

## Παραδοτέο Π6

### Έκθεση για το παραχθέν έργο

### T1 ΕΔΚ 04775 – 3BUILD:

## «Αναφορά Κατασκευής Διάταξης Τρισδιάστατης Εκτύπωσης Ημίσειας Κλίμακας και Αναφορά Λειτουργίας & Παρελκόμενης Δοκιμαστικής Διάταξης “Turn Table”»

### Ενότητα Εργασίας 4

Συγγραφείς	Ιωάννης Τσιλίκας (ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ), Δέσποινα Αλμπάνη (ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ), Θεόδωρος Μαυρέλος του Γ. (ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ), Ηλίας Κατής (ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ), Θεόδωρος Μαυρέλος του Κ. (ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ), Στυλιανός Σταφυλαράκης (ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ)
Συντονιστής Ενότητας	ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ Ε.Π.Ε.
Προθεσμία Υποβολής	
Επίπεδο Διάχυσης	Για χρήση μόνο μεταξύ των φορέων
Τύπος	Έκθεση

### Ιστορικό Αναθεωρήσεων

Όνομα (Φορέας)	Περιγραφή	Ημερομηνία
ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ Ε.Π.Ε.	Προσχέδιο Έκθεσης	31/01/2020
	Τελική Έκδοση	29/02/2020

### Περιεχόμενα

1. Περίληψη .....	3
2. Εισαγωγή.....	4
3. Κατασκευή διάταξης τρισδιάστατης εκτύπωσης ημίσειας κλίμακας και αναφορά λειτουργίας .....	5



<b>4. Κατασκευή παρελκόμενης δοκιμαστικής διάταξης “Turn Table” και αναφορά λειτουργίας</b> .....	8
<b>5. Συνεισφορά ανά εργαζόμενο</b> .....	10
5.1 Αλμπάνη Δέσποινα, Μηχανολόγος Μηχανικός .....	10
5.2 Μαυρέλος Θεόδωρος του Γεωργίου, Μηχανολόγος Μηχανικός .....	12
5.3 Μαυρέλος Θεόδωρος του Κωνσταντίνου, Μηχανολόγος Μηχανικός .....	13
5.4 Σταφυλαράκης Στυλιανός, χειριστής εργαλειομηχανών .....	14
5.5 Κατής Ηλίας, Μαθηματικός Εφαρμογών .....	14



## 1. Περίληψη

Στην παρούσα έκθεση γίνεται αναφορά από την ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ Ε.Π.Ε. σχετικά με το παραδοτέο αριθμού Π6 της Ενότητας Εργασίας 4 για την κατασκευή της διάταξης τρισδιάστατης εκτύπωσης ημίσειας κλίμακας και τη λειτουργία της. Η κατασκευή μελετήθηκε και σχεδιάστηκε σε συνεργασία με το Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών (ΕΣΜ) ΕΜΠ βασιζόμενη σε προϋπάρχουσα διάταξη ρομποτικού βραχίονα τριών βαθμών ελευθερίας. Για την αναπροσαρμογή του καρτεσιανού βραχίονα και την αναβάθμισή του σε λειτουργική διάταξη ικανή να καλύψει τις ερευνητικές ανάγκες του έργου μελετήθηκαν και κατασκευάστηκαν εξαρτήματα και διατάξεις, τα οποία κατόπιν ποιοτικού και λειτουργικού ελέγχου τοποθετήθηκαν στον βραχίονα. Στην παρούσα έκθεση παρουσιάζονται ορισμένα από τα εξαρτήματα αυτά σε μορφή τρισδιάστατου γραφήματος (CAD) ή σε πραγματικές φωτογραφίες καθώς και η πλέον λειτουργική διάταξη του εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας. Επιπλέον, για λόγους διευκόλυνσης της έρευνας σχετικά με τις παραμέτρους εκτύπωσης του κονιάματος σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από την ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ διάταξη δοκιμών με την ονομασία "Turn Table", σχέδια και φωτογραφίες της οποίας παρουσιάζονται επίσης στην παρούσα έκθεση. Η εν λόγω διάταξη έχει παραδοθεί στο ΕΣΜ ΕΜΠ και είναι επίσης λειτουργική.



## 2. Εισαγωγή

Ένα από τα κρίσιμα στάδια μελέτης και έρευνας σχετικά με την τρισδιάστατη εκτύπωση κτηρίων αποτελεί ο προσδιορισμός αφενός της χημικής σύστασης του κονιάματος και αφετέρου οι ίδιες οι παράμετροι της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Οι μηχανικές ιδιότητες του κονιάματος μεταβάλλονται συνεχώς από την πρώτη στιγμή παραγωγής και ανάδευσής του μέχρι και το τελικό στάδιο της στερεοποίησής του. Κατά συνέπεια, παράμετροι όπως η παροχή κονιάματος, η ταχύτητα εκτύπωσης, η διατομή κάθε νέας εναποτεθούμενης στρώσης υλικού καθώς και ο χρόνος που παρεμβάλλεται μεταξύ της εναπόθεσης δύο διαδοχικών στρώσεων καθορίζουν τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού αποτελέσματος. Κάνοντας λόγο για μηχανικές ιδιότητες εννοούνται όλες εκείνες οι παράμετροι που ορίζουν τη συμπεριφορά ενός υλικού και μίας διάταξης (όρια διαρροής και θραύσης, μέγιστη ελαστική – πλαστική παραμόρφωση, ολκιμότητα – ψαθυρότητα υλικού, μέτρο ελαστικότητας Young, λόγος Poisson, γήρανση, αντίσταση σε κάμψη, στρέψη, διάτμηση κ.α.), οι οποίες θα πρέπει να ξεπερνούν τα ορισμένα κατώτατα όρια προκειμένου η τελική κατασκευή να κρίνεται ασφαλής. Πριν όμως από όλα αυτά απαιτείται η ίδια η στερεοποίηση του εκτυπωμένου υλικού, η σωστή σύνδεση και συνοχή των στρώσεων μεταξύ τους καθώς και η επίτευξη ελάχιστου πορώδους. Τα παραπάνω εξαρτώνται άμεσα από τις παραμέτρους εκτύπωσης που αναφέρθηκαν και ο προσδιορισμός αυτών δεν δύναται να γίνει με αναλυτικό τρόπο λόγω της πολυπλοκότητας και μη γραμμικότητας των εμπλεκόμενων φαινομένων. Κατά συνέπεια κρίθηκε αναγκαία η χρήση τρισδιάστου εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας, όπως επίσης και της παρελκόμενης δοκιμαστικής διάταξης "Turn Table".

### 3. Κατασκευή διάταξης τρισδιάστατης εκτύπωσης ημίσειας κλίμακας και αναφορά λειτουργίας

Στα πλαίσια του έργου πραγματοποιήθηκε μελέτη και κατασκευή εξαρτημάτων αναβάθμισης και προσαρμογής του ήδη υπάρχοντος ρομποτικού καρτεσιανού βραχίονα. Ο εν λόγω ρομποτικός βραχίονας βρίσκεται στο Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών (ΕΣΜ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Πρόκειται για ένα καρτεσιανό ρομπότ τριών βαθμών ελευθερίας και επομένως η κίνησή του προδιαγράφεται στον χώρο και κυρίως στο επίπεδο συντεταγμένων (x,y), ενώ ο τρίτος βαθμός ελευθερίας κίνησης αναφέρεται στο ύψος z του εκάστοτε επιπέδου εργασίας. Το ρομπότ αυτό μπορεί κατά συνέπεια να φθάσει οποιοδήποτε σημείο εντός του χώρου εργασίας του – ο εφικτός χώρος τοποθετήσεων της κεφαλής του ρομπότ όπως ορίζεται από τα όρια των αξόνων κίνησης x-y-z – με τον προσανατολισμό του σταθερό και γνωστό, δηλαδή με το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα της κεφαλής του ρομπότ (διάνυσμα παράλληλα στον καθολικό άξονα συντεταγμένων z) κατακόρυφο ως προς το επίπεδο εργασίας. Τέτοιου τύπου διατάξεις είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες για εργασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς είναι εύκολα υλοποιήσιμες και ελέγξιμες και συνάδουν με τη βασική αρχή λειτουργίας μίας τρισδιάστατης εκτύπωσης, δηλαδή τη βηματική εναπόθεση στρώσεων υλικού.

Η διάταξη του ρομποτικού βραχίονα πριν τον ανασχεδιασμό και την αναβάθμισή του στα πλαίσια του έργου, παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1. Η διάταξη έφερε υδραυλικό σύστημα κίνησης με αναλογική επενέργηση. Κατά την αναβάθμισή του η ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ σε συνεργασία με το ΕΣΜ προέβη σε επιλογή και αγορά των απαραίτητων ηλεκτρικών σερβοκινητήρων, καθώς και σε κατασκευή των παρελκόμενων μηχανολογικών εξαρτημάτων προκειμένου να διασφαλιστεί η μετάδοση της κίνησης στους τρεις άξονες του ρομπότ. Στις Εικόνες 3.2 και 3.3 παρουσιάζεται το καρτεσιανό ρομπότ μετά την προσαρμογή των κινητήρων και των νέων εξαρτημάτων. Η εν λόγω αναβάθμιση κρίθηκε αναγκαία για την αύξηση της απόδοσης και της ακρίβειας του ρομπότ, καθώς και για την επέκταση του εύρους των δυνατών παραμετροποιήσεων εκτύπωσης, χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την εργασία του ως εκτυπωτής ημίσειας κλίμακας.



**Εικόνα 3.1:** Καρτεσιανό ρομπότ ΕΣΜ – ΕΜΠ πριν την αναβάθμισή του

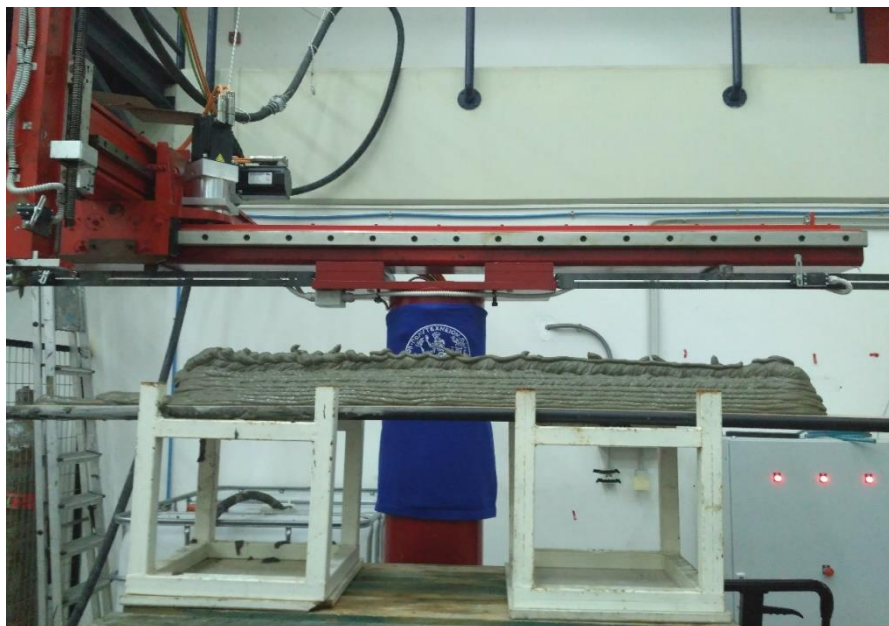


**Εικόνα 3.2:** Καρτεσιανό ρομπότ ΕΣΜ – ΕΜΠ μετά την αναβάθμιση



**Εικόνα 3.3:** Καρτεσιανό ρομπότ ΕΣΜ – ΕΜΠ μετά την αναβάθμιση

Το καρτεσιανό ρομπότ είναι πλέον λειτουργικό και πραγματοποιεί εκτυπώσεις μικρής κλίμακας με χρήση κονιάματος από την ΣΙΚΑ ΕΛΛΑΣ Α.Β.Ε.Ε. και δύναται να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση των απαραίτητων συνθηκών και παραμέτρων εκτύπωσης που οδηγούν σε επιτυχή πρωτότυπα τρισδιάστατης εκτύπωσης. Παράδειγμα τέτοιας εκτύπωσης και λειτουργίας του παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.4 (α) και (β).



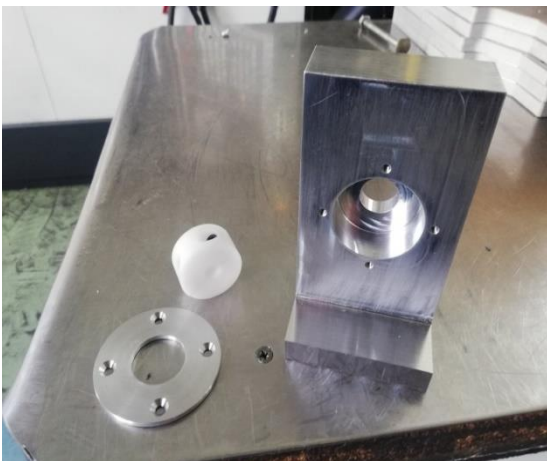
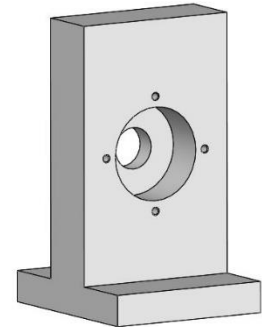
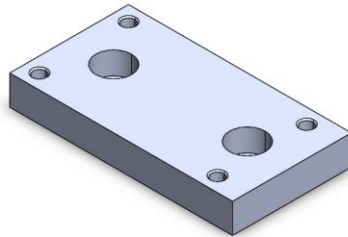
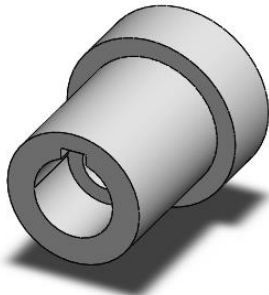
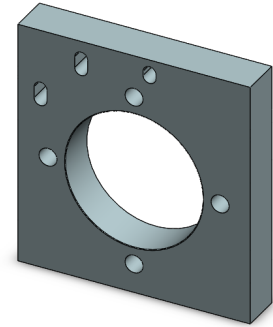
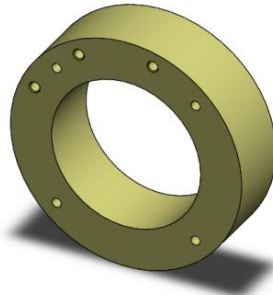
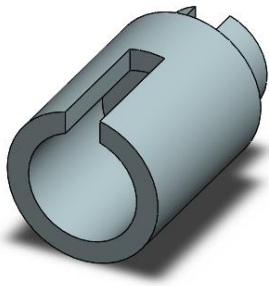
(α)



(β)

Εικόνα 3.4 (α) και (β): Επιτυχής λειτουργία εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας

Τα εξαρτήματα που κατασκευάστηκαν από την ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ Ε.Π.Ε. για την αναπροσαρμογή του καρτεσιανού ρομπότ σχεδιάστηκαν και μελετήθηκαν στο σχεδιαστικό περιβάλλον Siemens NX και στη συνέχεια καταργήστηκαν στα συμβατικά και τα CNC μηχανήματα από το εξειδικευμένο προσωπικό της εταιρίας. Παραδείγματα τέτοιων εξαρτημάτων παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.5 σε εικονική ή πραγματική μορφή.



Εικόνα 3.5: Εξαρτήματα προσαρμογής και αναβάθμισης εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας σχεδιασμένα και κατασκευασμένα από την ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ

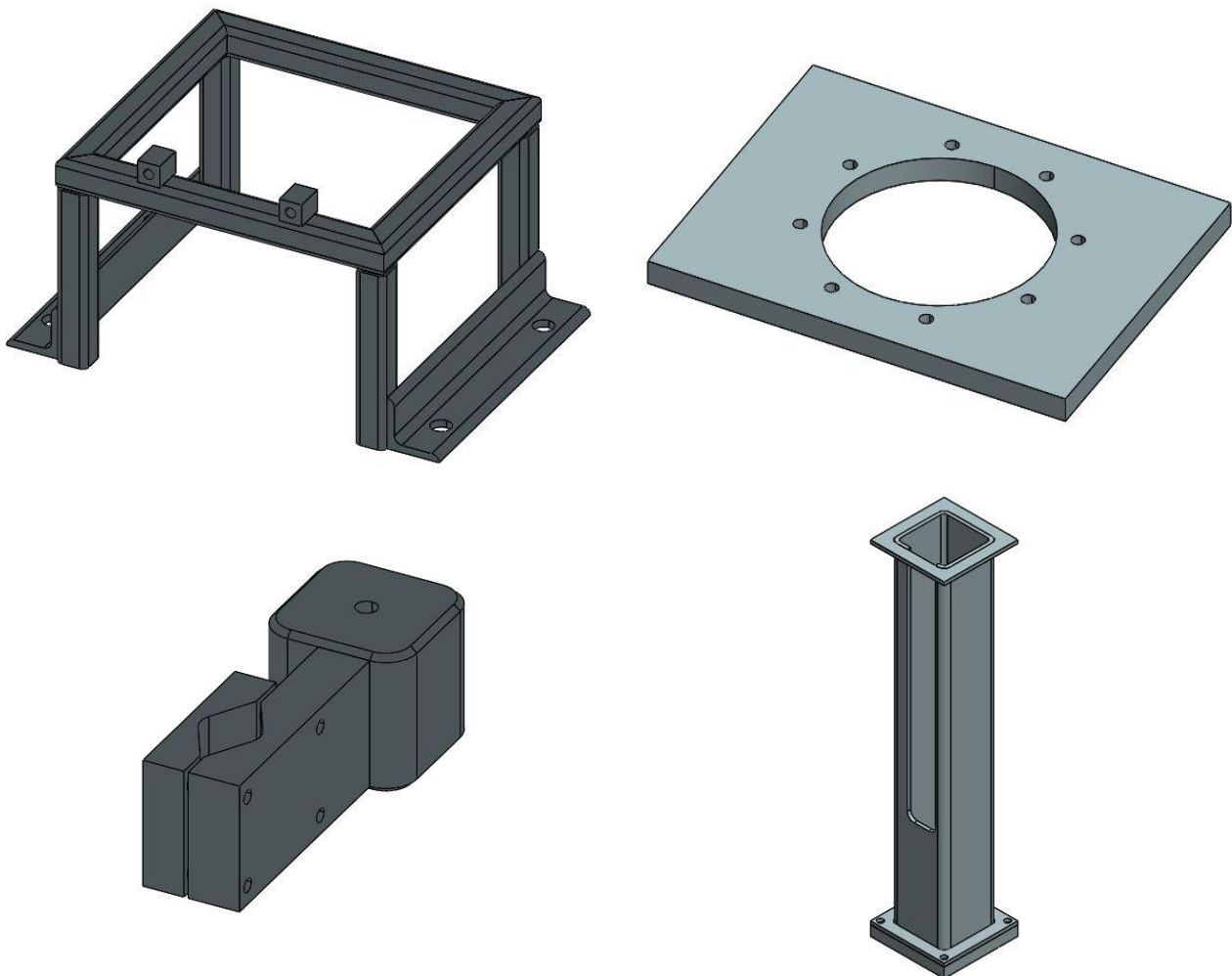
#### 4. Κατασκευή παρελκόμενης δοκιμαστικής διάταξης "Turn Table" και αναφορά λειτουργίας

Στα πλαίσια του έργου και ύστερα από σχετικό αίτημα του ΕΣΜ έγινε επίσης κατασκευή διάταξης προσδιορισμού των παραμέτρων εκτύπωσης με την ονομασία "Turn Table". Στόχος της διάταξης αυτής είναι ο προσδιορισμός της παροχής του κονιάματος σε συνδυασμό με την ταχύτητα εκτύπωσης που οδηγούν στη βέλτιστη στερεοποίηση και εν τέλει συνοχή του εκτυπωμένου κονιάματος, καθώς και στην απόδοση των βέλτιστων μηχανικών ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος. Η διάταξη αυτή είναι δύο βαθμών ελευθερίας, ενός περιστροφικού και ενός πρισματικού. Ο περιστροφικός βαθμός ελευθερίας αποδίδεται μέσω ρύθμισης στροφών από ηλεκτροκινητήρα και inverter και μετάδοσης της κίνησης μέσω ιμάντα σε κατάλληλα στερεομένη βάση. Στην



περιστρεφόμενη βάση εναποτίθεται κονίαμα ρυθμιζόμενης παροχής από ύψος που ρυθμίζεται μέσω του πρισματικού βαθμού ελευθερίας. Ο τελευταίος υλοποιείται από κατακόρυφο κοχλία κίνησης χειροκίνητα ή και αυτοματοποιημένα. Χάρη στην περιστροφική κίνηση της τράπεζας είναι δυνατό να καλυφθούν μεγάλες διαδρομές συνεχούς εκτύπωσης μέχρι την εναπόθεση υλικού της επόμενης στρώσης, στοιχείο κρίσιμο για την εκτύπωση πραγματικής κλίμακας – αφού ο εκτυπωτής πλήρους κλίμακας θα κλιθεί να διανύσει αρκετά μέτρα εναπόθεσης υλικού μεταξύ διαδοχικών στρώσεων – και δύσκολα επιτεύξιμο στην εκτύπωση ημίσειας κλίμακας.

Η διάταξη αυτή σχεδιάσθηκε σε συνεργασία με το ΕΣΜ και κατασκευάσθηκε εξ ολοκλήρου στην ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ Ε.Π.Ε. Η διάταξη έχει παραδοθεί στο ΕΣΜ και λειτουργεί κανονικά με στόχο των προσδιορισμό των παραμέτρων εκτύπωσης με χρήση κονιαμάτων της ΣΙΚΑ Α.Β.Ε.Ε. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζονται ορισμένα από τα εξαρτήματα της διάταξης, ενώ στην Εικόνα 4.2 (α) και (β) παρουσιάζεται η ίδια η διάταξη ολοκληρωμένη και λειτουργική στο ΕΣΜ ΕΜΠ.



**Εικόνα 4.1:** Εξαρτήματα διάταξης “Turn Table”



(α)



(β)

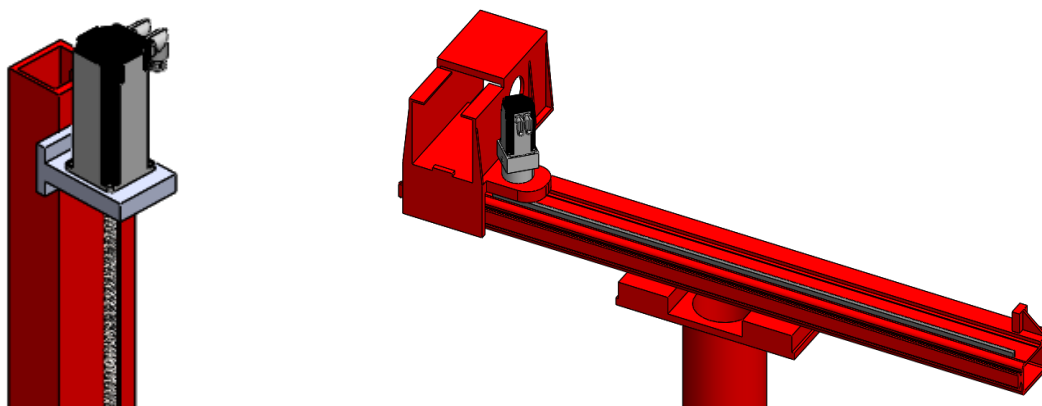
Εικόνα 4.2 (α) και (β): Διάταξη “Turn Table” ολοκληρωμένη και λειτουργική στο ΕΣΜ – ΕΜΠ

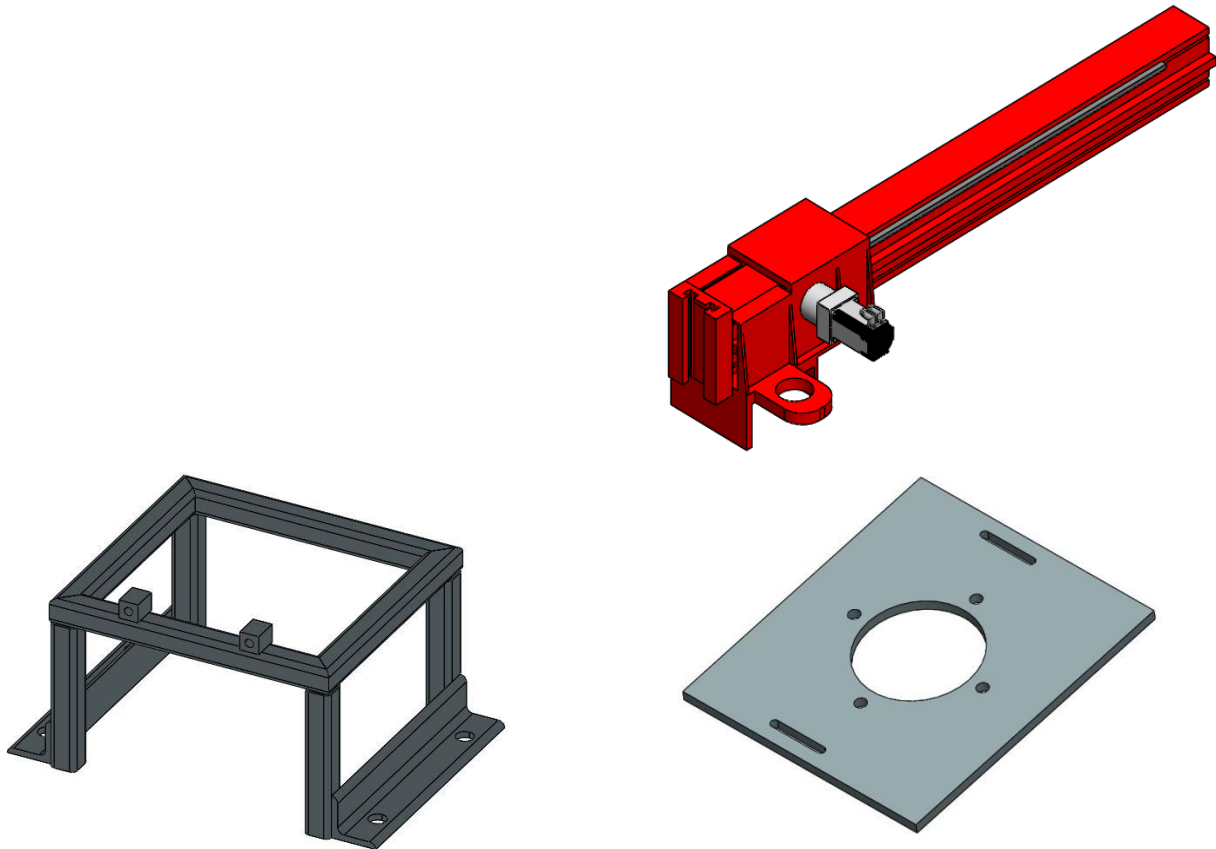
## 5. Συνεισφορά ανά εργαζόμενο

### 5.1 Αλππάνη Δέσποινα, Μηχανολόγος Μηχανικός

Σε συνεργασία με το ΕΣΜ πραγματοποίησε τη μελέτη και τον τελικό σχεδιασμό του εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας καθώς και της διάταξης “Turn Table” με στόχο τόσο την κάλυψη των ερευνητικών αναγκών

και απαιτήσεων, όσο και τη διασφάλιση της οικονομικότερης και ποιοτικότερης από πλευράς κατεργασίας διαμόρφωσης των διαφόρων εξαρτημάτων. Η σχεδίαση έγινε στο περιβάλλον Siemens NX ενώ πραγματοποιήθηκε και ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος κατά τη λειτουργία του με στόχο την αποφυγή συντονισμών και φαινομένων αστάθειας ή εμφάνισης μη επιτρεπτών παραμορφώσεων και φορτίσεων στα λειόμενα και μη μέρη της διάταξης. Επιπλέον, σε άμεση συνεννόηση με το ΕΣΜ έγινε προσδιορισμός των προδιαγραφών και απαιτήσεων των εξαρτημάτων προς προμήθεια, όπως οι σερβοκινητήρες, το Inverter, οι τραπεζοειδείς κοχλίες, οι αισθητήρες μέτρησης κ.α. Στην Εικόνα 5.1.1 παρουσιάζονται παραδείγματα σχεδιασμού από τις δύο διατάξεις.



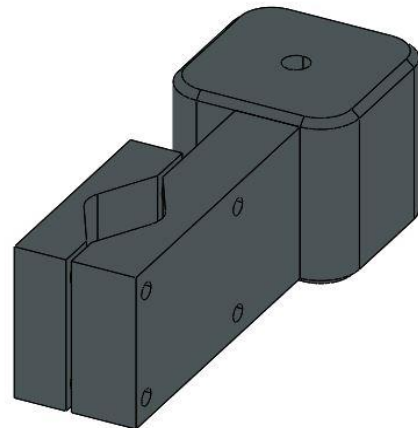
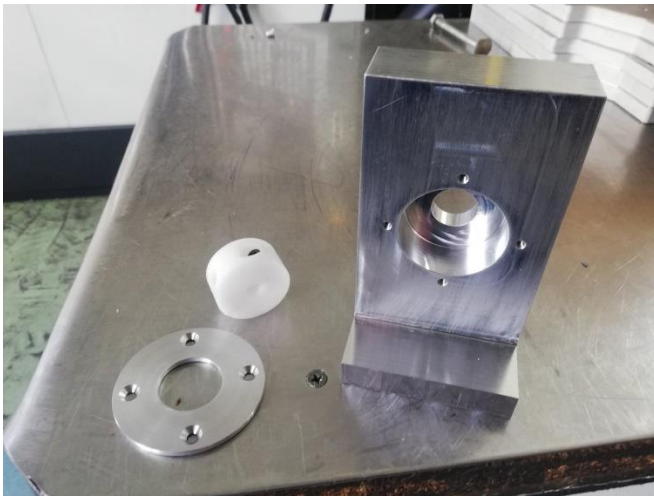


**Εικόνα 5.1.1:** Παραδείγματα σχεδιασμένων μερών των διατάξεων εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας και “Turn Table” από την Δ. Αλμπάνη

Η εργαζόμενη: .....

## 5.2 Μαυρέλος Θεόδωρος του Γεωργίου, Μηχανολόγος Μηχανικός

Διορθώσεις στον σχεδιασμό για την αρτιότερη κατασκευή των μηχανολογικών εξαρτημάτων καθώς και η ίδια η κατασκευή πλήθους αυτών έγιναν από τον Θεόδωρο Μαυρέλο με χρήση των λογισμικών Siemens NX (CAD) και EdgeCam (CAM). Οι κοπές πραγματοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο στο κέντρο κατεργασιών τεσσάρων αξόνων Akira Seiki SR3XP της εταιρίας με μέριμνα για την εξασφάλιση των μορφών αλλά και των απαραίτητων διαστασιολογικών και γεωμετρικών ανοχών προκειμένου τα εξαρτήματα να είναι πράγματι λειτουργικά και η συνεργασία τους να επιτυγχάνεται χωρίς προβλήματα, όπου αυτή είναι απαραίτητη. Η τελική συναρμογή των εξαρτημάτων με τους σερβοκινητήρες αλλά και με την ίδια τη διάταξη του εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας, όπως επίσης και η δοκιμαστική διάταξη “Turn Table”, αποδείχθηκαν επιτυχείς χάρη στην άρτια κατασκευή αυτών και την τήρηση των προτύπων ποιότητας της ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ Ε.Π.Ε. Παραδείγματα τέτοιων εξαρτημάτων κατασκευασμένων από τον Θ. Μαυρέλο παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.2.1.

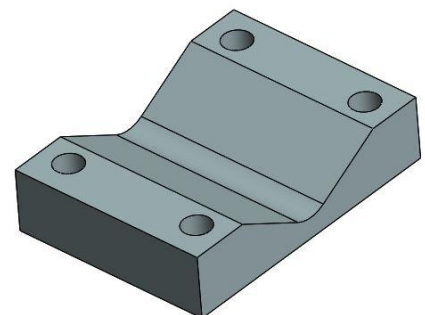
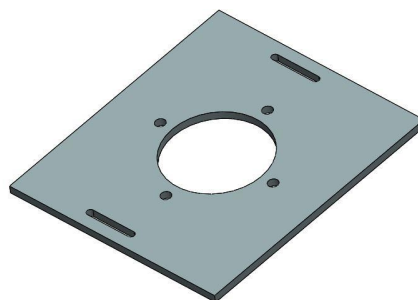
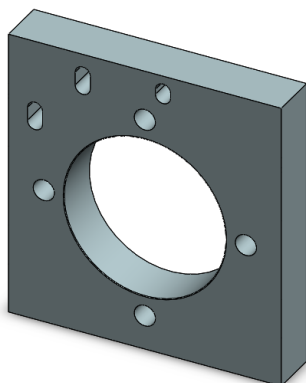


**Εικόνα 5.2.1:** Παραδείγματα εξαρτημάτων επιμελημένων και κατασκευασμένων από τον Θ. Μαυρέλο του Γ. για τον εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας και τη διάταξη "Turn Table"

Ο εργαζόμενος: .....

### 5.3 Μαυρέλος Θεόδωρος του Κωνσταντίνου, Μηχανολόγος Μηχανικός

Ως εξειδικευμένος χειριστής της ηλεκτροδιάβρωσης Wire EDM Charmilles Robofil 290 της εταιρίας ανέλαβε την κατεργασία και εξαγωγή κώδικα κοπής μέσω του λογισμικού EdgeCam για τα εξαρτήματα εκείνα που κρίθηκαν κατάλληλα για τον συγκεκριμένο τύπο κατεργασίας. Η διασφάλιση ποιότητας επιφανείας και διαστασιολογικής ακρίβειας σε πλήρη εναρμόνιση με τα πρότυπα ποιότητας της εταιρίας επιτεύχθηκε στα κρίσιμα μέρη των δύο διατάξεων οδηγώντας στο επιθυμητό αποτέλεσμα λειτουργίας τους. Επιπλέον, συνεισέφερε σε απαραίτητες κατεργασίες στις συμβατικές εργαλειομηχανές της ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ Ε.Π.Ε. Στην Εικόνα 5.3.1 παρουσιάζονται παραδείγματα εξαρτημάτων των δύο διατάξεων για τα οποία έγινε χρήση της ηλεκτροδιάβρωσης από τον Θ. Μαυρέλο.

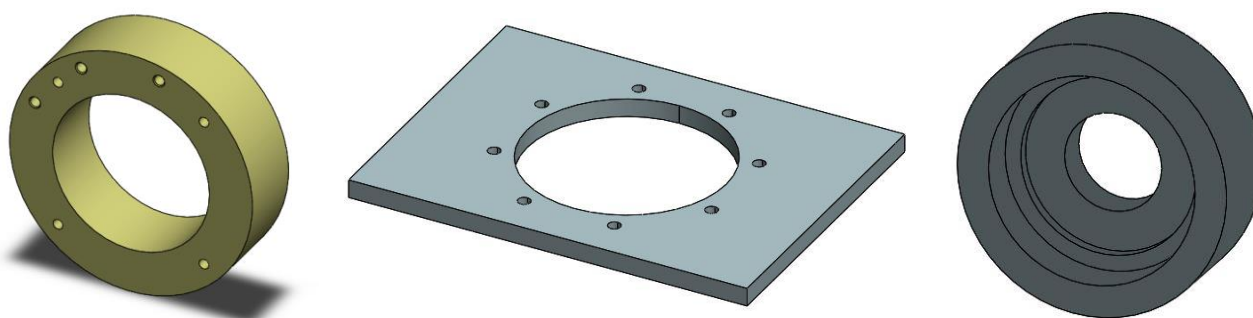


**Εικόνα 5.3.1:** Παραδείγματα εξαρτημάτων κατασκευασμένων από τον Θ. Μαυρέλο του Κ. για τον εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας και τη διάταξη "Turn Table"

Ο εργαζόμενος: .....

#### 5.4 Σταφυλαράκης Στυλιανός, χειριστής εργαλειομηχανών

Με χρήση τόσο των συμβατικών όσο και του CNC κέντρου κατεργασιών Primero VMC 3 AXIS πραγματοποίησε κατεργασίες κοπής και μορφοποίησης εξαρτημάτων των δύο διατάξεων τηρώντας τα πρότυπα ποιότητας της ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ Ε.Π.Ε. Η εξαγωγή των προγραμμάτων κοπής και του σχετικού κώδικα έγινε μέσω του λογισμικού EdgeCam με μέριμνα για την ταχεία αλλά ταυτόχρονα μηχανολογικά άρτια κατασκευή των ζητούμενων μερών. Στην Εικόνα 5.4.1 παρουσιάζονται ορισμένα από τα εξαρτήματα που κατεργάστηκαν από τον Σ. Σταφυλαράκη.

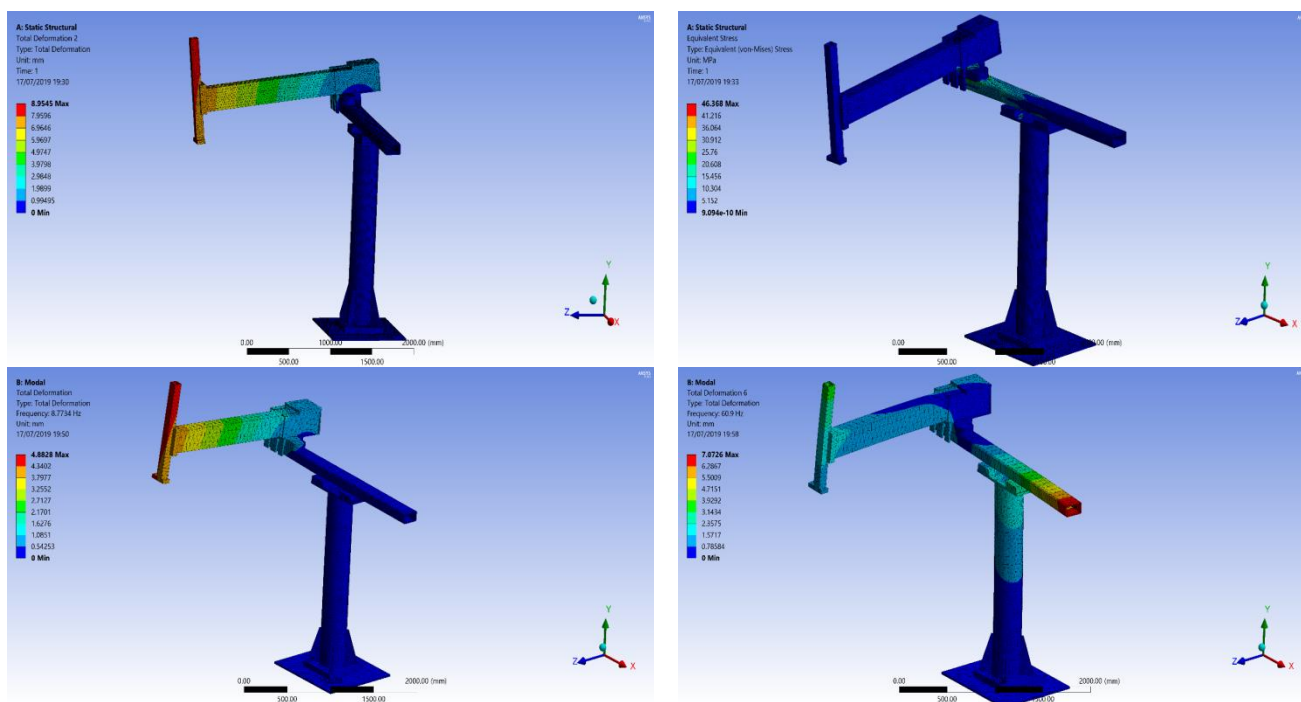


**Εικόνα 5.4.1:** Παραδείγματα εξαρτημάτων κατασκευασμένων από τον Σ. Σταφυλαράκη για τον εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας και τη διάταξη "Turn Table"

Ο εργαζόμενος: .....

#### 5.5 Κατής Ηλίας, Μαθηματικός Εφαρμογών

Με τη βοήθεια μαθηματικών λογισμικών και εργαλείων ανέλαβε την ανάλυση δεδομένων με στόχο την έρευνα και ανάπτυξη των εξαρτημάτων προς κατασκευή. Η μελέτη έγινε σε συνεργασία με τους μηχανολόγους μηχανικούς της εταιρίας αλλά και του ΕΣΜ καταρχάς αναφορικά με το στατικό τμήμα των κατασκευών (ανάλυση καταπονήσεων, τάσεων και παραμορφώσεων). Μετά την εξασφάλιση της στατικής αντοχής πραγματοποιήθηκε και ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων (modal) για την αποφυγή φαινομένων συντονισμού κατά τη λειτουργία του ρομπότ. Στις αναλύσεις αυτές λήφθηκε υπόψη το υλικό κατασκευής, οι τρόποι σύνδεσης των λειόμενων μερών, καθώς και το συχνοτικό εύρος του σήματος εισόδου κατά τη λειτουργία κάθε διάταξης. Η μοντελοποίηση έγινε μέσω πεπερασμένων στοιχείων και επίλυση των σχετικών διαφορικών εξισώσεων. Οι εν λόγω αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό Mathematica και στο λογισμό ANSYS εντός του ιδρύματος του ΕΜΠ. Στην Εικόνα 5.5.1 παρουσιάζονται ορισμένα από τα αποτελέσματα της στατικής και της συχνοτικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον ANSYS.



Εικόνα 5.5.1: Αποτελέσματα προσομοιώσεων στατικής και ιδιοσυχνотικής ανάλυσης με χρήση FEA από τον Η. Κατή