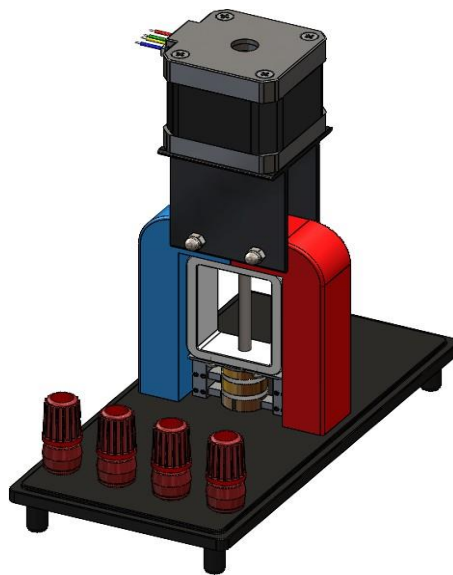


**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ**  
**ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Σχεδίαση και υλοποίηση ηλεκτρικών μηχανών για  
εκπαιδευτικούς σκοπούς»**



Του φοιτητή Μπρέντα Αλέξανδρου

Αριθμός Μητρώου: 513133

**Επιβλέπων:**  
Κιοσκερίδης Ιορδάνης

Θεσσαλονίκη, 2026

**Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας:**

«Σχεδίαση και υλοποίηση ηλεκτρικών μηχανών για εκπαιδευτικούς σκοπούς»

**Κωδικός Δ.Ε.:**

24206

**Όνοματεπώνυμο φοιτητή:**

Μπρέντας Αλέξανδρος

**Όνοματεπώνυμο Επιβλέποντα Καθηγητή:**

Κιοσκερίδης Ιορδάνης

**Ημερομηνία Ανάληψης Δ.Ε.:**

Σεπτέμβριος 2024

**Ημερομηνία Περάτωσης Δ.Ε.:**

Ιούνιος 2026

**Δήλωση:**

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες.

Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/των φοιτητή/ών που την εκπόνησε/αν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος.

Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση ή τροποποίηση της εργασίας χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

# Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει συνοπτικά την ιστορική εξέλιξη, τη λειτουργία και τις σύγχρονες εφαρμογές των ηλεκτρικών κινητήρων, αναδεικνύοντας τα βασικά αίτια που οδήγησαν στην επικράτησή τους έναντι παλαιότερων τεχνολογιών πρόωσης. Από τις πρώιμες μορφές μηχανικής ενέργειας, όπως οι ανεμόμυλοι και οι υδροκίνητοι τροχοί, έως τις ατμομηχανές της βιομηχανικής επανάστασης, η τεχνολογική πρόοδος κορυφώθηκε με την ανάπτυξη της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας κατά τον 19ο αιώνα, μέσα από το έργο των Faraday, Ampère, Maxwell και Tesla.

Η ευρεία χρήση των ηλεκτρικών κινητήρων οφείλεται στην υψηλή ενεργειακή τους απόδοση, στη δυνατότητα ακριβούς ελέγχου, στη μειωμένη ανάγκη συντήρησης και στη φιλικότητά τους προς το περιβάλλον. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μετάβαση από κινητήρες συνεχούς ρεύματος σε επαγωγικούς και σύγχρονους πολυφασικούς κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, οι οποίοι κυριαρχούν στη βιομηχανία λόγω αξιοπιστίας και απλότητας.

Παρουσιάζονται επίσης σύγχρονοι τύποι κινητήρων, όπως οι BLDC και PMSM, καθώς και οι εφαρμογές τους στη ρομποτική, στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις και στα ηλεκτρικά οχήματα. Τέλος, αναλύεται ο ρόλος του λογισμικού SolidWorks στη σχεδίαση και προσομοίωση, υποστηρίζοντας την ανάπτυξη αποδοτικών και καινοτόμων συστημάτων κίνησης, τα οποία συμβάλλουν σε ένα βιώσιμο τεχνολογικό μέλλον.



# Abstract

This diploma thesis examines the historical evolution, operating principles, and modern applications of electric motors, highlighting the key factors that led to their dominance over earlier propulsion technologies. From early mechanical energy systems, such as windmills and water wheels, to the steam engines of the industrial revolution, technological progress reached a turning point with the development of electromagnetic theory in the 19th century, through the contributions of Faraday, Ampère, Maxwell, and Tesla.

The widespread adoption of electric motors is attributed to their high energy efficiency, precise controllability, low maintenance requirements, and environmental sustainability. Particular emphasis is given to the transition from direct current motors to induction and modern polyphase alternating current motors, which dominate industrial applications due to their robustness and simplicity.

Furthermore, contemporary motor types such as Brushless DC (BLDC) and Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) are presented, along with their applications in robotics, industrial systems, and electric vehicles. Finally, the role of SolidWorks software is analyzed in the design and simulation process, supporting the development of efficient and innovative motion systems that contribute to a sustainable technological future.

# Περιεχόμενα

<b>Περίληψη</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
<b>1 Πρώιμες Αρχές και Ιστορική Θεμελίωση των Κινητήρων</b>	<b>3</b>
1.1 Σημαντικά Γεγονότα	3
<b>2 Η Ανάπτυξη των Ηλεκτρικών Κινητήρων και η Θεμελίωση της Βιομηχανικής Χρήσης</b>	<b>5</b>
2.1 Τα αίτια που οδήγησαν στη χρήση ηλεκτρικών κινητήρων	6
2.2 Η συμβολή της προόδου στα Μαθηματικά και τη Φυσική	7
<b>3 Σύγχρονοι Τύποι Κινητήρων και Τεχνολογικές Καινοτομίες</b>	<b>9</b>
3.1 Τα θεμέλια των Σύγχρονων Κινητήρων	9
3.2 Η Εφαρμογή των Κινητήρων στα Οχήματα και η Ηλεκτροκίνηση	11
3.3 Η επίδραση της νέας τεχνολογίας κινητήρων στην Κοινωνία	12
3.4 Κινητήρες στη Ρομποτική, τη Βιομηχανία και τα Έξυπνα Συστήματα Ελέγχου	13
3.5 Εφαρμογές Μηχανικής Μάθησης στην κατασκευή Κινητήρων	13
3.6 Το Μέλλον των Κινητήρων και η Πράσινη Τεχνολογική Μετάβαση	14
3.7 κατασκευή Κινητήρων που σέβονται το Περιβάλλον	15
<b>4 Η Φυσική και τα Μαθηματικά στην Κατασκευή και Λειτουργία Μηχανικών Κινητήρων</b>	<b>17</b>
4.1 Η Εφαρμογή των Φυσικών Εξισώσεων στους Πρώτους Μηχανικούς Κινητήρες	18
4.2 Κινητήρες Πετρελαίου – Θερμοδυναμική και Μαθηματικά Μοντέλα Λειτουργίας	19
<b>5 Χρονολογική Εξέλιξη των Κινητήρων – Σημαντικά Γεγονότα</b>	<b>21</b>
<b>6 Το λογισμικό Solidworks</b>	<b>27</b>
6.1 Ιστορική Αναδρομή	27
6.2 Η Χρήση του SolidWorks στη Μηχανολογική Σχεδίαση	28
6.3 Κατασκευαστική τεκμηρίωση, σχεδίαση 2D και εφαρμογές του SolidWorks σε πραγματικά έργα	31
6.4 Σύγχρονες Τάσεις, Ενοποίηση με Τεχνολογίες Industry 4.0 και Συμπεράσματα	32
<b>7 Η κατασκευή μου</b>	<b>35</b>
7.1 Τρισδιάστατη Σχεδίαση και Ψηφιακή Μοντελοποίηση της Κατασκευής	35
7.2 Διαδικασία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και Τεχνολογία FDM	36

7.3	Προετοιμασία Εκτύπωσης και Ρύθμιση Παραμέτρων μέσω Cura Slicer	37
7.4	Περιγραφή λειτουργίας της κατασκευής	59
7.5	Πειραματικά Δεδομένα	60
<b>8</b>	<b>Συμπεράσματα και Βελτιώσεις</b>	<b>63</b>
8.1	Προτεινόμενες Βελτιώσεις	64
8.2	Μελλοντικές Προοπτικές	64
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>66</b>

# Κατάλογος Πινάκων

7.1 Πειραματικές μετρήσεις κινητήρα για διαφορετικές τάσεις εισόδου

61

# Κατάλογος Σχημάτων

3.1	Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων. Πηγή: <a href="https://englishan.com/types-of-motors/">https://englishan.com/types-of-motors/</a>	11
4.1	Η φυσική του ηλεκτρικού κινητήρα. Πηγή: <a href="https://physics.stackexchange.com/questions/366255/is-torque-in-an-electric-motor-generated-from-repelling-magnetic-dipoles-and-the">https://physics.stackexchange.com/questions/366255/is-torque-in-an-electric-motor-generated-from-repelling-magnetic-dipoles-and-the</a>	19
6.1	Σχεδιασμός ηλεκτρικού κινητήρα με Solidworks. Πηγή :Bhatt, A., & Wiley, M. (2022). <i>SolidWorks 2022 Step-By-Step Guide (Colored Edition): Part Modeling, Assembly, Drawings, Sheet Metal, Surfacing</i> . Independently published.	34
7.1	Τρισδιάστατη απεικόνιση κοχλία σύσφιξης με εσωτερική εξαγωνική υποδοχή.	38
7.2	Τρισδιάστατη απεικόνιση ηλεκτρικού κινητήρα με άξονα εξόδου και ακροδέκτες σύνδεσης.	39
7.3	Τρισδιάστατη απεικόνιση πλαστικής βάσης στήριξης τύπου γωνίας.	39
7.4	Τρισδιάστατη απεικόνιση πλαστικού εξαρτήματος στήριξης.	40
7.5	Τρισδιάστατη απεικόνιση συμπληρωματικού πλαστικού εξαρτήματος.	41
7.6	Τρισδιάστατη απεικόνιση πηνίου με περίβλημα.	41
7.7	Τρισδιάστατη απεικόνιση βάσης στήριξης κινητήρα.	42
7.8	Τρισδιάστατη απεικόνιση κυκλικού δακτυλίου.	43
7.9	Τρισδιάστατη απεικόνιση μπόρνας.	44
7.10	Τρισδιάστατη απεικόνιση βάσης κατασκευής.	45
7.11	Τα ποδαράκια της βάσης της κατασκευής.	45
7.12	Τρισδιάστατη απεικόνιση δακτυλίου με εγκοπή.	46
7.13	Τρισδιάστατη απεικόνιση άξονα.	47
7.14	Τρισδιάστατη απεικόνιση συνδέσμου αξόνων (coupler).	47
7.15	Τρισδιάστατη απεικόνιση πλαστικού περιβλήματος.	48
7.16	Τρισδιάστατη απεικόνιση κοχλία με κεφαλή και ευθύγραμμη εγκοπή.	48
7.17	Τρισδιάστατη απεικόνιση ροδέλας.	49
7.18	Τρισδιάστατη απεικόνιση εξάγωνου περικοχλίου.	50
7.19	Τρισδιάστατη απεικόνιση τυφλού περικοχλίου.	50
7.20	Τρισδιάστατη απεικόνιση κοχλία με σταυροειδή εγκοπή.	51
7.21	Τρισδιάστατη απεικόνιση κοχλία με φαρδιά κεφαλή και σταυροειδή εγκοπή.	52
7.22	Τρισδιάστατη απεικόνιση μαγνήτη νεοδυμίου.	53
7.23	Τρισδιάστατη απεικόνιση της συνολικής συναρμολογημένης κατασκευής.	54
7.24	Τρισδιάστατη απεικόνιση της συνολικής κατασκευής από εναλλακτική γωνία θέασης.	55
7.25	Άνω όψη της συνολικής κατασκευής.	56
7.26	Πρόσωση της συνολικής κατασκευής.	57

7.27 Πρόσωση της κατασκευής με εμφανή τα εσωτερικά στοιχεία.	58
7.28 Φωτογραφία της κατασκευής.	60

# Εισαγωγή

Η ιστορία και η εξέλιξη των κινητήρων αποτελεί ένα από τα πιο συναρπαστικά και κρίσιμα κεφάλαια στην τεχνολογική πρόοδο της ανθρωπότητας, ξεκινώντας από τις αρχαίες μορφές μηχανικής κίνησης που στηρίζονταν στη μυϊκή δύναμη και στην υδραυλική ενέργεια και φτάνοντας μέχρι τους σύγχρονους ηλεκτρονικούς ελεγχόμενους κινητήρες ακριβείας [1]. Οι πρώτοι κινητήρες όπως οι ατμομηχανές αποτέλεσαν καταλύτες της βιομηχανικής επανάστασης, επιτρέποντας τη μαζική παραγωγή και την αυτοματοποίηση της εργασίας [2]. Η εισαγωγή του ηλεκτρισμού οδήγησε στην ανάπτυξη των ηλεκτρικών κινητήρων, με τον Michael Faraday και τον Nikola Tesla να παίζουν καθοριστικό ρόλο στη θεμελίωση των αρχών του ηλεκτρομαγνητισμού και των εναλλασσόμενων ρευμάτων, δημιουργώντας τη βάση για τους επαγωγικούς κινητήρες [3]. Οι τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες κυριάρχησαν στη βιομηχανία λόγω της απλότητας κατασκευής τους, της χαμηλής συντήρησης και της σταθερής απόδοσής τους [4]. Η General Motors ήταν πρωτοπόρος στην ανάπτυξη ηλεκτρικών οχημάτων, με παραδείγματα όπως τα Electrovair και Electrovap, τα οποία χρησιμοποιούσαν προηγμένες τεχνολογίες μπαταριών και καυσίμων κυψελών τη δεκαετία του 1960, ανοίγοντας τον δρόμο για σύγχρονα ηλεκτροκίνητα οχήματα [5]. Παράλληλα, η εφαρμογή των ηλεκτρικών κινητήρων επεκτάθηκε από τη βιομηχανία στη γεωργία, στην καθημερινή ζωή και στη ρομποτική, με την αξιοποίηση κινητήρων για την αυτοματοποίηση μουσικών οργάνων και την ενσωμάτωση σε έξυπνα ρομποτικά συστήματα [6]. Η εξέλιξη των κινητήρων συνεχίστηκε με την ανάπτυξη των σερβοκινητήρων και των κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (brushless), οι οποίοι επιτρέπουν την ακριβή ρύθμιση στροφών και ροπής σε πραγματικό χρόνο, ιδιαίτερα σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας όπως τα CNC μηχανήματα και τα ιατρικά ρομπότ [7]. Η ενσωμάτωση αισθητήρων, μετατροπέων ισχύος και ελεγκτών βάσει μικροεπεξεργαστών συνέβαλε στην αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και της λειτουργικής αξιοπιστίας των σύγχρονων ηλεκτρικών κινητήρων [8]. Ιδιαίτερη σημασία έχουν αποκτήσει τα συστήματα ελέγχου κινητήρων (motor control systems), τα οποία επιτρέπουν την αυτορρύθμιση και τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων σε συνδυασμό με τεχνικές μεταβλητής συχνότητας (VFD), συμβάλλοντας στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και στην αύξηση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού [9]. Η εξέλιξη αυτή δεν θα ήταν εφικτή χωρίς τη συμβολή της θεωρίας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, των εξισώσεων του Maxwell και της μαθηματικής περιγραφής της αλληλεπίδρασης μεταξύ ρευμάτων, μαγνητικών πεδίων και ροπής [3]. Οι πρόσφατες εξελίξεις στους κινητήρες περιλαμβάνουν την αξιοποίηση καινοτόμων υλικών, την ελαχιστοποίηση των μηχανικών απωλειών και την υιοθέτηση τεχνικών ψηφιακής προσομοίωσης και τεχνητής νοημοσύνης για την παρακολούθηση και διάγνωση βλαβών [4]. Ο ρόλος των κινητήρων στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης είναι καθοριστικός, καθώς μέσω του εξηλεκτρισμού της κινητικότητας, της ενεργειακής μετάβασης και των έξυπνων βιομηχανικών υποδομών, συνεισφέρουν στην επίτευξη κλιματικών και περιβαλλοντικών στόχων [1].



# Κεφάλαιο 1: Πρώιμες Αρχές και Ιστορική Θεμελίωση των Κινητήρων

Η έννοια της μηχανικής κίνησης αποτελεί βασικό πυλώνα της τεχνολογικής ανάπτυξης ήδη από την αρχαιότητα, καθώς οι πρώτες απόπειρες για τη μηχανοκίνηση των εργαλείων και των συστημάτων πραγματοποιήθηκαν μέσω απλών κατασκευών που βασίζονταν στη δύναμη του νερού, του ανέμου και της μυϊκής ενέργειας ανθρώπων και ζώων [2]. Στην Αρχαία Ελλάδα και στη Ρωμαϊκή αυτοκρατορία εμφανίζονται μηχανισμοί όπως ο τροχός του νερού και ο ανεμόμυλος, οι οποίοι λειτούργησαν ως πρόδρομοι των θερμικών και ηλεκτρικών κινητήρων που θα αναπτυχθούν αιώνες αργότερα [1]. Με την έναρξη της πρώτης βιομηχανικής επανάστασης στα τέλη του 18ου αιώνα, η ανάπτυξη της ατμομηχανής από τον James Watt υπήρξε σημείο καμπής, προσφέροντας την πρώτη σημαντική μηχανική λύση για την παροχή σταθερής και ελεγχόμενης ισχύος σε βιομηχανικά συστήματα [8]. Η ατμοκίνηση αποτέλεσε θεμέλιο για την αυτοματοποίηση της παραγωγής και τη μαζική μεταφορά, εισάγοντας μια νέα εποχή στην ανθρώπινη δραστηριότητα [2]. Κατά τη διάρκεια του 19ου αιώνα, οι ερευνητές στράφηκαν προς την κατανόηση των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων, οδηγώντας στην ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής από τον Faraday, και αργότερα στην κατασκευή των πρώτων ηλεκτρικών κινητήρων [3]. Τα πειράματα του Nikola Tesla με εναλλασσόμενο ρεύμα, καθώς και οι πατέντες του για πολυφασικούς κινητήρες, ενίσχυσαν την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς και μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε κινητική [5]. Έως τα τέλη του 19ου αιώνα, είχαν καθιερωθεί οι πρώτοι πρακτικοί κινητήρες συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος, οι οποίοι άρχισαν να ενσωματώνονται σε εργοστάσια, σιδηροδρομικά οχήματα και πρώιμα συστήματα μεταφορών [9]. Η εξέλιξη αυτή δημιούργησε νέα δεδομένα στην αρχιτεκτονική των μηχανών, καθώς ο ηλεκτρικός κινητήρας μπορούσε πλέον να παρέχει μηχανική ενέργεια με ακρίβεια, αξιοπιστία και χαμηλό κόστος συντήρησης, χωρίς την ανάγκη καύσης καυσίμου ή παραγωγής καυσαερίων [8]. Κατά συνέπεια, η πρώτη φάση της εξέλιξης των κινητήρων συνοδεύτηκε από ένα συνεχές πέρασμα από τη φυσική μηχανική ενέργεια στην αξιοποίηση της θερμικής και τελικά της ηλεκτρικής ενέργειας, θεμελιώνοντας τις προϋποθέσεις για την τεχνολογική επανάσταση που ακολούθησε [1].

## 1.1 Σημαντικά Γεγονότα

Μια από τις σημαντικότερες φάσεις της πρώιμης θεμελίωσης των κινητήρων υπήρξε η ανάπτυξη των πρώτων θερμικών μηχανών, οι οποίες αξιοποίησαν τις αρχές της θερμοδυναμικής και της πίεσης των αερίων για να μετατρέψουν θερμική ενέργεια σε μηχανική κίνηση, θεμελιώνοντας την τεχνολογία των κινητήρων εσωτερικής καύσης [2]. Η χρήση του ατμού ως ενεργειακού μέσου είχε ήδη τεκμηριωθεί

θεωρητικά μέσω των νόμων του Boyle και του Charles, που περιγράφουν τη σχέση όγκου, πίεσης και θερμοκρασίας ενός ιδανικού αερίου, παρέχοντας στους πρώτους μηχανικούς τα απαραίτητα εργαλεία για τον σχεδιασμό κυλίνδρων και εμβόλων [8]. Η πρώτη αξιόπιστη εφαρμογή έγινε από τον Thomas Newcomen το 1712 με την ατμομηχανή ατμοσυμπύκνωσης, ενώ η μεγάλη τομή ήρθε με τον James Watt, ο οποίος με τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης μέσω ξεχωριστού συμπυκνωτή εισήγαγε την ιδέα της συνεχιζόμενης περιστροφικής κίνησης [2]. Η θεωρητική περιγραφή της λειτουργίας αυτών των μηχανών έγινε με την εφαρμογή του πρώτου νόμου της θερμοδυναμικής, συνδυάζοντας την εσωτερική ενέργεια, την παρεχόμενη θερμότητα και την παραγόμενη μηχανική εργασία, επιτρέποντας την πρόβλεψη της απόδοσης και τη σύγκριση διαφορετικών μηχανικών διατάξεων [10]. Η βασική ιδέα του κύκλου λειτουργίας ως σειράς ιδανικών θερμοδυναμικών μεταβολών κατέστη κεντρική για τους μηχανικούς, οδηγώντας αργότερα στη διατύπωση των κύκλων Otto και Diesel, που αποτελούν τις θερμικές βάσεις των κινητήρων εσωτερικής καύσης [11]. Ακόμη και στους πρώτους μηχανικούς σχεδιασμούς, παρατηρείται χρήση γεωμετρικών και κινηματικών μαθηματικών μοντέλων για την περιγραφή της μετάδοσης της κίνησης από τον κύλινδρο προς τον στροφαλοφόρο άξονα, επιτρέποντας τη συνεχή περιστροφή μέσω εμβολοφόρου μετακίνησης [8]. Η λειτουργία των πρώτων θερμικών κινητήρων ήταν απόλυτα συνυφασμένη με την ανάγκη πρακτικής εφαρμογής θεμελιωδών φυσικών εννοιών, ενώ η σταδιακή εμβάθυνση στην κατανόηση της καύσης, της πίεσης και της ροής θερμότητας οδήγησε σε σταθερή αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και της αξιοπιστίας των μηχανών, επιταχύνοντας τη βιομηχανική επανάσταση και ανοίγοντας τον δρόμο για τις μετέπειτα ηλεκτρικές και εναλλακτικές τεχνολογίες πρόωσης [2].

## **Κεφάλαιο 2: Η Ανάπτυξη των Ηλεκτρικών Κινητήρων και η Θεμελίωση της Βιομηχανικής Χρήσης**

Η μετάβαση από τους θερμικούς στους ηλεκτρικούς κινητήρες αποτέλεσε ένα από τα πιο κρίσιμα τεχνολογικά άλματα της νεότερης εποχής, καθώς η ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και η διατύπωση των εξισώσεων του Maxwell διαμόρφωσαν το θεωρητικό πλαίσιο που επέτρεψε την υλοποίηση της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας [3]. Οι πρώτοι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC motors) αναπτύχθηκαν ήδη από τα μέσα του 19ου αιώνα, με τη συμβολή του Zénoobe Gramme, ο οποίος κατασκεύασε τον πρώτο πρακτικό κινητήρα που μπορούσε να παρέχει σταθερή ροπή υπό φορτίο [12]. Η ικανότητα αυτών των κινητήρων να ελέγχουν με σχετική ευκολία την ταχύτητα και την κατεύθυνση περιστροφής τους οδήγησε στην εκτεταμένη χρήση τους σε εφαρμογές όπως τα τραμ, οι ανελκυστήρες και οι μεταφορικές ταινίες στις πρώτες γραμμές παραγωγής [8]. Ωστόσο, οι περιορισμοί που σχετίζονταν με τη συντήρηση των ψήκτρων, τη φθορά των επαφών και τις απώλειες λόγω σπινθηρισμού, ώθησαν τους μηχανικούς στην αναζήτηση πιο αποδοτικών εναλλακτικών [13]. Αυτή η ανάγκη κάλυψης οδήγησε στην ανάπτυξη των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος (AC motors), με πιο χαρακτηριστικούς τους επαγωγικούς κινητήρες, στους οποίους η περιστροφή του δρομέα επιτυγχάνεται μέσω της επαγωγής ρεύματος από το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη χωρίς άμεση ηλεκτρική επαφή [14]. Οι επαγωγικοί κινητήρες αποτέλεσαν τη ραχοκοκαλιά της βιομηχανικής αυτοματοποίησης τον 20ό αιώνα λόγω της απλότητας, της στιβαρής κατασκευής και της χαμηλής ανάγκης συντήρησης, καθιστώντας τους ιδανικούς για χρήση σε αντλίες, ανεμιστήρες, κομπρεσέρ και γραμμές συναρμολόγησης [4]. Επιπλέον, με την ανάπτυξη των πολυφασικών συστημάτων, κυρίως των τριφασικών, επιτεύχθηκε βελτιωμένος διαμοιρασμός της ισχύος και περιορισμός των παλμών ροπής, αυξάνοντας την ενεργειακή αποδοτικότητα [15]. Η ενσωμάτωση τεχνικών μεταβλητής συχνότητας (VFDs) κατά τις τελευταίες δεκαετίες ενίσχυσε περαιτέρω τον έλεγχο και την απόδοση των AC κινητήρων, επιτρέποντας την ακριβή προσαρμογή της ταχύτητας και της ροπής στις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής [9]. Η σταδιακή μετάβαση από τους DC στους AC κινητήρες σηματοδότησε όχι μόνο την εξέλιξη της ηλεκτροτεχνικής αλλά και τη μετάβαση σε έναν νέο τρόπο σκέψης όπου η αποδοτικότητα, η αυτοματοποίηση και η διασύνδεση αποτελούν πλέον κεντρικά χαρακτηριστικά των σύγχρονων ηλεκτρομηχανικών συστημάτων [1].

## 2.1 Τα αίτια που οδήγησαν στη χρήση ηλεκτρικών κινητήρων

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρικών κινητήρων δεν αποτελεί μόνο προϊόν επιστημονικής ανακάλυψης και τεχνικής καινοτομίας, αλλά πρωτίστως είναι αποτέλεσμα μιας σειράς από διαδοχικές κοινωνικές, οικονομικές, ενεργειακές και τεχνολογικές ανάγκες, οι οποίες οδήγησαν σε βαθμιαία εγκατάλειψη άλλων μορφών κίνησης και στην υιοθέτηση της ηλεκτρομηχανολογίας ως κυρίαρχης λύσης για την παροχή μηχανικής ισχύος [14]. Από τους πρώτους κινητήρες εσωτερικής καύσης και τις μηχανές ατμού μέχρι τη ραγδαία εξάπλωση των ηλεκτρικών κινητήρων σε βιομηχανικές, οικιακές και μεταφορικές εφαρμογές, η ιστορική πορεία της μηχανοκίνησης αντικατοπτρίζει μεταβαλλόμενα πρότυπα παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, καθώς και την ανάγκη για πιο αποδοτικές, ασφαλείς, καθαρές και αυτοματοποιημένες τεχνολογίες [8]. Η εμφάνιση και επικράτηση των ηλεκτρικών κινητήρων δεν μπορεί να κατανοηθεί ανεξάρτητα από το πλαίσιο της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας, των βελτιώσεων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και των οικονομικών παραμέτρων που καθιστούσαν τη χρήση τους προτιμότερη σε σχέση με τις εναλλακτικές τεχνολογίες της εποχής [3]. Επιπλέον, η εσωτερική δομή και λειτουργία των ηλεκτρικών κινητήρων, στηριγμένη στις θεμελιώδεις αρχές της Φυσικής, προσέφερε την απαραίτητη σταθερότητα, ευελιξία και δυνατότητα κλιμάκωσης που απαιτούνταν τόσο από τις βαριές βιομηχανίες όσο και από τις μικρομεσαίες επιχειρήσεις [16]. Το παρόν κείμενο επιδιώκει να αναλύσει με συστηματικό τρόπο τα αίτια που οδήγησαν στην ευρεία χρήση των ηλεκτρικών κινητήρων, ταξινομώντας τα σε έξι βασικές κατηγορίες: επιστημονικά-θεωρητικά θεμέλια, τεχνολογική ωρίμανση, ενεργειακή αποδοτικότητα, περιβαλλοντικά κίνητρα, οικονομική σκοπιμότητα και κοινωνική αποδοχή [1]. Μέσα από αυτή την προσέγγιση, αναδεικνύεται η πολυπαραγοντική φύση της τεχνολογικής εξέλιξης και η δυναμική σχέση ανάμεσα στις φυσικές επιστήμες, τη βιομηχανική πρακτική και τις κοινωνικές ανάγκες [4].

Η πρώτη και θεμελιώδης αιτία που οδήγησε στην ανάπτυξη και χρήση των ηλεκτρικών κινητήρων ήταν η πρόοδος στην κατανόηση των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων, κυρίως χάρη στα έργα των Faraday, Ampère, Maxwell και άλλων επιστημόνων του 19ου αιώνα [3]. Η διατύπωση των εξισώσεων του Maxwell και η πειραματική επιβεβαίωση της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής από τον Faraday παρείχαν το θεωρητικό υπόβαθρο για την κατασκευή συστημάτων στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια μπορούσε να μετατραπεί σε μηχανική μέσω της αλληλεπίδρασης αγωγών με μαγνητικά πεδία [10]. Οι πρώτοι ηλεκτρικοί κινητήρες βασίστηκαν ακριβώς σε αυτές τις αρχές, εφαρμόζοντας τη δύναμη Lorentz και την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή για τη δημιουργία περιστροφικής ροπής, ενώ η παράλληλη ανάπτυξη των ηλεκτρογεννητριών κατέστησε εφικτή την αποκεντρωμένη παραγωγή και χρήση ηλεκτρικής ενέργειας [14]. Η θεωρητική ακρίβεια που προσέφεραν οι φυσικές εξισώσεις επέτρεψε τον μαθηματικό υπολογισμό της απόδοσης, της ροπής, των ρευμάτων και των φορτίων, οδηγώντας σε κινητήρες που ήταν προβλέψιμοι, σχεδιαστικά βελτιώσιμοι και εύκολα επεκτάσιμοι σε διαφορετικές εφαρμογές [16]. Αυτή η θεωρητική σταθερότητα αποτέλεσε βασικό πλεονέκτημα έναντι των θερμικών κινητήρων, οι οποίοι στηρίζονταν σε πιο σύνθετες και ασταθείς διεργασίες καύσης, θερμικής διαστολής και μεταβλητής απόδοσης [11]. Επομένως, η δυνατότητα φυσικομαθηματικής μοντελοποίησης των ηλεκτρικών κινητήρων τους καθιστούσε ιδανικούς για χρήση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών με διαφορετικές απαιτήσεις ισχύος, ταχύτητας και λειτουργικής ακρίβειας [8].

## 2.2 Η συμβολή της προόδου στα Μαθηματικά και τη Φυσική

Η πρόωμη ανάπτυξη των ηλεκτρικών κινητήρων στηρίχθηκε σε μεγάλο βαθμό στη θεμελίωση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας, η οποία αποτέλεσε το απαραίτητο επιστημονικό υπόβαθρο για την κατανόηση της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική κίνηση, ενώ παράλληλα η μαθηματική μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των αγωγών, των πηνίων και των μαγνητικών πεδίων κατέστησε δυνατή την πρόβλεψη και τη βελτιστοποίηση των πρώτων λειτουργικών κινητήρων [3]. Οι πρωτοπόροι επιστήμονες όπως ο Michael Faraday, ο Hippolyte Pixii και, αργότερα, οι Nikola Tesla και Galileo Ferraris, βασίστηκαν στις βασικές αρχές της δύναμης που ασκείται σε φορτισμένα σωματίδια εντός μαγνητικών πεδίων και στην επαγωγή τάσης λόγω μεταβολών στο μαγνητικό περιβάλλον, για να περιγράψουν την παραγόμενη κίνηση στους ηλεκτρικούς κινητήρες [3]. Η κατανόηση της κυκλοφορίας των ρευμάτων στον στάτη και του μηχανισμού περιστροφής του δρομέα θεμελιώθηκε στη μελέτη των κυμαινόμενων μαγνητικών πεδίων και στην ανάλυση της παραγόμενης ροπής, η οποία επέτρεψε τον ακριβή υπολογισμό της δύναμης που ασκείται στα περιστρεφόμενα μέρη [16]. Στους πρώτους κινητήρες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιήθηκαν διαφορικά μοντέλα για την κατανόηση των μεταβολών του ρεύματος και της επαγωγής στο αγωγίμο στοιχείο, ενώ στους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος αναπτύχθηκαν ισοδύναμα κυκλώματα με μιγαδικές παραμέτρους για την ανάλυση της συμπεριφοράς τους υπό χρονικά μεταβαλλόμενα σήματα, με τη βοήθεια προηγμένων μαθηματικών εργαλείων [10]. Η παραγωγή ροπής στους επαγωγικούς κινητήρες αναλύθηκε με βάση τη μαγνητική σύζευξη μεταξύ των επιμέρους στοιχείων και τη σχετική διαφορά περιστροφής μεταξύ στάτη και δρομέα, λαμβάνοντας υπόψη τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των κυκλωμάτων τους [14]. Ήδη από τις πρώτες δεκαετίες της λειτουργίας τους, οι ηλεκτρικοί κινητήρες ενσωμάτωναν θεμελιώδεις φυσικές αρχές σε συνδυασμό με τεχνικές μοντελοποίησης και μηχανολογικού σχεδιασμού, γεγονός που επέτρεψε την ακριβή πρόβλεψη της λειτουργικής τους συμπεριφοράς, τη δημιουργία κατασκευαστικών προτύπων και την καθιέρωσή τους ως το βασικότερο μέσο παροχής μηχανικής κίνησης στον σύγχρονο τεχνολογικό κόσμο [12].



# Κεφάλαιο 3: Σύγχρονοι Τύποι Κινητήρων και Τεχνολογικές Καινοτομίες

Η εξέλιξη των κινητήρων τον 20ό και 21ο αιώνα χαρακτηρίζεται από εντυπωσιακή ποικιλομορφία τύπων και τεχνολογικών καινοτομιών, οι οποίες ανταποκρίνονται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών από την καθημερινότητα μέχρι τις διαστημικές αποστολές [12]. Οι κινητήρες brushless συνεχούς ρεύματος (BLDC) αποτελούν μια εξέλιξη των παραδοσιακών DC κινητήρων, χωρίς την ανάγκη για ψήκτρες και μηχανικές επαφές, προσφέροντας αυξημένη διάρκεια ζωής, καλύτερη ενεργειακή απόδοση και χαμηλότερη συντήρηση [14]. Τέτοιοι κινητήρες χρησιμοποιούνται εκτενώς σε ρομποτικές εφαρμογές, drones, ηλεκτρικά ποδήλατα και μικροεργαλεία υψηλής ακρίβειας [6]. Επιπλέον, οι σερβοκινητήρες, που βασίζονται σε συστήματα ανατροφοδότησης (feedback), προσφέρουν εξαιρετικά υψηλό έλεγχο θέσης, ταχύτητας και ροπής, γεγονός που τους καθιστά απαραίτητους στην αεροναυπηγική, στις CNC μηχανές και στις βιομηχανίες αυτοματισμού [7]. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι γραμμικοί κινητήρες, οι οποίοι μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια απευθείας σε γραμμική κίνηση χωρίς τη χρήση μηχανικών μεταδόσεων, χρησιμοποιούμενοι σε εφαρμογές όπως τρένα μαγνητικής αιώρησης (maglev), αυτοματοποιημένα συστήματα αποθήκευσης και ιατρικές διαγνωστικές συσκευές [4]. Ένα άλλο πεδίο ραγδαίας εξέλιξης αποτελεί ο τομέας των υπεραγωγίων κινητήρων, που αξιοποιούν υλικά με μηδενική ηλεκτρική αντίσταση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, επιτρέποντας την κατασκευή πολύ ισχυρών αλλά ελαφριών κινητήρων για χρήση σε ηλεκτρικά αεροσκάφη και μεγάλα συστήματα παραγωγής ενέργειας [1]. Παράλληλα, οι τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης εφαρμόζονται πλέον στην παρακολούθηση και διάγνωση της κατάστασης των κινητήρων μέσω συστημάτων πρόγνωσης βλαβών και προληπτικής συντήρησης, βελτιώνοντας την απόδοση και μειώνοντας το λειτουργικό κόστος [4]. Η ανάπτυξη αισθητήρων, μικροελεγκτών και ψηφιακών συστημάτων ελέγχου επέτρεψε την ενσωμάτωση των κινητήρων σε διασυνδεδεμένα περιβάλλοντα, γνωστά ως Internet of Things (IoT), όπου η λειτουργία των συσκευών μπορεί να παρακολουθείται και να ρυθμίζεται απομακρυσμένα [13]. Τέλος, η προσομοίωση με τη βοήθεια υπολογιστών (computer-aided design) και η χρήση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων (FEM) έχουν καταστήσει δυνατή την ακριβή πρόβλεψη της απόδοσης ενός κινητήρα πριν καν κατασκευαστεί, επιταχύνοντας έτσι την καινοτομία και μειώνοντας το κόστος ανάπτυξης νέων προϊόντων [8].

## 3.1 Τα θεμέλια των Σύγχρονων Κινητήρων

Οι σύγχρονοι τύποι κινητήρων, όπως οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες (BLDC), οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (PMSM), οι γραμμικοί κινητήρες και οι σερβοκινητήρες, βασίζονται σε προηγμένες ε-

φαρμογές της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας, των μαθηματικών μοντέλων μεταβλητών φορτίων και των δυναμικών συστημάτων ελέγχου, ενσωματώνοντας τεχνολογίες υψηλής ακρίβειας και έξυπνης προσαρμογής [14]. Για την προσομοίωση και σχεδίαση αυτών των κινητήρων χρησιμοποιούνται εξισώσεις του Maxwell και τεχνικές υπολογιστικής ηλεκτρομαγνητικής, μέσω των οποίων υπολογίζονται η μαγνητική ροή, οι γραμμές πεδίου και οι επαγόμενες τάσεις σε πολύπλοκες γεωμετρίες και σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας [3]. Ιδιαίτερα οι BLDC και PMSM κινητήρες μοντελοποιούνται με χρήση μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη ροπή και την ταχύτητα περιστροφής ως συνάρτηση των μεταβαλλόμενων ηλεκτρικών ρευμάτων, των γωνιών θέσης του δρομέα και των μεταβολών φορτίου [10]. Η μαθηματική περιγραφή των πολυφασικών κυκλωμάτων AC απαιτεί την εφαρμογή θεωρίας μετασχηματισμών όπως του Clarke και του Park, που επιτρέπουν τη μετατροπή των κυμάτων τριών φάσεων σε ένα σταθερό σύστημα αναφοράς για την απλοποίηση των εξισώσεων ελέγχου [16]. Οι σερβοκινητήρες, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, απαιτούν ανάλυση μέσω της θεωρίας ελέγχου κλειστού βρόχου και συναρτήσεων μεταφοράς, επιτρέποντας την πρόβλεψη της απόκρισης και του σφάλματος θέσης με τη χρήση Laplace και διαγραμμάτων Bode [12]. Στους γραμμικούς κινητήρες, η μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε ευθύγραμμη κίνηση απαιτεί μοντελοποίηση της δύναμης Lorentz κατά μήκος μιας γραμμικής διαδρομής και συνδυάζεται με αναλυτική επίλυση μηχανικών μοντέλων κινηματικής για τον προσδιορισμό της ακρίβειας και της ταχύτητας [10]. Η χρήση προηγμένων υλικών, όπως σύνθετα μαγνητικά κράματα, ναοκρυσταλλικά πυρήνες και μονώσεις υψηλής θερμικής αντοχής, έχει οδηγήσει στην ανάγκη ενσωμάτωσης θερμικής και δομικής προσομοίωσης, μέσω πολυφυσικών μοντέλων που λαμβάνουν υπόψη τη σύζευξη μεταξύ θερμικής αγωγιμότητας, μαγνητικής ευαισθησίας και μηχανικών καταπονήσεων [14]. Η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης στους αλγόριθμους ελέγχου αυτών των κινητήρων επιτρέπει δυναμική μάθηση του προφίλ φορτίου, πρόβλεψη φθοράς εξαρτημάτων και αυτόνομη αναπροσαρμογή της στρατηγικής λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο, θεμελιώνοντας το πέρασμα από την απλή μηχανική σε ευφυή, προσαρμοστικά συστήματα κίνησης [4].



Σχήμα 3.1 Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων. Πηγή: <https://englishan.com/types-of-motors/>

### 3.2 Η Εφαρμογή των Κινητήρων στα Οχήματα και η Ηλεκτροκίνηση

Η εφαρμογή των κινητήρων στα οχήματα υπήρξε καταλυτική για την εξέλιξη των μεταφορών, ξεκινώντας από τις πρώτες ατμοκίνητες άμαξες και φτάνοντας στα σημερινά ηλεκτρικά οχήματα με προηγμένα συστήματα ελέγχου και ανάκτησης ενέργειας [5]. Οι θερμικοί κινητήρες εσωτερικής καύσης (ICE) κυριάρχησαν για περισσότερο από έναν αιώνα, αξιοποιώντας τη χημική ενέργεια των καυσίμων για την

παραγωγή μηχανικής ισχύος μέσω εμβόλων και στροφαλοφόρων αξόνων [11]. Η ανάγκη για αποδοτικότερες και καθαρότερες τεχνολογίες, σε συνδυασμό με τη διεθνή περιβαλλοντική νομοθεσία και την αύξηση της τιμής των καυσίμων, ώθησαν τη βιομηχανία προς την ηλεκτροκίνηση και την υιοθέτηση εναλλακτικών μορφών πρόωσης [1]. Τα ηλεκτρικά οχήματα (EVs) χρησιμοποιούν κυρίως μόνιμου μαγνήτη σύγχρονους κινητήρες (PMSM) ή επαγωγικούς κινητήρες, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση, ακριβή έλεγχο ταχύτητας και μικρή ανάγκη συντήρησης [14]. Οι εταιρείες όπως η General Motors και η Tesla πρωτοστάτησαν στην ενσωμάτωση προηγμένων ηλεκτρικών κινητήρων και συστημάτων ισχύος σε επιβατικά και εμπορικά οχήματα, ενώ νεότερες τεχνολογίες όπως οι γραμμικοί κινητήρες βρίσκουν εφαρμογές σε μέσα μαζικής μεταφοράς υψηλής ταχύτητας [12]. Παράλληλα, εξελίσσονται και τα συστήματα ανάκτησης ενέργειας κατά την πέδηση (regenerative braking), τα οποία αξιοποιούν την αδράνεια του οχήματος για την ανατροφοδότηση της μπαταρίας μέσω αντίστροφης λειτουργίας του κινητήρα [4]. Η ενεργειακή απόδοση των ηλεκτρικών κινητήρων ξεπερνά το 90%, σε αντίθεση με την περιορισμένη απόδοση των θερμικών κινητήρων που κυμαίνεται μεταξύ 25–30%, ενισχύοντας σημαντικά τη βιωσιμότητα της ηλεκτροκίνησης [1]. Επιπλέον, η χρήση ηλεκτρικών κινητήρων σε υβριδικά οχήματα (HEVs και PHEVs) επιτρέπει τη συνδυαστική αξιοποίηση του ηλεκτρισμού και των υγρών καυσίμων, εξισορροπώντας την αυτονομία με τη μείωση των εκπομπών ρύπων [5]. Η αυτοκινητοβιομηχανία πλέον επενδύει μαζικά σε νέες πλατφόρμες ειδικά σχεδιασμένες για EVs, ενσωματώνοντας τους κινητήρες απευθείας στους τροχούς (in-wheel motors), μειώνοντας τα μηχανικά μέρη και αυξάνοντας την ελευθερία σχεδίασης [11]. Με βάση αυτές τις εξελίξεις, οι ηλεκτρικοί κινητήρες καθίστανται πλέον το νέο πρότυπο κίνησης για την αυτοκίνηση του 21ου αιώνα, συνδέοντας την τεχνολογική πρόοδο με τους στόχους της βιώσιμης κινητικότητας και της πράσινης μετάβασης [1].

### 3.3 Η επίδραση της νέας τεχνολογίας κινητήρων στην Κοινωνία

Η ενσωμάτωση των κινητήρων στα οχήματα, αρχικά μέσω των θερμικών και αργότερα των ηλεκτρικών κινητήρων, επέφερε ριζικές κοινωνικές, οικονομικές και πολιτισμικές αλλαγές, μετασχηματίζοντας την καθημερινή ζωή, την εργασία και τις αντιλήψεις για τον χώρο και τον χρόνο [11]. Η δυνατότητα μετακίνησης με ιδιότητα ή μαζικά μηχανοκίνητα μέσα ανέτρεψε τα δεδομένα της βιομηχανικής κοινωνίας, καθώς επέτρεψε την καθημερινή μετακίνηση εργαζομένων, την αποκέντρωση των πόλεων και τη δημιουργία προαστιακών ζωνών, αναδομώντας τις αστικές δομές και τα δίκτυα παραγωγής [1]. Η μεταφορά προϊόντων σε μεγαλύτερες αποστάσεις με ταχύτερο ρυθμό οδήγησε στην παγίωση του εμπορίου μεγάλης κλίμακας και στην επιτάχυνση της κυκλοφορίας αγαθών, ενισχύοντας τη βιομηχανική παραγωγή και τη συγκέντρωση κεφαλαίου [5]. Ταυτόχρονα, η ψυχολογία της κίνησης και η έννοια της ατομικής ελευθερίας ενισχύθηκαν σημαντικά με την εξάπλωση του αυτοκινήτου, καθιστώντας τον κινητήρα εργαλείο πολιτισμικής ταυτότητας και κοινωνικής διάκρισης [11]. Η ηλεκτροκίνηση, αν και εμφανίστηκε νωρίς με πρωτότυπα ηλεκτρικά οχήματα ήδη από τα τέλη του 19ου αιώνα, δεν επικράτησε λόγω τεχνολογικών περιορισμών, όμως η αναβίωσή της στον 21ο αιώνα έδωσε νέα διάσταση στη σχέση κοινωνίας και τεχνολογίας, θέτοντας ζητήματα βιωσιμότητας, ενεργειακής ανεξαρτησίας και περιβαλλοντικής ευθύνης [1]. Η μαζική υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης ενισχύει τη μετάβαση προς τις πράσινες πόλεις, με λιγότερους ρύπους, χαμηλότερο θόρυβο και νέες μορφές αστικής κινητικότητας, όπως τα κοινόχρηστα οχήματα και τα αυτόνομα συστήματα μεταφοράς [4]. Ταυτόχρονα, η βιομηχανία των ηλεκτρικών οχημάτων δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας, αλλά και μετατοπίζει τις γεωπολιτικές ισορροπίες λόγω της ανάγκης για κρίσιμες πρώτες ύλες και τεχνογνωσία, ενώ θέτει και κοινωνικά ερωτήματα για την πρόσβα-

ση, την ισότητα και την τεχνολογική εξάρτηση [12]. Συνολικά, η εισαγωγή των κινητήρων στα οχήματα και η μετεξέλιξή τους μέσω της ηλεκτροκίνησης δεν αποτελεί απλώς τεχνική καινοτομία, αλλά δύναμη κοινωνικού μετασχηματισμού με μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στον τρόπο που οι άνθρωποι εργάζονται, μετακινούνται και νοσηματοδοτούν τον χώρο γύρω τους [11].

### 3.4 Κινητήρες στη Ρομποτική, τη Βιομηχανία και τα Έξυπνα Συστήματα Ελέγχου

Η ραγδαία πρόοδος στη ρομποτική και τα αυτοματοποιημένα βιομηχανικά συστήματα κατέστησε τους κινητήρες βασικά λειτουργικά στοιχεία για την επίτευξη ακριβούς και αξιόπιστης κίνησης, θέσης και ροπής σε πλήθος εφαρμογών, από τη μικροκλίμακα μέχρι τις βαριές μηχανές παραγωγής [6]. Οι σερβοκινητήρες και οι βηματικοί κινητήρες (stepper motors) χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα ακριβείας, καθώς επιτρέπουν τον ακριβή έλεγχο θέσης μέσω σημάτων ελέγχου παλμών, χωρίς την ανάγκη ανατροφοδότησης, κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εκτυπωτές, ρομποτικούς βραχίονες και CNC μηχανές [13]. Η αυτοματοποίηση των γραμμών παραγωγής και των ρομποτικών συστημάτων συναρμολόγησης βασίζεται σε δικτυωμένα συστήματα ελέγχου κίνησης, τα οποία επιτρέπουν τον συντονισμό πολλών κινητήρων ταυτόχρονα μέσω βιομηχανικών πρωτοκόλλων όπως EtherCAT, CANopen και Modbus [9]. Οι εξελίξεις στους αισθητήρες θέσης, τα ενσωματωμένα ηλεκτρονικά και τα προηγμένα μικροελεγκτικά συστήματα επιτρέπουν στους σύγχρονους κινητήρες να προσαρμόζονται σε πραγματικό χρόνο σε μεταβαλλόμενες συνθήκες φορτίου, ταχύτητας και θερμοκρασίας, καθιστώντας τους ιδανικούς για περιβάλλοντα υψηλής αβεβαιότητας όπως αυτά της ρομποτικής και της αεροδιαστημικής [7]. Παράλληλα, οι τεχνολογίες πρόβλεψης και διαγνωστικής βασισμένες σε τεχνητή νοημοσύνη και μηχανική μάθηση επιτρέπουν την έγκαιρη ανίχνευση φθορών και την προληπτική συντήρηση, μειώνοντας το κόστος διακοπών λειτουργίας και αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού [4]. Η τεχνολογία Internet of Things (IoT) έχει πλέον ενσωματωθεί στα κινητήρια συστήματα, επιτρέποντας την απομακρυσμένη παρακολούθηση, έλεγχο και αναβάθμιση λογισμικού μέσω cloud, δημιουργώντας ευφυή και ευπροσάρμοστα οικοσυστήματα κίνησης [1]. Χαρακτηριστική είναι η μετάβαση από τα απλά ηλεκτρομηχανικά συστήματα στα λεγόμενα cyber-physical systems, όπου ο κινητήρας δεν αποτελεί απλώς ένα ενεργοποιητικό στοιχείο, αλλά μέρος ενός ολοκληρωμένου συστήματος αντίληψης, απόφασης και δράσης [12]. Στον τομέα της μικρορομποτικής, οι μικροσκοπικοί κινητήρες και ενεργοποιητές αξιοποιούν καινοτόμα υλικά όπως πιεζοηλεκτρικά, ηλεκτροστατικά και μαγνητορολογικά μέσα για να επιτύχουν μικρές και ακριβείς κινήσεις σε διαγνωστικές εφαρμογές και νανοτεχνολογία [1]. Συνεπώς, η τεχνολογική ωρίμανση των κινητήρων και η ενσωμάτωσή τους σε έξυπνα περιβάλλοντα αυτοματοποίησης τους καθιστά κρίσιμη υποδομή της βιομηχανίας 4.0 και της νέας εποχής του βιομηχανικού ψηφιακού μετασχηματισμού [4].

### 3.5 Εφαρμογές Μηχανικής Μάθησης στην κατασκευή Κινητήρων

Η εισαγωγή της τεχνητής νοημοσύνης και των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης στην ανάλυση, διάγνωση και έλεγχο των κινητήρων έχει επιφέρει επανάσταση στη βιομηχανική παραγωγή, τη ρομποτική και τα έξυπνα συστήματα αυτοματισμού, προσφέροντας τη δυνατότητα πρόγνωσης, αυτοβελτιστοποίησης και προσαρμογής σε πραγματικό χρόνο [4]. Μέσω τεχνικών επιβλεπόμενης μάθησης, τα συστήματα μπορούν να εκπαιδεύονται σε ιστορικά δεδομένα λειτουργίας κινητήρων, αναγνωρίζοντας πρότυπα συμπεριφοράς που συνδέονται με επερχόμενες βλάβες, φθορά ή απόκλιση από την επιθυμητή λειτουργία,

επιτρέποντας έτσι την ανάπτυξη αλγορίθμων προγνωστικής συντήρησης [1]. Ταυτόχρονα, οι αλγόριθμοι μη επιβλεπόμενης μάθησης, όπως οι συσταδοποιήσεις και οι αλγόριθμοι PCA, χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ανωμαλιών σε μεγάλο όγκο αισθητηριακών δεδομένων, μειώνοντας τον κίνδυνο απροειδοποίητων αστοχιών [12]. Στα συστήματα ελέγχου κινητήρων, η χρήση ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning) επιτρέπει την αυτόνομη εξερεύνηση του βέλτιστου τρόπου λειτουργίας ενός συστήματος με στόχο τη βελτιστοποίηση παραμέτρων όπως η ροπή, η ταχύτητα και η κατανάλωση ενέργειας υπό μεταβαλλόμενα φορτία [16]. Παράλληλα, τα νευρωνικά δίκτυα και οι μέθοδοι βαθιάς μάθησης (deep learning) εφαρμόζονται σε προβλήματα ελέγχου και πρόβλεψης με υψηλή πολυπλοκότητα, ειδικά σε περιβάλλοντα με αβεβαιότητα ή περιορισμένη μοντελοποίηση, όπως είναι τα ευέλικτα ρομποτικά άκρα και τα προσαρμοζόμενα αυτόνομα οχήματα [14]. Οι κινητήρες, σε αυτό το πλαίσιο, ενσωματώνονται σε έξυπνα συστήματα όπου η επεξεργασία δεδομένων, η λήψη αποφάσεων και η δυναμική ρύθμιση της λειτουργίας βασίζονται σε real-time αξιολόγηση αισθητήρων, cloud υπολογισμό και αποκεντρωμένους ελεγκτές [6]. Η εξέλιξη αυτή επιτρέπει όχι μόνο την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας, αλλά και την προσαρμογή των μηχανών στις ανάγκες της 4ης βιομηχανικής επανάστασης, εισάγοντας νέα πρότυπα παραγωγικότητας, ευφυΐας και ανθεκτικότητας [4].

### 3.6 Το Μέλλον των Κινητήρων και η Πράσινη Τεχνολογική Μετάβαση

Το μέλλον των κινητήρων διαγράφεται έντονα συνδεδεμένο με τους στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης, την πράσινη μετάβαση και την απαλλαγή από τα ορυκτά καύσιμα, καθώς οι τεχνολογίες πρόωσης εξελίσσονται ραγδαία για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις μιας κλιματικά ουδέτερης παγκόσμιας οικονομίας [1]. Οι κινητήρες υψηλής απόδοσης αποτελούν πλέον βασική προτεραιότητα της βιομηχανικής και ενεργειακής πολιτικής, με στόχο τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μίγμα [14]. Η αξιοποίηση μαγνητών σπανίων γαιών και η ανάπτυξη σύγχρονων κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες υψηλής ισχύος και ελάχιστων απωλειών, επιτρέπει την υλοποίηση εφαρμογών μεγάλης ισχύος με περιορισμένο αποτύπωμα και ενεργειακή κατανάλωση [4]. Επιπλέον, οι κινητήρες χωρίς μαγνήτες, όπως οι σύγχρονοι επαγωγικοί κινητήρες ή αυτοί με συντονισμένες διεγέρσεις (switched reluctance motors), θεωρούνται υποσχόμενες εναλλακτικές λόγω της ανεξάρτησης από κρίσιμες πρώτες ύλες και της φιλικότητάς τους προς το περιβάλλον [12]. Ταυτόχρονα, η ανάπτυξη υπεραγωγίων κινητήρων και ενεργών υλικών σε υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες προσφέρει προοπτικές για χρήση σε μελλοντικά ηλεκτρικά αεροσκάφη, υπερταχείες αμαξοστοιχίες και θαλάσσιες μεταφορές μηδενικών εκπομπών [1]. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η τεχνητή νοημοσύνη, με εφαρμογές όπως η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, η δυναμική πρόβλεψη βλαβών και η αυτόνομη αναπροσαρμογή των παραμέτρων λειτουργίας των κινητήρων με βάση συνθήκες φορτίου και περιβάλλοντος [4]. Η μελλοντική ενσωμάτωση των κινητήρων σε πλήρως διασυνδεδεμένα συστήματα μέσω του βιομηχανικού Διαδικτύου των Πραγμάτων (IIoT) καθιστά εφικτή την πλήρη ψηφιοποίηση της λειτουργίας και της συντήρησης, ενισχύοντας τη διαφάνεια, τη βιωσιμότητα και την προσαρμοστικότητα της παραγωγής [13]. Παράλληλα, η ανακύκλωση υλικών και η σχεδίαση κινητήρων με αρχές κυκλικής οικονομίας επιτρέπουν τη μείωση του περιβαλλοντικού κόστους καθ' όλο τον κύκλο ζωής του προϊόντος [8]. Έτσι, οι κινητήρες του μέλλοντος δεν θα είναι απλώς ισχυρότεροι ή αποδοτικότεροι, αλλά και πιο «έξυπνοι», πιο βιώσιμοι και απόλυτα εναρμονισμένοι με τις απαιτήσεις μιας μεταβαλλόμενης κοινωνίας που επιδιώκει ισορροπία μεταξύ τεχνολογίας και περιβάλλοντος [1].

### **3.7 κατασκευή Κινητήρων που σέβονται το Περιβάλλον**

Η πορεία προς την πράσινη τεχνολογική μετάβαση καθιστά αναγκαία την εξέλιξη των κινητήρων σε κατευθύνσεις που ευθυγραμμίζονται με τις αρχές της βιωσιμότητας, της ενεργειακής αποδοτικότητας και της κυκλικής οικονομίας, θέτοντας νέες προκλήσεις αλλά και ευκαιρίες για καινοτομία στον τομέα της ηλεκτρομηχανολογίας [1]. Η τάση για εξηλεκτρισμό του συνόλου των συστημάτων μεταφοράς, παραγωγής και βιομηχανικής κατεργασίας οδηγεί σε κινητήρες που συνδυάζουν υψηλή απόδοση, χαμηλές απώλειες και τη δυνατότητα λειτουργίας με ενέργεια προερχόμενη αποκλειστικά από ανανεώσιμες πηγές [14]. Τα μελλοντικά συστήματα κίνησης βασίζονται σε καινοτόμα υλικά, όπως υπεραγωγία κράματα, μαγνήτες σπανίων γαιών φιλικότερους προς το περιβάλλον και μονώσεις με χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα, προσφέροντας νέες δυνατότητες στη σχεδίαση κινητήρων υψηλής πυκνότητας ισχύος [10]. Οι τεχνικές μοντελοποίησης κύκλου ζωής και ενεργειακού αποτυπώματος συμβάλλουν στον οικολογικό σχεδιασμό (eco-design), λαμβάνοντας υπόψη από την εξόρυξη πρώτων υλών μέχρι την ανακύκλωση ή επαναχρησιμοποίηση των εξαρτημάτων του κινητήρα [8]. Ταυτόχρονα, οι κινητήρες του μέλλοντος ενσωματώνουν αυτοδιάγνωση, λειτουργίες αποδοτικής ανάκτησης ενέργειας και δυνατότητες σύνδεσης σε έξυπνα δίκτυα (smart grids), διευκολύνοντας την αποκεντρωμένη ενεργειακή διαχείριση και την αλληλεπίδραση με ανανεώσιμες πηγές [4]. Στον τομέα των μεταφορών, η τεχνολογία των ηλεκτρικών κινητήρων συνδυάζεται πλέον με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου και προηγμένες μπαταρίες στερεάς κατάστασης, προκειμένου να επιτευχθεί μηδενικό ισοζύγιο εκπομπών ρύπων και υψηλή αυτονομία σε οχήματα, πλοία και αεροσκάφη [1]. Η ψηφιοποίηση της σχεδίασης και της παραγωγής μέσω τεχνικών προσθετικής κατασκευής (3D printing), τεχνητής νοημοσύνης και προσομοίωσης λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο, ενισχύει την ταχύτητα ανάπτυξης νέων κινητήρων και επιτρέπει την προσαρμογή τους σε συγκεκριμένες εφαρμογές με ελάχιστη κατανάλωση πόρων [12]. Η μελλοντική πορεία των κινητήρων δεν θα βασίζεται μόνο στην επίτευξη υψηλότερης απόδοσης, αλλά κυρίως στην ικανότητά τους να συνεργάζονται με ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας, περιβάλλοντος και δεδομένων, προάγοντας ένα νέο πρότυπο βιομηχανικής ανάπτυξης που συνδυάζει τεχνολογική πρόοδο και περιβαλλοντική ευθύνη [14].



# Κεφάλαιο 4: Η Φυσική και τα Μαθηματικά στην Κατασκευή και Λειτουργία Μηχανικών Κινητήρων

Η κατανόηση και σχεδίαση των μηχανικών και ηλεκτρικών κινητήρων απαιτεί σε βάθος γνώση φυσικών φαινομένων και την εφαρμογή σύνθετων μαθηματικών μοντέλων που περιγράφουν τη συμπεριφορά των πεδίων, των ρευμάτων και των δυνάμεων στο εσωτερικό του κινητήρα [3]. Βασική αρχή στη λειτουργία των ηλεκτρικών κινητήρων αποτελεί η δύναμη Lorentz, η οποία περιγράφει την αλληλεπίδραση ενός ηλεκτρικού φορτίου που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο και είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία ροπής στον δρομέα [3]. Οι εξισώσεις του Maxwell συνιστούν το θεμέλιο των ηλεκτρομαγνητικών μοντέλων, επιτρέποντας τη θεωρητική πρόβλεψη της κατανομής των πεδίων στον χώρο του στάτη και του δρομέα [16]. Το μαγνητικό κύκλωμα που σχηματίζεται στο εσωτερικό του κινητήρα αντιμετωπίζεται μαθηματικά με αναλογίες προς τα ηλεκτρικά κυκλώματα, χρησιμοποιώντας έννοιες όπως η μαγνητική αντίσταση, η μαγνητοκινητική δύναμη και η πυκνότητα ροής [10]. Στη σχεδίαση του στάτη και του δρομέα χρησιμοποιούνται διαφορικές εξισώσεις για την ανάλυση των κυματιζόντων πεδίων, ενώ η τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) επιτρέπει την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων σε πολύπλοκες γεωμετρίες και υλικά [10]. Παράλληλα, η θερμική ανάλυση είναι απαραίτητη για την εκτίμηση των θερμοκρασιακών κατανομών και των απωλειών λόγω Joule, μέσω της επίλυσης της εξίσωσης θερμότητας υπό συνθήκες αγωγιμότητας, συναγωγής και ακτινοβολίας [16]. Η δυναμική του κινητήρα περιγράφεται με τη χρήση νόμων του Newton και της κινηματικής, καθώς η ροπή που αναπτύσσεται εξισώνεται με τη γωνιακή επιτάχυνση επί τη ροπή αδράνειας του συστήματος [3]. Στην περίπτωση των εναλλασσόμενων κινητήρων, χρησιμοποιούνται φασματικές μέθοδοι και θεωρία μιγαδικών αριθμών για την ανάλυση των κυκλωμάτων στο πεδίο της συχνότητας, καθώς και θεωρία μετασχηματισμών για την απόσβεση των παλμών ροπής [16]. Επίσης, οι σύγχρονοι κινητήρες απαιτούν την ανάπτυξη ελεγκτών μέσω της θεωρίας αυτομάτου ελέγχου, όπου εφαρμόζονται μοντέλα μεταφοράς, συναρτήσεις Laplace και πίνακες κατάστασης, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η απόκριση και η σταθερότητα του συστήματος [10]. Η αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής, θερμικής και μηχανικής συμπεριφοράς καθιστά αναγκαία την πολυφυσική προσέγγιση, με ενιαία προσομοίωση όλων των πεδίων για την επίτευξη βέλτιστης σχεδίασης και λειτουργίας του κινητήρα [10].

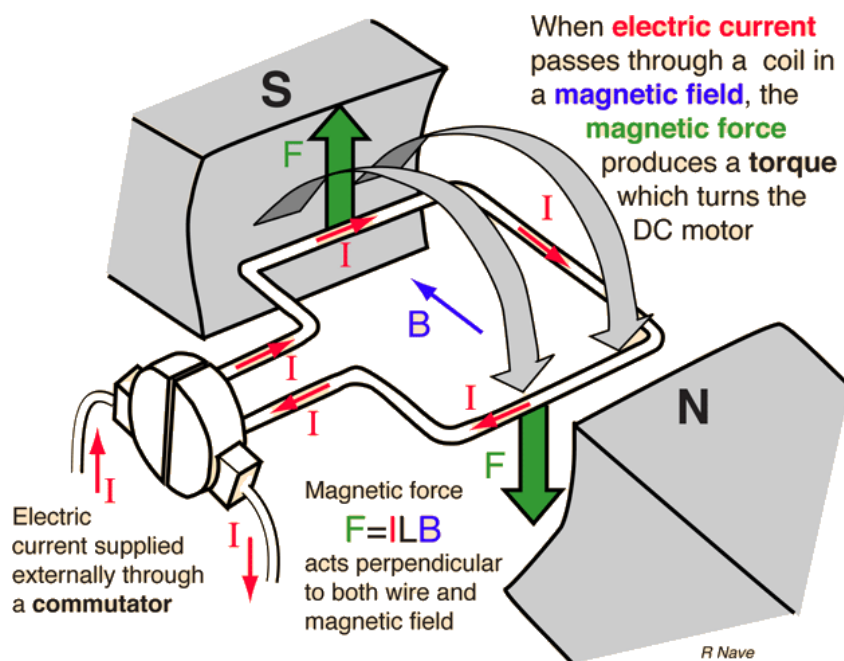
## 4.1 Η Εφαρμογή των Φυσικών Εξισώσεων στους Πρώτους Μηχανικούς Κινητήρες

Οι πρώτοι μηχανικοί κινητήρες που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της βιομηχανικής επανάστασης βασίστηκαν στην άμεση εφαρμογή των βασικών αρχών της μηχανικής, της θερμοδυναμικής και, αργότερα, του ηλεκτρομαγνητισμού, αποδεικνύοντας πώς η θεωρητική φυσική μπορεί να μετατραπεί σε πρακτική τεχνολογική καινοτομία [2]. Στις πρώτες ατμομηχανές, η κατανόηση της σχέσης μεταξύ πίεσης και όγκου επέτρεψε τον σχεδιασμό κυλίνδρων και εμβόλων για τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε κινητική [10]. Η θερμοδυναμική χρησιμοποιήθηκε για την κατανόηση της ενεργειακής απόδοσης και των απωλειών στα θερμικά κυκλώματα, γεγονός που οδήγησε σε βελτιώσεις μέσω καλύτερης θερμομόνωσης και καύσης [3]. Στις πρώτες γεννήτριες και ηλεκτρικούς κινητήρες, η έννοια της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, δηλαδή της παραγωγής ηλεκτρικής τάσης μέσω της μεταβολής μαγνητικού πεδίου, οδήγησε στην κατασκευή περιστρεφόμενων μηχανισμών με μαγνήτες και πηνία [12]. Οι αρχές της μηχανικής χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ροπής και της επιτάχυνσης των αξόνων των κινητήρων, συμβάλλοντας στην επιλογή κατάλληλων υλικών για τα κινούμενα μέρη [10]. Επιπλέον, οι έννοιες της μηχανικής και της κινητικής ενέργειας εφαρμόστηκαν στην κατανόηση της συμπεριφοράς των περιστρεφόμενων στοιχείων, όπως οι στροφαλοφόροι άξονες και οι τροχαλίες [8]. Στους επαγωγικούς κινητήρες, η μαγνητική σύζευξη μεταξύ στάτη και δρομέα και η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας κατέστησαν εφικτή τη μοντελοποίηση της λειτουργίας τους [16]. Η σύνδεση θεωρίας και εμπειρικής μηχανικής αποδεικνύει ότι η φυσική και τα μαθηματικά αποτέλεσαν όχι απλώς γλώσσα κατανόησης, αλλά βασικά εργαλεία κατασκευής, βελτιστοποίησης και λειτουργικής κατανόησης των πρώτων κινητήρων, οι οποίοι μεταμόρφωσαν ριζικά την παραγωγή, τις μεταφορές και την καθημερινή ζωή [2].

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι σήμερα οι πιο διαδεδομένοι τύποι κινητήρων, καθώς μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική μέσω ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης, εξυπηρετώντας ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στη βιομηχανία και στα νοικοκυριά [14]. Η βασική αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη δύναμη που αναπτύσσεται όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα τοποθετείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, προκαλώντας κίνηση [3]. Οι επαγωγικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος λειτουργούν με την πρόκληση ρεύματος στον δρομέα μέσω μαγνητικών πεδίων χωρίς άμεση ηλεκτρική επαφή, κάτι που προσφέρει αξιοπιστία και χαμηλό κόστος συντήρησης [10]. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, παρότι προσφέρουν ακριβή έλεγχο της ταχύτητας, παρουσιάζουν μειονεκτήματα λόγω της φθοράς των μηχανικών επαφών [13]. Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη προσφέρουν υψηλή απόδοση και χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα και αυτόματες γραμμές παραγωγής, αξιοποιώντας ισχυρούς μαγνήτες και σύγχρονα κυκλώματα μετατροπής ενέργειας [12]. Οι brushless κινητήρες, που δεν διαθέτουν μηχανικές επαφές, λειτουργούν μέσω πλήρους ηλεκτρονικού ελέγχου και είναι ιδανικοί για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας και μικρού μεγέθους [16]. Οι κινητήρες με μεταβαλλόμενη αντίσταση αναδεικνύονται λόγω της απλότητάς τους και της ικανότητάς τους να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες και στροφές χωρίς χρήση μαγνητών [14]. Η βελτιστοποίηση της απόδοσής τους επιτυγχάνεται με τη χρήση φυσικών μοντέλων, αριθμητικής προσομοίωσης και τεχνικών πεπερασμένων στοιχείων [10]. Η πρόοδος στην ηλεκτρονική ισχύς και τα συστήματα ελέγχου έχει επιτρέψει την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών κινητήρων σε έξυπνα δίκτυα και τεχνολογίες IoT [9]. Η ευρεία χρήση τους στους τομείς της παραγωγής, των μεταφορών, της αυτοματοποίησης και της ρομποτικής καταδεικνύει τον καθοριστικό ρόλο τους στη σύγχρονη τεχνολογική πρόοδο [1].

## 4.2 Κινητήρες Πετρελαίου – Θερμοδυναμική και Μαθηματικά Μοντέλα Λειτουργίας

Οι κινητήρες πετρελαίου ή Diesel αποτελούν βασικό τύπο θερμικής μηχανής εσωτερικής καύσης και λειτουργούν μέσω της αυτοανάφλεξης του καυσίμου σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, χωρίς εξωτερική πηγή ανάφλεξης [11]. Η λειτουργία τους περιγράφεται μέσω του κύκλου Diesel, ο οποίος περιλαμβάνει τέσσερα βασικά στάδια και διαφέρει από τον κύκλο Otto κυρίως στο στάδιο της καύσης [10]. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, ο αέρας συμπιέζεται, το καύσιμο εγχέεται και αναφλέγεται, προκαλώντας απότομη αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας [8]. Οι φάσεις αυτές περιλαμβάνουν αλλαγές στην πίεση, στη θερμοκρασία και στον όγκο, οι οποίες αναλύονται με εργαλεία της θερμοδυναμικής. Η απόδοση των κινητήρων Diesel είναι μεγαλύτερη από αυτή των βενζινοκινητήρων, κυρίως λόγω του αυξημένου λόγου συμπίεσης και της θερμικής σταθερότητας του πετρελαίου [11]. Τα σύγχρονα μοντέλα λειτουργίας περιλαμβάνουν την ανάλυση της δυναμικής μεταβολής των φυσικών μεγεθών στον κύλινδρο, καθώς και της θερμικής απώλειας προς το περιβάλλον [10]. Η προσομοίωση της λειτουργίας τους μέσω αριθμητικών μεθόδων προσφέρει ακριβείς προβλέψεις για την απόδοση, τις εκπομπές και τις θερμικές καταπονήσεις, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας και του χρονισμού της καύσης [8]. Η συνολική κατανόηση αυτών των κινητήρων απαιτεί συνδυασμένη γνώση θερμοδυναμικής, μηχανικής, ρευστοδυναμικής και χημείας καύσης, ενώ στα σύγχρονα συστήματα ενσωματώνονται και τεχνολογίες μείωσης ρύπων όπως οι υπερπληρωτές, οι κυκλώνες ανακυκλοφορίας καυσαερίων και τα φίλτρα σωματιδίων [11].



**Σχήμα 4.1** Η φυσική του ηλεκτρικού κινητήρα. Πηγή: <https://physics.stackexchange.com/questions/366255/is-torque-in-an-electric-motor-generated-from-repelling-magnetic-dipoles-and-the>



# Κεφάλαιο 5: Χρονολογική Εξέλιξη των Κινητήρων – Σημαντικά Γεγονότα

## Αρχαιότητα – 1700

### 60 π.Χ. – Ατμοστρόβιλος του Ήρωνος

Ο Ήρων ο Αλεξανδρεύς κατασκευάζει την \*aeolipile\*, μια πρώιμη μηχανή που χρησιμοποιεί τη διαστολή του ατμού για να περιστρέφει μια σφαίρα γύρω από τον άξονά της, θεωρούμενη ο πρώτος καταγεγραμμένος κινητήρας στην Ιστορία [2].

### 1206 – Αυτοματισμοί του Αλ-Τζαζαρί

Ο Άραβας μηχανικός Αλ-Τζαζαρί σχεδιάζει και κατασκευάζει πολύπλοκους υδραυλικούς και μηχανικούς μηχανισμούς με κινούμενα μέρη, βάζοντας τις βάσεις για τον σχεδιασμό κινητήριων μηχανών [6].

## 1705 – 1800

### 1712 – Ατμομηχανή του Newcomen

Ο Thomas Newcomen παρουσιάζει την πρώτη πρακτική ατμομηχανή για άντληση νερού από ορυχεία, βασισμένη στην πίεση του ατμού και στη συμπύκνωση [8].

### 1769 – Πατέντα ατμομηχανής από τον Watt

Ο James Watt βελτιώνει την ατμομηχανή του Newcomen προσθέτοντας ξεχωριστό συμπυκνωτή, μειώνοντας τις θερμικές απώλειες και αυξάνοντας την απόδοση. Αυτή η βελτίωση επιταχύνει τη Βιομηχανική Επανάσταση [11].

### 1791 – Κατασκευή του πρώτου στροφαλοφόρου μηχανισμού

Ο Edmund Cartwright εισάγει τον στροφαλοφόρο άξονα σε κλωστοϋφαντουργικές μηχανές, βελτιώνοντας τη μεταφορά ενέργειας και επιτρέποντας τη μετάδοση συνεχούς κίνησης [2].

## 1800 – 1850

### 1821 – Πρώτη περιστροφή αγωγού σε μαγνητικό πεδίο από τον Faraday

Ο Michael Faraday κατασκευάζει το πρώτο σύστημα περιστροφής αγωγού μέσω της αλληλεπίδρασης με μαγνητικό πεδίο, θεωρούμενο ως ο πρώτος πρόδρομος του ηλεκτρικού κινητήρα [3].

### 1831 – Ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής

Ο Faraday αποδεικνύει πειραματικά ότι η μεταβολή μαγνητικής ροής δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα, θεμελιώνοντας τη λειτουργία των γεννητριών και των κινητήρων [16].

**1832 – Πρώτος πρακτικός ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος**

Ο William Sturgeon κατασκευάζει έναν λειτουργικό DC κινητήρα που μπορεί να κινήσει μηχανικά εξαρτήματα, ανοίγοντας το δρόμο για τις πρώτες εφαρμογές [14].

**1850 – Θεμελίωση θερμικών κύκλων Otto και Carnot**

Οι θεωρίες των Otto και Carnot προσδιορίζουν την απόδοση των θερμικών κινητήρων, επιτρέποντας την ενεργειακή μοντελοποίηση των μηχανών εσωτερικής καύσης [10].

**1850 – 1900****1866 – Ο Siemens βελτιώνει τις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος**

Ο Werner von Siemens εισάγει τον αυτοδιεγειρόμενο δακτύλιο, βελτιώνοντας την απόδοση των γεννητριών και ανοίγοντας τον δρόμο για τη μαζική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [8].

**1873 – Επαγωγική μηχανή από τον Gramme**

Ο Zénobe Gramme σχεδιάζει μια γεννήτρια που μπορεί να λειτουργήσει και ως κινητήρας, μετατρέποντας το ηλεκτρικό ρεύμα σε περιστροφή, με υψηλή απόδοση [14].

**1883 – Θεμελίωση θεωρίας εναλλασσόμενου ρεύματος από τον Ferraris**

Ο Galileo Ferraris περιγράφει θεωρητικά την ύπαρξη στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, απαραίτητου για τη λειτουργία των επαγωγικών κινητήρων AC [3].

**1888 – Πατέντα πολυφασικού κινητήρα από τον Tesla**

Ο Nikola Tesla κατοχυρώνει την πατέντα του για πολυφασικούς επαγωγικούς κινητήρες, οι οποίοι λειτουργούν χωρίς επαφή μεταξύ στάτη και δρομέα, καθιερώνοντας τα θεμέλια της σύγχρονης κίνησης [12].

**1891 – Παρουσίαση του πρώτου γραμμικού κινητήρα**

Ο Charles Brown κατασκευάζει έναν πρωτότυπο γραμμικό κινητήρα, βασισμένο στις ίδιες αρχές με τον επαγωγικό, αλλά με απευθείας μετατροπή σε γραμμική κίνηση [10].

**1897 – Εφεύρεση του κινητήρα Diesel**

Ο Rudolf Diesel κατασκευάζει και δοκιμάζει τον πρώτο κινητήρα πετρελαίου, με υψηλότερο λόγο συμπίεσης και μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση, αποτελώντας θεμέλιο για τη βιομηχανία μεταφορών [11].

**1900 – 1950****1901 – Εφαρμογή επαγωγικών κινητήρων σε βιομηχανικές αντλίες**

Η General Electric ενσωματώνει για πρώτη φορά επαγωγικούς κινητήρες σε συστήματα βιομηχανικής άντλησης, επιτυγχάνοντας αξιοπιστία, σταθερότητα και μικρότερες ανάγκες συντήρησης, οδηγώντας στην επικράτηση των AC κινητήρων στη βιομηχανία [14].

**1908 – Παρουσίαση του Ford Model T με θερμικό κινητήρα**

Η μαζική παραγωγή του Model T της Ford καθιστά τους θερμικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης κυρίαρχους στον τομέα των μεταφορών, παρότι η ηλεκτροκίνηση είχε ήδη κάνει τα πρώτα της βήματα [11].

**1911 – Ανακάλυψη του φαινομένου του ολίσθησης στους επαγωγικούς κινητήρες**

Η αναλυτική κατανόηση της ολίσθησης (slip) ως διαφοράς συχνότητας μεταξύ του μαγνητικού πεδίου του στάτη και της ταχύτητας του δρομέα, επιτρέπει την ακριβή ρύθμιση και έλεγχο των κινητήρων AC [3].

**1915 – Στρατιωτική χρήση κινητήρων σε αεροσκάφη και υποβρύχια**

---

Κατά τον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο, οι κινητήρες αποκτούν στρατηγική σημασία: θερμικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε αεροπλάνα και πλοία, ενώ οι ηλεκτρικοί κινητήρες τίθενται σε υποβρύχια για αθόρυβη κίνηση [8].

#### **1921 – Εμπορική κατασκευή τριφασικών επαγωγικών κινητήρων**

Η ευρεία διανομή ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέπει την κατασκευή ισχυρών τριφασικών κινητήρων για βιομηχανική χρήση, με υψηλή απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής [14].

#### **1925 – Σχεδίαση κινητήρων για αστικές υποδομές και μεταφορές**

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε συστήματα αστικής συγκοινωνίας (τραμ, ηλεκτρικά τρένα), ανελκυστήρες και βιομηχανικά ανυψωτικά, αυξάνοντας την αστική κινητικότητα και την ασφάλεια [1].

#### **1931 – Εφαρμογή κινητήρων σε οικιακές συσκευές**

Ο εξηλεκτρισμός των κατοικιών δημιουργεί νέες ανάγκες και εφαρμογές: κινητήρες μικρού μεγέθους ενσωματώνονται σε πλυντήρια, ψυγεία, ανεμιστήρες και ηλεκτρικές σκούπες, αλλάζοντας ριζικά την καθημερινότητα [9].

#### **1935 – Τυποποίηση ελέγχου στροφών κινητήρων**

Καθιερώνεται η χρήση ρελέ, χρονικών διακοπών και πρώιμων μεταβλητών αντιστάσεων για τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος [13].

#### **1939 – Ένταξη κινητήρων σε πρώιμα ρομποτικά συστήματα**

Στις ΗΠΑ και την Ιαπωνία, γίνονται τα πρώτα βήματα κατασκευής μηχανικών αυτόματων βραχιόνων και ταχυδρομικών διαλογών, με χρήση ηλεκτρικών κινητήρων ως στοιχείων πρόωσης [6].

#### **1942 – Χρήση κινητήρων σε μηχανές κρυπτανάλυσης (WWII)**

Συστήματα όπως το \*Colossus\* χρησιμοποιούν μοτέρ για τον μηχανικό συγχρονισμό λογικών κυκλωμάτων, ενσωματώνοντας τις κινητήριες τεχνολογίες στην πρώιμη πληροφορική [12].

#### **1947 – Κατασκευή brushless DC κινητήρων εργαστηριακού τύπου**

Τα πρώτα πειραματικά brushless DC μοτέρ αναπτύσσονται σε εργαστήρια ελέγχου, καθιερώνοντας την αρχή λειτουργίας κινητήρων χωρίς ψήκτρες που αργότερα θα εξελιχθούν μαζικά [14].

#### **1950 – Τυποποίηση κινητήρων σε στρατιωτική βιομηχανία και τηλεπικοινωνίες**

Η ανάπτυξη ραντάρ, ραδιοσυνοχτήτων και αυτόματων στόχων απαιτεί μικρούς, ελαφρούς και αποδοτικούς κινητήρες, οδηγώντας στην υιοθέτηση μονάδων υψηλής ταχύτητας και ακρίβειας [10].

### **1950 – 2000**

#### **1956 – Ανάπτυξη του πρώτου σερβοκινητήρα με ανατροφοδότηση θέσης**

Η ανάπτυξη σερβοκινητήρων που χρησιμοποιούν ανατροφοδότηση από αισθητήρες θέσης επιτρέπει την ακριβή ρύθμιση και έλεγχο της κίνησης, ανοίγοντας τον δρόμο για τις εφαρμογές αυτοματισμού και ρομποτικής [12].

#### **1962 – Εφαρμογή stepper motors σε αριθμομηχανές και εκτυπωτές**

Οι βηματικοί κινητήρες, που λειτουργούν με παλμούς, βρίσκουν χρήση σε μηχανές ηλεκτρολόγησης, ταμειακές μηχανές και εκτυπωτές, λόγω της ικανότητάς τους για ακριβή έλεγχο θέσης χωρίς αισθητήρες [13].

#### **1969 – Εισαγωγή των πρώτων CNC εργαλειομηχανών με κινητήρες ελέγχου κίνησης**

Η Computer Numerical Control τεχνολογία ενσωματώνει κινητήρες σε εργαλειομηχανές, επιτρέποντας την πλήρη ψηφιακή καθοδήγηση κοπής, φρεζαρίσματος και διαμόρφωσης υλικών με ακρίβεια [14].

#### **1971 – Ενσωμάτωση brushless κινητήρων σε δίσκους αποθήκευσης δεδομένων**

Οι BLDC κινητήρες μικρού μεγέθους χρησιμοποιούνται για την περιστροφή των πλακών στους πρώτους σκληρούς δίσκους, καθιερώνοντας τη σημασία τους στην πληροφορική [16].

#### **1978 – Εμφάνιση της μετατροπής συχνότητας (VFD)**

Οι ελεγκτές μεταβλητής συχνότητας (Variable Frequency Drives) επιτρέπουν τη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής των AC κινητήρων, προσφέροντας ενεργειακή απόδοση και έλεγχο [14].

#### **1981 – Εφαρμογή σερβοκινητήρων σε βιομηχανικούς ρομποτικούς βραχίονες**

Η Fanuc και η ABB αρχίζουν να ενσωματώνουν σερβοκινητήρες σε βιομηχανικά ρομπότ με 6 βαθμούς ελευθερίας, οδηγώντας στην πλήρη αυτοματοποίηση συναρμολόγησης στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας [6].

#### **1984 – Ανάπτυξη μοντέλων κινητήρων με υπολογιστική προσομοίωση FEM**

Η εφαρμογή των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) επιτρέπει την ακριβή προσομοίωση της μαγνητικής και θερμικής συμπεριφοράς των κινητήρων πριν την κατασκευή τους [10].

#### **1989 – Πρώτη χρήση γραμμικών κινητήρων σε τρένα μαγνητικής αιώρησης**

Η Ιαπωνία και η Γερμανία ενσωματώνουν γραμμικούς επαγωγικούς κινητήρες σε τρένα υψηλής ταχύτητας χωρίς επαφή τροχών, επιτυγχάνοντας εξαιρετική ταχύτητα και ασφάλεια [1].

#### **1992 – Ανάπτυξη κινητήρων υψηλής απόδοσης IE2 και IE3**

Οι ευρωπαϊκές βιομηχανίες αρχίζουν να σχεδιάζουν ηλεκτρικούς κινητήρες βάσει αυστηρών ενεργειακών προτύπων, μειώνοντας τις απώλειες και βελτιώνοντας την κατανάλωση σε όλες τις εφαρμογές [14].

#### **1995 – Εφαρμογή μικροκινητήρων σε Ιατρικές συσκευές**

Η πρόοδος στην κατασκευή κινητήρων μικρών διαστάσεων (micromotors) επιτρέπει την ενσωμάτωσή τους σε ιατρικές αντλίες, ρομποτικά χειρουργικά εργαλεία και οδοντιατρικά μηχανήματα [12].

#### **1998 – Κατασκευή του πρώτου εμπορικού υβριδικού οχήματος Toyota Prius**

Το Toyota Prius ενσωματώνει κινητήρα βενζίνης με ηλεκτρικό κινητήρα υψηλής απόδοσης, σηματοδοτώντας τη μετάβαση στη σύγχρονη ηλεκτροκίνηση στον κλάδο της αυτοκίνησης [11].

#### **2000 – Ψηφιακοί ελεγκτές με ενσωματωμένη τεχνητή νοημοσύνη για κινητήρες**

Η εξέλιξη της μικροηλεκτρονικής επιτρέπει την κατασκευή έξυπνων οδηγών κίνησης (smart drives) με δυνατότητες μάθησης, διάγνωσης και αυτόνομης ρύθμισης παραμέτρων [4].

### **2000 – Σήμερα**

#### **2003 – Ίδρυση της Tesla Motors και νέα ώθηση στην ηλεκτροκίνηση**

Η ίδρυση της Tesla και η ανάπτυξη του Roadster σηματοδοτεί την αρχή μιας νέας εποχής για τα ηλεκτρικά οχήματα, με έμφαση στην αυτονομία, την απόδοση και την ενσωμάτωση ισχυρών ηλεκτρικών κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες (PMSM) [1].

#### **2005 – Μαζική εφαρμογή ελέγχου κινητήρων μέσω διανυσματικής ρύθμισης (vector control)**

Η προηγμένη τεχνική ελέγχου που βασίζεται σε μετασχηματισμούς Clarke και Park, επιτρέπει την ανεξάρτητη ρύθμιση ροπής και μαγνητικής ροής σε κινητήρες AC, βελτιώνοντας σημαντικά την ακρίβεια και την αποδοτικότητα [14].

#### **2008 – Ανάπτυξη brushless κινητήρων για drones και ρομποτική**

Η διάδοση των πολυελικών drones και των ευέλικτων ρομποτικών εφαρμογών οδηγεί σε εκτεταμένη χρήση μικρών, ελαφρών BLDC κινητήρων με υψηλή πυκνότητα ισχύος και αποδοτικό ψηφιακό έλεγχο [12].

#### **2010 – Διεθνή πρότυπα IE4 και IE5 για κινητήρες εξαιρετικά υψηλής απόδοσης**

Η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή καθορίζει νέες ενεργειακές κλάσεις απόδοσης (IE4, IE5) που στο-

---

χεύουν στη μείωση των απωλειών ισχύος κατά 30–50% σε σύγκριση με τα παραδοσιακά μοντέλα [10].

#### **2012 – Πρώτη εφαρμογή AI στον έλεγχο κινητήρων μεταβλητού φορτίου**

Η χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για την πρόβλεψη συνθηκών φορτίου και την αυτόματη βελτιστοποίηση λειτουργίας επιτρέπει την ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης σε βιομηχανικά και οικιακά συστήματα κίνησης [4].

#### **2014 – Εφαρμογή γραμμικών κινητήρων σε ασανσέρ χωρίς αντίβαρα**

Η τεχνολογία MULTI από την Thyssenkrupp αντικαθιστά τα συμβατικά συστήματα ανύψωσης με γραμμικούς κινητήρες που επιτρέπουν κίνηση τόσο κάθετα όσο και οριζόντια, εξαλείφοντας τα καλώδια και βελτιστοποιώντας τον χώρο [14].

#### **2016 – Συνδυασμός κινητήρων με έξυπνους αισθητήρες σε περιβάλλοντα IoT**

Οι κινητήρες ενσωματώνονται σε πλατφόρμες Internet of Things, αποστέλλοντας δεδομένα σε cloud συστήματα για ανάλυση, προληπτική συντήρηση και δυναμική προσαρμογή ρύθμισης [13].

#### **2018 – Παγκόσμια ανάπτυξη EV υποδομών και σταθμών φόρτισης**

Η ανάγκη για ηλεκτρικά οχήματα οδηγεί σε παγκόσμια επέκταση των υποδομών φόρτισης και στην παραγωγή κινητήρων κατάλληλων για διαφορετικά μοντέλα EV, ενισχύοντας τη χρήση PMSM και επαγωγικών κινητήρων [11].

#### **2020 – Κινητήρες σε ρομποτικά Ιατρικά συστήματα και μικροχειρουργική**

Κινητήρες πολύ μικρών διαστάσεων χρησιμοποιούνται σε ενδοσκοπικές συσκευές, συστήματα ρομποτικής χειρουργικής και εμφυτεύσιμες αντλίες, απαιτώντας απόλυτη ακρίβεια και βιοσυμβατότητα [12].

#### **2021 – Ανάπτυξη κινητήρων χωρίς σπάνιες γαίες (rare-earth-free motors)**

Λόγω της κρίσης των πρώτων υλών, οι ερευνητές αναπτύσσουν κινητήρες βασισμένους σε απλότερα μαγνητικά υλικά ή κινητήρες reluctance, μειώνοντας την εξάρτηση από περιορισμένα αποθέματα [1].

#### **2022 – Ψηφιακά δίδυμα (Digital Twins) για τον σχεδιασμό και τη διάγνωση κινητήρων**

Η τεχνολογία των ψηφιακών δίδυμων επιτρέπει τη δημιουργία πλήρως λειτουργικών προσομοιώσεων κινητήρων, επιταχύνοντας την ανάπτυξη και εντοπίζοντας προβλήματα σε πραγματικό χρόνο χωρίς ανάγκη φυσικής παρέμβασης [10].

#### **2023 – Εφαρμογή υπεραγωγίων κινητήρων σε αεροναυπηγική και μεγάλης Ισχύος εφαρμογές**

Τα πρώτα λειτουργικά μοντέλα υπεραγωγίων κινητήρων για χρήση σε ηλεκτρικά αεροσκάφη και ναυτιλιακές μονάδες υπόσχονται υψηλή απόδοση με ελάχιστο βάρος, ανοίγοντας νέους ορίζοντες στη βιώσιμη πρόωση [14].

#### **2024 – Έξυπνοι κινητήρες με ενσωματωμένη αυτόνομη λήψη απόφασης (Edge AI)**

Οι κινητήρες εξοπλίζονται με επεξεργαστές που επιτρέπουν την ανεξάρτητη επεξεργασία δεδομένων και λήψη αποφάσεων τοπικά, χωρίς ανάγκη σύνδεσης με κεντρικά συστήματα, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα των δικτύων αυτοματισμού [4].



# Κεφάλαιο 6: Το λογισμικό Solidworks

## 6.1 Ιστορική Αναδρομή

Κατά τη δεκαετία του 1990, η αγορά λογισμικού μηχανολογικού σχεδιασμού (CAD) άρχισε να εξελίσσεται από δισδιάστατες δυνατότητες προς την κατεύθυνση της τρισδιάστατης μοντελοποίησης, ανοίγοντας τον δρόμο για ραγδαία ανάπτυξη και καινοτομία στον τομέα [17]. Εκείνη την εποχή, τα κυρίαρχα συστήματα CAD, όπως τα Pro/Engineer, SDRC Ideas και Unigraphics, απαιτούσαν ισχυρούς υπολογιστές με λειτουργικό σύστημα UNIX, ενώ το συνολικό κόστος κτήσης και εκμάθησης των λογισμικών ξεπερνούσε τα \$18.000, καθιστώντας τα προσιτά μόνο σε μεγάλες επιχειρήσεις [17]. Η εκμάθηση του UNIX αποτελούσε ξεχωριστή πρόκληση, καθώς απαιτούσε εξειδικευμένες γνώσεις και σημαντικό χρόνο [17]. Το 1995, το SOLIDWORKS έκανε την εμφάνισή του, προσφέροντας μια εναλλακτική πρόταση φιλική προς τον χρήστη, με χαμηλό κόστος και δυνατότητα λειτουργίας σε Windows, που ήταν ήδη ευρέως διαδεδομένο και εύχρηστο λειτουργικό σύστημα [17]. Αν και οι ανταγωνιστές αντιμετώπισαν αρχικά με χλευασμό αυτήν τη νεοφυή επιχείρηση, θεωρώντας την καταδικασμένη σε πτώχευση, σύντομα αποδείχθηκε ότι είχαν υποτιμήσει τη δυναμική της [17]. Το γνώριμο περιβάλλον των Windows επέτρεψε την εκπαίδευση των χρηστών σε μόλις τρεις ημέρες, σε αντίθεση με τους τρεις μήνες που απαιτούνταν για τα παραδοσιακά συστήματα [17]. Η στρατηγική της εταιρείας να δίνει προτεραιότητα στα σχόλια των χρηστών αποτέλεσε βασικό στοιχείο της κουλτούρας της και την ξεχώρισε από τον ανταγωνισμό [17]. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '90, το SOLIDWORKS εγκαινίασε την πρακτική ετήσιας εισαγωγής νέων λειτουργιών, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονταν ο μοντελοποίηση με συμφραζόμενα στις συναρμολογήσεις, δυναμική αλληλεπίδραση εξαρτημάτων και μεταφορά τους μεταξύ διαφορετικών συναρμολογήσεων [17]. Το χαρακτηριστικό Smart Mates επέτρεψε την αυτόματη προσθήκη περιορισμών στα εξαρτήματα κατά την τοποθέτησή τους, διευκολύνοντας σημαντικά τη διαδικασία συναρμολόγησης [17]. Το 2003, η δυνατότητα δημιουργίας μοντέλων με πολλαπλά σώματα επεκτάθηκε στους χρήστες, προσφέροντας νέες επιλογές όπως η αντιγραφή και κατοπτρισμός σωμάτων [17]. Το 2006 και το 2007 ενσωματώθηκαν τα Έξυπνα Εξαρτήματα και το εργαλείο Πλήρως Ορισμένο Σκίτσο, τα οποία εισήγαγαν δυνατότητες προσθήκης συσχετισμένων χαρακτηριστικών σε εξαρτήματα και υπολογισμού των απαραίτητων διαστάσεων για την πλήρη οριστικοποίηση ενός σκίτσου [17]. Το 2015 πραγματοποιήθηκε ανασχεδιασμός της διεπαφής χρήστη, μειώνοντας τον χρόνο εκτέλεσης εντολών με το ποντίκι κατά 20% και αυξάνοντας τη συνολική ταχύτητα [17]. Το 2016 παρουσιάστηκε το εργαλείο Mate Controller, που παρείχε έλεγχο συγκεκριμένων βαθμών ελευθερίας σε συναρμολογήσεις, κάνοντάς τες πιο ευέλικτες και ακριβείς [17]. Το 2018, το SOLIDWORKS κυκλοφόρησε το 3D Creator και το xDesign, τα οποία αποτέλεσαν πλήρως διαδικτυακές εφαρμογές σχεδίασης με ενσωματωμένες τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης και χαρακτηριστικά φιλικά προς τον χρήστη [17]. Η πλατφόρμα xDesign αξιοποιεί εργαλεία μηχανικής μάθησης για την υποστήριξη του σχεδιασμού μέσω έξυπνων προτάσεων και αυτοματοποιήσεων, ανοίγο-

ντας τον δρόμο για το μέλλον της σχεδίασης [17]. Το 2020, το SOLIDWORKS ενσωματώθηκε πλήρως στην πλατφόρμα 3DEXPERIENCE, προσφέροντας μια ενοποιημένη εμπειρία σχεδιασμού, διαχείρισης και συνεργασίας σε υπολογιστικό νέφος [17]. Οι εφαρμογές 3D Creator, 3D SheetMetal Creator και 3D Structure Creator χρησιμοποιούν τεχνητή νοημοσύνη, και πιο συγκεκριμένα μηχανική μάθηση, για να υποστηρίζουν τον σχεδιαστή στον εντοπισμό ακμών, την επιλογή εξαρτημάτων και την οργάνωση της δομής των συναρμολογήσεων [17]. Όσο περισσότερο χρησιμοποιούνται τα εργαλεία Design Assistant, τόσο πιο αποτελεσματικά γίνονται, καθώς “μαθαίνουν” από τα δεδομένα των χρηστών και προσαρμόζονται αντίστοιχα [17]. Αυτές οι καινοτομίες ενισχύονται συνεχώς, καθιστώντας το SOLIDWORKS ένα ακόμα πιο ισχυρό εργαλείο στην καθημερινή εργασία μηχανικών, σχεδιαστών και επαγγελματιών που δραστηριοποιούνται σε τεχνικούς τομείς [17]. Όσοι ενδιαφέρονται για επίδειξη των δυνατοτήτων του SOLIDWORKS μέσω προγράμματος περιήγησης ή για γνωριμία με τον Design Assistant, μπορούν να απευθυνθούν στον τοπικό μεταπωλητή τους [17].

## 6.2 Η Χρήση του SolidWorks στη Μηχανολογική Σχεδίαση

Το SolidWorks αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα προγράμματα τρισδιάστατης παραμετρικής σχεδίασης στον χώρο της μηχανολογίας, προσφέροντας μια πλήρη σουίτα εργαλείων για τη δημιουργία, ανάλυση και τεκμηρίωση μηχανολογικών κατασκευών [17]. Η δημοφιλία του SolidWorks οφείλεται στη φιλική προς τον χρήστη διεπαφή, στη δυνατότητα δημιουργίας συσχετισμένων εξαρτημάτων, στην ευελιξία της παραμετρικής μοντελοποίησης και στις ενσωματωμένες δυνατότητες ανάλυσης και προσομοίωσης [17]. Η χρήση του SolidWorks έχει επεκταθεί από τον σχεδιασμό απλών μηχανικών εξαρτημάτων έως τη μοντελοποίηση σύνθετων συναρμολογήσεων, περιλαμβάνοντας πεδία όπως η αεροναυπηγική, η ιατρική τεχνολογία, η αυτοκινητοβιομηχανία και η βιομηχανία ρομποτικής [17].

Η βασική μοντελοποίηση στο SolidWorks στηρίζεται σε μια παραμετρική φιλοσοφία, σύμφωνα με την οποία κάθε χαρακτηριστικό του μοντέλου (feature) μπορεί να εξαρτάται από αριθμητικές παραμέτρους, σχέσεις διαστάσεων και γεωμετρικούς περιορισμούς [17]. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει υψηλή επαναληψιμότητα, προσαρμοστικότητα και αυτοματοποίηση του σχεδιαστικού κύκλου, διευκολύνοντας τη δημιουργία εναλλακτικών γεωμετριών ή εκδόσεων προϊόντων με ελάχιστες αλλαγές [17]. Οι χρήστες του SolidWorks ξεκινούν τη σχεδίαση με σκίτσα (2D sketches), τα οποία λειτουργούν ως θεμέλια για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων μέσω λειτουργιών εξώθησης, περιστροφής, κοπής ή προσθήκης υλικού [17].

Το περιβάλλον εργασίας του SolidWorks διακρίνεται σε τρία κύρια υποσυστήματα: το Part για μοντελοποίηση εξαρτημάτων, το Assembly για τη δημιουργία συναρμολογήσεων πολλών εξαρτημάτων και το Drawing για την παραγωγή δισδιάστατων σχεδίων κατασκευής και τεκμηρίωσης [17]. Στο περιβάλλον Part, ο χρήστης διαμορφώνει τη γεωμετρία και τις ιδιότητες του εκάστοτε εξαρτήματος, εφαρμόζοντας διαστάσεις, υλικά, καμπυλότητες και άλλες κατασκευαστικές λεπτομέρειες [17]. Στο Assembly, ο σχεδιαστής μπορεί να τοποθετήσει εξαρτήματα σε κοινό χώρο, να ορίσει συσχετίσεις (mates) μεταξύ επιφανειών, ακμών και αξόνων και να εξετάσει την κινητικότητα ή τις παρεμβολές μεταξύ των στοιχείων [17].

Σημαντικό πλεονέκτημα του SolidWorks είναι η δυνατότητα χρήσης βιβλιοθηκών στάνταρ εξαρτημάτων, όπως βίδες, παξιμάδια, ρουλεμάν και συνδέσμους, μέσω του εργαλείου Toolbox, που επιταχύνει τη διαδικασία σχεδίασης και διασφαλίζει τη συμμόρφωση με διεθνή πρότυπα [17]. Παράλληλα, ο σχεδιαστής μπορεί να εφαρμόσει υλικά με βάση τις μηχανικές τους ιδιότητες (πυκνότητα, αντοχή, ελαστικό-

τητα) και να πραγματοποιήσει βασικούς υπολογισμούς μάζας, κέντρου βάρους και αδράνειας απευθείας μέσα από το μοντέλο [17].

Η χρήση του SolidWorks δεν περιορίζεται μόνο στην απεικόνιση γεωμετρίας, αλλά επεκτείνεται και στην ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς μέσω του εργαλείου Simulation, που βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) [17]. Μέσω της ανάλυσης τάσεων, παραμορφώσεων και κατανομής φορτίων, ο μηχανικός μπορεί να εντοπίσει αδύναμα σημεία του σχεδιασμού, να δοκιμάσει εναλλακτικές λύσεις και να βελτιστοποιήσει την αντοχή του εξαρτήματος προτού αυτό κατασκευαστεί [17]. Επιπλέον, οι δυνατότητες ανάλυσης κίνησης (Motion Study) επιτρέπουν την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς μηχανισμών, με υπολογισμό ταχυτήτων, επιταχύνσεων και δυνάμεων μεταξύ κινούμενων εξαρτημάτων [17].

Μια ακόμη προχωρημένη εφαρμογή του SolidWorks είναι η μοντελοποίηση ελασμάτων (Sheet Metal), που επιτρέπει τη σχεδίαση επίπεδων μεταλλικών στοιχείων με προβλεπόμενες πτυχώσεις, κάμψεις και αναπτύγματα, χρήσιμη στην κατασκευή μεταλλικών περιβλημάτων και κουτιών [17]. Παράλληλα, το περιβάλλον Surfacing δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας ελεύθερων καμπύλων επιφανειών, πολύτιμο για βιομηχανικό σχεδιασμό και αεροδυναμικά σχήματα [17]. Οι συνδυασμοί επιφανειών, στερεών και παραμετρικών σχέσεων επιτρέπουν την παραγωγή σύνθετων γεωμετριών, ενώ η δυνατότητα αναφοράς σε υπάρχοντα πρότυπα εξαρτήματα μέσω τεχνικών design reuse μειώνει τον σχεδιαστικό χρόνο και αυξάνει την επαναληψιμότητα [17].

Η δυνατότητα δημιουργίας συναρμολογήσεων (Assemblies) στο SolidWorks προσφέρει στον μηχανικό το περιβάλλον για να ενσωματώσει πολλά εξαρτήματα σε ένα ολοκληρωμένο μηχανικό σύστημα, το οποίο μπορεί να προσομοιωθεί και να ελεγχθεί ως λειτουργική οντότητα [17]. Μέσω της τοποθέτησης εξαρτημάτων και του ορισμού σχέσεων ζεύξης (mates), ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει με ακρίβεια τις μεταξύ τους μηχανικές αλληλεπιδράσεις, καθορίζοντας βαθμούς ελευθερίας, περιορισμούς μετακίνησης και δυναμική συμπεριφορά [17]. Οι συναρμολογήσεις υποστηρίζουν τυπικές γεωμετρικές σχέσεις όπως παράλληλη, κάθετη, συγκεντρική, ταυτοχρονισμού ή επαφής, προσφέροντας τη δυνατότητα ελέγχου αλληλοεξαρτώμενων κινήσεων και εντοπισμού πιθανών παρεμβολών (interference) μεταξύ των εξαρτημάτων [17].

Η κίνηση εξαρτημάτων μέσα σε μία συναρμολόγηση μπορεί να προσομοιωθεί με απόλυτο ρεαλισμό μέσω της ενότητας Motion Study, η οποία βασίζεται στην κινηματική ανάλυση και στον υπολογισμό δυνάμεων με τη βοήθεια φυσικών νόμων [17]. Οι χρήστες μπορούν να ορίσουν κινητήρια στοιχεία (όπως μοτέρ, γραμμικές κινήσεις ή περιστροφικές ροπές), να παρακολουθήσουν τις μετατοπίσεις, τις ταχύτητες και τις επιταχύνσεις και να εξάγουν διαγράμματα που περιγράφουν την απόκριση του συστήματος σε προκαθορισμένες συνθήκες [17]. Η ενότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στον σχεδιασμό μηχανισμών με σύνδεσμούς, όπως ανυψωτικά, εργαλειομηχανές, ρομποτικοί βραχίονες και αρθρωτά εξαρτήματα, επιτρέποντας τη δοκιμή της κίνησης προτού κατασκευαστεί το φυσικό πρωτότυπο [17].

Πέρα από την καθαρά κινηματική ανάλυση, το SolidWorks Motion Study μπορεί να ενσωματώσει την επίδραση μαζών, αδράνειας και εξωτερικών φορτίων, παρέχοντας δυναμική προσομοίωση που λαμβάνει υπόψη τις πραγματικές φυσικές δυνάμεις [17]. Για παράδειγμα, σε ένα γρανάζι που συνδέεται με άξονα, η ανάλυση περιλαμβάνει τη ροπή αδράνειας του άξονα, τη μεταβλητή ταχύτητα του δίσκου και τις δυνάμεις αντίδρασης στους συνδέσμους του συστήματος [17]. Ο μηχανικός μπορεί επίσης να εισάγει επαφές με τριβή και απόσβεση, ώστε να εξετάσει τη ρεαλιστική λειτουργία μηχανών, μειώνοντας τον κίνδυνο σχεδιαστικών σφαλμάτων [17].

Ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο του SolidWorks στις συναρμολογήσεις είναι η Ανάλυση Παρεμβο-

λής (Interference Detection), η οποία εντοπίζει γεωμετρικές αλληλοεπικαλύψεις μεταξύ εξαρτημάτων, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχίες κατά την κατασκευή ή στη συναρμολόγηση [17]. Ο έλεγχος για κινηματικές συγκρούσεις (collision detection) είναι επίσης σημαντικός όταν μελετάται η λειτουργία σε συνθήκες πραγματικού χρόνου, ειδικά σε μηχανισμούς που περιέχουν κινούμενα μέρη σε στενά περιβάλλοντα [17]. Σε προχωρημένες περιπτώσεις, ο χρήστης μπορεί να προγραμματίσει τον έλεγχο της κίνησης μέσω πινάκων εισόδων (input values) ή μεταβλητών που σχετίζονται με τον χρόνο, δημιουργώντας πλήρως ρυθμιζόμενες σεναριακές προσομοιώσεις [17].

Οι συναρμολογήσεις στο SolidWorks υποστηρίζουν επίσης ανάλυση βαθμών ελευθερίας, επιτρέποντας στον σχεδιαστή να ελέγξει αν κάποια εξαρτήματα έχουν υπερπροσδιοριστεί ή εάν επιτρέπονται απρόβλεπτες κινήσεις, που πιθανώς να επηρεάζουν τη λειτουργία του τελικού προϊόντος [17]. Παράλληλα, το λογισμικό επιτρέπει την εξαγωγή κινούμενων γραφικών (animations) και αναφορών κίνησης (motion reports), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε παρουσιάσεις, τεχνικές τεκμηριώσεις ή ακόμα και ως εργαλεία επικοινωνίας με κατασκευαστές και πελάτες [17].

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα για τον σύγχρονο μηχανολόγο είναι η δυνατότητα χρήσης παραμετρικής μοντελοποίησης όχι μόνο σε εξαρτήματα αλλά και σε συναρμολογήσεις, με τη δημιουργία σχέσεων που μεταφέρουν διαστάσεις και περιορισμούς από το ένα υποσύστημα στο άλλο [17]. Έτσι, μεταβάλλοντας μια διάσταση στο βασικό εξάρτημα, ενημερώνονται αυτόματα οι εξαρτημένες οντότητες, διασφαλίζοντας ομοιογένεια και αποφεύγοντας ασυνέπειες [17]. Αυτή η δυνατότητα είναι θεμελιώδης σε εφαρμογές μαζικής παραγωγής ή προϊόντων που απαιτούν παραμετρικό customization [17].

Επιπλέον, η ανάλυση κινηματικής στο SolidWorks μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη μοντέλων λειτουργικής απόδοσης, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας, τη μείωση των δυνάμεων φθοράς ή την αύξηση της διάρκειας ζωής ενός μηχανισμού [17]. Ιδιαίτερα στον σχεδιασμό συστημάτων κίνησης, όπως μειωτήρες στροφών, γραμμικές μονάδες ή μηχανισμούς μετάδοσης με τροχαλίες και μιάντες, οι δυνατότητες κινηματικής προσομοίωσης προσφέρουν κρίσιμα δεδομένα για τη λειτουργική αξιολόγηση του συστήματος [17].

Μία από τις πιο ισχυρές επεκτάσεις του SolidWorks είναι το περιβάλλον σχεδίασης ελασμάτων (Sheet Metal), το οποίο επιτρέπει την ακριβή μοντελοποίηση εξαρτημάτων από επίπεδα μεταλλικά φύλλα, λαμβάνοντας υπόψη τις διαδικασίες κάμψης, αναδίπλωσης και διάτρησης που εφαρμόζονται κατά την κατασκευή [17]. Ο χρήστης μπορεί να ξεκινήσει από ένα απλό επίπεδο σχήμα και, μέσω λειτουργιών όπως flange, edge bend, hem και jog, να διαμορφώσει το τελικό προϊόν με ρεαλιστική γεωμετρία και πλήρη παραμετροποίηση [17]. Η δυνατότητα αυτόματης παραγωγής αναπτύγματος (flatten) προσφέρει την προβολή του φύλλου πριν την κάμψη, επιτρέποντας στον κατασκευαστή να δημιουργήσει ακριβή καλούπια ή να προετοιμάσει αρχεία CNC για κοπή laser [17]. Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως το bend allowance και το bend radius, που εξαρτώνται από το υλικό και τον εξοπλισμό, ενισχύοντας τη ρεαλιστική ακρίβεια του τελικού μοντέλου [17].

Το περιβάλλον επιφανειακής σχεδίασης (Surfacing) αποτελεί ένα ακόμη εξαιρετικά ισχυρό εργαλείο του SolidWorks, χρήσιμο ιδιαίτερα στον σχεδιασμό προϊόντων με σύνθετη καμπυλότητα, όπως αεροδυναμικά περιβλήματα, καταναλωτικά προϊόντα με εργονομικό σχήμα ή αισθητικές φόρμες [17]. Οι επιφάνειες, σε αντίθεση με τα στερεά σώματα, δεν έχουν πάχος και μπορούν να διαμορφωθούν ελεύθερα μέσω εργαλείων όπως loft, sweep, boundary surface και filled surface [17]. Ο συνδυασμός πολλών επιφανειών, με τεχνικές κοπής και ένωσης, επιτρέπει τη δημιουργία πολύπλοκων μορφών που θα ήταν δύσκολο να αποδοθούν με παραδοσιακές μεθόδους στερεάς μοντελοποίησης [17]. Η επιφανειακή σχεδίαση βρίσκει εφαρμογή και σε περιπτώσεις reverse engineering, όπου το μοντέλο δημιουργείται από

σύννεφα σημείων ή σαρωμένα δεδομένα 3D [17].

Το SolidWorks ενσωματώνει επίσης μια πλήρη πλατφόρμα μηχανικής ανάλυσης μέσω του περιβάλλοντος Simulation, το οποίο βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), επιτρέποντας την πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς εξαρτημάτων και συναρμολογήσεων υπό φορτίο [17]. Μέσω του Simulation, ο μηχανικός μπορεί να υπολογίσει κατανομές τάσεων (stress), παραμορφώσεων (strain), μετατοπίσεων (displacements) και συντελεστών ασφάλειας (factor of safety), προσδιορίζοντας με ακρίβεια τα σημεία πιθανής αστοχίας [17]. Οι συνθήκες φόρτισης μπορούν να περιλαμβάνουν στατικά φορτία, πιέσεις, δυνάμεις επαφής, θερμοκρασίες ή και δονήσεις, ενώ οι περιορισμοί μοντελοποιούνται με κατάλληλες συνθήκες στήριξης (fixtures) [17].

Η δυνατότητα χρήσης πλέγματος προσαρμοσμένης ακρίβειας (mesh refinement) βελτιώνει την ακρίβεια της προσομοίωσης, ενώ η χρήση συμμετρίας μειώνει τον υπολογιστικό χρόνο χωρίς να αλλοιώνει τα αποτελέσματα [17]. Το SolidWorks Simulation προσφέρει επίσης σενάρια ανάλυσης κόπωσης, θερμικής αγωγιμότητας και δομικών ταλαντώσεων, καλύπτοντας πλήρως τις ανάγκες σχεδίασης μηχανικών εξαρτημάτων σε ρεαλιστικές συνθήκες [17]. Μέσω γραφικών αναπαραστάσεων (contour plots), ο χρήστης μπορεί να εντοπίσει επικίνδυνες περιοχές υψηλής φόρτισης και να αναθεωρήσει τον σχεδιασμό του, ενισχύοντας τοπικά με νευρώσεις ή αυξάνοντας τα πάχη υλικού [17].

Η ενσωμάτωση όλων των παραπάνω εργαλείων σε ένα ενιαίο περιβάλλον καθιστά το SolidWorks ιδιαίτερα κατάλληλο για βιομηχανικές εφαρμογές που απαιτούν απόλυτη συνέπεια μεταξύ σχεδίου, ανάλυσης και παραγωγής [17]. Για παράδειγμα, ένας μηχανικός που σχεδιάζει ένα μεταλλικό περίβλημα για ηλεκτρολογικό πίνακα μπορεί να μοντελοποιήσει το φύλλο μετάλλου, να το υποβάλει σε θερμομηχανική ανάλυση και να δημιουργήσει τα αναπτύγματα κατασκευής χωρίς να φύγει από το περιβάλλον του λογισμικού [17]. Το SolidWorks Simulation επιτρέπει τη χρήση μεταβλητών και σεναρίων what-if, στα οποία αλλάζουν διαστάσεις, υλικά ή φορτία, προσφέροντας ταχύτατη σύγκριση διαφορετικών επιλογών [17].

Επιπρόσθετα, το SolidWorks παρέχει δυνατότητες βελτιστοποίησης μέσω του εργαλείου Design Study, στο οποίο ορίζονται στόχοι και περιορισμοί, και το λογισμικό υπολογίζει την καλύτερη γεωμετρία με βάση κριτήρια ελαχιστοποίησης βάρους, μέγιστης αντοχής ή συγκεκριμένων φυσικών χαρακτηριστικών [17]. Αυτή η προσέγγιση καθιστά το SolidWorks εξαιρετικό εργαλείο για το λεγόμενο concurrent engineering, δηλαδή τον παράλληλο σχεδιασμό και την ανάλυση από την αρχή της διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντων [17].

### **6.3 Κατασκευαστική τεκμηρίωση, σχεδίαση 2D και εφαρμογές του SolidWorks σε πραγματικά έργα**

Ένα από τα σημαντικότερα στάδια της μηχανολογικής σχεδίασης είναι η παραγωγή κατασκευαστικών σχεδίων, που χρησιμεύουν ως γέφυρα ανάμεσα στη μοντελοποίηση και την πραγματική κατασκευή του προϊόντος [17]. Το SolidWorks παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον παραγωγής δισδιάστατων σχεδίων (Drawings), που αντλεί δεδομένα απευθείας από το τρισδιάστατο μοντέλο και δημιουργεί προβολές, διαστάσεις και πίνακες χωρίς την ανάγκη επανασχεδίασης [17]. Η δυνατότητα αυτόματης ενημέρωσης των σχεδίων σε περίπτωση αλλαγής του αρχικού μοντέλου διασφαλίζει την ακρίβεια και τη συνέπεια μεταξύ του σχεδιασμού και της τεκμηρίωσης, μειώνοντας τον κίνδυνο λαθών κατά την κατασκευή [17].

Τα 2D σχέδια στο SolidWorks μπορούν να περιλαμβάνουν προβολές κατόψεων, πλαγιών, τομών, λεπτομερειών και αξονομετρικών παραστάσεων, συνοδευόμενα από πλήρη διαστασιολόγηση, ανοχές,

σημειώσεις υλικών και σύμβολα επιφανειακής κατεργασίας σύμφωνα με τα πρότυπα ISO και ASME [17]. Επιπλέον, οι χρήστες μπορούν να δημιουργούν πίνακες υλικών (BOM – Bill of Materials) και να τους συσχετίζουν με τις συναρμολογήσεις, διευκολύνοντας τη διαχείριση εξαρτημάτων και την επικοινωνία με τμήματα προμηθειών ή παραγωγής [17]. Οι πίνακες BOM μπορούν να εξαχθούν σε μορφή Excel ή να ενσωματωθούν σε συστήματα ERP για ολοκληρωμένη παραγωγική διαχείριση [17].

Το SolidWorks υποστηρίζει τη χρήση προτύπων (templates) για την αυτόματη δημιουργία σχεδίων που περιλαμβάνουν λογότυπα, σταθερά πλαίσια και τυποποιημένες ρυθμίσεις ανάλογα με τον οργανισμό ή τη βιομηχανία, μειώνοντας τον χρόνο τεκμηρίωσης και διασφαλίζοντας την ομοιομορφία [17]. Η ενσωμάτωση με το SolidWorks PDM (Product Data Management) επιτρέπει τον έλεγχο έκδοσης και την ιχνηλασιμότητα των σχεδίων, καθιστώντας το σύστημα κατάλληλο για σύνθετα έργα με πολλούς σχεδιαστές και στάδια έγκρισης [17].

Εκτός από την τεκμηρίωση, το SolidWorks χρησιμοποιείται εκτενώς και στην ανάπτυξη πραγματικών έργων και προϊόντων, σε τομείς που κυμαίνονται από τον βιομηχανικό σχεδιασμό και την αυτοκινητοβιομηχανία μέχρι τη ρομποτική και τη βιοϊατρική μηχανική [17]. Στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, το SolidWorks χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό πλαισίων, σασί, κινητήρων, συστημάτων ανάρτησης και περιβλημάτων, επιτρέποντας την παράλληλη ανάλυση καταπόνησης και τη βελτιστοποίηση βάρους με χρήση εργαλείων όπως το topology optimization [17]. Στη ρομποτική, η δυνατότητα προσομοίωσης κινηματικής και δυναμικής επιτρέπει τον σχεδιασμό ρομποτικών αρθρώσεων, γραμμικών ενεργοποιητών και αυτόματων μηχανισμών με υψηλή ακρίβεια [17].

Στην αεροναυπηγική βιομηχανία, το SolidWorks χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό πτερύγων, αεροδυναμικών εξαρτημάτων και διατάξεων με επιφανειακή σχεδίαση υψηλής πολυπλοκότητας, ενώ η ενσωματωμένη ανάλυση δυναμικής ρευστών μέσω πρόσθετων εργαλείων (π.χ. SolidWorks Flow Simulation) επιτρέπει την προσομοίωση ροής αέρα, απωλειών πίεσης και θερμικών μεταφορών [17]. Επιπλέον, σε εφαρμογές ιατροτεχνολογικού εξοπλισμού, το SolidWorks επιτρέπει τη μοντελοποίηση και ανάλυση προσθετικών συσκευών, εργαλείων μικροχειρουργικής, καθώς και εμφυτευμάτων με πολύπλοκη γεωμετρία, προσαρμοσμένων στην ανατομία του ασθενούς [17].

Η χρήση του SolidWorks σε εκπαιδευτικά ιδρύματα και τεχνικές σχολές έχει εδραιώσει τη σημασία του ως βασικό εργαλείο για την κατάρτιση των νέων μηχανολόγων μηχανικών, εξοικειώνοντάς τους με τις σύγχρονες αρχές ψηφιακής σχεδίασης, ανάλυσης και τεκμηρίωσης [17]. Μέσα από ολοκληρωμένες ασκήσεις και έργα που περιλαμβάνουν κατασκευή, συναρμολόγηση, ανάλυση και παραγωγή σχεδίων, οι φοιτητές αποκτούν γνώσεις που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της βιομηχανίας και τις ανάγκες της αγοράς εργασίας [17].

#### **6.4 Σύγχρονες Τάσεις, Ενοποίηση με Τεχνολογίες Industry 4.0 και Συμπεράσματα**

Η σύγχρονη χρήση του SolidWorks δεν περιορίζεται πλέον μόνο στον σχεδιασμό και στην προσομοίωση εξαρτημάτων, αλλά επεκτείνεται σε ολοκληρωμένα ψηφιακά περιβάλλοντα που ευθυγραμμίζονται με τις αρχές του Industry 4.0, ενσωματώνοντας τεχνολογίες όπως το Internet of Things (IoT), τα ψηφιακά δίδυμα (digital twins), η τεχνητή νοημοσύνη και η προσθετική κατασκευή [17]. Μέσω της πλατφόρμας 3DEXPERIENCE της Dassault Systèmes, το SolidWorks αποκτά πρόσβαση σε εργαλεία που επιτρέπουν τη διασύνδεση της σχεδίασης με παραγωγικά, εφοδιαστικά και εμπορικά συστήματα σε ένα ενιαίο cloud περιβάλλον [17]. Αυτή η ενοποίηση επιτρέπει τη συνεργασία μεταξύ μηχανικών, σχεδιαστών, διαχειρι-

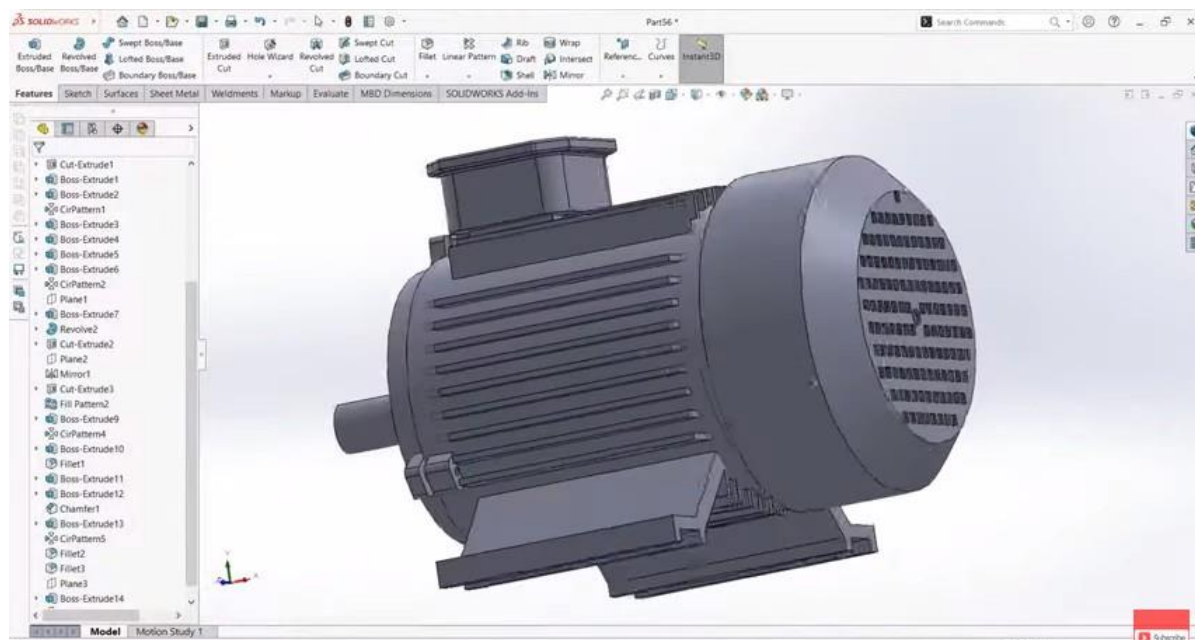
στών έργων και προμηθευτών σε πραγματικό χρόνο, ανεξαρτήτως γεωγραφικής θέσης [17].

Η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων, που υποστηρίζεται από το SolidWorks μέσω της σύνδεσης προσομοιώσεων με πραγματικά δεδομένα αισθητήρων, επιτρέπει την ακριβή πρόβλεψη της συμπεριφοράς εξαρτημάτων κατά τη λειτουργία, ενισχύοντας τη συντήρηση βάσει πρόγνωσης και τη βελτιστοποίηση απόδοσης [17]. Παράλληλα, η χρήση τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης στην ανάλυση δεδομένων σχεδιασμού και λειτουργίας επιτρέπει την αυτόματη αναγνώριση σχεδιαστικών μοτίβων, την αξιολόγηση κατασκευασιμότητας και την παραγωγή προτάσεων σχεδιαστικής βελτίωσης με βάση ιστορικά πρότυπα [17].

Το SolidWorks υποστηρίζει επίσης την προετοιμασία για προσθετική κατασκευή (3D printing), προσφέροντας εργαλεία για έλεγχο τοιχωμάτων, καθορισμό δομών υποστήριξης και προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς κατά την κατασκευή [17]. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ανάπτυξη πρωτοτύπων, προσωποποιημένων εξαρτημάτων και ελαφρών δομών σε τομείς όπως η αεροδιαστημική, η ιατρική τεχνολογία και η ρομποτική [17]. Επιπλέον, η τάση για βιώσιμο σχεδιασμό αντικατοπτρίζεται στην εισαγωγή εργαλείων που αξιολογούν το οικολογικό αποτύπωμα των προϊόντων και υποστηρίζουν επιλογές υλικών και κατασκευής με μικρότερη περιβαλλοντική επίπτωση [17].

Η χρήση του SolidWorks σε συνδυασμό με ψηφιακές αλυσίδες παραγωγής ενισχύει τη δυνατότητα ταχείας κατασκευής (rapid manufacturing), μειώνοντας τον χρόνο ανάπτυξης προϊόντων από τη σύλληψη μέχρι την αγορά και προσφέροντας ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε επιχειρήσεις που επενδύουν στην τεχνολογία [17]. Ο ρόλος του λογισμικού στην εκπαιδευτική διαδικασία εξακολουθεί να είναι κρίσιμος, καθώς εκατοντάδες τεχνικά πανεπιστήμια και επαγγελματικά ιδρύματα το χρησιμοποιούν ως βασικό εργαλείο κατάρτισης σε CAD και μηχανολογικό σχεδιασμό [17]. Η εκπαίδευση με SolidWorks όχι μόνο ενισχύει τις δεξιότητες σχεδίασης των φοιτητών, αλλά τους εισάγει και στη φιλοσοφία του ψηφιακού βιομηχανικού σχεδιασμού, η οποία αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την απασχόληση στον τεχνικό τομέα του 21ου αιώνα [17].

Συνοψίζοντας, το SolidWorks είναι κάτι πολύ περισσότερο από ένα πρόγραμμα σχεδίασης: αποτελεί ένα ολόκληρο ψηφιακό οικοσύστημα που ενώνει τον μηχανικό σχεδιασμό, την τεκμηρίωση, την ανάλυση, την παραγωγή και την καινοτομία σε μια ενιαία πλατφόρμα [17]. Η παραμετρική προσέγγιση του λογισμικού, η ενοποίηση της ανάλυσης με τη σχεδίαση, οι δυνατότητες προσομοίωσης πραγματικών σεναρίων και η συμβατότητα με σύγχρονες τεχνολογίες του Industry 4.0 καθιστούν το SolidWorks ένα από τα ισχυρότερα και πιο προσαρμόσιμα εργαλεία στο σύγχρονο ψηφιακό περιβάλλον μηχανικής σχεδίασης [17]. Η ικανότητά του να εξελίσσεται μαζί με τις ανάγκες της βιομηχανίας, να ενσωματώνει καινοτόμες τεχνολογίες και να υποστηρίζει την εκπαιδευτική διαδικασία, επιβεβαιώνει τον ρόλο του ως αναπόσπαστο εργαλείο για τον σύγχρονο μηχανικό [17].



**Σχήμα 6.1** Σχεδιασμός ηλεκτρικού κινητήρα με Solidworks. Πηγή :Bhatt, A., & Wiley, M. (2022). *SolidWorks 2022 Step-By-Step Guide (Colored Edition): Part Modeling, Assembly, Drawings, Sheet Metal, Surfacing*. Independently published.

# Κεφάλαιο 7: Η κατασκευή μου

## 7.1 Τρισδιάστατη Σχεδίαση και Ψηφιακή Μοντελοποίηση της Κατασκευής

Η ανάπτυξη της παρούσας κατασκευής βασίστηκε σε μία ολοκληρωμένη διαδικασία τρισδιάστατης ψηφιακής μοντελοποίησης, η οποία υλοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού SolidWorks. Η επιλογή του συγκεκριμένου περιβάλλοντος σχεδίασης δεν είναι τυχαία, καθώς αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα εργαλεία CAD (Computer-Aided Design) στον χώρο της μηχανολογίας και της βιομηχανικής παραγωγής, επιτρέποντας την ακριβή γεωμετρική αναπαράσταση πολύπλοκων συστημάτων, καθώς και την ανάλυση της λειτουργικής τους συμπεριφοράς. Στο πλαίσιο της σύγχρονης προσθετικής κατασκευής (additive manufacturing), η τρισδιάστατη μοντελοποίηση αποτελεί το πρώτο και καθοριστικό στάδιο, καθώς το ψηφιακό μοντέλο μετατρέπεται στη συνέχεια σε φυσικό αντικείμενο μέσω διαδικασιών όπως η FDM εκτύπωση.

Η σχεδίαση της κατασκευής πραγματοποιήθηκε αρχικά στο περιβάλλον δημιουργίας επιμέρους εξαρτημάτων (Part Design), όπου κάθε στοιχείο της διάταξης αντιμετωπίστηκε ως ανεξάρτητη γεωμετρική οντότητα. Η διαδικασία αυτή ξεκίνησε με τη δημιουργία δισδιάστατων σκίτσων σε επιλεγμένα επίπεδα αναφοράς (reference planes), τα οποία αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη τρισδιάστατων μορφών. Σε αυτό το στάδιο εφαρμόστηκαν γεωμετρικοί και διαστασιολογικοί περιορισμοί (constraints), οι οποίοι διασφαλίζουν ότι η μορφή κάθε εξαρτήματος είναι πλήρως καθορισμένη και απαλλαγμένη από ασάφειες. Οι περιορισμοί αυτοί μπορεί να περιλαμβάνουν συνθήκες παραλληλίας, καθετότητας, συμμετρίας ή σταθερών αποστάσεων, εξασφαλίζοντας την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα του σχεδιασμού.

Στη συνέχεια, τα δισδιάστατα σκίτσα μετατράπηκαν σε τρισδιάστατα στερεά σώματα με τη χρήση βασικών λειτουργιών στερεοποίησης, όπως η εξώθηση (Extrude), η περιστροφή (Revolve) και η αφαίρεση υλικού (Cut). Οι λειτουργίες αυτές αντιστοιχούν σε θεμελιώδεις γεωμετρικούς μετασχηματισμούς, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η μετάβαση από το επίπεδο στο χώρο. Για παράδειγμα, η εξώθηση ενός σκίτσου κατά μήκος ενός άξονα δημιουργεί ένα πρίσμα με σταθερή διατομή, ενώ η περιστροφή γύρω από έναν άξονα οδηγεί στη δημιουργία σωμάτων εκ περιστροφής, όπως κυλίνδρων ή αξονοσυμμετρικών μορφών.

Επιπρόσθετα, για τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας και τη μείωση συγκεντρώσεων τάσεων, εφαρμόστηκαν λειτουργίες όπως η στρογγύλευση ακμών (Fillet) και η δημιουργία λοξοτμήσεων (Chamfer). Οι επεμβάσεις αυτές δεν έχουν μόνο αισθητικό χαρακτήρα, αλλά συμβάλλουν ουσιαστικά στη μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής, καθώς μειώνουν τις τοπικές ασυνέχειες και βελτιώνουν την κατανομή των φορτίων. Η χρήση τέτοιων εργαλείων είναι ιδιαίτερα σημαντική σε κατασκευές που πρόκειται να παραχθούν μέσω 3D εκτύπωσης, δεδομένου ότι οι απότομες αλλαγές στη γεωμετρία μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την ποιότητα της εκτύπωσης και την αντοχή του τελικού αντικειμένου.

Μετά την ολοκλήρωση της σχεδίασης όλων των επιμέρους εξαρτημάτων, ακολούθησε η διαδικασία συναρμολόγησης στο περιβάλλον Assembly. Σε αυτό το στάδιο, τα μεμονωμένα στοιχεία εισήχθησαν και τοποθετήθηκαν στον τρισδιάστατο χώρο με βάση συγκεκριμένες σχέσεις συναρμολόγησης (mates). Οι σχέσεις αυτές περιλαμβάνουν συνθήκες όπως η ταύτιση επιφανειών (Coincident), η παραλληλία (Parallel), καθώς και η διατήρηση συγκεκριμένων αποστάσεων (Distance), επιτρέποντας την ακριβή χωρική τοποθέτηση των εξαρτημάτων. Μέσω της διαδικασίας αυτής επιτυγχάνεται η αναπαράσταση της πραγματικής λειτουργικής διάταξης, ενώ παράλληλα παρέχεται η δυνατότητα ελέγχου κινηματικών περιορισμών και πιθανών συγκρούσεων μεταξύ των στοιχείων.

Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στον έλεγχο της γεωμετρικής ακρίβειας και της λειτουργικής συμβατότητας των εξαρτημάτων, καθώς η επιτυχής συναρμολόγηση σε ψηφιακό επίπεδο αποτελεί προϋπόθεση για την ομαλή κατασκευή και λειτουργία του φυσικού πρωτοτύπου. Ο έλεγχος αυτός περιλαμβάνει τη διαπίστωση της σωστής ευθυγράμμισης, της επαρκούς ανοχής μεταξύ κινούμενων μερών και της αποφυγής παρεμβολών. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η οπτικοποίηση του μοντέλου μέσω εργαλείων απόδοσης υλικών και φωτισμού (rendering και appearance), με στόχο την πιο ρεαλιστική απεικόνιση της κατασκευής και την καλύτερη κατανόηση της μορφής της.

Η ολοκληρωμένη αυτή διαδικασία σχεδίασης οδηγεί στη δημιουργία ενός πλήρως καθορισμένου και λειτουργικού τρισδιάστατου μοντέλου, το οποίο δεν εξυπηρετεί μόνο σκοπούς παρουσίασης, αλλά αποτελεί και τη βάση για την επόμενη φάση της παραγωγής μέσω προσθετικής κατασκευής. Επιπλέον, το ψηφιακό μοντέλο μπορεί να αξιοποιηθεί για περαιτέρω μηχανολογική ανάλυση, όπως μελέτες αντοχής, θερμικής συμπεριφοράς ή κινηματικής, καθιστώντας το ένα ισχυρό εργαλείο στη διαδικασία σχεδιασμού και βελτιστοποίησης.

## 7.2 Διαδικασία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και Τεχνολογία FDM

Μετά την ολοκλήρωση της τρισδιάστατης ψηφιακής μοντελοποίησης, ακολούθησε το στάδιο της υλοποίησης της κατασκευής μέσω της μεθόδου της προσθετικής κατασκευής (additive manufacturing). Η συγκεκριμένη κατασκευή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση εκτυπωτή τεχνολογίας FDM (Fused Deposition Modeling), και συγκεκριμένα με το μοντέλο Ender 3 V3 KE. Η τεχνολογία FDM αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης, ιδιαίτερα σε εφαρμογές χαμηλού και μεσαίου κόστους, καθώς συνδυάζει ικανοποιητική ακρίβεια, ευκολία χρήσης και ευελιξία στην επιλογή υλικών.

Η βασική αρχή λειτουργίας της μεθόδου FDM στηρίζεται στη θερμική τήξη ενός θερμοπλαστικού υλικού και την εναπόθεσή του σε διαδοχικά στρώματα, μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου. Το υλικό εισάγεται υπό μορφή νήματος (filament) στον εκτυπωτή και οδηγείται προς το ακροφύσιο (nozzle), όπου θερμαίνεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της θερμοκρασίας υαλώδους μετάβασης και τήξης του υλικού. Στη συνέχεια, το υλικό εξωθείται μέσω του ακροφυσίου και εναποτίθεται πάνω στην επιφάνεια κατασκευής (build plate), σχηματίζοντας το πρώτο στρώμα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε επόμενο στρώμα, σύμφωνα με τις εντολές που λαμβάνει ο εκτυπωτής από το αρχείο εκτύπωσης.

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα κατασκευή είναι το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), ένα θερμοπλαστικό πολυμερές το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερα ευνοϊκά χαρακτηριστικά για εφαρμογές FDM εκτύπωσης. Το PLA χαρακτηρίζεται από χαμηλή θερμοκρασία τήξης, τυπικά της τάξης των 180–220°C, γεγονός που το καθιστά εύκολο στην επεξεργασία και μειώνει τις θερμικές παραμορφώσεις κατά την εκτύπωση. Επιπλέον, παρουσιάζει σχετικά μικρή συστολή κατά την ψύξη, γεγονός που περιορίζει φαινόμενα στρέβλωσης (warping) και συμβάλλει στη διατήρηση της γεωμετρικής ακρίβειας του τελικού

αντικειμένου.

Από φυσικής άποψης, η διαδικασία FDM μπορεί να περιγραφεί ως μία σύνθετη θερμομηχανική διεργασία, στην οποία λαμβάνουν χώρα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, ιξώδους ροής και συγκόλλησης μεταξύ των στρωμάτων. Η θερμοκρασία του ακροφυσίου καθορίζει το ιξώδες του υλικού, το οποίο αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη σωστή εξώθηση. Το ιξώδες  $\eta$  του πολυμερούς (μονάδες:  $Pa \cdot s$ ) μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας, σύμφωνα με σχέσεις τύπου Arrhenius, επιτρέποντας την ομαλή ροή του υλικού. Ταυτόχρονα, κατά την εναπόθεση, το υλικό υφίσταται ψύξη και στερεοποίηση, με αποτέλεσμα τη δημιουργία δεσμών μεταξύ διαδοχικών στρώσεων μέσω διάχυσης των μακρομορίων (interlayer diffusion).

Η ποιότητα της συγκόλλησης μεταξύ των στρώσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία εκτύπωσης, τον χρόνο ψύξης και την ταχύτητα εναπόθεσης. Εάν η θερμοκρασία είναι χαμηλή, το υλικό δεν συγκολλάται επαρκώς, οδηγώντας σε μειωμένη μηχανική αντοχή, ιδιαίτερα στην κατακόρυφη διεύθυνση (διεύθυνση  $z$ ). Αντίθετα, πολύ υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσουν υπερβολική ρευστότητα και απώλεια γεωμετρικής ακρίβειας. Επομένως, απαιτείται προσεκτική επιλογή των παραμέτρων εκτύπωσης, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ αντοχής και ακρίβειας.

### 7.3 Προετοιμασία Εκτύπωσης και Ρύθμιση Παραμέτρων μέσω Cura Slicer

Η μετάβαση από το ψηφιακό μοντέλο στην πραγματική εκτύπωση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Cura Slicer, το οποίο αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα εργαλεία τεμαχισμού (slicing software) στη διαδικασία της προσθετικής κατασκευής. Το λογισμικό αυτό αναλαμβάνει τη μετατροπή του τρισδιάστατου μοντέλου (συνήθως σε μορφή STL) σε ένα σύνολο εντολών G-code, οι οποίες είναι κατανοητές από τον εκτυπωτή και καθορίζουν με ακρίβεια τη διαδρομή του ακροφυσίου, την ταχύτητα κίνησης και τις θερμοκρασίες λειτουργίας.

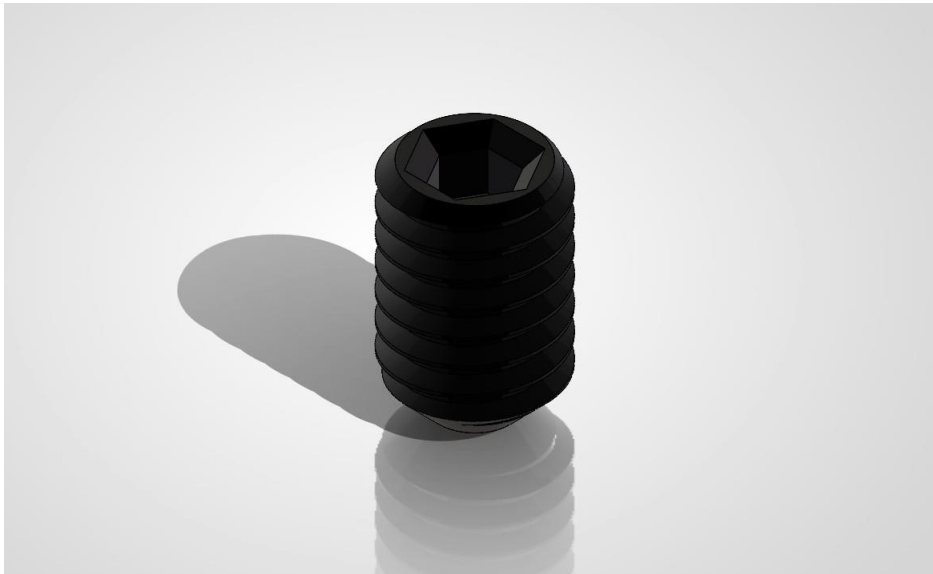
Κατά τη διαδικασία του slicing, το τρισδιάστατο μοντέλο διαχωρίζεται σε μία σειρά από οριζόντια στρώματα συγκεκριμένου πάχους, το οποίο ορίζεται από την παράμετρο του ύψους στρώσης (layer height). Το ύψος στρώσης, με μονάδες μήκους (mm), αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους εκτύπωσης, καθώς επηρεάζει άμεσα την ανάλυση και την ποιότητα της επιφάνειας του αντικειμένου. Μικρότερο ύψος στρώσης οδηγεί σε μεγαλύτερη ακρίβεια και ομαλότερη επιφάνεια, αλλά αυξάνει σημαντικά τον χρόνο εκτύπωσης. Αντίθετα, μεγαλύτερο ύψος στρώσης μειώνει τον χρόνο παραγωγής, εις βάρος όμως της ποιότητας.

Μία εξίσου σημαντική παράμετρος είναι η θερμοκρασία του ακροφυσίου, η οποία επηρεάζει τη ρεολογική συμπεριφορά του υλικού. Η επιλογή της κατάλληλης θερμοκρασίας γίνεται με βάση τις ιδιότητες του υλικού και τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, και συνήθως κυμαίνεται σε ένα εύρος που εξασφαλίζει επαρκή ρευστότητα χωρίς να προκαλεί αποδόμηση του πολυμερούς. Παράλληλα, η θερμοκρασία της επιφάνειας εκτύπωσης (bed temperature) συμβάλλει στη βελτίωση της πρόσφυσης του πρώτου στρώματος, μειώνοντας την πιθανότητα αποκόλλησης.

Η ταχύτητα εκτύπωσης (printing speed), με μονάδες  $mm/s$ , καθορίζει τον ρυθμό εναπόθεσης του υλικού και επηρεάζει τόσο την ποιότητα όσο και τη διάρκεια της διαδικασίας. Υψηλές ταχύτητες μπορεί να οδηγήσουν σε ανεπαρκή συγκόλληση και σφάλματα στη γεωμετρία, ενώ χαμηλές ταχύτητες αυξάνουν τον χρόνο εκτύπωσης αλλά βελτιώνουν την ακρίβεια. Επιπλέον, η παράμετρος του ποσοστού πλήρωσης (infill density), η οποία εκφράζεται σε ποσοστό (%), καθορίζει το ποσοστό του εσωτερικού όγκου του αντικειμένου που καταλαμβάνεται από υλικό. Η επιλογή της κατάλληλης τιμής εξαρτάται από τις απαι-

τήσεις αντοχής και το βάρος της κατασκευής.

Η επιλογή όλων των παραπάνω παραμέτρων πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την επίτευξη μιας ισορροπίας μεταξύ μηχανικής αντοχής, ποιότητας επιφάνειας και χρόνου παραγωγής. Η διαδικασία αυτή αποτελεί ουσιαστικά μία μορφή βελτιστοποίησης (optimization), όπου πολλαπλά κριτήρια λαμβάνονται υπόψη ταυτόχρονα, όπως αναφέρεται και στη σύγχρονη βιβλιογραφία της προσθετικής κατασκευής. Η σωστή ρύθμιση των παραμέτρων είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχία της εκτύπωσης και την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

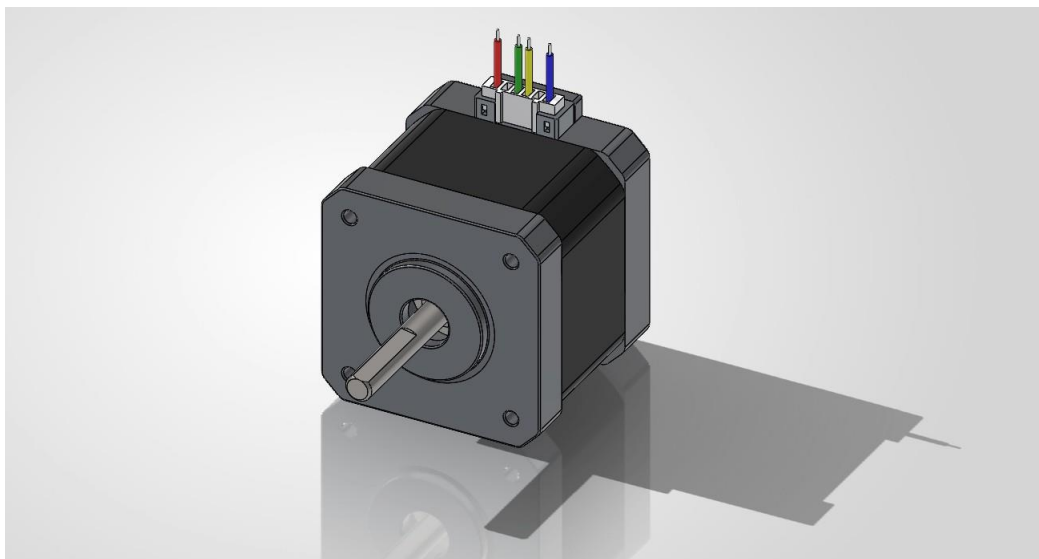


**Σχήμα 7.1** Τρισδιάστατη απεικόνιση κοχλία σύσφιξης με εσωτερική εξαγωνική υποδοχή.

Το συγκεκριμένο εξάρτημα αποτελεί έναν κοχλία σύσφιξης τύπου set screw, ο οποίος φέρει εσωτερική εξαγωνική υποδοχή για τη μετάδοση ροπής μέσω κατάλληλου εργαλείου, όπως εξαγωνικό κλειδί. Η γεωμετρία του χαρακτηρίζεται από κυλινδρικό σώμα με εξωτερικό σπείρωμα, το οποίο επιτρέπει τη σταθερή και αξονική σύσφιξη εντός αντίστοιχης οπής με σπείρωμα.

Η απουσία κεφαλής υποδηλώνει ότι ο κοχλίας αυτός χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές όπου απαιτείται συγκράτηση εξαρτημάτων χωρίς προεξοχές, όπως για παράδειγμα η στερέωση αξόνων ή η συγκράτηση περιστροφικών στοιχείων. Η εσωτερική εξαγωνική διαμόρφωση επιτρέπει την εφαρμογή ροπής με ακρίβεια, ενώ παράλληλα μειώνει τον απαιτούμενο χώρο λειτουργίας σε σχέση με συμβατικούς κοχλίες.

Η μορφή του εξαρτήματος υποδηλώνει ότι έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την ευκολία κατασκευής και την αξιοπιστία στη χρήση, ενώ η απλότητα της γεωμετρίας του το καθιστά κατάλληλο για παραγωγή μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης ή συμβατικών μεθόδων κατεργασίας.

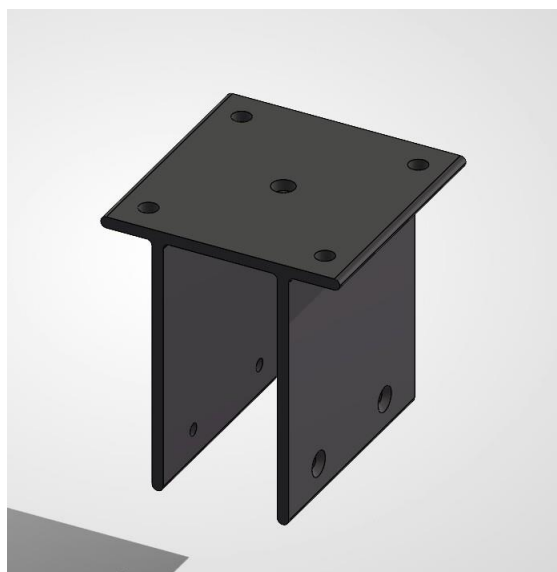


**Σχήμα 7.2** Τρισδιάστατη απεικόνιση ηλεκτρικού κινητήρα με άξονα εξόδου και ακροδέκτες σύνδεσης.

Η εικόνα παρουσιάζει έναν ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος αποτελεί βασικό στοιχείο της κατασκευής, καθώς είναι υπεύθυνος για την παραγωγή της περιστροφικής κίνησης. Ο κινητήρας διαθέτει συμπαγές σώμα, συνήθως μεταλλικής κατασκευής, το οποίο περιβάλλει τα εσωτερικά ηλεκτρομηχανικά στοιχεία και παρέχει την απαραίτητη μηχανική προστασία.

Στο εμπρόσθιο μέρος διακρίνεται ο άξονας εξόδου, μέσω του οποίου μεταδίδεται η κίνηση στα υπόλοιπα εξαρτήματα της διάταξης. Ο άξονας αυτός είναι κατάλληλα ευθυγραμμισμένος και στηρίζεται εσωτερικά, ώστε να εξασφαλίζεται ομαλή και σταθερή περιστροφή.

Στο άνω μέρος του κινητήρα εμφανίζονται οι ακροδέκτες ηλεκτρικής σύνδεσης, οι οποίοι επιτρέπουν την τροφοδοσία του με ρεύμα. Η ύπαρξη πολλαπλών ακροδεκτών υποδηλώνει τη δυνατότητα ελέγχου της λειτουργίας ή της φοράς περιστροφής. Η συνολική μορφή του κινητήρα είναι τυποποιημένη, γεγονός που διευκολύνει την ενσωμάτωσή του σε μηχανολογικές κατασκευές.



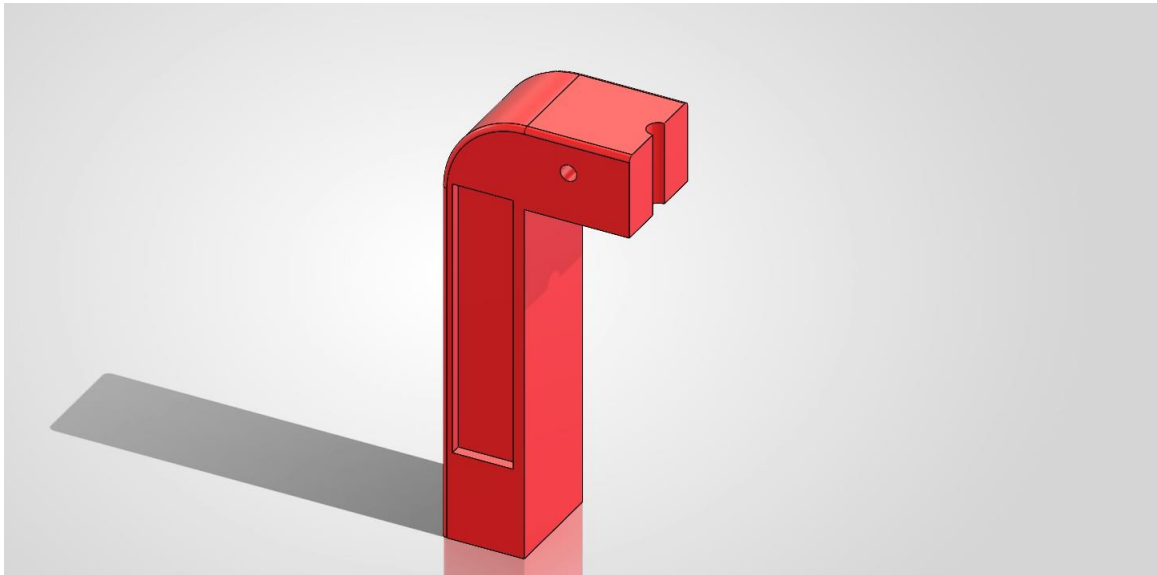
**Σχήμα 7.3** Τρισδιάστατη απεικόνιση πλαστικής βάσης στήριξης τύπου γωνίας.

Το εξάρτημα που απεικονίζεται αποτελεί μία βάση στήριξης τύπου γωνίας, η οποία χρησιμοποιείται

για τη συγκράτηση και τη στερέωση επιμέρους στοιχείων της κατασκευής. Η γεωμετρία της χαρακτηρίζεται από επίπεδη οριζόντια επιφάνεια και δύο κατακόρυφα πλευρικά τοιχώματα, τα οποία δημιουργούν μία σταθερή δομή με αυξημένη αντοχή.

Οι οπές που διακρίνονται στις επιφάνειες της βάσης επιτρέπουν τη σύνδεσή της με άλλα εξαρτήματα μέσω κοχλιών, εξασφαλίζοντας σταθερότητα και ακρίβεια στη συναρμολόγηση. Η διάταξη των οπών είναι συμμετρική, γεγονός που διευκολύνει την τοποθέτηση και την ευθυγράμμιση των συνδεόμενων στοιχείων.

Η συγκεκριμένη μορφή βάσης χρησιμοποιείται ευρέως σε μηχανολογικές εφαρμογές, καθώς παρέχει επαρκή στήριξη και ταυτόχρονα επιτρέπει την εύκολη συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση της κατασκευής.

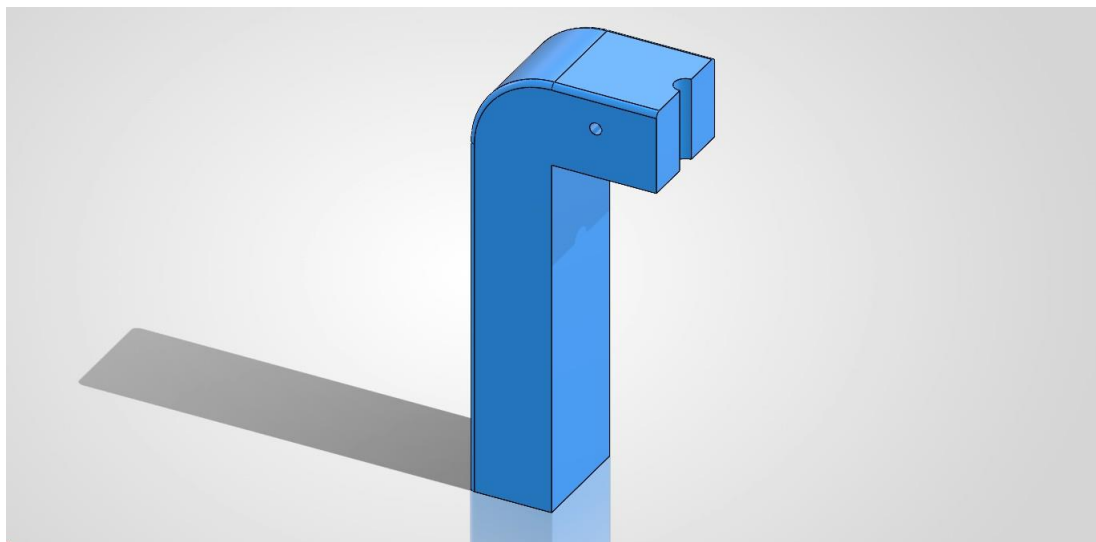


**Σχήμα 7.4** Τρισδιάστατη απεικόνιση πλαστικού εξαρτήματος στήριξης.

Το εξάρτημα που παρουσιάζεται αποτελεί ένα βασικό δομικό στοιχείο της κατασκευής, το οποίο έχει σχεδιαστεί ώστε να λειτουργεί ως τμήμα στήριξης και καθοδήγησης άλλων μηχανικών μερών. Η γεωμετρία του χαρακτηρίζεται από επιμήκη μορφή με καμπύλες επιφάνειες στο άνω τμήμα, οι οποίες συμβάλλουν τόσο στη βελτίωση της αισθητικής όσο και στην ομαλή κατανομή των φορτίων.

Στο εσωτερικό του εξαρτήματος διακρίνεται κοιλότητα, η οποία έχει διαμορφωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει την τοποθέτηση ή τη διέλευση άλλων στοιχείων της κατασκευής. Η ύπαρξη αυτής της κοιλότητας υποδηλώνει ότι το εξάρτημα δεν είναι απλώς συμπαγές, αλλά έχει σχεδιαστεί με λειτουργικά κριτήρια, μειώνοντας παράλληλα το βάρος και το απαιτούμενο υλικό κατασκευής.

Το άνω τμήμα φέρει οπή σύνδεσης, η οποία χρησιμοποιείται για τη στερέωση με άλλα εξαρτήματα μέσω κοχλιών. Η συνολική μορφή του στοιχείου το καθιστά κατάλληλο για χρήση σε τρισδιάστατα εκτυπωμένες κατασκευές, όπου απαιτείται συνδυασμός αντοχής, χαμηλού βάρους και λειτουργικής ευελιξίας.

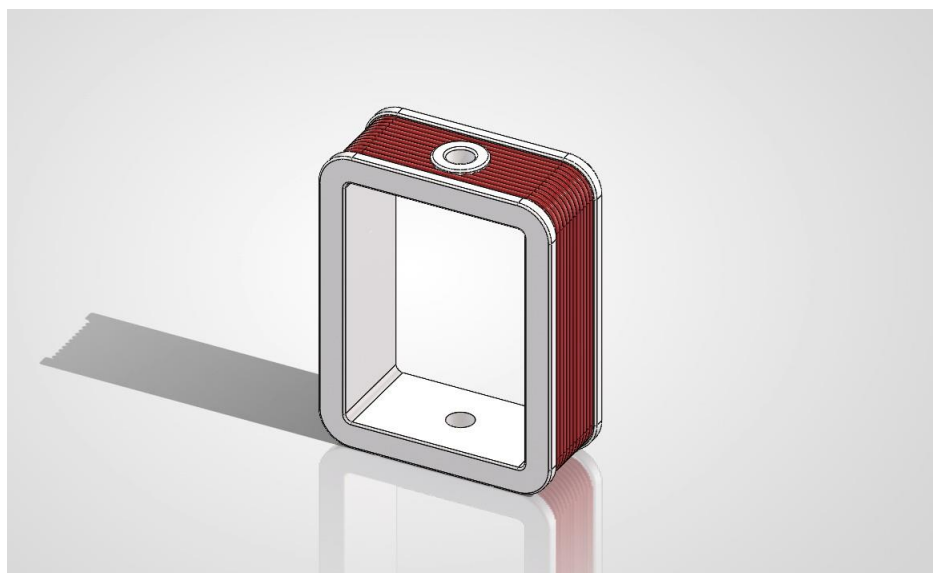


**Σχήμα 7.5** Τρισδιάστατη απεικόνιση συμπληρωματικού πλαστικού εξαρτήματος.

Το συγκεκριμένο εξάρτημα αποτελεί συμπληρωματικό στοιχείο του προηγούμενου και παρουσιάζει παρόμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα δύο αυτά μέρη λειτουργούν συνεργατικά στο πλαίσιο της συνολικής κατασκευής. Η μορφή του είναι επίσης επιμήκης, με καμπυλωμένες ακμές και ομαλές μεταβάσεις, που συμβάλλουν στη βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς.

Η ύπαρξη εσωτερικής κοιλότητας επιτρέπει την ενσωμάτωση ή την προστασία άλλων στοιχείων, ενώ η οπή στο άνω μέρος διευκολύνει τη συναρμολόγηση με τα υπόλοιπα εξαρτήματα. Η συμμετρία και η καθαρότητα της γεωμετρίας καθιστούν το εξάρτημα εύκολο στην κατασκευή και στη συναρμολόγηση.

Η χρήση διαφορετικού χρώματος στην απεικόνιση υποδηλώνει τον διαχωρισμό των εξαρτημάτων κατά τη φάση της σχεδίασης, γεγονός που βοηθά στην καλύτερη κατανόηση της συναρμολογούμενης δομής.



**Σχήμα 7.6** Τρισδιάστατη απεικόνιση πηνίου με περίβλημα.

Η εικόνα παρουσιάζει το πηνίο της διάταξης, το οποίο αποτελεί βασικό στοιχείο για τη λειτουργία του ηλεκτρομηχανικού συστήματος. Το πηνίο είναι τοποθετημένο εντός ενός προστατευτικού περιβλήματος,

το οποίο εξασφαλίζει τη σταθερότητα και την προστασία του κατά τη λειτουργία.

Οι πολλαπλές περιελίξεις του αγώγιμου υλικού είναι εμφανείς και υποδηλώνουν τη δομή του πηνίου, το οποίο έχει σχεδιαστεί ώστε να καταλαμβάνει τον διαθέσιμο χώρο με ομοιόμορφο τρόπο. Το εξωτερικό πλαίσιο του περιβλήματος είναι τετραγωνικής μορφής με στρογγυλεμένες ακμές, γεγονός που διευκολύνει την ενσωμάτωση του στοιχείου στη συνολική κατασκευή.

Η διάταξη αυτή επιτρέπει την εύκολη τοποθέτηση και αφαίρεση του πηνίου, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει την απαραίτητη σταθερότητα κατά τη λειτουργία του συστήματος.

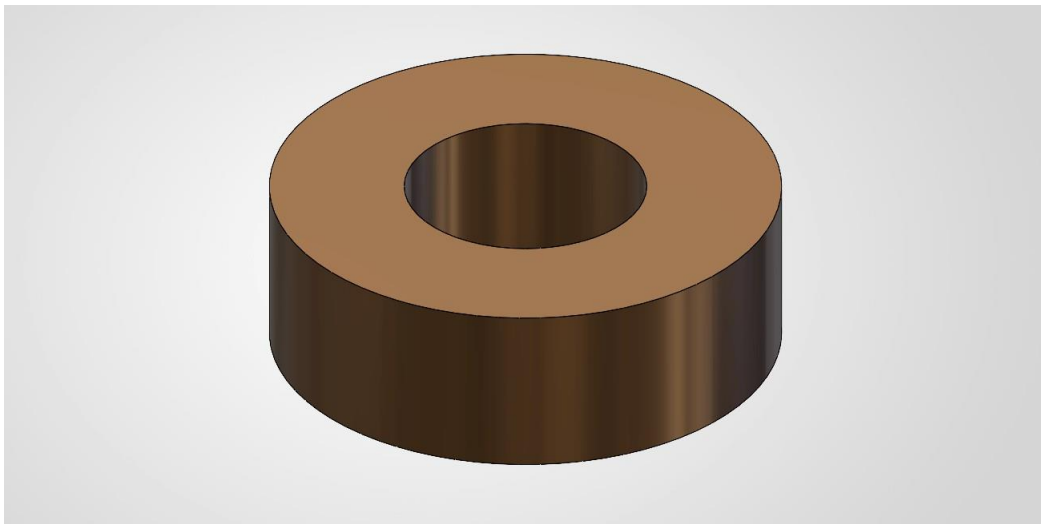


**Σχήμα 7.7** Τρισδιάστατη απεικόνιση βάσης στήριξης κινητήρα.

Η βάση που απεικονίζεται έχει σχεδιαστεί για τη στήριξη του κινητήρα και τη σύνδεσή του με τα υπόλοιπα μέρη της κατασκευής. Η γεωμετρία της περιλαμβάνει μία οριζόντια επιφάνεια με κυκλική οπή στο κέντρο, η οποία προορίζεται για την τοποθέτηση του άξονα ή του σώματος του κινητήρα.

Οι πολλαπλές οπές που υπάρχουν τόσο στην άνω όσο και στις πλευρικές επιφάνειες επιτρέπουν τη στερέωση της βάσης σε διαφορετικά σημεία, παρέχοντας ευελιξία στη συναρμολόγηση. Η συμμετρική διάταξη των οπών διευκολύνει την ευθυγράμμιση και τη σταθερή στήριξη.

Η κατασκευή της βάσης είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζει επαρκή ακαμψία, ενώ παράλληλα διατηρεί σχετικά χαμηλό βάρος, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε κατασκευές που περιλαμβάνουν κινούμενα μέρη.



**Σχήμα 7.8** Τρισδιάστατη απεικόνιση κυκλικού δακτυλίου.

Η χρήση του δακτυλίου (σχήμα 10.8) δεν περιορίζεται αποκλειστικά στη μηχανική στήριξη των επιμέρους στοιχείων της κατασκευής, αλλά διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο και στη λειτουργία του ηλεκτρομηχανικού συστήματος. Συγκεκριμένα, ο δακτύλιος είναι κατασκευασμένος από αγωγίμο υλικό, όπως ο χαλκός, γεγονός που επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος με χαμηλές απώλειες λόγω της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητάς του. Η επιλογή του συγκεκριμένου υλικού δεν είναι τυχαία, καθώς ο χαλκός παρουσιάζει εξαιρετική συμπεριφορά τόσο σε ηλεκτρικό όσο και σε θερμικό επίπεδο, συμβάλλοντας στην αποδοτική και ασφαλή λειτουργία του συστήματος.

Ο δακτύλιος βρίσκεται σε άμεση επαφή και συνεργασία με τις ψήκτρες, οι οποίες αποτελούν το βασικό μέσο μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος από το εξωτερικό κύκλωμα προς τα περιστρεφόμενα μέρη του κινητήρα. Μέσω αυτής της επαφής, το ρεύμα μεταφέρεται συνεχώς από τις ψήκτρες προς τον δακτύλιο, ακόμη και κατά την περιστροφή του άξονα, εξασφαλίζοντας αδιάλειπτη ηλεκτρική τροφοδοσία. Η συνεχής αυτή ροή ρεύματος οδηγεί στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου στα ενεργά στοιχεία του κινητήρα, το οποίο αλληλεπιδρά με τα αντίστοιχα πεδία του στάτη, παράγοντας ηλεκτρομαγνητική ροπή.

Η παραγόμενη ροπή αποτελεί το βασικό μηχανισμό μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική κίνηση, με αποτέλεσμα την περιστροφή του άξονα. Επομένως, ο δακτύλιος δεν λειτουργεί απλώς ως ένα παθητικό εξάρτημα στήριξης, αλλά ως κρίσιμο στοιχείο μεταφοράς ενέργειας και διασύνδεσης μεταξύ του ηλεκτρικού και του μηχανικού μέρους του συστήματος. Η σωστή κατασκευή και τοποθέτησή του επηρεάζουν άμεσα την απόδοση, τη σταθερότητα και τη διάρκεια ζωής του κινητήρα, καθιστώντας τον απαραίτητο για την ομαλή και αποδοτική λειτουργία της διάταξης.



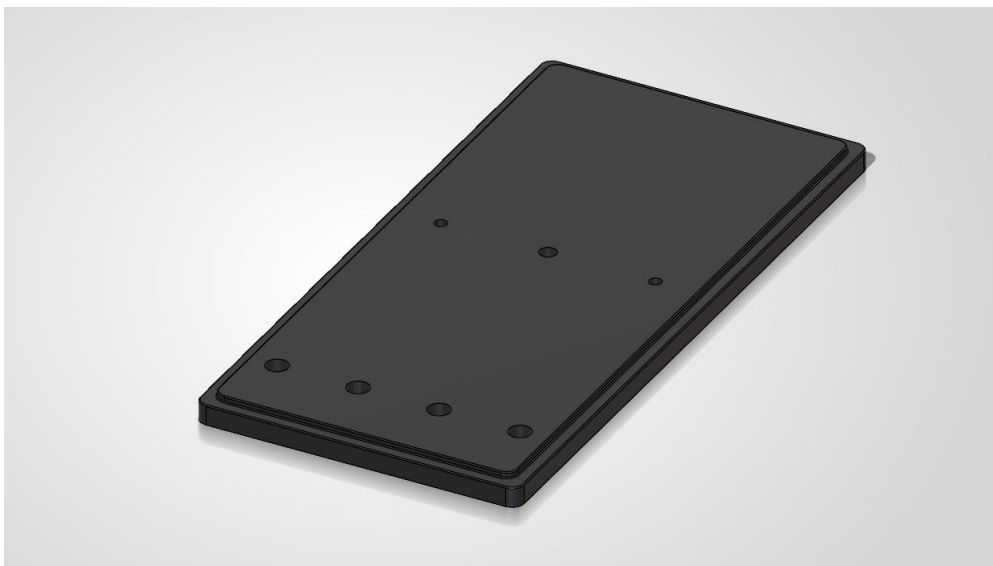
**Σχήμα 7.9** Τρισδιάστατη απεικόνιση μπόρνας.

Το στοιχείο που παρουσιάζεται στο σχήμα 10.9 αποτελεί μπόρνα σύνδεσης, δηλαδή για το σημείο εισόδου του ηλεκτρικού κυκλώματος. Η μπόρνα λειτουργεί ως βασικό στοιχείο διασύνδεσης μεταξύ της εξωτερικής πηγής τροφοδοσίας και των εσωτερικών αγωγίμων μερών της κατασκευής, επιτρέποντας την ασφαλή και σταθερή μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας προς το σύστημα.

Πιο συγκεκριμένα, μέσω της μπόρνας εισάγεται το ηλεκτρικό ρεύμα από την πηγή τροφοδοσίας, το οποίο στη συνέχεια διοχετεύεται στα επιμέρους στοιχεία του κυκλώματος, όπως οι αγωγοί, τα πηνία και οι δακτύλιοι. Η σωστή λειτουργία της είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς αποτελεί το αρχικό σημείο ενεργοποίησης του ηλεκτρομηχανικού συστήματος. Οποιαδήποτε αστοχία στη σύνδεση ή κακή επαφή μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες ισχύος, αστάθεια λειτουργίας ή ακόμη και σε πλήρη διακοπή της λειτουργίας του κινητήρα.

Από κατασκευαστικής πλευράς, η μπόρνα είναι συνήθως κατασκευασμένη από αγωγίμα υλικά υψηλής ποιότητας, όπως ο χαλκός ή ορείχαλκος, ώστε να εξασφαλίζεται χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση και αξιόπιστη επαφή με τα καλώδια τροφοδοσίας. Παράλληλα, συχνά συνοδεύεται από μονωτικά στοιχεία, τα οποία αποτρέπουν ανεπιθύμητες διαρροές ρεύματος και προστατεύουν τον χρήστη από ηλεκτροπληξία.

Συνεπώς, η μπόρνα δεν αποτελεί απλώς ένα παθητικό εξάρτημα σύνδεσης, αλλά ένα κρίσιμο στοιχείο της ηλεκτρικής υποδομής του συστήματος, το οποίο εξασφαλίζει την ομαλή εισαγωγή της ενέργειας και συμβάλλει καθοριστικά στην αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία της συνολικής διάταξης.



**Σχήμα 7.10** Τρισδιάστατη απεικόνιση βάσης κατασκευής.

Η βάση της κατασκευής αποτελεί το κύριο στοιχείο στήριξης πάνω στο οποίο τοποθετούνται όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα. Η μορφή της είναι επίπεδη και ορθογώνια, παρέχοντας μεγάλη επιφάνεια στήριξης και αυξημένη σταθερότητα.

Οι οπές που υπάρχουν στην επιφάνειά της επιτρέπουν τη στερέωση των επιμέρους στοιχείων με κοχλίες, εξασφαλίζοντας την ακριβή τοποθέτηση και τη μηχανική συνοχή της διάταξης. Η διάταξη των οπών έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να καλύπτει διαφορετικές ανάγκες συναρμολόγησης.

Η στιβαρότητα της βάσης είναι καθοριστικής σημασίας για τη σωστή λειτουργία του συστήματος, καθώς απορροφά φορτία και περιορίζει τις ανεπιθύμητες μετακινήσεις ή ταλαντώσεις κατά τη λειτουργία.



**Σχήμα 7.11** Τα ποδαράκια της βάσης της κατασκευής.

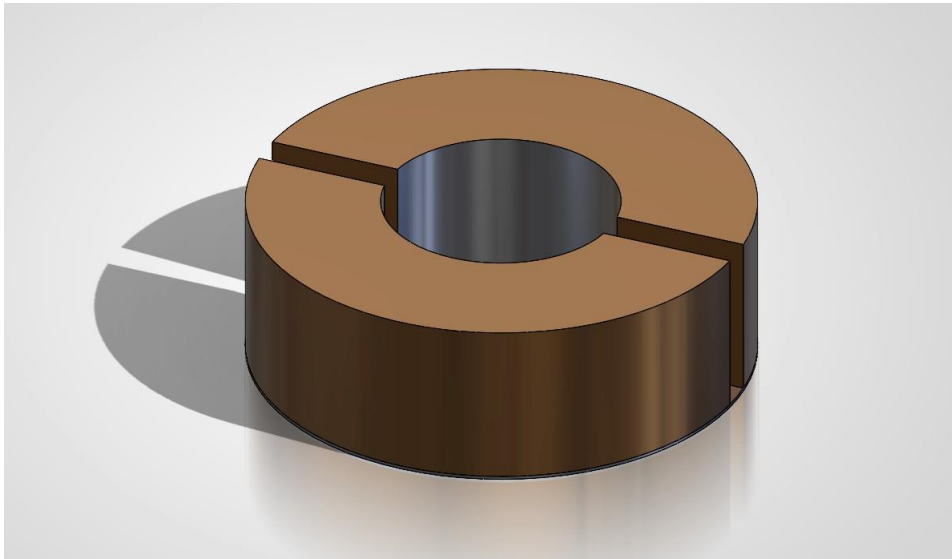
Το στοιχείο που απεικονίζεται στο σχήμα 10.11 πρόκειται για τα ποδαράκια της βάσης της κατασκευής. Τα ποδαράκια αυτά αποτελούν βασικά μηχανικά στοιχεία στήριξης, τα οποία εξασφαλίζουν την ανύψωση και τη σταθερή τοποθέτηση της διάταξης πάνω σε επιφάνεια εργασίας.

Η κύρια λειτουργία τους είναι να δημιουργούν μια ελεγχόμενη απόσταση μεταξύ της βάσης και της

επιφάνειας στήριξης, επιτρέποντας καλύτερη κατανομή των φορτίων και αποφυγή άμεσης επαφής με το υπόστρωμα. Με τον τρόπο αυτό συμβάλλουν στη μείωση των κραδασμών και των μηχανικών καταπονήσεων που μπορεί να αναπτυχθούν κατά τη λειτουργία του συστήματος, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν περιστρεφόμενα μέρη.

Παράλληλα, η ύπαρξη των ποδιών διευκολύνει τον αερισμό της κατασκευής, επιτρέποντας τη φυσική κυκλοφορία του αέρα κάτω από τη βάση. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε ηλεκτρομηχανικές διατάξεις, όπου αναπτύσσονται θερμικά φορτία λόγω απωλειών, συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς και στην αποφυγή υπερθέρμανσης.

Από κατασκευαστικής άποψης, τα ποδαράκια σχεδιάζονται ώστε να παρέχουν επαρκή μηχανική αντοχή και σταθερότητα, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φέρουν ελαστικά ή αντιολισθητικά στοιχεία για την καλύτερη πρόσφυση στην επιφάνεια. Συνεπώς, δεν πρόκειται για αποστάτες με λειτουργία ευθυγράμμισης εξαρτημάτων, αλλά για δομικά στοιχεία στήριξης που συμβάλλουν καθοριστικά στη συνολική ευστάθεια και λειτουργικότητα της κατασκευής.

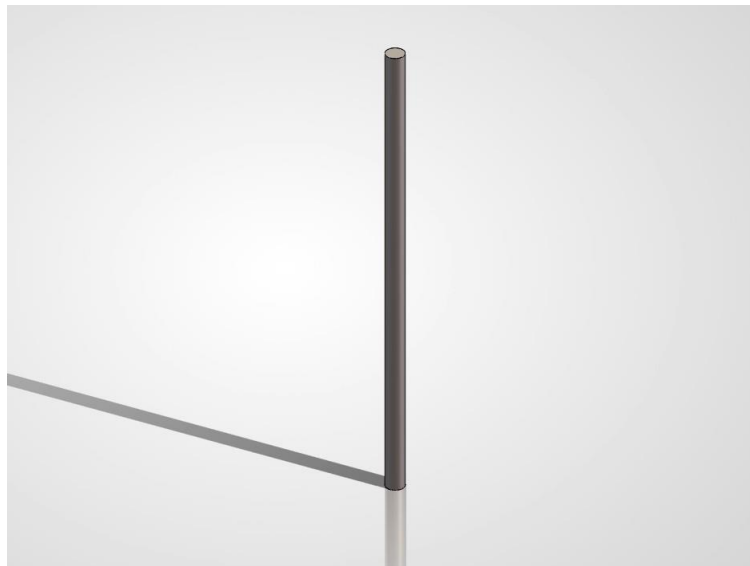


**Σχήμα 7.12** Τρισδιάστατη απεικόνιση δακτυλίου με εγκοπή.

Το εξάρτημα αυτό αποτελεί έναν κυκλικό δακτύλιο με πλευρική εγκοπή, ο οποίος έχει σχεδιαστεί ώστε να μπορεί να τοποθετείται και να αφαιρείται εύκολα από άξονες ή κυλινδρικά στοιχεία χωρίς να απαιτείται πλήρης αποσυναρμολόγηση της διάταξης.

Η εγκοπή επιτρέπει την ελαστική παραμόρφωση του δακτυλίου κατά την τοποθέτηση, διευκολύνοντας τη διαδικασία συναρμολόγησης. Παράλληλα, η κυκλική μορφή του εξασφαλίζει ομοιόμορφη επαφή με το στοιχείο στο οποίο προσαρμόζεται.

Η χρήση τέτοιου τύπου εξαρτημάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική σε μηχανισμούς όπου απαιτείται γρήγορη συντήρηση ή αντικατάσταση επιμέρους στοιχείων, χωρίς την ανάγκη πλήρους αποσυναρμολόγησης.



**Σχήμα 7.13** Τρισδιάστατη απεικόνιση άξονα.

Η εικόνα παρουσιάζει έναν άξονα, ο οποίος αποτελεί βασικό στοιχείο μετάδοσης της κίνησης στη διάταξη. Η γεωμετρία του είναι απλή και επιμήκης, με κυλινδρική μορφή και σταθερή διατομή κατά μήκος του.

Ο άξονας χρησιμοποιείται για τη μεταφορά της περιστροφικής κίνησης από τον κινητήρα προς τα υπόλοιπα εξαρτήματα, εξασφαλίζοντας τη μηχανική σύνδεση μεταξύ των επιμέρους στοιχείων. Η ευθύγραμμη μορφή του συμβάλλει στη σταθερή περιστροφή και στη μείωση των κραδασμών.

Η ακρίβεια στη γεωμετρία του άξονα είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επηρεάζει άμεσα την ομαλή λειτουργία του συστήματος και τη σωστή ευθυγράμμιση των κινούμενων μερών.



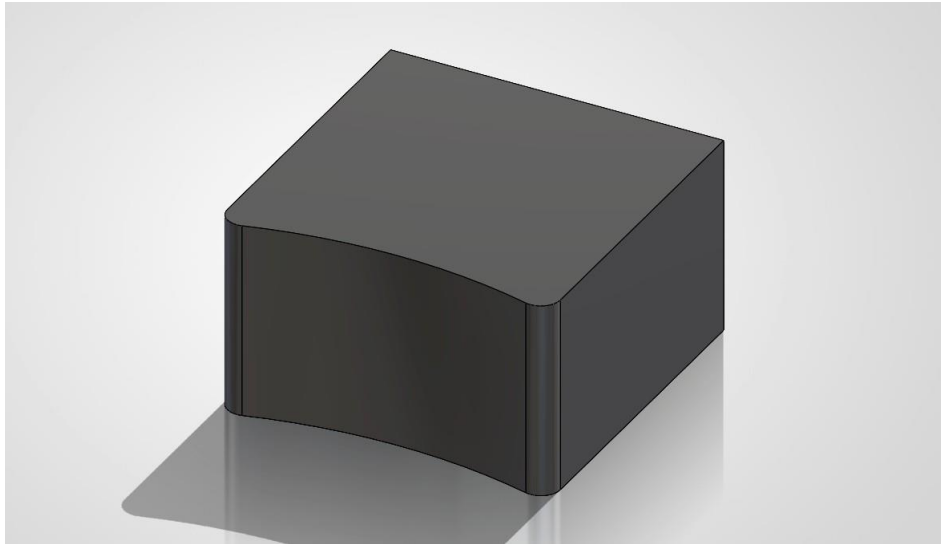
**Σχήμα 7.14** Τρισδιάστατη απεικόνιση συνδέσμου αξόνων (coupler).

Το εξάρτημα που παρουσιάζεται αποτελεί σύνδεσμο αξόνων, γνωστό και ως κόμπλερ, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη σύνδεση δύο αξόνων μεταξύ τους. Η μορφή του είναι κυλινδρική και φέρει πλευρικές οπές με σπείρωμα, στις οποίες τοποθετούνται κοχλίες σύσφιξης για τη στερέωση των αξόνων.

Η ύπαρξη αυτών των οπών επιτρέπει την ασφαλή σύσφιξη και αποτρέπει την ολίσθηση των αξόνων κατά τη λειτουργία. Οι περιφερειακές αυλακώσεις στο κεντρικό τμήμα του εξαρτήματος συμβάλλουν

στη μείωση της ακαμψίας και επιτρέπουν μικρές παραμορφώσεις, γεγονός που βοηθά στην απορρόφηση μικρών ασυμφωνιών ευθυγράμμισης.

Η χρήση συνδέσμων αυτού του τύπου είναι ιδιαίτερα σημαντική σε μηχανισμούς μετάδοσης κίνησης, καθώς εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία και μειώνει τις καταπονήσεις στα επιμέρους στοιχεία.



**Σχήμα 7.15** Τρισδιάστατη απεικόνιση πλαστικού περιβλήματος.

Το εξάρτημα αυτό αποτελεί τμήμα περιβλήματος της κατασκευής και έχει σχεδιαστεί ώστε να προστατεύει τα εσωτερικά στοιχεία από εξωτερικές επιδράσεις, ενώ παράλληλα συμβάλλει στη συνολική ακαμψία της δομής.

Η γεωμετρία του χαρακτηρίζεται από ορθογωνική μορφή με καμπυλωμένες επιφάνειες, οι οποίες βελτιώνουν τόσο την αισθητική όσο και τη μηχανική συμπεριφορά. Οι λείες επιφάνειες διευκολύνουν την κατασκευή μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης και μειώνουν τις συγκεντρώσεις τάσεων.

Το περίβλημα αυτό λειτουργεί ως προστατευτικό στοιχείο, αλλά και ως δομικό μέρος της κατασκευής, συμβάλλοντας στη σταθερότητα και στην οργάνωση των επιμέρους εξαρτημάτων στο εσωτερικό της διάταξης.



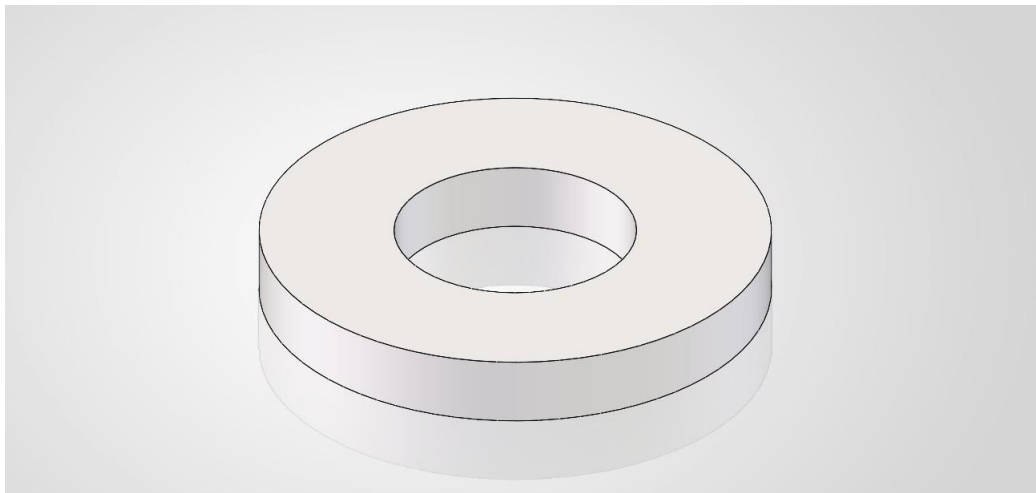
**Σχήμα 7.16** Τρισδιάστατη απεικόνιση κοχλία με κεφαλή και ευθύγραμμη εγκοπή.

Το εξάρτημα που απεικονίζεται αποτελεί έναν κοχλία με κεφαλή και ευθύγραμμη εγκοπή, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη σύνδεση και τη συγκράτηση επιμέρους στοιχείων της κατασκευής. Η κεφαλή του κοχλία είναι κυλινδρικής μορφής με επίπεδη επιφάνεια, ενώ φέρει εγκοπή στην άνω πλευρά, η οποία επιτρέπει την εφαρμογή ροπής μέσω κατάλληλου εργαλείου, όπως κατσαβίδι.

Το σώμα του κοχλία διαθέτει εξωτερικό σπείρωμα, το οποίο εξασφαλίζει την προοδευτική σύσφιξη μέσα σε αντίστοιχη σπειρωτή οπή. Η γεωμετρία του σπειρώματος επιτρέπει τη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε αξονική μετατόπιση, με αποτέλεσμα τη σταθερή και αξιόπιστη σύσφιξη των συνδεόμενων εξαρτημάτων.

Η μορφή της κεφαλής παρέχει μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής σε σχέση με κοχλίες χωρίς κεφαλή, γεγονός που συμβάλλει στην καλύτερη κατανομή των φορτίων και στη μείωση της πιθανότητας φθοράς των επιφανειών. Παράλληλα, η απλότητα της εγκοπής καθιστά τον κοχλία εύχρηστο και συμβατό με κοινά εργαλεία.

Η χρήση κοχλιών αυτού του τύπου είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε μηχανολογικές κατασκευές, καθώς επιτρέπουν εύκολη συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση, ενώ εξασφαλίζουν ικανοποιητική μηχανική αντοχή και αξιοπιστία κατά τη λειτουργία της διάταξης.



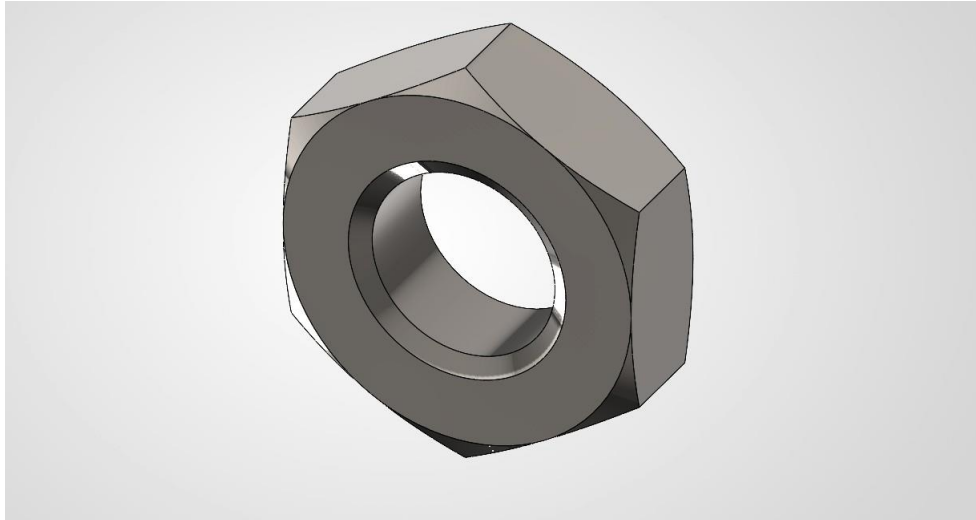
**Σχήμα 7.17** Τρισδιάστατη απεικόνιση ροδέλας.

Το εξάρτημα που απεικονίζεται αποτελεί μία ροδέλα, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως σε μηχανολογικές κατασκευές ως στοιχείο ενδιάμεσης στήριξης μεταξύ κοχλιών και επιφανειών σύσφιξης. Η γεωμετρία της χαρακτηρίζεται από επίπεδη κυκλική μορφή με ομοαξονική οπή στο κέντρο, γεγονός που επιτρέπει την εύκολη τοποθέτησή της γύρω από κοχλίες ή άξονες.

Ο βασικός ρόλος της ροδέλας είναι η κατανομή των φορτίων σύσφιξης σε μεγαλύτερη επιφάνεια, μειώνοντας τις τοπικές πιέσεις και αποτρέποντας τη φθορά ή την παραμόρφωση των επιφανειών επαφής. Με τον τρόπο αυτό συμβάλλει στη βελτίωση της αντοχής και της αξιοπιστίας της σύνδεσης.

Επιπλέον, η χρήση ροδέλας βοηθά στη διατήρηση της σταθερότητας της σύνδεσης, περιορίζοντας την πιθανότητα χαλάρωσης λόγω κραδασμών ή επαναλαμβανόμενων φορτίσεων. Η απλότητα της μορφής της την καθιστά ιδιαίτερα εύχρηστη και εύκολη στην κατασκευή, ενώ αποτελεί βασικό και απαραίτητο στοιχείο σε κάθε μηχανική συναρμολόγηση.

Στο πλαίσιο της παρούσας κατασκευής, η ροδέλα συμβάλλει στη σωστή λειτουργία των συνδέσεων, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη σύσφιξη και προστασία των επιμέρους εξαρτημάτων.



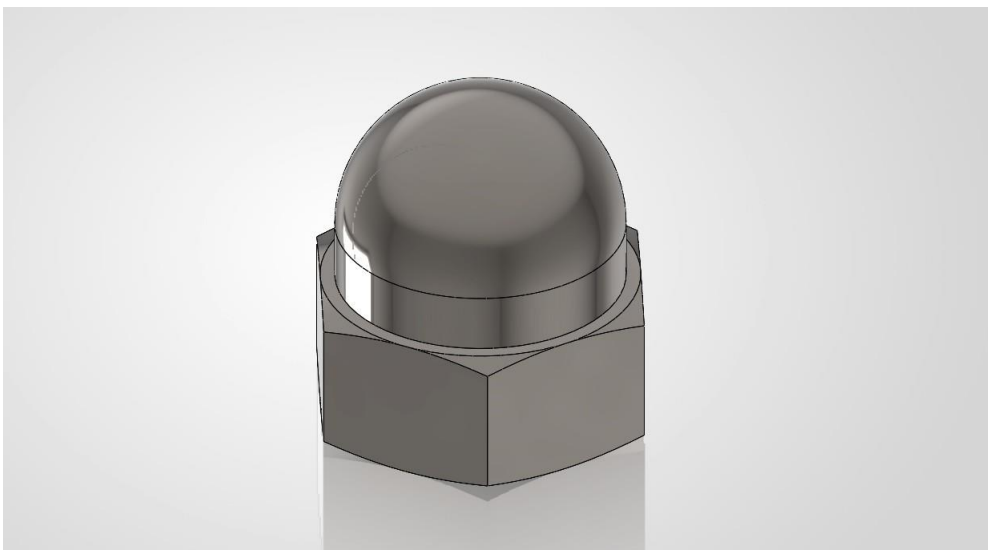
**Σχήμα 7.18** Τρισδιάστατη απεικόνιση εξάγωνου περικοχλίου.

Το εξάρτημα που παρουσιάζεται αποτελεί ένα εξάγωνο περικόχλιο, το οποίο χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με κοχλίες για τη δημιουργία αποσπώμενων μηχανικών συνδέσεων. Η εξωτερική του γεωμετρία είναι εξάγωνική, επιτρέποντας την εφαρμογή ροπής μέσω κατάλληλων εργαλείων, όπως κλειδιά ή κασάνιες, ενώ η εσωτερική επιφάνεια φέρει σπείρωμα για τη συνεργασία με τον αντίστοιχο κοχλία.

Η εξάγωνική μορφή του περικοχλίου παρέχει καλή εργονομία κατά τη σύσφιξη, επιτρέποντας την εύκολη και ασφαλή εφαρμογή δύναμης χωρίς ολίσθηση. Η εσωτερική σπειρωτή επιφάνεια εξασφαλίζει την αξονική συγκράτηση των εξαρτημάτων, μετατρέποντας την περιστροφική κίνηση σε σύσφιξη.

Το περικόχλιο αποτελεί βασικό στοιχείο σε κάθε μηχανολογική κατασκευή, καθώς επιτρέπει την επαναλαμβανόμενη συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση χωρίς μόνιμες συνδέσεις. Στο πλαίσιο της παρούσας διάταξης, χρησιμοποιείται για τη στερέωση επιμέρους στοιχείων, εξασφαλίζοντας τη μηχανική συνοχή και τη σταθερότητα του συστήματος.

Η απλότητα και η αξιοπιστία του εξαρτήματος το καθιστούν απαραίτητο για τη λειτουργία της κατασκευής, ενώ η γεωμετρία του επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωσή του σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία σύσφιξης, όπως κοχλίες και ροδέλες.



**Σχήμα 7.19** Τρισδιάστατη απεικόνιση τυφλού περικοχλίου.

Το εξάρτημα που παρουσιάζεται αποτελεί ένα τυφλό περικόχλιο, γνωστό και ως cap nut, το οποίο χρησιμοποιείται σε μηχανολογικές συνδέσεις όπου απαιτείται ταυτόχρονα στερέωση και προστασία του άκρου του κοχλία. Η γεωμετρία του χαρακτηρίζεται από εξαγωνική βάση, παρόμοια με αυτή ενός συμβατικού περικοχλίου, και από ημισφαιρικό κλειστό άνω τμήμα.

Η εξαγωνική μορφή της βάσης επιτρέπει την εφαρμογή ροπής μέσω εργαλείων, διευκολύνοντας τη διαδικασία σύσφιξης. Το εσωτερικό του εξαρτήματος φέρει σπείρωμα, το οποίο συνεργάζεται με τον αντίστοιχο κοχλία, εξασφαλίζοντας τη μηχανική σύνδεση των εξαρτημάτων.

Το κύριο χαρακτηριστικό του τυφλού περικοχλίου είναι το κλειστό άνω μέρος, το οποίο καλύπτει το προεξέχον άκρο του κοχλία. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται προστασία από μηχανικές φθορές, αποφεύγεται η επαφή με αιχμηρές επιφάνειες και βελτιώνεται η αισθητική της κατασκευής. Παράλληλα, μειώνεται η πιθανότητα διάβρωσης ή ρύπανσης του σπειρώματος.

Η χρήση αυτού του τύπου περικοχλίου είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε κατασκευές όπου η ασφάλεια και η προστασία των χρηστών είναι σημαντικές, καθώς και σε εφαρμογές όπου απαιτείται ένα πιο ολοκληρωμένο και προσεγμένο τελικό αποτέλεσμα. Στην παρούσα διάταξη, συμβάλλει τόσο στη μηχανική συγκράτηση όσο και στη βελτίωση της συνολικής εμφάνισης της κατασκευής.



**Σχήμα 7.20** Τρισδιάστατη απεικόνιση κοχλία με σταυροειδή εγκοπή.

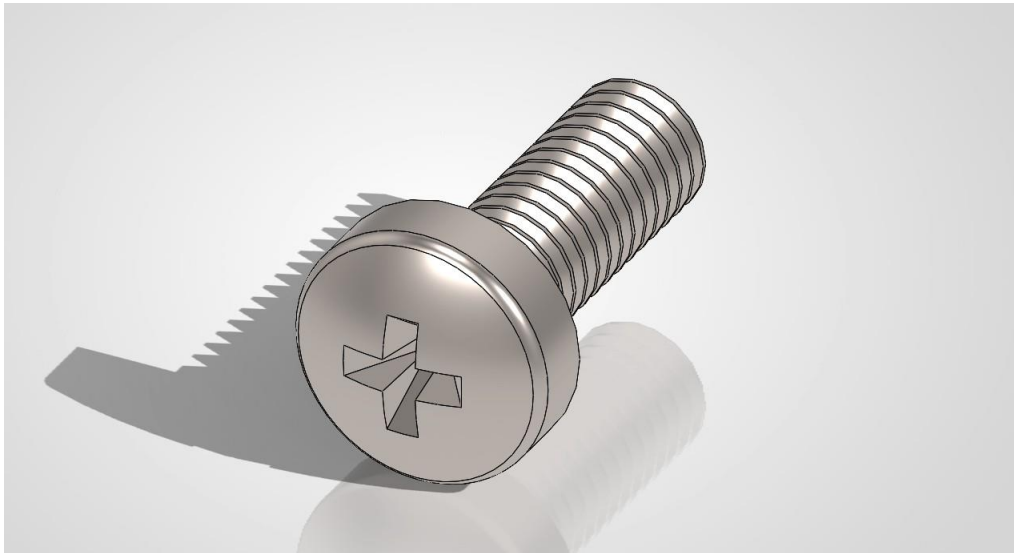
Το εξάρτημα που απεικονίζεται αποτελεί έναν κοχλία με σταυροειδή εγκοπή, γνωστό και ως Phillips screw, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως για τη σύνδεση και τη σύσφιξη μηχανικών στοιχείων. Η κεφαλή του κοχλία είναι επίπεδη και φέρει σταυροειδή εγκοπή, η οποία επιτρέπει τη χρήση κατάλληλου κατασβιδιού για την εφαρμογή ροπής.

Το σώμα του κοχλία είναι κυλινδρικό και διαθέτει εξωτερικό σπείρωμα κατά μήκος του, το οποίο επιτρέπει την ασφαλή σύσφιξη σε αντίστοιχες σπειρωτές οπές ή σε συνδυασμό με περικόχλια. Η γεωμετρία του σπειρώματος συμβάλλει στην αποτελεσματική μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε αξονική μετατόπιση, εξασφαλίζοντας τη σταθερή συγκράτηση των εξαρτημάτων.

Η σταυροειδής εγκοπή παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σχέση με την ευθύγραμμη, καθώς επιτρέπει καλύτερη καθοδήγηση του εργαλείου και μειώνει την πιθανότητα ολίσθησης κατά τη σύσφιξη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη ακρίβεια και ασφάλεια κατά τη συναρμολόγηση.

Ο συγκεκριμένος τύπος κοχλία χρησιμοποιείται εκτενώς σε μηχανολογικές και κατασκευαστικές εφαρμογές, καθώς συνδυάζει ευκολία χρήσης, αξιοπιστία και καλή μηχανική αντοχή. Στο πλαίσιο της

παρούσας κατασκευής, συμβάλλει στη σύνδεση των επιμέρους στοιχείων και στην εξασφάλιση της συνολικής δομικής ακεραιότητας της διάταξης.



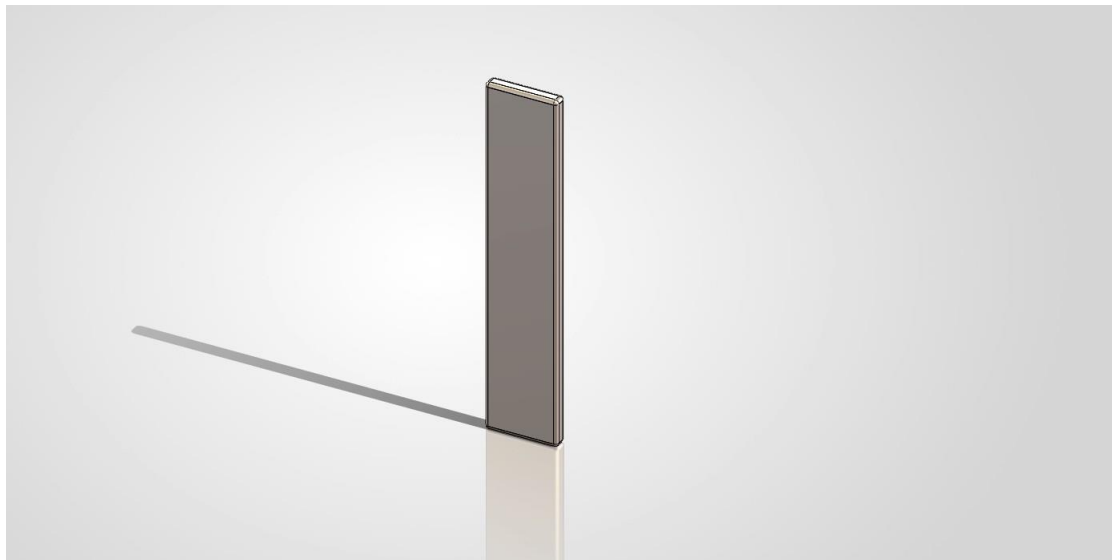
**Σχήμα 7.21** Τρισδιάστατη απεικόνιση κοχλία με φαρδιά κεφαλή και σταυροειδή εγκοπή.

Το εξάρτημα που παρουσιάζεται αποτελεί έναν κοχλία με φαρδιά κεφαλή και σταυροειδή εγκοπή, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη σύνδεση και τη συγκράτηση επιμέρους στοιχείων της κατασκευής. Η κεφαλή του κοχλία είναι κυκλική με ελαφρά καμπύλη επιφάνεια, προσφέροντας αυξημένη επιφάνεια επαφής με το συνδεδεμένο στοιχείο.

Η σταυροειδής εγκοπή στην κεφαλή επιτρέπει την εύκολη και ασφαλή εφαρμογή ροπής μέσω κατάλληλου εργαλείου, μειώνοντας την πιθανότητα ολίσθησης κατά τη σύσφιξη. Το σώμα του κοχλία διαθέτει εξωτερικό σπείρωμα, το οποίο επιτρέπει τη σταθερή σύνδεση με σπειρωτές οπές ή με περικόχλια.

Η φαρδιά κεφαλή συμβάλλει στη βελτίωση της κατανομής των φορτίων, μειώνοντας τις τοπικές πιέσεις και προστατεύοντας τις επιφάνειες των εξαρτημάτων από φθορά. Παράλληλα, παρέχει καλύτερη συγκράτηση σε περιπτώσεις όπου το υλικό στήριξης είναι σχετικά μαλακό, όπως σε τρισδιάστατα εκτυπωμένα πλαστικά μέρη.

Η χρήση αυτού του τύπου κοχλία είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για κατασκευές που περιλαμβάνουν συνδυασμό μεταλλικών και πλαστικών στοιχείων, καθώς εξασφαλίζει αξιόπιστη σύσφιξη και συμβάλλει στη συνολική μηχανική σταθερότητα της διάταξης.



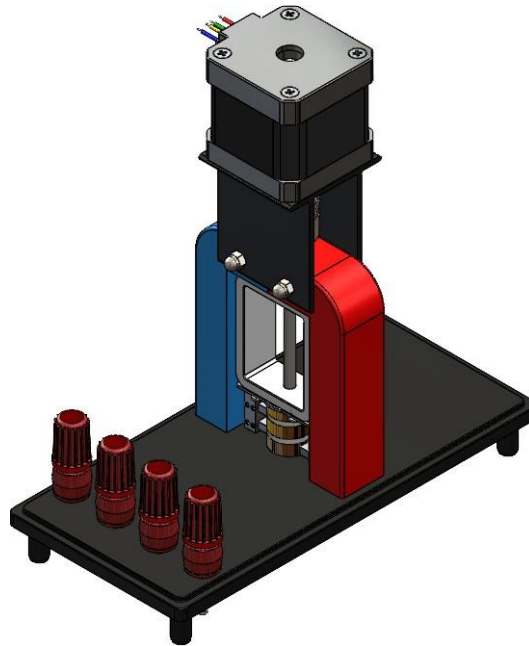
**Σχήμα 7.22** Τρισδιάστατη απεικόνιση μαγνήτη νεοδυμίου.

Το στοιχείο που απεικονίζεται στο σχήμα 10.22 αποτελεί έναν μαγνήτη νεοδυμίου (NdFeB), ο οποίος διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία του ηλεκτρομηχανικού συστήματος. Οι μαγνήτες νεοδυμίου ανήκουν στην κατηγορία των μόνιμων μαγνητών υψηλής απόδοσης και χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα ισχυρό μαγνητικό πεδίο σε σχέση με το μέγεθός τους, γεγονός που τους καθιστά ιδανικούς για χρήση σε ηλεκτρικές μηχανές μικρών διαστάσεων και υψηλής ισχύος.

Η βασική λειτουργία του μαγνήτη είναι η δημιουργία σταθερού μαγνητικού πεδίου, το οποίο αλληλεπιδρά με τα ρεύματα που διαρρέουν τα αγωγικά μέρη του κινητήρα, όπως τα πηνία ή οι αγωγοί του δρομέα. Η αλληλεπίδραση αυτή οδηγεί στην ανάπτυξη ηλεκτρομαγνητικής δύναμης, σύμφωνα με τη δύναμη Lorentz, και κατ' επέκταση στη δημιουργία ροπής που προκαλεί την περιστροφική κίνηση του συστήματος.

Η χρήση μαγνητών νεοδυμίου προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα, υψηλή απόδοση και δυνατότητα κατασκευής συμπαγών κινητήρων. Ωστόσο, απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός, καθώς οι μαγνήτες αυτοί είναι ευαίσθητοι σε υψηλές θερμοκρασίες και μηχανικές καταπονήσεις.

Συνεπώς, το στοιχείο του σχήματος 10.22 δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως απλό γεωμετρικό μέρος της κατασκευής, αλλά ως βασικό ενεργό στοιχείο που συμβάλλει άμεσα στη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου και στη συνολική λειτουργία του κινητήρα.



**Σχήμα 7.23** Τρισδιάστατη απεικόνιση της συνολικής συναρμολογημένης κατασκευής.

Η εικόνα παρουσιάζει τη συνολική συναρμολογημένη διάταξη της κατασκευής, στην οποία συνδυάζονται όλα τα επιμέρους εξαρτήματα που αναλύθηκαν προηγουμένως, σχηματίζοντας ένα ολοκληρωμένο ηλεκτρομηχανικό σύστημα. Η κατασκευή είναι τοποθετημένη πάνω σε επίπεδη βάση, η οποία λειτουργεί ως κύριο στοιχείο στήριξης και εξασφαλίζει τη σταθερότητα της διάταξης κατά τη λειτουργία.

Στο κάτω μέρος της κατασκευής διακρίνεται η βάση, πάνω στην οποία έχουν τοποθετηθεί τα επιμέρους εξαρτήματα με χρήση κοχλιών και κατάλληλων στοιχείων σύσφιξης. Η βάση αυτή φέρει επίσης στηρίγματα, τα οποία ανυψώνουν ελαφρώς τη διάταξη από την επιφάνεια έδρασης, συμβάλλοντας στη μείωση των κραδασμών και στη βελτίωση της λειτουργικής συμπεριφοράς.

Στο κεντρικό τμήμα της κατασκευής βρίσκεται η βασική δομή στήριξης, η οποία αποτελείται από δύο κατακόρυφα πλαστικά στοιχεία διαφορετικού χρώματος, τα οποία λειτουργούν ως φορείς στήριξης των εσωτερικών μηχανισμών. Μεταξύ αυτών των στοιχείων διαμορφώνεται ο χώρος στον οποίο τοποθετείται ο ρότορας και το πηνίο, δημιουργώντας το βασικό λειτουργικό τμήμα της διάταξης.

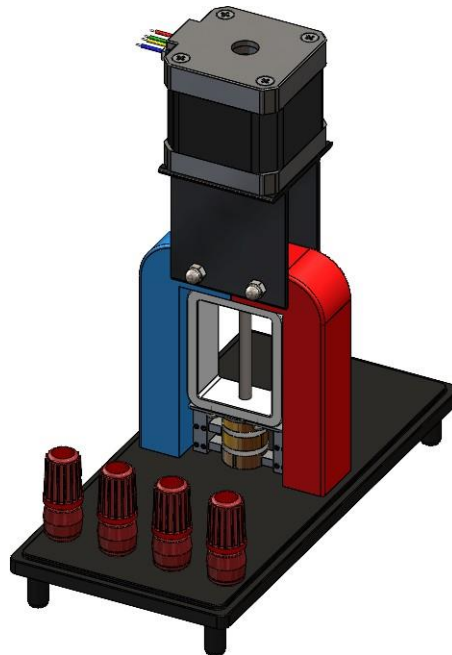
Στο εσωτερικό της δομής διακρίνεται ο άξονας, ο οποίος συνδέεται με τον ρότορα και επιτρέπει τη μετάδοση της κίνησης. Στο κάτω μέρος βρίσκεται το πηνίο, το οποίο αποτελεί βασικό στοιχείο για τη λειτουργία του συστήματος, ενώ γύρω από αυτό διαμορφώνεται το προστατευτικό περίβλημα.

Στο άνω μέρος της κατασκευής είναι τοποθετημένος ο ηλεκτρικός κινητήρας, ο οποίος αποτελεί την πηγή της κίνησης. Ο κινητήρας είναι στερεωμένος σε κατάλληλη βάση και συνδέεται με τον άξονα της διάταξης, επιτρέποντας τη μεταφορά της περιστροφικής κίνησης προς τα κάτω. Οι ηλεκτρικοί αγωγοί που είναι συνδεδεμένοι στο άνω μέρος του κινητήρα επιτρέπουν την τροφοδοσία του συστήματος.

Επιπλέον, στο εμπρόσθιο τμήμα της βάσης διακρίνονται ακροδέκτες σύνδεσης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την ηλεκτρική τροφοδοσία και τον έλεγχο της διάταξης. Η διάταξη αυτή επιτρέπει την εύκολη πρόσβαση και τη λειτουργική διαχείριση του συστήματος.

Η συνολική κατασκευή παρουσιάζει μία ολοκληρωμένη και λειτουργική διάταξη, στην οποία όλα τα επιμέρους εξαρτήματα συνεργάζονται αρμονικά. Η σωστή τοποθέτηση και ευθυγράμμιση των στοιχείων

εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος, ενώ η σχεδίαση της διάταξης επιτρέπει την εύκολη συναρμολόγηση, συντήρηση και πιθανή τροποποίηση στο μέλλον.



**Σχήμα 7.24** Τρισδιάστατη απεικόνιση της συνολικής κατασκευής από εναλλακτική γωνία θέασης.

Η παρούσα εικόνα παρουσιάζει τη συνολική συναρμολογημένη κατασκευή από διαφορετική γωνία θέασης, επιτρέποντας την πληρέστερη κατανόηση της γεωμετρικής διάταξης και της χωρικής σχέσης μεταξύ των επιμέρους εξαρτημάτων. Η εναλλακτική αυτή απεικόνιση αναδεικνύει με μεγαλύτερη σαφήνεια τη διάταξη του εσωτερικού μηχανισμού και τη σύνδεση των δομικών στοιχείων.

Στο άνω μέρος της κατασκευής διακρίνεται ο ηλεκτρικός κινητήρας, ο οποίος αποτελεί την κύρια πηγή κίνησης του συστήματος. Η τοποθέτησή του στην κορυφή της διάταξης επιτρέπει την κατακόρυφη μετάδοση της κίνησης μέσω του άξονα προς τα κατώτερα τμήματα. Η σύνδεση του κινητήρα με τη δομή στήριξης πραγματοποιείται μέσω κατάλληλης βάσης και στοιχείων σύσφιξης, εξασφαλίζοντας σταθερότητα και σωστή ευθυγράμμιση.

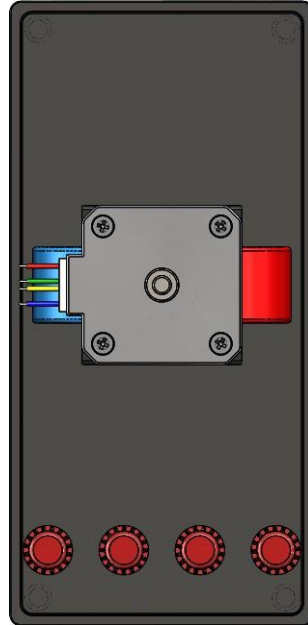
Στο κεντρικό τμήμα της κατασκευής παρατηρείται η διάταξη των δύο κατακόρυφων πλαστικών στοιχείων, τα οποία λειτουργούν ως πλευρικοί φορείς στήριξης. Μεταξύ αυτών διαμορφώνεται ο χώρος λειτουργίας του εσωτερικού μηχανισμού, όπου τοποθετείται ο άξονας και τα περιστρεφόμενα στοιχεία. Η ύπαρξη ανοίγματος στο εμπρόσθιο μέρος επιτρέπει την οπτική παρατήρηση του εσωτερικού, καθώς και την ευκολότερη πρόσβαση για συντήρηση.

Στο κάτω μέρος της διάταξης διακρίνεται το πηνίο, το οποίο αποτελεί βασικό λειτουργικό στοιχείο του συστήματος, ενώ η τοποθέτησή του έχει πραγματοποιηθεί με τρόπο που εξασφαλίζει τη σταθερότητα και την προστασία του. Η βάση της κατασκευής παραμένει το κύριο στοιχείο στήριξης, πάνω στο οποίο εδράζονται όλα τα εξαρτήματα.

Στην εμπρόσθια πλευρά της βάσης βρίσκονται οι ακροδέκτες σύνδεσης, οι οποίοι επιτρέπουν την ηλεκτρική τροφοδοσία και τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος. Η διάταξη αυτών των στοιχείων έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την εργονομία και την ευκολία πρόσβασης.

Η εναλλακτική αυτή απεικόνιση επιβεβαιώνει τη σωστή συναρμολόγηση της κατασκευής και ανα-

δεικνύει την ολοκληρωμένη λειτουργική της μορφή, όπου όλα τα επιμέρους εξαρτήματα συνεργάζονται με ακρίβεια και συνοχή για την επίτευξη της επιθυμητής λειτουργίας.



**Σχήμα 7.25** Άνω όψη της συνολικής κατασκευής.

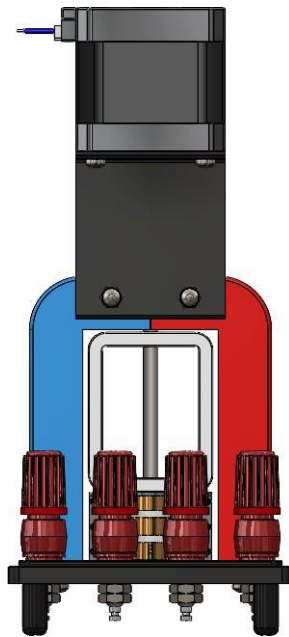
Η εικόνα παρουσιάζει την άνω όψη της συνολικής κατασκευής, προσφέροντας μία σαφή και ολοκληρωμένη απεικόνιση της χωρικής διάταξης των βασικών στοιχείων πάνω στη βάση στήριξης. Η συγκεκριμένη οπτική γωνία επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση της τοποθέτησης του ηλεκτρικού κινητήρα, των συνδέσεων και των σημείων ελέγχου της διάταξης.

Στο κεντρικό τμήμα της εικόνας διακρίνεται ο ηλεκτρικός κινητήρας, ο οποίος είναι στερεωμένος επάνω στη βάση μέσω τεσσάρων κοχλιών. Η συμμετρική τοποθέτησή του εξασφαλίζει τη σωστή κατανομή των φορτίων και τη βέλτιστη ευθυγράμμιση με τον άξονα του συστήματος. Από την αριστερή πλευρά του κινητήρα εξέρχονται οι αγωγοί τροφοδοσίας, οι οποίοι είναι οργανωμένοι με τρόπο που διευκολύνει τη σύνδεση και την αποφυγή εμπλοκών με άλλα εξαρτήματα.

Στην εμπρόσθια περιοχή της βάσης παρατηρείται η διάταξη των ακροδεκτών σύνδεσης, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε ευθύγραμμη διάταξη. Η θέση τους έχει επιλεγεί με γνώμονα την εργονομία, ώστε να επιτρέπεται η εύκολη πρόσβαση για τη σύνδεση και τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος.

Η βάση της κατασκευής εμφανίζεται ως επίπεδη επιφάνεια με στρογγυλεμένες γωνίες, προσφέροντας σταθερότητα και ασφάλεια κατά τη χρήση. Επιπλέον, στις γωνίες διακρίνονται σημεία στήριξης, τα οποία συμβάλλουν στην ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων και στη μείωση των κραδασμών.

Η άνω όψη της κατασκευής αναδεικνύει τον ορθολογικό σχεδιασμό της διάταξης, όπου όλα τα επιμέρους στοιχεία είναι τοποθετημένα με τρόπο που εξασφαλίζει τόσο τη λειτουργικότητα όσο και την ευκολία χρήσης. Η διάταξη αυτή επιβεβαιώνει τη σωστή σχεδιαστική προσέγγιση και την ολοκληρωμένη ενσωμάτωση των επιμέρους εξαρτημάτων.



**Σχήμα 7.26** Πρόσωση της συνολικής κατασκευής.

Η εικόνα παρουσιάζει την πρόωση της συνολικής κατασκευής, παρέχοντας μία άμεση και συμμετρική απεικόνιση της διάταξης των βασικών δομικών και λειτουργικών στοιχείων. Η συγκεκριμένη όψη είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αναδεικνύει την ευθυγράμμιση των επιμέρους εξαρτημάτων και τη γεωμετρική συνοχή της κατασκευής.

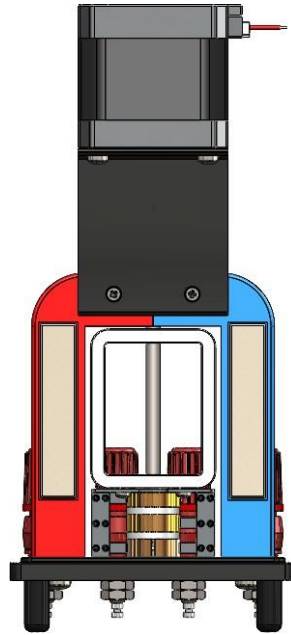
Στο άνω τμήμα της διάταξης διακρίνεται ο ηλεκτρικός κινητήρας, ο οποίος είναι τοποθετημένος κατακόρυφα και συνδεδεμένος με τη δομή στήριξης μέσω κοχλιών. Η θέση του κινητήρα εξασφαλίζει την άμεση μετάδοση της κίνησης προς τον κατακόρυφο άξονα, ο οποίος βρίσκεται στο κέντρο της κατασκευής.

Στο κεντρικό τμήμα εμφανίζεται ο χώρος λειτουργίας του μηχανισμού, όπου ο άξονας κινείται εντός του πλαισίου που σχηματίζουν τα πλευρικά στηρίγματα. Τα δύο κατακόρυφα στοιχεία, τα οποία απεικονίζονται με διαφορετικό χρώμα, λειτουργούν ως φορείς στήριξης και συμβάλλουν στη διατήρηση της ευθυγράμμισης του συστήματος.

Στο κάτω μέρος της διάταξης διακρίνεται το πηνίο, το οποίο αποτελεί βασικό λειτουργικό στοιχείο του συστήματος και είναι τοποθετημένο με τρόπο που εξασφαλίζει τη σταθερότητα και την προστασία του. Μπροστά από αυτό βρίσκονται οι ακροδέκτες σύνδεσης, οι οποίοι είναι διατεταγμένοι σε σειρά και επιτρέπουν την εύκολη ηλεκτρική σύνδεση και τον έλεγχο της λειτουργίας.

Η βάση της κατασκευής εμφανίζεται ως το κύριο στοιχείο στήριξης, πάνω στο οποίο εδράζονται όλα τα εξαρτήματα. Τα στηρίγματα στη βάση συμβάλλουν στη σταθερότητα και στη μείωση των κραδασμών κατά τη λειτουργία.

Η πρόωση της κατασκευής επιβεβαιώνει τη σωστή σχεδίαση και συναρμολόγηση της διάταξης, αναδεικνύοντας τη συμμετρία, τη λειτουργικότητα και τη συνοχή του συστήματος.



**Σχήμα 7.27** Πρόσωση της κατασκευής με εμφανή τα εσωτερικά στοιχεία.

Η εικόνα παρουσιάζει την πρόωση της κατασκευής με μεγαλύτερη έμφαση στα εσωτερικά στοιχεία του μηχανισμού, επιτρέποντας την αναλυτική κατανόηση της διάταξης και της συνεργασίας των επιμέρους εξαρτημάτων. Η συγκεκριμένη απεικόνιση καθιστά ορατά κρίσιμα λειτουργικά στοιχεία, τα οποία δεν είναι πλήρως εμφανή σε άλλες όψεις.

Στο άνω μέρος της κατασκευής διακρίνεται ο ηλεκτρικός κινητήρας, ο οποίος παραμένει το βασικό στοιχείο παραγωγής κίνησης. Η θέση του σε συνδυασμό με την κατακόρυφη διάταξη του άξονα εξασφαλίζει την άμεση και αποδοτική μεταφορά της κίνησης προς το εσωτερικό του συστήματος.

Στο κεντρικό τμήμα της κατασκευής αποκαλύπτεται ο εσωτερικός χώρος λειτουργίας, όπου είναι εμφανής ο κατακόρυφος άξονας καθώς και τα επιμέρους στοιχεία που τον περιβάλλουν. Η ύπαρξη ανοίγματος στο περίβλημα επιτρέπει την παρατήρηση της λειτουργίας του μηχανισμού, ενώ ταυτόχρονα διευκολύνει τη συντήρηση και την επιθεώρηση.

Στο κάτω μέρος της διάταξης διακρίνεται με μεγαλύτερη σαφήνεια το πηνίο και η διάταξη των σχετικών εξαρτημάτων, τα οποία αποτελούν βασικό λειτουργικό τμήμα της κατασκευής. Η τοποθέτησή τους έχει γίνει με τρόπο που εξασφαλίζει σταθερότητα και σωστή λειτουργία.

Τα πλευρικά στοιχεία της κατασκευής λειτουργούν ως προστατευτικό περίβλημα, ενώ παράλληλα συμβάλλουν στη μηχανική ακαμψία του συστήματος. Η διαφορετική χρωματική απεικόνιση βοηθά στην ευκολότερη διάκριση των επιμέρους εξαρτημάτων και στην κατανόηση της συναρμολόγησης.

Η συγκεκριμένη πρόωση επιβεβαιώνει τη σωστή τοποθέτηση και συνεργασία των στοιχείων, αναδεικνύοντας τη λειτουργική πληρότητα της κατασκευής και την επιτυχή ενσωμάτωση των μηχανικών και ηλεκτρικών μερών σε ένα ενιαίο σύστημα.

## 7.4 Περιγραφή λειτουργίας της κατασκευής

Η λειτουργία της κατασκευής βασίζεται στη θεμελιώδη αρχή της μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια, μέσω της αλληλεπίδρασης ηλεκτρικών ρευμάτων και μαγνητικών πεδίων, μια διαδικασία που περιγράφεται πλήρως από τους νόμους της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας και της κλασικής μηχανικής. Η διάταξη που έχει υλοποιηθεί μπορεί να θεωρηθεί ως ένα απλοποιημένο αλλά πλήρως λειτουργικό σύστημα ηλεκτρικού κινητήρα, στο οποίο η τροφοδοσία παρέχεται μέσω της μπόρνας, το ρεύμα μεταφέρεται μέσω αγωγίων στοιχείων όπως οι δακτύλιοι και οι ψήκτρες, ενώ η παρουσία μόνιμου μαγνήτη νεοδυμίου δημιουργεί το απαραίτητο μαγνητικό πεδίο για την ανάπτυξη ηλεκτρομαγνητικής δύναμης. Η συνολική λειτουργία της κατασκευής αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα σύζευξης ηλεκτρικών, μαγνητικών και μηχανικών φαινομένων, όπου η ενέργεια μετασχηματίζεται και μεταφέρεται διαδοχικά από το ηλεκτρικό στο μηχανικό επίπεδο, επιτρέποντας την παραγωγή περιστροφικής κίνησης με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά απόδοσης και σταθερότητας.

Η τροφοδοσία του συστήματος πραγματοποιείται μέσω της εφαρμογής ηλεκτρικής τάσης  $V$  στα άκρα της μπόρνας, η οποία λειτουργεί ως σημείο εισόδου της ηλεκτρικής ενέργειας στο κύκλωμα, και οδηγεί στη δημιουργία ρεύματος σύμφωνα με τον νόμο του Ohm, δηλαδή  $I = \frac{V}{R}$ , όπου  $R$  είναι η συνολική ηλεκτρική αντίσταση του κυκλώματος, η οποία εξαρτάται από τη γεωμετρία και τα υλικά των αγωγίων στοιχείων. Η αντίσταση αυτή μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω ως  $R = \rho \frac{L}{A}$ , όπου  $\rho$  είναι η ειδική αντίσταση του υλικού,  $L$  το μήκος του αγωγού και  $A$  η διατομή του, γεγονός που καταδεικνύει τη σημασία της επιλογής κατάλληλων υλικών, όπως ο χαλκός, για τη μείωση των απωλειών. Το ρεύμα που δημιουργείται μεταφέρεται μέσω των ψήκτρων στους δακτυλίους, δημιουργώντας μια δυναμική ηλεκτρική επαφή, η οποία επιτρέπει τη συνεχή ροή ηλεκτρικής ενέργειας ακόμη και κατά την περιστροφή του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα εισάγει απώλειες ισχύος λόγω αντίστασης επαφής, οι οποίες μπορούν να εκφραστούν ως  $P_{loss} = I^2 R_c$ , όπου  $R_c$  η αντίσταση επαφής.

Η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τους αγωγούς οδηγεί στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου, σύμφωνα με τον νόμο του Biot-Savart, ο οποίος δίνεται από τη σχέση  $d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{4\pi r^2}$ , ενώ σε απλούστερη μορφή για ευθύγραμμο αγωγό το πεδίο υπολογίζεται ως  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ . Το μαγνητικό αυτό πεδίο αλληλεπιδρά με το πεδίο που δημιουργείται από τον μόνιμο μαγνήτη νεοδυμίου, ο οποίος παρέχει ένα σταθερό και ισχυρό μαγνητικό πεδίο  $B_m$ , με αποτέλεσμα τη δημιουργία συνολικού πεδίου στο χώρο λειτουργίας του κινητήρα. Η αλληλεπίδραση αυτών των πεδίων αποτελεί το βασικό φυσικό μηχανισμό που οδηγεί στην ανάπτυξη δύναμης πάνω στους αγωγούς που διαρρέονται από ρεύμα.

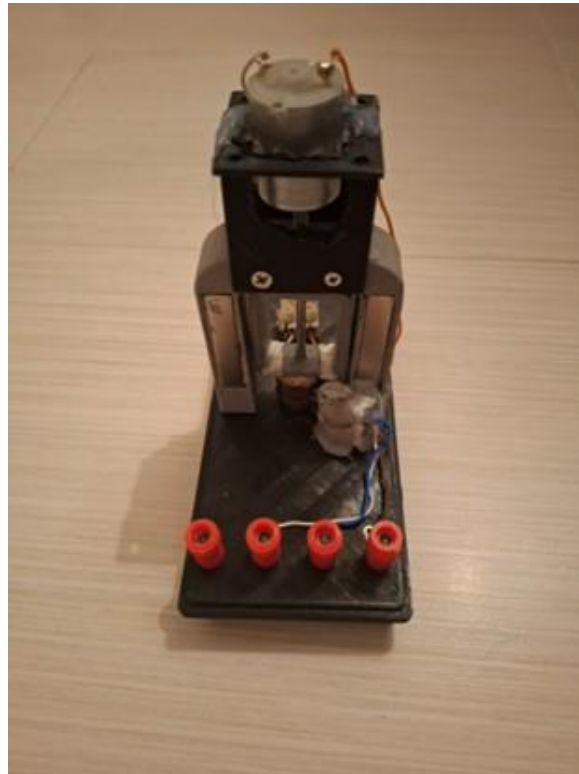
Η δύναμη που ασκείται στους αγωγούς περιγράφεται από τη δύναμη Lorentz, η οποία δίνεται από τη διανυσματική σχέση  $\mathbf{F} = I \mathbf{L} \times \mathbf{B}$ , όπου  $L$  είναι το διάνυσμα μήκους του αγωγού και  $B$  το μαγνητικό πεδίο. Το μέτρο της δύναμης είναι  $F = ILB \sin \theta$ , γεγονός που δείχνει ότι η δύναμη εξαρτάται από τη γωνία μεταξύ του αγωγού και του πεδίου. Η δύναμη αυτή, όταν εφαρμόζεται σε σημείο σε απόσταση  $r$  από τον άξονα περιστροφής, δημιουργεί ροπή  $\tau = rILB$ , η οποία αποτελεί την κύρια αιτία περιστροφής του συστήματος. Η παραγόμενη ροπή οδηγεί σε γωνιακή επιτάχυνση, σύμφωνα με τη σχέση  $\tau = J\alpha$ , όπου  $J$  η ροπή αδράνειας και  $\alpha$  η γωνιακή επιτάχυνση, ενώ η γωνιακή ταχύτητα περιγράφεται από τη σχέση  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ .

Καθώς το σύστημα τίθεται σε κίνηση, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική, με την ισχύ εισόδου να δίνεται από τη σχέση  $P_{in} = VI$  και την μηχανική ισχύ εξόδου από τη σχέση  $P_{out} = \tau\omega$ , ενώ η απόδοση του συστήματος ορίζεται ως  $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$ . Κατά τη λειτουργία του κινητήρα, εμφανίζεται επίσης το φαινόμενο της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (back EMF), η οποία δίνεται από τη σχέση  $E_b = k_e \omega$

και δρα αντίθετα προς την εφαρμοζόμενη τάση, μειώνοντας το καθαρό ρεύμα σύμφωνα με τη σχέση  $V = IR + E_b$ . Το φαινόμενο αυτό είναι κρίσιμο για τη σταθεροποίηση της λειτουργίας του κινητήρα και τον περιορισμό της υπερβολικής κατανάλωσης ρεύματος.

Παράλληλα με τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, αναπτύσσονται και θερμικά φαινόμενα λόγω των απωλειών ισχύος, με τη θερμότητα που παράγεται να δίνεται από τη σχέση  $Q = I^2 R t$ , ενώ η μεταφορά θερμότητας περιγράφεται από τον νόμο Fourier  $q = -k \nabla T$ . Η διαχείριση της θερμότητας είναι κρίσιμη για την αξιοπιστία του συστήματος, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να επηρεάσουν τόσο τα ηλεκτρικά όσο και τα μαγνητικά χαρακτηριστικά των υλικών, ιδιαίτερα στην περίπτωση των μαγνητών νεοδυμίου. Επιπλέον, η μαγνητική ροή στο σύστημα δίνεται από τη σχέση  $\psi = BA$ , ενώ η μεταβολή της οδηγεί στην εμφάνιση επαγόμενης τάσης σύμφωνα με τον νόμο του Faraday  $E = -\frac{d\Phi}{dt}$ , γεγονός που συνδέει άμεσα την ηλεκτρική και τη μαγνητική συμπεριφορά του συστήματος.

Σε κατάσταση μόνιμης λειτουργίας, το σύστημα φτάνει σε ισορροπία, όπου η ηλεκτρομαγνητική ροπή εξισορροπείται από τις ροπές φορτίου και απωλειών, δηλαδή  $\tau_{em} = \tau_{load} + \tau_{loss}$ , εξασφαλίζοντας σταθερή περιστροφική κίνηση. Συνολικά, η κατασκευή αποτελεί ένα ολοκληρωμένο παράδειγμα εφαρμογής των νόμων της φυσικής, όπου η θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού, η ανάλυση κυκλωμάτων και η μηχανική συνδυάζονται για τη δημιουργία ενός λειτουργικού συστήματος μετατροπής ενέργειας, αποδεικνύοντας στην πράξη τη στενή σχέση μεταξύ θεωρίας και μηχανικής εφαρμογής.



**Σχήμα 7.28** Φωτογραφία της κατασκευής.

## 7.5 Πειραματικά Δεδομένα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα

<b>Τάση Εισόδου (V)</b>	<b>Τάση Εξόδου (mV)</b>	<b>Ρεύμα (A)</b>
10	50	0.52
13	70	0.56
14	72	0.60

**Πίνακας 7.1** Πειραματικές μετρήσεις κινητήρα για διαφορετικές τάσεις εισόδου



## Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα και Βελτιώσεις

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη, σχεδίαση και υλοποίηση ηλεκτρικών κινητήρων για εκπαιδευτικούς σκοπούς, συνδυάζοντας θεωρητική ανάλυση, υπολογιστικά εργαλεία και πειραματική διερεύνηση. Μέσα από τη συστηματική προσέγγιση που ακολουθήθηκε, κατέστη δυνατή η εις βάθος κατανόηση της λειτουργίας των ηλεκτρικών κινητήρων, καθώς και η ανάδειξη των βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοσή τους.

Αρχικά, η ανάλυση της ιστορικής εξέλιξης των κινητήρων ανέδειξε τη μετάβαση από τις πρώιμες μηχανικές και θερμικές διατάξεις στους σύγχρονους ηλεκτρικούς κινητήρες υψηλής απόδοσης. Η κατανόηση των θεμελιωδών φυσικών αρχών, όπως η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και η αλληλεπίδραση ρευμάτων και μαγνητικών πεδίων, αποτέλεσε κρίσιμο στοιχείο για τη σωστή ερμηνεία της λειτουργίας των σύγχρονων συστημάτων κίνησης.

Στη συνέχεια, η μελέτη των σύγχρονων τύπων κινητήρων, όπως οι επαγωγικοί, οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη και οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες, κατέδειξε την τεχνολογική πρόοδο που έχει επιτευχθεί στον τομέα της ηλεκτροκίνησης. Οι κινητήρες αυτοί χαρακτηρίζονται από υψηλή ενεργειακή απόδοση, ακρίβεια ελέγχου και μειωμένες ανάγκες συντήρησης, καθιστώντας τους κατάλληλους για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από τη βιομηχανία έως τα ηλεκτρικά οχήματα.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην πρακτική υλοποίηση και στην κατασκευή ενός λειτουργικού συστήματος κινητήρα. Η χρήση λογισμικού σχεδίασης επέτρεψε την ακριβή μοντελοποίηση των επιμέρους εξαρτημάτων και την οπτικοποίηση της συνολικής κατασκευής. Η διαδικασία αυτή συνέβαλε στην κατανόηση της γεωμετρίας, των μηχανικών ανοχών και των απαιτήσεων συναρμολόγησης, οι οποίες αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την ορθή λειτουργία του συστήματος.

Η πειραματική διερεύνηση αποτέλεσε ένα από τα σημαντικότερα στάδια της εργασίας, καθώς παρείχε τη δυνατότητα επαλήθευσης των θεωρητικών υποθέσεων μέσω πραγματικών δεδομένων. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν σαφή συσχέτιση μεταξύ της τάσης εισόδου, του απορροφούμενου ρεύματος και της παραγόμενης εξόδου. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της τάσης οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης ρεύματος και της ενεργειακής απόδοσης του κινητήρα, γεγονός που επιβεβαιώνει τη θεωρητική σχέση μεταξύ ηλεκτρικής ισχύος και λειτουργίας του συστήματος.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι ο κινητήρας παρουσιάζει σταθερή και προβλέψιμη συμπεριφορά εντός του εύρους λειτουργίας που εξετάστηκε. Η γραμμική περίπου αύξηση των μεγεθών υποδηλώνει ότι το σύστημα λειτουργεί σε κανονικές συνθήκες, χωρίς έντονα μη γραμμικά φαινόμενα ή απώλειες λόγω κορεσμού. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι η ενεργειακή κατανάλωση αυξάνεται με ταχύτερο ρυθμό σε σχέση με την έξοδο, γεγονός που αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό των πραγματικών ηλεκτρομηχανικών συστημάτων.

Ένα σημαντικό συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι η απόδοση ενός κινητήρα δεν εξαρτάται μόνο από τα ηλεκτρικά μεγέθη, αλλά και από παράγοντες όπως οι μηχανικές απώλειες, οι θερμικές επιδράσεις

και η ποιότητα κατασκευής. Η τριβή, οι απώλειες στο μαγνητικό κύκλωμα και η θερμική αύξηση της αντίστασης των αγωγών αποτελούν κρίσιμους παράγοντες που περιορίζουν την πραγματική απόδοση σε σχέση με τη θεωρητική.

Επιπλέον, η ενσωμάτωση των κινητήρων σε σύγχρονα συστήματα ελέγχου και αυτοματισμού αναδεικνύει τη σημασία της διασύνδεσης μεταξύ ηλεκτρομηχανικών και ψηφιακών τεχνολογιών. Οι κινητήρες δεν αποτελούν πλέον απλά στοιχεία παραγωγής κίνησης, αλλά εντάσσονται σε ευφυή συστήματα που επιτρέπουν την παρακολούθηση, τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους σε πραγματικό χρόνο.

Η παρούσα εργασία ανέδειξε επίσης τη σημασία της εκπαίδευσης μέσω πρακτικών εφαρμογών. Η κατασκευή και η δοκιμή ενός πραγματικού συστήματος κινητήρα συμβάλλει ουσιαστικά στην κατανόηση εννοιών που δύσκολα γίνονται αντιληπτές μόνο μέσω θεωρητικής μελέτης. Η σύνδεση θεωρίας και πράξης αποτελεί βασικό στοιχείο της μηχανολογικής και ηλεκτρολογικής εκπαίδευσης.

## 8.1 Προτεινόμενες Βελτιώσεις

Παρά τα θετικά αποτελέσματα που προέκυψαν, υπάρχουν σημαντικά περιθώρια βελτίωσης τόσο στη σχεδίαση όσο και στη λειτουργία του κινητήρα.

Μία από τις βασικές προτάσεις αφορά τη βελτιστοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού σχεδιασμού. Η χρήση καλύτερων μαγνητικών υλικών και η βελτίωση της γεωμετρίας του στάτη και του δρομέα μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση της απόδοσης και μείωση των απωλειών. Παράλληλα, η μείωση των διαρροών μαγνητικού πεδίου μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της ενεργειακής εκμετάλλευσης.

Επιπλέον, η θερμική διαχείριση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη μακροχρόνια λειτουργία του κινητήρα. Η ενσωμάτωση συστημάτων ψύξης ή η χρήση υλικών με υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα μπορεί να περιορίσει την αύξηση της θερμοκρασίας και να βελτιώσει τη σταθερότητα της λειτουργίας.

Σημαντική βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί και μέσω της χρήσης προηγμένων συστημάτων ελέγχου. Η εφαρμογή τεχνικών ελέγχου μεταβλητής συχνότητας ή αλγορίθμων βασισμένων σε μικροελεγκτές επιτρέπει την ακριβή ρύθμιση της ταχύτητας και της ροπής, βελτιώνοντας την απόδοση και μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας.

Ακόμη, η ενσωμάτωση αισθητήρων για τη μέτρηση παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα και το ρεύμα μπορεί να επιτρέψει την ανάπτυξη συστημάτων προγνωστικής συντήρησης. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων και η αποφυγή βλαβών.

Στον τομέα της κατασκευής, η χρήση πιο προηγμένων τεχνικών, όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση υψηλής ακρίβειας, μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη ποιότητα εξαρτημάτων και μεγαλύτερη ακρίβεια συναρμολόγησης. Επιπλέον, η επιλογή υλικών με βελτιωμένες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες μπορεί να ενισχύσει τη συνολική απόδοση του συστήματος.

Τέλος, ιδιαίτερη σημασία έχει η περαιτέρω πειραματική διερεύνηση. Η πραγματοποίηση περισσότερων μετρήσεων σε διαφορετικά φορτία και συνθήκες λειτουργίας θα επιτρέψει την εξαγωγή πιο αξιόπιστων συμπερασμάτων και την ανάπτυξη πιο ολοκληρωμένων μοντέλων λειτουργίας.

## 8.2 Μελλοντικές Προοπτικές

Η εξέλιξη των ηλεκτρικών κινητήρων αναμένεται να συνεχιστεί με ταχύ ρυθμό, επηρεαζόμενη από τις ανάγκες της ενεργειακής μετάβασης και της βιώσιμης ανάπτυξης. Οι νέες τεχνολογίες, όπως οι κινητήρες

υψηλής απόδοσης χωρίς σπάνιες γαίες και οι υπεραγώγιμοι κινητήρες, αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο μέλλον.

Παράλληλα, η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης και των ψηφιακών τεχνολογιών θα επιτρέψει την ανάπτυξη ακόμη πιο ευφών συστημάτων, ικανών να προσαρμόζονται δυναμικά στις απαιτήσεις της λειτουργίας.

Συνολικά, η εργασία αυτή ανέδειξε τη σημασία των ηλεκτρικών κινητήρων ως βασικών στοιχείων της σύγχρονης τεχνολογίας και επιβεβαίωσε ότι η συνεχής βελτίωση και καινοτομία στον τομέα αυτό αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη βιώσιμων και αποδοτικών ενεργειακών συστημάτων.

# Βιβλιογραφία

## Βιβλία

1. A. Yildiz, B. Kaya, and A. Ates, “Electric motor technologies and sustainability,” *Journal of Clean Technologies*, vol. 35, no. 2, pp. 112–128, 2022.
2. A. Mollella, *Engines and Industrial Development*, London: TechPress, 2018.
3. D. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, 5th ed., Cambridge: Cambridge University Press, 2024.
4. Y. Tsytkin, *Electric Drives and Control*, Berlin: Springer, 2011.
5. K. Rajashekara, “History of electric vehicles and prospects,” *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 30, no. 2, pp. 15–25, 1994.
6. D. Kapur, *Automation and Robotics: Fundamentals and Applications*, New York: McGraw-Hill, 2005.
7. Moog Inc., *Servo Systems Catalog*, New York, 2020.
8. I. M. Gottlieb, *Electric Motors and Control Techniques*, New York: McGraw-Hill, 1997.
9. H. Herman, *Modern Power Electronics and Drives*, Hoboken, NJ: Wiley, 2010.
10. L. Tong, “Electromagnetic conversion principles in modern machines,” *International Journal of Electrical Engineering Education*, vol. 58, no. 3, pp. 233–247, 2020.
11. T. K. Garrett, *Motor Vehicle Technology for Mechanics*, 5th ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
12. J. He, *Advanced Electric Motor Systems*, Beijing: Beijing University Press, 2009.
13. D. Cox, *Sensors and Control in Mechatronics*, Amsterdam: Elsevier, 1993.
14. I. Boldea, *The Electric Generators Handbook*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2017.
15. P. Leeson, “Polyphase AC motors and drives,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 17, no. 1, pp. 36–42, 2001.
16. P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics*, 3rd ed., Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
17. A. Bhatt and M. Wiley, *SolidWorks 2022 Step-By-Step Guide (Colored Edition): Part Modeling, Assembly, Drawings, Sheet Metal, Surfacing*, Independently published, 2022.

## Εικόνες και Σχήματα

- Σχήμα 3.1 Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων. Πηγή: <https://englishan.com/types-of-motors/> .....11
- Σχήμα 7.1 Η φυσική του ηλεκτρικού κινητήρα. Πηγή: <https://physics.stackexchange.com/questions/366255/is-torque-in-an-electric-motor-generated-from-repelling-magnetic-dipoles-and-the>  
22

Σχήμα 9.1 Σχεδιασμός ηλεκτρικού κινητήρα με SolidWorks. Πηγή: Bhatt, A., & Wiley, M. (2022). *SolidWorks 2022 Step-By-Step Guide (Colored Edition): Part Modeling, Assembly, Drawings, Sheet Metal, Surfacing*. Independently published. .... 36