



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**Υλοποίηση Αυτόνομου Οχήματος Αποφυγής Εμποδίων**

Όνομα: Ευστάθιος Κατσίρης

A.M.: 06825

Επιβλέπων Καθηγητής

Παπαγέωργας Παναγιώτης

Καθηγητής

**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ**

29/7/2021



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

**Diploma Thesis**

**Implementation of an Autonomous Obstacle Avoidance Vehicle**

Student: Epstathios Katsiris

R.N.: 06825

Supervisor Professor

Papageorgas Panagiots

Professor

ATHENS-AIGALEO

29/7/2021

Η διπλωματική εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή

Παπαγέωργας Παναγιώτης Καθηγητής	Βόκας Γεώργιος Καθηγητής	Πυρομάλης Δημήτριος Επίκουρος Καθηγητής
Υπογραφή	Υπογραφή	Υπογραφή

Copyright@ Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ , Ευστάθιος Κατσίρης , 29/7/2021

Απαγορεύεται η αντιγραφή , αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας , εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής , για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση , αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό , εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης , υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος , της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του τμήματος ή του ιδρύματος.

## **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ευστάθιος Κατσίρης του Ιωάννη , με αριθμό μητρώου 06825 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης , οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων , ιδεών ή λέξεων , είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες , αναφέρονται στο σύνολό τους , με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς , τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό , συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης , βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου , όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 31-12-2022 και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών  
Ευστάθιος Κατσίρης

Υπογραφή φοιτητή



## **Περίληψη**

Η τεχνητή νοημοσύνη αναφέρεται στην ικανότητα μιας μηχανής να μιμείται στοιχεία της ανθρώπινης συμπεριφοράς τα οποία υπονοούν έστω και μια στοιχειώδη ευφυΐα. Έτσι η τεχνητή νοημοσύνη πρόκειται για έναν σύγχρονο και παράλληλα ενδιαφέρον κλάδο αφού δεν αφορά μόνο τον κλάδο της πληροφορικής αλλά συνδυάζει γνώσεις από πολλούς επιστημονικούς κλάδους. Για αυτούς τους λόγους συντάχτηκε και η παρούσα διπλωματική εργασία αντικείμενο της οποίας είναι η κατασκευή ενός αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ το οποίο χρησιμοποιεί ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο προκειμένου το ρομπότ αυτό να ακολουθεί κάθε φορά μια πορεία που θα του επιτρέπει να αποφεύγει τα εμπόδια που βρίσκονται μπροστά του. Παρόλο που η λειτουργία αυτή θα μπορούσε να επιτευχθεί και με ένα πιο απλό τρόπο επιλέχτηκε να υλοποιηθεί κατασκευάζοντας ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, σκοπός του οποίου είναι ο υπολογισμός της σωστής πορείας που πρέπει να ακολουθήσει το ρομπότ, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω αλλά και για να διερευνηθούν οι δυσκολίες και γενικότερα να μελετηθούν οι απαιτήσεις ενός τέτοιου εγχειρήματος.

## **Λέξεις-Κλειδιά**

ρομπότ , ρομποτικό χειριστές σταθερής βάσης , κινούμενα ρομπότ , στιβαρότητα , ενδοτικότητα , ακρίβεια θέσης , επαναληψιμότητα , ωφέλιμο φορτίο , βαθμοί ελευθερίας , σύνδεσμοι , τελικό στοιχείο δράσης , επενεργητές , μηχανισμοί μετάδοσης κίνησης , αρθρώσεις , αισθητήρες , μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακού σήματος , μικροεπεξεργαστές , μικροελεγκτές , μετατροπείς ψηφιακού σε αναλογικού σήματος , νευρωνικά δίκτυα , βιολογικά νευρωνικά δίκτυα , τεχνητά νευρωνικά δίκτυα , τεχνητά νευρωνικά δίκτυα perceptron , τεχνητά νευρωνικά δίκτυα πολλών στρωμάτων-επιπέδων , μάθηση με επίβλεψη , μάθηση χωρίς επίβλεψη , μάθηση με ενίσχυση , αλγόριθμος εκπαίδευσης σταθερής αύξησης , αλγόριθμος εκπαίδευσης οπισθοδιάδοσης σφάλματος , μονάδα επεξεργασίας γραφικών , διαμόρφωση εύρους παλμού

## **Abstract**

Artificial intelligence refers to a machine's ability to imitate elements of human behavior that imply even a rudimentary intelligence. Thus , artificial intelligence is a modern and at the same time interesting field since it does not only concern the IT industry but combines knowledge from many scientific disciplines. For these reasons , this diploma thesis has been drafted , the object of which is the construction of an autonomous wheeled robot that uses an artificial neural network in order to follow a course that will allow it each time to avoid the obstacles that are in front of it. Although this function could be achieved with a simpler way it was chosen to be implemented by constructing an artificial neural network , the purpose of which is to calculate the correct course that the robot should follow , for the reasons mentioned above but also to investigate the difficulties and generally to study the requirements of such an undertaking.

## **Keywords**

robots , fixed base robot manipulators , mobile robots , robustness , compliance , accuracy , repeatability , payload , degrees of freedom , links , end effector , actuators , motion transmission mechanisms , joints , sensors , A/D converters , microprocessors , microcontrollers , D/A converters , neural networks , biological neural networks , artificial neural networks , perceptron artificial neural networks , multilayer artificial neural networks , supervised learning , unsupervised learning , reinforcement learning , fixed increment learning algorithm , back-propagation learning algorithm , central processing unit , pulse width modulation

## **Περιεχόμενα**

### **1. Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> : Ο κλάδος της ρομποτικής**

1.1	Τι είναι τα ρομπότ .....	1
1.2	Ιστορική αναδρομή των ρομπότ.....	1
1.3	Κατηγορίες των ρομπότ .....	8
1.3.1	Ρομποτικοί χειριστές.....	8
1.3.2	Κινούμενα ρομπότ.....	14
1.4	Χαρακτηριστικά των ρομπότ .....	21
1.5	Υποσυστήματα των ρομπότ .....	21
1.5.1	Υποσύστημα κίνησης.....	22
1.5.2	Υποσύστημα αίσθησης .....	44
1.5.3	Υποσύστημα ελέγχου.....	48

### **2. Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> : Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα**

2.1	Βιολογικός νευρώνας .....	51
2.2	Τεχνητός νευρώνας .....	54
2.3	Κατηγορίες τεχνητών νευρωνικών δικτύων.....	57
2.4	Είδη μάθησης τεχνητών νευρωνικών δικτύων.....	59
2.5	Αλγόριθμοι εκπαίδευσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων .....	60

### **3. Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> : Πλατφόρμες υλικού**

3.1	Το αναπτυξιακό περιβάλλον Jetson Nano 2GB Developer Kit .....	65
3.2	Προγραμματισμός του Jetson Nano 2GB Developer Kit .....	68

### **4. Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> : Υλοποίηση αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ**

4.1	Επιλογή εξαρτημάτων .....	70
4.1.1	Επιλογή δομικών εξαρτημάτων .....	70
4.1.2	Επιλογή υπόλοιπων εξαρτημάτων .....	76

4.2	Συνδεσμολογία εξαρτημάτων .....	84
4.2.1	Συνδεσμολογία του κυκλώματος κίνησης .....	84
4.2.2	Συνδεσμολογία του κυκλώματος αίσθησης .....	88
4.2.3	Συνδεσμολογία ολόκληρου του κυκλώματος .....	91
4.3	Τοποθέτηση εξαρτημάτων .....	92
4.4	Προγραμματισμός του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ .....	93
4.4.1	Λογισμικό προγραμματισμού της πλακέτας teensy 3.2.....	93
4.4.2	Κώδικας του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ .....	94
	<b>Συμπεράσματα .....</b>	129
	<b>Αναφορές .....</b>	129
	<b>Κατάλογος εικόνων .....</b>	135
	<b>Κατάλογος σχημάτων.....</b>	137
	<b>Κατάλογος πινάκων.....</b>	140
	<b>Datasheets.....</b>	141

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## 1.1 Τι είναι τα ρομπότ

Ήδη από την αρχαιότητα ο άνθρωπος προσπαθούσε να κατασκευάσει μηχανές που θα τον βοηθούσαν στις χειρωνακτικές του εργασίες και θα τον διευκόλυναν στην καθημερινότητα και στον τρόπο ζωής του. Οι κατασκευές αυτές ευρήματα των οποίων ανακαλύπτονται ακόμα και σήμερα έθεσαν την βάση για εφευρέσεις και ιδέες που γεννήθηκαν τα χρόνια που ακολούθησαν συμβάλλοντας έτσι στην ανάπτυξη του ανθρώπινου είδους. Η ανάπτυξη αυτή αντικατοπτρίζεται μεταξύ άλλων και από τις μηχανές που κατασκευάζει ο άνθρωπος στην σημερινή εποχή μια κατηγορία εκ των οποίων είναι και τα ρομπότ (robots). Εξαιτίας της ανάπτυξης διάφορων κλάδων της επιστήμης τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκε και ο κλάδος της ρομποτικής (robotics). Η ρομποτική είναι ο κλάδος της επιστήμης που ασχολείται με τη σχεδίαση και την κατασκευή μηχανών που προσπαθούν να αντικαταστήσουν τον άνθρωπο στην εκτέλεση μιας φυσικής δραστηριότητας αλλά και στην λήψη αποφάσεων. Παρόλο που οι μηχανές αυτές ονομάζονται ρομπότ η σημασία του όρου αυτού δεν είναι ξεκάθαρη αφού δεν υπάρχει κάποιος αποδεκτός από όλους ορισμός με αποτέλεσμα κάποιες χώρες να προσδίδουν τον όρο αυτόν σε μηχανές που άλλες χώρες δεν θεωρούν ότι τις αντιπροσωπεύει. Παρόλο αυτά ένας ορισμός του όρου ρομπότ μπορεί να θεωρηθεί αυτός του Ινστιτούτου Ρομποτικής των ΗΠΑ σύμφωνα με τον οποίο ρομπότ θεωρείται ένας επαναπρογραμματιζόμενος χειριστής γενικής χρήσεως με εξωτερικούς αισθητήρες που μπορεί να εκπληρώσει πλήθος εργασιών [1],[2].

## 1.2 Ιστορική αναδρομή των ρομπότ

Ο όρος ρομπότ χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1921 στο θεατρικό έργο του Τσέχου συγγραφέα Κάρελ Τσάπεκ με τίτλο R.u.r. (Rossum's universal robots). Ο όρος αυτός προέρχεται από την τσέχικη λέξη «ρομπότα» που σημαίνει αγγαρεία ή καταναγκαστική εργασία. Μια από τις πρώτες κατασκευές που συνδέθηκε με τον όρο ρομπότ είναι και αυτή που βρέθηκε στον τάφο του Αμενχοτεπ στην Αίγυπτο η οποία και ονομάστηκε η κλεψύδρα του Karnak. Η εφεύρεση αυτή ήταν ένα αρχέγονο ρολόι το οποίο χρησιμοποιούσε την ροή νερού για τη μέτρηση του χρόνου. Συγκεκριμένα η εφεύρεση αυτή ήταν ένα πέτρινο αγγείο με κεκλιμένες πλευρές που επέτρεπε στο νερό να στάζει με σχεδόν σταθερό ρυθμό από μια μικρή τρύπα κοντά στην βάση του. Στο εσωτερικό του αγγείου υπήρχαν δώδεκα ξεχωριστές στήλες που αντιστοιχούσαν στους δώδεκα μήνες του έτους και σε κάθε στήλη υπήρχαν έντεκα σημάδια σε σχήμα κύκλου σχηματίζοντας έτσι μια διακεκομένη ευθεία η οποία ξεκίναγε από το χείλος του αγγείου και κατέληγε κοντά στον πυθμένα του. Καθώς η στάθμη του νερού έφτανε σε κάθε ένα σημάδι ο κάτοχος του αγγείου μετρούσε το πέρασμα των ωρών. Ο χρόνος που χρειαζόταν το νερό για να μεταβεί από ένα υψηλότερο σε ένα χαμηλότερο σημάδι ήταν περίπου μια ώρα [3].



**Εικόνα 1:** Η κλεψύδρα του Karnak [4]

Στην Ελλάδα τα πρώτα ρολόγια νερού χρησιμοποιήθηκαν το 325 π.χ.. Περίπου 25 χρόνια αργότερα ο Έλληνας μαθηματικός Αρχύτας ο Ταραντίνος κατασκεύασε την πρώτη αυτόνομη πτητική μηχανή. Η ιπτάμενη περιστερά όπως ονομάστηκε ήταν μια μικρή συσκευή σε σχήμα αεροπλάνου που λειτουργούσε με σύστημα αεροπροώθησης. Φτιαγμένη σε μορφή κέλυφος είχε στο εσωτερικό της μια κύστη ζώου σαν μπαλόνι στο άκρο της οποίας συνδεόταν μια αεραντλία ή ένας λέβητας μέσω ενός ανοίγματος. Κάθε φορά που η πίεση του αέρα περνούσε από αυτό το άνοιγμα, η περιστερά εκτοξευόταν λόγω του πεπιεσμένου αέρα που έβγαινε από πίσω της με ορμή [5].



**Εικόνα 2:** Η ιπτάμενη περιστερά του Αρχύτα [6]

Αρκετά χρόνια αργότερα ο Leonardo Da Vinci εκτός των άλλων σχεδίασε και ένα ανθρωπόμορφο ρομπότ το οποίο ονομάστηκε το ρομπότ ιππότης του Leonardo Da Vinci. Το ρομπότ αυτό μπορούσε να κάτσει, να σταθεί όρθιο και να κουνήσει τα χέρια του χρησιμοποιώντας τροχαλίες και καλώδια.



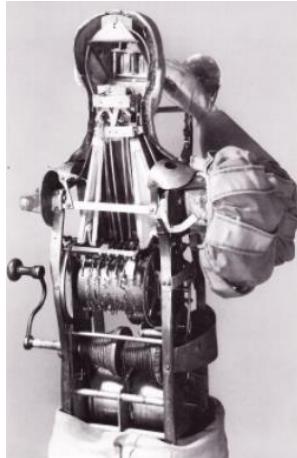
**Εικόνα 3:** Το μοντέλο του ρομπότ ιππότης του Leonardo Da Vinci [7]

Τον 17<sup>ο</sup> αιώνα ο Γάλλος εφευρέτης Jacques de Vaucanson ανέπτυξε δύο ανθρωπόμορφα ρομπότ και ένα ρομπότ το οποίο είχε τη μορφή πάπιας. Το πρώτο από τα δύο ανθρωπόμορφα ρομπότ μπορούσε να παίξει από μόνο του 12 τραγούδια στο φλάουτο ενώ το δεύτερο μπορούσε να παίξει από μόνο του ντέφι, τύμπανο και φλάουτο. Το τρίτο ρομπότ δηλαδή το ρομπότ πάπια που ήταν και το πιο περίφημο από τα τρία μπορούσε από μόνο του να κουνήσει τα φτερά του, να βγάλει θορύβους από το στόμα του, να κουνήσει το κεφάλι του ακόμα και να «φάει».



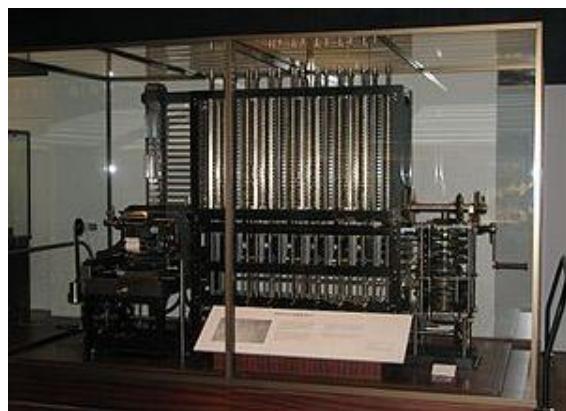
**Εικόνα 4:** Τα δύο ανθρωπόμορφα ρομπότ και το ρομπότ πάπια του Jacques de Vaucanson [8]

Το 1810 ο Γερμανός κατασκευαστής μουσικών οργάνων Friedrich Kaufmann κατασκεύασε και αυτός ένα ανθρωπόμορφο ρομπότ το οποίο έμοιαζε με στρατιώτη. Το ρομπότ αυτό φυσούσε μια τρομπέτα χρησιμοποιώντας μια αυτόματη φυσούνα.



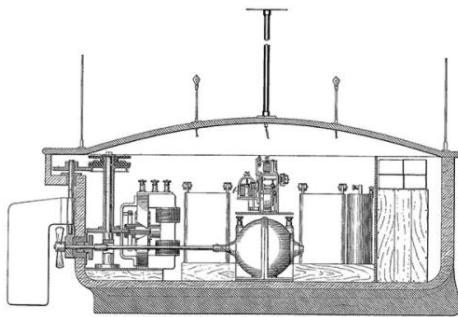
**Εικόνα 5:** Το ανθρωπόμορφο ρομπότ του Friedrich Kaufmann [9]

Μια άλλη εφεύρεση η οποία θεωρείται προάγγελος των σημερινών ψηφιακών υπολογιστών είναι η αναλυτική μηχανή η οποία σχεδιάστηκε από τον Βρετανό μαθηματικό Charles Babbage. Παρόλο που η εφεύρεση αυτή δεν ολοκληρώθηκε ποτέ κυρίως λόγω έλλειψης χρηματοδότησης και προσωπικών προβλημάτων του Charles Babbage, το 1991 κατασκευάστηκε μια πλήρης λειτουργική διαφορική μηχανή από τα αρχικά σχέδια του Charles Babbage με μεθόδους κατασκευής που αντιστοιχούσαν στον 19<sup>ο</sup> αιώνα δείχνοντας έτσι ότι αν το έργο του Charles Babbage συνεχιζόταν η μηχανή θα μπορούσε να λειτουργήσει [10].



**Εικόνα 6:** Η διαφορική μηχανή από τα σχέδια του Charles Babbage [11]

To 1898 o Nikola Tesla σχεδίασε ένα μη επανδρωμένο αντιτορπιλικό πλοίο το οποίο μπορούσε να ελεγχθεί από ένα τηλεχειριστήριο.



**Εικόνα 7:** Η διαγραμματική αναπαράσταση του εσωτερικού του μη επανδρωμένου αντιτορπιλικού πλοίου του Nikola Tesla [12]

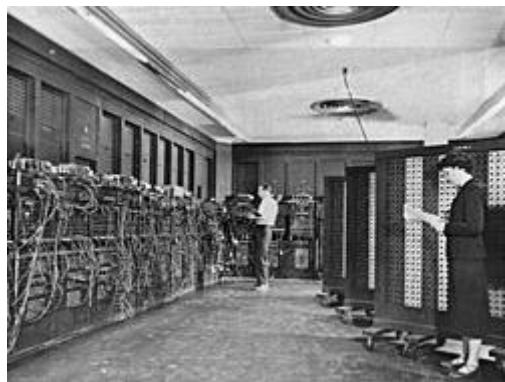


**Εικόνα 8:** Η διαγραμματική αναπαράσταση του μη επανδρωμένου αντιτορπιλικού πλοίου και του πομπού του Nikola Tesla [12]

Το 1942 ο Ρώσσος επιστήμονας Isaac Asimov δημιούργησε τον όρο ρομποτική και μαζί με τον όρο αυτόν δημιούργησε και τους τρεις νόμους της ρομποτικής. Οι τρεις αυτοί νόμοι είναι οι εξής [13]:

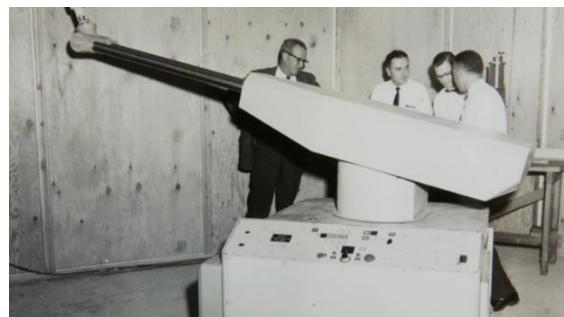
- 1) .Ένα ρομπότ δεν μπορεί να τραυματίσει έναν άνθρωπο ούτε με την αδράνεια του να βλάψει ένα ανθρώπινο ον.
- 2) .Το ρομπότ πρέπει να υπακούσει ένα ανθρώπινο ον , εκτός και αν οι διαταγές του έρχονται σε αντίθεση με τον πρώτο νόμο.
- 3) .Το ρομπότ οφείλει να προστατεύσει την ύπαρξή του εφόσον αυτό δεν συγκρούεται με τον πρώτο και δεύτερο νόμο.

Το 1946 κατασκευάστηκε ο ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) ο οποίος ήταν ο πρώτος μεγάλης κλίμακας επαναπρογραμματιζόμενος ηλεκτρονικός ψηφιακός υπολογιστής. Παρόλο που υπήρχαν και άλλοι υπολογιστές που διέθεταν παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά του ENIAC κανένας δεν μπορούσε να προσομοιώσει μια καθολική μηχανή Turing δηλαδή μια υποθετική υπολογιστική μηχανή όπως συνέβαινε στην περίπτωση του ENIAC [14].



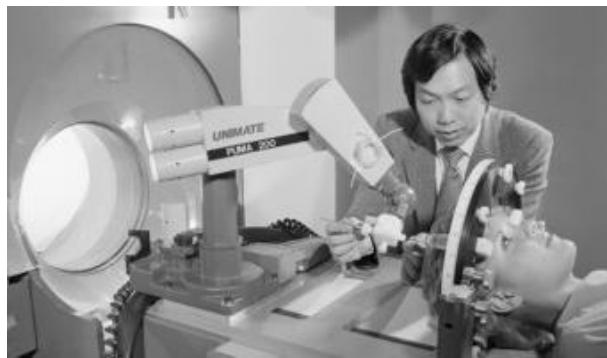
**Εικόνα 9:** Ο επαναπρογραμματιζόμενος ηλεκτρονικός ψηφιακός υπολογιστής ENIAC [14]

Το 1950 ο Αμερικάνος εφευρέτης George Devol κατασκεύασε το πρώτο βιομηχανικό ρομπότ το οποίο και ονόμασε UNIMATE. Το UNIMATE ήταν ένας ρομποτικός βραχίονας που χρησιμοποιούνταν από την εταιρία General Motors για την μετακίνηση καλουπιών χύτευσης από μια γραμμή παραγωγής σε μια άλλη και την συγκόλληση αυτών στο σώμα των αυτοκινήτων [15].



**Εικόνα 10:** Ο ρομποτικός βραχίονας UNIMATE [16]

Στο διάστημα από το 1960 μέχρι και το 1970 κατασκευάστηκαν και άλλοι ρομποτικοί βραχίονες όπως οι δύο βραχίονες που κατασκευάστηκαν στο πανεπιστήμιο του Stanford από τον Αμερικάνο καθηγητή Victor Scheinman. Οι δύο αυτοί βραχίονες ήταν ο βραχίονας με ονομασία Stanford Arm και ο βραχίονας με ονομασία Silver Arm. Στους δύο αυτούς βραχίονες στηρίχτηκε και η κατασκευή του βραχίονα UNIMATE PUMA 200 το οποίο ήταν το πρώτο ρομπότ που χρησιμοποιήθηκε σε χειρουργικές επεμβάσεις. Η βασική λειτουργία του UNIMATE PUMA 200 ήταν να καθοδηγεί μια βελόνα κατά την διάρκεια βιοψίας εγκεφάλου, αλλά για λόγους ασφάλειας έπαψε να χρησιμοποιείται [17].



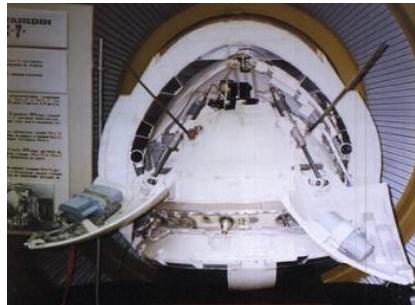
**Εικόνα 11:** Ο ρομποτικός βραχίονας UNIMATE PUMA 200 [18]

Έκτος όμως από την ανάπτυξη αυτών των ρομπότ αναπτύχθηκαν και τα ανθρωπόμορφα ρομπότ και μια τρανταχτή ένδειξη αυτού είναι το ρομπότ WABOT-1 η υλοποίηση του οποίου ξεκίνησε το 1967 στο πανεπιστήμιο της Waseda στην Ιαπωνία και ολοκληρώθηκε το 1972. Το WABOT-1 αποτελούνταν από ένα σύστημα ελέγχου άκρων, από ένα σύστημα όρασης και ακοής και από ένα σύστημα ομιλίας. Αυτό το ανθρωπόμορφο ρομπότ περπατούσε με τα κάτω άκρα και ήταν ικανό να πιάσει και να μεταφέρει αντικείμενα με τα χέρια του αλλά και να επικοινωνήσει με ανθρώπους στα Ιαπωνέζικα [19].



**Εικόνα 12:** Το ανθρωπόμορφο ρομπότ WABOT-1 [19]

Εκείνη την εποχή κατασκευάστηκαν και τα διαστημικά σκάφη Mars 2 και Mars 3 στα πλαίσια του Σοβιετικού διαστημικού προγράμματος Άρης. Το Mars 2 και το Mars 3 ήταν δυο παρόμοια διαστημικά σκάφη που διέθεταν ένα δορυφορικό και ένα προσεδαφιστικό σκάφος και ήταν τα πρώτα διαστημικά σκάφη που προσγειώθηκαν στον Άρη. Στην πραγματικότητα από τα δυο αυτά διαστημικά σκάφη μόνο το Mars 3 πέτυχε ομαλή προσεδάφιση στην επιφάνεια του Άρη αφού το Mars 2 εισήλθε στην ατμόσφαιρα του Άρη με ταχύτητα 6km/s και κάποια στιγμή δυσλειτούργησε με αποτέλεσμα τελικά να συντριβεί στην επιφάνεια του Άρη [20].



**Εικόνα 13:** Το προσεδαφιστικό σκάφος του διαστημικού σκάφους Mars 3 [20]



**Εικόνα 14:** Το προσεδαφιστικό σκάφος του διαστημικού σκάφους Mars 2 [20]

Στην σημερινή εποχή ο άνθρωπος έχει φτάσει πλέον σε σημείο να σχεδιάζει και να κατασκευάζει πολλά και διαφορετικά είδη ρομπότ ώστε αυτά να μπορούν να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα εργασιών με διαφορετικούς βαθμούς δυσκολίας και πολυπλοκότητας [21].

### 1.3 Κατηγορίες των ρομπότ

Τα ρομπότ χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, στους ρομποτικούς χειριστές (robot manipulators) και στα κινούμενα ρομπότ (mobile robots) [2].

#### 1.3.1 Ρομποτικοί χειριστές

Οι ρομποτικοί χειριστές είναι ρομπότ που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία και την τοποθέτηση υλικών χωρίς ο χειριστής να χρειάζεται να έρθει σε άμεση φυσική επαφή με αυτά. Έτσι τα ρομπότ αυτά επενεργούν πάνω σε ένα υλικό αλλάζοντας την μορφή του ή την διάταξη και την θέση του στο χώρο χωρίς τα ίδια τα ρομπότ να μετακινούνται ολόκληρα από μια θέση σε μια άλλη παρά μόνο τμήματα αυτών. Οι ρομποτικοί χειριστές είναι κυρίως οι ρομποτικοί χειριστές σταθερής βάσης (fixed base robot manipulators). Ένας ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης είναι ένας ρομποτικός βραχίονας δηλαδή μια μηχανική δομή που αποτελείται από ακολουθίες στερεών σωμάτων που ονομάζονται σύνδεσμοι (links) οι οποίοι διασυνδέονται με την βοήθεια αρθρώσεων (joints) σχηματίζοντας έτσι μια κινηματική αλυσίδα (kinematic chain). Η αλυσίδα αυτή έχει το ένα άκρο της σταθερό και το άλλο άκρο της ελεύθερο να κινηθεί ενώ πάνω στο ελεύθερο άκρο είναι προσαρμοσμένο το τελικό στοιχείο δράσης (end-effector) που εκτελεί την εργασία που απαιτείται από το ρομπότ. Από τοπολογική άποψη μια τέτοια κινηματική αλυσίδα ορίζεται ως ανοιχτή (open

kinematic chain) αφού υπάρχει μόνο μια ακολουθία μελών που συνοδεύουν τα δυο άκρα της ενώ μια κινηματική αλυσίδα ορίζεται ως κλειστή (closed kinematic chain) όταν μια ακολουθία μελών σχηματίζει ένα βρόχο. Εκτός από την ανοιχτή και την κλειστή κινηματική αλυσίδα υπάρχει και η παράλληλη κινηματική αλυσίδα (parallel kinematic chain) που αποτελείται από ανοιχτές ή κλειστές κινηματικές αλυσίδες συνδεδεμένες μέσω πολλαπλών αρθρώσεων σε έναν κοινό σύνδεσμο [22]. Για να μπορεί ο ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης να επενεργεί πάνω σε ένα υλικό θα πρέπει το υλικό αυτό να βρίσκεται μέσα στον χώρο εργασίας του ρομπότ. Ως χώρος εργασίας (work envelope) ενός ρομποτικού χειριστή σταθερής βάσης ορίζεται ο χώρος ο οποίος απαρτίζεται από όλα τα σημεία στα οποία μπορεί να τοποθετηθεί το τελικό στοιχείο δράσης. Ανάλογα με τον χώρο αυτόν ένας ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης μπορεί να είναι ένας ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης καρτεσιανής (cartesian) διαμόρφωσης , ένας ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης κυλινδρικής (cylindrical) διαμόρφωσης , ένας ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης σφαιρικής ή πολικής (spherical ή polar) διαμόρφωσης , ένας ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης αρθρωτής (articulated) διαμόρφωσης και ένας ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης διαμόρφωσης δέλτα (delta). Ο ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης καρτεσιανής διαμόρφωσης αποτελείται από τρεις αρθρώσεις όπου η κάθε μια άρθρωση είναι υπεύθυνη για την μεταφορική κίνηση του τελικού στοιχείου δράσης του ρομπότ σε έναν από τους τρεις άξονες του τρισδιάστατου χώρου. Ο ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης καρτεσιανής διαμόρφωσης διακρίνεται από μεγάλη δυσκαμψία και σταθερή ακρίβεια σε ολόκληρο τον χώρο εργασίας του ο οποίος και είναι ένα παραλληλεπίπεδο. Ένα τέτοιο ρομπότ είναι και το ρομπότ της εταιρίας Nordson EFD που φαίνεται στην εικόνα 15.



**Εικόνα 15:** Ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης καρτεσιανής διαμόρφωσης [23]

Μια παραλλαγή του ρομποτικού χειριστή σταθερής βάσης καρτεσιανής διαμόρφωσης είναι ο ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης διαμόρφωσης Gantry. Το ρομπότ αυτό είναι ένας ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης καρτεσιανής διαμόρφωσης όπως και το πρώτο διαφέρει όμως από αυτό στον αριθμό των αρθρώσεων που είναι υπεύθυνες για την μεταφορική κίνηση του τελικού στοιχείου

δράσης του ρομπότ σε κάθε έναν άξονα του τρισδιάστατου χώρο. Συγκεκριμένα στον ρομποτικό χειριστή σταθερής βάσης διαμόρφωσης Gantry η μεταφορική κίνηση του τελικού στοιχείου δράσης στον άξονα x ή στον άξονα y του τρισδιάστατου χώρου εξασφαλίζεται από δυο αρθρώσεις οι οποίες κινούνται ταυτόχρονα ενώ στον κλασικό ρομποτικό χειριστή σταθερής βάσης καρτεσιανής διαμόρφωσης η μεταφορική κίνηση του τελικού στοιχείου δράσης σε κάθε άξονα του τρισδιάστατου χώρου εξασφαλίζεται από μια μόνο άρθρωση. Έτσι με την διαμόρφωση Gantry αυξάνεται ο χώρος εργασίας αλλά και η δυσκαμψία και παράλληλα δίνεται η δυνατότητα στο ρομπότ να μπορεί να σηκώσει και να χειριστεί μεγάλα και βαριά υλικά. Ένα τέτοιο ρομπότ είναι και το ρομπότ της εταιρίας VEEGOO TECHNOLOGY που φαίνεται στην εικόνα 16.



**Εικόνα 16:** Ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης διαμόρφωσης Gantry [24]

Ο ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης κυλινδρικής διαμόρφωσης είναι ένας ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης καρτεσιανής διαμόρφωσης στον οποίο η πρώτη άρθρωση έχει αντικατασταθεί με μια άρθρωση που είναι υπεύθυνη για την περιστροφική κίνηση του τελικού στοιχείου δράσης του ρομπότ γύρω από τον άξονα z του τρισδιάστατου χώρου. Το ρομπότ αυτό χαρακτηρίζεται από μικρή δυσκαμψία ενώ όσον αφορά την ακρίβεια της θέσης του τελικού στοιχείου δράσης αυτή μειώνεται καθώς αυξάνεται η οριζόντια μετατόπιση. Ο χώρος εργασίας του ρομποτικού χειριστή σταθερής βάσης κυλινδρικής διαμόρφωσης είναι ένα τμήμα κυλίνδρου. Ένα τέτοιο ρομπότ είναι και το ρομπότ της εταιρίας Hudson Robotics που φαίνεται στην εικόνα 17.



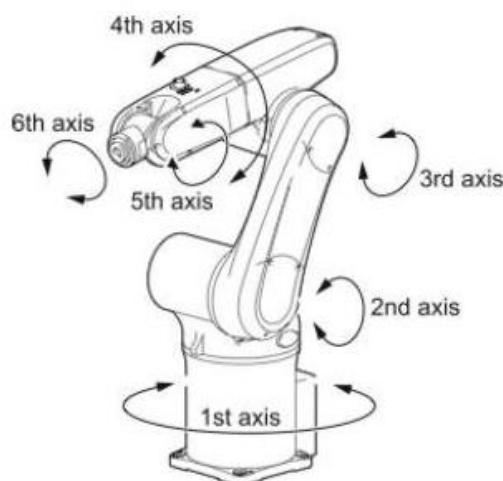
**Εικόνα 17:** Ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης κυλινδρικής διαμόρφωσης [25]

Ο ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης σφαιρικής ή πολικής διαμόρφωσης είναι και αυτός ένας ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης καρτεσιανής διαμόρφωσης στον οποίο αυτήν την φορά οι δύο πρώτες αρθρώσεις έχουν αντικατασταθεί με δύο αρθρώσεις που είναι υπεύθυνες για την περιστροφική κίνηση του τελικού στοιχείο δράσης του ρομπότ γύρω από δύο διαφορετικούς άξονες του τρισδιάστατου χώρου. Ο ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης σφαιρικής ή πολικής διαμόρφωσης διακρίνεται από υψηλή μηχανολογική πολυπλοκότητα και από μικρή δυσκαμψία. Επιπλέον η ακρίβεια της θέσης του τελικού στοιχείου δράσης του ρομπότ μειώνεται με την αύξηση της ακτινικής απόστασης. Ο χώρος εργασίας του ρομπότ αυτού είναι ένα τμήμα σφαίρας. Ένα τέτοιο ρομπότ είναι και το ρομπότ της εταιρίας FANUC που φαίνεται στην εικόνα 18.



**Εικόνα 18:** Ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης σφαιρικής ή πολικής διαμόρφωσης [26]

Ο ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης αρθρωτής διαμόρφωσης με δύο συνδέσμους είναι όμοιος με τον ανθρώπινο βραχίονα. Το ρομπότ αυτό όπως φαίνεται και στο σχήμα 1 αποτελείται από τρεις αρθρώσεις που βρίσκονται στο σύστημα σώματος-βραχίονα και από τρεις ακόμα αρθρώσεις που βρίσκονται στο σύστημα του καρπού.



**Σχήμα 1 :** Οι αρθρώσεις ενός ρομποτικού χειριστή σταθερής βάσης αρθρωτής διαμόρφωσης με 6 βαθμούς ελευθερίας [27]

Συγκεκριμένα οι τρεις αρθρώσεις που βρίσκονται στο σύστημα σώματος-βραχίονα είναι η άρθρωση μεταξύ της βάσης και του συστήματος μέσης-κύριου σώματος , η άρθρωση μεταξύ του συστήματος μέσης-κύριου σώματος και του μπράτσου και η άρθρωση μεταξύ του μπράτσου και του πήχη ενώ οι τρεις αρθρώσεις που βρίσκονται στο σύστημα του καρπού είναι η άρθρωση μεταξύ του πήχη και του τελικού στοιχείου δράσης και οι δυο αρθρώσεις που βρίσκονται πάνω στο τελικό στοιχείο δράσης. Οι τρεις πρώτες αρθρώσεις ρυθμίζουν την θέση του τελικού στοιχείου δράσης στον χώρο και οι τρεις τελευταίες τον προσανατολισμό του σε αυτόν. Λόγω των παραπάνω το ρομπότ αυτό έχει έξι βαθμούς ελευθερίας δηλαδή τους περισσότερους από κάθε άλλον ρομποτικό χειριστή σταθερής βάσης που ανήκει σε μια από τις υπόλοιπες κατηγορίες. Ένα τέτοιο ρομπότ είναι και το ρομπότ της εταιρίας ABB που φαίνεται στην εικόνα 19.



**Εικόνα 19:** Ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης αρθρωτής διαμόρφωσης [28]

Ένας ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης αρθρωτής διαμόρφωσης είναι και ο ρομποτικός χειριστής σταθερής διαμόρφωσης Scara (Selective Compliance Assembly Robot Arm). Συγκεκριμένα το ρομπότ αυτό αποτελείται από δυο αρθρώσεις που είναι υπεύθυνες για την περιστροφική κίνηση του τελικού στοιχείου δράσης του ρομπότ γύρω από δυο παράλληλες μεταξύ τους ευθείες αλλά και παράλληλες με τον άξονα z και από μια άρθρωση που είναι υπεύθυνη για την μεταφορική του κίνηση στον άξονα z. Το ρομπότ αυτό διακρίνεται από μεγάλη δυσκαμψία σε κατακόρυφη φόρτιση και ελαστικότητα σε οριζόντια ενώ η ακρίβεια της θέσης του τελικού στοιχείου δράσης μειώνεται με την αύξηση της απόστασης μεταξύ αυτού και του άξονα της πρώτης άρθρωσης. Ένα τέτοιο ρομπότ είναι και το ρομπότ της εταιρίας FANUC που φαίνεται στην εικόνα 20.



**Εικόνα 20:** Ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης διαμόρφωσης Scara [29]

Τέλος ο ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης διαμόρφωσης δέλτα είναι ένα τύπος παράλληλου ρομπότ που αποτελείται από τρία συγκροτήματα όπου στο κάθε συγκρότημα υπάρχουν δυο σύνδεσμοι οι οποίοι ενώνονται με την βοήθεια αρθρώσεων που επιτρέπουν περιστροφική κίνηση γύρω από έναν άξονα του τρισδιάστατου χώρου. Η μια άκρη του κάθε συγκροτήματος συνδέεται στην βάση του ρομπότ μέσω μιας άρθρωσης που επιτρέπει περιστροφική κίνηση γύρω από δυο άξονες του τρισδιάστατου χώρου και η άλλη άκρη του συγκροτήματος καταλήγει σε ένα κοινό σημείο από το οποίο το ρομπότ επιτελεί το έργο του σχηματίζοντας έτσι μια ανάποδη πυραμίδα ή ένα ανάποδο δέλτα. Ο χώρος εργασίας ενός τέτοιου ρομπότ είναι ένας κώνος με την βάση του κώνου να βρίσκεται κοντά στην βάση του ρομπότ και την κορυφή του κώνου να βρίσκεται στο κοινό σημείο των άκρων των τριών συγκροτημάτων. Ένα τέτοιο ρομπότ είναι και το ρομπότ της εταιρίας ABB που φαίνεται στην εικόνα 21 [30].



**Εικόνα 21:** Ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης διαμόρφωσης δέλτα [31]

Όλα τα παραπάνω ρομπότ χρησιμοποιούνται κυρίως στην βιομηχανία όπου και τοποθετούνται σε συγκεκριμένα σημεία τα οποία επιτρέπουν την ελεύθερη κίνηση του τελικού στοιχείου δράσης σε όλο τον χώρο εργασίας των ρομπότ και έτσι τα ρομπότ αυτά χωρίς να μετακινούν ολόκληρη την μάζα τους εκτελούν το έργο τους [1],[2].

### 1.3.2 Κινούμενα ρομπότ

Τα κινούμενα ρομπότ είναι τα ρομπότ τα οποία μπορούν και μετακινούν όλα τα σημεία του μηχανισμού τους ανεξάρτητα από τα αν αυτά βρίσκονται στο έδαφος , μέσα στο νερό ή στον αέρα. Τα κινούμενα ρομπότ χωρίζονται στα τροχοφόρα ρομπότ (wheeled robots) , στα υποβρύχια ρομπότ (underwater robots) , στα εναέρια ρομπότ (aerial robots ή drones) και στα βαδίζοντα ρομπότ (walking robots). Τα κινούμενα τροχοφόρα ρομπότ με την σειρά τους χωρίζονται στα αυτόματα καθοδηγούμενα οχήματα (automatic guided vehicles) , στα αυτόνομα τροχοφόρα ρομπότ (autonomous wheeled robots) και στα τηλεκατευθυνόμενα τροχοφόρα ρομπότ (remote-controlled wheeled robots). Τα αυτόματα καθοδηγούμενα οχήματα είναι τροχοφόρα ρομπότ τα οποία ακολουθούν μια προκαθορισμένη πορεία ανιχνεύοντας με τους αισθητήρες που διαθέτουν στην άτρακτό τους είτε σημάδια στο έδαφος είτε σήματα που εκπέμπονται από διάφορα σημεία του περιβάλλοντα χώρου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα αυτόματα καθοδηγούμενα οχήματα να έχουν περιορισμένη αυτονομία κίνησης. Ένα τέτοιο ρομπότ είναι και το ρομπότ της εταιρίας INDEVA GROUP που φαίνεται στην εικόνα 22.



**Εικόνα 22:** Αυτόματο καθοδηγούμενο όχημα [32]

Αντίθετα τα αυτόνομα τροχοφόρα ρομπότ δεν ακολουθούν μια προκαθορισμένη πορεία αλλά προσαρμόζουν κάθε φορά την πορεία τους ανάλογα με το έδαφος πάνω στο οποίο κινούνται και ανάλογα με τα υλικά σώματα που βρίσκονται στον περιβάλλοντα χώρο. Ένα τέτοιο ρομπότ είναι και το ρομπότ της εταιρίας AMAZON που φαίνεται στην εικόνα 23.



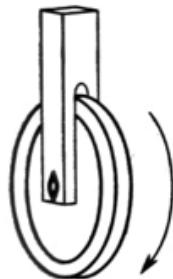
**Εικόνα 23:** Αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ [33]

Τα τηλεκατευθυνόμενα τροχοφόρα ρομπότ είναι τροχοφόρα ρομπότ που ακολουθούν την πορεία που ορίζει ο χειριστής μέσω ενός τηλεχειριστηρίου. Ένα τέτοιο ρομπότ είναι και το ρομπότ που έχει στην κατοχή του ο αμερικανικός στρατός το οποίο και φαίνεται στην εικόνα 24.



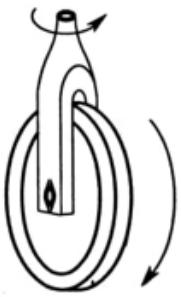
**Εικόνα 24:** Τηλεκατευθυνόμενο τροχοφόρο ρομπότ [34]

Όλα τα τροχοφόρα ρομπότ έχουν δυο ή περισσότερους τροχούς και οι τροχοί αυτοί μπορούν να διαταχθούν με ποικίλους τρόπους. Οι τροχοί των τροχοφόρων ρομπότ μπορεί να είναι σταθεροί (fixed) , καθοδηγίσιμοι (steerable) και προσανατολιζόμενοι (caster). Οι σταθεροί τροχοί όπως φαίνεται και στο σχήμα 2 περιστρέφονται γύρω από τον άξονα που διέρχεται από το κέντρο τους και είναι κάθετος στο επίπεδό τους. Οι τροχοί αυτοί είναι άκαμπτα προσαρτημένοι στην βάση των ρομπότ και έτσι ο προσανατολισμός της βάσης ως προς τους τροχούς αυτούς είναι σταθερός.



**Σχήμα 2:** Σταθερός τροχός [2]

Οι καθοδηγίσιμοι τροχοί όπως φαίνεται και στο σχήμα 3 έχουν δυο άξονες περιστροφής από τους οποίους ο πρώτος είναι ίδιος με εκείνων των σταθερών τροχών ενώ ο δεύτερος διέρχεται από το κέντρο των τροχών και είναι κάθετος στο έδαφος πάνω στο οποίο αυτοί κινούνται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι τροχοί αυτοί να μπορούν να αλλάζουν τον προσανατολισμό τους ως προς την βάση στην οποία είναι προσαρτημένοι.



**Σχήμα 3:** Καθοδηγίσιμος τροχός [2]

Τέλος όπως οι καθοδηγίσιμοι τροχοί έτσι και οι προσανατολιζόμενοι τροχοί έχουν και αυτοί δυο άξονες περιστροφής με την διαφορά ότι στους προσανατολιζόμενους τροχούς ο κάθετος στο έδαφος άξονας δεν διέρχεται από το κέντρο των τροχών όπως συμβαίνει στους καθοδηγίσιμους αλλά είναι μετατοπισμένος από αυτό κατά μια σταθερά (offset). Με αυτόν τον τρόπο οι προσανατολιζόμενοι τροχοί περιστρέφονται αυτόματα ώστε να ευθυγραμμίζονται γρήγορα με την διεύθυνση κίνησης της βάσης. Οι προσανατολιζόμενοι τροχοί φαίνονται στο σχήμα 4 [2].



**Σχήμα 4:** Προσανατολιζόμενος τροχός [2]

Εκτός από αυτές τις κατηγορίες τροχών υπάρχουν και ειδικοί τροχοί όπως είναι ο τροχός Mecanum ή αλλιώς Swedish που φαίνεται στην εικόνα 25 και ο σφαιρικός τροχός (spherical ή ball wheel) που φαίνεται στην εικόνα 26. Ο τροχός Mecanum ή αλλιώς Swedish πρόκειται για ένα σταθερό τροχό με παθητικούς κυλίνδρους δηλαδή με κυλίνδρους οι οποίοι περιστρέφονται από μόνοι τους τοποθετημένους σε όλη την περιφέρεια του εξωτερικού χείλους του τροχού και με τέτοιον τρόπο ώστε ο άξονας περιστροφής του κάθε κυλίνδρου να έχει κλίση 45 μοίρες ως προς το επίπεδο του τροχού [2].



**Εικόνα 25:** Τροχός Mecanum ή Swedish [35]

Ο σφαιρικός τροχός αποτελείται από μια σφαίρα τοποθετημένη μέσα σε ένα κέλυφος σε σχήμα φωλιάς ενώ μεταξύ αυτών των δυο σωμάτων είναι τοποθετημένα ρουλεμάν που επιτρέπουν την περιστροφή της σφαίρας γύρω από τον νοητό άξονα που διέρχεται από το κέντρο της προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.



**Εικόνα 26:** Σφαιρικός τροχός [36]

Ανάλογα με τον αριθμό , το είδος και την διαμόρφωση των τροχών στην βάση των τροχοφόρων ρομπότ προκύπτουν τρεις κύριοι μηχανισμοί κίνησης. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι η διαφορική οδήγηση (differential drive) , η οδήγηση ποδηλάτου (bicycle steering) και η οδήγηση Ackerman (Ackerman steering). Η διαφορική οδήγηση αναφέρεται σε τροχοφόρα ρομπότ που διαθέτουν δυο σταθερούς τροχούς ή δυο σταθερούς τροχούς και έναν προσανατολιζόμενο τροχό. Στα ρομπότ αυτά ανεξάρτητα από τα αν έχουν δυο ή τρεις τροχούς οι δυο σταθεροί τροχοί έχουν έναν κοινό άξονα περιστροφής και η ταχύτητα του κάθε τροχού ελέγχεται ξεχωριστά προκειμένου τα ρομπότ αυτά να μπορέσουν να εκτελέσουν οποιονδήποτε ελιγμό. Στην δεύτερη περίπτωση που τα ρομπότ διαθέτουν τρείς τροχούς η λειτουργία του προσανατολιζόμενου τροχού είναι να κρατάει τα ρομπότ σε στατική ισορροπία. Έτσι οι δυο σταθεροί τροχοί τοποθετούνται μπροστά και είναι υπεύθυνοι για την καθοδήγηση των ρομπότ ενώ ο τρίτος τροχός δηλαδή ο προσανατολιζόμενος τροχός τοποθετείται πίσω και είναι υπεύθυνος για την στήριξη των ρομπότ. Η οδήγηση ποδηλάτου όπως είναι φανερό αναφέρεται σε τροχοφόρα ρομπότ που έχουν την μορφή ποδηλάτου δηλαδή σε ρομπότ που αποτελούνται από έναν σταθερό και από ένα καθοδηγίσιμο τροχό. Στα ρομπότ αυτά ελέγχεται η ταχύτητα του ενός ή και των δυο τροχών ενώ ο οποιοσδήποτε ελιγμός των ρομπότ επιτυγχάνεται

στρίβοντας τον καθοδηγίσιμο τροχό προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Τέλος η οδήγηση Ackerman αναφέρεται σε τροχοφόρα ρομπότ που έχουν την μορφή αυτοκινήτου τεσσάρων τροχών. Στην ουσία τα ρομπότ αυτά είναι δυο ρομπότ οδήγησης ποδηλάτου τοποθετημένα παράλληλα μεταξύ τους και συνδεδεμένα με δυο άξονες. Οι δυο καθοδηγίσιμοι τροχοί μοιράζονται τον εμπρόσθιο άξονα ενώ οι δυο σταθεροί τον οπίσθιο άξονα [37]. Κάθε τροχοφόρο ρομπότ έχει τριες βαθμούς ελευθερίας αφού μετακινείται στο επίπεδο και περιστρέφεται γύρω από τον κάθετο σε αυτό άξονα. Όταν τα τροχοφόρα ρομπότ δεν μπορούν να ελέγξουν ανεξάρτητα αυτούς τους τρεις βαθμούς ελευθερίας ονομάζονται μη παγκατευθυντικά (nonholonomic) ενώ όταν έχουν την δυνατότητα αυτήν ονομάζονται παγκατευθυντικά (omnidirectional). Με άλλα λόγια τα τροχοφόρα ρομπότ που έχουν την δυνατότητα να εκτελούν μια λοξή πορεία κρατώντας παράλληλο το σύστημα συντεταγμένων τους με αυτό που είχαν στο σημείο από όπου ξεκίνησαν την πορεία ονομάζονται παγκατευθυντικά ενώ τα ρομπότ που δεν διαθέτουν την δυνατότητα αυτήν ονομάζονται μη παγκατευθυντικά. Τα παραπάνω τροχοφόρα ρομπότ είναι και τα τρία μη παγκατευθυντικά. Ενώ τέτοια ρομπότ μπορούν να φτάσουν σε κάθε σημείο του επιπέδου πάνω στο οποίο κινούνται και με οποιονδήποτε προσανατολισμό μπορεί να απαιτηθούν περίπλοκοι ελιγμοί και επομένως και πολύπλοκο σχεδιασμό διαδρομής ώστε να το καταφέρουν χωρίς να έχει σημασία αν τα ρομπότ αυτά ελέγχονται από κάποιον χειριστή ή αν είναι αυτόνομα. Αντίθετα τα παγκατευθυντικά τροχοφόρα ρομπότ δεν εκτελούν πολλούς και πολύπλοκους ελιγμούς προκειμένου να φτάσουν σε ένα σημείο στο επίπεδο με έναν συγκεκριμένο προσανατολισμό και για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται σε μικρούς και στενούς χώρους όπου οι δυνατότητες για ελιγμούς είναι περιορισμένες. Δυο παγκατευθυντικά τροχοφόρα ρομπότ που χρησιμοποιούνται συχνά είναι τα τροχοφόρα ρομπότ με τρείς ανεξάρτητα οδηγούμενους προσανατολιζόμενους τροχούς και τα τροχοφόρα ρομπότ με τέσσερις ανεξάρτητα οδηγούμενους τροχούς τύπου Mecanum [38],[2]. Τα υποβρύχια ρομπότ χωρίζονται στα τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα (remotely operated underwater vehicles) και στα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (autonomous underwater vehicles). Τα τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα είναι μη επανδρωμένα οχήματα τα οποία είναι συνδεδεμένα με το μητρικό τους πλοίο στην επιφάνεια της θάλασσας μέσω ενός καλωδίου. Το καλώδιο αυτό χρησιμοποιείται και για να επικοινωνεί το πλήρωμα του μητρικού πλοίου με το τηλεκατευθυνόμενο υποβρύχιο όχημα αλλά και για να το τροφοδοτεί με ενέργεια προκειμένου αυτό να μπορέσει να ανταπεξέλθει στην αποστολή του. Έτσι η αυτονομία κίνησης των τηλεκατευθυνόμενων υποβρύχιων οχημάτων περιορίζεται από το μήκος του καλωδίου. Ένα τέτοιο όχημα είναι και το όχημα της εταιρίας JAMHOURI S.A. που φαίνεται στην εικόνα 27.



**Εικόνα 27:** Τηλεκατευθυνόμενο υποβρύχιο όχημα [39]

Τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα σε αντίθεση με τα τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα είναι πλήρως αυτόνομα αφού δεν φέρουν κάποιο καλώδιο. Η τροφοδοσία των οχημάτων αυτών εξασφαλίζεται από ειδικές μπαταρίες που είναι τοποθετημένες εσωτερικά του σώματος τους πράγμα που σημαίνει ότι ο χρόνος λειτουργίας αυτών των οχημάτων είναι περιορισμένος. Ένα τέτοιο όχημα είναι και το όχημα της εταιρίας ECA Group που φαίνεται στην εικόνα 28.



**Εικόνα 28:** Αυτόνομο υποβρύχιο όχημα [40]

Τα εναέρια ρομπότ χωρίζονται στα τηλεκατευθυνόμενα εναέρια ρομπότ (remote-controlled aerial robots) και στα αυτόνομα εναέρια ρομπότ (autonomous aerial robots). Ο έλεγχος των τηλεκατευθυνόμενων εναέριων ρομπότ πραγματοποιείται μέσω ενός τηλεχειριστηρίου από έναν κατάλληλα εκπαιδευμένο χειριστή. Ένα τέτοιο ρομπότ είναι και το ρομπότ της εταιρίας DJI που φαίνεται στην εικόνα 29.



**Εικόνα 29:** Τηλεκατευθυνόμενο εναέριο ρομπότ [41]

Από την άλλη τα αυτόνομα εναέρια ρομπότ αποφασίζουν από μόνα τους τι πορεία πρέπει να ακολουθήσουν ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο έδαφος και στον αέρα του περιβάλλοντα χώρου. Ένα τέτοιο ρομπότ είναι και το ρομπότ που κατασκευάστηκε στο Autonomous Systems Lab ETH Zurich στην Ελβετία. Αυτό το ρομπότ φαίνεται στην εικόνα 30.



**Εικόνα 30:** Αυτόνομο εναέριο ρομπότ [42]

Η τελευταία κατηγορία κινούμενων ρομπότ είναι τα βαδίζοντα ρομπότ τα οποία χρησιμοποιούν μηχανικά πόδια για την κίνηση τους και όχι συμβατικούς τροχούς ή προπέλες. Αυτά τα ρομπότ μπορεί να διαθέτουν δυο μηχανικά πόδια και επομένως να έχουν την μορφή ανθρώπου όπως το ρομπότ με όνομα Sophia που φαίνεται στην εικόνα 31



**Εικόνα 31:** Ανθρωπόμορφο ρομπότ [43]

αλλά μπορεί να διαθέτουν και περισσότερα από δυο μηχανικά πόδια και επομένως να έχουν την μορφή ζώου όπως το ρομπότ της εταιρίας Boston Dynamics που φαίνεται την εικόνα 32.



**Εικόνα 32:** Ρομπότ σκύλος [44]

Τα βαδίζοντα ρομπότ που διαθέτουν δυο μηχανικά πόδια και έχουν την μορφή ανθρώπου ονομάζονται ανθρωπόμορφα ρομπότ (humanoid robots) και είναι πολύ διαδεδομένα αφού εκτός της

ικανότητας τους να αναρριχούνται ανώμαλα εδάφη και να προσπερνούν εμπόδια κάτι που χαρακτηρίζει όλα τα βαδίζοντα ρομπότ είναι και τα πιο ελκυστικά στον άνθρωπο σε σχέση με εκείνα που έχουν την μορφή ζώου [1]. Όλα τα παραπάνω ρομπότ έχουν κάποια χαρακτηριστικά τα οποία προσθέτουν επιπλέον κριτήρια επιλογής για την χρήση τους σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή.

## 1.4 Χαρακτηριστικά των ρομπότ

Κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά των ρομπότ και ιδιαίτερα των ρομποτικών χειριστών σταθερής βάσης είναι η στιβαρότητα (robustness) , η ενδοτικότητα (compliance) , η ακρίβεια θέσης (accuracy) , η επαναληψιμότητα (repeatability) , το ωφέλιμο φορτίο (payload) και οι βαθμοί ελευθερίας (degrees of freedom). Όταν ένα ρομπότ διακρίνεται από μεγάλη δυσκαμψία τότε το ρομπότ αυτό χαρακτηρίζεται ως ρομπότ υψηλής στιβαρότητας ενώ όταν ένα ρομπότ διακρίνεται από μεγάλη ευκαμψία τότε το ρομπότ αυτό χαρακτηρίζεται ως ρομπότ υψηλής ενδοτικότητας [45]. Επίσης όταν ένα ρομπότ διακρίνεται από υψηλή ακρίβεια θέσης σημαίνει ότι το ρομπότ μπορεί να οδηγήσει το τελικό στοιχείο δράσης του πολύ κοντά σε ένα καινούργιο σημείο στόχο εντός του χώρου εργασίας του. Από την άλλη όταν ένα ρομπότ διακρίνεται από υψηλή επαναληψιμότητα σημαίνει ότι το ρομπότ μπορεί να οδηγήσει το τελικό στοιχείο δράσης του πολύ κοντά σε ένα σημείο στο οποίο βρισκόταν παλιότερα. Το ωφέλιμο φορτίο είναι το βάρος που μπορεί να μεταφέρει το τελικό στοιχείο δράσης του ρομπότ [1] και τέλος οι βαθμοί ελευθερίας ενός ρομποτικού χειριστή σταθερής βάσης είναι ο συνολικός αριθμός ελευθεριών των άκαμπτων σωμάτων μείον των αριθμών των περιορισμών στην κίνησή τους λόγω κυρίως των αρθρώσεων. Για τον υπολογισμό του πλήθους των βαθμών ελευθερίας ενός ρομποτικού χειριστή σταθερής βάσης χρησιμοποιείται η σχέση (1) η οποία αποτελεί την σχέση του Grübler.

$$dof = m \cdot (N - 1 - J) + \sum_{i=1}^J f_i \quad (1)$$

Στην σχέση (1) το  $m$  ισούται με 6 για τα ρομπότ που κινούνται στον χώρο και με 3 για τα ρομπότ που κινούνται στο επίπεδο , το  $N$  ισούται με το πλήθος των συνδέσμων μαζί το σύνδεσμο γείωσης και το  $J$  ισούται με το πλήθος των αρθρώσεων. Όσον αφορά το  $f_i$  αυτό ισούται με το πλήθος των βαθμών ελευθερίας που έχει η κάθε άρθρωση  $i$  του ρομπότ [46]. Αυτά τα χαρακτηριστικά των ρομπότ εξαρτώνται από την κατασκευαστική δομή τους δηλαδή από τα μέρη από τα οποία αποτελούνται αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο τα μέρη αυτά συνδέονται μεταξύ τους.

## 1.5 Υποσυστήματα των ρομπότ

Κάθε ρομπότ είναι ένα σύνθετο σύστημα αφού αποτελείται από πολλά μέρη. Κάθε ένα από αυτά τα μέρη ανήκει σε ένα από τα υποσυστήματα του ρομπότ τα οποία και είναι το υποσύστημα κίνησης , το υποσύστημα αίσθησης και το υποσύστημα ελέγχου [47].

### 1.5.1 Υποσύστημα κίνησης

Το υποσύστημα κίνησης είναι υπεύθυνο για την κίνηση ολόκληρου του ρομπότ ή για την κίνηση κάποιων τμημάτων αυτού και αποτελείται από τους συνδέσμους , από το τελικό στοιχείο δράσης , από τους επενεργητές (actuators) και από τους μηχανισμούς μετάδοσης κίνησης (motion transmission mechanisms) συμπεριλαμβανομένων και των αρθρώσεων [47]. Οι σύνδεσμοι και το τελικό στοιχείο δράσης συναντώνται κυρίως στους ρομποτικούς χειριστές σταθερής βάσης ενώ οι επενεργητές και οι μηχανισμοί μετάδοσης κίνησης συναντώνται σε όλα τα ρομπότ. Το τελικό στοιχείο δράσης ενός ρομποτικού χειριστή σταθερής βάσης μπορεί να είναι ένα εργαλείο (tool) ή μια λαβίδα (gripper). Τα εργαλεία χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου το ρομπότ επεξεργάζεται ένα υλικό ενώ οι λαβίδες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου το ρομπότ συγκρατεί το υλικό που προορίζεται για επεξεργασία. Κάποια παραδείγματα εργαλείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τελικό στοιχείο δράσης σε έναν ρομποτικό χειριστή σταθερής βάσης είναι ένα πιστόλι συγκόλλησης σημείου (spot welding gun) , ένα εργαλείο συγκόλλησης τόξου (arc welding tool) , ένα πιστόλι βαφής με σπρέι (spray painting gun) , ένα εργαλείο κοπής με πίδακα νερού (water jet cutting tool) , ένα εργαλείο συναρμολόγησης (assembly tool) κ.α. [48]. Οι λαβίδες από την άλλη μπορούν να χωρισθούν ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους σε λαβίδες μηχανικής πίεσης (impactive grippers) , σε λαβίδες διείσδυσης (ingressive grippers) , σε λαβίδες έλξης (restrictive grippers) και σε λαβίδες πρόσφυσης (contigutive grippers). Οι λαβίδες μηχανικής πίεσης χρησιμοποιούν δαγκάνες ή αλλιώς μηχανικά δάκτυλα και ασκώντας μηχανική πίεση απενθείας στο υλικό μπορούν και το συγκρατούν. Μια τέτοια λαβίδα είναι και η λαβίδα της εταιρίας ONROBOT που φαίνεται στην εικόνα 33.



Εικόνα 33: Λαβίδα μηχανικής πίεσης [49]

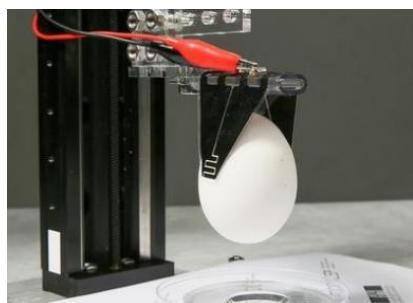
Οι λαβίδες αυτές μπορεί να έχουν δυο ή περισσότερα άκαμπτα ή εύκαμπτα μηχανικά δάκτυλα και χρησιμοποιούνται περισσότερο από τις λαβίδες των άλλων τύπων. Επίσης οι λαβίδες αυτές μπορεί να είναι είτε εσωτερικές (inner grippers) είτε εξωτερικές (outer grippers) ανάλογα με τον τύπο συγκράτησης που εφαρμόζουν. Οι εσωτερικές λαβίδες ασκούν πίεση προς τον νοητό άξονα που διέρχεται από το κέντρο τους ενώ οι εξωτερικές λαβίδες ασκούν πίεση προς την αντίθετη κατεύθυνση με αποτέλεσμα όταν το ρομπότ συγκρατεί ένα υλικό οι εσωτερικές λαβίδες να κλείνουν τα μηχανικά

τους δάκτυλα ενώ οι εξωτερικές να τα ανοίγουν. Οι λαβίδες μηχανικής πίεσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν και ανάλογα με την κίνηση των δακτύλων τους σε λαβίδες παράλληλης κίνησης (parallel grippers) και σε λαβίδες γωνιακής κίνησης (angular grippers). Στις λαβίδες παράλληλης κίνησης τα μηχανικά δάκτυλα εκτελούν παράλληλες μεταφορικές κινήσεις ως προς το σώμα των λαβίδων ενώ στις λαβίδες γωνιακής κίνησης τα μηχανικά δάκτυλα συγκλίνουν ή αποκλίνουν γύρω από ένα κεντρικό σημείο περιστροφής [50]. Οι λαβίδες διείσδυσης χρησιμοποιούν βελόνες ή άλλα αιχμηρά άκρα τα οποία περνούν από την επιφάνεια του υλικού και διεισδύουν σε αυτό προκειμένου να το συγκρατήσουν. Μια τέτοια λαβίδα είναι και η λαβίδα της εταιρίας SCHMALZ που φαίνεται στην εικόνα 34.



**Εικόνα 34:** Λαβίδα διείσδυσης [51]

Οι λαβίδες έλξης όπως και η λαβίδα της εικόνας 35 που αναπτύχθηκε στην Ομοσπονδιακή Πολυτεχνική Σχολή της Λωζάνης στην Ελβετία εφαρμόζουν ελκτικές δυνάμεις στην επιφάνεια του υλικού όπως μαγνητικές δυνάμεις, ηλεκτροστατικές δυνάμεις κ.α. και με αυτόν τον τρόπο συγκρατούν το υλικό.



**Εικόνα 35:** Λαβίδα έλξης [52]

Τέλος οι λαβίδες πρόσφυσης όπως και η λαβίδα της εταιρίας ONROBOT που φαίνεται στην εικόνα 36 συγκρατούν ένα υλικό προσκολλώντας την επιφάνεια τους πάνω στην επιφάνεια του υλικού [54].



**Εικόνα 36:** Λαβίδα πρόσφυσης [53]

Εκτός από τις παραπάνω κατηγορίες λαβίδων υπάρχουν και ειδικές λαβίδες όπως είναι αυτές στις οποίες χρησιμοποιείται μια σφαίρα κατασκευασμένη από πνευστό πλαστικό υλικό που έχει στο εσωτερικό της κόκκους κάποιου υλικού. Με αναρρόφηση των κόκκων που βρίσκονται στο εσωτερικό της οι λαβίδες αυτές προσαρμόζουν το σχήμα της σφαίρας ώστε να είναι ίδιο με το σχήμα του υλικού που προσπαθούν να συγκρατήσουν. Με αυτόν τον τρόπο οι λαβίδες εύκαμπτης σφαιρικής διαμόρφωσης (flexible spherical grippers) όπως ονομάζονται μπορούν να συγκρατήσουν υλικό οποιουδήποτε σχήματος αρκεί αυτό να είναι μικρού όγκου και βάρους [55]. Μια τέτοια λαβίδα είναι και η λαβίδα της εταιρίας Empire Robotics που φαίνεται στην εικόνα 37.



**Εικόνα 37:** Λαβίδα εύκαμπτης σφαιρικής διαμόρφωσης [55]

Επιπλέον κάποια ρομπότ μπορεί να έχουν πολλές λαβίδες στο ίδιο τελικό στοιχείο δράσης με αποτέλεσμα τα ρομπότ αυτά την ίδια χρονική στιγμή να μπορούν να συγκρατήσουν ένα υλικό από διαφορετικά σημεία ή να μπορούν να συγκρατήσουν ταυτόχρονα διαφορετικά υλικά. Αυτό είναι πολύ σημαντικό αφού με αυτόν τον τρόπο τα ρομπότ μπορούν να εκτελέσουν συντομότερα το έργο τους αλλά και να ανταποκριθούν ευκολότερα σε βαριά και ογκώδη υλικά. Επίσης υπάρχουν και ρομπότ τα οποία κατά την λειτουργία τους έχουν την δυνατότητα να αλλάζουν λαβίδες χωρίς να χρειάζεται η παρέμβαση του χειριστή κάνοντας έτσι τα ρομπότ αυτά ικανά στο να μπορούν να εκτελέσουν διαφορετικές εργασίες χωρίς να διακόπτεται η λειτουργία τους εξοικονομώντας χρήμα και χρόνο [48]. Οι επενεργητές είναι συσκευές που μετατρέπουν μια μορφή ενέργειας σε κινητική και χρησιμοποιούνται στο τελικό στοιχείο δράσης, στις αρθρώσεις των ρομπότ και γενικότερα όπου χρειάζεται κίνηση κάποιου μηχανισμού. Οι επενεργητές μπορούν να χωρισθούν ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους και ανάλογα με το είδος της κίνησης που παρέχουν. Ανάλογα με τον τρόπο

λειτουργίας τους οι επενεργητές διακρίνονται στους πνευματικούς επενεργητές (pneumatic actuators) , στους υδραυλικούς επενεργητές (hydraulic actuators) και στους ηλεκτρικούς επενεργητές (electric actuators). Οι πνευματικοί επενεργητές χρησιμοποιούν πεπιεσμένο αέρα τον οποίο και μετατρέπουν σε μηχανική κίνηση. Οι υδραυλικοί επενεργητές χρησιμοποιούν υγρό υπό πίεση συνήθως νερό ή λάδι και με αυτόν τον τρόπο παράγουν μηχανική κίνηση και τέλος οι ηλεκτρικοί επενεργητές χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια την οποία και μετατρέπουν σε μηχανική κίνηση. Ανάλογα με το είδος της κίνησης που παρέχουν , οι επενεργητές διακρίνονται στους γραμμικούς επενεργητές (linear actuators) όταν η κίνηση είναι γραμμική και στους περιστροφικούς επενεργητές (rotary actuators) όταν η κίνηση είναι περιστροφική [56]. Οι πνευματικοί γραμμικοί επενεργητές χρησιμοποιούν είτε έμβολο είτε μια πλαστική μεμβράνη που ονομάζεται διάφραγμα. Στην πρώτη περίπτωση υπάρχει ένα έμβολο μέσα σε έναν κύλινδρο και το έμβολο αυτό κινείται ανάλογα με την πίεση που ασκεί ο αέρας στην μια πλευρά του εμβόλου οπότε και ονομάζεται έμβολο μονής δράσης (single acting cylinder) ή και στις δυο πλευρές του εμβόλου οπότε και ονομάζεται έμβολο διπλής δράσης (double acting cylinder). Όταν μάλιστα υπάρχει μόνο μια υποδοχή για σωλήνα στον κύλινδρο εκτός από το έμβολο υπάρχει και ένα ελατήριο μέσα στον κύλινδρο έτσι ώστε όταν ο αέρας που διέρχεται μέσα από τον σωλήνα σταματήσει να ασκεί πίεση στην μια πλευρά του εμβόλου αυτό να καταφέρει να γυρίσει πάλι στην θέση ισορροπίας του. Αυτό οδηγεί στην ύπαρξη δυο διαφορετικών διαμορφώσεων. Στην πρώτη διαμόρφωση όταν το έμβολο βρίσκεται στην θέση ισορροπίας του το μεγαλύτερο μέρος του είναι εσωτερικά του κυλίνδρου και η διαμόρφωση αυτή ονομάζεται έμβολο μονής δράσης αρνητικής κατεύθυνσης (minus single acting cylinder) ενώ στην δεύτερη διαμόρφωση όταν το έμβολο βρίσκεται στην θέση ισορροπίας του το μεγαλύτερο μέρος του είναι εξωτερικά του κυλίνδρου και η διαμόρφωση αυτή ονομάζεται έμβολο μονής δράσης θετικής κατεύθυνσης (plus single acting cylinder) [57]. Οι δυο αυτές διαμορφώσεις φαίνονται στα σχήματα 5 και 6 αντίστοιχα.



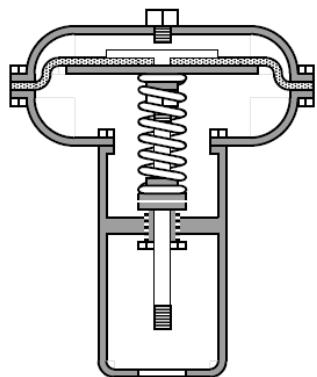
**Σχήμα 5:** Έμβολο μονής δράσης αρνητικής κατεύθυνσης [58]



**Σχήμα 6:** Έμβολο μονής δράσης θετικής κατεύθυνσης [58]

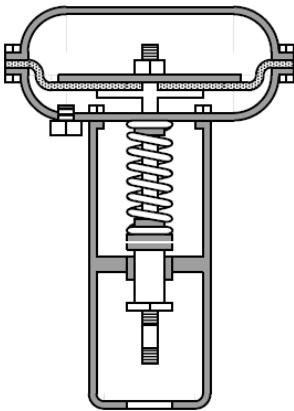
Στην δεύτερη περίπτωση όπου οι πνευματικοί γραμμικοί επενεργητές χρησιμοποιούν διάφραγμα υπάρχει μια πλαστική μεμβράνη η μια πλευρά της οποίας εφάπτεται με έναν συμπαγή κυλινδρικό

άξονα. Όταν πεπιεσμένος αέρας εισέρχεται από το πάνω μέρος της μεμβράνης η μεμβράνη αυτή κατεβαίνει και μαζί της κατεβαίνει και ο κυλινδρικός άξονας εκτελώντας γραμμική κίνηση. Όταν πεπιεσμένος αέρας εισέρχεται από το κάτω μέρος της μεμβράνης η μεμβράνη αυτή ανεβαίνει και μαζί της ανεβαίνει και ο κυλινδρικός άξονας εκτελώντας πάλι γραμμική κίνηση. Η πρώτη διαμόρφωση ονομάζεται βαλβίδα τύπου διαφράγματος άμεσης δράσης (fail open ή direct acting diaphragm valve) αφού όταν σταματήσει να εισέρχεται πεπιεσμένος αέρας από το πάνω μέρος της μεμβράνης λόγω του ελατηρίου μέσα από το οποίο διέρχεται ο κυλινδρικός άξονας η μεμβράνη ανεβαίνει και ο άξονας κινείται προς τα πάνω ανοίγοντας έτσι την βαλβίδα στην περίπτωση που στο άλλο άκρο του άξονα έχει τοποθετηθεί ο αντίστοιχος μηχανισμός. Η διαμόρφωση αυτή φαίνεται στο σχήμα 7.



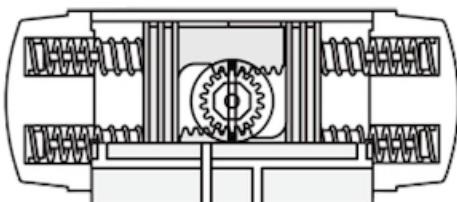
**Σχήμα 7:** Βαλβίδα τύπου διαφράγματος άμεσης δράσης [60]

Η δεύτερη διαμόρφωση ονομάζεται βαλβίδα τύπου διαφράγματος αντίστροφης δράσης (fail close ή reverse acting diaphragm valve) αφού όταν σταματήσει να εισέρχεται πεπιεσμένος αέρας από το κάτω μέρος της μεμβράνης λόγω του ελατηρίου μέσα από το οποίο διέρχεται ο κυλινδρικός άξονας η μεμβράνη κατεβαίνει και ο άξονας κινείται προς τα κάτω κλείνοντας έτσι την βαλβίδα στην περίπτωση που στο άλλο άκρο του άξονα έχει τοποθετηθεί ο αντίστοιχος μηχανισμός. Η διαμόρφωση αυτή φαίνεται στο σχήμα 8 [59].



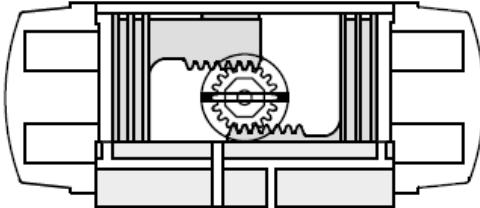
**Σχήμα 8:** Βαλβίδα τύπου διαφράγματος αντίστροφης δράσης [60]

Οι πνευματικοί περιστροφικοί επενεργητές χρησιμοποιούν είτε δυο οριζόντια τοποθετημένους άξονες με οδοντωτές προεξοχές μαζί με έναν κάθετα τοποθετημένο άξονα επίσης με οδοντωτές προεξοχές είτε έναν ανεμοδείκτη τοποθετημένο μέσα σε έναν κυλινδρικό κέλυφος. Στην πρώτη περίπτωση υπάρχουν δυο συμπαγής άξονες οι οποίοι τοποθετούνται οριζόντια μέσα στο κέλυφος του επενεργητή και ο κάθε άξονας έχει στην μια του πλευρά και κατά μήκος αυτής οδοντωτές προεξοχές. Εκτός από αυτούς τους δυο άξονες υπάρχει και ένας κυλινδρικός άξονας ο οποίος τοποθετείται κάθετα και ανάμεσα στους δυο οριζόντιους άξονες ενώ σε όλη την περιφέρεια της εξωτερικής επιφάνειας του έχει και αυτός οδοντωτές προεξοχές. Ασκώντας ο αέρας πίεση στην μια άκρη του κάθε οριζόντιου άξονα οι δυο αυτοί άξονες κινούνται με τέτοιον τρόπο ώστε ο ένας να απομακρύνεται από τον άλλον και η κίνηση αυτή των δυο αξόνων αναγκάζει τον κυλινδρικό άξονα να εκτελέσει περιστροφική κίνηση. Οι δυο οριζόντιοι άξονες επανέρχονται στην κατάσταση ισορροπίας τους μόλις σταματήσει να εισέρχεται αέρας στον κενό χώρο που υπάρχει μεταξύ τους δηλαδή στον εσωτερικό θάλαμο μέσω των ελατηρίων που βρίσκονται στους εξωτερικούς θαλάμους δηλαδή στους κενούς χώρους που βρίσκονται αριστερά και δεξιά των δυο αξόνων του επενεργητή. Οι επενεργητές αυτοί πετυχαίνουν περιστροφική κίνηση του κυλινδρικού άξονα με την ίδια φορά περιστροφής κατά την διάρκεια λειτουργίας τους και ονομάζονται επενεργητές κρεμαργιέρων και γραναζιού μονής δράσης (single acting double rack actuators). Οι επενεργητές αυτοί φαίνονται στο σχήμα 9.



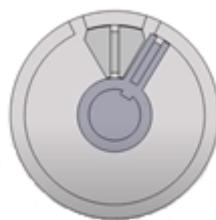
**Σχήμα 9:** Επενεργητής κρεμαργιέρων και γραναζιού μονής δράσης [62]

Αντίθετα όταν ο αέρας εισέρχεται και στον εσωτερικό αλλά και στους δυο εξωτερικούς θαλάμους ο κυλινδρικός άξονας περιστρέφεται με διαφορετική φορά περιστροφής σε κάθε περίπτωση και οι επενεργητές αυτοί ονομάζονται επενεργητές κρεμαργιέρων και γραναζιού διπλής δράσης (double acting double rack actuators). Οι επενεργητές αυτοί φαίνονται στο σχήμα 10 [62].



**Σχήμα 10:** Επενεργητής κρεμαργιέρων και γραναζιού διπλής δράσης [62]

Στην δεύτερη περίπτωση όπου οι περιστροφικοί πνευματικοί επενεργητές χρησιμοποιούν ανεμοδείκτη υπάρχει ένας κυλινδρικός θάλαμος μέσα στον οποίο είναι τοποθετημένος ο ανεμοδείκτης η μια άκρη του οποίου είναι στερεωμένη στο κέντρο του κυλινδρικού θαλάμου ενώ η άλλη κατά την διάρκεια λειτουργίας του επενεργητή διαγράφει κυκλική πορεία. Όταν πεπιεσμένος αέρας εισέρχεται από την μια πλευρά του ανεμοδείκτη μέσω του ανοίγματος που υπάρχει στο εξωτερικό περίβλημα του κυλινδρικού θαλάμου ο ανεμοδείκτης περιστρέφεται με μια συγκεκριμένη φορά περιστροφής μέχρι να φτάσει στο τέρμα της διαδρομής του. Το ίδιο συμβαίνει και όταν πεπιεσμένος αέρας εισέρχεται από την άλλη πλευρά του ανεμοδείκτη μέσω του δεύτερου ανοίγματος που υπάρχει στο εξωτερικό περίβλημα του κυλινδρικού θαλάμου αυτήν την φορά όμως ο ανεμοδείκτης περιστρέφεται με αντίθετη φορά περιστροφής από αυτήν της προηγούμενης. Αυτός ο τύπος περιστροφικού πνευματικού επενεργητή ονομάζεται επενεργητής τύπου πτερυγίου διπλής δράσης (double vane actuator) και φαίνεται στο σχήμα 11 [61],[63].



**Σχήμα 11:** Επενεργητής τύπου πτερυγίου διπλής δράσης [63]

Οι υδραυλικοί επενεργητές μοιάζουν αρκετά με τους πνευματικούς επενεργητές με την διαφορά ότι αντί για αέρα οι υδραυλικοί επενεργητές χρησιμοποιούν υγρό. Οι ηλεκτρικοί επενεργητές είναι κυρίως οι ηλεκτρικοί κινητήρες (electric motors). Οι ηλεκτρικοί κινητήρες διακρίνονται στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος (dc motors) και στους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (ac motors). Η λειτουργία των κινητήρων συνεχούς ρεύματος στηρίζεται στο φαινόμενο σύμφωνα με το

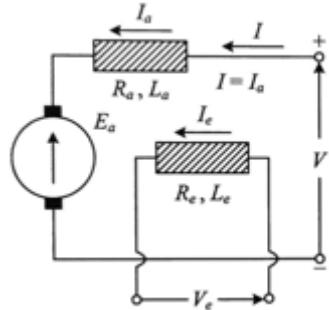
οποίο όταν ένας ρευματοφόρος αγωγός βρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο ασκείται σε αυτόν μια δύναμη που τείνει να τον μετακινήσει προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η δύναμη αυτή είναι η συνισταμένη των δυνάμεων Laplace στις οποίες υπόκεινται τα ελεύθερα ηλεκτρόνια τα οποία κινούνται μέσα στον αγωγό. Το μέτρο της δύναμης αυτής είναι ανάλογο του μαγνητικού πεδίου  $B$  σε μονάδες tesla , της έντασης του ρεύματος  $I$  που διαρρέει τον αγωγό σε μονάδες ampere , του μήκους  $l$  του αγωγού σε μονάδες meter και της γωνίας  $\alpha$  την οποία σχηματίζουν οι διευθύνσεις του αγωγού και του μαγνητικού πεδίου. Έτσι το μέτρο της δύναμης  $F$  σε μονάδες newton δίνεται από την σχέση (2).

$$F = B \cdot l \cdot I \cdot \sin(\alpha) \quad (2)$$

Η δύναμη  $F$  είναι κάθετη στον αγωγό και με φορά που προκύπτει από τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτόν ο μέσος δείχνει την φορά της δύναμης , ο δείκτης την φορά του μαγνητικού πεδίου και ο αντίχειρας την φορά του ρεύματος. Κάθε κινητήρας συνεχούς ρεύματος αποτελείται από δυο κύρια μέρη από τα οποία το ένα είναι ακίνητο και το άλλο περιστρέφεται με μια συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής. Το ακίνητο μέρος ονομάζεται στάτης (stator) και το μέρος που περιστρέφεται ονομάζεται δρομέας (armature). Ο στάτης είναι υπεύθυνος για την δημιουργία του μαγνητικού πεδίου ενώ ο δρομέας είναι υπεύθυνος για την περιστροφή του άξονα του κινητήρα και επομένως και για την μεταφορά της κίνησης αυτής στο φορτίο. Ο στάτης αποτελείται από το ζύγωμα , τους μαγνητικούς πόλους , τα πέδιλα των πόλων , τα τυλίγματα των πόλων , τα καλύμματα , τους ψηκτροφορείς , τους σιδερένιους δακτύλιους , τους βραχίονες , τις ψηκτροθήκες , της ψήκτρες και από τα ελατήρια πίεσης των ψηκτρών. Το ζύγωμα του στάτη αποτελεί τον κορμό της μηχανής και κατασκευάζεται από χυτοχάλυβα ή ελατό σίδηρο. Πάνω στο ζύγωμα στερεώνονται οι μαγνητικοί πόλοι ο σκοπός των οποίων είναι να εξασφαλίσουν την μαγνητική ροή που γεννιέται από τα τυλίγματα που τους περιβάλλουν. Σε πολλούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος υπάρχουν δυο τυλίγματα σε κάθε πόλο το καθένα ανεξάρτητο από το άλλο. Το ένα τύλιγμα αποτελείται από πολλές σπείρες με λεπτό σύρμα και ονομάζεται παράλληλο τύλιγμα και το άλλο τύλιγμα αποτελείται από λίγες σπείρες με χονδρό σύρμα και ονομάζεται τύλιγμα σειράς. Τα τυλίγματα αυτά είναι τα τυλίγματα των πόλων και το σύνολο των τυλιγμάτων αυτών ονομάζεται τύλιγμα διέγερσης. Στην πραγματικότητα ο όρος μαγνητικός πόλος αναφέρεται στο σύστημα πυρήνας-τυλίγματα πόλων και όχι μόνο στον πυρήνα δηλαδή στον κορμό των μαγνητικών πόλων ο οποίος κατασκευάζεται από μονωμένα ειδικά ελάσματα σιδήρου πάχους 1,5mm. Τα πέδιλα των μαγνητικών πόλων είναι τα τμήματα των μαγνητικών πόλων που βρίσκονται πλησιέστερα στο επαγωγικό τύμπανο. Αποτελούν συνήθως ξεχωριστή κατασκευή με το υπόλοιπο τμήμα των μαγνητικών πόλων και στερεώνονται με βίδες κάτω από αυτούς. Τα πέδιλα των μαγνητικών πόλων διαχέουν τη μαγνητική ροή σε ένα μεγαλύτερο μέρος της περιφέρειας του δρομέα από όσο καλύπτει

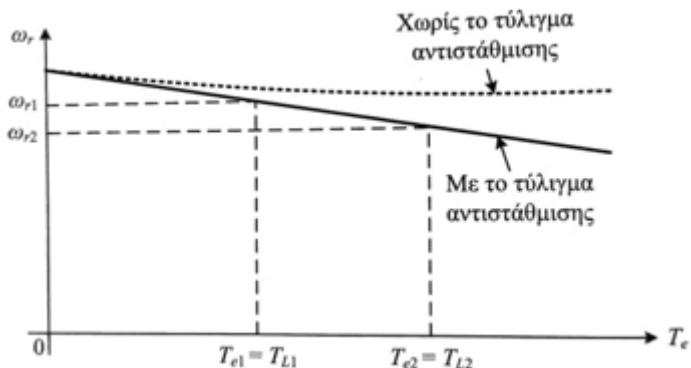
ο πυρήνας των μαγνητικών πόλων και παράλληλα συγκρατούν τα τυλίγματα των πόλων σε σταθερή θέση. Τα πέδιλα των μαγνητικών πόλων κατασκευάζονται από μονωμένα φύλλα σιδήρου για την αποφυγή της αύξησης της θερμοκρασίας αλλά και για την αποφυγή των απωλειών από τα δινορρεύματα. Τα δινορρεύματα είναι επαγωγικά ρεύματα τα οποία εμφανίζονται στα πέδιλα των μαγνητικών πόλων και συγκεκριμένα μέσα στην μάζα τους σε μορφή κλειστών τροχιών λόγω των διαταραχών του μαγνητικού πεδίου κατά την λειτουργία της μηχανής. Επειδή το πεδίο του τυμπάνου προκαλεί κάποια παραμόρφωση του αρχικού πεδίου των μαγνητικών πόλων το οποίο αποτελεί το κύριο μαγνητικό πεδίο για τη λειτουργία του κινητήρα πάνω στα πέδιλα των πόλων τοποθετείται ένα τύλιγμα το οποίο διαρρέεται από το ρεύμα του τυμπάνου δηλαδή είναι σε σειρά με το τύλιγμα του τυμπάνου προκειμένου να εξουδετερωθεί αυτή η παραμόρφωση. Το τύλιγμα αυτό ονομάζεται τύλιγμα αντιστάθμισης [64]. Τα καλύμματα στερεώνονται με κοχλίες στο ζύγωμα και χρησιμεύουν στο να στηρίζουν τον άξονα του δρομέα και τον ψηκτροφορέα και παράλληλα στο να προφυλάσσουν το εσωτερικό της μηχανής από εξωτερικές δυνάμεις. Ο ψηκτροφορέας είναι το σύστημα στο οποίο στερεώνονται οι ψηκτροθήκες και αποτελείται από ένα σιδερένιο δακτύλιο , από τους βραχίονες των ψηκτροθήκων και από τις ίδιες τις ψηκτροθήκες. Στο σιδερένιο δακτύλιο στερεώνονται οι βραχίονες υποστήριξης των ψηκτροθήκων και στις ψηκτροθήκες τοποθετούνται οι ψήκτρες. Οι ψήκτρες είναι συνήθως τεμάχια από σκληρό άνθρακα ή γραφίτη ή ακόμα και από μίγμα άνθρακα και χαλκού. Οι ψήκτρες τοποθετούνται μέσα στις ψηκτροθήκες και πιέζονται από ελατήρια ώστε να έχουν καλή επαφή με την επιφάνεια του συλλέκτη. Ο δρομέας από την άλλη μεριά αποτελείται από τον άξονα , τον πυρήνα του επαγωγικού τυμπάνου , το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου , το συλλέκτη , τον ανεμιστήρα και από την πλήμνη. Ο άξονας φέρει το επαγωγικό τύμπανο , το συλλέκτη και τον ανεμιστήρα και καθώς στρέφεται στρέφονται μαζί του και τα τρία αυτά τμήματα. Ο πυρήνας του επαγωγικού τυμπάνου ή αλλιώς του δρομέα παρέχει μια οδό για τις μαγνητικές γραμμές των πόλων αφού έχει μικρή μαγνητική αντίσταση και περιβάλλεται από το τύλιγμα του τυμπάνου. Το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου κατασκευάζεται από μονωμένο χάλκινο αγωγό κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής. Ο αγωγός κυκλικής διατομής χρησιμοποιείται κυρίως στις μηχανές μικρής ισχύος ή στις μηχανές υψηλής τάσης. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις προτιμάται ο αγωγός ορθογωνικής διατομής. Ο συλλέκτης κατασκευάζεται από πολλά χάλκινα ελάσματα τα οποία ονομάζονται τομείς του συλλέκτη. Ο σκοπός του συλλέκτη είναι να παίρνει (κινητήρας) ή να μεταβιβάζει (γεννήτρια) το ρεύμα. Ο ανεμιστήρας στερεώνεται στον άξονα και κατά την περιστροφή του δημιουργεί ρεύμα αέρα το οποίο εισέρχεται στη μηχανή από το άνοιγμα του ενός καλύμματος και εξέρχεται από το άνοιγμα του άλλου καλύμματος και χρησιμοποιείται για την ψύξη του κινητήρα. Τέλος η πλήμνη χρησιμοποιείται στις μηχανές μεγάλης σχετικά ισχύος για να μειωθεί το βάρος των μαγνητικών ελασμάτων αλλά και για να διευκολυνθεί η ψύξη του πυρήνα [65]. Ανάλογα με την προέλευση του ρεύματος διέγερσης οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος διακρίνονται στους κινητήρες με ανεξάρτητη

διέγερση (separately excited dc motors) και στους κινητήρες με αυτοδιέγερση (self-excited dc motors). Στους κινητήρες με ανεξάρτητη ή ξένη διέγερση μια εξωτερική πηγή συνεχούς τάσης τροφοδοτεί το τύλιγμα διέγερσης και μια άλλη τροφοδοτεί το τύλιγμα του τυμπάνου. Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτών των κινητήρων φαίνεται στο σχήμα 12.



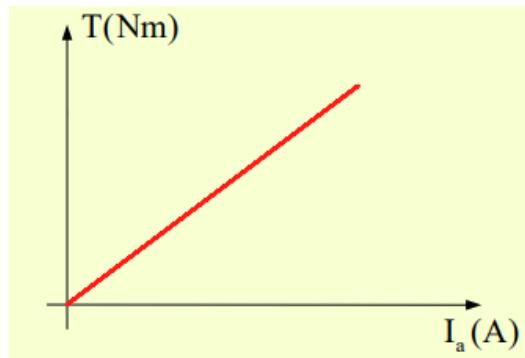
**Σχήμα 12:** Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση [67]

Όταν αυτοί οι κινητήρες έχουν σταθερή τάση τροφοδοσίας τυμπάνου  $V$  και σταθερή μαγνητική ροή φ η ταχύτητα  $\omega_r$  μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της ροπής  $T_e$  όπως φαίνεται και στο σχήμα 13.



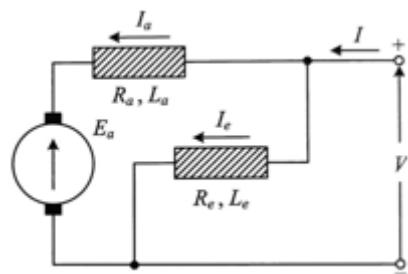
**Σχήμα 13:** Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση [67]

Ο ρυθμός μάλιστα με τον οποίο μειώνεται η ταχύτητα καθώς αυξάνεται η ροπή όπως φαίνεται και στο σχήμα 13 είναι μικρός και για αυτόν τον λόγο οι κινητήρες με ξένη διέγερση χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτείται σχεδόν σταθερή ταχύτητα αλλά όχι υψηλή ροπή εκκίνησης. Τέτοιες εφαρμογές είναι οι ανεμιστήρες, οι φυγοκεντρικές αντλίες κ.α.. Όσον αφορά το ρεύμα τυμπάνου για τον ίδιο κινητήρα αυτό αυξάνεται με την αύξηση της ροπής όπως φαίνεται και στο σχήμα 14.



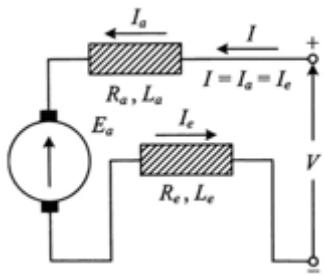
**Σχήμα 14:** Χαρακτηριστική ροπής-ρεύματος τυμπάνου κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση [66]

Η ταχύτητα των κινητήρων με ξένη διέγερση ελέγχεται είτε με τη ρύθμιση της τάσης τροφοδοσίας του τυλίγματος τυμπάνου είτε με τη ρύθμιση της μαγνητικής ροής. Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης του τυλίγματος διέγερσης με το τύλιγμα του τυμπάνου οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με αυτοδιέγερση διακρίνονται στους κινητήρες με παράλληλη διέγερση (shunt dc motors), στους κινητήρες με διέγερση σειράς (series dc motors) και στους κινητήρες με σύνθετη διέγερση (compounded dc motors). Σε αντίθεση με τους κινητήρες με ξένη διέγερση στους κινητήρες με παράλληλη διέγερση το τύλιγμα διέγερσης και το τύλιγμα τυμπάνου τροφοδοτούνται από την ίδια πηγή συνεχούς τάσης  $V$  και τα δυο αυτά τυλίγματα τοποθετούνται παράλληλα. Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτών των κινητήρων φαίνεται στο σχήμα 15.



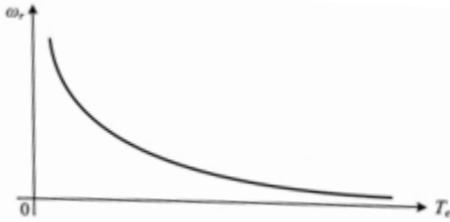
**Σχήμα 15:** Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος με παράλληλη διέγερση [67]

Παρόλο που οι κινητήρες με παράλληλη διέγερση συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο όπως συμπεριφέρονται και οι κινητήρες με ξένη διέγερση στα κινητήρια συστήματα χρησιμοποιούνται περισσότερο οι κινητήρες με ξένη διέγερση καθώς εξασφαλίζουν τον ανεξάρτητο έλεγχο της μαγνητικής ροής και του ρεύματος τυμπάνου. Στους κινητήρες με διέγερση σειράς το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του τυμπάνου. Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτών των κινητήρων φαίνεται στο σχήμα 16.



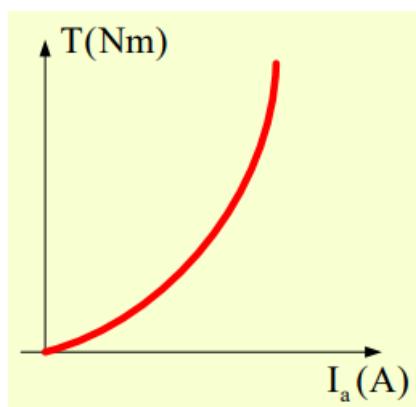
**Σχήμα 16:** Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς [67]

Στους κινητήρες αυτούς η χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής φαίνεται στο σχήμα 17.



**Σχήμα 17:** Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς [67]

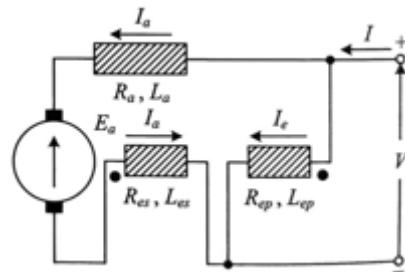
Όταν η ροπή τείνει στο μηδέν η ταχύτητα αυτών των κινητήρων όπως φαίνεται και στο σχήμα 17 αποκτά πολύ μεγάλες τιμές και για αυτόν τον λόγο οι κινητήρες αυτοί δεν πρέπει να λειτουργούν χωρίς φορτίο. Οι κινητήρες με διέγερση σειράς όπως φαίνεται και στο σχήμα 18 παρέχουν τη μεγαλύτερη ροπή ανά μονάδα ρεύματος τυμπάνου από κάθε άλλο κινητήρα συνεχούς ρεύματος και για αυτόν τον λόγο οι κινητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με υψηλή ροπή εκκίνησης και μεγάλες υπερφορτίσεις.



**Σχήμα 18:** Χαρακτηριστική ροπής-ρεύματος τυμπάνου κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς [66]

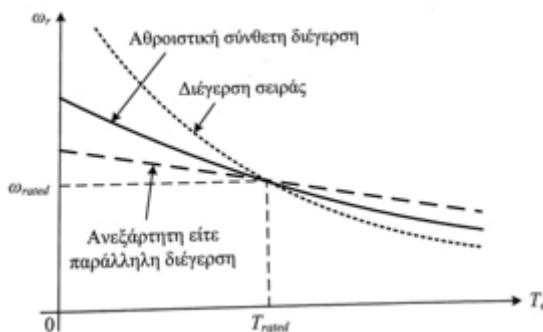
Η ταχύτητα των κινητήρων με διέγερση σειράς ελέγχεται με τη ρύθμιση της τάσης τροφοδοσίας τους. Μειώνοντας την τάση αυτή μειώνεται και η ταχύτητα του κινητήρα ανεξάρτητα από τη ροπή του

φορτίου. Οι κινητήρες με σύνθετη διέγερση διαθέτουν ταυτόχρονα και τα δυο τυλίγματα διέγερσης που αναφέρθηκαν προηγουμένως δηλαδή και το τύλιγμα του κινητήρα με παράλληλη διέγερση αλλά και το τύλιγμα του κινητήρα με διέγερση σειράς και έτσι συνδυάζουν τα επιμέρους χαρακτηριστικά αυτών των δυο κινητήρων. Ανάλογα με το αν το τύλιγμα του κινητήρα με παράλληλη διέγερση συνδέεται πιο κοντά στο τύλιγμα τυμπάνου σε σχέση με το τύλιγμα του κινητήρα με διέγερση σειράς οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με σύνθετη διέγερση διακρίνονται στους κινητήρες με αθροιστική σύνθετη διέγερση (cumulatively compounded dc motors) και στους κινητήρες με διαφορική σύνθετη διέγερση (differentially compounded dc motors). Το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα με αθροιστική σύνθετη διέγερση φαίνεται στο σχήμα 19.



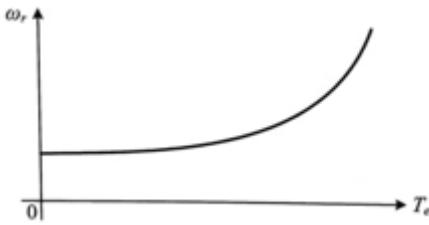
**Σχήμα 19:** Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος με αθροιστική σύνθετη διέγερση [67]

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 20 σε μικρές ροπές ο κινητήρας με αθροιστική σύνθετη διέγερση παρουσιάζει τη συμπεριφορά ενός κινητήρα με παράλληλη διέγερση ενώ σε μεγάλες ροπές ο κινητήρας με αθροιστική σύνθετη διέγερση τείνει να συμπεριφέρεται ως κινητήρας με διέγερση σειράς.



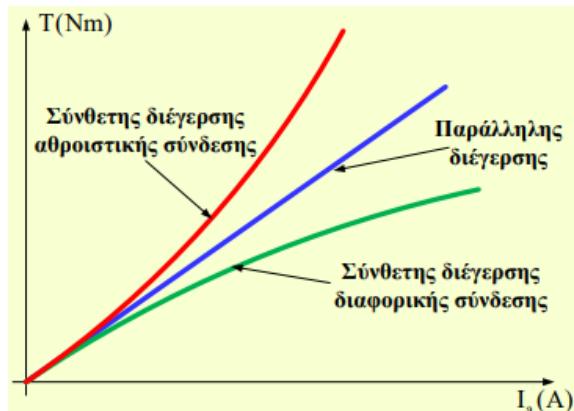
**Σχήμα 20:** Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής κινητήρα συνεχούς ρεύματος με αθροιστική σύνθετη διέγερση σε συνδυασμό με το κινητήρα με παράλληλη διέγερση και με διέγερση σειράς [67]

Ο κινητήρας με αθροιστική σύνθετη διέγερση μετατρέπεται σε κινητήρα με διαφορική σύνθετη διέγερση εναλλάσσοντας τον παράλληλο κλάδο με τον κλάδο σειράς του σχήματος 19. Η χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής αυτών των κινητήρων φαίνεται στο σχήμα 21.



**Σχήμα 21:** Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διαφορική σύνθετη διέγερση [67]

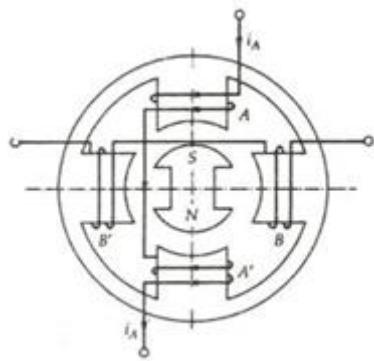
Όπως φαίνεται και στο σχήμα 21 η ταχύτητα του κινητήρα με διαφορική σύνθετη διέγερση αυξάνεται με την αύξηση της ροπής με συνέπεια την ασταθή λειτουργία του κινητήρα. Επίσης στον κινητήρα με διαφορική σύνθετη διέγερση η αύξηση του ρεύματος τυμπάνου οδηγεί στην αύξηση της ροπής όπως φαίνεται και στο σχήμα 22. Επιπλέον για το ίδιο ρεύμα τυμπάνου και για το ίδιο ρεύμα στο παράλληλο κλάδο η παραγόμενη ροπή στον κινητήρα με διαφορική σύνθετη διέγερση είναι μικρότερη από αυτήν του κινητήρα με παράλληλη διέγερση ενώ για τον κινητήρα με αθροιστική σύνθετη διέγερση ισχύει το ανάποδο.



**Σχήμα 22:** Χαρακτηριστική ροπής-ρεύματος τυμπάνου κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διαφορική σύνθετη διέγερση σε συνδυασμό με το κινητήρα με παράλληλη διέγερση και με αθροιστική σύνθετη διέγερση [66]

Εκτός από τις παραπάνω κατηγορίες κινητήρων υπάρχουν και οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες (permanent magnet dc motors) οι οποίοι προκειμένου να δημιουργήσουν το μαγνητικό πεδίο του στάτη δεν χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνήτες όπως οι προηγούμενοι αλλά μόνιμους μαγνήτες. Οι κινητήρες αυτοί είναι συνήθως κινητήρες μικρής ισχύος και για αυτόν τον λόγο δεν χρησιμοποιούνται σε μεγάλα κινητήρια συστήματα [66],[67]. Κάποιοι άλλοι ειδικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται στα ρομπότ και σε πολλές άλλες εφαρμογές είναι οι βηματικοί κινητήρες (stepper motors) και οι σερβοκινητήρες (servo motors). Οι βηματικοί κινητήρες είναι κινητήρες χωρίς ψήκτρες οι οποίοι προκειμένου να εκτελέσουν μια πλήρη περιστροφή εκτελούν

μικρά βήματα δηλαδή διαδοχικές περιστροφικές κινήσεις κατά μια συγκεκριμένη και σταθερή γωνία  $\theta$ . Η γωνία αυτή η οποία ονομάζεται γωνία βήματος (step angle) κυμαίνεται συνηθώς μεταξύ  $1,8^\circ$  και  $90^\circ$  και επομένως το πλήθος των βημάτων για μια πλήρη περιστροφή κυμαίνεται μεταξύ του 200 και του 4 αντίστοιχα. Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους οι βηματικοί κινητήρες διακρίνονται στους βηματικούς κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (permanent magnet stepper motors), στους βηματικούς κινητήρες μεταβλητής αντίδρασης (variable reluctance stepper motors) και στους υβριδικούς βηματικούς κινητήρες (hybrid synchronous stepper motors). Στους βηματικούς κινητήρες μόνιμου μαγνήτη ο δρομέας είναι ένας μόνιμος μαγνήτης και εφαρμόζοντας τάση σε δυο αντιδιαμετρικούς μαγνητικούς πόλους, τα τυλίγματα των οποίων συνδέονται σε σειρά και ανεξάρτητα από τα τυλίγματα των άλλων πόλων σχηματίζοντας μια φάση, οι δυο πόλοι του μαγνήτη έλκονται από τα δυο τυλίγματα της φάσης και έτσι ο δρομέας εκτελεί περιστροφική κίνηση μέχρι να ευθυγραμμιστεί ξανά με τα τυλίγματα της αντίστοιχης φάσης. Ένα παράδειγμα βηματικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη φαίνεται στο σχήμα 23.



**Σχήμα 23:** Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη [69]

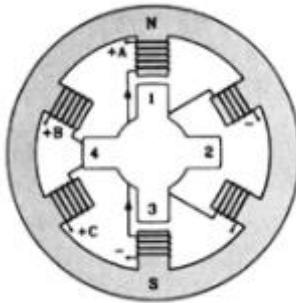
Ο βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη του σχήματος 23 έχει γωνία βήματος  $90^\circ$  και δυο φάσεις την φάση Α και την φάση Β. Προκειμένου ο δρομέας να εκτελέσει μια πλήρη περιστροφή ξεκινώντας από την θέση του σχήματος 23 και με φορά ίδια με την φορά των δεικτών του ρολογιού θα πρέπει στους ακροδέκτες της κάθε φάσης να εφαρμοστεί η τάση που φαίνεται στον πίνακα 1 αλλά και με την σειρά που φαίνεται σε αυτόν.

A	A'	B	B'	$\theta$
0	0	GND	V+	90°
GND	V+	0	0	180°
0	0	V+	GND	270°
V+	GND	0	0	360°

**Πίνακας 1:** Αλληλουχία συνδυασμών τάσης για μια πλήρη περιστροφή βηματικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη με γωνία βήματος 90°

Προκειμένου να μειωθεί η γωνία βήματος δηλαδή η γωνία θ υπάρχουν τρεις τρόποι. Ο πρώτος τρόπος είναι με την αύξηση του πλήθους των μαγνητικών πόλων στο στάτη και αρά με την αύξηση των φάσεων , ο δεύτερος τρόπος είναι με τον διαχωρισμό του δρομέα σε εναλλασσόμενα τμήματα μόνιμων μαγνητών βόρειου και νότιου πόλου και ο τρίτος τρόπος είναι με τη μέθοδο μισού βήματος στην οποία αντί να διεγείρεται μια φάση κάθε φορά διεγείρονται δυο φάσεις με αποτέλεσμα ο δρομέας να εκτελεί κάθε φορά περιστροφική κίνηση κατά μια γωνία θ' ίση με την μισή γωνία θ. Έτσι για παράδειγμα αν ο βηματικός κινητήρας ήταν αυτός του σχήματος 23 και εφαρμοζόταν η μέθοδος μισού βήματος η γωνία βήματος θα ήταν 45° και επομένως για μια πλήρη περιστροφή θα χρειαζόντουσαν οκτώ αλληλουχίες συνδυασμών τάσης δηλαδή οκτώ βήματα. Οι βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν απλή κατασκευή , μικρή ροπή αδράνειας , παράγοντα χαμηλή ροπή σε χαμηλές στροφές και έχουν το χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τους άλλους δυο τύπους βηματικών κινητήρων [70]. Στους βηματικούς κινητήρες μεταβλητής αντίδρασης ο δρομέας δεν είναι μόνιμος μαγνήτης αλλά ένα κυλινδρικό τμήμα μαλακού σιδήρου με μικρότερη μαγνητική αντίσταση από αυτήν του αέρα και με προεξοχές στην εξωτερική επιφάνειά του. Σε κάθε περιστροφική κίνηση του δρομέα κάποιες από τις προεξοχές αυτές συμπίπτουν με κάποιους από τους μαγνητικούς πόλους του στάτη ενώ οι υπόλοιπες προεξοχές είναι μετατοπισμένες δεξιά ή αριστερά από αυτούς. Καθώς διεγείρεται η κάθε φάση του βηματικού κινητήρα τα δυο τυλίγματα της φάσης μαγνητίζονται σχηματίζοντας έτσι ένα βόριο και ένα νότιο πόλο με αποτέλεσμα μαγνητική ροή να περνάει μέσα από εκείνη την προεξοχή του δρομέα , ή δόντι όπως αλλιώς ονομάζεται , που βρίσκεται πιο κοντά στο βόριο πόλο προς την αντιδιαμετρική της που βρίσκεται πιο κοντά στον νότιο πόλο ακολουθώντας έτσι τον δρόμο με την μικρότερη μαγνητική αντίσταση αφού στα σημεία που ο δρομέας δεν έχει προεξοχή υπάρχει αέρας. Με αυτόν τον τρόπο ο δρομέας περιστρέφεται εκτελώντας κάθε φορά ένα συγκεκριμένο βήμα το οποίο προκύπτει από τον αριθμό των μαγνητικών πόλων αλλά και από τον αριθμό των προεξοχών του δρομέα. Τα τυλίγματα της κάθε φάσης συνδέονται σε σειρά όπως και στον βηματικό κινητήρα μόνιμου μαγνήτη με τη διαφορά ότι στον βηματικό κινητήρα μεταβλητής

αντίδρασης η μια άκρη της κάθε φάσης συνδέεται σε ένα κοινό σημείο ενώ στην άλλη εφαρμόζεται η τάση διέγερσης για την περιστροφή του δρομέα. Ένα παράδειγμα βηματικού κινητήρα μεταβλητής αντίδρασης φαίνεται στο σχήμα 24.



**Σχήμα 24:** Βηματικός κινητήρας μεταβλητής αντίδρασης [71]

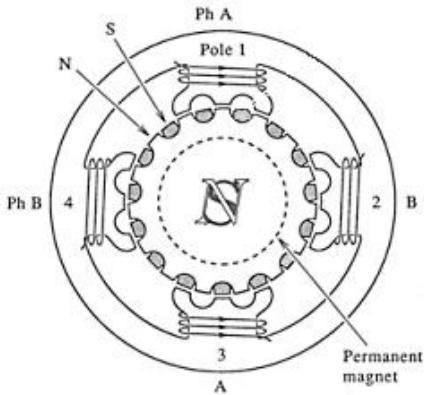
Ο βηματικός κινητήρας μεταβλητής αντίδρασης του σχήματος 24 έχει γωνία βήματος  $30^\circ$  και τρεις φάσεις, την φάση A, την φάση B και την φάση C. Προκειμένου ο δρομέας να εκτελέσει μια πλήρη περιστροφή ξεκινώντας από την θέση του σχήματος 24 και με φορά ίδια με την φορά των δεικτών του ρολογιού θα πρέπει στους ακροδέκτες της κάθε φάσης να εφαρμοστεί η τάση που φαίνεται στον πίνακα 2 αλλά και με την σειρά που φαίνεται σε αυτόν.

A	B	C	$\theta$
0	V+	0	30°
0	0	V+	60°
V+	0	0	90°
0	V+	0	120°
0	0	V+	150°
V+	0	0	180°
0	V+	0	210°
0	0	V+	240°
V+	0	0	270°
0	V+	0	300°
0	0	V+	330°
V+	0	0	360°

**Πίνακας 2:** Αλληλουχία συνδυασμών τάσης για μια πλήρη περιστροφή βηματικού κινητήρα μεταβλητής αντίδρασης με γωνία βήματος 30° [71]

Η μείωση της γωνίας βήματος στους βηματικούς κινητήρες μεταβλητής αντίδρασης επιτυγχάνεται είτε με την αύξηση των προεξοχών του δρομέα και των μαγνητικών πόλων του στάτη είτε με την μέθοδο μισού βήματος [72]. Η έλλειψη μόνιμου μαγνήτη στον δρομέα του βηματικού κινητήρα μεταβλητής αντίδρασης έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ονομαστικής ροπής αλλά δημιουργεί το πλεονέκτημα της ελεύθερης κίνησης του δρομέα όταν τα πηνία δεν διαρρέονται από ρεύμα. Οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των βηματικών κινητήρων μόνιμου μαγνήτη και των βηματικών κινητήρων μεταβλητής αντίδρασης. Οι κινητήρες αυτοί αποτελούνται από έναν μαγνήτη στον οποίο οι δυο πόλοι είναι δυο ξεχωριστή κύλινδροι με δόντια στην εξωτερική τους επιφάνεια. Ο ένας από αυτούς τους δυο κυλίνδρους είναι ο νότιος πόλος και ο άλλος είναι ο βόρειος πόλος. Τα δόντια αυτών των δυο κυλίνδρων δεν συμπίπτουν μεταξύ τους αλλά ο ένας κύλινδρος είναι μετατοπισμένος από τον άλλον κατά ένα δόντι με αποτέλεσμα σε μια απεικόνιση της πάνω όψης του δρομέα να φαίνονται συνεχόμενα δόντια δηλαδή δόντια που ακολουθούν το ένα το άλλο χωρίς να υπάρχουν κενά μεταξύ τους όπως συμβαίνει στους δυο ξεχωριστούς κυλίνδρους του

βόρειου και νότιου πόλου. Επίσης λόγω αυτής της μετατόπισης κατά ένα δόντι του πάνω κυλίνδρου με αυτόν του κάτω στην ίδια απεικόνιση το ένα δόντι θα είναι ο νότιος πόλος και το αμέσως επόμενο θα είναι ο βόρειος πόλος. Εκτός όμως από τον δρομέα στους υβριδικούς βηματικούς κινητήρες υπάρχουν δόντια και στους μαγνητικούς πόλους του στάτη. Εφαρμόζοντας τάση στους κατάλληλους μαγνητικούς πόλους του στάτη τα δόντια των πόλων μαγνητίζονται με αποτέλεσμα να περιστρέφεται ο δρομέας κατά μια συγκεκριμένη γωνία  $\theta$ . Ένα παράδειγμα υβριδικού βηματικού κινητήρα φαίνεται στο σχήμα 25.



**Σχήμα 25:** Υβριδικός βηματικός κινητήρας [73]

Οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες έχουν εξαιρετική δυναμική ροπή και πολύ μικρή γωνία βήματος γεγονός που τους προσδίδει υψηλή ακρίβεια. Τέλος τα κινητά τους μέρη μπορούν να περιστρέφονται σε υψηλές ταχύτητες σε σχέση με τους βηματικούς κινητήρες των άλλων δυο τύπων. Λόγω των πλεονεκτημάτων αυτών οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες είναι οι πιο διαδεδομένοι σε σχέση με τους άλλους δυο τύπους βηματικών κινητήρων. Ανάλογα με τα τυλίγματα του στάτη οι βηματικοί κινητήρες μπορούν να διαχωριστούν στους μονοπολικούς βηματικούς κινητήρες (unipolar stepper motors) και στους διπολικούς βηματικούς κινητήρες (bipolar stepper motors). Στους μονοπολικούς βηματικούς κινητήρες η κάθε φάση έχει μια ενδιάμεση ελικοτομή (λήψη) και έτσι για κάθε φάση υπάρχουν τρια καλώδια που συνεχίζουν μέχρι και το εξωτερικό περίβλημα των κινητήρων. Στο ενδιάμεσο καλώδιο συνδέεται η τάση διέγερσης και σε ένα από τα δυο ακριανά η γείωση και έτσι το ρεύμα κάθε φορά διαρρέει το μισό τμήμα της φάσης. Συνδέοντας το μεσαίο καλώδιο στην τροφοδοσία και αλλάζοντας το καλώδιο το οποίο είναι συνδεδεμένο με την γείωση δηλαδή συνδέοντας την μια φορά το ένα άκρο της φάσης στη γείωση και την άλλη το άλλο άκρο αντιστρέφεται ο βόρειος και ο νότιος πόλος. Αυτό το χαρακτηριστικό απλοποιεί το κύκλωμα ελέγχου αλλά παράλληλα προσφέρει παραγόμενη ροπή ίση με την μισή που θα παραγόταν με τον αντίστοιχο διπολικό βηματικό κινητήρα. Αντίθετα στους διπολικούς βηματικούς κινητήρες δεν υπάρχει αυτή η ενδιάμεση ελικοτομή (λήψη) και έτσι για κάθε φάση δυο καλώδια συνεχίζουν μέχρι και το εξωτερικό περίβλημα των κινητήρων. Στο ένα από αυτά τα δυο καλώδια συνδέεται η τάση διέγερσης και στο

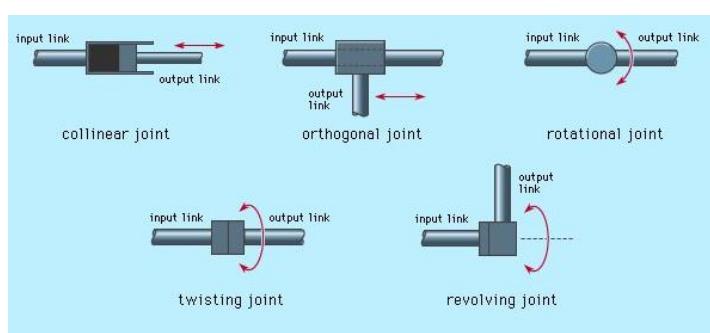
άλλο η γείωση και έτσι το ρεύμα κάθε φορά διαρρέει όλο το τμήμα της φάσης με αποτέλεσμα οι κινητήρες αυτοί να παράγουν μεγαλύτερη ροπή από τους αντίστοιχους μονοπολικούς. Το πλεονέκτημα αυτό αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι οι διπολικοί βηματικοί κινητήρες έχουν πιο πολύπλοκο κύκλωμα ελέγχου από ότι οι μονοπολικοί. Σε αυτούς τους κινητήρες αντιστρέφοντας την σύνδεση των καλωδίων της κάθε φάσης αντιστρέφεται ο βόρειος και ο νότιος πόλος [68]. Οι σερβοκινητήρες είναι κινητήρες οι οποίοι ανήκουν σε ένα κύκλωμα ελέγχου κλειστού βρόχου για το έλεγχο της γωνίας περιστροφής, της ταχύτητας περιστροφής και της φοράς περιστροφής του άξονά τους. Οι σερβοκινητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως στα ρομπότ είναι είτε σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος (dc servo motors) είτε σερβοκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (ac servo motors). Η κύρια διαφορά αυτών των δυο κινητήρων είναι ότι στους σερβοκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος η ταχύτητα των κινητήρων ελέγχεται μεταβάλλοντας την συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης που εφαρμόζεται σε αυτούς αλλά και τον αριθμό των μαγνητικών πόλων του στάτη ενώ στους σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος η ταχύτητα των κινητήρων είναι ανάλογη της συνεχής τάσης που εφαρμόζεται σε αυτούς για σταθερό φορτίο στον άξονα τους. Οι σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος μπορεί να είναι είτε σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες είτε σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες. Στους σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες χρησιμοποιούνται κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη οι οποίοι διαθέτουν συλλέκτη και ψήκτρες (brushed dc motors). Οι ψήκτρες έρχονται σε επαφή με τον συλλέκτη και ο συλλέκτης με το τύλιγμα του τυμπάνου. Καθώς ο άξονας του κινητήρα περιστρέφεται μαζί με αυτόν περιστρέφεται και ο συλλέκτης ενώ οι ψήκτρες παραμένουν σε σταθερό σημείο και το ρεύμα διαρρέεται μέσω αυτών αλλά και μέσω του συλλέκτη στο τύλιγμα του τυμπάνου. Λόγω της κατασκευαστικής δομής του συλλέκτη αλλά και της σύνδεσής του με το τύλιγμα του τυμπάνου η περιστροφή του οδηγεί στην αλλαγή της φοράς του ρεύματος που διαρρέει το τύλιγμα του τυμπάνου και αυτό με την σειρά του οδηγεί στην αντιστροφή του βόρειου και νότιο πόλου του μαγνητικού πεδίου του τυμπάνου. Με αυτόν τον τρόπο ο άξονας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη με συλλέκτη και ψήκτρες εκτελεί συνεχόμενη περιστροφική κίνηση μέχρις ότου διακοπεί η τροφοδοσία τους αφού τότε θα πάψει να υπάρχει το μαγνητικό πεδίο του δρομέα το οποίο σε κατάσταση λειτουργίας αλληλοεπιδρά με το μόνιμο μαγνητικό πεδίου του στάτη φαινόμενο πάνω στο οποίο στηρίζεται η λειτουργία των κινητήρων αυτών. Προκειμένου η περιστροφική κίνηση του άξονα των κινητήρων να είναι ομαλή χρησιμοποιούνται πολλά τυλίγματα στον δρομέα και το ρεύμα διαρρέει κάθε ένα τύλιγμα με συγκεκριμένη σειρά η οποία ρυθμίζεται από τον συλλέκτη. Στους σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες χρησιμοποιούνται κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη οι οποίοι δεν διαθέτουν συλλέκτη και ψήκτρες (brushless dc motors). Στους κινητήρες αυτούς σε αντίθεση με τους προηγούμενους ο μόνιμος μαγνήτης δεν βρίσκεται στον στάτη αλλά στον δρομέα ο οποίος μπορεί να είναι είτε εξωτερικά του στάτη (outrunner dc brushless motors)

είτε εσωτερικά του στάτη (inrunner dc brushless motors). Αυτοί οι κινητήρες διαθέτουν αισθητήρες hall (hall sensors) προκειμένου ο ηλεκτρονικός ελεγκτής με τον οποίο είναι συνδεδεμένοι να γνωρίζει την θέση του δρομέα ως προς τον στάτη για να μπορεί να διεγείρει τα κατάλληλα τυλίγματα με σκοπό να περιστρέψει τον δρομέα. Οι κινητήρες αυτοί έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη με ψήκτρες και συλλέκτη και αναπτύσσουν μεγαλύτερες ταχύτητες και επιταχύνσεις από αυτούς. Επίσης οι κινητήρες αυτοί έχουν μικρότερο ηλεκτρικό θόρυβο από τους αντίστοιχους με ψήκτρες και συλλέκτη αλλά είναι πιο ακριβοί από αυτούς [74]. Οι σερβοκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να είναι είτε σύγχρονοι σερβοκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος είτε ασύγχρονοι σερβοκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Στους σύγχρονους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (synchronous ac motors) που χρησιμοποιούν οι σερβοκινητήρες της πρώτης από τις προηγούμενες δυο κατηγορίες εφαρμόζεται ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων στον στάτη και έτσι στο εσωτερικό των κινητήρων παράγεται ένα περιστρεφόμενο ομογενές μαγνητικό πεδίο. Αντίθετα στον δρομέα εφαρμόζεται ένα συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα και έτσι αναπτύσσεται ένα δεύτερο ομογενές μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό των κινητήρων το οποίο και τείνει να ευθυγραμμιστεί με το πρώτο με αποτέλεσμα ο δρομέας να περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα η οποία και για έναν συγκεκριμένο κινητήρα είναι ανάλογη της συχνότητας του εναλλασσόμενου ρεύματος του στάτη και δίνεται από την σχέση (3).

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (3)$$

Στην σχέση (3) η σύγχρονη ταχύτητα δίνεται σε rpm και στην ίδια σχέση το P είναι ο αριθμός των πόλων του στάτη ανά ζεύγος και το f η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος. Αντίθετα στους ασύγχρονους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (asynchronous ac motors) που χρησιμοποιούν οι σερβοκινητήρες της δεύτερης από τις προηγούμενες δυο κατηγορίες δεν εφαρμόζεται στον δρομέα συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα αλλά αυτό παράγεται στον δρομέα από επαγωγή λόγω της ηλεκτρεγερτικής δύναμης για αυτόν τον λόγο και οι κινητήρες αυτοί ονομάζονται και επαγωγικοί κινητήρες. Ο δρομέας των κινητήρων αυτών δεν περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα αλλά με μικρότερη [75]. Από τους σύγχρονους και ασύγχρονους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος αυτοί που χρησιμοποιούνται πιο πολύ στους σερβοκινητήρες είναι οι σύγχρονοι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος καθώς διακρίνονται από υψηλή πυκνότητα ροπής και εξαιρετική απόδοση [76]. Σε έναν μηχανισμό μετάδοσης κίνησης μεταφέρεται κινητική ενέργεια από ένα σώμα σε ένα άλλο χωρίς να αλλάζει το είδος της κίνησης και έτσι ένας μηχανισμός μετάδοσης κίνησης αποτελείται από τα δυο αυτά σώματα δηλαδή από το σώμα στο οποίο ξεκινάει η κίνηση και από το σώμα στο οποίο καταλήγει αλλά και από το ενδιάμεσο στοιχείο το οποίο είναι υπεύθυνο για την μεταφορά της κίνησης από το ένα στο άλλο σώμα. Σε κάποιους μηχανισμούς μετάδοσης κίνησης το ενδιάμεσο στοιχείο απουσιάζει. Κάποιοι μηχανισμοί μετάδοσης κίνησης είναι ο μηχανισμός με γρανάζια, ο μηχανισμός με γρανάζια

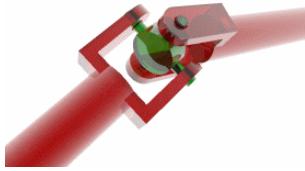
και αλυσίδες , ο μηχανισμός με ιμάντες και τροχαλίες ιμάντα , ο μηχανισμός με γρανάζια και κρεμαργίερες , ο μηχανισμός με γρανάζια και κοχλίες κ.α. [77]. Οι αρθρώσεις χρησιμοποιούνται για την κίνηση των συνδέσμων και γενικότερα των επιμέρους τμημάτων των ρομπότ. Οι αρθρώσεις με έναν βαθμό ελευθερίας χωρίζονται στις πρισματικές (prismatic) και στις στρεφόμενες (revolute) αρθρώσεις. Οι πρισματικές αρθρώσεις με την σειρά τους χωρίζονται στις συγγραμμικές αρθρώσεις (collinear joints) και στις ορθογώνιες αρθρώσεις (orthogonal joints) ενώ οι στρεφόμενες αρθρώσεις με την σειρά τους χωρίζονται στις περιστροφικές αρθρώσεις (rotational joints) , στις στρεπτικές αρθρώσεις (twisting joints) και στις ανακυκλικές αρθρώσεις (revolving joints). Στις συγγραμμικές αρθρώσεις ο άξονας που διέρχεται από το κέντρο του συνδέσμου εισόδου και είναι παράλληλος με αυτόν συμπίπτει με τον αντίστοιχο άξονα του συνδέσμου εξόδου και ο σύνδεσμος εξόδου εκτελεί μεταφορική κίνηση ως προς αυτόν τον άξονα. Στις ορθογώνιες αρθρώσεις ο άξονας που διέρχεται από το κέντρο του συνδέσμου εισόδου και είναι παράλληλος με αυτόν είναι κάθετος με τον αντίστοιχο άξονα του συνδέσμου εξόδου και ο σύνδεσμος εξόδου εκτελεί μεταφορική κίνηση ως προς τον πρώτο άξονα. Στις περιστροφικές αρθρώσεις ο σύνδεσμος εξόδου εκτελεί περιστροφική κίνηση ως προς κάθετο στον σύνδεσμο εισόδου άξονα που διέρχεται από το σημείο σύνδεσης των δυο άκαμπτων σωμάτων. Στις στρεπτικές αρθρώσεις ο άξονας που διέρχεται από το κέντρο του συνδέσμου εισόδου και είναι παράλληλος με αυτόν συμπίπτει με τον αντίστοιχο άξονα του συνδέσμου εξόδου και ο σύνδεσμος εξόδου εκτελεί περιστροφική κίνηση ως προς αυτόν τον άξονα. Τέλος στις ανακυκλικές αρθρώσεις η κίνηση του συνδέσμου εξόδου είναι ίδια με αυτήν του αντίστοιχου συνδέσμου στις στρεπτικές αρθρώσεις με την διαφορά ότι οι δυο άξονες που αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι κάθετοι μεταξύ τους. Οι αρθρώσεις αυτές φαίνονται στην εικόνα 38 [78].



**Εικόνα 38:** Κατηγορίες πρισματικών και στρεφόμενων αρθρώσεων [79]

Οι αρθρώσεις με δυο βαθμούς ελευθερίας είναι οι αρθρώσεις u (u joints) στις οποίες ο σύνδεσμος εξόδου εκτελεί περιστροφική κίνηση ως προς τους δυο κάθετους στον σύνδεσμο εισόδου άξονες οι οποίοι διέρχονται από το σημείο σύνδεσης των δυο άκαμπτων σωμάτων. Οι αρθρώσεις με τρεις βαθμούς ελευθερίας είναι οι σφαιρικές αρθρώσεις (spherical joints) στις οποίες ο σύνδεσμος εξόδου εκτελεί περιστροφική κίνηση γύρω από τους ίδιους άξονες με αυτούς στις αρθρώσεις u αλλά και

γύρω από τον άξονα που είναι παράλληλος με τον σύνδεσμο εισόδου και διέρχεται από το κέντρο του. Οι αρθρώσεις υ και οι σφαιρικές αρθρώσεις φαίνονται στην εικόνα 39 και στην εικόνα 40 αντίστοιχα [80],[81].



**Εικόνα 39:** Αρθρωση υ [80]



**Εικόνα 40:** Σφαιρική άρθρωση [81]

### 1.5.2 Υποσύστημα αίσθησης

Το υποσύστημα αίσθησης είναι υπεύθυνο για την συλλογή δεδομένων που αφορούν το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται το ρομπότ αλλά και δεδομένων που αφορούν την κατάσταση του ίδιου του ρομπότ και των επιμέρους τμημάτων του και αποτελείται από τους αισθητήρες (sensors) και από τους μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακού σήματος (A/D converters) [47]. Οι αισθητήρες μετρούν ένα φυσικό μέγεθος και το μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα. Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούνται είτε για την συλλογή πληροφοριών είτε για τον έλεγχο συστημάτων. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την συλλογή πληροφοριών παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες με στόχο να είναι διαρκώς γνωστή και κατανοητή η τρέχουσα κατάσταση των παραμέτρων ενός συστήματος. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο συστημάτων επικοινωνούν συνήθως με έναν ελεγκτή ο οποίος παράγει νέες εξόδους που ρυθμίζουν τις τιμές των μετρούμενων παραμέτρων του συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου (closed loop control systems) δηλαδή με συστήματα στα οποία η έξοδος συνδέεται με την είσοδο μέσω ενός βρόχου ανάδρασης. Στα συστήματα αυτά εισάγεται στην είσοδο η επιθυμητή τιμή της παραμέτρου του συστήματος που είναι υπό έλεγχο και η πραγματική τιμή της παραμέτρου ανακτάται από την έξοδο με τον αισθητήρα που βρίσκεται στον βρόχο ανάδρασης και μεταφέρεται στην είσοδο προκειμένου η τιμή αυτή να συγκριθεί με την επιθυμητή. Από την σύγκριση αυτή προκύπτει ένα σφάλμα το οποίο και το σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου προσπαθεί να μηδενίσει ώστε η πραγματική τιμή να πλησιάσει όσο περισσότερο γίνεται την επιθυμητή. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους, οι αισθητήρες ταξινομούνται σε ενεργούς (active sensors) και σε παθητικούς (passive sensors). Οι ενεργοί αισθητήρες προκειμένου να λειτουργήσουν θα πρέπει να τροφοδοτηθούν με μια εξωτερική

πηγή ενώ οι παθητικοί αισθητήρες δεν χρειάζονται τροφοδοσία από μια εξωτερική πηγή αφού στην έξοδό τους παρέχουν άμεσα ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της τιμής του μετρούμενου φυσικού μεγέθους [83]. Επίσης ανάλογα με την κλίμακα αναφοράς του σήματος εξόδου οι αισθητήρες διακρίνονται στους απόλυτους (absolute sensors) και στους σχετικούς (relative sensors). Στους απόλυτους αισθητήρες το σήμα εξόδου έχει ως κλίμακα αναφοράς μια απόλυτη (ακριβή) φυσική κλίμακα που είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες μέτρησης ενώ στους σχετικούς αισθητήρες το σήμα εξόδου έχει ως κλίμακα αναφοράς μια ειδική κλίμακα. Τέλος οι αισθητήρες ανάλογα με την μορφή του σήματος εξόδου τους διακρίνονται στους αναλογικούς (analog sensors) και στους ψηφιακούς (digital sensors). Στους αναλογικούς αισθητήρες το σήμα εξόδου είναι ένα αναλογικό σήμα δηλαδή ένα σήμα που αποτελείται από συνεχείς τιμές ενώ στους ψηφιακούς αισθητήρες το σήμα εξόδου είναι ένα ψηφιακό σήμα δηλαδή ένα σήμα που αποτελείται από διακριτές τιμές [82]. Τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων χωρίζονται στα στατικά χαρακτηριστικά και στα δυναμικά χαρακτηριστικά. Τα στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων αναφέρονται στην κατάσταση κατά την οποία έχει επέλθει ισορροπία μεταξύ των αισθητήρων και των μετρούμενων μεγεθών. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει τα μετρούμενα μεγέθη να είναι είτε σταθερά είτε να μεταβάλλονται πολύ αργά ώστε οι αισθητήρες να μην μπορούν να αντιληφθούν αυτές τις μεταβολές. Τα στατικά χαρακτηριστικά είναι η πιστότητα ή αλλιώς ακρίβεια (accuracy) , ή ακρίβεια προσέγγισης (precision) , η περιοχή τιμών εισόδου (range) , το συστηματικό σφάλμα (bias) , η γραμμική απόκριση (linear response) , η ευαισθησία στη μέτρηση (sensitivity to measurement) , η ευαισθησία στη διαταραχή (sensitivity to disorder) , η υστέρηση (hysteresis) , ή νεκρή ζώνη (dead zone) , το ελάχιστο σήμα κατωφλίου (threshold) και η διακριτική ικανότητα (resolution). Η πιστότητα σχετίζεται με το κατά πόσο το αποτέλεσμα που δίνει ο αισθητήρας πλησιάζει την φυσική πραγματικότητα μέσα σε ένα λογικό εύρος τιμών. Η πιστότητα εκφράζεται με τρεις τρόπους. Στον πρώτο τρόπο η πιστότητα εκφράζεται άμεσα σε μονάδες του μετρούμενου μεγέθους , στον δεύτερο τρόπο η πιστότητα εκφράζεται σαν εκατοστιαίο σφάλμα της τιμής μέτρησης και στον τρίτο τρόπο η πιστότητα εκφράζεται σαν εκατοστιαίο σφάλμα της περιοχής τιμών εισόδου. Για παράδειγμα αν σε ένα θερμόμετρο η περιοχή τιμών εισόδου είναι 0-50°C και η πιστότητα στην πρώτη περίπτωση  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  ενώ στην δεύτερη και στην τρίτη  $\pm 5\%$  τότε αν η μέτρηση και στις τρεις αυτές περιπτώσεις είναι 20°C η πραγματική τιμή της θερμοκρασίας στην πρώτη περίπτωση είναι μεταξύ 19,5°C και 20,5°C , στην δεύτερη περίπτωση είναι μεταξύ 19°C και 21°C και στην τρίτη περίπτωση είναι μεταξύ 17,5°C και 22,5°C. Η ακρίβεια προσέγγισης εκφράζει τον βαθμό ελευθερίας του αισθητήρα από τυχαία σφάλματα. Με άλλα λόγια αν παρθούν διαδοχικές μετρήσεις χωρίς να μεταβάλλονται οι συνθήκες σε κάθε μέτρηση τότε η ακρίβεια προσέγγισης δείχνει πόσο κοντά ή μακριά βρίσκονται μεταξύ τους οι τιμές των μετρήσεων αυτών. Η περιοχή τιμών εισόδου είναι η περιοχή τιμών του φυσικού μεγέθους που ο αισθητήρας μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια. Το συστηματικό σφάλμα είναι ένα σταθερό σφάλμα ίδιο σε όλη την περιοχή τιμών εισόδου του

αισθητήρα και το σφάλμα αυτό μπορεί να μηδενιστεί μέσω βαθμονόμησης (calibration). Η γραμμική απόκριση είναι ένα στατικό χαρακτηριστικό του αισθητήρα το οποίο συνδέεται με την συνάρτηση μεταφοράς του (transfer function). Η συνάρτηση μεταφοράς του αισθητήρα είναι η σχέση που συνδέει το σήμα εξόδου του αισθητήρα με το σήμα εισόδου. Η σχέση αυτή μπορεί να είναι γραμμική, πολυωνυμική, εκθετική κ.α.. Όταν η σχέση είναι γραμμική ο αισθητήρας χαρακτηρίζεται από γραμμική απόκριση. Το χαρακτηριστικό αυτό αν και επιθυμητό καθώς επιτρέπει τον ακριβή και απλό υπολογισμό της τιμής του μετρούμενου φυσικού μεγέθους από τις αντίστοιχες τιμές του σήματος εξόδου του αισθητήρα μέσω της επίλυσης μιας γραμμικής σχέσης συναντάται σπάνια αφού οι περισσότεροι αισθητήρες είναι μη γραμμικοί. Παρόλο αυτά χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα είναι δυνατή η γραμμικοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς και επομένως και η μετατροπή της απόκρισης του αισθητήρα από μη γραμμική σε γραμμική. Τα μοντέλα αυτά είναι η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων (line of least squares) και η ευθεία σύνδεσης των άκρων (line of connected ends). Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιώντας έναν πίνακα που περιέχει η ζευγάρια τιμών εισόδου-εξόδου δηλαδή η ζευγάρια ( $Q_i, Q_o$ ) υπολογίζονται αρχικά οι όροι  $a$  και  $b$  σύμφωνα με τις σχέσεις (4) και (5) αντίστοιχα

$$a = \frac{n \cdot \sum_{j=1}^n (Q_{ij} \cdot Q_{oj}) - \sum_{j=1}^n (Q_{ij}) \cdot \sum_{j=1}^n (Q_{oj})}{n \cdot \sum_{j=1}^n ((Q_{ij})^2) - (\sum_{j=1}^n (Q_{ij}))^2} \quad (4)$$

$$b = \frac{\sum_{j=1}^n (Q_{oj}) \cdot \sum_{j=1}^n ((Q_{ij})^2) - \sum_{j=1}^n (Q_{ij}) \cdot \sum_{j=1}^n (Q_{ij} \cdot Q_{oj})}{n \cdot \sum_{j=1}^n ((Q_{ij})^2) - (\sum_{j=1}^n (Q_{ij}))^2} \quad (5)$$

και στην συνέχεια σχεδιάζεται η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων η οποία δίνεται από την σχέση (6).

$$Q_o = a \cdot Q_i + b \quad (6)$$

Στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιώντας από την συνάρτηση μεταφοράς τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές εισόδου και εξόδου υπολογίζονται οι όροι  $a'$  και  $b'$  σύμφωνα με τις σχέσεις (7) και (8) αντίστοιχα

$$a' = \frac{Q_{omax} - Q_{omin}}{Q_{imax} - Q_{imin}} \quad (7)$$

$$b' = \frac{Q_{omin} \cdot Q_{imax} - Q_{omax} \cdot Q_{imin}}{Q_{imax} - Q_{imin}} \quad (8)$$

και με βάση τις τιμές των όρων αυτών και της σχέσης (9) σχεδιάζεται η ευθεία σύνδεσης των άκρων.

$$Q_o = a' \cdot Q_i + b' \quad (9)$$

Η ευαισθησία στην μέτρηση πρόκειται για το λόγο της μεταβολής του ηλεκτρικού σήματος εξόδου του αισθητήρα προς τη μεταβολή του φυσικού μεγέθους δηλαδή του σήματος εισόδου που την προκάλεσε. Η μεταβολή κάποιων στατικών χαρακτηριστικών του αισθητήρα λόγω της μεταβολής

κάποιον περιβαλλοντικών παραμέτρων ορίζεται ως η ευαισθησία στη διαταραχή. Τα χαρακτηριστικά που μεταβάλλονται συνήθως είναι η τιμή του σήματος εξόδου του αισθητήρα για μηδενική είσοδο και η ευαισθησία στην μέτρηση. Το πρώτο φαινόμενο ονομάζεται ολίσθηση του μηδενός (zero drift) ενώ το δεύτερο ολίσθηση ευαισθησίας (sensitivity drift). Η ολίσθηση του μηδενός είναι η μη μηδενική τιμή της εξόδου του αισθητήρα όταν η είσοδος είναι μηδέν και η ολίσθηση ευαισθησίας είναι το ποσό της μεταβολής της ευαισθησίας ενός αισθητήρα λόγω της μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών. Η υστέρηση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η έξοδος ενός αισθητήρα για την ίδια είσοδο διαφέρει ανάλογα με τη μορφή της μεταβολής της εισόδου του αισθητήρα. Η απόκλιση μεταξύ των διαφορετικών μετρήσεων ονομάζεται σφάλμα υστέρησης. Ως νεκρή ζώνη ορίζεται το εύρος του σήματος εισόδου για το οποίο το σήμα εξόδου είναι μηδενικό. Κάθε αισθητήρας που εμφανίζει υστέρηση εμφανίζει και νεκρή ζώνη. Ως ελάχιστο σήμα κατωφλίου ενός αισθητήρα ορίζεται η τιμή του σήματος εισόδου που απαιτείται από τον αισθητήρα ώστε να μπορέσει να το ανιχνεύσει και να ανταποκρίθει σε αυτό. Τέλος ως διακριτική ικανότητα ενός αισθητήρα ορίζεται η απαιτούμενη ελάχιστη μεταβολή του σήματος εισόδου ώστε να προκληθεί μεταβολή στο σήμα εξόδου του αισθητήρα [83]. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά περιγράφουν την συμπεριφορά του αισθητήρα μεταξύ της στιγμής κατά την οποία το σήμα εισόδου μεταβάλλεται έως την στιγμή κατά την οποία το σήμα εξόδου σταθεροποιείται εκ νέου. Όταν το σήμα εξόδου σταθεροποιείται ακαριαία ο αισθητήρας είναι μηδενικής τάξης και η συνάρτηση μεταφοράς ενός τέτοιου αισθητήρα δίνεται από την σχέση (10).

$$\frac{q_o}{q_i} = K \quad (10)$$

Το  $K$  στην σχέση (10) είναι η στατική ευαισθησία του αισθητήρα. Ο αισθητήρας μηδενικής τάξης δεν έχει δυναμικά χαρακτηριστικά αφού η έξοδος ανταποκρίνεται ακαριαία στην είσοδο. Όταν το σήμα εξόδου ακολουθεί την πορεία μιας εκθετικής συνάρτησης μέχρι τελικά να σταθεροποιηθεί ο αισθητήρας είναι πρώτης τάξης και η συνάρτηση μεταφοράς ενός τέτοιου αισθητήρα δίνεται από την σχέση (11).

$$\frac{q_o}{q_i} = \frac{K}{1+\tau \cdot D} \quad (11)$$

Στην σχέση (11) το  $K$  είναι η στατική ευαισθησία και το  $\tau$  η σταθερά χρόνου (time constant). Τέλος όταν το σήμα εξόδου εκτελεί ταλαντώσεις μέχρι τελικά να σταθεροποιηθεί ο αισθητήρας είναι δεύτερης τάξης και η συνάρτηση μεταφοράς ενός τέτοιου αισθητήρα δίνεται από την σχέση (12).

$$\frac{q_o}{q_i} = \frac{\omega^2 \cdot K}{D^2 + 2 \cdot \varepsilon \cdot \omega \cdot D + \omega^2} \quad (12)$$

Στην σχέση (12) το  $K$  είναι η στατική ευαισθησία, το  $\varepsilon$  ο λόγος ή συντελεστής απόσβεσης (damping ratio) και το  $\omega$  η μη αποσβενούμενη φυσική συγχύτητα (undamped natural frequency) [84]. Οι

αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στα ρομπότ χωρίζονται στους ενδοστρεφείς (proprioceptive sensors) και στους εξωστρεφείς (heteroceptive sensors). Αυτή η κατηγοριοποίηση των αισθητήρων δεν αφορά άμεσα τον τύπο των αισθητήρων αλλά το είδος της χρήσης τους όταν αυτοί τοποθετούνται στα ρομπότ. Συγκεκριμένα οι ενδοστρεφείς αισθητήρες είναι οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της θέσης και της ταχύτητας των διάφορων επενεργητών που υπάρχουν στο ρομπότ ενώ οι εξωστρεφείς αισθητήρες είναι οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για να κατευθύνουν τις κινήσεις και τις λειτουργίες του ρομπότ σε σχέση με τα αντικείμενα που υπάρχουν στον περιβάλλοντα χώρο αλλά και σε σχέση με το πώς αυτά είναι διατεταγμένα. Κάποια παραδείγματα ενδοστρεφών αισθητήρων είναι οι αισθητήρες ταχύτητας δηλαδή τα ταχύμετρα , οι αισθητήρες δύναμης-ροπής , τα ποτενσιόμετρα κ.α. και κάποια παραδείγματα εξωστρεφών αισθητήρων είναι οι αισθητήρες αφής , οι αισθητήρες προσέγγισης , οι κάμερες κ.α. [85]. Οι μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακού σήματος είναι διατάξεις οι οποίες όπως δηλώνει και το όνομά τους μετατρέπουν ένα αναλογικό σήμα όπως για παράδειγμα ο ήχος που ηχογραφείται από ένα μικρόφωνο σε ψηφιακό.

### 1.5.3 Υποσύστημα ελέγχου

Το υποσύστημα ελέγχου είναι υπεύθυνο για την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται από το υποσύστημα αίσθησης και την δημιουργία των κατάλληλων σημάτων ελέγχου που τροφοδοτούνται στο υποσύστημα κίνησης για την εκτέλεση της επιθυμητής ενέργειας από το ρομπότ και αποτελείται από τους ψηφιακούς υπολογιστές ή ελεγκτές (digital computers or controllers) και από τους μετατροπείς ψηφιακού σε αναλογικού σήματος (D/A converters) [47]. Το κύριο στοιχείο ενός ψηφιακού υπολογιστή ή ελεγκτή μπορεί να είναι είτε μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας (central processing unit) η οποία υλοποιείται σε ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό κύκλωμα (integrated circuit) το οποίο ονομάζεται μικροεπεξεργαστής (microprocessor) είτε ένας μικροελεγκτής (microcontroller). Κάθε μικροεπεξεργαστής αποτελείται από την αριθμητική και λογική μονάδα (arithmetic and logic unit) , από την μονάδα ελέγχου (control unit) και από τους καταχωρητές (registers). Η αριθμητική και λογική μονάδα είναι υπεύθυνη για την εκτέλεση αριθμητικών και λογικών πράξεων. Μια τυπική αριθμητική και λογική μονάδα είναι υπεύθυνη για την εκτέλεση αριθμητικών και λογικών πράξεων. Μια τυπική αριθμητική και λογική μονάδα εκτελεί μόνο δυο αριθμητικές πράξεις την πρόσθεση και την αφαίρεση ακέραιων αριθμών. Όταν η αριθμητική και λογική μονάδα εκτελεί και άλλες πράξεις μεταξύ ακέραιων τότε αυτή δεν ονομάζεται αριθμητική και λογική μονάδα αλλά μονάδα ακέραιων (integer unit) ή μονάδα σταθερής υποδιαστολής (fixed point unit). Εκτός από αυτήν την μονάδα οι σύγχρονοι μικροεπεξεργαστές διαθέτουν και μονάδα κινητής υποδιαστολής (floating point unit) η οποία χρησιμοποιείται στους μικροεπεξεργαστές για την διαχείριση αριθμών με κλασματικό μέρος. Η μονάδα ελέγχου αναλαμβάνει τον συντονισμό των εσωτερικών λειτουργιών του μικροεπεξεργαστή παράγοντας τα κατάλληλα σήματα. Οι καταχωρητές αποτελούν συγκεκριμένες περιοχές αποθήκευσης εσωτερικά του μικροεπεξεργαστή οι οποίες χρησιμοποιούνται για την διαχείριση των

δεδομένων που συμμετέχουν σε διάφορες πράξεις καθώς και άλλων σημαντικών δεδομένων για την λειτουργία του μικροεπεξεργαστή. Οι καταχωρητές των σύγχρονων μικροεπεξεργαστών έχουν μέγεθος 32bits ή 64bits και έτσι ο καθένας μπορεί να αποθηκεύσει 32 ή 64 δυαδικά ψηφία αντίστοιχα. Οι καταχωρητές ενός μικροεπεξεργαστή διακρίνονται στους καταχωρητές γενικού σκοπού (general purpose registers) και στους καταχωρητές ειδικού σκοπού (special purpose registers). Οι καταχωρητές γενικού σκοπού είναι αυτοί που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο προγραμματιστής όπως ο ίδιος επιθυμεί ενώ οι καταχωρητές ειδικού σκοπού είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται από το ίδιο το σύστημα. Η τιμή των καταχωρητών γενικού σκοπού μπορεί να μεταβληθεί μέσω των εντολών του προγραμματιστή και να γίνει ίση με την τιμή που ορίζει αυτός μέσα στον κώδικα του ενώ η τιμή των καταχωρητών ειδικού σκοπού ενημερώνεται αυτόματα και δεν μπορεί να μεταβληθεί από τον προγραμματιστή παρά μόνο να διαβαστεί από αυτόν. Βέβαια υπάρχουν και καταχωρητές ειδικού σκοπού οι οποίοι δεν είναι καν διαθέσιμοι για διαβασμα από τον προγραμματιστή. Κάθε μικροεπεξεργαστής έχει ένα προκαθορισμένο , από τον σχεδιαστή του , σύνολο εντολών. Ο προγραμματιστής μπορεί να χρησιμοποιήσει τις εντολές αυτές για να συντάξει έναν κώδικα σε συμβολική γλώσσα προγραμματισμού (assembly programming language) προκειμένου να δημιουργήσει ένα πρόγραμμα. Παρόλα αυτά μπορεί να χρησιμοποιήσει και μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου (high level programming language) για να δημιουργήσει το ίδιο πρόγραμμα. Σε κάθε περίπτωση ο κώδικας του προγραμματιστή μεταφράζεται τελικά σε γλώσσα μηχανής (machine language) δηλαδή σε ακολουθίες άσσων και μηδενικών αφού αυτή είναι η μόνη γλώσσα που καταλαβαίνει ο μικροεπεξεργαστής. Αυτή η γλώσσα δεν χρησιμοποιείται από κανέναν προγραμματιστή ενώ λίγοι είναι και εκείνοι που χρησιμοποιούν εντολές της συμβολικής γλώσσας προγραμματισμού. Οι πιο πολλοί χρησιμοποιούν μια γλώσσα υψηλού επιπέδου αφού είναι η πιο κοντινή στην φυσική γλώσσα σε σχέση με την γλώσσα μηχανής και την συμβολική γλώσσα. Η μετατροπή ενός κώδικα προγράμματος από γλώσσα υψηλού επιπέδου σε γλώσσα μηχανής γίνεται κατά την φάση της μεταγλώττισης ή της διερμηνείας. Για την εκτέλεση των προγραμμάτων που δημιουργεί ο προγραμματιστής με την βοήθεια μιας γλώσσας υψηλού επιπέδου ο μικροεπεξεργαστής συνεργάζεται με εξωτερικές μονάδες όπως μνήμη (memory) , συσκευές εισόδου/εξόδου (I/O devices) και σύστημα διαύλων (system bus). Η μνήμη φιλοξενεί τα προγράμματα καθώς και τα δεδομένα που αυτά διαχειρίζονται προκειμένου να διαβαστούν στην συνέχεια από τον μικροεπεξεργαστή. Μια θέση μνήμης αποτελείται από ένα πλήθος θέσεων σε κάθε μια από τις οποίες αποθηκεύεται και μια ποσότητα πληροφορίας. Οι θέσεις αυτές είναι αριθμημένες και ο κάθε αριθμός που αντιστοιχεί σε μια θέση ονομάζεται διεύθυνση της θέσης αυτής. Αν η μνήμη έχει N θέσεις τότε επειδή η πρώτη θέση της μνήμης έχει διεύθυνση μηδέν η τελευταία έχει διεύθυνση N – 1. Ο αριθμός N σε κάθε μνήμη είναι δύναμη του δυο και εξαρτάται από το εύρος του διαύλου διευθύνσεων ενώ η ποσότητα που μπορεί να αποθηκευτεί σε κάθε θέση μνήμης είναι συνήθως 1byte δηλαδή 8bit αν και αυτό

εξαρτάται από το εύρος του διαύλου δεδομένων. Η μνήμη ή αλλιώς η κύρια μνήμη χωρίζεται σε δυο διαφορετικά είδη μνημών , στη μνήμη τυχαίας προσπέλασης (Random Access Memory-RAM) και στη μνήμη ανάγνωσης μόνο (Read Only Memory-ROM). Δυο σημαντικές διαφορές μεταξύ αυτών των δυο μνημών είναι ότι η μνήμη RAM χάνει τα δεδομένα της όταν διακοπεί η τροφοδοσία σε αντίθεση με την μνήμη ROM και επίσης η μνήμη RAM χρησιμοποιείται και για ανάγνωση αλλά και για εγγραφή ενώ η μνήμη ROM όπως δηλώνει και το όνομα της χρησιμοποιείται μόνο για ανάγνωση. Η μνήμη ROM χρησιμοποιείται κυρίως για την υποστήριξη βασικών διαδικασιών του υπολογιστικού συστήματος δηλαδή του συστήματος που αποτελείται από τον μικροεπεξεργαστή και από τις εξωτερικές μονάδες ενώ η μνήμη RAM χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των προγραμμάτων του χρήστη που είναι έτοιμα ανά πάσα στιγμή να εκτελεστούν. Σε ένα υπολογιστικό σύστημα το μέγεθος της μνήμης RAM είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος της μνήμης ROM. Οι συσκευές εισόδου/εξόδου εξασφαλίζουν τόσο την αλληλεπίδραση του υπολογιστικού συστήματος με τον «έξω κόσμο» όσο και με κάποια μέσα αποθήκευσης όπως σκληρός δίσκος κ.α.. Οι συσκευές αυτές μπορεί να είναι μόνο συσκευές εισόδου (input devices) η οποίες χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή πληροφοριών στο σύστημα , μόνο συσκευές εξόδου (output devices) οι οποίες λαμβάνουν τις πληροφορίες που δίνει σαν έξοδο το σύστημα και συσκευές εισόδου/εξόδου η οποίες χρησιμοποιούνται και ως συσκευές εισόδου αλλά και ως συσκευές εξόδου. Ένα παράδειγμα μιας συσκευής εισόδου είναι το πληκτρολόγιο , ένα παράδειγμα μιας συσκευής εξόδου είναι η οθόνη και ένα παράδειγμα μιας συσκευής εισόδου/εξόδου είναι ο προσαρμοστής δικτύου. Το σύστημα διαύλων αποτελείται από τον δίαυλο δεδομένων (data bus) , από τον δίαυλο διευθύνσεων (address bus) και από τον δίαυλο ελέγχου (control bus). Οι δίαυλοι αυτοί χρησιμοποιούνται από το υπολογιστικό σύστημα προκειμένου οι ξεχωριστές μονάδες που αναλύθηκαν παραπάνω να επικοινωνούν μεταξύ τους. Ο δίαυλος είναι ένα σύνολο από γραμμές (καλώδια) , στις οποίες συνδέονται δυο ή περισσότερες συσκευές , ώστε να μπορούν να επικοινωνούν. Για να μπορούν οι συσκευές αυτές να επικοινωνούν μεταξύ τους θα πρέπει να τηρούνται μια σειρά από κανόνες. Οι κανόνες αυτοί που διέπουν την επικοινωνία πάνω από έναν συγκεκριμένο δίαυλο ονομάζονται πρωτόκολλο του διαύλου (channel protocol). Σε ένα υπολογιστικό σύστημα ο δίαυλος δεδομένων χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των περιεχομένων των θέσεων μνήμης , ο δίαυλος διευθύνσεων για τη μεταφορά διευθύνσεων μνήμης και τέλος ο δίαυλος ελέγχου για τη μεταφορά κατάλληλων σημάτων που αποσκοπούν στον συντονισμό ολόκληρου του συστήματος διαύλου. Σε αντίθεση με τον μικροεπεξεργαστή η μνήμη , οι μονάδες εισόδου/εξόδου και το σύστημα διαύλων βρίσκονται εσωτερικά του μικροελεγκτή. Συγκεκριμένα σε ένα μικροελεγκτή τα προγράμματα φορτώνονται στην εσωτερική μνήμη του μικροελεγκτή ενώ οι αντίστοιχες εντολές εκτελούνται από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του μικροελεγκτή. Ο μικροελεγκτής έχει επίσης ενσωματωμένα τα κυκλώματα επικοινωνίας με τον «έξω κόσμο» πράγμα που σημαίνει ότι έχει την δυνατότητα άμεσης ανταλλαγής δεδομένων με εξωτερικές συσκευές όπως

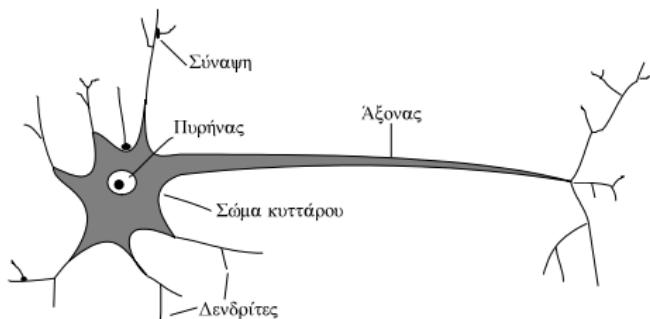
για παράδειγμα αισθητήρες ενώ υποστηρίζει ταυτόχρονα και ένα σύνολο από πρωτόκολλά επικοινωνίας όπως I2C , SPI , Serial Communication κ.α.. Κάποιες από τις σημαντικότερες διαφορές μεταξύ ενός μικροελεγκτή και ενός μικροεπεξεργαστή συναντώνται στην κατανάλωση ισχύος , στις επιδόσεις , στο κόστος και στο μέγεθος. Ένας μικροεπεξεργαστής καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από έναν μικροελεγκτή και παράλληλα είναι πιο ακριβός από αυτόν. Από την άλλη ένας μικροεπεξεργαστής έχει μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ από έναν μικροελεγκτή. Όσον αφορά το μέγεθος ενός μικροεπεξεργαστή αυτό είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος ενός μικροελεγκτή αφού προκειμένου να αξιοποιηθεί , ο μικροεπεξεργαστής χρειάζεται και εξωτερικά κυκλώματα ενώ ο μικροελεγκτής όχι [87],[88]. Οι μετατροπείς ψηφιακού σε αναλογικού σήματος είναι διατάξεις οι οποίες όπως δηλώνει και το όνομά τους μετατρέπουν ένα ψηφιακό σήμα σε αναλογικό.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### 2.1 Βιολογικός νευρώνας

Ο βιολογικός νευρώνας (biological neuron) είναι η βασική μονάδα δόμησης του ανθρώπινου εγκεφάλου. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος αποτελείται περίπου από  $10^{10}$  νευρώνες και πολλοί από αυτούς τους νευρώνες είναι διαφορετικοί μεταξύ τους. Κάθε νευρώνας συνδέεται με πολλούς άλλους νευρώνες μέσω των συνάψεων. Συνήθως ένας νευρώνας έχει  $10^4$  συνάψεις αν και ο αριθμός αυτός δεν είναι σταθερός αφού στον εγκέφαλο υπάρχουν και νευρώνες με 200000 συνάψεις όπως είναι οι νευρώνες τύπου Purkinje που βρίσκονται στην παρεγκεφαλίδα. Παρόλο που οι συνδέσεις νευρώνων με άλλους νευρώνες μέσω των συνάψεων φαίνεται εκ πρώτης όψεως ότι είναι τυχαίες ή ότι έχουν στατιστικό χαρακτήρα το πιο πιθανό είναι ότι έχουν δημιουργηθεί με μεγάλη ακρίβεια τόσο σε επίπεδο κύτταρο-προς-κύτταρο όσο και σε επίπεδο ολόκληρου συστήματος. Το πλήθος των νευρώνων μαζί με τις συνδέσεις τους με άλλους νευρώνες στον ανθρώπινο εγκέφαλο αποτελούν ένα βιολογικό νευρωνικό δίκτυο και ο εγκέφαλος μαζί με τον νωτιαίο μυελό αποτελούν το κεντρικό νευρικό σύστημα. Αν και δεν είναι σίγουρο ότι νευρώνες μπορούν σαν κύτταρα που είναι να αναπαραχθούν δείχνοντας έτσι ότι ο ανθρώπινος εγκέφαλος δεν είναι πλήρως μελετημένος το βέβαιο είναι ότι ο αριθμός των νευρώνων στον ανθρώπινο εγκέφαλο μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και ένα παράδειγμα αυτού είναι ο ανθρώπινος εγκέφαλος ενός υγιούς ενήλικα ο οποίος χάνει περίπου 1000 νευρώνες την ημέρα ενώ ο αριθμός αυτός μεγαλώνει στην περίπτωση που ο ενήλικας και γενικότερα ο οποιοσδήποτε καταναλώνει οινόπνευμα και άλλες βλαβερές για τον οργανισμό ουσίες. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τον αριθμό των νευρώνων είναι και η ηλικία. Όσον αφορά τις συνάψεις αυτές δεν ακολουθούν την πορεία των νευρώνων αλλά καθ 'όλη την διάρκεια ζωής του ατόμου οι συνάψεις βρίσκονται σε μια δυναμική ισορροπία. Αυτό σημαίνει ότι δημιουργούνται καινούργιες συνάψεις και καταστρέφονται παλιές. Η δημιουργία νέων συνάψεων πραγματοποιείται όταν ο εγκέφαλος αποκτά περισσότερες εμπειρίες από το περιβάλλον , μαθαίνει ,

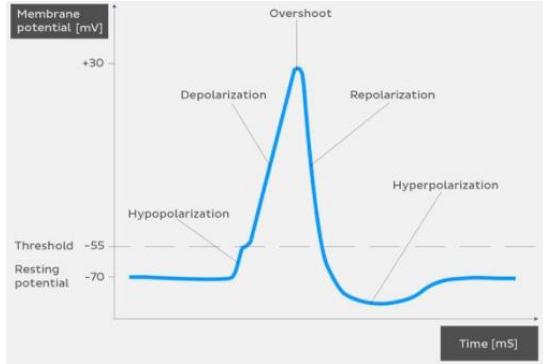
αναγνωρίζει, κατανοεί κ.λ.π. ενώ οι σοβαρές ασθένειες που συναντώνται σε άτομα μεγάλης ηλικίας προέρχονται κυρίως από την μεγάλη καταστροφή των συνάψεων στα νευρωνικά δίκτυα του κεντρικού νευρικού συστήματος και όχι τόσο από την καταστροφή των ίδιων των νευρώνων. Ο ρόλος του νευρώνα σε ένα βιολογικό νευρωνικό δίκτυο είναι να λαμβάνει όλα τα σήματα που έρχονται από άλλους νευρώνες, να τα επεξεργάζεται με κατάλληλο τρόπο, και να μεταδίδει περαιτέρω το επεξεργασμένο σήμα σε άλλους νευρώνες ούτως ώστε ένα σήμα να διαδίδεται μέσω ενός τεράστιου αριθμού νευρώνων σε διάφορα συστήματα του οργανισμού. Τα σήματα που επεξεργάζεται ένας βιολογικός νευρώνας είναι ηλεκτρικής μορφής και είναι της τάξης μερικών mV. Η δομή ενός βιολογικού νευρώνα φαίνεται στο σχήμα 26.



**Σχήμα 26:** Βιολογικός νευρώνας [89]

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 26 ένας βιολογικός νευρώνας αποτελείται από το σώμα (body), από τους δενδρίτες (dendrites) και από τον άξονα (axon). Το σώμα είναι ο κύριος κορμός του νευρώνα και μέσα σε αυτό βρίσκεται ο πυρήνας του. Στον πυρήνα βρίσκεται όλο το γενετικό υλικό του οργανισμού και σε αυτόν πραγματοποιείται η πιο έντονη χημική δράση του κυττάρου με σκοπό την σύνθεση ενζύμων, πρωτεϊνών και άλλων απαραίτητων για την ζωή του κυττάρου μορίων. Ο άξονας του νευρώνα που ονομάζεται αλλιώς και νευράξονας ή νευρίτης είναι μια μεγάλη επέκταση του σώματος του νευρώνα και εφάπτεται με άλλους νευρώνες. Ο άξονας του νευρώνα πρόκειται στην ουσία για μια λεπτή ίνα η οποία μπορεί να είναι και δεκάδες χιλιάδες φορές μεγαλύτερη σε μήκος από τη διάμετρο του σώματος του νευρώνα. Ο άξονας σε μερικούς νευρώνες είναι καλυμμένος με μια ουσία που λέγεται μυελίνη ενώ σε κάποιους άλλους νευρώνες ο άξονας είναι τελείως ακάλυπτος. Κάθε νευρώνας έχει έναν μόνο άξονα ο οποίος μεταδίδει σήματα σε άλλους νευρώνες. Τέλος οι δενδρίτες είναι λεπτές επεκτάσεις που μοιάζουν με διακλαδώσεις δένδρου και δέχονται τα σήματα των άλλων νευρώνων [89]. Οι συνάψεις (synapses) αποτελούνται από τα άκρα των τερματικών διακλαδώσεων του άξονα του προσυναπτικού νευρώνα δηλαδή από τις νευραξονικές απολήξεις του προσυναπτικού νευρώνα (presynaptic cell), από το σώμα ή τους δενδρίτες του μετασυναπτικού νευρώνα (postsynaptic cell) και από το συναπτικό χάσμα (synaptic cleft) δηλαδή από το κενό μεταξύ των νευραξονικών απολήξεων του προσυναπτικού νευρώνα και του σώματος ή των δενδριτών του μετασυναπτικού νευρώνα. Όταν ο νευρώνας βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας δηλαδή δεν δέχεται

κάποιο ερέθισμα στη εξωτερική επιφάνεια της κυτταρικής του μεμβράνης υπάρχει υψηλή συγκέντρωση θετικών ιόντων νατρίου ενώ στην εσωτερική του επιφάνεια υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση θετικών ιόντων καλίου και αρνητικών ιόντων άλλων χημικών στοιχείων με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση θετικών ιόντων εξωτερικά του νευρώνα και μεγάλη συγκέντρωση αρνητικών ιόντων εσωτερικά αυτού. Έτσι υπάρχει μια διαφορά δυναμικού η οποία είναι περίπου -70mV και το δυναμικό αυτό ονομάζεται δυναμικό ηρεμίας (calm potential). Το δυναμικό ηρεμίας διατηρείται στον νευρώνα για όσο χρόνο αυτός δεν δέχεται κάποιο ερέθισμα ή για όσο χρόνο αυτός δέχεται κάποιο ερέθισμα με ένταση μικρότερη από κάποια οριακή τιμή. Όταν κάποια χρονική στιγμή ο νευρώνας δεχτεί κάποιο ερέθισμα ικανό να τον διεγείρει εκκρίνεται στο συναπτικό χάσμα διαβιβαστική ουσία η οποία βρίσκεται μέσα στα αποθηκευτικά κυστίδια των νευροξονικών απολήξεων του προσυναπτικού νευρώνα και στην συνέχεια εισέρχονται στον νευρώνα θετικά ιόντα νατρίου. Αυτό οδηγεί στην εξουδετέρωση μέρους της αρνητικότητας του δυναμικού ηρεμίας της μεμβράνης και έτσι το δυναμικό ηρεμίας αυξάνεται στα -59mV. Μόλις η διαφορά του δυναμικού γίνει -59mV που αποτελεί το κατώφλι προκειμένου να υπάρξει το δυναμικό ενέργειας (action potential) εισέρχονται ακόμη περισσότερα θετικά ιόντα νατρίου στον νευρώνα και αυτό οδηγεί σε μια απότομη αύξηση της διαφοράς του δυναμικού μέχρι αυτό να γίνει +30mV. Όταν η διαφορά του δυναμικού γίνει +30mV παύουν να εισέρχονται θετικά ιόντα νατρίου στον νευρώνα ενώ εξέρχονται από αυτόν θετικά ιόντα καλίου. Μάλιστα εξέρχονται τόσα πολλά θετικά ιόντα καλίου από τον νευρώνα που η διαφορά δυναμικού γίνεται αρνητικότερη από κάθε άλλη φορά δηλαδή μικρότερη ακόμα και από την διαφορά δυναμικού που έχει ο νευρώνας όταν αυτός βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας. Στην κατάσταση αυτή για να μπορέσει γρήγορα να ξαναδιεγερθεί ο νευρώνας θα πρέπει η ένταση ή η διάρκεια του ερεθίσματος να είναι μεγαλύτερη από αυτήν που απαιτείται κανονικά. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι ο νευρώνας διέρχεται από τρεις διαφορετικές φάσεις. Στην πρώτη φάση η διαφορά δυναμικού αυξάνεται και έτσι από τα -70mV που αποτελεί το δυναμικό ηρεμίας η διαφορά δυναμικού φτάνει στα +30mV. Η φάση αυτή ονομάζεται εκπόλωση (depolarization). Στην δεύτερη φάση η διαφορά δυναμικού μειώνεται από τα +30mV μέχρι και τα -70mV και αυτή η φάση ονομάζεται επαναπόλωση (repolarization) και τέλος η τρίτη φάση είναι η φάση κατά την οποία η διαφορά δυναμικού μειώνεται ακόμα περισσότερο και φτάνει τα -90mV και αυτή η φάση ονομάζεται υπερπόλωση (hyperpolarization). Αυτές οι τρείς φάσεις φαίνονται στο σχήμα 27 [90].

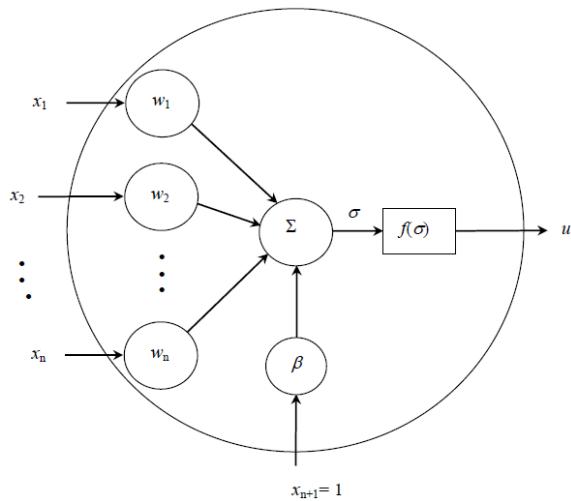


**Σχήμα 27:** Δυναμικό ηρεμίας και δυναμικό ενέργειας [90]

Τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα αποτέλεσαν την έμπνευση για την δημιουργία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων το βασικό στοιχείο των οποίων είναι ο τεχνητός νευρώνας.

## 2.2 Τεχνητός νευρώνας

Όπως ο βιολογικός νευρώνας έτσι και ο τεχνητός νευρώνας (artificial neuron) λαμβάνει κάποια σήματα από άλλους νευρώνες μέσω των εισόδων του και αφού επεξεργαστεί τα σήματα αυτά στέλνει μέσω της εξόδου του το τελικό σήμα σε άλλους νευρώνες. Το μοντέλο ενός τεχνητού νευρώνα φαίνεται στο σχήμα 28.



**Σχήμα 28:** Μοντέλου τεχνητού νευρώνα [91]

Στο μοντέλο του σχήματος 28 τα  $x_n$  μπορεί να είναι είτε η τιμή της εξόδου του κάθε νευρώνα με τον οποίο συνδέεται ο νευρώνας του σχήματος 28 είτε η τιμή της κάθε εισόδου του τεχνητού νευρωνικού δικτύου στο οποίο συμμετέχει ο νευρώνας του σχήματος 28 ενώ ταυτόχρονα σε κάθε περίπτωση τα  $x_n$  αποτελούν και τις τιμές των εισόδων του νευρώνα του σχήματος 28 και το  $x_{n+1}$  είναι η τιμή μιας επιπλέον εισόδου η οποία ισούται με 1. Οι τιμές αυτές μπορούν να αποτυπωθούν σε ένα διάνυσμα  $n + 1$  στοιχείων. Το διάνυσμα αυτό ονομάζεται επαυξημένο διάνυσμα εισόδου και είναι το διάνυσμα  $x$  της σχέσης (13).

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n \ 1]^T \quad (13)$$

Στο ίδιο μοντέλο τα  $w_n$  μπορεί να είναι είτε οι τιμές των βαρών που αντιστοιχούν σε κάθε σύνδεση μεταξύ του νευρώνα της κάθε εισόδου και του νευρώνα του σχήματος 28 είτε οι τιμές των βαρών που αντιστοιχούν σε κάθε σύνδεση μεταξύ της κάθε εισόδου του τεχνητού νευρωνικού δικτύου στο οποίο συμμετέχει ο νευρώνας του σχήματος 28 και του ίδιου του νευρώνα και το  $\beta$  είναι το βάρος που αντιστοιχεί στην επιπλέον είσοδο  $n + 1$  και έτσι κάθε  $w_i$  με το  $i$  να κυμαίνεται μεταξύ του 1 και του  $n$  αντιστοιχεί στην ουσία σε κάθε σύνδεση μεταξύ ενός νευρώνα και του νευρώνα του σχήματος 28 ή σε κάθε σύνδεση μεταξύ μιας εισόδου του τεχνητού νευρωνικού δικτύου και του νευρώνα του σχήματος 28. Το  $\beta$  ονομάζεται πόλωση (bias) του νευρώνα. Όπως οι τιμές των εισόδων του νευρώνα έτσι και οι τιμές των βαρών μπορούν να αποτυπωθούν σε ένα διάνυσμα  $n + 1$  στοιχείων. Το διάνυσμα αυτό ονομάζεται επαυξημένο διάνυσμα παραμέτρων η βαρών και είναι το διάνυσμα  $w$  της σχέσης (14).

$$w = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n \ \beta]^T \quad (14)$$

Στο σχήμα 28 το  $\Sigma$  είναι ένας αθροιστής και η τιμή της εξόδου του η οποία συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα  $\sigma$  ή με το αγγλικό γράμμα  $u$  όπως συναντάται σε πολλές βιβλιογραφίες ισούται με το άθροισμα των γινομένων της τιμής της κάθε εισόδου  $n$  του νευρώνα του σχήματος 28 με την τιμή του βάρους που αντιστοιχεί στην σύνδεση μεταξύ του αντίστοιχου νευρώνα ή μεταξύ της αντίστοιχης εισόδου του τεχνητού νευρωνικού δικτύου με τον νευρώνα του σχήματος 28. Η τιμή της εξόδου του αθροίσματος συμπεριλαμβάνει και το γινόμενο της τιμής της επιπλέον εισόδου με την τιμή του βάρους που αντιστοιχεί σε αυτήν και έτσι η τιμή της εξόδου του αθροιστή δίνεται από την σχέση (15).

$$\sigma = w^T \cdot x \quad (15)$$

Τέλος το  $f(\sigma)$  στο σχήμα 28 ή το  $f(u)$  στην περίπτωση που η έξοδος του αθροιστή συμβολίζόταν με το αγγλικό γράμμα  $u$  αντιστοιχεί σε μια συνάρτηση η οποία ονομάζεται συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function). Αυτή η συνάρτηση δέχεται στην είσοδο της την τιμή της εξόδου του αθροιστή και η τιμή της εξόδου της αντιστοιχεί στην έξοδο του νευρώνα. Η συνάρτηση ενεργοποίησης μπορεί να πάρει διάφορες μορφές και σε κάθε μια τέτοια μορφή η τιμή της  $f(\sigma)$  υπολογίζεται και από μια διαφορετική σχέση. Μια συνάρτηση ενεργοποίησης είναι η βηματική συνάρτηση -1/1 (step function -1/1) η τιμή της οποίας για μια τιμή του σ δίνεται από την σχέση (16).

$$f(\sigma) = \begin{cases} -1, & \sigma \leq 0 \\ 1, & \sigma > 0 \end{cases} \quad (16)$$

Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα που επιλύουν προβλήματα ταξινόμησης. Μια άλλη συνάρτηση ενεργοποίησης είναι η σιγμοειδής συνάρτηση (sigmoid function) η τιμή της οποίας για μια τιμή του  $\sigma$  δίνεται από την σχέση (17).

$$f(\sigma) = \frac{1}{1+e^{-\sigma}} \quad (17)$$

Η συνάρτηση αυτή σε σχέση με τις άλλες συναρτήσεις ενεργοποίησης είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη συνάρτηση αφού είναι παραγωγίσιμη, μονοτονική, έχει ομαλή κλίση και οι τιμές τις περιορίζονται στο διάστημα από 0 έως 1 με αποτέλεσμα να δίνει κανονικοποιημένη έξοδο αλλά και ταυτόχρονα μια έξοδο η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε μια πιθανότητα να συμβεί ένα γεγονός. Εκτός όμως από τα πλεονεκτήματα αυτά η σιγμοειδής συνάρτηση έχει και κάποια μειονεκτήματα όπως η σχεδόν μηδενική παράγωγος κοντά στις ακραίες τιμές του σ πράγμα που σημαίνει ότι σε εκείνες τις περιοχές το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο θα μαθαίνει πολύ αργά και η πολυπλοκότητα της ίδιας της συνάρτησης. Επιπλέον η σιγμοειδής συνάρτηση δεν έχει ως κέντρο το 0 αλλά το 0,5. Η υπερβολική εφαπτομένη (hyperbolic function) η τιμή της οποίας για μια τιμή του σ δίνεται από την σχέση (18) είναι μια συνάρτηση ενεργοποίησης με δομή παρόμοια με αυτήν της σιγμοειδής με την διαφορά ότι οι τιμές της συνάρτησης αυτής κυμαίνονται μεταξύ του -1 και του 1 και όχι μεταξύ του 0 και του 1 όπως συμβαίνει στην σιγμοειδής.

$$f(\sigma) = \tanh(\sigma) = \frac{1-e^{-\sigma}}{1+e^{-\sigma}} \quad (18)$$

Επειδή το σύνολο τιμών της συνάρτησης αυτής είναι μεταξύ του -1 και του 1 η συνάρτηση αυτή έχει κέντρο το 0. Μια τέταρτη συνάρτηση ενεργοποίησης είναι η συνάρτηση κατωφλίου (threshold function) η τιμή της οποίας για μια τιμή του  $\sigma$  δίνεται από την σχέση (19).

$$f(\sigma) = \begin{cases} 0, & \sigma \leq 0 \\ \sigma, & 0 < \sigma < 1 \\ 1, & \sigma \geq 1 \end{cases} \quad (19)$$

Η συνάρτηση αυτή είναι γραμμική μόνο σε ένα τμήμα της δηλαδή μόνο όταν το  $\sigma$  κυμαίνεται στο διάστημα (0,1). Μια πέμπτη συνάρτηση ενεργοποίησης είναι η συνάρτηση ράμπας (ramp function) η τιμή της οποίας για μια τιμή του  $\sigma$  δίνεται από την σχέση (20).

$$f(\sigma) = \begin{cases} 0, & \sigma \leq 0 \\ \sigma, & \sigma > 0 \end{cases} \quad (20)$$

και μια τελευταία συνάρτηση ενεργοποίησης είναι η γραμμική συνάρτηση (linear function) η τιμή της οποίας για μια τιμή του  $\sigma$  δίνεται από την σχέση (21).

$$f(\sigma) = \sigma \quad (21)$$

Μια παραλλαγή της βηματικής συνάρτησης -1/1 είναι η βηματική συνάρτηση 0/1 (step function 0/1) η τιμή της οποίας για μια τιμή του σ δίνεται από την σχέση (22).

$$f(\sigma) = \begin{cases} 0, & \sigma \leq 0 \\ 1, & \sigma > 0 \end{cases} \quad (22)$$

Πάνω στην συνάρτηση αυτή στηρίχτηκε και το πρώτο μοντέλο τεχνητού νευρώνα το οποίο ορίστηκε από τους Αμερικάνους επιστήμονες McCulloch και Pitts. Στο μοντέλο αυτό όταν ο νευρώνας έχει έξοδο 0 θεωρείτε ότι ο νευρώνας είναι αδρανής ενώ όταν ο νευρώνας έχει έξοδο 1 θεωρείται ότι ο νευρώνας πυροδοτεί παλμούς. Αυτό προφανώς σχετίζεται με τον βιολογικό νευρώνα και συγκεκριμένα με το δυναμικό ηρεμίας και το δυναμικό ενέργειας αντίστοιχα. Όταν οι τεχνητοί νευρώνες συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζουν ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (artificial neural network) παρόλο αυτά τεχνητό νευρωνικό δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί και το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο perceptron το οποίο αποτελείται από έναν μόνο τεχνητό νευρώνα [91],[92]. Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο perceptron αποτελεί μια από τις πολλές κατηγορίες τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

### 2.3 Κατηγορίες τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Το πιο απλό τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που μπορεί να σχεδιαστεί και να μελετηθεί είναι το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο perceptron (perceptron artificial neural network). Στην ουσία το νευρωνικό αυτό δίκτυο δεν πρόκειται για δίκτυο νευρώνων αφού δεν αποτελείται από νευρώνες συνδεδεμένους μεταξύ τους αλλά από έναν μόνο νευρώνα. Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο perceptron ή στα ελληνικά αντίληπτρο ή αισθητήρας χρησιμοποιείται σε προβλήματα γραμμικής ταξινόμησης αφού υλοποιεί μια γραμμική συνάρτηση και εφευρέθηκε το 1957 στο αεροναυτικό εργαστήριο του Cornell από τον Frank Rosenblatt. Αυτό το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιεί ως συνάρτηση ενεργοποίησης την βηματική συνάρτηση 0/1 ή την βηματική συνάρτηση -1/1 και έτσι η τιμή της έξοδο του είναι πάντα ίση με έναν αριθμό από ένα σύνολο δυο διαφορετικών μεταξύ τους αριθμών. Η έξοδος του αθροιστή σε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο perceptron δίνεται από την σχέση (15) η οποία είναι ισοδύναμη με την σχέση (23).

$$\sigma = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot x_i) + \beta = 0 \quad (23)$$

Η σχέση (23) αντιστοιχεί σε ένα υπερεπίπεδο στον  $n$ -διάστατο χώρο. Ο χώρος αυτός καθορίζεται από το πλήθος των εισόδων χωρίς την επιπλέον είσοδο  $n+1$  και αποτελείται από τα σημεία με τιμές συντεταγμένων ίσες με τις τιμές των εισόδων. Τα σημεία με τιμές συντεταγμένων που αντιστοιχούν σε θετικές τιμές σ βρίσκονται στη μια πλευρά του υπερεπιπέδου ενώ τα σημεία με τιμές συντεταγμένων που αντιστοιχούν σε αρνητικές τιμές σ βρίσκονται στην απέναντι πλευρά του υπερεπιπέδου. Έτσι το υπερεπίπεδο  $\sigma = 0$  χωρίζει τον  $n$ -διάστατο χώρο σε δυο μέρη και ανάλογα με το αν ένα σημείο με τιμές συντεταγμένων ίσες με τις τιμές ενός διανύσματος εισόδου βρίσκεται

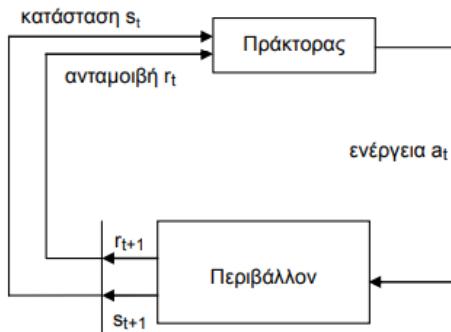
πάνω από το υπερεπίπεδο  $\sigma = 0$  ή κάτω από αυτό η έξοδος του perceptron είναι 1 ή 0 αντίστοιχα στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η βηματική συνάρτηση 0/1 και 1 ή -1 αντίστοιχα στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η βηματική συνάρτηση -1/1. Έτσι αν οι είσοδοι του τεχνητού νευρωνικού δίκτυου χωρίς την επιπλέον είσοδο δηλαδή χωρίς την επιπλέον είσοδο με τιμή ίση με 1 είναι δυο ο  $n$ -διάστατος χώρος είναι ένα επίπεδο και το υπερεπίπεδο  $\sigma = 0$  είναι μια ευθεία που χωρίζει το επίπεδο αυτό σε δυο ημιεπίπεδα ενώ στην περίπτωση που οι είσοδοι του τεχνητού νευρωνικού δίκτυου χωρίς την επιπλέον είσοδο είναι τρεις ο  $n$ -διάστατος χώρος είναι ένας χώρος τριών διαστάσεων και το υπερεπίπεδο  $\sigma = 0$  είναι ένα επίπεδο που χωρίζει τον τρισδιάστατο χώρο σε δυο τμήματα. Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο perceptron παρόλο που μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία και χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία σε γραμμικώς διαχωρίσιμες συναρτήσεις δηλαδή σε προβλήματα που τα δεδομένα εισόδου μπορούν να χωριστούν σε ομάδες με γραμμικές συναρτήσεις δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε προβλήματα που τα δεδομένα εισόδου για να χωριστούν απαιτούν πιο περίπλοκες συναρτήσεις. Για τα προβλήματα αυτά που στην ουσία το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο υλοποιεί μη γραμμικές συναρτήσεις χρησιμοποιούνται πολλοί νευρώνες και οι νευρώνες αυτοί συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα αληθινό τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο ονομάζεται τεχνητό νευρωνικό δίκτυο πολλών στρωμάτων-επιπέδων (multilayer neural network) αφού οι τεχνητοί νευρώνες σε αυτά τα δίκτυα οργανώνονται σε στρώματα-επίπεδα. Τα επίπεδα αυτά είναι το κρυφό επίπεδο και το επίπεδο εξόδου. Ένα τέτοιο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο μπορεί να έχει ένα ή περισσότερα κρυφά επίπεδα ενώ όλα έχουν ένα επίπεδο εξόδου. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα πολλών στρωμάτων-επιπέδων ανάλογα με τις συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων τους χωρίζονται στα πλήρως συνδεδεμένα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (fully connected artificial neural networks), στα μερικώς συνδεδεμένα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (partially connected artificial neural networks), στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα με απλή τροφοδότηση (feedforward artificial neural networks) και στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα με ανατροφοδότηση (recurrent artificial neural networks). Στα πλήρως συνδεδεμένα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα κάθε νευρώνας συνδέεται με όλους τους νευρώνες του επόμενου επιπέδου ενώ στα μερικώς συνδεδεμένα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα υπάρχουν νευρώνες που δεν συνδέονται με όλους τους νευρώνες του επόμενου επιπέδου. Στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα με απλή τροφοδότηση δεν υπάρχει κανένας νευρώνας που να συνδέεται με έναν άλλον νευρώνα που ανήκει σε προηγούμενο ή στο ίδιο επίπεδο και έτσι η πληροφορία ρέει προς μια κατεύθυνση δηλαδή από τα αριστερά προς τα δεξιά. Για αυτόν τον λόγο και τα τεχνητά νευρωνικά αυτά δίκτυα ονομάζονται αλλιώς και τεχνητά νευρωνικά δίκτυα εμπρόσθιας τροφοδότησης. Αντίθετα στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα με ανατροφοδότηση υπάρχει τουλάχιστον ένας νευρώνας ο οποίος μέσω ενός κλάδου ανάδρασης συνδέεται με έναν άλλον νευρώνα που ανήκει στο ίδιο ή σε ένα προηγούμενο επίπεδο [92],[93].

Προκειμένου το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο να μπορέσει να επιτελέσει το έργον του στην εκάστοτε εφαρμογή που χρησιμοποιείται θα πρέπει να έχει προηγηθεί η διαδικασία της μάθησης.

## 2.4 Είδη μάθησης τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Η μάθηση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων αναφέρεται στην μεταβολή των τιμών των βαρών που αντιστοιχούν σε κάθε σύνδεση μεταξύ δυο νευρώνων και μεταξύ μιας εισόδου του τεχνητού νευρωνικού δικτύου και ενός νευρώνα. Η μάθηση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων επιτυγχάνεται με τους αλγορίθμους εκπαίδευσης οι οποίοι στηρίζονται σε ένα από τα τρία είδη μάθησης. Αυτά τα είδη μάθησης είναι η μάθηση με επίβλεψη (supervised learning) , η μάθηση χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning) και η μάθηση με ενίσχυση (reinforcement learning). Στην μάθηση με επίβλεψη υποδεικνύονται στο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο οι τιμές των εισόδων για κάθε πρότυπο δηλαδή για κάθε επαυξημένο διάνυσμα εισόδου σε μορφή δισδιάστατου πίνακα καθώς και οι τιμές των στόχων που αντιστοιχούν σε κάθε πρότυπο σε μορφή επίσης δισδιάστατου πίνακα στην περίπτωση που το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο έχει παραπάνω από μια έξοδο και σε μορφή μονοδιάστατου πίνακα στην περίπτωση που το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο έχει μια μόνο έξοδο. Οι τιμές των βαρών αρχικοποιούνται με τυχαίες τιμές και κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αλλάζει συνεχώς αυτές τις τιμές προσπαθώντας να μειώσει την απόκλιση μεταξύ των αναμενόμενων τιμών ή της αναμενόμενης τιμής του πίνακα στόχων και των τιμών ή της τιμής που εξάγει το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Σε αυτό το είδος μάθησης το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο καταλήγει να έχει “μάθει” μια συνάρτηση η οποία ονομάζεται συνάρτηση στόχος (target function) η οποία και χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη μιας ή περισσότερων τιμών εξόδου βάση των τιμών εισόδου. Η εισαγωγή του πίνακα με τις τιμές των εισόδων και του πίνακα με τις τιμές των στόχων μπορεί να γίνει είτε από το προγραμματιστή είτε από το ίδιο το σύστημα το οποίο εμπεριέχει το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Στην τελευταία περίπτωση το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιεί αυτό το είδος μάθησης (self-supervised learning) ονομάζεται αυτό-επιβλεπόμενο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Στην μάθηση χωρίς επίβλεψη υποδεικνύονται στο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο μόνο οι τιμές των εισόδων που αντιστοιχούν σε κάθε πρότυπο και έτσι το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο βρίσκει από μόνο του συσχετίσεις και ομάδες από τα δεδομένα αυτά βασιζόμενο στις ιδιότητες τους. Τέλος στην ενισχυτική μάθηση η οντότητα που μαθαίνει και παίρνει αποφάσεις ονομάζεται πράκτορας (agent) ενώ οτιδήποτε άλλο εκτός του πράκτορα ονομάζεται περιβάλλον (environment). Ο πράκτορας και το περιβάλλον αλληλεπιδρούν συνεχώς μεταξύ τους με τον πρώτο να επιλέγει κάθε φορά την επόμενη ενέργεια και το δεύτερο να ανταποκρίνεται σε αυτήν και να παρουσιάζει στον πρώτο την καινούργια κατάσταση στην οποία μεταβαίνει αλλά και μια ειδική αριθμητική τιμή που ονομάζεται ανταμοιβή στην περίπτωση κέρδους ή τιμωρία στην περίπτωση κόστους. Πιο συγκεκριμένα ο πράκτορας και το περιβάλλον αλληλεπιδρούν κάθε χρονική στιγμή t

με το  $t$  να παίρνει διακριτές τιμές και σε κάθε χρονική στιγμή  $t$  ο πράκτορας λαμβάνει μια αναπαράσταση της κατάστασης του περιβάλλοντος από ένα σύνολο πιθανών καταστάσεων αλλά και μια αριθμητική τιμή που αντιστοιχεί σε ανταμοιβή ή τιμωρία και διαλέγει μια ενέργεια από ένα σύνολο ενεργειών που είναι διαθέσιμες στην δεδομένη κατάσταση. Την επόμενη χρονική στιγμή αφού έχει ολοκληρωθεί η ενέργεια αυτή από το περιβάλλον ο πράκτορας λαμβάνει την καινούργια κατάσταση του περιβάλλοντος και την αριθμητική τιμή της ανταμοιβής ή της τιμωρίας που αντιστοιχεί στην κατάσταση αυτήν και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε επόμενη χρονική στιγμή  $t$  δημιουργώντας έτσι τον βρόχο που φαίνεται στο σχήμα 29.



**Σχήμα 29:** Μοντέλο μάθησης με ενίσχυση [94]

Η αριθμητική τιμή της ανταμοιβής ή της τιμωρίας μπορεί να μην είναι διαθέσιμη μετά από κάθε ενέργεια όπως συμβαίνει στο σχήμα 29 αλλά μπορεί να είναι διαθέσιμη μετά από μια σειρά ενεργειών. Ο σκοπός στην ενισχυτική μάθηση είναι είτε η εκπαίδευση του πράκτορα ώστε να μαθαίνει να παρουσιάζει στο περιβάλλον τις ενέργειες εκείνες που θα του μεγιστοποιήσουν την ανταμοιβή του είτε η εκπαίδευση του πράκτορα ώστε να μαθαίνει να μην παρουσιάζει στο περιβάλλον τις ενέργειες εκείνες που θα του μεγιστοποιούν την τιμωρία του [94],[92]. Η μάθηση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου επιτυγχάνεται με τους αλγορίθμους εκπαίδευσης.

## 2.5 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Η εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου perceptron επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας την μάθηση με επίβλεψη και έτσι για κάθε πρότυπο δίνονται στο δίκτυο ένα ζεύγος πολλών τιμών εισόδων και μιας τιμής στόχου ώστε να ρυθμιστούν οι τιμές του επαυξημένου διανύσματος βαρών λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των εισόδων και την τιμή του στόχου που αντιστοιχούν σε κάθε πρότυπο χρησιμοποιώντας έναν επαναληπτικό αλγόριθμο εκπαίδευσης με απότερο σκοπό την εύρεση των κατάλληλων τιμών του επαυξημένου διανύσματος βαρών για τον διαχωρισμό των προτύπων σε κλάσεις ή ομάδες. Ο πιο κλασσικός αλγόριθμος εκπαίδευσης του τεχνητού νευρωνικού δικτύου perceptron είναι αυτός της σταθερής αύξησης (fixed increment learning algorithm). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ο αλγόριθμος αυτός είναι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος στον οποίο τα πρότυπα εμφανίζονται στην είσοδο με κυκλική σειρά και όταν τελειώσουν

επαναλαμβάνονται από την αρχή. Ένα πλήρη πέρασμα όλων των προτύπων στην είσοδο του τεχνητού νευρωνικού δικτύου αποτελεί μια εποχή (epoch). Ο αλγόριθμος μεταβάλλει το επαυξημένο διάνυσμα βαρών μόνο όταν υπάρχει σφάλμα ταξινόμησης δηλαδή μόνο όταν η τιμή του στόχου για ένα πρότυπο διαφέρει από την έξοδο του τεχνητού νευρωνικού δικτύου για το συγκεκριμένο πρότυπο. Στην περίπτωση αυτή η διόρθωση γίνεται προσθέτοντας ή αφαιρώντας στο τρέχων επαυξημένο διάνυσμα βαρών ένα ποσοστό του επαυξημένου διανύσματος εισόδου ανάλογο του σφάλματος εξόδου. Το ποσοστό αυτό ρυθμίζεται από μια παράμετρο που ονομάζεται βήμα εκπαίδευσης ή ρυθμός εκπαίδευσης (learning rate) και η τιμή της παραμέτρου αυτής είναι ένας μικρός θετικός αριθμός. Η εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου perceptron γίνεται έτσι ώστε αν το πρότυπο σε μια εποχή ταξινομήθηκε εσφαλμένα την επόμενη φορά δηλαδή στην επόμενη εποχή είτε να ταξινομηθεί σωστά είτε να προσεγγίσει την σωστή ταξινόμηση. Επομένως ο αλγόριθμος εκπαίδευσης του τεχνητού νευρωνικού δικτύου perceptron ξεκινάει με την αρχικοποίηση του επαυξημένου διανύσματος βαρών  $w$  με μικρές τυχαίες τιμές αλλά και με την αρχικοποίηση του βήματος εκπαίδευσης η με μια μικρή θετική τιμή. Στην συνέχεια εισάγονται σε ένα πίνακα  $x$  οι τιμές των εισόδων για κάθε πρότυπο  $k$  μαζί με την επιπλέον είσοδο με τιμή ίση με 1 και σε έναν διάνυσμα  $y$  οι τιμές των στόχων που αντιστοιχούν σε κάθε πρότυπο  $k$ . Για κάθε ένα πρότυπο  $k$  υπολογίζεται η έξοδος του perceptron σύμφωνα με την σχέση (24)

$$\widehat{y}^{(k)} = f(x^{(k)} \cdot (w_{\text{old}})^T) \quad (24)$$

και στην συνέχεια οι τιμές του επαυξημένου διανύσματος βαρών διορθώνονται σύμφωνα με την σχέση (25).

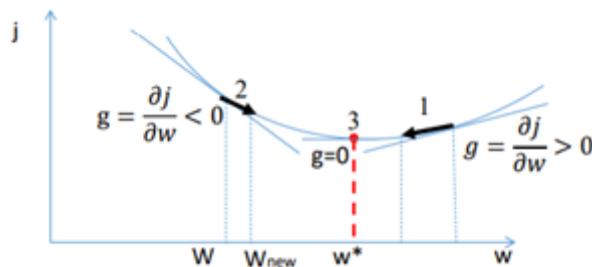
$$w_{\text{new}} = w_{\text{old}} + \eta \cdot (y^{(k)} - \widehat{y}^{(k)}) \cdot x^{(k)} \quad (25)$$

Εάν η έξοδος του perceptron που αντιστοιχεί σε κάθε πρότυπο  $k$  είναι ίδια με την τιμή του διανύσματος στόχων που αντιστοιχεί σε αυτό το πρότυπο  $k$  ο αλγόριθμος τερματίζει αλλιώς η διαδικασία επαναλαμβάνεται ξεκινώντας πάλι από το πρώτο πρότυπο  $k$ . Στον παραπάνω αλγόριθμο το επαυξημένο διάνυσμα βαρών είναι ένα διάνυσμα  $1 \times (n+1)$ , ο πίνακας εισόδων είναι ένας πίνακας  $p \times (n+1)$  και το διάνυσμα στόχων είναι ένα διάνυσμα  $p \times 1$ . Το  $n$  είναι το πλήθος των εισόδων χωρίς την επιπλέον είσοδο δηλαδή χωρίς την είσοδο με τιμή ίση με 1 και το  $p$  το πλήθος των προτύπων [92]. Για την εκπαίδευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων πολλών στρωμάτων-επιπέδων και κυρίως των τεχνητών νευρωνικών δικτύων με απλή τροφοδότηση χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης σφάλματος (back-propagation learning algorithm). Ο αλγόριθμος αυτός προτάθηκε από τον Paul Werbos τη δεκαετία του 1970 στα πλαίσια της ανάλυσης μοντέλων οικονομικής και πολιτικής πρόβλεψης. Τότε τα μοντέλα αυτά δεν είχαν σχεδιαστεί για να έχουν σχέση ή να θυμίζουν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα αργότερα όμως και συγκεκριμένα τη δεκαετία του

1980 έγινε αντιληπτό ότι η μέθοδος αυτού του αλγορίθμου μπορούσε να μεταφερθεί αυτούσια στην εκπαίδευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων πολλών στρωμάτων-επιπέδων. Ο αλγόριθμος αυτός στηρίζεται στην μάθηση με επίβλεψη και η ανανέωση των τιμών των βαρών πραγματοποιείται με την μέθοδο κατάβασης δυναμικού (gradient decent). Το ζητούμενο στη μέθοδο αυτή είναι η ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης η οποία ονομάζεται συνάρτηση κόστους (cost function). Η συνάρτηση εκτός από ένα παράδειγμα εκπαίδευσης ή αλλιώς πρότυπο θα πρέπει να μπορεί να εφαρμοστεί και για ένα πλήθος ρ παραδειγμάτων εκπαίδευσης ή αλλιώς προτύπων υπολογίζοντας τον μέσο όρο των τιμών της συνάρτησης κόστους όλων των παραδειγμάτων εκπαίδευσης και επίσης θα πρέπει η συνάρτηση αυτή να εξαρτάται από τις τιμές των εξόδων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Εκτός από τα παραπάνω η συνάρτηση κόστους θα πρέπει να είναι και παραγωγίσιμη προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον αλγόριθμο οπισθοδιάδοσης σφάλματος. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη συνάρτηση κόστους είναι η συνάρτηση του τετραγωνικού σφάλματος η οποία για ένα παράδειγμα εκπαίδευσης ή πρότυπο δίνεται από την σχέση (26).

$$J = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^m \left( y_i^{(k)} - \widehat{y}_i^{(k)} \right)^2 \quad (26)$$

Στην σχέση (26) το  $m$  είναι το πλήθος των νευρώνων που βρίσκονται στο επίπεδο εξόδου. Στον αλγόριθμο οπισθοδιάδοσης σφάλματος υπολογίζεται η μερική παράγωγος της συνάρτησης κόστους ως προς το βάρος της κάθε σύνδεσης και σε κάθε επανάληψη ανανεώνονται οι τιμές των βαρών έτσι ώστε η μερική παράγωγος που αντιστοιχεί σε κάθε βάρος να πλησιάζει την τιμή μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι αν η μερική παράγωγος της συνάρτησης κόστους ως προς το βάρος μιας σύνδεσης είναι αρνητική η τιμή του αντίστοιχου βάρους θα πρέπει να αυξηθεί ενώ αν η μερική παράγωγος της συνάρτησης κόστους ως προς το βάρος μιας σύνδεσης είναι θετική η τιμή του αντίστοιχου βάρους θα πρέπει να μειωθεί. Το πόσο θα αυξηθεί ή θα μειωθεί η τιμή του βάρους εκτός από την τιμή της μερικής παραγώγου καθορίζεται και από το βήμα εκπαίδευσης ή ρυθμό εκπαίδευσης που χρησιμοποιεί και ο αλγόριθμος σταθερής αύξησης για την εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου perceptron. Η αλλαγή αυτή στις τιμές των βαρών φαίνεται και στο σχήμα (30).



**Σχήμα 30:** Ανανέωση τιμής βάρους σύμφωνα με την μέθοδο κατάβασης δυναμικού [95]

Όπως φαίνεται και από το σχήμα (30) ο αλγόριθμος προσπαθεί να υπολογίσει εκείνες τις τιμές των βαρών ώστε η κλίση της συνάρτησης κόστους δηλαδή η μερική παράγωγος να είναι ίση με μηδέν. Στο σημείο που η μερική παράγωγος είναι ίση με μηδέν η συνάρτηση κόστους παρουσιάζει ένα τοπικό ελάχιστο ή ένα ολικό ελάχιστο στην περίπτωση που αυτό είναι μικρότερο από όλα τα άλλα τοπικά ελάχιστα. Επομένως στον αλγόριθμο οπισθοδιάδοσης σφάλματος οι τιμές των βαρών ανανεώνονται σύμφωνα με την σχέση (27).

$$w_{\text{new}} = w - \eta \cdot \frac{\theta J}{\theta w} \quad (27)$$

Αυτή η διόρθωση των βαρών μπορεί να γίνεται είτε μετά από κάθε πρότυπο είτε μετά από κάθε εποχή. Ο αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης σφάλματος για ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με πλήθος επιπέδων  $L$  ξεκινάει όπως και ο αλγόριθμος σταθερής αύξησης δηλαδή με την αρχικοποίηση των βαρών για κάθε επίπεδο του τεχνητού νευρωνικού δικτύου με μικρές τυχαίες τιμές αλλά και με την αρχικοποίηση του βήματος εκπαίδευσης η με μια μικρή θετική τιμή. Η αρχικοποίηση των βαρών για κάθε επίπεδο του τεχνητού νευρωνικού δικτύου με μικρές τυχαίες τιμές επιτυγχάνεται με την κανονικοποίηση των τιμών των βαρών έτσι ώστε το άθροισμα αυτών που αντιστοιχούν σε συνδέσεις πολλών νευρώνων με έναν άλλον νευρώνα ίδιο σε όλες αυτές τις συνδέσεις να είναι ίσο με 1 ή έτσι ώστε οι τιμές των βαρών να είναι όλες μικρότερες του 1. Ο λόγος για τον οποίο γίνεται αυτή η κανονικοποίηση είναι ότι τα βάρη με μεγάλες τιμές οδηγούν στον λεγόμενο κορεσμό των νευρώνων. Ο κορεσμός των νευρώνων είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο η μεταβολή των βαρών κατά την διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται κάθε φορά είναι πολύ μικρή όχι γιατί το δίκτυο έχει φτάσει σε καλό σημείο αλλά επειδή η έξοδος των νευρώνων είναι πολύ κοντά στο όριο της συνάρτησης ενεργοποίησης. Όσον αφορά την τιμή του βήματος εκπαίδευσης η τιμή αυτή δεν πρέπει να είναι πολύ μικρή αφού αν το βήμα εκπαίδευσης πάρει μια πολύ μικρή θετική τιμή είναι σίγουρο ότι ο αλγόριθμος εκπαίδευσης θα βρει ένα τοπικό ελάχιστο αλλά για να το καταφέρει αυτό θα χρειαστεί αρκετό χρόνο. Από την άλλη η τιμή του βήματος εκπαίδευσης δεν πρέπει να είναι ούτε πολύ μεγάλη αφού αν το βήμα εκπαίδευσης πάρει μια πολύ μεγάλη θετική τιμή ο αλγόριθμος εκπαίδευσης ενδέχεται να μεταβαίνει σε τιμές γύρω από ένα τοπικό ελάχιστο με αποτέλεσμα να εμφανίζει ταλαντώσεις και αδυναμία σταθεροποίησης της λύσης. Για αυτούς τους λόγους είναι σημαντικό το βήμα εκπαίδευσης να αρχικοποιηθεί με την κατάλληλη τιμή η οποία αν και είναι δύσκολο να προσδιοριστεί μαθηματικά εκ των προτέρων μπορεί να υπολογιστεί με την μέθοδο δοκιμής και σφάλματος με αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τυπικά χρησιμοποιούνται τιμές μικρότερες έως πολύ μικρότερες από την μονάδα. Στην συνέχεια ξεκινώντας από το πρώτο πρότυπο κ υπολογίζονται οι έξοδοι των νευρώνων όλων των επιπέδων ( $l=1,2,3,\dots,L-1,L$ ) σύμφωνα με τις σχέσεις (28) και (29)

$$u_i^{(k)}(l) = \sum_{j=1}^{N(l-1)} \left( w_{ij}(l) \cdot a_j^{(k)}(l-1) \right) + w_{i0}(l) \quad (28)$$

$$a_i^{(k)}(l) = f(u_i^{(k)}(l)) \quad (29)$$

και αφότου ολοκληρωθεί αυτό το στάδιο για το επίπεδο εξόδου  $L$  και για τα κρυφά επίπεδα  $1, 2, 3, \dots, L-1$  υπολογίζονται τα σφάλματα των νευρώνων όλων των επιπέδων σύμφωνα με τις σχέσεις (30) και (31) αντίστοιχα

$$\delta_i^{(k)}(L) = \left( y_i^{(k)} - \widehat{y_i^{(k)}} \right) \cdot f'(u_i^{(k)}(L)) \quad (30)$$

$$\delta_i^{(k)}(l) = f'(u_i^{(k)}(l)) \cdot \sum_{j=1}^{N(l+1)} \left( \delta_j^{(k)}(l+1) \cdot w_{ji}(l+1) \right) \quad (31)$$

και με βάση τα σφάλματα αυτά διορθώνονται τα βάρη όλων των επιπέδων ( $l=1, 2, 3, \dots, L-1, L$ ) σύμφωνα με την σχέση (32).

$$w_{ij\text{new}}(l) = w_{ij}(l) + \eta \cdot \delta_i^{(k)}(l) \cdot a_j^{(k)}(l-1) \quad (32)$$

Στις παραπάνω σχέσεις το  $N(l-1)$  και το  $N(l+1)$  είναι το πλήθος των νευρώνων του επιπέδου  $l-1$  και του επιπέδου  $l+1$  αντίστοιχα. Επίσης στις παραπάνω σχέσεις το  $w_{ij}(l)$ , το  $w_{ji}(l+1)$  και το  $w_{ij\text{new}}(l)$  είναι η τιμή του βάρους που αντιστοιχεί στην σύνδεση μεταξύ του νευρώνα  $j$  του επιπέδου  $l-1$  και του νευρώνα  $i$  του επιπέδου  $l$ , η τιμή του βάρους που αντιστοιχεί στην σύνδεση μεταξύ του νευρώνα  $i$  του επιπέδου  $l$  και του νευρώνα  $j$  του επιπέδου  $l+1$  και η καινούργια τιμή του βάρους που αντιστοιχεί στην σύνδεση μεταξύ του νευρώνα  $j$  του επιπέδου  $l-1$  και του νευρώνα  $i$  του επιπέδου  $l$  αντίστοιχα. Τέλος στην σχέση (28) το  $w_{i0}(l)$  είναι η τιμή της πόλωσης του  $i$  νευρώνα του επιπέδου  $l$ . Με το που ολοκληρωθούν και τα δυο τελευταία στάδια για το πρώτο πρότυπο η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται και για το επόμενο πρότυπο μέχρι τα παραπάνω στάδια να εκτελεστούν για όλα τα πρότυπα. Όταν τα παραπάνω στάδια εκτελεστούν και για το τελευταίο πρότυπο δηλαδή όταν τελειώσει η πρώτη εποχή ελέγχεται αν ικανοποιείται ένα κριτήριο τερματισμού και αν το κριτήριο αυτό ικανοποιείται ο αλγόριθμος τερματίζει αλλιώς ο αλγόριθμος ξεκινάει πάλι από το πρώτο πρότυπο προκειμένου να ξεκινήσει η δεύτερη εποχή. Έτσι ο έλεγχος του κριτηρίου τερματισμού πραγματοποιείται στο τέλος κάθε εποχής και αν κάποια στιγμή το αποτέλεσμα είναι αληθές ο αλγόριθμος τερματίζει ενώ αν το αποτέλεσμα είναι ψευδές ο αλγόριθμος μεταβαίνει στην επόμενη εποχή. Τα κριτήρια τερματισμού αφορούν είτε την συνάρτηση κόστους εκφρασμένη για όλα τα πρότυπα είτε τις τιμές των βαρών είτε το πλήθος των εποχών. Στην πρώτη περίπτωση τα κριτήρια τερματισμού είναι τρια. Το πρώτο από αυτά τα τρια κριτήρια τερματισμού είναι το τετραγωνικό σφάλμα των εξόδων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου για όλα τα παραδείγματα εκπαίδευσης ή αλλιώς πρότυπα δηλαδή για μια εποχή να είναι μικρότερο από κάποιο κατώφλι  $\epsilon$ . Για να υπολογιστεί αυτό το σφάλμα θα πρέπει οι τιμές των βαρών στο τέλος μιας εποχής να είναι σταθερές και με βάση

τις τιμές αυτές αλλά και με τις τιμές των εισόδων όλων των προτύπων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου να υπολογιστούν οι τιμές των εξόδων όλων των προτύπων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου και τελικά το σφάλμα της σχέσης (33).

$$C = \sum_{k=1}^p \left( \sum_{i=1}^m \left( y_i^{(k)} - \widehat{y_i^{(k)}} \right)^2 \right) \quad (33)$$

Αν λοιπόν το αποτέλεσμα της παραπάνω σχέσης είναι μικρότερο από το κατώφλι ε ο αλγόριθμος εκπαίδευσης τερματίζει αλλιώς ο αλγόριθμος εκπαίδευσης συνεχίζει στην επόμενη εποχή. Αν το αποτέλεσμα της σχέσης (33) διαιρεθεί με το γινόμενο του πλήθους των προτύπων με το πλήθος των νευρώνων του επιπέδου εξόδου δηλαδή με το γινόμενο  $p \cdot m$  τότε προκύπτει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των εξόδων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου για όλα τα πρότυπα που είναι και το δεύτερο κριτήριο τερματισμού. Το τρίτο κριτήριο τερματισμού είναι η διαφορά του σφάλματος της σχέσης (33) σε δυο διαδοχικές εποχές να είναι και αυτή μικρότερη από κάποιο κατώφλι ε. Αυτό σημαίνει πως ο αλγόριθμος εκπαίδευσης τερματίζει όταν το σφάλμα της σχέσης (33) από εποχή σε εποχή δεν μειώνεται σημαντικά. Ένα διαφορετικό κριτήριο τερματισμού που αφορά όμως τις τιμές των βαρών είναι οι μεταβολές των τιμών αυτών σε μια εποχή να είναι μικρές. Αυτό μπορεί να εκφραστεί με δυο τρόπους είτε χρησιμοποιώντας την απόλυτη τιμή είτε χρησιμοποιώντας την νιοστή δύναμη του δυο. Συγκεκριμένα στον πρώτο τρόπο το άθροισμα των απόλυτων τιμών όλων των μεταβολών στις τιμές των βαρών σε μια εποχή συγκρίνεται πάλι με ένα κατώφλι ε και αν το αποτέλεσμα είναι μικρότερο από αυτό το κατώφλι ο αλγόριθμος τερματίζει αλλιώς ο αλγόριθμος συνεχίζει στην επόμενη εποχή. Στον δεύτερο τρόπο το άθροισμα των τετραγώνων όλων των μεταβολών στις τιμές των βαρών σε μια εποχή συγκρίνεται και αυτό με ένα κατώφλι ε και αν το αποτέλεσμα είναι μικρότερο από αυτό το κατώφλι ο αλγόριθμος τερματίζει αλλιώς ο αλγόριθμος συνεχίζει στην επόμενη εποχή. Τέλος το κριτήριο τερματισμού που αφορά το πλήθος των εποχών είναι το πλήθος των εποχών να ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο αριθμό. Όταν ο πλήθος των εποχών γίνει μεγαλύτερο από έναν συγκεκριμένο αριθμό ο αλγόριθμος τερματίζει αλλιώς όσο το πλήθος των εποχών είναι μικρότερο ή ίσο από αυτόν τον αριθμό ο αλγόριθμος συνεχίζει στην επόμενη εποχή [95], [92].

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### 3.1 Το αναπτυξιακό περιβάλλον Jetson Nano 2GB Developer Kit

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα πολλών στρωμάτων-επιπέδων που αποτελούνται από πολλά κρυφά επίπεδα και διαχειρίζονται μεγάλο όγκο δεδομένων απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ και αρκετή μνήμη. Για αυτούς τους λόγους έχουν αναπτυχθεί κατάλληλες πλατφόρμες υλικού μια από τις οποίες είναι και η κεντρική μονάδα επεξεργασίας που αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο οι οποίες καλύπτουν αυτές τις απαιτήσεις. Άλλες πλατφόρμες υλικού είναι η μονάδα επεξεργασίας γραφικών

(Graphics Processing Unit-GPU) , οι διατάξεις πυλών προγραμματιζόμενου πεδίου (Field Programmable Gate Arrays-FPGAs) και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα ειδικού σκοπού (Application-Specific Integrated Circuits-ASICs). Ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα ειδικού σκοπού είναι ένα ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο έχει αναπτυχθεί για μια συγκεκριμένη εφαρμογή η λειτουργία και ο σκοπός της οποίας παραμένουν αμετάβλητα με τον χρόνο. Η διαδικασία παραγωγής ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος ειδικού σκοπού είναι περίπλοκη και το κόστος παραγωγής υψηλό αλλά το τελικό προϊόν που προκύπτει είναι εξαιρετικά βελτιστοποιημένο και ενεργειακά αποδοτικό ενώ ταυτόχρονα έχει μικρό μέγεθος. Οι διατάξεις πυλών προγραμματιζόμενου πεδίου χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση λογικών κυκλωμάτων με πολλές λογικές πύλες συντάσσοντας κάποιον κώδικα σε γλώσσα περιγραφής υλικού (Hardware Description Language-HDL) όπως είναι η VHDL και η Verilog. Σε αντίθεση με τα ολοκληρωμένα κυκλώματα ειδικού σκοπού που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές προκαθορισμένης λειτουργίας και σκοπού οι διατάξεις πυλών προγραμματιζόμενου πεδίου λόγω της δυνατότητας προγραμματισμού τους χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές στις οποίες οι παράμετροι λειτουργίας αλλά και η τελική χρήση αλλάζουν ανάλογα με τις απαιτήσεις του καταναλωτή. Μια μονάδα επεξεργασίας γραφικών είναι ένα εξειδικευμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα που έχει σχεδιαστεί για να επιταχύνει την διαδικασία απόδοσης τρισδιάστατων γραφικών σε πραγματικό χρόνο δηλαδή για την εκτέλεση παιχνιδιών αλλά και για την επεξεργασία και αναπαραγωγή βίντεο. Για να το καταφέρει αυτό η μονάδα επεξεργασίας γραφικών συνεργάζεται με μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας και οι δυο αυτές μονάδες μπορεί να βρίσκονται στην ίδια ή σε διαφορετική πλακέτα (board). Μάλιστα στην περίπτωση που η μονάδα επεξεργασίας γραφικών είναι ενσωματωμένη σε ξεχωριστή πλακέτα , η οποία και ονομάζεται κάρτα γραφικών , υπάρχουν πάνω σε αυτήν ακροδέκτες που συνδέονται στην αντίστοιχη θύρα PCI Express της μητρικής πλακέτας δηλαδή της πλακέτας που φιλοξενεί την κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Αν και αρχικά η χρήση της μονάδας επεξεργασίας γραφικών ήταν αυτή που αναφέρθηκε προηγουμένως αργότερα έγινε φανερό ότι η μονάδα επεξεργασίας γραφικών μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές μια από τις οποίες είναι και η τεχνητή νοημοσύνη. Έτσι προέκυψαν οι μονάδες επεξεργασίας γραφικών γενικού σκοπού (General Purpose Graphics Processing Units-GPGPUs) που εκμεταλλεύονται τους πολλούς πυρήνες που διαθέτουν οι μονάδες επεξεργασίας γραφικών για παράλληλη επεξεργασία σε εφαρμογές γενικού σκοπού. Παρόλο που το χαρακτηριστικό των πολλών πυρήνων συναντάται και σε μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας η οποία μπορεί να διαθέτει από 2 έως 16 πυρήνες σε μια μονάδα επεξεργασίας γραφικών το χαρακτηριστικό αυτό είναι πιο έντονο αφού μια τέτοια μονάδα διαθέτει πολλούς περισσότερους. Η παράλληλη επεξεργασία που εφαρμόζεται στις μονάδες επεξεργασίας γραφικών αναφέρεται στην διαδικασία κατά την οποία ένα σύνθετο πρόβλημα αναλύεται σε πολλά απλούστερα προβλήματα τα οποία και επιλύονται ταυτόχρονα προκειμένου στην συνέχεια συνδυάζοντας τις λύσεις των απλούστερων προβλημάτων να λυθεί το αρχικό. Τα τεχνητά

νευρωνικά δίκτυα επωφελούνται από αυτό το χαρακτηριστικό αφού αποτελούν προβλήματα που απαιτούν λίγη ή και καθόλου προσπάθεια για να διαχωριστούν σε πολλά απλούστερα προβλήματα για τα οποία η λύση του ενός δεν προϋποθέτει την λύση των υπολοίπων [96]. Έτσι αυτά τα απλούστερα προβλήματα μπορούν να λυθούν παράλληλα και στην συνέχεια συνδυάζοντας τις λύσεις αυτών να λυθεί και το αρχικό. Στο εμπόριο υπάρχουν πολλά αναπτυξιακά περιβάλλοντα που διαθέτουν μια μονάδα επεξεργασίας γραφικών για παράλληλη επεξεργασία και ένα από αυτά είναι και το Jetson Nano 2GB Developer Kit από την NVIDIA. Αυτό το αναπτυξιακό περιβάλλον φαίνεται στην εικόνα 41 και χρησιμοποιείται για την διδασκαλία και την μάθηση αλλά και για την σχεδίαση και την κατασκευή εφαρμογών τεχνητής νοημοσύνης και εφαρμογών ρομποτικής. Παρόλο αυτά οι δυνατότητες του Jetson Nano 2GB Developer Kit δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη μόνο τέτοιων εφαρμογών αλλά και την ανάπτυξη εφαρμογών δικτύου αφού το Jetson Nano 2GB Developer Kit διαθέτει WiFi αλλά και Ethernet. Η ενέργεια που καταναλώνει είναι μικρότερη από 5 Watts και οι διαστάσεις του είναι 100mm x 80mm x 29mm με αποτέλεσμα να μπορεί να μεταφερθεί και να εγκατασταθεί οπουδήποτε. Από όλα τα χαρακτηριστικά αυτό βέβαια που ξεχωρίζει είναι η μονάδα επεξεργασίας γραφικών με 128 πυρήνες αρχιτεκτονικής Maxwell καθιστώντας το Jetson Nano 2GB Developer Kit κατάλληλο για την υλοποίηση μεγάλων τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Επίσης αυτό το αναπτυξιακό περιβάλλον υποστηρίζει διάφορα πλαίσια λογισμικού μηχανικής μάθησης (machine learning software frameworks) όπως είναι το TensorFlow , το PyTorch , το Caffe , το Keras και το MXNet αλλά και διάφορα πλαίσια λογισμικού υπολογιστικής όρασης και ρομποτικής (computer vision and robotics software frameworks) όπως το OpenCV και το ROS. Το λειτουργικό σύστημα που χρησιμοποιεί το Jetson Nano 2GB Developer Kit είναι το Linux και πιο συγκεκριμένα το λογισμικό Linux4Tegra το οποίο αποτελεί στην πραγματικότητα μια έκδοση του Ubuntu 18.04 σχεδιασμένη για να τρέχει στο υλικό της NVIDIA [97].



**Εικόνα 41:** Jetson Nano 2GB Developer Kit [97]

Κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά του Jetson Nano 2GB Developer Kit είναι τα παρακάτω [97]

- ❖ . GPU: 128 core NVIDIA Maxwell
- ❖ . CPU: Quad-core ARM A57 1,43GHz

- ❖ . Memory: 2GB 64bit LPDDR4 25,6GB/s
- ❖ . Storage: microSD
- ❖ . Video Encoder: 4Kp30 | 4x 1080p30 | 9x 720p30
- ❖ . Video Decoder: 4Kp60 | 2x 4Kp30 | 8x 1080p30 | 18x 720p30
- ❖ . Connectivity: Gigabit Ethernet , 802.11ac wireless
- ❖ . Camera: 1x MIPI CSI-2 connector
- ❖ . Display: HDMI
- ❖ . USB: 1x USB 3.0 Type A, 2x USB 2.0 Type A, 1x USB 2.0 Micro-B
- ❖ . Others: 40 pin header (GPIO , 12C , 12S , SPI , UART) , 12 pin header (power and related signals , UART) , 4 pin fan header

To Jetson Nano 2GB Developer Kit μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσιο αλλά και ως ένα τμήμα υλικού σε μια εφαρμογή. Μια τέτοια εφαρμογή που αφορά την δεύτερη περίπτωση είναι και αυτή ενός αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ στην οποία το Jetson Nano 2GB Developer Kit μπορεί να αγοραστεί μαζί με άλλα εξαρτήματα προκειμένου να κατασκευαστεί το ρομπότ με όνομα JetBot. Το JetBot πρόκειται στην ουσία για ένα ανοιχτού κώδικα (open source) αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ το οποίο βασίζεται στο Jetson Nano 2GB Developer Kit και αποτελείται από διάφορα επιπλέον εξαρτήματα τα οποία μπορούν να βρεθούν από την λίστα που η ίδια η εταιρία NVIDIA έχει φτιάξει και να αγοραστούν ξεχωριστά ή να αγοραστούν ως ένα ολοκληρωμένο πακέτο από τρίτες εταιρίες [98].

### 3.2 Προγραμματισμός του Jetson Nano 2GB Developer Kit

Προκειμένου να μπορούν να αξιοποιηθούν οι 128 πυρήνες της μονάδας επεξεργασίας γραφικών που είναι ενσωματωμένη στο Jetson Nano 2GB Developer Kit έτσι ώστε να εκτελούν παράλληλα ένα τμήμα κώδικα που έχει οριστεί από τον προγραμματιστή η NVIDIA το 2007 δημιουργησε την πλατφόρμα παράλληλης επεξεργασίας και μοντέλο προγραμματισμού με το όνομα CUDA. Με το μοντέλο αυτό ο προγραμματιστής εξακολουθεί να χρησιμοποιεί τις γνωστές γλώσσες προγραμματισμού όπως η C/C++ , Fortran κ.α. και ενσωματώνοντας μερικές επεκτάσεις αυτών των γλωσσών σε μορφή μερικών βασικών λέξεων-κλειδιών αποκτά την δυνατότητα να μπορεί να εκφράσει τεράστιους όγκους παραλληλισμού και να κατευθύνει τον μεταγλωττιστή στο τμήμα της εφαρμογής που αντιστοιχίζεται στην μονάδα επεξεργασίας γραφικών. Όταν η μονάδα επεξεργασίας γραφικών υποστηρίζει αυτό το μοντέλο κάποιο τμήμα του κώδικα CUDA εκτελείται στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας και κάποιο άλλο στην μονάδα επεξεργασίας γραφικών και έτσι η αρχιτεκτονική CUDA είναι ετερογενής (heterogeneous) φύσης. Στην περίπτωση αυτήν η μονάδα επεξεργασίας γραφικών μαζί με την μνήμη που αντιστοιχεί σε αυτήν ονομάζεται συσκευή (device) ενώ η κεντρική μονάδα επεξεργασίας μαζί με την μνήμη που αντιστοιχεί σε αυτήν ονομάζεται

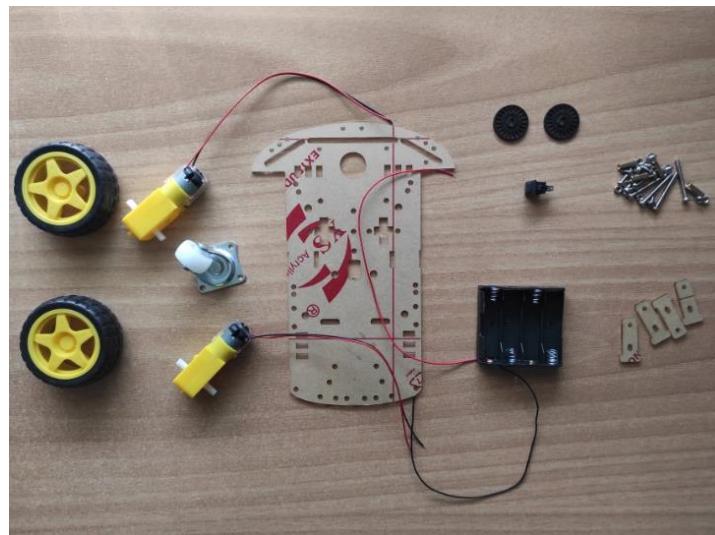
οικοδεσπότης (host). Τα βήματα που απαιτούνται για την εκτέλεση ενός κώδικα CUDA είναι η αντιγραφή των εισόδων από την μνήμη του οικοδεσπότη στην μνήμη της συσκευής, η φόρτωση του πυρήνα και η εκτέλεση του από την συσκευή και τέλος η αντιγραφή των αποτελεσμάτων από την μνήμη της συσκευής στην μνήμη του οικοδεσπότη. Έτσι γίνεται φανερό ότι ο κώδικας που εκτελείται στην συσκευή ονομάζεται πυρήνας (kernel) και ο κώδικας αυτός διασπάται σε μικρότερα τμήματα τα οποία και εκτελούνται παράλληλα από κάθε επεξεργαστή συνεχούς ροής (streaming processor). Ο κώδικας που εκτελείται σε κάθε επεξεργαστή συνεχούς ροής ονομάζεται νήμα (thread) και η παράλληλη εκτέλεση όλων των νημάτων επιτυγχάνεται με την οργάνωση τους σε ομάδες που ονομάζονται μπλοκς (blocks). Τα νήματα μέσα σε ένα μπλοκ μπορεί να είναι οργανωμένα σε μορφή μονοδιάστατου πίνακα ή αλλιώς διανύσματος, σε μορφή δισδιάστατου πίνακα ή σε μορφή τρισδιάστατου πίνακα ανάλογα με την διάσταση του αντίστοιχου μπλοκ. Κάθε μπλοκ εκτελείται σε έναν πολυεπεξεργαστή συνεχούς ροής (streaming multiprocessor). Τέλος τα μπλοκς οργανώνονται και αυτά σε ομάδες είτε σε μορφή μονοδιάστατου πίνακα ή διανύσματος είτε σε μορφή δισδιάστατου πίνακα σχηματίζοντας ένα πλέγμα (grid) η διάσταση του οποίου καθορίζει την μορφή οργάνωσης των μπλοκς από τα οποία αποτελείται. Η μνήμη της συσκευής αναφέρεται ως καθολική μνήμη (global memory) και σε αυτήν την μνήμη έχουν πρόσβαση όλα τα νήματα ανεξάρτητα από το μπλοκ ή το πλέγμα στο οποίο ανήκουν. Η καθολική μνήμη έχει μεγάλο μέγεθος ενώ παράλληλα διακρίνεται από υψηλή καθυστέρηση σε κάθε προσπέλαση της είτε αυτή γίνεται για ανάγνωση είτε για εγγραφή. Εννοιολογικά η μνήμη αυτή χωρίζεται σε κάποια τμήματα τα οποία εξυπηρετούν τις συσκευές ανάλογα με τα δεδομένα που θα προσπελάσουν όταν αυτό τους ζητηθεί. Αυτά τα λογικά τμήματα είναι η μνήμη σταθερών (constant memory) και η μνήμη υφών (texture memory). Η μνήμη σταθερών που διαθέτει η συσκευή είναι και αυτή μια αργή μνήμη όπως είναι και η καθολική μνήμη αλλά σε αντίθεση με την καθολική μνήμη η μνήμη σταθερών χρησιμοποιείται από τα νήματα μόνο για ανάγνωση. Σε αυτήν την μνήμη αποθηκεύονται οι τιμές που παραμένουν σταθερές κατά την διάρκεια των εκτελούμενων διεργασιών καθώς και τα ορίσματα των πυρήνων προς εκτέλεση. Όπως η μνήμη σταθερών έτσι και η μνήμη υφών είναι μια μνήμη που χρησιμοποιείται από τα νήματα μόνο για ανάγνωση και η μνήμη αυτή εξυπηρετεί ειδικά πρότυπα προσπέλασης δεδομένων. Εκτός από τα παραπάνω είδη μνήμης στην συσκευή υπάρχει επίσης η κοινή μνήμη (shared memory), η τοπική μνήμη (local memory) και οι καταχωρητές (registers). Η κοινή μνήμη πρόκειται για μια γρήγορη μνήμη η διαχείριση της οποίας απαιτεί προσοχή αφού η μνήμη αυτή είναι χωρισμένη σε υπο-στοιχεία μνήμης (banks). Η κοινή μνήμη μπορεί να προσπελαστεί από όλα τα νήματα που εκτελούνται μέσα στο ίδιο μπλοκ. Η τοπική μνήμη πρόκειται για μια αργή μνήμη η οποία χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των δεδομένων που δεν μπορούν να αποθηκευτούν στους καταχωρητές. Οι καταχωρητές αποτελούν τα πιο γρήγορα στοιχεία μνήμης και χρησιμοποιούνται από τα νήματα για ανάγνωση και εγγραφή δεδομένων με το κάθε νήμα να διαθέτει τον δικό του καταχωρητή [99].

## **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>**

### **4.1 Επιλογή εξαρτημάτων**

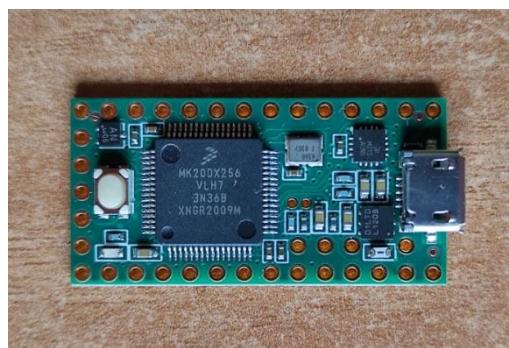
#### **4.1.1 Επιλογή δομικών εξαρτημάτων**

Αρχικά έγινε η επιλογή των δομικών εξαρτημάτων του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ δηλαδή της βάσης , των κινητήρων DC , της πλακέτας μικροελεγκτή και των αισθητήρων απόστασης του ρομπότ. Για την επιλογή της βάσης και των κινητήρων DC υπήρχαν δυο λύσεις όπου και οι δυο λύσεις αφορούσαν μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα η οποία εκτός από τα δυο προαναφερθέντα εξαρτήματα περιείχε και τους τροχούς αλλά και οποιοδήποτε άλλο απαραίτητο εξάρτημα για τη συναρμολόγηση του σώματος του ρομπότ. Η πρώτη λύση αφορούσε την αγορά πλατφόρμας που διέθετε τέσσερις τροχούς ενώ η δεύτερη λύση αφορούσε την αγορά πλατφόρμας που διέθετε τρεις τροχούς με τον τρίτο τροχό να χρησιμοποιείται για τη στήριξη του ρομπότ. Τελικά το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ που υλοποιήθηκε σχεδιάστηκε σύμφωνα με τη πλατφόρμα της δεύτερης λύσης αφού στην πρώτη λύση οι κινητήρες ήταν τέσσερις όσοι δηλαδή και οι τροχοί ενώ στην δεύτερη λύση οι κινητήρες ήταν δυο με αποτέλεσμα για τον ίδιο χρόνο λειτουργίας του ρομπότ η πρώτη λύση να απαιτεί μπαταρία μεγαλύτερης χωρητικότητας σε σχέση με τη δεύτερη λύση. Επιλέγοντας λοιπόν τη δεύτερη λύση η ισχύς που καταναλώνει το σύστημα είναι μικρότερη από την ισχύ που θα κατανάλωνε το σύστημα αν εφαρμοζόταν η πρώτη λύση και αυτό ενισχύει ακόμα περισσότερο την παράμετρο του κόστους αφού το σύστημα δεν αποτελείται μόνο από αυτήν τη πλατφόρμα η οποία της δεύτερης λύσης ήταν πιο φτηνή σε σχέση με αυτή της πρώτης αλλά και από άλλα εξαρτήματα τα οποία θα ήταν πιο ακριβά αν το ρομπότ σχεδιαζόταν σύμφωνα με τη πλατφόρμα της πρώτης λύσης. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 42 η πλατφόρμα αποτελείται από τη βάση , τους δυο κινητήρες DC , τους τρεις τροχούς , την μπαταριοθήκη , τους κωδικοποιητές ταχύτητας , τον διακόπτη ενεργοποίησης και απενεργοποίησης και από τις βίδες , τα παξιμάδια , τους αποστάτες και τους συνδέσμους που χρειάζονται για τη συναρμολόγηση του σώματος του ρομπότ.



**Εικόνα 42 :** Η πλατφόρμα του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ

Για την επιλογή της πλακέτας του μικροελεγκτή υπήρχαν τρεις λύσεις. Η πρώτη λύση αφορούσε την αγορά του arduino due , η δεύτερη λύση αφορούσε την αγορά του raspberry pi pico και η τρίτη λύση αφορούσε την αγορά του teensy 3.2. Το κοινό που έχουν αυτές οι τρεις πλακέτες είναι ότι βασίζονται σε μικροελεγκτή αρχιτεκτονικής ARM της εταιρίας ATMEL στο arduino due , raspberry pi στο raspberry pi pico και NXP στο teensy 3.2 και αυτό τις καθιστά ικανές στο να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις υπολογιστικές απαιτήσεις του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ σε σχέση με άλλες πλακέτες όπως το arduino uno που βασίζονται σε μικροελεγκτές ATmega της εταιρίας ATMEL. Επίσης και οι τρεις αυτές πλακέτες διαθέτουν αρκετή μνήμη ώστε να μπορεί να αποθηκευτεί το πρόγραμμα μαζί με όλες τις μεταβλητές του. Από τις πλακέτες που αναφέρθηκαν ως λύσεις αυτή που χρησιμοποιήθηκε είναι η teensy 3.2 αφού η πλακέτα arduino due απορρίφθηκε λόγω κόστους και μεγέθους ενώ η πλακέτα raspberry pi pico παρόλο του πολύ μικρού κόστους της απορρίφθηκε λόγω του ότι δεν είναι συμβατή με το arduino IDE. Η πλακέτα teensy 3.2 φαίνεται στην εικόνα 43.



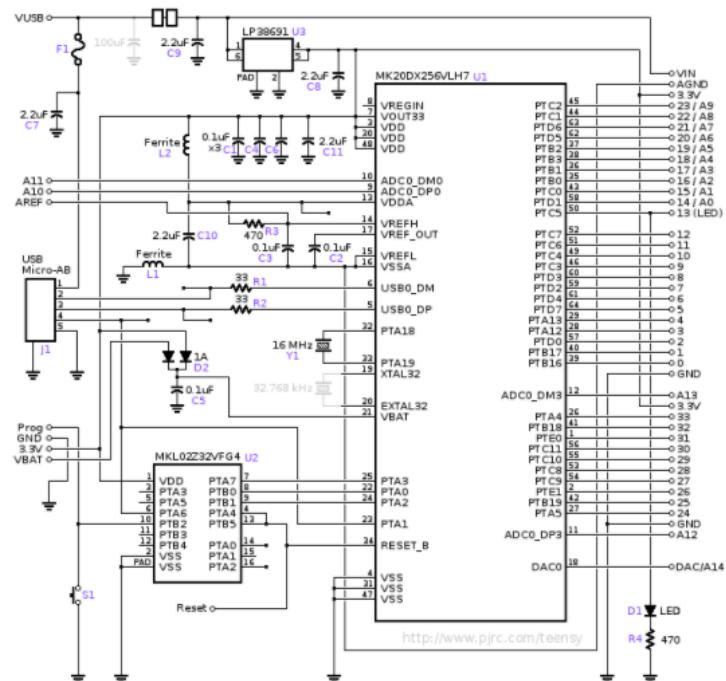
**Εικόνα 43:** Η πλακέτα μικροελεγκτή teensy 3.2

Κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά της πλακέτας teensy 3.2 είναι τα παρακάτω [100].

❖ . MK20DX256VLH7 Microcontroller (ARM Cortex-M4 at 72 MHz)

- ❖ . 256K Flash , 64K RAM , 2K EEPROM
- ❖ . USB device 12 Mbit/sec
- ❖ . 34 digital input/output pins , 12 PWM output pins
- ❖ . 21 analog input pins , 1 analog output pin , 12 capacitive sense pins
- ❖ . 3 serial , 1 SPI , 2 I2C ports
- ❖ . 1 I2S/TDM digital audio port
- ❖ . 1 CAN bus
- ❖ . 16 general purpose DMA channels
- ❖ . RTC for date/time

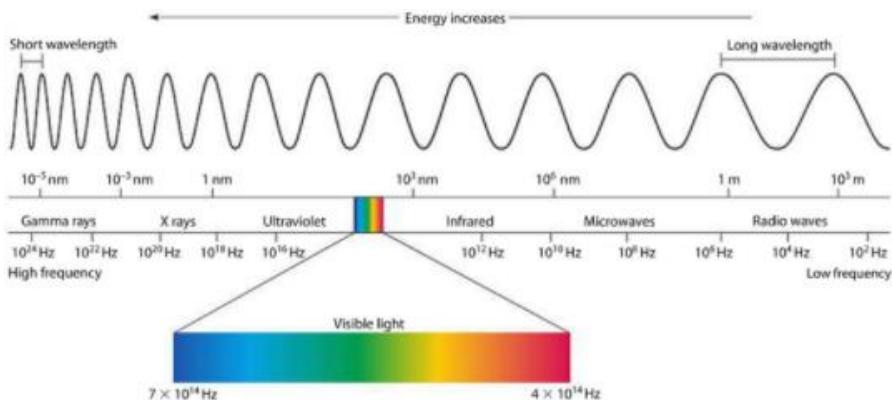
Το κύκλωμα της πλακέτας teensy 3.2 φαίνεται στο σχήμα 31.



**Σχήμα 31:** Το κύκλωμα της πλακέτας teensy 3.2 [100]

Για την επιλογή των αισθητήρων απόστασης υπήρχαν δυο λύσεις. Η πρώτη λύση αφορούσε την αγορά του αισθητήρα απόστασης που λειτουργεί με υπέρυθρη ακτινοβολία της εταιρίας Waveshare ενώ η δεύτερη λύση αφορούσε την αγορά του αισθητήρα HC-SR04 της εταιρίας OEM που λειτουργεί με υπέρηχους. Η επιλογή κρίθηκε καθαρά με βάση τον τρόπο λειτουργίας αυτών των δυο αισθητήρων και με βάση το πως αυτοί επηρεάζονται από το περιβάλλον. Η υπέρυθρη ακτινοβολία είναι ένα τμήμα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [101]. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (electromagnetic radiation) είναι η εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας υπό μορφή κυμάτων που ονομάζονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα [102]. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα (electromagnetic wave)

είναι η διάδοση της διαταραχής του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου στο χώρο. Η διαταραχή αυτή είναι περιοδική και πραγματοποιείται γύρω από μια θέση ισορροπίας και έτσι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα πρόκειται στην ουσία για ταυτόχρονη ταλάντωση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο ταλαντώνονται σε επίπεδα κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος και για αυτόν τον λόγο το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι εγκάρσιο κύμα. Όπως σε κάθε κύμα έτσι και στο ηλεκτρομαγνητικό κύμα διακρίνουμε τη συχνότητα  $f$  του κύματος η οποία είναι ίση με το αντίστροφο της περιόδου  $T$  δηλαδή του χρόνου που απαιτείται για μια πλήρη ταλάντωση και το μήκος κύματος  $\lambda$  το οποίο είναι ίσο με την απόσταση δυο διαδοχικών μεγίστων ή δυο διαδοχικών ελαχίστων κατά μήκος της διάδοσης του κύματος. Επίσης διακρίνουμε και την ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού κύματος η οποία σύμφωνα με τον Max Planck δεν εκπέμπεται με συνεχή τρόπο αλλά με συγκεκριμένες ποσότητες τα λεγόμενα κβάντα ενέργειας. Σύμφωνα με αυτήν τη θεωρία η ενέργεια που εκπέμπεται είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της ενεργειακής μονάδας  $h \cdot f$  όπου  $h$  η σταθερά του Planck η οποία ισούται με  $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ . Η μονάδα μέτρησης ενός κβάντου ενέργειας είναι το ηλεκτρονιοβολτ (eV) όπου 1eV είναι η ενέργεια που αποκτά ένα ηλεκτρόνιο όταν επιταχυνθεί από ηλεκτρικό δυναμικό 1V. Το 1eV ισούται με  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται στο κενό με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός ενώ μέσα στην ύλη με ταχύτητα μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός [103]. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (electromagnetic spectrum) το οποίο και φαίνεται στην εικόνα 44 είναι το εύρος της περιοχής συχνοτήτων που καλύπτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και εκτείνεται θεωρητικά από σχεδόν μηδενικές συχνότητες έως το άπειρο. Στην πράξη οι συχνότητες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος κυμαίνονται μεταξύ 0Hz έως και  $3 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$ .



Εικόνα 44: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [104]

Η υπέρυθρη ακτινοβολία (infrared radiation) καλύπτει στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μια ζώνη συχνοτήτων που κυμαίνεται από 300GHz έως 400THz με αντίστοιχο μήκος κύματος που κυμαίνεται από 1mm έως 740nm και με ενέργεια φωτονίων που κυμαίνεται από  $1,24 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$  έως 1,6eV [105]. Η υπέρυθρη ακτινοβολία δεν είναι ορατή από τον άνθρωπο με “γυμνό” μάτι παρά μόνο αν

χρησιμοποιηθεί κάμερα ενώ από κάποιους άλλους οργανισμούς όπως οι σκύλοι οι υπέρυθρες ακτίνες μπορούν να γίνουν αντιληπτές. Ο αισθητήρας υπερύθρων αποτελείται από ένα πομπό και από ένα δέκτη υπέρυθρης ακτινοβολίας. Ο πομπός υπερύθρων είναι στην ουσία ένα LED υπέρυθρης ακτινοβολίας ενώ ο δέκτης είναι στην ουσία μια φωτοδίοδος υπέρυθρης ακτινοβολίας. Όταν ένα αντικείμενο πλησιάζει τον αισθητήρα το υπέρυθρο φως που εκπέμπεται από τον πομπό αντανακλάται από το αντικείμενο και ανιχνεύεται από τον δέκτη. Ο αισθητήρας υπερήχων από την άλλη μεριά λειτουργεί ανιχνεύοντας τους υπερήχους που αντανακλώνται από το αντικείμενο που βρίσκεται μπροστά του. Οι υπέρηχοι (ultrasounds) όπως φαίνεται και από το ηχητικό φάσμα στην εικόνα 45 πρόκειται στην ουσία για ακουστικά κύματα συχνότητας μεγαλύτερη των 20kHz. Στο εύρος μεταξύ κάτω των 20kHz και πάνω των 20Hz ανήκουν οι συχνότητες των ακουστικών ήχων (human hearing range) δηλαδή των ήχων που μπορεί να ακούσει και να αντιληφθεί ο άνθρωπος και τέλος υπάρχουν και οι υπόηχοι (infrasounds) δηλαδή οι ήχοι συχνότητας κάτω των 20Hz [106].



**Εικόνα 45:** Το ηχητικό φάσμα [106]

Όπως ο αισθητήρας υπερύθρων έτσι και ο αισθητήρας υπερήχων αποτελείται από τον πομπό ο οποίος εκπέμπει τους υπέρηχους και από τον δέκτη ο οποίος ανιχνεύει τους υπέρηχους που αντανακλώνται από το αντικείμενο. Επομένως και οι δύο αισθητήρες είναι ενεργοί. Επειδή ο ήλιος εκπέμπει σε ένα μικρό ποσοστό υπερύθρη ακτινοβολία οι αισθητήρες υπερύθρων επηρεάζονται από τον ήλιο. Επίσης οι αισθητήρες υπερύθρων επηρεάζονται και από τα χρώματα αφού το καθένα από αυτά απορροφάει σε διαφορετικό βαθμό την υπέρυθρη ακτινοβολία με το άσπρο να αντανακλά σχεδόν όλη την υπέρυθρη ακτινοβολία και το μαύρο να απορροφά σχεδόν όλη την υπέρυθρη ακτινοβολία. Οι αισθητήρες υπερύθρων δεν είναι όμως οι μόνοι που επηρεάζονται από το περιβάλλον αφού και οι αισθητήρες υπερήχων επηρεάζονται από τη θερμοκρασία και από την υγρασία. Συγκεκριμένα η απόσταση χρησιμοποιώντας τους αισθητήρες υπερήχων υπολογίζεται σύμφωνα με τον χρόνο που απαιτείται ώστε το σήμα από την στιγμή που εκπέμπεται από τον πομπό να ανιχνευτεί από τον δέκτη με αποτέλεσμα μικρός χρόνος να σημαίνει ότι το αντικείμενο είναι κοντά ενώ μεγάλος χρόνος να σημαίνει ότι το αντικείμενο είναι μακριά. Έτσι λοιπόν η σχέση που δίνει την απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και του αντικειμένου είναι η σχέση (34).

$$d = \left( \frac{\Delta t}{2} \right) \cdot 0,0343 \quad (34)$$

Στην σχέση (34) η απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και του αντικειμένου δίνεται σε cm και επίσης στην ίδια σχέση το Δt αντιστοιχεί στον χρόνο σε ms που χρειάστηκε το σήμα ώστε να ταξιδέψει από τον πομπό και να φτάσει στον δέκτη λόγω ανάκλασης ενώ ο αριθμός 0,0343 αντιστοιχεί στην ταχύτητα του ήχου σε μονάδες  $\frac{\text{cm}}{\mu\text{s}}$  και σε περιβάλλον με ξηρό αέρα και θερμοκρασία 20°C. Επομένως η ταχύτητα του ήχου δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την υγρασία και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος σύμφωνα με την σχέση (35).

$$c \cong 331,4 + (0,606 \cdot T) + (0,0124 \cdot H) \quad (35)$$

Στην σχέση (35) το T αντιστοιχεί στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος σε βαθμούς κελσίου, το H αντιστοιχεί στην υγρασία του περιβάλλοντος σε ποσοστό % και το c αντιστοιχεί στην ταχύτητα του ήχου σε  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  [107]. Επειδή η θερμοκρασία και η υγρασία δεν μεταβάλλονται τόσο εύκολα όσο το φως που προέρχεται από το περιβάλλον και το χρώμα του αντικειμένου που βρίσκεται κάθε φορά μπροστά από τον αισθητήρα το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ υλοποιήθηκε σύμφωνα με τον αισθητήρα υπερήχων HC-SR04. Μάλιστα αγοράστηκαν τρεις αισθητήρες υπερήχων HC-SR04 αφού ο ένας δεν είναι αρκετός λόγω της μικρής γωνίας που καλύπτει. Παρόλο βέβαια που αυτή η γωνία είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του αισθητήρα υπερύθρων η απόσταση που καλύπτει ο αισθητήρας υπερήχων είναι μεγαλύτερη από αυτήν του αισθητήρα υπερύθρων. Όσον αφορά την τοποθέτηση των τριών αισθητήρων απόστασης HC-SR04 πάνω στο αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ ο ένας τοποθετήθηκε στην αριστερή πλευρά του ρομπότ, ο άλλος στο κέντρο του ρομπότ και ο τελευταίος στη δεξιά πλευρά του ρομπότ καλύπτοντας έτσι μια μεγάλη γωνία από το μπροστινό μέρος του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ. Οι αισθητήρες απόστασης HC-SR04 ultrasonic sensors φαίνονται στην εικόνα 46.



**Εικόνα 46:** Οι αισθητήρες απόστασης HC-SR04

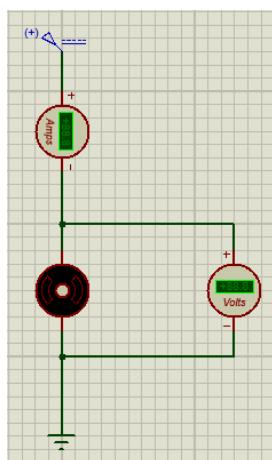
Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα απόστασης HC-SR04 ultrasonic sensor είναι τα παρακάτω [108].

❖ . Power Supply: +5V DC

- ❖ . Quiescent Current: <2mA
- ❖ . Working Current: 15mA
- ❖ . Effectual Angle: <15°
- ❖ . Ranging Distance: 2cm – 400cm
- ❖ . Resolution : 0.3cm
- ❖ . Measuring Angle: 30°
- ❖ . Trigger Input Pulse width: 10uS
- ❖ . Dimension: 45mm x 20mm x 15mm

#### 4.1.2 Επιλογή υπόλοιπων εξαρτημάτων

Στην συνέχεια με βάση τα δομικά εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν στο αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ έγινε η επιλογή των υπόλοιπων εξαρτημάτων. Για την επιλογή του κυκλώματος οδήγησης των δυο κινητήρων DC μετρήθηκε το ρεύμα που καταναλώνει ο ένας κινητήρας DC με τοποθετημένη τη ρόδα και χωρίς αυτή να έρχεται σε επαφή με το έδαφος αλλά και το ρεύμα που καταναλώνει ο ίδιος κινητήρας DC με μπλοκαρισμένη τη ρόδα ώστε να μην μπορεί να περιστραφεί. Οι δυο αυτές καταστάσεις αντιπροσωπεύουν το ελάχιστο και το μέγιστο φορτίο του κινητήρα αντίστοιχα. Τα δυο αυτά ρεύματα μετρήθηκαν για τάση στα άκρα του κινητήρα ίση με 3V και 6V δηλαδή ίση με την ελάχιστη και την μέγιστη τάση αντίστοιχα που μπορεί να εφαρμοστεί στα άκρα του κινητήρα ώστε αυτός να λειτουργεί μέσα στα επιτρεπτά όρια. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με ένα ολοκληρωμένο όργανο ταυτόχρονης ένδειξης τάσης και ρεύματος αλλά μπορούν να πραγματοποιηθούν και με δυο ξεχωριστά πολύμετρα όπου το ένα θα λειτουργεί ως αμπερόμετρο και το άλλο ως βιολτόμετρο. Τα δυο αυτά πολύμετρα θα πρέπει να συνδεθούν όπως φαίνεται στο σχήμα 32.



**Σχήμα 32:** Η συνδεσμολογία για την μέτρηση τάσης και ρεύματος DC κινητήρα

Το ρεύμα που καταναλώνει ο ένας κινητήρας DC όταν στα άκρα του έχει εφαρμοστεί DC τάση ίση με 6V και όταν αυτός λειτουργεί με το ελάχιστο φορτίο φαίνεται στην εικόνα 47.



**Εικόνα 47:** Η ένδειξη του ρεύματος DC κινητήρα όταν αυτός λειτουργεί με το ελάχιστο φορτίο και όταν στα άκρα του έχει εφαρμοστεί DC τάση ίση με 6V

Το ρεύμα που καταναλώνει ο ίδιος κινητήρας DC όταν στα άκρα του έχει εφαρμοστεί DC τάση ίση με 6V και όταν αυτός λειτουργεί με το μέγιστο φορτίο φαίνεται στην εικόνα 48.



**Εικόνα 48:** Η ένδειξη του ρεύματος DC κινητήρα όταν αυτός λειτουργεί με το μέγιστο φορτίο και όταν στα άκρα του έχει εφαρμοστεί DC τάση ίση με 6V

Το ρεύμα που καταναλώνει ο ίδιος κινητήρας DC όταν στα άκρα του έχει εφαρμοστεί DC τάση ίση με 3V και όταν αυτός λειτουργεί με το ελάχιστο φορτίο φαίνεται στην εικόνα 49.



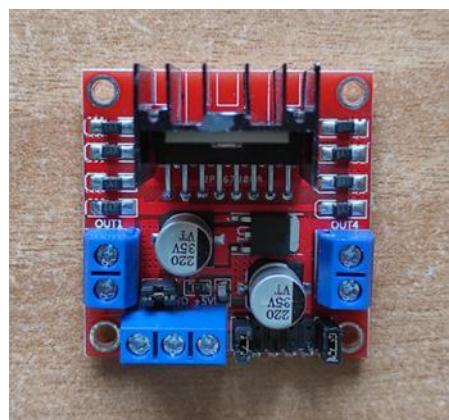
**Εικόνα 49:** Η ένδειξη του ρεύματος DC κινητήρα όταν αυτός λειτουργεί με το ελάχιστο φορτίο και όταν στα άκρα του έχει εφαρμοστεί DC τάση ίση με 3V

Το ρεύμα που καταναλώνει ο ίδιος κινητήρας DC όταν στα άκρα του έχει εφαρμοστεί DC τάση ίση με 3V και όταν αυτός λειτουργεί με το μέγιστο φορτίο φαίνεται στην εικόνα 50.



**Εικόνα 50:** Η ένδειξη του ρεύματος DC κινητήρα όταν αυτός λειτουργεί με το μέγιστο φορτίο και όταν στα άκρα του έχει εφαρμοστεί DC τάση ίση με 3V

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά παρατηρούμε ότι το όταν ο κινητήρας τροφοδοτείται με τάση 6V το ρεύμα που διέρχεται από αυτόν κυμαίνεται μεταξύ 110mA και 1,01A. Επομένως το κύκλωμα οδήγησης θα πρέπει να έχει δυο κανάλια όπου στο κάθε κανάλι θα συνδέεται ένας κινητήρας DC ώστε να ελέγχεται η ταχύτητα και φορά περιστροφής του. Επίσης το κύκλωμα οδήγησης θα πρέπει να δέχεται 6V τάση εισόδου για την τροφοδοσία των δυο κινητήρων DC και να μπορεί να προσφέρει στο κάθε κανάλι του ξεχωριστά έως και 1,01A. Δεδομένων των προδιαγραφών αυτών οι επιλογές ήταν το L298N Dual Motor Driver από την εταιρία OEM, το DRV8835 Dual Motor Driver από την εταιρία Pololu και το A4953ELJTR-T Dual Motor Driver από την εταιρία Microbot. Τελικά στο αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ χρησιμοποιήθηκε το L298N Dual Motor Driver αφού είναι το πιο φθηνό σε σχέση με τα άλλα δυο κυκλώματα οδήγησης αλλά και το πιο γνωστό με πολλές αναφορές και πληροφορίες στο διαδίκτυο. Αυτό το κύκλωμα οδήγησης βασίζεται στο ολοκληρωμένο L298N της εταιρίας STMicroelectronics. Η πλακέτα οδήγησης L298N Dual Motor Driver των δυο κινητήρων DC φαίνεται στην εικόνα 51.



**Εικόνα 51:** Η πλακέτα οδήγησης L298N Dual Motor Driver των δυο κινητήρων DC

Για την επιλογή της μπαταρίας προκειμένου να τροφοδοτηθεί ολόκληρο το κύκλωμα του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ υπήρχαν τρεις επιλογές όπου και στις τρεις επιλογές η χωρητικότητα της μπαταρίας ήταν περίπου ίση με 3000mAh και η τάση ήταν περίπου ίση είτε με 6V είτε με 3V όσο δηλαδή είναι τα όρια του διαστήματος των τάσεων για τις οποίες λειτουργούν οι δυο κινητήρες DC.

Η πρώτη επιλογή στηριζόταν στην μπαταρία RC Car Battery 7.2V 3300mAh Rechargeable Battery Pack SC τύπου νικελίου μετάλλου υδριδίου (NiMH) , η δεύτερη επιλογή στηριζόταν στην μπαταρία efest purple IMR 18650 3000mAh 3,7V τύπου ιόντων λιθίου (Li-Ion) και η τρίτη επιλογή στηριζόταν στην μπαταρία Gens ace LCG 3000mAh 7,4V 50/100C 2S1P Hard Case τύπου ιόντων λιθίου πολυμερούς (Li-Po). Η επιλογή κρίθηκε με βάση τον λόγο  $\frac{\text{Wh}}{\text{Kg}}$  όπου στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) ισούται με  $3600 \cdot \frac{\text{J}}{\text{Kg}}$  αφού η μπαταρία που αποτελεί το πιο βαρύ εξάρτημα σε σχέση με τα υπόλοιπα θα πρέπει να παρέχει όσο περισσότερη ενέργεια και ταυτόχρονα να είναι όσον τον δυνατόν ελαφριά ώστε να επιτρέψει στο αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ να μπορεί να λειτουργεί για αρκετή ώρα χωρίς όμως να του προσθέτει μεγάλο βάρος αφού η βάση του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ που επιλέχτηκε μπορεί να σηκώσει έως και 1Kg , τον λόγο  $\frac{\text{Self-Discharge}}{\text{month}}$  αφού το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ δεν θα λειτουργεί συνέχεια και στο διάστημα αυτό η μπαταρία θα πρέπει να μην χάνει την ενέργειά της και με βάση το κόστος. Εξαιτίας του χαμηλού κόστους , του υψηλού λόγου  $\frac{\text{J}}{\text{Kg}}$  όπως φαίνεται από τον πίνακα 3 και του χαμηλού λόγου  $\frac{\text{Self-Discharge}}{\text{month}}$  όπως επίσης φαίνεται από τον πίνακα 3 στο αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ χρησιμοποιήθηκε η μπαταρία efest purple IMR 18650 3000mAh 3,7V τύπου Li-Ion.

	NiCd	NiMH	Lead Acid	Li-ion	Li-ion polymer	Reusable Alkaline
Gravimetric Energy Density (Wh/kg)	45-80	60-120	30-50	110-160	100-130	80 (initial)
Internal Resistance (includes peripheral circuits) in mΩ	100 to 200 <sup>1</sup> 6V pack	200 to 300 <sup>1</sup> 6V pack	<100 <sup>1</sup> 12V pack	150 to 250 <sup>1</sup> 7.2V pack	200 to 300 <sup>1</sup> 7.2V pack	200 to 2000 <sup>1</sup> 6V pack
Cycle Life (to 80% of initial capacity)	1500 <sup>2</sup>	300 to 500 <sup>2,3</sup>	200 to 300 <sup>2</sup>	500 to 1000 <sup>3</sup>	300 to 500	50 <sup>3</sup> (to 50%)
Fast Charge Time	1h typical	2-4h	8-16h	2-4h	2-4h	2-3h
Overcharge Tolerance	moderate	low	high	very low	low	moderate
Self-discharge / Month (room temperature)	20% <sup>4</sup>	30% <sup>4</sup>	5%	10% <sup>5</sup>	~10% <sup>5</sup>	0.3%
Cell Voltage(nominal)	1.25V <sup>6</sup>	1.25V <sup>6</sup>	2V	3.6V	3.6V	1.5V
Load Current						
- peak	20C	5C	5C <sup>7</sup>	>2C	>2C	0.5C
- best result	1C	0.5C or lower	0.2C	1C or lower	1C or lower	0.2C or lower
Operating Temperature(discharge only)	-40 to 60°C	-20 to 60°C	-20 to 60°C	-20 to 60°C	0 to 60°C	0 to 65°C
Maintenance Requirement	30 to 60 days	60 to 90 days	3 to 6 months <sup>8</sup>	not req.	not req.	not req.
Typical Battery Cost (US\$, reference only)	\$50 (7.2V)	\$60 (7.2V)	\$25 (6V)	\$100 (7.2V)	\$100 (7.2V)	\$5 (9V)
Cost per Cycle(US\$) <sup>11</sup>	\$0.04	\$0.12	\$0.10	\$0.14	\$0.29	\$0.10-0.50
Commercial use since	1950	1990	1970 (sealed lead acid)	1991	1999	1992

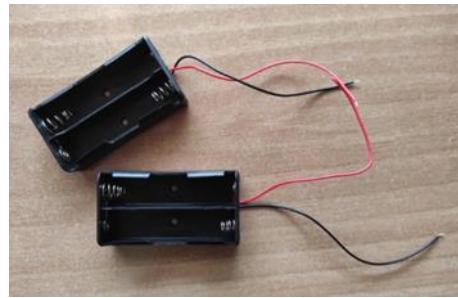
**Πίνακας 3:** Τα χαρακτηριστικά των συχνών τύπων μπαταριών [109]

Συγκεκριμένα για την τροφοδοσία του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις τέτοιες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες για μεγαλύτερη αυτονομία αλλά και για να αυξηθεί η τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ αφού η τάση που δέχεται το κύκλωμα οδήγησης L298N Dual Motor Driver για την τροφοδοσία των δυο κινητήρων DC ανήκει στο διάστημα από 5V έως και 35V. Έτσι οι τέσσερις αυτές μπαταρίες συνδέθηκαν ανά δυο σε σειρά και ανά ζευγάρι παράλληλα ώστε να σχηματίσουν ονομαστική τάση 7,4V και χωρητικότητα 6000mAh. Επειδή η τάση της μιας μπαταρίας όταν αυτή είναι πλήρως φορτισμένη είναι περίπου 4,2V, οι τέσσερις μπαταρίες συνδεδεμένες με τον τρόπο που αναφέρθηκε προηγουμένως και όταν αυτές είναι πλήρως φορτισμένες δίνουν μια τάση περίπου 8,4V. Συγκεκριμένα η τάση που μετρήθηκε από τις τέσσερις μπαταρίες όταν αυτές είναι πλήρως φορτισμένες και όταν είναι συνδεδεμένες με τον τρόπο που αναφέρθηκε προηγουμένως είναι 8,29V. Ακολουθώντας βέβαια αυτήν την συνδεσμολογία η τάση στα άκρα των δυο κινητήρων DC όταν αυτοί θα περιστρέφονται με την μέγιστη ταχύτητα θα είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη επιτρεπτή που μπορεί να εφαρμοστεί στα άκρα των δυο κινητήρων με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος καταστροφής τους. Το πρόβλημα αυτό όπως θα γίνει φανερό και στην συνέχεια αντιμετωπίστηκε μέσω του κώδικα. Οι τέσσερις μπαταρίες efest IMR 18650 3000mAh 3,7V φαίνονται στην εικόνα 52.



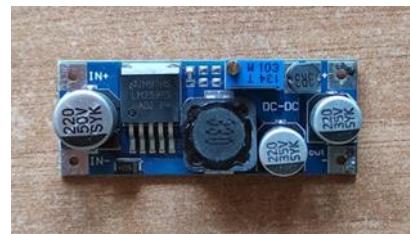
**Εικόνα 52:** Οι μπαταρίες efest IMR 18650 3000mAh 3,7V

Για την τοποθέτηση των μπαταριών στη βάση του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ χρησιμοποιήθηκαν δύο μπαταριοθήκες με δύο υποδοχείς η κάθε μια για σύνδεση δύο μπαταριών σε σειρά. Οι δύο μπαταριοθήκες φαίνονται εικόνα 53.



**Εικόνα 53:** Οι μπαταριοθήκες

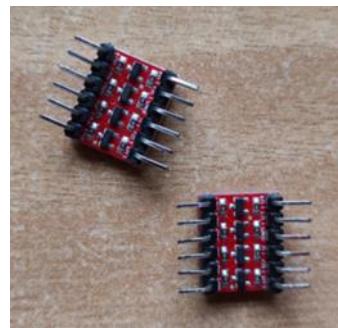
Επειδή το teensy 3.2 καθώς και οι αισθητήρες απόστασης HC-SR04 λειτουργούν με τάση τροφοδοσίας 5V και ολόκληρο το κύκλωμα τροφοδοτείται με τάση 8,29V χρησιμοποιήθηκε και ένα κύκλωμα DC to DC Step Down Converter το οποίο μετατρέπει την DC τάση 8,29V σε DC τάση 5V. Το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε στο αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ είναι το LM2596S-ADJ DC to DC Step Down Switching Regulator της εταιρίας OEM που βασίζεται στο ολοκληρωμένο LM2596S-ADJ της εταιρίας National Semiconductor. Η πλακέτα του κυκλώματος αυτού φαίνεται στην εικόνα 54.



**Εικόνα 54:** Η πλακέτα μετατροπής LM2596S-ADJ DC to DC Step Down Switching Regulator μιας DC τάσης σε DC τάση χαμηλότερης τιμής

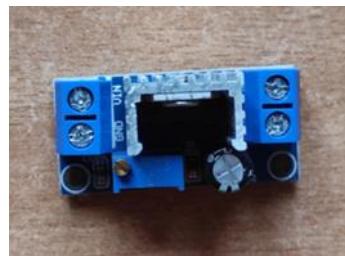
Επειδή οι αισθητήρες απόστασης HC-SR04 χρειάζονται παλμό πλάτους 5V στην είσοδο Trig και επειδή αντίστοιχα δίνουν παλμό πλάτους 5V στην έξοδο Echo αγοράστηκαν και δύο πανομοιότυπα

κυκλώματα TTL Logic Level Bi-Directional Converter ώστε να μπορούν οι παλμοί πλάτους 3,3V που δίνει το teensy 3.2 να μεταφραστούν σε παλμούς πλάτους 5V που χρειάζονται οι αισθητήρες απόστασης και αντίστοιχα ώστε να μπορούν οι παλμοί πλάτους 5V που δίνουν οι αισθητήρες απόστασης να μεταφραστούν σε παλμούς πλάτους 3,3V παρόλο που το μέγιστο επιτρεπτό όριο τάσης που μπορούν να δεχτούν οι ψηφιακές θύρες εισόδου/εξόδου του teensy 3.2 είναι τα 5V [100]. Ο λόγος για τον οποίο αγοράστηκαν δυο ίδια τέτοια κυκλώματα αντί για κάποιο άλλο που θα εκτελούσε την ίδια λειτουργία και θα κάλυπτε από μόνο του τις ανάγκες του αυτόνομο τροχοφόρου ρομπότ που ήταν και η δεύτερη εναλλακτική είναι ότι το συγκεκριμένο κύκλωμα της δεύτερης εναλλακτικής ήταν πιο μεγάλο σε μέγεθος από ότι και τα δυο κυκλώματα της πρώτης εναλλακτικής μαζί. Έτσι στο αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ χρησιμοποιήθηκαν τα δυο μικρά κυκλώματα της πρώτης εναλλακτικής με λιγότερους ακροδέκτες το καθένα αντί για το κύκλωμα της δεύτερης εναλλακτικής με περισσότερους ακροδέκτες με αποτέλεσμα ο συνολικός χώρος που καταλαμβάνουν τα δυο κυκλώματα της πρώτης εναλλακτικής να είναι μικρότερος από τον χώρο που θα καταλάμβανε το κύκλωμα της δεύτερης εναλλακτικής. Στην πραγματικότητα τα δυο αυτά κυκλώματα θα μπορούσαν να παραληφθούν και οι αισθητήρες απόστασης HC-SR04 να συνδεθούν κατευθείαν με το teensy 3.2 αλλά για λόγους ασφάλειας και αξιοπιστίας , μιας και το datasheet των αισθητήρων απόστασης HC-SR04 δεν αναφέρει περισσότερα πάνω σε αυτό το θέμα , αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν στο αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ. Το ίδιο συμβαίνει και με τις εισόδους ENA , ENB , IN1 , IN2 , IN3 και IN4 του L298N Dual Motor Driver αφού και οι έξι αυτοί είσοδοι λειτουργούν με λογική τάση 5V που σημαίνει ότι στους ακροδέκτες αυτούς η τάση με τιμή 0V μεταφράζεται σε λογικό LOW και η τάση με τιμή 5V μεταφράζεται σε λογικό HIGH. Παρόλο αυτά επειδή σύμφωνα με το datasheet του L298N το εύρος των τιμών τάσης που μεταφράζονται σε λογικό LOW και το εύρος των τιμών τάσης που μεταφράζονται σε λογικό HIGH είναι -0,3V έως 1,5V και 2,3V έως 5V αντίστοιχα δεν χρειάστηκε κάποιο επιπλέον κύκλωμα που να μετατρέπει την TTL τάση 3,3V του teensy 3.2 σε TTL τάση 5V που απαιτεί το κύκλωμα οδήγησης των δυο κινητήρων DC όπως χρειάστηκε για τους αισθητήρες απόστασης HC-SR04. Τα κυκλώματα που επιτελούν αυτόν τον σκοπό και χρησιμοποιήθηκαν είναι τα BSS138 TTL Logic Level Bi-Directional Converters της εταιρίας Sparkfun που βασίζονται στα BSS138 N-Channel Logic Level Mosfets της εταιρίας FAIRCHILD. Οι δυο πλακέτες αυτών των κυκλωμάτων φαίνονται στην εικόνα 55.



**Εικόνα 55:** Οι πλακέτες μετατροπής BSS138 N-Channel Logic Level Mosfets μιας TTL τάσης σε μια άλλη

Επειδή τα δυο κυκλώματα BSS138 TTL Logic Level Bi-Directional Converters χρειάζονται σταθερή DC τάση 3,3V αγοράστηκε και ένα κύκλωμα DC to DC Step Down Converter ώστε τα 8,29V που τροφοδοτούν ολόκληρο το κύκλωμα του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ να μετατραπούν σε 3,3V. Το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το LM317T Positive Adjustable Voltage Regulator της εταιρίας OEM που βασίζεται στο ολοκληρωμένο LM317T της εταιρίας STMicroelectronics. Η πλακέτα του κυκλώματος αυτού φαίνεται στην εικόνα 56.



**Εικόνα 56:** Η πλακέτα μετατροπής LM317T Positive Adjustable Voltage Regulator μιας DC τάσης σε DC τάση χαμηλότερης τιμής

Τέλος χρησιμοποιήθηκαν και τρεις βάσεις στήριξης οι οποίοι φαίνονται στην εικόνα 57 , 9 βίδες με διάμετρο σπειρώματος τρία χιλιοστά και μήκος δέκα χιλιοστά , 9 παξιμάδια με διάμετρο σπειρώματος τρία χιλιοστά και ένας διακόπτης push-button ο οποίος φαίνεται στην εικόνα 58.



**Εικόνα 57:** Οι βάσεις στήριξης των αισθητήρων απόστασης HC-SR04



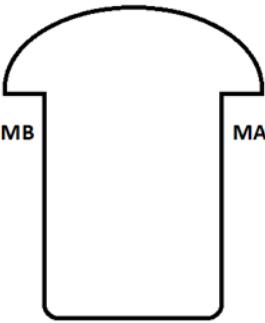
**Εικόνα 58:** Ο διακόπτης push button

Οι τρεις βάσεις στήριξης μαζί με τις δύο μπαταριοθήκες και τις 9 βίδες και τα 9 παξιμάδια χρησιμοποιήθηκαν για την στήριξη των τριών αισθητήρων απόστασης HC-SR04 και για την στήριξη των τεσσάρων μπαταριών στην βάση του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ ενώ ο διακόπτης push-button χρησιμοποιήθηκε για το reset της πλακέτας teensy 3.2. Όλα τα παραπάνω εξαρτήματα κόστισαν συνολικά 101,27 ευρώ.

## 4.2 Συνδεσμολογία εξαρτημάτων

### 4.2.1 Συνδεσμολογία του κυκλώματος κίνησης

Το κύκλωμα οδήγησης L298N Dual Motor Driver διαθέτει εφτά εισόδους και πέντε εξόδους. Η είσοδος  $V_S$ , ή αλλιώς +12V όπως αναγράφεται στην πλακέτα, χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των δύο κινητήρων DC, του κινητήρα A και του κινητήρα B. Οι είσοδοι ENA και ENB χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής μέσω PWM του κινητήρα A και του κινητήρα B αντίστοιχα. Οι είσοδοι IN1 και IN2 χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της φοράς περιστροφής του κινητήρα A και τέλος οι είσοδοι IN3 και IN4 χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της φοράς περιστροφής του κινητήρα B. Οι είσοδοι αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την ακινητοποίηση των δύο κινητήρων. Με βάση τα παραπάνω στην είσοδο  $V_S$  εφαρμόστηκε η DC τάση 8,29V. Στις εισόδους ENA και ENB συνδέθηκαν οι ακροδέκτες 5 και 6 του teensy 3.2 αντίστοιχα και οι ακροδέκτες αυτοί ορίστηκαν ως έξοδοι ώστε να παράγουν σήμα PWM και στις εισόδους IN1, IN2, IN3 και IN4 συνδέθηκαν οι ακροδέκτες 1, 2, 3 και 4 του teensy 3.2 αντίστοιχα και οι ακροδέκτες αυτοί ορίστηκαν ως έξοδοι ώστε να παράγουν λογικά σήματα δηλαδή σήματα που αντιστοιχούν σε λογικό HIGH ή σε λογικό LOW. Θεωρώντας πως το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ έχει τον προσανατολισμό που φαίνεται στο σχήμα 33 ο κινητήρας A είναι αυτός που βρίσκεται δεξιά ενώ ο κινητήρας B είναι αυτός που βρίσκεται αριστερά.



**Σχήμα 33:** Η διάταξη των κινητήρων στην βάση του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ

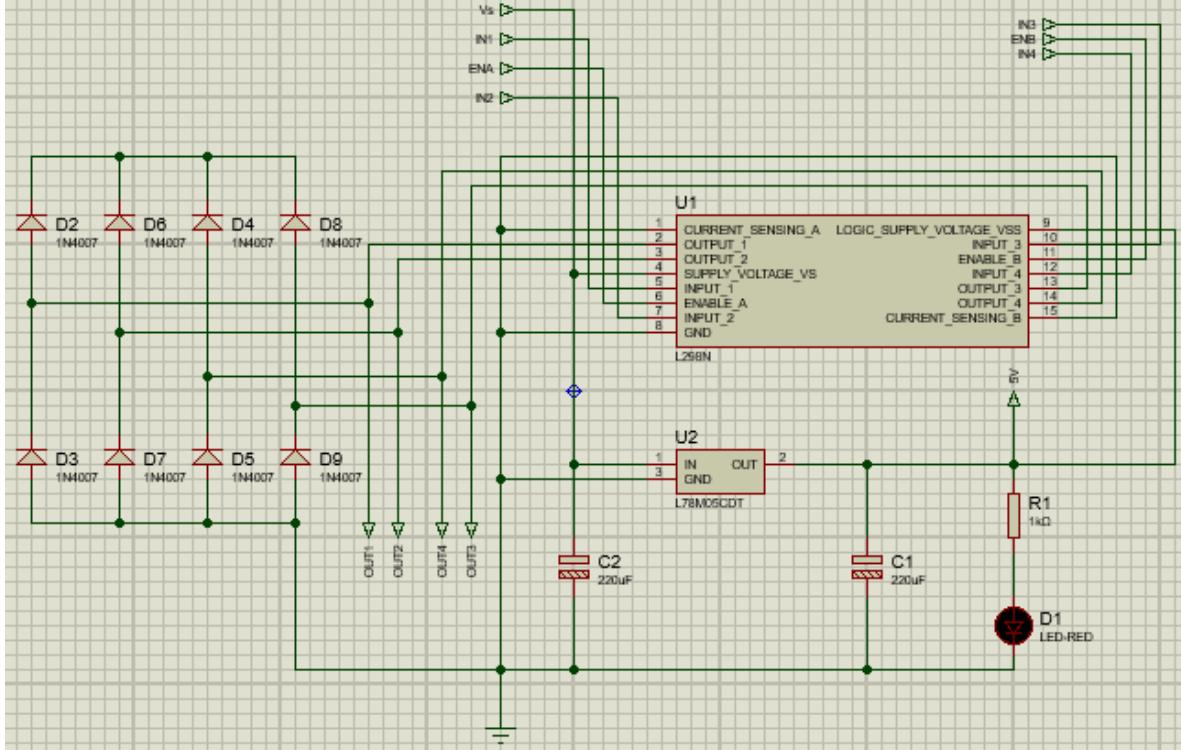
Δεδομένου του σχήματος 33 η λογική τάση που πρέπει να εφαρμοστεί στην κάθε είσοδο IN1 , IN2 , IN3 και IN4 προκειμένου το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ να εκτελέσει μια από τις τέσσερις δυνατές κινήσεις φαίνεται στον πίνακα 4.

IN1	IN2	IN3	IN4	MA	MB	MR
HIGH	LOW	HIGH	LOW	Forward	Forward	forward
LOW	HIGH	LOW	HIGH	Backward	Backward	backward
LOW	HIGH	HIGH	LOW	Backward	Forward	Turn Right
HIGH	LOW	LOW	HIGH	Forward	Backward	Turn Left

**Πίνακας 4:** Οι λογικές τάσεις των ακροδεκτών του κυκλώματος οδήγησης L298N Dual Motor Driver για την εκτέλεση όλων των δυνατών κινήσεων από το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ

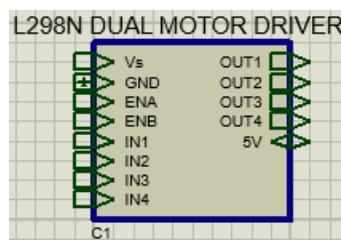
Οι έξοδοι του κυκλώματος οδήγησης L298N Dual Motor Driver είναι η OUT1 , η OUT2 , η OUT3 , η OUT4 και η έξοδος +5V αν και ο ακροδέκτης αυτός χρησιμοποιείται ως είσοδος στην περίπτωση που η τάση  $V_S$  είναι μεγαλύτερη από 12V. Στις εξόδους OUT1 και OUT2 συνδέονται οι ακροδέκτες του κινητήρα A και στις εξόδους OUT3 και OUT4 συνδέονται οι ακροδέκτες του κινητήρα B οπότε στους ακροδέκτες αυτούς συνδέθηκαν οι κινητήρες του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ. Η έξοδος +5V στην συγκεκριμένη εφαρμογή δεν συνδέθηκε πουθενά αφού το ρεύμα που μπορεί να περάσει από αυτόν τον ακροδέκτη εξόδου είναι 500mA. Συγκεκριμένα η έξοδος αυτή είναι η έξοδος του σταθεροποιητή τάσης 78M05 της εταιρίας STMicroelectronics που είναι ενσωματωμένος στην πλακέτα του κυκλώματος οδήγησης και επειδή σύμφωνα με το datasheet το μέγιστο ρεύμα εξόδου αυτού του ολοκληρωμένου είναι 500mA η έξοδος αυτή δεν χρησιμοποιήθηκε για την τροφοδοσία της πλακέτας teensy 3.2 και των αισθητήρων απόστασης HC-SR04. Επειδή στο αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ η τάση  $V_S$  είναι μικρότερη από 12V όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το jumper που θέτει σε λειτουργία τον σταθεροποιητή τάσης δεν αφαιρέθηκε από την πλακέτα L298N Dual Motor Driver.

Αντίθετα επειδή η ταχύτητα περιστροφής των δυο κινητήρων DC ελέγχεται από τους ακροδέκτες ENA και ENB τα jumper που είναι τοποθετημένα σε αυτούς τους ακροδέκτες αφαιρέθηκαν από την πλακέτα L298N Dual Motor Driver [110]. Το κύκλωμα οδήγησης L298N Dual Motor Driver φαίνεται στο σχήμα 34 [111].



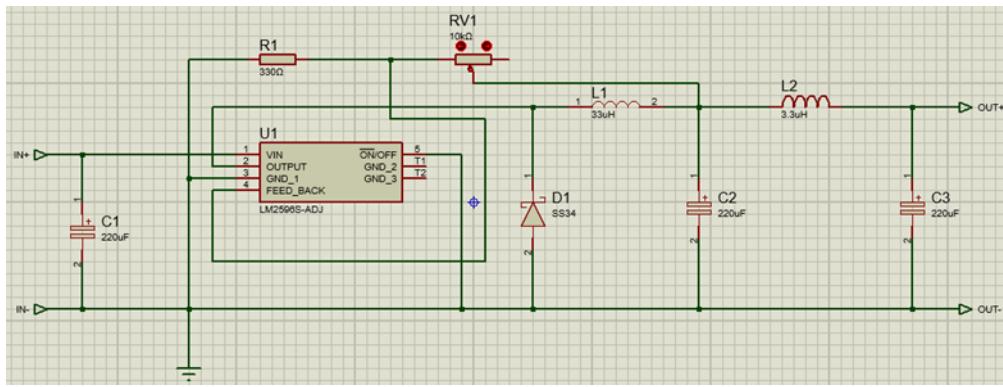
**Σχήμα 34:** Το κύκλωμα οδήγησης L298N Dual Motor Driver

Το κύκλωμα οδήγησης L298N Dual Motor Driver σε μορφή sub\_circuit φαίνεται στην εικόνα 59.



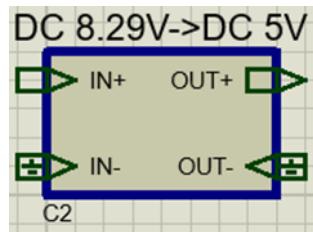
**Εικόνα 59:** Το κύκλωμα οδήγησης L298N Dual Motor Driver σε μορφή sub\_circuit

Το κύκλωμα LM2596S-ADJ DC to DC Step Down Switching Regulator έχει μια είσοδο και μια έξοδο. Η είσοδος είναι η IN+ και η έξοδος είναι η OUT+. Στην είσοδο εφαρμόζεται μια DC τάση μεταξύ 3,2V και 40V και μέσω ενός ποτενσιομέτρου η τάση αυτή ρυθμίζεται ώστε η έξοδος του κυκλώματος να έχει μια τάση από 1,3V έως 35V. Στο αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ στην είσοδο του κυκλώματος εφαρμόστηκε η DC τάση 8,29V και η έξοδος ρυθμίστηκε στην DC τάση 5V ώστε να τροφοδοτηθούν οι αισθητήρες απόστασης HC-SR04 και η πλακέτα teensy 3.2. Το κύκλωμα LM2596S-ADJ DC to DC Step Down Switching Regulator φαίνεται στο σχήμα 35.



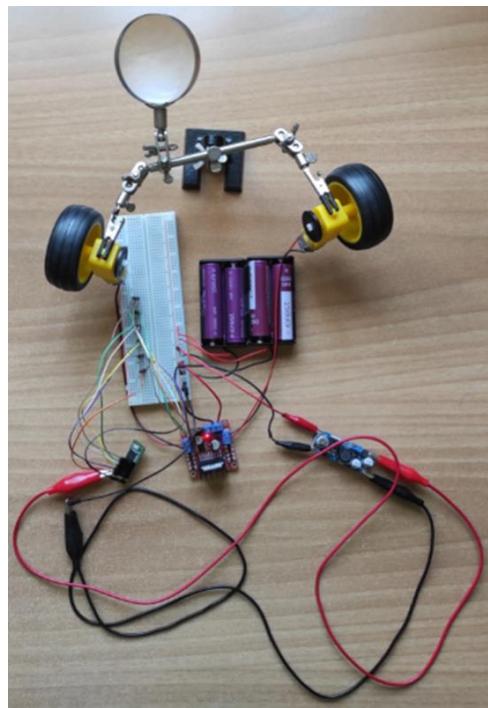
**Σχήμα 35:** Το Κύκλωμα LM2596S-ADJ DC to DC Step Down Switching Regulator

Το κύκλωμα LM2596S-ADJ DC to DC Step Down Switching Regulator σε μορφή sub\_circuit φαίνεται στην εικόνα 60.



**Εικόνα 60:** Το Κύκλωμα LM2596S-ADJ DC to DC Step Down Switching Regulator σε μορφή sub\_circuit

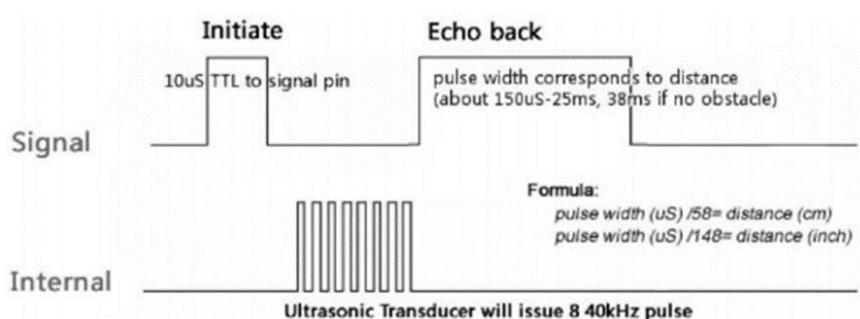
Με βάση τα παραπάνω πραγματοποιήθηκε η συνδεσμολογία και συντάχτηκε ο κώδικας για τον έλεγχο της ταχύτητας και της φοράς περιστροφής των δυο κινητήρων DC. Η συνδεσμολογία αυτή φαίνεται στην εικόνα 61.



**Εικόνα 61:** Η συνδεσμολογία του κυκλώματος κίνησης

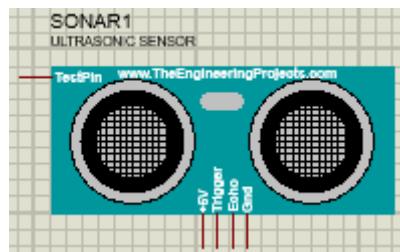
#### 4.2.2 Συνδεσμολογία του κυκλώματος αίσθησης

Ο αισθητήρας απόστασης HC-SR04 διαθέτει δυο εισόδους και μια έξοδο. Η είσοδος Vcc χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του αισθητήρα. Ο αισθητήρας HC-SR04 τροφοδοτείται με DC τάση 5V. Στην είσοδο Trig εφαρμόζεται ένας παλμός με πλάτος 5V για 10μs ώστε ο αισθητήρας στην συνέχεια να εκπέμψει οκτώ συνεχόμενους ηχητικούς παλμούς συχνότητας 40kHz (υπερηχητικοί παλμοί). Όταν μπροστά από τον αισθητήρα εμφανιστεί ένα αντικείμενο θα ανιχνευτεί από τον δέκτη η αντανάκλαση του σήματος και η έξοδος Echo θα γίνει ίση με 5V για 150μs με 25ms. Στην περίπτωση που δεν εμφανιστεί κάποιο αντικείμενο μπροστά από τον αισθητήρα η έξοδος Echo θα γίνει ίση με 5V για 38ms [108]. Το χρονικό διάγραμμα αυτών των σημάτων φαίνεται στο σχήμα 36.



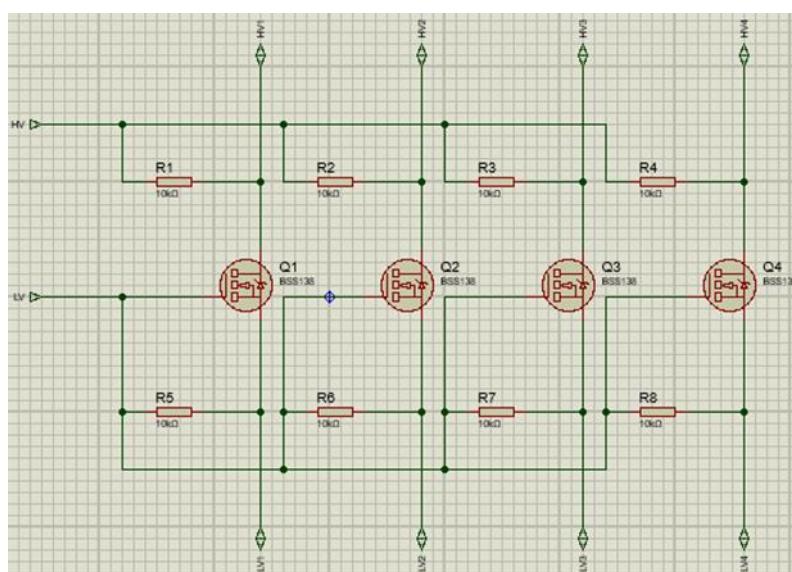
**Σχήμα 36:** Το χρονικό διάγραμμα των σημάτων Echo , Trig και του εσωτερικού σήματος του αισθητήρα απόστασης HC-SR04 [108]

Έτσι με βάση την διάρκεια αυτού του παλμού και την ταχύτητα του ήχου μπορεί να μετρηθεί η απόσταση του αντικειμένου από τον αισθητήρα. Συγκεκριμένα αν διαιρεθεί η διάρκεια αυτού του παλμού με τον αριθμό δυο αφού ο χρόνος αυτός είναι ο χρόνος που έκανε το σήμα ώστε να φτάσει στο αντικείμενο και να γυρίσει πίσω και το αποτέλεσμα της διάρεσης πολλαπλασιαστεί με την ταχύτητα του ήχου τότε το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι στην ουσία η απόσταση του αντικειμένου από τον αισθητήρα. Το μοντέλο του αισθητήρα απόστασης HC-SR04 φαίνεται στην εικόνα 62.



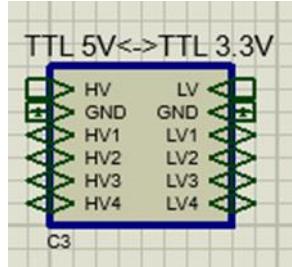
**Εικόνα 62:** Το μοντέλο του αισθητήρα απόστασης HC-SR04

Το κύκλωμα BSS138 TTL Logic Level Bi-Directional Converter διαθέτει από την μια πλευρά έξι ακροδέκτες τους HV1 , HV2 , HV3 , HV4 , HV και GND και από την άλλη πλευρά άλλους έξι ακροδέκτες τους LV1 , LV2 , LV3 , LV4 , LV και GND. Στους ακροδέκτες HV1 , HV2 , HV3 και HV4 συνδέεται μια λογική DC τάση 0V ή 5V και στους ακροδέκτες LV1 , LV2 , LV3 και LV4 συνδέεται μια λογική DC τάση 0V ή 3,3V. Όσον αφορά τους ακροδέκτες HV και GND μεταξύ αυτών των ακροδεκτών συνδέεται μια σταθερή DC τάση 5V ενώ όσον αφορά τους ακροδέκτες LV και GND μεταξύ αυτών των ακροδεκτών συνδέεται μια σταθερή DC τάση 3,3V. Το κύκλωμα BSS138 TTL Logic Level Bi-Directional Converter φαίνεται στο σχήμα 37 [112].



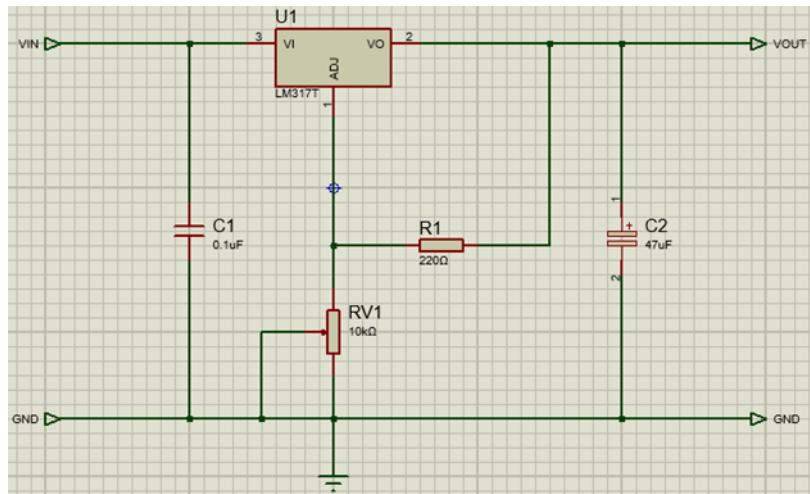
**Σχήμα 37:** Το κύκλωμα BSS138 TTL Logic Level Bi-Directional Converter

Το κύκλωμα BSS138 TTL Logic Level Bi-Directional Converter σε μορφή sub\_circuit φαίνεται στην εικόνα 63.



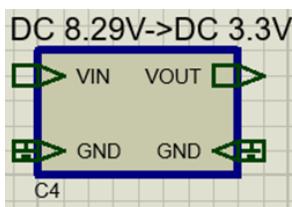
**Εικόνα 63:** Το κύκλωμα BSS138 TTL Logic Level Bi-Directional Converter σε μορφή sub\_circuit

Το κύκλωμα LM317T Positive Adjustable Voltage Regulator έχει μια είσοδο και μια έξοδο. Η είσοδος είναι η VIN και η έξοδος είναι η VOUT. Στην είσοδο εφαρμόζεται μια DC τάση μεταξύ 4,2V και 40V και η έξοδος ρυθμίζεται από 1,2V μέχρι 37V. Στο αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ στην είσοδο του κυκλώματος LM317T Positive Adjustable Voltage Regulator εφαρμόστηκε η DC τάση 8,29V και η έξοδος ρυθμίστηκε στην DC τάση 3,3V ώστε να τροφοδοτηθούν τα δύο κυκλώματα BSS138 TTL Logic Level Bi-Directional Converter. Το κύκλωμα LM317T Positive Adjustable Voltage Regulator φαίνεται στο σχήμα 38.



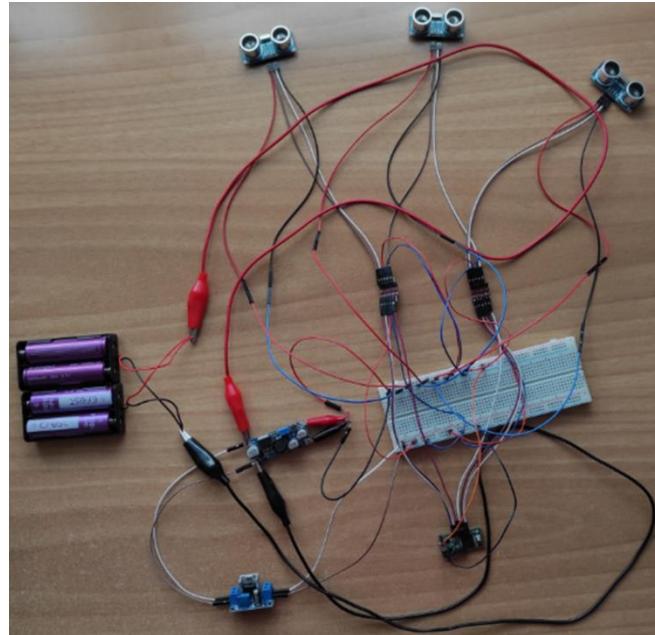
**Σχήμα 38:** Το κύκλωμα LM317T Positive Adjustable Voltage Regulator

Το κύκλωμα LM317T Positive Adjustable Voltage Regulator σε μορφή sub\_circuit φαίνεται στην εικόνα 64.



**Εικόνα 64:** Το κύκλωμα LM317T Positive Adjustable Voltage Regulator σε μορφή sub\_circuit

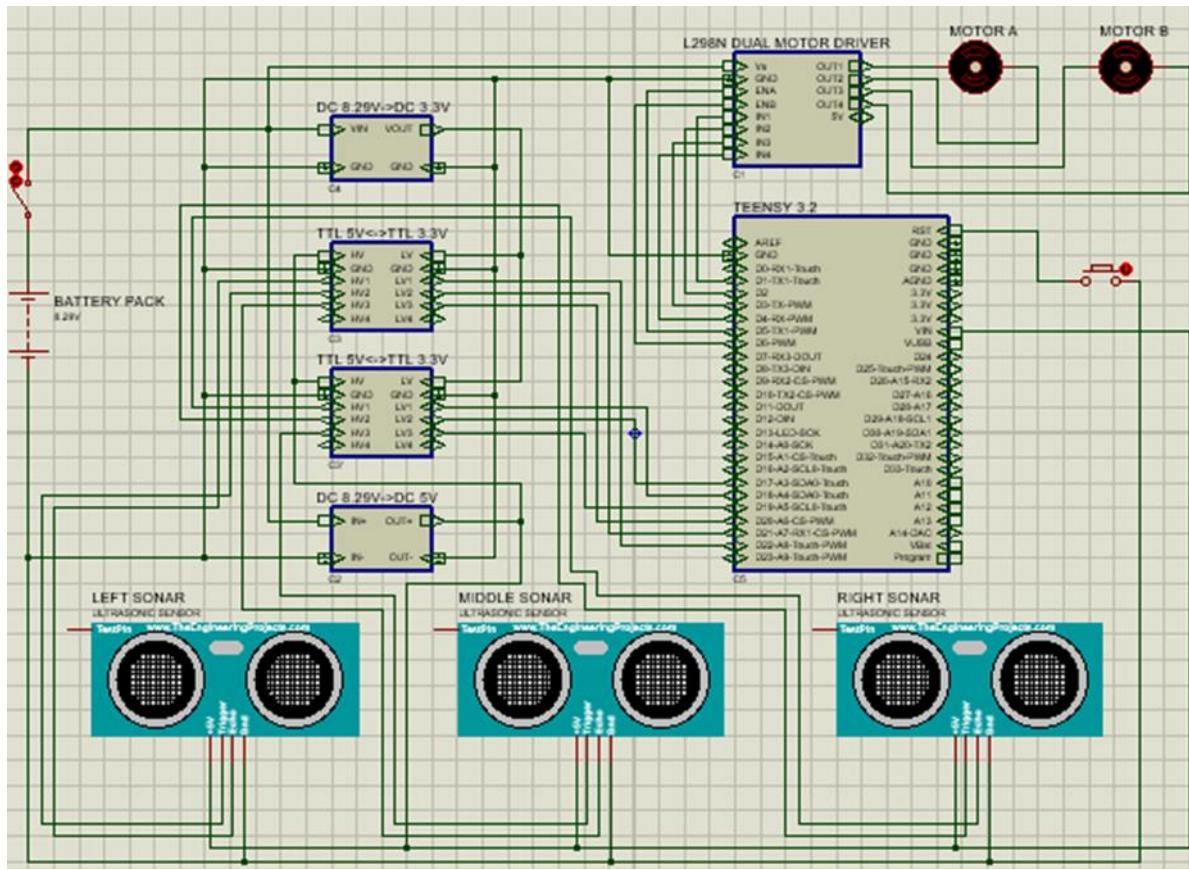
Με βάση τα παραπάνω πραγματοποιήθηκε η συνδεσμολογία και συντάχτηκε ο κώδικας για την μέτρηση της απόστασης μεταξύ ενός αντικειμένου και των αισθητήρων απόστασης. Η συνδεσμολογία αυτή φαίνεται στην εικόνα 65.



**Εικόνα 65:** Η συνδεσμολογία του κυκλώματος αίσθησης

#### 4.2.3 Συνδεσμολογία ολόκληρου του κυκλώματος

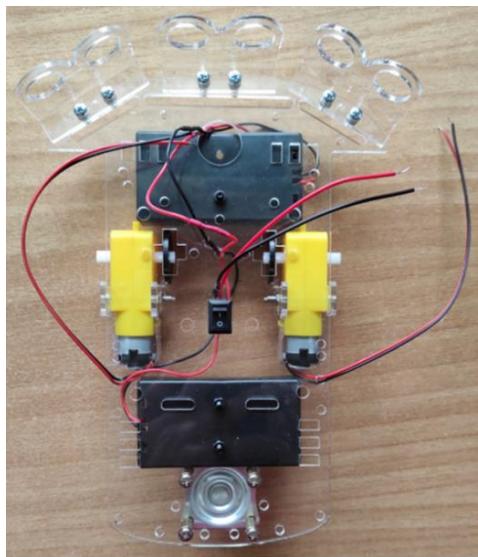
Η συνδεσμολογία ολόκληρου του κυκλώματος του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ σχεδιασμένη στο πρόγραμμα proteus χρησιμοποιώντας τα sub-circuit κάθε ξεχωριστού κυκλώματος σχεδιασμένα επίσης στο πρόγραμμα proteus φαίνεται στο σχήμα 39.



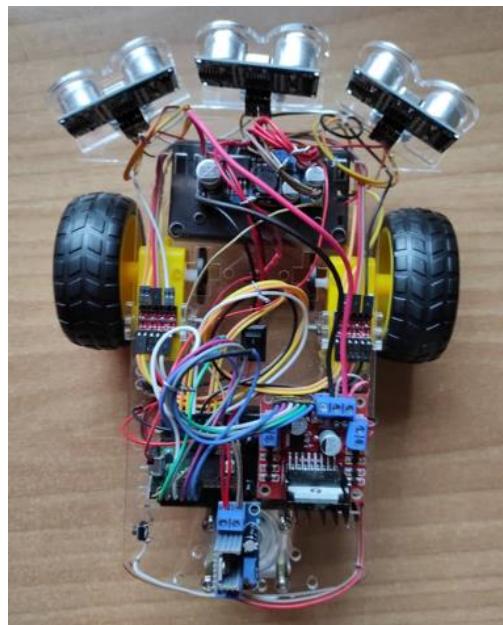
**Σχήμα 39:** Η συνδεσμολογία ολόκληρου του κυκλώματος του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ

#### 4.3 Τοποθέτηση εξαρτημάτων

Αρχικά στη βάση του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ όπως φαίνεται και από την εικόνα 66 τοποθετήθηκαν οι δύο κινητήρες DC, οι δύο μπαταριοθήκες, οι τρεις βάσεις στήριξης των αισθητήρων απόστασης HC-SR04, ο διακόπτης ON-OFF και ο πίσω τροχός (παθητικός τροχός) και στην συνέχεια έγιναν οι κατάλληλες συνδέσεις ώστε το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ να μπορεί να ενεργοποιείται και να απενεργοποιείται μέσω του διακόπτη ON-OFF.



**Εικόνα 66:** Το κύκλωμα ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ Στην συνέχεια όπως φαίνεται και από την εικόνα 67 τοποθετήθηκαν και τα υπόλοιπα εξαρτήματα.



**Εικόνα 67:** Το ολοκληρωμένο αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ

#### 4.4 Προγραμματισμός του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ

##### 4.4.1 Λογισμικό προγραμματισμού της πλακέτας teensy 3.2

Η πλακέτα μικροελεγκτή teensy 3.2 μπορεί να προγραμματιστεί κυρίως με τρεις διαφορετικούς τρόπους δηλαδή είτε χρησιμοποιώντας το arduino IDE μαζί με το Teensyduino , είτε χρησιμοποιώντας το Visual Micro , είτε χρησιμοποιώντας το PlatformIO. Για τον προγραμματισμό του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ χρησιμοποιήθηκε το arduino IDE μαζί με το Teensyduino. Το arduino IDE πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης το οποίο στηρίζεται σε μια απλοποιημένη μορφή της γλώσσας προγραμματισμού C και C++ και χρησιμοποιείται για τον

προγραμματισμό όλης της σειράς των ολοκληρωμένων συστημάτων μικροελεγκτών της arduino αλλά και για τον προγραμματισμό παρόμοιων συστημάτων που προέρχονται όμως από άλλους κατασκευαστές. Το λογισμικό αυτό μπορεί να εγκατασταθεί και χωρίς πληρωμή και εκτός από την περιοχή σύνταξης του κώδικα που προορίζεται να φορτωθεί στην πλακέτα μικροελεγκτή για να εκτελεστεί παρέχει επιπλέον ανιχνευτή σφαλμάτων , έτοιμες βιβλιοθήκες , έτοιμα παραδείγματα εφαρμογών και σειριακή οθόνη. Κάθε κώδικας γραμμένος από τον χρήστη στο arduino IDE ονομάζεται sketch και αποτελείται από δυο κύριες συναρτήσεις την void setup() και την void loop(). Ότι είναι γραμμένο μέσα στην void setup() εκτελείται μόνο μια φορά και πάντα στην αρχή ενώ ότι είναι γραμμένο μέσα στην void loop() εκτελείται συνέχεια. Το Teensyduino πρόκειται για ένα πρόσθετο λογισμικό μικρού μεγέθους το οποίο χρησιμοποιείται προκειμένου να μπορέσει να περαστεί ο κώδικας που είναι γραμμένος στο arduino IDE στον μικροελεγκτή που είναι ενσωματωμένος στην πλακέτα teensy 3.2. Όπως και το arduino IDE έτσι και το Teensyduino είναι διαθέσιμο για Windows , για Macintosh και για Linux [100].

#### 4.4.2 Κώδικας του αυτόνομο τροχοφόρου ρομπότ

Για την εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου δημιουργήθηκαν αρχικά οι πίνακες ή αλλιώς το datasheet για τον αλγορίθμου εκπαίδευσης. Οι πίνακες αυτοί είναι ο πίνακας που περιέχει τις τιμές των εισόδων και ο πίνακας που περιέχει τις τιμές των στόχων. Οι είσοδοι του τεχνητού νευρωνικού δικτύου είναι οι αποστάσεις του εμποδίου από τον κάθε αισθητήρα απόστασης και οι στόχοι του τεχνητού νευρωνικού δικτύου είναι τα σήματα PWM που εφαρμόζονται στις εισόδους ENA και ENB του L298N Dual Motor Driver με τα οποία γίνεται ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής των δυο κινητήρων DC. Αυτό σημαίνει πως ελέγχεται μόνο η ταχύτητα περιστροφής των δυο κινητήρων DC και όχι και η φορά περιστροφής τους αφού το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ πρόκειται για τροχοφόρο ρομπότ διαφορικής οδήγησης και έτσι η φορά περιστροφής των δυο κινητήρων DC είναι σταθερή και τέτοια ώστε αν η ταχύτητα περιστροφής των δυο κινητήρων DC είναι ίδια το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα κινηθεί προς τα εμπρός. Επομένως οι είσοδοι είναι τρεις αφού τρεις είναι και οι αισθητήρες απόστασης και οι έξοδοι είναι δυο αφού δυο είναι και οι κινητήρες του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 161 δεδομένα εκπαίδευσης ή αλλιώς πρότυπα και έτσι δημιουργήθηκαν δυο πίνακες όπου ο πρώτος έχει μέγεθος 161x3 και αποτελεί τον πίνακα εισόδων και ο δεύτερος έχει μέγεθος 161x2 και αποτελεί τον πίνακα στόχων. Για την αρχικοποίηση αυτών των δυο πινάκων το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ τοποθετήθηκε σε έναν μεγάλο χώρο χωρίς να υπάρχουν αντικείμενα γύρω του παρά μόνο το αντικείμενο που θα χρησιμοποιούνταν για τον σκοπό αυτόν αλλά και γενικότερα για την εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Συγκεκριμένα για την αρχικοποίηση του πίνακα εισόδων τα 161 δεδομένα εκπαίδευσης χωρίστηκαν σε πέντε ομάδες οι οποίες αντιστοιχούν σε πέντε διαφορετικές πορείες που πρέπει να ακολουθεί το

αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ ανάλογα με την θέση στην οποία βρίσκεται το αντικείμενο. Οι πέντε αυτές ομάδες αντιστοιχούν σε πορεία ευθεία με την μέγιστη ταχύτητα , σε ανοιχτή στροφή δεξιά , σε κλειστή στροφή δεξιά , σε ανοιχτή στροφή αριστερά και σε κλειστή στροφή αριστερά. Όταν το αντικείμενο βρίσκεται μπροστά από τον αριστερό αισθητήρα και σε απόσταση μικρότερη ή ίση με 20cm από αυτόν όπως φαίνεται και από το σχήμα 40 τότε το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ εκτελεί την ανοιχτή στροφή δεξιά ενώ όταν το αντικείμενο βρίσκεται μπροστά και από τον αριστερό αισθητήρα αλλά και από τον κεντρικό αισθητήρα και σε απόσταση μικρότερη ή ίση με 20cm από τον καθένα όπως φαίνεται και από το σχήμα 41 τότε το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ εκτελεί την κλειστή στροφή δεξιά. Κλειστή στροφή δεξιά εκτελεί και όταν το αντικείμενο βρίσκεται μπροστά και από τους τρεις αισθητήρες και σε απόσταση μικρότερη ή ίση με 20cm από τον καθένα όπως φαίνεται και από το σχήμα 42 ενώ ανοιχτή στροφή δεξιά εκτελεί και όταν το αντικείμενο βρίσκεται μπροστά από τον κεντρικό αισθητήρα και σε απόσταση μικρότερη ή ίση με 20cm από αυτόν όπως φαίνεται και από το σχήμα 43. Στην περίπτωση που το αντικείμενο βρίσκεται μπροστά από τον δεξιό αισθητήρα και σε απόσταση μικρότερη ή ίση με 20cm από αυτόν όπως φαίνεται και από το σχήμα 44 το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ εκτελεί την ανοιχτή στροφή αριστερά ενώ στην περίπτωση που το αντικείμενο βρίσκεται μπροστά και από τον δεξιό αισθητήρα αλλά και από τον κεντρικό αισθητήρα και σε απόσταση μικρότερη ή ίση με 20cm από τον καθένα όπως φαίνεται και από το σχήμα 45 το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ εκτελεί την κλειστή στροφή αριστερά. Τέλος όταν δεν υπάρχει αντικείμενο μπροστά και από τους τρεις αισθητήρες όπως φαίνεται και από το σχήμα 46 το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ κινείται ευθεία με την μέγιστη ταχύτητα [113].



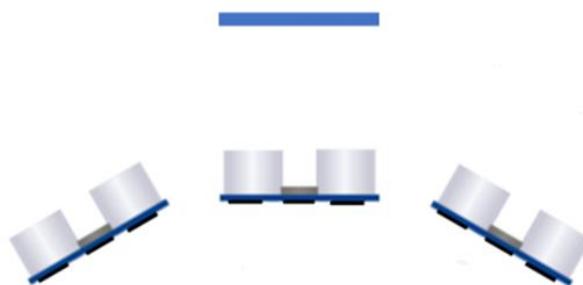
**Σχήμα 40:** Το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα εκτελέσει την ανοικτή στροφή δεξιά



**Σχήμα 41:** Το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα εκτελέσει την κλειστή στροφή δεξιά



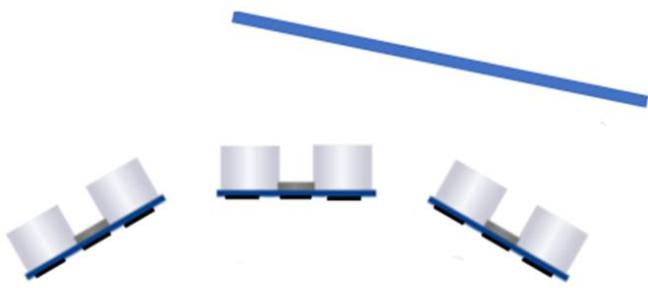
**Σχήμα 42:** Το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα εκτελέσει την κλειστή στροφή δεξιά



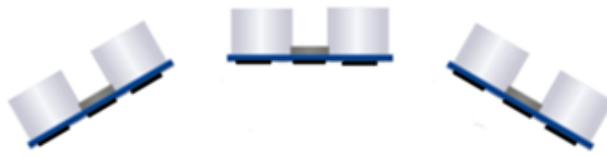
**Σχήμα 43:** Το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα εκτελέσει την ανοικτή στροφή δεξιά



**Σχήμα 44:** Το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα εκτελέσει την ανοικτή στροφή αριστερά



**Σχήμα 45:** Το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα εκτελέσει την κλειστή στροφή αριστερά



**Σχήμα 46:** Το αυτόνομο τροχοφόρο αυτόνομο ρομπότ θα κινηθεί ευθεία με την μέγιστη ταχύτητα

Προκειμένου να εξαχθούν οι τιμές για τον πίνακα εισόδων το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ ήταν σταθερό και το αντικείμενο σε κάθε περίπτωση από τις παραπάνω πέντε πλησίαζε το ρομπότ ακολουθώντας ευθεία κατεύθυνση. Καθώς το αντικείμενο μετακινούνταν ο μικροελεγκτής διάβαζε τις τιμές που επέστρεφαν οι αισθητήρες απόστασης δηλαδή τις αποστάσεις μεταξύ του αντικειμένου και του κάθε αισθητήρα και τύπωνε στο Serial Monitor εκείνες που ήταν μικρότερες ή ίσες από 20cm. Στην συνέχεια οι τιμές αυτές αντιγράφηκαν σε ένα φύλλο excel προκειμένου να μπορεί να γίνει η επεξεργασία τους και ενσωματώθηκαν στον κώδικα του προγράμματος. Η επεξεργασία των μετρήσεων αυτών αφορούσε την διαγραφή των διπλότυπων προτύπων δηλαδή την διαγραφή των διπλότυπων γραμμών και την διαγραφή των προτύπων που περιείχαν αρκετό θόρυβο. Οι τιμές των προτύπων του πίνακα εισόδων tid που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων στο πρόγραμμα excel και που τελικά ενσωματώθηκαν στον κώδικα φαίνονται στον πίνακα 5.

	0	1	2	3
0	{167,19,126},	{19,127,181},	{132,18,20},	{16,14,18},
1	{169,15,130},	{16,107,183},	{106,16,17},	{17,14,18},
2	{169,18,124},	{20,119,181},	{110,18,19},	{17,14,20},
3	{212,18,128},	{15,104,181},	{148,17,18},	{18,15,20},
4	{211,15,131},	{20,120,180},	{105,20,20},	{18,14,19},
5	{169,15,126},	{115,106,19},	{176,16,18},	{17,15,18},

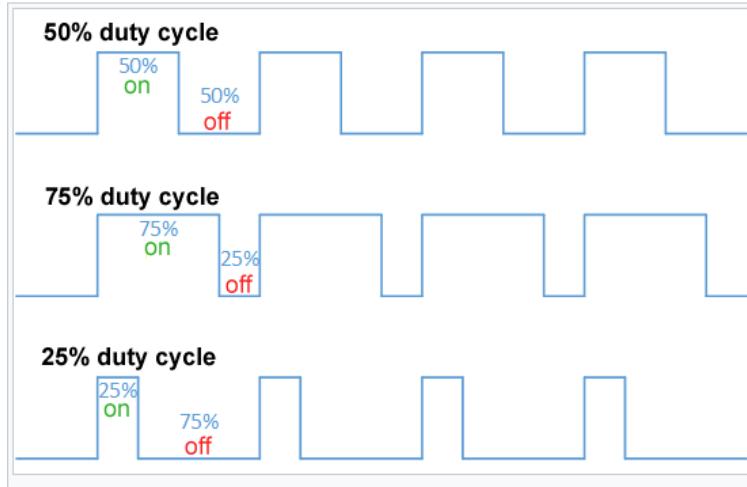
<b>6</b>	{212,19,123},	{119,107,19},	{120,15,16},	{18,14,17},
<b>7</b>	{168,16,140},	{116,106,19},	{108,16,16},	{18,15,19},
<b>8</b>	{167,20,122},	{116,107,16},	{125,15,16},	{19,15,19},
<b>9</b>	{168,19,124},	{116,107,20},	{140,16,16},	{16,14,19},
<b>10</b>	{168,16,128},	{118,107,17},	{14,14,105},	{19,14,20},
<b>11</b>	{169,17,125},	{121,105,15},	{18,19,106},	{18,16,20},
<b>12</b>	{168,20,122},	{122,107,16},	{15,16,118},	{19,16,19},
<b>13</b>	{168,18,125},	{121,105,19},	{14,15,112},	{17,14,19},
<b>14</b>	{212,16,131},	{120,107,15},	{16,15,119},	{18,14,18},
<b>15</b>	{168,17,126},	{115,107,16},	{17,17,108},	{161,155,162},
<b>16</b>	{167,19,141},	{116,107,14},	{15,15,106},	{166,161,166},
<b>17</b>	{169,20,123},	{122,107,15},	{15,15,110},	{161,167,170},
<b>18</b>	{168,14,142},	{120,107,16},	{20,20,106},	{175,166,170},
<b>19</b>	{212,18,123},	{119,105,15},	{19,19,112},	{164,159,165},
<b>20</b>	{169,14,130},	{118,106,19},	{16,16,113},	{162,158,125},
<b>21</b>	{168,15,129},	{115,108,18},	{16,16,106},	{165,160,165},
<b>22</b>	{167,20,140},	{123,105,18},	{16,17,118},	{174,168,171},
<b>23</b>	{14,105,182},	{121,107,16},	{17,18,105},	{165,162,167},
<b>24</b>	{20,108,182},	{115,107,20},	{19,15,193},	{165,161,164},
<b>25</b>	{14,129,182},	{120,105,17},	{16,17,112},	{167,161,165},
<b>26</b>	{16,123,181},	{118,106,18},	{18,19,110},	{161,157,163},
<b>27</b>	{14,130,181},	{119,108,17},	{20,20,110},	{165,159,166},
<b>28</b>	{15,125,181},	{105,16,18},	{19,15,192},	{164,159,162},
<b>29</b>	{17,122,181},	{122,17,18},	{14,14,127},	{167,161,167},
<b>30</b>	{14,126,181},	{138,17,18},	{19,19,106},	{161,159,119},
<b>31</b>	{16,127,183},	{136,17,18},	{17,18,113},	{168,162,167},
<b>32</b>	{16,104,181},	{122,14,15},	{14,15,125},	{168,162,165},
<b>33</b>	{18,121,180},	{107,14,15},	{16,14,17},	{168,163,165},

<b>34</b>	{19,105,180},	{109,15,15},	{17,14,17},	{168,161,165},
<b>35</b>	{20,123,183},	{122,15,15},	{19,14,18},	{164,158,164},
<b>36</b>	{15,129,182},	{106,20,19},	{17,15,19},	{194,100,177},
<b>37</b>	{15,107,183},	{123,16,16},	{18,14,20},	{166,159,162});
<b>38</b>	{17,105,180},	{138,16,16},	{19,15,18},	
<b>39</b>	{18,125,181},	{107,15,18},	{19,16,20},	
<b>40</b>	{15,130,182},	{129,19,20},	{19,15,20},	

**Πίνακας 5:** Ο πίνακας εισόδων για την εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου

Όλες οι παραπάνω τιμές εκφράζουν απόσταση μετρούμενη σε cm. Η πρώτη τιμή αφορά τον αριστερό αισθητήρα , η δεύτερη τιμή αφορά τον κεντρικό αισθητήρα και η τρίτη τιμή αφορά τον δεξιό αισθητήρα. Όταν κάποιος από τους τρεις αισθητήρες έχει τιμή μικρότερη ή ίση του 20 σημαίνει ότι μπροστά από τον αισθητήρα υπάρχει εμπόδιο ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση δεν υπάρχει εμπόδιο μπροστά από τον αισθητήρα. Έτσι από τον πίνακα 5 τα πρώτα 23 ζευγάρια (0,0 έως 22,0) υποδηλώνουν ότι το εμπόδιο βρίσκεται μπροστά από τον κεντρικό αισθητήρα , τα επόμενα 23 ζευγάρια (23,0 έως 4,1) υποδηλώνουν ότι το εμπόδιο βρίσκεται μπροστά από τον αριστερό αισθητήρα , τα επόμενα 23 ζευγάρια (5,1 έως 27,1) υποδηλώνουν ότι το εμπόδιο βρίσκεται μπροστά από τον δεξιό αισθητήρα , τα επόμενα 23 ζευγάρια (28,1 έως 9,2) υποδηλώνουν ότι το εμπόδιο βρίσκεται μπροστά από τον δεξιό αλλά και από τον κεντρικό αισθητήρα , τα επόμενα 23 ζευγάρια (10,2 έως 32,2) υποδηλώνουν ότι το εμπόδιο βρίσκεται μπροστά από τον αριστερό αλλά και από τον κεντρικό αισθητήρα , τα επόμενα 23 ζευγάρια (33,2 έως 14,3) υποδηλώνουν ότι το εμπόδιο βρίσκεται μπροστά και από τους τρεις αισθητήρες και τέλος τα τελευταία 23 ζευγάρια (15,3 έως 37,3) υποδηλώνουν ότι δεν υπάρχει εμπόδιο μπροστά από τους τρεις αισθητήρες. Σύμφωνα λοιπόν με τα σχήματα που δείχνουν ποια κατεύθυνση πρέπει να ακολουθήσει το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ σε κάθε περίπτωση και σύμφωνα με τον πίνακα εισόδων γίνεται φανερό ότι για τα πρώτα 46 ζευγάρια (0,0 έως 4,1) το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα πρέπει να εκτελέσει την ανοιχτή στροφή δεξιά , για τα επόμενα 23 ζευγάρια (5,1 έως 27,1) το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα πρέπει να εκτελέσει την ανοιχτή στροφή αριστερά , για τα επόμενα 23 ζευγάρια (28,1 έως 9,2) το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα πρέπει να εκτελέσει την κλειστή στροφή αριστερά , για τα επόμενα 46 ζευγάρια (10,2 έως 14,3) το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα πρέπει να εκτελέσει την κλειστή στροφή δεξιά και τέλος για τα τελευταία 23 ζευγάρια (15,3 έως 37,3) το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα πρέπει να κινηθεί ευθεία με την μέγιστη ταχύτητα. Προκειμένου το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ να εκτελέσει την ανοιχτή στροφή δεξιά ή την κλειστή στροφή δεξιά χωρίς η φορά περιστροφής των δυο τροχών να είναι διαφορετική θα πρέπει η ταχύτητα περιστροφής του τροχού Β να είναι μεγαλύτερη από την

ταχύτητα περιστροφής του τροχού Α. Βέβαια η διαφορά στην ταχύτητα περιστροφής των δυο τροχών στις παραπάνω δυο περιπτώσεις θα πρέπει να είναι διαφορετική ώστε η γωνία που θα καλύπτει το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ καθώς εκτελεί την κλειστή στροφή δεξιά να είναι μεγαλύτερη από αυτήν που θα καλύπτει στην περίπτωση που το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ εκτελεί την ανοιχτή στροφή δεξιά . Αυτό επιτεύχθηκε κρατώντας την ίδια ταχύτητα στον τροχό Β και ρυθμίζοντας την ταχύτητα περιστροφής στον τροχό Α να είναι μικρότερη από αυτήν του τροχού Β για την περίπτωση της ανοιχτής στροφής δεξιά και μηδενική για την περίπτωση της κλειστής στροφής δεξιά. Η ίδια λογική ακολουθήθηκε και για την ανοιχτή στροφή αριστερά και την κλειστή στροφή αριστερά. Η μόνη διαφορά είναι ότι η ταχύτητα περιστροφής του τροχού Α για αυτές τις δυο περιπτώσεις θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα περιστροφής του τροχού Β. Έτσι η ταχύτητα περιστροφής του τροχού Α είναι σταθερή για τις παραπάνω δυο περιπτώσεις ενώ η ταχύτητα περιστροφής του τροχού Β είναι μικρότερη από αυτή του τροχού Α για την περίπτωση της ανοιχτής στροφής αριστερά και μηδενική για την περίπτωση της κλειστής στροφής αριστερά. Ακόμα προκειμένου το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ να κινηθεί ευθεία θα πρέπει η ταχύτητα περιστροφής των δυο τροχών αλλά και η φορά περιστροφής τους είναι ίδια. Η ταχύτητα περιστροφής των δυο κινητήρων DC και άρα και των τροχών ρυθμίζεται μέσω του σήματος PWM που δημιουργεί η πλακέτα teensy 3.2 στους ακροδέκτες 5 και 6 οι οποίοι με την σειρά τους είναι συνδεδεμένοι στους ακροδέκτες ENA και ENB του κυκλώματος οδήγησης L298N Dual Motor Driver αντίστοιχα. Η διαμόρφωση εύρους παλμού (Pulse Width Modulation-PWM) είναι μια μέθοδος ελέγχου της μέσης ισχύος που παρέχεται από ένα ηλεκτρικό σήμα σε ένα φορτίο. Στην διαμόρφωση εύρους παλμού η μέση τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στο φορτίο ποικίλει μεταξύ της τάσης τροφοδοσίας και της μηδενικής τάσης μεταβάλλοντας το χρονικό διάστημα στο οποίο το φορτίο τροφοδοτείται με την τάση τροφοδοσίας ως προς το χρονικό διάστημα που διαρκεί μια περίοδος του περιοδικού παλμού. Ο λόγος αυτών των δυο χρονικών διαστημάτων μετριέται σε ποσοστό τις εκατό και ονομάζεται κύκλος καθήκοντος (duty cycle). Έτσι στην διαμόρφωση εύρους παλμού το σήμα μια συνεχής τάσης μετατρέπεται σε ένα ψευδοαναλογικό σήμα και συγκεκριμένα σε έναν τετραγωνικό παλμό με το πλάτος του παλμού σε μια περίοδο να μεταβάλλεται ανάλογα με το κύκλο καθήκοντος ο οποίος όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως αντιπροσωπεύει το ποσοστό του θετικού μετώπου σε μια περίοδο. Αν για παράδειγμα ο κύκλος καθήκοντος είναι 50% το φορτίο κατά την διάρκεια μιας περιόδου τροφοδοτείται με τάση για χρόνο ίσο μόνο με το μισό του χρονικού διαστήματος της περιόδου ενώ για τον υπόλοιπο χρόνο δεν τροφοδοτείται με κάποια τάση δηλαδή η τάση στα άκρα του είναι μηδενική. Αυτό φαίνεται και από το σχήμα 47.



**Σχήμα 47:** Ενδεικτικές τιμές κύκλου καθήκοντος ενός σήματος PWM [114]

Αν μάλιστα στο χρονικό διάστημα που το φορτίο τροφοδοτείται με τάση η τάση αυτή είναι 5V στην περίπτωση που ο κύκλος καθήκοντος είναι 50% το φορτίο αντιλαμβάνεται την μισή από αυτήν την τάση δηλαδή 2,5V. Στο σχήμα 47 φαίνεται επίσης και ο τετραγωνικός παλμός με κύκλο καθήκοντος 75% αλλά και ο τετραγωνικός παλμός με κύκλο καθήκοντος 25%. Στις δυο αυτές περιπτώσεις και για τάση πάλι 5V η τάση που αντιλαμβάνεται το φορτίο είναι 3,75V και 1,25V αντίστοιχα [114]. Στο arduino IDE υπάρχει η συνάρτηση `analogWrite()` η οποία δέχεται ως παραμέτρους δυο ακέραιους αριθμούς. Ο πρώτος αριθμός είναι ο ακροδέκτης της πλακέτας μικροελεγκτή που χρησιμοποιείται για σήμα PWM και ο δεύτερος αριθμός είναι ένας αριθμός από το 0 έως και το 255. Η συνάρτηση αυτή με βάση την τιμή της δεύτερης παραμέτρου δημιουργεί ένα σήμα PWM στον ακροδέκτη που υποδηλώνει η πρώτη παράμετρος. Ο κύκλος καθήκοντος αυτού του σήματος κυμαίνεται από 0% όταν η τιμή της δεύτερης παραμέτρου είναι 0 έως και 100% όταν η τιμή της δεύτερης παραμέτρου είναι 255. Έτσι αν ο ακροδέκτης της πρώτης παραμέτρου αντιστοιχεί στον ακροδέκτη του teensy 3.2 που είναι συνδεδεμένος με τον ακροδέκτη ENA του L298N Dual Motor Driver και αν η τιμή της δεύτερης παραμέτρου είναι 0 τότε η τάση στα άκρα του κινητήρα A θα είναι και αυτή μηδέν ενώ αν η τιμή της δεύτερης παραμέτρου είναι 255 τότε η τάση στα άκρα του κινητήρα A θα είναι 8,29V. Στην πραγματικότητα η τάση αυτή δεν θα είναι ακριβώς 8,29V γιατί σύμφωνα με το datasheet του L298N υπάρχει μια πτώση τάσης μεταξύ των ακροδεκτών  $V_S$  και των εξόδων του L298N Dual Motor Driver. Παρόλο αυτά όταν η δεύτερη παράμετρος πάρει την τιμή 255 η τάση στα άκρα του κινητήρα A ή του κινητήρα B ανάλογα με τον ακροδέκτη στον οποίο “δείχνει” η πρώτη παράμετρος θα είναι μεγαλύτερη των 6V και αυτό μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του κινητήρα. Για αυτόν τον λόγο η μέγιστη τιμή της δεύτερης παραμέτρου που χρησιμοποιείται στον κώδικα είναι το 125 που αντιστοιχεί σε ένα κύκλο καθήκοντος λίγο μικρότερο από 50%. Έτσι σύμφωνα με τα παραπάνω δημιουργήθηκαν 10 μεταβλητές δηλαδή 5 ζευγάρια των δυο μεταβλητών αφού υπάρχουν πέντε διαφορετικές πορείες που ακολουθεί το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ και σε κάθε πορεία ελέγχεται η ταχύτητα περιστροφής δυο τροχών. Οι μεταβλητές αυτές ορίστηκαν ως μακροεντολές και

αρχικοποιήθηκαν με τιμές μεταξύ 0 και 125. Συγκεκριμένα με τις μακροεντολές ENA\_FO 125 και ENB\_FO 125 επιτυγχάνεται η ευθεία πορεία με την μέγιστη ταχύτητα , με τις μακροεντολές ENA\_OR 75 και ENB\_OR 125 επιτυγχάνεται η ανοιχτή στροφή δεξιά , με τις μακροεντολές ENA\_CR 0 και ENB\_CR 125 επιτυγχάνεται η κλειστή στροφή δεξιά , με τις μακροεντολές ENA\_DL 125 και ENB\_DL 75 επιτυγχάνεται η ανοιχτή στροφή αριστερά και τέλος με τις μακροεντολές ENA\_CL 125 και ENB\_CL 0 επιτυγχάνεται η κλειστή στροφή αριστερά. Καλώντας λοιπόν την συνάρτηση analogWrite() με τιμές της δεύτερης παραμέτρου ίσες με τις παραπάνω τιμές δημιουργούνται στους ακροδέκτες ENA και ENB σήματα PWM και με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η ταχύτητα περιστροφής των δυο κινητήρων DC χωρίς αυτοί να ακολουθούν σε κάθε περίπτωση διαφορετική φορά περιστροφής. Δεδομένου λοιπόν όλων των παραπάνω και δεδομένου ότι στον πίνακα στόχων η πρώτη στήλη αντιστοιχεί στον κινητήρα A και η δεύτερη στον κινητήρα B για τις πρώτες 46 γραμμές (0,0 έως 4,1) η πρώτη στήλη του πίνακα στόχων θα έχει την τιμή 75 και η δεύτερη στήλη την τιμή 125 , για τις επόμενες 23 γραμμές (5,1 έως 27,1) η πρώτη στήλη του πίνακα στόχων θα έχει την τιμή 125 και η δεύτερη στήλη την τιμή 75, για τις επόμενες 23 γραμμές (28,1 έως 9,2) η πρώτη στήλη του πίνακα στόχων θα έχει την τιμή 125 και η δεύτερη στήλη την τιμή 0 , για τις επόμενες 46 γραμμές (10,2 έως 14,3) η πρώτη στήλη του πίνακα στόχων θα έχει την τιμή 0 και η δεύτερη στήλη την τιμή 125 και τέλος για τις τελευταίες 23 γραμμές (15,3 έως 37,3) η πρώτη στήλη του πίνακα στόχων θα έχει την ίδια τιμή με την δεύτερη στήλη του πίνακα στόχων και η τιμή αυτή θα είναι ίση με 125. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε ο πίνακας 6 που αποτελεί τον πίνακα στόχων tod.

	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>0</b>	{ENA_OR,ENB_OR},	{ENA_OR,ENB_OR},	{ENA_CL,ENB_CL},	{ENA_CR,ENB_CR},
<b>1</b>	{ENA_OR,ENB_OR},	{ENA_OR,ENB_OR},	{ENA_CL,ENB_CL},	{ENA_CR,ENB_CR},
<b>2</b>	{ENA_OR,ENB_OR},	{ENA_OR,ENB_OR},	{ENA_CL,ENB_CL},	{ENA_CR,ENB_CR},
<b>3</b>	{ENA_OR,ENB_OR},	{ENA_OR,ENB_OR},	{ENA_CL,ENB_CL},	{ENA_CR,ENB_CR},
<b>4</b>	{ENA_OR,ENB_OR},	{ENA_OR,ENB_OR},	{ENA_CL,ENB_CL},	{ENA_CR,ENB_CR},
<b>5</b>	{ENA_OR,ENB_OR},	{ENA_DL,ENB_DL},	{ENA_CL,ENB_CL},	{ENA_CR,ENB_CR},
<b>6</b>	{ENA_OR,ENB_OR},	{ENA_DL,ENB_DL},	{ENA_CL,ENB_CL},	{ENA_CR,ENB_CR},
<b>7</b>	{ENA_OR,ENB_OR},	{ENA_DL,ENB_DL},	{ENA_CL,ENB_CL},	{ENA_CR,ENB_CR},
<b>8</b>	{ENA_OR,ENB_OR},	{ENA_DL,ENB_DL},	{ENA_CL,ENB_CL},	{ENA_CR,ENB_CR},
<b>9</b>	{ENA_OR,ENB_OR},	{ENA_DL,ENB_DL},	{ENA_CL,ENB_CL},	{ENA_CR,ENB_CR},
<b>10</b>	{ENA_OR,ENB_OR},	{ENA_DL,ENB_DL},	{ENA_CR,ENB_CR},	{ENA_CR,ENB_CR},

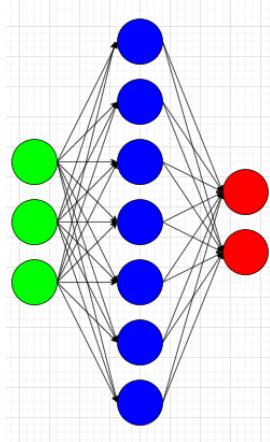


39	<{ENA_OR,ENB_OR},	<{ENA_CL,ENB_CL},	<{ENA_CR,ENB_CR},	
40	<{ENA_OR,ENB_OR},	<{ENA_CL,ENB_CL},	<{ENA_CR,ENB_CR},	

**Πίνακας 6:** Ο πίνακας στόχων για την εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου

Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ είναι ένα πλήρως συνδεδεμένο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με απλή τροφοδότηση και αποτελείται από δυο επίπεδα , το κρυφό επίπεδο και το επίπεδο εξόδου. Συγκεκριμένα το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο όπως αναφέρθηκε και παραπάνω έχει τρείς εισόδους , 7 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο και δυο εξόδους άρα και δυο νευρώνες στο επίπεδο εξόδου. Για την εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης σφάλματος. Αφού δημιουργήθηκε ο πίνακας εισόδων tid , ο πίνακας στόχων tod και οι μακροεντολές των σημάτων PWM με τον τρόπο που αναφέρθηκε προηγουμένως δημιουργήθηκε και αρχικοποιήθηκε η μεταβλητή του πλήθους των νευρώνων του κρυφού επιπέδου , η μεταβλητή του βήματος εκπαίδευσης και η μεταβλητή του κατωφλίου τερματισμού του αλγορίθμου εκπαίδευσης. Η μεταβλητή του πλήθους των νευρώνων του κρυφού επιπέδου nnhl αρχικοποιήθηκε με την τιμή 7 , η μεταβλητή του βήματος εκπαίδευσης lr αρχικοποιήθηκε με την τιμή 0,25 και η μεταβλητή του κατωφλίου τερματισμού του αλγορίθμου εκπαίδευσης tn αρχικοποιήθηκε με την τιμή 0,01. Στην συνέχεια δημιουργήθηκαν οι πίνακες των βαρών του κρυφού επιπέδου και του επιπέδου εξόδου και οι δυο αυτοί πίνακες αρχικοποιήθηκαν με τυχαίες τιμές μεταξύ 0 και 1. Ως μέγεθος αυτών των πινάκων ορίστηκε το 4x7 για τον πίνακα βαρών του κρυφού επιπέδου wh και το 8x2 για τον πίνακα βαρών του επιπέδου εξόδου wo. Ο λόγος που επιλέχτηκαν αυτά τα μεγέθη είναι ότι η κάθε είσοδος του τεχνητού νευρωνικού δικτύου μαζί με την σταθερή είσοδο συνδέεται και με τους επτά νευρώνες του κρυφού επιπέδου αλλά και κάθε νευρώνας του κρυφού επιπέδου μαζί με την σταθερή είσοδο συνδέεται και με τους δύο νευρώνες του επιπέδου εξόδου. Έτσι σε κάθε νευρώνα του κρυφού επιπέδου του τεχνητού νευρωνικού δικτύου αντιστοιχούν τέσσερα βάρη δηλαδή τρία βάρη για τις τρεις εισόδους του τεχνητού νευρωνικού δικτύου και η πόλωση του ίδιου του νευρώνα ενώ σε κάθε νευρώνα του επιπέδου εξόδου του τεχνητού νευρωνικού δικτύου αντιστοιχούν οκτώ βάρη δηλαδή επτά βάρη για τους επτά νευρώνες του κρυφού επιπέδου και η πόλωση του ίδιου του νευρώνα. Τα βάρη μαζί με την πόλωση που αντιστοιχούν σε κάθε νευρώνα του κρυφού επιπέδου του τεχνητού νευρωνικού δικτύου είναι τα στοιχεία της κάθε στήλης του πίνακα βαρών του κρυφού επιπέδου δηλαδή του πίνακα wh . Έτσι από τα όλα τα στοιχεία αυτών των δύο πινάκων η τιμή του κάθε στοιχείου της τελευταίας γραμμής του πίνακα wh είναι η τιμή της πόλωσης του κάθε νευρώνα του κρυφού επιπέδου και η τιμή του κάθε στοιχείου της τελευταίας γραμμής του πίνακα wo είναι η τιμή της πόλωσης του κάθε νευρώνα του

επιπέδου εξόδου. Η αναπαράσταση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ φαίνεται στο σχήμα 48.



**Σχήμα 48:** Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ

Στην συνέχεια κανονικοποιήθηκαν τα δεδομένα του πίνακα εισόδων *tid* και στον καινούργιο πίνακα που προέκυψε προστέθηκε η σταθερή είσοδος για κάθε πρότυπο. Αφού κανονικοποιήθηκαν τα δεδομένα του πίνακα εισόδων ακολούθησε η κανονικοποίηση των δεδομένων του πίνακα στόχων *tod* έτσι ώστε οι τιμές αυτών των δεδομένων να βρίσκονται στο ίδιο διάστημα που ανήκουν και οι τιμές των δεδομένων του πίνακα εισόδων μετά την κανονικοποίηση δηλαδή στο διάστημα 0 έως 1 και έτσι δημιουργήθηκαν οι πίνακες *tidan* και *todan* που θα χρησιμοποιούνταν για την εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Η κανονικοποίηση για τον πίνακα *tid* επιτεύχθηκε αφαιρώντας από κάθε στοιχείον του πίνακα *tid* την μικρότερη τιμή του πίνακα και διαιρώντας το αποτέλεσμα με την διαφορά της μεγαλύτερης τιμής του πίνακα με την μικρότερη τιμή του πίνακα. Όσο για την κανονικοποίηση του πίνακα *tod* αυτή επιτεύχθηκε διαιρώντας κάθε στοιχείον του πίνακα *tod* με το 125. Ακολούθως συντάχτηκε ο κώδικας εκπαίδευσης του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Ο κώδικας αυτός χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι το Forward-Pass στο οποίο ξεκινάμε από τις εισόδους του τεχνητού νευρωνικού δικτύου και καταλήγουμε στο επίπεδο εξόδου του τεχνητού νευρωνικού δικτύου και το δεύτερο μέρος είναι το Backward-Pass στο οποίο ακολουθούμε την ανάποδη πορεία. Στο Forward-Pass υπολογίζουμε τις εξόδους του κάθε νευρώνα του κρυφού επιπέδου και του επιπέδου εξόδου ενώ στο Backward-Pass υπολογίζουμε τις καινούργιες τιμές του πίνακα βαρών του επιπέδου εξόδου και του κρυφού επιπέδου. Κάθε φορά που κάθε πρότυπο εισόδου *k* περνάει από το τμήμα του κώδικα Forward-Pass υπολογίζονται οι έξοδοι των νευρώνων του κρυφού επιπέδου και του επιπέδου εξόδου με τον εξής τρόπο. Θεωρώντας το διάνυσμα της σχέσης (36) δηλαδή το διάνυσμα  $x^{(k)}$  που περιέχει τις τιμές των εισόδων αφού αυτές έχουν πρότα πανονικοποιηθεί για το πρότυπο *k* αλλά και την τιμή της σταθερής εισόδου για το ίδιο πρότυπο

$$x^{(k)} = [x_0^{(k)} \quad x_1^{(k)} \quad x_2^{(k)} \quad x_3^{(k)} = 1] \quad (36)$$

, το διάνυσμα της σχέσης (37) δηλαδή το διάνυσμα  $y^{(k)}$  που περιέχει τις τιμές των στόχων αφού αυτές έχουν πρώτα κανονικοποιηθεί για το πρότυπο  $k$

$$y^{(k)} = [y_0^{(k)} \quad y_1^{(k)}] \quad (37)$$

, τον πίνακα της σχέσης (38) δηλαδή τον πίνακα  $w_h$  που περιέχει τα βάρη του κρυφού επιπέδου

$$w_h = \begin{bmatrix} W_{h(0,0)} & W_{h(0,1)} & W_{h(0,2)} & W_{h(0,3)} & W_{h(0,4)} & W_{h(0,5)} & W_{h(0,6)} \\ W_{h(1,0)} & W_{h(1,1)} & W_{h(1,2)} & W_{h(1,3)} & W_{h(1,4)} & W_{h(1,5)} & W_{h(1,6)} \\ W_{h(2,0)} & W_{h(2,1)} & W_{h(2,2)} & W_{h(2,3)} & W_{h(2,4)} & W_{h(2,5)} & W_{h(2,6)} \\ W_{h(3,0)} & W_{h(3,1)} & W_{h(3,2)} & W_{h(3,3)} & W_{h(3,4)} & W_{h(3,5)} & W_{h(3,6)} \end{bmatrix} \quad (38)$$

και τον πίνακα της σχέσης (39) δηλαδή τον πίνακα  $w_o$  που περιέχει τα βάρη του επιπέδου εξόδου

$$w_o = \begin{bmatrix} W_{o(0,0)} & W_{o(0,1)} \\ W_{o(1,0)} & W_{o(1,1)} \\ W_{o(2,0)} & W_{o(2,1)} \\ W_{o(3,0)} & W_{o(3,1)} \\ W_{o(4,0)} & W_{o(4,1)} \\ W_{o(5,0)} & W_{o(5,1)} \\ W_{o(6,0)} & W_{o(6,1)} \\ W_{o(7,0)} & W_{o(7,1)} \end{bmatrix} \quad (39)$$

υπολογίζεται το διάνυσμα  $u_h$  σύμφωνα με την σχέση (40)

$$u_h = x^{(k)} \cdot w_h \quad (40)$$

Στην συνέχεια η έξοδος του κάθε νευρώνα του κρυφού επιπέδου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ως ανεξάρτητη μεταβλητή της σιγμοειδής συνάρτησης κάθε στοιχείο του διανύσματος  $u_h$  και έτσι προκύπτει το διάνυσμα  $s_h$ . Μάλιστα στον κώδικα του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ το διάνυσμα  $s_h$  δηλώνεται ως ένας μονοδιάστατος πίνακας με όνομα  $a_{fh}$  και με διάσταση  $1 \times 8$  και όχι  $1 \times 7$  όπως προκύπτει από τα παραπάνω αφού θα πρέπει στο διάνυσμα  $s_h$  να προστεθεί ένα επιπλέον στοιχείο που αντιστοιχεί στην σταθερή είσοδο. Όσον αφορά την έξοδο του κάθε νευρώνα του επιπέδου εξόδου υπολογίζεται αρχικά το διάνυσμα  $u_o$  σύμφωνα με την σχέση (41) και αφού έχει προστεθεί στο διάνυσμα  $s_h$  το στοιχείο που αντιστοιχεί στην σταθερή είσοδο

$$u_o = s_h \cdot w_o \quad (41)$$

και στην συνέχεια η έξοδος του κάθε νευρώνα του επιπέδου εξόδου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ως ανεξάρτητη μεταβλητή της σιγμοειδής συνάρτησης κάθε στοιχείο του διανύσματος  $u_o$  και έτσι προκύπτει το διάνυσμα  $s_o$ . Στον κώδικα του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ το διάνυσμα  $s_o$  αντιστοιχεί στον μονοδιάστατο πίνακα  $a_{fo}$ . Επίσης στον ίδιο κώδικα το διάνυσμα  $x^{(k)}$  αντιστοιχεί σε κάθε γραμμή του πίνακα  $tidan$ , το διάνυσμα  $y^{(k)}$  αντιστοιχεί σε κάθε γραμμή του πίνακα  $todan$ , ο πίνακας  $w_h$  όπως είναι φανερό αντιστοιχεί στον πίνακα  $w_h$  και ο πίνακας  $w_o$  όπως είναι φανερό αντιστοιχεί στον πίνακα  $w_o$ . Αφού το πρότυπο  $k$  περάσει από το τμήμα του κώδικα Forward-Pass περνάει στην συνέχεια από το τμήμα του κώδικα Backward-Pass όπου και ανανεώνονται οι τιμές του

πίνακα βαρών του επιπέδου εξόδου και του κρυφού επιπέδου σύμφωνα με τις σχέσεις (42) και (43) αντίστοιχα. Στις σχέσεις αυτές η μερική παράγωγος προκύπτει από τις σχέσεις (44), (45) και (46).

$$e' = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left[ (y_0^{(k)} - s_{o(0)})^2 \right] + \left[ (y_1^{(k)} - s_{o(1)})^2 \right] \right] = e_{(0)} + e_{(1)} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \frac{\theta e'}{\theta w_{o(j,i)}} &= \frac{\theta e'}{\theta s_{o(i)}} \cdot \frac{\theta s_{o(i)}}{\theta u_{o(i)}} \cdot \frac{\theta u_{o(i)}}{\theta w_{o(j,i)}} = \\ &= (s_{o(i)} - y_0^{(k)}) \cdot [s_{o(i)} \cdot (1 - s_{o(i)})] \cdot s_{h(j)} \end{aligned} \quad (44)$$

$$n w_{o(j,i)} = w_{o(j,i)} - \eta \cdot \frac{\theta e'}{\theta w_{o(j,i)}} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \frac{\theta e'}{\theta w_{h(j,i)}} &= \frac{\theta e'}{\theta s_{h(i)}} \cdot \frac{\theta s_{h(i)}}{\theta u_{h(i)}} \cdot \frac{\theta u_{h(i)}}{\theta w_{h(j,i)}} \Leftrightarrow \frac{\theta e'}{\theta w_{h(j,i)}} = \\ &= \left( \left( \frac{\theta e_{(0)}}{\theta s_{o(0)}} \cdot \frac{\theta s_{o(0)}}{\theta u_{o(0)}} \cdot \frac{\theta u_{o(0)}}{\theta s_{h(i)}} \right) + \left( \frac{\theta e_{(1)}}{\theta s_{o(1)}} \cdot \frac{\theta s_{o(1)}}{\theta u_{o(1)}} \cdot \frac{\theta u_{o(1)}}{\theta s_{h(i)}} \right) \right) \cdot \frac{\theta s_{h(i)}}{\theta u_{h(i)}} \cdot \frac{\theta u_{h(i)}}{\theta w_{h(j,i)}} = \\ &= \left[ [(s_{o(0)} - y_0^{(k)}) \cdot [s_{o(0)} \cdot (1 - s_{o(0)})] \cdot w_{o(i,0)}] + [(s_{o(1)} - y_1^{(k)}) \cdot [s_{o(1)} \cdot (1 - s_{o(1)})] \cdot w_{o(i,1)}] \right] \cdot \\ &\quad \cdot [s_{h(i)} \cdot (1 - s_{h(i)})] \cdot x_j^{(k)} \end{aligned} \quad (45)$$

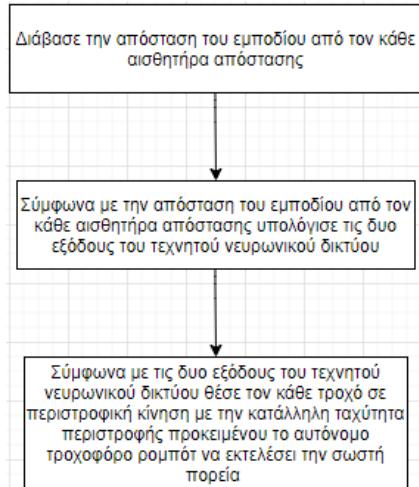
$$n w_{h(j,i)} = w_{h(j,i)} - \eta \cdot \frac{\theta e'}{\theta w_{h(j,i)}} \quad (43)$$

Στις παραπάνω σχέσεις το  $\eta$  είναι το βήμα εκπαίδευσης το οποίο και στον κώδικα του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ αντιστοιχεί όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στην μεταβλητή  $lr$ . Μόλις έρθει και το τελευταίο πρότυπο  $k$  και ανανεωθούν οι δυο πίνακες που περιέχουν τα βάρη υπολογίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των εξόδων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου για όλα τα πρότυπα εισόδου και για τις τελευταίες τιμές του πίνακα βαρών του κρυφού επιπέδου και του επιπέδου εξόδου και αν το σφάλμα αυτό είναι μεγαλύτερο από την τιμή του κατωφλίου τερματισμού του αλγορίθμου εκπαίδευσης η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή ξεκινώντας πάλι από το πρώτο πρότυπο  $k$ . Όταν η τιμή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος γίνει μικρότερη ή ίση της τιμής του κατωφλίου τερματισμού του αλγορίθμου εκπαίδευσης ο αλγόριθμος εκπαίδευσης σταματάει και οι τιμές που έχει ο πίνακας βαρών του κρυφού επιπέδου και του επιπέδου εξόδου εκείνη την χρονική στιγμή είναι οι τιμές για τις οποίες το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο υπολογίζει σωστά σε έναν ικανοποιητικό βαθμό την ταχύτητα περιστροφής του κάθε τροχού όταν στο αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ εισάγονται καινούργια δεδομένα από τους αισθητήρες απόστασης HC-SR04 [115],[92]. Ο παραπάνω κώδικας σε μορφή flow-chart σχεδιασμένο στο πρόγραμμα draw.io στο οποίο σχεδιάστηκε και το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο του σχήματος 48 φαίνεται στο σχήμα 49.



**Σχήμα 49:** Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης του τεχνητού νευρωνικού δικτύου σε μορφή flow-chart

Επειδή ο κώδικας αυτός εκτελείται μόνο μια φορά ορίστηκε μέσα στην συνάρτηση void setup(). Αντίθετα ο κώδικας που εκτελείτε μέσα στην συνάρτηση void loop() είναι ο κώδικας ο οποίος χρησιμοποιεί το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που έχει ήδη εκπαιδευτεί μέσα στην συνάρτηση void setup() και με βάση αυτό δίνει την κατάλληλη εντολή στο αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ ώστε αυτό να εκτελέσει την σωστή πορεία προκειμένου να μην συγκρουστεί με κάποιο εμπόδιο που βρίσκεται μπροστά του. Ο κώδικας αυτός σε μορφή flow-chart σχεδιασμένος επίσης στο πρόγραμμα draw.io φαίνεται στο σχήμα 50.



**Σχήμα 50:** Ο κώδικας απόφασης και εκτέλεσης της σωστής πορείας που πρέπει να ακολουθήσει το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ σε μορφή flow-chart

Κάθε τμήμα του κώδικα αυτού είναι μια κλήση συνάρτησης η οποία επιστρέφει τις τιμές που δέχεται ως ορίσματα η επόμενη συνάρτηση που καλείται στον κώδικα. Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των δυο εξόδων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου στον κώδικα του σχήματος 50 είναι η ίδια συνάρτηση που χρησιμοποιείται και στον κώδικα εκπαίδευσης του τεχνητού νευρωνικού δικτύου για τον υπολογισμό του μέσου τετραγωνικού σφάλματος των εξόδων του για όλα τα πρότυπα εισόδου. Η συνάρτηση αυτή επιστρέφει μια δομή τύπου networkoutputs με δυο πεδία όπου το ένα από αυτά είναι η πρώτη έξοδος του τεχνητού νευρωνικού δικτύου και το άλλο η δεύτερη έξοδος του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Οι τιμές των δυο αυτών πεδίων όταν επιστρέφονται από την συνάρτηση είναι αποκανονικοποιημένες δηλαδή βρίσκονται στο ίδιο εύρος τιμών που βρίσκονται και όλες οι τιμές του πίνακα tod. Η αποκανονικοποίηση των δυο εξόδων επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας και τις δυο τιμές εξόδων με το 125. Έτσι οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατευθείαν από την συνάρτηση analogWrite() για τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής των δυο κινητήρων DC. Ολόκληρος ο κώδικας του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ φαίνεται παρακάτω.

```

#define ENA_FO 125
#define ENB_FO 125
#define ENA_OR 75
#define ENB_OR 125
#define ENA_CR 0
#define ENB_CR 125
#define ENA_OL 125
#define ENB_OL 75
#define ENA_CL 125

```

```

#define ENB_CL 0
#define nnhl 7
#define lr 0.25
#define tn 0.01

//Δηλώνουμε ως σταθερές τους ακροδέκτες του Motor Driver και τις αρχικοποιούμε με τους
αντίστοιχους ακροδέκτες του Teensy 3.2.

const int ENA=5;
const int IN1=1;
const int IN2=2;
const int IN3=3;
const int IN4=4;
const int ENB=6;

//Δηλώνουμε ως σταθερές τους ακροδέκτες των αισθητήρων απόστασης και τις αρχικοποιούμε με
τους αντίστοιχους ακροδέκτες του Teensy 3.2.

const int LSEP=22;
const int LSTP=21;
const int MSEP=20;
const int MSTP=19;
const int RSEP=18;
const int RSTP=17;

//Δηλώνουμε το πρότυπο μιας δομής τύπου distances.

struct distances
{
    int d1;
    int d2;
    int d3;
};

//Δηλώνουμε το πρότυπο μιας δομής τύπου networkoutputs.

struct networkoutputs
{
    int o1;
    int o2;
};

//Δηλώνουμε τη συνάρτηση που είναι υπεύθυνη για το διάβασμα της απόστασης μεταξύ του εμποδίου
και του κάθε αισθητήρα απόστασης.

```

```

struct distances read_sensors_data();

//Δηλώνουμε τη συνάρτηση που είναι υπεύθυνη για τον υπολογισμό των δυο εξόδων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου ανάλογα με την απόσταση του εμποδίου από τον κάθε αισθητήρα απόστασης.

struct networkoutputs compute_neural_network_outputs(struct distances getdis);

//Δηλώνουμε τη συνάρτηση που είναι υπεύθυνη για την κίνηση του ρομπότ ανάλογα με τις τιμές των δυο εξόδων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

void move_robot(struct networkoutputs getno);

float wh[4][nnhl],wo[nnhl+1][2];

int i,j,mintid,maxtid;

void setup()
{
    struct distances td;
    struct networkoutputs tno;
    float afh[nnhl+1];
    float afo[2];
    float
    sum1=0,uswboduwo,uafoduswbo,uEtduafo,uEtduwo,uswbhduwh,uafhduswbh,uEtduafh,uEtduwh,p
    wo[nnhl+1][2],v1,v2,tr1,tr2;
    float tidan[161][4],todan[161][2];
    float mse;
    int k=0;
    //Δηλώνουμε τον πίνακα που περιέχει τις τιμές των εισόδων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

    //Αριστερός Αισθητήρας , Κεντρικός Αισθητήρας , Δεξιός Αισθητήρας.

    int tid[161][3]={{167,19,126},
                    {169,15,130},
                    {169,18,124},
                    {212,18,128},
                    {211,15,131},
                    {169,15,126},
                    {212,19,123},
                    {168,16,140},
                    {167,20,122},
                    {168,19,124},
                    {168,16,128},

```

{169,17,125},  
{168,20,122},  
{168,18,125},  
{212,16,131},  
{168,17,126},  
{167,19,141},  
{169,20,123},  
{168,14,142},  
{212,18,123},  
{169,14,130},  
{168,15,129},  
{167,20,140},  
{14,105,182},  
{20,108,182},  
{14,129,182},  
{16,123,181},  
{14,130,181},  
{15,125,181},  
{17,122,181},  
{14,126,181},  
{16,127,183},  
{16,104,181},  
{18,121,180},  
{19,105,180},  
{20,123,183},  
{15,129,182},  
{15,107,183},  
{17,105,180},  
{18,125,181},  
{15,130,182},  
{19,127,181},  
{16,107,183},  
{20,119,181},  
{15,104,181},  
{20,120,180},

{115,106,19},  
{119,107,19},  
{116,106,19},  
{116,107,16},  
{116,107,20},  
{118,107,17},  
{121,105,15},  
{122,107,16},  
{121,105,19},  
{120,107,15},  
{115,107,16},  
{116,107,14},  
{122,107,15},  
{120,107,16},  
{119,105,15},  
{118,106,19},  
{115,108,18},  
{123,105,18},  
{121,107,16},  
{115,107,20},  
{120,105,17},  
{118,106,18},  
{119,108,17},  
{105,16,18},  
{122,17,18},  
{138,17,18},  
{136,17,18},  
{122,14,15},  
{107,14,15},  
{109,15,15},  
{122,15,15},  
{106,20,19},  
{123,16,16},  
{138,16,16},  
{107,15,18},

{129,19,20},  
 {132,18,20},  
 {106,16,17},  
 {110,18,19},  
 {148,17,18},  
 {105,20,20},  
 {176,16,18},  
 {120,15,16},  
 {108,16,16},  
 {125,15,16},  
 {140,16,16},  
 {14,14,105},  
 {18,19,106},  
 {15,16,118},  
 {14,15,112},  
 {16,15,119},  
 {17,17,108},  
 {15,15,106},  
 {15,15,110},  
 {20,20,106},  
 {19,19,112},  
 {16,16,113},  
 {16,16,106},  
 {16,17,118},  
 {17,18,105},  
 {19,15,193},  
 {16,17,112},  
 {18,19,110},  
 {20,20,110},  
 {19,15,192},  
 {14,14,127},  
 {19,19,106},  
 {17,18,113},  
 {14,15,125},  
 {16,14,17},

{17,14,17},  
 {19,14,18},  
 {17,15,19},  
 {18,14,20},  
 {19,15,18},  
 {19,16,20},  
 {19,15,20},  
 {16,14,18},  
 {17,14,18},  
 {17,14,20},  
 {18,15,20},  
 {18,14,19},  
 {17,15,18},  
 {18,14,17},  
 {18,15,19},  
 {19,15,19},  
 {16,14,19},  
 {19,14,20},  
 {18,16,20},  
 {19,16,19},  
 {17,14,19},  
 {18,14,18},  
 {161,155,162},  
 {166,161,166},  
 {161,167,170},  
 {175,166,170},  
 {164,159,165},  
 {162,158,125},  
 {165,160,165},  
 {174,168,171},  
 {165,162,167},  
 {165,161,164},  
 {167,161,165},  
 {161,157,163},  
 {165,159,166},

{164,159,162},  
{167,161,167},  
{161,159,119},  
{168,162,167},  
{168,162,165},  
{168,163,165},  
{168,161,165},  
{164,158,164},  
{194,100,177},  
{166,159,162}}}

//Δηλώνουμε τον πίνακα που περιέχει τις τιμές των στόχων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

//Δεξιός Τροχός , Αριστερός Τροχός.







//Δηλώνουμε τους ακροδέκτες του Teensy 3.2 που συνδέονται στους ακροδέκτες του Motor Driver ως εξόδους.

```

pinMode(ENA,OUTPUT);
pinMode(IN1,OUTPUT);
pinMode(IN2,OUTPUT);
pinMode(IN3,OUTPUT);
pinMode(IN4,OUTPUT);
pinMode(ENB,OUTPUT);

//Δηλώνουμε τους ακροδέκτες του Teensy 3.2 που συνδέονται στους ακροδέκτες Trig των
αισθητήρων απόστασης ως εξόδους.

pinMode(LSTP,OUTPUT);
pinMode(MSTP,OUTPUT);
pinMode(RSTP,OUTPUT);

//Δηλώνουμε τους ακροδέκτες του Teensy 3.2 που συνδέονται στους ακροδέκτες Echo των
αισθητήρων απόστασης ως εισόδους.

pinMode(LSEP,INPUT);
pinMode(MSEP,INPUT);
pinMode(RSEP,INPUT);
randomSeed(micros());

//Αρχικοποιούμε τον πίνακα που περιέχει τα βάρη του κρυφού επιπέδου με τυχαίες τιμές μεταξύ 0
και 1.

for(i=0;i<4;i++)
{
    for(j=0;j<nvh1;j++)
    {
        v1=random(11);
        v2=random(11);
        wh[i][j]=(v1/10.0)*(v2/10.0);
    }
}

//Αρχικοποιούμε τον πίνακα που περιέχει τα βάρη του επιπέδου εξόδου με τυχαίες τιμές μεταξύ 0
και 1.

for(i=0;i<(nvh1+1);i++)
{
    for(j=0;j<2;j++)
    {
        v1=random(11);
    }
}

```

```

v2=random(11);
wo[i][j]=(v1/10.0)*(v2/10.0);
}

}

//Βρίσκουμε την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή του πίνακα που περιέχει τις τιμές των εισόδων του
τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

mintid=400;
maxtid=2;
for(i=0;i<161;i++)
{
    for(j=0;j<3;j++)
    {
        if(tid[i][j]>=maxtid)
        {
            maxtid=tid[i][j];
        }
        if(tid[i][j]<=mintid)
        {
            mintid=tid[i][j];
        }
    }
}

//Κανονικοποιούμε τις τιμές των εισόδων ώστε να βρίσκονται μεταξύ 0 και 1 και σε κάθε στοιχείο
της τελευταίας στήλης του καινούργιου πίνακα εκχωρούμε τη σταθερή είσοδο.

for(i=0;i<161;i++)
{
    for(j=0;j<4;j++)
    {
        if(j!=3)
        {
            tidan[i][j]=((float)(tid[i][j]-mintid))/((float)(maxtid-mintid));
        }
        else
        {
            tidan[i][j]=1.0;
        }
    }
}

```

```

    }
}

}

//Κανονικοποιούμε τις τιμές των στόχων ώστε να βρίσκονται μεταξύ 0 και 1.

for(i=0;i<161;i++)
{
    for(j=0;j<2;j++)
    {
        todan[i][j]=((float)(tod[i][j]))/125.0;
    }
}

do
{
    while(k<161)
    {

        //Εκτελούμε Forward Pass και υπολογίζουμε την έξοδο του κάθε νευρώνα του κρυφού επιπέδου
        και την έξοδο του κάθε νευρώνα του επιπέδου εξόδου. Στο στοιχείο της τελευταίας στήλης του
        μονοδιάστατου πίνακα που περιέχει τις τιμές των εξόδων του κάθε νευρώνα του κρυφού επιπέδου
        εκχωρούμε τη σταθερή είσοδο.

        for(i=0;i<(nnhl+1);i++)
        {
            if(i!=nnhl)
            {
                for(j=0;j<4;j++)
                {
                    sum1=sum1+(tidan[k][j]*wh[j][i]);
                }

                afh[i]=1.0/(1.0+(exp(-sum1)));
                sum1=0;
            }
        }

        else
        {
            afh[i]=1.0;
        }
    }
}

```

```

for(i=0;i<2;i++)
{
    for(j=0;j<(nnhl+1);j++)
    {
        sum1=sum1+(afh[j]*wo[j][i]);
    }
    afo[i]=1.0/(1.0+(exp(-sum1)));
    sum1=0;
}

```

//Εκτελούμε Backward Pass και διορθώνουμε τα βάρη του επιπέδου εξόδου και τα βάρη του κρυφού επιπέδου.

```

for(i=0;i<(nnhl+1);i++)
{
    for(j=0;j<2;j++)
    {
        pwo[i][j]=wo[i][j];
    }
}

for(i=0;i<2;i++)
{
    for(j=0;j<(nnhl+1);j++)
    {
        uswboduwo=afh[j];
        uafoduswbo=afo[i] * (1.0-afo[i]);
        uEtduafo=afo[i]-todan[k][i];
        uEtduwo=uEtduafo*uafoduswbo*uswboduwo;
        wo[j][i]=wo[j][i]-(lr*uEtduwo);
    }
}

for(i=0;i<nnhl;i++)
{
    for(j=0;j<4;j++)
    {
        uswbhduwh=tidan[k][j];
        uafhduswbh=afh[i] * (1.0-afh[i]);
    }
}

```

```

uEtduafh=((afo[0]-todan[k][0])*(afo[0]*(1.0-afo[0]))*pwo[i][0])+((afo[1]-
todan[k][1])*(afo[1]*(1.0-afo[1]))*pwo[i][1]);
uEtduwh=uEtduafh*uafhduswbh*uswbhduwh;
wh[j][i]=wh[j][i]-(lr*uEtduwh);
}

}

//Παίρνουμε το επόμενο πρότυπο.

k=k+1;

}

//Υπολογίζουμε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των εξόδων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου για
όλα τα πρότυπα.

for(k=0;k<161;k++)
{
    td.d1=tid[k][0];
    td.d2=tid[k][1];
    td.d3=tid[k][2];
    tno=compute_neural_network_outputs(td);
    tr1=(float)pow(todan[k][0]-((float)tno.o1)/125.0),2.0);
    tr2=(float)pow(todan[k][1]-((float)tno.o2)/125.0),2.0);
    sum1=sum1+tr1+tr2;
}
mse=sum1/322.0;
sum1=0;
k=0;
//Ελέγχουμε αν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι μεγαλύτερο από το κατώφλι τερματισμού. Αν
είναι μεγαλύτερο ο αλγόριθμος εκπαίδευσης ξεκινάει από την αρχή ενώ αν είναι μικρότερο ή ίσο ο
αλγόριθμος εκπαίδευσης σταματάει.

}while(mse>tn);
}

void loop()
{
    struct distances ld;
    struct networkoutputs lno;
    ld=read_sensors_data();

```

```

lno=compute_neural_network_outputs(ld);
move_robot(lno);
}

//Ορίζουμε τη συνάρτηση που διαβάζει την απόσταση του εμποδίου από τον κάθε αισθητήρα
//απόστασης.

struct distances read_sensors_data()
{
    struct distances retdis;
    float LSDU,MSDU,RSDU;
    int LSDI,MSDI,RSDI,nLSDI,nMSDI,nRSDI;
    digitalWrite(LSTP,LOW);
    digitalWrite(MSTP,LOW);
    digitalWrite(RSTP,LOW);
    delayMicroseconds(2);

    //Διαβάζουμε την απόσταση μεταξύ του εμποδίου και του αριστερού αισθητήρα.
    digitalWrite(LSTP,HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(LSTP,LOW);
    LSDU=pulseIn(LSEP,HIGH);
    LSDI=(int)round((LSDU/2.0)*0.0343);

    //Διαβάζουμε την απόσταση μεταξύ του εμποδίου και του κεντρικού αισθητήρα.
    digitalWrite(MSTP,HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(MSTP,LOW);
    MSDU=pulseIn(MSEP,HIGH);
    MSDI=(int)round((MSDU/2.0)*0.0343);

    //Διαβάζουμε την απόσταση μεταξύ του εμποδίου και του δεξιού αισθητήρα.
    digitalWrite(RSTP,HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(RSTP,LOW);
    RSDU=pulseIn(RSEP,HIGH);
    RSDI=(int)round((RSDU/2.0)*0.0343);
}

```

//Αλλάζουμε τις τιμές των αποστάσεων που διαβάσαμε ώστε να μην είναι μεγαλύτερες από τη μέγιστη τιμή του πίνακα που περιέχει τις τιμές των εισόδων και μικρότερες από την ελάχιστη τιμή του ίδιου πίνακα.

```
nLSDI=constrain(LSDI,mintid,maxtid);
nMSDI=constrain(MSDI,mintid,maxtid);
nRSDI=constrain(RSDI,mintid,maxtid);
//Επιστρέφουμε τις τιμές των αποστάσεων που διαβάσαμε.
retdis.d1=nLSDI;
retdis.d2=nMSDI;
retdis.d3=nRSDI;
return retdis;
}
```

//Ορίζουμε τη συνάρτηση που υπολογίζει τις δυο εξόδους του τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

```
struct networkoutputs compute_neural_network_outputs(struct distances getdis)
```

```
{  
    struct networkoutputs retno;  
    float sdman[4],hl[nnhl+1];  
    float ol[2];  
    float sum2=0;  
    int olad[2];
```

//Κανονικοποιούμε τα δεδομένα που διαβάσαμε από τους αισθητήρες απόστασης ώστε να βρίσκονται μεταξύ 0 και 1.

```
sdman[0]=((float)(getdis.d1-mintid))/((float)(maxtid-mintid));
sdman[1]=((float)(getdis.d2-mintid))/((float)(maxtid-mintid));
sdman[2]=((float)(getdis.d3-mintid))/((float)(maxtid-mintid));
sdman[3]=1.0;
```

//Υπολογίζουμε την έξοδο του κάθε νευρώνα του κρυφού επιπέδου. Στο στοιχείο της τελευταίας στήλης του μονοδιάστατου πίνακα που περιέχει τις τιμές των εξόδων του κάθε νευρώνα του κρυφού επιπέδου εκχωρούμε τη σταθερή είσοδο.

```
for(j=0;j<(nnhl+1);j++)  
{  
    if(j!=nnhl)  
    {  
        for(i=0;i<4;i++)
```

```

{
    sum2=sum2+(sdman[i]*wh[i][j]);
}
hl[j]=1.0/(1.0+(exp(-sum2)));
sum2=0;
}
else
{
    hl[j]=1.0;
}
}

//Υπολογίζουμε τις δυο εξόδους του τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

for(i=0;i<2;i++)
{
    for(j=0;j<(nnhl+1);j++)
    {
        sum2=sum2+(hl[j]*wo[j][i]);
    }
    ol[i]=1.0/(1.0+(exp(-sum2)));
    sum2=0;
}

//Αποκανονικοποιούμε τις δυο εξόδους του τεχνητού νευρωνικού δικτύου ώστε να βρίσκονται
μεταξύ 0 και 125.

for(i=0;i<2;i++)
{
    olad[i]=(int)(ol[i]*125.0);
}

//Επιστρέφουμε τις τιμές των δυο εξόδων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

retno.o1=olad[0];
retno.o2=olad[1];
return retno;
}

//Ορίζουμε τη συνάρτηση για την κίνηση του ρομπότ.

void move_robot(struct networkoutputs getno)

```

{

//Μεταβάλλουμε την ταχύτητα του ενός τροχού ή και των δυο τροχών ταυτόχρονα σύμφωνα με τις δυο εξόδους του τεχνητού νευρωνικού δίκτυου ώστε το ρομπότ να κινηθεί προς τη σωστή κατεύθυνση προκειμένου να αποφύγει το εμπόδιο.

```
digitalWrite(IN1,HIGH);
digitalWrite(IN2,LOW);
analogWrite(ENA,getno.o1);
digitalWrite(IN3,HIGH);
digitalWrite(IN4,LOW);
analogWrite(ENB,getno.o2);
```

}

## Συμπεράσματα

Από τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ όταν κάποιο εμπόδιο βρεθεί στην πορεία του γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η ανταπόκριση του πλησιάζει αρκετά την επιθυμητή. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης τα οποία όμως αυξάνουν την πολυπλοκότητα ενώ κάποια από αυτά αυξάνουν και το συνολικό κόστος της κατασκευής. Συγκεκριμένα ένας τρόπος για να βελτιωθεί η απόδοση του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ είναι η προσθήκη περισσότερων αισθητήρων απόστασης HC-SR04 ώστε να καλύπτεται μια μεγαλύτερη γωνία μέσα στην οποία τα αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα μπορεί να ανιχνεύσει κάποιο εμπόδιο. Με αυτόν τον τρόπο το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα μπορεί να αποφεύγει ακόμα και πλευρικά εμπόδια δηλαδή εμπόδια που βρίσκονται προς την πλευρά των τροχών. Η προσθήκη επιπλέον αισθητήρων συνεπάγεται βέβαια και την προσθήκη επιπλέον εισόδων στο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο και επομένως και την αύξηση της πολυπλοκότητας αλλά και των υπολογισμών που απαιτούνται προκειμένου αυτό να μπορέσει να εκπαιδευτεί. Ένας δεύτερος τρόπος για να βελτιωθεί η απόδοση του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ είναι η επιλογή καλύτερων τιμών για τις υπερ-παραμέτρους (hyperparameters) δηλαδή για τις παραμέτρους που δεν ανανεώνονται κατά την διάρκεια της εκμάθησης και χρησιμοποιούνται είτε για την διαμόρφωση του μοντέλου του τεχνητού νευρωνικού δίκτυου είτε για την διασφάλιση της επιτυχής εκπαίδευσης του μέσω του αλγορίθμου εκπαίδευσης που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Έτσι χρησιμοποιώντας κάποιους άλλους αλγορίθμους και τεχνικές για την βελτιστοποίηση και την επιλογή των καλύτερων τιμών που αντιστοιχούν στο πλήθος των νευρώνων του κρυφού επιπέδου , στο βήμα εκπαίδευσης και στο κατώφλι τερματισμού του αλγορίθμου οπισθοδιάδοσης σφάλματος μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά η απόδοση του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ. Ένας τρίτος τρόπος που ίσως θα μπορούσε να βελτιώσει την απόδοση του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ είναι η προσθήκη τεσσάρων επιπλέον εξόδων ώστε εκτός από την

ταχύτητα του κάθε τροχού να ρυθμίζεται και η φορά περιστροφής του. Έτσι το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα αποκτούσε ένα είδος φρένου το οποίο και θα μετέτρεπε την κάθε στροφή πιο κλειστή και πιο απότομη μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ να συγκρουστεί με κάποιο εμπόδιο όταν αυτό εμφανιστεί ξαφνικά μπροστά του. Παρόλο που και οι τρεις παραπάνω τρόποι θα μπορούσαν να επιφέρουν κάποια βελτίωση στην απόδοση του ήδη υπάρχοντος αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ αυτό που θα οδηγούσε σε πολύ καλύτερα αποτελέσματα θα ήταν η κατασκευή ενός αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ βασισμένο στο αναπτυξιακό περιβάλλον Jetson Nano 2GB Developer Kit λόγω της μεγάλης μνήμης και της δυνατότητας παράλληλης επεξεργασίας που διαθέτει αλλά και λόγω των πλαισίων λογισμικού που υποστηρίζει. Σε αυτήν την περίπτωση θα γινόταν και η αντικατάσταση των αισθητήρων απόστασης HC-SR04 με μια κάμερα μιας και οι αισθητήρες απόστασης HC-SR04 εκτός από την υγρασία και την θερμοκρασία του περιβάλλοντος επηρεάζονται και από την μορφή αλλά και από το σχήμα του αντικειμένου που βρίσκεται μπροστά τους. Επίσης λόγω του ότι οι αισθητήρες απόστασης βρίσκονται σε κάποιο ύψος πάνω από το έδαφος η ανίχνευση κάποιου εμποδίου από τους αισθητήρες εξαρτάται και από το ύψος του ίδιου του εμποδίου.

## Αναφορές

- [1] <https://docplayer.gr/1612147-Eisagogikes-simeioseis-rompotikis.html>
- [2] Βιβλίο: Ρομποτική Μοντελοποίηση , Σχεδιασμός και Έλεγχος. ISBN-13: 978960330748-8.
- [3] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Clepsydre\\_dans\\_1%27%C3%89gypte\\_antique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Clepsydre_dans_1%27%C3%89gypte_antique)
- [4] [https://www.reddit.com/r/ArtefactPorn/comments/3o00x3/the\\_oldest\\_water\\_clock\\_or\\_clepsydra\\_known\\_the/](https://www.reddit.com/r/ArtefactPorn/comments/3o00x3/the_oldest_water_clock_or_clepsydra_known_the/)
- [5] <https://www.mixanitouxronou.gr/i-proti-iptameni-michani-kataskevastike-apo-ellina-pithagorio-filosofo-ke-petaxe-se-apostasi-200-metron-o-idiros-elise-ena-apo-ta-megalitera-mathimatika-provlimata/>
- [6] <https://athensflat.gr/museum-of-the-ancient-greek-technology>
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Leonardo%27s\\_robot](https://en.wikipedia.org/wiki/Leonardo%27s_robot)
- [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/Jacques\\_de\\_Vaucanson](https://en.wikipedia.org/wiki/Jacques_de_Vaucanson)
- [9] <http://cyberneticzoo.com/robots/1810-automaton-trumpet-player-friedrich-kaufmann-german/>
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/Analytical\\_Engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Analytical_Engine)
- [11] [https://en.wikipedia.org/wiki/Difference\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Difference_engine)

- [12] <https://www.forbes.com/sites/berniecarlson/2018/07/11/nikola-teslas-third-greatest-invention-the-first-drone/?sh=44e7ef9564d6>
- [13] [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CF%81%CE%B5%CE%B9%CF%82\\_%CE%BD%CF%8C%CE%BC%CE%BF%CE%B9\\_%CF%84%CE%B7%CF%82\\_%CF%81%CE%BF%CE%BC%CF%80%CE%BF%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CF%81%CE%B5%CE%B9%CF%82_%CE%BD%CF%8C%CE%BC%CE%BF%CE%B9_%CF%84%CE%B7%CF%82_%CF%81%CE%BF%CE%BC%CF%80%CE%BF%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82)
- [14] <https://el.wikipedia.org/wiki/ENIAC>
- [15] <https://en.wikipedia.org/wiki/Unimate>
- [16] <https://latestnews.plus/the-film-like-story-of-the-first-real-robot-unimate-in-history/>
- [17] [https://en.wikipedia.org/wiki/Programmable\\_Universal\\_Machine\\_for\\_Assembly](https://en.wikipedia.org/wiki/Programmable_Universal_Machine_for_Assembly)
- [18] <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/invasive-surgery>
- [19] [https://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato\\_2.html](https://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_2.html)
- [20] [https://en.wikipedia.org/wiki/Mars\\_2](https://en.wikipedia.org/wiki/Mars_2)
- [21] <https://www.ctemag.com/news/articles/evolution-of-robots>
- [22] <https://www-robotics.cs.umass.edu/~grupen/603/slides/KINEMATICS.pdf>
- [23] <https://www.businesswire.com/news/home/20180523005033/en/Nordson-EFD-Introduces-New-GV-Series-Gantry-Fluid-Dispensing-Robot-with-Vision>
- [24] <http://www.veegoochina.com/en/product-item/gantry-robot/>
- [25] <https://hudsonrobotics.com/microplate-handling-2/platecrane-sciclops-3/>
- [26] <https://www.slideshare.net/gowsick/robotics-and-machine-vision-system>
- [27] [https://www.researchgate.net/figure/Model-of-Articulated-robotic-arm\\_fig5\\_276062380](https://www.researchgate.net/figure/Model-of-Articulated-robotic-arm_fig5_276062380)
- [28] <https://global.abb/group/en>
- [29] <https://www.yingpaicn.top/products.aspx?cname=scara+robot+fanuc&cid=7>
- [30] [https://en.wikipedia.org/wiki/Delta\\_robot](https://en.wikipedia.org/wiki/Delta_robot)
- [31] <https://ifr.org/robot-history>
- [32] <https://www.indevagroup.com/tag/agv-automated-guided-vehicles/>
- [33] <https://interestingengineering.com/amazon-introduces-wheeled-autonomous-robots-for-suburban-parcel-delivery>
- [34] <https://www.businessinsider.com/marines-testing-robot-2016-7>

- [35] [https://www.alibaba.com/product-detail/SS-350-kg-robot-mecanum-wheel\\_60734948266.html](https://www.alibaba.com/product-detail/SS-350-kg-robot-mecanum-wheel_60734948266.html)
- [36] [https://www.aliexpress.com/item/4000344832319.html?algo\\_pvid=6281910b-c9ea-45ed-a6b5-13819f3299ce&algo\\_exp\\_id=6281910b-c9ea-45ed-a6b5-13819f3299ce-42](https://www.aliexpress.com/item/4000344832319.html?algo_pvid=6281910b-c9ea-45ed-a6b5-13819f3299ce&algo_exp_id=6281910b-c9ea-45ed-a6b5-13819f3299ce-42)
- [37] <https://rpal.cs.cornell.edu-foundations/mechanisms.pdf>
- [38] <http://mate.tue.nl/mate/pdfs/7566.pdf>
- [39] <https://jamhouri.com/product/uav-rov/>
- [40] <https://www.navyrecognition.com/index.php/naval-news/naval-exhibitions/euronaval-2020-exhibitors-visitors-information/euronaval-2020-news/9155-euronaval-online-2020-eca-group-has-developed-a-full-range-of-autonomous-underwater-vehicles.html>
- [41] <https://coptrz.com/5-times-uk-police-used-drones-for-good/>
- [42] <https://asl.ethz.ch/the-lab/robots.html>
- [43] <https://www.theguardian.com/lifeandstyle/2021/apr/07/sophia-the-robot-pop-music-nfts>
- [44] <https://www.cnet.com/news/boston-dynamics-spot-robot-dog-reminds-park-visitors-to-maintain-distance/>
- [45] <https://blog.robotiq.com/bid/69962/How-Do-Industrial-Robots-Achieve-Compliance>
- [46] <https://modernrobotics.northwestern.edu/nu-gm-book-resource/2-2-degrees-of-freedom-of-a-robot/>
- [47] <https://web.iitd.ac.in/~saha/ethiopia/02lec.pdf>
- [48] [https://www.brainkart.com/article/End-Effectors--Grippers-and-Tools\\_6411/](https://www.brainkart.com/article/End-Effectors--Grippers-and-Tools_6411/)
- [49] <https://www.generationrobots.com/en/403425-rg2-ft-gripper.html>
- [50] <https://www.automation.com/en-us/articles/2011-1/gripper-101-what-is-a-gripper>
- [51] <https://www.schmalz.com/en/vacuum-knowledge/the-vacuum-system-and-its-components/special-grippers/needle-grippers/>
- [52] <https://www.thejournal.ie/robot-soft-touch-gripper-2582024-Feb2016/>
- [53] <https://marvin-robotics.com/product/gecko-gripper/>
- [54] [https://en.wikipedia.org/wiki/Robot\\_end\\_effector](https://en.wikipedia.org/wiki/Robot_end_effector)
- [55] <https://techxplore.com/news/2015-01-versaball-gripper-ball-cup-game.html>
- [56] <https://realpars.com/actuator/>

- [57] <https://www.youtube.com/watch?v=R-OBtVCPjMc>
- [58] <https://www.fluidpowerworld.com/what-are-single-acting-pneumatic-cylinders/>
- [59] <https://www.youtube.com/watch?v=tiyOHZgSa-s>
- [60] <https://instrumentationtools.com/direct-reverse-acting-control-valves/>
- [61] <http://blog.parker.com/know-your-pneumatics-rotary-actuator-basics>
- [62] <https://tameson.com/pneumatic-rotary-rack-and-pinion-actuators.html>
- [63] <https://www.youtube.com/watch?v=U4KpMiXOUAI>
- [64] <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/EE656/%CE%A3%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%B9%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82%20%CE%91%CE%BD%CE%BF%CE%B9%CE%BA%CF%84%CF%8E%CE%BD%20%CE%9C%CE%B1%CE%B8%CE%B7%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD%CE%9C%CE%B7%CF%87%CE%B1%C%BD%CE%AD%CF%82%20%CE%A3%CF%85%CE%BD%CE%B5%CF%87%CE%BF%CF%8D%CF%82%20%CE%A1%CE%B5%CF%8D%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82%20%28%CE%A3%CE%A1%29%201.pdf>
- [65] [https://blogs.sch.gr/mlagoudakos/files/2013/01/P075\\_164.pdf](https://blogs.sch.gr/mlagoudakos/files/2013/01/P075_164.pdf)
- [66] <https://eclass.uniwa.gr/modules/document/file.php/EEE259/%CE%97%CE%9B%CE%95%CE%9A%CE%A4%CE%A1%CE%99%CE%9A%CE%95%CE%A3%20%CE%9C%CE%97%CE%A7%CE%91%CE%9D%CE%95%CE%A3%20-%CE%9C%CE%97%CE%A7%CE%91%CE%9D%CE%95%CE%A3%20DC%20-%202020-2021.pptx.pdf>
- [67] Βιβλίο: Ηλεκτρονικά ισχύος. ISBN: 978-960-418-158-2.
- [68] <http://okeanis.lib.puas.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/3385/%CE%A0%CF%84%CF%85%CF%87%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE.StepperMotor.%CE%9A%CF%85%CF%81%CE%B3.%CE%A7%CE%BF%CE%BD%CF%84..pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- [69] <https://circuitglobe.com/permanent-magnet-stepper-motor.html>
- [70] <https://www.youtube.com/watch?v=ynz2x4Wq7nM>
- [71] <http://stepper-motor.blogspot.com/2007/12/variable-reluctance-vr-stepper-motors.html>
- [72] <https://www.youtube.com/watch?v=vc0ZW44fXgc>
- [73] <https://www.designworldonline.com/step-motortroubleshooting-basics-part-1/>

- [74] <https://www.monolithicpower.com/en/brushless-vs-brushed-dc-motors>
- [75] <https://sites.google.com/site/elektrikesmechanesi/eide-elektrikon-mechanon/kineteres-elektrikou-reumatos>
- [76] <https://www.linearmotiontips.com/what-type-of-motor-is-a-servo-motor/>
- [77] <https://davidlevan.files.wordpress.com/2016/12/dl15-motion-transmission-systems-and-speed.pdf>
- [78] <https://www.slideshare.net/badebhau/robot-joints-pdf>
- [79] <https://www.britannica.com/technology/joint-robotics>
- [80] [https://en.wikipedia.org/wiki/Universal\\_joint](https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_joint)
- [81] [https://en.wikipedia.org/wiki/Ball\\_joint](https://en.wikipedia.org/wiki/Ball_joint)
- [82] [https://qr.tziola.gr/wp-content/uploads/2019/03/qr\\_1.1.pdf](https://qr.tziola.gr/wp-content/uploads/2019/03/qr_1.1.pdf)
- [83] <https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/ECE351/%CE%98%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%AF%CE%B1/Ch%205%20-%20Sensors%20Fundamentals.pdf>
- [84] <http://okeanis.lib2.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/3614/%CE%A4%CE%95%CE%9B%CE%99%CE%9A%CE%97%20%CE%A0%CE%A4%CE%A5%CE%A7%CE%99%CE%91%CE%9A%CE%97.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [85] [http://nereus.mech.ntua.gr/courses/robotics/robotics\\_pdf/kk/Electric-Subsystem.pdf](http://nereus.mech.ntua.gr/courses/robotics/robotics_pdf/kk/Electric-Subsystem.pdf)
- [86] <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%BF%CF%81%CF%86%CE%BF%CF%84%CF%81%CE%BF%CF%80%CE%AD%CE%B1%CF%82>
- [87] [https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/4583/4/02\\_chapter\\_02.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/4583/4/02_chapter_02.pdf)
- [88] Βιβλίο: Μικροεπεξεργαστές Αρχές και Εφαρμογές. ISBN: 978-960-418-508-5.
- [89] <http://kelifos.physics.auth.gr/COURSES/neural/K3.pdf>
- [90] <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/action-potential>
- [91] Βιβλίο: Εισαγωγή στην Υπολογιστική Νοημοσύνη. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα.
- [92] Βιβλίο: Μηχανική Μάθηση. ISBN: 978-960-461-995-5.
- [93] <https://docplayer.gr/2640638-Refanidis-giannis-oktovrios-2011-http-users->

uom-gr-yrefanid-courses-neuralnetworks.html

[94] <http://aibook.csd.auth.gr/include/slides/Chap18.pdf>

[95] [http://www.idpe.uniwa.gr/images/2018/TN\\_2018-2019.pdf](http://www.idpe.uniwa.gr/images/2018/TN_2018-2019.pdf)

[96] [https://www.researchgate.net/publication/342756865\\_An\\_Updated\\_Survey\\_of\\_Efficient\\_Hardware\\_Architectures\\_for\\_Accelerating\\_Deep\\_Convolutional\\_Neural\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/342756865_An_Updated_Survey_of_Efficient_Hardware_Architectures_for_Accelerating_Deep_Convolutional_Neural_Networks)

[97] <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano-2gb-developer-kit>

[98] <https://jetbot.org/master/>

[99] [http://eureka.teithe.gr/jspui/bitstream/123456789/10446/1/Kelaidi\\_Aimilia.pdf](http://eureka.teithe.gr/jspui/bitstream/123456789/10446/1/Kelaidi_Aimilia.pdf)

[100] <https://www.pjrc.com/store/teensy32.html>

[101] [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A5%CF%80%CE%AD%CF%81%CF%85%CE%8B%CF%81%CE%B7\\_%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AF%CE%B1](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A5%CF%80%CE%AD%CF%81%CF%85%CE%8B%CF%81%CE%B7_%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AF%CE%B1)

[102] [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BC%CE%B1%CE%B3%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%B9%CE%BA%C E%AE\\_%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AF%CE%B1](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BC%CE%B1%CE%B3%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%B9%CE%BA%C E%AE_%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AF%CE%B1)

[103] Βιβλίο: Μαθήματα Οπτικής. ISBN: 960-985-311-0.

[104] [https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum\\_25.html](https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum_25.html)

[105] [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BC%CE%B1%CE%B3%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%B9%CE%BA%C F%8C\\_%CF%86%CE%AC%CF%83%CE%BC%CE%B1](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BC%CE%B1%CE%B3%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%B9%CE%BA%C F%8C_%CF%86%CE%AC%CF%83%CE%BC%CE%B1)

[106] <https://www.medicwiz.com/medtech/diagnostics/256-shades-of-gray-medical-ultrasound-scan-quick-info>

[107] [https://www.youtube.com/watch?v=6F1B\\_N6LuKw](https://www.youtube.com/watch?v=6F1B_N6LuKw)

[108] [http://grobotronics.com/images/companies/1/HC-SR04Users\\_Manual.pdf](http://grobotronics.com/images/companies/1/HC-SR04Users_Manual.pdf)

[109] <https://himaxelectronics.com/whats-the-best-battery/>

[110] <http://grobotronics.com/images/companies/1/datasheets/L298N-module-informatie.pdf?1515498896903>

[111] <https://newscrewdriver.com/2021/01/28/circuit-schematic-of-generic-l298n-driver-board/>

[112] [http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/BreakoutBoards/Logic\\_Level\\_Bidirectional.pdf](http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/BreakoutBoards/Logic_Level_Bidirectional.pdf)

[113] [https://www.daaam.info/Downloads/Pdfs/proceedings/proceedings\\_2019/099.pdf](https://www.daaam.info/Downloads/Pdfs/proceedings/proceedings_2019/099.pdf)

[114] [https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width\\_modulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation)

[115] <https://www.youtube.com/watch?v=GJXKOrqZauk>

## **Κατάλογος εικόνων**

<b>Εικόνα 1:</b> Η κλεψύδρα του Karnak [4]	2
<b>Εικόνα 2:</b> Η πτάμενη περιστερά του Αρχύτα [6]	2
<b>Εικόνα 3:</b> Το μοντέλο του ρομπότ ιππότης του Leonardo Da Vinci [7]	3
<b>Εικόνα 4:</b> Τα δυο ανθρωπόμορφα ρομπότ και το ρομπότ πάπια του Jacques de Vaucanson [8]	3
<b>Εικόνα 5:</b> Το ανθρωπόμορφο ρομπότ του Friedrich Kaufmann [9]	4
<b>Εικόνα 6:</b> Η διαφορική μηχανή από τα σχέδια του Charles Babbage [11]	4
<b>Εικόνα 7:</b> Η διαγραμματική αναπαράσταση του εσωτερικού του μη επανδρωμένου αντιτορπιλικού πλοίου του Nikola Tesla [12]	5
<b>Εικόνα 8:</b> Η διαγραμματική αναπαράσταση του μη επανδρωμένου αντιτορπιλικού πλοίου και του πομπού του Nikola Tesla [12]	5
<b>Εικόνα 9:</b> Ο επαναπρογραμματιζόμενος ηλεκτρονικός ψηφιακός υπολογιστής ENIAC [14]	6
<b>Εικόνα 10:</b> Ο ρομποτικός βραχίονας UNIMATE [16]	6
<b>Εικόνα 11:</b> Ο ρομποτικός βραχίονας UNIMATE PUMA 200 [18]	7
<b>Εικόνα 12:</b> Το ανθρωπόμορφο ρομπότ WABOT-1 [19]	7
<b>Εικόνα 13:</b> Το προσεδαφιστικό σκάφος του διαστημικού σκάφους Mars 3 [20]	8
<b>Εικόνα 14:</b> Το προσεδαφιστικό σκάφος του διαστημικού σκάφους Mars 2 [20]	8
<b>Εικόνα 15:</b> Ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης καρτεσιανής διαμόρφωσης [23]	9
<b>Εικόνα 16:</b> Ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης διαμόρφωσης Gantry [24]	10
<b>Εικόνα 17:</b> Ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης κυλινδρικής διαμόρφωσης [25]	10
<b>Εικόνα 18:</b> Ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης σφαιρικής ή πολικής διαμόρφωσης [26]	11

<b>Εικόνα 19:</b> Ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης αρθρωτής διαμόρφωσης [28]	12
<b>Εικόνα 20:</b> Ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης διαμόρφωσης Scara [29]	13
<b>Εικόνα 21:</b> Ρομποτικός χειριστής σταθερής βάσης διαμόρφωσης δέλτα [31]	13
<b>Εικόνα 22:</b> Αυτόματο καθοδηγούμενο όχημα [32]	14
<b>Εικόνα 23:</b> Αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ [33]	14
<b>Εικόνα 24:</b> Τηλεκατευθυνόμενο τροχοφόρο ρομπότ [34]	15
<b>Εικόνα 25:</b> Τροχός Mecanum ή Swedish [35]	17
<b>Εικόνα 26:</b> Σφαιρικός τροχός [36]	17
<b>Εικόνα 27:</b> Τηλεκατευθυνόμενο υποβρύχιο όχημα [39]	19
<b>Εικόνα 28:</b> Αυτόνομο υποβρύχιο όχημα [40]	19
<b>Εικόνα 29:</b> Τηλεκατευθυνόμενο εναέριο ρομπότ [41]	19
<b>Εικόνα 30:</b> Αυτόνομο εναέριο ρομπότ [42]	20
<b>Εικόνα 31:</b> Ανθρωπόμορφο ρομπότ [43]	20
<b>Εικόνα 32:</b> Ρομπότ σκύλος [44]	20
<b>Εικόνα 33:</b> Λαβίδα μηχανικής πίεσης [49]	22
<b>Εικόνα 34:</b> Λαβίδα διείσδυσης [51]	23
<b>Εικόνα 35:</b> Λαβίδα έλξης [52]	23
<b>Εικόνα 36:</b> Λαβίδα πρόσφυσης [53]	24
<b>Εικόνα 37:</b> Λαβίδα εύκαμπτης σφαιρικής διαμόρφωσης [55]	24
<b>Εικόνα 38:</b> Κατηγορίες πρισματικών και στρεφόμενων αρθρώσεων [79]	43
<b>Εικόνα 39:</b> Άρθρωση u [80]	44
<b>Εικόνα 40:</b> Σφαιρική άρθρωση [81]	44
<b>Εικόνα 41:</b> Jetson Nano 2GB Developer Kit [97]	67
<b>Εικόνα 42:</b> Η πλατφόρμα του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ	71
<b>Εικόνα 43:</b> Η πλακέτα μικροελεγκτή teensy 3.2	71
<b>Εικόνα 44:</b> Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [100]	73
<b>Εικόνα 45:</b> Το ηχητικό φάσμα [102]	74

<b>Εικόνα 46:</b> Οι αισθητήρες απόστασης HC-SR04 .....	75
<b>Εικόνα 47:</b> Η ένδειξη του ρεύματος DC κινητήρα όταν αυτός λειτουργεί με το ελάχιστο φορτίο και όταν στα άκρα του έχει εφαρμοστεί DC τάση ίση με 6V .....	77
<b>Εικόνα 48:</b> Η ένδειξη του ρεύματος DC κινητήρα όταν αυτός λειτουργεί με το μέγιστο φορτίο και όταν στα άκρα του έχει εφαρμοστεί DC τάση ίση με 6V .....	77
<b>Εικόνα 49:</b> Η ένδειξη του ρεύματος DC κινητήρα όταν αυτός λειτουργεί με το ελάχιστο φορτίο και όταν στα άκρα του έχει εφαρμοστεί DC τάση ίση με 3V .....	77
<b>Εικόνα 50:</b> Η ένδειξη του ρεύματος DC κινητήρα όταν αυτός λειτουργεί με το μέγιστο φορτίο και όταν στα άκρα του έχει εφαρμοστεί DC τάση ίση με 3V .....	78
<b>Εικόνα 51:</b> Η πλακέτα οδήγησης L298N Dual Motor Driver των δυο κινητήρων DC .....	78
<b>Εικόνα 52:</b> Οι μπαταρίες efest IMR 18650 3000mAh 3,7V .....	81
<b>Εικόνα 53:</b> Οι μπαταριοθήκες .....	81
<b>Εικόνα 54:</b> Η πλακέτα μετατροπής LM2596S-ADJ DC to DC Step Down Switching Regulator μιας DC τάσης σε DC τάση χαμηλότερης τιμής .....	81
<b>Εικόνα 55:</b> Οι πλακέτες μετατροπής BSS138 N-Channel Logic Level Mosfets μιας TTL τάσης σε μια άλλη .....	83
<b>Εικόνα 56:</b> Η πλακέτα μετατροπής LM317T Positive Adjustable Voltage Regulator μιας DC τάσης σε DC τάση χαμηλότερης τιμής .....	83
<b>Εικόνα 57:</b> Οι βάσεις στήριξης των αισθητήρων απόστασης HC-SR04 .....	83
<b>Εικόνα 58:</b> Ο διακόπτης push button .....	84
<b>Εικόνα 59:</b> Το κύκλωμα οδήγησης L298N Dual Motor Driver σε μορφή sub_circuit .....	86
<b>Εικόνα 60:</b> Το Κύκλωμα LM2596S-ADJ DC to DC Step Down Switching Regulator σε μορφή sub_circuit .....	87
<b>Εικόνα 61:</b> Η συνδεσμολογία του κυκλώματος κίνησης .....	88
<b>Εικόνα 62:</b> Το μοντέλο του αισθητήρα απόστασης HC-SR04 .....	89
<b>Εικόνα 63:</b> Το κύκλωμα BSS138 TTL Logic Level Bi-Directional Converter σε μορφή sub_circuit .....	90
<b>Εικόνα 64:</b> Το κύκλωμα LM317T Positive Adjustable Voltage Regulator σε μορφή sub_circuit...	90
<b>Εικόνα 65:</b> Η συνδεσμολογία του κυκλώματος αίσθησης .....	91

**Εικόνα 66:** Το κύκλωμα ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ 93

**Εικόνα 67:** Το ολοκληρωμένο αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ ..... 93

## Κατάλογος σχημάτων

**Σχήμα 1 :** Οι αρθρώσεις ενός ρομποτικού χειριστή σταθερής βάσης αρθρωτής διαμόρφωσης με 6 βαθμούς

ελευθερίας [27] ..... 11

**Σχήμα 2:** Σταθερός τροχός [2] ..... 15

**Σχήμα 3:** Καθοδηγίσιμος τροχός [2] ..... 16

**Σχήμα 4:** Προσανατολιζόμενος τροχός [2] ..... 16

**Σχήμα 5:** Έμβολο μονής δράσης αρνητικής κατεύθυνσης [58] ..... 25

**Σχήμα 6:** Έμβολο μονής δράσης θετικής κατεύθυνσης [58] ..... 25

**Σχήμα 7:** Βαλβίδα τύπου διαφράγματος άμεσης δράσης [60] ..... 26

**Σχήμα 8:** Βαλβίδα τύπου διαφράγματος αντίστροφης δράσης [60] ..... 27

**Σχήμα 9:** Επενεργητής κρεμαργιέρων και γραναζιού μονής δράσης [62] ..... 27

**Σχήμα 10:** Επενεργητής κρεμαργιέρων και γραναζιού διπλής δράσης [62] ..... 28

**Σχήμα 11:** Επενεργητής τύπου πτερυγίου διπλής δράσης [63] ..... 28

**Σχήμα 12:** Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση [67] . 31

**Σχήμα 13:** Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση [67]

31

**Σχήμα 14:** Χαρακτηριστική ροπής-ρεύματος τυμπάνου κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση [66] ..... 32

**Σχήμα 15:** Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος με παράλληλη διέγερση [67] ..... 32

**Σχήμα 16:** Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς [67]

33

**Σχήμα 17:** Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς [67]

33

<b>Σχήμα 18:</b> Χαρακτηριστική ροπής-ρεύματος τυμπάνου κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς [66] .....	33
<b>Σχήμα 19:</b> Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος με αθροιστική σύνθετη διέγερση [67] .....	34
<b>Σχήμα 20:</b> Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής κινητήρα συνεχούς ρεύματος με αθροιστική σύνθετη διέγερση σε συνδυασμό με το κινητήρα με παράλληλη διέγερση και με διέγερση σειράς [67] .....	34
<b>Σχήμα 21:</b> Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διαφορική σύνθετη διέγερση [67] .....	35
<b>Σχήμα 22:</b> Χαρακτηριστική ροπής-ρεύματος τυμπάνου κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διαφορική σύνθετη διέγερση σε συνδυασμό με το κινητήρα με παράλληλη διέγερση και με αθροιστική σύνθετη διέγερση [66] .....	35
<b>Σχήμα 23:</b> Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη [69] .....	36
<b>Σχήμα 24:</b> Βηματικός κινητήρας μεταβλητής αντίδρασης [71] .....	38
<b>Σχήμα 25:</b> Υβριδικός βηματικός κινητήρας [73] .....	40
<b>Σχήμα 26:</b> Βιολογικός νευρώνας [89] .....	52
<b>Σχήμα 27:</b> Δυναμικό ηρεμίας και δυναμικό ενέργειας [90] .....	54
<b>Σχήμα 28:</b> Μοντέλου τεχνητού νευρώνα [91] .....	54
<b>Σχήμα 29:</b> Μοντέλο μάθησης με ενίσχυση [94] .....	60
<b>Σχήμα 30:</b> Ανανέωση τιμής βάρους σύμφωνα με την μέθοδο κατάβασης δυναμικού [95] .....	62
<b>Σχήμα 31:</b> Το κύκλωμα της πλακέτας teensy 3.2 [96] .....	72
<b>Σχήμα 32:</b> Η συνδεσμολογία για την μέτρηση τάσης και ρεύματος DC κινητήρα .....	76
<b>Σχήμα 33:</b> Η διάταξη των κινητήρων στην βάση του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ .....	85
<b>Σχήμα 34:</b> Το κύκλωμα οδήγησης L298N Dual Motor Driver .....	86
<b>Σχήμα 35:</b> Το Κύκλωμα LM2596S-ADJ DC to DC Step Down Switching Regulator .....	87
<b>Σχήμα 36:</b> Το χρονικό διάγραμμα των σημάτων Echo , Trig και του εσωτερικού σήματος του αισθητήρα απόστασης HC-SR04 [104] .....	88
<b>Σχήμα 37:</b> Το κύκλωμα BSS138 TTL Logic Level Bi-Directional Converter .....	89
<b>Σχήμα 38:</b> Το κύκλωμα LM317T Positive Adjustable Voltage Regulator .....	90
<b>Σχήμα 39:</b> Η συνδεσμολογία ολόκληρου του κυκλώματος του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ ..	92

<b>Σχήμα 40:</b> Το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα εκτελέσει την ανοικτή στροφή δεξιά .....	95
<b>Σχήμα 41:</b> Το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα εκτελέσει την κλειστή στροφή δεξιά .....	96
<b>Σχήμα 42:</b> Το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα εκτελέσει την κλειστή στροφή δεξιά .....	96
<b>Σχήμα 43:</b> Το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα εκτελέσει την ανοικτή στροφή δεξιά .....	96
<b>Σχήμα 44:</b> Το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα εκτελέσει την ανοικτή στροφή αριστερά .....	96
<b>Σχήμα 45:</b> Το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ θα εκτελέσει την κλειστή στροφή αριστερά .....	97
<b>Σχήμα 46:</b> Το αυτόνομο τροχοφόρο αυτόνομο ρομπότ θα κινηθεί ευθεία με την μέγιστη ταχύτητα	
97	
<b>Σχήμα 47:</b> Ενδεικτικές τιμές κύκλου καθήκοντος ενός σήματος PWM [110] .....	101
<b>Σχήμα 48:</b> Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ .....	105
<b>Σχήμα 49:</b> Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης του τεχνητού νευρωνικού δικτύου σε μορφή flow-chart .	108
<b>Σχήμα 50:</b> Ο αλγόριθμος απόφασης και εκτέλεσης της σωστής πορείας του αυτόνομου τροχοφόρου ρομπότ σε μορφή flow-chart .....	109

## Κατάλογος πινάκων

<b>Πίνακας 1:</b> Άλληλουχία συνδυασμών τάσης για μια πλήρη περιστροφή βηματικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη με γωνία βήματος $90^\circ$ .....	37
<b>Πίνακας 2:</b> Άλληλουχία συνδυασμών τάσης για μια πλήρη περιστροφή βηματικού κινητήρα μεταβλητής αντίδρασης με γωνία βήματος $30^\circ$ [71] .....	39
<b>Πίνακας 3:</b> Τα χαρακτηριστικά των συχνών τύπων μπαταριών [105] .....	80
<b>Πίνακας 4:</b> Οι λογικές τάσεις των ακροδεκτών του κυκλώματος οδήγησης L298N Dual Motor Driver για την εκτέλεση όλων των δυνατών κινήσεων από το αυτόνομο τροχοφόρο ρομπότ .....	85
<b>Πίνακας 5:</b> Ο πίνακας εισόδων για την εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου .....	99
<b>Πίνακας 6:</b> Ο πίνακας στόχων για την εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου .....	104

## Datasheets

L298 Dual Full Bridge Driver:

<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22440/STMICROELECTRONICS/L298N.html>

78M05 Three Terminal Positive Regulator:

<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/933145/STMICROELECTRONICS/78M05A.html>

LM2596 Step Down Voltage Regulator:

<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/8752/NSC/LM2596S-ADJ.html>

BSS138 N Channel Logic Level Enhancement Mode Field Effect Transistor:

<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/50815/FAIRCHILD/BSS138.html>

LM317 Adjustable Voltage Regulator:

<https://www.st.com/resource/en/datasheet/lm317.pdf>

MK20DX256VLH7 32bit ARM Cortex M4:

<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/K20P64M72SF1.pdf>