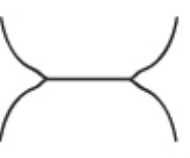

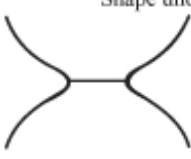
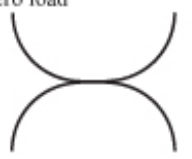
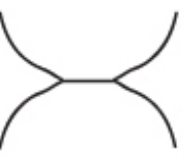
$$P_{pull-off} = -2\pi R \Delta\gamma \quad (1.10)$$

1.3.4 Θεωρία MD (Maugis-Dugdale)

Τα δυο προηγούμενα μοντέλα αναπαριστούν δυο ακραίες περιπτώσεις: το μοντέλο JKR ισχύει για μαλακά ελαστικά υλικά με μεγάλη ακτίνα επαφής και υψηλή επιφανειακή ενέργεια, ενώ αντίθετα το μοντέλο DMT[10] είναι εφαρμόσιμο για σκληρά άκαμπτα στερεά με μικρή ακτίνα και χαμηλή επιφανειακή ενέργεια. Οι Maugis και Dugdale ενοποίησαν αυτές τις διαφορές εισάγοντας την αδιάστατη παράμετρο (ισοδύναμη της παραμέτρου Tabor, μ):

$$\lambda = 2\sigma_0 \left(\frac{9R}{16\pi \Delta\gamma E^2} \right)^{1/3} = 1.16\mu \quad (1.11)$$

Για χαμηλές τιμές της παραμέτρου λ ισχύει η θεωρία των JKR, ενώ για υψηλές αυτή των DMT.

Hertz	JKR	DMT	Maugis
Stress distribution under compressive load			
			
Shape under compressive load			
			
Shape under zero load			
			
Adhesion Force			
0	$3\pi\gamma R$	$4\pi\gamma R$	$(3-4)\pi\gamma R$

Εικόνα 1.1 Τα βασικά χαρακτηριστικά των κλασικών θεωριών της μηχανικής των επαφών [11]

1.4 Προσκόλληση (adhesion)

1.4.1 Ορισμός

Προσκόλληση (adhesion) ονομάζεται η κατάσταση όπου ανόμοια σωματίδια ή επιφάνειες προσκολλώνται μεταξύ τους, έτσι ώστε για την αποκόλληση τους να απαιτείται δύναμη. Έτσι, το έργο της προσκολλητικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των δυο σωμάτων περιγράφεται από την εξίσωση Dupré [12]:

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (1.12)$$

στην οποία ως γ_1 και γ_2 ορίζονται οι ενέργειες των επιφανειών 1 και 2, και γ_{12} η διεπιφανειακή ενέργεια. Η επιφανειακή ενέργεια ορίζεται ως το έργο κατασκευής μιας επιφάνειας ενώ η διεπιφανειακή ενέργεια είναι το έργο αποχωρισμού δυο επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή.

1.4.2 Προσκολλητικοί μηχανισμοί

Οι προσκολλητικοί μηχανισμοί χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

1. Μηχανικοί

Πρόκειται για περιπτώσεις που αξιοποιούν τη μηχανική σύνδεση, όπως για παράδειγμα η κλωστοϋφαντουργία ή οι ταινίες Velcro, που λειτουργούν με άγκιστρο και θηλιά, καθώς και μηχανισμοί όπως οι βεντούζες που αξιοποιούν την ατμοσφαιρική πίεση.

2. Ηλεκτροστατικοί

Αφορά αγώγιμα υλικά, που με τη ροή ρεύματος από το ένα υλικό στο άλλο, δημιουργούνται ηλεκροστατικές ελκτικές δυνάμεις μεταξύ τους.

3. Χημικοί

Εδώ, προϋπόθεση για προσκόλληση είναι η δημιουργία ιοντικών, ομοιοπολικών ή δεσμών υδρογόνου μεταξύ δυο επιφανειών. Πρόκειται για πολύ ισχυρούς χημικούς δεσμούς, οι οποίοι είναι επιδραστικοί σε διαστάσεις κάτω του ενός νανόμετρου.

4. Τριχοειδείς

βασίζονται στη δημιουργία τριχοειδών γεφυρών, όταν ένα ρευστό βρίσκεται ανάμεσα και σε επαφή με δυο στερεά, ο οποίες συγκρατούν τις δυο επιφάνειες που ακουμπούν.

Συνήθως, όταν αναφερόμαστε σε προσκόλληση, εννοούμε ένα πέμπτο μηχανισμό, αυτό της μοριακής προσκόλλησης, που θα αναλυθεί παρακάτω.

1.4.3 Μοριακή προσκόλληση

Μοριακή προσκόλληση είναι δύναμη που υφίστανται σώματα που έρχονται σε επαφή στο μοριακό επίπεδο, με κενά κοντά στις μοριακές διαστάσεις ($\approx 10^{-9}m$). Ελκτικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ ηλεκτρικά ουδέτερων σωματιδίων μπορούν να συμβούν με ποικίλους τρόπους, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αλλά ο πιο καθολικός τρόπος συμβαίνει εξαιτίας των κβαντικών διακυμάνσεων στις ηλεκτρονικές δομές δυο γειτονικών σωματιδίων που δημιουργούν στιγμιαία δίπολα, τα οποία έλκονται.

Αυτού του τύπου αλληλεπιδράσεις ονομάζονται van der Waals, προς τιμήν του γνωστού Ολλανδού φυσικού, και από αυτές προκύπτουν ασθενείς ελκτικές δυνάμεις που συμβαίνουν σε οποιαδήποτε επαφή νανοκλίμακας, με την προϋπόθεση απουσίας ηλεκτροαρνητικότητας. Οι δυνάμεις van der Waals αποτελούνται από ένα ελκτικό και ένα απωστικό κομμάτι. Το απωστικό κομμάτι έγκειται στο γεγονός ότι δεν είναι εφικτή η διείσδυση του ενός μορίου μέσα στο άλλο.

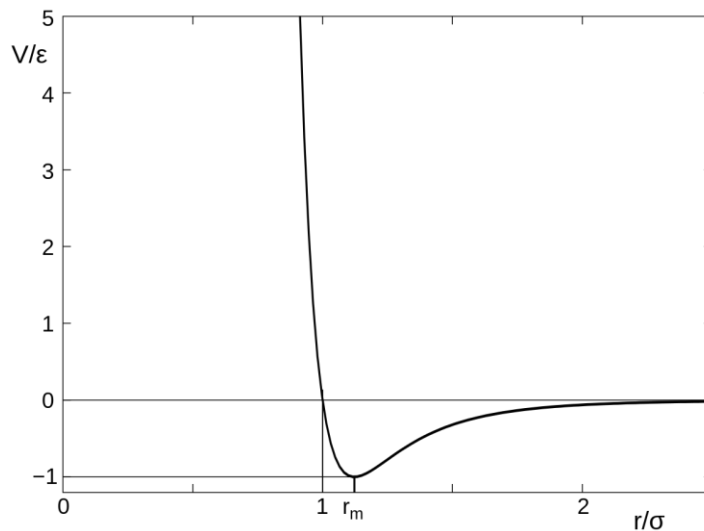
Η δύναμη μεταξύ δυο σφαιρών με ακτίνες R_1 και R_2 , απόστασης μεταξύ των κέντρων τους r και με γνωστή τη σταθερά Hamaker H , είναι [13]:

$$F_{vdw}(r) = -\frac{HR_1R_2}{(R_1 + R_2)6r^2} \quad (1.13)$$

Συχνά χρησιμοποιείται το μαθηματικά απλό μοντέλο του δυναμικού Lennard-Jones[14] για την προσέγγιση των αλληλεπιδράσεων van der Waals, μεταξύ 2 ουδέτερων μορίων:

$$V_{LJ} = 4\varepsilon\left[\left(\frac{\sigma}{r}\right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r}\right)^6\right] \quad (1.14)$$

όπου ε είναι το βάθος του πηγαδιού δυναμικού, σ η πεπερασμένη απόσταση όπου το διαμοριακό δυναμικό είναι μηδέν και r η απόσταση μεταξύ των μορίων.

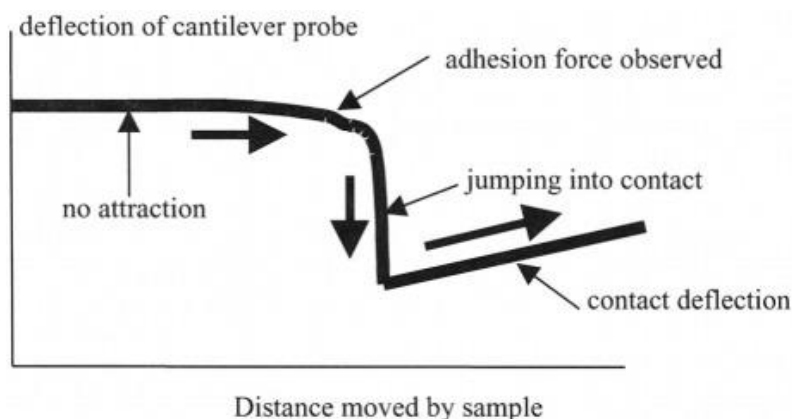


Εικόνα: 1.2-Γραφική παράσταση δυναμικού L-J Το r_m είναι η απόσταση που το δυναμικό γίνεται ελάχιστο.

1.4.4 Βασικά χαρακτηριστικά της μοριακής προσκόλλησης

A) μηχανισμός προσκόλλησης

Όλα τα πειράματα προσκόλλησης, έχουν δείξει ότι ο μηχανισμός της μοριακής προσκόλλησης δεν είναι μια ενιαία διαδικασία, αλλά χωρίζεται σε 3 στάδια (εικόνα 1.3): άλμα προς την επαφή, δημιουργία συγκεκριμένης περιοχής επαφής και τέλος σπάσιμο της επαφής με την επιβολή δύναμης. Το πρώτο στάδιο σχετίζεται με την ένταση της προσκόλλησης: όσο μεγαλύτερη η απόσταση του άλματος, τόσο ισχυρότερη προσκόλληση έχουμε. Το δεύτερο στάδιο σχετίζεται με την κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των ελαστικών δυνάμεων που προσπαθούν να αποχωρίσουν τα άτομα, και αυτών της μοριακής προσκόλλησης, των οποίων η ισορροπία καθορίζει την επιφάνεια επαφής: προφανώς, μεγαλύτερη επιφάνεια σημαίνει ισχυρότερη προσκόλληση. Το τελευταίο στάδιο είναι και το πιο χαρακτηριστικό, καθώς μας δείχνει τη δύναμη που απαιτείται για να υπάρξει πλήρης διαχωρισμός.

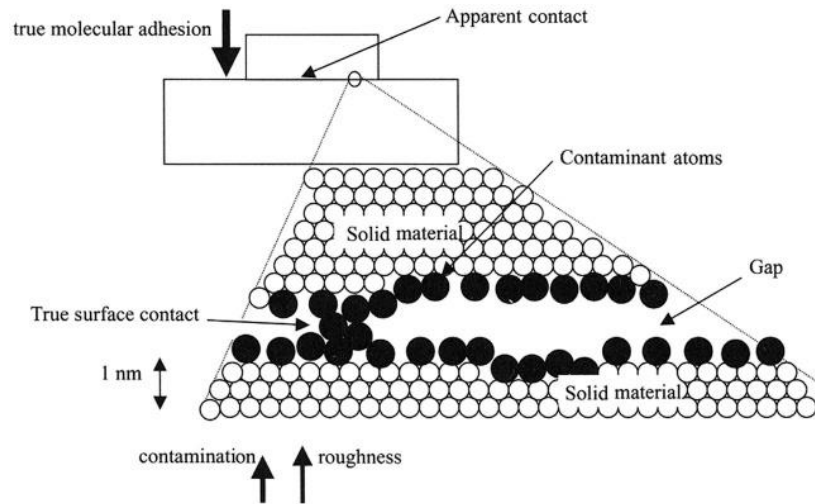


Εικόνα 1.3 Γράφημα που δείχνει την απόκλιση του ανιχνευτή προβόλου καθώς κινείται το δείγμα, σε ένα πείραμα προσκόλλησης με AFM [15].

B) Κλίμακα επιρροής

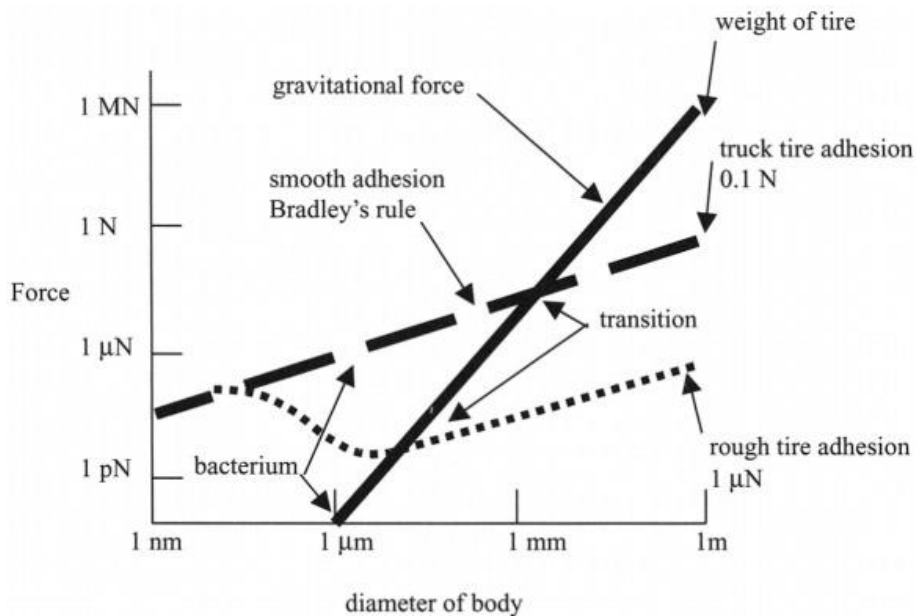
Συνήθως οι μοριακές προσκολλητικές δυνάμεις περνούν απαρατήρητες στις περισσότερες περιπτώσεις του μακρόκοσμου, λόγω φυσικά της πολύ μικρής απόστασης στην οποία

επιδρούν (εικόνα 1.4), καθώς και λόγω του γεγονότος ότι ατομικά λείες επιφάνειες δεν υπάρχουν, άρα η τραχύτητα είναι παρούσα σε κάθε επιφάνεια, δημιουργώντας πάντα μια μορφή υστέρησης είτε κατά την ένωση είτε κατά την αποχώριση. Το ίδιο ισχύει και για κάθε είδους μοριακό ρύπο που είναι αναπόφευκτα παρών στην ατμόσφαιρα (όπως η υγρασία, ή το οξυγόνο), που εμποδίζει τη μοριακή προσκόλληση, καθώς παρεμβάλλεται μεταξύ των επαφών. Αυτοί οι δύο παράγοντες συντελούν στη μείωση της πραγματικής επιφάνειας επαφής μεταξύ δυο σωμάτων καθιστώντας την επίδραση της μοριακής προσκόλλησης σε μακροκλίματα αμελητέα.



Εικόνα 1.4 Σχηματική αναπαράσταση της περιοχής πραγματικής επαφής μεταξύ δυο στερεών [15].

Καθώς όμως η κλίμακα μειώνεται, στις επαφές κυριαρχεί η προσκόλληση, καθώς γίνεται επιδραστικότερη της βαρύτητας, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.5, στην οποία παρουσιάζεται η επίδραση της διάστασης ενός λάστιχου φορτηγού στην δύναμη προσκόλλησης.

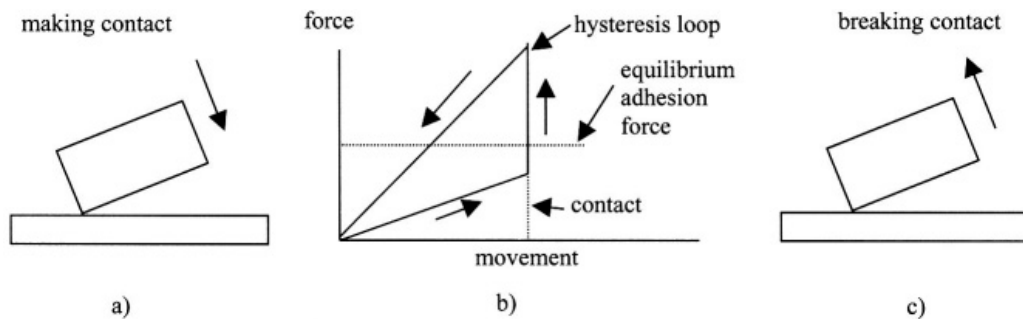


Εικόνα 1.5 Δύναμη προσκόλλησης μεταξύ σωμάτων διαφορετικών διαστάσεων σε σύγκριση με τη βαρυτική [15].

Γ) Υστέρηση

Η υστέρηση είναι πάντοτε παρούσα στη μοριακή προσκόλληση. Συγκεκριμένα, η ενέργεια που απαιτείται για τη μοριακή προσκόλληση δυο επιφανειών είναι πάντα μικρότερη από αυτή

που απαιτείται για τον αποχωρισμό τους. Το φαινόμενο αυτό ενισχύεται από παράγοντες όπως η φόρτιση επιφανειών που δημιουργούν πλαστική ροή στα σημεία επαφής, η συμπύκνωση υδρατμών εγκλωβισμένων σε κενά, και η αυξημένη ελαστικότητα των σωμάτων που έρχονται σε επαφή, αφού όλα τα παραπάνω ουσιαστικά προσφέρουν ενέργεια αυξάνοντας την επιφάνεια επαφής. Στην **εικόνα 1.6** φαίνεται ποιοτικά ο κύκλος της υστέρησης



Εικόνα 1.6 Υστέρηση κατά την προσκολλητική διαδικασία [15]

1.5 Τριβή πολλαπλής κλίμακας

Η ξηρή τριβή μεταξύ στερεών είναι ένα πολύπλοκο και καθολικό φαινόμενο, στο οποίο έχει παρατηρηθεί σε διάφορες κλίμακες: από την ατομική, μέχρι τη μακροκλίμακα. Κάθε διαφορετική διάσταση αντιστοιχεί και σε διαφορετικό επίπεδο ιεραρχίας και κατασκευής (συσκευές, εξαρτήματα, επιφάνειες, τραχύτητα, μόρια), έχοντας διαφορετικό επικρατούντα μηχανισμό, όπως δείχνει η **εικόνα 1.7**. Καθώς στο μεν ατομικό επίπεδο επικρατεί η κβαντική ανάλυση, ενώ στη μακροκλίμακα οι θεωρίες συνέχειας, η ανάλυση στη μεσοκλίμακα αποτελεί ένα χρήσιμο σταυροδρόμι ανάλυσης μεταξύ των δυο πρώτων.

Scale	Objects	Models	Parameters	Hierarchy levels
Atomic scale (<1 nm)	Atoms and molecules	Quantum mechanics	Surface energy states	Molecule, surface
Nanoscale (mesoscale, 1 nm to 1 μm)	Dislocations, defects	Dislocation dynamics	Concentration of dislocations, defects	Surface, asperity
Micro/macroscale (>1 μm)	Continuum body	Continuum mechanics	Stresses, strain	Asperity, component, system

Εικόνα 1.7 Αντικείμενα, θεωρίες, παράμετροι και ιεραρχικά επίπεδα που αντιστοιχούν σε διαφορετικές κλίμακες [16]

Επίσης, η μετάβαση από τη μακροκλίμακα στη μικροκλίμακα διαφοροποιεί σημαντικά τους παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο στα τριβολογικά φαινόμενα όπως φαίνεται στην **εικόνα 1.8**.

Parameter	Macrorange	Microrange
normal force range	> 1 N	< 1 N
ratio of real to geometric contact area	$A_c \ll A_g$	$A_c \leq A_g$
impact of wear	large	small, often negligible
heat generation	large	negligible
impact of surface properties ^a	negligible	dominant

Εικόνα 1.8 Διαφορές μεταξύ μικρο και μακρο τριβής [17]

Η τριβή ολίσθησης είναι μια διαδικασία ενεργειακού διασκορπισμού, θερμοδυναμικά μη αναστρέψιμη, που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εντροπίας του συστήματος στο οποίο λαμβάνει χώρα. Η τριβή δεν πρόκειται για μια ιδιότητα της επιφάνειας, αλλά μια απόκριση του συστήματος, που οδηγεί σε αύξηση των διαταραχών. Δεν αποτελεί θεμελιώδη δύναμη

της φύσης, αλλά μια δύναμη αντίδρασης, αντιστεκόμενη στην κίνηση. Ιδανικά μιλώντας, αν δεν υπήρχε διασκορπισμός ενέργειας στην επαφή των σωμάτων, δεν θα υπήρχε τριβή.

Είναι γνωστό από πειράματα, ότι μετρήσεις του συντελεστή τριβής διαφέρουν όταν πραγματοποιούνται σε διαφορετικές κλίμακες (μικρο-ναοκλίμακα και μακροκλίμακα), κάτι που φανερώνει την επίδραση της κλίμακας στην τριβή [18, 19]. Παρακάτω, θα θεωρήσουμε την τριβή ως ένα ιεραρχικό φαινόμενο, που οι μηχανισμοί διάχυσης ενέργειας προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των δυνάμεων σε δύο ή παραπάνω επίπεδα ιεραρχίας.

1.5.1 Μηχανισμοί της ξηρής τριβής

Η τριβή αποτελεί ένα πολυσύνθετο φαινόμενο, το οποίο δεν μπορεί να απλοποιηθεί σε ένα μηχανισμό, όντας αποτέλεσμα ταυτόχρονης δράσης διαφόρων μηχανισμών σε διαφορετικές κλίμακες δράσης.

A) Προσκολλητική τριβή (adhesive friction) [Εικόνα 1.8 (a)]

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, όταν δυο επιφάνειες έρθουν σε επαφή, προσκολλητικοί δεσμοί λαμβάνουν χώρα σε νανοαποστάσεις, με συνέπεια να απαιτείται δύναμη (τάξης λίγων kJ/mol) για τον αποχωρισμό τους. Καθώς κάθε επιφάνεια έχει τραχύτητα, οι προσκολλητικές δυνάμεις εξαρτώνται από το αριθμό των επαφών των δυο επιφανειών, δηλαδή από την πραγματική επιφάνεια επαφής.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι η νανοτριβή δεν σχετίζεται με την προσκόλληση αυτή καθ' αυτή, αλλά με το μηχανισμό υστέρησής της, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη διαφορά ενέργειας μεταξύ προσκόλλησης και αποκόλλησης, και προκαλείται από την τραχύτητα και την ανομοιογένεια [20, 21].

B) Παραμόρφωση των ανωμαλιών της τραχύτητας [Εικόνα 1.8 (b)]

Στην περίπτωση αυτή, ο μηχανισμός αφορά την πλαστική ή ελαστική παραμόρφωση αλληλοσυνδεδεμένων κορυφών. Σημειώνεται, ότι ακόμα και στην περίπτωση ελαστικής παραμόρφωσης, έχουμε να κάνουμε με υστερητικά φαινόμενα, λόγω απώλειας ενέργειας από ελαστικές κυματώσεις κατά τον κύκλο φόρτισης αποφόρτισης. Συνήθως, η τιμή της τριβής είναι μεγαλύτερη από αυτή της προσκολλητικής και εξαρτάται από την αντοχή διαρροής και τη σκληρότητα. Ο μηχανισμός αυτός εξαρτάται από τη πραγματική επιφάνεια επαφής [22].

Γ) Πλαστική παραμόρφωση [Εικόνα 1.8 (c)]

Το μοντέλο αυτό, βασίζεται στην πλαστική παραμόρφωση. Πρόκειται για επαφή άκαμπτου σώματος με ελαστοπλαστικό. Όσο αυξάνεται το κάθετο φορτίο, η μέγιστη διατμητική τάση και η ζώνη της πλαστικής περιοχής αυξάνεται, και με την επιβολή οριζόντιας δύναμης, αρχίζει η ολίσθηση όταν η πλαστική ζώνη φτάσει στην επιφάνεια [23].

Δ) Θραύση [Εικόνα 1.8 (d)]

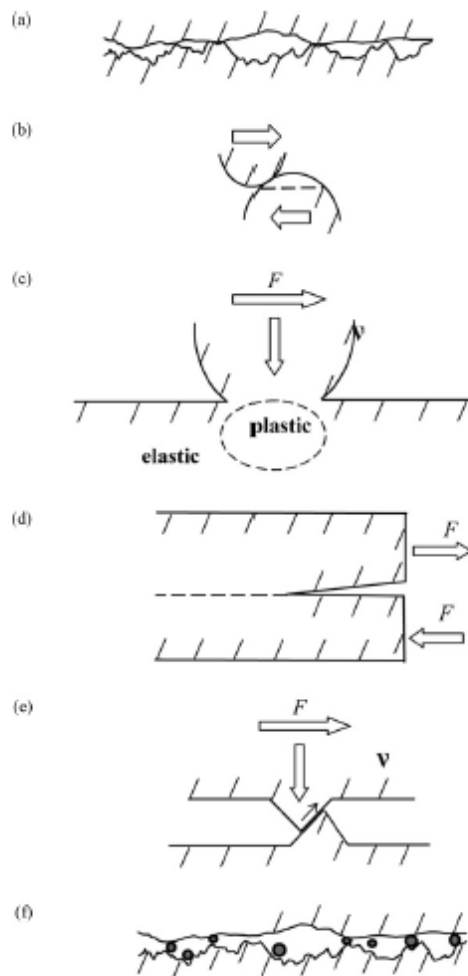
Σε ένα ψαθυρό υλικό, οι κορυφές της τραχύτητας μπορούν να σπάσουν δημιουργώντας υπολείμματα φθοράς. Όταν μια κορυφή ολισθαίνει, οι δεσμοί σπάνε στην πίσω πλευρά, ενώ νέοι δημιουργούνται στην μπροστινή. Αυτό μπορεί να παρουσιαστεί σαν μια αναλογία εξάπλωσης ρωγμής φάσης II (δηλαδή σε διατμητική φόρτιση) στην πίσω πλευρά της κορυφής, και κλεισίματος ρωγμής στην μπροστινή. Τα ολισθαίνοντα θραύσματα της πλευράς ρωγμής, μπορούν να οδηγήσουν σε μικρο-ολισθήσεις ή σχετική τοπική κίνηση μεταξύ των δυο σωμάτων [24].

Ε) Οδοντωτοί μηχανισμοί (ratchet and cobblestone mechanisms) [Εικόνα 1.8 (e)]

Εδώ, η αλληλοσύνδεση μεταξύ κορυφών μπορεί να οδηγήσει στο σκαρφάλωμα της μιας πάνω στην άλλη. Σε αυτή την περίπτωση, για να διατηρηθεί η ολίσθηση, είναι αναγκαία η εφαρμογή μιας οριζόντιας δύναμης ανάλογα με την κλίση της κορυφής. Στην ατομική κλίμακα ισχύει ο ίδιος μηχανισμός, όταν μια κορυφή περνάει από τα μόρια και τις κοιλάδες μεταξύ τους [25].

ΣΤ) Μηχανισμός ' τρίτου σώματος' (third-body mechanism) [Εικόνα 1.8 (f)]

Πρόκειται για σωματίδια που είναι εγκλωβισμένα στην διεπιφάνεια των δυο σωμάτων. Μπορεί να αυξήσουν το συντελεστή τριβής λόγω οργώματος (plowing), ή να τον μειώσουν λόγω κύλισης, δρώντας σαν έδρανα ολίσθησης. Στις περισσότερες εφαρμογές περίπου το 10% των σωματιδίων κυλάει [22], άρα έχουμε αύξηση του συντελεστή τριβής. Στην ατομική κλίμακα, το ρόλο του τρίτου σώματος αναλαμβάνουν προσροφημένα κινητά μόρια που οδηγούν σε σημαντική αύξηση της τριβής [26].



Εικόνα 1.8 Οι βασικοί μηχανισμοί τριβής

1.5.2 Η τριβή ως γραμμικό φαινόμενο

Χωρίς να υπάρχει κάποια φυσική αρχή που να καθιστά αναγκαία την γραμμικότητα της τριβής, εμπειρικές παρατηρήσεις σχετικά με την ξηρή τριβή συνοψίζονται στην παρακάτω πασίγνωστη σχέση:

$$F = \mu W \quad (1.15)$$

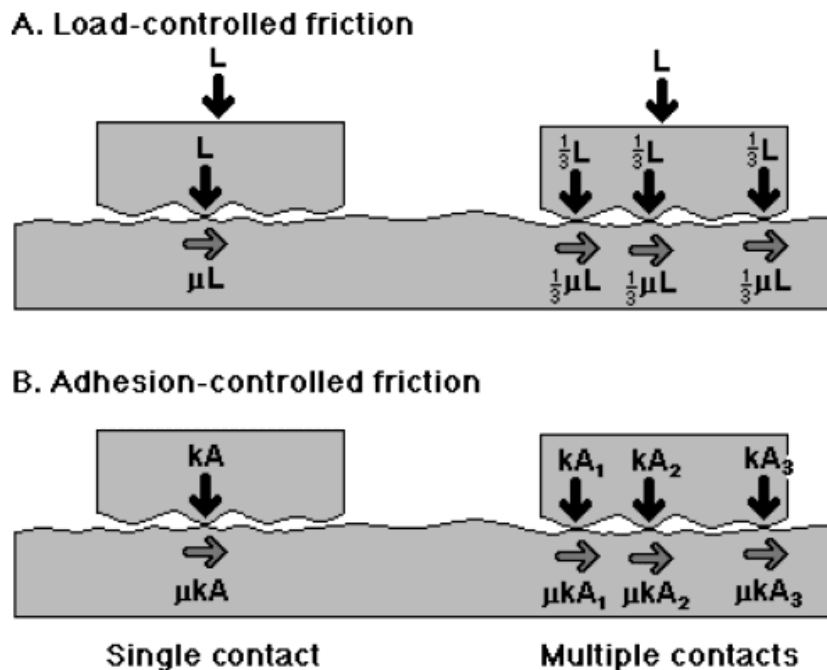
που δείχνει ότι η δύναμη τριβής F είναι γραμμικά ανάλογη με τη κάθετη δύναμη W . Η σχέση αυτή ισχύει για διαστάσεις και φορτία εύρους από τη μακροκλίμακα μέχρι τη νανοκλίμακα.

A) Τριβή ελεγχόμενη από προσκόλληση και από φορτίο (adhesion vs load controlled friction)

Στην περίπτωση της ξηρής τριβής, κατά την επαφή δυο επιφανειών, δυο δυνάμεις επηρεάζουν ουσιαστικά τη συνολική δύναμη τριβής: οι εσωτερικές δυνάμεις στην επαφή λόγω προσκολλητικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μορίων, και οι κάθετες στην επαφή συνιστώσες των εξωτερικών δυνάμεων. Αυτό οδηγεί σε μια επέκταση του γνωστού νόμου Amontons-Coulomb, που πλέον περιέχει και τη συνιστώσα της προσκολλητικής τριβής [27]:

$$F = \mu L + kA \quad (1.16)$$

όπου L το κάθετο φορτίο, μ ο συντελεστής τριβής μεταξύ των επιφανειών, A η πραγματική επιφάνεια επαφής, και k η προσκολλητική διατμητική τάση. Οι δύο αυτοί όροι παρουσιάζονται και στην παρακάτω εικόνα 1.9:



Εικόνα 1.9 Δύναμη τριβής για μια και πολλαπλές επαφές α) Ελεγχόμενη από κάθετη δύναμη β) Ελεγχόμενη από προσκόλληση [27]

Σύμφωνα με μοντέλα στατιστικής [28] και φράκταλ τραχύτητας [29], για ελαστικές και πλαστικές επαφές, υπάρχει γραμμική εξάρτηση της πραγματικής επιφάνειας επαφής με το φορτίο, που καταλήγουν σε γραμμική εξάρτηση της τριβής με το φορτίο.

B) Τριβή ελεγχόμενη από μέση κλίση επιφάνειας

Αυτού του τύπου τα γραμμικά μοντέλα βασίζονται στην υπόθεση ότι κατά τη διάρκεια της ολίσθησης οι κορυφές σκαρφαλώνουν η μία πάνω στην άλλη (οδοντωτός μηχανισμός, ratchet mechanism). Έτσι από ισορροπία δυνάμεων, η οριζόντια δύναμη που χρειάζεται για την έναρξη κίνησης είναι [16]:

$$F = W \tan \theta \quad (1.17)$$

όπου θ η μέση κλίση των κορυφών σε μια επιφάνεια. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση, η $\tan\theta$ ταυτίζεται με το συντελεστή τριβής. Πανομοιότυπη είναι η ανάλυση όταν η κλίμακα είναι ατομικών διαστάσεων (cobblestone mechanism).

1.5.3 Η τριβή ως μη γραμμικό φαινόμενο

A) Κατευθυντικότητα της τριβής

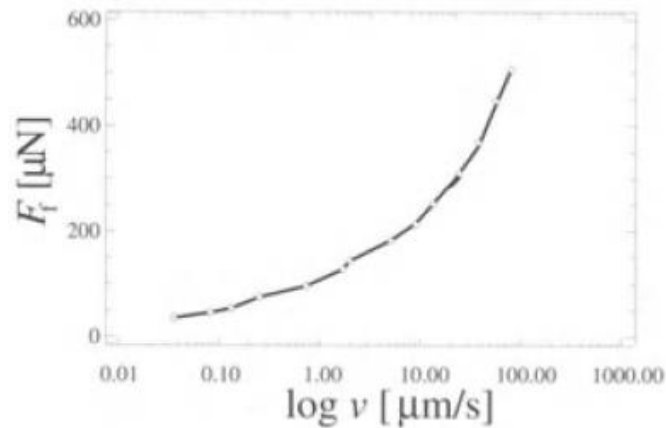
Στην πραγματικότητα, ο νόμος των Amontons-Coulomb είναι εκ φύσεως μη γραμμικός για το διάνυσμα της τριβής [16]:

$$\vec{F} = \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|} \mu |\vec{W}| \quad (1.18)$$

όπου \vec{V} η ταχύτητα ολίσθησης. Ο λόγος $\frac{\vec{V}}{|\vec{V}|}$ είναι μη γραμμικός. Ένα άλλο δείγμα μη γραμμικότητας είναι το γεγονός ότι ο συντελεστής στατικής τριβής είναι συνήθως μεγαλύτερος από αυτόν της δυναμικής. Επίσης, λόγω των τυχαίων κλίσεων και της ασυμμετρίας των τραχυτήτων των επιφανειών, η δύναμη της τριβής επηρεάζεται σύμφωνα με την κατεύθυνση της κίνησης [30]

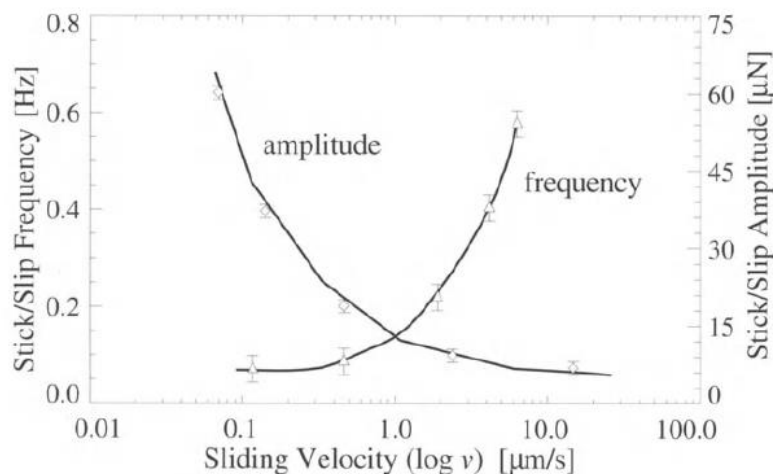
B) Δυναμική αστάθεια της τριβής

Ο Coulomb είχε πρώτος παρατηρήσει ότι υπάρχει μια συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας ολίσθησης και της δύναμης τριβής, η οποία μειώνεται με την αύξηση της πρώτης. Στην περίπτωση της ξηρής τριβής, έχει υποθεθεί ότι λόγω της χρονικής εξάρτησης των ιξωδών παραμορφώσεων της τραχύτητας, όσο μειώνεται ο χρόνος για να παραμορφωθούν, τόσο το σώμα ανυψώνεται με αποτέλεσμα να μειώνεται ο συντελεστής τριβής, λόγω μικρότερης πραγματικής επιφάνειας επαφής [31, 32]. Βέβαια, αυτό μπορεί να προκαλέσει δυναμική αστάθεια, καθώς όσο μειώνεται η δύναμη τριβής δημιουργείται επιτάχυνση, που αυξάνει επιπλέον την ταχύτητα και μειώνει εκ νέου τη δύναμη τριβής κ.ο.κ.. Σε ότι αφορά τη μικροκλίμακα, φαινόμενα πλαστικών παραμορφώσεων είναι αμελητέα σε σχέση με τη συνεισφορά των προσκολλητικών συνδέσεων στην απώλεια ενέργειας και την επακόλουθη αύξηση της δύναμης τριβής, για ταχύτητες μικρότερες των m/sec, όπως δείχνει το διάγραμμα της εικόνας 1.10.



Εικόνα 1.10 Γραφική παράσταση της δύναμης τριβής με το λογάριθμο της ταχύτητας [17]

Μια άλλη γνωστή περίπτωση δυναμικής αστάθειας στην τριβή είναι τα φαινόμενα stick-slip. Πρόκειται για μια μη γραμμική συνεχή μετάβαση μεταξύ της στατικής φάσης (stick), όπου εμφανίζεται η στατική τριβή, και της δυναμικής φάσης (slip), όπου εμφανίζεται η τριβή ολίσθησης. Στη μακρο και μικρο κλίμακα εμφανίζεται λόγω τραχύτητας, ενώ στη νανοκλίμακα λόγω των ενεργειακών λόφων μεταξύ των ατόμων στην επιφάνεια. Πρόκειται για ένα πολύπλοκο φαινόμενο, που η ένταση και η συχνότητα του επηρεάζεται έντονα από την ταχύτητα ολίσθησης (εμφανίζεται για τιμές ταχύτητας πάνω από την κρίσιμη), όπως φαίνεται στην **εικόνα 1.11**:



Εικόνα 1.11 Γραφική παράσταση της έντασης και της συχνότητας stick-slip σε συνάρτηση με το λογάριθμο της ταχύτητας [17]

1.5.4 Ανομοιογένεια και διάχυση ενέργειας σε διάφορα επίπεδα ιεραρχίας.

Στην ιδανική περίπτωση επαφής, δυο σώματα θα αλληλοεπιδρούσαν με άκαμπτες, χημικά ανενεργές, απόλυτα λείες και ομογενείς επιφάνειες. Στην πραγματικότητα όμως, καμία από αυτές τις προϋποθέσεις δεν ισχύει, με συνέπεια διάχυση ενέργειας και ενεργοποίηση μηχανισμών τριβής.

Έτσι:

- Τα σώματα που έρχονται σε επαφή είναι παραμορφώσιμα, συνεπώς υπάρχει απώλεια ενέργειας από πλαστικές παραμορφώσεις, αλλά και από ελαστικές, λόγω υστέρησης, που συμβαίνει λόγω ελαστικών ταλαντώσεων (ακτινοβολία φωνονίων).
- Σε απόλυτα ατομικά λείες επιφάνειες, η επιφανειακή δυναμική ενέργεια είναι πολύ ασθενέστερη από την ελαστική, οδηγώντας σε υπερολισθηρότητα [33]. Όσο η

τραχύτητα αυξάνεται στη μικροκλίμακα, η επίδραση της ελαστικής ενέργειας μειώνεται και δημιουργούνται διακυμάνσεις στην επιφανειακή ενέργεια, με αποτέλεσμα την εμφάνιση τριβής.

- Παρόμοια με την τραχύτητα, η χημική ετερογένεια της επιφάνειας οδηγεί σε διακυμάνσεις της επιφανειακής ενέργειας [34]. Όσο μεγαλώνει η ενέργεια παραμόρφωσης στην περιοχή της ετερογένειας σε σχέση με το επιφανειακό ενεργειακό φράγμα, τόσο μεγαλύτερο ρόλο παίζουν οι ετερογένειες.
- Οι χημικοί δεσμοί στην επιφάνεια δεν είναι αναστρέψιμοι, συνεπώς, το σπάσιμο των δεσμών δημιουργεί απώλεια ενέργειας.

1.6 Βιομιμητική στην τριβολογία

Βιομιμητική είναι η μίμηση βιολογικών αντικειμένων προκειμένου να κατασκευαστούν τεχνητά αντικείμενα με επιθυμητές ιδιότητες [35]. Η λέξη προέρχεται από το βιοφυσικό Otto Schmitt, που, μεταξύ άλλων, προσπάθησε να κατασκευάσει μια συσκευή που θα μιμούταν την ηλεκτρική δραστηριότητα ενός νεύρου. Η ιδέα της κατασκευής τεχνητών συσκευών που θα μιμούνται τη φύση δεν είναι καινούργια. Υπάρχει από το μύθο του Ίκαρου και του Δαίδαλου μέχρι το Λεονάρντο ντα Βίντσι και το σήμερα.

Αν και η έρευνα βιολογικών αντικειμένων από φυσικούς και χημικούς προϋπάρχει της βιομιμητικής, η τελευταία έχει ως απώτερο σκοπό να μιμηθεί τα αντικείμενα αυτά, έχοντας επιθυμητές ιδιότητες. Η ιδέα πίσω από τη βιομιμητική είναι ότι οι τεχνικές λύσεις που παρέχει η φύση, προερχόμενες από την πάροδο χιλιάδων χρόνων εξέλιξης, είναι τουλάχιστον καλύτερες από αυτές που η σύγχρονη τεχνολογία μπορεί να παρέχει. Είναι επίσης σημαντικό να τονισθεί ότι υπάρχει διαφορά στην ομοιότητα της λειτουργικότητας ενός βιολογικού και ενός κατασκευασμένου αντικειμένου (όπως ενός αεροπλάνου και ενός πουλιού, ενός τανκ και μιας χελώνας), με μια αληθινή υιοθέτηση των αρχών και των προσεγγίσεων της φύσης στο σχεδιασμό μιας τεχνητής συσκευής.

Οι βιομιμητικές εφαρμογές καλύπτουν μεγάλο φάσμα πεδίων της μηχανικής, όπως η τεχνητή νοημοσύνη και νευρωνικά δίκτυα, εμπνευσμένα από τον ανθρώπινο εγκέφαλο, κεραμικά εμπνευσμένα από τα θαλάσσια κελύφη, η προσπάθεια κατασκευής αυτοοργανωμένων συσκευών μοριακής κλίμακας εμπνευσμένες από το DNA και άλλα βιοκύτταρα, κ.ο.κ..

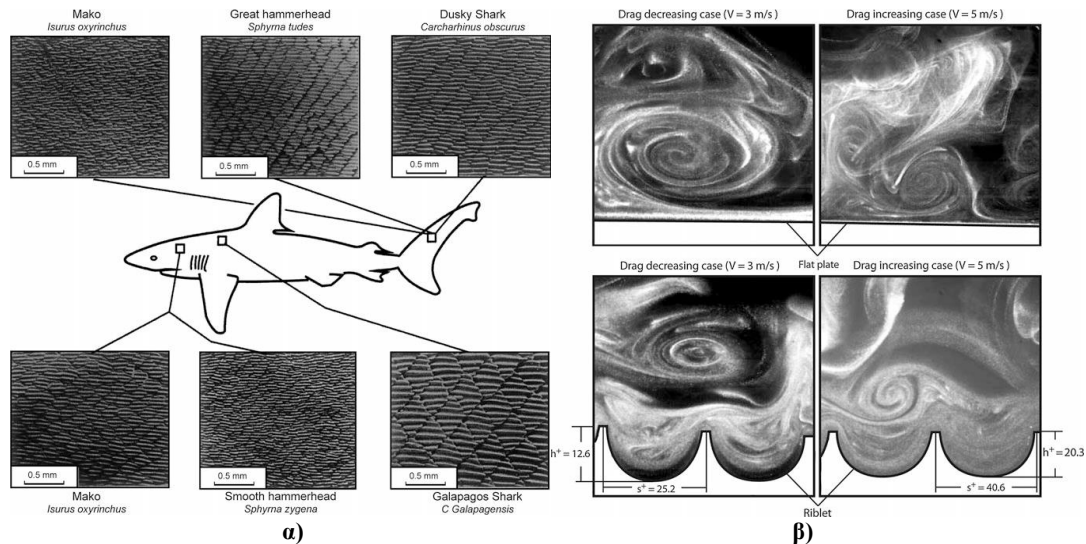
Στο κομμάτι των βιομιμητικών επιφανειών υπάρχουν το πόδι της σαύρας Gecko, που παρέχει πολύ υψηλή και προσαρμοζόμενη προσκόλληση, το φύλλο του λωτού, που είναι εξαιρετικά υδρόφοβο και αυτοκαθαριζόμενο και άλλα πολλά που θα αναφερθούν παρακάτω. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, στις περισσότερες από αυτές τις επιφάνειες υπάρχει ο κοινός παράγοντας της ιεραρχικής τραχύτητας, που ποικίλλει από νανόμετρα μέχρι χιλιοστά.

Οι ιεραρχικές δομές είναι εξαιρετικής σημασίας για τις βιομιμητικές εφαρμογές. Η έννοια της ιεραρχίας είναι διαφορετική από αυτή της κλίμακας, υπό την έννοια ότι η πρώτη περιλαμβάνει μια πολύπλοκη δομή και οργάνωση. Οι ιεραρχικές επιφάνειες είναι δομημένες από στοιχεία διαφορετικών χαρακτηριστικών μηκών οργανωμένες με συγκεκριμένο τρόπο, που οδηγεί σε συγκεκριμένη λειτουργικότητα.

1.6.1 Συστήματα με μειωμένη τριβή

Η φύση έχει δημιουργήσει τρόπους για να μειώσει την αντίσταση στην κίνηση μέσα σε ρευστά, όπως είναι φανερό από την αποτελεσματική κίνηση των ψαριών, των δελφινιών και

των καρχαριών. Το δέρμα των καρχαριών είναι καλυμμένο από ένα ιδιαίτερο τύπο λεπιών (εικόνα 1.12α), που ονομάζονται πλακοειδή και σχηματίζουν εξογκώματα σχήματος V, από το ίδιο υλικό με τα δόντια τους. Λόγω των μικρών ραχών που ευθυγραμμίζονται με τη διεύθυνση της τοπικής ροής και ελέγχουν καλύτερα τους στροβιλισμούς από θαλάσσια ρεύματα (εικόνα 1.12β), επιτυγχάνοντας μια σημαντική μείωση της οπισθέλκουσας σε συνθήκες τυρβώδους ροής. Επίσης, οι ράχες ανυψώνουν τους στροβίλους πάνω από την επιφάνεια, αποτρέποντας ένα μεγάλο κομμάτι της επιφάνειας να έρθει σε επαφή με ροές υψηλής ταχύτητας. Με τους δυο αυτούς μηχανισμούς επιτυγχάνεται αποδοτικότερη κατανομή της ταχύτητας στην επιφάνεια με αποτέλεσμα να μειώνονται οι διατμητικές τάσεις.



Εικόνα 1.12 α) μοτίβα στο δέρμα διαφόρων ειδών καρχαρία [36] β) Τυρβώδης ροή σε τομή λείας και πτυχωμένης πλάκας [37]

Διάφορες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας των ραχών. Μελέτες έχουν δείξει ότι μπορεί να επιτευχθεί μείωση της οπισθέλκουσας έως και 9.9% [38]. Εμπορικές εφαρμογές αποτελούν στολές διαγωνισμών κολύμβησης [Speedo FastSkin], και πειραματικές εφαρμογές σε αεροπλάνα και θαλάσσια σκάφη.

Άλλα βιολογικά παραδείγματα συστημάτων μειωμένης τριβής είναι οι αρθρικοί χόνδροι, με συντελεστή τριβής 0.0026 [39] ή οι συνδετικοί ιστοί των μυών, μειώνουν την τριβή κατά 96% [40].

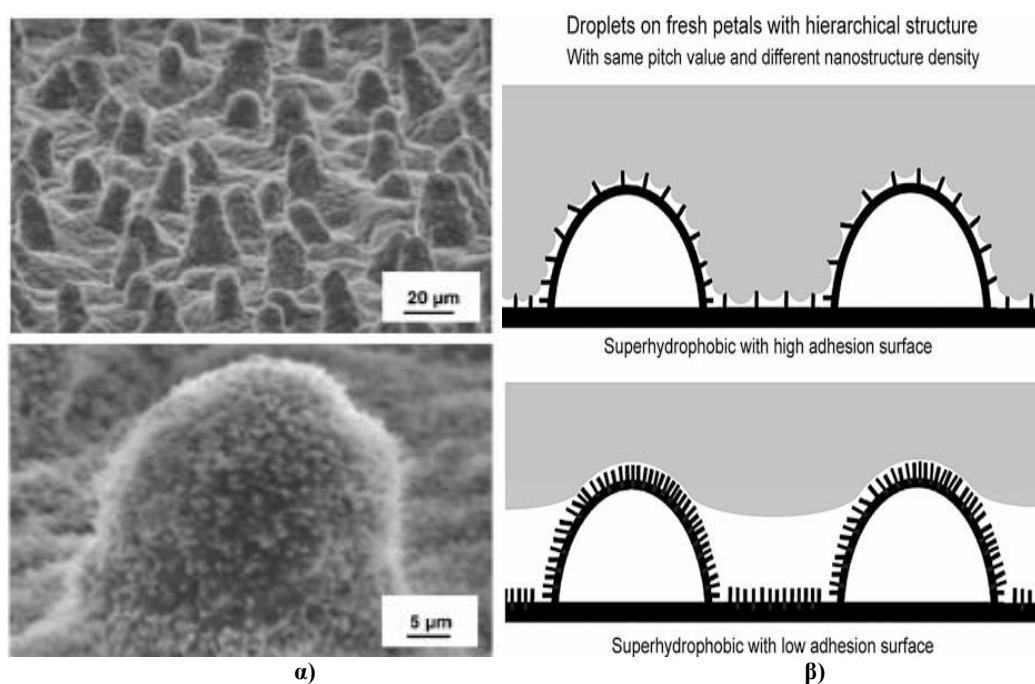
1.6.2 Συστήματα με αυξημένη ή μειωμένη προσκόλληση

Σε ότι αφορά την αυξημένη προσκόλληση στη φύση, χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα κύτταρα [41], που χρησιμοποιούν όλα τα είδη των διαμοριακών δεσμών, τα βακτήρια χρησιμοποιούν εξωπολυσακχαρίτες [42, 43], διαφόρων ειδών μαλάκια και ο αυστραλιανός βάτραχος που χρησιμοποιούν πρωτεϊνικές εκκρίσεις [44]. Φυσικά το χαρακτηριστικότερο παράδειγμα είναι αυτό της σαύρας Gecko που θα αναλυθεί εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο.

Αντίστροφα με πριν, υπάρχουν συστήματα στη φύση για μειωμένη προσκόλληση. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το φαινόμενο του λωτού. Το φύλλο του λωτού είναι μια φυσική, ιεραρχικής τραχύτητας επιφάνεια (με θηλώδη επιδερμικά κύτταρα, καλυμμένα με κήρο), που είναι φύσει υδρόφοβη (με γωνία επαφής νερού 160°) και αυτοκαθαριζόμενη, λόγω αυτής της ιδιομορφίας στην τραχύτητα [45]. Αντίστοιχη δομή έχουν και τα

ροδοπέταλα, με τη διαφορά ότι υπάρχει μεγάλη υστέρηση στη γωνία επαφής του νερού, και μπορεί να παρουσιάζουν μικρή ή μεγάλη προσκόλληση, αναλόγως το είδος (εικόνα 1.13β).

Ένα άλλο παράδειγμα, είναι αυτό της γερίδας, ενός εντόμου που έχει τη δυνατότητα να περπατάει στο νερό, χωρίς να βρέχεται και να βουλιάζει. Αυτό συμβαίνει λόγω της ιεραρχικής δομής των ποδιών της, τα οποία είναι καλυμμένα από μεγάλο αριθμό τριχών υπό κλίση με νανοαυλακώσεις [46]. Από το φαινόμενο του λωτού, έχουν δημιουργηθεί αρκετά προϊόντα που εκμεταλλεύονται τις παραπάνω ιδιότητες [47] όπως αυτο-καθαριζόμενες επιφάνειες, αντικολλητικές επιφάνειες για μικρο/νανοηλεκτρονικά συστήματα (MEMS/NEMS) και οδηγούμενη κίνηση σταγόνων με εναλλαγή υδρόφοβων και υδρόφιλων επιφανειών σε μικρο/νανοροϊκές εφαρμογές.



Εικόνα 1.13 α) Μεγεθυμένη εικόνα της επιφάνειας του φύλλου του λωτού [16] β) σχηματική αναπαράσταση προσκολλητικής και μη-προσκολλητικής επιφάνειας ροδοπέταλων [48]

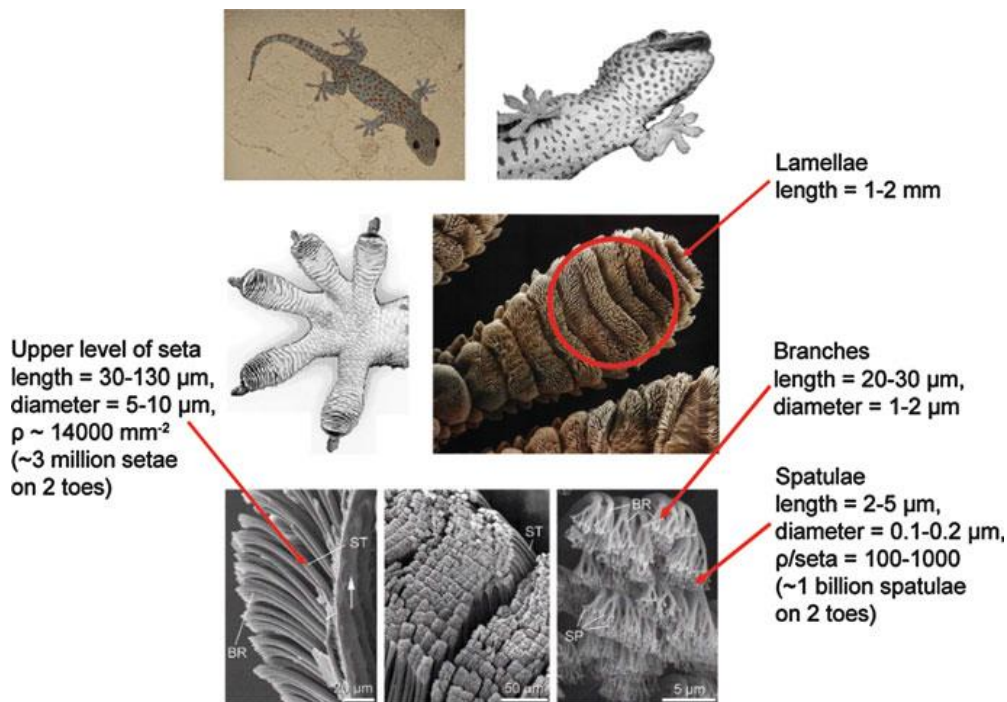
2 Η περίπτωση της σαύρας Γκέκο (Gecko)

Οι πατούσες διάφορων ζώων συμπεριλαμβανομένων διαφόρων εντόμων και σαυρών έχουν τη δυνατότητα να προσαρτώνται και να αποσπώνται σε μια ποικιλία επιφανειών, καθώς και να μετακινούνται σε κάθετους τοίχους ή ακόμα και σε ταβάνια. Η βιολογική εξέλιξη διαμέσου μιας μεγάλης χρονικής περιόδου των ειδών αυτών έχει οδηγήσει στην βελτιστοποίηση τέτοιων συστημάτων προσάρτησης των άκρων τους. Αυτή η δυναμική δυνατότητα προσάρτησης αναφέρεται ως αναστρεπτή ή έξυπνη προσκόλληση [49]. Ανάμεσα στα είδη με αυτή τη δυνατότητα (αράχνες, μύγες, σκαθάκια), η σαύρα γκέκο επιδεικνύει το μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω του μεγάλου της βάρους καθώς και λόγω του ότι κατέχει την πιο ευέλικτη και αποτελεσματική προσκόλληση που είναι γνωστή στη φύση.

Παρ' ότι εδώ και 2,500 χρόνια η δυνατότητα αυτή είχε παρατηρηθεί πρώτα από τον Αριστοτέλη (στο 'περί ζώων κινήσεως'), μόλις στο τέλος του 19^{ου} αιώνα έγινε γνωστή η γενική δομή των ακροδαχτύλων της γκέκο. Με την ανακάλυψη του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου στα μέσα της δεκαετίας του 1950, έγινε δυνατή η αποκάλυψη της περίπλοκης ιεραρχικής μορφολογίας που καλύπτει το δέρμα των δαχτύλων της σαύρας γκέκο. Υπάρχει ακόμα μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον στην περαιτέρω μελέτη των ποδιών της γκέκο προκειμένου την παραγωγή μικρο-/νανοεπιφανειών ικανών να αναπαράγουν τις προσκολλητικές δυνάμεις που παράγουν οι σαύρες αυτές. Από τα περίπου 1,000 είδη γκέκο που υπάρχουν, το πιο πολύ μελετημένο είδος είναι το Tokay gecko (Gekko gecko), το δεύτερο μεγαλύτερο σε μέγεθος από όλα, μήκους 0.3m και βάρους 0.3kg περίπου.

2.1 Μορφολογικά χαρακτηριστικά

Οι εξαιρετικές προσκολλητικές δυνατότητες της σαύρας γκέκο οφείλονται στην ιεραρχικού τύπου μορφολογία του δέρματος στην κάτω πλευρά των ακροδαχτύλων. Η δομή ξεκινάει με λεπτές μαλακές λωρίδες (lamellae) μήκους 1-2mm, που συμπιέζονται εύκολα επιτρέποντας επαφή με τραχιές επιφάνειες. Από αυτές, εκτείνονται μικρές καμπυλωτές τρίχες (setae) μήκους 30-130μm, διαμέτρου 5-10μm πυκνότητας 14,000/mm², και είναι συντεθειμένες από β-κερατίνη και σε μικρότερο βαθμό από α-κερατίνη. Στην άκρη κάθε τριχιδίου διακλαδίζονται περίπου 100-1000 ινίδια με σπατουλοειδείς απολήξεις (spatulae), μήκους 2-5μm και διαμέτρου 0.1-0.2μm και πλάτους απόληξης 0.2-0.3μm, που αποτελούν και τις τελικές απολήξεις επαφής με την επιφάνεια. Επίσης, η συνολική επιφάνεια μιας πατούσας είναι 110mm² και ο συνολικός αριθμός των απολήξεων της είναι της τάξης του ενός δισεκατομμυρίου [50, 51].



Εικόνα 2.1 Συγκεντρωμένα μορφολογικά χαρακτηριστικά της σαύρας Gekko Gecko [50-52]

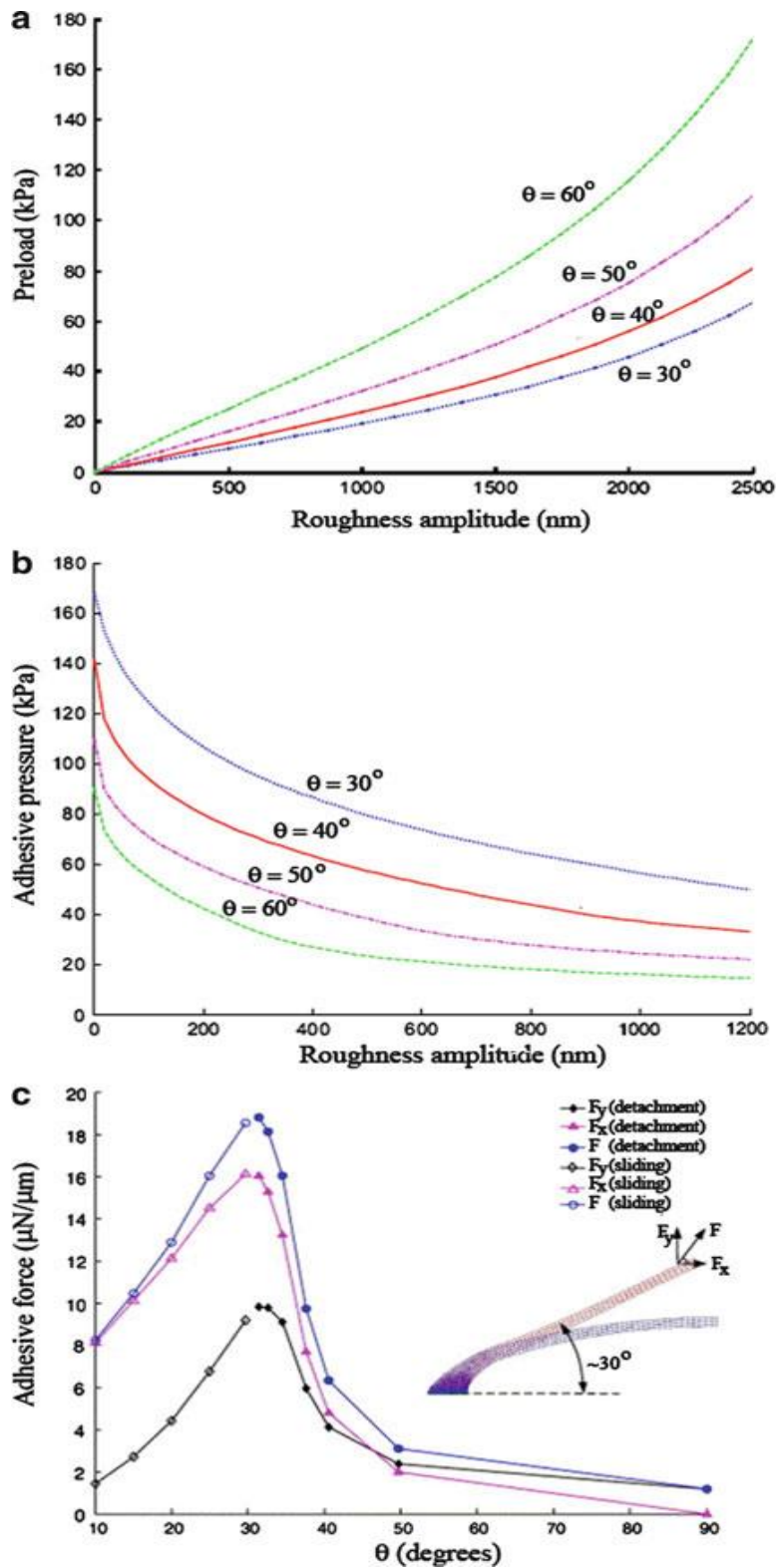
2.2 Προσκολλητικά χαρακτηριστικά της σαύρας γκέκο

A) Ανισότροπη προσάρτηση και υψηλός συντελεστής προσκόλλησης

Σε μετρήσεις των δυνάμεων μιας ίνας (seta) που πραγματοποιήθηκαν [52], φάνηκε ότι η γωνία του άξονα της ίνας ήταν μεγάλης σημασίας στο να επιτευχθεί προσκολλητικός δεσμός. Μια μικρή προφόρτιση σε συνδυασμό με μια μικρή πλευρική μετατόπιση, με προσανατολισμό που ορίζει η δυναμική της κίνησης της σαύρας, φαίνεται να αυξάνει 100 φορές τη δύναμη τριβής σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε από την κίνηση στην αντίθετη κατεύθυνση, κάτι που δείχνει την ανισότροπη φύση του μηχανισμού προσάρτησης. Επίσης, ο συντελεστής προσκόλλησης, που ορίζεται ως το πηλίκο της δύναμης προσκόλλησης προς την προφόρτιση, παίρνει τιμές από 8-16 [53]. Επιπλέον, αν και οι περίπου 6,5 εκατομμύρια ίνες μπορούν θεωρητικά να παράγουν 1300 N διατμητικής δύναμης, οι μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί [54] δείχνουν μόλις 20 N, δηλαδή το 0.04%, που αποτελεί ένα μεγάλο συντελεστή ασφάλειας.

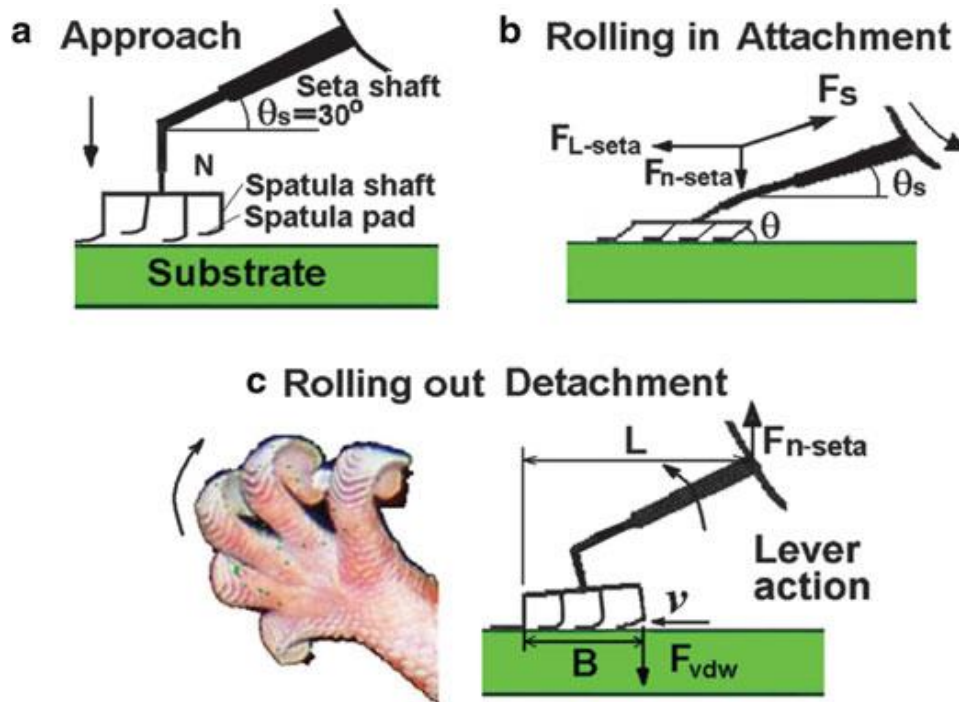
B) Εύκολη αποκόλληση

Είναι εύλογο ερώτημα το πως παρά τις μεγάλες προσκολλητικές δυνάμεις των τριχιδίων, οι σαύρες γκέκο έχουν τη δυνατότητα να αποκολλήσουν τα πόδια τους σε μόλις 15 ms χωρίς μετρήσιμες αποκολλητικές δυνάμεις [55]. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της γωνίας (α) επαφής του τριχιδίου με την επιφάνεια. Όσο αυξάνεται η γωνία α , σταματάει η ολίσθηση και αυξάνονται οι τάσεις στο πίσω άκρο του τριχιδίου, προκαλώντας ρωγμή στους δεσμούς επιφάνειας-τριχιδίου [56], με κρίσιμη γωνία αυτή των 30° . Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Shah και Sitti [57], οι οποίοι μέτρησαν την προφόρτιση και την προσκολλητική τάση σε σχέση με το μέγεθος της τραχύτητας για γωνίες από 30° - 60° καθώς και την προσκολλητική δύναμη σε σχέση με τη γωνία [58], όπως φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 2.2 Αποτελέσματα για την επίδραση της κατεύθυνσης των ιών α) προφόρτιση και β) πίεση που απαιτείται για προσκολλητική επαφή για διάφορες τραχύτητες και γωνίες [57] γ) δύναμη προσκόλλησης σε συνάρτηση με την κατεύθυνση τραβήγματος ενός τριχιδίου

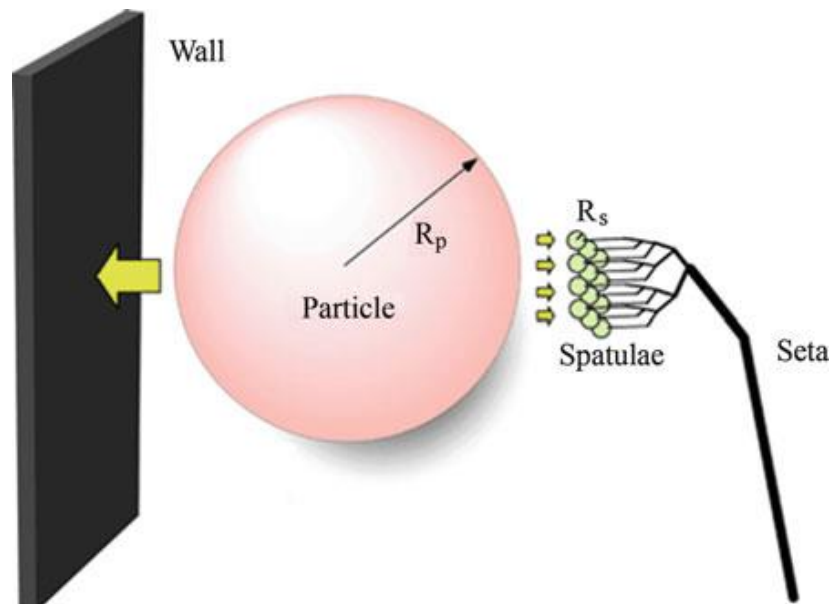
Έτσι, η διαδικασία κίνησης της γκέκο συνοψίζεται σε τρία στάδια, αυτό της προσέγγισης, αυτό του ‘γραπώματος’ και αυτό της αποκόλλησης, όπως φαίνεται και σχηματικά (εικόνα 2.3) παρακάτω:



Εικόνα 2.3 α) προσέγγιση β) θεμελίωση επαφής γ) αποκόλληση [59]

Γ) Αυτο-καθαρισμός

Φυσικοί ρύποι όπως η σκόνη ή σωματίδια της ατμόσφαιρας είναι αναπόφευκτα εμπλεκόμενοι με την προσκολλητική δυνατότητα της γκέκο. Παρά το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιεί κανένα μηχανισμό επί τούτου, έχει παρατηρηθεί ότι μετά από επιμόλυνση με σωματίδια ανάμεσα στις σπατουλοειδείς απολήξεις της γκέκο και τον τοίχο, μόλις μετά από τέσσερα βήματα είχε τη δυνατότητα να σηκώσει πάλι το βάρος της [60]. Η σχηματική αναπαράσταση φαίνεται στην **εικόνα 2.4**.



Εικόνα 2.4 Μοντέλο αλληλεπίδρασης των σπατουλοειδών απολήξεων με σωματίδιο που εμποδίζει την επαφή τους με επίπεδο τοίχωμα [60]

Ο λόγος μεταξύ της ενέργειας αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός σωματιδίου και του τοίχου και μεταξύ σωματιδίου και της σπατουλοειδούς απόληξης, που εδώ υποτίθεται σφαιρική, σύμφωνα με τον Israelachvili [25], είναι:

$$Z = \frac{W_{pw}}{W_{ps}} = \left(1 + \frac{R_p}{R_s}\right) \frac{H_{pw} D_{ps}}{H_{ps} D_{pw}} \quad (2.1)$$

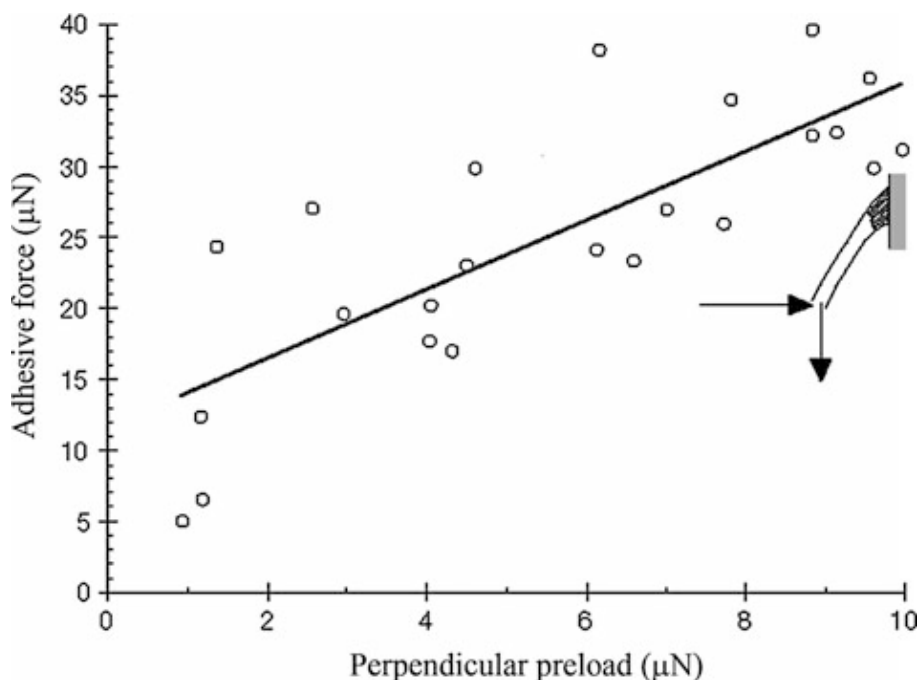
όπου οι δείκτες p,w και s είναι για το σωματίδιο, τον τοίχο και την απόληξη αντίστοιχα, και οι δείκτες R,D και H την ακτίνα, την απόσταση και την ακτίνα αντίστοιχα. Όταν $Z > 1$, η ενέργεια αποχωρισμού του σωματιδίου από τον τοίχο είναι μεγαλύτερη από αυτή της σφαιρικής απόληξης από αυτόν, οδηγώντας σε αυτο-καθαρισμό. Όμως, για μικρά σωματίδια ($R < 0.5 \mu\text{m}$) δεν υπάρχουν αρκετές απολήξεις να προσκολληθούν, ενώ το ίδιο ισχύει για μεγαλύτερα, λόγω της μεγάλης καμπυλότητας, οδηγώντας έτσι σε κάθε περίπτωση στον αυτο-καθαρισμό.

Δ) Μηχανισμοί προσκόλλησης

Αρκετοί μηχανισμοί προσκόλλησης που περιγράφουν τις ελκτικές δυνάμεις που αναπτύσσονται όταν δυο επιφάνειες έρχονται σε επαφή, έχουν αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην περίπτωση της σαύρας γκέκο, τις προηγούμενες δεκαετίες μέσω πειραματικών δοκιμών και παρατηρήσεων σχεδόν όλοι οι πιθανοί μηχανισμοί, όπως συγκολλητικές ουσίες, μικρομηχανική εμπλοκή ή τύπου βεντούζας έχουν αποκλειστεί. Οι δυο επιβεβαιωμένοι μηχανισμοί είναι οι δυνάμεις van der Waals (κατά κύριο λόγο) και οι τριχοειδείς δυνάμεις. Λόγω της καθολικότητας των δυνάμεων van der Waals, οι σαύρες γκέκο έχουν την δυνατότητα να προσκολλώνται σχεδόν σε κάθε υλικό, αρκεί αυτό να έχει δυνατότητα πόλωσης. Για τυπικές τιμές της εξίσωσης (σταθερά Hamaker στα 10^{-19} J , επιφάνεια απόληξης $2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$, και απόστασή της από την επιφάνεια 0.6 nm), λαμβάνουμε μια ενδεικτική τιμή των 0.5 μN .

Ε) Προσκολλητική δύναμη υπό συνθήκες περιβάλλοντος

Χρησιμοποιώντας ένα διπλού άξονα μικροσκόπιο ατομικής δύναμης, ο Autumn et al [52] μέτρησε την προσκολλητική δύναμη ενός τριχιδίου, που αυξάνει γραμμικά με την κάθετη προφόρτιση που υφίσταται (εικόνα 2.5). Επίσης, παρατήρησε ότι η διατμητική προσκολλητική δύναμη αυξάνεται όταν συνδυαστεί κάθετη προφόρτιση μαζί με μια μικρή μετατόπιση της τάξης των 5 μm , όπου η προσκολλητική δύναμη μετρήθηκε $194 \pm 25 \mu\text{N}$.



Εικόνα 2.5 Προσκολλητική δύναμη ενός τριχιδίου ως συνάρτηση της προφόρτισης

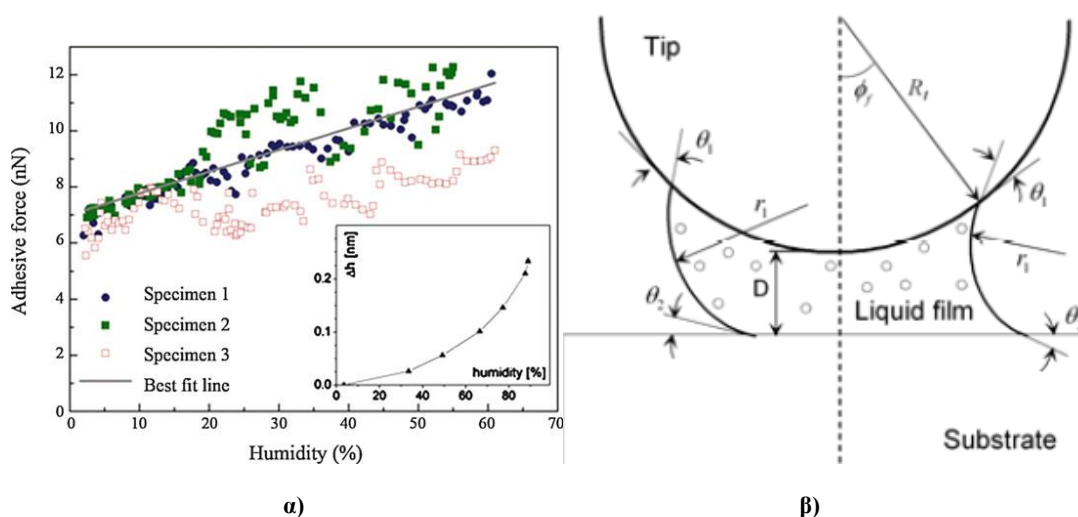
Ο Huber [61] χρησιμοποιώντας επίσης μικροσκοπία ατομικής δύναμης, μέτρησε την δύναμη κατά την αποκόλληση ενός τριχιδίου με τέσσερις απολήξεις, αφού είχε προηγηθεί προφόρτιση 90nN. Κατέληξε στην τιμή των 10 nN για την τιμή μιας σπατουλοειδούς απόληξης.

ΣΤ) Επίδραση της υγρασίας

Ο Huber [62] πραγματοποίησε επιπλέον μετρήσεις με μικροσκόπιο ατομικής δύναμης, για διάφορα επίπεδα υγρασίας. Βρήκε ότι η δύναμη αποκόλλησης σχεδόν διπλασιάστηκε, αυξανόμενης της υγρασίας από 1.5% μέχρι 60% (εικόνα 2.6α). Αυτή η αύξηση συμβαίνει είτε λόγω της αύξησης των δεσμών van der Waals λόγω της ύπαρξης μορίων νερού, είτε λόγω καθαρών τριχοειδών φαινομένων, δημιουργώντας προσκολλητικές γέφυρες (μηνίσκους). Επίσης η αύξηση της υγρασίας επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες των τριχιδίων (μειώνει το μέτρο ελαστικότητας της κερατίνης) αυξάνοντας την τριβή και την προσκόλληση[63]. Για τις τριχοειδείς δυνάμεις έχει προταθεί [64] η παρακάτω σχέση:

$$F_c = \pi R_t \gamma \{ 2 \sin \varphi_f \sin(\theta_1 + \varphi_f) - \kappa R_t \sin^2 \varphi_f \} \quad (2.2)$$

όπου R_t η ακτίνα της απόληξης, γ η επιφανειακή τάση, φ_f η γωνία πλήρωσης, θ_1 η γωνία μηνίσκου με την εφαπτομένη της απόληξης και κ η καμπυλότητα του μηνίσκου.



Εικόνα 2.6 α) επίδραση της υγρασίας στην προσκολλητική δύναμη [62] β) δημιουργία μηνίσκου σε λεπτό υγρό φιλμ που παρεμβάλλεται μεταξύ δυο στερεών [64]

Ζ) Ιεραρχία

Συνήθως τραχιές και άκαμπτες επιφάνειες έχουν πολύ λιγότερα σημεία επαφής από τη φαινόμενη επιφάνεια επαφής. Η ιεραρχική δομή του δαχτύλου της σαύρας γκέκο παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην εξαιρετική ικανότητα προσκόλλησης που διαθέτει σχεδόν σε κάθε είδος επιφάνειας. Θεωρώντας τις σπατουλοειδείς απολήξεις σαν ημισφαίρια ακτίνας R , με δεδομένη την επιφανειακή ενέργεια, υπάρχει προσκολλητική δύναμη επαφής F_{ad} , που προκύπτει από το θεώρημα JKR. Για μια επιφάνεια χωρισμένη σε μεγάλο αριθμό επαφών n (όπως συμβαίνει στη δομή του δαχτύλου της σαύρας γκέκο), η συνολική ακτίνα δίνεται από τον τύπο αυτο-όμοιας διαβάθμισης [65] ως $R' = \sqrt{n}R$. Συνεπώς η συνολική δύναμη τροποποιείται ως εξής:

$$F'_{ad} = \sqrt{n}F_{ad} \quad (2.3)$$

Ο ίδιος τύπος ισχύει και αν συνυπολογιστεί και η τριχοειδής δύναμη [66].

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν για λείες επιφάνειες. Το σώμα της γκέκο προσφέρει προσαρμογή στην κλίμακα των cm. Τα δάχτυλα και τα λεπτά στρώματα κάτω από αυτά, προσαρμόζονται στην κλίμακα των mm. Επακόλουθα, τα τριχίδια προσφέρουν προσαρμογή στην κλίμακα μm, και τελευταίες οι σπατουλοειδείς απολήξεις προσαρμόζονται σε διαστάσεις τραχύτητας λίγων μέχρι αρκετών εκατοντάδων nm. Τέλος, η ιεραρχία επηρεάζει και τις ιδιότητες του υλικού των δαχτύλων, καθώς παρά το γεγονός ότι η β-κερατίνη έχει μέτρο ελαστικότητας 1-20 GPa, το ενεργό μέτρο ελαστικότητας των τριχιδίων είναι 100 kPa [67].

Θ) Προσκόλληση εξαρτώμενη από το ρυθμό (rate-dependent adhesion)

Όλα τα είδη τριβής είναι εξαρτώμενα του ρυθμού κίνησης, κάτι που είναι φανερό από τους δυο διαφορετικούς συντελεστές τριβής (στατικός και δυναμικός) καθώς και από την εξάρτηση από την ταχύτητα. Σε κανονικές συνθήκες, τα ξηρά και σκληρά υλικά συναντούν μικρότερη τριβική αντίσταση όσο αυξάνεται η ταχύτητα ολίσθησής τους. Το αντίθετο έχει παρατηρηθεί στα τριχίδια των σαυρών γκέκο [68], τα οποία γίνονται πιο ‘κολλώδη’ όσο αυξάνεται η ταχύτητα ολίσθησής τους. Επίσης, έχουν εξαιρετική αντίσταση στη φθορά, ολισθαίνοντας 300 m χωρίς αξιοσημάντη επιδείνωση.

Αυτή η ιδιότητα έχει σημαντικές συνέπειες για τις δυνατότητες του οργανισμού, καθώς πολύ ισχυρές δυνάμεις μπορούν να αναπτυχθούν σε καταστάσεις μεγάλης σχετικής ταχύτητας, όπως για παράδειγμα η ελεύθερη πτώση. Αυτές οι σταθερές τριβολογικές δυνάμεις μπορεί να προκύπτουν από στοχαστικές εναλλαγές μεταξύ στατικής και δυναμικής τριβής μεγάλου πληθυσμού τριχιδίων με υψηλές συχνότητες συντονισμού.

2.3 Μοντέλα προσκόλλησης, τριβής και αποκόλλησης

Λόγω όλων των χαρακτηριστικών που έχουν περιγραφεί παραπάνω, αλλά και του γεγονότος ότι συμμετέχουν παραπάνω από ένα τριβολογικά φαινόμενα στην επαφή της γκέκο με τις επιφάνειες, διάφορα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί που επιχειρούν να μοντελοποιήσουν την αρκετά πολύπλοκη αυτή τριβολογική περίπτωση.

2.3.1 Μοντέλα προσκόλλησης

Η εξήγηση των προσκολλητικών ιδιοτήτων της σαύρας γκέκο βρίσκεται στην μορφολογία της επιφάνειάς της. Έτσι, η μηχανική της προσκόλλησής της χωρίζεται σε δυο μέρη: τη μηχανική προσκόλλησης μονής επαφής, και τη υιοθέτηση μεγάλου αριθμού απολήξεων σε μια τραχιά επιφάνεια. Όσον αφορά την πρώτη, περικλείει το μοντέλο δεσμών van der Waals, μοντέλα μηχανικής των επαφών και τις τριχοειδείς δυνάμεις, στα οποία έχει γίνει αναφορά παραπάνω. Η δεύτερη, περιλαμβάνει δύο μοντέλα, της ινώδους και της ιεραρχικής δομής πολλών κλιμάκων. Στο πρώτο, η προσκολλητική δύναμη είναι το άθροισμα των δυνάμεων συστοιχίων κεκλιμένων προβόλων ή ελατηρίων με ημισφαιρική απόληξη, ενώ το δεύτερο, δείχνει το πως η ιεραρχική δομή μπορεί να αυξήσει την ενεργή προσκόλληση αυξάνοντας την ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης.

2.3.1.1 Μοντέλο ινώδους προσκολλητικής δομής

Οι Kim και Bhusham [69], παρουσίασαν ένα ινώδες μοντέλο για την εύρεση σχεδιαστικών παραμέτρων της συστοιχίας ινών ενός μονής κλίμακας συστήματος προσάρτησης. Οι ίνες μοντελοποιούνται ως κεκλιμένοι κυλινδρικοί πρόβολοι σφαιρικής απόληξης, προσαρτημένοι σε ένα μπλοκ. Στην **εικόνα 2.7**, l είναι το μήκος των προβόλων, S είναι η μεταξύ τους

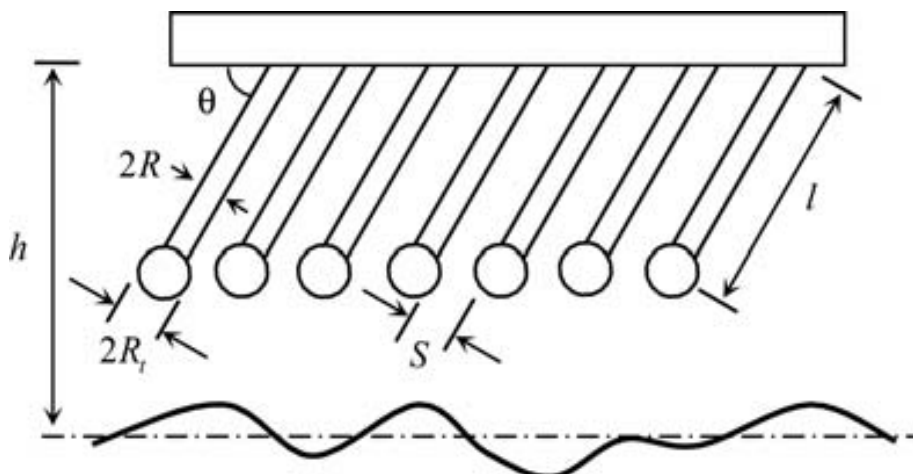
απόσταση, R η ακτίνα της ίνας, R_t η ακτίνα του άκρου, S η απόσταση μεταξύ των ινών, θ η γωνία με τη βάση και h η απόσταση της βάσης των ινών με το μέσο προφίλ τραχύτητας. Η δυσκαμψία k κάθε ίνας δίνεται από τη σχέση [70]:

$$k = \frac{\pi RE}{2\lambda \sin^2 \theta \left(1 + \frac{16\lambda^2 \cot^2 \theta}{3}\right)} \quad (2.4)$$

όπου $\lambda=1/2R$ ο λόγος διαστάσεων του προβόλου. Η προσκολλητική δύναμη υπολογίστηκε μέσω της θεωρίας JKR ως:

$$F_{ad} = \frac{3}{2}\pi R_t W_{ad} \quad (2.5)$$

όπου W_{ad} το έργο προσκόλλησης, όπως υπολογίστηκε παραπάνω. Η προσκολλητική δύναμη χρησιμοποιήθηκε σαν κρίσιμη δύναμη, έτσι ώστε εάν είναι μεγαλύτερη της ελαστικής δύναμης να θεωρηθεί αποκολλημένη η ίνα.



Εικόνα 2.7 Σύστημα προσκόλλησης μονού επιπέδου κεκλιμένων προβόλων με σφαιρικές απολήξεις [69]

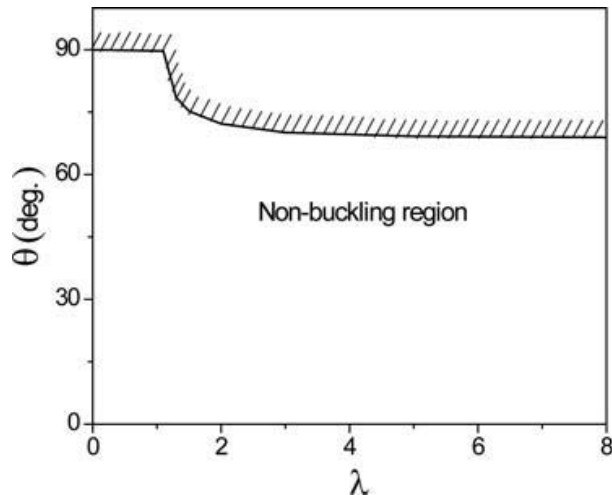
Επιπλέον, θεωρήθηκαν κάποιοι περιορισμοί για την ομαλή λειτουργία του μοντέλου:

1. Συνθήκη μη λυγισμού

Μια ινώδης επιφάνεια μπορεί να αποκτήσει σύμμορφη απόκριση ερχόμενη σε επαφή με ένα σκληρό υλικό εξαιτίας λυγισμού και κατάρρευσης των ινών. Η συνθήκη αυτή εκφράζεται ως εξής μέσω της κρίσιμης θλιπτικής παραμόρφωσης:

$$\varepsilon_{cr} = -b_c \pi^2 \left(\frac{1}{16\lambda^2} + \frac{\cot^2 \theta}{3} \right) \quad (2.6)$$

όπου $b_c=2$ για σταθεροποιημένες μικροδοκούς. Έτσι, προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα, της κρίσιμης γωνίας των ινών σε σχέση με το συντελεστή μεγέθους:



Εικόνα 2.8 Γραμμή κρίσιμης κλίσης των ινών σε συνάρτηση με το λόγο διαστάσεών τους για συνθήκη μη λυγισμού

2. Συνθήκη μη κατάρρευσης ινών

Σε μικρές επαφές, η αντοχή του συστήματος εξαρτάται τελικά από την κατάρρευση των ινών. Έτσι, υπολογίστηκε η παρακάτω ανισότητα για την ακτίνα R_t :

$$R_t \geq \frac{8b^3 E^2}{3\pi^2(1-\nu^2)^2 W_{ad}^2} \quad (2.7)$$

όπου b το χαρακτηριστικό μήκος της επιφάνειας επαφής.

3. Συνθήκη για ανεπιθύμητη κόλληση

Υψηλή πυκνότητα σε συνδυασμό με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας των ινών μπορεί να προκαλέσει την μεταξύ τους προσκόλληση, προκαλώντας μια ανεπιθύμητη κατάσταση. Σε αυτή την περίπτωση δύο είναι οι ικανές συνθήκες:

$$S > 2\delta \quad (2.8)$$

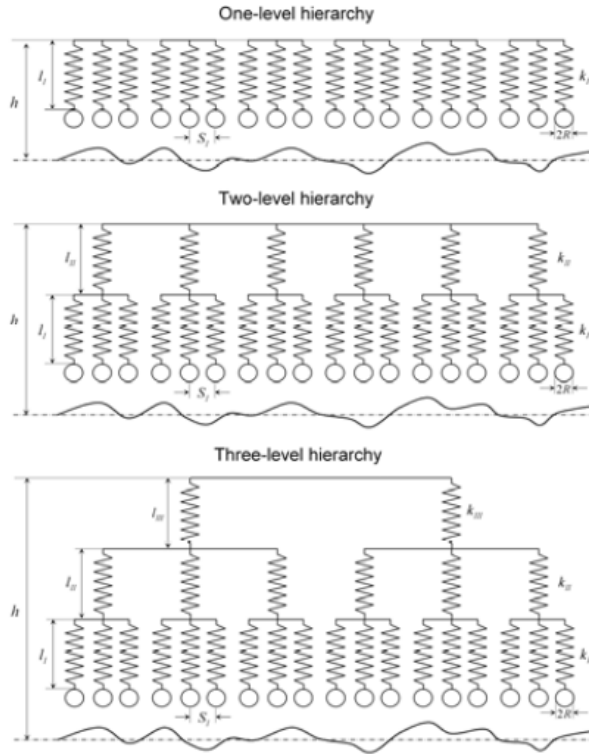
όπου δ το βέλος κάμψης, και

$$\rho = \frac{1}{(S + 2R)^2} \quad (2.9)$$

Στην παραπάνω εξίσωση το ρ αντιπροσωπεύει την μέγιστη επιτρεπόμενη πυκνότητα τοποθέτησης των ινών.

2.3.1.2 Μοντέλο ιεραρχικής προσκόλλησης πολλαπλής κλίμακας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ιεραρχική δομή του πέλματος της σαύρας γκέκο είναι εξαιρετικής σημασίας για την αποτελεσματική προσκόλλησή της, καθώς προσφέρει καλή προσαρμογή μέχρι και σε τραχύτητες νανόμετρων, πετυχαίνοντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερες επιφάνειες επαφής. Οι Kim και Bhushan [71] ανέπτυξαν ένα ιεραρχικό μοντέλο με ένα, δύο και τρία επίπεδα ιεραρχίας προκειμένου να εξετάσουν την επίδραση του αριθμού των επιπέδων (εικόνα 2.9). Κάθε επίπεδο ελατηρίων αντιστοιχεί σε ένα επίπεδο διακλάδωσης των τριγιδίων της γκέκο.



Εικόνα 2.9 Μοντέλα ελατηρίων για ένα, δύο και τρία επίπεδα ιεραρχίας που προσομοιάζουν τη μορφολογική ιεραρχία των τριχιδίων της γκέκο [71]

Η σταθερά ελατηρίου σε κάθε επίπεδο είναι σταθερή, και ίση με:

$$k = \frac{\pi R_m^2 E}{l_m \sin^2 \theta \left(1 + \frac{4l_m^2 \cot^2 \theta}{3R_m^2} \right)} \quad (2.10)$$

όπου ο δείκτης m είναι ο αριθμός του επιπέδου. Σύμφωνα με τη θεωρία DMT η προσκολλητική δύναμη μιας σπατουλοειδούς απόληξης είναι 11 nN . Αυτή η τιμή χρησιμοποιήθηκε σαν κρίσιμη δύναμη έτσι ώστε εάν είναι μεγαλύτερη από τη δύναμη ελατηρίου, το ελατήριο θεωρείται ως αποκολλημένο. Οι βάσεις των ελατηρίων θεωρούνται άκαμπτες. Η μετατόπιση του ελατηρίου υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta l = h - l_0 - z \quad (2.11)$$

όπου h είναι η απόσταση της βάσης των ελατηρίων από τη μέση γραμμή της επιφάνειας, l_0 η συνολική επιμήκυνση των ελατηρίων και z το προφίλ ύψους της τραχιάς επιφάνειας. Η δύναμη ελατηρίου για ένα, δύο και τρία επίπεδα είναι αντίστοιχα:

$$F_{el} = -k_l \sum_{i=1}^p \Delta l_i u_i, \quad u_i = \begin{cases} 1 & \text{με επαφή} \\ 0 & \text{χωρίς επαφή} \end{cases} \quad (2.12)$$

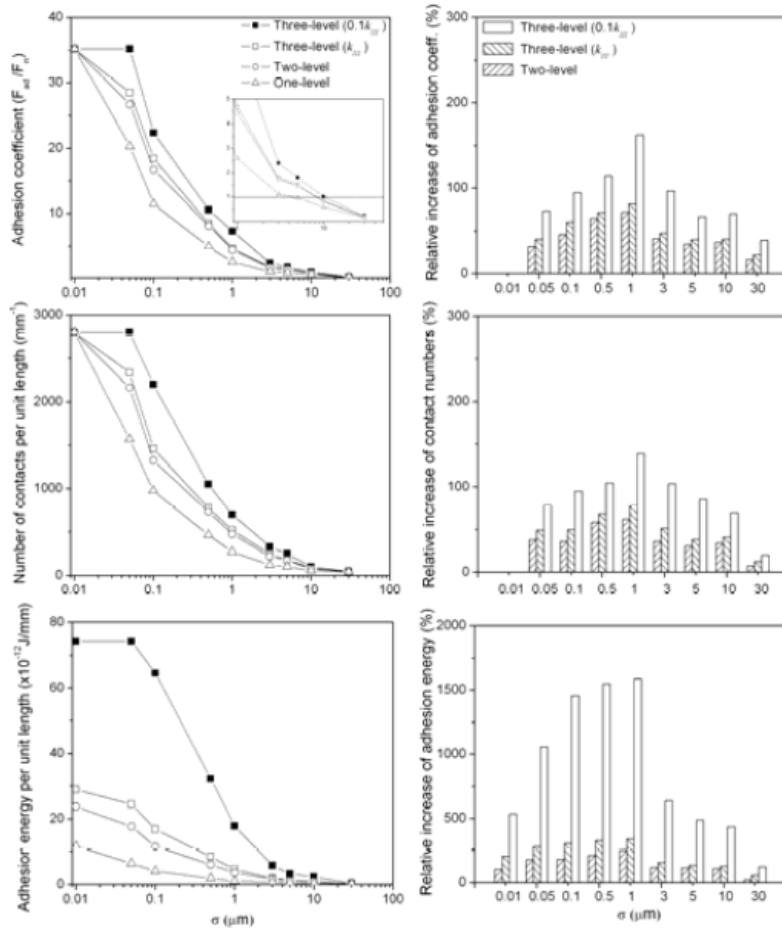
$$F_{el} = - \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^p k_{ji} (\Delta l_{ji} - \Delta l_j) u_{ji}, \quad u_{ji} = \begin{cases} 1 & \text{με επαφή} \\ 0 & \text{χωρίς επαφή} \end{cases} \quad (2.13)$$

$$F_{el} = - \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^p k_{kji} (\Delta l_{kji} - \Delta l_{kj} - \Delta l_j) u_{kji}, \quad u_{kji} = \begin{cases} 1 & \text{με επαφή} \\ 0 & \text{χωρίς επαφή} \end{cases} \quad (2.14)$$

όπου στις παραπάνω εξισώσεις το p, q και r είναι ο αριθμός των ελατηρίων στα επίπεδα I, II και III αντίστοιχα. Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν και για την συμπίεση των σφαιρικών απολήξεων ελατηρίων αλλά και κατά την αποκόλλησή τους από την επιφάνεια. Η ενέργεια προσκόλλησης υπολογίζεται ως εξής:

$$W_{ad} = \int_{\bar{D}}^{\infty} F_{el}(D) dD \quad (2.15)$$

όπου D είναι η απόσταση που η βάση των ελατηρίων μετακινείται από την επιφάνεια επαφής, και \bar{D} είναι το κατώτερο όριο της απόστασης, δηλαδή η τιμή της D όταν η F_{el} μηδενιστεί, όταν το μοντέλο μόλις έχει απομακρυνθεί από την επιφάνεια επαφής. Τα αποτελέσματα για τα τρία επίπεδα ιεραρχίας, σε ότι αφορά το συντελεστή προσκόλλησης, τον αριθμό επαφών καθώς και την ενέργεια προσκόλλησης σε σχέση με τη ρίζα της μέσης τραχύτητας (root mean square, RMS) φαίνονται παρακάτω (εικόνα 2.10):



Εικόνα 2.10 Επίδραση του επιπέδου ιεραρχίας σε σχέση με τη μέση τραχύτητα για το συντελεστή προσκόλλησης, τον αριθμό επαφών και την ενέργεια προσκόλλησης ανά μονάδα μήκους [71]

2.3.2 Μοντέλα τριβής

2.3.2.1 Τριβή σε ινώδεις δομές

Η δύναμη τριβής σε ινώδεις δομές είναι συνδυασμός της τριβής Coulomb και της προσκολλητικής τριβής. Η τριβή Coulomb συμβαίνει όταν μια ίνα είναι σε θλίψη, ενώ η προσκολλητική τριβή είναι μια πλευρική συνιστώσα της εφελκυστικής δύναμης. Ο Majidi [72], πρότεινε ένα μοντέλο του φαινομένου της ενίσχυσης της τριβής βασισμένο στο νόμο του Coulomb. Για μικρο-τραχιές επιφάνειες ή/και μικρή διακύμανση του μήκους των ινών, ένα ποσοστό του συνόλου των ινών θα βρίσκεται σε επαφή, υπό ένα μικρό φορτίο F_n . Έτσι η δύναμη τριβής μιας ίνας σε κάθε επαφή θα είναι:

$$F'_f = \mu F_{cr} + \tau A_f \quad (2.16)$$

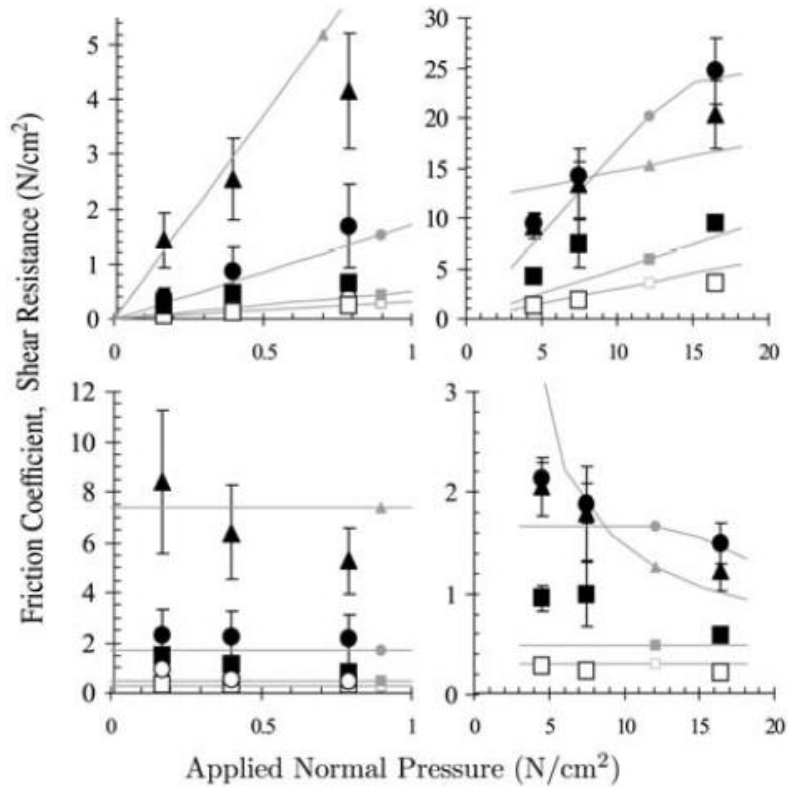
όπου μ είναι ο συντελεστής τριβής, F_{cr} το κρίσιμο φορτίο κατάρρευσης της ίνας, τ είναι η διεπιφανειακή διατμητική δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας και A_f η πραγματική επιφάνεια επαφής της ίνας. Υπό ένα μικρό θλιπτικό φορτίο F_n ο αριθμός των επαφών είναι προσεγγιστικά $N = F_n/F_{cr}$. Με την προσθήκη ενός διατμητικού φορτίου, η δύναμη τριβής γίνεται:

$$F_f = F'_f N = \left(\mu + \frac{\tau A_f}{F_{cr}} \right) F_n = \mu_{eff} F_n \quad (2.17)$$

όπου μ_{eff} είναι ο ενεργός συντελεστής τριβής. Όταν στην επαφή όλες οι ίνες (N_0 σε αριθμό) είναι σε επαφή, τότε ο ενεργός συντελεστής τριβής παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\mu_{eff} = \mu + \frac{\tau N_0 A_f}{F_n} \quad (2.18)$$

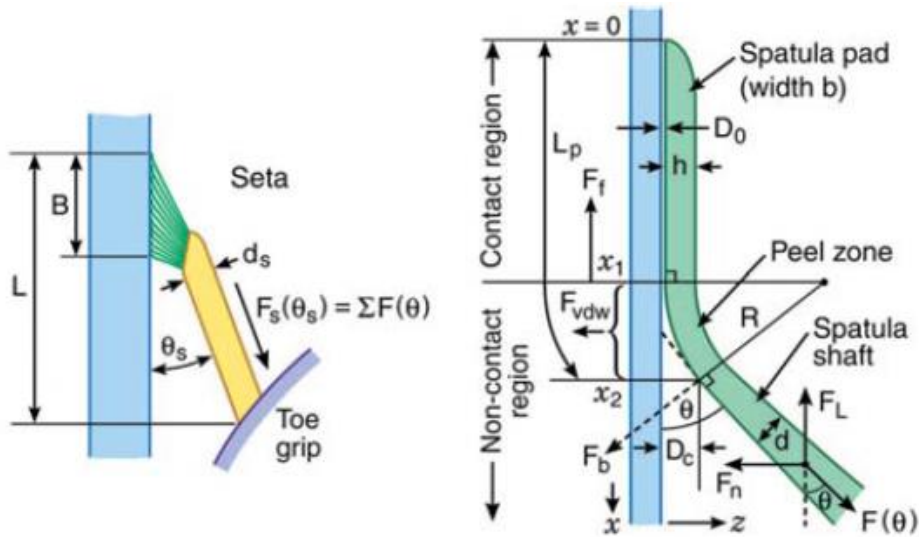
Παρακάτω φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις για το συντελεστή τριβής και τη χωρική δύναμη τριβής, σε σχέση με την εφαρμοζόμενη θλιπτική πίεση που πραγματοποιήθηκαν σε μικροϊνώδεις συστοιχίες από πολυπροπυλένιο:



Εικόνα 2.11 Διαγράμματα του συντελεστή τριβής (αριστερά) και τη χωρική δύναμη τριβής (δεξιά) σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη πίεση

2.3.2.2 Μοντέλο τριβικής προσκόλλησης (frictional adhesion model)

Από διάφορα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί φαίνεται ότι οι δυνάμεις τριβής είναι πολύ μεγαλύτερες από τις προσκολλητικές δυνάμεις. Ο Autumn [73] πρότεινε ένα μοντέλο τριβικής προσκόλλησης, στο οποίο η προσκόλληση της γκέκο εξαρτάται άμεσα από τις διατμητικές δυνάμεις στη διεύθυνση που γραπώνεται το πέλμα. Ο Tian [59] παρουσίασε ένα μοντέλο τριβικής προσκόλλησης στη μικροκλίμακα. Χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο κολλητικής ταινίας με τα δυο τελευταία επίπεδα της ιεραρχικής δομής της γκέκο, δηλαδή των τριχιδίων και των σπατουλοειδών απολήξεων (εικόνα 2.11). Τα τριχίδια έχουν μήκος $l_s=120$ μm , διάμετρο $d_s=4.2$ μm . Ο άξονας των απολήξεων έχει μήκος $l=0.8$ μm και διαστάσεις $0.3\mu\text{m}$ (μήκος L_p)* 0.2 μm (πλάτος b)* 5nN (πάχος, h). Οι ροπές αδράνειας για κάμψη στους άξονες των τριχιδίων και των απολήξεων, και των απολήξεων είναι $I_s = 1.5 \times 10^{-23}\text{m}^4$, $I' = 4.9 \times 10^{-30}\text{m}^4$ και $I = 1.7 \times 10^{-32}\text{m}^4$ αντίστοιχα. Το μέτρο ελαστικότητας E υποτέθηκε 2 GPa.



Εικόνα 2.11 Μοντέλο κολλητικής ταινίας για τη τριβική προσκόλληση στη μικροκλίμακα με δυο επίπεδα ιεραρχίας [59]

Η δύναμη ισορροπίας στο τράβηγμα μιας σπατουλοειδούς απόληξης αναλύεται σε τρία στάδια: (i) στην περιοχή επαφής από $x = 0$ μέχρι $x = x_1$, όπου οι ελκτικές δυνάμεις van der Waals ισορροπούν από την απωστική επιφανειακή δύναμη, (ii) μια μεταβατική ζώνη αποκόλλησης μεταξύ x_1 και x_2 , όπου οι δυνάμεις van der Waals που προκύπτουν από ολοκλήρωση ισορροπούν με τη δύναμη $F(\theta)$ κατά μήκος του άξονα της απόληξης, και (iii) για $x > x_2$, όπου οι δυνάμεις van der Waals είναι πλέον αμελητέες και η συνολική δύναμη ισούται με $F(\theta)$, η οποία είναι:

$$F(\theta) = F_n \sin\theta + F_l \cos\theta \quad (2.19)$$

που F_n και F_l η κάθετη και η οριζόντια συνιστώσα της δύναμης για τις οποίες ισχύει:

$$F_n = F_{vdw} = F(\theta)\sin\theta \quad (2.20)$$

$$F_l = F_f = F(\theta)\cos\theta \quad (2.21)$$

για την ακτίνα της σπατουλοειδούς απόληξης, χρησιμοποιήθηκε μια εμπειρική σχέση της μορφής:

$$R = 4.215 \times \theta^{1.35} \quad (2.22)$$

για μια ρεαλιστική από φυσικής άποψης μορφή για το R για όλες τις γωνίες. Επίσης προσεγγιστικά χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση για την προσκολλητική δύναμη:

$$F_{vdw} = \frac{AbR^{\frac{1}{2}}}{16\sqrt{2}D_0^{\frac{5}{2}}} \quad (2.23)$$

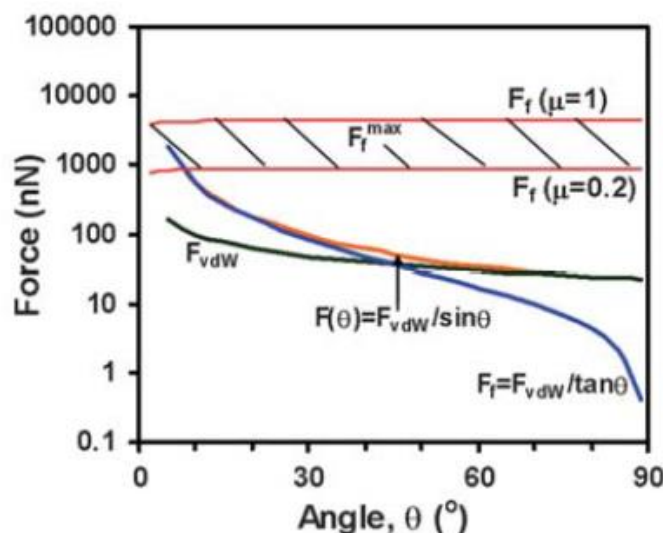
όπου D_0 η απόσταση στην επαφή. Η ελκτική δύναμη στην περιοχή επαφής ($x < x_1$) που καθορίζει την συνεισφορά της προσκολλητικής δύναμης στην δύναμη τριβής είναι:

$$F_{c,vdW} = x_1 b \frac{A}{6\pi D_0^3} \quad (2.24)$$

όπου $x_1 b$ η περιοχή επαφής της σπατουλοειδούς απόληξης με την βάση. Η μέγιστη δύναμη τριβής είναι:

$$F_f^{max} = \mu F_{c,vdW} \quad (2.25)$$

με μ το συντελεστή τριβής. Για τιμές από 0.2 ως 1.0 για το συντελεστή τριβής, η μέγιστη δύναμη τριβής βρέθηκε περίπου 900-4,500 nN όπως φαίνεται στην **εικόνα 2.12**, στην οποία φαίνεται επίσης όλο το εύρος μέγιστων πιθανών τιμών για την $F(\theta)$ προτού συμβεί αποκόλληση ή ολίσθηση. Συμπερασματικά, οι τιμές των δυνάμεων τριβής και προσκόλλησης ενός τριχιδίου μπορούν να αλλάξουν παραπάνω από τρεις τάξεις μεγέθους.



Εικόνα 2.12 Διάγραμμα της δύναμης αποκόλλησης $F(\theta)$ σε σχέση με τη γωνία της αποκόλλησης. Στο διάγραμμα φαίνεται επίσης η δύναμη τριβής F_f [59]

2.3.3 Μοντέλο αποκόλλησης κολλητικής ταινίας (tape peeling model)

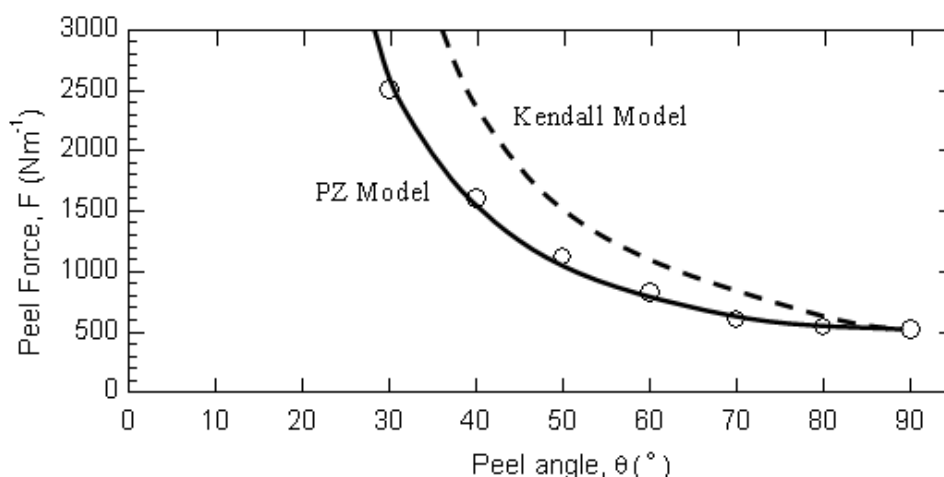
Μελέτες [74, 75] για την αποκόλληση μιας σπατουλοειδούς απόληξης έχουν χρησιμοποιήσει το μοντέλο αποκόλλησης του Kendall (Kendall peeling model) το οποίο εκφράζεται ως εξής:

$$\left(\frac{F}{b}\right)^2 \frac{1}{2hE} + \left(\frac{F}{b}\right) (1 - \cos\theta) - W_{ad} = 0 \quad (2.26)$$

όπου F είναι η δύναμη απολέπισης, b το πλάτος της ταινίας, h το πάχος της, E το μέτρο ελαστικότητας της και θ η γωνία απολέπισης. Στην παραπάνω εξίσωση φαίνεται πως ο όρος ελαστικότητας, το δυναμικό και η επιφάνεια αλληλοεπιδρούν. Η εξίσωση αυτή είναι βασισμένη στην ενεργειακή ισορροπία της προσκολλητικής δύναμης μεταξύ της ταινίας και της επιφάνειας, με το ποσό ενέργειας που απαιτείται για τη μερική αποκόλληση της ταινίας με σταθερή γωνία θ . Το μοντέλο του Kendall εγγενώς δεν παρέχει καμία πληροφορία για τη γεωμετρία της ζώνης αποκόλλησης ή για το πως οι δυνάμεις τριβής συνεισφέρουν στις προσκολλητικές. Ο Pesika [76], πρότεινε ένα άλλο μοντέλο, το μοντέλο ζώνης απολέπισης (peel zone [PZ] model), που βασίζεται στη γεωμετρία της ζώνης αυτής. Η εξίσωση που το διέπει είναι:

$$\frac{F}{b} = \frac{2W_{ad}\theta}{\pi(1 - \cos\theta)\sin\theta} \quad (2.27)$$

Η βασική διαφορά με το μοντέλο του Kendall είναι ότι περιέχει ένα πολλαπλασιαστή εξαρτώμενο από την γωνία, ο οποίος λαμβάνει υπ' όψιν το μήκος της ζώνης απολέπισης καθώς η γωνία μειώνεται. Έτσι, πάντα η δύναμη απολέπισης του μοντέλου PZ θα είναι πάντα μικρότερη από αυτή που προβλέπει το μοντέλο του Kendall. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, όπου φαίνεται η δύναμη απολέπισης μιας ταινίας από ένα βοριοπυρρικό γυαλί για γωνίες απολέπισης από 30° μέχρι 90° (εικόνα 2.13).



Εικόνα 2.13 Διάγραμμα δύναμης απολέπισης σε συνάρτηση με τη γωνία απολέπισης για το μοντέλο του Kendall και το μοντέλο PZ [76]

2.3.4 Υπολογιστικά μοντέλα προσκόλλησης

Η προσπάθεια μοντελοποίησης προσκολλητικών μηχανισμών, όπως αυτόν της σαύρας γκέκο, περιλαμβάνει αρκετές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την δημιουργία ενός αξιόπιστου μοντέλου. Μερικές από αυτές είναι η πολυπλοκότητα στη γεωμετρία, η εγγενής μη γραμμικότητα των συστημάτων αυτών που προκύπτει από τις μεγάλες παραμορφώσεις που λαμβάνουν χώρα, το φαινόμενο της σταδιακής αποκόλλησης (peeling effect), εξαιτίας του οποίου η απλή θεώρηση μονομιάς αποκόλλησης υπερεκτιμά τη συνολική δύναμη αποκόλλησης, η δυναμική μοντελοποίηση της συμπεριφοράς προσκολλητικών συστημάτων και η αλληλεπίδραση της τριβής με την προσκόλληση σε τραχιές επιφάνειες. Συνήθως χρησιμοποιούνται μοντέλα μοριακής προσκόλλησης van der Waals (όπως το δυναμικό Lennard-Jones) και φαινομενολογικοί νόμοι προσκόλλησης όπως μοντέλα συνεκτικής ζώνης (cohesive zone models, CZM).

Από τα πιο χαρακτηριστικά υπολογιστικά μοντέλα είναι το χονδρόκοκκο μοντέλο επαφής του Sauer [77-80] (coarse-grained contact model), που προσομοιάζει την προσκόλληση της σπάτουλας αλλά και των τριών τελευταίων επίπεδων ιεραρχίας. Στο μοντέλο αυτό θεωρούνται δύο είδη δυνάμεων στη νανοκλίμακα, αναλόγως με το μέγεθος των σωμάτων:

1. Τη δύναμη σώματος (body force), που πρόκειται για δύναμη που δρα στο σύνολο του όγκου των δυο σωμάτων, που χρησιμοποιείται για μοντέλα τύπου μοριακής προσκόλλησης, η οποία έχει ισχύ όταν η επιφανειακή καμπυλότητα είναι πάνω από 10 nm:

$$B_k(x_k) = \frac{A_H}{2\pi r_0^4 J_l} \left[\frac{1}{5} \left(\frac{r_0}{r_k} \right)^{10} - \left(\frac{r_0}{r_k} \right)^4 \right] n_p \quad (2.28)$$

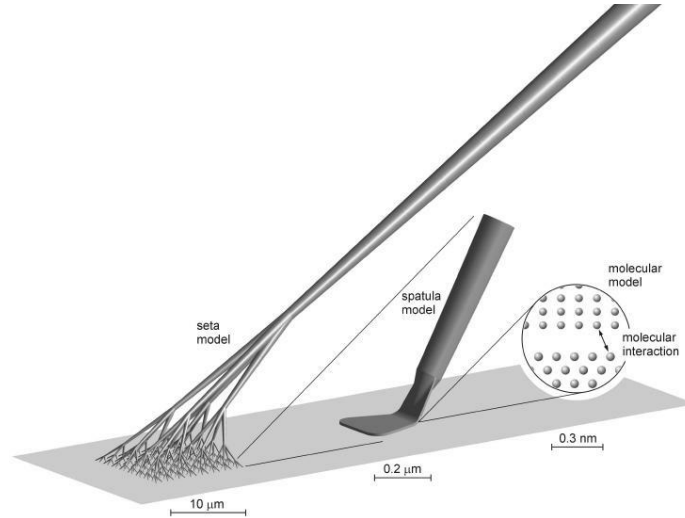
όπου r_k η απόσταση ενός σημείου του ενός σώματος και της κοντινότερης προβολής του στο γειτονικό του, A_H η σταθερά του Hamaker, J_l η ορίζουσα της κλίσης παραμόρφωσης, r_0 η απόσταση ισορροπίας και n_p το διάνυσμα κατεύθυνσης.

2. Την επιφανειακή έλξη (surface traction), που πρόκειται για δύναμη που δρα μόνο στις επιφάνειες των δυο σωμάτων, και παραπέμπει σε μοντέλα τύπου CZM, που ισχύει για σώματα μεγαλύτερα από αρκετά nm:

$$T_k(x_k) = \frac{A_H}{2\pi r_0^3 J_l} \left[\frac{f_1}{45} \left(\frac{r_0}{r_k}\right)^9 - \frac{f_2}{3} \left(\frac{r_0}{r_k}\right)^3 \right] n_p \quad (2.29)$$

όπου f_1 και f_2 είναι συναρτήσεις από την επιφανειακή καμπυλότητα του σώματος.

Βάσει αυτών των εξισώσεων προέκυψαν οι εκφράσεις για τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην παραπάνω ανάλυση. Η προσέγγιση για την μοντελοποίηση των επόμενων δύο κλιμάκων (των τριχιδίων και των διακλαδώσεών τους), διαπερνά έξι τάξεις μεγέθους (εικόνα 2.14). Έτσι, η σπατουλοειδής απόληξη μοντελοποιήθηκε σαν ελαστική ράβδος με μεταβλητή διατομή και για την ιεραρχική διακλάδωση των τριχιδίων χρησιμοποιήθηκε μοντέλο φράκταλ γεωμετρίας. Η συνολική γεωμετρία αποτελείται από γεωμετρικά ακριβή πεπερασμένα στοιχεία δοκών σύμφωνα με την ανάλυση των Simo και Vu-Quoc [81, 82]. Με τη χρησιμοποίηση αυτού του τύπου των πεπερασμένων στοιχείων, είναι εφικτή η απόδοση της μη γραμμικής κινηματικής των μεγάλων παραμορφώσεων. Τελικά το ολικό μοντέλο παρέχει μια γέφυρα μεταξύ των νανοαλληλεπιδράσεων με συνεχή μοντέλα επαφών.

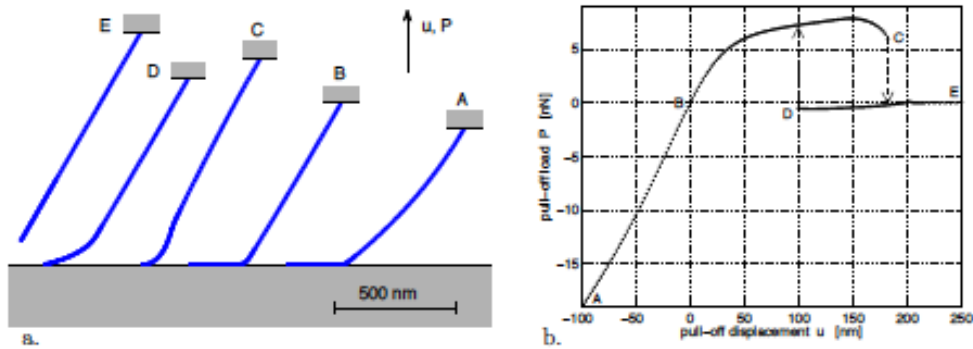


Εικόνα 2.14 Μοντέλο για την ικανοποίηση της μετάβασης από τη μικροκλίμακα στη νανοκλίμακα [79]

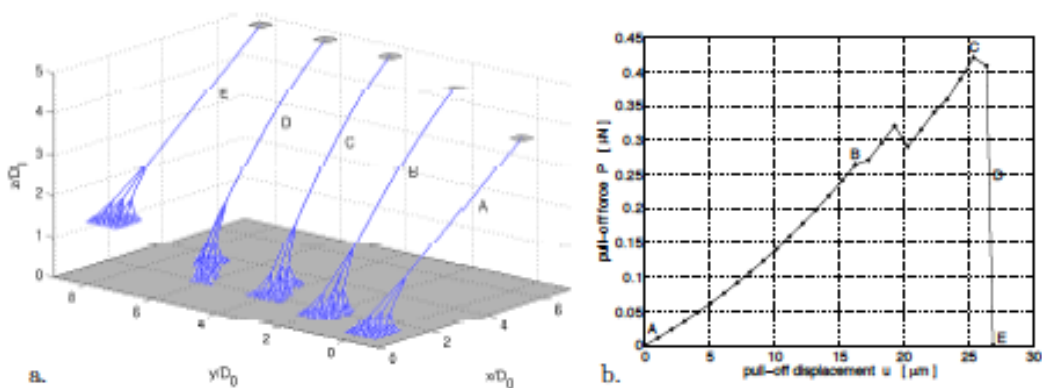
Το διάνυσμα δυνάμεων που δρα στο πεπερασμένο στοιχείο δοκού είναι [78]:

$$f_c^e = - \int_0^{L_e} N_e^T T_c \frac{w(S)dS}{\cos\alpha} \quad (2.30)$$

όπου L_e το αρχικό μήκος του πεπερασμένου στοιχείου, το S δηλώνει τη συντεταγμένη του, το w είναι το πλάτος του, T_c είναι η γραμμή φόρτισης του στοιχείου και N_e το μητρώο σχηματός του. Η καμπύλη δύναμης αποκόλλησης-μετατόπισης για την απόληξη και το τριχίδιο, καθώς και η καμπύλη δύναμης αποκόλλησης-μετατόπισης για την απόληξη για διαφορετικές ταχύτητες φαίνονται παρακάτω:

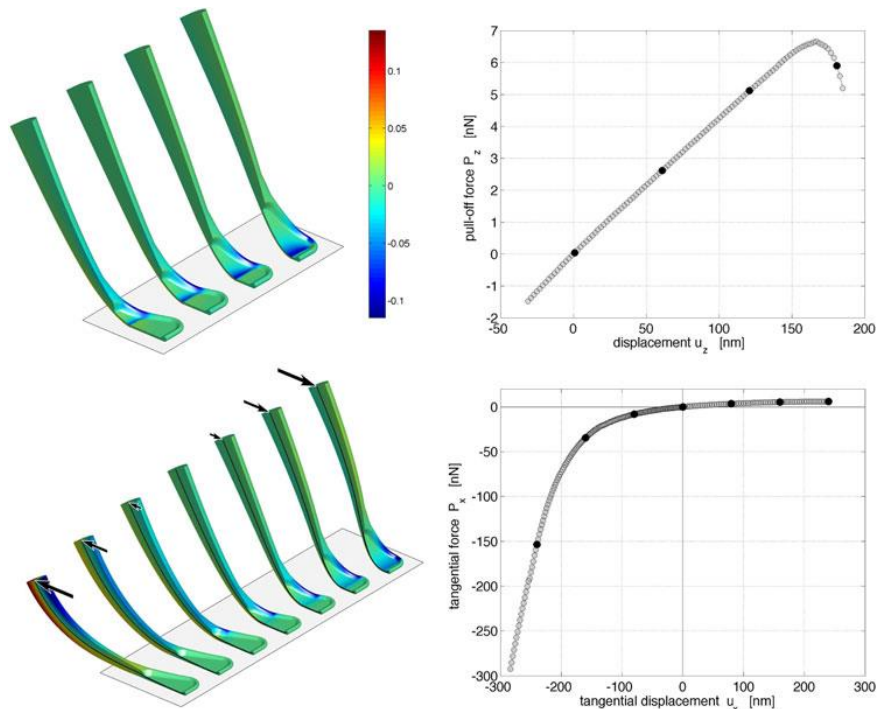


Εικόνα 2.15 α) στιγμιότυπα αποκόλλησης μιας απόληξης β) διάγραμμα δύναμης προσκόλλησης σε συνάρτηση με την μετατόπιση του ανώτατου σημείου



Εικόνα 2.16 α) στιγμιότυπα αποκόλλησης ενός τριγιδίου β) διάγραμμα δύναμης προσκόλλησης σε συνάρτηση με την μετατόπιση του ανώτατου σημείου

Ο ίδιος συγγραφέας [80] χρησιμοποιώντας μια μη γραμμική επέκταση της θεωρίας δοκού Timoshenko από τον Reissner [83] σε γεωμετρικά ακριβή πεπερασμένα στοιχεία δοκών, επέκτεινε το προαναφερθέν μοντέλο για τις σπατουλοειδείς απόληξεις, το οποίο λαμβάνει υπ' όψιν τη ροπή κάμψης. Τα αποτελέσματα για εφελκυστική και διατμητική αποκόλληση της σπατουλοειδούς απόληξης φαίνονται στην **εικόνα 2.17**.



Εικόνα 2.17 Υλοποίηση της κάθετης (επάνω μέρος) και της οριζόντιας (κάτω) αποκόλλησης με πεπερασμένα στοιχεία και τα αντίστοιχα διαγράμματα σε σχέση με τη μετατόπιση. Στα διαγράμματα ισochρωματικά τοπογραφήματα τάσεων φαίνονται πολλαπλάσια των 2 GPa

2.4 Συνθετικά συγκολλητικά εμπνευσμένα από τη σαύρα γκέκο

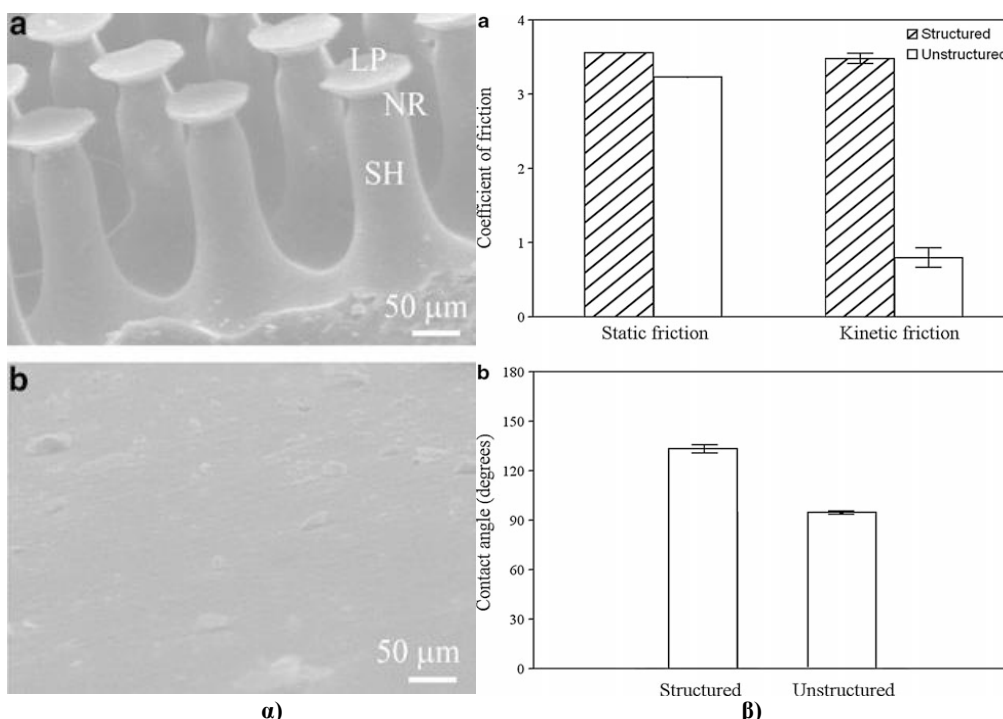
Με βάση τις μελέτες που έχουν αναφερθεί παραπάνω, ο κυρίαρχος μηχανισμός που χρησιμοποιούν οι σαύρες γκέκο φαίνεται να είναι οι δυνάμεις van der Waals. Η ιεραρχική δομή που διαιρείται το δέρμα της επιτρέπει μεγάλο αριθμό επαφών μεταξύ του πέλματος και της επιφάνειας προσκόλλησης. Έτσι, οι ιεραρχικές ινώδεις μικρο-δομημένες επιφάνειες πρέπει να είναι κατασκευασμένες με τέτοιο τρόπο που να επιτυγχάνουν αναστρέψιμη ξηρή προσκόλληση, μιμούμενες τις φυσικές ιδιότητες της γκέκο. Παρά την ύπαρξη αρκετών περιορισμών των σύγχρονων κατασκευαστικών μεθόδων, πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για τη δημιουργία βιο-εμπνευσμένων συγκολλητικών.

Ένας από τους κυριότερους λόγους που πραγματοποιείται έρευνα στα βιομημητικά αυτά υλικά είναι η σαφής υπεροχή τους σε σχέση με τα συμβατικά συγκολλητικά, όπως τα ευαίσθητα σε πίεση (pressure sensitive adhesive, PSA). Τα PSA είναι μονής χρήσης, αφού αν καταστραφεί ο συγκολλητικός δεσμός δεν αποκαθίσταται, έχουν μόνιμη κολλώδη κατάσταση και λιγότερο ευέλικτες ελαστικές ιδιότητες σε σχέση με τα σύνθετα βιομημητικά συγκολλητικά που προσομοιάζουν τη δομή του πέλματος της γκέκο.

2.4.1 Δομές ενός επιπέδου τραχύτητας

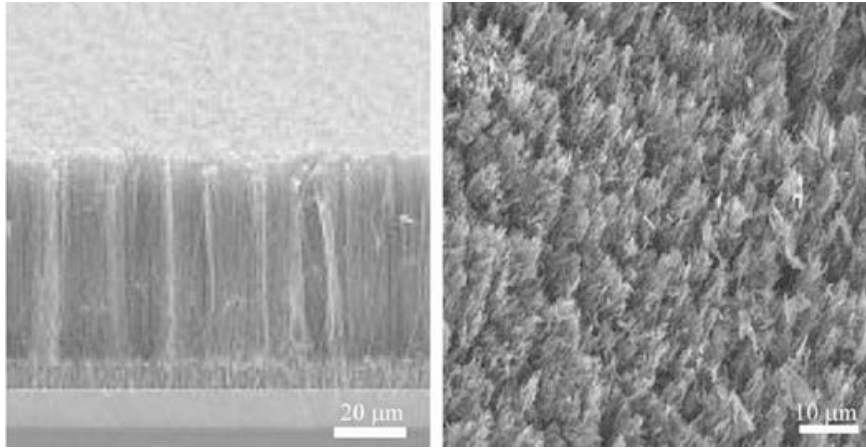
Η βασική λογική σε αυτές τις δομές είναι η δημιουργία μιας μαλακής, ευένδοτης ινώδους δομής προκειμένου τη μείωση της απόστασης διεπιφάνειας, για την αύξηση των δυνάμεων van der Waals. Ο [84] δημιούργησε συστοιχίες νανοϊνών από πολυϊμίδιο χρησιμοποιώντας λιθογραφία ηλεκτρονιακής δέσμης και καθαρισμό με ξηρό πλάσμα οξυγόνου. Ένα δείγμα 1 cm² μπορούσε να παράξει 3 N προσκολλητικής δύναμης, που είναι περίπου το ένα τρίτο της προσκολλητικής δύναμης της γκέκο. Η συσσωμάτωση των ινιδίων που παρατηρήθηκε όμως είναι κάτι μείωσε την προσκολλητική δύναμη και την αντοχή της πολυμερούς ταινίας, υποδεικνύοντας απαίτηση για βελτιστοποίηση της γεωμετρίας.

Ο Gorb και οι Bhusham και Sayer [85, 86] μελέτησαν σε ξεχωριστές μελέτες δύο δείγματα πολυβινυλοσιλοξάνης (PVS): το ένα περιείχε συστοιχία στηλών με σχήμα μανιταριού και το άλλο μια αδόμητη επιφάνεια ελέγχου (**εικόνα 2.18α**). Το σχήμα μανιταριού παρέχει μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής. Η τεχνική παραγωγής ήταν με πολυμερισμό διπλής ένωσης. Ο Gorb μελέτησε την προσκολλητική δύναμη των δυο δειγμάτων με μικροτριβόμετρο. Τα αποτελέσματα δείχνανε διπλάσια προσκολλητική δύναμη στο δομημένο δείγμα σε σχέση με το αδόμητο, ανεξαρτησία της δύναμης σε σχέση με την προ-φόρτιση και μεγαλύτερη ανοχή στη μόλυνση. Οι Bhusham και Sayer σύγκριναν την τραχύτητα, τη δύναμη τριβής και τη γωνία επαφής νερού ανάμεσα στα δυο δείγματα (**εικόνα 2.18β**), και βρήκαν μεγαλύτερο συντελεστή κινητικής τριβής και γωνία επαφής στο δομημένο δείγμα όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 2.18 α) (α) δομημένη και (β) αδόμητη βιομιμητική επιφάνεια από PVS **β)** (α) Στατικός και δυναμικός συντελεστής τριβής (β) γωνία επαφής νερού, για τις δυο επιφάνειες

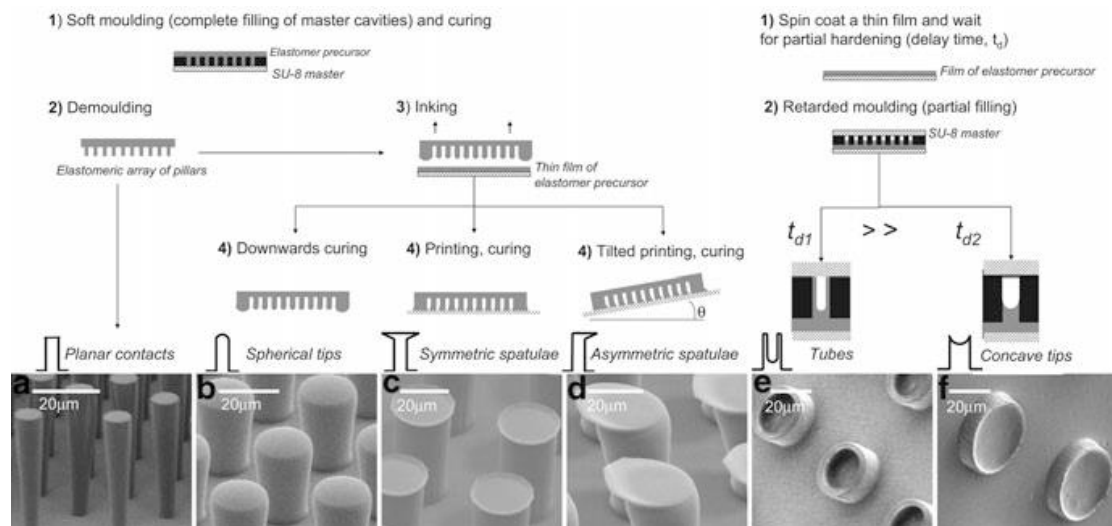
Ένας άλλος τρόπος που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μικροδομών σε πολυμερείς επιφάνειες είναι οι κάθετα στοιχισμένοι πολυεπίπεδοι νανοσωλήνες άνθρακα (multiwalled carbon nanotubes, MWCNT). Ο Yurdumakan [87] χρησιμοποίησε χημική εναπόθεση υπό ατμό (chemical vapor deposition, CVD) για την ανάπτυξη νανοσωλήνων μήκους 50-100 μm επάνω σε μήτρα από πολυμεθακρυλικό μεθυλεστέρα (PPMA), όπως φαίνεται στην **εικόνα 2.19**. Στη ναοκλίμακα οι MWCNT απέδωσαν δυνάμεις μέχρι και δύο τάξεων μεγαλύτερες από αυτές των τριχιδίων της γκέκο, χωρίς όμως να παρουσιάζουν αντίστοιχα μεγάλες δυνάμεις στη μακροκλίμακα, λόγω της μη ενδοτικότητάς τους.



Εικόνα 2.19 Στοιχισμένοι πολυεπίπεδοι νανωσολήνες άνθρακα [87]

Μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους είναι η κατασκευή μικροϊνών ή μικροπτερυγίων από πολυδιμεθυλοσιλοξάνιο (PDMS). Ο Aksak [88] κατασκεύασε κεκλιμένες μικροϊνες φωτοαντίστασης SU-8 με φωτολιθογραφία, αλλάζοντας τη γωνία της υπερϊώδους ακτινοβολίας, απλώς γέροντας το δισκίο κατά την έκθεση. Οι κεκλιμένες ίνες παρουσίασαν μειωμένη προσκόλληση σε σχέση με τις κάθετες.

Ο del Campo [89] κατασκεύασε συστοιχίες στηλών με ελεγχόμενες τρισδιάστατες γεωμετρίες στις απολήξεις τους. Η κατασκευαστική στρατηγική του ήταν βασισμένη σε ολική ή μερική μαλακή χύτευση σε δισδιάστατα πρότυπα φτιαγμένα από λιθογραφία, με ελαστομερείς προδρόμους ακολουθούμενους σε κάποιες περιπτώσεις από μελάνωση και μικροεκτύπωση. Οι γεωμετρίες των τελικών απολήξεων ήταν επίπεδες, σφαιρικές, σχήματος σπάτουλας σχήματος μανιταριού ή με εσοχές, όπως περιγράφονται στο παρακάτω σχήμα:

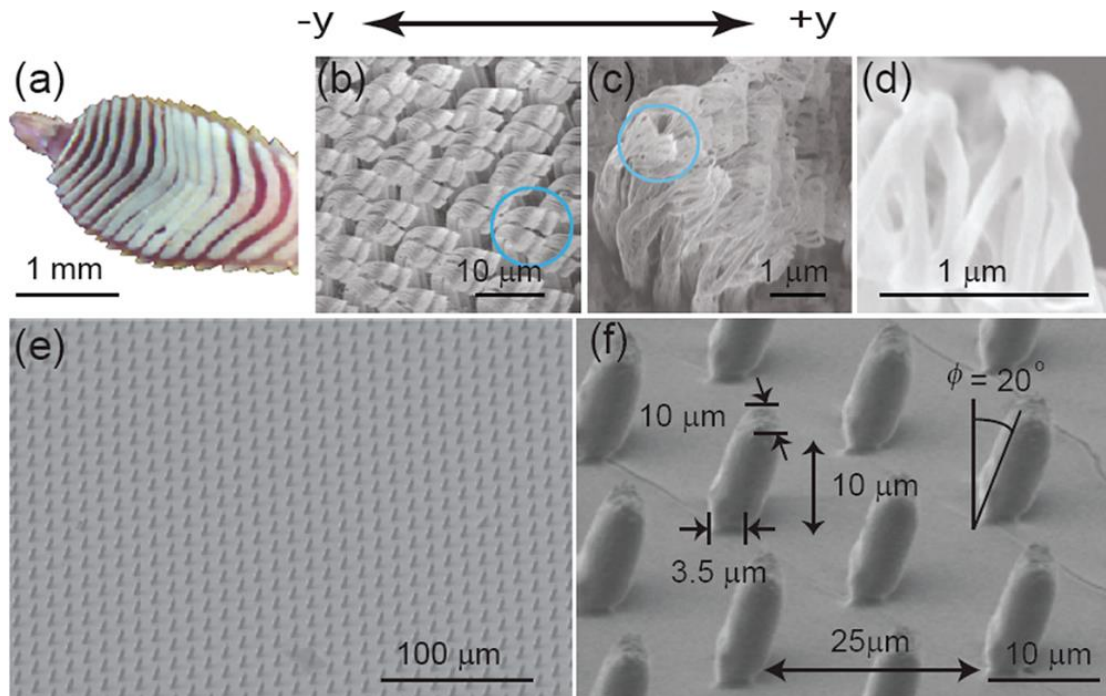


Εικόνα 2.20 Διαφορετικές στρατηγικές σχεδιασμού συστοιχίας βιομημητικών στηλών

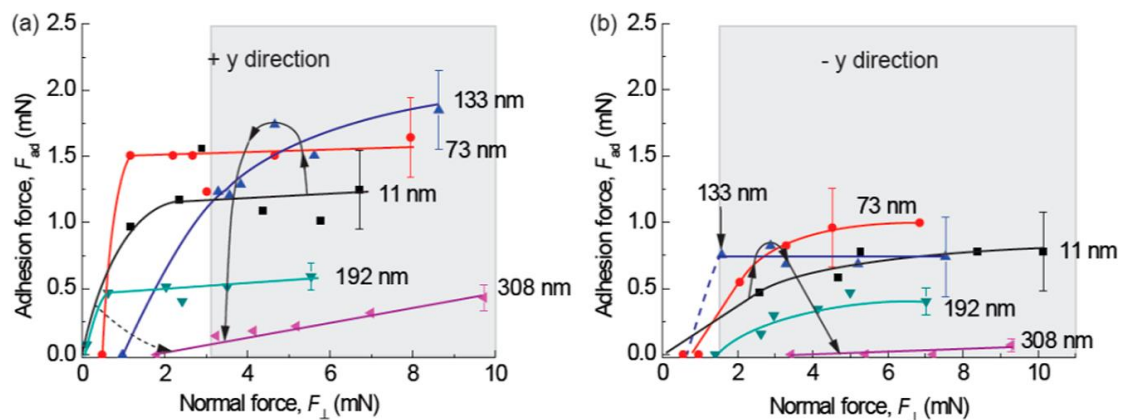
Τα αποτελέσματα από τα προσκολλητικά τεστ που πραγματοποιήθηκαν απέναντι σε ζαφειρένια σφαίρα, έδειξαν ότι το σχήμα της απόληξης επηρεάζει την προσκολλητική συμπεριφορά. Μάλιστα, μεγαλύτερη προσκολλητική δύναμη έδειξαν οι απολήξεις σε σχήμα μανιταριού ή σπάτουλας.

Μια άλλη περίπτωση, αυτή της συστοιχίας κεκλιμένων μικροπτερυγίων από PDMS (εικόνα 2.21), κατασκευασμένων με τη μέθοδο της λιθογραφίας δυο σταδίων, τα οποία έρχονται σε επαφή με δίσκο από SiO_2 , εξετάστηκε από τον Yu [90, 91]. Εξέτασε τη διακύμανση της

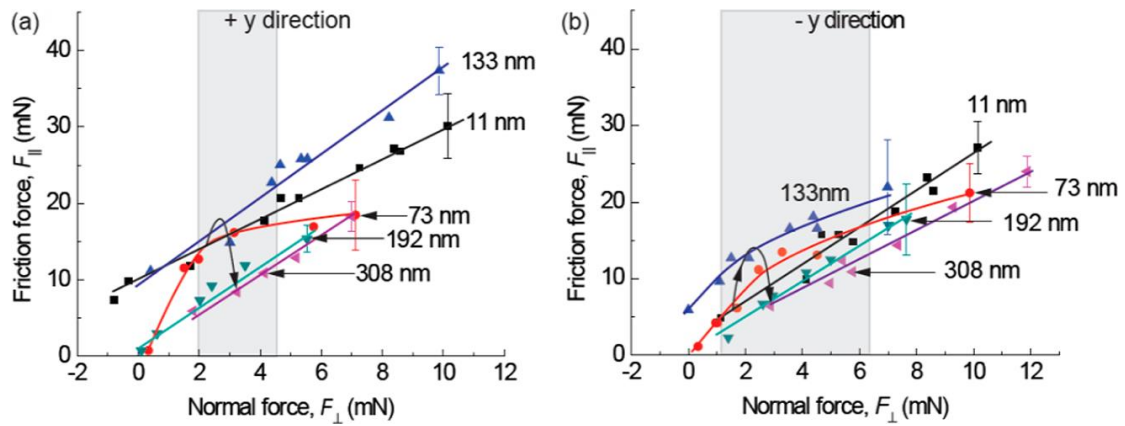
δύναμη της τριβής και της προσκόλλησης σε σχέση τη φορά της σχετικής κίνησης της επιφάνειας, καταλήγοντας σε αρκετά ανισότροπης φύσεως αποτελέσματα, λόγω της έμφυτης γεωμετρίας. Επίσης, εξέτασε την επίδραση της τραχύτητας για διάφορες τιμές RMS που φαίνονται παρακάτω, στα διαγράμματα διακύμανσης της δύναμης προσκόλλησης και τριβής σε σχέση με τη δύναμη προφόρτισης.



Εικόνα 2.21 Από τη βιοέμπνευση στην κατασκευή [91]



Εικόνα 2.22 Διάγραμμα προσκολλητικής δύναμης σε σχέση με την φόρτιση για διάφορες τραχύτητες a) στην κατεύθυνση των πτερυγίων b) στην αντίθετη κατεύθυνση [91]

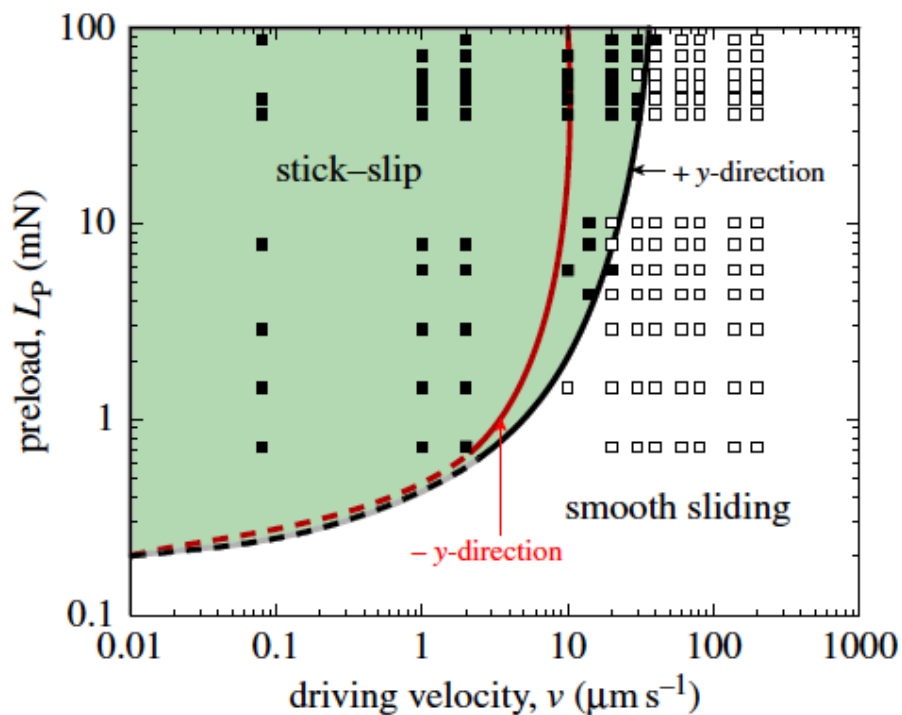


Εικόνα 2.23 Διάγραμμα δύναμης τριβής σε σχέση με την φόρτιση για διάφορες τραχύτητες α) στην κατεύθυνση των περυγίων β) στην αντίθετη κατεύθυνση [91]

Η εξήγηση που δόθηκε για την ανοδική τάση των δυνάμεων μέχρι κάποια τραχύτητα, είναι ότι πιθανότατα φαινόμενα σύμπλεξης λαμβάνουν χώρα στη διεπιφάνεια.

Στο ίδιο ακριβώς μοντέλο, έγιναν περαιτέρω πειραματικές έρευνες από τον Das [92, 93] σε σχέση με το φαινόμενο stick-slip. Αρχικά, σε σχέση με την πυκνότητα των περυγίων, όπου φάνηκε ότι για μικρές πυκνότητες παρατηρείται μικρής έντασης φαινόμενο stick slip, για μεσαίες μεγάλης έντασης, και για υψηλές πυκνότητες καθόλου, φαινόμενο που αποδίδεται στον αριθμό των περυγίων που βρίσκονται σε αστάθεια ολίσθησης κατά την αποκόλληση.

Επιπλέον εξετάστηκε η ένταση του φαινομένου stick slip για διαφορετικές τραχύτητες, ταχύτητες και προ-φορτίσεις. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε πιο έντονα σε πολύ τραχιές και πολύ λείες επιφάνειες. Έτσι, για διάφορες τιμές ταχύτητας και προφόρτισης, καταρτίστηκε ο χάρτης της εικόνας 2.24, που δείχνει τις περιοχές ομαλής και μη ομαλής κύλισης σε συνάρτηση με την προφόρτιση και την ταχύτητα του δίσκου.

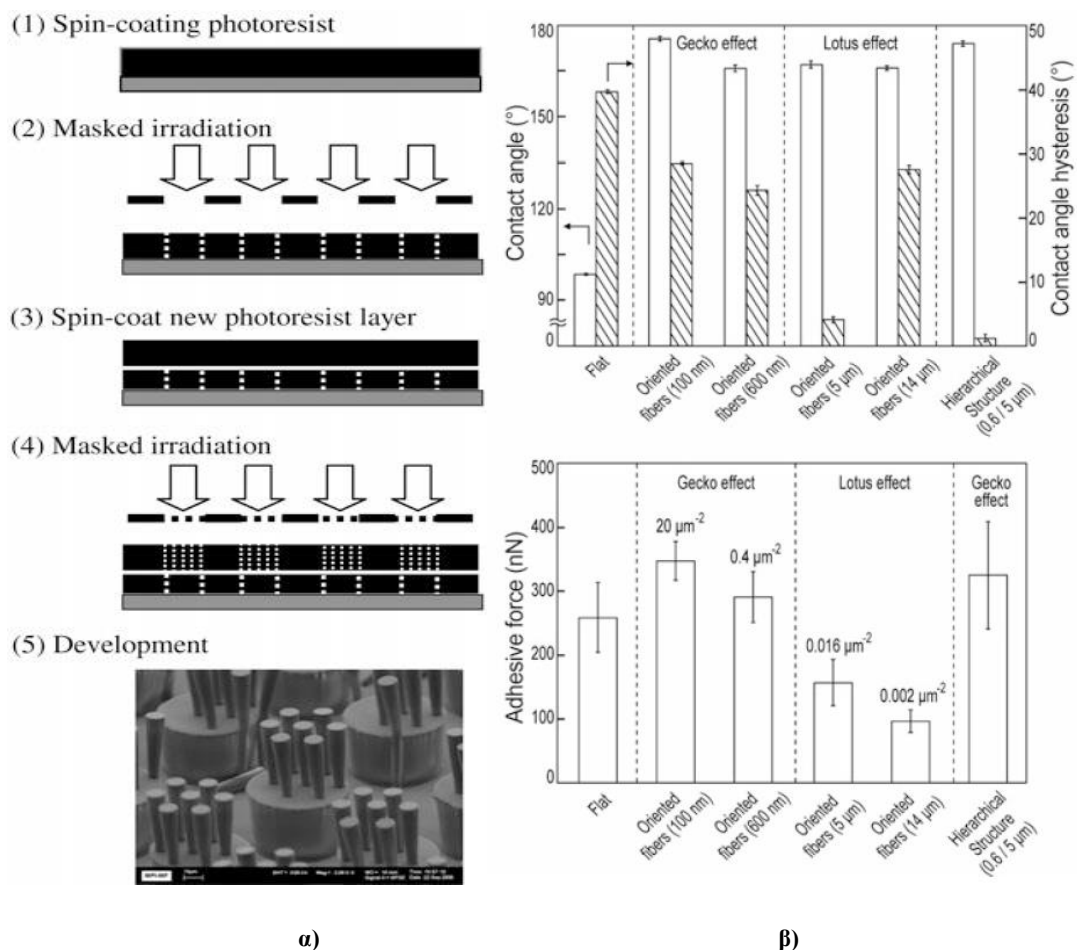


Εικόνα 2.24 Χάρτης ομαλής και μη ομαλής ολίσθησης (stick-slip) για διάφορες τιμές προφόρτισης και ταχύτητας δίσκου [93]

2.4.2 Πολυεπίπεδες ιεραρχικές δομές

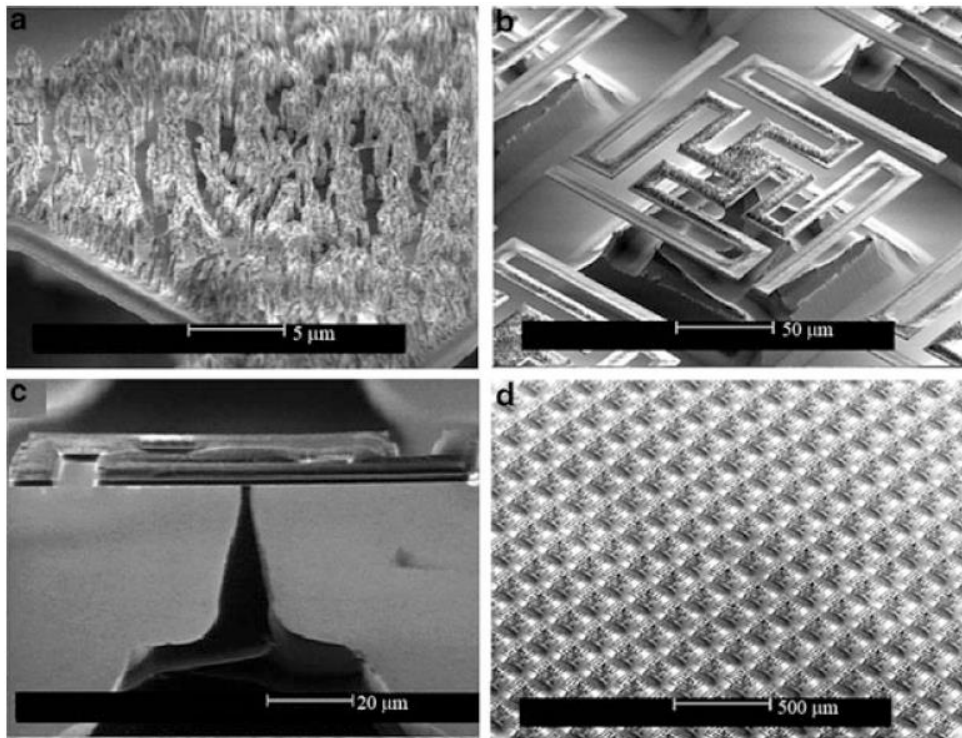
Συνήθως οι προαναφερθείσες δομές ενός επιπέδου, αν και παρουσιάζουν υψηλές προσκολλητικές δυνάμεις στη μικρο/νανο κλίμακα, δεν αναμένεται να παρουσιάσουν τόσο υψηλή προσκόλληση σε μεγαλύτερες κλίμακες λόγω της έλλειψης ενδοτικότητας και των ανεπιθύμητων συσσωματώσεων. Οι del Campo και Greiner [94] κατασκεύασαν μια ιεραρχική δομή με φωτολιθογραφία δύο επιπέδων (**εικόνα 2.25α**).

Οι Lee και Bhusham [95] κατασκεύασαν ιεραρχικές επιφάνειες ενός και δύο επιπέδων, φτιαγμένες από πολυπροπυλένιο. Αλλάζοντας την πυκνότητα και τη διάμετρο των ινών, πέτυχαν διαφορετικές ιδιότητες που προσομοιάζουν στο φαινόμενο της γκέκο είτε στο φαινόμενο του λωτού. Οι μετρήσεις για την γωνία επαφής νερού, την υστέρησή της, καθώς και για την προσκολλητική δύναμη φαίνονται στην **εικόνα 2.25β**.



Εικόνα 2.25 α) Διαδικασία παραγωγής ιεραρχικής βιομιμητικής επιφάνειας [94], **β)** Διαγράμματα γωνίας επαφής υγρού (επάνω) και προσκολλητικής δύναμης (κάτω) για διάφορες γεωμετρίες βιομιμητικών ινών [95]

Οι Northen and Turner [96] δημιούργησαν μια ενδοτική επιφάνεια δύο επιπέδων χρησιμοποιώντας φωτολιθογραφία ως μέθοδο κατασκευής. Το αποτέλεσμα ήταν ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο από δισκία πυριτίου με στήλες που υποστηρίζουν τετραγωνικές πλατφόρμες 100-150 μm από διοξείδιο του πυριτίου, πάνω στις οποίες βρίσκονται συστοιχίες από νανοραβδιά ύψους 2 μm και διαμέτρου 50-200 nm (**εικόνα 2.26**). Οι δοκιμές για την προσκολλητική πίεση έδειξαν ότι στις δομές δύο επιπέδων οι πιέσεις ήταν τέσσερις φορές μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές του ενός επιπέδου.



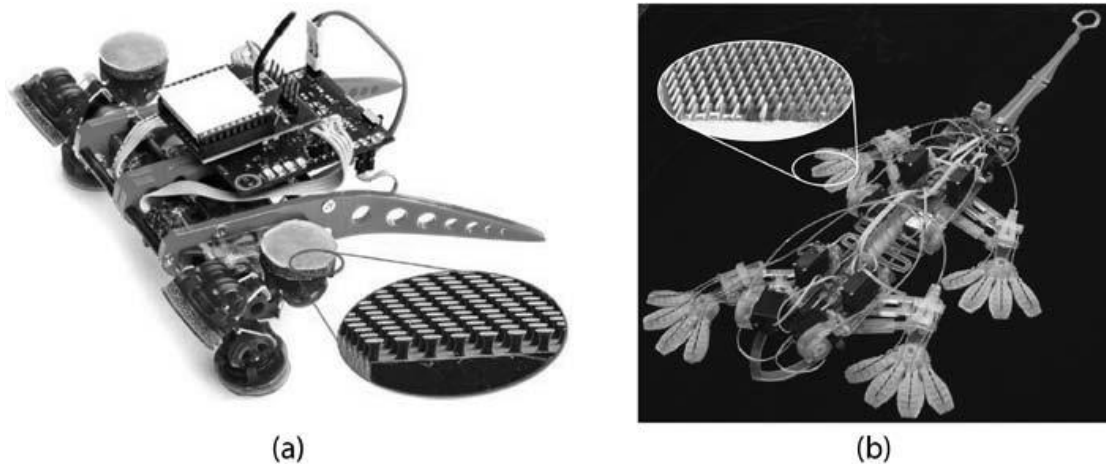
Εικόνα 2.26 Βιομιμητική προσκολλητική επιφάνεια δύο επιπέδων a) οργανικά ινίδια b) πλατφόρμες διοξειδίου του πυριτίου c) υποστηρικτικές στήλες d) μοτίβο της επιφάνειας [96]

2.4.3 Εφαρμογές των βιομιμητικών συγκολλητικών

Η ανάπτυξη σύνθετων υλικών εμπνευσμένων από τα πέλματα της σαύρας γκέκο έχει αρκετά μεγάλο εύρος εφαρμογών που έχουν την απαίτηση παθητικά έξυπνης ξηρής προσκόλλησης ειδικά στον τομέα της ρομποτικής και της ιατρικής.

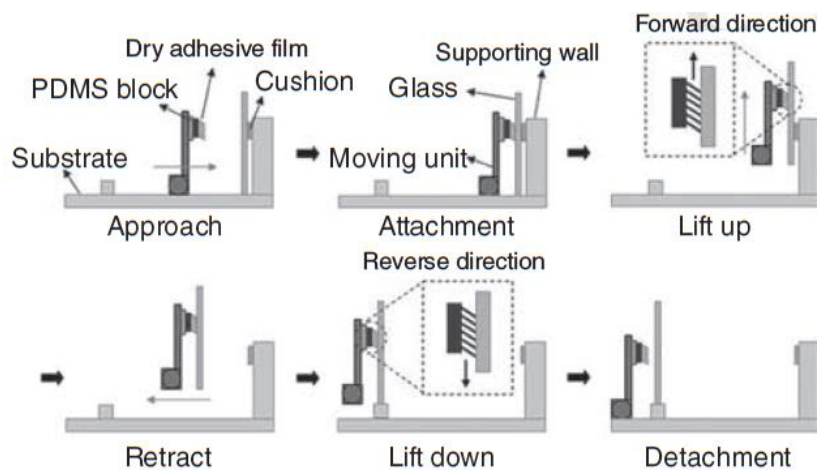
2.4.3.1 Ρομποτική

Τα κινούμενα ρομπότ, ιδιαίτερα τα αναρριχόμενα, αποτελούν μια ιδανική εφαρμογή, μιας και η αυθεντική έμπνευση για τα παραπάνω βιομιμητικά συγκολλητικά προέρχεται από την εξαιρετική ικανότητα αναρρίχησης των σαυρών γκέκο. Ο Murphy [97] χρησιμοποίησε απολήξεις σε σχήμα μανιταριού για την επιφάνεια προσκόλλησης, στο Waalbot (εικόνα 2.27α). Ο Kim [98] κατασκεύασε μια επιφάνεια με σφηνοειδείς απολήξεις, μιμούμενη τη ιδιότητα της τριβικής προσκόλλησης των πελμάτων της γκέκο, με προσαρμοστικότητα σε επιφάνειες διαφόρων τραχυτήτων (εικόνα 2.27β), που χρησιμοποιήθηκαν ως πέλματα για το Stickybot. Αν και τα δυο παραπάνω ρομπότ έχουν τη δυνατότητα αναρρίχησης σε τοίχους, προσμοιάζουν περισσότερο σε συμβατικά PSA και δεν αξιοποιούν όλες τις δυνατότητες της δομής της σαύρας γκέκο.



Εικόνα 2.27 α) Waalbot [97] και β) Stickybot [98]

Ένα άλλο πεδίο εφαρμογής της ρομποτικής είναι οι ρομποτικοί βραχίονες. Ο Jeong [99] αξιοποίησε την ιδιότητα της τριβικής προσκόλλησης των κεκλιμένων νανοϊνών για να χειριστεί μεγάλα γυάλινα πλαίσια που χρησιμοποιούνται για τρανζίστορ λεπτού στρώματος σε οθόνες υγρών κρυστάλλων (εικόνα 2.28). Η λειτουργία αυτή κατέστη δυνατή μόνο για διατμητικά φορτία, και απέδιδε λόγο δύναμης εφαρμογής-απελευθέρωσης 6:1. Το μειονέκτημά του βραχίονα αυτού είναι το γεγονός ότι για να είναι αποτελεσματικός χρειάζεται να έχει διεύθυνση τέτοια ώστε να κρατά τις ίνες υπό διάτμηση. Ο Kim [100] παρουσίασε ένα βραχίονα μικροδιαστάσεων με λόγο δύναμης εφαρμογής-απελευθέρωσης 1000:1, που χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή και μεταφορά πεταλιοειδών μικροεξαρτημάτων πυριτίου. Σε παρόμοιες περιπτώσεις, ο Menguc [101] και ο Carlson [102], σε μια κατασκευή με κεκλιμένες ελαστομερείς μικροστήλες, μπόρεσαν να ελέγξουν την προσκολλητική δύναμη ρυθμίζοντας την οριζόντια μετατόπιση, κάνοντας την κατασκευή πιο κατάλληλη για υψηλότερα φορτία.

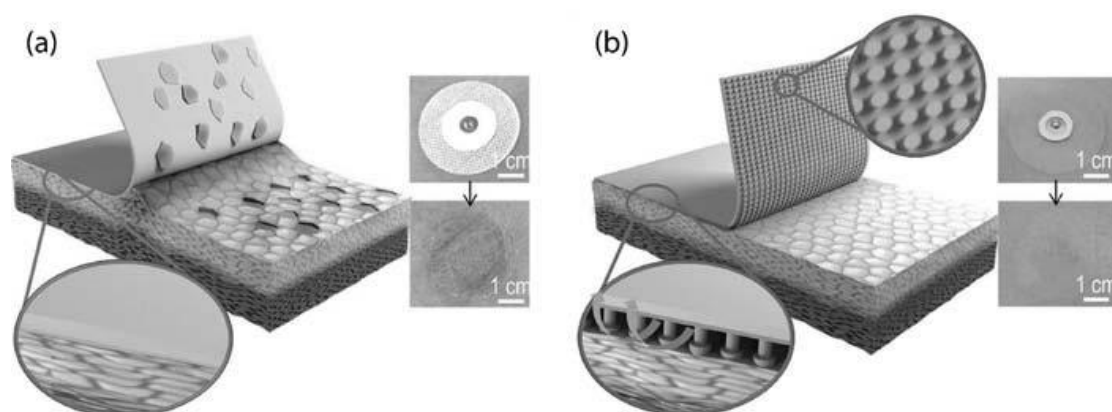


Εικόνα 2.28 Βιομηχανική εφαρμογή προσκολλητικών ινών για μεταφορά γυάλινων πλαισίων

2.4.3.2 Βιοϊατρικές συσκευές

Στον τομέα της ιατρικής τα βιομιμητικά συγκολλητικά θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως έμπλαστρα δέρματος ή ιατρικοί επίδεσμοι. Ο Kwak [103] κατασκεύασε τέτοια συγκολλητικά με απολήξεις σε σχήμα μανιταριού από PDMS. Σε σύγκριση με τα συμβατικά ακρυλικά έμπλαστρα έδειξαν αποτελεσματικότερο αερισμό και πολύ μεγαλύτερη δυνατότητα στον

καθαρισμό, άρα μεγαλύτερης αντοχής προσκολλητικές δυνάμεις, αν και μικρότερης δύναμης (εικόνα 2.29). Ο Mahdavi [104] εξέτασε την πιθανότητα χρησιμοποίησης των συγκολλητικών ως ράμματα. Χρησιμοποίησε κωνικές στήλες με βιοσυγκολλητική επένδυση από αλδεϋδη δεξτράνης που διπλασίασε τη διατμητική δύναμη προσκόλλησης, καθώς και βιοδιασπώμενο και βιοσυμβατό ελαστομερές. Μια άλλη πρόταση από τον τομέα των ιατρικών συσκευών είναι η πρόταση για μια ενεργή ενδοσκοπική κάψουλα [105], η οποία έχοντας άκρα με τη βιομιμητική δομή της γκέκο, θα μπορούσε να εφαρμόσει ικανοποιητική προσκολλητική δύναμη στα τοιχώματα του οισοφάγου, αντέχοντας τις αναμενόμενες περισταλτικές δυνάμεις.



Εικόνα 2.29 α) Συμβατικός και β) βιο-εμπνευσμένος ιατρικός επίδεσμος [103]

2.5 Μελλοντικές κατευθύνσεις

Έπειτα από σχεδόν δεκαπέντε χρόνια με ερευνητικό ενδιαφέρον και αξιοσημείωτες ανακαλύψεις, τα εμπνευσμένα από τη γκέκο συγκολλητικά μεταβαίνουν από τη φάση των πρωτότυπων τεχνολογικών υλικών με εξαιρετικές προοπτικές, σε αυτή της νέας τεχνολογίας με αποδεδειγμένες δυνατότητες. Παρά όλα αυτά, η κατανόηση της συμπεριφοράς και των αρχών της προσκόλλησης της γκέκο είναι κυρίως ακαδημαϊκή και συνήθως περιορίζεται στην επαφή με λείες και άκαμπτες επιφάνειες. Για παράδειγμα, ο ρόλος της βισκοελαστικότητας στην δύναμη προσκόλλησης δομών με συστοιχίες παραμένει σχετικά ασαφής, παρά κάποιες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί [106]. Επίσης, ελάχιστη έρευνα έχει πραγματοποιηθεί επάνω στην προσκολλητική συμπεριφορά απέναντι σε μαλακές και ενδοτικές επιφάνειες. Μια άλλη βασική ιδιότητα που χρήζει περαιτέρω εξερεύνησης είναι αυτή του αυτο-καθαρισμού, η οποία δεν έχει διερευνηθεί σε βαθμό που θα μπορούσε να οδηγήσει στη συστηματική κατασκευή αυτο-καθαριζόμενων συγκολλητικών. Επιπλέον, δεν υπάρχει κάποιο ικανοποιητικό μοντέλο που να λαμβάνει υπ' όψιν την τραχύτητα.

Η περαιτέρω διερεύνηση των παραπάνω και πολλών άλλων παραμέτρων θα έκανε δυνατή την εισαγωγή των βιομιμητικών συγκολλητικών σε μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογών, όπως η αντικατάσταση συγκολλητικών τύπου Velcro, φερμουάρ, σαν συνδετικό για προσωρινές ή επείγουσες κατασκευές και, τέλος, σαν αντικαταστάτης κλασικών μέσων σύνδεσης όπως καρφιά, συρραπτικά και κοχλίες.

3 Υλοποίηση υπολογιστικού μοντέλου δίσκου-βιομημητικών πτερυγίων στο Comsol.

Για την επίλυση προβλημάτων στα οποία η πολυπλοκότητά τους σε διάφορα στάδια καθιστούν αδύνατη την επίλυσή τους, συχνά καταφεύγουμε στη χρήση διαφόρων αριθμητικών μεθόδων. Μια από τις πιο διαδεδομένες αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method, FEM), που αποτελεί μια εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων, και η βάση για τη χρησιμοποίησή της τέθηκε τη δεκαετία του '40. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, μια πολύπλοκη περιοχή, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, που ονομάζονται Πεπερασμένα Στοιχεία (Finite Elements), τα οποία συνθέτουν ένα πλέγμα, στους κόμβους του οποίου υπολογίζονται προσεγγιστικά οι ζητούμενες προς επίλυση τιμές. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αριθμητική επίλυση διαφόρων φυσικών κλάδων σε μόνιμες ή μεταβατικές καταστάσεις. Συνήθως, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει τα εξής τέσσερα στάδια:

1. Η γεωμετρική κατασκευή του μοντέλου, η οποία υλοποιείται σε ένα πρόγραμμα CAD.
2. Η διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία του γεωμετρικού μοντέλου, καθώς και η εισαγωγή επιπλέον δεδομένων για τον τρόπο επίλυσης (pre processing).
3. Η επίλυση των παραπάνω δεδομένων, με χρήση της κατάλληλης υπολογιστικής μεθόδου από τον επιλύτη (solver).
4. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της επίλυσης, με τη χρήση του τελικού επεξεργαστή (post processor) για την απεικόνιση και μελέτη των αποτελεσμάτων της επίλυσης του προβλήματος.

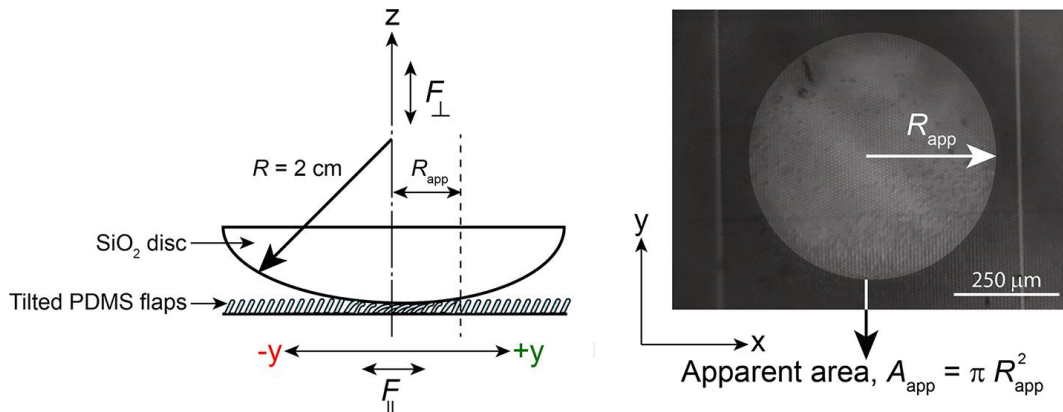
3.1 Το πακέτο λογισμικού Comsol Multiphysics

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για την υπολογιστική προσομοίωση και μελέτη των τριβολογικών φαινομένων από τη σχετική κίνηση ενός δίσκου διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) πάνω στα κεκλιμένα μικρο-πτερύγια μιας βιομημητικής επιφάνειας από πολυδιμεθυλοσιλοξάνιο (PDMS), χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης Comsol Multiphysics 5.2a. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση διάφορων εφαρμογών στο πεδίο του μηχανικού, μέσω της επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων (partial differential equations) με τις αρχικές και συνοριακές τους συνθήκες. Βασίζεται σε προηγμένες αριθμητικές μεθόδους για την μοντελοποίηση και επίλυση σύνθετων φυσικών προβλημάτων και διαθέτει ευρεία γκάμα φυσικών εφαρμογών όπως δομική ανάλυση, ηλεκτρικά φαινόμενα, μεταφορά θερμότητας, ακουστική, ρευστά και οπτική, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα για σχεδιασμό εφαρμογών συζευγμένων φυσικών φαινομένων. Επίσης, παρέχει στο μηχανικό κατάλληλο σχεδιαστικό περιβάλλον για μοντελοποίηση σε δύο ή τρεις διαστάσεις καθώς και αλληλεπίδραση με άλλα προγράμματα όπως η MATLAB και το AutoCad. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί το γεγονός ότι οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στις παρακάτω υποενότητες παρέχονται από το βασικό εγχειρίδιο του Comsol [107] στον τομέα της μηχανικής στερεών.

3.2 Σχεδιασμός της γεωμετρίας του μοντέλου

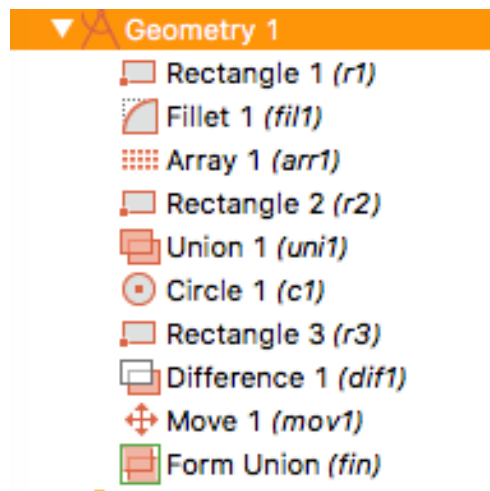
Προκειμένου να υπάρχει συγκριτική δυνατότητα των παραμέτρων που θα εξετασθούν στο επόμενο κεφάλαιο με πειραματικά αποτελέσματα, αποφασίστηκε η κατασκευή δισδιάστατης (2D) γεωμετρίας η οποία να προσομοιάζει αυτή της πειραματικής διάταξης δίσκου-βιομημητικής επιφάνειας, όπως περιγράφεται στις δημοσιεύσεις μιας σειράς πειραματικών

μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν από τους Yu [90, 91] και Das [92, 93], όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 3.1 Ποιοτική αναπαράσταση της πειραματικής εγκατάστασης που μοντελοποιήθηκε [92]

Η γεωμετρία αποτελείται ουσιαστικά από δύο βασικά μέρη: το κομμάτι του δίσκου και ένα μπλοκ με μια συστοιχία κεκλιμένων μικρο-πτερυγίων. Ο δίσκος παριστάνει μια κινούμενη επιφάνεια επαφής με καμπυλότητα, και τα μικρο-πτερύγια μια ενός επιπέδου ιεραρχίας ακίνητη επιφάνεια. Για το σχεδιασμό της γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκαν ως επιθυμητές μονάδες μέτρησης μήκους τα μm και γωνίας οι μοίρες. Στην **εικόνα 3.2** φαίνονται συνοπτικά όλες οι γεωμετρικές οντότητες και διεργασίες που πραγματοποιήθηκαν για την κατασκευή της γεωμετρίας.



Εικόνα 3.2 Οι βασικοί γεωμετρικοί υποκόμβοι της γεωμετρίας που χρησιμοποιήθηκε

3.2.1 Σχεδιασμός του μπλοκ και των βιομημητικών μικρο-πτερυγίων

Για το σχεδιασμό του μπλοκ με τα ενσωματωμένα βιομημητικά μικρο-πτερύγια ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

1. Έχοντας ανοίξει τον πλοηγό Model Wizard, που εμφανίζεται όταν ανοίξουμε το Comsol, επιλέγουμε σύστημα συντεταμένων για 2D γεωμετρία.
2. Για την κατασκευή του πτερυγίου παραμετροποιήθηκαν κάποιες βασικές διαστάσεις, που φαίνονται στον **πίνακα 3.1**.

Περιγραφή διάστασης	Όνομα μεταβλητής	Τιμή
μήκος πτερυγίου	L	10.64 μm
ύψος πτερυγίου	H	10 μm
πλάτος πτερυγίου	W	3.5 μm
γωνία κλίσης	TH	20°
οριζόντια απόσταση μεταξύ πτερυγίων	D	12 μm
πλήθος πτερυγίων	flap_num	10

Πίνακας 3.1 βασικές παράμετροι γεωμετρίας

Για την κατασκευή ενός πτερυγίου επιλέχθηκε η κατασκευή ορθογωνίου διαστάσεων $W*2L$, κεκλιμένο κατά 20° ανθρωπολογικά με τη διαδικασία **Geometry**→**Rectangle**, και τοποθέτηση των επιθυμητών διαστάσεων.

Καθώς η γωνία κλίσης έχει ως αρχή μέτρησης το κέντρο του ορθογωνίου, επιλέχθηκε διπλάσιο μήκος για αυτό το ορθογώνιο και τοποθέτηση του κέντρου του στον άξονα y, με τη λογική ότι όταν ενωθεί στη συνέχεια με το μπλοκ, θα συγχωνευτεί η περιττή επιφάνεια. Στη συνέχεια, με τη διεργασία **fillet** κοιλιούνται οι δύο πάνω άκρες σε ακτίνα $W/2$.

3. Για να δημιουργηθεί η επιθυμητή συστοιχία πτερυγίων επιλέγεται η εντολή **Geometry**→**Transforms**→**Array**, η οποία πραγματοποιείται με δεδομένο τον αριθμό των επαναλήψεων της γεωμετρικής οντότητας των πτερυγίων (flap_num) αλλά και την σταθερή οριζόντια απόσταση τοποθέτησής τους (D). Για την επίτευξη διαφορετικής πυκνότητας τοποθέτησης πτερυγίων στον ίδιο χώρο, σε περιπτώσεις που θα μελετηθούν παρακάτω, είναι σημαντικό ο λόγος $D/\text{flap_num}$ να διατηρείται σταθερός.
4. Για την κατασκευή του ορθογωνίου μπλοκ $125\mu\text{m}*30\mu\text{m}$ που θα εδράζονται τα πτερύγια, με παρόμοια διαδικασία με παραπάνω, δημιουργήθηκε ένα ορθογώνιο, έτσι ώστε η πάνω πλευρά του να συμπίπτει με τον άξονα y, προκειμένου τη δημιουργία των επιθυμητών διαστάσεων των πτερυγίων, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.
5. Με την εντολή **Geometry**→**Booleans and partitions**→**Union** ενοποιήθηκαν οι δυο γεωμετρικές οντότητες που δημιουργήθηκαν: της συστοιχίας των πτερυγίων και του ορθογωνίου. Τα εσωτερικά όρια δεν διατηρήθηκαν, καθώς δεν θα αξιοποιηθούν κάπως στη συνέχεια.

Μετά την επιλογή **Build all** από την ενότητα της γεωμετρίας, οριστικοποιούνται τα μέρη που αποτελείται, τα οποία είναι: 2 τομείς, 57 σύνορα και 57 κορυφές.

3.2.2 Σχεδιασμός του δίσκου

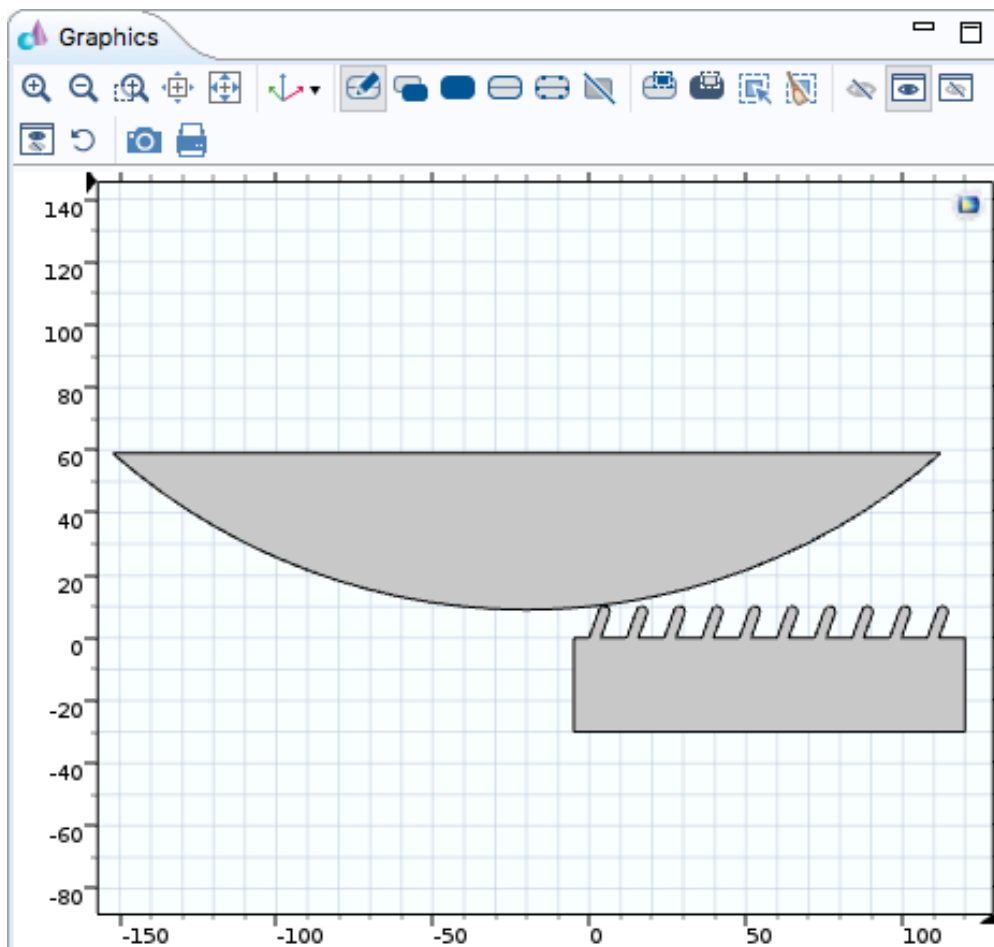
Για το σχεδιασμό του δίσκου πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

1. Επιλογή δημιουργίας της γεωμετρικής οντότητας ημικυκλίου ακτίνας 200 μm , με την επιλογή **Geometry**→**Circle**, και τοποθέτηση των διαστάσεων στα αντίστοιχα πεδία. Επειδή η ακτίνα του δίσκου ήταν μια παράμετρος που άλλαξε στις προσομοιώσεις που θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο, η συντεταγμένη κατά y του κέντρου του

διατηρούταν πάντα ίση με την ακτίνα του, ώστε να είναι ευκολότερη η κάθετη μετακίνησή του.

2. Δημιουργία ορθογώνιου με διαστάσεις τέτοιες, ώστε όταν αφαιρεθεί από το ημικόκλιο, να δώσει ένα μικρότερο κομμάτι του, το οποίο θα επαρκεί για την επαφή με τα πτερύγια. Ολόκληρο το ημικόκλιο δεν θα χρησιμοποιε σε κάτι, και θα ήταν υπολογιστικά επιβαρυντικό.
3. Εκτέλεση της εντολής **Geometry→Booleans and partitions→Difference**, η οποία υλοποιεί γεωμετρική αφαίρεση σε δύο γεωμετρικές οντότητες. Εδώ αφαιρέθηκε από το ημικόκλιο το ορθογώνιο.
4. Εκτέλεση της εντολής **Geometry→Transforms→Move**, προκειμένου να μετακινήσουμε το δημιουργηθέν κομμάτι κύκλου κατά τους άξονες x και y, στο σημείο που θέλουμε να βρίσκεται όταν αρχίσει η προσομοίωση.

Τελικά, μέσω όλων των παραπάνω βημάτων, δημιουργήθηκε η επιθυμητή αρχική γεωμετρία για την υπολογιστική προσομοίωση. Πρέπει να αναφερθεί, ότι αν και σε αρκετές προσομοιώσεις η γεωμετρία άλλαξε, είτε ως προς το μέγεθος του κύκλου, είτε ως προς την πυκνότητα των πτερυγίων, είτε ως προς τη σχετική θέση του δίσκου και των πτερυγίων, τα βήματα για την υλοποίησή της είναι όπως περιγράφηκαν παραπάνω. Έτσι, η εικόνα της τελικής γεωμετρίας που προέκυψε παρουσιάζεται στην **εικόνα 3.3**.



Εικόνα 3.3 Η τελική γεωμετρία του μοντέλου στη διεπιφάνεια του προγράμματος

3.3 Επιλογή υλικών

Η επιλογή των υλικών έγινε με βάση την ίδια πειραματική διάταξη που έχει αναφερθεί και παραπάνω. Το υλικό του δίσκου είναι το διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂), το οποίο είναι στη παρασκευασμένη τεχνητά μορφή του, ως silica gel. Το υλικό του μπλοκ και των μικροπτερυγίων είναι το πολυδιμεθυλοσιλοξάνιο (PDMS), η οποία είναι ένα οργανικό πολυμερές, γνωστό για τις ασυνήθιστες ρεολογικές του ιδιότητες. Η πολύ καλά ενημερωμένη βιβλιοθήκη υλικών του Comsol περιλαμβάνει αυτά τα δύο υλικά: το SiO₂ βρίσκεται στη διαδρομή **MEMS→insulators→SiO₂**, ενώ το PDMS στη διαδρομή **MEMS→Polymers→PDMS**. Η εντολή **Materials→Add Material** προσθέτει τα δύο παραπάνω υλικά στο μοντέλο, και καθιστά δυνατή την εισαγωγή τους σε γεωμετρικές οντότητες. Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των παραπάνω υλικών, καθώς και η γεωμετρική οντότητα που εφαρμόζονται, φαίνονται στον **πίνακα 3.2**.

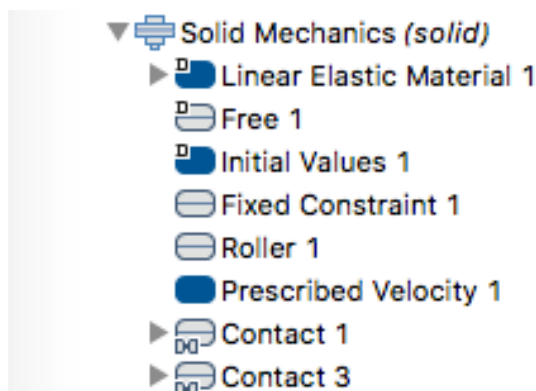
Υλικό	PDMS	SiO ₂
Περιοχή	μπλοκ πτερυγίων	δίσκος
Πυκνότητα (kg/m ³)	970	2200
Μέτρο Young (MPa)	0.75	70000
Λόγος Poisson	0.49	0.17

Πίνακας 3.2 βασικές μηχανικές ιδιότητες των δυο υλικών

Αξίζει να σημειωθεί, ότι το Comsol, πέρα από τις βασικές ιδιότητες των υλικών, διαθέτει μια πληθώρα επιπλέον ιδιοτήτων για διαφορετικές φυσικές (μηχανική των στερεών, ηλεκτρομαγνητισμός, ρεολογία, ακουστική κ.ά.) και για διάφορα μοντέλα υλικού (γραμμικό και μη γραμμικό ελαστικό, υπερελαστικό, ελαστοπλαστικό, βισκοελαστικό κ.ά.).

3.4 Ρυθμίσεις φυσικών μοντέλων

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο, θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήθηκε η φυσική του προβλήματος, ώστε να προσομοιωθεί η επαφή δίσκου-πτερυγίων λόγω της σχετικής τους κίνησης με όσο το δυνατόν καλύτερο τρόπο. Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στην μοντελοποίηση της τριβής και της προσκόλλησης. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι κόμβοι που δημιουργήθηκαν στην ενότητα της φυσικής:



Εικόνα 3.3 Υποκόμβοι των επιλογών φυσικής

3.4.1 Επιλογή φυσικής

Για την μοντελοποίηση επαφών, από τα διαθέσιμα είδη φυσικών που παρέχει το Comsol στο χρήστη, η πιο κατάλληλη ενότητα φυσικής είναι αυτή της δομοστατικής μηχανικής (Structural Mechanics Module), η οποία έχει σαν διαθέσιμες επιλογές διεπαφών τη μηχανική των στερεών (Solid Mechanics), κελύφη και πλάκες (Shell and Plate), μεμβράνες (Membrane), δοκούς (Beam) και δικτυώματα (Truss). Από τις προαναφερθείσες επιλογές, η μοναδική διεπαφή που παρέχει τη δυνατότητα για μοντελοποίηση επαφών είναι αυτή της μηχανικής των στερεών, η οποία και επιλέχθηκε τελικά. Η διεπαφή της μηχανικής των στερεών βασίζεται στις γενικές αρχές της μηχανικής του συνεχούς μέσου. Για δισδιάστατες γεωμετρίες, όπως αυτή που υλοποιήθηκε παραπάνω, υπάρχουν δύο παραλλαγές της διεπαφής της μηχανικής των στερεών για το επίπεδο xy : αυτή της επίπεδης τάσης (plane stress) και αυτή της επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain). Για την πρώτη, οι συνιστώσες εκτός επιπέδου για τον τανυστή των τάσεων θεωρούνται μηδενικές, ενώ για τη δεύτερη, θεωρούνται μηδενικές οι συνιστώσες παραμορφώσεων εκτός του επιπέδου. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του Comsol, η πρώτη περίπτωση είναι προτιμότερη για γεωμετρίες που έχουν μικρό πάχος σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις, ενώ το αντίθετο ισχύει για τη δεύτερη περίπτωση. Σύμφωνα με τις πειραματικές διαστάσεις των άρθρων που αναφέρθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου, το πάχος (thickness) επιλέχθηκε στα 10 μm . Συνεπώς, εφόσον το πάχος είναι αρκετά μικρό σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις, επιλέχθηκαν οι επίπεδες τάσεις (plane stress), ως τρόπος ανάλυσης.

3.4.2 Μοντέλο υλικού

α) Γραμμικό ελαστικό μοντέλο υλικού (linear elastic material model)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα μοντέλα υλικού. Το μοντέλο υλικού που επιλέχθηκε για τις περισσότερες προσομοιώσεις, είναι αυτό του γραμμικού ελαστικού υλικού. Σε αυτό το μοντέλο, ο νόμος του Hooke συσχετίζει τον τανυστή των τάσεων με αυτόν των παραμορφώσεων ως εξής:

$$\sigma = \sigma_{ex} + C : \varepsilon_{el} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{el} = \varepsilon - \varepsilon_{inel} \quad (3.2)$$

όπου C είναι ο 4^{ης} τάξης τανυστής ελαστικότητας, σ_{ex} είναι η επιπλέον συνεισφορά της τάσης λόγω αρχικών ή βισκοελαστικών τάσεων και η ελαστική παραμόρφωση ε_{el} αποτελεί τη διαφορά της συνολικής παραμόρφωσης ε με όλες τις μη ελαστικές παραμορφώσεις ε_{inel} . Επίσης η ενεργειακή πυκνότητα παραμόρφωσης είναι:

$$W_s = \frac{1}{2} \varepsilon_{el} : (C : \varepsilon_{el} + 2\sigma_0) \quad (3.3)$$

με σ_0 την αρχική τάση. Η έκφραση αυτή έχει την προϋπόθεση ότι η αρχική κατανομή τάσεων παραμένει σταθερή κατά την παραμόρφωση του υλικού. Επίσης, σε ότι αφορά τη διακύμανση των μηχανικών ιδιοτήτων στις χωρικές κατευθύνσεις επιλέχθηκε ο τύπος του ισότροπου υλικού (isotropic material). Σε αυτή την περίπτωση, το μητρώο ελαστικότητας δύο διαστάσεων έχει την εξής έκφραση:

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και ν ο λόγος Poisson.

β) Υπερελαστικό μοντέλο υλικού (Hyperelastic material model)

Το υπερελαστικό μοντέλο υλικού ορίζεται από την ενεργειακή πυκνότητα ελαστικής παραμόρφωσης W_s , που είναι συνάρτηση της κατάστασης ελαστικής παραμόρφωσης. Βασικό χαρακτηριστικό του μοντέλου αυτού είναι ότι αποδίδει μη γραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων, σε αντίθεση με τον νόμο του Hooke για την ελαστικότητα. Το μοντέλο αυτό θεωρείται κατάλληλο για τη μοντελοποίηση πολυμερών και βιολογικών ιστών, και παρέχει πιο ακριβή αποτελέσματα για μεγάλες παραμορφώσεις σε σχέση με το κλασικό γραμμικό ελαστικό μοντέλο για το PDMS, σύμφωνα με πειραματικές έρευνες για τους τύπους Neo-Hookean και Mooney-Rivlin (δύο παραμέτρων) [108, 109]. Συνεπώς, τα δυο μοντέλα αυτά δοκιμάστηκαν για το PDMS σε προσομοίωση. Για το μοντέλο υλικού Neo-Hookean, η ενεργειακή πυκνότητα δίνεται από τον τύπο:

$$W_s = \frac{1}{2}\mu(I_1 - 3) - \mu \ln(J_{el}) + \frac{1}{2}\lambda[\ln(J_{el})]^2 \quad (3.5)$$

όπου J_{el} λόγος ελαστικού όγκου, I_1 η πρώτη σταθερά του ταυστή παραμορφώσεων Cauchy-Green, και λ και μ οι δυο παράμετροι Lamé, οι οποίοι υπολογίζονται ως εξής:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.6)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.7)$$

που υπολογίζονται από τις προκαθορισμένες τιμές του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson για το PDMS. Για το μοντέλο Mooney-Rivlin δύο παραμέτρων, η ενεργειακή πυκνότητα δίνεται ως εξής:

$$W_s = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{2}\kappa(J_{el} - 1)^2 \quad (3.8)$$

όπου \bar{I}_1 και \bar{I}_2 οι δύο ισόχωρες μεταβλητές ταυστή παραμορφώσεων Cauchy-Green, οι C_{10} και C_{01} οι δύο παράμετροι που σχετίζονται με την παράμετρο Lamé μ , και κ το μέτρο όγκου (Bulk modulus) που είναι:

$$\kappa = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3.9)$$

Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας των παραμέτρων λ , μ , κ που υπολογίστηκαν από τους παραπάνω τύπους αλλά και των C_{10} και C_{01} των οποίων οι τιμές πάρθηκαν από τα πειραματικά αποτελέσματα των Yu [108] και Payne [110]. Οι παρακάτω παράμετροι απαιτούνται από το πρόγραμμα προκειμένου να γίνει η προσομοίωση των δυο υπερελαστικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν:

	λ (GPa)	μ (GPa)	κ (GPa)	C_{10} (MPa)	C_{01} (MPa)
Neo-Hookean	12.332214.77	0.251677852			
Mooney-Rivlin	-	-	12.5	0.0124	0.127

Πίνακας 3.3 τιμές των παραμέτρων Lamé λ , μ του μέτρου όγκου κ , και των δυο παραμέτρων Mooney-Rivlin

3.4.3 Κινητικοί περιορισμοί

Η επιθυμητή προσομοίωση της κίνησης είναι να υπάρχει οριζόντια σταθερής ταχύτητας κίνηση του δίσκου με κατεύθυνση τα θετικά του άξονα x, και ταυτόχρονα το μπλοκ με τα πτερύγια ακίνητο. Οι αρχικές συνθήκες μετατόπισης και ταχύτητας του πεδίου, από τον κόμβο **Initial Values**, τέθηκαν μηδενικές. Επίσης, επιβλήθηκε στην πάνω πλευρά του δίσκου συνθήκη κύλισης (Roller), καθώς και πάκτωση (Fixed constraint) στην κάτω και στις δυο πλαϊνές πλευρές του μπλοκ. Επιπλέον, δημιουργήθηκε κόμβος προκαθορισμένης ταχύτητας (prescribed velocity) για την επιφάνεια του δίσκου, στην οποία τέθηκε σταθερή ταχύτητα ίση με 15 $\mu\text{m}/\text{sec}$, κατά τον άξονα x. Σε κάποιες προσομοιώσεις που έγιναν, χρησιμοποιήθηκε επιβολή δύναμης αντί της ταχύτητας σε όλη την επιφάνεια του δίσκου, με ανεπιτυχή αποτελέσματα σύγκλισης.

3.4.4 Μοντελοποίηση συνθηκών επαφής

Μια από τις πιο σημαντικές ενότητες των βημάτων για την προετοιμασία των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, είναι η μοντελοποίηση της επαφής. Στο Comsol υπάρχουν δυο διαθέσιμοι (σε διδιάστατες είτε τρισδιάστατες γεωμετρίες) αλγόριθμοι: η μέθοδος επαυξητικής λαγκραντζιανής (augmented Lagrangian method) και η μέθοδος ποινής (penalty method). Η πρώτη, λύνει το σύστημα των εξισώσεων με διαχωριστικό τρόπο (segregated way), εισάγοντας επαυξητικές συνιστώσες για την τάση επαφής και το διάνυσμα της τριβής πρόσφυσης. Μια επιπλέον επαναληπτική διαδικασία προστίθεται για την ξεχωριστή επίλυση των προαναφερθέντων μεταβλητών και των συμβατικών μεταβλητών μετατόπισης και ο αλγόριθμος συνεχίζει αυτή τη διαδικασία μέχρι την ικανοποίηση του κριτηρίου σύγκλισης.

Στη μέθοδο ποινής, δεν προστίθενται οι παραπάνω συνισταμένες, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η ανάγκη για τους επιπλέον βαθμούς ελευθερίας που εισάγουν οι μεταβλητές της τάσης επαφής και του διανύσματος της τριβής πρόσφυσης, οι οποίες υπολογίζονται απλούστερα μέσω των μετατοπίσεων και της δυσκαμψίας ποινής (penalty stiffness). Στα παρακάτω υποκεφάλαια γίνεται περιγραφή του πως υλοποιήθηκε η επαφή, η τριβή και η προσκόλληση στο μοντέλο.

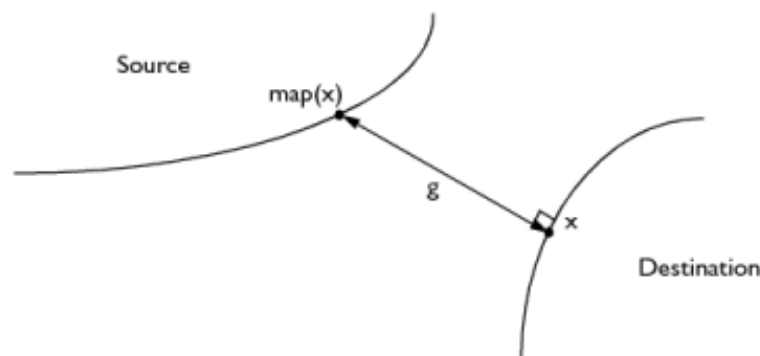
3.4.4.1 Δημιουργία ζευγαριού επαφής (contact pair)

Το πρωταρχικό βήμα που πρέπει να πραγματοποιηθεί, προκειμένου να υπάρχει δυνατότητα προσομοίωσης ενός φυσικού προβλήματος που περιέχει επαφή, είναι η δημιουργία ενός ζευγαριού επαφής. Για να συμβεί αυτό πρέπει να επιλέξουμε τη διαδρομή **Definitions**→**Pairs**→**Contact pair**. Αφού γίνει αυτό, πρέπει να επιλέξουμε ποιο σύνορο θα είναι η πηγή (source boundary) και ποιο ο προορισμός (destination boundary). Στο εγχειρίδιο του Comsol για την ανάλυση επαφών, αναφέρεται ότι ως σύνορο-πηγή πρέπει να επιλεγθεί

εκείνο με τη μεγαλύτερη δυσκαμψία, εφόσον δεν ανήκει σε σώμα που έχει δηλωθεί ως άκαμπτο (rigid body) ή δεν υπάρχει γεωμετρία θηλυκού-αρσενικού. Έτσι, στην περίπτωση μας, ως σύνορο-πηγή επιλέχθηκε το κοίλο μέρος του δίσκου, ενώ ως σύνορο-προορισμός, αυτό της πάνω επιφάνειας του μπλοκ πτερυγίων, αφού η διαφορά δυσκαμψίας μεταξύ των δυο υλικών που έχουν δηλωθεί παραπάνω είναι σαφής. Ουσιαστικά, το ζευγάρι επαφών περιορίζει το σύνορο-προορισμός από το να διαπεράσει το σύνορο-πηγή, αλλά όχι απαραίτητα το αντίθετο.

3.4.4.2 Ο κόμβος επαφής (Contact node)

Αφού έχει ορισθεί το ζευγάρι επαφής, έχει νόημα η δημιουργία του κόμβου επαφής στον κλάδο της μηχανικής των στερεών: **Solid mechanics**→**Pairs**→**Contact**, και ύστερα μπορεί να επιλεγθεί από τα χαρακτηριστικά του κόμβου το επιθυμητό ζευγάρι επαφής. Πριν υπάρξει επαφή και για δεδομένο απόσταση των δύο συνόρων g , για κάθε σημείο που ανήκει στο σύνορο-προορισμός αναζητείται ένα σημείο ανταπόκρισης που ανήκει στο σύνορο-πηγή, σε κατεύθυνση κάθετη πάντα στο σύνορο-προορισμός (εικόνα 3.4). Έτσι, σημείο του συνόρου-πηγή δεν είναι απαραίτητα το πραγματικά κοντινότερο στο σημείο προορισμού, καθώς τα δύο σύνορα πλησιάζουν μεταξύ τους, το σημείο της πηγής μετατρέπεται στο καινούργιο κοντινότερο όσο η τιμή της απόστασης g μειώνεται, τείνοντας στο 0.



Εικόνα 3.4 Σχηματική αναπαράσταση από το εγχειρίδιο του Comsol ενός ζευγαριού επαφής συνόρων

Η μεταβλητή της απόστασης (gap distance variable) και του χειριστή του χάρτη $map(E)$ ορίζονται από το στοιχείο επαφής $elcontact$. Το ενεργό κενό d_g , στην γενική περίπτωση, υπολογίζεται ως εξής:

$$d_g = g - o_{dst} - \frac{o_{src}}{-(n \cdot map(n))} \quad (3.10)$$

όπου τα o_{dst} και o_{src} είναι εισαγόμενες από το χρήστη αποκλίσεις (offsets) από τις αρχικά μηδενικές τιμές απόστασης για την πηγή και τον προορισμό, αντίστοιχα. Ο κύριος λόγος χρήσης τους είναι να αποφευχθούν ανωμαλίες στη γεωμετρία που μπορεί να προκύψουν από την πλεγματοποίησή της. Αν και σε κάποιες δοκιμαστικές προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν, δεν εισήγαγαν κάποια σημαντική διαφορά στα αποτελέσματα της επαφής, συνεπώς η τιμή τους τέθηκε μηδενική, κάνοντας το ενεργό κενό ίσο με την τυπική μετρούμενη απόσταση ($d_g = g$).

3.4.4.3 Επιλογή αλγόριθμου επαφής (contact algorithm)

Στον κόμβο της επαφής (εικόνα 3.5), μπορούμε να διαλέξουμε τον επιθυμητό αλγόριθμο υπολογισμού πίεσης επαφής. Το Comsol ουσιαστικά επιβάλλει την τη χρήση του αλγόριθμου

ποινής, όταν στα χαρακτηριστικά της επαφής προστεθεί προσκόλληση, αλλά και τον προτείνει σε χρονικά εξαρτώμενα προβλήματα, όπως το παρόν. Σε σχέση με τον αλγόριθμο επαυξητικής λαγκρανζιανής, ο αλγόριθμος ποινής είναι απλούστερος και πιο στιβαρός. Ουσιαστικά βασίζεται στην εισαγωγή ενός άκαμπτου ελατηρίου ανάμεσα στις επιφάνειες επαφής. Έτσι, ο παράγοντας ποινής (penalty factor) μπορεί να ερμηνευτεί ως η σκληρότητα του ελατηρίου. Πολύ υψηλές τιμές του παράγοντα ποινής μπορεί να δημιουργήσουν αστάθειες. Η τιμή του παράγοντα ποινής, όπως φαίνεται στην **εικόνα 3.5**, είναι η τιμή $solid.cnt2.E_char/solid.hmin_dst$, που είναι ο λόγος του ισοδύναμου μέτρου του Young προς το ελάχιστο μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου, για το σύνορο προορισμού. Η πίεση επαφής στην κάθετη διεύθυνση υπολογίζεται ως εξής:

$$T_n = \begin{cases} -p_n d_g + p_0, & \text{όταν } d_g < \frac{p_0}{p_n} \\ 0 & , \text{όταν } d_g \geq \frac{p_0}{p_n} \end{cases} \quad (3.11)$$

όπου p_n είναι ο παράγοντας ποινής και p_0 η πίεση σε μηδενικό κενό. Η προκαθορισμένη τιμή για τη μεταβλητή p_0 είναι μηδέν, κάτι που σημαίνει ότι η πίεση επαφής αναπτύσσεται για μηδενικά κενά. Στις προσομοιώσεις που έγιναν, χρησιμοποιήθηκε προκαθορισμένη τιμή της μεταβλητής p_0 .

The image shows a software interface for configuring contact settings. It is divided into three sections:

- Contact Pressure Method:** A dropdown menu is set to "Penalty". Below it, "Characteristic stiffness:" is labeled E_{char} with a text input field containing "solid.Eequ" and a unit of "Pa".
- Penalty Factor:** "Contact pressure penalty factor:" is labeled p_n with a text input field containing "solid.cnt2.E_char/solid.hmin_dst" and a unit of "N/m³". There is an unchecked checkbox for "Offset penalty function". "Contact pressure at zero gap:" is labeled T_0 with a text input field containing "0" and a unit of "N/m²".
- Offset and Adjustment:** "Contact surface offset from geometric destination surface:" is labeled $d_{offset,d}$ with a text input field containing "0" and a unit of "m". "Contact surface offset from geometric source surface:" is labeled $d_{offset,s}$ with a text input field containing "0" and a unit of "m". There is an unchecked checkbox for "Force zero initial gap".

Εικόνα 3.5 Η διεπιφάνεια του κόμβου επαφής

3.4.4.4 Ο υποκόμβος τριβής (Friction node)

Ο υποκόμβος (του κόμβου επαφής) τριβής δημιουργείται από τη διαδρομή **Solid mechanics** → **Contact** → **Friction** και δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής τριβής στην επαφή των δυο συνόρων του ζευγαριού επαφής που έχει επιλεγεί στον γονικό κόμβο επαφής. Υπάρχουν δυο διαθέσιμα μοντέλα τριβής: το στατικό μοντέλο τριβής Coulomb και το εκθετικό δυναμικό μοντέλο τριβής Coulomb. Καθώς η προσομοίωση γίνεται στο πεδίο του χρόνου, επιλέχθηκε το δεύτερο μοντέλο. Σε αυτό, πρέπει να ορισθούν τέσσερις μεταβλητές, όπως φαίνεται στην **εικόνα 3.6** και επεξηγείται παρακάτω.

Εικόνα 3.6 Διεπιφάνεια υποκόμβου τριβής

Όπου m_stat είναι η μεταβλητή για το συντελεστή στατικής τριβής μ_s , που έχει δηλωθεί στις παραμέτρους. Έπισης εισάγεται και ο συντελεστής τριβής ολίσθησης μ_d , 10% μικρότερος από τον στατικό. Η αντίσταση κύλισης λόγω συνοχής T_{cohe} , προκειται για την τιμή της τάσης που πρέπει να ξεπεραστεί για να ξεκινήσει η κύλιση, και τέθηκε στην προκαορισμένη μηδενική τιμή της, καθώς τον ρόλο αυτό ουσιαστικά παίζει η προσκόλληση, που θα αναλυθεί παρακάτω. Επίσης, η μέγιστη εφαπτομενική τάση $T_{t,max}$ είναι το όριο για την εκκίνηση γλιστρίματος (slip), χωρίς να ληφθεί υπ' όψιν η κάθετη τάση. Προκειμένου να μην υπάρχει αυτό το όριο τίθεται η προκαθορισμένη τιμή του απείρου. Η τελευταία παράμετρος που πρέπει να εισαχθεί είναι αυτή του συντελεστή πτώσης της τριβής α_{dcf} , που δηλώνει πόσο απότομα θα γίνει η μετάβαση από τη στατική τριβή στην τριβή ολίσθησης, όπου τίθεται η τιμή 0.1. Η τιμή του συντελεστή τριβής δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d) \exp(-\alpha_{dcf} |u_s|) \quad (3.12)$$

με u_s τη ταχύτητα ολίσθησης. Καθώς η ταχύτητα είναι της τάξεως των μικρομέτρων ανά δευτερόλεπτο, είναι γεγονός ότι ο συντελεστής τριβής δεν αναμένεται να επηρεαστεί ιδιαίτερα από το συντελεστή πτώσης τριβής, σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση. Η εφαπτομενική δύναμη τριβής υπολογίζεται από το Comsol ως εξής:

$$T_t = \min\left(\frac{T_{t,crit}}{|T_{t,trial}|}, 1\right) T_{t,trial} \quad (3.13)$$

$$T_{t,trial} = -p_t s \quad (3.14)$$

όπου s είναι η απόσταση κύλισης και p_t είναι ο παράγοντας ποινής για τον υποκόμβο της τριβής, για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε η προκαθορισμένη του τιμή, που είναι τρεις φορές μικρότερη από αυτή του παραγοντα ποινής για τον κόμβο. Η τελευταία εξίσωση μπορεί να θεωρηθεί ως η τάση που παράγει ένα εφαπτομενικό ελατήριο σε αναλογία με την απόσταση

που έχει επιμηκυνθεί. Επίσης, η εξίσωση αυτή φανερώνει ότι η συνθήκη ακινησίας (sticking condition) λόγω τριβής, αντικαθίσταται από ένα δύσκαμπτο ελατήριο που πάντα θα δίνει μια μικρή μετατόπιση. Η τιμή $T_{t,crit}$ εξαρτάται από τον αλγόριθμο επαφής, και στην περίπτωση του αλγόριθμου ποινής είναι:

$$T_{t,crit} = \min(\mu T_n + T_{cohe}, T_{t,max}) \quad (3.15)$$

3.4.4.5 Ο κόμβος προσκόλλησης (adhesion node)

Ο υποκόμβος (του κόμβου επαφής) προσκόλλησης δημιουργείται από τη διαδρομή **Solid mechanics**→**Contact**→**Adhesion** και καθιστά δυνατή την εισαγωγή προσκόλλησης στο ζευγάρι επαφής που έχει επιλεγθεί από το γονικό κόμβο επαφής. Το Comsol υλοποιεί την προσκόλληση σαν ένα λεπτό ελαστικό στρώμα ανάμεσα στα σύνορα του προορισμού και της πηγής. Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές επιλογές για τη συνθήκη ενεργοποίησης προσκόλλησης:

1. Να είναι πάντα ενεργή, που έχει εφαρμογή σε ζευγάρι επαφής που πριν την έναρξη της προσομοίωσης βρίσκεται ήδη σε επαφή.
2. Να ενεργοποιείται μέσω κριτηρίου πίεσης, όπου όταν μια ελάχιστη πίεση κατά την επαφή του ζευγαριού επαφής ξεπεραστεί, τα δύο σύνορα θεωρούνται προσκολλημένα.
3. Να ενεργοποιείται μέσω κριτηρίου απόστασης, όπου μόλις η απόσταση του ζευγαριού επαφής γίνει μικρότερη από μια τιμή, τα δύο σύνορα θεωρούνται προσκολλημένα.
4. Να ενεργοποιείται μέσω Boolean έκφρασης, καθορισμένης από το χρήστη.

Στο παρόν μοντέλο, έγιναν δοκιμές με ενεργοποίηση πίεσης και απόστασης. Ο καθορισμός της κατάλληλης πίεσης προκειμένου να ανταποκρίνεται σε πραγματικά δεδομένα ήταν δύσκολος, πέραν του γεγονότος ότι η πίεση στην επαφή ήταν μια από τις παραμέτρους που αναζητήθηκαν ως αποτελέσματα. Επίσης, το κριτήριο της απόστασης, είναι πιο ρεαλιστικό, καθώς προσεγγίζει τον τρόπο που δρουν οι δυνάμεις van der Waals, οι οποίες είναι οι δυνάμεις που, όπως έχει καταγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια, που είναι υπεύθυνες για την ύπαρξη της προσκόλλησης στη νανοκλίμακα. Τελικά, η τιμή της κρίσιμης απόστασης τέθηκε 1 nm και βρίσκεται εντός της κλίμακας δράσεων των δυνάμεων αυτών (~1-10 nm). Μια άλλη παράμετρος για τη μοντελοποίηση της προσκόλλησης είναι η δυσκαμψία ποινής προσκόλλησης (penalty stiffness), που ουσιαστικά αφορά τη δυσκαμψία του λεπτού ελαστικού στρώματος μεταξύ των συνόρων που έρχονται σε επαφή. Υπολογίζεται έτσι η εφελκυστική τάση:

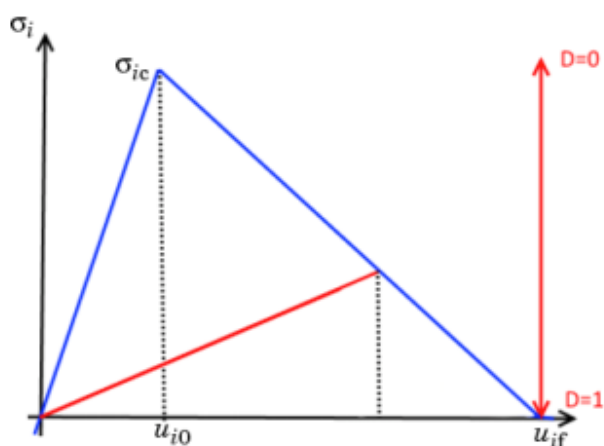
$$\sigma_n = -K_p d_g \quad (3.16)$$

όπου σ_n η εφελκυστική τάση στην κάθετη διεύθυνση και K_p η δυσκαμψία ποινής προσκόλλησης στην κάθετη διεύθυνση. Στην περίπτωση που η τάση είναι θλιπτική το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη δυσκαμψία ποινής. Όταν χρησιμοποιήθηκε η προκαθορισμένη τιμή της δυσκαμψίας ($K_p = 10^{10} \frac{N}{m^3}$), σε δοκιμή σε εφελκυσμό και κάθετη προκαθορισμένη ταχύτητα, παρατηρήθηκε ότι τα δύο σύνορα είχαν ορατή απόσταση μεταξύ τους στη γραφική απεικόνιση, κάτι που δείχνει ότι για αποστάσεις μικρότερες της τάξης των μm δεν αναπτύσσονταν αρκετά μεγάλες εφελκυστικές τάσεις για να επιμηκύνουν τα πτερύγια. Έτσι αντί της προκαθορισμένης τιμής, χρησιμοποιήθηκε αυξημένη τιμή κατά τρεις τάξεις μεγέθους ($K_p = 10^{13} \frac{N}{m^3}$). Για την τιμή της δυσκαμψίας ποινής προσκόλλησης στην οριζόντια διεύθυνση ισχύει:

$$K_\tau = n_\tau K_p \quad (3.17)$$

όπου ο συντελεστής n_t καθορίζει την αναλογία των δύο δυσκαμψιών ποιηής προσκόλλησης, με προκαθορισμένη τιμή στο 0.17. Στο Comsol, υπάρχει η δυνατότητα υλοποίησης αποκόλλησης (decohesion), της οποίας τα χαρακτηριστικά βρίσκονται στον υποκόμβο της προσκόλλησης. Ο τρόπος διαχωρισμού, καθορίζεται μέσω ενός εκ των τριών διαθέσιμων νόμων διαχωρισμού που είναι διαθέσιμοι, και θα αναλυθεί παρακάτω. Η συμπεριφορά αποκόλλησης βασίζεται σε δύο ποσότητες, την μέγιστη τάση αποκόλλησης και το ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας. Η αποχώρηση των δύο συνόρων στην κάθετη διεύθυνση ονομάζεται φάση I (mode I), και στη οριζόντια, φάση II (mode II). Μέχρι την υπέρβαση των προηγούμενων ποσοτήτων για τη φάση I και II, το προσκολλητικό στρώμα θεωρείται γραμμικά ελαστικό. Όταν με αυξανόμενη παραμόρφωση, η τάση μειώνεται, υποτίθεται ότι αρχίζει η αστοχία του προσκολλητικού στρώματος, η οποία είναι μια βαθμωτή ποσότητα που εκφράζει τη σχετική μετατόπιση των δύο συνόρων.

Ο νόμος αποχωρισμού που επιλέχθηκε είναι ο γραμμικός νόμος αποχωρισμού (linear separation law) και ποιοτικά παρουσιάζεται από μια καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης στην **εικόνα 3.7**.



Εικόνα 3.7 Ποιοτικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων για το γραμμικό νόμο αποκόλλησης

Στο παραπάνω διάγραμμα ο δείκτης i παίρνει τις τιμές I και II ανάλογα με το αν έχουμε εφελκυσμό ή διάτμηση, αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, μέχρι την τιμή σ_{ic} , που είναι και η κρίσιμη τάση έναρξης της αστοχίας του προσκολλητικού στρώματος, υπάρχει μια γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Σε αυτή την κρίσιμη τιμή τάσης, αντιστοιχεί μια τιμή μετατόπισης u_{i0} του στρώματος η οποία αναλόγως την τιμή του δείκτη i είναι:

$$u_{I0} = \frac{\sigma_{Ic}}{K_p} \quad (3.18)$$

$$u_{II0} = \frac{\sigma_{IIc}}{K_\tau} \quad (3.19)$$

Η μετατόπιση αποκόλλησης u_{if} , ουσιαστικά βρίσκεται έμμεσα, από το εμβαδό του δεξιά τριγώνου του διαγράμματος, το οποίο αντιστοιχεί στο ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας G_{ic} :

$$u_{if} = \frac{2G_{ic}}{\sigma_{ic}} \quad (3.20)$$

Η συνδυαστική μετόπιση έναρξης αστοχίας των δυο φάσεων ορίζεται ως εξής:

$$u_0 = u_{I0}u_{II0} \sqrt{\frac{u_m^2}{u_I^2 u_{II0}^2 + u_{II}^2 u_{mI0}^2}} \quad (3.21)$$

όπου u_I και u_{II} οι μετατοπίσεις του προσκολλητικού στρώματος. Η τελική συνδυαστική μετατόπιση αστοχίας των δυο φάσεων εξαρτάται από το κριτήριο αστοχίας, για το οποίο επιλέχθηκε ο εκθετικός νόμος (Power law) συσχέτισης:

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}}\right)^\eta + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}}\right)^\eta = 1 \quad (3.22)$$

Η παραπάνω σχέση για την προκαθορισμένη τιμή του εκθέτη τη μονάδα, δείχνει ότι για προσεγγιστικά ίσους κρίσιμους ρυθμούς απελευθέρωσης ενέργειας, ουσιαστικά η μετόπιση αστοχίας θα ξεκινήσει στα μισά του εμβαδού του δεξιά τριγώνου τάσεων μετατοπίσεων του διαγράμματος της **εικόνας 3.7**. Ο εκθέτης η λέγεται εκθέτης μίξης φάσης (mode mixity exponent) και καθορίζει τη συμμετοχή της κάθε φάσης στη διαδικασία της αποκόλλησης. Τελικά, η τιμή της τελικής συνδυαστικής μετατόπισης ορίζεται ως:

$$u_f = \frac{2(1 + \beta^2)}{u_0} \left(\left(\frac{K_p}{G_{Ic}}\right)^\eta + \left(\frac{\beta^2 K_t}{G_{IIc}}\right)^\eta \right)^{\frac{-1}{\eta}} \quad (3.23)$$

$$\beta = \frac{u_{II}}{u_I} \quad (3.24)$$

Στο διάγραμμα της **εικόνας 3.7**, η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στην σκληρότητα του προσκολλητικού στρώματος, η οποία στο τέλος της αστοχίας έχει μηδενική τιμή και αντιπροσωπεύεται από την συνάρτηση αστοχίας D , που αντικατοπτρίζει το ποσοστό αστοχίας για κάποια μετατόπιση ($D=0$ στην έναρξη αστοχίας και $D=1$ στην ολοκλήρωση της αστοχίας. Στην πράξη η μηδενική τιμή της δυσκαμψίας του προσκολλητικού στρώματος αντιστοιχεί στη συνθήκη αποκόλλησης.

Προκειμένου να γίνει δυνατή η μοντελοποίηση της αποκόλλησης χρειάζεται να γίνει μια εύστοχη επιλογή των παραμέτρων $[\sigma_{Ic}, \sigma_{IIc}, G_{Ic}, G_{IIc}, \eta]$ που πρέπει να εισαχθούν στο πρόγραμμα από το χρήστη, σε σχέση με την ταυτόχρονη ικανοποίηση του ποιοτικού διαγράμματος της **εικόνας 3.7**, πιθανών προτάσεων της βιβλιογραφίας αλλά και υπολογιστικών περιορισμών του μοντέλου. Αυτός ο συνδυασμός συνοπτικά εκφράζεται ως εξής:

- Σύμφωνα με το ποιοτικό διάγραμμα της **εικόνας 3.7**, είναι προφανές ότι οι τιμές των τελικών μετατοπίσεων θα πρέπει να είναι δεξιότερα από αυτές των αρχικών, πράγμα που δίνει ένα αρχικό γενικό περιορισμό στην επιλογή των παραμέτρων.
- Η σχετική βιβλιογραφία [92] δίνει τιμές που αντιστοιχούν στους συντελεστές G_{Ic} και G_{IIc} από 8-122 mJ/m².
- Οι τιμές για τις κρίσιμες τάσεις αποκόλλησης άνω των MPa δημιουργούσαν προβλήματα απόκλισης και φαινομενικής θραύσης του PDMS ($E=750$ kPa).
- Οι προκύπτουσες μετατοπίσεις u_{i0} και u_{if} να είναι εναρμονισμένες με την τάξη μεγέθους του προβλήματος, δηλαδή μικρότερες των μm.

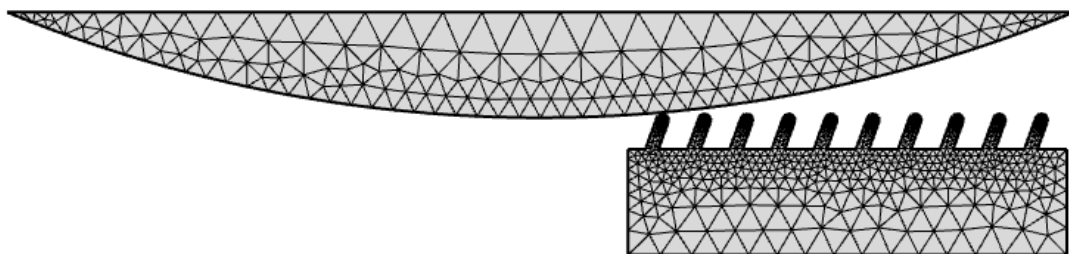
Λαμβάνοντας όλα τα παραπάνω υπ' όψιν, και αφού προηγουμένως είχαν γίνει αρκετές αποτυχημένες προσπάθειες μοντελοποίησης της αποκόλλησης, παρουσιάζονται στον παρακάτω **πίνακα 3.4** οι τιμές εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο καθώς και οι προκύπτουσες τιμές των κρίσιμων μετατοπίσεων που προέκυψαν:

Όνομα Μεταβλητής	Τιμή	Περιγραφή
σ_{Ic}	110 kPa	τάση έναρξης αποκόλλησης σε εφελκυσμό
σ_{IIc}	150 kPa	τάση έναρξης αποκόλλησης σε διάτμηση
G_{Ic}	20 mJ/m ²	ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας σε εφελκυσμό
G_{IIc}	25 mJ/m ²	ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας σε διάτμηση
η	1	εκθέτης μίξης φάσης
K_p	10 ¹³ N/ m ³	σκληρότητα προσκολλητικού στρώματος σε εφελκυσμό
n_τ	0.17	συντελεστής αναλογίας σκληρότητας σε εφελκυσμό και διάτμηση
K_τ	1.17e10 ¹² N/ m ³	σκληρότητα προσκολλητικού στρώματος σε διάτμηση
u_{I0}	11 nm	μετατόπιση έναρξης αποκόλλησης σε εφελκυσμό
u_{II0}	88 nm	μετατόπιση έναρξης αποκόλλησης σε διάτμηση
u_{If}	0.36 μm	μετατόπιση ολοκλήρωσης αποκόλλησης σε εφελκυσμό
u_{IIf}	0.33 μm	μετατόπιση ολοκλήρωσης αποκόλλησης σε διάτμηση

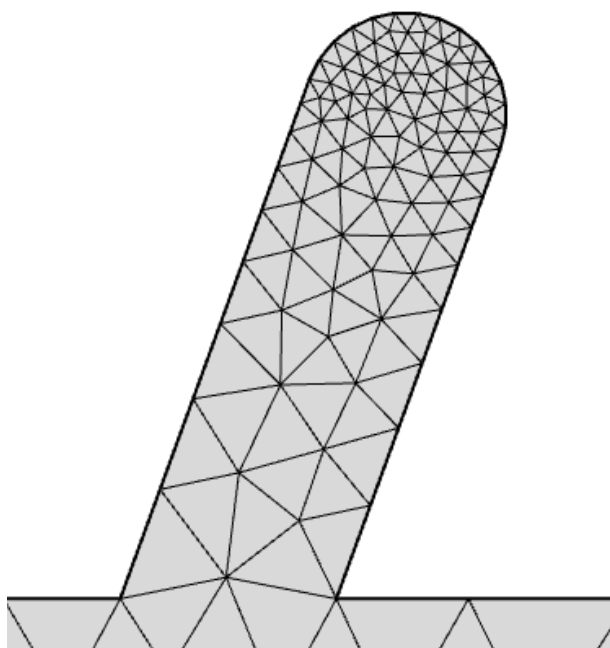
Πίνακας 3.4 Οι σχετικές με τον υποκόμβο της προσκόλλησης μεταβλητές

3.5 Κατασκευή πλέγματος διακριτοποίησης (meshing)

Για την κατασκευή του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, το Comsol έχει τη δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας πλέγματος εννέα κατηγοριών, ξεκινώντας από υπερβολικά αραιό (extremely coarse) μέχρι υπερβολικά πυκνό (extremely fine) αλλά και κατευθυνόμενο από το χρήστη, στην ενότητα **Mesh**. Στην παρούσα περίπτωση, η πλεγματοποίηση επιλέχθηκε να γίνει πιο πυκνή στο ζευγάρι επαφής. Γενικά, σε προβλήματα επαφής προτείνεται [comsol documentation] η χρήση τουλάχιστον δυο φορές αραιότερου πλέγματος στο σύνορο της πηγής από ότι σε αυτό του συνόρου προορισμού. Ο λόγος είναι ότι επειδή ο αλγόριθμος είναι ασύμμετρος, τα σημεία στο σύνορο του προορισμού συνδέονται με αυτά του συνόρου της πηγής, και όχι αντίστροφα. Συνεπώς, με ένα αραιό πλέγμα στην πλευρά του προορισμού, ένα μεγάλο ποσοστό ενός στοιχείου στην πλευρά της πηγής θα μείνει χωρίς σύνδεση με την πλευρά του προορισμού. Μια δεύτερη σημαντική παράμετρος που λήφθηκε υπόψη είναι η γενική απαίτηση για σχετικά πυκνό πλέγμα σε καμπύλες γεωμετρίες, όπως αυτή των δυο συνόρων στο ζευγάρι επαφής που ορίστηκε. Στις εικόνες 3.8 και 3.9 φαίνεται η πλεγματοποιημένη γεωμετρία.



Εικόνα 3.8 Πλεγματοποιημένη συνολική γεωμετρία



Εικόνα 3.9 Πλεγματοποιημένη εικόνα ενός πτερυγίου

Μετά την επιλογή **Build all**, η τελική πλεγματοποίηση παράγει γύρω στα 28000 πεπερασμένα στοιχεία τομέα και 490 πεπερασμένα στοιχεία συνόρων. Οι ακριβείς τιμές έχουν μια ελαφριά διαφοροποίηση καθώς εξαρτώνται από τις διαστάσεις της τελικής γεωμετρίας, καθώς έτρεξαν προσομοιώσεις για διαφορετικές γεωμετρίες και πυκνότητες πτερυγίων.

3.6 Ρυθμίσεις επίλυσης

Οι ρυθμίσεις της επίλυσης του προβλήματος βρίσκονται στην ενότητα **Study**. Προκειμένου να προσθέσουμε το είδος της επίλυσης που επιθυμούμε, επιλέγουμε **Add Study→Time dependent**. Η επιλογή δυναμικής ανάλυσης είναι οριακά αποδεκτή για προβλήματα επαφής γιατί μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα σύγκλισης στην επίλυση, εάν τα αδρανειακά φαινόμενα έχουν μεγάλο αντίκτυπο στο πρόβλημα, ή αν δεν χρησιμοποιηθεί επαρκώς μικρό μέγιστο χρονικό βήμα. Επιπλέον, σε σχέση με μια στατική ανάλυση προβλέπεται να έχει πολύ μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος. Όμως, η επιλογή δυναμικής ανάλυσης είναι ενδεδειγμένη και επιθυμητή, καθώς προσομοιώνει καλύτερα τα τριβολογικά φαινόμενα, τα οποία είναι χρονικά εξαρτώμενα. Αρχικά θέλουμε να ρυθμίσουμε τις χρονικές παραμέτρους με τις οποίες θα τρέξει η προσομοίωση, δηλαδή τον αρχικό και τελικό χρόνο, καθώς και το χρονικό μεσοδιάστημα που θα επιστρέφεται η λύση:

χρονική μονάδα:	Second
αρχικός χρόνος:	0 s
τελικός χρόνος:	10 s
ενδιάμεσος χρόνος υπολογισμού:	0.005 s
σχετική ανοχή:	0.01

Επίσης, από τη στιγμή που πραγματοποιείται μελέτη με επαφή, είναι προκαθορισμένη η επιλογή **Include geometric nonlinearity**, καθώς και η επιλογή **plot results while solving**, για τις τάσεις von Mises, ώστε να υπάρχει μια γενική εποπτεία της προόδου της λύσης.

3.6.1 Ρυθμίσεις για το χρονικό βήμα (time stepping)

Γενικά, οι ρυθμίσεις που αφορούν το χρονικό βηματισμό της λύσης χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή σε προβλήματα που περιλαμβάνουν επαφή. Το πρώτο βήμα που χρειάζεται να γίνει είναι η επιλογή της μεθόδου επίλυσης. Από τις τρεις διαθέσιμες (BDF, Generalized- α και Runge Kutta), επιλέχθηκε η **Generalized- α** , καθώς εκτός του ότι έχει αναπτυχθεί ειδικά για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων 2ου βαθμού για μη γραμμικές εφαρμογές στη μηχανική των στερεών, θεωρείται ότι, μέσω της παραμέτρου α , ελέγχει καλύτερα την απόσβεση και έχει καλύτερη ακρίβεια. Σε πρωταρχικές προσομοιώσεις, δοκιμάστηκε και μέθοδος BDF, αλλά σε αρκετές περιπτώσεις, η σύγκλιση απέτυχε. Μέσω δοκιμών, αλλά και προτάσεων από το εγχειρίδιο του Comsol, τέθηκαν οι παρακάτω ρυθμίσεις για τα χαρακτηριστικά του χρονικού βηματισμού:

Time Stepping	
Method:	Generalized alpha
Steps taken by solver:	Strict
Initial step:	<input type="checkbox"/> 0.001 s
Maximum step:	<input checked="" type="checkbox"/> 0.0005 s
Time step increase delay:	<input checked="" type="checkbox"/> 20
Amplification for high frequency:	0.3
Predictor:	Constant
— Algebraic variable settings —	
Singular mass matrix:	Maybe
Consistent initialization:	Backward Euler
Fraction of initial step for Backward Euler:	0.001
Error estimation:	Include algebraic

Εικόνα 3.10 Διεπιφάνεια για το χρονικό βηματισμό (time stepping)

Εξηγούνται παρακάτω οι επιλογές της παραπάνω εικόνας από το περιβάλλον του προγράμματος:

- **Method:** εδώ γίνεται η επιλογή της μεθόδου, που όπως προαναφέρθηκε είναι η generalized- α .
- **Steps taken by solver**→**Strict:** πρόκειται για ρύθμιση που επιβάλλει στη επιλεγμένη μέθοδο να κάνει χρονικά βήματα που θα τελειώνουν στους ενδιάμεσους χρόνους υπολογισμού, που έχουν ορισθεί παραπάνω, καθώς και να κάνει επιπλέον βήματα αν είναι αναγκαίο. Από τις διαθέσιμες επιλογές (Free, Intermediate, Strict) αποτελεί την πιο αμυντική και για αυτό επιλέχθηκε.
- **Initial step:** πρόκειται για το αρχικό βήμα που θα ξεκινήσει η επίλυση. Δεν έγινε κάποια τροποποίηση καθώς η προσομοίωση δεν ξεκινάει με επαφή.
- **Maximum step:** πρόκειται για το μέγιστο χρονικό βήμα που επιτρέπουμε στον επιλύτη. Στις προσομοιώσεις που έγιναν, έπαιξε καθοριστικό ρόλο η τιμή του, καθώς με την προκαθορισμένη τιμή του (0.1 sec), αλλά και μικρότερες, υπήρχαν προβλήματα απόκλισης. Έτσι η μέγιστη τιμή που μπορούσε να παρέχει την ασφάλεια της ολοκλήρωσης της λύσης ήταν τα 0.0005 sec.
- **Time step increase delay:** αυτή η επιλογή δείχνει πόσα βήματα τουλάχιστον είναι υποχρεωμένος ο επιλύτης να πραγματοποιήσει, προτού αυξήσει το χρονικό βήμα. Αυτή η επιλογή υπήρξε ιδιαίτερα σημαντική καθώς περιορίζει τον επιλύτη από το να ανεβάσει απότομα το χρονικό βήμα, και να οδηγήσει σε σταθερά μεγάλες αποκλίσεις, μπλοκάροντας ουσιαστικά την επίλυση.

- **Amplification for high frequency:** σε αυτό το πεδίο μια τιμή μεταξύ του 0 και του 1 ελέγχει το μέγεθος της απόσβεσης υψηλών συχνοτήτων. Όπως και πριν, με σκοπό τη δημιουργία μιας αμυντικής στρατηγικής επίλυσης, επιλέχθηκε μια τιμή πιο κοντά στο 0 από την προκαθορισμένη (0.75), που οδηγεί σε αποτελεσματικότερη απόσβεση.
- **Predictor:** με την επιλογή constant η τωρινή λύση χρησιμοποιείται ως αρχική πρόβλεψη.
- **Singular mass matrix:** η επιλογή maybe ορίζει στον επιλύτη να ψάχνει για μηδενικές στήλες ή σειρές ως μέσο ανίχνευσης μιας διαφορική αλγεβρικής εξίσωσης.
- **Consistent initialization:** με την επιλογή της μεθόδου Backward Euler πραγματοποιείται αρχικοποίηση χρησιμοποιώντας ένα μικρό τεχνητό βήμα και εισάγεται τιμή στο πεδίο **Fraction of initial step for Backward Euler** που είναι το 0.1% του αρχικού βήματος.
- **Error estimation:** αυτό το πεδίο καθορίζει το πως θα χειριστεί ο επιλύτης τους αλγεβρικούς βαθμούς ελευθερίας ενός διαφορικού αλγεβρικού συστήματος όταν υπολογίζει το χρονικό σφάλμα διακριτοποίησης, όπου η προκαθορισμένη τιμή του είναι να τους περιλαμβάνει.

3.6.2 Υποκόμβοι του χρονικά εξαρτώμενου επιλύτη

Ανάλογα την επιλογή του τύπου μελέτης και του επιλύτη που θα χρησιμοποιηθούν, εμφανίζονται οι αντίστοιχοι στις επιλογές υποκόμβοι, με γονικό κόμβο τον χρονικά εξαρτώμενο επιλύτη (time dependent solver). Στην περίπτωση μας, είναι οι κάτωθι τέσσερις:

1. **Direct:** είναι ο υποκόμβος που χειρίζεται τις ρυθμίσεις για την ευθεία επίλυση των γραμμικών συστημάτων. Ο προεπιλεγμένος επιλύτης είναι ο **MUMPS** (multifrontal massively parallel sparse direct solver), ο οποίος εκτιμάει πόση μνήμη θα απαιτηθεί από το μη αντεστραμμένο σύστημα.
2. **Advanced:** είναι ο κόμβος που χειρίζεται πιο προχωρημένες ρυθμίσεις για τους κόμβους επίλυσης όπως η μορφή και η συμμετρία των πινάκων, η εξισορρόπηση των σειρών και συναρτήσεις ορθογώνιου μηδενικού υποχώρου.
3. **Previous solution:** πρόκειται για ένα προαιρετικό υποκόμβο που χειρίζεται μεταβλητές πεδίου που έχουν πρόσβαση σε προηγούμενες τιμές παραμέτρων ή χρόνου και προτείνεται για χρονικά εξαρτώμενα προβλήματα με τριβή. Επίσης, είναι ο κόμβος που εμφανίζονται διάφορες εξαρτημένες μεταβλητές που σχετίζονται με τους κόμβους της επαφής.
4. **Fully coupled:** είναι ο κόμβος που χρησιμοποιώντας μια αποσβεστική έκδοση της μεθόδου Newton, χειρίζεται παραμέτρους για προσέγγιση πλήρως συζευγμένης λύσης.

3.6.3 Λοιπά χαρακτηριστικά σχετικά τη διαδικασία της επίλυσης

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε φορητό υπολογιστή με λειτουργικό mac OS X sierra, με τετραπύρηνο επεξεργαστή 2.3 GHz i7 με κρυφή μνήμη 6MB επιπέδου 3, και δυο RAM 4GB DDR3L 1600 MHz. Με αυτά τα τεχνικά χαρακτηριστικά, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η διαστάση επίλυση (για τις περιπτώσεις που θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο) γινόταν για 40000 βαθμούς ελευθερίας, ότι το χρονικό βήμα για το χρονικό διάστημα που υπήρχε επαφή έφτανε μέχρι το ένα χιλιοστό του μέγιστου χρονικού βήματος (για περίπου το μισό χρόνο επίλυσης) καθώς και ότι ο συνολικός αριθμός των χρονικών βημάτων ήταν της τάξης του 10^5 , είναι εύλογος ο χρόνος επίλυσης της κάθε προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε, ο οποίος κυμάνθηκε μεταξύ 12h και 24h, ανάλογα με την προσομοίωση. Τέλος, ο συνολικός αριθμός των προσομοιώσεων που

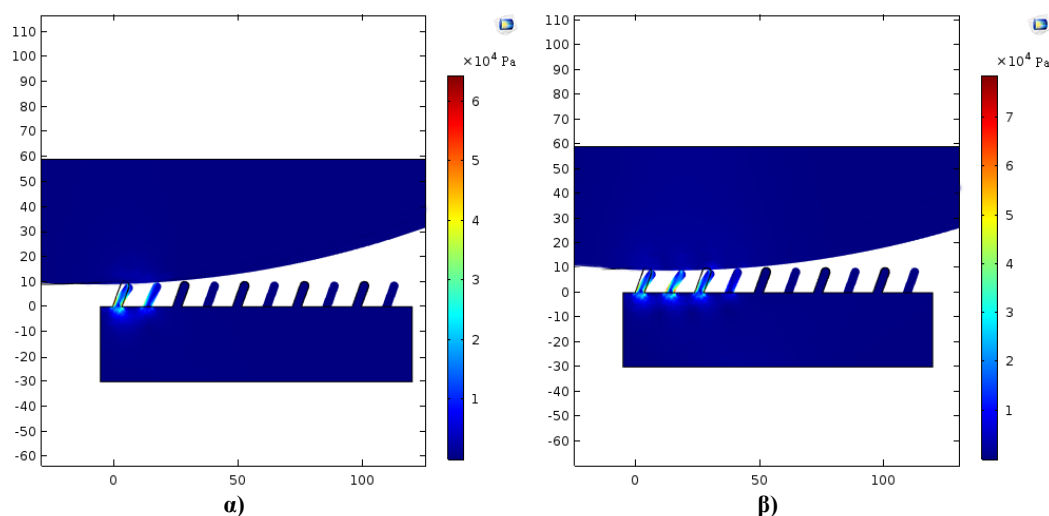
πραγματοποιήθηκαν είναι 89, και περιλαμβάνει δοκιμαστικά μοντέλα (που αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό), που βοήθησαν καθοριστικά στην κατανόηση της λειτουργίας διαφόρων χαρακτηριστικών του προγράμματος αλλά και τα τελικά μοντέλα, των οποίων η παρουσίαση θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο.

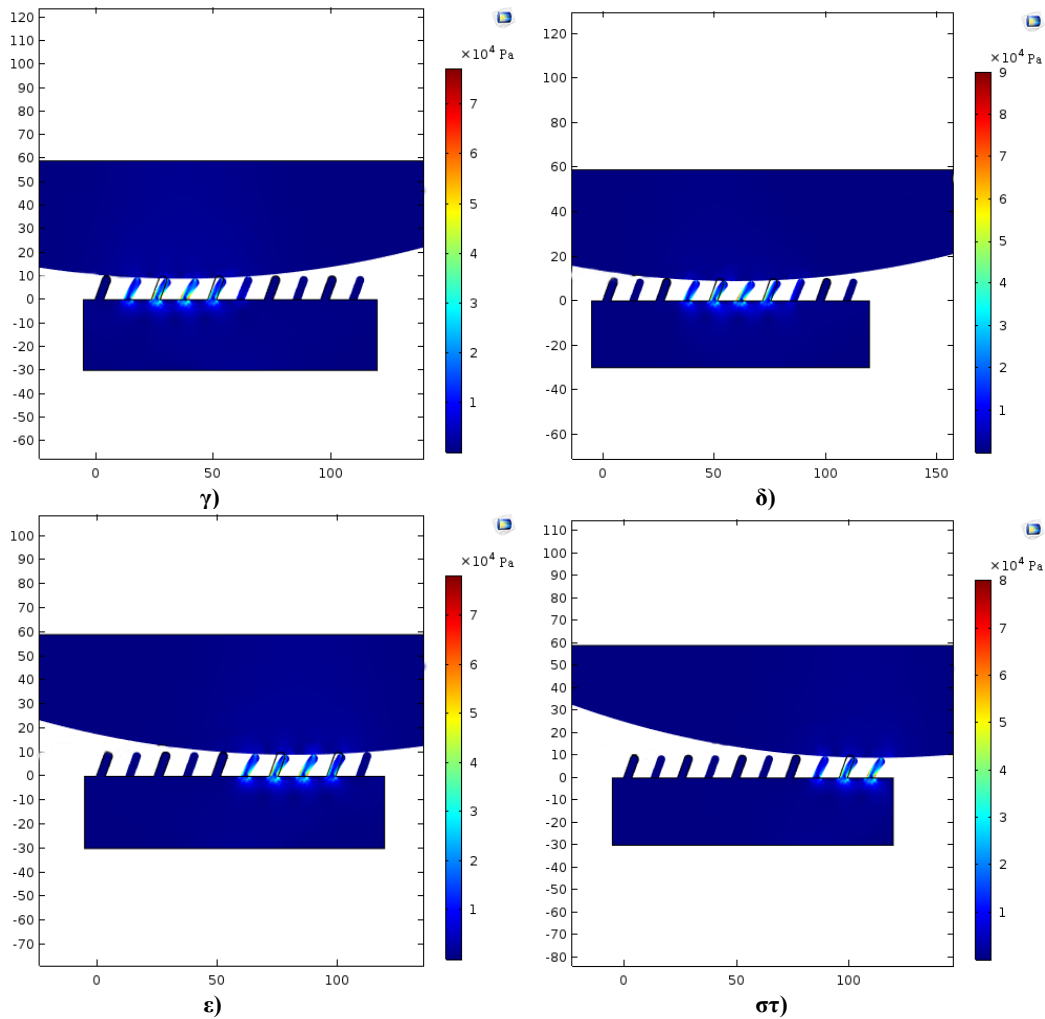
4 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο πρόκειται να γίνει η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις πέντε διαφορετικές κατηγορίες προσομοιώσεων που εξετάστηκαν. Αυτές επί γραμματικά είναι:

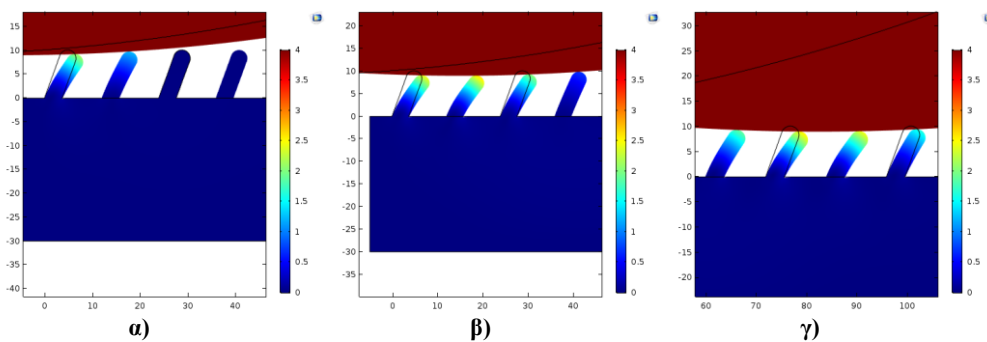
1. Μεταβολή της καμπυλότητας του δίσκου και της πυκνότητας τοποθέτησης των πτερυγίων.
2. Κίνηση του δίσκου στην αντίθετη κατεύθυνση
3. Μεταβολή του ύψους τοποθέτησης του δίσκου.
4. Μεταβολή του συντελεστή τριβής
5. Χρησιμοποίηση υπερελαστικού μοντέλου υλικού

Οι παραπάνω περιπτώσεις επιλέχθηκαν με το σκεπτικό της δημιουργίας ενός πρωταρχικού υπολογιστικού μοντέλου που θα προσεγγίζει και θα ανταποκρίνεται όλο και πιο ρεαλιστικά στις συνθήκες επαφής που περιγράφονται στη βιβλιογραφία. Στις εικόνες **4.1(α-ζ)** φαίνεται ενδεικτικά η πορεία της διαδικασίας για ακτίνα δίσκου 400 μm και αριθμό πτερυγίων 10, που αποτελεί τη μεσαία πυκνότητα τοποθέτησης, για τις χρονικές στιγμές των 1.5s, 3s, 4.5s, 6s, 7.5s και 9.5s. Ο δίσκος, σε όλες τις περιπτώσεις, εκκινεί από θέση που δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμα η επαφή. Στην **εικόνα 4.1α** ο δίσκος έρχεται σε επαφή με τα πρώτα πτερύγια με αποτέλεσμα την άσκηση φορτίου και ανάπτυξη τάσεων (στην εικόνα φαίνονται οι τάσεις von Mises) σε αυτά. Στη συνέχεια (**4.1β**), έρχεται σε επαφή με τα υπόλοιπα δυο και ταυτόχρονα πιέζει το δεύτερο με το σημείο ελάχιστης απόστασης από τον άξονα χ , έχοντας ως αποτέλεσμα την μικρή αύξηση των τάσεων. Στην **εικόνα 4.1γ** ο δίσκος έχοντας προχωρήσει, βρίσκεται σε επαφή με πέντε πτερύγια, που είναι και ο μέγιστος αριθμός που μπορεί ο δίσκος με τη συγκεκριμένη καμπυλότητα να ακουμπάει ταυτόχρονα. Επίσης, το πρώτο πτερύγιο έχει πλέον αποκολληθεί. Στις υπόλοιπες εικόνες **4.1(δ-ζ)** φαίνεται η προοδευτική κίνηση του δίσκου, που έρχεται διαδοχικά σε επαφή με όλα τα υπόλοιπα πτερύγια, μέχρι το τέλος του χρόνου της προσομοίωσης, που είναι τα 10s. Η επόμενη τριάδα εικόνων **4.2(α-γ)**, δείχνει τις μετατοπίσεις (displacements) με χρωματικό χάρτη, όπου φαίνεται η μετατόπιση των πτερυγίων από την αρχική τους θέση. Εδώ παρατηρούμε ότι, όπως είναι λογικό, οι μεγαλύτερες τιμές των μετατοπίσεων βρίσκονται στις κορυφές των πτερυγίων και οι μικρότερες στις βάσεις, όπου η μετατόπιση περιορίζεται.





Εικόνα 4.1 α, β, γ, δ, ε, ζ Γραφήματα τάσεων von Mises για (α) 1.5s, (β) 3s, (γ) 4.5s, (δ) 6s, (ε) 7.5s, (ζ) 9.5s



Εικόνα 4.2 Γραφήματα μετατοπίσεων για (α) 1.5s, (β) 3s, (γ) 7.5s

Σε όλες περιπτώσεις που περιγράφονται στα επόμενα υποκεφάλαια, εκτός της περίπτωσης με την αντίστροφη ταχύτητα, το μοτίβο κίνησης είναι όπως περιγράφηκε παραπάνω. Οι εικόνες 4.1 και 4.2, όπως και όλα τα δισδιάστατα ή μονοδιάστατα γραφήματα των επόμενων υποκεφαλαίων, δημιουργήθηκαν στην ενότητα των αποτελεσμάτων του Comsol, από τη διαδρομή **Results**→**1D/2D plot group**. Οι κύριες μεταβλητές του προγράμματος οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν και διερευνήθηκαν για τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων είναι:

- *Solid.mises*: η συγκεκριμένη μεταβλητή χρησιμοποιήθηκε στις 2D γραφικές παραστάσεις για την απεικόνιση των τάσεων von Mises, σε δισδιάστατα ισοχρωματικά τοπογραφήματα, για διάφορες χρονικές στιγμές.
- *Solid.eXX*, *solid.eYY*, *solid.eZZ*, *solid.eXY*, *solid.eXZ*, *solid.eYZ*: πρόκειται για μεταβλητές οι οποίες αναπαριστούν τις παραμορφώσεις του τανυστή παραμορφώσεων, και χρησιμοποιήθηκαν σε δισδιάστατα χρωμογραφήματα για διάφορες χρονικές στιγμές.
- *Solid.T_totx*, *solid.T_toty*: είναι οι μεταβλητές που αναπαριστούν τη συνολική δύναμη ενός ζευγαριού επαφής στις διευθύνσεις των δυο αξόνων, και χρησιμοποιήθηκαν σε μονοδιάστατες γραφικές παραστάσεις.
- *Solid.Tnmax_p1*: είναι η μεταβλητή που δηλώνει τη συνολική πίεση επαφής που δημιουργείται σε ένα ζευγάρι επαφής.
- *Solid.gapmin_p1*: είναι η μεταβλητή που δείχνει τις ελάχιστες μονάδες απόστασης που βρίσκεται το ζευγάρι επαφής.
- *Comp1.solid.isSliding_p1_old*: είναι αδιάστατη μεταβλητή με τιμές 0 και 1 που δηλώνει αν ένα σύνορο έχει σημεία που βρίσκονται σε επαφή και ολισθαίνουν. Επίσης, εμφανίζεται με την προϋπόθεση ύπαρξης υποκόμβου τριβής.
- *Solid.Ws_tot*: είναι η μεταβλητή που δείχνει τη συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του συστήματος.
- *Solid.Tnorm*: είναι η συνισταμένη δύναμη τριβής. Το Comsol δεν τη χρησιμοποιεί σε μονάδες δύναμης, αλλά σαν χωρική κατανομή δύναμης δηλαδή σε N/m².

Σε όλες τις παρακάτω περιπτώσεις, όταν αναφέρεται η συνισταμένη δύναμη, είναι αυτή που προκύπτει από τη σύνθεση της *solid.T_totx* και *solid.T_toty* ως εξής:

$$F_{tot} = \sqrt{\text{solid.T}_{totx}^2 + \text{solid.T}_{toty}^2} \quad (4.1)$$

Επίσης, στα διαγράμματα παραμορφώσεων επιλέχθηκε η απεικόνιση της ισοδύναμης παραμόρφωσης:

$$e_{eq} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{3}{2}(\text{solid.eXX}^2 + \text{solid.eYY}^2 + \text{solid.eZZ}^2) + \frac{3}{4}(\text{solid.eXY}^2 + \text{solid.eXZ}^2 + \text{solid.eYZ}^2)} \quad (4.2)$$

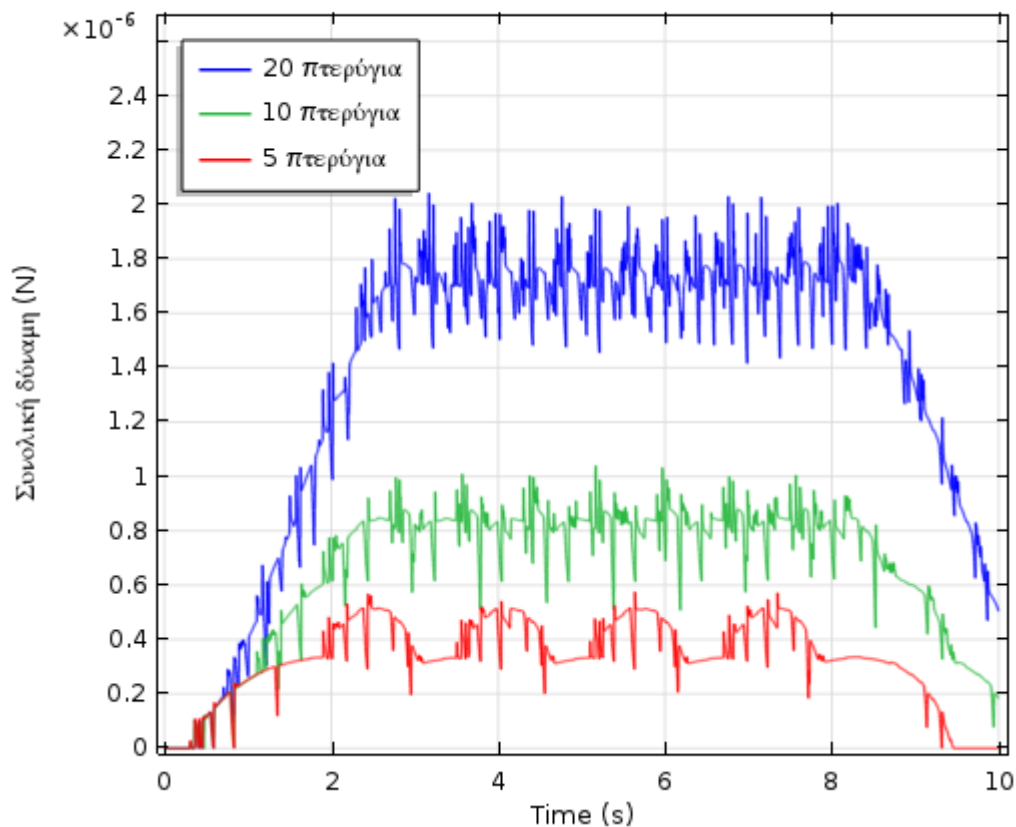
4.1 Μελέτη της επίδρασης καμπυλότητας δίσκου και πυκνότητας τοποθέτησης πτερυγίων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα μελετηθεί η επίδραση της καμπυλότητας του δίσκου και της πυκνότητας τοποθέτησης των πτερυγίων. Θα εξετασθούν πέντε διαφορετικές καμπυλότητες δίσκου, με αρχική ακτίνα 200 μm, και κάθε επόμενη ακτίνα διπλάσια της προηγούμενης. Σε κάθε καμπυλότητα, εξετάζονται τρεις διαφορετικές πυκνότητες τοποθέτησης πτερυγίων, για 5, 10 και 20 πτερύγια (τοποθετημένα στην ίδια συνολική απόσταση). Η κύρια παράμετρος που εξετάζεται είναι αυτή της συνισταμένης δύναμης στην επαφή, συνεπικουρούμενη από διαγράμματα τάσεων von Mises, ισοδύναμης παραμόρφωσης των τάσεων αυτών καθώς και κάποια γραφήματα συνολικής ολίσθησης. Ο κύριος στόχος είναι να συμπεράνουμε τι επίδραση έχουν οι αλλαγές των παραμέτρων αυτών στις 15 περιπτώσεις, οι οποίες με τους απανωτούς υποδιπλασιασμούς της καμπυλότητας έχουν στόχο να πλησιάσουν τις πειραματικές διαστάσεις του αντίστοιχου πειραματικού μοντέλου στο οποίο ο δίσκος έχει ακτίνα 2 cm. Φυσικά, λόγω του σχετικά μεγάλου υπολογιστικού κόστους δεν υπήρχε η δυνατότητα να προσομοιωθεί μια καμπυλότητα της τάξεως των cm, καθώς κάτι τέτοιο θα

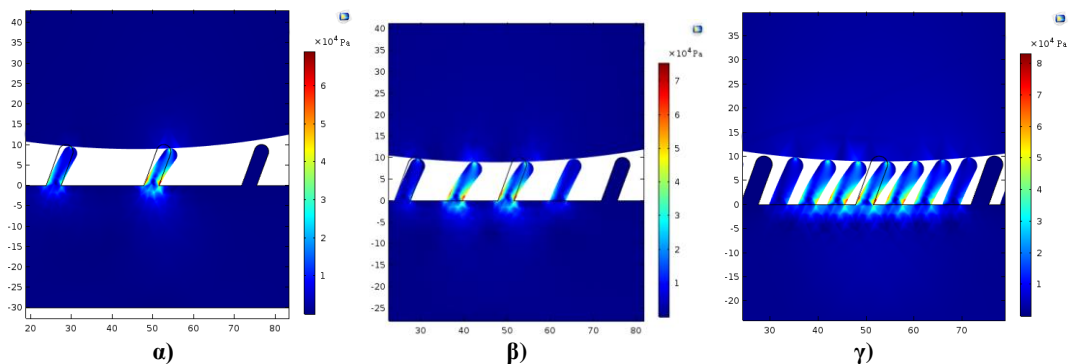
απαιτούσε πολύ μεγαλύτερο συνολικό αριθμό πτερυγίων για να έχει νόημα η προσομοίωση, και θα ξέφευγε από τα χρονικά πλαίσια μιας διπλωματικής.

4.1.1 Καμπυλότητα ακτίνας R=200 μm

Η ακτίνα των 200 μm αποτελεί την πρώτη καμπυλότητα που εξετάστηκε στο παρόν υποκεφάλαιο. Στην **εικόνα 4.1.1** φαίνεται το διάγραμμα των συνισταμένων δυνάμεων με το χρόνο, για τους τρεις διαφορετικούς αριθμούς πτερυγίων.

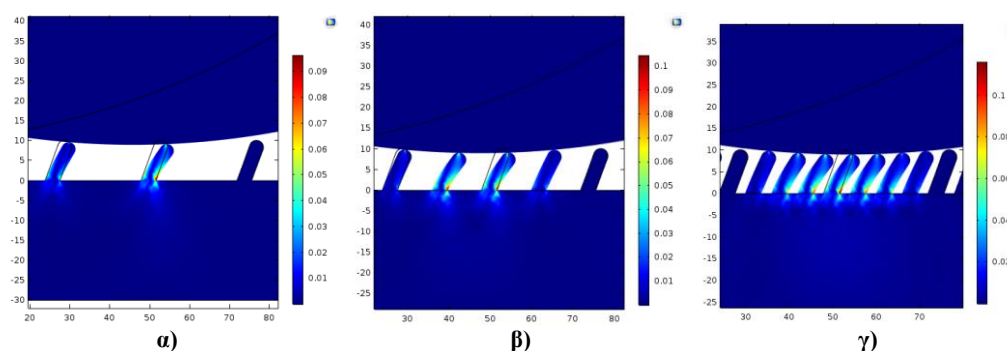


Εικόνα 4.1.1 Συνολική δύναμη για R=200 μm



Εικόνα 4.1.2 Τάσεις von Mises για α) 4.4s-5 πτερύγια β) 4.5s-10 πτερύγια γ) 4.9s-20 πτερύγια

Με μια πρώτη ματιά, φαίνεται ξεκάθαρα η επίδραση της διαφορετικής πυκνότητας τοποθέτησης στην τιμή της δύναμης. Αυτό φυσικά είναι κάτι αναμενόμενο, καθώς όσο μεγαλώνει ο αριθμός των πτερυγίων, τόσο περισσότερα έρχονται σε επαφή με το δίσκο, κάτι που φαίνεται και από τις **εικόνες 4.1.2(α-γ)**, όπου φαίνεται ο μέγιστος αριθμός πτερυγίων που έρχονται σε επαφή, για κάθε περίπτωση, δηλαδή 2,4 και 7 αντίστοιχα. Η μέση τιμή του μέγιστου των δυνάμεων αυτών, όπως φαίνεται από την **εικόνα 4.1.1**, διπλασιάζεται όταν διπλασιάζεται η πυκνότητα τοποθέτησης (0.42 μN , 0.85 μN , 1.75 μN). Αυτή είναι μια αναμενόμενη συμπεριφορά, καθώς παρά το γεγονός ότι τα πτερύγια που έρχονται σε επαφή δεν είναι ακριβώς διπλάσια, όσο διπλασιάζεται ο αριθμός τους, το προφίλ των τάσεων δείχνει ότι βρίσκονται περισσότερα σε μεγαλύτερη τάση. Επίσης, συγκρίνοντας τα προφίλ των τάσεων και παραμορφώσεων στις ίδιες χρονικές τιμές, των εικόνων **4.1.2** και **4.1.3**, παρατηρούμε ότι για τις μεν τάσεις υπάρχει συγκέντρωση και στις δυο πλευρές εκατέρωθεν των πτερυγίων, στις δε παραμορφώσεις οι μεγαλύτερες τιμές βρίσκονται κυρίως στην πλευρά που δέχεται θλιπτικά φορτία λόγω της κάμψης.



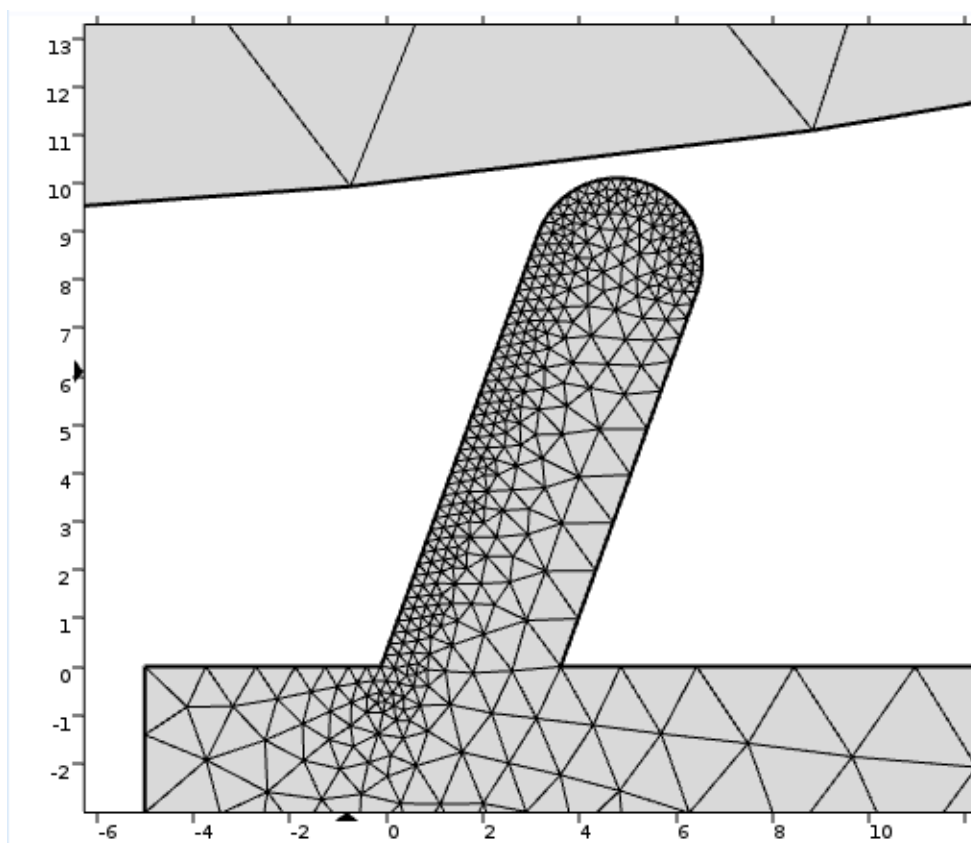
Εικόνα 4.1.3 Παραμορφώσεις για α) 4.4s-5 πτερύγια β) 4.5s-10 πτερύγια γ) 4.9s-20 πτερύγια

Στη γραφική παράσταση της δύναμης για την περίπτωση των 5 πτερυγίων, βλέπουμε ότι μέχρι την τιμή των 2s υπάρχει μια σταθερή αύξηση της δύναμης με μη-γραμμικό τρόπο [**εικόνα 4.1.1**]. Ύστερα, υπάρχει μια αντίστοιχο τύπου αύξηση μέχρι τα 2.5s, καθώς πλέον βρίσκεται σε επαφή με το δεύτερο πτερύγιο και το κατώτατο σημείο του δίσκου δεν επαφίεται σε κανένα από τα δύο πτερύγια, κάτι που εξηγεί το γεγονός του μη διπλασιασμού της δύναμης. Στη συνέχεια, μέχρι τα 3s, παρατηρείται μια πτώση της δύναμης που οφείλεται στο γεγονός ότι σταδιακά ο δίσκος πατάει όλο και λιγότερο το πρώτο πτερύγιο. Το ίδιο μοτίβο επαναλαμβάνεται μέχρι την αποχώρηση του δίσκου από το τελευταίο πτερύγιο.

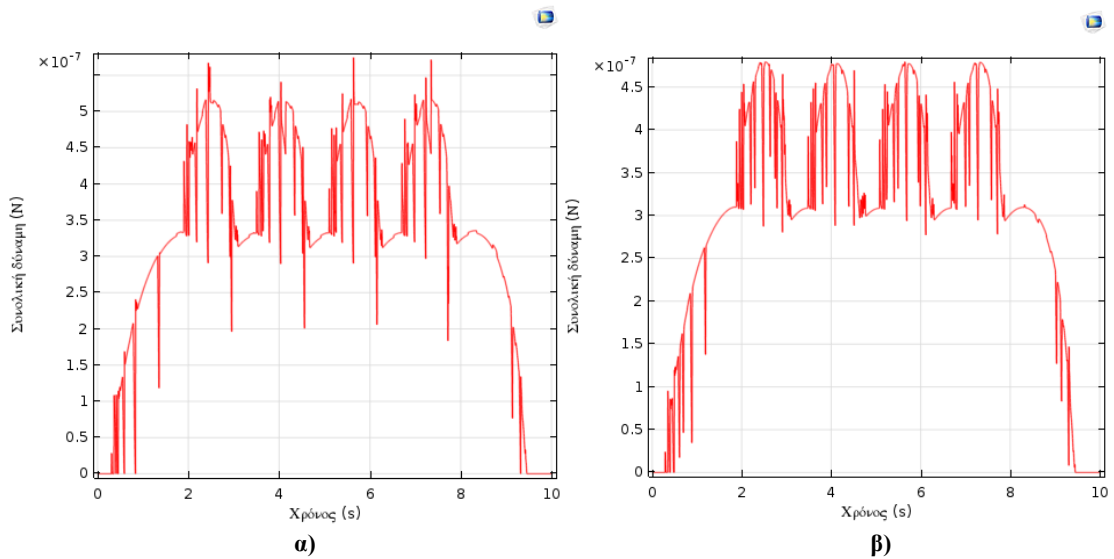
Τα γραφήματα δύναμης για 10 και 20 πτερύγια ακολουθούν το ίδιο μοτίβο σε γενικές γραμμές, αλλά υπάρχουν διαφοροποιήσεις από πρώτο. Αρχικά, φαίνεται σαφώς ότι η χρονική στιγμή που φτάνουν τη μέγιστη μέση δύναμη είναι μεγαλύτερη, όσο μεγαλώνει η πυκνότητα τοποθέτησης των πτερυγίων. Αυτό το γεγονός, σχετίζεται με τον μέγιστο αριθμό πτερυγίων που βρίσκονται ταυτόχρονα σε επαφή. Έτσι, το σημείο του δίσκου με τη μικρότερη κάθετη απόσταση, βρίσκεται όλο και δεξιότερα, όσο αυξάνεται ο αριθμός των πτερυγίων. Επίσης, οι διακυμάνσεις της δύναμης (χωρίς να λάβουμε υπ' όψιν ακόμα τις απότομες εναλλαγές), μικραίνουν σε πλάτος με την αύξηση της πυκνότητας τοποθέτησης των πτερυγίων. Αυτό συμβαίνει λόγω του γεγονότος ότι όσο περισσότερα πτερύγια βρίσκονται ταυτόχρονα σε επαφή, τόσο λιγότερο θα επηρεαστεί η δύναμη όταν προστεθεί ή αφαιρεθεί κάποιο. Ανάλογα, με την αύξηση των πτερυγίων θα αυξηθεί και η συχνότητα διακυμάνσεων της δύναμης.

4.1.1.1 Περιγραφή και σχολιασμός των απότομων εναλλαγών δύναμης

Στην **εικόνα 4.1.1** είναι φανερό ότι τη μέση τιμή δύναμης ακολουθούν αρκετές απότομες διακυμάνσεις. Οι διακυμάνσεις αυτές φαίνεται να πυκνώνουν και να αυξάνονται κατά απόλυτο πλάτος όσο αυξάνεται ο αριθμός των πτερυγίων, δίνοντας την εικόνα υπέρθεσης. Για αυτό το λόγο η περιγραφή θα επικεντρωθεί στην πρώτη περίπτωση, όπου η εναλλαγή της επαφής των πτερυγίων με το δίσκο είναι μεταξύ ενός και δύο πτερυγίων. Σε αυτή την περίπτωση, παρατηρούνται κυρίως απότομες πτώσεις της δύναμης, σε διάφορα χρονικά σημεία. Σε πρώτη φάση, επιχειρήθηκε να προσομοιωθεί ξανά η περίπτωση αυτή, αλλά με πολύ πυκνότερο πλέγμα (**εικόνα 4.1.4**) στην περιοχή επαφής προκειμένου να υπάρχει ένα στοιχείο για το αν η συμπεριφορά αυτή της δύναμης οφείλεται σε υπολογιστικό παράγοντα, ή αν έχει νόημα να το αποδώσουμε σε φυσικά αίτια.

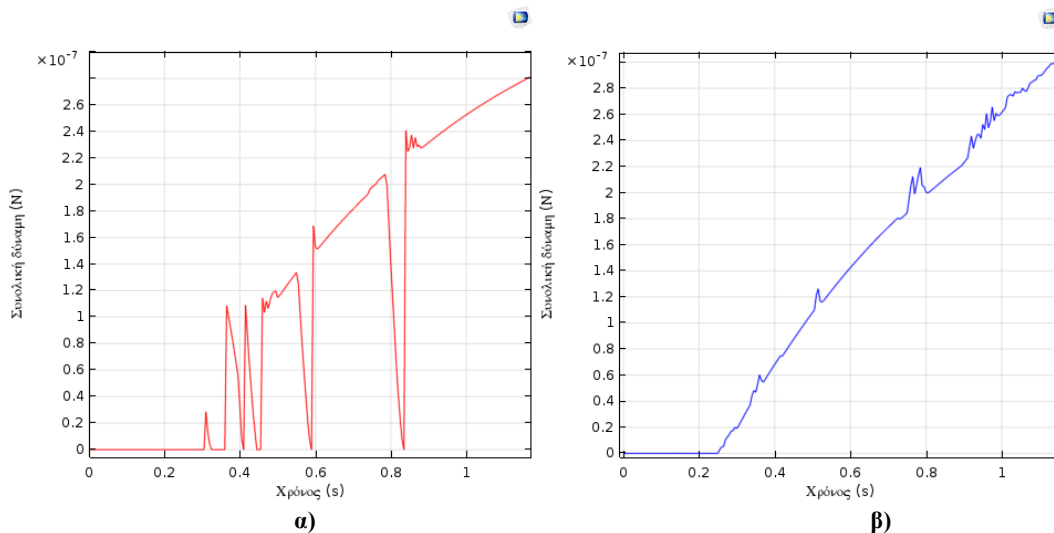


Εικόνα 4.1.4 Το πλέγμα του πτερυγίου στην προσομοίωση με πυκνότερο πλέγμα αριθμού 5 πτερυγίων

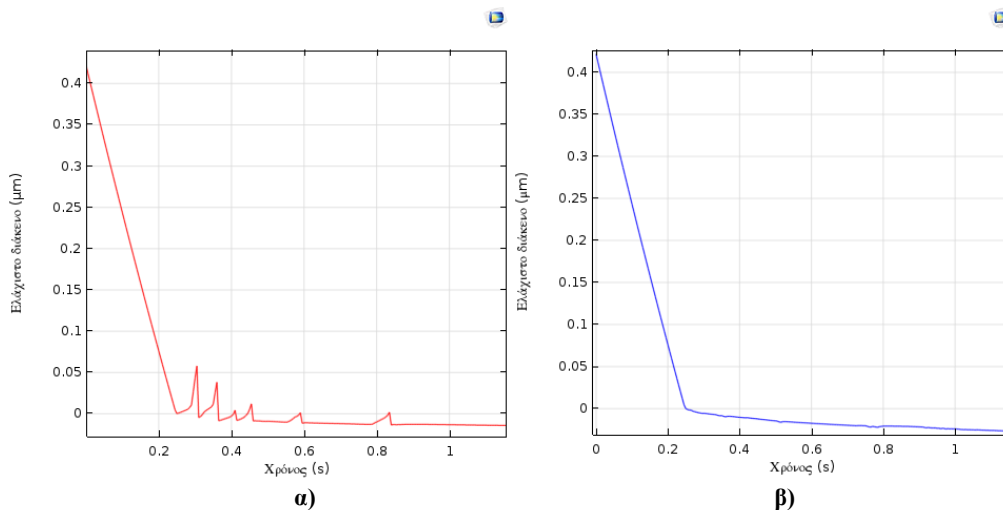


Εικόνα 4.1.5 Συνολική δύναμη για α) αραιό και β) πυκνό πλέγμα

Όπως φαίνεται στην **εικόνα 4.1.5**, οι δυο δυνάμεις δεν παρουσιάζουν ποιοτική διαφορά, παρά μόνο μικρές διαφορές στην τιμή των δυνάμεων, οι οποίες λογικά οφείλονται στην μεγαλύτερη ακρίβεια της δεύτερης, που έχει πολλαπλάσια σημεία από την πρώτη, άρα μεγαλύτερη ακρίβεια. Όμως, είναι σημαντικό στοιχείο το γεγονός ότι οι διακυμάνσεις της δύναμης δεν εξαφανίστηκαν. Συνεπώς, δεν θα μπορούσαμε να αποδώσουμε τις διακυμάνσεις αυτές σε υπολογιστικό σφάλμα. Σε δεύτερη φάση, προσομοιώθηκε η ίδια περίπτωση, αλλά χωρίς την εισαγωγή προσκόλλησης, για να μπορέσουμε να συμπεράνουμε εάν αυτή παίζει ρόλο. Στην περίπτωση αυτή θα δοθεί έμφαση στο πρώτο δευτερόλεπτο, που εμφανίζονται οι πρώτες διακυμάνσεις, καθώς τότε μόνο ένα πτερύγιο βρίσκεται σε επαφή, και κατά συνέπεια θα βγουν πιο σαφή συμπεράσματα.



Εικόνα 4.1.6 Συνολική δύναμη για 1.5 s για 5 πτερύγια α) με προσκόλληση β) χωρίς προσκόλληση

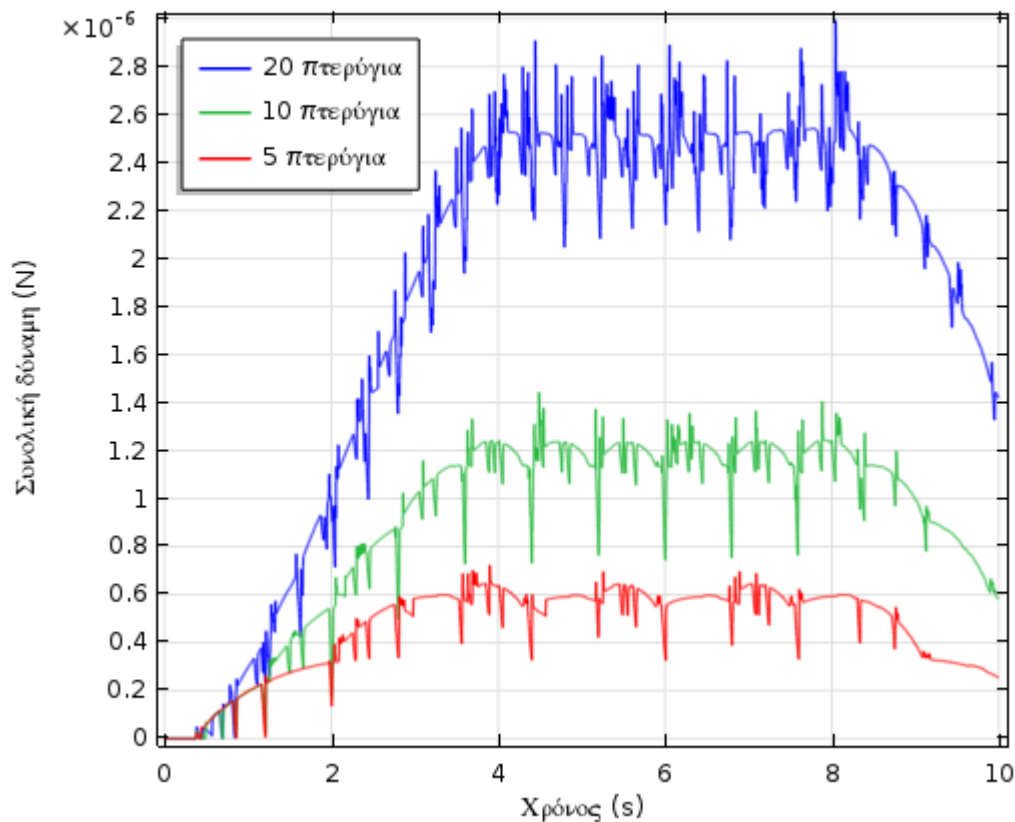


Εικόνα 4.1.7 Ελάχιστο διάκενο για 5 πτερύγια **α)** με προσκόλληση **β)** χωρίς προσκόλληση

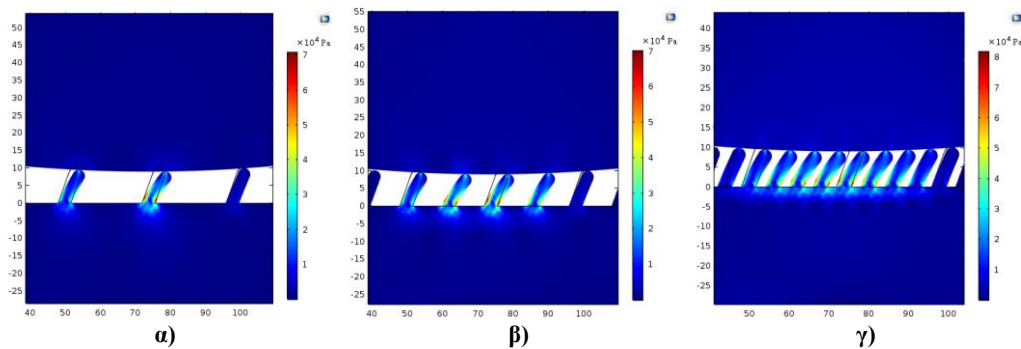
Από τις **εικόνες 4.1.6** και **4.1.7** βγαίνει το συμπέρασμα ότι η επίδραση της προσκόλλησης στις διακυμάνσεις της δύναμης είναι μεγάλη. Παρατηρώντας το ελάχιστο διάκενο στην περίπτωση με προσκόλληση παρατηρούνται κορυφές μεγαλύτερες του 0, κάτι που επεξηγεί το γεγονός ότι η δύναμη στις ίδιες χρονικές στιγμές μηδενίζεται. Αυτή η συμπεριφορά δείχνει ότι το μοντέλο προσκόλλησης-αποκόλλησης επιβάλλει μια σχετικά απότομη απώλεια της επαφής, και πιθανότατα εξηγεί τις απότομες πτώσεις δύναμης στα διαγράμματα. Πιο συγκεκριμένα, για αυτές τις πτώσεις δύναμης, είναι πιθανό να οφείλεται η μετάβαση από την φάση αποκόλλησης δυο σημείων που ήταν σε προσκολλητική επαφή σε αυτή που το σημείο του πτερυγίου θα έρθει πάλι σε επαφή με ένα νέο σημείο του δίσκου. Όπως θα διαπιστώσουμε σε επόμενο υποκεφάλαιο, δεν παράγει μόνο η προσκόλληση εναλλαγές δύναμης. Τέλος, φαίνεται να υπάρχει αύξηση στις τιμές του πλάτους των διακυμάνσεων, με την αύξηση του αριθμού των πτερυγίων, αλλά με μικρότερο ρυθμό από αυτόν που αυξάνει η δύναμη.

4.1.2 Καμπυλότητα ακτίνας R=400 μm

Στην περίπτωση αυτή, διπλασιάστηκε η προηγούμενη ακτίνα και όλες οι υπόλοιπες παράμετροι έμειναν σταθερές. Παρακάτω φαίνεται η γραφική παράσταση της συνισταμένης δύναμης επαφής:



Εικόνα 4.1.5 Συνολική δύναμη για R=400 μm



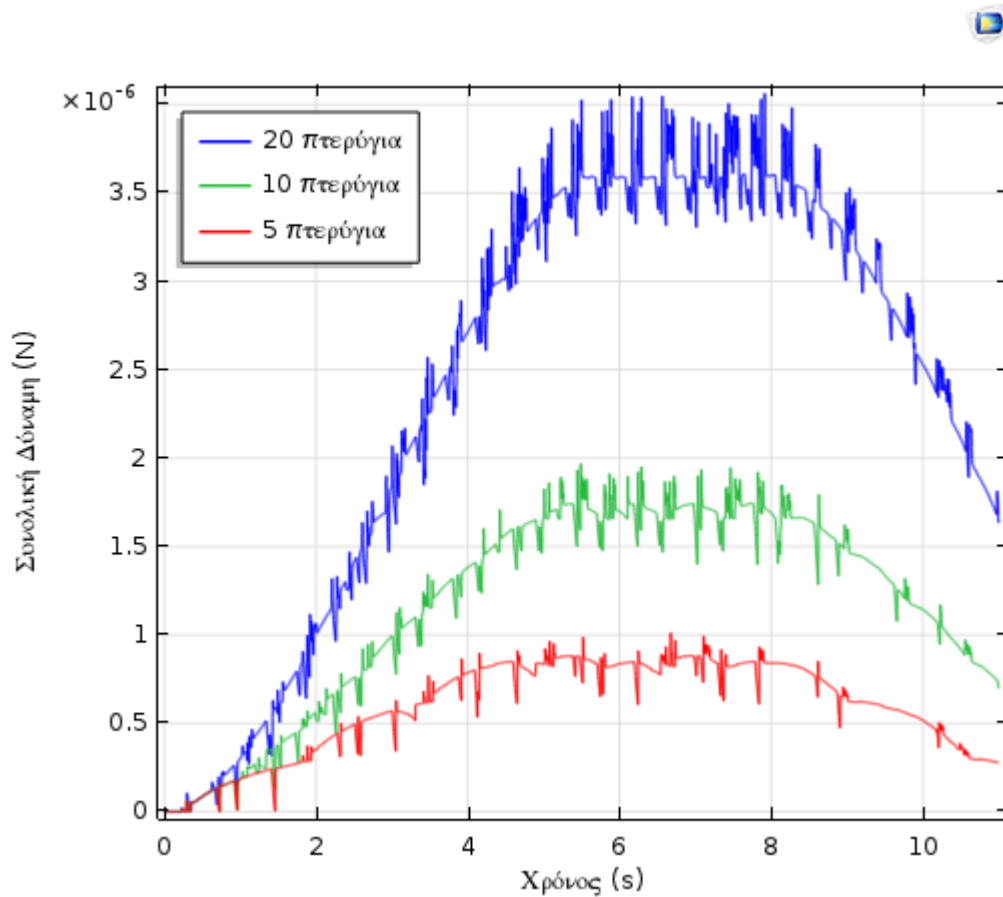
εικόνα 4.1.6 Τάσεις von Mises για α)6.9s β)6.9s γ)6.9s

Όπως φαίνεται στην **εικόνα 4.1.5**, υπάρχει διαφορά μεταξύ της μέσης μέγιστης δύναμης ($0.58 \mu\text{N}$, $1.18 \mu\text{N}$ και $2.5 \mu\text{N}$) για κάθε πυκνότητα τοποθέτησης πτερυγίων σε σχέση με τις αντίστοιχες της προηγούμενης περίπτωσης. Ο κύριος λόγος είναι ότι όπως φαίνεται στα τρία στιγμιότυπα της **εικόνας 4.1.6**, τα πτερύγια που βρίσκονται σε επαφή είναι περισσότερα σε σχέση με πριν, δηλαδή 3, 5 και 10. Επίσης, η διάρκεια μέγιστης δύναμης μειώνεται σε σχέση με πριν, καθώς λόγω της επαφής περισσότερων πτερυγίων απαιτείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέχρι έρθει σε επαφή ο μέγιστος δυνατός αριθμός πτερυγίων. Επιπλέον, ειδικά στις γραφικές παραστάσεις των δυνάμεων στις περιπτώσεις των 10 και 20 πτερυγίων φαίνονται σαφέστερα σε σχέση με πριν τα όροι και οι κοιλάδες κατά την επαφή με το επόμενο πτερύγιο και την αποκόλληση με το τελευταίο. Στους ίδιους αριθμούς πτερυγίων διαφαίνεται επίσης η

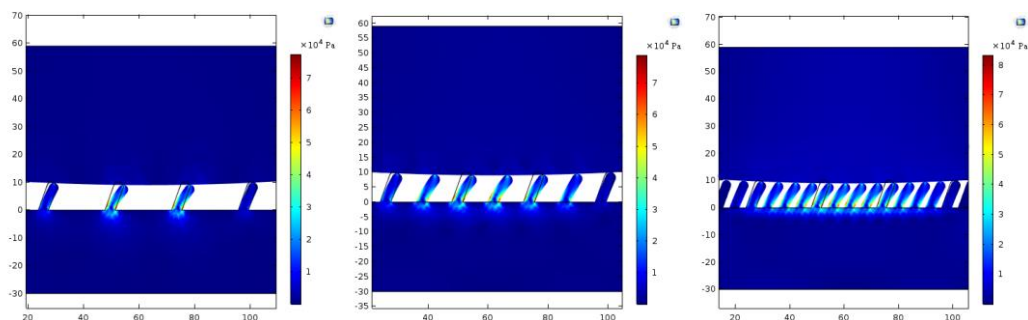
διπλάσια συχνότητα εμφάνισης των κοιλάδων της μέσης τιμής δύναμης του αριθμού των 20 πτερυγίων σε σχέση με αυτόν των 10.

4.1.3 Καμπυλότητα ακτίνας R=800 μm

Όπως και πριν, διπλασιάστηκε η προηγούμενη ακτίνα και προέκυψαν τα εξής:



εικόνα 4.1.7 Συνολική δύναμη για R=800 μm



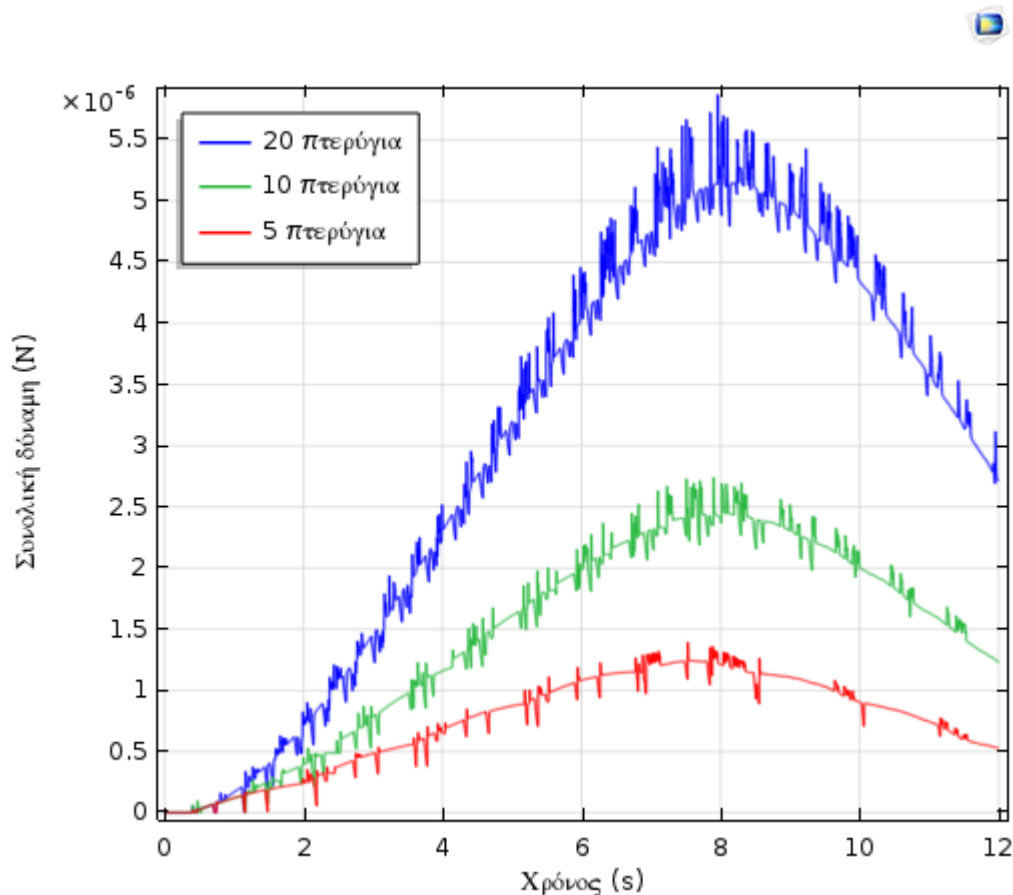
εικόνα 4.1.8 Τάσεις von Mises για α)6.9s β)6.8s γ)6.8s

Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται αύξηση των μέσων μέγιστων δυνάμεων σε σχέση με πριν, με τις τιμές για τις τρεις πυκνότητες τοποθέτησης πτερυγίων να είναι 0.85 μN , 1.18 μN και 3.6 μN . Ο μέγιστος αριθμός πτερυγίων που βρίσκονται σε επαφή είναι 4, 7 και 14 αντίστοιχα. Οι δύο πρώτες πυκνότητες τοποθέτησης έχουν τον ίδιο αριθμό μέγιστων

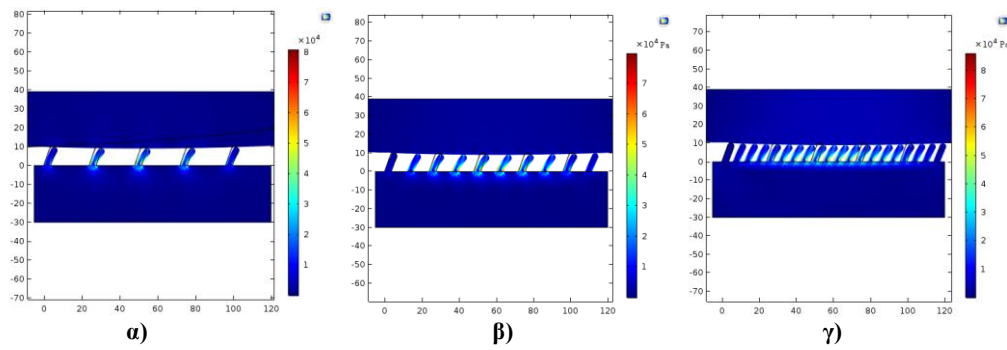
πτερυγίων με τις δυο τελευταίες πυκνότητες τοποθέτησης της πρώτης καμπυλότητας. Συνεπώς είναι λογικό να αναμένουμε περίπου τις ίδιες τιμές δύναμης, όπως και συμβαίνει. Αυτό δείχνει την πολύ πιο άμεση επίδραση της πυκνότητας τοποθέτησης πτερυγίων σε σχέση με την καμπυλότητα στην τιμή της συνολικής δύναμης. Όμως, η παρατήρηση της μορφολογίας των παραστάσεων των δυνάμεων σε αυτές τις δύο περιπτώσεις μας δείχνει ότι υπάρχει διαφορά σε αυτό το κομμάτι. Συνεπώς, από τη σύγκριση φαίνεται ότι η επίδραση της γεωμετρίας επηρεάζει περισσότερο το κομμάτι της μορφής της γραφικής παράστασης της δύναμης. Επίσης, από αυτή την καμπυλότητα αρχίζει να φαίνεται πιο ξεκάθαρα, το γεγονός ότι η μορφή της γραφικής παράστασης της δύναμης, φαίνεται ελαφρώς διαφορετική πριν και μετά τη χρονική περίοδο της μέγιστης δύναμης, κάτι που φαινομενικά αποδίδεται στη ανισοτροπία της επαφής. Δηλαδή, λόγω της κλίσης των πτερυγίων, είναι διαφορετική η επιφάνεια επαφής που δημιουργείται με την μπροστινή πλευρά του δίσκου σε σχέση με την πίσω πλευρά.

4.1.4 Καμπυλότητα ακτίνας R=1600 μm

Υποδιπλασιάζοντας την προηγούμενη καμπυλότητα, λαμβάνουμε τις κάτωθι γραφικές παραστάσεις:



εικόνα 4.1.9 Συνολική δύναμη για R=1600 μm

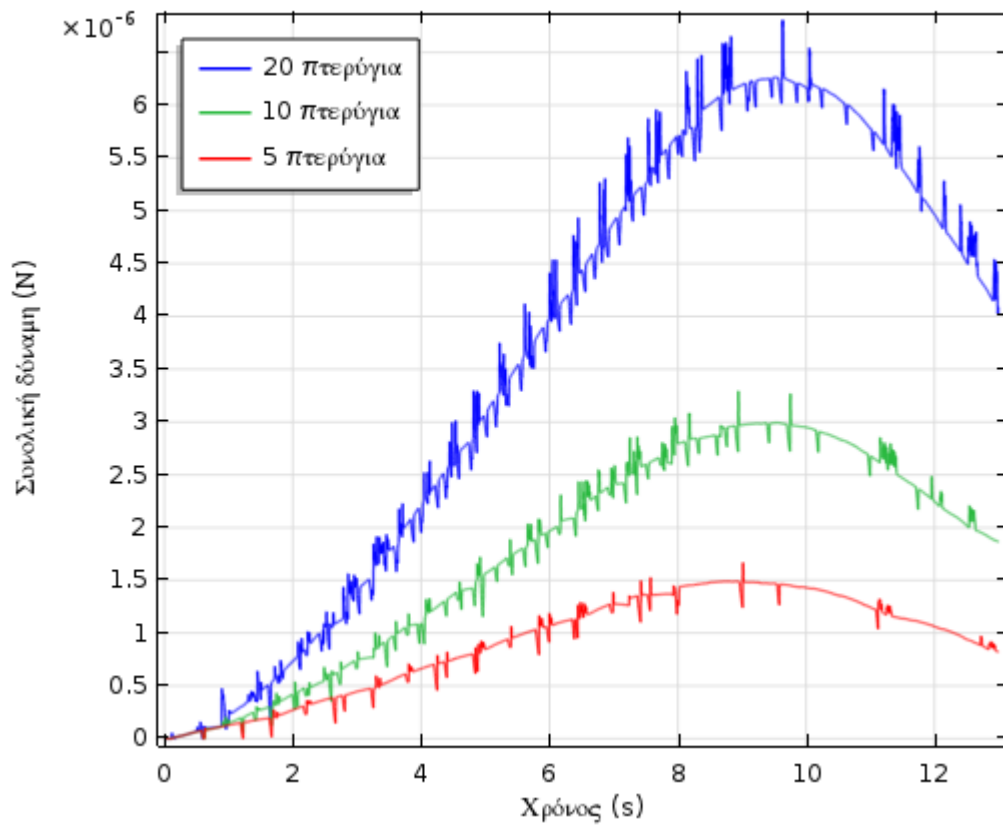


εικόνα 4.1.10 Τάσεις von Mises για α)7.5s β)8s γ)8.2s

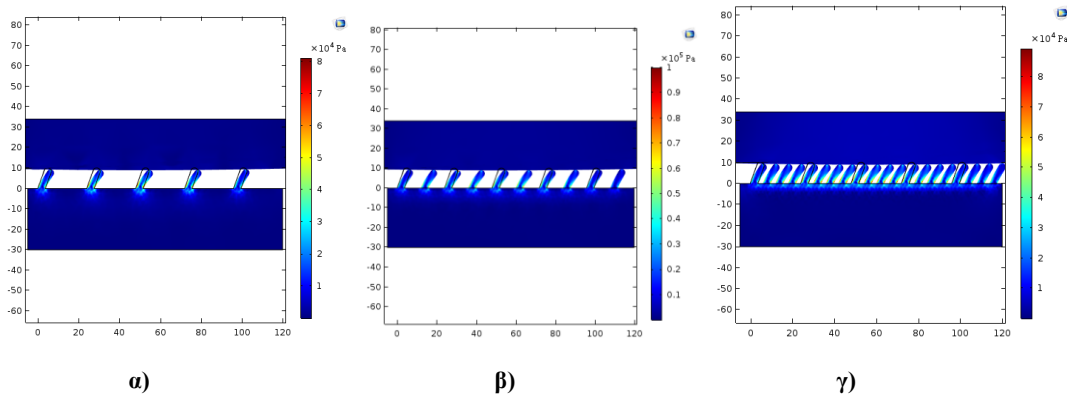
Από την γραφική παράσταση της δύναμης σε σχέση με τις προηγούμενες παρατηρείται και πάλι αύξηση των τιμών της δύναμης (1.25 μN , 2.4 μN και 5.2 μN) σε σχέση με τις μεγαλύτερες καμπυλότητες. Με την παρούσα καμπυλότητα ο μέγιστος αριθμός των πτερυγίων που έρχονται σε επαφή κατά την πάροδο του χρόνου στην οριζόντια κίνηση ταυτίζεται με το συνολικό αριθμό πτερυγίων και για τις τρεις πυκνότητες τοποθέτησής τους. Επίσης, παρατηρούμε ότι η μέση τιμή της δύναμης (χωρίς να λάβουμε υπ' όψιν τις αναταραχές) έχει πολύ ομαλότερο προφίλ σε σχέση με τις προηγούμενες, φανερώνοντας την επίδραση της καμπυλότητας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις μικρότερες διαφορές κατά y κατά την επαφή των δυο σωμάτων που υπάρχουν στην περίπτωση χρήσης δίσκου με μικρότερη καμπυλότητα. Επιπλέον, σε σχέση με πριν παρατηρούμε ακόμα μικρότερη περιοχή μέγιστης μέσης δύναμης και μεγαλύτερη χρονικά στιγμή που η μέση τιμή της δύναμης φτάνει τη μέγιστη τιμή της (περίπου 5s αργότερα σε σχέση με την πρώτη περίπτωση).

4.1.5 Καμπυλότητα ακτίνας $R=3200 \mu\text{m}$

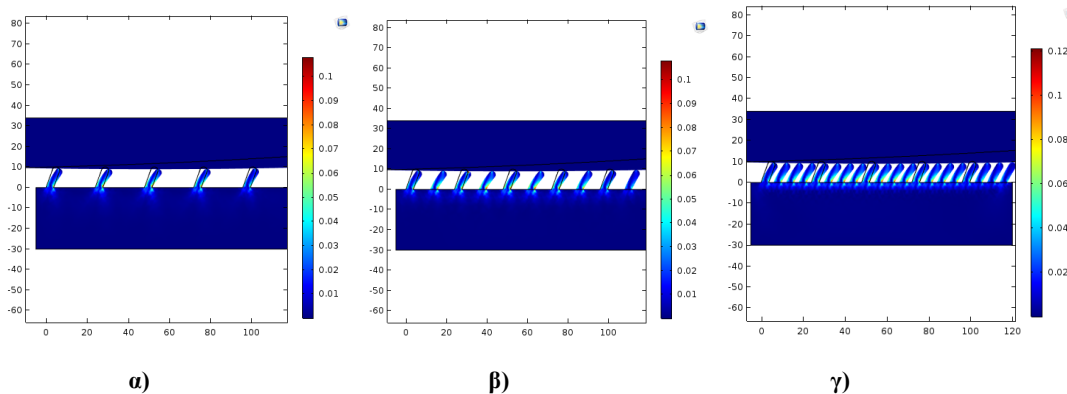
Η περίπτωση αυτή αφορά την μέγιστη τιμή αύξησης της ακτίνας, η οποία γίνεται 16 φορές μεγαλύτερη της αρχικής. Παρακάτω φαίνονται σχετικά γραφήματα:



εικόνα 4.1.11 Συνολική δύναμη για R=3200 μm

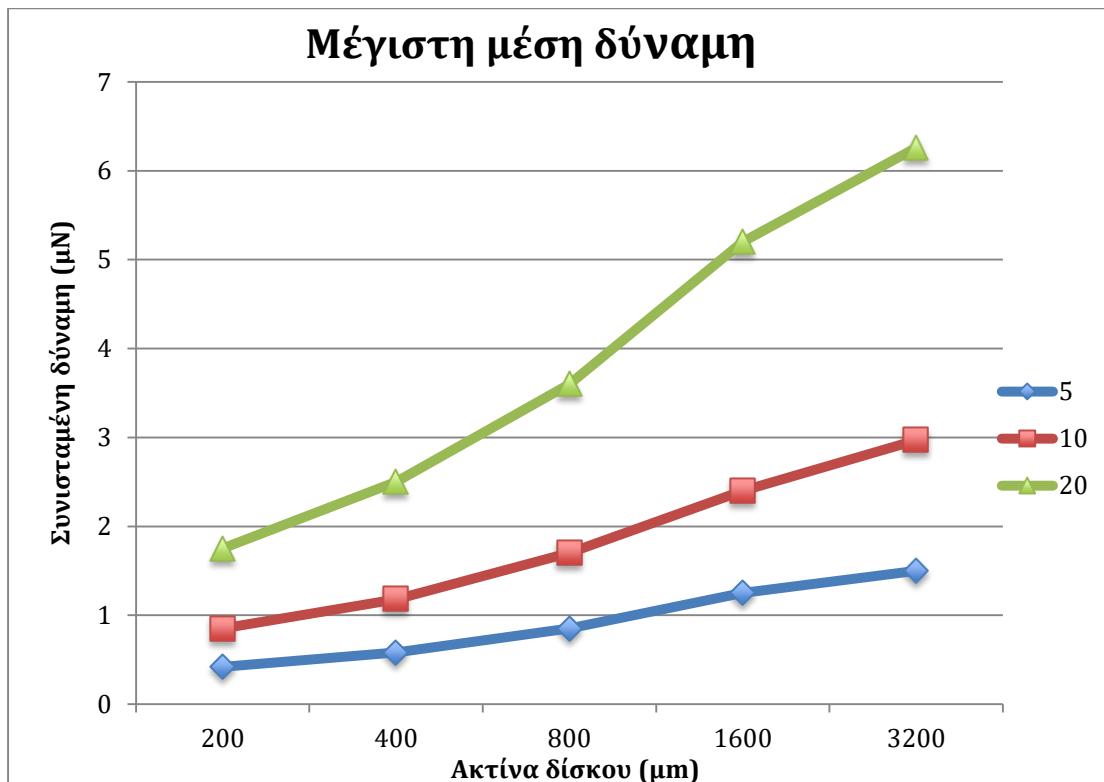


εικόνα 4.1.12 Τάσεις von Mises για α) 8.7s β) 8.8s γ) 9.1s



εικόνα 4.1.13 Ισοδύναμες παραμορφώσεις για α) 8.7s β) 8.8s γ) 9.1s

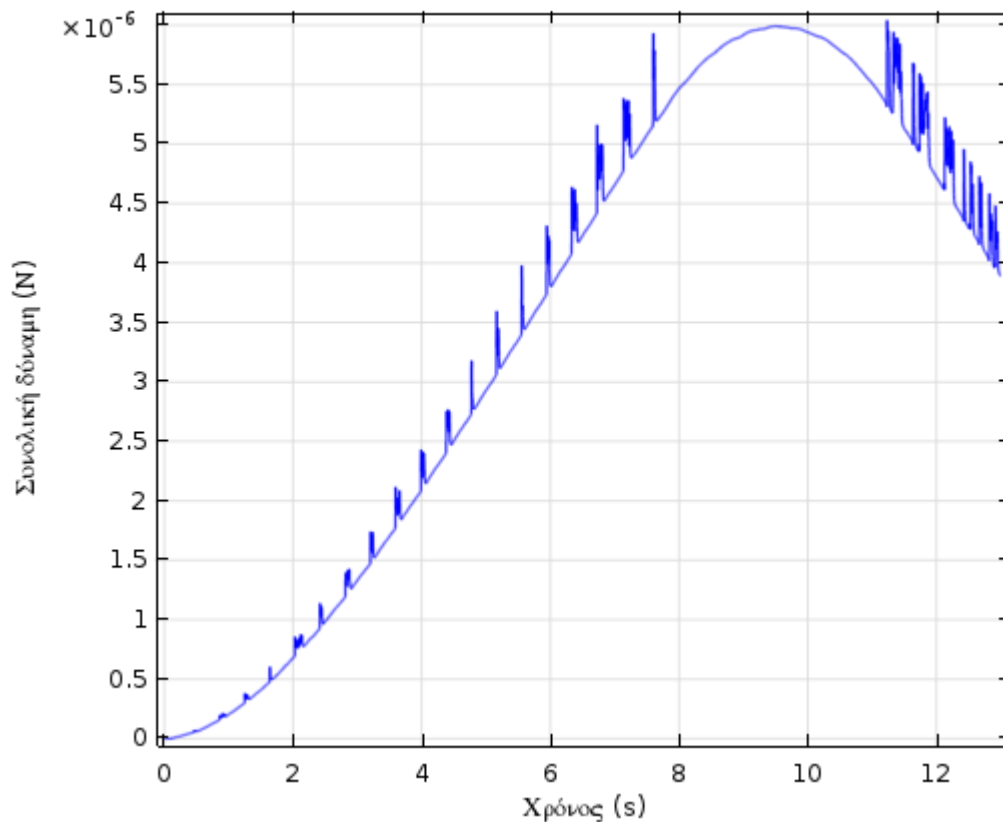
Στην τελευταία αυτή γεωμετρία παρατηρούμε από την **εικόνα 4.1.11** ότι οι δυνάμεις αυξήθηκαν περαιτέρω, σε σχέση με πριν, παρά το γεγονός ότι στην προηγούμενη καμπυλότητα ο μέγιστος αριθμός πτερυγίων που βρισκόντουσαν σε επαφή είναι ο ίδιος. Η διαφορά στη δύναμη υπάρχει λόγω του γεγονότος ότι η μικρότερη καμπυλότητα πιέζει τα πτερύγια σε λίγο χαμηλότερο ύψος, κατά μέσο όρο, σε σχέση με πριν. Η δύναμη, σε σχέση με τη μορφολογία της προηγούμενης περίπτωσης έχει λίγο λιγότερες και μικρότερες αναταραχές, κάτι που ίσως να οφείλεται στην άμβλυνση της κλίσης επαφής, λόγω μικρότερης καμπυλότητας. Στην **εικόνα 4.1.14** φαίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των δυνάμεων επαφής για τις 15 προαναφερθείσες περιπτώσεις. Βλέπουμε εποπτικά το γεγονός ότι στον τελευταίο διπλασιασμό της ακτίνας υπάρχει μείωση του ρυθμού αύξησης της δύναμης, αντίθετα με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Επιπλέον, ο διπλασιασμός της πυκνότητας φαίνεται να διπλασιάζει και τη δύναμη σε κάθε περίπτωση.



Εικόνα 4.1.14 Μέγιστη μέση δύναμη σε συνάρτηση με την ακτίνα του δίσκου και τον αριθμό πτερυγίων

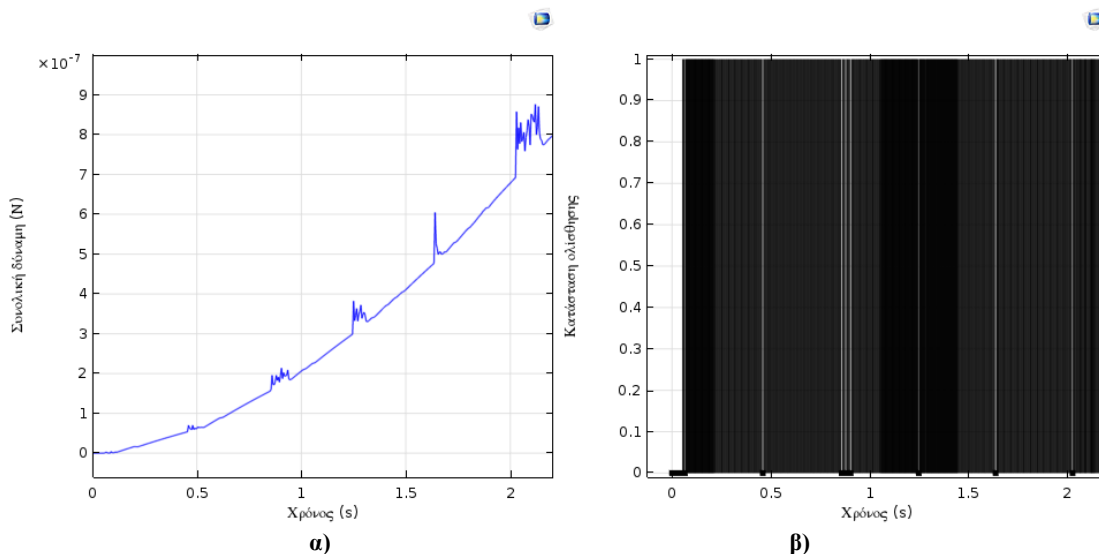
4.1.5.1 Ενδείξεις φαινομένου stick-slip

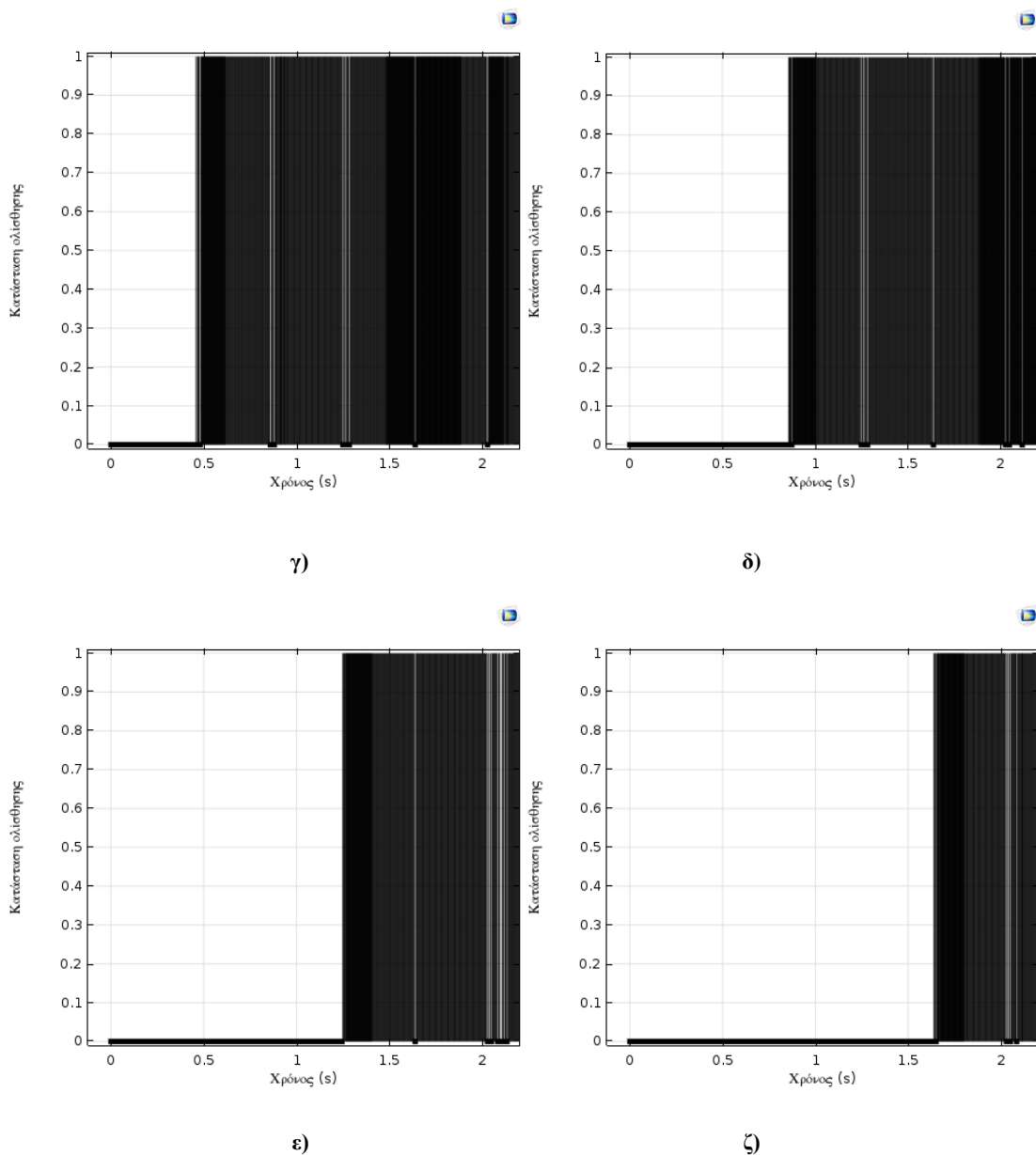
Όπως έγινε στην πρώτη καμπυλότητα και πυκνότητα τοποθέτησης πτερυγίων, έτσι και στην τελευταία, έγινε προσομοίωση χωρίς προσκόλληση. Παρακάτω φαίνεται η συνολική δύναμη για την περίπτωση αυτή:



εικόνα 4.1.15 Συνολική δύναμη για $R=3200 \mu\text{m}$, 20 πτερύγια και χωρίς προσκόλληση

Όπως φαίνεται στην **εικόνα 4.1.15**, είναι φανερή η επίδραση της προσκόλλησης. Η πρώτη γενική ένδειξη είναι ότι η τιμή της μέγιστης μέσης δύναμης μειώθηκε στα 6 μN . Όπως είχε παρατηρηθεί στο υποκεφάλαιο 4.1.1, οι απότομες πτώσεις της δύναμης εξαφανίστηκαν. Επίσης, φαίνονται ξεκάθαρα κάποιες τοπικές αυξήσεις στη δύναμη οι οποίες φαίνεται να γίνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα και είναι σε αριθμό όσες και τα πτερύγια. Για να αποσαφηνιστούν καλύτερα αυτές οι κορυφές, χρειάζεται να μεγεθύνουμε μια περιοχή της δύναμης, και να αξιολογήσουμε τη μεταβλητή που δείχνει αν το σύνορο που έχουμε επιλέξει βρίσκεται σε κατάσταση ολίσθησης ή όχι.

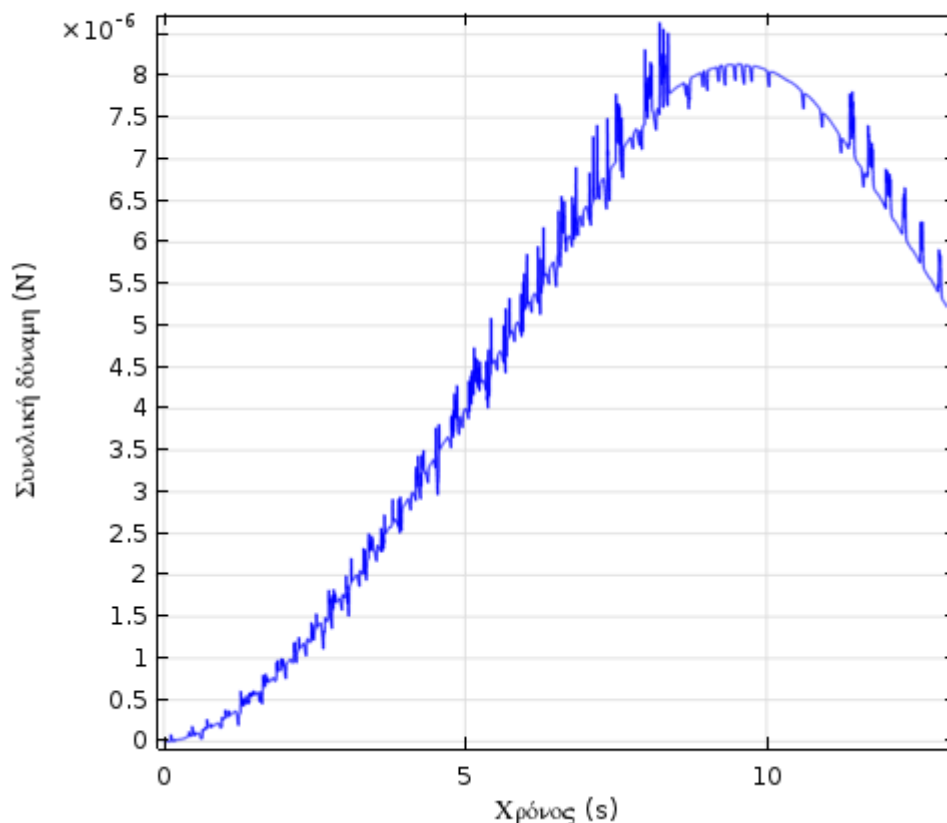




εικόνα 4.1.16 α)μεγεθυμένη περιοχή της συνολικής δύναμης, β-ζ η κατάσταση ολίσθησης για τα πρώτα 5 πτερύγια

Όπως φαίνεται στη μεγεθυμένη περιοχή της δύναμης της **εικόνας 4.1.16α**, υπάρχουν πέντε διακριτές κορυφές της δύναμης. Μελετώντας προσεκτικά τις **εικόνες 4.1.16(β-ζ)**, οι οποίες δείχνουν την κατάσταση ολίσθησης (με 1 υπάρχει ολίσθηση, με 0 όχι) για τα πάνω σύνορα των πέντε πρώτων πτερυγίων, παρατηρούμε ότι υπάρχει χρονική ταύτιση στις περιοχές που απουσιάζει η ολίσθηση και τις περιοχές που η δύναμη αυξάνεται απότομα. Ταύτιση φαίνεται να υπάρχει και στην ένταση και το μέγεθος του χρονικού διαστήματος. Για παράδειγμα, τη χρονική στιγμή λίγο μετά τα 2 sec στο τέταρτο πτερύγιο (**εικόνα 4.1.16ε**) ο δείκτης ολίσθησης δείχνει την τιμή 0 για σχετικά μεγαλύτερο διάστημα σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, κάτι που απεικονίζεται στο διάγραμμα της δύναμης, όπου φαίνεται μια κορυφή μεγαλύτερης διάρκειας από τις υπόλοιπες. Επίσης, το ίδιο σημείο δείχνει να έχει μεγαλύτερο πλάτος από τα προηγούμενα, το οποίο είναι λογικό, καθώς και τα πέντε πτερύγια δεν ολίσθησαν σε εκείνο το χρονικό σημείο, άρα το μεγαλύτερο πλάτος δικαιολογείται ως υπέρθεση. Από τα παραπάνω θα μπορούσαμε να υποθέσουμε, ότι αυτές οι κορυφές είναι

ενδείξεις ύπαρξης του φαινομένου stick-slip, το οποίο έχει περιγραφεί στη θεωρία. Το ίδιο μοτίβο εκτυλίσσεται και τις υπόλοιπες χρονικές στιγμές, αλλά και κατά την απώλεια της επαφής των πτερυγίων. Επίσης, μια άλλη σημαντική διαφορά είναι η μέγιστη τιμή της δύναμης, η οποία φαίνεται ελαφρώς μικρότερη από την πανομοιότυπη περίπτωση με προσκόλληση. Αυτό ίσως αποτελεί ένα δείγμα της συνεισφοράς της προσκόλλησης στην συνολική δύναμη. Τέλος, έγινε ακόμα μια προσομοίωση με μεγαλύτερο αριθμό πτερυγίων (26 πτερύγια), που σύμφωνα με τη θεωρία [93] αναμένεται να μειωθεί το φαινόμενο stick-slip.



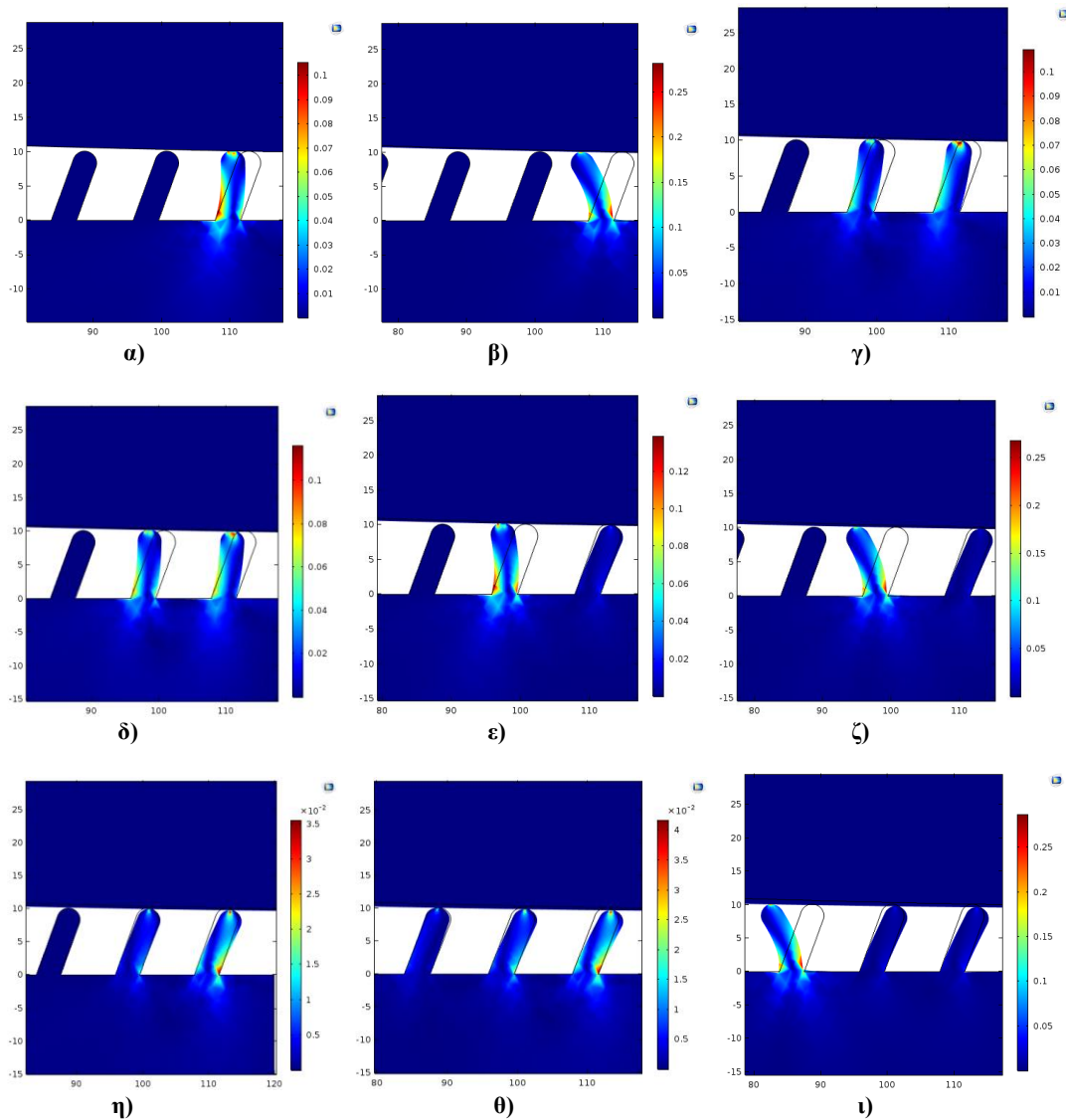
εικόνα 4.1.17 Συνολική δύναμη για $R=3200 \mu\text{m}$, 26 πτερύγια

Στην **εικόνα 4.1.17** φαίνεται η συνολική δύναμη για τα 26 πτερύγια. Είναι σαφές ότι πάλι έχουμε αύξηση της δύναμης κατά $2 \mu\text{N}$ περίπου. Αυτή η πυκνότητα τοποθέτησης είναι και ο μέγιστος αριθμός πτερυγίων που μπορούν να υπάρξουν στο δεδομένο μήκος της προσομοίωσης χωρίς να υπάρχει επαφή μεταξύ τους (self contact). Όμως, το προφίλ της δύναμης δεν δείχνει να έχει αλλάξει ιδιαίτερα σε σχέση με πριν (**εικόνα 4.1.11**), σε ότι αφορά το απόλυτο πλάτος των αναταραχών, και μια πού ισχνή αύξηση του σχετικού, από 0.15 (για 20 πτερύγια) σε 0.13 (για τα 26 πτερύγια).

4.2 Προσομοίωση με την αντίθετη φορά

Στο παρόν υποκεφάλαιο έγινε δοκιμή με το δίσκο να κινείται από τα δεξιά προς τα αριστερά με ακτίνα δίσκου $R=3200 \mu\text{m}$ και αριθμό πτερυγίων 10. Σκοπός ήταν να εξεταστεί η

επίδραση που θα είχε η κλίση των περυγίων σε διάφορες παραμέτρους. Όπως φάνηκε στις προσομοιώσεις, πρόκειται για υπολογιστικά πολύ πιο δύσκολη περίπτωση από τις υπόλοιπες, καθώς καμία προσομοίωση δεν ολοκληρώθηκε, αποκλίνοντας σε διάφορα στάδια της διαδικασίας επίλυσης. Αυτό γίνεται περισσότερο εμφανές από τις ενδεικτικές εικόνες των παραμορφώσεων που ακολουθούν.



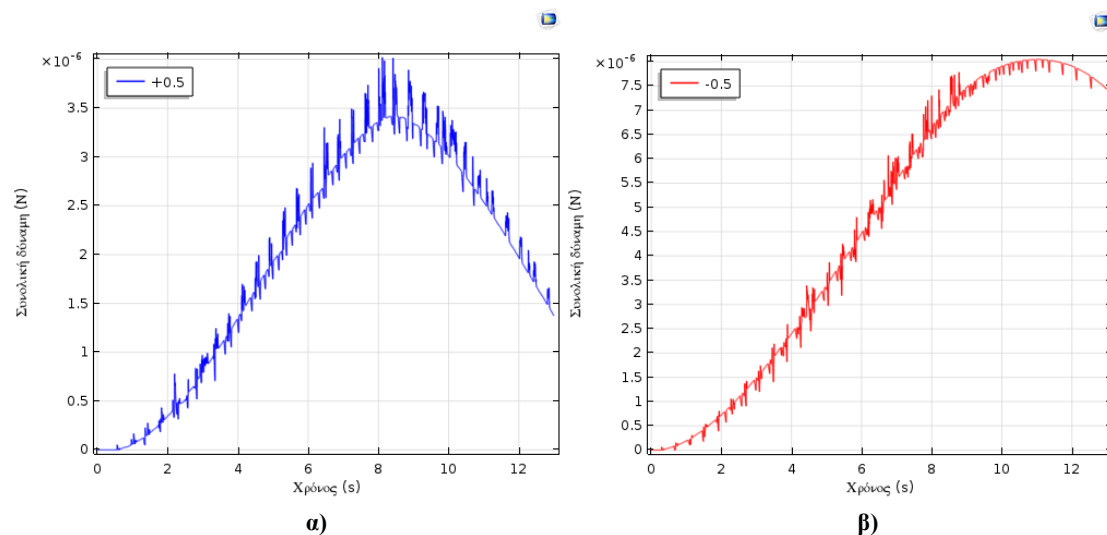
εικόνα 4.2.1 Ισοδύναμες παραμορφώσεις για $R=3200 \mu\text{m}$, 10 περυγία για α) 0.2s β) 0.5s γ) 0.65s δ) 0.7s ε) 0.8s ζ) 1s η) 1.3s θ) 1.6s ι) 2.1s

Στα στιγμιότυπα της εικόνας 4.2.1 φαίνεται η πορεία των παραμορφώσεων. Ειδικά στα ζευγάρια β-γ και ζ-η φαίνεται η αστάθεια της κίνησης, όπου παρατηρείται μια απότομη μετάβαση του περυγίου από μια θέση μεγάλων παραμορφώσεων σε μια πολύ μικρότερων. Στα στιγμιότυπα αυτά δίνεται η αίσθηση ότι καθώς ο δίσκος το παραμορφώνει αρχικά, αυτό έχει την τάση για επαναφορά στην αρχική του θέση. Αυτό πιθανόν να συμβαίνει τη στιγμή που συμβαίνει αποκόλληση (decohesion) και έτσι να δημιουργείται η προϋπόθεση για

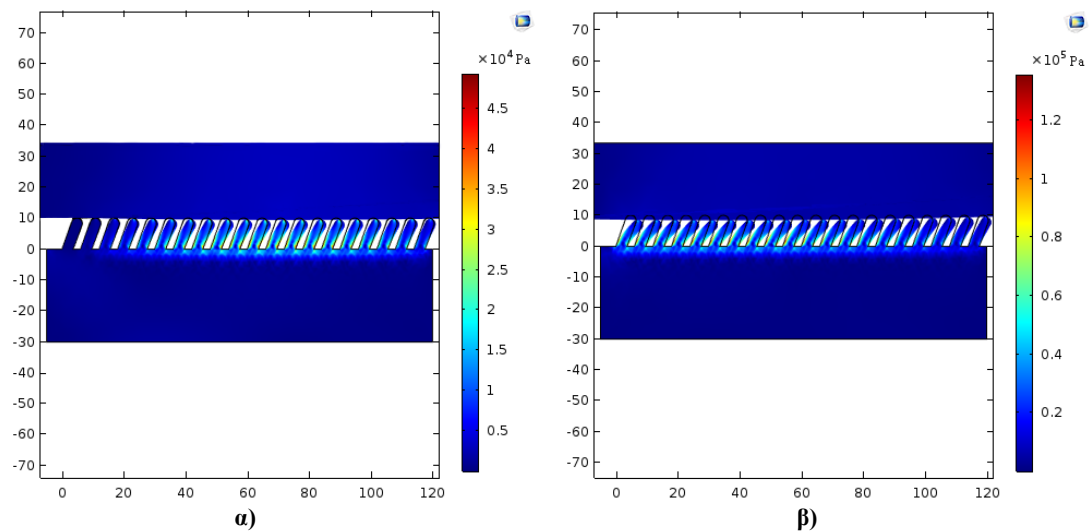
επαναφορά. Αυτή η απότομη επαναφορά μεγάλης μετατόπισης είναι πολύ πιθανό να δημιουργήσει τα κυρίως προβλήματα απόκλισης της περίπτωσης αυτής.

4.3 Επίδραση της κάθετης απόστασης τοποθέτησης του δίσκου

Για την ενότητα αυτή πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις, με διαφορετικό ύψος τοποθέτησης του δίσκου σε σχέση με την περίπτωση με τη μεγαλύτερη πυκνότητα τοποθέτησης πτερυγίων και ακτίνα δίσκου. Συγκεκριμένα, ο δίσκος τοποθετήθηκε $\pm 0.5 \mu\text{m}$ σε σχέση με την αρχική του θέση. Ο σκοπός ήταν να παρατηρηθεί η επίδραση που έχει το ύψος τοποθέτησης, το οποίο παίζει πρακτικά το ρόλο της προφόρτισης, αφού ο δίσκος έχει κύλιση στην πάνω πλευρά του. Παρακάτω φαίνονται τα σχετικά αποτελέσματα.

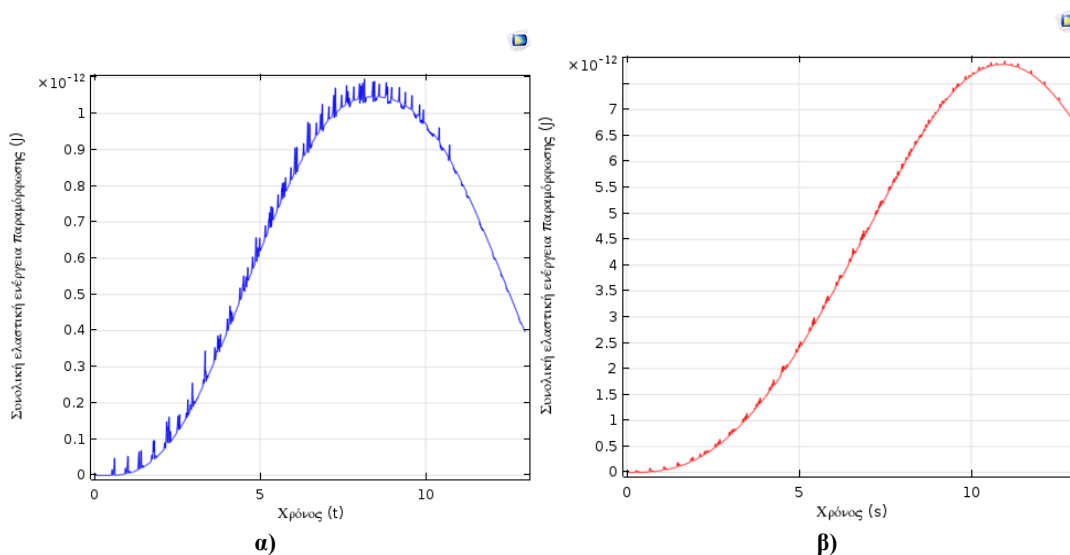


εικόνα 4.3.1 Συνολική δύναμη για $R=3200$, 20 πτερύγια και ύψος τοποθέτησης δίσκου α) $y=9.5 \mu\text{m}$ β) $y=8.5 \mu\text{m}$



εικόνα 4.3.2 Τάσεις von Mises στα 9.1s και για ύψος τοποθέτησης δίσκου α) $y=9.5 \mu\text{m}$ β) $y=8.5 \mu\text{m}$

Από την **εικόνα 4.3.1**, που φαίνονται οι συνισταμένες δύναμης επαφής για τις δύο περιπτώσεις, παρατηρούμε ότι η μέγιστη φόρτιση που δημιουργεί η περίπτωση β είναι λίγο παραπάνω από διπλάσια αυτής που δημιουργεί η περίπτωση α. Η ενδιάμεση περίπτωση των παραπάνω δυο (**εικόνα 4.1.11**) δίνει δύναμη κοντινότερη με αυτή του χαμηλότερου ύψους. Επίσης, διαφαίνεται μια εμφανής πτώση του πλάτους των αναταραχών της δύναμης κοντά στην περιοχή της μέγιστης τιμής της, όσο μειώνεται το ύψος τοποθέτησης του δίσκου. Αυτό ίσως αποτελεί μια ένδειξη ότι η μεγαλύτερη φόρτιση του δίσκου μειώνει το εύρος των αναταραχών. Παρατηρώντας την **εικόνα 4.3.2**, φαίνεται ότι οι τάσεις von Mises φαίνονται να ακολουθούν τις διαφορές των δυνάμεων. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι και για τις συνισταμένες δυνάμεις αλλά και για τις αναπτυσσόμενες τάσεις ο ρυθμός αύξησής τους φαίνεται να μειώνεται.



εικόνα 4.3.3 Συνολική ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης για ύψος τοποθέτησης δίσκου α) $y=9.5 \mu\text{m}$ β) $y=8.5 \mu\text{m}$

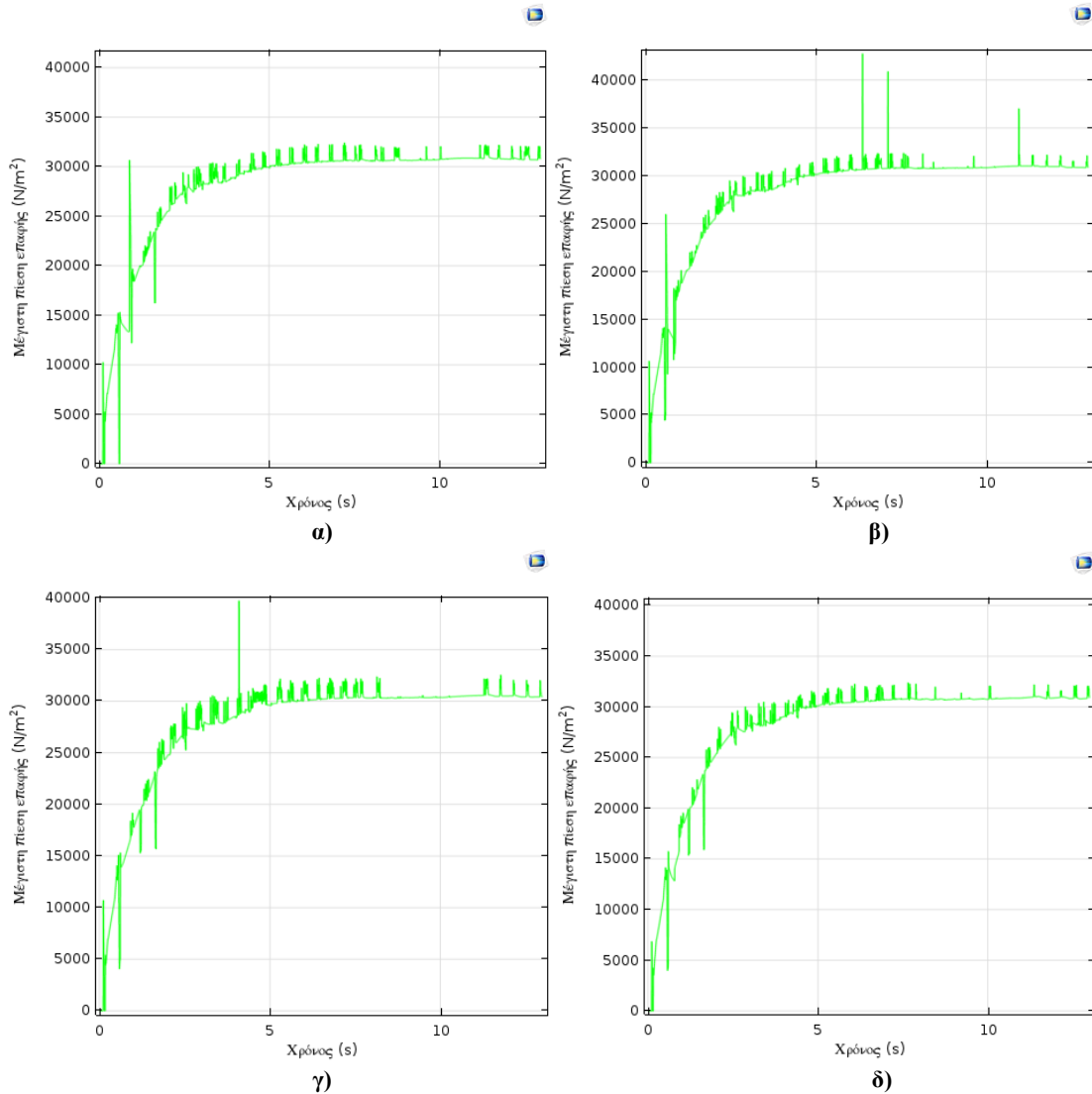
Στην **εικόνα 4.3.3** φαίνεται η συνολική ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης για τις δυο περιπτώσεις. Στα γραφήματα αυτά φαίνεται ότι παρά την πολλαπλάσια ενέργεια παραμόρφωσης που έχουν τα πτερύγια στην περίπτωση β, οι αναταραχές της περίπτωσης α δεν μεγάλωσαν ανάλογα, κάτι που πιθανόν να είναι μια ένδειξη του γεγονότος ότι η μεγαλύτερη προφόρτιση δεν επηρεάζει το πλάτος των αναταραχών.

Η μεταβλητή της ενέργειας παραμόρφωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως δείκτης για την προσκόλληση-αποκόλληση, καθώς η απότομη τοπική αυξομείωσή του μπορεί να υποδεικνύει την διαδικασία έναρξης προσκόλλησης (αύξησης της ενέργειας)-έναρξης αποκόλλησης (μέγιστο σημείο)-ολοκλήρωση αποκόλλησης (πτώση της ενέργειας).

4.4 Επίδραση του συντελεστή τριβής

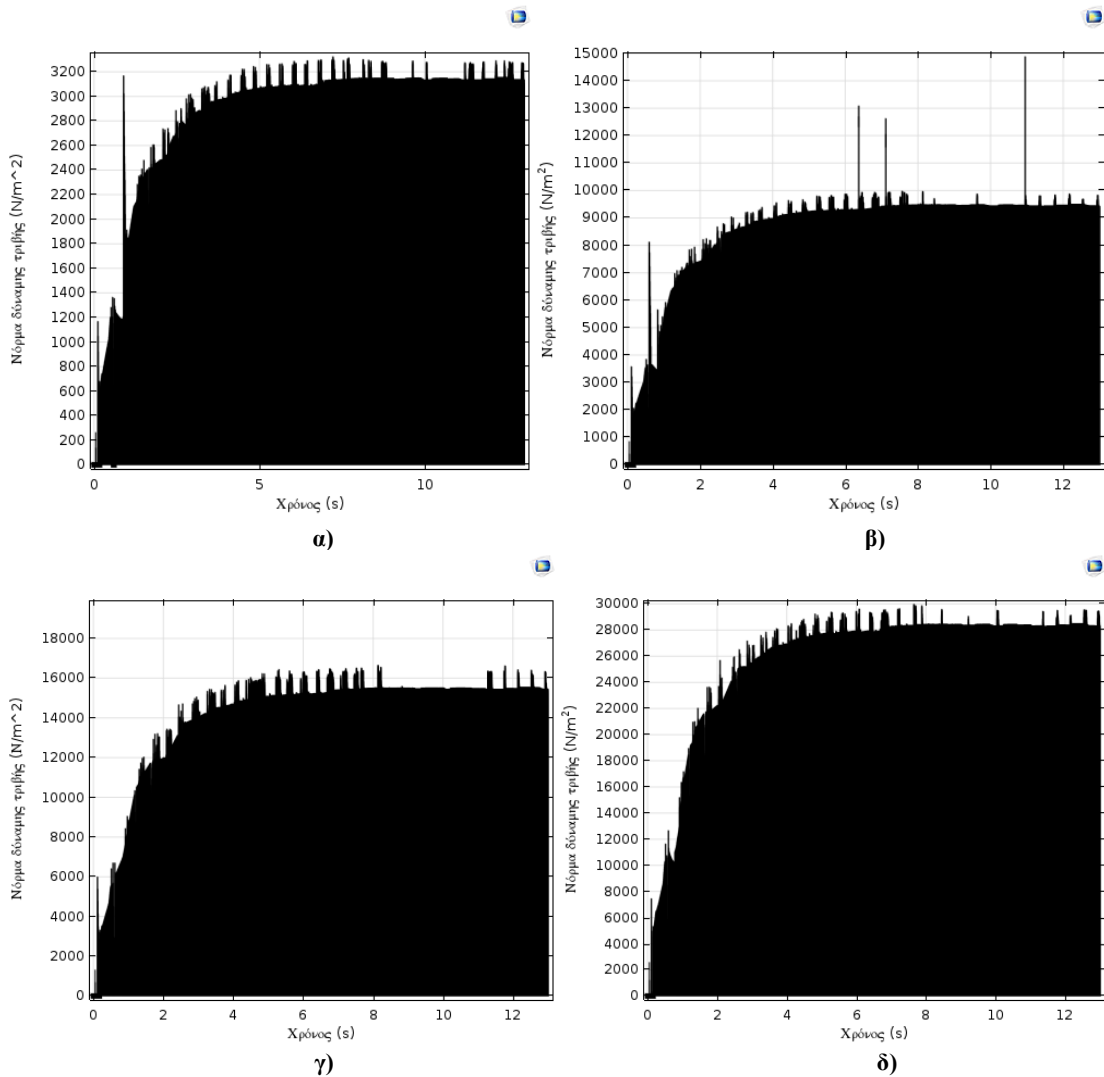
Σε αυτή την υποενότητα εξετάζεται η επίδραση που έχει ο συντελεστής τριβής σε κάποιες ποσότητες σχετικές με την τριβή. Πραγματοποιήθηκαν τρεις προσομοιώσεις της

καμπυλότητας με ακτίνα $R=3200$ μm και 20 πτερύγια, αλλάζοντας μόνο το συντελεστή τριβής στις τιμές 0.3, 0.5 και 0.9. Αρχικά θα εξετάσουμε τις πιέσεις επαφής αλλά και τη συνισταμένη δύναμη τριβής (friction force norm) τριβής, που είναι η απόλυτη δύναμη τριβής σε μονάδες τάσης, για τους τέσσερις συντελεστές τριβής που έχουμε προσομοιώσει (0.1, 0.3, 0.5, 0.9).

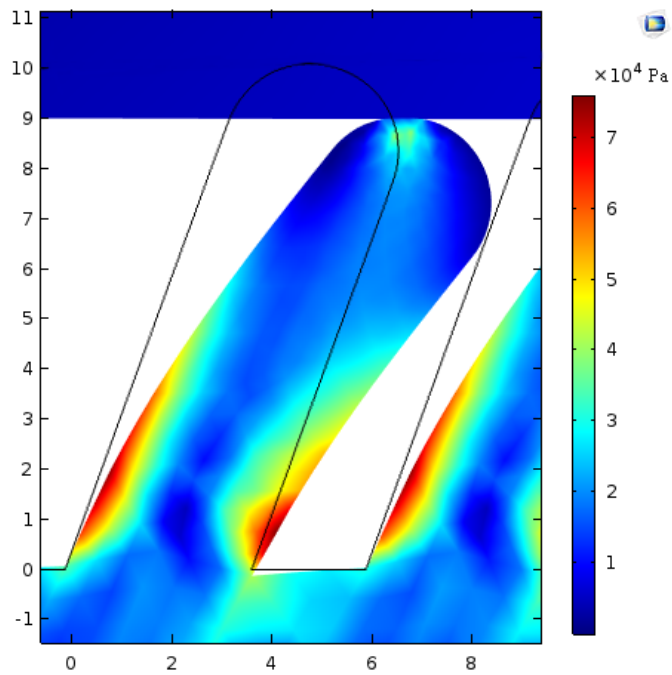


εικόνα 4.4.1 Μέγιστη πίεση επαφής για $R=3200$ μm , 20 πτερύγια και α) $\mu=0.1$ β) $\mu=0.3$ γ) $\mu=0.5$ δ) $\mu=0.9$

Από τα διαγράμματα της **εικόνας 4.4.1** φαίνεται ότι η πίεση επαφής παραμένει σταθερή (περίπου 31000 N/m^2) και για τις τέσσερις περιπτώσεις. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς το ύψος του δίσκου και η καμπυλότητά του δεν έχουν μεταβληθεί. Έτσι, μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι και στις τέσσερις περιπτώσεις η κατάσταση φόρτισης είναι σχεδόν σταθερή.

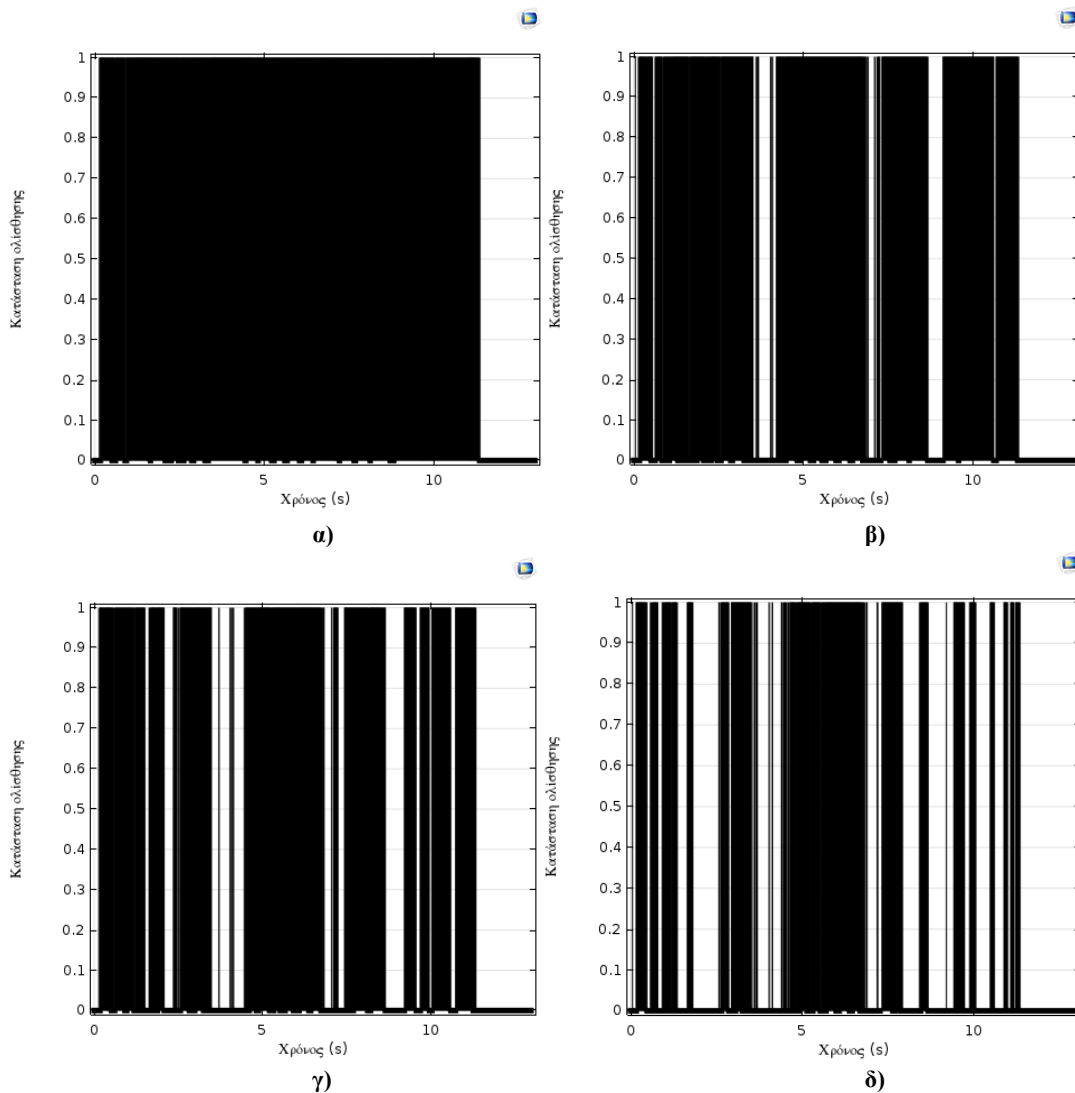


εικόνα 4.4.2 Συνολική δύναμη τριβής για $R=3200 \mu\text{m}$, 20 πετρώγια και α) $\mu=0.1$ β) $\mu=0.3$ γ) $\mu=0.5$ δ) $\mu=0.9$



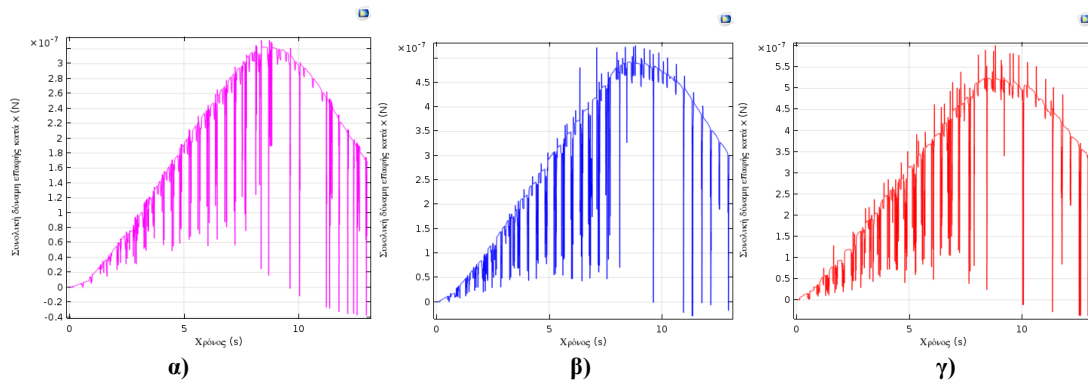
εικόνα 4.4.3 Τάσεις von Mises με $R=3200 \mu\text{m}$, 20 πετρώγια, για τη χρονική στιγμή των 6 sec

Παρατηρώντας την **εικόνα 4.4.1** και **4.4.2**, φαίνεται η σταθεροποίηση των πιέσεων επαφής αλλά και των συνολικών δύναμης τριβής σε μια χρονική τιμή που δεν αλλάζει ιδιαίτερα στη συνέχεια της προσομοίωσης. Η τιμή αυτή είναι κοντά στα 6 sec που όπως φαίνεται από την **εικόνα 4.4.3**, είναι η χρονική στιγμή που το κατώτατο σημείο του δίσκου έρχεται σε επαφή με το πρώτο πτερύγιο, και επιβάλλει τη μέγιστη πίεση επαφής. Από αυτή τη χρονική στιγμή και ύστερα, τα πτερύγια θα έρθουν διαδοχικά σε επαφή με αυτό το σημείο, συνεπώς η μέγιστη δύναμη επαφής δεν θα αλλάξει τιμή μέχρι το τέλος της προσομοίωσης, καθώς στην τελευταία χρονική στιγμή δεν έχει αποχωριστεί από την επιφάνεια των πτερυγίων. Επακόλουθα με τη δύναμη επαφής, η τάση τριβής θα παρουσιάσει το μέγιστο της στη χρονική περίοδο που η πίεση επαφής θα είναι μέγιστη, κάτι που φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα. Επίσης, οι τάσεις τριβής παρουσιάζουν αυξητική πορεία, όσο μεγαλώνει ο συντελεστής τριβής. Μάλιστα, παρατηρώντας την **εικόνα 4.4.2**, φαίνεται ότι στις περιπτώσεις β, γ και δ η μέγιστη τιμή των τάσεων τριβής είναι τριπλάσια, πενταπλάσια και εννεαπλάσια της α. Δηλαδή, για ίδια μέγιστη πίεση επαφής, οι τάσεις τριβής πολλαπλασιάστηκαν όσο πολλαπλασιάστηκε ο συντελεστής τριβής που είχε εισαχθεί, κάτι που αποτελεί ένδειξη ότι το μοντέλο ανταποκρίθηκε ικανοποιητικά σε αυτές τις αλλαγές.



εικόνα 4.4.4 Κατάσταση ολίσθησης για R=3200 μm, 20 πτερύγια και α) $\mu=0.1$ β) $\mu=0.3$ γ) $\mu=0.5$ δ) $\mu=0.9$

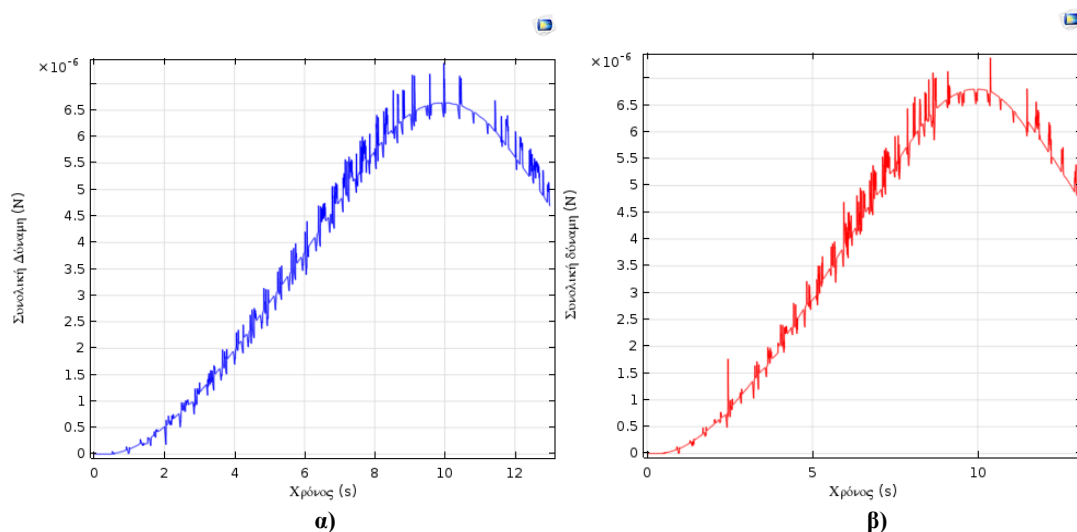
Μια επιπλέον τριβολογική παράμετρος που έχει νόημα να εξεταστεί είναι ο δείκτης κατάστασης ολίσθησης, που φαίνεται στην **εικόνα 4.4.4** για τους τέσσερις συντελεστές τριβής για την επιφάνεια επαφής του πρώτου πτερυγίου από κάθε περίπτωση. Οι διαφορετικοί συντελεστές τριβής ουσιαστικά αποτελούν μια απλουστευτική μοντελοποίηση της σχετικής τραχύτητας των δύο επιφανειών. Αυτό που παρατηρείται είναι μια σαφής μείωση των στιγμών που υπάρχει σχετική ολίσθηση, όσο μεγαλώνει ο συντελεστής τριβής. Αυτό φαίνεται ποιοτικά και από την **εικόνα 4.4.5**, όπου για δύο διαδοχικούς τριπλασιασμούς του συντελεστή τριβής παρατηρείται αύξηση και πύκνωση των κορυφών των δυνάμεων, οι οποίες κορυφές, όπως έχει παρατηρηθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, πιθανόν να οφείλονται σε εναλλαγές στατικής και δυναμικής τριβής. Επιπλέον, φαίνεται η αύξηση της δύναμης επαφής κατά x όσο αυξάνει ο συντελεστής τριβής.



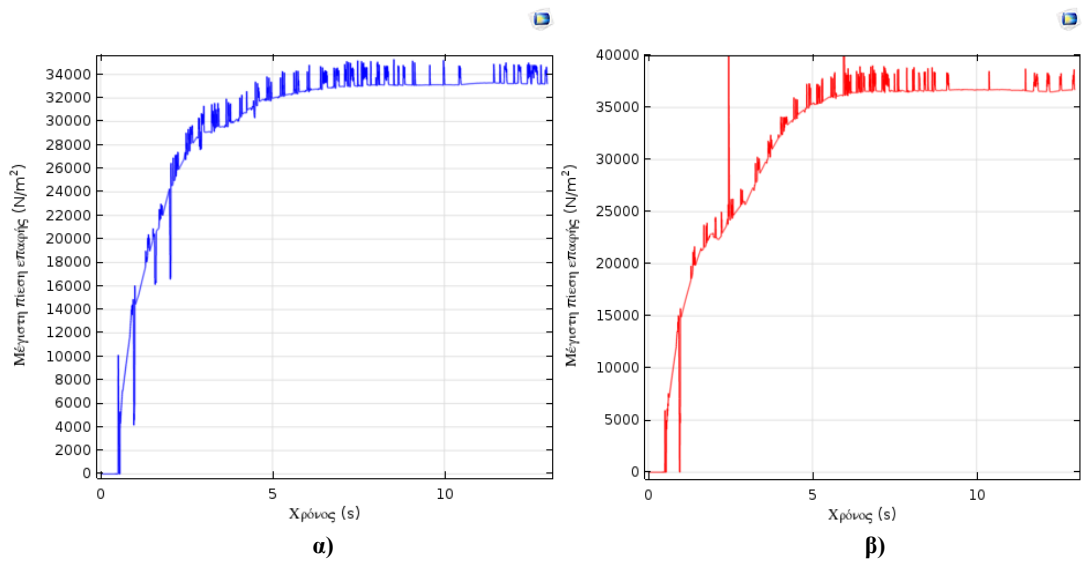
εικόνα 4.4.5 Δύναμη επαφής κατά x για **α)** $\mu=0.1$ **β)** $\mu=0.3$ **γ)** $\mu=0.9$

4.5 Επίδραση υπερελαστικού μοντέλου υλικού

Στη συγκεκριμένη υποενότητα εξετάστηκε η επίδραση χρησιμοποίησης δυο υπερελαστικών μοντέλων υλικού (neo-Hookean και Mooney-Rivlin), αντί του γραμμικού ελαστικού, για το υλικό PDMS. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι ίδιες με την περίπτωση του **υποκεφαλαίου 4.1.5** για 20 πτερύγια. Ο κύριος σκοπός των δυο προσομοιώσεων είναι να φανεί τι διαφορές εισάγει η χρησιμοποίηση δυο μοντέλων που θεωρητικά προσομοιάζουν πολύ ακριβέστερα τις πραγματικές ελαστικές ιδιότητες του υλικού αυτού.

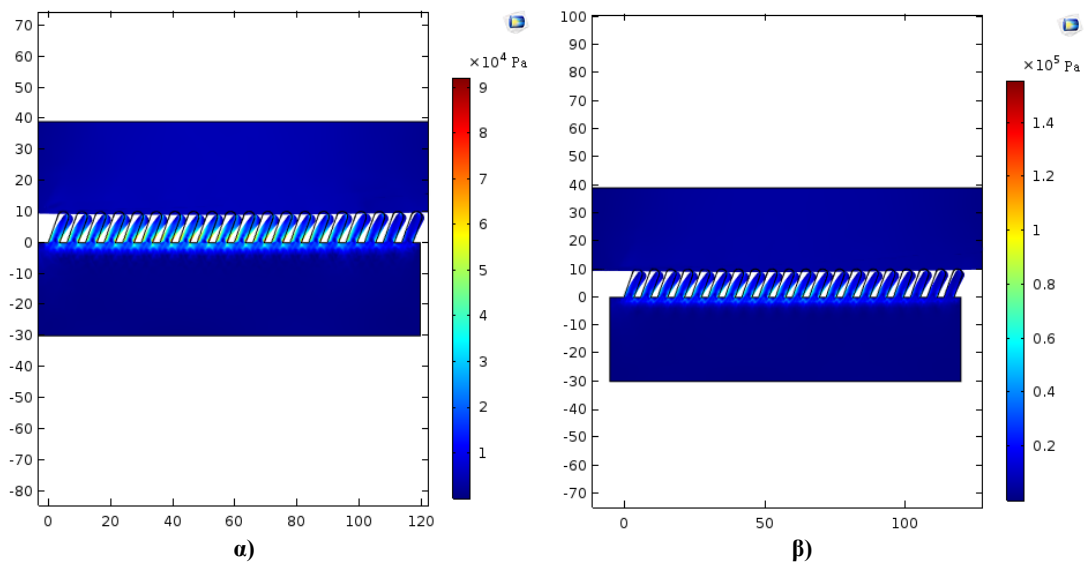


εικόνα 4.5.1 Συνολική δύναμη για τα δύο μοντέλα υλικού **α)** Neo-Hookean **β)** Mooney-Rivlin

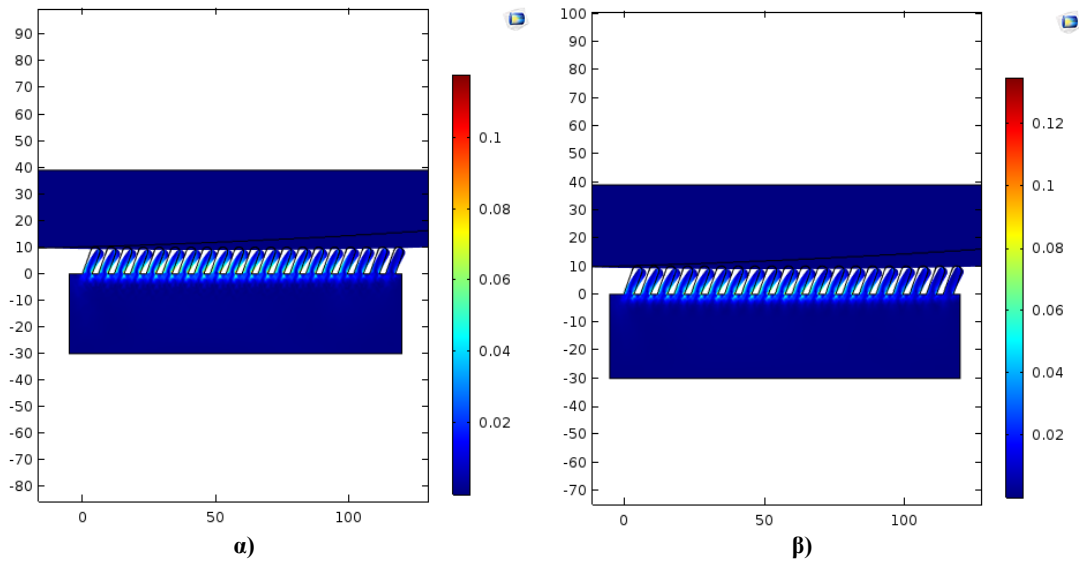


εικόνα 4.5.2 Συνολική πίεση επαφής για τα δύο μοντέλα υλικού α) Neo-Hookean β) Mooney-Rivlin

Σε πρώτη ανάλυση, βλέπουμε από τις εικόνες 4.5.1 και 4.5.2 ότι στα δύο μοντέλα υλικού η συνολική δύναμη και η πίεση επαφής είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από το γραμμικό ελαστικό μοντέλο. Συγκεκριμένα, το μοντέλο Mooney-Rivlin δείχνει να αποδίδει τη μεγαλύτερη δύναμη και πίεση επαφής από τα τρία. Αυτό πιθανόν να αποτελεί μια ένδειξη για το γεγονός ότι οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων υλοποιούνται με διαφορετικό τρόπο, καθώς κατά τα άλλα οι υπόλοιπες παράμετροι είναι κοινές. Για περαιτέρω ενδείξεις για το γεγονός ότι η ελαστική συμπεριφορά με τα δυο υπερελαστικά μοντέλα είναι διαφορετική σε σχέση με το γραμμικό ελαστικό παρουσιάζονται τα διδιάστατα ισοχρωματικά τοπογραφήματα των τάσεων και των παραμορφώσεων για την ίδια χρονική στιγμή με τα αντίστοιχα του υποκεφαλαίου 4.1.5 για 20 πτερύγια.

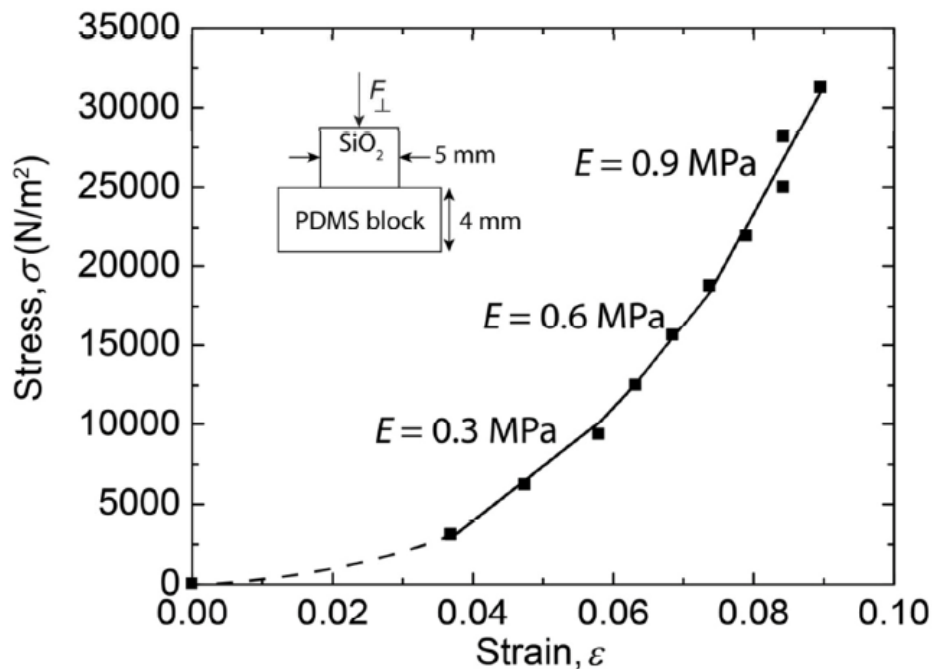


εικόνα 4.5.3 Τάσεις von Mises στα 9.1s για τα δύο μοντέλα υλικού α) Neo-Hookean β) Mooney-Rivlin



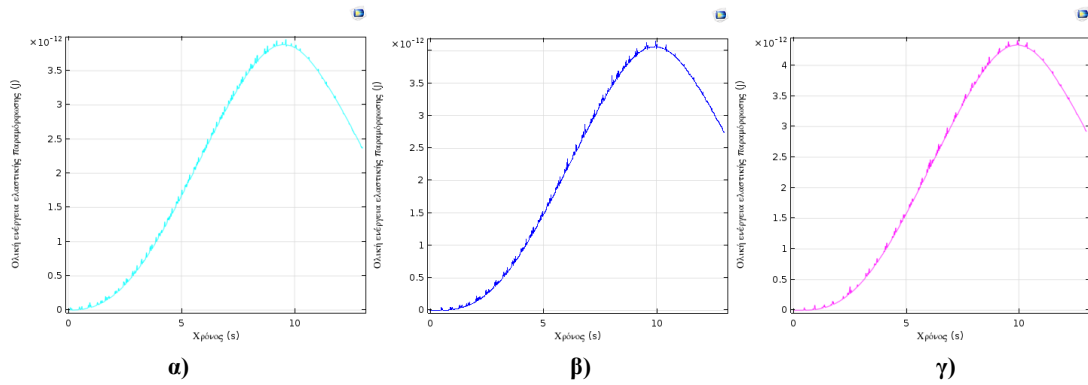
εικόνα 4.5.4 Ισοδύναμες παραμορφώσεις στα 9.1s για τα δύο μοντέλα υλικού α) Neo-Hookean β) Mooney-Rivlin

Όπως προκύπτει από τις εικόνες 4.5.3 και 4.5.4 σε σύγκριση με τις εικόνες 4.1.12 και 4.1.13, παρατηρούμε ότι για τις ίδιες παραμορφώσεις, οι μέγιστες τάσεις στα δύο υπερελαστικά μοντέλα είναι μεγαλύτερες από το γραμμικό ελαστικό. Σε σχέση με τα δύο μοντέλα οι τάσεις του μοντέλου Mooney-Rivlin είναι μεγαλύτερες από αυτές του Neo-Hookean. Στην εικόνα 4.5.5 φαίνεται το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων [92] το οποίο δείχνει την έντονη μη-γραμμικότητα που παρουσιάζει το PDMS. Λαμβάνοντας υπ' όψιν την κλίση αυτή ποιοτικά, μπορούμε να επιβεβαιώσουμε ότι εφόσον οι τάσεις του υπερελαστικού μοντέλου βρίσκονται -για τις ίδιες παραμορφώσεις- πιο πάνω από αυτές του γραμμικού ελαστικού, τότε τα υπερελαστικά μοντέλα δείχνουν να προσεγγίζουν καλύτερα την πραγματική συμπεριφορά του PDMS σε σχέση με το γραμμικό.



εικόνα 4.5.5 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων για το PDMS που χρησιμοποιήθηκε από τον Das[92]

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα παραπάνω, θα περιμέναμε η ολική ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης να αυξάνεται στα δυο υπερελαστικά μοντέλα σε σχέση με το γραμμικό ελαστικό, και μάλιστα εφόσον οι τάσεις του Neo-Hookean ήταν μικρότερες από αυτές Mooney-Rivlin, θα ήταν λογικό στο τελευταίο να βρίσκεται η μέγιστη ενέργεια. Αυτή η υπόθεση επιβεβαιώνεται από τα διαγράμματα της **εικόνας 4.5.6**.



εικόνα 4.5.6 Συνολική ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης για τα τρία μοντέλα υλικού α) Γραμμικό ελαστικό β) Neo-Hookean γ) Mooney-Rivlin

5 Σύνοψη και μελλοντικές κατευθύνσεις

Στην παρούσα εργασία μοντελοποιήθηκε και προσομοιώθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η προσκολλητική και τριβική επαφή σφαίρας SiO_2 με επιφάνεια βιομιμητικών της σαύρας Gecko πτερυγίων από PDMS. Σκοπός ήταν η ανάλυση των συνθηκών επαφής για διάφορες περιπτώσεις. Έμπνευση αποτέλεσε η έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια για την ανάπτυξη έξυπνων βιομιμητικών προσκολλητικών, εμπνευσμένων από τη δομή του πέλματος της σαύρας Gecko.

Αρχικά, μετά από μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας, επιλέχθηκε να μοντελοποιηθεί η διάταξη δίσκου- κεκλιμένων πτερυγίων, με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου Comsol Multiphysics. Το βασικό πρόβλημα που εξετάστηκε ήταν η ανάλυση των συνθηκών επαφής στο πεδίο του χρόνου, του οριζόντια κινούμενου με σταθερή ταχύτητα δίσκου, με τα ακίνητα πτερύγια. Το μοντέλο υλικού που χρησιμοποιήθηκε ήταν το γραμμικό ελαστικό. Σε ότι αφορά τις συνθήκες επαφής, το μοντέλο τροποποιήθηκε έτσι ώστε να ενσωματώνει τις συνθήκες δυναμικής τριβής και αναστρέψιμης προσκόλλησης, υλοποιημένες με τη μέθοδο ποινής. Το πλέγμα δημιουργήθηκε με βάση τις απαιτήσεις του αλγόριθμου ποινής: πυκνότερο στα πτερύγια από ότι στο δίσκο. Η μέθοδος επίλυσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν η *generalized- α* , που ειδικεύεται στην επίλυση μη γραμμικών συστημάτων. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν και οι κατάλληλες ρυθμίσεις για την ομαλή προσομοίωση.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με σκοπό τη διερεύνηση και σύγκριση των συνθηκών επαφής. Αρχικά εξετάστηκαν πέντε διπλασιασμοί της ακτίνας του δίσκου σε τρεις διαφορετικές πυκνότητες τοποθέτησης των πτερυγίων για κάθε ακτίνα. Οι διαδοχικοί διπλασιασμοί της ακτίνας του δίσκου, είχαν ως αποτέλεσμα την επαφή του με όλο και περισσότερα πτερύγια, αλλά και τη μεγαλύτερη πίεση σε αυτά λόγω της μικρότερης καμπυλότητας. Επίσης, η αύξηση της ακτίνας ομαλοποίησε το γενικό προφίλ της μέσης δύναμης. Οι τιμές των δυνάμεων έδειξαν να προσεγγίζουν την ανηγμένη στον αριθμό πτερυγίων τάξη μεγέθους που λαμβάνεται πειραματικά. Ο αριθμός των πτερυγίων επηρέασε πιο έντονα τη συνισταμένη δύναμη, διπλασιάζοντάς την με κάθε διπλασιασμό του. Η τάση αυτή συνεχίστηκε και στην αύξηση των πτερυγίων σε 26.

Η συνθήκη της προσκόλλησης φάνηκε να επηρεάζει σε δύο κυρίως παράγοντες. Αφ' ενός αύξησε λίγο τη τιμή της συνισταμένης δύναμης, αφ' ετέρου εισήγαγε στη δύναμη ένα έντονο προφίλ ασταθειών, κυρίως λόγω της στιγμιαίας απώλειας επαφής κατά την αποκόλληση. Σε προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε χωρίς προσκόλληση, φάνηκε εγγενής απουσία τριβής ολίσθησης ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν τρεις προσομοιώσεις για συντελεστή τριβής 0.3, 0.5 και 0.9. Αυτό που φάνηκε πιο ξεκάθαρα, είναι η λογική ανταπόκριση των τάσεων τριβής στην αλλαγή της τιμής του συντελεστή τριβής. Επίσης, παρατηρήθηκαν ολοένα αυξανόμενες στιγμές απώλειας ολίσθησης.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δυο προσομοιώσεις για μεγαλύτερο και μικρότερο ύψος τοποθέτησης του δίσκου. Παρατηρήθηκε ότι στο χαμηλότερο ύψος δεν παρουσιάστηκε διπλασιασμός της δύναμης, όπως υποδιπλασιάστηκε για το υψηλότερο σημείο τοποθέτησης. Αντίθετα, η ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης είχε κατά προσέγγιση διαδοχικούς διπλασιασμούς από το ανώτερο, μέχρι το κατώτερο σημείο. Τέλος, φάνηκε ότι το χαμηλό ύψος τοποθέτησης του δίσκου ομαλοποιεί σχετικά τις απότομες μεταβολές της δύναμης, στην περιοχή της μέγιστης μέσης τιμής της.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν δυο προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας δυο υπερελαστικά μοντέλα υλικού στα πτερύγια. Η χρησιμοποίηση υπερελαστικών μοντέλων υλικού φάνηκε να προσδίδει στη ρεαλιστικότερη συμπεριφορά του μοντέλου, σε σχέση με το γραμμικό ελαστικό. Απέδωσε μεγαλύτερες συνισταμένες δυνάμεις, τάσεις von Mises και μεγαλύτερη

ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης. Μάλιστα, σε σχέση με τα δύο χρησιμοποιούμενα μοντέλα, το Mooney-Rivlin φάνηκε να έχει την πιο υπερελαστική συμπεριφορά.

Αν και το παρόν μοντέλο έδειξε να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά σε αρκετές αλλαγές παραμέτρων, σίγουρα υπάρχουν πολλά περιθώρια βελτίωσης και διερεύνησης. Ενδεικτικά αναφέρονται μερικές προτάσεις:

- **Επέκταση του μοντέλου σε τρεις διαστάσεις**

Αν και έγινε στην παρούσα εργασία η προσπάθεια αυτή (εικόνα 5.1), το υπολογιστικό κόστος που απαιτήθηκε για προσομοίωση σε τρεις διαστάσεις, ξεπερνούσε κατά πολύ το χρονικό ορίζοντα για την τρισδιάστατη ανάλυση ως μια υποπερίπτωση της εργασίας αυτής.

- **Εξέταση της επίδρασης τραχύτητας**

Θα είχε ενδιαφέρον η εισαγωγή διαφορετικών προφίλ τραχυτήτων, καθώς όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία, η τραχύτητα είναι ακόμα μια σχετικά ανεξερεύνητη παράμετρος επιρροής, σε τριβολογικά προβλήματα όπως το παρόν.

- **Μελέτη της επίδρασης της ταχύτητας**

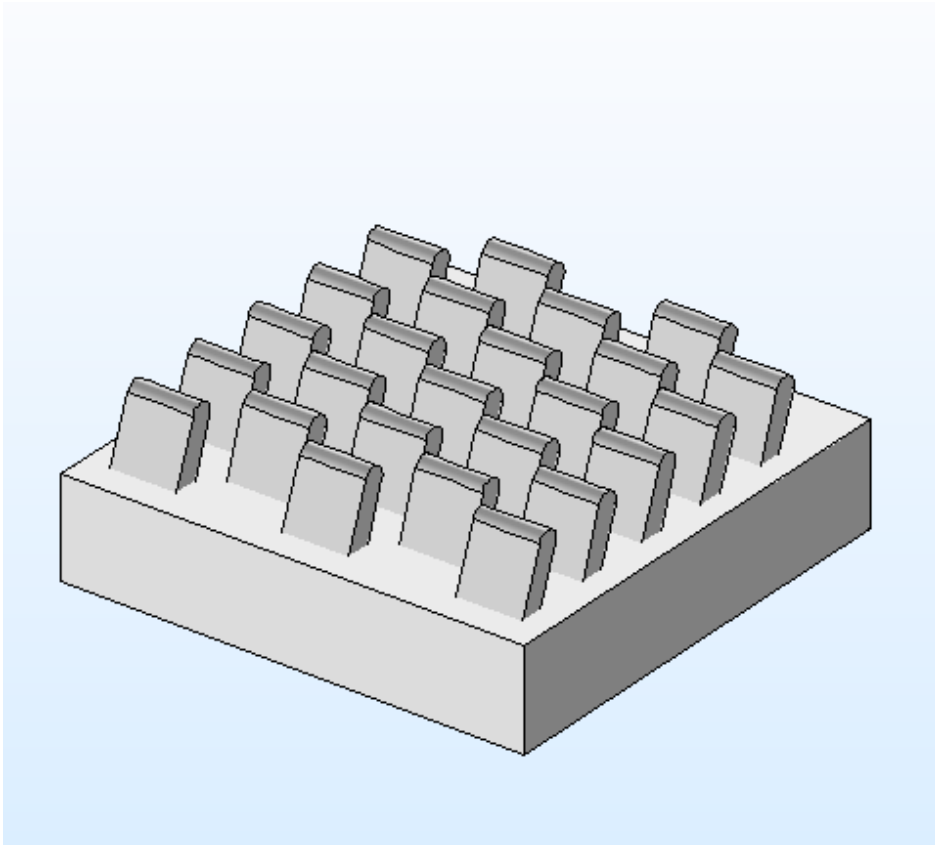
Καθώς η ταχύτητα θεωρείται ότι επηρεάζει τις τριβολογικές παραμέτρους, θα είχε νόημα να γίνει μελέτη της επίδρασης της ταχύτητας στις συνθήκες τριβής και προσκόλλησης του προβλήματος

- **Μελέτη της επίδρασης της ιεραρχίας**

Όπως αναφέρει η βιβλιογραφία, οι ιεραρχικές δομές πιθανόν να έχουν καλύτερη τριβολογική συμπεριφορά σε διάφορους τομείς. Συνεπώς, αξίζει να διερευνηθεί κατά πόσο θα είχε νόημα η εισαγωγή ιεραρχίας στο μοντέλο αυτό, με σκοπό τη βελτιστοποίηση τριβολογικών παραμέτρων.

- **Εφαρμογή σε βιομηχανικές διαδικασίες**

Για τη σύνδεση με πιο πρακτικές περιπτώσεις, θα είχε νόημα η εισαγωγή του μοντέλου για τη βελτιστοποίηση κάποιας βιομηχανικής διαδικασίας, στην οποία θα είχε νόημα η εισαγωγή ενός τριβικού-προσκολλητικού μοντέλου.



Εικόνα 5.1 Τρισδιάστατη γεωμετρία πτερυγίων

Βιβλιογραφία:

- [1] Dowson D. History of tribology: Addison-Wesley Longman Limited; 1979.
- [2] Amontons G. 1699. De la resistance causee dans les machines. Histoire de l'Academie Royale de Sciences Paris.12:206.
- [3] Coulomb CA. Théorie des machines simples en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des cordages: Bachelier; 1821.
- [4] Tabor D, Winterton RHS. The direct measurement of normal and retarded van der Waals forces. Proceedings of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1969:435-50.
- [5] Binnig G, Quate CF, Gerber C. Atomic force microscope. Physical review letters. 1986;56:930.
- [6] Hertz H. On the contact of rigid elastic solids and on hardness, chapter 6: Assorted papers by H. Hertz: MacMillan. 1882.
- [7] Roberts AD, Thomas AG. The adhesion and friction of smooth rubber surfaces. Wear. 1975;33:45-64.
- [8] Johnson KL, Kendall K, Roberts AD. Surface energy and the contact of elastic solids. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences: The Royal Society; 1971. p. 301-13.
- [9] Derjaguin BV, Muller VM, Toporov YP. Effect of contact deformations on the adhesion of particles. Journal of Colloid and interface science. 1975;53:314-26.
- [10] Maugis D. Adhesion of spheres: the JKR-DMT transition using a Dugdale model. Journal of colloid and interface science. 1992;150:243-69.
- [11] Zeng H. Polymer adhesion, friction, and lubrication: John Wiley & Sons; 2013.
- [12] Dupré A, Dupré P. Théorie mécanique de la chaleur: Gauthier-Villars; 1869.
- [13] Hamaker HC. The London—van der Waals attraction between spherical particles. physica. 1937;4:1058-72.
- [14] Jones JE. On the determination of molecular fields. II. From the equation of state of a gas. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences: The Royal Society; 1924. p. 463-77.
- [15] Kendall K. Molecular Adhesion and Its Applications: The Sticky Universe: Springer Science & Business Media; 2001.
- [16] Nosonovsky M, Bhushan B. Multiscale friction mechanisms and hierarchical surfaces in nano-and bio-tribology. Materials Science and Engineering: R: Reports. 2007;58:162-93.
- [17] Scherge M, Gorb S, Gorb SN. Biological micro-and nanotribology: Springer Science & Business Media; 2001.
- [18] Homola AM, Israelachvili JN, McGuiggan PM, Gee ML. Fundamental experimental studies in tribology: the transition from “interfacial” friction

- of undamaged molecularly smooth surfaces to “normal” friction with wear. *Wear*. 1990;136:65-83.
- [19] Schwarz UD, Zwörner O, Köster P, Wiesendanger R. Quantitative analysis of the frictional properties of solid materials at low loads. I. Carbon compounds. *Physical Review B*. 1997;56:6987.
- [20] Maeda N, Chen N, Tirrell M, Israelachvili JN. Adhesion and friction mechanisms of polymer-on-polymer surfaces. *Science*. 2002;297:379-82.
- [21] Zeng H, Tirrell M, Israelachvili J. Limit cycles in dynamic adhesion and friction processes: A discussion. *The Journal of Adhesion*. 2006;82:933-43.
- [22] Bhushan B. *Introduction to Tribology* John Wiley & Sons. Inc New York, New York. 2002.
- [23] Chang WR, Etsion I, Bogy DB. An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces. *Journal of tribology*. 1987;109:257-63.
- [24] Gerde E, Marder M. Friction and fracture. *Nature*. 2001;413:285.
- [25] Israelachvili JN. *Intermolecular and surface forces*: Academic press; 2011.
- [26] He G, Robbins MO. Scale effects and the molecular origins of tribological behavior. *Nanotribology*: Springer; 2003. p. 29-44.
- [27] Gao J, Luedtke WD, Gourdon D, Ruths M, Israelachvili JN, Landman U. Frictional forces and Amontons' law: from the molecular to the macroscopic scale. ACS Publications; 2004.
- [28] Adams GG, Nosonovsky M. Contact modeling—forces. *Tribology International*. 2000;33:431-42.
- [29] Majumdar A, Bhushan B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces. *ASME J Tribol*. 1991;113:1-11.
- [30] Bhushan B. *Nanotribology and nanomechanics: an introduction*: Springer Science & Business Media; 2008.
- [31] Tolstoi DM. Significance of the normal degree of freedom and natural normal vibrations in contact friction. *Wear*. 1967;10:199-213.
- [32] Persson BNJ, Spencer ND. *Sliding friction: Physical principles and applications*. *Physics Today*. 1999;52:66-8.
- [33] Sokoloff JB. Possible microscopic explanation of the virtually universal occurrence of static friction. *Physical Review B*. 2002;65:115415.
- [34] Swain PS, Lipowsky R. Contact angles on heterogeneous surfaces: A new look at Cassie's and Wenzel's laws. *Langmuir*. 1998;14:6772-80.
- [35] Bar-Cohen Y. *Biomimetics: biologically inspired technologies*: CRC Press; 2005.
- [36] Reif W-E. *Squamation and ecology of sharks*: Senckenbergische Naturforschende Gesellschaft; 1985.
- [37] Lee SJ, Lee SH. Flow field analysis of a turbulent boundary layer over a riblet surface. *Experiments in fluids*. 2001;30:153-66.

- [38] Bechert DW, Bruse M, Hage Wv, Van der Hoeven JGT, Hoppe G. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry. *Journal of fluid mechanics*. 1997;338:59-87.
- [39] Fung Y-c. *Biomechanics: mechanical properties of living tissues*: Springer Science & Business Media; 2013.
- [40] Hills BA. SURFACE-ACTIVE PHOSPHOLIPID IN MUSCLE LYMPH AND ITS LUBRICATION AND ABHESIVE PROPERTIES. *Lymphology*. 1990;23:39-47.
- [41] Weiss L. A biophysical consideration of cell contact phenomena. *Adhesion in Biological Systems*. 1970:1-14.
- [42] Donlan RM. Biofilms: microbial life on surfaces. *Emerging infectious diseases*. 2002;8:881.
- [43] Flemming H-C, Wingender J. The biofilm matrix. *Nature reviews Microbiology*. 2010;8:623.
- [44] Evans CM, Brodie ED. Adhesive strength of amphibian skin secretions. *Journal of Herpetology*. 1994;28:499-502.
- [45] Barthlott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*. 1997;202:1-8.
- [46] Gao X, Jiang L. Biophysics: water-repellent legs of water striders. *Nature*. 2004;432:36-.
- [47] Bhushan B, Nosonovsky M. Hydrophobic surface with geometric roughness pattern. *Google Patents*; 2005.
- [48] Bhushan B, Nosonovsky M. The rose petal effect and the modes of superhydrophobicity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2010;368:4713-28.
- [49] Bhushan B, Peressadko AG, Kim T-W. Adhesion analysis of two-level hierarchical morphology in natural attachment systems for 'smart adhesion'. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2006;20:1475-91.
- [50] Ruibal R, Ernst V. The structure of the digital setae of lizards. *Journal of Morphology*. 1965;117:271-93.
- [51] Williams EE, Peterson JA. Convergent and alternative designs in the digital adhesive pads of scincid lizards. *Science*. 1982;215:1509-11.
- [52] Autumn K, Liang YA, Hsieh ST, Zesch W. Adhesive force of a single gecko foot-hair. *Nature*. 2000;405:681.
- [53] Autumn K, Peattie AM. Mechanisms of adhesion in geckos. *Integrative and comparative biology*. 2002;42:1081-90.
- [54] Irschick DJ, Austin CC, Petren K, Fisher RN, Losos JB, Ellers O. A comparative analysis of clinging ability among pad-bearing lizards. *Biological journal of the Linnean Society*. 1996;59:21-35.
- [55] Autumn K, Hsieh ST, Dudek DM, Chen J, Chitaphan C, Full RJ. Dynamics of geckos running vertically. *Journal of experimental biology*. 2006;209:260-72.

- [56] Autumn K, Sitti M, Liang YA, Peattie AM, Hansen WR, Sponberg S, et al. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2002;99:12252-6.
- [57] Shah GJ, Sitti M. Modeling and design of biomimetic adhesives inspired by gecko foot-hairs. *Robotics and Biomimetics, 2004 ROBIO 2004 IEEE International Conference on: IEEE; 2004*. p. 873-8.
- [58] Gao H, Wang X, Yao H, Gorb S, Arzt E. Mechanics of hierarchical adhesion structures of geckos. *Mechanics of Materials*. 2005;37:275-85.
- [59] Tian Y, Pesika N, Zeng H, Rosenberg K, Zhao B, McGuiggan P, et al. Adhesion and friction in gecko toe attachment and detachment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2006;103:19320-5.
- [60] Hansen WR, Autumn K. Evidence for self-cleaning in gecko setae. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2005;102:385-9.
- [61] Huber G, Gorb SN, Spolenak R, Arzt E. Resolving the nanoscale adhesion of individual gecko spatulae by atomic force microscopy. *Biology Letters*. 2005;1:2-4.
- [62] Huber G, Mantz H, Spolenak R, Mecke K, Jacobs K, Gorb SN, et al. Evidence for capillarity contributions to gecko adhesion from single spatula nanomechanical measurements. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2005;102:16293-6.
- [63] Prowse MS, Wilkinson M, Puthoff JB, Mayer G, Autumn K. Effects of humidity on the mechanical properties of gecko setae. *Acta biomaterialia*. 2011;7:733-8.
- [64] Kim TW, Bhushan B. The adhesion model considering capillarity for gecko attachment system. *Journal of The Royal Society Interface*. 2008;5:319-27.
- [65] Arzt E, Gorb S, Spolenak R. From micro to nano contacts in biological attachment devices. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2003;100:10603-6.
- [66] Bhushan B. Adhesion of multi-level hierarchical attachment systems in gecko feet. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2007;21:1213-58.
- [67] Autumn K, Majidi C, Groff RE, Dittmore A, Fearing R. Effective elastic modulus of isolated gecko setal arrays. *Journal of Experimental Biology*. 2006;209:3558-68.
- [68] Gravish N, Wilkinson M, Sponberg S, Parness A, Esparza N, Soto D, et al. Rate-dependent frictional adhesion in natural and synthetic gecko setae. *Journal of the royal society interface*. 2010;7:259-69.
- [69] Kim TW, Bhushan B. Optimization of biomimetic attachment system contacting with a rough surface. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. 2007;25:1003-12.
- [70] Glassmaker NJ, Jagota A, Hui CY, Kim J. Design of biomimetic fibrillar interfaces: 1. Making contact. *Journal of The Royal Society Interface*. 2004;1:23-33.

- [71] Kim TW, Bhushan B. Adhesion analysis of multi-level hierarchical attachment system contacting with a rough surface. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2007;21:1-20.
- [72] Majidi C, Groff RE, Maeno Y, Schubert B, Baek S, Bush B, et al. High friction from a stiff polymer using microfiber arrays. *Physical review letters*. 2006;97:076103.
- [73] Autumn K, Dittmore A, Santos D, Spenko M, Cutkosky M. Frictional adhesion: a new angle on gecko attachment. *Journal of Experimental Biology*. 2006;209:3569-79.
- [74] Persson BNJ, Gorb S. The effect of surface roughness on the adhesion of elastic plates with application to biological systems. *The Journal of chemical physics*. 2003;119:11437-44.
- [75] Spolenak R, Gorb S, Gao H, Arzt E. Effects of contact shape on the scaling of biological attachments. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences: The Royal Society*; 2005. p. 305-19.
- [76] Pesika NS, Tian Y, Zhao B, Rosenberg K, Zeng H, McGuiggan P, et al. Peel-zone model of tape peeling based on the gecko adhesive system. *The Journal of Adhesion*. 2007;83:383-401.
- [77] Sauer RA, Wriggers P. Formulation and analysis of a three-dimensional finite element implementation for adhesive contact at the nanoscale. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2009;198:3871-83.
- [78] Sauer RA. Multiscale modelling and simulation of the deformation and adhesion of a single gecko seta. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*. 2009;12:627-40.
- [79] Sauer RA. A computational model for nanoscale adhesion between deformable solids and its application to gecko adhesion. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2010;24:1807-18.
- [80] Sauer RA, Mergel JC. A geometrically exact finite beam element formulation for thin film adhesion and debonding. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2014;86:120-35.
- [81] Simo JC. A finite strain beam formulation. The three-dimensional dynamic problem. Part I. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 1985;49:55-70.
- [82] Simo JC, Vu-Quoc L. A three-dimensional finite-strain rod model. Part II: Computational aspects. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 1986;58:79-116.
- [83] Reissner E. On one-dimensional finite-strain beam theory: the plane problem. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik (ZAMP)*. 1972;23:795-804.
- [84] Geim AK, Dubonos SV, Grigorieva IV, Novoselov KS, Zhukov AA, Shapoval SY. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. *Nature materials*. 2003;2:461.

- [85] Gorb S, Varenberg M, Peressadko A, Tuma J. Biomimetic mushroom-shaped fibrillar adhesive microstructure. *Journal of The Royal Society Interface*. 2007;4:271-5.
- [86] Bhushan B, Sayer RA. Surface characterization and friction of a bio-inspired reversible adhesive tape. *Microsystem Technologies*. 2007;13:71.
- [87] Yurdumakan B, Raravikar NR, Ajayan PM, Dhinojwala A. Synthetic gecko foot-hairs from multiwalled carbon nanotubes. *Chemical Communications*. 2005:3799-801.
- [88] Aksak B, Murphy MP, Sitti M. Adhesion of biologically inspired vertical and angled polymer microfiber arrays. *Langmuir*. 2007;23:3322-32.
- [89] del Campo A, Greiner C, Álvarez I, Arzt E. Patterned surfaces with pillars with controlled 3D tip geometry mimicking bioattachment devices. *Advanced Materials*. 2007;19:1973-7.
- [90] Yu J, Chary S, Das S, Tamelier J, Pesika NS, Turner KL, et al. Gecko - Inspired Dry Adhesive for Robotic Applications. *Advanced Functional Materials*. 2011;21:3010-8.
- [91] Yu J, Chary S, Das S, Tamelier J, Turner KL, Israelachvili JN. Friction and adhesion of gecko-inspired PDMS flaps on rough surfaces. *Langmuir*. 2012;28:11527-34.
- [92] Das S, Chary S, Yu J, Tamelier J, Turner KL, Israelachvili JN. JKR Theory for the Stick-Slip Peeling and Adhesion Hysteresis of Gecko Mimetic Patterned Surfaces with a Smooth Glass Surface. *Langmuir*. 2013;29:15006-12.
- [93] Das S, Cadirov N, Chary S, Kaufman Y, Hogan J, Turner KL, et al. Stick-slip friction of gecko-mimetic flaps on smooth and rough surfaces. *Journal of The Royal Society Interface*. 2015;12:20141346.
- [94] del Campo A, Greiner C. SU-8: a photoresist for high-aspect-ratio and 3D submicron lithography. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2007;17:R81.
- [95] Lee H, Bhushan B. Fabrication and characterization of hierarchical nanostructured smart adhesion surfaces. *Journal of colloid and interface science*. 2012;372:231-8.
- [96] Northen MT, Turner KL. A batch fabricated biomimetic dry adhesive. *Nanotechnology*. 2005;16:1159.
- [97] Murphy MP, Kute C, Mengüç Y, Sitti M. Waalbot II: Adhesion recovery and improved performance of a climbing robot using fibrillar adhesives. *The International Journal of Robotics Research*. 2011;30:118-33.
- [98] Kim S, Spenko M, Trujillo S, Heyneman B, Mattoli V, Cutkosky MR. Whole body adhesion: hierarchical, directional and distributed control of adhesive forces for a climbing robot. *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on: IEEE; 2007*. p. 1268-73.
- [99] Jeong HE, Lee J-K, Kim HN, Moon SH, Suh KY. A nontransferring dry adhesive with hierarchical polymer nanohairs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2009;106:5639-44.

- [100] Kim S, Wu J, Carlson A, Jin SH, Kovalsky A, Glass P, et al. Microstructured elastomeric surfaces with reversible adhesion and examples of their use in deterministic assembly by transfer printing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010;107:17095-100.
- [101] Mengüç Y, Yang SY, Kim S, Rogers JA, Sitti M. Gecko - Inspired Controllable Adhesive Structures Applied to Micromanipulation. *Advanced Functional Materials*. 2012;22:1246-54.
- [102] Carlson A, Kim-Lee H-J, Wu J, Elvikis P, Cheng H, Kovalsky A, et al. Shear-enhanced adhesiveless transfer printing for use in deterministic materials assembly. *Applied Physics Letters*. 2011;98:264104.
- [103] Kwak MK, Jeong HE, Suh KY. Rational design and enhanced biocompatibility of a dry adhesive medical skin patch. *Advanced Materials*. 2011;23:3949-53.
- [104] Mahdavi A, Ferreira L, Sundback C, Nichol JW, Chan EP, Carter DJD, et al. A biodegradable and biocompatible gecko-inspired tissue adhesive. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2008;105:2307-12.
- [105] Glass P, Cheung E, Sitti M. A legged anchoring mechanism for capsule endoscopes using micropatterned adhesives. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2008;55:2759-67.
- [106] Castellanos G, Arzt E, Kamperman M. Effect of viscoelasticity on adhesion of bioinspired micropatterned epoxy surfaces. *Langmuir*. 2011;27:7752-9.
- [107] Inc C. COMSOL Multiphysics Reference Manual, version 5.2a. 2016.
- [108] Yu Y-S, Zhao Y-P. Deformation of PDMS membrane and microcantilever by a water droplet: Comparison between Mooney–Rivlin and linear elastic constitutive models. *Journal of colloid and interface science*. 2009;332:467-76.
- [109] Bourbaba H, Mohamed B. Mechanical behavior of polymeric membrane: comparison between PDMS and PMMA for micro fluidic application. *Energy Procedia*. 2013;36:231-7.
- [110] Payne T, Mitchell S, Bibb R, Waters M. The evaluation of new multi-material human soft tissue simulants for sports impact surrogates. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. 2015;41:336-56.

