

# Η Βιομημητική και οι Εφαρμογές της στους Ευρύτερους Τομείς της Μηχανικής

Κωνσταντίνος Καρανικόλας

Επιβλέπων Καθηγητής  
Δημήτριος Ιψάκης

Χανιά, Οκτώβριος 2022

«Ἡ φύσις μηδὲν μήτε ἀτελὲς ποιεῖ, μήτε μάτην»  
-Αριστοτέλης

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Βιομιμητική είναι η μελέτη των φυσικών φαινομένων και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών/συμπεριφορών των έμβιων οργανισμών, με στόχο α) την κατανόηση των αρχών και των μηχανισμών που τα διέπουν, β) την εκμείλιυση ιδεών από αυτά και γ) την εφαρμογή τους στον ευρύτερο τομέα της Μηχανικής (π.χ. μεταφορές, Ιατρική, βιομηχανία, κατασκευές). Στην περίοδο που διανύουμε, μπορεί κάποιος να διακρίνει ολοένα και περισσότερα παραδείγματα/εφαρμογές της βιομιμητικής στην καθημερινότητα. Παραδείγματα του κλάδου της βιομιμητικής είναι μεταξύ άλλων η κατασκευή υποβρυχίων οχημάτων με γεωμετρία εμπνευσμένη από τα μορφολογικά χαρακτηριστικά τονοειδών ή άλλων υδρόβιων πλασμάτων, στην κατασκευή οστικών μοσχευμάτων βασισμένων στη σύσταση των ίδιων των οστών, ακόμα και στη δημιουργία αλγορίθμων βελτιστοποίησης δικτύων βάσει της συμπεριφοράς του «*Physarum polycephalum*».

Στα πλαίσια αυτά, η παρούσα εργασία θα μελετήσει τους βασικούς τρόπους βιομιμητικού σχεδιασμού και καθορισμένες εφαρμογές της βιομιμητικής. Οι προς μελέτη εφαρμογές αφορούν τη βιομιμητική σχεδίαση αυτόνομων μη-επανδρωμένων υποβρυχίων σκαφών, τη δημιουργία αλγορίθμων βελτιστοποίησης δικτύων βάσει της συμπεριφοράς του *Physarum Polycephalum* και τη δημιουργία εμφυτευμάτων βασισμένων στη σύσταση των ίδιων των οστών. Θα αναλύσει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των εφαρμογών αυτών, καθώς και τη σημασία της για την επιστήμη της Μηχανικής και των επιστημών στο άμεσο μέλλον.

## **ABSTRACT**

Biomimicry is the study of natural phenomena, characteristics and behaviors of living organisms with the aim to a) understand the underlayning principles and mechanisms of them b) generate ideas c) apply them in the field of engineering (e.g. transportations, medicine, industry, construction). Nowadays, biomimicry has an increasing impact and presence in products and applications in everyday life. Examples of biomimicry can be found in underwater vehicles with design based on tuna-fish body shape and other marine species, in bone implants with chemical structure based on human bones and in network optimization algorithms inspired by Physarum Polycephalum's behavior.

This Diploma Thesis aims to analyse the basic biomimetic design philosophies and specific applications of biomimetic design. More specifically, bio-inspired underwater drones, Physarum-inspired network optimization algorithms and biomimetic bone implants are studied and analyzed to determine their advantages and disadvantages, as well as how biomimetics can contribute to the future of engineering and science.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Δημήτριο Ιψάκη, για τη βοήθεια στο να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία. Η έως τώρα πορεία μου δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την υποστήριξη των γονέων μου και της αδελφής μου και τους ευχαριστώ εκ βάθρων για αυτό. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο Ελευθέριο Τσερκέζη για την βοήθεια που μου προσέφερε στην περεταίρω αναζήτηση και εύρεση βιβλιογραφίας, όπως και τους φίλους που ήταν κοντά μου στον μέχρι τώρα ακαδημαϊκό μου βίο.

## Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή .....	8
1.1 Βιομιμητική .....	8
1.2 Ιστορικά στοιχεία – αναδρομή.....	8
1.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΒΙΟΜΙΜΗΤΙΚΗΣ.....	9
1.3.1 Αεροναυπηγική .....	11
1.3.2 Αρχιτεκτονική .....	12
1.3.3 Velcro.....	13
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : Προσεγγίσεις Βιομιμητικού σχεδιασμού .....	15
2.1 Βιομιμητική, Προκλήσεις και Σχεδιασμός.....	15
2.2 Τρόποι Προσέγγισης Βιομιμητικού Σχεδιασμού.....	16
2.2.1 Άμεση προσέγγιση βιομιμητικού σχεδιασμού. ....	17
2.2.2 Έμμεση προσέγγιση βιομιμητικού σχεδιασμού. ....	19
2.2.3 Συμπεράσματα .....	20
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : Βιομιμητική και Σχεδίαση Μη Επανδρωμένων Υποβρύχιων Σκαφών. ....	21
3.1 Μη Επανδρωμένα Υποβρύχια Οχήματα – Κατηγορίες και Προοπτικές .....	21
3.2 AUVs και Πλεονεκτήματα Βιομιμητικής Σχεδίασης .....	24
3.2.1 Ταχύτητα .....	24
3.2.2 Αποδοτικότητα και Αυτονομία.....	31
3.2.3 Ικανότητα Πραγματοποίησης Ελιγμών .....	33
3.2.4 Επίλογος .....	36
Κεφάλαιο 4ο : Βιομιμητική, Physarum Polycephalum, Αλγόριθμοι και Δίκτυα .....	39
4.1 Physarum Polycephalum και γνωρίσματά του με βιομιμητικό ενδιαφέρον .....	39
4.1.1 Εισαγωγή στον Physarum Polycephalum .....	39
4.1.2 Ικανότητα εύρεσης της συντομότερης διαδρομής. ....	39
4.1.3 Δημιουργία δικτύων υψηλής ποιότητας.....	40
4.1.4 Προσαρμογή σε μεταβαλλόμενο περιβάλλον. ....	41
4.1.5 Μάθηση και απομνημόνευση.....	41
4.1.6 Επικοινωνία και μετάδοση πληροφοριών .....	41
4.1.7 Biological Computing και Αποκεντρωμένα Δίκτυα .....	43
4.2 Μοντέλα Εμπνευσμένα από το Physarum Polycephalum .....	43
4.2.1 Μεθοδολογία ανάπτυξης μοντέλων εμπνευσμένων από τον Physarum Polycephalum. ....	43
4.2.2 Μοντέλο αγωγιμότητας ροής (Flow conductivity model).....	44

4.2.3 Κυτταρικό μοντέλο (cellular model).....	45
4.2.4 Το πολυπαραγοντικό μοντέλο (multi-agent model) .....	45
4.2.5 Το μοντέλο εναλλασσόμενης ροής (shuttle streaming model) .....	46
4.3 Προβλήματα Βελτιστοποίησης δικτύων και εφαρμογές. ....	46
4.3.1 Πρόβλημα εύρεσης συντομότερης διαδρομής και εφαρμογές .....	46
4.3.2 Ευκλείδειο Πρόβλημα Δένδρου Steiner.....	46
4.3.3 Πρόβλημα Δένδρου Steiner σε γραφήματα και εφαρμογές .....	47
4.3.4 Το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή και εφαρμογές .....	47
4.3.5 Πρόβλημα δρομολόγησης πολλαπλής διανομής (multicast routing problem) και εφαρμογές.....	48
4.3.6 Αξιολόγηση δικτύων και εφαρμογές. ....	48
4.3.7 Πρόβλημα σχεδίασης δικτύων αλυσίδας εφοδιασμού (supply chain network) ...	49
4.3.8 Πρόβλημα σχεδίασης δικτύου μεταφορών. ....	49
4.3.9 Συμπεράσματα .....	49
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> : Βιομηχανική και Ιατρική – Βιομηχανικά Εμφυτεύματα και προοπτικές. ....	52
5.1 Ιατρική και Βιολογική Εξέλιξη .....	52
5.2 Εμφυτεύματα Οστών και Βιοσυμβατότητα .....	53
5.3 Μεταλλικά Μοσχεύματα και Συνήθη Προβλήματα.....	53
5.4 Βιομηχανικά εμφυτεύματα Εμφυτεύματα βασισμένα στη χημική σύσταση των οστών. ....	54
Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup> : Αποτίμηση , Συμπεράσματα, Προτάσεις. ....	56
6.1 Σύνοψη Διπλωματικής .....	56
6.2 Συμπεράσματα .....	56
6.3 Ευ ζην, τέχνη και βιομηχανική: μία ελεύθερη προσέγγιση-πρόταση. ....	58
Βιβλιογραφία .....	61

# Εισαγωγή

## 1.1 Βιομιμητική

Ο όρος «Βιομιμητική» είναι σύνθετος και προέρχεται από τις λέξεις «βίος» και «μίμηση». Βιομιμητική είναι η μελέτη της φύσης και των φυσικών φαινομένων με σκοπό την κατανόηση των αρχών των μηχανισμών λειτουργίας τους, την απόκτηση ιδεών από αυτή, την εφαρμογή αυτών στην επιστήμη, στη μηχανική και στην ιατρική.

## 1.2 Ιστορικά στοιχεία – αναδρομή

Η αναζήτηση του ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος στον αγώνα για μία θέση κάτω από τον ήλιο, οδήγησε τον άνθρωπο στην προσπάθεια εύρεσης του τεχνολογικού πλεονεκτήματος σε κάθε πτυχή της ζωής του, όπου συναντούσε δυσκολίες. Η φύση, ως σύστημα που βασίζεται στην εξέλιξη, αποτελεί δε μία εξαιρετική δεξαμενή για άντληση ιδεών για αυτό το σκοπό. Προϊόντα βιομιμητικής μπορούν να εντοπιστούν εύκολα μέσα στα αντικείμενα που χρησιμοποιούνται στην καθημερινότητα του ανθρώπου, σε όλη του την ιστορική πορεία και άσχετα με το τεχνολογικό επίπεδο κάθε εποχής. Από τη μυθολογία, μαθαίνουμε για τον Τάλω, ανιψιό του Δαιδάλου, ο οποίος εμπνέεται την κατασκευή του πριονιού από τη ραχοκοκαλιά ενός ψαριού ή από το σαγόνι ενός φιδιού. Ένα άλλο παράδειγμα βιομιμητικής από τη μυθολογία αποτελεί και την πηγή έμπνευσης του σήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο Δαίδαλος, αναζητώντας τη σωτηρία του, κοίταξε ψηλά. Είδε πως η φύση είχε την απάντηση για αυτό που έψαχνε· ένα ζευγάρι φτερά θα χάριζε την ελευθερία σε αυτόν και τον υιό του.

Ο Ελληνικός κόσμος εμπνεύστηκε από τη φύση, όχι μόνο για την ανάπτυξη της τεχνολογίας, αλλά και για την εξύψωση του κάλλους. Εξαιρετικό παράδειγμα αποτελεί το ακρωτήριο του Παρθενώνα, αλλά και τα κιονόκρανα κορινθιακού ρυθμού. Άλλωστε, η φύση κυριαρχεί στις τέχνες σχεδόν κάθε πολιτισμού στην ανθρώπινη ιστορία. Από τα περίτεχνα αγαλματίδια ζώων του κινεζικού πολιτισμού, στο φυτικό διάκοσμο της ισλαμικής τέχνης και από εκεί ως τους πολιτισμούς των



ιθαγενών της Αμερικής, βλέπουμε πως η αίσθηση του κάλλους των ανθρώπων συνδέεται άμεσα με τον φυσικό κόσμο.



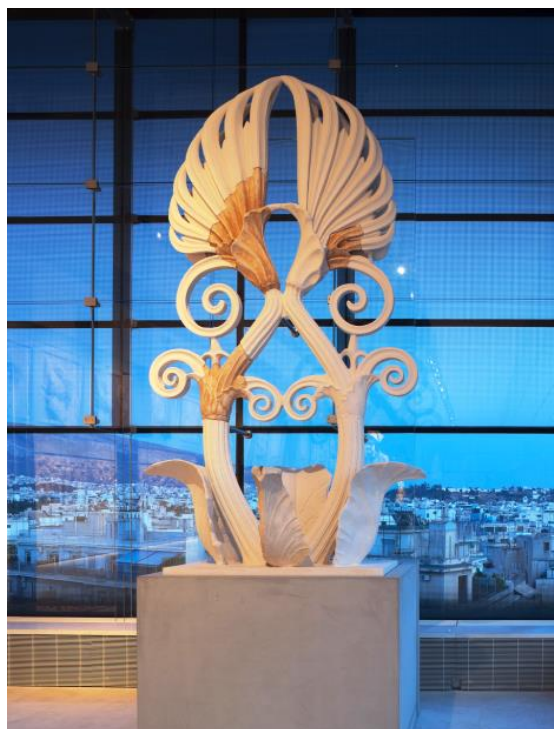
Εικόνα 1.1: Το σήμα του Πολυτεχνείου Κρήτης στο οποίο παρουσιάζεται ο δαίδαλος κατά την κατασκευή ζεύγους φτερών. (Πηγή: [www.tuc.gr](http://www.tuc.gr))

Στον τομέα της μηχανικής ήταν ανέκαθεν σύνηθες στην προσπάθεια ανάπτυξης τεχνολογίας, οι πρώτες προσεγγίσεις να είναι βιομιμητικές. Χαρακτηριστικά είναι τα σχέδια του Λεονάρντο ντα Βίντσι στην προσπάθειά του να κατασκευάσει αεροπλάνο βασιζόμενος στο σώμα πτηνών, αλλά και στον τρόπο που αυτά πετούν

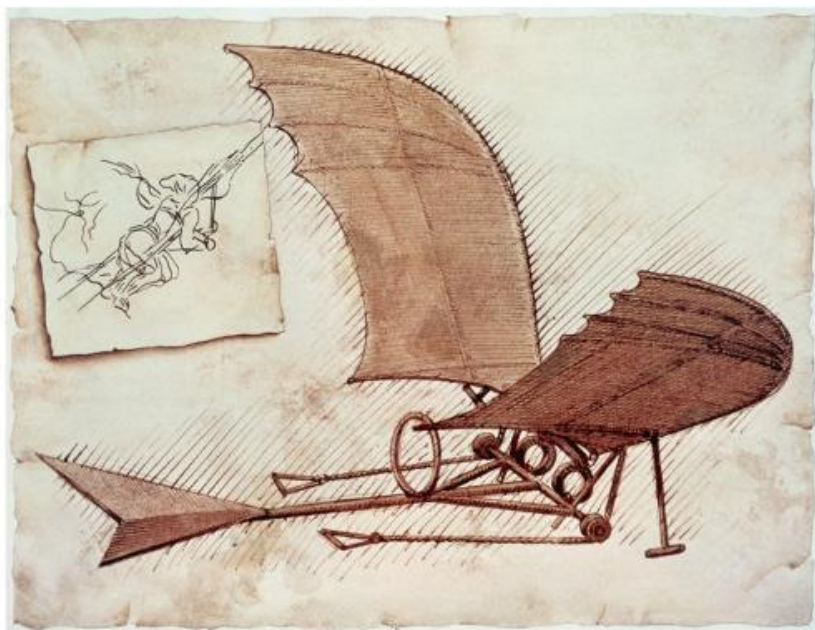
Στο σύγχρονο κόσμο, η βιομιμητική έχει προχωρήσει αρκετά πέρα από την απλή αντιγραφή μορφολογίας. Με την προσεκτική μελέτη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών ζώων ή φυτών και την αναπροσαρμογή τους στις ανάγκες του προς σχεδίασης προϊόντος/τεχνολογίας, έχει επιτευχθεί πρόοδος στη μηχανική, την ιατρική, αρχιτεκτονική και σε άλλους τομείς.

### 1.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΒΙΟΜΙΜΗΤΙΚΗΣ

Προϊόντα βιομιμητικής δίνουν παρόν σε πολλούς τεχνολογικούς τομείς. Μάλιστα πολλά από αυτά συναντώνται στην καθημερινή ζωή. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά μερικά παραδείγματα



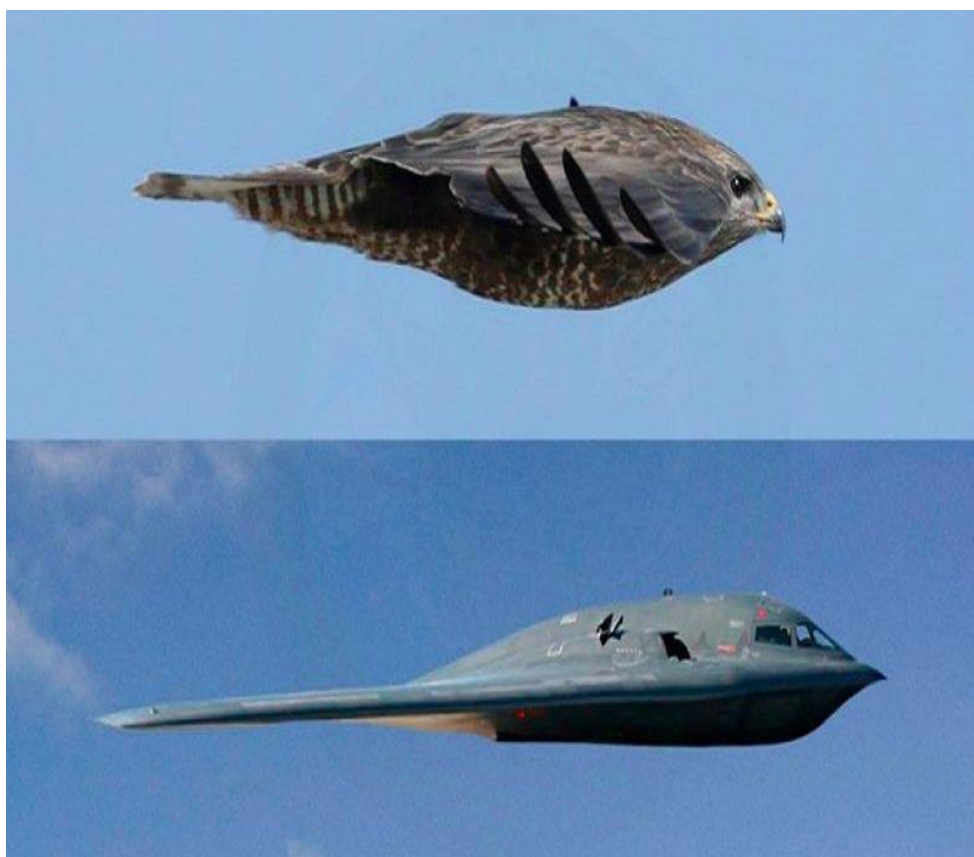
Εικόνα 1.2: Ανθέμιο: Ακρωτήριο της στέγης του Παρθενώνα. (Πηγή:  
<https://www.theacropolismuseum.gr/el/content/anthemio-akrotirio-tis-stegis-toy-parthenona>)



Εικόνα 1.3 Καλλιτεχνική απεικόνιση ανεμόπτερου που σχεδίασε ο Λεονάρντο ντα Βίντσι. Πηγή:  
[https://www.leonardodavinci.net/flyingmachine.jsp#prettyPhoto\[gallery1\]/3/](https://www.leonardodavinci.net/flyingmachine.jsp#prettyPhoto[gallery1]/3/)

### 1.3.1 Αεροναυπηγική

Η ανθρωπότητα για αιώνες ονειρευόταν την κατάκτηση των αιθέρων. Με την εφεύρεση των αεροπλάνων το όνειρο αυτό άρχισε να λαμβάνει σάρκα και οστά. Το αποτέλεσμα των αδελφών Wright ήταν σαφέστατα ένα επίτευγμα επικουρούμενο από πολλά έτη βιομηχανικής μελέτης των πτηνών. Πέρα από τη μελέτη των πτηνών ως μονάδες, βρίσκουμε παραδείγματα στη φύση από την ομαδική συμπεριφορά των πτηνών τα οποία βοηθούν στην αεροναυπηγική. Για παράδειγμα, οι άγριες χήνες πετάνε σε σχηματισμό V και με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται ανοδικά ρεύματα αέρα που κάνουν τα πτηνά στο πίσω μέρος του



Εικόνα 1.4: Η ομοιότητα του προφίλ ενός πετρίτη (*Falco peregrinus*) και του stealth βομβαρδιστικού B-2 Spirit  
(Πηγή: [https://studiousguy.com/biomimicry-examples/#7\\_Air\\_Crafts](https://studiousguy.com/biomimicry-examples/#7_Air_Crafts))

σχηματισμού να πετάνε με λιγότερη δαπάνη ενέργειας. Αυτή την αρχή χρησιμοποιεί η εταιρεία AIRBUS στη σχεδίαση των αεροσκαφών της. Επίσης, τα είδη των πτηνών που πετάνε μεγάλες αποστάσεις και εκείνα που πετάνε σε μικρές αποστάσεις έχουν διαφορετικού τύπου φτερά και σωματοδομή. Αυτά τα χαρακτηριστικά μελετώνται και χρησιμοποιούνται για τη σχεδίαση αεροσκαφών που προορίζονται για μεγάλες και μικρές αποστάσεις αντίστοιχα [1].



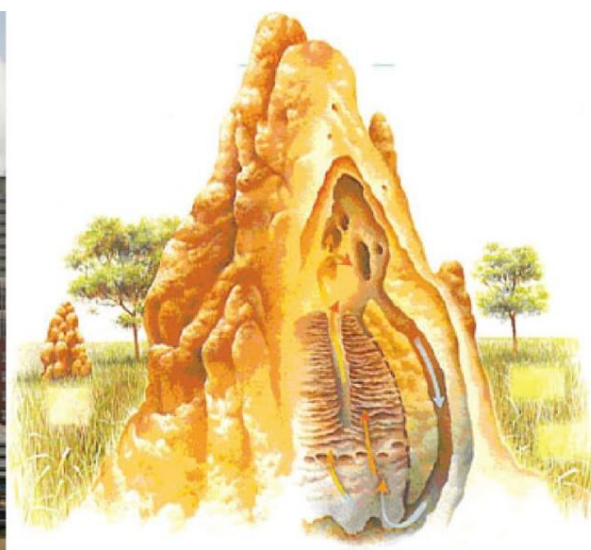
Εικόνα 1.5: Αεροσκάφη της Airbus αριστερά και δεξιά χαρακτηριστικά ζώων από τα οποία αντλήθηκε σχεδιαστική έμπνευση. (Πηγή: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2018-01-biomimicry-engineering-in-natures-style>)

### 1.3.2 Αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική ανήκει στους τομείς που έχουν να ωφεληθούν πολλαπλώς από τη βιομιμητική. Ένα χαρακτηριστικό μοντέλο βιομιμητικής σχεδίασης κτηρίων είναι οι αποικίες των τερμιτών στην αφρικανική σαβάνα. Οι αποικίες αυτές φτάνουν σε ύψος τα 6 μέτρα και είναι κατασκευασμένες από χώμα φλοιούς δέντρων, σίελο τερμιτών και είναι ισχυρότερο ακόμα και από σκυρόδεμα. Οι τερμίτες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στη ζέστη. Οι αποικίες τους παρέχουν εξαιρετική προστασία από της υψηλές θερμοκρασίες που μπορεί να αναπτύσσονται γύρω τους. Ακόμα και όταν οι εξωτερική θερμοκρασία αγγίζει τους 40°C, η θερμοκρασία της αποικίας διατηρείται στους 30°C [1].



Ο Mike Peace από τη Ζιμπάμπουε σχεδίασε το Eastgate Centre στην πρωτεύουσα της Ζιμπάμπουε, το πρώτο πλήρως φυσικά κλιματιζόμενο κτήριο στον κόσμο, εμπνευσμένος από τις αποικίες των τερμιτών. Το κτήριο έχει οπές στην οροφή του, καθώς και στους κατώτερους ορόφους, επιτρέποντας έτσι στο κτήριο να αερίζεται, μιμούμενο τον τρόπο που αυτό συμβαίνει στις αποικίες των τερμιτών. Ο θερμός αέρας εξέρχεται από την οροφή και ο ψυχρότερος εισέρχεται από τους χαμηλότερους ορόφους του κτηρίου. Οι ενεργειακή κατανάλωση του κτηρίου είναι έτσι μειωμένη και επιτυγχάνει να διατηρεί εσωτερική θερμοκρασία στους 24°C ενώ η εξωτερική να ξεπερνάει τους 38°C[1].

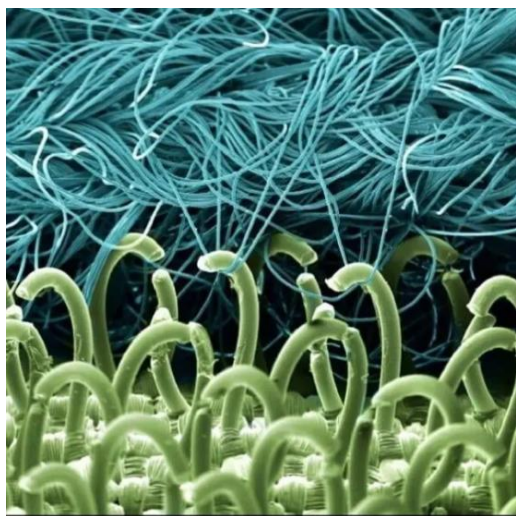


Εικόνα 1.6: Το Eastgate Centre στη Ζιμπάμπουε. (Πηγή:Hwang κ.α. 2015, Biomimetics: forecasting the future of science, engineering, and medicine, International Journal of Nanomedicine)

### 1.3.3 Velcro

Το Velcro δεν είναι άλλο από το προϊόν που στην καθομιλουμένη αποκαλείται ως «χριτς-χρατς», πιθανόν από τον χαρακτηριστικό ήχο που παράγει όταν οι ταινίες του αποκολλώνται η μία από την άλλη. Το Velcro, αποτελείται από δύο επιφάνειες. Η μία επιφάνεια έχει μικροσκοπικές θηλιές και η άλλη από μικροσκοπικούς γάντζους. Όταν οι δύο αυτές πλευρές εφάπτονται τότε προσκολλώνται μεταξύ τους και σταθεροποιούνται. Στις αρχές της δεκαετίας του 1940 , ο Ελβετός Μηχανικός George de Mastral παρατήρησε πως συχνά οι καρποί του φυτού *Xanthium Strumarium* (κοινώς, μεγάλη κολλιτσίδα ή αγριομελιτζάνα) κολλάνε στο τρίχωμα των σκύλων. Αυτό κέντρισε το ενδιαφέρον του και με τη χρήση μικροσκοπίου

μελέτησε τον καρπό του φυτού αυτού και ανακάλυψε πως έχει ένα πυκνό στρώμα από «αγκάθια», όμοια με άγκιστρα. Οι καρποί αυτοί έχουν την τάση να προσκολλώνται στα ρούχα των ανθρώπων ή στο τρίχωμα ζώων και με αυτό τον τρόπο να εξαπλώνεται. Εμπνευσμένος από το *Xanthium Strumarium*, ο Mastral, με τη χρήση nylon δημιούργησε τους μάντες Velcro. Ως προς το μέγεθός του, το Velcro έχει εξαιρετική συγκολλητική ικανότητα και χρησιμοποιείται ευρέως προς αντικατάσταση κουμπιών ή γάντζων σε είδη ρουχισμού, υποδήματα κλπ [1].



Εικόνα 1.7: Οι δύο όψεις του Velcro υπό το πρίσμα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Διακρίνονται καθαρά τα άγκιστρα και οι θηλιές της κάθε πλευράς. (Πηγή: <https://www.illinoisscience.org/2019/05/superhuman-capabilities-biomimicry/>)



Εικόνα 1.8: Καρποί του φυτού *Xanthium Strumarium*

# Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> : Προσεγγίσεις Βιομιμητικού σχεδιασμού

## 2.1 Βιομιμητική, Προκλήσεις και Σχεδιασμός

Ο βιομιμητικός σχεδιασμός είναι ένα θέμα συνεχώς αυξανόμενης δημοτικότητας. Η βιβλιογραφία γύρω από την έννοια της βιομιμητικής πληθαίνει σε όλα τα πεδία, όπως επί παραδείγματι της μηχανικής, της αρχιτεκτονικής και της ιατρικής. Η βιομιμητική είναι μία διαδικασία μεταφοράς σχεδιαστικής γνώσης ή και εμπνεύσεως από την βιολογία -ως πηγή- προς την τεχνολογία, ή σε οποιοδήποτε άλλο πεδίο εφαρμογής. Μια τέτοια διαδικασία εξ ορισμού έχει αυξημένη πολυπλοκότητα, καθώς απαιτείται ο συνδυασμός γνώσεων πλήθους γνωστικών αντικειμένων και επιστημών για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος[2].

Ως διαδικασία, η βιομιμητική μπορεί να βασίζεται στη μελέτη της φύσης και τη μεταφορά ή εφαρμογή γνώσεων και μηχανισμών στο σχεδιασμό εν γένει. Πρέπει όμως όσοι ασχολούνται με τον βιομιμητικό σχεδιασμό να είναι προσεκτικοί και να μην οδηγούνται σε άμεσες ερμηνείες[3]. Συνεπώς, κατά τη σχεδίαση πρέπει να αποφεύγετε η άκριτη αντιγραφή ενός χαρακτηριστικού ως προς τη μορφή του (βιομορφισμός) και να αναζητείται ο επί της ουσίας μηχανισμός του που θα προσδώσει ουσιαστικό όφελος στη σχεδίαση. Επί παραδείγματι, όπως αποδείχθηκε από της προσπάθειες μεγάλων επιστημόνων, όπως πχ ο Λεονάρντο ντα Βίντσι, δεν αρκούσε μόνο η αντιγραφή της μορφολογίας των πτηνών, ούτε ο τρόπος κίνησής τους για να την κατάκτηση των αιθέρων από τον άνθρωπο[4].

Εκτός από τον εξ αρχής σκοπό αντιγραφής ενός χαρακτηριστικού από έναν οργανισμό, είναι απαραίτητο να ερευνηθεί η πλήρης δυναμική των πιθανών χρήσεων. Για παράδειγμα, ένα βιομιμητικό υλικό το οποίο προορίζεται για χρήση στη μηχανική, θα μπορούσε να έχει και χρήσεις πέρα από τον αρχικό λόγο σχεδίασης.

## 2.2 Τρόποι Προσέγγισης Βιομιμητικού Σχεδιασμού

Ο βιομιμητικός σχεδιασμός είναι σαφέστατα μια διαθεματική και διεπιστημονική διαδικασία. Επιπρόσθετα των βασικών κλάδων που είναι αναγκαίο να συνεργαστούν ώστε να συγκροτηθεί ομάδα σχεδιασμού προϊόντος (μηχανικοί, marketing, πελάτες), στο βιομιμητικό σχεδιασμό, επιπλέον και βασικά μέλη είναι οι βιολόγοι. Η αναγκαία, λοιπόν, αυτή συνθήκη, αυξάνει την πολυπλοκότητα της βιομιμητικής σχεδίασης, αλλά ταυτοχρόνως προσδίδει στη δυναμική της.

Ο σχεδιασμός ενός προϊόντος μπορεί να επιτευχθεί με πολλές και διαφορετικές προσεγγίσεις. Με την εισαγωγή της βιομιμητικής στην εξίσωση του σχεδιασμού, το επίπεδο της πολυπλοκότητας αυξάνεται[5]. Ωστόσο, οι δύο γνωστότερες και ευρέως χρησιμοποιούμενες βιομιμητικές διαδικασίες, μπορούν να προσδιοριστούν βάσει της αφετηρίας προσεγγίσεώς τους[6].

Η πρώτη διαδικασία μπορεί να ξεκινήσει έχοντας ως αφετηρία τη μηχανική ή την τεχνολογία, με ένα πρόβλημα σχεδιασμού και να εντοπιστεί η λύση στη βιολογία. Ένα ευρέως γνωστό παράδειγμα βιομιμητικής σχεδίασης αυτής της κατηγορίας είναι ο υψηλής ταχύτητας Ιαπωνικός συρμός «Shinkansen», γνωστότερο με τον αγγλικό όρο «bullet train». Ο συρμός επανασχεδιάστηκε αντλώντας έμπνευση από το ράμφος του πτηνού αλκυόνη (Alcedo atthis). Ο επανασχεδιασμός πραγματοποιήθηκε στην προσπάθεια εξάλειψης του κρότου που δημιουργείται από τους από τους εξερχόμενους από μία σήραγγα συρμούς υψηλής ταχύτητας. Αρχικά αναγνωρίστηκε το πρόβλημα και η αιτία του: ο ισχυρός κρότος παράγεται από την απότομη αλλαγή πίεσης του αέρα. Εν συνεχεία, εντοπίστηκε μία πιθανή λύση στη φύση: η αλκυόνη, κατά την προσπάθεια εύρεσης της τροφής της, βουτάει στο νερό προκαλώντας μικρή αναταραχή. Ο επανασχεδιασμός του τρένου είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του θορύβου και ταυτοχρόνως ο συρμός να μπορεί να κινηθεί με μεγαλύτερη ταχύτητα[5].

Η δεύτερη διαδικασία κινείται από τη βιολογία στην εφαρμογή. Δηλαδή εντοπίζεται κάποιο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό στη φύση, ή αλλιώς μια «λύση» και στη συνέχεια αναζητείται εφαρμογή για ένα εφάμιλλο πρόβλημα στην τεχνολογία[5]. Παραδείγματα τέτοιας διαδικασίας είναι το ευρέως γνωστό Velcro και η



αυτοκαθαριζόμενη βαφή Sto Lotusan. Στην περίπτωση του Velcro, ο Ελβετός μηχανικός George de Mestral παρατήρησε τις κολλισίδες που κολλούσαν στο τρίχωμα του σκύλου του, αντλώντας έτσι έμπνευση για τη δημιουργία του προϊόντος. Η βαφή Sto Lotusan είναι προϊόν ανάπτυξης της Sto Corp. Η εταιρεία ανέπτυξε τη βαφή αυτή εμπνεόμενη από τα φύλλα του λωτού, τα οποία παραμένουν καθαρά χάρις την υδρόφοβή τους επιφάνεια[7].

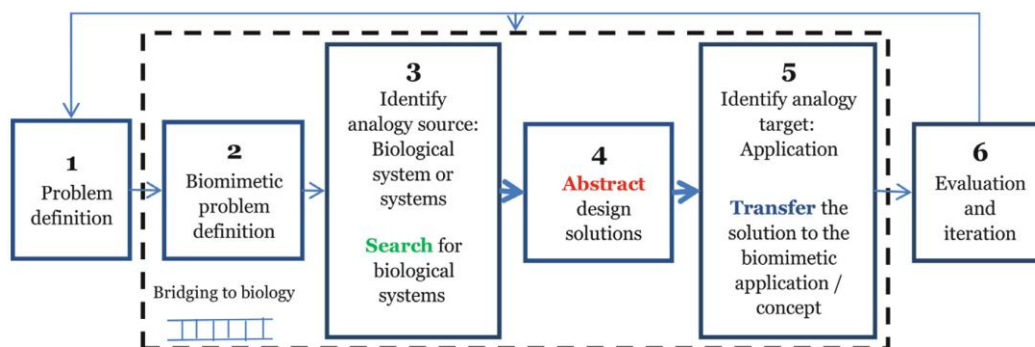
Σύμφωνα με [7], οι δύο αυτές κατηγορίες μπορούν να χαρακτηριστούν ως εξής:

1. Άμεση προσέγγιση ή σχεδιασμός με στόχο τη βιολογία [Design looking to biology].
2. Έμμεση προσέγγιση ή σχεδιασμός επηρεαζόμενος από τη βιολογία [Biology influencing design]

Ουσιαστικά, στην πρώτη κατηγορία, ο σχεδιασμός είναι που επιδιώκει να μιμηθεί στρατηγικές της φύσης. Δηλαδή ερευνά στη φύση για να εντοπίσει πώς άλλοι οργανισμοί αντιμετωπίζουν το ίδιο πρόβλημα με αποτελεσματικό τρόπο. Στη δεύτερη κατηγορία βιομιμητικού σχεδιασμού, επιδιώκεται το να βρεθεί εφαρμογή επί της μηχανικής, τεχνολογίας, ιατρικής κλπ. για προϋπάρχουσα γνώση από τη φύση για την αντιμετώπιση ενός προβλήματος. Αντίστοιχα, και στις δύο περιπτώσεις βιομιμητικού σχεδιασμού γίνεται άντληση γνώσεως από τη βιολογία με στόχο τη δημιουργία νέων λύσεων ή την ανανέωση/αντικατάσταση λύσεων που προϋπήρχαν. Παρακάτω ακολουθεί μία συνοπτική περιγραφή των δύο κατηγοριών βιομιμητικού σχεδιασμού[7].

### **2.2.1 Άμεση προσέγγιση βιομιμητικού σχεδιασμού.**

Κατά την άμεση προσέγγιση βιομιμητικού σχεδιασμού, δηλαδή όταν η διαδικασία εκκινεί από ένα υπάρχον πρόβλημα που αναζητείται τη λύση του στη φύση, υπάρχει μία σειρά καθορισμένων βημάτων για την ορθή του προσέγγιση. Κατά τους Cohen και Reich, ο βιομιμητικός σχεδιασμός που έχει την αφετηρία του σε ένα πρόβλημα και την κατάληξή στη βιολογία, έχει έξι στάδια. Πέρα από δύο στάδια που αποτελούν κοινό τόπο σε κάθε σχεδιαστικό πρόβλημα, τα υπόλοιπα τέσσερα αφορούν καθαρά βιομιμητικό σχεδιασμό.



Εικόνα 2.1: Διάγραμμα της άμεσης προσέγγισης βιομιμητικού σχεδιασμού, όπως παρουσιάζεται από τους Cohen & Reich στο βιβλίο τους *Biomimetic Design Method for Innovation and Sustainability* [5]

Εναρκτήριο και απαραίτητο σημείο κάθε προβλήματος είναι το να επιτευχθεί ο σαφής και ουσιαστικός ορισμός του. Ως πρώτο στάδιο είναι εξαιρετικά σημαντικό σε κάθε πρόβλημα, μιας και αποτελεί σημαντικό κομμάτι στην προσπάθεια επίλυσής του. Συνεπώς, κατά τον άμεσο βιομιμητικό σχεδιασμό, αυτό το ουσιώδες βήμα δε θα μπορούσε να απουσιάζει. Μάλιστα, ο σωστός ορισμός του προβλήματος είναι ακόμα σημαντικότερος για τον βιομιμητικό σχεδιασμό, μιας και αμέσως επόμενο στάδιο είναι η σύνδεσή του με τη βιολογία.

Τα τρία στάδια που έπονται είναι μοναδικά για το βιομιμητικό σχεδιασμό. Αρχικά πρέπει να γίνει η επιλογή της αναλογικής πηγής, δηλαδή η επιλογή του βιολογικού συστήματος ή και συστημάτων που θα αποτελέσει πεδίο έρευνας και έμπνευσης. Έπειτα πρέπει να γίνει ταυτοποίηση της λύσης από τη βιολογία και μετά η μεταφορά της λύσης στην τεχνολογία, δηλαδή η εφαρμογή της.

Έπεται το στάδιο της αξιολόγησης και της ανατροφοδότησης. Το αρχικό και το τελευταίο στάδιο αφορούν κάθε σχεδιαστικό πρόβλημα και όχι μόνο τα βιομιμητικά[5].

Συνοψίζοντας, τα στάδια της διαδικασίας του άμεσου βιομιμητικού σχεδιασμού έχουν ως εξής:

1. Ορισμός του προβλήματος.
2. Ορισμός του βιομιμητικού προβλήματος.
3. Επιλογή αναλογικής πηγής.
4. Ταυτοποίηση της λύσης.

5. Τεχνολογική εφαρμογή
6. Αξιολόγηση λύσης και ανατροφοδότηση.

### **2.2.2 Έμμεση προσέγγιση βιομιμητικού σχεδιασμού.**

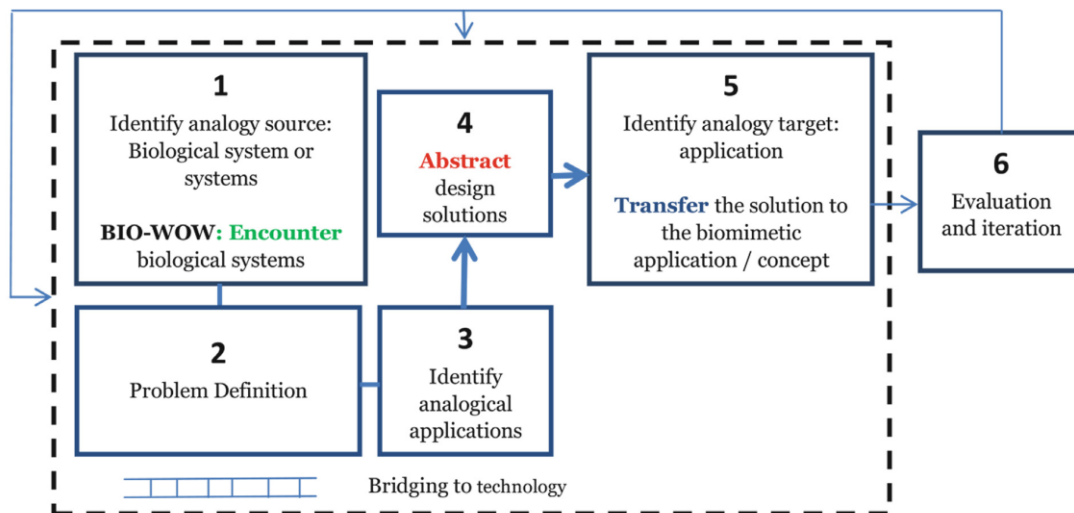
Η άλλη διαδικασία βιομιμητικού σχεδιασμού έχει ως αφετηρία τη βιολογία και καταλήγει σε τεχνολογική λύση. Ως διαδικασία είναι καταλληλότερη για περιπτώσεις που κάποιος έχει μια πληροφορία από τη βιολογία και τη χρησιμοποιεί ως πηγή έμπνευσης με σκοπό να την εκμεταλλευτεί σχεδιαστικά[8].

Σύμφωνα με [5], διαδικασία αυτή ορίζεται από επίσης έξι στάδια. Προσομοιάζει δε με την διαδικασία που εκείνη από το πρόβλημα και καταλήγει στη βιολογία, όμως παρουσιάζει ορισμένες διαφορές.

Εναρκτήριο στάδιο της διαδικασίας είναι ο εντοπισμός ενός βιολογικού συστήματος με κάποιο χαρακτηριστικό που παρουσιάζει ιδιαιτερότητες ή μηχανισμό ο οποίος φαίνεται κατάλληλος για να αποτελέσει πηγή έμπνευσης στη δημιουργία ενός τεχνολογικού προϊόντος. Σε περίπτωση που έχουν εντοπιστεί πολλαπλά βιολογικά συστήματα, μπορεί να επιτευχθεί η ανάπτυξη πιο πολυσύνθετης τεχνολογίας. Ως στάδιο, αυτό ονομάζεται BIO-WOW.

Εν συνεχεία, πρέπει να προσδιορισθεί σωστά το πρόβλημα που στη φύση επιλύει αυτό το σύστημα ή ο μηχανισμός, ώστε να είναι ευκολότερη η εύρεση εφάμιλλης φύσης προβλήματος που θα μπορούσε να επιλύσει με τη «μεταφορά» του στην τεχνολογία. Έτσι μπορούν να αναγνωριστούν πιθανές εφαρμογές. Η σημασία του σταδίου αυτού έγκειται στο ότι έτσι είναι ευκολότερη η ορθή εκτέλεση των επόμενων σταδίων, τα οποία είναι μείζονος σημασίας.

Επόμενο στάδιο της διαδικασίας είναι ο εντοπισμός των ιδιαιτέρων χαρακτηριστικών του βιολογικού συστήματος που μπορούν τεχνολογικά να χρησιμοποιηθούν, ώστε έτσι να επιτευχθεί η δημιουργία συσχέτισης βιολογίας-τεχνολογίας. Έπειτα, είναι το στάδιο εφαρμογής, όπου η λύση σε ένα πρόβλημα από τη βιολογία μετατρέπεται σε μία εφαρμογή ή σε βιομιμητική ιδέα. Τέλος, υπάρχει το στάδιο της αξιολόγησης και της ανατροφοδότησης, εάν κρίνεται απαραίτητο [5].



Εικόνα 2.2: Διάγραμμα της έμμεσης προσέγγισης βιομιμητικού σχεδιασμού, όπως παρουσιάζεται από τους Cohen & Reich στο βιβλίο τους *Biomimetic Design Method for Innovation and Sustainability*

Ονομαστικά, η διαδικασία του έμμεσου βιομιμητικού σχεδιασμού έχει ως εξής:

1. Εντοπισμός ενός βιολογικού συστήματος – προτύπου
2. Ορισμός του προβλήματος που επιλύει το σύστημα στη φύση.
3. Σύνδεση του προβλήματος που επιλύεται στη φύση με πιθανές εφαρμογές.
4. Σύνδεση βιολογίας – τεχνολογίας.
5. Τεχνολογική εφαρμογή
6. Αξιολόγηση και ανατροφοδότηση

### 2.2.3 Συμπεράσματα

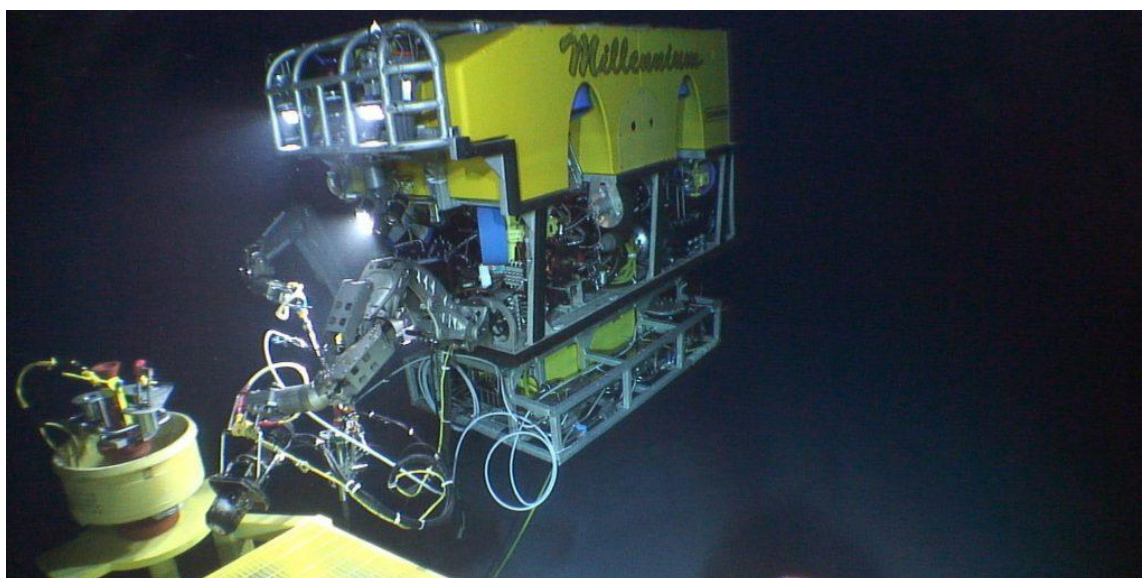
Οι προσεγγίσεις βιομιμητικού σχεδιασμού χωρίζονται σε αυτές που ξεκινάνε από ένα τεχνολογικό πρόβλημα και καταλήγουν στη βιολογία για εύρεση λύσης ή βελτίωσης και σε αυτές που ξεκινάνε από τη βιολογία και αναζητούν πεδίο εφαρμογής στην τεχνολογία. Η μεν προσέγγιση αφορά προσπάθεια επίλυσης συγκεκριμένου προβλήματος, η άλλη αφορά προσπάθεια μεταφοράς μίας λύσης από την βιολογία στην τεχνολογία. Συνεπώς δεν τίθεται λόγος σύγκρισης μεταξύ των προσεγγίσεων αυτών, διότι στοχεύουν σε διαφορετικούς τύπους προβλήματος.

# Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> : Βιομημητική και Σχεδίαση Μη Επανδρωμένων Υποβρύχιων Σκαφών.

## 3.1 Μη Επανδρωμένα Υποβρύχια Οχήματα – Κατηγορίες και Προοπτικές

Τα ρομποτικά συστήματα κάνουν όλο και πιο εμφανή την παρουσία τους στους αιθέρες, στη γη και στους υδάτινους όγκους. Τα μη επανδρωμένα υποβρύχια σκάφη, τηλεχειριζόμενα είτε αυτόνομα (ROVs και AUVs αντίστοιχα) , ανοίγουν νέους ορίζοντες στην εξερεύνηση των ωκεανών και σε πλήθος άλλων χρήσεων. Η σημασία τους δε για τη βιομημητική είναι βαρύνουσα, μιας και αποτελούν το αποτελεσματικότερο εργαλείο για τη μελέτη των ωκεανών. Παρ' όλα αυτά, η συμβατική τεχνολογία πέφτει στα όρια που επιβάλλονται από την ιδιαίτερη φύση του υδάτινου στοιχείου. Τα κωλύματα αυτά, κάνουν έντονη την εμφάνισή τους σε τομείς όπως της υποστήριξης, του προγραμματισμού και λειτουργίας επί του πεδίου δράσεώς των. Μία νέα γενιά μη επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων που φιλοδοξεί να υπερκεράσει τα ως τώρα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα αντίστοιχα συμβατικά, βρίσκεται σε φάση εξέλιξης. Η γενιά αυτή (Biological AUVs (BAUVs) ), βασίζεται στις ικανότητες και την μορφή υδρόβιων πλασμάτων, προσδοκώντας μέσω του βιομημητικού τους σχεδιασμού να βελτιώσει την απόδοση των οχημάτων, έναντι των αντίστοιχων συμβατικής τεχνολογίας[9].

Τα θαλάσσια ρομποτικά συστήματα, μπορούν εν γένει να κατηγοριοποιηθούν ως Μη Επανδρωμένα Υποβρύχια Οχήματα (UUVs/Unmanned Underwater Vehicles). Τα UUVs χωρίζονται σε άλλες δύο βασικές υποκατηγορίες: Σε τηλεχειριζόμενα (ROVs/Remotely Operated Vehicles) και σε αυτόνομα (AUVs/ Autonomous underwater Vehicles) [9]. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά τους.



Εικόνα 3.1: ROV στο πεδίο δράσεως. (Πηγή: <https://www.imca-int.com/divisions/rov/industry/>)

Τα ROVs, συνήθως προσδένονται με καλώδιο σε βοηθητικό σκάφος επιφανείας, όπου υπάρχει άνθρωπος/χειριστής του σκάφους. Επειδή τα τηλεχειριζόμενα οχήματα δεν είναι προγραμματισμένα εκ των προτέρων, ο χειριστής είναι ελεύθερος να εξερευνήσει τον περιβάλλοντα χώρο γύρω από το βοηθητικό σκάφος με ευελιξία. Η χρήση τέτοιων σκαφών, οδήγησε στην κατάκτηση νέων γνώσεων για τον υποθαλάσσιο κόσμο[10]. Η χρήση των ROVs απαιτεί την ύπαρξη βοηθητικού σκάφους και χειριστή. Αντιθέτως, τα AUVs, όντας προγραμματισμένα εκ των προτέρων, απαιτούν τη χρήση βοηθητικού σκάφους μόνο για άφεση και περισυλλογή.

Τα συμβατικά AUVs, αν και φαντάζουν ως επιτεύγματα «εξωτικής» τεχνολογίας, είναι ήδη σε χρήση. Για παράδειγμα, το πολεμικό ναυτικό των ΗΠΑ, έχει ένα πλήθος AUVs σε χρήση. Τέτοιο σκάφος είναι για παράδειγμα το Kingfish το οποίο βασίζεται στο σχεδιασμό του REMUS[11]. Η χρήση αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων γίνεται κυρίως για χαρτογράφηση, εφαρμογές γεωεπιστημών, άμυνα και ασφάλεια, καθώς και για την παρακολούθηση οργανισμών στο φυσικό τους περιβάλλον[9]. Τα σκάφη αυτά, όντας σχεδιασμένα ως τορπίλες είναι εν γένει αργά και με περιορισμένη ευελιξία κίνησης[12].





1

Εικόνα 3.2 : Το AUV Kingfish. Φωτογραφία του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ. (Πηγή: [https://www.navy.mil/submit/display.asp?story\\_id=75039](https://www.navy.mil/submit/display.asp?story_id=75039))



Εικόνα 3.3: Το AUV REMUS. (Πηγή: <http://www.navaldrone.com/Remus.html>)

Η ανάπτυξη και χρήση βιομιμητικής σχεδίασης αυτόνομων UUVs (BAUVs/Biological AUVs) είναι κάτι που αφορά το άμεσο μέλλον. Τέτοια οχήματα είναι προϊόντα ανάπτυξης συστημάτων μηχανικής τα οποία ενσωματώνουν/έχουν χαρακτηριστικά που ομοιάζουν ή λειτουργούν με αντίστοιχα χαρακτηριστικά έμβιων οργανισμών. Στα ζώα-πρότυπα για τη δημιουργία BAUVs συμπεριλαμβάνονται ψάρια, δελφίνια, σαλάχια, καλαμάρια, σουπιές, θαλάσσιοι λέοντες, θαλάσσιες χελώνες, αστακοί, πιγκουίνοι και φίδια. Τα BAUVs φιλοδοξούν να παρουσιάσουν μία καινοτόμα προσέγγιση όσων αφορά την κίνηση εντός του υδάτινου στοιχείου, καθώς και να υπερνικήσουν τους περιορισμούς στους οποίους υπόκεινται τα αντίστοιχα οχήματα συμβατικής τεχνολογίας. Πιο συγκεκριμένα, οι βελτιώσεις που μπορούν να προκύψουν από τη χρήση βιομιμητικού σχεδιασμού είναι μεταξύ άλλων η αύξηση της δυνατότητας ελιγμών των οχημάτων, μεγαλύτερη ευελιξία, αυξημένη πρόωση, μεγαλύτερη ευστάθεια σε απαιτητικό περιβάλλον και καταστάσεις (π.χ. σε κύματα, θαλάσσια ρεύματα κ.α.), χαμηλή παρατηρησιμότητα, και δυνατότητα λειτουργίας

σε παράκτιο περιβάλλον, όπως επίσης και σε ανοιχτή θάλασσα[9]. Τέτοιες δυνατότητες θα μπορούσαν να αποτελέσουν το κλειδί για πλήθος νέων χρήσεων.

Τα BAUVs θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποστολές επιτήρησης, έρευνα και διάσωση, αποστολές φύλαξης, για εντοπισμό διακίνησης ανθρώπων και ναρκωτικών, στρατιωτικές αποστολές (π.χ. για επιτήρηση, επικοινωνίες, για αποστολές καθαρισμού θαλασσίων ναρκών, για εντοπισμό υποβρυχίων κλπ.), για τον εντοπισμό διαρροών σε πετρελαιοπηγές, εντοπισμό εκρηκτικών, εκτίμηση αλιευτικών αποθεμάτων κ.α. [9]. Τα BAUVs λειτουργώντας μιμούμενα υδρόβια πλάσματα, θα ήταν ιδανικά για προγραμματισμό με χρήση τεχνητής νοημοσύνης, έτσι ώστε να είναι πλήρως λειτουργικά σε περίπλοκες αποστολές και σε όλους τους ωκεανούς του κόσμου [13].

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται συνοπτική σύγκριση μεταξύ φύσης και τεχνολογίας αντλώντας πληροφορίες από τα ήδη λειτουργικά BAUVs. Εφόσον η πλειοψηφία των οχημάτων αυτών βασίζεται στη μορφολογία και τις δυνατότητες των ψαριών (λ.χ. τονοειδή) και των κητωδών (π.χ. δελφίνια), αυτά τα ζώα θα αποτελέσουν τους κύριους συγκριτικούς παράγοντες στο παρόν κείμενο.

## **3.2 AUVs και Πλεονεκτήματα Βιομιμητικής Σχεδίασης**

Τα μη επανδρωμένα υποβρύχια σκάφη προσδίδουν μεγάλες δυνατότητες στην προσπάθεια εξερεύνησης των υδάτινων όγκων της γης και των πλασμάτων που ζουν σε αυτούς. Ιδιαίτερα τα αυτόνομα μη επανδρωμένα υποβρύχια σκάφη, έχουν εξαιρετικά απαιτητικό έργο να εκτελέσουν λόγω της έλλειψης άμεσης υποστήριξης και τροφοδοσίας, που εν τοις πράγμασι επιβάλλεται από την τεχνολογική τους φύση. Συνεπώς, χαρακτηριστικά όπως η ταχύτητα, η αποδοτικότητα, η αυτονομία και η ικανότητα πραγματοποίησης ελιγμών είναι εξαιρετικά σημαντικά για τα AUVs. Οπότε, η μελέτη των υδρόβιων πλασμάτων ως πηγή εμπνεύσεως για το σχεδιασμό AUVs είναι εκ των ων ουκ άνευ για την τεχνολογική πρόοδο των οχημάτων αυτών.

### **3.2.1 Ταχύτητα**

Η ταχύτητα είναι ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά στο ζωικό βασίλειο. Μπορεί να αποτελέσει τον κρίσιμο παράγοντα στον αγώνα για επιβίωση: τη γραμμή



μεταξύ ζωής και θανάτου. Είτε στην προσπάθεια εύρεσης τροφής, είτε στην προσπάθεια αποφυγής ενός κυνηγού, ο κάτοχος της μεγαλύτερης ταχύτητας αποκτάει ένα σαφέστατο πλεονέκτημα. Τα πλάσματα του υδάτινου κόσμου δεν αποτελούν εξαίρεση στον κανόνα.

Εκτός από τις τορπίλες υπερσπηλαίωσης, οι οποίες μπορούν να αναπτύξουν ταχύτητες μέχρι και 200 κόμβων (103 m/s) [14] και τις συμβατικές τορπίλες [15], τα μεγάλα ψάρια (πχ ξιφίες, ιστιόψαρα, τονοειδή) και τα κητοειδή (δελφίνια, φάλαινες) μπορούν να κινηθούν γρηγορότερα από τα ήδη υπάρχοντα AUVs & BAUVs. Το προτέρημά τους αυτό ισχύει και σε απόλυτη ταχύτητα, αλλά και σε αναλογία ταχύτητας προς μήκος σώματος (BL) ανά δευτερόλεπτο (πίνακας 1). Το γρηγορότερο συμβατικό AUV είναι το σκάφος REMUS M3V, το οποίο επιτυγχάνει ταχύτητες των 5.14 m/s (5.62 BL / s). Αντίστοιχα, το ταχύτερο BAUV είναι το BIOswimmer. Το σκάφος αυτό έχει σώμα σε μορφή τόνου και κινείται με τη χρήση προπέλας, επιτυγχάνοντας έτσι μέγιστη ταχύτητα στα 2.57 m/s (1.69 BL/s) [9].

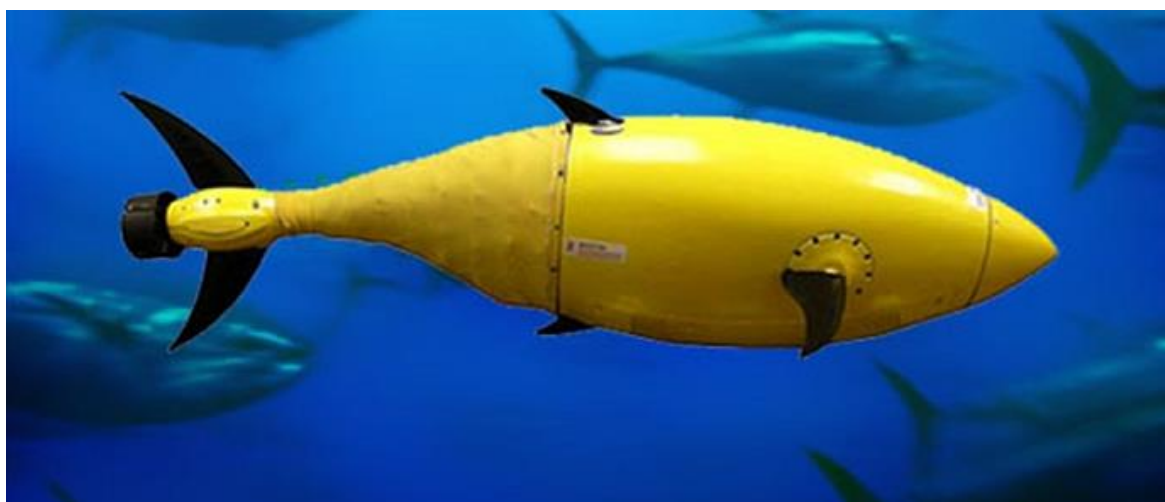


Εικόνα 3.4: Καλλιτεχνική αναπαράσταση τορπίλης υπερσπηλαίωσης στο πεδίο δράσης. ( Πηγή: <https://navalnews.net/a-gamechanger-weapon-supercavitating-torpedo/>)

Τα γρηγορότερα ψάρια είναι τα Μάρλιν (Marlin). Οι ταχύτητές τους (33.33-36.11 m/s) μπορούν ξεπεράσουν ακόμα και τις συμβατικές τορπίλες (20.5 m/s). Τα ψάρια, υπακούοντας στο νόμο της ελαχίστης ενέργειας, συνήθως κινούνται σε αρκετά χαμηλότερες ταχύτητες από το μέγιστο των δυνατοτήτων τους. Η κίνηση με υψηλές

ταχύτητες εντός του νερού είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα, συνεπώς χρησιμοποιείται μόνο για μικρά χρονικά διαστήματα [9].

Από τον πίνακα 3.1.1 & 3.1.2 παρατηρείται πως πολλά υδρόβια πλάσματα μπορούν να αναπτύξουν ταχύτητες μεγαλύτερες από αυτές των συμβατικών AUVs, αλλά και των BAUVs. Οι επιδόσεις αυτές στην ταχύτητα μπορούν να δικαιολογηθούν και λόγω της φυσιολογίας των ζώων αυτών. Τα υδρόβια πλάσματα χρησιμοποιούν όλο τους το σώμα για τη δημιουργία ώσης. Μπορεί να θεωρηθεί πως οι μύες λειτουργούν ως ο κινητήρας του συστήματος με τους τένοντες και τους συνδέσμους να λειτουργούν ως η μετάδοση του συστήματος και τα πτερύγια να λειτουργούν ως η προπέλα. Ο συνδυασμός των δράσεων αυτών δημιουργεί έναν εξαιρετικό μηχανισμό ώσης, ο οποίος σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα ώσης (προπέλες) είναι αποδοτικότερος και δεν προκαλεί σπηλαίωση κατά τη λειτουργία του[9].

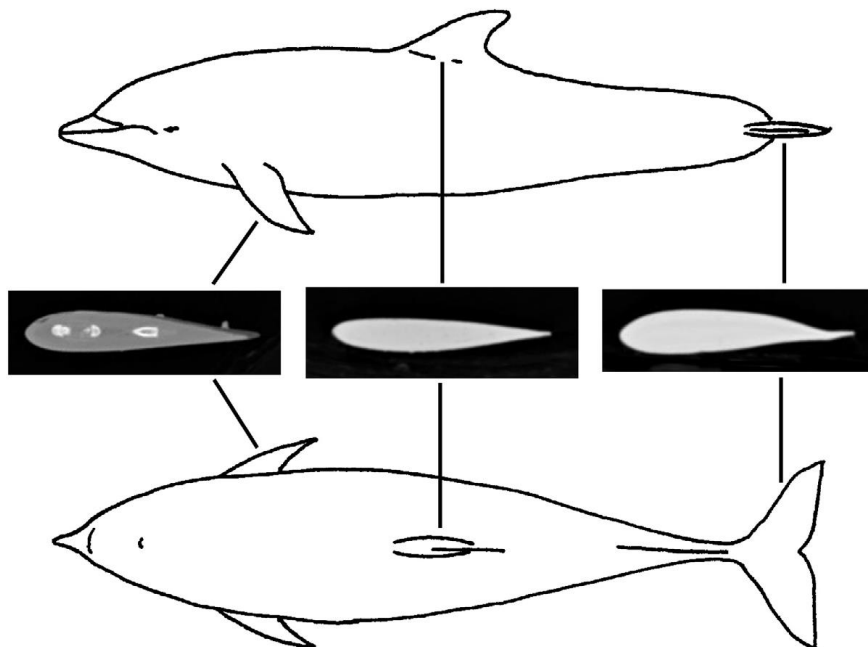


Εικόνα 3.5: Το σκάφος BIOswimmer (Πηγή: <https://www.sbir.gov/node/735801>)

Στον αγώνα για ταχύτητα εντός του υδάτινου στοιχείου, η φύση δεν εξαντλείται μόνο στους μηχανισμούς δημιουργίας ώσης. Στην εξίσωση των υψηλών ταχυτήτων σημαντικοί παράγοντες είναι επίσης ο υδροδυναμικός σχεδιασμός, όπως και διάφοροι μηχανισμοί για τη μείωση των τριβών. Ένας απ τους βασικότερους

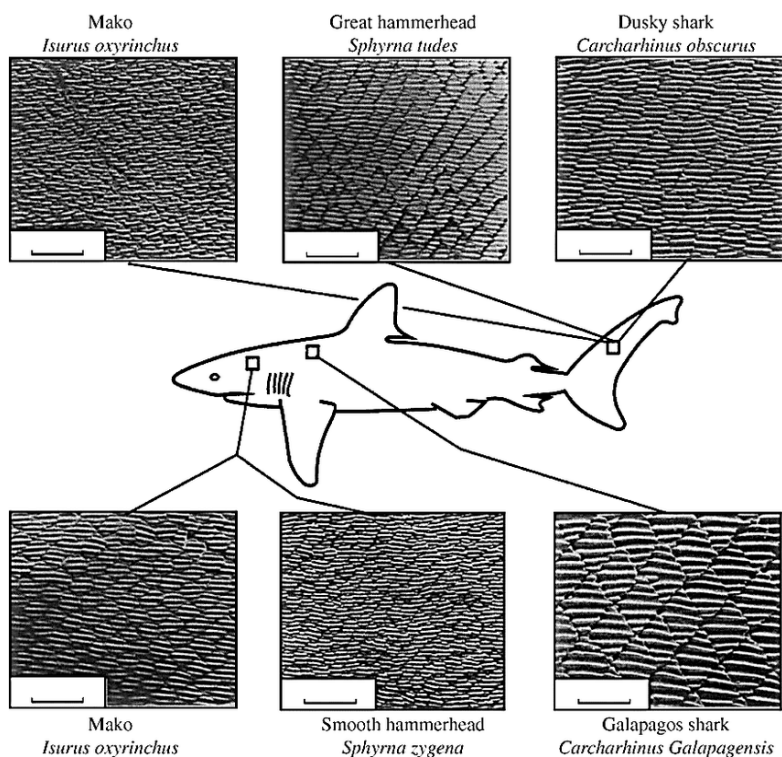
τρόπους επίτευξης καλού υδροδυναμικού προφίλ στη φύση, είναι η ατρακτοειδής δομή του σώματος των υδρόβιων πλασμάτων. Αυτός ο σχεδιασμός δεν παρατηρείται μόνο στο κύριο σώμα όσων ζώων μπορούν να αναπτύξουν υψηλές ταχύτητες κολυμπώντας, αλλά και στα πτερύγιά τους. Ο ατρακτοειδής σχεδιασμός μειώνει τους στροβιλισμούς που δημιουργούνται στο πίσω μέρος του σώματος του ζώου. Η μείωση των στροβιλισμών μειώνει και τις αντιστάσεις στην κίνηση εντός του ρευστού. Κάτι τέτοιο μπορεί επίσης να επιτευχθεί μεταφέροντας το μέγιστο πλάτος της ατρακτοειδούς διατομής στο 34%-50% του μήκους σώματος, όπως παρατηρείται στις σκομβρίδες (τονοειδή) και τα κητώδη[9].

Ένας δείκτης για το πόσο υδροδυναμικό είναι ένα σώμα ή ένα σκάφος είναι το μέγεθος του λόγου FR (Fineness Ratio), ο οποίος ισούται με το μέγιστο μήκος του σώματος προς το μέγιστο πλάτος[16]. Τα σώματα ατρακτοειδούς διατομής παρουσιάζουν μικρότερες αντιστάσεις όταν ο δείκτης FR τους είναι στο διάστημα μεταξύ 3 έως 7. Εν γένει, τα ταχυκίνητα υδρόβια πλάσματα έχουν λόγο FR μεταξύ του 3,3 και 8,0 [9].



Εικόνα 3.6: Πλευρική και ραχιαία όψη καθώς και οι διατομές των πτερυγίων (πλευρικά, ραχιαία, ουραίο) ενός ρινοδέλφινου (*Tursiops truncatus*). Ο ατρακτοειδής σχεδιασμός του σώματος όπως και των πτερυγίων του δελφινιού αυτού είναι εμφανής. Το συγκεκριμένο δελφίνι μπορεί να αναπτύξει ταχύτητες της τάξεως των 11,20 m/s . (Πηγή: Frank E Fish 2020 *Bioinspir. Biomim.* 15 025001)

Πέρα από τη σχήμα σώματος, τα υδρόβια πλάσματα που είναι ικανά για υψηλές ταχύτητες είναι προικισμένα από τη φύση και με άλλους μηχανισμούς για ώστε να επιτευχθεί μείωση τριβών. Για παράδειγμα, τα δελφίνια και οι φάλαινες έχουν λείο δέρμα. Τα ψάρια είναι επικαλυμμένα με βλέννα ώστε η επιφάνειά τους να είναι λεία και αντιστοίχως η χημική της σύνθεση μειώνει επίσης τις αντιστάσεις. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το δέρμα των καρχαριών ως προς τη μείωση των αντιστάσεων εντός του υδάτινου στοιχείου. Αν και εκ πρώτης όψεως φαίνεται να είναι λείο, μια κοντινότερη ματιά αποκαλύπτει την ιδιαιτερότητά του. Όντας τραχύ στην αφή, η δομή του κρύβει ένα πλέγμα από μικροσκοπικά αυλακωτά λέπια τα οποία σχηματίζοντας «κανάλια» βοηθούν στη μείωση της οπισθέλκουσας (ταυτοχρόνως, αυτό το χαρακτηριστικό του καρχαρία εμποδίζει την εγκατάσταση παρασίτων στο σώμα του). Αντιστοίχως, «κανάλια» δημιουργούν και οι ραχιαίες αυλακώσεις της δερματοχελώνας (*Dermochelys coriacea*) δίνοντάς της υδροδυναμικό πλεονέκτημα. Τα ανωτέρω δεν εξαντλούν τους μηχανισμούς που μπορεί να συναντήσει κανείς στη φύση προς ωφέλεια της ταχύτητας, είναι όμως ενδεικτικοί[9].



Εικόνα 3.7: Λεπτομερής απεικόνιση δέρματος διαφόρων καρχαριοειδών.

(Πηγή:[https://www.researchgate.net/figure/Shark-skin-source\\_fig1\\_327269800](https://www.researchgate.net/figure/Shark-skin-source_fig1_327269800))



Εικόνα 3.8: Δερματοχελώνα (*Dermochelys coriacea*). Διακρίνονται στη ράχη της οι αυλακώσεις. (Πηγή: <http://www.nestonline.org/leatherback-dermochelys-coriacea/>)

Πίνακας 3.1 : Η μέγιστη ταχύτητα και η μέγιστη ταχύτητα συναρτήσει του μήκους σώματος για UAV, BUAV και θαλάσσιων ζώων. (Πηγή: Frank E Fish 2020 Bioinspir. Biomim. 15 025001)

Table 1. (Continued)

Type	Length (m)	Max. Speed ( $\text{m s}^{-1}$ )	Max. Speed ( $\text{BL s}^{-1}$ )	Reference
<b>Animals</b>				
Blue whale	NA	10.30	NA	Gawn (1948)
Bottlenose dolphin	2.40	11.20	4.67	Rohr <i>et al</i> (2002)
California sea lion	1.60	5.50	3.44	Kooyman (1989)
Common dolphin	1.79	14.00	7.84	Aleyev (1977)
Fin whale	NA	11.11	NA	Vidal and Pechter (1989)
Harbor porpoise	NA	6.17	NA	Gaskin <i>et al</i> (1974)
Harbor seal	1.60	4.90	3.06	Williams and Kooyman (1985)
Horse mackerel	0.56	6.00	10.71	Aleyev (1977)
Killer whale	NA	15.40	NA	Johannessen and Harder (1960)
King penguin	1.10	3.40	3.09	Clark and Bemis (1979)
Leatherback sea turtle	1.69	2.80	1.66	Eckert (2002)
Marlin	NA	36.11	NA	Barsukov (1960)
Sailfish	NA	33.33	NA	Kramer (1960)
Shortfin mako shark	NA	19.44	NA	Diez <i>et al</i> (2015)
Skipjack tuna	0.50	9.50	19.00	Magnuson (1978)
Spotted dolphin	1.86	11.05	5.94	Lang and Pryor (1966)
Squid	0.42	3.90	9.29	Foyle and O'Dor (1988)
Striped dolphin	NA	8.89	NA	Ridgway and Johnston (1966)
Swordfish	3.00	36.10	12.03	Aleyev (1977)
Yellowfin tuna	0.76	20.72	27.26	Walters and Fiersteine (1964)
Wahoo	1.13	21.34	18.88	Walters and Fiersteine (1964)



**Table 1.** List of maximum speeds for AUVs, BAUVs, and marine animals.

Type	Length (m)	Max. Speed (m s <sup>-1</sup> )	Max. Speed (BL s <sup>-1</sup> )	Reference
<b>Conventional AUVs</b>				
ASW torpedo	2.60	20.50	7.88	Cho <i>et al</i> (2007)
AutoSub AUV	5.50	5.14	0.93	Phillips <i>et al</i> (2018)
Bluefin-9M AUV	2.50	2.57	1.03	McColgan and McGookin (2016)
Conventional torpedo	NA	20.50	NA	Zhan <i>et al</i> (2011)
Folaga I	3.00	0.40	0.13	Alvarez <i>et al</i> (2005)
Guanay II	2.30	1.00	0.43	Gomáriz <i>et al</i> (2015)
Iver3	2.16	2.00	0.93	<a href="https://ocean-server.com/iver3/">https://ocean-server.com/iver3/</a>
Iver4	2.50	2.06	1.29	<a href="https://ocean-server.com/iver4-pw/">https://ocean-server.com/iver4-pw/</a>
Manta test vehicle	10.44	2.32	0.22	<a href="https://auvac.org/explore- database/simple-search">https://auvac.org/explore- database/simple-search</a>
MUN explorer AUV	4.50	2.50	0.56	Issac <i>et al</i> (2007)
REMUS 100	1.60	2.57	1.61	Stanway (2008)
REMUS 600	2.70	2.30	0.85	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/ REMUS_(AUV)">https://en.wikipedia.org/wiki/ REMUS_(AUV)</a>
REMUS 6000/kingfish	3.93	2.57	0.65	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/ REMUS_(AUV)">https://en.wikipedia.org/wiki/ REMUS_(AUV)</a>
REMUS M3V	0.92	5.14	5.62	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/ REMUS_(AUV)">https://en.wikipedia.org/wiki/ REMUS_(AUV)</a>
SeaBED AUV	2.00	0.50	0.25	Tolimieri <i>et al</i> (2008)
SLOCUM UGS	1.52	0.20	0.13	McColgan and McGookin (2016)
SPRAY UGS	2.00	0.26	0.13	McColgan and McGookin (2016)
Torpedo Mark 48	5.79	28.34	4.89	Nesteruk (2019)
Torpedo spearfish	7.00	41.67	5.95	Nesteruk (2019)
<b>BAUVs</b>				
ADCSL robot fish	0.60	0.70	1.16	Mohammadshahi <i>et al</i> (2008)
Aquatic flight model	NA	NA	2.90	Man <i>et al</i> (2012)
AquaPenguin	0.77	1.39	1.81	<a href="https://auvac.org/explore- database/simple-search">https://auvac.org/explore- database/simple-search</a>
BFFAUV	NA	1.38	NA	Seo <i>et al</i> (2010)
BioSwimmer BAUV	1.52	2.57	1.69	McColgan and McGookin (2016)
Carangiforme robot	0.35	0.58	1.68	Fujiwara and Yamaguchi (2017)
Dolphin robot	0.56	0.61	1.11	Yu <i>et al</i> (2012)
Dolphin robot	0.72	2.05	2.85	Yu <i>et al</i> (2016b)
Electronic fish	0.09	0.14	1.45	Li <i>et al</i> (2017)
Finnegan	2.00	1.44	0.72	Stanway (2008)
Fish robot	0.35	0.20	0.60	Hirata <i>et al</i> (2000)
Four-fin UUV	0.41	0.51	1.25	Geder <i>et al</i> (2011)
GhostSwimmer	1.52	2.00	1.32	<a href="https://auvac.org/explore-database/simple-search">https://auvac.org/explore-database/simple-search</a>
Gliding robotic fish	0.90	0.20	0.22	Zhang <i>et al</i> (2016)
Lamprey robot	1.14	1.40	0.64	Leftwich and Smits (2011)
Madeleine	0.78	0.71	0.91	Long <i>et al</i> (2006a)
Mantabot	0.40	0.43	1.00	Fish <i>et al</i> (2017)
Nero tartaruga	NA	2.00	NA	<a href="https://auvac.org/explore- database/simple-search">https://auvac.org/explore- database/simple-search</a>
Robo-ray II	0.32	0.16	0.50	Cai <i>et al</i> (2010)
Robopike	0.82	0.09	0.11	Kumph (2000)
RoboSalmon BAUV	0.90	0.14	0.16	McColgan and McGookin (2016)
RoboScallop	0.08	0.16	2.00	Robertson <i>et al</i> (2019)
Robotic fish	0.35	0.50	1.43	Yu <i>et al</i> (2016c)
Robotic fish (group of 3)	0.45	0.60	1.33	Li <i>et al</i> (2019)
Robotuna	2.40	1.25	0.52	Anderson and Chhabra (2002)
Soft robotic fish	0.48	0.24	0.50	Katzschmann <i>et al</i> (2018)
Subcarangiforme robot	0.43	0.50	1.17	Fujiwara and Yamaguchi (2017)
Subsea glider	3.50	2.77	0.79	<a href="https://auvac.org/explore- database/simple-search">https://auvac.org/explore- database/simple-search</a>
Tadros (robotic tadpole)	0.07	0.07	1.01	Long <i>et al</i> (2006b)
Tunabot	0.26	1.02	4.00	Zhu <i>et al</i> (2019)
UC-Ika 1	NA	0.29	NA	Farideddin <i>et al</i> (2015)
Wire-driven robot fish	0.31	0.82	0.25	Li <i>et al</i> (2013)

(Continued)

### 3.2.2 Αποδοτικότητα και Αυτονομία

Η αποδοτικότητα είναι ένας κρίσιμος παράγοντας είτε αναφερόμαστε σε υδρόβια πλάσματα, είτε σε AUVs. Το χαρακτηριστικό αυτό έχει να κάνει με την κατανάλωση ενέργειας, και κατ' επέκταση με την απόσταση που μπορεί να διανυθεί και τις ενέργειες που μπορούν να πραγματοποιηθούν με δεδομένο ενεργειακό απόθεμα. Η αποδοτικότητα ως μέτρο, θα μπορούσε να οριστεί ως ο λόγος της «χρήσιμης» από τη δαπανώμενη ενέργεια προς την συνολικά διαθέσιμη ενέργεια [17].

Η επιχειρησιακή ακτίνα και η χρονική διάρκεια της αυτονομίας των AUVs είναι περιορισμένη στα στενά πλαίσια της χωρητικότητας των μπαταριών τους ή των δεξαμενών καυσίμου τους. Τα AUVs που κινούνται με παθητικό τρόπο εντός του νερού, σαφέστατα μπορούν να έχουν πολλαπλάσια ακτίνα δράσης, όμως και σε αυτά η ακτίνα δράσης τους δεν είναι ανεξάντλητη (π.χ. το SLOCUM με ακτίνα δράσης τα 40,000 χιλιόμετρα, το Spray με επιχειρησιακό χρόνο δράσης τις 7920 ώρες / 330 ημέρες). Μηχανισμοί για συλλογή ενέργειας για τη λειτουργία των AUVs από το περιβάλλον (π.χ. ηλιακή ενέργεια, μέσω πέψης οργανικών ουσιών κ.α.) πιθανόν να έχουν μεγαλύτερη χρήση και καλύτερη εφαρμογή στο μέλλον[9].

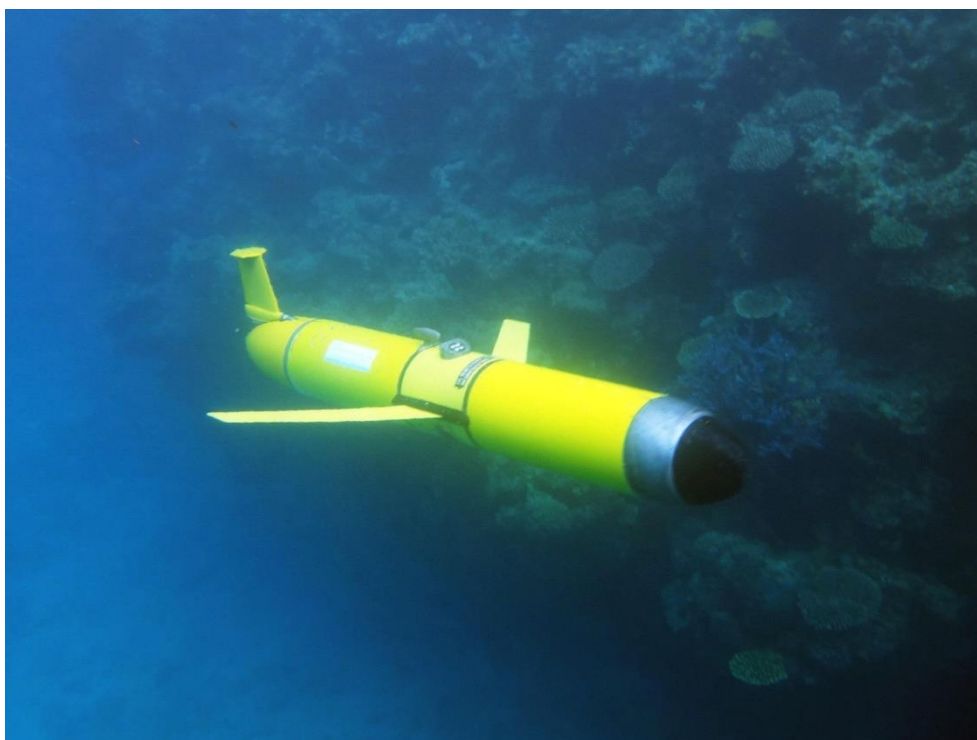
Τα υδρόβια πλάσματα συνεχίζουν να διατηρούν πλεονέκτημα στον τομέα της αυτονομίας έναντι στα AUVs. Τα ζώα αυτά μπορούν να καταναλώσουν την τροφή τους στο περιβάλλον τους και κατά συνέπεια να τροφοδοτήσουν το σώμα τους με ενέργεια, ώστε να μπορούν να κινούνται. Ωστόσο η κατανομή της τροφής εντός του υδάτινου στοιχείου δεν είναι ομοιόμορφη και ταυτοχρόνως τα ζώα ανταγωνίζονται μεταξύ τους για τροφή. Οπότε η προσαρμογή του μεταβολισμού τους αλλά και του τρόπου κολύμβησης πρέπει να γίνεται ανάλογα με το απόθεμα ενεργειακών πηγών[18].



Εικόνα 3.10: Μεγάπτερη φάλαινα (*Megaptera novaeangliae*) κάνοντας άλμα έξω από το νερό. Τα εξογκώματα στα πλευρικά πτερύγια είναι εμφανή. (Πηγή: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%B5%CE%B3%CE%AC%CF%80%CF%84%CE%B5%CF%81%CE%B7>)

Μια απόπειρα για να μετρήσουμε την αποδοτικότητα ενός AUV ή ενός υδρόβιου πλάσματος είναι μέσω του αριθμού Froude ( $\eta_p$ ), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ώσης προς τη συνολική ισχύ που δαπανάται. Μία συμβατική προπέλα σταθερού βήματος έχει ως βέλτιστο αριθμό  $\eta_p$  0,7. Η αποδοτικότητα όμως μίας τέτοιας προπέλας θα μπορούσε να αυξηθεί μέσω μιας βιομιμητικής τροποποίησης, υιοθετώντας τα εξογκώματα που διαθέτει η μεγάπτερη φάλαινα (*Megaptera novaeangliae*) στα πτερύγιά της. Για ταχυκίνητα υδρόβια πλάσματα, ο αριθμός  $\eta_p$  τους είναι 0,76-0,90 για τα τονοειδή, 0,89 για το σαλάχι μάντα (*Manta birostris*) και 0,75-0,90 για κητώδη (φάλαινες, δελφίνια κ.α.) Ένα άλλο μειονέκτημα της συμβατικής προπέλας είναι πως ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης  $\eta_p$  επιτυγχάνεται σε ένα πολύ στενό εύρος ταχυτήτων. Η αποδοτικότητά τους μειώνεται ραγδαία σε ταχύτητες μεγαλύτερες ή μικρότερες απ το προαναφερθέν βέλτιστο εύρος ταχυτήτων. Αντίθετα από τις συμβατικές προπέλες, τα κητώδη διατηρούν μεγάλο αριθμό  $\eta_p$  σε ένα εκτεταμένο εύρος ταχυτήτων. Φαίνεται πως με τον έλεγχο της ελαστικότητας της ουράς τους, τα κητώδη, επιτυγχάνουν υψηλό βαθμό απόδοσης  $\eta_p$  [9].





Εικόνα 3.9: Το σκάφος SLOCUM στο πεδίο δράσης. (Πηγή: <https://www.wired.com/story/hurricane-florence-underwater-drone-slocum-glider/>)

### 3.2.3 Ικανότητα Πραγματοποίησης Ελιγμών

Η αλλαγή κατεύθυνσης ενός σκάφους συνδέεται στενά με την ικανότητα πραγματοποίησης ελιγμών. Η ικανότητα πραγματοποίησης ελιγμών είναι ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των υδρόβιων πλασμάτων, των σκαφών επιφανείας, αλλά και των υποβρυχίων οχημάτων. Αλλαγές και διόρθωση πορείας, αποφυγή εμποδίων, ανάδυση, κατάδυση, σύλληψη θηραμάτων, προσέγγιση ενός στόχου και διατήρηση της σταθερότητας κάτω από αντίξοες συνθήκες συνδέονται άμεσα με την ικανότητα πραγματοποίησης ελιγμών[19].

Τα υδρόβια πλάσματα είναι σύνηθες να μπορούν να ελίσσονται εξαιρετικά καλά, διατηρώντας τον έλεγχο του σώματός τους, καθώς και την ευστάθειά τους. Για παράδειγμα, ένα ψάρι μπορεί να διατηρήσει την ταχύτητά του ενώ πραγματοποιεί στροφή με ακτίνα το 10-30% του μήκους σώματός του, ενώ ένα πλοίο θα πρέπει να μειώσει τουλάχιστον κατά το ήμισυ την ταχύτητά του για να αναστρέψει την πορεία του[20].

Η ικανότητα πραγματοποίησης ελιγμών μπορεί να μετρηθεί ως συνάρτηση της ακτίνας στροφής ως προς το μήκος σώματος του οχήματος ή ζώου που ελίσσεται

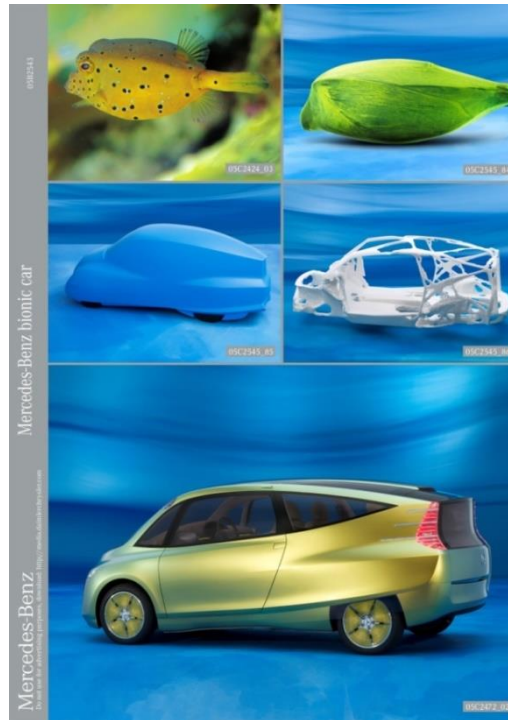
(R/BL όπου R η ακτίνα στροφής και BL το μήκος σώματος του σκάφους/ζώου). Η μέγιστη ευελιξία συνδέεται άμεσα με μικρή ακτίνα στροφής. Σε μερικές περιπτώσεις, AUVs (πχ Six-finned BAUV) και ζώα (π.χ. boxfish) μπορούν να πραγματοποιήσουν στροφή με μηδενική ακτίνα. Ωστόσο, και σε αυτές τις περιπτώσεις, η ικανότητα προς ελιγμό περιορίζεται σχετικά από το μήκος σώματος τους κατά την περιστροφή[9].

Όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα, η διαφορά μεταξύ συμβατικών AUVs και υδρόβιων πλασμάτων ως προς την ικανότητα να ελιχθούν είναι σημαντική. Η ακτίνα στροφής των AUVs είναι εν γένει μεγάλη ως προς το μήκος του (δείκτης R/BL) σε σύγκριση με αυτή των ζώων και αυτό διότι συνήθως έχουν άκαμπτο σώμα σε σχήμα τορπίλης και λίγες επιφάνειες ελέγχου. Αντίθετα, τα υδρόβια πλάσματα έχουν αρκετές επιφάνειες ελέγχου και ευέλικτο σώμα. Ενδιαφέρουσα εξαίρεση είναι το ψάρι κύβος(boxfish). Το boxfish έχει την ικανότητα να στρίβει με μηδενική ακτίνα στροφής, ταυτόχρονα όμως το σώμα του είναι άκαμπτο. Αυτό επιτυγχάνεται χάρις στα πολλαπλά κινητά πτερύγια που διαθέτει στο σώμα του. Το συγκεκριμένο μάλιστα ψάρι έχει ενδιαφέρον από βιομιμητικής άποψης σε πολλούς τομείς, μιας και το εξαιρετικά ιδιαίτερο και υδροδυναμικό του σχήμα έχει αποτελέσει αντικείμενο έμπνευσης ακόμα και στη σχεδίαση αυτοκινήτων (Mercedes-Benz Bionic car). Τα BAUVs αντίστοιχα, με την προσθήκη πολλαπλών επιφανειών ελέγχου και με σώματα που δύνανται να λυγίζουν έχουν επιτύχει τη μείωση της ακτίνας στροφής, όμως υπάρχουν ακόμα δυνατότητες περεταίρω βελτίωσης.



Εικόνα 3.11: Boxfish, *Ostracion cubicus* (Πηγή: <https://en.wiktionary.org/wiki/boxfish>)

Άλλος παράγοντας που αφορά την ευελιξία ενός σώματος είναι και η ταχύτητα με την οποία μπορεί να στρίψει. Η γωνιακή ταχύτητα (μοίρες ανά δευτερόλεπτο) αποτελεί το κατ' εξοχήν εργαλείο για τη μέτρησή της. Σε γρήγορους ελιγμούς, τα ζώα έχουν σαφές πλεονέκτημα έναντι των υπαρχόντων τεχνολογιών των AUVs και BAUVs (παρακάτω πίνακες). Υπάρχουν ψάρια που μπορούν να στρίψουν με



Εικόνα 3.13: Το ψάρι-κύβος (boxfish) και το bionic car της Mercedes-Benz ως αποτέλεσμα βιομιμητικής σχεδίασης. (Πηγή: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Taking-its-clues-from-nature--Mercedes-Benz-bionic-car.xhtml?oid=9361190>)

γωνιακή ταχύτητα άνω των  $5000^\circ/\text{s}$ , ενώ τα συμβατικά AUVs δεν ξεπερνάνε τις  $75^\circ/\text{s}$  και τα BAUVs φτάνουν μέχρι τις  $670^\circ/\text{s}$ . Δύο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την ταχύτητα ενός ελιγμού είναι το μήκος ενός σώματος, αλλά και η ευελιξία του. Από τον πίνακα βλέπουμε η ιριδίζουσα πέστροφα (rainbow trout) μπορεί να επιτύχει εξαιρετικά μεγάλη γωνιακή ταχύτητα όταν στρίβει, κάτι που μαρτυρά το μικρό της μέγεθος. Αντιστοίχως, τα υποβρύχια και τα AUVs σε μορφή торπίλης, περιοριζόμενα από το μέγεθός τους, έχουν αρκετά μικρή γωνιακή ταχύτητα όταν στρίβουν. Ενώ όμως τα υποβρύχια δεν έχουν αντίστοιχο θαλάσσιο ζώο ώστε να συγκριθούν βάσει μεγέθους, τα θαλάσσια θηλαστικά (π.χ. φάλαινες,

δελφίνια, φώκιες ) είναι σαφέστατα πιο ευέλικτα από AUVs και BAUVs ίδιου και μικρότερου μεγέθους από αυτά[9].



Εικόνα 3.12 Ιριδίζουσα πέστροφα, *Oncorhynchus mykiss*

(Πηγή: [https://en.wiktionary.org/wiki/rainbow\\_trout](https://en.wiktionary.org/wiki/rainbow_trout))

### 3.2.4 Επίλογος

Όσο η μελέτη των ωκεανών προχωρά, τόσο η ανάγκη για βελτίωση των μη επανδρωμένων αυτόνομων οχημάτων(AUVs) γίνεται επιτακτικότερη. Το παρόν τεχνολογικό επίπεδο των συμβατικών AUVs περιορίζει τα οχήματα σε τομείς όπως ταχύτητα, αποδοτικότητα, ικανότητα πραγματοποίησης ελιγμών κλπ. Στον αντίποδα, τα BAUVs που βασίζονται σε υδρόβια πλάσματα βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και περεταίρω εξέλιξή τους είναι απαραίτητη ώστε να πλησιάσουν τις αποδόσεις που έχουν τα υδρόβια ζώα. Ο υδάτινος κόσμος αποτελεί μια δεξαμενή γεμάτη από πλάσματα δοκιμασμένα από αιώνες εξέλιξης στον αγώνα για επιβίωση. Συνεπώς, με το βλέμμα στραμμένο στη φύση και με τις υπάρχουσες τεχνολογίες στη φαρέτρα της επιστήμης, ο δρόμος για την εξερεύνηση των ωκεανών και την εξέλιξη της βιομιμητικής μπορεί να γίνει ευκολότερος.

**Πίνακας 3.2: Τα μήκη σώματος, η ελάχιστη ακτίνα στροφής σε μήκος, συναρτήσει του μήκους σώματος και η μέγιστη γωνιακή ταχύτητα θαλάσσιων ζώων και AUVs. (Πηγή: Frank E Fish 2020 Bioinspir. Biomim. 15 025001)**

**Table 2.** Minimum radius and maximum turn rate for AUVs, BAUVs, and animals.

Type	Length (m)	Min. radius (m)	Min. radius (BL)	Max. turn rate (deg s <sup>-1</sup> )	Reference
<b>Conventional AUVs</b>					
ASW torpedo	2.60	65.00	25.00	NA	Cho <i>et al</i> (2007)
Conventional submarine	NA	120.00	NA	17.50	Zhan <i>et al</i> (2011)
Conventional torpedo	NA	65.00	NA	9.00	Zhan <i>et al</i> (2011)
Dorado	NA	10.00	NA	NA	Murthy <i>et al</i> (2010)
Folaga I	3.00	71.40	23.80	NA	Alvarez <i>et al</i> (2005)
Generic UUV	6.10	2.70	0.44	4.00	Anderson and Chhabra (2002)
Iver2-580 AUV	1.60	4.00	2.50	NA	McColgan and McGookin (2016)
LDATV	NA	NA	1.00	NA	Bandyopadhyay <i>et al</i> (1995)
Microrobot	0.05	0.03	0.60	6.00	Ye <i>et al</i> (2007)
MUN explorer AUV	4.50	22.50	5.00	NA	Issac <i>et al</i> (2007)
REMUS	1.60	4.64	2.90	9.88	Stanway (2008)
SLOCUM UGS	1.52	7.00	4.61	NA	McColgan and McGookin (2016)
SoFi	NA	0.78	NA	NA	Katzschmann <i>et al</i> (2018)
SPC-III	NA	NA	2.00	75.00	Liang <i>et al</i> (2011)
SPRAY UGS	2.0	0.26	0.13	NA	McColgan and McGookin (2016)
Torpedo	NA	NA	5.00	NA	Bandyopadhyay <i>et al</i> (1995)
USS albacore	62.10	NA	NA	2.00	Miller (1991)
<b>BAUVs</b>					
BioSwimmer BAUV	1.52	1.00	0.66	NA	McColgan and McGookin (2016)
Bluefin-9M AUV	2.50	2.63	1.05	NA	McColgan and McGookin (2016)
Dolphin robot	0.56	0.22	0.40	31.88	Yu <i>et al</i> (2012)
Electronic fish	0.09	0.09	0.91	NA	Li <i>et al</i> (2017)
Finnegan	2.00	1.54	0.77	53.60	Stanway (2008)
Fishlike robot D	0.38	0.21	0.55	43.90	Pollard and Tallapragada (2019)
Four-fin UUV	0.40	NA	NA	30.00	Geder <i>et al</i> (2011)
Gliding robotic fish	0.90	0.34	0.38	NA	Zhang <i>et al</i> (2016)
MantaBot	0.40	NA	NA	53.70	Fish <i>et al</i> (2017)
Microrobot fish	NA	NA	NA	33.00	Tomie <i>et al</i> (2005)
Multijoint fish robot	0.59	NA	NA	200.00	Su <i>et al</i> (2013)
Multijoint fish robot	0.50	NA	0.30	670.00	Su <i>et al</i> (2013)
Robopike	0.82	NA	NA	17.50	Kumph (2000)
RoboSalmon BAUV	0.90	0.60	0.67	NA	McColgan and McGookin (2016)
Robotic fish	0.10	0.08	0.80	NA	Ye <i>et al</i> (2007)
Robotic fish	0.17	0.18	1.10	NA	McGovern <i>et al</i> (2009)
Robotic fish	0.34	0.16	0.47	36.00	Hirata <i>et al</i> (2000)
Robotic fish	0.50	0.15	0.30	200.00	Su <i>et al</i> (2013)
Robotic fish	0.41	0.36	0.89	53.00	Yu <i>et al</i> (2008)
Robotic fish	0.37	NA	NA	63.80	Yu <i>et al</i> (2016a)
Robotic fish	0.41	0.18	0.44	62.51	Yu <i>et al</i> (2008)
Robotic fish/pectoral fins	0.15	0.15	1.00	9.00	Behbahani <i>et al</i> (2013)
Robotic killer whale	1.58	2.69	1.70	7.80	Wu <i>et al</i> (2019)
Robotuna	2.40	1.20	0.50	75.00	Anderson and Chhabra (2002)
Six-finned BAUV	0.91	0.00	NA	40.00	Menozi <i>et al</i> (2008)
Wire-driven robot fish	0.31	0.30	0.96	6.84	Li <i>et al</i> (2013)
<b>Animals</b>					
Amazon river dolphin	2.56	0.26	0.10	123.75	Fish (2002)
Angelfish	0.07	NA	0.06	3244.08	Domenici and Blake (1991)
Beluga whale	3.23	0.50	0.15	245.00	Fish (2002)
Bluefish	0.22	NA	0.19	NA	Bandyopadhyay <i>et al</i> (1995)
Bottlenose dolphin	2.36	0.30	0.13	405.00	Fish (2002)

(Continued)

Table 2. (Continued)

Type	Length (m)	Min. radius (m)	Min. radius (BL)	Max. turn rate (deg s <sup>-1</sup> )	Reference
Bottlenose dolphin	NA	NA	0.08	1372.00	Maresh <i>et al</i> (2004)
Boxfish	0.12	NA	0.0005	200.50	Walker (2000)
Brief squid	0.09	NA	0.000 42	725.80	Jastrebsky <i>et al</i> (2016)
Brief squid	0.06	NA	0.007	302.60	Jastrebsky <i>et al</i> (2017)
California sea lion	1.72	0.28	0.16	690.00	Fish <i>et al</i> (2003a)
Commerson's dolphin	1.28	0.19	0.15	366.00	Fish (2002)
Crocodile	1.10	NA	NA	230.40	Frey and Salisbury (2001)
Cuttlefish	0.03	NA	0.000 13	485.00	Jastrebsky <i>et al</i> (2016)
Cuttlefish	0.09	NA	NA	383.00	Helmer <i>et al</i> (2017)
Dasyatis ray	1.05	1.00	0.09	32.00	Parson <i>et al</i> (2011)
Dolphin fish	1.09	NA	0.13	NA	Webb and Keyes (1981)
False killer whale	3.55	0.52	0.13	252.50	Fish (2002)
Hammerhead shark	0.75	NA	0.06	1221.00	Kajiura <i>et al</i> (2003)
Harbor seal	1.70	NA	NA	388.70	Geurten <i>et al</i> (2017)
Humpback whale	NA	NA	NA	13.80	Wiley <i>et al</i> (2011)
Killer whale	5.05	0.55	0.11	232.50	Fish (2002)
Knifefish	NA	NA	0.06	NA	Domenici and Blake (1997)
Leopard shark	0.35	0.002	0.006	300.23	Porter <i>et al</i> (2011)
Manta ray	1.25	0.48	0.37	67.32	Fish <i>et al</i> (2018)
Myliobatis ray	0.82	0.50	0.90	48.00	Parson <i>et al</i> (2011)
Penguin	0.58	0.14	0.24	575.80	Hui (1985)
Pike	NA	NA	0.09	NA	Domenici and Blake (1997)
Painted turtle	0.05	0.0001	0.002	501.80	Rivera <i>et al</i> (2006)
Rainbow trout	0.10	0.02	0.18	5157.00	Webb (1976)
Rainbow trout	0.39	0.01	0.18	2332.75	Webb (1976)
Rainbow trout	0.26	0.05	0.18	3114.14	Webb (1983)
Sandbar shark	0.69	NA	NA	246.37	Kajiura <i>et al</i> (2003)
Smallmouth bass	0.24	0.03	0.11	5509.61	Webb (1983)
Spiny dogfish	0.59	NA	0.06	1221.00	Domenici <i>et al</i> (2004)
Steller sea lion	2.26	0.61	0.27	274.27	Cheneval <i>et al</i> (2007)
Striped dolphin	2.13	0.42	0.20	453.33	Fish (2002)
Turtle ( <i>Chrysemys</i> )	0.13	NA	0.08	397.50	Mayerl <i>et al</i> (2018)
Turtle ( <i>Emydura</i> )	0.18	NA	0.01	477.80	Mayerl <i>et al</i> (2018)
Whirligig beetle	0.01	0.003	0.24	4437.50	Fish and Nicastro (2003)
Yellowfin tuna	0.35	0.07	0.20	425.60	Blake <i>et al</i> (1995)
Yellowtail	0.61	NA	0.23	NA	Webb and Keyes (1981)



# Κεφάλαιο 4ο : Βιομιμητική, Physarum Polycephalum, Αλγόριθμοι και Δίκτυα

## 4.1 Physarum Polycephalum και γνωρίσματά του με βιομιμητικό ενδιαφέρον

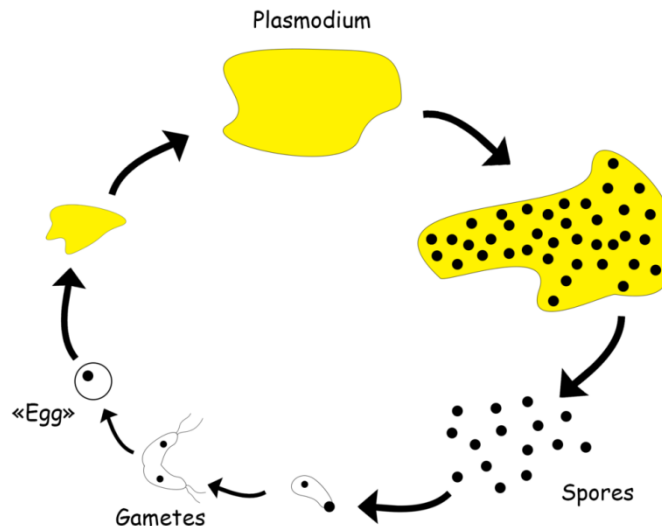
### 4.1.1 Εισαγωγή στον Physarum Polycephalum

Η εξέλιξη των έμβιων οργανισμών μέσω του ανταγωνισμού για επιβίωση, χάρισε σε πολλούς οργανισμούς ιδιαίτερες ικανότητες και χαρακτηριστικά. Πλην των ζώων που μπορεί να ενέπνεαν τον άνθρωπο κεντρίζοντάς του την προσοχή (όπως π.χ. οι αετοί και τα γεράκια με την οξυμένη όραση, η οργάνωση της αγέλης των λύκων, ο ιδιαίτερος τρόπος που τα δελφίνια κολυμπούν), άλλοι οργανισμοί, λιγότερο παρατηρήσιμοι, κρατάνε ακόμα τα εξελικτικά τους πλεονεκτήματα εκτός του οπτικού μας πεδίου. Ένας οργανισμός εξ αυτών είναι σίγουρα ο μυξομύκητας Physarum Polycephalum.

Ο μυξομύκητας Physarum Polycephalum, παρά το όνομά του, δεν είναι μύκητας αλλά αμοιβόζωο. Παρουσιάζει δε τη μεγαλύτερη μοριακή πολυπλοκότητα σε σύγκριση με τα άλλα αμοιβόζωα. Είναι ένας μεγάλος μονοκύτταρος οργανισμός που μπορεί να επεκταθεί σε επιφάνεια εκατοντάδων τετραγωνικών εκατοστών. Το κύτταρο δημιουργεί ψευδοπόδια για τη μετακίνησή του σε διάφορες επιφάνειες, με μέγιστη ταχύτητα τα 4 cm/h. Ζει σε σκιερά και θερμά μέρη με αυξημένη υγρασία. Η περιγραφή του κύκλου ζωής του έγινε πρώτη φορά από τον Howard το 1931. Αποτελείται από διάφορα στάδιο, όπως του σπόρου, του πλασμοδίου, του σκληρωτίου και των σποροκάρπιων[21]. Τα πειράματα και οι εφαρμογές που μας αφορούν είναι από τη φάση του πλασμοδίου. Ο Physarum Polycephalum έχει αρκετές ευφυείς ικανότητες, οι οποίες παρουσιάζονται σε επόμενες υποενότητες.

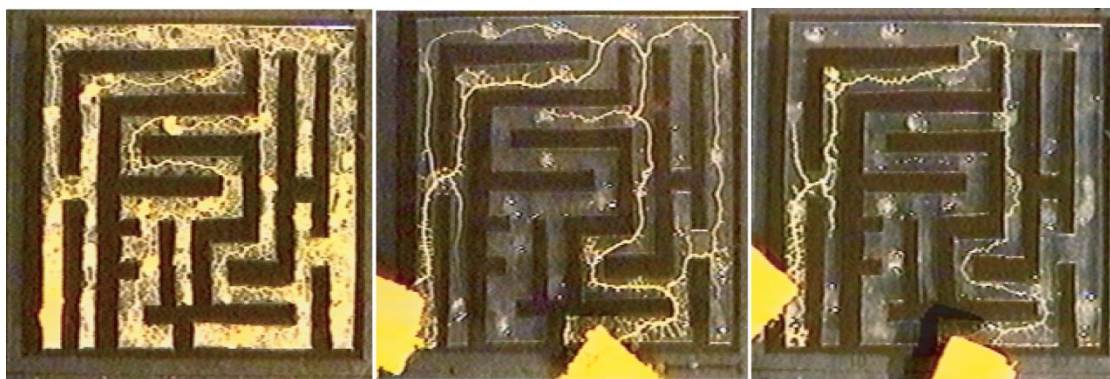
### 4.1.2 Ικανότητα εύρεσης της συντομότερης διαδρομής.

Η ικανότητα του Physarum Polycephalum να βρίσκει τη συντομότερη διαδρομή



Εικόνα 4.1: Ο κύκλος ζωής του *Physarum Polycephalum* (Πηγή: [https://en.wikidia.org/wiki/Physarum\\_polycephalum](https://en.wikidia.org/wiki/Physarum_polycephalum))

παρατηρήθηκε πρώτη φορά από τους Nakagaki κ.α. το 2000 [22]. Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε, ο *Physarum* βρήκε τη συντομότερη διαδρομή μεταξύ δύο επιλεγμένων σημείων σε ένα λαβύρινθο. Αξίζει να αναφερθεί πως ο *Physarum* μπορεί να λύσει και άλλα προβλήματα που μπορούν να μετασχηματιστούν ως πρόβλημα συντομότερης διαδρομής, όπως π.χ. το πρόβλημα του πύργου του Ανόι[23].



Εικόνα 4.2: Ο *Physarum Polycephalum* βρίσκει τη συντομότερη διαδρομή σε έναν λαβύρινθο. (Πηγή: Yahui Sun, 2019, *Physarum-inspired Network Optimization: A Review*)

#### 4.1.3 Δημιουργία δικτύων υψηλής ποιότητας.

Ο *Physarum Polycephalum* μπορεί να δημιουργήσει δίκτυα υψηλής ποιότητας για να ενώσει πολλαπλά σημεία που αποτελούν πηγή τροφής. Η ικανότητά του να κατασκευάσει δίκτυα τα οποία έχουν καλή ισορροπία μεταξύ κόστους,



αποδοτικότητα και ανθεκτικότητα , πιστεύεται πως είναι αποτέλεσμα εκατομμυρίων χρόνων φυσικής επιλογής. Για παράδειγμα, στο διάσημο πείραμα των Tero κ.α. το 2010 [24], ο Physarum ανέπτυξε δίκτυο με ανταγωνιστικές ποιότητες ως προς το σιδηροδρομικό δίκτυο του Τόκιο. Μετά το πείραμα αυτό, έχουν προσεγγιστεί και άλλα μεταφορικά δίκτυα από τον Physarum, όπως πχ Μεξικανικό και το Ιβηρικό δίκτυο εθνικών οδών.

#### **4.1.4 Προσαρμογή σε μεταβαλλόμενο περιβάλλον.**

Ο Physarum Polycerphalum είναι χημειοτακτικός, θερμοτακτικός και φωτοτακτικός οργανισμός. Πειράματα έχουν δείξει πως ο Physarum μπορεί να αποσυνδέσει και να επανασυνδέσει δίκτυα, σε διάστημα μερικών ωρών, ανάλογα με τις εκάστοτε εξωτερικές συνθήκες που μπορεί να τον επηρεάζουν. Παραδείγματος χάρη, όταν εφαρμόζονται χημικές ουσίες επί οποιουδήποτε μέρους του σώματος του Physarum, τότε όλος ο οργανισμός απομακρύνεται από το σημείο αυτό.

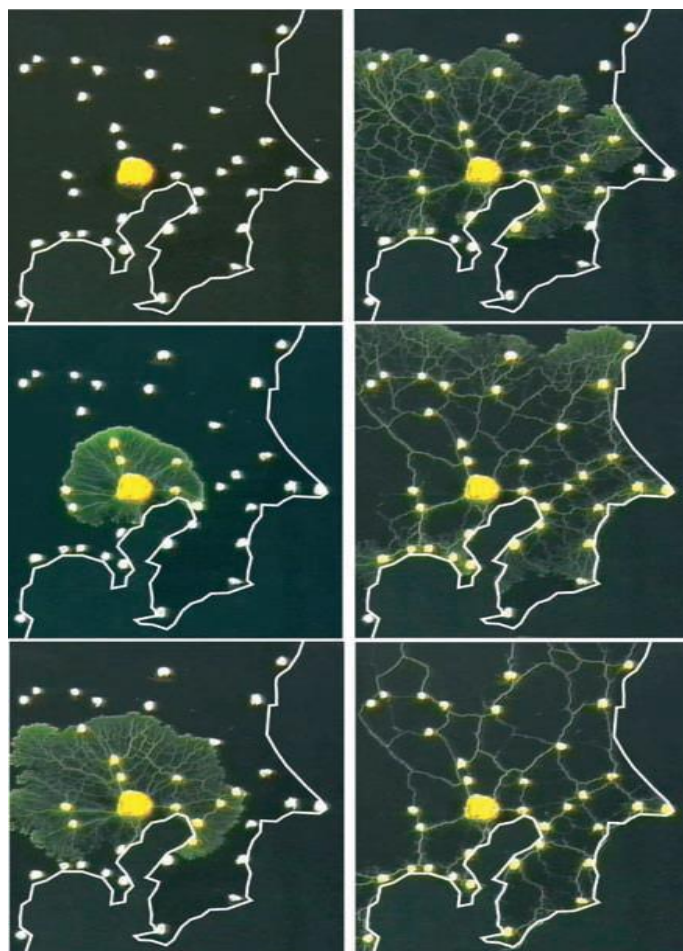
#### **4.1.5 Μάθηση και απομνημόνευση.**

Ο Physarum έχει την ικανότητα να μαθαίνει και να απομνημονεύει πληροφορίες. Το γεγονός ότι είναι μονοκύτταρος οργανισμός, κάνει αυτές τις ικανότητές του να μοιάζουν πραγματικά εντυπωσιακές [23]. Η ικανότητα μάθησης και απομνημόνευσης εντοπίστηκε από τους Saigusa κ.α. το 2008[25]. Στο πείραμά τους, υπέβαλαν τον Physarum σε δυσμενείς για αυτόν συνθήκες, με τη μορφή τριών διαδοχικών παλμών σε με ίσα χρονικά διαστήματα. Σε κάθε παλμό, ο Physarum μείωνε την ταχύτητα μετακίνησής του. Όταν έπαψαν οι δυσμενείς συνθήκες να εφαρμόζονται επί του Physarum, ο οργανισμός αυτός συνέχισε να μειώνει την ταχύτητα μετακίνησής του τις χρονικές στιγμές που θα δεχόταν τον παλμό.

#### **4.1.6 Επικοινωνία και μετάδοση πληροφοριών**

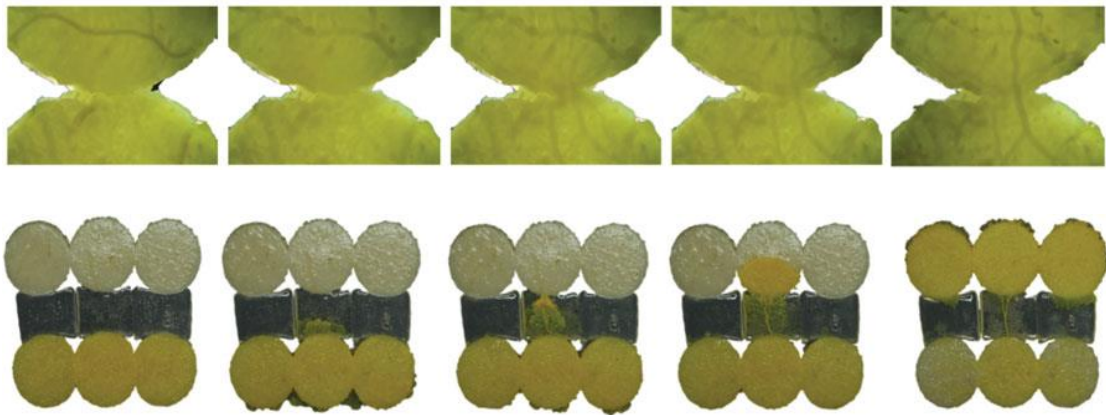
Ένα άλλο προς μελέτη χαρακτηριστικό του Physarum είναι η ικανότητα μετάδοσης πληροφορίας σε άλλους ίδιους οργανισμούς. Η ικανότητα αυτή αποκαλύπτεται από το πείραμα των Vogel και Dussutour το 2016 [21] (Εικόνα 4.4). Στο Πείραμα, μία ομάδα αμοιβόζων Physarum Polycerphalum διδάχθηκε να περνάει από μία γέφυρα για την εύρεση τροφής. Στη συνέχεια, στους μισούς Physarum της ομάδας

τοποθετήθηκε αλάτι στη γέφυρα, κάτι που απωθεί τον *Physarum* αλλά δεν τον βλάπτει. Αρχικά απωθήθηκαν, αλλά στη συνέχεια έμαθαν να προσπερνάνε το αλάτι



Εικόνα 4.3: Φωτογραφία από το πείραμα των Tero κ.α. του 2010 [24], για την ανάπτυξη του οργανισμού σε αντιδιαστολή με το σιδηροδρομικό δίκτυο του Τόκιο. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος που *Physarum Polycephalum* αναπτύσσεται για την εύρεση τροφής και πως στην πορεία φτιάχνει το δίκτυο διανομής θρεπτικών ουσιών.

για να βρίσκουν τροφή. Όταν σε δεύτερο χρόνο, το μέρος της ομάδας που είχε εκτεθεί στο αλάτι και εκείνο που δεν είχε εκτεθεί τοποθετήθηκαν όλα να περάσουν από γέφυρα με αλάτι, αυτά που είχαν ήδη περάσει προηγουμένως από το αλάτι, το προσπέρασαν γρηγορότερα από τους άλλους *Physarum*. Μάλιστα, όταν ένας *Physarum* που είχε μάθει να προσπερνάει το αλάτι ώστε να βρίσκει τροφή, ερχόταν σε επαφή με έναν άλλο *Physarum* που δεν το είχε διδαχθεί, τότε ο δεύτερος περνούσε γρήγορα τη γέφυρα με το αλάτι, ακόμα και όταν πλέον δε βρισκόταν σε επαφή με τον πρώτο. Αυτό δείχνει την ικανότητα του *Physarum Polycephalum* να μαθαίνει και να επικοινωνεί.



Εικόνα 4.4: Φωτογραφίες από τη διεξαγωγή του πειράματος των Vogel και Dussutour το 2016. (Πηγή: Vogel D, Dussutour A. 2016 Direct transfer of learned behavior via cell fusion in non-neural organisms. Proc. R. Soc. B)

#### 4.1.7 Biological Computing και Αποκεντρωμένα Δίκτυα

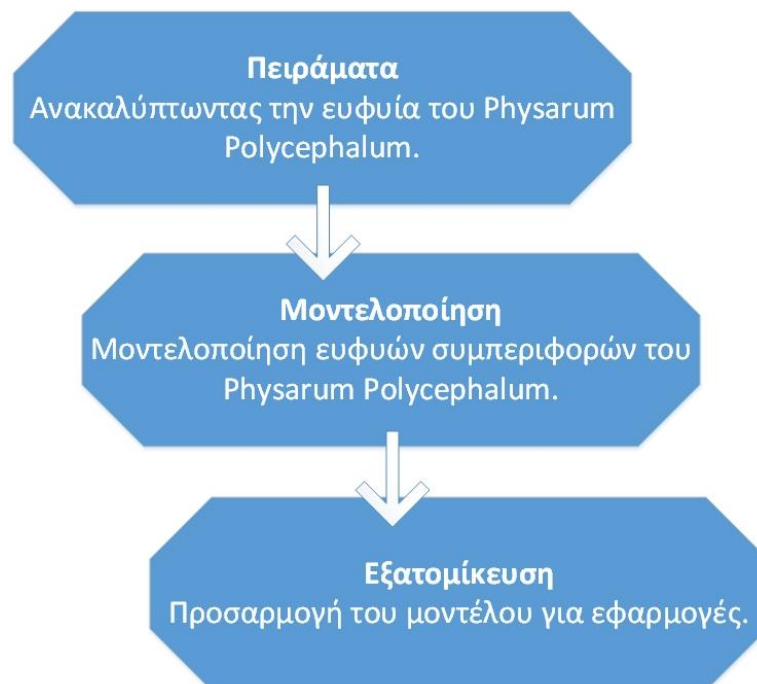
Ο *Physarum* συγκαταλέγεται μεταξύ των περισσότερο υποσχόμενων οργανισμών για την κατασκευή βιο-υπολογιστών. Πολλά πειράματα έχουν γίνει για την εξερεύνηση των δυνατοτήτων του οργανισμού στον τομέα αυτό. Για παράδειγμα, οι Tsuda et al [26]. χρησιμοποίησαν τον *Physarum* για τη δημιουργία δυαδικής πύλης και έγινε χρήση του οργανισμού αυτού για τον έλεγχο ρομπότ σε άγνωστα και δυναμικά περιβάλλοντα. Στο σώμα του *Physarum Polycerphalum* δεν υπάρχει κάποιο κεντρικό όργανο διαχείρισης πληροφοριών, όπως για παράδειγμα είναι ο εγκέφαλος. Αντ' αυτού υπάρχει ένα σύνολο παρόμοιων μερών από πρωτόπλασμα. Ως συνέπεια, εάν αποκοπεί ένα μέρος από το σώμα του, τότε ο οργανισμός έχει την ικανότητα να παράγει ξανά το χαμένο μέλος και να γίνει πάλι «αρτιμελής» ως οργανισμός. Επίσης, δύο *Physarum Polycerphalum* μπορούν να ενωθούν και δημιουργήσουν έναν οργανισμό. Έτσι, ο *Physarum Polycerphalum* αποτελεί αντικείμενο έρευνας για τη δημιουργία αποκεντρωμένων δικτύων[23].

### 4.2 Μοντέλα Εμπνευσμένα από το *Physarum Polycerphalum*

#### 4.2.1 Μεθοδολογία ανάπτυξης μοντέλων εμπνευσμένων από τον *Physarum Polycerphalum*.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη φύση, όπως π.χ. οι γενετικοί αλγόριθμοι και τα νευρονικά δίκτυα. Η μεθοδολογία για την ανάπτυξη μοντέλων εμπνευσμένων από τον *Physarum* είναι παρόμοια με

την ανάπτυξη και άλλων τεχνικών δικτύωσης εμπνευσμένων από τη φύση. Συγκεκριμένα, οι Dressler και Akan [27], όρισαν τρία βήματα για την κατασκευή βιο-εμπνευσμένων μοντέλων δικτύωσης. Τα βήματα αυτά είναι: i) Αναγνώριση αναλογιών από τη φύση. ii) Μοντελοποίηση ρεαλιστικών βιολογικών συμπεριφορών iii) Προσαρμογή του μοντέλου για εφαρμογές. Αρχικά, είναι απαραίτητο να γίνουν πειράματα ώστε να αποκαλυφθεί η ευφυΐα του *Physarum* στην κατασκευή και βελτιστοποίηση δικτύων. Δεύτερον, μπορούμε να δημιουργήσουμε μοντέλα βάσει των παρατηρήσεων από τα πειράματα. Τέλος, τα μοντέλα αυτά πρέπει να προσαρμοστούν για χρήση σε διάφορες εφαρμογές βελτιστοποίησης δικτύων.



Εικόνα 4.5: Μεθοδολογία ανάπτυξης μοντέλων συμπεριφοράς του *Physarum Polycerhalum* κατά τους Dressler και Akan,

#### 4.2.2 Μοντέλο αγωγιμότητας ροής (Flow conductivity model)

Η πρωτοπλασματική ροή στις σωληνοειδείς φλέβες του *Physarum* θεωρείται ως η πηγή της ευφυΐας του. Πολλά μοντέλα προσπαθούν να προσομοιώσουν τη ροή αυτή, με το πιο πετυχημένο απ' όλα να θεωρείται το μοντέλο αγωγιμότητας ροής (flow-conductivity model). Αυτό το μοντέλο προτάθηκε πρώτα από τους Tero et al. το 2006[28], για την επίλυση του προβλήματος εύρεσης της συντομότερης

διαδρομής (shortest path problem). Το μοντέλο αυτό στηρίζεται σε ένα συγκεκριμένο μηχανισμό της φυσιολογίας του *Physarum Polycephalum*: οι «αγωγοί» του αυξάνουν τη διάμετρό τους καθώς η πρωτοπλασματική ροή αυξάνεται. Ως μοντέλο αποτελεί πηγή έμπνευσης για τη δημιουργία πλήθους αλγορίθμων. Εκτός από την επίλυση του προβλήματος εύρεσης συντομότερης διαδρομής, το μοντέλο τροποποιημένο δύναται να χρησιμοποιηθεί και για την επίλυση προβλημάτων δένδρων Steiner[23].

#### **4.2.3 Κυτταρικό μοντέλο (Cellular model)**

Το κυτταρικό μοντέλο αρχικά προτάθηκε από τους Gunji κ.α. το 2008 [29] για τον σχεδιασμό δικτύων υψηλής ποιότητας και επί της ουσίας μιμείται τη συμπεριφορά πραγματικών κυττάρων. Στο μοντέλο αυτό υπάρχουν δύο φάσεις: η φάση της ανάπτυξης και η φάση και η φάση συλλογής τροφής. Στη φάση της ανάπτυξης, ένα σύνολο από στοιχεία του κυττάρου πηγάζει από έναν σπόρο. Στη φάση συλλογής, η συμπεριφορά του κυττάρου ομοιάζει με εκείνη της φυτικής φάσης του *Physarum*. Το κυτταρικό μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε από τους για την προσομοίωση της αμοιβαδικής κίνησης και για τη λύση του προβλήματος δέντρου Steiner. Το μοντέλο αυτό δέχθηκε κριτική πως είναι χαμηλής αποδοτικότητας και έπειτα έγιναν βελτιώσεις σε αυτό[23].

#### **4.2.4 Το πολυπαραγοντικό μοντέλο (Multi-agent model)**

Ο *Physarum Polycephalum* έχει δείξει την ικανότητά του να δημιουργεί δίκτυα υψηλής ποιότητας σε πλήθος πειραμάτων. Αντίστοιχα, πολλά μοντέλα προσπαθούν να προσομοιώσουν την ικανότητα αυτή του *Physarum* για τη δημιουργία δικτύων. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι και το πολυπαραγοντικό, το οποίο προτάθηκε από τον Jones το 2009 [30]. Αυτό το μοντέλο βασίζεται στον τρόπο συμπεριφοράς ενός πληθυσμού παραγόντων που ομοιάζουν με σωματίδια, ώστε να προσεγγίσουν τις περίπλοκες συμπεριφορές που παρατηρούνται στον *Physarum*. Κάθε παράγοντας αισθάνεται και αποθηκεύει το ερέθισμα καθώς κινείται προς αυτό εντός ενός πλέγματος που διαχέεται, το οποίο αναπαριστάται από ένα πίνακα κινητής υποδιαστολής (floating point).

#### **4.2.5 Το μοντέλο εναλλασσόμενης ροής (Shuttle streaming model)**

Το μοντέλο εναλλασσόμενης ροής προτάθηκε από τους Siriwardana κ.α. [31] και βασίζεται στη πρωτοπλασματική ροή στο σώμα του *Physarum Polycephalum*. Μέσω της αμφίδρομης πρωτοπλασματικής ροής επιχειρεί να λύσει το πρόβλημα εύρεσης της συντομότερης διαδρομής. Ο Siriwardana κ.α. έχουν δείξει πως το μοντέλο αυτό είναι αρκετά γρηγορότερο στην εύρεση συντομότερης διαδρομής σε ένα δίκτυο από το μοντέλο αγωγιμότητας ροής. Ωστόσο, δεν έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να βρίσκει πάντα τη συντομότερη διαδρομή. Το μοντέλο εναλλασσόμενης ροής δεν έχει εφαρμοστεί ακόμα σε ιδιαίτερα περίπλοκα δίκτυα και απαιτείται περεταίρω εργασία για την πλήρη ανάδειξή του[23].

### **4.3 Προβλήματα Βελτιστοποίησης δικτύων και εφαρμογές.**

Τα βίο-εμπνευσμένα μοντέλα που περιγράφονται συνοπτικά στις προηγούμενες υποενότητες, έχουν χρησιμοποιηθεί για διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης δικτύων. Τα προβλήματα αυτά παρουσιάζονται συνοπτικά:

#### **4.3.1 Πρόβλημα εύρεσης συντομότερης διαδρομής και εφαρμογές**

Το πρόβλημα εύρεσης συντομότερης διαδρομής αφορά –όπως μαρτυρεί και το όνομά του- την εύρεση της συντομότερης διαδρομής μεταξύ δύο κόμβων/τερματικών σταθμών σε ένα δίκτυο. Πολλοί αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τον *Physarum Polycephalum* έχουν εφαρμοστεί για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων, με τον αλγόριθμο *Physarum Solver* [28] που βασίζεται στο μοντέλο αγωγιμότητας ροής (flow-conductivity model) να είναι από τους πιο δημοφιλέστερους. Άλλος δημοφιλής αλγόριθμος εμπνευσμένος από τον *Physarum* για την εύρεση συντομότερης διαδρομής, είναι ο *Physarum Optimization with Shuttle Streaming* ο οποίος βασίζεται στο μοντέλο εναλλασσόμενης. Ωστόσο, οι κλασικοί αλγόριθμοι για την εύρεση συντομότερης διαδρομής υπερέχουν ακόμα. Συνεπώς κρίνεται απαραίτητο να βελτιωθούν τα μοντέλα στο μέλλον[23].

#### **4.3.2 Ευκλείδειο Πρόβλημα Δένδρου Steiner.**

Το Ευκλείδειο πρόβλημα δέντρου Steiner αφορά την εύρεση του μικρότερου δυνατού δικτύου για την ένωση πολλαπλών κόμβων σε περιορισμένο γεωμετρικά χώρο. Έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι βάσει μοντέλων συμπεριφοράς του *Physarum Polycephalum* για την επίλυσή του. Εκ των σημαντικότερων είναι από τον



Nakagaki κ.α. [32] με βάση το μοντέλο αγωγιμότητας ροής το οποίο πέτυχε προσεγγίσεις ελαχίστων Steiner δέντρων έως 16 κόμβους. Επίσης, ο Gunji κ.α. [29] πρότειναν αλγόριθμο βασισμένο στο κυτταρικό μοντέλο (cellular model) το οποίο πέτυχε προσεγγίσεις ελαχίστων Steiner δέντρων με έως 4 κόμβους. Πέρα από τον περιορισμένο αριθμό κόμβων στον οποίο περιορίζονται οι αλγόριθμοι, έχουν επίσης και σχετικά χαμηλή ακρίβεια στις λύσεις τους. Θα ήταν λοιπόν ασφαλές να ειπωθεί πως οι αλγόριθμοι αυτοί για το εν λόγω πρόβλημα δεν είναι ακόμα σε στάδιο ωριμότητας.

#### **4.3.3 Πρόβλημα Δένδρου Steiner σε γραφήματα και εφαρμογές**

Το πρόβλημα δένδρου Steiner σε γραφήματα αφορά την εύρεση του μικρότερου υποδικτύου για τη σύνδεση πολλαπλών κόμβων σε ένα δίκτυο. Ο Song κ.α. [33] πρότειναν ένα αλγόριθμο εμπνευσμένο από το μοντέλο αγωγιμότητας ροής για την επίλυση του προβλήματος ελάχιστης έκθεσης (minimal exposure problem) σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα οποία μπορούσαν να μετατραπούν σε πρόβλημα δένδρου Steiner. Ο Liu κ.α. [34] βελτίωσαν αυτό τον αλγόριθμο και η βελτιωμένη έκδοση είχε παρόμοια απόδοση με δύο κλασικούς αλγόριθμους για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων: τον αλγόριθμο αναζήτησης tabu (tabu search algorithm) και τον 1.55 worst-case ratio algorithm.

#### **4.3.4 Το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή και εφαρμογές**

Το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή αφορά την εύρεση της συντομότερης κυκλικής διαδρομής σε ένα δίκτυο με πολλαπλούς κόμβους. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές του συγκεκριμένου προβλήματος στα logistics, στην οργάνωση έργων, και στην κατασκευή των microchips. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι, όπως π.χ. ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης βάσει της λειτουργίας των αποικιών των μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization Algorithm) και ο γενετικός αλγόριθμος, χρησιμοποιούνται ευρέως για την επίλυση του προβλήματος αυτού. Οι αλγόριθμοι αυτοί αποδίδουν καλά σε περιπτώσεις περιορισμένου αριθμού κόμβων, όμως υστερούν στην επίλυση μεγάλων και ρεαλιστικών προβλημάτων[23]. Εκεί έρχονται τα μοντέλα συμπεριφοράς του Physarum να συνεισφέρουν σε περεταίρω βελτίωσή τους. Ο Zhang κ.α. [35] πρότειναν βελτιώσεις για τον πίνακα φερομόνης του αλγόριθμου βελτιστοποίησης βάσει της λειτουργίας των αποικιών των μυρμηγκιών,

βασιζόμενοι στο μοντέλο αγωγιμότητας ροής. Η βελτίωση αυτή βοήθησε στην αποφυγή πρόωρης σύγκλισης, κάτι που συνέβαινε συχνά με τον κλασικό αλγόριθμο. Εφαρμογή του βελτιωμένου αλγορίθμου έγινε από τον Lu κ.α. [36] σε πραγματικά προβλήματα με 34 κόμβους και επετεύχθη καλύτερη απόδοση από το κλασικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης βάσει της λειτουργίας των αποικιών των μυρμηγκιών.

#### **4.3.5 Πρόβλημα δρομολόγησης πολλαπλής διανομής (multicast routing problem) και εφαρμογές.**

Το πρόβλημα δρομολόγησης πολλαπλής διανομής αφορά την εύρεση οικονομικότερου υποδικτύου για τη μεταφορά δεδομένων σε πολλαπλούς δέκτες σε ένα δίκτυο επικοινωνίας. Μία ανανεωμένη έκδοση του γενετικού αλγορίθμου προτάθηκε από τον Liang κ.α. [37] με βελτιώσεις βασισμένες στο μοντέλο αγωγιμότητας ροής. Ο αλγόριθμος αυτός σε εφαρμογές για το πρόβλημα δρομολόγησης πολλαπλής διανομής είχε αρκετά καλύτερη απόδοση από τον γενετικό αλγόριθμο.

#### **4.3.6 Αξιολόγηση δικτύων και εφαρμογές.**

Η αξιολόγηση δικτύων αφορά την αξιολόγηση των στοιχείων ενός δικτύου. Η κεντρικότητα βαθμού (Degree Centrality) και η ενδιάμεση κεντρικότητα (Betweenness Centrality) αποτελούν δύο δημοφιλή μέτρα για την αξιολόγηση κόμβων σε ένα δίκτυο. Ωστόσο, η κεντρικότητα βαθμού αμελεί τη σημασία ενός κόμβου στο δίκτυο, ενώ η ενδιάμεση κεντρικότητα απαιτεί καθολικές (global) πληροφορίες του δικτύου. Συνεπώς, τα δύο αυτά μέτρα δεν είναι κατάλληλα για κάποιες εφαρμογές. Οι Liu κ.α. [38] πρότειναν ένα αλγόριθμο βασισμένο στο μοντέλο αγωγιμότητας ροής για την αξιολόγηση της σημασίας των κόμβων για ένα δίκτυο. Ο αλγόριθμος λαμβάνει υπ' όψιν το βαθμό ενός κεντρικού κόμβου και το πώς οι γειτονικοί κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους, ξεπερνώντας έτσι τα προβλήματα που προκύπτουν από τα προαναφερθέντα μέτρα. Χρήση του αλγορίθμου έχει γίνει σε πλήθος δικτύων και φαίνεται πως υπερέχει έναντι των ως τώρα καθιερωμένων μέτρων.

#### **4.3.7 Πρόβλημα σχεδίασης δικτύων αλυσίδας εφοδιασμού (supply chain network)**

Ένα δίκτυο αλυσίδας εφοδιασμού αποτελείται από κατασκευαστές, κέντρα διανομής και πελάτες. Το πρόβλημα στη σχεδίαση ενός τέτοιου δικτύου αφορά την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς προϊόντων από τον κατασκευαστή προς τους πελάτες. Έχει προταθεί από τον Zhang κ.α. [39] αλγόριθμος βασισμένος στο μοντέλο αγωγιμότητας ροής για το πρόβλημα αυτό. Ο αλγόριθμός τους συγκλίνει σε σημεία ισορροπίας γρήγορα όταν αλλάζουν οι συνθήκες στο δίκτυο. Συνεπώς, επειδή οι πραγματικές συνθήκες στον τομέα των εφοδιαστικών αλυσίδων είναι εξαιρετικά δυναμικές, ίσως ο αλγόριθμος αυτός να μπορέσει να επιτύχει καλύτερα αποτελέσματα από τις παραδοσιακές τεχνικές.

#### **4.3.8 Πρόβλημα σχεδίασης δικτύου μεταφορών.**

Η μετακίνηση ανθρώπων και η μεταφορά αγαθών έπαιζαν πάντοτε σημαντικό ρόλο στις ανθρώπινες κοινωνίες. Αντίστοιχα, ο σχεδιασμός δικτύων μεταφορών είναι κάτι που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα. Μερικά εκ των επιθυμητών χαρακτηριστικών ενός δικτύου μεταφορών είναι να έχει χαμηλό κόστος λειτουργίας, υψηλή αποδοτικότητα, ανοχή σε σφάλματα κ.α. Συνεπώς, για τη βελτιστοποίηση ενός δικτύου μεταφορών είναι απαραίτητο να ληφθούν αρκετοί παράγοντες υπ όψιν, κάτι που κάνει τη σχεδίασή τους απαιτητική[23].

Πρώτη απόπειρα με ικανοποιητικά αποτελέσματα για σχεδίαση σιδηροδρομικού δικτύου με αλγόριθμο βασισμένο στον Physarum Polycerhalum έγινε από τους Watanabe κ.α. [40]. Επίσης, ο Houbraken [41] πρότεινε έναν αλγόριθμο βασισμένο στον Physarum για τη σχεδίαση ενός δικτύου με καλή ανοχή σε σφάλματα. Οι δύο αυτοί αλγόριθμοι είναι βασισμένοι αμφότεροι στο μοντέλο αγωγιμότητας ροής. Επίσης, οι Jones[42], Becker κ.α. [43] έχουν επίσης δημιουργήσει αλγόριθμους για τη σχεδίαση δικτύου μεταφορών βάσει του πολυπαραγοντικού μοντέλου.

#### **4.3.9 Συμπεράσματα**

Οι έρευνες με σκοπό τη βελτιστοποίηση δικτύων με μεθόδους εμπνευσμένες από τον Physarum Polycerhalum βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Από τα μοντέλα που εξετάστηκαν, το μοντέλο αγωγιμότητας ροής (Flow-Conductivity model) έχει σαφέστατα περισσότερες δυνατότητες για επίλυση διαφόρων προβλημάτων με

δεδομένες τις ως τώρα εφαρμογές. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα μοντέλα που περιγράφουν τη συμπεριφορά του οργανισμού και καθώς και τα είδη των προβλημάτων όπου έχουν δημιουργηθεί αλγόριθμοι επίλυσής τους με βάση αυτά. Σε όλους τους τύπους προβλημάτων χρησιμοποιείται πάντα το μοντέλο αγωγιμότητας ροής ως βάση για τη δημιουργία αλγορίθμων. Στις περιπτώσεις δε που έχουν δημιουργηθεί αλγόριθμοι επίλυσης προβλημάτων βάσει άλλων μοντέλων πέρα από το αγωγιμότητας ροής (Εύρεση Συντομότερης Διαδρομής, Ευκλείδεια Δένδρα Steiner, Σχεδίασης Δικτύου Μεταφορών), οι αλγόριθμοι που βασίζονται στο μοντέλο αγωγιμότητας ροής δίνουν εφάμιλλα ή καλύτερα αποτελέσματα από τους άλλους αλγόριθμους. Συνεπώς είναι ασφαλές να συμπεράνουμε ότι το μοντέλο αγωγιμότητας ροής περιγράφει ίσως καλύτερα τη συμπεριφορά του *Physarum Polycephalum* σε σύγκριση με τα άλλα μοντέλα που μελετήθηκαν.

Τέλος, η ιδιαίτερη φύση του *Physarum Polycephalum* φαίνεται πως έχει πολλά να προσφέρει ακόμα στη βελτιστοποίηση δικτύων. Αποδεικνύει δε πως η βιομιμητική μπορεί να συνεισφέρει ακόμα και στον τομέα της βελτιστοποίησης και της πληροφορικής. Ακόμα, οι αλγόριθμοι που έχουν δημιουργηθεί βάσει της συμπεριφοράς του *Physarum Polycephalum* βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο, παρ' όλα αυτά, έχουν ακόμα πολλά περιθώρια βελτίωσης ώστε να υπερκεράσουν ή να συμβάλλουν στη βελτίωση των έως τώρα καθιερωμένων αλγορίθμων στα προβλήματα που εξετάστηκαν. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητο περεταίρω έρευνες να εξερευνήσουν την πηγή της ευφυΐας αυτού του μονοκύτταρου οργανισμού έτσι ώστε στο μέλλον να αποτελέσει πηγή έμπνευσης νέων τεχνολογιών και τεχνικών.

**Πίνακας 4.1: Προβλήματα δικτύων και τα μοντέλα συμπεριφοράς του *Physarum Polycephalum* που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη αλγορίθμων επίλυσής τους.**

<b>Προβλήματα/εφαρμογές</b>	<b>Μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τη σχεδίαση Αλγορίθμων.</b>
Εύρεση Συντομότερης Διαδρομής	Μοντέλο Αγωγιμότητας Ροής, Μοντέλο Εναλλασσόμενης Ροής
Ευκλείδεια Δένδρα Steiner	Μοντέλο Αγωγιμότητας

	Ροής, Κυτταρικό Μοντέλο
Δένδρα Steiner σε Γραφήματα	Μοντέλο Αγωγιμότητας Ροής
Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή	Μοντέλο Αγωγιμότητας Ροής
Πρόβλημα Δρομολόγησης Πολλαπλής Διανομής (multicast routing problem)	Μοντέλο Αγωγιμότητας Ροής
Αξιολόγηση Δικτύων	Μοντέλο Αγωγιμότητας Ροής
Πρόβλημα Σχεδίασης Δικτύων Αλυσίδας Εφοδιασμού	Μοντέλο Αγωγιμότητας Ροής
Σχεδίασης Δικτύου Μεταφορών	Μοντέλο Αγωγιμότητας Ροής, Πολυπαραγοντικό Μοντέλο

# Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> : Βιομημητική και Ιατρική – Βιομημητικά Εμφυτεύματα και προοπτικές.

## 5.1 Ιατρική και Βιολογική Εξέλιξη

Στον αγώνα για επιβίωση, ο άνθρωπος αντέτεινε το νου του. Ενώ σε ένα ζώο, ένα σπασμένο ισχίο θα σήμαινε μια *de facto* θανατική καταδίκη, ο άνθρωπος, με όπλο την αλληλεγγύη πραγματοποίησε τη ληξιαρχική πράξη γεννήσεως της Ιατρικής, παρέχοντας φροντίδα στον συνάνθρωπο που είχε ανάγκη. Σημάδια ενός πρώιμου επιπέδου Ιατρικής συναντάμε σε οστικά ευρήματα προϊστορικών ανθρώπων, όπου τραύματα που σε έναν μονήρη άνθρωπο θα είχαν αποβεί μετά βεβαιότητας μοιραία, φαίνεται πως ιάθηκαν.

Όμως η φύση δεν άφησε τα ζώα έρμαια των διάφορων δυσκολιών που επρόκειτο να συναντήσουν. Από τα σαλιγκάρια με την ικανότητα ανάπλασης του κελύφους του, το ψάρι ζέβρα (*Danio rerio*) με την ικανότητα να αναπλάθει εσωτερικά του όργανα, τις σαύρες που μπορούν να αναγεννήσουν την ουρά τους και από τόσα άλλα πλάσματα με φυσικά χαρίσματα, ο άνθρωπος μπορεί να διδαχθεί για την πρόοδο της ιατρικής επιστήμης. Όμως βιομημητικές προσεγγίσεις δεν μπορούν να γίνουν μόνο έχοντας ως παράδειγμα εξωτικά ζώα ή άλλα πλάσματα, αλλά και απλά κοιτώντας την ίδια την ανθρώπινη φύση.

Τον τελευταίο αιώνα η ιατρική επιστήμη έχει πραγματοποιήσει μεγάλα άλματα προόδου. Παρά όμως την πρόοδο αυτή, διάφορα προβλήματα όπως, για παράδειγμα, οι παρενέργειες μίας θεραπείας, δεν έχουν ξεπεραστεί πλήρως. Σε τέτοιου είδους προβλήματα η βιομημητική έρχεται επιδιώκοντας να δώσει λύσεις. Τα πλεονεκτήματα της βιομημητικής στην Ιατρική ποικίλουν. Από τη βιοσυμβατότητα ενός μοσχεύματος, μέχρι τον περιορισμό παρενεργειών, μία βιομημητική προσέγγιση δείχνει πολλά υποσχόμενη. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μία σύντομη παρουσίαση των πλεονεκτημάτων που μπορεί να έχει η βιομημητική σχεδίαση εμφυτευμάτων για τα οστά.



## 5.2 Εμφυτεύματα Οστών και Βιοσυμβατότητα

Τα είδη των εμφυτευμάτων για την αντικατάσταση ενός οστού ποικίλουν. Αντίστοιχα και οι ιδιαίτερες απαιτήσεις και προκλήσεις για την κατασκευή του εκάστοτε εμφυτεύματος διαφέρουν. Τα προς αντικατάσταση οστά μπορεί να έχουν περίπλοκη γεωμετρία, μικρό ή μεγάλο μέγεθος και ιδιαίτερες απαιτήσεις ως προς τις μηχανικές αντοχές τους. Για παράδειγμα, ένα μόσχευμα για κρανιακό οστό μπορεί να έχει μικρό μέγεθος και ιδιαίτερες απαιτήσεις ως προς τη γεωμετρία του, αλλά να μην απαιτείται να αντέχει τις ίδιες φορτίσεις με ένα μηριαίο οστό[44].

Πέρα από τις μηχανικές ιδιότητες, βασική προϋπόθεση για την επιλογή ενός υλικού είναι να είναι βιοσυμβατό. Ως βιοσυμβατότητα (biocompatibility) ορίζεται η απαίτηση του βιοϋλικού να μην αποβάλλεται από τον οργανισμό, να μην είναι τοξικό και αλλεργιογόνο, να μην προκαλεί μεταλλάξεις (καρκινογόνο) και με φυσικές ιδιότητες όμοιες ή παραπλήσιες με τους ιστούς που αντικαθιστούν στο σώμα.

## 5.3 Μεταλλικά Μοσχεύματα και Συνήθη Προβλήματα

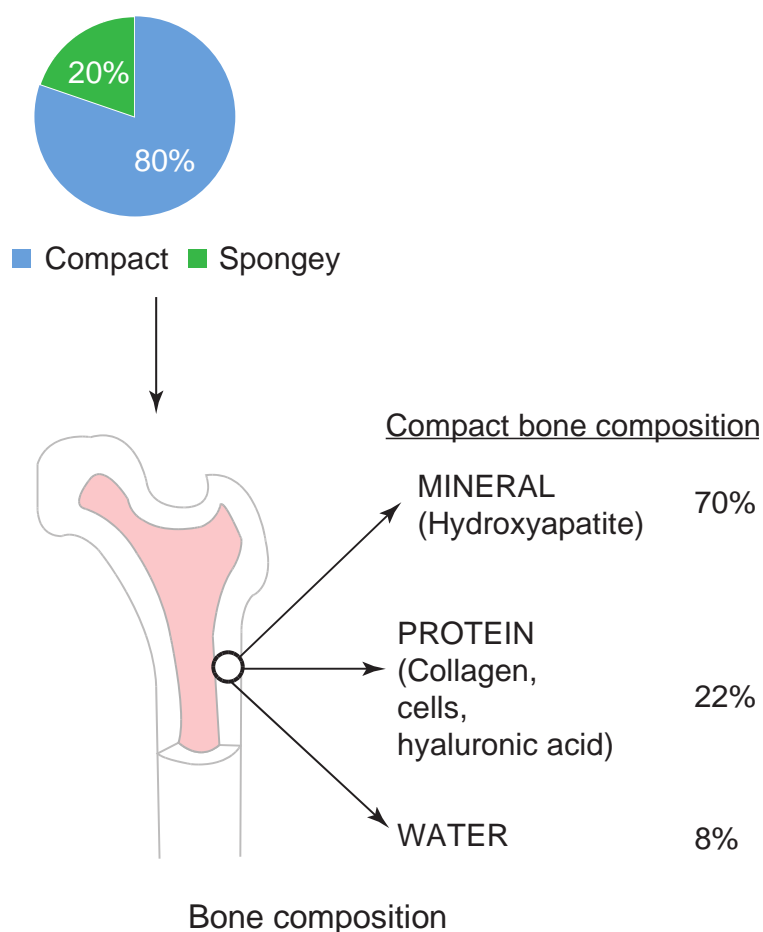
Τρία μέταλλα που έχουν ευρεία χρήση σε ορθοπεδικές επεμβάσεις είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας, τιτάνιο ή κράματα τιτανίου και κράματα κοβαλτίου-χρωμίου. Το μέτρο ελαστικότητας των μετάλλων αυτών είναι αρκετά μεγαλύτερο απ' ό,τι των οστών. Πιο συγκεκριμένα, το μέτρο ελαστικότητας του ανοξείδωτου χάλυβα είναι 180 GPa, του τιτανίου 110 GPa και του κράματος κοβαλτίου χρωμίου είναι στα 210GPa. Το μέτρο ελαστικότητας των οστών του ανθρώπου είναι μεταξύ 10,4 GPa έως 20,7 GPa [45].

Η μεγάλη διαφορά στο μέτρο ελαστικότητας είναι και ο λόγος εμφάνισης του προβλήματος της αποφόρτισης (Stress shielding). Το φαινόμενο αυτό είναι φυσιολογικό αποτέλεσμα που προκύπτει όταν τοποθετείται ένα σκληρότερο εμφύτευμα συγκριτικά με το οστό του παραλήπτη. Αυτό οδηγεί σε χαλάρωση της σύνδεσης μεταξύ οστού και εμφυτεύματος, επιτρέποντας την πραγματοποίηση μικροκινήσεων. Οι κινήσεις αυτές δεν είναι άνευ επιπτώσεων, αφού προκαλούν φθορά και με την πάροδο του χρόνου μπορεί το εμφύτευμα μπορεί να εισχωρήσει εντός του οστού του ξενιστή. Επίσης, είναι σύνηθες φαινόμενο να αποκολλώνται

θραύσματα από το εμφύτευμα, προκαλώντας προβλήματα σε τοπικό επίπεδο. Μικροθραύσματα από τα εμφυτεύματα πολλές φορές μπορεί να εντοπιστούν και σε άλλες περιοχές του σώματος, όπως π.χ. ο σπλήνας, το ήπαρ. Τα προαναφερθέντα προβλήματα καθιστούν μία βιομημητική προσέγγιση για τη δημιουργία εμφυτευμάτων να φαίνεται πολλά υποσχόμενη[44].

## 5.4 Βιομημητικά εμφυτεύματα Εμφυτεύματα βασισμένα στη χημική σύσταση των οστών.

Η σχεδίαση βιομημητικών εμφυτευμάτων, στοχεύει στη δημιουργία εμφυτευμάτων τα οποία δεν θα έχουν τις παρενέργειες/προβλήματα των συμβατικών. Ένα από τα είδη βιομημητικών εμφυτευμάτων είναι εκείνα που βασίζονται στη χημική σύσταση των οστών.



Εικόνα 5.1: Η Χημική σύσταση των οστών (Πηγή: [44])

Τα οστά αποτελούνται από οστίτη ιστό, ο οποίος βρίσκεται σε συμπαγή και σπογγώδη μορφή. Το 60-70% της μάζας των οστών αποτελείται από ανόργανα άλατα, τα οποία δεν σπανίζουν στη φύση. Τα υλικά αυτά, όντας ήδη σε χρήση σε διάφορες εφαρμογές, αποτελούν επιλογή για τη δημιουργία βιομιμητικών εμφυτευμάτων. Για παράδειγμα, το μάργαρο (κοινώς, σεντέφι) αποτελείται από καθαρό ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ). Έχει γίνει χρήση μάργαρου σε μορφή σκόνης αναμεμειγμένο με αίμα του ασθενούς, ως μόσχευμα, σε περιπτώσεις ελαττωμάτων της κάτω γνάθου και είχε καλά αποτελέσματα στην επούλωση των βλαβών, ωθώντας τα κύτταρα της περιοχής που εφαρμόστηκε σε φάση αναγέννησης[44].

Πολλά ακόμα βιο-υλικά μελετώνται για την αποτελεσματικότητά τους ως μοσχεύματα ή για τη δημιουργία εμφυτευμάτων, στοχεύοντας κυρίως στην αναγέννηση των οστών και στη μίμηση των επουλωτικών μηχανισμών του ίδιου του ανθρωπίνου σώματος.

# Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Αποτίμηση , Συμπεράσματα, Προτάσεις.

## 6.1 Σύνοψη Διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική είχε ως στόχο την παρουσίαση της βιομιμητικής σαν έννοια καθώς και τα πλεονεκτήματα του βιομιμητικού σχεδιασμού σε τομείς της μηχανικής και βελτιστοποίησης δικτύων. Παρουσιάστηκαν οι κύριοι τρόποι βιομιμητικής σχεδίασης, τα πλεονεκτήματα των βιομιμητικών AUVs έναντι των συμβατικών καθώς και πως η βιομιμητική μπορεί να συμβάλει στη βελτιστοποίηση δικτύων.

Αρχικά, ο όρος της βιομιμητικής αποσαφηνίστηκε και έπειτα από μία ιστορική αναδρομή δόθηκαν παραδείγματα βιομιμητικής σε διάφορους τομείς της καθημερινής ζωής. Έπειτα, στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο έγινε παρουσίαση των δύο βασικών φιλοσοφιών βιομιμητικής σχεδίασης καθώς και το πότε ακολουθείται ο κάθε τρόπος σχεδίασης. Το κύριο μέρος της εργασίας αναπτύχθηκε στο 2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο έγινε κατηγοριοποίηση των μη επανδρωμένων υποβρυχίων οχημάτων καθώς και η ανάδειξη της σημασίας αυτών για την εξερεύνηση των ωκεανών και άλλων χρήσεων. Έγινε αποτύπωση της παρούσας κατάστασης στον τομέα των αυτόματων μη επανδρωμένων υποβρυχίων οχημάτων(AUVs), των επιδόσεων τους σε τομείς όπως η ταχύτητα, ευελιξία και αυτονομία καθώς και τα πλεονεκτήματα που μπορούν να έχουν τα BAUVs (Biological AUVs) έναντι των συμβατικών. Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναπτύσσονται οι ιδιαίτερα γνωρίσματα του *Physarum Polycerhalum* που παρουσιάζουν δυνητικά ενδιαφέρον για τη βιομιμητική. Έπειτα παρουσιάστηκαν τα σημαντικότερα έως τώρα μοντέλα συμπεριφοράς του *Physarum* και στη συνέχεια παρουσιάστηκαν αλγόριθμοι βασισμένοι στα μοντέλα για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης δικτύων.

## 6.2 Συμπεράσματα

Η βιομιμητική συναντάται σε πολλά πεδία και εφαρμογές. Η φύση είναι εκ των πραγμάτων μία δεξαμενή πλασμάτων με ποικίλα και διαφορετικά χαρακτηριστικά

και ικανότητες -προϊόντα φυσικής επιλογής και εξέλιξης εκατομμυρίων ετών- . Η βιομιμητική δεν περιορίζεται σε ένα στενό φάσμα εφαρμογών και θεμάτων, αλλά μπορεί να συνεισφέρει σε πλήθος διαφορετικών εφαρμογών, επιστημών και τεχνολογιών.

Ένα άλλο πλεονέκτημα της βιομιμητικής είναι πως μπορεί να λειτουργήσει εξελικτικά και ταυτόχρονα σε αρμονία με τη φύση. Τα ζώα, τα φυτά και τα έντομα έχουν αναπτύξει τις δικές τους τεχνικές να επιλέγουν, να δημιουργούν και να προσαρμόζουν το κατάλληλο οικοσύστημα γύρω τους, χωρίς αυτό να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον. Ακόμα και οι φαινομενικά πιο απλοί οργανισμοί στη φύση έχουν αναπτύξει, στους αιώνες εξέλιξής τους, συμπεριφορές (βλέπε κεφάλαιο 4) και μορφολογικά χαρακτηριστικά από τα οποία έχουμε ακόμα πολλά να μάθουμε.

Η επιφάνεια των υδάτινων όγκων καλύπτει το 71% της γης. Πέρα από ελάχιστες εξαιρέσεις (π.χ. Νεκρά Θάλασσα), εντός του υδάτινου στοιχείου αναπτύσσονται πολλές και διαφορετικές μορφές ζωής. Οι ωκεανοί αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία των υδάτινων όγκων, βρίθουν ζωής και είναι στο μεγαλύτερό τους ποσοστό ανεξερεύνητοι. Με δεδομένο πως η ζωή ξεκίνησε στους ωκεανούς, την πολυμορφία πλασμάτων εντός τους και το πως είναι ανεξερεύνητοι στο μεγαλύτερό τους ποσοστό, είναι ασφαλές να θεωρηθούν ως μια πολλά υποσχόμενη δεξαμενή έμπνευσης για τη βιομιμητική. Για την μελέτη των ωκεανών είναι απαραίτητη η χρήση μη επανδρωμένων υποβρυχίων σκαφών (βλέπε Κεφάλαιο 3). Τα ROVs είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την εξερεύνηση των ωκεανών, όμως τα AUVs έχουν σαφέστατα μεγαλύτερη δυναμική ως προς την έρευνα των ωκεανών και τη μελέτη υδρόβιων πλασμάτων. Συνεπώς, η εξέλιξη των AUVs περνάει μέσα από τη βιομιμητική και συνάμα η εξέλιξη της βιομιμητικής περνάει μέσα από την εξέλιξη των ίδιων των AUVs. Άρα η περεταίρω εξέλιξη των AUVs μέσω της βιομιμητικής είναι απαραίτητη και καθοριστική για την κατανόηση και μελέτη των ωκεανών.

Η φύση αποτελεί ανεξάντλητη πηγή έμπνευσης για τη βιομιμητική. Ακόμα και οι πιο απλοί φαινομενικά οργανισμοί έχουν αναπτύξει πληθώρα μηχανισμών, χαρακτηριστικών και συμπεριφορών με ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον. Ένας

τέτοιος οργανισμός είναι αναμφίβολα ο *Physarum Polycerhalum* (βλέπε κεφάλαιο 4). Ο μονοκύτταρος αυτός οργανισμός έχει μια σειρά χαρακτηριστικών και συμπεριφορών που μπορούν να φανούν χρήσιμα σε τομείς που αφορούν τη βελτιστοποίηση δικτύων, τις τηλεπικοινωνίες και την πληροφορική. Η έρευνα επί του οργανισμού αυτού φαίνεται πως έχει μέλλον. Τα μοντέλα συμπεριφοράς του *Physarum Polycerhalum* που έχουν δημιουργηθεί ως τώρα -αν και βρίσκονται σε σχετικά πρώιμο στάδιο ακόμα- έχουν συμβάλει στην εξέλιξη πολλών αλγορίθμων. Τα αποτελέσματα στην επίλυση διαφόρων προβλημάτων σε δίκτυα για τα οποία αναπτύχθηκαν οι αλγόριθμοι αυτοί ήταν στις περισσότερες περιπτώσεις καλά και με μεγάλο περιθώριο εξέλιξης και βελτίωσης. Η ιδιαίτερη φύση του *Physarum Polycerhalum* αναδεικνύει τη σημασία ακόμα και των πιο απλών οργανισμών για τη βιομηχανική. Είναι απαραίτητο μελλοντικά να γίνουν περεταίρω έρευνες στη συμπεριφορά του *Physarum Polycerhalum* καθώς και η ανάπτυξη καλύτερων μοντέλων περιγραφής της συμπεριφοράς του οργανισμού αυτού.

Η βιομηχανική δεν περιορίζεται εντός των στενών ορίων ενός τομέα της μηχανικής ή μίας επιστήμης. Η βιομηχανική μπορεί να υποστηρίξει σε πολλά επίπεδα την τεχνολογική εξέλιξη σε πολλούς τομείς. Η ανάγκη προστασίας του περιβάλλοντος και αρμονική συνύπαρξη ανθρώπου-φύσης είναι πλέον πιο αναγκαία από ποτέ. Η σημασία της βιομηχανικής σε αυτό έγκειται πως ο δρόμος της προστασίας του περιβάλλοντος περνάει μέσα από αυτή. Συνεπώς τα οφέλη που πρόκειται να αποκομίσει ο άνθρωπος με την περεταίρω έρευνα και ανάπτυξή της -σε κάθε τομέα- είναι πολλαπλά.

### **6.3 Ευ ζην, τέχνη και βιομηχανική: μία ελεύθερη προσέγγιση- πρόταση.**

**Οὐκ ἔστι χείρων οὐδεμία φύσις τέχνης· καὶ γὰρ αἱ τέχναι τὰς φύσεις μιμοῦνται.**

Απόδοση: Καμιά μορφή της φύσης δεν είναι κατώτερη από την τέχνη, αφού οι τέχνες απλά μιμούνται τη φύση. (“Τα εις εαυτόν” ια΄10)



Με αυτή τη φράση ο Μάρκος Αυρήλιος, στωικός φιλόσοφος και τελευταίος από τους «πέντε καλούς αυτοκράτορες», περιγράφει τη σχέση φύσης-τέχνης. Το κάλλος μέσα από μία επιπόλαια οπτική ίσως μοιάζει σαν κάτι δίχως ουσιαστικό όφελος. Οι τέχνες όμως πραγματικά συμβάλουν στην ανάπτυξη του ατόμου, του πολιτισμού και στο «ευ ζην». Κοιτώντας την ιστορία και τα αρχαιολογικά ευρήματα είναι εμφανές πως κάθε πολιτισμός που κατάφερε να ανθίσει, άφησε πίσω του θαυμαστά έργα τέχνης. Ιδίως σε έργα της ελληνιστικής περιόδου, βλέπουμε πως η φύση θριαμβεύει. Ακόμα όμως και όταν ο φυτικός διάκοσμος απουσίαζε, ο «χρυσός κανόνας» -γέννημα της φύσης- έδινε παρόν στη σχεδίαση ναών, κτηρίων και έργων τέχνης. Χωρίς να γίνει περεταίρω ανάλυση των ιδιαιτεροτήτων των τεχνών του κάθε πολιτισμού, διαπιστώνεται πάντα μια «βιομιμητική» προσέγγιση στις τέχνες. Από τους πολιτισμούς της άπω ανατολής, στην αφρικανική ήπειρο και από τις ακτές της μεσογείου, ως την αμερικανική ήπειρο, η φύση είχε σημαίνοντα και πολυεπίπεδο ρόλο στον ανθρώπινο βίο.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης, το πως περιγράφεται σε διάφορες θρησκευτικές παραδόσεις ο τόπος στον οποίο κατέληγαν -μετά θάνατον- οι ψυχές των ανθρώπων. Για παράδειγμα, στις μεγάλες μονοθεϊστικές θρησκείες και σε πολυθεϊστικές παραδόσεις, ο τόπος όπου καταλήγουν οι ενάρετοι άνθρωποι όταν αποβιώσουν, παρουσιάζεται να είναι γεμάτος από βλάστηση και η φύση να βασιλεύει ειρηνικά. Αντίθετα, ως τόπος τιμωρίας θεωρείται ένας κόσμος που η φύση είναι απύσχα. Αντιλαμβανόμενοι λοιπόν την τεράστια σημασία σε επίπεδο ψυχολογίας που έχει για τον άνθρωπο το να αισθάνεται κοντά στη φύση, θα ήταν μεγάλη παράλειψη να μη ληφθεί υπ' όψιν αυτό κατά το σχεδιασμό προϊόντων, κτηρίων, οχημάτων κλπ.. Συνεπώς, μία σχεδιαστική προσέγγιση με το βλέμμα στραμμένο στη φύση, μπορεί να ξεφύγει και πέρα από τον καθαρά τεχνολογικό τομέα, αποφέροντας όχι μόνο οφέλη ως προς τη λειτουργία των προϊόντων, αλλά και να τα καταστήσει δελεαστικότερα και πιο ευχάριστα στη χρήση τους.

Με γνώμονα τους τομείς στους οποίους μπορεί να συμβάλει η βιομιμητική, είναι σαφές πως μπορεί να αποτελέσει εξαιρετικό εργαλείο για τους Μηχανικούς Παραγωγής και Διοίκησης. Ο σχεδιασμός προϊόντων, η ρομποτική, η βελτιστοποίηση δικτύων και ο προγραμματισμός υπάρχουν –μεταξύ άλλων- ως

αντικείμενα επιμόρφωσης στη σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Συνεπώς, η βιομημητική μπορεί να αποτελέσει εργαλείο περεταίρω ακαδημαϊκής ανάπτυξης και προόδου, καθώς και επαγγελματικής εξέλιξης για τους φοιτητές του τμήματος. Κρίνεται λοιπόν ως ασφαλές συμπέρασμα πως πέρα από τη σημασία της βιομημητικής στον γενικότερο κλάδο της μηχανικής, ο Μηχανικός Παραγωγής και Διοίκησης, δύναται να ωφεληθεί πολλαπλώς από την απόκτηση γνώσεων επί της βιομημητικής.

# Βιβλιογραφία

- [1] J. Hwang, Y. Jeong, J. M. Park, K. H. Lee, J. W. Hong, και J. Choi, 'Biomimetics: Forecasting the future of science, engineering, and medicine', *Int. J. Nanomedicine*, τ. 10, σσ 5701–5713, 2015, doi: 10.2147/IJN.S83642.
- [2] Α. Α. Δήμου, 'ΒΙΟΜΙΜΗΤΙΚΗ & ΒΙΟΦΙΛΙΑ', Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2021.
- [3] W. Nachtigal, *Bionik als Wissenschaft*, τ. 4. 2010.
- [4] G. Pohl και W. Nachtigall, *Biomimetics for Architecture & Design*. 2015.
- [5] Y. Helfman Cohen και Y. Reich, *Biomimetic Design Method for Innovation and Sustainability*. 2016.
- [6] F. O. Okeke, Okekeogbu C. J., και Α. F. A., 'Biomimicry and sustainable architecture : A review of existing literature', *J. Environ. Manag. Saf.*, τ. 8, τχ. February, σσ 11–24, 2019.
- [7] M. P. Zari, 'Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability', τχ. April, σ 2006, 2007.
- [8] D. Baumeister Ph.D., Dayna, Smith, Jessica, Tocke, Rose, *Biomimicry Resource Handbook: A Seed Bank of Best Practices: Baumeister Ph.D., Dayna, Smith, Jessica, Tocke, Rose, Dwyer, Jamie, Ritter, Sherry, Benyus, Janine: 0884791955622: Amazon.com: Books*. 2011.
- [9] F. E. Fish, 'Advantages of aquatic animals as models for bio-inspired drones over present AUV technology', *Bioinspiration and Biomimetics*, τ. 15, τχ. 2, 2020, doi: 10.1088/1748-3190/ab5a34.
- [10] K. Katija, R. E. Sherlock, A. D. Sherman, και B. H. Robison, 'New technology reveals the role of giant larvaceans in oceanic carbon cycling', *Sci. Adv.*, τ. 3, τχ. 5, σσ 1–8, 2017, doi: 10.1126/sciadv.1602374.
- [11] R. Sparrow και G. Lucas, 'When Robots Rule the Waves?', *Nav. War Coll. Rev.*, τ. 69, τχ. 4, σσ 49–78, 2016, [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <http://search.proquest.com/docview/1827605379/>.
- [12] B. R. Page, S. Ziaeeefard, A. J. Pinar, και N. Mahmoudian, 'Highly Maneuverable Low-Cost Underwater Glider: Design and Development', *IEEE Robot. Autom. Lett.*, τ. 2, τχ. 1, σσ 344–349, 2017, doi: 10.1109/LRA.2016.2617206.
- [13] T. Mukherjee, *Securing the maritime commons: The role of artificial intelligence in naval operations*, τ. 3, τχ. 00. 2018.
- [14] K. J. M. Norman Polmar, *Cold War submarines: the design and construction of U.S. and Soviet submarines*, τ. 42, τχ. 01. 2004.
- [15] I. Nesteruk, 'Maximal Speed of Underwater Locomotion', *Innov. Biosyst. Bioeng.*, τ. 3, τχ. 3, σσ 152–167, 2019, doi: 10.20535/ibb.2019.3.3.177976.

- [16] W. P. W, 'Hydrodynamics and energetics of fish propulsion', 1975.
- [17] D. T, 'Efficiency in aquatic locomotion: limitations from single cells to animals Efficiency and Economy in Animal Physiology', *Cambridge Univ. Press*, σσ 83–95, 191μ.X.
- [18] F. E. Fish, 'Transitions from drag-based to lift-based propulsion in mammalian swimming', *Am. Zool.*, τ. 36, τχ. 6, σσ 628–641, 1996, doi: 10.1093/icb/36.6.628.
- [19] P. Webb, 'Maneuverability -- General issues', *IEEE J. Ocean. Eng.*, τ. 29, σσ 547–555, Αυγούστου 2004, doi: 10.1109/JOE.2004.833220.
- [20] D. Scaradozzi, G. Palmieri, D. Costa, και A. Pinelli, 'BCF swimming locomotion for autonomous underwater robots: a review and a novel solution to improve control and efficiency', *Ocean Eng.*, τ. 130, τχ. November 2016, σσ 437–453, 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.11.055.
- [21] D. Vogel και A. Dussutour, 'Direct transfer of learned behaviour via cell fusion in non-neural organisms', *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, τ. 283, τχ. 1845, 2016, doi: 10.1098/rspb.2016.2382.
- [22] T. Nakagaki, H. Yamada, και Á. Tóth, 'Maze-solving by an amoeboid organism', *Nature*, τ. 407, τχ. 6803, σ 470, 2000, doi: 10.1038/35035159.
- [23] Y. Sun, 'Physarum-inspired Network Optimization: A Review', *arXiv*. 2017.
- [24] A. Tero κ.ά., 'Rules for biologically inspired adaptive network design', *Science (80-. )*, τ. 327, τχ. 5964, σσ 439–442, 2010, doi: 10.1126/science.1177894.
- [25] T. Saigusa, A. Tero, T. Nakagaki, και Y. Kuramoto, 'Amoebae anticipate periodic events.', *Phys. Rev. Lett.*, τ. 100, τχ. 1, σ 18101, Ιανουαρίου 2008, doi: 10.1103/PhysRevLett.100.018101.
- [26] S. Tsuda, M. Aono, και Y.-P. Gunji, 'Robust and emergent Physarum logical-computing', *Biosystems*, τ. 73, τχ. 1, σσ 45–55, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2003.08.001>.
- [27] F. Dressler και O. B. Akan, 'Bio-inspired networking: from theory to practice', *IEEE Commun. Mag.*, τ. 48, τχ. 11, σσ 176–183, 2010, doi: 10.1109/MCOM.2010.5621985.
- [28] A. Tero, R. Kobayashi, και T. Nakagaki, 'Physarum solver: A biologically inspired method of road-network navigation', *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, τ. 363, τχ. 1, σσ 115–119, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.01.053>.
- [29] Y.-P. Gunji, T. Shirakawa, T. Niizato, και T. Haruna, 'Minimal model of a cell connecting amoebic motion and adaptive transport networks.', *J. Theor. Biol.*, τ. 253, τχ. 4, σσ 659–667, Αυγούστου 2008, doi: 10.1016/j.jtbi.2008.04.017.
- [30] J. Jones, 'Approximating the Behaviours of Physarum polycephalum for the Construction and Minimisation of Synthetic Transport Networks BT - Unconventional Computation', 2009, σσ 191–208.
- [31] J. Siriwardana και S. K. Halgamuge, 'Fast shortest path optimization inspired by shuttle streaming of Physarum polycephalum', στο *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2012, σσ 1–8, doi: 10.1109/CEC.2012.6252956.

- [32] A. Tero, K. Yumiki, R. Kobayashi, T. Saigusa, και T. Nakagaki, 'Flow-network adaptation in *Physarum amoebae*', *Theory Biosci.*, τ. 127, τχ. 2, σσ 89–94, 2008, doi: 10.1007/s12064-008-0037-9.
- [33] Y. Song, L. Liu, και H. Ma, 'A physarum-inspired algorithm for minimal exposure problem in wireless sensor networks', στο *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2012, σσ 2151–2156, doi: 10.1109/WCNC.2012.6214148.
- [34] L. Liu, Y. Song, H. Zhang, H. Ma, και A. V Vasilakos, 'Physarum Optimization: A Biology-Inspired Algorithm for the Steiner Tree Problem in Networks', *IEEE Trans. Comput.*, τ. 64, τχ. 3, σσ 818–831, 2015, doi: 10.1109/TC.2013.229.
- [35] Z. Zhang, C. Gao, Y. Liu, και T. Qian, 'A universal optimization strategy for ant colony optimization algorithms based on the Physarum-inspired mathematical model', *Bioinspiration and Biomimetics*, τ. 9, τχ. 3, 2014, doi: 10.1088/1748-3182/9/3/036006.
- [36] Y. Lu, Y. Liu, C. Gao, L. Tao, και Z. Zhang, 'A Novel Physarum-Based Ant Colony System for Solving the Real-World Traveling Salesman Problem BT - Advances in Swarm Intelligence', 2014, σσ 173–180.
- [37] M. Liang, C. Gao, και Z. Zhang, 'A new genetic algorithm based on modified Physarum network model for bandwidth-delay constrained least-cost multicast routing', *Nat. Comput.*, τ. 16, Μαρτίου 2017, doi: 10.1007/s11047-016-9545-6.
- [38] Y. Liu, Y. Deng, M. Jusup, και Z. Wang, 'A biologically inspired immunization strategy for network epidemiology.', *J. Theor. Biol.*, τ. 400, σσ 92–102, Ιουλίου 2016, doi: 10.1016/j.jtbi.2016.04.018.
- [39] X. Zhang κ.ά., 'An intelligent physarum solver for supply chain network design under profit maximization and oligopolistic competition', *Int. J. Prod. Res.*, τ. 55, τχ. 1, σσ 244–263, Ιανουαρίου 2017, doi: 10.1080/00207543.2016.1203075.
- [40] S. Watanabe, A. Tero, A. Takamatsu, και T. Nakagaki, 'Traffic optimization in railroad networks using an algorithm mimicking an amoeba-like organism, *Physarum plasmodium*', *Biosystems*, τ. 105, σσ 225–232, Μαΐου 2011, doi: 10.1016/j.biosystems.2011.05.001.
- [41] M. Houbraken, S. Demeyer, D. Staessens, P. Audenaert, D. Colle, και M. Pickavet, 'Fault tolerant network design inspired by *Physarum polycephalum*', *Nat. Comput.*, τ. 12, τχ. 2, σσ 277–289, 2013, doi: 10.1007/s11047-012-9344-7.
- [42] J. Jones, 'Towards Programmable Smart Materials: Dynamical Reconfiguration of Emergent Transport Networks', *IJUC*, τ. 7, σσ 423–447, Ιανουαρίου 2011.
- [43] M. Becker, F. Schmidt, και H. Szczerbicka, 'Applicability of Bio-inspired and Graph-Theoretic Algorithms for the Design of Complex Fault-Tolerant Graphs', στο *2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2013, σσ 2730–2734, doi: 10.1109/SMC.2013.465.
- [44] E. Brett, M. Sauter, και D. Duscher, 'Biomimetics: A New Abstraction for Bone Implant Design', 2019, σσ 151–157.
- [45] K. Papakonstantinou, 'Σχεδίαση οστικών εμφυτευμάτων', University of the Aegean,

2006.