ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

« *Γενική Εξέταση των Ελαστομερών Μαλακών Ρομποτικών Αρπάγων για Αντικείμενα Μικρού Βάρους*»

« *An Overview of elastomeric Soft Robotics grippers for light weight objects* »

Υπό

Πόπτσης Σάββας

Α.Μ. 2919045

Πτυχιακή Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Πτυχίου του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας

Λάρισα, 2025

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Ζαούτσος Στέφανος

(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Νταφόπουλος Βασίλειος

Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας,

Σχολή Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Βασιλειάδου Αγάπη

Επίκουρη Καθηγήτρια επί θητεία, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

Με το παρόν κείμενο βεβαιώνω ότι ο Πόπτσης Σάββας είμαι συγγραφέας της παρούσης πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και η οποία παραδόθηκε, μετά από έγκριση του επιβλέποντας καθηγητή μου, σε έντυπη και ψηφιακή μορφή στη Γραμματεία του Τμήματος. Επίσης δηλώνω πως κάθε πηγή που χρησιμοποίησα (βιβλιογραφία, αρθρογραφία, δικτυογραφία), για την υποστήριξη των υποθέσεων της μελέτης και της ερευνάς μου, είναι πλήρως συμβατή με τα ακολουθούμενα επιστημονικά πρότυπα και, επιπλέον, αναφέρεται ρητά, υπό μορφή αναφοράς-παραπομπής, σε όλο το φάσμα κειμένων της παρούσης εργασίας. Το αυτό ισχύει για τη χρήση δευτερογενών δεδομένων (πινάκων, διαγραμμάτων και εικόνων), ιδεών και λέξεων, τα οποία και αναφέρονται είτε ακριβώς όπως υπάρχουν στις πηγές είτε μεθερμηνεύονται από εμένα.

ΕΠΩΝΥΜΟ	**ΠΟΠΤΣΗΣ**
ΟΝΟΜΑ	**ΣΑΒΒΑΣ**
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	**2919045**
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	**18/8/2025**
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

© 2025. ΣΑΒΒΑΣ ΠΟΠΤΣΗΣ

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας της Σχολής Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον σύμβουλό μου για την ανεκτίμητη καθοδήγηση, την αμέριστη υποστήριξή του και τις κρίσιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της ερευνητικής διαδικασίας. Η εμπειρία του, η επιστημονική του εμπειρία και η προθυμία του να παράσχει καθοδήγηση ήταν καθοριστικής σημασίας για την επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα τρία μέλη της αναθεωρητικής επιτροπής για τον χρόνο τους και τα πολύτιμα σχόλια και προτάσεις, που βοήθησαν στην βελτίωση της ποιότητας αυτής της έρευνας.

Είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων στην οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξη, την υπομονή και την κατανόησή τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου. Η υποστήριξή τους ήταν μια συνεχής πηγή δύναμης και έμπνευσης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και τους συμμαθητές μου για τη συνεργασία, την αλληλοβοήθεια και την υποστήριξή τους, που έκαναν το ακαδημαϊκό ταξίδι μου πιο δημιουργικό και ευχάριστο. Η συμβολή όλων είναι ανεκτίμητη και τους ευχαριστώ ειλικρινά για τη βοήθειά τους στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτή η εργασία εμβαθύνει στο πεδίο των εύκαμπτων μαλακών ρομποτικών λαβών και τη συμβολή τους στον χειρισμό ελαφρών αντικειμένων. Η έρευνα επικεντρώνεται στη θεωρητική και πρακτική ανάλυση των υλικών, των μεθόδων ενεργοποίησης, των αισθητήρων και των στρατηγικών ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη καινοτόμων ρομποτικών λαβών ικανών να μιμούνται τη βιολογική κίνηση και να επιτρέπουν την ασφαλή, προσαρμοστική αλληλεπίδραση με αντικείμενα και το περιβάλλον.

Πρώτον, αυτό το έγγραφο περιγράφει την ιστορική εξέλιξη της μαλακής ρομποτικής και τις τεχνολογικές καινοτομίες που επέτρεψαν τη μετάβαση από τις άκαμπτες στις εύκαμπτες λαβές. Στη συνέχεια αναλύει τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα παραδοσιακά συστήματα, όπως η περιορισμένη προσαρμοστικότητα, ο κίνδυνος ζημιάς σε ευαίσθητα αντικείμενα και θέματα ασφάλειας. Στη συνέχεια εξετάζει τους κύριους τύπους μαλακών λαβών, τεχνολογίες ενεργοποίησης (πνευματικές, υδραυλικές, ηλεκτρικές, καλωδιακές, θερμικές και μαγνητικές) και την ενσωμάτωση ευφυών αισθητήρων για βελτιστοποίηση της ακρίβειας και της σταθερότητας συγκράτησης.

Αυτή η εργασία εξετάζει τις σύγχρονες ερευνητικές μεθόδους και τις βιομηχανικές εφαρμογές σε τομείς όπως τα αγροδιατροφικά προϊόντα, η συσκευασία, η κλωστοϋφαντουργία, η ηλεκτρονική και η ιατρική ρομποτική. Επιπλέον, συζητά τα πλεονεκτήματα των μαλακών λαβών, όπως η υψηλή προσαρμοστικότητα, η ασφάλεια, η μειωμένη ζημιά και η αυξημένη απόδοση, καθώς και οι εναπομένουσες προκλήσεις, όπως η στιβαρότητα του υλικού, η ενεργειακή απόδοση και η ανάγκη για τυποποιημένες μετρήσεις και δοκιμές.

Τέλος, η παρούσα εργασία προτείνει μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας, εστιάζοντας στην ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης και στην ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων με υψηλότερη προσαρμοστική απόδοση, ώστε να μπορέσουν οι μαλακές ρομποτικές αρπάγες να γίνουν καταλύτες για τον βιομηχανικό αυτοματισμό και την καθημερινή ζωή.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Λέξεις-κλειδιά

Μαλακή ρομποτική - Ελαστική λαβή - Ρομποτικός ενεργοποιητής - Εξαιρετικά ευέλικτα υλικά - Μέθοδος ενεργοποίησης - Έξυπνος αισθητήρας - Βιομηχανικός αυτοματισμός - Ρομποτική σύλληψη αντικειμένων - Υβριδικό ρομποτικό σύστημα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Abstract

This thesis delves into the field of flexible soft robotic grippers and their contribution to the manipulation of lightweight objects. The research focuses on the theoretical and practical analysis of materials, actuation methods, sensors, and control strategies used in the development of innovative robotic grippers capable of mimicking biological motion while ensuring safe and adaptive interaction with objects and their environment.

Firstly, the study outlines the historical evolution of soft robotics and the technological innovations that enabled the transition from rigid to flexible grippers. It then analyzes the challenges faced by traditional systems, such as limited adaptability, the risk of damaging delicate objects, and safety concerns. Furthermore, it examines the main types of soft grippers, various actuation technologies (pneumatic, hydraulic, electric, cable-driven, thermal, and magnetic), as well as the integration of intelligent sensors to optimize gripping accuracy and stability.

The thesis also reviews modern research approaches and industrial applications across diverse sectors, including agri-food processing, packaging, textiles, electronics, and medical robotics. Additionally, it highlights the advantages of soft grippers, such as high adaptability, improved safety, reduced damage, and enhanced efficiency, while addressing remaining challenges, including material durability, energy efficiency, and the need for standardized testing and evaluation metrics.

Finally, the study proposes future research directions, emphasizing the integration of artificial intelligence and the development of hybrid systems with enhanced adaptive performance, enabling soft robotic grippers to become key catalysts for industrial automation and everyday applications.

Keywords

Soft robotics - Elastomeric gripper - Robotic actuator - Highly flexible materials - Actuation methods - Intelligent sensors - Industrial automation - Robotic object manipulation - Hybrid robotic systems

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες 4

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 5

Abstract 7

Περιεχόμενα 8

Πίνακας Πινάκων 11

Πίνακας Εικόνων 11

Εισαγωγή 17

1 Κεφάλαιο Ελαστομερών Μαλακών Ρομποτικών Αρπάγων 19

1.1 Ερευνητικό υπόβαθρο και κίνητρο 20

1.1.1 Εφαρμογές σε Ακραία Περιβάλλοντα 20

1.1.2 Σύγχρονες Εξελίξεις στον Τομέα των Ελαστικών Αρπαγών 21

1.2 Ορισμός και εξέλιξη των μαλακών ρομπότ 22

1.2.1 Τι σημαίνει "μαλακή ρομποτική" (λειτουργικός ορισμός) 22

1.2.2 Εξέλιξη του πεδίου: από τον «ορισμό» στον «αντίκτυπο» (2015–2025) 23

1.3 Robotic Gripper: Από άκαμπτο σε ευέλικτο 25

1.3.1 Μειονεκτήματα των παραδοσιακών άκαμπτων λαβών 25

1.4 Η σημασία των Soft Grippers στην ελαφριά βιομηχανία και τις καθημερινές εφαρμογές 27

1.4.1 Πλεονεκτήματα σε βασικούς ελαφρούς βιομηχανικούς τομείς 28

1.4.2 Απόδοση, Ποιότητα, Υγιεινή και Βιωσιμότητα 29

1.5 Στόχοι και Ερευνητικά Ερωτήματα 31

1.5.1 Ειδικοί Στόχοι (S.M.A.R.T.) 32

2 Κεφάλαιο Θεωρητικό υπόβαθρο 33

2.1 Τεχνολογία και Εφαρμογές Ρομποτικής 33

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

2.1.1 Βασικοί τομείς: Από τη βιομηχανία στις υπηρεσίες 34

2.2 Διαφορές μεταξύ σκληρών και μαλακών ρομπότ 37

2.3 Ορισμός και χαρακτηριστικά ελαστικών μαλακών ρομπότ 40

2.4 Ιστορική ανασκόπηση της μαλακής ρομποτικής 42

2.5 Ο ρόλος των υλικών και της μηχανικής ελαστομερών 45

2.5.1 Κατηγορίες ελαστομερών Gripper – Χαρακτηριστικά, Οφέλη και Περιορισμοί 46

2.5.2 Μηχανικές ιδιότητες ελαστομερών υπό φορτίο: Υπερελαστικότητα, ιξωδοελαστικότητα και υστέρηση 47

3 Κεφάλαιο: Τύποι και ταξινομήσεις Soft Robotic Grippers 49

3.1 Κατηγοριοποίηση σύμφωνα με την εφαρμογή 49

3.1.1 Ιατρική παρέμβαση 50

3.1.2 Βοηθητικές Εφαρμογές 52

3.1.3 Βιομηχανικοί σφιγκτήρες 53

3.1.4 Υποβρύχια σύλληψη 53

3.2 Βιομιμητικοί αρπάγες 54

3.2.1 Ταξινομία Σύλληψης 55

3.2.2 Ανθρωποειδείς αρπάγες 56

3.3 Κράπες εμπνευσμένες από ζώα 58

3.3.1 Σύλληψη Τύπου Σφιγκτήρα (Clamp Grasp) 59

3.3.2 Σύλληψη μέσω Αναρρόφησης (Sucking Grasp) 61

3.4 Ιατρικές και φορητές εφαρμογές 64

3.4.1 Φυσικές διεπαφές σε φορητά ρομπότ 65

4 Κεφάλαιο: Τεχνολογία κίνησης Μαλακών Ρομποτικών Αρπάγων 70

4.1 Μέθοδοι ενεργοποίησης 71

4.1.1 Πνευματική Ενεργοποίηση 72

4.1.2 Υδραυλική ενεργοποίηση 73

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

4.1.3 Μηχανική Ενεργοποίηση 74
4.1.4 Ενεργοποίηση μέσω Καλωδίων 74
4.1.5 Ηλεκτρική ενεργοποίηση 75
4.1.6 Άλλες μεθόδους ενεργοποίησης 76
4.2 Αισθητήρες και έλεγχος 77
4.2.1 Σχεδιασμός συστήματος αισθητήρων 77
4.2.2 Άμεση ανίχνευση με βάση τις ιδιότητες των Υλικών 79
4.3 Έλεγχος λειτουργίας μαλακής λαβής 81
4.3.1 Χειροκίνητος έλεγχος 81
4.3.2 Μοντελοποίηση και έλεγχος μαλακής λαβής 82
5 Κεφάλαιο: Σχεδιασμός, Προσομοίωση και Κατασκευή 87
5.1 Γενική περιγραφή 87
5.1.1 Σχεδιασμός 87
5.1.2 Προσομοίωση 88
5.1.3 Κατασκευή 89
5.2 Θεωρητικό υπόβαθρο - Αρχή συμπίεσης στρώματος 91
5.3 Δομή και κατασκευή 92
5.3.1 Στατική Σχεδιασμός 92
5.3.2 Αρχή παθητικής συμπίεσης στρώσης 93
5.3.3 Διαδικασία παραγωγής 95
5.4 Πειράματα και αποτελέσματα 96
5.4.1 Συντελεστής Τριβής Πολυστρωματικών Υλικών 96
5.4.2 Πείραμα κάμψης 96
5.4.3 Πείραμα ακαμψίας 97
5.4.4 Συγκριτικά Πειράματα 98
5.4.5 Πειράματα Gripper 98
6 Συμπεράσματα - Προτάσεις 100

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

6.1 Προτάσεις 103

Παράρτημα 106

Βιβλιογραφία 116

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1.1 Σημαντικές εφαρμογές, απαιτήσεις, κατάλληλες μαλακές λαβές (τα τελευταία χρόνια) 30

Πίνακας 2.1 εφαρμογών, απαιτήσεων και κατάλληλων λύσεων 36

Πίνακας 2.2 «Σκληρά» ρομπότ εναντίον «μαλακών» ρομπότ: Σύγκριση μεγέθους 37

Πίνακας 2.3 Η απόφαση να επιλέξει κάποιος ένα "σκληρό" ή "μαλακό" εργαλείο μύτης (gripper) 39

Πίνακας 2.4 Χρονολόγιο βασικού ιστότοπου (Σύνοψη) 45

Πίνακας 2.5 Χρονοδιάγραμμα βασικών σταθμών 46

Πίνακας 3.1 Μερικές τυπικές λαβίδες που χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά σενάρια, Πηγή: Advanced Materials Technologies 49

Πίνακας 5.1 96

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.1 Ρομποτική λαβή, Πηγή: Robotics 19

Εικόνα 1.2 Ρομποτικό σύστημα, Πηγή: SABO Electric 19

Εικόνα 1.3 Μαλακά ρομπότ εμπνευσμένα από νηματώδεις, Πηγή: Georgia Tech (Φωτογραφία: Candler Hobbs) 22

Εικόνα 1.4 Σύγκριση μηχανισμών λαβής σχεδίων ηλεκτροσυγκολλητικών βεντούζες. Πηγή: Advanced Materials 29

Εικόνα 2.1 Ρομποτική, Πηγή: European Robotics Technology Platform 33

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Εικόνα 2.2 Soft Robots, 41

Εικόνα 2.3 Soft robotics, Πηγή: Wilson Hennessy 42

Εικόνα 2.4 Το Octobot είναι ένα αυτόνομο μαλακό ρομπότ που λειτουργεί εξ ολοκλήρου σε χημικές αντιδράσεις, Πηγή: Lori Sanders 43

Εικόνα 3.1 Μερικοί τυπικοί μαλακοί λαβές σε διαφορετικά πεδία εφαρμογών, Πηγή: a) Soft Gripper (SCG). Ανατύπωση με άδεια από τους (Rateni. G et.al, 2015). Πνευματικά δικαιώματα 2015, Springer.b) Πιπτήρας που πιάνει ένα λεπτό σύρμα με φούσκωμα. Ανατύπωση με άδεια από τους (Guo. J et.al, 2017). Πνευματικά δικαιώματα 2017, IEEE. c) Πολυδαχτυλική λαβή κυπέλλου. Ανατύπωση με άδεια από τους (Nguyen. P H et.al, 2019). Πνευματικά δικαιώματα 2019, IEEE. d) Πιάστε ένα μήλο χρησιμοποιώντας ένα μαλακό γάντι. Ανατύπωση με άδεια από τους (Polygerinos. P et.al, 2013). Πνευματικά δικαιώματα 2013, IEEE. e) Στιγμιότυπο δοκιμής σύλληψης ψωμιού. Ανατύπωση με άδεια από τους (Wang. Z Or. K & Hirai. S, 2020). Πνευματικά δικαιώματα 2020, Elsevier.f) Επίδειξη επιτυχούς ανύψωσης στη βιομηχανία. Ανατύπωση με άδεια από τους (Wang. Z Chathuranga. D S & Hirai. S, 2016). Πνευματικά δικαιώματα 2016, IEEE. g) Αρπάγη τύπου φυσούνας που συλλέγει μαλακά κοράλλια. Ανατύπωση με άδεια από τους (Galloway. K C et.al, 2016). Πνευματικά δικαιώματα 2016, Mary Ann Liebert, Inc., Publishers. h) Η λαβή κινείται προς τα κάτω για να πιάσει το υποβρύχιο σφουγγάρι. Ανατύπωση με άδεια από το (Phillips. B T et.al, 2018). Πνευματικά δικαιώματα 2018, Nature Publishing Group. 51

Εικόνα 3.2 Ταξινομία σύλληψης του ανθρώπινου χεριού βάσει των στάσεων του αντίχειρα, της παλάμης και των δακτύλων, Πηγή: (Saudabayev. A et.al, 2018)(© 2018, Scientific Data 5). 55

Εικόνα 3.3 Οι βιονικές αρπάγες (B-I grippers) βασίζονται στους μηχανισμούς λαβής διαφόρων ζώων: (a) πτηνών (Thomas. J, 2013). (b) origami (Yan. W & Mehta. A, 2023); (c) αράχνες (Kellaris. N et.al, 2021). και (d) καβούρια (Nguyen. V P & Chow. W T, 2023) (© IEEE Robotics and Automation Letters). 61

Εικόνα 3.4 Η βιομιμητική λαβή (B-I gripper) βασίζεται στον μηχανισμό αναρρόφησης διαφόρων ζώων: (a) χταπόδι [142] (© Advanced Science, τόμος 9) και (b) lamprey [143] (© Actuators, vol. 11). 63

Εικόνα 3.5 (A) Μαλακό ρομποτικό εξωσκελετικό κοστούμι για υποστηρικτικές εφαρμογές και εφαρμογές αποκατάστασης για ασθενείς με εγκεφαλικό (Awad. L et.al, 2020) (Ανατύπωση από τους (Koch. M A & Font-Llagunes. J M, 2021)). (B) Φορητή συσκευή

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

αποκατάστασης αστραγάλου βασισμένη σε πνευματικό τεχνητό μυ McKibben (Park. Y L et.al, 2014) (Ανατύπωση από τους (Koch. M A & Font-Llagunes. J M, 2021). (C) Φορήσιμο μαλακό ρομποτικό σύστημα καρπού με ηλεκτρικό σύστημα τάνυσης για βελτιωμένη μετάδοση δύναμης (Choi. W H et.al, 2019)(Ευγενική προσφορά του καθηγητή Kyu-Jin Cho, Εθνικό Πανεπιστήμιο της Σεούλ, Νότια Κορέα). (D) Ηλεκτρικά ρυθμιζόμενη προσθετική υποδοχή για άτομα με ακρωτηριασμό πάνω από το γόνατο (Paterno. L et.al, 2021) (Ευγενική προσφορά της καθηγήτριας Arianna Menciassi, Scuola Superiore di Sant'Anna, Ιταλία). (E) Αισθητηριακή όρθωση που κατασκευάζεται με πλαστικοποίηση εύκαμπτων αισθητήρων υπό κενό (Bauwens. P et.al, 2020) (Ευγενική προσφορά του καθηγητή Jan Vanflateren, Πανεπιστήμιο της Γάνδης, Βέλγιο). (F) Όρθωση με μεταβλητή ακαμψία και σχήμα (Ibrahimi. M et.al, 2021) (Ευγενική προσφορά της καθηγήτριας Arianna Menciassi, Scuola Superiore Sant'Anna, Ιταλία). (G) Ενεργό ύφασμα που βασίζεται σε τεχνητές μυϊκές ίνες που οδηγούνται από πνευματική ροή (αναπαράγεται από (Phan. P T et.al, 2022). (H) Triboelectric all-textile sensor array (TATSA) για τη μέτρηση της πίεσης στην επιφάνεια του δέρματος (Fan. W et.al, 2020) (αναπαράγεται από (Tseghai. G B et.al, 2020). (I) Εύκαμπτος και πλενόμενος αισθητήρας καταπόνησης για παρακολούθηση ανθρώπινης κίνησης (αναπαράγεται από (Tolvanen. J Hannu. J & Jantunen. H, 2018). (J) Έξυπνη υφασμάτινη στολή (E-textile suit) για ηλεκτρομυογραφία επιφάνειας (sEMG) για την αξιολόγηση της έντασης της άσκησης (αναπαράγεται από τους (Ohiri. K A et.al, 2022). Όλες οι εικόνες αναπαράγονται με μια διεθνή άδεια Creative Commons Attribution 4.0 (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 64

Εικόνα 4.1 Μαλακές λαβές με διαφορετικές αρχές ενεργοποίησης: a–c) Πνευματικά ενεργοποιούμενες μαλακές λαβές, οι οποίες χαρακτηρίζονται από γρήγορη ταχύτητα απόκρισης αλλά απαιτούν παροχή αέρα. Ανατύπωση με άδεια (Teeple. C B et.al, 2020) Πνευματικά δικαιώματα 2020, Wiley. Ανατύπωση με άδεια (Hao. Y et.al, 2017) Πνευματικά δικαιώματα 2017, Εκδόσεις SAGE. Ανατύπωση με άδεια (Cheng. P et.al, 2022) Πνευματικά δικαιώματα 2022, American Society of Mechanical Engineers.d-f) Υδραυλικά ενεργοποιούμενες μαλακές λαβές. Η υδραυλική και η πνευματική κίνηση έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Ανατύπωση με άδεια (Sinatra. N R et.al, 2019) Πνευματικά δικαιώματα 2019, American Association for the Advancement of Science. Ανατύπωση με άδεια (Chen. G et.al, 2021) Πνευματικά δικαιώματα 2021, Elsevier. Ανατύπωση με άδεια (Wang. H et.al, 2020) Πνευματικά δικαιώματα 2020, IEEE. g-i) Ηλεκτρικά ενεργοποιούμενες μαλακές λαβές, οι οποίες απαιτούν υψηλή τάση ενεργοποίησης. Ανατύπωση με άδεια (Li. J Sun. M & Wu. Z, 2021) Πνευματικά δικαιώματα 2021, Mary Ann Liebert, Inc., Publishers. Ανατύπωση με άδεια

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

από (Lau. G.-K et.al, 2017) Πνευματικά δικαιώματα 2017, AIP Publishing LLC. Ανατύπωση με άδεια από (Jain. R et.al, 2011) Πνευματικά δικαιώματα 2011, Εκδόσεις SAGE. i-l) Μαλακές λαβές που ενεργοποιούνται με καλώδιο, που απαιτούν καλώδια και κινητήρες (Bemfica. J R et.al, 2014), (Wang.. H et.al, 2013), (Maghooa. F et.al, 2015). Ανατύπωση με άδεια από (Bemfica. J R et.al, 2014) Πνευματικά δικαιώματα 2014, IEEE. Ανατύπωση με άδεια από (Wang.. H et.al, 2013)Πνευματικά δικαιώματα 2013, IEEE. Ανατύπωση με άδεια από (Maghooa. F et.al, 2015) Πνευματικά δικαιώματα 2015, IEEE. m-o) Μηχανικά ενεργοποιούμενες μαλακές λαβές, με στιβαρές δυνατότητες ανύψωσης φορτίου. Ανατύπωση με άδεια από (D. Mura et.al, 2018) Πνευματικά δικαιώματα 2014, IEEE. Ανατύπωση με άδεια από (Sakagami. N Takeuchi. K & Koganezawa. K, 2020) Πνευματικά δικαιώματα 2020, IEEE. Ανατύπωση με άδεια από (Bemfica. J R et.al, 2014) Πνευματικά δικαιώματα 2013, Elsevier. p–r) Μαλακές λαβές που ενεργοποιούνται από υλικό, των οποίων τα χαρακτηριστικά απόδοσης εξαρτώνται από το δομικό υλικό. Ανατύπωση με άδεια (Eroğlu. M & Şam Parmak E D, 2022) Πνευματικά δικαιώματα 2022, Taylor & Francis. Ανατύπωση με άδεια (Zhang. Z et.al, 2022) Πνευματικά δικαιώματα 2022, Mary Ann Liebert, Inc., Publishers. Ανατύπωση με άδεια (Pilz da Cunha. M et.all, 2020)Πνευματικά δικαιώματα 2020, Εθνική Ακαδημία Επιστημών. 70

Εικόνα 4.2 Comparison of several actuate methods 72

Εικόνα 4.3 Για εύκαμπτες λαβές, η ευέλικτη αίσθηση μπορεί να εφαρμοστεί από τρεις διαφορετικές οπτικές γωνίες: Επιφανειακή ανίχνευση, Ενσωματωμένη δομή και Εξωτερικές πληροφορίες. Τα συμβατικά εύκαμπτα συστήματα ανίχνευσης λαβής έχουν σχεδιαστεί ως εξής: (a) Άμεση παρατήρηση τοποθέτησης με χρήση συμβατικών αισθητήρων. Ανατύπωση με άδεια από τους (Mannsfeld. S C B et.al, 2010). Πνευματικά δικαιώματα © 2010, Nature Publishing Group. (b) Ενσωματωμένη παρατήρηση με βάση τις ιδιότητες του υλικού. Ανατύπωση με άδεια από τους (Park. Y-L Chen. B-R & Wood. R-J, 2012). Πνευματικά δικαιώματα © 2012, IEEE. (c) Αυτόνομο σύστημα ανίχνευσης που βασίζεται σε φωτοηλεκτρικά σήματα. Ανατύπωση με άδεια από τους (Gong. Z et.al., 2021). Πνευματικά δικαιώματα © 2021, Εκδόσεις SAGE. 79

Εικόνα 4.4 Σύγκριση της δυνατότητας ελέγχου των μηχανισμών μαλακής λαβής που βασίζονται σε διαφορετικές δομές και μεθόδους ενεργοποίησης, καθώς και σε αρκετούς κοινούς τύπους μαλακής λαβής που χρησιμοποιούνται σήμερα. Ανατύπωση με άδεια από (Xu. Z & Todorov. E, 2016) Πνευματικά δικαιώματα 2010, Springer Nature. Ανατύπωση με άδεια από (Calisti. M et.al, 2011) Πνευματικά δικαιώματα 2012, IEEE. Ανατύπωση με άδεια από (D'Avella, 2020) Πνευματικά δικαιώματα 2021, Εκδόσεις SAGE. 81

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Εικόνα 4.5 Διαφορετικές διαδικασίες ελέγχου μαλακής λαβής: a) Μαλακή λαβή για πιάσιμο με χειροκίνητο έλεγχο. Ανατύπωση με άδεια από τους (Sinatra. N R et.al, 2019)], Copyright 2019, American Association for the Advancement of Science. b) Πνευματική λαβή για απευθείας χαρτογράφηση κίνησης. Ανατύπωση με άδεια από τους (Chen. G et.al, 2021), Copyright 2021, Elsevier. c) Έλεγχος συγκεκριμένων ενεργειών μέσω αφηρημένων μοντέλων. Ανατύπωση με άδεια από τους (Gong. Z et.al, 2018), Copyright 2018, Springer. d) Ακριβής έλεγχος με αλλαγή της γωνίας ροπής πολλαπλών αρθρώσεων. Ανατύπωση με άδεια από τους (Sakagami. N Takeuchi. K & Koganezawa. K, 2020), Copyright 2020, IEEE. e) Πνευματική λαβή για σύστημα κλειστού βρόχου που βασίζεται σε ανάδραση εικόνας. Ανατύπωση με άδεια από τους (Gong. Z et.al., 2021), Copyright 2021, SAGE Press. 84

Εικόνα 7.1 Σχεδιαστική ιδέα ενός μαλακού «δακτύλου» διπλής κοιλότητας με παθητική παρεμβολή στρώματος: (α) Δομικό διάγραμμα. (β) Λεπτομερείς διαστάσεις. 106

Εικόνα 7.2 Διατομή εύκαμπτου «δακτύλου»: (a) Αρχική κατάσταση. (b) Κεκαμμένη κατάσταση. (c) Σχηματικό διάγραμμα μορφολογικής συμπεριφοράς. (d) Σύγκριση μονάδας κάρτας στρώσης πριν και μετά την κάμψη. 107

Εικόνα 7.3 Προτεινόμενη διαδικασία κατασκευής δακτύλων. (a) Διαδικασία κατασκευής πυρήνα κεριού. (b) Συναρμολόγηση του εύκαμπτου καλουπιού δακτύλου. (c) Ευέλικτη διαδικασία κατασκευής δακτύλων 108

Εικόνα 7.4 Διαφορετικοί τύποι υλικών: πλαστικό χαρτί, γυαλόχαρτο P1500, γυαλόχαρτο P800. 109

Εικόνα 7.5 Πλατφόρμα μέτρησης συντελεστών τριβής. (a) Σχηματικό διάγραμμα. (b) Πειραματική πλατφόρμα. 110

Εικόνα 7.6 Πειραματική ρύθμιση για δοκιμή εύκαμπτης γωνίας κάμψης δακτύλων. (a) Σχηματικό διάγραμμα. (b) Πειραματική πλατφόρμα. 110

Εικόνα 7.7 Αποτελέσματα δοκιμής γωνίας κάμψης. (a) Διάγραμμα μετρημένης κάμψης (γυαλόχαρτο P1500). (b) Γωνίες κάμψης διαφορετικών υλικών. 111

Εικόνα 7.8 Πειραματική πλατφόρμα μέτρησης ακαμψίας. (a) Σχηματικό διάγραμμα. (b) Πειραματική πλατφόρμα. 111

Εικόνα 7.9 Αποτελέσματα δοκιμής ακαμψίας. (a-c) Σύγκριση ακαμψίας σε διαφορετικές πιέσεις φουσκώματος (υλικά στρώματος συμπίεσης: πλαστικό χαρτί, γυαλόχαρτο P1500 και γυαλόχαρτο P800). (d-f) Σύγκριση ακαμψίας μονάδων με διαφορετικά στρώματα συμπίεσης (πιέσεις φουσκώματος: 10 kPa, 20 kPa και 30 kPa). 112

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Εικόνα 7.10 Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών. (a) Διαφορετικές αρχές παθητικής συμπίεσης. 113

Εικόνα 7.11 Πειραματική εγκατάσταση για τη δοκιμή της ικανότητας φορτίου ενός συστήματος σύσφιξης. (α) Σχηματικό διάγραμμα. (β) Πειραματική πλατφόρμα. 113

Εικόνα 7.12 Πειράματα συστήματος λαβής. (a-c) Δοκιμές δύναμης λαβής χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά στρώματος συμπίεσης (υλικά στρώματος συμπίεσης: πλαστικό χαρτί, γυαλόχαρτο P1500 και γυαλόχαρτο P800). (d-f) Δοκιμές δύναμης λαβής χρησιμοποιώντας διαφορετικές πιέσεις φουσκώματος (10 kPa, 20 kPa και 30 kPa). 114

Εικόνα 7.13 Επίδειξη της κίνησης σύλληψης του συστήματος σύλληψης. (a) Φράουλα, (b) Πορτοκάλι, (c) Apple, (d) Χαρτοπετσέτα, (e) Πένσα. (f) Κάδος σιλικόνης, (g-i) Πλαστικά κύπελλα διαφορετικού βάρους. 115

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Εισαγωγή

Η ταχεία πρόοδος της ρομποτικής τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που στοχεύουν στη βελτίωση της ευελιξίας, της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας των ρομποτικών συστημάτων. Ένας από τους πιο καινοτόμους τομείς είναι η μαλακή ρομποτική, η οποία διαφέρει από τα παραδοσιακά ρομποτικά συστήματα με τη χρήση ελαστικών και εύκαμπτων υλικών που μιμούνται τις ιδιότητες του βιολογικού ιστού. Οι ελαστικές μαλακές ρομποτικές λαβές αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της τεχνολογικής καινοτομίας, προσφέροντας νέες δυνατότητες για το χειρισμό ελαφρών, εύθραυστων ή ακανόνιστου σχήματος αντικειμένων.

Λόγω των σημαντικών περιορισμών των παραδοσιακών άκαμπτων ρομποτικών λαβών, η ζήτηση για πιο ευέλικτα, ασφαλέστερα και προσαρμόσιμα ρομποτικά συστήματα γίνεται όλο και πιο επείγουσα. Οι παραδοσιακές λαβές απαιτούν εξαιρετικά ακριβείς υπολογισμούς δύναμης και θέσης και συχνά δεν μπορούν να χειριστούν αντικείμενα με ασυνήθιστη ευαισθησία ή πολύπλοκες γεωμετρίες. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη τεχνολογιών που μπορούν να προσαρμοστούν δυναμικά στο περιβάλλον τους και να μειώσουν τον κίνδυνο ζημιάς στα προϊόντα και στους ανθρώπους που αλληλεπιδρούν μαζί τους είναι επιτακτική.

Οι μαλακές ρομποτικές λαβές προσφέρουν τα ακόλουθα σημαντικά πλεονεκτήματα:

- ✓ Υψηλή προσαρμοστικότητα στο σχήμα και τη μορφή αντικειμένου.
- ✓ Ασφαλής αλληλεπίδραση με ευαίσθητα αντικείμενα και το ανθρώπινο σώμα.
- ✓ Ευκολότερος έλεγχος λόγω της ελαστικότητας του υλικού.
- ✓ Βελτιωμένη απόδοση και ενεργειακή απόδοση σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Αυτή η εργασία εστιάζει στη θεωρητική και πρακτική ανάλυση υλικών, μεθόδων ενεργοποίησης (πνευματικά, υδραυλικά, ηλεκτρικά, θερμικά, μαγνητικά και με καλώδιο) και στρατηγικές ελέγχου για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας της λαβής. Εισάγει επίσης βασικές βιομηχανικές εφαρμογές των μαλακών λαβών σε τομείς όπως η παραγωγή αγροδιατροφικών προϊόντων, η συσκευασία, τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, τα ηλεκτρονικά είδη και η ιατρική ρομποτική.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Η εργασία υπογραμμίζει επίσης τις σύγχρονες ερευνητικές μεθόδους που τονίζουν τη σημασία των ευφυών αισθητήρων και την ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης σε ρομποτικά συστήματα για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας, σταθερότητας και αυτονομίας.

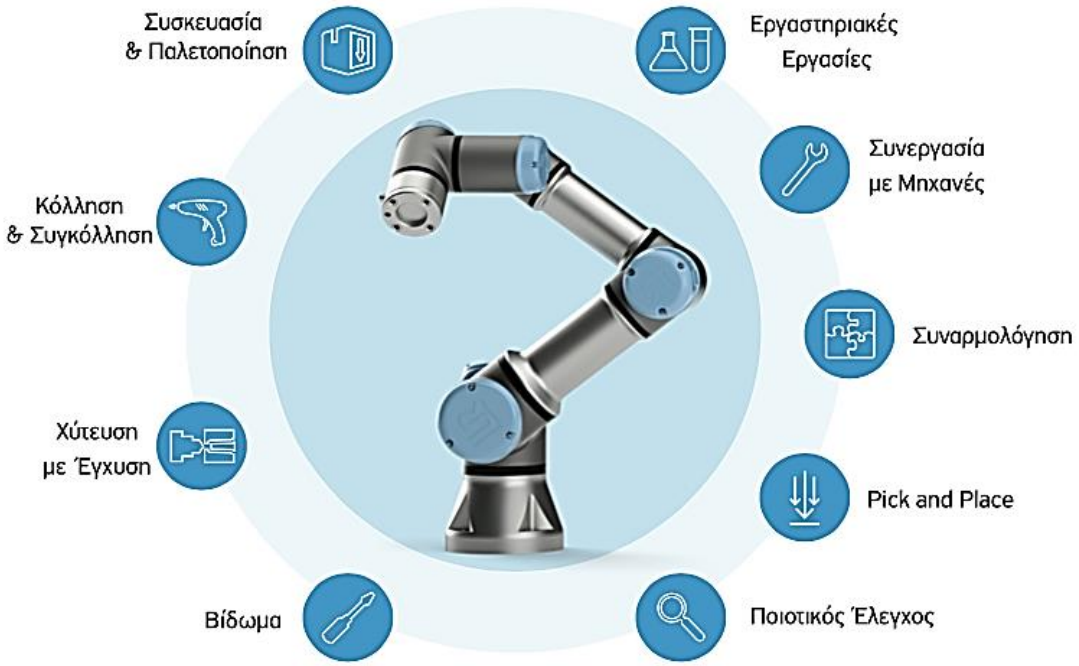
Αυτή η εργασία στοχεύει να παρέχει μια συστηματική και περιεκτική μελέτη των ελαστικών μαλακών ρομποτικών λαβών, τονίζοντας τα πλεονεκτήματά τους, τις τεχνικές προκλήσεις και τις μελλοντικές προοπτικές ανάπτυξης. Αυτή η εργασία συμβάλλει στη βαθύτερη κατανόηση του ρόλου των μαλακών λαβών στον βιομηχανικό αυτοματισμό και υπογραμμίζει τις δυνατότητές τους να βελτιώσουν την παραγωγικότητα, την ποιότητα και την ασφάλεια στις σύγχρονες ρομποτικές εφαρμογές.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

1 Κεφάλαιο Ελαστομερών Μαλακών Ρομποτικών Αρπάγων

Η ανάπτυξη μαλακών ρομποτικών λαβών που βασίζονται σε ελαστομερή υλικά είναι ένας σχετικά νέος αλλά ταχέως αναπτυσσόμενος τομέας στη ρομποτική. Η ανάγκη για λαβές (βλ. Εικόνες 1.1 και 1.2) που μπορούν να χειρίζονται ευαίσθητα, εύθραυστα ή ακανόνιστου σχήματος αντικείμενα χωρίς να προκαλούν ζημιά ή παραμόρφωση υπήρξε κινητήρια δύναμη στην έρευνα στη μαλακή ρομποτική.

Εικόνα 1.1 Ρομποτική λαβή, Πηγή: Robotics



Εικόνα 1.2 Ρομποτικό σύστημα, Πηγή: SABO Electric

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

1.1 Ερευνητικό υπόβαθρο και κίνητρο

Αν και οι πρώτες εφαρμογές των μαλακών δακτύλων μπορούν να ανιχνευθούν στις δεκαετίες του 1970 και του 1980, η σύγχρονη έκρηξη στον τομέα των ελαστομερών (μαλακών) ρομποτικών λαβών ξεκίνησε κυρίως μετά το 2010. Η εφεύρεση της τεχνολογίας «*universal gripper*» από τους (Brown. E et.al, 2010), με βάση το φαινόμενο του κολλήματος (κλείδωμα σωματιδίων με αναρρόφηση αέρα), ήταν ένα βασικό σημείο στην ευρεία αποδοχή της μαλακής ρομποτικής (Hughes. J et.al, 2016).

1.1.1 Εφαρμογές σε Ακραία Περιβάλλοντα

Ο (Kulkarni. M, 2025) ερεύνησε τις εφαρμογές της μαλακής ρομποτικής σε ακραία περιβάλλοντα, όπως μέσα στο ανθρώπινο σώμα, υποβρύχια, στο διάστημα και για αποστολές διάσωσης, υπογραμμίζοντας τη χρησιμότητα των μαλακών υλικών σε συνθήκες όπου η ασφάλεια, η ευελιξία και η ανθεκτικότητα είναι ζωτικής σημασίας.

- **Εφαρμογές σε Υποβρύχιες και Διεπιστημονικές Προσεγγίσεις**

Ο (Wu. M et.al, 2024) ανέπτυξε μια υποβρύχια μαλακή λαβή εμπνευσμένη από χταπόδι, ικανή να απελευθερώνει, να τραβάει, να κολυμπάει και να ανασύρει αντικείμενα σε περιορισμένα υποβρύχια περιβάλλοντα.

- **Συστήματα Σχεδιασμού και Αυτοματισμού**

Οι (Pinskier. J et.al, 2022) Έρευνα στο (2022) έδειξε πώς να συνδυάζεται η βελτιστοποίηση τοπολογίας πολλαπλών υλικών με την εκτύπωση 3D για να καταστεί δυνατή η αυτοματοποιημένη σχεδίαση μαλακών λαβών ειδικά για εφαρμογές όπως η συλλογή φρούτων.

Πρόσφατα, το DexGrip (Wang. X et.al, 2024) έδειξε εντυπωσιακά αποτελέσματα ως μαλακή λαβή ικανή να περιστρέφει και να χειρίζεται αντικείμενα σε τρεις βαθμούς ελευθερίας, ενισχύοντας την πρακτικότητα του συστήματος.

- **Επιστημονικές Προκλήσεις και Μέλλον**

Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (NIST) (Case. J C & Marvel. J A, 2024). Αναγνωρίζονται οι προκλήσεις της μετρολογίας που αντιμετωπίζει η μαλακή ρομποτική, όπως η μελέτη υλικών (ιξωδοελαστικότητα, πολυμερή μνήμης σχήματος,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

υγρασία/θερμοκρασία) και η ανάπτυξη αισθητήρων και στρατηγικών ελέγχου που μπορούν να λειτουργήσουν σε δυναμικές καταστάσεις.

Τέλος, ο (Sarker. A Ul Islam. T & Robiul Islam. M, 2024) εξέτασαν προκλήσεις σε υλικά και ενεργοποίηση, καθώς και προκλήσεις στους αισθητήρες και τον έλεγχο, σε μια πρόσφατη ανασκόπηση, υπογραμμίζοντας το πεδίο για περαιτέρω πρακτικές και θεωρητικές βελτιώσεις.

1.1.2 Σύγχρονες Εξελίξεις στον Τομέα των Ελαστικών Αρπαγών

Ο (AboZaid. Y A et.al, 2024) παρέχουν μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση των τεχνολογιών, των υλικών και των εφαρμογών soft gripper, υπογραμμίζοντας το εύρος και την ποικιλομορφία των σύγχρονων προσεγγίσεων στην μαλακή ρομποτική.

Ο (Otti. M et.al, 2024) εστιάζουν στην εξέλιξη των soft grippers, εστιάζοντας στην ευελιξία, την επιδεξιότητά τους και την ανάπτυξη ενός ομοιογενούς πλαισίου για την αξιολόγηση της λειτουργικής τους απόδοσης.

Ο (Dzedzickis. A et.al, 2024) παρέχουν μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση της ανάπτυξης των μαλακών λαβών από το 2015 έως το 2024. Παρέχεται μια ολοκληρωμένη ταξινόμηση και ανάλυση των προόδων στις μαλακές λαβές από το 2020 έως το 2024, συμπεριλαμβανομένων μηχανισμών ενεργοποίησης, δυνάμεων λαβής και εφαρμογών για εύθραυστα αντικείμενα, υπόγειες ή γεωργικές δραστηριότητες στη Ρομποτική: Πρόοδος κατά τα τελευταία 10 χρόνια, Μηχανές, 2024]).

- **Ενσωμάτωση νέων υλικών και λειτουργιών**

Οι (Hu. F & Liu. Y, 2024) πρότειναν μια καινοτόμο εφαρμογή της μαγνητοελαστικής τεχνολογίας σε μαλακούς ενεργοποιητές, χρησιμοποιώντας μαγνητικά σφαιρικά στοιχεία για ενεργοποίηση, ανοίγοντας νέες επιλογές για τη σύνθεση και τη λειτουργία μαλακών ενεργοποιητών.

Οι (Jung. Y et.al, 2024) εισήγαγαν σύγχρονους μαλακούς ενεργοποιητές που δεν απαιτούν καλώδια ή σωλήνες και ενεργοποιούνται χρησιμοποιώντας εξωτερικά ερεθίσματα όπως μαγνητικά πεδία, θερμότητα, φως ή υγρασία.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

1.2 Ορισμός και εξέλιξη των μαλακών ρομπότ

Η μαλακή ρομποτική είναι ένας κλάδος της ρομποτικής που βασίζεται στη χρήση εύκαμπτων, παραμορφώσιμων υλικών όπως ελαστομερή, πολυμερή και υλικά με ιδιότητες που μιμούνται τον βιολογικό ιστό, με στόχο τη δημιουργία μηχανισμών που μπορούν να προσαρμοστούν καλύτερα στο περιβάλλον τους. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά άκαμπτα ρομπότ, τα μαλακά ρομπότ μπορούν να εκτελούν εξαιρετικά ευέλικτες κινήσεις, να αλληλεπιδρούν με ασφάλεια με τους ανθρώπους και να προσαρμόζονται σε μη δομημένα ή απρόβλεπτα περιβάλλοντα.

1.2.1 Τι σημαίνει "μαλακή ρομποτική" (λειτουργικός ορισμός)

Ο όρος «*μαλακό ρομπότ*» (soft robot) αναφέρεται σε ρομποτικά συστήματα των οποίων το σώμα αποτελείται κυρίως από συμμορφώσιμα/ελαστομερή υλικά ή/και φέρει γεωμετρική συμμόρφωση που οδηγεί σε κατανεμημένες παραμορφώσεις και «*σχεδόν άπειρους*» βαθμούς ελευθερίας (βλ. Εικόνα 1.3). Ο σχεδιασμός τους στοχεύει σε ασφαλή, προσαρμοστική αλληλεπίδραση με απρόβλεπτα περιβάλλοντα και ευαίσθητα αντικείμενα (Whitesides. G M, 2018).

Εικόνα 1.3 Μαλακά ρομπότ εμπνευσμένα από νηματώδεις, Πηγή: Georgia Tech (Φωτογραφία: Candler Hobbs)

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία, η «*μαλακότητα*» ορίζεται λειτουργικά σε τρεις άξονες: (**α**) υλικό (Young's modulus κοντά σε βιολογικούς ιστούς), (**β**) μορφολογία/γεωμετρία (origami/kirigami, μεταϋλικά), και (**γ**) αλληλεπίδραση/ασφάλεια (περιορισμός επαγόμενων τάσεων/βλάβης στο περιβάλλον) (Yasa. O et.al, 2023).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Έτσι, για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, μαλακό ρομπότ είναι κάθε ρομπότ του οποίου η κυρίαρχη μηχανική συμπεριφορά καθορίζεται από ελαστομερή/συμμορφώσιμα υποσυστήματα, με αποτέλεσμα παθητική προσαρμογή σχήματος και ενδογενή ασφάλεια κατά την επαφή, ανεξάρτητα από το αν ορισμένα βοηθητικά μέρη (αντλίες, ηλεκτρονικά) είναι άκαμπτα (Rus. D & Tolley M T, 2015).

- **Διαστάσεις του ορισμού: υλικότητα, γεωμετρία, περιβάλλον**

Υλικότητα. Η χαμηλή ακαμψία (π.χ. σιλικόνες, EAPs, ελαστομερή) επιτρέπει «*συμμόρφωση κατά την επαφή*», μειώνοντας ανάγκες για πολύπλοκο κλειστό βρόχο ελέγχου στο τελικό στάδιο σύλληψης (Shintake. J et.al, 2018).

Γεωμετρία/μεταϋλικά. Δομές origami-εμπνευσμένες και μεταϋλικά «*μεταφράζουν*» λεπτές τοπικές παραμορφώσεις σε μεγάλες μορφολογικές μεταβολές χωρίς αύξηση της πολυπλοκότητας στο σύστημα ενεργοποίησης (Hu. F, 2020).

Περιβάλλον/ασφάλεια. Η ασφάλεια κατά την συνεργασία με ανθρώπους και η ικανότητα λειτουργίας σε απρόβλεπτα περιβάλλοντα αποτελούν θεμέλια του ορισμού και πυρήνα της υπόσχεσης της μαλακής ρομποτικής για τον «επόμενο κύκλο επιρροής (Hawkes. E W, 2021).

1.2.2 Εξέλιξη του πεδίου: από τον «ορισμό» στον «αντίκτυπο» (2015–2025)

Η πρώτη μετα-σύνθεση του πεδίου ήρθε με τη Nature (Rus. D & Tolley M T, 2015), που συστηματοποίησε σχεδίαση–κατασκευή–έλεγχο ως ενιαία γραμμή έρευνας και έθεσε την βιομιμητική ως βασικό μοτίβο (Rus. D & Tolley M T, 2015).

Το 2018, το «*πλαίσιο*» του Whitesides χαρτογράφησε τις διαφορές σκληρής/μαλακής ρομποτικής σε στόχους και μέσα (υλικά/δομές αντί για σκληρές αρθρώσεις), προσφέροντας έναν διαισθητικό αλλά αυστηρό ορισμό (Whitesides. G M, 2018).

Παράλληλα, στους αρπάγες-κεντρικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας-η ανασκόπηση των (Shintake. J et.al, 2018) κωδικοποίησε έννοιες, αρχές, υλικά, αρχιτεκτονικές και διάχυτη αισθητήρια στα δάκτυλα/παλάμες, θέτοντας γέφυρα από την ακαδημαϊκή στην βιομηχανική υιοθέτηση (Shintake. J et.al, 2018). Από το 2021 και μετά, το Science Robotics κάλεσε το πεδίο να περάσει από τη «*φάση διερεύνησης*» στη φάση αντίκτυπου, θέτοντας στόχους για μετρικές, πρότυπα, αξιολόγηση και διοχέτευση στην πράξη (Hawkes. E W, 2021).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Μεθοδολογικά, η ανάπτυξη untethered ενεργοποιητών (χωρίς σωληνώσεις/καλώδια) αποτελεί ορόσημο της τελευταίας διετίας, με χαρτογράφηση υλικών/στρατηγικών και προοπτικών (Jung. Y et.al, 2024). Σε επίπεδο οικοσυστήματος, οι συστηματικές βιβλιομετρικές επισκοπήσεις καταγράφουν εκθετική αύξηση δημοσιεύσεων μετά το 2018 σε υποπεδία υλικών, αισθητήρων, ελέγχου και εφαρμογών (Rusu. D M et.al, 2023).

- **Τυπολογίες «μαλακότητας»: intrinsic, structural, hybrid**
  - ***Intrinsic softness***: κυριαρχία ελαστομερών/υδροτζελικών στρωμάτων. π.χ. πνευματικά δάκτυλα με ινώδεις ενισχύσεις για κατευθυνόμενη κάμψη και «*enveloping*» σύλληψη (Shintake. J et.al, 2018).
  - ***Structural softness***: «*μαλακή*» συμπεριφορά μέσω γεωμετρίας (αναδιπλώσεις/μεταϋλικά) που πολλαπλασιάζει την συμμόρφωση χωρίς αλλαγή υλικού (Hu. F, 2020).
  - ***Hybrid systems***: συνδυασμός μαλακών σωμάτων με άκαμπτα στοιχεία ισχύος/αισθητήρων/ηλεκτρονικών κρίσιμη τάση είναι η ολοκλήρωση ενεργοποίησης–αισθητηρίων για «*έξυπνα*» μαλακά σώματα (Zhou. S et.al, 2024).
- **Δυναμική συνιστώσα: υλικά, κατασκευή, αισθητήρια, έλεγχος**
  - Υλικά & ενεργοποίηση. Τα τελευταία έτη, πέρα από πνευματικά/υδραυλικά, έχουν ωριμάσει τεχνικές όπως μαγνητικά/θερμικά ενεργοποιούμενα ελαστομερή και διηλεκτρικοί ενεργοποιητές, ενώ η «*αποσύζευξη*» από ογκώδη συστήματα παροχής ισχύος/ρευστού κάνει τα συστήματα πιο φορητά (Jung. Y et.al, 2024).
  - Κατασκευή. Η επιτραπέζια πολυϋλική εκτύπωση και η χαμηλού κόστους κατασκευή μονολιθικών συσκευών επιταχύνουν τον κύκλο σχεδίασης-δοκιμής (Zhai. Y et.al, 2023).
  - Αισθητήρια & «σώμα με αίσθηση». Η ολοκλήρωση απτικών/παλαμιαίων αισθητήρων και οπτικών/χωρητικών λύσεων βελτιώνει τη σταθερότητα σύλληψης και την «επίγνωση» επαφής - κρίσιμο για αρπάγες ελαφρών αντικειμένων (Zhou. S et.al, 2024).
- **Θεσμικές/ερευνητικές τάσεις της τελευταίας δεκαετίας**
  - **Στοχοθεσία επιρροής** & **πρότυπα**. Το Science Robotics πρόβαλε θεματικά τεύχη για ερωτήματα σκληρά για μαλακά ρομπότ» και στρατηγικές ωρίμανσης (W, 2021).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

- **Συστηματικές επισκοπήσεις**. Οι πρόσφατες ανασκοπήσεις και βιβλιομετρικές μελέτες τεκμηριώνουν την «έκρηξη» του πεδίου και χαρτογραφούν τις ερευνητικές νησίδες (Yasa. O et.al, 2023).
- **Κλαδική διάχυση**. Η έρευνα σε αρπάγες «μικρού βάρους» εκτείνεται από τη βιομηχανία τροφίμων έως τη γεωργία ακριβείας και την υποβρύχια ρομποτική, με παραδείγματα «*χταποδόμορφων*» αρπάγων για ήπια σύλληψη σε περιορισμένους χώρους (Wu. M et.al, 2024).

1.3 Robotic Gripper: Από άκαμπτο σε ευέλικτο

Μια ρομποτική λαβή, ο τελικός τελεστής ενός ρομποτικού βραχίονα, είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία των εφαρμογών βιομηχανικού αυτοματισμού. Η επιλογή του εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου που χειρίζεται, όπως το βάρος, το σχήμα, η ακαμψία και η ευθραυστότητα. Παραδοσιακά, ο βιομηχανικός τομέας βασιζόταν σε άκαμπτες λαβές, οι οποίες, ενώ είναι αποτελεσματικές για ορισμένες εργασίες, έχουν επίσης σημαντικά μειονεκτήματα.

1.3.1 Μειονεκτήματα των παραδοσιακών άκαμπτων λαβών

Οι άκαμπτες λαβές, κατασκευασμένες από υλικά όπως μέταλλο ή σκληρό πλαστικό, βασίζονται σε ακριβείς υπολογισμούς θέσης και δύναμης για να πιάσουν αντικείμενα.

☛ **Αυτή η προσέγγιση έχει τα ακόλουθα εγγενή μειονεκτήματα:**

¶ ***Περιορισμένη προσαρμοστικότητα***: Η σταθερή γεωμετρία τους τα καθιστά αναποτελεσματικά στο χειρισμό αντικειμένων με ακανόνιστα ή ποικίλα σχήματα (Terrile. S, 2022). Για παράδειγμα, μια άκαμπτη λαβή που έχει σχεδιαστεί για να πιάνει ένα τετράγωνο κουτί δεν μπορεί να χειριστεί με επιτυχία ένα σφαιρικό αντικείμενο. Αυτό μπορεί να είναι δαπανηρό, καθώς απαιτούνται πολλαπλές λαβές για το χειρισμό διαφορετικών προϊόντων στην ίδια γραμμή παραγωγής (Paik. J et al, 2021).

¶ ***Κίνδυνος φθοράς***: Η άκαμπτη φύση τους και η συγκέντρωση της δύναμης σε συγκεκριμένα σημεία επαφής μπορεί να προκαλέσουν φθορά, ακόμη και ζημιά σε ευαίσθητα αντικείμενα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε βιομηχανίες που χειρίζονται εύθραυστα προϊόντα όπως φρούτα, λαχανικά, γυάλινα σκεύη ή ηλεκτρονικά εξαρτήματα (Chen. F et.al, 2019).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

- ***Ασφάλεια και Συνεργατική Ρομποτική***: Σε περιβάλλοντα όπου οι ρομποτικοί βραχίονες συνεργάζονται με ανθρώπους (cobots), οι άκαμπτες λαβές ενέχουν σημαντικό κίνδυνο τραυματισμού λόγω των υψηλών δυνάμεων και της άκαμπτης δομής τους (Soft Gripping, 2024). Η ασφάλεια των εργαζομένων είναι πρωταρχικής σημασίας και οι παραδοσιακές λαβές απαιτούν πρόσθετα, πολύπλοκα συστήματα ασφαλείας.

☛ **Soft Grippers ως λύση**

Η εμφάνιση της μαλακής ρομποτικής προσφέρει μια καινοτόμο λύση στις προκλήσεις των άκαμπτων λαβών. Οι μαλακές λαβές είναι κατασκευασμένες από εύκαμπτα, ελαστικά υλικά (όπως η σιλικόνη) και λειτουργούν με βάση την εγγενή προσαρμοστικότητά τους (Anwar. I Ho. V K & Ho. V V, 2019).

☛ **Αυτή η προσέγγιση προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα:**

- Ευρεία προσαρμοστικότητα: Οι μαλακές λαβές μπορούν να προσαρμοστούν στο σχήμα του αντικειμένου που πιάνουν, ακόμα κι αν το αντικείμενο είναι ακανόνιστο ή παραμορφώσιμο (Zhong. C Li. S & Li. R, 2020). Αυτό τα καθιστά ιδανικά για το χειρισμό μιας μεγάλης ποικιλίας προϊόντων με ένα μόνο εργαλείο, μειώνοντας την ανάγκη για προσαρμοσμένες λύσεις και επιταχύνοντας τις γραμμές παραγωγής.
- Μαλακή και ασφαλής επαφή: Η φυσική ευελιξία των μαλακών υλικών τους επιτρέπει να κατανέμουν ομοιόμορφα την πίεση σε όλη την επιφάνεια του αντικειμένου, εξαλείφοντας τον κίνδυνο φθοράς. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για βιομηχανίες όπως η παραγωγή τροφίμων (φρούτα, αρτοσκευάσματα), τα φαρμακευτικά προϊόντα (δισκία, φιαλίδια) και τα ιατρικά (χειρουργικά εργαλεία για ευαίσθητους ιστούς) (Low. J H et.al, 2021).
- Βελτιωμένη ασφάλεια: Οι ελαστικές ιδιότητες των μαλακών λαβών μειώνουν σημαντικά τον κίνδυνο τραυματισμού σε συνεργατικά περιβάλλοντα, καθώς οι δυνάμεις κρούσης απορροφώνται από το υλικό, καθιστώντας το "πιο φιλικό προς τον χρήστη" (Shintake. J et.al, 2018).
- Απλοποιημένος έλεγχος: Η φυσική ευελιξία της λαβής με το αντικείμενο απλοποιεί τις απαιτήσεις προγραμματισμού και ελέγχου. Η λαβή καθοδηγείται από το σχήμα του αντικειμένου, μειώνοντας την ανάγκη για

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

πολύπλοκους αλγόριθμους όρασης και ακριβή τοποθέτηση (Shintake. J Cacucciolo, 2016).

1.4 Η σημασία των Soft Grippers στην ελαφριά βιομηχανία και τις καθημερινές εφαρμογές

Οι μαλακές λαβές είναι μια από τις πιο καινοτόμες εφαρμογές των μαλακών ρομπότ και είναι ιδιαίτερα σημαντικές στην ελαφριά βιομηχανία και την καθημερινή ζωή. Χάρη στην ευελιξία και την προσαρμοστικότητά τους, είναι σε θέση να πιάνουν αντικείμενα διαφορετικών σχημάτων, μεγεθών και ευαισθησίας υλικού χωρίς να προκαλούν ζημιές.

- ☛ Η σημασία των Soft Grippers στην πράξη

Οι ελαστομερείς (μαλακές) λαβές έχουν εξελιχθεί από εργαστηριακές επιδείξεις σε μια ώριμη τεχνολογία με σημαντικά πλεονεκτήματα: μπορούν να μειώσουν τη ζημιά σε εύθραυστα προϊόντα, να βελτιώσουν την προσαρμοστικότητα σε μη δομημένα περιβάλλοντα και να επιτρέψουν γρήγορες αλλαγές προϊόντων χωρίς επανασχεδιασμό άκαμπτων δακτύλων/σιαγόνων. Στην αλυσίδα αγροδιατροφικών προϊόντων, οι «*έξυπνες*» μαλακές λαβές μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τη ζημιά των φρούτων, να αυξήσουν τις αποδόσεις και έτσι να ενισχύσουν τα κέρδη (Liu. Y et.al, 2023). Εν τω μεταξύ, στη βιομηχανία συσκευασίας/διανομής, η ανομοιόμορφη γεωμετρία και η εύθραυστη υφή των αντικειμένων (ψημένα προϊόντα, φρούτα, πλαστικές συσκευασίες και αντικείμενα επικαλυμμένα με λεπτό υμένιο) καθιστούν τις μαλακές λαβές πιο κατάλληλες από τις παραδοσιακές «*σκληρές*» τελικές μηχανές (AboZaid. Y A, 2024).

Όσον αφορά τις εφαρμογές της αγοράς, τα σύγχρονα συστήματα συλλογής παραγγελιών στα κέντρα διανομής δείχνουν αυξανόμενη υιοθέτηση "μαλακών" και υβριδικών λαβών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χειριστούν τα πάντα, από πορτοκάλια σε σακουλάκια έως εύθραυστα συσκευασμένα προϊόντα (The Verge, 2025), Οι παραλληλόγραμμες και οι μαλακές λαβές θα αυξηθούν στο 80% του picking τα επόμενα χρόνια).

1.4.1 Πλεονεκτήματα σε βασικούς ελαφρούς βιομηχανικούς τομείς

1. **Αγροδιατροφική Βιομηχανία - Συλλογή και Συσκευασία**

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει υψηλά ποσοστά επιτυχίας χωρίς να βλάπτουν τα φρούτα: για παράδειγμα, η ρομποτική μηχανή συγκομιδής «*broccoli florets*» πέτυχε ποσοστό επιτυχίας σύλληψης 94% και ποσοστό μη καταστροφικής συγκομιδής 97% σε 150 δοκιμές, αποδεικνύοντας την ωριμότητά της για ελαφριές και ευαίσθητες εφαρμογές (Anyanwu. C et.al, 2025). Μια οικονομικά αποδοτική, εκτυπώσιμη και εύκολα αναπαραγόμενη μαλακή λαβή έχει αποδειχθεί επιτυχώς για το μάζεμα και την τοποθέτηση μικρών φρούτων στη βιομηχανία τροφίμων (Navas. E et.al, 2024). Πρόσφατη έρευνα έδειξε ότι οι μαλακές λαβές μπορούν να μειώσουν τις ζημιές/απόβλητα και να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα της γραμμής παραγωγής (Liu. Y et.al, 2023).

2. Κέντρα Διανομής και Ηλεκτρονικό Εμπόριο.

Στην ηλεκτρονική εκπλήρωση ειδών παντοπωλείου/παραγγελιών, οι «μαλακές» λύσεις καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα ειδών (ασύμμετρες σακούλες συσκευασίας, εύθραυστα πλαστικά, πορώδη υλικά). Μεγάλες αποθήκες, όπως το Ocado, αναφέρουν αύξηση στο ποσοστό των εργασιών συλλογής που εκτελούνται από ρομποτικούς βραχίονες εξοπλισμένους με μαλακά εξαρτήματα (The Verge, 2025).

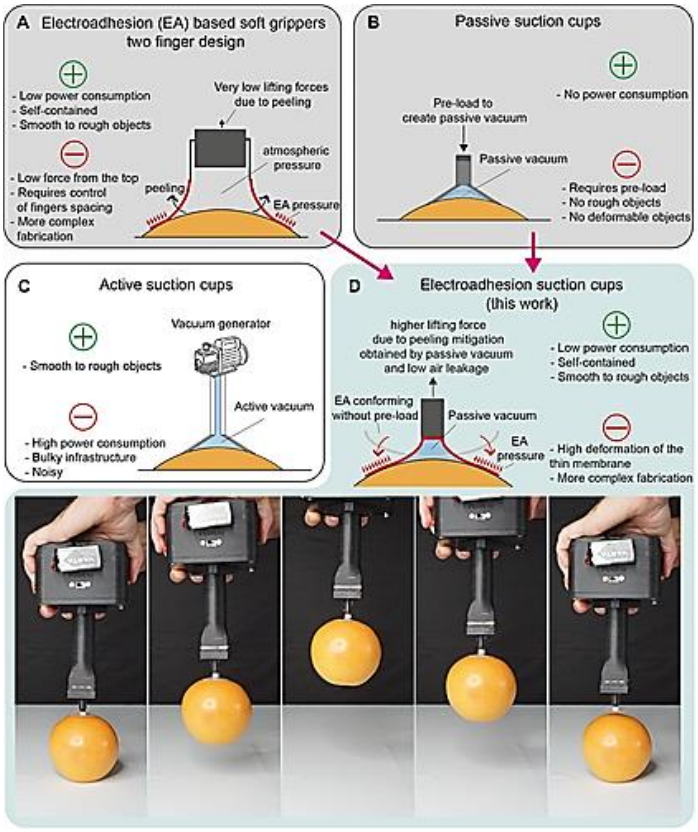
Η ανάλυση της αγοράς picking προβλέπει μεσοπρόθεσμη έως μακροπρόθεσμη ανάπτυξη, αντί για προσωρινή οπισθοδρόμηση, με τους «έξυπνους» λαβείς να παίζουν σημαντικό ρόλο (Robotics247 / Interact Analysis, 2025).

3. Κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα/Ενδύματα-Εύκαμπτα και Συμπιεστά Υλικά.

Τα υφάσματα είναι λεπτά, εύκαμπτα και εύκολα παραμορφώσιμα, καθιστώντας τα δύσκολο να τα χειριστούν οι σκληρές λαβές. Η έρευνα τα τελευταία δύο χρόνια έχει τεκμηριώσει τις προόδους στις λαβές για τη συμπίεση υφασμάτων και στις τεχνολογίες ακριβούς ρίψης/τοποθέτησης (Kumar. V et.al, 2024).

Η τεχνολογία Electroadhesion (EA), (βλ. Εικόνα 1.4) επιτρέπει την αθόρυβη πρόσφυση χαμηλής ισχύος (~1,5 W) σε λεία και τραχιά υποστρώματα. Η μονή «*βεντούζα*» του μπορεί να χωρέσει αντικείμενα βάρους περίπου 1,5 kg, καθιστώντας το μια ελκυστική επιλογή για ευαίσθητα, λεπτά αντικείμενα (Caruso. F Shea. H & Cacucciolo. V, 2025).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250



Εικόνα 1.4 Σύγκριση μηχανισμών λαβής σχεδίων ηλεκτροσυγκολλητικών βεντούζες. Πηγή: Advanced Materials

4. Ηλεκτρονικά, Συσκευασία, Διαχείριση Εργαστηρίου.

Για ελαφριά αντικείμενα με λείες/ευαίσθητες επιφάνειες (π.χ. PCB, μεμβράνες), λαβές ΕΑ, υβρίδια ΕΑ + πνευματικών ή σωματιδιακών διαταραχών και νέα συμπλέγματα ΕΑ (συμπλέκτης) με υψηλές ειδικές δυνάμεις ανά μονάδα βολτ προσφέρουν πρόσθετες μη καταστροφικές επιλογές χειρισμού χαμηλής ενέργειας (Piskarev. Y et.al, 2023).

1.4.2 Απόδοση, Ποιότητα, Υγιεινή και Βιωσιμότητα

Οι ευέλικτες λαβές μπορούν να βελτιώσουν τις μετρήσεις ποιότητας (μειώνοντας τα σβολάκια/μελανώματα), να μειώσουν το κρυφό κόστος των απορριμμάτων και των επιστροφών και να εξαλείψουν την ανάγκη για συνεχή σκούπισμα (λύσεις ΕΑ), μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας (Caruso. F Shea. H & Cacucciolo. V, 2025).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Στη βιομηχανία αγροδιατροφής, η μείωση των απωλειών οδηγεί σε λιγότερες απορρίψεις και υψηλότερη απόδοση (Liu. Y et.al, 2023). Ενώ στα κέντρα διανομής, η αυξημένη ευελιξία της λαβής μπορεί να επιταχύνει τις αλλαγές του SKU και να καλύψει καλύτερα τις «*ακραίες θήκες*» (The Verge, 2025).

Η έρευνα έχει δείξει ότι ο συνδυασμός ενεργοποίησης και πρόσφυσης (π.χ. πνευματικά δάχτυλα + ΕΑ) επιτρέπει πιο σταθερή σύλληψη δυσκολόπιαστών αντικειμένων (λείο, λεπτό, πορώδη) (Piskarev. Y et.al, 2023).

- **Περιορισμοί και τρέχουσες προκλήσεις**

Παρά τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα, υπάρχουν περιορισμοί: φορτίο/ακαμψία, αντοχή/γήρανση υλικού, πρότυπα υγιεινής/καθαριότητας (CIP) και μετρήσεις αξιολόγησης για αξιόπιστη σύγκριση λύσεων. Πρόσφατες ανασκοπήσεις έχουν τονίσει την ανάγκη για τυποποίηση δοκιμών και μη καταστροφικό χειρισμό, ιδιαίτερα στον τομέα των φρούτων (Zhang. Y et.al, 2025). Επιπλέον, ο ακριβής έλεγχος πτώσης και παραμόρφωσης είναι ένα ενεργό θέμα στον τομέα της κλωστοϋφαντουργίας και οι νέες στρατηγικές βελτιώνουν την ευθυγράμμιση (Shen. J et.al, 2025).

Πίνακας 1.1 Σημαντικές εφαρμογές, απαιτήσεις, κατάλληλες μαλακές λαβές (τα τελευταία χρόνια)

Βιομηχανία/Σενάριο	Χαρακτηριστικά αντικειμένου	Βασικές Απαιτήσεις	Ενδεικτικοί τύποι Soft Gripper	Αντιπροσωπευτικές Πρόσφατες Πηγές
Μικρό ρομπότ συλλογής φρούτων (αγροτικό ρομπότ)	Εύθραυστο, ελαφρύ, σχέδιο σε σχήμα μπουκέτου	χωρίς φθορές και μπορεί να λειτουργήσει σε ακατάστατους χώρους	Πνευματικά δάχτυλα, εξαιρετική ευελιξία, 3D-εκτυπωμένο υλικό TPE	(Navas. E et.al, 2024). Frontiers
Συγκομιδή του "Baby Broccoli"	εύθραυστα κλαδιά/κορμούς	High success rate, no damage	Μαλακή πεπιεσμένη λαβή	(Anyanwu. C et.al, 2025). ScienceDirect
Μαλακή πεπιεσμένη λαβή	Διάφορες τσάντες, εύθραυστα αντικείμενα	Η αντικατάσταση του SKU είναι γρήγορη και το ποσοστό	Μαλακά δάχτυλα + αναρρόφηση / παράλληλα	(The Verge, 2025). The Verge

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

		ζημιάς είναι χαμηλό		
Κλωστοϋφαντουργία/Ενδύματα	Λεπτό, εύκαμπτο, συμπιεσμένο	Σταθερή πρόσφυση και ακριβής εναπόθεση	EA Cup, EA Finger, Hybrid	(Kumar. V et.al, 2024). ScienceDirect
Ηλεκτρονικά/Λεπτές Μεμβράνες/Μεμβράνες	Λείες/ευαίσθητες επιφάνειες	Χαμηλή ισχύς, χωρίς άδειους αγωγούς	Κύπελλο EA, συμπλέκτης EA	(Caruso. F Shea. H & Cacucciolo. V, 2025). PubMed
Μικτές εφαρμογές (διάφορες επιφάνειες)	Διαφορετικά σχήματα/υφές	Σταθερότητα και «*έξυπνος*» έλεγχος	Hybrid EA + Particle Interference/Pneumatic	(Piskarev. Y et.al, 2023). Online Library

1.5 Στόχοι και Ερευνητικά Ερωτήματα

Αυτή η εργασία παρουσιάζει μια συστηματική, κριτική και μετρήσιμη επισκόπηση των ελαστικών μαλακών ρομποτικών λαβών για ελαφριά αντικείμενα. Οι στόχοι του είναι οι εξής:

- **a)** κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών (υλικά, ενεργοποίηση, πρόσφυση, αισθητήρες),
- **b)** προτείνει κοινές μετρήσεις αξιολόγησης και διαδικασίες δοκιμών και
- **c)** χαρτογράφηση ερευνητικών κενών σε ελαφρές βιομηχανικές και καθημερινές εφαρμογές.

Η έμφαση στις μετρήσεις και την τυποποίηση ανταποκρίνεται στις πρόσφατες εκκλήσεις για "σκληρά προβλήματα" και μετρήσιμο αντίκτυπο στον ακαδημαϊκό χώρο (Hawkes. E W, 2021).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

1.5.1 Ειδικοί Στόχοι (S.M.A.R.T.[1])

1. **Μετρική τυποποίηση**: Να οριστεί ένα σύνολο ελάχιστων μετρήσεων για σύγκριση λαβής (π.χ., ποσοστό επιτυχίας λαβής, ζημιά/περιθώριο προϊόντος, πίεση επαφής, κατανάλωση ενέργειας/κύκλος, χρόνος κύκλου, TRL) και συνδέστε τις με το προτεινόμενο πρωτόκολλο δοκιμής (Case. J C & Marvel. J A, 2024).
2. **Με βάση πρόσφατες μελέτες απόδοσης/ισχύς/χρηστικότητας**, διεξήχθη μια συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών ενεργοποίησης/προσκόλλησης για «*ελαφριά*» αντικείμενα: ψυχοακουστική συμμόρφωση, ηλεκτροσυγκόλληση (EA), παρεμβολή σωματιδίων και υβριδικές τεχνολογίες (π.χ. EA+GJ) (Piskarev. Y et.al, 2023); (Caruso. F Shea. H & Cacucciolo. V, 2025).
3. **Sensing and Intelligence**: Mapping Actuation-Sensor Integration and Its Impact on Grasp Stability/Injury Avoidance (Zhou. S et.al, 2024).
4. **Wireless Direction: Evaluating** Wireless/Autonomous Operation of Soft Actuators and their Impact on Safety/Mobility/Circulation (Jung. Y et.al, Untethered soft actuators for soft standalone robotics, 2024).
5. **Εφαρμογές και επιπτώσεις**: Τεκμηρίωση μείωσης των απωλειών/αποβλήτων και κερδών αποδοτικότητας στην αλυσίδα/διανομή αγροδιατροφικών προϊόντων μέσω πρόσφατων περιπτωσιολογικών μελετών (Liu. Y et.al, 2023).
6. **Βιβλιομετρικός χάρτης**: Ανάλυση της δυναμικής του πεδίου (νησιά θεμάτων, τάσεις μετά το 2018) ως πλαίσιο για την ιεράρχηση ζητημάτων (Rusu. D M et.al, 2023).

[1] **S.M.A.R.T.**: Οι SMART στόχοι είναι μια μέθοδος καθορισμού στόχων που βοηθούν στην επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων. Το ακρωνύμιο SMART σημαίνει: Συγκεκριμένο, Μετρήσιμο, Εφικτό, Σχετικό και Χρονοδιάγραμμα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

2 Κεφάλαιο Θεωρητικό υπόβαθρο

Το θεωρητικό υπόβαθρο αυτής της έρευνας βρίσκεται στον τομέα της μαλακής ρομποτικής και συγκεκριμένα των ελαστικών λαβών για ελαφριά αντικείμενα. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά σκληρά ρομπότ, η μαλακή ρομποτική χρησιμοποιεί παραμορφώσιμα υλικά και μορφολογίες για να επιτύχει μεγάλης κλίμακας κατανεμημένη παραμόρφωση, παθητική προσαρμογή σχήματος και ασφαλή αλληλεπίδραση με εύθραυστα προϊόντα και ανθρώπους. Ο πυρήνας αυτής της έρευνας (βλ. Εικόνα 2.1) βρίσκεται στα υλικά (σιλικόνη, TPU, υδρογέλη, διηλεκτρικό ελαστομερές), μηχανισμούς ενεργοποίησης (πνευματικό/υδραυλικό, διηλεκτρικό, μαγνητικό, θερμικό, ηλεκτροσυγκόλληση), τεχνικές κατασκευής (μαλακή λιθογραφία, τρισδιάστατη εκτύπωση πολλαπλών υλικών, χύτευση) και την ενσωμάτωση δύναμης, αισθητήρων επαφής.

Εικόνα 2.1 Ρομποτική, Πηγή: European Robotics Technology Platform

2.1 Τεχνολογία και Εφαρμογές Ρομποτικής

Η ρομποτική είναι ένας κλάδος της μηχανικής που ασχολείται με το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία των ρομπότ, καθώς και με τα συστήματα που ελέγχουν και υποστηρίζουν τη λειτουργία τους. Η ρομποτική έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, που περιλαμβάνει πολλούς τομείς, όπως η βιομηχανία, η ιατρική, η εκπαίδευση, η εξερεύνηση του διαστήματος και οι υπηρεσίες.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

☛ **Παγκόσμια επισκόπηση και τάσεις**

Η ρομποτική έχει επεκταθεί από τη βαριά βιομηχανία στην εσωτερική εφοδιαστική, τη γεωργία τροφίμων, την υγειονομική περίθαλψη και τις βιομηχανίες υπηρεσιών, με πρωταρχική έμφαση στην παραγωγικότητα, την ασφάλεια και την ποιότητα. Σύμφωνα με τη Διεθνή Ομοσπονδία Ρομποτικής (IFR), ο παγκόσμιος αριθμός ενεργών βιομηχανικών ρομπότ θα φτάσει τα 4.281.585 το 2024 (αύξηση 10%), με ετήσιες νέες εγκαταστάσεις να ξεπερνούν τις 500.000 για τρίτη συνεχή χρονιά. Το 70% αυτών των νέων εγκαταστάσεων θα είναι στην Ασία (International Federation of Robotics, 2024).

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας της ρομποτικής συνοδεύεται από έναν μετασχηματισμό στις εφαρμογές της: από σταθερούς βραχίονες σε αυτοματοποιημένα φορητά ρομπότ (AMR) εξοπλισμένα με αισθητήρα και AI, τα οποία εκτελούν εργασίες όπως μεταφορά, τροφοδοσία σταθμού εργασίας και ρομποτική συλλογή σε αποθήκες. Πρόσφατες ερευνητικές εκθέσεις έχουν διερευνήσει την ωριμότητα και τα ερευνητικά κενά αυτής της τεχνολογίας (Lackner. T et.al, 2024).

2.1.1 Βασικοί τομείς: Από τη βιομηχανία στις υπηρεσίες

1) Intralogistics και Αποθήκες

Τα AMR υποστηρίζουν διαδικασίες από προϊόντα σε άτομο/επιλογέα σε ανταλλακτικά, βελτιώνοντας την απόδοση και την ασφάλεια, ενώ η έρευνα έχει τεκμηριώσει την ταχεία ενσωμάτωση με ψηφιακά δίδυμα, συστήματα διαχείρισης αποθήκης και τεχνολογίες προσομοίωσης (Raamets. T et.al, 2024). Εν τω μεταξύ, μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα AMR σε αποθήκες τεκμηριώνει την ποικιλομορφία των προμηθευτών και τον ρόλο τους στη δρομολόγηση/προγραμματισμό (Khosravi. P et.al, 2024).

2) Υγεία - Νοσοκομειακά Περιβάλλοντα

Η ρομποτική στην υγειονομική περίθαλψη περιλαμβάνει χειρουργικά συστήματα, μεταφορά υλικού, αποστείρωση και υποστήριξη κλινικών διαδικασιών. Η ανασκόπηση παραθέτει εμπορικά διαθέσιμα συστήματα, περιοχές χρήσης και θέματα ασφάλειας/λειτουργίας (Cruz. E M G N V Oliveira. S & Correia. A, 2024). Ιδιαίτερα στις μονάδες εντατικής θεραπείας (ΜΕΘ), η χρήση ρομπότ «*βελτιωμένης με τεχνητή*

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

νοημοσύνη» εγείρει ανησυχίες ηθικής, ιδιωτικότητας και κόστους-αποτελεσματικότητας (Li. Y et.al, 2024).

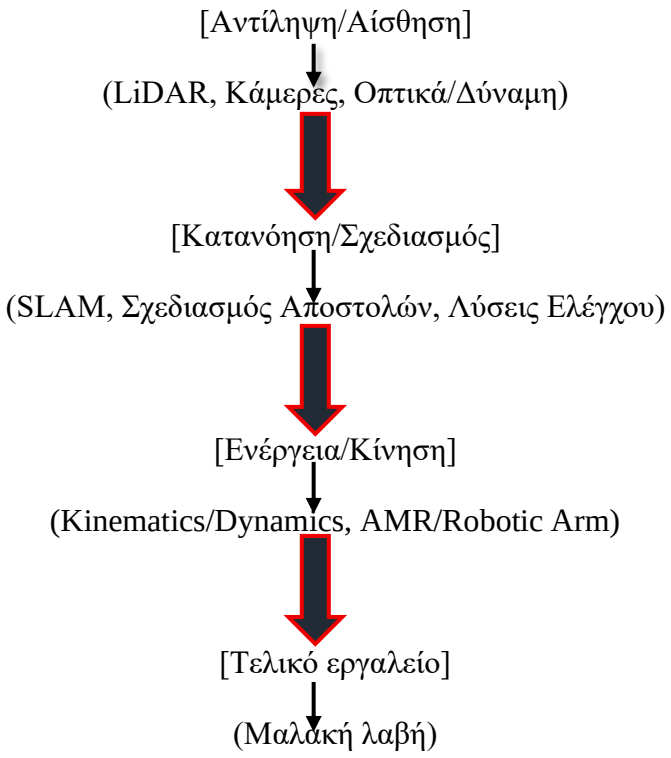
3) Αγροδιατροφική Αλυσίδα

Οι μαλακές λαβές μπορούν να μειώσουν τις ζημιές/απόβλητα και να εξορθολογίσουν τις διαδικασίες χειρισμού σε αδόμητα περιβάλλοντα κατά τη συγκομιδή/διαλογή/συσκευασία ευπαθών προϊόντων (Liu. Y et.al, 2023). Μια πρόσφατη ανασκόπηση συνέταξε μεθόδους ενεργοποίησης/μεταβλητής ακαμψίας για το πιάσιμο εύθραυστων φρούτων και παρείχε πρακτικά κριτήρια επιλογής (Zhang. D et.al, 2025). Στο επίπεδο «προϊόν online», εισήχθη μια εκτυπώσιμη μαλακή λαβή για μικρά φρούτα, με στόχο την επίτευξη μη καταστροφικής συλλογής και τοποθέτησης (Navas. E et.al, 2024).

4) Κατασκευή/Παραγωγή - Πέρα από τον Ρομποτικό Βραχίονα

Οι υβριδικοί σταθμοί εργασίας (σταθερός βραχίονας + AMR + «μαλακός» τελικός τελεστής) διευκολύνουν μεγαλύτερη ευελιξία και πρόσφατη έρευνα προτείνει ότι μπορούν να βελτιώσουν τον προγραμματισμό και τη ροή υλικών στα εργοστάσια (Raamets. T et.al, 2024).

☛ **Εννοιολογική Αρχιτεκτονική Ρομποτικών Εφαρμογών**



Σημείωση: Τελικά, οι ελαστικές μαλακές λαβές μπορούν να βελτιώσουν την ασφάλεια επαφής και την προσαρμοστικότητα σε ελαφριά αντικείμενα - κρίσιμα στους τομείς

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

των αγροδιατροφών, των ηλεκτρονικών, της κλωστοϋφαντουργίας και της εφοδιαστικής (Liu. Y et.al, 2023); (Navas. E et.al, 2024).

Πίνακας 2.1 εφαρμογών, απαιτήσεων και κατάλληλων λύσεων

Κλάδος	Τυπικές εργασίες	Βασικές απαιτήσεις	Κατάλληλα Υποσυστήματα	Πρόσφατες ενδεικτικές πληροφορίες
Εσωτερική επιμελητεία/αποθήκη	Μεταφορά, διανομή και προμήθεια τερματικού σταθμού	Ασφάλεια, απόδοση, ευελιξία	AMR, ρομποτικός βραχίονας, μαλακή λαβή για μη ομοιόμορφα αντικείμενα	(Lackner. T et.al, 2024)
Υγειονομική περίθαλψη νοσοκομείο/ΜΕΘ	Χειρουργείο, μεταφορά υλικού, απολύμανση	Ασφάλεια, ιχνηλασιμότητα, ηθική	Χειρουργικά ρομπότ, ρομπότ UVC, AMR	(Cruz. E M G N V Oliveira. S & Correia. A, 2024)
αγροτικών προϊόντων	Συλλογή/διαλογή/συσκευασία φρούτων	Έννοια «χωρίς απώλειες», υγιεινή	Μαλακή λαβή (πνευματική/ΕΑ), σύστημα όρασης ρομπότ	(Liu. Y et.al, 2023)
Παραγωγή και κατασκευή	Ευέλικτες γραμμές, προμήθεια και συναρμολόγηση	Επαναληψιμότητα, ασφάλεια, γρήγορη επαναφορά	Arm + AMR, υβριδικός τελικός τελεστής	(Raamets. T et.al, 2024)

Υγειονομική περίθαλψη (Νοσοκομεία/ΜΕΘ) Χειρουργική, μεταφορά υλικού, αποστείρωση Ασφάλεια, ιχνηλασιμότητα, ηθική Χειρουργικά ρομπότ, ρομπότ UVC, AMR (Cruz. E M G N V Oliveira. S & Correia. A, 2024), γεωργία Συγκομιδή/διαλογή/συσκευασία φρούτων Μη καταστροφικό κράτημα, υγιεινή Μαλακές λαβές (πνευματικές/ΕΑ), ρομποτικά συστήματα όρασης (Liu. Y et.al, 2023); (Zhang. D et.al, 2025).

- Παραγωγή/Κατασκευή: Ευέλικτες γραμμές παραγωγής, τροφοδοσία, συναρμολόγηση. Επαναληψιμότητα, ασφάλεια, γρήγορη επαναφορά. Ρομποτικοί βραχίονες + αυτόνομα κινητά ρομπότ (AMR), υβριδικοί τελικοί τελεστές (Raamets. T et.al, 2024).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

- **Ενσωμάτωση με μαλακά ρομπότ (soft grippers)**

Η αυξανόμενη δημοτικότητα της ελαφριάς βιομηχανίας (τροφίμων, υφασμάτων, ηλεκτρονικών ειδών) θέτει μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ασφαλές και συμβατό κράτημα/τοποθέτηση: Οι μαλακές λαβές μπορούν να μειώσουν τη ζημιά και να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα, ειδικά όταν συνδυάζονται με αισθητήρες ολίσθησης/απτικής (Liu. Y et.al, 2023). Εν τω μεταξύ, η «*μαλακή επιφάνεια*» στο τελικό εργαλείο βελτιώνει την αξιοπιστία πρόσφυσης σε ανώμαλες επιφάνειες (Xiao. W et al, 2022).

2.2 Διαφορές μεταξύ σκληρών και μαλακών ρομπότ

Οι κύριες διαφορές μεταξύ σκληρών και μαλακών ρομπότ βρίσκονται στη δομή και την ευελιξία τους. Τα σκληρά ρομπότ είναι κατασκευασμένα από άκαμπτα υλικά και έχουν σταθερή γεωμετρία, ενώ τα μαλακά ρομπότ είναι κατασκευασμένα από εύκαμπτα υλικά και μπορούν να αλλάξουν σχήμα. Αυτή η δομική διαφορά οδηγεί σε διαφορές στις λειτουργίες και τις εφαρμογές τους.

- **Ορισμός και Έννοιες Σχεδιασμού**

Στα «σκληρά» ρομπότ, ο σκελετός είναι άκαμπτος. η συμμόρφωση επιτυγχάνεται κυρίως μέσω ελέγχου (π.χ. σειριακή/παράλληλη ελαστικότητα) για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας και φορτίου. Αντίθετα, στα μαλακά ρομπότ, η συμμόρφωση είναι μια εγγενής ιδιότητα του υλικού/γεωμετρίας, μετατοπίζοντας μέρος της πολυπλοκότητας από τον έλεγχο στο «ύλη» (Whitesides. G M, 2018).

Η τρέχουσα έρευνα σε αυτόν τον τομέα τονίζει ότι η «απαλότητα» είναι πολυδιάστατη (υλικό-μορφολογία-ασφάλεια) και ότι τα μαλακά ρομπότ διαπρέπουν σε ασφαλείς και προσαρμοστικές αλληλεπιδράσεις με απρόβλεπτα περιβάλλοντα και εύθραυστα αντικείμενα (Yasa. O et.al, 2023). Η μετάβαση από τον «*ορισμό*» στον μετρήσιμο αντίκτυπο απαιτεί μετρήσεις, πρότυπα και σαφή κριτήρια αξιολόγησης (Hawkes. E W, 2021).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

- **Διαστάσεις σύγκρισης: υλικά, δομή, κίνηση, αισθητήρας, έλεγχος**

Πίνακας 2.2 «Σκληρά» ρομπότ εναντίον «μαλακών» ρομπότ: Σύγκριση μεγέθους

Διαστάσεις	Σκληρή Ρομποτική	Μαλακή Ρομποτική	Πρόσφατα δεδομένα αναφοράς
Σώμα/Υλικό	**Άκαμπτη δομή (μέταλλο/σύνθετο)**	**Ελαστομερή/υδροπηκτές/μεταϋλικά χαμηλής εκπομπής**	(Whitesides. G M, 2018); (Yasa. O et.al, 2023)
Γεωμετρία	**Διακριτές αρθρώσεις/αρθρώσεις**	**Συνεχείς/συμβατές δομές, origami/μεταϋλικά**	(Yasa. O et.al, 2023); (Shintake. J et.al, 2018)
Δραστηριοποίηση	**Ενσωματωμένοι κινητήρες/υδραυλικά**	**Πνευματικά/υδραυλικά, διηλεκτρικά ελαστομερή, μαγνητισμός, ηλεκτροσυγκόλληση**	(Shintake. J et.al, 2018); (Sarker. A Ul Islam. T & Robiul Islam. M, 2024)
Αισθητήρας	**Εξωτερικοί/ενσωματωμένοι σκληροί αισθητήρες**	**Αισθητήρες ενσωματωμένοι στο "σώμα" (κατανεμημένη αίσθηση)**	(Shintake. J et.al, 2018); (Zhou. S et.al, 2024)
Έλεγχος	**Ακριβής και επαναλαμβανόμενη κίνηση**	**Συνεχής παραμόρφωση. αισθητήρας/μοντέλο/έλεγχος βάσει μάθησης**	(Yasa. O et.al, 2023)
Ασφάλεια επαφής	**Αξιόπιστος on-line έλεγχος/συμμόρφωση**	**Εγγενής «ασφάλεια» λόγω συμμόρφωσης**	(Whitesides. G M, 2018); (Hawkes. E W, 2021)
Ακρίβεια/Φορτίο	**Εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια/φορτίο**	**Μέση ακρίβεια/φορτίο. απαιτείται ευαισθησία**	(Yasa. O et.al, 2023); (Case. J C & Marvel. J A, 2024)
Υγιεινή/Καθαρισμός	**Συμβατό με επιφάνεια/συμβατό με CIP**	**Καταλληλότητα υλικού για αντοχή σε CIP/γήρανση**	(Case. J C & Marvel. J A, 2024)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Σημείωση: Οι διαφορές κορυφώνονται στον τελικό ενεργοποιητή, τη λαβή: Η μαλακή λαβή επιτυγχάνει την επαφή «*φακέλλου*», κατανέμοντας τάσεις και περιορίζοντας τη ζημιά σε εύθραυστα αντικείμενα (Shintake. J et.al, 2018).

- **Επιπτώσεις στη Μοντελοποίηση και τη Μετρολογία**

Η συνεχής παραμόρφωση μαλακών σωμάτων απαιτεί μοντέλα μηχανικής συνεχούς (π.χ. μοντέλα ράβδων/Cosserat, μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων) και τυποποίηση μετρήσεων (π.χ. υστέρηση, ερπυσμός, φαινόμενα θερμικής υγρασίας). Το NIST IR 8508 καταγράφει κενά στη μετρολογία και προτείνει έναν οδικό χάρτη για την επαναληψιμότητα υλικού/συστήματος (Case. J C & Marvel. J A, 2024). Εν τω μεταξύ, μια πρόσφατη ανασκόπηση συγκεντρώνει αριθμητικές μεθόδους για τη μη γραμμική δυναμική και τον έλεγχο των μαλακών ρομπότ (Qin. L et.al, 2024).

- **E Hybrid Approaches on the Soft-Hard "Continuum"**

Υπάρχει ένα φάσμα μεταξύ «άκαμπτου» και «μαλακού»:

- Τα ρομπότ Continuum (ιατρικά/επιθεώρηση) παρέχουν υψηλή ευελιξία μέσω συνεχών δομών (Russo. M et.al, 2023).
- Οι μέθοδοι ακαμψίας (μεταβλητή ακαμψία) συνδέουν την ακρίβεια και τη συμμόρφωση (Fan. Y et.al, 2024).
- Οι ελαστικοί ενεργοποιητές σειράς (SEA) σε άκαμπτους βραχίονες εισάγουν ελεγχόμενη συμμόρφωση για ασφαλέστερες φυσικές αλληλεπιδράσεις (Calanca. A et.al, 2023).

- **Επιλέγεται η τεχνολογία με βάση το σενάριο (ελαφριά/εύθραυστα αντικείμενα)**

Πίνακας 2.3 Η απόφαση να επιλέξει κάποιος ένα "σκληρό" ή "μαλακό" εργαλείο μύτης (gripper)

Πρότυπα	Προτιμώμενο "Σκληρό"	Προτιμάται το μαλακό	Σχόλια/Αναφορές
Ακρίβεια/μικρό-μετατόπιση	✓	-	Ανθεκτικοί κινηματικοί/υψηλής ακρίβειας αισθητήρες

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Εύθραυστα αντικείμενα	-	✓	Επαφή "φάκελος", χαμηλή τοπική τάση (Shintake. J et.al, 2018)
Ακατάστατα περιβάλλοντα	-/✓ (Όραση)	✓	Συμμόρφωση/Προσαρμοστικότητα (Yasa. O et.al, 2023)
Υγιεινή/CIP	✓	✓ (Χρήση με τα κατάλληλα υλικά)	(Case. J C & Marvel. J A, 2024)
Ενέργεια/θόρυβος	-/✓	✓ (ΕΑ/παθητική λύση)	(Sarker. A Ul Islam. T & Robiul Islam. M, 2024); (Zhou. S et.al, 2024) (Ενσωματωμένος αισθητήρας)
Έλεγχος κόστους	Υψηλή (συμμόρφωση)	Κάτω (μετατόπιση υλικού)	(Whitesides. G M, 2018)

☛ **Σύντομο τεχνικό υπόβαθρο για Grippers**

Οι μαλακές λαβές παρέχουν σταθερότητα στο κράτημα μέσω γεωμετρικών περιορισμών και/ή ελεγχόμενης πρόσφυσης (π.χ. ηλεκτροσυγκόλληση) και ενσωματώνουν απτικά/ολίσθηση για να επιτύχουν κλείσιμο βρόχου (Shintake. J et.al, 2018); (Zhou. S et.al, 2024). Μια πρόσφατη ανασκόπηση των (Sarker. A Ul Islam. T & Robiul Islam. M, 2024) συνοψίζουν τα υλικά/ενεργοποιητές αιχμής και υπογραμμίζουν τις προκλήσεις στην τυποποίηση και την ενσωμάτωση αισθητήρων (Sarker. A Ul Islam. T & Robiul Islam. M, 2024).

2.3 Ορισμός και χαρακτηριστικά ελαστικών μαλακών ρομπότ

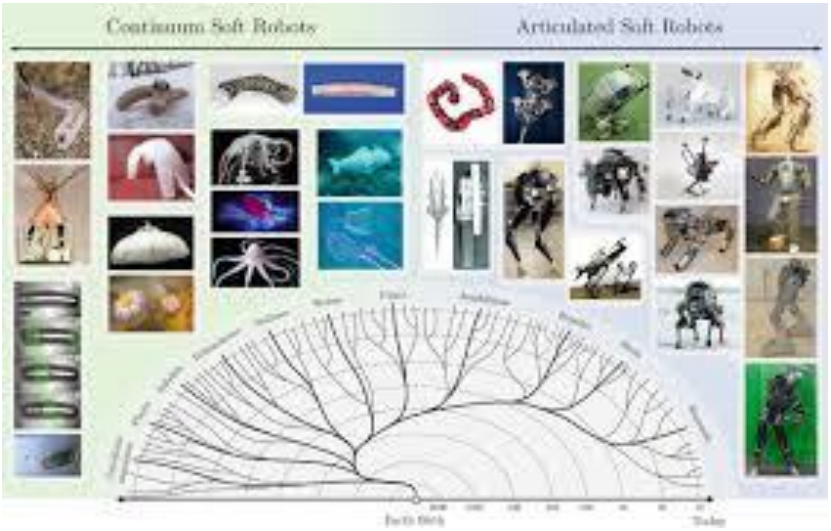
Ο όρος «*μαλακό ρομπότ από καουτσούκ*» φαίνεται να μην έχει καθιερωθεί, αλλά πιθανότατα αναφέρεται σε ρομπότ κατασκευασμένα από μαλακό καουτσούκ ή ρομπότ που χρησιμοποιούν ρομποτικούς βραχίονες για να χειριστούν ελαστικά. Τα ρομπότ από μαλακό υλικό έχουν σχεδιαστεί για να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους με τρόπο παρόμοιο με αυτόν των ζωντανών οργανισμών, ενώ τα ρομπότ που χειρίζονται καουτσούκ μπορεί να χρησιμοποιούν τεχνητή νοημοσύνη για να προσαρμοστούν σε διαφορετικούς τύπους ελαστικών.

☛ **Ορισμός και βασικές ιδιότητες (υλικό-δομή-συνάρτηση-δείκτης)**

Τα ελαστικά μαλακά ρομπότ είναι ρομποτικά συστήματα των οποίων η κύρια μηχανική συμπεριφορά προέρχεται από συμβατά, ελαστικά υλικά (σιλικόνη, ακρυλικό, TPU/TPE, υδρογέλες). Αυτό επιτρέπει μεγάλης κλίμακας κατανεμημένη παραμόρφωση, παθητική προσαρμογή σχήματος και ασφαλή αλληλεπίδραση με

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

εύθραυστα αντικείμενα και ανθρώπους. Η «*απαλότητα*» δεν είναι απλώς μια ιδιότητα υλικού, αλλά μια σχεδιαστική αρχή που συνυφαίνει υλικά, γεωμετρία, ενεργοποιητές και αισθητήρες (Yasa. O et.al, 2023). Σε αντίθεση με τα άκαμπτα ρομπότ, των οποίων η συμμόρφωση επιτυγχάνεται μέσω χειριστηρίων/ελατηρίων, η συμμόρφωση των ελαστικών μαλακών ρομπότ είναι εγγενής στο ίδιο το ρομπότ. Η βιομηχανία έχει ζητήσει την ανάπτυξη σαφών μετρήσεων επιπτώσεων, (βλ. Εικόνα 2.2) έτσι ώστε ο ορισμός να μπορεί να αντικατοπτρίζει μετρήσιμες επιδόσεις σε εργασίες πραγματικού κόσμου (Hawkes. E W, 2021).



Εικόνα 2.2 Soft Robots,

☛ **Βασικά Χαρακτηριστικά (Υλικό-Δομή-Συνάρτηση-Μετρικές)**

- ***Υλικά/Μηχανική***: Χαμηλός συντελεστής, ιξωδοελαστικότητα, υψηλή ικανότητα καταπόνησης. συχνά συνδυάζοντας πολλαπλά υλικά ή γεωμετρίες μεταϋλικού για την επίτευξη προγραμματισμένης συμμόρφωσης (Yasa. O et.al, 2023).
- ***Ενεργοποίηση***: Πνευματική/υδραυλική ενεργοποίηση, διηλεκτρικά ελαστομερή υψηλής ενέργειας (DEAs), μαγνητικά ενεργά ελαστομερή και ηλεκτροσυγκόλληση (EA) για μαλακή/αθόρυβη πρόσφυση (Guo. Y et.al, 2021); (Caruso. F Shea. H & Cacucciolo. V, 2025).
- ***Αισθητήρες και «Έξυπνα» Σώματα***: Ενσωμάτωση αισθητήρων (απτικής/οπτικής/χωρητικής) σε υλικά για ανίχνευση επαφής/ολίσθησης/στρεπτικού ελέγχου και ελέγχου κλειστού βρόχου (Zhou. S et.al, 2024).
- ***Τελικοί τελεστές*** (***grippers***): Αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε **(α)** ενεργοποίηση/κλείσιμο, **(β)** έλεγχο ακαμψίας (π.χ. μπλοκάρισμα σωματιδίων) και

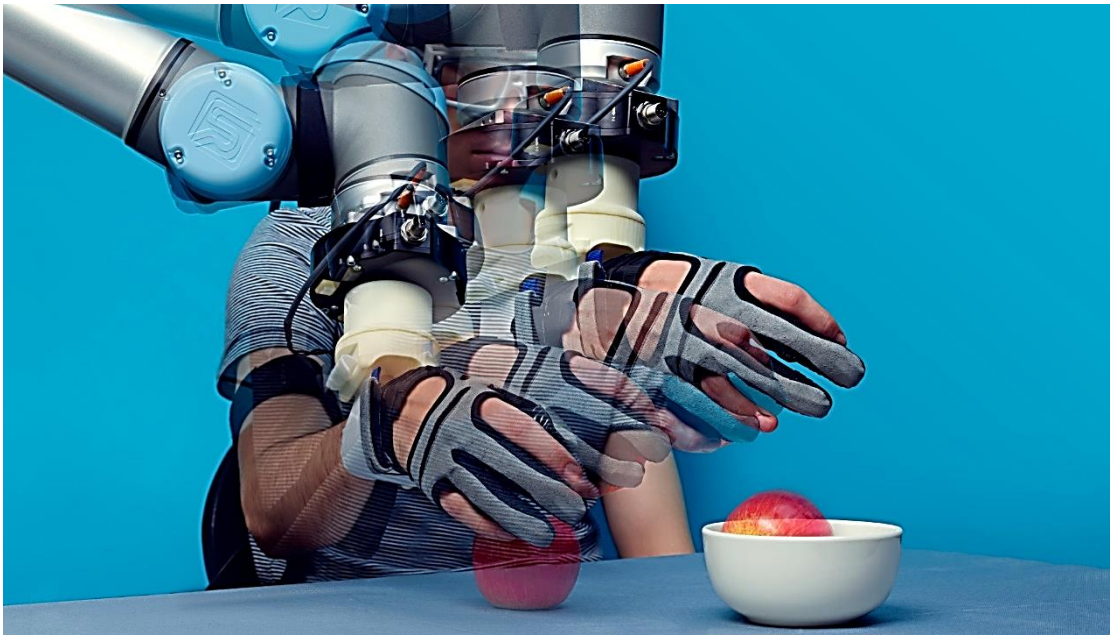
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

(γ) έλεγχο πρόσφυσης (ΕΑ/αναρρόφηση), με εστίαση στο κράτημα «*χωρίς ζημιές*» (Shintake. J et.al, 2018).

- ***Μετρήσεις αξιολόγησης***: Ποσοστό επιτυχίας πρόσφυσης, δείκτης ζημιάς προϊόντος, χρόνος κύκλου, ενέργεια/κύκλος, σταθερότητα πρόσφυσης/ολίσθηση. Απαιτήσεις Τυποποίησης (Case. J C & Marvel. J A, 2024).

2.4 Ιστορική ανασκόπηση της μαλακής ρομποτικής

Οι απαρχές της μαλακής ρομποτικής μπορούν να αναχθούν στις πρώιμες ερευνητικές κατευθύνσεις, όπως οι συμβατοί μηχανισμοί και οι συνεχείς χειριστές, που προσπάθησαν να ξεπεράσουν τους περιορισμένους βαθμούς ελευθερίας των αρθρωτών βραχιόνων. Η βιομιμητική κατεύθυνση (βλ. Εικόνα 2.3) άκμασε στις αρχές του 21ου αιώνα και αναπτύχθηκε πλήρως σε μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση από τους (Kim. S Laschi. C & Trimmer. B, 2013), η οποία τόνισε την ανάγκη για γεωμετρίες υλικού που μπορούν να επιτύχουν μεγάλες παραμορφώσεις και να αλληλοεπιδράσουν με ασφάλεια με απρόβλεπτα περιβάλλοντα (Kim. S Laschi. C & Trimmer. B, 2013).



Εικόνα 2.3 Soft robotics, Πηγή: Wilson Hennessy

☛ 2010–2013: Θεμελιώδη Έργα και Διαμόρφωση Ταυτότητας

Αυτή η περίοδος χαρακτηρίστηκε από δύο σημαντικά επιτεύγματα:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

- Ο "Universal Jamming Gripper" (Brown E et.al, 2010) έδειξε ότι μια στοίβα κοκκωδών υλικών μέσα σε μια ελαστική τσάντα μπορούσε να προσαρμοστεί στο σχήμα των αντικειμένων και να τα συλλάβει μέσω των μεταβάσεων εμπλοκής (Brown E et.al, 2010).

- Το «*μαλακό ρομπότ πολλαπλών βαδίσματος*» (Shepherd. R F et.al, 2011) έδειξε την ικανότητα να επιτυγχάνει πολλαπλά μοτίβα βάδισης χρησιμοποιώντας μια καθαρά ελαστική κοιλότητα (πνευματική κοιλότητα) και απλή πνευματική αλληλουχία (Shepherd. R F et.al, 2011).

Την ίδια περίοδο, οι (Ilievski. F et.al, 2011) εισήγαγε πνευματικά δίκτυα και μαλακή λιθογραφία στην κοινότητα χημείας/υλικών, προτείνοντας πλήρως μαλακές συσκευές ως πρότυπο σχεδίασης (Ilievski. F et.al, 2011).

- **2014–2016: Field Consolidation - Περιοδικά, Κριτικές και «*Octobot*»**

Το 2014, κυκλοφόρησε το επιστημονικό περιοδικό Soft Robotics (SoRo) (συγγραφέας η Mary Ann Liebert), σηματοδοτώντας τη θεσμική ωριμότητα του κλάδου (Mary Ann Liebert. Inc, 2014).

Ταυτόχρονα, η Nature δημοσίευσε μια κλασική κριτική από τους (Rus. D & Tolley M T, 2015), η οποία συστηματοποίησε το σχεδιασμό, την κατασκευή και τον έλεγχο των μαλακών ρομπότ και έθεσε το πλαίσιο για την έρευνα την επόμενη δεκαετία (Rus. D & Tolley M T, 2015).

Το 2016, οι (Wehner. M et.al, 2016). δημοσίευσαν το «*Octobot*» στο Nature, το πρώτο πλήρως ευέλικτο αυτόνομο ρομπότ (βλ. Εικόνα 2.4). Χρησιμοποιεί μικρορευστική λογική και χημική πρόωση (υπεροξείδιο του υδρογόνου) χωρίς να βασίζεται σε άκαμπτες πηγές ενέργειας ή ηλεκτρονικά (Wehner. M et.al, 2016).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Εικόνα 2.4 Το Octobot είναι ένα αυτόνομο μαλακό ρομπότ που λειτουργεί εξ ολοκλήρου σε χημικές αντιδράσεις, Πηγή: Lori Sanders

- **2017–2020: Επέκταση πεδίου εφαρμογής και τεχνικές «κατευθυντήριες γραμμές»**

Μια κριτική του Whitesides (2018) στο Angewandte Chemie αναφέρει ρητά ότι η μαλακή ρομποτική διαφέρει από τη σκληρή ρομποτική τεχνικά επειδή μετατοπίζει την πολυπλοκότητα από τον έλεγχο στο υλικό και τη γεωμετρία (Whitesides. G M, 2018).

Ταυτόχρονα, έχουν αναπτυχθεί βιομιμητικές πλατφόρμες (π.χ. μαλακό γόνο ψαριού, «φυγόκεντρη» κίνηση μέτρησης ουρανίου) και έχει διεξαχθεί θεμελιώδης έρευνα σχετικά με πνευματικές, μεταβλητής ακαμψίας ή ηλεκτροσυγκόλλησης/διηλεκτρικούς ελαστομερείς αρπάγες, καθορίζοντας τη διάσταση εφαρμογής του πεδίου (Marchese. A D Onal. Ç D & Rus. D, 2014); (Katzschmann. K et.al, 2018).

2021-Σήμερα: Κρίσιμος προβληματισμός, μετρήσεις και απεριόριστη διαβίωση

Οι Hawkes, Majidi και Tolley (2021) δημοσίευσαν ένα άρθρο στο Science Robotics που έθεσε κριτήρια ωριμότητας και επικεντρώθηκε στον μετρήσιμο αντίκτυπο (Hawkes. E W, 2021). Η Ετήσια Ανασκόπηση του 2023 του Control, Robotics & Autonomous Systems συνόψισε τη σχετική πρόοδο και τα ερευνητικά (Yasa. O et.al, 2023).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Εν τω μεταξύ, μια βιβλιομετρική ανάλυση (Micromachines, 2023) έδειξε μια εκθετική αύξηση στις δημοσιεύσεις μετά το 2010, με τους ενεργοποιητές, τα υλικά και τις λαβές να γίνονται κύρια θέματα (Rusu. D M et.al, 2023). Το 2024, μια ανασκόπηση στο Nature Communications υπογράμμισε τη στροφή προς μη προσδεδεμένους μαλακούς ενεργοποιητές, δηλαδή λύσεις που δεν απαιτούν σωλήνες ή καλώδια — προϋπόθεση για πραγματικά αυτόνομα μαλακά ρομπότ (Κράτηση_θέσης2).

Τέλος, η έκθεση NIST IR 8508 (2024) επισημαίνει μετρολογικά κενά (τυποποίηση δοκιμών υλικών, επαναληψιμότητα και διαδικασίες υγιεινής) και προτείνει έναν οδικό χάρτη για την αξιοπιστία και τη βιομηχανική υιοθέτηση (Case. J C & Marvel. J A, 2024).

Πίνακας 2.4 Χρονολόγιο βασικού ιστότοπου (Σύνοψη)

Έτος	Σταθμός	Εννοια	Αναφορά
2010	Universal Jamming Gripper	Μεταβλητή **ακαμψία** για «***καθολική***» σύλληψη μέσω μανδάλωσης	**(Brown E et.al, 2010)**
2011	Multigait Soft Robot	Πρώιμη πλήρως απαλή κίνηση με χρήση **πνευματικών ενεργοποιητών**	**(Shepherd. R F et.al, 2011)**
2011	Soft Robotics for Chemists	Επέκταση σε **υλικά/χημεία** και **μαλακή λιθογραφία**	**(Ilievski. F et.al, 2011)**
2014	Κυκλοφόρησε το περιοδικό Soft Robotics (SoRo).	Θεσμική ολοκλήρωση στον τομέα αυτό	**(Mary Ann Liebert. Inc, 2014)**
2015	Nature Review	Συστηματοποίηση **σχεδιασμού-ελέγχου**	**(Rus. D & Tolley M T, 2015)**
2016	«Octobot» (Nature)	Πλήρως **μαλακά αυτόνομα ρομπότ** που χρησιμοποιούν **μικρορευστική λογική**	**(Wehner. M et.al, 2016)**
2018	Angewandte Review (Whitesides)	Ανάπτυξη της ποικιλομορφίας στη **μαλακή ρομποτική**	**(Whitesides. G M, 2018)**
2021	Science Robotics	Κριτήρια ωριμότητας/επιπτώσεων	**(Hawkes. E W, 2021)**
2023	Annual Review	Σύγχρονη πανοραμική **χαρτογράφηση**	**(Yasa. O et.al, 2023)**
2023	Bibliometrics	**Εκρηκτική ανάπτυξη των δημοσιεύσεων από το 2010**	**(Rusu. D M et.al, 2023)**
2024	Nature Communications	Μετάβαση σε αυτόνομο έλεγχο με χρήση μη **προσδεδεμένων ενεργοποιητών**	**(Jung. Y et.al, 2024)**

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

2024	NIST IR 8508	**Μετρολογία/πρότυπα** για βιομηχανικές εφαρμογές	**(Case. J C & Marvel. J A, 2024)**

2.5 Ο ρόλος των υλικών και της μηχανικής ελαστομερών

Στην μαλακή ρομποτική, η απόδοση εξαρτάται όχι μόνο από τον αλγόριθμο ελέγχου αλλά και από τις χημικές ιδιότητες, τη μικροδομή και τη ρεολογία του ελαστομερούς: αυτό συμβαίνει επειδή αυτές οι ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας, ιξωδοελαστικότητα, υστέρηση, διηλεκτρικές παράμετροι, επιφανειακή ενέργεια/προσκόλληση) καθορίζουν άμεσα την κατανομή της δύναμης επαφής, το σχήμα παραμόρφωσης και τη λαβή. Οι σύγχρονες κριτικές υπογραμμίζουν αυτή τη «*μετατόπιση πολυπλοκότητας*» από τον έλεγχο στο ίδιο το υλικό (Whitesides. G M, 2018).

2.5.1 Κατηγορίες ελαστομερών Gripper – Χαρακτηριστικά, Οφέλη και Περιορισμοί

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις κύριες κατηγορίες υλικών για μαλακές λαβές (σιλικόνες με βάση Ecoflex/PDMS, TPU/TPE, ακρυλικά ελαστομερή, υδρογέλες και εξειδικευμένες κατηγορίες όπως μαγνητικά ενεργά ελαστομερή), μαζί με τις τυπικές ιδιότητες και τις εφαρμογές αναφοράς τους. Οι ειδικές τιμές εξαρτώνται από τη σύνθεση, τη μέθοδο σκλήρυνσης και τις μεθόδους δοκιμής. Ως εκ τούτου, τα φύλλα δεδομένων και οι τρέχουσες κριτικές παραμένουν βασικές πηγές πληροφοριών. (Smooth-On, 2024-2025); (Raise3D, 2024); (Guo. Y et.al, 2021).

Πίνακας 2.5 Χρονοδιάγραμμα βασικών σταθμών

Κατηγορία Υλικού	Τυπικές μηχανικές ιδιότητες (ενδεικτικές)	Τυπικές χρήσεις/δραστικά συστατικά	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί/Σημειώσεις
Σιλικόνη (Ecoflex™, Dragon Skin™, PDMS)	Ecoflex 00-50: ε = ~980%, αντοχή ~2,2 MPa, 100% συντελεστής ~0,08 MPa (Smooth-On TDS)	PneuNets, περιβάλλουσα σύλληψη. επιφάνεια επαφής	Υψηλή παραμόρφωση και βιοσυμβατότητα	Γήρανση/υγρασία; Παραλλαγή/ωρίμανση ιδιότητας από παρτίδα σε παρτίδα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

TPU/TPE (Shore A 85–98)	TPU-95A: Σκληρότητα Shore A 95, επιμήκυνση 400–580% (TDS 2024/2022)	Εύκαμπτες αρθρώσεις σε σχήμα δακτυλίου/φτερού, δάχτυλα με τρισδιάστατη εκτύπωση	Αντοχή στη φθορά, δυνατότητα εκτύπωσης (FDM/DLS)	Ανώτερο E → Λιγότερη "τρυφερότητα" στην επαφή
Ακρυλικά ελαστομερή (μεμβράνες DEA, όπως VHB/νέα συμπολυμερή)	Υψηλή καταπόνηση υπό μαγνητικό πεδίο, υψηλή εr	Διηλεκτρικά ελαστομερή (DEAs), "τεχνητοί μύες"	Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, ταχύτητα	Απαιτεί υψηλή τάση. θέτει ζητήματα ασφάλειας/γήρανσης
Υδροπηκτές και ιονογέλη	Εξαιρετικά μαλακό, αγώγιμο/αναπνεύσιμο	Αισθητήρες αφής, προσθετικές επιφάνειες	Βιοσυμβατότητα, υγρά περιβάλλοντα	Αποδέσμευση/Σταθερότητα χρόνου
Μαγνητικά ενεργά/πολλαπλά δίκτυα (MNEs)	Ρυθμιζόμενη ακαμψία/απώλεια	Μεταβλητή ακαμψία, απόκριση "σώματα"	Γρήγορες ρυθμίσεις επί τόπου	Το ιστορικό μηχανικών εφέ/φορτίου Mullins απαιτεί ειδική μοντελοποίηση

Επιθεώρηση Μετρολογίας. Το NIST IR 8508 συντάσσει πρότυπα δοκιμών για ελαστομερή, εστιάζοντας σε συγκρίσιμες διεργαστηριακές μετρήσεις (π.χ. τάνυση, ερπυσμός/χαλάρωση, κύκλοι φόρτωσης), κάτι που είναι κρίσιμο για βιομηχανικές εφαρμογές μαλακών λαβών (Case. J C & Marvel. J A, 2024).

2.5.2 Μηχανικές ιδιότητες ελαστομερών υπό φορτίο: Υπερελαστικότητα, ιξωδοελαστικότητα και υστέρηση

Τα μαλακά αντικείμενα παρουσιάζουν μη γραμμική υπερελαστικότητα (Mooney-Rivlin, Yeoh, Gent, Arruda-Boyce, Ogden), το φαινόμενο Mullins (μαλάκυνση του στρες), φαινόμενα εξαρτώμενα από το χρόνο (χαλάρωση, ερπυσμός) και συμπεριφορά εξαρτώμενη από τον ρυθμό, τα οποία επηρεάζουν άμεσα τις δυνάμεις πρόσφυσης και ολίσθησης. Πρόσφατες μελέτες συνέκριναν την προγνωστική ακρίβεια διαφορετικών υπερελαστικών μοντέλων και παρείχαν οδηγίες επιλογής για κάθε εφαρμογή (Huri. D et.al, 2024); (Park. S-J, 2025). Επιπλέον, πρόσφατη έρευνα έχει αναλύσει/προσομοιώσει το φαινόμενο Mullins σε μαγνητοενεργά ελαστομερή (Li. Y Wang. Z Liu. J Zhang. X & Chen. Q, 2023).

Τι σημαίνει αυτό για τους αρπάγες;

- Σε χαμηλές ταχύτητες, η υψηλή συμμόρφωση μειώνει τις κορυφές καταπόνησης, ελαχιστοποιώντας έτσι τη ζημιά του προϊόντος.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

- Σε υψηλές ταχύτητες/υψηλές συχνότητες, οι απώλειες (tan δ) και η υστέρηση αυξάνουν τα θερμικά φορτία. Η σταθερότητα και η διάρκεια ζωής εξαρτώνται από την επιλογή υλικού και γεωμετρίας (Tang. C et.al, 2024).

☛ **Μηχανική Επαφής και Πρόσφυση: Από JKR έως Τριβή-ολίσθηση**

Η πρόσφυση/τριβή στα ελαστομερή διέπεται από μη γραμμικά φαινόμενα επαφής (JKR) και εξαρτάται από την επιφανειακή ενέργεια, την τραχύτητα, την ταχύτητα και την προολίσθηση. Πρόσφατες ανασκοπήσεις και μελέτες (Oliver. C et.al, 2023) έδειξαν ότι η προφόρτιση διάτμησης μπορεί να αλλάξει σημαντικά τη δύναμη διαχωρισμού και τα σενάρια ολίσθησης - οι γνώσεις είναι κρίσιμες για την ανίχνευση ολίσθησης και την απελευθέρωση μαλακών αντικειμένων. Πρόσφατη έρευνα έχει επίσης αντιμετωπίσει δυναμικά σενάρια JKR σε ταλαντευόμενες επαφές. (Ciavarella. M, 2025); (Oliver. C et.al, 2023).

☛ **Διηλεκτρικές και ηλεκτροστατικές συσκευές: Υλικά με «λειτουργικές» ιδιότητες**

Τα DEA απαιτούν ελαστομερή με υψηλή επιτρεπόμενη καταπόνηση, υψηλή ηλεκτρική αντοχή διάσπασης και ιδανικά, υψηλότερες διηλεκτρικές σταθερές για τη μείωση των τάσεων λειτουργίας. Πρόσφατες ανασκοπήσεις (Tang. C et.al, 2024); (Zhang. D et.al, 2025) και τεχνικά έγγραφα τεκμηριώνουν την πρόοδο σε συμπολυμερή υψηλής διηλεκτρικής σταθερότητας, νανοσύνθετα υλικά και πολυστρωματικές δομές, καθώς και σε ηλεκτροσυγκολλητικές συσκευές (συμπλέκτες ΕΑ/κύπελλα) που επιτυγχάνουν υψηλή ειδική αντοχή σε χαμηλότερες τάσεις (Caruso. F Shea. H & Cacucciolo. V, 2025).

☛ **Κατασκευή/Παραγωγή προσθέτων και «Υλικό ως Λογική»**

Η Additive Manufacturing (AM) επεκτείνει τον χώρο σχεδιασμού: Το TPU-95A και οι εξειδικευμένες σιλικόνες/ρητίνες επιτρέπουν την εκτύπωση δακτύλων 3D, τα ενσωματωμένα κανάλια και τις υβριδικές δομές (Wang. X et.al, 2024). Η τάση «*Material as Logic*» αξιοποιεί μικροδομές ινών/κυτταρικών ινών για την επίτευξη προγραμματιζόμενης παραμόρφωσης χωρίς πολύπλοκο έλεγχο (Yasa. O et.al, 2023).

☛ **Περιβάλλον, Υγιεινή και Αξιοπιστία (CIP)**

Για τις ελαφριές βιομηχανίες/βιομηχανίες τροφίμων, οι λαβές πρέπει να αντέχουν τον καθαρισμό στη θέση τους (CIP), τα χημικά και το θερμικό σοκ χωρίς να

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

υποβαθμίζουν την απόδοση του προϊόντος. Το NIST IR 8508 συνιστά την ανάπτυξη ενός οδικού χάρτη δοκιμών/προτύπων (υλικά, αισθητήρες, συστήματα) για να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα και αναπαραγώγιμα - προϋπόθεση για την αναβάθμιση (Case. J C & Marvel. J A, 2024).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

3 Κεφάλαιο: Τύποι και ταξινομήσεις Soft Robotic Grippers

Οι μαλακές ρομποτικές λαβές κατηγοριοποιούνται με βάση τρεις κύριες πτυχές: (**α**) αρχή λειτουργίας, (**β**) μορφολογία και (**γ**) εύρος εφαρμογής. Η επιλογή του τύπου εξαρτάται από τις ιδιότητες του αντικειμένου (γεωμετρία, ευθραυστότητα, υφή), το περιβάλλον (υγιεινή/CIP, καθαριότητα), την απόδοση και το κόστος ενέργειας. Οι βασικές μετρήσεις περιλαμβάνουν το ποσοστό επιτυχίας, τον χρόνο κύκλου, τις kWh/1.000 επιλογές, τον δείκτη ζημιών και την ευελιξία αντικειμένων. Τελικά, οι αναπόφευκτες αντισταθμίσεις - ευελιξία έναντι ακρίβειας, ταχύτητα έναντι ευελιξίας, απλότητα έναντι ελέγχου - οδηγούν στην αυξανόμενη χρήση υβριδικών λαβών για ελαφριά αντικείμενα.

3.1 Κατηγοριοποίηση σύμφωνα με την εφαρμογή

Στον τομέα των εφαρμογών μαλακής λαβής, ο σχεδιασμός, τα δομικά υλικά και οι μέθοδοι ενεργοποίησης προσαρμόζονται συνήθως σύμφωνα με τις ειδικές απαιτήσεις διαφορετικών περιβαλλόντων εφαρμογής (Chen X et.al, 2022). Οι μαλακές λαβές έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς, όπως ιατρικές διαδικασίες, βοηθητικές εφαρμογές, βιομηχανική λαβή, υποβρύχια λαβή κ.λπ. Ο Πίνακας 3.1.1 παραθέτει μια πλήρη λίστα με τις τρέχουσες εφαρμογές μαλακής λαβής.

Πίνακας 3.1 Μερικές τυπικές λαβίδες που χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά σενάρια, Πηγή: Advanced Materials Technologies

Α/Α	Πεδίο εφαρμογής	Τρόπος οδήγησης	Υλικό	Παραπομπές
1	**Ιατρικές διαδικασίες**	Διαδικασίες οδηγού σύρματος	Σιλικόνη	(Rateni. G et.al, 2015)
2		Κίνηση ρευστού	Σιλικόνη	(De Falco. I et.al, 2017)
3	**Βοηθητικές Εφαρμογές**	Κίνηση ρευστού	Ύφασμα	(Nguyen. P H et.al, 2019)
4		Πνευματικό	Σιλικόνη	(Polygerinos. P et.al, 2013)
5	**Βιομηχανικοί σφιγκτήρες**	Κίνηση ρευστού	Καουτσούκ	(Wang. Z Or. K & Hirai. S, 2020)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

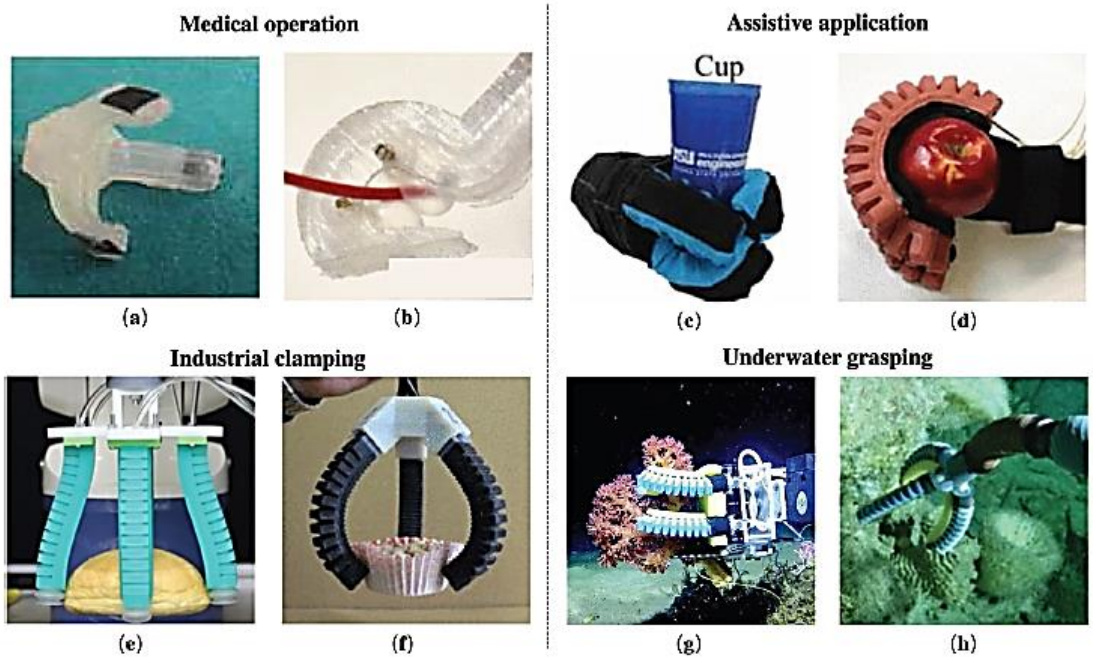
6		Κίνηση ρευστού	Ρευστά ελαστομερή	(Wang. Z Chathuranga. D S & Hirai. S, 2016)
7	**Υποβρύχια σύλληψη**	Σερβοηλεκτρική κίνηση	Σιλικόνη και ρητίνη	(Kumamoto. H et.al, 2021)
8		Κίνηση ρευστού	ελαστικά υλικά	(Galloway. K C et.al, 2016)

3.1.1 Ιατρική παρέμβαση

Οι μαλακές λαβές έχουν προσελκύσει ευρεία προσοχή στη βιοϊατρική βιομηχανία λόγω της εξαιρετικής προσαρμοστικότητας και ασφάλειάς τους στους βιολογικούς ιστούς (Mo. H et.al, 2022). Οι άκαμπτες ιατρικές συσκευές μπορούν να προκαλέσουν βλάβη στους ασθενείς και να καταστρέψουν τον χειρουργικό εξοπλισμό, ενώ οι μαλακές λαβές (Rus. D & Tolley. M T, 2015) μπορούν να συνυπάρχουν αρμονικά με τους οργανικούς ιστούς. Πρόσφατα, οι ερευνητές άρχισαν να διερευνούν την εφαρμογή των μαλακών ρομπότ στην τεχνολογία που φοριέται και στη χειρουργική ιατρική.

Οι μαλακές λαβές έχουν πολλές πρακτικές εφαρμογές στη βιοϊατρική βιομηχανία επειδή μπορούν να προσαρμόσουν παθητικά τις επιφάνειές τους ώστε να προσαρμόζονται σε αντικείμενα. Ένα εργαλείο λαβής για ελάχιστα επεμβατική χειρουργική (Rateni. G et.al., 2015) (βλ. Εικόνα 3.1a) μπορεί να προσαρμοστεί στο αντικείμενο στόχο και να εφαρμόσει μια συγκεκριμένη δύναμη. Λόγω της καλής προσαρμοστικότητάς του, αυτή η μαλακή λαβή βελτιώνει σημαντικά την ασφάλεια της αλληλεπίδρασης μεταξύ χειρουργικών εργαλείων και ανθρώπινου ιστού.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250



Εικόνα 3.1 Μερικοί τυπικοί μαλακοί λαβές σε διαφορετικά πεδία εφαρμογών, Πηγή: a) Soft Gripper (SCG). Ανατύπωση με άδεια από τους (Rateni. G et.al, 2015). Πνευματικά δικαιώματα 2015, Springer.b) Πιπτήρας που πιάνει ένα λεπτό σύρμα με φούσκωμα. Ανατύπωση με άδεια από τους (Guo. J et.al, 2017). Πνευματικά δικαιώματα 2017, IEEE. c) Πολυδαχτυλική λαβή κυπέλλου. Ανατύπωση με άδεια από τους (Nguyen. P H et.al, 2019). Πνευματικά δικαιώματα 2019, IEEE. d) Πιάστε ένα μήλο χρησιμοποιώντας ένα μαλακό γάντι. Ανατύπωση με άδεια από τους (Polygerinos. P et.al, 2013). Πνευματικά δικαιώματα 2013, IEEE. e) Στιγμιότυπο δοκιμής σύλληψης ψωμιού. Ανατύπωση με άδεια από τους (Wang. Z Or. K & Hirai. S, 2020). Πνευματικά δικαιώματα 2020, Elsevier.f) Επίδειξη επιτυχούς ανύψωσης στη βιομηχανία. Ανατύπωση με άδεια από τους (Wang. Z Chathuranga. D S & Hirai. S, 2016). Πνευματικά δικαιώματα 2016, IEEE. g) Αρπάγη τύπου φυσούνας που συλλέγει μαλακά κοράλλια. Ανατύπωση με άδεια από τους (Galloway. K C et.al, 2016). Πνευματικά δικαιώματα 2016, Mary Ann Liebert, Inc., Publishers. h) Η λαβή κινείται προς τα κάτω για να πιάσει το υποβρύχιο σφουγγάρι. Ανατύπωση με άδεια από το (Phillips. B T et.al, 2018). Πνευματικά δικαιώματα 2018, Nature Publishing Group.

Ένας νέος τύπος μαλακής λαβής μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ελαχιστοποίηση των κινδύνων που σχετίζονται με τα μαλακά ρομπότ (Guo. J et.al, 2017). Η λαβή αποτελείται από ένα τρισδιάστατο εκτυπωμένο κέλυφος σε σχήμα γάντζου, έναν μαλακό φουσκωτό ενεργοποιητή και δύο μικρές ράβδους. Όταν εφαρμόζεται πεπιεσμένος αέρας, η μαλακή λαβή μπορεί να πιάσει σταθερά τον μαλακό ιστό μέσω πολλαπλών σημείων επαφής. Η δομή που μοιάζει με γάντζο επιτρέπει επίσης κινήσεις ανύψωσης κατά τη διάρκεια λεπτών χειρουργικών επεμβάσεων (βλ. Εικόνα 3.1b).

Μια άλλη μελέτη σχεδίασε και κατασκεύασε έναν πολυλειτουργικό μαλακό βραχίονα που αποτελείται από τρεις ίδιες μονάδες. Χρησιμοποιείται κυρίως ως μαλακός χειριστής για βιοϊατρική ελάχιστα επεμβατική χειρουργική (De Falco. I et.al, 2017).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Ωστόσο, λόγω του υψηλού κόστους των ρομπότ, οι μαλακές λαβές στον ιατρικό τομέα δεν έχουν ακόμη χρησιμοποιηθεί ευρέως. Στο μέλλον, είναι απαραίτητο να βελτιωθεί η ευελιξία τους με τη μείωση του κόστους και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας.

3.1.2 Βοηθητικές Εφαρμογές

Η υποβοήθηση κίνησης είναι επίσης μια σημαντική κατεύθυνση εφαρμογής για μαλακές λαβές. Σε κοινά υποστηρικτικά σενάρια, έχει προταθεί ένας σχεδιασμός μιας μαλακής λαβής που μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα εύκαμπτο άκρο πολυμερούς (Nguyen. P H et.al, 2019). Η λαβή αποτελείται από έναν μαλακό ενεργοποιητή κατασκευασμένο από φουσκωτό ύφασμα υψηλής αντοχής που μπορεί να βοηθήσει τους χρήστες να ολοκληρώσουν λειτουργικές εργασίες στις καθημερινές δραστηριότητες (βλ. Εικόνα 3.1c).

Επιπλέον, έχει σχεδιαστεί ένα φορητό γάντι (Polygerinos. P et.al, 2013). Ο μαλακός ενεργοποιητής του είναι κατασκευασμένος από ελαστομερές υλικό με ενσωματωμένα κανάλια. Η κάμψη προσομοιώνεται από ένα πνευματικό δίκτυο που μπορεί να προσαρμοστεί με ασφάλεια στην κίνηση των ανθρώπινων δακτύλων (βλ. Εικόνα 3.1d).

Με την πρόοδο της έρευνας σχετικά με τις μαλακές λαβές σε βοηθητικές εφαρμογές, η δομική ευελιξία και σταθερότητα αυτών των συστημάτων έχουν γίνει σημαντικές προκλήσεις. Είναι σημαντικό να ολοκληρωθεί η μετέπειτα επαναληπτική ανάπτυξη των μαλακών λαβών μέσω εξυπνότερων και πιο ευέλικτων μεθόδων σχεδιασμού υλικών και δομικών στοιχείων.

3.1.3 Βιομηχανικοί σφιγκτήρες

Οι μαλακές λαβές έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στον τομέα των βιομηχανικών ρομπότ λόγω των προσαρμοστικών τους ιδιοτήτων. Στην εποχή του Industry 4.0, υπάρχει τεράστια ζήτηση για μαλακές λαβές που μπορούν να πιάσουν διαφορετικούς τύπους συσκευασίας. Μια μαλακή λαβή που αποτελείται από μια δομή τεσσάρων δακτύλων (βλ. Εικόνα 3.1e) μπορεί να πιάσει και να προσροφήσει διάφορους τύπους αντικειμένων (Wang. Z Or. K & Hirai. S, 2020) και είναι η απλούστερη εφαρμογή στον βιομηχανικό τομέα. Μια άλλη μελέτη έδειξε μια τρισδιάστατη εκτυπωμένη μαλακή

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

λαβή με αρθρωτό σχέδιο για συσκευασία μεσημεριανού κουτιού (βλ. Εικόνα 3.1f). Η λαβή αποτελείται από μια άκαμπτη βάση και τρία μαλακά δάχτυλα (Wang. Z Chathuranga. D S & Hirai. S, 2016).

Οι μαλακές λαβές έχουν σημειώσει σημαντική πρόοδο στον βιομηχανικό τομέα. Ωστόσο, η προώθηση και εφαρμογή τους σε διαφορετικούς βιομηχανικούς τομείς φέρνει και νέες προκλήσεις. Σήμερα, εταιρείες όπως η Soft Robotics και η SRT ειδικεύονται στο σχεδιασμό προϊόντων που βασίζονται σε μαλακές λαβές, προωθώντας περαιτέρω την ανάπτυξη μαλακών λαβών στον βιομηχανικό τομέα.

Ωστόσο, η μετάβαση των μαλακών λαβών από τις παραδοσιακές βιομηχανικές εφαρμογές σε πιο σύνθετες παραμένει μια σημαντική πρόκληση για τη μελλοντική τους ανάπτυξη.

3.1.4 Υποβρύχια σύλληψη

Εκτός από τις εφαρμογές στον βιομηχανικό τομέα και την καθημερινή ζωή, οι μαλακές λαβές έχουν επίσης πρακτικές εφαρμογές στη βαθιά θάλασσα (Gong. Z et.al., 2021); (Liu. J et.al, 2020); (Mazzeo. A et.al, 2022); (Zhang. J-H Chen. Y-L & Gong. Y-J, 2021); (Li. H et.al, 2021). Σε σύγκριση με τις επίγειες εφαρμογές, ο ρόλος των soft grippers στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι πιο σημαντικός. Για παράδειγμα, στη μελέτη (Galloway. K C et.al, 2016), οι ερευνητές επέδειξαν μια υποβρύχια μαλακή λαβή που μπορεί να πιάσει με ακρίβεια τους μαλακούς οργανισμούς στον βυθό της θάλασσας (Εικόνα 3.1g).

Τα χαρακτηριστικά ευέλικτης κίνησης της μαλακής λαβής (Phillips. B T et.al, 2018) καθιστούν τον μαλακό ρομποτικό χειριστή εύκολο στη χρήση σε λειτουργίες βαθέων υδάτων. Η επιλογή των δομικών υλικών του ταιριάζει με τα μαλακά και εύθραυστα χαρακτηριστικά των θαλάσσιων οργανισμών. Ο ενεργοποιητής κινείται από έναν προσαρμοσμένο αναλογικό υδραυλικό κινητήρα ελέγχου με απαίτηση ισχύος μικρότερη από 50 W (Εικόνα 3.1h).

Ο σχεδιασμός του συστήματος είναι το κλειδί για τη δημιουργία μιας λαβής με πρακτική αξία. Στη μελέτη (Cai. M et.al, 2020), σχεδιάστηκε ένα υβριδικό σύστημα χειριστή για υποβρύχια σύλληψη θαλάσσιων προϊόντων. Για να διασφαλιστεί το ασφαλέστερο κράτημα και να αποφευχθεί η ζημιά του προϊόντος, ελέγχονται επίσης οι γωνίες ανοίγματος και κλεισίματος της λαβής.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Επιπλέον, έχει αναπτυχθεί μια υποβρύχια λαβή αναρρόφησης (USG) για τη σύλληψη αντικειμένων (Kumamoto. H et.al, 2021). Η συσκευή κινείται από μια προπέλα, η οποία επιτρέπει τον εύκολο έλεγχο της αναρρόφησης. Το USG μπορεί να ολοκληρώσει τις εργασίες ανύψωσης και τοποθέτησης αντικειμένων με πιο σύντομες και ευκολότερες κινήσεις σύλληψης. Οι υποβρύχιες κινήσεις σύλληψης απαιτούν λεπτούς και αποτελεσματικούς χειρισμούς, γεγονός που αποτελεί τεράστια πρόκληση για την ακρίβεια και το εύρος κίνησης των μαλακών λαβών. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση της ακρίβειας σύλληψης και των δυνατοτήτων εκτέλεσης κίνησης των μαλακών λαβών, ώστε να μπορούν να προσαρμοστούν καλύτερα στις διαφορετικές ανάγκες των υποβρύχιων περιβαλλόντων.

3.2 Βιομιμητικοί αρπάγες

Οι ρομποτικές λαβές μπορούν γενικά να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κύριες ομάδες: τις συμβατικές λαβές και τις μαλακές λαβές. Και οι δύο τύποι λαβών αντλούν έμπνευση από φυσικούς μηχανισμούς. Στην πραγματικότητα, η φύση διαθέτει μια εντυπωσιακή σειρά χαρακτηριστικών που παρέχουν μια πλούσια πηγή προσομοίωσης για τη δημιουργία συνεχώς ενεργοποιούμενων δομών. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν βελτιστοποιημένα σχέδια, μοναδικά εξελιγμένα σχήματα προσαρμοσμένα σε συγκεκριμένες εργασίες και ενεργειακά αποδοτική δυναμική και κινητική που διασφαλίζουν την επιβίωση (Trivedi. D et.al, 2008).

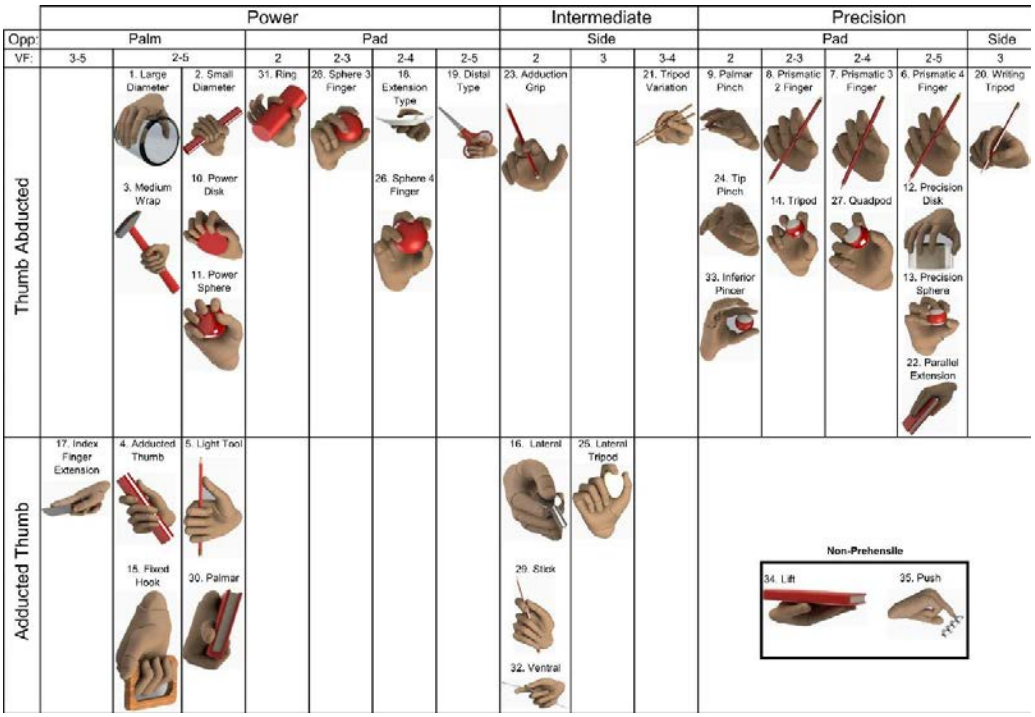
3.2.1 Ταξινομία Σύλληψης

Η σύλληψη είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει τα δάχτυλα, την παλάμη, το χέρι και το σώμα που ασκούν δυνάμεις για να έρθουν σε επαφή και να σταθεροποιήσουν ένα υπόστρωμα και χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει τη λειτουργία μιας αρπάγης. Ανάλογα με τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του υποστρώματος και τα χαρακτηριστικά της αρπάγης, υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι λαβής.

Το ανθρώπινο χέρι χαρακτηρίζεται από πολλαπλούς βαθμούς ελευθερίας (DoFs) ανά δάχτυλο, όπως και τα άκρα ορισμένων ζώων, επιδεικνύοντας αξιοσημείωτη προσαρμοστικότητα στο χειρισμό αντικειμένων. Για παράδειγμα, οι συγγραφείς του

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

(Saudabayev. A et.al, 2018); (Feix. T et.al, 2016); (Stival. F et.al, 2019) συνέταξαν και ταξινόμησαν τους τύπους ανθρώπινων λαβών σε 32 κατηγορίες, όπως φαίνεται στη Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2 Ταξινομία σύλληψης του ανθρώπινου χεριού βάσει των στάσεων του αντίχειρα, της παλάμης και των δακτύλων, Πηγή: (Saudabayev. A et.al, 2018)(© 2018, Scientific Data 5).

Σύμφωνα με αυτή την ταξινόμηση, το ανθρώπινο χέρι χρησιμοποιεί ένα ή περισσότερα δάχτυλα, τις άκρες των δακτύλων, τις φάλαγγες και μερικές φορές την παλάμη, προσαρμόζοντας το καθένα στη συγκεκριμένη κατάσταση.

Σήμερα, τα ρομποτικά χέρια με πέντε δάχτυλα (R-Hs) άμεσα εμπνευσμένα από την ανατομία του ανθρώπινου χεριού έχουν σημειώσει σημαντική πρόοδο στην προσομοίωση αυτών των τύπων λαβών. Τα σχέδια R-H βασίζονται σε παραδοσιακές ή υβριδικές αρχιτεκτονικές, αντανακλώντας αποτελεσματικά τις διάφορες μεθόδους σύλληψης που αναλύθηκαν προηγουμένως.

Ενώ οι βιομιμητικές λαβές είναι γνωστές για τις ευρέως διαδεδομένες εφαρμογές τους στην καθημερινή ζωή και τη βιομηχανία, επιδεικνύοντας εξαιρετική σταθερότητα και ευελιξία, εξακολουθούν να παρουσιάζουν προκλήσεις λόγω περιορισμένων βαθμών ελευθερίας (DoF). Αντίθετα, τα φυτά και τα ζώα στη φύση διαθέτουν διάφορους μηχανισμούς για να πιάνουν ή να κρατούν αντικείμενα. Αυτοί οι μηχανισμοί μπορούν να χρησιμεύσουν ως αναφορά για το σχεδιασμό της λαβής.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Εκτός από το ότι μοιράζονται κοινές αρχές με τα ανθρωπόμορφα σχέδια, οι βιομιμητικές λαβές ενισχύουν τις ικανότητές τους να συλλαμβάνουν μέσω μικροδομών μέσα στο σώμα τους, όπως:

- Αναρρόφηση
- Υγρή πρόσφυση
- Ξηρή πρόσφυση
- Μηχανικό κλείδωμα

Επιπλέον, αυτές οι βιομιμητικές αρπάγες παρουσιάζουν αυξημένη ευελιξία αλλά μειωμένη σταθερότητα σε σύγκριση με τις ανθρωπόμορφες αρπάγες, λόγω των εκτεταμένων και απεριόριστων βαθμών ελευθερίας (DoF) που παρέχει η ανατομική τους δομή.

3.2.2 Ανθρωποειδείς αρπάγες

Το ανθρώπινο χέρι αποτελείται από άκαμπτες οστέινες φάλαγγες και εύκαμπτες συνδέσμους, καθιστώντας το τον πιο προηγμένο χειριστή από όλα τα ζώα. Αυτή η υβριδική φύση του ανθρώπινου χεριού δίνει στα δάχτυλα δύναμη και ευελιξία (Kapandji. I A, 1987), επιτρέποντάς τους να χειρίζονται πολύπλοκα αντικείμενα και να δημιουργούν πολύπλοκες δομές. Δεδομένου ότι τα σχήματα, τα μεγέθη και οι ιδιότητες της επιφάνειας των αντικειμένων που πρέπει να πιαστούν ποικίλλουν, κάθε κατάσταση απαιτεί μια συγκεκριμένη μέθοδο σύλληψης. Ο Schlesinger (Schlesinger. G, 1919) ταξινόμησε τις χειρονομίες σύλληψης σε έξι λειτουργικούς τύπους με βάση τα χαρακτηριστικά σχήματος του χεριού και του αντικειμένου που πιάνεται. Αυτές οι κατηγορίες περιλαμβάνουν: τσιμπήματα με τα δάχτυλα, τσιμπήματα στο πλάι, τσιμπήματα, αγκίστρωση, σφαιρική σύλληψη και κυλινδρική σύλληψη.

Ο Napier (Napier. J R, 1956) επεκτάθηκε σε αυτήν την ταξινόμηση, δίνοντας έμφαση στην επίδραση των ιδιοτήτων της επιφάνειας, του μεγέθους και του σχήματος του αντικειμένου στόχου στη δράση σύλληψης και πρότεινε τη διάκριση μεταξύ σύλληψης ακριβείας και σύλληψης δύναμης. Οι συμβατικές ρομποτικές λαβές χρησιμοποιούν άκαμπτες αρθρώσεις και δομές σύνδεσης και αποτελούν δημοφιλή επιλογή για βιομηχανικές ρομποτικές εφαρμογές. Χρησιμοποιούν παραδοσιακά συστήματα μετάδοσης κίνησης, όπως μηχανισμούς μετάδοσης κίνησης και μετάδοσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

σύνδεσης ή τένοντα. Χαρακτηρίζονται από υψηλή δομική ακαμψία και ισχυρή φέρουσα ικανότητα, η οποία μπορεί να παρέχει ισχυρές δυνάμεις για ακριβή έλεγχο και χειρισμό.

Όπως περιγράφεται στη μελέτη (Samadikhoshkho. Z Zareinia. K & Janabi-Sharifi. F, 2019), τα σχέδια των συμβατικών λαβών ποικίλλουν από ρομποτικές λαβές δύο δακτύλων και τριών δακτύλων έως λαβές πολλαπλών δακτύλων και προσαρμοστικές, ανάλογα με τον αριθμό των δακτύλων και την προσαρμοστική τεχνολογία. Αν και οι συμβατικές λαβές είναι πολύ ευέλικτες στο χειρισμό αντικειμένων, θέτουν επίσης προκλήσεις λόγω της πολυπλοκότητας της μηχανικής και του ελέγχου τους. Συγκεκριμένα, τείνουν να έχουν δυσκολία στο χειρισμό μαλακών ή παραμορφώσιμων αντικειμένων (Shintake.. J et.al, 2018). Επιπλέον, η υψηλή δομική ακαμψία τους καθιστά την αλληλεπίδρασή τους με τον άνθρωπο δυνητικά επικίνδυνη (Zhou. L et.al, 2021). Για να ξεπεραστούν αυτές οι ελλείψεις, οι ερευνητές στράφηκαν στην τεχνολογία μαλακής ρομποτικής, δίνοντας προτεραιότητα στην ευελιξία του τελικού τελεστή και στην προσαρμοστικότητά του σε διάφορα αντικείμενα (Deimel. R & Brock O, 2016); (Catalano. M G et.al, 2014).

Η βιολογική κοινότητα τονίζει τη σημασία της απαλότητας και της ευελιξίας στη διευκόλυνση της αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον (Dickinson. M H et.al, 2000). Οι μαλακές λαβές χρησιμοποιούν κυρίως πολυμερή μνήμης σχήματος (SMPs), κράματα μνήμης σχήματος (SMAs) και κράματα χαμηλού σημείου τήξης (LMPAs), τα οποία είναι ικανά να ανταποκρίνονται στις αλλαγές θερμοκρασίας. Επιπλέον, για την περαιτέρω ανάπτυξη μαλακών και εύκαμπτων λαβών, έχουν διερευνηθεί ερεθίσματα όπως το pH, το φως, ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός.

Παρά τη σημαντική πρόοδο στην έρευνα των χειριστών και των αρπαγών, η επίτευξη του ίδιου επιπέδου στιβαρότητας και προσαρμοστικότητας με το ανθρώπινο χέρι παραμένει μια σημαντική πρόκληση (Zheng. W et.al, 2021). Οι υπάρχοντες χειριστές (R-H) ποικίλλουν ευρέως, που κυμαίνονται από απλές παράλληλες λαβές ενός DOF έως ανθρωπόμορφους χειριστές υψηλού DOF. Ορισμένα R-H χρησιμοποιούν ενεργοποιητές με έναν ή λίγους περιορισμένους βαθμούς ελευθερίας, ενώ άλλα χρησιμοποιούν πλήρως ενεργοποιημένους συνδέσμους, παθητικούς συνδέσμους και χειριστές πολλαπλών DOF (Dollar. A M & Howe. R D, 2010); (Crisman. J Kanojia. C & Zeid. I, 1996); (Odhner. L U et.al, 2014); (Ciocarlie. M et.al,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

2014); (Wolf. A & Schunk. H, 2018); (Birglen. L Laliberté. T & Gosselin. C, 2008); (Hirose. S & Umetani. Y, 1978).

3.3 Κράπες εμπνευσμένες από ζώα

Σε αυτήν την ενότητα, θα γίνει εμβάθυνση στην τέχνη των λαβών εμπνευσμένων από ζώα και θα εξερευνηθούν οι διαφορετικές μορφές τους σε οκτώ κύριες ταξινομήσεις:

- ✓ Σφιγκτήρας,
- ✓ Αναρρόφηση,
- ✓ Τύλιγμα,
- ✓ Ξηρά πρόσφυση,
- ✓ Υγρή πρόσφυση,
- ✓ Κατάποση,
- ✓ Απαγόρευση κυκλοφορίας,
- ✓ Γάντζος.

Κάθε ταξινόμηση περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα μηχανισμών σύλληψης και συχνά περιλαμβάνει πρόσθετες υποκατηγορίες για την καταγραφή πιο διαφοροποιημένων διαφορών. Ορισμένες λαβές συνδυάζουν στοιχεία από πολλαπλές ταξινομήσεις, δημιουργώντας υβριδικά σχέδια που αντλούν έμπνευση από διάφορες πτυχές του ζωικού βασιλείου.

3.3.1 Σύλληψη Τύπου Σφιγκτήρα (Clamp Grasp)

Μία από τις πιο κοινές μεθόδους που χρησιμοποιούνται στο ζωικό βασίλειο είναι η σύλληψη αντικειμένων χρησιμοποιώντας συμπιεστικές δυνάμεις που δημιουργούνται από ανατομικά χαρακτηριστικά όπως τα δάχτυλα των χεριών και των ποδιών. Αυτός ο μηχανισμός έχει επίσης κερδίσει δημοτικότητα στον τομέα των ρομποτικών λαβών και έχει γίνει ευρέως μιμούμενος.

Ένα παράδειγμα είναι το CCRobot-II, μια αρπάγη εμπνευσμένη από μαϊμού που περιγράφεται από τους (Zheng. Z & Ding. N, 2019). Η λαβή είναι εξοπλισμένη με ένα σύστημα καλωδίων τοποθετημένο στις παλάμες, το οποίο της επιτρέπει να διασχίζει γέφυρες. Έχει δύο παλάμες - μία σε κάθε πλευρά - και δημιουργεί συμπιεστικές

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

δυνάμεις μέσω παθητικών ελατηρίων και μετάδοσης γραναζιών για να διατηρήσει την πρόσφυσή του στη δομή της γέφυρας.

Τα αρπακτικά πτηνά έχουν την ικανότητα να αιχμαλωτίζουν το θήραμα γρήγορα και με υψηλά ποσοστά επιτυχίας υπό διάφορες συνθήκες. Ο (Thomas. J et.al, 2013) πρότεινε μια λαβή με βάση τα δάχτυλα εμπνευσμένη από πουλιά που ενσωματώθηκε σε ένα τετρακόπτερο UAV για γρήγορη σύλληψη αντικειμένων (βλ Εικόνα 3.3a). Η λαβή αποτελείται από δύο αντίθετα δάχτυλα και χρησιμοποιεί σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος για να πιάνει και να απελευθερώνει κινήσεις.

Άλλες μελέτες έχουν επίσης αναπτύξει παρόμοιους μηχανισμούς, συχνά με κάποιες βελτιώσεις για την επίτευξη πιο ήπιων αλληλεπιδράσεων. Για παράδειγμα, ο (Liu. S et.al, 2021) πρότεινε ένα σχέδιο για μια μαλακή λαβή που αποτελείται από δύο αντίθετα πνευματικά δάχτυλα που οδηγούνται από πνευματική πίεση. Αυτά τα δάχτυλα είναι κατασκευασμένα από σιλικόνη και αποτελούνται από μια σειρά θαλάμων των οποίων η περιοχή διατομής σταδιακά μειώνεται από την παλάμη προς την άκρη. Αυτή η μορφολογική δομή επιτρέπει στην λαβή να χειρίζεται αποτελεσματικά αντικείμενα διαφόρων σχημάτων, όπως σφαίρες, κύλινδροι, μπλοκ και δίσκους.

Ένα άλλο παράδειγμα είναι η «μπλοκαρισμένη» λαβή δακτύλου που προτείνεται τους (Fakhri. O et.al, 2023). Σε αυτή την περίπτωση, δύο στρώματα μεμβράνης λατέξ περιέχουν μια ορισμένη ποσότητα μικροσωματιδίων και η κίνηση και η ακαμψία των δακτύλων ρυθμίζονται ελέγχοντας την πίεση αέρα ενός σωληνοειδούς συστήματος που συνδέεται με μια αντλία.

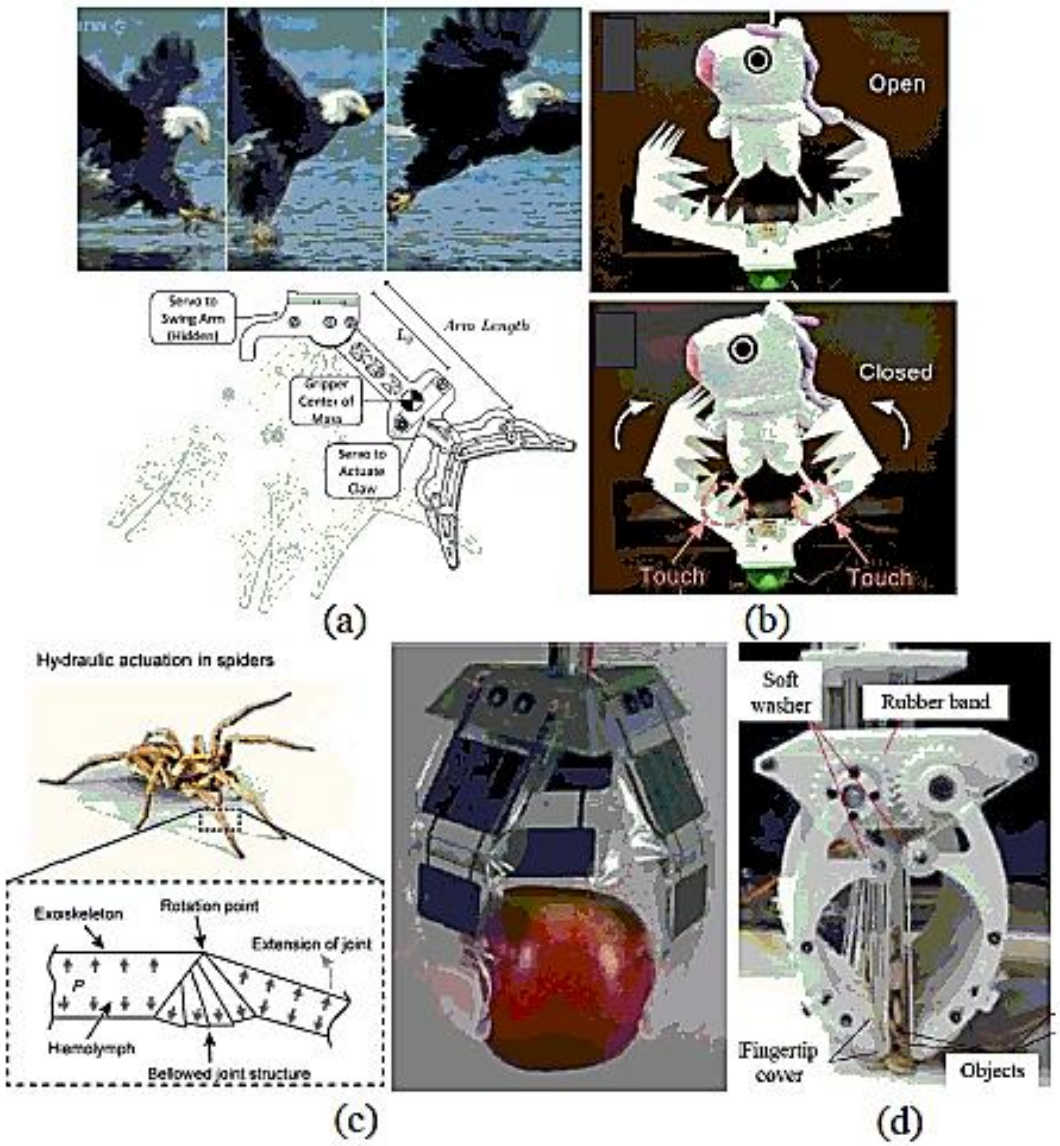
Επιπλέον, (Kang. L et.al, 2019) πρότεινε μια λαβή τριών αρθρώσεων που αποτελείται από δύο άκαμπτα δάχτυλα, το καθένα με τρεις φάλαγγες, και λειτουργεί με έναν μόνο βαθμό ελευθερίας (DoF). Η λαβή από (Triyonoputro. J C et.al, 2018) είναι εμπνευσμένη από τα σαγόνια των χελιών και έχει δύο άκαμπτα δάχτυλα, το καθένα με τρεις αρθρώσεις. Αυτή η δομή διασφαλίζει ότι τα άκρα των δακτύλων παραμένουν παράλληλα μεταξύ τους, βελτιώνοντας σημαντικά την ικανότητα σύλληψης.

Περαιτέρω συνεισφορές στον τομέα των βιομιμητικών αρπαγών (B-I grippers) έχουν γίνει από μελέτες όπως το (Feliu-Talegon. D et.al, 2020); (Bai. L & Sun. Y, 2021); (Zhu. Y et.al, 2022), οι οποίες επικεντρώθηκαν σε σχέδια εμπνευσμένα από τους μηχανισμούς αναρρίχησης των πτηνών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Οι Crabs έχουν αναπτύξει έναν μοναδικό μηχανισμό σύλληψης που αποτελείται από δύο νύχια που αποτελούνται από πολλαπλές αρθρώσεις, ο οποίος έχει γίνει έμπνευση για το σχεδιασμό προηγμένων λαβών. Οι (Yan. W & Mehta. A, 2023) προτείνανε μια δομή που μοιάζει με origami που αποτελείται από δύο συμμετρικά δάχτυλα εξοπλισμένα με πολλαπλές σφηνοειδείς μονάδες. Αυτά τα δάχτυλα μπορούν να ανοίξουν και να διπλωθούν με αρθρώσεις origami, ενώ οι σφηνοειδείς μονάδες εξασφαλίζουν σταθερή επαφή με το αντικείμενο (βλ Εικόνα 3.3b). Οι (Nam. N D et.al, 2019) συνέβαλαν περαιτέρω στο πεδίο προτείνοντας το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση μιας λαβής σαν καβούρι που ενσωματώνει πολλαπλούς άκαμπτους συνδέσμους σε συμπαγή μορφή με μικροκλίμακα και συμβατές ιδιότητες. Με βάση αυτές τις έννοιες, οι πρόσφατες μελέτες μας (H, 2021); (Nguyen. V P & Chow. W T, 2023) πρότειναν μια νέα λαβή με δύο συμμετρικά δάχτυλα συνδεδεμένα σε μια κεντρική παλάμη. Κάθε δάχτυλο περιέχει μια σειρά από πολλά δάκτυλα που λειτουργούν συγχρονισμένα μέσω ενός άξονα σύνδεσης. Επιπλέον, η υβριδική δομή κάθε δακτύλου αποτελείται από ένα σύρμα που τεντώνεται από έναν άκαμπτο σκελετό. Αυτές οι λαβές έδειξαν εξαιρετική αποτελεσματικότητα στις δοκιμές σύλληψης σε μια ποικιλία αντικειμένων (βλ Εικόνα 3.3.1 d). Η (βλ Εικόνα 3.3c) δείχνει μια αράχνη σαν αράχνη με τρία δάχτυλα που κινείται από έναν ηλεκτροϋδραυλικό ενεργοποιητή, σχεδιασμένη να επιτυγχάνει γρήγορο χειρισμό (Kellaris. N et.al, 2021). Η δομή αποτελείται από ένα δάκτυλο με τρεις άκαμπτες φάλαγγες που μπορούν να περιστρέφονται μεταξύ τους μέσω συνδέσεων άρθρωσης που οδηγούνται από ένα ηλεκτροϋδραυλικό σύστημα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250



Εικόνα 3.3 Οι βιονικές αρπάγες (B-I grippers) βασίζονται στους μηχανισμούς λαβής διαφόρων ζώων: (a) πτηνών (Thomas. J, 2013). (b) origami (Yan. W & Mehta. A, 2023); (c) αράχνες (Kellaris. N et.al, 2021). και (d) καβούρια (Nguyen. V P & Chow. W T, 2023) (© IEEE Robotics and Automation Letters).

3.3.2 Σύλληψη μέσω Αναρρόφησης (Sucking Grasp)

Το χταπόδι είναι ένα αξιόλογο μαλάκιο με οκτώ χέρια. Η μοναδική του ανατομία πηγάζει από το γεγονός ότι κάθε χέρι καλύπτεται με κορόιδα (Kier. W M & Stella. M P, 2007); (Kennedy. E B L & Hanlon. R T, 2020); (Grasso. F W, 2008); (Richter. J N Hochner. B & Kuba. M J, 2015). Η περιοχή διατομής κάθε βραχίονα είναι η ευρύτερη στη βάση και λεπταίνει προς την άκρη. Τα μπράτσα, σε συνδυασμό με τα κορόιδα, παρέχουν μια ποικιλία λειτουργιών, όπως:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

1. Χειρισμός αντικειμένων.
2. Μετακίνηση και κίνηση.
3. Αίσθηση μέσω χημικών ερεθισμάτων (χημειοτάξη).

Τα χταπόδια χρησιμοποιούν τα χέρια τους για έλξη, περπάτημα, σήμανση, καμουφλάζ και θήραμα. Αυτή η ευελιξία έχει οδηγήσει στην ενσωμάτωση ιδεών εμπνευσμένων από χταπόδι στην έρευνα χειραγώγησης.

Στα πρώτα στάδια της έρευνας, σχεδιάστηκε ένας βραχίονας που μοιάζει με χταπόδι, αποτελούμενος από τρία τμήματα, το καθένα εξοπλισμένο με δύο πνευματικούς μύες (Guglielmino. E et.al, 2013); (Walker. I D et.al, 2005) που ελέγχονται από την πίεση του αέρα. Όλοι οι μύες ασφαλίστηκαν με ένα στριμμένο νάιλον νήμα. Μια παρόμοια προσέγγιση προτάθηκε στο (Grissom. M D et.al, 2006), όπου χρησιμοποιήθηκε ένας ρομποτικός βραχίονας τεσσάρων μερών, ο καθένας από τους οποίους περιείχε τρεις πνευματικούς μύες.

Σε μελέτες (Calisti. M et.al, 2011); (Mazzolai. B et.al, 2012); (Laschi. C et.al, 2012), οι ερευνητές κατασκεύασαν δύο ρομποτικούς βραχίονες εμπνευσμένους από χταπόδι που είχαν μήκος 210 mm, διάμετρο 16 mm στην άκρη και 21 mm διάμετρο στον κορμό. Αυτοί οι βραχίονες ήταν κατασκευασμένοι από σιλικόνη και χρησιμοποιούσαν καλώδια ή ενεργοποιητές SMA για κίνηση, επιδεικνύοντας την ικανότητα προσαρμογής και ανύψωσης βαρέων αντικειμένων.

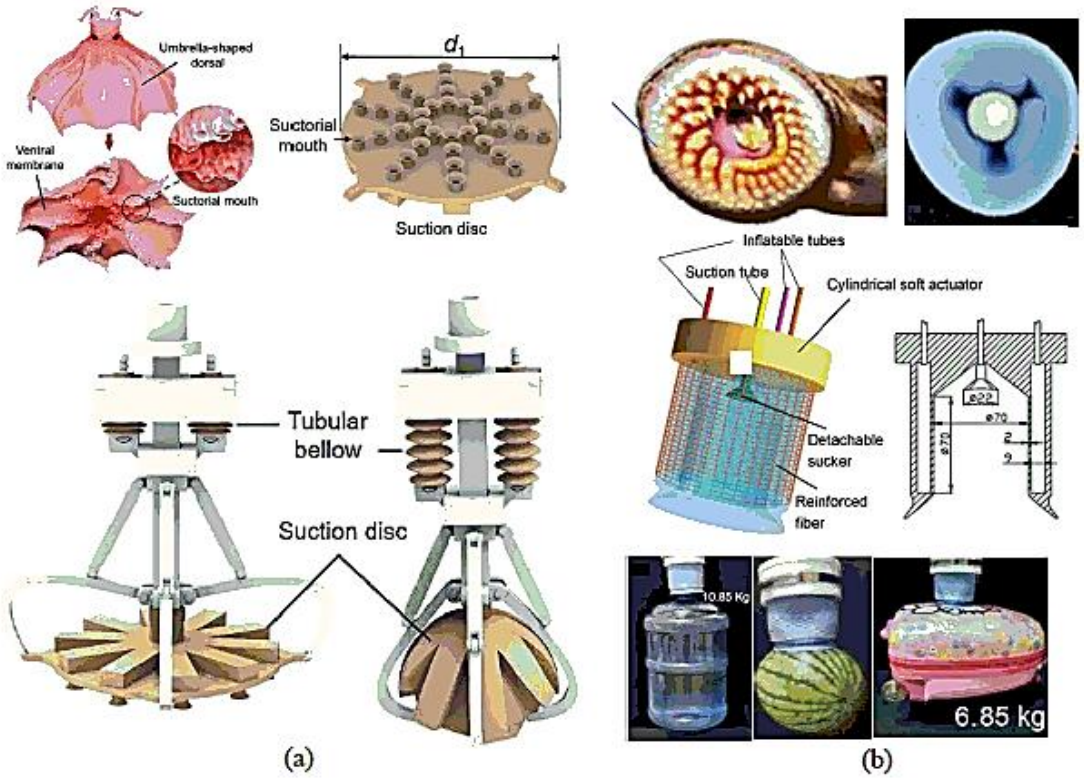
Ένας άλλος μαλακός βραχίονας χταποδιού με οκτώ πλοκάμια χρησιμοποίησε ενεργοποιητές κάμψης υγρού για κίνηση (Fras. J et.al, 2018). Ο Jie (Pi. J et.al, 2021) ανέπτυξε μια εύκαμπτη λαβή χταποδιού αποτελούμενη από δύο μαλακά δάχτυλα πνευμόνων κατάλληλα για να πιάνετε αντικείμενα όπως τα μήλα.

Οι πρόσφατες εξελίξεις επικεντρώθηκαν στη βελτίωση της λειτουργικότητας των βεντούζες του χταποδιού. Για παράδειγμα, η ερευνητική ομάδα της Barbara (Mazzolai. B et.al., 2019)σχεδίασε βεντούζες με διαφορετικές μορφολογίες που επέτρεπαν την κίνηση της εσωτερικής μεμβράνης μέσω ενός πνευματικού μηχανισμού. Επιπλέον, η δύναμη αναρρόφησης βελτιώθηκε αλλάζοντας τη γωνία κλίσης και την καμπυλότητα κάμψης της βεντούζας (Xie. Z et.al, 2020).

Οι βεντούζες Micro PDMS κατασκευάστηκαν επίσης για τη βελτίωση της πρόσφυσης του υγρού (Baik. S et.al, 2017). Για καλύτερη αυτορύθμιση υποβρύχια, ο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

(Wu. M et.al., 2022) εισήγαγε πτερύγια μεταξύ παρακείμενων βραχιόνων και ενσωματωμένες συσκευές φωτισμού σε κάθε βεντούζα (βλ. Εικόνα 3.4a).



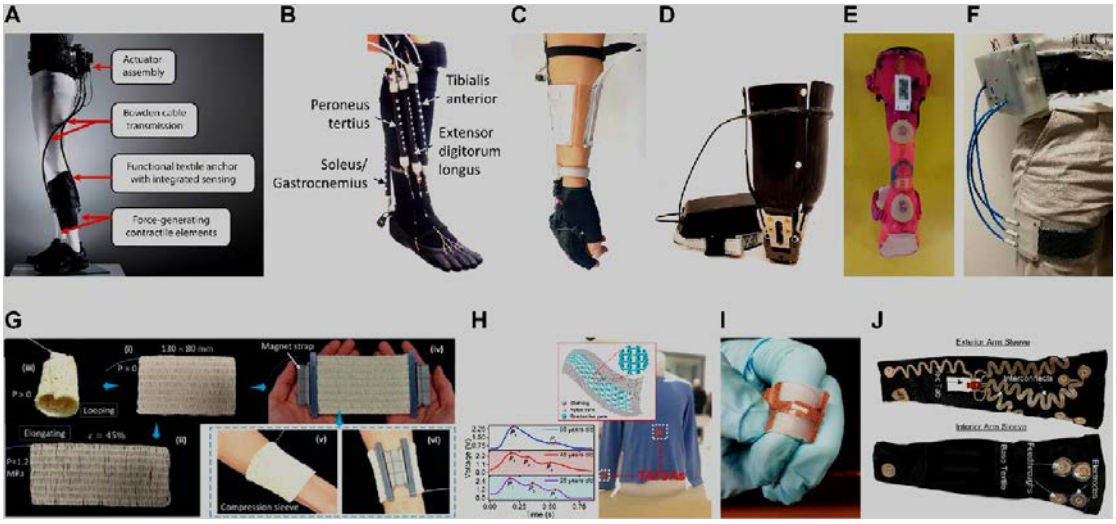
Εικόνα 3.4 Η βιομιμητική λαβή (B-I gripper) βασίζεται στον μηχανισμό αναρρόφησης διαφόρων ζώων: (a) χταπόδι [142] (© Advanced Science, τόμος 9) και (b) lamprey [143] (© Actuators, vol. 11).

Ένα άλλο ενδιαφέρον παράδειγμα είναι μια λαβή εμπνευσμένη από το στόμιο μιας λάμπας, η οποία διαθέτει ομόκεντρα τοποθετημένες βεντούζες διαφόρων μεγεθών (Wang. D Wu. X Zhang. J & Du. Y, 2022) (βλ. Εικόνα 3.4b). Αυτή η πρωτοποριακή λαβή χρησιμοποιεί αναρρόφηση για να μαζεύει μεγάλα αντικείμενα. Αντίθετα, η λαβή που μοιάζει με στόμα με λάμπα που προτείνεται από τους (Paixão. P H A D et.al, 2018) χρησιμοποιεί μια μονή βεντούζα για να συλλαμβάνει αντικείμενα μέσω παθητικής πίεσης μέσα στην κοιλότητα του κυπέλλου χωρίς εξωτερική πνευματική βοήθεια. Επιπλέον, (Mathew. B P et.al, 2022) πρότειναν έναν μηχανισμό βεντούζας με βάση το origami, εμπνευσμένο από πουλιά.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

3.4 Ιατρικές και φορητές εφαρμογές

Αυτή η εργασία αναλύει τις τρέχουσες προκλήσεις και τις μελλοντικές προοπτικές της μαλακής ρομποτικής σε φορητές και εμφυτεύσιμες ιατρικές εφαρμογές. Ξεκινώντας από την τρέχουσα κατάσταση αυτών των πεδίων, αυτό το άρθρο προτείνει νέα πιθανά σενάρια εφαρμογής με βάση τα πλεονεκτήματα της μαλακής ρομποτικής και την ακόλουθη κατανόηση: «*Τα μαλακά ρομπότ θα μπορούν να εκτελούν εργασίες που είναι πέρα από τις δυνατότητες των υπαρχόντων μηχανών*» (Trimmer. B, 2013).



Εικόνα 3.5 (A) Μαλακό ρομποτικό εξωσκελετικό κοστούμι για υποστηρικτικές εφαρμογές και εφαρμογές αποκατάστασης για ασθενείς με εγκεφαλικό (Awad. L et.al, 2020) (Ανατύπωση από τους (Koch. M A & Font-Llagunes. J M, 2021)). (B) Φορητή συσκευή αποκατάστασης αστραγάλου βασισμένη σε πνευματικό τεχνητό μυ McKibben (Park. Y L et.al, 2014) (Ανατύπωση από τους (Koch. M A & Font-Llagunes. J M, 2021). (C) Φορήσιμο μαλακό ρομποτικό σύστημα καρπού με ηλεκτρικό σύστημα τάνυσης για βελτιωμένη μετάδοση δύναμης (Choi. W H et.al, 2019)(Ευγενική προσφορά του καθηγητή Kyu-Jin Cho, Εθνικό Πανεπιστήμιο της Σεούλ, Νότια Κορέα). (D) Ηλεκτρικά ρυθμιζόμενη προσθετική υποδοχή για άτομα με ακρωτηριασμό πάνω από το γόνατο (Paterno. L et.al, 2021) (Ευγενική προσφορά της καθηγήτριας Arianna Menciassi, Scuola Superiore di Sant'Anna, Ιταλία). (E) Αισθητηριακή όρθωση που κατασκευάζεται με πλαστικοποίηση εύκαμπτων αισθητήρων υπό κενό (Bauwens. P et.al, 2020) (Ευγενική προσφορά του καθηγητή Jan Vanflateren, Πανεπιστήμιο της Γάνδης, Βέλγιο). (F) Όρθωση με μεταβλητή ακαμψία και σχήμα (Ibrahimi. M et.al, 2021) (Ευγενική προσφορά της καθηγήτριας Arianna Menciassi, Scuola Superiore Sant'Anna, Ιταλία). (G) Ενεργό ύφασμα που βασίζεται σε τεχνητές μυϊκές ίνες που οδηγούνται από πνευματική ροή (αναπαράγεται από (Phan. P T et.al, 2022). (H) Triboelectric all-textile sensor array (TATSA) για τη μέτρηση της πίεσης στην επιφάνεια του δέρματος (Fan. W et.al, 2020) (αναπαράγεται από (Tseghai. G B et.al, 2020). (I) Εύκαμπτος και πλενόμενος αισθητήρας καταπόνησης για παρακολούθηση ανθρώπινης κίνησης (αναπαράγεται από (Tolvanen. J Hannu. J & Jantunen. H, 2018). (J) Έξυπνη υφασμάτινη στολή (E-textile suit)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

για ηλεκτρομυογραφία επιφάνειας (sEMG) για την αξιολόγηση της έντασης της άσκησης (αναπαράγεται από τους (Ohiri. K A et.al, 2022). Όλες οι εικόνες αναπαράγονται με μια διεθνή άδεια Creative Commons Attribution 4.0 (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

3.4.1 Φυσικές διεπαφές σε φορητά ρομπότ

Η πρόσφατη ανάπτυξη ολοένα και πιο περίπλοκων φορητών ρομπότ, όπως προσθετικών μελών και εξωσκελετών, κατέστησε δυνατή την υπέρβαση πολλών εμποδίων μέσω της τεχνολογικής καινοτομίας. Για να επιτευχθεί αυτό και ακόμη και να το ξεπεράσει, είναι ζωτικής σημασίας μια φυσική και γνωστική συμβίωση μεταξύ της συσκευής και του χρήστη (Pons. J L, 2019).

Η σχεδιαστική κοινότητα χρειάζεται ακόμα να επενδύσει σημαντική έρευνα στη φυσική αλληλεπίδραση των φορητών ρομπότ, καθώς «*ακόμα δεν είναι ακόμη εμφανές πώς να συνδεθεί μηχανικά η συσκευή με το ανθρώπινο σώμα*» (Herr. H, 2014). Η ιδανική φυσική διεπαφή ανθρώπου-μηχανής (pHMI) θα πρέπει να ενσωματώνεται άψογα με το σώμα του χρήστη, ενεργώντας σαν ένα «*δεύτερο δέρμα*» (Herr. H., 2009). Θα πρέπει να ευθυγραμμίζεται με ακρίβεια με τις φυσικές αρθρώσεις και να μεταδίδει με ασφάλεια δυνάμεις, αποφεύγοντας κινηματικές ασυμβατότητες και περιορισμούς κίνησης. Επιπλέον, θα πρέπει να είναι άνετο, καθώς ακόμη και το πιο περίπλοκο σύστημα είναι άχρηστο χωρίς εγγυημένη άνεση χρήστη.

Οι τρέχουσες φορητές συσκευές pHMI είναι άκαμπτες και παθητικές. Αν και ένα μαλακό στρώμα εισάγεται συνήθως μεταξύ άκαμπτων υλικών και φυσικού ιστού, οι μη φυσιολογικές κανονικές και διατμητικές τάσεις που επιβάλλονται στο δέρμα συχνά προκαλούν βλάβη και πόνο, ενώ επίσης βλάπτουν την κυκλοφορία του αίματος.

Επιπλέον, αλλαγές στον όγκο και το σχήμα του σώματος που προκαλούνται από την κίνηση του υγρού ή τη μυϊκή σύσπαση/χαλάρωση μπορεί να επηρεάσουν την προσαρμοστικότητα της διεπαφής, οδηγώντας σε σχετική μετατόπιση και μεταβολή της κατανομής του στρες στον ιστό. Τα τεχνητά φυσικά εμπόδια μεταξύ του δέρματος και του περιβάλλοντος μπορούν να εμποδίσουν τους κανονικούς μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας, επηρεάζοντας έτσι την ομοιόσταση του σώματος και αυξάνοντας τους ρυθμούς εφίδρωσης. Αυτοί οι παράγοντες μπορούν να οδηγήσουν σε διάφορες μορφές δυσφορίας, δερματολογικές και αγγειακές επιπλοκές, και σε σοβαρές

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

περιπτώσεις, ακόμη και σε εγκατάλειψη της συσκευής (Herr. H., 2009); (Wood. R & Walsh. C, 2013).

Η αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική στον τομέα της προσθετικής, ειδικά για άτομα με ακρωτηριασμό κάτω άκρων, καθώς η υπολειμματική πρόσθεση και η προσθετική διεπαφή (δηλαδή η δομή της υποδοχής) φέρουν μεγαλύτερα φορτία (Paternò. L et.al, 2018). Μια προσέγγιση που αναπτύχθηκε πρόσφατα είναι η οστεοενσωμάτωση, η οποία επιτρέπει στην πρόσθεση να συνδεθεί απευθείας στο οστό του ασθενούς, αποκαθιστώντας τη μεταφορά φορτίου μέσω του οστού και ξεπερνώντας τα προβλήματα που σχετίζονται με την υποδοχή. Αν και η οστεοενσωμάτωση είναι η πιο πολλά υποσχόμενη προσέγγιση, παραμένει επεμβατική και δύσκολο να την αποδεχτούν οι ασθενείς.

Επιπλέον, αυτή η προσέγγιση αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις, κυρίως τον κίνδυνο μόλυνσης λόγω της διαδερμικής φύσης της (Overmann. A L & Forsberg. J A., 2020). Μια άλλη πολλά υποσχόμενη λύση μπορεί να είναι μια «έξυπνη» προσθετική υποδοχή. Αυτές οι τεχνολογίες ενσωματώνουν τεχνολογία αισθητήρων και ενεργοποιητή για τη βελτιστοποίηση της προσαρμογής και της κατανομής της πίεσης των ιστών μέσω αυτοματοποιημένης ρύθμισης κλειστού βρόχου (Sanders. J E et.al, 2019); (Weathersby. E J et.al, 2021).

Τα τελευταία χρόνια, ο τομέας των εξωσκελετών έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο, επωφελούμενος από την εφαρμογή του παραδείγματος της μαλακής ρομποτικής. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες λύσεις που βασίζονται σε υφασμάτινες άγκυρες (βλ Εικόνα 3.5A) και μαλακούς ενεργοποιητές (βλ Εικόνα 3.5B), με αποτέλεσμα σχέδια εξωσκελετών να μοιάζουν περισσότερο με κοστούμια παρά με ρομπότ (Wood. R & Walsh. C., 2013); (Masia. L et.al, 2018); (Walsh. C, 2018). Αυτά τα σχέδια προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, ιδιαίτερα όσον αφορά τη φυσική αλληλεπίδραση, καθώς εξαλείφουν την ανάγκη για ακριβή ευθυγράμμιση με τις φυσικές αρθρώσεις του χρήστη και εξαλείφουν τους περιορισμούς κίνησης που προκαλούνται από το βάρος και τον όγκο. Ωστόσο, σε ορισμένες συγκεκριμένες περιοχές αποκατάστασης, τα άκαμπτα συστήματα παραμένουν η μόνη διαθέσιμη λύση και παραμένει σημαντικό περιθώριο βελτίωσης για την επίτευξη πραγματικά βιομιμητικών συστημάτων και την αποδοχή των χρηστών, ιδιαίτερα όσον αφορά την άνεση (Pons. J L, Witnessing a wearables transition, 2019); (Xiloyannis. M et.al, 2021).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Σε αυτό το πλαίσιο, η ενσωμάτωση της μαλακής ρομποτικής και της επιστήμης των υλικών παρουσιάζει μοναδικές δυνατότητες, επιτρέποντας τη δημιουργία φορητών διεπαφών με νέες λειτουργίες που βασίζονται στις συντονίσιμες μηχανικές ιδιότητες των υλικών τους και τη μορφολογική προσαρμοστικότητα των δομών τους. Η συνεχής πρόοδος στην τεχνολογία CAD-CAM προσφέρει μια ελκυστική οδό για την ανάπτυξη βιομιμητικών υλικών με όλο και πιο πολύπλοκες δομές (Studart. A R, 2016).

Ετερογενή πολυλειτουργικά σύνθετα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εξατομικευμένες διεπαφές ανθρώπου-μηχανής (pHMIs) για την επίτευξη διαφορετικών βαθμών ακαμψίας και απόδοσης απόσβεσης. Αυτές οι διεπαφές μπορούν να σχεδιαστούν και να αναπτυχθούν με βάση τις ιδιότητες του υποκείμενου ιστού και το σχήμα του άκρου (Sengeh. D M & Herr. H, 2013); (Petron. A Duval. J F & Herr. H, 2017); (Paternò. L et.al., 2020). Μπορούν επίσης να συνδυαστούν με συστήματα ενεργοποίησης για να αντισταθμίσουν σημαντικές αλλαγές όγκου και σχήματος, διασφαλίζοντας μακροπρόθεσμη συμμόρφωση.

Από αυτή την άποψη, το ενεργό pHMI ρομποτικό σύστημα καρπού που προτείνεται από τους (Choi. W H et.al, 2019) προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη λύση, συνδυάζοντας μια μαλακή δομή πολλαπλών στρωμάτων με έναν μηχανοκίνητο κορσέ για αποτελεσματική εφαρμογή δύναμης και μετάδοση (βλ Εικόνα 3.5C). Αντίστοιχα, στον τομέα της προσθετικής, έχουν προταθεί ηλεκτροκίνητες πρίζες που ενσωματώνουν επενδύσεις σιλικόνης (βλ Εικόνα 3.5D).

Εναλλακτικά, μπορούν να ενσωματωθούν ενεργές διεπαφές με ευρέως φάσματος συντονίσιμες ιδιότητες ακαμψίας και απόσβεσης για τη βελτίωση της αλληλεπίδρασης με τον βιολογικό ιστό (Kornbluh. R et.al, 2004). Αυτό μπορεί να παρέχει μια πιο στιβαρή διεπαφή συσκευής όταν απαιτείται βιομηχανική σταθερότητα, ενώ σε άλλες περιπτώσεις, είναι επιθυμητή μια μαλακή, ευέλικτη και άνετη αλληλεπίδραση.

Οι ψευδοεπίπεδες τεχνικές σχεδίασης όπως η παρεμβολή στιβάδας με βάση το κενό (Choi. W H et.al, 2019); (Paternò.. L et.al, 2022) ή οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις είναι ιδιαίτερα υποσχόμενες προς αυτή την κατεύθυνση (Kornbluh. R et.al, 2004); (Herr. H, 2014); (Wang. T et.al, 2019). Επιπλέον, η ενσωμάτωση της τεχνολογίας κενού με μαλακούς πνευματικούς ενεργοποιητές έχει δείξει δυνατότητες ανάπτυξης ρυθμίσιμης ακαμψίας και μεταβλητών σχημάτων διεπαφής, ενισχύοντας έτσι την άνεση και την εφαρμογή φορητών συσκευών (βλ Εικόνα 3.5F) (Ibrahimi. M et.al, 2021).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Τα πνευματικά συστήματα μπορούν να αξιοποιήσουν μια ποικιλία πηγών ενέργειας για να καλύψουν τις ανάγκες φορητών εφαρμογών (Wehner.. M et.al, 2014). Επιπλέον, η ανάπτυξη συστημάτων συλλογής πνευματικής ενέργειας που βασίζονται σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα (Shveda. R A et.al, 2022) και η χρήση μαλακών βαλβίδων που μπορούν να αλλάζουν αυτόματα τη ροή αέρα (Rothemund. P et.al, 2018); (Kendre. S V et.al, 2022) ανοίγουν το δρόμο για την υπέρβαση των περιορισμών του τρέχοντος mechatronky εξαρτήματος.

Σε αυτό το πλαίσιο, τα ενεργά ρευστά υφάσματα που βασίζονται σε τεχνητές μυϊκές ίνες θα μπορούσαν να γίνουν μια επιτυχημένη λύση μαλακών ιστών. Ενεργοποίηση (βλ Εικόνα 3.5G) (Kurumaya. S et.al, 2019); (Zhu. M et.al, 2019); (Phan. P T et.al., 2022). Πράγματι, μπορούν να συνδυαστούν με έξυπνους αισθητήρες κλωστοϋφαντουργίας και τεχνολογίες ηλεκτρονικών υφασμάτων (βλ Εικόνες 3.5H-J) για να σχηματίσουν ψευδοεπίπεδα σχέδια, επιτρέποντας pHMI που μπορούν να προσαρμοστούν στην ανθρώπινη φυσιολογία με την πάροδο του χρόνου (Castano. L M & Flatau. A B, 2014); (Islam. G et.al, 2020).

Ένα pHMI για φορετά ρομπότ πρέπει επίσης να είναι εξοπλισμένο με αισθητήρες και ενεργοποιητές για αποκωδικοποίηση πρόθεσης και αισθητηριακή ανάδραση. Πράγματι, ένας ανθρωποκεντρικός βρόχος ελέγχου κλειστού βρόχου, συμπεριλαμβανομένης της εξόδου του απαγωγού κινητήρα και της εισόδου προσαγωγών αισθητήρων, είναι ζωτικής σημασίας για την ενοποίηση συσκευής-χρήστη.

Εστιάζοντας σε μη εμφυτεύσιμες, αμφίδρομες φυσικές διεπαφές, ορισμένες τεχνολογίες μπορούν να ενσωματωθούν σε εξωτερικά άκαμπτα στοιχεία φορητών ρομπότ, εξαλείφοντας την ανάγκη για άμεση επαφή με τον ιστό του χρήστη (π. Επειδή τα άκαμπτα εξαρτήματα αντιγράφουν συνήθως το σχήμα του σώματος του χρήστη και είναι κατασκευασμένα από θερμοδιαμορφώσιμα υλικά, τα ελαστικά ηλεκτρονικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη συμπαγών και ελαφρών σχεδίων, όπως φαίνεται στην (βλ Εικόνα 3.5E) (Bauwens. P et.al, 2020).

Αντίθετα, όταν απαιτείται άμεση επαφή με ιστό, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται διαλύματα που βασίζονται σε μαλακά, εύκαμπτα υλικά όπως υφάσματα ή ελαστομερή (π.χ. αισθητήρες ηλεκτρομυογραφίας (EMG)) (βλ Εικόνες 3.5H-J).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Η ενσωμάτωση πολλαπλών τεχνολογιών σε φορητές φυσικές διεπαφές αποτελεί σημαντική πρόκληση. Οι πρόσφατες εξελίξεις στις διαδικασίες παραγωγής, την επιστήμη των υλικών, τους υπολογιστές και τα μικροελαστικά ηλεκτρονικά έχουν επιταχύνει την εμφάνιση μιας νέας κατηγορίας υλικών. Αυτά τα υλικά επιτρέπουν την ενσωμάτωση στοιχείων υπολογιστών και επικοινωνίας, καθώς και αισθητήρων και ενεργοποιητών, σε ολοένα πιο συμπαγή και αποτελεσματικά σχέδια (McEvoy. M A & Correll. N, 2015).

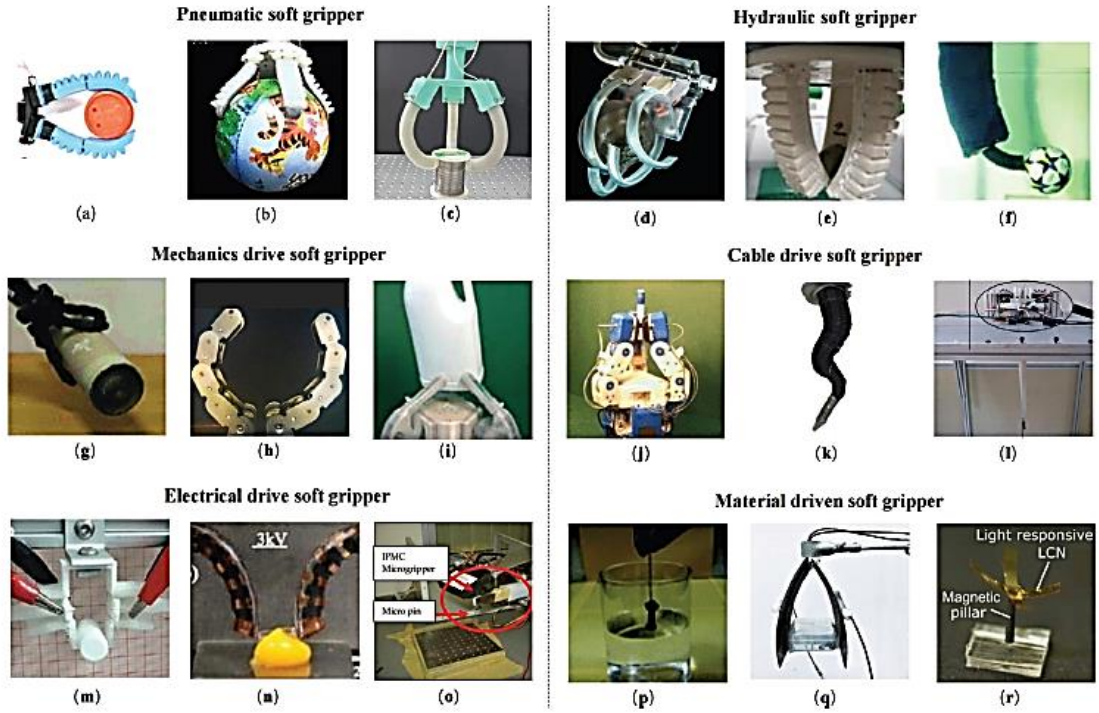
Αυτά τα λεγόμενα «ρομποτικά υλικά» μπορούν να αλλάξουν όχι μόνο την ακαμψία τους αλλά και το σχήμα τους ή άλλες φυσικές παραμέτρους και είναι πλήρως προγραμματιζόμενα. Η έννοια των ρομποτικών υλικών βασίζεται στην ανάπτυξη τεχνολογιών μικροκλίμακας που μπορούν να αντιληφθούν τις ιδιότητες του υλικού, να τις χειριστούν και να ενεργοποιήσουν τις επιθυμητές λειτουργίες. Όλες αυτές οι τεχνολογίες πρέπει να ενσωματωθούν σε μια συνεχή δομή κατασκευασμένη από το ίδιο το υλικό.

Αν και αυτή η προσέγγιση βρίσκεται ακόμα στα αρχικά της στάδια, η τεράστια πρόοδος στην τεχνολογία κλωστοϋφαντουργίας, τη μαλακή ρομποτική και την επιστήμη των έξυπνων υλικών τις τελευταίες δεκαετίες έχει ανοίξει νέους δρόμους για την επίτευξη αυτού του στόχου (Sanchez. V et.al, 2021). Η κατεύθυνση των ρομποτικών υλικών είναι ιδιαίτερα ελκυστική για την ανάπτυξη φορητών διεπαφών που δεν είναι απλώς παθητικές άκαμπτες δομές αλλά μάλλον «ρομποτικά δέρματα» χρησιμοποιώντας μαλακά και άνετα υλικά ως συνεχείς δομές σε επαφή με το ανθρώπινο σώμα. Μπορεί να ανιχνεύει τους χρήστες, να ανταλλάσσει πληροφορίες με τους χρήστες και να προσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο μέσω ενός κλειστού βρόχου ελέγχου για να ανταποκρίνεται στις διάφορες ανάγκες των χρηστών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

4 Κεφάλαιο: Τεχνολογία κίνησης Μαλακών Ρομποτικών Αρπάγων

Για τη βελτίωση της απόδοσης των μαλακών λαβών, οι ευέλικτες και αποτελεσματικές λειτουργίες λαβής είναι ζωτικής σημασίας. Οι ερευνητές έχουν αναπτύξει διαφορετικές τεχνολογίες ενεργοποίησης για τη λειτουργία ευαίσθητων μαλακών λαβών σύμφωνα με τις απαιτήσεις κάθε συγκεκριμένης εργασίας λαβής (βλ Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1 Μαλακές λαβές με διαφορετικές αρχές ενεργοποίησης: a–c) Πνευματικά ενεργοποιούμενες μαλακές λαβές, οι οποίες χαρακτηρίζονται από γρήγορη ταχύτητα απόκρισης αλλά απαιτούν παροχή αέρα. Ανατύπωση με άδεια (Teeple. C B et.al, 2020) Πνευματικά δικαιώματα 2020, Wiley. Ανατύπωση με άδεια (Hao. Y et.al, 2017) Πνευματικά δικαιώματα 2017, Εκδόσεις SAGE. Ανατύπωση με άδεια (Cheng. P et.al, 2022) Πνευματικά δικαιώματα 2022, American Society of Mechanical Engineers.d-f) Υδραυλικά ενεργοποιούμενες μαλακές λαβές. Η υδραυλική και η πνευματική κίνηση έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Ανατύπωση με άδεια (Sinatra. N R et.al, 2019) Πνευματικά δικαιώματα 2019, American Association for the Advancement of Science. Ανατύπωση με άδεια (Chen. G et.al, 2021) Πνευματικά δικαιώματα 2021, Elsevier. Ανατύπωση με άδεια (Wang. H et.al, 2020) Πνευματικά δικαιώματα 2020, IEEE. g-i) Ηλεκτρικά ενεργοποιούμενες μαλακές λαβές, οι οποίες απαιτούν υψηλή τάση ενεργοποίησης. Ανατύπωση με άδεια (Li. J Sun. M & Wu. Z, 2021) Πνευματικά δικαιώματα 2021, Mary Ann Liebert, Inc., Publishers. Ανατύπωση με άδεια από (Lau. G.-K et.al, 2017) Πνευματικά

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

δικαιώματα 2017, AIP Publishing LLC. Ανατύπωση με άδεια από (Jain. R et.al, 2011) Πνευματικά δικαιώματα 2011, Εκδόσεις SAGE. i-l) Μαλακές λαβές που ενεργοποιούνται με καλώδιο, που απαιτούν καλώδια και κινητήρες (Bemfica. J R et.al, 2014), (Wang.. H et.al, 2013), (Maghooa. F et.al, 2015). Ανατύπωση με άδεια από (Bemfica. J R et.al, 2014) Πνευματικά δικαιώματα 2014, IEEE. Ανατύπωση με άδεια από (Wang.. H et.al, 2013)Πνευματικά δικαιώματα 2013, IEEE. Ανατύπωση με άδεια από (Maghooa. F et.al, 2015) Πνευματικά δικαιώματα 2015, IEEE. m-o) Μηχανικά ενεργοποιούμενες μαλακές λαβές, με στιβαρές δυνατότητες ανύψωσης φορτίου. Ανατύπωση με άδεια από (D. Mura et.al, 2018) Πνευματικά δικαιώματα 2014, IEEE. Ανατύπωση με άδεια από (Sakagami. N Takeuchi. K & Koganezawa. K, 2020) Πνευματικά δικαιώματα 2020, IEEE. Ανατύπωση με άδεια από (Bemfica. J R et.al, 2014) Πνευματικά δικαιώματα 2013, Elsevier. p–r) Μαλακές λαβές που ενεργοποιούνται από υλικό, των οποίων τα χαρακτηριστικά απόδοσης εξαρτώνται από το δομικό υλικό. Ανατύπωση με άδεια (Eroğlu. M & Şam Parmak E D, 2022) Πνευματικά δικαιώματα 2022, Taylor & Francis. Ανατύπωση με άδεια (Zhang. Z et.al, 2022) Πνευματικά δικαιώματα 2022, Mary Ann Liebert, Inc., Publishers. Ανατύπωση με άδεια (Pilz da Cunha. M et.all, 2020)Πνευματικά δικαιώματα 2020, Εθνική Ακαδημία Επιστημών.

4.1 Μέθοδοι ενεργοποίησης

Σε γενικές γραμμές, η λειτουργία πίεσης είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, η οποία χρησιμοποιεί πνευματικά και υδραυλικά συστήματα για να καθοδηγήσει εύκαμπτα υλικά για να ολοκληρώσει το έργο της σύλληψης αντικειμένων.

Η μηχανική μετάδοση κίνησης, ως πιο ώριμη και σταθερή παραδοσιακή τεχνολογία μετάδοσης κίνησης, μπορεί να επιτύχει μια «*μαλακή*» μορφή μέσω μιας δομής πολλαπλών τμημάτων, η οποία είναι πιο ευέλικτη και ελεγχόμενη. Ταυτόχρονα, για την επίλυση συγκεκριμένων τεχνικών προβλημάτων, η ηλεκτρική κίνηση και η κίνηση σωματιδίων έχουν επίσης εισαχθεί στον τομέα των μαλακών λαβών (Shintake.. J et.al, 2018). Αυτή η ενότητα συγκρίνει και συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών μεθόδων κίνησης, όπως φαίνεται στην (βλ Εικόνα 4.2).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Actuate mode		Response speed	Load capacity	Equipment basics
Pneumatic actuation	Conventional pneumatic	Quick	Medium	–Air source equipment support
	Bionic pneumatic actuate	Quick	High	
Hydraulic actuation		Quick	Medium	–Liquid driven equipment
Mechanical actuation		Quick	High	–Motor and corresponding end effector
Cable driven		Quick	Medium	–Requires cable and motor
Electrical driven	DE	Quick	Medium	–Sophisticated high-voltage equipment
	IPMC			–Stable sealing equipment
	Conductive polymer			–High versatility with low power consumption
Special material driven	Particle interference	Slow	High	–External accommodating mechanism
	Self-folding film	Quick	Low	–Specific solution environment
	SMA	Slow	Medium	–Variable temperature conditions
	Heterogeneous hydrogels	Slow	Low	

Εικόνα 4.2 Comparison of several actuate methods

4.1.1 Πνευματική Ενεργοποίηση

Η πνευματική κίνηση είναι μια παραδοσιακή μέθοδος ελέγχου για μαλακές λαβές (Hughes.. J et.al, 2016); (Cheng. P et.al, Sensors, 2021); (Xiao. W et.al, 2022). Σε πρακτικές εφαρμογές, ο μαλακός βραχίονας χρησιμοποιείται συνήθως για τον εντοπισμό του σημείου εργασίας πρώτα και στη συνέχεια η μαλακή λαβή ολοκληρώνει την εργασία σύλληψης. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς της ελεγχόμενης κίνησης του πνευματικού ενεργοποιητή, η ανάπτυξη και η κατασκευή πολλαπλών μαλακών βραχιόνων είναι βασική απαίτηση.

Για παράδειγμα, οι (Liu.. J et.al, 2020) πρότεινε μια μαλακή ρομποτική λαβή που ονομάζεται SILVER2. Το SILVER2 επιτυγχάνει μεγαλύτερη ευελιξία από μια λαβή ενός βραχίονα μέσω της εγκάρσιας διάταξης των μαλακών βραχιόνων και έχει επαληθευτεί σε περιβάλλοντα βαθιάς θάλασσας. Επιπλέον, η εύκαμπτη κίνηση της πνευματικής μαλακής λαβής μελετήθηκε μέσω του σχεδιασμού ανάστροφης κάμψης (Gong. Z et.al., 2021), που διασφαλίζει την αποτελεσματική λειτουργία του προσαρμοστικού βραχίονα στο περιβάλλον εργασίας. Επιπλέον, υιοθετήθηκε και δοκιμάστηκε μια διφασική δομή με εγγύς πνευματική κίνηση (Teeple. C B et.al, 2020) για να επαληθευτεί η αποτελεσματικότητα σύλληψης της διφασικής συσκευής σε

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

διαφορετικά περιβάλλοντα. Η μαλακή λαβή με μαλακούς βραχίονες (Wang. H et.al, 2020) έχει μια πολύπλοκη δομή πολλαπλών τμημάτων και ταυτόχρονα έναν ευέλικτο σχεδιασμό πνευματικής κίνησης. Εκτός από τη μακροδομή, η μικροσκοπική σχεδίαση της μαλακής λαβής επηρεάζει επίσης την απόδοσή της. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να διεξαχθεί μια εις βάθος ανάλυση της διάταξης κίνησης (Hao. Y et.al, 2017) και να μελετηθεί η επίδραση της γωνίας σφήνας του άνω μέρους της κοιλότητας στην απόδοση της λαβής.

Οι (Vogt D M et.al, 2018) συζήτησαν συγκεκριμένα τις απαιτήσεις σχεδιασμού του υλικού προσάρτησης της μαλακής λαβής στην εφαρμογή σύλληψης βιολογικού δείγματος στο περιβάλλον βαθιάς θάλασσας και διεξήγαγε πειράματα μαλακής βιολογικής σύλληψης στη βαθιά θάλασσα για επαλήθευση. Σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς ενεργοποιητές πίεσης, ορισμένες μαλακές λαβές που βασίζονται σε βιομιμητικό σχεδιασμό (Eroğlu. M & Şam Parmak E D, 2022); (Zhuo. S et.al, 2020); (Cheng. P et.al, Sensors, 2021); (Kumamoto. H et.al, 2021) μπορούν επίσης να συνδυαστούν με πνευματικούς ενεργοποιητές για να επιτύχουν μοναδική απόδοση.

Οι αλλαγές της πίεσης του περιβάλλοντος μπορούν να επηρεάσουν σοβαρά την απόδοση διαφόρων ενεργοποιητών πίεσης. Επομένως, ο σχεδιασμός πνευματικών ενεργοποιητών λαμβάνοντας υπόψη την αντίσταση πίεσης είναι ένα σημαντικό ερευνητικό θέμα. Με την ενθυλάκωση μαλακών υλικών με σχεδιασμό πολλαπλών στρώσεων, η κανονική λειτουργία των μαλακών εξαρτημάτων μπορεί να είναι εγγυημένη ακόμη και σε περιβάλλοντα υψηλής διαφοράς πίεσης (Liu. C-H et.al, 2022), (Wang.. H et.al., 2022).

4.1.2 Υδραυλική ενεργοποίηση

Προκειμένου να ξεπεραστεί η υψηλή πίεση του περιβάλλοντος του βυθού, μια μέθοδος οδήγησης με βάση το υδραυλικό σύστημα έχει επίσης εφαρμοστεί στο σχεδιασμό εύκαμπτων (μαλακών) ενεργοποιητών λαβής (Xu. F & Wang. H S, 2021); (Lavigne. Q et.al, 2019), (Qu. T et.al, 2019). Η πιο παραδοσιακή μέθοδος υδραυλικής οδήγησης είναι παρόμοια με την πνευματική οδήγηση, η οποία ελέγχει τη συνολική αλλαγή διαμόρφωσης μέσω του υδραυλικού καναλιού που είναι ενσωματωμένο μέσα στην εύκαμπτη μήτρα του σώματος (Chen. G et.al, 2021). Προκειμένου να αποφευχθεί η επίδραση της πίεσης στην ίδια την εύκαμπτη λαβή, σχεδιάστηκε ένα ανοιχτό (Nie. S

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

et.al, 2020) υδραυλικό σύστημα οδήγησης για να επιτύχει το προσαρμοστικό αποτέλεσμα της υδραυλικής οδήγησης μέσω της σύνδεσης μεταξύ της υδραυλικής πηγής και του περιβάλλοντος. Επιπλέον, μια ανεξάρτητη υδραυλική μονάδα οδήγησης προτάθηκε σε αναφορά (Shen. Z et.al, 2020), η οποία επιτρέπει ομαλές λειτουργίες σύλληψης σε πραγματικά πολύπλοκα περιβάλλοντα.

4.1.3 Μηχανική Ενεργοποίηση

Η μέθοδος οδήγησης με βάση την πίεση έχει ισχυρή καθολικότητα για διάφορα εύκαμπτα υλικά, αλλά έχει επίσης το πρόβλημα της δυσκολίας ελέγχου. Η μέθοδος μηχανικής κίνησης εκτελεί απευθείας μηχανική μετάδοση μέσω μιας άκαμπτης δομής πολλαπλών στρωμάτων και είναι μια πιο σταθερή τεχνολογία μετάδοσης κίνησης.

Για παράδειγμα, ο Mura (Mura. D et.al, 2018) σχεδίασε ένα ρομπότ πολλαπλών τμημάτων με κίνηση πολλαπλών κινητήρων για υποβρύχιες εργασίες σύλληψης. Η μορφή κίνησης κινητήρα υιοθέτησε επίσης ένα σχέδιο τεσσάρων συνδέσμων (Bemfica.. J R et.al, 2013). Ομοίως, οι (Sakagami. N Takeuchi. K & Koganezawa. K, 2020) κατασκεύασαν μια αρπάγη δομής πολλαπλών συνδέσμων και μια πιο εύκαμπτη μηχανικά κινούμενη εύκαμπτη λαβή έγινε μέσω ενός μηχανισμού διαφορικού γραναζιού με ρυθμιζόμενη ακαμψία.

Η μηχανικά κινούμενη εύκαμπτη λαβή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με ένα υποβρύχιο ρομπότ (ROV) (Rawashdeh. N & Abu-Alrub. N, 2021), γεγονός που αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της λαβής σε πραγματικό υποβρύχιο περιβάλλον.

4.1.4 Ενεργοποίηση μέσω Καλωδίων

Η ενεργοποίηση καλωδίου είναι επίσης μια αποτελεσματική μέθοδος ενεργοποίησης για εύκαμπτες λαβές σιλικόνης. Κατά τη λειτουργία, η κάμψη της εύκαμπτης κατασκευής επιτυγχάνεται τραβώντας το προεγκατεστημένο καλώδιο. Η λαβή με καλώδιο (Bemfica. J R et.al, 2014) μπορεί να σχεδιαστεί ως συνδεδεμένη κίνηση 8 μοιρών ελευθερίας (8-DOF). Επιπλέον, η λαβή είναι εξοπλισμένη με αισθητήρα ροπής για βελτίωση του ελέγχου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Από (Wang. H et.al., 2013), προτείνεται ένας εύκαμπτος βραχίονας από καουτσούκ που αποτελείται από ένα μεγάλο τμήμα με καλώδιο, το οποίο μπορεί να επιτύχει αμφίδρομη κάμψη. Μέσω ενός υβριδικού συστήματος ενεργοποίησης που συνδυάζει ένα καλώδιο και ένα πνευματικό σύστημα, οι τένοντες του βιονικού βραχίονα χταποδιού μετατοπίζονται (Maghooa. F et.al, 2015), επιτυγχάνοντας έτσι ένα κράτημα με ρυθμιζόμενη ακαμψία. Σύμφωνα με τους (Kang. R et.al, 2017), η λειτουργία ακριβούς τοποθέτησης της ενεργοποίησης του καλωδίου βελτιστοποιείται περαιτέρω. Όσον αφορά την ενεργοποίηση του καλωδίου, η περαιτέρω μηχανική βελτιστοποίηση μέσω δυναμικής μοντελοποίησης είναι επίσης ένας σημαντικός τομέας έρευνας. Στην αναφορά (Renda. F & Laschi. C, 2012), οι ερευνητές διεξήγαγαν μια λεπτομερή ανάλυση των δυνάμεων που εφαρμόζονται στην επιφάνεια επαφής του καλωδίου μέσω δυναμικής ανάλυσης. Εξετάζοντας τη μηχανική των ρευστών, πέτυχαν περαιτέρω την επέκταση της λειτουργίας σε υποβρύχια περιβάλλοντα. Επιπλέον, η δυναμική μοντελοποίηση μιας λαβής που ενεργοποιείται με καλώδιο (Rucker. D C & Webster. R J III, 2011) ενσωματώθηκε στην ανάλυση, διευκολύνοντας τη βελτιστοποίηση του εύκαμπτου ρομπότ κάτω από εξωτερικά φορτία.

4.1.5 Ηλεκτρική ενεργοποίηση

Όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται σε ένα συγκεκριμένο υλικό, προκαλεί αντιδράσεις παραμόρφωσης όπως συστολή και διαστολή. Αυτό το φαινόμενο χρησιμοποιείται συχνά για την προσομοίωση της συστολής των βιολογικών μυών. Οι μέθοδοι ηλεκτρικής ενεργοποίησης έχουν προσελκύσει σταδιακά το ενδιαφέρον των ερευνητών λόγω των χαρακτηριστικών των εύκαμπτων λαβών όπως το μικρό βάρος και η αθόρυβη λειτουργία.

Μια εύκαμπτη λαβή κατασκευασμένη από σύνθετο πολυμερές μέταλλο (IPMC) είναι μια ηλεκτρικά κινούμενη δομή που λειτουργεί υπό τη δράση ηλεκτρικού πεδίου (Jain.. R K et.al, 2011). Μια άλλη ηλεκτρικά κινούμενη εύκαμπτη λαβή (Li. J Sun. M & Wu. Z, 2021) είναι εμπνευσμένη από τη διαδικασία μετατροπής υγρών χαμηλού σημείου βρασμού σε ατμό και μπορεί να λειτουργήσει υπό ηλεκτροθερμικές συνθήκες. Επιπλέον, σχεδιάστηκε ένας σωληνωτός ενεργοποιητής πέντε τμημάτων που βασίζεται σε διηλεκτρικό ελαστομερές (DEA) (Xing. Z et.al, 2020). Προκειμένου να επιτευχθεί

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

συνεχής συνολική παραμόρφωση, κάθε τμήμα της λαβής ελέγχεται ανεξάρτητα από ένα τροφοδοτικό υψηλής τάσης πολλαπλών καναλιών.

Η ηλεκτρική ενεργοποίηση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για εύκαμπτη παραμόρφωση αγώγιμων πολυμερών. Αν και η αρχή λειτουργίας του είναι παρόμοια με αυτή των DEA και IPMC, τα αγώγιμα πολυμερή (Mutlu. R Alici. G & Li. W, 2016) έχουν τα δικά τους μοναδικά χαρακτηριστικά. Σε σύγκριση με τις απαιτήσεις υψηλής τάσης των παραδοσιακών ενεργοποιητών EAP, οι ενεργοποιητές αγώγιμου πολυμερούς απαιτούν μόνο τάση έως 1 V και συχνότητα περίπου 4 Hz για να επιτύχουν ενεργοποίηση (Mutlu. R Alici. G & Li. W, 2016). Αυτό επιτρέπει την ευρεία εφαρμογή ηλεκτροκίνητων υλικών σε εύκαμπτες κινήσεις σύσφιξης.

Ταυτόχρονα, η δύναμη σύσφιξης που μπορεί να προσφέρει είναι εντυπωσιακή σε σχέση με το βάρος του ίδιου του υλικού (Alici. G & Huynh. N N, 2007). Είναι προβλεπόμενο ότι λόγω των χαμηλών απαιτήσεων κατανάλωσης ενέργειας και των εξαιρετικών ιδιοτήτων παραμόρφωσης, αυτό το αγώγιμο πολυμερές θα αντικαταστήσει τις DEA και IPMC σε ελαφριές εφαρμογές στο μέλλον και θα εξελιχθεί σε ένα πιο εύκαμπτο ηλεκτροκίνητο υλικό.

4.1.6 Άλλες μεθόδους ενεργοποίησης

Ο ειδικός σχεδιασμός του ίδιου του υλικού μπορεί να επιτύχει τη μετατροπή κατάστασης μεταξύ σταθερής δομής και εξαναγκασμένης κλειστής δομής, η οποία είναι μια σημαντική κατεύθυνση για την ενεργοποίηση των εύκαμπτων λαβών. Οι εύκαμπτες λαβές μεμβράνης γεμάτοι σωματίδια (Licht. S et.al, 2018); (Capalbo. C E et.al, 2022); (Licht.. S et.al, 2016) αναγκάζονται να κλείνουν σύμφωνα με την αρχή της παρεμβολής σωματιδίων, επιτυγχάνοντας έτσι την προσαρμοστική σύλληψη αντικειμένων διαφορετικών σχημάτων.

Μια άλλη μέθοδος ενεργοποίησης υλικού βασίζεται σε μια μεμβράνη διπλής στρώσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες, συνδυάζοντας την ευελιξία με τον έλεγχο. Σε αυτό το πλαίσιο, μια δομή μεμβράνης με ικανότητα αυτοαναδίπλωσης (Eroğlu. M & Şam Parmak E D, 2022) εφαρμόζεται σε περιβάλλον λύσης για την εκτέλεση εργασιών σύλληψης. Η αλλαγή των ιδιοτήτων των εύκαμπτων υλικών μπορεί να επιτρέψει στις εύκαμπτες λαβές να επιτύχουν καλή προσαρμοστική σύλληψη, ωστόσο, το πρόβλημα των δύσκολων λειτουργιών σύλληψης εξακολουθεί να υφίσταται.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Προκειμένου να επιτευχθεί απλούστερη απόδοση σύλληψης, υιοθετείται ένας μηχανισμός οδήγησης που βασίζεται σε ένα δισταθερό υλικό, ο οποίος επιτρέπει την εκτέλεση της εργασίας σύλληψης και επιτυγχάνει απλή και αποτελεσματική σύλληψη με μετατροπή μεταξύ δύο σταθερών καταστάσεων (Zhang. Z et.al, 2022). Επιπλέον, η ενεργοποίηση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας πολυφασικές υδρογέλες (Zhuo. S et.al, 2020); (Shiblee. M D N I et.al, 2019) μέσω της αλλαγής φάσης των υλικών υδρογέλης σε διαφορετικές θερμοκρασίες, η οποία είναι μια μέθοδος ενεργοποίησης υλικού που συνδυάζει ευελιξία και ελεγχόμενη απόκριση.

4.2 Αισθητήρες και έλεγχος

Ένα πλήρες και αποτελεσματικό σύστημα ελέγχου είναι ζωτικής σημασίας για την απόδοση των εύκαμπτων λαβών και ο ορθολογικός σχεδιασμός του έχει γίνει ένα σημαντικό ερευνητικό θέμα στον τομέα των εύκαμπτων λαβών. Εκτός από τους βασικούς ενεργοποιητές, το παραδοσιακό σύστημα ελέγχου των εύκαμπτων λαβών αποτελείται κυρίως από δύο μέρη:

1. Το σύστημα αισθητήρων χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και παρακολούθηση πληροφοριών που σχετίζονται με το εύκαμπτο σώμα και το περιβάλλον (Zhong. H et.al, 2020). και
2. Η στρατηγική ελέγχου χρησιμοποιείται για την ενοποίηση πληροφοριών αισθητήρων για τη λήψη αποφάσεων (Hughes. J et.al., 2016); (Li. R & Peng. B, 2022).

4.2.1 Σχεδιασμός συστήματος αισθητήρων

Λόγω των εγγενών δομικών περιορισμών των ευέλικτων αισθητήρων, τα συστήματα αισθητήρων παρακολούθησης παρουσιάζουν σημαντικές προκλήσεις. Για την προσαρμογή στη διαδικασία εύκαμπτης παραμόρφωσης του αισθητήρα, χρησιμοποιούνται εύκαμπτοι αισθητήρες που μπορούν να ακολουθήσουν την παραμόρφωση για την παρακολούθηση και την ανίχνευση της κατάστασης του αισθητήρα. Η εκτίμηση κατάστασης που βασίζεται στον εγγενή δομικό σχεδιασμό του αισθητήρα και σε συνδυασμό με σχετική υπολογιστική ανάλυση δεδομένων είναι επίσης μια σημαντική κατεύθυνση για την αντίληψη της κατάστασης του συστήματος.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Ωστόσο, τα περισσότερα τέτοια συστήματα αισθητήρων αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της ανεπαρκούς πληροφόρησης. Για να εξασφαλιστούν επαρκείς πληροφορίες και να ξεπεραστούν οι περιορισμοί της εγγενούς δομής του εύκαμπτου αισθητήρα, η χρήση εξωτερικών αισθητήρων για την παρακολούθηση της κατάστασης του αισθητήρα είναι επίσης μια σημαντική ερευνητική κατεύθυνση.

4.2.1.1 Παραδοσιακοί πρόσθετοι αισθητήρες

Η προσθήκη παραδοσιακών αισθητήρων χωρίς να επηρεάζεται η λειτουργία ευέλικτων αισθητήρων είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος επίλυσης του προβλήματος της αντίληψης κατάστασης τέτοιων συστημάτων. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες καταπόνησης μπορούν να συνδεθούν με εύκαμπτους αισθητήρες για τη μέτρηση της στρεπτικής τους κατάστασης (Gullapalli. H et.al, 2010); (Zhou. J et.al, 2008); (Liao. Q et.al, 2013). Η απτική αντίληψη (Bemfica.. J R et.al, 2013) μπορεί να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση οπτοηλεκτρονικών στοιχείων σε αισθητήρες πολλαπλών τμημάτων μέσω μιας μήτρας σιλικόνης.

Επιπλέον, οι ερευνητές παρατήρησαν την περιστροφή του άξονα του κινητήρα μέσω ενός μαγνητικού κωδικοποιητή και χρησιμοποίησαν πληροφορίες ανίχνευσης πολλαπλών τμημάτων για να συμπεράνουν την κατάσταση του εύκαμπτου αισθητήρα (Mura. D et.al, 2018).

Προκειμένου να προσαρμοστούν στην εύκαμπτη παραμόρφωση κατά τη λειτουργία του αισθητήρα, χρησιμοποιούνται ειδικοί πρόσθετοι αισθητήρες κατασκευασμένοι από ειδικά υλικά για την ανίχνευση της κατάστασης του συστήματος (Liu. R et.al, 2021); (Xie. Z et.al, 2020); (Hao. Y et.al., 2020); (Huang. J et.al, 2022). Ένας τυπικός εύκαμπτος πρόσθετος αισθητήρας είναι ένα εξαιρετικά εύκαμπτο πολυμερές τρανζίστορ (Someya) τοποθετημένο σε ένα υπόστρωμα PDMS για ανίχνευση πίεσης (Mannsfeld. S C B et.al, 2010); (Someya. Tet.al, 2004); (Schwartz. G et.al, 2013); (Noguchi. Y Sekitani. T & Someya. T, 2006).

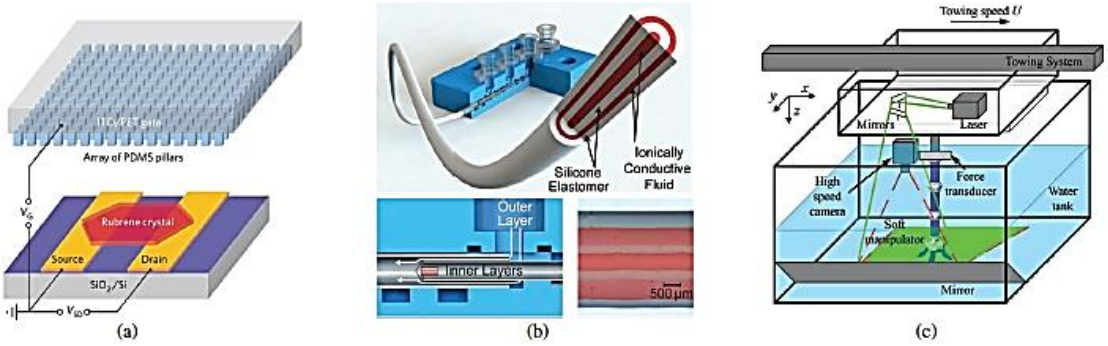
Επιπλέον, εύκαμπτοι ηλεκτρονικοί αισθητήρες βασισμένοι σε μεμβράνες νανοσωλήνων άνθρακα χρησιμοποιούνται επίσης για την ανίχνευση της παραμόρφωσης των εύκαμπτων αισθητήρων (Lipomi. D J et.al, 2011); (Chossat. J-B et.al, 2013). Ωστόσο, λόγω των περιορισμών των υλικών προετοιμασίας, αυτοί οι

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

ειδικοί εύκαμπτοι αισθητήρες έχουν προβλήματα όπως μικρό εύρος παραμόρφωσης και χαμηλή ευελιξία.

4.2.2 Άμεση ανίχνευση με βάση τις ιδιότητες των Υλικών

Λόγω των πολλών περιορισμών της ευέλικτης δομής της ίδιας της μαλακής λαβής, είναι μεγάλη πρόκληση να ενσωματωθούν αισθητήρες απευθείας στη μαλακή λαβή. Για να ξεπεραστεί αυτή η πρόκληση, πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να παρατηρήσουν άμεσα την κατάσταση του συστήματος αλλάζοντας τις ιδιότητες του υλικού του ενεργοποιητή (βλ Εικόνα 4.3 b).



Εικόνα 4.3 Για εύκαμπτες λαβές, η ευέλικτη αίσθηση μπορεί να εφαρμοστεί από τρεις διαφορετικές οπτικές γωνίες: Επιφανειακή ανίχνευση, Ενσωματωμένη δομή και Εξωτερικές πληροφορίες. Τα συμβατικά εύκαμπτα συστήματα ανίχνευσης λαβής έχουν σχεδιαστεί ως εξής: (a) Άμεση παρατήρηση τοποθέτησης με χρήση συμβατικών αισθητήρων. Ανατύπωση με άδεια από τους (Mannsfeld. S C B et.al, 2010). Πνευματικά δικαιώματα © 2010, Nature Publishing Group. (b) Ενσωματωμένη παρατήρηση με βάση τις ιδιότητες του υλικού. Ανατύπωση με άδεια από τους (Park. Y-L Chen. B-R & Wood. R-J, 2012). Πνευματικά δικαιώματα © 2012, IEEE. (c) Αυτόνομο σύστημα ανίχνευσης που βασίζεται σε φωτοηλεκτρικά σήματα. Ανατύπωση με άδεια από τους (Gong. Z et.al., 2021). Πνευματικά δικαιώματα © 2021, Εκδόσεις SAGE.

Μέσω του ολοκληρωμένου σχεδιασμού πιεζοηλεκτρικών υλικών, οι άνθρωποι έχουν συνειδητοποιήσει τη χαρακτηριστική αίσθηση καταπόνησης των εύκαμπτων υλικών, η οποία έχει αναφερθεί ευρέως στην έρευνα της μαλακής ρομποτικής (Zhou. J et.al, 2008); (Liao. Q et.al, 2013); (Mattmann. C Clemens. F & Tröster. G, 2008); (Luheng. W Tianhuai. D & Peng. W, 2009). Επιπλέον, οι άνθρωποι έχουν προτείνει σύνθετα πιεζοηλεκτρικά υλικά χρησιμοποιώντας πλέγμα κυτταρίνης (Gullapalli. H et.al, 2010) για την επίτευξη ανίχνευσης κατάστασης μεγαλύτερων παραμορφώσεων. Επιπλέον, οι πιεζοαντιστικές και χωρητικές μέθοδοι ανίχνευσης καταπόνησης που

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

βασίζονται στην τεχνολογία MEMS είναι επίσης σημαντικές ενσωματωμένες τεχνολογίες μέτρησης (Liu. H et.al, 2008); (Frutiger. A et.al, 2015); (Cai. L et.al, 2013).

Σε σύγκριση με τη σχεδίαση που χρησιμοποιεί ενσωματωμένα αισθητήρια υλικά, η παρακολούθηση της κατάστασης σύλληψης του μαλακού χειριστή μπλοκάροντας τη βιονική βεντούζα (Wu.. M et.al., 2013) έχει αποδειχθεί ότι είναι μια καινοτόμος μέθοδος. Επιπλέον, με την προσθήκη αγώγιμου υγρού στο εσωτερικό του υλικού (Park. Y-L Chen. B-R & Wood. R-J, 2012), μπορεί να επιτευχθεί ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός των λειτουργιών οδήγησης και αίσθησης.

Τέλος, για μηχανικά ενεργοποιούμενους μαλακούς χειριστές (Sakagami. N Takeuchi. K & Koganezawa. K, 2020); (Bemfica. J R et.al, 2014), (Rawashdeh. N & Abu-Alrub. N, 2021), οι ιδιότητες των τμηματικά άκαμπτων υλικών μπορούν να αξιοποιηθούν για την επίτευξη άμεσης χαρτογράφησης της κατάστασης εκτέλεσης του μαλακού χειριστή.

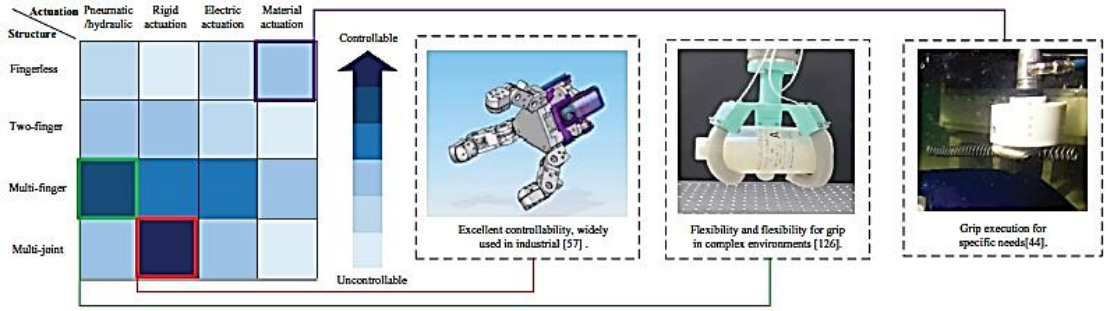
4.2.2.1 Φωτοηλεκτρικός αισθητήρας εξοπλισμός

Η κανονική διαδικασία εργασίας της μαλακής λαβής είναι πολύπλοκη και οι γενικοί αισθητήρες είναι δύσκολο να παρέχουν επαρκή υποστήριξη πληροφοριών. Επομένως, η παρατήρηση μέσω ενός εξωτερικού συστήματος φωτοηλεκτρικής αίσθησης (βλ Εικόνα 4.3 c) είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος αντίληψης πληροφοριών και το σύστημα πολλαπλών καμερών χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της διαδικασίας σύλληψης (Gong. Z et.al., 2021) και τοποθέτησης της μαλακής λαβής στο υδάτινο περιβάλλον. Το σύστημα οπτικής ανίχνευσης που βασίζεται στο OpenROV θέτει τα θεμέλια για σταθερή αντίληψη της κατάστασης της μαλακής λαβής (Yan. W & Mehta. A, 2023) και επιτυγχάνει σημαντικά αποτελέσματα ελέγχου κλειστού βρόχου.

Οι φωτοηλεκτρικοί αισθητήρες υψηλής ακρίβειας μπορούν να ανιχνεύσουν λεπτομερείς πληροφορίες πέρα από τη μακροσκοπική κατάσταση της μαλακής λαβής. Συγκεκριμένα, η εσωτερική κατάσταση του άκρου της μαλακής λαβής παρατηρείται χρησιμοποιώντας μια κάμερα (Winstone. B et.al, 2013) για να επιτευχθεί πιο ευαίσθητη αντίληψη κατάστασης. Σε μικροσκοπικό επίπεδο, η χρήση μικρο-νανο καμερών (Ramon-Soria. P et.al, 2019) συνειδητοποιεί την αντίληψη του τελικού τελεστή soft gripper και ολοκληρώνει τις εργασίες συντήρησης του αγωγού. Η χρήση ανελαστικών

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

οπτικών ινών (Park. Y-L et.al, 2007) και φωτοανιχνευτών (Puangmali. P et.al, 2008) βελτιώνει περαιτέρω την αποτελεσματικότητα των φωτοηλεκτρικών αισθητήρων στην αντίληψη της κατάστασης της μαλακής λαβής, καθιστώντας δυνατή την πλήρη παρακολούθηση της κατάστασης μέσω οπτικών σημάτων.



Εικόνα 4.4 Σύγκριση της δυνατότητας ελέγχου των μηχανισμών μαλακής λαβής που βασίζονται σε διαφορετικές δομές και μεθόδους ενεργοποίησης, καθώς και σε αρκετούς κοινούς τύπους μαλακής λαβής που χρησιμοποιούνται σήμερα. Ανατύπωση με άδεια από (Xu. Z & Todorov. E, 2016) Πνευματικά δικαιώματα 2010, Springer Nature. Ανατύπωση με άδεια από (Calisti. M et.al, 2011) Πνευματικά δικαιώματα 2012, IEEE. Ανατύπωση με άδεια από (D'Avella, 2020) Πνευματικά δικαιώματα 2021, Εκδόσεις SAGE.

4.3 Έλεγχος λειτουργίας μαλακής λαβής

Για τις μαλακές λαβές, ο αποτελεσματικός έλεγχος είναι θεμελιώδης προϋπόθεση για την απόδοσή τους. Επί του παρόντος, η πιο κοινή μέθοδος για τον έλεγχο των μαλακών λαβών είναι ο χειροκίνητος έλεγχος της λαβής μετά το σχεδιασμό της. Για να διευκρινιστεί η σχέση μεταξύ της μεταβλητής ελέγχου και του αποτελέσματος ελέγχου, έχουν χρησιμοποιηθεί διαδικασίες ελέγχου ανοιχτού βρόχου μέσω μοντελοποίησης και γραμμικής απεικόνισης. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση παραμένει ανεπαρκής για τον έλεγχο των μαλακών λαβών σε περιβάλλοντα με ισχυρές παρεμβολές. Ως εκ τούτου, τα συστήματα ελέγχου ανάδρασης κλειστού βρόχου έχουν σχεδιαστεί για να επιτυγχάνουν ισχυρά και αξιόπιστα αποτελέσματα ελέγχου.

4.3.1 Χειροκίνητος έλεγχος

Μεταξύ των παραδοσιακών μεθόδων ελέγχου για μαλακές λαβές, η πιο κοινή είναι η χειροκίνητη λειτουργία, δηλαδή ο ανθρώπινος έλεγχος χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας (βλ Εικόνα 4.5a). Η σφαιρική

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

μαλακή λαβή που βασίζεται στην αρχή του μπλοκαρίσματος σωματιδίων (Licht. S et.al, 2018) είναι μια σημαντική ερευνητική μέθοδος. Η μαλακή λαβή επιτυγχάνει το κράτημα ελέγχοντας χειροκίνητα τη θέση της και προσαρμόζεται στη ροή των σωματιδίων. Η μαλακή λαβή διπλής στρώσης (Eroğlu. M & Şam Parmak E D, 2022) μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί χειροκίνητα. Η μαλακή λαβή μπορεί να διπλωθεί σε υγρό περιβάλλον για να επιτευχθεί έλεγχος με τη βοήθεια του ανθρώπου. Ομοίως, η μαλακή λαβή που βασίζεται στη δομή θόλου διπλής στρώσης (Tang. Y-L & Yin. J, 2018) μπορεί επίσης να ελεγχθεί χειροκίνητα και ο αποτελεσματικός χειροκίνητος έλεγχος επιτυγχάνεται μέσω μιας γραμμικής λειτουργίας. Με βάση την υποβρύχια πλατφόρμα ROV, πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος της εύκαμπτης μαλακής λαβής ενισχυμένης με νανοΐνες (Sinatra. N R et.al, 2019) και η ικανότητά της να πιάνει τα μαλάκια επαληθεύτηκε μέσω υποβρύχιων πειραμάτων.

Προκειμένου να διασφαλιστεί η αποτελεσματικότητα της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-υπολογιστή, οι περισσότερες μαλακές λαβές που βασίζονται στον άμεσο χειροκίνητο έλεγχο έχουν σχεδιαστεί με καλή λειτουργία τελικού ενεργοποιητή και υπάρχει μια ισχυρή γραμμική σχέση μεταξύ ελέγχου και εξόδου. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος έχει επίσης μειονεκτήματα όπως μειωμένη ευαισθησία των αποτελεσμάτων ελέγχου και τεχνητούς περιορισμούς.

4.3.2 Μοντελοποίηση και έλεγχος μαλακής λαβής

Λαμβάνοντας υπόψη τα γραμμικά χαρακτηριστικά της πνευματικής εξόδου, η μέθοδος άμεσης αντιστοίχισης της εξόδου μέσω του ενεργοποιητή (βλ Εικόνα 4.5b) έχει γίνει μια κλασική μέθοδος ελέγχου για πνευματικούς μηχανισμούς μαλακής σύσφιξης (Chen. G et.al, 2021); (Hao. Y et.al, 2017); (Cheng. P et.al, Sensors, 2021); (Kurumaya. S et.al., 2018); (Sun. Y et.al, 2021). Ο (Teeple. C B et.al, 2020) ανέπτυξε περαιτέρω έναν πιο ευέλικτο μηχανισμό μαλακής σύσφιξης διπλής άρθρωσης μοντελοποιώντας και σχεδιάζοντας μια εγγύς κίνηση πολλαπλών αρμών.

Ωστόσο, αυτή η μέθοδος γραμμικής αναπαράστασης περιορίζεται από τη γραμμική σχέση και δεν μπορεί να επιτύχει υψηλή απόδοση ελέγχου. Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του μηχανισμού μαλακής σύσφιξης από την άποψη της ευελιξίας, χρησιμοποιείται επίσης η μέθοδος μοντελοποίησης αφηρημένης παραμόρφωσης σχήματος για τον έλεγχο του μηχανισμού (Gong. Z et.al, 2018).

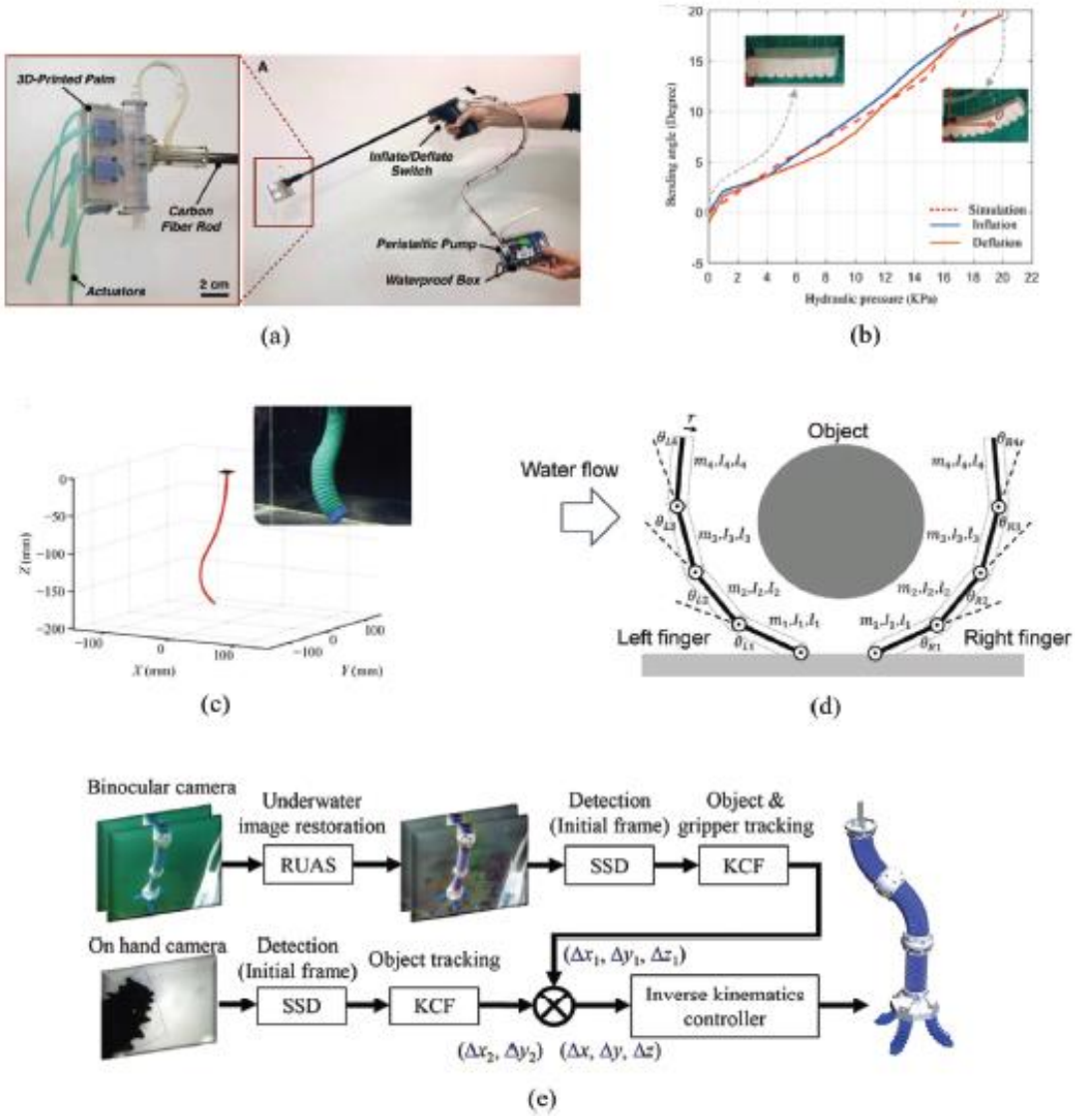
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Επιπλέον, ο (Nie. S et.al, 2020) καθιέρωσε ένα συγκεκριμένο μοντέλο μέσω της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, μελέτησε τη διαδικασία παραμόρφωσης του μηχανισμού μαλακής σύσφιξης και έδωσε τη συνολική διαδικασία ελέγχου κίνησης του μηχανισμού μαλακής σύσφιξης.

Για μαλακούς σφιγκτήρες που είναι διαφορετικοί από πνευματικούς ενεργοποιητές, η μοντελοποίηση της ίδιας της δομής του μηχανισμού (βλ Εικόνα 4.5c) είναι πιο σημαντική για τον έλεγχο. Ο δισταθής μηχανισμός μαλακής σύσφιξης που προτείνεται από το (Zhang. Z et.al, 2022) μπορεί να επιτύχει σταθερή απόδοση κάτω από απλές συνθήκες ελέγχου μέσω του σχεδιασμού δισταθερής δομής.

Ο πολυφασικός μηχανισμός μαλακής σύσφιξης υδρογέλης (Zhuo. S et.al., 2020) πρέπει να ολοκληρώσει τον έλεγχο συγκράτησης σύμφωνα με τον έλεγχο μεταβλητής θερμοκρασίας. Ο μηχανισμός μαλακής σύσφιξης που βασίζεται στην αρχή της απώθησης σωματιδίων (Capalbo. C E et.al, 2022) μπορεί να εξασφαλίσει άμεσα τη σταθερότητα του φαινομένου σύλληψης αλλάζοντας προσαρμοστικά το υλικό της επιφάνειας υπό την προϋπόθεση της ακριβούς τοποθέτησης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250



Εικόνα 4.5 Διαφορετικές διαδικασίες ελέγχου μαλακής λαβής: a) Μαλακή λαβή για πιάσιμο με χειροκίνητο έλεγχο. Ανατύπωση με άδεια από τους (Sinatra. N R et.al, 2019)], Copyright 2019, American Association for the Advancement of Science. b) Πνευματική λαβή για απευθείας χαρτογράφηση κίνησης. Ανατύπωση με άδεια από τους (Chen. G et.al, 2021), Copyright 2021, Elsevier. c) Έλεγχος συγκεκριμένων ενεργειών μέσω αφηρημένων μοντέλων. Ανατύπωση με άδεια από τους (Gong. Z et.al, 2018), Copyright 2018, Springer. d) Ακριβής έλεγχος με αλλαγή της γωνίας ροπής πολλαπλών αρθρώσεων. Ανατύπωση με άδεια από τους (Sakagami. N Takeuchi. K & Koganezawa. K, 2020), Copyright 2020, IEEE. e) Πνευματική λαβή για σύστημα κλειστού βρόχου που βασίζεται σε ανάδραση εικόνας. Ανατύπωση με άδεια από τους (Gong. Z et.al., 2021), Copyright 2021, SAGE Press.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

4.3.2.1 Έλεγχος μαλακής λαβής με βάση τη μηχανική κίνηση

Όσον αφορά τον έλεγχο, σε σύγκριση με τις μαλακές λαβές από άλλα υλικά, η μαλακή λαβή με δομή πολλαπλών τμημάτων και μηχανική κίνηση δείχνει καλύτερη δυνατότητα ελέγχου και στιβαρότητα (βλ Εικόνα 4.5d). Η μοντελοποίηση και η ανάλυση με βάση την κινηματική μήτρα της μαλακής λαβής πολλαπλών συνδέσμων (Rawashdeh. N & Abu-Alrub. N, 2021) επέτυχε αποτελεσματικό έλεγχο του μηχανισμού.

Οι (Sakagami. N Takeuchi. K & Koganezawa. K, 2020) επέκτειναν περαιτέρω τον έλεγχο της δομής πολλαπλών τμημάτων και καθιέρωσε ένα τρισδιάστατο μοντέλο της διαδικασίας ελέγχου βασισμένο σε έναν μηχανισμό πολλαπλών τμημάτων με ρυθμιζόμενη ακαμψία. Τα πλεονεκτήματα του σταθερού ελέγχου της μηχανικής κατασκευής πολλαπλών τμημάτων επαληθεύτηκαν μέσω μιας σταθερής και ελεγχόμενης διαδικασίας προσομοίωσης.

4.3.2.2 Έλεγχος ανάδρασης βάσει συστημάτων αισθητήρων

Οι περισσότερες από τις προαναφερθείσες παραδοσιακές στρατηγικές ελέγχου μοντελοποίησης ανήκουν σε στρατηγικές ελέγχου ανοιχτού βρόχου (βλ Εικόνα 4.5e). Δεδομένου ότι τα υλικά των μαλακών λαβών συχνά εμφανίζουν προφανή μη γραμμικά χαρακτηριστικά, αυτός ο μονόδρομος αλγόριθμος εξόδου είναι δύσκολο να επιτευχθεί τέλεια μη γραμμική προσαρμογή σε περιβάλλοντα παρεμβολών, με αποτέλεσμα ρυθμιζόμενα σφάλματα ελέγχου.

Ο έλεγχος ανάδρασης που βασίζεται σε συστήματα αισθητήρων έχει γίνει ένα σημαντικό ερευνητικό θέμα για τη μείωση του σφάλματος ελέγχου των μαλακών λαβών. Λόγω της δυσκολίας τοποθέτησης των αισθητήρων σε μαλακές δομές, οι (Wu. M et.al., 2022) ανίχνευσαν έξυπνα την κατάσταση σύλληψης μέσω της κατανομής απόφραξης της βεντούζας της μαλακής λαβής, και σε αυτή τη βάση, πέτυχε έλεγχο κλειστού βρόχου για να ολοκληρώσει την εργασία σύλληψης.

Επιπλέον, οι ερευνητές τακτοποίησαν αισθητήρες στον μηχανισμό πολλαπλών σταδίων μηχανικής μετάδοσης κίνησης, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τους στόχους εφαρμογής λογισμικού (Mura. D et.al, 2018) όσο και τον έλεγχο κλειστού βρόχου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Αισθητήρες απτικής κανονικής δύναμης (Bemfica.. J R et.al, 2013) χρησιμοποιήθηκαν επίσης στον μηχανισμό μαλακής λαβής και ο συντονισμένος έλεγχος μεταξύ του δακτύλου και του μηχανισμού λαβής επιτεύχθηκε μέσω της στρατηγικής «*διαίρει και βασίλευε*».

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

5 Κεφάλαιο: Σχεδιασμός, Προσομοίωση και Κατασκευή

Η ανάπτυξη της μαλακής ρομποτικής πηγάζει από την ανάγκη για ρομποτικά συστήματα που μπορούν να χειριστούν αντικείμενα διαφορετικών σχημάτων και ευαισθησιών. Σε αντίθεση με τις άκαμπτες λαβές, οι μαλακές λαβές χρησιμοποιούν υλικά χαμηλού συντελεστή λαβής και βιομιμητικά σχέδια της Young modulus όπως έχουν αναλυθεί, για να επιτύχουν ευέλικτη προσαρμοστικότητα και να ελαχιστοποιήσουν τη ζημιά σε εύθραυστα φορτία.

5.1 Γενική περιγραφή

Τα παρακάτω περιγράφουν συνοπτικά τον σχεδιασμό, την προσομοίωση και την κατασκευή μιας ελαστικής μαλακής ρομποτικής λαβής:

5.1.1 Σχεδιασμός

- Ο σχεδιασμός των ελαστομερών μαλακών ρομποτικών λαβών εστιάζει στη χρήση ελαστικών υλικών (όπως σιλικόνη ή μαλακά θερμοπλαστικά) για την επίτευξη υψηλής ευελιξίας και ασφάλειας όταν πιάνετε μικρά, ευαίσθητα αντικείμενα (Rothemund. P et.al, 2018); που αναφέρεται στο (Xu. M et.al., 2024).
- Η τρέχουσα έρευνα εισάγει μεταβλητή ακαμψία μέσω τεχνικών διαταραχής (όπως η διαταραχή σωματιδίων ή η διαταραχή στρώματος) για να προσαρμόσει το στυλ λαβής στο αντικείμενο που χειρίζεται (El-Sayed. A M, 2025).

5.1.1.1 Απαιτήσεις και Αρχές

Οι μαλακές λαβές στοχεύουν στην επίτευξη ασφαλούς επαφής, συμμόρφωσης και ανοχής σε σφάλματα με αντικείμενα που κυμαίνονται από μερικά χιλιοστά έως πολλά εκατοστά σε διάμετρο (π.χ. μούρα, ηλεκτρονικά εξαρτήματα). Τα ελαστομερή (σιλικόνη, TPU/TPE) έχουν χαμηλή ακαμψία και επιτρέπουν μεγάλη παραμόρφωση. η επιλογή του υλικού επηρεάζεται από τον επιθυμητό συντελεστή τριβής, την υστέρηση και την αντοχή στην κόπωση. Μια πρόσφατη ανασκόπηση παραθέτει τα κύρια σχήματα δακτύλων (μονός/πολλαπλός θάλαμος, φυσούνες, διάφραγμα) και δομές λαβής (πνευματικό, υποβοηθούμενο από κενό, μαγνητικά ενεργοποιημένο, ιοντικό), μαζί με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους (Wang. X et.al, 2024).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

5.1.1.2 Μεταβλητή ακαμψία και υλικά

Για μικρά αντικείμενα, η μεταβλητή ακαμψία μπορεί να μειώσει την ολίσθηση και να βελτιώσει τη σταθερότητα της λαβής. Λύσεις όπως η σύσφιξη περιστρεφόμενης στρώσης ενσωματώνονται απευθείας στο σώμα του δακτύλου μέσω πολυμερούς εκτύπωσης και ενθυλάκωσης κενού, επιτρέποντας υψηλότερη επιτάχυνση κίνησης χωρίς να θυσιάζεται η δύναμη λαβής (Zhu. M et.al., 2024).

Εν τω μεταξύ, τα μαγνητορεολογικά ελαστομερή (MREs) με μόνιμους μαγνήτες μπορούν να παρέχουν χαμηλής ενέργειας αυτοκλειόμενες αρπάγες, οι οποίες είναι χρήσιμες σε πνευματικά δύσκολες καταστάσεις (Bernat. J et.al, 2024). Το εκτυπωμένο με FFF TPE/TPU είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές παραγωγής/τροφίμων, προσφέροντας υγιεινή σχεδίαση, εύκολο καθάρισμα και χαμηλό κόστος αντικατάστασης (Navas. E et.al, 2024).

5.1.1.3 Μορφολογία και διεπαφή δακτύλων

Από σχεδιαστική άποψη, το σχήμα φυσούνας/διαφράγματος επιτρέπει σχεδόν μονοαξονική κάμψη με ευκολότερο έλεγχο, ενώ οι μικρουφές/πλευρές στην επιφάνεια επαφής αυξάνουν την τριβή χωρίς να προσθέτουν σκληρά ένθετα. Πρόσφατη έρευνα διερεύνησε τη χρήση μαγνητοελαστικών ενισχυμένων υλικών (σφαιρικές μαγνητικές αλυσίδες) για ελεγχόμενη κάμψη (Hu. F & Liu Y, 2024).

5.1.2 Προσομοίωση

Τα εργαλεία προσομοίωσης περιλαμβάνουν:

- Ένα ψηφιακό δίδυμο μοντέλο Webots που βασίζεται στη διακριτοποίηση άκαμπτων συνδέσμων (RLD), όπου οι παράμετροι βελτιστοποιούνται χρησιμοποιώντας τη βελτιστοποίηση σμήνος σωματιδίων (PSO) για την επίτευξη ρεαλιστικής συμπεριφοράς (Hadi. Y W et.al, 2024).
- Χρήση τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης και βελτιστοποίησης για την επίτευξη τοπολογιών πολλαπλών υλικών για το σχεδιασμό λαβών για συγκεκριμένες εφαρμογές (π.χ. συλλογή φρούτων) (Pinskier. J et.al., 2022).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

5.1.2.1 Υλικά και Μοντελοποίηση

Η ελαστομερής απόκριση απαιτεί υπερελαστικά μοντέλα (Neo-Hookean, Ogden, Yeoh) και μπορεί να υπάρχει πορώδης υπερελαστικότητα όταν υπάρχουν κοιλότητες/ρευστά. Ένα πρόσφατα αναπτυγμένο πλαίσιο βελτιστοποίησης πορώδους υπερελαστικής τοπολογίας για πνευματικούς ενεργοποιητές μπορεί να σχεδιάσει αυτόματα κανάλια/τοίχους με περιορισμούς μετατόπισης/πίεσης, κάτι που είναι πολύ χρήσιμο για τα μικροδάχτυλα (Mehta. S & Poulios. K, 2025).

5.1.2.2 Ρεαλισμός, Ταυτοποίηση και Συνπροσομοίωση

Για να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ μοντέλου και πραγματικότητας: (α) προσδιορίζονται παράμετροι από πειράματα πίεσης-όγκου-κάμψης. (β) απλοποίηση του μοντέλου για γρήγορη ανακύκλωση (π.χ. γραμμικό μοντέλο με ομαδοποιημένη δέσμη ή RLD) και (γ) συν-προσομοίωση με ROS/URDF και ψηφιακά δίδυμα μοντέλα για έλεγχο/προγραμματισμό της λαβής. Μια ανασκόπηση της εφαρμογής αισθητήρων και ενεργοποιητών σε εφαρμογές ιατρικής τεχνολογίας δείχνει ότι η ακριβής κατασκευή πρωτοτύπων είναι ζωτικής σημασίας για την ασφαλή επαφή με μαλακούς ιστούς - ειδικά όταν ο στόχος είναι μικρά, εύθραυστα εξαρτήματα (Wang. Y Xie. Z Huang. H & Liang. X, 2024).

5.1.2.3 Έλεγχος/Αντίληψη

Τα σχέδια μικρών λαβών επωφελούνται από την έμμεση ανίχνευση (π.χ. εκτίμηση επαφής με βάση την πίεση/ροή εισόδου) και από αισθητήρες χαμηλού προφίλ (αγωγιμότητα, πιεζοηλεκτρική αντίσταση, οπτικές ίνες). Η πρόσφατη βιβλιογραφία σχετικά με τους αισθητήρες που είναι ενσωματωμένοι σε μαλακές λαβές υπογραμμίζει την τάση προς υλικά αισθητήρων που είναι συμβατά με μεγάλες παραμορφώσεις και σήματα χαμηλού θορύβου (Hegde. C et.al, 2023).

5.1.3 Κατασκευή

Οι κύριες μέθοδοι κατασκευής περιλαμβάνουν:

- Υψηλή καθαριότητα επιφάνειας, ενσωματωμένα κανάλια με αφαιρούμενους πυρήνες. η κλασική «συνταγή» παραμένει το σημείο αναφοράς για τα φουσκωτά ελαστομερή δάχτυλα (Marchese. A D Katzschmann. R K & Rus. D, 2015).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

- Η τρισδιάστατη εκτύπωση με εύκαμπτα θερμοπλαστικά παρέχει οικονομικές, επαναλαμβανόμενες και εύκολα αντικαταστάσιμες δομές, όπως για μικρές λαβές φρούτων (Navas. E et.al, 2024).
- Συνδυάζοντας ένα μαλακό μαγνητορεολογικό ελαστομερές (MRE) με έναν μόνιμο μαγνήτη για αυτοκλειόμενες λαβές με εύκαμπτο κράτημα (Bernat. J et.al, 2024).

5.1.3.1 Πρακτικές Παράμετροι

- Επιλογή σιλικόνης/TPU με βάση τη σκληρότητα Shore A, την επιμήκυνση στο σπάσιμο και την κυκλική καταπόνηση. Πρόσφατη έρευνα δείχνει ότι η ακριβής πρόβλεψη του χρόνου σκλήρυνσης των σιλικονών με βάση την πλατίνα μπορεί να μειώσει τα απόβλητα και να αυξήσει την παραγωγικότητα, κάτι που είναι κρίσιμο για την παραγωγή πρωτοτύπων μικρής κλίμακας (Rice University, 2024).
- Σφράγιση και ποιότητα: Για πνευματικά δάχτυλα, η εκτύπωση μικρών πάχους (π.χ. φυσούνα 0,8 mm) απαιτεί χαμηλότερες ταχύτητες και ελεγχόμενη περιμετρική επικάλυψη. έχει τεκμηριωθεί μια πλήρης ρύθμιση FFF για TPE (Navas. E et.al, 2024).

5.1.3.2 Διαδικασία επικύρωσης μικρού αντικειμένου

1. Μετρολογία λαβής: Καμπύλες δύναμης-πίεσης για τυπικές γεωμετρίες 10-20 mm, δοκιμές ολίσθησης σε κεκλιμένο επίπεδο.
2. Ευαισθησία Υπερφόρτωσης: Δοκιμή διάτμησης με επαναπρογραμματιζόμενο κύκλο "πιάσε-κρατά-απελευθέρωση".
3. Σχεδιασμός αποστείρωσης/υγιεινής όπως απαιτείται (για τρόφιμα/βιοϋλικά).
4. Πριν από την ενσωμάτωση του χειριστή, πραγματοποιείται συν-προσομοίωση με το URDF/ROS για να «*δέσουν*» τις παραμέτρους ελέγχου με την ελαστική απόκριση (όπως τεκμηριώνεται στην πρόσφατη έρευνα λαβής μαλακού πεδίου).

☛ Η αρχή της συμπίεσης έχει μελετηθεί ευρέως λόγω των πλεονεκτημάτων της:

- απλή λειτουργία,
- χαμηλό κόστος,
- γρήγορη απόκριση και
- εύκολος έλεγχος.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Σημείωση: Για να γίνουν περισσότερο κατανοητά τα παραπάνω, θα ακολουθήσει μια μελέτη με τίτλο: «*Design, Fabrication and Analysis of Soft Robotic Grippers based on Passive Layer Jamming*» (**Σχεδίαση, Κατασκευή και Ανάλυση Μαλακών Ρομποτικών Σφιγκτήρων βασισμένων στην Παθητική Μέθοδο Εγκλωβισμού Στρώσεων**) που πραγματοποιήθηκε από τους (Li. M Yin. Z Huang. X & Liu. Q, 2023) και προτείνεται «***ένα μαλακό δάκτυλο μεταβλητής ακαμψίας που βασίζεται στην αρχή της παθητικής συμπίεσης του στρώματος***».

5.2 Θεωρητικό υπόβαθρο - Αρχή συμπίεσης στρώματος

‘Όπως έχει περιγραφεί και αναλυθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, η ανάπτυξη μαλακών ρομπότ έχει φέρει επανάσταση στον σχεδιασμό των παραδοσιακών άκαμπτων ρομπότ, καθιστώντας τα πιο ευέλικτα και καλύτερα ικανά να προσαρμόζονται σε μη ομοιόμορφους στόχους και αδόμητα περιβάλλοντα (Rus. D & Tolley. M T, 2015).

Οι μαλακοί χειριστές, κυρίως κατασκευασμένοι από εξαιρετικά ελαστικά υλικά όπως η σιλικόνη, έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των άκαμπτων χειριστών, ειδικά όταν αλληλεπιδρούν με εύθραυστα αντικείμενα, ανώμαλες επιφάνειες ή το ανθρώπινο σώμα (Dou. W et.al, 2021); (Shintake.. J et.al, 2018). Την τελευταία δεκαετία, οι ερευνητές εργάζονται για την ανάπτυξη μαλακών ρομποτικών δακτύλων για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών (Ilievski. F et.al, 2011); (Galloway. K C et.al, 2016). Παρά την πρόοδο, τα περισσότερα μαλακά δάχτυλα έχουν μέτρο Young παρόμοιο με αυτό των βιολογικών ιστών. Αυτό τους δίνει υψηλή περιβαλλοντική προσαρμοστικότητα, αλλά και περιορίζει τη δύναμη πρόσφυσης και την ικανότητα φόρτωσης.

Οι βιολογικοί μαλακοί ιστοί στη φύση έχουν τόσο υψηλή ευελιξία όσο και υψηλή αντοχή, όπως τα πλοκάμια του χταποδιού (Laschi. C et.al, 2012); (Wu. Q et.al, 2022), τα κουφάρια ελεφάντων (Burgner-Kahrs. J Rucker. D C & Choset. H, 2015) και τα ανθρώπινα δάχτυλα (Yap. H K Ng. H Y & Yeow. C-H, 2016); (Jiang. Y Chen. D Liu. C & Li J, 2019). Αυτή η ικανότητα αλλαγής της ακαμψίας σύμφωνα με τον στόχο ονομάζεται μεταβλητή ακαμψία. Η μεταβλητή ακαμψία είναι ζωτικής σημασίας για τα εύκαμπτα δάχτυλα επειδή τους επιτρέπει: Σε χαμηλή ακαμψία: προσαρμόζονται

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

εύκολα σε επιφάνειες διαφορετικών σχημάτων. Σε υψηλή ακαμψία: διατηρήστε το σχήμα κατά τη διάρκεια της λαβής και αντέχετε υψηλότερα φορτία.

Για την επίτευξη μεταβλητής ακαμψίας, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι :

- Ανταγωνιστική επίδραση (Al Abeach. L A T Nefti-Meziani. S & Davis. S, 2017); (Ham. K Han. J & Park. Y J, 2018); (Zhang. X Yan. J & Zhao. J.)
- Αρχή εμπλοκής (Wei. Y et.al, 2016); (Zhu. M et.al, 2019); (Shintake. J et.al., 2015)
- Υλικά χαμηλού σημείου τήξης (Yufei. H et.al, 2017)
- Υλικά μνήμης σχήματος (Wang. W & Ahn. S-H, 2017)
- Μαγνητορεολογικό υγρό (Nishida. T Okatani. Y & Tadakuma. K, 2016)
- Ηλεκτρολογικό υγρό (Kenaley. G L & Cutkosky. M R, 1989)

Μεταξύ αυτών, η αρχή Jamming έχει μελετηθεί ευρέως λόγω της απλής δομής, του χαμηλού κόστους και της γρήγορης ταχύτητας απόκρισης.

5.3 Δομή και κατασκευή

5.3.1 Στατική Σχεδιασμός

Με βάση την αρχή της παθητικής συμπίεσης του στρώματος, αυτή η εργασία προτείνει ένα νέο μαλακό δάκτυλο μεταβλητής ακαμψίας. Στο παράρτημα (βλ Εικόνα 7.1) που δείχνει τον εννοιολογικό σχεδιασμό του μαλακού δακτύλου. Το μαλακό δάχτυλο αποτελείται από τέσσερα κύρια συστατικά:

1. **Φουσκωτός θάλαμος**
2. **Θάλαμος συμπίεσης**
3. **Περιοριστικό μανίκι καταπόνησης**
4. **Μονάδα στρώματος αποκλεισμού**

- Ο φουσκωτός θάλαμος αποτελείται από πολλαπλά διαμερίσματα:
  - 10 διαμερίσματα συνολικά,
  - ημικυκλικό σχήμα με **ακτίνα 15 mm** και
  - πάχος τοιχώματος **3 mm**.

Ο θάλαμος συμπίεσης βρίσκεται **κάτω από τον φουσκωτό θάλαμο** και έχει πάχος **τοιχώματος 2 mm**.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Το χιτώνιο περιορισμού της καταπόνησης δίνει στο μαλακό δάχτυλο έναν μόνο βαθμό ελευθερίας (1 DoF).

Η πολυστρωματική μονάδα αποτελείται από πολλαπλά φύλλα υλικού,

- **μήκους 120 mm** και
- **πλάτος 24 mm**,
- ☛ τρία διαφορετικά είδη υλικών:
  - **πλαστικό φύλλο**,
  - **P1500 γυαλόχαρτο**,
  - **Γυαλόχαρτο P800**.

Αυτά τα υλικά επιλέχθηκαν λόγω των σημαντικών διαφορών τους στο συντελεστή τριβής. Ο φουσκωτός θάλαμος συνδέεται με έναν αεροσυμπιεστή μέσω μιας εισόδου πίεσης. Η θετική πίεση που εισάγεται προκαλεί:

- Το **δάχτυλο** να λυγίσει,
- Τα **τοιχώματα του θαλάμου** συμπίεσης για συμπίεση,
- Τα **στρώματα** να έρθουν σε στενή επαφή.
- Δημιουργείται **τριβή** και αυξάνεται η **ακαμψία**.

Συμπέρασμα: Η ακαμψία του δακτύλου μπορεί εύκολα να ελεγχθεί από την πίεση φουσκώματος. Αυτό το σύστημα επιτυγχάνει κάμψη και μεταβλητή ακαμψία χωρίς την ανάγκη κενού ή πρόσθετου εξοπλισμού ελέγχου.

5.3.2 Αρχή παθητικής συμπίεσης στρώσης

Για να μειωθεί ο πρόσθετος εξοπλισμός και να βελτιωθεί η ευελιξία του μαλακού δακτύλου, αναπτύχθηκε ένα νέο σύστημα μεταβλητής ακαμψίας με παθητική συμπίεση στρώματος παράρτημα (βλ Εικόνα 7.2a). Ο θάλαμος φουσκώματος και ο θάλαμος συμπίεσης με στρωμένες κυψέλες συνδέονται μεταξύ τους και η κατεύθυνση κάμψης περιορίζεται από το εξωτερικό κέλυφος.

Όταν ο θάλαμος φουσκώματος είναι ενεργοποιημένος:

- Τα **στρωματοποιημένα** κύτταρα συμπιέζονται **παθητικά** (βλ Εικόνα 7.2b).
- Η υψηλότερη πίεση αυξάνει την **ακαμψία**,
- επιτρέποντας την σύλληψη **βαρύτερων αντικειμένων**.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Στο παράρτημα (βλ Εικόνα 7.2c) δείχνει ένα σχηματικό διάγραμμα του δακτύλου πριν και μετά την κάμψη:

- Χωρίς **πίεση**: Το δάχτυλο παραμένει **χαλαρό** και **εύκαμπτο**.
- Όταν εφαρμόζεται **πίεση**: Τα διαμερίσματα διαστέλλονται, το δάχτυλο κάμπτεται και τα στρώματα έρχονται σε επαφή, δημιουργώντας τριβή (βλ Εικόνα 7.2d).

Υπολογισμός Τριβής

Η τριβή μεταξύ των στρωμάτων υπολογίζεται ως εξής:

$$f = \mu \cdot P \cdot W \cdot L$$

Όπου:

- ✓ f = δύναμη τριβής μεταξύ δύο στρωμάτων,
- ✓ μ = συντελεστής τριβής μεταξύ των φύλλων,
- ✓ P = πίεση φουσκώματος,
- ✓ W = πλάτος φύλλου,
- ✓ L = μήκος φύλλου.

Η **συνολική δύναμη τριβής** της συσκευής είναι:

$$F = (n-1) \cdot \mu \cdot P \cdot W \cdot L$$

Όπου:

n = ο αριθμός των στρώσεων.

Συμπέρασμα: Όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση, τόσο μεγαλύτερη είναι η τριβή → αυξάνεται η ακαμψία.

- ☛ Υπολογισμός ακαμψίας των δακτύλων

Περιστροφική ακαμψία *k* ορίζεται ως:

$$k = \frac{M}{\theta}$$

Όπου:

M = εφαρμοζόμενη ροπή,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

θ = γωνία περιστροφής.

- ☛ Ο τύπος υπολογισμού της ροπής είναι ο εξής:

$$M = F \cdot L'$$

Όπου **F** = εξωτερική δύναμη και **L′** = μήκος βραχίονα.

5.3.3 Διαδικασία παραγωγής

Αυτή η διαδικασία κατασκευής βασίζεται στη μέθοδο χαμένου κεριού για ολοκληρωμένη χύτευση.

- ☛ **Βήματα κατασκευής:**

1. Σχέδιο καλουπιού
   - Προετοιμασία του καλουπιού για το δάχτυλο και το κερί.
   - Εκτύπωση 3D εκτυπωτή.
2. Παρασκευή πυρήνα κεριού
   - Συναρμολόγηση το καλούπι κεριού (βλ Εικόνα 7.3a).
   - Έγχυση λιωμένου παραφινέλαιου.
   - Ψύξη και αφαίρεση τον πυρήνα του κεριού.
3. Συναρμολόγηση του μαλακού καλουπιού
   - Τοποθέτηση του καλουπιού, τον πυρήνα κεριού και το κέλυφος (βλ Εικόνα 7.3b).
   - Εφαρμογή παράγοντα απελευθέρωσης για εύκολο ξεκαλούπωμα.
4. Χύτευση σιλικόνης
   - Χρησιμοποίηση σιλικόνης **E620**.
   - Ανάμειξη των συστατικών **A** και **B** σε αναλογία **1:1**.
   - Τοποθέτηση σε θάλαμο κενού για να αφαιρέσετε τις φυσαλίδες αέρα.
   - Έγχυση στο καλούπι.
   - Παραμονή **6** ώρες και ξεφλουδίζεται.
5. Τοποθέτηση φύλλων **laminate**
   - Τοποθέτηση **6** φύλλων **lamnate** από κάθε υλικό (βλ Εικόνα 7.4).
   - Σύνδεση του θαλάμου στον σωλήνα αέρα για σφράγιση.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

5.4 Πειράματα και αποτελέσματα

5.4.1 Συντελεστής Τριβής Πολυστρωματικών Υλικών

Όταν ο ενεργοποιητής δακτύλου πολλαπλών κοιλοτήτων κάμπτεται υπό πίεση φουσκώματος, τα εξωτερικά τοιχώματα των θαλάμων συμπίεσης συμπιέζονται, αναγκάζοντας τις πολυστρωματικές μονάδες σε στενή επαφή. Για να διερευνηθεί η επίδραση των υλικών στη μεταβλητή ακαμψία, μετρήθηκαν οι συντελεστές τριβής τριών διαφορετικών υλικών:

- **Πλαστικό φύλλο,**
- **P1500 γυαλόχαρτο,**
- **Γυαλόχαρτο P800.**

Η πλατφόρμα μέτρησης κατασκευάστηκε σύμφωνα με το πρότυπο GB/T 10006 (βλ Εικόνα 7.5).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον **Πίνακα 5.1**:

Πίνακας 5.1

Α/Α	Υλικό	Συντελεστής τριβής υλικού (μ)
1	Πλαστικό φύλλο	Χαμηλό
2	P1500 γυαλόχαρτο	Μεσαίο
3	P800 γυαλόχαρτο	Ψηλό

Συμπέρασμα: Οι υψηλότεροι συντελεστές τριβής υποδηλώνουν μεγαλύτερη ακαμψία.

5.4.2 Πείραμα κάμψης

Για να αξιολογηθεί η επίδραση της πίεσης φουσκώματος στη μορφολογία κάμψης του μαλακού δακτύλου, η γωνία κάμψης (θ).

Το (θ) ορίστηκε ως βασική μέτρηση.

- Η πλατφόρμα μέτρησης (βλ Εικόνα 7.6) σχεδιάστηκε για να μετρήσει τη σχέση μεταξύ:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

- πίεση φουσκώματος (0-30 kPa, βήματα 5 kPa),
- γωνία κάμψης των δακτύλων,
- και το είδος του υλικού στη μονάδα πλαστικοποίησης.

Κάθε δοκιμή επαναλήφθηκε τρεις φορές και τα δεδομένα εξομαλύνθηκαν.

(βλ Εικόνα 7.7):

a) Κάμψη δακτύλων με γυαλόχαρτο P1500.

b) Καμπύλες γωνίας κάμψης έναντι πίεσης για τρία υλικά.

Σημείωση: Η σχέση πίεσης-κάμψης είναι σχεδόν γραμμική.

Υλικά με χαμηλότερους συντελεστές τριβής μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερη παραμόρφωση.

5.4.3 Πείραμα ακαμψίας

Η ακαμψία του μαλακού δακτύλου είναι βασικό κριτήριο για τη σταθερότητα της λαβής.

☛ **Η πλατφόρμα μέτρησης (βλ Εικόνα 7.8) περιλαμβάνει:**

- ένας αεροσυμπιεστής με ρυθμιστή θετικής πίεσης (0-30 kPa),
- ένας μετατροπέας δύναμης HP-50N,
- ένα κινούμενο στάδιο μετατόπισης για ακριβή έλεγχο.

Η μέτρηση επαναλήφθηκε **πέντε φορές** για κάθε κατάσταση και καταγράφηκε το **μέσο αποτέλεσμα**.

Αποτελέσματα (βλ Εικόνα 7.9):

- (a)-(c) Σχέσεις **δύναμης-μετατόπισης** σε διαφορετικές πιέσεις.
- (d)-(f) Επίδραση του τύπου υλικού στην ακαμψία.

Σύναψη:

- Η υψηλότερη πίεση οδηγεί σε υψηλότερη ακαμψία.
- Το υλικό με **υψηλότερο συντελεστή τριβής** (P800) παρουσιάζει καλύτερη ακαμψία, ενώ το **πλαστικό φύλλο** παρουσιάζει **χαμηλότερη ακαμψία**.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

5.4.4 Συγκριτικά Πειράματα

Για να επαληθευθεί η υπεροχή της παθητικής πλαστικοποίησης, συγκρίθηκαν τρεις τύποι δακτύλων:

1. **Μη ελασματοποιημένη μονάδα**
2. **Χρησιμοποιώντας γυαλόχαρτο P1500**
3. **Χρήση σωματιδίων (απόφραξη σωματιδίων)**

(βλ Εικόνα 7.10a):

- Σε **πίεση 20 kPa**, όλες οι συσκευές ενεργοποιήθηκαν με την ίδια αρχική **δύναμη 0,6 N**.
- Καθώς η μετατόπιση αυξήθηκε, η διαφορά στην **ακαμψία** αυξήθηκε:
    - Μη **ελασματοποιημένο δάκτυλο → χαμηλότερη ακαμψία**.
    - Χρήση **P1500 → υψηλότερη ακαμψία**.
    - Χρήση **σωματιδίων → ενδιάμεση απόδοση**.

(βλ Εικόνα 7.10b):

- Η επίδραση του αριθμού των στρωμάτων διερευνήθηκε.
- Από **2** έως **6 στρώσεις**, η **ακαμψία** αυξάνεται.
- Μετά από **6 στρώσεις**, η αύξηση δεν είναι σημαντική.

(βλ Εικόνα 7.10 c-d):

- **Σύγκριση**: Χωρίς συμπίεση, παθητική συμπίεση και ενεργή συμπίεση.
- Το ενεργό σύστημα είναι πιο άκαμπτο αλλά απαιτεί πρόσθετο εξοπλισμό κενού.
- Η απόδοση του παθητικού συστήματος κάτω από μεγάλες παραμορφώσεις ήταν παρόμοια με αυτή του ενεργού συστήματος.

5.4.5 Πειράματα Gripper

Για να επαληθευτεί η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθόδου, **σχεδιάστηκε ένας μαλακός χειριστής με τρία δάχτυλα**.

Πειραματική ρύθμιση (βλ Εικόνα 7.11):

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Εγκαταστάθηκε αισθητήρας δύναμης με ημισφαιρικό καπάκι.

Οι δυνάμεις λαβής καταγράφηκαν κατά την επαφή, τη σταθερή λαβή και την απελευθέρωση.

Αποτελέσματα (βλ Εικόνα 7.12):

- Όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση, τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη λαβής.
- Το **υλικό υψηλής τριβής (P800)** παρείχε καλύτερη απόδοση στο κράτημα.
- Τα αποτελέσματα του παθητικού χειριστή ήταν συγκρίσιμα με αυτά του ενεργού συστήματος.

(βλ Εικόνα 7.13):

- Ο χειριστής τριών δακτύλων δοκιμάστηκε με διάφορα αντικείμενα:
- Φράουλες, πορτοκάλια, μήλα, χαρτοπετσέτες, πένσες, σιλικόνη και
- Πλαστικά ποτήρια διαφόρων βαρών.

Σημείωση: Όλες οι εικόνες και τα διαγράμματα σχετικά με την δομή και την κατασκευή του νέου μαλακού δάκτυλου μεταβλητής ακαμψίας θα βρίσκονται στο Παράρτημα στο τέλος της πτυχιακής εργασίας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

6 Συμπεράσματα - Προτάσεις

Αυτή η πτυχιακή εργασία εξετάζει τις τεχνολογίες, τα υλικά, τις μεθόδους ενεργοποίησης, τις εφαρμογές και τις προκλήσεις των εύκαμπτων μαλακών ρομποτικών λαβών για το χειρισμό ελαφρών αντικειμένων. Συνδυάζοντας μια εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση με πειραματική ανάλυση δεδομένων, εξάγονται τα ακόλουθα 17 συμπεράσματα:

1. **Ταχεία Ανάπτυξη στο Πεδίο**

Η μαλακή ρομποτική είναι ένας από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους κλάδους της ρομποτικής, με την ερευνητική δραστηριότητα να αυξάνεται εκθετικά από το 2015 (Rus. D & Tolley M T, 2015). Η πρόοδος στα υλικά, τους αισθητήρες και τους αλγόριθμους επέτρεψε τη μετάβαση από τα θεωρητικά μοντέλα στα πρακτικά συστήματα.

2. **Πλεονεκτήματα έναντι των Rigid Grippers**

Οι παραδοσιακές άκαμπτες λαβές έχουν πολλούς περιορισμούς, όπως περιορισμένη προσαρμοστικότητα, υψηλό κίνδυνο ζημιάς και ανάγκη για πολύπλοκα συστήματα ελέγχου (Paik. J et al, 2021). Αντίθετα, οι μαλακές λαβές προσφέρουν μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα και ασφαλέστερη αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ (Shintake. J et.al, 2018).

3. **Ο Αποφασιστικός Ρόλος των Υλικών**

Η επιλογή υλικού είναι καθοριστική. Οι σιλικόνες, τα πολυμερή, τα ελαστομερή και τα μεταϋλικά διαθέτουν ιδιότητες όπως ευελιξία, ανθεκτικότητα και συμμόρφωση με την επαφή, επιτρέποντας την ασφαλή σύλληψη ευαίσθητων αντικειμένων (Hu. F, 2020).

4. **Καινοτόμες τεχνολογίες ενεργοποίησης**

Εκτός από τις παραδοσιακές πνευματικές και υδραυλικές μεθόδους, ενεργοποιητές που βασίζονται σε μαγνητική, θερμική, οπτική και διηλεκτρική διέγερση βρίσκονται επίσης υπό ανάπτυξη (Hu. F & Liu Y, 2024), διευρύνοντας τις δυνατότητες για αυτόνομο χειρισμό.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

5. **Ενσωμάτωση αισθητήρων και νοημοσύνης**

Η ενσωμάτωση απτικών, οπτικών και χωρητικών αισθητήρων σε μαλακές λαβές μπορεί να βελτιώσει τη σταθερότητα και την ακρίβεια της σύλληψης, επιτρέποντάς τους να προσαρμοστούν σε μη δομημένα περιβάλλοντα (Zhou. S et.al, 2024).

6. **Σημαντικές Επιδράσεις Τριβής και Πίεσης**

Πειραματικά αποτελέσματα από αυτή τη μελέτη δείχνουν ότι η αύξηση της πίεσης φουσκώματος αυξάνει σημαντικά τη δύναμη σύλληψης, ενώ η χρήση υλικών με υψηλό συντελεστή τριβής βελτιώνει τη σταθερότητα σύλληψης (Navas. E et.al, 2024).

7. **Ευελιξία ελαφρών αντικειμένων**

Οι μαλακές λαβές μπορούν να πιάσουν αποτελεσματικά εύθραυστα, ελαφριά ή ακανόνιστου σχήματος αντικείμενα, από φρούτα έως μικροσυσκευές, χωρίς να τα καταστρέψουν ή να τα παραμορφώσουν (Anyanwu. C et.al, 2025).

8. **Βιομιμητικός Σχεδιασμός**

Οι αρχές σχεδίασης που προέρχονται από τη φύση, όπως το κράτημα που μοιάζει με χταπόδι και οι δομές με πολλά δάχτυλα, βελτιώνουν την προσαρμοστικότητα και διευκολύνουν την σύλληψη γεωμετρικά πολύπλοκων αντικειμένων (Wu. M et.al, 2024).

9. **Εφαρμογές πολλαπλών πεδίων**

Οι ελαστομερείς μαλακές λαβές χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένων των αγροδιατροφών, της συσκευασίας, της ιατρικής ρομποτικής, της κλωστοϋφαντουργίας, της υποβρύχιας ρομποτικής και της μικροηλεκτρονικής (AboZaid. Y A et.al, 2024).

10. **Βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση**

Οι σύγχρονες μέθοδοι ενεργοποίησης μειώνουν το ενεργειακό αποτύπωμα, καθιστώντας αυτή την τεχνολογία κατάλληλη για Φορητά αυτόνομα ρομποτικά συστήματα (Caruso. F Shea. H & Cacucciolo. V, 2025).

11. **Βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων**

Η χρήση μαλακών λαβών μπορεί να μειώσει τη ζημιά σε ευαίσθητα προϊόντα, να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες, να βελτιώσει την υγιεινή και να αυξήσει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας παραγωγής (Liu. Y et.al, 2023).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

12. Συνδυασμός μαλακών και σκληρών εξαρτημάτων

Τα υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν μαλακά υλικά με σκληρά εξαρτήματα επιτυγχάνουν ανώτερη σταθερότητα και έλεγχο, παρέχοντας βελτιωμένη λειτουργικότητα σε βιομηχανικές εφαρμογές (Zhang. Y et.al, 2025).

13. Σταδιακή Επίτευξη Τυποποίησης Αξιολόγησης

Η ανάπτυξη κοινών μετρήσεων, διαδικασιών δοκιμών και προτύπων αποτελεί προϋπόθεση για την επίτευξη συγκρισιμότητας μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών και την προώθηση της εμπορικής εφαρμογής (Case. J C & Marvel. J A, 2024).

14. Προκλήσεις αντοχής υλικού

Η γήρανση, η φθορά και η υποβάθμιση της ανθεκτικότητας των ελαστομερών υπό ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες είναι επί του παρόντος ένα καυτό θέμα έρευνας, ειδικά σε απαιτητικές εφαρμογές (Shen. J et.al, 2025).

15. Βελτίωση της Συνεργατικής Ασφάλειας

Η ελαστικότητα των μαλακών λαβών μειώνει τον κίνδυνο προσωπικού τραυματισμού κατά τη συνεργασία με ρομποτικά συστήματα, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα των συνεργατικών ρομπότ (Soft Gripping, 2024).

16. Δυνατότητες Αυτόνομης Ρομποτικής

Ο συνδυασμός αισθητήρων, ευφυών αλγορίθμων και ευέλικτων μηχανισμών ενεργοποίησης καθιστά δυνατή την ενσωμάτωση μαλακών λαβών σε αυτόνομα κινητά ρομπότ και συστήματα παράδοσης (Pinskier. J et.al, 2022).

17. Μελλοντικές προοπτικές

Η τεχνολογία ελαστικής μαλακής λαβής έχει τη δυνατότητα να επαναπροσδιορίσει τον αυτοματισμό. Η ενσωμάτωση των ιδιοτήτων του που μιμούνται το ανθρώπινο άγγιγμα βελτιώνει την αποτελεσματικότητα και επιτρέπει ασφαλέστερες αλληλεπιδράσεις ανθρώπου-ρομπότ (Hawkes. E W, 2021).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

6.1 Προτάσεις

Μέσω μιας εκτεταμένης βιβλιογραφικής ανασκόπησης και πειραματικής έρευνας, αυτό το έγγραφο υπογραμμίζει τις δυνατότητες και τις προοπτικές των ελαστικών μαλακών ρομποτικών λαβών για το χειρισμό ελαφρών αντικειμένων. Ωστόσο, αυτές οι τεχνολογίες βρίσκονται ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης, δημιουργώντας ευκαιρίες για περαιτέρω έρευνα, βελτίωση και βιομηχανική εφαρμογή. Με βάση τα ευρήματα της έρευνας, η παρούσα εργασία προτείνει τις ακόλουθες συστάσεις:

1. **Τυποποίηση Μεθόδων Αξιολόγησης**

Η έλλειψη καθολικών μετρήσεων καθιστά δύσκολη τη σύγκριση διαφορετικών σχεδίων soft gripper (Rus. D & Tolley. M T, 2015). Συνιστάται να αναπτυχθεί ένα ενοποιημένο πρωτόκολλο δοκιμών που να λαμβάνει υπόψη τους ακόλουθους παράγοντες:

- μέγιστη δύναμη λαβής,
- κατανάλωση ενέργειας,
- υλική ζωή και ποσοστό επιτυχίας για κάθε κατηγορία αντικειμένων.

2. **Ενσωμάτωση ευφυών αισθητήρων**

Η ανάπτυξη λαβών που ενσωματώνουν αισθητήρες αφής, πίεσης, ολίσθησης και οπτικής αναγνώρισης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια και την προσαρμοστικότητα σε μη δομημένα περιβάλλοντα (Shintake. J et.al, 2018). Τέτοια συστήματα μπορούν να προσαρμόσουν δυναμικά τη δύναμη λαβής με βάση το σχήμα και την υφή του αντικειμένου.

3. **Ανάπτυξη ενεργειακώς αποδοτικών ενεργοποιητών**

Οι πνευματικοί ενεργοποιητές, ενώ είναι αποτελεσματικοί, καταναλώνουν πολλή ενέργεια (Paik. J et al, 2021). Συνιστάται περαιτέρω έρευνα για μαγνητοελαστικούς, οπτικά ελεγχόμενους, διηλεκτρικούς και θερμοευαίσθητους ενεργοποιητές. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να μειώσουν το βάρος και την κατανάλωση ενέργειας και να διευκολύνουν την ανάπτυξη φορητών και αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

4. **Βελτίωση της αντοχής του υλικού**

Η γήρανση, η κόπωση και η θερμική καταπόνηση στα ελαστομερή μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση της λαβής (Hu. F, 2020). Συνιστάται η ανάπτυξη νέων πολυμερών συνθέσεων με βελτιωμένη αντοχή στη φθορά και η ενσωμάτωση αυτο-θεραπευόμενων υλικών για την παράταση της διάρκειας ζωής της συσκευής.

5. **Επέκταση βιομιμητικής σχεδίασης**

Το Biomimicry έχει αποδειχθεί αποτελεσματικό στην επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων χειραγώγησης. Συνιστάται περαιτέρω έρευνα για δομές σε σχήμα χταποδιού, με πολλά δάχτυλα και σπειροειδείς δομές για τη βελτίωση της ικανότητας των αρπαγών να προσαρμόζονται σε ακανόνιστες γεωμετρίες (Wu. M et.al, 2024).

6. **Περαιτέρω Εφαρμογές στην Ιατρική Ρομποτική**

Η ενσωμάτωση των εύκαμπτων λαβών θα βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα των ιατρικών ρομπότ, ιδιαίτερα σε εφαρμογές ελάχιστα επεμβατικής χειρουργικής, φυσικοθεραπείας και αποκατάστασης. Συνιστώνται εξειδικευμένα σχέδια για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας και ήπιας αλληλεπίδρασης με ευαίσθητους ιστούς (Zhou. S et.al, 2024).

7. **Βελτιστοποίηση σχεδίασης μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης**

Η προηγμένη τεχνολογία 3D εκτύπωσης επιτρέπει την κατασκευή λαβών από πολλαπλά υλικά και ενσωματωμένες σε αισθητήρες. Αυτό μπορεί να μειώσει το βάρος, να βελτιώσει την απόδοση και να μειώσει το κόστος παραγωγής (Caruso. F Shea. H & Cacucciolo. V, 2025).

8. **Ανάπτυξη Υβριδικού Συστήματος**

Έχει προταθεί μια υβριδική λαβή, που συνδυάζει την ευελιξία ενός ελαστομερούς με την ακρίβεια των άκαμπτων μηχανικών εξαρτημάτων. Αυτή η προσέγγιση θα επιτύχει υψηλή σταθερότητα χωρίς να θυσιάζεται η ασφάλεια και η προσαρμοστικότητα (Zhang. Y et.al, 2025).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

9. Αυτονομία μέσω της Μηχανικής Μάθησης

Η ενσωμάτωση αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης θα μπορούσε να επιτρέψει στους soft grippers να μαθαίνουν από προηγούμενες ενέργειες, να αναγνωρίζουν αντικείμενα και να βελτιστοποιούν τις στρατηγικές σύλληψης σε πραγματικό χρόνο (Pinskier. J et.al., 2022). Αυτό θα τα καθιστούσε ιδανικά για αυτόνομα ρομποτικά συστήματα.

10. Προώθηση Βιομηχανικών Εφαρμογών

Για να επιτευχθεί η ευρεία υιοθέτηση των soft grippers, είναι απαραίτητη η συνεργασία μεταξύ ερευνητικών ιδρυμάτων, βιομηχανίας και κατασκευαστών. Η ανάπτυξη διεθνών προτύπων και κατευθυντήριων γραμμών θα διευκόλυνε την εφαρμογή τους σε τομείς όπως τα αγροδιατροφικά προϊόντα, η συσκευασία, η μικροηλεκτρονική και η υποβρύχια ρομποτική (AboZaid. Y A, 2024).

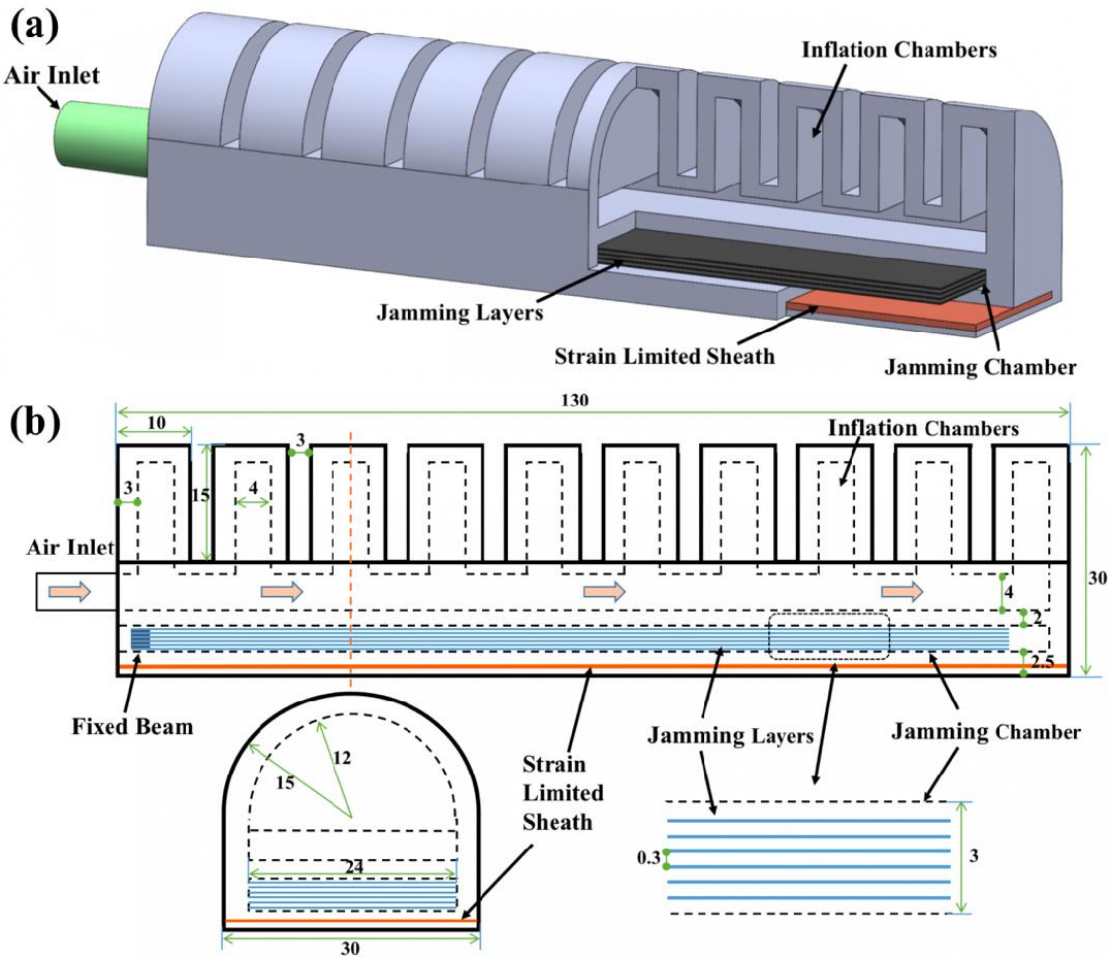
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Παράρτημα

Στο παράρτημα εδώ θα γίνει ακόμη πιο πολύ κατανοητό με την μορφή εικόνων και διαγραμμάτων, ο σχεδιασμός και η δομή μιας μαλακής λαβής, με την αρχή παθητικής συμπίεσης στρώσης.

Εικόνες:

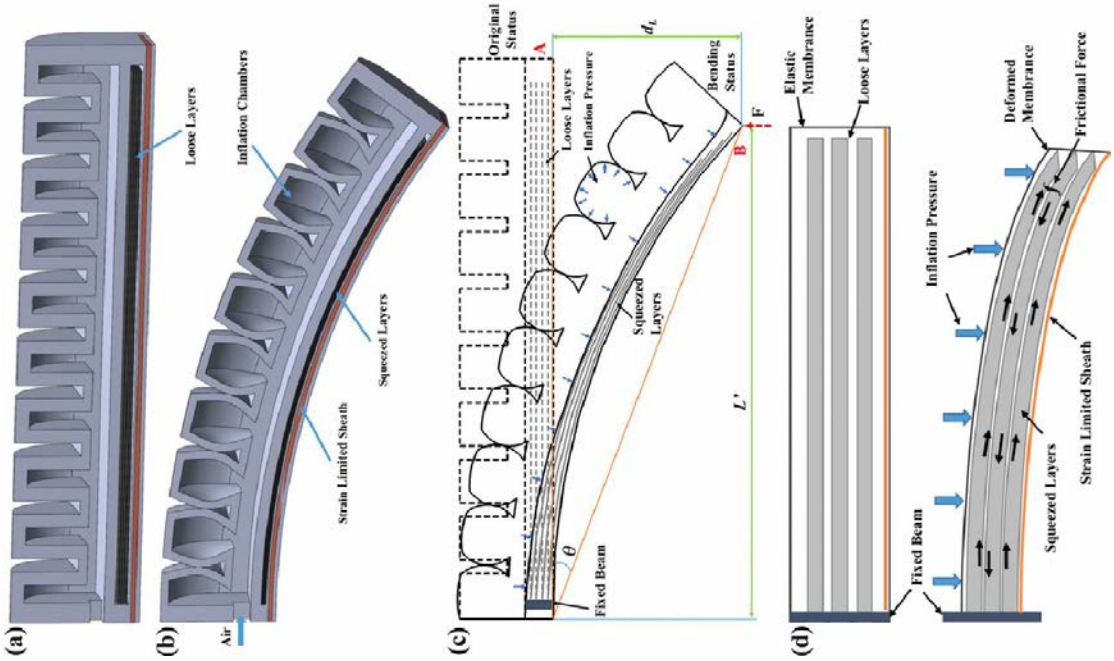
1)



Εικόνα 7.1 Σχεδιαστική ιδέα ενός μαλακού «δακτύλου» διπλής κοιλότητας με παθητική παρεμβολή στρώματος: (α) Δομικό διάγραμμα. (β) Λεπτομερείς διαστάσεις.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

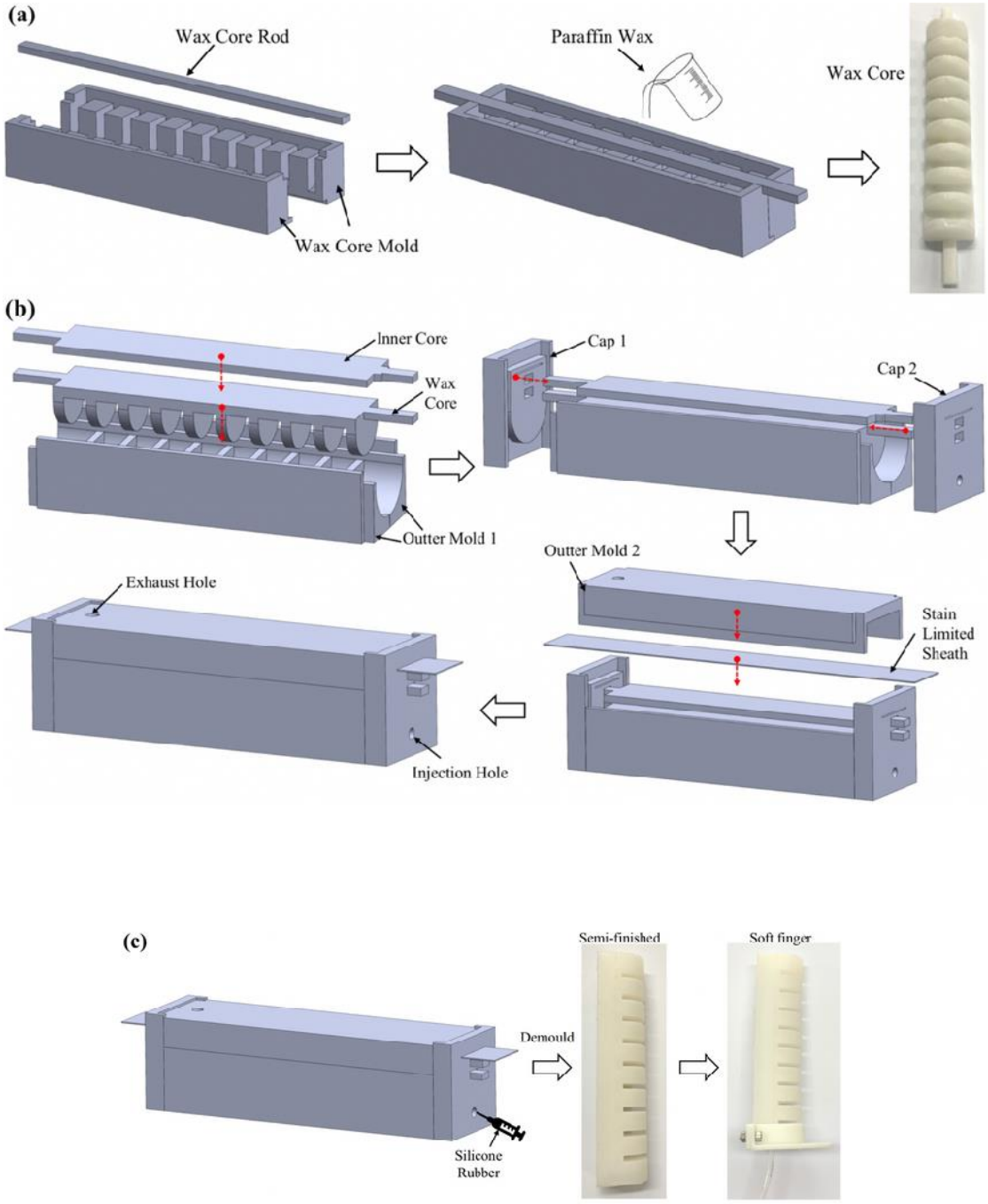
2)



Εικόνα 7.2 Διατομή εύκαμπτου «δακτύλου»: (a) Αρχική κατάσταση. (b) Κεκαμμένη κατάσταση. (c) Σχηματικό διάγραμμα μορφολογικής συμπεριφοράς. (d) Σύγκριση μονάδας κάρτας στρώσης πριν και μετά την κάμψη.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

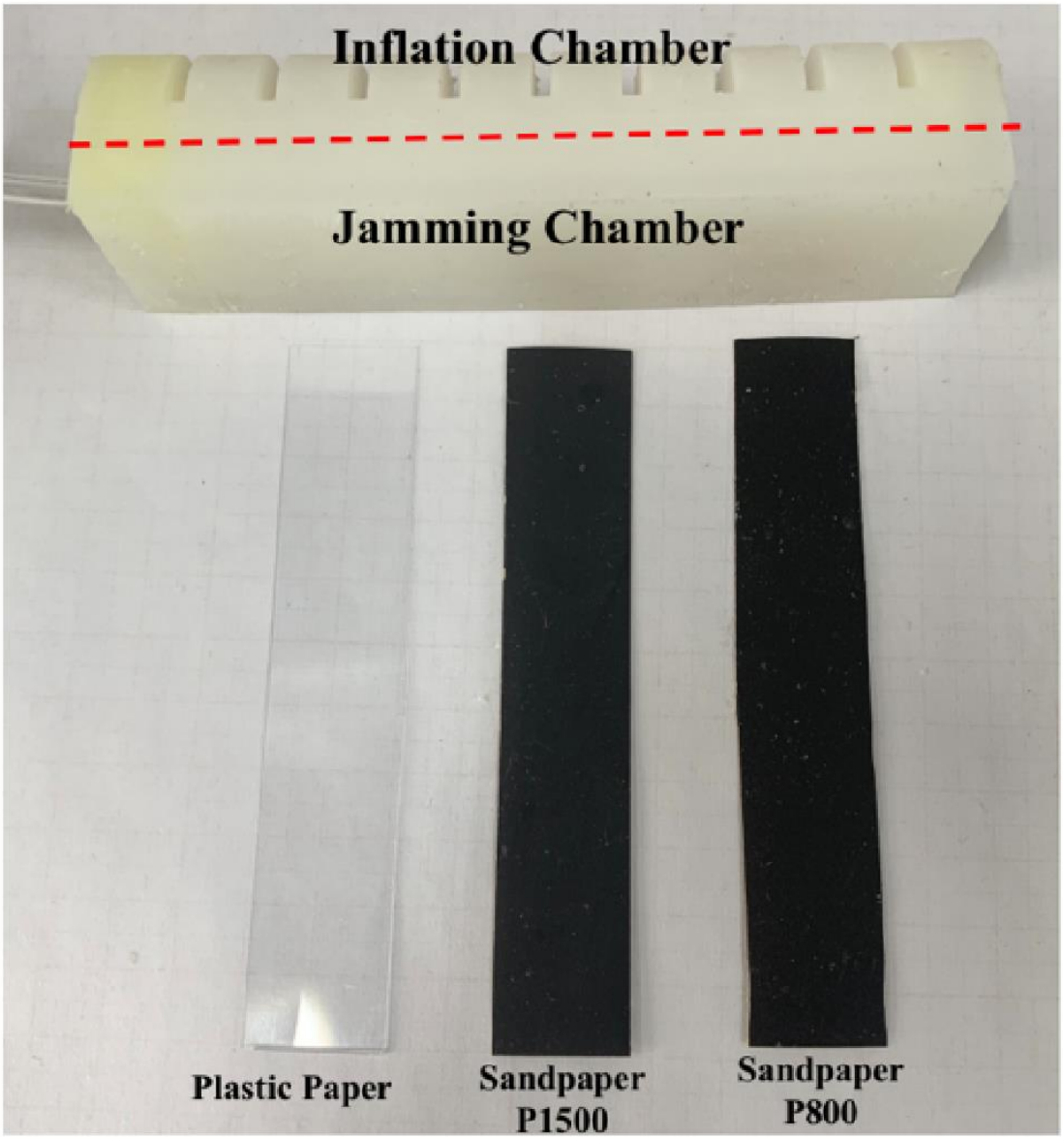
3)



Εικόνα 7.3 Προτεινόμενη διαδικασία κατασκευής δακτύλων. (a) Διαδικασία κατασκευής πυρήνα κεριού. (b) Συναρμολόγηση του εύκαμπτου καλουπιού δακτύλου. (c) Ευέλικτη διαδικασία κατασκευής δακτύλων

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

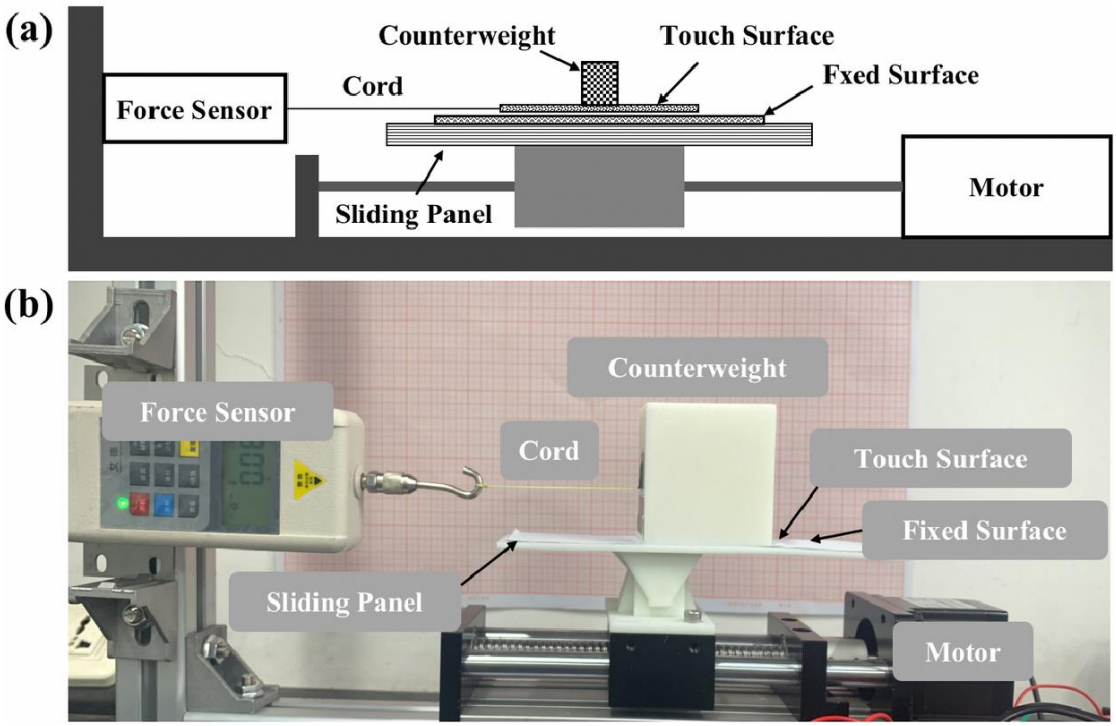
4)



Εικόνα 7.4 Διαφορετικοί τύποι υλικών: πλαστικό χαρτί, γυαλόχαρτο P1500, γυαλόχαρτο P800.

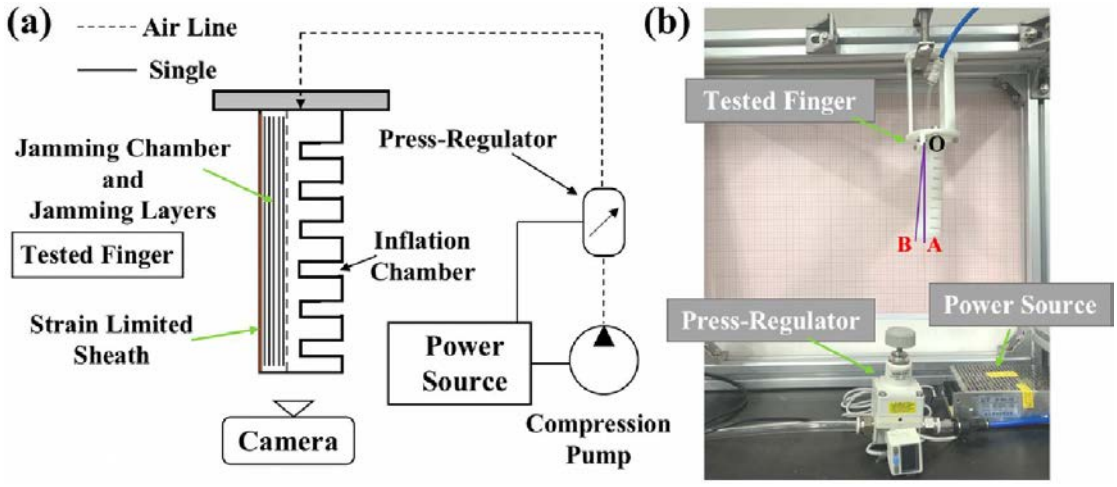
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

5)



Εικόνα 7.5 Πλατφόρμα μέτρησης συντελεστών τριβής. (a) Σχηματικό διάγραμμα. (b) Πειραματική πλατφόρμα.

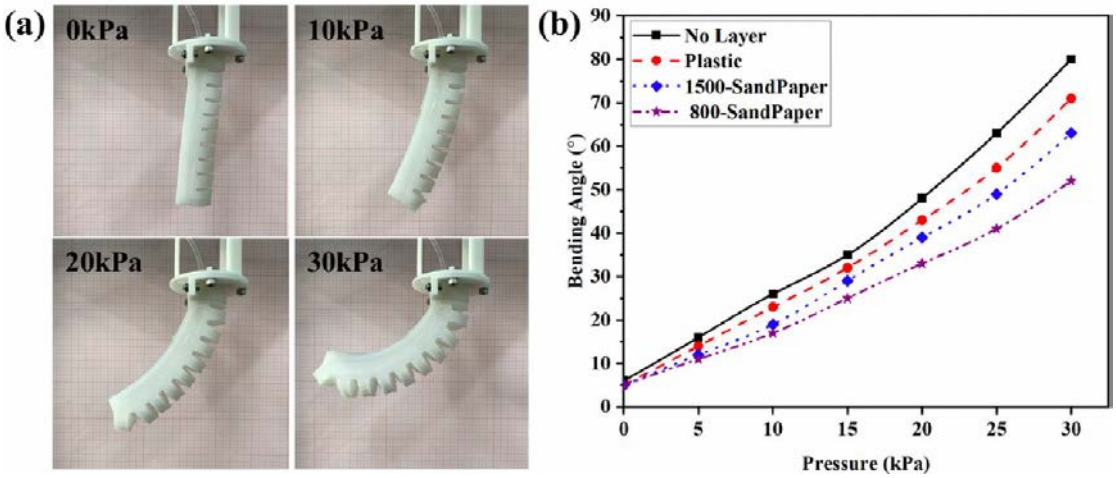
6)



Εικόνα 7.6 Πειραματική ρύθμιση για δοκιμή εύκαμπτης γωνίας κάμψης δακτύλων. (a) Σχηματικό διάγραμμα. (b) Πειραματική πλατφόρμα.

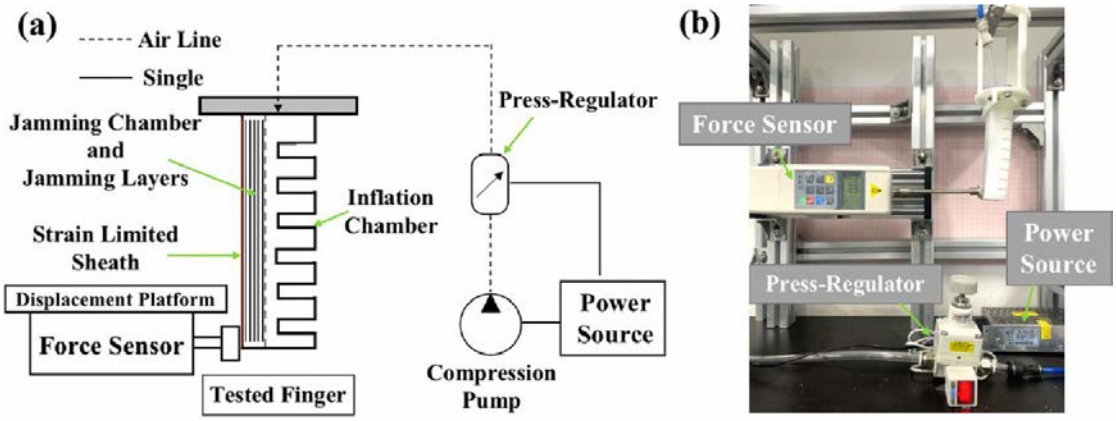
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

7)



Εικόνα 7.7 Αποτελέσματα δοκιμής γωνίας κάμψης. (a) Διάγραμμα μετρημένης κάμψης (γυαλόχαρτο P1500). (b) Γωνίες κάμψης διαφορετικών υλικών.

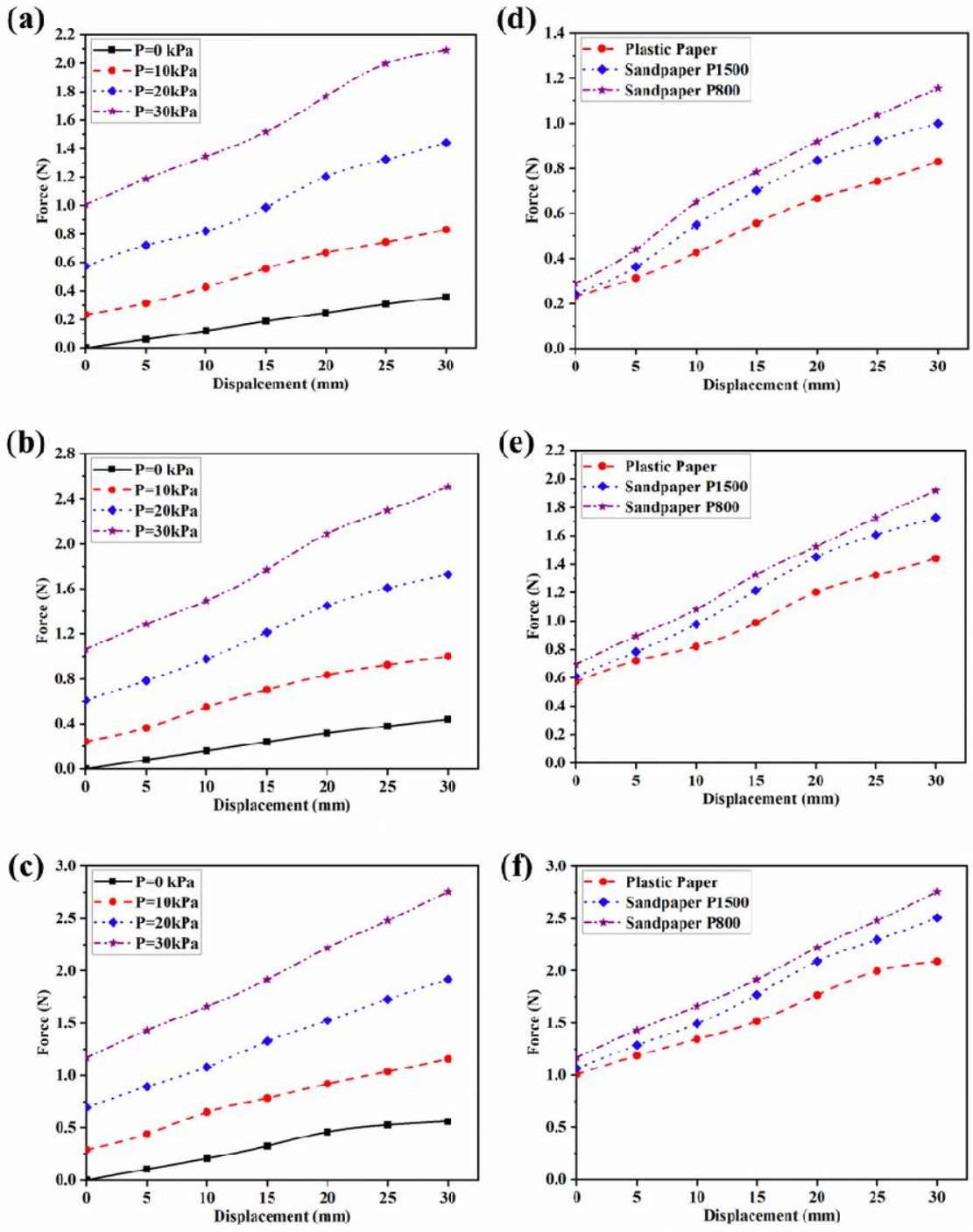
8)



Εικόνα 7.8 Πειραματική πλατφόρμα μέτρησης ακαμψίας. (a) Σχηματικό διάγραμμα. (b) Πειραματική πλατφόρμα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

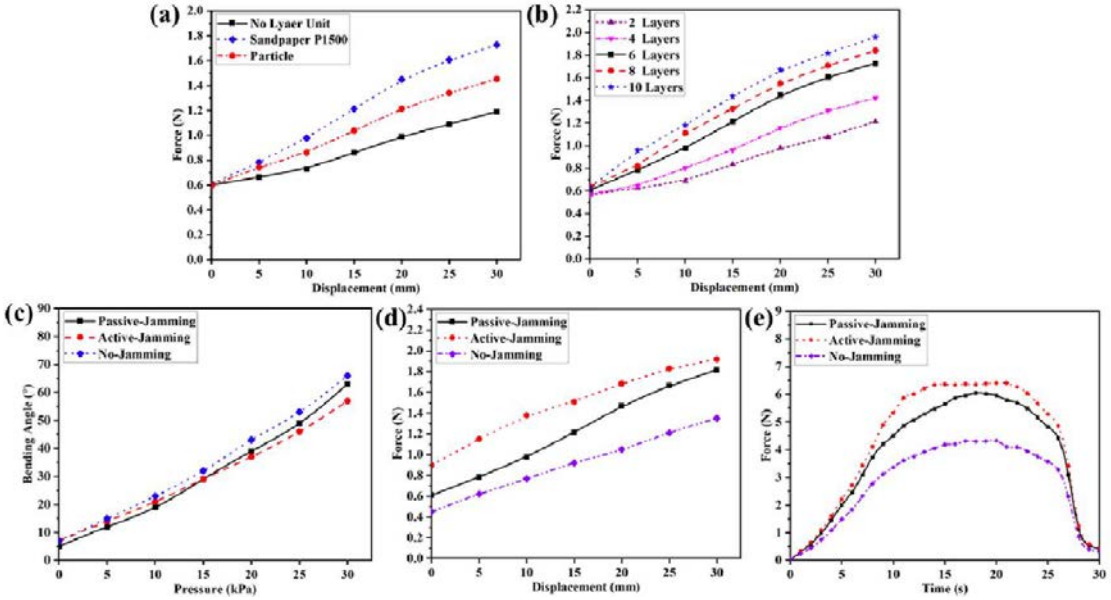
9)



Εικόνα 7.9 Αποτελέσματα δοκιμής ακαμψίας. (a-c) Σύγκριση ακαμψίας σε διαφορετικές πιέσεις φουσκώματος (υλικά στρώματος συμπίεσης: πλαστικό χαρτί, γυαλόχαρτο P1500 και γυαλόχαρτο P800). (d-f) Σύγκριση ακαμψίας μονάδων με διαφορετικά στρώματα συμπίεσης (πιέσεις φουσκώματος: 10 kPa, 20 kPa και 30 kPa).

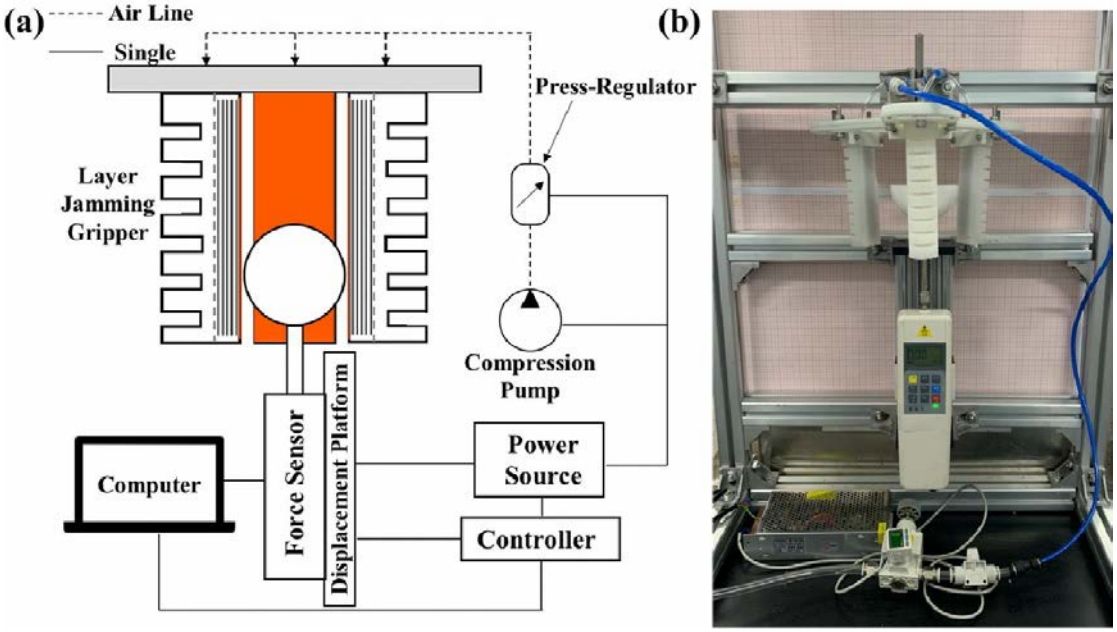
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

10)



Εικόνα 7.10 Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών. (a) Διαφορετικές αρχές παθητικής συμπίεσης. (b) Διαφορετικοί αριθμοί στρωμάτων συμπίεσης. (c) Σύγκριση διαφορετικών γωνιών κάμψης δακτύλων. (d) Σύγκριση διαφορετικών ακαμψιών των δακτύλων.

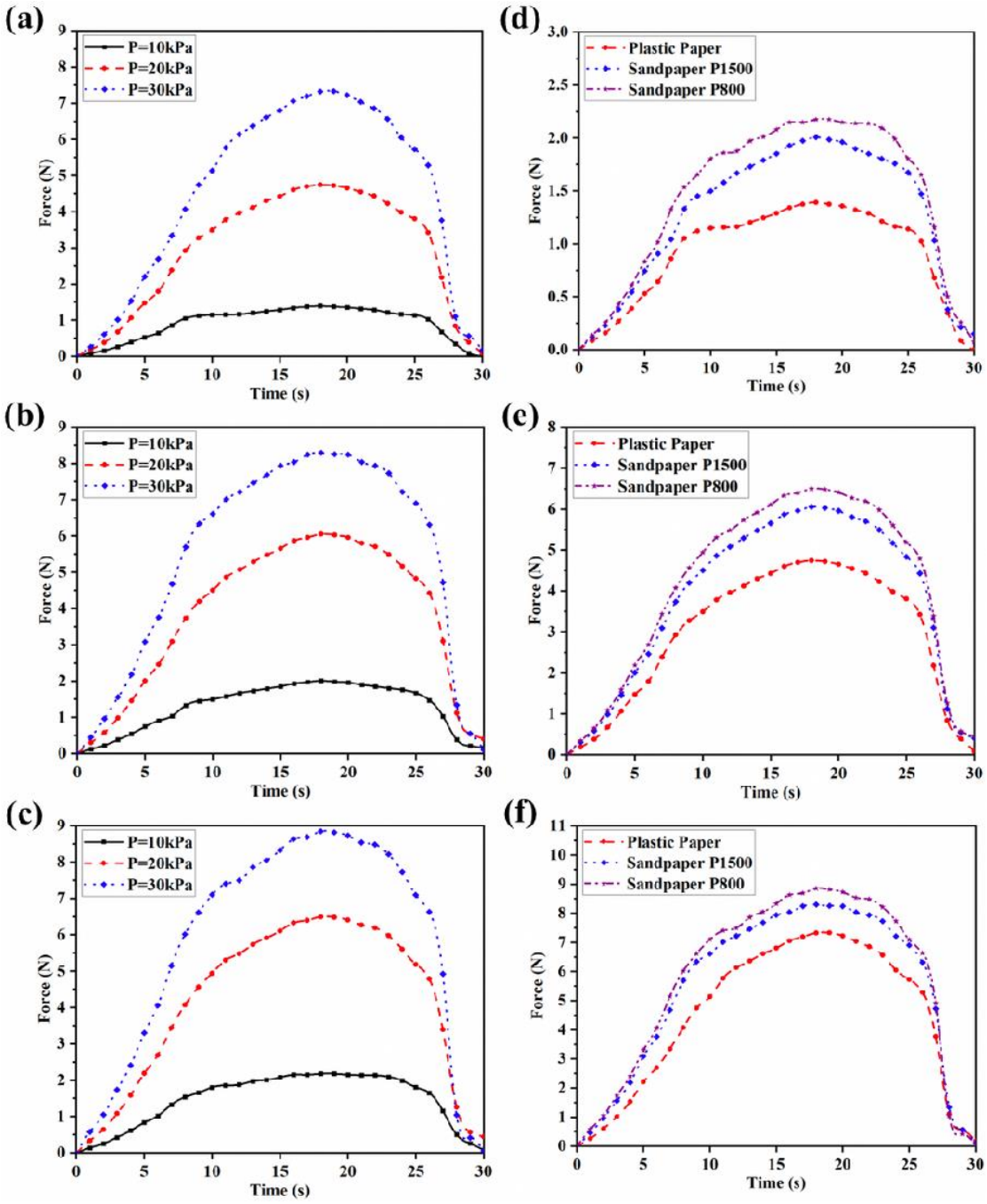
11)



Εικόνα 7.11 Πειραματική εγκατάσταση για τη δοκιμή της ικανότητας φορτίου ενός συστήματος σύσφιξης. (α) Σχηματικό διάγραμμα. (β) Πειραματική πλατφόρμα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

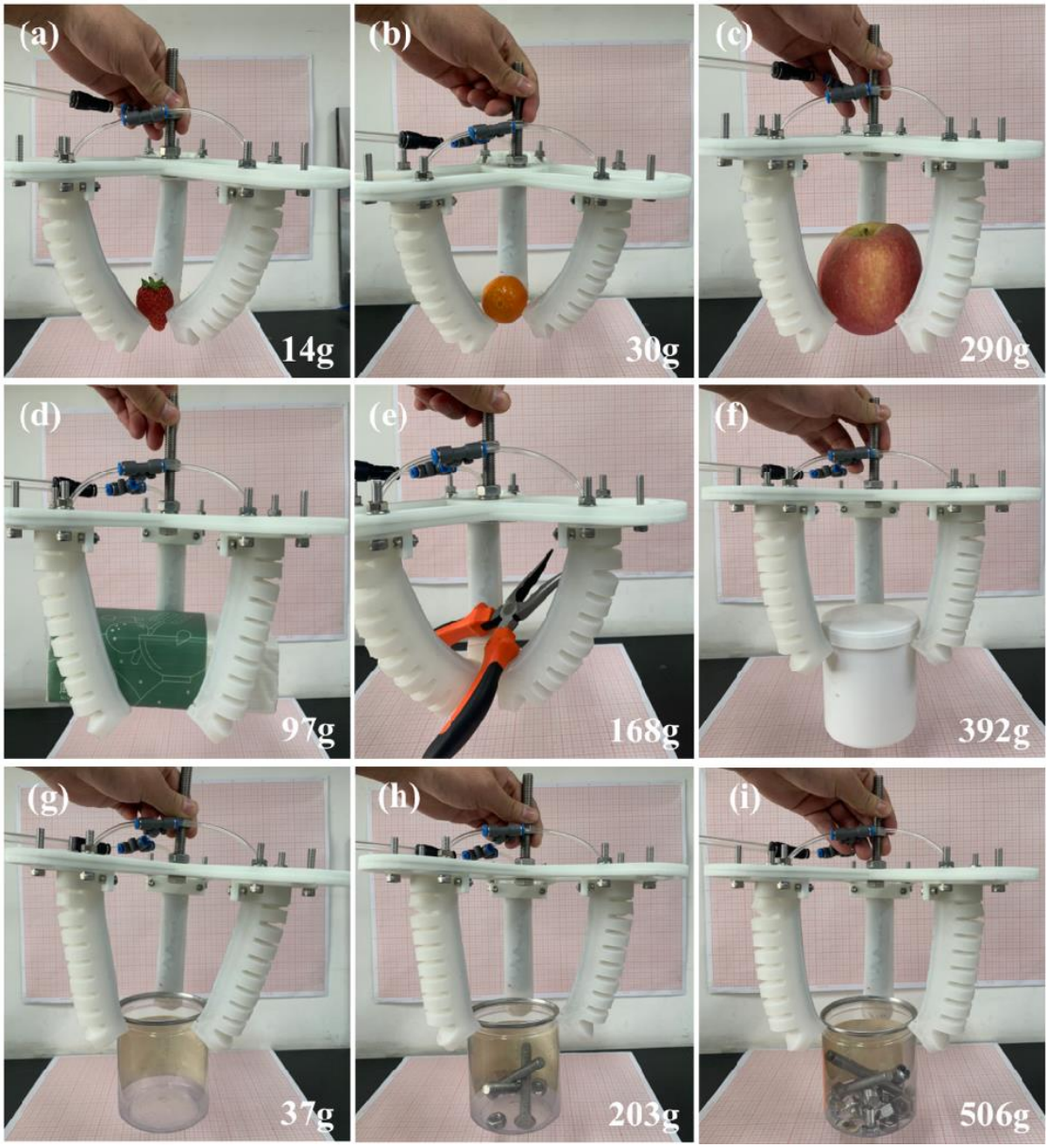
12)



Εικόνα 7.12 Πειράματα συστήματος λαβής. (a-c) Δοκιμές δύναμης λαβής χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά στρώματος συμπίεσης (υλικά στρώματος συμπίεσης: πλαστικό χαρτί, γυαλόχαρτο P1500 και γυαλόχαρτο P800). (d-f) Δοκιμές δύναμης λαβής χρησιμοποιώντας διαφορετικές πιέσεις φουσκώματος (10 kPa, 20 kPa και 30 kPa).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

13)



Εικόνα 7.13 Επίδειξη της κίνησης σύλληψης του συστήματος σύλληψης. (a) Φράουλα, (b) Πορτοκάλι, (c) Apple, (d) Χαρτοπετσέτα, (e) Πένσα. (f) Κάδος σιλικόνης, (g-i) Πλαστικά κύπελλα διαφορετικού βάρους.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Βιβλιογραφία

(χ.χ.).

AboZaid. Y A. (2024). Soft robotic grippers: A review on technologies, materials, and applications. *Sensors and Actuators A: Physical, 371*. doi:https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115281

AboZaid. Y A et.al. (2024, July 1). Soft robotic grippers: A review on technologies, materials, and applications. *Sensors and Actuators A: Physical, 379*. doi:10.1016/j.sna.2024.115380

Al Abeach. L A T Nefti-Meziani. S & Davis. S. (2017). Design of a variable stiffness soft dexterous gripper. *Soft Robotics, 4*(3), σσ. 274–284. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2016.0044

Alici. G & Huynh. N N. (2007). Performance quantification of conducting polymer actuators for real applications: A micro-gripping system. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 12*(1), σσ. 73–84. doi:https://doi.org/10.1109/TMECH.2007.886256

Anwar. I Ho. V K & Ho. V V. (2019). A novel soft gripper with enhanced gripping adaptability based on spring-reinforced soft pneumatic actuators. *Industrial Robot: An International Journal, 47*(1), σσ. 74–82. doi:https://doi.org/10.1108/IR-07-2019-0147

Anyanwu. C et.al. (2025, August 15). A novel soft gripper for baby broccoli robotic harvesting. *Biosystems Engineering Reports*. doi:https://doi.org/10.1016/j.bser.2025.100234

Awad. L et.al. (2020). Walking faster and farther with a soft robotic exosuit: Implications for post-stroke gait assistance and rehabilitation. *IEEE Open Journal of Engineering in Medicine and Biology, 1*, σσ. 108–115. doi:https://doi.org/10.1109/ojemb.2020.2984429

Bai. L & Sun. Y. (2021). Design and experiment of a deformable bird-inspired UAV perching mechanism. *Journal of Bionic Engineering, 18*(5), σσ. 1304–1316. doi:https://doi.org/10.1007/s42235-021-0071-1

Baik. S et.al. (2017). A wet-tolerant adhesive patch inspired by protuberances in suction cups of octopi. *Nature, 546*(7658), σσ. 396–400. doi:https://doi.org/10.1038/nature22382

Bauwens. P et.al. (2020). Vacuum lamination of a stretchable sensor system in polypropylene. *Proceedings of the 2020 IEEE 8th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC)* (σσ. 1–6). Tonsberg, Norway: IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/ESTC48849.2020.9229752

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Bemfica. J R et.al. (2014). A three-fingered cable-driven gripper for underwater applications. *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (σσ. 2469–2474). Hong Kong, China: IEEE.

Bemfica.. J R et.al. (2013). Mechatronic design of a three-fingered gripper for underwater applications. *IFAC Proceedings Volumes*, *46*, σσ. 307–312. doi:https://doi.org/10.3182/20130410-3-CN-2034.00080

Bernat. J et.al. (2024, July 18). The Construction of a Soft Gripper Based on Magnetorheological Elastomer with Permanent Magnet — ακριβής απόδοση από την arXiv έκδοση. arXiv. doi:https://arxiv.org/abs/2407.13477

Birglen. L Laliberté. T & Gosselin. C. (2008). *Underactuated robotic hands* (Τόμ. 40). Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.

Brown E et.al. (2010). Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 107*(44), σσ. 18809–18814. doi:https://doi.org/10.1073/pnas.1003250107

Brown. E et.al. (2010, Sept 22). Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. Ανάκτηση από https://arxiv.org/abs/1009.4444

Burgner-Kahrs. J Rucker. D C & Choset. H. (2015). Continuum robots for medical applications: A survey. *IEEE Transactions on Robotics, 31*(6), σσ. 1261–1280. doi:https://doi.org/10.1109/TRO.2015.2489500

Cai. L et.al. (2013, October 25). Super-stretchable, Transparent Carbon Nanotube-Based Capacitive Strain Sensors for Human Motion Detection. *Scientific Reports, 3*. doi:https://doi.org/10.1038/srep03048

Cai. M et.al. (2020). Grasping marine products with hybrid-driven underwater vehicle-manipulator system. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 17*(3), σσ. 1443–1454. doi:https://doi.org/10.1109/TASE.2019.2957782

Calanca. A et.al. (2023). Force control of lightweight series elastic systems using disturbance observers. *Robotics and Autonomous Systems, 167*. doi:https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104319

Calisti. M et.al. (2011). An octopus-bioinspired solution to movement and manipulation for soft robots. *Bioinspiration & Biomimetics, 6*(3). doi:https://doi.org/10.1088/1748-3182/6/3/036002

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Capalbo. C E et.al. (2022). A soft robotic gripper with neutrally buoyant jamming pads for gentle yet secure grasping of underwater objects. *IEEE Journal of Oceanic Engineering, 47*(4), σσ. 975–983. doi:https://doi.org/10.1109/JOE.2022.3156746

Caruso. F Shea. H & Cacucciolo. V. (2025, April). Electroadhesion suction cups. *Advanced Materials, 37*(16). doi:https://doi.org/10.1002/adma.202420231

Case. J C & Marvel. J A. (2024). *FY24 Soft Robotics Report.* National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD . doi:https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8508

Castano. L M & Flatau. A B. (2014). Smart fabric sensors and E-textile technologies: A review. *Smart Materials and Structures, 23*(5). doi:https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/5/053001

Catalano. M G et.al. (2014). Adaptive synergies for the design and control of the Pisa/IIT SoftHand. *The International Journal of Robotics Research, 33*(5), σσ. 768–782. doi:https://doi.org/10.1177/0278364913518998

Chen X et.al. (2022). A review of soft manipulator research, applications, and opportunities. *Journal of Field Robotics, 39*(3), σσ. 281–311. doi:https://doi.org/10.1002/rob.22051

Chen. F et.al. (2019). A review on soft robotic grippers for food handling. *Journal of Food Engineering, 259*, σσ. 1-12. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.017

Chen. G et.al. (2021). A soft robotic fish with variable stiffness and undulatory locomotion. *Applied Ocean Research, 109*. doi:https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102551

Cheng. P et.al. (2021). Sensors. *Sensors, 21*(1). doi:https://doi.org/10.3390/s21020493

Cheng. P et.al. (2022). *Journal of Mechanisms and Robotics, 14*.

Choi. W H et.al. (2019). Soft, multi-DoF, variable stiffness mechanism using layer jamming for wearable robots. *IEEE Robotics and Automation Letters, 4*(3). doi:https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2908493

Chossat. J-B et.al. (2013). A soft strain sensor based on ionic and metal liquids. *IEEE Sensors Journal, 13*(9), σσ. 3405–3414. doi:https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2263797

Ciavarella. M. (2025). On the dynamic JKR adhesion problem. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 188*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmps.2025.105503

Ciocarlie. M et.al. (2014). The Velo gripper: A versatile single-actuator design for enveloping, parallel and fingertip grasps. *The International Journal of Robotics Research, 33*(5), σσ. 753–767. doi:https://doi.org/10.1177/0278364913518514

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Crisman. J Kanojia. C & Zeid. I. (1996). Graspar: A flexible, easily controllable robotic hand. *IEEE Robotics & Automation Magazine, 3*(2), σσ. 32–38. doi:https://doi.org/10.1109/100.537704

Cruz. E M G N V Oliveira. S & Correia. A. (2024). Robotics applications in the hospital domain: A literature review. *Applied System Innovation, 7*(6). doi:https://doi.org/10.3390/asi7060125

D. Mura et.al. (2018). A soft modular end effector for underwater manipulation: A gentle, adaptable grasp for the ocean depths. *IEEE Robotics & Automation Magazine, 25*(4), σσ. 45–56.

D'Avella, S. T. (2020). A study on picking objects in cluttered environments: Exploiting depth features for a custom low-cost universal jamming gripper. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 63*. doi:https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101888

De Falco. I et.al. (2017, September 26). A soft multi-module manipulator with variable stiffness for minimally invasive surgery. *Bioinspiration & Biomimetics, 12*(5). doi:https://doi.org/10.1088/1748-3190/aa7ccd

Deimel. R & Brock O. (2016). A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping. *The International Journal of Robotics Research, 35*(1-3), σσ. 161–185. doi:https://doi.org/10.1177/0278364915592961

Dickinson. M H et.al. (2000). How animals move: An integrative view. *Science, 288*(5463), σσ. 100–106. doi:https://doi.org/10.1126/science.288.5463.100

Dollar. A M & Howe. R D. (2010). The highly adaptive SDM hand: Design and performance evaluation. *The International Journal of Robotics Research, 29*(5), σσ. 585–597. doi:https://doi.org/10.1177/0278364909360852

Dou. W et.al. (2021). Soft robotic manipulators: Designs, actuation, stiffness tuning, and sensing. *Advanced Materials Technologies*. doi:https://doi.org/10.1002/admt.202100018

Dzedzickis. A et.al. (2024, December 5). Soft grippers in robotics: Progress of last 10 years. *Machines, 12*(12). doi:https://doi.org/10.3390/machines12120887

El-Sayed. A M. (2025). A novel approach to enhancing smart stiffness of soft robotic gripper fingers for wider grasping capability. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 9*(2), σσ. 553–573. doi:https://doi.org/10.1007/s41315-024-00398-z

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Eroğlu. M & Şam Parmak E D. (2022). A simple manufacturing process of the miniaturised octopus-inspired underwater soft robotic grippers. *Journal of Adhesion Science and Technology, 37*(7), σσ. 1163–1176. doi:https://doi.org/10.1080/01694243.2022.2043056

Fakhri. O et.al. (2023). A systematic approach to stable grasping of a two-finger robotic hand activated by jamming of granular media. *Electronics, 12*(9). doi:https://doi.org/10.3390/electronics12091902

Fan. W et.al. (2020). Machine-knitted washable sensor array textile for precise epidermal physiological signal monitoring. *Science Advances, 6*. doi:https://doi.org/10.1126/sciadv.aay2840

Fan. Y et.al. (2024). An overview of stiffening approaches for continuum robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 85*. doi:https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102554

Feix. T et.al. (2016). The GRASP taxonomy of human grasp types. *IEEE Transactions on Human–Machine Systems, 46*(1), σσ. 66–77. doi:https://doi.org/10.1109/THMS.2015.2470657

Feliu-Talegon. D et.al. (2020). A bio-inspired manipulator with claw prototype for winged aerial robots: Benchmark for design and control. *Applied Sciences, 10*(18). doi:https://doi.org/10.3390/app10186516

Fras. J et.al. (2018). Fluidical bending actuator designed for soft octopus robot tentacle. *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)* (σσ. 253–257). IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/RoboSoft.2018.8404912

Frutiger. A et.al. (2015). Capacitive soft strain sensors via multicore–shell fiber printing. *Advanced Materials, 27*(15), σσ. 2440–2446. doi:https://doi.org/10.1002/adma.201405426

Galloway. K C et.al. (2016). Soft Robotic Grippers for Biological Sampling on Deep Reefs. *Soft Robotics, 3*(1), σσ. 23–33. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2015.0019

Gong. Z et.al. (2018, March). A Bio-inspired Soft Robotic Arm: Kinematic Modeling and Hydrodynamic Experiments. *Journal of Bionic Engineering, 15*, σσ. 204–219. doi:https://doi.org/10.1007/s42235-018-0016-x

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Gong. Z et.al. (2021). A soft manipulator for efficient delicate grasping in shallow water: Modeling, control, and real-world experiments. *The International Journal of Robotics Research, 40*(1), σσ. 449–469. doi:https://doi.org/10.1177/0278364920917203

Grasso. F W. (2008). Octopus sucker-arm coordination in grasping and manipulation. *American Malacological Bulletin, 24*((1-2)), σσ. 13–23. doi:https://doi.org/10.4003/0740-2783-24.1.13

Grissom. M D et.al. (2006). Design and experimental testing of the OctArm soft robot manipulator. *Proceedings of the Unmanned Systems Technology VIII. 6230*, σσ. 1–10. SPIE. doi:https://doi.org/10.1117/12.666301

Guglielmino. E et.al. (2013). A pragmatic bio-inspired approach to the design of octopus-inspired arms. *Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (σσ. 4577–4582). IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696986

Gullapalli. H et.al. (2010). Flexible piezoelectric ZnO-paper nanocomposite strain sensor. *Small, 6*(15), σσ. 1641–1646. doi:https://doi.org/10.1002/smll.201000254

Guo. J et.al. (2017). Design and fabrication of a pneumatic soft robotic gripper for delicate surgical manipulation. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)* (σσ. 1069–1074). Piscataway, NJ: IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/ICMA.2017.8015965

Guo. Y et.al. (2021). Review of dielectric elastomer actuators and their applications. *Advanced Intelligent Systems, 3*(6). doi:https://doi.org/10.1002/aisy.202000282

H, N. P. (2021). Towards safely grasping group objects by hybrid robot hand. *Proceedings of the 2021 4th International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering (RCAE)* (σσ. 389–393). IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/RCAE53762.2021.9635237

Hadi. Y W et.al. (2024, November 5). Developing simulation models for soft robotic grippers in Webots. arXiv. doi:https://arxiv.org/abs/2411.03176

Ham. K Han. J & Park. Y J. (2018). Soft gripper using variable stiffness mechanism and its application. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 19*(4), σσ. 487–494. doi:https://doi.org/10.1007/s12541-018-0059-2

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Hao. Y et.al. (2017). Design and modeling of a soft robotic finger actuated by dielectric elastomer. *International Journal of Advanced Robotic Systems, 14*(3). doi:https://doi.org/10.1177/1729881417707148

Hao. Y et.al. (2020). A soft gripper with programmable effective length, tactile and curvature sensory feedback. *Smart Materials and Structures, 29*(3). doi:https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab6759

Hawkes. E W. (2021, April 28). Hard questions for soft robotics. *Science Robotics, 6*(53). doi:https://doi.org/10.1126/scirobotics.abg6049

Hegde. C et.al. (2023). Sensing in Soft Robotics. *ACS Nano, 17*(16), σσ. 15277–15307. doi:https://doi.org/10.1021/acsnano.3c04089

Herr. H. (2014, March). New bionics let us run, climb and dance. Ανάκτηση από https://www.youtube.com/watch?v=CDsNZJTWw0w.

Herr. H. (2009). Exoskeletons and orthoses: Classification, design challenges and future directions. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 6*(1). doi:https://doi.org/10.1186/1743-0003-6-21

Hirose. S & Umetani. Y. (1978). The development of soft gripper for the versatile robot hand. *Mechanism and Machine Theory, 13*(3), σσ. 351–359. doi:https://doi.org/10.1016/0094-114X(78)90059-9

Hu. F & Liu Y. (2024). A magneto-elastica reinforced elastomer makes soft robotic grippers. *Sensors and Actuators A: Physical, 397*. doi:https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115977

Hu. F & Liu. Y. (2024, December 1). A magneto-elastica reinforced elastomer makes soft robotic grippers . *Sensors and Actuators A: Physical*. doi:https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115977

Hu. F. (2020). Origami spring–inspired metamaterials and robots. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 117*(31), σσ. 18385–18392. doi:https://doi.org/10.1073/pnas.2004760117

Huang. J et.al. (2022). Modular origami soft robot with the perception of interaction force and body configuration. *Advanced Intelligent Systems, 4*. doi:https://doi.org/10.1002/aisy.202200081

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Hughes. J et.al. (2016, November 16). Soft manipulators and grippers: A review. *Frontiers in Robotics and AI, 3*(69). doi:10.3389/frobt.2016.00069

Hughes. J et.al. (2016). Soft manipulators and grippers: A review. *Frontiers in Robotics and AI, 3*. doi:https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00069

Hughes.. J et.al. (2016, November 16). Soft manipulators and grippers: A review. *Frontiers in Robotics and AI, 3*(69). doi:https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00069

Huri. D et.al. (2024). Prediction accuracy of hyperelastic material models for rubber-like polymers. *Materials, 17*(2). doi:https://doi.org/10.3390/ma17020311

Ibrahimi. M et.al. (2021). A layer jamming actuator for tunable stiffness and shape-changing devices. *Soft Robotics, 8*(1), σσ. 85–96. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2019.0182

Ilievski. F et.al. (2011). Soft robotics for chemists. *Angewandte Chemie International Edition, 50*(8), σσ. 1890–1895. doi:https://doi.org/10.1002/anie.201006464

International Federation of Robotics. (2024, September 24). *IFR*. Ανάκτηση από World robotics 2024 – Press release: https://ifr.org

Islam. G et.al. (2020). Textile sensors for wearable applications: A comprehensive review. *Cellulose, 27*(11), σσ. 6103–6131. doi:https://doi.org/10.1007/s10570-020-03215-5

Jain. R et.al. (2011). Design and analysis of a dexterous robotic gripper with soft fingers. *International Journal of Advanced Robotic Systems, 8*(1). doi:https://doi.org/10.5772/45810

Jain.. R K et.al. (2011). Two IPMC fingers based micro gripper for handling. *International Journal of Advanced Robotic Systems, 8*(1). doi:https://doi.org/10.5772/10523

Jiang. Y Chen. D Liu. C & Li J. (2019). Chain-like granular jamming: A novel stiffness-programmable mechanism for soft robotics. *Soft Robotics, 6*(1), σσ. 118–132. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2018.0005

Jung. Y et.al. (2024, April 25). Untethered soft actuators for soft standalone robotics. *Nature Communications, 15*(1). doi:https://doi.org/10.1038/s41467-024-47639-0

Kang. L et.al. (2019). Design and implementation of a multi-function gripper for grasping general objects. *Applied Sciences, 9*(24). doi:https://doi.org/10.3390/app9245266

Kang. R et.al. (2017). Design of a pneumatic muscle based continuum robot with embedded tendons. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 22*(2), σσ. 751–761. doi:https://doi.org/10.1109/TMECH.2016.2636199

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Kapandji. I A. (1987). *The physiology of the joints: Lower limb* (5η έκδοση εκδ.). Edinburgh, UK: Churchill Livingstone.

Katzschmann. K et.al. (2018). Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish — σε sentence case. *Science Robotics, 3*(16). doi:https://doi.org/10.1126/scirobotics.aar3449

Kellaris. N et.al. (2021). Spider-inspired electrohydraulic actuators for fast, soft-actuated joints. *Advanced Science, 8*(21). doi:https://doi.org/10.1002/advs.202100916

Kenaley. G L & Cutkosky. M R. (1989). Electrorheological fluid-based robotic fingers with tactile sensing. *Proceedings of the 1989 International Conference on Robotics and Automation* (σσ. 132–136). Scottsdale, AZ, USA: IEEE Computer Society Press. doi:https://doi.org/10.1109/ROBOT.1989.99979

Kendre. S V et.al. (2022). The soft compiler: A web-based tool for the design of modular pneumatic circuits for soft robots. *IEEE Robotics and Automation Letters, 7*(3), σσ. 6060–6066. doi:https://doi.org/10.1109/lra.2022.3159858

Kennedy. E B L & Hanlon. R T. (2020). Octopus arms exhibit exceptional flexibility. *Scientific Reports, 10*. doi:https://doi.org/10.1038/s41598-020-77878-8

Khosravi. P et.al. (2024, Jun 12). Review of autonomous mobile robots for the warehouse environment. *arXiv preprint*. Ανάκτηση από https://arxiv.org/abs/2406.08333

Kier. W M & Stella. M P. (2007). The arrangement and function of octopus arm musculature and connective tissue. *Journal of Morphology, 268*(7), σσ. 831–843. doi:https://doi.org/10.1002/jmor.10548

Kim. S Laschi. C & Trimmer. B. (2013). Soft robotics: A bioinspired evolution in robotics. *Trends in Biotechnology, 31*(5), σσ. 287–294. doi:https://doi.org/10.1016/S0167-7799(13)00063-2

Koch. M A & Font-Llagunes. J M. (2021). Lower-limb exosuits for rehabilitation or assistance of human movement: A systematic review. *Applied Sciences, 11*(18). doi:https://doi.org/10.3390/app11188743

Kornbluh. R et.al. (2004). Rubber to rigid, clamped to undamped: Toward composite materials with wide-range controllable stiffness and damping. *Proceedings of the International Society for Optical Engineering*, σσ. 372–386. doi:https://doi.org/10.1117/12.548971

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Kulkarni. M. (2025, February 20). Soft robots built for extreme environments. *Soft Science*. doi:https://www.oaepublish.com/articles/ss.2023.51

Kumamoto. H et.al. (2021). Underwater suction gripper for object manipulation with an underwater robot. *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)* (σσ. 1–7). Piscataway, NJ: IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/ICM46511.2021.9385703

Kumar. V et.al. (2024). A systematic review of developments in gripper systems handling compressed fabric parts. *Heliyon*. doi:https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24164183

Kurumaya. S et.al. (2019). Active textile braided in three strands with thin McKibben muscle. *Soft Robotics, 6*(2), σσ. 250–262. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2018.0076

Kurumaya. S et.al. (2018, August). A Modular Soft Robotic Wrist for Underwater Manipulation. *Soft Robotics, 5*(4), σσ. 399–409. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2017.0097

Lackner. T et.al. (2024). Review of autonomous mobile robots in intralogistics. *Journal of Manufacturing Systems, 74*, σσ. 102–120. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.07.006

Laschi. C et.al. (2012). Soft robot arm inspired by the octopus. *Advanced Robotics, 26*(7), σσ. 709–727. doi:https://doi.org/10.1163/156855312X626343

Lau. G.-K et.al. (2017). Lightweight soft actuators for miniature robots using dielectric elastomer and liquid metal electrodes. *Applied Physics Letters, 110*(18). doi:https://doi.org/10.1063/1.4983051

Lavigne. Q et.al. (2019). Sensors and Actuators A: Physical. *Sensors and Actuators A: Physical, 291*, σσ. 13–22. doi:https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.03.018

Li. H et.al. (2021). An untethered soft robotic gripper with high payload-to-weight ratio. *Mechanism and Machine Theory, 158*. doi:https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104226

Li. J Sun. M & Wu. Z. (2021). A soft robotic actuator with programmable deformation modes. *Soft Robotics, 8*(4), σσ. 448–460. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2020.0028

Li. M Yin. Z Huang. X & Liu. Q. (2023, May). *www.researchgate.net*. doi:10.21203/rs.3.rs-2925272/v1

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Li. R & Peng. B. (2022). Implementing monocular visual-tactile sensors for robust manipulation. *Cyborg and Bionic Systems, 2022*. doi:https://doi.org/10.34133/2022/9797562

Li. Y et.al. (2024). Advances in the application of AI robots in critical care. *Frontiers in Public Health, 12*. doi:https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1356717

Li. Y Wang. Z Liu. J Zhang. X & Chen. Q. (2023). Modelling the Mullins effect and magnetic-dependent behavior in magnetoactive elastomers. *International Journal of Non-Linear Mechanics, 151*. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2023.104331

Liao. Q et.al. (2013). Carbon fiber–ZnO nanowire hybrid structures for flexible and adaptable strain sensors. *Nanoscale, 5*(24), σσ. 12350–12355. doi:https://doi.org/10.1039/C3NR03536K

Licht. S et.al. (2018). A partially filled jamming gripper for underwater recovery of objects resting on soft surfaces. *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (σσ. 6461–6468). Piscataway, NJ: IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8593361

Licht.. S et.al. (2016). Universal jamming grippers for deep-sea manipulation. *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey* (σσ. 1–5). IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761237

Lipomi. D J et.al. (2011). Skin-like pressure and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes. *Nature Nanotechnology, 6*(12), σσ. 788–792. doi:https://doi.org/10.1038/nnano.2011.184

Liu. C-H et.al. (2022, April 1). Topology Optimization Design and Experiment of a Soft Pneumatic Bending Actuator for Grasping Applications. *IEEE Robotics and Automation Letters, 7*(2), σσ. 2086–2093. doi:https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3142910

Liu. H et.al. (2008). Multisensory five-finger dexterous hand: The DLR/HIT Hand II. *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (σσ. 3692–3697). IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4650624

Liu. J et.al. (2020). Underwater mobile manipulation: A soft arm on a benthic legged robot. *IEEE Robotics & Automation Magazine, 27*(4), σσ. 12–26. doi:https://doi.org/10.1109/MRA.2020.3024001

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Liu. R et.al. (2021). Highly stretchable strain sensor with spiral fiber for curvature sensing of a soft pneumatic gripper. *IEEE Sensors Journal, 21*(21), σσ. 23880–23888. doi:0.1109/JSEN.2021.3116427

Liu. S et.al. (2021). A two-finger soft-robotic gripper with enveloping and pinching grasping modes. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 26*(1), σσ. 146–155. doi:https://doi.org/10.1109/TMECH.2020.2999933

Liu. Y et.al. (2023, November 22). ntelligent soft robotic grippers for agricultural and food product handling: A brief review with a focus on design and control. *Advanced Intelligent Systems, 6*(1). doi:https://doi.org/10.1002/aisy.202300233

Liu.. J et.al. (2020). Underwater mobile manipulation: A soft arm on a benthic legged robot. *IEEE Robotics and Automation Magazine, 27*(4), σσ. 12–26. doi:https://doi.org/10.1109/MRA.2020.3024001

Low. J H et.al. (2021). A review of soft robotics for agricultural and food applications. *IEEE Robotics and Automation Letters, 6*(3), σσ. 567–574. doi:https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3068895

Luheng. W Tianhuai. D & Peng. W. (2009). Influence of carbon black concentration on piezoresistivity for carbon-black-filled silicone rubber composite. *Carbon, 47*(14), σσ. 3151–3157. doi:https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.06.050

Maghooa. F et.al. (2015). Tendon and pressure actuation for a bio-inspired manipulator based on an antagonistic principle. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* (σσ. 2556–2561). Seattle, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). doi:https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139542

Mannsfeld. S C B et.al. (2010). Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers. *Nature Materials, 9*(10), σσ. 859–864. doi:https://doi.org/10.1038/nmat2834

Marchese. A D Katzschmann. R K & Rus. D. (2015). A recipe for soft fluidic elastomer robots. *Soft Robotics, 2*(1), σσ. 7–25. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2014.0022

Marchese. A D Onal. Ç D & Rus. D. (2014). Autonomous soft robotic fish capable of escape maneuvers using fluidic elastomer actuators. *Soft Robotics, 1*(1), σσ. 75–87. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2013.0009

Mary Ann Liebert. Inc. (2014). *Soft Robotics (SoRo)*. Ανάκτηση από https://welch.jhmi.edu/journal?n=101623819

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Masia. L et.al. (2018). Soft wearable assistive robotics: Exosuits and supernumerary limbs. Στο Masia. L et.al, *Wearable exoskeleton systems: Design, control and applications* (σσ. 219–254). Institution of Engineering and Technology (IET).

Mathew. B P et.al. (2022). Implementation of an origami inspired gripper robot for picking objects of variable geometry. *Materials Today: Proceedings, 58*, σσ. 176–183. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.255

Mattmann. C Clemens. F & Tröster. G. (2008). Sensor for measuring strain in textile. *Sensors, 8*(6), σσ. 3719–3732. doi:https://doi.org/10.3390/s8063719

Mazzeo. A et.al. (2022). Marine Robotics for Deep-Sea Specimen Collection: A taxonomy of underwater manipulative actions. *Sensors, 22*(4). doi:https://doi.org/10.3390/s22041471

Mazzolai. B et.al. (2012). Soft-robotic arm inspired by the octopus: II. From artificial requirements to innovative technological solutions. *Bioinspiration & Biomimetics, 7*(2). doi:https://doi.org/10.1088/1748-3182/7/2/025005

Mazzolai. B et.al. (2019). Octopus-inspired soft arm with suction cups for enhanced grasping tasks in confined environments. *Advanced Intelligent Systems, 1*(6). doi:https://doi.org/10.1002/aisy.201900041

McEvoy. M A & Correll. N. (2015). Materials that couple sensing, actuation, computation, and communication. *Science, 347*(6228). doi:https://doi.org/10.1126/science.1261689

Mehta. S & Poulios. K. (2025). Topology optimization of pneumatic soft actuators based on porohyperelasticity. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 444*. doi:https://doi.org/10.1016/j.cma.2025.118123

Mo. H et.al. (2022). Task autonomy of a flexible endoscopic system for laser-assisted surgery. *Cyborg and Bionic Systems, 2022*. doi:https://doi.org/10.34133/2022/9759504

Mura. D et.al. (2018). A Soft Modular End Effector for Underwater Manipulation: A Gentle, Adaptable Grasp for the Ocean Depths. *IEEE Robotics and Automation Magazine, 25*, σσ. 45–56. doi:https://doi.org/10.1109/MRA.2018.2871350

Mutlu. R Alici. G & Li. W. (2016). A soft mechatronic micro-stage mechanism based on electroactive polymer actuators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 21*(3), σσ. 1467–1478. doi:https://doi.org/10.1109/TMECH.2015.2502597

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Nam. N D et.al. (2019). Multi-objective optimization design for a sand crab-inspired compliant microgripper. *Microsystem Technologies, 25*(10), σσ. 3991–4009. doi:https://doi.org/10.1007/s00542-018-4244-0

Napier. J R. (1956). The prehensile movements of the human hand. *The Journal of Bone and Joint Surgery British Volume, 38-B*(4), σσ. 902–913. doi:https://doi.org/10.1302/0301-620X.38B4.902

Navas. E et.al. (2024, January 18). Soft gripper for small fruits harvesting and pick and place operations. *Frontiers in Robotics and AI, 10*. doi:https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1330496

Nguyen. P H et.al. (2019). Fabric-based soft grippers capable of selective distributed bending for assistance of daily living tasks. *2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)* (σσ. 404–409). IEEE.

Nguyen. V P & Chow. W T. (2023). Wiring-claw gripper for soft-stable picking up multiple objects. *IEEE Robotics and Automation Letters*, σσ. 3972–3979. doi:https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3262150

Nie. S et.al. (2020). Simulation and experiment study on deformation characteristics of the water hydraulic flexible actuator used for the underwater gripper. *IEEE Access, 8*, σσ. 191447–191459. doi:https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032179

Nishida. T Okatani. Y & Tadakuma. K. (2016). Development of universal robot gripper using MRα fluid. *International Journal of Humanoid Robotics, 13*(4). doi:https://doi.org/10.1142/S0219843616500171

Noguchi. Y Sekitani. T & Someya. T. (2006). Organic-transistor-based flexible pressure sensors using ink-jet-printed electrodes and gate dielectric layers. *Applied Physics Letters, 89*(25). doi:https://doi.org/10.1063/1.2416001

Odhner. L U et.al. (2014). A compliant, underactuated hand for robust manipulation. *The International Journal of Robotics Research, 33*(5), σσ. 736–752. doi:https://doi.org/10.1177/0278364913515414

Ohiri. K A et.al. (2022). E-textile based modular SEMG suit for large area level of effort analysis. *Scientific Reports, 12*(1), σσ. 1–14. doi:https://doi.org/10.1038/s41598-022-13701-4

Oliver. C et.al. (2023). Adhesion in soft contacts is minimum beyond a critical shear displacement. *Journal of Biomechanics, 157*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111876

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Otti. M et.al. (2024, December 30). Recent improvements in the development of soft grippers capable of dexterous manipulation. *Applied Sciences (MDPI), 15*(1). doi:10.3390/app15010275

Overmann. A L & Forsberg. J A. (2020). The state of the art of osseointegration for limb prosthesis. *Biomedical Engineering Letters, 10*(1), σσ. 5–16. doi:https://doi.org/10.1007/s13534-019-00133-9

Paik. J et al. (2021). Recent improvements in the development of soft grippers capable of dexterous manipulation. *Applied Sciences, 11*(1). doi:https://doi.org/10.3390/app11010275

Paixão. P H A D et.al. (2018). Closed structure soft robotic gripper. *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)* (σσ. 66–70). Livorno, Italy: IEEE.

Park. S-J. (2025). Comparative study on hyperelastic constitutive models for the static and dynamic behavior of resilient mounts. *Materials, 18*(2). doi:https://doi.org/10.3390/ma18020311

Park. Y L et.al. (2014). Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle–foot rehabilitation. *Bioinspiration & Biomimetics, 9*(1). doi:https://doi.org/10.1088/1748-3182/9/1/016007

Park. Y-L Chen. B-R & Wood. R-J. (2012). Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors. *IEEE Sensors Journal, 12*(8), σσ. 2711–2718. doi:https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2200790

Park. Y-L et.al. (2007). *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (σσ. 1510–1516). Piscataway, NJ: IEEE.

Paternò. L et.al. (2018). Sockets for limb prostheses: A review of existing technologies and open challenges. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 65*(9), σσ. 1996–2010. doi:https://doi.org/10.1109/tbme.2017.2775100

Paterno. L et.al. (2021). A new motor-driven smart prosthetic socket. Στο Menciassi. A Ibrahimi. M & Gruppioni. E (Επιμ.), *Proceedings of the 7th National Congress of Bioengineering* (σσ. 1–10). Berlin, Germany: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-77950-1_1

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Paternò. L et.al. (2020). A personalised prosthetic liner with embedded sensor technology: A case study. *Biomedical Engineering Online, 19*(1), σσ. 1–20. doi:https://doi.org/10.1186/s12938-020-00814-y

Paternò.. L et.al. (2022). Variable stiffness and shape prosthetic socket based on layer jamming technology. *2022 IEEE 5th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)* (σσ. 729–734). Edinburgh, United Kingdom: IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/RoboSoft54090.2022.9762124

Petron. A Duval. J F & Herr. H. (2017). Multi-indenter device for in vivo biomechanical tissue measurement. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 25*(5), σσ. 426–435. doi:https://doi.org/10.1109/tnsre.2016.2572168

Phan. P T et.al. (2022). Smart textiles using fluid-driven artificial muscle fibers. *Scientific Reports, 12*(1). doi:https://doi.org/10.1038/s41598-022-15369-2

Phan. P T et.al. (2022). Smart textiles using fluid-driven artificial muscle fibers. *Scientific Reports, 12*(1). doi:https://doi.org/10.1038/s41598-022-15369-2

Phillips. B T et.al. (2018). A dexterous, glove-based teleoperable low-power soft robotic arm for delicate deep-sea biological exploration. *Scientific Reports (Sci Rep), 8*. doi:https://doi.org/10.1038/s41598-018-33138-y

Pi. J et.al. (2021). An octopus-inspired bionic flexible gripper for apple grasping. *Agriculture, 11*(10). doi:https://doi.org/10.3390/agriculture11101014

Pilz da Cunha. M et.all. (2020). An artificial aquatic polyp that wirelessly attracts, grasps, and releases objects. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (συντομογραφία: Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.), 117*(30), σσ. 17571–17577. doi:https://doi.org/10.1073/pnas.2004748117

Pinskier. J et.al. (2022, November 25). Automated design of pneumatic soft grippers through design-dependent multi-material topology optimization. doi:https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.13843

Pinskier. J et.al. (2022, November 25). Automated design of pneumatic soft grippers through design-dependent multi-material topology optimization. arXiv. doi:https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.13843

Piskarev. Y et.al. (2023). A soft gripper with granular jamming and electroadhesive capabilities for gentle grasping and versatile release of objects. *Advanced Intelligent Systems, 5*(2). doi:https://doi.org/10.1002/aisy.202200409

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Polygerinos. P et.al. (2013). Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (σσ. 1512–1517). IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696549

Pons. J L. (2019). Witnessing a wearables transition. *Science, 365*(6454), σσ. 636–637. doi:https://doi.org/10.1126/science.aaw9407

Pons. J L. (2019). Witnessing a wearables transition. *Science, 365*(6454), σσ. 636–637. doi:https://doi.org/10.1126/science.aaw9407

Puangmali. P et.al. (2008, April). State-of-the-art in force and tactile sensing for minimally invasive surgery. *IEEE Sensors Journal, 8*(4), σσ. 371–380. doi:https://doi.org/10.1109/JSEN.2008.917481

Qin. L et.al. (2024). Modeling and simulation of dynamics in soft robotics. *SN Computer Science, 5*(2). doi:https://doi.org/10.1007/s43154-023-00105-z

Qu. T et.al. (2019). Proceedings of the 2019 WRC. *Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA)* (σσ. 235–241). Piscataway: IEEE.

Raamets. T et.al. (2024). Autonomous mobile robots for production logistics. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, *73*, σσ. 134–141. Ανάκτηση από https://kirj.ee/wp-content/plugins/kirj/pub/proc-2-2024-134-141_20240402140115.pdf

Raise3D. (2024). *Premium TPU-95A TDS (v2.2).* Raise3D. Ανάκτηση από https://s1.raise3d.com/2024/10/Raise3D-Premium-TPU95A_TDS_V2.2.pdf

Ramon-Soria. P et.al. (2019). Autonomous landing on pipes using soft gripper for inspection and maintenance in outdoor environments. *Proceedings of the 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (σσ. 5832–5839). Piscataway, NJ: IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/IROS40897.2019.8967850

Rateni. G et.al. (2015). Design and development of a soft robotic gripper for manipulation in minimally invasive surgery: A proof of concept. *Meccanica, 50*(11), σσ. 2855–2863. doi:https://doi.org/10.1007/s11012-015-0261-6

Rateni. G et.al. (2015). Design and development of a soft robotic gripper for manipulation in minimally invasive surgery: A proof of concept. *Meccanica, 50*(11), σσ. 2855–2863. doi:https://doi.org/10.1007/s11012-015-0261-6

Rawashdeh. N & Abu-Alrub. N. (2021). Gripper Control Design and Simulation for OpenROV Submarine Robot. *Actuators, 10*(10). doi:https://doi.org/10.3390/act10100252

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Renda. F & Laschi. C. (2012). A general mechanical model for tendon-driven continuum manipulators. *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2012)* (σσ. 3813–3818). IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6224703

Rice University. (2024, March 18). Rice research could advance soft robotics manufacturing, design (modeling curing time of platinum-catalyzed silicones). *Rice University News*. Ανάκτηση από https://news.rice.edu/news/2024/rice-research-could-advance-soft-robotics-manufacturing-design

Richter. J N Hochner. B & Kuba. M J. (2015). Octopus arm movements under constrained conditions: Adaptation, modification and plasticity of motor primitives. *Journal of Experimental Biology, 218*(7), σσ. 1069–1076. doi:https://doi.org/10.1242/jeb.113456

Robotics247 / Interact Analysis. (2025, February 7). *Robotics247.* Ανάκτηση από 2024 robotic picking report underscores 6 key themes…: https://www.robotics247.com/

Rothemund. P et.al. (2018). A soft, bistable valve for autonomous control of soft actuators. *Science Robotics, 3*. doi:https://doi.org/10.1126/scirobotics.aar7986

Rucker. D C & Webster. R J III. (2011). Statics and Dynamics of Continuum Robots With General Tendon Routing and External Loading. *IEEE Transactions on Robotics, 27*(6), σσ. 1033–1044. doi:https://doi.org/10.1109/TRO.2011.2160469

Rus. D & Tolley M T. (2015, May 27). Design, fabrication and control of soft robots. *Nature, 521*(7553), σσ. 467–475. doi:https://doi.org/10.1038/nature14543

Rus. D & Tolley. M T. (2015). Design, fabrication and control of soft robots. *Nature, 521*(7553), σσ. 467–475. doi:https://doi.org/10.1038/nature14543

Russo. M et.al. (2023). Continuum robots: An overview. *Advanced Intelligent Systems, 5*(7). doi:https://doi.org/10.1002/aisy.202200367

Rusu. D M et.al. (2023). Soft robotics: A systematic review and bibliometric analysis. *Micromachines, 14*(2). doi:https://doi.org/10.3390/mi14020359

Sakagami. N Takeuchi. K & Koganezawa. K. (2020). Numerical and experimental testing of underwater gripper with adjustable stiffness joints. *2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)* (σσ. 1118–1122). Piscataway, NJ: IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/SII46433.2020.9025809

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Samadikhoshkho. Z Zareinia. K & Janabi-Sharifi. F. (2019). A brief review on robotic grippers classifications. *Proceedings of the 2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)* (σσ. 1-4). IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/CCECE.2019.8861843

Sanchez. V et.al. (2021). Textile technology for soft robotic and autonomous garments. *Advanced Functional Materials, 31*(32). doi:https://doi.org/10.1002/adfm.202008278

Sanders. J E et.al. (2019). A motor-driven adjustable prosthetic socket operated using a mobile phone app: A technical note. *Medical Engineering & Physics, 68*, σσ. 94–100. doi:https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2019.04.003

Sarker. A Ul Islam. T & Robiul Islam. M. (2024, September 30). A review on recent trends of bioinspired soft robotics: Actuators, control methods, materials selection, sensors, challenges, and future prospects. *Advanced Intelligent Systems*. doi:https://doi.org/10.1002/aisy.202400414

Saudabayev. A et.al. (2018). Human grasping database for activities of daily living with depth, color and kinematic data streams. *Scientific Data, 5*. doi:https://doi.org/10.1038/sdata.2018.101

Schlesinger. G. (1919). The mechanical structure of the artificial limbs. Στο Schlesinger. G, *Replacement links and work aids: For war disabled and accident victims* (σσ. 321–661). Berlin/Heidelberg, Germany: Julius Springer.

Schwartz. G et.al. (2013). Flexible polymer transistors with high pressure sensitivity for application in electronic skin and health monitoring. *Nature Communications, 4*. doi:https://doi.org/10.1038/ncomms2832

Sengeh. D M & Herr. H. (2013). A variable-impedance prosthetic socket for a transtibial amputee designed from magnetic resonance imaging data. *Journal of Prosthetics and Orthotics, 25*(3), σσ. 129–137. doi:https://doi.org/10.1097/JPO.0b013e31829be19c

Shen. J et.al. (2025). Intelligent and precise textile drop-off: A new strategy for automated fabric handling. *Textiles, 5*(3). doi:https://doi.org/10.3390/textiles5030034

Shen. Z et.al. (2020, October). An Underwater Robotic Manipulator with Soft Bladders and Compact Depth-Independent Actuation. *Soft Robotics, 7*(5), σσ. 535–549. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2019.0087

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Shepherd. R F et.al. (2011). Multigait soft robot. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 108*(51), σσ. 20400–20403. doi:https://doi.org/10.1073/pnas.1116564108

Shiblee. M D N I et.al. (2019). 4D printing of shape-memory hydrogels for soft-robotic functions. *Advanced Materials Technologies, 4*(8). doi:https://doi.org/10.1002/admt.201900071

Shintake. J Cacucciolo, V. &. (2016). Soft robotic gripper for handling fragile objects. *IEEE Transactions on Robotics, 32*(4), σσ. 1085–1097. doi:https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2588880

Shintake. J et.al. (2018, May 7). Soft robotic grippers: A comprehensive review of device concepts, physical principles, materials, distributed sensing, and applications. *Advanced Materials, 30*(29). doi:https://doi.org/10.1002/adma.201707035

Shintake. J et.al. (2015). Variable stiffness actuator for soft robotics using dielectric elastomer and low-melting-point alloy. *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (σσ. 1097–1102). Hamburg, Germany: IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7353507

Shintake.. J et.al. (2018). Soft robotic grippers. *Advanced Materials, 30*(29). doi:https://doi.org/10.1002/adma.201707035

Shveda. R A et.al. (2022). A wearable textile-based pneumatic energy harvesting system for assistive robotics. *Science Advances, 8*. doi:https://doi.org/10.1126/sciadv.abo2418

Sinatra. N R et.al. (2019). Ultragentle manipulation of delicate structures using a soft robotic gripper. *Science Robotics, 4*(33). doi:https://doi.org/10.1126/scirobotics.aax5425

Smooth-On. (2024-2025). Ecoflex™ series technical bulletin. Smooth-On, Inc. Ανάκτηση από https://www.smooth-on.com

Soft Gripping. (2024). *soft-gripping.com*. Ανάκτηση από Soft robotics vs. hard robotics – Comparative insights and analysis: https://soft-gripping.com/discover/soft-robotics-vs-hard-robotics/

Someya. Tet.al. (2004). A large-area, flexible pressure sensor matrix with organic field-effect transistors for artificial skin applications. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)., 101*(27), σσ. 9966–9970. doi:https://doi.org/10.1073/pnas.0401918101

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Stival. F et.al. (2019). A quantitative taxonomy of human hand grasps. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 16*. doi:https://doi.org/10.1186/s12984-019-0488-x

Studart. A R. (2016). Additive manufacturing of biologically-inspired materials. *Chemical Society Reviews, 45*(2), σσ. 359–376. doi:https://doi.org/10.1039/c5cs00836k

Sun. Y et.al. (2021). An Underwater Soft Claw Based on Bionic Principle. *2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (σσ. 973–977). Sanya, China: IEEE.

Tang. C et.al. (2024). High-frequency dielectric elastomer actuators: Materials, modeling, and applications. *Advanced Intelligent Systems, 6*(5). doi:https://doi.org/10.1002/aisy.202300047

Tang. Y-L & Yin. J. (2018, July). Design of multifunctional soft doming actuator for soft machines. *Advanced Materials Technologies, 3*(7). doi:https://doi.org/10.1002/admt.201800069

Teeple. C B et.al. (2020). Multi-segment soft robotic fingers enable robust precision grasping. *International Journal of Robotics Research, 39*(14), σσ. 1647–1667. doi:https://doi.org/10.1177/0278364920910465

Terrile. S. (2022). *blogs.upm.es.* Ανάκτηση από PhD thesis: Silvia Terrile: https://blogs.upm.es/robcib/wp-content/uploads/sites/291/2022/04/PhD-Thesis-Silvia-Terrile-UPM.pdf

The Verge. (2025, August 11). *The Verge.* Ανάκτηση από Inside the automated warehouse where robots are packing your groceries (Ocado OGRP): https://www.theverge.com/

Thomas. J et.al. (2013). Avian-inspired grasping for quadrotor micro UAVs. *Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2013). 6A.* New York, NY, USA: American Society of Mechanical Engineers (ASME). doi:https://doi.org/10.1115/DETC2013-13200

Thomas. J, e. (2013). Avian-inspired grasping for quadrotor micro UAVs. *Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2013), Volume 6A: 37th Mechanisms and Robotics Conference*, σσ. 1–10. doi:https://doi.org/10.1115/DETC2013-12035

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Tolvanen. J Hannu. J & Jantunen. H. (2018). Stretchable and washable strain sensor based on cracking structure for human motion monitoring. *Scientific Reports, 8*. doi:https://doi.org/10.1038/s41598-018-31628-7

Trimmer. B. (2013). Soft robots. *Current Biology, 23*(15). doi:https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.04.070

Trivedi. D et.al. (2008). Soft robotics: biological inspiration, state of the art, and future research. *Applied Bionics and Biomechanics, 5*(3), σσ. 99–117. doi:https://doi.org/10.1080/11762320802557865

Triyonoputro. J C et.al. (2018). A double-jaw hand that mimics a mouth of the moray eel. *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (σσ. 1527–1532). IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/ROBIO.2018.8665058

Tseghai. G B et.al. (2020). Integration of conductive materials with textile structures, an overview. *Sensors, 20*. doi:https://doi.org/10.3390/s20236910

Vogt D M et.al. (2018, August 1). Shipboard design and fabrication of custom 3D-printed soft robotic manipulators for the investigation of delicate deep-sea organisms. *PLOS ONE, 13*(8). doi:https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200386

W, H. E. (2021, April 28). Hard questions for soft robotics. *Science Robotics, 6*(53). doi:https://doi.org/10.1126/scirobotics.abg6049

Walker. I D et.al. (2005). Continuum robot arms inspired by cephalopods. *Proceedings of the Unmanned Ground Vehicle Technology VII. 5804*, σσ. 303–314. SPIE. doi:https://doi.org/10.1117/12.604311

Walsh. C. (2018). Human-in-the-loop development of soft wearable robots. *Nature Reviews Materials, 3*(6), σσ. 78–80. doi:https://doi.org/10.1038/s41578-018-0011-1

Wang. D Wu. X Zhang. J & Du. Y. (2022). A pneumatic novel combined soft robotic gripper with high load capacity and large grasping range. *Actuators, 11*(1). doi:https://doi.org/10.3390/act11010003

Wang. H et.al. (2020). Modeling and experiments on the swallowing and disgorging characteristics of an underwater continuum manipulator. *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (σσ. 2946–2952). Paris, France: IEEE.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Wang. H et.al. (2013). Visual servo control of cable-driven soft robotic manipulator. *Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (σσ. 57–62). IEEE.

Wang. T et.al. (2019). Electrostatic layer jamming variable stiffness for soft robotics. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 24*(2), σσ. 424–433. doi:https://doi.org/10.1109/tmech.2019.2893480

Wang. W & Ahn. S-H. (2017). Shape memory alloy-based soft gripper with variable stiffness for compliant and effective grasping. *Soft Robotics, 4*(4), σσ. 379–389. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2016.0081

Wang. X et.al. (2024, November 26). DexGrip: Multi-modal soft gripper with dexterous grasping and in-hand manipulation capacity. *arXiv*. doi:https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.17124

Wang. Y Xie. Z Huang. H & Liang. X. (2024). Pioneering healthcare with soft robotic devices: A review. *Smart Medicine, 3*(1). doi:https://doi.org/10.1002/SMMD.20230045

Wang. Z Chathuranga. D S & Hirai. S. (2016). *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (σσ. 503–508). Piscataway, NJ: IEEE.

Wang. Z Or. K & Hirai. S. (2020). A dual-mode soft gripper for food packaging. *Robotics and Autonomous Systems, 125*. doi:https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103427

Wang.. H et.al. (2013). Visual servo control of cable-driven soft robotic manipulator. *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots* (σσ. 57–62). China: IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/iros.2013.6696332

Wang.. H et.al. (2022, April 1). A Bidirectional Soft Biomimetic Hand Driven by Water Hydraulic for Dexterous Underwater Grasping. *IEEE Robotics and Automation Letters, 7*(2), σσ. 2186–2193. doi:https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3143297

Weathersby. E J et.al. (2021). Automatic control of prosthetic socket size for people with transtibial amputation: Implementation and evaluation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 68*(1), σσ. 36–46. doi:https://doi.org/10.1109/tbme.2020.2992739

Wehner. M et.al. (2016). An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots. *Nature, 536*(7617), σσ. 451–455. doi:https://doi.org/10.1038/nature19100

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Wehner.. M et.al. (2014). Pneumatic energy sources for autonomous and wearable soft robotics. *Soft Robotics, 1*(4), σσ. 263–274. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2014.0018

Wei. Y et.al. (2016). A novel, variable stiffness robotic gripper based on integrated soft actuating and particle jamming. *Soft Robotics, 3*(3), σσ. 134–143. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2016.0027

Whitesides. G M. (2018, April 9). Soft robotics. *Angewandte Chemie International Edition, 57*(16), σσ. 4258–4273. doi:https://doi.org/10.1002/anie.201800907

Winstone. B et.al. (2013). TACTIP – Tactile Fingertip Device, Texture Analysis through Optical Tracking of Skin Features. *Biomimetic and Biohybrid Systems. Living Machines 2013. Lecture Notes in Computer Science, vol. 8064* (σσ. 323–334). Berlin, Heidelberg: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-642-39802-5_28

Wolf. A & Schunk. H. (2018). Grippers in motion. Στο Wolf. A & Schunk. H, & W. A. H (Επιμ.), *Grippers in motion* (σσ. 1–13). Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.

Wood. R & Walsh. C. (2013). Smaller, softer, safer, smarter robots. *Science Translational Medicine, 5*(210). doi:https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3006949

Wood. R & Walsh. C. (2013). Smaller, softer, safer, smarter robots. *Science Translational Medicine, 5*(210). doi:https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3006949

Wu. M et.al. (2024, August 28). Octopus-inspired underwater soft robotic gripper with crawling and swimming capabilities. *Research (Wash D.C.), 7*. doi:https://doi.org/10.34133/research.0456

Wu. M et.al. (2022). Glowing sucker octopus (Stauroteuthis syrtensis)-inspired soft robotic gripper for underwater self-adaptive grasping and sensing. *Advanced Science, 9*(17). doi:https://doi.org/10.1002/advs.202104382

Wu. Q et.al. (2022). Bipedal walking of underwater soft robot based on data-driven model inspired by octopus. *Frontiers in Robotics and AI, 9*. doi:https://doi.org/10.3389/frobt.2022.815435

Wu.. M et.al. (2013, June 13). Glowing Sucker Octopus (Stauroteuthis syrtensis)-Inspired Soft Robotic Gripper for Underwater Self-Adaptive Grasping and Sensing. *Advanced Science, 9*(17). doi:https://doi.org/10.1002/advs.202104382

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Xiao. W et al. (2022). Soft robotic surface enhances the grasping adaptability and reliability of the soft gripper. *International Journal of Mechanical Sciences, 227*. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107427

Xiao. W et.al. (2022). Soft robotic surface enhances the grasping adaptability and reliability of pneumatic grippers. *International Journal of Mechanical Sciences, 219*. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107094

Xie. Z et.al. (2020). Octopus arm-inspired tapered soft actuators with suckers for improved grasping. *Soft Robotics, 7*(5), σσ. 639–648. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2019.0082

Xiloyannis. M et.al. (2021). Soft robotic suits: State of the art, core technologies, and open challenges. *IEEE Transactions on Robotics, 38*(3), σσ. 1343–1362. doi:https://doi.org/10.1109/tro.2021.3084466

Xing. Z et.al. (2020). A super-lightweight and soft manipulator driven by dielectric elastomers. *Soft Robotics, 7*(4), σσ. 512–520. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2018.0134

Xu. F & Wang. H S. (2021, September). Soft Robotics: Morphology and Morphology-Inspired Motion Strategy. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 8*(9), σσ. 1500–1522. doi:https://doi.org/10.1109/JAS.2021.1004105

Xu. M et.al. (2024, October 2). Review of flexible robotic grippers, with a focus on grippers based on magnetorheological materials. *Materials (Basel), 17*(19). doi:https://doi.org/10.3390/ma17194858

Xu. Z & Todorov. E. (2016). Design of a highly biomimetic anthropomorphic robotic hand towards artificial limb regeneration. *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (σσ. 3485–3492). Piscataway, NJ: IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487528

Yan. W & Mehta. A. (2023). Origami-based integration of robots that sense, decide, and respond. *Nature Communications, 14*. doi:https://doi.org/10.1038/s41467-023-37062-9

Yap. H K Ng. H Y & Yeow. C-H. (2016). High-force soft printable pneumatics for soft robotic applications. *Soft Robotics, 3*(3), σσ. 144–158. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2016.0030

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Yasa. O et.al. (2023, May 22). An overview of soft robotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, 6*, σσ. 243–271. doi:https://doi.org/10.1146/annurev-control-062322-100607

Yufei. H et.al. (2017). A variable stiffness soft robotic gripper with low-melting-point alloy. *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)* (σσ. 6781–6786). Dalian, China: IEEE. doi:https://doi.org/10.23919/ChiCC.2017.8028427

Zhai. Y et.al. (2023). Desktop fabrication of monolithic soft robotic devices with…. *Science Robotics, 8*(79). doi:https://doi.org/10.1126/scirobotics.adg3792

Zhang. D et.al. (2025). Application of soft grippers in the field of agricultural harvesting: A review. *Machines, 13*(1). doi:https://doi.org/10.3390/machines13010055

Zhang. J-H Chen. Y-L & Gong. Y-J. (2021). Dynamic model and analysis of soft manipulator facing underwater complex environment. *6th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE)* (σσ. 593–597). Piscataway, NJ: IEEE.

Zhang. X Yan. J & Zhao. J. (χ.χ.). A gas–ribbon-hybrid actuated soft finger with active variable stiffness. *Soft Robotics, 9*(2), σσ. 250–265. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2020.0031

Zhang. Y et.al. (2025, July 20). Towards damage-less robotic fragile fruit grasping: A review. *Advanced Robotics, 39*(13). doi:https://doi.org/10.1002/rob.70021

Zhang. Z et.al. (2022). Pneumatically actuated soft gripper with bistable structures. *Soft Robotics, 9*(1), σσ. 57–71. doi:10.1089/soro.2019.0195

Zheng. W et.al. (2021). Dexterous robotic grasping of delicate fruits aided with a multi-sensory e-glove and manual grasping analysis for damage-free manipulation. *Computers and Electronics in Agriculture, 190*. doi:https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106472

Zheng. Z & Ding. N. (2019). Design and implementation of CCRobot-II: A palm-based cable climbing robot for cable-stayed bridge inspection. *Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (σσ. 9747–9753). IEEE. doi:https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794340

Zhong. C Li. S & Li. R. (2020). Soft robotics: A review of materials, actuators, and sensors for soft robotic grippers. *Applied Sciences, 10*(23). doi:https://doi.org/10.3390/app10238567

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250

Zhong. H et.al. (2020). A hybrid underwater manipulator system with intuitive muscle-level sEMG mapping control. *IEEE Robotics and Automation Letters, 5*(2), σσ. 3198–3205. doi:https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2974700

Zhou. J et.al. (2008). Flexible piezotronic strain sensor. *Nano Letters, 8*(9), σσ. 3035–3040. doi:https://doi.org/10.1021/nl802367t

Zhou. L et.al. (2021). Bio-inspired soft grippers based on impactive gripping. *Advanced Science, 8*(5). doi:https://doi.org/10.1002/advs.202002017

Zhou. S et.al. (2024). Integrated actuation and sensing: Toward intelligent soft robotics. *Cyborg and Bionic Systems, 5*. doi:https://doi.org/10.34133/cbsystems.0105

Zhu. M et.al. (2019). Fluidic fabric muscle sheets for wearable and soft robotics. *Soft Robotics, 7*(2), σσ. 179–197. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2019.0033

Zhu. M et.al. (2024). A variable stiffness soft gripper based on rotational layer jamming. *Soft Robotics, 11*(1), σσ. 85–94. doi:https://doi.org/10.1089/soro.2023.0051

Zhu. Y et.al. (2022). Perching and grasping mechanism inspired by a bird—claw. *Machines, 10*(8). doi:https://doi.org/10.3390/machines10080656

Zhuo. S et.al. (2020, January 1). Complex multiphase organohydrogels with programmable mechanics toward adaptive soft-matter machines. *Science Advances, 6*(5). doi:https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1464

Zhuo. S et.al. (2020, January 31). Complex multiphase organohydrogels with programmable mechanics toward adaptive soft-matter machines. *Science Advances, 6*(5). doi:https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1464

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/09/2026 18:23:30 EEST - 216.73.216.250