

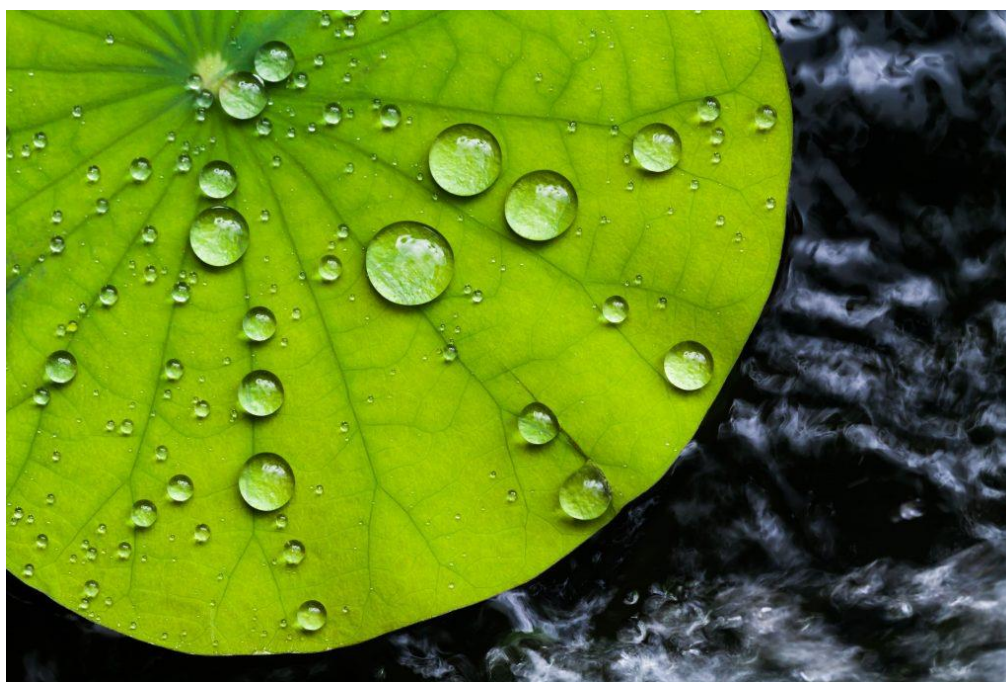


ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών
— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΒΟΤΑΝΙΚΗΣ

Θέματα Βιομμητικής: Από τη βιολογία φυτών σε σύγχρονα (bio-inspired) υλικά

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Αικατερίνη Σάρδη, Α.Μ: 1113201500092

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Σοφία Ριζοπούλου

ΑΘΗΝΑ 2021

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτριά μου, κυρία Σοφία Ριζοπούλου που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και καινοτόμο θέμα!

Ευχαριστώ επίσης την οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου!

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
1. Ορισμός Βιομημητικής.....	4
2. Η έννοια της διαβρεξιμότητας και η χρήση της ως κριτήριο κατηγοριοποίησης των επιφανειών.....	4
2.1 Μελέτη διαβρεξιμότητας – Μέτρηση γωνίας επαφής.....	4
2.1.1 Μοντέλο Young.....	5
2.1.2 Μοντέλο Wenzel.....	6
2.1.3 Μοντέλο Cassie-Baxter.....	7
2.2 Γωνίες υστέρησης και κλίσης.....	9
2.3 Χαρακτηρισμός επιφανειών με βάση τη γωνία επαφής (CA).....	10
3. Η εφουμενίδα των φυτών	11
3.1 Τα βασικά συστατικά της εφουμενίδας και η βιοσύνθεσή τους.....	11
3.2 Οι λειτουργίες της εφουμενίδας.....	14
4. Έμβιοι οργανισμοί που ενέπνευσαν την επιστήμη της Βιομημητικής.....	16
4.1 Ο λωτός (<i>Nelumbo nucifera</i>).....	16
4.2 Η σαλβίνια (<i>Salvinia molesta</i>).....	18
4.3 Τα τριαντάφυλλα (<i>Rosa spp.</i>).....	19
4.4 Τα σαρκοφάγα φυτά του γένους <i>Nepenthes</i>	20
4.5 Οι καρχαρίες.....	22
4.6 Οι σαύρες του γένους <i>Gecko</i>	22
4.7 Τα έντομα της οικογένειας Gerridae.....	24
4.8 Οι πεταλούδες του γένους <i>Morpho</i>	25
5. Η Βιομημητική στην πράξη.....	26
5.1 Η ιστορία του Velcro.....	26
5.2 Βιομημητικές υπερυδρόφοβες επιφάνειες.....	26
5.3 Βιομημητικές υπερυδρόφιλες επιφάνειες.....	28
5.4 Η συμβολή της Βιομημητικής στην κλωστοϋφαντουργία.....	28
5.5 Παραγωγή τεχνητών δομικών χρωματισμών.....	29

5.6 Κατασκευή ηλιακών κυψελίδων ευαισθητοποιημένων από φυτικές χρωστικές.....	30
5.7 Η Βιομιμητική στην Ελλάδα.....	31
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ ΓΙΑ ΤΗ ΒΙΟΜΙΜΗΤΙΚΗ ΦΥΤΩΝ.....	32
Αποτελέσματα.....	34
Σχολιασμός των αποτελεσμάτων.....	39
ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	40
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	42

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Ορισμός Βιομιμητικής

Η Βιομιμητική αποτελεί έναν ταχέως αναπτυσσόμενο και διεπιστημονικό κλάδο, ο οποίος περιλαμβάνει την κατανόηση των βιολογικών λειτουργιών, δομών και αρχών πολλών οργανισμών που συναντώνται στη φύση από Βιολόγους, Φυσικούς, Χημικούς, Επιστήμονες των Υλικών καθώς και Μηχανικούς (Bhushan 2009). Η επιστήμη αυτή αντλεί έμπνευση τόσο από το φυτικό όσο και από το ζωικό Βασίλειο.

Σύμφωνα με τους Vincent et al. (2006), η «Βιομιμητική» ή «Βιομίμηση» αναφέρεται στην μίμηση (αντιγραφή) των μοντέλων, συστημάτων και στοιχείων της φύσης με σκοπό την επίλυση σύνθετων ανθρώπινων προβλημάτων. Ο όρος προέρχεται από τις λέξεις της αρχαίας ελληνικής γλώσσας *βίος* (ζωή) και *μίμησις* (μίμηση, αντιγραφή) και επινοήθηκε από τον Otto Schmitt το 1957, ο οποίος κατά τη διδακτορική του διατριβή κατασκεύασε μια συσκευή που ήταν ικανή να μιμηθεί την ηλεκτρική δραστηριότητα των νεύρων. Η πρώτη εμφάνιση της λέξης “biomimetics” διατυπώθηκε στο Webster’s dictionary το 1974, με τον ορισμό «η μελέτη του σχηματισμού, της δομής ή της λειτουργίας των βιολογικά παραγόμενων ουσιών και υλικών (όπως τα ένζυμα ή το μετάξι) και των βιολογικών μηχανισμών ή διαδικασιών (όπως η πρωτεϊνοσύνθεση ή η φωτοσύνθεση), ιδίως για τη σύνθεση παρόμοιων προϊόντων με τεχνητούς μηχανισμούς που μιμούνται τους πραγματικούς» (Bhushan 2009).

Η φύση, έχοντας υποστεί δισεκατομμύρια χρόνια εξέλιξης, «έχει μάθει» να διατηρεί τους οργανισμούς που έχουν χαρακτηριστικά κατάλληλα για επιβίωση και συνεπώς μεγαλύτερες πιθανότητες διατήρησης σε βάθος χρόνου. Επίσης «έμαθε» πώς να αξιοποιεί ελάχιστους πόρους ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση στις δομές και τα στοιχεία της (Sullivan & O’Callaghan 2020). Η κατανόηση της λειτουργίας διαφόρων κατασκευών και διαδικασιών που απαντώνται στη φύση μπορεί να μας οδηγήσει στην αντιγραφή τους με στόχο την παραγωγή υλικών, συσκευών αλλά και μεθόδων εμπνευσμένων από τη φύση που παρουσιάζουν βελτιστοποιημένες ιδιότητες. Οι βιομιμητικές τεχνολογίες επιχειρούν να ελαχιστοποιήσουν το χάσμα μεταξύ των μαθημάτων που διδάσκει η φύση και των πρακτικών μηχανικών εφαρμογών (Sun & Bhushan 2019).

2. Η έννοια της διαβρεξιμότητας και η χρήση της ως κριτήριο κατηγοριοποίησης των επιφανειών

2.1 Μελέτη διαβρεξιμότητας – Μέτρηση γωνίας επαφής

Η διαβρεξιμότητα είναι η θεμελιώδης διαδικασία της αλληλεπίδρασης υγρού σε διεπιφάνειες στερεού – αερίου. Περιγράφει πώς ένα υγρό έρχεται σε επαφή με μια στερεή επιφάνεια. Η κύρια μέθοδος για τον χαρακτηρισμό της διαβρεξιμότητας των επιφανειών είναι η μέτρηση της γωνίας επαφής (contact angle – CA). Παρακάτω

παρουσιάζονται τα κύρια μοντέλα που έχουν προταθεί για τον υπολογισμό της γωνίας επαφής:

2.1.1 Μοντέλο Young

Ο όρος «γωνία επαφής» επινοήθηκε από τον Thomas Young το 1805. Ο Thomas Young (1773-1829) ήταν ένας Βρετανός πολυμαθής ιατρός, ο οποίος έχει συνεισφέρει σημαντικά σε πολλούς επιστημονικούς τομείς (πχ οπτική, μηχανική στερεών, φυσιολογία). Έκανε μια σειρά από πρωτότυπες και διορατικές καινοτομίες στην αποκρυπτογράφηση των αιγυπτιακών ιερογλυφικών και έχει χαρακτηριστεί ως «ο τελευταίος άνθρωπος που γνώριζε τα πάντα» (Robinson 2007).

Ο Young πρότεινε ένα μοντέλο μέτρησης της γωνίας επαφής το οποίο δίνεται από τη σχέση των δυνάμεων που ενεργούν πάνω στο υγρό σταγονίδιο. Συγκεκριμένα, η γωνία επαφής μιας υγρής σταγόνας πάνω σε μια στερεή επιφάνεια καθορίζεται από τη μηχανική ισορροπία της σταγόνας, η οποία βρίσκεται υπό τη δράση τριών επιφανειακών τάσεων: της τάσης στερεού-αερίου, της τάσης στερεού-υγρού και της τάσης υγρού-αερίου (Kwok et al. 1999).

Η ισορροπία που περιγράφηκε είναι γνωστή ως εξίσωση Young και δίνεται από τον εξής τύπο:

$$\gamma_{lv} \cdot \cos\theta = \gamma_{sv} - \gamma_{sl}$$

όπου:

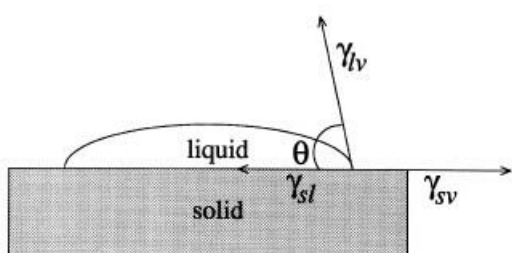
θ : η γωνία επαφής,

γ_{lv} : η διεπιφανειακή τάση υγρού-αερίου

γ_{sv} : η διεπιφανειακή τάση στερεού-αερίου

γ_{sl} : η διεπιφανειακή τάση στερεού-υγρού

Η εξίσωση Young έχει εφαρμογή σε ιδανικές επιφάνειες, οι οποίες είναι επίπεδες, λείες και ομοιογενείς (Whyman et al. 2008).

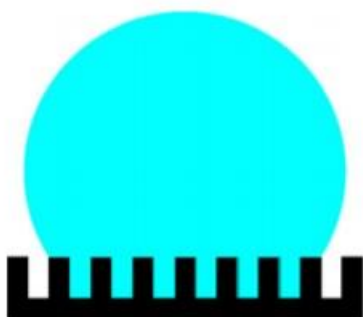


Εικόνα 1. Σχηματική αναπαράσταση των διεπιφανειακών τάσεων και της γωνίας επαφής μιας σταγόνας νερού πάνω σε μια λεία στερεή επιφάνεια (Kwok et al. 1999).

Είναι προφανές πως, στην πραγματικότητα, οι επιφάνειες παρουσιάζουν ποικίλες διαφοροποιήσεις από τις ιδανικές. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε πειραματικές μετρήσεις της γωνίας επαφής οι οποίες αποκλίνουν σημαντικά από τις θεωρητικά αναμενόμενες μέσω της εξίσωσης Young. Παραδείγματος χάριν, σε επιφάνειες που έχουν μεγάλη τραχύτητα οι γωνίες επαφής είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με τις χημικά ολόιδιες μεν, αλλά λείες επιφάνειες (Grundke et al. 1996). Λαμβάνοντας υπόψη τις αποκλίσεις αυτές, προτάθηκαν νέα μοντέλα τα οποία επιχειρούσαν να εξηγήσουν και να μετρήσουν ορθότερα τις γωνίες επαφής. Τα δύο πιο γνωστά μοντέλα είναι το μοντέλο Wenzel και το μοντέλο των Cassie-Baxter.

2.1.2 Μοντέλο Wenzel

Το συγκεκριμένο μοντέλο προτάθηκε το 1936 από τον Robert Wenzel και αφορά επιφάνειες οι οποίες είναι χημικά ομοιογενείς αλλά εμφανίζουν τραχύτητα (Wenzel 1936). Βασίζεται στην υπόθεση ότι η σταγόνα νερού που έρχεται σε επαφή με την συγκεκριμένη επιφάνεια έχει την ικανότητα να γεμίσει πλήρως τις εσοχές που δημιουργούνται σε αυτήν εξαιτίας της τραχύτητας (Zhang et al. 2013), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2. Η σταγόνα νερού, σύμφωνα με το μοντέλο Wenzel, εισχωρεί πλήρως στις εσοχές της τραχιάς επιφάνειας (Zhang et al. 2013).

Το μοντέλο Wenzel αποτελεί ουσιαστικά μια τροποποίηση του μοντέλου Young, περιλαμβάνοντας τον παράγοντα της τραχύτητας. Σύμφωνα με αυτό, η γωνία επαφής ορίζεται ως εξής:

$$\cos\theta_w = r \cdot \cos\theta$$

όπου:

θ_w : η φαινομενική γωνία επαφής

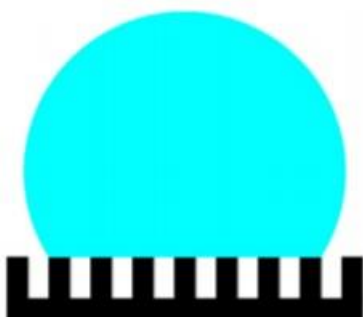
r : ο συντελεστής τραχύτητας

θ : η γωνία επαφής κατά Young

Ο συντελεστής τραχύτητας r ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής επιφάνειας προς την γεωμετρική επιφάνεια. Η πραγματική επιφάνεια αναφέρεται στην πραγματική περιοχή επαφής του υγρού με το στερεό, ενώ η γεωμετρική επιφάνεια στην φαινομενική περιοχή επαφής. Είναι προφανές ότι αν τοποθετηθεί η ίδια ποσότητα νερού με τη μορφή σταγόνας σε μια λεία στερεή επιφάνεια και σε μια στερεή επιφάνεια που εμφανίζει τραχύτητα, η πραγματική περιοχή που διαβρέχεται κάτω από τη σταγόνα είναι πολύ μεγαλύτερη στην πρώτη περίπτωση. Σε περιπτώσεις διεπιφανειών υγρού-υγρού ή υγρού-αερίου, όπου υποθετικά υπάρχει απόλυτη ομοιογένεια, η πραγματική επιφάνεια και η γεωμετρική επιφάνεια ταυτίζονται. Αντιθέτως, σε όλες τις πραγματικές στερεές επιφάνειες, η πραγματική επιφάνεια είναι πάντοτε μεγαλύτερη από τη γεωμετρική λόγω της τραχύτητας (Wenzel 1936).

2.1.3 Μοντέλο Cassie-Baxter

Το 1944, οι Cassie και Baxter πρότειναν ένα νέο μοντέλο το οποίο αποτελεί ουσιαστικά εξέλιξη του μοντέλου Wenzel. Το μοντέλο αυτό αναφέρεται στην ετερογενή διαβροχή των επιφανειών και στηρίζεται στην υπόθεση ότι η σταγόνα νερού που έρχεται σε επαφή με την τραχιά επιφάνεια δεν καλύπτει πλήρως τον κενό χώρο που δημιουργείται από τις εσοχές. Αυτό συμβαίνει επειδή κάτω από τη σταγόνα είναι παγιδευμένη κάποια ποσότητα αέρα (Cassie & Baxter 1944), (Εικόνα 3).



Εικόνα 3. Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου Cassie-Baxter. Η σταγόνα νερού δεν διαβρέχει πλήρως τον κενό χώρο στις εσοχές της επιφάνειας (Zhang et al. 2013).

Σύμφωνα με το μοντέλο Cassie-Baxter, η εξίσωση της γωνίας επαφής (CA) τροποποιείται ως εξής:

$$\cos\theta_{CB} = f \cdot \cos\theta - (1-f), \text{ ή αλλιώς } \cos\theta_{CB} = f(\cos\theta + 1) - 1$$

όπου:

θ_{CB} : φαινομενική γωνία επαφής κατά Cassie-Baxter,

θ : γωνία επαφής κατά Young,

f : ο λόγος της ολικής επιφάνειας επαφής στερεού-υγρού προς την ολική επιφάνεια επαφής στερεού-υγρού και υγρού-αερίου (Yan et al. 2011).

Αν στην παραπάνω εξίσωση συμπεριληφθεί και ο παράγοντας της τραχύτητας, τότε η εξίσωση αναδιατυπώνεται ως εξής:

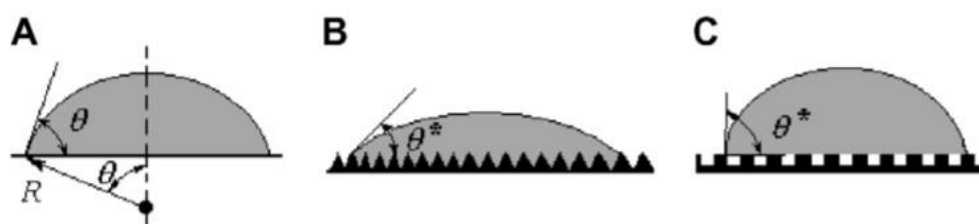
$$\cos\theta_{CB} = r_f \cdot f (\cos\theta + 1) - 1$$

όπου r_f : ο λόγος της πραγματικής περιοχής που διαβρέχεται προς την προβαλλόμενη περιοχή.

Είναι προφανές ότι για $f=1$ και $r_f=r$ η εξίσωση Cassie-Baxter μετατρέπεται στην εξίσωση Wenzel.

Έχει διαπιστωθεί ότι για να ισχύουν τόσο η εξίσωση Cassie-Baxter όσο και η εξίσωση Wenzel, θα πρέπει η σταγόνα νερού που τοποθετείται πάνω στην επιφάνεια να είναι ικανοποιητικά μεγάλη συγκριτικά με την κλίμακα της τραχύτητας της επιφάνειας αυτής (Marmur 2003, Wolansky & Marmur 1999, Brandon et al. 2003).

Συνοψίζοντας, τα τρία μοντέλα που περιγράφηκαν διακρίνονται μεταξύ τους με βάση την επιφάνεια που διαβρέχεται. Έτσι, το μοντέλο Young ισχύει για ιδανικές επιφάνειες (λείες και ομοιόμορφες), το μοντέλο Wenzel για επιφάνειες που διαβρέχονται ομοιογενώς, ενώ το μοντέλο Cassie-Baxter αφορά στην ετερογενή διαβροχή, όπως φαίνεται παρακάτω:

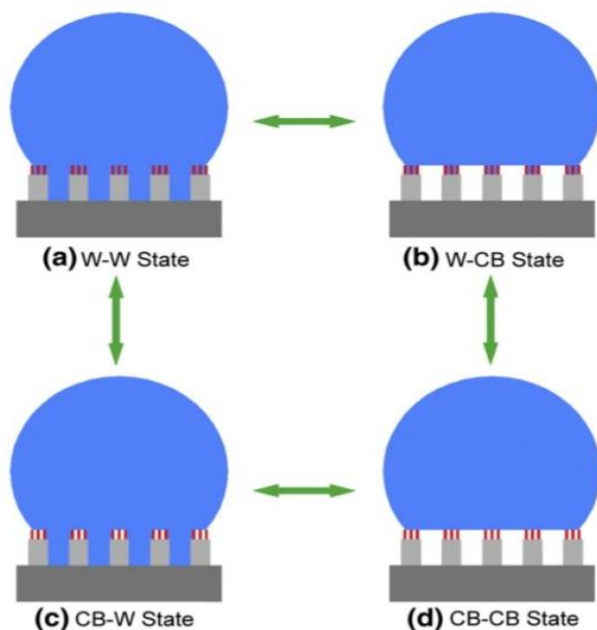


Εικόνα 4. Σχηματική απεικόνιση διαφορετικών μοντέλων διαβροχής. **A:** λεία, επίπεδη επιφάνεια (Young), **B:** ομοιογενής διαβροχή (Wenzel), **C:** ετερογενής διαβροχή (Cassie-Baxter) (Whyman et al. 2008).

Είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι τα μοντέλα και οι εξισώσεις που περιγράφηκαν παραπάνω αποτελούν ένα βασικό θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση της έννοιας της διαβρεξιμότητας και της προσέγγισής αυτής με μέτρηση της γωνίας επαφής. Η πραγματικότητα όμως διαφέρει σημαντικά από τη θεωρία. Συγκεκριμένα, είναι δυνατή η παρουσία μιας μεταβατικής κατάστασης μεταξύ ομοιογενούς και ετερογενούς επιφάνειας, η οποία προκύπτει με τρόπο που δεν είναι πλήρως κατανοητός (Yan et al. 2011). Πρακτικά, στις πραγματικές επιφάνειες συναντώνται συχνά μεταβατικές καταστάσεις μεταξύ των μοντέλων Cassie-Baxter και Wenzel εξαιτίας των περίπλοκων επιφανειακών μικροδομών (Zhang et al. 2013).

Επιπλέον, συναντώνται συχνά ιεραρχικές επιφάνειες. Μια καλά οργανωμένη ιεραρχική δομή περιλαμβάνει το υπόστρωμα και δύο στρώματα προεξοχών

(protrusions) εκ των οποίων το πρώτο συναντάται σε επίπεδο μικροκλίμακας και το δεύτερο σε επίπεδο νανοκλίμακας. Είναι πιθανό να υπάρχουν και κάποια πιο μικρά στρώματα προεξοχών (μικρότερα και από τη νανοκλίμακα), (Gao et al. 2011). Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι πιθανές καταστάσεις διαβροχής στις οποίες μπορεί να βρεθεί μια ιεραρχική επιφάνεια με δύο στρώματα προεξοχών:



Εικόνα 5. Απεικόνιση των μοντέλων επαφής μεταξύ μιας υγρής σταγόνας και μιας στερεής επιφάνειας με ιεραρχική δομή. Τα διπλά βέλη υποδεικνύουν τις πιθανές μεταβάσεις από την μια κατάσταση στην άλλη (Gao et al. 2011).

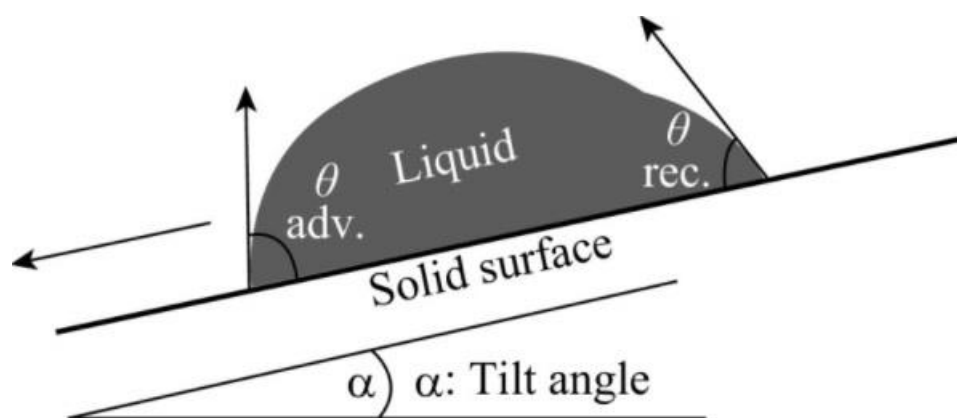
Αναλυτικότερα, στην εικόνα 5(a) φαίνεται πως και τα δύο στρώματα προεξοχών διαβρέχονται πλήρως ακολουθώντας το μοντέλο Wenzel. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται Wenzel-Wenzel (W-W state). Στην περίπτωση 5(b) το νερό εισέρχεται μόνο στα ανώτερα στρώματα υποδεικνύοντας ότι αυτά ακολουθούν το μοντέλο Wenzel ενώ τα κατώτερα ακολουθούν το μοντέλο Cassie-Baxter (W-CB state), ενώ η αντίστροφη κατάσταση παρουσιάζεται στην εικόνα 5(c). Τέλος, στην εικόνα 5(d) ακολουθείται και για τα δύο στρώματα προεξοχών το μοντέλο Cassie-Baxter (CB-CB state) καθώς το νερό δεν εισέρχεται πλήρως στα κενά μεταξύ των προεξοχών εξαιτίας του αέρα που είναι παγιδευμένος σε αυτά.

2.2 Γωνίες υστέρησης και κλίσης

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας για τη μελέτη της διαβρεξιμότητας μιας επιφάνειας είναι η υστέρηση, η οποία είναι υπεύθυνη για την παραμονή και προσρόφηση του εκάστοτε υγρού πάνω στην μελετούμενη στερεή επιφάνεια. Σε μια σταγόνα υγρού που κινείται πάνω σε μια στερεή επιφάνεια διακρίνονται δύο γωνίες: η γωνία προώθησης (advancing contact angle - θ_{adv}) και η γωνία υποχώρησης (receding contact angle - θ_{rec}), όπως φαίνεται στην εικόνα 6. Προκειμένου όμως να επιτευχθεί η κύλιση της σταγόνας είναι απαραίτητο το υπόστρωμα να βρίσκεται σε κάποια κλίση. Εισάγεται έτσι η έννοια της γωνίας κλίσης (tilt angle - TA) που

εκφράζει ουσιαστικά την τιμή της γωνίας κλίσης του υποστρώματος στην οποία η σταγόνα δεν μένει πια σταθερή, αλλά αρχίζει να κυλά προς τα κάτω (Extrand 2002).

Ως γωνία υστέρησης (CAH) λοιπόν ορίζεται η διαφορά μεταξύ της γωνίας προώθησης και της γωνίας υποχώρησης μιας σταγόνας υγρού, όταν αυτή κυλά σε ένα κεκλιμένο στερεό υπόστρωμα (δηλαδή $CAH = CA_{adv} - CA_{rec}$), (Koch & Barthlott 2009).



Εικόνα 6. Σχεδιάγραμμα για τις γωνίες προώθησης και υποχώρησης μιας σταγόνας που κινείται σε μια στερεή επιφάνεια με γωνία κλίσης α (Barthlott et al. 2017).

Η γωνία προώθησης μιας σταγόνας που κινείται πάνω σε μια στερεή επιφάνεια είναι μεγαλύτερη από την γωνία υστέρησης. Όμως, στην περίπτωση όπου η σταγόνα κυλά με μικρή αντίσταση και σε μικρή γωνία κλίσης, η διαφορά των δύο αυτών γωνιών είναι σημαντικά μικρότερη, οδηγώντας έτσι σε μια χαμηλή γωνία υστέρησης (CAH), (Israelachvili 1992).

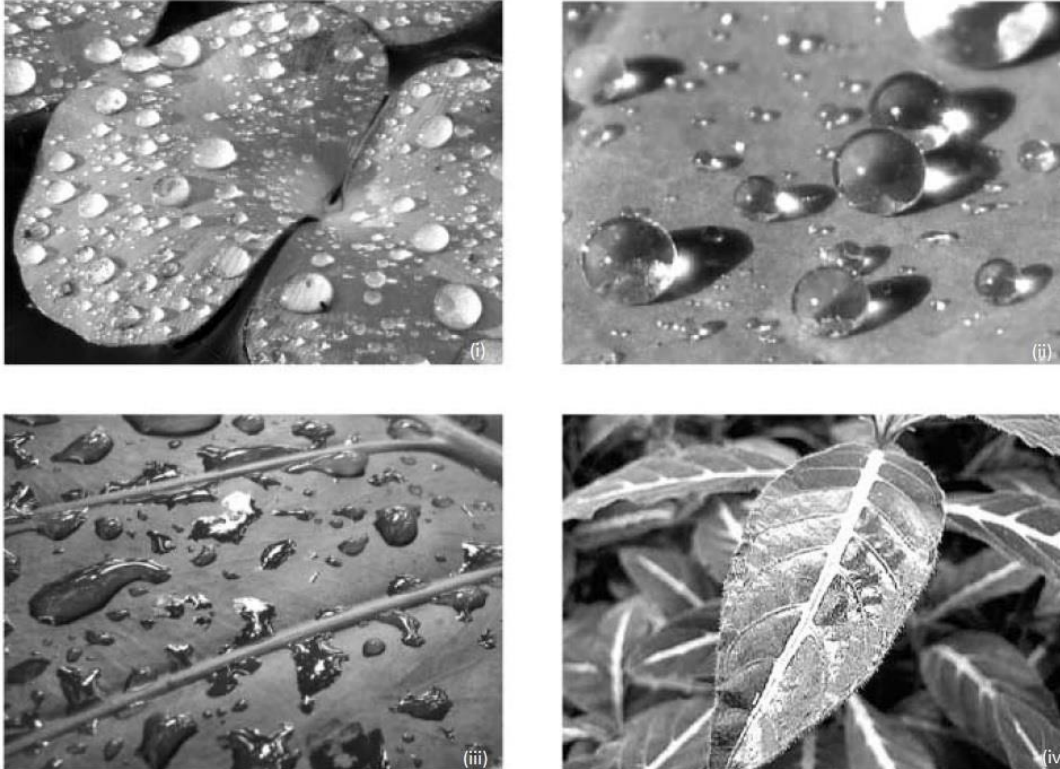
2.3 Χαρακτηρισμός επιφανειών με βάση τη γωνία επαφής (CA)

Σύμφωνα με τους Koch & Barthlott (2009), όλες οι στερεές επιφάνειες μπορούν να ταξινομηθούν σε 4 κατηγορίες με βάση την τιμή της γωνίας επαφής που σχηματίζει μια σταγόνα νερού με το υπόστρωμα. Έτσι, παρουσίασαν τις εξής κατηγορίες επιφανειών:

1. Υπερδρόφιλες επιφάνειες χαρακτηρίζονται οι επιφάνειες εκείνες στις οποίες η γωνία επαφής της σταγόνας νερού με την επιφάνεια είναι μικρότερη των 10° ($CA < 10^\circ$)
2. Υδρόφιλες χαρακτηρίζονται οι επιφάνειες που έχουν γωνία επαφής μεγαλύτερη των 10° αλλά μικρότερη των 90° ($10^\circ < CA < 90^\circ$)
3. Υδρόφοβες είναι οι επιφάνειες στις οποίες η γωνία επαφής που σχηματίζεται είναι μεγαλύτερη των 90° αλλά μικρότερη των 150° ($90^\circ < CA < 150^\circ$)

4. Υπερυδρόφοβες επιφάνειες είναι εκείνες οι επιφάνειες όπου η γωνία επαφής παίρνει τιμές μεγαλύτερες των 150° ($CA > 150^\circ$).

Στην εικόνα 7 παρουσιάζονται φύλλα διαφορετικών ειδών φυτών, καθένα εκ των οποίων αντικατοπτρίζει ένα από τα τέσσερα παραπάνω μοντέλα διαβρεξιμότητας:



Εικόνα 7. (i) Τα υδρόφοβα φύλλα του είδους *Regnellidium diphyllum*, (ii) η υπερυδρόφοβη επιφάνεια των φύλλων του είδους *Brassica oleracea*, (iii) το υδρόφιλο φύλλο του είδους *Alocasia odora*, (iv) τα υπερυδρόφιλα φύλλα του είδους *Ruellia devosiana* (Koch et al. 2009).

Όσον αφορά τις υδρόφοβες επιφάνειες, είναι προφανές πως οι μεγάλες τιμές γωνίας επαφής υποδεικνύουν πως όταν το υγρό βρεθεί πάνω σε αυτές, σχηματίζει σφαιρικές ή ημισφαιρικές σταγόνες.

Επιπλέον, στην περίπτωση που μια επιφάνεια είναι υπερυδρόφοβη και ταυτόχρονα έχει μικρή υστέρηση ή γωνία κλίσης μικρότερη των 10° ($TA < 10^\circ$) τότε η επιφάνεια παρουσιάζει και ιδιότητες αυτο-καθαρισμού.

3. Η εφουμενίδα των φυτών

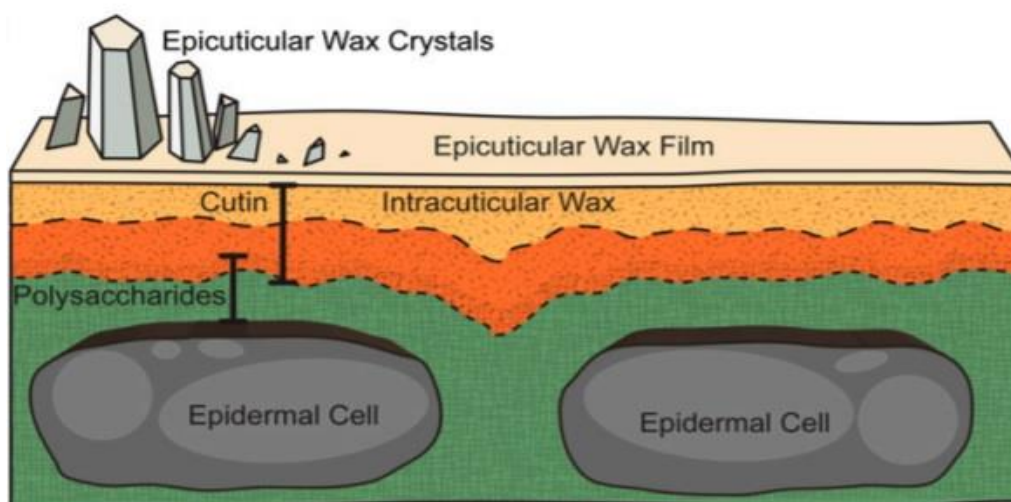
3.1 Τα βασικά συστατικά της εφουμενίδας και η βιοσύνθεσή τους

Η επιδερμίδα των φυτών είναι το εξωτερικό καλυπτήριο στρώμα του πρωτογενούς φυτικού σώματος, με κύρια λειτουργία την προστασία των εσωτερικών ευαίσθητων ιστών του φυτού από τις ποικίλες και αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες. Στην

εξωτερική επιφάνεια της επιδερμίδας των υπέργειων τμημάτων των φυτών δημιουργείται ένα συνεχές στρώμα με βασικό συστατικό την υμενίνη (ή κυτίνη), το οποίο ονομάζεται εφυμενίδα (Ελευθερίου 2007). Η εφυμενίδα λοιπόν αποτελεί μια σύνθετη δομή, η οποία περιέχει κυρίως υμενίνη αλλά και μια ποικιλία οργανικών λιπιδίων, τα οποία συνολικά ονομάζονται κηροί.

Σε μικροσκοπική κλίμακα, η εφυμενίδα διακρίνεται σε δύο περιοχές με βάση τη χημική σύσταση και την ιστοχημική τους χρώση. Η μία περιοχή είναι πλούσια σε υμενίνη και περιέχει ενσωματωμένους πολυσακχαρίτες, ενώ η δεύτερη περιοχή αποτελεί ουσιαστικά μια υπερκείμενη στιβάδα που είναι εμπλουτισμένη με κηρούς αλλά περιέχει πολύ λιγότερους πολυσακχαρίτες (Yeats & Rose 2013). Οι κηροί μπορεί να βρίσκονται είτε μέσα στη στιβάδα της υμενίνης (ενδο-εφυμενιδιακοί κηροί) είτε πάνω στην επιφάνεια αυτής (επιεφυμενιδιακοί κηροί) και παρουσιάζουν μεγάλη μορφολογική και χημική ποικιλία ενώ παράλληλα οι τελευταίοι μπορούν να αυτό-συναρμολογούνται προς παραγωγή τρισδιάστατων επιεφυμενιδιακών κρυστάλλων κηρών (Barthlott et al. 2017).

Στην εικόνα 8 φαίνονται πιο ξεκάθαρα οι περιοχές και οι δομές που περιγράφηκαν:



Εικόνα 8. Σχηματική απεικόνιση της εφυμενίδας. Τα επιδερμικά κύτταρα (epidermal cells) καλύπτονται από το κυτταρικό τοίχωμα που περιέχει πολυσακχαρίτες. Η πορτοκαλί περιοχή της εφυμενίδας είναι το πλούσιο σε πολυσακχαρίτες στρώμα, ενώ το υπερκείμενο κίτρινο στρώμα είναι πλούσιο σε κηρούς. Στην επιφάνειά της παρουσιάζονται οι επιεφυμενιδιακοί κηροί (epicuticular waxes), (Yeats & Rose 2013).

Από χημικής απόψεως, η υμενίνη είναι ένα πολυμερές που αποτελείται κατά κύριο λόγο από δύο ομάδες λιπαρών οξέων, με 16 και 18 άτομα άνθρακα αντίστοιχα, οι οποίες σχηματίζουν μείγματα διαφορετικών αναλογιών. Τα διαφορετικά αυτά λιπαρά οξέα πολυμερίζονται και σχηματίζουν εστερικούς δεσμούς μεταξύ τους, δημιουργώντας έτσι ένα τρισδιάστατο πλέγμα (Ρουμπελάκη-Αγγελάκη κ.ά. 2014). Η

βιοσυνθετική οδός της υμενίνης έχει μελετηθεί εκτενώς στο *Arabidopsis thaliana*. Τα πρόδρομα μόρια της είναι τα λιπαρά οξέα C16:0 (παλμιτικό οξύ), C18:0 (στεατικό οξύ) και C18:1 (ελαϊκό οξύ), τα οποία συντίθεται στα πλαστίδια και μεταφέρονται στο ενδοπλασματικό δίκτυο όπου υφίστανται περαιτέρω τροποποιήσεις (Li-Beisson et al. 2013). Τελικό στάδιο είναι η εναπόθεσή τους στην σχηματιζόμενη εφυμενίδα. Υποστηρίζεται ότι τα πρόδρομα μόρια της υμενίνης φτάνουν στην κυτταρική επιφάνεια ως μονομερή και πολυμερίζονται εκεί.

Όσον αφορά τη σύνθεση των κηρών της εφυμενίδας, αυτή μπορεί να διαφέρει μεταξύ των ειδών και εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες ανάπτυξης (Jenks & Ashworth 1999). Όμως, στις περισσότερες περιπτώσεις τα συστατικά των κηρών προέρχονται από κορεσμένα λιπαρά οξέα με πολύ μακριές αλυσίδες (very-long-chain fat acids, VLCFAs) των οποίων το μήκος κυμαίνεται από 20 έως και 34 άτομα άνθρακα. Από τα VLCFAs με τροποποιήσεις προκύπτουν αλδεΐδες, πρωτοταγείς και δευτεροταγείς αλκοόλες, αλκάνια, κετόνες και εστέρες, ουσίες οι οποίες αποτελούν συστατικά του μείγματος των κηρών (Kunst & Samuels 2003).

Όλες οι αντιδράσεις που οδηγούν στη σύνθεση και παραγωγή των VLCFAs λαμβάνουν χώρα στα επιδερμικά κύτταρα και διακρίνονται σε δύο στάδια: πρώτο στάδιο για τη βιοσύνθεσή τους αποτελεί η *de novo* σύνθεση των λιπαρών οξέων C16 και C18 στο στρώμα των πλαστιδίων η οποία καταλύεται από το ενζυμικό σύμπλοκο της συνθάσης των λιπαρών οξέων (FAS). Κατά το δεύτερο στάδιο τα λιπαρά αυτά οξέα επιμηκύνονται προς σχηματισμό VLCFAs με τη βοήθεια συμπλόκων ενζύμων που ονομάζονται FAE (fatty acid elongases), (Kunst & Samuels 2003).

Ύστερα από την ολοκλήρωση της βιοσύνθεσης των VLCFAs μπορούν να ακολουθηθούν δύο μονοπάτια. Το πρώτο μονοπάτι περιλαμβάνει αντιδράσεις οι οποίες καταλύονται από μια αναγωγάση και οδηγούν στον σχηματισμό πρωτοταγών αλκοολών (Rowland et al. 2006). Οι πρωτοταγείς αλκοόλες βρίσκονται είτε ελεύθερες στο μείγμα των κηρών είτε εστεροποιούνται προς σχηματισμό εστέρων των κηρών. Στο δεύτερο μονοπάτι πραγματοποιούνται αντιδράσεις αποκαρβοξυλίωσης με τελικά προϊόντα τις αλδεΐδες, τα αλκάνια, καθώς και τις δευτεροταγείς αλκοόλες και τις κετόνες (Schneider & Kolattukudy 2000).

Τόσο τα πρόδρομα μόρια της υμενίνης όσο και αυτά των κηρών πρέπει να μετακινηθούν μέσω της πλασματικής μεμβράνης και του κυτταρικού τοιχώματος ώστε να φτάσουν στη σχηματιζόμενη εφυμενίδα. Η μεταφορά δια μέσου της πλασματικής μεμβράνης λαμβάνει χώρα με τη βοήθεια πρωτεϊνών μεταφορέων ABC (ATP binding cassette), οι οποίες ανήκουν στην υποοικογένεια G (ABCG). Ωστόσο, δεν είναι ακόμη ξεκάθαρος ο ακριβής τρόπος μετακίνησης των λιπιδίων μέσα στην πλασματική μεμβράνη (Philippe et al. 2020). Εξίσου αδιευκρίνιστη είναι και η μεταφορά των λιπιδίων μέσα από το κυτταρικό τοίχωμα προς τη σχηματιζόμενη εφυμενίδα. Το ζήτημα αυτό αποτελεί μια από τις λιγότερο κατανοητές πτυχές της βιοσύνθεσης της εφυμενίδας. Έχει προταθεί η άποψη ότι η μεταφορά των μονομερών δια μέσου του υδρόφιλου κυτταρικού τοιχώματος επιτυγχάνεται με τη συμβολή

πρωτεϊνικών μεταφορέων λιπιδίων (lipid transport proteins, LTPs). Οι LTPs είναι πρωτεΐνες μικρού μοριακού βάρους (9kDa) που αποτελούνται από 8 κυστεΐνες ενωμένες μεταξύ τους με δισουλφιδικούς δεσμούς, σχηματίζοντας μια υδρόφοβη κοιλότητα στην οποία προσδένονται τα προς μεταφορά λιπίδια. Στα περισσότερα είδη φυτών οι LTPs έχουν χαμηλή ειδικότητα, προσδένοντας έτσι ένα ευρύ φάσμα λιπιδίων (Kunst & Samuels 2003). Θα μπορούσαν λοιπόν οι πρωτεΐνες αυτές να συμβάλλουν στη δίοδο των πρόδρομων μορίων από το κυτταρικό τοίχωμα. Όμως, δεδομένης της απουσίας ενός μηχανισμού ανακύκλωσης των μεταφορέων αυτών, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το ενεργειακό κόστος μιας τέτοιας διαδικασίας θα ήταν εξαιρετικά υψηλό. Μια εναλλακτική εξήγηση προτείνει ότι τα πρόδρομα μόρια της υμενίνης και των κηρών μεταναστεύουν από το εσωτερικό υδρόφιλο περιβάλλον του κυτταρικού τοιχώματος στην επιφάνειά του εξαιτίας της υδροφοβικότητάς τους. Συγκεκριμένα, μέσα στο κυτταρικό τοίχωμα δημιουργούνται κάποιες σχετικά υδρόφοβες περιοχές από πρωτεΐνες ή πολυσακχαρίτες οι οποίες επιτρέπουν τη διέλευση των λιπιδίων προς τη σχηματιζόμενη εφυμενίδα. Εκεί συσσωρεύονται μέσω της παθητικής διαδικασίας διαχωρισμού των δύο φάσεων και σταδιακά πολυμερίζονται (Philippe et al. 2020, Gabarayeva et al. 2020). Εφόσον δεν έχει επιβεβαιωθεί επιστημονικά καμία από τις παραπάνω υποθέσεις, κάποια ερωτήματα παραμένουν ακόμη αναπάντητα αφήνοντας χώρο για περαιτέρω έρευνα.

3.2 Οι λειτουργίες της εφυμενίδας

Η βασικότερη λειτουργία της εφυμενίδας είναι η παρεμπόδιση της απώλειας του νερού. Μια κοινή αντίληψη σχετικά με την διαπερατότητα της εφυμενίδας σε νερό είναι ότι όσο μεγαλύτερο πάχος έχει η εφυμενίδα τόσο μικρότερη θα είναι η διαπερατότητά της. Ωστόσο η υπόθεση αυτή έχει καταρριφθεί εδώ και αρκετά χρόνια από μελέτες σε διαφορετικά είδη φυτών που αποδεικνύουν ότι δεν υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ του πάχους και της διαπερατότητας της εφυμενίδας (Riederer & Schreiber 2001). Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι ορισμένα φυτικά είδη αντιδρούν σε συνθήκες καταπόνησης λόγω έλλειψης νερού παράγοντας παχύτερο στρώμα εφυμενίδας κατά την ανάπτυξη των φύλλων τους, με αποτέλεσμα να ελαττώνουν την εφυμενιδική διαπνοή. Η διαπνοή αυτή όμως αποτελεί μόνο το 5-10% της συνολικής διαπνοής ενός φύλλου και συνεπώς η συγκεκριμένη απόκριση θεωρείται σημαντική μόνο κάτω από ακραίες συνθήκες καταπόνησης (Taiz & Zeiger 2012). Συστατικό-κλειδί στον έλεγχο της διαπερατότητας του νερού φαίνεται να αποτελούν οι κηροί, καθώς η απομάκρυνση αυτών από την εφυμενίδα μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της διαπερατότητας κατά 100-1000 φορές, ανάλογα με το φυτικό είδος (Schreiber 2010). Από την άλλη πλευρά, μια σημαντική μείωση της υμενίνης επιδρά ελάχιστα στη διαπερατότητα της εφυμενίδας, γεγονός που αποδεικνύει ότι η ποσότητα της υμενίνης δεν καθορίζει την αποτελεσματικότητα της εφυμενίδας ως φράγμα για την παρεμπόδιση της απώλειας νερού. Όμως, κρίσιμο ρόλο κατέχει η σωστή δόμηση του στρώματος της υμενίνης. Υποστηρίζεται λοιπόν ότι η υμενίνη αποτελεί μια βάση που

συγκρατεί τους κηρούς και εξασφαλίζει την συνέχεια της εφυμενίδας (Fich et al. 2016).

Ένας εξίσου σημαντικός ρόλος της εφυμενίδας είναι η προστασία των υποκείμενων φυτικών ιστών από την υπεριώδη ακτινοβολία (UV). Η UV ακτινοβολία βρίσκεται στη φασματική περιοχή από 100 έως 400 nm και χωρίζεται στις εξής τρεις κατηγορίες: ακτινοβολία UV-A (315-400nm), UV-B (280-315nm) και UV-C (100-280nm). Η UV-B αποτελεί πλέον, λόγω της τρύπας του όζοντος, ένα σημαντικό ποσοστό της υπεριώδους ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη και συνεπώς στην επιφάνεια των φυτών. Οι επιπτώσεις της δράσης της συγκεκριμένης ακτινοβολίας στους φυτικούς ιστούς σχετίζονται με μεταλλαγές στο DNA των κυττάρων, στις πρωτεΐνες καθώς και στα λιπίδια των μεμβρανών. Επιπλέον, προκαλεί αναστολή της φυτικής ανάπτυξης και επηρεάζει τη φωτοσυνθετική διαδικασία (Nithia & Shanthi 2017). Για την αποφυγή των δυσμενών αυτών επιπτώσεων τα φυτά έχουν αναπτύξει ορισμένες στρατηγικές στις οποίες συγκαταλέγεται και η παραγωγή των συστατικών της εφυμενίδας. Οι Krauss et al. (1997) ύστερα από έρευνες σε απομονωμένες εφυμενίδες διαφορετικών φυτικών ειδών απέδειξαν ότι πραγματοποιείται επαρκές φιλτράρισμα της UV-B ακτινοβολίας αλλά υπάρχει μεγάλη διαπερατότητα για το ορατό φάσμα φωτός που είναι φωτοσυνθετικά ενεργό και άρα αναγκαίο για τους φυτικούς οργανισμούς. Η εφυμενίδα λοιπόν έχει την ικανότητα να αντανακλά το φως ως ένα βαθμό, ο οποίος πιθανόν εξαρτάται από την ποσότητα των επεφυμενιδιακών κηρών, παρέχοντας έτσι την απαραίτητη προστασία στα κύτταρα και τους ιστούς (Yeats & Rose 2013).

Δεδομένης της θέσης της ως ένα εξωτερικό στρώμα της επιφάνειας των φυτών, η εφυμενίδα αποτελεί ένα από τα πρώτα τμήματα που έρχονται σε επαφή με έντομα και μικροοργανισμούς και καλείται να τους αντιμετωπίσει. Όσον αφορά τους μικροοργανισμούς, έχει αποδειχθεί ότι η εφυμενίδα εμποδίζει επιτυχώς την είσοδο των βακτηρίων αλλά είναι ένα ανεπαρκές εμπόδιο για πολλά είδη παθογόνων μυκήτων (Fich et al. 2016). Το πρώτο φράγμα που συναντούν τα παθογόνα μικρόβια που επιχειρούν να διέλθουν από την εφυμενίδα είναι οι επεφυμενιδιακοί κηροί και οι κρύσταλλοι αυτών, οι οποίοι δυσχεραίνουν την προσκόλληση άρα και την είσοδο των παθογόνων. Εξίσου κρίσιμος είναι ο ρόλος των κηρών στις αλληλεπιδράσεις των φυτών με τα έντομα καθώς οι επεφυμενιδιακοί κηροί δημιουργούν μια δομικά ασταθή και αφιλόξενη επιφάνεια που αποτρέπει την συγκράτηση και μετακίνηση των εντόμων (Borodich et al. 2010). Πιστεύεται επίσης ότι η υμενίνη είναι εξαιρετικά σημαντική για τις λειτουργίες που περιγράφηκαν όμως ο ακριβής της ρόλος παραμένει ασαφής.

Τέλος, σε κάποια είδη φυτών η ιδιαίτερη δόμηση της εφυμενίδας συνεισφέρει σημαντικά στην ιδιότητα του αυτο-καθαρισμού. Στα φύλλα αυτά το νερό της βροχής που πέφτει σχηματίζει σταγονίδια, τα οποία καθώς κυλούν προς τα κάτω παρασύρουν και απομακρύνουν σωματίδια σκόνης αλλά και παθογόνα μικρόβια από τη φυλλική επιφάνεια. Η αποτελεσματικότητα του μηχανισμού του αυτο-καθαρισμού έχει συσχετισθεί άμεσα με την παρουσία επεφυμενιδιακών κηρών, ανάμεσα στους

οποίους παγιδεύεται αέρας, επιτρέποντας στο νερό να σχηματίσει σφαιρικά σταγονίδια (Barthlott & Neinhuis 1997). Οι αυτο-καθαριζόμενες επιφάνειες έχουν μελετηθεί και έχουν αποτελέσει εξαιρετική πηγή έμπνευσης για την επιστήμη της Βιομιμητικής, με τρόπο που θα περιγραφεί στα επόμενα κεφάλαια.

4. Έμβιοι οργανισμοί που ενέπνευσαν την επιστήμη της Βιομιμητικής

4.1 Ο λωτός (*Nelumbo nucifera*)

Ο λωτός του είδους *Nelumbo nucifera* αναφέρεται συχνά και ως ινδικός ή ιερός λωτός και αποτελεί ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον φυτό εξαιτίας όχι μόνο των βιολογικών ιδιοτήτων του αλλά και της σημαντικότητάς του σε ορισμένες κουλτούρες και θρησκείες. Αυτό το φυτικό είδος αναπτύσσεται ως αυτοφυές στην τροπική Ασία και η συσχέτισή του με τον ανθρώπινο πολιτισμό χρονολογείται τουλάχιστον πριν από 3000 χρόνια. Για τους Βουδιστές και τους Ινδουιστές το φυτό αυτό θεωρείται ιερό (Sacred Lotus), συμβολίζοντας τόσο την ομορφιά λόγω του άνθους του όσο και την καθαρότητα και αγνότητα λόγω των χαρακτηριστικών που θα αναλυθούν παρακάτω. Η παρουσία του σε πολλά έργα τέχνης των λαών της Ασίας υποδεικνύει τον σεβασμό και τον θαυμασμό που αισθάνονταν οι άνθρωποι στην όψη του λωτού.

Από βιολογικής άποψης ο λωτός είναι ένα υδρόβιο φυτό που διαθέτει έναν λεπτό, επιμήκη μίσχο και φύλλα με διάμετρο 25-90cm τα οποία μπορεί να επιπλέουν στο νερό ή να βρίσκονται έξω από αυτό (Paudel & Panth 2015). Τα άνθη έχουν διάμετρο 10-23cm και το χρώμα τους ποικίλλει από λευκό έως ροζ, ενώ τα στελέχη τους ξεπερνούν σε ύψος τους μίσχους των φύλλων (εικόνα 9), (Lim 2016).



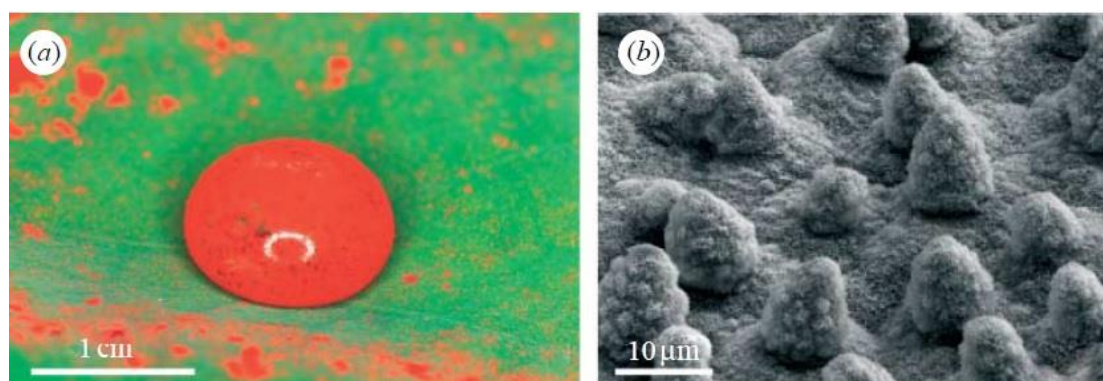
Εικόνα 9. Τα φύλλα και τα άνθη του *Nelumbo nucifera* (Lim 2016).

Τα φύλλα του λωτού διαθέτουν ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον των επιστημόνων και δεν είναι άλλο από την ικανότητα αυτο-καθαρισμού. Η ικανότητα αυτή οφείλεται στις υπερυδρόφοβες ιδιότητες της άνω πλευράς των φύλλων του είδους, ενώ το φαινόμενο της απόθησης του νερού και των

ξένων σωματιδίων από την επιφάνειά τους συναντάται συχνά με τον όρο «φαινόμενο του λωτού» (Lotus effect), (Lee & Michielsen 2006).

Οι Barthlott & Neinhuis (1997) παρουσίασαν μια ολοκληρωμένη έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε περισσότερα από 200 είδη φυτών που είχαν υπερυδροφικές επιφάνειες με γωνίες επαφής μεγαλύτερες των 150° (βλ. παράγραφο 2.3). Βρέθηκε ότι η επιφάνεια των φύλλων του λωτού σχηματίζει γωνίες επαφής 162° με τις σταγόνες του νερού. Στην έρευνα αυτή υπήρχαν πολλά ακόμη φυτικά είδη με γωνίες επαφής στο εύρος των 160 - 163° τα οποία όμως δεν εμφάνιζαν τις ιδιαίτερες ικανότητες των υπερυδροφικών φύλλων του λωτού. Εξήχθη επομένως το συμπέρασμα ότι η μέτρηση μόνο της γωνίας επαφής είναι ανεπαρκής για τη σύγκριση των υπερυδροφικών επιφανειών μεταξύ τους. Αντιθέτως, οι γωνίες υστέρησης (CAH) και οι γωνίες κλίσης (TA) είναι εκείνες που παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ειδών (Ensikat et al. 2011). Αυτό που ξεχωρίζει λοιπόν στον λωτό είναι ο συνδυασμός μιας υψηλής γωνίας επαφής ($CA=162^\circ$) με χαμηλές γωνίες υστέρησης και κλίσης ($TA=4^\circ$) ο οποίος επιτρέπει την κύλιση του νερού υπό μορφή σφαιρικών σταγονιδίων (Koch & Barthlott 2009).

Χημικές αναλύσεις και μελέτες της επιφάνειας των φύλλων έχουν τεκμηριώσει την παρουσία θηλωδών (papillose) επιδερμικών κυττάρων τα οποία σε συνεργασία με μια πληθώρα επιεφυμενδιακών κηρών δημιουργούν ένα εξαιρετικά υδρόφοβο περιβάλλον (Bhushan 2009). Φαίνεται λοιπόν πως τα κύτταρα της άνω επιδερμίδας σχηματίζουν θηλές ποικίλου ύψους με κορυφές που έχουν καμπυλωτό σχήμα (εικόνα 10b). Μια τέτοια δομή επιτρέπει το γέμισμα των κοιλότητων μεταξύ των θηλών με αέρα, γεγονός που συνδυαστικά με την παρουσία των υδρόφοβων κηρών ελαχιστοποιεί την επαφή του νερού με τη στερεή επιφάνεια (Ensikat et al. 2011). Οι σταγόνες του νερού καθώς κυλούν πάνω στα φύλλα έρχονται ουσιαστικά σε άμεση επαφή μόνο με τις υψηλότερες κορυφές των θηλωδών κυττάρων (Ensikat et al. 2009) ενώ ταυτόχρονα συμπαρασύρουν σωματίδια σκόνης και παθογόνους μικροοργανισμούς, αφήνοντας έτσι την επιφάνεια απολύτως καθαρή (εικόνα 10a).



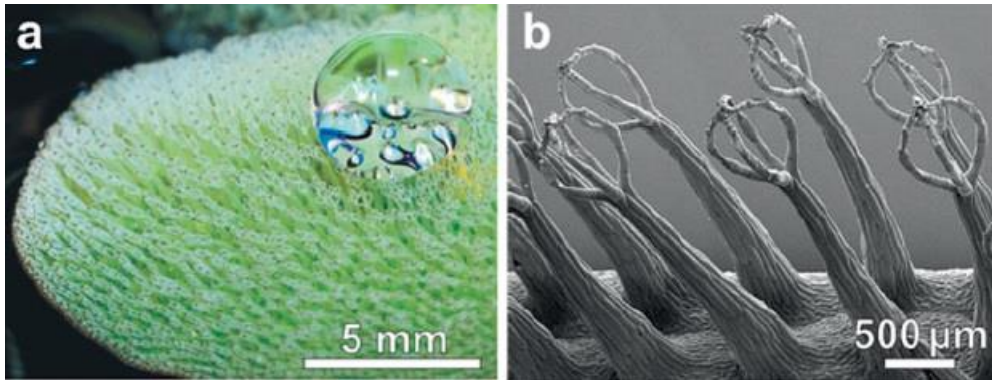
Εικόνα 10. (a) Στην επιφάνεια του φύλλου του λωτού έχει διασκορπιστεί η χρωστική Sudan red. Ένα σταγονίδιο νερού κινούμενο πάνω στο φύλλο συλλέγει τα σωματίδια της χρωστικής. (b) Τα θηλώδη κύτταρα, όπως φαίνονται σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Koch & Barthlott 2009).

4.2 Η σαλβίνια (*Salvinia molesta*)

Η *Salvinia molesta* αποτελεί ένα είδος που έχει μελετηθεί εκτενώς για τους σκοπούς της Βιομηχανικής. Το είδος αυτό είναι υδρόβιο και εμφανίζεται συχνά με τις κοινές ονομασίες γιγαντιαία σαλβίνια ή ζιζάνιο Καρίμπα, καθώς το 1962 εισέβαλε και επεκτάθηκε σε μεγάλο μέρος της τότε παγκοσμίως μεγαλύτερης τεχνητής λίμνης Καρίμπα που βρίσκεται μεταξύ της Ζιμπάμπουε και της Ζάμπια. Η *Salvinia molesta* θεωρείται ένα από τα χειρότερα φυτά-ζιζάνια εξαιτίας της ικανότητάς της να διπλασιάζεται σε μέγεθος εντός δύο μόνο ημερών και να καλύπτει λίμνες ή αργά ρέοντα ύδατα σχηματίζοντας ένα στρώμα με πάχος που μπορεί να φτάσει έως και το 1 μέτρο, εμποδίζοντας την ανάπτυξη των υποκείμενων φυτικών και ζωικών οργανισμών. Προέκυψε έτσι η ανάγκη εύρεσης ενός τρόπου περιορισμού της ανεξέλεγκτης εξάπλωσής της. Σε πολλές περιοχές η λύση δόθηκε με απελευθέρωση σκαθαριών του είδους *Cyrtobagous salviniae* τα οποία προκαλούν καταστροφές στα άτομα της *Salvinia molesta*, αναχαιτίζοντας έτσι την ανάπτυξή της (Thomas & Room 1986).

Ωστόσο, τα φύλλα της *Salvinia* έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένων ερευνών εξαιτίας των υπερυδρόφοβων ιδιοτήτων τους. Μελέτες με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης αποκάλυψαν την εντυπωσιακή δομή της άνω επιφάνειας των φύλλων, η οποία καλύπτεται από ένα πυκνό στρώμα πολυκύτταρων τριχών. Οι τρίχες ομαδοποιούνται ανά 4 και ενώνουν τις κορυφές τους σχηματίζοντας μια υπερυψωμένη δομή, το σχήμα της οποίας παρομοιάζεται συχνά με αυτό ενός αυγού (εικόνα 11b). Με εξαίρεση τις κορυφές των πολύπλοκων αυτών τριχών, όλη η υπόλοιπη επιφάνεια καλύπτεται με κηρούς. Προκύπτουν έτσι δύο διαφορετικά είδη επιφανειών: η μία είναι λεία και αποτελείται από τις κορυφές των ομαδοποιημένων τριχών, ενώ όλη η υποκείμενη εμφανίζει τραχύτητα εξαιτίας της παρουσίας των κηρών (Barthlott et al. 2010). Ο μοναδικός συνδυασμός των υδρόφιλων υπερυψωμένων κορυφών με την υπερυδρόφοβη επιδερμίδα δίνει τη δυνατότητα συγκράτησης ενός στρώματος αέρα μεταξύ των δύο επιφανειών. Το νερό λοιπόν έρχεται σε άμεση επαφή με το υδρόφιλο τμήμα ενώ δεν μπορεί να διαβρέξει τα κατώτερα εφόσον παρεμποδίζεται από τον παγιδευμένο αέρα.

Οι Cerman et al. (2009) απέδειξαν ότι το στρώμα του αέρα μπορεί να διατηρείται για έως και 17 ημέρες σε φύλλα της *Salvinia* που βυθίζονται στο νερό. Όταν επανέλθουν στην επιφάνεια, το νερό απομακρύνεται αμέσως χωρίς να αφήνει κανένα ίχνος διαβροχής. Φαίνεται πως ο παγιδευμένος αέρας έχει κρίσιμο βιολογικό ρόλο καθώς η παρουσία του καθιστά δυνατή την συνεχή ανταλλαγή αερίων (O_2 και CO_2) μεταξύ των βυθισμένων φύλλων και του περιβάλλοντός τους, επιτρέποντας την απρόσκοπτη λειτουργία των διαδικασιών φωτοσύνθεσης και αναπνοής (Colmer & Pedersen 2008). Εξάγεται έτσι το συμπέρασμα ότι ο αέρας αυτός συμβάλλει στην επιβίωση αλλά και ανάπτυξη των προσωρινά ή μόνιμα βυθισμένων φυτών που ζουν σε υγροτόπους (Raven 2008).



Εικόνα 11. (a) Το σφαιρικό σχήμα μιας σταγόνας νερού πάνω στην υπερυδροφόβη επιφάνεια φύλλου της *Salvinia molesta*, (b) Η δομή των πολυκύτταρων τριχών της όπως φαίνονται σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Barthlott et al. 2010).

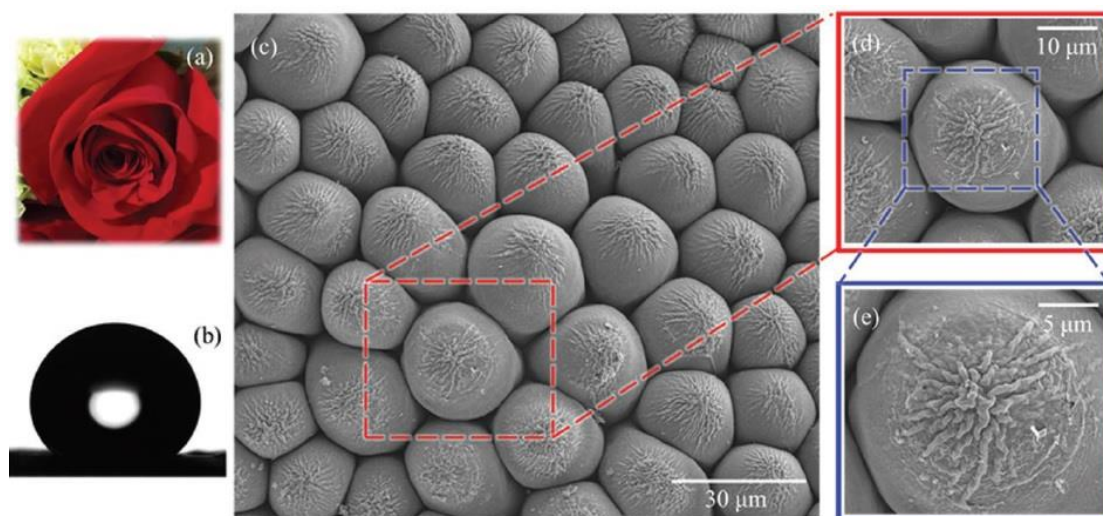
Τέλος, σημαντικό είναι να διευκρινιστεί πως οι επιφάνειες της *Salvinia* δεν διαθέτουν την ικανότητα αυτο-καθαρισμού. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το νερό δεν μπορεί να διεισδύσει ανάμεσα στις τρίχες με αποτέλεσμα να μην μπορούν να απομακρυνθούν οποιαδήποτε σωματίδια έχουν εισέλθει στα συγκεκριμένα σημεία (Koch & Barthlott 2009).

4.3 Τα τριαντάφυλλα (*Rosa spp.*)

Οι τριανταφυλλιές αποτελούν ένα από τα πιο κοινά καλλωπιστικά φυτά, ενώ τα άνθη τους θαυμάζονταν ανέκαθεν λόγω της εμφάνισης, του αρώματος αλλά και των εντυπωσιακών, έντονων χρωμάτων τους. Από την αρχαία Ελλάδα όπου συνδεόταν με την θεά Αφροδίτη έως και σήμερα, το τριαντάφυλλο φαίνεται να αντιπροσωπεύει ένα διαχρονικό σύμβολο ομορφιάς. Εξέχουσα θέση κατέχει φυσικά και στην αρωματοποιία.

Στα ροδοπέταλα εμφανίζεται ένα ξεχωριστό φαινόμενο το οποίο αποτέλεσε αφορμή για την λεπτομερή μελέτη της επιφάνειάς τους. Πιο αναλυτικά, πάνω στα ροδοπέταλα μπορούν να συγκρατούνται μικρά σταγονίδια νερού τα οποία συμβάλλουν στην φρέσκια όψη των ανθέων. Αντιθέτως, οι μεγαλύτερες σταγόνες όπως αυτές της βροχής κυλούν κανονικά (Feng et al. 2010). Τα ροδοπέταλα αντιπροσωπεύουν μια ομάδα επιφανειών που ορίζονται ως παραυδροφόβες και χαρακτηρίζονται από υψηλές γωνίες επαφής ($CA > 150^\circ$) αλλά και υψηλές γωνίες υστέρησης (CAH). Ο συνδυασμός των δύο αυτών χαρακτηριστικών υποδεικνύει πως πρόκειται για υδροφόβες επιφάνειες οι οποίες όμως έχουν υψηλή συνάφεια με το νερό με αποτέλεσμα να εμποδίζουν την κύλιση των σταγονιδίων του ακόμη και υπό μεγάλες γωνίες κλίσης (Szczeranski et al. 2017). Έχει διαπιστωθεί πως η επιφάνεια των ερυθρών πετάλων καλύπτεται από θηλώδεις δομές σε επίπεδο μικροκλίμακας. Στην κορυφή καθεμιάς από αυτές τις δομές συναντώνται κάποιες νανοδομές (εικόνα 12). Με περαιτέρω αναλύσεις αποδείχθηκε πως η διαβρεξιμότητα των ροδοπέταλων ακολουθεί ένα σύνθετο μοντέλο Cassie-Baxter (βλ. παράγραφο 2.1.3): το νερό έρχεται σε άμεση επαφή με τις νανοδομές και μπορεί να εισέρχεται εν μέρει στους

χώρους ανάμεσα στις μικροδομές (Chakraborty et al. 2019). Τα σταγονίδια που καταφέρνουν να διεισδύσουν στις κοιλότητες μεταξύ των μικροδομών παραμένουν εκεί εξαιτίας των μεγάλων δυνάμεων συνάφειας (Feng et al. 2008).



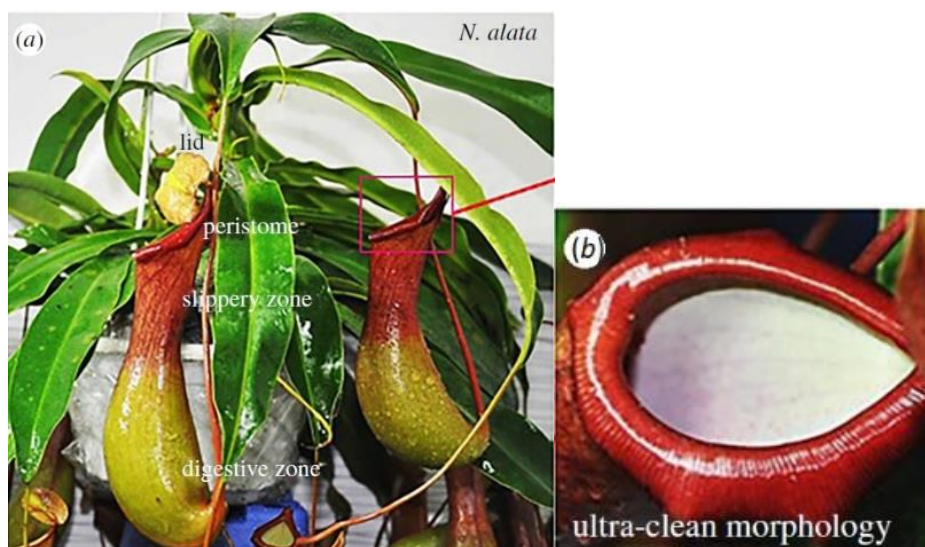
Εικόνα 12. (a) ένα φρεσκοκομμένο τριαντάφυλλο, (b) μια σταγόνα νερού που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια ενός πετάλου, (c) η επιφάνεια των ροδοπέταλων σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης με μεγέθυνση σε μια θηλώδη μικροδομή (d) και στις νανοδομές επάνω σε αυτήν (e), (Chakraborty et al. 2019).

Έχει βρεθεί ότι οι δομές που περιγράφηκαν συνεισφέρουν όχι μόνο στις ξεχωριστές ιδιότητες διαβρεξιμότητας αλλά και στην παραγωγή των εντυπωσιακών χρωματισμών των πετάλων. Οι χρωματισμοί που συναντώνται στη φύση είναι αποτέλεσμα είτε χημικών είτε δομικών χρωμάτων (Feng et al. 2010). Τα χημικά χρώματα αναφέρονται στην παρουσία χρωστικών οι οποίες απορροφούν ένα εύρος του ορατού φάσματος φωτός και αντανακλούν μόνο αυτό που δεν απορροφάται με αποτέλεσμα να παράγουν το χρώμα του τελευταίου. Από την άλλη πλευρά, τα δομικά χρώματα παράγονται εξαιτίας της παρουσίας νανοδομών και πτυχώσεων στις εκάστοτε επιφάνειες οι οποίες αντανακλούν επιλεκτικά συγκεκριμένα μήκη κύματος του ορατού φωτός (Glover & Whitney 2010). Το θαυμάσιο λοιπόν χρώμα των πετάλων των ερυθρών τριαντάφυλλων είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού χημικών και δομικών χρωμάτων. Οι Lee et al. (2010) ανέδειξαν τη σημασία της ιεραρχικής δόμησης στην επιφάνεια του ροδοπέταλου αποδεικνύοντας ότι οποιαδήποτε αλλαγή στο μέγεθος των μικρο- και νανο- δομών επέφερε μεταβολές στην αντανακλώμενη ακτινοβολία και συνεπώς στο παραγόμενο χρώμα.

4.4 Τα σαρκοφάγα φυτά του γένους *Nepenthes*

Το γένος *Nepenthes* απαντάται κυρίως στο Βόρνεο, στη Σουμάτρα και στις Φιλιππίνες εμφανίζοντας τη μεγαλύτερη βιοποικιλότητα στα τροπικά δάση του

Βόρνεο. Η κοινή του ονομασία είναι «pitcher plant», δηλαδή φυτό που ομοιάζει με κανάτα και βασίζεται στο σχήμα των εξειδικευμένων δομών που φέρει για τη σύλληψη της λείας του. Οι εντυπωσιακές αυτές δομές αποτελούν ουσιαστικά διαφοροποιημένα φύλλα καθένα εκ των οποίων διαθέτει τις εξής περιοχές: (i) το κάλυμμα ή καπάκι, (ii) το περιστόμιο, (iii) την ολισθηρή ζώνη και (iv) τη ζώνη πέψης (εικόνα 13), (Wang et al. 2020).



Εικόνα 13. (a) Διάκριση των τεσσάρων περιοχών στις «κανάτες» του είδους *Nepenthes alata* και (b) μεγέθυνση στο περιστόμιο και στο εσωτερικό της ολισθηρής ζώνης (Wang et al. 2020).

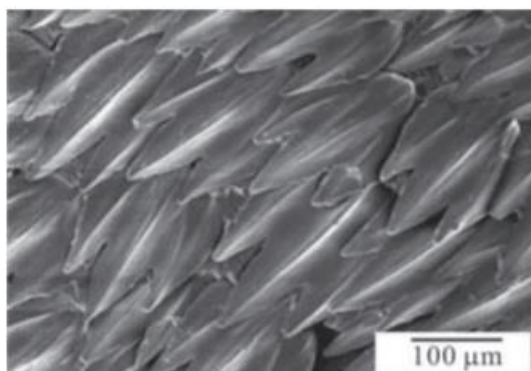
Το περιστόμιο των ιδιαίτερων αυτών δομών είναι υπερυδρόφιλο, με αποτέλεσμα οι σταγόνες νερού που πέφτουν πάνω του να δημιουργούν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα ένα πολύ ολισθηρό λεπτό στρώμα το οποίο προκαλεί την πτώση των εντόμων στο εσωτερικό του φύλλου (Bauer et al. 2008). Η διαβροχή των περιστομίων στο φυσικό περιβάλλον συμβαίνει είτε από την υγρασία και τη βροχή είτε από το νέκταρ που εκκρίνεται στην επιφάνειά τους από εκκριτικούς αδένες (Bohn & Federle 2004). Τα έντομα λοιπόν προσελκύονται από το νέκταρ αλλά φτάνοντας στην επιφάνεια του περιστομίου δεν μπορούν να συγκρατηθούν και γλιστρούν. Κρίσιμος φαίνεται να είναι σε αυτό το στάδιο ο ρόλος της ολισθηρής ζώνης. Μελέτες της ζώνης αυτής έχουν αποδείξει ότι η επιφάνειά της καλύπτεται από πυκνούς επιεφουμενιδιακούς κηρούς που την καθιστούν υπερυδρόφοβη αποκλείοντας την πιθανότητα να κρατηθούν τα έντομα σε κάποιο σημείο της. Δεδομένης της απουσίας κάποιας σανίδας σωτηρίας, τα έντομα καταλήγουν στο πεπτικό υγρό που είναι πλούσιο σε πεπτικά ένζυμα (Gorb et al. 2005). Τέλος, το κάλυμμα συμβάλλει στην αποτροπή της υπερχειλίσης του εσωτερικού χώρου από το νερό της βροχής.

Υπό τη δράση της εξέλιξης, ορισμένα φύλλα των *Nepenthes* διαφοροποιήθηκαν δημιουργώντας τις «κανάτες» που περιγράφηκαν και έδωσαν τη δυνατότητα επιβίωσης των φυτών αυτών σε συνθήκες έλλειψης θρεπτικών συστατικών. Το άζωτο που παράγεται από τη σύλληψη και πέψη των αρθροπόδων συμβάλλει σημαντικά

στην επιβίωση και ανάπτυξη του φυτικού οργανισμού (Bohn & Federle 2004). Η φύση, συνδυάζοντας δύο διαφορετικά μοντέλα διαβρεξιμότητας κατάφερε να επιτύχει τη μέγιστη αποτελεσματικότητα των δομών σύλληψης της λείας στα άτομα του γένους *Nepenthes*.

4.5 Οι καρχαρίες

Οι καρχαρίες είναι μια κατηγορία υδρόβιων ζώων που έχουν την ικανότητα να κινούνται στο νερό με μεγάλες ταχύτητες και μικρή αντίσταση παρά το μεγάλο μέγεθός τους. Η ικανότητά τους αυτή αποδίδεται στον τρόπο που δομείται η επιδερμίδα τους. Μελέτες του δέρματος των καρχαριών απέδειξαν ότι η επιφάνειά του αποτελείται από προεξοχές σχήματος V που μοιάζουν με δόντια (εικόνα 14) που αποτελούνται από ένα εξωτερικό στρώμα σμάλτου και ένα εσωτερικό στρώμα σε μορφή οστού και σχηματίζουν τρισδιάστατες δομές. Οι δομές αυτές δημιουργούν αυλακώσεις οι οποίες ευθυγραμμίζονται παράλληλα με τη διεύθυνση των εκάστοτε ρευμάτων νερού καθιστώντας αποτελεσματικότερη και ενεργειακά λιγότερο δαπανηρή την κίνηση μέσα στο νερό. Το ακριβές σχήμα των προεξοχών μπορεί να διαφέρει από άτομο σε άτομο και παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των ειδών (Wen et al. 2014).



Εικόνα 14. Οι τρισδιάστατες δομές που παρομοιάζονται με «δόντια» στη επιφάνεια του δέρματος του καρχαρία (Zhang et al. 2011).

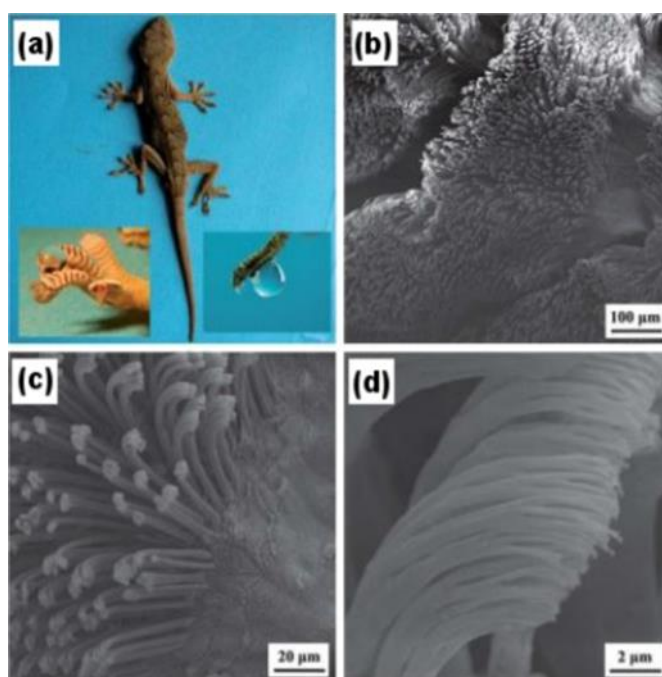
Έχει αποδειχθεί πως η συγκεκριμένη δόμηση του δέρματος των καρχαριών ελαττώνει την αντίσταση κατά 5-10 % ενώ ταυτόχρονα αποτρέπει την προσκόλληση σωματιδίων ή μικροοργανισμών στην επιφάνειά του (Bechert et al. 2000).

4.6 Οι σαύρες του γένους *Gecko*

Οι σαύρες *Gecko* έχουν μήκος σώματος από 1,6 έως και 60 cm και συναντώνται σε θερμά κλίματα ανά τον κόσμο. Οι σαύρες αυτές έχουν την ικανότητα να προσκολλώνται για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε κάθετες αλλά και σε ανεστραμμένες επιφάνειες παρόλο που το σώμα τους έχει σχετικά υψηλή μάζα της τάξης των 0,2-200 g. Φυσικά τα ζώα προσκολλώνται αντιστρεπτά στις επιφάνειες

έχοντας την ικανότητα αποκόλλησης και μετακίνησης όποτε αυτή είναι επιθυμητή (Russel et al. 2019). Η συγκεκριμένη ιδιότητα συναντάται συχνά με τον όρο «έξυπνη προσκόλληση» (“smart adhesion”) και οι *Gecko* είναι τα μεγαλύτερα ζώα στα οποία αυτή εμφανίζεται.

Αναλύσεις στα πόδια των σαυρών έχουν αποδείξει μια ιεραρχική δόμηση. Υπεύθυνες για το φαινόμενο της αντιστρεπτής προσκόλλησης φαίνεται να είναι κάποιες λεπτές κυρτές τρίχες που ονομάζονται “setae” και έχουν μήκος 20-70μm και διάμετρο 2-7μm. Κύριο συστατικό τους είναι η β-κερατίνη ενώ περιέχουν και α-κερατίνη σε μικρότερο ποσοστό. Κάθε τέτοια τρίχα διακλαδίζεται στο άκρο της σε 100-1000 μικρότερες οι οποίες ονομάζονται “spatulae” (πεπλατυσμένες απολήξεις) και έχουν διάμετρο 100-200 nm (εικόνα 15). Με γωνίες επαφής της τάξης των 160° οι τρίχες “setae” εμφανίζουν υδρόφοβες ιδιότητες (Garg et al. 2017).

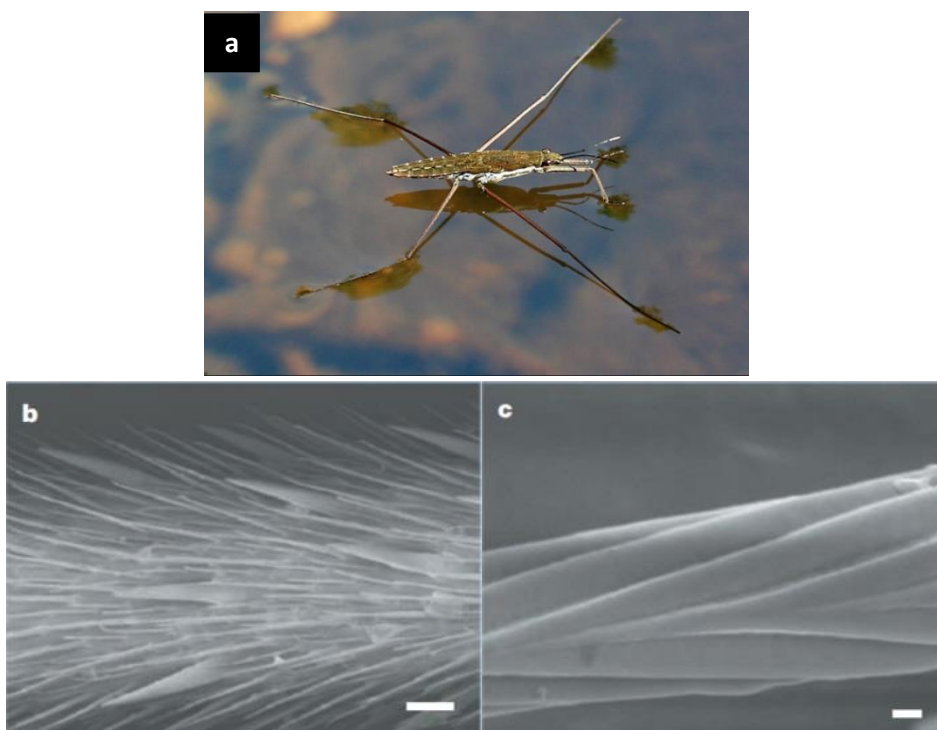


Εικόνα 15. (a) Μια σαύρα του γένους *Gecko*. Κάτω αριστερά φαίνεται η υδροφοβικότητα των ποδιών της ενώ δεξιά η προσκόλληση, (b) το πόδι της σαύρας σε μικροσκόπιο SEM με μικρή μεγέθυνση, ενώ σε μεγαλύτερη μεγέθυνση φαίνονται οι τρίχες setae (c) και spatulae (d), (Garg et al. 2017).

Το φαινόμενο του γένους *Gecko* έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές οι οποίοι έχουν επιχειρήσει να εξηγήσουν τον ακριβή μηχανισμό προσκόλλησης των σαυρών πάνω στις επιφάνειες. Έτσι, με την πάροδο των χρόνων είχαν προταθεί μηχανισμοί όπως η έκκριση κάποιας κολλοειδούς ουσίας, ο στατικός ηλεκτρισμός ή η επιφανειακή τάση. Ο Autumn (2007) απέδειξε ότι υπεύθυνες για την προσκόλληση πάνω σε οποιοδήποτε είδους επιφάνειες είναι αποκλειστικά οι δυνάμεις van der Waals.

4.7 Τα έντομα της οικογένειας Gerridae

Τα μέλη της οικογένειας Gerridae ανήκουν στα Ημίπτερα και είναι έντομα τα οποία ζουν στην επιφάνεια λιμνών και αργά ρέοντων υδάτων. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους είναι η ικανότητά τους να περπατούν και να στέκονται σε υδάτινες επιφάνειες χωρίς να βυθίζονται αλλά ούτε και να βρέχονται. Η ιδιότητα αυτή οφείλει την παρουσία της στην ιεραρχική δόμηση που εμφανίζουν οι τρίχες στα πόδια των εντόμων. Συγκεκριμένα, οι Gao & Jiang (2004) απέδειξαν ότι σε κάθε πόδι υπάρχουν μικρές τρίχες “setae” (όπως αυτές που περιγράφηκαν στην παραπάνω παράγραφο) με μήκος περίπου 50μm. Σε κάθε μια από αυτές τις τρίχες υπάρχουν αυλακώσεις σε επίπεδο νανοκλίμακας. Δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο μια ιεραρχική επιφανειακή δομή, η οποία με γωνία επαφής 167° απωθεί το νερό και επιτρέπει στα έντομα να κινούνται πάνω σε αυτό.



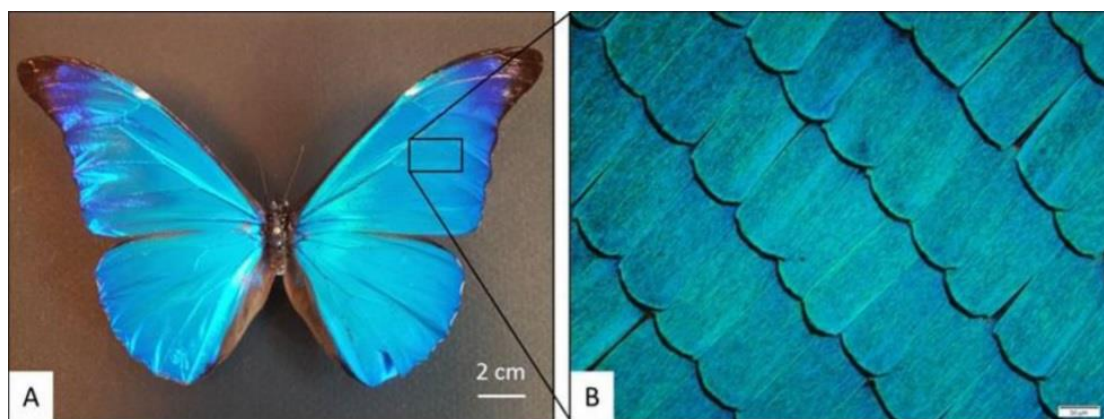
Εικόνα 16. (a) Ένα άτομο *Aquarius remigis* περπατά πάνω στο νερό. Εικόνες των ποδιών σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης αποκαλύπτουν τις τρίχες “setae” (b) αλλά και τις νανο- αυλακώσεις σε καθεμιά από αυτές (c), (Gao & Jiang 2004).

Σε πολλά από τα είδη της οικογένειας που έχουν μελετηθεί έχουν βρεθεί επίσης τρίχες σε ολόκληρη την επιφάνεια του σώματος των εντόμων. Πιστεύεται ότι ο λειτουργικός τους ρόλος είναι η προστασία του σώματος από τη βροχή και την υγρασία οι οποίες θα μπορούσαν να το διαβρέξουν και να οδηγήσουν σε βύθιση του εντόμου (Mahadik et al. 2020).

4.8 Οι πεταλούδες του γένους *Morpho*

Στην παράγραφο 4.3 εισήχθη η έννοια του δομικού χρώματος, το οποίο είναι αποτέλεσμα της παρουσίας μικρο- και νανοδομών πάνω σε ορισμένες επιφάνειες που συναντώνται στη φύση. Οι πεταλούδες του γένους *Morpho* είναι ίσως το πιο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα δομικού χρωματισμού μεταξύ των εντόμων. Το γένος περιλαμβάνει παραπάνω από 29 είδη. Τα αρσενικά άτομα ορισμένων ειδών παρουσιάζουν έναν εντυπωσιακό έντονο μπλε χρωματισμό στα φτερά τους.

Αν και η δομή της επιφάνειας των φτερών των μπλε πεταλούδων εμφανίζει διαφορές μεταξύ των ειδών, ισχύει σε γενικές γραμμές η κοινή αρχή της ιεραρχικής δόμησης. Η άνω επιφάνεια των φτερών καλύπτεται από λέπια καθένα από τα οποία αποτελείται από μια πληθώρα πολύ πυκνά διατεταγμένων νανοδομών. Τα λέπια κατασκευάζονται από χιτίνη που παράγεται και διαφοροποιείται από κύτταρα που βρίσκονται στην επιφάνεια των φτερών (Niu et al. 2015). Η χωρική κατανομή των νανοδομών πάνω στα λέπια είναι άτακτη καθώς διατάσσονται τόσο στον κάθετο όσο και στον οριζόντιο άξονα. Η διάταξη αυτή υποδεικνύει ότι τα λέπια είναι μεμονωμένα και δεν λειτουργούν ως μια ενιαία επιφάνεια (Chung et al. 2012). Ο παραγόμενος κυανός ή μπλε χρωματισμός είναι αποτέλεσμα της συμβολής του φωτός που προσπίπτει στην επιφάνεια των νανοδομών με το φως που ανακλάται από αυτές.



Εικόνα 17. Η ραχιαία επιφάνεια των φτερών ενός αρσενικού ατόμου του είδους *Morpho rhetenor* (A) μακροσκοπικά και (B) όπως φαίνεται σε οπτικό μικροσκόπιο (κλίμακα μεγέθυνσης 40X), (Thomé et al. 2020).

Ο συγκεκριμένος χρωματισμός έχει σημαντικούς βιολογικούς ρόλους, καθώς σε περιόδους αναπαραγωγής γίνεται ακόμη πιο έντονος ώστε να προσελκύονται θηλυκά άτομα του ίδιου είδους. Επίσης, κατά τη διάρκεια της πτήσης των πεταλούδων αλλάζει διαρκώς η γωνία πρόσπτωσης του φωτός με συνέπεια τη συνεχή μεταβολή του χρώματος των φτερών. Οι πεταλούδες δίνουν έτσι την εντύπωση ότι χάνονται και επανεμφανίζονται παραπλανώντας τους θηρευτές τους (Niu et al. 2015).

5. Η Βιομημητική στην πράξη

Παρατηρώντας τις δομές και τις λειτουργίες που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, πολλοί ερευνητές οδηγήθηκαν στην κατασκευή καινοτόμων υλικών, τα οποία μιμούνται τη φύση. Τέτοιου είδους κατασκευές απαιτούν φυσικά τη συνεργασία πολλών διαφορετικών επιστημόνων που κατανοούν συλλογικά όλο το θεωρητικό υπόβαθρο που βρίσκεται πίσω από κάθε νέα εφεύρεση.

5.1 Η ιστορία του Velcro

Το πρώτο ευρέως διαδεδομένο αντικείμενο που δημιουργήθηκε με έμπνευση από τη φύση χρονολογείται στο 1941 και δεν είναι άλλο από το Velcro, γνωστό στην καθομιλουμένη και ως «χριτς-χρατς». Σύμφωνα με την ιστορία, καθώς ο Ελβετός George de Mestral επέστρεφε στο σπίτι του ύστερα από μια βόλτα με τον σκύλο του στα χωράφια παρατήρησε ότι τόσο στο παντελόνι του όσο και στο τρίχωμα του σκύλου είχαν κολλήσει σπέρματα του φυτού *Arctium lappa* (κοινώς κολλιτσίδα). Παρακινούμενος από την περιέργεια για το συμβάν, ο de Mestral αποφάσισε να εξετάσει τα σπέρματα κάτω από το μικροσκόπιο. Αυτό που είδε ήταν χιλιάδες δομές στην επιφάνεια οι οποίες έμοιαζαν με γάντζους δίνοντας την ικανότητα στις φυτικές αυτές δομές να προσκολλώνται σε σχεδόν όλα τα υφάσματα (Eadie & Ghosh 2011). Σκέφτηκε λοιπόν ότι θα μπορούσε να κατασκευάσει ένα νέο είδος ένωσης υφασμάτων που θα αντικαθιστούσε τα κλασσικά κουμπιά και φερμουάρ. Έφτιαξε έτσι ένα ύφασμα που έφερε τις δομές-γάντζους που είχε παρατηρήσει στο φυτό *Arctium* και ένα ακόμα που έφερε μικρές θηλιές. Όταν αυτά τα δύο κομμάτια έρχονταν σε επαφή οι δομές του πρώτου γαντζώνονταν ισχυρά στις θηλιές του δεύτερου προσφέροντας επαρκή πρόσδεση των δύο υφασμάτων. Το 1958 χορηγήθηκε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στον George de Mestral για την εφεύρεση του Velcro.

5.2 Βιομημητικές υπερυδροφοβες επιφάνειες

Ιδιαίτερα καινοτόμες είναι οι πρακτικές εφαρμογές που έχουν προκύψει από τη μελέτη των φαινομένου του λωτού και της *Salvinia*. Η υπερυδροφοβικότητα και ο αυτο-καθαρισμός είναι ευνοϊκά χαρακτηριστικά για πολλά είδη επιφανειών. Ο Patankar (2004) απέδειξε ότι οι τεχνητές επιφάνειες θα πρέπει να έχουν ιεραρχική δόμηση ώστε να μπορούν να αυτο-καθαρίζονται. Με βάση την αρχή αυτή κυκλοφορούν ολοένα και περισσότερες νέες εφευρέσεις που υπόσχονται να βελτιστοποιήσουν τις ιδιότητες των ήδη υπάρχοντων. Το 1999 εισήχθη στην αγορά η πρώτη υδροφοβή βαφή για προσόψεις κτιρίων ενώ σήμερα κυκλοφορεί με την εμπορική ονομασία Lotusan (Somasundaram & Kumaravel 2019). Οι συγκεκριμένες βαφές περιέχουν σωματίδια ελεγχόμενων μεγεθών που εξασφαλίζουν τη σωστή επιφανειακή δόμηση. Ύστερα από την εφαρμογή της βαφής ακολουθεί επίστρωση με διοξείδιο του τιτανίου που προσφέρει τον υδροφοβο χαρακτήρα. Με αυτόν τον τρόπο

οι προσόψεις των κτιρίων μπορούν να παραμένουν καθαρές και να διατηρούν το αρχικό τους χρώμα εμφανίζοντας σημαντικά λιγότερες φθορές.

Μια από τις καινοτομίες του φετινού έτους ήταν η κατασκευή ενός νέου, «έξυπνου» υλικού πρόσοψης κτιρίων το οποίο έχει την ικανότητα να αποκρίνεται στις εκάστοτε συνθήκες φωτισμού σε πραγματικό χρόνο. Η έμπνευση αντλήθηκε από τον τρόπο που τα δέντρα φιλτράρουν την ποσότητα του φωτός που περνά από το στρώμα των φύλλων στα κατώτερα επίπεδα. Αντίστοιχα, το νέο υλικό πρόσοψης αποτελείται από σωματίδια που μπορούν να μετακινούνται και να προσαρμόζουν τη δόμησή τους με αποτέλεσμα να φιλτράρεται το φως που αντανακλάται ή περνά μέσω των παραθύρων, διευκολύνοντας την καθημερινή ζωή των κατοίκων των αντίστοιχων κτιρίων (Hosseini et al. 2021).

Εξίσου χρήσιμη είναι και η κατασκευή υδρόφοβων τζαμιών και γυάλινων επιφανειών. Στα φανάρια πολλών γερμανικών αυτοκινητόδρομων έχουν τοποθετηθεί αυτο-καθαριζόμενοι γυάλινοι φακοί (Koch & Barthlott 2009) που αποτρέπουν την προσκόλληση των σωματιδίων σκόνης και καθιστούν τα χρώματα των φαναριών διαυγή. Ομοίως, η τοποθέτηση υδρόφοβων τζαμιών σε παράθυρα αλλά και ντουζιέρες συμβάλλουν στην απώθηση της σκόνης και των υδρατμών αντίστοιχα, διευκολύνοντας τον καθαρισμό τους. Έχει αποδειχθεί ακόμη ότι η επίστρωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων με υδρόφοβα υλικά οδηγεί σε αύξηση της αποτελεσματικότητάς τους, ιδίως σε περιβάλλοντα όπου οι σταγόνες υγρασίας που επικάθονται στις επιφάνειες παρεμποδίζουν την άρτια λειτουργία τους (Hwang et al. 2015).

Μιμούμενοι τα δομικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας των φύλλων του λωτού οι Stratakis et al. (2009) κατασκεύασαν τεχνητές υδρόφοβες επιφάνειες. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε περιλάμβανε την ακτινοβολήση μιας επιφάνειας πυριτίου με χρήση laser υπό ατμόσφαιρα αντιδραστικού αερίου και στη συνέχεια επίστρωση με ακυλοσιλάνιο. Οι επιφάνειες που προέκυψαν παρουσίαζαν γωνίες επαφής και υστέρησης σχεδόν ίσες με αυτές του λωτού εμφανίζοντας έτσι και την ιδιαίτερη ικανότητα απώθησης του νερού. Ένα χρόνο αργότερα, οι Stratakis et al. (2010) σχεδίασαν και ανέπτυξαν επιφάνειες οι οποίες άλλαζαν συμπεριφορά ως προς τη διαβροχή τους αποκρινόμενες σε ένα εξωτερικό ερέθισμα που ήταν η αλλαγή του pH. Έτσι, σε χαμηλές τιμές pH οι επιφάνειες ήταν υπερυδρόφιλες ενώ σε υψηλές τιμές pH ήταν υπερυδρόφοβες και αδιάβροχες.

Μια διαφορετική προσέγγιση έγινε από τους Natarajan et al. (2019) οι οποίοι κατάφεραν να δημιουργήσουν οικολογικές υδρόφοβες επιστρώσεις με τη χρήση του bagasse ως πηγή πυριτίου. Το bagasse είναι το υπόλειμμα που παραμένει μετά τη συμπίεση του ζαχαροκάλαμου για την παραγωγή ζάχαρης και η περιεκτικότητά του σε πυρίτιο ποικίλλει ανάλογα με το περιβάλλον και το έδαφος από το οποίο συλλέγεται το ζαχαροκάλαμο. Για την επίτευξη υψηλών γωνιών επαφής άνω των 150° και τη βελτιστοποίηση των υδρόφοβων ιδιοτήτων οι ερευνητές πρότειναν τη χρήση πολυμερών σιλοξανίων.

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί έμφαση στα πλεονεκτήματα που θα μπορούσαν να προσφέρουν η υπερυδροφοβικότητα και η παγίδευση του αέρα (φαινόμενο της *Salvinia*) σε αντικείμενα και δομές που βρίσκονται κάτω από το νερό. Συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός караβιών με υπερυδροφόβα εξωτερικά τοιχώματα δίνει τη δυνατότητα κίνησης στο νερό με μικρότερη αντίσταση. Ακόμη, τέτοιου είδους επιφάνειες συμβάλλουν στην αποτροπή της προσκόλλησης θαλάσσιων οργανισμών όπως τα φύκη και τα στρείδια στα τμήματα των πλοίων που παραμένουν μέσα στο νερό (Bhushan 2009).

5.3 Βιομιμητικές υπερυδροφιλες επιφάνειες

Από την άλλη πλευρά, οι υπερυδροφιλες επιφάνειες εμφανίζουν μια πλεονεκτική ιδιότητα η οποία απασχολεί τους ερευνητές για τις πιθανές μελλοντικές χρήσεις τους. Ειδικότερα, το νερό ή οποιοδήποτε άλλο υγρό έρχεται σε επαφή με τις υπερυδροφιλες επιφάνειες εξαπλώνεται ταχύτατα πάνω σε αυτές με αποτέλεσμα να μπορεί να εξατμίζεται γρηγορότερα συγκριτικά με οποιαδήποτε άλλη επιφάνεια. Εξαιρετικά χρήσιμες φαίνεται να είναι οι εφαρμογές σε καθρέφτες και τζάμια μπάνιων τα οποία τείνουν να θολώνουν από τους υδρατμούς (Gould 2003). Το ίδιο ισχύει και για τα τζάμια των οχημάτων όπου οι υπερυδροφιλες επιφάνειες συμβάλλουν στην ταχύτερη εξάτμιση των σταγόνων της βροχής και της υγρασίας διασφαλίζοντας έτσι την βέλτιστη ορατότητα του οδηγού.

Ένα ακόμη φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί σε επιφάνειες με υπερυδροφιλες επιστρώσεις είναι η ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας. Σύμφωνα με τους Zhang et al. (2012) σε συνθήκες ελάχιστης ροής θερμότητας η μέγιστη θερμοκρασία των επιφανειών με τη συγκεκριμένη επίστρωση ήταν σημαντικά υψηλότερη σε σύγκριση με αυτή της αρχικής επιφάνειας. Προτείνεται λοιπόν ότι με τη ρύθμιση του πάχους των επιστρώσεων μπορεί να ελεγχθεί το ποσοστό της θερμότητας που διαπερνά την εκάστοτε επιφάνεια.

5.4 Η συμβολή της Βιομιμητικής στην κλωστοϋφαντουργία

Τα υφάσματα αποτελούν επίσης δείγματα κατάλληλα για μίμηση των φυσικών φαινομένων. Είναι εύκολα επεξεργάσιμα λόγω των μεγάλων επιφανειών που παρέχουν αλλά και του γεγονότος πως τα βασικά δομικά τους στοιχεία είναι οι ίνες. Έτσι, με τις απαραίτητες τροποποιήσεις στον τρόπο που δομούνται οι ίνες ενός υφάσματος μπορούν να αποδοθούν σε αυτό οι επιθυμητές ιδιότητες.

Οι Gao & McCarthy (2006) παρουσίασαν έναν τρόπο κατασκευής υδροφобων υφασμάτων βασιζόμενοι σε μια πατέντα που επινοήθηκε το 1945. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν δύο είδη υφασμάτων, ένα συμβατικό από πολυεστέρα που προμηθεύτηκαν από το εμπόριο και ένα ακόμη πολυεστερικό ύφασμα το οποίο αποτελούνταν από μικροΐνες. Η διαδικασία που ακολούθησαν ήταν απλή και περιλάμβανε τη βύθιση και επίστρωση των υφασμάτων με διάλυμα σιλικόνης.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα συμπεράναν ότι το ύφασμα με τις μικροΐνες παρουσίαζε υδρόφοβες ιδιότητες και μάλιστα ισχυρότερες από αυτές του λωτού. Υπεύθυνη για το φαινόμενο αυτό ήταν η τοπογραφία του υφάσματος η οποία αποτελούμενη από ίνες δύο μεγεθών (2μm και 50μm) μιμούταν την ιεραρχική δομή της επιφάνειας των φύλλων του λωτού. Με βάση την αρχή της επίστρωσης των ήδη υπάρχοντων επιφανειών με ειδικά διαλύματα για την προσθήκη νέων ιδιοτήτων οι Choi et al. (2009) πρότειναν την επίστρωση υφασμάτων με διάλυμα πολυεδρικών ολιγομερικών σιλοξανίων (polyhedral oligomeric silsesquioxane – POSS) και υπέδειξαν την ακτίνα των ινών και την μεταξύ τους απόσταση ως δύο κρίσιμες παραμέτρους για την επιτυχή εφαρμογή υδροφοβικότητας στα υφάσματα. Τα POSS αποτελούνται από πυρήνες πυριτίου-οξυγόνου ενώ στην κορυφή κάθε πυριτίου είναι προσδεμένη κάποια οργανική ομάδα (Λιακάκη-Σταυροπούλου 2019). Ωστόσο, τέτοιου είδους επιστρώσεις είναι οικονομικά δαπανηρές και συχνά είναι αδύνατη η πλήρης και ομοιογενής προσκόλλησή τους στα αντίστοιχα υποστρώματα (Meuler et al. 2011).

Τεχνολογική εφεύρεση-ορόσημο στην ιστορία της παραγωγής υφασμάτων αποτέλεσε το 2006 ο σχεδιασμός ενός ολόσωμου μαγιό από την εταιρεία Speedo το οποίο μιμούταν τη δομή του δέρματος του καρχαρία και κυκλοφόρησε στο εμπόριο με την ονομασία Fastskin. Το ύφασμα ήταν κατασκευασμένο από λίκρα, νάιλον και πολουρεθάνη ενώ ο τρόπος ύφανσης επιχειρούσε να προσφέρει στους κολυμβητές την ικανότητα κολύμβησης με μικρότερη αντίσταση και μεγαλύτερη ταχύτητα. Πράγματι, στους Ολυμπιακούς Αγώνες του 2008 όπου έγινε κατάρριψη πολλών ρεκόρ, έγινε αντιληπτό ότι τα συγκεκριμένα μαγιό προσέδιδαν στους αθλητές κάποια ευνοϊκά χαρακτηριστικά. Το συμβάν αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αλλαγή των κανονισμών που αφορούσαν τα επιτρεπόμενα αγωνιστικά μαγιό από τη Διεθνή Ομοσπονδία Κολύμβησης.

Σε πιο πρόσφατες έρευνες φαίνεται να είναι περισσότερο διαδεδομένη η χρήση πολυμερών πολυδιμέθυλο-σιλοξανίου (polydimethylsiloxane , PDMS). Οι Mazzon et al. (2019) χρησιμοποίησαν υγρό διάλυμα PDMS στο οποίο πρόσθεσαν υδατοδιαλυτή πολουρεθάνη και απέδειξαν ότι είναι δυνατή η παραγωγή υδρόφοβων υφασμάτων είτε με επίστρωση είτε με βύθιση αυτών μέσα στο διάλυμα.

Με την πάροδο των χρόνων προτείνονται ολοένα και περισσότερες μέθοδοι κατεργασίας ή και επίστρωσης υφασμάτων που δεν απορροφούν το νερό και τους λεκέδες υποσχόμενα μια ευκολότερη καθημερινότητα καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε είδη ρουχισμού, σε χαλιά αλλά και σε εξωτερικές επιφάνειες όπως οι τέντες.

5.5 Παραγωγή τεχνητών δομικών χρωματισμών

Στις παραγράφους 4.3 και 4.8 παρουσιάστηκαν δύο παραδείγματα δομικών χρωματισμών που συναντώνται στη φύση και είναι αποτέλεσμα της αυτό-

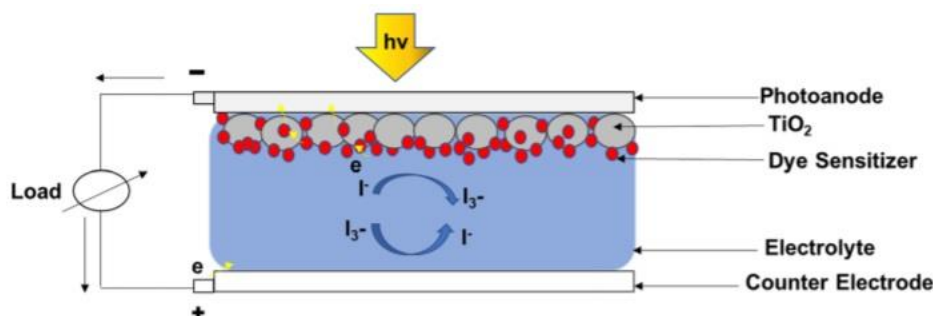
συναρμολόγησης των μικρο- και νανοδομών των φυσικών επιφανειών. Η ζωντάνια των δομικών χρωμάτων είναι αξιοθαύμαστη και έχει στρέψει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών στην κατασκευή επιφανειών με παρόμοια ιεραρχική δόμηση οι οποίες θα είναι ικανές να παράγουν εξίσου έντονο χρώμα με το φαινόμενο της συμβολής κυμάτων φωτός. Η κυρίαρχη μέθοδος παραγωγής τεχνητού δομικού χρώματος περιλαμβάνει τη χρήση νανοσωματιδίων πυριτίου (silica nanoparticles, SNPs). Οι Gao et al. (2017) αξιοποιώντας τις τεχνικές της καθίζησης και της αυτό-συναρμολόγησης των SNPs κατάφεραν να δημιουργήσουν δομές οι οποίες παράγαν χρώμα από ερυθρό έως μπλε, ανάλογα με το μέγεθος των SNPs. Παρόλο που έγιναν αισθητά ορισμένα προβλήματα στην εφαρμογή των συγκεκριμένων τεχνικών σε υφάσματα, οι ερευνητές πρότειναν ότι είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος που θα μπορούσε μελλοντικά να αντικαταστήσει τη χρήση των μη φιλικών προς το περιβάλλον χρωστικών για είδη ρουχισμού αλλά και να προσφέρει καινοτόμες ιδέες στον σχεδιασμό τους.

5.6 Κατασκευή ηλιακών κυψελίδων ευαισθητοποιημένων από φυτικές χρωστικές

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος στις σύγχρονες τεχνολογίες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μια νέα γενιά ηλιακών κυψελίδων που ονομάζονται «ευαισθητοποιημένες από χρωστική ηλιακές κυψελίδες» (Dye-Sensitized Solar Cells, DSSCs) υπόσχεται την αξιοποίηση του ορατού φάσματος φωτός στο έπακρο.

Κάθε τέτοια κυψελίδα αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

1. Ένα διαφανές αγωγίμο τμήμα υάλου το οποίο έχει μια επίστρωση ημιαγωγικών υλικών (συνήθως TiO_2). Το τμήμα αυτό αποτελεί την φωτοάνοδο,
2. Μόρια χρωστικής τα οποία προστίθενται πάνω στην φωτοάνοδο και απορροφούν στο ορατό φάσμα φωτός,
3. Έναν ηλεκτρολύτη που είναι ουσιαστικά ένα οξειδοαναγωγικό ζεύγος (π.χ I^-/I_3^- , Br^-/Br_2),
4. Ένα δεύτερο τμήμα διάφανου υάλου το οποίο επιστρώνεται με λευκόχρυσο ή γραφίτη και λειτουργεί ως κάθοδος ηλεκτρονίων.



Εικόνα 18. Σχηματική απεικόνιση της διάταξης και της αρχής λειτουργίας μιας κυψελίδας ευαισθητοποιημένης από χρωστική (James & Contractor 2018).

Η αρχή λειτουργίας των DSSCs είναι η εξής: καθώς το ηλιακό φως προσπίπτει στην επιφάνεια των κυψελίδων απορροφάται από τα μόρια της χρωστικής τα οποία διεγείρονται. Τα ηλεκτρόνια από τη διεγερμένη κατάσταση των μορίων χρωστικής μεταφέρονται στην αγώγιμη ζώνη του ημιαγωγού με ταυτόχρονη οξείδωση της χρωστικής. Στη συνέχεια περνούν στην αγώγιμη διαφανή ύαλο και μέσω της διαδρομής που διαγράφουν τα βέλη στην εικόνα 18 φτάνουν στην κάθοδο. Εκεί τα ιόντα Γ^{-3} μετατρέπονται σε Γ^{-} , τα οποία τελικά ανάγουν την οξειδωμένη μορφή της χρωστικής, οδηγώντας στην αναγέννησή της (Sharma et al. 2018, James & Contractor 2018).

Είναι προφανές ότι η λειτουργία των DSSCs είναι εμπνευσμένη από τη φωτοσύνθεση. Αντικείμενο μελέτης πολλών σύγχρονων ερευνών έχει αποτελέσει η πιθανή αντικατάσταση των συνθετικών χρωστικών με φυσικές. Οι Omar et al. (2020) παρουσίασαν μια ολοκληρωμένη μελέτη της απόδοσης των χρωστικών ορισμένων φυτικών οργανισμών ως ευαίσθητοποιητές στα DSSCs. Τα πειράματα έδειξαν ότι μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα παρείχαν οι ανθοκυανίνες που είχαν εκχυλιστεί από το κόκκινο λάχανο. Προς το παρόν, η χρήση των φυσικών χρωστικών παραμένει αδύνατη καθώς οι τεχνητές τείνουν να υπερισχύουν από άποψη αποδοτικότητας. Ωστόσο, δεν σταματούν οι προσπάθειες βελτιστοποίησης της συνολικής διάταξης με στόχο να επιτευχθεί η άρτια λειτουργία της με χρήση φυσικών χρωστικών, καθώς αυτές αποτελούν μια οικονομική και εύκολη λύση, απολύτως φιλική προς το περιβάλλον.

5.7 Η Βιομιμητική στην Ελλάδα

Μια ελληνική καινοτομία αποτέλεσε η ίδρυση της spin-off εταιρείας «Biomimetic» το 2020 με επικεφαλής τον Εμμανουήλ Στρατάκη. Η εταιρεία ανήκει στο Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ) με έδρα το Ηράκλειο της Κρήτης. Συνιδρυτές είναι επίσης οι ερευνητές του ΙΤΕ Ευάγγελος Σκουλάς, Ανδρέας Λεμονής, Αντώνης Παπαδόπουλος και Αλέξανδρος Μιμίδης.

Αντικείμενο μελέτης των παραπάνω επιστημόνων είναι η κατασκευή αντι-ανακλαστικών επιφανειών και οθονών με τη χρήση διαφόρων τεχνικών λέιζερ που παρέχονται από το Ινστιτούτο Ηλεκτρονικής Δομής και Λείζερ (ΙΗΔΛ) του ΙΤΕ. Έμπνευση για την κατασκευή αυτή αποτελούν τα φτερά των τζιτζικιών και ορισμένων ειδών πεταλούδων, τα οποία φέρουν νανοδομές με αντι-ανακλαστικές ιδιότητες. Η μίμηση των δομών αυτών υπόσχεται τον σχεδιασμό γυαλιών και οθονών που δεν θα ανακλούν το φως με αποτέλεσμα να καθίσταται ευκολότερη η χρήση τους κατά τη διάρκεια της ημέρας και κάτω από συνθήκες έντονου ηλιακού φωτός. Η εφαρμογή τους σε οθόνες ηλεκτρονικών ειδών, ηλιακούς συλλέκτες καθώς και σε εξειδικευμένα οπτικά συστήματα αναμένεται να βελτιστοποιήσει τη χρήση τους.

ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ ΓΙΑ ΤΗ ΒΙΟΜΙΜΗΤΙΚΗ ΦΥΤΩΝ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας κατασκευάστηκε ένα ερωτηματολόγιο που αφορούσε τη Βιομιμητική Φυτών. Το ερωτηματολόγιο περιείχε συνολικά 7 ερωτήσεις, εκ των οποίων οι 6 ήταν κλειστού τύπου και η τελευταία ανοιχτού, δίνοντας στους ερωτώμενους την πλήρη ελευθερία απάντησης. Αυτοί που κλήθηκαν να απαντήσουν στις ερωτήσεις ήταν οι φοιτητές που παρακολουθούσαν τις διαλέξεις του μαθήματος της Φυσιολογίας Φυτών στο τμήμα Βιολογίας κατά το ακαδημαϊκό έτος 2019-2020. Σημειώνεται ότι η Φυσιολογία Φυτών είναι υποχρεωτικό μάθημα και ανήκει στο τρίτο εξάμηνο του βασικού κύκλου σπουδών. Συνεπώς, η πλειονότητα των φοιτητών που απάντησαν στο ερωτηματολόγιο βρίσκονταν στο δεύτερο έτος σπουδών τους, ενώ υπήρξαν φυσικά και κάποιοι φοιτητές μεγαλύτερων ετών.

Σκοπός της διαδικασίας αυτής ήταν να μελετηθεί και να αξιολογηθεί η οικειότητα των φοιτητών με τον καινοτόμο κλάδο της Βιομιμητικής αλλά και να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με το ενδιαφέρον που μπορεί οι ίδιοι φοιτητές να εκδηλώνουν τόσο για τον κλάδο όσο και για συγκεκριμένα φυτικά είδη.

Παρακάτω δίνεται η ακριβής δομή του ερωτηματολογίου που τυπώθηκε και μοιράστηκε στους φοιτητές:

ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ ΓΙΑ ΤΗ ΒΙΟΜΙΜΗΤΙΚΗ ΦΥΤΩΝ
Φύλο
<input type="checkbox"/> ΑΓΟΡΙ
<input type="checkbox"/> ΚΟΡΙΤΣΙ
1. Γνωρίζεις τι είναι η Βιομιμητική Φυτών;
<input type="checkbox"/> ΝΑΙ
<input type="checkbox"/> ΟΧΙ
2. Γνωρίζεις αν κατασκευάζονται υλικά τα οποία είναι εμπνευσμένα από τη φύση;
<input type="checkbox"/> ΝΑΙ
<input type="checkbox"/> ΟΧΙ

**3. Ποια φυτικά τμήματα αποτελούν έμπνευση για την ανάπτυξη της Βιομημητικής;
(Μπορείς να επιλέξεις περισσότερες από μία απαντήσεις)**

- ΦΥΛΛΑ
- ΒΛΑΣΤΟΙ
- ΑΝΘΗ
- ΡΙΖΕΣ

**4. Σε ποιες περιοχές πραγματοποιούνται εκτεταμένες έρευνες στον κλάδο της Βιομημητικής;
(Μπορείς να επιλέξεις περισσότερες από μία απαντήσεις)**

- ΕΥΡΩΠΗ
- ΑΣΙΑ
- ΑΦΡΙΚΗ
- ΗΠΑ

5. Θα σε ενδιέφερε να μάθεις περισσότερα για τη Βιομημητική Φυτών;

- ΝΑΙ
- ΟΧΙ

6. Θα σε ενδιέφερε να μάθεις αν έχει ερευνηθεί από τη Βιομημητική κάποιο συγκεκριμένο φυτό;

- ΝΑΙ
- ΟΧΙ

7. Αν απάντησες ναι ποιο είναι αυτό το φυτό;

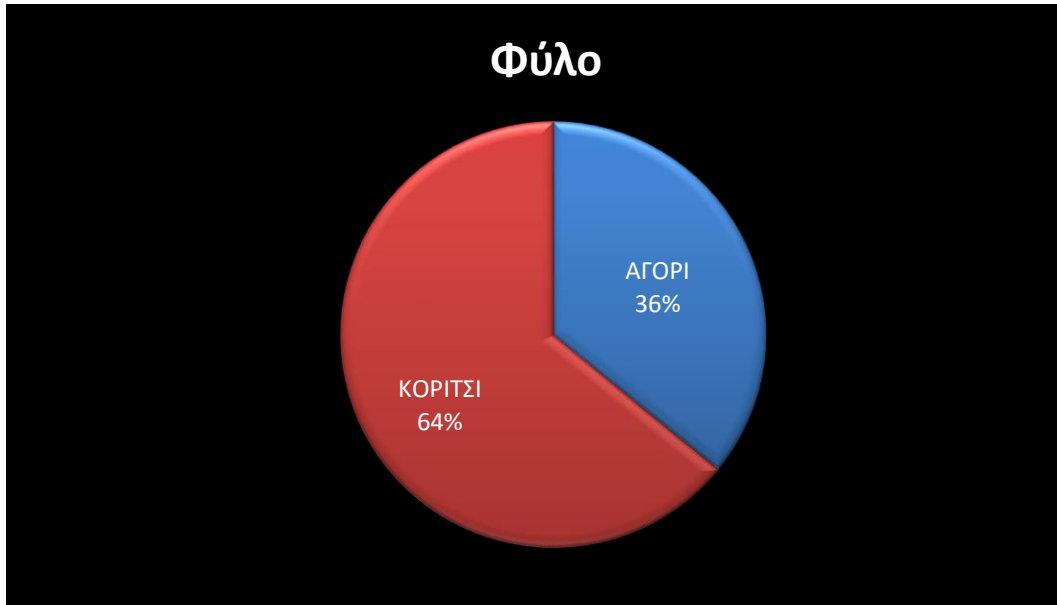
Τα απαντημένα ερωτηματολόγια συλλέχθηκαν και οι απαντήσεις συγκεντρώθηκαν σε ένα αρχείο Excel, όπως φαίνεται στην επόμενη σελίδα:

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΦΥΤΩΝ

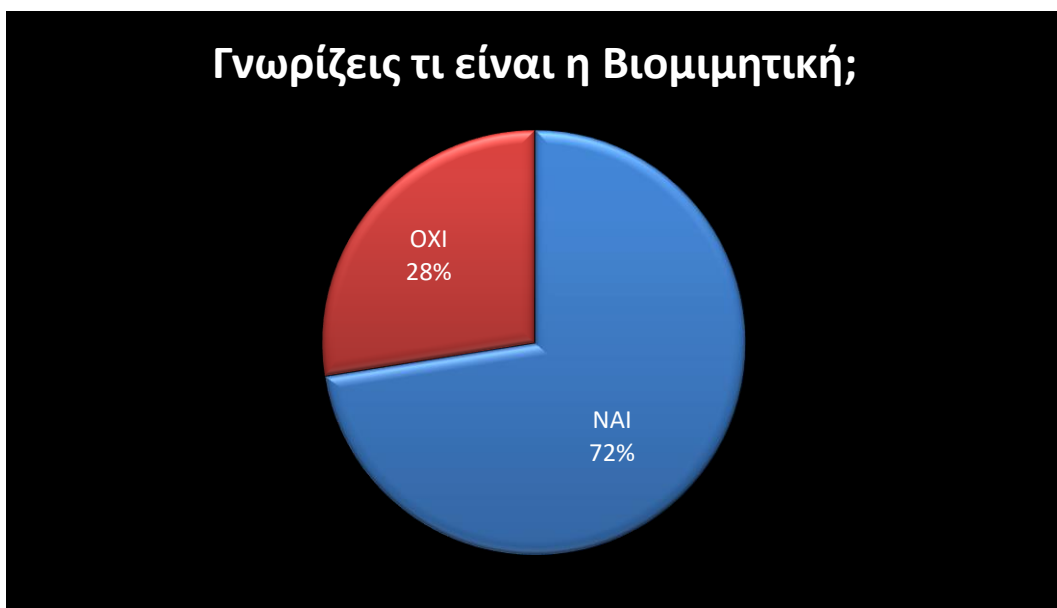
		Φύλο										ΠΑΗΘΟΣ	ΠΟΣΟΤΟ %	
ΑΤΟΡΙ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	14	35,9
ΚΟΡΤΕΙ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	25	64,1
1. Γνωρίζετε τι είναι η Βιομηχανική:														
ΝΑΙ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	29	72,5
ΟΧΙ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	11	27,5
2. Γνωρίζετε αν κατασκευάζονται υλικά τα οποία είναι εμβασματικά από τη φύση:														
ΝΑΙ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	39	97,5
ΟΧΙ													1	2,5
3. Ποια φυσικά τμήματα αποσπώνται έμμεσα για την ανάπτυξη της Βιομηχανικής:														
ΦΥΛΛΑ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	30	31,9
ΒΛΑΣΤΟΙ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	24	25,5
ΑΝΘΗ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	20	21,3
ΡΙΖΕΣ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	20	21,3
4. Σε ποιες περιπτώσεις η παραγωγή τους είναι εκτεταμένες έρευνες στον κλάδο της Βιομηχανικής:														
ΕΡΩΠΗ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	23	36,5
ΑΣΙΑ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	11	17,5
ΑΦΡΙΚΗ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1	1,6
ΗΠΑ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	28	44,4
5. Θα σε ενδιέφερε να μάθει περισσότερα για τη Βιομηχανική Φυτών:														
ΝΑΙ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	36	92,3
ΟΧΙ													3	7,7
6. Θα σε ενδιέφερε να μάθει αν έχει ερευνηθεί από τη Βιομηχανική κάποιο συγκεκριμένο φυτό:														
ΝΑΙ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	22	56,4
ΟΧΙ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	17	43,6
7. Αν απάντησε ναι ποιο είναι αυτό το φυτό:														
ΟΡΥΖΙΑ	X	X											3	13,6
ΚΑΚΤΟΣ	X	X											2	9,1
ΔΡΥΣ	X												1	4,5
ΕΛΙΑ		X											8	36,4
ΟΠΟΙΟΔΗΠΟΤΕ			X										2	9,1
ΚΑΡΑΜΑ			X	X									1	4,5
ΖΑΡΚΟΦΑΤΟ			X										1	4,5
ΓΛΑΙΕΜΙ			X										1	4,5
ΝΥΧΤΟΔΟΥΝΔΥΑΟ			X										1	4,5
ΑΙΤΟΣ			X										1	4,5
ΜΠΑΜΠΟΥ			X										1	4,5

* Οι κελιά περιούχες υποδεικνύουν ερωτήσεις που δεν απαντήθηκαν από τον αντίστοιχο φοιτητή.

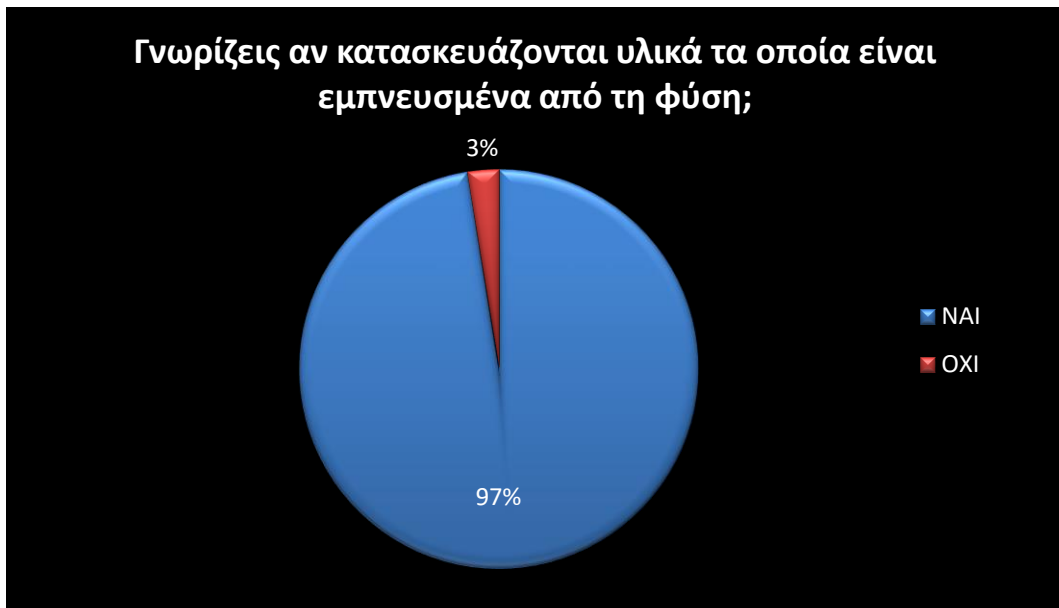
Στη συνέχεια τα αποτελέσματα απεικονίστηκαν σε γραφήματα-πίτες ώστε να είναι πιο ευδιάκριτα και ευκολότερα συγκρίσιμα τα ποσοστά. Τα γραφήματα παρουσιάζονται παρακάτω με την ίδια σειρά που έγιναν και οι ερωτήσεις:



Γράφημα 1. Τα ποσοστιαία αποτελέσματα για το φύλο: το 64% των φοιτητών που απάντησαν το ερωτηματολόγιο ήταν κορίτσια ενώ το 36% ήταν αγόρια.



Γράφημα 2. Στην ερώτηση «Γνωρίζεις τι είναι η Βιομημητική;» το 72% των φοιτητών απάντησε ναι ενώ το 28% απάντησε όχι.

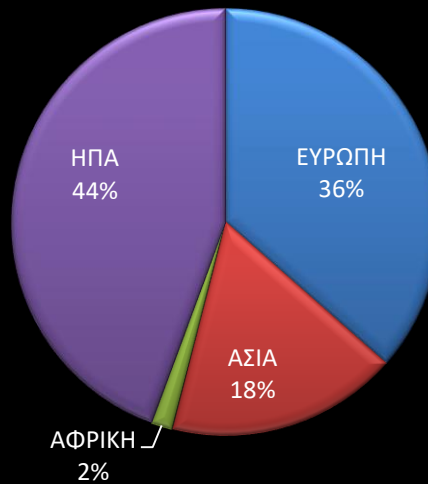


Γράφημα 3. Στην ερώτηση «Γνωρίζεις αν κατασκευάζονται υλικά τα οποία είναι εμπνευσμένα από τη φύση;» το 97% των φοιτητών απάντησε ναι και μόνο το 3% απάντησε όχι.



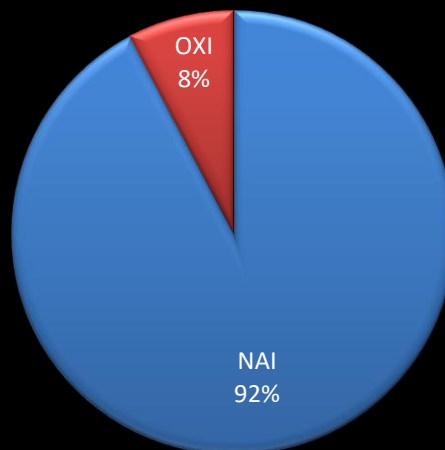
Γράφημα 4. Στην ερώτηση «Ποιά φυτικά τμήματα αποτελούν έμπνευση για την ανάπτυξη της Βιομιμητικής;» υπερίσχυσαν τα φύλλα με ποσοστό 32%, ακολούθησαν οι βλαστοί με 26% και τέλος οι ρίζες και τα άνθη με ποσοστό 21% το καθένα.

Σε ποιες περιοχές πραγματοποιούνται εκτεταμένες έρευνες στον κλάδο της Βιομηχανικής;



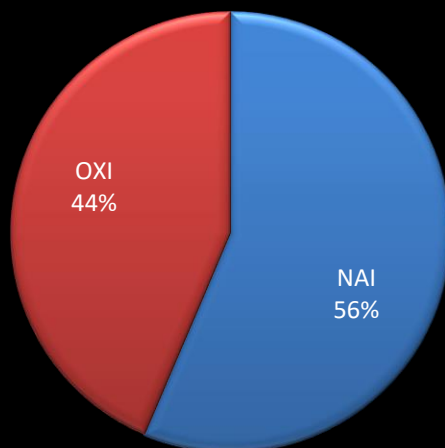
Γράφημα 5. Οι ΗΠΑ με 44% ήταν η πρώτη απάντηση στην ερώτηση «Σε ποιές περιοχές πραγματοποιούνται εκτεταμένες έρευνες στον κλάδο της Βιομηχανικής;» ενώ ακολούθησαν η Ευρώπη με 36%, η Ασία με 18% και τέλος η Αφρική με 2%.

Θα σε ενδιέφερε να μάθεις περισσότερα για τη Βιομηχανική Φυτών;



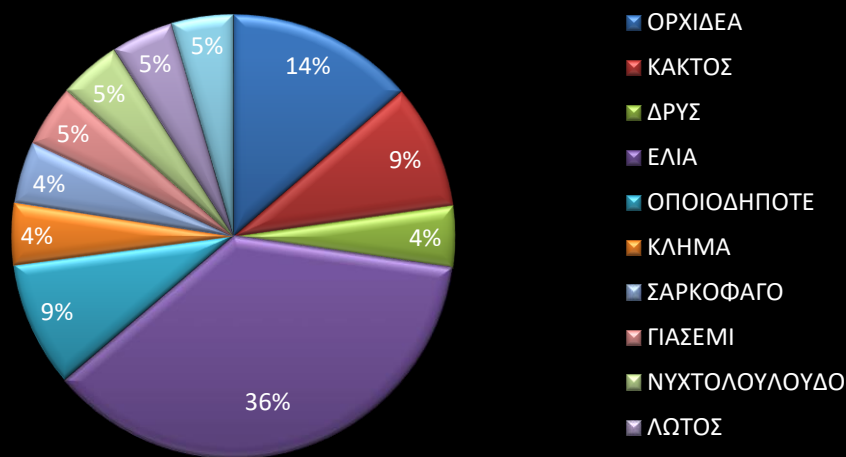
Γράφημα 6. Στην ερώτηση «Θα σε ενδιέφερε να μάθεις περισσότερα για τη Βιομηχανική Φυτών;» το 92% των φοιτητών απάντησε ναι ενώ το 8% απάντησε όχι.

Θα σε ενδιέφερε να μάθεις αν έχει ερευνηθεί από τη Βιομημητική κάποιο συγκεκριμένο φυτό;



Γράφημα 7. Το 56% των φοιτητών απάντησε θετικά στην ερώτηση «Θα σε ενδιέφερε να μάθεις αν έχει ερευνηθεί από τη Βιομημητική κάποιο συγκεκριμένο φυτό;» ενώ το υπόλοιπο 44% απάντησε αρνητικά.

Αν απάντησες ναι ποιο είναι αυτό το φυτό;



Γράφημα 8. Στην ερώτηση ανοικτού τύπου «Αν απάντησες ναι ποιο είναι αυτό το φυτό;» κυριάρχησε η ελιά με ποσοστό 36% και στη συνέχεια η ορχιδέα με ποσοστό 14%. Με ποσοστά 9% ακολούθησαν ο κάκτος και η απάντηση «οποιοδήποτε φυτό». Άλλες απαντήσεις με ποσοστά 4-5% περιλάμβαναν τη δρυ, το κλήμα, τα σαρκοφάγα φυτά, το γιασεμί, το νυχτολούλουδο, τον λωτό καθώς και το μπαμπού.

Σχολιασμός των αποτελεσμάτων:

Οι απαντήσεις των δευτεροετών φοιτητών στις ερωτήσεις που τους μοιράστηκαν δίνουν την γενική εικόνα πως η μεγάλη πλειοψηφία γνωρίζει το αντικείμενο που μελετάται από τη Βιομημητική. Το συμπέρασμα αυτό είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικό αν λάβει κανείς υπόψη το γεγονός ότι οι συγκεκριμένοι φοιτητές βρίσκονται ακόμη στις αρχές των σπουδών τους και δεν έχουν διδαχθεί πολλά από τα υποχρεωτικά τους μαθήματα. Φαίνεται λοιπόν ότι πολλοί από αυτούς τείνουν να ενημερώνονται για τις νέες εξελίξεις στην επιστήμη της Βιολογίας παίρνοντας ίσως έναυσμα από πιθανές συζητήσεις κατά τη διάρκεια των διαλέξεων.

Σχεδόν όλοι οι ερωτηθέντες φοιτητές (97%) δήλωσαν ότι γνωρίζουν πως υπάρχουν φυτά τα οποία εμπνέουν την ανθρωπότητα για κατασκευή νέων υλικών. Ταυτόχρονα, ανέδειξαν τα φύλλα ως τα κύρια φυτικά τμήματα στα οποία βασίζονται οι ιδέες της Βιομημητικής Φυτών. Εξάγεται η υπόθεση ότι πιθανόν έχουν ενημερωθεί ή ακούσει για το φαινόμενο του λωτού ή και το φαινόμενο της *Salvinia* καθώς αυτά αποτελούν τα δημοφιλέστερα από τα παραδείγματα που αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.

Αναφορικά με την ερώτηση για τις περιοχές του κόσμου όπου πραγματοποιούνται έρευνες για τον κλάδο της Βιομημητικής πρέπει να ειπωθεί ότι τόσο η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία όσο και οι διαδικτυακοί σύνδεσμοι που συνέβαλαν στην κατανόηση των γενικότερων αρχών του κλάδου προέρχονται από την Ευρώπη (με κυρίαρχη τη Γερμανία), την Ασία (ιδίως Κίνα και Χονγκ Κονγκ) αλλά και από τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Συνεπώς, οι απαντήσεις στην αντίστοιχη ερώτηση κρίνονται ορθές και εύστοχες με μοναδική παρατήρηση το μικρό ποσοστό που δόθηκε στην Ασία (18%) το οποίο στην πραγματικότητα είναι μεγαλύτερο.

Η προτελευταία ερώτηση δίχασε τους φοιτητές καθώς μόνο λίγοι παραπάνω από τους μισούς εξέφρασαν ενδιαφέρον για την πιθανή μελέτη συγκεκριμένων φυτικών ειδών από τη Βιομημητική. Το γεγονός ότι πρώτη στη λίστα των ειδών αυτών βρίσκεται η ελιά δεν προκαλεί έκπληξη αν αναλογιστεί κανείς πως το ερωτηματολόγιο απευθύνθηκε σε ανθρώπους που ζουν στην Ελλάδα. Η ελιά αποτελεί ίσως το πιο αντιπροσωπευτικό μεσογειακό δέντρο και δεν έχει πάψει να απασχολεί την επιστημονική κοινότητα τόσο για τις εξαιρετικές δομές των φύλλων της όσο και για τις πιθανές ιατρικές χρήσεις παράγωγών της, όπως οι πολυφαινόλες. Δεν είναι λοιπόν τυχαία η θέση που έλαβε το φυτό αυτό. Άλλα φυτά όπως οι ορχιδέες προτάθηκαν ίσως λόγω των εντυπωσιακών ανθέων και χρωματισμών τους.

Ο αριθμός των φοιτητών που συμμετείχαν είναι ίσως μικρός για να εξάγουμε βέβαια συμπεράσματα, παρουσιάζεται όμως μια γενική εντύπωση. Ταυτόχρονα, πέραν της χρησιμότητάς του για την παρούσα εργασία, το ερωτηματολόγιο αυτό μπορεί να έδωσε το κίνητρο σε ορισμένους από τους ερωτηθέντες ώστε να αναζητήσουν, να

διαβάσουν και να συζητήσουν για την επιστήμη της Βιομιμητικής, η οποία μπορεί να τους φανεί χρήσιμη στην μετέπειτα πορεία τους ως ερευνητές.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Από τα πρώτα σχέδια ιπτάμενων μηχανών που σχεδίασε ο Leonardo da Vinci κατά τον 15^ο αιώνα παρατηρώντας τα πτηνά και το αεροδυναμικό τους σχήμα (Hanley 2015) μέχρι τα σύγχρονα καινοτόμα υλικά, η φύση φαίνεται να έχει αποτελέσει εξαιρετική πηγή έμπνευσης για την κατασκευή μιας πληθώρας διαφορετικών αντικειμένων. Δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι η φύση κατασκευάζει σύνθετες δομές χρησιμοποιώντας τα απλούστερα στοιχεία και υλικά. Στην μίμηση του φαινομένου αυτού στρέφονται ολοένα και περισσότεροι επιστήμονες με στόχο να βρουν λύσεις οι οποίες όχι μόνο διευκολύνουν την ανθρώπινη καθημερινότητα αλλά είναι ταυτόχρονα και φιλικότερες προς το περιβάλλον.

Η Janine Benyus, συγγραφέας του βιβλίου “*Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*” και συν-ιδρύτρια του Ινστιτούτου Βιομιμητικής στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής τονίζει ότι η θεμελιώδης άποψη της Βιομιμητικής είναι ότι οι ζωντανοί οργανισμοί που συναντώνται στη φύση είναι οι τέλει επιστήμονες, καθώς έχουν καταφέρει να δώσουν απαντήσεις σε ζητήματα που απασχολούν πολλές γενιές ερευνητών. Προτείνει λοιπόν σε κάθε νέο πρόβλημα που προκύπτει να τίθεται πρωτίστως η ερώτηση «τι θα έκανε η φύση σε αυτήν την περίπτωση;» (“*Biomimicry*” film, 2015).

Ο άνθρωπος πρέπει να αντικρίζει τη φύση ως μοντέλο προς μίμηση σεβόμενος συγχρόνως όλα όσα αυτή του προσφέρει. Οι νέες γενιές βιο-εμπνευσμένων υλικών υπόσχονται να φέρουν εις πέρας την ανθρώπινη αυτή ευθύνη απέναντι στο περιβάλλον. Παραδείγματος χάριν, η χρήση αυτό-καθαριζόμενων βαφών σε κτίρια και εξωτερικούς χώρους μειώνει δραστικά τις απαιτήσεις τους για επιπλέον πλύσιμο, γεγονός που οδηγεί σε λιγότερη σπατάλη νερού και απορρυπαντικών τα οποία καταλήγουν ως απόβλητα στα ύδατα με δυσμενείς επιπτώσεις στα αντίστοιχα οικοσυστήματα. Επίσης, η επιτυχής εφαρμογή δομικών χρωματισμών σε αντικείμενα όπως τα αυτοκίνητα και τα είδη ρουχισμού θα συμβάλει σημαντικά στη μείωση της χρήσης τοξικών χρωστικών ουσιών αλλά ενδέχεται να μειώσει και τον όγκο των ρούχων που καταλήγουν στις χωματερές, καθώς τα συγκεκριμένα χρώματα είναι ανθεκτικά στη φθορά.

Η αντιγραφή των δομών που υπάρχουν στην φύση με τη χρήση όσο το δυνατόν απλούστερων και εύκολα παραγόμενων υλικών φαίνεται να είναι πλέον μονόδρομος. Όμως, η ακριβής μίμηση των δομών αυτών στον χώρο του εργαστήριου είναι ιδιαίτερα περίπλοκη, γεγονός που αναδεικνύει την πολυπλοκότητα των βιολογικών συστημάτων. Διαδικασίες όπως η φωτοσύνθεση που θεωρούνται θεμελιώδεις και δεδομένες για τους φυτικούς οργανισμούς μπορεί θεωρητικά να έχουν μελετηθεί και κατανοηθεί ωστόσο η πρακτική εφαρμογή των αρχών τους σε σύγχρονα τεχνητά

συστήματα εξακολουθεί να είναι λιγότερο αποτελεσματική σε σχέση με το φυσικό περιβάλλον (βλ. παράγραφο 5.6).

Οι συνέπειες που έχει επιφέρει η ανθρώπινη δραστηριότητα στο περιβάλλον είναι ευρέως γνωστές με δυσμενείς προγνώσεις για τη μελλοντική βιωσιμότητα των οργανισμών του πλανήτη. Όλοι οι επιστημονικοί τομείς συνεργάζονται ήδη με σκοπό την εύρεση λύσεων που θα μπορούσαν να ελαττώσουν το παγκόσμιο οικολογικό αποτύπωμα ενώ υπάρχει μεγάλη ευαισθητοποίηση και σε ατομικό επίπεδο.

Η Βιομηχανική είναι ένας επιστημονικός κλάδος που στηρίζεται ως επί το πλείστον στην ανθρώπινη συνεργασία και μάλιστα στη συνεργασία ατόμων με εντελώς διαφορετικές γνώσεις και υπόβαθρο. Δεδομένης της ταχείας ανάπτυξης του, ο τομέας αυτός αναμένεται να προσελκύσει πολλούς νέους επιστήμονες που θα φέρουν στο φως και στο προσκήνιο ποικίλες ανακαλύψεις βασισμένες σε δομές που υπάρχουν γύρω μας εδώ και πολλά χρόνια. Οι εφευρέσεις καινοτόμων, «έξυπνων» υλικών θα βελτιστοποιήσουν τη χρήση και την απόδοση των ήδη υπάρχοντων παρέχοντας μεγαλύτερες ανέσεις στο ανθρώπινο είδος χωρίς όμως να βλάπτουν τα υπόλοιπα. Άλλωστε, οφείλουμε να θυμόμαστε ότι είναι χρέος μας να διαφυλάξουμε την βιοποικιλότητα του πλανήτη στον οποίο φιλοξενούμαστε.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Autumn K. 2007. *Gecko* Adhesion: Structure, Function, and Applications. MRS Bulletin, 32(06), 473-478.
- Barthlott W, Neinhuis C. 1997. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 202 (1), 1-8.
- Barthlott W., Mail M., Bhushan B., Koch K. 2017. Plant Surfaces: Structures and Functions for Biomimetic Innovations. *Nano-micro Letters*, 9(2), 23.
- Barthlott W., Schimmel T., Wiersch S., Koch K., Brede M., Barczewski M., Walheim S., Weis A., Kaltenmaier A., Leder A., Bohn H. F. 2010. The *Salvinia* Paradox: Superhydrophobic Surfaces with Hydrophilic Pins for Air Retention Under Water. *Advanced Materials*, 22(21), 2325-2328.
- Bauer U., Bohn H. F., Federle W. 2008. Harmless nectar source or deadly trap: *Nepenthes* pitchers are activated by rain, condensation and nectar. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 275(1632), 259-265.
- Bechert D.W., Bruse M., Hage W., Meyer, R. 2000. Fluid Mechanics of Biological Surfaces and their Technological Application. *Naturwissenschaften*, 87(4), 157-171.
- Bhushan B. 2009. Biomimetics: lessons from nature-an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1893), 1445-1486.
- Bohn H. F., Federle W. 2004. Insect aquaplaning: *Nepenthes* pitcher plants capture prey with the peristome, a fully wettable water-lubricated anisotropic surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(39), 14138.
- Borodich FM, Gorb EV, Gorb SN. 2010. Fracture behaviour of plant epicuticular wax crystals and its role in preventing insect attachment: a theoretical approach. *Applied Physics*, 100(1), 63-71.
- Brandon S, Haimovich N, Yeger E, Marmur A. 2003. Partial wetting of chemically patterned surfaces: the effect of drop size. *Journal of Colloid and Interface Science*, 263(1), 237-243.
- Cassie A.B.D, Baxter S. 1944. Wettability of porous surfaces. *Transactions of Faraday Society*, 40, 546-551.
- Cerman Z., Striffler B. F., Barthlott W. 2009. Dry in the water: the superhydrophobic water fern *Salvinia*-a model for biomimetic surfaces. Gorb S.N. (eds) *Functional Surfaces in Biology*, 97-111. Springer, Dordrecht.
- Chakraborty M., Weibel J. A., Schaber J. A., Garimella S.V. 2019. The Wetting State of Water on a Rose Petal. *Advanced Materials Interfaces*, 6(17), 1-7.
- Choi W., Tuteja A., Chhatre S., Mabry J. M., Cohen R. E., McKinley G. H. 2009. Fabrics with Tunable Oleophobicity. *Advanced Materials*, 21(21), 2190-2195.
- Chung K., Yu S., Heo C.-J., Shim J. W., Yang S.-M., Han M. G., Lee H.-S., Jin Y., Lee S.-Y., Park N., Shin J. H. 2012. Flexible, Angle-Independent, Structural Color Reflectors Inspired by *Morpho* Butterfly Wings. *Advanced Materials*, 24(18), 2375-2379.

- Colmer T. D., Pedersen O. 2008. Underwater photosynthesis and respiration in leaves of submerged wetland plants: gas films improve CO₂ and O₂ exchange. *New Phytologist*, 177(4), 918-926.
- Eadie L., Ghosh T. K. 2011. Biomimicry in textiles: past, present and potential. An overview. *Journal of The Royal Society Interface*, 8(59), 761-775.
- Ensikat H. J., Schulte A. J., Koch K., Barthlott W. 2009. Droplets on Superhydrophobic Surfaces: Visualization of the Contact Area by Cryo-Scanning Electron Microscopy. *Langmuir*, 25(22), 13077-13083.
- Ensikat H. J., Ditsche-Kuru P., Neinhuis C., Barthlott W. 2011. Superhydrophobicity in perfection: the outstanding properties of the lotus leaf. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2, 152-161.
- Extrand C.W. 2002. Model for contact angle and hysteresis on rough and ultraphobic surfaces. *Langmuir*, 18(21), 7991-7999.
- Feng L., Zhang Y., Li M., Zheng Y., Shen W., Jiang, L. 2010. The Structural Color of Red Rose Petals and Their Duplicates. *Langmuir*, 26(18), 14885-14888.
- Feng, L. Zhang Y., Xi J., Zhu Y., Wang N., Xia F., Jiang, L. 2008. Petal Effect: A Superhydrophobic State with High Adhesive Force. *Langmuir*, 24(8), 4114-4119.
- Fich E. A., Segerson N. A., Rose J.K.C. 2016. The Plant Polyester Cutin: Biosynthesis, Structure, and Biological Roles. *Annual Review of Plant Biology*, 67(1), 207-233.
- Gabarayeva N.I., Grigorjeva V.V., Lavrentovich M.O. 2020. Artificial pollen walls simulated by the tandem processes of phase separation and self-assembly in vitro. *New Phytologist*, 225(5), 1956-1973.
- Gao L., McCarthy T. J. 2006. "Artificial Lotus Leaf" Prepared Using a 1945 Patent and a Commercial Textile. *Langmuir*, 22(14), 5998-6000.
- Gao N., Yan Y.Y, Chen X.Y., Mee D.J. 2011. Superhydrophobic surfaces with hierarchical structure. *Materials Letters*, 65(19-20), 2902-2905.
- Gao W., Rigout M., Owens H. 2017. The structural coloration of textile materials using self-assembled silica nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, 19(9), 303.
- Gao X., Jiang, L. 2004. Water-repellent legs of water striders. *Nature*, 432(7013), 36-36.
- Garg P., Ghatmale P., Tarwadi K., Chavan S. 2017. Influence of Nanotechnology and the Role of Nanostructures in Biomimetic Studies and Their Potential Applications. *Biomimetics*, 2(2), 7.
- Glover B.J., Whitney H. M. 2010. Structural colour and iridescence in plants: the poorly studied relations of pigment colour. *Annals of Botany*, 105(4), 505-511.
- Gorb E., Haas K., Henrich A., Enders S., Barbakadze N., Gorb S. 2005. Composite structure of the crystalline epicuticular wax layer of the slippery zone in the pitchers of the carnivorous plant *Nepenthes alata* and its effect on insect attachment. *Journal of Experimental Biology*, 208(24), 4651-4662.
- Gould P. 2003. Smart, clean surfaces. *Materials Today*, 6(11), 44-48.

- Grundke K., Bogumil T., Gietzelt T., Jacobasch H.J., Kwok D. Y., Neumann A.W. 1996. Wetting measurements on smooth, rough and porous solid surfaces. *Progress in Colloid & Polymer Science*, 101, 58-68.
- Hanley R. S. 2015. *Biomimicry and Sustainable Communities: The Urban Challenge* A Dissertation, University of Cambridge.
- Hosseini S. M., Fadlib F., Mohammadia M. 2021. Biomimetic Kinetic Shading Facade Inspired by Tree Morphology for Improving Occupant's Daylight Performance. *Journal of Daylighting*, 8(1), 65-85.
- Hwang I., Jeong I., Lee J., Ko M. J., Yong K. 2015. Enhancing Stability of Perovskite Solar Cells to Moisture by the Facile Hydrophobic Passivation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(31), 17330-17336.
- Israelachvili J. N. 1992. *Intermolecular and surface forces*, 2nd edn. London, UK: Academic Press.
- James S., Contractor R. 2018. Study on Nature-inspired Fractal Design-based Flexible Counter Electrodes for Dye-Sensitized Solar Cells Fabricated using Additive Manufacturing. *Scientific Reports*, 8(1), 17032.
- Jenks MA, Ashworth EN. 1999. Plant epicuticular waxes: function, production and genetics. *Horticultural Reviews*, 23, 1-68.
- Koch K., Barthlott W. 2009. Superhydrophobic and superhydrophilic plant surfaces: an inspiration for biomimetic materials. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1893), 1487-1509.
- Krauss P., Markstädter C., Riederer M. 1997. Attenuation of UV radiation by plant cuticles from woody species. *Plant, Cell & Environment*, 20(8), 1079-1085.
- Kunst L, Samuels A.L. 2003. Biosynthesis and secretion of plant cuticular wax. *Progress in Lipid Research*, 42(1), 51-80.
- Kwok D.Y., Neumann A.W. 1999. Contact angle measurement and contact angle interpretation. *Advances in Colloid and Interface Science*, 81(3), 167-249.
- Lee H.J., Michielsen S. 2006. Lotus effect: Superhydrophobicity. *Journal of the Textile Institute*, 97(5), 455-462.
- Lee S.-M., Üpping J., Bielawny A., Knez M. 2010. Structure-Based Color of Natural Petals Discriminated by Polymer Replication. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 3(1), 30-34.
- Li-Beisson Y., Shorrosh B., Beisson F., Andersson M.X., Arondel V., Bates P.D., Baud S., Bird D., DeBono A., Durrett T.P. 2013. Acyl-lipid metabolism. *Arabidopsis Book*, 11:e0161.
- Lim T.K. 2016. *Nelumbo nucifera*. *Edible Medicinal and Non-Medicinal Plants*, 55-109.
- Mahadik G. A., Hernandez-Sanchez J. F., Arunachalam S., Gallo A., Cheng L., Farinha A. S., Thoroddsen S.T., H. Mishra H., Duarte C. M. 2020. Superhydrophobicity and size reduction enabled Halobates (Insecta: Heteroptera, Gerridae) to colonize the open ocean. *Scientific Reports*, 10(1), 7785.

- Marmur A. 2003. Wetting on hydrophobic rough surfaces: to be heterogeneous or not to be? *Langmuir*, 19(20), 8343-8348.
- Mazzon G., Zahid M., Heredia-Guerrero J.A., Balliana E., Zendri E., Athanassiou A., Bayer I.S. 2019. Hydrophobic treatment of woven cotton fabrics with polyurethane modified aminosilicone emulsions. *Applied Surface Science*, 490, 331-342.
- Meuler A. J., Chhatre S., Nieves A. R., Mabry J. M., Cohen R. E., McKinley G. H. 2011. Examination of wettability and surface energy in fluorodecyl POSS/polymer blends. *Soft Matter*, 7(21), 10122.
- Natarajan S., Subramaniyam S., Kumaravel V. 2019. Fabrication of Hydrophobic Coatings Using Sugarcane Bagasse Waste Ash as Silica Source. *Applied Sciences*, 9(1), 190.
- Nithia S.M., Shanthi J.N. 2017. Effect of enhanced solar UVB (280-320nm) radiation on secondary pigment synthesis in some plants. *International Journal of Environmental & Agriculture Research (IJOEAR)*, 3(1), 111-115.
- Niu S., Li B., Mu Z., Yang M., Zhang J., Han Z., Ren L. 2015. Excellent Structure Based Multifunction of *Morpho* Butterfly Wings: A Review. *Journal of Bionic Engineering*, 12(2), 170-189.
- Omar A., Ali M. S., Rahim Abd N. 2020. Electron transport properties analysis of titanium dioxide dye-sensitized solar cells (TiO₂-DSSCs) based natural dyes using electrochemical impedance spectroscopy concept: A review. *Solar Energy*, 207, 1088-1121.
- Patankar N. A. 2004. Mimicking the lotus effect: influence of double roughness structures and slender pillars. *Langmuir*, 20, 8209-8213.
- Paudel K.R.&Panth N. 2015. Phytochemical Profile and Biological Activity of *Nelumbo nucifera*. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 1-16.
- Philippe G., Sørensen I., Jiao C., Sun X., Fei Z., Domozych D. S., Rose J. K. 2020. Cutin and suberin: assembly and origins of specialized lipidic cell wall scaffolds. *Current Opinion in Plant Biology*, 55, 11-20.
- Raven J. A. 2008. Not drowning but photosynthesizing: probing plant plastrons. *New Phytologist*, 177(4), 841-845.
- Riederer M., Schreiber L. 2001. Protecting against water loss: analysis of the barrier properties of plant cuticles. *Journal of Experimental Botany*, 52(363), 2023-2032.
- Robinson A. 2007. *The Last Man Who Knew Everything: Thomas Young, the Anonymous Genius who Proved Newton Wrong and Deciphered the Rosetta Stone, among Other Surprising Feats*. Penguin. ISBN 978-0-13-134304-7.
- Rowland O., Zheng H., Hepworth S.R., Lam P., Jetter R., Kunst L. 2006. CER4 encodes an alcohol-forming fatty acyl-coenzyme A reductase involved in cuticular wax production in Arabidopsis. *Plant Physiology*, 142(3), 866-877.
- Russell A. P., Stark A. Y., Higham T. E. 2019. The Integrative Biology of Gecko Adhesion: Historical Review, Current Understanding and Grand Challenges. *Integrative and Comparative Biology*, 59(1), 101-116.

- Schneider-Belhaddad F., Kolattukudy P.E. 2000. Solubilization, partial purification and characterization of a fatty aldehyde decarboxylase from a higher plant, *Pisum sativum*. Archives of Biochemistry and Biophysics, 377(2), 341-349.
- Schreiber L. 2010. Transport barriers made of cutin, suberin and associated waxes. Trends in Plant Science, 15(10), 546-553.
- Sharma K., Sharma V., Sharma S.S. 2018. Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status. Nanoscale Research Letters, 13, 381.
- Somasundaram S., Kumaravel V. 2019. Application of Nanoparticles for Self-Cleaning Surfaces. Emerging Nanostructured Materials for Energy and Environmental Science, 23, 471-498.
- Stratakis E., Mateescu A., Barberoglou M., Vamvakaki M., Fotakis C., Anastasiadis S. H. 2010. From superhydrophobicity and water repellency to superhydrophilicity: smart polymer-functionalized surfaces. Chemical Communications, 46(23), 4136.
- Stratakis E., Zorba V., Barberoglou M., Spanakis E., Rhizopoulou S., Tzanetakis P., Anastasiadis S., Fotakis C. 2009. Laser structuring of water-repellent biomimetic surfaces. SPIE Newsroom 10.1117/2.1200901.1441.
- Sullivan T, O'Callaghan I. 2020. Recent Developments in Biomimetic Antifouling Materials: A Review. Biomimetics, 5(4), 58.
- Sun J., Bhushan B. 2019. Nanomanufacturing of bioinspired surfaces. Tribology International, 129, 67-74.
- Szczepanski C. R., Guittard F., Darmanin T. 2017. Recent advances in the study and design of parahydrophobic surfaces: From natural examples to synthetic approaches. Advances in Colloid and Interface Science, 241, 37-61.
- Taiz L., Zeiger E. 2012. Φυσιολογία Φυτών. Εκδόσεις Utopia, 1^η ελληνική έκδοση.
- Thomas P.A., Room P. M. 1986. Taxonomy and control of *Salvinia molesta*. Nature, 320(6063), 581-584.
- Thomé M., Richalot E., Berthier S. 2020. Light guidance in photonic structures of *Morpho* butterfly wing scales. Applied Physics A, 126(10), 778.
- Vincent J. F.V, Bogatyreva O., Bogatyrev N.R., Bowyer A., Pahl A.K. 2006. Biomimetics: its practice and theory. Journal of the Royal Society Interface, 3(9), 471-482.
- Wang L, Zhang S, Li S, Yan S, Dong S. 2020. Inner surface of *Nepenthes* slippery zone: ratchet effect of lunate cells causes anisotropic superhydrophobicity. Royal Society Open Science, 7(3), 200066.
- Wen L., Weaver J.C., Lauder, G.V. 2014. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function. Journal of Experimental Biology, 217(10), 1656-1666.
- Wenzel R.N. 1936. Resistance of solid surfaces to wetting by water. Industrial & Engineering Chemistry, 28(8), 988-994.
- Whyman G., Bormashenko E., Stein T. 2008. The rigorous derivation of Young, Cassie-Baxter and Wenzel equations and the analysis of the contact angle hysteresis phenomenon. Chemical Physics Letters, 450(4-6), 355-359.

- Wolansky G, Marmur A. 1999. Apparent contact angles on rough surfaces: the Wenzel equation revisited. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 156(1), 381-388.
- Yan Y.Y, Gao N., Barthlott W. 2011. Mimicking natural superhydrophobic surfaces and grasping the wetting process: A review on recent progress in preparing superhydrophobic surfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*, 169(2), 80-105.
- Yeats T.H., Rose J. K.C. 2013. The Formation and Function of Plant Cuticles. *Plant Physiology*, 163(1), 5-20.
- Zhang C., Zhoua W., Wang Q., Wang H., Tang Y., Huid K.S. 2013. Comparison of static contact angle of various metal foams and porous copper fiber sintered sheet. *Applied Surface Science*, 276, 377-382.
- Zhang D., Luo Y., Li X., Chen H. 2011. Numerical simulation and experimental study of drag-reducing surface of a real shark skin. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 23(2), 204-211.
- Zhang L., Zhao N., Xu J. 2012. Fabrication and application of superhydrophilic surfaces: a review. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 28(8-9), 769-790.
- Ελευθερίου Π. Ελευθέριος. 2007. Βοτανική: Βιολογία φυτικού κυττάρου και ιστολογία φυτών. University Studio Press, Θεσσαλονίκη, 1^η έκδοση.
- Λιακάκη-Σταυροπούλου Σ. 2019. Σύνθεση και χαρακτηρισμός Πολυεδρικών Ολιγομερικών Σιλοξανίων (POSS) και φωσφορικών παραγώγων τους και ο ρόλος τους ως στερεωτικά για την προστασία της Πολιτιστικής Κληρονομιάς. Μεταπτυχιακό Δίπλωμα ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Κρήτης, Τμήμα Χημείας.
- Ρουμπελάκη-Αγγελάκη Κ., Γαλάτης Β., Γανωτάκης Δ., Γκανή-Σπυροπούλου Κ., Καραμπουρνιώτης Γ., Κοτζαμπάσης Κ., Κωνσταντινίδου Ελ.-Ι., Μανέτας Ι. 2014. Φυσιολογία Φυτών: από το μόριο στο περιβάλλον, 2^η έκδοση. Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ

“Biomimicry” film, 2015: <https://biomimicry.org/treemedia/>

Εταιρεία «Biomimetic» : <https://www.biomimetic.gr/>