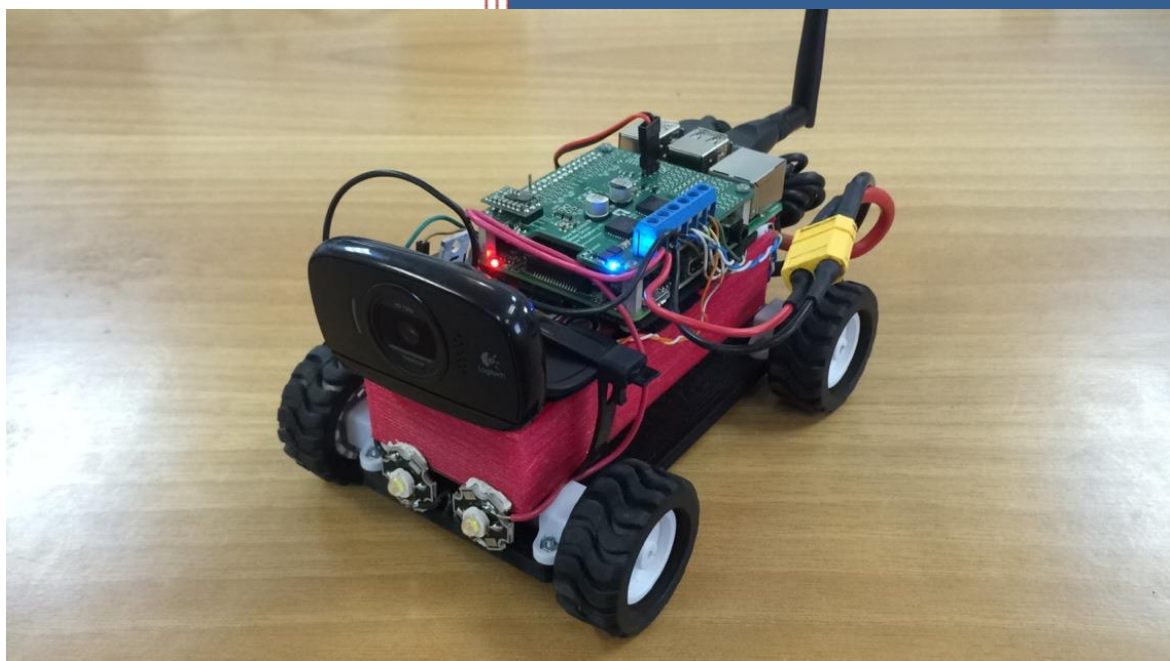




**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΚΡΗΤΗΣ**

**2016**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**



**Διπλωματική Εργασία**

**Κατασκευή πρωτότυπου  
μη επανδρωμένου ρομποτικού συστήματος  
για την επιθεώρηση μεταλλικών αγωγών**

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:**

**Επ. Καθ. Παρτσινέβελος Παναγιώτης (επιβλέπων)**

**Επ. Καθ. Κουτρούλης Ευτύχιος**

**Δρ. Παπαδάκης Γεώργιος**

**Τσατσαρούνος Στυλιανός**

**Χανιά**

**Φεβρουάριος, 2016**

## **Περίληψη**

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση, ο προγραμματισμός και τελικά η κατασκευή ενός πρωτότυπου ρομποτικού μη επανδρωμένου τροχοφόρου οχήματος επιθεώρησης αγωγών (robotic pipeline inspection system). Κύρια χαρακτηριστικά του οχήματος είναι το χαμηλό του κόστος και οι δυνατότητες που έχει αναφορικά με τον εντοπισμό, αποτύπωση και αξιολόγηση της υγείας του εσωτερικού τμήματος οποιουδήποτε μεταλλικού αγωγού με διάμετρο μεγαλύτερη των 300mm ή μεταλλικής επιφάνειας μέσω της απευθείας μετάδοσης υψηλής ποιότητας τόσο σταθερών όσο και κινούμενων εικόνων (δυνατότητα φωτογραφίας και ζωντανής βιντεοσκόπησης). Η λειτουργία του πρωτότυπου ρομποτικού συστήματος πραγματοποιείται σε ασφαλή από ανάφλεξη και διάβρωση περιβάλλοντα, καθώς και σε περιβάλλοντα στα οποία το σύστημα δεν έρχεται σε άμεση επαφή με το νερό. Ο χειρισμός του οχήματος γίνεται ενσύρματα αλλά και ασύρματα ενώ η ενσωμάτωση στο όχημα μαγνητών, καθιστά εφικτή την προσκόλληση και ανάβαση του οχήματος σε μεταλλικές επιφάνειες.

Η ανάπτυξη ενός τέτοιου ρομποτικού συστήματος συμβάλλει αποφασιστικά σε πλήθος επιστημών και εφαρμογών, όπως οι Γεωεπιστήμες, η επιθεώρηση κατασκευαστικών έργων, η προστασία του περιβάλλοντος από διαρροές, σε εφαρμογές έρευνας και διάσωσης, ενώ τέλος, λόγω της υψηλής παραμετροποίησης και αναβάθμισής του θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά σε βιομηχανίες πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Για την κατασκευή του οχήματος χρησιμοποιήθηκε πλαίσιο που δημιουργήθηκε μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης με ανακυκλώσιμα υλικά. Ο εξοπλισμός που φέρει το πρωτότυπο επιτρέπει την ασύρματη μετάδοση δεδομένων και την αμφίδρομη επικοινωνία προς το σταθμό βάσης. Η αυτονομία του οχήματος υπολογίζεται σε περίπου 6 ώρες με μέγιστο βάρος εγκατεστημένου εξοπλισμού, το 1 kg.

Η πειραματική διαδικασία έλαβε μέρος σε εξωτερικές μεταλλικές επιφάνειες (οριζόντιες και κατακόρυφες), σε μεταλλικούς αγωγούς, καθώς και σε μεταλλικές δοκούς. Κατά την διαδικασία αυτή συλλέχθηκαν δεδομένα τα οποία και αξιολογήθηκαν προκειμένου να εντοπιστούν πιθανές αστοχίες των μεταλλικών επιφανειών.

## **Abstract**

The purpose of the current diploma thesis is the design, programming and construction of a prototype robotic pipeline inspection vehicle. The main features of this low cost vehicle include its capabilities regarding identification, mapping and evaluation of the health of any metal pipeline interior with a diameter greater than 300mm and any metal surface through the transmission of high quality live feed imagery and video. The vehicle can be operated both in wireless and Ethernet-connection modes, while integrated magnets enable navigation of the vehicle under any inclination upon metal surfaces. The operation of the vehicle requires its use in a secure ignition and corrosion environments, as long as the system does not come into direct contact with water.

The development of such a robotic system contributes decisively in many engineering domains and applications, such as geosciences, oil and gas industry, environmental protection from leaks, and search and rescue applications.

The construction of the prototype used common three dimensional prints from recyclable materials. The inspection system allows wireless data transmission and two-way communication to the base station. The operation time of the vehicle is estimated at six hours carrying a maximum weight of 1 kg, for the installed equipment.

The experimental procedure took place on various metal surfaces (horizontal and vertical), including pipelines, construction beams and vertical walls. During this process the data collected were assessed in order to identify possible failures for the metal surfaces.

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, αποτελώντας το τελευταίο στάδιο για την ολοκλήρωση των σπουδών μου. Θα ήθελα πρώτα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Παναγιώτη Παρτσινέβελο, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, ο οποίος έδειξε εμπιστοσύνη στο όλο εγχείρημά μου, επενδύοντας χρηματικό κονδύλι για την κατασκευή του πρωτότυπου ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών και στηρίζοντάς με σε κάθε προσπάθεια υλοποίησης αυτής της πλατφόρμας.

Ευχαριστίες επίσης οφείλω να δώσω στο σύνολο της εξεταστικής μου επιτροπής, Επ. Καθηγητή Ευτύχιο Κουτρούλη και Δρ. Γεώργιο Παπαδάκη για την συνεργασία τους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ερευνητική Ομάδα SenseLab του εργαστηρίου Γεωδαισίας και Πληροφορικής των Γεωεπιστημών, στην οποία και είμαι μέλος, και ιδιαίτερα τον μεταπτυχιακό φοιτητή Σαράντη Κυρίτση για τις συμβουλές του σε θέματα που αφορούσαν τον προγραμματισμό της πλατφόρμας και συγκεκριμένα της δυνατότητας άμεσης μεταδόσης ζωντανής βιντεοσκοπημένης εικόνας, καθώς και τον προπτυχιακό φοιτητή Στάθη Μπίκο για τις συμβουλές του στην επιλογή κατάλληλων κινητήρων. Ευχαριστώ επίσης θερμά τον Αχιλλέα Τριπολιτσιώτη για την βοήθειά του στη συγγραφή αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς και την προπτυχιακή φοιτήτρια Ιωάννα-Ανδριάννα Ροδοπούλου για την αμέριστη στήριξή της. Ευχαριστίες επίσης οφείλω να δώσω στους προπτυχιακούς φοιτητές Νίκο Πρόκα και Άγγελο Αντωνόπουλο για την βοήθειά τους στο ηλεκτρολογικό μέρος της κατασκευής, καθώς και στον Ανδρέα Πιτσιλαδή για την βοήθειά του στην βιντεοσκόπηση των πειραμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που όλα αυτά τα χρόνια με βοηθάει και με στηρίζει σε κάθε μου προσπάθεια.

## **Περιεχόμενα**

<b>Περίληψη</b> .....	i
<b>Περίληψη στα Αγγλικά (Abstract)</b> .....	ii
<b>Πρόλογος</b> .....	iii
<b>Κατάλογος Σχημάτων</b> .....	vii
<b>Κατάλογος Πινάκων</b> .....	xi
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή</b> .....	1
1.1 Σκοπός.....	2
1.2 Στάδια Υλοποίησης και Ανάπτυξης.....	3
1.3 Οργάνωση τόμων.....	3
<b>Κεφάλαιο 2: Ρομποτικά Συστήματα Επιθεώρησης Αγωγών (PipeLine Inspection Robots)</b> .....	5
2.1 Ιστορική Αναδρομή.....	5
2.2 Εφαρμογές των Ρομποτικών Συστημάτων Επιθεώρησης.....	7
2.3 Προβλήματα Αγωγών και Τρόποι Εντοπισμού Αυτών.....	7
2.4 Πλεονεκτήματα Ρομποτικών Συστημάτων Επιθεώρησης Αγωγών.....	10
2.5 Απαιτήσεις Συστήματος.....	13
2.6 Έρευνα Αγοράς Συστημάτων Επιθεώρησης Αγωγών.....	15
2.6.1 Διαθέσιμες Επιλογές Ρομποτικών συστημάτων Επιθεώρησης Αγωγών .....	16
2.7 Αξιολόγηση Ρομποτικών Συστημάτων Επιθεώρησης Αγωγών.....	26
2.8 Συμπεράσματα.....	29
<b>Κεφάλαιο 3: Υλικό (Hardware)</b> .....	30
3.1 Επιλογή Κατάλληλου Υλικού Κατασκευής Ρομποτικού Οχήματος .....	30
3.1.1 Κινητήρες.....	32
3.1.2 Ενσωματωμένο σύστημα (Raspberry Pi 2 Model B).....	35
3.1.3 Κάμερα (Logitech HD Webcam C525) .....	38
3.1.4 Οδηγός Συστήματος Κινητήρων (Dual MC33926 Motor Driver for Raspberry Pi).....	39
3.1.5 Μπαταρία (Gens Ace 2S1P 5300mAh 7.4V).....	41
3.1.6 Neodymium Magnets N52.....	42
3.1.7 Καλωδιώσεις και Φωτισμός .....	43

i) Καλώδιο Ethernet.....	43
ii) Καλώδια Ρευμάτων.....	45
iii) Φωτισμός - Cree Led Lights.....	45
iv) Κύκλωμα Φωτισμού λαμπτήρων.....	46
3.2 Φυσικοί Υπολογισμοί.....	47
<b>Κεφάλαιο 4: Σχεδιασμός.....</b>	<b>52</b>
4.1 Στάδια Σχεδιασμού.....	52
4.2 Σχεδιασμός και Μοντελοποίηση του Ρομποτικού Συστήματος Επιθεώρησης Αγωγών.....	53
4.3 Δημιουργία και Τρισδιάστατη Εκτύπωση Αντικειμένου.....	54
4.4 Σκελετός Μοντέλου.....	58
<b>Κεφάλαιο 5 : Κατασκευή Τροχοφόρου Ρομποτικού Συστήματος.....</b>	<b>63</b>
5.1 Στάδια Κατασκευής Μοντέλου – Συναρμολόγηση.....	63
5.2 Κατασκευή Καλωδιώσεων - Συνδεσμολογία Κινητήρων.....	71
<b>Κεφάλαιο 6: Προγραμματισμός Μοντέλου.....</b>	<b>73</b>
6.1 Επιλογή γλώσσας Προγραμματισμού.....	73
6.2 Εγκατάσταση και Περιγραφή Βιβλιοθήκης Οδήγησης Οχήματος.....	74
6.3 Δημιουργία Interface.....	74
<b>Κεφάλαιο 7: Διεξαγωγή Πειραματικής Διαδικασίας.....</b>	<b>76</b>
7.1 Λίστα Ελέγχου Ρομποτικού Οχήματος.....	77
7.2 Πρώτο Στάδιο Πειραματικής Διαδικασίας.....	78
7.3 Δεύτερο Στάδιο Πειραματικής Διαδικασίας.....	79
7.4 Τρίτο Στάδιο Πειραματικής Διαδικασίας .....	84
<b>Κεφάλαιο 8: Επεξεργασία Αποτελεσμάτων.....</b>	<b>89</b>
8.1 Αποτελέσματα Επεξεργασίας Δευτέρου Σταδίου Πειραματικής Διαδικασίας.....	89
8.2 Αποτελέσματα Επεξεργασίας Τρίτου Σταδίου Πειραματικής Διαδικασίας.....	93

<b>Κεφάλαιο 9: Ερμηνεία Αποτελεσμάτων.....</b>	<b>97</b>
9.1 Ερμηνεία αποτελέσματος πρώτου σταδίου πειραματικής διαδικασίας.....	97
9.2 Ερμηνεία αποτελέσματος δευτέρου σταδίου πειραματικής διαδικασίας.....	98
9.3 Ερμηνεία αποτελέσματος τρίτου σταδίου πειραματικής διαδικασίας.....	100
9.4 Συμπεράσματα.....	102
<b>Κεφάλαιο 10: Συμπεράσματα και Προτάσεις.....</b>	<b>103</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>105</b>

## **Κατάλογος Σχημάτων**

Σχήμα 2.1: Ρομποτικό Σύστημα Επιθεώρησης Αγωγών (Pipeline Inspection Robot)

Σχήμα 2.2: Διαδικασία καθαρισμού και συντήρησης αγωγού (Pigging)

Σχήμα 2.3: Συσκευές καθαρισμού και συντήρησης αγωγών (Pigs)

Σχήμα 2.4: Pipeline Inspection Robot με μηχανικά ορισμένο μεταβλητό μέγεθος δομής ψαλιδιού

Σχήμα 2.5: Τροχοφόρο ρομποτικό σύστημα επιθεώρησης αγωγών

Σχήμα 2.6: Ερπυστριοφόρο ρομποτικό σύστημα επιθεώρησης αγωγών

Σχήμα 2.7: RX95 Crawler

Σχήμα 2.8: RX130 Crawler

Σχήμα 2.9: RX400 Crawler

Σχήμα 2.10: Versatrax 450

Σχήμα 2.11: Versatrax 100

Σχήμα 2.12: Versatrax NanoMag

Σχήμα 2.13: Versatrax MicroMag 100

Σχήμα 2.14: Honeybee Robotics Mini Pipeline Inspection Robot

Σχήμα 2.15: Genexis Pipeline Inspection Robot

Σχήμα 2.16: APEX CCTV Channel Inspecting Robot

Σχήμα 2.17: Ολική καταστροφή αγωγού πετρελαίου με συνεπακόλουθες σοβαρές Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Σχήμα 2.18: Πρόκληση πυρκαγιάς εξαιτίας εκρήξεως λόγω διαρροής Φυσικού Αερίου από τον αγωγό μεταφοράς αυτού (New Delhi, January 16, 2015, Gas Authority of India Ltd.)

Σχήμα 2.19: Διαρροή πετρελαίου με συνεπακόλουθη Περιβαλλοντική καταστροφή εξαιτίας κακής συντηρήσεως του αγωγού συστήματος μεταφοράς, η οποία οδήγησε στην εκκένωση του χωριού Toccate στην περιοχή Ayacucho στο Περού. (2005, North Peruvian Oil Pipeline)

Σχήμα 2.20: Διαρροή Φυσικού Αερίου εξαιτίας κακής συντηρήσεως του αγωγού συστήματος μεταφοράς αυτού

Σχήμα 3.1: Σχεδιάγραμμα του κινητήρα Pololu HighPower Micro Metal Gearmotor 250:1 (Pololu)



- Σχήμα 3.2: HP Micro Metal Gearmotor 250:1 (Pololu)
- Σχήμα 3.3: Διάγραμμα απεικόνισης των καμπυλών απόδοσης του συνεχούς ρεύματος, της ταχύτητας και της δύναμης, ως συναρτήσεις της ροπής του κινητήρα (Pololu)
- Σχήμα 3.4: Σχεδιάγραμμα του ενσωματωμένου συστήματος Raspberry Pi 2 Model B
- Σχήμα 3.5: Ενσωματωμένο σύστημα Raspberry Pi 2 Model B
- Σχήμα 3.6: Logitech HD WebCam C525
- Σχήμα 3.7: Συναρμολογημένο Dual MC33926 Motor Driver for Raspberry Pi
- Σχήμα 3.8: Μπαταρία GensAce LiPo 2S1P 5300 mAh
- Σχήμα 3.9: Μαγνήτες νεοδυμιο-σιδηρο-βορίου (NdFeB), Neodymium N52
- Σχήμα 3.10: Καλώδιο Ethernet UTP και STP
- Σχήμα 3.11: Καλώδιο Ethernet Cat5
- Σχήμα 3.12: Εσωτερική καλωδίωση ενός καλωδίου Ethernet
- Σχήμα 3.13: Λαμπτήρας Cree Led Light ισχύος 3W
- Σχήμα 3.14: Ασκούμενες δυνάμεις στο ρομποτικό όχημα όταν αυτό βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση
- Σχήμα 4.1: Σχεδιασμός βασικού σκελετού στην πλατφόρμα CREO Parametrics 2.0
- Σχήμα 4.2: Αλλαγή συστήματος μονάδων στην πλατφόρμα CREO Parametrics 2.0
- Σχήμα 4.3: Σχεδιασμός του αντικειμένου σε φυσικές διαστάσεις
- Σχήμα 4.4: Υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου PLA
- Σχήμα 4.5: Υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου ABS
- Σχήμα 4.6: Υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου PETG
- Σχήμα 4.7 : Χαρακτηριστικά αντοχής σε εφελκυσμό, σκληρότητας και θερμοκρασίας τήξεως διαφόρων υλικών τρισδιάστατης εκτύπωσης
- Σχήμα 4.8: Αρχή τρισδιάστατης εκτύπωσης βασικού σκελετού οχήματος
- Σχήμα 4.9: Συνέχεια τρισδιάστατης εκτύπωσης βασικού σκελετού οχήματος
- Σχήμα 4.10: Ολοκλήρωση τρισδιάστατης εκτύπωσης βασικού σκελετού οχήματος
- Σχήμα 4.11: Αρχή τρισδιάστατης εκτύπωσης θήκης μπαταρίας οχήματος
- Σχήμα 4.12: Ολοκλήρωση τρισδιάστατης εκτύπωσης θήκης μπαταρίας οχήματος
- Σχήμα 4.13: Ολοκλήρωση τρισδιάστατης εκτύπωσης της βάσης ένωσης
- Σχήμα 4.14: Συνδεσμολογία συστήματος φωτισμού
- Σχήμα 4.15: Ολοκλήρωση τρισδιάστατης εκτύπωσης βάσης Raspberry Pi 2 Model B

Σχήμα 5.1: Τοποθέτηση κινητήρων στις ειδικά σχεδιασμένες υποδοχές των τροχών

Σχήμα 5.2: Τοποθέτηση και των τεσσάρων τροχών στις ειδικές υποδοχές των τροχών καθώς και τοποθέτηση των πλαστικών βραχιόνων ασφαλείας.

Σχήμα 5.3: Η ειδικά σχεδιασμένη θήκη της μπαταρίας μαζί με τα καλώδια τροφοδοσίας των κινητήρων

Σχήμα 5.5: Σύστημα Dual MC33926 Motor Driver και Raspberry Pi 2 Model B

Σχήμα 5.6: Συναρμολόγηση του συστήματος και ένωση του Dual MC33926 Motor Driver και Raspberry Pi 2 Model B μέσω της 40pin GPIO επεκτασιμότητας

Σχήμα 5.7: Προσθήκης ειδικά σχεδιασμένης βάσης στο ολοκληρωμένο σύστημα

Σχήμα 5.8: Τελικό αποτέλεσμα συναρμολόγησης των δύο συστημάτων

Σχήμα 5.9: Τοποθέτηση μαγνητών και προστατευτικών αυτών, εντός των ειδικά σχεδιασμένων υποδοχών του σκελετού του οχήματος

Σχήμα 5.10: Εγκατάσταση σταθεροποιητή-ρυθμιστή τάσης στον Οδηγό Dual MC33926 Motor Driver

Σχήμα 5.11: Ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συνδέσεις καθώς και συγκόλληση των μερών του οχήματος

Σχήμα 5.12: Συνδεσμολογία συστήματος φωτισμού του ρομποτικού οχήματος

Σχήμα 5.13: Συνδεσμολογία κινητήρων ρομποτικού οχήματος

Σχήμα 7.1: Ανάβαση ρομποτικού οχήματος σε κάθετη μεταλλική επιφάνεια

Σχήμα 7.2: Τοποθέτηση ρομποτικού οχήματος σε πλαϊνή μεταλλική επιφάνεια με σκοπό την εξωτερική επιθεώρηση αγωγών

Σχήμα 7.3: Ενεργοποίηση συστήματος φωτισμού για την καλύτερη απόδοση εικόνας

Σχήμα 7.4: Ζωντανή μετάδοση εικόνας από την κάμερα του ρομποτικού συστήματος

Σχήμα 7.5: Εικόνα προερχόμενη από την κάμερα του ρομποτικού οχήματος εντός του περιβάλλοντα μεταλλικού χώρου όπου διέρχονται αγωγοί

Σχήμα 7.6: Τοποθέτηση ρομποτικού οχήματος στο έδαφος, εντός του χώρου διεύλεσης αγωγών

Σχήμα 7.7: Επιθεώρηση εσωτερικού τμήματος αγωγού

Σχήμα 7.8: Ζωντανή λήψη εικόνας από το εσωτερικό τμήμα του αγωγού

Σχήμα 7.9: Ανάβαση ρομποτικού οχήματος σε εξωτερική μεταλλική κατασκευή

Σχήμα 7.10: Τοποθέτηση ρομποτικού οχήματος στην επιφάνεια της μεταλλικής

κατασκευής και ζωντανή μετάδοση εικόνας

Σχήμα 7.11: Παρουσίαση σημείου ελέγχου μεταλλικής κατασκευής

Σχήμα 7.12: Ανάβαση ρομποτικού οχήματος σε μεταλλική κατασκευή με παράλληλη ζωντανή μετάδοση εικόνας σε Ηλεκτρονικό Υπολογιστή

Σχήμα 7.13: Ευελιξία κίνησης οχήματος κατά την ανάβαση στενών επιφανειών σε μεταλλικές κατασκευές

Σχήμα 7.14: Κίνηση ρομποτικού οχήματος στην μεταλλική πρόσοψη του κτηρίου

Σχήμα 7.15: Ανάβαση στενής κεκλιμένης μεταλλικής επιφάνειας

Σχήμα 8.1: Φωτογραφία προερχόμενη από την βιντεοσκόπηση του εσωτερικού τμήματος του περιβάλλοντα χώρου όπου βρίσκονται οι αγωγοί.

Σχήμα 8.2: Πλαϊνή φωτογραφία του εσωτερικού τμήματος του περιβάλλοντα χώρου.

Σχήμα 8.3: Φωτογραφία του εσωτερικού τμήματος του αγωγού επιθεώρησης

Σχήμα 8.4: Φωτογραφία προερχόμενη από την βιντεοσκόπηση του εσωτερικού τμήματος του αγωγού

Σχήμα 8.5: Τρισδιάστατη αποτύπωση αγωγού έρευνας

Σχήμα 8.6: Τρισδιάστατη αποτύπωση του εσωτερικού τμήματος του αγωγού

Σχήμα 8.7: Πλάγια ανάβαση του μη επανδρωμένου οχήματος σε μεταλλική επιφάνεια

Σχήμα 8.8: Φωτογραφία από την ζωντανή μετάδοση εικόνας κατά την επιθεώρηση της μεταλλικής κατασκευής (προσομοίωση ανάβασης γέφυρας)

Σχήμα 8.9: Φωτογραφία από το Ρομποτικό όχημα κατά την διάρκεια της επιθεώρησης της μεταλλικής κατασκευής

Σχήμα 8.10: Φωτογραφία από την ζωντανή μετάδοση εικόνας κατά την διάρκεια του ελέγχου της μεταλλικής κατασκευής

Σχήμα 9.1: Πρόβλημα διαρροής αγωγού που εντοπίστηκε κατά την διάρκεια επιθεώρησης του ρομποτικού οχήματος εντός μεταλλικής κατασκευής

Σχήμα 9.2: Εσωτερικό τμήμα αγωγού με πρόβλημα συσσώρευσης υλικού και πιθανής φράξης

Σχήμα 9.3: Πλάγια ανάβαση του ρομποτικού οχήματος στην επιφάνεια μεταλλικής κατασκευής και σε ύψος που ξεπερνάει τα 3 μέτρα

## **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 2.1: Μέθοδοι NTD για την επιθεώρηση της λειτουργίας των αγωγών

Πίνακας 2.2: Ενδεικτικά χαρακτηριστικά και τιμές ρομποτικών οχημάτων

επιθεώρησης αγωγών από την Εταιρεία ΑΙΤ

Πίνακας 2.3: Ενδεικτικά χαρακτηριστικά και τιμές ρομποτικών οχημάτων

επιθεώρησης αγωγών από την Εταιρεία ΙΣΛ

Πίνακας 2.4: Ενδεικτικά χαρακτηριστικά και τιμή του Genexis ρομποτικού οχήματος

Πίνακας 2.5: Ενδεικτικά χαρακτηριστικά και τιμή του ρομποτικού οχήματος της

ΑΡΕΧ

Πίνακας 3.1: Διαστάσεις κινήτηρα

Πίνακας 3.2: Γενικές ιδιότητες κινήτηρα

---

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Τα μη επανδρωμένα τροχοφόρα ρομποτικά συστήματα επιθεώρησης αγωγών (Robotic Pipeline Inspection Systems) χρησιμοποιούνται για την επιθεώρηση και τον έλεγχο του εσωτερικού τμήματος διαφόρων τύπων αγωγών καθώς και στην αποτύπωση, καταγραφή αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις επιδιόρθωση τυχόν προβλημάτων εντός τους. Αποτελούν συστήματα εξέχουσας σημασίας για την πρόληψη και την επίβλεψη, καθώς και την επισκευή του εσωτερικού τμήματος του προς επιθεώρηση αγωγού και συνάγουν εν γένει στην σωστή και εύρυθμη λειτουργία αυτού. Χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου, καθώς και σε άλλους κλάδους και εργασίες Μηχανικών, όπου η ανθρώπινη παρέμβαση είναι είτε αδύνατη, είτε υψηλού κινδύνου. [1], [2]

Ο εξοπλισμός ο οποίος φέρουν αποτελείται κυρίως από μια κάμερα υψηλής ευκρίνειας και αναλογικής μεγέθυνσης εικόνας, από έναν ελεγκτή των κινητήρων του οχήματος, από ένα μικροϋπολογιστή-μικροελεγκτή ο οποίος είναι υπεύθυνος για την

αποκωδικοποίηση και μετάδοση των δεδομένων στο χρήστη του συστήματος, καθώς και από κάποια εγκατεστημένη επί του σκελετού ή σε συνδυασμό με την κάμερα, πηγή φωτός. Τα πιο εξελιγμένα ρομποτικά συστήματα επιθεώρησης αγωγών είναι πλήρως υδατοστεγανά, ενώ φέρουν επίσης ρομποτικούς βραχίονες καθώς και συστήματα χαρτογράφησης τύπου LIDAR, με σκοπό την καλύτερη δυνατή απεικόνιση του εσωτερικού τμήματος του αγωγού έρευνας. Η τροφοδοσία του συστήματος γίνεται μέσω εξωτερικής παροχής ρεύματος ή σε διαφορετική περίπτωση με την τοποθέτηση μπαταρίας εντός του ίδιου του οχήματος. Το κόστος αγοράς ενός τέτοιου εμπορικού συστήματος, από δραστηριοποιημένες εταιρείες κατασκευής συστημάτων επιθεώρησης αγωγών, είναι πολύ υψηλό, απαιτώντας διάθεση μεγάλου κεφαλαίου, ακόμα και εάν το προς αγορά μοντέλο περιλαμβάνει τον πιο απλό συνδυασμό βασικών χαρακτηριστικών. [5], [16], [17], [18]

### **1.1 Σκοπός**

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την προβολή και αξιοποίηση των δυνατοτήτων που προσφέρουν τα ρομποτικά συστήματα επιθεώρησης αγωγών σε εφαρμογές του Μηχανικού Ορυκτών Πόρων. Ως στόχος, τέθηκε ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός πρωτότυπου ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών, το οποίο χαρακτηρίζεται από:

- το χαμηλό του κόστος,
- το πλήθος των δυνατοτήτων που προσφέρει στο χρήστη το εγκατεστημένο σε αυτό υλικό και λογισμικό,
- την σχετικά αυξημένη αυτονομία του,
- την εύκολη και άμεση δυνατότητα παραμετροποίησής του,
- τη δυνατότητα καταγραφής και ζωντανής απεικόνισης των δεδομένων της εικόνας, εντός του αγωγού έρευνας,
- την επεκτασιμότητα επιθεώρησης πλήθους μεταλλικών κατασκευών, συμπεριλαμβανομένων δοκών, τεχνικών έργων και δομικών στοιχείων,
- καθώς και την ιδιαιτερότητα - ικανότητά του να προσκολλάται με απόλυτη ασφάλεια σε μεταλλικές επιφάνειες με αποτέλεσμα την είσοδο και προσχώρησή του σε δύσβατα σημεία.

Το θέμα αποτελεί καινοτομία για την Σχολή των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων καθώς αποτελεί την πρώτη προσπάθεια αντίστοιχης πρωτότυπης κατασκευής.

## **1.2 Στάδια Υλοποίησης**

Αρχικό στάδιο υλοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η συλλογή πληροφοριών από εταιρείες οι οποίες δραστηριοποιούνται στην κατασκευή τέτοιων ρομποτικών συστημάτων επιθεώρησης αγωγών. Το επόμενο στάδιο της υλοποίησης περιλαμβάνει τις απαιτήσεις του συστήματος, τους φυσικούς υπολογισμούς και την επιλογή του κατάλληλου υλικού από το οποίο θα αποτελείται το προς κατασκευή ρομποτικό σύστημα. Το στάδιο αυτό αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μέρη της κατασκευής, μιας και η σωστή επιλογή του υλικού σε συνδυασμό με τους φυσικούς υπολογισμούς έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση σφαλμάτων και ακολούθως της καθυστέρησης της ολοκλήρωσης της κατασκευής του οχήματος. Έπειτα ακολουθεί το στάδιο του σχεδιασμού του ρομποτικού συστήματος. Κατά το στάδιο αυτό γίνεται η διαστασιολόγηση του επιλεγμένου υλικού και τοποθέτησή του στο ρομποτικό όχημα με τρόπο τέτοιο ώστε να είναι όσο το δυνατόν ευκολότερη η παραμετροποίησή του, σε περίπτωση που ο χρήστης το επιθυμεί. Έπειτα από το στάδιο του σχεδιασμού, ακολουθεί το στάδιο της κατασκευής του μοντέλου, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί και ο προγραμματισμός αυτού ώστε να παρέχει στον χρήστη όλες τις λειτουργίες και δυνατότητες, βάσει των οποίων έχει κατασκευαστεί. Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής σειρά έχει το πειραματικό μέρος, κατά το οποίο το πρωτότυπο ρομποτικό τροχοφόρο όχημα επιθεώρησης αγωγών θα δοκιμαστεί σε διαφορετικά περιβάλλοντα εφαρμογών, ώστε να ελεγχθεί η εύρυθμη λειτουργία του με την ταυτόχρονη αξιολόγηση των δεδομένων.

## **1.3 Οργάνωση Κεφαλαίων**

Το επόμενο Κεφάλαιο περιλαμβάνει μια ιστορική αναδρομή των ρομποτικών συστημάτων επιθεώρησης αγωγών, καθώς και τα πλεονεκτήματα τα οποία προσφέρουν στο πεδίο εφαρμογής τους, όπως στη Βιομηχανία Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου. Επίσης, αναφέρονται οι απαιτήσεις των συστημάτων αυτών, ενώ γίνεται έρευνα αγοράς για τις διαθέσιμες επιλογές ρομποτικών συστημάτων, κατά την

παρούσα χρονική περίοδο στην αγορά. Οι βασικές τεχνικές λεπτομέρειες καθώς και η επιλογή του προς εγκατάσταση κατάλληλου υλικού (hardware) για την κατασκευή του ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών, καθώς και τα χαρακτηριστικά αυτών, περιλαμβάνονται στο Κεφάλαιο 3. Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η διαδικασία και τα στάδια σχεδιασμού του οχήματος, καθώς και η δημιουργία της φυσικής υπόστασης του σκελετού της πλατφόρμας μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης του σχεδιασμένου μοντέλου σε κατάλληλο εκτυπωτή τρισδιάστατων αντικειμένων. Το Κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει όλα τα στάδια της κατασκευής και συναρμολόγησης του ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών. Η διαδικασία προγραμματισμού του μοντέλου περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6. Το Κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει τη διεξαγωγή του πειραματικής διαδικασίας, ενώ στο Κεφάλαιο 8 πραγματοποιείται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτής. Στο Κεφάλαιο 9 δίδονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων κατά τη διεξαγωγή του πειράματος καθώς και η ερμηνεία αυτών. Τέλος, στο Κεφάλαιο 10, παρουσιάζονται προτάσεις και συμπεράσματα σχετικά με την ορθή και ομαλή λειτουργία του ρομποτικού συστήματος, την μελλοντική αναβάθμισή του, καθώς και πιθανές εφαρμογές σε άλλους τομείς.



# Κεφάλαιο 2

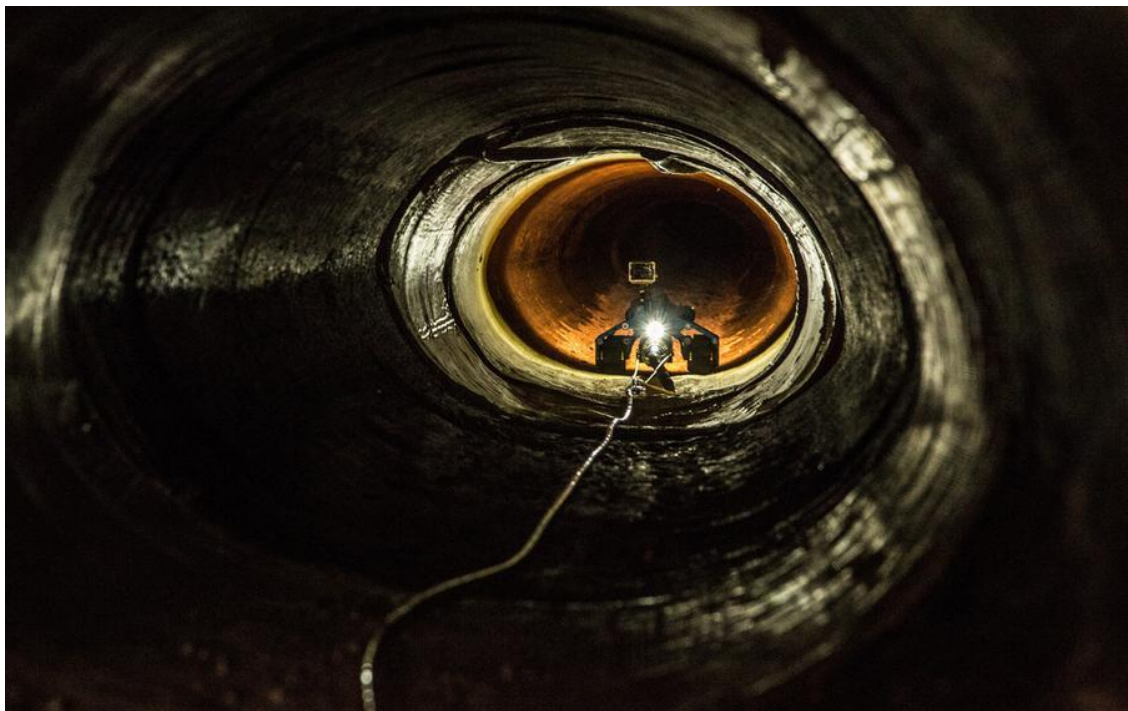
## **Ρομποτικά Συστήματα Επιθεώρησης Αγωγών (PipeLine Inspection Robots)**

### **2.1 Ιστορική Αναδρομή**

Τα ρομποτικά συστήματα επιθεώρησης αγωγών ξεκίνησαν να κατασκευάζονται και να χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου, από την δεκαετία του 1960 (Σχήμα 1.1) [4]. Πρωταρχικός σκοπός της κατασκευής τους ήταν ο εντοπισμός, η αποτύπωση και η αξιολόγηση του εσωτερικού τμήματος των προς επιθεώρηση αγωγών, για την εξασφάλιση της ορθής λειτουργίας αυτών. Διαφέρουν τόσο ως προς το είδος των εξαρτημάτων-αισθητήρων με τα οποία είναι εξοπλισμένα, όσο και από το μέγεθός τους, τον τρόπο κινήσεώς τους και τα υλικά κατασκευής τους. Επίσης, μια ακόμα διαφοροποίησή τους περιλαμβάνει το κριτήριο της στεγανότητας, με τα πιο εξελιγμένα συστήματα να προσφέρουν πλήρη στεγανότητα, για χρήση τόσο σε υδάτινο, όσο και σε πετρελαιοδιαβρεχτό περιβάλλον. Οι πρώτες επιθεωρήσεις αγωγών πραγματοποιούνταν μονάχα με τη χρήση μίας κάμερας υψηλής ευκρίνειας η οποία συνδεόταν με τη βάση, σε μια οθόνη ή ηλεκτρονικό υπολογιστή,

με την χρήση μεγάλου μήκους καλωδίου. Στη συνέχεια και ως συνέπεια της τεχνολογικής εξέλιξης, το σύστημα αυτό προσαρμόστηκε επάνω σε τροχοφόρα και ερπυστριοφόρα οχήματα ώστε να προστεθεί το κριτήριο της ευελιξίας, ενώ επίσης έγινε εφικτή η πρόσθεση και εγκατάσταση πιο εξελιγμένων συστημάτων ελέγχου επιθεώρησης εντός αυτών, όπως για παράδειγμα εγκατάσταση συσκευής υπερήχων, εγκατάσταση συστημάτων τρισδιάστατης απεικόνισης με χρήση ακτινών laser, εγκατάσταση συσκευών θερμογραφίας κ.α. [9], [10], [15]

Η χρήση τέτοιων ρομποτικών συστημάτων πραγματοποιείται επίσης σε διαδικασίες ανθρώπινης διάσωσης, καθώς και σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν την αποτύπωση και επιθεώρηση μη ευκόλως προσβάσιμων σημείων, π.χ. μέσα από αγωγούς γεωτρήσεων.



Σχήμα 2.1: Ρομποτικό Σύστημα Επιθεώρησης Αγωγών (Pipeline Inspection Robot)

[Link 22]

## **2.2 Εφαρμογές Ρομποτικών Συστημάτων Επιθεώρησης**

Υπάρχει μια τεράστια ποικιλία αγωγών όπως αστικοί, αερίου, πετρελαίου, χημικού εργαστηρίου, πυρηνικού σταθμού κλπ. οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την ζωή μας. Επίσης, οι αγωγοί είναι το κύριο μέσο μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου, το οποίο επιλέγουν τόσο οι ίδιες οι χώρες όσο και οι βιομηχανίες για ασφαλή μεταφορά. [20]

Ενδεικτικά, οι εφαρμογές τέτοιων ρομποτικών συστημάτων περιλαμβάνουν τομείς όπως:

- i) Βιομηχανία Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου,
- ii) Εργοστάσια και Βιομηχανίες Χημικών Αποβλήτων,
- iii) Πυρηνικός Σταθμός,
- iv) Υπόγειες Εκμεταλλεύσεις Ορυκτών Πόρων,
- v) Βιομηχανία Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας,
- vi) Κατασκευή και Επιθεώρηση Υπόγειων Σηράγγων,
- vii) Εργοστάσια Παραγωγής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Υδροηλεκτρικά Εργοστάσια),
- viii) Επιθεώρηση Αστικών έργων (Αγωγοί λημμάτων και ύδρευσης),
- ix) Επιθεώρηση Επιφάνειας Αεροσκαφών,
- x) Επιθεώρηση Μεταλλικών Κατασκευών,
- xi) Εφαρμογές Έρευνας και Διάσωσης,
- xii) Περιβαλλοντικές Εφαρμογές.

## **2.3 Προβλήματα Αγωγών και Τρόποι Εντοπισμού Αυτών**

Οι περισσότεροι αγωγοί, που υπάρχουν και χρησιμοποιούνται αυτή την στιγμή στον πλανήτη, κατασκευάστηκαν την δεκαετία του 1980. Αποτέλεσμα αυτού είναι να δημιουργούνται προβλήματα στην λειτουργία τους, τόσο από το γεγονός της παλαιώσης αυτών, όσο και από αιτίες που έχουν να κάνουν με την ρωγμάτωση, ρήξη και μηχανική καταστροφή από εξωτερικούς παράγοντες που μπορεί να αφορούν στην υγρασία και στη χημική καταστροφή των τοιχωμάτων, καθώς και στην ανθρώπινη παρέμβαση και καταστροφή αυτών, λόγω εργασιών (Πηγή: Intelligent Autonomous Systems 10, pp. 407, 2008).

Η καταστροφή, ή διαρροή και γενικά η μη ορθή λειτουργία ενός αγωγού συνεπάγεται τόσο σε απώλειες κερδών και εγκαταστάσεων για την ίδια την βιομηχανία, όσο και σε σοβαρότερες συνέπειες που περιλαμβάνουν ανθρώπινες ζωές και καταστροφή του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα το 2008, το άμεσο χρηματικό κόστος εξαιτίας της πλήρους καταστροφής των αγωγών λόγω μη έγκαιρης επιθεώρησης και συντήρησης, το οποίο οι Βιομηχανίες Πετρελαίου στην Ήπειρο της Αμερικής αναγκάστηκαν να καταβάλουν, ανέρχεται στα 276 Δισεκατομμύρια Δολάρια. (Πηγή: Intelligent Autonomous Systems 10, pp. 407, 2008)

Η πιο συχνή αιτία μη ορθής λειτουργίας ενός αγωγού σε μια μονάδα επεξεργασίας, περιλαμβάνει την υπολειτουργία ή πλήρη καταστροφή απλών μηχανικών μερών του αγωγού. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται ειδικευμένες μη καταστρεπτικές μέθοδοι επιθεώρησης (Non-destructive Testing, NTD) του αγωγού για να καθοριστούν το υπολειπόμενο πάχος του τοιχώματος, καθώς και για να εντοπιστούν διάφορες ανωμαλίες στην επιφάνεια του αγωγού, όπως ρωγμές. Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες μέθοδοι NTD που χρησιμοποιούνται για την ορθή λειτουργία των αγωγών:

Μέθοδος	Αρχή Εφαρμογής	Δυνατότητες και Περιορισμοί
CCTV – Camera / Visual	Οπτική παρατήρηση διαφόρων ανωμαλιών εντός της επιφάνειας του αγωγού. Επίσης είναι δυνατή η οπτική παρατήρηση ρωγμών καθώς και διαρροών ρευστού. Περιλαμβάνει σύστημα κάμερας	Δυνατότητα παρατήρησης μόνο της επιφάνειας του αγωγού. Η ορθή οπτική παρατήρηση εξαρτάται από το είδος της κάμερας. Ειδική για σάρωση περιοχών.

Thermography	Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στο γεγονός ότι κατά την θέρμανση / ψύξη των αντικειμένων, γίνονται ορατά ελαττώματα που αλλάζουν την θερμική αγωγιμότητα αυτών.	Πραγματοποιείται μόνο σε σιδηρομαγνητικά υλικά.
Ultrasonics	Υπερηχητικά κύματα αντανακλώνται στην μεταλλική επιφάνεια και επιστρέφουν πίσω στον δέκτη. Υπολογίζεται το πάχος του εσωτερικού τμήματος του αγωγού.	Απαιτείται μεταλλικός αγωγός επιθεώρησης. Η μέτρηση περιλαμβάνει μόνο ένα σημείο του αγωγού. (Point-type measurement)
Radiography	Λειτουργία με χρήση ραδιενεργής ακτινοβολίας, Ακτινών X και Γάμμα. Η απορρόφηση της ραδιενεργής ακτινοβολίας εξαρτάται από το πάχος και την πυκνότητα του διαπερνώντος υλικού.	Δαπανηρή τήρηση υψηλών κανόνων ασφαλείας.
Acoustic Emission	Ανιχνεύει ακουστικά κύματα που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των μικροσκοπικών ατελειών.	Στατικά ελαττώματα δεν μπορούν να ανιχνευθούν.

Πίνακας 2.1: Μέθοδοι NTD για την επιθεώρηση της λειτουργίας των αγωγών

Η ανίχνευση των διαρροών έχει επίσης ιδιαίτερο ενδιαφέρον και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που παρουσιάζουν οι διαφόρων τύπων αγωγοί. Τέτοια προβλήματα πρέπει να εντοπίζονται και να διορθώνονται άμεσα μιας και η διαρροή ενός αγωγού συνεπάγεται πολλές φορές με την δραπέτευση επικίνδυνων ουσιών στο περιβάλλον και την ατμόσφαιρα, με τις συνέπειες σε τέτοιες περιπτώσεις να είναι συνήθως καταστροφικές.

Για την ασφαλή επιθεώρηση του συστήματος του αγωγού χωρίς την εισαγωγή εργατικού δυναμικού στην πραγματοποίηση της διαδικασίας λόγω των πολλαπλών κινδύνων που αυτές εγκυμονούν, η χρήση μη επανδρωμένων αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων επιθεώρησης αγωγών είναι μεγίστης σημασίας, τόσο για το καλύτερο αποτέλεσμα της διαδικασίας της επιθεώρησης μέσω των εξελιγμένων συστημάτων των οποίων φέρουν, όσο και για την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής. Επίσης, τα απομακρυσμένου ελέγχου ρομποτικά συστήματα είναι ιδιαίτερα επωφελή όταν η προς έρευνα περιοχή αποτελείται από δύσβατα σημεία ή σημεία που απαιτούν αναρρίχηση (π.χ. σωληνώσεις, δοκοί και αγωγοί σε γέφυρες ύψους 20 – 30 μέτρων πάνω από το έδαφος, επιφάνειες δεξαμενής αποθήκευσης σε πολυόροφα κτήρια, επιθεώρηση σιδηροκατασκευών και κτηριακών εγκαταστάσεων κ.α.). [16]

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι δραστηριότητες που έχουν να κάνουν με την επιθεώρηση, την παρακολούθηση και την επισκευή τέτοιων εγκαταστάσεων και αγωγών είναι όλο και περισσότερο αναγκαίες, τόσο για την σωστή και ασφαλή λειτουργία του αγωγού όσο και την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής αλλά και του περιβάλλοντος. Η αναγκαιότητα τέτοιων συστημάτων και η τεράστια άνθιση που γνωρίζουν τα τελευταία χρόνια έχει ως αποτέλεσμα τέτοιες δραστηριότητες να απαιτούν τεράστια κεφάλαια για την αγορά κατάλληλων ρομποτικών συστημάτων επιθεώρησης αγωγών, από τις εταιρείες που δραστηριοποιούνται στην κατασκευή και το εμπόριο αυτών.

## **2.4 Πλεονεκτήματα Ρομποτικών Συστημάτων Επιθεώρησης Αγωγών**

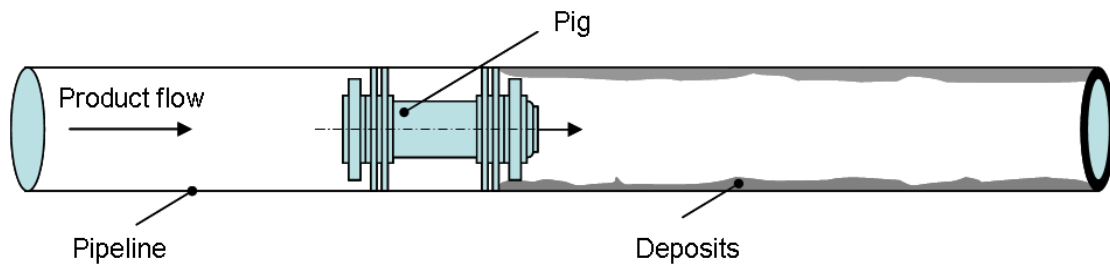
Η εσωτερική επιθεώρηση των αγωγών είναι από τις πιο σημαντικές δραστηριότητες ώστε να βεβαιωθούμε και να κατανοήσουμε πλήρως την κατάσταση στην οποία

βρίσκεται ο αγωγός, με σκοπό την εξασφάλιση της πλήρους λειτουργικότητας όλων των μερών του για μεγάλο χρονικό διάστημα. Υπάρχουν πολλές ανάγκες για αυτόνομες συσκευές ελέγχου με δυνατότητα εισαγωγής, κίνησης και επιθεώρησης εντός του αγωγού έρευνας, ωστόσο η επιθεώρηση αγωγών σε συνθήκες πεδίου εμπεριέχουν αρκετές πτυχές δυσκολίας. [3] [14] Τέτοιες πτυχές μπορεί να είναι:

- i) Η θέση στην οποία βρίσκονται και η οποία επιτρέπει συνήθως περιορισμένη πρόσβαση εντός αυτών,
- ii) Η εσωτερική διαμόρφωση του αγωγού, η οποία μπορεί να είναι αρκετά περίπλοκη και με πολλαπλές διακλαδώσεις,
- iii) Η εσωτερική διάμετρος του αγωγού, η οποία μπορεί να περιορίσει την είσοδο συστημάτων επιθεώρησης, και
- iv) Η επιφάνεια του αγωγού, η οποία μπορεί να έχει υποστεί αλλοιώσεις, λόγω βαθουλωμάτων, χτυπημάτων αλλά και παρακωλύσεων, κατά την διάρκεια της συντήρησης.

Η διαδικασία επιθεώρησης αγωγών είναι συχνά το πρώτο στάδιο πριν από κάθε διαδικασία συντήρησης και καθαρισμού, προκειμένου να εκτιμηθεί η ζημιά εντός του αγωγού σε συνδυασμό με άλλα πιθανά προβλήματα που μπορεί να έχουν πιθανώς προκύψει, καθώς και η σοβαρότητα αυτών. Η διαδικασία που δρομολογείται μετά την είσοδο και την ανάλυση των αποτελεσμάτων των ρομποτικών συστημάτων επιθεώρησης του αγωγού και η οποία αποσκοπεί στην συντήρηση και τον καθαρισμό του αγωγού, ονομάζεται “Pigging” (Σχήμα 2.2) και πραγματοποιείται μέσω της χρήσης ειδικών για τον σκοπό αυτό συσκευών οι οποίες ονομάζονται “Pigs” (Σχήμα 2.3). Οι συσκευές αυτές μέσω ειδικού λογισμικού προγράμματος και αναλόγως των δεδομένων που έχουν λάβει κατά το πρώτο στάδιο επιθεώρησης, προσδιορίζουν τις δραστηριότητες και τα εργαλεία που απαιτούνται για να καταστούν λειτουργικά όλα τα μέρη του αγωγού, για μέγιστη ποιότητα και παραγωγικότητα. Οι πιο εξελιγμένες συσκευές χρησιμοποιούν τεχνικές ροής υπερήχων καθώς και τεχνικές μαγνητικής ροής για να εξασφαλίσουν την πλήρη λειτουργικότητα και ασφάλεια του αγωγού. [6], [7]





Σχήμα 2.2: Διαδικασία καθαρισμού και συντήρησης αγωγού (Pigging)



Σχήμα 2.3: Συσκευές καθαρισμού και συντήρησης αγωγών (Pigs) [Link 19]

Τα πλεονεκτήματα των ρομποτικών συστημάτων επιθεωρήσεις των αγωγών είναι:

- i) Η ικανότητα τους να εκτελούν μικρής ή μεγάλης εμβέλειας επιθεωρήσεις υπό διάφορες συνθήκες,
- ii) Η ικανότητα τους να φέρουν συστήματα με τα οποία καθίστανται δυνατή η εκτέλεση υψηλής ευκρίνειας βιντεοσκόπησης, χαρτογράφησης και έρευνας του προς επιθεώρηση σημείου,
- iii) Η ικανότητα λειτουργίας τους σε μεγάλο εύρος διαφόρων τύπων αγωγών και περιβαλλόντων,
- iv) Εγκαταλείπεται η ανάγκη για επανδρωμένες εισόδους εντός των επιθεωρήσιμων σημείων, με αποτέλεσμα την ασφάλεια του ανθρώπινου δυναμικού,
- v) Υψηλή μέγιστη ταχύτητα που επιτρέπει την γρήγορη και ταυτόχρονα προηγμένη επιθεώρηση των αγωγών με αποτελεσματικό τρόπο,
- vi) Πρόληψη καταστάσεων υψηλού κινδύνου για τον ίδιο τον άνθρωπο και το Περιβάλλον,
- vii) Έρευνα και Ανθρώπινη διάσωση σε δύσβατα σημεία. (Σήραγγες, Ορυχεία κ.α.).



## 2.5 Απαιτήσεις Συστήματος

Ο βασικός εξοπλισμός ενός ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών, περιλαμβάνει μια κάμερα υψηλής ευκρίνειας με δυνατότητα αναλογικής μεγέθυνσης εικόνας, έναν ελεγκτή των κινητήρων του οχήματος, έναν μικροϋπολογιστή-μικροελεγκτή ο οποίος είναι υπεύθυνος για την αποκωδικοποίηση και μετάδοση των δεδομένων στον χρήστη του συστήματος αυτού, καθώς και από κάποια εγκατεστημένη επί του σκελετού ή σε συνδυασμό με την κάμερα, πηγή φωτός. Ο σκελετός τους συνήθως κατασκευάζεται από αλουμίνιο, σίδηρο ή ακόμα και από υψηλής ποιότητας πλαστικό. Το μέγεθός τους ποικίλει ανάλογα του φέροντος εξοπλισμού, ενώ αντιστοίχως επηρεάζει το εύρος των αγωγών στους οποίους μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Ορισμένα ρομποτικά συστήματα επιθεώρησης αγωγών έχουν μηχανικά μεταβλητό μέγεθος (δομή ψαλιδιού) το οποίο βοηθάει στην συμβατότητα και λειτουργία τους σε μεγαλύτερου εύρους διαμέτρων αγωγούς. (Σχήμα 2.4) [8], [12]



Σχήμα 2.4: Pipeline Inspection Robot με μηχανικά ορισμένο μεταβλητό μέγεθος δομής ψαλιδιού [Link 20]

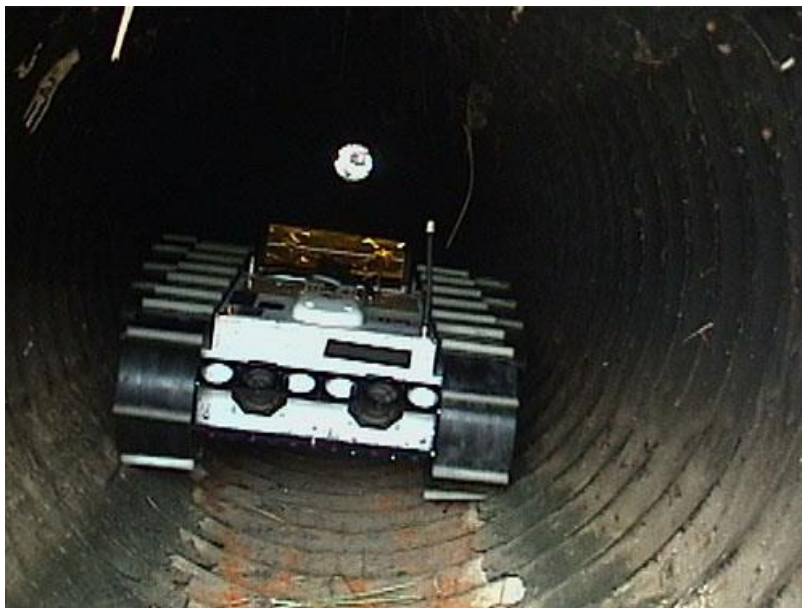
Οι κύριοι τρόποι κίνησης των ρομποτικών συστημάτων επιθεώρησης, περιλαμβάνουν είτε την κίνησή τους με τροχούς και ονομάζονται τροχοφόρα (Σχήμα 2.5), είτε την

κίνησή τους με την βοήθεια ερπυστριών και ονομάζονται ερπυστριοφόρα (Σχήμα 2.6). Μέχρι και τα τελευταία χρόνια τα συστήματα αυτά είχαν αρκετούς περιορισμούς ως προς την ικανότητά τους να στραφούν σε ένα σωλήνα με σχήμα T ή να επιτύχουν ασφαλή κάθετη ανάβαση εντός του αγωγού έρευνας. Τα πιο εξελιγμένα πλέον ρομποτικά συστήματα επιθεώρησης έχουν καταφέρει να μειώσουν τους περιορισμούς αυτούς, αναβαθμίζοντας τον εξοπλισμό τους με ειδικά μαγνητικά (και ηλεκτρομαγνητικά) συστήματα, τα οποία τους επιτρέπουν την ασφαλή προσκόλλησή τους και, χωρίς ιδιαίτερους περιορισμούς, μετακίνησή τους επάνω στην επιφάνεια αγωγών κατασκευασμένων από μέταλλο. Επίσης, άλλα ρομποτικά συστήματα επιθεώρησης, για να επιτύχουν τον ίδιο ακριβώς σκοπό, εγκατέστησαν, είτε ειδικά σχεδιασμένους μαγνητικούς τροχούς, είτε μαγνητικές ερπύστριες, αναλόγως του τρόπου κινήσεως του ρομποτικού οχήματός τους. [13], [19]

Ο φερόμενος μηχανολογικός εξοπλισμός ενός συστήματος επιθεώρησης αγωγών, εκτός των βασικών συσκευών και εξαρτημάτων, μπορεί να περιλαμβάνει κάμερα υπερύθρων με συνδυασμό εγκατεστημένης πηγής υπέρυθρου φωτισμού, ρομποτικούς βραχίονες για την επί τόπου λύση τυχόν προβλημάτων εντός του αγωγού έρευνας καθώς και ειδικές συσκευές συστήματος χαρτογραφήσεως και ανάλυσης τύπου LIDAR. Μέχρι σήμερα η τεχνολογία επιτρέπει την κατασκευή ρομποτικών συστημάτων αρκετά μικρών σε μέγεθος, με δυνατότητα εισαγωγής τους σε αγωγούς διαμέτρου μικρότερων των 4 in., τα οποία όμως δεν είναι κατάλληλα για εφαρμογές γενικών χρήσεων, μιας και δύναται να εγκατασταθεί σε αυτά μόνο ο απαιτούμενος φερόμενος εξοπλισμός, χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα μετέπειτα αναβάθμισής του, ενώ επίσης το κόστος αγοράς ενός τέτοιου συστήματος απαιτεί χρήση μεγάλου κεφαλαίου.



Σχήμα 2.5: Τροχοφόρο ρομποτικό σύστημα επιθεώρησης αγωγών [Link 21]



Σχήμα 2.6: Ερπυστριοφόρο ρομποτικό σύστημα επιθεώρησης αγωγών [Link 23]

## **2.6 Έρευνα Αγοράς Συστημάτων Επιθεώρησης Αγωγών**

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μια έρευνα αγοράς σχετικά με τα έτοιμα ρομποτικά συστήματα επιθεώρησης αγωγών, με σκοπό να συγκριθεί το κόστος και τα χαρακτηριστικά των έτοιμων συστημάτων με αυτά ενός πρότυπου.

Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε Ξένες Εταιρείες που δραστηριοποιούνται ενεργά στην δημιουργία, κατασκευή και εργοστασιακή παραγωγή τέτοιων οχημάτων, προέκυψε ως συμπέρασμα ότι η αγορά ρομποτικών συστημάτων επιθεώρησης αγωγών απαιτεί σε κάθε περίπτωση χρήση μεγάλου κεφαλαίου, ακόμα και αν το υπό αγορά ρομποτικό σύστημα περιέχει τον βασικό μόνο εξοπλισμό, ο οποίος περιλαμβάνει μόνο μια εγκατεστημένη κάμερα εντός του σκελετού του μοντέλου για την επιθεώρηση αγωγών, χωρίς να υπάρχει καμία δυνατότητα προσκόλλησης σε μεταλλική επιφάνεια καθώς και το χαρακτηριστικό της στεγανότητας του οχήματος.

Τέλος, από την έρευνα από την οποία πραγματοποιήθηκε προέκυψε ότι ο αριθμός των ρομποτικών συστημάτων τα οποία παραγγέλθηκαν και κατόπιν αγοράστηκαν στην Βόρειο Αμερική κατά την χρονολογία του 2010, ήταν 15860 τεμάχια, με το κόστος αγοράς αυτών να κυμαίνεται στα 993.2 εκατομμύρια ευρώ. [Link 15]

### **2.6.1 Διαθέσιμες Επιλογές Ρομποτικών συστημάτων Επιθεώρησης Αγωγών**

Στο σημείο αυτό θα αναφερθούν ενδεικτικά μερικές από τις διαθέσιμες επιλογές αγοράς ρομποτικών συστημάτων επιθεώρησης αγωγών, όπως αυτές προέκυψαν από την έρευνα αγοράς που πραγματοποιήθηκε και αναφέρθηκε παραπάνω. Όλα τα συστήματα με το χαρακτηριστικό της υδατοστεγάνοτητας λειτουργούν τόσο σε υδατοδιαβρεχτό όσο και σε πετρελαιοδιαβρεχτό περιβάλλον. [Link 1]

#### 1η Επιλογή

Η Αμερικανική Εταιρεία Advanced Inspection Technologies (AIT) με έδρα την Φλώριντα, διαθέτει στην αγορά μια ποικιλία από ρομποτικά οχήματα επιθεώρησης αγωγών. Τα ρομποτικά αυτά συστήματα μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες επιθεώρησης αγωγών με εύρος διαμέτρου από 100 mm (4 in.), με επιλογή αγοράς της μικρότερης πλατφόρμας, έως και 2000mm (79 in.) , με επιλογή αγοράς της μεγαλύτερης πλατφόρμας.

Τα ενδεικτικά χαρακτηριστικά αυτών παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 2.2:

Τύπος Μοντέλου	RX95 Crawler	RX130 Crawler	RX400 Pipe Crawler
Μήκος καλωδίου	100 m	200 m	300 m
Εύρος Διαμέτρου Αγωγού Επιθεώρησης	DN 100 - DN 200 (100mm - 200mm)	DN 150 – DN 1000 (150mm - 1000mm)	DN 400 – DN 1300 (400mm - 1300mm)
Ανάλυση Κάμερας	420 x 560	420 x 560	420 x 560
Δυνατότητα Αυτόματης Εστίασης Εικόνας (AutoFocus)	Ναι	Ναι	Ναι
Δυνατότητα περιστροφής κάμερας	90 μοίρες	+/- 135 μοίρες	+/- 135 μοίρες
Δυνατότητα Μεγένθυσης Εικόνας	Όχι	10 x Optical Zoom 12 x Digital Zoom	10 x Optical Zoom 12 x Digital Zoom
Κιβώτιο Ταχυτήτων	Όχι	Όχι	2-speed gearbox
Σύστημα Υπολογισμού Απόστασης	Ναι	Ναι	Ναι
Αριθμός Τροχών	6	6	6
Υδατοστεγανότητα IP68 για έως 10 μέτρα βάθος νερού	-	Ναι	Ναι

Δυνατότητα Προσκόλλησης και Ανάβασης Μεταλλικών Επιφανειών	Όχι	Όχι	Όχι
Διαστάσεις	274 x 86 x 75 mm	310 x 111 x 90 mm	700 x 240 x 250 mm (χωρίς ρόδες)
Βάρος	4.5 kg	6 kg	32 kg
Τιμή	12740 \$	16816.80 \$	53304.16 \$

Πίνακας 2.2: Ενδεικτικά χαρακτηριστικά και τιμές ρομποτικών οχημάτων επιθεώρησης αγωγών από την Εταιρεία ΑΙΤ



Σχήμα 2.7: RX95 Crawler



Σχήμα 2.8: RX130 Crawler



Σχήμα 2.9: RX400 Crawler

## 2η Επιλογή

Η δεύτερη επιλογή προέρχεται από την Καναδέζικη Εταιρεία Inuktun Services Ltd. (ISL) με κύρια έδρα το Nanaimo του Vancouver, καθώς επίσης και με έδρες τόσο στην Αμερικανική Ήπειρο και συγκεκριμένα στην περιοχή του Τέξας, όσο και την Ασία με έδρα την Κίνα αλλά και την Ευρώπη με έδρα την Σκωτία. Η Εταιρεία αυτή προσφέρει μια μεγάλη ποικιλία ρομποτικών συστημάτων επιθεώρησης αγωγών τα οποία διαφέρουν τόσο σε μέγεθος όσο και σε δυνατότητες. [Link 2]

Τα ενδεικτικά χαρακτηριστικά αυτών παρουσιάζονται στον πίνακα της επόμενης σελίδας:

Τύπος Μοντέλου	Versatrax 450	Versatrax 100	Versatrax NanoMag	Versatrax MicroMag 100
Μήκος καλωδίου	160 m	183 m	30	183 m
Εύρος Διαμέτρου Αγωγού Επιθεώρησης	381 mm	100mm – 152mm		100mm
Ανάλυση Κάμερας	460 TVL	420 x 560	420 x 520	420 x 560
Δυνατότητα Αυτόματης Εστίασης Εικόνας (AutoFocus)	Ναι	-	Όχι	Ναι
Δυνατότητα περιστροφής κάμερας	360 μοίρες	90 μοίρες	150 μοίρες	90 μοιρών

Δυνατότητα Μεγένθυσης Εικόνας	10 x Optical 2 x Digital	-	Όχι	-
Κιβώτιο Ταχυτήτων	Όχι	Όχι	Όχι	-
Σύστημα Υπολογισμού Απόστασης	Ναι	Ναι	Όχι	Ναι
Αριθμός Τροχών	Ερπυστ/φόρο	Ερπυστ/φόρο	Ερπυστ/φόρο	Ερπυστ/φόρο
Υδατοστεγανότητα IP68 για έως 10 μέτρα βάθος νερού	-	Ναι (έως 30 μέτρα)	Όχι	Ναι (έως 30 μέτρα)
Δυνατότητα Προσκόλλησης και Ανάβασης Μεταλλικών Επιφανειών	Όχι	Όχι	Ναι (μέσω μαγνητών)	Ναι (μέσω μαγνητών)
Διαστάσεις	367 x 317 x 507 mm	-	105 x 40 x 193	-
Βάρος	45 kg	9 kg	2.27 kg	4.54 kg
Τιμή				

Πίνακας 2.3: Ενδεικτικά χαρακτηριστικά και τιμές ρομποτικών οχημάτων επιθεώρησης αγωγών από την Εταιρεία ISL





Σχήμα 2.10: Versatrax 450



Σχήμα 2.11: Versatrax 100



Σχήμα 2.12: Versatrax NanoMag



Σχήμα 2.13: Versatrax MicroMag 100

### 3η Επιλογή

Η τρίτη επιλογή προέρχεται από την Αμερικάνικη Εταιρεία Honeybee Robotics με έδρες το Manhattan της Νέας Υόρκης και το Brooklyn, η οποία δραστηριοποιείται στην κατασκευή ρομποτικών συστημάτων και η οποία θεωρείται μια από τις Εταιρείες Κολοσσούς τέτοιων συστημάτων με συνεργασίες τόσο με την NYSearch, την NASA , την IBM, την BOEING καθώς και το Αμερικανικό Επιτελείο Άμυνας (US Department of Defence). [Link 3]

Η συγκεκριμένη εταιρεία έχει αναπτύξει ένα μικρών διαστάσεων ρομποτικό σύστημα επιθεώρησης αγωγών το οποίο έχει την δυνατότητα προσκόλλησης και ανάβασης μεταλλικών επιφανειών, καθώς επίσης και το χαρακτηριστικό της υδατοστεγανότητας. Επίσης, ο εξοπλισμός του περιλαμβάνει και μια κάμερα ανάλυσης 420x560 pixel, καθώς και φωτισμό led. Τέλος, το κόστος αγοράς αυτού του συστήματος κυμαίνεται σε τιμές άνω των 70000 ευρώ.



Σχήμα 2.14: Honeybee Robotics Mini Pipeline Inspection Robot [Link 3]

#### 4η Επιλογή

Η 4η επιλογή περιλαμβάνει ένα ρομποτικό σύστημα που προέρχεται από την Εταιρεία Genexis με έδρα την Κίνα. Πρόκειται για ένα μοντέλο χαρακτηριστικό του οποίου θεωρείται το χαμηλό κόστος τιμής πώλησής του, σε σχέση με τα υπόλοιπα βιομηχανικά συστήματα που κυκλοφορούν στην αγορά. (Σχήμα 2.15) [Link 4]  
Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά του συστήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4:

Τύπος Μοντέλου	Genexis Pipeline Inspection Robot
Μήκος καλωδίου	30 m
Εύρος Διαμέτρου Αγωγού Επιθεώρησης	DN400
Ανάλυση Κάμερας	420x560
Δυνατότητα Αυτόματης Εστίασης Εικόνας (AutoFocus)	Όχι
Δυνατότητα Μεγένθυσης Εικόνας	Όχι
Κιβώτιο Ταχυτήτων	Όχι
Σύστημα Υπολογισμού Απόστασης	Όχι
Αριθμός Τροχών	4
Υδατοστεγανότητα IP68 για έως 10 μέτρα βάθος νερού	Όχι
Δυνατότητα Προσκόλλησης και Ανάβασης Μεταλλικών Επιφανειών	Όχι
Διαστάσεις	-
Βάρος	-
Τιμή	6000 ευρώ

Πίνακας 2.4: Ενδεικτικά χαρακτηριστικά και τιμή του Genexis ρομποτικού οχήματος



Σχήμα 2.15: Genexis Pipeline Inspection Robot [Link4]

#### 5η Επιλογή

Η πέμπτη και τελευταία επιλογή προέρχεται από την Τουρκική Εταιρεία Roteksan, η οποία δραστηριοποιείται στον χώρο των ρομποτικών συστημάτων. (Σχήμα 2.16) [Link 5]

Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά του συστήματος παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 2.5:

Τύπος Μοντέλου	APEX CCTV CHANNEL INSPECTING ROBOT
Μήκος καλωδίου	100m
Εύρος Διαμέτρου Αγωγού Επιθεώρησης	DN200 - DN2400
Ανάλυση Κάμερας	570 TVL
Δυνατότητα Αυτόματης Εστίασης Εικόνας (AutoFocus)	Ναι

Δυνατότητα περιστροφής κάμερας	360 μοίρες
Δυνατότητα Μεγένθυσης Εικόνας	10x Optical
Κιβώτιο Ταχυτήτων	Όχι
Σύστημα Υπολογισμού Απόστασης	-
Αριθμός Τροχών	6x6
Υδατοστεγανότητα IP68 για έως 10 μέτρα βάθος νερού	-
Δυνατότητα Προσκόλλησης και Ανάβασης Μεταλλικών Επιφανειών	Όχι
Διαστάσεις	-
Βάρος	-
Τιμή	30000 ευρώ

Πίνακας 2.5: Ενδεικτικά χαρακτηριστικά και τιμή του ρομποτικού οχήματος της APEX



Σχήμα 2.16: APEX CCTV Channel Inspecting Robot [Link 5]

## 2.7 Αξιολόγηση Ρομποτικών Συστημάτων Επιθεώρησης Αγωγών

Η επιθεώρηση ενός αγωγού είναι μια μεγίστης σημασίας δραστηριότητα για την καλύτερη κατανόηση και τον υπολογισμό της πραγματικής απόδοσης του αγωγού σε σχέση με την θεωρητική απόδοση της φάσης της μηχανικής σχεδίασης. Ο έγκαιρος εντοπισμός ενός προβλήματος εντός του αγωγού σημαίνει ότι η επιδιόρθωσή του μπορεί να είναι λιγότερο δαπανηρή, ενώ επίσης η προγραμματισμένη συντήρησή του, τόσο σε αγωγούς πετρελαίου και φυσικού αερίου, όπου θα μπορεί να ορισθεί έτσι ώστε να έχει μικρότερο αντίκτυπο στην παραγωγή, όσο και σε αγωγούς που συνδέονται με Χημικές Βιομηχανίες καθώς και Εργοστάσια Ραδιενέργειας στα οποία η μη έγκαιρη επιδιόρθωση τυχόν προβλήματος στους αγωγούς μπορεί να οδηγήσει σε τεραστίου μεγέθους οικολογικές καταστροφές και με κόστος την απώλεια ανθρώπινων ζωών. Παρατηρείτε εύκολα λοιπόν, πόσο ουσιαστική είναι για μια Φυσικού Αερίου (ή Πετρελαϊκή) εταιρεία, η επιθεώρηση, καταγραφή και ανάλυση των δεδομένων από ένα ρομποτικό σύστημα επιθεώρησης αγωγών ώστε να εξασφαλιστεί άμεσα, με την μετέπειτα χρήση των ειδικών μηχανημάτων καθαρισμού και συντήρησης του επομένου σταδίου, η πλήρης λειτουργικότητα του αγωγού, με σκοπό την συνεχή διακίνηση και ροή εντός αυτού και με παραγόμενο αποτέλεσμα την αύξηση των κερδών της εκάστοτε εταιρείας. Κυριότερος όμως και πιο κρίσιμος λόγος της ύπαρξης αυτού του συστήματος επιθεώρησης αγωγών, είναι η πρόληψη και η προστασία του ανθρώπινου δυναμικού και του περικλείοντος Περιβάλλοντος από τυχόν ανεπιθύμητες διαρροές ρευστών και αερίων, εξαιτίας της ανεπαρκούς, λανθασμένης και σε ορισμένες περιπτώσεις πλήρης απουσίας συντήρησης των αγωγών με αποτέλεσμα την, με το πέρασμα του χρόνου, διάβρωση και καταστροφή τους, έχοντας ως ακόλουθο αντίκτυπο την δημιουργία άμεσων και σοβαρών επιπτώσεων τόσο στον άνθρωπο, όσο και στο φυσικό περιβάλλον. Ιδιαίτερος σκοπός λοιπόν αυτού του συστήματος είναι η σωστή καταγραφή και ανάλυση των δεδομένων εντός του αγωγού έρευνας, ώστε να δρομολογηθούν όλες οι απαραίτητες ενέργειες και να ενεργοποιηθούν άμεσα οι διαδικασίες συντήρησης, για την αποφυγή τέτοιων σοβαρών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που πολλές φορές καθίστανται μη αναστρέψιμες.





Σχήμα 2.17: Ολική καταστροφή αγωγού πετρελαίου με συνεπακόλουθες σοβαρές Περιβαλλοντικές επιπτώσεις



Σχήμα 2.18: Πρόκληση πυρκαγιάς εξαιτίας εκρήξεως λόγω διαρροής Φυσικού Αερίου από τον αγωγό μεταφοράς αυτού (New Delhi, January 16, 2015, Gas Authority of India Ltd.)



Σχήμα 2.19: Διαρροή πετρελαίου με συνεπακόλουθη Περιβαλλοντική καταστροφή εξαιτίας κακής συντηρήσεως του αγωγού συστήματος μεταφοράς, η οποία οδήγησε στην εκκένωση του χωριού Toccate στην περιοχή Ayacucho στο Περού. (2005, North Peruvian Oil Pipeline)



Σχήμα 2.20: Διαρροή Φυσικού Αερίου εξαιτίας κακής συντηρήσεως του αγωγού συστήματος μεταφοράς αυτού [Link 24]



## 2.8 Συμπεράσματα

Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε αυτό το Κεφάλαιο, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το κόστος αγοράς ενός τέτοιου έτοιμου συστήματος, από τις λίγες αλλά ισχυρές δραστηριοποιημένες εταιρείες κατασκευής τέτοιων συστημάτων επιθεώρησης αγωγών, είναι πολύ υψηλό, της τάξεως των χιλιάδων ευρώ, ακόμα και εάν το προς αγορά έτοιμο μοντέλο περιλαμβάνει τον πιο απλό συνδυασμό βασικών χαρακτηριστικών. Αποτέλεσμα του υψηλού κόστους απόκτησης τέτοιων ρομποτικών συστημάτων είναι η μη χρήση τους για μικρές κλίμακες εφαρμογές, οι οποίες όμως είναι σημαντικότερες για την ορθή λειτουργία του συστήματος του εκάστοτε αγωγού.

Επίσης, η μη δυνατότητα προσαρμογής συστημάτων εντός της πλειονότητας των έτοιμων βιομηχανικών ρομποτικών συστημάτων επιθεώρησης αγωγών τα καθιστά μη τροποποιήσιμα, ενώ συγχρόνως όσα ελάχιστα από αυτά επιδέχονται αλλαγές και παραμετροποιήσεις στον εγκατεστημένο εξοπλισμό και λογισμικό τους, οι παραμετροποιήσεις αυτές αφορούν μια μικρή διαθέσιμη ποικιλία συστημάτων που προέρχονται μόνο από τον ίδιο πάροχο αγοράς τους, όπως για παράδειγμα καλύτερης ανάλυσης κάμερα, απαιτώντας φυσικά και το ανάλογο υψηλό διαθέσιμο κεφάλαιο.

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η κατασκευή ενός πρωτότυπου ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών με χαμηλό κόστος και υψηλή δυνατότητα παραμετροποίησης του υπάρχοντος εγκατεστημένου συστήματος, με άμεσο αποτέλεσμα αυτού την τεράστια ευελξία στις εφαρμογές που αυτό θα χρησιμοποιηθεί, να αποτελεί την λύση των παραπάνω προβλημάτων που προκύπτουν. Με βάση τα ανωτέρω και για τον σκοπό αυτό, αποφασίστηκε ο σχεδιασμός, η κατασκευή και ο προγραμματισμός ενός πρωτότυπου ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών για το Πολυτεχνείο Κρήτης στο εργαστήριο Γεωδαισίας και Πληροφορικής των Γεωεπιστημών και συγκεκριμένα στην ερευνητική ομάδα Χωρικών Πληροφοριακών Συστημάτων SenseLab.

Στο επόμενο Κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικά τόσο ο εξοπλισμός που επιλέχθηκε, εγκαταστάθηκε και χρησιμοποιήθηκε, όσο και οι φυσικοί υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν και οδήγησαν στην επιλογή της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής.

# Κεφάλαιο 3

## Υλικό (Hardware)

### 3.1 Επιλογή Κατάλληλου Υλικού Κατασκευής Ρομποτικού Οχήματος

Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών είναι τα εξής:

- i) Τέσσερις κινητήρες από την εταιρεία Pololu και συγκεκριμένα οι HighPower Micro Metal Gearmotor 250:1 , οι οποίοι επιλέχθηκαν έναντι άλλων λόγω του χαμηλού κόστους αλλά και της υψηλής ροπής καθώς και των αριθμό στροφών ανά λεπτό που αποδίδουν σε σχέση με το μικρό μέγεθός τους και το ελαφρύ σε γραμμάρια βάρος τους.
- ii) Ένα ενσωματωμένο σύστημα Raspberry Pi 2 Model B με προβλεπόμενη λειτουργία ως μικροϋπολογιστή-μικροελεγκτή του όλου συστήματος.
- iii) Μια κάμερα Logitech HD Webcam C525, υψηλής ευκρίνειας και αναλύσεως 2-megapixel (με ενσωματωμένο λογισμικό ενίσχυσης αναλύσεως, έως τα 8-megapixel), συνδέσεως μέσω USB 2.0 θύρας, με

δυνατότητα αυτόματης εστίασης σε απόσταση μεγαλύτερη των 7 εκατοστών, καθώς και δυνατοτήτων άμεσης μεγέθυνσης εικόνας και ανάλυσης βιντεοσκόπησης HD 720p.

- iv) Ένας Dual MC33926 Motor Driver for Raspberry Pi από την εταιρεία Pololu. Ο Driver της Pololu επιλέχθηκε έναντι άλλων λόγω της συμβατότητας με τα ενσωματωμένα συστήματα Raspberry, του συνεχούς ρεύματος των 3A (Ampere) που μπορούσε να διοχετεύσει μέσα από τις εξόδους του στους κινητήρες μας καθώς επίσης και της χαμηλής τιμής του σε σχέση με τα πλεονεκτήματά του.
- v) Μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία πολυμερών ιόντων λιθίου (LiPo) 2 κελιών (2 cell) από την εταιρεία Gens Ace, και συγκεκριμένα η μπαταρία GensAce LiPo 2S1P 5300 mAh. Η μπαταρία αυτή επιλέχθηκε λόγω της τάσης της στα 7.4 V , της μέγιστης συνεχής εκφόρτισής της στα 30C, του μεγέθους και της αναλογίας βάρους της σε σχέση με τα χαρακτηριστικά της, καθώς επίσης και της χαμηλής τιμής της βάσει της ποιότητάς της.
- vi) Τέσσερις Ρόδες Pololu, από την εταιρεία Pololu, διαστάσεων 42x19 mm με άνοιγμα εφαρμογής αξόνων μορφής και διαμέτρου D Shaft = 3 mm και με εξωτερικό περίβλημα από καουτσούκ, οι οποίες επιλέχθηκαν βάσει του συντελεστή τριβής του καουτσούκ με τις διάφορες επιφάνειες όπως επίσης και του μικρού μεγέθους τους.
- vii) Τέσσερις μαγνήτες Neodymium N52, φυσικών διαστάσεων 25x10x5 mm (μήκος x πλάτος x πάχος) και βάρους 4 grams (γραμμάρια) ο κάθε ένας
- viii) Ένα καλώδιο Ethernet 10/100 CAT5, καθώς και μια ασύρματη κεραία Logilink Wireless LAN
- ix) Τέσσερα καλώδια ρευμάτων χαλκού διαμέτρου 0.51 mm (Gauge wire N.24) με μέγιστο όριο συνεχούς ρεύματος, της τάξεως των 3.5A (Ampere), για σύνδεση των κινητήρων στις ειδικά κατασκευασμένες υποδοχές του Dual MC33926 Motor Driver.
- x) Δύο τρισδιάστατες εκτυπωμένες, λεπτές επιφάνειες υλικού PETG, διαστάσεων 30x35 mm (χιλιοστά) και πάχους δύο χιλιοστών (2 mm) για την προστασία και ασφάλεια των μαγνητών.

- xi) Ένας σταθεροποιητής-ρυθμιστής τάσης, ο οποίος θα παρέχει μια σταθερή και συνεχή τάση εξόδου στα 5V (Volt), ανεξαρτήτως της τάσεως εισόδου.
- xii) Δύο λαμπτήρες φωτισμού, Cree Led Lights, ισχύος 3W (Watt), καθώς και ίδιος αριθμός ψυκτρών για την αποτελεσματική ψύξη αυτών, διαστάσεων 2.3x2.3x0.5 mm.
- xiii) Ένας microcontroller AtTiny85 για την λειτουργία του συστήματος φωτισμού καθώς και για την μελλοντική προσθήκη αισθητήρων
- xiv) Εξαρτήματα για την δημιουργία κυκλώματος με διακόπτη τύπου Mosfet LRF640N για την λειτουργία του συστήματος φωτισμού.

### 3.1.1 Κινητήρες

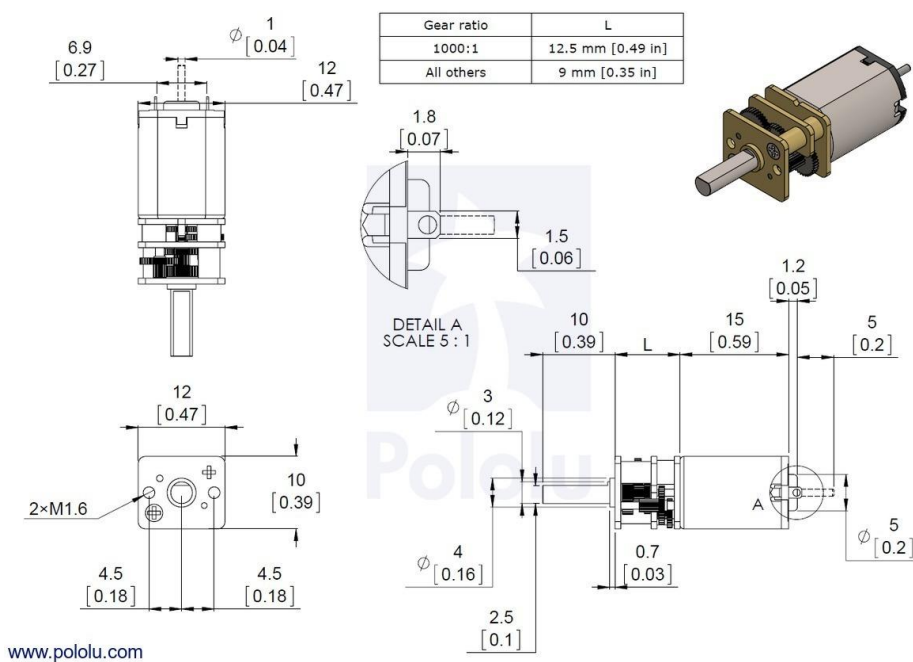
Οι κινητήρες που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι HighPower Micro Metal Gearmotor 250:1, της εταιρείας Pololu (Σχήμα 3.2). Το συγκεκριμένο μοντέλο κινητήρα έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί με τάση στα 6V (Volt), παρ'όλα αυτά μπορεί να λειτουργήσει και με τάση μικρότερη ή και μεγαλύτερη της ονομαστικής του τάσης, με αποτέλεσμα να έχει ένα εύρος λειτουργίας από 3V – 9V (Volt). Βεβαίως οι χαμηλές τάσεις δεν καθίστανται τόσο πρακτικές, ενώ εν αντιθέσει οι πολύ υψηλές μειώνουν την διάρκεια ζωής του κινητήρα. [Link 6]

Οι διαστάσεις των κινητήρων είναι 26x12x10 mm (χιλιοστά) ενώ το βάρος τους καθορίζεται στα 9.5 grams (γραμμάρια) ο κάθε ένας. Παρά το μικρό τους μέγεθος έχουν ιδιαίτερα εντυπωσιακή μέγιστη ροπή η οποία μετράται στα 60 oz/in (0.4237 N\*m), ενώ η μέγιστη ταχύτητά τους υπολογίζεται στις 120 στροφές ανά λεπτό. Η σχέση μετάδοσης των γραναζιών του κινητήρα είναι ακριβώς 248.98:1, ενώ η διάμετρος και η μορφή του άξονά του είναι στα 3mm D Shaft. (Σχήμα 3.1)

Όταν ο κινητήρας περιστρέφεται ελεύθερα χωρίς φορτίο με την μέγιστη ταχύτητα και με μόνες αντιστάσεις την τριβή και τις ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις που δημιουργούνται

στον ίδιο τον κινητήρα, καταναλώνει ρεύμα της τάξεως των 120mA (Free Current).

Όταν ο κινητήρας εφαρμόζει την μέγιστη ροπή του, είτε επειδή εμποδίζεται να κινηθεί εντελώς, είτε επειδή δεν μπορεί να επιταχύνει εξαιτίας του φορτίου το οποίο έχει κατανεμηθεί σε αυτόν, το ρεύμα που καταναλώνει είναι της τάξεως των 1600mA (Stall Current). (Σχήμα 3.3)



Σχήμα 3.1: Σχεδιάγραμμα του κινητήρα Pololu HighPower Micro Metal Gearmotor 250:1 (Pololu) [Link 6]

### Dimensions

<b>Size:</b>	<b>10 × 12 × 26 mm</b>
<b>Weight:</b>	<b>9.5 g</b>
<b>Shaft diameter:</b>	<b>3 mm</b>

Πίνακας 3.1: Διαστάσεις κινητήρα

### General specifications

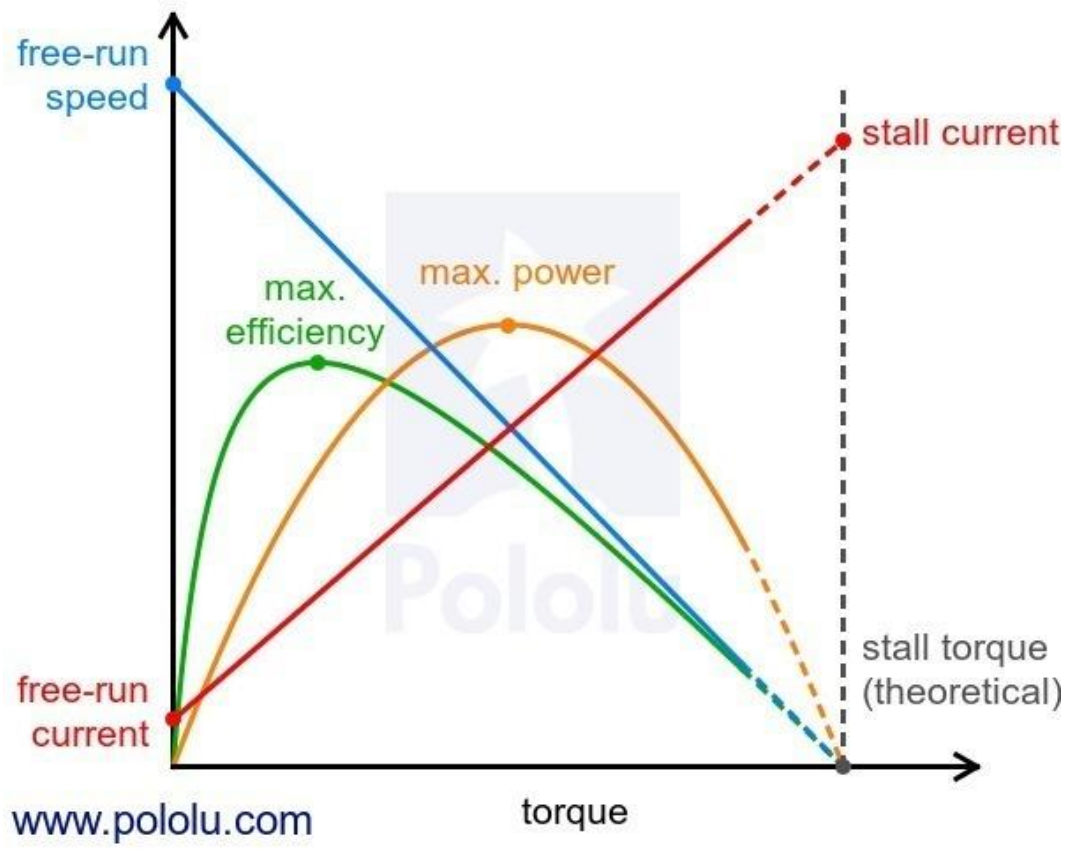
<b>Gear ratio:</b>	<b>248.98:1</b>
<b>Free-run speed @ 6V:</b>	<b>120 rpm</b>
<b>Free-run current @ 6V:</b>	<b>120 mA</b>
<b>Stall current @ 6V:</b>	<b>1600 mA</b>
<b>Stall torque @ 6V:</b>	<b>60 oz·in</b>
<b>Extended motor shaft?:</b>	<b>N</b>
<b>Motor type:</b>	<b>1.6A stall @ 6V (HP)</b>

Πίνακας 3.2: Γενικές ιδιότητες κινητήρα



[www.pololu.com](http://www.pololu.com)

Σχήμα 3.2: HP Micro Metal Gearmotor 250:1 (Pololu) [Link 6]



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα απεικόνισης των καμπυλών απόδοσης του συνεχούς ρεύματος, της ταχύτητας και της δύναμης, ως συναρτήσεις της ροπής του κινητήρα (Pololu)  
[Link 6]

### 3.1.2 Ενσωματωμένο σύστημα Raspberry Pi 2 Model B

Η συσκευή που θα χρησιμοποιηθεί σαν μικροϋπολογιστής στην κατασκευή του ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών είναι ο Raspberry Pi 2 Model B. (Σχήμα 3.5)

Πρόκειται για ένα από τα καλύτερα ενσωματωμένα συστήματα, βάση της τιμής του στην κατηγορία αυτή, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν υπολογιστής και ελεγκτής του όλου συστήματος. Φέρει τετραπύρηνο επεξεργαστή Broadcom

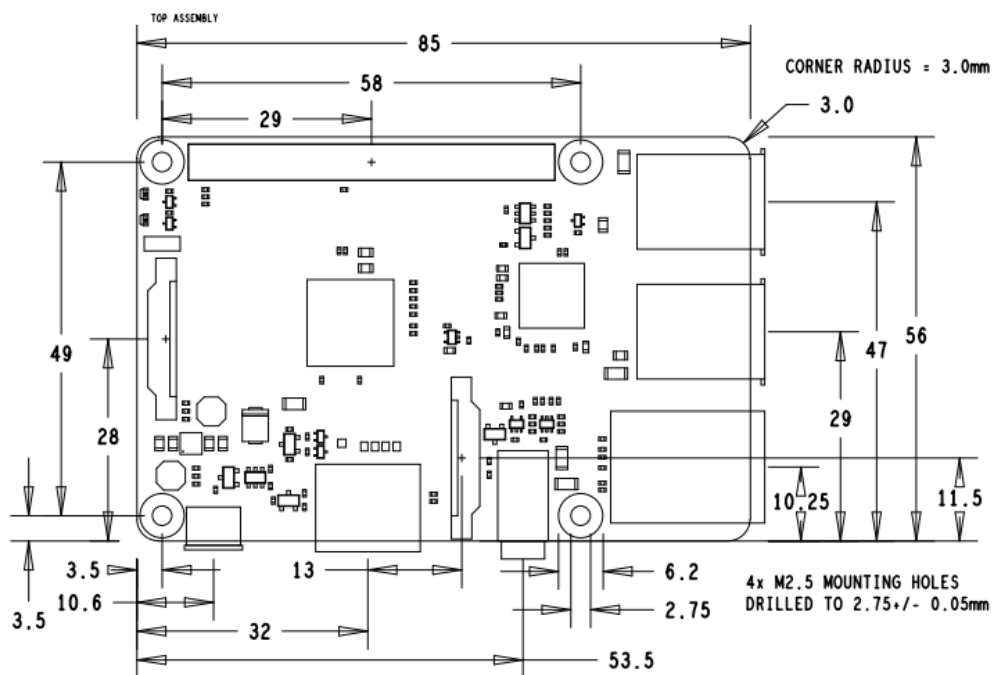
BCM2836 ARMv7 χρονισμένο στα 900MHZ, με την μνήμη RAM να είναι στο 1GB.

Επίσης, το άνω τμήμα του συστήματος φέρει μια 40pin GPIO επεκτασιμότητα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την επιλογή οποιουδήποτε επεκτάσιμου, μέσα από την τεράστια ποικιλία εξωτερικών εξαρτημάτων και επεκτάσιμων που προσφέρει τόσο η ίδια η εταιρεία, όσο και άλλες εταιρείες, που σχεδιάζουν τα προϊόντα τους με βασικό γνώμονα την πλήρη συμβατότητά τους με τους συγκεκριμένους μικροϋπολογιστές.

Στα επιπλέον χαρακτηριστικά του είναι η υποδοχή που φέρει για Micro SD κάρτες αποθήκευσης, η οποία χρησιμεύει για την αποθήκευση των πληροφοριών αλλά και για την φόρτωση του λειτουργικού συστήματος, καθώς και η εξωτερική θύρα οθόνης DSI για σύνδεση του Raspberry με οθόνη αφής. [Link 7]

Στον μικροϋπολογιστή αυτόν μπορεί εύκολα να συνδεθεί κάμερα είτε μέσω ενός εκ των τεσσάρων εγκατεστημένων εξόδων USB, είτε με αγορά ειδικά σχεδιασμένης κάμερας για τους μικροϋπολογιστές της Raspberry η οποία συνδέεται μέσω της ειδικά διαμορφωμένης για τον σκοπό αυτό, CSI εγκατεστημένης θύρας φωτογραφικής μηχανής με την δυνατότητα τόσο της καταγραφής του αρχείου στην μνήμη όσο και της ζωντανής μετάδοσής του πίσω στον χρήστη μέσω ειδικού συστήματος. Τέλος, έχει εγκατεστημένη υποδοχή Ethernet Port 10/100 βύσματος RJ45 καθώς και ειδική είσοδο για HDMI, ενώ η τροφοδοσία ρεύματος στο σύστημα πραγματοποιείται μέσω καλωδίου Micro USB. Οι διαστάσεις του σε φυσικό μέγεθος είναι 85x56 mm (μήκος x πλάτος σε χιλιοστά), ενώ το βάρος του υπολογίζεται στα 45 grams (γραμμάρια). (Σχήμα 3.4) [Link 8]





Σχήμα 3.4: Σχεδιάγραμμα του ενσωματωμένου συστήματος Raspberry Pi 2 Model B  
[Link 8]



Σχήμα 3.5: Ενσωματωμένο σύστημα Raspberry Pi 2 Model B

### 3.1.3 Κάμερα Logitech HD Webcam C525

Η κάμερα που επιλέχθηκε για την αποτύπωση και βιντεοσκόπηση του περιβάλλοντος έρευνας και επιθεώρησης, είναι η Logitech HD WebCam C525. (Σχήμα 3.6) Πρόκειται για μια υψηλής ευκρίνειας κάμερα η οποία φέρει αισθητήρα αναλύσεως 2-megapixel, ενώ επίσης έχει εγκατεστημένο το λογισμικό Logitech Fluid Crystal™ Technology. Το λογισμικό αυτό αποτελεί έναν αλγόριθμο, οποίος ρυθμίζει αυτόματα το frame rate (ρυθμός των καρέ της εικόνας), το χρώμα και την ευκρίνεια ώστε να εξουδετερώσει τις παραμέτρους εκείνες που έχουν ως αποτέλεσμα την χαμηλή ποιότητα ανάλυσης μιας εικόνας, είτε στατικής είτε κινούμενης, συμπεριλαμβανομένου και του φαινομένου του χαμηλού φωτισμού του περιβάλλοντος λήψεως αυτών. Η ενσωμάτωση του συγκεκριμένου λογισμικού στην κάμερα έχει ως αποτέλεσμα ο αισθητήρας ανάλυσης της κάμερας κατά την διάρκεια λήψης στατικών εικόνων να ενισχύεται έως της τάξεως των 8-megapixel.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της κάμερας είναι η δυνατότητα αυτόματης εστίασης της εικόνας σε απόσταση μεγαλύτερη των 7 εκατοστών, έχοντας ως αποτέλεσμα την καλύτερη ανάλυση και αποτύπωση της εικόνας. Στα χαρακτηριστικά της περιλαμβάνεται επίσης η δυνατότητα λήψης βίντεο ανάλυσης High Definition και συγκεκριμένα 1280 x 720 pixel, με ταυτόχρονη λήψη φωτογραφιών αναλύσεως 2-megapixel, καθ'όλη την διάρκεια της βιντεοσκόπησης. Ένα ακόμα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της κάμερας είναι η δυνατότητα καταγραφής μονοφωνικού ήχου μέσω του ενσωματωμένου μικροφώνου που είναι εγκατεστημένο σε αυτή. [Link 9]

Η σύνδεση της κάμερας με το ενσωματωμένο σύστημα Raspberry Pi 2 Model B καθώς και η μετάδοση των δεδομένων σε αυτό, επιτυγχάνεται μέσω της θύρας USB 2.0. Τέλος, εάν ο χρήστης το επιθυμεί, υπάρχει η δυνατότητα άμεσης μεγέθυνσης της εικόνας λήψεως, καθώς επίσης και η δυνατότητα πλήρης οριζόντιας περιστροφής της κάμερας, κατά κλίση δηλαδή 360 μοιρών, μέσω της ειδικής βάσης στην οποία είναι τοποθετημένη αυτή.



Σχήμα 3.6: Logitech HD WebCam  
C525

### 3.1.4 Οδηγός συστήματος Κινητήρων Dual MC33926 Motor Driver for Raspberry Pi

Πρόκειται για ένα ειδικά σχεδιασμένο σύστημα επεκτασιμότητας από την εταιρεία της Pololu, το οποίο λειτουργεί με την σύνδεσή του στην ειδική υποδοχή 40pin GPIO του μικροϋπολογιστή της Raspberry και μας επιτρέπει να ελέγχουμε ένα ζεύγος διπλής κατευθύνσεως και συνεχούς ρεύματος κινητήρων (DC motors). (Σχήμα 3.7) Είναι συμβατό με τα μοντέλα των μικροϋπολογιστών Raspberry Pi Model B, Raspberry Pi Model A και Raspberry Pi 2 Model B. Η πλακέτα επέκτασης αυτή, η οποία ορίζεται και διαφορετικά ως Οδηγός, χρησιμοποιεί ένα ζεύγος οδηγών οχήματος (Motor Driver) FreeScale MC33926, τα οποία λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα από 5 έως 28 Volt, ενώ μπορεί να προσφέρει σε κάθε ένα από τα δύο αυτά κανάλια, συνεχές ρεύμα της τάξεως των 3A (Ampere), με δυνατότητα αύξησης του συνεχούς ρεύματος, εάν οι συνθήκες το απαιτούν και για λίγα δευτερόλεπτα, στα 5A (Ampere), μέχρις ότου η εγκατεστημένη θερμική προστασία του συστήματος αρχίσει να μειώνει το ρεύμα. Επίσης περιλαμβάνει ένα αντίστροφο κύκλωμα προστασίας της μπαταρίας και των λογικών πυλών (Logic Gates), το οποίο μειώνει τον αριθμό των I/O ακίδων που απαιτούνται για τον αποτελεσματικότερο έλεγχο των ICs του Οδηγού.

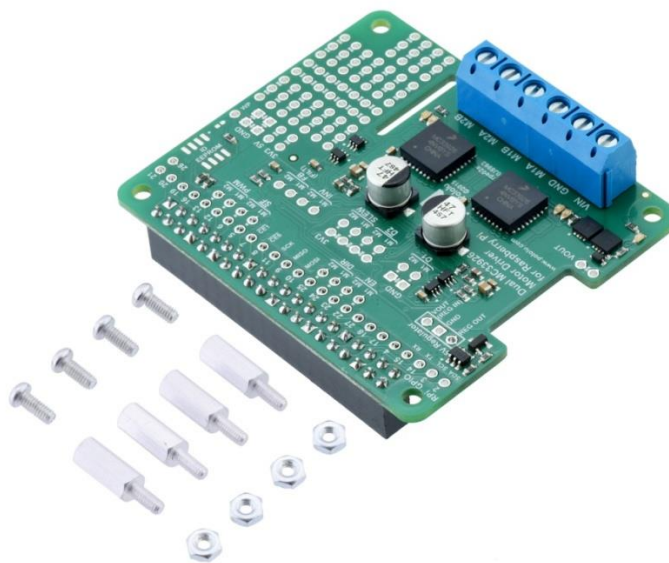
Το σύστημα Dual MC33926 Motor Driver, για να καταφέρει τον έλεγχο των κινητήρων, χρησιμοποιεί έξι GPIO ακίδες, κάνοντας παράλληλη χρήση των εγκατεστημένων εξόδων PWM (pulse width-modulation) του Raspberry, με λειτουργία έως τα 20 kHz, η οποία είναι με υπερήχους για να επιτρέπει την πιο αθόρυβη λειτουργία των κινητήρων, ενώ επίσης χρησιμοποιεί δύο ακόμα GPIO ακίδες ώστε να λαμβάνει τα δεδομένα της καταστάσεως των εξόδων των οδηγών(drivers). Εάν οι προεγκατεστημένες αντιστοιχίσεις αυτές δεν είναι βολικές για τον χρήστη, μπορούν να επιδεχθούν αλλαγή και παραμετροποίηση ώστε να προσαρμοστούν αναλόγως, όπως επίσης αλλαγή και μετέπειτα προσαρμογή μπορούν να υποστούν και άλλες είσοδοι και εξοδοί ελέγχου οι οποίοι είναι προσβάσιμοι στην πλακέτα, για πιο εξειδικευμένες εφαρμογές.

Ο προγραμματισμός της πλακέτας Οδηγού μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα από την γλώσσα προγραμματισμού και μέσα από τις βιβλιοθήκες της Python.

Στην προεπιλεγμένη κατάσταση, το σύστημα του Οδηγού και ο μικροϋπολογιστής της Raspberry τροφοδοούνται με ρεύμα ξεχωριστά μιας και ο μικροϋπολογιστής λειτουργεί με εφαρμοζόμενη σε αυτόν τάση των ακριβώς 5V (Volt) την οποία και λαμβάνει μέσω της Micro USB θύρας τροφοδοσίας του, ενώ αντίθετα ο Οδηγός, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μπορεί σε να λειτουργήσει σε ένα ευρύ φάσμα τάσεως από 5 έως 28 V (Volt).

Σε εναλλακτική κατάσταση, το σύστημα του Οδηγού μπορεί να τροφοδοτήσει απευθείας με ρεύμα τον μικροϋπολογιστή της Raspberry με την σύνδεση και χρήση ενός κατάλληλου ρυθμιστή τάσης στις τρεις στο σύνολο διαμπερείς οπές που παρέχει ο Οδηγός για τον σκοπό αυτό, επιτρέποντας την παράλληλη τροφοδότηση με ρεύμα του μικροϋπολογιστή, μέσα από την τροφοδοσία των κινητήρων. Σε περίπτωση που η παροχή ρεύματος στους κινητήρες είναι συνδεδεμένη ανάποδα, ένα κύκλωμα προστασίας αντίθετης τάσης προστατεύει το σύστημα. Η πλακέτα περιλαμβάνει επίσης λογικές πύλες οι οποίες επιτρέπουν την λειτουργία της κινήσεως και της πεδήσεως των δύο MC33926 οδηγών οχήματος, με μόνο δύο ακίθες ελέγχου ανά κινητήρα, αυτές του PWM και της κατευθύνσεως.

Τέλος, οι φυσικές διαστάσεις της πλακέτας επέκτασης Dual MC33926 Motor Driver είναι της τάξεως των 65x56 cm (εκατοστών), ενώ το βάρος της υπολογίζεται στα 14 grams (γραμμάρια). [Link 10]



Σχήμα 3.7: Συναρμολογημένο Dual MC33926 Motor Driver for Raspberry Pi

### 3.1.5 Μπαταρία Gens Ace 2S1P 5300 mAh 7.4 V

Η μπαταρία που επιλέχθηκε είναι η GensAce LiPo 2S1P 5300 mAh της εταιρείας της Gens Ace (Σχήμα 3.8). Πρόκειται για μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία πολυμερών ιόντων λιθίου, η οποία αποτελείται από στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά αλλά και εν παραλλήλω ώστε να αποδόσει την επιθυμητή τάση, σε μορφή θήκης η οποία την καθιστά ελαφρύτερη και λιγότερο άκαμπτη. Η συγκεκριμένη μπαταρία LiPo αποτελείται από δύο κελιά σε σειρά (2Series) και ένα κελί εν παραλλήλω (1Parallel), χαρακτηρίζοντάς την ως μπαταρία δύο κελιών (2-cell battery). Η χωρητικότητά της είναι στα 5300 mAh (μili-Άμπερ-ώρα) με τάση στα 7.4 Volt. Για την ακριβέστερη και πιο σωστή περιγραφή των χαρακτηριστικών μιας μπαταρίας, εκφράζουμε το ρεύμα εκφόρτισης χρησιμοποιώντας μια μεταβλητή, και συγκεκριμένα την μεταβλητή C. Η μεταβλητή C, αποτελεί το μέτρο του ρυθμού κατά τον οποίο μια μπαταρία αποφορτίζεται σε σχέση με την μέγιστη χωρητικότητά της. Με απλά λόγια εκφράζει το πόσο ρεύμα μπορεί να δώσει η μπαταρία. Ο υπολογισμός του ποσού ρεύματος που μπορεί να αντληθεί από την μπαταρία πραγματοποιείται με τον πολλαπλασιασμό του αριθμού της μεταβλητής C με την χωρητικότητα της μπαταρίας. Το τελικό αποτέλεσμα διαιρείται με το 1000 ώστε η τελική μονάδα μέτρησής μας να μετατραπεί σε A (Αμπέρ). Η μέγιστη συνεχής εκφόρτισή (Max Continuous Discharge) της συγκεκριμένης μπαταρίας κυμαίνεται στα 30C (159A) , ενώ εάν το απαιτούν οι συνθήκες μπορεί να φτάσει για μικρή χρονική διάρκεια στη μέγιστη τιμή εκφόρτισης (Max Burst Discharge) των 60C (318A). Οι φυσικές διαστάσεις της μπαταρίας είναι 138.5x46.35x24.5 mm (μήκος x πλάτος x πάχος), ενώ το βάρος της κυμαίνεται στα 280 grams (γραμμάρια). [Link 11]



Σχήμα 3.8: Μπαταρία GensAce LiPo 2S1P 5300 mAh

### 3.1.6 Neodymium Magnets N52

Οι μαγνήτες Νεοδυμίου, που συνήθως ονομάζονται και μαγνήτες νεοδυμιο-σιδηρο-βορίου (NdFeB), είναι οι ισχυρότεροι μαγνήτες στον πλανήτη, έχοντας την μέγιστη ένταση μαγνητικού πεδίου, με το μειονέκτημα όμως ότι η πανίσχυρη ελκτική ισχύς τους μειώνεται απότομα όσο η απόσταση αυξάνεται ακόμα και όταν η αύξηση αυτή είναι κάποιον χιλιοστών. Η ισχύς τους εξαρτάται του μεγέθους, του σχήματος αλλά και του αριθμού που φέρει ο κάθε μαγνήτης. Οι μαγνήτες Νεοδυμίου με αριθμό N52 είναι οι ισχυρότεροι της οικογένειας των μαγνητών αυτών. (Σχήμα 3.9)

Οι συγκεκριμένοι μαγνήτες επιλέχθηκαν στο συγκεκριμένο μέγεθος, διότι σύμφωνα με ευρεθέντα ερευνητικά δεδομένα από την εταιρεία της K&J Magnetics [Link 12], η ελκτική δύναμη του καθενός μαγνήτη ξεχωριστά μετρούμενη σε μεταλλική επιφάνεια πάχους 3mm και σε πλήρη επαφή με αυτήν, αντιστοιχεί σε 18.45 lb (8.36 κιλά περίπου), ενώ σε απόσταση 3mm από αυτήν η ελκτική δύναμη του αντιστοιχεί σε 3.75 lb (1.7 κιλά) και σε απόσταση 4 mm η ελκτική του δύναμη αντιστοιχεί σε 2.63 lb (1.2 κιλά περίπου), το οποίο με βάση τους φυσικούς υπολογισμούς, αναφορά των οποίων θα γίνει στην επόμενη ενότητα, και το συνολικό βάρος του ρομποτικού μας συστήματος το οποίο αντιστοιχεί σε 4 γραμμάρια (0.004 κιλά), το πλήθος και τα χαρακτηριστικά των μαγνητών αυτών μας ικανοποιούν πλήρως ώστε να επιτύχουμε ανάβαση σε μεταλλική επιφάνεια πάχους άνω των 2.5 mm και γωνίας 90 μοιρών.

Επίσης ένα ακόμα χαρακτηριστικό τους, εκτός των μικρών διαστάσεών τους και την τεράστιας ελκτικής τους δύναμης, το οποίο και οριστικοποίησε την επιλογή των συγκεκριμένων διαστάσεων και τύπου μαγνητών, είναι το μικρό σε γραμμάρια βάρος τους.

Σχήμα 3.9: Μαγνήτες νεοδυμιο-σιδηρο-βορίου (NdFeB), Neodymium N52



### 3.1.7 Καλωδιώσεις και Φωτισμός

#### **i) Καλώδιο Ethernet**

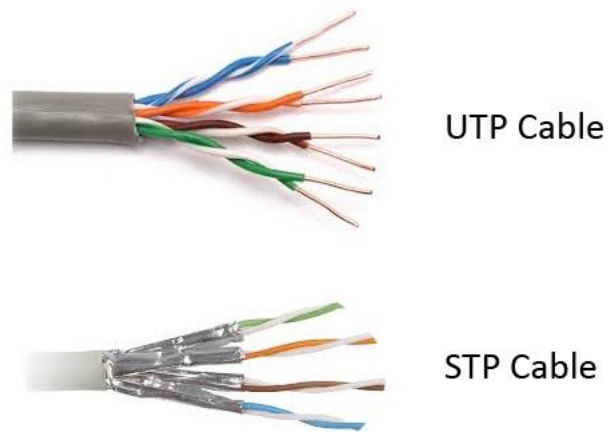
Τα καλώδια Ethernet χρησιμοποιούνται ευρέως στα δίκτυα υπολογιστών και έχουν ονομαστεί κατα αυτόν τον τρόπο εξαιτίας του πρωτοκόλου Ethernet που χρησιμοποιούν. Μέσω των καλωδίων Ethernet επιτυγχάνεται μετάδοση σήματος υψηλής πιστότητας μεταξύ ηλεκτρονικών συσκευών και συσκευών τηλεπικοινωνίας. Διακρίνονται σε κατηγορίες, από την κατηγορία 3 (CAT 3) έως και την κατηγορία 7 (CAT 7) αναλόγως των προδιαγραφών που έχουν και της πιστότητας μεταδόσεως του σήματος που προσφέρουν, σε γενιές, ανάλογα την αναβάθμιση της κάθε κατηγορίας με το πέρασμα των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας, όπως για παράδειγμα, κατηγορίας 5 (CAT5) 5<sup>ης</sup> γενιάς (Σχήμα 3.11), κατηγορίας 6 (CAT 6) 7<sup>ης</sup> γενιάς κλπ. , καθώς και του γεγονότος εάν είναι απλά ή ενισχυμένα. Η διαφορά ενός απλού με ενός ενισχυμένου καλωδίου Ethernet έγκειται στο γεγονός ότι το ενισχυμένο καλώδιο περιέχει εσωτερικά υλικά ώστε να μειώνεται ο θόρυβος που προκαλείται από το περιβάλλον.

Τα καλώδια Ethernet διακρίνονται επίσης, με βάση την ταχύτητα και τον ρυθμό της μετάδοσης των δεδομένων, σε απλό Ethernet με ταχύτητες έως 10 MBps (MegaBytes per second), σε Fast Ethernet με ταχύτητες έως 100MBps, σε Gigabit Ethernet με ταχύτητες έως 1Gbps (Gigabyte per second) και τέλος σε 10 Gigabit Ethernet με ταχύτητες έως 10 Gbps. Μια ακόμη ξεχωριστή κατηγορία Ethernet είναι εκείνα τα οποία ονομάζονται Crossover.

Τα καλώδια Crossover χρησιμοποιούνται στην περίπτωση κατά την οποία θέλουμε να συνδέσουμε δύο υπολογιστές μεταξύ τους και να δημιουργήσουμε ένα πολύ μικρό δίκτυο (τοπικό δίκτυο) μεταφέροντας αρχεία. Οι άκρες όλων των καλωδίων Ethernet καταλήγουν σε ένα RJ45 βύσμα, ενώ στο εσωτερικό των καλωδίων Ethernet



χρησιμοποιούνται είτε κοινά μικρά καλώδια χαλκού με αθωράκιστα (καλώδια UTP) ή θωρακισμένα (καλώδια STP) συνεστραμμένα ζεύγη αγωγών ή σε διαφορετική περίπτωση οπτικές ίνες. (Σχήμα 3.10) [Link 13]



Σχήμα 3.10: Καλώδιο Ethernet UTP και STP

Ένα από τα μειονεκτήματα του καλωδίων Ethernet είναι το γεγονός ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άπειρο μήκος, με αποτέλεσμα σε μήκη άνω των 100 περίπου μέτρων να παρατηρείται εξασθένιση του σήματος.

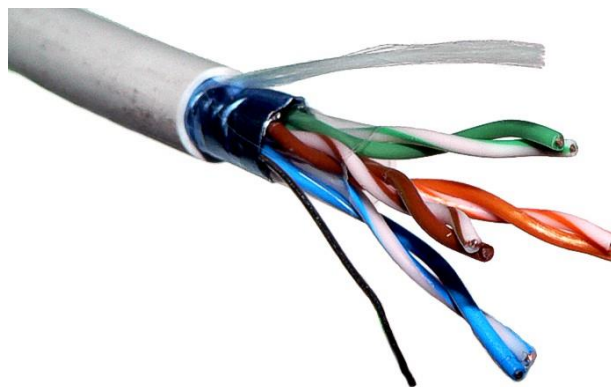




Σχήμα 3.11: Καλώδιο Ethernet Cat5

### **ii) Καλώδια Ρευμάτων**

Τα καλώδια ρευμάτων που θα χρησιμοποιηθούν αποτελούσαν την εσωτερική καλωδίωση ενός καλωδίου Ethernet (Σχήμα 3.12). Πρόκειται για μονόκλιωνα καλώδια τα οποία έχουν διάμετρο περίπου 0.51 mm, η οποία αντιστοιχεί σε καλώδια με αριθμό Gauge N.24, με μέγιστο όριο συνεχούς ρεύματος της τάξεως των 3.5A (Ampere).



Σχήμα 3.12: Εσωτερική καλωδίωση ενός καλωδίου Ethernet

### **iii) Φωτισμός - Cree Led Lights**

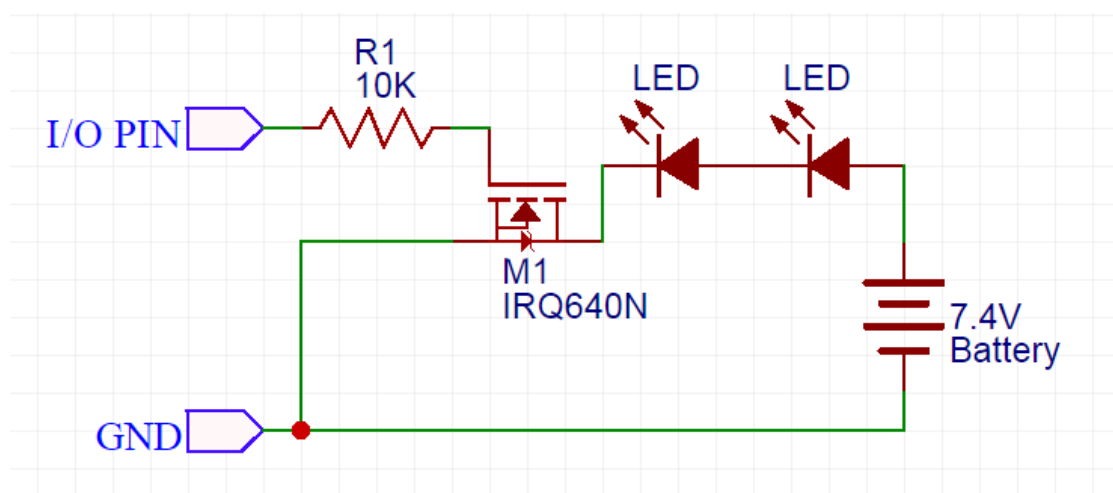
Στο ρομποτικό σύστημα επιθεώρησης αγωγών θα προστεθούν επίσης δύο Cree Led Lights, ισχύος 3W, συνδεδεμένα σε σειρά. Οι συγκεκριμένες λάμπες φωτισμού λειτουργούν με ρεύμα  $I_F = 700\text{mA}$  και τάση  $V_F = 3.3 - 4\text{V}$ . Επίσης έχουν δύναμη φωτός (όπως αυτή γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι) της τάξεως των 18.5 – 20.5 lm (Lumen), ενώ το χρώμα εκπομπής φωτός τους είναι καθαρό λευκό χρώμα υψηλής φωτεινότητας, με την θερμοκρασία χρώματος να είναι της τάξεως των 6000 – 6500 στην κλίμακα Kelvin (Σχήμα 3.13). Τέλος, η γωνία εκπομπής φωτός τους είναι στις 60 μοίρες. [Link 14]



Σχήμα 3.13: Λαμπτήρας Cree Led Light ισχύος 3W

#### iv) Κύκλωμα Φωτισμού λαμπτήρων

Στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 3.14), φαίνεται η συνδεσμολογία που υλοποιήθηκε για την λειτουργία του συστήματος φωτισμού του ρομποτικού οχήματος.



Σχήμα 3.14: Συνδεσμολογία συστήματος φωτισμού

Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ένας microcontroller ATTiny85 για την λειτουργία του συστήματος φωτισμού, καθώς και την μελλοντική προσθήκη αισθητήρων, που δεν υποστηρίζονται από το ενσωματωμένο σύστημα Raspberry Pi 2 Model B, προσφέροντας καλύτερη επεκτασιμότητα.

### **3.2 Φυσικοί Υπολογισμοί**

Τα πρώτα ερωτήματα που δημιουργούνται κατά την κατασκευή ενός ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών με δυνατότητα προσκόλλησης και κάθετης ανάβασης σε μεταλλικές επιφάνειες με την χρήση και εγκατάσταση ειδικών μαγνητών Νεοδυμίου, είναι του πόσο ισχυρή θα πρέπει να είναι η δύναμη έλξης, των εγκατεστημένων σε αυτό μαγνητών, με την μεταλλική επιφάνεια, καθώς και πόση δύναμη απαιτείται για να κρατηθεί το ρομποτικό σύστημα με ασφάλεια προσκολλημένο στην επιφάνεια.

Η ελκτική δύναμη των μαγνητών Νεοδυμίου, μειώνεται με την αύξηση με απόστασής τους από την μεταλλική επιφάνεια και εφόσον το ρομποτικό μας σύστημα δεν θα είναι προσκολλημένο σε αυτή θα πρέπει αρχικά να υπολογισθεί η συνολική απόσταση μεταξύ των εγκατεστημένων μαγνητών και της μεταλλικής πλάκας. Η απόσταση αυτή στους σχεδιαστικούς υπολογισμούς μας υπολογίζεται στα 3 mm και προκύπτει ως εξής.

Ο κάθε τροχός έχει διάμετρο 42 mm, άρα η ακτίνα του είναι στα 21 mm. Από την στιγμή που θα εγκατασταθεί σε αυτόν ο άξονας του κινητήρα στην κατάλληλη υποδοχή που έχει, λαμβάνει χώρα η τοποθέτηση σε κάθε κινητήρα ενός βραχίονα από πλαστικό, ο οποίος θα βιδωθεί στις υποδοχές που θα σχεδιαστούν κατά τον αρχικό σχεδιασμό του σκελετού του ρομποτικού συστήματός μας. Η απόσταση μεταξύ του σημείου που θα βιδωθεί ο βραχίονας πάνω στον βασικό σκελετό, με το κέντρο του τροχού, είναι το μισό του ύψους του τοποθετημένου στον τροχό κινητήρα, δηλαδή  $10/2 = 5$  mm. Για να καταφέρουν οι μαγνήτες να διατηρηθούν εγκατεστημένοι στον σκελετό του οχήματός μας παρά τις ελκτικές δυνάμεις, θα τοποθετηθούν σε ειδικά σχεδιασμένες θήκες οι οποίες θα φτιαχθούν σύμφωνα με τις διαστάσεις των μαγνητών

Επειδή οι τροχοί έχουν ακτίνα μόλις 21 mm, η επιλογή μαγνητών με πάχος στα 5 mm είναι η πλέον κατάλληλη οπότε και οι υποδοχές θα σχεδιαστούν με πάχος ενός χιλιοστού ακόμα για την καλύτερη εφαρμογή των μαγνητών εντός αυτών, δηλαδή στα 6 mm. Επιπλέον για την ασφάλεια και την ολοκλήρωση της εγκατάστασης των μαγνητών θα τοποθετηθεί πάνω σε αυτούς βιδωτή επιφάνεια υλικού PETG και πάχους 2 mm. Από τους υπολογισμούς αυτούς και χωρίς ακόμα τον υπολογισμό του πάχους του βασικού σκελετού του ρομποτικού συστήματός μας προκύπτει ότι, εάν

θεωρητικά το πάχος του σκελετού μας ήταν 1mm η απόσταση των μαγνητών από την επιφάνεια της μεταλλικής πλάκας θα ήταν:  $21\text{ mm} - 5\text{ mm} - 6\text{ mm} - 2\text{ mm} - 1\text{ mm} = 7\text{ mm}$  (χιλιοστά).

Με τον τρόπο αυτό, αλλάζοντας πλέον μόνο τις διαστάσεις του βασικού σκελετού μπορούμε να ορίσουμε την απαιτούμενη απόσταση μαγνητών και μεταλλικής επιφάνειας, με αποτέλεσμα σχεδιάζοντας τον βασικό σκελετό του ρομποτικού οχήματος, με πάχος στα 4 mm, η τελική απόσταση των εγκατεστημένων μαγνητών σε σχέση με την μεταλλική επιφάνεια, να είναι της τάξεως των 3 mm, με την δυνατότητα μείωσης ή αύξησής της αναλόγως των συνθηκών, να είναι ευκόλως εφικτή.

Το μέτρο της δύναμης που απαιτείται για να κρατήσει το ρομποτικό μας σύστημα προσκολλημένο στην επιφάνεια εξαρτάται από τις διαστάσεις του μοντέλου μας, την γεωμετρία του, το συνολικό βάρος του, την ελκτική δύναμη των μαγνητών καθώς και το υλικό κατασκευής του εξωτερικού περιβλήματος των τροχών ώστε να παρέχει αρκετή τριβή για να αποφευχθούν καταστάσεις ολίσθησης του τροχοφόρου οχήματος.

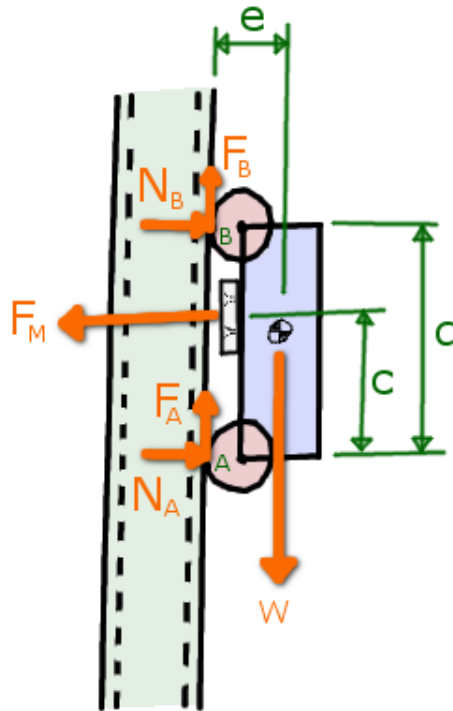
Αρχικά ας υποθέσουμε ότι το ρομποτικό σύστημα βρίσκεται ακίνητο και προσκολλημένο πάνω σε μία κάθετη μεταλλική επιφάνεια με αποτέλεσμα το σύνολο των δυνάμεων στον κάθετο άξονα να ισοδυναμεί με μηδέν. Το βάρος του αυτοκινήτου είναι αντίθετο της τριβής των ελαστικών του τροχού, η οποία δύναμη τριβής ισχυροποιείται αναλόγως της δύναμης του μαγνητή ο οποίος βοηθά την προσκόλληση του οχήματος στην μεταλλική επιφάνεια. Όσο πιο ισχυρός είναι ο μαγνήτης τόσο ισχυρότερη θα είναι και η δύναμη της τριβής. Εάν δεν γνωρίζουμε τον ακριβή συντελεστή τριβής μεταξύ των δύο επιφανειών, συνεχίζουμε τους υπολογισμούς μας με εμπειρικό γνώμονα, η συνολική δύναμη έλξης που παρέχουν οι εγκατεστημένοι μαγνήτες μας να είναι 1,5 έως 2,5 φορές μεγαλύτερη από το συνολικό βάρος του οχήματός μας. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να αντιμετωπίσουμε το προκύπτον φαινόμενο της ολίσθησης.

Ένα ακόμη φαινόμενο που επηρεάζει την ανάβαση και μπορεί να προκαλέσει την πτώση και πιθανή καταστροφή του ρομποτικού οχήματος, είναι εκείνο της αποκόλλησης του μοντέλου από την επιφάνεια λόγω της προσπάθειας κίνησης και περιστροφής του επάνω σε αυτήν. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την διάρκεια μιας στροφής, ενώ ο μαγνήτης προσπαθεί να περιστρέψει το σύστημα

προς μια κατεύθυνση με φορά για παράδειγμα ίδια με αυτή των δεικτών του ρολογιού, το βάρος του οχήματος προσπαθεί να το στρέψει προς την αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή με φορά αντίθετης αυτής των δεικτών του ρολογιού, με την ενδεχόμενη αποκόλληση και πτώση του οχήματος, η οποία μπορεί επίσης να προκληθεί και εξαιτίας της επιταχυνόμενης κίνησης του οχήματος πάνω στην επιφάνεια κατά την προσπάθεια των δυνάμεων ροπής των κινητήρων να υπερνικήσουν τις αντίθετες σε αυτών δυνάμεις, όπως το βάρος του οχήματος. Η αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων γίνεται με την επιλογή κατάλληλης γεωμετρίας και διαστάσεων του οχήματος (ιδιαίτερος του ύψους του), από τα σημεία τοποθέτησής του φερόμενου εξοπλισμού ώστε το κέντρο βάρους του οχήματος να είναι σταθερισμένο, καθώς επίσης και από τα σημεία εγκατάστασης των μαγνητών, τα οποία πρέπει να τοποθετηθούν με τρόπο ώστε να κρατήσουν το κέντρο βάρους του ρομποτικού συστήματος όσο το δυνατόν πιο κοντά στην μεταλλική επιφάνεια.

Η συνέχεια των φυσικών υπολογισμών μας περιλαμβάνει την επιλογή κατάλληλων κινητήρων, οι οποίοι θα μπορούν να προσφέρουν υψηλές τιμές ροπής για να υπερνικήσουν τις αντίθετες σε αυτών δυνάμεις, όπως το βάρος του οχήματος, καθώς και αρκετά ικανοποιητικό αριθμό στροφών ανά λεπτό, συνυπολογίζοντας πάντοτε, τόσο το μέγεθος και το βάρος τους, όσο και την τιμή του κόστους αγοράς τους.

Για να επιλέξουμε τους κινητήρες πρέπει να υπολογίσουμε, έστω σε θεωρητικό επίπεδο το αναμενόμενο βάρος του οχήματός μας. Στο παρακάτω σχέδιο (Σχήμα 3.15) βλέπουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα όταν αυτό βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση προσκολλημένο σε μια μεταλλική επιφάνεια.



Σχήμα 3.15: Ασκούμενες δυνάμεις στο ρομποτικό όχημα όταν αυτό βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση

Παρατηρούμε ότι η δύναμη που ασκείται στον κάθετο άξονα και θα πρέπει να υπερνικηθεί, είναι το βάρος του οχήματος, ενώ επίσης κατά την μετέπειτα κίνησή του θα υπάρχει και η δύναμη της τριβής μεταξύ της επιφάνειας των τροχών και της μεταλλικής επιφάνειας. Κατά την αρχική σταθερή φάση, στην οποία η δύναμη της ροπής καλείται να ξεπεράσει εκείνη του βάρους του οχήματος πραγματοποιούμε μια ανάλυση των δυνάμεων με θετική φορά προς τα πάνω.

Εάν υποθέσουμε ότι το βάρος του οχήματός μας είναι 1 κιλό και για να βρίσκεται το σύστημα σε ισορροπία, πρέπει:

$$\Sigma F = F_T - F_w = 0 \Rightarrow F_T = F_w \quad (1)$$

Η δύναμη του βάρους  $F_w$  υπολογίζεται ως:

$$F_w = W = m \cdot g, \text{ όπου } g: \text{ η επιτάχυνση της βαρύτητας με μέση τιμή } 9,81 \text{ m/sec}^2.$$

Συνεπώς αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές, το αποτέλεσμα της δύναμης του βάρους υπολογίζεται σε  $F_w = W = m \cdot g = 1 \cdot 9.81 \text{ (kg} \cdot \text{m/sec}^2) = 9.81 \text{ N (Newton)}$  (2)

Αντικαθιστώντας το αποτέλεσμα της εξίσωσης (2), στην εξίσωση (1), προκύπτει ότι  $F_T = 9.81 \text{ N}$  (Newton), δηλαδή η δύναμη της ροπής  $F_T$  θα πρέπει να ισούται με  $9.81 \text{ N}$  (Newton) προκειμένου το σύστημα να παραμένει σταθερό.

Η ροπή στο σύστημα μας υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$\tau = F_T * r$  (3), όπου  $F_T$ : το διάνυσμα της δύναμης (N) , και  $r$  : το διάνυσμα μετατόπισης (m), από το σημείο εκ του οποίου μετράτε η ροπή, με πιο σύνηθες εκείνο του άξονα περιστροφής, έως το σημείο που εφαρμόζεται η δύναμη.

Το διάνυσμα της μετατόπισης  $r$  στην εξεταζόμενη περίπτωση αυτή είναι ίσο με την τιμή της ακτίνας του εγκατεστημένου στο όχημα τροχού.

Υποθέτοντας ότι το πειραματικό όχημά μας έχει εγκατεστημένους τροχούς διαμέτρου  $4 \text{ mm}$ , και κατά συνέπεια ακτίνας  $2 \text{ mm}$ , η τιμή της μεταβλητής  $r$  ορίζεται ως:

$$r = 2 \text{ mm} = 0.02 \text{ m}$$

Αντικαθιστώντας την τιμή  $r$  στην εξίσωση (3), έχουμε το παρακάτω αποτέλεσμα:

$$\tau = F_T * r \Rightarrow \tau = 9.81 * 0.02 \text{ (N*m)} = 0.1962 \text{ N*m}$$

Για να υπάρξει ισορροπία λοιπόν στο σύστημα αυτό θα πρέπει, η απαιτούμενη και ασκούμενη μέσω των εγκατεστημένων κινητήρων, συνολική ροπή να είναι της τάξεως των  $\tau = 0.1962 \text{ N*m}$ , η οποία θα διαμοιρίζεται ανάλογα των αριθμό αυτών, με αποτέλεσμα, εάν το μοντέλο μας λειτουργεί έχοντας δύο κινητήρες η απαιτούμενη ροπή του καθενός να ισούται με  $0.1962 / 2 = 0.0981 \text{ N*m}$  , ενώ στην περίπτωση της λειτουργίας του με τέσσερις κινητήρες, η απαιτούμενη ροπή του καθενός να ισούται με  $0.1962 / 4 = 0.04905 \text{ N*m}$ .

Οι τιμές αυτές καθορίζουν την ελάχιστη απαιτούμενη ροπή που χρειάζεται ώστε το σύστημα μας να παραμείνει σε ισορροπία χωρίς την επίδραση εξωτερικών παραγόντων και δυνάμεων. Επίσης λειτουργούν σαν βάση για την επιλογή των χαρακτηριστικών, των προς αγορά κινητήρων του ρομποτικού συστήματός μας, η συνολική ροπή των οποίων θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη της συνολικής τιμής της απαιτούμενης ροπής του ισορροπομένου συστήματος, ώστε να επιτευχθεί κίνηση και ανάβαση του οχήματος πάνω στην επιφάνεια. Τέλος, είναι σαφές, λαμβάνοντας

υπ' όψιν και τον τύπο της εξίσωσης (3), ότι η απαιτούμενη ροπή είναι ανάλογη, τόσο του συνολικού βάρους του οχήματός μας, όσο και της διαμέτρου των τοποθετημένων σε αυτό τροχών.

## **Κεφάλαιο 4**

### **Σχεδιασμός**

#### **4.1 Στάδια Σχεδιασμού**

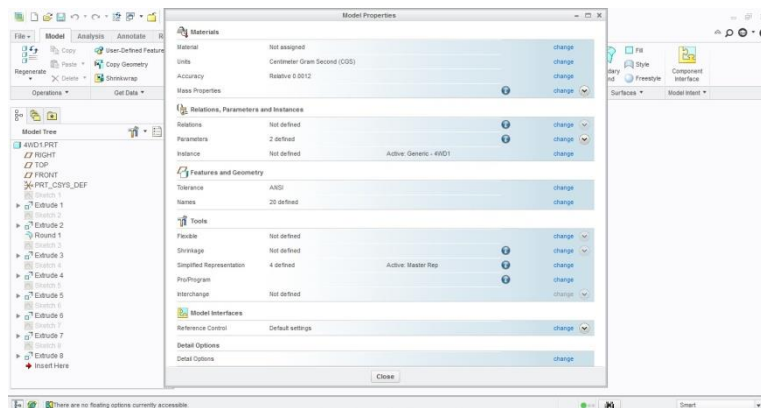
Το παρόν ρομποτικό σύστημα επιθεώρησης αγωγών σχεδιάστηκε στην πλατφόρμα σχεδιασμού για μηχανικούς με όνομα CREO Parametric η οποία έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία PTC.

Η πλατφόρμα αυτή λειτουργεί σε λογισμικό σύστημα Microsoft Windows και προσφέρει στους χρήστες της μια ξεχωριστή σειρά από δυνατότητες για την ανάπτυξη ενός προϊόντος καθώς και εφαρμογές για στερεή μοντελοποίηση σε 3D Cad, ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και προσομοίωση, σχηματική σχεδίαση, τεχνικές σχηματικές αναπαραστάσεις, άμεση 3D μοντελοποίηση όπως επίσης και δυσδιάστατες (2D) ορθογραφικές απόψεις και προβολές.

Το πρώτο στάδιο της σχεδίασης ήταν η μέτρηση των φυσικών διαστάσεων όλων των αντικειμένων που θα προορίζονταν για το ρομποτικό σύστημα επιθεώρησης αγωγών.

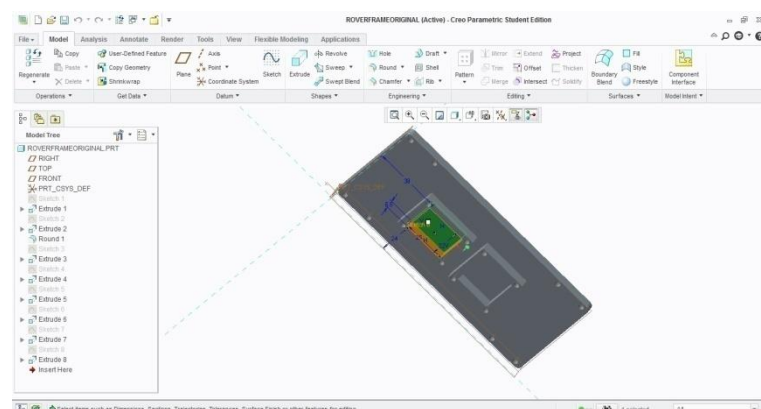






Σχήμα 4.2: Αλλαγή συστήματος μονάδων στην πλατφόρμα CREO Parametrics 2.0

Κατόπιν, ακολουθεί ο ίδιος σχεδιασμός του αντικειμένου μέσω της πλατφόρμας CREO Parametrics 2.0 (Σχήμα 4.3)



Σχήμα 4.3: Σχεδιασμός του αντικειμένου σε φυσικές διαστάσεις

Μόλις ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός ακολουθεί η αρχική αποθήκευση του αρχείου σε μορφή .PRT (Part), για να μπορέσουμε να το παραμετροποιήσουμε εάν αυτό απαιτηθεί, και η μετέπειτα επαναποθήκευσή του σε μορφή .STL (STereoLithography) για να μπορέσουμε να το χρησιμοποιήσουμε στον 3D εκτυπωτή ώστε το αντικείμενό μας να αποκτήσει φυσική υπόσταση.

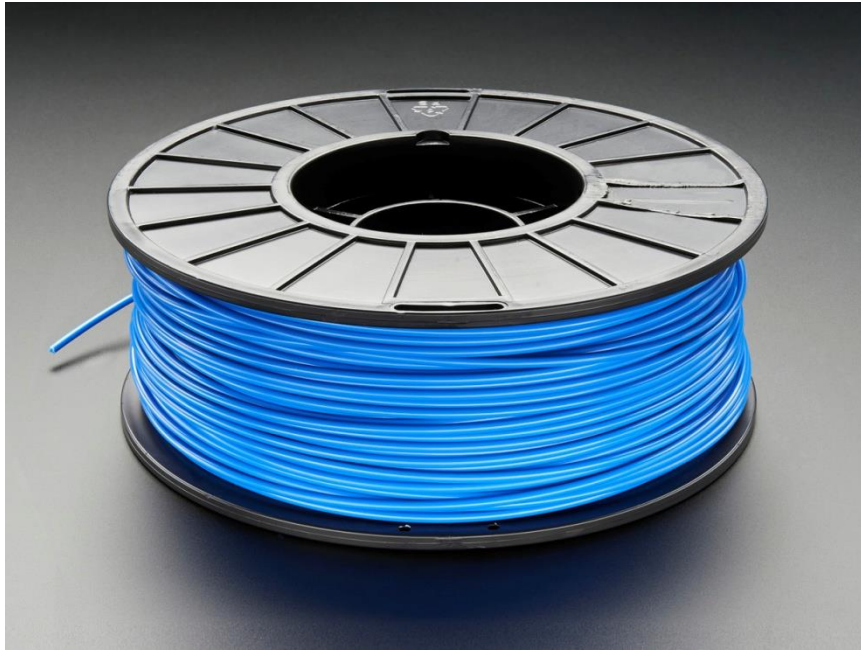
### 4.3 Δημιουργία και Τρισδιάστατη Εκτύπωση Αντικειμένου

Μετά την αποθήκευση του σχεδιασμένου μοντέλου στην κατάλληλη μορφή αρχείου και με τις προαναφερόμενες παραμέτρους, ακολουθεί η δημιουργία της φυσικής υπόστασης του αντικειμένου μέσω της χρήσης ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή. Οι εκτυπώσεις μπορούν να έχουν διαστάσεις έως 20x20x20 cm (μήκος x πλάτος x ύψος), ενώ ως υλικό εκτύπωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί το PLA ,το ABS και το PETG. Το PLA είναι η συντομογραφία για το πολυ-γαλακτικό-οξύ (poly-lactic-acid) και πρόκειται για ένα πολυμερές το οποίο κατασκευάζεται από γαλακτικό οξύ (Σχήμα 4.4). [Link 16] Για να επιτευχθεί τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιώντας αυτό το υλικό, η κατάλληλη θερμοκρασία θέρμανσης της κεφαλής εκτύπωσης είναι στους 200 βαθμούς Κελσίου ενώ η επιφάνεια εκτύπωσης θα πρέπει να έχει θερμοκρασία άνω των 45 βαθμών Κελσίου ώστε το υλικό να παραμείνει προσκολλημένο στην επιφάνεια.



Σχήμα 4.4: Υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου PLA

Το ABS με την σειρά του είναι η συντομογραφία του Ακρυλονιτρίλο-βουταδιένιο στυρενίου (Acrylonitrile Butadiene Styrene) και πρόκειται για ένα θερμοπλαστικό πολυμερές (Σχήμα 4.5) [Link 17]. Πρόκειται για ένα τριπολυμερές που προκύπτει από τον πολυμερισμό στυρολίου και ακρυλονιτρίλιου με την παρουσία πολυβουτανιεδίου. Οι κατάλληλες θερμοκρασίες θέρμανσης προς εκτύπωση είναι ίδιες με εκείνες του PLA.



Σχήμα 4.5: Υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου ABS

Τέλος, το PETG είναι η συντομογραφία για το Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο με τροποποιημένη γλυκόλη (Polyethylene terephthalate – glycol modified). [Link 18] Πρόκειται για το πιο κοινό θερμοπλαστικό πολυμερές το οποίο ανήκει στην οικογένεια των πολυεστέρων και είναι πλήρως ανακυκλώσιμο. Είναι ένα υλικό πολύ ελαφρύ με αρκετή ελαστικότητα ενώ επίσης είναι υγροσκοπικό, που σημαίνει ότι απορροφά νερό από το περιβάλλον που το περικλείει (Σχήμα 4.6).

Για να επιτύχουμε τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιώντας αυτό το υλικό, η κατάλληλη θερμοκρασία θέρμανσης της κεφαλής εκτύπωσης, είναι κοντά στους 240 βαθμούς Κελσίου, ενώ η επιφάνεια εκτύπωσης θα πρέπει να έχει θερμοκρασία άνω των 60 βαθμών Κελσίου ώστε να υλικό να παραμείνει προσκολλημένο στην επιφάνεια καθ' όλη την διάρκεια της εκτύπωσης.



Σχήμα 4.6: Υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου PETG

Οι διαφορές των συγκεκριμένων υλικών εκτός της διαφοράς θερμοκρασίας τήξης για την πραγματοποίηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης, περιλαμβάνει και την διαφορά στην αντοχή εφελκυσμού του κάθε υλικού, η οποία αναφέρεται στο πόση πίεση μπορεί αυτό να αντέξει προτού σπάσει, ενώ επίσης αναγκαίο είναι να λάβουμε υπόψη μας και την σκληρότητα αυτού. (Σχήμα 4.7)

Τα στοιχεία αυτά μπορούν να λειτουργήσουν ως οδηγός για την επιλογή του καταλληλότερου υλικού εκτύπωσης αναλόγως της πραγματοποιούμενης εργασίας εκτύπωσης.

	Tensile strength	Toughness (IZOD notched impact)	Heat Deflection Temperature
ABS	33 MPa (4,700 psi)	106 J/m	204 °F
Nylon	48 MPa (7,000 psi)	200 J/m	207 °F
PLA	50 MPa (7,250 psi)	80 J/m	150 °F
PC	68 MPa (9,800 psi)	53 J/m	280 °F
PEI	81 MPa (11,735 psi)	41 J/m	415 °F

Σχήμα 4.7 : Χαρακτηριστικά αντοχής σε εφελκυσμό, σκληρότητας και θερμοκρασίας τήξεως διαφόρων υλικών τρισδιάστατης εκτύπωσης

#### 4.4 Σκελετός Μοντέλου

Ο σκελετός του ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών το οποίο κατασκευάζουμε αποτελείται από τέσσερα τμήματα, όλα εκ των οποίων έχουν εκτυπωθεί στον τρισδιάστατο εκτυπωτή του εργαστηρίου.

Το πρώτο τμήμα αποτελεί τον βασικό σκελετό του τροχοφόρου οχήματός μας μαζί με τις υποδοχές για τους μαγνήτες Νεοδυμίου που έχουμε επιλέξει κατά την συγκομιδή των υλικών μας. Το υλικό εκτύπωσης για την πραγματοποίηση αυτού του τρισδιάστου μοντέλου είναι το PLA, χρώματος μαύρου. (Σχήματα 4.8 , 4.9 , 4.10)

Το δεύτερο τμήμα αποτελεί την θήκη της μπαταρίας μαζί με τα εσωτερικά περάσματα για τις καλωδιώσεις του συστήματος. Το υλικό εκτύπωσης για την πραγματοποίηση αυτού του τρισδιάστατου μοντέλου είναι το PETG, χρώματος κόκκινου. Το PETG επιλέχθηκε, έναντι του PLA υλικού στην περίπτωση αυτή, λόγω της μεγαλύτερης ελαστικότητάς του. (Σχήματα 4.11 , 4.12)

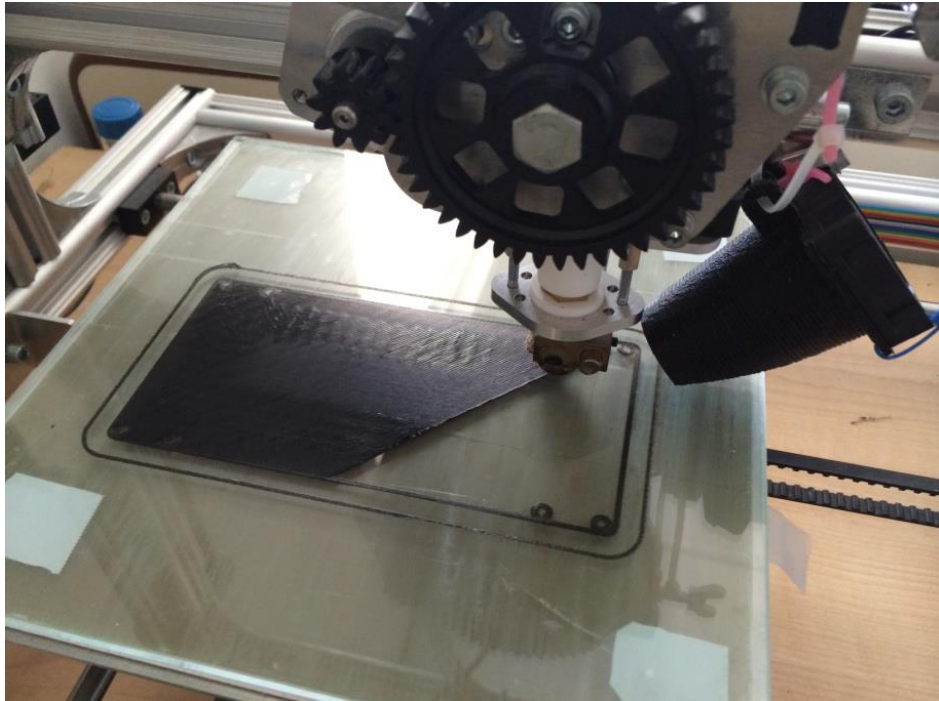
Το τρίτο τμήμα αποτελεί την βάση που ενώνει την θήκη της μπαταρίας με την βάση του τροχοφόρου οχήματός μας. Το υλικό εκτύπωσης για την πραγματοποίηση αυτού του τρισδιάστατου μοντέλου είναι το PETG, χρώματος κόκκινου. (Σχήμα 4.13)

Το τέταρτο και τελευταίο τμήμα του σκελετού αποτελεί η βάση του μικροϋπολογιστή Raspberry Pi 2 Model B. Το υλικό εκτύπωσης για την πραγματοποίηση αυτού του τρισδιάστατου μοντέλου είναι το PLA, χρώματος μαύρου. (Σχήμα 4.14)

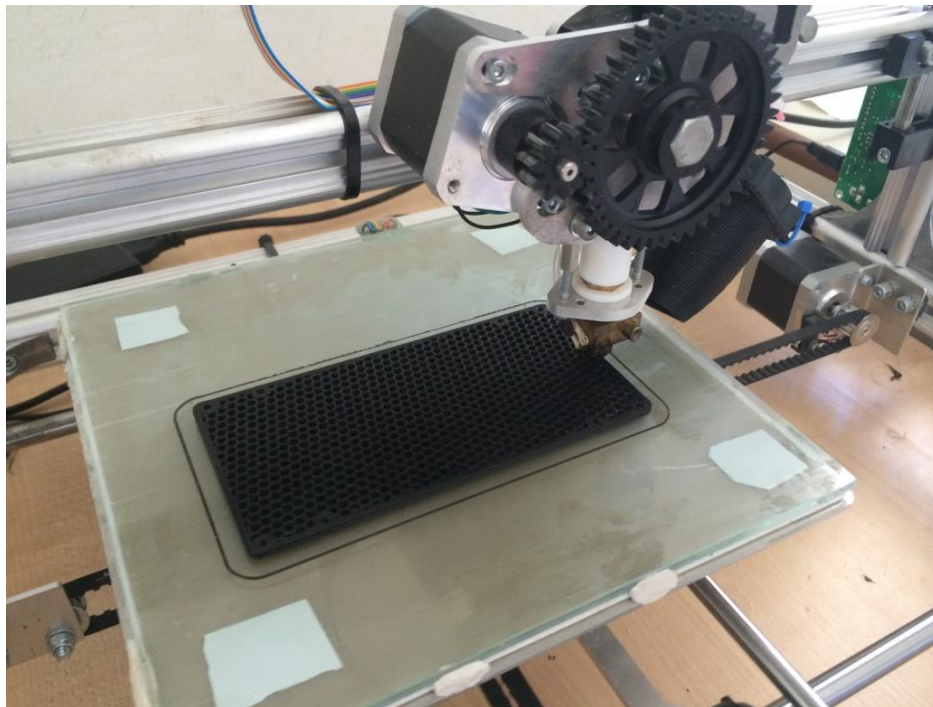
Τα παραπάνω τμήματα ενώνονται μεταξύ τους με την βοήθεια εποξειδικής κόλλας ή αλλιώς κόλλας δύο συστατικών για πλαστικά, η οποία προσφέρει υψηλή αντοχή συγκόλλησης, πολύ μεγάλη αντοχή στην υγρασία καθώς και εξαιρετική αντοχή στις θερμοκρασίες. Επίσης οι μαγνήτες αφού τοποθετηθούν στις ειδικές υποδοχές οι οποίες έχουν σχεδιαστεί ειδικά γι' αυτούς, θα καλυφθούν με δύο πλαστικές επιφάνειες πάχους 2mm, οι οποίες θα τοποθετηθούν βιδωτά, με διαστάσεις όσο και οι σχεδιασμένες θήκες που περιέχουν τους μαγνήτες, με σκοπό την προστασία των μαγνητών και την μη αποκόλλησή τους από τον σκελετό του ρομποτικού τροχοφόρου οχήματος. Ακολουθούν εικόνες των εκτυπωμένων τμημάτων του ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών:



### Πρώτο τμήμα: Βασικός σκελετός τροχοφόρου οχήματος



Σχήμα 4.8: Αρχή τρισδιάστατης εκτύπωσης βασικού σκελετού οχήματος

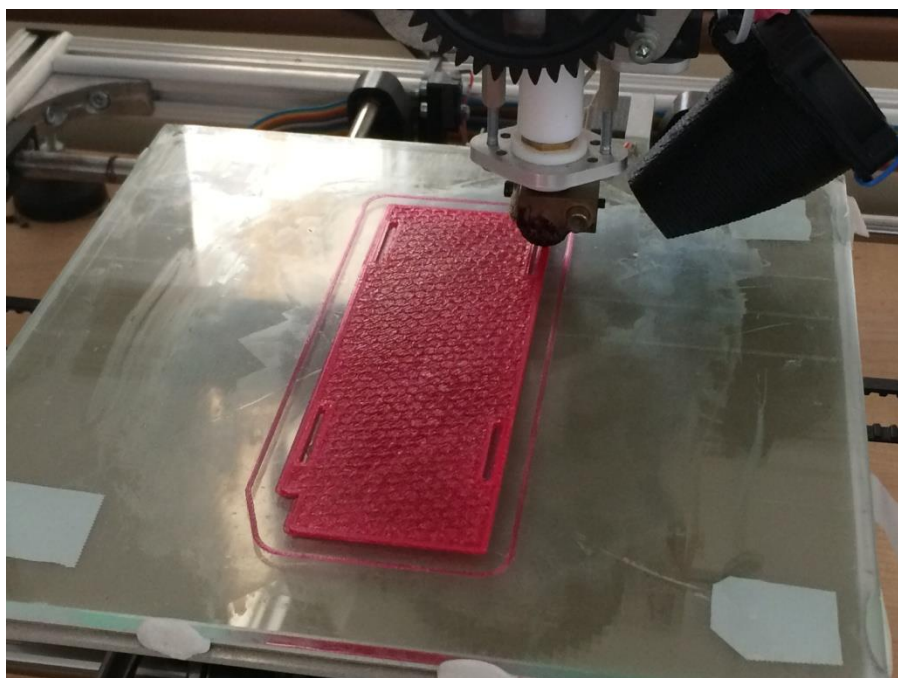


Σχήμα 4.9: Συνέχεια τρισδιάστατης εκτύπωσης βασικού σκελετού οχήματος



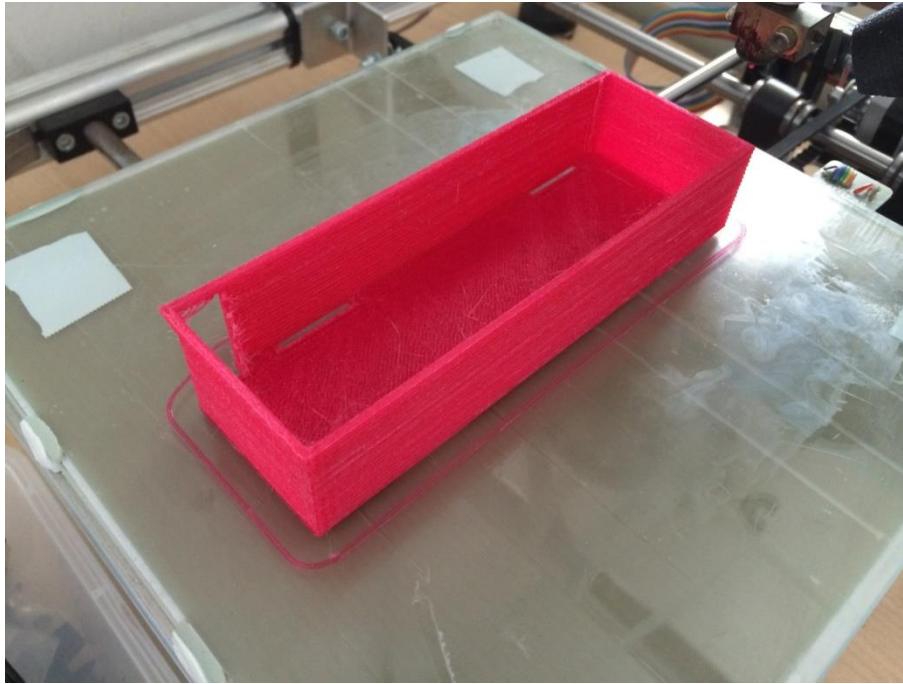
Σχήμα 4.10 : Ολοκλήρωση τρισδιάστατης εκτύπωσης βασικού σκελετού οχήματος

**Δεύτερο Τμήμα: Θήκη Μπαταρίας οχήματος**



Σχήμα 4.11: Αρχή τρισδιάστατης εκτύπωσης θήκης μπαταρίας οχήματος





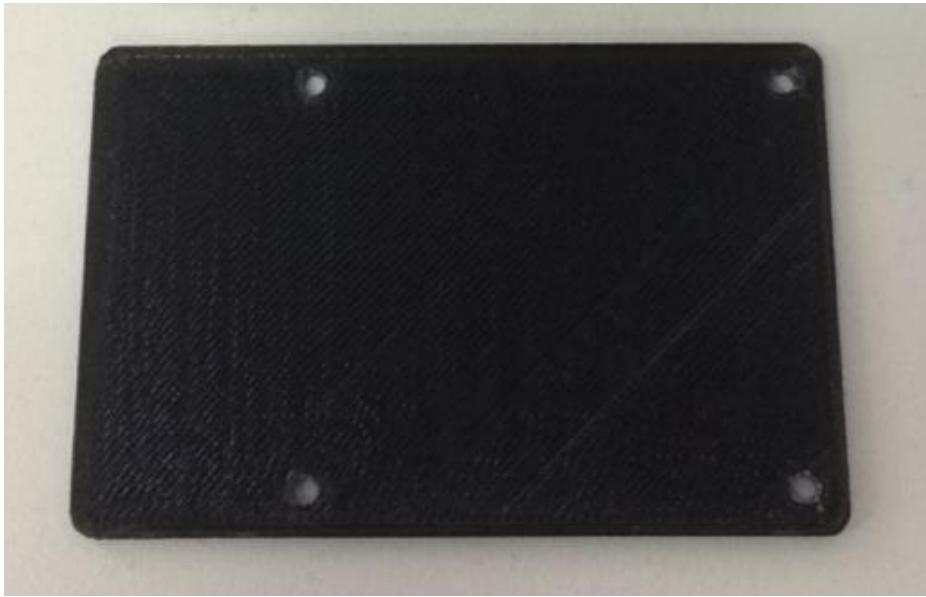
Σχήμα 4.12: Ολοκλήρωση τρισδιάστατης εκτύπωσης θήκης μπαταρίας οχήματος

**Τρίτο Τμήμα: Βάση ένωσης θήκης μπαταρίας και σκελετού οχήματος**



Σχήμα 4.13: Ολοκλήρωση τρισδιάστατης εκτύπωσης της βάσης ένωσης

#### **Τέταρτο Τμήμα: Βάση Raspberry Pi 2 Model B**



Σχήμα 4.14: Ολοκλήρωση τρισδιάστατης εκτύπωσης βάσης Raspberry Pi 2 Model B

# **Κεφάλαιο 5**

## **Κατασκευή Τροχοφόρου Ρομποτικού Συστήματος**

Το Κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει την συναρμολόγηση όλων των τμημάτων του υπό κατασκευή τροχοφόρου ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών, παρέχοντας παράλληλα σημαντικές πληροφορίες που αφορούν το κατασκευαστικό κομμάτι του μοντέλου.

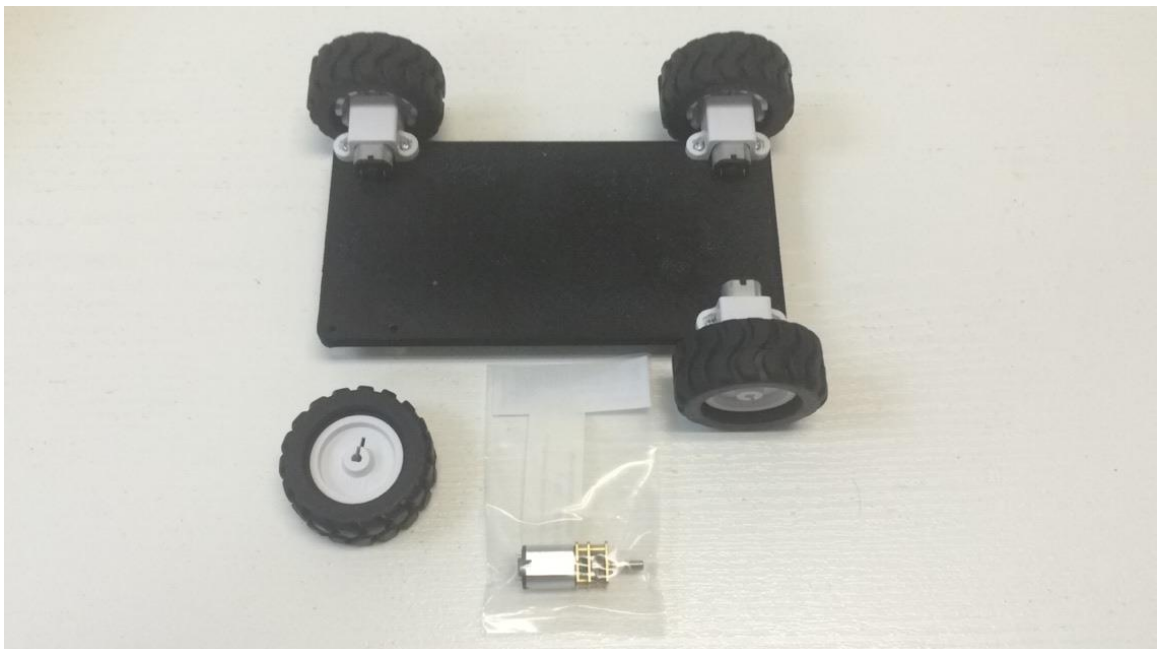
### **5.1 Στάδια Κατασκευής Μοντέλου – Συναρμολόγηση**

i) Το πρώτο στάδιο της συναρμολόγησης περιλαμβάνει την τοποθέτηση των κινητήρων στις κατάλληλες και ειδικά σχεδιασμένες υποδοχές των τροχών. Κατόπιν, επάνω στον κάθε κινητήρα τοποθετείται βραχίονας από πλαστικό, ο οποίος βιδώνεται στις ειδικές υποδοχές που έχουν σχεδιαστεί κατά τον αρχικό σχεδιασμό του σκελετού του ρομποτικού συστήματός μας, ώστε να μην υπάρχει οποιαδήποτε μετατόπιση του κινητήρα από την ορισμένη σε αυτόν θέση. (Σχήμα 5.1)



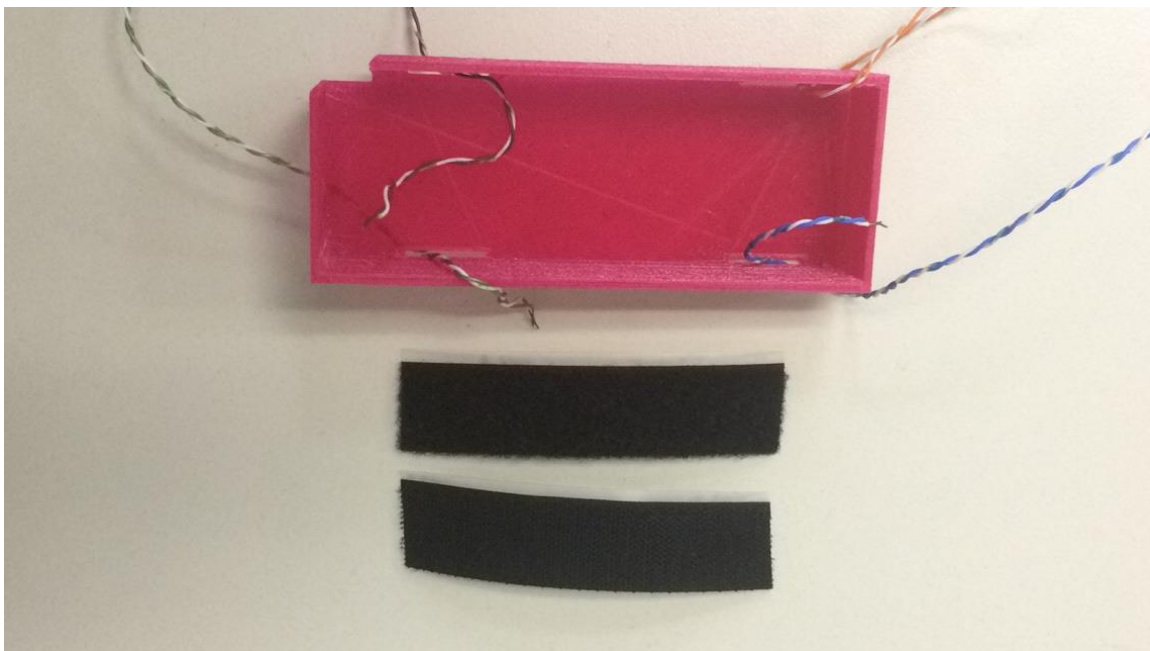
Σχήμα 5.1: Τοποθέτηση κινητήρων στις ειδικά σχεδιασμένες υποδοχές των τροχών

Πραγματοποιούμε την ίδια διαδικασία και για τους τέσσερις κινητήρες μας, όπως μπορούμε να δούμε στο παρακάτω σχήμα. (Σχήμα 5.2)



Σχήμα 5.2: Τοποθέτηση και των τεσσάρων τροχών στις ειδικές υποδοχές των τροχών καθώς και τοποθέτηση των πλαστικών βραχίωνων ασφαλείας.

ii) Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την τοποθέτηση της μπαταρίας, στην ειδικά διαμορφωμένη θήκη η οποία σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο και σκοπό ώστε να περικλύει όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ασφάλεια την χρησιμοποιούμενη μπαταρία στις συγκεκριμένες διαστάσεις της, ενώ παράλληλα μέσω των τεσσάρων ειδικών υποδοχών που περιέχονται εσωτερικά αυτής, να μπορούν να διαπερνούν οι καλωδιώσεις από τις οποίες θα μεταβιβάζονται τόσο το ρεύμα όσο και τα δεδομένα, από τον Driver στους κινητήρες, έως ότου συνδεθούν στις ειδικές υποδοχές του εκάστοτε εξαρτήματος. (Σχήμα 5.3)

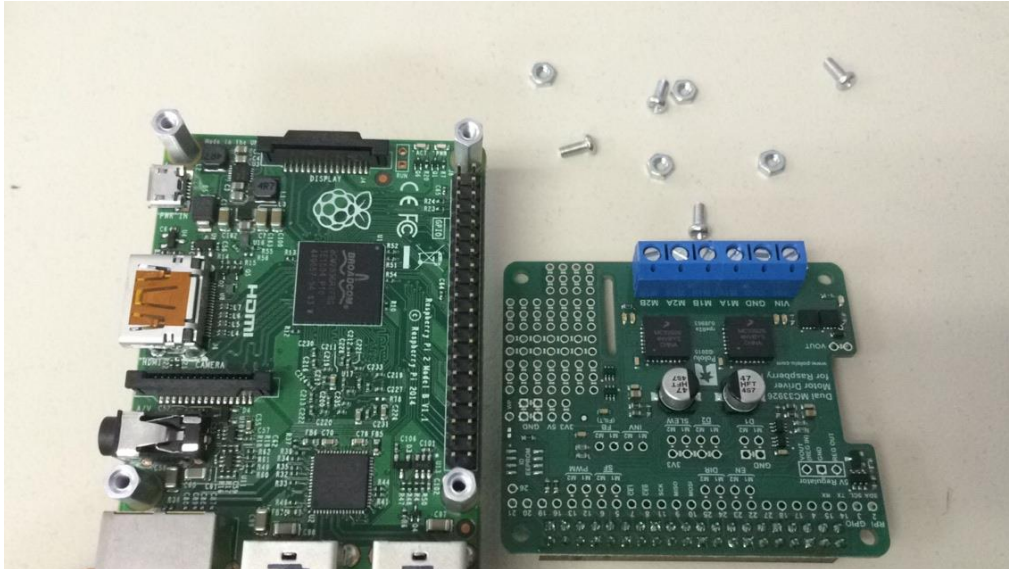


Σχήμα 5.3: Η ειδικά σχεδιασμένη θήκη της μπαταρίας μαζί με τα καλώδια τροφοδοσίας των κινητήρων

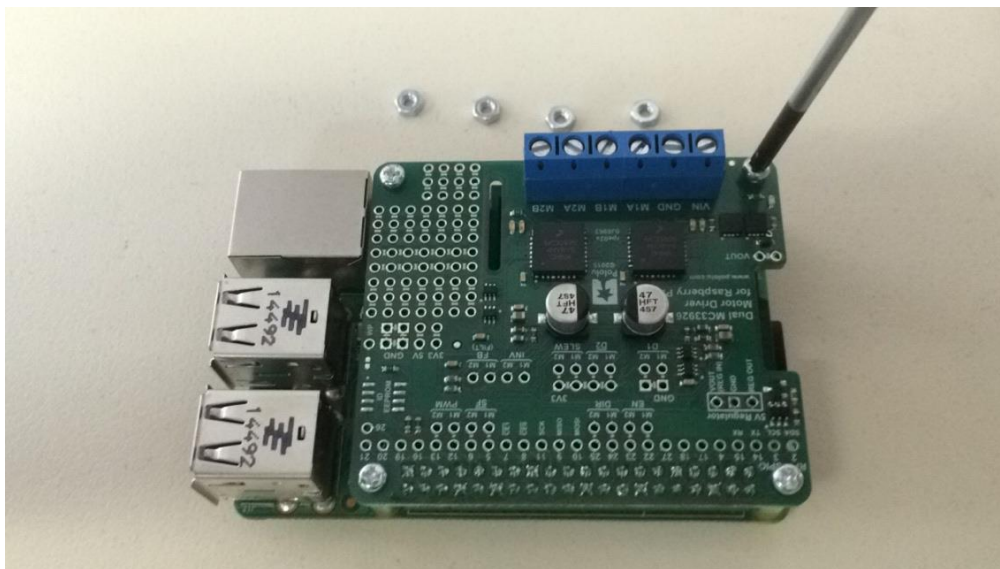
iii) Το τρίτο στάδιο περιλαμβάνει την σύνδεση του Dual MC33926 Motor Driver με τον μικροϋπολογιστή Raspberry Pi 2 Model B (Σχήμα 5.4). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της 40pin GPIO επεκτασιμότητας που φέρει ο μικροϋπολογιστής (Σχήμα 5.5). Κατά την σύνδεση του Dual MC33926 Motor Driver με το Raspberry Pi 2 Model B, τοποθετούνται πύροι για την κάλυψη των κενών, που δημιουργούνται ανάμεσα τους λόγω της υψομετρικής διαφοράς, με σκοπό την πλήρη σταθερότητα και με το τελικό



αποτέλεσμα να είναι η ένωση των δύο συστημάτων, ως ένα ενιαίο και σταθερό σύστημα. (Σχήμα 5.7)



Σχήμα 5.4: Σύστημα Dual MC33926 Motor Driver και Raspberry Pi 2 Model B

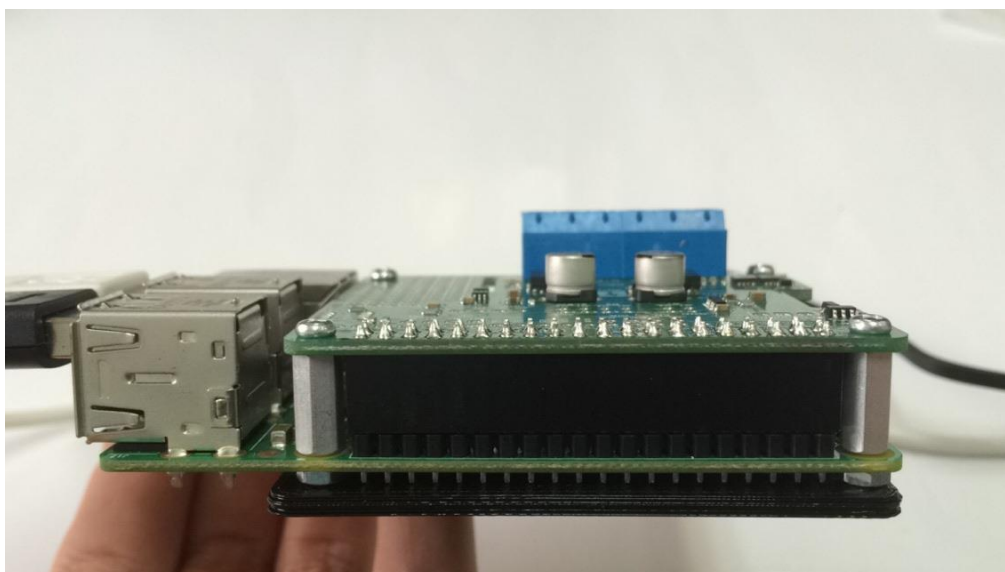


Σχήμα 5.5: Συναρμολόγηση του συστήματος και ένωση του Dual MC33926 Motor Driver και Raspberry Pi 2 Model B μέσω της 40pin GPIO επεκτασιμότητας

iv) Στο επόμενο, τέταρτο κατά σειρά στάδιο, περιλαμβάνεται η εφαρμογή της ειδικά σχεδιασμένης βάσης για τον μικροϋπολογιστή Raspberry Pi 2 Model B, με το ενιαίο σύστημα που δημιουργήθηκε κατά το προηγούμενο στάδιο. Το πλάτος της βάσης έχει σχεδιαστεί λίγα χιλιοστά μεγαλύτερο από το πλάτος της θήκης της μπαταρίας, με σκοπό την τοποθέτησή του επάνω σε αυτήν και την συγκόλλησή του με την χρήση κόλλας δύο συστατικών. Επίσης, η διάμετρος των τεσσάρων σχεδιασμένων επί της βάσης υποδοχών, της τάξεως των 3mm (χιλιοστών), είναι τέτοια ώστε το σύστημα του μικροϋπολογιστή να μπορεί να βιθωθεί επακριβώς επάνω σε αυτήν, εγγυώντας την πλήρη ασφάλεια του συστήματος σε κάθε περίπτωση. (Σχήμα 5.6)

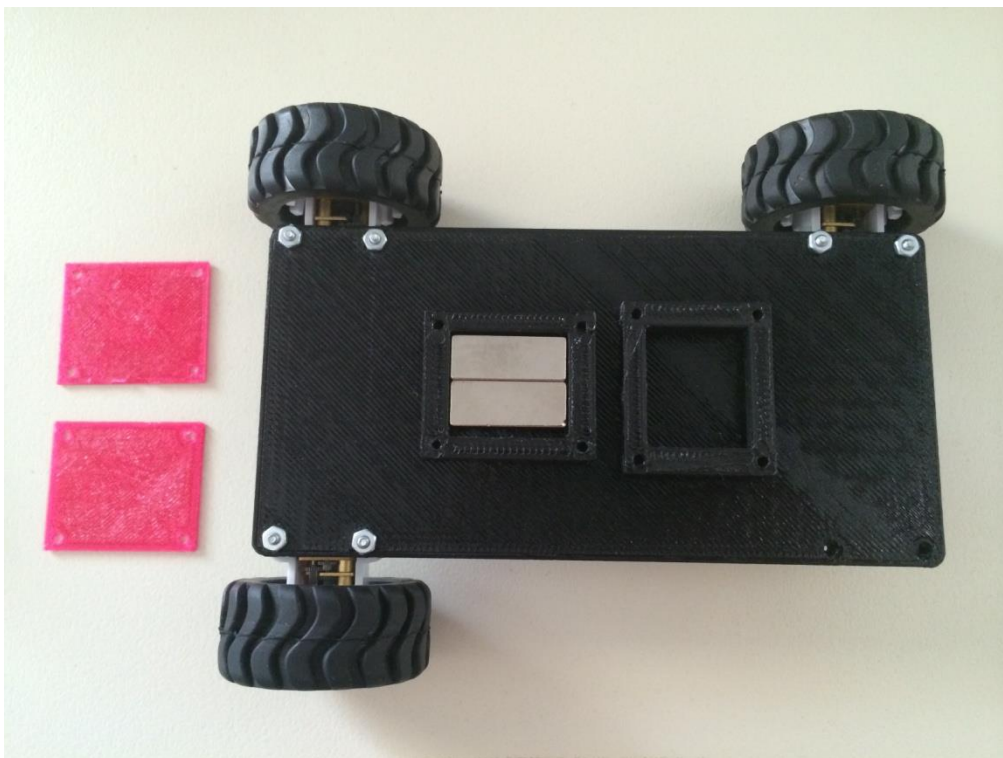


Σχήμα 5.6: Προσθήκης ειδικά σχεδιασμένης βάσης στο ολοκληρωμένο σύστημα



Σχήμα 5.7: Τελικό αποτέλεσμα συναρμολόγησης των δύο συστημάτων

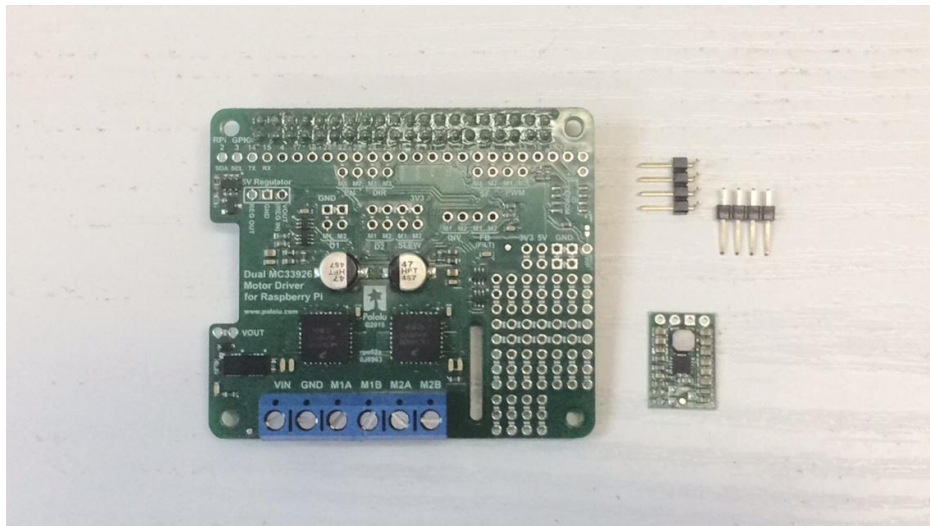
ν) Το πέμπτο στάδιο περιλαμβάνει την τοποθέτηση των μαγνητών Νεοδυμίου N52, στις ειδικές υποδοχές που έχουν δημιουργηθεί στην κάτω επιφάνεια του βασικού σκελετού. Οι μαγνήτες τοποθετούνται ανά ζεύγη των δύο σε κάθε μια υποδοχή. Οι διαστάσεις των υποδοχών έχουν σχεδιαστεί με βάση τις διαστάσεις του κάθε ζεύγους μαγνητών και με τέτοιον τρόπο ώστε να εφάπτονται ακριβώς μέσα σε αυτόν και με σχεδιασμένο βάθος αυξημένο κατά 1 mm (χιλιοστό) από το πάχος του κάθε μαγνήτη. Η κάθε μία από τις δύο παραλληλεπίπεδες υποδοχές των μαγνητών, φέρει τέσσερα διάκενα διαμέτρου 3mm σε κάθε μία από τις ακμές της, σχεδιασμένες για την εφαρμογή και βίδωση ίδιου μεγέθους πλαστικής πλάκας των 2mm (χιλιοστών), με σκοπό την προστασία των μαγνητών και την μη αποκόλλησή τους, λόγω ελκτικών δυνάμεων, από τον βασικό σκελετό, με την παράλληλη όμως εκμετάλλευση της μαγνητικής τους δύναμης για τις διάφορες εφαρμογές που θα χρησιμοποιηθεί, το επί κατασκευής ρομποτικό σύστημα επιθεώρησης αγωγών (Pipe Line Inspection Robot). (Σχήμα 5.9) Τέλος, κατά το στάδιο αυτό πραγματοποιείται και η τοποθέτηση και βίδωση των πλαστικών πλακών στην επιφάνεια των υποδοχών των μαγνητών κάτω από τον βασικό σκελετό του τροχοφόρου συστήματός μας.



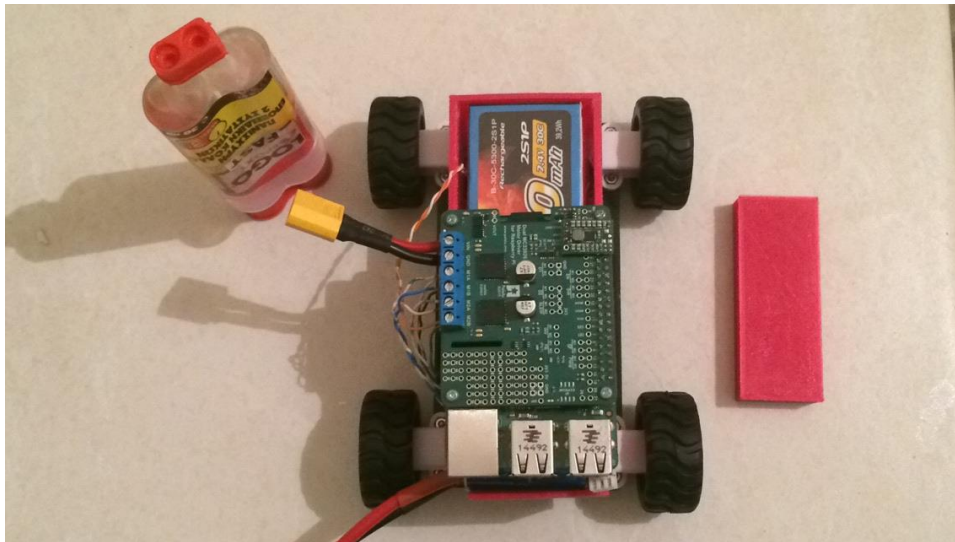
Σχήμα 5.9: Τοποθέτηση μαγνητών και προστατευτικών αυτών, εντός των ειδικά σχεδιασμένων υποδοχών του σκελετού του οχήματος



vi) Το έκτο στάδιο περιλαμβάνει τόσο τις συγκολήσεις όλων των τρισδιάστατων εκτυπωμένων μερών του επί κατασκευή τροχοφόρου ρομποτικού συστήματος, πάνω στον βασικό σκελετό, με την χρήση κόλλας δύο συστατικών (εποξειδικής κόλλας), όσο και τις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συνδέσεις, μέσω των κατάλληλων καλωδίων, των μερών του συστήματος (Σχήμα 5.11). Επίσης, για την σωστή τροφοδοσία του ενσωματωμένου συστήματος Raspberry Pi 2 Model B από το σύστημα Dual MC33926 Motor Driver, εγκαθίστανται στον Οδηγό ένας σταθεροποιητής-ρυθμιστής τάσης, ο οποίος θα παρέχει μια σταθερή και συνεχή τάση εξόδου στα 5V (Volt), ανεξαρτήτως της τάσεως εισόδου. (Σχήμα 5.10)

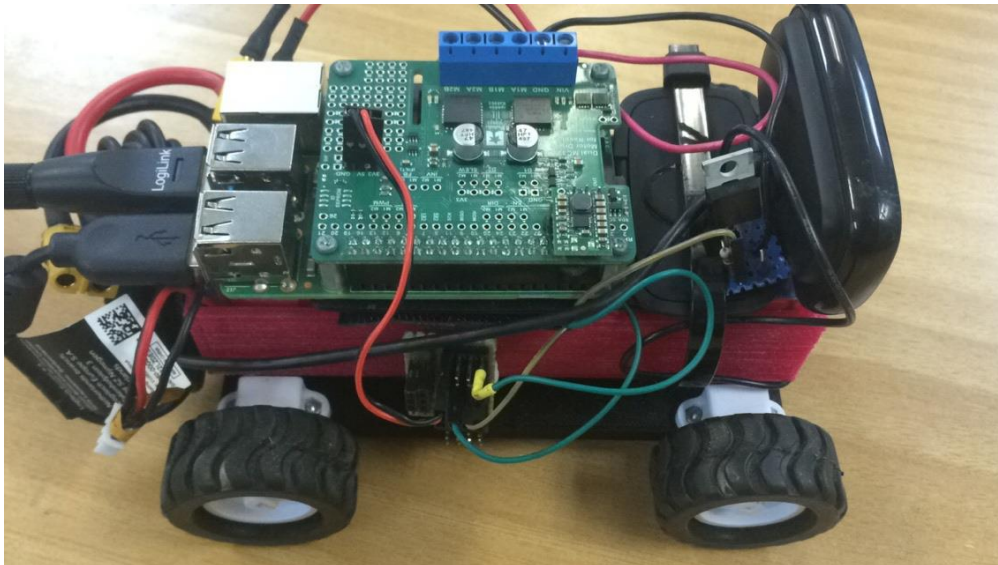


Σχήμα 5.10: Εγκατάσταση σταθεροποιητή-ρυθμιστή τάσης στον Οδηγό Dual MC33926 Motor Driver



Σχήμα 5.11: Ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συνδέσεις καθώς και συγκόλληση των μερών του οχήματος

vi) Το έβδομο και τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει την εγκατάσταση του φωτισμού στον σκελετό του τροχοφόρου ρομποτικού συστήματος. Για τον επαρκή φωτισμό του προς επιθεώρηση περιβάλλοντος, θα τοποθετηθεί στο ρομποτικό όχημα, σύστημα φωτισμού το οποίο θα περιλαμβάνει δύο Cree Led Lights ισχύος 3W με δυνατότητα ελέγχου του φωτισμού εξ αποστάσεως, από τον χρήστη στην βάση. Το ηλεκτρονικό σύστημα αυτό δημιουργήθηκε στο εργαστήριο από απλά υλικά και το κύκλωμα αποτελείται από δύο Cree Led Lights συνδεδεμένα σε σειρά, τα οποία έπειτα συνδέονται με ένα Mosfet LRF640N. Το Mosfet έχει την δυνατότητα να λειτουργεί σαν ηλεκτρονικός διακόπτης του συστήματος και με την σειρά του συνδέεται με την θύρα GPIO 18 του Raspberry, για τον έλεγχό του, ενώ η οδήγηση αυτού ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα φωτισμού, είναι στα 5V. Τέλος, για την σωστή και ασφαλής λειτουργία του συστήματος ενδιάμεσα στο Mosfet και την θύρα GPIO 18 του Raspberry Pi, παρεμβάλλεται μία αντίσταση του 1 ΚΩ.

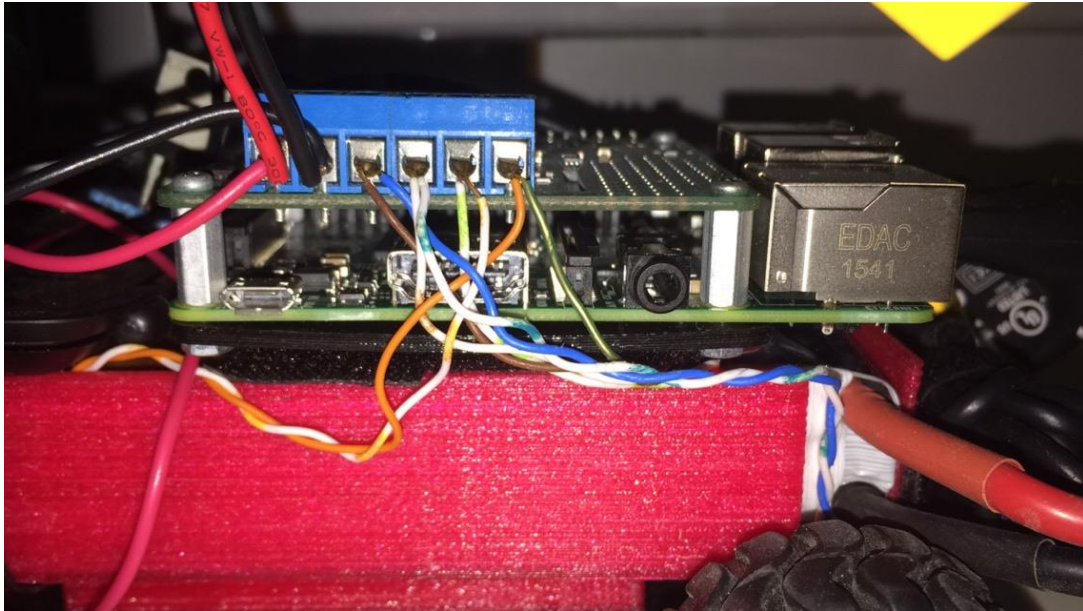


Σχήμα 5.12: Συνδεσμολογία συστήματος φωτισμού του ρομποτικού οχήματος

## 5.2 Κατασκευή Καλωδιώσεων - Συνδεσμολογία Κινητήρων

Κατά την διαδικασία της συνδεσμολογίας των καλωδίων ρεύματος θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή κατά την σύνδεση των πόλων των κινητήρων με τους αντίστοιχους πόλους του συστήματος οδήγησης του ρομποτικού οχήματος Dual MC33926 Motor Driver. Η σύνδεση των καλωδιώσεων του συγκεκριμένου πρωτότυπου ρομποτικού οχήματος έχει το χαρακτηριστικό της διπλής σύνδεσης κάθε μεριάς των κινητήρων του οχήματος στις ειδικά κατασκευασμένες υποδοχές του Driver (Σχήμα 5.13). Η συνδεσμολογία αυτή μας δίνει ως αποτέλεσμα οι δύο κινητήρες κάθε πλευράς, είτε της αριστερής είτε της δεξιάς, να κινούνται ταυτόχρονα προς την ίδια κατεύθυνση, λαμβάνοντας την ίδια εντολή και το ίδιο απαιτούμενο ρεύμα. Με αυτόν τον τρόπο ο Dual MC33926 Motor Driver έχει την δυνατότητα οδήγησης τεσσάρων κινητήρων. Ο κάθε κινητήρας έχει μέγιστο απαιτούμενο ρεύμα της τάξεως των 1.6A. Η κάθε έξοδος του Dual MC33926 Motor Driver έχει δυνατότητα παροχής συνεχόμενου ρεύματος της τάξεως των 3A, το οποίο βεβαίως μπορεί να φτάσει και στα 5A για λίγα δευτερόλεπτα. Η διπλή σύνδεση των κινητήρων σε κάθε μία από τις δύο εξόδους του Οδηγού έχει ως αποτέλεσμα το μέγιστο συνεχές απαιτούμενο ρεύμα των κινητήρων να είναι  $1.6 + 1.6 = 3.2\text{A}$  (Ampere), το οποίο, εάν απαιτηθεί από το σύστημα, θα μπορεί να καλυφθεί από τον συγκεκριμένο Οδηγό. Τέλος, τα καλώδια σύνδεσης ρευμάτων χαλκού διαμέτρου 0.51 mm (Gauge wire N.24) με μέγιστο όριο συνεχούς

ρεύματος, της τάξεως των 3.5A (Ampere), για σύνδεση των κινητήρων στις ειδικά κατασκευασμένες υποδοχές του Dual MC33926 Motor Driver, εγγυώνται την σωστή και ασφαλής τροφοδοσία του συστήματος των κινητήρων.



Σχήμα 5.13: Συνδεσμολογία κινητήρων ρομποτικού οχήματος

# **Κεφάλαιο 6**

## **Προγραμματισμός Μοντέλου**

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του ρομποτικού συστήματος, συνέχεια έχει ο προγραμματισμός του συστήματος αυτού. Η διαδικασία του προγραμματισμού του ρομποτικού συστήματος ξεκινάει από την σωστή επιλογή της γλώσσας προγραμματισμού μέσα από την οποία θα δημιουργήσουμε τον κώδικα που θα δώσει "ζωή" στο ρομποτικό σύστημά μας και θα δώσει την δυνατότητα στον χρήστη να εκμεταλλευτεί πλήρως τις δυνατότητές που προσφέρει. Ο σωστός προγραμματισμός του μοντέλου έχει ως αποτέλεσμα την εύρυθμη λειτουργία του ρομποτικού συστήματος και την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων για τον σκοπό το οποίο αυτό έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί.

### **6.1 Επιλογή γλώσσας Προγραμματισμού**

Ο προγραμματισμός του ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών πραγματοποιείται μέσω της γλώσσας προγραμματισμού της Python. Η επιλογή αυτής

της γλώσσας προγραμματισμού έγκειται στο γεγονός ότι παρέχει υψηλό επίπεδο πολλαπλών μηχανισμών ελέγχου για την διαχείριση εφαρμογών και απομακρυσμένων εντολών, όπως αποτύπωση και λήψη εικόνας και ζωντανής βιντεοσκόπησης, επικοινωνίας του χρήστη με άμεσο έλεγχο της κινήσεως και της θέσεως του ρομποτικού συστήματος, καθώς και έλεγχο των επιμέρους πρόσθετων εγκατεστημένων συστημάτων, όπως έλεγχο των φώτων του ρομποτικού συστήματος. Η βιβλιοθήκη που θα χρησιμοποιηθεί υποστηρίζει τόσο της έκδοση της Python 2.7.x όσο και την έκδοση 3.2.x , ενώ επίσης υποστηρίζεται στα μοντέλα Raspberry Pi B+ , Raspberry Pi A+ και Raspberry Pi 2 , παρέχοντας την δυνατότητα λειτουργιών για έλεγχο και των δύο καναλιών του συστήματος Pololu Dual MC33926 Motor Driver.

## **6.2 Εγκατάσταση και Περιγραφή Βιβλιοθήκης Οδήγησης Οχήματος**

Η έκδοση της γλώσσας προγραμματισμού η οποία θα χρησιμοποιηθεί είναι η Python 2.7. Η βιβλιοθήκη η οποία εγκαταστάθηκε μέσα από την συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού, χρησιμοποιεί υπερηχητικά σήματα PWM (Pulse-Width Modulation) των 20kHz για την οδήγηση των κινητήρων.

Οι ταχύτητες των κινητήρων παρουσιάζονται σαν αριθμοί με εύρος από -480 έως 480. Οι θετικοί αριθμοί υποδηλώνουν θετικές ταχύτητες, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται κίνηση προς τα εμπρός στο ρομποτικό όχημα, ενώ αντίθετα οι αρνητικές τιμές έχουν ως αποτέλεσμα κίνηση του οχήματος προς τα πίσω. Οι θετικές ταχύτητες αντιστοιχούν σε ρεύμα που ρέει από M1A / M2A σε M1B / M2B , ενώ οι αρνητικές ταχύτητες αντιστοιχούν σε ρεύμα που ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η τιμή 0 έχει ως αποτέλεσμα την ακινησία του οχήματός μας και αντιστοιχεί στο φρενάρισμά του.

## **6.4 Δημιουργία Interface**

Για την καλύτερη, ευκολότερη και φιλικότερη προς τον χρήστη, χρήση του ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών δημιουργήθηκε ένα Interface με το

οποίο ο χρήστης θα μπορεί να έχει έλεγχο των κινήσεων, της ταχύτητας και των εγκατεστημένων ηλεκτρονικών μερών του οχήματος, όπως για παράδειγμα τον φωτισμού αυτού. Ο χειρισμός του ρομποτικού οχήματος πραγματοποιείται μέσω της σύνδεσης του οχήματος με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή με την χρήση Wi-Fi. Η σύνδεση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε ενσύρματα, με την χρήση καλωδίου Ethernet ανάμεσα στο ρομποτικό όχημα και τον Ηλεκτρονικό Υπολογιστή, είτε ασύρματα, με την χρήση ασύρματης κεραίας Wi-Fi, η οποία εγκαθίστανται στις θύρες υποδοχής USB του ενσωματωμένου συστήματος Raspberry Pi 2 Model B.

Τα πλήκτρα εντολών κινήσεως και ελέγχου του ρομποτικού οχήματος από τον Ηλεκτρονικό Υπολογιστή, έχουν προγραμματιστεί ως εξής:

Πλήκτρο «W» : Forward (το όχημα κινείται εμπρός)

Πλήκτρο «S» : Backward (το όχημα κινείται πίσω)

Πλήκτρο «A» : Left (το όχημα κινείται αριστερά)

Πλήκτρο «D» : Right (το όχημα κινείται δεξιά)

Πλήκτρο «L» : Lights ON/OFF (τα φώτα του οχήματος μπορούν να ανάψουν ή να σβήσουν αντίστοιχα κατά περίπτωση)

Αξιοσημείωτο να αναφερθεί είναι το γεγονός ότι κατά τον προγραμματισμό του οχήματος επιλέχθηκε η κίνηση και συγκεκριμένα η στροφή του οχήματος να πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο που πραγματοποιείται στα ερπυστριοφόρα οχήματα. Κατά την στροφή του οχήματος δηλαδή προς μια κατεύθυνση οι ίδιες πλευράς ρόδες ακινητοποιούνται, ενώ αυτές της απέναντι πλευράς κινούνται με σκοπό την στρέψη και στροφή του οχήματος προς την πρώτη επιλεγμένη πλευρά κατεύθυνσης. Για παράδειγμα, εάν ο χρήστης θελήσει να στρίψει το όχημα δεξιά, οι ρόδες της δεξιάς πλευράς του οχήματος ακινητοποιούνται ενώ εκείνες της απέναντι αριστερής πλευράς κινούνται. Κατ'αυτόν τον τρόπο λοιπόν το όχημα στρέφεται προς την δεξιά κατεύθυνση.

Το αποτέλεσμα αυτού είναι η μεγάλη ευελεξία που αποκτά το ρομποτικό όχημα με την τεράστια μείωση της ακτίνας στροφής του οχήματος εξαιτίας της δυνατότητας να



μπορεί σχεδόν να περιστραφεί γύρω από τον εαυτό του, καθώς και οι λεπτοί χειρισμοί οι οποίοι μπορούν να πραγματοποιηθούν από τον χρήστη, όπου αυτό απαιτηθεί και σε οποιαδήποτε περίπτωση.

## **Κεφάλαιο 7**

### **Διεξαγωγή Πειραματικής Διαδικασίας**

Η διεξαγωγή των μετρήσεων της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε στο Πολυτεχνείο Κρήτης και συγκεκριμένα στο Εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωπληροφοριακών Συστημάτων, καθώς και τον περιβάλλοντα χώρο της σχολής όπου στεγάζεται το τμήμα των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Η πειραματική διαδικασία αποτελείται από τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την επιτυχή προσκόλληση και ασφαλή κίνηση του ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών επάνω σε μια κάθετη μεταλλική επιφάνεια. Κατά το δεύτερο στάδιο θα πραγματοποιηθεί είσοδος του οχήματος σε εγκατάσταση μεταλλικών αγωγών καθώς και στο εσωτερικό τμήμα ενός εξ αυτών, με σκοπό την επιθεώρηση αυτών και του περιβάλλοντος χώρου με την χρήση των εγκατεστημένων συστημάτων του πρωτότυπου ρομποτικού συστήματος. Το τρίτο και τελευταίο πειραματικό στάδιο περιλαμβάνει την ανάβαση του ρομποτικού οχήματος σε μεταλλικές εξωτερικές κατασκευές με σκοπό την επιθεώρηση δυσπρόσιτων σημείων σε μεταλλικές κατασκευές και κτηριακές εγκαταστάσεις.



## 7.1 Λίστα Ελέγχου Ρομποτικού συστήματος

Για την ασφαλή και ορθή λειτουργία του ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών πραγματοποιούνται κάποιοι απαραίτητοι έλεγχοι πριν, κατά την διάρκεια καθώς και στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας. Οι έλεγχοι ορίζονται ως εξής:

### Πριν την πειραματική διαδικασία

- Έλεγχος της τάσης της μπαταρίας
- Έλεγχος των βιδών ότι είναι σφιγμένες σωστά
- Έλεγχος του ενσωματωμένου συστήματος με τον εγκατεστημένο Οδηγό ότι είναι σωστά σταθεροποιημένος
- Έλεγχος της σωστής και ασφαλούς τοποθέτησης των μαγνητών
- Ενεργοποίηση συστήματος
- Έλεγχος της σωστής σταθεροποίησης και ορθής λειτουργίας των καμερών
- Έλεγχος της ορθής λειτουργίας του συστήματος φωτισμού
- Έλεγχος της σύνδεσης με τον υπολογιστή μέσω ασύρματης σύνδεσης ή καλωδίου Ethernet
- Έλεγχος ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών συστημάτων τροφοδοσίας

### Κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας

- Έλεγχος ορθής εκτέλεσης εντολών και σωστής κίνησης οχήματος
- Έλεγχος ζωντανής μετάδοσης εικόνας και δυνατότητας λήψης φωτογραφιών

### Στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας

- Έλεγχος της τάσης της μπαταρίας
- Έλεγχος των μαγνητών
- Έλεγχος ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών συστημάτων τροφοδοσίας
- Κλείσιμο συστήματος

## **7.2 Πρώτο Στάδιο Πειραματικής Διαδικασίας**

Το πρώτο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας περιλαμβάνει την οδήγηση και προσκόλληση του οχήματος σε κάθετη μεταλλική επιφάνεια, καθώς και την μετέπειτα ασφαλή ανάβαση αυτής. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε εντός του εργαστηρίου «Γεωδαισίας και Πληροφορικής των Γεωεπιστημών».

Για την πραγματοποίηση του πρώτου σταδίου της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε μεταλλική επιφάνεια πάχους περίπου 1 mm (χιλιοστού). Κατά το στάδιο αυτό και μετά τον απαιτούμενο έλεγχο, το ρομποτικό όχημα επιθεώρησης αγωγών τοποθετήθηκε αρχικά στο έδαφος. Στην συνέχεια με την ενεργοποίηση του συστήματος δώθηκε στο όχημα ευθεία πορεία προς την κάθετη μεταλλική επιφάνεια με σκοπό την ανάβαση αυτής.

Στην συνέχεια και μετά άνοδο του ρομποτικού συστήματος και την προσκόλληση αυτού στην κάθετη μεταλλική επιφάνεια, για να ελεγχεί η ασφάλεια του συστήματος, δώθηκε στο όχημα μια σειρά από εντολές κινήσεως ώστε να διαπιστωθεί η ευελιξία αυτού.



Σχήμα 7.1: Ανάβαση ρομποτικού οχήματος σε κάθετη μεταλλική επιφάνεια

Η ολοκλήρωση του πρώτου σταδίου της πειραματικής διαδικασίας περιελάμβανε την κάθοδο και ασφαλή αποκόλληση του ρομποτικού οχήματος από την κάθετη μεταλλική επιφάνεια καθώς και την επιστροφή του στο σημείο εκκινήσεως.

### 7.3 Δεύτερο Στάδιο Πειραματικής Διαδικασίας

Το δεύτερο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας περιλαμβάνει την τοποθέτηση του ρομποτικού οχήματος σε σημείο όπου διέρχονται αγωγοί, καθώς και ο εσωτερικός έλεγχος ενός εξ αυτών, με σκοπό την επιθεώρησή τους και πραγματοποιήθηκε στο κτήριο της σχολής των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Κατά το συγκεκριμένο στάδιο το ρομποτικό σύστημα επιθεώρησης αγωγών και μετά τον απαιτούμενο έλεγχο αυτού, τοποθετήθηκε αρχικώς στην είσοδο και συγκεκριμένα στην πλαϊνό τμήμα της κατασκευής εντός της οποίας βρίσκόντουσαν διάφορων τύπων αγωγοί.



Σχήμα 7.2: Τοποθέτηση ρομποτικού οχήματος σε πλαϊνή μεταλλική επιφάνεια με σκοπό την εξωτερική επιθεώρηση αγωγών

Στην συνέχεια, αφού ελέγχθηκε η σωστή λειτουργία της κάμερας και των υπόλοιπων μερών του οχήματος, κατά την είσοδό του εντός του μεταλλικού περιβάλλοντα χώρου ενεργοποιήθηκε και το σύστημα φωτισμού για την καλύτερη απόδοση της εικόνας.



Σχήμα 7.3: Ενεργοποίηση συστήματος φωτισμού για την καλύτερη απόδοση εικόνας

Η ζωντανή μετάδοση αυτής υπάρχει καθ'όλη την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, η οποία μεταδίδεται ασύρματα μέσω συνδέσεως Wi-Fi, πίσω στην βάση όπου βρίσκεται ο υπολογιστής. (Σχήμα 7.4)



Σχήμα 7.4: Ζωντανή μετάδοση εικόνας από την κάμερα του ρομποτικού συστήματος

Κατά την διάρκεια της ζωντανής μετάδοσης εικόνας πραγματοποιείται και λήψη φωτογραφιών στα σημεία όπου υπάρχει υποψία προβλήματος με βάση την αναμεταδόμενη εικόνα, με σκοπό την μετέπειτα επεξεργασία αυτών. (Σχήμα 7.5)



Σχήμα 7.5: Εικόνα προερχόμενη από την κάμερα του ρομποτικού οχήματος εντός του περιβάλλοντα μεταλλικού χώρου όπου διέρχονται αγωγοί



Για την καλύτερη αποτύπωση και επιθεώρηση το όχημα τοποθετήθηκε επίσης και στην βάση του χώρου διέλευσης αγωγών και κινήθηκε κατά μήκος αυτής, ώστε να καταγραφούν περισσότερα δεδομένα.



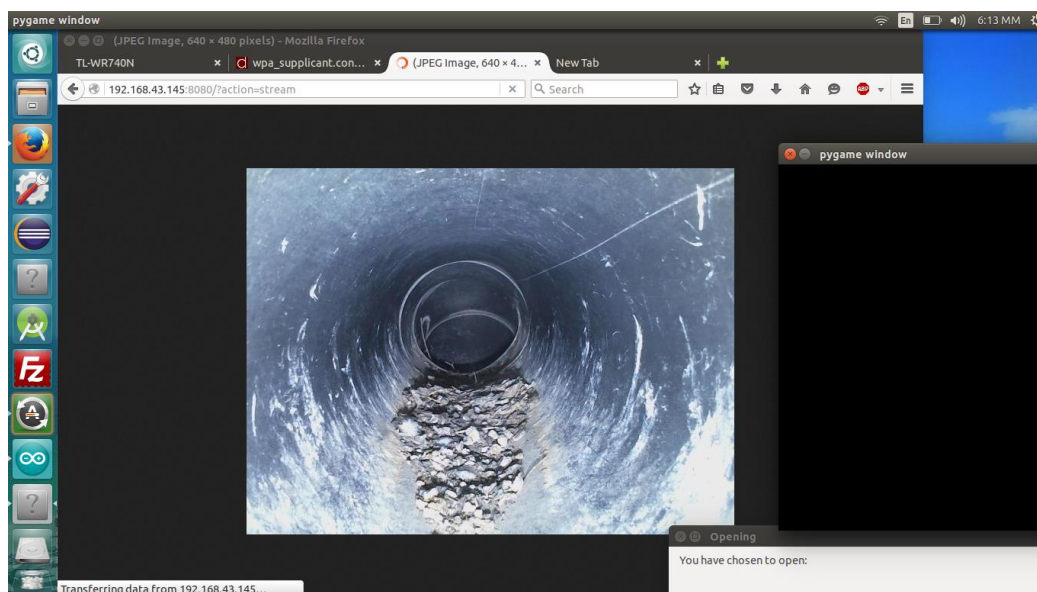
Σχήμα 7.6: Τοποθέτηση ρομποτικού οχήματος στο έδαφος, εντός του χώρου διέλευσης αγωγών

Μετά την ολοκλήρωση της εξωτερικής επιθεώρησης των αγωγών, το μη επανδρωμένο τροχοφόρο ρομποτικό σύστημα τοποθετήθηκε στην είσοδο ενός αγωγού διαμέτρου 25cm (εκατοστών) με σκοπό την επιθεώρηση του εσωτερικού τμήματος αυτού. (Σχήμα 7.7)



Σχήμα 7.7: Επιθεώρηση εσωτερικού τμήματος αγωγού

Καθ'όλη την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας υπήρχε λήψη ζωντανής εικόνας και καταγραφής φωτογραφιών για την μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων. (Σχήμα 7.8)



Σχήμα 7.8: Ζωντανή λήψη εικόνας από το εσωτερικό τμήμα του αγωγού

Η ολοκλήρωση του δεύτερου σταδίου της πειραματικής διαδικασίας περιελάμβανε την έξοδο του ρομποτικού οχήματος και την συλλογή και μετέπειτα επεξεργασία όλων των δεδομένων που κατεγράφησαν καθ'όλη την διάρκεια της διαδικασίας.

#### 7.4 Τρίτο Στάδιο Πειραματικής Διαδικασίας

Το τρίτο και τελευταίο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε αρχικά στην μεταλλική κατασκευή που κοσμεί τον περιβάλλοντα χώρο της σχολής των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, καθώς επίσης και στην εξωτερική μεταλλική κατασκευή του τελευταίου ορόφου του Κεντρικού Κτηρίου της Σχολής, με σκοπό τον έλεγχο των δυνατοτήτων του ρομποτικού συστήματος και την επιθεώρηση των μεταλλικών αυτών κατασκευών.

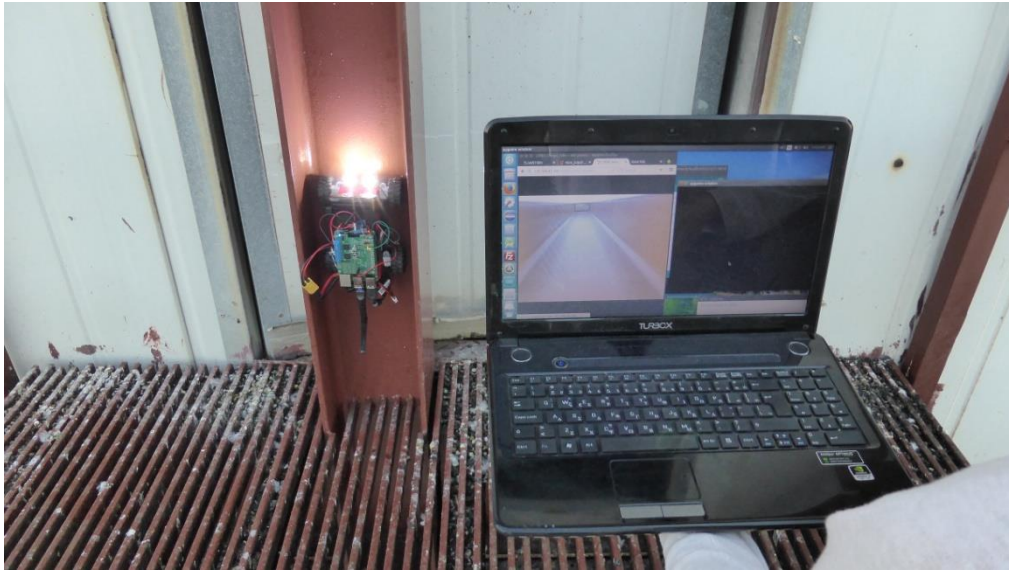
Το ρομποτικό σύστημα επιθεώρησης μετά τον απαιτούμενο έλεγχο, τοποθετήθηκε αρχικά μεταλλική κατασκευή που βρίσκεται στον περιβάλλοντα χώρο της σχολής των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και συγκεκριμένα στην βάση αυτής, ενώ στην συνέχεια οδηγήθηκε στην ανάβαση και επιθεώρησή της. (Σχήμα 7.9)



Σχήμα 7.9: Ανάβαση ρομποτικού οχήματος σε εξωτερική μεταλλική κατασκευή

Στην συνέχεια το ρομποτικό σύστημα επιθεώρησης τοποθετήθηκε σε εξωτερική μεταλλική κατασκευή που βρίσκεται στον τελευταίο όροφο του Κεντρικού Κτηρίου της σχολής των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα 7.10 και 7.11 με σκοπό την ασφαλή ανάβαση και τον έλεγχο αυτής.





Σχήμα 7.10: Τοποθέτηση ρομποτικού οχήματος στην επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής και ζωντανή μετάδοση εικόνας



Σχήμα 7.11: Παρουσίαση σημείου ελέγχου μεταλλικής κατασκευής

Στην συνέχεια, στα σχήματα 7.12, 7.13 και 7.14 παρατίθενται τρεις φωτογραφίες από την ανάβαση του ρομποτικού οχήματος στην επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής, καθώς και στην μεταλλική πρόσοψη του κτηρίου.



Σχήμα 7.12: Ανάβαση ρομποτικού οχήματος σε μεταλλική κατασκευή με παράλληλη ζωντανή μετάδοση εικόνας σε Ηλεκτρονικό Υπολογιστή



Σχήμα 7.13: Ευελιξία κίνησης οχήματος κατά την ανάβαση στενών επιφανειών σε μεταλλικές κατασκευές



Σχήμα 7.14: Κίνηση ρομποτικού οχήματος στην μεταλλική πρόσοψη του κτηρίου

Επίσης, δοκιμάστηκαν οι δυνατότητες ανάβασης στενών κεκλιμένων επιφανειών με σκοπό την παρουσίαση της μεγάλης ευελιξίας του οχήματος σε σημεία όπου απαιτούνται λεπτοί και ακριβείς χειρισμοί αυτού. (Σχήμα 7.15)



Σχήμα 7.15: Ανάβαση στενής κεκλιμένης μεταλλικής επιφάνειας

Η ολοκλήρωση του τρίτου και τελευταίου σταδίου της πειραματικής διαδικασίας περιελάμβανε την συλλογή και μετέπειτα επεξεργασία όλων των δεδομένων που κατεγράφησαν καθ' όλη την διάρκεια της διεξαγωγής των πειραμάτων.

# Κεφάλαιο 8

## Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

Στο Κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί επεξεργασία των αποτελεσμάτων από το δεύτερο και τρίτο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας του προηγούμενου Κεφαλαίου 7, τα οποία περιελάμβαναν διαδικασίες επιθεώρησης δύσβατων σημείων τόσο σε μεταλλικούς αγωγούς όσο και σε μεταλλικές κατασκευές, καθώς και τον έλεγχο των δυνατοτήτων του ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης στις διάφορες συνθήκες.

### 8.1 Αποτελέσματα Επεξεργασίας Δευτέρου Σταδίου Πειραματικής Διαδικασίας

Κατά το δεύτερο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε είσοδος του οχήματος σε εγκατάσταση μεταλλικών αγωγών καθώς και στο εσωτερικό τμήμα ενός εξ αυτών. Μετά την αρχική συλλογή των δεδομένων των εικόνων και των



βιντεοσκοπήσεων στο πεδίο ακολούθησε ένας διαχωρισμός, παρατηρώντας κάθε μια εικόνα ξεχωριστά. Αφαιρέθηκαν φωτογραφίες κατά τις οποίες η εικόνα παρουσίαζε θαμπάδα με αποτέλεσμα το περιβάλλον προβολής να μην είναι αρκετά ευκρινές. Αφού επιλέχθηκαν οι κατάλληλες εικόνες μετατράπηκαν και αποθηκεύτηκαν όλες σε μορφή .JPG.

Την αποθήκευση των εικόνων ακολούθησε η οπτική επεξεργασία τόσο αυτών όσο και των αρχείων βιντεοσκοπήσεως, με σκοπό τον οπτικό έλεγχο αρχικά του εξωτερικού τμήματος των αγωγών και του περιβάλλοντα χώρου στον οποίο βρίσκονται, καθώς επίσης και του εσωτερικού τμήματος ενός αγωγού εξ αυτών.

Στα σχήματα 8.1 και 8.2 παρατίθενται δύο φωτογραφίες από το εξωτερικό τμήμα των αγωγών καθώς και του περιβάλλοντα χώρου ενώ στα σχήματα 8.3 και 8.4 παρατίθενται δύο φωτογραφίες από το εσωτερικό τμήμα του αγωγού εντός του οποίου πραγματοποιήθηκε η επιθεώρηση.



Σχήμα 8.1: Φωτογραφία προερχόμενη από την βιντεοσκόπηση του εσωτερικού τμήματος του περιβάλλοντα χώρου όπου βρίσκονται οι αγωγοί.



Σχήμα 8.2: Πλαϊνή φωτογραφία του εσωτερικού τμήματος του περιβάλλοντα χώρου.

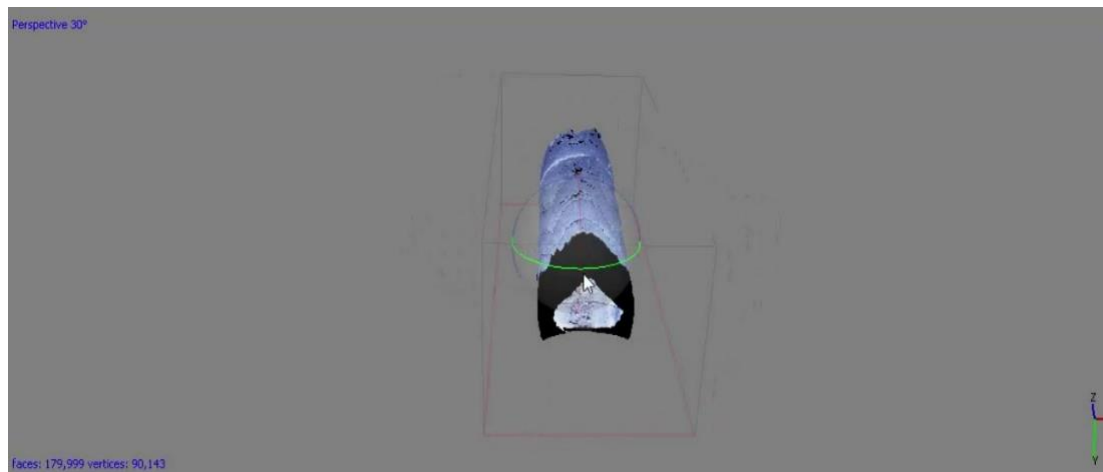


Σχήμα 8.3: Φωτογραφία του εσωτερικού τμήματος του αγωγού επιθεώρησης



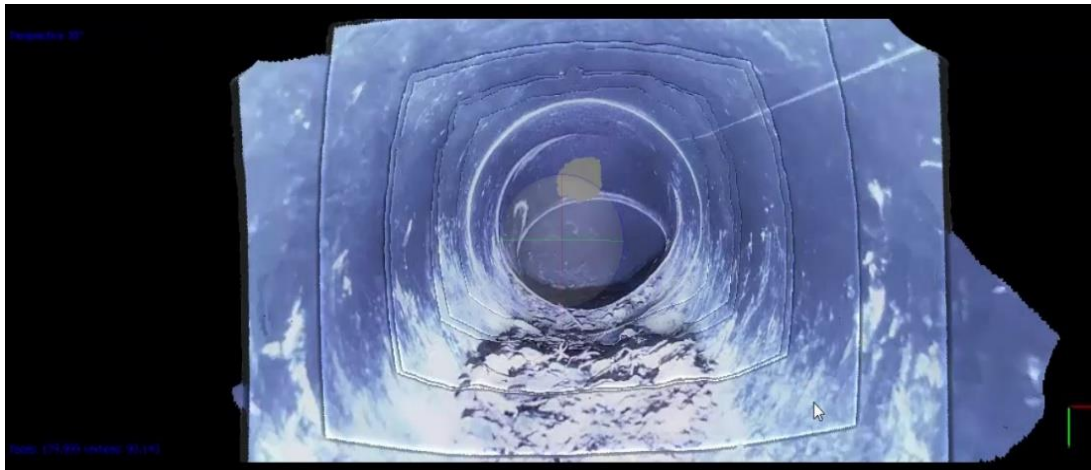
Σχήμα 8.4: Φωτογραφία προερχόμενη από την βιντεοσκόπηση του εσωτερικού τμήματος του αγωγού

Επίσης, με την συλλογή των δεδομένων φωτογραφίας και βιντεοσκόπησης από τον αγωγό έρευνας και την μετέπειτα φωτογραμμετρική επεξεργασία τους, δημιουργήθηκε μια υψηλής ευκρίνειας τρισδιάστατη (3D) αποτύπωση τόσο του εσωτερικού όσο και του εξωτερικού τμήματος του αγωγού. (Σχήματα 8.5 και 8.6)



Σχήμα 8.5: Τρισδιάστατη αποτύπωση αγωγού έρευνας





Σχήμα 8.6: Τρισδιάσταση αποτύπωση του εσωτερικού τμήματος του αγωγού

Το τελικό στάδιο της επεξεργασίας αυτής, περιελάμβανε την καταγραφή των σημείων στα οποία κατά τον οπτικό έλεγχο των δεδομένων των φωτογραφιών και της βιντεοσκοπήσης που συλλέχθηκαν κατά την διάρκεια της επιθεώρησης, φάνηκε να υπάρχει κάποιο είδος προβλήματος, τόσο εντός του εσωτερικού τμήματος του αγωγού, όσο και του περιβάλλοντα χώρου εντός του οποίου στεγάζονται διαφόρων τύποι αγωγοί.

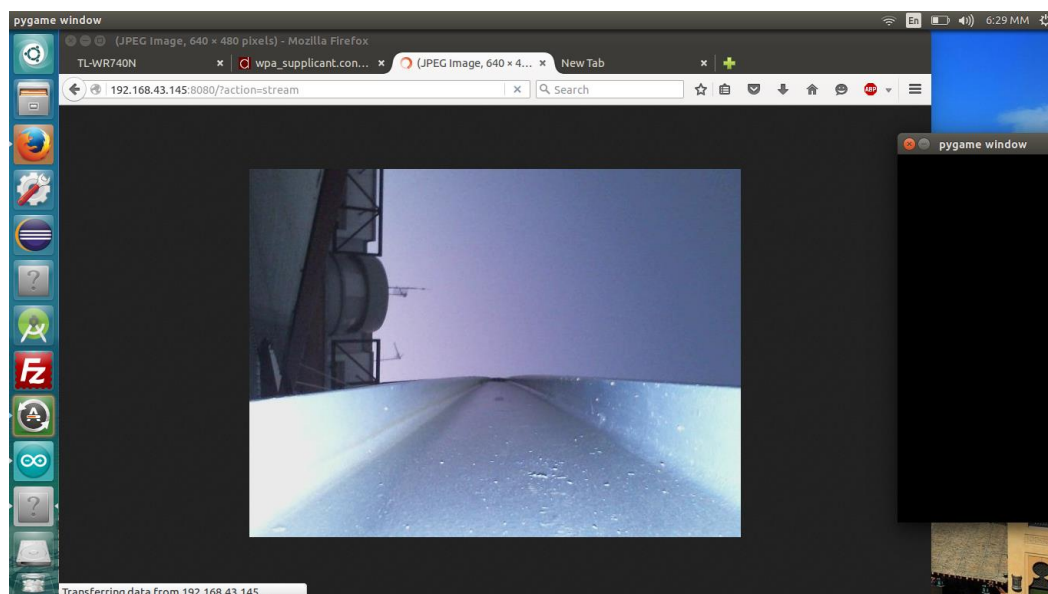
## 8.2 Αποτελέσματα Επεξεργασίας Τρίτου Σταδίου Πειραματικής Διαδικασίας

Κατά το τρίτο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε επιθεώρηση και έλεγχος του εξωτερικού τμήματος δύο διαφορετικών μεταλλικών κατασκευών. Όπως και στο προηγούμενη ενότητα, την αρχική συλλογή των δεδομένων των εικόνων και των βιντεοσκοπήσεων στο πεδίο ακολούθησε ένας διαχωρισμός στις εικόνες έπειτα από εκτενή παρατήρηση του υλικού. Αφαιρέθηκαν όλες φωτογραφίες στις οποίες η εικόνα παρουσίαζε κάποιο είδος σφάλματος με αποτέλεσμα το περιβάλλον προβολής να μην είναι αρκετά ευκρινές. Στην συνέχεια, οι επιλεγμένες εικόνες μετατράπηκαν και αποθηκεύτηκαν όλες σε μορφή .JPG, ενώ επίσης ακολούθησε η οπτική επεξεργασία τόσο αυτών όσο και των αρχείων βιντεοσκοπήσεως, με σκοπό τόσο τον οπτικό έλεγχο των τμημάτων των μεταλλικών κατασκευών, όσο και την πειραματική δοκιμασία των δυνατοτήτων προσκολλησεως και αναβάσεως του ρομποτικού οχήματος επιθεώρησης. [11]

Στα σχήματα 8.7 και 8.8 παρατίθενται δύο φωτογραφίες από το εξωτερικό τμήμα της μεταλλικής κατασκευής που βρίσκεται στον προαύλιο χώρο της σχολής των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και προσομοιάζει συνθήκες αναβάσεως σε δόκο μεταλλικού σκελετού γέφυρας.



Σχήμα 8.7: Πλάγια ανάβαση του μη επανδρωμένου οχήματος σε μεταλλική επιφάνεια

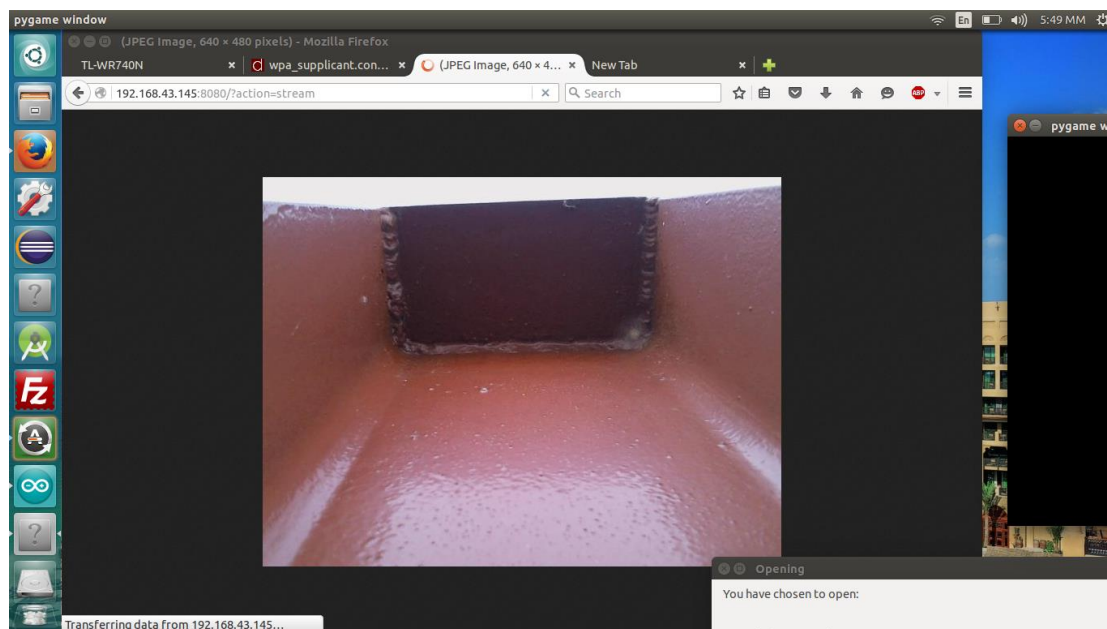


Σχήμα 8.8: Φωτογραφία από την ζωντανή μετάδοση εικόνας κατά την επιθεώρηση της μεταλλικής κατασκευής (προσομοίωση ανάβασης γέφυρας)

Στα επόμενα σχήματα 8.9 και 8.10 παρατίθενται τρεις φωτογραφίες από το εξωτερικό τμήμα των μεταλλικών κατασκευών που επιθεωρήθηκαν και βρίσκονται στον τελευταίο ορόφο του κτηρίου της σχολής των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.



Σχήμα 8.9: Φωτογραφία από το Ρομποτικό όχημα κατά την διάρκεια της επιθεώρησης της μεταλλικής κατασκευής



Σχήμα 8.10: Φωτογραφία από την ζωντανή μετάδοση εικόνας κατά την διάρκεια του ελέγχου της μεταλλικής κατασκευής

Κατά το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων, δεν υπήρξε κάποια ιδιαίτερη καταγραφή σημείων στην επιφάνεια των μεταλλικών κατασκευών στα οποία κατά τον οπτικό έλεγχο των δεδομένων των φωτογραφιών και της βιντεοσκόπησης που συλλέχθηκαν κατά την διάρκεια της επιθεώρησης, φάνηκε να υπάρχει κάποιο είδος προβλήματος.

# Κεφάλαιο 9

## Ερμηνεία Αποτελεσμάτων

Στο Κεφάλαιο αυτό θα γίνει ερμηνεία των αποτελεσμάτων από τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας του Κεφαλαίου 7 καθώς και από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του προηγούμενου Κεφαλαίου 8. Αρχικά θα παρουσιαστεί η ερμηνεία του αποτελέσματος του πρώτου σταδίου της πειραματικής διαδικασίας και έπειτα θα ακολουθήσει η ερμηνεία του δευτέρου και τρίτου σταδίου.

### 9.1 Ερμηνεία αποτελέσματος πρώτου σταδίου πειραματικής διαδικασίας

Κατά την συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία στόχος ήταν η ασφαλής προσκόλληση και κίνηση του πρωτότυπου ρομποτικού συστήματος επιθεώρησης αγωγών, σε μια κάθετη μεταλλική επιφάνεια με σκόπο την προσομοίωση συνθηκών κατά τις οποίες θα είναι αναγκαία η κάθετη ανάβαση και κατάβαση μεταλλικών επιφανειών.

Το ρομποτικό όχημα κατάφερε να προσκολληθεί και να κινηθεί επιτυχώς με ασφάλεια κάθετα και επάνω στην μεταλλική επιφάνεια, ενώ επίσης οι δοκιμές της αλλαγής κατεύθυνσης της κίνησης καθώς και του συστήματος αυξομείωσης ταχύτητας και επιτόπιας πέδησης, επιβεβαίωσαν την ομαλή λειτουργία του οχήματος. Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι η μεταλλική επιφάνεια προσκολλήσεως ήταν πάχους μόλις 1 mm (χιλιοστού), την ώρα που το κατασκευασμένο όχημα κατασκευάστηκε με αρχικές προδιαγραφές το πάχος της μεταλλικής επιφάνειας αναβάσεως να είναι το ελάχιστο 2.5 mm (χιλιοστά).

Κατά την διάρκεια διεξαγωγής της πειραματικής αυτής διαδικασίας παρατηρήθηκε σε ορισμένες περιπτώσεις μικρή ολίσθηση των τροχών του οχήματος, χωρίς την πιθανότητα πτώσης αυτού, η οποία ολίσθηση όμως δεν παρατηρήθηκε στα υπόλοιπα πειραματικά στάδια. Συμπέρασμα αυτού είναι, ότι η ολίσθηση μπορεί να οφείλεται στην λεία επιφάνεια της συγκεκριμένης μεταλλικής πλάκας, στο μικρό πάχος αυτής που είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της μαγνητικής δύναμης και συνεπώς της δυνατής προσκόλλησης του οχήματος, στην πιθανή ύπαρξη κάποιου ολισθηρού ρευστού με το οποίο οι τροχοί ήρθαν σε επαφή, καθώς επίσης και στην ίδια την εργοστασιακή πρόσφυση των ελαστικών.

## **9.2 Ερμηνεία αποτελέσματος δευτέρου σταδίου πειραματικής διαδικασίας**

Κατά την συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία στόχος ήταν η επιθεώρηση περιοχής εντός της οποίας βρισκόντουσαν μεταλλικοί αγωγοί καθώς επίσης και η επιθεώρηση του εσωτερικού τμήματος ενός εξ'αυτών, με σκοπό την ανάδειξη τυχόν δυσλειτουργιών που μπορεί να αποτελέσουν αξιοποιήσιμες πληροφορίες για την μετέπειτα επισκευή τόσο του αγωγού όσο και του περιβάλλοντα χώρου, ώστε να επανέλθει το σύστημα σε ορθή και ασφαλή λειτουργία.

Η επεξεργασία των δεδομένων της πειραματικής διαδικασίας είχε ως αποτέλεσμα την εύρεση προβλήματος τόσο στο εξωτερικό μέρος ενός εκ των αγωγών εντός του περιβάλλοντα χώρου επιθεώρησης, όσο και του αγωγού εντός του οποίου πραγματοποιήθηκε έλεγχος.

Στο σχήμα 9.1 που ακολουθεί παρατηρούμε διαρροές που παρατηρήθηκαν στο εξωτερικό μέρος ενός από τους αγωγούς που βρίσκονται εντός μεταλλικής κατασκευής



Σχήμα 9.1: Πρόβλημα διαρροής αγωγού που εντοπίστηκε κατά την διάρκεια επιθεώρησης του ρομποτικού οχήματος εντός μεταλλικής κατασκευής

Στο σχήμα 9.2 που ακολουθεί παρατηρούμε ότι εντός του εσωτερικού τμήματος του αγωγού που ελέγχθηκε διαπιστώνεται πρόβλημα συγκέντρωσης οργανικού υλικού και αποβλήτων εντός αυτού με πιθανό αποτέλεσμα την μετέπειτα φραγή του αγωγού σε περίπτωση μη πρόβλεψης ή αποφυγής καθαρισμού αυτού.





Σχήμα 9.2: Εσωτερικό τμήμα αγωγού με πρόβλημα συσσώρευσης υλικού και πιθανής φράξης

Παρατήρουμε ότι στο κεντρικό τμήμα του αγωγού έχει συσσωρευτεί οργανικό και ανόργανο υλικό, όπως χαλίκι, χώμα, κλαδιά, φύλλα κλπ., τα οποία μπορεί να οδηγήσουν στην φράξη του αγωγού, καθώς και σε άλλα προβλήματα που αφορούν την σωστή λειτουργία του.

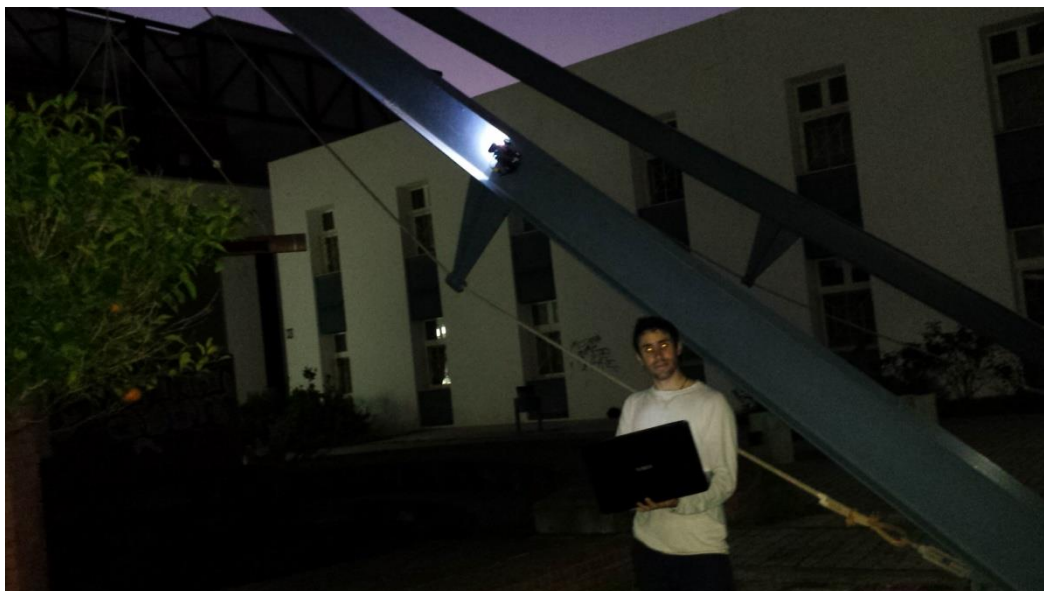
Από την επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν κατά την επιθεώρηση του ρομποτικού οχήματος, διαπιστώθηκαν και καταγράφηκαν τα παραπάνω προβλήματα με σκοπό να αποτελέσουν μια αξιοποιήσιμη πληροφορία για τον καθαρισμό και την συντήρηση των αγωγών από τον υπεύθυνο διαχειριστή.

### **9.3 Ερμηνεία αποτελέσματος τρίτου σταδίου πειραματικής διαδικασίας**

Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε επιθεώρηση και έλεγχος του εξωτερικού τμήματος δύο διαφορετικών μεταλλικών κατασκευών, καθώς και έλεγχος των δυνατοτήτων του συστήματος στις διάφορες



συνθήκες. Κατά την επιθεώρηση της πρώτης κατασκευής, η οποία βρίσκεται στον προαύλιο χώρο της σχολής των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, το ρομποτικό όχημα πέτυχε πλάγια ανάβαση της μεταλλικής κατασκευής σε ύψος που ξεπερνάει τα 3 μέτρα με σκοπό τόσο την επιθεώρηση της κατασκευής, όσο και του ελέγχου των δυνατοτήτων αυτού (Σχήμα 9.3). Το ύψος των 3 μετρών αποτελεί μονάχα ένα δείγμα των δυνατοτήτων του οχήματος μιας και έχει σχεδιαστεί ώστε να φθάνει και σε μεγαλύτερα υψόμετρα. Η συλλογή των δεδομένων και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων από την επιθεώρηση της μεταλλικής αυτής κατασκευής, δεν ανέδειξαν κάποιο πρόβλημα αυτής.



Σχήμα 9.3: Πλάγια ανάβαση του ρομποτικού οχήματος στην επιφάνεια μεταλλικής κατασκευής και σε ύψος που ξεπερνάει τα 3 μέτρα

Κατά την επιθεώρηση της δεύτερης μεταλλικής κατασκευής, η οποία βρίσκεται στον τελευταίο όροφο του κτηρίου της σχολής των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, το ρομποτικό όχημα κατόρθωσε να επιτύχει κάθετη ανάβαση στην στενή επιφάνεια της μεταλλικής αυτής κατασκευής, με σκοπό την επιθεώρησή της. Η δοκιμή των δυνατοτήτων ανάβασης στενών κάθετων αλλά και κεκλιμένων επιφανειών με σκοπό την παρουσίαση της ευελιξίας του οχήματος σε σημεία όπου απαιτούνται λεπτοί και ακριβείς χειρισμοί αυτού, ήταν απόλυτα επιτυχείς. Η συλλογή των δεδομένων και η

επεξεργασία των αποτελεσμάτων εικόνας και βιντεοσκοπήσεως από την επιθεώρηση της εξωτερικής μεταλλικής κατασκευής, δεν ανέδειξαν κάποιο πρόβλημα αυτής.

#### **9.4 Συμπεράσματα**

Στο Κεφάλαιο αυτό έγινε μια ερμηνεία των αποτελεσμάτων από την συλλογή και μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων τα οποία λήφθηκαν από το ρομποτικό όχημα επιθεώρησης σε κάθε ένα από τα τρία πειραματικά στάδια. Στην συνέχεια, καταγράφηκαν και αναδείχθηκαν τα ευρεθέντα προβλήματα με σκοπό την αξιοποίηση των συλλεχθέντων πληροφοριών που θα οδηγήσει στην λύση αυτών. Επίσης, ελέγχθηκε με επιτυχία μέρος των δυνατοτήτων και της ευελιξίας του πρωτότυπου κατασκευασμένου οχήματος.

# Κεφάλαιο 10

## Συμπεράσματα και Προτάσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε, προγραμματίστηκε και τελικά κατασκευάστηκε ένα πρωτότυπο ρομποτικό μη επανδρωμένο τροχοφόρο όχημα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος επιστημών και εφαρμογών όπως οι Γεωεπιστήμες, η βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, η προστασία του περιβάλλοντος από διαρροές, καθώς και σε εφαρμογές έρευνας και διάσωσης, καλύπτοντας ένα μεγάλο εύρος του κλάδου των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.

Χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου οχήματος είναι το εύρος των δυνατοτήτων που προσφέρει σε σχέση με το χαμηλό του κόστος, το οποίο είναι περίπου 20-40 φορές μικρότερο από αντίστοιχα συστήματα που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Επίσης, η προσφερόμενη συγκεκριμένη λύση είναι πλήρως παραμετροποιήσιμη με δυνατότητες εύκολης επέκτασης σε αυτονομία, επιλογή κάμερας και προσθήκης εξοπλισμού που αφορά αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα, κ.ά.

Το πρωτότυπο ρομποτικό σύστημα με τις δυνατότητες και το χαμηλό του κόστος θα μπορούσε να αποτελέσει μία εύχρηστη εναλλακτική λύση για Εθνικούς και τοπικούς οργανισμούς, όπως η Δημόσια Εταιρεία Ηλεκτρισμού, εταιρείες πετρελαίου (ΕΛ.ΠΕ.), φυσικού αερίου (Φυσικό Αέριο Αττικής), κ.α.. Κατασκευαστικές εταιρείες (π.χ. Άκτωρ), μπορούν άμεσα και με ελάχιστο κόστος να πραγματοποιήσουν επιθεωρήσεις και συντήρηση τόσο των αγωγών, όσο και των διαφόρων μεταλλικών κατασκευών τους, εκμεταλλευόμενοι το πλήθος των δυνατοτήτων που προσφέρει το ρομποτικό σύστημα.

Οι μελλοντικές παραμετροποιήσεις περιλαμβάνουν τόσο τη δημιουργία νέου σκελετού, ώστε το σύστημα να αποκτήσει υδατοστεγανότητα, καθώς και την πλήρη αυτοματοποίησή του για την εύρεση ρωγμών και διαρροών σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, αφορούν στην κατασκευή και ενσωμάτωση ειδικής βάσης στο όχημα, η οποία θα δίνει στο χρήστη την δυνατότητα κίνησης και περιστροφής της κάμερας, ενώ μπορεί να προστεθεί και δεύτερη κάμερα με δυνατότητα λήψης υπέρυθρων εικόνων για την καλύτερη αποτύπωση και καταγραφή. Τέλος, μελλοντικές παραμετροποιήσεις περιλαμβάνουν την προσθήκη πλάγιας κίνησης του οχήματος και την αύξηση της δυνατότητάς του να υπερπηδά εμπόδια, καθώς και την προσθήκη της δυνατότητας ανάλυσης δεδομένων με διαδικασίες επεξεργασίας εικόνας.

Το κατασκευασμένο ρομποτικό όχημα θα παραμείνει στο τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και συγκεκριμένα στο εργαστήριο Γεωδαισίας και Πληροφορικής των Γεωεπιστημών, για περαιτέρω εξέλιξη, τόσο σε επίπεδο εξοπλισμού όσο και σε επίπεδο λογισμικού, με την ταυτόχρονη έρευνα άλλων εφαρμογών στις οποίες θα μπορεί να ανταπεξέλθει..

## **Βιβλιογραφία**

- [1] Y. Kawaguchi, L. Yoshida, H. Kurumatani, and T. Kikuta, “Development of an Internal Pipe Inspection Robot”, Proceedings of 12<sup>th</sup> Annual Conference of Japan Robotics Society, pp. 447-448, 1994.
- [2] J. Hollingum, “Robots explore underground pipes”, Ind. Robot, vol.25, no.5, pp. 321-325, 1998.
- [3] Y. Kawaguchi, L. Yoshida, H. Kurumatani, and T. Kikuta, “Development of an In-pipe Inspection Robot for Iron Pipes”, J. of the Robotics Society of Japan, Vol. 14, pp. 137-143, 1996.
- [4] A. Kroll, “A survey on mobile robots for industrial inspections”, Intelligent Autonomous Systems 10, pp. 406 - 412, 2008.
- [5] S. Iwashita, I. Hayashi, N. Iwatsuki, and K. Nakamura, “Development of in-pipe operation micro robots”, Proc. IEEE 5<sup>th</sup> Int. Symp. Micro Machine and Human Sciences, pp. 41-45, 1994.
- [6] J. Saenz, N. Elkmann, T. Stuerze, S. Kutzner, and H. Althoff, “Robotic systems for cleaning and inspection of large concrete pipes”, Applied Robotics for the Power, Industry, IEEE Montreal, pp. 1-7, 2010.
- [7] M. Suzuki, T. Yukawa, Y. Satoh, and H. Okano, “Mechanisms of autonomous pipe-surface inspection robot with magnetic elements”, Systems, Man and Cybernetics, IEEE Taipei, pp. 3286-3291, 2006.
- [8] S. Hirose, H. Ohno, T. Mitsui, and K. Suyama, “Design of in-pipe inspection vehicles for  $\Phi 25$ ,  $\Phi 50$ ,  $\Phi 150$  pipes”, Robotics and Automation, IEEE Detroit, Vol. 3, pp. 2309-2314, 1999.
- [9] M. Muramatsu, N. Namiki, R. Koyama, and Y. Suga, “Autonomous Mobile Robot in Pipe for Piping Operations”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2166-2171, 2000.
- [10] S.G. Roh and H.R. Choi, “Differential-Drive In-Pipe Robot for Moving Inside Urban Gas Pipelines”, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 21, No. 1, pp. 1-17, 2005.

- [11] O. Duran, K. Althoefer, and L.D. Seneviratne, "Automated Sewer Pipe Inspection through Image Processing", International Conference on Robotics and Automation, pp. 2551-2556, 2002.
- [12] S.G. Roh, S.M. Ryew, J.H. Yang, and H.R. Choi, "Actively Steerable Inpipe Inspection Robots for Underground Urban", International Conference on Robotics and Automation, pp. 761-766, 2001.
- [13] M.M. Moghaddam and A. Hadi, "Control and Guidance of a Pipe Inspection Crawler (PIC)", International Symposium on Automation and Robotics, pp. 11-14, 2005.
- [14] H.R. Choi and S.M. Ryew, "Robotic system with active steering capability for internal inspection of urban gas pipelines", Mechatronics, Vol. 12, No. 5, pp. 731-736, 2001.
- [15] T. Fukuda, H. Hosokai, and H. Ohyama, "A study on in-pipe inspection robots", International J. Japan Society Mech. Eng., Vol. 57, No. 537, pp. 243-248, 1991
- [16] C.P. Lu, H.P. Huang, J.L. Yan, and T.H. Cheng, "Development of a pipe inspection robot", Proc. 33<sup>rd</sup> IEEE IECON, pp. 626-631, 2007.
- [17] T. Okada and T. Sanemori, "MOGRER: A vehicle study and realization for in-pipe inspection tasks, IEEE J. Robot. Autom., Vol. RA-3, No. 6, pp. 573-581, 1987
- [18] A.A.F. Nassiraei, Y. Kawamura, A. Ahrary, Y. Mikuriya, and K. Ishii, "Concept and design of a fully autonomous sewer pipe inspection mobile robot KANTARO", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 136-143, 2007
- [19] F. Kirchner and J. Hertzberg, "A prototype Study of an Autonomous Robot Platform for Sewerage System Maintenance" Autonomous robots 4, pp. 319-331, 1997.
- [20] E. Rome, J. Hertzberg, F. Kirchner, U. Lichet, H. Streich, and T. Christaller, "Towards Autonomous Sewer robots: The MAKRO project", J. Urban Water, pp. 1-70, 1999.

- [Link 1]: <http://aitproducts.com/borescopes/robotic-pipe-inspection-cameras.html>
- [Link 2]: <http://www.inuktun.com/crawler-vehicles/>
- [Link 3]: <http://www.honeybeerobotics.com/portfolio/pipe-inspection-robot/>
- [Link 4]: <http://www.azorobotics.com/equipment-details.aspx?EquipID=526>
- [Link 5]: <http://roteksan.com.tr/hizmet.asp?hId=20>
- [Link 6]: <https://www.pololu.com/product/995>
- [Link 7]: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/>
- [Link 8]: <http://www.raspberrypi-spy.co.uk/2014/07/new-raspberry-pi-model-b-revealed/>
- [Link 9]: <http://www.logitech.com/el-gr/product/hd-webcam-c525>
- [Link 10]: <https://www.pololu.com/product/2755>
- [Link 11]: <http://www.hobbypartz.com/98p-30c-5300-2s1p.html>
- [Link 12]: <https://www.kjmagnetics.com/calculator.asp>
- [Link 13]: <https://el.wikipedia.org/wiki/Ethernet>
- [Link 14]: [http://www.kal-electronics.gr/index.php/rl-c18c4hw-led-3w-lefko-xroma-ypsilis-foteinotitas-detail?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&product\\_id=1044&category\\_id=196](http://www.kal-electronics.gr/index.php/rl-c18c4hw-led-3w-lefko-xroma-ypsilis-foteinotitas-detail?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=1044&category_id=196)
- [Link 15]: [https://secure.globeadvisor.com/servlet/ArticleNews/story/gam/20110527/ROBMAG\\_JUNE\\_2011\\_P12\\_14](https://secure.globeadvisor.com/servlet/ArticleNews/story/gam/20110527/ROBMAG_JUNE_2011_P12_14)
- [Link 16]: [https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic\\_acid](https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid)
- [Link 17]: [https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile\\_butadiene\\_styrene](https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene)
- [Link 18]: <https://www.lairdplastics.com/product/materials/petg>
- [Link 19]: <http://www.pipeline101.com/are-pipelines-safe/better-safety-through-technology>
- [Link 20]: [https://www.youtube.com/watch?v=IWUtHt5J\\_Gc](https://www.youtube.com/watch?v=IWUtHt5J_Gc)
- [Link 21]: [http://www.cs.cmu.edu/~halismai/images/lpv\\_robot\\_1.jpg](http://www.cs.cmu.edu/~halismai/images/lpv_robot_1.jpg)
- [Link 22]: [http://cdn.theatlantic.com/assets/media/img/photo/2014/11/robots-at-work-and-play/r08\\_24162557/main\\_900.jpg?1420490894](http://cdn.theatlantic.com/assets/media/img/photo/2014/11/robots-at-work-and-play/r08_24162557/main_900.jpg?1420490894)
- [Link 23]: [http://archive.wired.com/news/images/full/wtc\\_robot\\_01\\_f.jpg](http://archive.wired.com/news/images/full/wtc_robot_01_f.jpg)
- [Link 24]: <http://www.cctexas.com/government/gas/damage-prevention/index>

(Τελευταία επίσκεψη ιστοτόπων, 12 Φεβρουαρίου 2016).