



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

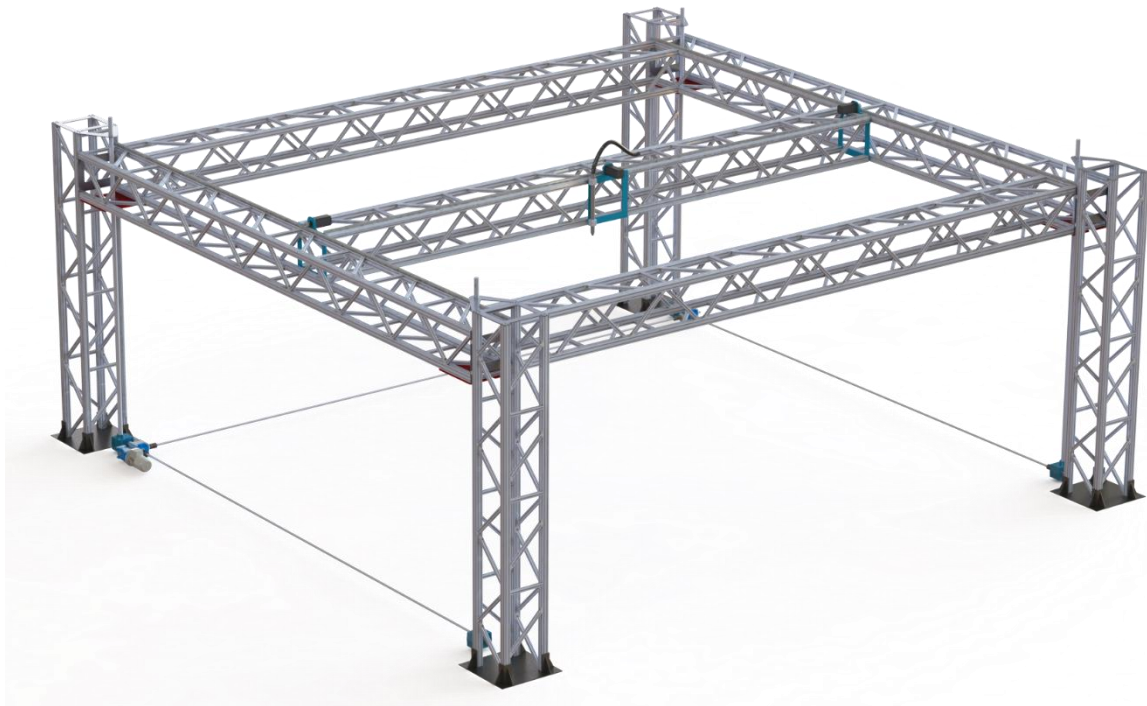
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ  
ΕΛΕΓΧΟΥ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ & ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

## Στατική και ιδιοδιανυσματική ανάλυση χωροδικτύωματος πρωτότυπου εκτυπωτή τρισδιάστατης εκτύπωσης κτιρίων σε περιβάλλον CAD/CAE

Διπλωματική εργασία του Ιωάννη Καϊσαρλή

Επιβλέπων: Βασίλειος Σπιτάς, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ



Αθήνα, Μάρτιος 2023







## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ειδικότερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών, τόσο τους καθηγητές, όσο και τους υποψήφιους διδάκτορες, οι οποίοι από κοινού παρείχαν οδηγίες και συμβουλές όπου κρινόταν αναγκαίο. Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντά μου κ. Β. Σπιτά, ο οποίος μου έδειξε πώς οι γνώσεις που λήφθηκαν από τη σχολή μπορούν να εφαρμοστούν πρακτικά σε ένα πραγματικό έργο. Ακόμη, ευχαριστώ θερμά για την ευκαιρία που μου δόθηκε να ασχοληθώ με ένα τόσο σημαντικό έργο και να συνεργαστώ με τις εταιρίες ‘ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ’, ‘SIKA HELLAS’ και ‘TITAN GREECE’.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη .....	3
Abstract.....	5
1. Εισαγωγή .....	7
1.1 Αξιολόγηση τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	12
2. Βασικός σχεδιασμός .....	13
2.1 Προδιαγραφές .....	13
2.2 Βασικές σχεδιαστικές επιλογές.....	14
2.2.1 Κίνηση .....	15
2.2.2 Οδήγηση.....	17
2.2.3 Ανύψωση.....	18
2.3 Δικτύωμα .....	20
2.3.1 Επιλογή Προφίλ .....	20
2.3.2 Σχεδιασμός Γεωμετρίας δικτύωματος.....	21
2.3.3 Σχεδιασμός Module .....	25
2.3.4 Σχεδιασμός Πλαισίου - Γέφυρας .....	29
2.4 Εκτίμηση μαζών.....	30
3. Ανάλυση βασικού μοντέλου .....	33
3.1 Στατική ανάλυση.....	33
3.2 Δυναμική ανάλυση.....	38
4. Επιλογή λύσης ανύψωσης.....	41
4.1 Ανύψωση με τη χρήση ψαλιδωτού μηχανισμού .....	41
4.1.1 Σχεδιασμός ψαλιδωτού μηχανισμού .....	41
4.1.2 Περίπτωση ενός σταδίου.....	46
4.1.3 Περίπτωση τριών σταδίων .....	48
4.1.4 Στατική ανάλυση ψαλιδωτού μηχανισμού: .....	49
4.2 Ανύψωση με τη χρήση μεταφορικών κοχλιών .....	57
5. Λεπτομερής σχεδίαση .....	60
5.1 Συνδετικά μέσα .....	60
5.2 Οδοντωτοί κανόνες .....	61
5.3 Επενεργητές γέφυρας και κεφαλής.....	63
5.4 Γραμμικοί οδηγοί.....	63

5.5 Ανυψωτικοί κοχλίες.....	64
5.6 Μοτέρ Ανύψωσης:.....	65
5.6.1 Έλεγχος ταχύτητας ανύψωσης.....	66
5.6.2 Έλεγχος απαιτούμενης ροπής.....	66
5.7 End switches (Limit Switches):.....	66
5.8 Slicer: Cura by Ultimaker.....	66
5.9 Τελική στατική ανάλυση.....	67
5.10 Τελική δυναμική ανάλυση.....	69
6. Αποτελέσματα.....	72
6.1 Κόστος.....	72
6.2 Σύγκριση με τον κατασκευασμένο εκτυπωτή.....	72
6.2.1 Σχεδιασμένος εκτυπωτής.....	72
6.2.2 Κατασκευασμένος εκτυπωτής.....	74
6.2.3 Σύγκριση-Σχολιασμός.....	75
6.3 Μελλοντική χρήση.....	78
7. Συμπεράσματα.....	79
8. Κατάλογοι.....	80
8.1 Κατάλογος εικόνων.....	80
8.2 Κατάλογος πινάκων.....	84
8.3 Κατάλογος αναφορών.....	84
9. Παράρτημα Α.....	85



## *Περίληψη*

Η εργασία αυτή έχει σκοπό την ανάλυση ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή κτιρίου, στα πλαίσια του ερευνητικού έργου 3Build που υποστηρίζεται από την δράση ΕΣΠΑ 2014-2020 Ερευνώ-Δημιουργώ-Καινοτομώ. Ο εκτυπωτής αυτός θα πρέπει να χωρίζεται σε επιμέρους κομμάτια για να μπορεί να μεταφέρεται και να συναρμολογείται εύκολα και γρήγορα. Στα πρώτα κεφάλαια της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται αναλυτικά η πορεία της αξιολόγησης των διάφορων εναλλακτικών λύσεων σχετικά με τον σχεδιασμό του εκτυπωτή και διατυπώνονται με σαφήνεια οι προδιαγραφές, που θέτουν το πλαίσιο στο οποίο θα κινηθεί η σχεδίαση. Ως βέλτιστη λύση προκρίνεται ο σχεδιασμός ενός εκτυπωτή τύπου γερανογέφυρας που θα αποτελείται από διακριτά δικτυωτά μέλη (module) κατασκευασμένα από τυποποιημένα αλουμινένια προφίλ μήκους 2 μέτρων για την επίτευξη μιας αρθρωτής (modular) κατασκευής. Η χρήση δικτύωματος αποδείχθηκε αναγκαία ώστε να επιτευχθούν οι προδιαγραφές σχετικά με το μέγιστο βέλος κάμψης του εκτυπωτή. Στα πρώτα στάδια της ανάλυσης γίνεται εκτίμηση των μαζών του κάθε μέλους για την αρχική σχεδίαση της γεωμετρίας του δικτύωματος. Ακολουθεί η σχεδίαση της γέφυρας και του πλαισίου ανύψωσης που αποτελούνται από έναν αριθμό όμοιων μελών και λαμβάνουν χώρα στατικές και δυναμικές αναλύσεις. Στη συνέχεια διερευνώνται οι δύο επικρατέστερες λύσεις ανύψωσης: του ψαλιδωτού μηχανισμού και του μεταφορικού κοχλία. Πρώτα εξετάζεται η λύση του ψαλιδωτού μηχανισμού, και διαπιστώνεται μέσω αναλύσεων πως η πρακτική της εφαρμογή είναι προβληματική, οπότε επιλέγεται η χρήση μεταφορικού κοχλία. Όμως, οι κοχλίες είναι σχεδιασμένοι για να παραλαμβάνουν μόνο αξονικά φορτία, επομένως, δημιουργείται η ανάγκη για οδήγηση, η οποία υλοποιείται με την χρήση των modules. Στη συνέχεια, ακολουθεί η λεπτομερής σχεδίαση της κατασκευής, όπου, μεταξύ άλλων, γίνονται οι υπολογισμοί και η αναζήτηση του οδοντωτού κανόνα που απαιτείται για την κίνηση της γέφυρας και της κεφαλής εκτύπωσης. Παράλληλα, υπολογίζονται τα μοτέρ που απαιτούνται για την κίνηση. Στη συνέχεια, γίνεται μια σύντομη αναφορά στον έλεγχο του εκτυπωτή, καθώς αυτός δεν αποτελεί μέρος της κατασκευής, αλλά της λειτουργίας. Με τα νέα δεδομένα, πραγματοποιείται στατική και δυναμική ανάλυση του συνόλου της κατασκευής, η οποία αποδεικνύει ότι βρίσκεται εντός προδιαγραφών, τόσο στις τάσεις και τις μετατοπίσεις, όσο και στις ιδιοσυχνότητες. Αμέσως μετά, παρουσιάζονται φωτογραφίες από το έργο 3Build, στις οποίες φαίνεται ο εκτυπωτής που σχεδιάστηκε και αναλύθηκε, να έχει κατασκευαστεί και να λειτουργεί. Τέλος, γίνεται αναφορά στις δυνατότητες της κατασκευής αυτής, στις μορφές που μπορεί να πάρει και στους τρόπους που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον.



## *Abstract*

This thesis aims to analyze a three dimensional concrete printer in the context of the 3Build project, supported by the action of ΕΣΠΙΑ (Partnership Agreement for the Development Framework) 2014-2020 “Research - Create - Innovate”. This printer should be able to be dismantled in individual pieces for easy transport and assembly. The first chapters of the thesis analytically show the journey of evaluating each one of the alternative solutions as far as the design of the printer is concerned and state clearly the specifications that set the context in which the design will be realized. A gantry style 3D printer comes in first as the best solution, which will be composed of distinct truss members (modules) manufactured from commercial, 2 meters long aluminum profiles in order to achieve a modular construction. The use of truss turned out necessary to match the specifications of the maximum elastic deflection of the 3D printer. In the first stages of the analysis the mass of each member is calculated for the initial geometry design of the truss. Then follows the design of the bridge and the lifting frame which are composed of a number of similar members and static and dynamic analysis takes place. Subsequently, the two dominant lifting solutions are investigated: the scissor mechanism and the lifting screw. Firstly, the solution of the scissor mechanism is tested and through analysis it is found that its practical application is problematic, so the use of a lifting screw is chosen. However, the screws are designed to only withstand axial loads, therefore, the need for guidance is created, which is implemented using the modules. Then follows the detailed design of the structure, where, among other things, the calculations and the search for the gear rack required for the movement of the bridge and the printing head are made. At the same time, the motors required are calculated. This is followed by a brief reference to the control of the printer, as this does not form part of the build, but the function. With the new info, a static and dynamic analysis of the whole structure is carried out, which proves that it meets the specifications as much for stresses and displacements, as for natural frequencies. After that, photos from the actual 3Build project are shown, demonstrating the designed and analyzed printer built and operating. Finally, a reference is made concerning the possibilities of this construction, the forms it can take and the ways it can be used in the future.



## 1. Εισαγωγή

Είναι ευρέως γνωστό ότι το κόστος μιας κατοικίας είναι αρκετά υψηλό. Αυτό δεν οφείλεται αποκλειστικά στα υλικά τα οποία έχουν κάποιο κόστος, αλλά σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους οφείλεται στις πολύωρες και δύσκολες εργασίες που πρέπει να πραγματοποιηθούν από ανθρώπους. Ακόμη, επειδή η ανοικοδόμηση γίνεται κατά κύριο λόγο σε εξωτερικό χώρο, οι εργάτες καλούνται να αντιμετωπίσουν και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες δεν είναι πάντοτε φιλικές (πχ άνεμος, βροχή, κρύο, καύσωνα κ.λπ.). Επομένως, θα αποτελούσε σημαντική βοήθεια αν υπήρχε ένα μηχάνημα, το οποίο να δρούσε ως αρωγός στους εργάτες, καθιστώντας τη δουλειά τους ευκολότερη. Ακόμη, η ανοικοδόμηση κτιρίων όπως εφαρμόζεται μέχρι σήμερα, περιορίζει τα παραγόμενα έργα (κτίρια) μορφολογικά. Αυτό συμβαίνει διότι οι έως τώρα δυνατές διεργασίες είναι συγκεκριμένες, όπως για παράδειγμα ο ξυλότυπος, η τοποθέτηση τούβλων κ.λπ. Λύση στα προβλήματα αυτά έρχονται να δώσουν οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές.

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές τα τελευταία χρόνια κάνουν την είσοδο τους στη βιομηχανία των κτιριακών κατασκευών, ωστόσο η είσοδος αυτή είναι πιο αργή σχετικά με την ενσωμάτωσή τους σε άλλες βιομηχανίες όπως της προσθετικής κατασκευής και του rapid prototyping (ταχείας ανάπτυξης πρωτοτύπων). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παραπάνω βιομηχανία λόγω της φύσης της επιδιώκει το λιγότερο δυνατό ρίσκο όσον αφορά τις τεχνικές που εφαρμόζει. Παρά την χαμηλή τους εφαρμογή για την ώρα, είναι σημαντικό να τονιστούν τα οφέλη που θα προέκυπταν από την χρήση τους στην κατασκευή κτιρίων. Σαφέστερα:

- Ευελιξία σχεδιασμού: Καθίστανται εφικτές πολύπλοκες γεωμετρίες, όπως και η χρήση καμπυλών και λεπτότοιχων επιφανειών.
- Έχουν ικανοποιητική ταχύτητα εκτύπωσης και μπορούν να κατασκευάσουν κτίρια από μικρών, έως αρκετά μεγάλων διαστάσεων.
- Ο χειρισμός τους είναι απλός και ο αριθμός του προσωπικού που απαιτείται είναι μικρός, δίνοντας έτσι την δυνατότητα στο εργατικό δυναμικό να ασχοληθεί με περισσότερες εργασίες.
- Οι εκτυπωτές αποτελούν επαναχρησιμοποιούμενα μηχανήματα, και κατά τη λειτουργία τους παράγουν ελάχιστα απόβλητα συγκριτικά με τις κοινές πρακτικές δόμησης, βελτιώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και το κόστος του έργου.

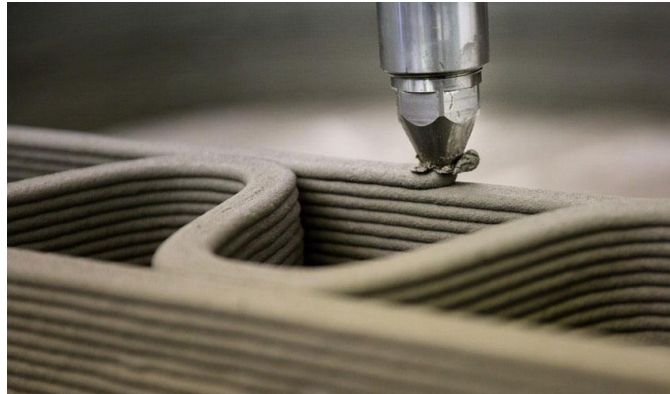
Όσον αφορά τις κατασκευές κτιρίων, οι βασικές κατηγορίες τρισδιάστατης εκτύπωσης την παρούσα στιγμή είναι δύο:

- Η εξώθηση σκυροδέματος (concrete extrusion 3D printing)
- Η εκτύπωση κλίνης σωματιδίων (particle bed 3D printing) [1]

Η πρώτη από τις προαναφερθείσες, επινοήθηκε από τον Καθηγητή Behrokh Khoshnevis [2] και λαμβάνει τη μεγαλύτερη προσοχή από την ερευνητική και κατασκευαστική κοινότητα. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί αυτή η μορφή εκτύπωσης είναι ο εξής: Ειδικό μείγμα σκυροδέματος εναποτίθενται με τη χρήση ενός αυτοματοποιημένου μηχανισμού σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου, με σκοπό την υλοποίηση σύνθετων αρχιτεκτονικών σχεδίων.

Η δεύτερη κατηγορία εκτύπωσης, δηλαδή της κλίνης σωματιδίων, αφορά τον ελεγχόμενο ψεκασμό ειδικού ρευστού μίγματος σε κλίνη σωματιδίων (σε μορφή πούδρας) τα οποία διαθέτουν τιμμεντοειδείς ιδιότητες. Η τεχνική αυτή προήλθε από τον Enrico Dini [3]. Συγκριτικά με την εξώθηση σκυροδέματος, επιτρέπει την δημιουργία προεξοχών (overhangs) και παρέχει υψηλότερο επίπεδο λεπτομέρειας στις εκτυπώσεις. Από την άλλη, ακολουθώντας αυτήν την τεχνική, καθίσταται αδύνατο να αναπτυχθούν δοκίμια ιδιαίτερα υψηλών αντοχών, ενώ ταυτόχρονα απαιτείται σημαντική χειρωνακτική εργασία για

την απομάκρυνση των υπολειμμάτων πούδρας από τα εκτυπωμένα στοιχεία. Όσον αφορά στα υλικά, η τεχνική έχει ενδιαφέρον ως προς τον τρόπο με τον οποίο το μίγμα υγρών εισέρχεται στη κλίνη των σωματιδίων και αντιδρά με αυτά χωρίς την παρουσία ανάμιξης. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται η χρήση δομικών υλικών υψηλών προδιαγραφών, καθώς και η λειτουργία μηχανολογικών συστημάτων υψηλής ακρίβειας, συμπεριλαμβανομένων και ρομποτικών διατάξεων. Στις ενότητες που ακολουθούν θα γίνει αναφορά και στις δύο τεχνικές, δίνοντας έμφαση στην εξώθηση σκυροδέματος, που σχετίζεται άμεσα με την παρούσα εργασία. Αντίστοιχα, θα παρουσιαστούν οι απαιτήσεις όσον αφορά τις ιδιότητες των υλικών (τσιμεντοειδών μειγμάτων, χημικών πρόσθετων και άλλων), όπως επίσης και περιγραφή των κυριότερων συστημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης.



*Εικόνα 1 Τρισδιάστατη εκτύπωση με εξώθηση σκυροδέματος*

Όταν μιλάμε για τρισδιάστατη εκτύπωση με εξώθηση αναφερόμαστε στην ελεγχόμενη εναπόθεση ειδικού μίγματος με βάση το τσιμέντο για την δημιουργία δομών σε στρώσεις. Κατά την τεχνική αυτή δεν χρησιμοποιούνται καλούπια ή ξυλότυπα για την κατασκευή κτιριακών δομών, καθώς εμπεριέχεται η ακριβής τοποθέτηση συγκεκριμένης ποσότητας δομικού υλικού σε διαδοχικές στρώσεις μέσω αυτοματοποιημένης διαδικασίας η οποία ελέγχεται από σύστημα υπολογιστή.

Η μορφή του μίγματος εξώθησης είναι σαν συνεχές νήμα διαμέτρου από 6 έως 50 mm συνήθως, που τροφοδοτείται με άντληση δια μέσω ακροφυσίου τοποθετημένου σε κατάλληλο σύστημα στήριξης (π.χ. τύπου Gantry ή σε ρομποτικό βραχίονα). Είναι ένα μίγμα με υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο, ενώ περιέχει επίσης αδρανή υλικά και χημικά πρόσθετα.

Η εκτύπωση με εξώθηση σκυροδέματος μπορεί να παράξει τριών ειδών εκτυπώσεις:

- Δομικά στοιχεία, μεμονωμένα ή προς συναρμολόγηση.



*Εικόνα 2 Εκτύπωση Μεμονωμένων Δομικών Στοιχείων*

- Τοιχία και κολώνες εκτυπωμένα επί τούτου (in-situ).



Εικόνα 3 Εκτύπωση In-Situ

- Εκτύπωση πλαισίου με συμβατική σκυροδέτηση.



Εικόνα 4 Εκτυπωμένο πλαίσιο με συμβατική σκυροδέτηση

Το υλικό εκτύπωσης, το σύστημα εξώθησης, οι λειτουργικές παράμετροι και η χρήση υπολογιστικών αλγορίθμων για την επίτευξη της επιθυμητής γεωμετρίας της κατασκευής βρίσκονται σε μια περίπλοκη σχέση εξάρτησης μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να οδηγούν σε ασυνέπειες ή ασυνέχειες. Είναι αναγκαίο το υλικό εκτύπωσης να ρέει με σταθερό τρόπο, να εξωθείται δια μέσω του ακροφυσίου, να συνδέεται δομικά με το προηγούμενο στρώμα και να διατηρεί το σχήμα του υπό την αυξανόμενη πίεση που προκαλούν τα επόμενα στρώματα εκτύπωσης. Ο βαθμός εξάρτησης των παραπάνω παραμέτρων σημαίνει ότι ακόμα και μικρές, μη σχεδιασμένες αλλαγές στο υλικό ή στη διεργασία μπορούν να

επιφέρουν σημαντικές διαταραχές στην εκτύπωση και να επηρεάσουν αρνητικά την ολοκλήρωση της κατασκευής.

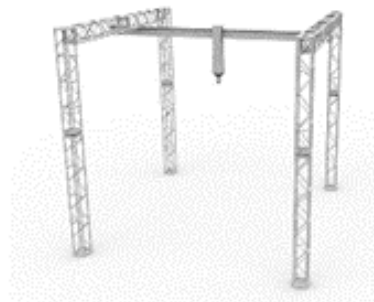
#### *Συστήματα Τρισδιάστατης Εκτύπωσης Εξωθούμενου Σκυροδέματος*

Οι μέθοδοι υλοποίησης τρισδιάστατα εκτυπωμένων κτιρίων ταξινομείται σε πέντε κατηγορίες με βάση τις χρησιμοποιούμενες διατάξεις:

- Τύπου Gantry (γερανογέφυρες)
- Ρομπότ καλωδίων (cable-suspended platforms)
- Κατασκευή με εκτυπωτές σμήνους (swarm approach)
- Αυτοματοποιημένες διατάξεις πολλαπλών χρήσεων (multi-purpose robotics & automated assembly)

#### *Συστήματα Τύπου Gantry*

Οι διατάξεις τύπου γερανογέφυρας (gantry), βασίζονται στην τεχνολογία των καρτεσιανών ρομποτικών συστημάτων. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε στην τρισδιάστατη εκτύπωση το 2001 από τον Καθ. Khoshnevis κάτω από το όνομα «κατασκευή περιγράμματος» (contour crafting) [4]. Εμπνευσμένος από την ανάγκη για γρήγορη ανακατασκευή οικιστικών δομών και υποδομών σε πόλεις που επλήγησαν από φυσικές καταστροφές, ο Καθ. Khoshnevis θα επέφερε πρωτοποριακές αλλαγές στην έννοια της κατασκευής. Η αρχική ιδέα αυτής της τεχνολογίας ήταν μια υβριδική μέθοδος κατά την οποία θα εκτυπωνόταν το περίγραμμα της κατασκευής προκειμένου να πληρωθεί με σκυρόδεμα σε μετέπειτα βήμα. Στη συνέχεια η βελτιστοποίηση της διαδικασίας επέτρεψε την κατασκευή κτιριακών δομών χωρίς την ανάγκη καλουπιού [5].



*Εικόνα 5 Εκτυπωτές τύπου Gantry*

#### *Συστήματα Ρομπότ Καλωδίων*

Αν και οι εκτυπωτές τύπου Gantry παρουσιάζονται σαν προφανής λύση για την τρισδιάστατη εκτύπωση χάρη στην ακρίβεια και τη σταθερότητα που παρέχουν, η κατασκευή μεγάλων όγκων για κτιριακές δομές επιφέρει την ανάγκη για κατανάλωση μεγάλου ποσού ενέργειας για την μεταφορά και εγκατάσταση του εκτυπωτή. Ως λύση στο εν λόγω πρόβλημα προέκυψαν οι εκτυπωτές με συστήματα ρομπότ καλωδίων, τα οποία επιτρέπουν μεγαλύτερη ελευθερία σε όγκο εκτύπωσης με μειωμένο κόστος, ενώ συσκευάζονται, μεταφέρονται και εγκαθίστανται γρηγορότερα από τους συμβατικούς τρισδιάστατους εκτυπωτές. Ένας εκτυπωτής ρομπότ καλωδίων αποτελείται από μία πλατφόρμα εκτύπωσης αναρτημένη σε σύστημα στήριξης καλωδίων, όπως βλέπουμε στην Εικόνα 9(β). Η κεφαλή εκτύπωσης είναι εγκατεστημένη στην πλατφόρμα και η κίνηση του συστήματος ελέγχεται από την επέκταση ή σύμπτυξη των καλωδίων [6]. Το πρώτο παράδειγμα της εν λόγω τεχνολογίας ήταν το «C 4 Robot» όπως το παρουσίασε ο Bosscher et al. το 2007, το οποίο αποτελείτο από πλαίσιο εκτύπωσης ελεγχόμενο από δώδεκα καλώδια [7].



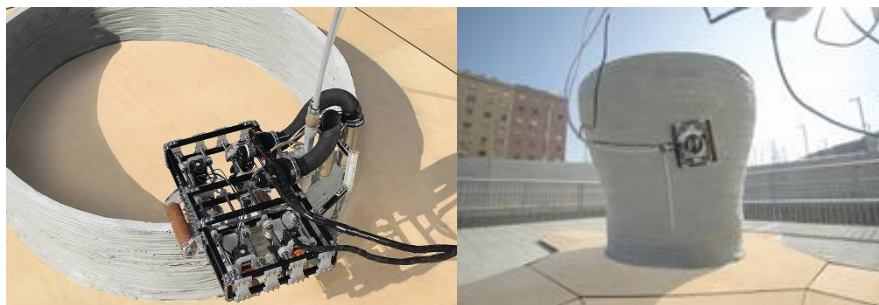


Εικόνα 6 Εκτυπωτές τύπου ρομπότ καλωδίων

### Κατασκευή με Εκτυπωτές Σμήνους

Η εν λόγω μέθοδος αφορά την αντικατάσταση των εκτυπωτών «γιγάντιων» διαστάσεων με πολλά μικρότερα ρομπότ και παρομοιάζεται με την λειτουργία των αποικιών μυρμηγκιών. Η συγκεκριμένη τεχνολογία – που περιγράφηκε ήδη από το 1997 από τον Joseph Pegna [8] – έχει ιδιαίτερη απήχηση στο ενδεχόμενο κατασκευής κτισμάτων σε άλλους πλανήτες, όπου η μεταφορά εγκαταστάσεων και εξοπλισμού καθίσταται δύσκολη και το κόστος υψηλό [9]. Τα αναμενόμενα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης κατασκευής σμήνους έναντι των άλλων διατάξεων τρισδιάστατων εκτυπωτών περιλαμβάνουν τα εξής:

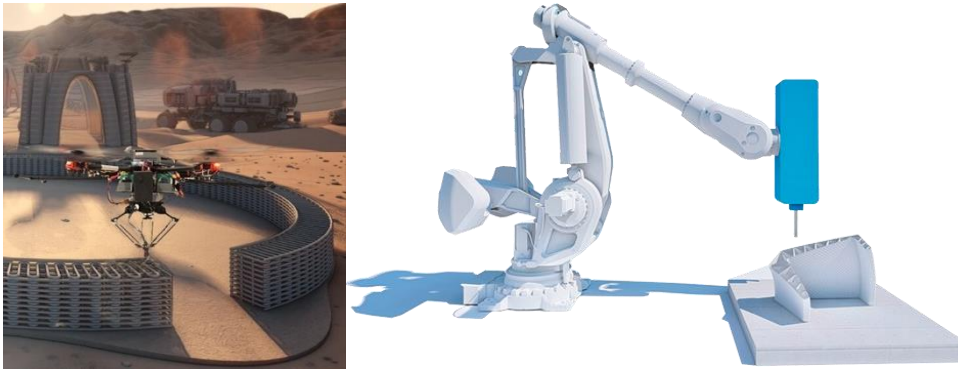
- Τα πολλά «μικρά» ρομπότ, μπορούν να έχουν πλήρη αυτονομία κινήσεων εντός ενός εργοταξίου χωρίς να απαιτείται η ύπαρξη ανθρώπινου δυναμικού, πράγμα το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό, ειδικά σε περιβάλλοντα όπου υπάρχει υψηλός κίνδυνος για παρουσία ανθρώπων [10].
- Τα ρομπότ που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο σμήνους θα μπορούν να «σκαρφαλώνουν» στο ίδιο το κτήριο που κατασκευάζουν, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη υποστηρικτικών υποδομών.



Εικόνα 7 Εκτυπωτές σμήνους

### *Αυτοματοποιημένες Διατάξεις Πολλαπλών Χρήσεων*

Πρόκειται για χρήση βιομηχανικού τύπου ρομποτικών συστημάτων στην τρισδιάστατη κατασκευή κτιριακών δομών, συμπεριλαμβάνοντας ρομποτικούς βραχίονες ή και drones. Η εν λόγω τεχνική αφορά είτε την απευθείας τρισδιάστατη εκτύπωση με εξώθηση σκυροδέματος, είτε την πραγματοποίηση επικουρικών εργασιών κατά της διάρκειας της κατασκευαστικής διαδικασίας. Η πρόοδος που έχει επιτευχθεί στον χώρο της ρομποτικής συναρμολόγησης έχει οδηγήσει σε εξαιρετικά παραδείγματα τρισδιάστατης κατασκευής με αυτοματοποιημένες διατάξεις [11,12].



*Εικόνα 8 Αυτοματοποιημένες διατάξεις εκτύπωσης*

## **1.1 Αξιολόγηση τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης**

Στην παρούσα φάση έρευνας και ανάπτυξης της εκτυπωτικής μεθόδου και με στόχο την δημιουργία ενός συστήματος αξιολόγησης των διαφόρων παραλλαγών είναι αναγκαία η ύπαρξη κριτηρίων που με ποσοτικό τρόπο θα αποτυπώνουν τις επιδόσεις κάθε προσέγγισης.

Μία ενδεικτική λίστα παραμέτρων αξιολόγησης των εκτυπωτικών τεχνικών δίνεται ακολούθως:

- Κόστος μεταφοράς εκτυπωτή
- Σταθερότητα εκτυπωτή
- Ταχύτητα εκτύπωσης
- Επιφάνεια εκτύπωσης
- Τεχνολογική ωριμότητα
- Κόστος εκτύπωσης

Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει την αξιολόγηση των εκτυπωτικών μεθόδων εξώθησης σκυροδέματος που πραγματοποιήθηκε, με σκοπό την εύρεση της επικρατέστερης λύσης. Σε κάθε παράμετρο αξιολόγησης αποδίδεται μία βαθμολογία στην κλίμακα 1-5 και ένα ποσοστιαίο ειδικό βάρος συμμετοχής της στην τελική βαθμολογία.

Παράμετροι	Βάρος %	Gantry	Cable	Swarm	Robotics
Κόστος μεταφοράς	10%	3	3	4	4
Σταθερότητα	10%	5	4	3	4
Ταχύτητα εκτύπωσης	10%	4	3	3	3
Επιφάνεια εκτύπωσης	10%	3	4	5	3
Τεχνολογική ωριμότητα	30%	4	4	1	4
Κόστος εκτύπωσης	30%	3	3	3	3
	100%				
Βαθμολογία		3.6	3.5	2.7	3.5

Πίνακας 1 Βαθμολόγηση τύπων εκτυπωτών (βαθμολογία από 1 έως 5)

Σύμφωνα με τις βαθμολογίες που έλαβαν οι παραπάνω τύποι εκτυπωτών, είναι σαφές πως η επιλογή ‘Gantry’ είναι η επικρατέστερη.

## 2. Βασικός σχεδιασμός

### 2.1 Προδιαγραφές

Για να καταστεί δυνατή η σωστή σχεδίαση μιας κατασκευής, είναι πολύ σημαντικό να διατυπωθούν εξαρχής οι προδιαγραφές που θα οφείλει να πληροί. Οι προδιαγραφές αυτές βοηθούν στην συνολική εποπτεία των ποσοτικών και των ποιοτικών περιορισμών που θα καθορίσουν τα πλαίσια στα οποία θα κινηθεί η σχεδίαση. Στο συγκεκριμένο έργο, οι πιο καθοριστικές προδιαγραφές που τέθηκαν ήταν:

- Ο εκτυπωτής θα πρέπει να χωρίζεται σε μέλη (Modules), τα οποία να μην ξεπερνούν σε καμία διάσταση τα 2 μέτρα.
- Ο όγκος εκτύπωσης να είναι μεγαλύτερος από 7 m x 7 m x 3 m
- Ο εκτυπωτής να μπορεί να συναρμολογηθεί κατ’ ελάχιστο από 2 άτομα, σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα

Οι προδιαγραφές αυτές, παράλληλα με τις υπόλοιπες που διέπουν το συγκεκριμένο έργο παρουσιάζονται παρακάτω σε πινακοποιημένη μορφή:

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Μέγιστο μήκος δομικών μελών	2 m
Ελάχιστος όγκος εκτύπωσης	7 m x 7 m x 3 m
Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας:	2
Αριθμός ατόμων για συναρμολόγηση	2 ή περισσότερα

Απαιτούμενες ώρες συναρμολόγησης	Περίπου 6
Να μπορεί να κατασκευαστεί χωρίς απαιτητικές κατεργασίες (συγκόλληση, χύτευση, φρεζάρισμα κ.λπ.)	-
Αντοχή σε συνθήκες εξωτερικού χώρου (αέρας, βροχή, σκόνη κ.λπ.)	-
Ιδιοσυχνότητες (σχετικά υψηλές)	>4 Hz
Ευκολία στη χρήση	
Ταχύτητα εκτύπωσης	0.75 m/s
Ανοχές μετατόπισης κεφαλής	+/-5 mm προς όλες τις κατευθύνσεις από το εκάστοτε σημείο εκτύπωσης
Πάχος στρώσης εκτύπωσης	10 mm
Μέγιστη μάζα κεφαλής	200 kg

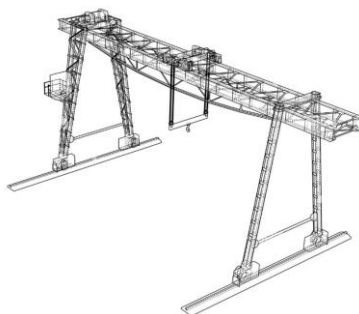
Πίνακας 2 Πίνακας Προδιαγραφών

## 2.2 Βασικές σχεδιαστικές επιλογές

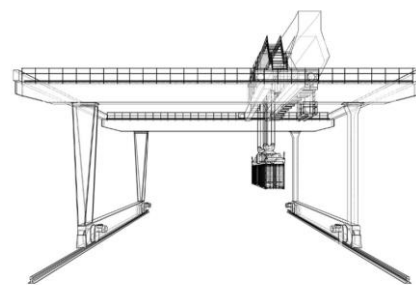
Με βάση την ανάλυση που έλαβε μέρος στην εισαγωγή, έγινε σαφές ότι ο εκτυπωτής που θα σχεδιαστεί θα είναι τύπου ‘Γερανογέφυρας’ (Gantry Crane). Τα μηχανήματα αυτά, αποτελούνται από μία γέφυρα η οποία μετατοπίζεται σε οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Ακόμη, ο εκάστοτε ακροδέκτης εργασίας (end effector), μπορεί να μετατοπίζεται κατά μήκος της γέφυρας με τη χρήση οδηγών. Ενδεικτικά παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες κάποιες γερανογέφυρες (Gantry Cranes):



Εικόνα 9 Γερανογέφυρα



Εικόνα 10 Γερανογέφυρα με δικτύωμα

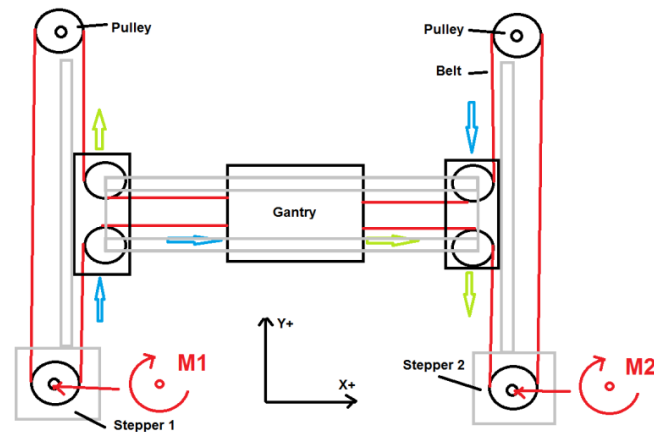


Εικόνα 11 Γερανογέφυρα με πλαίσιο

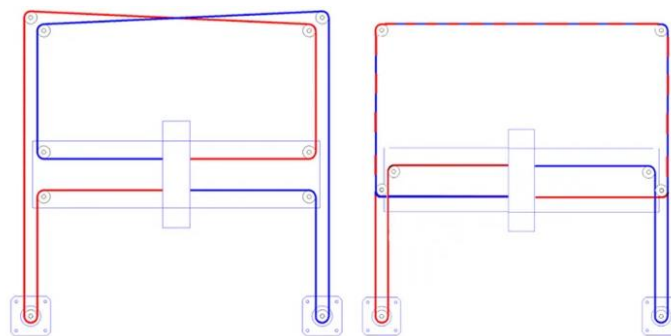
Επειδή τα μέρη στα οποία θα καλείτε ο εκτυπωτής να εκτυπώσει ενδεχομένως να μην είναι αρκούντως επίπεδα, και για να διατηρηθεί η ακρίβεια της εκτύπωσης, γίνεται η επιλογή ενός πλαισίου το οποίο θα ανυψώνεται σε 4 πυλώνες. Οι δύο πλευρές του πλαισίου θα συνδέονται με μια μετατοπιζόμενη γέφυρα, επί της οποίας θα μπορεί να μεταφέρεται μια πλάκα η οποία θα φέρει την κεφαλή της εκτύπωσης. Για να ξεκινήσει η σχεδίαση του μοντέλου, χρειάζεται αρχικά να γίνουν κάποιες καθοριστικές επιλογές.

## 2.2.1 Κίνηση

Στον προς σχεδίαση εκτυπωτή, απαιτείται μεταφορική κίνηση στους τρεις άξονες, ενώ δεν απαιτείται καμία περιστροφική κίνηση. Αρχικά θα αναζητηθεί ο τρόπος κίνησης στους δύο οριζόντιους άξονες και στη συνέχεια θα μελετηθεί η κίνηση κατά τον κατακόρυφο άξονα. Για τη μεταφορική κίνηση αυτή, εξετάστηκαν υπάρχουσες λύσεις με μαντοκίνηση, που εφαρμόζονται σε τρισδιάστατους εκτυπωτές. Αυτές οι λύσεις παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:



Εικόνα 12 Σύστημα HBOT



Εικόνα 13 Σύστημα Core XY

Οι λύσεις αυτές έχουν προτερήματα, αλλά και αρκετά μειονεκτήματα, τα οποία είναι πολύ καθοριστικά για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Προτερήματα:

- Απαιτούνται μόνο δύο επενεργητές (μοτέρ) για κίνηση και στους δύο άξονες
- Ο μίαντας που απαιτείται είναι σχετικά οικονομική λύση
- Ο μίαντας αποτελεί ακόμη και μια από τις ελαφρύτερες επιλογές μετάδοσης κίνησης

Μειονεκτήματα:

- Το ελάχιστο μήκος μίαντα που χρειάζεται για έναν εκτυπωτή επιφάνειας εκτύπωσης 8m x 8m, ανέρχεται στα 64 μέτρα.
- Απαιτείται σημαντική προένταση του μίαντα, λόγω του μεγάλου του μήκους. Επομένως, αν η προένταση του μίαντα δεν είναι επαρκής, θα ταλαντώνεται κατά τη λειτουργία λόγω της

μεταφοράς της μάζας του, λόγω του ανέμου κ.λπ. Επομένως, θα μειώνεται η ακρίβεια της θέσης της κεφαλής, καθώς κατά την ταλάντωση του ιμάντα ‘μειώνεται’ η απόσταση των σημείων πρόσδεσής του.

- Απαιτείται πολύς χώρος για την στερέωση και τη λειτουργία της ιμαντοκίνησης.
- Απαιτείται προστασία του ιμάντα από σκόνη, νερό και από την ηλιακή ακτινοβολία.
- Τα ελαστομερή έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής από άλλα υλικά όπως π.χ. το αλουμίνιο
- Η ακρίβεια που παρέχει σε σχέση με έναν άκαμπτο (rigid) μηχανισμό, είναι αδιαμφισβήτητα μικρότερη.

Η λύση αυτή είναι ευκολότερα εφικτή σε μικρούς τρισδιάστατους εκτυπωτές, διότι οι μάζες είναι πολύ μικρότερες, η αντίσταση από τον άνεμο είναι σχεδόν αμελητέα και ο χώρος που καταλαμβάνουν οι ιμάντες δεν είναι σημαντικός. Στην περίπτωση ενός μεγάλου εκτυπωτή όμως, τα μειονεκτήματα αυτά είναι σημαντικά και απαιτείται ενδεχομένως μια πιο εφαρμόσιμη λύση.



Εικόνα 14 Οδοντωτός κανόνας πινιόν

Πιο κατάλληλη λύση για την υλοποίηση της μεταφοράς αποτελεί η χρήση οδοντωτού κανόνα και πινιόν. Η εφαρμογή αυτή παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα. Συγκεκριμένα:

- Έχει μεγάλη ακρίβεια και επαναληψιμότητα στις κινήσεις
- Μπορεί να δεχτεί σημαντικά φορτία
- Η εγκατάσταση είναι απλή
- Υπάρχει μεγάλη ποικιλία στο εμπόριο
- Καταλαμβάνει ελάχιστο χώρο

Τα στοιχεία αυτά βαθμολογούνται στον παρακάτω πίνακα, στον οποίο οι επιλογές είναι ισοβαρείς, όπου αποδεικνύεται πως ο οδοντωτός κανόνας υπερτερεί έναντι του ιμάντα όσον αφορά την κίνηση.

Λύση μεταφοράς	Ιμάντας	Οδοντωτός Κανόνας
Ακρίβεια	2	3
Αντοχή	2	3
Ικανότητα φόρτισης	2	3
Ευκολία εγκατάστασης	1	2
Οικονομία χώρου	1	3
Χαμηλό κόστος	2	2
<b>Σύνολο</b>	<b>1.7</b>	<b>2.7</b>

Πίνακας 3 Σύγκριση λύσεων μεταφοράς (βαθμολογία από 1 έως 3)

## 2.2.2 Οδήγηση

Για τις μεταφορικές κινήσεις του εκτυπωτή, απαιτείται να επιλεγθεί ένα είδος οδήγησης. Αυτή, συνήθως στα μηχανήματα του εμπορίου επιτυγχάνεται με τη χρήση ράουλων τα οποία κυλιόνται στο σώμα του πλαισίου ή της γέφυρας αντίστοιχα.

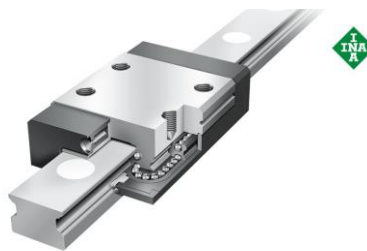


Εικόνα 15 Λεπτομέρεια οδήγησης σε γερανογέφυρα

Ωστόσο, επειδή ο σκοπός της προκείμενης κατασκευής είναι η ακριβής εκτύπωση κτιρίων και όχι η ανύψωση βαρειών αντικειμένων, θα γίνει η χρήση γραμμικών οδηγών.

Για γραμμικούς οδηγούς, προκύπτουν δύο επικρατέστερα σενάρια:

- Γραμμικοί οδηγοί με βαγονάκια (Linear guides with carriages)



Εικόνα 16 Γραμμικός οδηγός και βαγονάκι

- Κυλινδρικοί οδηγοί με ρουλεμάν



Εικόνα 17 Κυλινδρικοί οδηγοί και ρουλεμάν σε προφίλ

Παρόλο που οι κυλινδρικοί οδηγοί μπορούν να παραλάβουν μεγαλύτερα φορτία, έχουν ένα σημαντικό μειονέκτημα: δεν μπορούν να περιορίσουν την μετατόπιση σε πάνω από έναν άξονα, με αποτέλεσμα αν δεν τοποθετηθούν επαρκείς οδηγοί, η γέφυρα να ενδέχεται να εκτροχιαστεί. Από την άλλη πλευρά, οι γραμμικοί οδηγοί με βαγονάκια, είναι πολύ καλύτερη λύση, διότι μπορούν να παραλάβουν φορτία σε δύο διευθύνσεις (αξονικά), καθώς και σε δύο διευθύνσεις περιστροφικά.

### 2.2.3 Ανύψωση

Η ανύψωση του δικτύωματος αποτέλεσε ένα δύσκολο κομμάτι κατά το σχεδιασμό. Συγκεκριμένα, η δυσκολία έγκειται στις προδιαγραφές που ορίστηκαν, όπου αναφέρεται ότι το μέγιστο μήκος κάθε μέλους του συναρμολογήματος θα πρέπει να είναι 2 μέτρα, ώστε η μεταφορά του να μπορεί να γίνει εύκολα. Σαν επιλογές για την υλοποίηση της ανύψωσης προτείνονται:

- Η χρήση ψαλιδωτών πυλώνων



Εικόνα 18 Ψαλιδωτός μηχανισμός ανύψωσης

Οι ψαλιδωτοί μηχανισμοί έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να καταλάβουν πολύ μικρό χώρο κατά τη μεταφορά και αποθήκευσή τους. Τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι το βάρος και η ανακρίβεια θέσης.

- Η χρήση μεταφορικού κοχλίου



Εικόνα 19 Σύστημα ανυψωτικών κοχλίων

Η χρήση μεταφορικού κοχλίου αποτελεί μια από τις ελαφρύτερες λύσεις. Ωστόσο, για να εφαρμοστεί σωστά απαιτεί κατάλληλη οδήγηση, καθώς είναι σχεδιασμένοι για να παραλαμβάνουν αξονικά και όχι καμπτικά φορτία.



- Η χρήση ιμάντα



*Εικόνα 20 Ανυψωτικός μηχανισμός με χρήση ιμάντα*

Η ανύψωση με ιμάντα δεν παρέχει πολύ μεγάλη ακρίβεια θέσης, λόγω:

- Της επιμήκυνσης του κατά τη φόρτιση
- Της μεταβολής του μήκους του λόγω αλλαγής θερμοκρασίας
- Της ταλάντωσής του από τυχόν άνεμο
- Των δυνάμεων που δρουν μόνο προς μία κατεύθυνση (παραλαμβάνει μόνο εφελκυστικά φορτία)

- Η χρήση υδραυλικών εμβόλων



*Εικόνα 21 Ανυψωτικός μηχανισμός με χρήση υδραυλικού εμβόλου*

Η ανύψωση με τη χρήση εμβόλων έχει τα εξής σημαντικά μειονεκτήματα που την καθιστούν ακατάλληλη για την συγκεκριμένη εφαρμογή:

- Έχουν μικρή σχετικά διαδρομή
- Ο έλεγχός τους είναι δύσκολο να επιτευχθεί με ακρίβεια
- Έχουν μεγαλύτερο κόστος από ηλεκτρικούς επενεργητές (π.χ. μοτέρ)
- Απαιτούν υδραυλική αντλία για να λειτουργήσουν

Από τις παραπάνω λύσεις, θα εξεταστούν οι περιπτώσεις των ψαλιδωτών μηχανισμών και των ανυψωτικών κοχλιών, καθώς οι υπόλοιπες κρίνονται ακατάλληλες. Όποια από τις δύο λύσεις υπερτερεί, θα επιλεγεί στο σχεδιασμό του εκτυπωτή. Η εξέταση αυτή θα λάβει χώρα σε επόμενο κεφάλαιο, καθώς τα δεδομένα που έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής δεν επαρκούν για την πραγματοποίηση αναλύσεων και εξαγωγή σαφών αποτελεσμάτων.

Στο σημείο αυτό, κρίνεται αναγκαίο να επιλεγεί το κύριο υλικό κατασκευής του εκτυπωτή. Οι επιλογές που λαμβάνονται υπόψη είναι: χάλυβας, ανοξείδωτος χάλυβας και αλουμίνιο. Η σύγκριση αυτών, γίνεται ευκολότερη πινακοποιώντας τα χαρακτηριστικά τους και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα:

Υλικό	Αντοχή στη διάβρωση	Χαμηλό κόστος	Πυκνότητα	Μέτρο ελαστικότητας	Σύνολο
Χάλυβας	1	2	1	2	1.5
Ανοξείδωτος Χάλυβας	3	1	1	2	1.75
Αλουμίνιο	2	3	2	1	2

Πίνακας 4 Σύγκριση υλικών κατασκευής (βαθμολογία από 1 έως 3)

Επομένως η επικρατέστερη επιλογή υλικού είναι το αλουμίνιο.

Εφόσον η συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτεί τη μέγιστη δυνατή δυσκαμψία (για λόγους ακρίβειας εκτύπωσης), και παράλληλα χαμηλό βάρος, θα γίνει χρήση δικτύωματος.

## 2.3 Δικτύωμα

### 2.3.1 Επιλογή Προφίλ

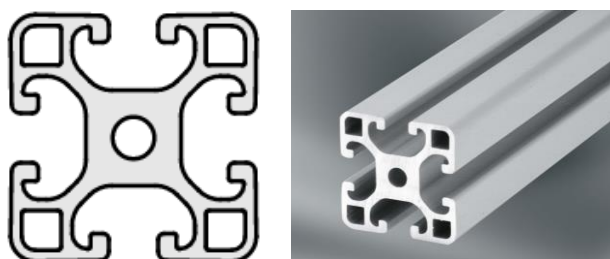
Συνήθως στα δικτύωματα αυτού του είδους κατασκευών (τύπου γερανογέφυρας), τα προφίλ αυτά έχουν ορθογωνική διατομή, και συγκολλούνται μεταξύ τους όπου απαιτείται. Ωστόσο, για να μπορέσει η κατασκευή να γίνει ευκολότερη στη συναρμολόγηση, και να μην απαιτεί χρονοβόρες κατεργασίες, θα γίνει η επιλογή λυόμενων προφίλ. Τα προφίλ αυτά, διατίθενται στο εμπόριο από διάφορες εταιρίες, και συναρμολογούνται εύκολα, καθώς συνοδεύονται από ειδικά συνδετικά κομμάτια. Η επιλογή αυτή στη σχεδίαση, δίνει ευελιξία, καθώς μπορούν μελλοντικά να γίνουν τροποποιήσεις στον ήδη κατασκευασμένο εκτυπωτή. Συγκεκριμένα μπορούν ν' αλλάξουν οι διαστάσεις, να προστεθούν νέα μέλη, να τοποθετηθούν εύκολα καινούργιοι επενεργητές, αισθητήρες κ.λπ.

Η επιλογή των προφίλ θα γίνει από τον κατάλογο της εταιρίας ITEM, καθώς η εταιρία αυτή έχει μεγάλο πλήθος προϊόντων. Τα προϊόντα αυτά είναι αντιπροσωπευτικά και για άλλες εταιρείες. Από τις διαθέσιμες σειρές, θα δοκιμαστεί αρχικά η σειρά 8, διότι αυτή η σειρά έχει τα περισσότερα συμβατά συνδετικά τυποποιημένα προϊόντα (συνδέσμους, οδηγήσεις, κανόνες κ.λπ.). Επίσης, στη σειρά αυτή οι συμβατοί οδηγοί έχουν ικανοποιητικό μέγεθος για την περίπτωση που εξετάζεται. Στη συνέχεια, θα ελεγχθεί αν η επιλογή αυτή ήταν σωστή μέσω αναλύσεων με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Θα επιλεγεί για τους τέσσερις κύριους φορείς του δικτύωματος το 'Profile 8 80x80 light, natural', διότι αυτό είναι ικανοποιητικά ελαφρύ και είναι το μικρότερο που έχει δύο οδηγούς σε κάθε πλευρά, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία στις συνδέσεις. Όσον αφορά τα υπόλοιπα μέρη του δικτύωματος, θα επιλεγεί το 'Profile 8 40x40 light, natural', διότι είναι στην κατηγορία του από τα ελαφρύτερα, και συγχρόνως πιο δύσκαμπτα.

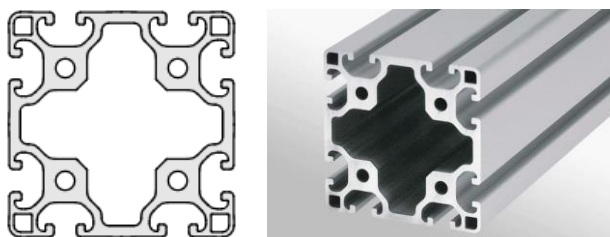
Τα χαρακτηριστικά των προφίλ δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Profile	8 40x40 light, natural	8 80x80 light, natural
ESD-Safe	NAI	NAI
Moment of inertia torsional $I_t$	1.36 cm <sup>4</sup>	80.8 cm <sup>4</sup>
Moment of inertia x-axis $I_x$	9 cm <sup>4</sup>	134.06 cm <sup>4</sup>
Moment of inertia y-axis $I_y$	9 cm <sup>4</sup>	134.06 cm <sup>4</sup>
Weight, spec: Length m	1.74 Kg/m	5.33 Kg/m
Material	Al,anodized	Al,anodized
Resistance moment x-axis $W_x$	4.5 cm <sup>3</sup>	33.51 cm <sup>3</sup>
Resistance moment y-axis $W_y$	4.5 cm <sup>3</sup>	33.51 cm <sup>3</sup>

Πίνακας 5 Χαρακτηριστικά των επιλεγμένων προφίλ.



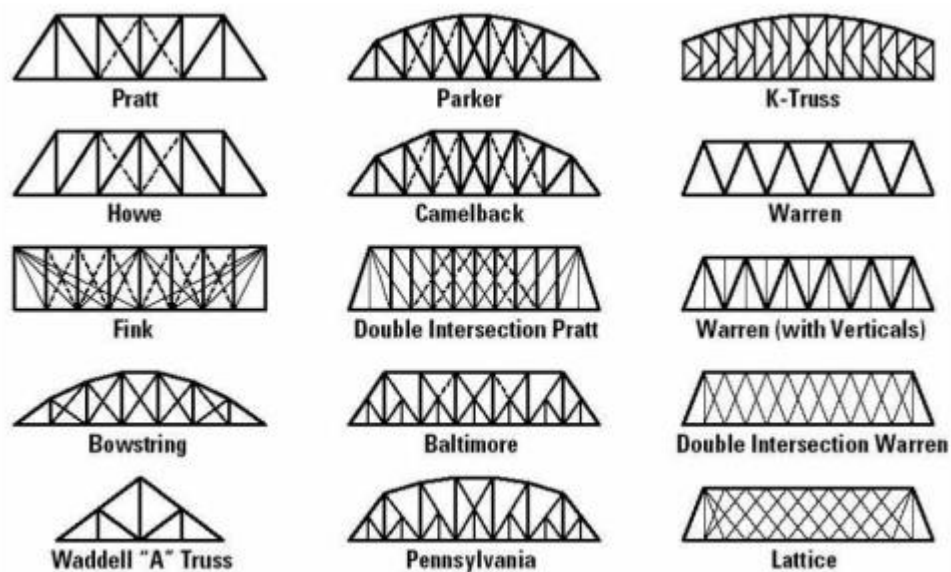
Εικόνα 22 Profile 8 40x40 light, natural



Εικόνα 23 Profile 8 80x80 light, natural

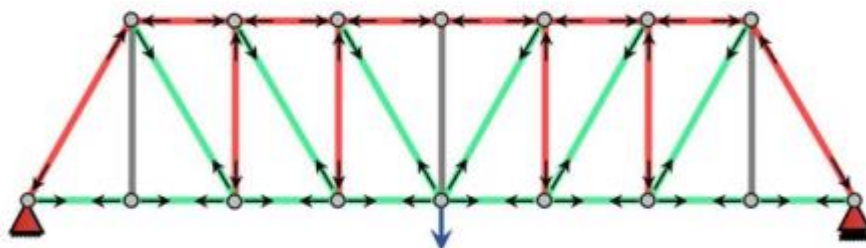
### 2.3.2 Σχεδιασμός Γεωμετρίας δικτύωματος

Τα δίμετρα μέλη του εκτυπωτή θα σχεδιαστούν έτσι ώστε να είναι όμοια μεταξύ τους και να μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε σημείο του. Έτσι, επιτυγχάνεται μεγάλη ευελιξία κατά τη συναρμολόγηση, καθώς δεν απαιτείται να μπαίνουν σε συγκεκριμένες θέσεις. Ακόμη, σε περίπτωση που χρειάζεται να υπάρξει κάποιο ανταλλακτικό μέλος, αυτό θα μπορεί να είναι ένα και να τοποθετηθεί όπου τυχόν χρειαστεί. Για το σχεδιασμό του δικτύωματος του εκτυπωτή, θα εξετασθούν οι παρακάτω περιπτώσεις δικτυωμάτων, τα οποία εφαρμόζονται συχνά στις κατασκευές γερανών, γεφυρών, υποστυλωμάτων κ.λπ.:



Εικόνα 24 Γεωμετρίες δικτυωμάτων

Από τις απεικονιζόμενες παραπάνω γεωμετρίες, οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είναι η Pratt και η Warren. Οι δύο αυτές γεωμετρίες όπως φαίνεται κι από τα σχήματα, απαιτούν λιγότερα μέλη κι επομένως είναι ευκολότερες στην κατασκευή.



Εικόνα 25 Δικτύωμα Pratt: Πράσινα μέλη υπό εφελκυσμό, κόκκινα υπό θλίψη και γκρι χωρίς τάσεις

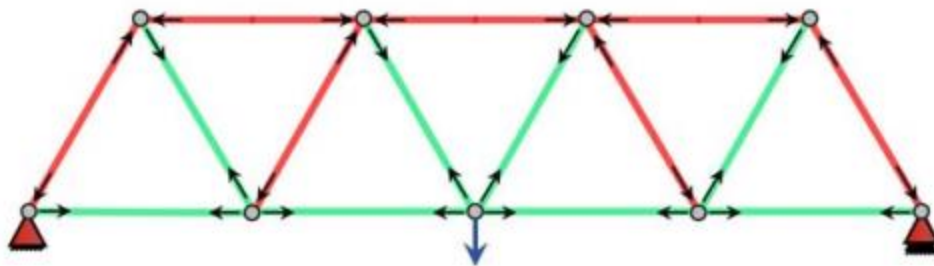
Το **Δικτύωμα Pratt** έγινε γνωστό το 1844 από τον Thomas Pratt και αποτελείται από κάθετα και διαγώνια μέλη τα οποία με τον τρόπο που διατάσσονται θυμίζουν το γράμμα 'N'. Στα μέλη που έχουν διαγώνιο προσανατολισμό, δρουν όπως φαίνεται και στην εικόνα μόνο εφελκυστικές τάσεις. Επομένως, τα μέλη αυτά εφόσον κατά τη φόρτιση του δικτυώματος δεν δέχονται θλιπτικές τάσεις, εξαλείφεται η ανάγκη για εξέτασή τους για φαινόμενα λυγισμού λόγω συμπίεσης. Ωστόσο, τα κάθετα μέλη δέχονται θλιπτικά φορτία κι επομένως χρειάζεται να είναι αντίστοιχα σχεδιασμένα ώστε να αποκλείονται τα ενδεχόμενα λυγισμού όταν βρίσκονται υπό φόρτιση. Το δικτύωμα Pratt είναι σχετικά απλό και προσφέρει ευκολία στο πεδίο της ανάλυσής του. [13].



Εικόνα 26 Χρήση δικτύωματος Pratt σε γέφυρα



Εικόνα 27 Χρήση δικτύωματος Pratt σε γέφυρα



Εικόνα 28 Δικτύωμα Warren: Πράσινα μέλη υπό εφελκυσμό, κόκκινα υπό θλίψη και γκρι χωρίς τάσεις

Το **Δικτύωμα Warren** κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1848 από τους James Warren και Willoughby Theobald Monzani. Το δικτύωμα αυτό αποτελείται από διαμήκη μέλη που ενώνονται μόνο με γωνιακά εγκάρσια μέλη, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό ισόπλευρα τρίγωνα κατά το μήκος του. Κάθε μέλος του δικτύωματος, υπόκειται μόνο σε τάσεις εφελκυσμού ή συμπίεσης, δηλαδή δεν υπάρχουν δυνάμεις κάμψης ή στρέψης σε αυτά. Αυτό το γεγονός συμβαίνει λόγω της παρουσίας ισόπλευρων τριγώνων, ενώ στην περίπτωση που αυτά είναι ισοσκελή (Neville Truss), δεν συμβαίνει. Τα φορτία στα διαγώνια μέλη, εναλλάσσονται μεταξύ θλίψης και εφελκυσμού πηγαίνοντας προς το κέντρο, χωρίς κατακόρυφα μέλη, ενώ τα μέλη που βρίσκονται κοντά στο κέντρο πρέπει να υποστηρίξουν τόσο εφελκυσμό όσο και θλίψη, αντισταθμίζοντας έτσι τα φορτία που εφαρμόζονται κατά τη λειτουργία. Αυτή η διαμόρφωση συνδυάζει την αντοχή με την οικονομία των υλικών, με αποτέλεσμα να μπορεί να γίνει σχετικά ελαφρύ. Επειδή οι δοκοί έχουν ίσο μήκος και τοποθετούνται

στο ίδιο επαναλαμβανόμενο μοτίβο, καθιστούν το δικτύωμα αυτό ιδανικό για χρήση σε προκατασκευασμένες γέφυρες. Μια παραλλαγή του δικτύωματος αυτού περιλαμβάνει κατακόρυφα μέλη μεταξύ των τριγώνων, αυτά χρησιμοποιούνται όταν τα μήκη από τα ανώτερα οριζόντια μέλη είναι σχετικά μεγάλα και υπάρχει ο κίνδυνος να υποστούν λυγισμό. [14]

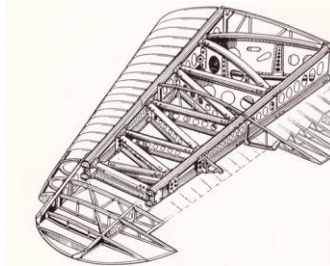
Το δικτύωμα αυτό χρησιμοποιήθηκε και στην κατασκευή αεροσκαφών, πολιτικών αλλά και μαχητικών του Α' και του Β' παγκόσμιου πολέμου. Στον Α' παγκόσμιο, χρησιμοποιήθηκε στην στήριξη των δύο πτερύγων των διπλάνων και στην κατασκευή της ατράκτου, ενώ στον Β' παγκόσμιο έκαναν την εμφάνισή τους και στο εσωτερικό των πτερύγων.



Εικόνα 29 Δικτύωμα Warren σε διπλάνο. Δεν επέτρεπε την στρέψη των πτερύγων



Εικόνα 30 Το δικτύωμα Warren στην κατασκευή της ατράκτου ενός συμβατικού αεροπλάνου του 1ου Π.Π.



Εικόνα 31 Δικτύωμα Warren στο Hawker Hurricane



Εικόνα 32 Αεροσκάφος Handley Page H.P.42

Στο σημείο αυτό, κρίνεται αναγκαίο να γίνει σύγκριση των δύο δικτυωμάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω, με σκοπό την επιλογή του πλέον κατάλληλου για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

	<b>PRATT</b>	<b>WARREN</b>
Χαμηλό Βάρος	2	3
Οικονομία κατασκευής	3	3
Ευκολία κατασκευής	2	2
Συμμετρία	2	3
<b>Σύνολο</b>	<b>2.25</b>	<b>2.75</b>

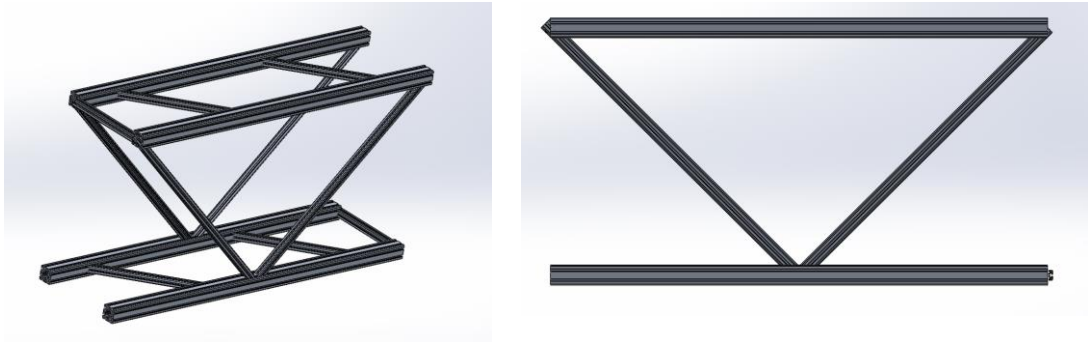
Πίνακας 6 Σύγκριση δικτυωμάτων Pratt και Warren (βαθμολογία από 1 έως 3)

Συγκρίνοντας αυτά τα δύο δικτυώματα, παρατηρείται ότι υπερτερεί το Warren, οπότε αυτό επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί στην σχεδίαση του εκτυπωτή.

### 2.3.3 Σχεδιασμός Module

Συνεπώς, η γεωμετρία του δικτύωματος των modules, θα είναι τύπου Warren, δηλαδή θα αποτελείται από ισόπλευρα τρίγωνα. Για να προκύψει το μήκος του module 2 m και να μην υπάρχει επικάλυψη των δικτυωμάτων, με γωνίες 45 μοιρών (οι οποίες προκύπτουν από τα ισόπλευρα τρίγωνα), οι επιλογές φαίνονται παρακάτω.

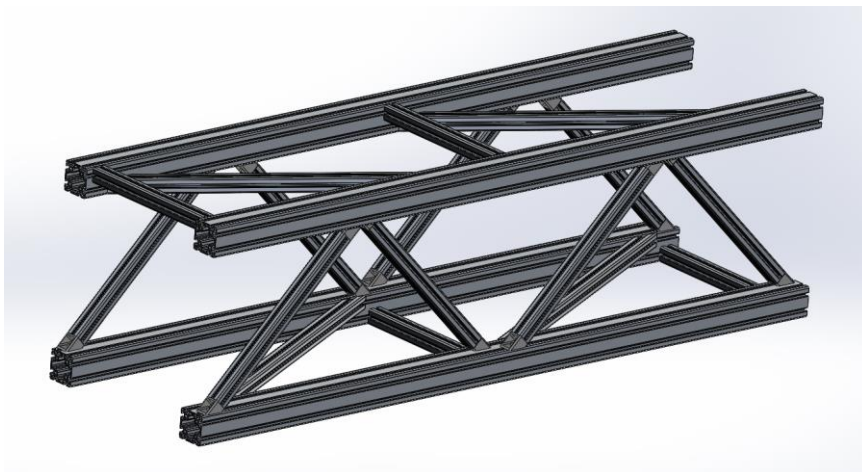
*Με χρήση μιας γωνίας*



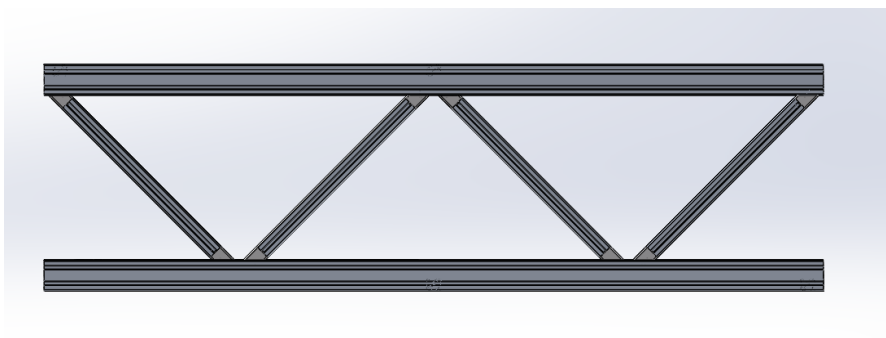
*Εικόνα 33 Module 2m με δικτύωμα μίας γωνίας*

Οι διαστάσεις του module προκύπτουν περίπου: 2000 mm x 1000 mm x 500 mm. Το ύψος του module αυτού είναι 1 μέτρο, το οποίο κρίνεται υπερβολικά μεγάλο (μη πρακτικό) για τη συγκεκριμένη κατασκευή.

*Με χρήση δύο γωνιών*

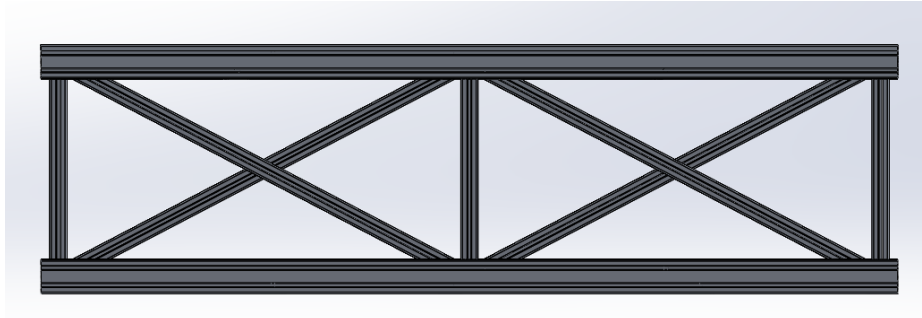


*Εικόνα 34 Module 2m με δικτύωμα δύο γωνιών*

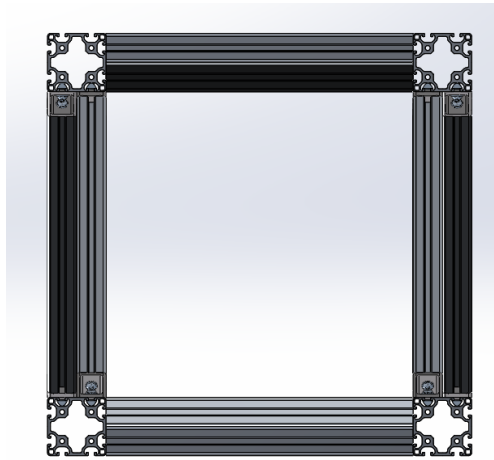


*Εικόνα 35 Πρόοψη module*





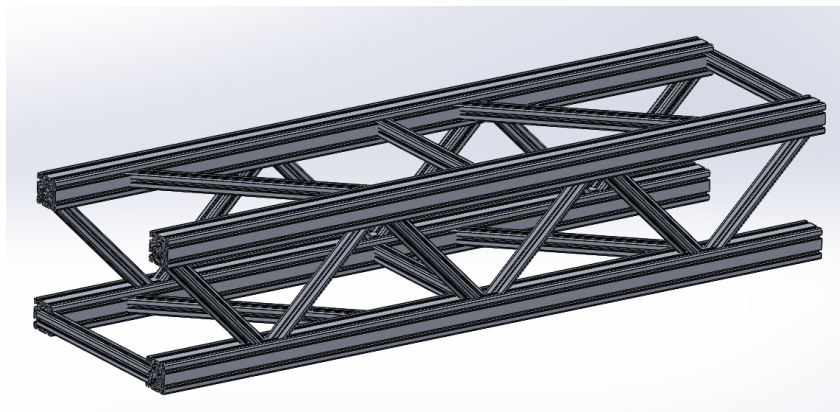
*Εικόνα 36 Κάτοψη module*



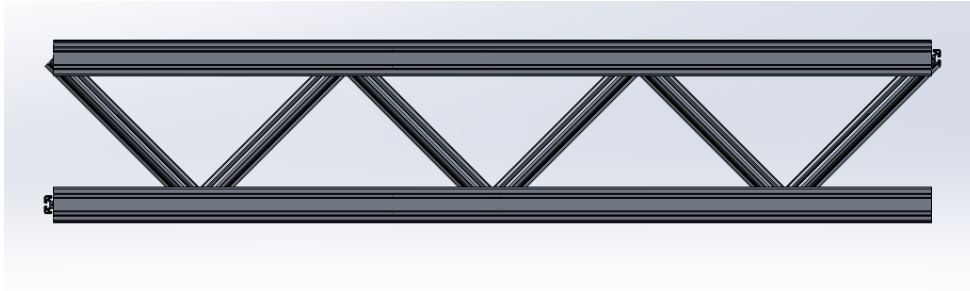
*Εικόνα 37 Πλάγια όψη module*

Οι διαστάσεις του module αυτού προκύπτουν περίπου: 2000 mm x 500 mm x 500 mm. Το μέγεθος του δείχνει να έχει αναλογίες οι οποίες ταιριάζουν στο μέγεθος της κατασκευής μας.

### *Με χρήση τριών γωνιών*



*Εικόνα 38 Module 2m με δικτύωμα δύο γωνιών*



Εικόνα 39 Πρόοψη module

Οι διαστάσεις του module αυτού προκύπτουν περίπου: 2000 mm x 300 mm x 500 mm. Οι διαστάσεις αυτές δεν είναι υπερβολικά μικρές για την κατασκευή μας, όμως προστίθενται περισσότερα συνδετικά μέσα, και απαιτείται μεγαλύτερο μήκος προφίλ, το οποίο αυξάνει το κόστος και την πολυπλοκότητα.

Ακόμη, για τα δικτυώματα που ενώνουν τα ανώτερα προφίλ μεταξύ τους (και τα κατώτερα αντίστοιχα), επιλέγονται αρχικά γωνίες 60 μοιρών, καθώς οι δύο διευθύνσεις στις οποίες αυτά τα δικτυώματα λαμβάνουν φορτία είναι κάθετες στον κατακόρυφο άξονα, άρα και στο βάρος. Επομένως, γίνεται η επιλογή των 60 μοιρών για λόγους μείωσης του συνολικού βάρους, αφού απαιτούνται λιγότερα μέτρα προφίλ. Μετά από δοκιμές όμως με τα συνδετικά στοιχεία για 60 μοίρες που παρέχει η εταιρία που επιλέχθηκε (ITEM), παρατηρήθηκε ότι αστοχούν. Το γεγονός αυτό συμβαίνει μετά από μια ορισμένη τιμή προέντασής τους, κι επομένως αυτό τα καθιστά ακατάλληλα για την συγκεκριμένη εφαρμογή.



Εικόνα 40 Συνδετικό μέσο που αστόχησε (Mitre-Fastening Set 8)

Στις παραπάνω φωτογραφίες είναι φανερό το σημείο αστοχίας αυτών των συνδετικών μέσων.

Με τα αποτελέσματα αυτά, γίνεται η επιλογή να χρησιμοποιηθούν και στα οριζόντια δικτυώματα γωνίες 45 μοιρών, οι οποίες στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν δεν παρουσίασαν κανένα πρόβλημα. Με σκοπό την εξοικονόμηση βάρους κι επειδή τα οριζόντια φορτία είναι πολύ μικρότερης έντασης από τα κατακόρυφα, γίνεται η επιλογή να χρησιμοποιηθούν 2 μόνο μέλη υπό γωνία 45 μοιρών και όχι 4 όπως συμβαίνει στο δικτύωμα warren. Επίσης, τοποθετείται και ένα μέλος κάθετο στο μήκος του module. Για να υπάρχει συμμετρία στο module όπου και να τοποθετηθεί, τα άνω προφίλ τοποθετούνται στραμμένα κατά 90 μοίρες από τα κάτω. Εδώ δεν χρησιμοποιείται κάποιο δικτύωμα γέφυρας, διότι δεν υπάρχει δύναμη με σταθερή κατεύθυνση, όπως το βάρος. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω πληροφορίες, προκύπτει η γεωμετρία του module που θα χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή του εκτυπωτή:



Εικόνα 41 Τελική γεωμετρία του module

### 2.3.4 Σχεδιασμός Πλαισίου - Γέφυρας

Στο σημείο αυτό, κρίνεται αναγκαίο να πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός του βασικού μοντέλου, δηλαδή του πλαισίου και της γέφυρας που θα φέρει την κεφαλή. Στις προδιαγραφές αναφέρθηκε πως η επιφάνεια εκτύπωσης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από  $7 \times 7 \text{ m}^2$ . Για να επιτευχθεί αυτό με τα ελάχιστα δυνατά modules, θα πρέπει τόσο κάθε πλευρά του πλαισίου, όσο και η γέφυρα να αποτελούνται από 4 modules. Επομένως, θα σχεδιαστεί και θα μελετηθεί αυτό το μοντέλο. Επειδή στην ανάλυση μιας τόσο μεγάλης κατασκευής, λεπτομέρειες όπως: τα συνδετικά στοιχεία, τα καλώδια, οι τερματικοί διακόπτες κ.λπ. έχουν πολύ μικρή συνεισφορά στο τελικό αποτέλεσμα, δεν θα συμπεριληφθούν σε αυτή. Ωστόσο, άλλα στοιχεία της κατασκευής, όπως οι οδοντωτοί κανόνες και οι γραμμικοί οδηγοί αφορούν άμεσα την συμπεριφορά της κατασκευής με δύο τρόπους:

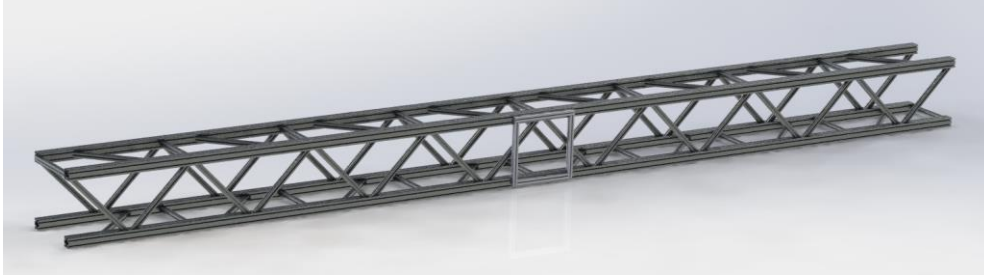
- Τη μάζα τους, που είναι μη αμελητέα
- Την δυσκαμψία τους, η οποία συντελεί στην αύξηση της δυσκαμψίας του συνόλου της κατασκευής

Η μάζα των στοιχείων αυτών θα συμπεριληφθεί στις αναλύσεις που θα γίνουν, ως κατανεμημένη. Οι οδοντωτοί κανόνες που θα κείται στην ανώτερη ελεύθερη επιφάνεια των modules, αποτελούν πραγματικά κατανεμημένη μάζα. Συγχρόνως, οι γραμμικοί οδηγοί έχουν πολλά σημεία πρόσδεσης με το δικτύωμα, οπότε παρόλο που θα βρίσκονται προσδεδεμένοι στις πλαϊνές πλευρές του, προσεγγίζουν κι αυτοί ομοιόμορφα κατανεμημένη μάζα. Επειδή τα στοιχεία αυτά είναι διακοπτόμενα (ακολουθώντας τη λογική των modules) και δεν συνδέονται κατά το μήκος τους, όπως συμβαίνει με τα αλουμινένια προφίλ, δεν μπορούν να παραλάβουν αξονικές δυνάμεις και να τις μεταφέρουν σε όλο το μήκος τους. Αυτές που παραλαμβάνουν, τις μεταφέρουν μέσω της τριβής πρόσδεσής τους στον αλουμινένιο φορέα. Όσον αφορά την κάμψη των φορέων αυτών, μπορούν να παραλάβουν κάποιο μέρος της, αλλά εξαιτίας του ίδιου λόγου όχι σε όλη την έκτασή τους. Όμως, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η γεωμετρία των modules αποτελεί δικτύωμα warren, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος των δυνάμεων που δέχονται τα προφίλ να είναι αξονικές και όχι καμπτικές.

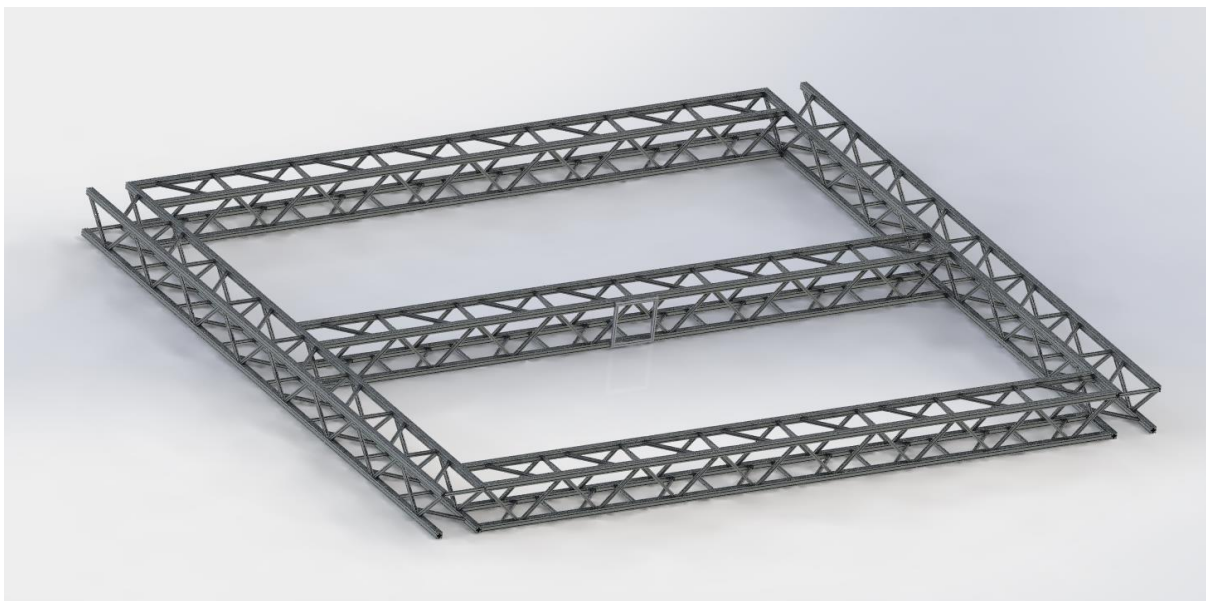
Επομένως, παρόλο που συντελούν σε ένα ποσοστό στην δυσκαμψία του δικτύωματος τα στοιχεία αυτά, θα παραληφθεί η συνεισφορά τους αυτή κατά την ανάλυση. Η επιλογή αυτή γίνεται σκόπιμα για δύο λόγους:

- Ανάλογα με τον τρόπο συναρμολόγησης, οι αποστάσεις των κομματιών των γραμμικών οδηγών ή του κανόνα μπορεί να διαφέρουν.
- Ανάλογα με την ροπή σύσφιξης των παραπάνω, μπορεί να διαφέρει η ικανότητα μεταφοράς φορτίων μέσω τριβής.
- Ανάλογα με την διαφορά θερμοκρασίας της στιγμής συναρμολόγησης και της στιγμής χρήσης, τα κενά μεταξύ των παραπάνω στοιχείων μπορούν να διαφέρουν.

Οι παραπάνω λόγοι έχουν ως αποτέλεσμα την αβεβαιότητα του ποσοστού συνεισφοράς των στοιχείων αυτών στην δυσκαμψία του συνολικού μηχανισμού. Εξαιτίας αυτού, κι επειδή στο μέλλον μπορεί να χρειαστεί να γίνουν αλλαγές αυτών των στοιχείων (χρήση άλλων οδηγών, χρήση οδοντωτού κανόνα που να διαφέρει ελαφρώς κ.λπ.), θα παραλειφθεί η συνεισφορά τους στη δυσκαμψία κατά την ανάλυση.



Εικόνα 42 Γέφυρα αποτελούμενη από modules



Εικόνα 43 Πλαίσιο και γέφυρα αποτελούμενα από modules

## 2.4 Εκτίμηση μαζών

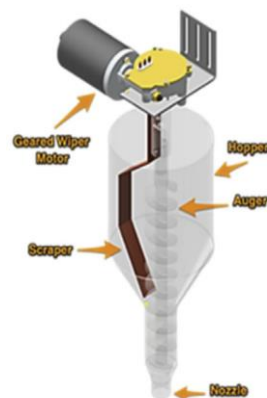
Για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση και τα αποτελέσματα που θα ληφθούν να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες, θα πρέπει να γίνουν κάποιες εκτιμήσεις, όσον αφορά τις θέσεις και μάζες των επιμέρους μηχανισμών που θα τοποθετηθούν.

Η κεφαλή εκτύπωσης βρίσκεται εκτός των ορίων μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας. Σύμφωνα με άλλες μελέτες για εκτύπωση κονιάματος με εξώθηση υλικού, αλλά και με τους εκτυπωτές του εμπορίου, παρατηρούμε πως αυτή επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

- Με ανάμειξη του μείγματος στην κεφαλή (Mixer) και στη συνέχεια εξώθησή του μέσω ενός μεταφορικού κοχλία



Εικόνα 44 Εκτυπωτής με ανάμειξη στην κεφαλή



Εικόνα 45 Μοντελοποίηση κεφαλής ανάμειξης εκτυπωτή

- Με προανάμειξη του μείγματος εκτός του εκτυπωτή και στη συνέχεια οδήγηση του μείγματος αυτού μέσω ενός εύκαμπτου σωλήνα στην κεφαλή του εκτυπωτή. Η κεφαλή αυτή αποτελείται από ένα μικρό σχετικά μήκος άκαμπτου σωλήνα που φέρει ένα ακροφύσιο.



Εικόνα 46 Εκτυπωτές με προανάμειξη μείγματος



Εικόνα 47 Συσκευή προανάμιξης μείγματος

Ο προς σχεδίαση εκτυπωτής θα πρέπει να είναι ικανός να φέρει οποιοδήποτε είδος από τις δύο αυτές κεφαλές, διότι δεν είναι σαφές ακόμη ποια από τις δύο τεχνολογίες υπερτερεί. Για να επιτευχθεί ο σκοπός αυτός, θα ληφθεί υπόψιν μάζα κεφαλής 200 kg, η οποία είναι μία τιμή αρκετά υψηλή για οποιαδήποτε κεφαλή κυκλοφορεί στην αγορά. Ωστόσο, επειδή ακόμη η τεχνολογία των κεφαλών βρίσκεται υπό εξέλιξη, είναι θεμιτό να μπορεί ο εκτυπωτής να είναι συμβατός.

Για την κατασκευή ενός module (2 m), απαιτούνται: 80 x 80 profile συνολικής μάζας 42.6 kg και 40 x 40 profile συνολικής μάζας 14.1 kg. Επομένως η συνολική μάζα του πλαισίου XY και της γέφυρας ανέρχεται στα 1134 kg. Όσον αφορά την κίνηση, θα χρησιμοποιηθούν μοτέρ τύπου stepper. Συγκεκριμένα, απαιτούνται 3 μοτέρ, 2 για τη μετατόπιση της γέφυρας και 1 για την μετατόπιση της κεφαλής. Για να πραγματοποιηθούν οι αρχικές αναλύσεις, επιλέγονται από το εμπόριο σχετικά μεγάλα μοτέρ, διότι αυτή η περίπτωση θα είναι η δυσμενέστερη ως προς τις τάσεις και τις παραμορφώσεις. Στη συνέχεια, θα ελεγχθεί αν τα μοτέρ αυτά επαρκούν. Τα μοτέρ αυτά είναι τα: 110HS3230-06, τα οποία έχουν μάζα 11.8 kg. Επίσης, εκτιμάται και το βάρος του πινιόν στο 1 kg. Επομένως η συνολική μάζα μοτέρ και πινιόν εκτιμάται στα 38.4 kg. Συνεχίζοντας, ο οδοντωτός κανόνας εκτιμάται πως θα έχει διαστάσεις περίπου 30 mm x 30 mm και θα είναι χαλύβδινος. Ο χάλυβας έχει πυκνότητα: 7870 kg/m<sup>3</sup> (AISI 1020), άρα η μάζα ανά μέτρο οδοντωτού κανόνα εκτιμάται περίπου στα 7 kg/m. Απαιτούνται 24 m κανόνα, οπότε η συνολική του μάζα εκτιμάται στα 168 kg. Σχετικά με την οδήγηση, επιλέγονται οδηγοί από τον κατάλογο της ίδιας εταιρείας (ITEM), συμβατοί με τα επιλεγμένα προφίλ: Linear Guide Rail PS 4-15. Θα γίνει χρήση 2 οδηγών ανά module (στα module που απαιτείται οδήγηση). Η μάζα αυτών σύμφωνα με τους καταλόγους του κατασκευαστή είναι 1.3 kg/m, οπότε η συνολική μάζα των οδηγών προβλέπεται να είναι 62.4kg. Όσον αφορά τους τερματικούς διακόπτες, την καλωδίωση και τα συνδετικά μέσα, η μάζα τους θεωρείται αμελητέα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Συνεπώς, από τα παραπάνω προκύπτει συνολική μάζα περίπου 1600 kg.

Σε αυτή συμπεριλαμβάνονται:

- Πλαίσιο XY
- Γέφυρα
- Κεφαλή
- Οδηγοί
- Κανόνες
- Μοτέρ

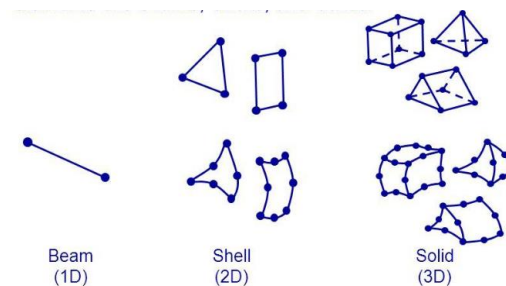
### 3. Ανάλυση βασικού μοντέλου

#### 3.1 Στατική ανάλυση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία μοντελοποίησης, που οδηγεί στη στατική ανάλυση με βάση όσα ειπώθηκαν. Είναι σαφές πως η δυσμενέστερη περίπτωση, όσον αφορά τις τάσεις και τις παραμορφώσεις, είναι όταν η γέφυρα βρίσκεται στα μισά της συνολικής διαδρομής που μπορεί να εκτελέσει, ενώ συγχρόνως η κεφαλή βρίσκεται στα μισά της διαδρομής που μπορεί εκείνη να εκτελέσει. Εφόσον δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμη ο αναλυτικός σχεδιασμός, δεν είναι γνωστά τα ακριβή σημεία επαφής της γέφυρας με το πλαίσιο, και της βάσης της κεφαλής με τη γέφυρα. Ωστόσο, η απόσταση των τεσσάρων σημείων που κυλίνουν στους οδηγούς σε καθένα από τα παραπάνω, μπορεί προσεγγιστικά να θεωρηθεί ότι είναι σχεδόν ίση με το πλάτος τους δικτύωματος, χωρίς βλάβη της γενικότητας.

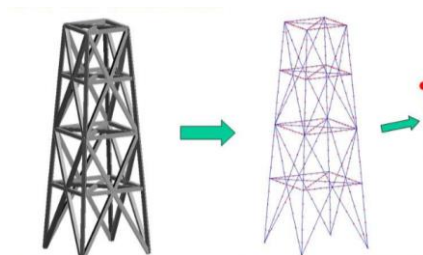
Με τα δεδομένα αυτά, θα πραγματοποιηθεί στατική ανάλυση με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή αυτή είναι το 'SOLIDWORKS', το οποίο είναι ένα από τα πιο εξελιγμένα που υπάρχουν στο εμπόριο, συνδυάζοντας τον σχεδιασμό τρισδιάστατων μοντέλων (CAD) με την ανάλυση.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method (FEM)), είναι μια αριθμητική προσεγγιστική μέθοδος. Με τη χρήση αυτής μπορεί να ερευνηθεί η συμπεριφορά περίπλοκων σχημάτων, χωρίζοντάς τα σε μικρότερα κομμάτια. Αυτά τα μικρότερα κομμάτια ονομάζονται στοιχεία και συνδέονται μεταξύ τους σε κόμβους. Τα στοιχεία αυτά έχουν σχήματα τα οποία είναι σχετικά εύκολα να αναλυθούν. Τα τρία βασικά είναι οι δοκοί (Beams), τα κελύφη (Shells) και τα στερεά (Solids)



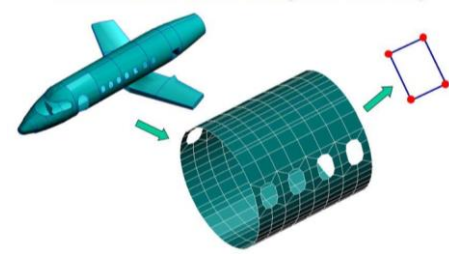
Εικόνα 48 Στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε αναλύσεις

- Οι δοκοί αποτελούν μονοδιάστατα στοιχεία (1D) και χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιηθούν κατασκευές που αποτελούνται από μακριά λεπτά δομικά μέλη.



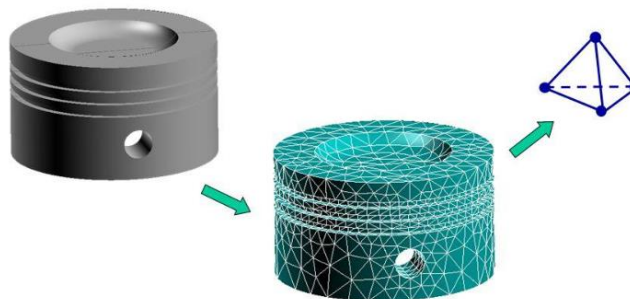
Εικόνα 49 Στοιχεία Beam

- Τα κελύφη είναι δισδιάστατα στοιχεία (2D) και χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιηθούν λεπτότοιχες κατασκευές.



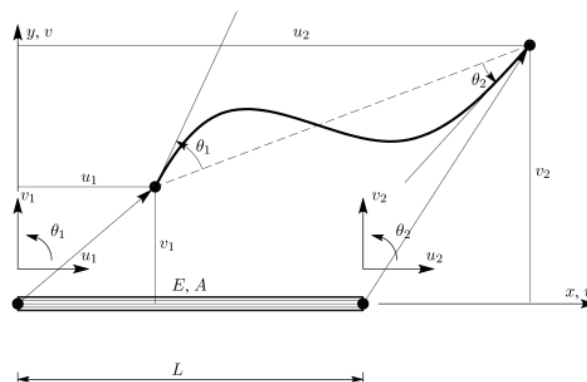
Εικόνα 50 Στοιχεία Shell

- Τα στερεά είναι τρισδιάστατα στοιχεία (3D) και χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιηθεί οποιοδήποτε τρισδιάστατο αντικείμενο



Εικόνα 51 Στοιχεία Solid

Επειδή η κατασκευή αποτελείται από μεγάλο πλήθος μελών, και το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών είναι δοκοί (διότι περί δικτύωματος πρόκειται), θα γίνει η επιλογή 'Beam analysis'. Σαφέστερα, με την επιλογή αυτή θα ληφθούν υπόψη οι ροπές αδράνειας των διατομών των προφίλ, και θα παράξει το πρόγραμμα ένα δίκτυο από δοκούς 'Beams' και αρθρώσεις 'Joints' στα σημεία που αυτές συντρέχουν. Οι δοκοί αυτοί, χωρίζονται σε στοιχεία κατά το μήκος τους, το πλήθος των οποίων επιλέγεται από τις παραμέτρους του προγράμματος. Στη συνέχεια παρέχονται τα υπόλοιπα δεδομένα στο πρόγραμμα, τίθενται σε λειτουργία και παράγει αποτελέσματα.



Εικόνα 52 Στοιχείο δοκού στο επίπεδο

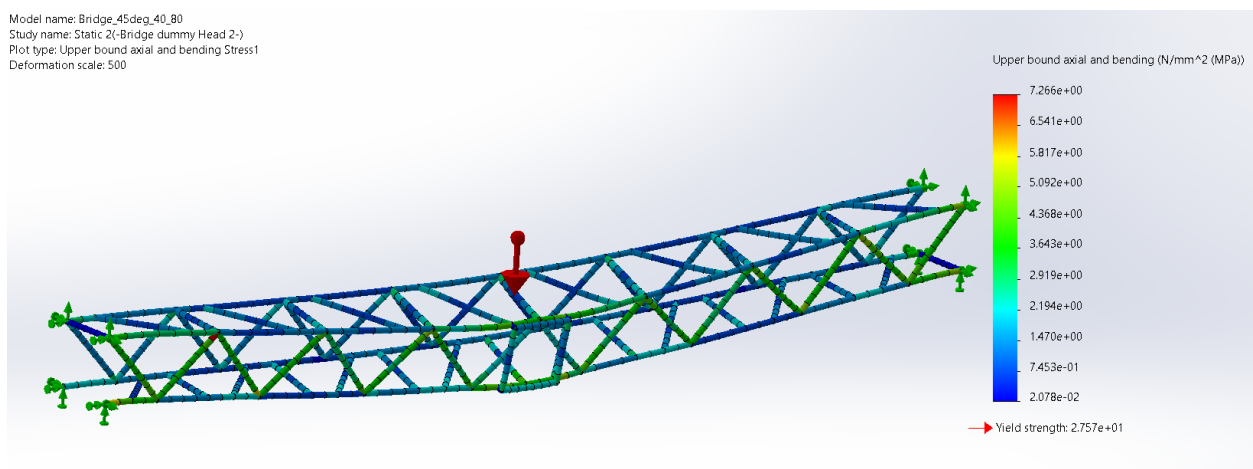


Η αναφορά στα μέλη του δικτύωματος ως δοκοί (Beams), και όχι ως ράβδοι (rods) έγινε σκόπιμα. Σαφέστερα, επειδή τα μέλη του δικτύωματος σε αυτή την κατασκευή δεν ενώνονται μεταξύ τους με αρθρώσεις αλλά με πακτώσεις, είναι δυνατή η μεταφορά στρεπτικής και καμπτικής ροπής στα σημεία όπου ενώνονται, διαφέροντας έτσι από το δικτύωμα. Θα μπορούσε επίσης να γίνει χρήση της μεθόδου των τρισδιάστατων στερεών στοιχείων, όμως το εγχείρημα αυτό θα απαιτούσε υπερβολικά μεγάλο πλήθος στοιχείων για να μοντελοποιηθεί επαρκώς. Ειδικότερα, αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό αν κανείς σκεφτεί την πολυπλοκότητα που έχει η γεωμετρία των προφίλ, το μεγάλο πλήθος των μελών και το μεγάλο συνολικά μέγεθος της κατασκευής. Κατά συνέπεια, θα απαιτούσε υπερβολικά πολλή υπολογιστική ισχύ, πολλή μνήμη και αντίστοιχα πολύ χρόνο για να εκτελεστεί.

Αρχικά πραγματοποιείται στατική ανάλυση στη γέφυρα η οποία φέρει την κεφαλή, για να εξεταστεί αν οι τάσεις και οι μετατοπίσεις βρίσκονται σε αποδεκτά επίπεδα. Οι θέσεις πρόσδεσης της γέφυρας στους οδηγούς, θεωρούνται ως πακτώσεις στο συγκεκριμένο έλεγχο.

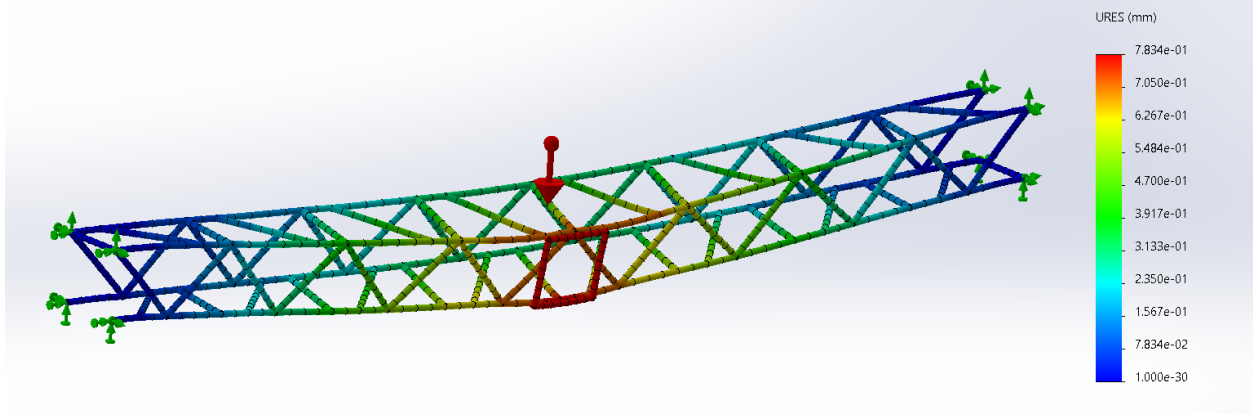
Για να προετοιμαστεί το μοντέλο για Beam analysis, ακολουθούνται τα εξής στάδια:

- Σχεδιάζεται το τρισδιάστατο μοντέλο σε απλοποιημένη μορφή, αποτελούμενο μόνο από προφίλ. Ως κεφαλή, σχεδιάζεται ένα πλαίσιο 500 mm x 500 mm x 100 mm, στο οποίο θα τοποθετηθεί στη συνέχεια η μάζα της.
- Η κεφαλή και η γέφυρα τοποθετούνται στα μισά της διαδρομής, όπως προαναφέρθηκε
- Ορίζεται μια στατική ανάλυση δοκών (Beam analysis)
- Παράγεται το αρχικό πλέγμα, με 10 στοιχεία/δοκό
- Ελέγχεται ότι οι ροπές αδράνειας των στοιχείων ( $I_{xx}$  και  $I_{yy}$ ) προσεγγίζουν αρκετά αυτές που παρέχονται από τον κατασκευαστή των προφίλ
- Επιλέγεται το υλικό των προφίλ (αλουμίνιο στην προκειμένη περίπτωση)
- Ελέγχεται ότι η μάζα ανά μονάδα μήκους είναι αντίστοιχη με αυτή που παρέχει ο κατασκευαστής
- Ορίζεται η επιτάχυνση της βαρύτητας κατακόρυφα ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ )
- Η μάζα της κεφαλής (200 kg) ισοκατανέμεται σε 4 κόμβους, στην πλαϊνή πλευρά της γέφυρας και κεντρικά, εξομοιώνοντας έτσι τα σημεία όπου θα έρχεται σε επαφή με τους οδηγούς.
- Ορίζεται η κατανεμημένη μάζα των οδηγών και του οδοντωτού κανόνα
- Ορίζονται ως συγκεντρωμένες οι μάζες των μοτέρ και των πινιόν
- Εκτελείται η ανάλυση και παράγονται τα αποτελέσματα



Εικόνα 53 Τάσεις που αναπτύσσονται στη γέφυρα σε φορτίο 200kg

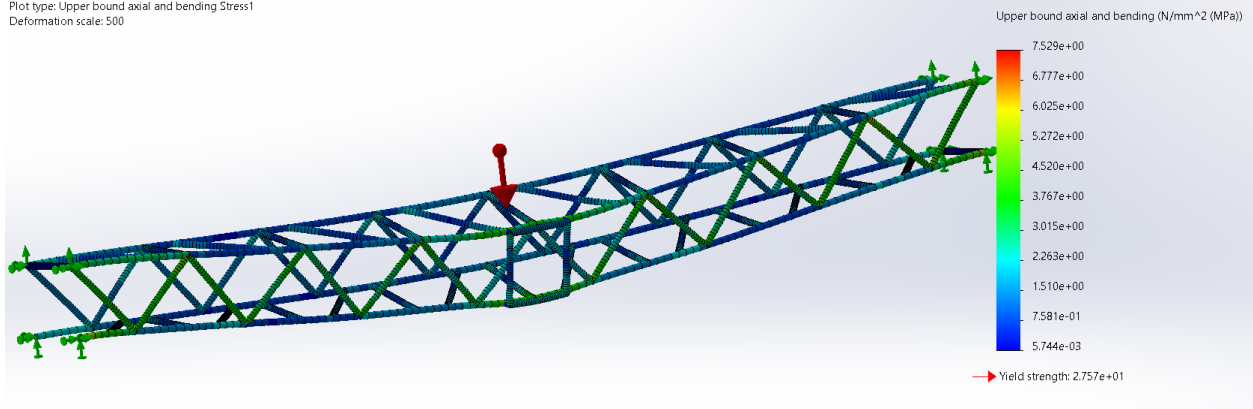
Model name: Bridge\_45deg\_40\_80  
Study name: Static 2(-Bridge dummy Head 2-)  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 500



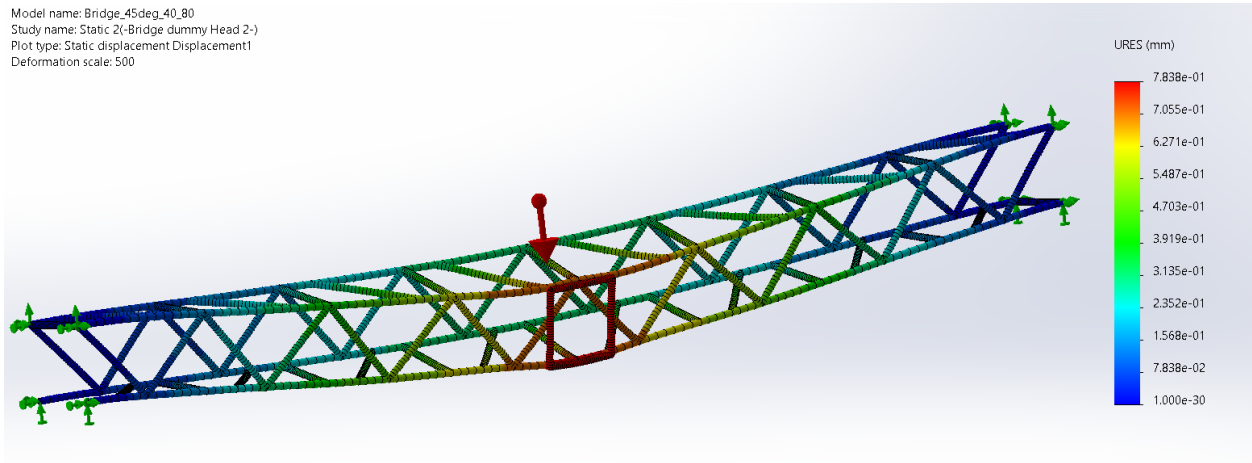
Εικόνα 54 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στη γέφυρα σε φορτίο 200kg

Η επιλογή του πλήθους των στοιχείων ανά δοκό είναι σημαντική, διότι σε περίπτωση που επιλεγθεί μικρό πλήθος, τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από την πραγματική εφαρμογή. Ωστόσο, όσο αυξάνεται το πλήθος των στοιχείων, τόσο αυξάνεται και η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση σε εύλογο χρονικό διάστημα. Επομένως, για να εξετασθεί αν τα στοιχεία επαρκούν, η παραπάνω ανάλυση επαναλαμβάνεται, με πυκνότερο πλέγμα κατά 3 φορές (30 στοιχεία/δοκό):

Model name: Bridge\_45deg\_40\_80  
Study name: Static 2(-Bridge dummy Head 2-)  
Plot type: Upper bound axial and bending Stress1  
Deformation scale: 500



Εικόνα 55 Τάσεις που αναπτύσσονται στη γέφυρα σε φορτίο 200kg



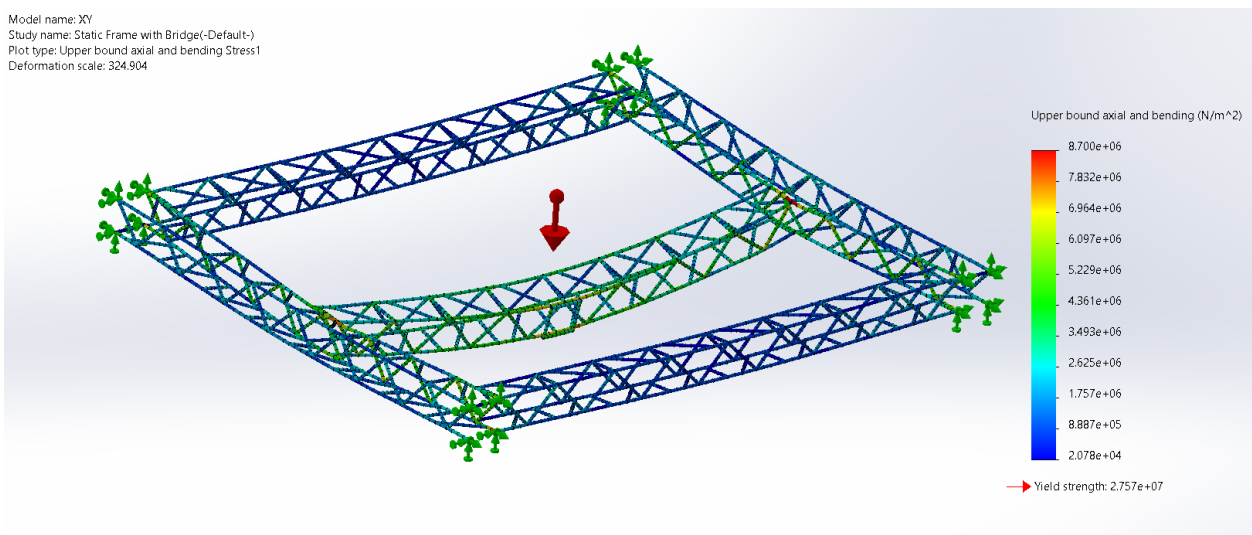
Εικόνα 56 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στη γέφυρα σε φορτίο 200kg

Εφόσον οι δύο αυτές αναλύσεις εξάγουν πολύ κοντινά αποτελέσματα, είναι σαφές ότι και με 10 στοιχεία ανά δοκό τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα, παρατηρείται πως οι αναπτυσσόμενες τάσεις βρίσκονται σε χαμηλό επίπεδο, ενώ όμοια είναι και τα αποτελέσματα που αφορούν τις μετατοπίσεις. Επομένως, αφού δεν ξεπερνάται κάποια προδιαγραφή, θα ακολουθήσει νέα ανάλυση, που θα περιλαμβάνει την γέφυρα, η οποία σε αυτή την περίπτωση θα βρίσκεται στη μέση ενός πλαισίου. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι όμοια με τα προηγούμενα, ενώ σε αυτά προστίθενται:

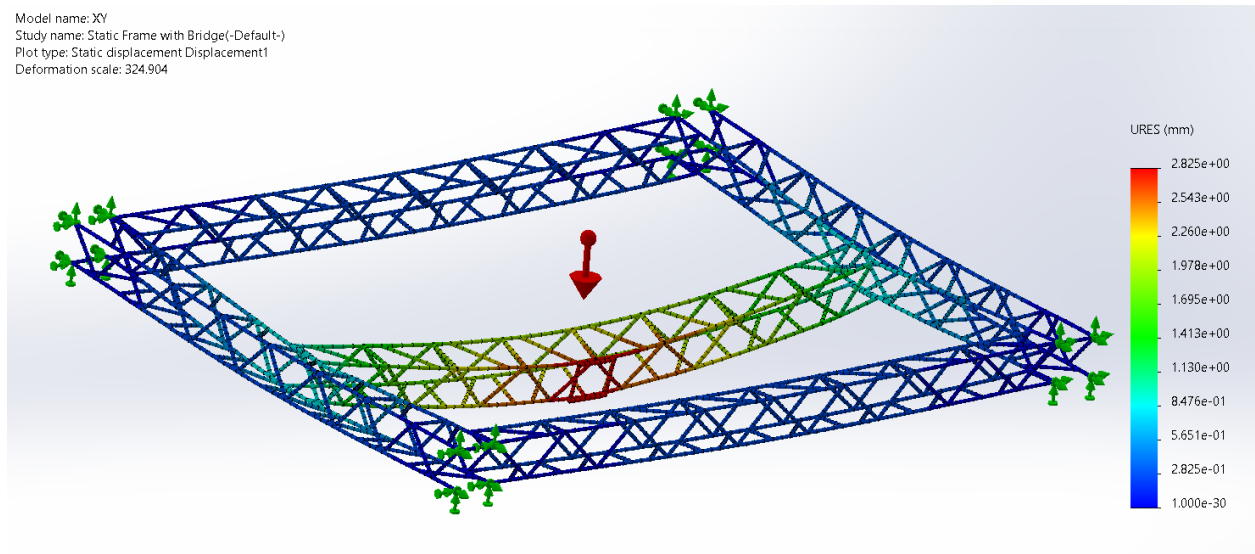
- Οι κόμβοι που βρίσκονται στις 4 γωνίες του πλαισίου ορίζονται ως πακτώσεις, καθώς στα σημεία αυτά θα βρίσκονται οι πυλώνες ανύψωσης
- Πακτώσεις θεωρούνται και τα σημεία επαφής του πλαισίου με τη γέφυρα

Η ανάλυση πραγματοποιείται επιτυχώς, και λαμβάνονται τα παρακάτω αποτελέσματα:



Εικόνα 57 Τάσεις που αναπτύσσονται στο πλαίσιο XY και στη γέφυρα, σε φορτίο 200kg

Model name: XY  
Study name: Static Frame with Bridge(-Default-)  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 324.904



Εικόνα 58 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο πλαίσιο XY και στη γέφυρα, σε φορτίο 200kg

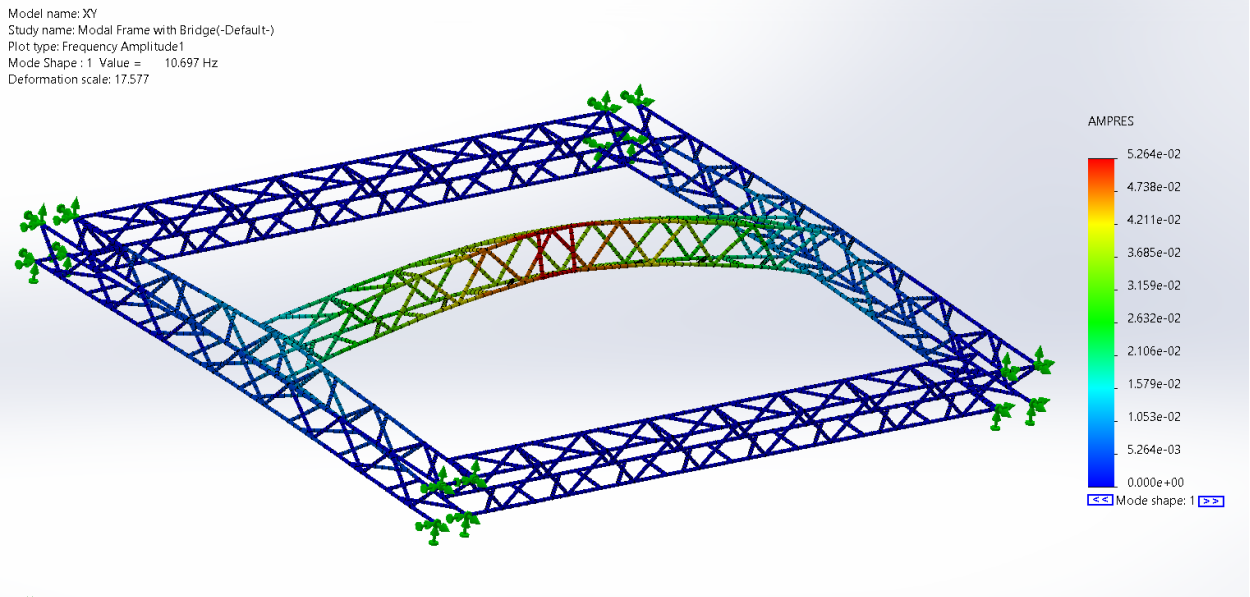
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης, είναι σαφές πως η κατασκευή έχει ικανοποιητική συμπεριφορά όσον αφορά την στατική φόρτιση. Σαφέστερα, οι τάσεις που αναπτύσσονται βρίσκονται σε πολύ χαμηλότερο επίπεδο από το όριο διαρροής, ενώ παράλληλα η μέγιστη παραμόρφωση που προκύπτει είναι μόλις 2.8 mm. Ωστόσο, τα παραπάνω δεν είναι αρκετά για να αποδειχθεί πως δεν θα υπάρξει πρόβλημα κατά τη λειτουργία. Συγκεκριμένα, θα πρέπει η κατασκευή να εξεταστεί και ως προς τις ιδιοσυχνότητές της, διότι αν αυτές είναι χαμηλές, μπορεί να διεγερθούν από εξωτερικούς παράγοντες (άνεμος, σεισμοί κ.λπ.) , με αποτέλεσμα την εκτέλεση ταλαντώσεων μεγάλου πλάτους.

### 3.2 Δυναμική ανάλυση

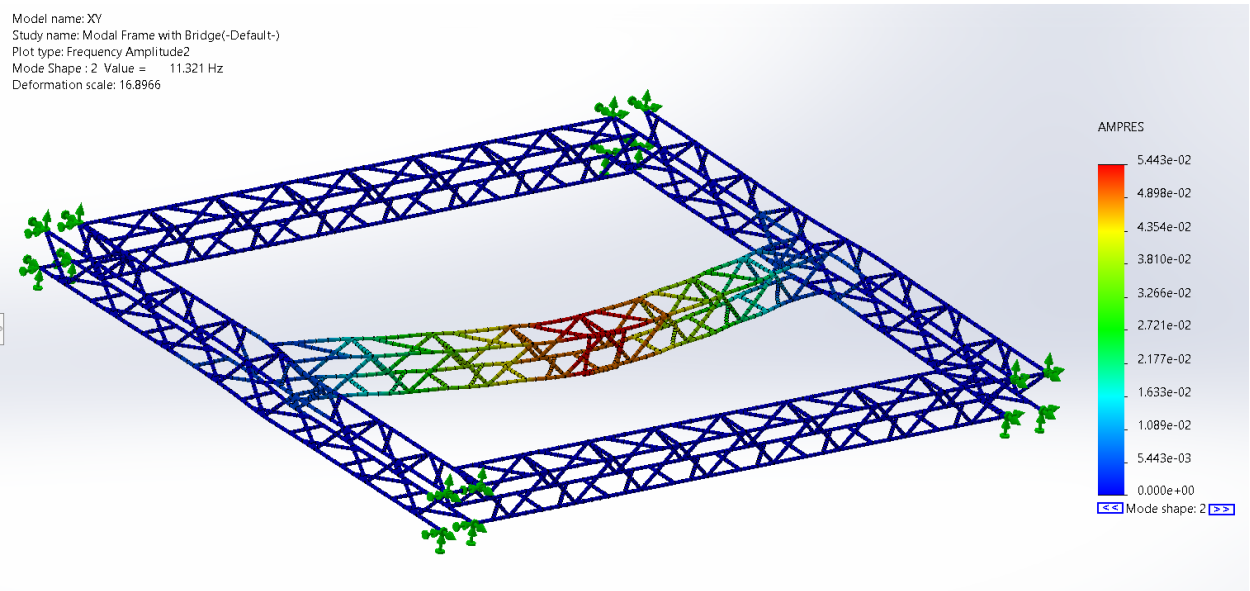
Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθεί το δικτύωμα ως προς τις ιδιοσυχνότητές του. Συγκεκριμένα, θα μελετηθεί το πλαίσιο που φέρει την γέφυρα, χωρίς ακόμη να συμπεριλαμβάνεται ο μηχανισμός ανύψωσης. Η επιλογή αυτή γίνεται διότι, με την προσθήκη του μηχανισμού ανύψωσης οι ιδιοσυχνότητες θα μειωθούν, οπότε αν αυτές που θα προκύψουν από την ανάλυση είναι χαμηλότερες από τις αποδεκτές, θα πρέπει να αλλάξει ο σχεδιασμός πριν τη μελέτη του μηχανισμού ανύψωσης. Συνεπώς, γίνεται η επιλογή 'Frequency' στο λογισμικό 'SOLIDWORKS' και ορίζεται το μοντέλο όμοια με τη στατική ανάλυση που προηγήθηκε.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες. Οι πρώτες ιδιοσυχνότητες που προέκυψαν είναι κατά αύξουσα σειρά: 10.7Hz, 11.3Hz, 13.3Hz, 22.4Hz, 23.2Hz

Στατική και ιδιοδυναμική ανάλυση χωροδικτύωματος πρωτότυπου εκτυπωτή τριδιάστατης εκτύπωσης κτιρίων σε περιβάλλον CAD/CAE - Καϊσαρλής Ιωάννης 2023



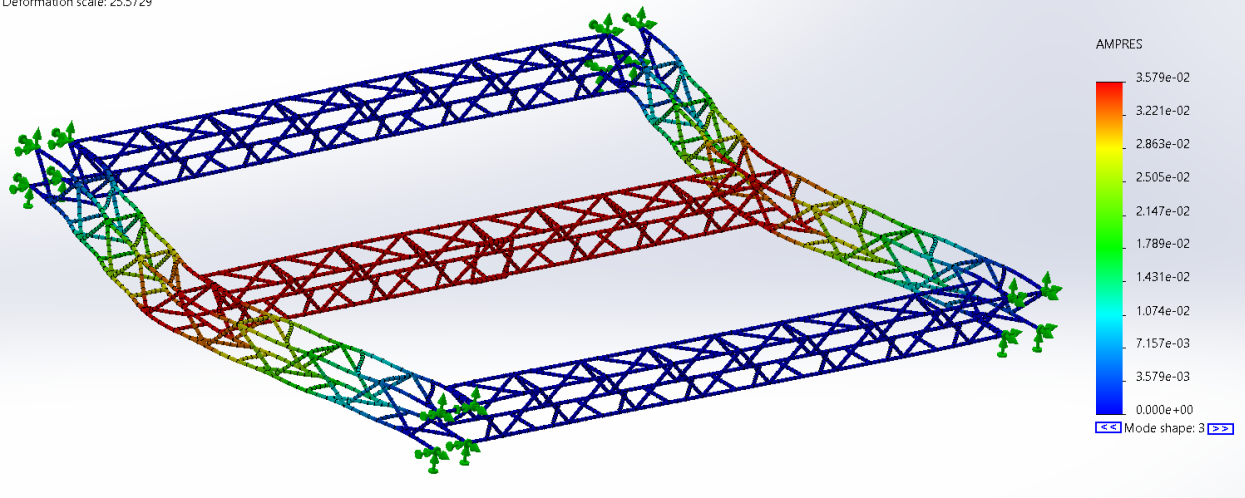
Εικόνα 59 Η πρώτη ιδιοσυχνότητα του πλαισίου XY και της γέφυρας, σε φορτίο 200kg είναι 10.7 Hz



Εικόνα 60 Η δεύτερη ιδιοσυχνότητα του πλαισίου XY και της γέφυρας, σε φορτίο 200kg είναι 11.3 Hz

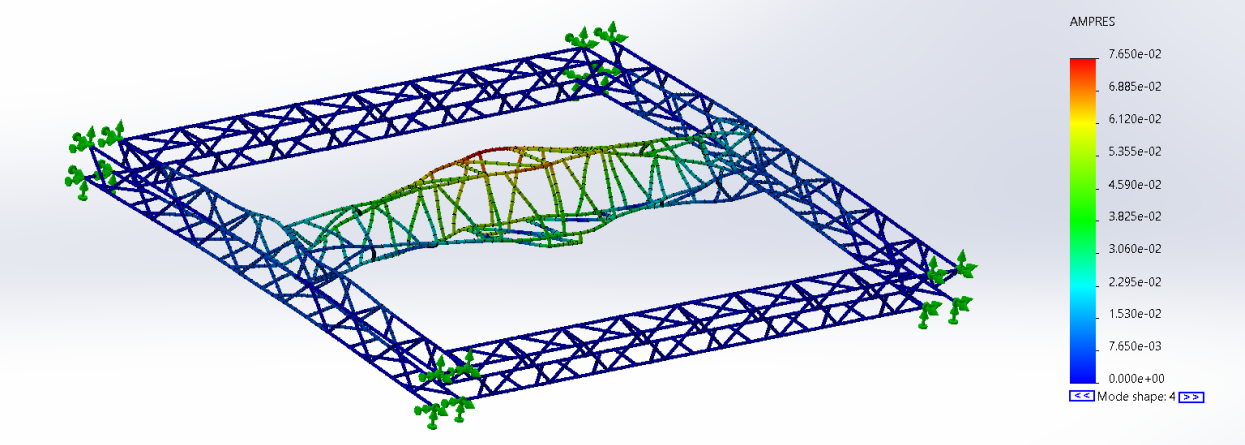
# Στατική και ιδιοδιανυσματική ανάλυση χωροδικτύωματος πρωτότυπου εκτυπωτή τρισδιάστατης εκτύπωσης κτιρίων σε περιβάλλον CAD/CAE - Καϊσαρλής Ιωάννης 2023

Model name: XY  
Study name: Modal Frame with Bridge(-Default-)  
Plot type: Frequency Amplitude3  
Mode Shape : 3 Value = 13.307 Hz  
Deformation scale: 25.5729



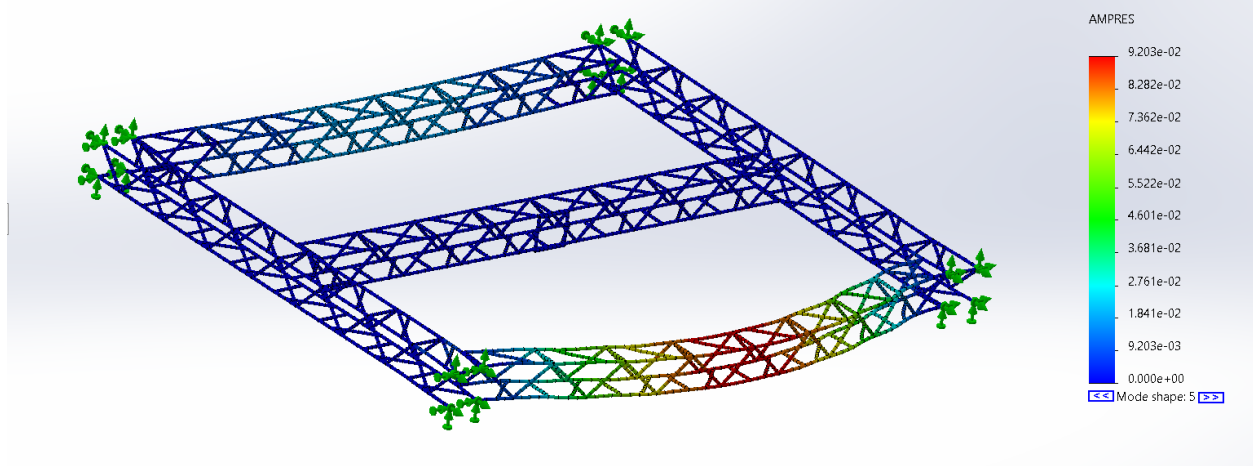
Εικόνα 61 Η τρίτη ιδιοσυχνότητα του πλαισίου XY και της γέφυρας, σε φορτίο 200kg είναι 13.3 Hz

Model name: XY  
Study name: Modal Frame with Bridge(-Default-)  
Plot type: Frequency Amplitude4  
Mode Shape : 4 Value = 22.389 Hz  
Deformation scale: 15.9685



Εικόνα 62 Η τέταρτη ιδιοσυχνότητα του πλαισίου XY και της γέφυρας, σε φορτίο 200kg είναι 22.4 Hz

Model name: XY  
Study name: Modal Frame with Bridge(-Default-)  
Plot type: Frequency Amplitude5  
Mode Shape : 5 Value = 23.205 Hz  
Deformation scale: 9.94375



Εικόνα 63 Η πέμπτη ιδιοσυχνότητα του πλαισίου XY και της γέφυρας, σε φορτίο 200kg είναι 23.2 Hz

Είναι γνωστό, πως η συχνότητα που παρουσιάζουν οι σεισμοί συνήθως είναι κάτω των 2 Hz. Συγκρίνοντας την τιμή αυτή με τη χαμηλότερη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής, παρατηρείται πως η δεύτερη είναι πολύ υψηλότερη. Συνεπώς, δεν ενδέχεται να προκληθούν προβλήματα λόγω συντονισμού και μπορεί να συνεχιστεί ο σχεδιασμός της κατασκευής με την επιλογή κατάλληλου μηχανισμού ανύψωσης.

## 4. Επιλογή λύσης ανύψωσης

### 4.1 Ανύψωση με τη χρήση ψαλιδωτού μηχανισμού

Με τη χρήση τεσσάρων ψαλιδωτών πυλώνων οι οποίοι θα επιτελούν την ανύψωση του δικτύωματος, θα επιτυγχάνεται η σταθερή και συγχρονισμένη ανύψωση. Αρχικά θα διαστασιοποιηθούν τα στοιχεία του ψαλιδωτού μηχανισμού ώστε να αντέχουν τα απαραίτητα φορτία, ενώ στη συνέχεια θα γίνει η ανάλυση των μετατοπίσεων που θα δέχεται ο μηχανισμός.

#### 4.1.1 Σχεδιασμός ψαλιδωτού μηχανισμού

Αφετηρία του σχεδιασμού, αποτελεί η αναζήτηση και η μελέτη υπάρχοντων ψαλιδωτών μηχανισμών του εμπορίου. Εύκολα παρατηρεί κανείς ότι οι μηχανισμοί αυτοί συναντώνται σε δύο ειδών εφαρμογές στο εμπόριο:

- Σε μικρούς ανυψωτικούς μηχανισμούς βαρέων αντικειμένων (πχ αυτοκινήτων)



Εικόνα 64 Ψαλιδωτός μηχανισμός ανύψωσης αυτοκινήτων

- Σε μεγάλους ανυψωτικούς μηχανισμούς οι οποίοι προορίζονται για την ανύψωση προσωπικού



Εικόνα 65 Ψαλιδωτός μηχανισμός ανύψωσης προσωπικού

Ωστόσο, μέσα από την έρευνα που έγινε, δεν βρέθηκε κάποιο προϊόν που να συνδυάζει και τα δύο: Μεγάλη ανύψωση και υψηλό όριο βάρους, τα οποία απαιτούνται στην κατασκευή του εκτυπωτή.

Για την κίνηση του ψαλιδωτού μηχανισμού, συνήθως χρησιμοποιούνται τρεις τρόποι:

- Υδραυλικά έμβολα



Εικόνα 66 Ψαλιδωτός μηχανισμός με χρήση υδραυλικών εμβόλων



- Κοχλίας



Εικόνα 67 Ψαλιδωτός μηχανισμός με χρήση μεταφορικού κοχλία

- Συρματόσχοινα

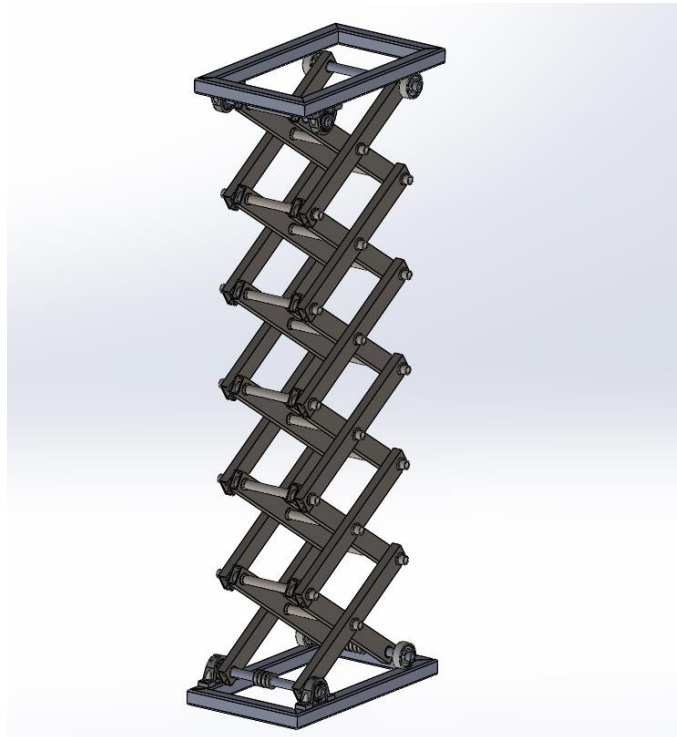


Εικόνα 68 Ψαλιδωτός μηχανισμός με χρήση συρματόσχοινων

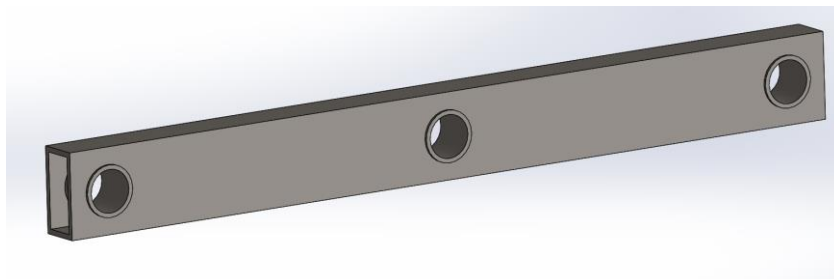
Τα υδραυλικά έμβολα απαιτούν αντλία για να λειτουργήσουν, και δεν παρέχουν μεγάλη ακρίβεια στην κίνηση. Επομένως, αποκλείονται και η επιλογή της κίνησης θα γίνει μεταξύ του κοχλία και των συρματόσχοινων.

Στο σημείο αυτό θα σχεδιαστεί ένα μοντέλο ψαλιδωτού μηχανισμού, για να διαπιστωθεί αν μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις της κατασκευής. Το μοντέλο θα αποτελείται από δοκούς ορθογωνικής διατομής, και δύο πλαίσια. Στα πλαίσια, θα αρθρώνεται η μία πλευρά του ψαλιδωτού μηχανισμού με τη χρήση κουζινέτων, ενώ η άλλη πλευρά θα κυλιέται ελεύθερη με τη χρήση ροδών από τεφλόν, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Για την ανύψωση του μηχανισμού, θα χρησιμοποιηθεί συρματόσχοινο, το οποίο θα οδηγείται στις τροχαλίες που βρίσκονται στον άξονα της βάσης του μηχανισμού, και θα καταλήγει σε ένα τύμπανο όπου θα τυλίγεται με τη χρήση ηλεκτροκινητήρα Stepper, για να επιτυγχάνεται έλεγχος θέσης.

Στόχος του ψαλιδωτού μηχανισμού είναι να μπορεί να αυξομειώνει το ύψος του κατά τουλάχιστον 3 μέτρα (ώστε να πληροί τις προδιαγραφές), και να καταλαμβάνει τον, ελάχιστο δυνατό χώρο, ώστε να είναι πρακτικός στην μεταφορά και την εγκατάσταση.



Εικόνα 69 Παράδειγμα ψαλιδωτού μηχανισμού για χρήση στον εκτυπωτή



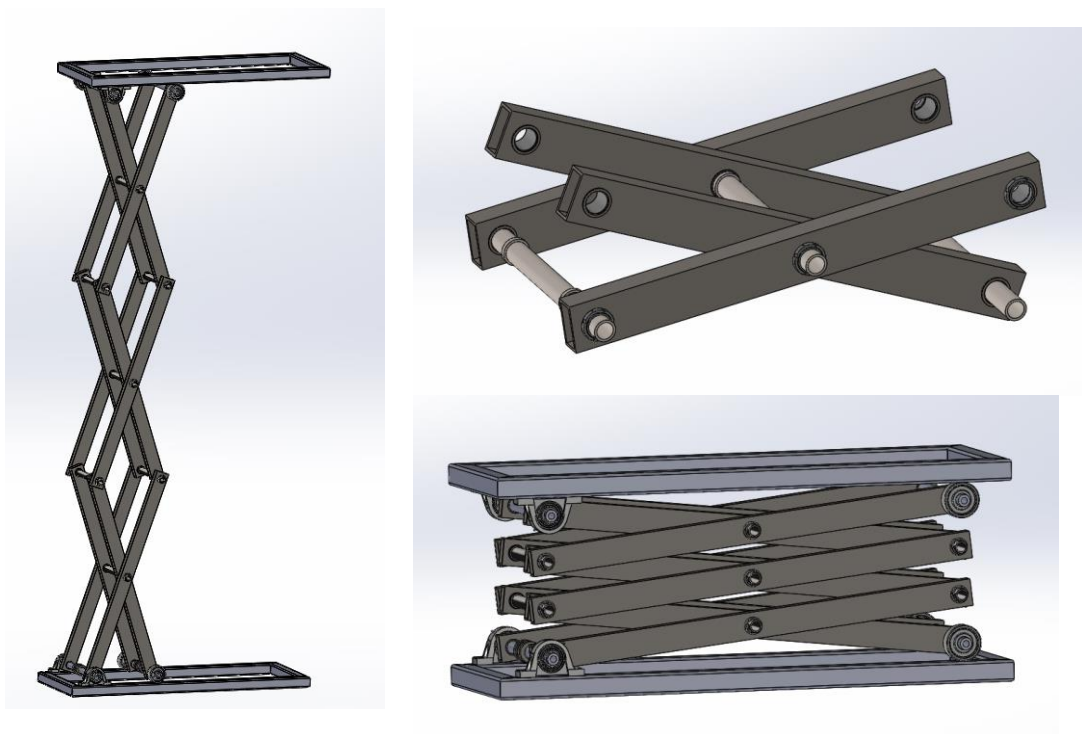
Εικόνα 70 Μέλος ψαλιδωτού μηχανισμού

	Thickness (mm)							
	2	2.5	3	3.2	3.6	4	5	6
Size (mm)	Kgs/m							
40 x 20	1.68	2.18	2.55					
50 x 25	2.21	2.72	3.25					
50 x 30	2.37	2.92	3.45			4.46		
60 x 40		3.71	4.39			5.72	6.97	8.25
80 x 40		4.26	5.34			6.97	8.54	10.50
80 x 50			5.82				9.38	
90 x 50			6.28				10.10	12.00
100 x 50		5.63	6.75	7.18		8.86	10.90	12.90

Εικόνα 71 Απόσπασμα καταλόγου προφίλ της εταιρίας RFL Steels Ltd.

Για τη δημιουργία αυτού του ψαλιδωτού μηχανισμού, χρησιμοποιήθηκαν ορθογωνικά προφίλ διατομής: 100 mm x 50 mm x 6 mm, τα οποία βρίσκονται στους καταλόγους του εμπορίου. Το μήκος των μελών αυτών είναι 1.7m και είναι χαλύβδινα. Ο μηχανισμός αποτελείται από 3 στάδια, και μπορεί να μεταβάλλει το ύψος του από 0.7m έως 4.7 m. Κατά συνέπεια, η διαδρομή που μπορεί να επιτύχει κατά τον κατακόρυφο άξονα είναι 4 m.

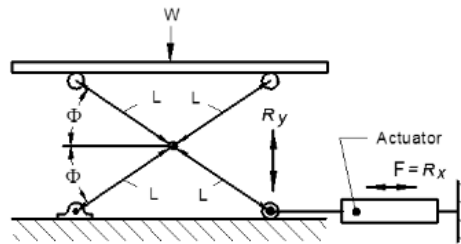
Η διαστασιολόγηση αυτή έγινε στα όρια των προδιαγραφών, ώστε αν αποδειχθεί ότι ο μηχανισμός αυτός δεν επαρκεί, να απορριφθεί η χρήση του ψαλιδωτού μηχανισμού ως λύση για την ανύψωση. Συγκεκριμένα, όπως θα αποδειχθεί παρακάτω, όσο λιγότερα στάδια περιλαμβάνει ένας ψαλιδωτός μηχανισμός, τόσο λιγότερη οριζόντια δύναμη απαιτείται να ασκηθεί στην βάση του για να πραγματοποιηθεί η ανύψωση του επιθυμητού βάρους. Επομένως, τα πλαίσια που επιλέχθηκαν στο πάνω και κάτω μέρος του μηχανισμού έχουν μήκος 2 m, όσο το όριο μήκους κάθε κομματιού του εκτυπωτή στις προδιαγραφές, ώστε να απαιτηθούν τα λιγότερα δυνατά στάδια. Επίσης, η γωνία που λαμβάνει ο μηχανισμός για να φτάσει το μέγιστο ύψος είναι πολύ μεγάλη, κάνοντας έτσι το σύστημα πολύ ευάλωτο σε οριζόντια φορτία. Ωστόσο, προτεραιότητα έχει προς το παρόν η επιλογή των λιγότερων δυνατών σταδίων, οπότε δεν ερευνάται ακόμη η συμπεριφορά σε οριζόντια φορτία. Τέλος, οι επιλογές που έγιναν στην διατομή των δοκών, έχουν σκοπό να προσεγγίσουν ένα ρεαλιστικό σενάριο, χωρίς υπερβολές στις διαστάσεις.



Εικόνα 72 Ψαλιδωτός μηχανισμός με τρία στάδια για χρήση στον εκτυπωτή

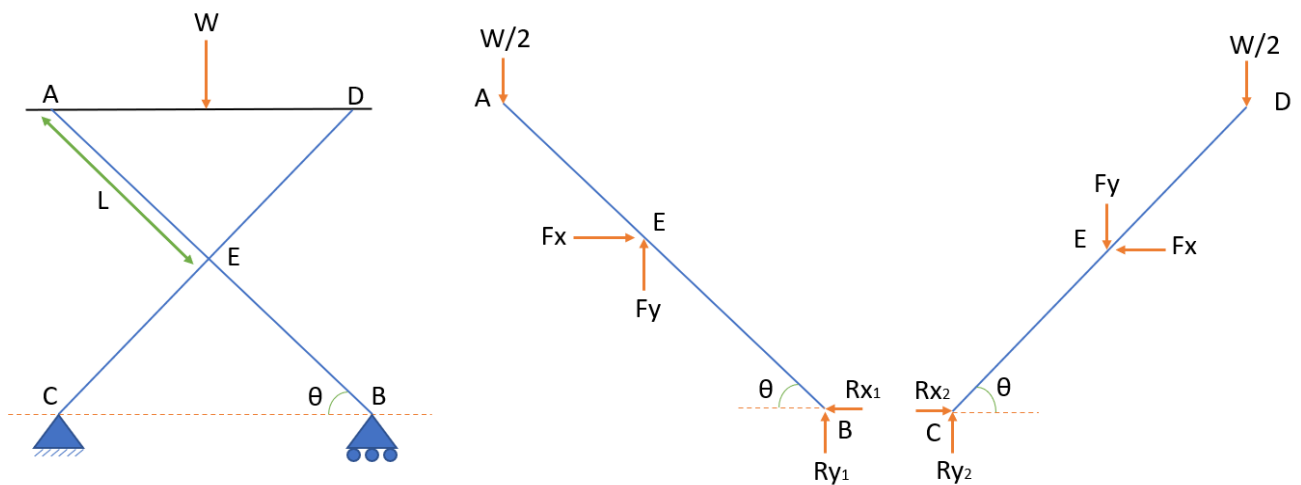
Η επιλογή του τρόπου πρόσδοσης της κίνησης δεν θα πραγματοποιηθεί ακόμη, αλλά θα προηγηθούν υπολογισμοί για την τιμή της δύναμης που απαιτείται από τον μηχανισμό κίνησης.

### 4.1.2 Περίπτωση ενός σταδίου



Εικόνα 73 Σχήμα ψαλιδωτού μηχανισμού ενός σταδίου

Παραδοχή για την παρακάτω μελέτη: Αβαρείς και άκαμπτες δοκοί, χωρίς τριβές



Εικόνα 74 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος ψαλιδωτού μηχανισμού ενός σταδίου

- A.  $\Sigma M_B = 0 = \frac{W}{2} * 2L * \cos(\theta) - F_y * L * \cos(\theta) - F_x * L * \sin(\theta)$
- B.  $\Sigma F_x = 0 = F_x - R_{x1}$
- C.  $\Sigma F_y = 0 = -\frac{W}{2} + F_y + R_{y1}$
- D.  $\Sigma M_A = 0 = -\frac{W}{2} * 2L * \cos(\theta) - F_y * L * \cos(\theta) + F_x * L * \sin(\theta)$
- E.  $\Sigma F_x = 0 = -F_x + R_{x2}$
- F.  $\Sigma F_y = 0 = -\frac{W}{2} - F_y + R_{y2}$

6 εξισώσεις με 6 μεταβλητές

Η «Α» ως προς  $F_y$ :

$$F_y = -\frac{\frac{W}{2} * 2L * \cos(\theta)}{L * \cos(\theta)} + \frac{F_x * L * \sin(\theta)}{L * \cos(\theta)}$$

$$F_y = -W + F_x * \tan(\theta)$$

Η «D» ως προς  $F_x$ :

$$F_x = \frac{\frac{W}{2} * 2L * \cos(\theta)}{L * \sin(\theta)} - \frac{F_y * L * \cos(\theta)}{L * \sin(\theta)}$$

$$F_x = \frac{W}{\tan(\theta)} - \frac{F_y}{\tan(\theta)}$$

Συνδυάζοντας την A με την D:

$$F_x = \frac{W}{\tan(\theta)} - \left(-\frac{W}{\tan(\theta)} - F_x * \frac{\tan(\theta)}{\tan(\theta)}\right)$$

$$F_x = \frac{2W}{\tan(\theta)} + F_x = \frac{W}{\tan(\theta)}$$

Αν  $R_{x1} = F_x$  και  $R_{x2} = F_x$  Τότε:

$$F_x = R_{x1} = R_{x2} = \frac{W}{\tan(\theta)}$$

$$(A) -W + F_x * \tan(\theta) = F_y$$

$$(D) \frac{W}{\tan(\theta)} - \frac{F_y}{\tan(\theta)} = F_x$$

$$F_y = -W + \left(\frac{W}{\tan(\theta)} - \frac{F_y}{\tan(\theta)}\right) * \tan(\theta)$$

$$F_y = 0$$

Για τον υπολογισμό των κατακόρυφων αντιδράσεων:

$$(F) 0 = -\frac{W}{2} - F_y + R_{y2}$$

$$\frac{W}{2} = R_{y2}$$

$$(C) 0 = -\frac{W}{2} + F_y + R_{y1}$$

$$\frac{W}{2} = R_{y1}$$

Συνοψίζοντας:

$$R_{x1} = R_{x2} = \frac{W}{\tan(\theta)} \quad R_{y1} = R_{y2} = \frac{W}{2} \quad F_x = \frac{W}{\tan(\theta)} \quad F_y = 0$$

Η μάζα του πλαισίου με τη γέφυρα και την κεφαλή υπολογίστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, και είναι  $m = 1600 \text{ kg}$ . Επίσης, η επιτάχυνση της βαρύτητας είναι:  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  (Για τους παρακάτω υπολογισμούς θα θεωρηθεί  $g=10 \text{ m/s}^2$ ). Κανονικά, όταν η κεφαλή βρίσκεται ακίνητη στη μέση της διαδρομής, όλοι οι πυλώνες δέχονται ίση κατακόρυφη δύναμη:  $W = 4 \text{ KN}$ . Όμως, επειδή η γέφυρα μετακινείται κι επειδή δεν θα ληφθούν για τους παρακάτω υπολογισμούς υπόψη οι μάζες των δοκών, για να υπάρχει ένας συντελεστής ασφαλείας (σχεδόν 4), θα απαιτηθεί καθένας από τους πυλώνες να είναι σε θέση να ανυψώσει:  $W' = 16 \text{ KN}$ . Επειδή ο κάθε πυλώνας αποτελείται από 2 παράλληλους μηχανισμούς (Για να υπάρχει συμμετρία και να εξαλείφονται οι ροπές), θα μοιράζεται το φορτίο, επομένως:  $W'' = 8 \text{ KN}$ . Στην κλειστή θέση, όπως θα φανεί παρακάτω, οι δοκοί των σταδίων του μηχανισμού έχουν γωνία  $\theta = 5$  μοιρών.

Εισάγοντας τις μεταβλητές στις εξισώσεις προκύπτουν οι αντιδράσεις στήριξης:

$$R_x = 91.44 \text{ KN} \quad R_y = 4 \text{ KN}$$

Στην πλήρη έκτασή, έχουν γωνία  $\theta = 60$  μοιρών

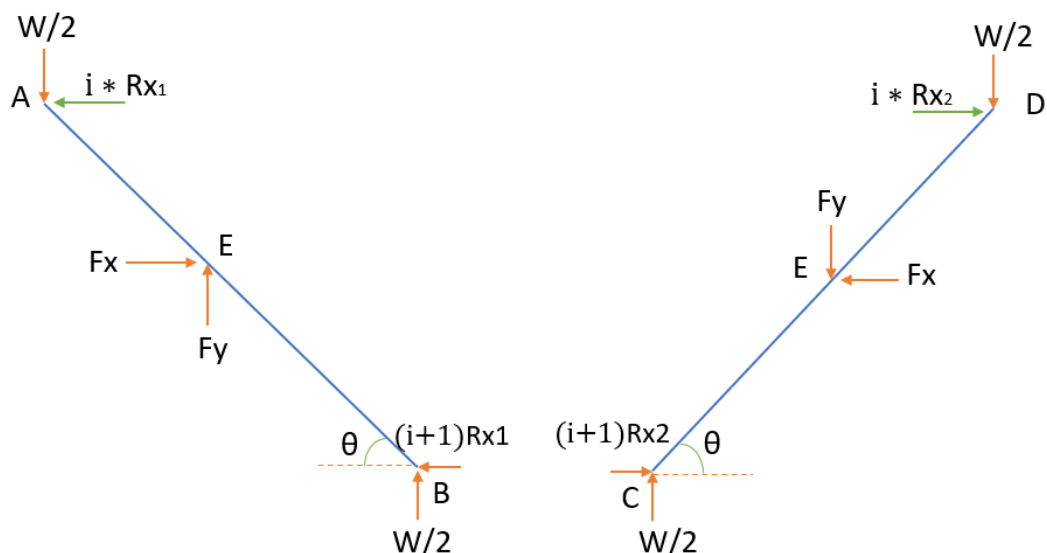
Αντίστοιχα προκύπτουν:

$$R_x = 13.86 \text{ KN} \quad R_y = 4 \text{ KN}$$

Όπως είναι αναμενόμενο, η περισσότερη δύναμη απαιτείται όταν η πλατφόρμα βρίσκεται στο κατώτερο σημείο της κίνησής της (μικρότερη γωνία  $\theta$ ).

### 4.1.3 Περίπτωση τριών σταδίων

Ο μηχανισμός όμως, όπως αναφέρθηκε, αποτελείται από 3 στάδια για να μπορεί να αποκτήσει το απαιτούμενο ύψος. Με βάση τα προηγούμενα, θέτοντας 'i' το κάθε στάδιο, ξεκινώντας από το ανώτερο ( $i = 0$ ), το σχήμα για κάθε στάδιο γενικεύεται:



Εικόνα 75 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος 'i' σταδίου ψαλιδωτού μηχανισμού

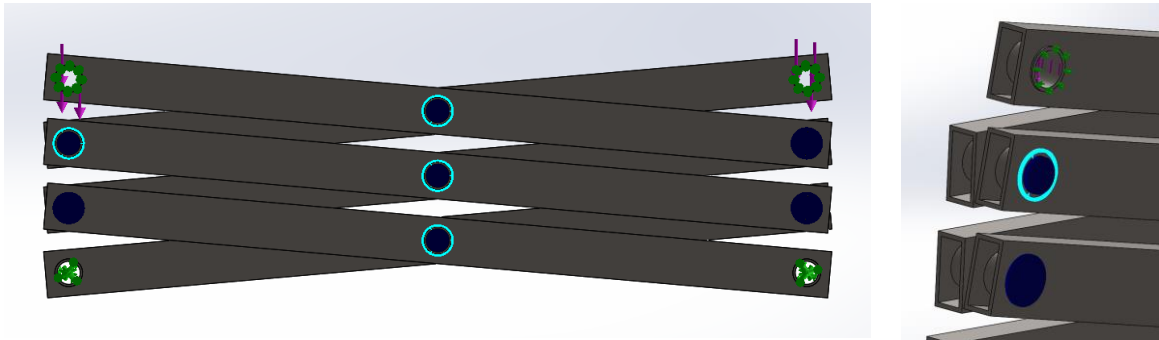
Προστίθενται δηλαδή, στην οριζόντια αντίδραση στήριξης η οριζόντια συνιστώσα του σταδίου που βρίσκεται από πάνω κάθε φορά. Επομένως, στην περίπτωση των τριών σταδίων, η δύναμη που θα ασκείται στην βάση θα είναι:

$$R_x' = (i + 1) * R_x = 3 * R_x = 3 * 91.44 = 274.3 \text{ KN} \quad (i = 3)$$

Η δύναμη  $R_x$  που απαιτείται είναι πολύ υψηλή. Θα πραγματοποιηθεί στατική ανάλυση στο κατώτερο στάδιο ενός πυλώνα, για να μετρηθούν οι τάσεις που αναπτύσσονται και να διαπιστωθεί αν θα αστοχήσει.

#### 4.1.4 Στατική ανάλυση ψαλιδωτού μηχανισμού:

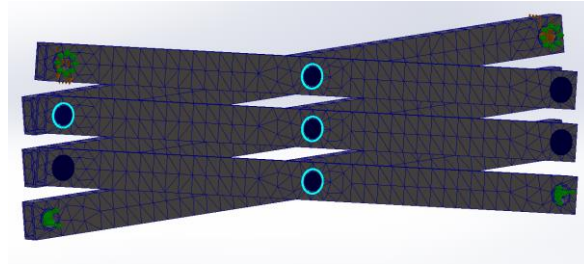
Η γωνία όπου έρχονται σε επαφή οι πλευρές των δοκών είναι  $\theta = 3.7$  μοίρες. Όμως, δεν θα ληφθεί αυτή ως κατώτερη θέση, για να υπολογιστούν σωστά οι αντιδράσεις στήριξης. Για να γίνει αυτό, χρειάζεται στην κατώτερη θέση να μην έρχονται σε επαφή οι πλευρές του μηχανισμού, παρά τις παραμορφώσεις που λαμβάνει. Θα δοκιμαστεί αρχικά ως κατώτερη θέση η:  $\theta = 5$  μοίρες. Είναι φανερό, πως κάθε πυλώνας αποτελείται από δύο παράλληλους ψαλιδωτούς μηχανισμούς. Από το συνολικό συναρμολόγημα, θα ληφθεί ένας από τους δύο αυτούς μηχανισμούς, και θεωρώντας το ήμισυ του φορτίου (αφού ισομοιράζεται), θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση.



Εικόνα 76 Μοντελοποίηση ψαλιδωτού μηχανισμού τριών σταδίων

Επιλογές που έγιναν στην μοντελοποίηση:

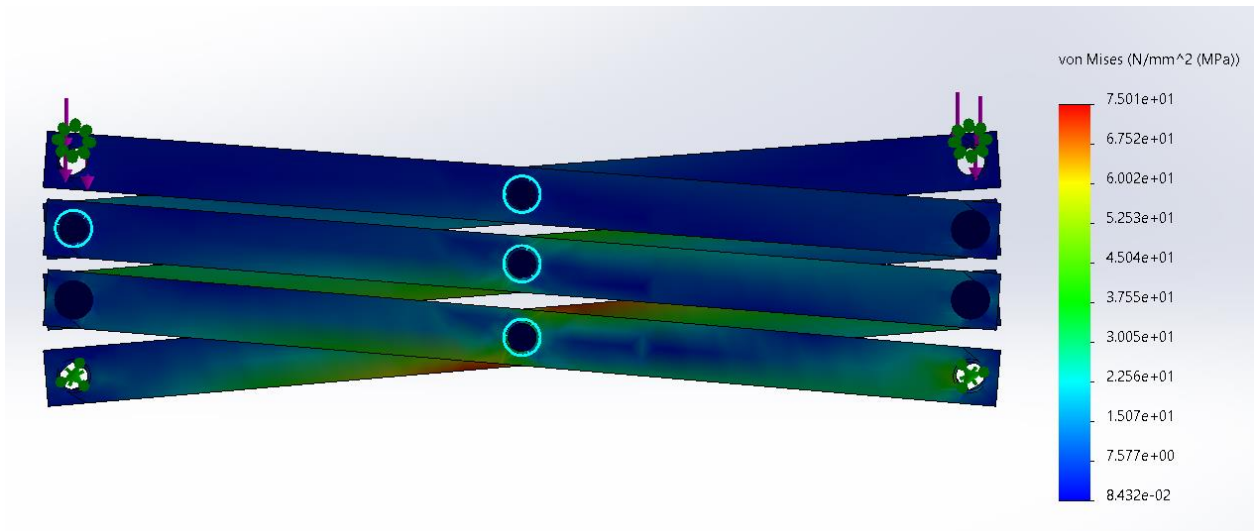
- Διατομή μελών: 100 mm x 50 mm x 6 mm
- Ως υλικό επιλέχθηκε χάλυβας 1023
- Δεν ορίστηκε ακόμη πεδίο βαρύτητας, γιατί σκοπός των πρώτων αναλύσεων είναι να επιβεβαιωθούν εξισώσεις που παρατέθηκαν παραπάνω, στους οποίους έγινε η παραδοχή αβαρών μελών.
- Επιλέχθηκαν πείροι οι οποίοι θα αποτρέπουν την αξονική μετατόπιση, και δεν θα μεταφέρουν ροπή
- Επιλέχθηκαν σταθερές αρθρώσεις στη βάση του μηχανισμού
- Για τα ανώτερα ελεύθερα άκρα, επιλέχθηκε μετατόπιση μόνο κατακόρυφα, για να αποτραπεί τυχόν αστάθεια του μοντέλου (στον πραγματικό μηχανισμό η ισορροπία θα παρέχονταν από τον συμμετρικό όμοιο μηχανισμό)
- Έγινε η επιλογή τα διαφορετικά αντικείμενα να μην μπορούν να εισχωρήσουν το ένα στο άλλο (Component contact: No penetration)
- Παράχθηκε πλέγμα, το οποίο ήταν ικανοποιητικά πυκνό, ώστε οι αποκλίσεις από την πραγματικότητα να είναι μικρές



Εικόνα 77 Δημιουργία πλέγματος στο μοντέλο

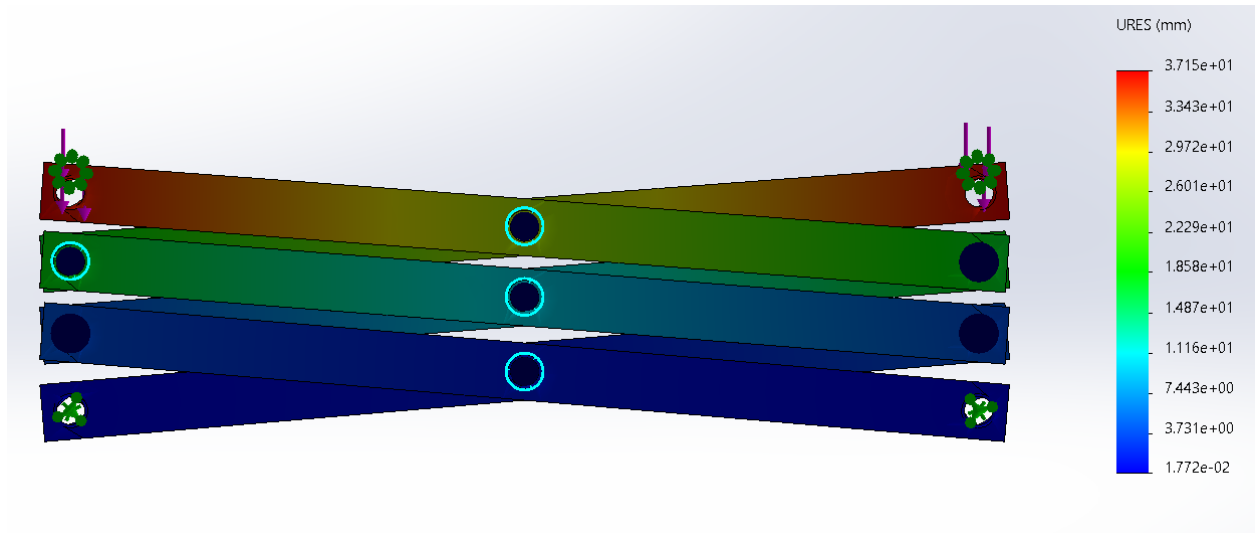
Πριν γίνει η ανάλυση για το πλήρες φορτίο, θα λάβει χώρα μια δοκιμαστική ανάλυση για να διαπιστωθεί αν οι μαθηματικές σχέσεις που αναπτυχθήκαν παραπάνω βρίσκονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της. Η διαπίστωση θα γίνει μετρώντας τις αντιδράσεις στήριξης, και συγκρίνοντάς τες με αυτές που προέκυψαν από τις εξισώσεις. Για το τεστ αυτό, δεν θα επιλεγεί βαρυτικό πεδίο, αφού στις σχέσεις έγινε η παραδοχή αβαρών μελών. Ως δοκιμαστικό φορτίο επιλέγεται 1 KN, ισομοιρασμένο στις δύο ανώτερες οπές.

### Διεξαγωγή στατικής ανάλυσης

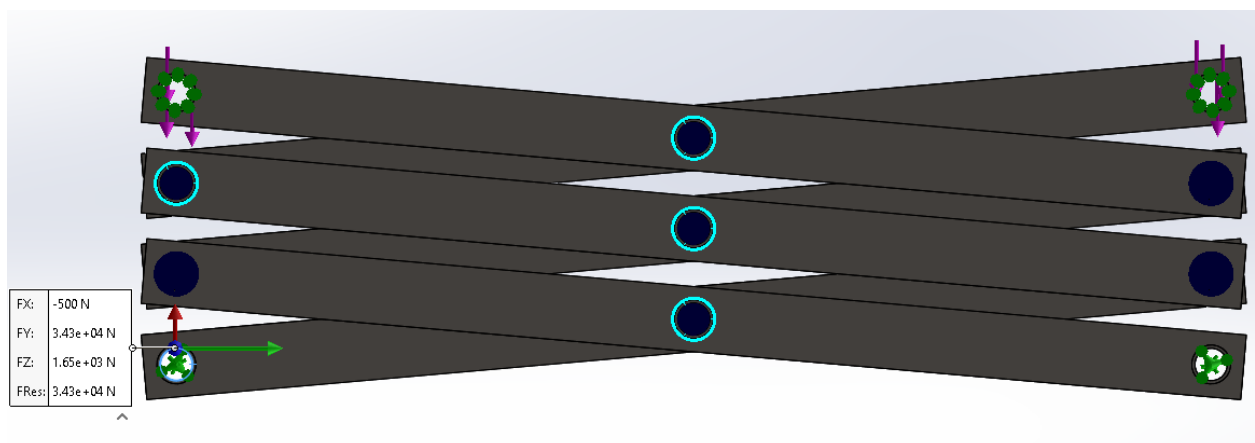


Εικόνα 78 Τάσεις που αναπτύσσονται στον ψαλιδωτό μηχανισμό





Εικόνα 79 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον ψαλιδωτό μηχανισμό



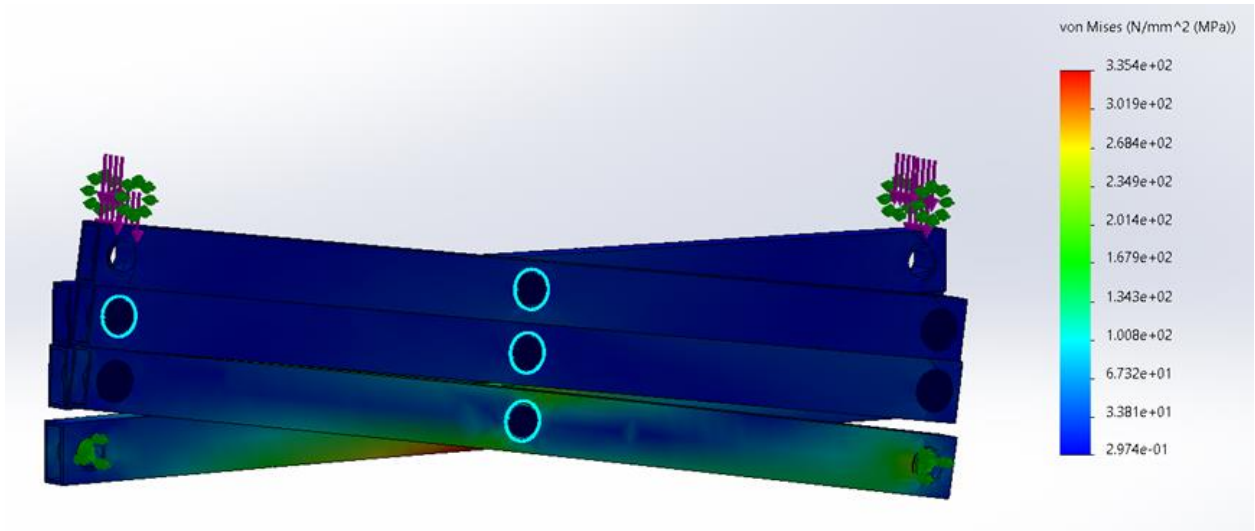
Εικόνα 80 Αντιδράσεις στήριξης που προκύπτουν από την ανάλυση

Επειδή στην ανάλυση ο y άξονας είναι οριζόντιος, εναλλάσσονται οι τιμές για να είναι ο x οριζόντιος, οπότε οι τιμές των δυνάμεων προκύπτουν:  $F_x = 34.3 \text{ KN}$   $F_y = 0.5 \text{ KN}$

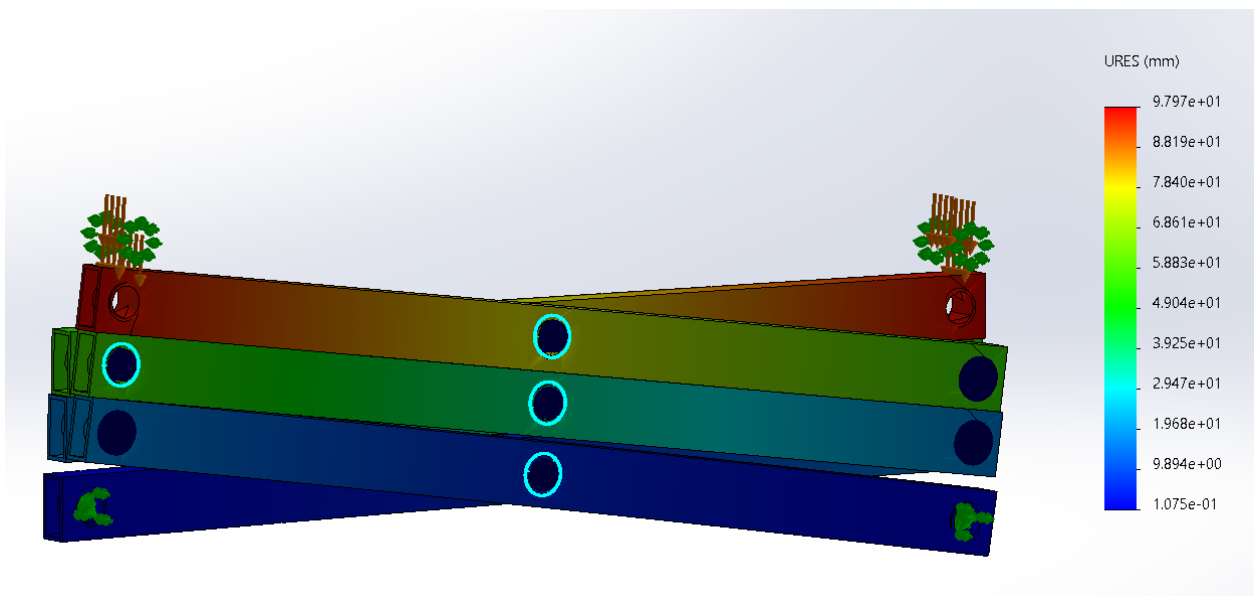
Εισάγοντας όμοια δεδομένα ( $W = 1 \text{ KN}$ ,  $\theta = 5$  μοίρες) στις εξισώσεις που αναπτύχθηκαν παραπάνω, είναι εμφανές πως για τον ανώτερο μηχανισμό θα ισχύει:  $R_x = 11.4 \text{ KN}$  και  $R_y = 0.5 \text{ KN}$ . Επειδή στο σύνολο του πυλώνα περιλαμβάνονται 3 ψαλιδωτοί μηχανισμοί, για τον κατώτερο μηχανισμό ισχύει:  $R_x' = 34.2 \text{ KN}$  και  $R_y' = 0.5 \text{ KN}$ . Αφού οι τιμές προέκυψαν σχεδόν ίδιες και με τους δύο τρόπους, η εγκυρότητα της μοντελοποίησης επαληθεύτηκε.

Χωρίς ακόμη να γίνει εισαγωγή του βαρυντικού πεδίου, θα γίνει έλεγχος αν η διατομή που επιλέχθηκε είναι κατάλληλη για την ανύψωση του φορτίου που έχει οριστεί παραπάνω:  $8 \text{ KN}$

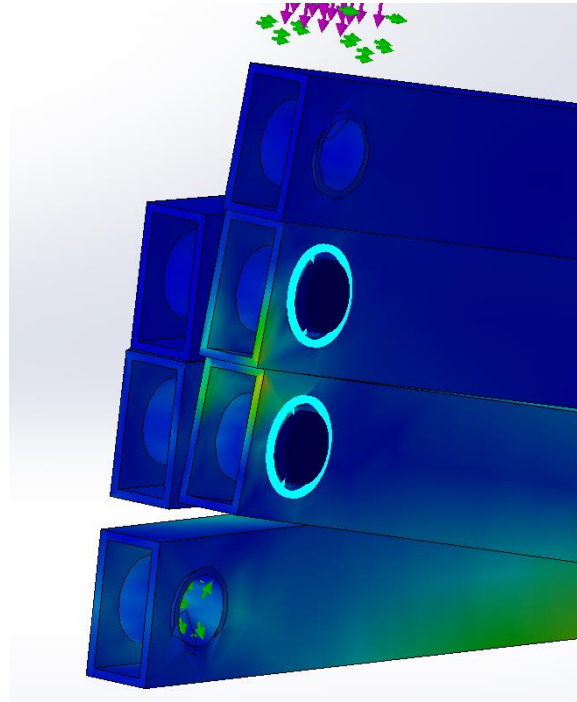
### Διεξαγωγή στατικής ανάλυσης



Εικόνα 81 Τάσεις που αναπτύσσονται στον ψαλιδωτό μηχανισμό



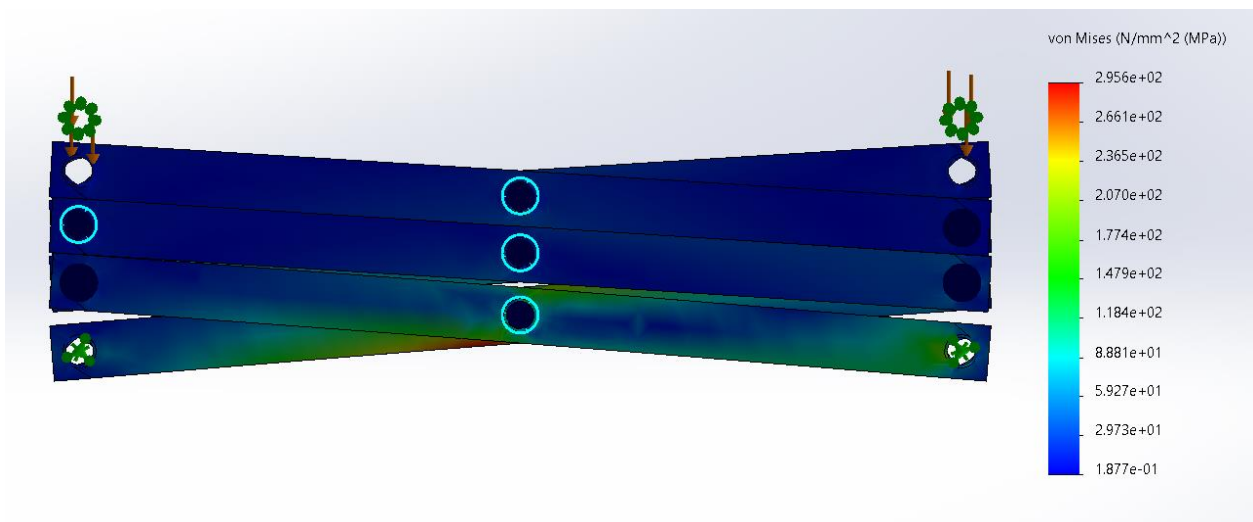
Εικόνα 82 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον ψαλιδωτό μηχανισμό



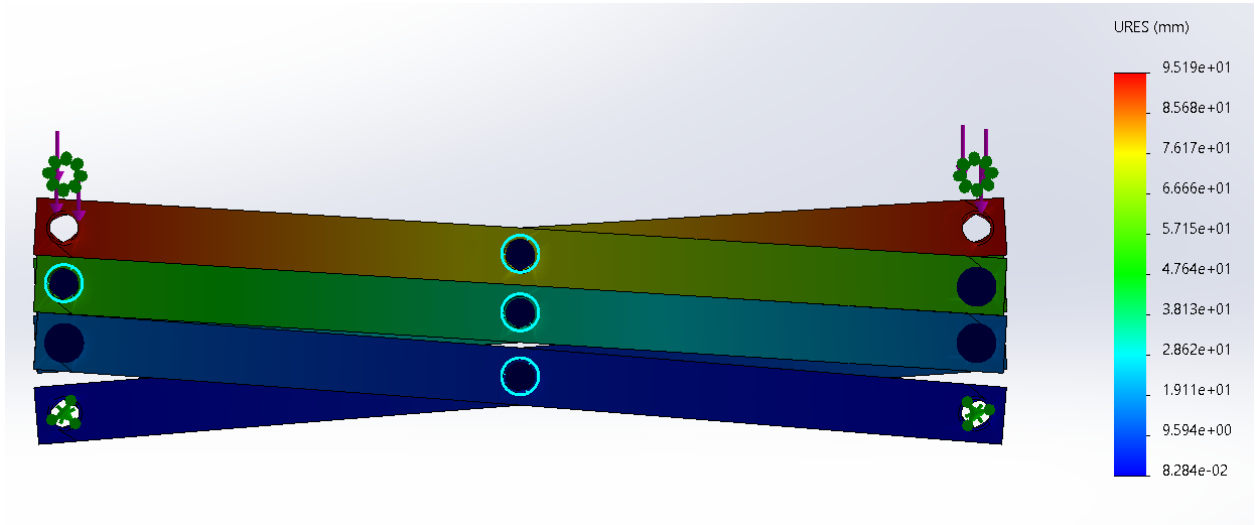
Εικόνα 83 Τάσεις που αναπτύσσονται - Τα στάδια βρίσκονται σε επαφή λόγω φόρτισης

Όπως φαίνεται οι πλευρές των μελών ήρθαν σε επαφή λόγω της παραμόρφωσης. Γίνεται επίσης αντιληπτό το γεγονός ότι η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται ( $335.4\text{MPa}$ ) υπερβαίνει το όριο πλαστικής παραμόρφωσης ( $282\text{MPa}$ ) και πλησιάζει το όριο διαρροής ( $425\text{MPa}$ ) του υλικού που επιλέχθηκε.

Επιλέγεται από τους πίνακες του εμπόριο, μεγαλύτερο πάχος διατομής ( $8\text{mm}$  αντί για  $6\text{mm}$ , δηλαδή η διατομή:  $100\text{mm} \times 50\text{mm} \times 8\text{mm}$ ) και επαναλαμβάνεται η ανάλυση:

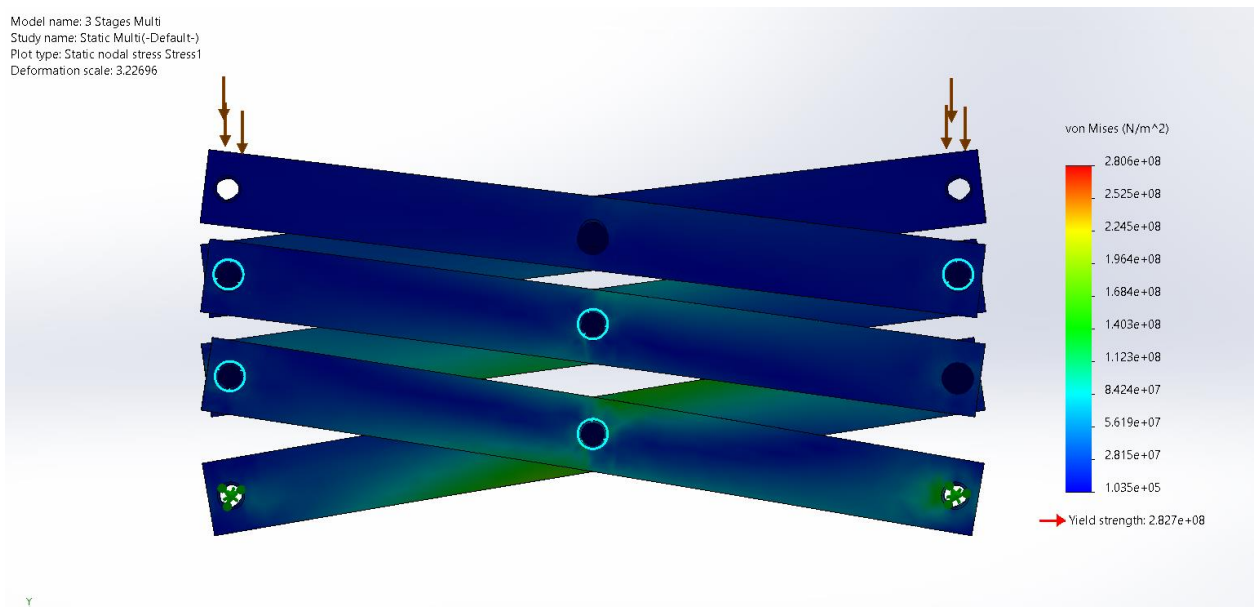


Εικόνα 84 Τάσεις που αναπτύσσονται - Τα στάδια βρίσκονται σε επαφή λόγω φόρτισης

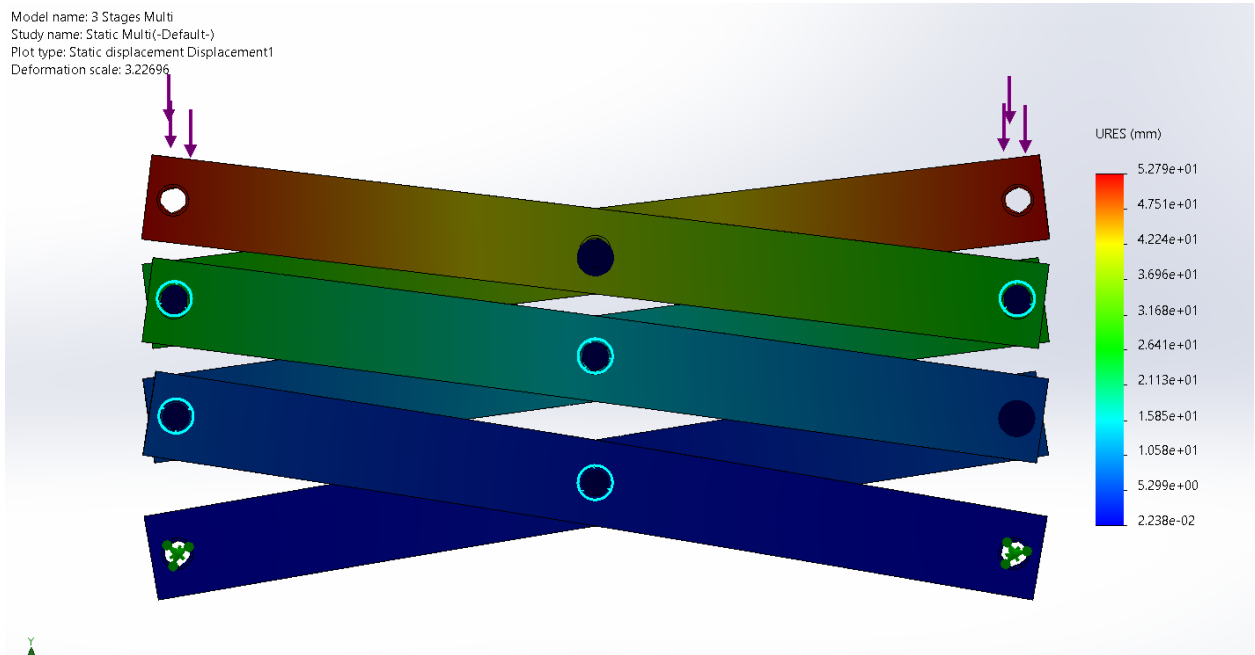


Εικόνα 85 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται - Τα στάδια βρίσκονται σε επαφή λόγω φόρτισης

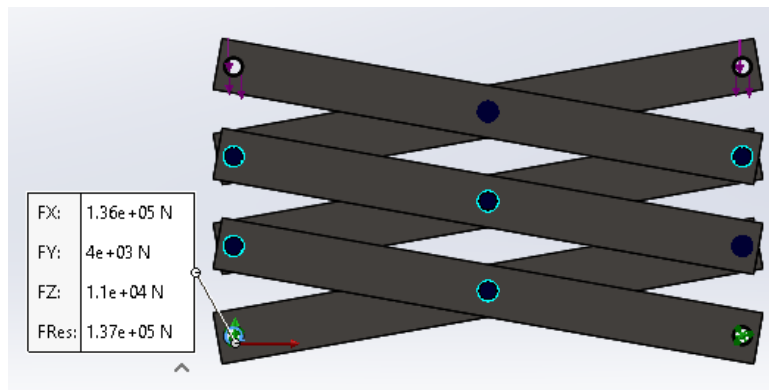
Και σε αυτή την περίπτωση υπερβαίνεται το όριο πλαστικής παραμόρφωσης ( $295.6\text{MPa} > 282\text{MPa}$ ). Φαίνεται λοιπόν, πως θα χρειαστεί μεγαλύτερη διατομή για να είναι εφικτή η ανύψωση του φορτίου. Επιλέγεται η διατομή  $160\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 6\text{ mm}$  κι επανεκτελείται η ανάλυση, με  $\theta = 10$  για την κατώτατη θέση (επειδή η  $\theta = 5$  δεν είναι αρκετή)



Εικόνα 86 Τάσεις που αναπτύσσονται στον μηχανισμό

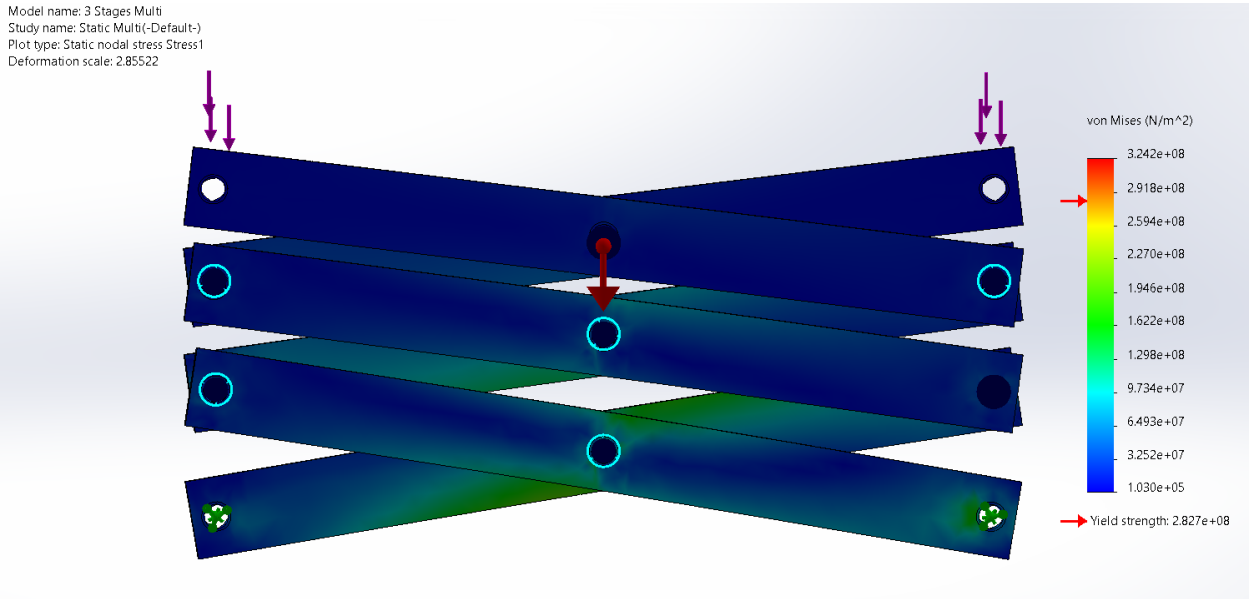


Εικόνα 87 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον μηχανισμό

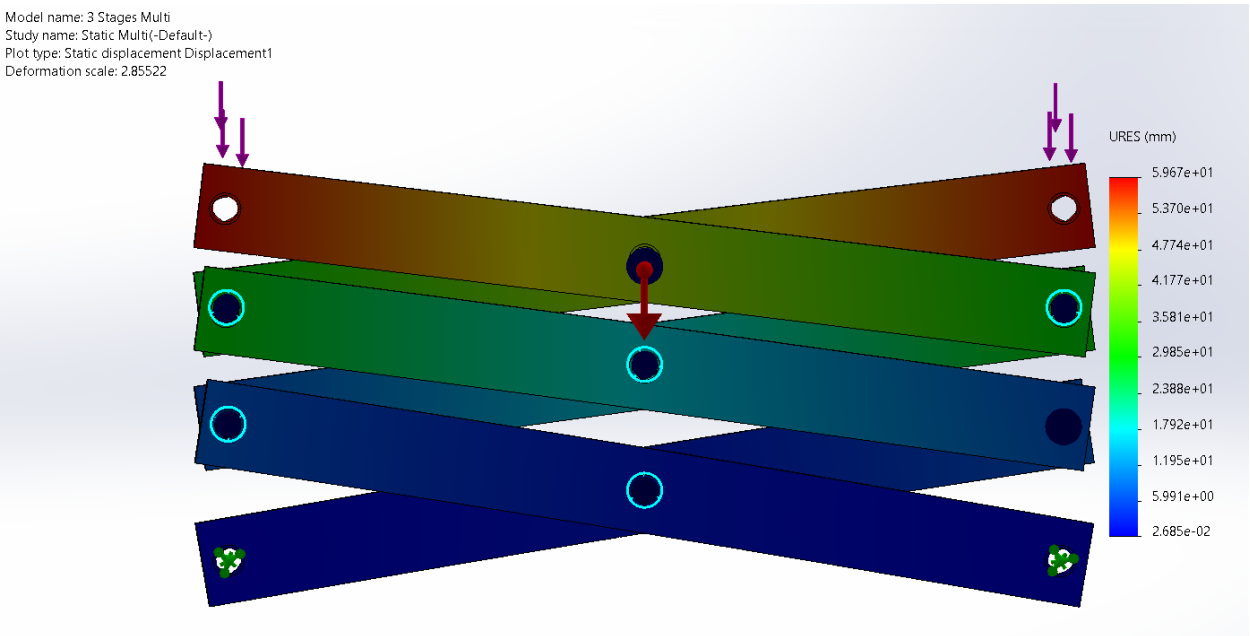


Εικόνα 88 Αντιδράσεις στήριξης που προκύπτουν από την ανάλυση

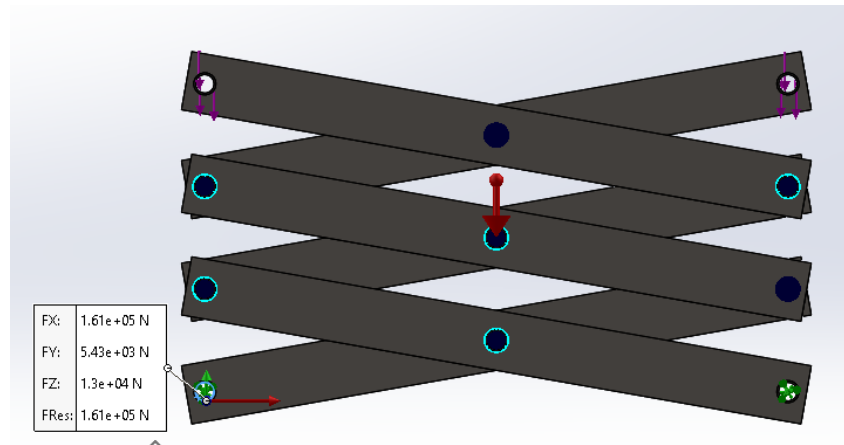
Οι τάσεις που αναπτύσσονται δεν ξεπερνούν το όριο διαρροής. Θα επαναληφθεί η ανάλυση μετά από την προσθήκη βαρυτικού πεδίου  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$



Εικόνα 89 Τάσεις που αναπτύσσονται στον μηχανισμό



Εικόνα 90 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον μηχανισμό



Εικόνα 91 Αντιδράσεις στήριξης που προκύπτουν από την ανάλυση

Στην περίπτωση αυτή το όριο διαρροής ξεπερνάται. Επίσης, η οριζόντια δύναμη που απαιτείται να ασκηθεί από τον επενεργητή για την ανύψωση, θα είναι τουλάχιστον:  $2F_x = 322 \text{ KN}$ . Η τιμή αυτή της δύναμης είναι εξαιρετικά υψηλή, για ένα σύστημα ηλεκτρικού επενεργητή φυσιολογικού μεγέθους. Επίσης, είναι φανερό και η μεγάλη παραμόρφωση (περίπου 60 mm), η οποία θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν ότι δεν θα είναι σταθερή κατά τη λειτουργία και τη θέση της γέφυρας, και θα πρέπει ο εκτυπωτής να κάνει τις απαραίτητες διορθώσεις για να αντισταθμίσει αυτή τη μετατόπιση.

Σύμφωνα με τον κατάλογο, το βάρος του τελευταίου προφίλ είναι: 21.3 kg/m. Ο μηχανισμός αποτελείται από 12 μέλη μήκους 1.7 m. Επομένως, μόνο το βάρος των μελών είναι: 434.5 kg. Επομένως για 4 όμοιους μηχανισμούς το βάρος είναι: 1738 kg.

Συνοψίζοντας, από την ανάλυση προκύπτουν οι παρατηρήσεις:

- Το βάρος του ανυψωτικού μηχανισμού είναι σχετικά υψηλό, άρα και το κόστος του αντίστοιχα.
- Για να λειτουργήσει απαιτείται πολύ μεγάλος επενεργητής (322 KN!).
- Η λύση αυτή απαιτεί πολύ επιπλέον χώρο, δυσκολεύοντας έτσι επιμέρους εργασίες.
- Η κατασκευή των πυλώνων είναι πολύπλοκη και χρονοβόρα.
- Η απόσταση της ανώτερης θέσης κάθε πυλώνα σε σχέση με τη θεωρητικά ανώτερη θέση (χωρίς κάμψη των δοκών), διαφέρει σημαντικά. Επομένως, θα πρέπει να υπολογίζεται πόση θα είναι αυτή η απόσταση σε κάθε σημείο της κεφαλής και να διορθώνεται η κίνηση των επενεργητών. Όμως, και να γινόταν αυτό, θα ήταν δύσκολο να προβλεφθεί η πραγματική θέση, καθώς αυτή περιλαμβάνει και απρόβλεπτους παράγοντες όπως: μετατοπίσεις από την κίνηση της μάζας της κεφαλής, ταλαντώσεις λόγω ανέμου, φορτία από τον αγωγό τροφοδοσίας της κεφαλής κ.λπ.

Για όλους τους λόγους που αναφέρθηκαν, ο μηχανισμός αυτός δεν μπορεί να επιλεγεί ως λύση.

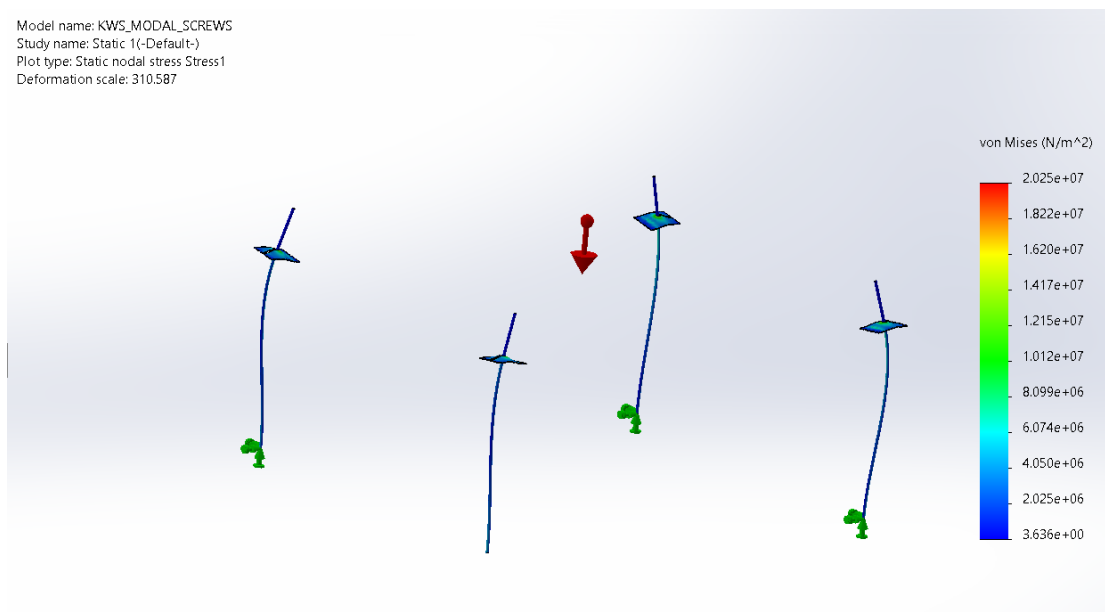
## 4.2 Ανύψωση με τη χρήση μεταφορικών κοχλιών

Οι μεταφορικοί κοχλίες αποτελούν την πιο συχνή λύση για την ανύψωση σε τρισδιάστατους εκτυπωτές και σε μηχανήματα CNC. Τα κύρια χαρακτηριστικά που τους καθιστούν άριστη επιλογή για την εφαρμογή αυτή είναι:

- Η υψηλή τους ακρίβεια στη μετατόπιση
- Το ελάχιστο backlash
- Το χαμηλό κόστος
- Η ευρύτατη διάθεσή τους στο εμπόριο
- Η χαμηλή απαίτηση σε ισχύ

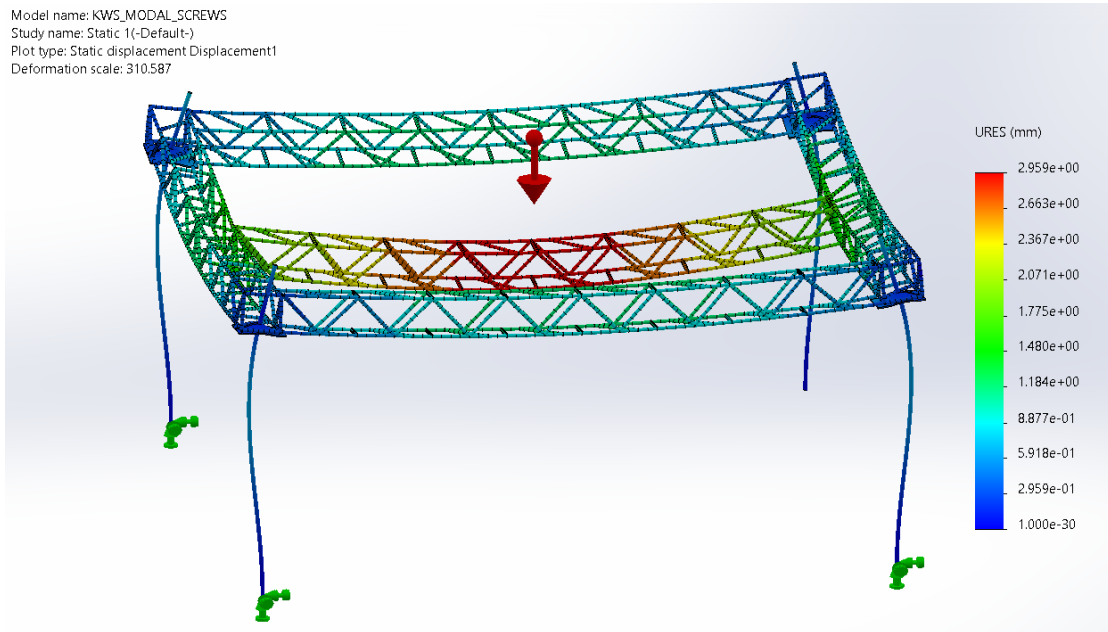
Οι κοχλίες, δεν υπόκεινται στον περιορισμό των 2 μέτρων που θέτουν οι προδιαγραφές, καθώς αυτή αφορά μόνο τα δομικά μέλη.

Οι κοχλίες που θα χρησιμοποιηθούν για την ανύψωση, θα αναζητηθούν στο εμπόριο. Εφόσον οι εταιρείες κατασκευής των κοχλίων παρέχουν αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των μηχανισμών, δεν απαιτείται να διεξαχθούν αναλύσεις για την εκτίμησή τους. Επίσης, είναι γνωστό πως οι μεταφορικοί κοχλίες είναι σχεδιασμένοι ώστε να παραλαμβάνουν μόνο αξονικά φορτία, οπότε απαιτείται κατά την τοποθέτησή τους και η εξασφάλιση οδήγησης. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση των ‘module’, των κύριων δομικών στοιχείων του εκτυπωτή. Η επιλογή αυτή αυξάνει την αρθρωτότητα (modularity) της κατασκευής, καθώς τα ‘modules’ μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε σημείο αυτής, με ελάχιστες τροποποιήσεις. Δημιουργείται επομένως, μια ‘οικογένεια σπονδυλωτών συνόλων’ [15], η οποία διευκολύνει την κατασκευή και μειώνει την απαίτηση σε ανταλλακτικά. Επομένως, ο εκτυπωτής θα αποτελείται από τέσσερις πυλώνες οι οποίοι θα οδηγούν το πλαίσιο που φέρει τη γέφυρα, ενώ η ανύψωσή του θα πραγματοποιείται με τη χρήση τεσσάρων μεταφορικών κοχλίων. Ο έλεγχος της λύσης αυτής στην πλήρη μορφή της, ως προς την επάρκειά της με τη χρήση αναλύσεων, θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο, αφού προηγηθεί η οριστικοποίηση των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν. Ωστόσο, με σκοπό την διεξαγωγή κάποιων πρώτων αποτελεσμάτων, κρίνεται αναγκαίο να πραγματοποιηθεί μια στατική ανάλυση στην περίπτωση του πλήρους φορτίου. Στην ανάλυση αυτή, δεν θα χρησιμοποιηθούν ακόμη οι οδηγίες, καθώς δεν θα ληφθούν υπόψη διατμητικά φορτία. Στην ανάλυση, το πλαίσιο τοποθετείται σε ύψος 3.5m, όσο το μέγιστο που υποδεικνύεται από τις προδιαγραφές. Ακόμη, οι κοχλίες που επιλέγονται έχουν διάμετρο 55 mm. Τα αποτελέσματα των τάσεων και των παραμορφώσεων που προκύπτουν, παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 92 Τάσεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή

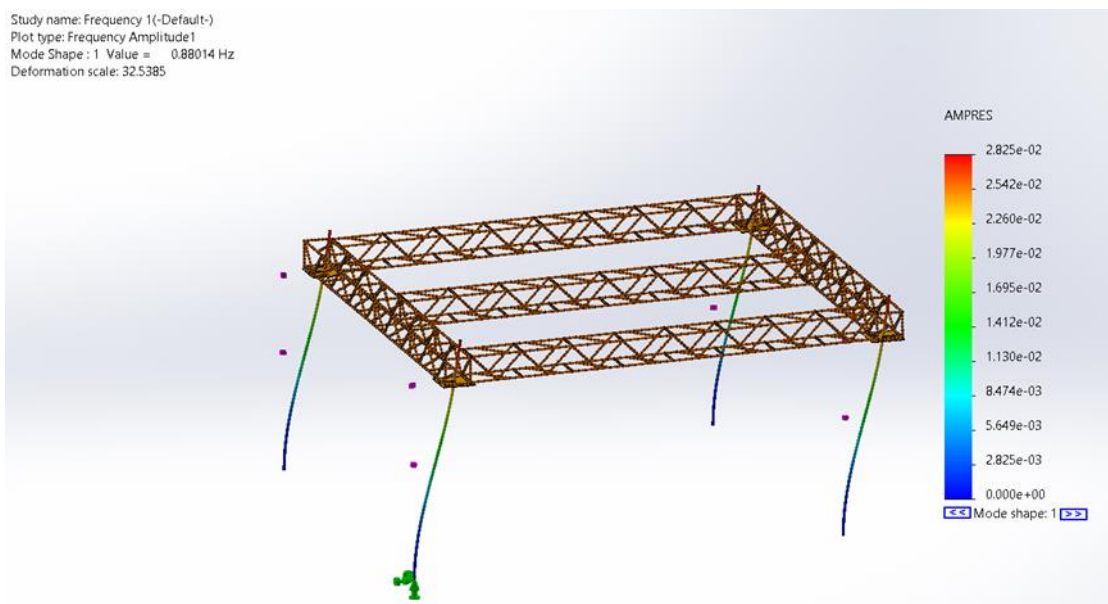




Εικόνα 93 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή

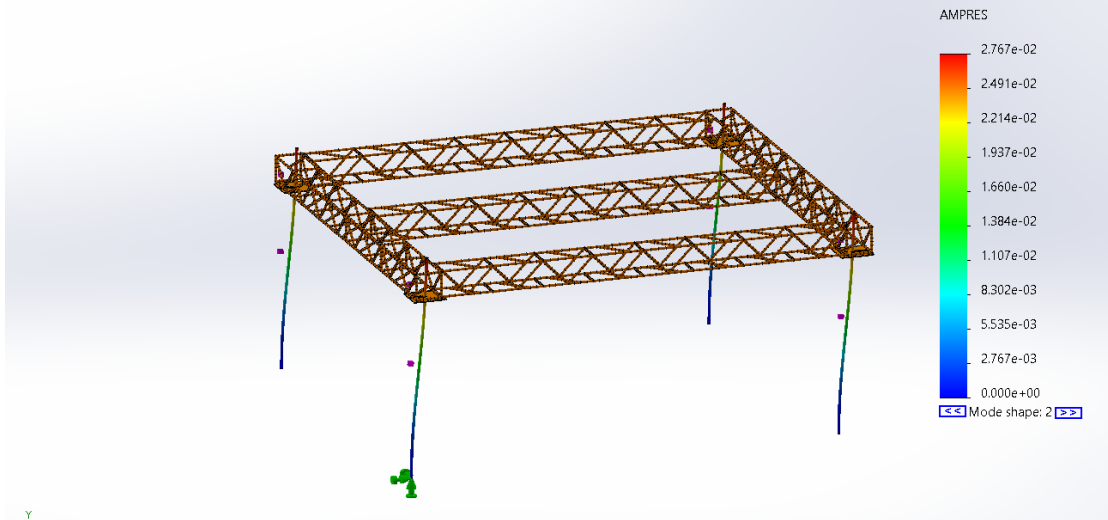
Συνεπώς, με τη χρήση ανυψωτικών κοχλιών διαμέτρου 55 mm, αποδεικνύεται πως δεν προκύπτει κάποιο λειτουργικό πρόβλημα. Συγκεκριμένα, οι τάσεις που προκύπτουν είναι σε πολύ χαμηλότερο επίπεδο από το όριο διαρροής και οι παραμορφώσεις είναι ελάχιστες. Συνεπώς, δεν εκδηλώνονται φαινόμενα όπως λογισμός, αστοχία κ.λπ.

Η παραπάνω ανάλυση όπως αναφέρθηκε, έγινε χωρίς να ληφθούν υπόψη διατμητικά φορτία. Σαφώς, αν πραγματοποιηθεί δυναμική ανάλυση, με σκοπό τη εξαγωγή των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος αυτού, θα διαπιστωθεί πως αυτές βρίσκονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Η εξέταση εκτελείται, και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες. Συνεπώς, επιβεβαιώνεται η αναγκαιότητα χρήσης οδήγησης.



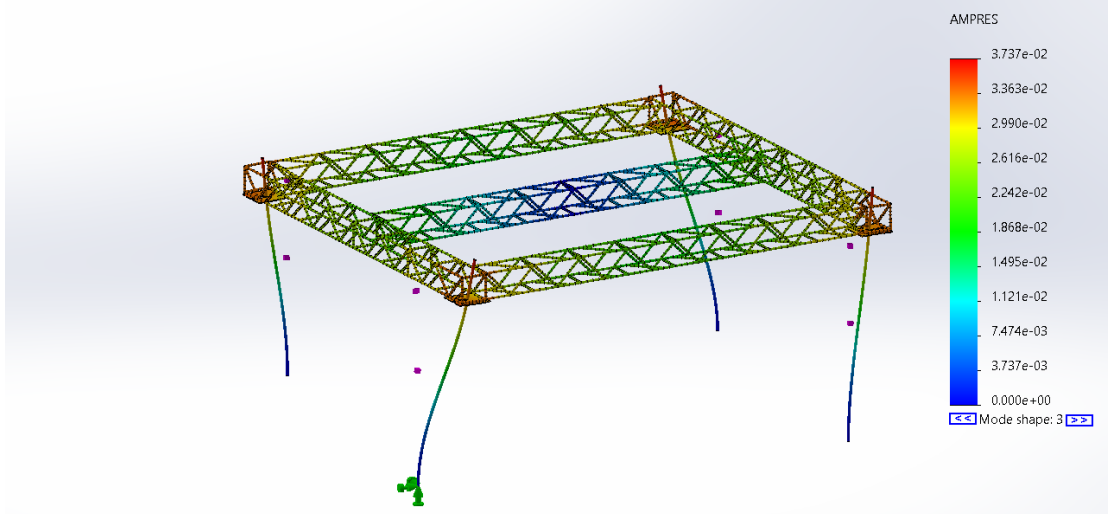
Εικόνα 94 Πρώτη ιδιοσυχνότητα του συστήματος 0.88Hz

Study name: Frequency 1(-Default-)  
Plot type: Frequency Amplitude2  
Mode Shape : 2 Value = 0.92092 Hz  
Deformation scale: 33.2138



Εικόνα 95 Δεύτερη ιδιοσυχνότητα του συστήματος 0.92Hz

Study name: Frequency 1(-Default-)  
Plot type: Frequency Amplitude3  
Mode Shape : 3 Value = 1.2271 Hz  
Deformation scale: 32.8191



Εικόνα 96 Τρίτη ιδιοσυχνότητα του συστήματος 1.23Hz

## 5. Λεπτομερής σχεδίαση

### 5.1 Συνδετικά μέσα

Για τη σύνδεση των αλουμινένιων προφίλ προς τη δημιουργία των modules, θα γίνει χρήση των παρακάτω συνδετικών στοιχείων, τα οποία βρίσκονται στον κατάλογο της εταιρείας των προφίλ (ITEM).



*Εικόνα 97 45 Μοίρες: Angle Fastener 8 40x40-45°*



*Εικόνα 98 90 Μοίρες: Automatic-Fastening Set 8, bright zinc-plated*



*Εικόνα 99 0 Μοίρες: Automatic Butt-Fastening Set 8, bright zinc-plated*

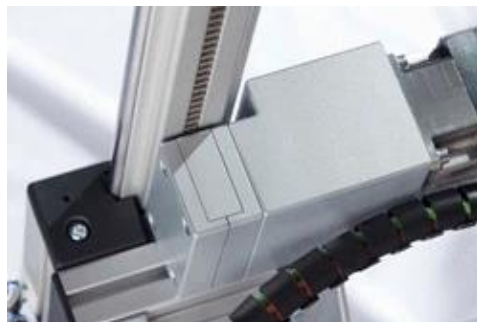
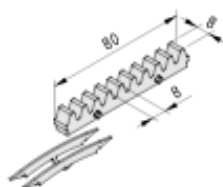
## **5.2 Οδοντωτοί κανόνες**



*Εικόνα 100 Οδοντωτός κανόνας και πινιόν*

Θα μελετηθεί αν είναι εφαρμόσιμη η λύση του οδοντωτού κανόνα για την μετακίνηση στους δύο οριζόντιους άξονες. Συγκεκριμένα θα μελετηθούν οι δυσμενέστερες περιπτώσεις (μέγιστη επιτάχυνση - επιβράδυνση).

Η εταιρία επιλογής των προφίλ (ITEM), έχει στον κατάλόγό της οδοντωτό κανόνα, όμως δεν είναι συμβατός με τη σειρά 8 light που επιλέχθηκε. Αυτό αναφέρεται ρητά στην ιστοσελίδα της εταιρίας.



Εικόνα 101 Οδοντωτός κανόνας της εταιρίας ITEM

Επομένως, θα υπολογιστεί ο κανόνας που χρειάζεται και στη συνέχεια θα ερευνηθεί αν υπάρχει στο εμπόριο. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει, θα πρέπει να κατασκευαστεί.

Σύμφωνα με τις πληροφορίες που παρέχονται από εταιρείες που κατασκευάζουν και χρησιμοποιούν τρισδιάστατους εκτυπωτές εξώθησης κονιάματος, η ταχύτητα εκτύπωσης που χρησιμοποιούν είναι 0.25 m/s. Ωστόσο, στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο 'Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών' του ΕΜΠ, παρατηρήθηκε πως με το κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε, η ταχύτητα εκτύπωσης που παρείχε ικανοποιητικά αποτελέσματα ήταν: 10 m/min = 0.167 m/s. Με τα δεδομένα αυτά, επιλέγεται η ταχύτητα εκτύπωσης των εκτυπωτών του εμπορίου, με ένα συντελεστή ασφαλείας 3. Η επιλογή αυτή γίνεται για να καλυφθεί η περίπτωση στο μέλλον ο εκτυπωτής να χρησιμοποιηθεί με άλλα, ενδεχομένως πιο εξελιγμένα κονιάματα, τα οποία θα στερεοποιούνται ταχύτερα. Ακόμη, καλύπτεται και το ενδεχόμενο εκτύπωσης άλλων υλικών (πχ πλαστικό). Έτσι, διαμορφώνεται η επιθυμητή ταχύτητα εκτύπωσης:  $V = 0.75 \text{ m/s}$ . Ένα εύλογο χρονικό διάστημα για να αλλάξει η διεύθυνση εκτύπωσης κατά 180 μοίρες (δηλαδή να επιτευχθεί μέγιστη επιβράδυνση έως την ακινησία, και στη συνέχεια μέγιστη επιτάχυνση έως την επιθυμητή ταχύτητα εκτύπωσης) είναι 2s. Συνεπώς, η μέγιστη επιτάχυνση που προκύπτει είναι  $a_{\max} = 0.75 \text{ m/s}^2$ .

Γέφυρα	$m_1 = 226.8 \text{ Kg}$
Κεφαλή	$m_2 = 200 \text{ Kg}$
1 Μοτέρ και 1 Πινιόν	$m_3 = 12.8 \text{ kg}$
Οδηγοί	$m_4 = 20.8 \text{ kg}$
Οδοντωτός κανόνας	$m_5 = 10.4 \text{ kg}$

Πίνακας 7 Μάζες επιμέρους στοιχείων

Στη δυσμενέστερη περίπτωση, η κεφαλή βρίσκεται στο τέλος της διαδρομής. Επομένως, ο ένας από τους δύο κανόνες θα παραλάβει την δύναμη λόγω της επιτάχυνσης της γέφυρας (κατά το ήμισυ), συν την επιτάχυνση της κεφαλής και του μοτέρ κίνησής της. Συνεπώς:  $\Sigma F_{\max} = 266 \text{ N}$ . Για να ληφθεί συντελεστής ασφαλείας 3, θα πρέπει να μπορούν να παραληφθούν φορτία:  $\Sigma F'_{\max} = 0.8 \text{ KN}$

Σχετικά με το πινιόν, επιλέγεται μοντούλ 3 και 18 δόντια, οπότε:  $d = 0.054 \text{ m}$ . Ακόμη, σημειώνεται πως το πλάτος του κανόνα θα ληφθεί αρχικά 30mm. Από τους υπολογισμούς που έγιναν σύμφωνα με το: ISO 6336, προέκυψε πως η μέγιστη ροπή που μπορεί να παραλάβει το πινιόν είναι:  $T_{\max}(\text{pinion}) =$

190 Nm. Φυσικά, η τιμή της μέγιστης ροπής είναι αρκετά μεγάλη για την εφαρμογή, οπότε δεν χρειάζεται να αυξηθεί το πλάτος του κανόνα.

Όσον αφορά τη μέγιστη ροπή που απαιτείται για την επίτευξη της επιθυμητής επιτάχυνσης, αυτή προκύπτει:  $T_{\max}(\text{accel}) = F_{\max}R = 21.6 \text{ Nm}$ . Η  $T_{\max}(\text{accel})$  υπερτερεί της  $T_{\max}(\text{pinion})$ , άρα δεν θα αστοχήσουν τα δόντια. Επομένως, θα αναζητηθούν stepper motors που να μπορούν να παρέχουν ροπή μεγαλύτερη των 22 Nm, για να καλυφθούν οι ανάγκες επιτάχυνσης.

### 5.3 Επενεργητές γέφυρας και κεφαλής

Μετά από έρευνα, επιλέγεται από τους καταλόγους του εμπορίου ο παρακάτω συνδυασμός βηματικού μοτέρ (stepper motor) και οδηγού (driver), για την κίνηση της γέφυρας και της κεφαλής του εκτυπωτή. Το μοτέρ αυτό είναι το 110HS3230-06 και μπορεί να παρέχει ροπή έως και 30 Nm. Αντίστοιχα, ο οδηγός είναι ο DSP-32207BH και μπορεί να καλύψει της ανάγκες ισχύος του μοτέρ. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 102 Stepper motor και Driver



Εικόνα 103 Stepper driver

### 5.4 Γραμμικοί οδηγοί

Οι γραμμικοί οδηγοί και τα βαγόνια που θα χρησιμοποιηθούν, παρέχονται κι εκείνοι από την εταιρία επιλογής των προφίλ (ITEM). Συγκεκριμένα, οι γραμμικοί οδηγοί είναι οι: Linear Guide Rail PS 4-15 και τα βαγονάκια είναι τα : Bearing Carriage PS 4-15.



Εικόνα 104 Ο γραμμικός οδηγός με το βαγονάκι

Από τον κατάλογο του κατασκευαστή λαμβάνονται οι πληροφορίες για τα βαγονάκια:

- Μέγιστη ταχύτητα:  $V_{\max} = 5 \text{ m/s}$
- Μέγιστη φόρτιση:  $C = 14.5 \text{ kN}$

Είναι σαφές πως η ταχύτητα εκτύπωσης ( $0.75 \text{ m/s}$ ) είναι πολύ χαμηλότερη από τη μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα ( $5 \text{ m/s}$ ). Επίσης, θα χρησιμοποιηθούν 4 βαγόνια σε κάθε πλευρά στήριξης της γέφυρας, επομένως το βάρος αυτής και της κεφαλής θα κατανέμεται σε 8 βαγόνια. Στην δυσμενέστερη περίπτωση, η κεφαλή εκτύπωσης βρίσκεται στο τέλος της διαδρομής της, οπότε τα 4 βαγόνια θα λαμβάνουν φορτίο:  $0.78 \text{ kN}$  το καθένα, τιμή πολύ χαμηλότερη από τη μέγιστη επιτρεπτή ( $14.5 \text{ kN}$ ).

## 5.5 Ανυψωτικοί κοχλίες

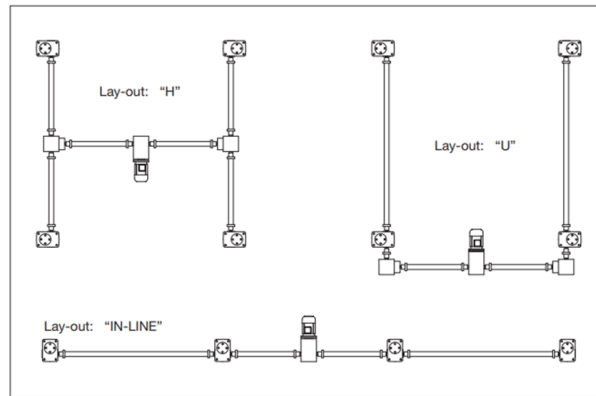
Το μέρος της κατασκευής που ανυψώνεται, έχει μάζα  $1600 \text{ kg}$  όπως υπολογίστηκε παραπάνω. Η επιλογή του συστήματος ανυψωτικών κοχλίων έγινε από την εταιρία SERVOMECH. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε το μοντέλο: SJ100 Model B. Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιεί  $55 \text{ mm}$  ACME Screw και για την κατασκευή αυτή επιλέγεται να έχει μήκος  $3.5 \text{ m}$ .



Εικόνα 105 Ανυψωτικός μηχανισμός SJ100 Model B

Ο μηχανισμός αυτός είναι σε θέση να ανυψώσει έως και  $100 \text{ kN}$  (περίπου 10 τόνους). Επομένως, 4 μηχανισμοί (ένας σε κάθε πλώνα), υπερπληρούν το έργο της ανύψωσης. Για να μην καταλαμβάνεται ο χώρος εκτύπωσης, οι ανυψωτικοί κοχλίες τοποθετούνται σε διάταξη 'U', όπως υποδεικνύεται από το σχήμα στον κατάλογο του κατασκευαστή:

LAY-OUT: Four points lifting systems



Εικόνα 106 Διατάξεις ανυψωτικών κοχλιών

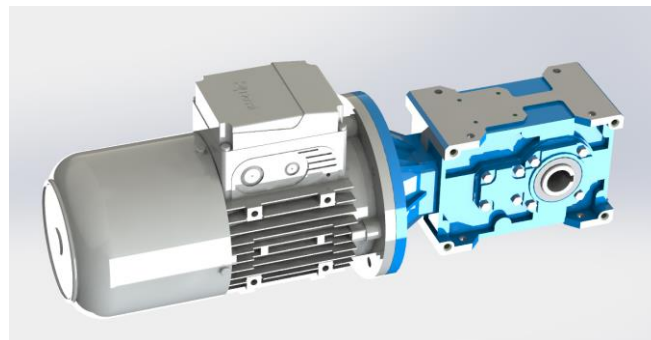
Παράλληλα, για να είναι δυνατή η γωνιακή μετάδοση, θα χρησιμοποιηθεί από την εταιρία TRAMEC το μοντέλο: RNEW A 28 A B 1 SeA E B3. Είναι σαφές πως για να επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη ανύψωση των πυλώνων, ο λόγος μετάδοσης θα πρέπει να είναι 1:1.



Εικόνα 107 Γωνιακή μετάδοση TRAMEC

## 5.6 Μοτέρ Ανύψωσης:

Η κίνηση στο σύστημα των ανυψωτικών κοχλιών, θα υλοποιηθεί με τη χρήση του ηλεκτρικού μοτέρ: HBZ 90S 4 της εταιρίας Rossi, και του μειωτήρα: T C 71 B 40 200/24 H28 0 O B3 της εταιρίας TRAMEC.



Εικόνα 108 Μοτέρ και μειωτήρας που επιλέχθηκαν

### 5.6.1 Έλεγχος ταχύτητας ανύψωσης

Ο μειωτήρας που επιλέχθηκε, έχει σχέση μετάδοσης  $i = 40:1$ , οπότε οι ονομαστικές στροφές του μοτέρ από  $n = 1720$  RPM, γίνονται  $n' = 43$  RPM. Ακόμη, Ο μηχανισμός των κοχλιών ανύψωσης έχει σχέση μετάδοσης  $j = 7:1$ , οπότε η ταχύτητα περιστροφής των κοχλιών προκύπτει  $N = 6.1$  RPM. Εφόσον το βήμα του ανυψωτικού κοχλία είναι  $P = 9$  mm, η ταχύτητα ανύψωσης προκύπτει:  $U = NP = 55$  mm/min. Οι στρώσεις κατά την εκτύπωση έχουν πάχος περίπου 10mm, οπότε αυτή η ταχύτητα είναι αρκετή για σχεδόν 1 στρώση κάθε 10 δευτερόλεπτα, γεγονός αρκετά ικανοποιητικό, αφού οι στρώσεις συνήθως παίρνουν αρκετά λεπτά για να υλοποιηθούν.

### 5.6.2 Έλεγχος απαιτούμενης ροπής

Η ροπή που απαιτείται για ανύψωση του μέγιστου δυνατού φορτίου (100 kN) είναι 46 Nm, για κάθε ανυψωτικό μηχανισμό SJ100. Οπότε συνολικά για τους 4 μηχανισμούς:  $M = 184$  Nm. Από τον κατάλογο του κατασκευαστή, η ροπή του μοτέρ (στις ονομαστικές στροφές) είναι  $T = 6.2$  Nm. Σε συνδυασμό με τον μειωτήρα, η ροπή αυτή λαμβάνει την τιμή  $T' = 248$  Nm. Είναι σαφές, ότι η ροπή του μοτέρ είναι αρκετή, αφού είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη ροπή που μπορούν να λάβουν οι μηχανισμοί των κοχλιών (για ανύψωση συνολικά 400 kN), και στην περίπτωση του παρόντος μηχανισμού χρησιμοποιείται μόνο το 4% αυτής της ανυψωτικής ικανότητας.

## 5.7 End switches (Limit Switches):



Εικόνα 109 Τερματικός διακόπτης

Για τον έλεγχο του εκτυπωτή, θα χρειαστεί να τοποθετηθούν τερματικοί διακόπτες στο τέλος κάθε διαδρομής. Με τον τρόπο αυτό, ο εκτυπωτής θα μπορεί να μηδενίζει την θέση του, πριν εκτελέσει την εκάστοτε εκτύπωση. Αντίστοιχα, θα πρέπει να εγκατασταθεί και διάταξη για τον έλεγχο των περιστροφών του μοτέρ ανύψωσης. Ωστόσο οι λεπτομέρειες αυτές αφορούν τον έλεγχο του μηχανισμού, και ξεφεύγουν από το θέμα της παρούσας εργασίας.

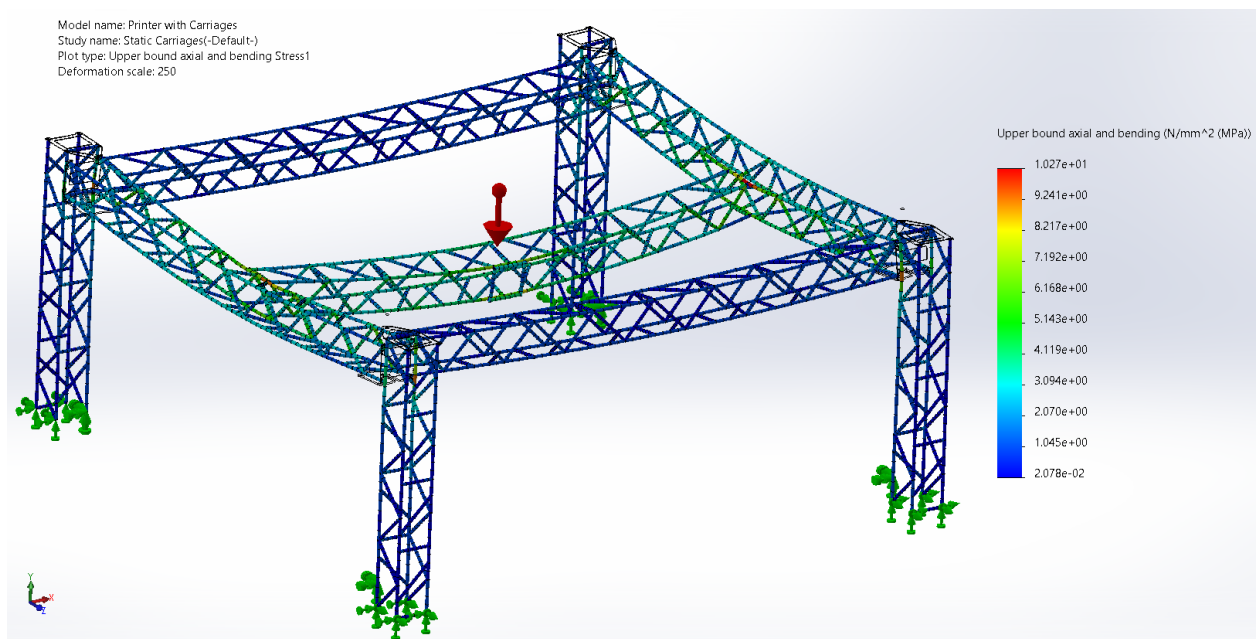
## 5.8 Slicer: Cura by Ultimaker

Για την προετοιμασία των τρισδιάστατων μοντέλων προς εκτύπωση, θα χρησιμοποιηθεί υπάρχον λογισμικό 'slicer', το οποίο διατίθεται δωρεάν. Αυτό ονομάζεται 'Cura' και είναι της εταιρίας Ultimaker. Στο πρόγραμμα αυτό θα δοθούν τα δεδομένα του συστήματος (γεωμετρικά όπως π.χ. όγκος εκτύπωσης, ηλεκτρονικά όπως π.χ. τα βήματα των μοτέρ και η σχέση μετάδοσης κ.λπ.). Στο λογισμικό αυτό θα χρησιμοποιηθεί η λειτουργία Vase Mode. Στη λειτουργία αυτή, ο εκτυπωτής τυπώνει ένα τοίχωμα, και ανεβαίνει με σταθερό ρυθμό η κεφαλή κατά τον άξονα Z. Η επιλογή αυτή είναι σημαντική, διότι με τον συγκεκριμένο σχεδιασμό εξώθησης του υλικού, δεν μπορούμε να έχουμε διακοπτόμενη ροή. Επομένως, αν λειτουργούσε σε απλή λειτουργία, όπου θα εκτελούσε συγκεκριμένα 'Βήματα' κατά τον Z, θα υπήρχαν ανωμαλίες στην εκτύπωση κατά την εκτέλεση αυτών των βημάτων.

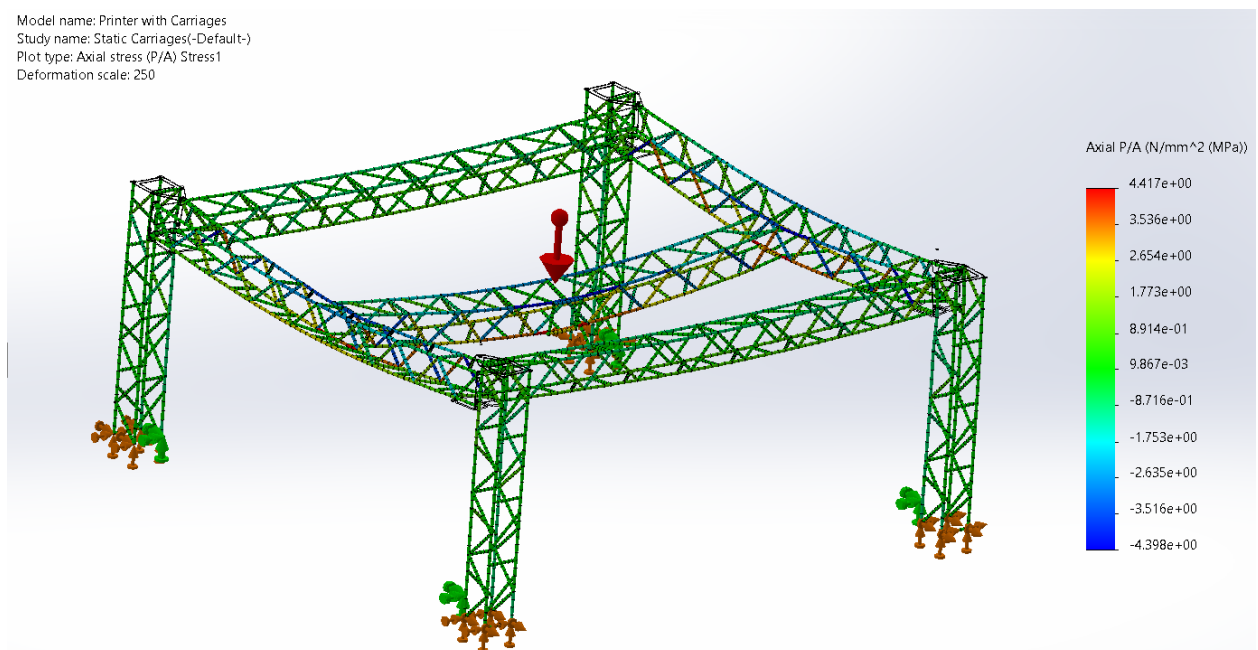


## 5.9 Τελική στατική ανάλυση

Στο σημείο αυτό, θα πραγματοποιηθεί στατική ανάλυση, αντλώντας δεδομένα από τους καταλόγους των κατασκευαστών των εξαρτημάτων που επιλέχθηκαν, με σκοπό την καλύτερη προσέγγιση του μοντέλου. Στην ανάλυση αυτή, πέρα από το πλέγμα που θα παραχθεί για τα προφίλ, θα παραχθεί πλέγμα και για τα υπόλοιπα κομμάτια του μηχανισμού που θα χρησιμοποιηθούν. Επομένως θα παραχθούν δύο ειδών πλέγματα και θα βρεθούν οι μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται στο καθένα. Για τους κοχλίες και τα στοιχεία των πυλώνων θα επιλεγεί χάλυβας για υλικό. Οι υπόλοιπες επιλογές για την μοντελοποίηση είναι όμοιες με αυτές των προηγούμενων αναλύσεων. Εκτελείται η ανάλυση και παράγονται τα παρακάτω αποτελέσματα:



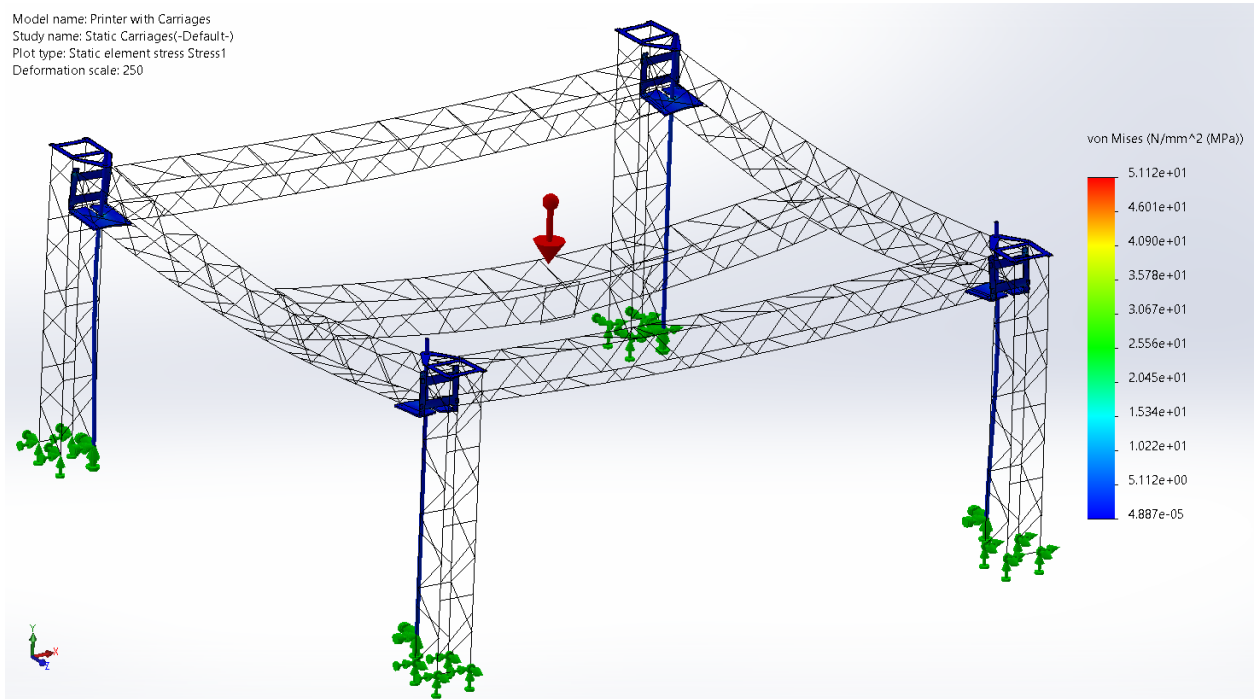
Εικόνα 110 Τάσεις που αναπτύσσονται στις δοκούς (α)



Εικόνα 111 Τάσεις που αναπτύσσονται στις δοκούς (β)

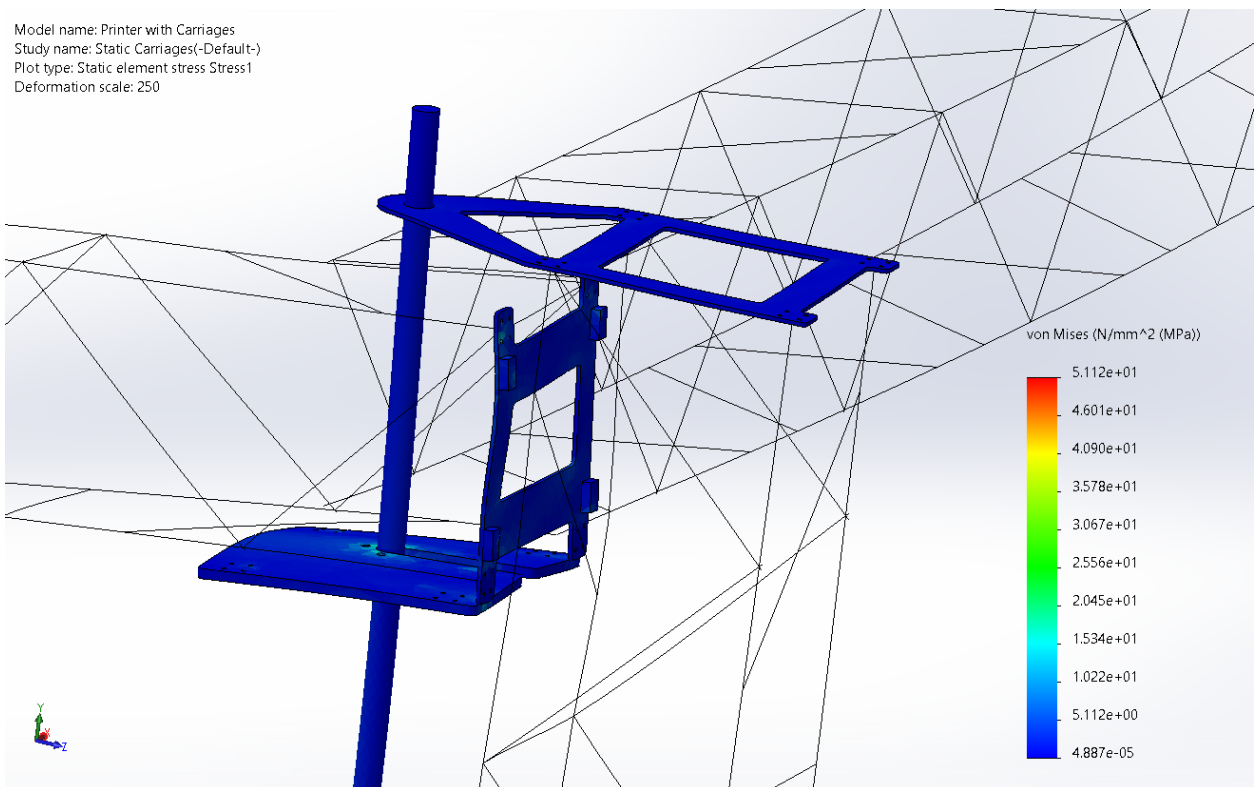
Στατική και ιδιοδιανυσματική ανάλυση χωροδικτύωματος πρωτότυπου εκτυπωτή τρισδιάστατης εκτύπωσης κτιρίων σε περιβάλλον CAD/CAE - Καϊσαρλής Ιωάννης 2023

Model name: Printer with Carriages  
Study name: Static Carriages(-Default-)  
Plot type: Static element stress Stress1  
Deformation scale: 250



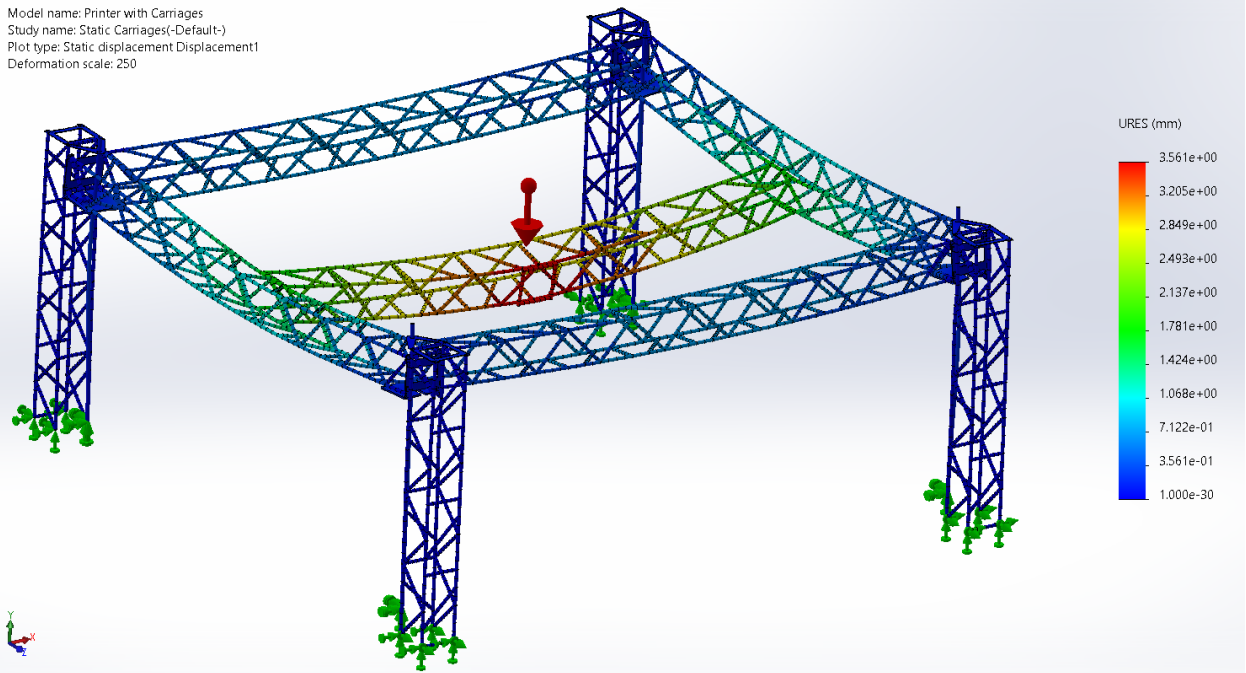
Εικόνα 112 Τάσεις που αναπτύσσονται στο σύστημα ανύψωσης

Model name: Printer with Carriages  
Study name: Static Carriages(-Default-)  
Plot type: Static element stress Stress1  
Deformation scale: 250



Εικόνα 113 Τάσεις που αναπτύσσονται στο σύστημα ανύψωσης (λεπτομέρεια)

Model name: Printer with Carriages  
Study name: Static Carriages(-Default-)  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 250



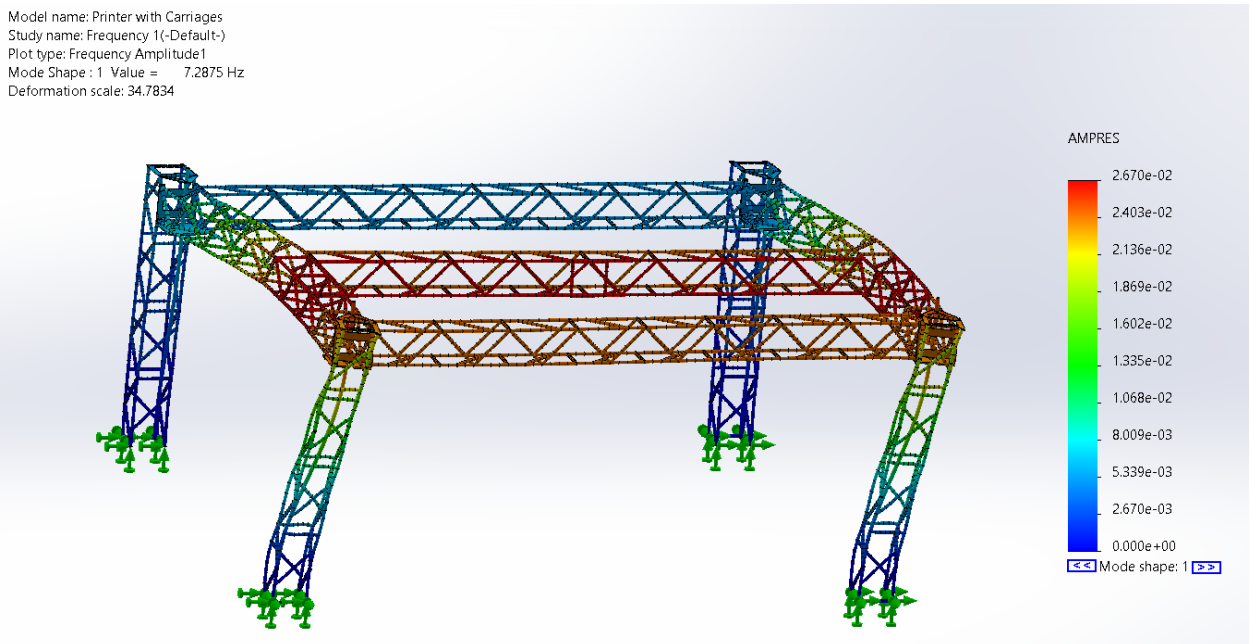
Εικόνα 114 Μετατοπίσεις που αναπτύσσονται στο σύστημα ανύψωσης

Είναι σαφές ότι το όριο διαρροής του αλουμινίου και του χάλυβα αντίστοιχα, δεν ξεπερνάται σε καμία περίπτωση. Επιπροσθέτως, το βέλος κάμψης της γέφυρας είναι μόλις 3.6 mm και βρίσκεται επομένως εντός προδιαγραφών.

## 5.10 Τελική δυναμική ανάλυση

Ακολουθεί η εκτέλεση δυναμικής ανάλυσης, που αποσκοπεί στην εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής.

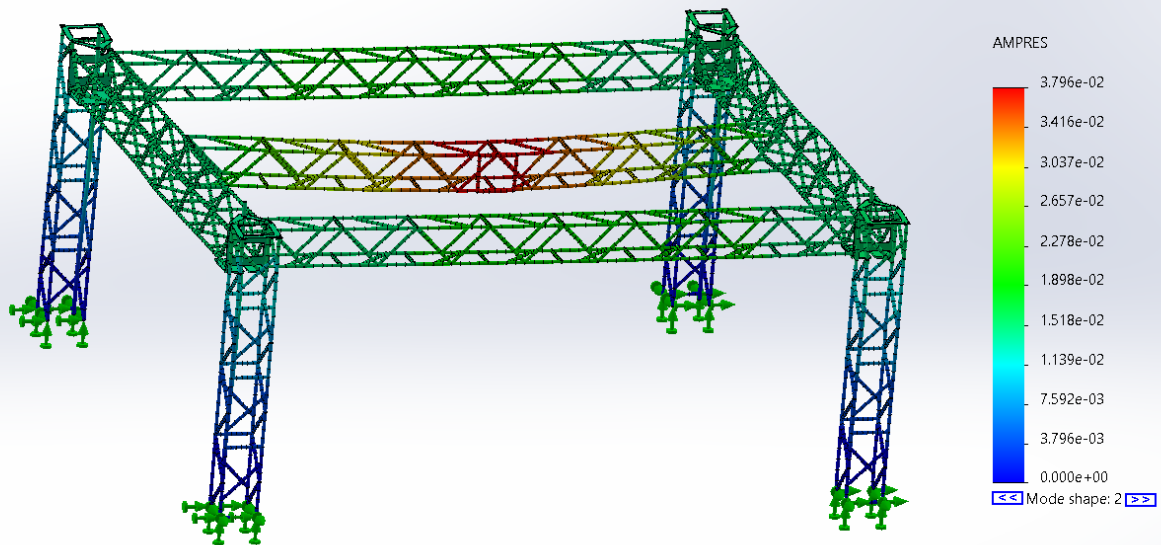
Model name: Printer with Carriages  
Study name: Frequency 1(-Default-)  
Plot type: Frequency Amplitude1  
Mode Shape : 1 Value = 7.2875 Hz  
Deformation scale: 34.7834



Εικόνα 115 Πρώτη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής: 7.3Hz

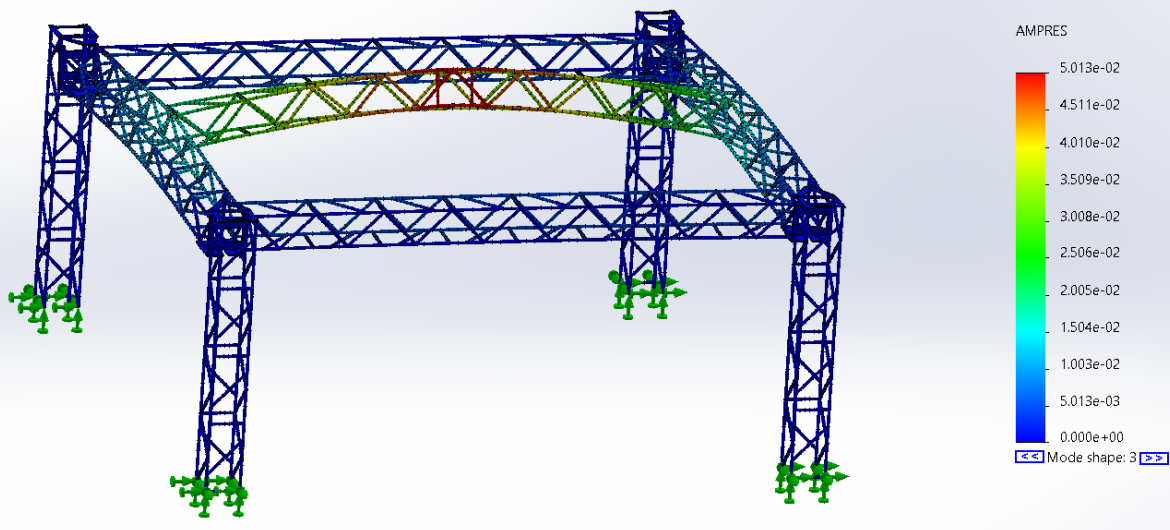
Στατική και ιδιοδιανυσματική ανάλυση χωροδικτύωματος πρωτότυπου εκτυπωτή τρισδιάστατης εκτύπωσης κτιρίων σε περιβάλλον CAD/CAE - Καϊσαρλής Ιωάννης 2023

Model name: Printer with Carriages  
Study name: Frequency 1(-Default-)  
Plot type: Frequency Amplitude2  
Mode Shape : 2 Value = 8.5693 Hz  
Deformation scale: 24.3072



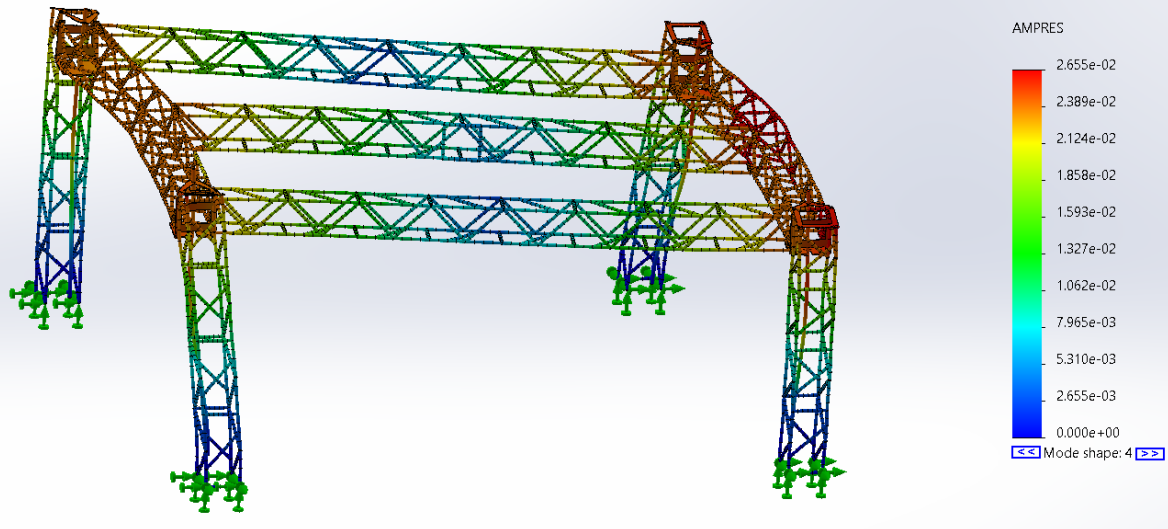
Εικόνα 116 Δεύτερη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής: 8.6Hz

Model name: Printer with Carriages  
Study name: Frequency 1(-Default-)  
Plot type: Frequency Amplitude3  
Mode Shape : 3 Value = 9.9252 Hz  
Deformation scale: 18.4439



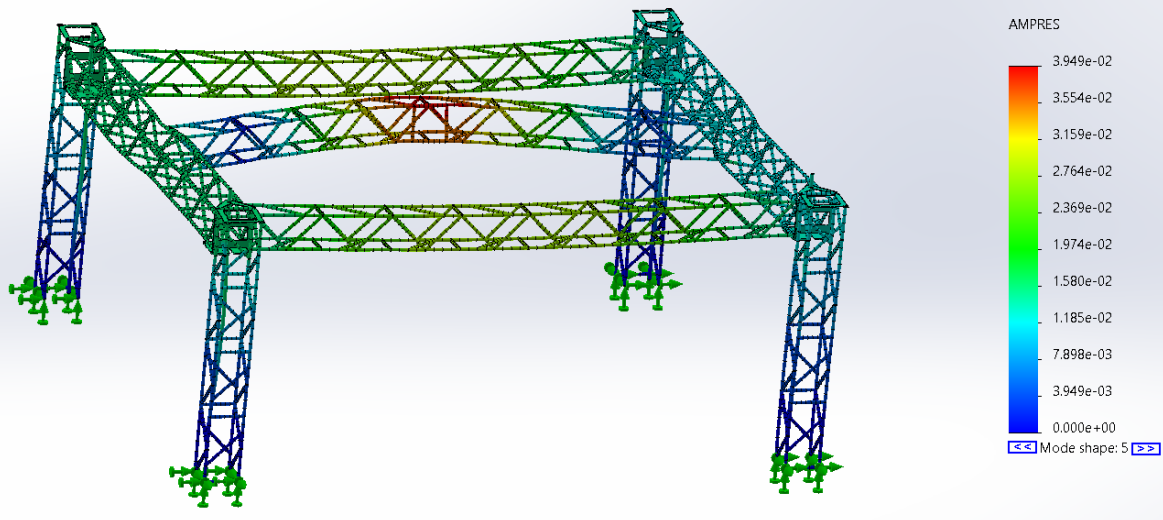
Εικόνα 117 Τρίτη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής: 9.9Hz

Model name: Printer with Carriages  
Study name: Frequency 1(-Default-)  
Plot type: Frequency Amplitude4  
Mode Shape : 4 Value = 12.518 Hz  
Deformation scale: 36.4135



Εικόνα 118 Τέταρτη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής: 12.5Hz

Model name: Printer with Carriages  
Study name: Frequency 1(-Default-)  
Plot type: Frequency Amplitude5  
Mode Shape : 5 Value = 13.647 Hz  
Deformation scale: 23.348



Εικόνα 119 Πέμπτη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής: 13.6Hz

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτει πως η χαμηλότερη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής είναι 7.3 Hz. Η τιμή αυτή είναι ικανοποιητική, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι σεισμοί συνήθως έχουν συχνότητα κάτω από 2 Hz (δηλαδή σχεδόν το 25 % της πρώτης ιδιοσυχνότητας). Ωστόσο, για περαιτέρω αύξηση της δυσκαμψίας του εκτυπωτή, θα μπορούσε να γίνει χρήση συρματόσχοινων, τα οποία θα στήριζαν τους πυλώνες. Η χρήση αυτών όμως, πρέπει να σημειωθεί πως θα είχε ως συνέπεια την δυσχέρεια της πρόσβασης στο χώρο εκτύπωσης.

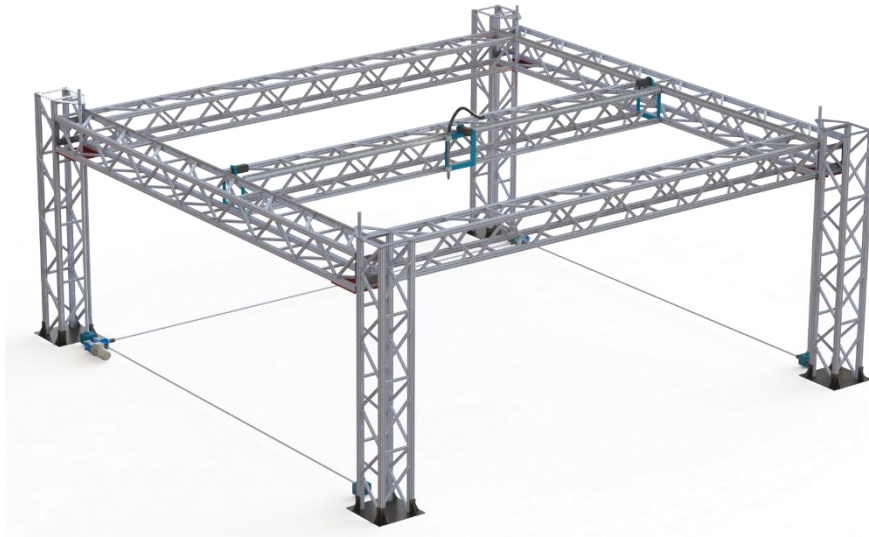
## 6. Αποτελέσματα

### 6.1 Κόστος

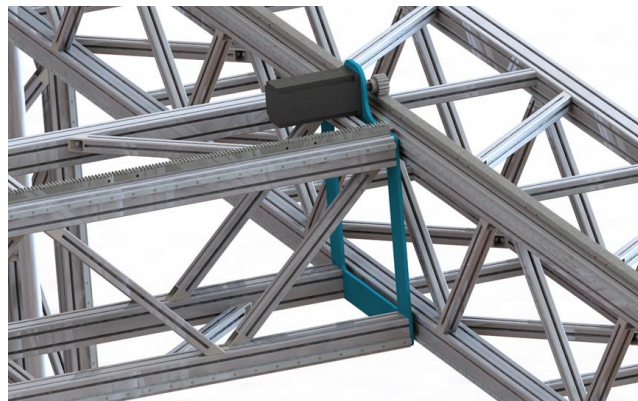
Το συνολικό κόστος της κατασκευής δεν μπορεί να αποδοθεί μονοσήμαντα, καθώς τα τελευταία χρόνια οι τιμές των υλικών και των μεταφορικών σημειώνουν διαρκώς αύξηση. Επίσης, απαιτούνται πολλές εργατοώρες για την αρχική αρμολόγησή του εκτυπωτή. Ωστόσο, μια εκτίμηση του κόστους των υλικών, με βάση το έργο που πραγματοποιήθηκε, ανέρχεται στα 70.000 Ευρώ.

### 6.2 Σύγκριση με τον κατασκευασμένο εκτυπωτή

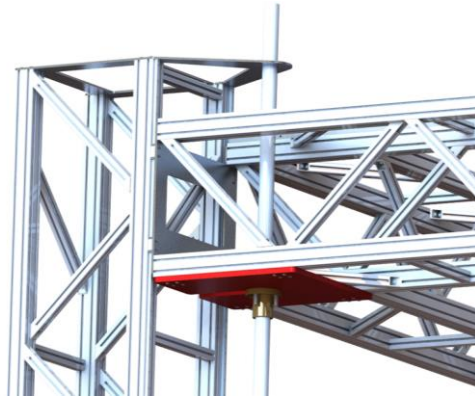
#### 6.2.1 Σχεδιασμένος εκτυπωτής



Εικόνα 120 Ισομετρική όψη (Μοντέλο εκτυπωτή)



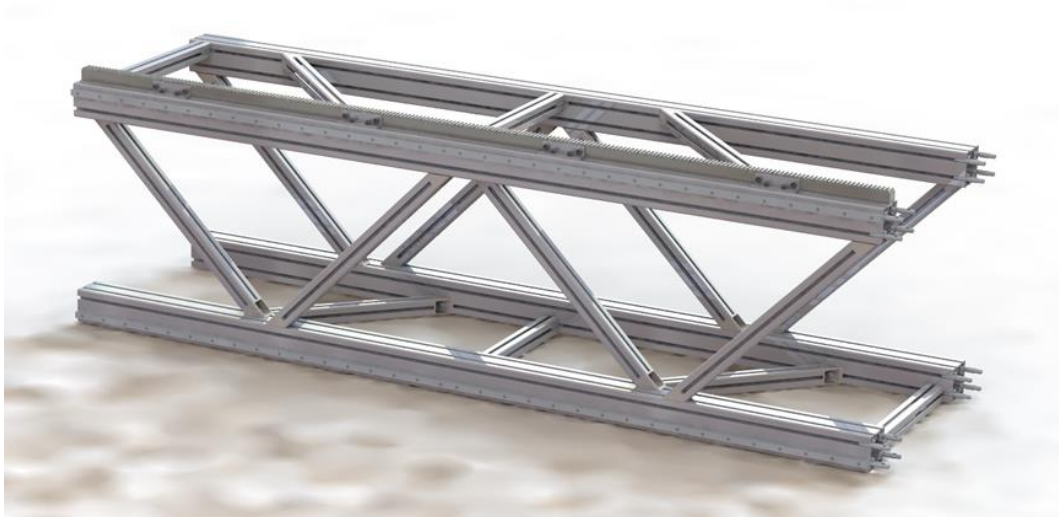
Εικόνα 121 Οδήγηση γέφυρας (Μοντέλο εκτυπωτή)



*Εικόνα 122 Πυλώνας ανύψωσης με το πλαίσιο (Μοντέλο εκτυπωτή)*



*Εικόνα 123 Μοτέρ ανύψωσης (Μοντέλο εκτυπωτή)*



*Εικόνα 124 Module (Μοντέλο εκτυπωτή)*

## 6.2.2 Κατασκευασμένος εκτυπωτής



Εικόνα 125 Εκτυπωτής σε λειτουργία (Κατασκευασμένος εκτυπωτής)



Εικόνα 126 Ισομετρική όψη (Κατασκευασμένος εκτυπωτής)



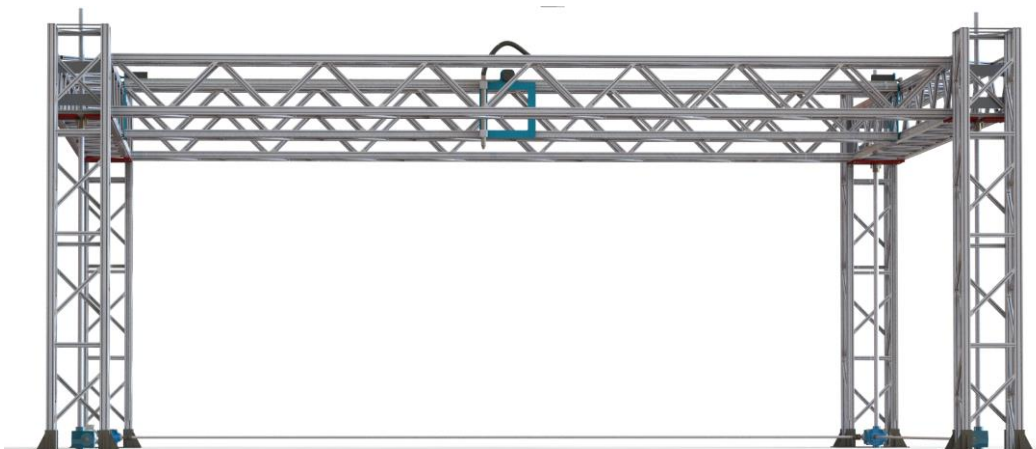


Εικόνα 127 Οδοντωτός κανόνας - πινιόν (Κατασκευασμένος εκτυπωτής)

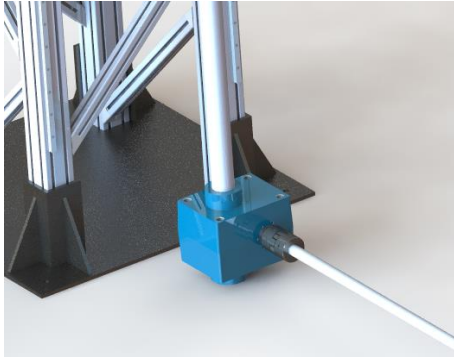
### 6.2.3 Σύγκριση-Σχολιασμός



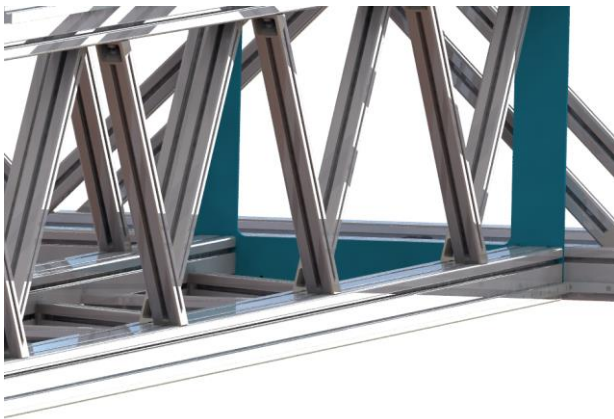
Εικόνα 128 Κατασκευασμένος εκτυπωτής (Πρόοψη)



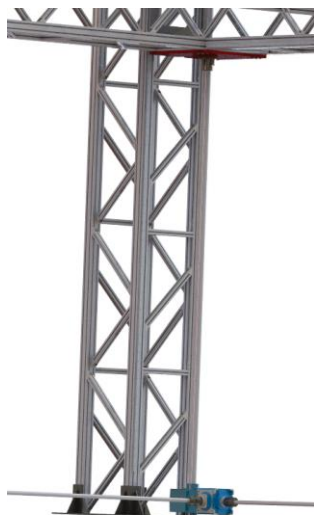
Εικόνα 129 Σχεδιασμένος εκτυπωτής (Πρόοψη)



Εικόνα 130 Μηχανισμός ανύψωσης Σχεδιασμός - Κατασκευή



Εικόνα 131 Γέφυρα εκτυπωτή Σχεδιασμός - Κατασκευή



Εικόνα 132 Πυλώνας εκτυπωτή Σχεδιασμός - Κατασκευή

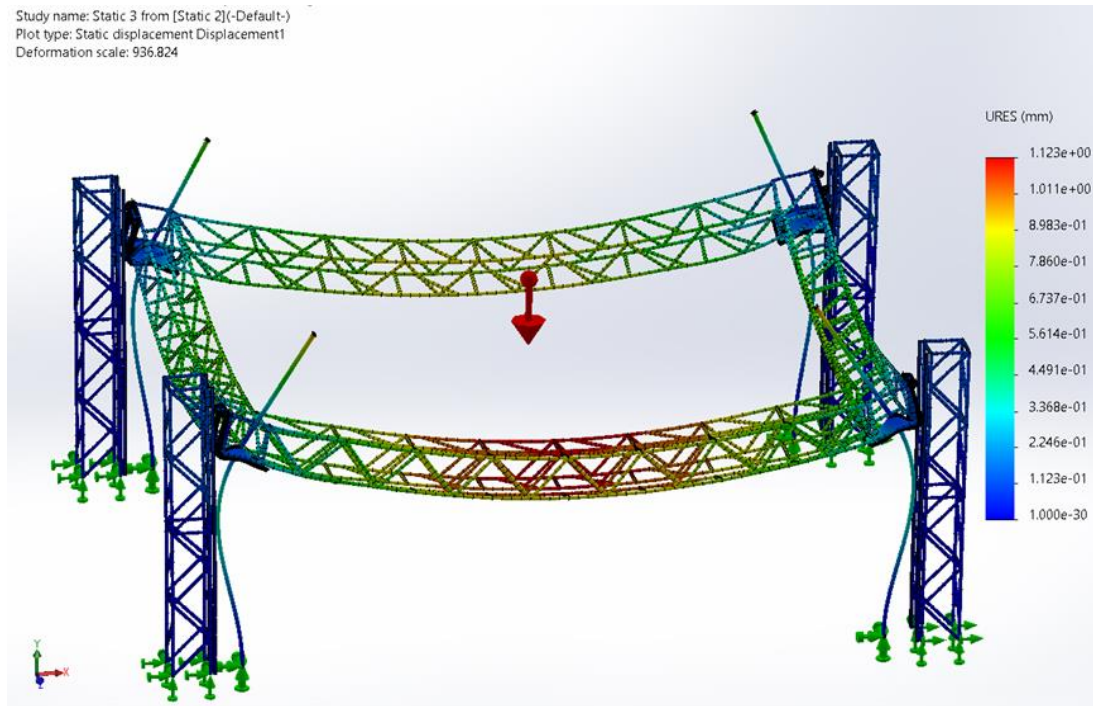
Όπως φαίνεται και από τις φωτογραφίες, ο κατασκευασμένος εκτυπωτής αντιστοιχεί στον σχεδιασμένο. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες διαφορές, οι οποίες οφείλονται σε παράγοντες που ποικίλλουν. Ειδικότερα, κάποιοι από τους παράγοντες αυτούς είναι:

- Η έλλειψη συγκεκριμένων προϊόντων από την αγορά, που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον σχεδιασμό. Ωστόσο, αυτά αντικαταστάθηκαν με παρόμοια προϊόντα, τα οποία επιτελούν τους ίδιους σκοπούς. Επομένως, η μοντελοποίηση και η ανάλυση που έγινε εξακολουθεί να είναι έγκυρη, εφόσον δεν άλλαξε κάποια γεωμετρία, μάζα ή στιβαρότητα σημαντικά.
- Κάποια από τα ειδικά κομμάτια που κατασκευάστηκαν και δεν ήταν τυποποιημένα, διαφέρουν ελαφρώς από τον σχεδιασμό ως προς τη γεωμετρία, καθώς αυτό κρίθηκε αργότερα σκόπιμο κατά την κατασκευή. Ωστόσο, και στην περίπτωση αυτή οι αναλύσεις που έγιναν δεν θα επηρεαστούν αρνητικά, διότι όλες οι αλλαγές που έγιναν, έγιναν με σκοπό την ενίσχυση της στιβαρότητας της κατασκευής.
- Οι πυλώνες διαφέρουν ως προς το μέγεθος και το δικτύωμα. Αυτό συμβαίνει κυρίως για λόγους εξοικονόμησης υλικών και χρόνου συναρμολόγησης. Επίσης, το κατασκευασμένο αποτελεί πρωτότυπο (δηλαδή άμεσα δεν απαιτείται τα modules να είναι όμοια), ενώ το σχεδιασμένο πληροί τις προϋποθέσεις για τον σκοπό αυτό.

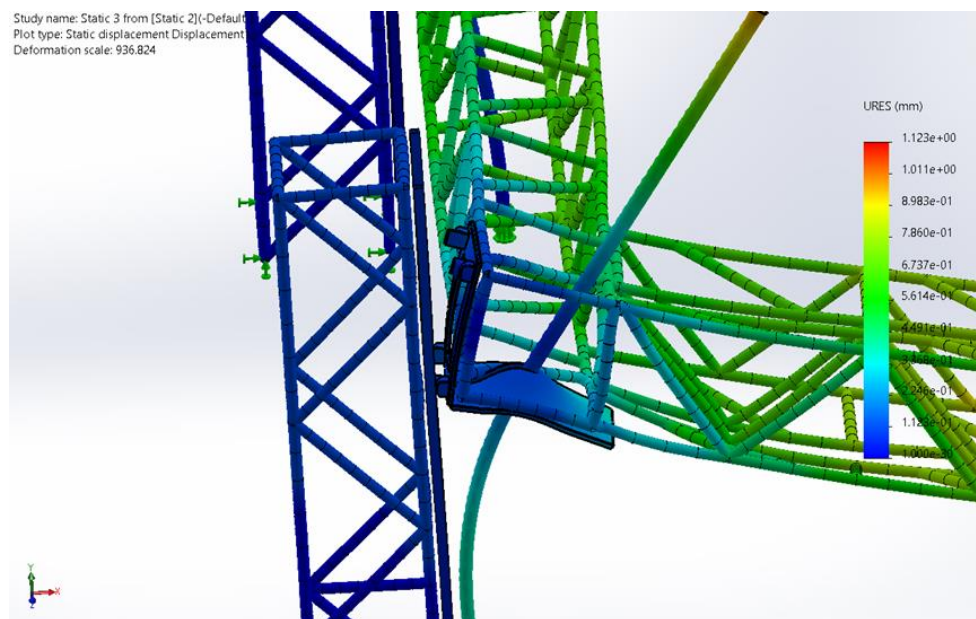


Εικόνα 133 Εκτυπωτής με ροδάκια αντί για βαγόνια (Κατασκευή - Μοντέλο)

Στον κατασκευασμένο εκτυπωτή, χρησιμοποιήθηκαν στους πυλώνες ροδάκια για την υλοποίηση της οδήγησης, και όχι βαγόνια με οδηγούς. Η επιλογή αυτή έγινε για πρακτικούς λόγους, όμως ελέγχθηκε και μέσω στατικής ανάλυσης και διαπιστώθηκε πως δεν παρουσιάζεται κάποιο πρόβλημα. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε ανάλυση με την γέφυρα στο τέλος της διαδρομής της (αυτή είναι η δυσμενέστερη περίπτωση ώστε οι τροχοί να χάσουν επαφή) και διαπιστώθηκε πως η μέγιστη μετατόπιση που προκύπτει είναι πολύ χαμηλή (κάτω από 2mm), επομένως αποκλείεται το ενδεχόμενο εκτροχιασμού. Ωστόσο, αυτή η αλλαγή αξίζει να αναφερθεί πως έγινε στην κατασκευή του πρωτότυπου εκτυπωτή, και δεν συνιστάται να γίνει σε εκτυπωτή που προορίζεται για εκτεταμένη χρήση.



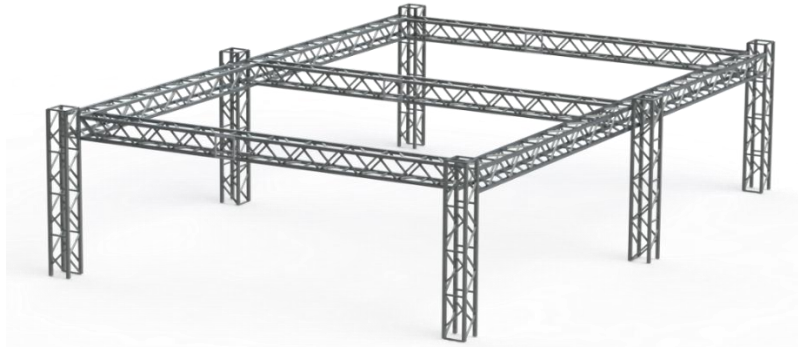
Εικόνα 134 Αποτελέσματα μετατοπίσεων για την περίπτωση ροδών



Εικόνα 135 Αποτελέσματα μετατοπίσεων για την περίπτωση ροδών (λεπτομέρεια)

### 6.3 Μελλοντική χρήση

Ο εκτυπωτής που αναπτύχθηκε, λόγω του σχεδιασμού του που συμπεριέλαβε οικογένειες σπονδυλωτών συνόλων [15], μπορεί να αναδιαταχθεί και να λάβει διάφορες μορφές. Σαφέστερα, με την χρήση περισσότερων modules, μπορεί να αυξήσει την επιφάνεια εκτύπωσης του, ενώ παράλληλα ελαττώνεται η ανάγκη ύπαρξης πολλών διαφορετικών ανταλλακτικών. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται μια εναλλακτική μορφή που μπορεί να λάβει ο εκτυπωτής, για να αυξήσει την επιφάνεια εκτύπωσής του σε 128 m<sup>2</sup>



Εικόνα 136 Παραλλαγή διάταξης του εκτυπωτή

Είναι σαφές το γεγονός ότι η κατασκευή αυτή μπορεί να επιτελέσει πολλές διαφορετικές εργασίες, και η εκτύπωση τσιμέντου είναι μόνο μία από αυτές. Κάποιες από τις άλλες εργασίες είναι:

- Εκτύπωση πλαστικού. Με κατάλληλη κεφαλή εξώθησης πλαστικού, θα μπορούσαν να τυπωθούν σκάφη, μικρά ηλεκτρικά οχήματα, ειδικά έπιπλα κ.λπ.
- Χρήση του εκτυπωτή ως CNC εργαλειομηχανή. Πιο συγκεκριμένα, με τον τρόπο αυτό θα μπορεί ο εκτυπωτής να λάβει μετρήσεις και να επιτελέσει διάφορες κατεργασίες αυτοματοποιημένα, όπως η διάτρηση, το φρεζάρισμα, η διάνοιξη σπειρωμάτων, η συναρμολόγηση προϊόντων κλπ.
- Χρήση του εκτυπωτή ως μηχανή τρισδιάστατης σάρωσης (3D scanner). Με την εφαρμογή κατάλληλης κεφαλής, ο εκτυπωτής θα μπορεί να σαρώσει και να αποτυπώσει τον χώρο που βρίσκεται από κάτω του με ακρίβεια. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο στην περίπτωση που απαιτείται η τρισδιάστατη αποτύπωση ενός χώρου ή ενός μεγάλου αντικείμενου στον υπολογιστή με ακρίβεια.

## 7. Συμπεράσματα

Από την εργασία αυτή εξήχθησαν πολύ ενδιαφέροντα και παράλληλα σημαντικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, έγινε σαφές πως με υλικά που βρίσκονται εύκολα στο εμπόριο, μπορεί να κατασκευαστεί ένας εκτυπωτής κονιάματος, με αρκετές δυνατότητες. Απαριθμώντας τες, αξίζει να σταθεί κανείς στη δυνατότητα που έχει να μεταβάλλει τη διάταξή του για να καλύψει διαφορετικές ανάγκες, καθώς και στο γεγονός ότι αποτελείται από όμοια μέλη (modules) τα οποία μεταφέρονται εύκολα χάρη στις μικρές τους διαστάσεις.

Γενικότερα, χωρίς αμφιβολία, η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια διαρκώς αναπτυσσόμενη και πολλά υποσχόμενη μεθοδολογία. Σε συνδυασμό με τις απαιτούμενες οικονομίες κλίμακος καθώς και τα νέα υλικά κατασκευής, θα μπορούσε να ανατρέψει τις καθιερωμένες, συμβατικές μεθόδους κατασκευής. Εκτιμάται ότι δεν θα αποτελέσει λύση για όλα τα προβλήματα στον τομέα της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Παρ' όλα αυτά, η προσοχή που λαμβάνει τόσο από τον ακαδημαϊκό χώρο όσο και τον χώρο των επιχειρήσεων είναι διαρκώς αυξανόμενη. Συνεπώς, μέσα από τον σχεδιασμό, τον πειραματισμό και την κατασκευή πρωτοτύπων, η ενσωμάτωση των τρισδιάστατων εκτυπωτών στον κατασκευαστικό τομέα εκτιμάται πως θα φθάσει ταχύτατα, με αποτελέσματα που αναμένεται να συναρπάσουν.

## 8. Κατάλογοι

### 8.1 Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Τρισδιάστατη εκτύπωση με εξώθηση σκυροδέματος.....	8
Εικόνα 2 Εκτύπωση Μεμονωμένων Δομικών Στοιχείων .....	8
Εικόνα 3 Εκτύπωση In-Situ .....	9
Εικόνα 4 Εκτυπωμένο πλαίσιο με συμβατική σκυροδέτηση .....	9
Εικόνα 5 Εκτυπωτές τύπου Gantry .....	10
Εικόνα 7 Εκτυπωτές τύπου ρομπότ καλωδίων .....	11
Εικόνα 8 Εκτυπωτές σμήνους.....	11
Εικόνα 9 Αυτοματοποιημένες διατάξεις εκτύπωσης .....	12
Εικόνα 10 Γερανογέφυρα .....	14
Εικόνα 11 Γερανογέφυρα με δικτύωμα .....	14
Εικόνα 12 Γερανογέφυρα με πλαίσιο .....	14
Εικόνα 13 Σύστημα HBOT.....	15
Εικόνα 14 Σύστημα Core XY .....	15
Εικόνα 15 Οδοντωτός κανόνας πινιόν .....	16
Εικόνα 16 Λεπτομέρεια οδήγησης σε γερανογέφυρα.....	17
Εικόνα 17 Γραμμικός οδηγός και βαγονάκι .....	17
Εικόνα 18 Κυλινδρικοί οδηγοί και ρουλεμάν σε προφίλ.....	17
Εικόνα 19 Ψαλιδωτός μηχανισμός ανύψωσης.....	18
Εικόνα 20 Σύστημα ανυψωτικών κοχλιών .....	18
Εικόνα 21 Ανυψωτικός μηχανισμός με χρήση ιμάντα.....	19
Εικόνα 22 Ανυψωτικός μηχανισμός με χρήση υδραυλικού εμβόλου.....	19
Εικόνα 23 Profile 8 40x40 light, natural.....	21
Εικόνα 24 Profile 8 80x80 light, natural.....	21
Εικόνα 25 Γεωμετρίες δικτυωμάτων .....	22
Εικόνα 26 Δικτύωμα Pratt: Πράσινα μέλη υπό εφελκυσμό, κόκκινα υπό θλίψη και γκρι χωρίς τάσεις .....	22
Εικόνα 27 Χρήση δικτύωματος Pratt σε γέφυρα .....	23
Εικόνα 28 Χρήση δικτύωματος Pratt σε γέφυρα .....	23
Εικόνα 29 Δικτύωμα Warren: Πράσινα μέλη υπό εφελκυσμό, κόκκινα υπό θλίψη και γκρι χωρίς τάσεις .....	23

Εικόνα 30 Δικτύωμα Warren σε διπλάνο. Δεν επέτρεπε την στρέψη των περυγών .....	24
Εικόνα 31 Το δικτύωμα Warren στην κατασκευή της ατράκτου ενός συμβατικού αεροπλάνου του 1ου Π.Π.....	24
Εικόνα 32 Δικτύωμα Warren στο Hawker Hurricane.....	24
Εικόνα 33 Αεροσκάφος Handley Page H.P.42 .....	25
Εικόνα 34 Module 2m με δικτύωμα μίας γωνίας.....	26
Εικόνα 35 Module 2m με δικτύωμα δύο γωνιών.....	26
Εικόνα 36 Πρόοψη module.....	26
Εικόνα 37 Κάτοψη module .....	27
Εικόνα 38 Πλάγια όψη module.....	27
Εικόνα 39 Module 2m με δικτύωμα δύο γωνιών.....	27
Εικόνα 40 Πρόοψη module.....	28
Εικόνα 41 Συνδετικό μέσο που αστόχησε (Mitre-Fastening Set 8).....	28
Εικόνα 42 Τελική γεωμετρία του module.....	29
Εικόνα 43 Γέφυρα αποτελούμενη από modules .....	30
Εικόνα 44 Πλαίσιο και γέφυρα αποτελούμενα από modules .....	30
Εικόνα 45 Εκτυπωτής με ανάμειξη στην κεφαλή.....	31
Εικόνα 46 Μοντελοποίηση κεφαλής ανάμειξης εκτυπωτή.....	31
Εικόνα 47 Εκτυπωτές με προανάμειξη μείγματος.....	31
Εικόνα 48 Συσκευή προανάμειξης μείγματος.....	32
Εικόνα 49 Στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε αναλύσεις.....	33
Εικόνα 50 Στοιχεία Beam .....	33
Εικόνα 51 Στοιχεία Shell .....	34
Εικόνα 52 Στοιχεία Solid.....	34
Εικόνα 53 Στοιχείο δοκού στο επίπεδο.....	34
Εικόνα 54 Τάσεις που αναπτύσσονται στη γέφυρα σε φορτίο 200kg .....	35
Εικόνα 55 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στη γέφυρα σε φορτίο 200kg.....	36
Εικόνα 56 Τάσεις που αναπτύσσονται στη γέφυρα σε φορτίο 200kg .....	36
Εικόνα 57 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στη γέφυρα σε φορτίο 200kg.....	37
Εικόνα 58 Τάσεις που αναπτύσσονται στο πλαίσιο XY και στη γέφυρα, σε φορτίο 200kg .....	37
Εικόνα 59 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο πλαίσιο XY και στη γέφυρα, σε φορτίο 200kg.....	38
Εικόνα 60 Η πρώτη ιδιοσυχνότητα του πλαισίου XY και της γέφυρας, σε φορτίο 200kg είναι 10.7 Hz .....	39

Εικόνα 61 Η δεύτερη ιδιοσυχνότητα του πλαισίου XY και της γέφυρας, σε φορτίο 200kg είναι 11.3 Hz.....	39
Εικόνα 62 Η τρίτη ιδιοσυχνότητα του πλαισίου XY και της γέφυρας, σε φορτίο 200kg είναι 13.3 Hz .....	40
Εικόνα 63 Η τέταρτη ιδιοσυχνότητα του πλαισίου XY και της γέφυρας, σε φορτίο 200kg είναι 22.4 Hz .....	40
Εικόνα 64 Η πέμπτη ιδιοσυχνότητα του πλαισίου XY και της γέφυρας, σε φορτίο 200kg είναι 23.2 Hz .....	41
Εικόνα 65 Ψαλιδωτός μηχανισμός ανύψωσης αυτοκινήτων .....	42
Εικόνα 66 Ψαλιδωτός μηχανισμός ανύψωσης προσωπικού .....	42
Εικόνα 67 Ψαλιδωτός μηχανισμός με χρήση υδραυλικών εμβόλων .....	42
Εικόνα 68 Ψαλιδωτός μηχανισμός με χρήση μεταφορικού κοχλία .....	43
Εικόνα 69 Ψαλιδωτός μηχανισμός με χρήση συρματόσκοινων .....	43
Εικόνα 70 Παράδειγμα ψαλιδωτού μηχανισμού για χρήση στον εκτυπωτή .....	44
Εικόνα 71 Μέλος ψαλιδωτού μηχανισμού .....	44
Εικόνα 72 Απόσπασμα καταλόγου προφίλ της εταιρίας RFL Steels Ltd. ....	44
Εικόνα 73 Ψαλιδωτός μηχανισμός με τρία στάδια για χρήση στον εκτυπωτή .....	45
Εικόνα 74 Σχήμα ψαλιδωτού μηχανισμού ενός σταδίου .....	46
Εικόνα 75 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος ψαλιδωτού μηχανισμού ενός σταδίου.....	46
Εικόνα 76 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος 'i' σταδίου ψαλιδωτού μηχανισμού .....	48
Εικόνα 77 Μοντελοποίηση ψαλιδωτού μηχανισμού τριών σταδίων .....	49
Εικόνα 78 Δημιουργία πλέγματος στο μοντέλο.....	50
Εικόνα 79 Τάσεις που αναπτύσσονται στον ψαλιδωτό μηχανισμό .....	50
Εικόνα 80 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον ψαλιδωτό μηχανισμό.....	51
Εικόνα 81 Αντιδράσεις στήριξης που προκύπτουν από την ανάλυση .....	51
Εικόνα 82 Τάσεις που αναπτύσσονται στον ψαλιδωτό μηχανισμό .....	52
Εικόνα 83 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον ψαλιδωτό μηχανισμό.....	52
Εικόνα 84 Τάσεις που αναπτύσσονται - Τα στάδια βρίσκονται σε επαφή λόγω φόρτισης .....	53
Εικόνα 85 Τάσεις που αναπτύσσονται - Τα στάδια βρίσκονται σε επαφή λόγω φόρτισης .....	53
Εικόνα 86 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται - Τα στάδια βρίσκονται σε επαφή λόγω φόρτισης..	54
Εικόνα 87 Τάσεις που αναπτύσσονται στον μηχανισμό .....	54
Εικόνα 88 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον μηχανισμό .....	55
Εικόνα 89 Αντιδράσεις στήριξης που προκύπτουν από την ανάλυση .....	55
Εικόνα 90 Τάσεις που αναπτύσσονται στον μηχανισμό .....	56



Εικόνα 91 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον μηχανισμό .....	56
Εικόνα 92 Αντιδράσεις στήριξης που προκύπτουν από την ανάλυση.....	57
Εικόνα 93 Τάσεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή .....	58
Εικόνα 94 Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή.....	59
Εικόνα 95 Πρώτη ιδιοσυχνότητα του συστήματος 0.88Hz .....	59
Εικόνα 96 Δεύτερη ιδιοσυχνότητα του συστήματος 0.92Hz.....	60
Εικόνα 97 Τρίτη ιδιοσυχνότητα του συστήματος 1.23Hz .....	60
Εικόνα 98 45 Μοίρες: Angle Fastener 8 40x40-45° .....	61
Εικόνα 99 90 Μοίρες: Automatic-Fastening Set 8, bright zinc-plated .....	61
Εικόνα 100 0 Μοίρες: Automatic Butt-Fastening Set 8, bright zinc-plated .....	61
Εικόνα 101 Οδοντωτός κανόνας και πινιόν.....	61
Εικόνα 102 Οδοντωτός κανόνας της εταιρίας ITEM.....	62
Εικόνα 103 Stepper motor και Driver.....	63
Εικόνα 104 Stepper driver .....	63
Εικόνα 105 Ο γραμμικός οδηγός με το βαγονάκι.....	64
Εικόνα 106 Ανυψωτικός μηχανισμός SJ100 Model B .....	64
Εικόνα 107 Διατάξεις ανυψωτικών κοχλιών .....	65
Εικόνα 108 Γωνιακή μετάδοση TRAMEC.....	65
Εικόνα 109 Μοτέρ και μειωτήρας που επιλέχθηκαν .....	65
Εικόνα 110 Τερματικός διακόπτης.....	66
Εικόνα 111 Τάσεις που αναπτύσσονται στις δοκούς (α) .....	67
Εικόνα 112 Τάσεις που αναπτύσσονται στις δοκούς (β) .....	67
Εικόνα 113 Τάσεις που αναπτύσσονται στο σύστημα ανύψωσης.....	68
Εικόνα 114 Τάσεις που αναπτύσσονται στο σύστημα ανύψωσης (λεπτομέρεια) .....	68
Εικόνα 115 Μετατοπίσεις που αναπτύσσονται στο σύστημα ανύψωσης.....	69
Εικόνα 116 Πρώτη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής: 7.3Hz.....	69
Εικόνα 117 Δεύτερη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής: 8.6Hz .....	70
Εικόνα 118 Τρίτη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής: 9.9Hz.....	70
Εικόνα 119 Τέταρτη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής: 12.5Hz .....	71
Εικόνα 120 Πέμπτη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής: 13.6Hz .....	71
Εικόνα 121 Ισομετρική όψη (Μοντέλο εκτυπωτή).....	72
Εικόνα 122 Οδήγηση γέφυρας (Μοντέλο εκτυπωτή).....	72
Εικόνα 123 Πυλώνας ανύψωσης με το πλαίσιο (Μοντέλο εκτυπωτή).....	73

Εικόνα 124 Μοτέρ ανύψωσης (Μοντέλο εκτυπωτή).....	73
Εικόνα 125 Module (Μοντέλο εκτυπωτή).....	73
Εικόνα 126 Εκτυπωτής σε λειτουργία (Κατασκευασμένος εκτυπωτής) .....	74
Εικόνα 127 Ισομετρική όψη (Κατασκευασμένος εκτυπωτής).....	74
Εικόνα 128 Οδοντωτός κανόνας - πινιόν (Κατασκευασμένος εκτυπωτής).....	75
Εικόνα 129 Κατασκευασμένος εκτυπωτής (Πρόοψη).....	75
Εικόνα 130 Σχεδιασμένος εκτυπωτής (Πρόοψη).....	75
Εικόνα 131 Μηχανισμός ανύψωσης Σχεδιασμός - Κατασκευή.....	76
Εικόνα 132 Γέφυρα εκτυπωτή Σχεδιασμός - Κατασκευή.....	76
Εικόνα 133 Πυλώνας εκτυπωτή Σχεδιασμός - Κατασκευή .....	76
Εικόνα 134 Εκτυπωτής με ροδάκια αντί για βαγονάκια (Κατασκευή - Μοντέλο).....	77
Εικόνα 135 Αποτελέσματα μετατοπίσεων για την περίπτωση ροδών .....	78
Εικόνα 136 Αποτελέσματα μετατοπίσεων για την περίπτωση ροδών (λεπτομέρεια) .....	78
Εικόνα 137 Παραλλαγή διάταξης του εκτυπωτή.....	79

## ***8.2 Κατάλογος πινάκων***

Πίνακας 1 Βαθμολόγηση τύπων εκτυπωτών (βαθμολογία από 1 έως 5).....	13
Πίνακας 2 Πίνακας Προδιαγραφών .....	14
Πίνακας 3 Σύγκριση λύσεων μεταφοράς (βαθμολογία από 1 έως 3) .....	16
Πίνακας 4 Σύγκριση υλικών κατασκευής (βαθμολογία από 1 έως 3) .....	20
Πίνακας 5 Χαρακτηριστικά των επιλεγμένων προφίλ.....	21
Πίνακας 6 Σύγκριση δικτυωμάτων Pratt και Warren (βαθμολογία από 1 έως 3).....	25
Πίνακας 7 Μάζες επιμέρους στοιχείων.....	62

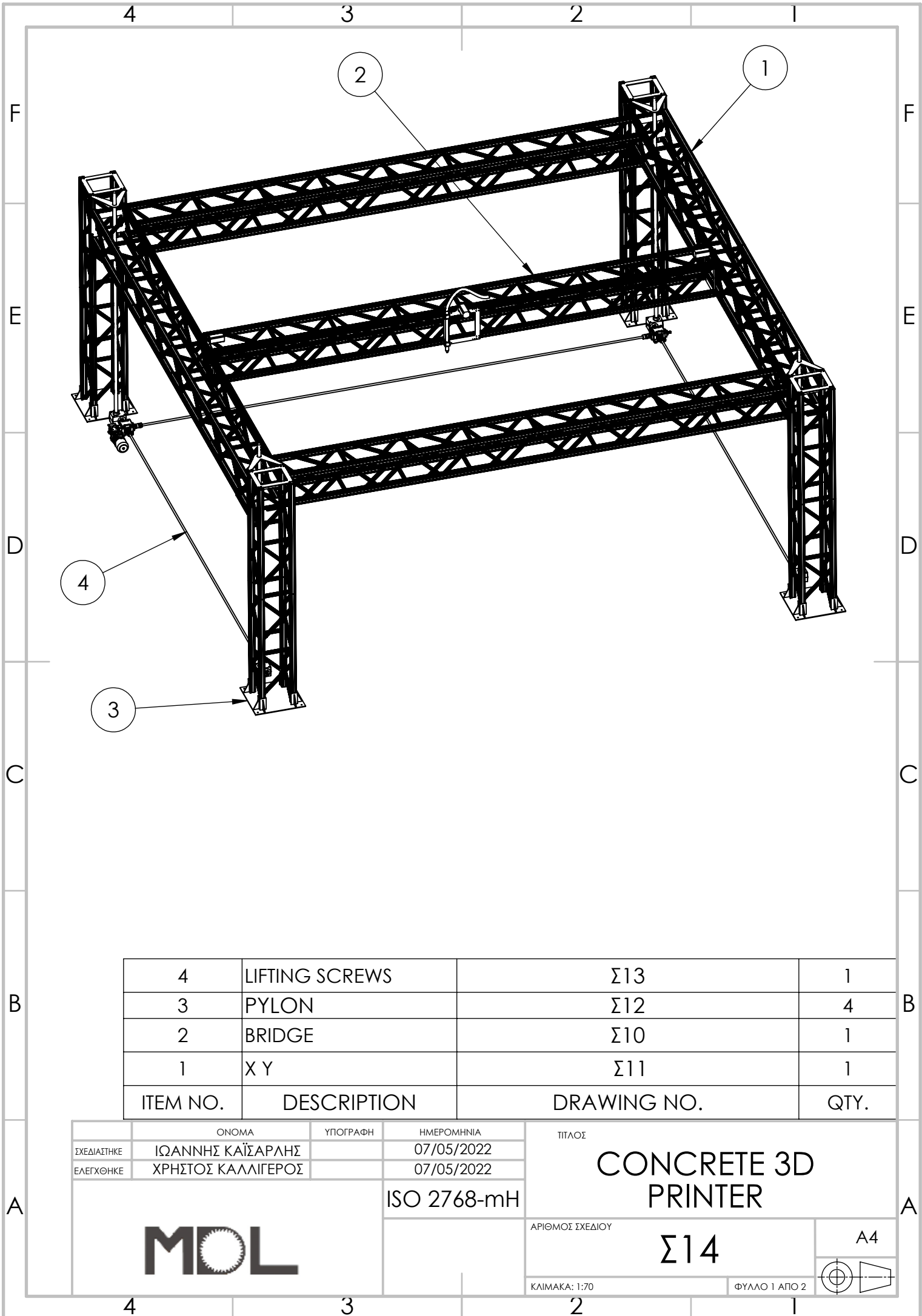
## ***8.3 Κατάλογος αναφορών***

- [1] R. J. Flatt και T. Wangler, «Editorial for special issue on digital concrete,» *Cement & Concrete Research - Digital Concrete 2018 (special issue)*, τόμ. 112, pp. 1-4, 2018.
- [2] B. Khoshnevis, «Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies,» *Automation in Construction*, τόμ. 13, αρ. 1, pp. 5-19, 2004.
- [3] E. Dini, M. Chiarugi και R. Nannini, «Method and Device for Building Automatically Conglomerate Structures». USA Ευρεσιτεχνία US20080148683A1, 26 June 2008



- [4] Contour Crafting, «Contour Crafting Homepage,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://contourcrafting.com/>. [Πρόσβαση 30 October 2018].
- [5] J. Zhang και B. Khoshnevis, «Contour crafting process planning and optimization,» σε 26th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC) IIT Madras, Austin, USA, 2009.
- [6] E. Barnett και C. Gosselin, «Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot,» Additive Manufacturing, τόμ. 7, pp. 27-44, 2015.
- [7] P. Bosscher, R. Williams , S. Bryson και D. Castro-Lacouture, «Cable-suspended robotic contour crafting system,» Automation in Construction, τόμ. 17, αρ. 1, pp. 45-55, 2007.
- [8] J. Pegna, «Exploratory investigation of solid freeform construction,» Automation in Construction, τόμ. 5, αρ. 5, pp. 427-437, 1997.
- [9] F. Ceccanti, E. Dini, X. De Kestelier, V. Colla και Pambaguian, «3D printing technology for a moon outpost exploiting lunar soil,» σε 61st International Astronautical Congress, Prague, Czech Republic, 2010.
- [10] M. Thangavelu, B. Khoshnevis, A. Carlson και N. Leach, «Architectural concepts employing co-robot strategy and contour crafting technologies for lunar settlement infrastructure development,» σε AIAA SPACE Conference and Exposition, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., Pasadena, USA, 2012.
- [11] R. Technologies, «ROB Technologies Homepage,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://robtechnologies.com/>. [Πρόσβαση 29 October 2018].
- [12] G. K. Architects, «Non-Standardised Brick Façade,» 2006. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.gramaziokohler.com/web/e/bauten/52.html>. [Πρόσβαση 29 October 2018].
- [13] D. V. Tinkov and A. A. Safonov, ``Design optimization of truss bridge structures of composite materials,`` Journal of Machinery Manufacture and Reliability, vol. 46, pp. 46--52, 2017, available at: <https://doi.org/10.3103/ S1052618817010149>.
- [14] Helmer-Smith, H., Vlachopoulos, N., Dagenais, M. A., & Forbes, B. (2021). In-situ load testing of a WWII era timber Warren truss in the development of a structural health monitoring program. Engineering Structures, 239, 112274.
- [15] Μ. Μ. Σφαντζικόπουλου, Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών ΙΙ, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2003

## ***9. Παράρτημα Α***

### **Κατασκευαστικά σχέδια**



4	LIFTING SCREWS	Σ13	1
3	PYLON	Σ12	4
2	BRIDGE	Σ10	1
1	X Y	Σ11	1
ITEM NO.	DESCRIPTION	DRAWING NO.	QTY.

	ΟΝΟΜΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΙΤΛΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ		07/05/2022	CONCRETE 3D PRINTER
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ		07/05/2022	
			ISO 2768-mH	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ
				Σ14
			ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:70	ΦΥΛΛΟ 1 ΑΠΟ 2
				A4
				

4 3 2 1

F

F

4240

E

E

D

D

9434

C

C


B

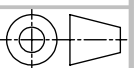
B

9440

A

A

	ΟΝΟΜΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΙΤΛΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ		07/05/2022	CONCRETE 3D PRINTER
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ		07/05/2022	
			ISO 2768-mH	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ
				Σ14
			ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:70	ΦΥΛΛΟ 2 ΑΠΟ 2

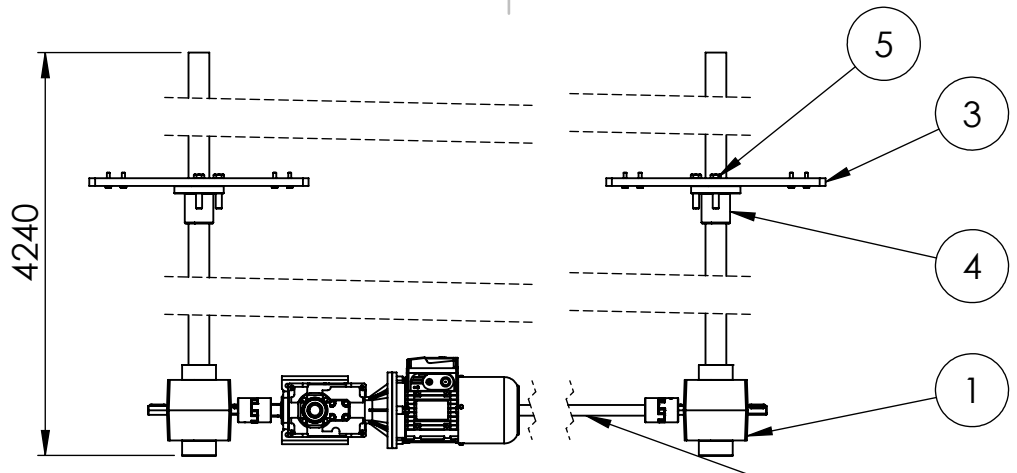


4 3 2 1

4 3 2 1

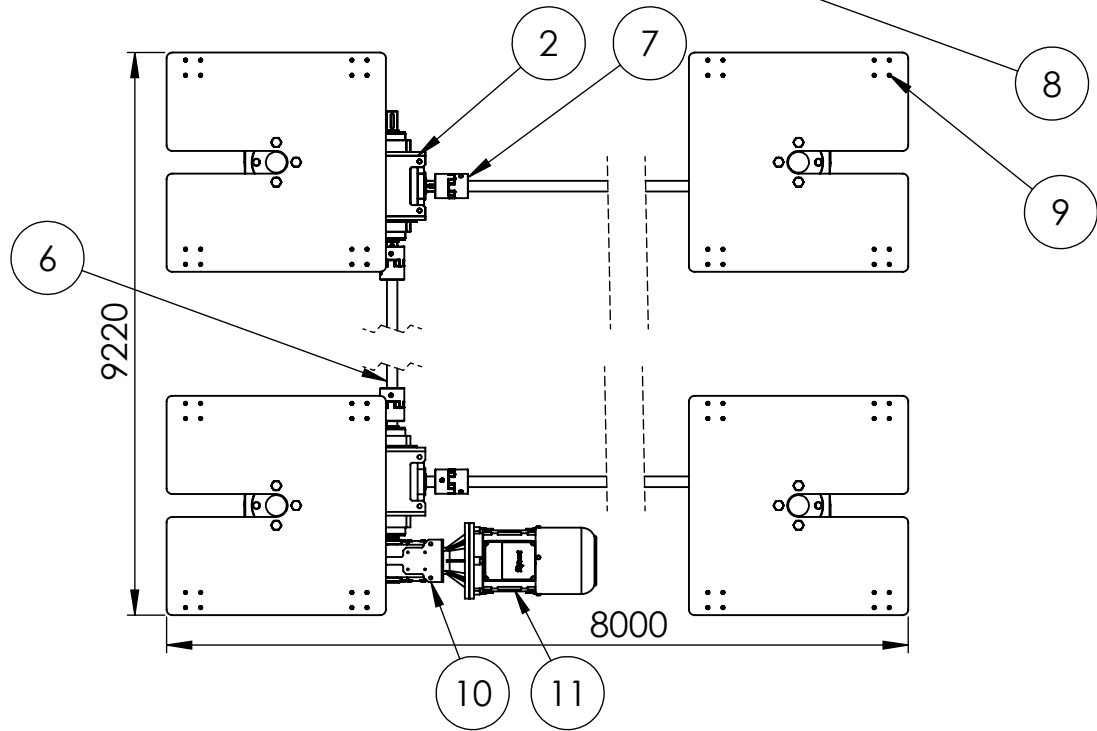
F

F



E

E



D

D

C

C

11	HBZ MOTOR	HBZ 90S	1
10	TRAMEC BEVEL HELICAL GEARBOX	T C 71 B 40 200/24 H28 0 O B3	1
9	DIN EN 24015 - M8 X 35 X 22-N		64
8	STEEL AXLE D=28 L=6800		2
7	AXLE COUPLING D=28		8
6	STEEL AXLE D=28 L=8100		1
5	DIN EN 24014 - M16 X 80 X 38-N		12
4	ACME SCREW NUT	TR 55X9	4
3	LIFTING SCREW PLATE	Σ04	4
2	TRAMEC RIGHT ANGLE GEARBOX	PART-R28 CORPO SX-DESC	2
1	SERVOMECH ACME SCREW JACK	SJ100	4
ITEM NO.	DESCRIPTION	PART NO.	QTY.

B

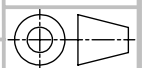
B

A

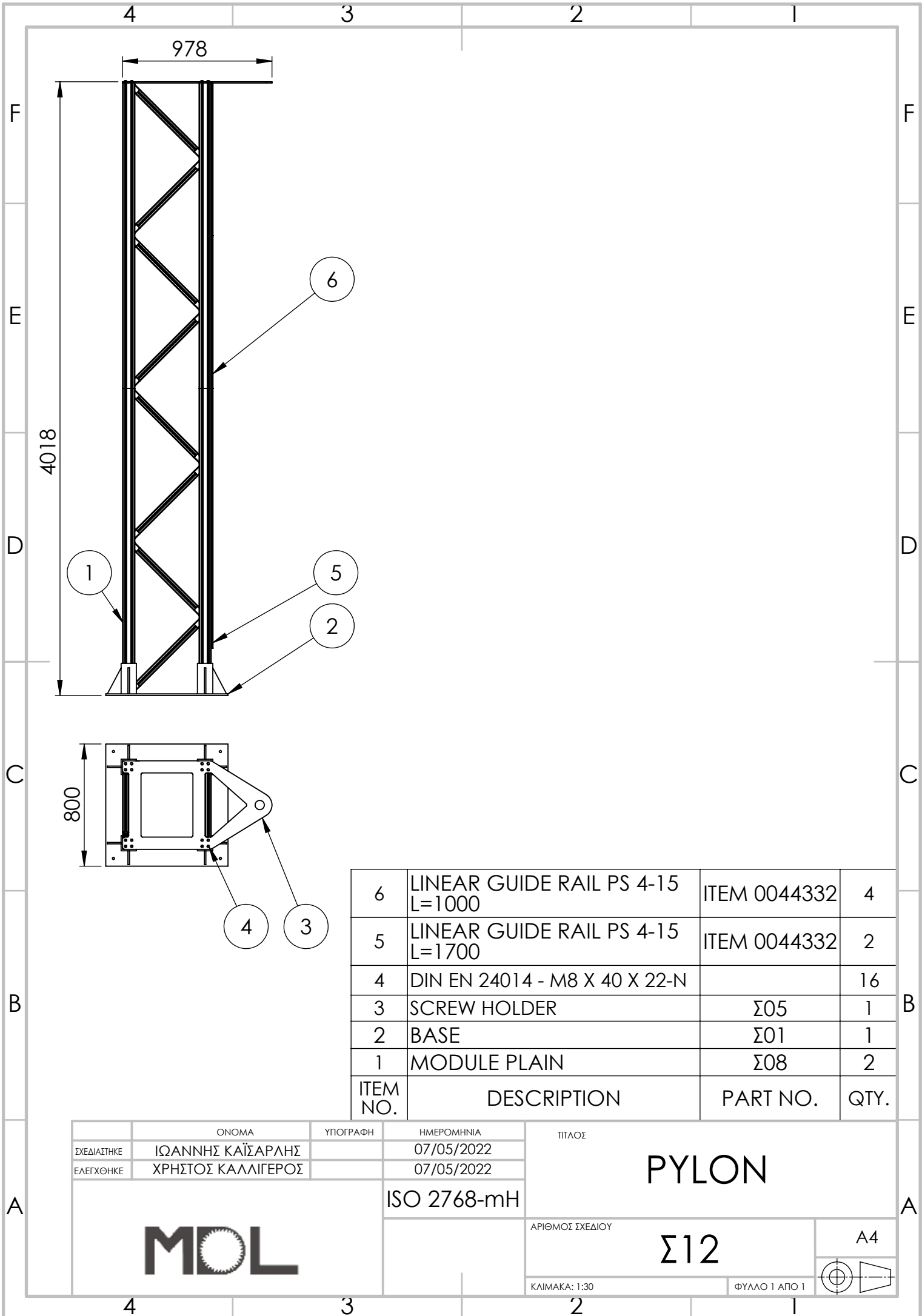
A

ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΟΝΟΜΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ		07/05/2022
	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ		07/05/2022
			ISO 2768-mH


ΤΙΤΛΟΣ
MODULE PLAIN
ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ
Σ13
ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:20
ΦΥΛΛΟ 1 ΑΠΟ 1



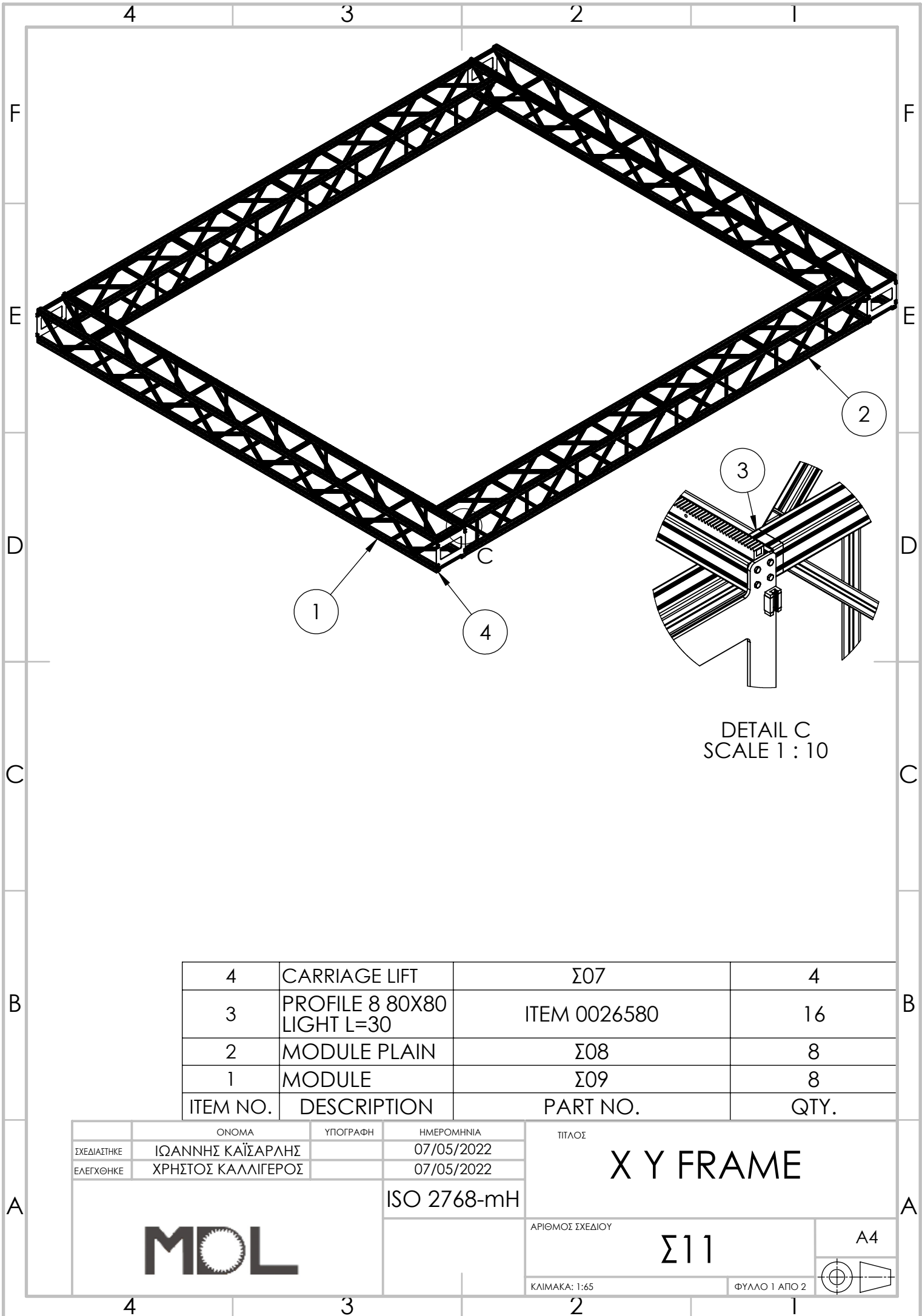
4 3 2 1



6	LINEAR GUIDE RAIL PS 4-15 L=1000	ITEM 0044332	4
5	LINEAR GUIDE RAIL PS 4-15 L=1700	ITEM 0044332	2
4	DIN EN 24014 - M8 X 40 X 22-N		16
3	SCREW HOLDER	Σ05	1
2	BASE	Σ01	1
1	MODULE PLAIN	Σ08	2
ITEM NO.	DESCRIPTION	PART NO.	QTY.


	ΟΝΟΜΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΙΤΛΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ		07/05/2022	PYLON
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ		07/05/2022	
			ISO 2768-mH	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ
				Σ12
			ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:30	ΦΥΛΛΟ 1 ΑΠΟ 1
				A4





DETAIL C  
SCALE 1 : 10

4	CARRIAGE LIFT	Σ07	4
3	PROFILE 8 80X80 LIGHT L=30	ITEM 0026580	16
2	MODULE PLAIN	Σ08	8
1	MODULE	Σ09	8
ITEM NO.	DESCRIPTION	PART NO.	QTY.

	ΟΝΟΜΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΙΤΛΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ		07/05/2022	X Y FRAME
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ		07/05/2022	
			ISO 2768-mH	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ
				Σ11
			ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:65	ΦΥΛΛΟ 1 ΑΠΟ 2
				A4





4

3

2

1

F

F

610

E

E

D

D

9220

C

C


8016

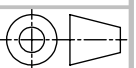
B

B

A

A

	ΟΝΟΜΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΙΤΛΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ		07/05/2022	X Y FRAME
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ		07/05/2022	
			ISO 2768-mH	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ
				Σ11
			ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:50	ΦΥΛΛΟ 2 ΑΠΟ 2

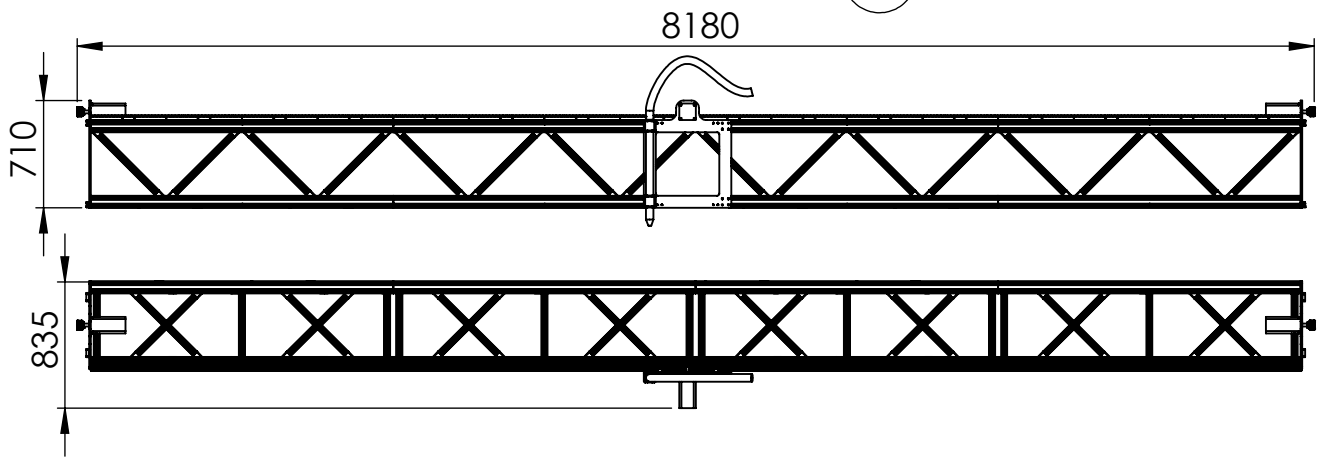
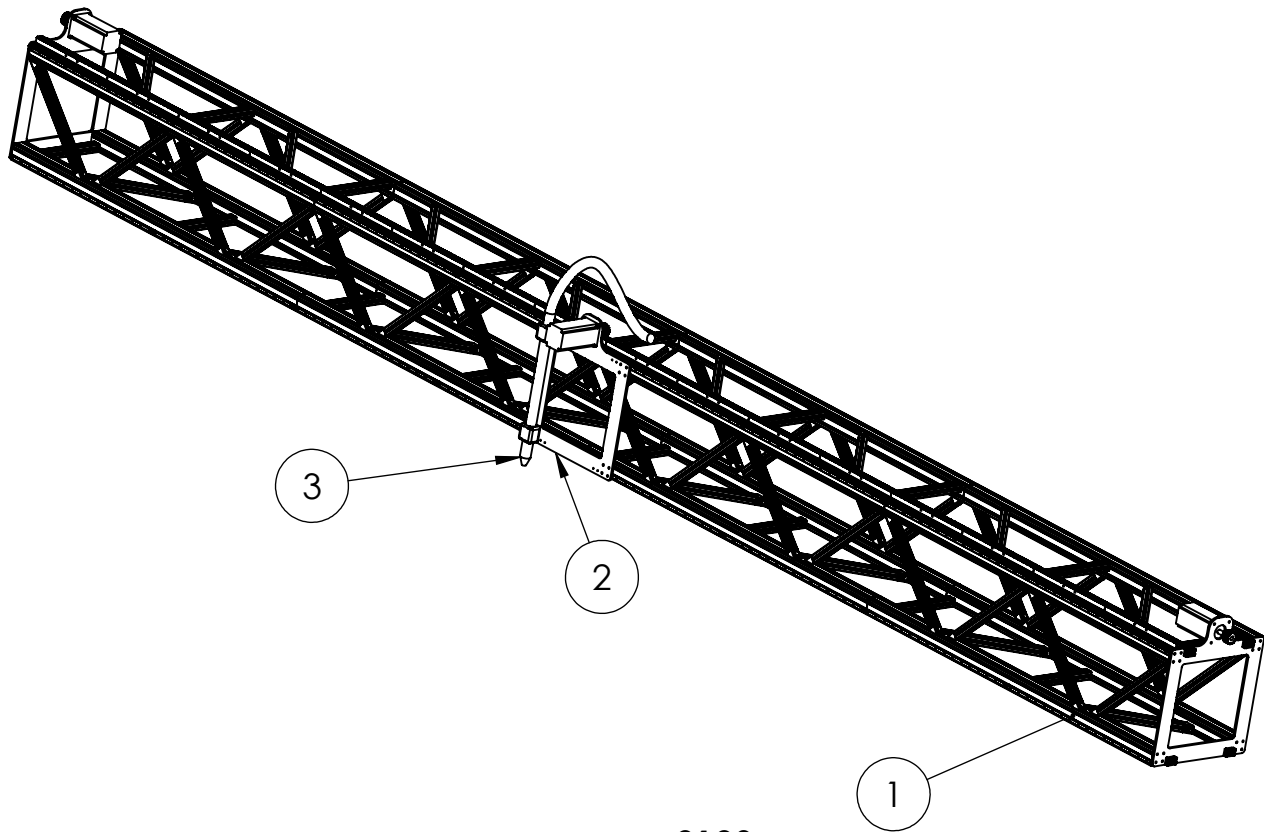


4


3

2

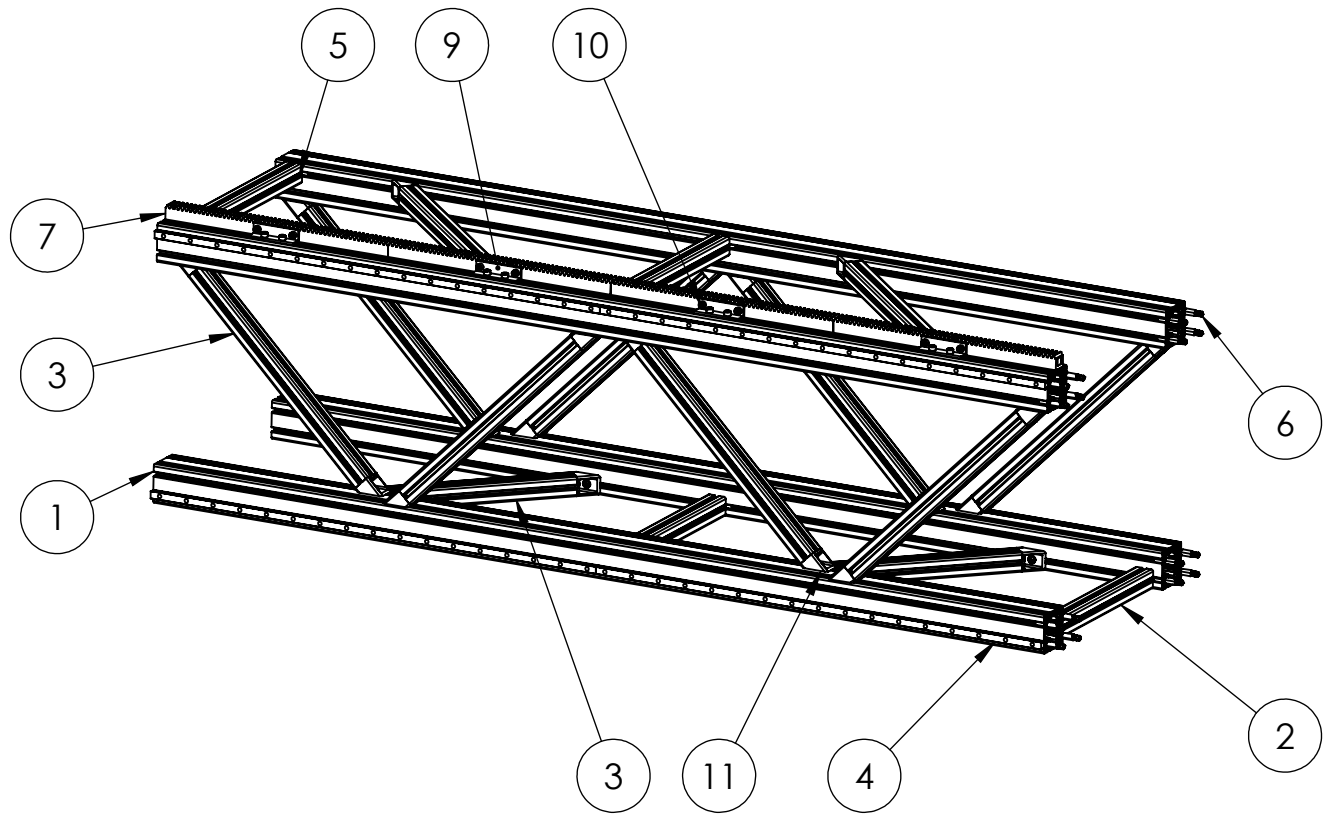
1





3	HEAD		1
2	BRIDGE PLATE	Σ06	3
1	MODULE	Σ09	4
ITEM NO.	DESCRIPTION	PART NO.	QTY.

	ΟΝΟΜΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΙΤΛΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ		07/05/2022	BRIDGE
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ		07/05/2022	
			ISO 2768-mH	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ
				Σ10
			ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:50	ΦΥΛΛΟ 1 ΑΠΟ 1
				A4





11	ANGLE FASTENER 8	ITEM 0067756	24
10	EN ISO 4762 M8 X 12 - 12N		16
9	RIGHT ANGLE BRACKET 25X25		4
8	T-SLOT NUT V8 ST M6	ITEM 0048050	8
7	GEAR RACK M3 L=500	GN 7822 VG	2
6	AUTOMATIC BUTT-FASTENING SET 8	ITEM 0040680	16
5	AUTOMATIC-FASTENING SET 8	ITEM 0038808	12
4	LINEAR GUIDE RAIL PS 4-15 L=1000	ITEM0044332	4
3	PROFILE 8 40X40 LIGHT L=538	ITEM 0002633	12
2	PROFILE 8 40X40 LIGHT L=420	ITEM 0002633	4
1	PROFILE 8 80X80 LIGHT L=2000	ITEM 0026580	4
ITEM NO.	DESCRIPTION	PART NO.	

	ΟΝΟΜΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΙΤΛΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ		07/05/2022	MODULE
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ		07/05/2022	
			ISO 2768-mH	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ
				Σ09
			ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:15	ΦΥΛΛΟ 1 ΑΠΟ 2
				A4
				

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

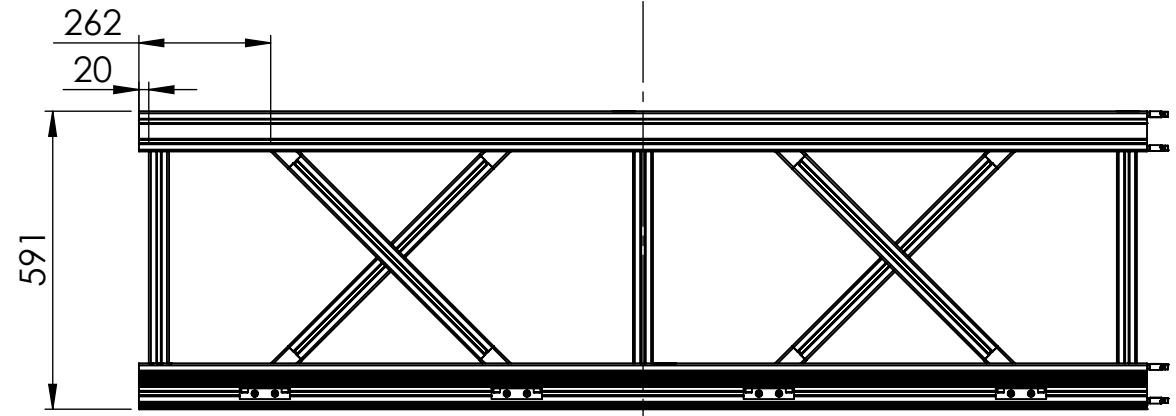
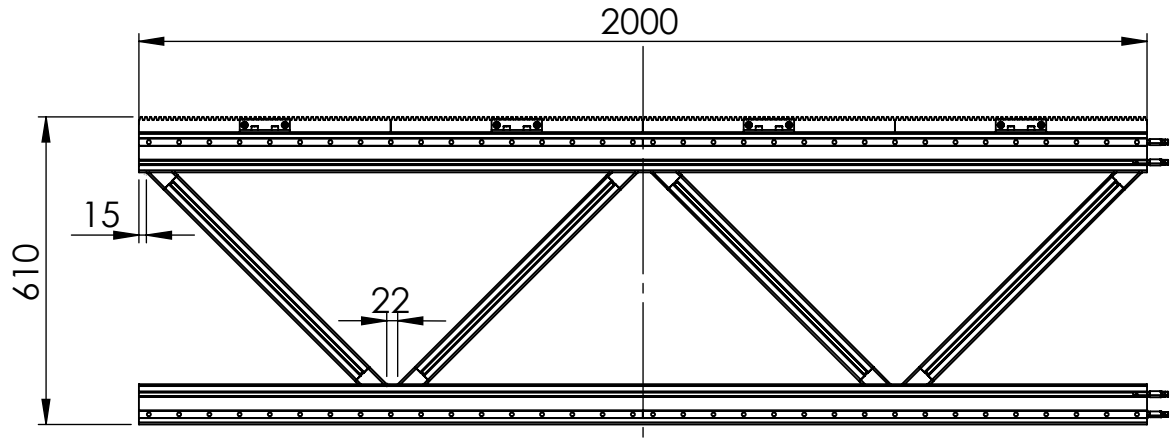
C



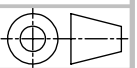
B

B

A

A



	ΟΝΟΜΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΙΤΛΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ		07/05/2022	MODULE
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ		07/05/2022	
			ISO 2768-mH	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ
				Σ09
			ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:15	ΦΥΛΛΟ 2 ΑΠΟ 2
				 

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

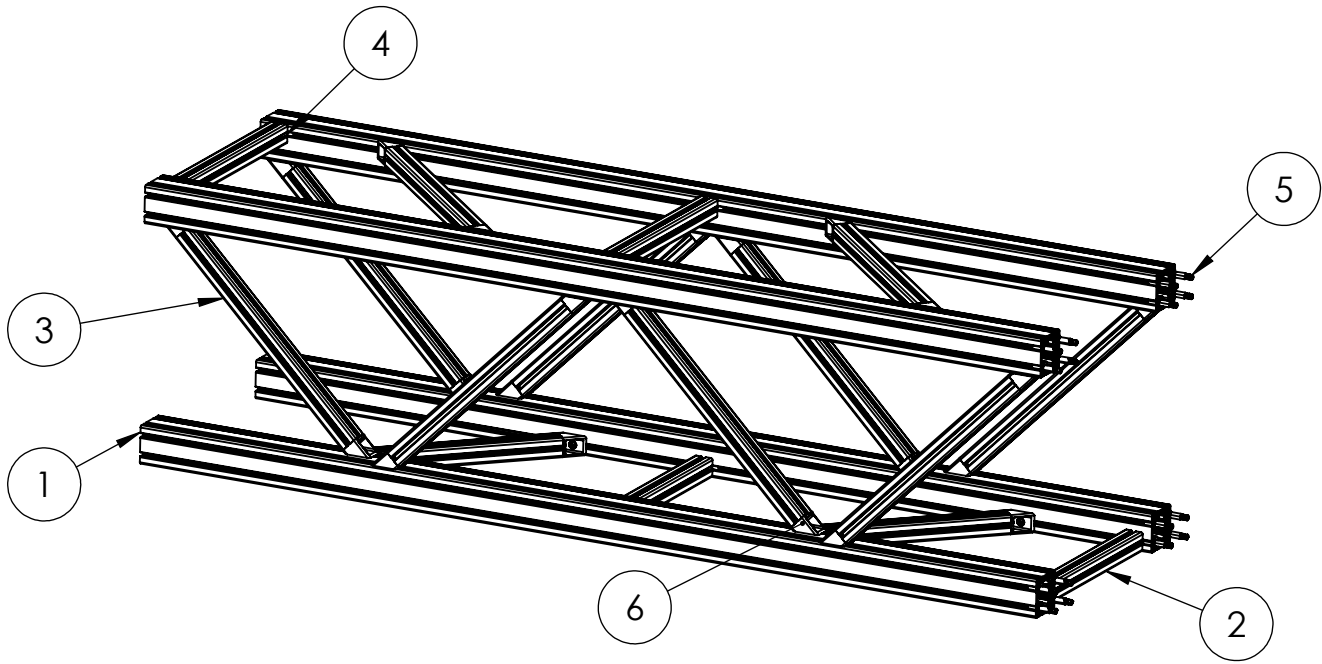
C

B



B

A

A



6	ANGLE FASTENER 8	ITEM 0067756	24
5	AUTOMATIC BUTT-FASTENING SET 8	ITEM 0040680	16
4	AUTOMATIC FASTENING SET 8	ITEM 0038808	12
3	PROFILE 8 40X40 LIGHT L=538	ITEM 0002633	12
2	PROFILE 8 40X40 LIGHT L=420	ITEM 0002633	4
1	PROFILE 8 80X80 LIGHT L=2000	ITEM 0026580	4
ITEM NO.	DESCRIPTION	PART NO.	QTY.

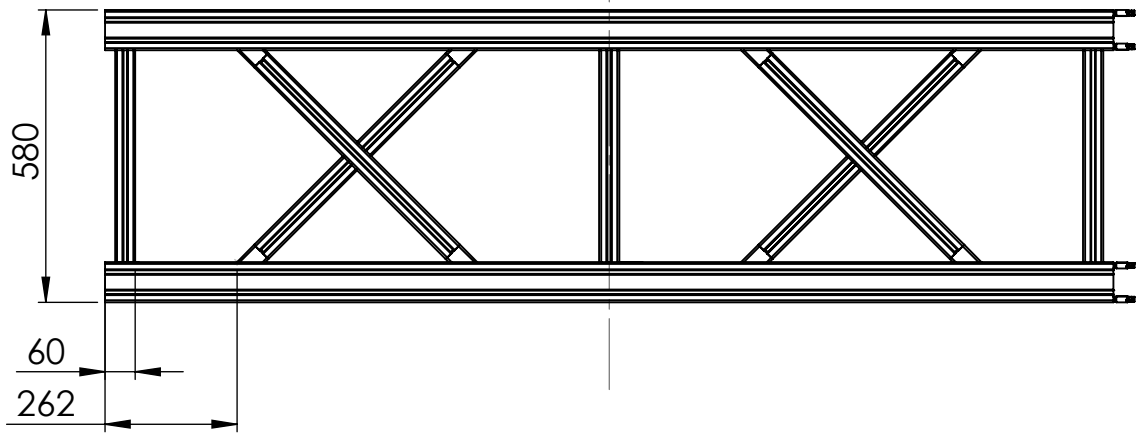
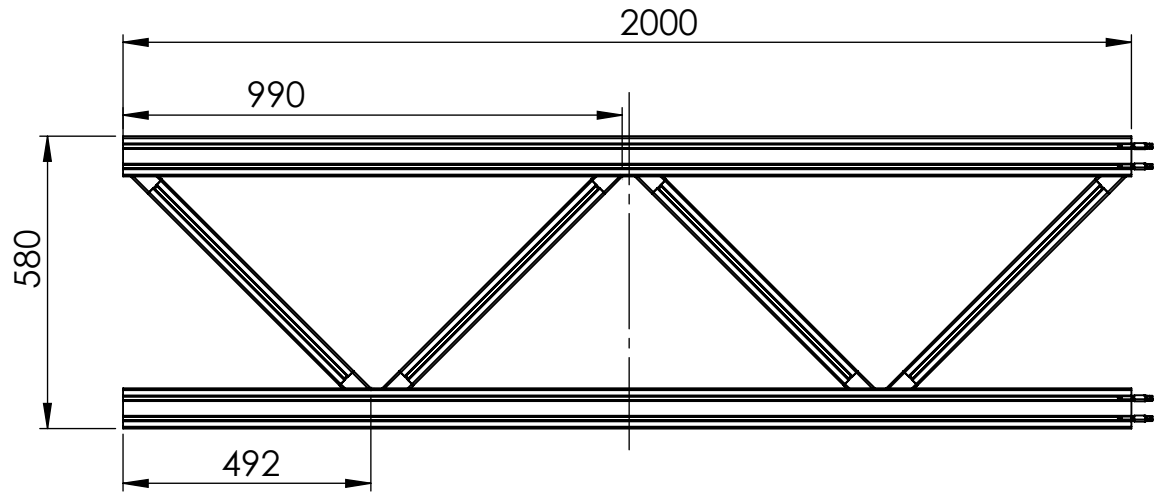
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΙΤΛΟΣ
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ		07/05/2022	MODULE PLAIN
			07/05/2022	
			ISO 2768-mH	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ
				Σ08
			ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:15	ΦΥΛΛΟ 1 ΑΠΟ 2
				A4
				


4

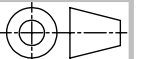
3

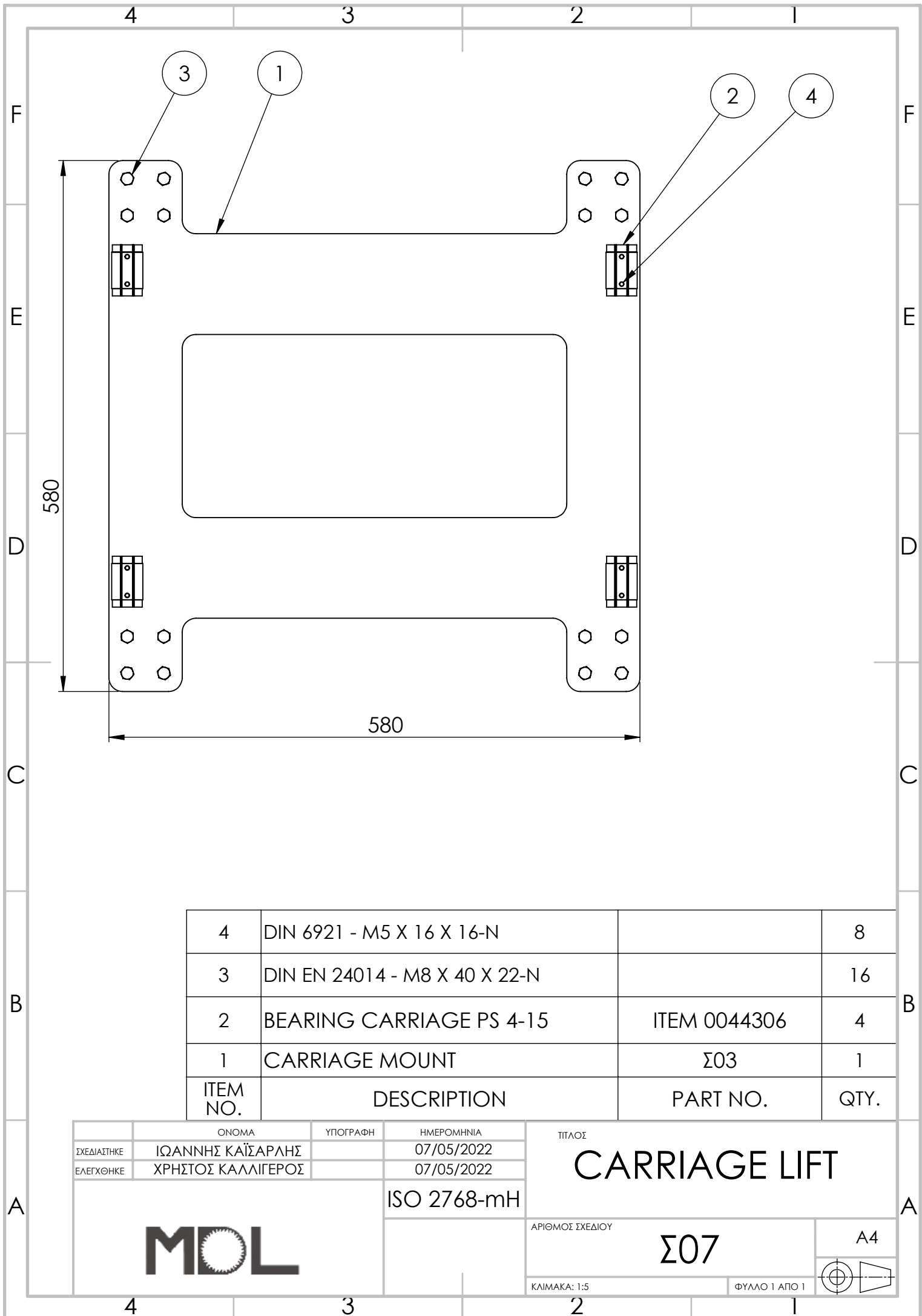
2

1



	ΟΝΟΜΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΙΤΛΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ		07/05/2022	MODULE PLAIN
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ		07/05/2022	
			ISO 2768-mH	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ
				Σ08
			ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:15	ΦΥΛΛΟ 2 ΑΠΟ 2
				A4

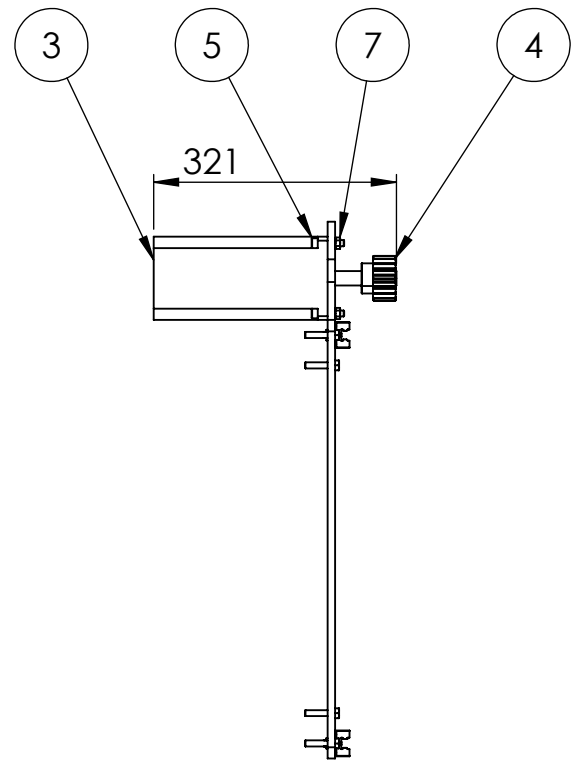
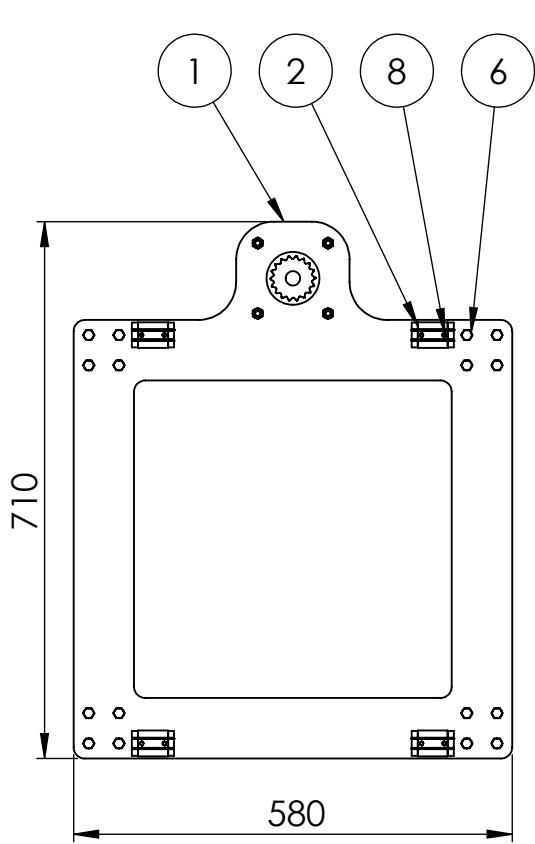





4	DIN 6921 - M5 X 16 X 16-N		8
3	DIN EN 24014 - M8 X 40 X 22-N		16
2	BEARING CARRIAGE PS 4-15	ITEM 0044306	4
1	CARRIAGE MOUNT	Σ03	1
ITEM NO.	DESCRIPTION	PART NO.	QTY.

	ΟΝΟΜΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΙΤΛΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ		07/05/2022	CARRIAGE LIFT
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ		07/05/2022	
ISO 2768-mH			ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ	
			Σ07	A4
			ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:5	ΦΥΛΛΟ 1 ΑΠΟ 1

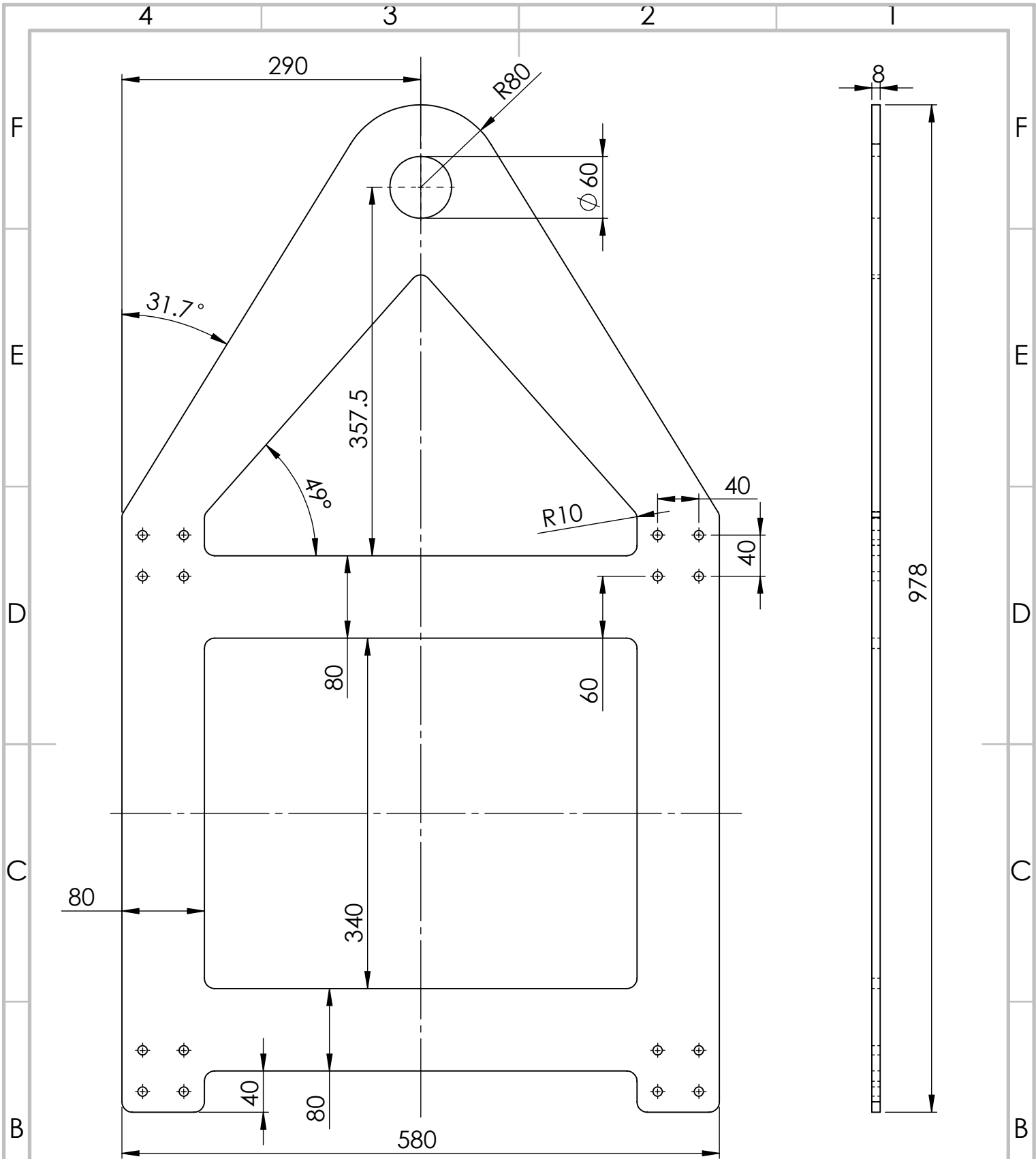




8	DIN EN 24017 - M5 X 20-N		8
7	HEXAGON NUT ISO 4032 - M8 - W - N		4
6	DIN EN 24015 - M8 X 40 X 22-N		16
5	SOCKET HEAD CAP SCREW 4762_DIN		4
4	KANA PINION GEAR M=3 B=18	M3B18	1
3	STEPPER MOTOR	110HS 3230-06	1
2	BEARING CARRIAGE PS 4-15	ITEM 0044306	4
1	BRIDGE PLATE	PART--DESC	1
ITEM NO.	DESCRIPTION	PART NO.	QTY.

ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ		ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	07/05/2022	ΤΙΤΛΟΣ <b>BRIDGE PLATE</b>
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ			07/05/2022		
					ISO 2768-mH	
					ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ	<b>Σ06</b>
					ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:10	ΦΥΛΛΟ 1 ΑΠΟ 1
						A4





ISO 2768-mH

$\sqrt{Ra\ 3.2}$  ( $\checkmark$ )

ISO 13715

$\begin{matrix} \text{L} \\ \text{L} \\ \text{L} \end{matrix} \begin{matrix} -0.5 \\ -0.5 \\ -0.5 \end{matrix} \begin{matrix} +0.5 \\ +0.5 \\ +0.5 \end{matrix}$

	ΟΝΟΜΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ		07/05/2022
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ		07/05/2022
			ΥΛΙΚΟ: 1023 STEEL

ΤΙΤΛΟΣ

SCREW HOLDER

**MOL**

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ

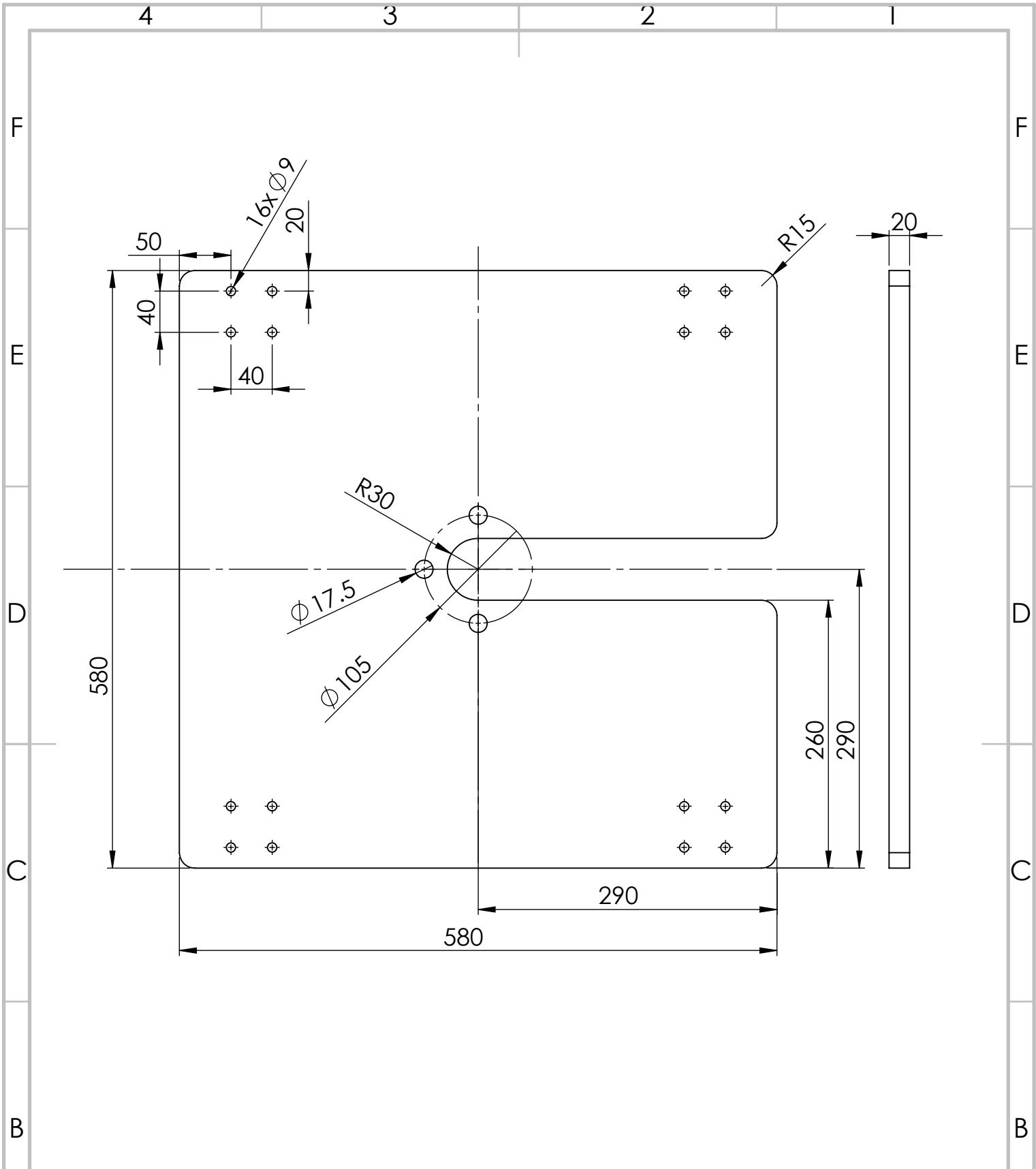
Σ05

A4

ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:5

ΦΥΛΛΟ 1 ΑΠΟ 1





ISO 2768-mH		$\sqrt{Ra\ 3.2}$ (✓)		ISO 13715			
ΟΝΟΜΑ		ΥΠΟΓΡΑΦΗ		ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ		ΤΙΤΛΟΣ	
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ			07/05/2022	LIFTING SCREW PLATE		
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ			07/05/2022			
				ΥΛΙΚΟ: 1023 STEEL		ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ	
						Σ04	
				ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:5		ΦΥΛΛΟ 1 ΑΠΟ 1	

A

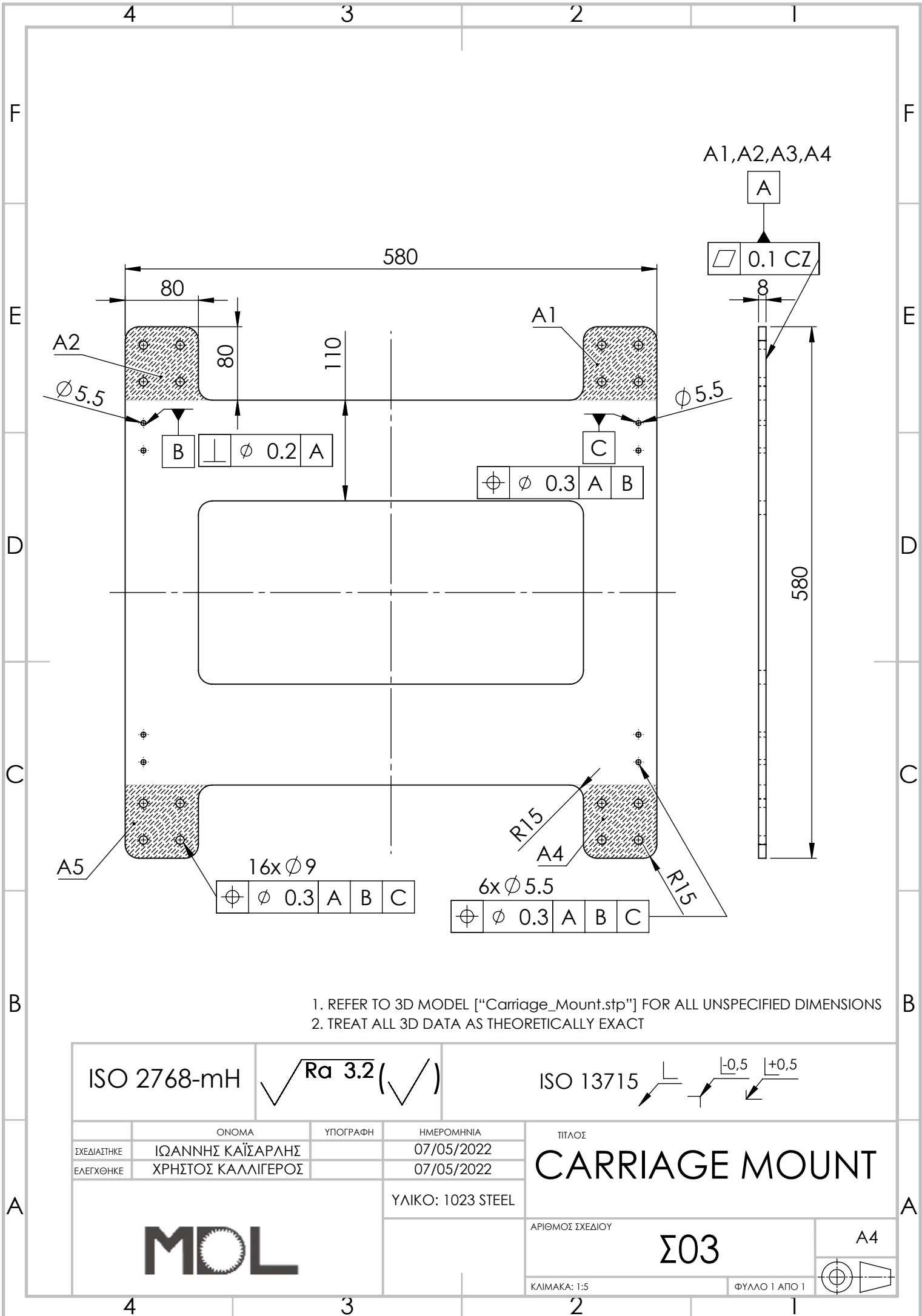
A

4

3

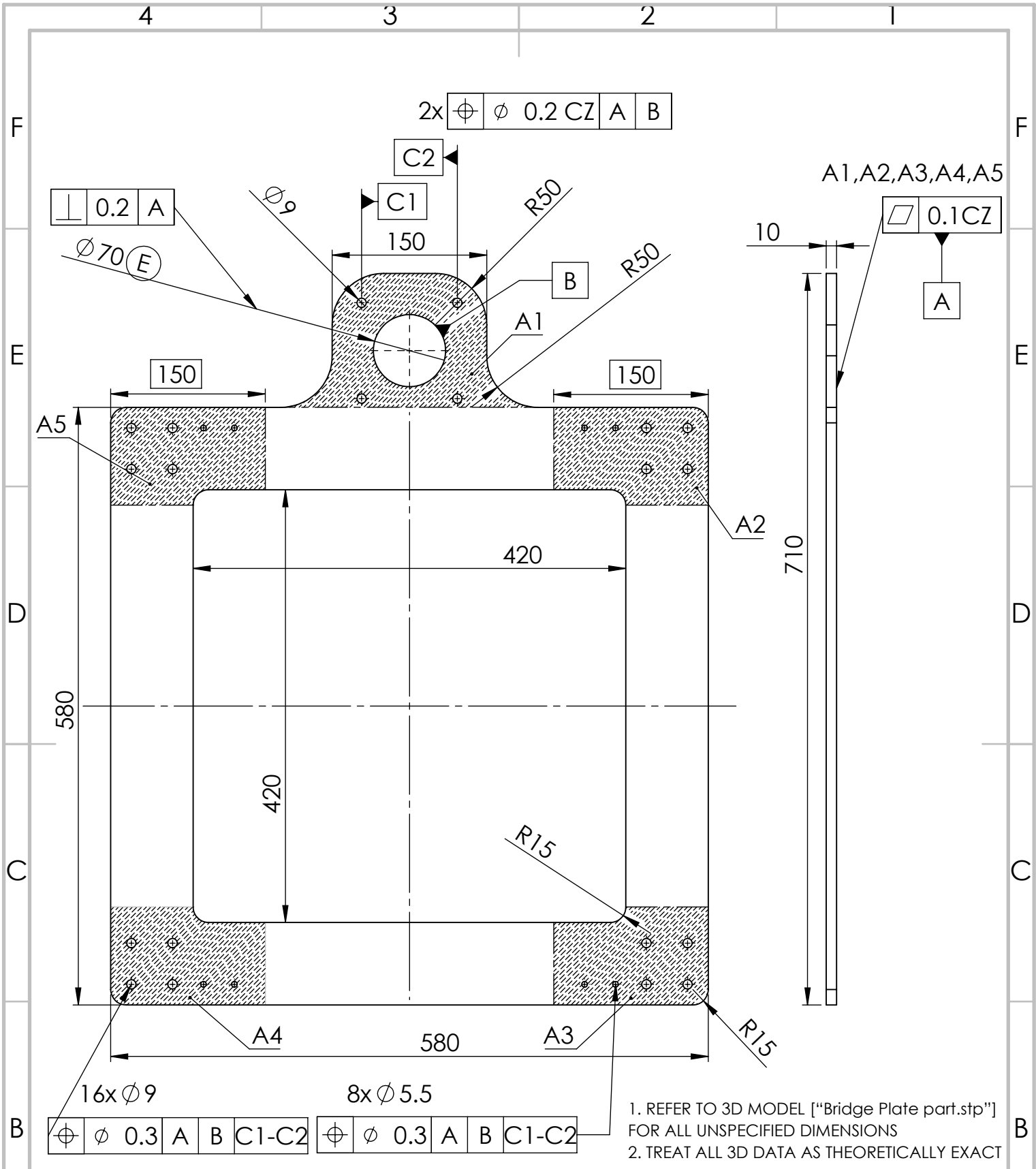
2

1



1. REFER TO 3D MODEL ["Carriage\_Mount.stp"] FOR ALL UNSPECIFIED DIMENSIONS  
 2. TREAT ALL 3D DATA AS THEORETICALLY EXACT

ISO 2768-mH		$\sqrt{Ra\ 3.2}$		ISO 13715	
ΟΝΟΜΑ		ΥΠΟΓΡΑΦΗ		ΤΙΤΛΟΣ	
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ			CARRIAGE MOUNT	
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ				
		ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ			
		07/05/2022			
		07/05/2022			
		ΥΛΙΚΟ: 1023 STEEL			
				ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ	
				Σ03	
				Α4	
		ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:5		ΦΥΛΛΟ 1 ΑΠΟ 1	



ISO 2768-mH

$\sqrt{Ra\ 3.2}$

ISO 13715

$\begin{matrix} \text{L} \\ \text{L} \\ \text{L} \end{matrix} \begin{matrix} -0.5 \\ -0.5 \\ -0.5 \end{matrix} \begin{matrix} +0.5 \\ +0.5 \\ +0.5 \end{matrix}$

ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ		ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	07/05/2022
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ			ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	07/05/2022
			ΥΛΙΚΟ: 1023 STEEL		

ΤΙΤΛΟΣ

BRIDGE PLATE PART

**MOL**

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ

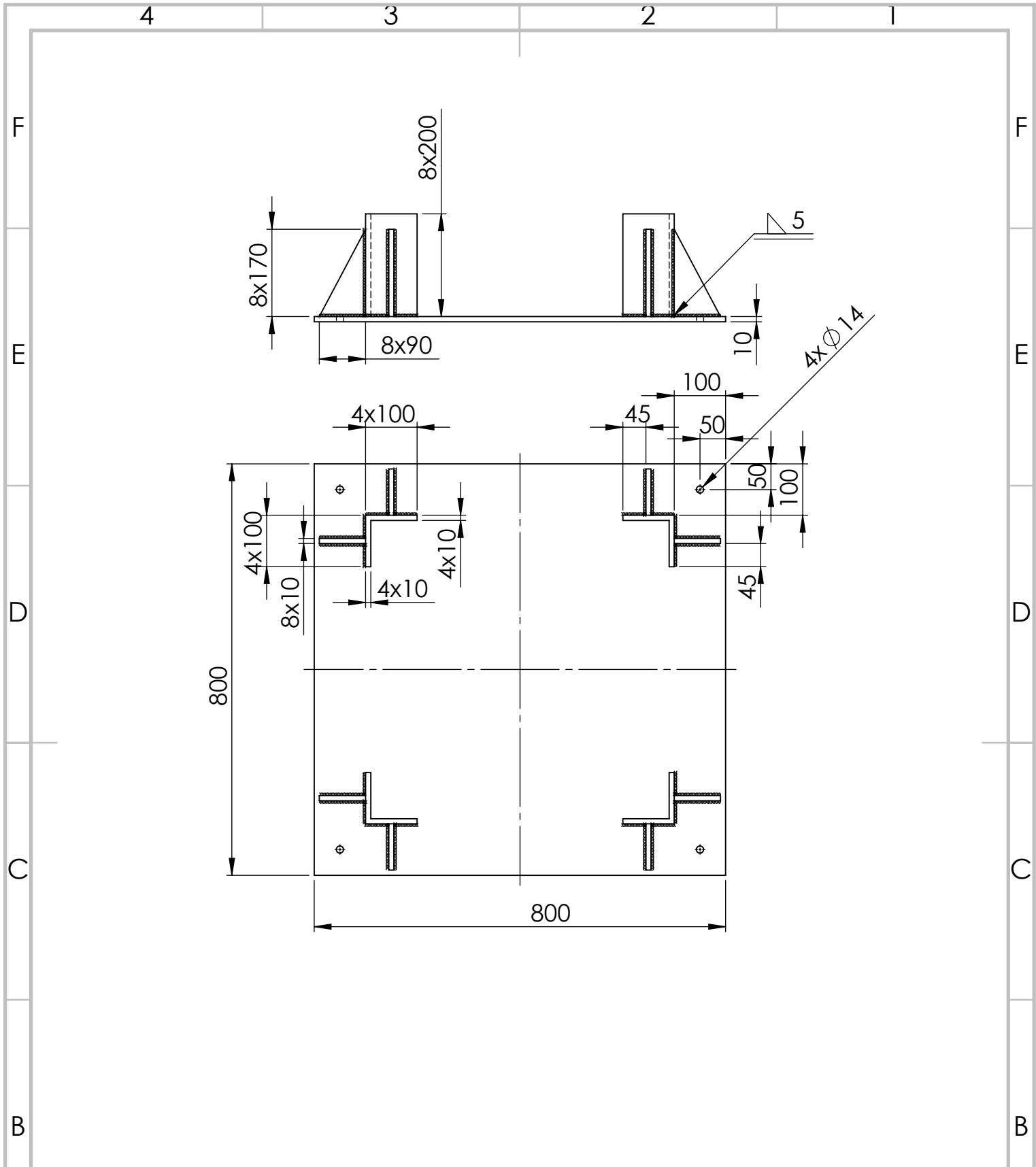
Σ02

A4

ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:5

ΦΥΛΛΟ 1 ΑΠΟ 1






ISO 13920-BF

$\sqrt{Ra\ 3.2}$  ( $\checkmark$ )

ISO 13715

$\begin{matrix} \text{L} \\ \text{L} \\ \text{L} \end{matrix} \begin{matrix} -0.5 \\ -0.5 \\ -0.5 \end{matrix} \begin{matrix} +0.5 \\ +0.5 \\ +0.5 \end{matrix}$

ΟΝΟΜΑ		ΥΠΟΓΡΑΦΗ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΙΤΛΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΪΣΑΡΛΗΣ		07/05/2022	BASE
ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ	ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΛΙΓΕΡΟΣ		07/05/2022	
			ΥΛΙΚΟ: 1023 STEEL	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ
				Σ01
			ΚΛΙΜΑΚΑ: 1:10	ΦΥΛΛΟ 1 ΑΠΟ 1

A4

