

Ψηφιακός έλεγχος – Τελική εργασία

Τίτλος εργασίας: Δημιουργία συστήματος διαλογής και τοποθέτησης (pick and place) με την κατασκευή ρομποτικού βραχίονα και ζυγαριάς, με σκοπό την ταξινόμηση αντικειμένων με κριτήριο το βάρος τους.

Ονοματεπώνυμο: Πρίντζιος Λάμπρος

Περιεχόμενα:

Εισαγωγή – Θέμα και σκοπός της εργασίας.....	2
Περιγραφή της διαδικασίας υλοποίησης της κατασκευής.....	3
Εξήγηση της γραφικής διεπαφής και του κώδικα στο LabVIEW	16
Αποτελέσματα και συμπεράσματα	28
Παραπομπές – Πηγές.....	30

Εισαγωγή – Θέμα και σκοπός της εργασίας

Όπως αναφέρει και ο τίτλος της εργασίας, στόχος μου είναι η κατασκευή μιας διάταξης διαλογής και τοποθέτησης αντικειμένων, η οποία θα έχει τη δυνατότητα να τα ταξινομεί βάσει του βάρους τους. Τα δύο κυριότερα και πιο απαιτητικά ζητούμενα της διάταξης είναι η δημιουργία μιας ακριβούς ζυγαριάς, η οποία προφανώς θα χρησιμοποιείται για τη ζύγιση των αντικειμένων και η δημιουργία ενός ρομποτικού βραχίονα, ο οποίος θα αναλαμβάνει τις εργασίες της επιλογής, μεταφοράς και τοποθέτησης των διαφόρων αντικειμένων. Επιχείρησα να φτιάξω κάτι χειροποίητο, με καθημερινά υλικά που μπορεί οποιοσδήποτε να βρει στο σπίτι του. Κάποια από τα ηλεκτρονικά μέρη της κατασκευής έπρεπε προφανώς να αγοραστούν.

Το θέμα της εργασίας αυτής βρίσκει πολλές εφαρμογές, κυρίως στη βιομηχανία τροφίμων, με την ταξινόμηση αυγών, τυριών, κρεάτων, ψαριών και φρούτων να είναι οι πιο συνηθισμένες. Ο χώρος της βιομηχανίας φαρμάκων είναι επίσης ένα ευρύ πεδίο δράσης των τεχνολογιών αυτών, π.χ. λόγω της ανάγκης ζύγισης και ταξινόμησης μεγάλων ποσοτήτων χαπιών. Η Morrison Weighing Systems [1] είναι ίσως η γνωστότερη εταιρία που δημιουργεί τέτοιου είδους συστήματα ταξινόμησης με ζυγαριές υψηλής ακρίβειας για μια πληθώρα πραγματικών εφαρμογών, με κάποια άλλα παραδείγματα να αποτελούν η Falcon Autotech, η Scaletronic, η Arlyn Scales, η Thompson Scale Company κ.ά.. Οι εταιρίες αυτές κατασκευάζουν (μεταξύ άλλων) διατάξεις ταξινόμησης, που ταξινομούν και κατηγοριοποιούν αντικείμενα διαφόρων μεγεθών και σχημάτων σε ξεχωριστές ομάδες με κριτήριο το βάρος τους. Γενικά, τα συστήματα του εμπορίου ελέγχουν αν το βάρος ενός αντικειμένου ανήκει σε ένα εύρος τιμών και το κατατάσσουν στην ανάλογη κατηγορία. Αντιθέτως, εδώ αντιμετωπίζω κάθε αντικείμενο (πρόκειται για μικρά κουτιά που φέρουν διαφορετικά βάρη) ως ξεχωριστή κατηγορία.

Η συντριπτική πλειοψηφία των διατάξεων ζύγισης και ταξινόμησης που κυκλοφορούν στην αγορά χρησιμοποιούν μεταφορικές ταινίες για την ανατροφοδότηση και τη μετακίνηση των αντικειμένων, με ζώνες και διαδρομές εξόδου για την οδήγηση των ταξινομημένων αντικειμένων στις κατάλληλες ομάδες αποθήκευσης (π.χ. σε ειδικούς κάδους) ή για το πέρασμά τους στην επόμενη φάση της βιομηχανικής διαδικασίας. Η επιλογή αυτή είναι η συμφέρουσα ιδίως σε χώρους παραγωγής με μεγάλες αποστάσεις. Λόγω του μικρού μεγέθους της κατασκευής μου, αποφάσισα να διαφοροποιηθώ δοκιμάζοντας τη χρήση ενός ρομποτικού βραχίονα, ο οποίος λειτουργεί ως pick and place ρομπότ [2] (ας σημειωθεί ότι αυτά τα ρομπότ υπάρχουν και σε μεταφορικές ταινίες, αλλά έχουν συνήθως επικουρικό χαρακτήρα και δουλεύουν τοπικά). Τέτοια ρομποτικά συστήματα προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία εγκατάστασης, επανατοποθέτησης και κίνησης, ευκολότερη προσαρμογή στις απαιτήσεις του χώρου και πιο άνετη συντήρηση [3]. Διαθέτουν συχνά αισθητήρες με τους οποίους αντιλαμβάνονται την κατάστασή τους (π.χ. θέση και ταχύτητα του τελικού στοιχείου δράσης) και το περιβάλλον τους, κάτι που δεν υλοποιώ εδώ.

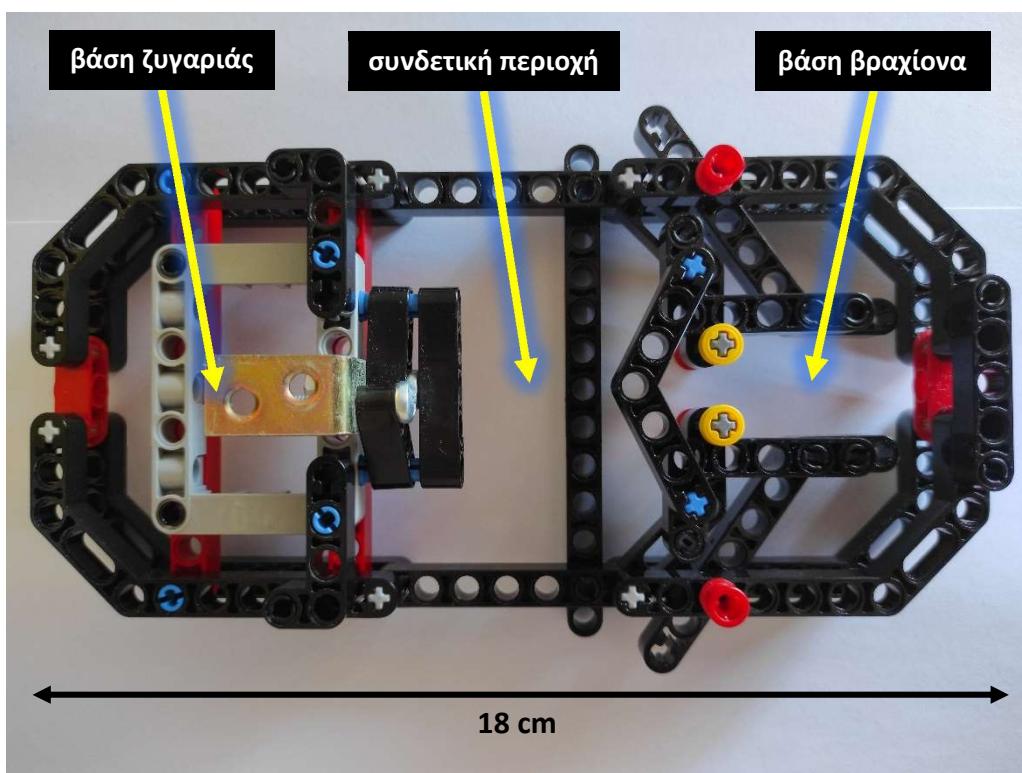
Σημαντικές τεχνικές προδιαγραφές για τις διατάξεις με τις οποίες ασχολούμαι αποτελούν η μεγάλη ταχύτητα, η υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία, καθώς και η ευελιξία και η πλήρης αυτοματοποίηση της διαδικασίας. Επιπλέον, πολλές φορές υφίστανται δικλείδες ασφαλείας που διασφαλίζουν την επιτυχή επιτέλεση της εργασίας ακόμη και σε περιπτώσεις ξαφνικής διακοπής της ή ύπαρξης τυχόν σφαλμάτων και πραγματοποιούνται τεστ ποιότητας για την απόρριψη ελαττωματικών προϊόντων. Η κατασκευή μου δίνει έμφαση στα στοιχεία της αυτοματοποίησης, της ακρίβειας και της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας.

Περιγραφή της διαδικασίας υλοποίησης της κατασκευής

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται με αναλυτικό τρόπο το σύνολο των μηχανολογικών και ηλεκτρολογικών υλικών, καθώς και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ολοκλήρωση της κατασκευής. Εξηγείται ακόμα η χρησιμότητα και η λειτουργία του καθενός στην υλοποίηση της διάταξης. Για την καλύτερη παρουσίαση της κατασκευαστικής διαδικασίας, έχει γίνει η διαμέρισή της σε πέντε βασικά κομμάτια, που κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθούν ξεχωριστά. Αυτά είναι η βάση στήριξης, η ζυγαριά, ο ρομποτικός βραχίονας, τα κουτάκια αποθήκευσης των βαρών και το ηλεκτρικό κύκλωμα.

1. Βάση στήριξης

- Κομμάτια lego από το σετ LEGO MINDSTORMS EV3 31313
- 2 όμοιες βίδες και 2 αντίστοιχα παξιμάδια
- 1 μεταλλική γωνία στήριξης



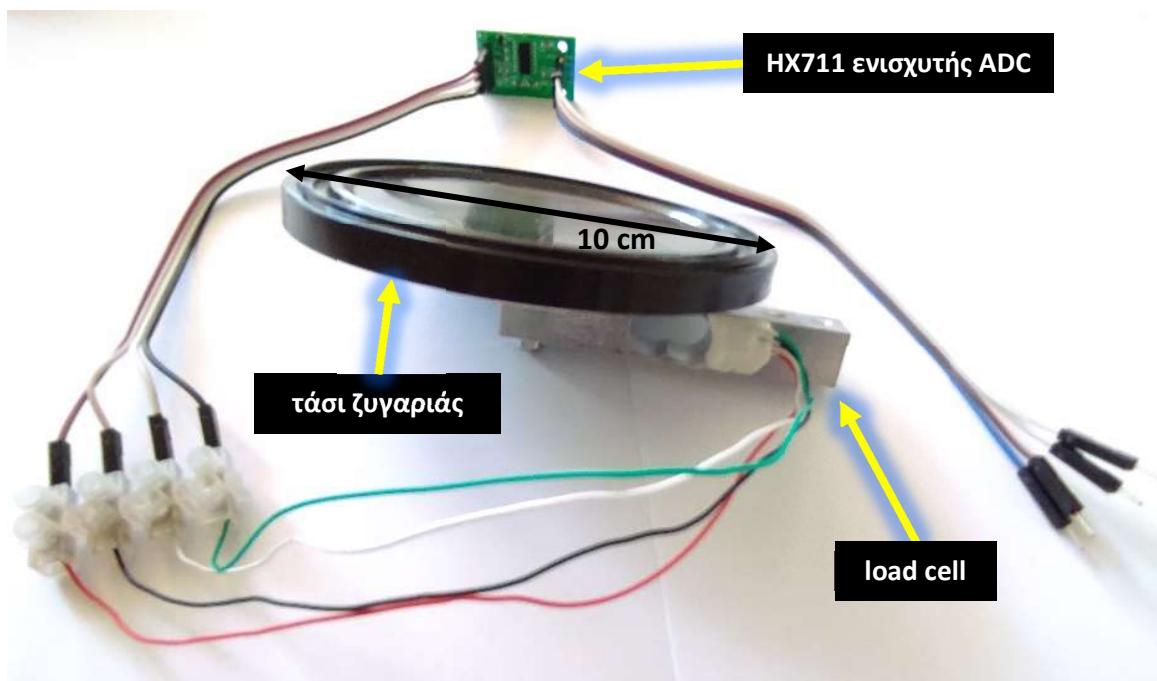
Εικόνα 1

Η βάση στήριξης χρησιμεύει για την ορθή τοποθέτηση και τη στερέωση της ζυγαριάς και του βραχίονα. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1 συνίσταται αποκλειστικά από κομμάτια lego. Αποτελείται πρακτικά από τρία δομικά μέρη: τη βάση της ζυγαριάς, τη βάση του βραχίονα και τη συνδετική περιοχή (το μέγεθός της καθορίζει τις σχετικές θέσεις της ζυγαριάς και του βραχίονα) που ενώνει τις δύο επιμέρους βάσεις. Στη βάση της ζυγαριάς έχει βιδωθεί με τη χρήση των βιδών και των παξιμαδιών η μεταλλική γωνία, πάνω στην οποία στηρίζεται το load cell της ζυγαριάς.

Στην κενή θέση (σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου) που υπάρχει στη βάση του ρομποτικού βραχίονα, εφαρμόζει ο κινητήρας της περιστροφικής άρθρωσης του βραχίονα. Η βάση στήριξης είναι σχετικώς ελαφριά, γι' αυτό βιδώνεται σε συμπαγή, αρκετά βαρύτερη ξύλινη σανίδα, με σκοπό την αύξηση της σταθερότητάς της. Μ' αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η πιθανότητα ανατροπής της όταν ο βραχίονας βρίσκεται σε ακραίες θέσεις, καθώς και το ενδεχόμενο περιστροφής της εξαιτίας των γωνιακών επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων που προκαλεί η περιστροφική άρθρωση του βραχίονα.

2. Ζυγαριά

- 1 load cell μέγιστου ανεκτού βάρους 1 kg
 - 1 HX711 ενισχυτής ADC (analog to digital converter)
 - 2 κυκλικά καπάκια (από μικρό βάζο και από συσκευασία καφέ)
 - 2 όμοιες βίδες και 3 αντίστοιχα παξιμάδια
 - Κλέμμες 4 πόλων
 - Αυτοκόλλητη ταινία διπλής όψης



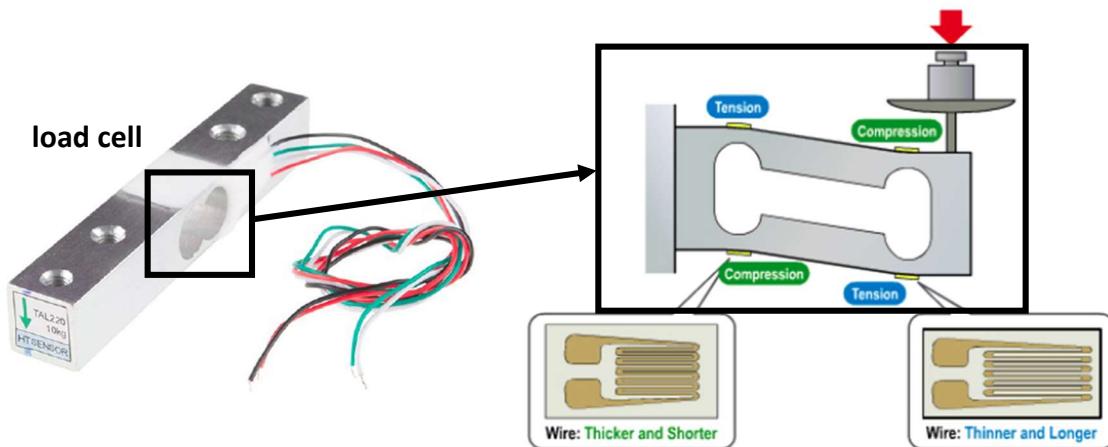
Εικόνα 2

Η ζυγαριά αποτελεί τον μοναδικό αισθητήρα της κατασκευής, όντας απαραίτητη για τη ζύγιση των διάφορων κουτιών και την καταγραφή του βάρους τους. Τα βασικά μέρη της είναι το load cell, ο ενισχυτής HX711 και το τάσι της (εικόνα 2). Παρακάτω αναλύεται η λειτουργία τους.

Το τάσι της ζυγαριάς χρησιμεύει ως η επιφάνεια πάνω στην οποία εναποτίθενται τα κουτιά προς ζύγιση. Για την κατασκευή του άνοιξα με τρυπάνι μια οπή στο μικρό καπάκι, στο κέντρο του, έτσι ώστε να μπορεί να περάσει η κατάλληλη βίδα και έπειτα βίδωσα το μικρό καπάκι (με το κάτω μέρος του, δηλαδή το κυρτό κομμάτι, να “κοιτάζει” προς τα πάνω) στη μεριά του load cell

που δεν βρίσκεται κοντά στα καλώδια του. Ανάμεσα στο μικρό καπάκι και στο load cell παρεμβάλλεται ένα παξιμάδι, έτσι ώστε το καπάκι να διατηρεί μία ασφαλή απόσταση από την ευαίσθητη περιοχή στο κέντρο του load cell. Στη συνέχεια, με χρήση της κολλητικής ταινίας διπλής όψης, εφάρμοσα πάνω στο μικρό καπάκι το μεγαλύτερο μαύρο καπάκι της συσκευασίας καφέ, το οποίο έχει διάμετρο περίπου 10 cm. Για να είναι σωστές οι μετρήσεις που λαμβάνουμε από το load cell πρέπει το τάσι της ζυγαριάς να είναι όσο το δυνατόν σταθερό, γι' αυτό το έχω κολλήσει πάνω στο load cell με χρήση της διπλοκόλλητης ταινίας.

Το load cell είναι αισθητήρας γέφυρας και χρησιμοποιείται κατά κόρον για την κατασκευή συστημάτων ζύγισης, τόσο ερασιτεχνικά όσο και σε βιομηχανικές εφαρμογές. Πρόκειται για μία μεταλλική ράβδο, ελάχιστα ελαστική, που στο κέντρο της περιέχονται τέσσερις ίδιοι Strain Gauge ηλεκτρικοί αισθητήρες διατεταγμένοι σε σχήμα γέφυρας Wheatstone [4]. Οι Strain Gauge μετατρέπουν τη δύναμη ή πίεση που δέχεται η μεταλλική ράβδος σε μετρήσιμη αλλαγή της αντίστασής τους. Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3, όταν ασκείται μια δύναμη στο ένα άκρο της μεταλλικής ράβδου ενώ το άλλο είναι πακτωμένο, υπάρχουν δύο περιοχές που παραμορφώνονται θλιπτικά (compression), όπου οι αντιστάσεις των αντίστοιχων Strain Gauge μειώνονται και κατά συνέπεια υπάρχουν δύο ακόμα περιοχές που υφίστανται εφελκυσμό (tension), με αποτέλεσμα οι αντιστάσεις των αντίστοιχων Strain Gauge να αυξάνονται. Οι μεταβολές αυτές επιδρούν άμεσα στην τάση εξόδου της γέφυρας, η οποία είναι ανάλογη του φορτίου που δέχεται το load cell, έτσι εξάγουμε συμπεράσματα για το μέγεθος της δύναμης και το είδος της μηχανικής παραμόρφωσης που έχει υποστεί λόγω αυτής. Το load cell που διαθέτω μπορεί να δεχτεί μέγιστη δύναμη που αντιστοιχεί σε μάζα 1 kg, επομένως είναι υπεραρκετό για τα μικρά βάρη μάζας μικρότερης των 100 gr που χρησιμοποιώ στην εργασία. Το άκρο που είναι ελεύθερο, δηλαδή αυτό που δεν φέρει το τάσι, πακτώνεται με μία βίδα και ένα παξιμάδι στη μεταλλική γωνία της βάσης στήριξης. Τα τέσσερα καλώδια του load cell είναι πολύ λεπτά και ευαίσθητα, με αποτέλεσμα να χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή όταν τα γυμνώνουμε και τα βιδώνουμε στις κλέμμες 4 πόλων για τη σύνδεσή τους με το HX711.



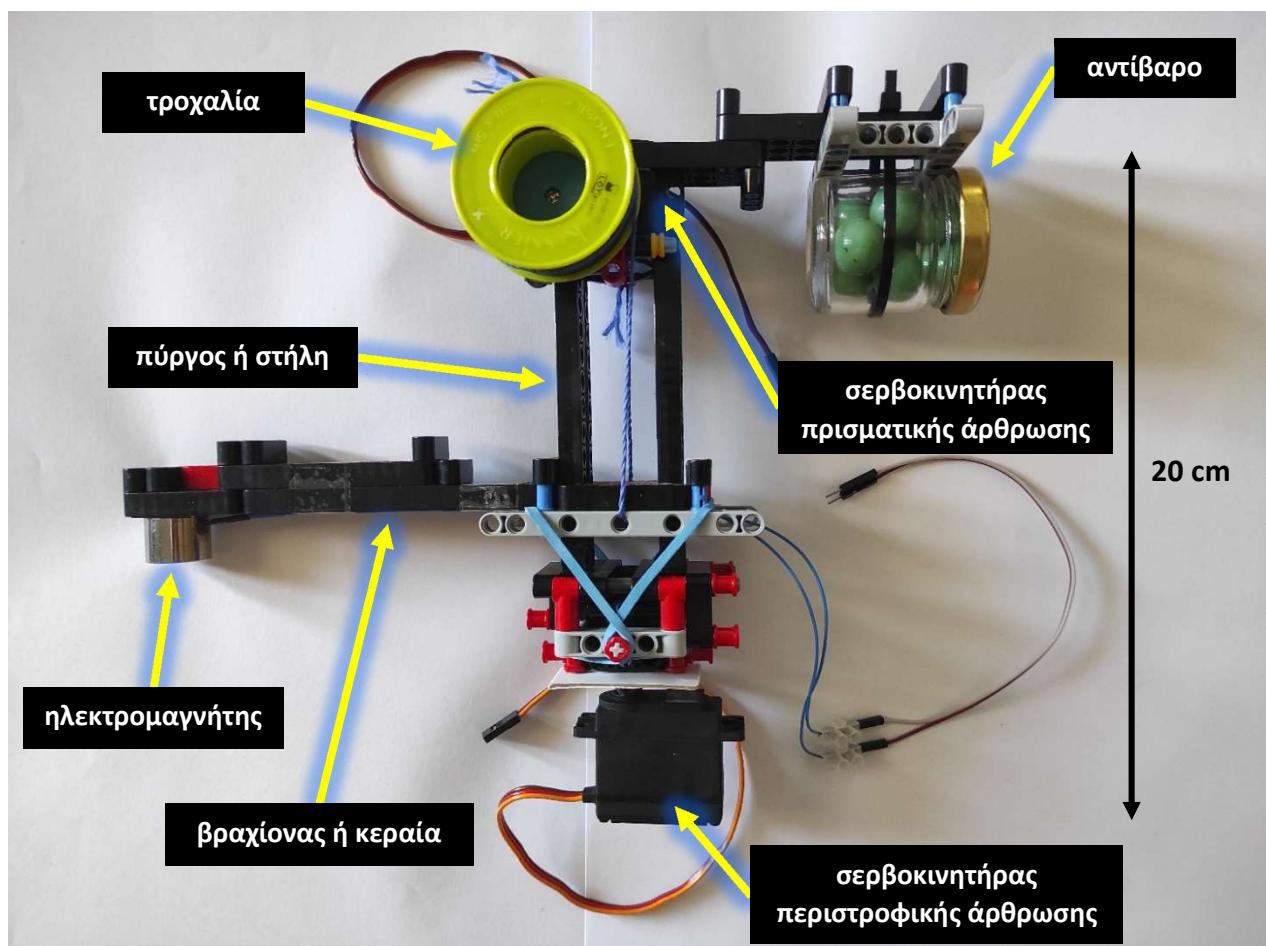
Εικόνα 3

Ο ενισχυτής HX711 είναι ένας μετατροπέας από αναλογικό σήμα σε ψηφιακό (ADC) ακρίβειας 24 bits, σχεδιασμένος να λειτουργεί συνδεδεμένος με αισθητήρες γέφυρας, όπως ακριβώς είναι το load cell [5]. Είναι απαραίτητος για την ανάγνωση της μέτρησης του load cell, διότι πρώτον ενισχύει το αναλογικό σήμα τάσης που δίνει ο αισθητήρας στην έξοδο και δεύτερον

μετατρέπει την αναλογική τιμή σε ψηφιακά δεδομένα που οδεύουν προς επεξεργασία στο arduino board μέσω digital pins. Η επικοινωνία με το arduino board πραγματοποιείται με το πρωτόκολλο επικοινωνίας TWI (Two Wire Interface), δηλαδή υπάρχει μια γραμμή Data για τη μεταφορά των σειριακών δεδομένων και μια γραμμή Clock για το σήμα του ρολογιού. Περισσότερα για τον τρόπο σύνδεσής του με το load cell και τον μικροελεγκτή arduino θα ειπωθούν αργότερα στο μέρος “5. Ηλεκτρικό κύκλωμα”.

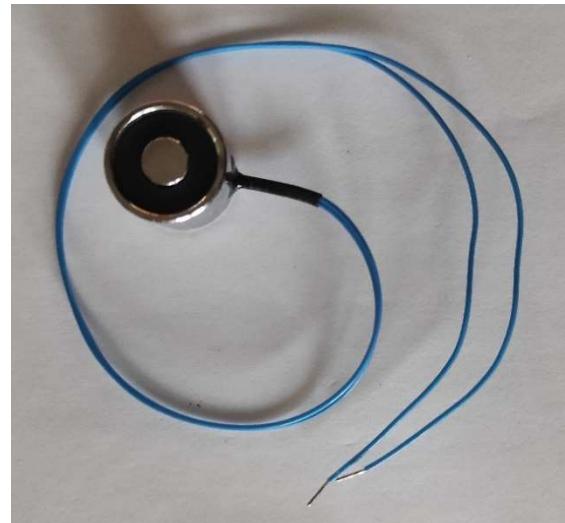
3. Ρομποτικός βραχίονας (ανυψωτικός μηχανισμός – γερανός)

- Κομμάτια lego από το σετ LEGO MINDSTORMS EV3 31313
- 2 servomotors FT5116M της Feetech
- 1 ηλεκτρομαγνήτης DFR0794 των 5 V DC, 1 W ονομαστική ισχύς, 3 kg δύναμη κρατήματος
- Κλέμμες 2 πόλων
- 1 ρολό λευκοπλάστη και 1 ρολό κλασικής μαύρης κολλητικής ταινίας μονής όψης
- Σπάγκος και λαστιχάκια
- Βαζάκι και 8 σφαιρικοί βόλοι μάζας 5 – 6 gr
- Αυτοκόλλητη ταινία διπλής όψης και δεματικά (tie-wraps)



Εικόνα 4

Για τους σκοπούς της εργασίας αποφάσισα να κατασκευάσω έναν ρομποτικό βραχίονα – γερανό τύπου πύργου (δηλαδή πυργογερανό, tower crane). Θεωρώ ότι είναι η απλούστερη δυνατή επιλογή για να εξυπηρετήσει τις απαιτήσεις μεταφοράς των κουτιών. Το σώμα του γερανού, όπως φαίνεται στην εικόνα 4, αποτελείται αποκλειστικά από κομμάτια lego, παρόμοια με τη βάση στήριξης, και διακρίνεται σε δύο δομικά μέρη: τον πύργο (mast) ή στήλη και την κεραία ή αλλιώς βραχίονα (jib) [6]. Πύργος είναι η κατακόρυφη κατασκευή που φέρει την κεραία και προσδίδει το απαραίτητο ύψος λειτουργίας. Η κεραία είναι το στοιχείο που προσφέρει την κατάλληλη εμβέλεια λειτουργίας. Εδώ δεν είναι πτυσσόμενη, συνεπώς η ακτίνα δράσης παραμένει σταθερή. Στο ένα άκρο της κεραίας βρίσκεται η βάση της, η οποία έχει τη δυνατότητα να κινείται κατά μήκος του πύργου. Στο άλλο, ελεύθερο άκρο της κεραίας τοποθετείται το σύστημα συγκράτησης του φορτίου, το οποίο καλείται και τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα. Πρόκειται για τη διάταξη που αρπάζει, συγκρατεί και μεταφέρει το φορτίο (εδώ τα κουτάκια με τα βάρη) και μπορεί να είναι αρπάγη, άγκιστρο ή, στην περίπτωσή μου, ηλεκτρομαγνήτης (εικόνα 5). Αυτός που χρησιμοποιώ είναι ο DFR0794 [7] των 5 V DC, με δύναμη κρατήματος 3 kg, υπεραρκετή για τα βάρη της εργασίας. Τον έχω στερεώσει στο ελεύθερο άκρο της κεραίας με διπλοκόλλητη ταινία. Τα δύο καλώδια τροφοδοσίας του ηλεκτρομαγνήτη έχουν οδηγηθεί κατά μήκος της κεραίας, στο πίσω μέρος της βάσης της, όπου προσαρμόζονται σε κλέμμες 2 πόλων ώστε να συνδεθούν εύκολα με το ηλεκτρικό κύκλωμα αργότερα. Για να μην κρέμονται προκαλώντας πιθανές δυσλειτουργίες, τα έχω κολλήσει με sellotape πάνω στην κεραία.

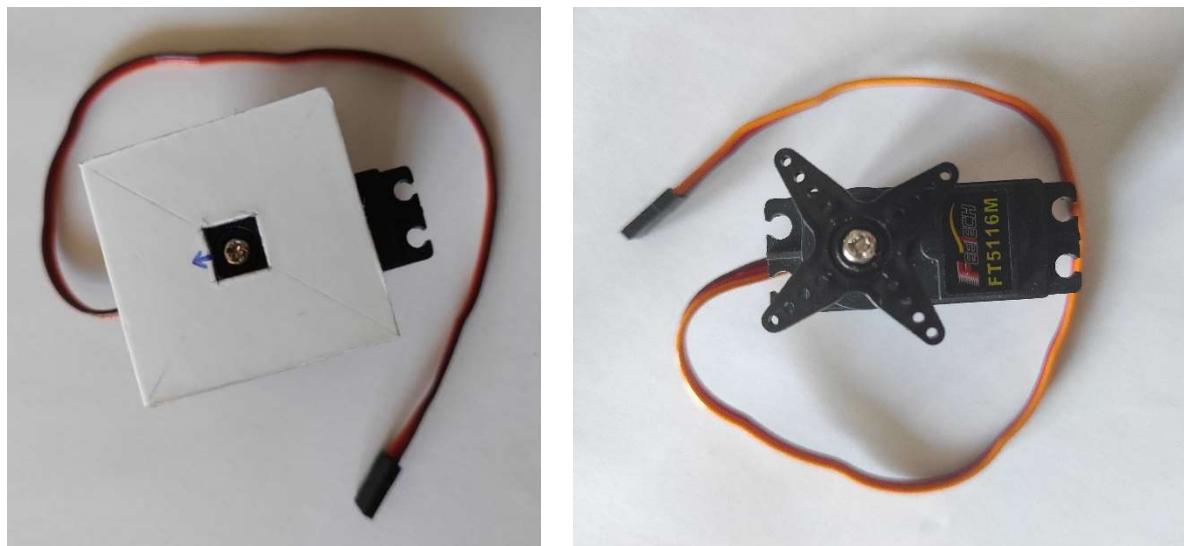


Εικόνα 5

Ο πυργογερανός πρέπει να μπορεί να περιστρέφεται αριστερόστροφα και δεξιόστροφα, καθώς και να ανεβοκατεβάζει την κεραία του. Τα δύο είδη κίνησης δύνανται να πραγματοποιηθούν με τη χρήση των δύο σερβοκινητήρων που φαίνονται στην εικόνα 6. Στον σερβοκινητήρα αριστερά έχω κολλήσει με αυτοκόλλητη ταινία διπλής όψης ένα κομμάτι χαρτούνι (το μπλε βέλος δείχνει τη γωνία των 0°, απ' όπου ο σερβοκινητήρας μπορεί να περιστραφεί μόνο αριστερόστροφα), πάνω στο οποίο στερεώνω, επίσης με διπλοκόλλητη ταινία αλλά και με δεματικά, τη βάση του πύργου. Τοποθετώ τον σερβοκινητήρα “όρθιο” στην υποδοχή που έχω δημιουργήσει ειδικά γι' αυτόν στη βάση στήριξης και τον δένω με δεματικά για να στέκεται ακλόνητος στη θέση του. Προφανώς, ο συγκεκριμένος σερβοκινητήρας περιστρέφει ολόκληρο τον πυργογερανό, ενώ στους πραγματικούς πυργογερανούς υπάρχει γενικά πλατφόρμα που περιστρέφει μονάχα την κεραία. Ο σερβοκινητήρας στα δεξιά της εικόνας 6 χρησιμεύει για την αλλαγή του ύψους της κεραίας. Τον στερεώνω “ξαπλωμένο” στο ανώτερο μέρος του πυργογερανού με χρήση της αυτοκόλλητης ταινίας διπλής όψης, έτσι ώστε το άκρο περιστροφής να εξέχει στα πλάγια του πύργου. Στο άκρο περιστροφής βιδώνω την τροχαλία, που αποτελεί τον ανυψωτικό μηχανισμό. Για την κατασκευή της τροχαλίας τοποθέτησα με ισχυρή κόλλα στιγμής ένα ρολό κλασσικής μαύρης κολλητικής ταινίας μονής όψης στο εσωτερικό ενός ρολού λευκοπλάστη. Προκειμένου να αυξήσω τη διάμετρό της (σημαντικό όπως θα φανεί αργότερα), τύλιξα χοντρή κολλητική ταινία γύρω από το ρολό της μαύρης ταινίας. Γύρω από την τροχαλία

δένω σπάγκο, το ελεύθερο άκρο του οποίου το περνάω μέσα από τη βάση της κεραίας στην απέναντι πλευρά του πύργου από αυτήν που έχω την τροχαλία και το δένω σε ένα σταθερό σημείο. Τυλίγοντας τον σπάγκο στην τροχαλία, η κεραία και ο ηλεκτρομαγνήτης κερδίζουν ύψος, ενώ ισχύει και το αντίστροφο.

Λόγω της τριβής που δημιουργείται μεταξύ του πύργου και της βάσης της κεραίας, υπάρχει ο σοβαρός κίνδυνος ακινητοποίησης της κεραίας την ώρα που ξετυλίγω τον σπάγκο από την τροχαλία, διότι η βαρύτητα δεν μπορεί να νικήσει τη στατική τριβή. Για τον χειρισμό αυτού του προβληματικού σεναρίου έχω φτιάξει ένα σύστημα επαναφοράς με λαστιχάκια, τα οποία ενώνουν το πίσω μέρος της βάσης της κεραίας με τη βάση του πύργου. Ένα ακόμη πρόβλημα που χρίζει αντιμετώπισης είναι η τάση του πυργογερανού να γέρνει προς τα εμπρός όταν μεταφέρει αντικείμενα με βάρος πάνω από μια ορισμένη τιμή. Γι' αυτό έχω φτιάξει ένα αυτοσχέδιο αντίβαρο γεμίζοντας ένα βαζάκι με 8 βόλους μάζας 5 – 6 gr ο καθένας. Το αντίβαρο προσδένεται με δεματικό πάνω σε μία προέκταση φτιαγμένη από κομμάτια Iego, η οποία έχει κολληθεί με αυτοκόλλητη ταινία διπλής όψης και στερεωθεί με δεματικά πάνω στον σερβοκινητήρα της πρισματικής άρθρωσης, στην κορυφή του πυργογερανού. Μ' αυτόν τον τρόπο δημιουργώ μια σταθερή ροπή αντίθετης φοράς από αυτήν που τείνει να γείρει τον πυργογερανό προς τη μεριά του φορτίου. Βέβαια, στους πραγματικούς πυργογερανούς υπάρχει δυνατότητα αλλαγής του μήκους της προέκτασης που φέρει το αντίβαρο, με σκοπό τη μεταβολή της ροπής αναλόγως του φορτίου στο τελικό στοιχείο δράσης, γεγονός που δεν προβλέπω εδώ.



Εικόνα 6

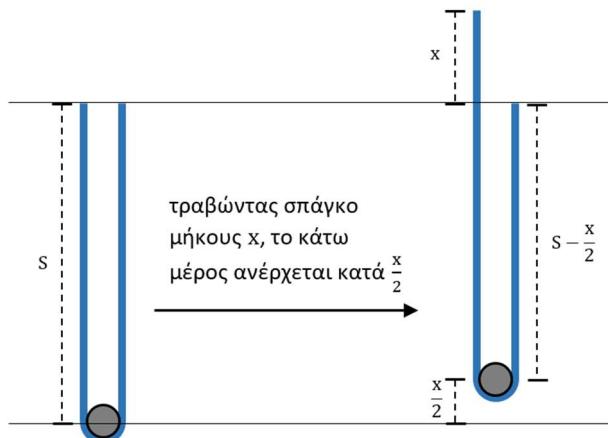
Οι σερβοκινητήρες διαθέτουν εξορισμού έλεγχο κλειστού βρόχου, με αποτέλεσμα οι εντολές κίνησης που τους δίνονται να εκτελούνται με εξαιρετική ακρίβεια. Γενικά, λαμβάνουν PWM (Pulse Width Modulation) σήματα ελέγχου. Ρυθμίζοντας το χρονικό πλάτος του παλμού, δηλαδή πόσο χρόνο η τάση είναι HIGH, μεταβάλλεται το duty cycle και κατά συνέπεια η γωνία περιστροφής. Ας σημειωθεί ότι η συχνότητα του PWM σήματος επηρεάζει την ταχύτητα και την ακρίβεια της λειτουργίας του σερβοκινητήρα, ειδικότερα, όσο μεγαλώνει η συχνότητα μεγαλώνει και η ταχύτητα αλλά μικραίνει η ακρίβεια (το Arduino Mega 2560 δίνει PWM σήματα 490 Hz) και το αντίστροφο. Στην ιστοσελίδα αγορών της Grobotronics για τον συγκεκριμένο σερβοκινητήρα FT5116M της Feetech [8], αναγράφεται ότι το εύρος περιστροφής του είναι 270°,

με την ελάχιστη γωνία των 0° να επιτυγχάνεται για χρονικό παλμό 500 μsec και τη μέγιστη γωνία των 270° να επιτυγχάνεται για χρονικό παλμό 2500 μsec. Μετά από πειραματικές δοκιμές διαπίστωσα ότι ακριβέστερες τιμές για τα προηγούμενα μεγέθη (με αυτές εργάζομαι στη συνέχεια) είναι: εύρος περιστροφής 255° , ελάχιστος παλμός 550 μsec και μέγιστος παλμός 2400 μsec. Η γωνία περιστροφής και ο χρονικός παλμός είναι ανάλογα μεγέθη, οπότε, θεωρώντας ότι η γωνιακή θέση angle είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή και ο χρονικός παλμός time είναι η εξαρτημένη μεταβλητή, υπάρχει μία γραμμική σχέση που τις συνδέει και παρατίθεται ακολούθως (η angle δίνεται σε μοίρες και η time μετριέται σε msec):

$$\text{time} = \text{minpulse} + \frac{\text{maxpulse} - \text{minpulse}}{\text{maxangle}} \cdot \text{angle} = 550 + \frac{2400 - 550}{255} \cdot \text{angle}$$

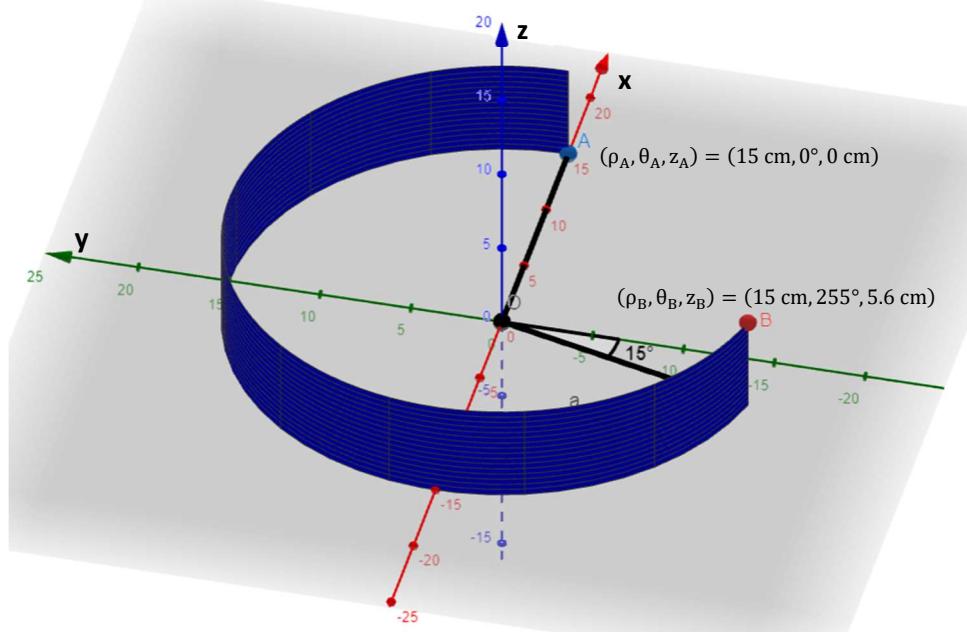
Είναι επιθυμητό η τροχαλία να διαθέτει μεγάλη διάμετρο (συμβολίζω την ακτίνα της τροχαλίας με r), αφού αυτό οδηγεί στο τύλιγμα και στο ξετύλιγμα μεγαλύτερου μήκους σπάγκου I για την ίδια γωνία στρέψης φ. Η σχέση $I = \varphi \cdot r$ συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη (η φ μετριέται σε rad). Η διάμετρος της τελικής μορφής της τροχαλίας έχει μετρηθεί ίση με 5 cm, που δίνει ακτίνα ίση με $r = 2.5$ cm. Με δεδομένο ότι η μέγιστη γωνία στρέψης της τροχαλίας έχει βρεθεί ίση με $\varphi_{\max} = 255^\circ = \frac{255}{360} \cdot 2\pi \text{ rad} \approx 4.45 \text{ rad}$, υπολογίζουμε $I_{\max} = \varphi_{\max} \cdot r = 4.45 \cdot 2.5 \text{ rad} \approx 11.1 \text{ cm}$ το μέγιστο μήκος σπάγκου. Επιπλέον, αποτελεί εξαιρετικής σημασίας να συνδέσουμε το μήκος I με το ύψος z του τελικού στοιχείου δράσης του βραχίονα. Η εικόνα 7 βοηθάει στην εξαγωγή της ζητούμενης σχέσης. Παρατηρούμε πως αν ξεκινήσουμε με συνολικό μήκος σπάγκου $2S$ στις δύο πλευρές (υπάρχει λίγη ακόμη ποσότητα σπάγκου στο κάτω μέρος η οποία θα αγνοηθεί διότι παραμένει σταθερή) και μαζέψουμε μήκος σπάγκου x από την αριστερή πλευρά, τότε το κάτω μέρος ανέρχεται κατά $\frac{x}{2}$. Αυτό συμβαίνει διότι το συνολικό μήκος σπάγκου παραμένει σταθερό (θεωρώ πως ο σπάγκος της τροχαλίας είναι ιδανικός, δηλαδή μη εκτατός), επομένως στην αριστερή πλευρά το μήκος σπάγκου είναι $x + S - \frac{x}{2}$ και στη δεξιά πλευρά είναι $S - \frac{x}{2}$, δηλαδή συνολικά $2S$. Άρα ισχύει $z = \frac{1}{2}$ και παρομοίως είναι $z_{\max} = \frac{l_{\max}}{2} = \frac{11.1 \text{ cm}}{2} \approx 5.6 \text{ cm}$. Ο ρομποτικός βραχίονας πρέπει να μπορεί να μεταφέρει ένα κουτί πάνω από ένα άλλο χωρίς αυτά να συγκρούονται για ευνόητους λόγους. Στο επόμενο μέρος της κατασκευής "4. Κουτάκια αποθήκευσης των βαρών" μετριέται ότι το ύψος των κουτιών είναι 4.5 cm, συνεπώς υφίσταται ικανό περιθώριο ασφαλείας.

Τέλος, είναι χρήσιμη η διαπίστωση ότι ο πυργογερανός γίνεται να μελετηθεί ως ρομποτικός βραχίονας δύο βαθμών ελευθερίας, διότι διαθέτει δύο αρθρώσεις. Συγκεκριμένα, έχει μία περιστροφική άρθρωση (ο σερβοκινητήρας στη βάση του πύργου) και μία πρισματική άρθρωση (ο σερβοκινητήρας στην κορυφή του πύργου). Η θέση στον χώρο του τελικού στοιχείου δράσης γίνεται να περιγραφεί πολύ φυσικά με τη χρήση των κυλινδρικών συντεταγμένων θ



Εικόνα 7

(μεταβλητή της περιστροφικής άρθρωσης, μετριέται σε μοίρες) και z (μεταβλητή της πρισματικής άρθρωσης, μετριέται σε cm). Όπως προαναφέρθηκε, η ακτίνα δράσης ρ , δηλαδή το μήκος της κεραίας, είναι σταθερή και έχει μετρηθεί ίση με 15 cm. Βάσει αυτού και των προηγούμενων υπολογισμών, συμπεραίνουμε ότι ο χώρος εργασίας του βραχίονα, δηλαδή το σύνολο των σημείων όπου μπορεί να φτάσει το τελικό στοιχείο δράσης, είναι η κομμένη παράπλευρη επιφάνεια ενός κυλίνδρου, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 8 που δημιουργήθηκε με το online λογισμικό GeoGebra. Ο άξονας z συμπίπτει με την κατακόρυφη ευθεία που διέρχεται από το άκρο περιστροφής του σερβοκινητήρα της περιστροφικής άρθρωσης. Έχω κάνει την παραδοχή ότι το επίπεδο $z = 0$ cm είναι αυτό που εφάπτεται στην κάτω επίπεδη πλευρά του ηλεκτρομαγνήτη, όταν ο βραχίονας βρίσκεται στο κατώτερο δυνατό ύψος (είναι $z_{\max} = 5.6$ cm).

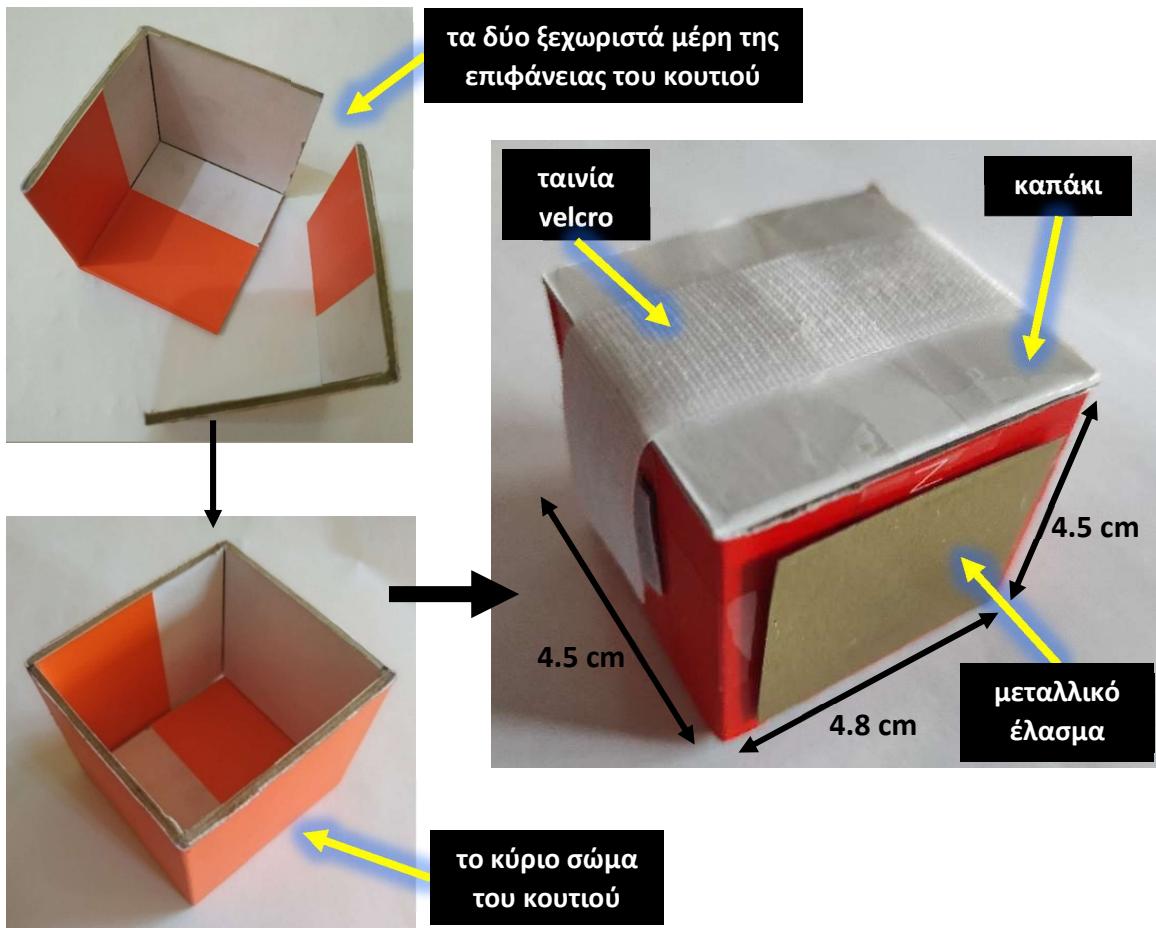


Εικόνα 8

4. Κουτάκια αποθήκευσης των βαρών

- Σκληρό χαρτόνι από συσκευασία κινητού τηλεφώνου (Xiaomi Redmi Note 6 Pro)
- 4 μεταλλικά ελάσματα (κομμένα από σιδηρομαγνητικό υλικό μεταλλικής συσκευασίας μπισκότων)
- Αυτοκόλλητες ταινίες διπλής όψης και τύπου velcro (hook and loop)
- Σφαιρικοί βόλοι (10 – 20 στο πλήθος, 5 – 6 gr ο καθένας)

Για την αποθήκευση των διαφορετικών βαρών έχουν κατασκευαστεί 4 πανομοιότυπα ελαφριά κουτάκια, με τέτοιον τρόπο ώστε να είναι εύκολο για τον ρομποτικό βραχίονα να τα πιάσει και να τα μεταφέρει. Έχουν ζυγιστεί με ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας και η μάζα του καθενός βρέθηκε ίση με 19 gr. Μέσα σε κάθε κουτάκι βάζω έναν διαφορετικό αριθμό από σφαιρικούς βόλους (π.χ. 1, 2, 3 και 4), μάζας 5 gr περίπου ο καθένας, έτσι ώστε να δημιουργήσω τέσσερα διακριτά βάρη. Στην εικόνα 9 παρουσιάζονται περιεκτικά τα στάδια κατασκευής τους. Ακολούθως περιγράφεται αναλυτικότερα ολόκληρη η διαδικασία.



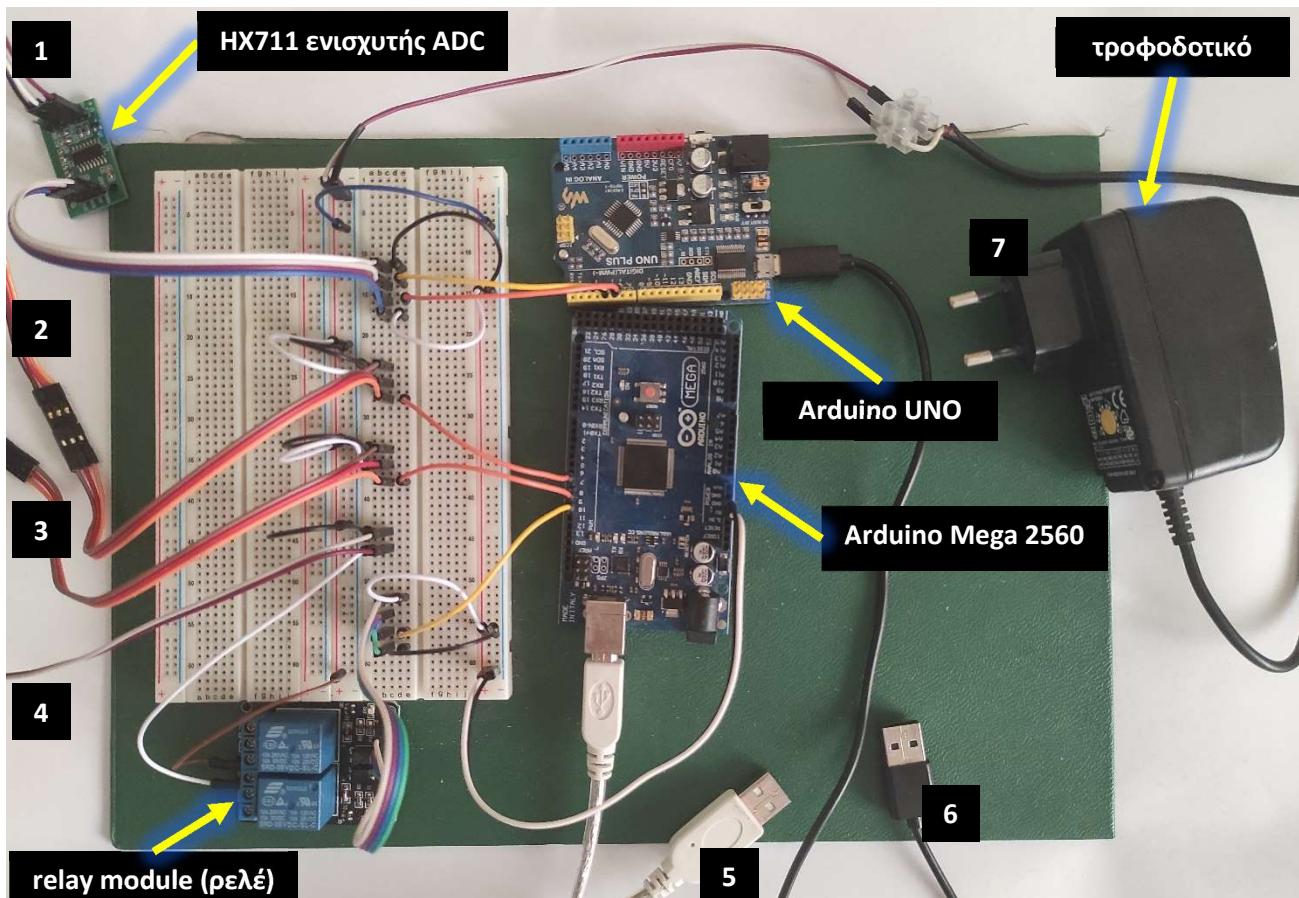
Εικόνα 9

Αρχικά, δημιούργησα την παράπλευρη επιφάνεια (μαζί με τη βάση) του κουτιού, που αποτελείται από δύο σκληρά χαρτονένια κομμάτια κομμένα με κοπίδι από τη συσκευασία κινητού που αναφέρεται στα υλικά. Τα δύο κομμάτια ενώνονται μεταξύ τους με ισχυρή κόλλα στιγμής και έτσι δημιουργείται το κύριο σώμα του κουτιού. Στη συνέχεια, έφτιαξα τα καπάκια των κουτιών κόβοντας τέσσερα ορθογώνια κομμάτια σκληρού χαρτονιού. Για την άνετη προσθαφαίρεση του καπακιού και το γερό κράτημά του πάνω στο κουτί αξιοποιώ τη velcro ταινία διπλής όψης, με μια λωρίδα από τη hook πλευρά κολλημένα σε δυο απέναντι πλευρές του κουτιού. Τέλος, κόλλησα με την ταινία διπλής όψης ένα μεταλλικό έλασμα σε μία ελεύθερη πλευρά της παράπλευρης επιφάνειας του κάθε κουτιού. Το μεταλλικό έλασμα έχει κοπεί με ψαλίδι από μεταλλική συσκευασία μπισκότων. Πρόκειται για σιδηρομαγνητικό υλικό, με αποτέλεσμα να έλκεται από τον ηλεκτρομαγνήτη του ρομποτικού βραχίονα.

Όπως θα φανεί αργότερα και στην εικόνα της τελικής ολοκληρωμένης διάταξης, τα 4 κουτάκια τοποθετούνται πάνω σε μία μικρή ξύλινη βάση, σε ικανό ύψος για να τα φτάνει το τελικό στοιχείο δράσης του ρομποτικού βραχίονα. Η πλευρά με το μεταλλικό έλασμα πρέπει να “κοιτάζει” προς τα πάνω, οπότε η πλευρά απέναντι από αυτήν αγγίζει τη μικρή ξύλινη βάση.

5. Ηλεκτρικό κύκλωμα

- 2 breadboards
- Jumper καλώδια αρσενικό – αρσενικό και Ribbon καλωδιοταινίες αρσενικό – αρσενικό, θηλυκό – αρσενικό και θηλυκό – θηλυκό
- 2 μικροελεγκτές της οικογένειας Arduino, ο Arduino Mega 2560 και ο Arduino UNO
- 1 LOW level relay module (ρελέ) SRD-05VDC-SL-C 5 V των 2 καναλιών (θέλω μόνο το 1)
- Τροφοδοτικό ρυθμιζόμενης τάσης MW7E08GS (από 3 V έως 12 V, 1600 mA μέγιστο ρεύμα εξόδου)
- Κλέμμες 2 πόλων



1. σύνδεση με load cell
2. σύνδεση με σερβοκινητήρα περιστροφικής άρθρωσης
3. σύνδεση με σερβοκινητήρα πρισματικής άρθρωσης
4. σύνδεση με ηλεκτρομαγνήτη
5. σύνδεση με σειριακή θύρα USB του υπολογιστή PC
6. σύνδεση με σειριακή θύρα USB του υπολογιστή PC
7. σύνδεση με πρίζα ρεύματος

Εικόνα 10

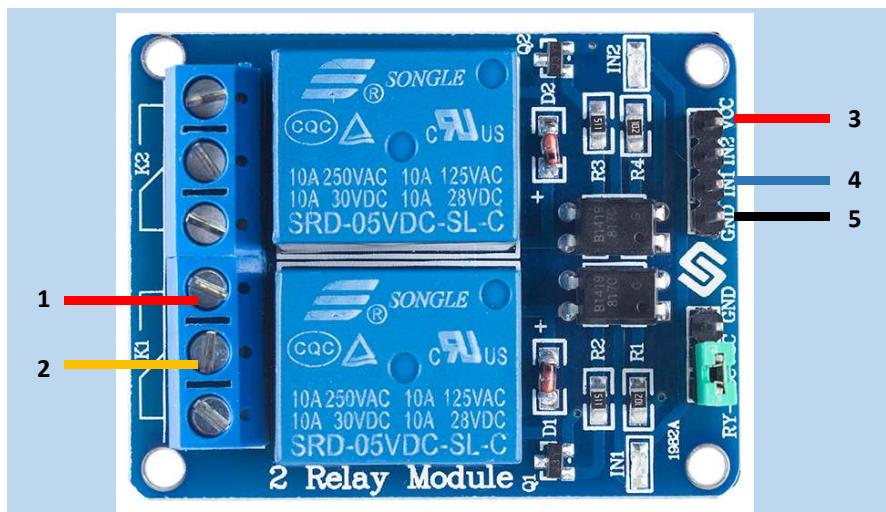
Προκειμένου να ελέγξω ολόκληρη τη διάταξη έχω δημιουργήσει το απλό ηλεκτρικό κύκλωμα της εικόνας 10. Για την καλύτερη οργάνωση των καλωδιώσεων χρησιμοποιώ 2 breadboards κολλημένα το ένα δίπλα στο άλλο. Γενικά χρησιμοποιώ καλώδια και καλωδιοταινίες αρσενικό – αρσενικό [9], όμως στην περίπτωση του ρελέ και του HX711 κάνω τις συνδέσεις και με καλωδιοταινίες θηλυκό – αρσενικό, καθώς οι πλακέτες τους έχουν προεξέχουσες ακίδες. Το πέρασμα των εντολών από τον υπολογιστή προς τον ηλεκτρομαγνήτη και τους σερβοκινητήρες των δύο αρθρώσεων του βραχίονα γίνεται μέσω ενός μικροελεγκτή Arduino Mega 2560. Ακόμα, η ανάγνωση των τιμών εξόδου του HX711 από τον υπολογιστή πραγματοποιείται μέσω ενός Arduino UNO. Τα arduino boards επικοινωνούν με τον υπολογιστή σειριακά μέσω δύο θυρών USB (συνήθως απασχολώ τις COM11 και COM8). Ο λόγος που χρησιμοποιώ δύο arduino boards αντί για ένα εξηγείται στην ενότητα “Εξήγηση της γραφικής διεπαφής και του κώδικα στο LabVIEW”.

Οι σερβοκινητήρες διαθέτουν τρία καλώδια. Τα δύο από αυτά χρησιμεύουν για την τροφοδοσία και το τρίτο για τη μεταφορά των σημάτων ελέγχου. Συγκεκριμένα, το καφέ καλώδιο είναι το GND και το κόκκινο είναι η θετική τάση (εδώ DC τάση 6 V), ενώ το πορτοκαλί συνδέεται με το κατάλληλο PWM pin του arduino board. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχω συνδέσει το PWM pin 7 του Arduino Mega 2560 στον σερβοκινητήρα της περιστροφικής άρθρωσης και το PWM pin 8 στον σερβοκινητήρα της πρισματικής άρθρωσης. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η τροφοδοσία των σερβοκινητήρων δεν γίνεται από το arduino board, επειδή το ρεύμα που δίνει ο μικροελεγκτής είναι πολύ μικρό. Για να εξασφαλίσω την κατάλληλη ισχύ για την κίνηση των σερβοκινητήρων χρησιμοποίησα ένα τροφοδοτικό ρυθμιζόμενης τάσης [10] που έχει μάλιστα περιστροφικό επιλογέα και το ρύθμισα να δίνει 6 V συνεχούς τάσης. Η σύνδεση του τροφοδοτικού στο breadboard έγινε με δύο καλώδια αρσενικό – αρσενικό που βίδωσα σε κλέμμες 2 πόλων.

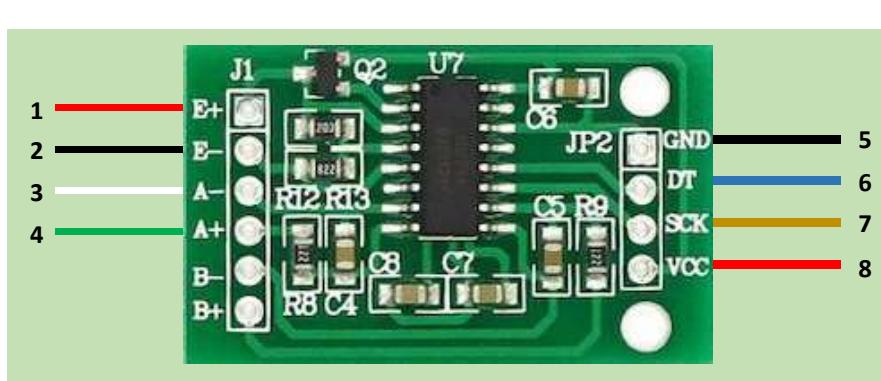
Για τη λειτουργία του ηλεκτρομαγνήτη κάνω χρήση του ίδιου τροφοδοτικού. Σε αντίθεση όμως με τους σερβοκινητήρες, που απαιτείται να βρίσκονται διαρκώς υπό τάση, εδώ πρέπει να έχω τη δυνατότητα να απενεργοποιώ και να ενεργοποιώ τον ηλεκτρομαγνήτη όποτε θέλω. Για τον λόγο αυτό αξιοποιώ ένα ρελέ 2 καναλιών [11], αν και χρειάζομαι μόνο το 1. Το ρελέ οδηγείται με τα 5 V του μικροελεγκτή arduino, διότι απαιτεί μικρό ρεύμα (15 – 20 mA). Παρέχω στον ηλεκτρομαγνήτη τα 6 V συνεχούς τάσης του τροφοδοτικού αν και τα χαρακτηριστικά του προτείνουν τα 5 V, παρ' όλ' αυτά δεν παρατηρούνται προβλήματα στη λειτουργία του (ίσως θερμαίνεται λίγο περισσότερο από το κανονικό, διότι λαμβάνει μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ του 1 W). Όπως φαίνεται στην εικόνα 11, έχω συνδέσει τα 6 V DC του τροφοδοτικού και τον έναν ακροδέκτη του ηλεκτρομαγνήτη στις normally open (n.o.) επαφές του πρώτου καναλιού του ρελέ (ο άλλος ακροδέκτης του ηλεκτρομαγνήτη είναι συνδεδεμένο στο κοινό GND). Το ρελέ ελέγχεται από το digital pin 9 του Arduino Mega 2560 και είναι LOW level triggered, δηλαδή πυροδοτείται με χαμηλή τάση. Αυτό σημαίνει πως, όταν στο pin 9 δίνω HIGH τάση, τότε οι n.o. επαφές μένουν κανονικά ανοιχτές και ο ηλεκτρομαγνήτης διατηρείται απενεργοποιημένος, ενώ όταν δίνω LOW τάση οι επαφές βραχυκυκλώνουν και ο ηλεκτρομαγνήτης ενεργοποιείται (παράλληλα ανάβει ένα ενδεικτικό κόκκινο LED στην πλακέτα του ρελέ).

Τέλος, η σύνδεση του ADC ενισχυτή HX711 με το load cell και τον μικροελεγκτή Arduino UNO παρουσιάζεται στην εικόνα 12 [12]. Τροφοδοτείται από το arduino board παρόμοια με το ρελέ, αφού κι αυτό οδηγείται με πολύ μικρό ρεύμα (γύρω στα 2 mA). Οι επαφές E+ και E- του HX711 είναι οι είσοδοι της γέφυρας Wheatstone εσωτερικά του load cell, ενώ οι επαφές A- και

Α+ είναι οι έξοδοι της γέφυρας. Έχω συνδέσει το digital pin 4 του Arduino UNO με τη γραμμή Data του HX711 και το digital pin 5 με τη γραμμή Clock.



Εικόνα 11



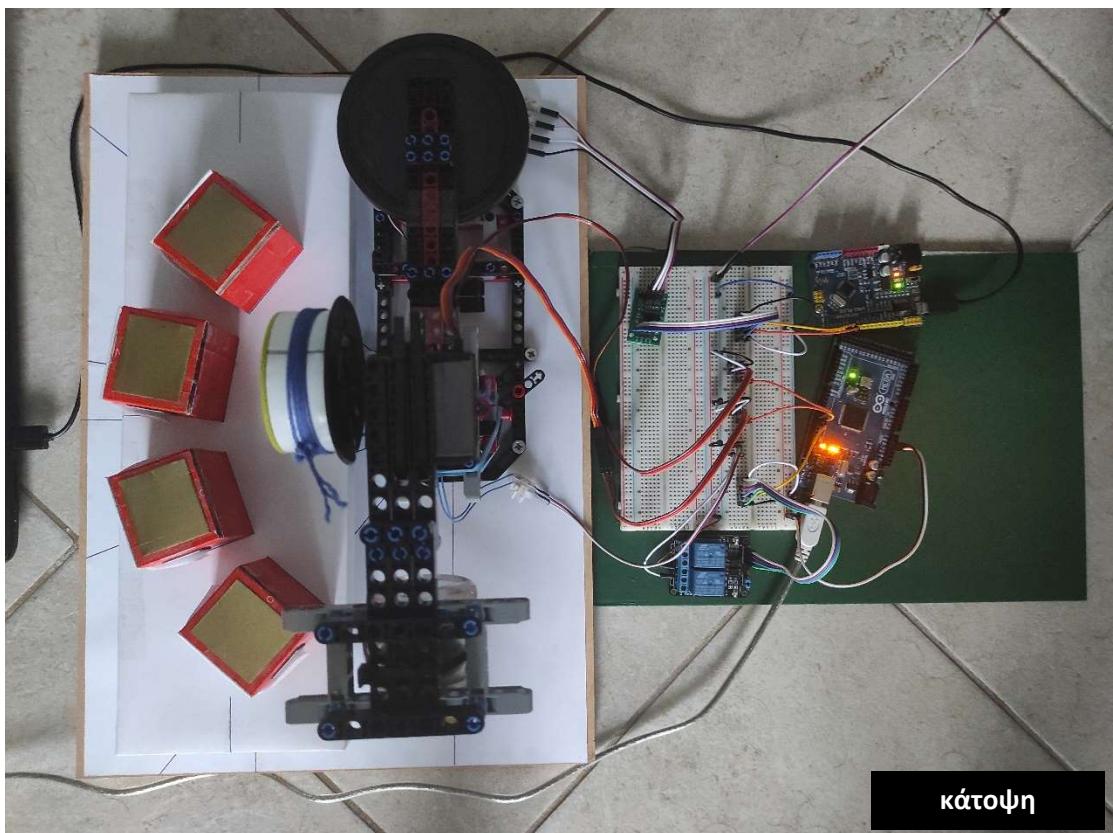
Εικόνα 12

Τελική ολοκληρωμένη διάταξη

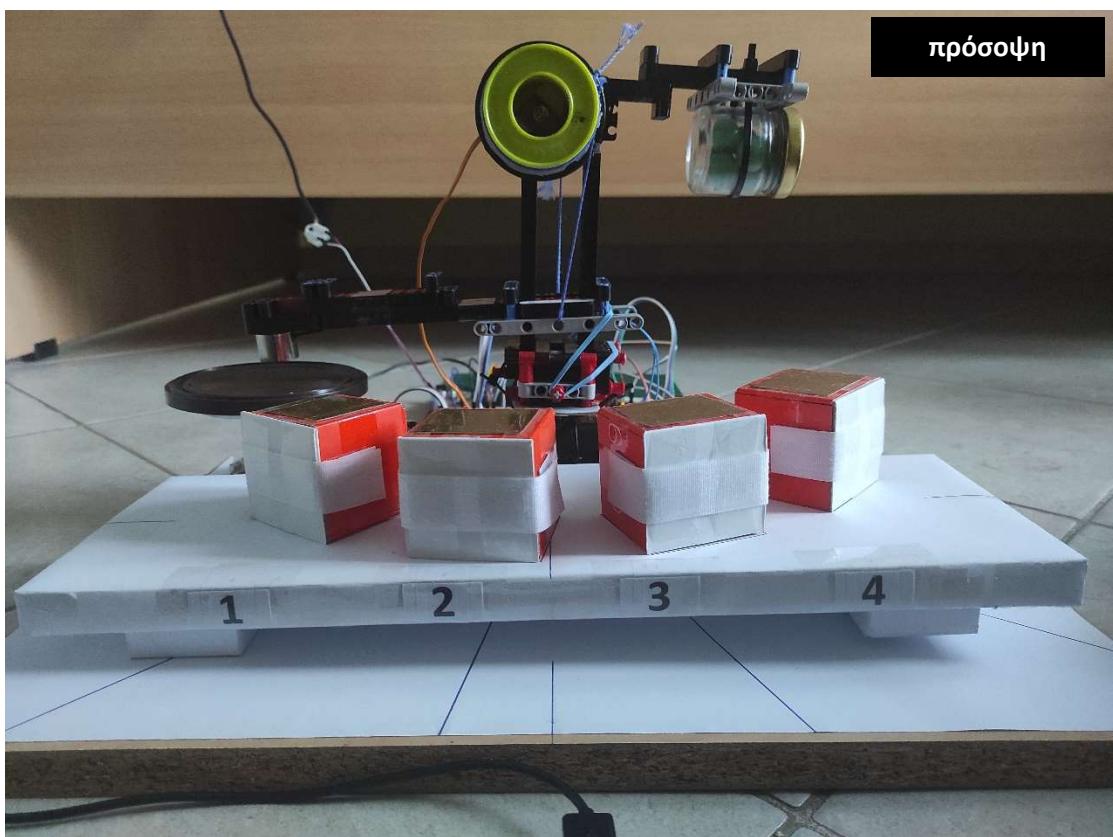
Στις επόμενες εικόνες 13 και 14 παρουσιάζεται, σε κάτοψη και σε πρόσοψη αντίστοιχα, το τελικό αποτέλεσμα που προέκυψε από την ένωση των προαναφερθέντων πέντε ξεχωριστών κομματιών της κατασκευής. Εκτός του πλαισίου της φωτογραφίας της κάτοψης, στα αριστερά της διάταξης, υπάρχει ο υπολογιστής PC όπου συνδέονται οι μικροελεγκτές arduino και τρέχει η εφαρμογή στο LabVIEW. Στη μεγάλη ξύλινη βάση (διαστάσεων 30.7 cm x 42.3 cm) έχω κολλήσει ένα χαρτί Α3 με κατάλληλα σημάδια με στυλό, ώστε να γνωρίζω πού να βιδώσω τη βάση στήριξης και σε ποια περιοχή να τοποθετήσω τη μικρή ξύλινη βάση. Πάνω στη μικρή ξύλινη βάση (12.4 cm x 37.0 cm) σημειώνονται οι 4 θέσεις που καταλαμβάνουν τα ισάριθμα κουτιά.

- 1) 6 V DC του τροφοδοτικού
- 2) Ένας ακροδέκτης του ηλεκτρομαγνήτη
- 3) 5 V του Arduino Mega 2560
- 4) Digital pin 9 του Arduino Mega 2560
- 5) Κοινό GND

- 1) Κόκκινο καλώδιο (excitation +) του load cell
- 2) Μαύρο καλώδιο (excitation -) του load cell
- 3) Άσπρο καλώδιο (signal -) του load cell
- 4) Πράσινο καλώδιο (signal +) του load cell
- 5) Κοινό GND
- 6) Digital pin 4 του Arduino UNO
- 7) Digital pin 5 του Arduino UNO
- 8) 5 V του Arduino Mega 2560



Εικόνα 13

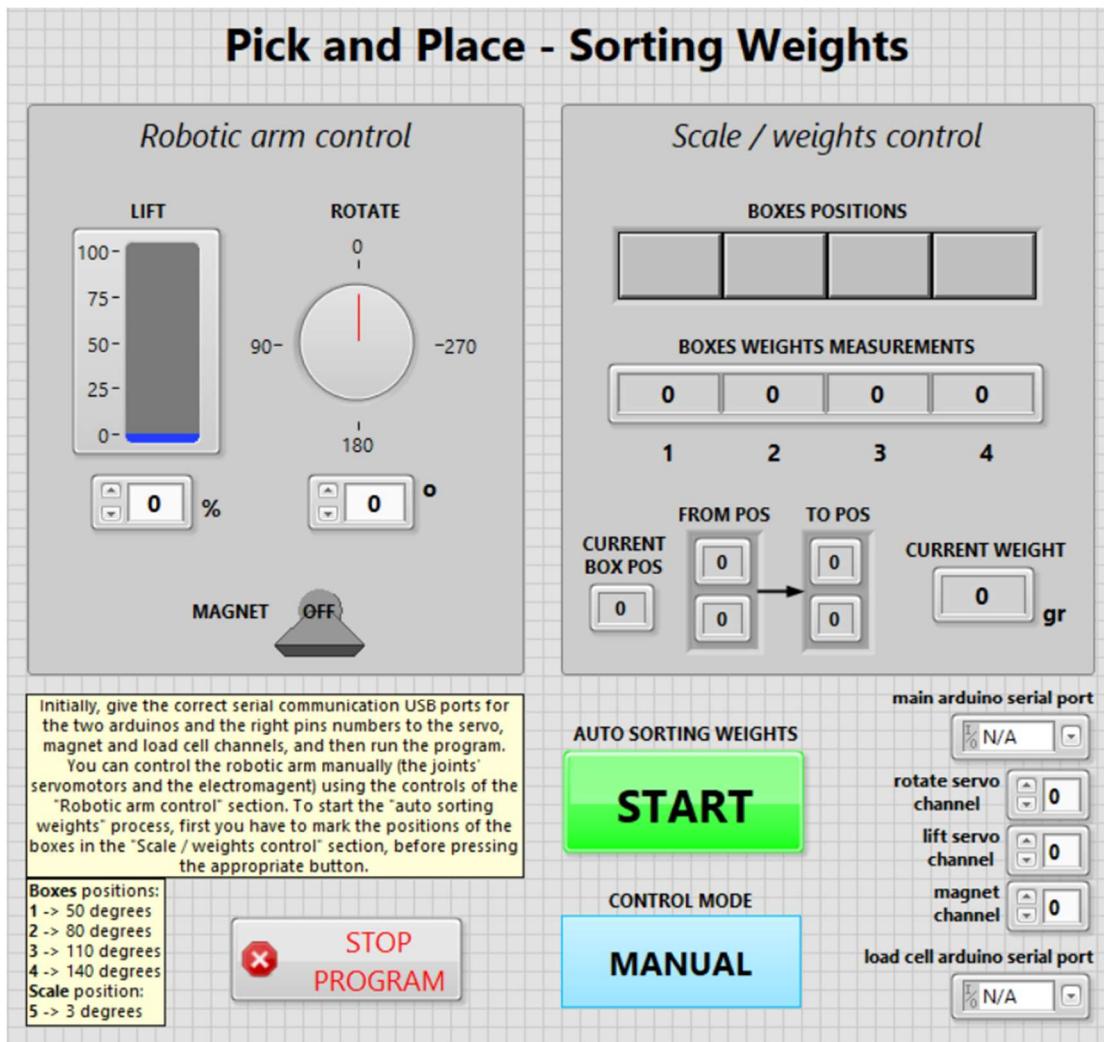


Εικόνα 14

Εξήγηση της γραφικής διεπαφής και του κώδικα στο LabVIEW

Για την ανάπτυξη της εφαρμογής μέσω της οποίας ελέγχω τη διάταξη αξιοποίησα το λογισμικό LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), το οποίο χρησιμοποιεί τη γραφική γλώσσα προγραμματισμού "G" της National Instruments. Το vi αρχείο της εφαρμογής ονομάζεται "labview_gui.vi". Ακολουθεί μια αναλυτική επισκόπηση και εξήγηση τόσο της γραφικής διεπαφής (Front Panel), στην οποία έχει πρόσβαση ο απλός χρήστης, όσο και του κώδικα (Block Diagram), με την οποία ασχολείται κυρίως ο προγραμματιστής και παρέχει τη λειτουργικότητα της γραφικής διεπαφής.

Γραφική διεπαφή (Front Panel)



Εικόνα 15

Στην παραπάνω εικόνα 15 προβάλλεται το περιβάλλον της γραφικής διεπαφής (Front Panel). Όπως φαίνεται από τις αριθμητικές ενδείξεις, το έχω χωρίσει σε 3 βασικές περιοχές, δηλαδή στις δύο ενότητες "Ελεγχος ρομποτικού βραχίονα" ("Robotic arm control") και "Ελεγχος ζυγαριάς / βαρών" ("Scale / weights control") και στη γενικότερη περιοχή στο κάτω μέρος.

Ας ξεκινήσουμε από την κατώτερη γενικότερη περιοχή. Πρώτα απ' όλα περιλαμβάνει ορισμένες οδηγίες που απευθύνονται προς τον χρήστη και τον βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση των λειτουργιών της εφαρμογής. Στο δεξί μέρος υπάρχουν ορισμένα control στοιχεία για την επικοινωνία με τα arduino boards, συγκεκριμένα δύο VISA resources για τον καθορισμό των δύο σειριακών USB θυρών, καθώς και τρία numeric για τον προσδιορισμό των pins του Arduino Mega 2560 που χρησιμοποιούνται για την αποστολή εντολών στον ηλεκτρομαγνήτη και στους δύο σερβοκινητήρες. Επίσης, υφίστανται το boolean button "AUTO SORTING WEIGHTS" για την εναλλαγή της λειτουργίας από χειροκίνητη "MANUAL" σε αυτόματη ταξινόμηση "AUTO" και ένας boolean indicator "CONTROL MODE" που δείχνει σε ποια από τις δύο αυτές καταστάσεις βρίσκεται το πρόγραμμα κάθε στιγμή. Τέλος, περιέχεται και ένα boolean button για τον τερματισμό του προγράμματος.

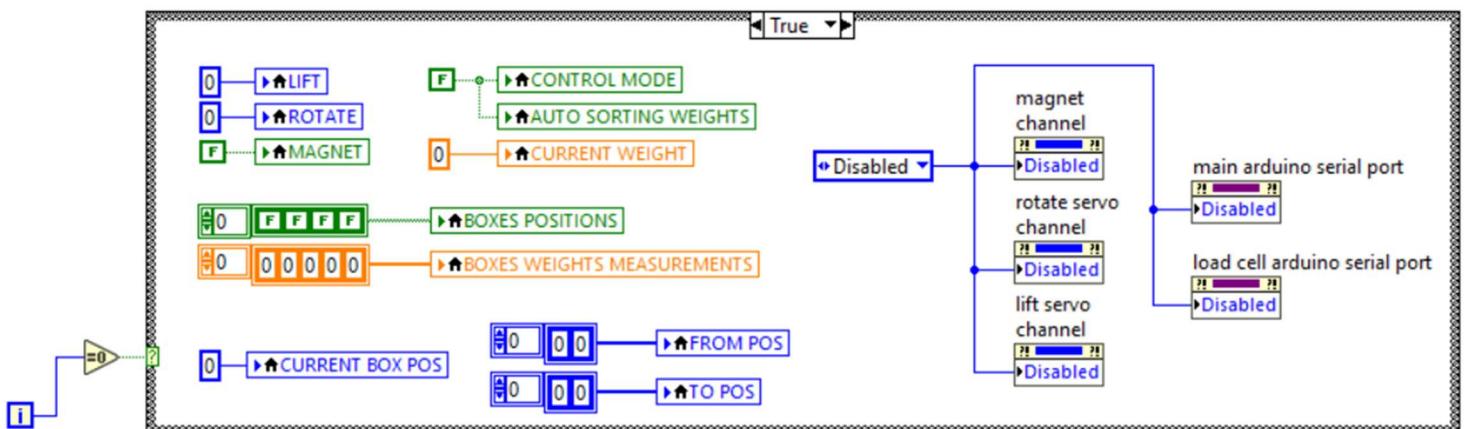
Η ενότητα "Robotic arm control" (πάνω αριστερά) περιλαμβάνει όλα τα controls του ρομποτικού βραχίονα. Το boolean toggle switch "MAGNET" εναλλάσσει τη λειτουργία του ηλεκτρομαγνήτη από ON σε OFF και το αντίστροφο, ενώ το numeric slide "LIFT" και το numeric dial "ROTATE" ελέγχουν τη θέση του τελικού στοιχείου δράσης του βραχίονα. Ειδικότερα, το control "LIFT" ορίζει με ποσοστιαίο τρόπο το ύψος του τελικού στοιχείου δράσης του βραχίονα, δηλαδή σχετίζεται με τη μεταβλητή z (για 0 % είναι $z = 0$ cm, για 100 % είναι $z = z_{max}$ και π.χ. το 20 % αντιστοιχεί σε $z = 0.2 \cdot z_{max}$). Από την άλλη, το control "ROTATE" μεταβάλλει τη γωνία θ περιστροφής του βραχίονα και δέχεται τιμές σε μοίρες. Ας επισημανθεί ότι τα control στοιχεία της ενότητας αυτής είναι ενεργά μονάχα στη "MANUAL" λειτουργία.

Η ενότητα "Scale / weights control" (πάνω δεξιά) περιέχει όλα τα controls και indicators που έχουν σχέση με τη ζυγαριά και τα βάρη των κουτιών. Αρχικά, υπάρχει ο πίνακας "BOXES POSITIONS" που αποτελείται από 4 boolean buttons (controls) αριθμημένα από το 1 έως και το 4, τα οποία δηλώνουν αν η αντίστοιχη θέση είναι κατειλημμένη από κουτί (παίρνουν την τιμή TRUE) ή όχι (λαμβάνουν την τιμή FALSE). Πριν ο χρήστης ενεργοποιήσει την αυτόματη ταξινόμηση επιλέγει με κατάλληλο τρόπο τις αρχικές θέσεις με κουτιά, για να γνωρίζει ο βραχίονας πού χρειάζεται να πάει. Οι καταγραφές των βαρών των κουτιών προβάλλονται στον πίνακα "BOXES WEIGHTS MEASUREMENTS" που περιλαμβάνει 5 numeric indicators, με τα τέσσερα πρώτα να αντιστοιχίζονται στις τέσσερις θέσεις των κουτιών και το πέμπτο να λογίζεται ως η θέση της ζυγαριάς. Η πέμπτη θέση του πίνακα δεν είναι φανερή στον χρήστη της εφαρμογής, αφού χρησιμεύει μονάχα για να αποθηκεύει το βάρος του κουτιού που τυχαίνει να τοποθετηθεί πάνω στο τάσι της ζυγαριάς κατά τη διάρκεια της αυτόματης ταξινόμησης (η ενέργεια αυτή δικαιολογείται περισσότερο στη συνέχεια, στην ερμηνεία του κώδικα). Ο numeric indicator "CURRENT BOX POS" δείχνει την τρέχουσα θέση κουτιού με την οποία ασχολείται ο αλγόριθμος ταξινόμησης και οι πίνακες "FROM POS" και "TO POS" με τους δύο numeric indicators ο καθένας καταδεικνύοντας μεταφορές κουτιών που πρέπει να πραγματοποιηθούν (δύο το μέγιστο), ώστε να οδηγηθεί το σωστό κουτί στη θέση "CURRENT BOX POS". Τέλος, ο numeric indicator "CURRENT WEIGHT" ενημερώνει διαρκώς τον χρήστη για το βάρος που μετράει η ζυγαριά. Ο indicator "CURRENT WEIGHT" είναι ενεργός και στις δύο λειτουργίες, "MANUAL" και "AUTO", ενώ οι υπόλοιποι indicators της ενότητας αυτής δίνουν αποτελέσματα αποκλειστικά στην "AUTO" λειτουργία.

Κώδικας (Block Diagram)

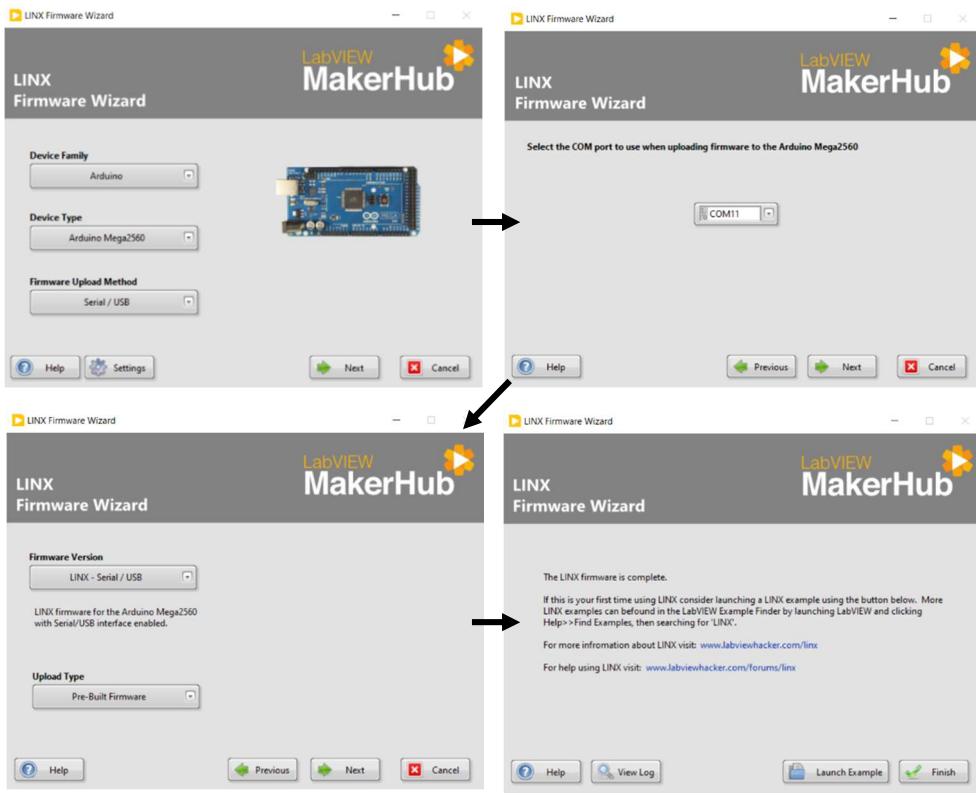
Το Block Diagram του vi αρχείου συνίσταται ουσιαστικά από δύο κύρια while loops. Το πρώτο χρησιμεύει για τον έλεγχο των δύο σερβοκινητήρων και του ηλεκτρομαγνήτη που γίνεται μέσω του Arduino Mega 2560, καθώς και για την ανάγνωση της μέτρησης της ζυγαριάς με την αξιοποίηση των σειριακών δεδομένων που λαμβάνονται από το Arduino UNO. Το δεύτερο while loop περιέχει τη λογική που ακολουθείται στη λειτουργία της αυτόματης ταξινόμησης των κουτιών βάσει του βάρους τους.

Ας εξετάσουμε αρχικά τα περιεχόμενα του πρώτου while loop. Αμέσως μόλις τρέξει η εφαρμογή, δίνω τις αρχικές ουδέτερες τιμές (0 και FALSE) στα controls και indicators του Front Panel. Επιπλέον, απενεργοποιώ τα controls που ορίζουν τις θύρες σειριακής επικοινωνίας με τα δύο arduino boards και τα pins ελέγχου των δύο σερβοκινητήρων και του ηλεκτρομαγνήτη, ώστε να μην επηρεάζονται από τον χρήστη κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος (εικόνα 16).



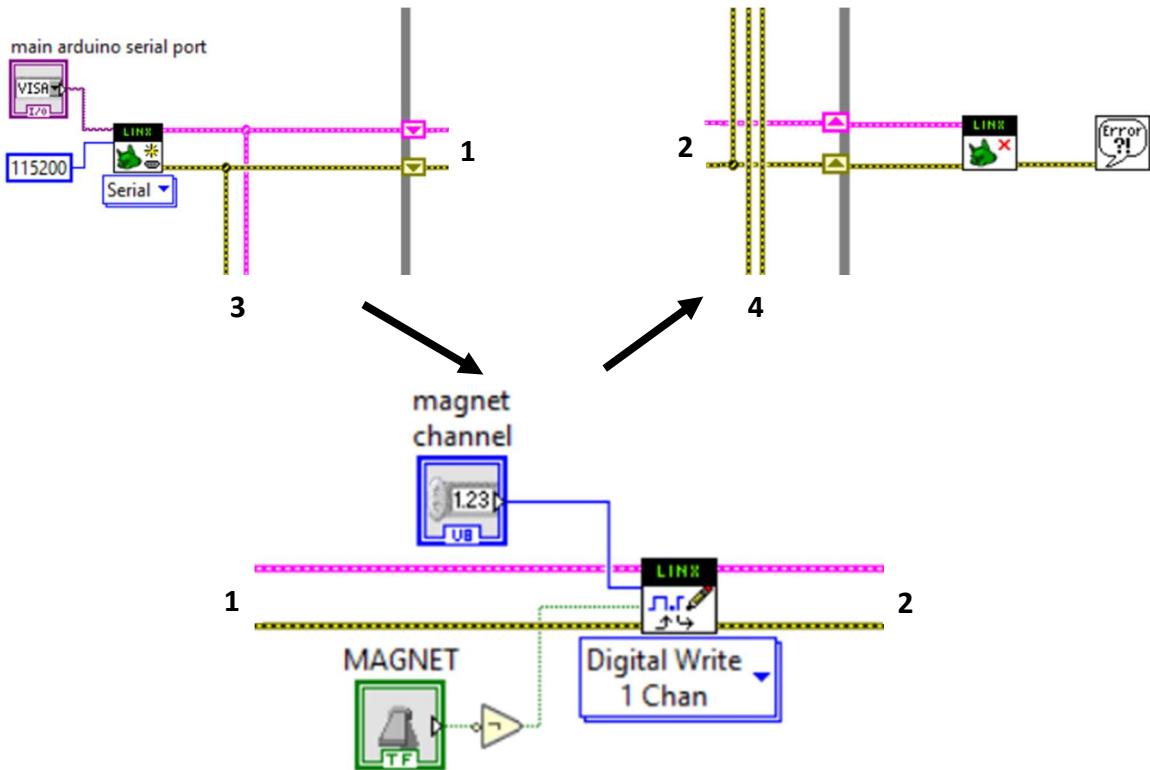
Εικόνα 16

Για να επικοινωνήσω με το Arduino Mega 2560 μέσω του LabVIEW αποφάσισα να χρησιμοποιήσω το LINUX [13]. Πρόκειται για ένα επίπεδο αφαίρεσης υλικού που επιτρέπει την ύπαρξη μιας ενιαίας διεπαφής LabVIEW για τη διάδραση με μια πληθώρα περιφερειακών συσκευών. Το πρώτο απαραίτητο βήμα είναι να φορτωθεί το firmware του LINUX στον μικροελεγκτή arduino, που σημαίνει ότι η πρόσβαση πραγματοποιείται με Remote I/O τρόπο (προφανώς έχει γίνει προηγουμένως η εγκατάσταση του LINUX και του MarkerHub toolbox μέσω του διαχειριστή πακέτων VIPM). Για να το κάνουμε αυτό, πηγαίνουμε αρχικά στη γραμμή εργαλείων του Front Panel (ή του Block Diagram) και επιλέγουμε διαδοχικά Tools -> MarkerHub -> LINUX -> LINUX Firmware Wizard. Τότε εμφανίζεται το παράθυρο του LINUX Firmware Wizard, στο οποίο γίνεται το setup, όπως φαίνεται στην εικόνα 17. Επιλέγουμε με τη σειρά την οικογένεια και τον τύπο του μικροελεγκτή (στην περίπτωσή μου είναι το Arduino Mega 2560), τη θύρα επικοινωνίας με το arduino board και την έκδοση του firmware / μορφή της επικοινωνίας (εδώ είναι σειριακή μέσω θύρας USB). Τέλος, επιλέγουμε τη φόρτωση του Pre-Built Firmware στο arduino board.

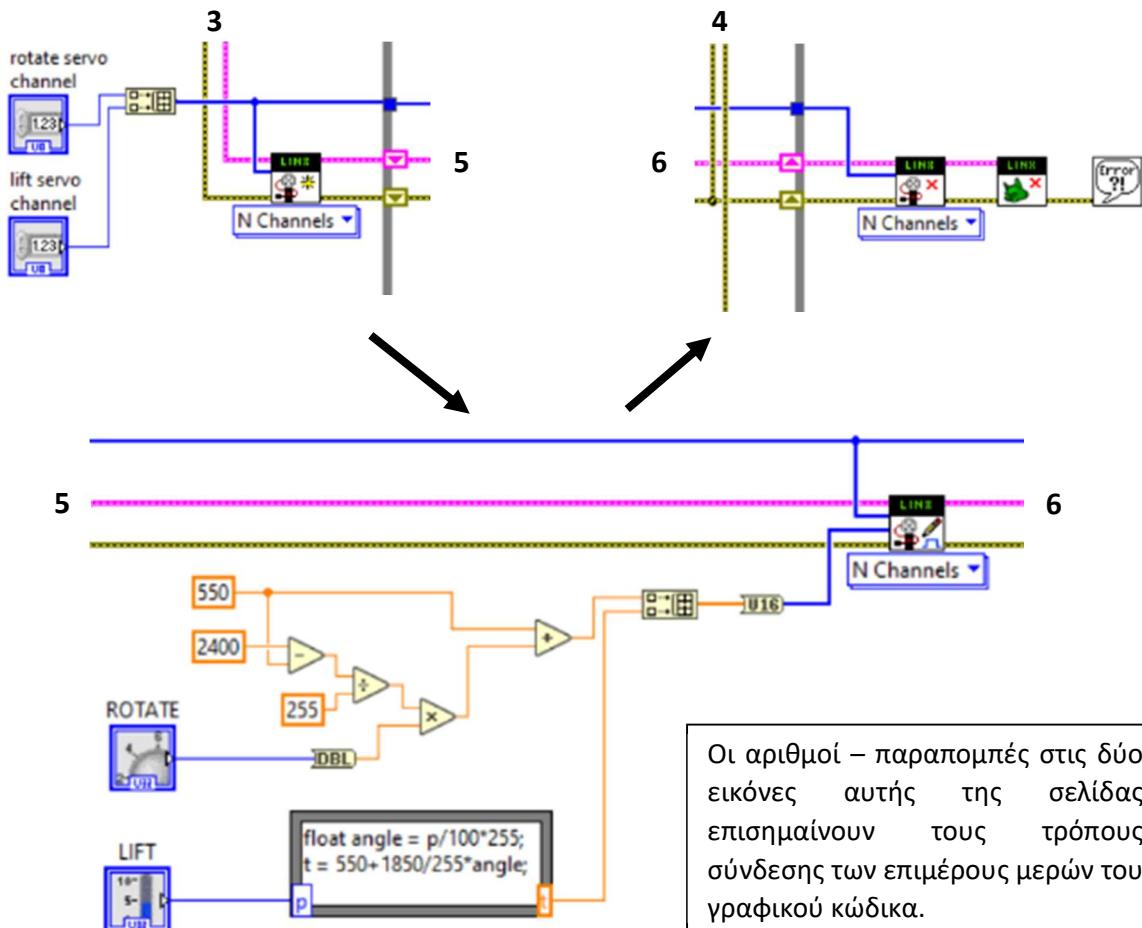


Εικόνα 17

Τώρα μπορούμε να αξιοποιήσουμε τα blocks του LINUX για την επικοινωνία με το Arduino Mega 2560 (εικόνες 18 και 19). Αρχικά, έχω από το while loop, ανοίγω με το “Open Serial” block μια σειριακή σύνδεση με την απομακρυσμένη συσκευή του μικροελεγκτή, ορίζοντας τη σειριακή θύρα (με το ανάλογο VISA control) και τον ρυθμό baud rate μετάδοσης δεδομένων μέσω της θύρας. Ανοίγω μόνο μία σειριακή σύνδεση για όλα τα controls του ρομποτικού βραχίονα και στέλνω εντολές στα αντίστοιχα pins του Arduino Mega 2560 επαναλαμβανόμενα, εντός του while loop, με καθυστέρηση 20 msec. Για τον ηλεκτρομαγνήτη χρησιμοποιώ ένα “Digital Write” block ενός καναλιού για να γράφω στο ψηφιακό pin “magnet channel”. Όταν το control “MAGNET” είναι TRUE θέλω να ενεργοποιώ τον ηλεκτρομαγνήτη, οπότε γράφω την τιμή FALSE (γι' αυτό έχω την πύλη NOT) ή αλλιώς LOW τάση, ενώ πράττω το αντίστροφο στην αντίθετη περίπτωση. Για τους δύο σερβοκινητήρες συνδέω πρώτα στο “Open Serial” block το “Servo Open N channels” block, το οποίο δέχεται έναν πίνακα με στοιχεία τα PWM pins “rotate servo channel” και “lift servo channel”. Γράφω στα pins με τη βοήθεια του “Servo Set Pulse Width N channels” block, που παίρνει εισόδους τα δύο κανάλια και έναν πίνακα δύο στοιχείων με τους αντίστοιχους χρονικούς παλμούς, οι οποίοι υπολογίζονται με χρήση του τύπου της ενότητας “Περιγραφή της διαδικασίας υλοποίησης της κατασκευής”, στο μέρος “3. Ρομποτικός βραχίονας (ανυψωτικός μηχανισμός – γερανός)”. Έχω υλοποιήσει τον τύπο με τα blocks της κατηγορίας “Numeric” (για το control “ROTATE”), αλλά και με τη δομή “Formula Node” (για το control “LIFT”). Κλείνω τους σερβοκινητήρες εκτός του while loop με το “Servo Close N channels” block. Η σειριακή σύνδεση με τον ηλεκτρομαγνήτη και τους δύο σερβοκινητήρες τερματίζεται έχω από το while loop με δύο ξεχωριστά “Close” blocks, τα οποία παράγουν κατάλληλο μήνυμα λάθους (συνδεόμενα με το “Simple Error Handler” block) αν η σύνδεση διακοπεί λόγω σφάλματος και σταματήσει το πρόγραμμα.



Εικόνα 18

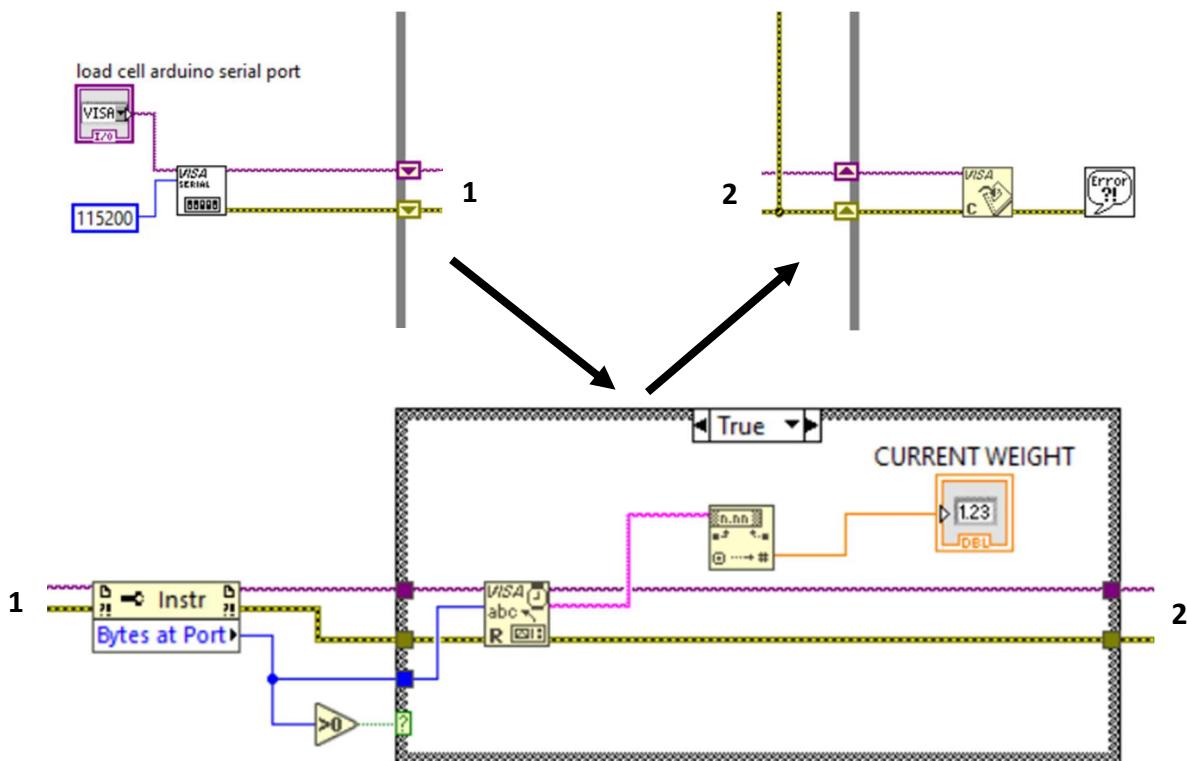


Οι αριθμοί – παραπομπές στις δύο εικόνες αυτής της σελίδας επισημαίνουν τους τρόπους σύνδεσης των επιμέρους μερών του γραφικού κώδικα.

Εικόνα 19

Για την ανάγνωση της μέτρησης του load cell χρησιμοποιώ το VISA (Virtual Instrument Software Architecture) [14]. Πρόκειται για ένα από το βασικότερα API εργαλεία του LabVIEW που βοηθάει στην επικοινωνία με περιφερειακές συσκευές εισόδου – εξόδου. Αρχικά, βάζω έξω από το while loop ένα “VISA Configure Serial Port” block, που παίρνει εισόδους το όνομα της σειριακής θύρας (διαφορετική αυτής του Arduino Mega 2560) και τον ρυθμό baud rate (εδώ είναι 115200 bps). Έτσι, εγκαθιδρύω μια σειριακή επικοινωνία με το Arduino UNO (κλείνει μονάχα με τον τερματισμό του LabVIEW προγράμματος, με ένα “VISA Close” block), το οποίο στέλνει τα επεξεργασμένα δεδομένα του ADC ενισχυτή HX711 στον υπολογιστή μου [15]. Στο εσωτερικό του while loop, αν φτάνουν δεδομένα στη θύρα (πρόκειται για strings με το δεκαδικό νούμερο της μέτρησης της ζυγαριάς σε γραμμάρια), διαβάζονται με ένα “VISA Read” block, μετατρέπονται από αλφαριθμητικά σε αριθμητικά με ένα “Fract/Exp String To Number” block και γράφονται στον indicator “CURRENT WEIGHT”. Ο γραφικός κώδικας φαίνεται στην εικόνα 20.

Για να διαβάσω σωστά και αποτελεσματικά τα δεδομένα εισόδου του HX711 συνέταξα τον arduino κώδικα “arduino_read_load_cell.ino” της εικόνας 21 (περιέχει αρκετά επεξηγηματικά σχόλια ερμηνείας της λειτουργίας του). Πριν τρέξω την εφαρμογή στο LabVIEW, έχω ανεβάσει στο Arduino UNO το συγκεκριμένο πρόγραμμα (μέσω του Arduino IDE), το οποίο εκτελείται συνεχώς και δίνει σειριακά δεδομένα στην ανάλογη θύρα με ρυθμό 115200 bps. Ο λόγος λοιπόν που έχω δύο arduino boards αντί για ένα είναι επειδή στο Arduino Mega 2560 έχω ήδη φορτώσει το firmware του LINX, επομένως δεν έχω πλέον τη δυνατότητα να ανεβάσω κώδικα στον μικροελεγκτή μέσω του Arduino IDE. Επίσης, είναι επιθυμητό η θύρα που δέχεται τα σειριακά δεδομένα εισόδου του HX711 να μην απασχολείται με άλλες εργασίες, ώστε να είναι όσο το δυνατόν γρηγορότερη η λήψη των μετρήσεων βάρους από την ζυγαριά. Αν υπάρξει κάποιο σφάλμα στην επικοινωνία και στην αξιοπιστία των δεδομένων, μπορεί να γίνει επανεκκίνηση του προγράμματος πατώντας το reset button του Arduino UNO.



Εικόνα 20

```

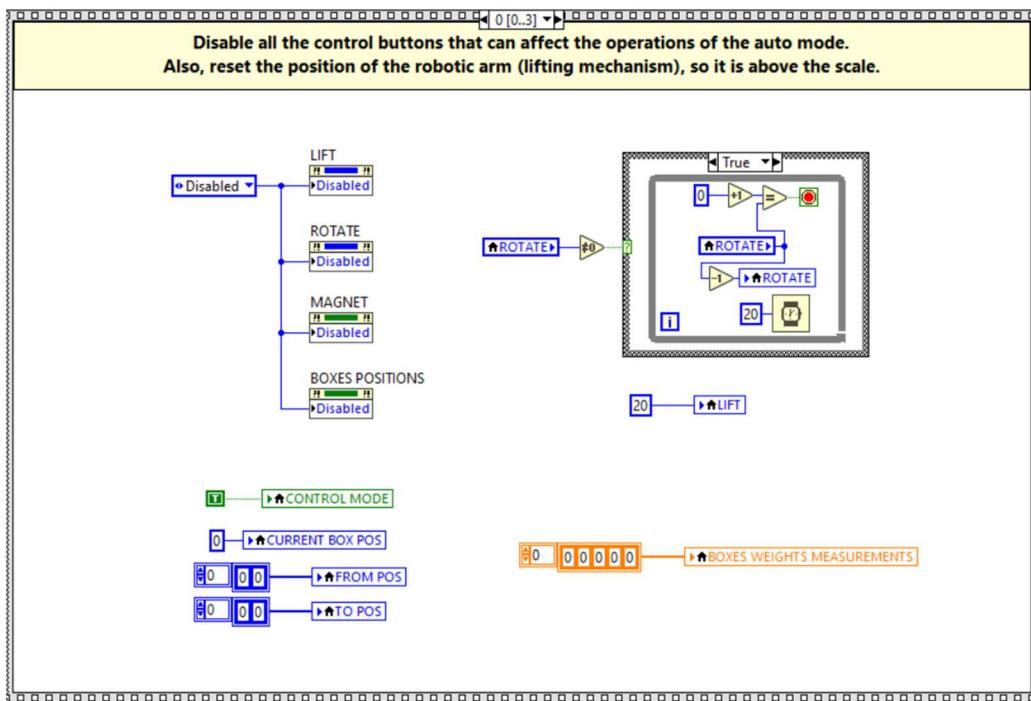
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include <HX711_ADC.h> // library for the HX711 ADC amplifier
4
5 // define the pins for HX711 module
6 const unsigned int data_pin = 4; // the Data line pin
7 const unsigned int clock_pin = 5; // the Clock line pin
8
9 // create an HX711 object (an instance of the HX711_ADC class)
10 HX711_ADC load_cell(data_pin, clock_pin); // the constructor
11 const float calibration_factor = 782.5; // the calibration factor
12
13 void setup() {
14     // establish the serial communication between the PC and the arduino board
15     Serial.begin(115200);
16     // initialize the HX711 load cell amplifier
17     load_cell.begin(); // set pins, HX711 default gain and power up the HX711
18     load_cell.setCalFactor(calibration_factor); // adjust the calibration value
19     load_cell.tare(); // tare the load cell, zero the scale
20 }
21
22 void loop() {
23     load_cell.update(); // read out 24 bits data and add to dataset of samples
24     float sensor_reading = load_cell.getData(); // return the filtered data
25     Serial.println(sensor_reading); // send to the PC the measurement in grams
26     delay(20); // make a time delay of 20 msec
27 }

```

Έχω χρησιμοποιήσει την ειδική βιβλιοθήκη “HX711_ADC” του arduino [16], η οποία πραγματοποιεί φίλτρασμα και εξομάλυνση των μετρήσεων εφαρμόζοντας ένα moving average φίλτρο σε ένα διαρκώς ανανεώσιμο παράθυρο των 16 δειγμάτων (default τιμή) και επιπλέον αφαιρεί τις υψηλές και χαμηλές ακραίες τιμές. Για τη βαθμονόμηση της ζυγαριάς χρησιμοποιώ μία γνωστή μάζα (μετρημένη από ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας) και το παράδειγμα “Calibration.ino” της ίδιας βιβλιοθήκης, προκειμένου να βρω τον παράγοντα βαθμονόμησης που χρειάζεται να περάσω στον κώδικα.

Εικόνα 21

Το δεύτερο while loop εκτελεί τέσσερις βασικές εργασίες, οι οποίες εκκινούν όταν ο χρήστης επιλέξει τη λειτουργία αυτόματης ταξινόμησης των βαρών (“auto sorting weights”) πατώντας το “START”. Εξηγώντας συνοπτικά, πρώτον ο ρομποτικός βραχίονας επαναφέρεται στην αρχική του θέση, δεύτερον ο βραχίονας διατρέχει όλες τις κατειλημένες από κάποιο κουτί θέσεις και ζυγίζει τα βάρη όλων των κουτιών, τρίτον ταξινομούνται τα κουτιά κατά φθίνουσα σειρά βάρους και τέταρτον ο ρομποτικός βραχίονας επανέρχεται στην αρχική του θέση και στέλνεται μήνυμα επιτυχούς ολοκλήρωσης της διαδικασίας στον χρήστη. Στη συνέχεια, αναλύονται διεξοδικά τα τέσσερα αυτά στάδια του αλγορίθμου (κάθε στάδιο περιέχεται σε ένα από τα τέσσερα frames μιας δομής Stacked Sequence).

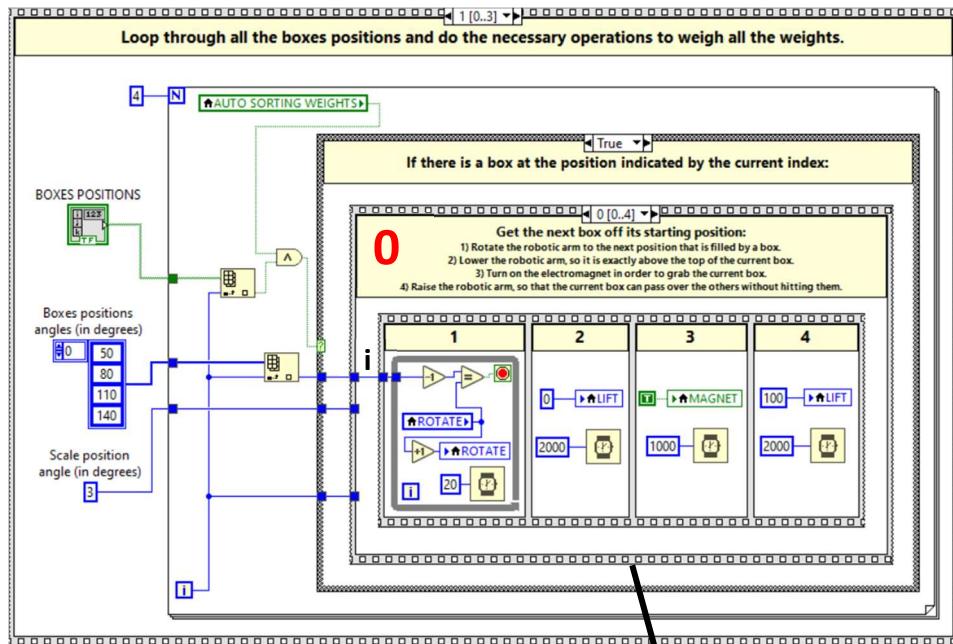


Εικόνα 22

Αρχικά, όπως φαίνεται στην εικόνα 22, μεταφέρω τον ρομποτικό βραχίονα στην αρχική του θέση (ακριβώς πάνω από το τάσι της ζυγαριάς). Ακόμα, απενεργοποιώ όλα τα κουμπιά ελέγχου των τομέων της γραφικής διεπαφής “Robotic arm control” και “Scale / weights control” που θα μπορούσαν να διαταράξουν τη λειτουργία αυτόματης ταξινόμησης. Επίσης, ο indicator “CONTROL MODE” αλλάζει την ένδειξή του από “MANUAL” σε “AUTO”. Τέλος, μηδενίζονται οι καταγραφές βάρους των κουτιών.

Το επόμενο βήμα είναι η διαδοχική ζύγιση όλων των κουτιών που βρίσκονται πάνω στη μικρή ξύλινη βάση, η οποία μπορεί να δεχτεί από 1 έως και 4 κουτιά. Ο βραχίονας ξεκινάει την κίνηση του από την αρχική του θέση, ακριβώς πάνω από το τάσι της ζυγαριάς. Έχω φτιάξει ένα for loop που διατρέχει και τις 4 πιθανές θέσεις. Αν η τρέχουσα θέση έχει κουτί (γεγονός που ελέγχεται με τη βοήθεια του πίνακα “BOXES POSITIONS”), πραγματοποιούνται οι παρακάτω πέντε ενέργειες, που συμπεριλαμβάνονται σε διαφορετικά frames μιας δομής Stacked Sequence και είναι αριθμημένες από το 0 έως και το 4. Στο εσωτερικό κάθε frame υπάρχει μία δομή Flat Sequence, η οποία περιέχει τα επιμέρους βήματα εκτέλεσης της κάθε ενέργειας (απαριθμούνται με τους λατινικούς χαρακτήρες). Ο γραφικός κώδικας παρουσιάζεται αναλυτικά στην εικόνα 23.

- 0) Παίρνω το επόμενο στη σειρά κουτί από την αρχική του θέση:
 - a) Περιστρέφω τον ρομποτικό βραχίονα μέχρι την επόμενη θέση που είναι κατειλημμένη από κουτί.
 - b) Χαμηλώνω τον ρομποτικό βραχίονα ώστε να είναι ακριβώς πάνω από την κορυφή του τρέχοντος κουτιού.
 - c) Ενεργοποιώ τον ηλεκτρομαγνήτη προκειμένου να πιάσω το τρέχον κουτί.
 - d) Ανυψώνω τον ρομποτικό βραχίονα ώστε το τρέχον κουτί να μπορεί περάσει πάνω από τα άλλα χωρίς να τα χτυπήσει.
- 1) Αφήνω το τρέχον κουτί πάνω στη ζυγαριά:
 - a) Περιστρέφω τον ρομποτικό βραχίονα μέχρι να βρεθεί πάνω από τη ζυγαριά.
 - b) Χαμηλώνω τον ρομποτικό βραχίονα ώστε το τρέχον κουτί να αγγίξει το τάσι.
 - c) Απενεργοποιώ τον ηλεκτρομαγνήτη προκειμένου να απελευθερώσω το τρέχον κουτί.
 - d) Ανυψώνω τον ρομποτικό βραχίονα ώστε να μην επηρεάσει τη μέτρηση της ζυγαριάς.
- 2) Μετράω το βάρος του τρέχοντος κουτιού και αποθηκεύω την τιμή:
 - a) Περιμένω λίγη ώρα πριν καταγράψω τη μέτρηση του βάρους (για να σταθεροποιηθεί η τιμή).
 - b) Παίρνω τη μέτρηση του βάρους του τρέχοντος κουτιού και την αποθηκεύω.
- 3) Παίρνω το τρέχον κουτί από τη ζυγαριά:
 - a) Χαμηλώνω τον ρομποτικό βραχίονα ώστε να είναι ακριβώς πάνω από την κορυφή του τρέχοντος κουτιού.
 - b) Ενεργοποιώ τον ηλεκτρομαγνήτη προκειμένου να αρπάξω το τρέχον κουτί.
 - c) Ανυψώνω τον ρομποτικό βραχίονα ώστε το τρέχον κουτί να μην αγγίζει πλέον το τάσι.
- 4) Επιστρέφω το τρέχον κουτί στην αρχική του θέση:
 - a) Περιστρέφω τον ρομποτικό βραχίονα μέχρι να βρεθεί πάνω από την αρχική θέση του τρέχοντος κουτιού.
 - b) Χαμηλώνω τον ρομποτικό βραχίονα ώστε το τρέχον κουτί να αγγίξει τη βάση.
 - c) Απενεργοποιώ τον ηλεκτρομαγνήτη προκειμένου να απελευθερώσω το τρέχον κουτί.
 - d) Ανυψώνω τον ρομποτικό βραχίονα ώστε να μην επηρεάζει πλέον το τρέχον κουτί.

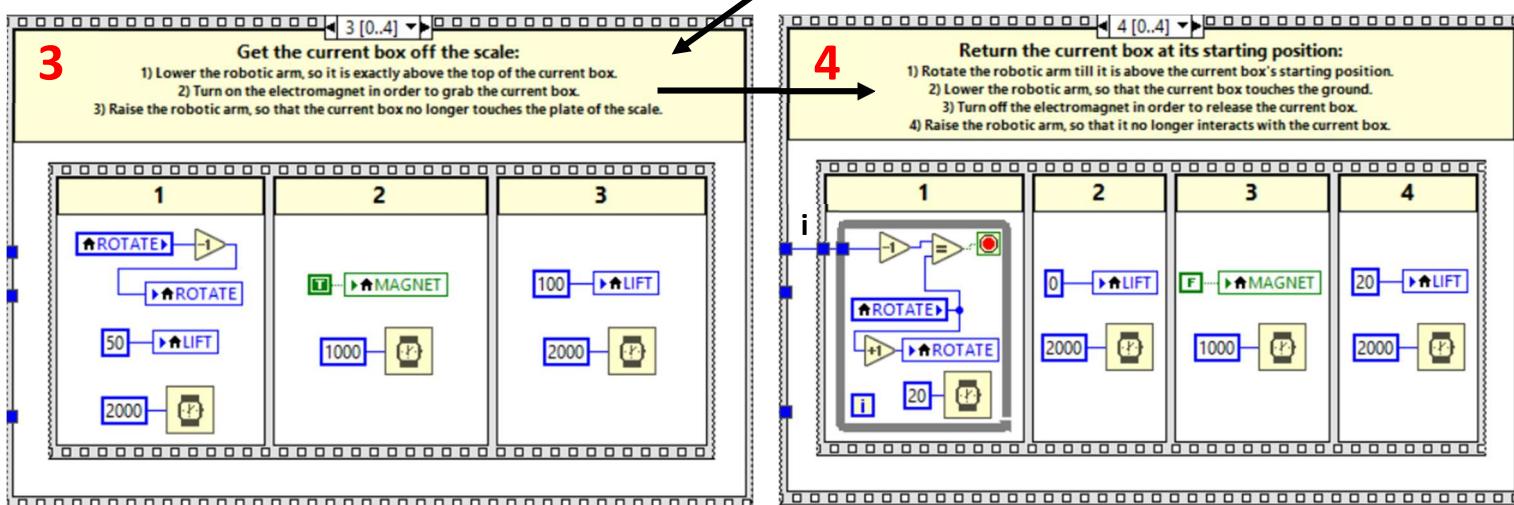
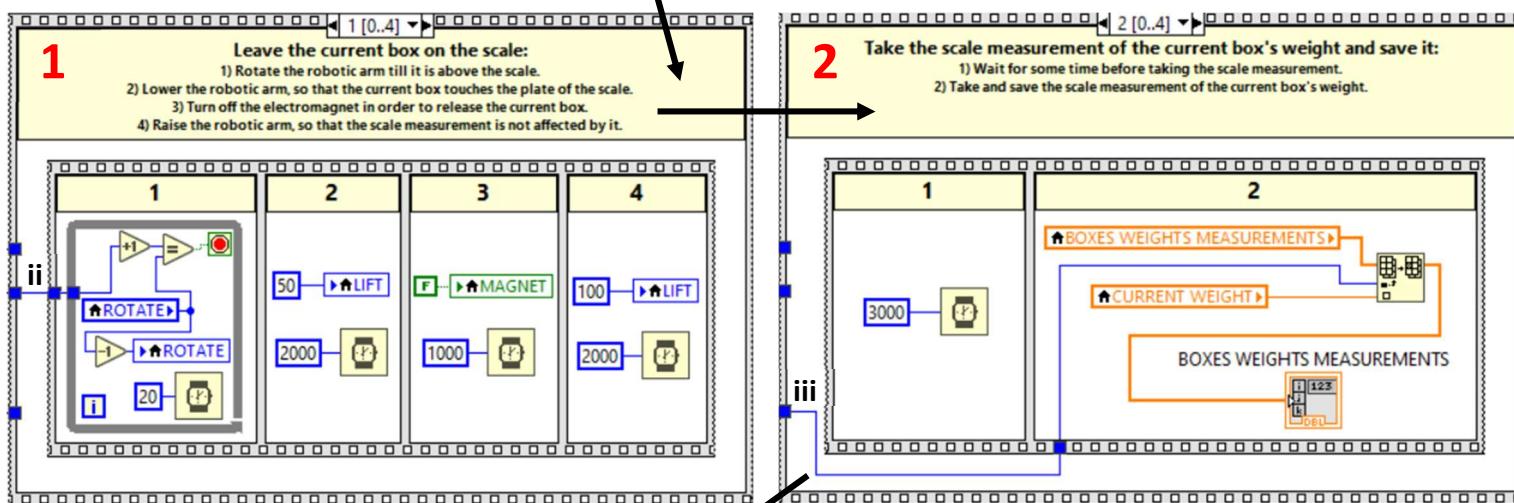


i) Η γωνία της θέσης του τρέχοντος κουτιού σε μοίρες.

ii) Η γωνία της θέσης της ζυγαριάς σε μοίρες.

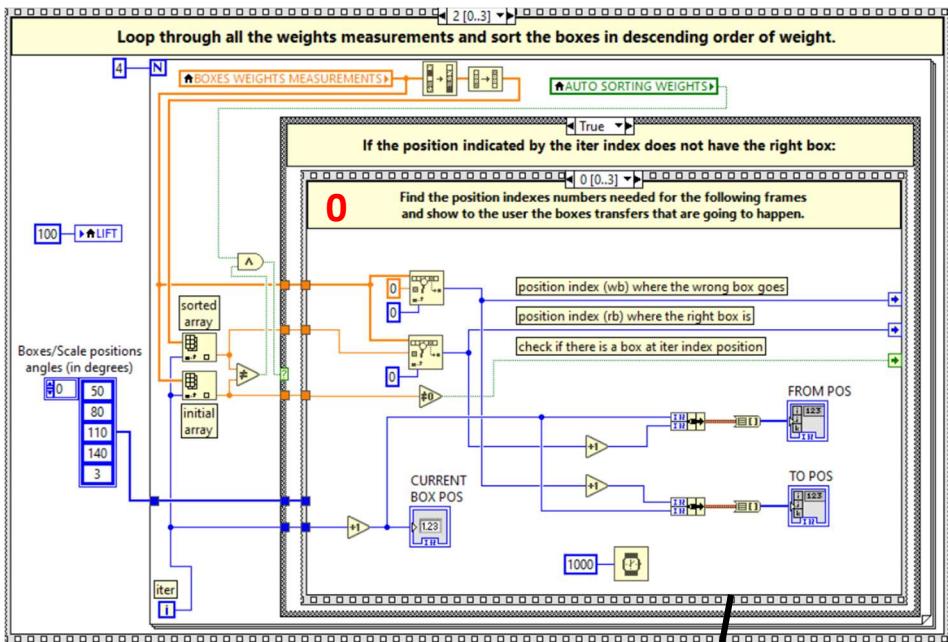
iii) Ο δείκτης της τρέχουσας επανάληψης του for loop.

(Πρόκειται για παραπομπές που έχουν προστεθεί σε κάποιες συνδέσεις του γραφικού κώδικα και φαίνονται στις εικόνες.)



Το προτελευταίο βήμα του αλγορίθμου είναι η χωρική ταξινόμηση των κουτιών κατά φθίνουσα σειρά (ο γραφικός κώδικας αυτού του βήματος παρουσιάζεται στις εικόνες 24 και 25). Ταξινομώντας τα βάρη από το βαρύτερο προς το ελαφρύτερο, θα πρέπει στο τέλος της αυτόματης ταξινόμησης να βρίσκεται στη θέση 1 το βαρύτερο κουτάκι, στη θέση 2 το αμέσως ελαφρύτερο και ούτω καθεξής μέχρι την τελευταία θέση, όπου βρίσκεται το πιο ελαφρύ κουτάκι. Το βασικό σκεπτικό είναι να ασχοληθώ με μία θέση κάθε φορά, ξεκινώντας από την 1 και οδηγούμενος προς την 4, προχωρώντας στις απαραίτητες ενέργειες για να μεταφέρω το σωστό κουτάκι στην εκάστοτε θέση. Συνεπώς, η γενική δομή του γραφικού κώδικα είναι ένα for loop που διατρέχει όλες τις θέσεις με τη σειρά και ελέγχει αν στην τρέχουσα θέση βρίσκεται το σωστό κουτάκι. Αν ναι, τότε δεν πρέπει να γίνει τίποτα, αντιθέτως, αν αυτό δεν ισχύει, εκτελείται μια δομή Stacked Sequence της οποίας το περιεχόμενο παρατίθεται με συνοπτικό τρόπο αμέσως μετά (η αρίθμηση δηλώνει τα frames της δομής, καθώς και τα υπο-frames που περιλαμβάνονται σε επιπρόσθετες δομές Stacked Sequence εντός των frames).

- 0) Βρίσκω και δείχνω στον χρήστη τις μετακινήσεις κουτιών που απαιτείται να γίνουν (δύο το μέγιστο) για τη μεταφορά του σωστού κουτιού στην τρέχουσα θέση. Επίσης, περνάω τους δείκτες θέσης όπου πρέπει να πάει το λάθος κουτί και όπου βρίσκεται το σωστό κουτί, καθώς και την πληροφορία για το αν η τρέχουσα θέση είναι άδεια, στα επόμενα frames.
- 1) Αν η τρέχουσα θέση είναι άδεια δεν γίνεται καμία ενέργεια στο συγκεκριμένο frame, αλλιώς αρπάζω το λάθος κουτί που είναι τοποθετημένο σε αυτήν και το στέλνω στην πρώτη άδεια θέση που εντοπίζω, σύμφωνα με τα εξής:
 - 1.0) Πρώτα, αρπάζω το κουτί της τρέχουσας θέσης με κατάλληλες κινήσεις του ρομποτικού βραχίονα (περιστροφή, χαμήλωμα, ενεργοποίηση ηλεκτρομαγνήτη και ανύψωση). Για τη σωστή περιστροφή του βραχίονα λαμβάνω πάντα υπόψη τη σχέση της αρχικής με την τελική γωνιακή θέση.
 - 1.1) Έπειτα, οδηγώ το λάθος κουτί στη ζητούμενη άδεια θέση (περιστροφή, χαμήλωμα, απενεργοποίηση ηλεκτρομαγνήτη, ανύψωση). Η ελεύθερη θέση μπορεί να είναι μία από αυτές των κουτιών της μικρής ξύλινης βάσης (δηλαδή 1, 2, 3 ή 4) ή το τάσι της ζυγαριάς (δηλαδή 5) σε περίπτωση που όλες οι προηγούμενες είναι κατειλημμένες. Οπότε ο βραχίονας πρέπει να κατέβει στο ανάλογο ύψος (προφανώς ψηλότερα αν η θέση προορισμού είναι το τάσι της ζυγαριάς).
- 2) Πηγαίνω στη θέση όπου βρίσκεται το σωστό κουτί και το οδηγώ στην τρέχουσα θέση, όπου θεωρείται ταξινομημένο, σύμφωνα με τα ακόλουθα:
 - 2.0) Αρχικά, πηγαίνω στη θέση του σωστού κουτιού και το αρπάζω, προσέχοντας πάλι το ύψος του τελικού στοιχείου δράσης του βραχίονα.
 - 2.1) Στη συνέχεια, μεταφέρω το σωστό κουτί στην τρέχουσα θέση, με παρόμοιες κινήσεις του ρομποτικού βραχίονα.
- 3) Ανανεώνω τα περιεχόμενα του indicator “BOXES WEIGHTS MEASUREMENTS”, ώστε να συμβαδίζουν με τις συντελεσθείσες αλλαγές στις θέσεις των κουτιών. Αξίζει να σημειωθεί ότι, αν το λάθος κουτί έχει οδηγηθεί στο τάσι της ζυγαριάς, τότε το βάρος του αποθηκεύεται στην πέμπτη θέση του πίνακα “BOXES WEIGHTS MEASUREMENTS” που δεν είναι φανερή στον χρήστη (βέβαια, η συγκεκριμένη τιμή βάρους μετριέται από τη ζυγαριά και εμφανίζεται στον indicator “CURRENT WEIGHT”).



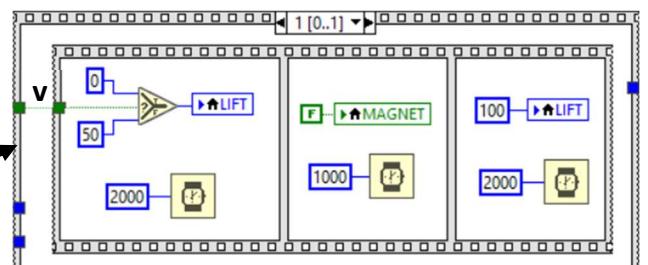
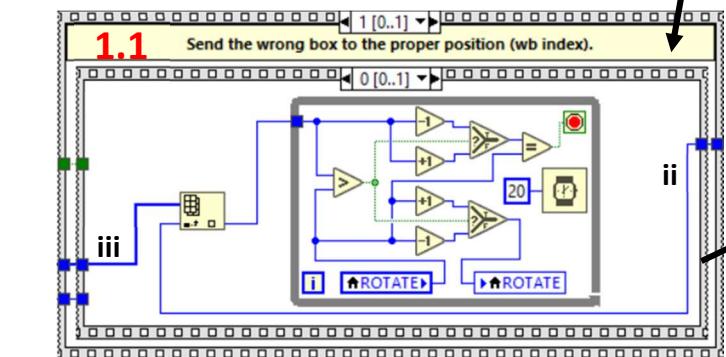
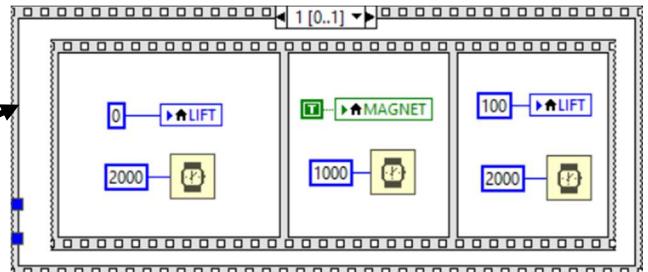
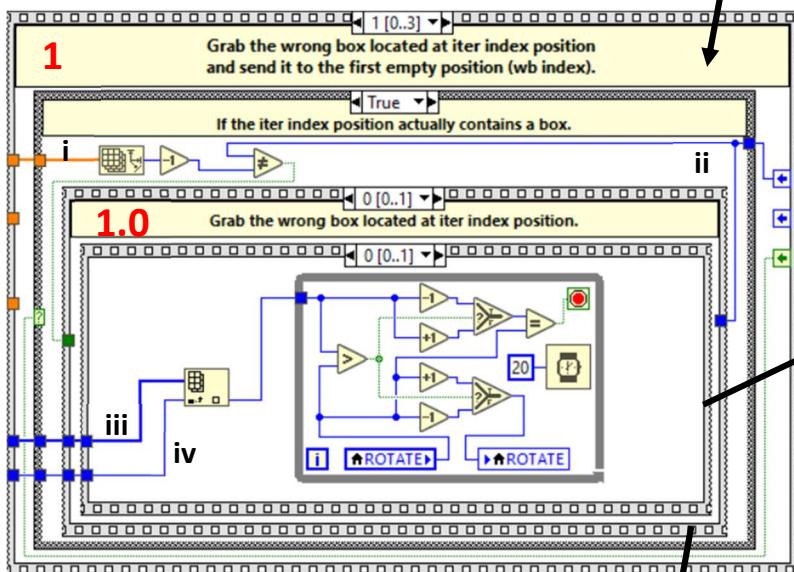
i) Ο indicator πίνακας “BOXES WEIGHTS MEASUREMENTS”.

ii) Ο δείκτης της άδειας θέσης όπου πρέπει να μεταφερθεί το λάθος κουτί.

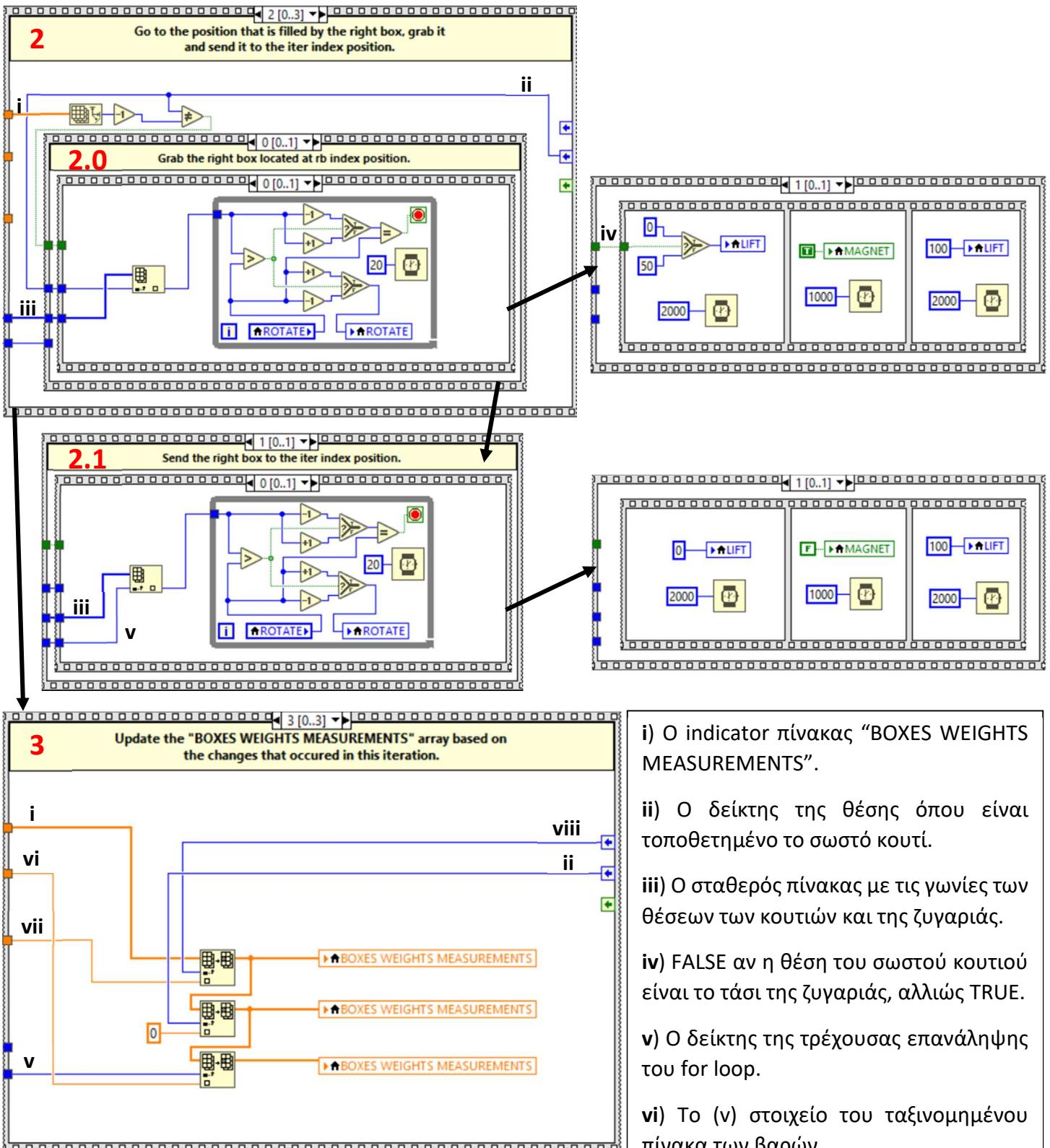
iii) Ο σταθερός πίνακας με τις γωνίες των θέσεων των κουτιών και της ζυγαριάς.

iv) Ο δείκτης της τρέχουσας επανάληψης του for loop.

v) FALSE αν η άδεια θέση είναι το τάσι της ζυγαριάς, αλλιώς TRUE.

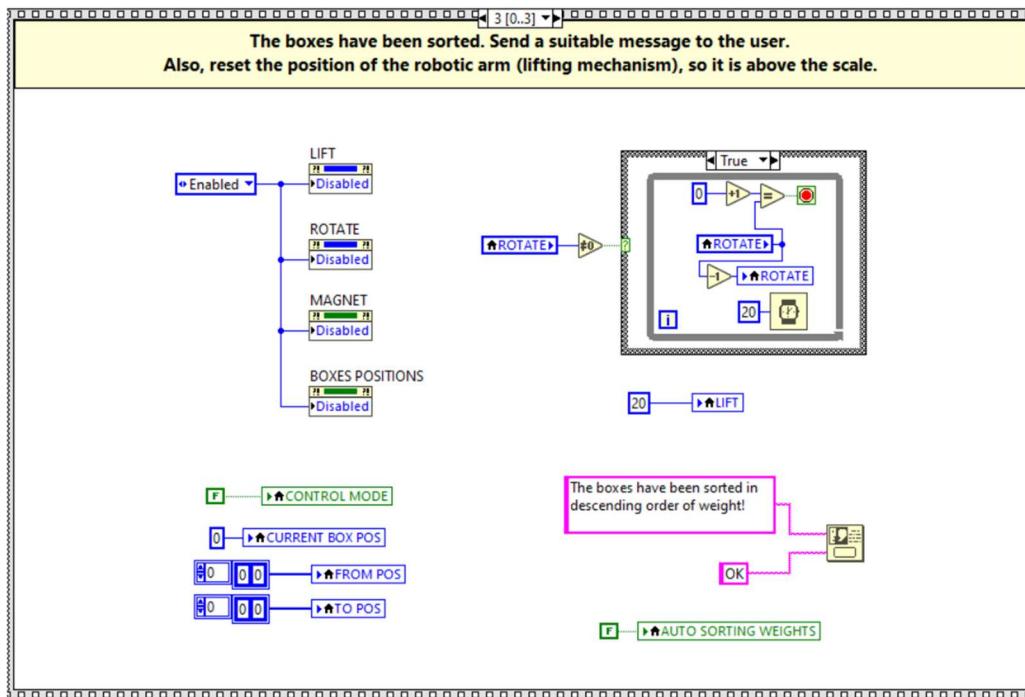


Εικόνα 24



- i) Ο indicator πίνακας "BOXES WEIGHTS MEASUREMENTS".
- ii) Ο δείκτης της θέσης όπου είναι τοποθετημένο το σωστό κουτί.
- iii) Ο σταθερός πίνακας με τις γωνίες των θέσεων των κουτιών και της ζυγαριάς.
- iv) FALSE αν η θέση του σωστού κουτιού είναι το τάσι της ζυγαριάς, αλλιώς TRUE.
- v) Ο δείκτης της τρέχουσας επανάληψης του for loop.
- vi) Το (v) στοιχείο του ταξινομημένου πίνακα των βαρών.
- vii) Το (v) στοιχείο του πίνακα των βαρών.
- viii) Ο δείκτης της θέσης όπου έπρεπε να πάει το λάθος κουτί.

Στο τέταρτο και τελευταίο βήμα (εικόνα 26), μετά την τοποθέτηση όλων των κουτιών στις σωστές τους θέσεις, επαναφέρω τον ρομποτικό βραχίονα στην αρχική του θέση. Επίσης, ενεργοποιώ όλα τα controls της γραφικής διεπαφής και αλλάζω την ένδειξη του “CONTROL MODE” από “AUTO” σε “MANUAL”. Ακόμα, στέλνω ένα μήνυμα επιτυχούς ολοκλήρωσης της διαδικασίας αυτόματης ταξινόμησης στον χρήστη.

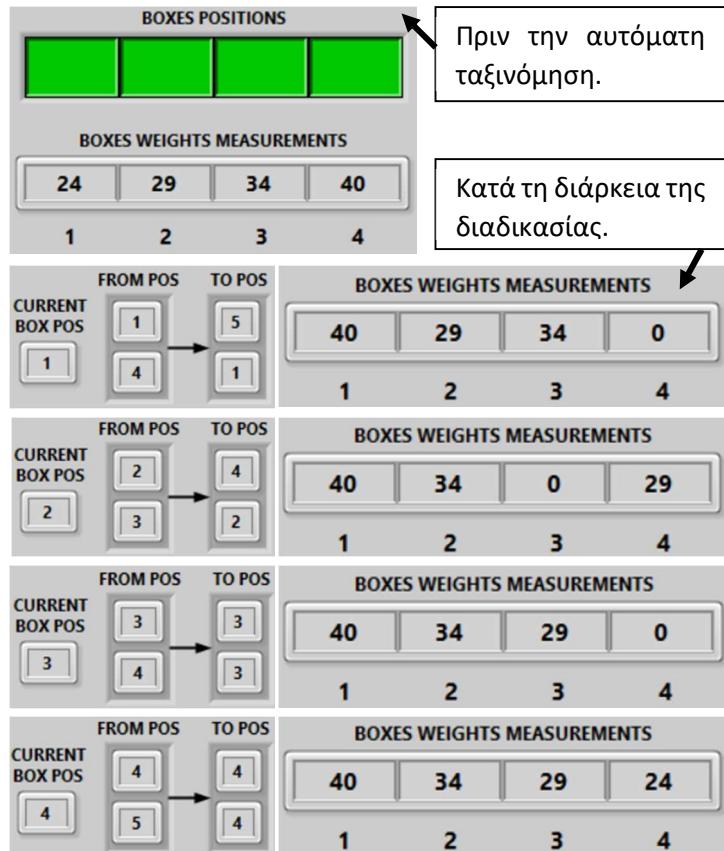


Εικόνα 26

Αποτελέσματα και συμπεράσματα

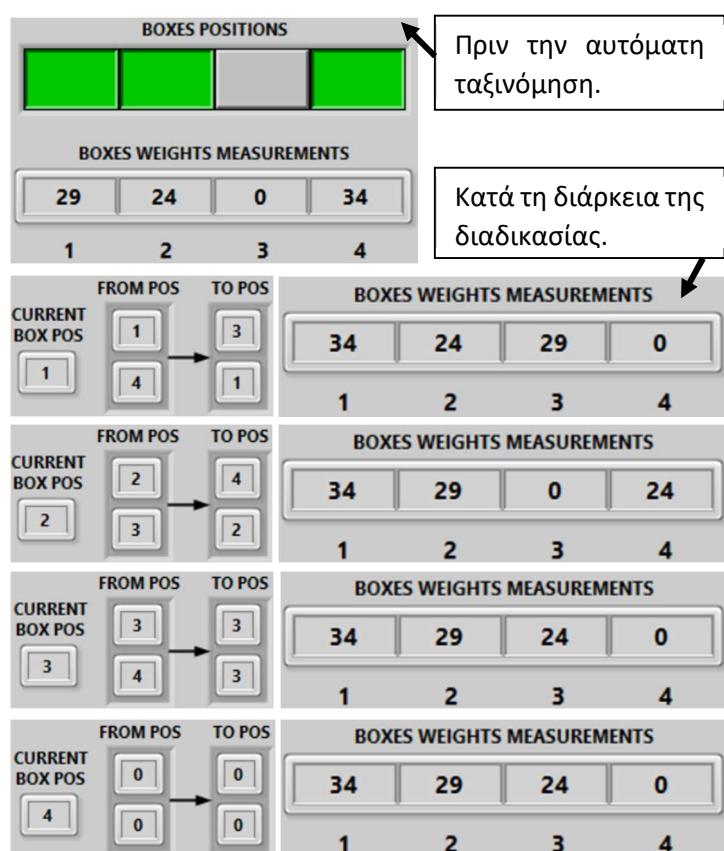
Μέσα στα τέσσερα κουτάκια περιέχεται διαφορετικός αριθμός βόλων. Ενδεικτικά, έχω βάλει 1, 2, 3 και 4 βόλους, που σημαίνει (βάσει των μετρήσεων του μέρους “4. Κουτάκια αποθήκευσης των βαρών”, της ενότητας “Περιγραφή της διαδικασίας υλοποίησης της κατασκευής”) ότι τα βάρη τους είναι αντίστοιχα 24, 29, 34 και 39 γραμμάρια, με απόκλιση ίσως προς τα πάνω κατά 1 γραμμάριο. Έχω δοκιμάσει δύο διαφορετικές διατάξεις των κουτιών. Στην πρώτη έχω βάλει και τα τέσσερα κουτάκια σε αύξουσα σειρά βάρους (στη θέση 1 αυτό με τον 1 βόλο κ.τ.λ.) και στη δεύτερη έχω τοποθετήσει τα κουτάκια με τους 2, 1 και 3 βόλους στις θέσεις 1, 2 και 4 αντίστοιχα. Τα αντίστοιχα βίντεο για τις ταξινομήσεις των δύο διατάξεων ονομάζονται “first_video.mp4” και “second_video.mp4”, και περιέχονται στον drive σύνδεσμο <https://drive.google.com/drive/folders/1fekzdiSp4skTO1alJnSjG9AEYg3RPyo-?usp=sharing>. Τόσο ο ρομποτικός βραχίονας όσο και η ζυγαριά φαίνεται ότι λειτουργούν όπως περιμέναμε. Ο ρομποτικός βραχίονας μεταφέρει τα διάφορα κουτιά με σταθερότητα και συνέπεια και η ζυγαριά υπολογίζει το βάρος τους με την αναμενόμενη ακρίβεια. Στις εικόνες 27 και 28 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στη γραφική διεπαφή για τις δύο περιπτώσεις. Ειδικότερα, παρατίθενται οι ενδείξεις των indicators “BOXES WEIGHTS MEASUREMENTS”, “CURRENT BOX POS”, “FROM POS” και “TO POS” καθ’ όλη τη διάρκεια της αυτόματης ταξινόμησης.

1^η περίπτωση: Κουτάκια με τους 1, 2, 3 και 4 βόλους στις θέσεις 1, 2, 3 και 4 αντίστοιχα.



Εικόνα 27

2^η περίπτωση: Κουτάκια με τους 2, 1 και 3 βόλους στις θέσεις 1, 2 και 4 αντίστοιχα.



Εικόνα 28

Πριν την αυτόματη ταξινόμηση.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.

Παρατηρώντας τη λειτουργία της τελικής κατασκευής διαπίστωσα ότι χαρακτηρίζεται από πολλά πλεονεκτήματα, αλλά και πως μπορεί να δεχτεί αρκετές βελτιώσεις. Στα υπέρ συγκαταλέγονται η αξιοπιστία και η αποτελεσματικότητα της, αφού η διάταξη εκτελεί με εξαιρετικά μεγάλο ποσοστό επιτυχίας την επιθυμητή εργασία (έχω κάνει πολλές προσπάθειες με την ολοκληρωμένη έκδοση και ελάχιστες απέτυχαν, εκτιμώ 1 στις 10). Επίσης, παρέχονται δυνατότητες προσαρμοσμένης σχεδίασης, αφού ο αριθμός των αντικειμένων (κουτιών) καθώς και η αρχική τους τοποθέτηση καθορίζονται από τον χρήστη. Ακόμα, η διαδικασία της ταξινόμησης είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και δεν απαιτεί καμία παρέμβαση από τον χρήστη (η μόνη είσοδος που δίνεται είναι οι θέσεις που καταλαμβάνουν αρχικά τα κουτιά, σε μια παραλλαγή της εργασίας θα μπορούσα να προσθέσω έναν αισθητήρα απόστασης στο τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα, που να καταλαβαίνει αν υπάρχει κάποιο κουτάκι στην εκάστοτε θέση). Στα αρνητικά στοιχεία της κατασκευής θεωρώ κυριότερο τη μικρή της ευελιξία, με την έννοια ότι για να λειτουργήσει αξιόπιστα, επιβάλλεται να τοποθετηθούν τα κουτιά σε συγκεκριμένες αρχικές θέσεις με ελάχιστα περιθώρια απόκλισης (η ανοχή είναι ίσως μερικά χλιοστά). Κατ' επέκταση, παρότι η ακρίβεια είναι πολύ καλή στις τοποθετήσεις των κουτιών στις θέσεις προορισμού τους, παρατηρούνται μερικές φορές αποκλίσεις από τα σημειωμένα πλαίσια κατά κάποια χλιοστά του μέτρου. Επιπλέον, αν η διαδικασία ταξινόμησης διακοπεί για οποιοδήποτε λόγο, δεν γίνεται να επανεκκινήσει από το σημείο που σταμάτησε, διότι δεν διατηρείται μνήμη ούτε της θέσης των κουτιών ούτε του καταγεγραμμένου βάρους τους. Τέλος, η διαδικασία αυτόματης ταξινόμησης είναι open loop, επειδή εκτελείται μία σειρά αυστηρά προκαθορισμένων ενεργειών και δεν υπάρχουν αισθητήρες που να ανιχνεύουν τυχόν μικροδιορθώσεις που ίσως πρέπει να γίνουν, π.χ. στην κίνηση του βραχίονα. Βέβαια, η αδυναμία αυτή δεν έχει τόση σημασία, επειδή όπως προαναφέρθηκε η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας είναι πολύ καλή.

Παραπομπές – Πηγές

1. <https://www.morrisonweighing.com/weighing-systems/industrial-sorting-scales> (ιστοσελίδα της Morrison Weighing Systems με τα βιομηχανικά συστήματα ζύγισης και ταξινόμησης που κατασκευάζει)
2. <https://www.pwrpack.com/what-is-a-pick-and-place-robot/> (περιγραφή του τρόπου λειτουργίας και των χαρακτηριστικών ενός pick and place ρομπότ)
3. <https://wiserobotics.com/blog/15-reasons-why-robots-beat-conveyors/> (παρουσίαση των πλεονεκτημάτων της ευέλικτης αυτοματοποίησης, π.χ. έντροχα ρομπότ και ρομποτικοί βραχίονες, έναντι της σταθερής, π.χ. μεταφορικές ταινίες)
4. https://en.wikipedia.org/wiki/Load_cell (το κύριο άρθρο της Wikipedia που εξηγεί τη λειτουργία του load cell)
5. https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf (datasheet του ADC ενισχυτή HX711)

6. http://okeanis.lib2.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/2137/hlg_201400897.pdf?sequence=1&isAllowed=y (στη σελίδα 10 παρατίθενται μερικά από τα κύρια μέρη ενός γερανού – ανυψωτικού μηχανισμού, όπως αυτός που έχω κατασκευάσει)
7. <https://www.dfrobot.com/product-2217.html> (ιστοσελίδα αγορών της DFROBOT για τον ηλεκτρομαγνήτη DFR0794 των 5 V DC και 3 kg δύναμη κρατήματος)
8. <https://grobotronics.com/servo-standard-15kg.cm-metal-gears-with-overload-protection-feetech-ft5116m.html?sl=en> (ιστοσελίδα αγορών της Grobotronics για τον servomotor FT5116M της Feetech, όπου περιέχονται όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά του)
9. <https://grobotronics.com/breadboard-jumper-wires-male-to-male-pack-of-65.html>,
<https://grobotronics.com/ribbon-40wire-20cm-male-to-male.html>,
<https://grobotronics.com/ribbon-40wire-20cm-female-to-female.html>,
<https://grobotronics.com/ribbon-40wire-20cm-female-to-ale.html> (ιστοσελίδες αγορών της Grobotronics για όλα τα απαραίτητα καλώδια του ηλεκτρικού κυκλώματος)
10. <https://www.tme.eu/en/details/mw7e08gs/mains-power-supplies/> (ιστοσελίδα αγορών της TME για το τροφοδοτικό ρυθμιζόμενης τάσης MW7E08GS, όπου δίνονται όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά του)
11. http://wiki.sunfounder.cc/index.php?title=2_Channel_5V_Relay_Module (ιστοσελίδα της wiki για το SRD-05VDC-SL-C LOW level ρελέ 5 V των 2 καναλιών)
12. <https://randomnerdtutorials.com/arduino-load-cell-hx711/> (περιέχει μεταξύ άλλων ερμηνεία της λειτουργίας του load cell και οδηγίες σύνδεσης του ADC ενισχυτή HX711 με το load cell και το arduino board)
13. <https://www.labviewmakerhub.com/doku.php?id=libraries:linx:start>,
https://www.labviewmakerhub.com/doku.php?id=learn:libraries:linx:misc:linx-internals#remote_io,
<https://www.labviewmakerhub.com/doku.php?id=learn:libraries:linx:reference:labview:start> (η ιστοσελίδα του LabVIEW MarkerHub, αναλυτική εξήγηση του τι είναι και πώς δουλεύει το LINX, καθώς και η περιγραφή ολόκληρης της αρχιτεκτονικής του)
14. <https://www.ni.com/en/support/documentation/supplemental/06/ni-visa-overview.html> (περιλαμβάνει μια επισκόπηση των δυνατοτήτων του VISA API της National Instruments)
15. <https://forums.ni.com/t5/LabVIEW-Interface-for-Arduino/Using-LabVIEW-with-Arduino-HX711-Load-Cell-with-VISA-only/td-p/4110178> (forum της National Instruments όπου βρήκα τον τρόπο να διαβάζω τα σειριακά δεδομένα που έρχονται από τον ADC ενισχυτή HX711)
16. https://github.com/olkai/HX711_ADC/tree/master (το GitHub link με τον πηγαίο κώδικα της arduino βιβλιοθήκης “HX711_ADC”)