



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Μελέτη και σχεδιασμός πρωτότυπου 3D εκτυπωτή μεγάλου όγκου εργασίας βασισμένου
στην πλατφόρμα OpenBuilds ACRO”**

(ΚΑΤΗΦΟΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ)

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Πανώριος Μπενάρδος

ΑΘΗΝΑ 2024

Περίληψη

Στην διπλωματική αυτή εργασία, θα πραγματοποιηθεί μελέτη και σχεδιασμός ενός πρωτότυπου 3D εκτυπωτή μεγάλου όγκου εργασίας. Αυτό θα γίνει με χρήση της πλατφόρμας ACRO της εταιρίας OpenBuilds, (OpenBuilds ACRO n.d.) που αποτελεί σύστημα κινηματικής XY υψηλής ακρίβειας, ώστε να προσδοθεί σε αυτήν ένας άξονας κίνησης Z. Στην πορεία της εργασίας είναι σημαντικό να επιτευχθούν και επιμέρους στοιχεία που κάνουν έναν 3D εκτυπωτή χρήσιμο, όπως η ακρίβεια, η ευχέρεια στην χρήση, η ταχύτητα εκτύπωσης. Μέσα και παράλληλα με την εργασία θα γίνουν και όλες οι απαραίτητες επιλογές υποσυστημάτων ενός εκτυπωτή.

Η συγγραφή της εργασίας στηρίχτηκε σε μελέτες και εργασίες ακαδημαϊκών από πανεπιστήμια της Ευρώπης και της Αμερικής και κυριότερα του ΕΜΠ και του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Κατεργασιών. Η εργασία διαχωρίζεται σε τρεις μεγάλες ενότητες, όπου στην πρώτη γίνεται μια γενικότερη ανάλυση στην Τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής ενώ στην δεύτερη ενότητα γίνεται μια πιο συγκεκριμένη αναφορά και εμβάθυνση στη συγκεκριμένη μελέτη, όπου τελικά καταλήγει στην τρίτη ενότητα και στην μοντελοποίηση του τελικού πρωτοτύπου.

Η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής, αποτελεί τεχνική μέσω της οποίας πραγματοποιείται κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων μέσω ενός ψηφιακού μοντέλου. Υποκατηγορία της Προσθετικής κατασκευής αποτελεί η Τρισδιάστατη εκτύπωση, μέθοδος δηλαδή κατασκευής αντικειμένων μέσω διαδοχικής απόθεσης στρώσεων υλικού. Μέσω αυτής της διαδικασίας μπορούν να κατασκευαστούν αντικείμενα από διάφορα υλικά όπως πλαστικά κατά κύριο λόγο, αλλά ακόμα και κεραμικά, πολυμερή, ακόμη και μεταλλικά. Η Προσθετική Κατασκευή έχει γεννηθεί εδώ και αρκετά χρόνια και αποτελεί πλέον πυλώνα της 4^{ης} βιομηχανικής επανάστασης.

Η διαδικασία είναι σχετικά απλή. Ένα τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο τεμαχίζεται μέσω ειδικού προγράμματος σε διάφορα στρώματα. Το αρχείο αυτό μετατρέπεται στη συνέχεια σε G-κώδικα, ο οποίος με τη σειρά του μέσω του εκτυπωτή μετατρέπεται σε εντολές κίνησης και απόθεσης υλικού. Διαδοχικά στρώματα εναποτίθενται το ένα πάνω στο άλλο δίνοντας μια τελική μορφή στο αντικείμενο.

Η μέθοδος της τρισδιάστατης εκτύπωσης, προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα που την καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμη, πλεονεκτήματα που έχουν να κάνουν με τον τρόπο κατασκευής, την εξατομίκευση, την φύρα κ.α. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι προσθετικής κατασκευής, οι οποίες ταξινομούνται σύμφωνα με το ISO/ASTM 52900:2021. (Additive manufacturing General principles Fundamentals and vocabulary 2021)

Στην συγκεκριμένη εργασία, επιλέχθηκε το αρχιτεκτονικό μοντέλο FDM ευθύγραμμου καρτεσιανού εκτυπωτή, με εναπόθεση υλικού, όντας μια επιλογή σχετικά πιο απλή στην μελέτη και κατασκευή, με ακριβή αποτελέσματα, ιδιαίτερα δημοφιλή, με δυνατότητα εργασίας με διάφορες πρώτες ύλες.

Το μοντέλο του πρωτότυπου εκτυπωτή διαχωρίστηκε σε επιμέρους υποσυστήματα, για καθένα από τα οποία έγινε έρευνα και επιλογή. Η εκάστοτε επιλογή έγινε κατόπιν εμπειριστατωμένης μελέτης με χρήση Πίνακα Αποφάσεων. Οι Πίνακες Αποφάσεων αποτελούν εργαλείο λήψης αποφάσεων όταν αυτές εξαρτώνται από μια σειρά κριτηρίων. Αποτελούν ένα ιδιαίτερα αξιόπιστο εργαλείο ανάμεσα σε άλλα για την πραγματοποίηση μια αντικειμενικής μελέτης σε σύνθετα ζητήματα είτε ποσοτικά είτε ποιοτικά. Τα κριτήρια που τέθηκαν ήταν ο όγκος της εκτύπωσης, η ακρίβεια, η ταχύτητα εκτύπωσης, η στιβαρότητα του τελικού πρωτοτύπου και φυσικά το κόστος μιας ενδεχόμενης μεταγενέστερης κατασκευής, με διαφορετικό βαθμό βαρύτητας το καθένα, αναλόγως με τις ανάγκες.

Τα υποσυστήματα αυτά αφορούν το μοντέλο κινηματικής του εκτυπωτή, την τράπεζα εκτύπωσης, την μετάδοση κίνηση στους άξονες XYZ, την μέθοδο τροφοδοσίας υλικού, την θέρμανση της τράπεζας εκτύπωσης και την θερμομόνωση του εκτυπωτή.

Με τις τελικές επιλογές, πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση σε περιβάλλον SolidWorks, ώστε να διαπιστωθεί εάν τα μέρη που επιλέχθηκαν ή κατασκευάστηκαν μπορούν να ανταπεξέλθουν σε πραγματικές συνθήκες. Στο περιβάλλον του SolidWorks δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να πραγματοποιήσει έλεγχο σε ένα μοντέλο με αξιοποίηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Πρόκειται για αριθμητική μέθοδο με σκοπό μια προσέγγιση (αρκετά ακριβή) της λύσης διαφορικών εξισώσεων. Η μέθοδος αυτή αποτελεί συνέχεια των μεθόδων αριθμητικής επίλυσης μητρώων και συνιστά μια ιδιαίτερα ακριβή και συνεπή μεθοδολογία για τον έλεγχο σε καταπόνηση οποιονδήποτε γεωμετριών. (Kurowski 2013)

Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Στην μέθοδο ακολουθείται η εξής διαδικασία: Σχεδιάζεται το τρισδιάστατο μοντέλο, στο οποίο στη συνέχεια ορίζεται ένα υλικό. Με αυτόν τον τρόπο «φορτώνονται» οι συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες από ψηφιακή βιβλιοθήκη του προγράμματος. Έστερα, ο χρήστης μπορεί αν ορίσει συγκεκριμένα σημεία στήριξης και βαθμούς ελευθερίας αναλόγως το είδος του μηχανισμού που καλείται να κατασκευάσει. Τέλος και αναλόγως το είδος της μελέτης, το μοντέλο χωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία και ελέγχεται υπολογιστικά στην εκάστοτε καταπόνηση.

Συγκεκριμένα έγιναν μελέτες σχετικά με την αντοχή της τράπεζας εκτύπωσης η οποία θα δέχεται και θα πρέπει να αντέχει ιδιαίτερα μεγάλα φορτία σε σχέση με έναν συμβατικό εκτυπωτή, σχετικά με την αντοχή του άξονα μεταφοράς του ακροφυσίου, που θα προστεθεί, αλλά και για την διάταξη που θα αναλάβει την κίνηση στον Z άξονα, αφού κι αυτό αποτελεί τροποποίηση στην αρχική πλατφόρμα.

Με το πέρας των παραπάνω ενεργειών, εκλέχθηκαν τα κατάλληλα μηχανικά μέρη τα οποία σε δεύτερο χρόνο μπορούν να αγοραστούν και να πραγματοποιηθεί η τελική συναρμογή. Ορισμένα συμπεράσματα από την μελέτη μπορούν να συνοψιστούν παρακάτω:

Η τράπεζα εκτύπωσης, σχεδιάστηκε σε διαστάσεις ίσες με αυτές που ορίστηκαν ως ωφέλιμες από την αρχή της εργασίας. Τα σενάρια για τα οποία θα πρέπει να γίνει η μελέτη είναι δύο. Το πρώτο σενάριο θα είναι για καταπόνηση από ισοδύναμο φορτίο, δηλαδή καταπόνηση συμμετρική ως προς την τράπεζα και το δεύτερο για καταπόνηση από μη ισοδύναμο φορτίο, δηλαδή για καταπόνηση μόνο σε μια πλευρά της τράπεζας με την άλλη να μην δέχεται καθόλου φορτίο. Για κάθε περίπτωση μελετήθηκαν 3 διαφορετικά πάχη αλουμινίου ως τράπεζα. Επίσης πραγματοποιήθηκε μελέτη για κάθε υποσενάριο με δύο πιθανές παραμέτρους ως προς τα σημεία στήριξης, για 6 σημεία και για 8. Από την μελέτη φάνηκε πως σε κάθε περίπτωση μια τράπεζα πάχους 3mm δεν θα μπορούσε καμία περίπτωση να συγκρατήσει το κατασκευαζόμενο δοκίμιο. Για πάχος 5mm στο ενδεχόμενο 6 σημείων στήριξης οι ανοχές ήταν εκτός ορίων ενώ για 8 οι ανοχές ήταν εντός ορίων. Για πάχος τράπεζας 6mm κάθε ενδεχόμενο ήταν εφικτό.

Για τον άξονα μεταφοράς του ακροφυσίου και την αντοχή μετά την προσθήκη της διάταξης εξώθησης τα αποτελέσματα έδειξαν πως δεν θα επιφέρει καμία αλλαγή.

Για τους τραπεζοειδείς κοχλίες και συγκεκριμένα για τον αριθμό αυτών, έγινε έλεγχος για χρήση ενός ο οποίος έδωσε απορριπτά αποτελέσματα και για αυτόν τον λόγο αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν δύο σε συμμετρικές θέσεις προκειμένου να επιμερίζεται το βάρος της διάταξης ACRO. Για την διάμετρό τους έγινε μελέτη σε κοινούς κοχλίες Φ8mm, οι οποίοι φάνηκε να μην δίνουν επιτρεπτά αποτελέσματα και γι' αυτό πραγματοποιήθηκε επαναδιαστασιολόγηση σε 10mm και οι οποίοι φάνηκε να δέχονται το φορτίο μέσα σε επιτρεπόμενα όρια.

Επίσης μελέτη πραγματοποιήθηκε για την ανάγκη θέρμανσης της τράπεζας εκτύπωσης αλλά και την ανάγκη ικανοποιητικής θερμομόνωσής του εκτυπωτή, καθώς σε τέτοια μεγάλα μεγέθη οι διαφορές της θερμοκρασίας από τη μια άκρη της τράπεζας στην άλλη θα μπορούσαν να είναι μεγάλες, κάτι που θα οδηγήσει σε μη ασφαλή επικόλληση του τεμαχίου στην τράπεζα και ανομοιομορφίες στην

τοποθέτηση και την ένωση των στρωμάτων, ζητήματα που με τη σειρά τους θα οδηγήσουν σε ενδεχόμενες αστοχίες.

Τέλος υπολογίστηκε το κόστος μιας ενδεχόμενης κατασκευής του πρωτότυπου και κατασκευάστηκε το Πίνακας Υλικών. Μέσα από την πορεία μελέτης αποδείχθηκε πως ακόμη και με τους πιο μετριοπαθείς υπολογισμούς, το κόστος της κατασκευής ενός τέτοιου πρωτότυπου εκτυπωτή θα ξεπερνάει τα 1200€, με την σύμβαση πως όλα τα μηχανικά μέρη θα αγοραστούν και χωρίς να υπάρχει ήδη απόθεμα κάποιων.

Η εργασία ανοίγει το δρόμο για πολλά πεδία μελέτης και μελλοντικής εργασίας. Προφανώς ένας πρώτος στόχος θα μπορούσε να ήταν η ηλεκτρολογική μελέτη του πρωτότυπου, η έρευνα αγορά ως προς τα απαραίτητα ηλεκτρονικά μέρη ώστε ο εκτυπωτής αυτός να κατασκευαστεί και να προγραμματιστεί. Επίσης θα μπορούσε να αποτελέσει πεδίο μελέτης, η αναβάθμιση των τελικών χαρακτηριστικών του πρωτότυπου, χαρακτηριστικά όπως η ταχύτητα, η ακρίβειά κ.α. Επίσης η έρευνα και ο σχεδιασμός για συνεργασία του εκτυπωτή με περισσότερα υλικά θα μπορούσε να ανοίξει δρόμους για μελέτη εκτύπωσης μεγάλων αντικειμένων για νευραλγικούς τομείς όπως ιατρική, αεροδιαστημική, αυτοκινητοβιομηχανία κ.α. Τέλος σαν μεταγενέστερη εργασία ιδιαίτερα σημαντική θα μπορούσε να θεωρηθεί μια προσπάθεια για σχεδιασμό και μελέτη εκτυπωτών υψηλού όγκου εργασίας που να στηρίζονται σε διαφορετικές αρχιτεκτονικές, όπως λ.χ. εκτυπωτών ρητίνης, ή ακόμα και σκόνης.

Λέξεις κλειδιά: 3D εκτύπωση, εκτυπωτής, πρωτότυπος, υψηλού όγκου, καρτεσιανός, ευθύγραμμος, πεπερασμένα στοιχεία, μελέτη, μετατροπή, ACRO, σύστημα κινηματικής, σχεδιασμός, εξώθηση νήματος, FDM, Προσθετική κατασκευή, Πίνακες Αποφάσεων, πεπερασμένα στοιχεία, προσομοίωση, SolidWorks

Abstract

In this thesis, a study and design of a prototype 3D printer of a large volume of work will be carried out. This will be done using the ACRO platform of the OpenBuilds company, (OpenBuilds ACRO n.d.) which is a high-precision kinematic XY system, in order to give it a Z axis of movement. In the course of the work it is important to achieve individual elements that make a 3D printer useful such as accuracy, ease of use, printing speed. Inside and in parallel with the work, all the necessary choices of subsystems of a printer will be made.

The writing of the paper was based on studies and works by academics from universities in Europe and America, mainly from NTUA and the Laboratory of Processing Technology.

The work is divided into three large sections, where in the first a more general analysis is made in Prosthetic Manufacturing Technology, while in the second section a more specific reference and in-depth study is made, where it finally concludes in the third section and the modeling of the final prototype.

Prosthetic manufacturing technology is a technique through which three-dimensional objects are manufactured through a digital model. A subcategory of Additive manufacturing is 3D printing, i.e. a method of manufacturing objects through the successive deposition of layers of material. Through this process, objects can be made from various materials such as plastics mainly, but also ceramics, polymers and even metals. Prosthetic Construction has been born for several years and is now a pillar of the 4th industrial revolution.

The process is relatively simple. A 3D digital model is sliced through a special program into various layers. This file is then converted into G-code, which in turn through the printer is converted into commands for moving and depositing material. Successive layers are deposited one on top of the other giving a final form to the object.

The method of 3D printing offers many advantages that make it particularly useful, advantages that have to do with the way of manufacturing, personalization, heat, etc. There are several methods of additive manufacturing, which are classified according to ISO/ASTM 52900:2021. (Additive manufacturing General principles Fundamentals and vocabulary 2021)

In this particular work, the architectural model FDM linear Cartesian printer was chosen, with material deposition, being a relatively simpler option to study and manufacture, with accurate results, particularly popular, able to work with various raw materials.

The prototype printer model was split into individual sub-systems, each of which was researched and selected. Each choice was made after a thorough study using a Decision Table. Decision Tables are a tool for making decisions when they depend on a series of criteria. They are a particularly reliable tool among others for carrying out an objective study on complex issues either quantitatively or qualitatively. The criteria set were the volume of the print, the accuracy, the speed of the print, the robustness of the final prototype and of course the cost of a possible subsequent manufacture, with a different degree of gravity each, depending on the needs.

These sub-systems concern the kinematics model of the printer, the printing bed, the transmission of motion to the XYZ axes, the material feeding method, the heating of the printing bed and the thermal insulation of the printer.

With the final selections, modeling was done in a SolidWorks environment to see if the parts selected or manufactured can withstand real-world conditions. In the SolidWorks environment, the user is given the possibility to check a model using the finite element method. It is a numerical method aimed at an approximation (fairly accurate) of the solution of differential equations. This method is a continuation of the numerical methods of solving registers and constitutes a particularly accurate and consistent methodology for stress testing any geometry. (Kurowski 2013)

Although this method is approximate, it can give reliable results and has the advantage that it can be applied to all problems. The following procedure is followed in the method: The 3D model is drawn, in which a material is then defined. In this way, the specific mechanical properties are "loaded" from the program's digital library. Then, the user can define specific support points and degrees of freedom according to the type of mechanism he is asked to construct. Finally and depending on the type of study, the model is divided into finite elements and checked computationally to the respective strain.

In particular, studies were carried out on the strength of the print bed, which will receive and should withstand particularly heavy loads compared to a conventional printer, on the strength of the nozzle

transfer axis, which will be added, but also on the arrangement that will take over the movement in the Z axis, since this is also a modification to the original platform.

At the end of the above actions, the appropriate mechanical parts were chosen which in a second year can be purchased and the final assembly carried out. Some conclusions from the study can be summarized below:

The printing bank was designed in dimensions equal to those defined as beneficial from the beginning of the work. The scenarios for which the study should be done are two. The first scenario will be for stress from an equivalent load, i.e. stress symmetrical to the bank, and the second for stress from a non-equivalent load, i.e. stress on only one side of the bank with the other receiving no load at all. For each case, 3 different aluminum thicknesses were studied as a bank. A study was also carried out for each sub-scenario with two possible parameters in terms of support points, for 6 points and for 8. From the study it appeared that in any case a 3mm thick bank would not be able to hold the manufactured specimen under any circumstances. For a thickness of 5mm in the possibility of 6 support points the tolerances were outside the limits while for 8 the tolerances were within the limits. For a bank thickness of 6mm, every possibility was possible.

For the nozzle transfer axis and the strength after the addition of the extrusion device, the results showed that it will not bring about any change.

For the trapezoidal screws and specifically for their number, a check was made to use one which gave unacceptable results and for this reason it was decided to use two in symmetrical positions in order to distribute the weight of the ACRO device. For their diameter, a study was carried out on common screws $\Phi 8\text{mm}$, which seemed not to give permissible results and for this reason a re-dimensioning was carried out to 10mm and which seemed to accept the load within permissible limits.

A study was also carried out on the need to heat the printing table but also the need for adequate thermal insulation of the printer, as in such large sizes the temperature differences from one end of the table to the other could be large, which will lead to unsafe gluing of the piece on the bank and unevenness in the placement and joining of the layers, issues which in turn will lead to eventual failures.

Finally, the cost of a possible production of the prototype was calculated and the Bill of Materials was created. Through the course of the study it was shown that even with the most modest calculations, the cost of manufacturing such a prototype printer will exceed €1200, with the contract that all mechanical parts will be purchased and without already having a stock of some.

The work paves the way for many fields of study and future work. Obviously a first goal could be the electrical study of the prototype, the research market as to the necessary electronic parts for this printer to be built and programmed. It could also be a field of study, the upgrading of the final characteristics of the prototype, characteristics such as speed, accuracy, etc. Also, the research and planning for the cooperation of the printer with more materials could open ways to study the printing of large objects for critical sectors such as medicine, aerospace, automotive industry, etc. Finally, an effort to design and study high-volume printers based on different architectures, such as e.g. resin printers, or even powder.

Keywords: 3D printing, printer, prototype, high volume, cartesian, linear, finite element, study, conversion, ACRO, kinematic system, design, filament extrusion, FDM, Additive manufacturing, Decision Tables, finite element, simulation, SolidWorks

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	2
Κατάλογος Πινάκων	4
Κατάλογος Συντμήσεων-αρκτικόλεξων	5
Εισαγωγή	6
Σκοπός Εργασίας.....	8
Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	8
1 Στοιχεία Θεωρίας	11
1.1 Εισαγωγή	11
1.2 Ιστορική αναδρομή της Προσθετικής Κατασκευής	12
1.3 Μέθοδοι Προσθετικής Κατασκευής	12
1.3.1 Εξώθηση υλικού.....	13
1.3.2 Φωτοπολυμερισμός	13
1.3.3 Σύντηξη Πούδρας.....	14
1.3.4 Εναπόθεση υλικού	15
1.3.5 Εναπόθεση συγκολλητικού υλικού (Binder jetting).....	15
1.3.6 Πλαστικοποίηση φύλλων (LOM)	16
1.3.7 Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας	16
1.4 Περιγραφή της μεθόδου	18
1.5 Πλεονεκτήματα μεθόδου.....	18
1.6 Μειονεκτήματα μεθόδου.....	19
1.7 Ειδικότερα ζητήματα για τον σχεδιασμό του πρωτότυπου εκτυπωτή	19
1.8 Πίνακες αποφάσεων	19
2 Σχεδιασμός και ανάπτυξη πρωτότυπου 3D εκτυπωτή	22
2.1 Εισαγωγή	22
2.2 Κριτήρια σχεδιασμού	22
2.2.1 Όγκος εκτύπωσης.....	22
2.2.2 Κόστος.....	22
2.2.3 Ακρίβεια	22
2.2.4 Ταχύτητα εκτύπωσης.....	23
2.2.5 Στιβαρότητα εκτυπωτή	23
2.3 Ανάλυση των επιλογών.....	23
2.3.1 Υπό-σύστημα τράπεζας εκτύπωσης	24
2.3.2 Υπο-σύστημα κινηματικής.....	25
2.3.3 Κίνηση στον Z άξονα.....	32
2.3.4 Μηχανισμός μετάδοσης κίνησης στους XY άξονες.....	33
2.3.5 Τροφοδοσία υλικού	35
2.3.6 Θέρμανση τράπεζας- Θερμομόνωση εκτυπωτή	36
3 Μοντελοποίηση	39

3.1.1	Προσομοίωση σε περιβάλλον SolidWorks.....	39
3.1.2	Τράπεζα Εκτύπωσης.....	40
3.1.3	Άξονας μεταφοράς ακροφυσίου.....	59
3.1.4	Τραπεζοειδείς κοχλίες.....	65
4	Τελικός σχεδιασμός	78
4.1	Πλατφόρμα ACRO.....	78
4.2	Τράπεζα Εκτύπωσης.....	78
4.3	Κίνηση στον άξονα Z.....	80
4.4	Προσθήκη εξωθητή.....	87
4.5	Θερμομόνωση εκτυπωτή.....	87
5	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	93
5.1	Συμπεράσματα.....	93
5.2	Μελλοντική Εργασία.....	93
6	Βιβλιογραφία	95

Κατάλογος Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 2-1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ	13
ΣΧΗΜΑ 2-2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΦΩΤΟΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΥ	14
ΣΧΗΜΑ 2-3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΥΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΛΕΙΖΕΡ	14
ΣΧΗΜΑ 2-4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ	15
ΣΧΗΜΑ 2-5 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	16
ΣΧΗΜΑ 2-6 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΛΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΛΛΩΝ	16
ΣΧΗΜΑ 2-7 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΗΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	17
ΣΧΗΜΑ 3-1: ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	24
ΣΧΗΜΑ 3-2 ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΕΣ 3D ΕΚΤΥΠΩΤΩΝ.....	25
ΣΧΗΜΑ 3-3 ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΣ ΕΚΤΥΠΩΤΗΣ	ΣΦΑΑΜΑ! ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΟΡΙΣΤΕΙ ΣΕΛΙΔΟΔΕΙΚΤΗΣ.
ΣΧΗΜΑ 3-4 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ.....	27
ΣΧΗΜΑ 3-5 ΧΖ-HEAD ΚΑΙ ΧΥ-HEAD ΕΚΤΥΠΩΤΕΣ	27
ΣΧΗΜΑ 3-6 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΚΤΥΠΩΤΗ COREXY	28
ΣΧΗΜΑ 3-7 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΚΤΥΠΩΤΗ COREXY	28
ΣΧΗΜΑ 3-8 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΚΤΥΠΩΤΗ H-BOT	29
ΣΧΗΜΑ 3-9 ΕΚΤΥΠΩΤΗΣ DELTA	30
ΣΧΗΜΑ 3-10 ΕΚΤΥΠΩΤΗΣ SCARA.....	30
ΣΧΗΜΑ 3-11 ΕΚΤΥΠΩΤΗΣ ΠΟΛΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ	31
ΣΧΗΜΑ 3-12 ΑΠΟΨΗ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ Z ΣΕ ΕΝΑΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟ ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΟ 3D ΕΚΤΥΠΩΤΗ	32
ΣΧΗΜΑ 3-13 ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΥΛΙΚΟΥ	35
ΣΧΗΜΑ 3-14 ΣΕΝΑΡΙΑ ΜΕΛΕΤΩΝ ΤΡΑΠΕΖΑΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ.....	41
ΣΧΗΜΑ 3-15 ΣΕΝΑΡΙΟ 1 (6 ΣΗΜΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ)- ΣΕΝΑΡΙΟ 2 (8 ΣΗΜΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ).....	41
ΣΧΗΜΑ 3-16 ΦΟΡΤΙΣΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΠΛΑΚΑ 6 ΣΗΜΕΙΩΝ ΣΤΗΡΙΞΗΣ	42
ΣΧΗΜΑ 3-17 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.6.3	42
ΣΧΗΜΑ 3-18 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.6.3	43
ΣΧΗΜΑ 3-19 ΤΑΣΗ VON MISES ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.6.3	43
ΣΧΗΜΑ 3-20 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.6.5	44
ΣΧΗΜΑ 3-21 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.6.5	44
ΣΧΗΜΑ 3-22 ΤΑΣΗ VON MISES ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.6.5	45
ΣΧΗΜΑ 3-23 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.6.6	45
ΣΧΗΜΑ 3-24 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.6.6.....	46
ΣΧΗΜΑ 3-25 ΤΑΣΗ VON MISES ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.6.6.....	46
ΣΧΗΜΑ 3-26 ΦΟΡΤΙΣΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΠΛΑΚΑ 8 ΣΗΜΕΙΩΝ ΣΤΗΡΙΞΗΣ	47
ΣΧΗΜΑ 3-27 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.8.3	48
ΣΧΗΜΑ 3-28 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.8.3	48
ΣΧΗΜΑ 3-29 ΤΑΣΗ VON MISES ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.8.3	49
ΣΧΗΜΑ 3-30 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.8.5	49
ΣΧΗΜΑ 3-31 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.8.5	50
ΣΧΗΜΑ 3-32 ΤΑΣΗ VON MISES ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.8.5	50
ΣΧΗΜΑ 3-33 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.8.6	51
ΣΧΗΜΑ 3-34 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.8.6	51
ΣΧΗΜΑ 3-35 ΤΑΣΗ VON MISES ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 1.8.6.....	52
ΣΧΗΜΑ 3-36 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 2.6.6	53
ΣΧΗΜΑ 3-37 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 2.6.6	54
ΣΧΗΜΑ 3-38 ΤΑΣΗ VON MISES ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 2.6.6	54
ΣΧΗΜΑ 3-39 ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΠΛΑΚΑ 8 ΣΗΜΕΙΩΝ ΣΤΗΡΙΞΗΣ.....	55
ΣΧΗΜΑ 3-40 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 2.8.5	56
ΣΧΗΜΑ 3-41 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 2.8.5	56
ΣΧΗΜΑ 3-42 ΤΑΣΗ VON MISES ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 2.8.5	57
ΣΧΗΜΑ 3-43 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 2.8.6	57
ΣΧΗΜΑ 3-44 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 2.8.6	58
ΣΧΗΜΑ 3-45 ΤΑΣΗ VON MISES ΥΠΟ-ΣΕΝΑΡΙΟ 2.8.6	58
ΣΧΗΜΑ 3-46 ΣΗΜΕΙΑ ΟΡΙΣΜΟΥ ΠΑΚΤΩΣΗΣ	60
ΣΧΗΜΑ 3-47 ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ ΣΤΟ ΜΕΣΟ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ X	60
ΣΧΗΜΑ 3-48 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ- ΜΕΣΟ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ X.....	61
ΣΧΗΜΑ 3-49 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ-ΜΕΣΟ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ X	61
ΣΧΗΜΑ 3-50 ΤΑΣΗ VON MISES-ΜΕΣΟ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ X	62
ΣΧΗΜΑ 3-51 ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ ΣΤΟ ΑΚΡΟ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ X.....	63
ΣΧΗΜΑ 3-52 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ- ΑΚΡΟ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ X	63
ΣΧΗΜΑ 3-53 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ - ΑΚΡΟ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ X	64
ΣΧΗΜΑ 3-54 ΤΑΣΗ VON MISES- ΑΚΡΟ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ X	64
ΣΧΗΜΑ 3-55 ΘΕΣΕΙΣ ΠΡΟΣΔΕΣΗΣ ΜΕ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΗΣ ΚΟΧΛΙΕΣ	65
ΣΧΗΜΑ 3-56 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΟΡΕΙΑΣ ΕΚΤΥΠΩΤΗ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΩΝ ΚΟΧΛΙΩΝ	66

ΣΧΗΜΑ 3-57 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΕΚΤΥΠΩΤΗ ΣΕ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥΣ ΟΔΗΓΟΥΣ ΚΑΙ ΕΝΟΣ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΟΥΣ ΚΟΧΛΙΑ Φ8ΜΜ	66
ΣΧΗΜΑ 3-58 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ- 1 ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΗΣ ΚΟΧΛΙΑΣ Φ8ΜΜ.....	67
ΣΧΗΜΑ 3-59 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ- 1 ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΗΣ ΚΟΧΛΙΑΣ Φ8ΜΜ.....	67
ΣΧΗΜΑ 3-60 ΤΑΣΗ VON MISES-1 ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΗΣ ΚΟΧΛΙΑΣ Φ8ΜΜ.....	68
ΣΧΗΜΑ 3-61 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΕΚΤΥΠΩΤΗ ΣΕ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥΣ ΟΔΗΓΟΥΣ ΚΑΙ ΔΥΟ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΩΝ ΚΟΧΛΙΩΝ Φ8ΜΜ	68
ΣΧΗΜΑ 3-62 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ-2 ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΕΙΣ ΚΟΧΛΙΑΣ Φ8ΜΜ	69
ΣΧΗΜΑ 3-63 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ -2 ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΕΙΣ ΚΟΧΛΙΑΣ Φ8ΜΜ	69
ΣΧΗΜΑ 3-64 ΤΑΣΗ VON MISES-2 ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΕΙΣ ΚΟΧΛΙΑΣ Φ8ΜΜ	70
ΣΧΗΜΑ 3-65 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ- ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 8ΜΜ- ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ: ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ	71
ΣΧΗΜΑ 3-66 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ- ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 8ΜΜ- ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ: ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ	71
ΣΧΗΜΑ 3-67 ΤΑΣΗ VON MISES- ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 8ΜΜ- ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ: ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ	72
ΣΧΗΜΑ 3-68 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ- ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 8ΜΜ- ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ: ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΗΣ ΕΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ ΧΥ.....	72
ΣΧΗΜΑ 3-69 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ- ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 8ΜΜ- ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ: ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΗΣ ΕΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ ΧΥ.....	73
ΣΧΗΜΑ 3-70 ΤΑΣΗ VON MISES-ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 8ΜΜ- ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ: ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΗΣ ΕΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ ΧΥ.....	73
ΣΧΗΜΑ 3-71 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ- ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 10ΜΜ- ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ: ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ	74
ΣΧΗΜΑ 3-72 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ- ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 10ΜΜ- ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ: ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ	75
ΣΧΗΜΑ 3-73 ΤΑΣΗ VON MISES- ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 10ΜΜ- ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ: ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ	75
ΣΧΗΜΑ 3-74 ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ- ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 10ΜΜ- ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ: ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΗΣ ΕΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ ΧΥ.....	76
ΣΧΗΜΑ 3-75 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ- ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 10ΜΜ- ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ: ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΗΣ ΕΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ ΧΥ.....	76
ΣΧΗΜΑ 3-76 ΤΑΣΗ VON MISES- ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 10ΜΜ- ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ: ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΗΣ ΕΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ ΧΥ.....	77
ΣΧΗΜΑ 4-1 ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ACRO.....	78
ΣΧΗΜΑ 4-2 ΣΧΕΔΙΟ ΤΡΑΠΕΖΑΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	79
ΣΧΗΜΑ 4-3 ΒΑΣΗ ΕΚΤΥΠΩΤΗ	80
ΣΧΗΜΑ 4-4 ΣΥΝΑΡΜΟΓΗ ΒΑΣΗΣ ΕΚΤΥΠΩΤΗ ΜΕ ΤΡΑΠΕΖΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	80
ΣΧΗΜΑ 4-5 ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ Ζ	81
ΣΧΗΜΑ 4-6 ΕΞΑΤΟΜΙΚΕΥΜΕΝΟ ΤΕΜΑΧΙΟ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ACRO-ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΟΔΗΓΩΝ.....	81
ΣΧΗΜΑ 4-7 ΣΥΝΑΡΜΟΓΗ ΒΑΣΗΣ-ΤΡΑΠΕΖΑΣ-ACRO-ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ Ζ	83
ΣΧΗΜΑ 4-8 ΕΞΑΤΟΜΙΚΕΥΜΕΝΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ACRO-ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΩΝ ΚΟΧΛΙΩΝ	84
ΣΧΗΜΑ 4-9 ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΣΕ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΗ ΚΟΧΛΙΑ.....	84
ΣΧΗΜΑ 4-10 ΕΞΑΤΟΜΙΚΕΥΜΕΝΟ ΤΕΜΑΧΙΟ ΠΑΚΤΩΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ NEMA	85
ΣΧΗΜΑ 4-11 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΣΧΕΔΙΟ ΤΡΑΠΕΖΑΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	85
ΣΧΗΜΑ 4-12 ΣΥΝΑΡΜΟΓΗ ΤΡΑΠΕΖΑΣ-ACRO-ΒΑΣΗΣ- ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ Ζ- ΚΟΧΛΙΩΝ	86
ΣΧΗΜΑ 4-13 ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΗΜΑ ΕΚΤΥΠΩΤΗ	87
ΣΧΗΜΑ 4-14 ΣΧΕΔΙΑ ΦΥΛΛΩΝ PLEXIGLASS- ΜΕΝΤΕΣΣΕΛΕΣ-ΧΕΡΟΥΛΙΑ	88
ΣΧΗΜΑ 4-15 ΤΕΛΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ ΕΚΤΥΠΩΤΗ	89
ΣΧΗΜΑ 4-16 ΕΞΑΤΟΜΙΚΕΥΜΕΝΗ ΒΑΣΗ ΚΑΡΟΥΛΙΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ	90
ΣΧΗΜΑ 4-17 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΦΥΛΛΟ PLEXIGLASS ΓΙΑ ΠΑΚΤΩΣΗ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΡΟΥΛΙΟΥ	90
ΣΧΗΜΑ 4-18 ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΕΙΚΟΝΑ ΕΚΤΥΠΩΤΗ.....	91

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΒΑΡΩΝ ΠΙΝΑΚΑ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ	21
ΠΙΝΑΚΑΣ 2 ΒΑΡΗ ΕΚΑΣΤΟΤΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ	23
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΡΩΝ ΣΤΟ ΕΚΑΣΤΟΤΕ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΥΠΩΤΗ.....	26
ΠΙΝΑΚΑΣ 4 ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	31
ΠΙΝΑΚΑΣ 5 ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΚΙΝΗΣΗ Ζ.....	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 6 ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ΧΥ	34
ΠΙΝΑΚΑΣ 7 ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΝΗΜΑΤΟΣ	36
ΠΙΝΑΚΑΣ 8 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ SILICONE HEAT BED.....	37
ΠΙΝΑΚΑΣ 9 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΕ ΤΡΑΠΕΖΑ ΜΕ 6 ΣΗΜΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ.....	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 10 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΕ ΤΡΑΠΕΖΑ ΜΕ 8 ΣΗΜΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 11 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΜΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΕ ΤΡΑΠΕΖΑ ΜΕ 6 ΣΗΜΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ.....	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 12 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΜΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΕ ΤΡΑΠΕΖΑ ΜΕ 8 ΣΗΜΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ.....	59
ΠΙΝΑΚΑΣ 13 ΠΙΝΑΚΑΣ ΥΛΙΚΩΝ	92

Κατάλογος Συντμήσεων-αρκτικόλεξων

EMII	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
ETK	Εργαστήριο Τεχνολογίας Κατεργασιών
3D	Three-dimensional
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
DIY	Do It Yourself
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DOD	Drop On Demand
EBAM	Electron-beam additive manufacturing
EBM	Electron Beam Melting
ESTRN	Equivalent strain
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused filament fabrication
FoS	Factor of Safety
ISO	International Organization for Standardization
LOM	Laminated Object Manufacturing
MCDA	Multiple-criteria decision analysis
MCDM	Multiple-criteria decision-making
MJF	Multi Jet Fusion
NPJ	NanoParticle Jetting
PJ	PolyJet
PLA	Polylactic acid
PTFE	Polytetrafluoroethylene
SCARA	Selective Compliance Articulated Robot Arm
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective laser sintering

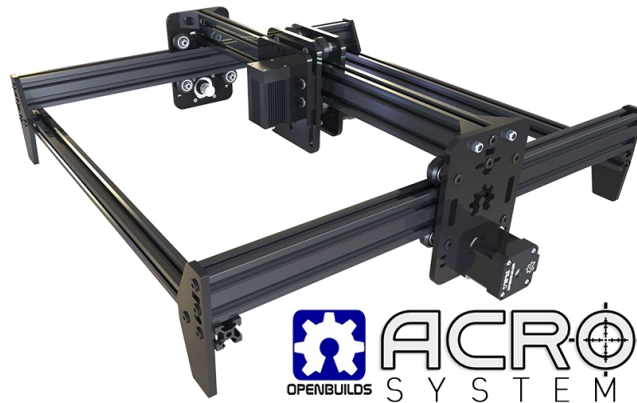
Εισαγωγή

Το Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών (ETK) έχει έντονη ερευνητική δραστηριότητα στο αντικείμενο της σχεδίασης και κατασκευής πρωτότυπων διατάξεων, είτε πρόκειται για 3D εκτυπωτές, είτε για συσκευές και σταθμούς μέτρησης, είτε και ακόμα για τελικά στοιχεία δράσης ρομποτικών βραχιόνων.

Οι 3D εκτυπωτές εξώθησης νήματος βρίσκουν πλέον εκτεταμένες εφαρμογές που κυμαίνονται από οικιακό έως και βιομηχανικό επίπεδο. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι το, συγκριτικά, χαμηλό κόστος και η ευκολία χειρισμού ακόμα και από ανειδίκευτο προσωπικό. Δυστυχώς, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ο όγκος εργασίας και αντίστοιχα, τα τεμάχια που παράγονται είναι περιορισμένων διαστάσεων και ειδικά ως προς το ύψος τους.

Από αυτή τη σκοπιά, αποτελεί μια ιδιαίτερη πρόκληση η μελέτη και η σχεδίαση ενός 3D εκτυπωτή ο οποίος θα μπορεί να κατασκευάσει τεμάχια μεγάλου όγκου, ή ακόμα και μεγάλες παρτίδες μικρότερων σε διάσταση αντικειμένων. Ένας τέτοιος εκτυπωτής θα έδινε την δυνατότητα να ξεκλειδωθούν δυνατότητες που μέχρι τώρα μένουν μόνο στο ψηφιακό περιβάλλον ή στην καλύτερη των περιπτώσεων απαιτούν τώρα ιδιαίτερα πολύ χρόνο κατασκευής. Ακόμα, στην ανάγκη κατασκευής μεγάλων τεμαχίων- μεγαλύτερων σε όγκο από αυτό που μπορεί να κατασκευάσει ένας εκτυπωτής του εμπορίου- ο χρήστης είναι αναγκασμένος να οδηγηθεί στην κατάρτιση αυτών των τεμαχίων και την συναρμογή τους αφού εκτυπωθούν, κάτι που αυξάνει ιδιαίτερα την ανθρώπινη εργασία αλλά πολλές φορές μπορεί να οδηγήσει και σε λανθασμένες συναρμογές, αστοχίες και σπατάλη τελικά της πρώτης ύλης. Σε μια σειρά ζητημάτων που αυτή τη στιγμή αποτελούν τροχοπέδη, ένας εκτυπωτής υψηλού όγκου εργασίας θα μπορούσε να δώσει αξιόπιστη λύση. Από τον τομέα της ταχείας προτυποποίησης, όπου ένα πρωτότυπο δεν θα χρειάζεται τόσο πολύ χρόνο ή μεταγενέστερη συναρμογή από τον μηχανικό. Ή ακόμα και σε πιθανή εργασία με περίπλοκες γεωμετρίες, οι οποίες δεν δίνουν την ευκαιρία εύκολης και σωστής συναρμογής. Εκτυπωτές FDM υψηλού όγκου εργασίας, θα μπορούσαν να απελευθερώσουν νέες δυνατότητες για τομείς-κλειδιά όπως την αεροδιαστημική, την αυτοκινητοβιομηχανία, την ιατρική, αλλά ακόμα και τρόφιμα, κατασκευές, αμυντική βιομηχανία. (Md. Hazrat Ali, Syuhei Kurokawa και Essam Sheh 2022)

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία στοχεύει στο σχεδιασμό ενός πρωτότυπου 3D εκτυπωτή FDM μεγάλου όγκου εργασίας που θα βασίζεται στην πλατφόρμα OpenBuilds ACRO. Η πλατφόρμα αυτή αποτελεί ένα αρθρωτό σύστημα κινηματικής υψηλής ακρίβειας που έχει σχεδιαστεί για συνεργασία με ένα μεγάλο εύρος εργαλείων. Η πλατφόρμα ACRO αποτελείται από V-Slots και για αυτόν τον λόγο διαθέτει υψηλές δυνατότητες επέκτασης, δημιουργώντας διάφορες διαμορφώσεις προσαρμοσμένες στις εκάστοτε ανάγκες. (ACRO n.d.)



Σχημα 1 Πλατφόρμα ACRO

Πηγή: OpenBuilds

<https://openbuilds.com/builds/openbuilds-acro-system.5416/>

Για τους σκοπούς της εργασίας και την ορθή οριοθέτησή της ορίστηκαν ως ζητούμενες οι παρακάτω προδιαγραφές:

Μετατροπή υπάρχουσας διάταξης ACRO X:1000mm, Y:500mm

Ωφέλιμες διαστάσεις εκτυπωτή: X: 750mm, Y: 300mm, Z: 250mm

Με τα παραπάνω δεδομένα, αρχικά πραγματοποιήθηκε μελέτη στις διαφορετικές τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής που υπάρχουν και επιλογή αυτής με την οποία θα προχωρήσει η εργασία. Μετά από μελέτη αυτών, καταλήχθηκε η τεχνολογία εξώθησης υλικού. Εν συνεχεία σχεδιάστηκε η πρώτη άποψη της τράπεζας εκτύπωσης, σύμφωνα με τον ωφέλιμο όγκο που τέθηκε ως δεδομένο. Ύστερα έγινε καταγραφή των υπο-συστημάτων που υπήρξε ανάγκη να μετατραπούν ή και να δημιουργηθούν εξαρχής προκειμένου να μετατραπεί η πλατφόρμα σε 3D εκτυπωτή. Αυτά τα υπο-συστήματα αφορούν:

- Κινηματικό μοντέλο
- Κίνηση στον Z άξονα (κατακόρυφη κίνηση)
- Κίνηση στους XY άξονες
- Τροφοδοσία υλικού
- Θέρμανση τράπεζα- θερμομόνωση εκτυπωτή

Η μελέτη και τελική επιλογή των εκάστοτε υπο-συστημάτων, έγινε με χρήση Πινάκων αποφάσεων. Οι πίνακες αυτοί αποτελούν φόρμες αξιολόγησης κριτηρίων. Πρόκειται για ένα εργαλείο λήψης αποφάσεων όταν αυτές εξαρτώνται από μια σειρά κριτηρίων. **Τα κριτήρια που θεσπίστηκαν και που θα πρέπει να πληροί το τελικό μοντέλο, το καθένα με τον δικό του βαθμό σημαντικότητας φαίνονται παρακάτω:**

- Ακρίβεια εκτύπωσης
- Όγκος εργασίας
- Ταχύτητα
- Στιβαρότητα εκτυπωτή
- Κόστος ενδεχόμενης κατασκευής

Μετά την επιλογή του εκάστοτε υποσυστήματος, ήταν ανάγκη να γίνει ένας πρώτος σχεδιασμός του μοντέλου καθώς και απαραίτητες μελέτες σε τροποποιήσεις που πρέπει να γίνουν στην πλατφόρμα, προκειμένου να δημιουργηθεί το μοντέλο του εκτυπωτή. Ύστερα έγιναν μοντελοποιήσεις σε περιβάλλον SolidWorks, ώστε να αποδειχθεί υπολογιστικά εάν στατικά το μοντέλο μπορεί να δεχθεί τις αλλαγές αυτές και έγιναν οι απαραίτητες επιλογές και επαναδιαστασιολογήσεις. Τέλος έγινε έρευνα αγοράς και συγκεντρώθηκαν τα απαραίτητα μηχανικά μέρη που τελικά θα είναι απαραίτητα για τον εκτυπωτή.

Σκοπός Εργασίας

Η παρούσα εργασία καταπιάνεται με τον σχεδιασμό και την ανάλυση ενός πρωτότυπου 3D εκτυπωτή FDM μεγάλου όγκου εργασίας, εξώθησης υλικού. Παρόλη την υψηλή δημοφιλία εκτυπωτών τέτοιου τύπου, είναι ακόμη αρκετά μικρή η παρουσία εκτυπωτών υψηλού όγκου εργασίας, τουλάχιστον στο εμπόριο. Ακόμη και εκτυπωτές που κυκλοφορούν και διαθέτουν τέτοια χαρακτηριστικά έχουν συνήθως πολύ υψηλό κόστος. Για τον λόγο αυτό θα γίνει προσπάθεια μελέτης και σχεδιασμού ενός πρωτότυπου 3D εκτυπωτή υψηλού όγκου εργασίας με χρήση της πλατφόρμας κινηματικής OpenBuilds ACRO. Αντικείμενο μελέτης θα είναι η μετατροπή της πλατφόρμας ώστε να αυξηθεί σημαντικά η διαδρομή του άξονα Z, διατηρώντας όμως την ακρίβεια κίνησης, όπως και ο σχεδιασμός, η κατασκευή και επιλογή κατάλληλων υποσυστημάτων (π.χ. εξώθησης υλικού, ακροφυσίου εκτύπωσης, τράπεζας εκτύπωσης κλπ.), αλλά και η έρευνα αγοράς αυτών.

Για τον σκοπό αυτό θα οριστούν τα βασικά υποσυστήματα του πρωτότυπου εκτυπωτή, θα γίνει ένας πρώτος σχεδιασμός του και αφού γίνουν οι απαραίτητες μελέτες υπολογιστικά σε περιβάλλον SolidWorks, θα σχεδιαστεί το τελικό μοντέλο.

Κατά την πορεία της εργασίας παρουσιάστηκαν διάφορα ζητήματα, σχετικά με την τεχνολογία εκτύπωσης που θα ακολουθηθεί, τα κριτήρια που θα πρέπει να ικανοποιεί, αλλά και την δυνατότητα μετατροπής της πλατφόρμας σε εκτυπωτή σε στατικό επίπεδο καθώς και τις ενέργειες που είναι απαραίτητες για να γίνει κάτι τέτοιο εφικτό. Είναι προφανές πως προκειμένου η πλατφόρμα αυτή να μετατραπεί σε 3D εκτυπωτή, θα πρέπει να αλλάξουν μια σειρά χαρακτηριστικά που διαθέτει αλλά και να προστεθούν άλλα. Ουσιαστικά, η όλη πλατφόρμα από αυτό καθαυτό εργαλείο, μέσα από την μελέτη θα μετατραπεί σε ένα μόνο μέρος μιας κατά άλλα υψηλής περιπλοκότητας κατασκευής.

Μέσα από την ανάγνωση της εργασίας, ο αναγνώστης θα έχει μια ευκαιρία να κατατοπιστεί τόσο σε μια γενικότερη ανάλυση της 3D εκτύπωσης (τεχνολογίες, εναλλακτικές, διαφορές μεταξύ αυτών), όσο και πιο συγκεκριμένα στην μεθοδολογία της συγκεκριμένης μελέτης.

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Για την συγγραφή της παρούσας εργασίας λήφθηκαν υπόψιν και μελετήθηκαν διπλωματικές εργασίες από πανεπιστήμια της Ελλάδας και του εξωτερικού, δημοσιεύσεις ανεξάρτητων ερευνητών αλλά και ερευνητών πανεπιστημίων, κυβερνητικές μελέτες και πρωτοβουλίες αλλά και έγγραφα και δημοσιεύσεις ανεξάρτητων αρχών. Η συγγραφή της εργασίας στηρίχτηκε σε μελέτες και εργασίες ακαδημαϊκών από πανεπιστήμια της Ευρώπης της Ασίας και της Αμερικής. Πάρθηκαν υπόψιν ζητήματα και προβληματισμοί της ακαδημαϊκής κοινότητας. Ακόμη μελετήθηκαν βιβλία- κυρίως ξενόγλωσσα- που αφορούν το αντικείμενο της προσθετικής κατασκευής. Τέλος μελετήθηκαν διαλέξεις αλλά και ηλεκτρονικές σημειώσεις από μαθήματα και καθηγητές του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Κατά την έρευνα που πραγματοποιήθηκε μελετήθηκαν συγγραφείς και ερευνητές με παρόμοια θέματα μελέτης, όπως σχεδίαση και κατασκευή πρωτότυπων εκτυπωτών. Οι περισσότερες από αυτές αφορούσαν FDM τεχνολογίες, κάτι το οποίο είναι λογικό αφού αποτελεί την πιο εύκολη και

συμφέρουσα λύση, αφού είναι από τις πιο απλές αρχιτεκτονικές για να κατασκευαστούν εξαρχής, υπάρχει μεγάλη δημοφιλία, οπότε και περισσότερες λύσεις στους όποιους σκοπέλους ενδεχομένως παρουσιαστούν, αλλά και το κόστος κατασκευής φαίνεται να είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με άλλες τεχνολογίες που απαιτούν ιδιαίτερα μεγάλες μετατροπές και αγορά εξαρτημάτων. Παρόλα αυτά μέσα από την έρευνα δεν βρέθηκαν παρόμοιες εργασίες με επίκεντρο την μετατροπή της πλατφόρμας ACRO σε 3D εκτυπωτή. Από αυτήν την άποψη παρόλο το όποιο υλικό υπήρχε σε ηλεκτρονική και έντυπη μορφή, αποτέλεσε μια δοκιμασία η μελέτη της παραπάνω μετατροπής. Βεβαίως βοήθεια αποτέλεσαν εργασίες κατασκευής 3D εκτυπωτών εξαρχής και που έχουν παρουσιαστεί σε διεθνή φόρουμ και εκθέσεις. Παράδειγμα αυτού αποτελεί ο εκτυπωτής WorkHorse από την 3D Distributed (3D DISTRIBUTED 2023), στην σχεδίαση του οποίου στηρίχτηκε σε μεγάλο βαθμό η παρούσα εργασία. Παρόλα αυτά αρκετές αποφάσεις πάρθηκαν διαφορετικά, αφού στην παρούσα εργασία, έπαιξε μεγάλο ρόλο και το ίδιο το κόστος μιας ενδεχόμενης σε δεύτερο χρόνο κατασκευής. Για τον λόγο αυτό όπως θα φανεί και παρακάτω, κάποιες επιλογές προσαρμόστηκαν σε αυτό, όπως λ.χ. η επιλογή οδοντωτών ιμάντων για την κίνηση στον XY άξονα (που ήδη διαθέτει η πλατφόρμα ACRO) και όχι αντικατάσταση από τραπεζοειδείς κοχλίες, οι οποίοι παρόλο που σίγουρα προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια και σταθερότητα, ήταν πολύ πιο κοστοβόρα επιλογή. (416.5 € για το σύνολο των συστημάτων κοχλιών για τους άξονες XY). Άλλωστε και στην ίδια την μελέτη για την κατασκευή του WorkHorse, αναφέρεται πως το σύνθηες και πιο δημοφιλές είναι η επιλογή ιμάντων και όχι κοχλιών. (3D DISTRIBUTED 2023)

Για την μελέτη των διαφόρων τεχνολογιών εκτύπωσης όπως παρατέθηκαν, πάρθηκε υπόψιν το πρωτόκολλο ISO/ASTM 52900:2021, το οποίο οριοθετεί τον τομέα της Προσθετικής Κατασκευής και μεταξύ άλλων ορίζει τις διαφορετικές τεχνολογίες αυτής. Σχετικά με την μέθοδο και τα χαρακτηριστικά της κάθε τεχνολογίας, μελετήθηκαν διάφορες εργασίες κυρίως του εξωτερικού. Εργασίες οι οποίες κυρίως είχαν ως στόχο να συγκεκριμενοποιήσουν την εκάστοτε τεχνολογία σχετικά με την δυνατότητα παραγωγής κάποιου- συγκεκριμένης φύσεως και χαρακτηριστικών- υλικού με χρήση της τεχνολογίας αυτής. Μέσα από αυτές όμως πάρθηκε χρήσιμο υλικό για να στηρίξει την παρούσα εργασία. Συμπεράσματα, που βγήκαν από την εκάστοτε εργασία, βοήθησαν ιδιαίτερα προκειμένου να προσανατολιστεί η μελέτη.

Προκειμένου να αποφασιστεί ποια τεχνολογία θα ακολουθηθεί, πάρθηκαν υπόψιν αποτελέσματα μελετών και συμπεράσματα, τα οποία βοήθησαν να αναλυθούν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εκάστοτε τεχνολογίας, καθένα από τα οποία αν και εδώ παρουσιάζονται ως θέσφατα, ουσιαστικά αποτελούν συμπεράσματα μελετών άλλων συγγραφέων.

Για τους σκοπούς της εργασίας ήταν απαραίτητο να θεσπιστούν ορισμένα κριτήρια, ως δεδομένα και τα οποία είχαν να κάνουν με τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να διαθέτει το τελικό πρότυπο. Δεδομένου πως τα χαρακτηριστικά αυτά θα πρέπει να επιτευχθούν, αλλά δεδομένου επίσης πως το καθένα από αυτά έχει διαφορετικό βαθμό σημαντικότητας, κρίθηκε απαραίτητο να εκλεχθεί ένα κατάλληλο εργαλείο λήψης αποφάσεων, προκειμένου η κρίση αυτή να είναι αντικειμενική και να αντικατοπτρίζει όσο γίνεται περισσότερο την πραγματικότητα και τις ανάγκες. Για τον λόγο αυτό και μετά από μελέτη αποφασίστηκε το εργαλείο αυτό να είναι οι πίνακες αποφάσεων, ή Πίνακες Pugh. Οι πίνακες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να ληφθεί απόφαση σε μια σειρά διαφορετικές περιπτώσεις. Μπορούν να αποτελέσουν αξιόπιστη λύση σε μια σειρά τομείς, όπως στον σχεδιασμό παραγωγής, στη διαχείριση ρίσκου, στην επιλογή προμηθευτών, υλικών ακόμη και στην διαχείριση ανθρωπίνου δυναμικού. Η μέθοδος Pugh συγκαταλέγεται στις πιο γνωστές μεθοδολογίες σχεδιασμού μηχανικής, αλλά φαίνεται να χρησιμοποιείται μόνο από ένα μικρό ποσοστό μηχανικών. Έρευνα με συμμετοχή 106 έμπειρων μηχανικών (οι περισσότεροι από τους οποίους εργάζονταν στις Ηνωμένες Πολιτείες) έδειξε ότι λίγο πάνω από το 15% είχε χρησιμοποιήσει τους πίνακες αποφάσεων στην εργασία του και ότι οι περισσότεροι από αυτούς το βρήκαν χρήσιμο ως εργαλείο (Yang 2007). Η

έρευνα διαπίστωσε ότι μερικές απλές τεχνικές χρησιμοποιήθηκαν από την πλειονότητα των ασκούμενων μηχανικών, όπως η εύρεση αναγκών, η συγκριτική αξιολόγηση, κ.α. (Daniel D. Frey, et al. 2008)

Μελετήθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να διαθέτει ένας τέτοιος πίνακας, καθώς και η μεθοδολογία για την θέσπιση στο εκάστοτε χαρακτηριστικό βαθμών βαρύτητας ή βαθμολογιών όπως θα αναφέρεται στη συνέχεια. Στην βιβλιογραφία που μελετήθηκε διασαφηνίστηκαν διαφορετικές μέθοδοι εργασίας με τους πίνακες αυτούς. Λ.χ. μπορούν να κατασκευαστούν πίνακες αποφάσεων χωρίς ποσοτικό προσδιορισμό, αλλά με την λογική 0 και 1, δηλαδή για κάθε πιθανό σενάριο, εάν εξυπηρετεί το επιθυμητό χαρακτηριστικό ή όχι. Άλλο παράδειγμα αποτελεί ο Πίνακας Απόφασης με χρήση «βάσης», δηλαδή γίνεται έλεγχος εάν κάθε πιθανό σενάριο περνάει ή όχι την βάση, συνδυάζοντας έτσι τόσο την ποιοτική μέτρηση, όσο και την ποσοτική. Παρόλο πως μελετήθηκαν αρκετές εργασίες που εντάσσουν τους Πίνακες Αποφάσεων στην διαδικασία επιλογής εκτυπωτή, ή ακόμη και στην διαδικασία επιλογής μεμονωμένων μηχανικών μερών, από την έρευνα δεν βρέθηκε κάποια εργασία που να χρησιμοποιεί Πίνακες Αποφάσεων για την σχεδίαση ενός πρωτότυπου εκτυπωτή με βάση συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Για διευκόλυνση της μελέτης και εξέταση εις βάθος, αποφασίστηκε ο διαχωρισμός του μοντέλου του εκτυπωτή σε διαφορετικά υποσυστήματα. Με τον τρόπο αυτόν ήταν δυνατό να ελεγχθεί το κάθε υποσύστημα ξεχωριστά με σκοπό κάθε απόφαση να μπορεί ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες να ικανοποιεί τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Βασιζόμενη σε άλλες εργασίες με σκοπό την κατασκευή εκτυπωτών υψηλού όγκου, η παρούσα εργασία επιχείρησε να ξεπεράσει προβλήματα που αναδείχθηκαν στις πρώτες, όπως λ.χ. δυσκολίες βαθμονόμησης συγκεκριμένων κινηματικών μοντέλων και αποφυγή αυτών, ζητήματα που σχετίζονται με την θερμοκρασία της τράπεζας εκτύπωσης καθώς και ζητήματα παρέμβασης εξωτερικών περιβαλλοντικών παραγόντων με την μελέτη και σχεδίαση θερμομόνωσης.

Αφού μελετήθηκαν και αποφασίστηκαν τα υποσυστήματα με τη βοήθεια των Πινάκων Απόφασης, στη συνέχεια σχεδιάστηκαν σε περιβάλλον SolidWorks, τα μηχανικά μέρη προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες στατικές μελέτες με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Για την εργασία αυτή σχεδιάστηκαν ή και πάρθηκαν από ψηφιακές βιβλιοθήκες σχέδια του εκάστοτε υποσυστήματος. Στις περιπτώσεις όπου όλα τα σενάρια ανταποκρίνονταν ορθά, η απόφαση πάρθηκε με οικονομοτεχνικά κριτήρια, ενώ σε μελέτες που οδηγούσαν σε αστοχία έγιναν οι απαραίτητες επαναδιαστασιολογήσεις. Για τις ανάγκες της σχεδίασης εξαρτημάτων πραγματοποιήθηκε μελέτη οδηγών και μαθημάτων της Dassault SolidWorks, σε διαδικτυακό επίπεδο.

1 Στοιχεία Θεωρίας

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα βασικά θεωρητικά στοιχεία που αντλήθηκαν από την βιβλιογραφική μελέτη και πάνω στα οποία στηρίζεται όλος ο σχεδιασμός αλλά και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν.

Η Προσθετική Κατασκευή (ΠΚ) αποτελεί μια τεχνολογία που αναπτύσσεται ταχέως και ενσωματώνεται σε βιομηχανικούς τομείς, στις κατασκευές, την ιατρική, αλλά και στην καθημερινή ζωή. Εννοιολογικά, η ΠΚ είναι μια μέθοδος όπου τρισδιάστατα μοντέλα μπορούν να δημιουργηθούν απευθείας από ένα αρχείο σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) χωρίς εργαλεία ή μήτρες. Σε αυτήν την μέθοδο, πολλαπλά στρώματα κατασκευάζονται το ένα πάνω μετά το άλλο για να δημιουργήσουν μια 3^η διάσταση. (Amit Bandyopadhyay and Susmita Bose 2020).

Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια σχεδιασμού ενός πρωτότυπου 3D εκτυπωτή υψηλού όγκου εργασίας, με αξιοποίηση της πλατφόρμας ACRO της εταιρίας OpenBuilds, η οποία αποτελεί σύστημα κινηματικής υψηλής ακρίβειας και κατάλληλο για συνεργασία με διάφορα εργαλεία.

Κατά την πορεία της εργασίας θα μελετηθούν όλες οι απαραίτητες μετατροπές και προσθήκες, προκειμένου τουλάχιστον σε σχεδιαστικό επίπεδο η πλατφόρμα να μετατραπεί σε έναν 3D εκτυπωτή. Προκειμένου η μελέτη των εκάστοτε σταδίων και των εκάστοτε μερών να γίνει σωστά, η προς σχεδιασμό διάταξη, διαχωρίστηκε σε υπο-συστήματα, το καθένα από τα οποία μελετήθηκε ξεχωριστά. Για την ορθή πορεία της μελέτης κρίθηκε απαραίτητο, να αξιοποιηθεί το εργαλείο του Πίνακα Αποφάσεων που αποτελεί εργαλείο λήψης απόφασης όταν αυτές εξαρτώνται από μια σειρά κριτηρίων και θα αναλυθεί εκτενώς παρακάτω. Αυτή η μέθοδος επιλέχθηκε καθώς τόσο οι διαθέσιμες επιλογές, όσο και τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του τελικού μοντέλου ήταν πολλά. **Τα κριτήρια που θεσπίστηκαν και που θα πρέπει να πληροί το τελικό μοντέλο, το καθένα με τον δικό του βαθμό σημαντικότητας (θα αναλυθεί εκτενώς παρακάτω) φαίνονται παρακάτω:**

- Ακρίβεια εκτύπωσης
- Όγκος εργασίας
- Ταχύτητα
- Στιβαρότητα εκτυπωτή
- Κόστος ενδεχόμενης κατασκευής

1.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής αποτελεί τεχνική μέσω της οποίας πραγματοποιείται κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων μέσω ενός ψηφιακού μοντέλου. (N. Shahrubudin, T.C. Lee και R. Ramlan 2019).

Η προσθετική κατασκευή ήρθε να δώσει λύση στην ανάγκη που υπήρξε για παραγωγή τεμαχίων κυρίως πρωτότυπων αλλά και όχι, ανώτερης ποιότητας και ακρίβειας, για τομείς της βιομηχανίας, της αρχιτεκτονικής, της ιατρικής κ.α., χωρίς τη χρήση καλουπιών και την ανάγκη μαζικής παραγωγής.

Η προσθετική κατασκευή έχει γεννηθεί εδώ και αρκετά χρόνια και δικαίως έχει χαρακτηριστεί «επανάσταση» στον χώρο της μηχανικής και αποτελεί πυλώνα της 4ης βιομηχανικής επανάστασης. (Erboz 2017)

Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος στον τομέα της κατασκευής, της ιατρικής, της αεροδιαστημικής, ακόμη και της εκπαίδευσης. Τα επόμενα χρόνια προδιαφάνεται ακόμη μεγαλύτερη άνοδος του τομέα καθώς ιδιαίτερα μεγάλες βιομηχανίες, ερευνητικά κέντρα ακόμη και κυβερνητικοί φορείς δείχνουν ακόμη μεγαλύτερη εμπιστοσύνη και μπαίνουν στον «αγώνα» της Προσθετικής Κατασκευής.

Η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα πολύ ισχυρό εργαλείο στην φαρέτρα του τεχνολογικού κόσμου, κυρίως για τις νέες δυνατότητες που έχει δώσει. Δυνατότητες που έχουν να κάνουν τόσο με τη μείωση του κόστους παραγωγής, της εξατομίκευσης των προϊόντων, της μεταφοράς των «παραγωγικών γραμμών» πιο κοντά στον καταναλωτή. (N. Shahrubudin, T.C. Lee και R. Ramlan 2019) Η άνοδος της Προσθετικής Κατασκευής μπορεί ακόμη -και ήδη το κάνει- και να απλουστεύσει τις ίδιες τις διαδικασίες μεταφοράς και αποθήκευσης και συνολικότερα του τομέα των logistics. (Brenna Sniderman και Parker Baum 2016).

Πολλές παρεξηγήσεις έχουν δημιουργηθεί γύρω από αυτήν, τόσο από υπέρμαχους, όσο και από «δύσπιστους». Οι μεν πρώτοι μπορεί να προσδίδουν σε αυτήν δυνατότητες που προς το παρόν δεν υπάρχουν ή βρίσκονται μόνο σε ερευνητικό στάδιο, οι δε δύσπιστοι για το κατά πόσο μπορεί να δώσει ουσιαστικές λύσεις σε συγκεκριμένα προβλήματα. Η αλήθεια είναι πάντως πως σαν κάθε τεχνολογικό εργαλείο αποτελεί ένα βοήθημα και πολύ χρήσιμο μάλιστα, αν υπάρχει γνώση γύρω από αυτό και αξιοποιηθεί εκεί που πραγματικά χρειάζεται.

Υποκατηγορία της Προσθετικής κατασκευής αποτελεί η Τρισδιάστατη εκτύπωση, μέθοδος δηλαδή κατασκευής αντικειμένων μέσω διαδοχικής απόθεσης στρώσεων υλικού. Μέσω αυτής της διαδικασίας μπορούν να κατασκευαστούν αντικείμενα από διάφορα υλικά, κυρίως θερμοπλαστικά αλλά όχι μόνο. Αυτά τα υλικά έχουν συνήθως τη μορφή νημάτων, τα οποία μέσω της εκτύπωσης τήκονται και εξωθούνται σε μια πλατφόρμα στρώμα-στρώμα και στερεοποιούνται σχηματίζοντας τελικά τρισδιάστατα αντικείμενα. (Deck Khong Tan, Mohammed Maniruzzaman και Ali Nokho 2018)

1.2 Ιστορική αναδρομή της Προσθετικής Κατασκευής

Η γενικότερη ιδέα της Προσθετικής Κατασκευής γεννήθηκε ήδη από τη δεκαετία του 1980. Τότε ξεκίνησε η άτυπη έρευνα, με τον Δρ. Hideo Kodama, να κατοχυρώνει το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας σχετιζόμενο με την νέα μέθοδο το 1981. (Dongkeon Lee, και συν. 2006)

Συνέχεια αυτού του ορόσημου αποτελεί η εργασία του Αμερικάνου μηχανικού Charles Hull το 1984, όταν ο ίδιος κατασκεύασε μια κούπα τσαγιού μέσω εκτυπωτή με χρήση στερεολιθογραφίας, τον οποίο κατασκεύασε ο ίδιος. (Mariano Jiméne, και συν. 2019) Σε αυτή τη μέθοδο στρώματα φωτοπολυμερούς ρητίνης στερεοποιούνται με χρήση υπεριώδους φωτός. Με τον τρόπο αυτό στρώμα-στρώμα δημιουργείται το τελικό τρισδιάστατο αντικείμενο. (Εφραιμίδης Αριστομένης, Εφαρμογές της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης στη Βιομηχανία 2019)

Κατά την δεκαετία του 1990 η προσθετική κατασκευή μπαίνει πιο μαχητικά στον εμπορικό τομέα, με το λανσάρισμα των πρώτων εμπορικών τρισδιάστατων εκτυπωτών. Βέβαια όπως με κάθε νέα τεχνολογία στο ξεκίνημα της, αποτελούσε μια ιδιαίτερα κοστοβόρα τεχνολογία και γι' αυτόν τον λόγο χρησιμοποιήθηκε σχεδόν αποκλειστικά από την αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική.

Το 2009, με την λήξη του διπλώματος ευρεσιτεχνίας υπήρξε ραγδαία άνοδος της καινοτομίας και της ποικιλίας των μοντέλων. (Πολύδωρας 2024) Από αυτό το σημείο και μετά η προσθετική κατασκευή έχει μπει για τα καλά στη ζωή και συνεχώς αναπτύσσεται και κερδίζει έδαφος. Ωστόσο από εδώ και μετά η πλειονότητα των 3D εκτυπωτών ειδικά σε οικιακό επίπεδο, έχουν ως βάση την τεχνολογία εξώθησης υλικού, παρά άλλες μεθόδους, όπως στερεολιθογραφίας ή πυροσυσσωμάτωσης με χρήση λέιζερ που χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά για επαγγελματική χρήση από μεγάλες βιομηχανίες και φορείς.

1.3 Μέθοδοι Προσθετικής Κατασκευής

Σήμερα, στον τομέα της Προσθετικής Κατασκευής υπάρχει μια πληθώρα λύσεων και επιλογών. Διάφορες μέθοδοι, με διαφορετική φιλοσοφία η καθεμία, με διαφορετικές πρώτες ύλες και με τελικές κατασκευές με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Σύμφωνα με το ISO/ASTM 52900:2021 (Additive manufacturing General principles Fundamentals and vocabulary 2021), υπάρχουν 7 κατηγορίες

διεργασιών Προσθετικής Κατασκευής. Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι κατηγορίες καθώς και οι σημαντικότεροι εκπρόσωποι αυτών.

1. Εξώθηση υλικού
2. Φωτοπολυμερισμός
3. Σύντηξη πούδρας
4. Εναπόθεση υλικού (Material jetting)
5. Εναπόθεση συγκολλητικού υλικού (Binder jetting)
6. Πλαστικοποίηση φύλλων (LOM)
7. Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Directed energy deposition)

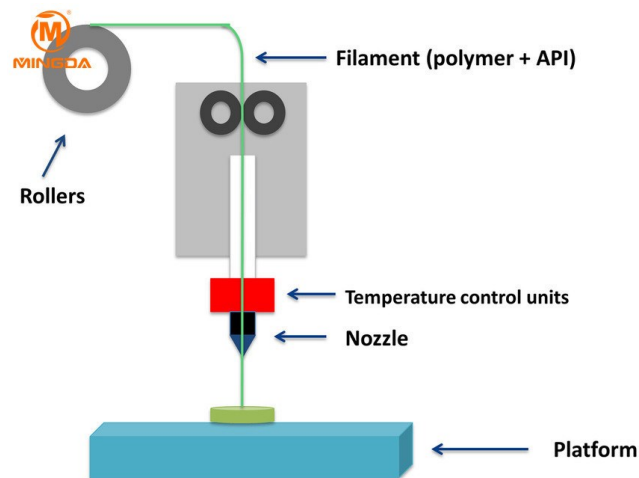
1.3.1 Εξώθηση υλικού

Στην τεχνολογία αυτή που αποτελεί και την πιο δημοφιλή, το υλικό σε μορφή νήματος τροφοδοτείται σε ένα ακροφύσιο υψηλής θερμοκρασίας. Εκεί το νήμα τήκεται και εναποτίθεται στην τράπεζα εκτύπωσης. (Redwood B., Schöffner F. και Garret B 2017)

Με τις απαραίτητες κινήσεις της κεφαλής εκτύπωσης στους άξονες XY, το τηκόμενο υλικό παίρνει το σχήμα του εκάστοτε στρώματος και στερεοποιείται. Συνεχίζοντας, είτε η τράπεζα εκτύπωσης είτε το ακροφύσιο μετακινείται στον κατακόρυφο άξονα Z δημιουργώντας το επόμενο στρώμα. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται το τελικό τεμάχιο, ως αποτέλεσμα των αλληπάλλληλων στρώσεων υλικού. Οι εκτυπωτές εξώθησης υλικού διαφοροποιούνται μεταξύ τους ως προς την ακρίβεια, την ταχύτητα και άλλα χαρακτηριστικά, είναι σαφώς όμως υποδεέστεροι σε σχέση με άλλες τεχνολογίες.

Υποκατηγορίες:

FDM



Σχήμα 1-1 Τεχνολογία Εξώθησης υλικού

Πηγή: Vicky Xu - MINGDA 3D, Overseas Channel Manager at Shenzhen Mingda Technology Co., Ltd
<https://www.linkedin.com/pulse/what-advantages-fdm-3d-printing-technology-vicky-xu/>

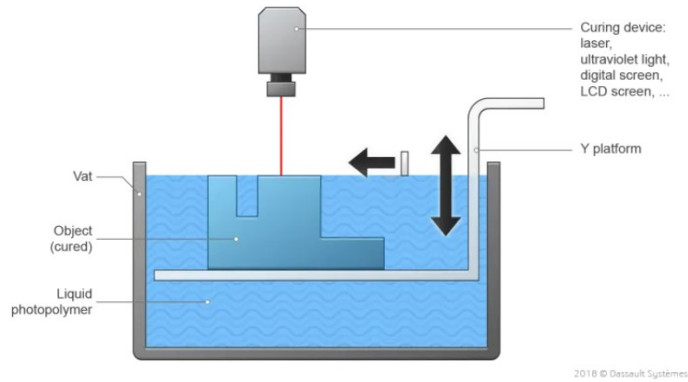
1.3.2 Φωτοπολυμερισμός

Σε αυτήν την τεχνολογία, ένα φωτοπολυμερές υγρό τοποθετείται σε μια δεξαμενή. Το υγρό αυτό πολυμερίζεται και στερεοποιείται με χρήση πηγής θερμότητας (φωτός, λέιζερ κλπ). Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα στρώμα του τελικού στερεοποιημένου αντικειμένου. Στη συνέχεια στερεοποιείται το επόμενο στρώμα, οδηγώντας έτσι στην κατασκευή του τελικού αντικειμένου. (Ali Bagheri and Jianyong Jin 2019)

Υποκατηγορίες:

SLA: στερεοποίηση μέσω δέσμης λέιζερ υπεριώδους ακτινοβολίας

DLP: στερεοποίηση μέσω φωτός από προβολέα, στερεοποίηση ολόκληρου του στρώματος σε κάθε βήμα



Σχήμα 1-2 Τεχνολογία Φωτοπολυμερισμού

Πηγή: Dassault Systèmes,

<https://www.3ds.com/make/guide/process/photopolymerization>

1.3.3 Σύντηξη Πούδρας

Σε αυτήν την μέθοδο, πούδρα ενός υλικού είναι τοποθετημένη στην τράπεζα εκτύπωσης. Στην πούδρα αυτή επενεργεί δέσμη λέιζερ ή ηλεκτρονίων, αναλόγως την υποκατηγορία, αντιδρώντας με αυτήν και στερεοποιώντας την, δημιουργώντας έτσι στρώμα-στρώμα το τελικό τεμάχιο. Η τεχνολογία αυτή ξεχωρίζει για την πολυπλοκότητα και την συνθετότητα του τελικού τεμαχίου καθώς μπορεί να προσδώσει εξαιρετική ακρίβεια σε αυτό. (Fina, Simon Gaisford and Abdul W. Basit 2018)

Υποκατηγορίες:

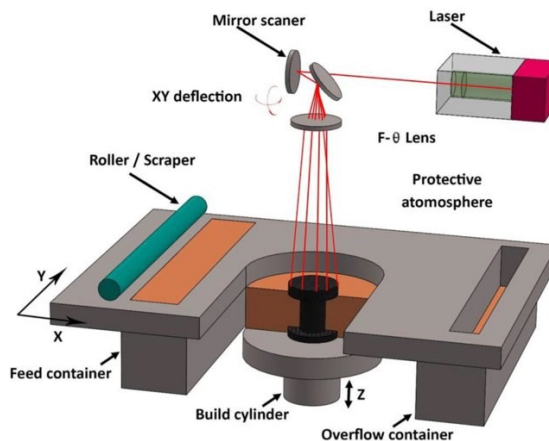
DMLS: πυροσυσσωμάτωση με χρήση υψηλής ισχύος λέιζερ

SLS: πυροσυσσωμάτωση με χρήση λέιζερ

SLM: τήξη πούδρας με χρήση υψηλής ισχύος λέιζερ

MJF: τήξη με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας

EBM: τήξη μέσω δέσμης ηλεκτρονίων



Σχήμα 1-3 Τεχνολογία πυροσυσσωμάτωσης με χρήση λέιζερ

Πηγή: Mehrshad Mehrpouya,

https://www.researchgate.net/publication/351959771_Additive_manufacturing_of_polyhydroxyalkanoates_PHA_s_biopolymers_Materials_printing_techniques_and_applications/figures

1.3.4 Εναπόθεση υλικού

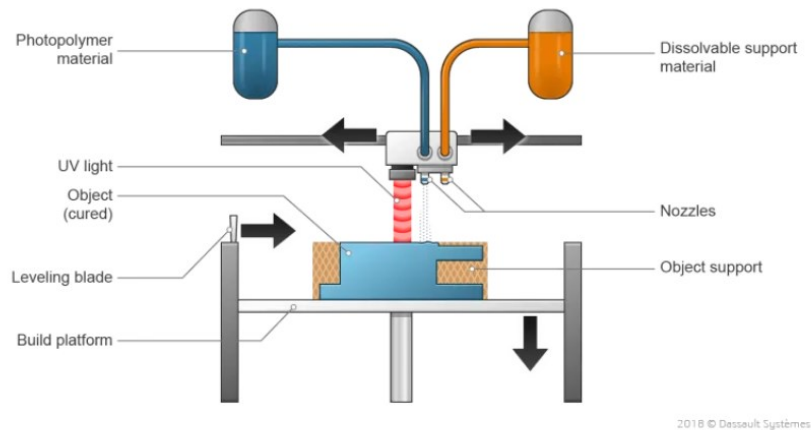
Σε αυτήν την τεχνολογία, που προσιδιάζει ιδιαίτερα την τεχνολογία των κλασικών οικιακών εκτυπωτών μελάνης, ρευστά φωτοπολυμερή σταγονίδια, εναποτίθενται στο τραπέζι εκτύπωσης. Αυτά στερεοποιούνται αργότερα μέσω πηγών υπεριώδους ακτινοβολίας. Η ακρίβεια των εκτυπωτών αυτών είναι ιδιαίτερα μεγάλη και θεωρούνται αξιόπιστοι εκτυπωτές για λεπτομερείς και ακριβείς εργασίες. Η χρήση της τεχνολογίας αυτής έχει αυξηθεί σε δημοτικότητα και έχει προσαρμοστεί από διαφορετικές βιομηχανίες, από τη βιοϊατρική και την οδοντιατρική έως τον τομέα των κατασκευών και την αεροπορία. (Orhan Gülcen, Kadir Günaydin και Aykut Tamer 2021)

Υποκατηγορίες:

Drop On Demand (DOD): Δύο ακροφύσια συμμετέχουν στην εργασία, ένα για την εναπόθεση του υλικού εργασίας και ένα για την εναπόθεση του υλικού υποστήριξης.

PolyJet(PJ): Εναπόθεση και στερεοποίηση με χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας

NanoParticle Jetting (NPJ): Η διαδικασία πραγματοποιείται με εναπόθεση νανοσωματιδίων, αυξάνοντας έτσι κατακόρυφα την τελική ακρίβεια του τεμαχίου.



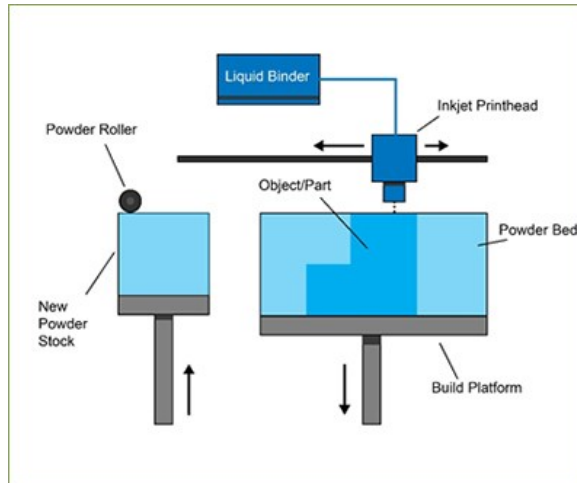
Σχήμα 1-4 Τεχνολογία Εναπόθεσης Υλικού

Πηγή: Dassault Systemes

<https://www.3ds.com/make/guide/process/material-jetting>

1.3.5 Εναπόθεση συγκολλητικού υλικού (Binder jetting)

Εδώ, πούδρα η οποία είναι τοποθετημένη στο τραπέζι εκτύπωσης, συγκολλάται μέσω σταγονιδίων συγκολλητικού ρευστού που εναποτίθεται από το ακροφύσιο. Μετά την στερεοποίηση του στρώματος, η τράπεζα εκτύπωσης μετακινείται προς τα κάτω, ώστε να δημιουργηθεί το επόμενο στρώμα. (Yue Wang, και συν. 2020)



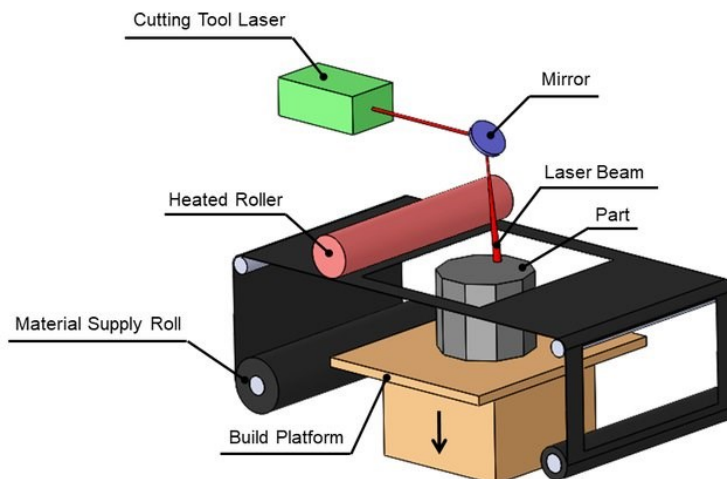
Σχήμα 1-5 Τεχνολογία Εναπόθεσης συγκολλητικού υλικού

Πηγή: Additive Manufacturing Research Group

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>

1.3.6 Πλαστικοποίηση φύλλων (LOM)

Στην τεχνολογία πλαστικοποίησης φύλλων ή Laminated Object Manufacturing, φύλλα υλικού εναποτίθενται το ένα πάνω στο άλλο, με αντίστοιχο τρόπο σαν στρώματα. Το κάθε φύλλο έχει πάρει το θεμιτό σχήμα του στρώματος μέσω κοπής από μαχαίρια ή λέιζερ. (Benjamin Dermeik and Nahum Travitzky 2020)



Σχήμα 1-6 Τεχνολογία πλαστικοποίησης φύλλων

Πηγή: Abbas Razavykia

https://www.researchgate.net/publication/344071560_An_Overview_of_Additive_Manufacturing_Technologies-A_Review_to_Technical_Synthesis_in_Numerical_Study_of_Selective_Laser_Melting/figures

1.3.7 Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας

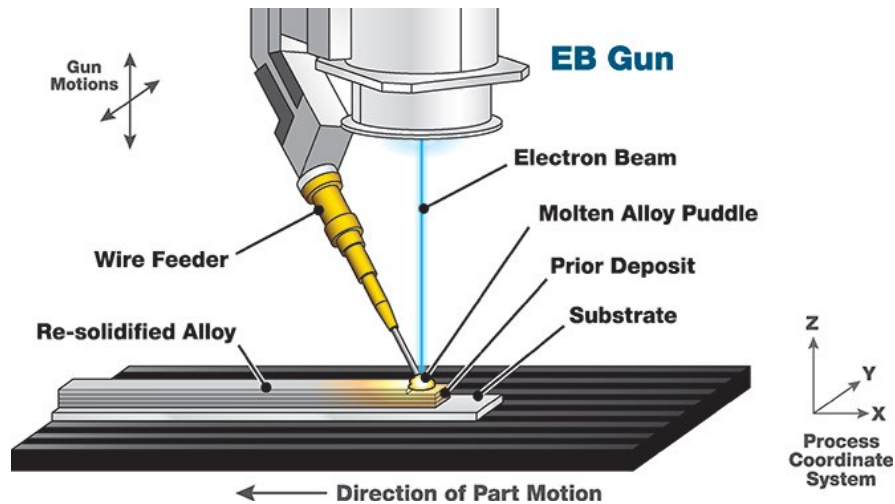
Σε αυτήν την κατηγορία, υλικό σε μορφή σκόνης ή σύρματος, τήκεται και εναποτίθεται στην τράπεζα εκτύπωσης. Με παρόμοιο τρόπο με έναν FDM εκτυπωτή, χτίζουν στρώμα στρώμα το τελικό τεμάχιο. Μέσω της διεργασίας αυτής μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν ετερογενή υλικά με επιθυμητές

ιδιότητες και χαρακτηριστικά μέσω διαδοχικών και ταυτόχρονων εναποθέσεων διαφορετικών υλικών. Ως εκ τούτου, οι έρευνες για την κατηγορία αυτή, έχουν αυξηθεί σταθερά τα τελευταία χρόνια. (Ahn 2021)

Υποκατηγορίες:

EBAM: Μέταλλο σε μορφή καρουλιού, τήκεται και εναποτίθεται στο τραπέζι εκτύπωσης.

LENS: Μέταλλο σε μορφή κόνις τήκεται με χρήση λέιζερ



Σχήμα 1-7 Τεχνολογία κατευθυνόμενης εναπόθεσης ενέργειας

Πηγή: SCIACY inc.

<https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/what-is-ded-3d-printing>

Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η μέθοδος της εξώθησης υλικού. Θα σχεδιαστεί και θα μελετηθεί 3D εκτυπωτής που θα στηρίζεται στην τεχνολογία FDM. Η τεχνολογία αυτή επιλέχθηκε για τους παρακάτω λόγους:

❖ **Ευκολία χρήσης**

Η τεχνολογία αυτή είναι σχετικά απλή στη ρύθμιση και τη λειτουργία. Η διαδικασία εκτύπωσης συνήθως περιλαμβάνει τη φόρτωση του νήματος, τη βαθμονόμηση του εκτυπωτή και την έναρξη της εργασίας εκτύπωσης χρησιμοποιώντας το κατάλληλο λογισμικό.

❖ **Ευρεία γκάμα υλικών**

Στην μεγάλη αυτή γκάμα περιλαμβάνονται υλικά όπως PLA, ABS, PETG και TPU. Αυτή η ευελιξία σίγουρα αποτελεί ένα πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν πολύ συγκεκριμένα υλικά, πολλές φορές ιδιαίτερα ακριβά, αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις τοξικής φύσεως.

❖ **Κόστος**

Παρόλο που δεν θα πραγματοποιηθεί κατασκευή του εκτυπωτή, αυτό μπορεί να αποτελεί μια μελλοντική εργασία, γι' αυτό το λόγο το κόστος μιας ενδεχόμενης κατασκευής θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν. Η τεχνολογία αυτή αποτελεί την πιο προσιτή σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης.

❖ Συντήρηση

Οι εκτυπωτές FDM έχουν συνήθως χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης, με απλά εξαρτήματα που καθαρίζονται εύκολα και αντικαθίστανται εάν είναι απαραίτητο. Αυτό συμβάλλει στη συνολική αξιοπιστία και μακροζωία τους.

1.4 Περιγραφή της μεθόδου

Αρχικά σχεδιάζεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο είτε σε περιβάλλον CAD με τα χαρακτηριστικά που επιθυμεί ο σχεδιαστής, είτε μέσω 3D σάρωσης κάποιου φυσικού αντικειμένου. Στη συνέχεια το τρισδιάστατο μοντέλο εισάγεται σε ένα λογισμικό που ονομάζεται «slicer» το οποίο ουσιαστικά θα μετατρέψει το τρισδιάστατο μοντέλο σε μια αλληλουχία στρωμάτων και θα παράξει ένα αρχείο G-κώδικα, παρόμοιο με αυτό που διαβάζεται από CNC και το οποίο περιέχει τις κατάλληλες εντολές που θα δοθούν στον εκτυπωτή. (Vinod G. Gokhare και Dr. D. N. Raut 2017).

Ουσιαστικά σε αυτό το σημείο το αρχείο πλέον δεν αποτελεί τόσο ένα τρισδιάστατο μοντέλο αλλά περισσότερο μια γραμμή εντολών. Στη συνέχεια ο κώδικας αυτός διαβάζεται από το λογισμικό του 3D εκτυπωτή και μέσω αυτού δίνονται εντολές για κίνηση του ακροφυσίου και για απόθεση υλικού. Αλληπαλλήλες στρώσεις υλικού εναποτίθενται η μια πάνω στην άλλη, κατασκευάζοντας ένα στρώμα. Εν συνεχεία κατασκευάζεται το επόμενο στρώμα καταλήγοντας έτσι στην κατασκευή ενός τρισδιάστατου αντικειμένου. Μέσω αυτής της διαδικασίας μπορούν να κατασκευαστούν τρισδιάστατες δομές, από τις πιο απλές έως και τις πιο σύνθετες, αναλόγως πάντα την ακρίβεια του εκάστοτε εκτυπωτή. Η γκάμα των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι μεγάλη, μεταξύ αυτών τα πιο δημοφιλή είναι το PLA, το ABS, το PET-G.

1.5 Πλεονεκτήματα μεθόδου

Η μέθοδος της τρισδιάστατης εκτύπωσης, προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα που την καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμη και της χαρίζουν υπεροχή σε σχέση με τις υπάρχουσες μεθόδους κατεργασίας, αναλόγως πάντα με την φύση του αποτελέσματος που επιχειρείται.

Χαρακτηριστικά αναφέρονται:

- Μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας προσαρμοσμένων προϊόντων, αφού αποφεύγεται η χρήση καλουπιών και γραμμών παραγωγής που είναι πολύ δύσχρηστες για την παραγωγή εξατομικευμένων τεμαχίων. (H. Bikas, P. Stavropoulos and G. Chryssolouris 2016)
- Η τρισδιάστατη εκτύπωση «ξεκλείδωσε» την διαδικασία δημιουργίας πρωτοτύπων. Η δημιουργία των πρωτοτύπων γίνεται έτσι πολύ πιο γρήγορη και απλή, λιγότερο χρονοβόρα και λιγότερο κοστοβόρα αλλά και δίνει χώρο σε πειραματισμό και επιδιορθώσεις που σε άλλη περίπτωση θα απαιτούσαν πολύ παραπάνω χρόνο. (Chee Kai Chua and Kah Fai Leong 2016)
- Με την χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης μειώνονται σημαντικά τα απόβλητα της κατασκευής. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους αποβολής υλικού, μέσω κατεργασιών κοπής, κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση το υλικό κατασκευής προσδίδεται στον εκτυπωτή, μέσω ειδικών διατάξεων. Με αυτόν τον τρόπο η φύρα είναι πολύ μικρότερη από αυτή των κατεργασιών αποβολής. Γι' αυτόν τον λόγο η τρισδιάστατη εκτύπωση, αποτελεί και φιλικότερη λύση για το περιβάλλον. (Anketa Jandyal, et al. 2022)
- Δυνατότητα κατασκευής κατά παραγγελία στον χώρο. Με την 3D εκτύπωση δίνεται η δυνατότητα σε οποιοδήποτε μέρος, υπάρχει μια ψηφιακή βιβλιοθήκη και ένας εκτυπωτής, να γίνει η κατασκευή κάποιου απαραίτητου τεμαχίου, εργαλείου. Τέτοιες εφαρμογές χρησιμεύουν ιδιαίτερα στην αεροδιαστημική. (Gaskill n.d.)

- Δυνατότητα κατασκευής περίπλοκων δομών και σύνθετων γεωμετριών, οι οποίες θα ήταν αδύνατον να δημιουργηθούν με τις υπάρχουσες μεθόδους αφαίρεσης υλικού. (Dassault Systemes n.d.)

1.6 Μειονεκτήματα μεθόδου

- Τα 3D εκτυπωμένα τεμάχια συνήθως έχουν λιγότερη ακρίβεια από αυτά που είναι κατεργασμένα σε CNC, ή γενικότερα με μέθοδο αποβολής υλικού. Ενώ τα δεύτερα έχουν ακρίβεια της τάξης των 0,005mm, τα πρώτα φτάνουν έως την ακρίβεια των 0,2mm. Αυτό ενδεχομένως στο μέλλον να βελτιωθεί. (Dassault Systemes n.d.)
- Τα συμβατά με την 3D εκτύπωση υλικά είναι ακόμα περιορισμένα σε σύγκριση με άλλες διαδικασίες παραγωγής. Επίσης τα θερμοσκληρυνόμενα υλικά δεν μπορούν να ανακυκλωθούν, δημιουργώντας απόβλητα υλικών. (Tuan D. Ngo, et al. 2018)
- Τα περισσότερα τεμάχια που εκτυπώνονται, χρειάζονται κάποια μορφή επεξεργασίας σε δεύτερο επίπεδο (μετ-επεξεργασία) προκειμένου να αφαιρεθεί το υλικό στήριξης και να εξομαλυνθεί η επιφάνεια. Οι μέθοδοι αυτοί μπορεί να είναι τρίψιμο, χημική επεξεργασία, στέγνωμα, συναρμολόγηση και άλλες. (The Welding Institute n.d.)
- Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές στην μεγάλη τους πλειοψηφία παράγουν τεμάχια σχετικά μικρού μεγέθους. Μεγαλύτερου μεγέθους τεμάχια απαιτούν ξεχωριστές εκτυπώσεις και συναρμολόγηση σε δεύτερο χρόνο. (May, Protototal UK n.d.)

1.7 Ειδικότερα ζητήματα για τον σχεδιασμό του πρωτότυπου εκτυπωτή

Οι διαθέσιμες επιλογές κατά την ανάπτυξη ενός 3D εκτυπωτή είναι πάρα πολλές, καθεμιά με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, αλλά και τα δικά της χαρακτηριστικά, όσον αφορά συγκεκριμένα κριτήρια. (Anketa Jandyal, και συν. 2022).

Υπάρχουν τεχνολογίες που είναι πολύ πιο προσιτές τόσο ως προς την απαραίτητη τεχνογνωσία όσο και ως προς το ίδιο το κόστος κατασκευής. Ακόμη από τεχνολογία σε τεχνολογία, υπάρχουν μεγάλες – πολλές φορές χαώδεις- διαφορές όσον αφορά την ακρίβεια, την ταχύτητα, την συνεργασία με διαφορετικές πρώτες ύλες.

Στην παρούσα εργασία αποφασίστηκε να ακολουθηθεί η τεχνολογία της 3D εκτύπωσης με χρήση νήματος. Η απόφαση αυτή πάρθηκε κυρίως για διάφορους λόγους που αναλύθηκαν παραπάνω. Δεδομένου πως οι πόροι έχουν συγκεκριμένα όρια, η κατασκευή ενός FDM εκτυπωτή αποτελεί την οικονομικότερη επιλογή, καθώς απαιτεί και τις λιγότερες μετατροπές της υπάρχουσας διάταξης αλλά και τα λιγότερα υλικά. Η υπάρχουσα διάταξη ACRO, η οποία θα δεχθεί την μετατροπή σε εκτυπωτή, λειτουργεί σχεδόν με τις ίδιες αρχές με έναν εκτυπωτή εξώθησης υλικού. Η κινηματική σε επίπεδο XY είναι ίδια με αυτή που πραγματοποιείται και έναν εκτυπωτή FDM, ενώ ο άξονας Z θα προστεθεί εμβόλιμα.

Ακόμη κρίθηκε πως για τους σκοπούς που σχεδιάζεται, ένας εκτυπωτής FDM αποτελεί μια σχετικά καλή επιλογή αναφορικά με την ακρίβεια κι την ταχύτητα, χαρακτηριστικά που προφανώς υστερούν σε σχέση με άλλες τεχνολογίες, αλλά εξακολουθεί να αποτελεί μια σχετικά αξιόπιστη τεχνολογία.

Για τους παραπάνω λόγους, μπορεί να οριστεί η γενική κατηγορία του εκτυπωτή προς ανάπτυξη ως Εκτυπωτής Εξώθησης Νήματος (FDM).

1.8 Πίνακες αποφάσεων

Ο Πίνακας Αποφάσεων ή πίνακας Pugh είναι ένας πίνακας, ο οποίος χρησιμοποιεί τη βαθμολόγηση κριτηρίων για να καθορίσει ποιες εναλλακτικές λύσεις θα πρέπει να επιλεγούν. Η τεχνική πήρε το

όνομά της από τον Stuart Pugh και έχει γίνει τυπικό μέρος της μεθοδολογίας Six Sigma. (Adams 2024). Σε αντίθεση με μια απλή λίστα πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων, ένας πίνακας αποφάσεων επιτρέπει την βαθμολογία σε κάθε παράγοντα και την στάθμισή τους αναλόγως την σημαντικότητά τους. Περιλαμβάνει τον καθορισμό μιας λίστας κριτηρίων που επηρεάζουν μια κατάσταση και στη συνέχεια την ανάθεση ενός βαθμού βαρύτητας σε καθένα. Αυτή η μέθοδος μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην οπτικοποίηση της σημασίας κάθε κριτηρίου καθώς και τη συσχέτισή του με το πρόβλημα που τίθεται. Ένας πίνακας αποφάσεων μειώνει την υποκειμενικότητα και βοηθά τον μηχανικό να εξάγει ασφαλές συμπέρασμα. (Peek 2024)

Τα κριτήρια που ορίστηκαν παραπάνω αποτελούν τις βασικές προδιαγραφές που θα πρέπει να πληροί ο εκτυπωτής που σχεδιάζεται. Κάθε χαρακτηριστικό από τα παραπάνω αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο, η έλλειψη της οποίας θα οδηγήσει σε ένα απορριπτικό αποτέλεσμα. Παρόλα αυτά κάθε χαρακτηριστικό διαθέτει μια συγκεκριμένη βαρύτητα, δεδομένου πως οικονομοτεχνικά θα ήταν ασύμφορο να γίνει προσπάθεια όλα τα χαρακτηριστικά να είναι απόλυτα πετυχημένα, λ.χ. ένας εκτυπωτής με ακρίβεια της τάξης χαμηλότερης του μικρομέτρου θα ήταν ένα πολύ θεμιτό αποτέλεσμα, όμως θα ανέβαζε ιδιαίτερα το κόστος της τελικής συναρμογής. Συνεπώς υπήρξε η ανάγκη να θεσπιστούν δείκτες βαρύτητας για καθένα από τις παραπάνω προδιαγραφές, προκειμένου να βρεθεί η χρυσή τομή ενός εκτυπωτή που έχει αρκετές δυνατότητες αλλά και μετριασμένο -όσο γίνεται- κόστος.

Πίνακας Αποφάσεων: Ο Πίνακας αποφάσεων ή όπως μπορεί να ειπώνεται με διαφορετικούς τρόπους, πίνακας Pugh, πίνακας λύσεων, φόρμα αξιολόγησης κριτηρίων, αποτελεί εργαλείο λήψης αποφάσεων όταν αυτές εξαρτώνται από μια σειρά κριτηρίων, κάθε ένα από τα οποία μπορεί να επηρεάζει μια παράμετρο ή μια σειρά παραμέτρων που οριοθετούνται από τον συντάκτη.

Αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στα χέρια αυτού που τον συντάσσει καθώς πρόκειται για μια μεθοδολογία που μπορεί να δώσει απαντήσεις σε ερωτήματα και διλλήματα για τα οποία μπορεί να μην υπάρχει μια σαφής και προφανής προτιμώμενη επιλογή. Ακόμα αποτελεί ουσιαστική βοήθεια σε προβλήματα στα οποία παρουσιάζονται αρκετοί περιορισμοί, όπως π.χ. κόστος, ασφάλεια, κίνδυνοι κλπ.

Ο πίνακας αποφάσεων αποτελεί μια πολύ απλουστευμένη μορφή της Ανάλυσης απόφασης πολλαπλών κριτηρίων (MCDA) ή αλλιώς της Διαχείρισης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (MCDM). Το εξελιγμένο μοντέλο MCDA μπορεί να αποτελεί εργαλείο ανάλυσης ιδιαίτερα πολύπλοκων μοντελοποιημένων σεναρίων χρησιμοποιώντας προηγμένα μαθηματικά. (Tague 2024)

Ο πίνακας απόφασης είναι βασικά ένας πίνακας που παρουσιάζει σε έναν άξονα μια λίστα των εναλλακτικών λύσεων που αξιολογούνται και στον άλλο άξονα, έναν κατάλογο κριτηρίων, τα οποία σταθμίζονται ανάλογα με τους αντίστοιχη σημασία στην τελική απόφαση που θα ληφθεί. (Concept Design 2004)

Η μεθοδολογία αυτή αποτελείται ουσιαστικά από ορισμένα βασικά βήματα όπως αυτά φαίνονται παρακάτω: (Science Direct n.d.)

Βήμα 1ο: Αξιολόγηση και ιεράρχηση των επιλογών. Σε αυτό το βήμα προφανώς, όσοι περισσότεροι μπορούν να εμπλακούν, τόσο καλύτερα θα είναι τα αποτελέσματα. Μέσω ελέγχου, ανάλυσης, ιδεών, καταγράφονται όλες οι ιδέες και επιλογές, όσο καλές ή κακές μπορεί να φαίνονται εκ πρώτης εντύπωσης.

Βήμα 2ο: Κατάρτιση της λίστας με τα κριτήρια που θα οριστούν. Σημαντικό σε αυτό το βήμα είναι να καταγραφούν όλα τα κριτήρια τα οποία μπορεί να παρουσιαστούν στη συνέχεια και όχι μόνο τα προφανή. Ο πίνακας αποφάσεων στη συνέχεια έχει τη δυνατότητα από μόνος του να απορρίψει όσα κριτήρια δεν θα φέρουν ιδιαίτερη βαρύτητα.

Βήμα 3^ο (Προαιρετικό): Στο βήμα αυτό «χρεώνεται» σε κάθε κριτήριο ένα ειδικό βάρος, το οποίο ουσιαστικά θα αποτελεί δείκτη σημαντικότητας του συγκεκριμένου κριτηρίου. Με τον τρόπο αυτό ιεραρχούνται συγκεκριμένα κριτήρια πολλαπλασιαζόμενα με τον συγκεκριμένο δείκτη. Έτσι για παράδειγμα με ένα εύρος δεικτών (1-5), το 1 θα αφήνει πλήρως ανεπηρέαστο τον βαθμό που αξιολογήθηκε το κριτήριο, ενώ το 5 που θα μπορούσε να οριστεί για μια πολύ σημαντική παράμετρο θα μπορούσε να ενισχύσει ιδιαίτερα την παράμετρο αυτήν.

Βήμα 4ο: Αξιολόγηση κάθε επιλογής με βάση τα παραπάνω κριτήρια. Αυτό αποτελεί το σημαντικότερο βήμα και απαιτεί από τον συντάκτη του προβλήματος ιδιαίτερη προσοχή καθώς είναι πολύ εύκολο να «χειραγωγηθεί» η διαδικασία της αξιολόγησης από την ενδόμυχη προαποφασισμένη επιλογή του συντάκτη.

Έτσι λοιπόν σε κάθε υπό σύστημα για το οποίο θα γίνεται η μελέτη θα γίνεται χρήση ενός τέτοιου πίνακα, προκειμένου να προκύπτει η καλύτερη λύση. Σε κάθε υπό κεφάλαιο θα γίνεται ανάλυση των εκάστοτε επιλογών.

Τέλος, επιλέχθηκε να οριστούν βάρη στα κριτήρια προκειμένου, αυτά με την μεγαλύτερη σημασία να επηρεάσουν περισσότερο την τελική απόφαση. Το εύρος των βαρών ορίστηκε στις τιμές 1 έως 5, με το 1 να θεωρείται καθόλου σημαντικό και το 5 πολύ σημαντικό. Το 3 αποτελεί μια κεντρική τιμή, η οποία ορίζει την βάση, το ανεκτό. Συγκεκριμένα το εύρος και οι ερμηνείες του φαίνονται παρακάτω:

Βάρος	1	2	3	4	5
	Καθόλου σημαντικό	Σχετικά σημαντικό	Σημαντικό	Αρκετά Σημαντικό	Πολύ Σημαντικό
—————▶					

Πίνακας 1 Ορισμός βαρών πίνακα αποφάσεων

Όσον αφορά την βαθμολογία της εκάστοτε επιλογής, αποφασίστηκε να καταταχθούν με ένα σύστημα βαθμολογίας με εύρος από το 1 έως το 10, με το 1 να θεωρείται η χειρότερη εναλλακτική ενώ το 10 η βέλτιστη.

Σημείωση: Παίρνοντας υπόψιν προ-υπάρχουσες μελέτες και για λόγους κατανόησης, το κόστος δεν θα υπολογίζεται καθαυτό αλλά ως «μείωση κόστους», προκειμένου να συμπορεύεται με την μέθοδο βαθμολογίας των υπόλοιπων κριτηρίων. (Σε άλλη περίπτωση μια υψηλή βαθμολογία του κόστους, θα απέφερε το αντίθετο αποτέλεσμα και θα έπρεπε να γίνει διαφορετικός υπολογισμός).

2 Σχεδιασμός και ανάπτυξη πρωτότυπου 3D εκτυπωτή

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει μελέτη και ανάλυση για την μετατροπή της πλατφόρμας ACRO της εταιρίας OpenBuilds και συγκεκριμένα του μοντέλου OpenBuilds ACRO 500x1000mm, σε 3D εκτυπωτή μεγάλου όγκου εργασίας. Κατά την μετατροπή αυτή θα αναλυθούν τόσο οι επιλογές που υπάρχουν για κάθε υποσύστημα του προς ανάπτυξη εκτυπωτή, όσο και τα χαρακτηριστικά που καλείται να έχει το τελικό μηχάνημα.

Το OpenBuilds ACRO αποτελεί έναν DIY ευέλικτο σύστημα που επιτρέπει την ακριβή τοποθέτηση πολλών διαφορετικών συναρμολογούμενων εργαλείων και εξαρτημάτων (ACRO 2024).

Αποτελείται από ένα σταθερό σασί παραλληλόγραμμου σχήματος από V-slots. Πάνω σε αυτό είναι προσδεδεμένο και κινείται κάθετα ένα προφίλ V-slot στον οποίο προσδένεται, αναλόγως την φύση της εργασίας το κατάλληλο εργαλείο. Οι κινήσεις πραγματοποιούνται με χρήση V-wheels.

Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει διαστάσεις 500x1000mm. Είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο καθιστώντας το μια ελαφριά κατασκευή χωρίς περιττό βάρος. Τόσο οι περιμετρικοί άξονες όσο και ο άξονας μεταφοράς της κεφαλής αποτελούνται από προφίλ αλουμινίου V-slot για την εύκολη σύνδεση μεταξύ τους, αλλά και με περιφερειακά μέρη. (ACRO 2024)

2.2 Κριτήρια σχεδιασμού

Στην εργασία και κατά την ίδια την οριοθέτηση της, θεσπίστηκαν ορισμένα κριτήρια, καθένα με την δική του βαρύτητα, κριτήρια τα οποία σκιαγραφούν τα επιθυμητά τελικά χαρακτηριστικά του πρωτότυπου εκτυπωτή. Τα κριτήρια αυτά φαίνονται παρακάτω:

2.2.1 Όγκος εκτύπωσης

Αφορά τον μέγιστο όγκο των εκτυπωμένων τεμαχίων που θα μπορούν να κατασκευάζονται σε έναν κύκλο λειτουργίας του εκτυπωτή. Υπενθυμίζεται πως ο εκτυπωτής που θα κατασκευαστεί θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα εκτύπωσης τεμαχίων διαστάσεων M.750xΠ300xY250(mm). Δεδομένου λοιπόν πως πρόκειται για έναν εκτυπωτή μεγάλων διαστάσεων, η βαρύτητα του συγκεκριμένου κριτηρίου είναι αρκετά σημαντική.

2.2.2 Κόστος

Το κόστος αποτελεί πάντα ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια, αλλά και γενικά την αχίλλειο πτέρνα κάθε έργου ενός μηχανικού, καθώς θα πρέπει να αποτελεί την χρυσή τομή μεταξύ ποιότητας και δυνατότητας διάθεσης. Ένα πολύ ακριβό προϊόν μπορεί να είναι και πολύ ποιοτικό, όμως μπορεί να αποτελεί μια δυσχερή λύση από τον πελάτη. Στον αντίποδα ένα πολύ φθινό προϊόν συνήθως θα συνοδεύεται και από τις αντίστοιχες εκπώσεις στην ποιότητα, στην ακρίβεια. Το κόστος θα αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο.

2.2.3 Ακρίβεια

Η ακρίβεια αποτελεί ένα σημαντικό κριτήριο για έναν 3D εκτυπωτή. Δεδομένου πως στην παρούσα εργασία, σκοπός είναι η σχεδίαση ενός εκτυπωτή που θα έχει την

δυνατότητα να κατασκευάζει μεγάλα τεμάχια, εκ των πραγμάτων φαίνεται πως η ακρίβεια δεν θα αποτελεί τον πιο σημαντικό πρωταγωνιστή, χωρίς βέβαια να αποτελεί και ασήμαντη παράμετρο. Η ακρίβεια θα πρέπει να είναι σταθμισμένη έτσι ώστε να ικανοποιεί το μέτρο της λεπτομέρειας που θα οριστεί αλλά να μην επιβαρύνει ιδιαίτερα το κομμάτι του κόστους. Ο στόχος είναι η επίτευξη ακρίβειας ενός μέσω εκτυπωτή.

2.2.4 Ταχύτητα εκτύπωσης

Ενώ γενικά η ταχύτητα αποτελεί έναν σχετικά σημαντικό παράγοντα κυρίως από την άποψη της άνεσης και της ευκολίας σε έναν εκτυπωτή, εδώ η ταχύτητα δεν αποτελεί σημαντικό δείκτη, αρκεί πάντα να μη είναι ιδιαίτερα μικρή και δημιουργηθούν ζητήματα στερεοποίησης μεταξύ των στρωμάτων.

2.2.5 Στιβαρότητα εκτυπωτή

Το χαρακτηριστικό αυτό είναι επίσης σημαντικό, καθώς ουσιαστικά επηρεάζει την ίδια την ποιότητα του τεμαχίου, την πιθανότητα εμφάνισης σφάλματων και αστοχιών.

Με βάση την ανάλυση αυτή, σε αυτό το βήμα θα οριστούν τα κατάλληλα βάρη. Όσον αφορά τα κριτήρια τα βάρη έχουν ως εξής:

Όγκος εκτύπωσης	4
Κόστος	5
Ακρίβεια	3
Ταχύτητα εκτύπωσης	2
Στιβαρότητα εκτυπωτή	4

Πίνακας 2 Βάρη εκάστοτε κριτηρίου

2.3 Ανάλυση των επιλογών

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως υπάρχει μια πληθώρα διαθέσιμων επιλογών κατά την σχεδίαση ενός 3D εκτυπωτή. Προκειμένου να γίνει η κατάλληλη ανάλυση και σύγκριση αλλά και η τελική επιλογή το μοντέλο του προς σχεδίαση εκτυπωτή θα διαχωριστεί σε 6 υπό-συστήματα.

1. Υπό-σύστημα τράπεζας εκτύπωσης
2. Υπό-σύστημα κινηματικής
3. Υπό-σύστημα κίνησης στον Z άξονα
4. Υπό-σύστημα κίνησης στον XY άξονα
5. Υπό-σύστημα τροφοδοσίας υλικού
6. Υπό-σύστημα θέρμανσης τράπεζας- θερμομόνωσης

Σε κάθε διάταξη υπάρχουν ζητήματα που θα πρέπει να μελετηθούν προκειμένου να καταληχθεί ποια επιλογή είναι η βέλτιστη. Παρακάτω θα αναλυθούν οι διαθέσιμες επιλογές για κάθε υπό διάταξη.

2.3.1 Υπό-σύστημα τράπεζας εκτύπωσης

Αρχικά θα μελετηθεί και θα σχεδιαστεί η τράπεζα εκτύπωσης.

Η τράπεζα εκτύπωσης αποτελεί την βάση πάνω στην οποία εναποτίθεται το τηγμένο νήμα και κατασκευάζεται σε στρώματα το τρισδιάστατο μοντέλο. Κύριος σκοπός της τράπεζας είναι η ασφαλής προσκόλληση του πρώτου στρώματος, προκειμένου να μην υπάρξουν μεταγενέστερες αστοχίες, αλλά και η ασφαλής συγκράτηση του τελικού μοντέλου ανεξαρτήτως τους τελικού βάρους του (πόσο μάλλον στην παρούσα εργασία που καταπιάνεται με εκτυπωτή υψηλού όγκου εργασίας).

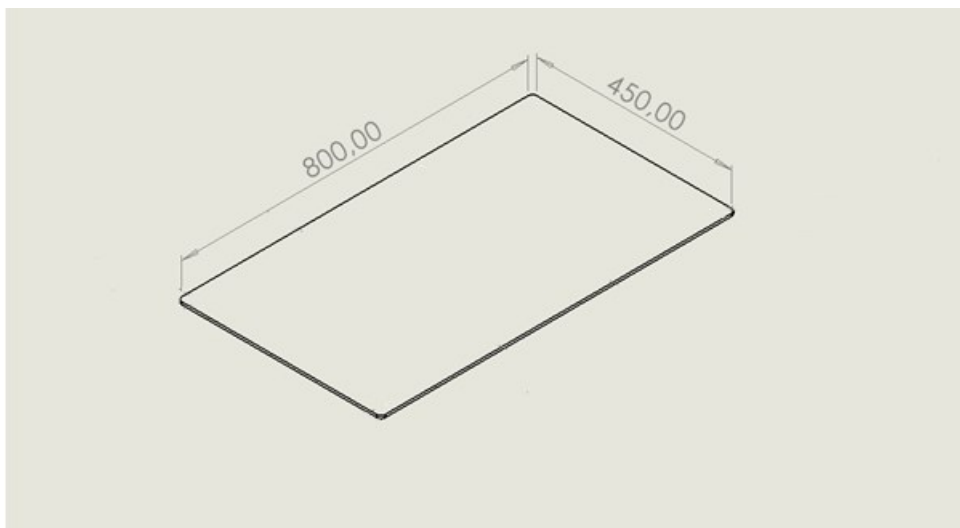
Σχετικά με το υλικό από το οποίο αποτελούνται οι τράπεζες εκτύπωσης σε εκτυπωτές του εμπορίου, υπάρχει μια πληθώρα επιλογών, μεταξύ άλλων, γυαλί, μαγνητικές εύκαμπτες επιφάνειες, από ανθρακόνημα, αλουμίνιο κ.α.

Παρόλα αυτά, σε κατασκευές εκτυπωτών, το πιο σύνηθες είναι να χρησιμοποιείται πλάκα αλουμινίου. Ειδικότερα σε εκτυπωτές όπως προαναφέρθηκε όπου το βάρος του κατασκευαζόμενου τεμαχίου μπορεί να ανέρχεται σε πολλά κιλά, η πιο κατάλληλη επιλογή είναι το αλουμίνιο, αφού διαθέτει πολλά πλεονεκτήματα:

- Μπορεί ιδιαίτερα εύκολα να βρεθεί στο εμπόριο, σε αντίθεση με τράπεζες εκτύπωσης από υλικό όπως ανθρακόνημα, οι οποίες για τις συγκεκριμένες διαστάσεις θα έπρεπε να γίνουν ειδική παραγγελία.
- Είναι πολύ πιο προσιτό από πλευράς κόστους, συγκριτικά και πάλι με ανθρακόνημα, ή γυαλί μεγάλου πάχους.
- Μπορεί να αντέξει πολύ βάρος σε σύγκριση με την αμέσως επόμενη επιλογή που θα ήταν το γυαλί.
- Διαθέτει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, άρα μπορεί ευκολότερα και σε λιγότερο χρόνο να φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία, χαρακτηριστικά αναφέρεται η θερμική αγωγιμότητα του αλουμινίου 237 W m.K (Zhang and Yanxiang Li 2023) σε σύγκριση με αυτή του γυαλιού όπου είναι 1,38 W m.K (Optics 2004)

Οι διαστάσεις της τράπεζας εκτύπωσης υπολογίστηκαν παίρνοντας υπόψιν τις επιθυμητές ωφέλιμες διαστάσεις εκτύπωσης που είναι: X: 750mm, Y: 300mm, Z: 250mm. Δεδομένου πως θα πρέπει να υπάρχει και ένας ελεύθερος χώρος περιμετρικά προκειμένου η τράπεζα να πακτωθεί, ορίστηκαν οι διαστάσεις: **X: 800mm, Y: 450mm.**

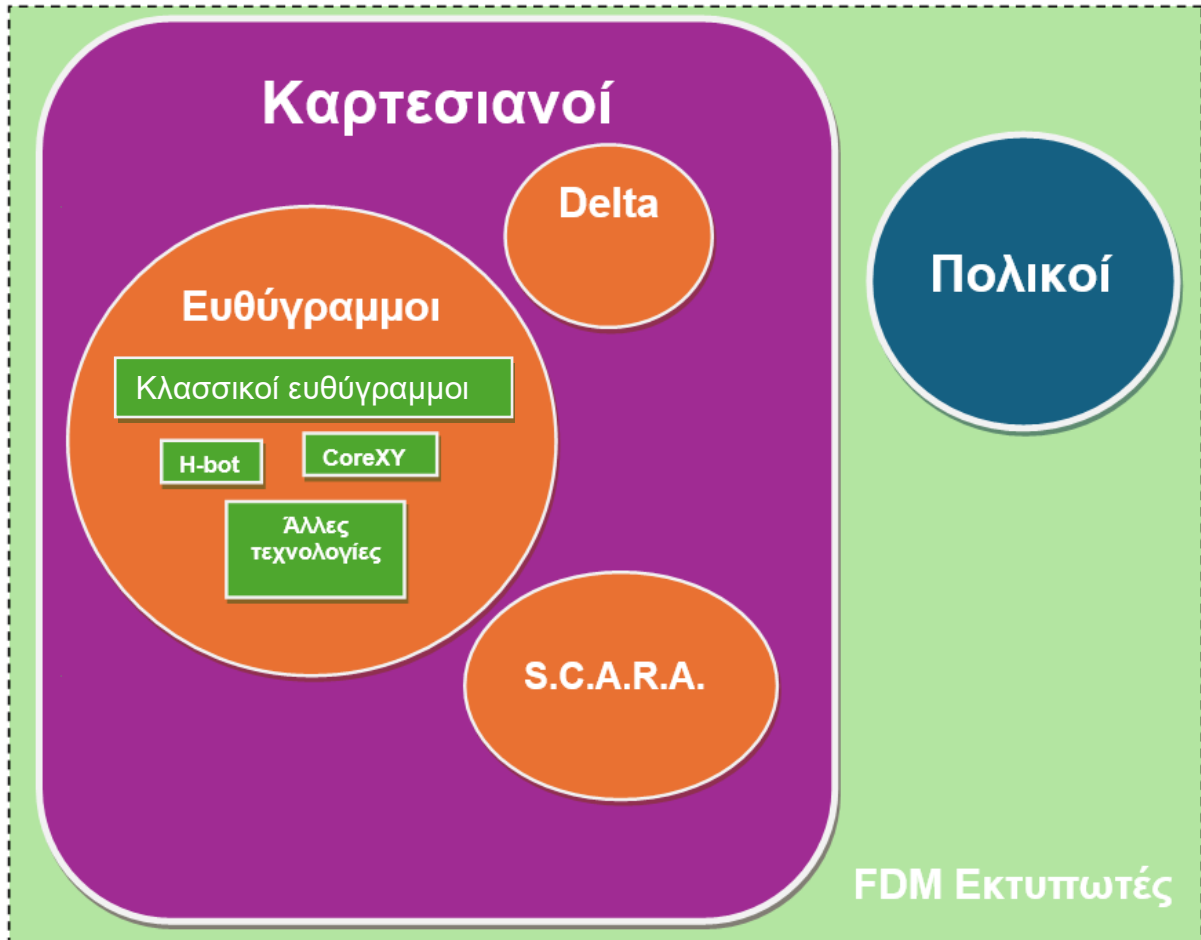
Οι 4 γωνίες της τράπεζας σχεδιάστηκαν λειασμένες σε ακτίνα R10. Σχετικά με το πάχος της τράπεζας, θα υπολογιστεί παρακάτω κατά την στατική μελέτη. Τα ενδεχόμενα είναι τρία: 3mm, 5mm ή 6mm.



Σχήμα 2-1: Αρχικός σχεδιασμός τράπεζας εκτύπωσης

2.3.2 Υπο-σύστημα κινηματικής:

Στους εκτυπωτές FDM, υπάρχουν ορισμένα διαφορετικά είδη κινηματικής διαθέσιμα στην αγορά, καθένα από τα οποία έρχεται να λύσει συγκεκριμένα ζητήματα που κάθε φορά ξεπροβάλλουν. Ενδεικτικά αναφέρονται τα 4 βασικά είδη, που όμως εντάσσονται σε δύο μεγάλες οικογένειες: (Top3D Shop n.d.)



Σχήμα 2-2 Οικογένειες 3D εκτυπωτών

Γενικότερα υπάρχει αρκετή σύγχυση σχετικά με το κάθε είδος και υπο-είδος, πολλές φορές όροι όπως καρτεσιανός, ευθύγραμμος, δέλτα, τείνουν να μπερδεύονται από το ευρύ κοινό οδηγώντας σε παρερμηνείες. Για παράδειγμα, μία από τις κύριες πηγές σύγχυσης βρίσκεται στον όρο «καρτεσιανός», ο οποίος συχνά χρησιμοποιείται όχι για να διαφοροποιηθεί από τους πολικούς εκτυπωτές, αλλά για να αναφέρεται γενικά σε ευθύγραμμους εκτυπωτές αντί για πιο συγκεκριμένα ονόματα υποειδών (π.χ. XZ-head).

Παρακάτω θα γίνει μια ανάλυση του εκάστοτε είδους και υπο-είδους.

ΤΥΠΟΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΕΚΤΥΠΩΤΩΝ

[1] Καρτεσιανοί εκτυπωτές

Οι καρτεσιανοί εκτυπωτές είναι οι πιο συνηθισμένοι εκτυπωτές FFF/FDM στην αγορά. Η τεχνολογία χρησιμοποιεί τρεις άξονες X, Y, Z (καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων) για τον προσδιορισμό των

κινήσεων των μηχανικών μερών, η κεφαλή εκτύπωσης και η τράπεζα κινούνται σύμφωνα με τις συντεταγμένες. (Waleed Ahmed, et al. 2020)

Στους καρτεσιανούς εκτυπωτές ανήκουν τρία διαφορετικά αρχιτεκτονικά μοντέλα:

- Οι Ευθύγραμμοι καρτεσιανοί
- Οι Delta
- Οι SCARA

I. Ευθύγραμμοι καρτεσιανοί

Ο όρος "ευθύγραμμος" αναφέρεται στην κίνηση που πραγματοποιείται κατά μήκος του κάθε άξονα, η οποία είναι γραμμική και ανεξάρτητη από τις υπόλοιπες. Και μέσα σε αυτό το είδος όμως ξεχωρίζουν ορισμένα υπο-είδη. Τα κυριότερα φαίνονται παρακάτω:

A) Κλασσικοί ευθύγραμμοι καρτεσιανοί

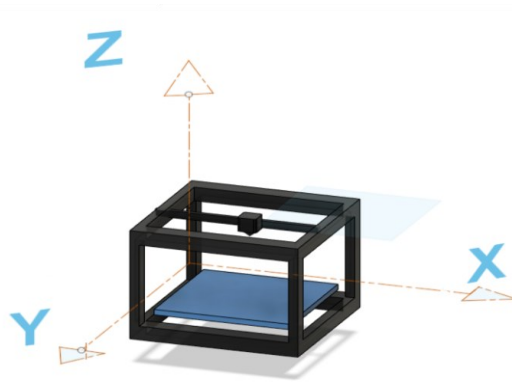
Οι πιο συνηθισμένοι τύποι τρισδιάστατων εκτυπωτών. Αποτελούνται από ένα ορθογώνιο πλαίσιο, μια τράπεζα εκτύπωσης και μια κεφαλή εκτύπωσης. Την κίνηση στους άξονες XYZ σε έναν 3D Εκτυπωτή, μπορεί να την επωμίζεται είτε ο άξονας της κεφαλής εκτύπωσης είτε η τράπεζα εκτύπωσης, με διάφορες παραλλαγές. (XoMetry 2024) Στο εμπόριο διακρίνονται σε XY-head, XZ-head, ή XYZ-head. Ουσιαστικά οι ονομασίες αυτές υποδεικνύουν την κίνηση που επωμίζεται ο εξωθητής. Δηλαδή σε έναν XZ-head εκτυπωτή, ο εξωθητής μετακινείται στους άξονες X και Z ενώ στον άξονα Y μετακινείται η τράπεζα. Αντίστοιχα σε έναν XY-head, ο εξωθητής μετακινείται στους άξονες X και Y ενώ η κίνηση στον Z πραγματοποιείται από την τράπεζα. Τέλος στο μοντέλο XYZ-Head, όλες οι κινήσεις πραγματοποιούνται από τον εξωθητή, ενώ η τράπεζα εκτύπωσης είναι πακτωμένη.

Παρακάτω φαίνονται συγκεντρωμένα τα υπό-είδη των ευθύγραμμων καρτεσιανών εκτυπωτών:

	X	Y	Z	
Κεφαλή Τράπεζα	1	1	1	Η τράπεζα δεν κινείται, η κεφαλή κινείται τρισδιάστατα.
Κεφαλή Τράπεζα	1		1	Η κεφαλή κινείται οριζόντια κατά μήκος του άξονα X, η τράπεζα κινείται κάθετα κατά μήκος των άλλων δύο αξόνων.
Κεφαλή Τράπεζα	1	1		Η τράπεζα κινείται κατά μήκος των αξόνων XY, η κεφαλή κινείται κάθετα.
Κεφαλή Τράπεζα			1	Η τράπεζα κινείται στον άξονα X, η κεφαλή στους άξονες YZ
Κεφαλή Τράπεζα	1		1	Η τράπεζα κινείται μόνο στον άξονα Y, η κεφαλή κινείται δισδιάστατα κατά μήκος των αξόνων X-Z.

Πίνακας 3 Κινήσεις μηχανικών μερών στο εκάστοτε μοντέλο εκτυπωτή

Προς αποφυγή λάθους κατανόησης παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας ορισμού των αξόνων.



Σχήμα 2-3 Ορισμός των αξόνων



Σχήμα 2-4 XZ-head και XY-head εκτυπωτές

Πηγή: All3DP

<https://all3dp.com/2/3d-printer-axis-the-basics-simply-explained/>

Πλεονεκτήματα

- ❖ Οι κλασικοί ευθύγραμμοι καρτεσιανοί εκτυπωτές γενικότερα ως υποείδος αποτελούν μια πολύ πιο οικονομική λύση, σε σύγκριση με άλλους εκτυπωτές, κυρίως λόγω του απλούστερου σχεδιασμού τους. (Tully and Gabriel N. Meloni 2020)
- ❖ Η δημοφιλία των εκτυπωτών τέτοιου τύπου είναι πολύ μεγαλύτερη. Έτσι υπάρχει διαθέσιμη πολύ μεγάλη υποστήριξη και βοήθεια σε τυχόν προβλήματα που μπορεί να αντιμετωπίσει ο χρήστης.
- ❖ Απλούστερος σχεδιασμός και ευκολία χρήσης. (Pavel Stoklásek, και συν. 2018)
- ❖ Μεγαλύτερη ευέλιξη σε περίπλοκα σχέδια. (Pavel Stoklásek, και συν. 2018)
- ❖ Υπάρχει μεγάλη δυνατότητα αναβάθμισης μεμονωμένων μηχανικών μερών ή ακόμα και τροποποιήσεων, κάτι το οποίο μπορεί να είναι πιο δύσκολο σε εκτυπωτές άλλης (συνθετότερης) αρχιτεκτονικής.

Μειονεκτήματα

- ❖ Ενώ οι εκτυπωτές τέτοιας αρχιτεκτονικής μπορούν όντως να αποτελούν γενικότερα καλές λύσεις, ένα στοιχείο στο οποίο υστερούν, είναι αυτό της ταχύτητας εκτύπωσης. Λόγω των πολλαπλών κινήσεων που αναλαμβάνει είτε ο εξωθητής, είτε η τράπεζα εκτύπωσης, γενικά η ταχύτητα αποτελεί μια αδυναμία. (Donghua Zhao, et al. 2020)
- ❖ Γενικά οι κλασικοί ευθύγραμμοι καρτεσιανοί εκτυπωτές δεν αποτελούν τις πιο στιβαρές επιλογές, χωρίς βέβαια και πάλι να μην υπάρχουν εξαιρέσεις οι οποίες όμως πάντοτε συνδέονται με το κόστος. (Rauf, et al. 2021)

Στην ίδια κατηγορία (ευθύγραμμοι καρτεσιανοί) ανήκουν όμως και μοντέλα διαφορετικής αρχιτεκτονικής όπως οι CoreXY και H-bot, που φαίνονται παρακάτω:

B) CoreXY

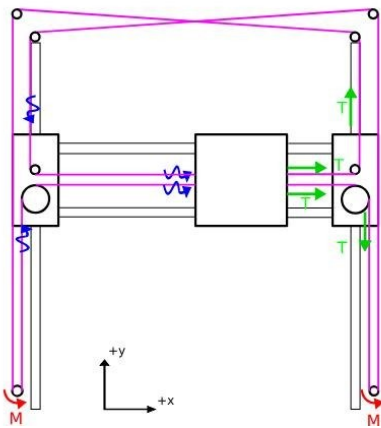
Αυτή η κινηματική χρησιμοποιείται συχνά για εμπορικούς σκοπούς. Διαθέτει μια μη τυπική κίνηση εξωθητή. Συγκεκριμένα, η CoreXY διαθέτει δύο κινητήρες που ελέγχουν δύο ιμάντες που κινούν τον εξωθητή στο επίπεδο XY. (Alexander and Vernon 1975) Η κινηματική δομή CoreXY είναι καρτεσιανή που σημαίνει πως επιτρέπει στην κεφαλή εκτύπωσης να κινείται εύκολα σε ευθεία γραμμή κατά μήκος των αξόνων X,Y που είναι κάθετοι μεταξύ τους. (RepRap 2020). Η ονομασία CoreXY, υποδηλώνει τον έλεγχο της κίνησης σε δύο άξονες (X,Y) και εφαρμόζεται συνήθως για την κεφαλή εκτύπωσης ενώ η κίνηση στον άξονα Z επιτυγχάνεται από την κάθετη κίνηση της τράπεζας εκτύπωσης. (A. R. Avdeev, A. A. Shvets and I. S. Torubarov 2019)

Πλεονεκτήματα

- ❖ Μεγαλύτερες ταχύτητες εκτύπωσης λόγω της ικανότητας της κεφαλής εκτύπωσης να κινείται ταυτόχρονα και στις δύο κατευθύνσεις X και Y. (Nosakhare Edoimioya, Keval S. Ramani and Chinedum E. 2021)
- ❖ Μεγαλύτερη ακρίβεια γιατί η κίνηση ελέγχεται από δύο ξεχωριστούς κινητήρες. (Edoardo Idá, Federico Nanetti and Giovanni Mottola 2022)
- ❖ Λιγότεροι κραδασμοί κατά την εκτύπωση, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη ποιότητα εκτύπωσης. (Nguyen 2019)

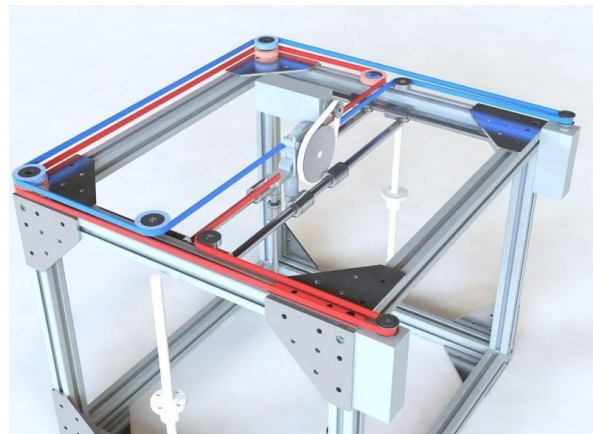
Μειονεκτήματα

- ❖ Απαιτεί ακριβέστερη βαθμονόμηση και συντήρηση λόγω των πολλαπλών ιμάντων που χρησιμοποιούνται και οι οποίοι τείνουν να τεντώνονται και να ξεχειλώνουν. (Nguyen 2019)
- ❖ Υψηλότερο κόστος λόγω της ανάγκης για πρόσθετα εξαρτήματα όπως τροχαλίες και ιμάντες. (Nguyen 2019)



Σχήμα 2-6 Μηχανική εκτυπωτή CoreXY

Πηγή Σχήματος: smoothieware.org

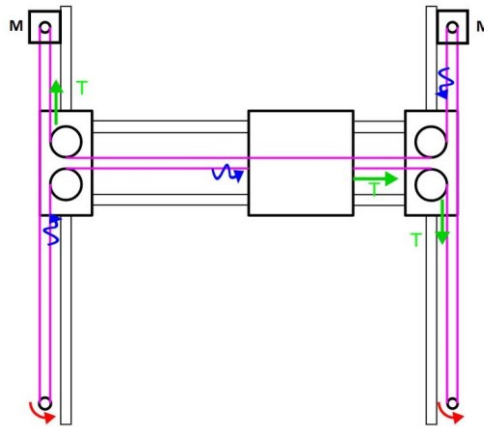


Σχήμα 2-5 Μηχανική εκτυπωτή CoreXY

Πηγή: <https://www.pinterest.com>

Γ) H-Bot

Η κινηματική H-Bot είναι παρόμοια, αλλά χρησιμοποιεί διαφορετικό σύστημα κίνησης ιμάντα. Υπάρχει μόνο ένας ιμάντας τοποθετημένος σε ένα πλαίσιο που έχει σχήμα H, εξ ου και το όνομα της κινηματικής.



Σχήμα 2-7 Μηχανική εκτυπωτή H-bot
Πηγή Σχήματος: *smoothieware.org*

Όταν και οι δύο κινητήρες περιστρέφονται προς την ίδια κατεύθυνση, ο εξωθητής κινείται κατά μήκος του άξονα X, όταν περιστρέφονται σε διαφορετικές κατευθύνσεις, ο εξωθητής κινείται κατά μήκος του άξονα Y. Όταν ένας από τους κινητήρες δεν κινείται, ο εξωθητής κινείται διαγώνια.

Πλεονεκτήματα

- ❖ Απλός και συμπαγής σχεδιασμός που είναι εύκολο να συναρμολογηθεί και να συντηρηθεί. (Edoardo Idá, Federico Nanetti and Giovanni Mottola, An Alternative Parallel Mechanism for Horizontal Positioning of a Nozzle in an FDM 3D Printer 2022)
- ❖ Επιτρέπει γρήγορες ταχύτητες εκτύπωσης λόγω της παράλληλης κίνησης της κεφαλής εκτύπωσης προς τις κατευθύνσεις X και Y. (Nosakhare Edoimioya, Keval S. Ramani and Chinedum E. 2021)
- ❖ Καλή ακρίβεια για εκτυπώσεις μικρού έως μεσαίου μεγέθους. (Vlastimil Chalupa, Michal Staněk and Jiří Vanek 2023)

Μειονεκτήματα

- ❖ Περιορισμένος όγκος κατασκευής λόγω της μηχανικής της σχεδίασης H-bot. (Mirko Kariž, et al. 2021)
- ❖ Μπορεί να είναι δύσκολο να επιτευχθεί ακριβής βαθμονόμηση και επιπεδοποίηση της τράπεζας εκτύπωσης. (Esha Mukherjee, et al. 2023)

II. Εκτυπωτές Delta

Οι εκτυπωτές Delta, έχουν πάρει το όνομά τους από τους αντίστοιχους τύπους βιομηχανικών ρομπότ. Ανήκουν στην οικογένεια των καρτεσιανών, χρησιμοποιούν όμως μια σχετικά διαφορετική φιλοσοφία.

Η διαφορά έγκειται στο ότι σε αυτό τον τύπο εκτυπωτών υπάρχουν 3 κάθετες ράγες πάνω στις οποίες κινούνται γραμμικά 3 οδηγοί. Οι οδηγοί αυτοί κινούνται ανεξάρτητα στον άξονα Z (πάνω-κάτω) και μεταφέρουν την κίνηση στον εξωθητή μέσω βραχιόνων. (Waleed Ahmed, και συν. 2020).

Η τράπεζα εκτύπωσης είναι είτε κυκλική είτε εξαγωνική. Η κατασκευή των τεμαχίων γίνεται μετακινώντας όλο το σύστημα των βραχιόνων/εξωθητή κατακόρυφα με αποτέλεσμα να μπορούν να κατασκευάσουν τεμάχια με μεγαλύτερο ύψος σε σχέση με

τους ευθύγραμμους καρτεσιανούς και μάλιστα με πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα. Κάθε βραχίονας μπορεί να κινηθεί μόνο κατακόρυφα πάνω και κάτω, αλλά μετακινώντας κάθε βραχίονα ανεξάρτητα, ο εξωθητής μπορεί να κινηθεί προς όλες τις κατευθύνσεις. (A113DP 2024)



Σχήμα 2-8 Εκτυπωτής Delta

Πηγή: *NQ Maker Supplies*

<https://nqmakersupplies.com.au/shop/product/delta-3d-printer-kossel-40?page=3>

III. Εκτυπωτές SCARA

Το SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm) είναι ένα σχέδιο κινηματικής πιο συμπαγές. Έχει επίσης πάρει το όνομα του από αντίστοιχη τεχνολογία βιομηχανικού ρομπότ. Οι εκτυπωτές αυτοί έχουν πολύ υψηλή ακρίβεια, χαμηλότερα επίπεδα θορύβου και κραδασμών. Οι συσκευές είναι ακριβές, έχουν όμως περιορισμένη δυνατότητα κίνησης κατά μήκος των αξόνων XY, μικρότερη επιφάνεια κατασκευής και περιορισμένη κίνηση. Οι εκτυπωτές αυτοί δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι. (A113DP 2023)



Σχήμα 2-9 Εκτυπωτής SCARA

Πηγή: *3D Potter*

<https://3dpotter.com/printers/scara>

[2] Πολικοί εκτυπωτές

Μια λιγότερο δημοφιλής επιλογή είναι οι πολικοί εκτυπωτές. Σε αυτούς τους εκτυπωτές, χρησιμοποιείται μια περιστρεφόμενη κυκλικού σχήματος τράπεζα, πάνω στην οποία εδράζεται το

κατασκευαζόμενο τεμάχιο, ενώ στον άξονα Z κινείται μόνο ο εξωθητής, ο οποίος, ελέγχεται από έναν γραμμικό ενεργοποιητή. (Sourabh Prashant Deshpande, et al. 2019)



Σχήμα 2-10 Εκτυπωτής πολικού τύπου

Πηγή: <http://www.purdue3dpc.org>

Οι εκτυπωτές αυτοί παρόλο πως είναι μικροί και αποδοτικοί έχουν χαμηλότερη ακρίβεια σε σύγκριση με τους Delta ή τους ευθύγραμμους και χρησιμοποιούνται προς το παρόν τουλάχιστον περισσότερο για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Αφού αναλύθηκαν οι διάφορες επιλογές όσον αφορά το υποσύστημα της κινηματικής, παρακάτω θα γίνει εκλογή του πιο κατάλληλου αναλόγως και τα κριτήρια που έχουν θεσπιστεί. Με βάση τα κριτήρια που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, στον ακόλουθο πίνακα αποφάσεων, γίνεται η σύγκριση μεταξύ των 3 επιλογών στο κομμάτι της κινηματικής. Για προφανείς λόγους μέσα στην διαδικασία επιλογής δεν μπορούσαν να συμμετέχουν οι εναλλακτικές των Delta, SCARA και πολικών αφού αρχιτεκτονικά δεν έχουν καμία απολύτως σχέση με την διάταξη της ACRO.

	Βάρος 1-5	Κινηματική					
		CoreXY		H-Bot		Κλασικός Ευθύγραμμος Καρτεσιανός	
		Βαθμολογία	Τελικό Σκορ	Βαθμολογία	Τελικό Σκορ	Βαθμολογία	Τελικό Σκορ
Όγκος εκτύπωσης	4	5	20	5	20	5	20
Κόστος	5	3	15	3	15	7	35
Ακρίβεια	3	8	24	7	21	6	18
Ταχύτητα εκτύπωσης	2	8	16	8	16	7	14
Στιβαρότητα εκτυπωτή	4	7	28	7	28	5	20
Σύνολο			103		100		107

Πίνακας 4 Πίνακας αποφάσεων για κινηματικό μοντέλο

Κατόπιν της παραπάνω μελέτης, αποφασίστηκε πως το μοντέλο κινηματικής που θα ακολουθηθεί θα είναι αυτό του ευθύγραμμου καρτεσιανού. Φαίνεται πως ενώ σχετικά με τον όγκο εκτύπωσης δεν παρατηρείται καμία διαφορά με τα υπόλοιπα μοντέλα, ένας ευθύγραμμος καρτεσιανός εκτυπωτής είναι σαφώς λιγότερο κοστοβόρος αφού αποτελεί την πιο διαδεδομένη μορφή DIY εκτυπωτών δίνοντας έτσι την ελευθερία επιλογής ανάμεσα σε μια τεράστια γκάμα επιλογών όσον αφορά το εκάστοτε υπο σύστημα, αλλά μπορεί και να επιδιορθωθεί με πολύ μικρότερο κόστος. Υπολείπεται ωστόσο σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα τόσο ως προς την ταχύτητα αλλά και την ακρίβεια,

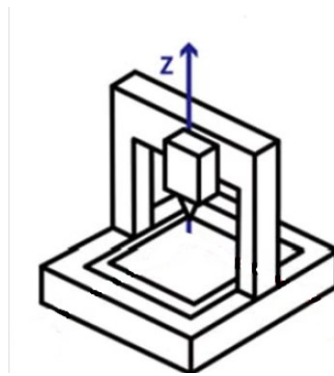
κριτήρια όμως τα οποία όπως φαίνεται και από τους πίνακες αποφάσεων, έχουν μια μικρότερη βαρύτητα.

Άρα ο πρωτότυπος 3D εκτυπωτής θα σχεδιαστεί σύμφωνα με την αρχιτεκτονική του κλασσικού ευθύγραμμου καρτεσιανού εκτυπωτή.

2.3.3 Κίνηση στον Z άξονα

Ακολούθως θα πρέπει να αποφασιστεί το μοντέλο κίνησης ως προς τον άξονα Z. Σε έναν κλασσικό ευθύγραμμο καρτεσιανό 3D εκτυπωτή, ο άξονας Z υποδεικνύει τον κάθετο στην τράπεζα εκτύπωσης άξονα, δηλαδή απλούστερα, το ύψος. Η κίνηση στον άξονα Z πραγματοποιείται μετά από την τοποθέτηση ενός στρώματος και πριν την τοποθέτηση του επόμενου. Το ύψος αυτό της κίνησης εξαρτάται από την ακρίβεια του μηχανήματος καθώς και από τις ρυθμίσεις του χρήστη. Η κίνηση λοιπόν στον άξονα Z μπορεί να πραγματοποιείται με δύο διαφορετικές μεθόδους.

- Κίνηση τράπεζας στον Z άξονα
- Κίνηση κεφαλής στον Z άξονα



Σχήμα 2-11 Αποψη του άξονα Z σε έναν κλασσικό ευθύγραμμο καρτεσιανό 3D εκτυπωτή
(Πηγή: all3dp.com)

Στην περίπτωση που την κίνηση την επιμερίζεται η κεφαλή, η λογική είναι απλή: Μετά από κάθε στρώμα, ο άξονας που συγκρατεί την κεφαλή εκτύπωσης μετακινείται κατά x mm προς τα επάνω, φτάνοντας στην θέση της επόμενης εναπόθεσης στρώματος.

Στην περίπτωση της κίνησης του τραπέζιου, συμβαίνει το αντίθετο. Η τράπεζα εκτύπωσης ξεκινά από την ανώτατη θέση, ενώ μετά από την εναπόθεση του ενός στρώματος, κατεβαίνει κατά $-x$ mm, φτάνοντας στην θέση για την επόμενη εναπόθεση.

Παρακάτω αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που συνοδεύουν την κάθε εναλλακτική:

I. Κίνηση τράπεζας στον Z άξονα

Πλεονεκτήματα

- ❖ Όλες οι διατάξεις που βοηθούν στην μετακίνηση, αφαιρούνται από την κεφαλή εκτύπωσης με αποτέλεσμα να αφήνουν μια ελαφρύτερη και με λιγότερα φορτία κεφαλή, οδηγώντας σε μεγαλύτερη ποιότητα εκτύπωσης. (Faris Dwi Mulyanto, Yuris Setyoadi and Rifki Herman 2022)
- ❖ Η κίνηση της τράπεζας στον άξονα Z διευκολύνει την εκτύπωση σύνθετων γεωμετριών με αυστηρές ανοχές, καθιστώντας τον κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που απαιτούν λεπτομερείς και ακριβείς τρισδιάστατες εκτυπώσεις. (Alp Karakoc, et al. 2020)

Μειονεκτήματα

- ❖ Πιο αργή εκτύπωση λόγω της μεγαλύτερης δύναμης που απαιτείται για την μετακίνηση της τράπεζας αντί της κεφαλής. (Giraso Keza Monia Kabandana, Tao Zhang and Chengpeng Chen n.d.)
- ❖ Η κίνηση της τράπεζας μπορεί να επιφέρει κραδασμούς που μπορεί να έχουν αντίκτυπο στην ποιότητα του κατασκευαζόμενου δοκιμίου, ενδεχομένως να οδηγήσουν και σε αποκολλήσεις και αστοχίες. (Multi-axis Fused Deposition Modeling using parallel manipulator integrated with a Cartesian 3D printer n.d.)
- ❖ Για εκτυπωτές μεγάλου όγκου (όπως αυτόν που μελετάται), ενδέχεται να απαιτηθεί ένα πιο στιβαρό πλαίσιο για να υποστηρίξει το βάρος της τράπεζας εκτύπωσης και των αντικειμένων που εκτυπώνονται.

II. Κίνηση κεφαλής στον άξονα Z

Πλεονεκτήματα

- ❖ Μεγαλύτερες ταχύτητες εκτύπωσης. (All3DP n.d.)
- ❖ Λιγότερη ανάγκη χώρου (All3DP n.d.)

Μειονεκτήματα

- ❖ Βαρύτερη και πιο φορτισμένη κεφαλή εκτύπωσης άρα και αυξημένη πιθανότητα κραδασμών και μειωμένη ποιότητα εκτύπωσης. (All3DP n.d.)

Με βάση τα παραπάνω κατασκευάζεται ο πίνακας αποφάσεων:

	Βάρος	Κίνηση Z			
		Τράπεζα (XY-head)		Κεφαλή (XZ-head)	
	1-5	Βαθμολογία	Τελικό Σκορ	Βαθμολογία	Τελικό Σκορ
Όγκος εκτύπωσης	4	5	20	5	20
Κόστος	5	5	25	7	35
Ακρίβεια	3	7	21	8	24
Ταχύτητα εκτύπωσης	2	5	10	6	12
Στιβαρότητα εκτυπωτή	4	6	24	8	32
Σύνολο			100		123

Πίνακας 5 Πίνακας αποφάσεων για κίνηση Z

Ερμηνεύοντας τον πίνακα, παρατηρείται πως οι διαφορές είναι μικρές και κυρίως έχουν να κάνουν με τον αυξημένο όγκο εκτύπωσης και το πως αυτός θα επηρεάσει στη δυσμενέστερη περίπτωση δηλαδή στην εκτύπωση του μεγαλύτερου δυνατού τεμαχίου, χαρακτηριστικά όπως την ταχύτητα της μεταφοράς της τράπεζας, ή την στιβαρότητά της. Τέλος από πλευράς κόστους θα ήταν απαραίτητη η ενίσχυση των μηχανισμών κίνησης σε ενδεχόμενο όπου την κίνηση Z θα την αναλάβει η τράπεζα, καθώς όσο θα μεγαλώνει το βάρος του εκτυπωμένου τεμαχίου τόσο θα δυσχεραίνεται η εργασία των μηχανισμών αυτών.

Λόγω των παραπάνω αποφασίζεται η επιλογή της κίνησης στον άξονα Z από τον άξονα της κεφαλής.

2.3.4 Μηχανισμός μετάδοσης κίνησης στους XY άξονες

Σε αυτό το βήμα θα πρέπει να καθοριστεί ο τρόπος μετάδοσης της κίνησης στον άξονα XY δηλαδή στην μετάδοση της κίνησης στο οριζόντιο επίπεδο ανά στρώμα.

Η κίνηση στο επίπεδο XY μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους:

- Με χρήση κοχλιών κίνησης
- Με χρήση οδοντωτού ιμάντα (τον οποίο ήδη διαθέτει η πλατφόρμα).

Παρακάτω θα γίνει ταξινόμηση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της κάθε εναλλακτικής ώστε να εξαχθεί το κατάλληλο συμπέρασμα:

I. Κοχλίας κίνησης

Πλεονεκτήματα

- ❖ Μεγαλύτερη ακρίβεια, λόγω της καλύτερης συνεργασίας του κοχλίου με το παξιμάδι σε σχέση με τον ιμάντα με την τροχαλία. (Nguyen 2019)
- ❖ Μεγαλύτερη ροπή και δύναμη, συνεπώς πιο ομαλές γραμμικές κινήσεις, λιγότερος τζόγος. (Nguyen 2019)

Μειονεκτήματα

- ❖ Υψηλό κόστος. (3D DISTRIBUTED 2023) Ειδικότερα στην παρούσα περίπτωση, όπου θα πρέπει να γίνει αφαίρεση των ιμάντων από την πλατφόρμα και μετατροπή για εργασία με κοχλίες.
- ❖ Υψηλότερα επίπεδα θορύβου. (3D DISTRIBUTED 2023)

II. Οδοντωτός ιμάντας

Πλεονεκτήματα

- ❖ Μεγαλύτερες ταχύτητες εκτύπωσης. (Nguyen 2019)
- ❖ Οικονομικότερη επιλογή. (Lavecchia, Alessandro Pellegrini and Luigi Maria Galantucci 2022)
- ❖ Ελαφρύτερη κατασκευή, που μπορεί να οδηγήσει σε πιο γρήγορες και ομαλές κινήσεις. (Valentin Romanov, et al. 2018)

Μειονεκτήματα

- ❖ Λιγότερο ακριβείς κινήσεις λόγω του τζόγου που δημιουργείται μεταξύ ιμάντα και τροχαλίας. (Anton Smirnov, et al. 2022)
- ❖ Χαμηλότερη ροπή, που μπορεί να οδηγήσει σε λιγότερο συνεπείς κινήσεις. (Thomas J. Campbell and James F. Jones 2020)

Παρακάτω με την σειρά του, θα στοιχειοθετηθεί ο πίνακας απόφασης, με βάση την ανάλυση που έγινε προηγούμενα.

	Βάρος	Κίνηση XY μέσω:			
		Κοχλίας		Ιμάντας	
		Βαθμολογία	Τελικό Σκορ	Βαθμολογία	Τελικό Σκορ
Όγκος εκτύπωσης	4	5	20	5	20
Κόστος	5	2	10	8	40
Ακρίβεια	3	8	24	6	18
Ταχύτητα εκτύπωσης	2	7	14	6	12
Στιβαρότητα εκτυπωτή	4	9	36	7	28
Σύνολο			104		118

Πίνακας 6 Πίνακας αποφάσεων για κίνηση XY

Εδώ παρατηρείται εύκολα πως η ακρίβεια είναι εμφανώς μεγαλύτερη με χρήση κοχλίων κίνησης. Σχετικά με τον όγκο της εκτύπωσης δεν φαίνεται πως κάποια επιλογή επηρεάζει θετικά ή αρνητικά. Το κόστος μιας ενδεχόμενης κατασκευής θα ήταν προφανώς πολύ μεγαλύτερο για την επιλογή των

κοχλιών κίνησης. Τέλος οι κοχλίες κινήσεις υπερτερούν και στην συνολική στιβαρότητα του εκτυπωτή, παρόλο που οι διαφορές θα ήταν μικρές.

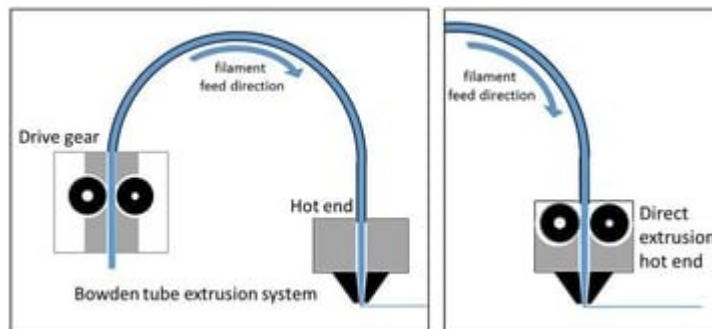
Εν τέλει θα γίνει επιλογή του οδοντωτού ιμάντα κυρίως για οικονομοτεχνικούς σκοπούς.

2.3.5 Τροφοδοσία υλικού

Το σύστημα τροφοδοσίας υλικού σε έναν εκτυπωτή αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό μέρος της εργασίας. Αποτελεί την διάταξη εκείνη που προωθεί το νήμα στην κεφαλή εκτύπωσης προκειμένου να πραγματοποιηθεί η τήξη. Φαίνεται λοιπόν πως χρήζει ιδιαίτερης προσοχής η επιλογή του αντίστοιχου συστήματος. Εδώ δίνονται δύο επιλογές ανάμεσα στις οποίες θα γίνει η εκλογή.

- **Σύστημα Bowden και**
- **Σύστημα άμεσης εξώθησης**

Επεξηγηματικά, στο σύστημα άμεσης εξώθησης, το νήμα τροφοδοτείται απευθείας στην κεφαλή εκτύπωσης, ενώ σε ένα σύστημα Bowden, το σύστημα προώθησης του νήματος βρίσκεται τοποθετημένο πάνω στο πλαίσιο του εκτυπωτή. Από εκεί μεταφέρεται μέσω ενός σωλήνα πολυτετραφθοροαιθυλένιου (PTFE), στο ακροφύσιο.



Σχήμα 2-12 Μέθοδοι τροφοδοσίας υλικού

Πηγή: All3DP

<https://all3dp.com/2/direct-vs-bowden-extruder-technology-shootout/>

Υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τόσο στα συστήματα Bowden όσο και στα συστήματα άμεσης εξώθησης, τα οποία φαίνονται παρακάτω:

I. Σύστημα Bowden

Πλεονεκτήματα

- ❖ Λιγότερο βάρος στον άξονα που φέρει την κεφαλή εκτύπωσης, συνεπώς ταχύτερη και πιο ομαλή εκτύπωση. Οι τυχόν κραδασμοί που θα παρουσιαστούν κατά την διάρκεια προώθησης του νήματος επηρεάζουν πολύ λιγότερο την σταθερότητα της κεφαλής, αφήνοντας σχεδόν ανεπηρέαστη την ποιότητα εκτύπωσης. (Brathikan V , και συν. 2021)
- ❖ Μικρότερο κόστος. (Petrice M Cogswell, et al. 2020)

Μειονεκτήματα

- ❖ Μεγαλύτερες αποστάσεις και υψηλότερες ταχύτητες ανάκλησης λόγω της απόστασης μεταξύ του εξωθητή και της κεφαλής εκτύπωσης, που μπορεί να οδηγήσει σε κορδονισμό. (Yuan 2021)
- ❖ Λιγότερο συμβατός με εναλλακτικά νήματα (όπως τα εύκαμπτα), αφού αυξάνεται η πιθανότητα μέσα σε όλη τη διαδρομή του σωλήνα Bowden, να στραβώσει το νήμα. (Jaemin Lee, et al. 2020)

II. Σύστημα Άμεσης εξώθησης

Πλεονεκτήματα

- ❖ Δεδομένου ότι ένας άμεσος εξωθητής είναι τοποθετημένος στην κεφαλή εκτύπωσης, ο κινητήρας μπορεί εύκολα να σπρώξει το νήμα μέσα από το ακροφύσιο, ελαχιστοποιώντας τις πιθανότητες να εμφανιστούν προβλήματα που σχετίζονται με την εξώθηση. (Yuan 2021)
- ❖ Μεγαλύτερη γκάμα υλικών και δυνατότητα εργασίας με εύκαμπτα νήματα, λόγω του μεγαλύτερου ελέγχου του νήματος. (Jaemin Lee, et al. 2020)
- ❖ Μικρότερες αποστάσεις και ταχύτητες ανάσυρσης, μειώνοντας την πιθανότητα κορδονισμού. (Yihang Ma, et al. 2023)

Μειονεκτήματα

- ❖ Αύξηση του βάρους της κεφαλής εκτύπωσης, που ενδέχεται να οδηγήσει σε κραδασμούς και μείωση της ποιότητας εκτύπωσης. (Jeffrey M. Moore, Matthew A. Glaser and Meredith D. Betterton n.d.)
- ❖ Λόγω του συστήματος άμεσης εξώθησης που βρίσκεται πάνω στην κεφαλή, γίνεται πιο δύσκολη η πρόσβαση και συντήρηση σε ορισμένα μέρη της κεφαλής. (Hullette, All3DP n.d.)

	Βάρος	Τροφοδοσία υλικού			
		Άμεσος εξωθητής		Bowden	
		1-5	Βαθμολογία	Τελικό Σκορ	Βαθμολογία
Όγκος εκτύπωσης	4	5	20	5	20
Κόστος	5	7	35	5	25
Ακρίβεια	3	6	7	7	21
Ταχύτητα εκτύπωσης	2	5	10	4	8
Στιβαρότητα εκτυπωτή	4	6	24	5	20
Σύνολο			96		94

Πίνακας 7 Πίνακας αποφάσεων για τροφοδοσία νήματος

Φαίνεται πως οι διαφορές που δημιουργούνται μεταξύ των επιλογών του άμεσου εξωθητή και του συστήματος Bowden είναι μικρές και έχουν να κάνουν με την ακρίβεια. Ενώ στην περίπτωση του συστήματος Bowden, αφαιρείται ουσιαστικά ένα βάρος από τον άξονα της κεφαλής μειώνοντας έτσι τους κραδασμούς, με τον άμεσο εξωθητή μειώνεται σημαντικά το ενδεχόμενο κορδονισμού, λόγω της καλύτερης εξώθησης. Για αυτόν τον λόγο η ακρίβεια βρίσκεται σε τόσο κοντινές βαθμολογίες. Επίσης μια μικρή διαφορά φαίνεται και στο κομμάτι του κόστους.

Ως τελική λύση επιλέγεται ο άμεσος εξωθητής.

2.3.6 Θέρμανση τράπεζας- Θερμομόνωση εκτυπωτή

Για την ομαλή λειτουργία του εκτυπωτή είναι απαραίτητη η σωστή ρύθμιση της θερμοκρασίας της τράπεζας εκτύπωσης. Η θέρμανση της τράπεζας, εξυπηρετεί τόσο στην αρμονική ένωση των στρωμάτων της εκτύπωσης όσο και στην αρχική προσκόλληση στην τράπεζα προκειμένου να αποφευχθούν σφάλματα. (Sagar Kailas Gawali, Narendra Kumar and Prashant K. 2020)

Μια θερμαινόμενη τράπεζα θα πρέπει να διατηρεί την ίδια θερμοκρασία (ή με όσο το δυνατόν μικρότερες διαφοροποιήσεις) σε κάθε μέρος της, από το κέντρο έως τις άκρες.

Συγκεκριμένα μέσω της θέρμανσης της τράπεζας εκτύπωσης επιτυγχάνεται:

- **Η μείωση πιθανότητα παραμόρφωσης του τεμαχίου.** Κατά την στερεοποίηση του εκάστοτε στρώματος ενός προς εκτύπωση τεμαχίου, υπάρχει η πιθανότητα ορισμένες περιοχές του

στρώματος να ψύχονται σε μικρότερο χρόνο από ότι άλλες, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε κύρτωση των πρώτων. Αποτέλεσμα αυτού είναι είτε ή ολική αποκόλληση του τεμαχίου από την τράπεζα, ή ακόμα και εάν δεν γίνει αυτό, να προκύψει ένα αποτέλεσμα παραμορφωμένο και σε καμία περίπτωση αυτό το οποίο σχεδιάζοταν. (Douglas 2024)

- **Η καλύτερη και πιο ασφαλής προσκόλληση του πρώτου στρώματος.** (Douglas 2024)
- **Η ορθότερη εργασία με υλικά υψηλής συρρίκνωσης.** Ορισμένα υλικά (όπως το ABS), έχουν την τάση να συρρικνώνονται σε μεγάλο βαθμό κατά την στερεοποίηση τους. Μια θερμαινόμενη τράπεζα μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη ισορροπία κατά την στερεοποίηση. (Griffey 2014)

Για τις ανάγκες της θέρμανσης της τράπεζας, επιλέχθηκαν 2 Silicone Heat Bed 300x300mm, 24V-350W, οι οποίες θα τοποθετηθούν η μια δίπλα στην άλλη ώστε να καλύπτουν το σύνολο της τράπεζας. Παρακάτω φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά:

Κατασκευαστής:	OEM
Μικτό Βάρος:	0,3kg
Χώρα Προέλευσης:	Κίνα
Τάση:	24V DC
Ονομασία ισχύος:	350 Watt
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας:	120C (σε θερμοκρασία δωματίου)
Ρεύμα:	14,5A
Αντίσταση:	1,65 Ω
Ανοχή παραγωγής:	+/-10%
Τύπος θερμίστορ:	NTC 3950, που υποστηρίζεται απευθείας σε υλικολογισμικό Marlin
Αδιάβροχο επίπεδο:	IP65
Υψηλή ακρίβεια:	1%
Τιμή αντίστασης στους 25°C=	100K
Διαστάσεις:	300x300 mm
Πάχος:	περίπου 1,5mm-1,6mm
Μήκος καλωδίωσης:	1 μέτρο ή περισσότερο

Πίνακας 8 Τεχνικά χαρακτηριστικά Silicone Heat Bed

Όσο σημαντική όμως είναι η ρύθμιση της θερμοκρασίας αυτής, τόσο σημαντική είναι και η διατήρηση της. Πόσο μάλλον όταν η τράπεζα έχει τις μεγάλες διαστάσεις του πρωτύπου αυτού εκτυπωτή. Για τον λόγο αυτό, θα σχεδιαστεί και περίβλημα από plexiglass προκειμένου οι απώλειες θερμότητας να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες. Μέσω του περιβλήματος, δίνεται η δυνατότητα ελέγχου και διατήρησης σταθερής θερμοκρασίας στον χώρο εργασίας, μειώνοντας έτσι το ρίσκο παραμόρφωσης και αστοχίας που αναφέρθηκε παραπάνω, οδηγώντας έτσι σε ασφαλέστερες και ποιοτικότερες εκτυπώσεις. (3D Print Nation 2024) Ακόμη ελέγχεται καλύτερα η ψύξη του τεμαχίου, ώστε να γίνεται ταυτόχρονα σε όλο το τεμάχιο (στο βαθμό που αυτό είναι δυνατό) και όχι σε κάθε στρώμα ξεχωριστά. Επίσης μειώνεται η παρέμβαση εξωτερικών παραγόντων, όπως ρεύματα αέρα, αλλαγές στη θερμοκρασία, ακόμα και δραστηριότητες ανθρώπων στο χώρο. Προλαμβάνεται η σκόνη και γενικότερα η επιμόλυνση, όπως επίσης και μειώνεται αρκετά ο θόρυβος εργασίας. (Alneo3D 2024) Και τέλος αλλά ιδιαιτέρως σημαντικό είναι το ζήτημα της ασφάλειας. Όταν γίνεται λόγος για

έναν εκτυπωτή τέτοιων διαστάσεων, με τον όγκο που διαθέτει, είναι απαραίτητο, μηχανικά μέρη που κινούνται και εν γένει μπορεί να προκαλέσουν ατύχημα ακόμη και τραυματισμό, να είναι σε κλειστό ελεγχόμενο περιβάλλον. Ακόμη και αναθυμιάσεις (παρόλο που πρόκειται για απειροελάχιστες δεδομένου πως πρόκειται για FDM εκτυπωτή) καλό είναι να μετριάστούν.

3 Μοντελοποίηση

3.1.1 Προσομοίωση σε περιβάλλον SolidWorks

Στο στάδιο αυτό της μελέτης έχουν καταληχθεί:

- ✓ Η τεχνολογία εκτύπωσης για τον πρωτότυπο εκτυπωτή σε FDM.
- ✓ Ένα πρώτο σχεδιάγραμμα και διαστασιολόγηση της τράπεζας εκτύπωσης.
- ✓ Το υπο-σύστημα κινηματικής σε ευθύγραμμο καρτεσιανό.
- ✓ Η αρχιτεκτονική μετάδοσης κίνησης στον Z άξονα, μέσω τραπεζοειδούς κοχλίας.
- ✓ Η μέθοδος μετάδοσης κίνησης στον XY άξονα μέσω οδοντωτών μάντων.
- ✓ Η μέθοδος τροφοδοσίας υλικού με χρήση συστήματος άμεσης εξώθησης.
- ✓ Το υποσύστημα θέρμανσης της τράπεζας εκτύπωσης, αλλά και η ανάγκη θερμομόνωσης του εκτυπωτή.

Ύστερα από τα παραπάνω, στο στάδιο αυτό θα πραγματοποιηθεί σχεδίαση και μελέτη των εκάστοτε διατάξεων σε περιβάλλον SolidWorks 2021.

Η προσομοίωση σε περιβάλλον SolidWorks αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για μηχανικούς και σχεδιαστές για την ανάλυση και την επιβεβαίωση της δομικής ακεραιότητας των σχεδίων τους μέσω της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. (Finite element analysis using solidworks. Introduction to SOLIDWORKS 2017).

Μέσω του λογισμικού ο χρήστης μπορεί αφού σχεδιάσει το μοντέλο, να ορίσει τις ιδιότητες υλικού του, τις φορτίσεις που θα δεχτεί και με τον τρόπο αυτό να πραγματοποιήσει προσομοίωση του πως θα αντιδράσει στις ασκούμενες δυνάμεις, διασφαλίζοντας τη αντοχή του. (Rahmad Saputra, και συν. 2023).

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρέχουν πληροφορίες για την κατανομή της τάσης, την παραμόρφωση και τον συντελεστή ασφάλειας, βοηθώντας στον εντοπισμό των πιο αδύναμων περιοχών και την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού. (Finite element analysis using solidworks. Introduction to SOLIDWORKS 2017).

Η μελέτη αυτή θα βοηθήσει ως προς τον υπολογισμό και την τελική επιλογή εξαρτημάτων και υπο-διατάξεων με βάση τις παραμέτρους που επιλέχθηκαν στο πρώτο μέρος. Συγκεκριμένα οι μελέτες που θα γίνουν αφορούν τα εξής ζητήματα.

1) Τράπεζα εκτύπωσης

Για τρία διαφορετικά πιθανά πάχη της τράπεζας και για 2 διαφορετικά μοντέλα πάκτωσής της (όσον αφορά τον αριθμό των οπών), θα πραγματοποιηθεί έλεγχος τόσο σε ισοδύναμο κατανεμημένο φορτίο, όσο και σε μη ισοδύναμο κατανεμημένο φορτίο, προκειμένου να διασφαλιστεί πως στατικά η τράπεζα ανταπεξέρχεται ακόμα και στις δυσμενέστερες περιπτώσεις.

2) Άξονας μεταφοράς ακροφυσίου

Η πλατφόρμα ACRO, θα επιμεριστεί τουλάχιστον στο στάδιο της μελέτης, το βάρος του εξωθητή που θα προστεθεί. Για τον λόγο αυτό απαραίτητο κρίνεται να πραγματοποιηθεί στατική μελέτη και για αυτή την προσθήκη και για το κατά πόσο το οριζόντιο V-slot μπορεί να επιμεριστεί το βάρος αυτό. Προκειμένου να διασφαλιστεί η αντοχή αυτή έγινε μελέτη σε δύο διαφορετικά σενάρια, για τον εξωθητή στο κέντρο του άξονα αλλά και για τον εξωθητή στο άκρο του άξονα.

3) Τραπεζοειδείς κοχλίες

I. Αριθμός

Για τον αριθμό των κοχλιών έγινε μελέτη σε έναν ή δύο κοχλίες στις θέσεις που προαναφέρθηκαν.

II. Διάμετρος

Τέλος απαραίτητο κρίθηκε να πραγματοποιηθεί μελέτη και για την διάμετρο των κοχλιών προκειμένου να αποδειχτεί εάν σε κάθε δεδομένη στιγμή οι κοχλίες αυτοί θα μπορούν να συγκρατήσουν την πλατφόρμα χωρίς κίνδυνο αστοχίας.

Μέσω του υπολογισμού θα αποδειχθεί εάν οι παράμετροι εκπληρώνονται ή όχι και θα καταληχθούν τα τελικά μέρη. Θα παρουσιαστούν Προσομοιώσεις λειτουργίας (Case Studies) και αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν σε 3 διαγράμματα, καθένα από τα οποία αντικατοπτρίζει ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα παρακάτω:

B1) **Προκύπτουσα κάθετη μετατόπιση**, ως προς το δοκίμιο, μετρούμενη σε mm. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί με απλούστερα λόγια την βύθιση ως προς τον άξονα και την διεύθυνση άσκησης της δύναμης.

B2) **Συντελεστής ασφαλείας (FoS)**, καθαρός αριθμός. Ο συντελεστής ασφαλείας χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό των μηχανικών κατασκευών για να συμπεραθεί εάν θα υπάρξει αστοχία κατά την συνεργασία των αντικειμένων. Αποτελεί το πηλίκο της αντοχής C του καταπονούμενου μέρους, προς την ασκούμενη δύναμη D. Ο Συντελεστής Ασφάλειας θα πρέπει να έχει τιμή μεγαλύτερη της μονάδας, ενώ εάν η τιμή είναι μικρότερη το δοκίμιο ενδέχεται να αστοχήσει και έτσι απορρίπτεται. Προφανώς σε άλλες περιπτώσεις, όπως πολύπλοκους μηχανισμούς ή συνεχόμενες φορτίσεις ο συντελεστής αυτός πρέπει να λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές. Στην περίπτωση της εργασίας αυτής όμως ένας $FoS > 1$, θεωρείται αρκετός.

B3) **Προκύπτουσα τάση Von Mises**, μετρούμενη σε N/m^2 . Η τάση αυτή προσδιορίζει εάν κατά την φόρτισή του, ένα δοκίμιο θα υποχωρήσει ή και θα σπάσει. Η τάση αυτή βρίσκει εφαρμογή σε όλκιμα υλικά όπως μέταλλα.

Σημείωση: Στις μελέτες αρχικά περιλαμβανόταν και η οριζόντια παραμόρφωση που αντικατοπτρίζει τις διατμητικές τάσεις, η οποία όμως παρατηρήθηκε να πληροί τις προϋποθέσεις και να μην βγαίνει εκτός ορίων σε κανένα από τα υπό μελέτη σενάρια. Για τον λόγο αυτό αφαιρέθηκε από τα αποτελέσματα και φαίνεται μόνο στους πίνακες για τυχόν παρατηρήσεις που χρειαστούν.

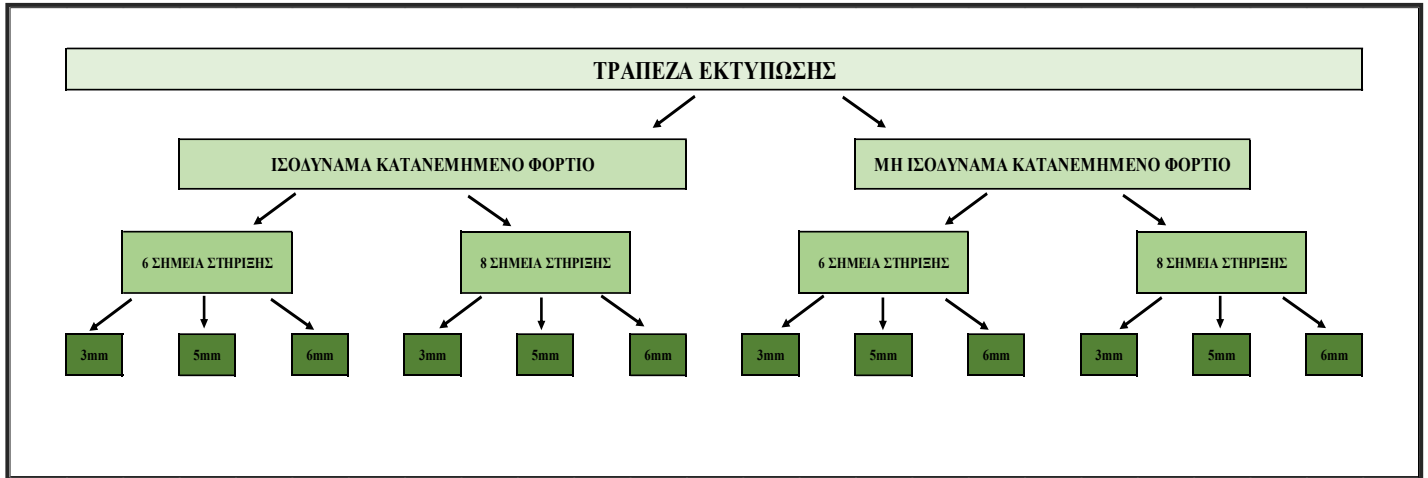
3.1.2 Τράπεζα Εκτύπωσης

Για την μελέτη της τράπεζας εκτύπωσης, μελετήθηκαν 2 διαφορετικά σενάρια. Το πρώτο αφορά ισοδύναμα καταναμημένο φορτίο και το δεύτερο μη ισοδύναμα καταναμημένο φορτίο. Για καθένα από αυτά τα σενάρια θα πραγματοποιηθεί μελέτη για πλάκα αλουμινίου με 6 σημεία στήριξης και για πλάκα αλουμινίου με 8 σημεία στήριξης. Οι στηρίξεις υλοποιούνται μέσω κοχλιών M10, με πρόσδεση πάνω στα κάθετα προφίλ. Τέλος για κάθε ένα από αυτά τα υπο-σενάρια θα μελετηθούν διαφορετικά πάχη της πλάκας προκειμένου να καταληχθούν τα συμπεράσματα.

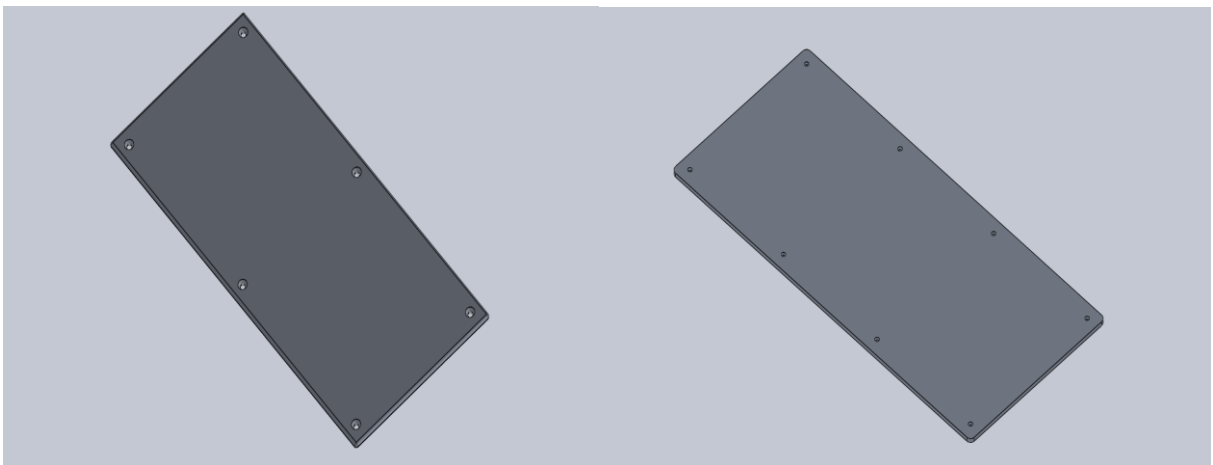
Για την στατική μελέτη αρχικά σχεδιάστηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα της τράπεζας εκτύπωσης για 6 σημεία στήριξης και για 8 σημεία στήριξης και ορίστηκε ως υλικό κράμα αλουμινίου 1060. Στη συνέχεια έγινε υπολογισμός του μέγιστου όγκου που θα μπορεί να τυπωθεί με βάση τις ωφέλιμες διαστάσεις του εκτυπωτή και πολλαπλασιασμός του με την πυκνότητα του PLA, που κυμαίνεται περί τα $1,12g/cm^3$ (Vennix n.d.). Με βάση τον υπολογισμό $Βάρος(gr.) = Όγκος (cm^3) \times Πυκνότητα (g/cm^3)$ και για ωφέλιμο όγκο $30 \times 75 \times 25 (cm) = 56250cm^3$ υπολογίστηκε πως το μέγιστο βάρος που θα μπορούσε να εκτυπωθεί θα ήταν 63kg. Δεδομένου πως $g \approx 10m/s^2$, η δύναμη που θα ασκείται στην δυσμενέστερη περίπτωση στην τράπεζα θα είναι της τάξης των 630N. Για λόγους ασφαλείας ορίστηκε και μια ανοχή 5kg, άρα έτσι καταλήγεται πως η δύναμη που θα ασκηθεί στην τράπεζα θα είναι 680N, το οποίο αποτελεί και το δυσμενέστερο σενάριο, εάν θεωρηθεί πως θα τυπωθεί αντικείμενο όγκου ίσο με τον ωφέλιμο όγκο της τράπεζας.

Έτσι στη συνέχεια και αφού ορίστηκαν οι πακτώσεις στα σημεία στήριξης, έγινε εφαρμογή κάθετης δύναμης 680N σε κάθε μοντέλο.

Χάριν διευκόλυνσης της κατανόησης παρακάτω παρατίθενται τα διαφορετικά σενάρια σε μορφή δέντρου.



Σχήμα 3-1 Σενάρια μελετών τράπεζας εκτύπωσης



Σχήμα 3-2 Σενάριο 1 (6 σημεία στήριξης)- Σενάριο 2 (8 σημεία στήριξης)

Παρακάτω αναλύονται τα αποτελέσματα για τα σενάρια και δικαιολογούνται οι αποφάσεις. Χάριν ευκολίας κατανόησης, κάθε Case Study θα συμβολίζεται με μια αλληλουχία αριθμών.

Ο πρώτος αριθμός συμβολίζει την κατανομή φορτίου, όπου:

- 1: Ισοδύναμη κατανομή φορτίου
- 2: Μη ισοδύναμη κατανομή φορτίου

Ο δεύτερος αριθμός συμβολίζει τα σημεία στήριξης, όπου:

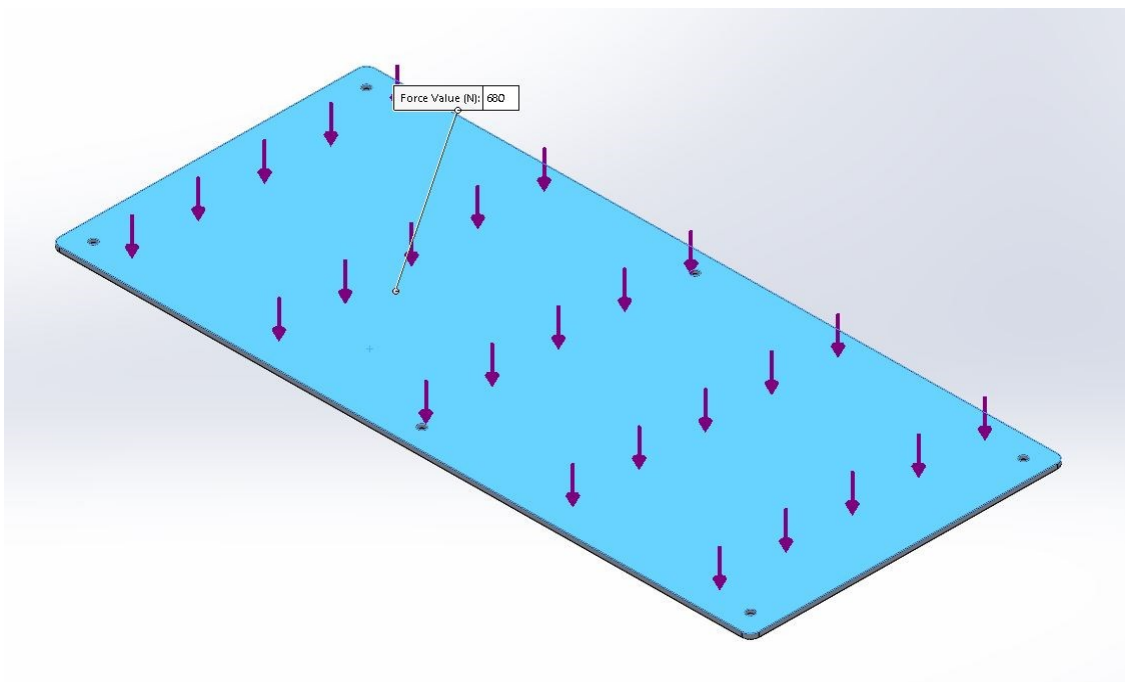
- 6: 6 σημεία στήριξης
- 8: 8 σημεία στήριξης

Ο τρίτος αριθμός συμβολίζει το πάχος της πλάκας, όπου:

- 3: πάχος πλάκας 3mm
- 5: πάχος πλάκας 5mm
- 6: πάχος πλάκας 6mm

Περίπτωση 1. ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ

Στην πρώτη περίπτωση, αυτή δηλαδή της φόρτισης από ισοδύναμο καταναμημένο φορτίο, υπολογίστηκε η δύναμη που θα ασκήσει το τεμάχιο στην τράπεζα εκτύπωσης,



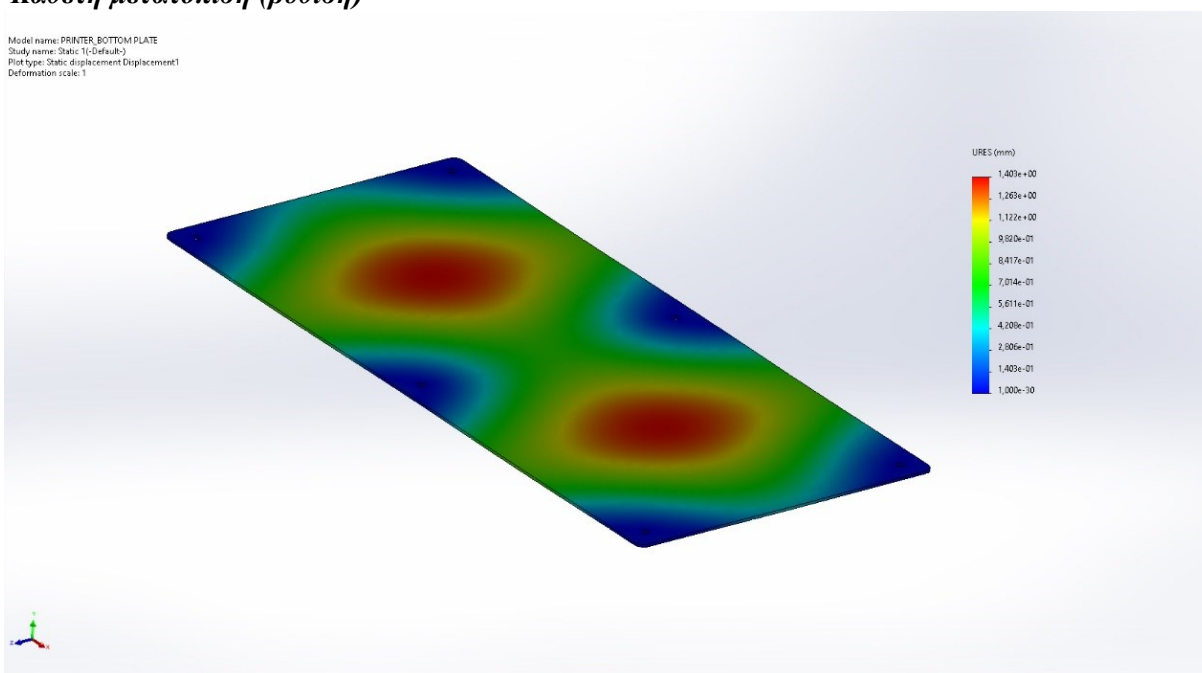
Σχήμα 3-3 Φόρτιση ισοδύναμο καταναμημένου φορτίου σε πλάκα 6 σημείων στήριξης

Υπο-σενάριο 1.6.3:

- Κατανομή φορτίου: Ισοδύναμη, Σημεία στήριξης: 6, Πάχος πλάκας: 3mm

Κάθετη μετατόπιση (βόθιση)

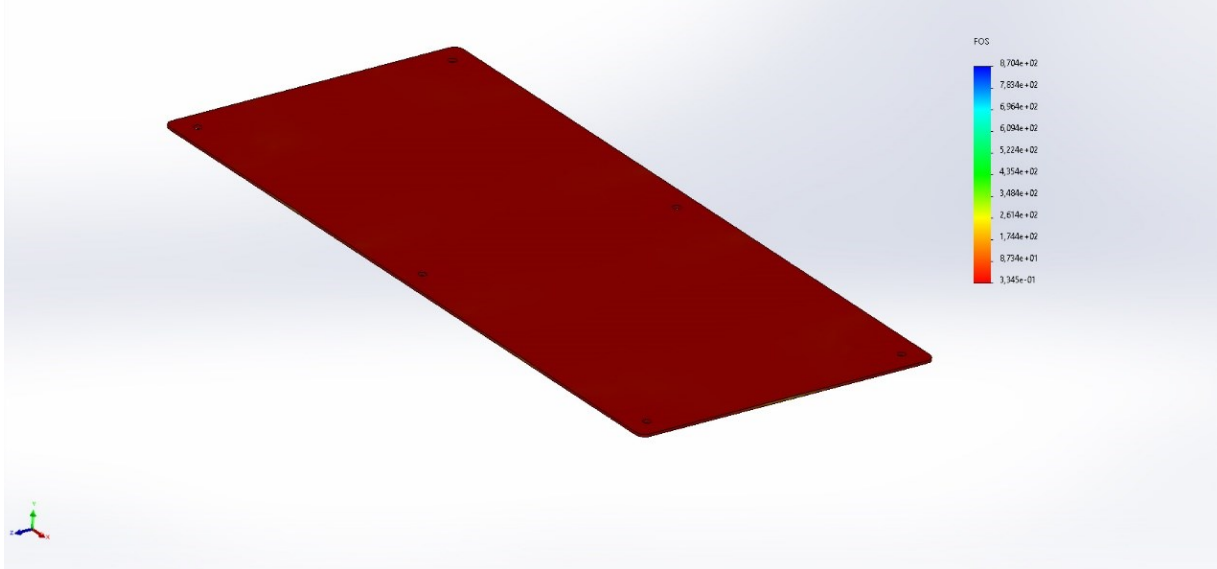
Model name: PRINTER_BOTTOM_PLATE
Study name: Static 1(-Default)
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 1



Σχήμα 3-4 Κάθετη μετατόπιση Υπο-σενάριο 1.6.3

Συντελεστής Ασφαλείας

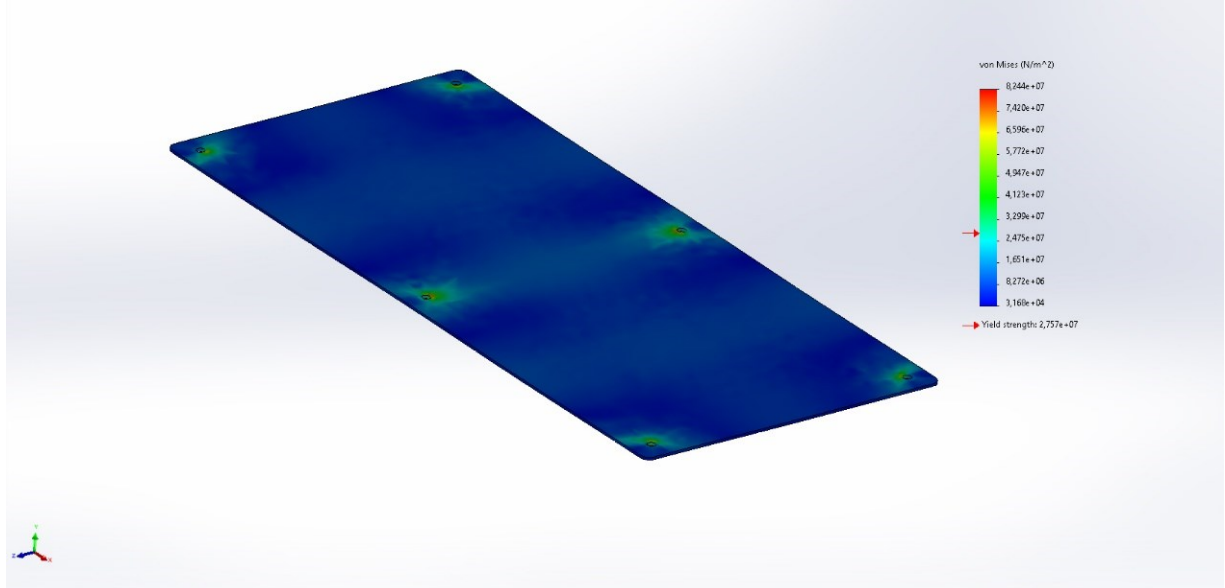
Model name: PRINTER_BOTTOM_PLATE
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1
Criterion : Automatic
Factor of safety distribution: Min FOS = 0,33



Σχήμα 3-5 Συντελεστής Ασφαλείας Υπο-σενάριο 1.6.3

Τάση Von Mises

Model name: PRINTER_BOTTOM_PLATE
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Static nodal stress Stress1
Deformation scale: 1

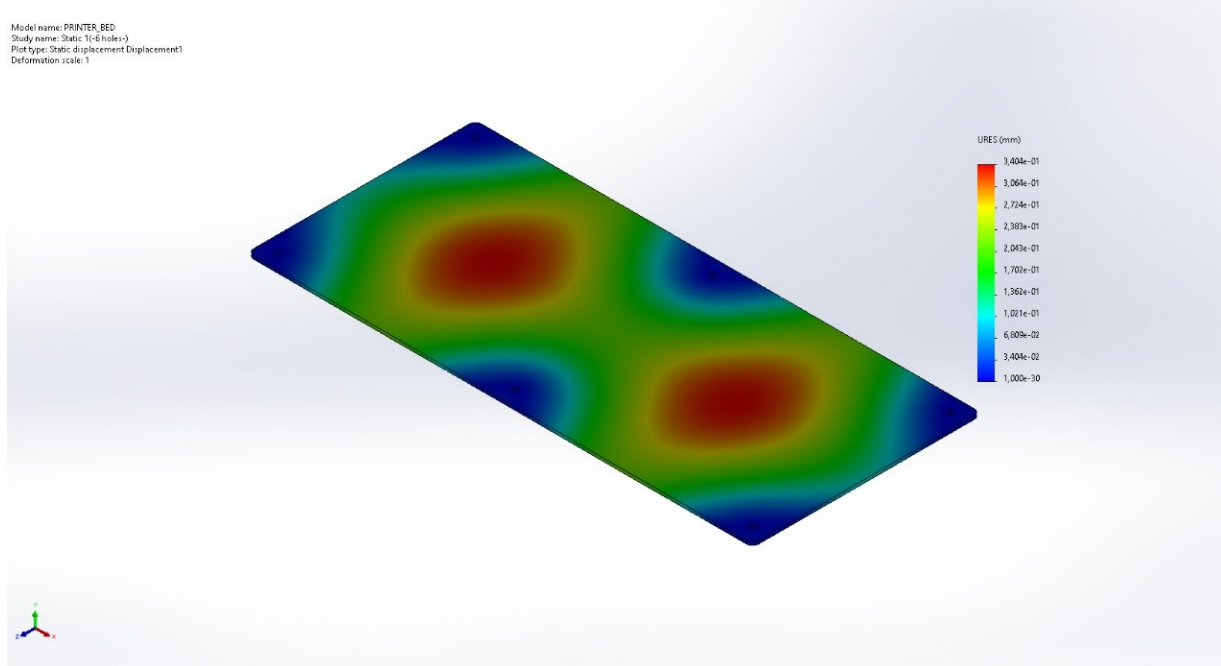


Σχήμα 3-6 Τάση Von Mises Υπο-σενάριο 1.6.3

Υπο-σενάριο 1.6.5:

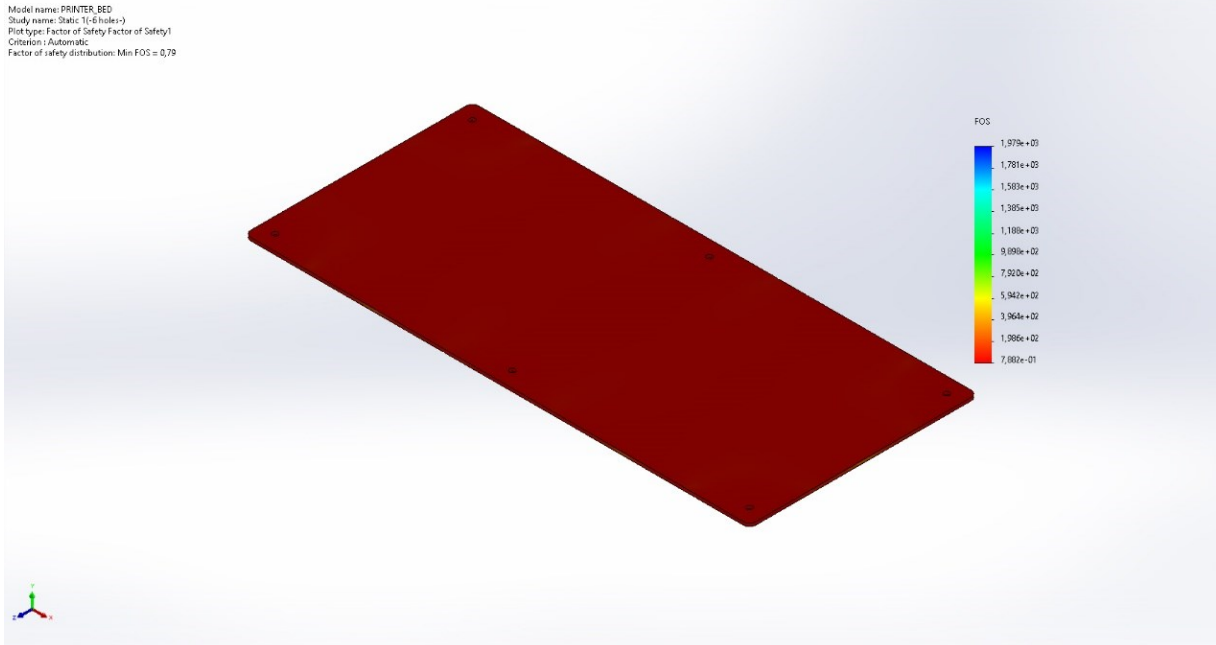
Κατανομή φορτίου: Ισοδύναμη, Σημεία στήριξης: 6, Πάχος πλάκας: 5mm

Κάθετη μετατόπιση (βύθιση)



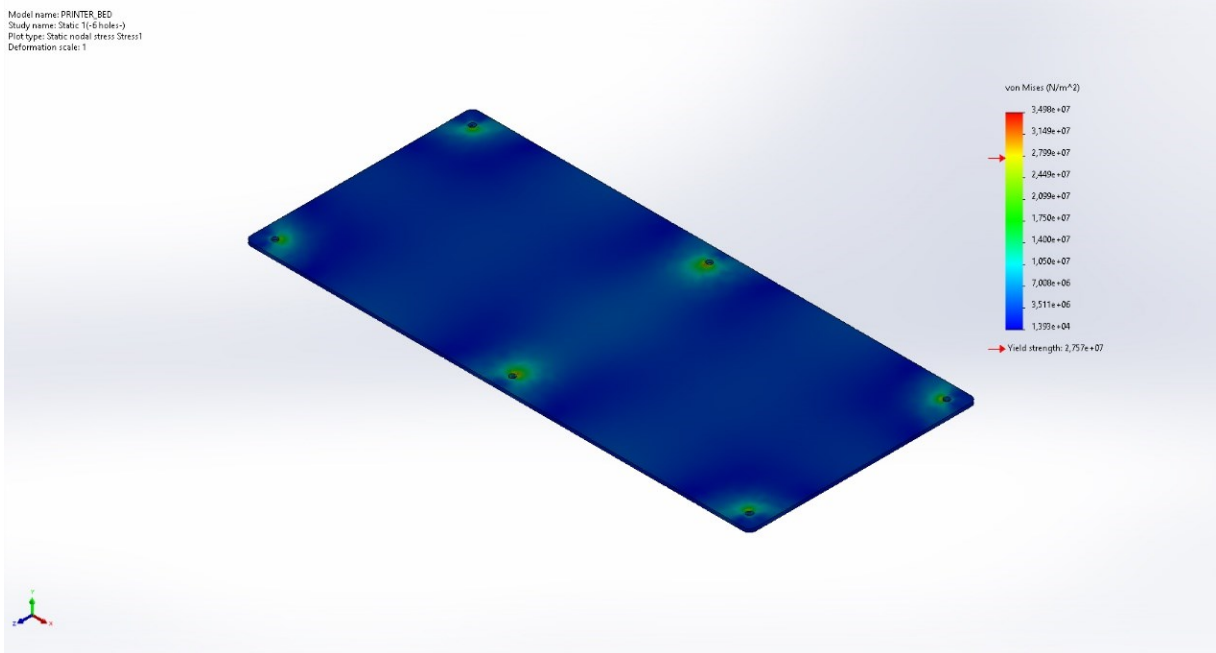
Σχήμα 3-7 Κάθετη μετατόπιση Υπο-σενάριο 1.6.5

Συντελεστής Ασφαλείας



Σχήμα 3-8 Συντελεστής Ασφαλείας Υπο-σενάριο 1.6.5

Τάση Von Mises

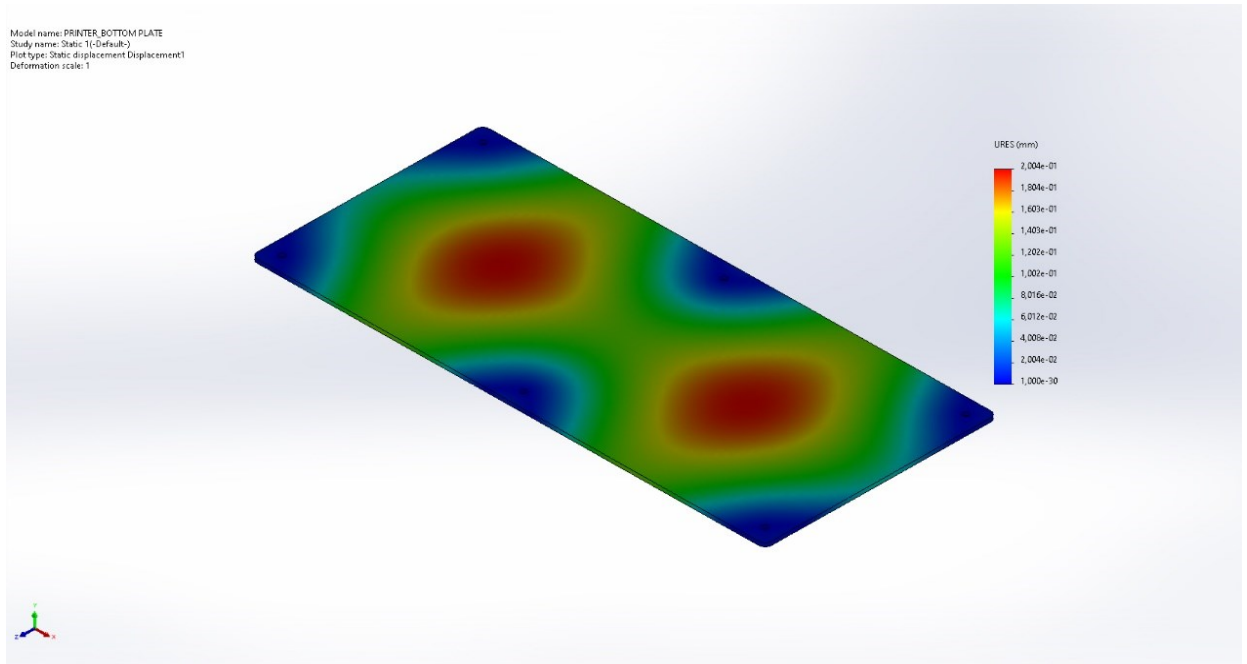


Σχήμα 3-9 Τάση Von Mises Υπο-σενάριο 1.6.5

Υπο-σενάριο 1.6.6:

- Κατανομή φορτίου: Ισοδύναμη, Σημεία στήριξης: 6, Πάχος πλάκας: 6mm

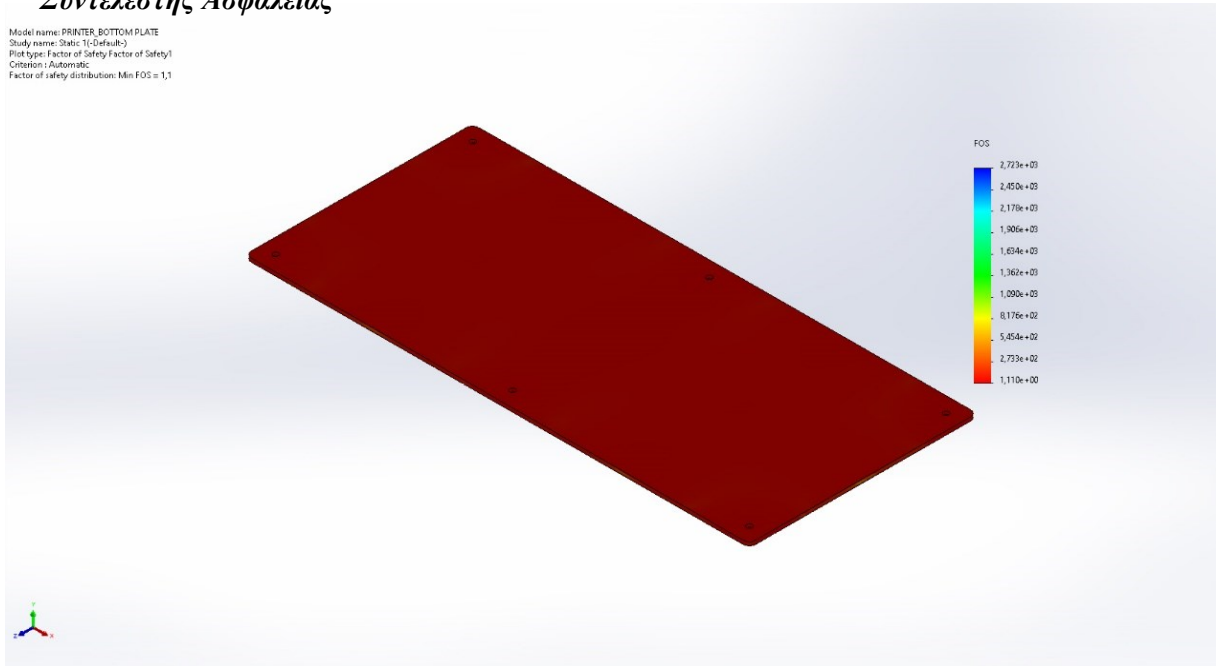
Κάθετη μετατόπιση (βόθιση)



Σχήμα 3-10 Κάθετη μετατόπιση Υπο-σενάριο 1.6.6

Συντελεστής Ασφαλείας

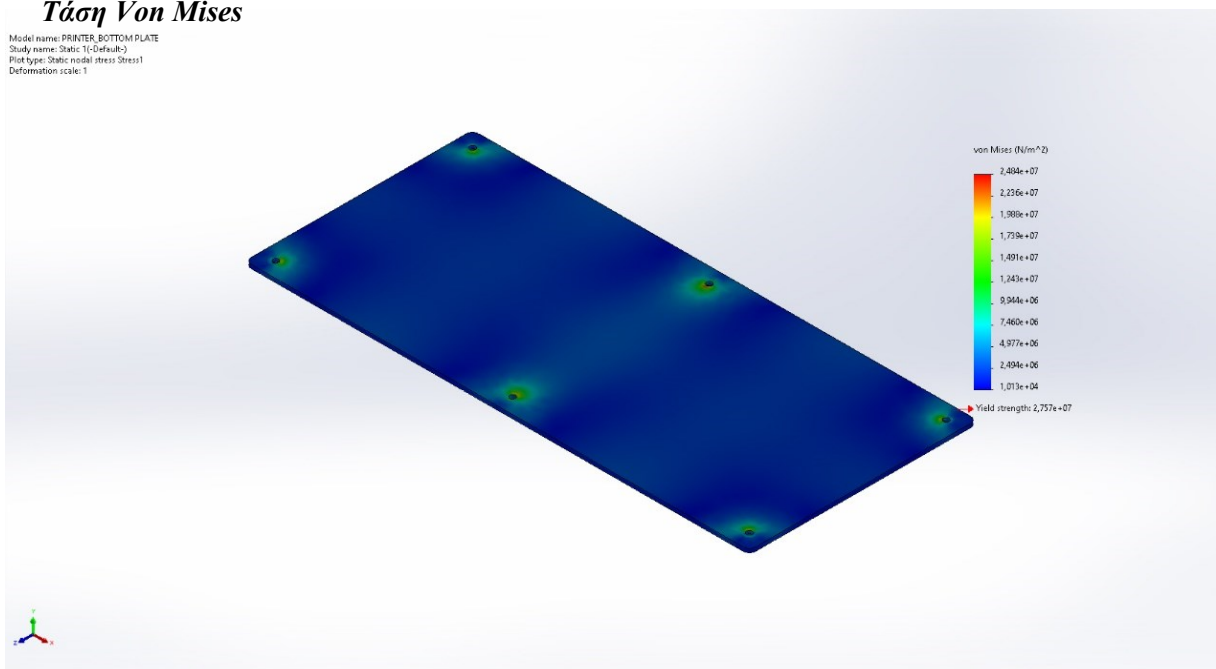
Model name: PRINTER_BOTTOM_PLATE
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1
Criterion : Automatic
Factor of safety distribution: Min FOS = 1,1



Σχήμα 3-11 Συντελεστής Ασφαλείας Υπο-σενάριο 1.6.6

Τάση Von Mises

Model name: PRINTER_BOTTOM_PLATE
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Static nodal stress Stress1
Deformation scale: 1



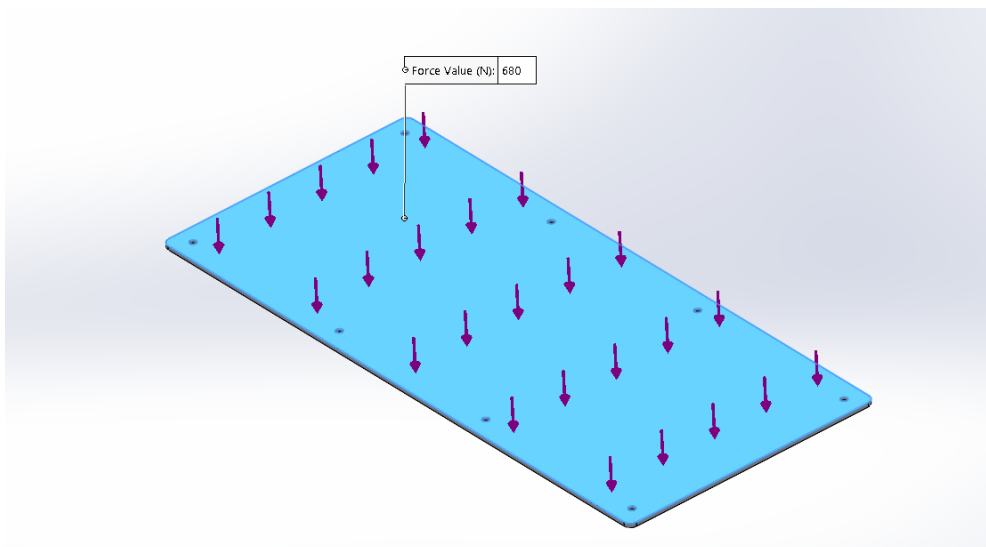
Σχήμα 3-12 Τάση Von Mises Υπο-σενάριο 1.6.6

Σενάρια Αποτελέσματα		Ισοδύναμα κατανεμημένο φορτίο		
		6 Σημεία Στήριξης		
		Πάχος πλάκας		
		3mm	5mm	6mm
Κάθετη μετατόπιση(URES) (mm)		1,403	$3,404 \cdot 10^{-1}$	$2,004 \cdot 10^{-1}$
Συντελεστής Ασφαλείας (FoS)	>1	0,33	0,79	1,1
Οριζόντια παραμόρφωση		$7,226 \cdot 10^{-4}$	$3,548 \cdot 10^{-4}$	$2,469 \cdot 10^{-4}$
Τάση Von Mises(N/m ²)	< $2,757 \cdot 10^7$	$8,244 \cdot 10^7$	$3,498 \cdot 10^7$	$2,484 \cdot 10^7$

Πίνακας 9 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων μοντελοποίησης για Ισοδύναμα κατανεμημένο φορτίο σε τράπεζα με 6 σημεία στήριξης

Συμπερασματικά, προκύπτουν τα εξής:

- A) Ως προς τον συντελεστή ασφαλείας, απορρίπτονται και οι επιλογές των 3mm και των 5mm ως προς το πάχος της τράπεζας, ενώ ακόμα και η επιλογή του πάχους των 6mm, οριακά μπορεί να γίνει αποδεκτή για ένα ελάχιστο Συντελεστή Ασφαλείας =1, ανέρχεται σε 1.1.
- B) Ως προς την κάθετη μετατόπιση (βύθιση), για 3mm, 5mm, 6mm, αυτή ανέρχεται στα μέγιστα $1,403\text{mm}$, $3.404 \cdot 10^{-1}\text{mm}$ και $2,004 \cdot 10^{-1}\text{mm}$ αντίστοιχα. Φαίνεται λοιπόν πως όσο μεγαλώνει το πάχος της τράπεζας, αντιστρόφως ανάλογα μειώνεται η κάθετη μετατόπιση. Αφήνοντας στην άκρη την πρώτη και δεύτερη περίπτωση όπου ξεκάθαρα αποτελούν απορριπτές επιλογές, η τρίτη θα γινόταν δεκτή, αφού και μια μικρή παραμόρφωση των 200 μικρομέτρων θεωρείται ανεκτή.
- Γ) Τέλος και σχετικά με την ασκούμενη τάση Von Mises, φαίνεται πως στις δύο πρώτες περιπτώσεις, το όριο παραμόρφωσης βρίσκεται εντός του εύρους των τιμών που θα παρατηρηθούν κατά την φόρτιση της τράπεζας και άρα οι περιπτώσεις αυτές θεωρούνται απορριπτές. Στην τελευταία περίπτωση η τάση αυτή φτάνει εξαιρετικά κοντά στο όριο, χωρίς όμως ποτέ να το φτάνει ($2,484 \cdot 10^7 < 2,757 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$).
- Δ) Θα μπορούσε λοιπόν να συμπεραθεί, πως από τις παραπάνω περιπτώσεις, αυτές των 3mm και 5mm απορρίπτονται, ενώ εκείνη των 6mm αποτελεί αποδεκτή επιλογή. Στην συνέχεια θα γίνουν οι ίδιες μελέτες αλλά για 8 σημεία στήριξης.



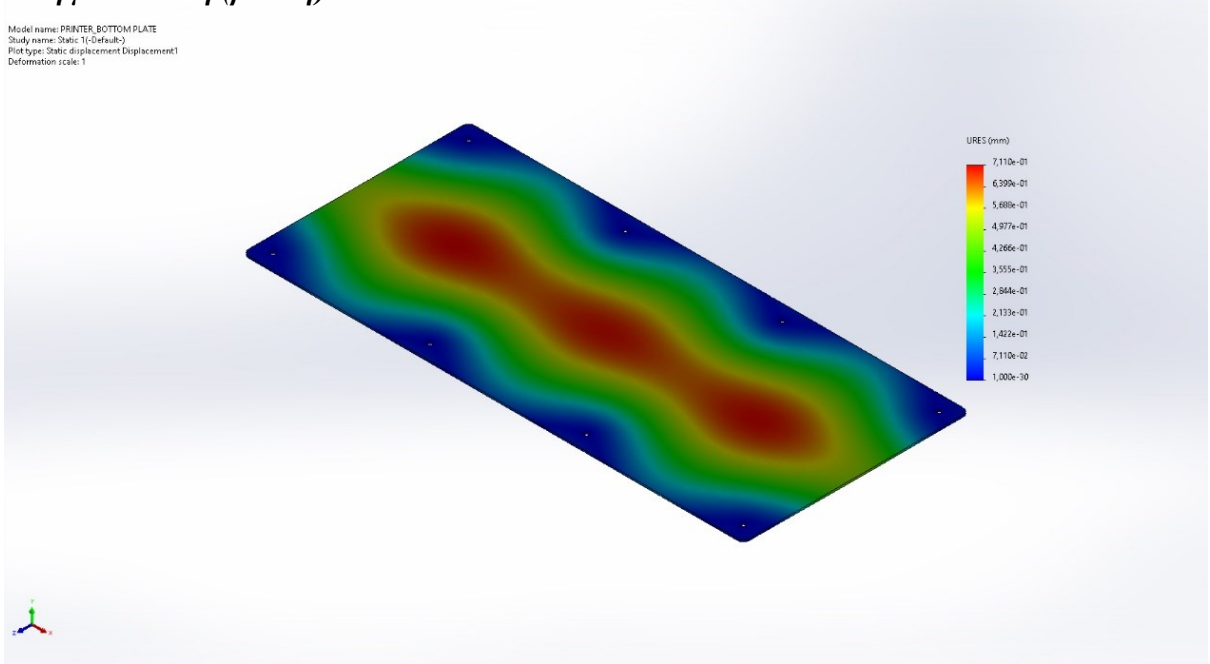
Σχήμα 3-13 Φόρτιση ισοδύναμα κατανεμημένου φορτίου σε πλάκα 8 σημείων στήριξης

Υπο-σενάριο 1.8.3:

- Κατανομή φορτίου: Ισοδύναμη, Σημεία στήριξης: 8, Πάχος πλάκας: 3mm

Κάθετη μετατόπιση (βύθιση)

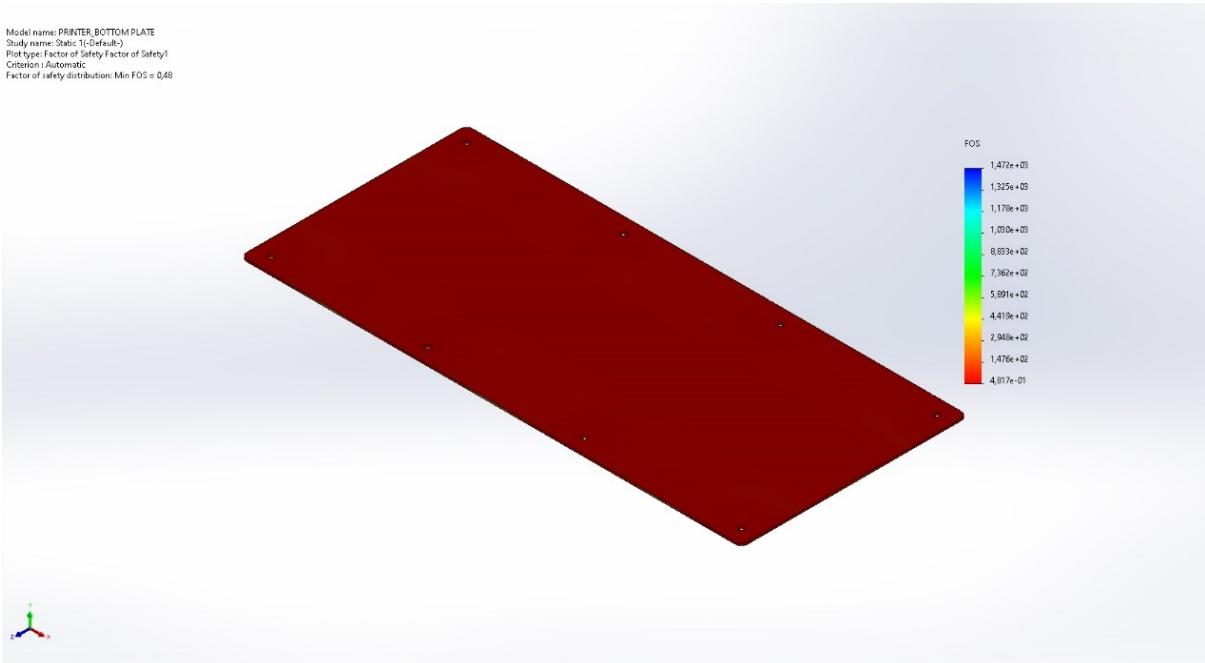
Model name: PRINTER_BOTTOM_PLATE
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Static displacement (Displacement)
Deformation scale: 1



Σχήμα 3-14 Κάθετη μετατόπιση Υπο-σενάριο 1.8.3

Συντελεστής Ασφαλείας

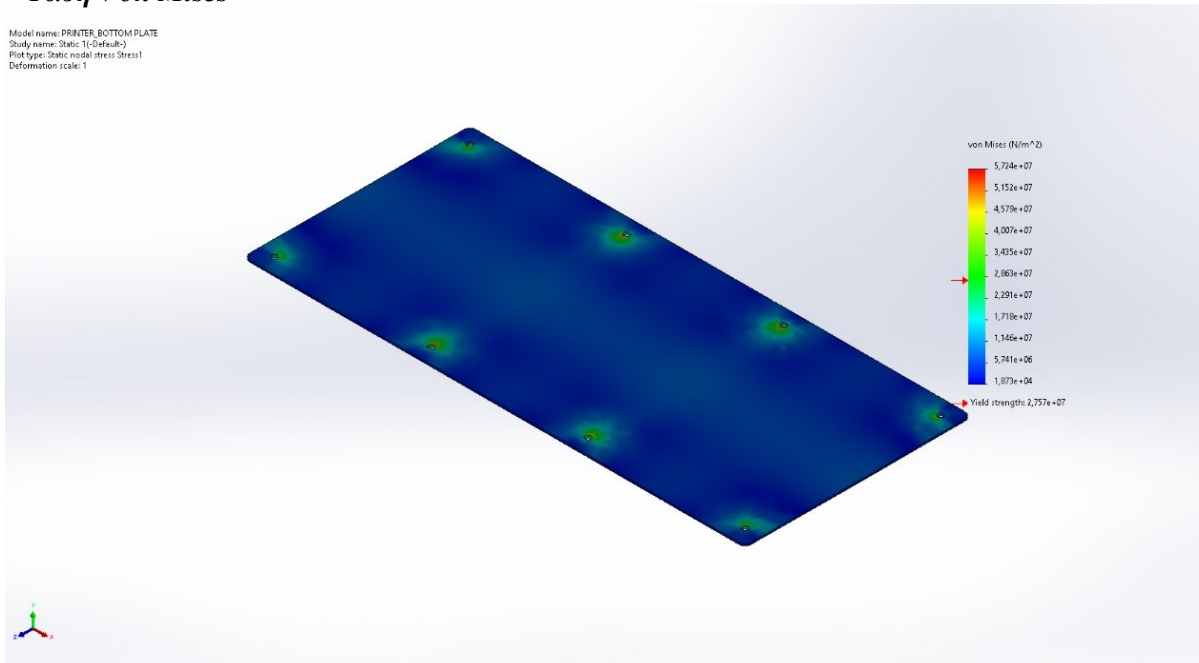
Model name: PRINTER_BOTTOM_PLATE
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Factor of Safety (Factor of Safety)
Criteria: Automatic
Factor of safety distribution: Min FOS = 0,48



Σχήμα 3-15 Συντελεστής Ασφαλείας Υπο-σενάριο 1.8.3

Τάση Von Mises

Model name: PRINTER_BOTTOM_PLATE
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Static nodal stress Stress1
Deformation scale: 1



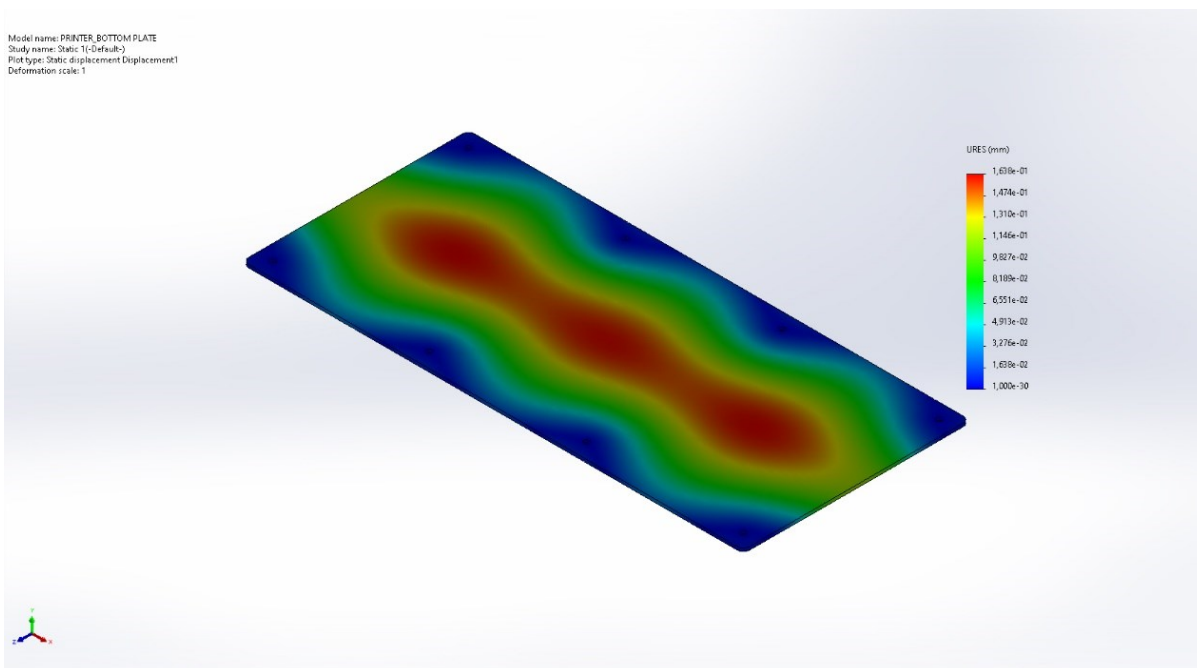
Σχήμα 3-16 Τάση Von Mises Υπο-σενάριο 1.8.3

Υπο-σενάριο 1.8.5:

- Κατανομή φορτίου: Ισοδύναμη, Σημεία στήριξης: 8, Πάχος πλάκας: 5mm

Κάθετη μετατόπιση (βύθιση)

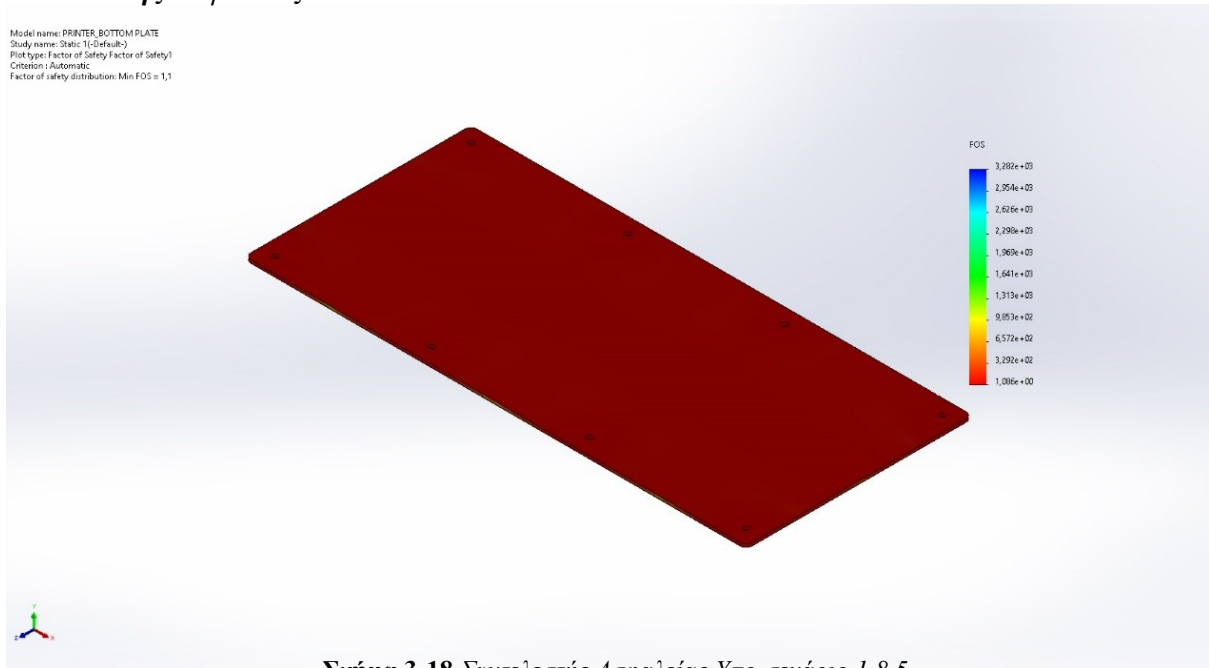
Model name: PRINTER_BOTTOM_PLATE
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 1



Σχήμα 3-17 Κάθετη μετατόπιση Υπο-σενάριο 1.8.5

Συντελεστής Ασφαλείας

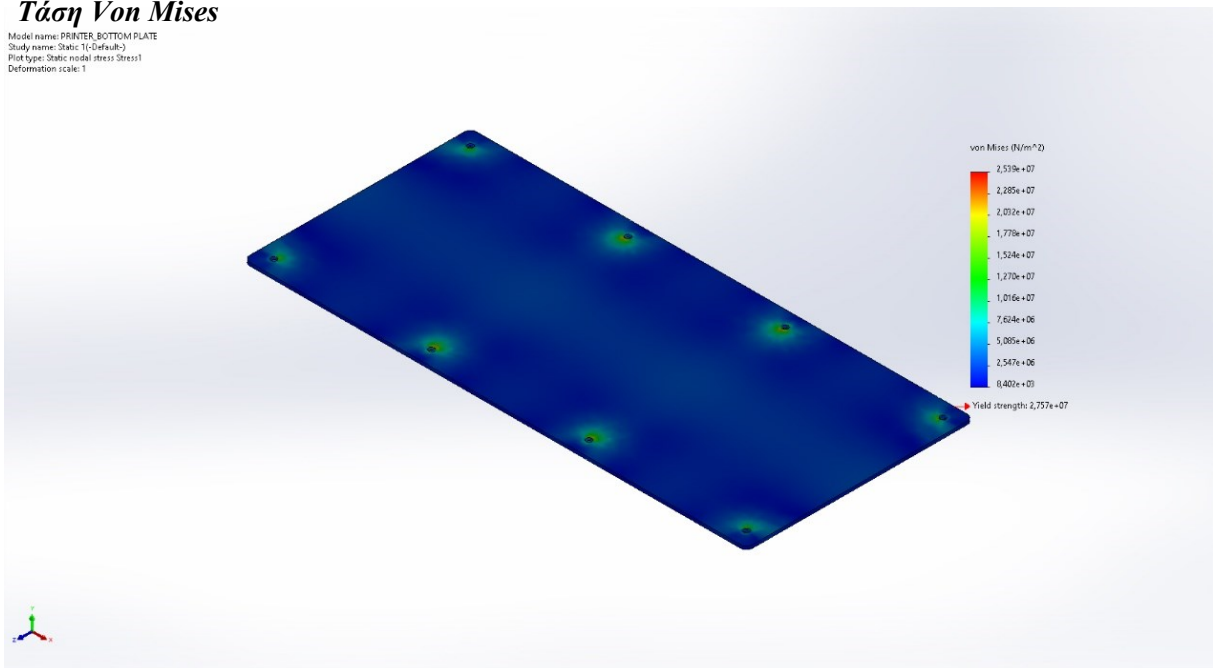
Model name: PRINTER_BOTTOM_PLATE
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1
Criterion : Automatic
Factor of safety distribution: Min FOS = 1,1



Σχήμα 3-18 Συντελεστής Ασφαλείας Υπο-σενάριο 1.8.5

Τάση Von Mises

Model name: PRINTER_BOTTOM_PLATE
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Static: vonMises stress Stress1
Deformation scale: 1

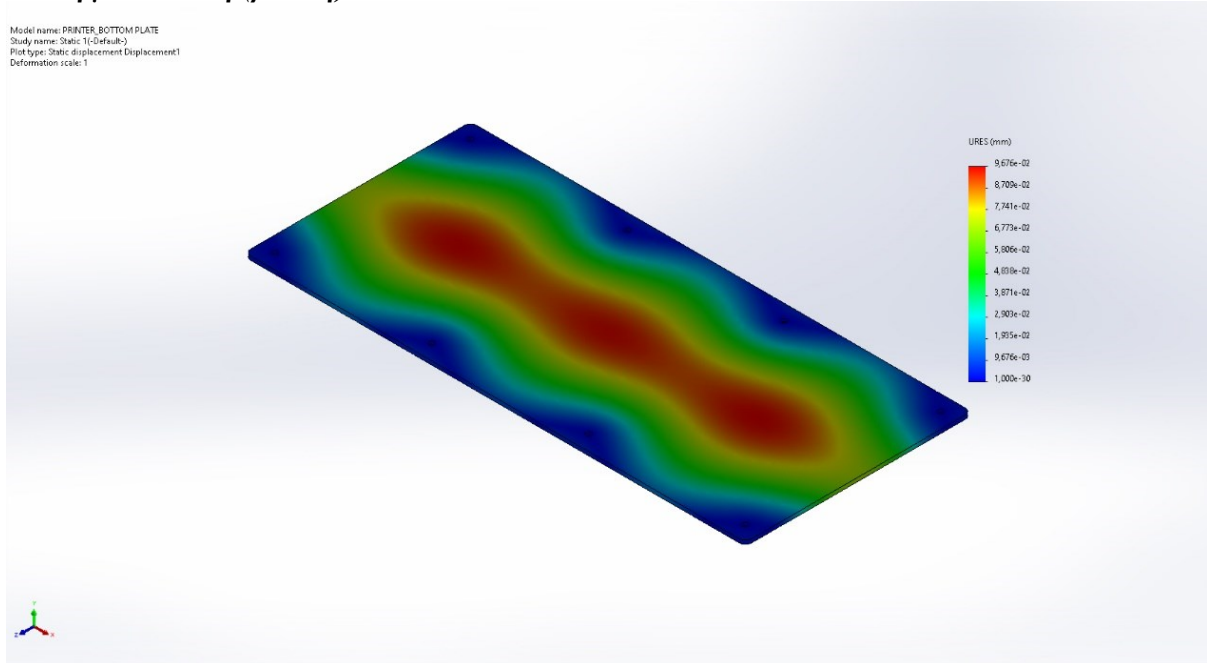


Σχήμα 3-19 Τάση Von Mises Υπο-σενάριο 1.8.5

Υπο-σενάριο 1.8.6:

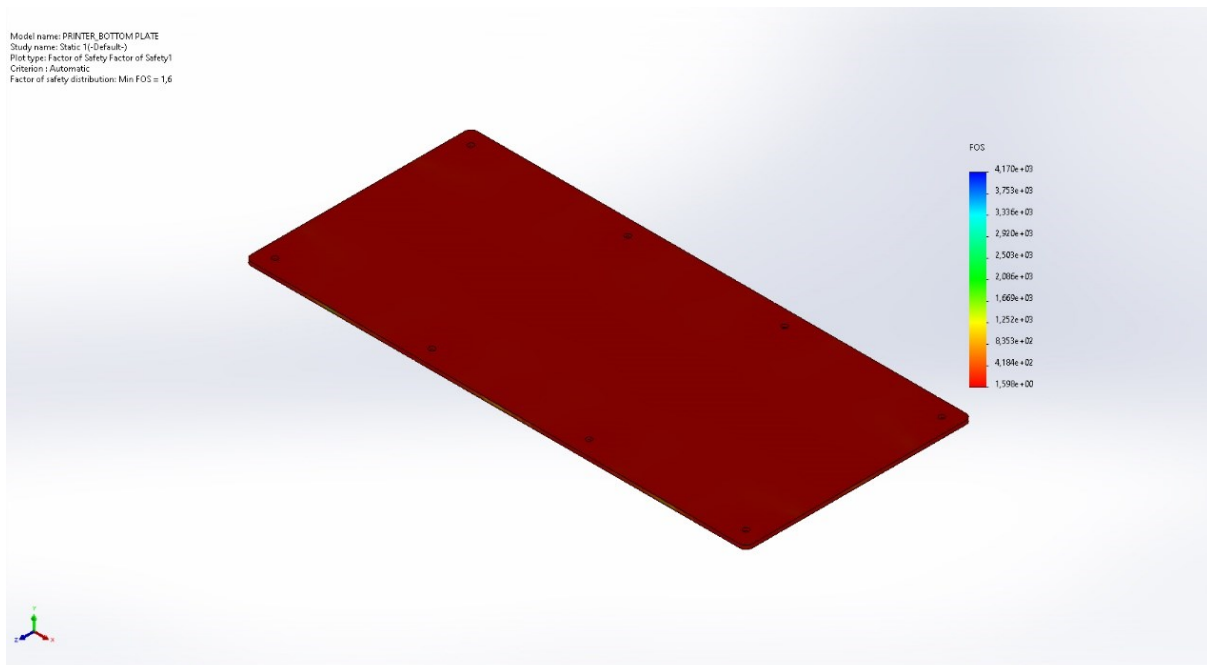
- Κατανομή φορτίου: Ισοδύναμη, Σημεία στήριξης: 8, Πάχος πλάκας: 6mm

Κάθετη μετατόπιση (βύθιση)



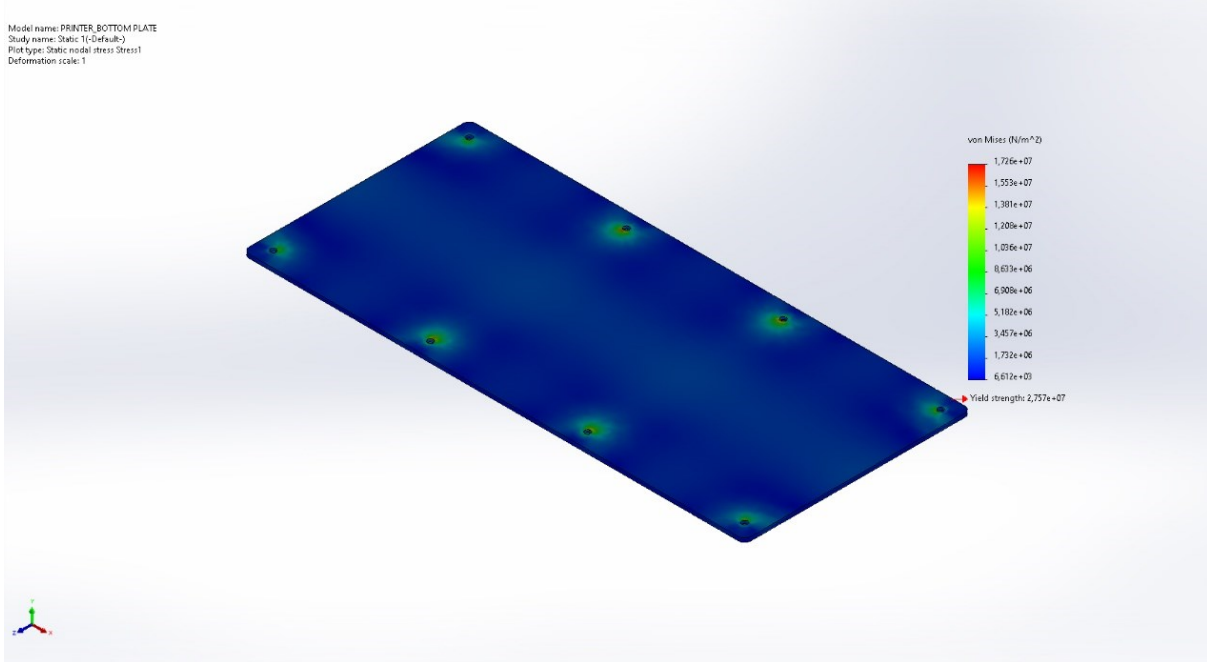
Σχήμα 3-20 Κάθετη μετατόπιση Υπο-σενάριο 1.8.6

Συντελεστής Ασφαλείας



Σχήμα 3-21 Συντελεστής Ασφαλείας Υπο-σενάριο 1.8.6

Τάση Von Mises



Σχήμα 3-22 Τάση Von Mises Υπο-σενάριο 1.8.6

Σενάρια		Ισοδύναμα κατανεμημένο φορτίο		
		8 Σημεία Στήριξης		
		Πάχος πλάκας		
Αποτελέσματα		3mm	5mm	6mm
Κάθετη μετατόπιση(URES) (mm)		$7,11 \cdot 10^{-1}$	$1,638 \cdot 10^{-1}$	$9,676 \cdot 10^{-2}$
Συντελεστής Ασφαλείας (FoS)	>1	0,48	1,1	1,6
Οριζόντια παραμόρφωση		$4,946 \cdot 10^{-4}$	$2,856 \cdot 10^{-4}$	$1,728 \cdot 10^{-4}$
Τάση Von Mises(N/m ²)	< $2,757 \cdot 10^7$	$5,724 \cdot 10^7$	$2,539 \cdot 10^7$	$1,726 \cdot 10^7$

Πίνακας 10 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων μοντελοποίησης για Ισοδύναμα κατανεμημένο φορτίο σε τράπεζα με 8 σημεία στήριξης

Συμπερασματικά για το σενάριο των 8 σημείων στήριξης:

A) Όσον αφορά τον συντελεστή ασφαλείας, φαίνεται πως στην περίπτωση των 3mm, αυτός δεν ικανοποιείται, άρα αυτή η περίπτωση απορρίπτεται. Στην δεύτερη περίπτωση οριακά ο συντελεστής αυτός ικανοποιείται, άρα και είναι αποδεκτή, ενώ στην τρίτη φαίνεται πως ο συντελεστής αυτός ικανοποιείται σε καλό επίπεδο και άρα δεν υπάρχει κανένας κίνδυνος.

B) Σχετικά με την κάθετη μετατόπιση, φαίνεται πως ακόμη και στην δυσμενέστερη περίπτωση (αυτή των 3mm), ήδη τα αποτελέσματα είναι υποδιπλάσια της αντίστοιχης του σεναρίου των 6 σημείων στήριξης ($0,711\text{mm} < 1,403\text{mm}$). Προφανώς όσο αυξάνεται το πάχος της πλάκας, φαίνεται να μειώνεται και η κάθετη μετατόπιση.

Γ) Τέλος και σχετικά με την τάση Von Mises, φαίνεται πως η περίπτωση των 3mm πάχους πλάκας δεν ικανοποιεί την αναγκαία συνθήκη ($5,724 \cdot 10^7 \text{N/m}^2 > 2,757 \cdot 10^7 \text{N/m}^2$). Η δεύτερη περίπτωση οριακά μεν αλλά βρίσκεται πάνω από το όριο, ενώ η τρίτη περίπτωση, αυτή των 6mm πάχους πλάκας, βρίσκεται σε πολύ ασφαλή απόσταση από το όριο.

Δ) Από τα παραπάνω προκύπτει, πως τόσο οι περιπτώσεις των 5mm και 6mm πάχους πλάκας ικανοποιούν τις αναγκαίες συνθήκες, ενώ εκείνη των 3mm απορρίπτεται. Οικονομοτεχνικά,

συμπεραίνεται πως η περίπτωση των 5mm αποτελεί έως τώρα την βέλτιστη δυνατή λύση, δεδομένου πως και πληροί τα κριτήρια και αποτελεί λιγότερο κοστοβόρα επιλογή.

Τα παραπάνω μοντέλα αποτέλεσαν την μελέτη του σεναρίου της ισοδύναμης κατανομής φορτίου, παρακάτω θα πραγματοποιηθούν οι αντίστοιχες μελέτες για την μη ισοδύναμη κατανομή.

Περίπτωση 2. ΜΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ

Σε αυτήν την περίπτωση λήφθηκε υπόψιν μόνο το ένα μισό του μέγιστου εκτυπωμένου τεμαχίου, άρα αντίστοιχα η δύναμη ανέρχεται στα 340N, η οποία ασκείται όλη στο μισό μέρος της τράπεζας.

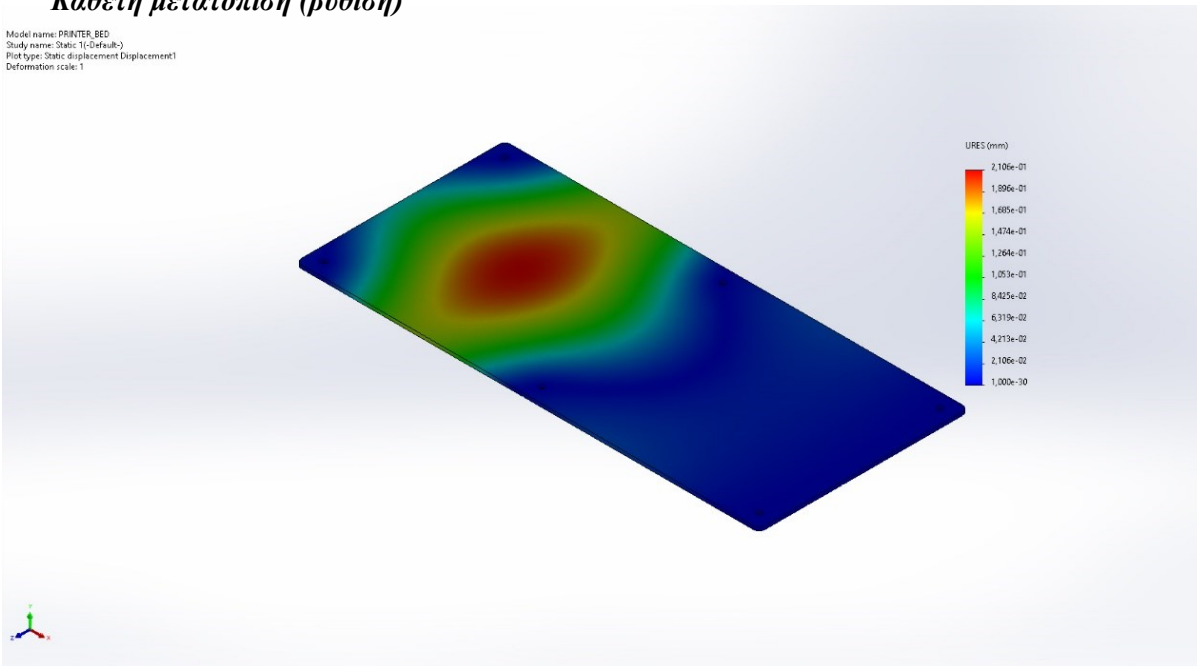
Σημειώνεται πως σε αυτήν την περίπτωση, η εναλλακτική της τράπεζας πάχους 3mm δεν πάρθηκε καθόλου υπόψιν αφού έχει ήδη απορριφθεί στην προηγούμενη μελέτη τόσο για 6 σημεία πρόσδεσης όσο και για 8. Η εναλλακτική της τράπεζας πάχους 5mm θα μελετηθεί μόνο για το σενάριο 8 σημείων πρόσδεσης, διότι για 6 σημεία πρόσδεσης έχει ήδη απορριφθεί.

Υπο-σενάριο 2.6.6:

- Κατανομή φορτίου: Μη Ισοδύναμη, Σημεία στήριξης: 6, Πάχος πλάκας: 6mm

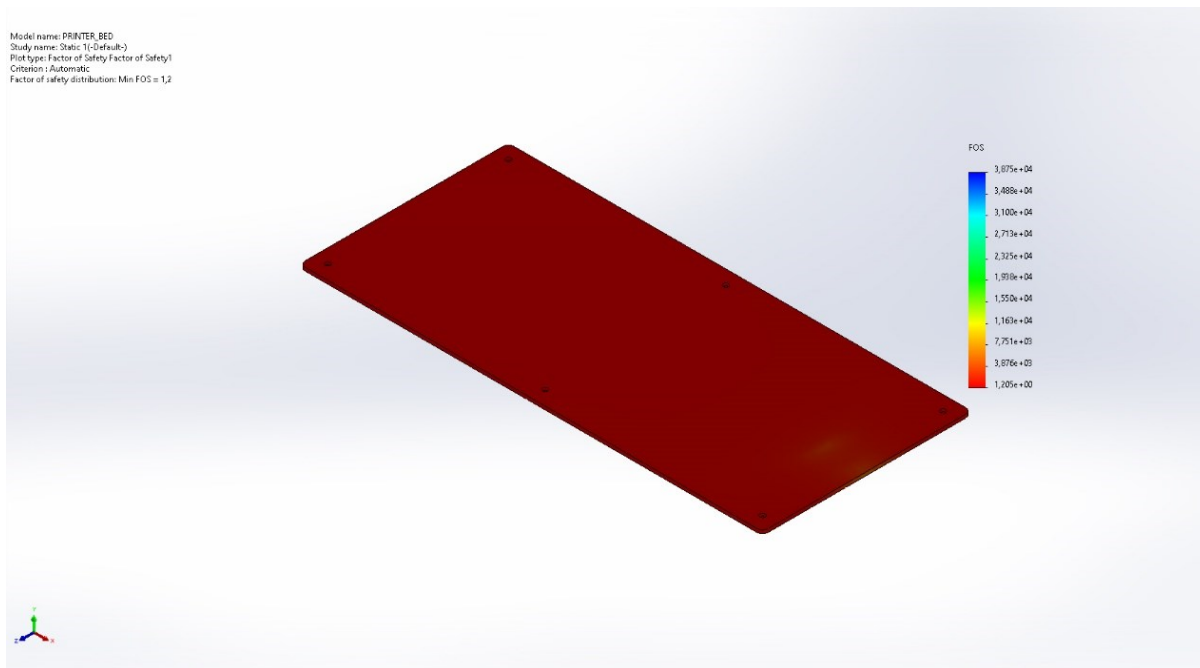
Κάθετη μετατόπιση (βύθιση)

Model name: PRINTER_BED
Study name: Static 1 (-Default-)
Plot type: Static displacement (Displacement)
Deformation scale: 1



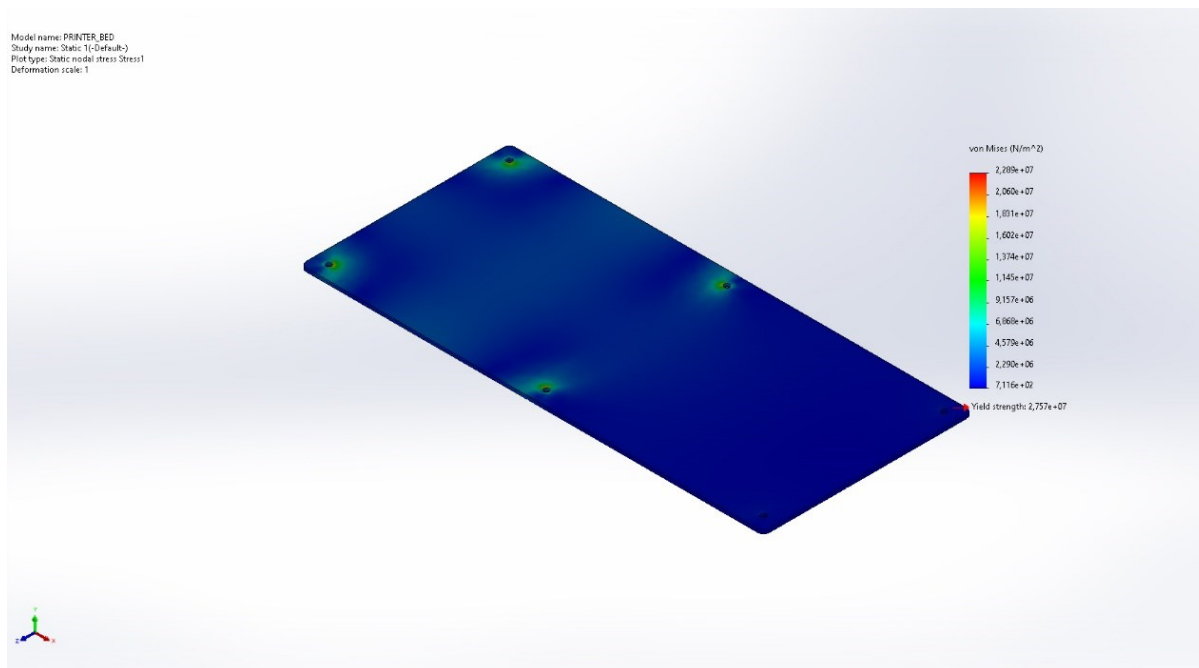
Σχήμα 3-23 Κάθετη μετατόπιση Υπο-σενάριο 2.6.6

Συντελεστής Ασφαλείας



Σχήμα 3-24 Συντελεστής Ασφαλείας Υπο-σενάριο 2.6.6

Τάση Von Mises



Σχήμα 3-25 Τάση Von Mises Υπο-σενάριο 2.6.6

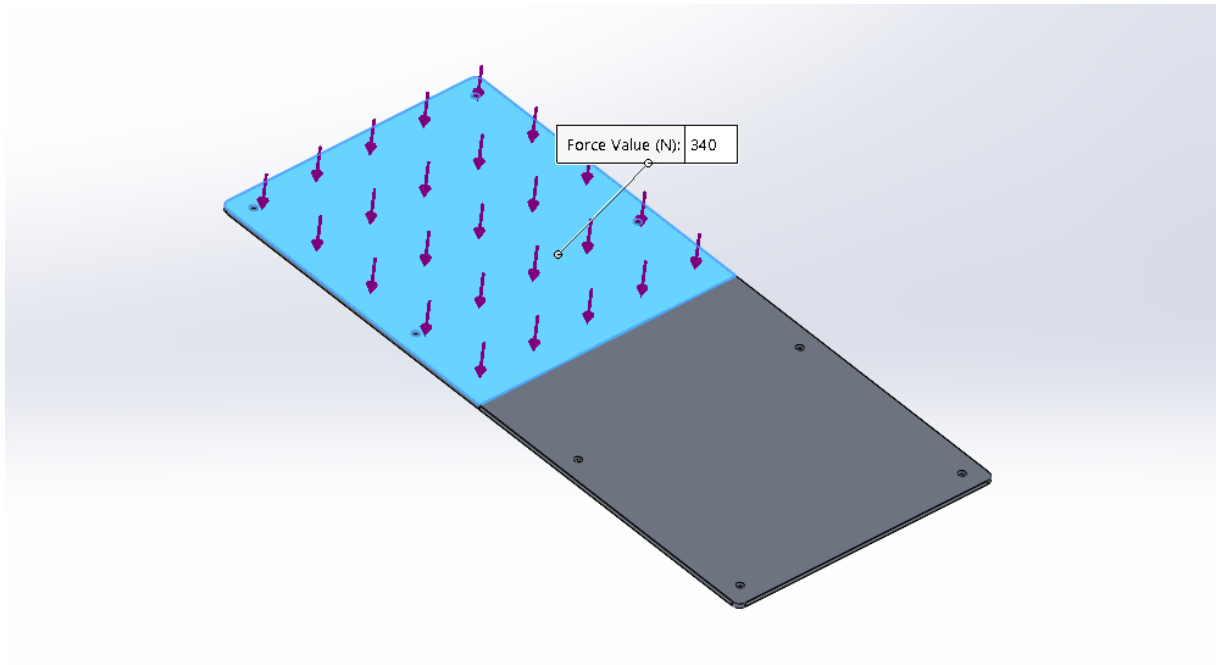
Σενάρια	Μη ισοδύναμα 6 Σημεία Στήριξης Πάχος πλάκας 6mm	
Αποτελέσματα		
Κάθετη μετατόπιση (URES) (mm)		$2,106 \cdot 10^{-1}$
Συντελεστής Ασφαλείας (FoS)	>1	1,2
Οριζόντια Παραμόρφωση		$2,264 \cdot 10^{-4}$
Τάση Von Mises(N/m ²)	$<2,757 \cdot 10^7$	$2,289 \cdot 10^7$

Πίνακας 11 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων μοντελοποίησης για Μη Ισοδύναμα καταναμημένο φορτίο σε τράπεζα με 6 σημεία στήριξης

Συμπερασματικά από τα παραπάνω:

- A) Ο συντελεστής ασφαλείας κρίνεται επιτρεπτός.
- B) Η κάθετη μετατόπιση ανέρχεται σε 0,2106mm. Οριακά το μέγεθος αυτό, θα επηρεάσει την ποιότητα της εκτύπωσης.
- Γ) Η τάση Von Mises κινείται μέσα σε αποδεκτά πλαίσια.
- Δ) Φαίνεται από τα παραπάνω πως η επιλογή των 6mm είναι αποδεκτή.

Παρόμοια θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος και για 8 σημεία στήριξης

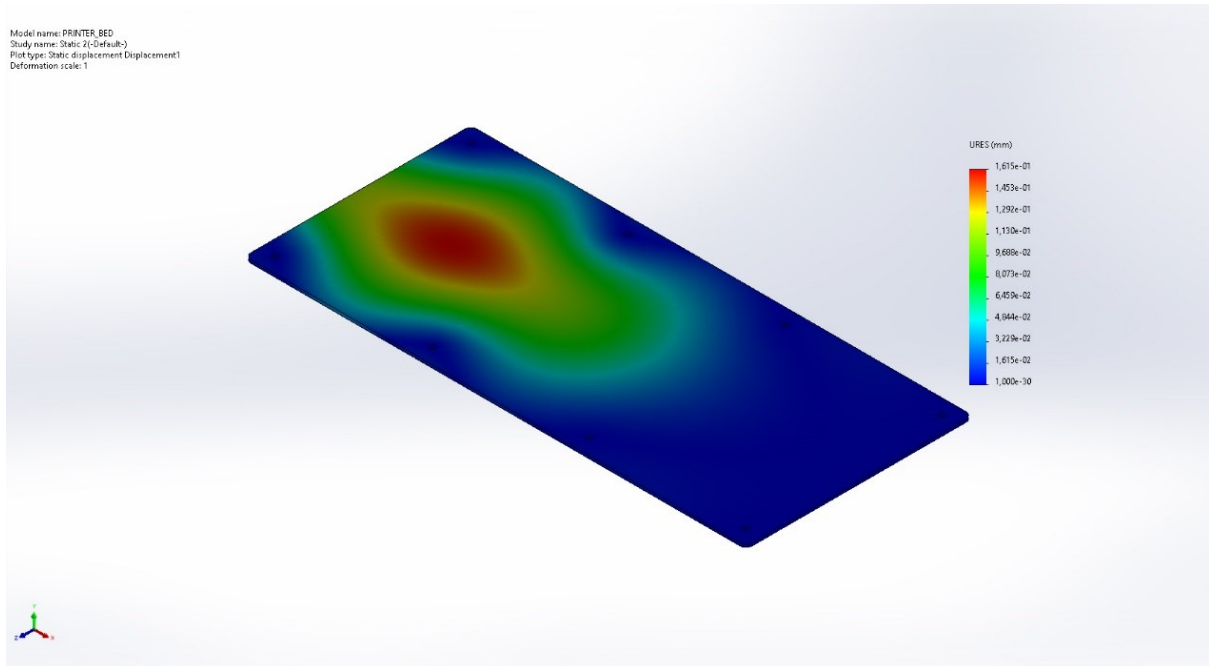


Σχήμα 3-26 Φόρτιση μη ισοδύναμα καταναμημένου φορτίου σε πλάκα 8 σημείων στήριξης

Υπο-σενάριο 2.8.5:

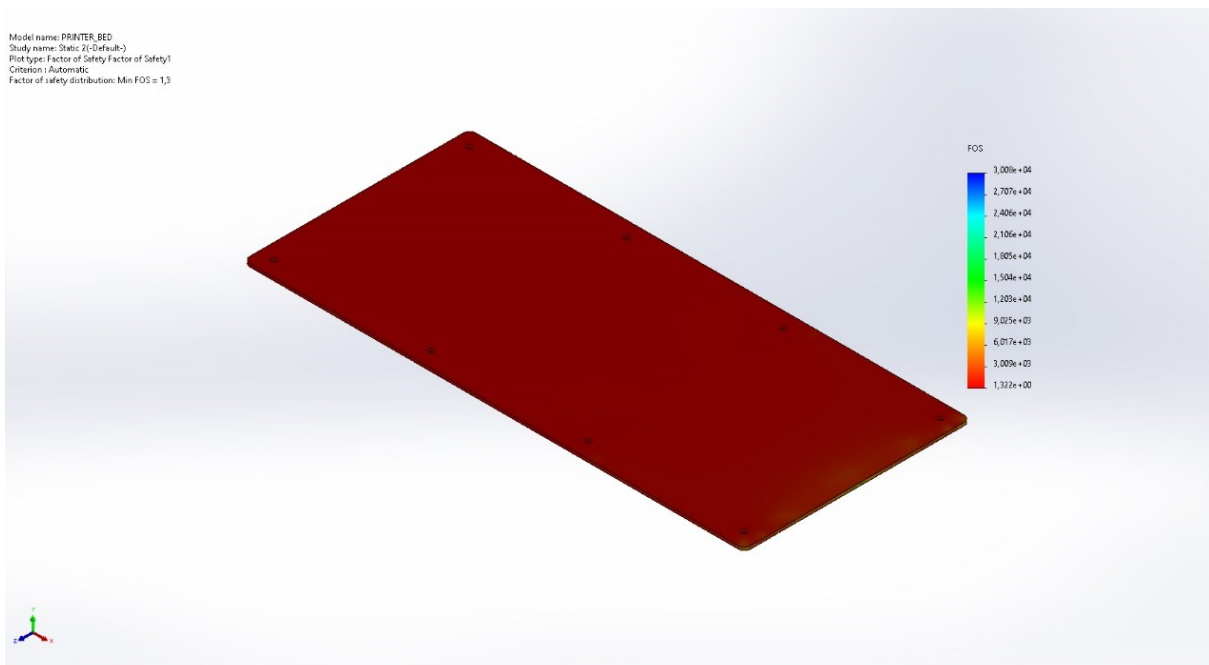
- Κατανομή φορτίου: Μη Ισοδύναμη, Σημεία στήριξης: 8, Πάχος πλάκας: 5mm

Κάθετη μετατόπιση (βόθιση)



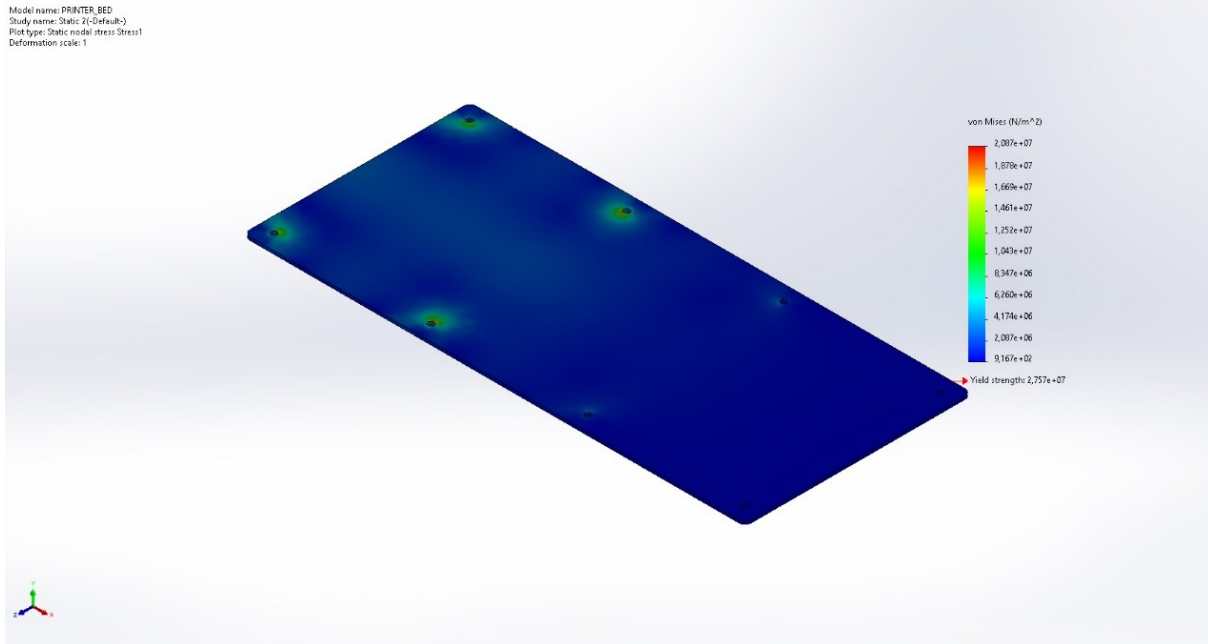
Σχήμα 3-27 Κάθετη μετατόπιση Υπο-σενάριο 2.8.5

Συντελεστής Ασφαλείας



Σχήμα 3-28 Συντελεστής Ασφαλείας Υπο-σενάριο 2.8.5

Τάση Von Mises

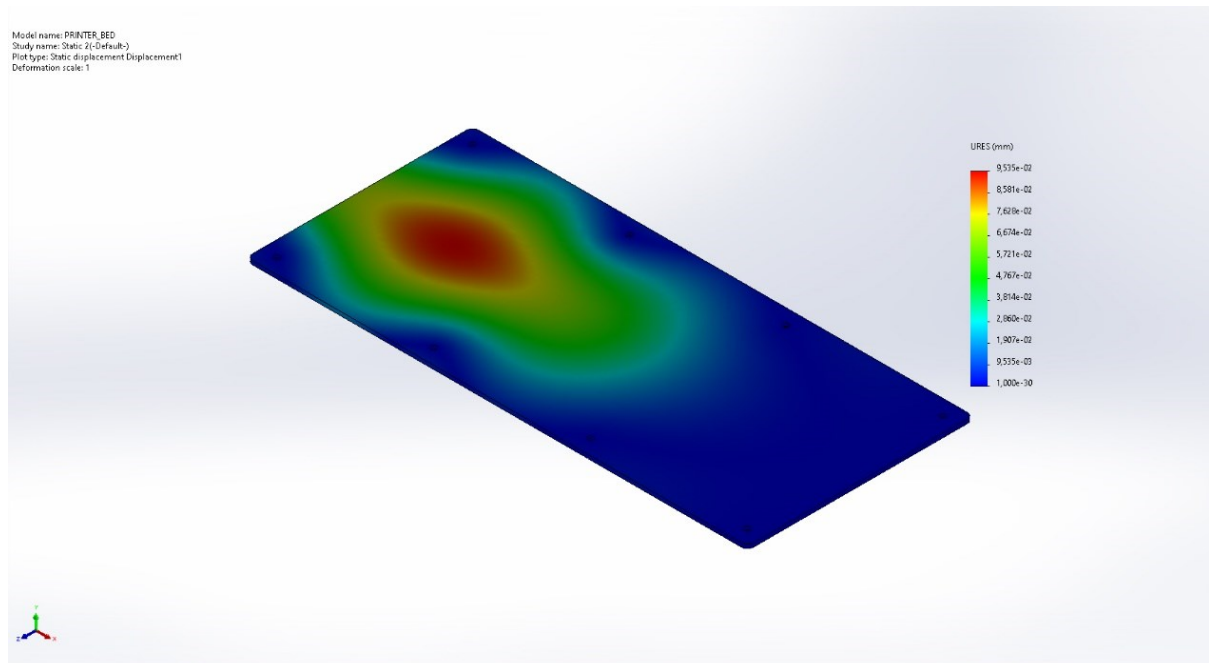


Σχήμα 3-29 Τάση Von Mises Υπο-σενάριο 2.8.5

Υπο-σενάριο 2.8.6:

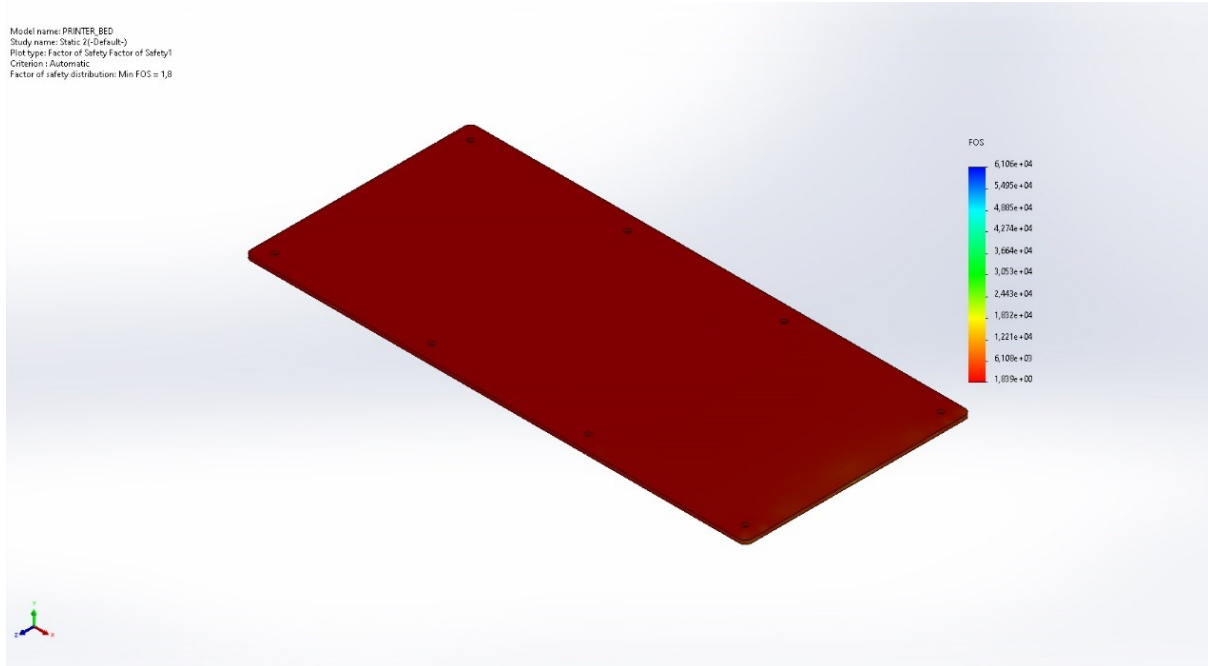
- Κατανομή φορτίου: Μη Ισοδύναμη, Σημεία στήριξης: 8, Πάχος πλάκας: 6mm

Κάθετη μετατόπιση (βύθιση)



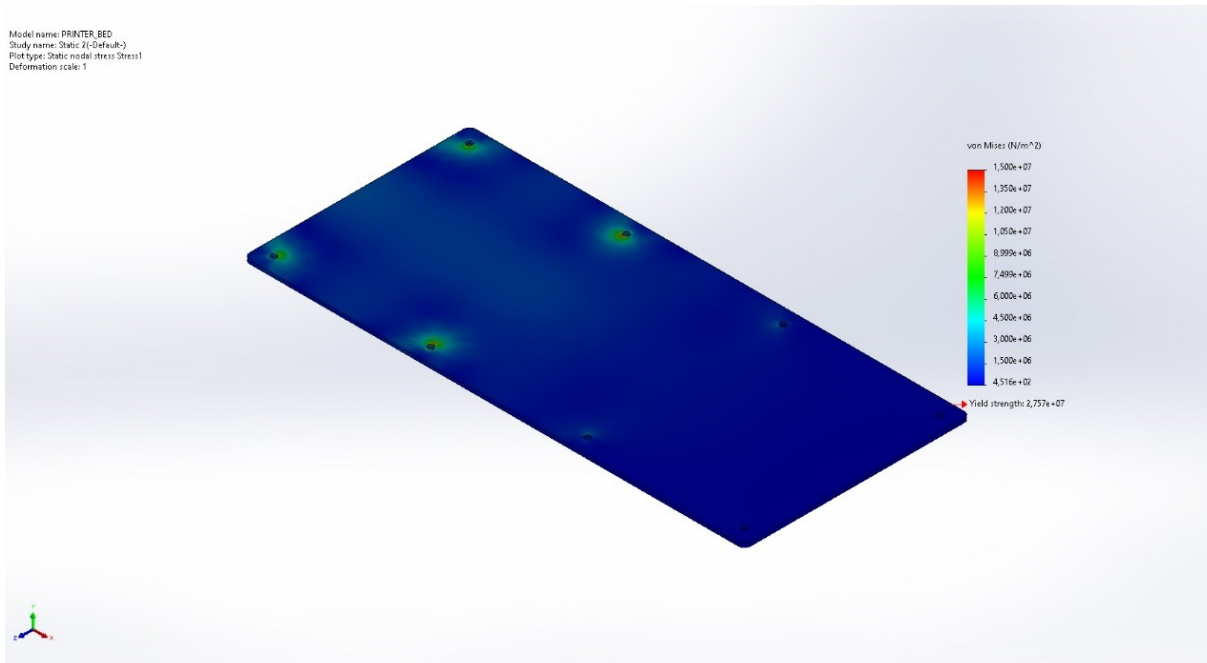
Σχήμα 3-30 Κάθετη μετατόπιση Υπο-σενάριο 2.8.6

Συντελεστής Ασφαλείας



Σχήμα 3-31 Συντελεστής Ασφαλείας Υπο-σενάριο 2.8.6

Τάση Von Mises



Σχήμα 3-32 Τάση Von Mises Υπο-σενάριο 2.8.6

Σενάρια Αποτελέσματα		Μη ισοδύναμα κατανεμημένο φορτίο	
		8 Σημεία Στήριξης	
		Πάχος πλάκας	
		5mm	6mm
Κάθετη μετατόπιση(URES) (mm)		$1,615 \cdot 10^{-1}$	$9,535 \cdot 10^{-2}$
Συντελεστής Ασφαλείας (FoS)	>1	1,3	1,8
Οριζόντια παραμόρφωση		$2,162 \cdot 10^{-4}$	$1,489 \cdot 10^{-4}$
Τάση Von Mises(N/m ²)	<2,757*10 ⁷	$2,087 \cdot 10^7$	$1,500 \cdot 10^7$

Πίνακας 12 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων μοντελοποίησης για Μη Ισοδύναμα κατανεμημένο φορτίο σε τράπεζα με 8 σημεία στήριξης

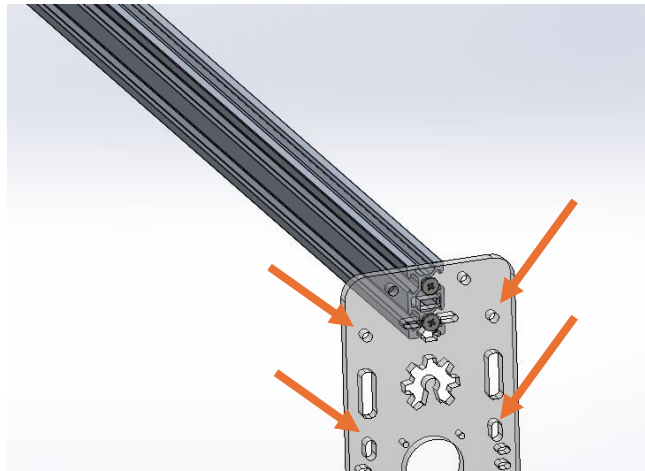
Συμπερασματικά για τα παραπάνω:

- A) Σχετικά με τον συντελεστή ασφαλείας και οι δύο περιπτώσεις φαίνεται να τον ικανοποιούν.
- B) Η κάθετη μετατόπιση και στις δύο περιπτώσεις κινείται σε σχετικά χαμηλά μεγέθη, αποδεκτά για την μελέτη.
- Γ) Η τάση Von Mises δεν ξεπερνιέται σε καμία περίπτωση.
- Δ) Και τα δύο υποσενάρια θεωρούνται αποδεκτά. Και πάλι για οικονομοτεχνικούς λόγους, το σενάριο των 5mm θεωρείται το βέλτιστο καθώς ικανοποιεί τα κριτήρια και είναι λιγότερο κοστοβόρο.

Για τους παραπάνω λόγους, σχετικά με την διάταξη της τράπεζας εκτύπωσης καταλήγεται πως θα επιλεγεί τράπεζα εκτύπωσης πάχους 5mm με 8 σημεία πρόσδεσης.

3.1.3 Άξονας μεταφοράς ακροφυσίου

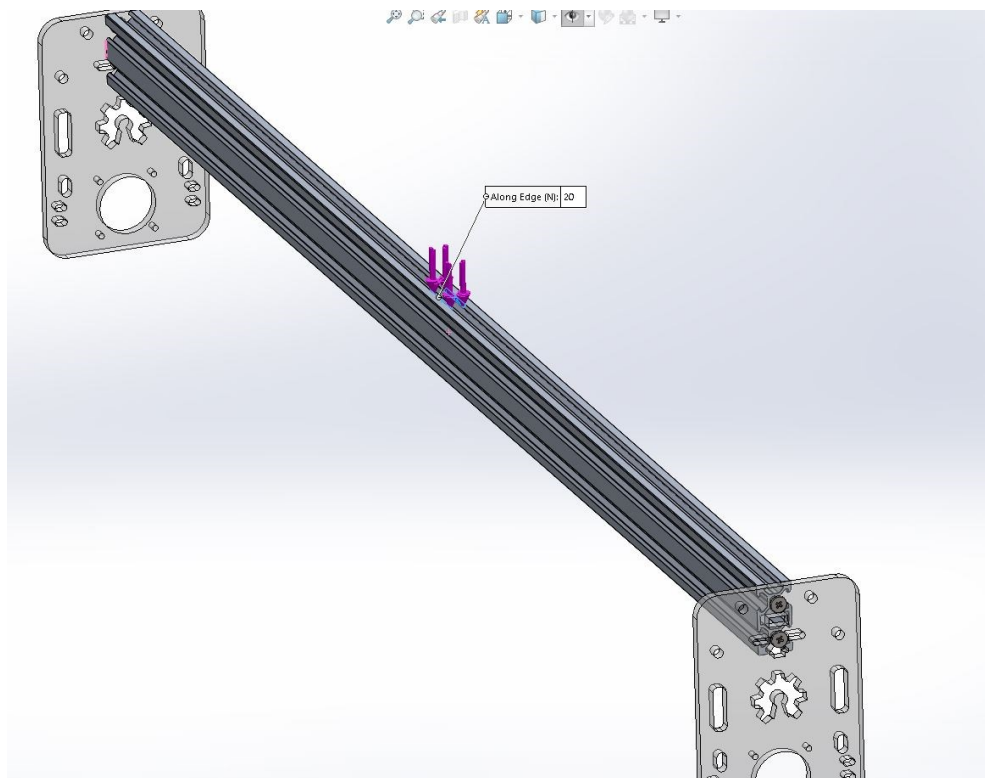
Σε αυτά τα Case Study, μελετήθηκαν οι θέσεις του ακροφυσίου, κατά μήκος του άξονα X, καθώς και η τυχόν παρέμβαση αυτών στην ομαλή λειτουργία του εκτυπωτή κατά σειρά λοιπόν και στην ποιότητα εκτύπωσης. Για την μελέτη αυτή φάνηκε πως αρκούν 2 πιθανά σενάρια: ένα για την διάταξη του ακροφυσίου στο μέσο του άξονα και ένα για την ακραία θέση. Μέσω των δύο αυτών σεναρίων θα φανεί εάν τελικά και πόσο επηρεάζει η προσθήκη της νέας διάταξης εξώθησης στον σχεδιασμό της διάταξης. Σε περιβάλλον προσομοίωσης, εισήχθη μόνο το προφίλ αλουμινίου του άξονα X με τις δύο πλάκες στις άκρα του. Ορίστηκαν σημεία πάκτωσης τα 4 σημεία στην κάθε πλάκα στην οποία προσδένονται οι οδηγό κύλισης.



Σχήμα 3-33 Σημεία ορισμού πάκτωσης

Εν συνεχεία ασκήθηκε δύναμη στους έσω κεκλιμένους άξονες του αλουμινένιου προφίλ, διότι εκεί είναι που ασκείται η πίεση μέσω των οδηγών κύλισης. Τέλος, όπως φαίνεται παρακάτω η ασκούμενη δύναμη είναι 20N. Αυτό προκύπτει υπολογίζοντας το βάρος της διάταξης του ακροφυσίου $\approx 2\text{kg}$, και πολλαπλασιάζοντας το με την επιτάχυνση της βαρύτητας 10m/s^2 . Σημειώνεται πως το βάρος της διάταξης εξώθησης σε καμία περίπτωση δεν θα φτάνει τα 2kg. Οι διατάξεις αυτές ζυγίζουν 0.5-1kg, αλλά για λόγους ασφαλείας και πάλι αυξήθηκε το βάρος για τις μοντελοποιήσεις. Παρακάτω φαίνονται τα δύο αυτά σενάρια:

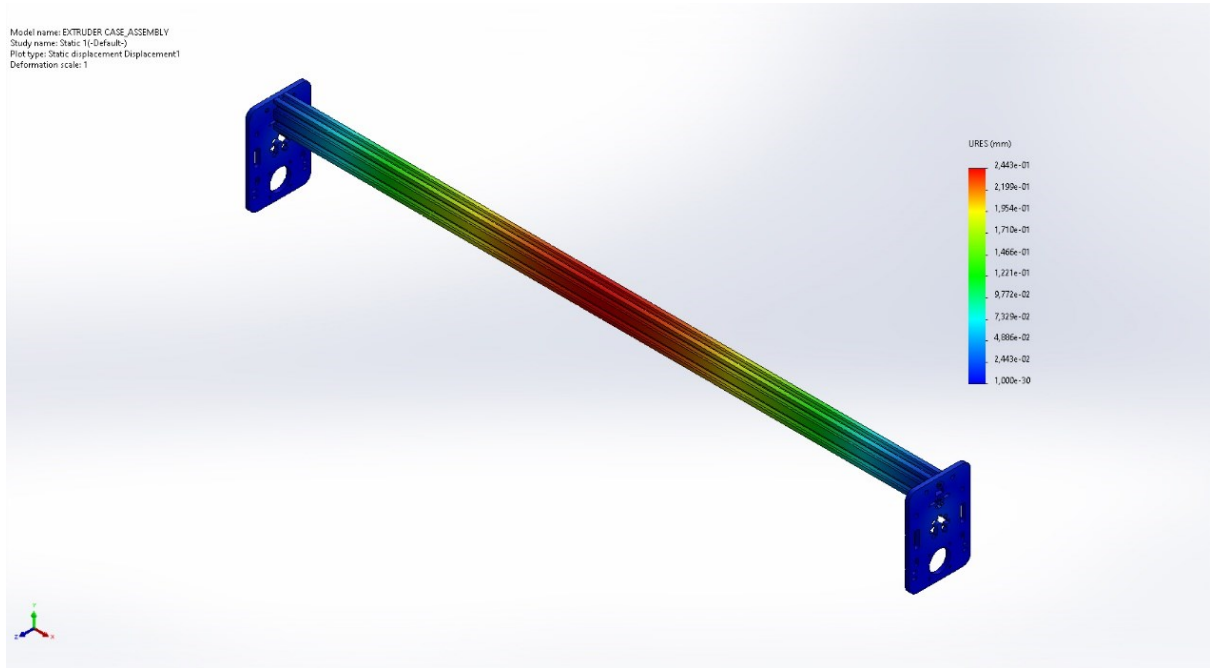
Θέση ακροφυσίου στο μέσο του άξονα.



Σχήμα 3-34 Θέση ακροφυσίου στο μέσο του άξονα X

Κάθετη μετατόπιση (βύθιση)

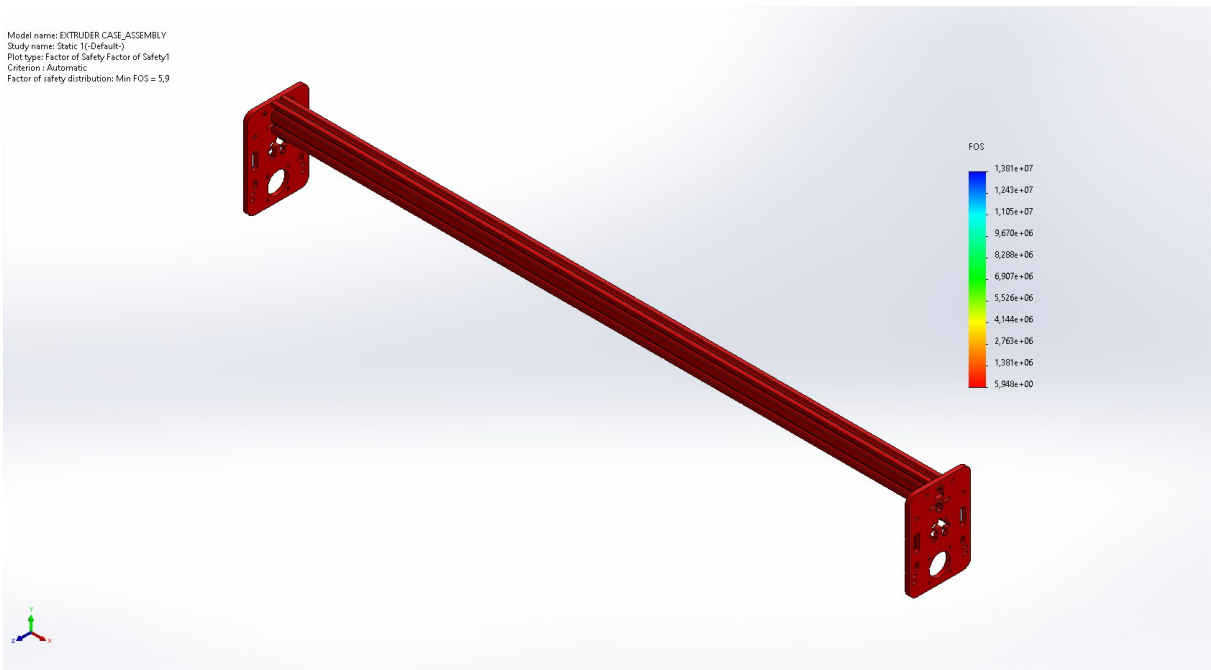
Model name: EXTRUDER_CASE_ASSEMBLY
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Static displacement (Displacement)
Deformation scale: 1



Σχήμα 3-35 Κάθετη μετατόπιση- Μέσο του άξονα X

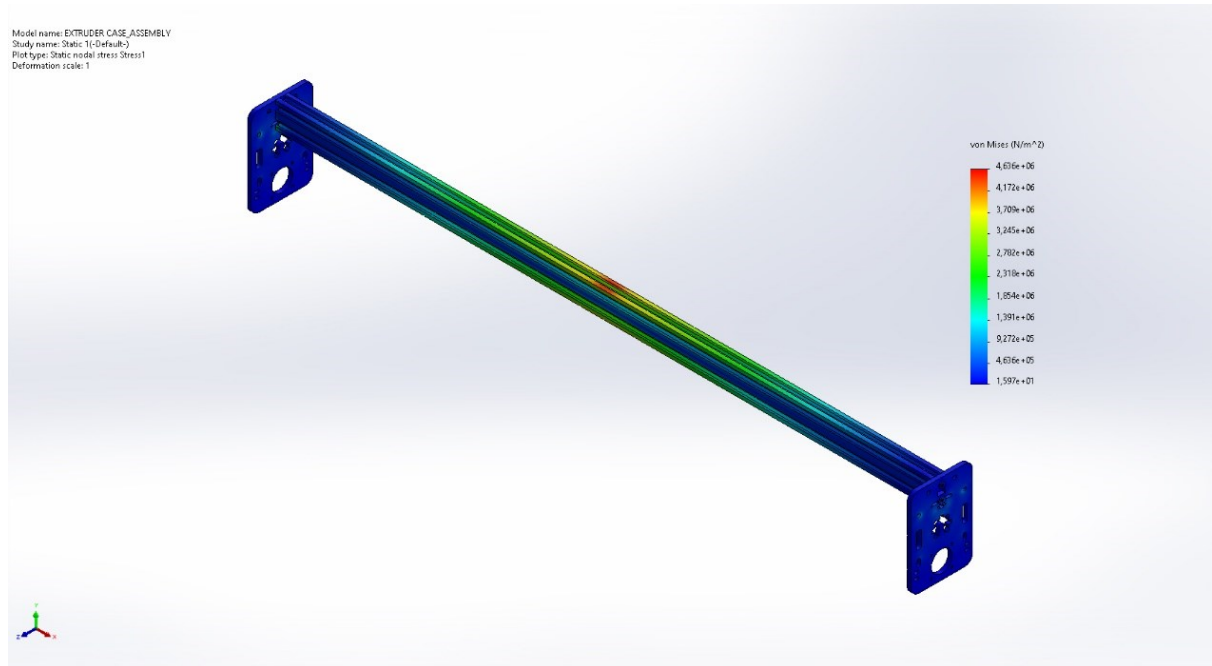
Συντελεστής Ασφαλείας

Model name: EXTRUDER_CASE_ASSEMBLY
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1
Criterion: Automatic
Factor of safety distribution: Min FOS = 5.9



Σχήμα 3-36 Συντελεστής Ασφαλείας-Μέσο του άξονα X

Τάση Von Mises



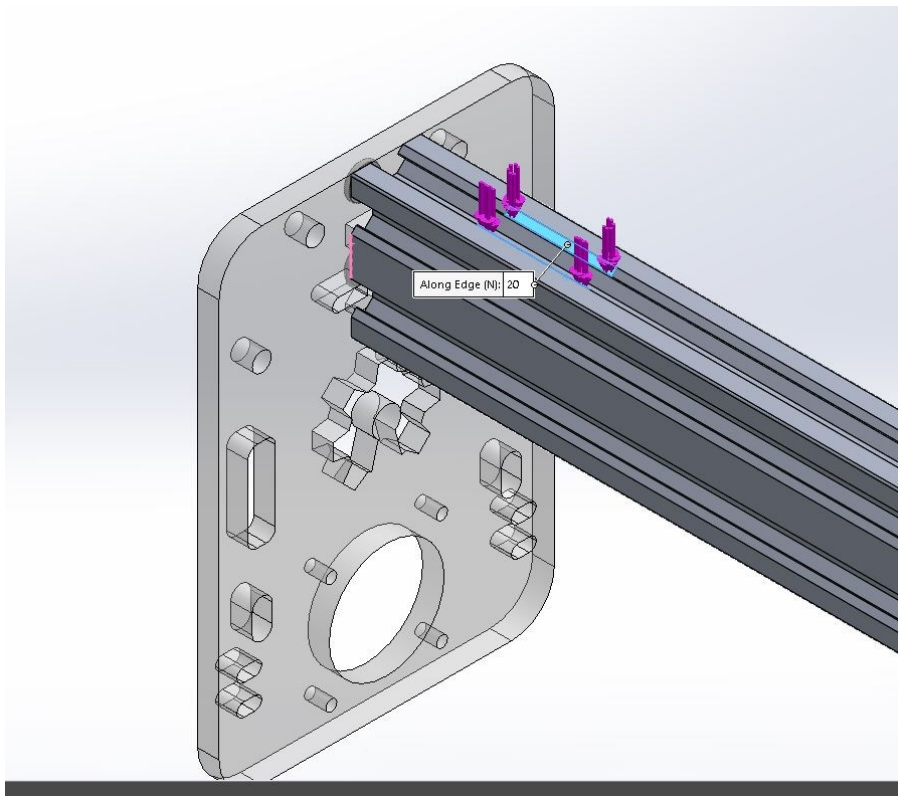
Σχήμα 3-37 Τάση Von Mises-Μέσο του άξονα X

Από τα παραπάνω διαγράμματα πηγάζουν τα εξής συμπεράσματα:

- A) Η κάθετη μετατόπιση (βύθιση) στο κέντρο του άξονα, εκεί δηλαδή που ασκείται η δύναμη ανέρχεται σε $2,443 \cdot 10^{-1} \text{mm}$, μέγεθος αμελητέο και ακίνδυνο, ενώ στον υπόλοιπο άξονα και κινούμενοι προς τα άκρα του, η τιμή κυμαίνεται από $2,199 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-30} \text{mm}$.
- B) Ο Συντελεστής Ασφαλείας έχει τιμή 5,9 και άρα αποτελεί επιτρεπτή επιλογή.
- Γ) Τέλος, η τάση Von Mises, είναι μέγιστη στο σημείο εφαρμογής της δύναμης και συγκεκριμένα $4,636 \cdot 10^6$.

Με βάση τα παραπάνω φαίνεται ξεκάθαρα πως η τοποθέτηση του ακροφυσίου στον οριζόντιο άξονα στην μεσαία θέση, δεν αποτελεί σε καμία περίπτωση ζήτημα επιβάρυνσης της συναρμογής, ούτε θα δημιουργήσει επιπλοκές κατά την εύρυθμη λειτουργία της διάταξης.

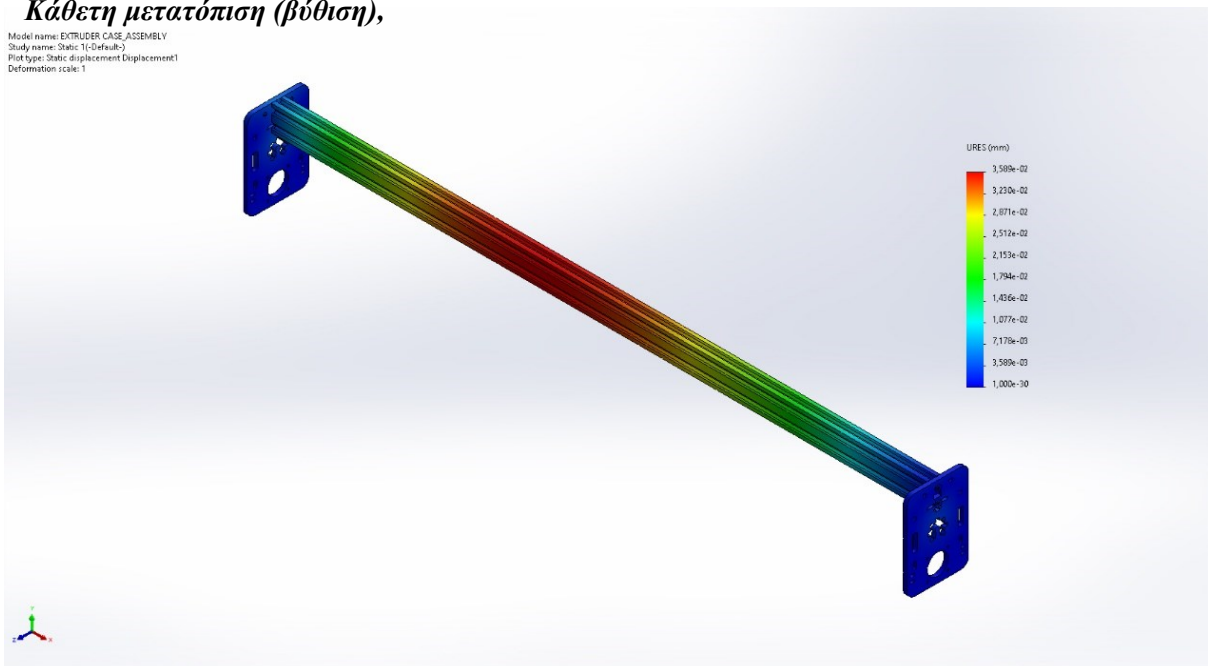
Θέση ακροφυσίου στον άκρο του άξονα



Σχήμα 3-38 Θέση ακροφυσίου στο άκρο του άξονα X

Κάθετη μετατόπιση (βύθιση),

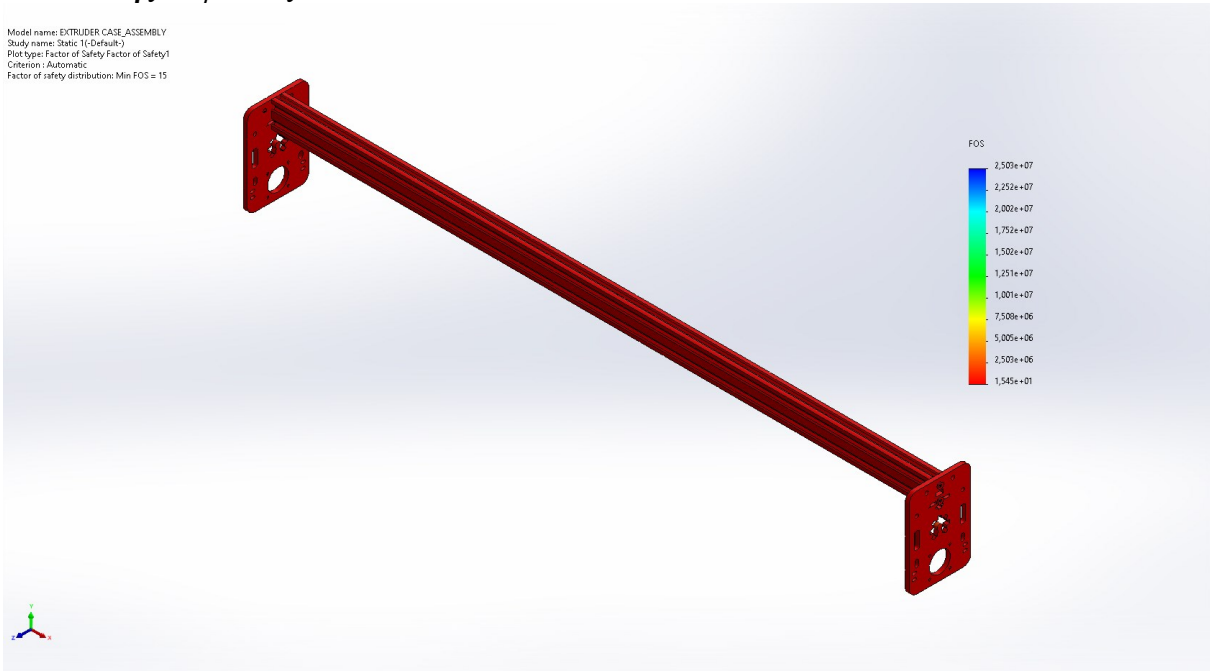
Model name: EXTRUDER_CASE_ASSEMBLY
Study name: Static 1(-Default)
Plot type: Static displacement (Displacement1)
Deformation scale: 1



Σχήμα 3-39 Κάθετη μετατόπιση- Άκρο του άξονα X

Συντελεστής Ασφαλείας

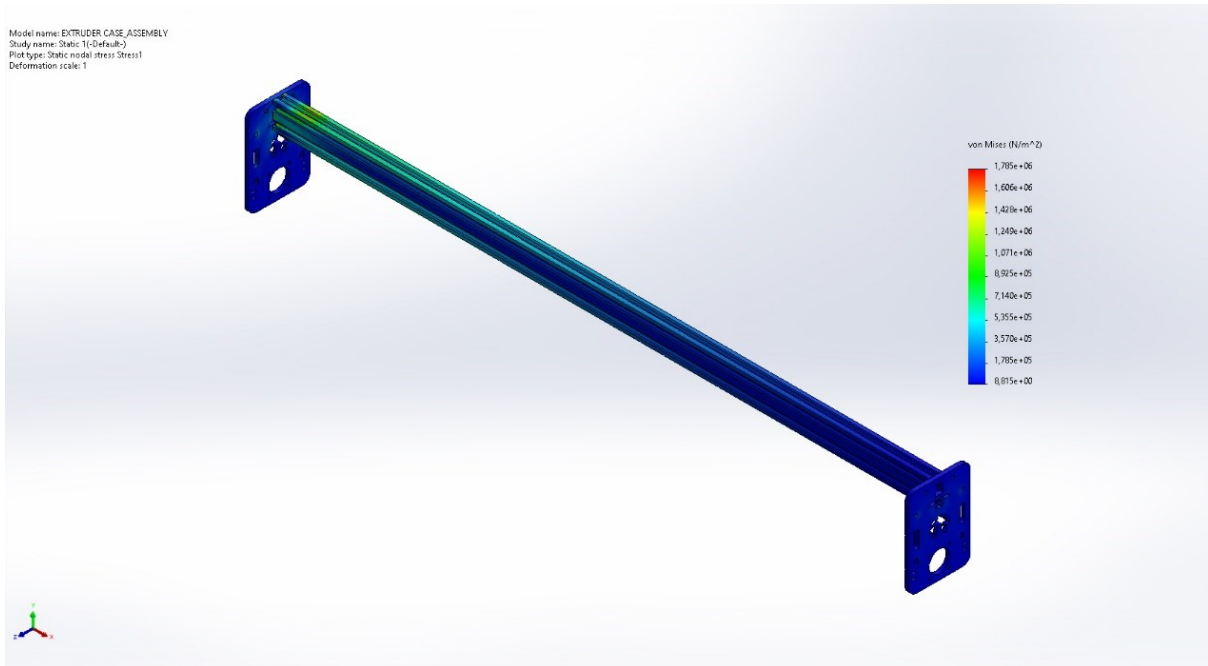
Model name: EXTRUDER_CASE_ASSEMBLY
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1
Criterion: Automatic
Factor of safety distribution: Min FOS = 15



Σχήμα 3-40 Συντελεστής Ασφαλείας - Άκρο του άξονα X

Τάση Von Mises

Model name: EXTRUDER_CASE_ASSEMBLY
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Static model stress Stress1
Deformation scale: 1



Σχήμα 3-41 Τάση Von Mises- Άκρο του άξονα X

Και σε αυτό το σενάριο, το μοτίβο προφανώς είναι το ίδιο, με τις διαφορές να προκύπτουν μονάχα στους αριθμούς. Όπως φαίνεται:

- A) Η βύθιση ανέρχεται στα $3,589 \cdot 10^{-2}$ mm, μέγεθος αρκετά μικρότερο από την πρώτη περίπτωση και λογικό αφού σε αυτήν την περίπτωση η δύναμη ασκείται πολύ πιο κοντά στο σημείο στήριξης, είτε μιλάμε για το δεξιό άκρο, είτε για το αριστερό.
- B) Ο Συντελεστής Ασφαλείας ανέρχεται στο 15, άρα και δεν αποτελεί σε καμία περίπτωση πρόβλημα.

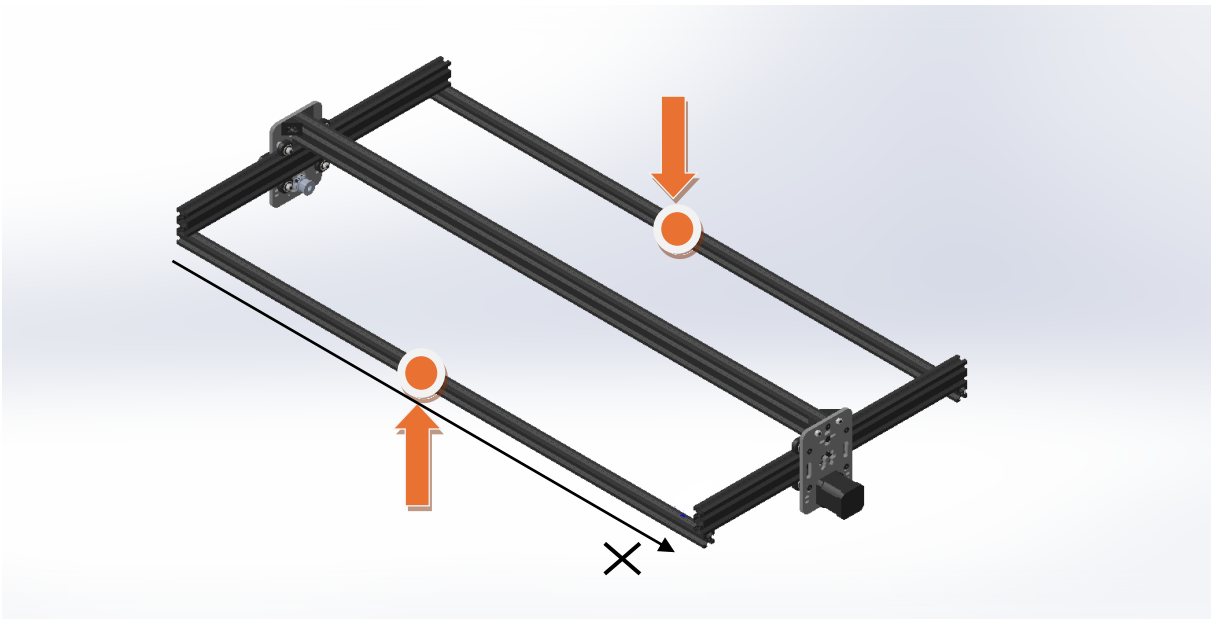
Γ) Τέλος και η τάση Von Mises, φαίνεται αρκετά μικρότερη, με τιμή $1,785 \cdot 10^6$, στοιχείο επίσης λογικό, αφού η τάση εφαρμόζεται πολύ κοντά στο σημείο πρόσδεσης.

Συνεπώς παρατηρείται πως κανένα πρόβλημα δεν θα προκύψει από την προσθήκη της διάταξης εξώθησης.

3.1.4 Τραπεζοειδείς κοχλίες

1) ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΩΝ ΚΟΧΛΙΩΝ

Σχετικά με τους τραπεζοειδείς κοχλίες κρίθηκε απαραίτητο η θέση που θα προσαρμοστούν στην διάταξη να είναι στο κέντρο του άξονα X.

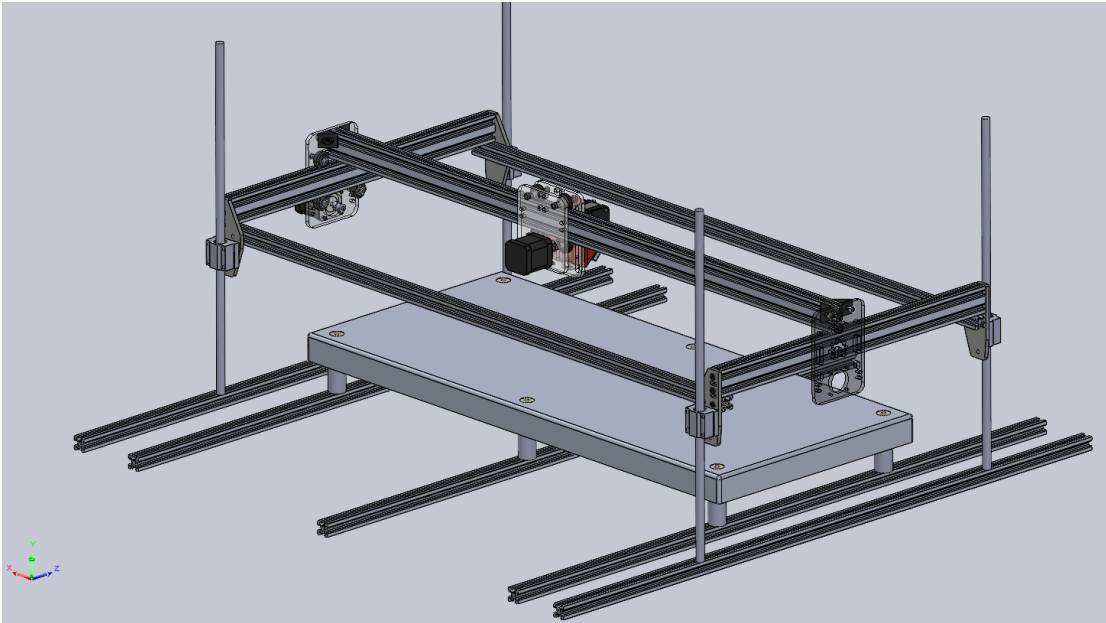


Σχήμα 3-42 Θέσεις πρόσδεσης με τραπεζοειδής κοχλίες

Η συλλογιστική πίσω από αυτό φαίνεται παρακάτω:

- Σε ενδεχόμενο χρήσης ενός τραπεζοειδούς κοχλία, σε μια γωνία του άξονα X, θα υπήρχε ισχυρό ενδεχόμενο στρέβλωσης της στήριξης από την μεριά που δεν διαθέτει κοχλία.
- Το ίδιο θα συμβεί και στον ενδεχόμενο χρήσης δυο κοχλιών στην ίδια πλευρά και απέναντι.
- Σε ενδεχόμενο χρήσης δύο τραπεζοειδών κοχλιών στις αντιδιαμετρικές άκρες του άξονα και πάλι ενδεχομένως να δημιουργούσε πρόβλημα, σε ενδεχόμενο όπου όλο το βάρος του εξωθητή βρισκόταν στην μια γωνία.
- Για προφανείς λόγους οι τραπεζοειδείς κοχλίες δεν μπορούν να τοποθετηθούν στον άξονα Y αφού εκεί κινείται το κινητό μέρος της πλατφόρμας.

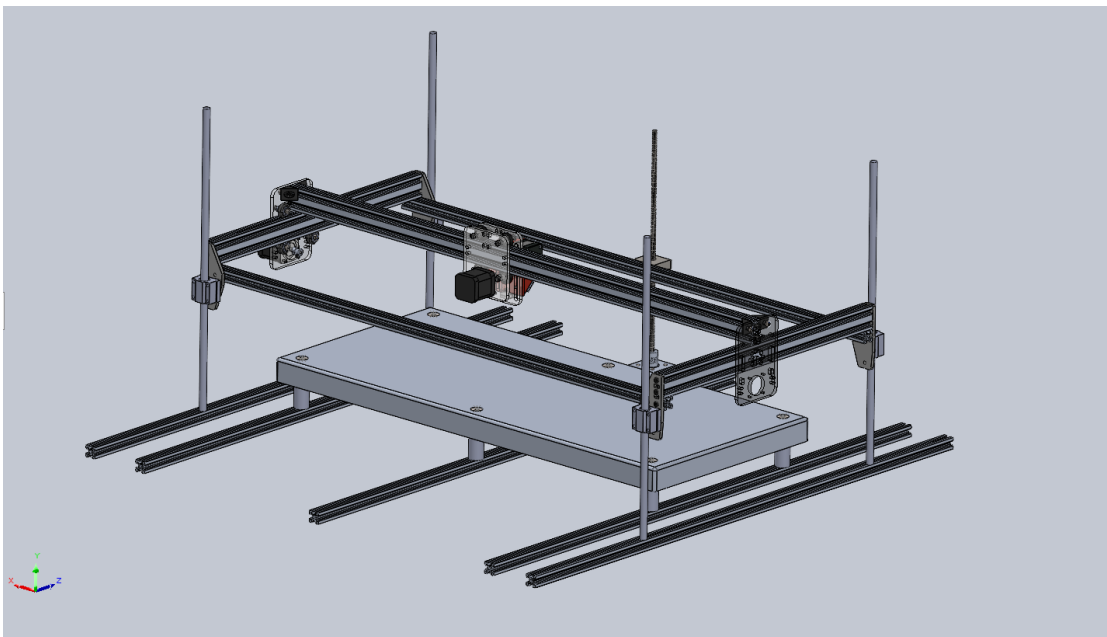
Σχετικά με τον αριθμό των τραπεζοειδών κοχλιών που θα αναλάβουν την κίνηση της συναρμογής στον άξονα Z, μελετήθηκαν 2 σενάρια.



Σχήμα 3-43 Μοντέλο πορείας εκτυπωτή πριν την προσθήκη τραπεζοειδών κοχλιών

Η γενική ιδέα της συναρμογής είναι πως η διάταξη ACRO, κινείται μέσω ενός ή παραπάνω τραπεζοειδών κοχλιών στον άξονα Z. Η κίνηση αυτή υποβοηθάται με χρήση γραμμικών οδηγών στις 4 άκρες της συναρμογής, που βοηθούν στην καλύτερη στήριξη και την αποφυγή διαφορών κατά την μετακίνηση στις εκάστοτε πλευρές. Στην παρακάτω προσομοίωση υπολογίστηκε κατά πόσο ένας ή δύο τραπεζοειδείς κοχλίες μπορούν να υποστηρίξουν το βάρος της διάταξης ACRO, χωρίς να οδηγηθούν σε αστοχία. Η προσομοίωση πραγματοποιείται για στατική θέση της διάταξης, με το κινητό προφίλ αλουμινίου στο κέντρο και χωρίς το βάρος της διάταξης εξώθησης. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης σχεδιάστηκε τεμάχιο τετραγωνικής διατομής το οποίο και τοποθετήθηκε στο άκρο των τραπεζοειδών κοχλιών. Κάθετα στο τεμάχιο ασκήθηκε δύναμη ίση με το βάρος της ACRO.

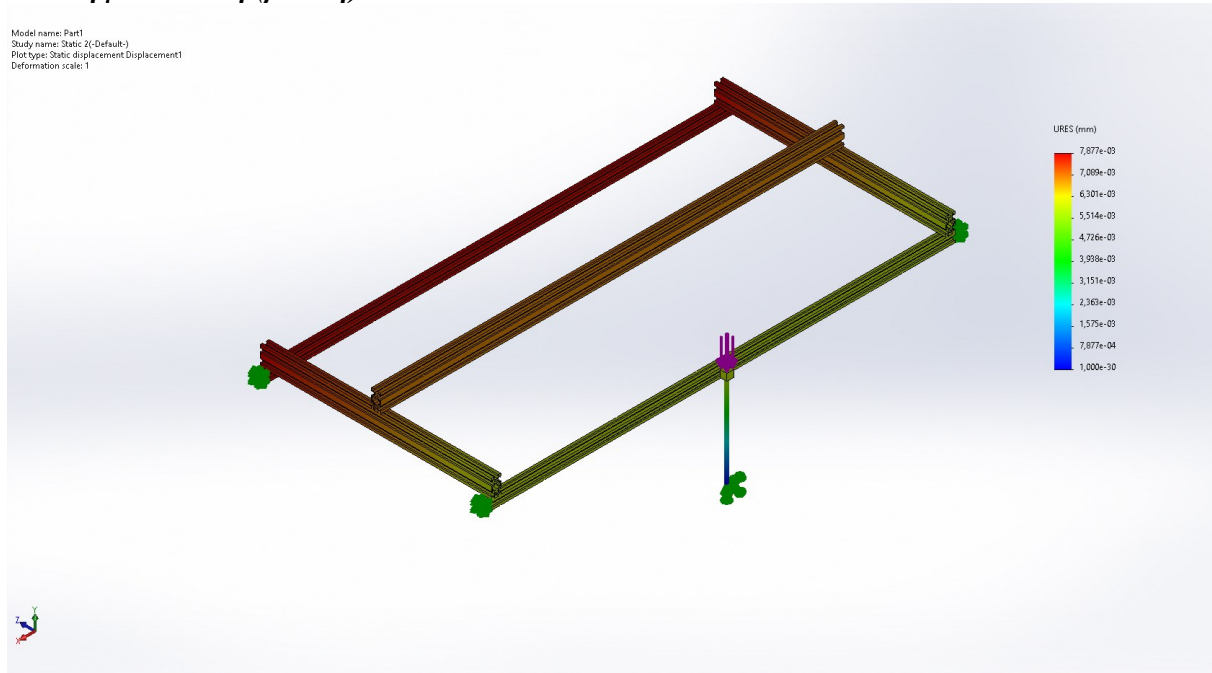
Περίπτωση 1: (1 τραπεζοειδής κοχλίας Φ8mm)



Σχήμα 3-44 Μοντελοποίηση διάταξης εκτυπωτή σε συνεργασία με γραμμικούς οδηγούς και ενός τραπεζοειδούς κοχλία Φ8mm

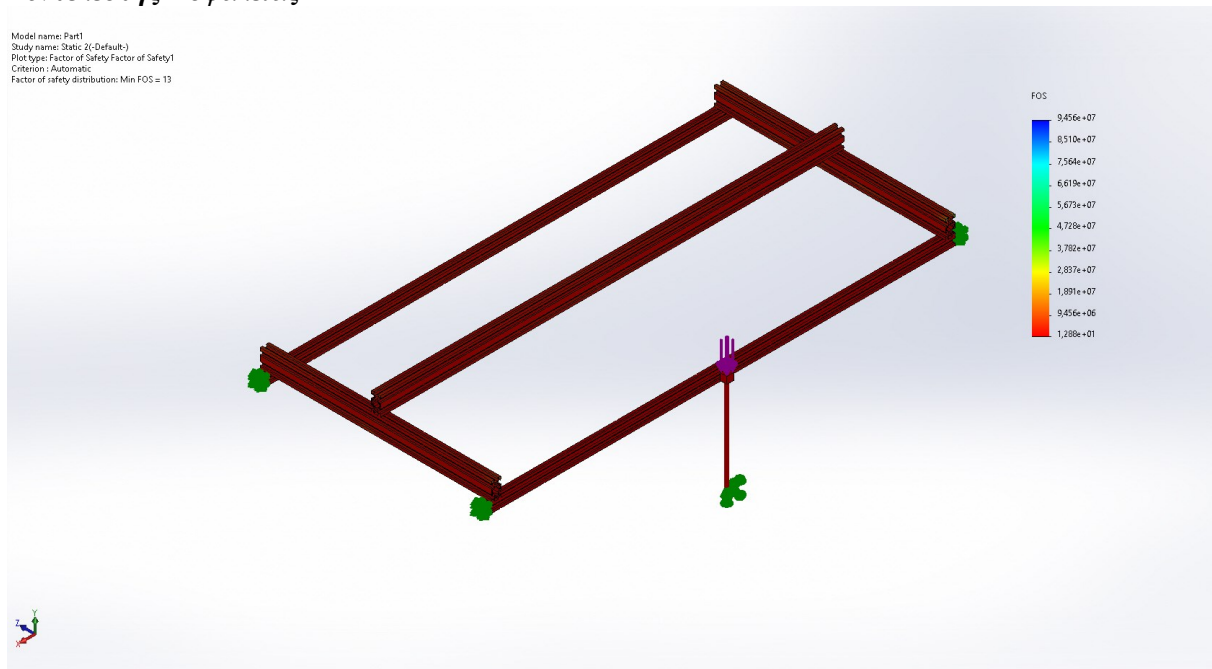
Παρακάτω φαίνονται οι υπολογισμοί σε περιβάλλον SolidWorks.

Κάθετη μετατόπιση (βύθιση)



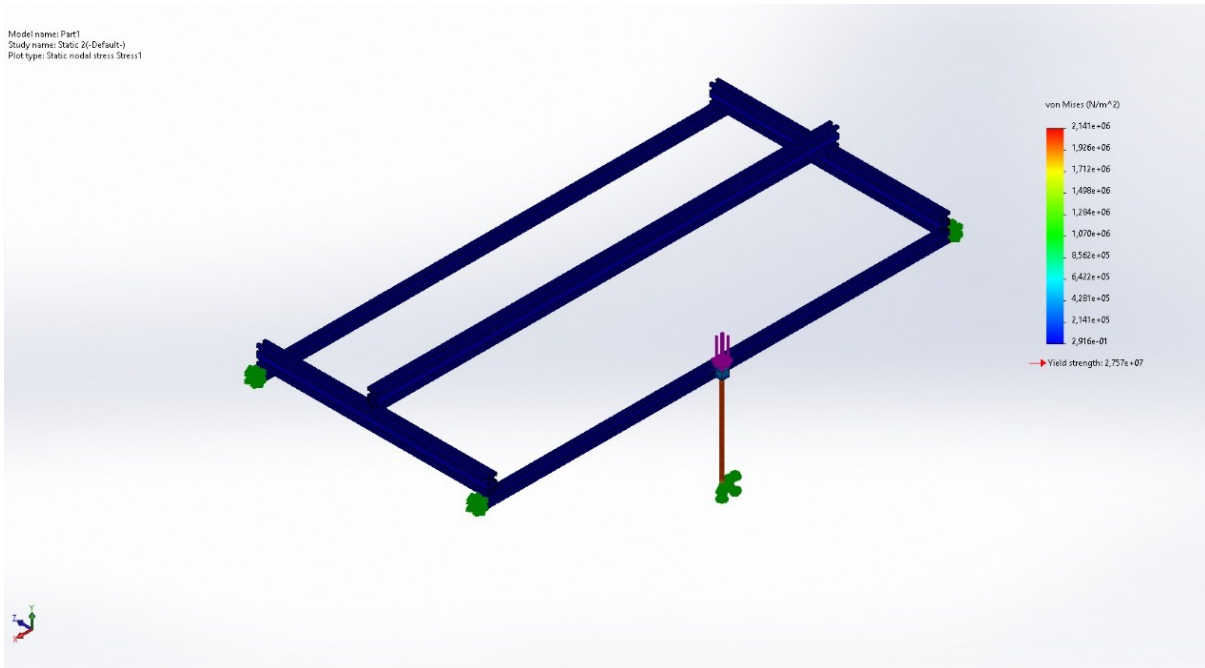
Σχήμα 3-45 Κάθετη μετατόπιση- 1 τραπεζοειδής κοχλίας Φ8mm

Συντελεστής Ασφαλείας



Σχήμα 3-46 Συντελεστής Ασφαλείας- 1 τραπεζοειδής κοχλίας Φ8mm

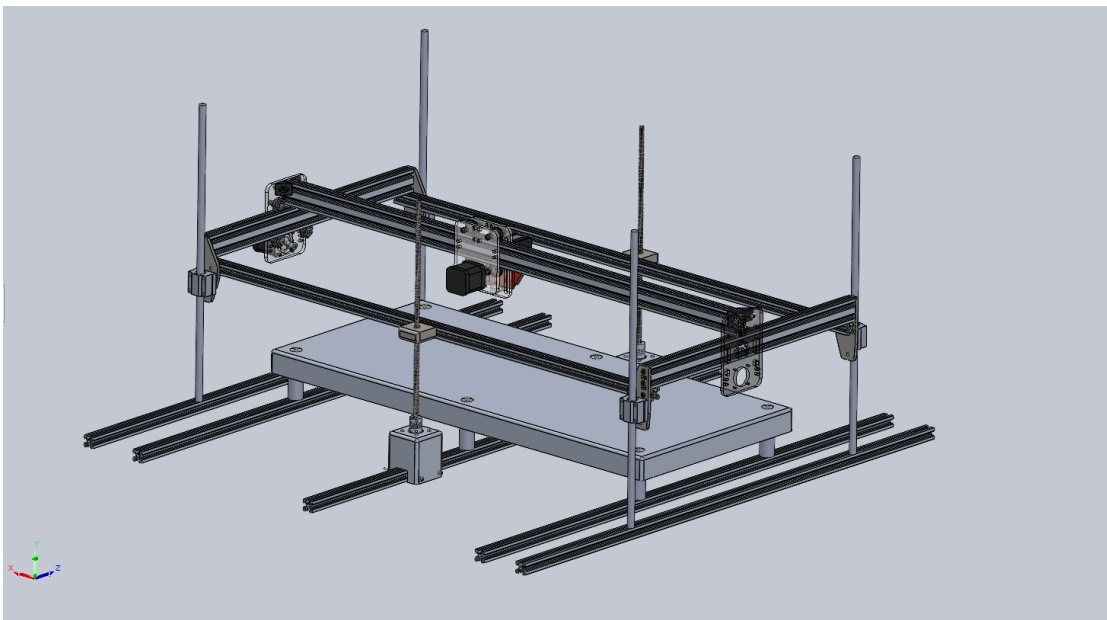
Τάση Von Mises



Σχήμα 3-47 Τάση Von Mises-1 τραπεζοειδής κοιλίας Φ8mm

Περίπτωση 2: (2 τραπεζοειδείς κοιλίες Φ8mm)

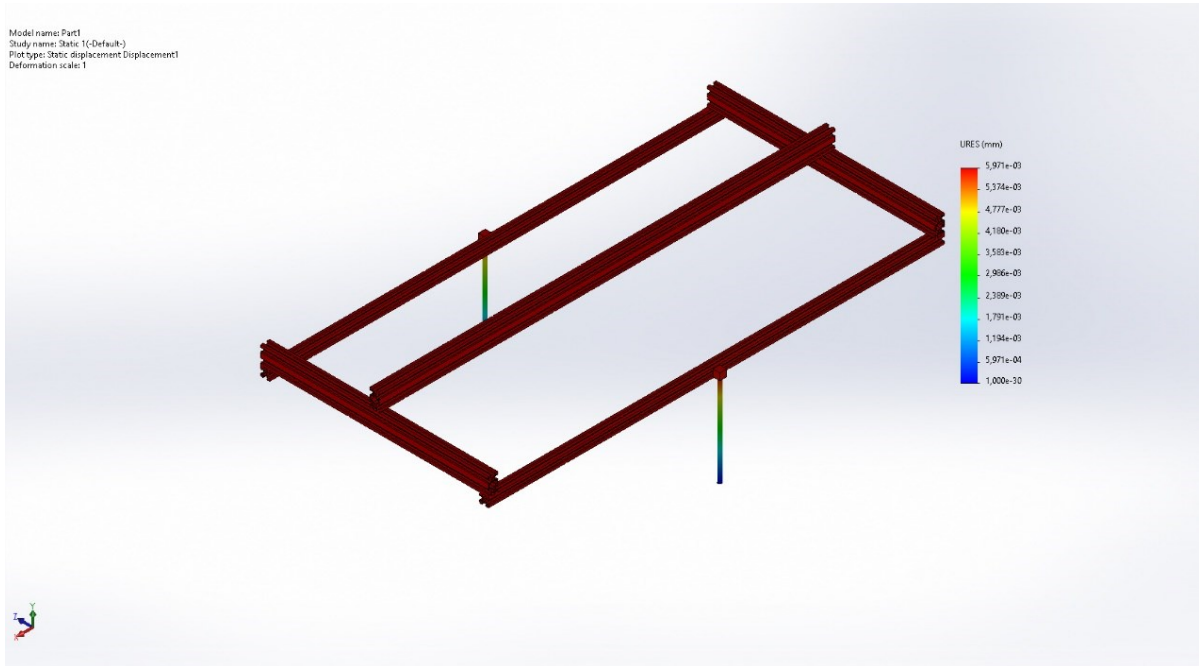
Στο δεύτερο σενάριο τοποθετήθηκε ένας τραπεζοειδής κοιλίας σε κάθε μεριά της συναρμογής για να μειωθεί και να εξισσοροπιστεί αυτή η επιβάρυνση.



Σχήμα 3-48 Μοντελοποίηση διάταξης εκτυπωτή σε συνεργασία με γραμμικούς οδηγούς και δύο τραπεζοειδών κοιλιών Φ8mm

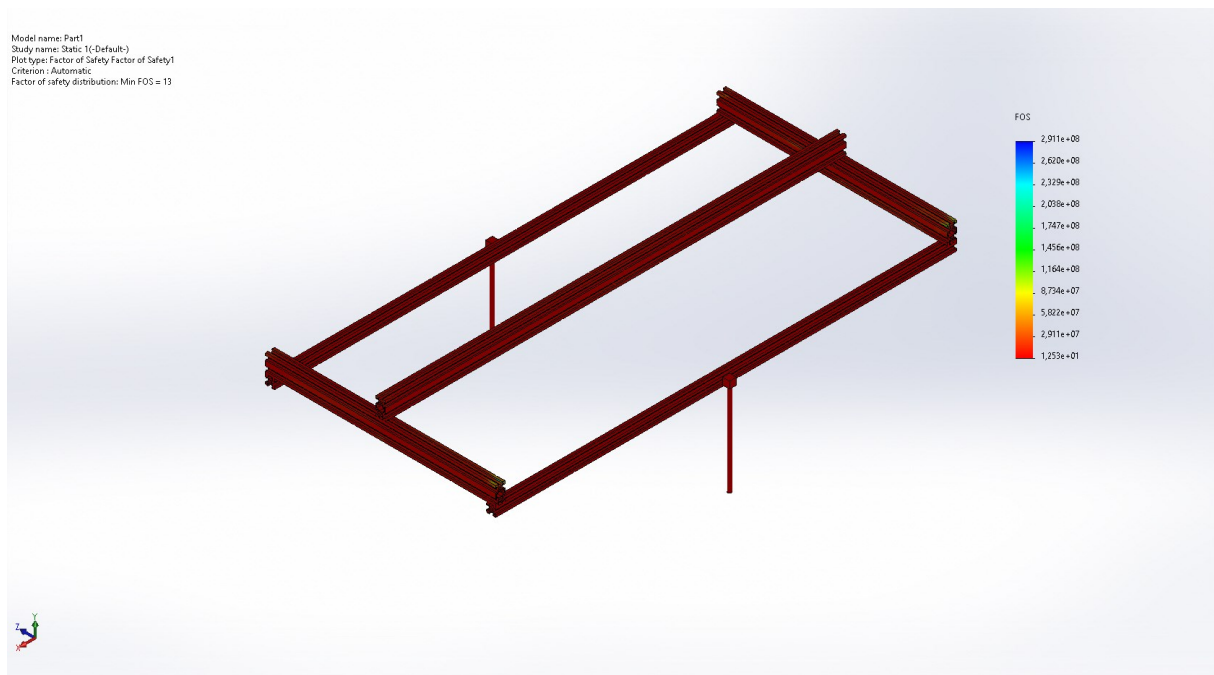
Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα:

Κάθετη μετατόπιση (βύθιση)



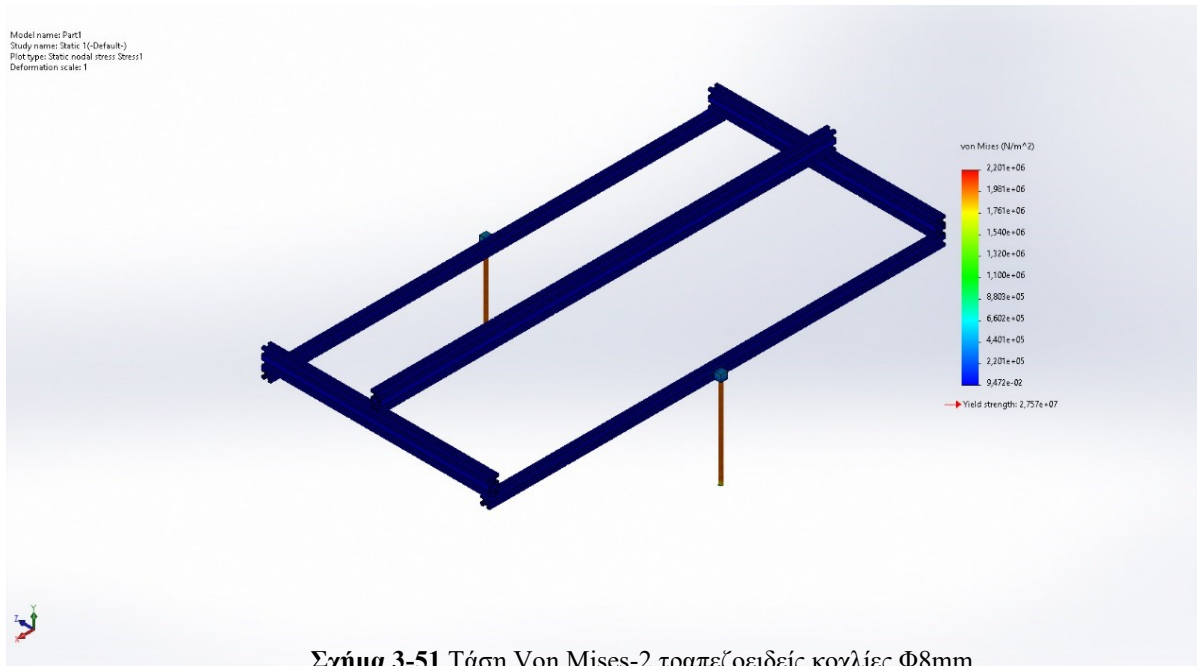
Σχήμα 3-49 Κάθετη μετατόπιση-2 τραπεζοειδείς κοχλίες Φ8mm

Συντελεστής Ασφαλείας



Σχήμα 3-50 Συντελεστής Ασφαλείας -2 τραπεζοειδείς κοχλίες Φ8mm

Τάση Von Mises



Σχήμα 3-51 Τάση Von Mises-2 τραπεζοειδείς κοχλίες Φ8mm

Παρατηρείται πως και στα δύο σενάρια, δεν θα οδηγηθεί σε αστοχία η συναρμογή. Καθαρὰ στατικά φαίνεται πως είτε ένας είτε δύο τραπεζοειδείς κοχλίες μπορούν με επιτυχία να υποστηρίξουν το βάρος της ACRO. Προφανώς στην περίπτωση 2 κοχλιών όμως θα αποφευχθούν ενδεχόμενα ζητήματα ανομοιομορφιών στην κίνηση, άρα και θεωρείται βέλτιστη επιλογή. Στην επόμενη προσομοίωση θα μελετηθεί η αντοχή των κοχλιών σε ακραίες θέσεις του κινητού προφίλ και της διάταξης εξώθησης. Εδώ πάρθηκε υπόψιν τόσο το βάρος της διάταξης ACRO, όσο και το βάρος της διάταξης εξώθησης και λήφθηκαν δεδομένα για ακραίες θέσεις.

II) ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΩΝ ΚΟΧΛΙΩΝ

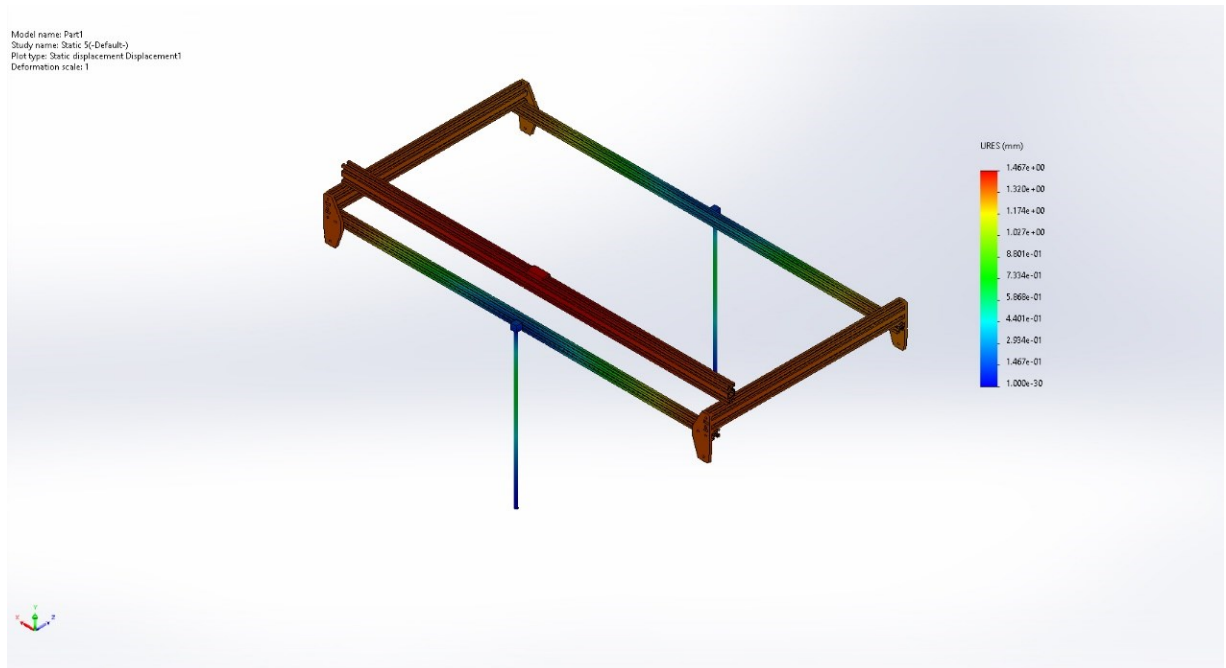
Στην μελέτη 3.I. φάνηκε πως δυο τραπεζοειδείς κοχλίες διαμέτρου 8mm, είναι αρκετοί για την στήριξη της συναρμογής. Στην παρούσα μελέτη (3.II), θα υπολογιστεί εάν οι συγκεκριμένοι κοχλίες μπορούν σε κάθε χρονική στιγμή και για κάθε πιθανή θέση του ακροφυσίου να προσδώσουν επαρκή στήριξη στην συναρμογή. Για τις ανάγκες της μελέτης σχεδιάστηκε τρισδιάστατο αντικείμενο τετραγωνικής διατομής, το οποίο αντιπροσωπεύει την διάταξη του ακροφυσίου. Εν συνεχεία ασκήθηκε δύναμη 20N πάνω σε αυτό που υποκαθιστά το βάρος του ακροφυσίου ($2\text{kg} \cdot 10 \text{ m/sec}^2$). Ακόμη ασκήθηκε δύναμη στο εκάστοτε προφίλ της ACRO, που αντιπροσωπεύει το βάρος της συναρμογής. Αυτή η μέθοδος επιλέχθηκε προκειμένου να παρασταθούν όσο το δυνατόν ακριβέστερα οι δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στην συναρμογή.

Παρακάτω φαίνεται σχηματικά ο σκοπός της μελέτης:

- Σε πρώτη φάση πραγματοποιήθηκε μελέτη για δύο διαφορετικές πιθανές θέσεις του ακροφυσίου στους άξονες XY, λαμβάνοντας ως διάμετρο την υπάρχουσα (8mm). Παρακάτω φαίνονται οι θέσεις αυτές καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

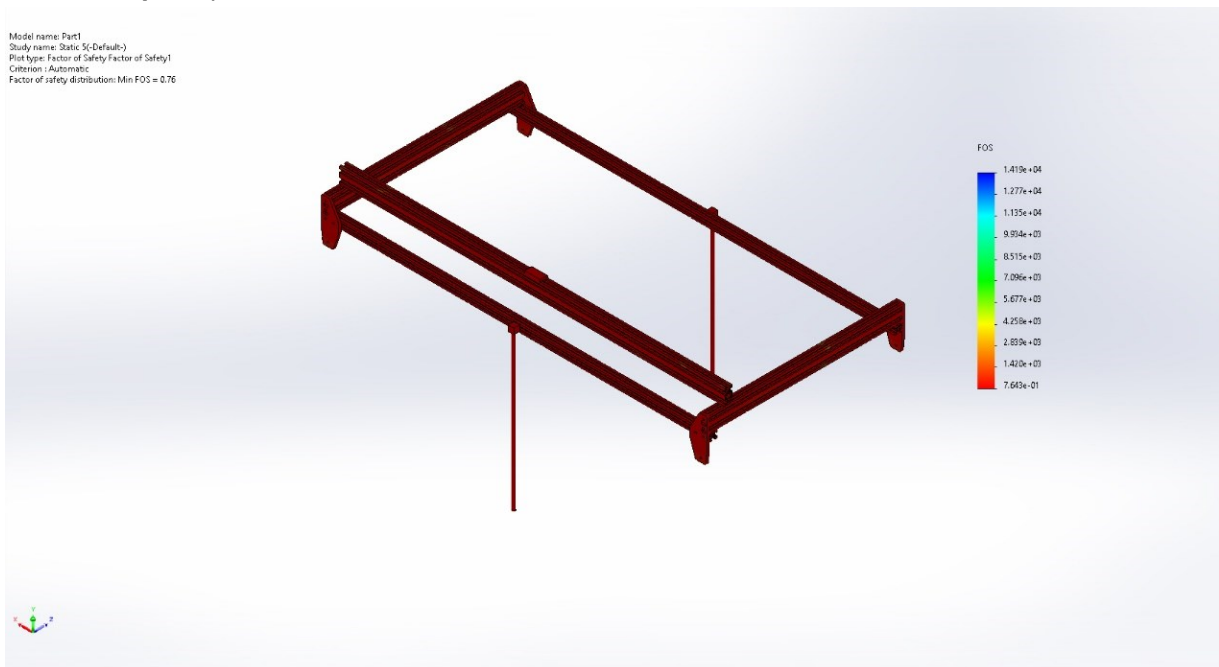
Διάμετρος κοχλιών:	8mm
Θέση ακροφυσίου:	Πλησίον του κοχλία

Κάθετη μετατόπιση (βύθιση),



Σχήμα 3-52 Κάθετη μετατόπιση- Διάμετρος 8mm- Θέση ακροφυσίου: Πλησίον του κοχλία

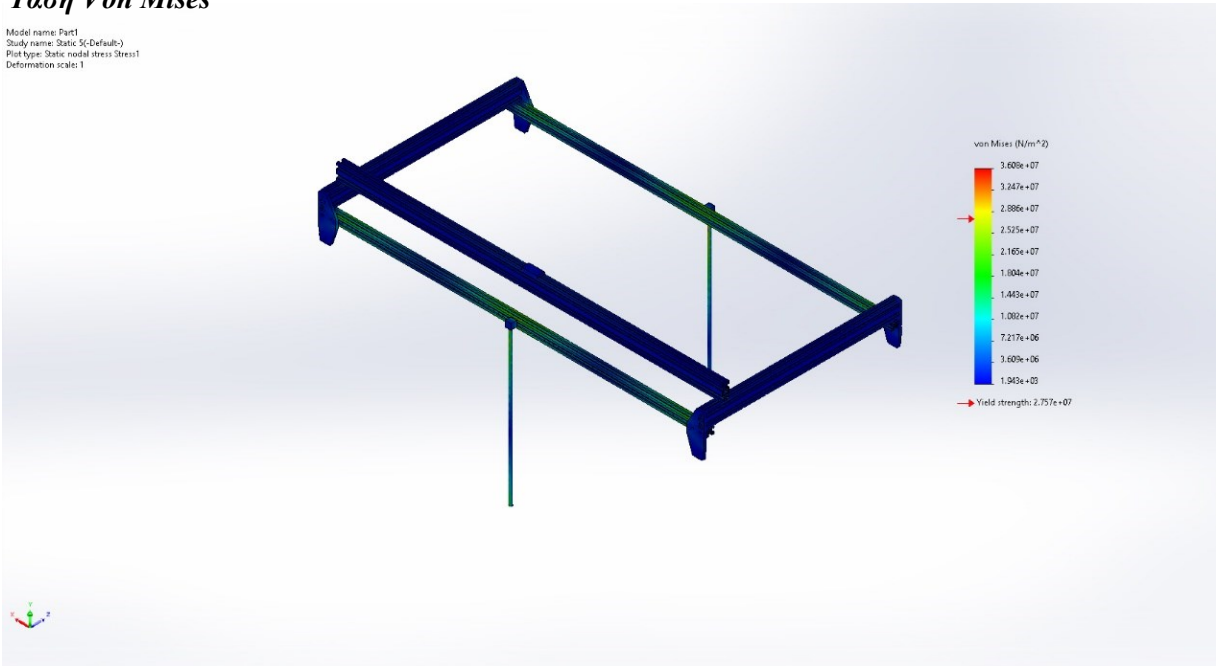
Συντελεστής Ασφαλείας



Σχήμα 3-53 Συντελεστής Ασφαλείας- Διάμετρος 8mm- Θέση ακροφυσίου: Πλησίον του κοχλία

Τάση Von Mises

Model name: Part1
Study name: Static 5(-Default-)
Plot type: Static model stress (Stress1)
Deformation scale: 1



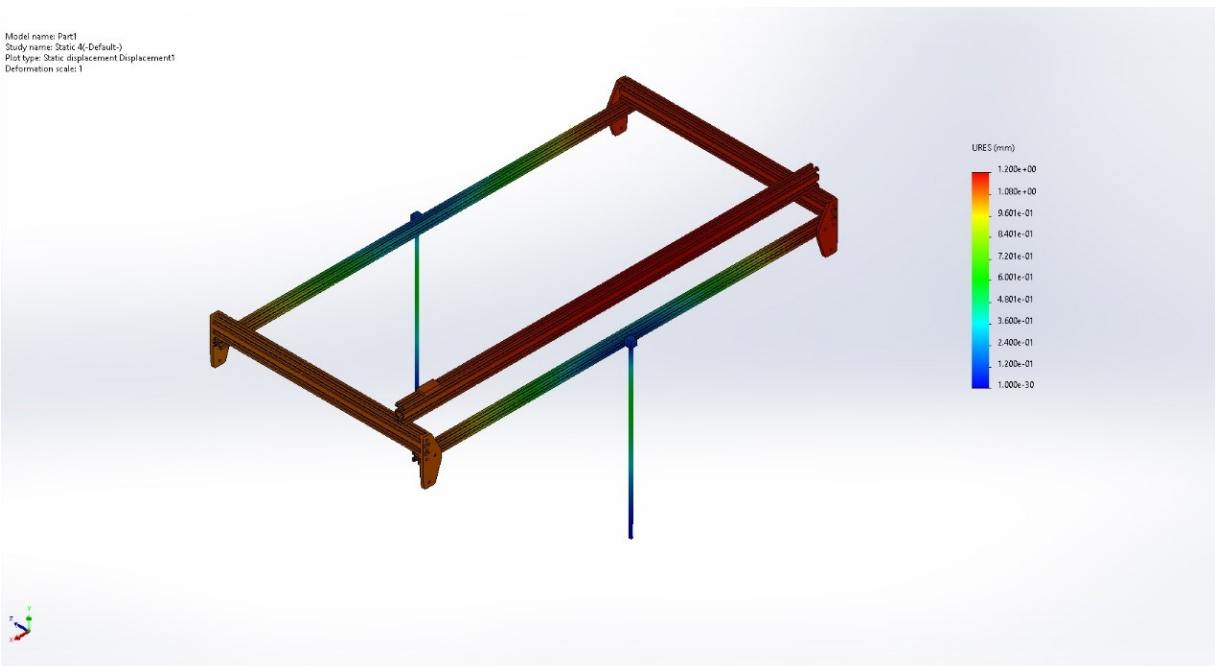
Σχήμα 3-54 Τάση Von Mises- Διάμετρος 8mm- Θέση ακροφυσίου: Πλησίον του κοχλία

- Επίσης πραγματοποιήθηκε ο ίδιος υπολογισμός για την δεύτερη πιθανή θέση του ακροφυσίου:

Διάμετρος κοχλιών:	8mm
Θέση ακροφυσίου:	Πλησίον της ένωσης των αξόνων XY

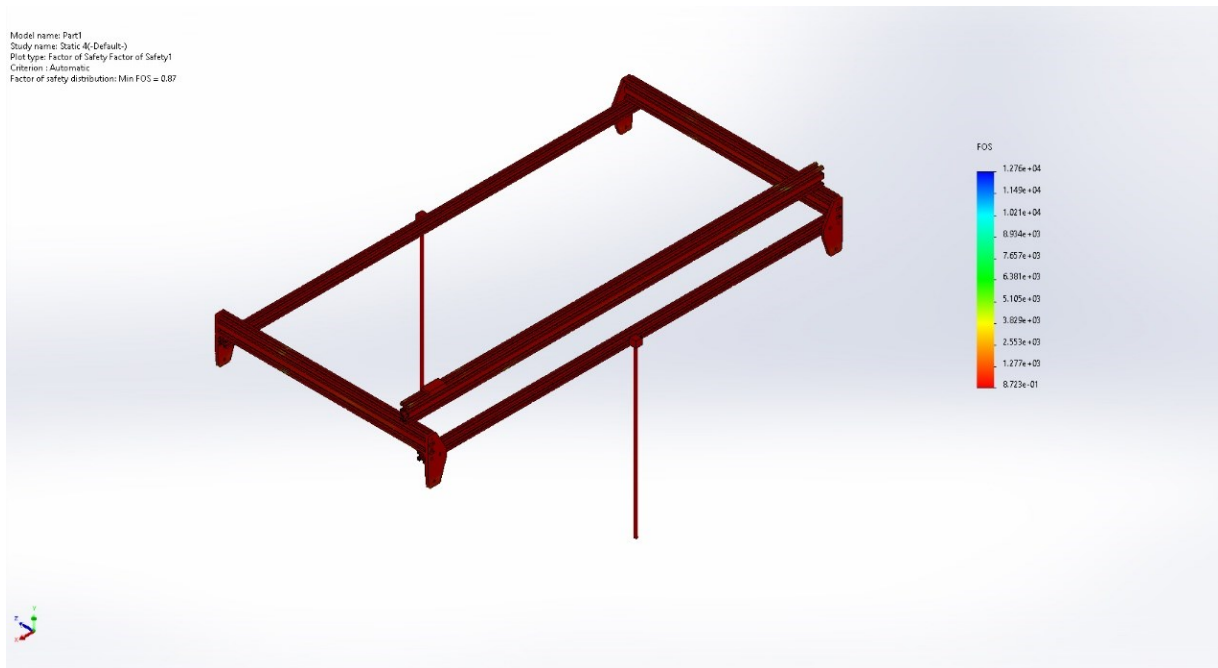
Κάθετη μετατόπιση (βύθιση),

Model name: Part1
Study name: Static 4(-Default-)
Plot type: Static displacement (Displacement1)
Deformation scale: 1



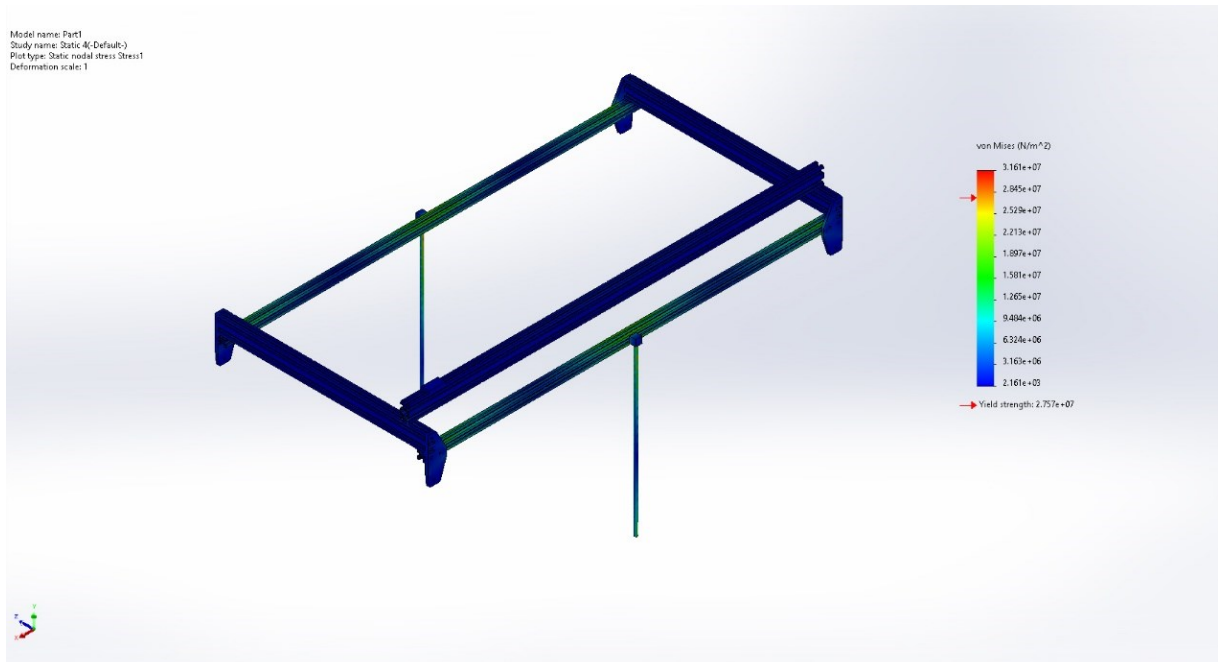
Σχήμα 3-55 Κάθετη μετατόπιση- Διάμετρος 8mm- Θέση ακροφυσίου: Πλησίον της ένωσης των αξόνων XY

Συντελεστής Ασφαλείας



Σχήμα 3-56 Συντελεστής Ασφαλείας- Διάμετρος 8mm- Θέση ακροφυσίου: Πλησίον της ένωσης των αξόνων XY

Τάση Von Mises



Σχήμα 3-57 Τάση Von Mises-Διάμετρος 8mm- Θέση ακροφυσίου: Πλησίον της ένωσης των αξόνων XY

Συμπερασματικά:

A) Παρατηρείται εύκολα πως ενώ για τους ίδιους κοχλίες στην μελέτη 3I, η προσομοίωση έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά την στήριξη της συναρμογής με δοσμένη θέση του

ακροφυσίου στο κέντρο της ACRO, τώρα τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά. Φαίνεται ξεκάθαρα πως σε μια μετατοπισμένη θέση του ακροφυσίου δίνει πλέον μη ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Β) Ο Συντελεστής Ασφαλείας και για τις δύο περιπτώσεις βρίσκεται κάτω του ορίου, 0,76 και 0,87 αντίστοιχα. Με αυτά τα αποτελέσματα σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί ασφαλής η συναρμογή.

Γ) Το όριο διαρροής ανέρχεται στα $2,757 \cdot 10^7$ N/m². Η τάση τείνει να φτάσει στο όριο αυτό στα σημεία πρόσδεσης των κοχλιών, στα σημεία ένωσης των αξόνων X και Y καθώς και κατά μήκος των τραπεζοειδών κοχλιών. Το περιθώριο αυτό φαίνεται πως δεν είναι αρκετό για να θεωρηθεί ασφαλής η συναρμογή. Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα και στο δεύτερο σενάριο.

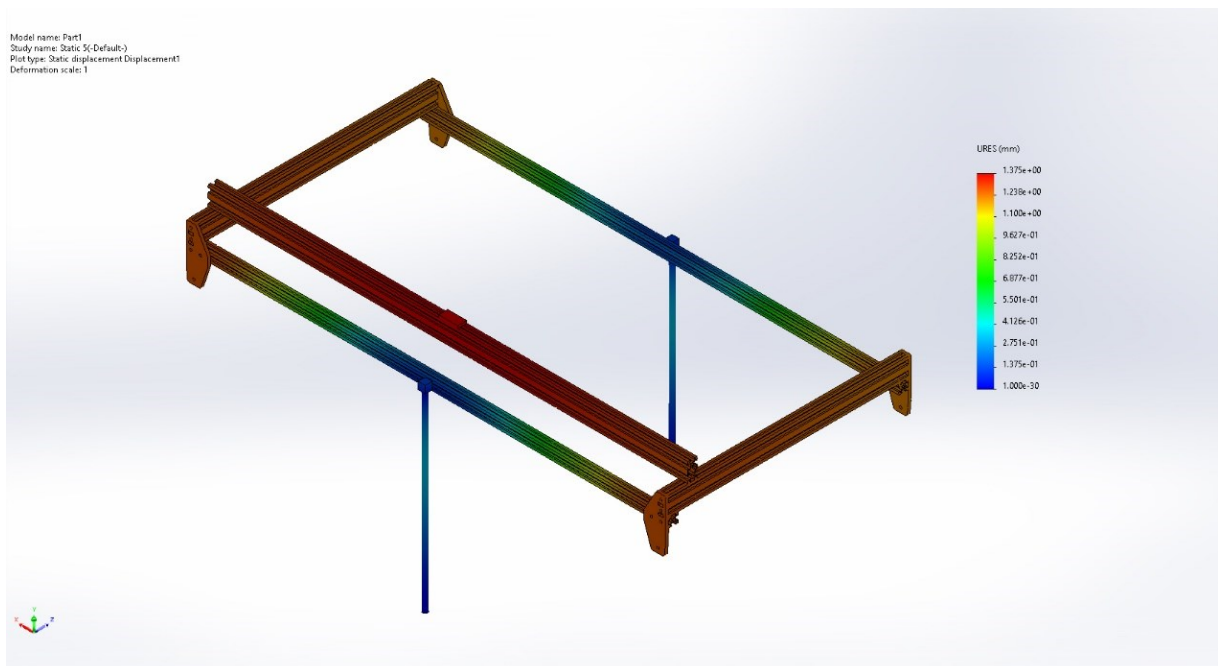
Δ) Προφανώς μέσω της παραπάνω προσομοίωσης, αυτόματα κρίνεται μη αποδεκτή και η επιλογή του ενός τραπεζοειδούς κοχλία που μελετήθηκε παραπάνω.

Μετά από τα παραπάνω είναι ξεκάθαρο πως είναι αναγκαία η επαναδιαστασιολόγηση των κοχλιών. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε εκλογή τραπεζοειδών κοχλιών διαμέτρου 10 mm και έγινε εκ νέου προσομοίωση και έλεγχος. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

ΕΠΑΝΑΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ

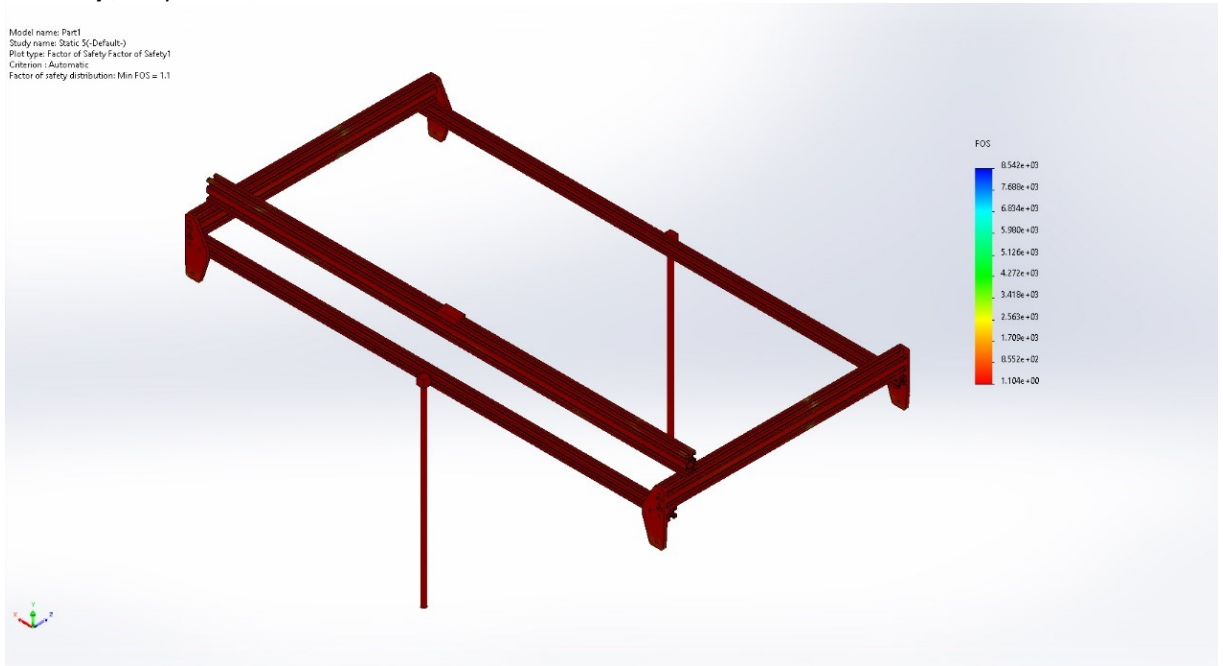
Διάμετρος κοχλιών:	10mm
Θέση ακροφυσίου:	Πλησίον του κοχλία

Κάθετη μετατόπιση (βύθιση),



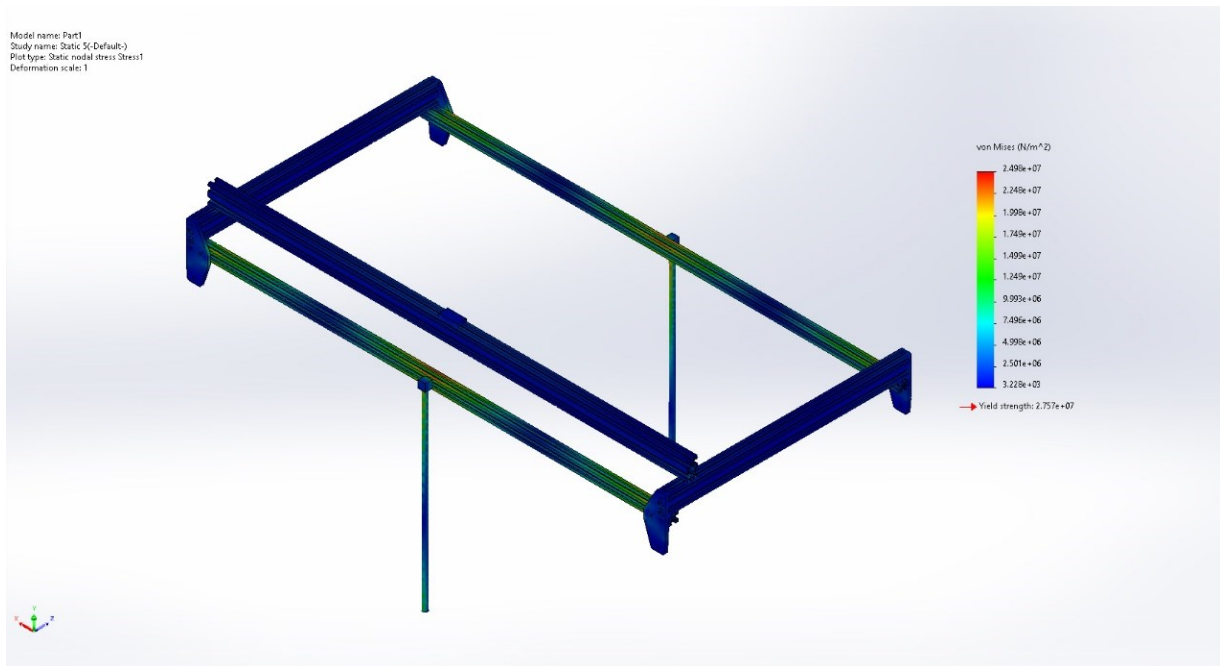
Σχήμα 3-58 Κάθετη μετατόπιση- Διάμετρος 10mm- Θέση ακροφυσίου: Πλησίον του κοχλία

Συντελεστής Ασφαλείας



Σχήμα 3-59 Συντελεστής Ασφαλείας- Διάμετρος 10mm- Θέση ακροφυσίου: Πλησίον του κοχλία

Τάση Von Mises

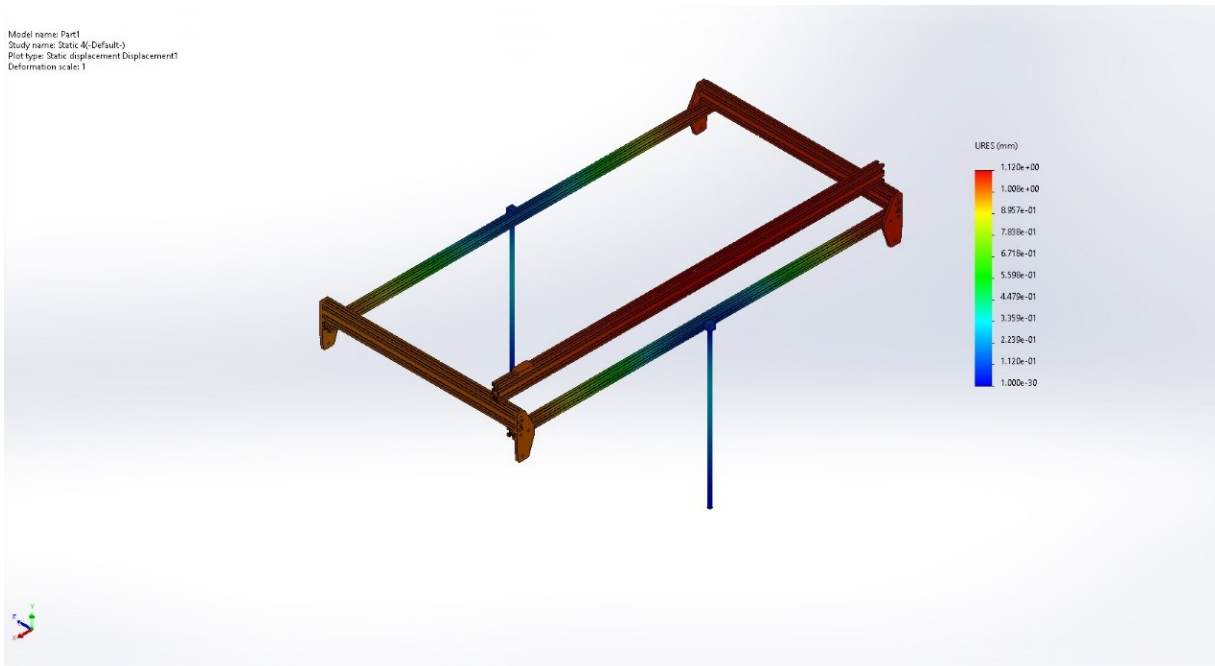


Σχήμα 3-60 Τάση Von Mises- Διάμετρος 10mm- Θέση ακροφυσίου: Πλησίον του κοχλία

Αντίστοιχα για την δεύτερη ακραία θέση:

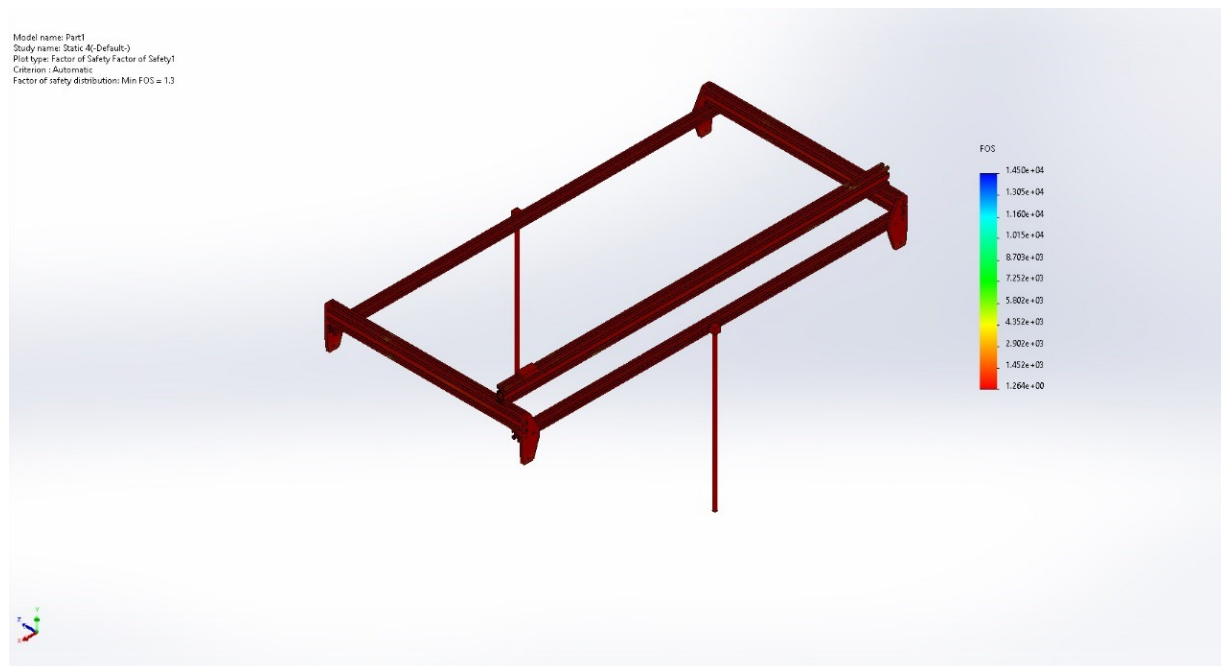
Διάμετρος κοχλιών:	10mm
Θέση ακροφυσίου:	Πλησίον της ένωσης των αξόνων XY

Κάθετη μετατόπιση (βύθιση)



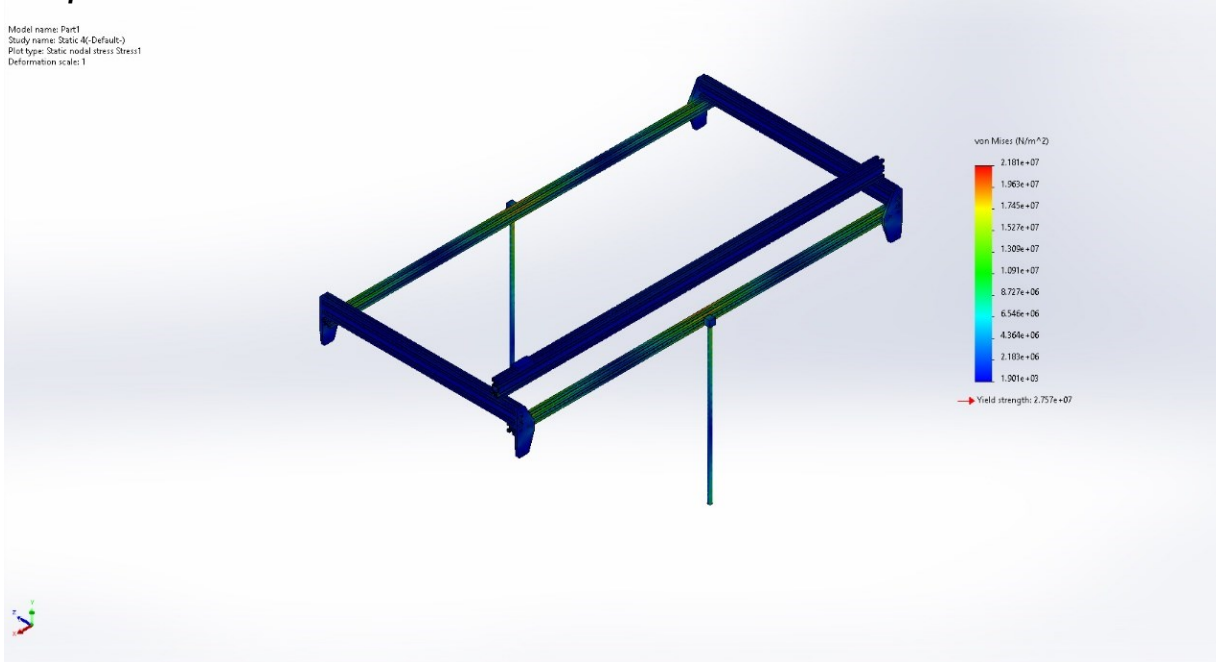
Σχήμα 3-61 Κάθετη μετατόπιση- Διάμετρος 10mm- Θέση ακροφυσίου: Πλησίον της ένωσης των αξόνων XY

Συντελεστής Ασφαλείας



Σχήμα 3-62 Συντελεστής Ασφαλείας- Διάμετρος 10mm- Θέση ακροφυσίου: Πλησίον της ένωσης των αξόνων XY

Τάση Von Mises



Σχήμα 3-63 Τάση Von Mises- Διάμετρος 10mm- Θέση ακροφυσίου: Πλησίον της ένωσης των αξόνων XY

Συμπερασματικά:

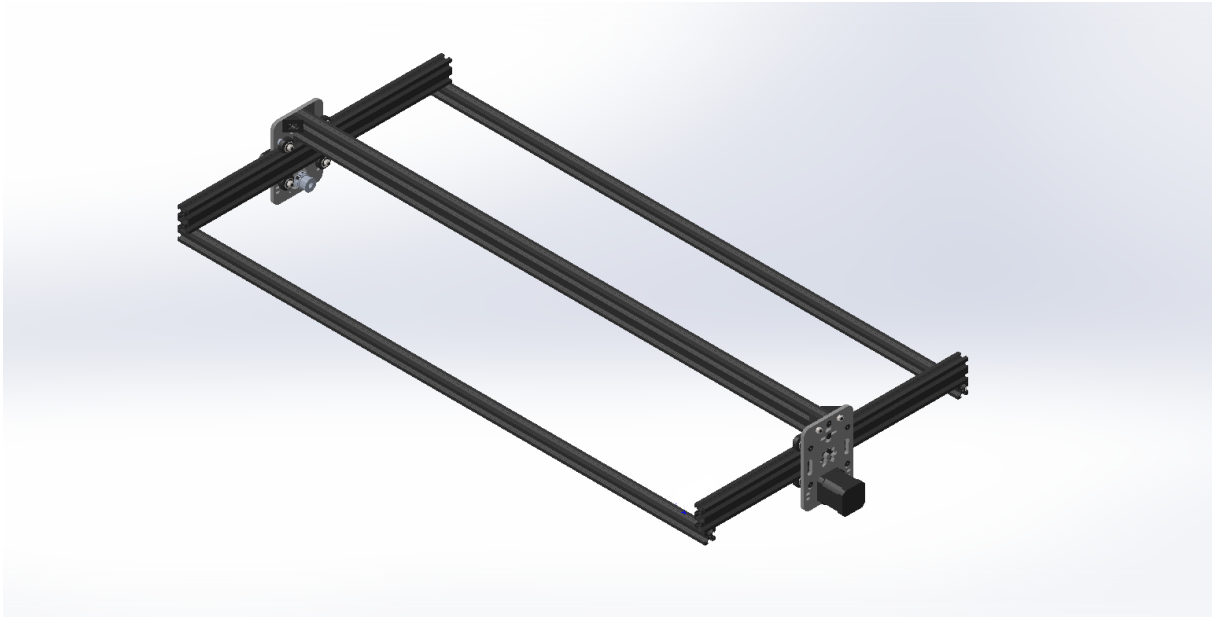
- A) Σχετικά με τον Συντελεστή Ασφαλείας φαίνεται πως για την πρώτη περίπτωση ανέρχεται στα 1,1 και στην δεύτερη στα 1,3. Και στις δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα είναι επαρκή για την εκλογή των κοχλιών και η συναρμογή θεωρείται ασφαλής.
- B) Σχετικά με την τάση Von Mises, στην πρώτη περίπτωση, το όριο διαρροής ανέρχεται στα $2,757 \cdot 10^7$ N/m². Η τάση δεν φτάνει σε αυτό το ύψος ακόμη και στα σημεία όπου αυτή είναι μέγιστη, που είναι στα σημεία πρόσδεσης της συναρμογής με τους κοχλίες. Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα και στην δεύτερη περίπτωση, όπου η μέγιστη τάση ανέρχεται στα $2,181 \cdot 10^7$ N/m².
- Γ) Συνεπώς μέσω της μελέτης φαίνεται πως οι κοχλίες διαμέτρου 10mm, επαρκούν άρα και εκλέγονται οι συγκεκριμένοι.

Συμπερασματικά, για τον σχεδιασμό θα χρησιμοποιηθούν δύο τραπεζοειδείς κοχλίες Φ10.

4 Τελικός σχεδιασμός

4.1 Πλατφόρμα ACRO

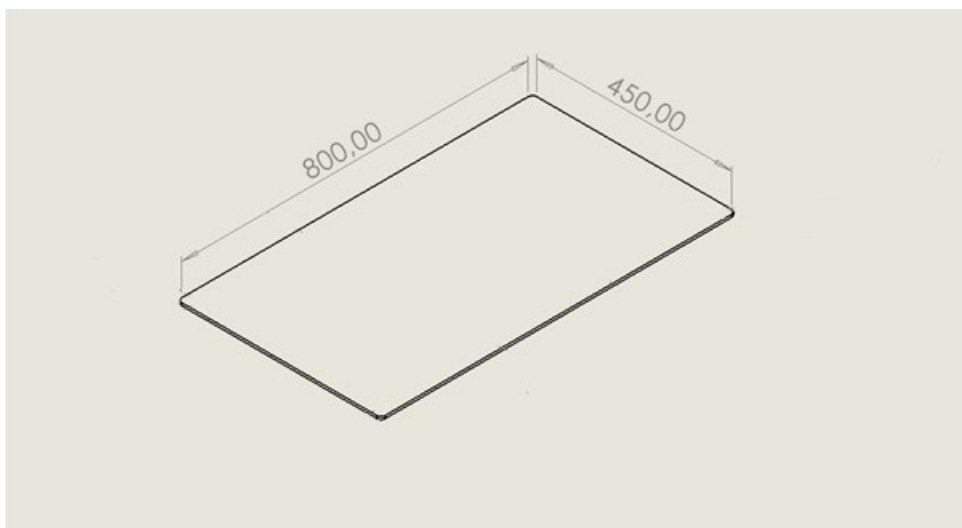
Ξεκινώντας τον τελικό σχεδιασμό του πρωτότυπου 3D εκτυπωτή, το μόνο διαθέσιμο μέρος είναι η πλατφόρμα ACRO. Η ACRO όπως ειπώθηκε και παραπάνω, αποτελείται από 4 V-Slot, που λειτουργούν ως το βασικό σασί πάνω στο οποίο κινείται το πέμπτο προφίλ V-Slot, στο οποίο είναι προσδεμένο το εκάστοτε εργαλείο. Σαν πρώτο βήμα έγινε η συναρμογή της πλατφόρμας.



Σχήμα 4-1 Πλατφόρμα ACRO

4.2 Τράπεζα Εκτύπωσης

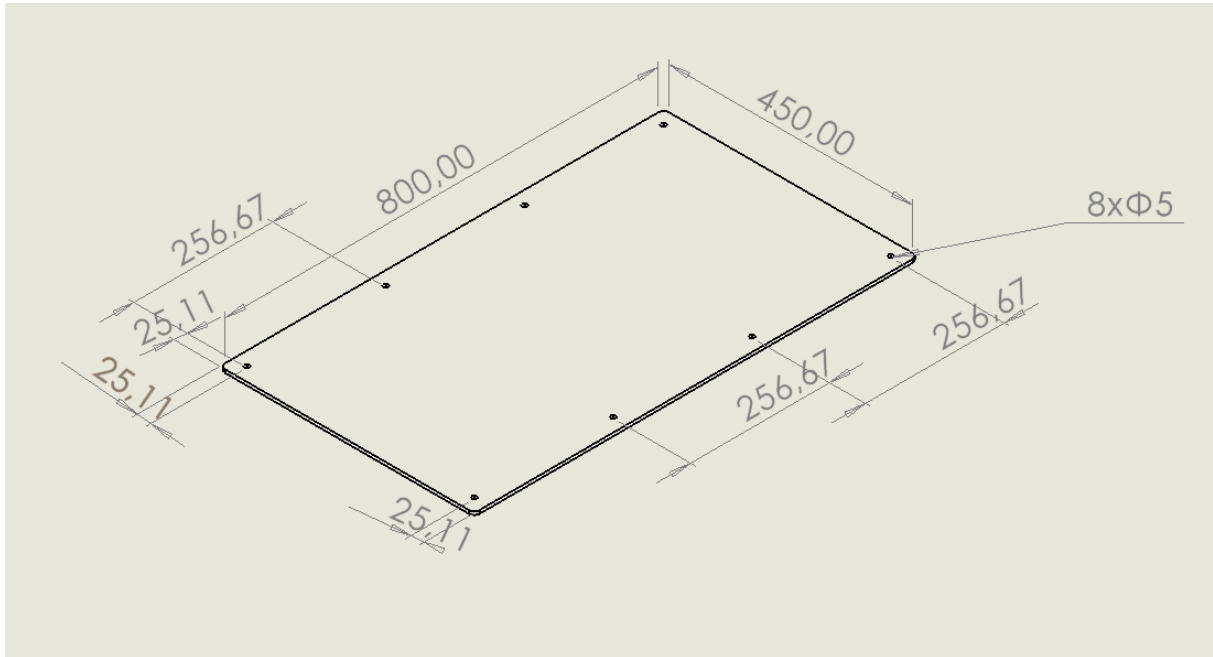
Στο στάδιο αυτό έχει ήδη σχεδιαστεί μια πρώτη άποψη της τράπεζας εκτύπωσης με διαστάσεις 800mm x 470mm και με λειασμένες άκρες με ακτίνα R10.



Σχήμα 4-2 Πρώτη άποψη τράπεζας εκτύπωσης

Στις διαστάσεις αυτές πάρθηκαν υπόψιν και τα σημεία πάκτωσης της, με τον κεντρικό σκελετό, που όπως φάνηκε από τις μοντελοποιήσεις θα πρέπει να είναι 8.

Οι οπές για τα σημεία πάκτωσης σχεδιάστηκαν για φρεζάτους κοχλίες M5. Τέλος το πάχος της τράπεζας είναι 5mm. Σε αυτό το στάδιο θα σχεδιαστούν οι οπές πρόσδεσης.

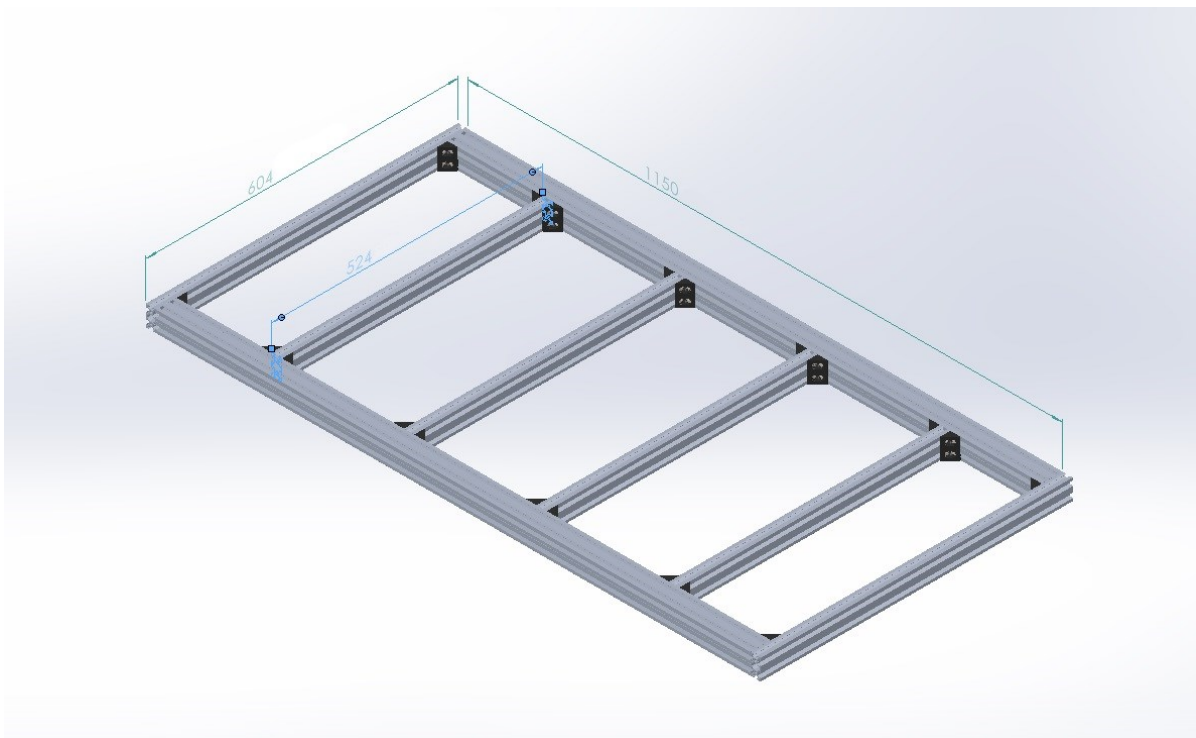


Σχήμα 4-3 Σχέδιο τράπεζας εκτύπωσης

Μετά από την τράπεζα εκτύπωσης σχεδιάστηκε η βάση πάνω στην οποία θα εδράζεται τόσο η τράπεζα, όσο και ο κάθετος άξονας της συναρμογής. Για την βάση επιλέχθηκαν τα παρακάτω μέρη:

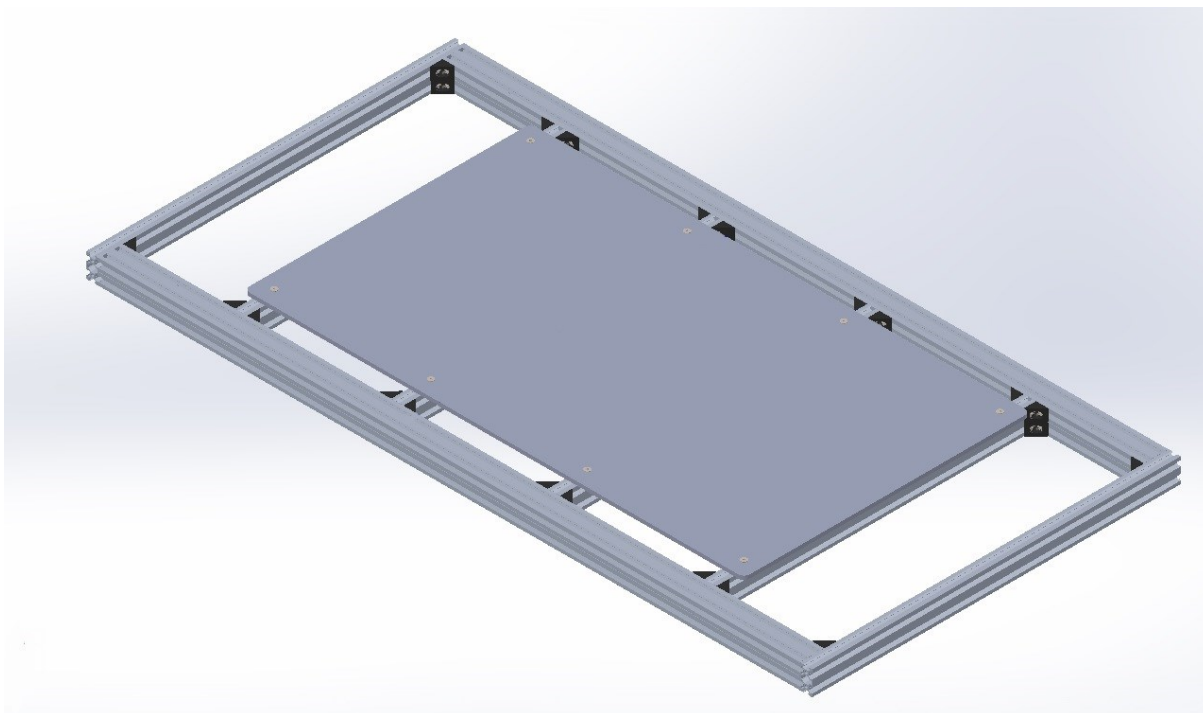
- 2 V-slots 20x40 μήκους 1150mm
- 2 V-slots 20x40 μήκους 604mm
- 4 V-slots 20x40 μήκους 524mm
- Γωνίες

Οι 2 πρώτες ομάδες V-slot θα αποτελούν το εξωτερικό σκελετό της βάσης, ενώ η τρίτη τα εσωτερικά νεύρα της. Αυτά τα V-slots πακτώθηκαν μεταξύ τους σε μια σταθερή συναρμογή με χρήση γωνιών κοχλιών M5, μήκους 10mm και tee nuts που προσαρμόστηκαν στο εσωτερικών των αξόνων. Η τελική συναρμογή της βάσης φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4-4 Βάση εκτυπωτή

Στη συνέχεια η τράπεζα εκτύπωσης θα μπορεί να προσαρτηθεί επάνω στην βάση και να πακτωθεί με χρήση 8 κοχλιών M5.



Σχήμα 4-5 Συναρμογή βάσης εκτυπωτή με τράπεζα εκτύπωσης

4.3 Κίνηση στον άξονα Z

Για την ανάγκη κίνησης στον άξονα Z, όπως φάνηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, έγινε χρήση 2 τραπεζοειδών κοχλιών $\Phi 10\text{mm}$, καθώς και γραμμικών αξόνων στα 4 άκρα της ACRO, προκειμένου

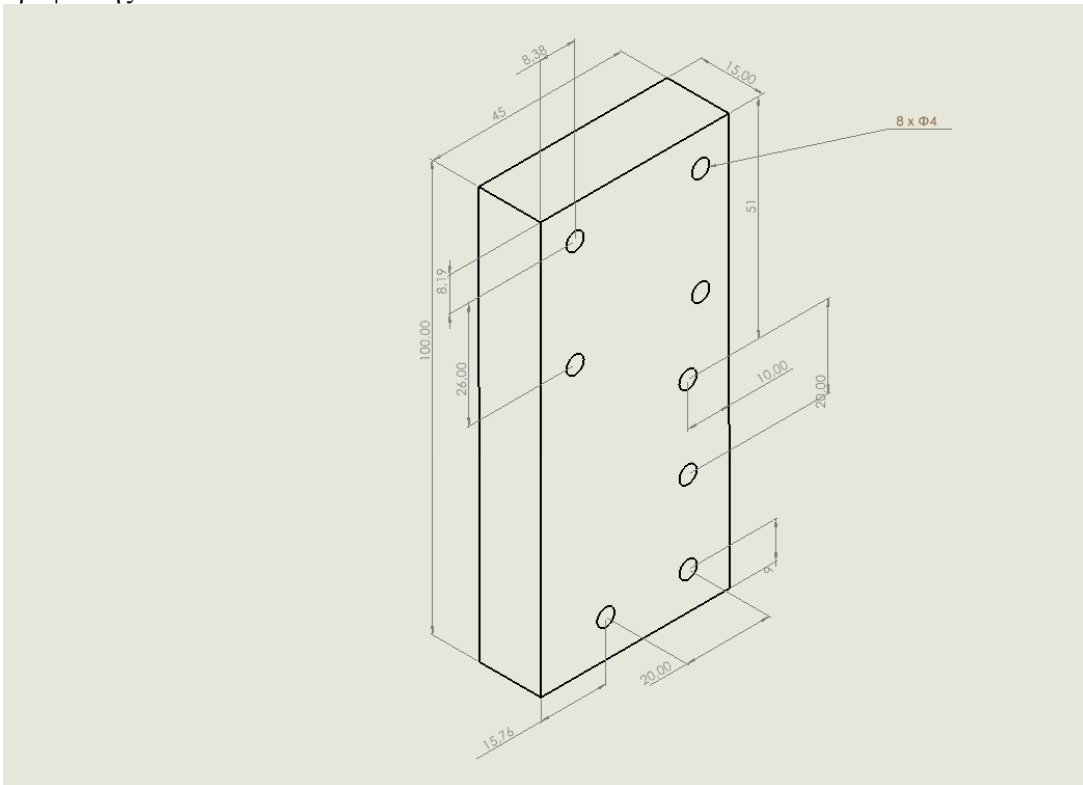
να μην υπάρχει παράπλευρη κίνηση που θα οδηγήσει σε εμπλοκές. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκαν τα παρακάτω εξαρτήματα:

- γραμμικοί άξονες $\Phi 12\text{mm}$ μήκους 470mm
- γραμμικοί οδηγοί $\Phi 12\text{mm}$
- 8 βάσεις με φλάντζα $\Phi 12\text{mm}$



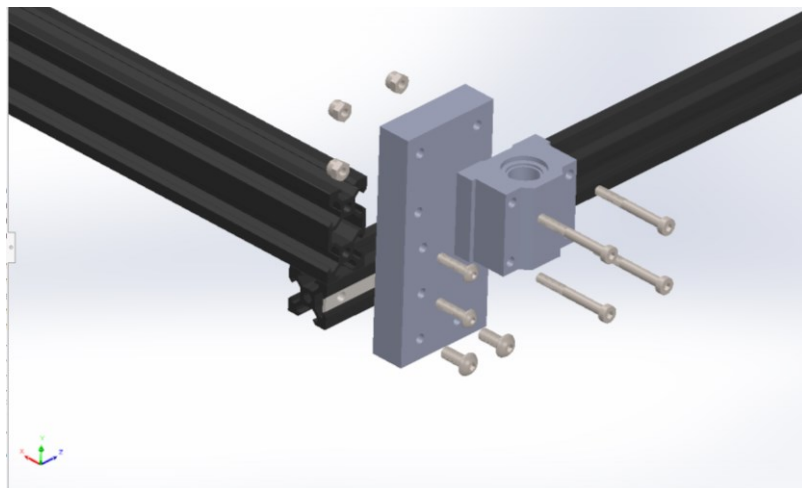
Σχήμα 4-6 Εξαρτήματα γραμμικής κίνησης Z

Για την πρόσδεση των οδηγών στην πλατφόρμα της ACRO, σχεδιάστηκαν εξατομικευμένες πλάκες χάλυβα διαστάσεων 100x 45mm, με 4 οπές $\Phi 4\text{mm}$ σε νοητό τετράγωνο στο ένα μέρος προκειμένου να πακτωθούν με τους γραμμικούς οδηγούς. Επίσης διαθέτει άλλες δυο οπές $\Phi 4\text{mm}$ στο μέσο κάθετα για πάκτωση στον προφίλ της ACRO και στο άλλο μέρος δύο οπές $\Phi 4\text{mm}$ για πάκτωση στο άλλο προφίλ της ACRO.

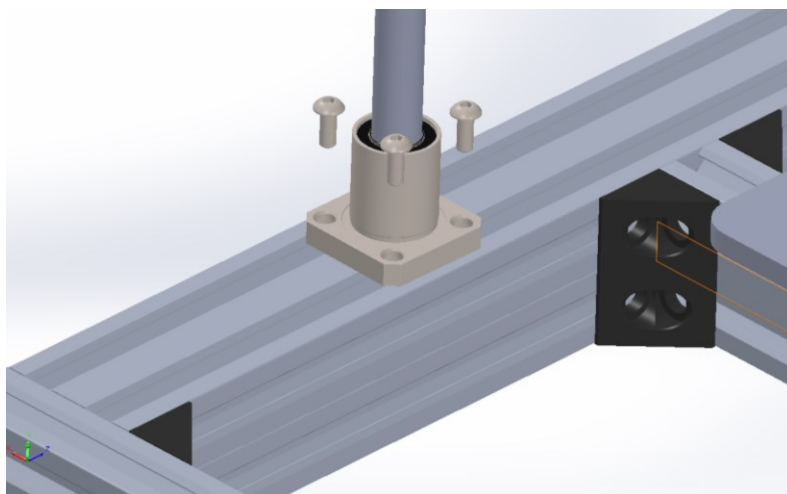


Σχήμα 4-7 Εξατομικευμένο τεμάχιο σύνδεσης ACRO-γραμμικών οδηγών

Εν συνεχεία πραγματοποιείται η σύνδεση των γραμμικών οδηγών και της πλατφόρμας μέσω των ειδικών συνδέσμων όπως επίσης και των βάσεων των οδηγών με την βάση του εκτυπωτή μέσω tee nuts. Θα χρησιμοποιηθούν κοχλίες M4 μήκους 12mm για την πρόσδεση του συνδέσμου στην πλατφόρμα ενώ για την σύνδεση του οδηγού με τον σύνδεσμο θα χρησιμοποιηθούν περαστοί κοχλίες M4 μήκους 35mm με παξιμάδια M4. Τέλος θα συνδεθούν οι βάσεις των γραμμικών αξόνων με την βάση της διάταξης με χρήση κοχλιών M4 μήκους 10mm.

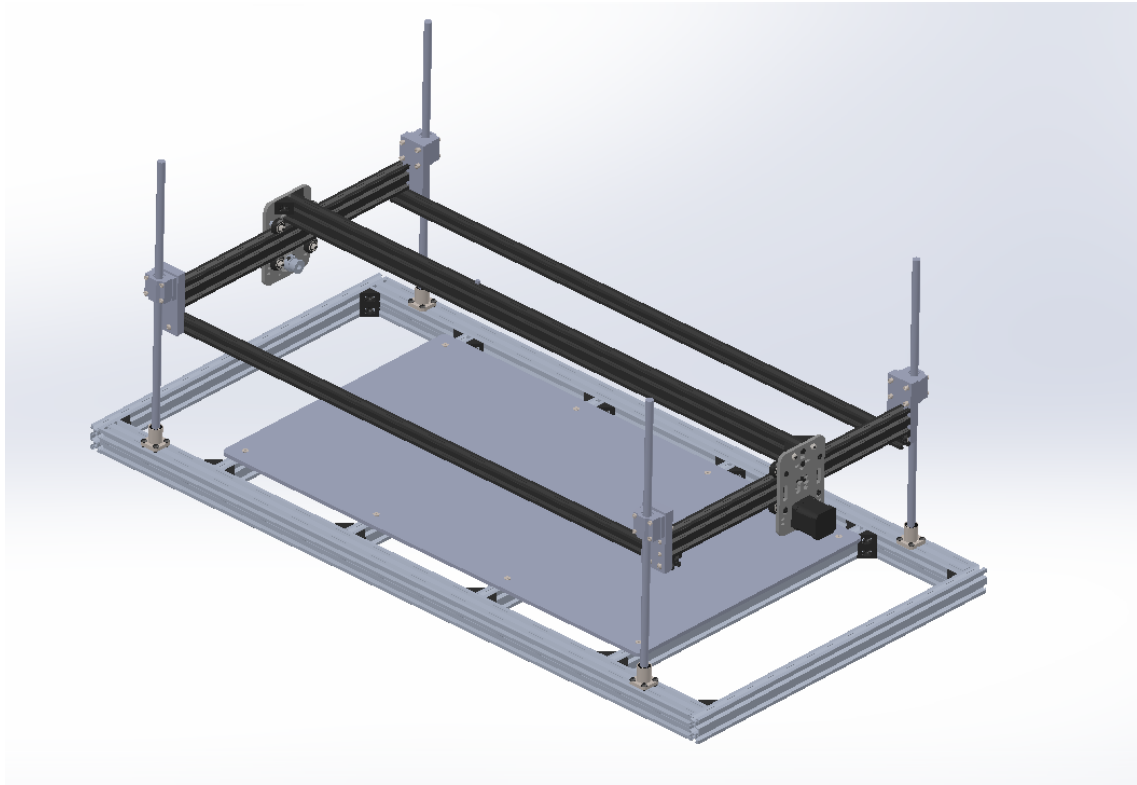


Σχήμα 4-8 Ένωση γραμμικού οδηγού- συνδέσμου-ACRO



Σχήμα 4-9 Σύνδεση βάσεων αξόνων με βάση διάταξης

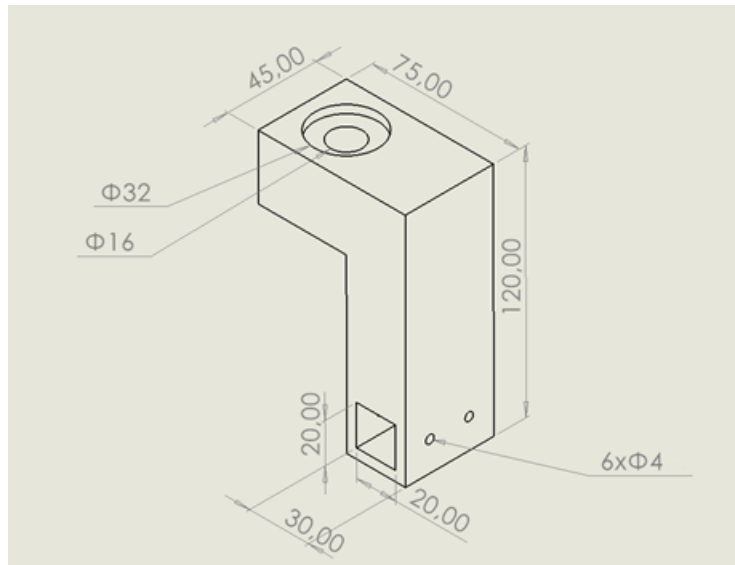
Παρακάτω φαίνεται η τελική εικόνα.



Σχήμα 4-10 Συναρμογή Βάσης-Τράπεζας-ACRO-Συστήματος γραμμικής κίνησης Z

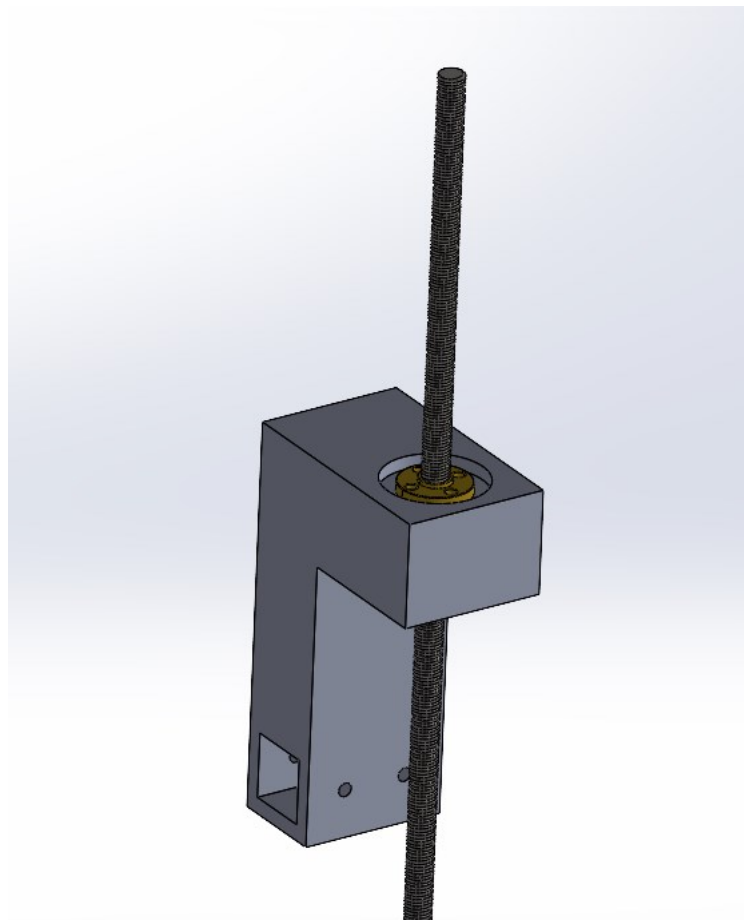
Στο επόμενο βήμα θα τοποθετηθούν οι τραπεζοειδείς κοχλίες. Για την επιλογή τραπεζοειδούς κοχλία έχει ήδη επιλεγεί η διάμετρος βάσει μοντελοποιήσεων στα 10mm. Σχετικά με το βήμα του κοχλία επιλέγεται στα 2mm. Το βήμα αποτελεί την απόσταση που θα διανυθεί κατά μια πλήρη περιστροφή του κοχλία. Για συναρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και λεπτή κίνηση, υπάρχουν κοχλίες με ιδιαίτερα μικρό βήμα π.χ. 0,5 mm ή και ακόμη μικρότερες. Για συναρμογές που απαιτούν υψηλή ταχύτητα, τότε υπάρχουν επιλογές με μεγαλύτερα βήματα, όπως 20 mm ή και περισσότερο. Στην παρούσα περίπτωση και εφόσον η ακρίβεια και η ταχύτητα είναι δύο σημαντικές προτεραιότητες και πάντα με βάση το κόστος, μπορεί να γίνει επιλογή ενός βήματος 2mm, κάτι που εφαρμόζεται σε κοινούς οικιακούς 3D εκτυπωτές.

Προκειμένου οι τραπεζοειδείς κοχλίες να τοποθετηθούν χωρίς την παρέμβαση πάνω στα προφίλ της πλατφόρμας, παρέμβαση η οποία ενδέχεται να αποβεί και καταστροφική, θα πρέπει να κατασκευαστούν και εδώ εξατομικευμένοι σύνδεσμοι. Οι σύνδεσμοι αυτοί θα έχουν το καθήκον να ενώσουν την πλατφόρμα με τους κοχλίες, μετατρέποντας έτσι την περιστροφική κίνηση των τελευταίων σε οριζόντια κίνηση για την πρώτη.



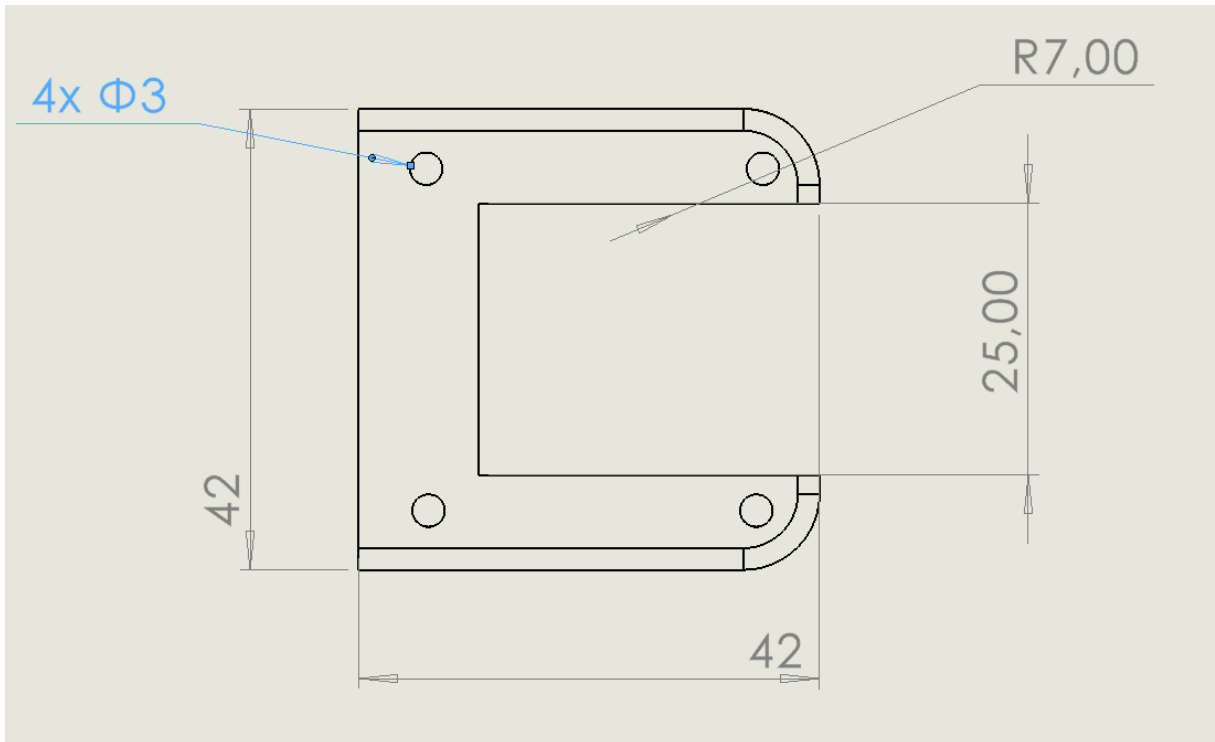
Σχήμα 4-11 Εξατομικευμένος σύνδεσμος ACRO-τραπεζοειδών κοχλιών

Οι σύνδεσμοι αυτοί είναι κατασκευασμένοι σε σχήμα Γ. Στο κάτω μέρος έχουν διαμπερή οπή τετραγωνικής διατομής με πλάτος 30mm και ύψος 20mm, προκειμένου να περάσει από μέσα τους το προφίλ V-Slot όπως επίσης φέρουν και 6 οπές $\Phi 4$ mm μέσω των οποίων θα πακτωθούν στο προφίλ με χρήση κοχλιών και tee nuts. Τέλος στο πάνω μέρος φέρουν διαμπερή οπή $\Phi 16$ mm με πατούρα $\Phi 32$ mm, προκειμένου να προσδεθεί το περικόχλιο $\Phi 10$ mm.



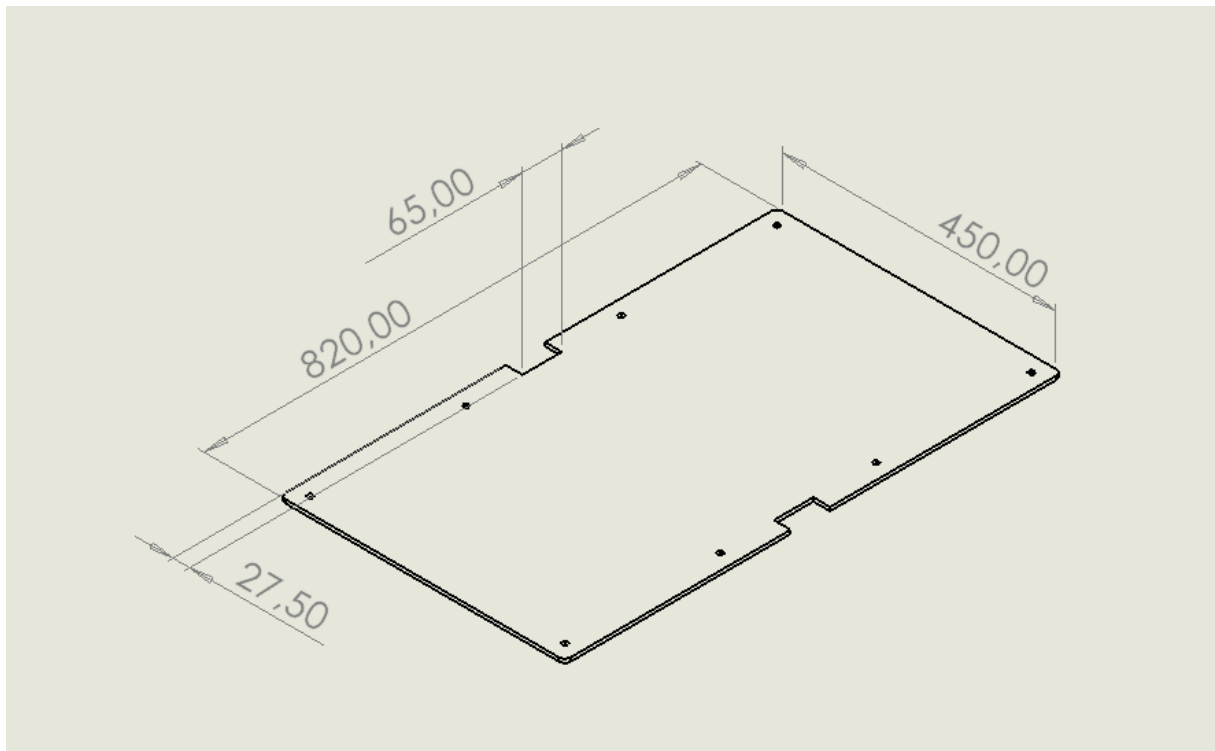
Σχήμα 4-12 Σύνδεσμος σε συνεργασία με τραπεζοειδή κοχλία

Για την συγκράτηση του βηματικού κινητήρα NEMA17, σχεδιάστηκε τεμάχιο συγκράτησης, τα χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται παρακάτω. Το τεμάχιο θα πακτώνεται με τον κινητήρα μέσω 4 κοχλιών M3 και με το κάθετο προφίλ του περιβλήματος που θα τοποθετηθεί στη συνέχεια με χρήση tee nuts.



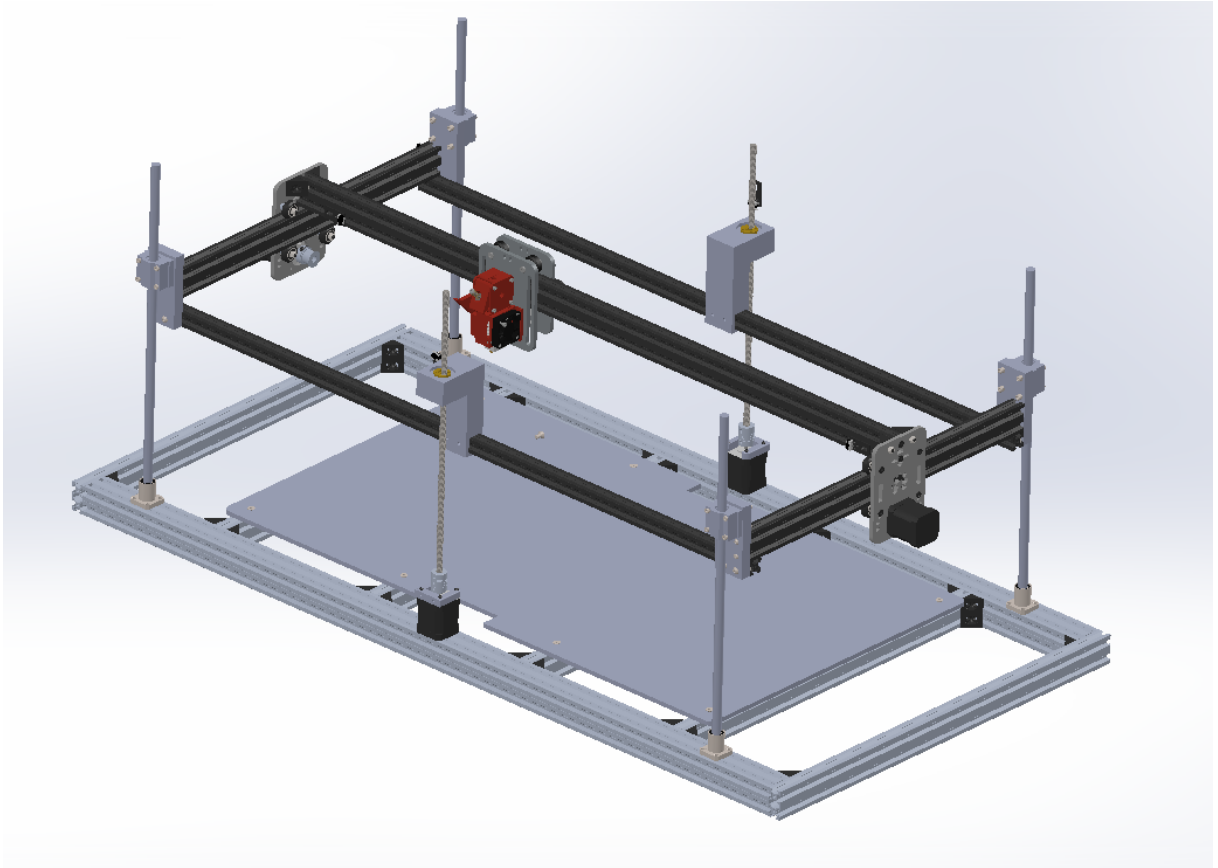
Σχήμα 4-13 Εξατομικευμένο τεμάχιο πάκτωσης κινητήρα NEMA

Προκειμένου η πλατφόρμα να έχει τη δυνατότητα να φτάνει μέχρι το κατώτερο σημείο χωρίς πρόσκρουση στην τράπεζα εκτύπωσης, στο σημείο αυτό έγινε μια διόρθωση στην τελευταία. Συγκεκριμένα στο μέσο της τράπεζας έγινε αφαίρεση υλικού τετραγωνικού σχήματος.



Σχήμα 4-14 Τροποποιημένο σχέδιο τράπεζας εκτύπωσης

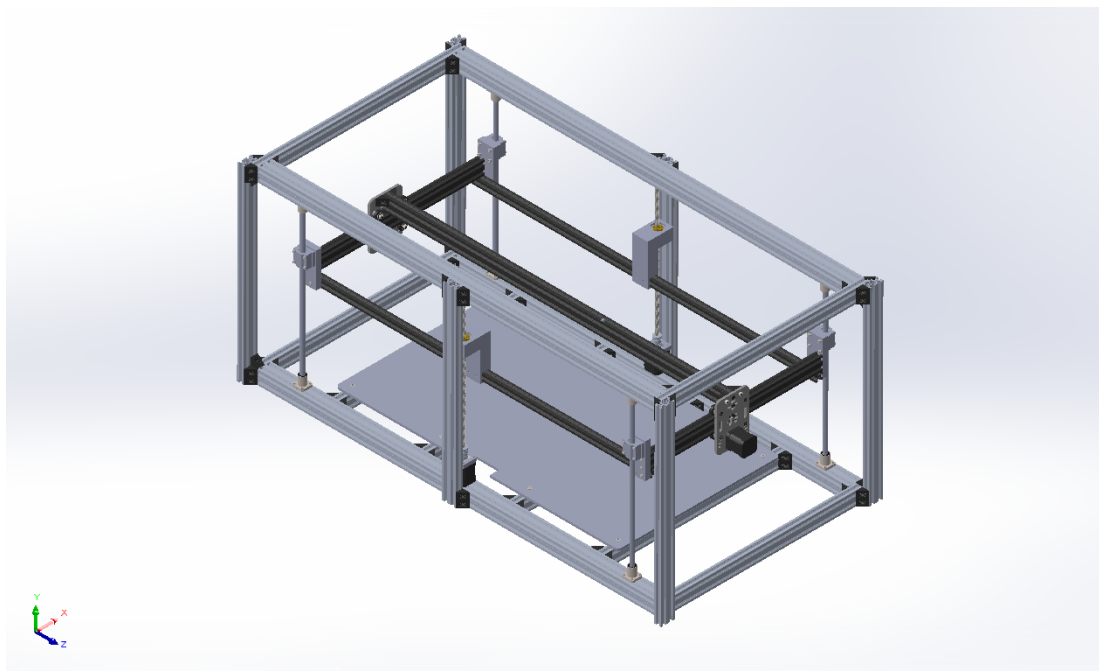
Τελικά η δομή θα έχει την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 4-15 Συναρμογή Τράπεζας-ACRO-Βάσης- Συστήματος Z- Κοχλιών

Εν συνεχεία θα προστεθεί το εξωτερικό περίβλημα που θα προσδώσει περαιτέρω ευστάθεια και στιβαρότητα και θα χρησιμοποιηθεί ως η βάση της προστασίας plexiglass. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν:

- V-Slot 20x40 μήκους 548mm
- 2 V-Slot 20x40 μήκους 1150mm
- 2 V-Slot 20x40 μήκους 583mm
- Γωνίες

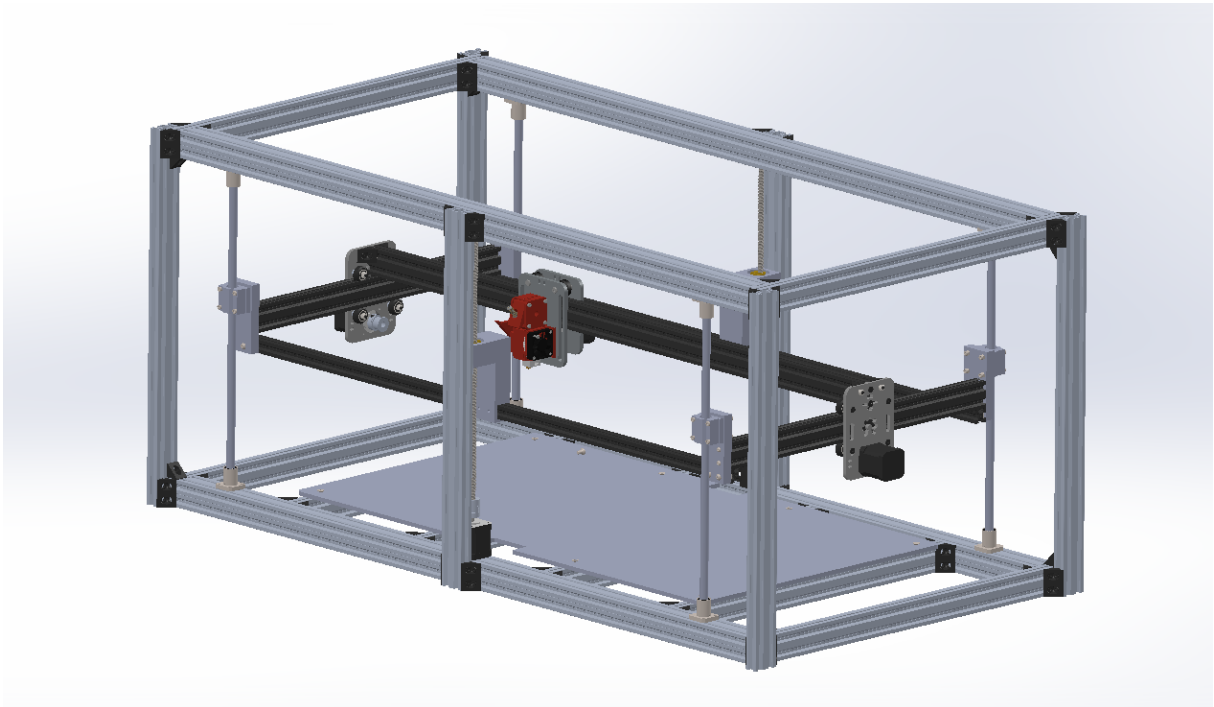


Σχήμα 4-16 Μορφή εκτυπωτή μετά την προσθήκη του εξωτερικού περιβλήματος

4.4 Προσθήκη εξωθητή

Στη συνέχεια προσδένεται ο εξωθητής. Ο εξωθητής που επιλέχθηκε είναι ο Creality 3D Ender-3 Direct Extruding Kit. Πρόκειται για έναν από τους πιο κοινούς εξωθητές της αγοράς, αξιόπιστος και αποτελεσματικός. Είναι στιβαρός και ανθεκτικός και προσφέρει ομαλή τροφοδοσία. Τέλος πρόκειται για μια ιδιαίτερα οικονομική επιλογή της κατηγορίας του.

Σημειώνεται πως στο επάνω μέρος του εκτυπωτή τοποθετήθηκαν επίσης βάσεις των γραμμικών αξόνων μετά την προσθήκη του περιβλήματος κατά παρόμοιο τρόπο με αυτών της βάσης. Μετά την συναρμογή ο εκτυπωτής θα έχει την εξής μορφή:

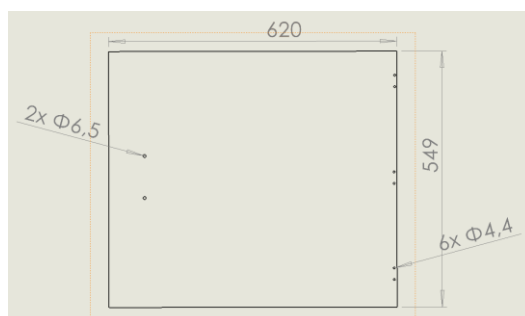
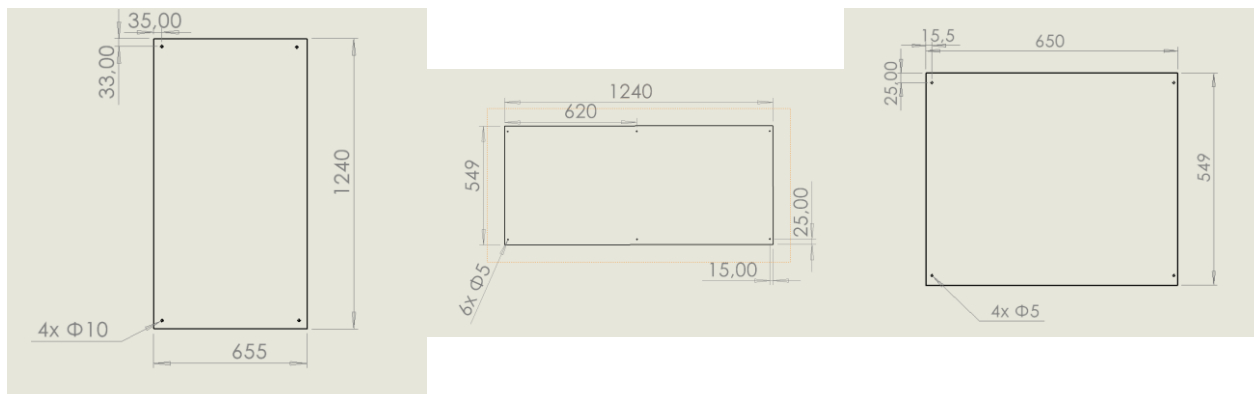


Σχήμα 4-17 Εξωτερικό περίβλημα εκτυπωτή

4.5 Θερμομόνωση εκτυπωτή

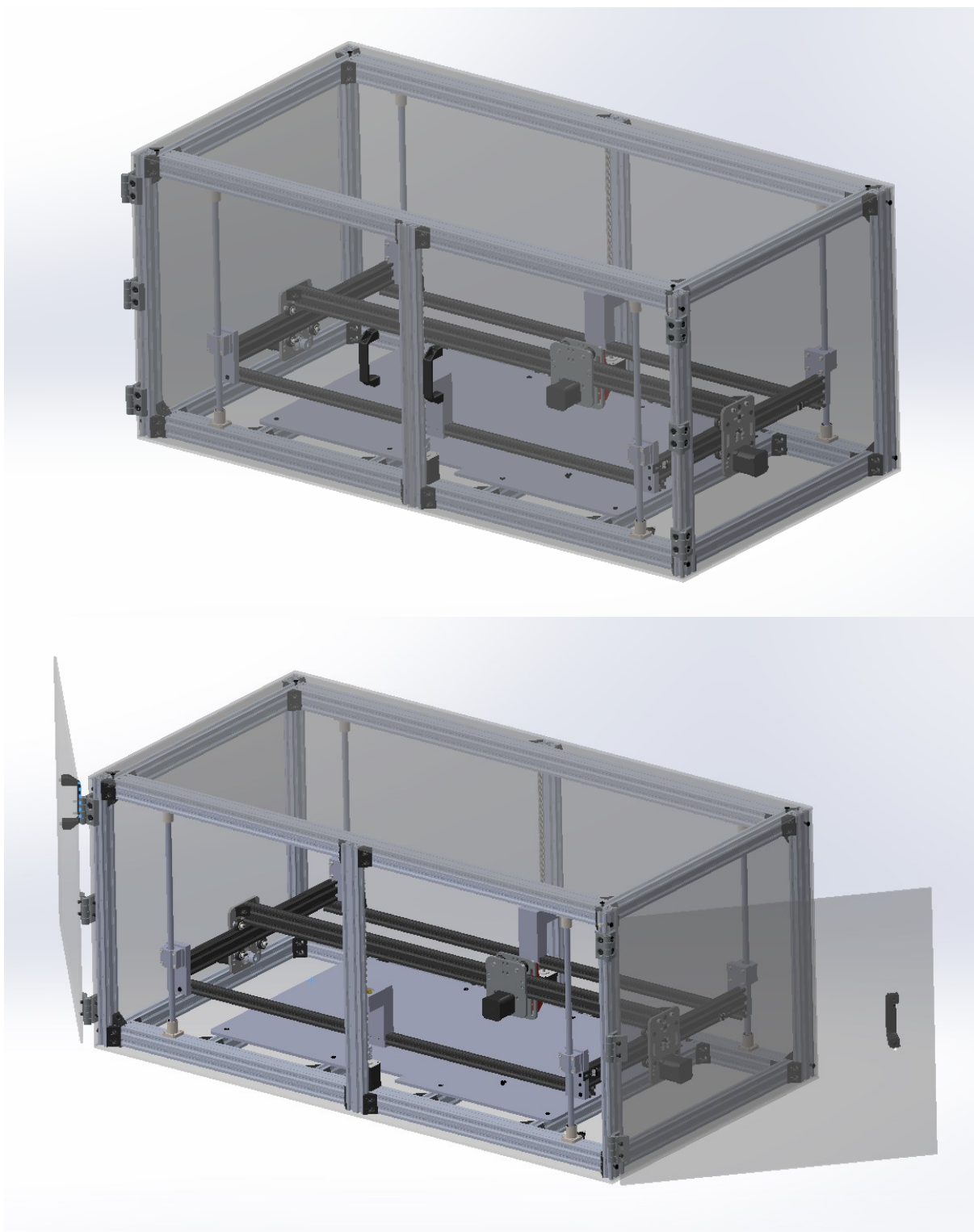
Για την προστασία και την θερμομόνωση του εκτυπωτή επιλέχθηκε η λύση του plexiglass, ως πιο οικονομικής επιλογής αλλά και αποτελεσματικής. Παρακάτω φαίνονται τα απαραίτητα:

- 2 φύλλα plexiglass διαστάσεων 1240x655mm
- 2 φύλλα plexiglass διαστάσεων 1240x549mm
- 1 φύλλο plexiglass διαστάσεων 650x549mm
- 2 φύλλα plexiglass διαστάσεων 620x549mm
- 2 χερούλια 2020
- 6 μεντεσέδες 2020



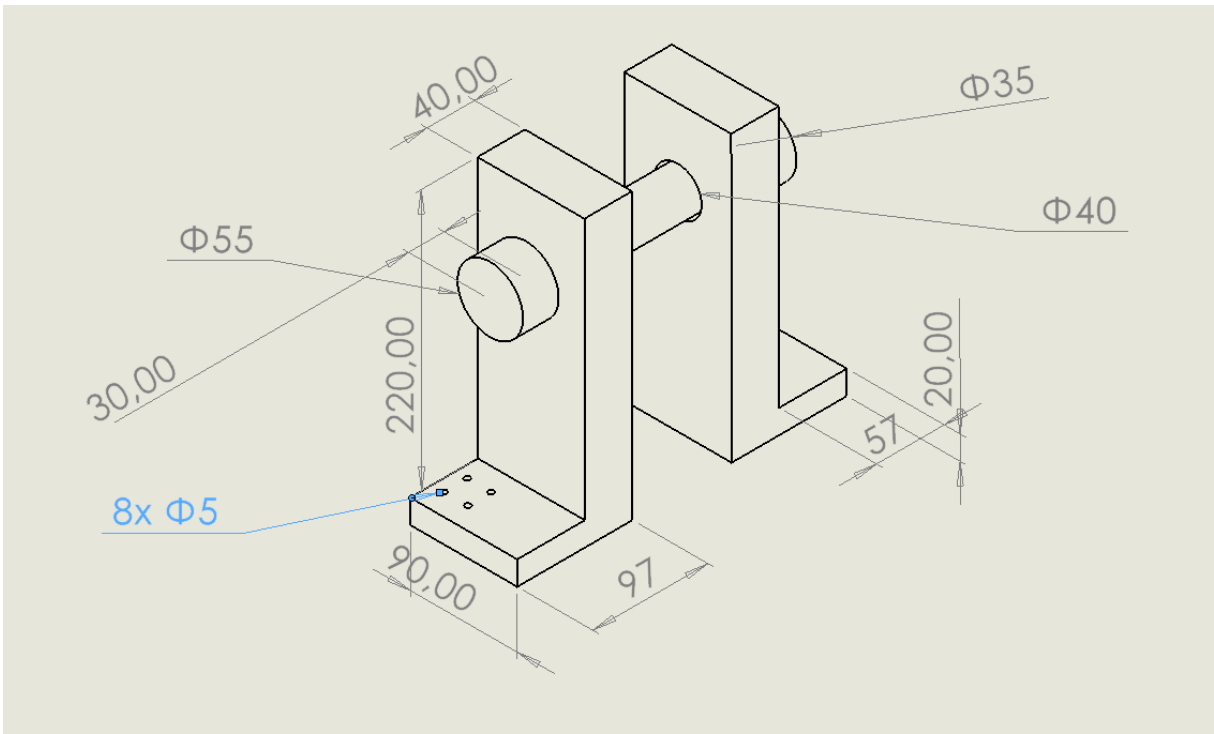
Σχήμα 4-18 Σχέδια φύλλων Plexiglass- μεντεσέδες-χερούλια

Τελικά το μοντέλο θα μοιάζει κάπως έτσι:



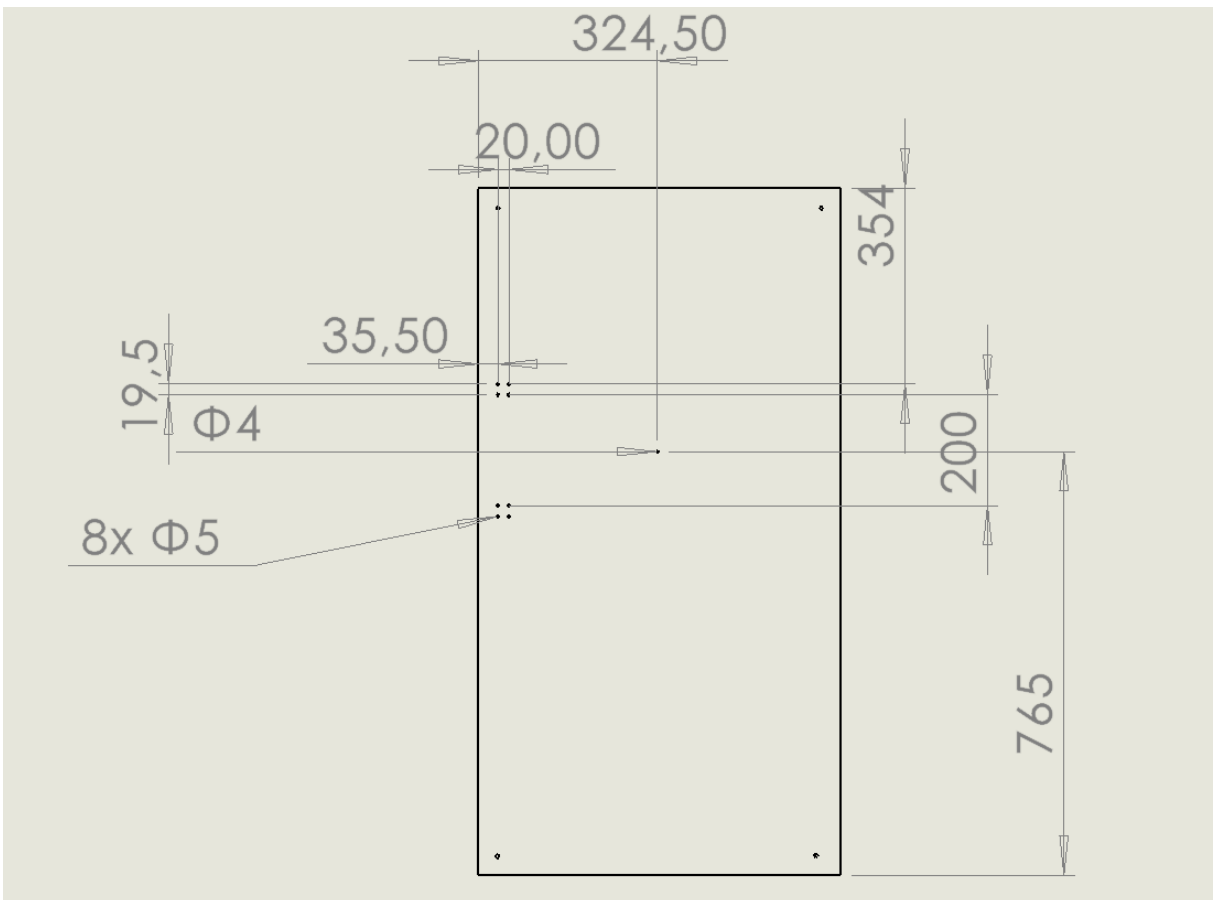
Σχήμα 4-19 Τελική εικόνα εκτυπωτή

Έπειτα θα πρέπει να κατασκευαστεί η βάση του καρουλιού νήματος. Για την κατασκευή του δημιουργήθηκε 3D μοντέλο προκειμένου να εκτυπωθεί σε 3D εκτυπωτή. Η βάση του νήματος αποτελείται από 2 κατασκευές τύπου Γ με διαμπερείς οπές στις οποίες εφαρμόζεται κατασκευή κυλινδρικής διατομής πάνω στην οποία θα στηρίζεται το νήμα. Παρακάτω φαίνεται το 3D μοντέλο:



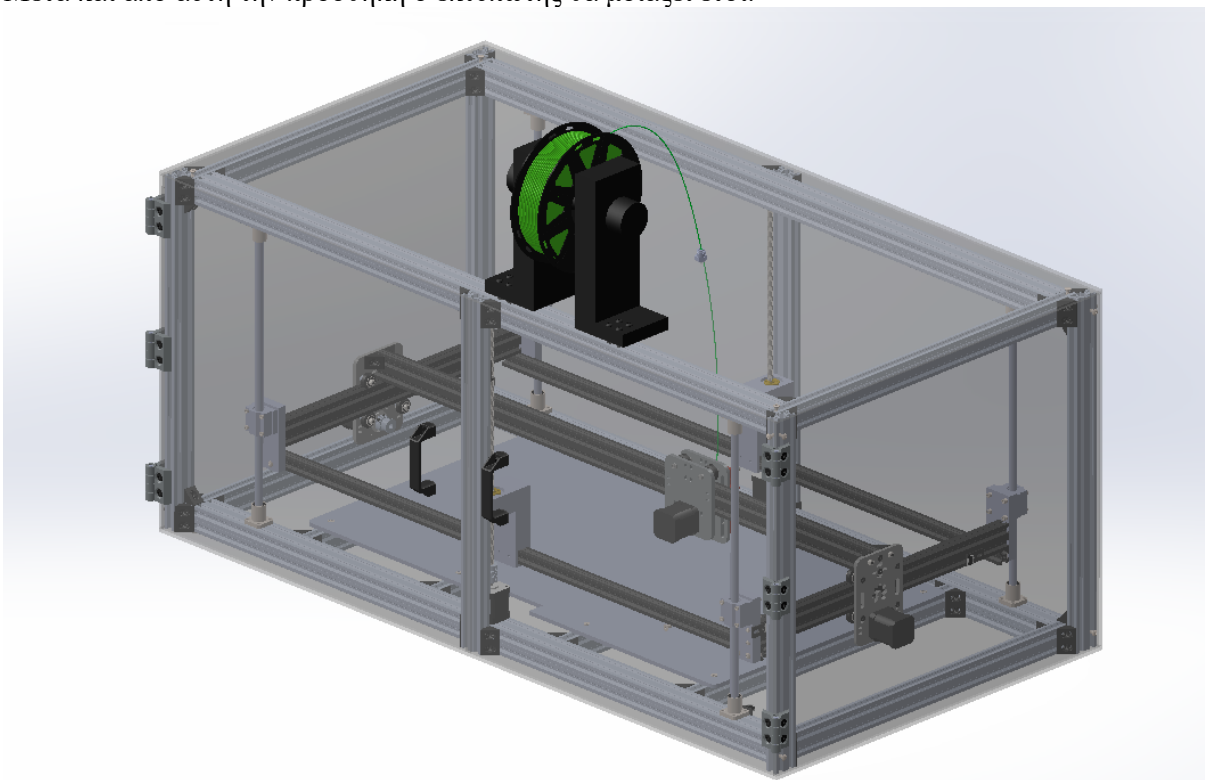
Σχήμα 4-20 Εξατομικευμένη βάση καρουλιού νήματος

Προκειμένου το παραπάνω να πακτωθεί στο πάνω μέρος του εκτυπωτή, έγιναν κάποιες απαραίτητες τροποποιήσεις στο φύλλο plexiglass που χρησιμοποιείται στο επάνω μέρος του εκτυπωτή. Επίσης διανοίχθηκε οπή $\Phi 4$ στο κέντρο του φύλλου προκειμένου να προσαρμοστεί Push Fit Connector PC4-M5, μέσα από το οποίο θα οδηγείται το νήμα στην κεφαλή εκτύπωσης.



Σχήμα 4-21 Τροποποιημένο φύλλο plexiglass για πάκτωση της βάσης καρουλιού

Μετά και από αυτή την προσθήκη ο εκτυπωτής θα μοιάζει έτσι:



Σχήμα 4-22 Ολοκληρωμένη εικόνα εκτυπωτή

Τέλος μετά τις απαραίτητες μετρήσεις τοποθετήθηκαν και limit switches προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή και εντός ορίων κίνηση της πλατφόρμας και να αποφευχθούν τυχόν συγκρούσεις.

Μετά την μοντελοποίηση συντάχθηκε ο Πίνακας Υλικών.

“Μελέτη και σχεδιασμός προτύπου 3D εκτυπωτή μεγάλου όγκου εργασίας βασισμένου στην πλατφόρμα OpenBuilds ACRO”

Εξάρτημα	Διαστάσεις	Ποσότητα	Τιμή	Link
Εξωτερικό περίβλημα				
V slot	20x40x1150mm	4	85,60 €	https://grobotronics.com/v-slot-2040-1500mm-natural-anodized.html
V slot	20x40x590mm	2	28,40 €	https://grobotronics.com/v-slot-2040-1000mm-natural-anodized.html
V slot	20x40x550mm	6	85,20 €	https://grobotronics.com/v-slot-2040-1000mm-natural-anodized.html
Black angle connectors		70	210,00 €	https://grobotronics.com/openbuilds-90-degree-angle-corner-connector.html
Βίδες για Black Angle Connector		150	12,00 €	https://grobotronics.com/bolts-m5-110mm-low-profile-black.html
Τραπέζι εκτύπωσης				
Πλάκα αλουμινίου	820x470mm	1	241,00 €	https://www.matrakas.gr/σιδερα-και-ανοξειδωτα-ινοχ-/λαμαρινα/αλουμινιου-φυλλα
Socket countersunk head screw	5x0,8x10	8	0,64 €	https://grobotronics.com/bolts-m5-110mm-low-profile-black.html
Silicone Heat Bed	300x300	2	29,90 €	https://grobotronics.com/silicone-heatbed-300x300mm-24v-350w-black.html
Κίνηση Z				
Στηρίγματα Z	Φ12x470	4	24,00 €	https://grobotronics.com/precision-shaft-d12mm-x-1500mm.html
Οδηγοί Στηριγμάτων	Φ12,42x28	4	23,20 €	https://grobotronics.com/linear-bearing-platform-small-12mm-diameter-sc12uu.html
Ειδικά κομμάτια ένωσης	46x100	4		
Socket button head cap screw	5x0,8x12	8	0,64 €	https://grobotronics.com/bolts-m5-110mm-low-profile-black.html
Socket button head cap screw	4x0,7x16	8	0,64 €	https://grobotronics.com/m4-6mm.html
Socket thin pilot cap screw	M4x35	16	1,28 €	https://grobotronics.com/bolt-4-135mm-din912.html
Παξιμάδια	M4	16	0,64 €	https://grobotronics.com/nut-m4-stainless.html
Βάσεις στηριγμάτων		8	49,60 €	https://grobotronics.com/linear-ball-bearing-flanged-12mm-lmk12luu.html
Ειδικό κομμάτι Nema-Acro		2		
Socket button head cap screw	4x0,7x10	12	0,96 €	https://grobotronics.com/m4-6mm.html
Double Tee Nut	Φ4,2	3	0,90 €	https://grobotronics.com/double-tee-nut.html
Τραπεζοειδής Κοχλίας T10	10x400mm	2	59,80 €	https://grobotronics.com/lead-screw-t10-1000mm.html
Περικόχλιο T10mm	Φ10mm	2	15,80 €	https://grobotronics.com/nut-for-lead-screw-t10-brass.html
Nema 17 Stepper Motor		2	29,60 €	https://grobotronics.com/creality-3d-42-40-stepper-motor.html
Lead screw Coupler	Φ10mm	2	6,40 €	https://grobotronics.com/aluminum-flex-shaft-coupler-5mm-to-10mm.html
Βίδες για κομμάτι Nema Acro	4x0,7x10	12	0,96 €	https://grobotronics.com/m4-6mm.html
ACRO				
V slot	20x20x1000	2		
V slot	20x40x500	2		
V slot 20x40x1000		1		
ACRO axis bracket YY2		2		
Black angle connector		4		
Low profile screw M5		8		
Nema 17 stepper motor		3		
Self Tapping Screw		4		
Tee Nuts		4		
Nylon Insert Lock Nut		12		
Low Profile Screw M5		12		
Mini V Wheel		12		
Ball Bearing		24		
Precision Shim	8x5x1	28		
Nylon Spacer		16		
ACRO SYSTEM extruder plate		2		
Nylon insert hex locknut		12		
Βίδες για Black Angle Connector		10		
Βάση				
Vslot 20x40x1150		4	85,60 €	https://grobotronics.com/v-slot-2040-1500mm-natural-anodized.html
Vslot 20x40x584		2	28,40 €	https://grobotronics.com/v-slot-2040-1000mm-natural-anodized.html
Vslot 20x40x504		4	56,80 €	https://grobotronics.com/v-slot-2040-1000mm-natural-anodized.html
Limit Switch Plates		6	14,40 €	https://grobotronics.com/micro-limit-switch-plate.html
Limit Switches		6	3,60 €	https://grobotronics.com/microswitch-mini-spdt-on-on-with-roller-simulation.html
Plexiglass	1250x660	2		https://monotikashop.gr/product-tag/plexi-glass/?gclid=Cj0KCQiAwP6sBhDAARIsAPFK_wYfoyWTOxgTCjtWqM64AxklqtFZrdCFkiD2qErP9ORBk8mANP-_OaYaAu73EALw_wcB
Plexiglass	550x650	2	225,00 €	
Plexiglass	1250x550	2		
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ			1.320,96 €	

Πίνακας 13 Πίνακας Υλικών

5 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

5.1 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά πραγματοποιήθηκε μελέτη και μοντελοποίηση πρωτότυπου 3D εκτυπωτή υψηλού όγκου εργασίας. Μέσα από την πορεία της εργασίας μελετήθηκαν εργασίες ακαδημαϊκών, πανεπιστημίων, επιστημονικά άρθρα και βιβλιογραφία. Τα παραπάνω βοήθησαν ιδιαίτερα στο να καθοριστεί η μεθοδολογία η οποία πρέπει να ακολουθηθεί για τον σχεδιασμό και την μελέτη ενός εκτυπωτή.

Μελετήθηκαν μέθοδοι κατασκευής Πινάκων Αποφάσεων, οι οποίοι αν και βιβλιογραφικά δεν βρέθηκαν παραδείγματα χρήσης του κατά τον σχεδιασμό διατάξεων, αλλά περισσότερο, σε μελέτες και προσπάθειες βελτιστοποιήσεις υπηρεσιών, έδωσαν την δυνατότητα ασφαλούς σύγκρισης και επιλογής κατάλληλων υποσυστημάτων.

Έγιναν οι απαραίτητες μελέτες και προσομοιώσεις, σε περιβάλλον SolidWorks και με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να εξασφαλιστεί η στατικότητα του εκτυπωτή. Παρατηρήθηκε πως αναφορικά τον σχεδιασμό της τράπεζας εκτύπωσης αλλά και τον υπολογισμό των κοχλιών κίνησης στον Z άξονα, οι αρχικές προβλέψεις δεν ήταν σωστές και ήταν ανάγκη να μεταβληθούν και να επαναδιαστασιοποιηθούν. Σχετικά με την κίνηση στο XY άξονα φάνηκε πως η προσθήκη της διάταξης εξώθησης δεν δημιουργεί κανένα πρόβλημα στη στατικότητα και κατά συνέπεια στη λειτουργία της διάταξης.

Μετά από τα παραπάνω πραγματοποιήθηκε έρευνα αγοράς και επιλέχθηκαν τα κατάλληλα εξαρτήματα που να ικανοποιούν τις προδιαγραφές που ορίστηκαν. Ακόμη και λόγω του πρωτότυπου χαρακτήρα του εκτυπωτή, ορισμένα εξαρτήματα σχεδιάστηκαν εκ του μηδενός με βάση μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικό περιβάλλον. Τα εξαρτήματα αυτά αφορούσαν την ένωση της διάταξης ACRO με τους τραπεζοειδείς κοχλίες. Αυτό έγινε, διότι η ACRO μετατράπηκε ουσιαστικά από διάταξη αυτό καθαυτό στον XY άξονα του τελικού εκτυπωτή. Επίσης παρόμοιος σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε και για την αντικατάσταση των πλακών σύνδεσης του X και του Y άξονα της ACRO. Αυτό κρίθηκε αναγκαίο προκειμένου να μπορούν σε αυτά τα τεμάχια να προσδεθούν και οι γραμμικοί οδηγοί, μέσα στους οποίους θα κινούνται οι γραμμικοί άξονες που βοηθούν την κίνηση στον άξονα Z.

Μέσα από την εργασία και ακόμη και με τους πιο μετριοπαθείς σχεδιασμούς, αποδείχθηκε πως η τελική κατασκευή ενός πρωτότυπου εκτυπωτή υψηλού όγκου εργασίας -παρόλη την οικονομοτεχνική προσέγγιση που ακολουθήθηκε -θα ήταν ιδιαίτερα κοστοβόρα, αφού παρατηρείται πως το συνολικό κόστος για μια ενδεχόμενη κατασκευή θα ξεπερνούσε τα 1300€ και όλα αυτά μάλιστα, χωρίς να υπολογίζονται τα ηλεκτρονικά μέρη του εκτυπωτή, τροφοδοτικό, μητρική πλακέτα, μικροελεγκτές, διεπαφή οθόνης, ανεμιστήρες ψύξης, θερμίστορ κ.α. Εύκολα εξάγεται το συμπέρασμα λοιπόν πως ένας τέτοιος εκτυπωτής ολοκληρωμένος και κατασκευασμένος, έτοιμος προς λειτουργία, θα μπορούσε να ξεπερνά μέχρι και τα 2000€ σε κόστος. φάνηκε πως είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα η κατασκευή ενός πρωτοτύπου εκτυπωτή υψηλού όγκου εργασίας.

5.2 Μελλοντική Εργασία

Σε επόμενο χρόνο υπάρχουν μια σειρά ζητήματα που θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο εργασίας.

- Πρώτα και κυριότερα θα μπορούσαν να είναι ζητήματα μελέτης και σχεδιασμού με επίκεντρο την μείωση του κόστους σε πιο προσιτά επίπεδα και την κατασκευή του πρωτότυπου σε πραγματικό περιβάλλον.

- Ιδιαίτερα σημαντική θα μπορούσε να αποδειχθεί μια προσπάθεια 3D εκτύπωσης ορισμένων μερών απαραίτητων για την συναρμογή κάτι το οποίο θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά το κόστος. Παραδείγματα τέτοιων μερών είναι οι γωνίες σύνδεσης των αξόνων (70 τεμάχια με κόστος 210€), ή ακόμα και ειδικά σχεδιασμένα τεμάχια όπως το κομμάτι ένωσης NEMA-ACRO, ή οι προσαρμοσμένες βάσεις σύνδεσης των V-slot με τους γραμμικούς οδηγούς.
- Ακόμη αντικείμενο μελέτης θα μπορούσε σίγουρα να είναι η ηλεκτρολογική μελέτη του παραπάνω πρωτότυπου, η έρευνα αγοράς ως προς τα απαραίτητα ηλεκτρονικά μέρη ώστε ο εκτυπωτής αυτός να κατασκευαστεί και να προγραμματιστεί.
- Η παρούσα μελέτη εδράζεται σε συγκεκριμένα κριτήρια που τέθηκαν ως δεδομένα, όσον αφορά τα τελικά επιθυμητά χαρακτηριστικά του εκτυπωτή. Σαν μελλοντική εργασία, θα μπορούσε να μελετηθεί η πιθανότητα σχεδιασμού ενός πρωτότυπου εκτυπωτή, βασισμένου στην υπάρχουσα μελέτη, ο οποίος θα διαθέτει ακόμη καλύτερα χαρακτηριστικά και θα μπορεί να απάντα σε αυξημένες ανάγκες που μπορεί να υπάρχουν. Παραδείγματα τέτοιων χαρακτηριστικών, θα μπορούσαν να είναι η ταχύτητα εκτύπωση, η μεγαλύτερη ακρίβεια, κ.α.
- Εξαιρετικά σημαντική μελέτη θα μπορούσε να γίνει στο πεδίο της εργασίας του εκτυπωτή με περισσότερα υλικά. Ειδικότερα με τα μεγάλα μεγέθη εκτύπωσης που υπόσχεται η διάταξη αυτή, θα μπορούσαν να προσφερθούν λύσεις σε μια σειρά τομείς, με σημαντικότερους την ιατρική (παραγωγή πρόσθετων μελών, στεντ κ.α.), στην αεροναυπηγική και την αυτοκινητοβιομηχανία.
- Ιδιαίτερα χρήσιμο σε ερευνητικό επίπεδο θα ήταν η μελέτη και ο σχεδιασμός προκειμένου ο συγκεκριμένος εκτυπωτής να εκτυπώνει με περισσότερα από ένα νήματα στην ίδια εκτύπωση. Ακόμη και σαν ξεχωριστό εργαλείο το οποίο θα μπορεί να συνεργαστεί με τον εκτυπωτή, θα αποτελούσε ιδιαίτερη πρόοδο στον τομέα. Παρόμοια συστήματα υπάρχουν στο εμπόριο, βέβαια ακόμη σε ιδιαίτερα εμβρυακό στάδιο, συστήματα τα οποία δεν συνεργάζονται με όλους εκτυπωτές και πολλές φορές παρουσιάζουν προβλήματα.
- Ζητήματα αυτοματοποιημένης βαθμονόμησης και συντήρησης, επίσης θα μπορούσαν να αποτελέσουν πεδίο μετέπειτα εργασίας. Με σχεδιασμό αλγορίθμων και μηχανισμών για αυτόματη βαθμονόμηση των διαφόρων στοιχείων του εκτυπωτή (λ.χ. επιπεδοποίηση κλίνης, ευθυγράμμιση εξωθητή), αλλά ακόμη και μελέτη και καταγραφή τεχνικών προληπτικής συντήρησης και πρόληψη μηχανικών βλαβών.
- Μελέτη και ανάπτυξη τεχνικών και αισθητηρίων για την «έξυπνη» λειτουργία του εκτυπωτή. Παραδείγματα τέτοιων είναι η παρακολούθηση μέσω κάμερας της πορείας εργασίας του εκτυπωτή, ο απομακρυσμένος έλεγχος του, τουλάχιστον σε επίπεδο ενεργοποίησης-απενεργοποίησης σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, η παρακολούθηση της θερμοκρασίας μέσω ειδικών αισθητήρων, αλλά και η βελτίωση του ασφαλούς χειρισμού, με αισθητήρες τύπου επαφών στις πόρτες του εκτυπωτή και χρήση μαγνητών, προκειμένου να μην υπάρχει δυνατότητα ανοίγματος τους όσο ο εκτυπωτής δουλεύει, αλλά ακόμη και εάν εν τέλει ανοιχτούν, να παράγει ηχητικούς συναγερμούς είτε ακόμη και να διακόπτει την λειτουργία του με λογική έκτακτης ανάγκης.
- Τέλος σε μεταγενέστερο χρόνο θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο, τουλάχιστον σε επίπεδο πειραματισμού να πραγματοποιηθούν προσπάθειες και για τον σχεδιασμό και την μελέτη εκτυπωτών υψηλού όγκου εργασίας που να στηρίζονται σε διαφορετικές αρχιτεκτονικές, όπως λ.χ. εκτυπωτών ρητίνης, ή ακόμα και σκόνης.

6 Βιβλιογραφία

- [1] 2023. 3D DISTRIBUTED. <https://3ddistributed.com/3d-printers/workhorse-printer/>.
- [2] 3D Print Nation. <https://3dprintnation.com/enclosure/>.
R. Avdeev, A. A. Shvets, και I. S. Torubarov . 2019. «Investigation of Kinematics of 3D Printer Print Head Moving Systems.» Στο Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. Springer.
- [3] ACRO, OpenBuilds. *χ.χ.* OpenBuilds . <https://openbuilds.com/builds/openbuilds-acro-system.5416/>.
- [4] ACTA Polytechnica, Czech Technical University Publish. 2004. «Concept Design.»
- [5] Adams, Chris. 2024. Modern Analyst. <https://www.modernanalyst.com/Careers/InterviewQuestions/tabid/128/ID/2159/What-is-a-Pugh-Matrix.aspx>.
- [6] 2021. Additive manufacturing General principles Fundamentals and vocabulary.
- [7] Ahn, Dong-Gyu. 2021. «Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art.» International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 703-742.
- [8] Ali Bagheri, και Jianyong Jin. 2019. «Photopolymerization in 3D Printing.» Applied Polymer Materials, 593-611.
- [9] All3DP. <https://all3dp.com/2/3d-printer-axis-the-basics-simply-explained/>.
- [10] Alp Karakoç, Vibhore Kumar Rastogi, Blaise L. Tardy, Jouni Paltakari, Orlando J. Rojas, και Tapani Isoaho. 2020. «Comparative Screening of the Structural and Thermomechanical Properties of FDM Filaments Comprising Thermoplastics Loaded with Cellulose, Carbon and Glass Fibers.» Materials, 13(2).
- [11] Alveo3D. <https://www.alveo3d.com/en/why-make-a-3d-printer-enclosure-advantages-and-disadvantages/>.
- [12] Amit Bandyopadhyay, και Susmita Bose. 2020. Additive Manufacturing Second Edition. CRC Press.
- [13] Anketa Jandyal, Ikshita Chaturvedi, Ishika Wazir, , Ankush Raina PhD, και Mir Irfan Ul Haq PhD. 2022. «3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0.» Sustainable Operations and Computers, Vol. 3, 33-42.
- [14] Antón Smirnov, Anton Seleznev, Pavel Peretyagin, Ekaterina Bentseva, Yuri Pristinskiy, Ekaterina Kuznetsova, και S. N. Grigoriev. 2022. «Rheological Characterization and Printability of Polylactide (PLA)-Alumina (Al₂O₃) Filaments for Fused Deposition Modeling (FDM).» Materials, 15(23).
- [15] Benjamin Dermeik, και Nahum Travitzky. 2020. «Laminated Object Manufacturing of Ceramic-Based Materials.» Advanced Engineering Materials.
- [16] Brathikan V , Balasubramanian S, Kiranlal S, και Ravi Ragul. 2021. «Design and development of large scale FDM based 3D printer.» ICDMME.
- [17] Brenna Sniderman, και Parker Baum. 2016. «3D opportunity for life-Additive manufacturing takes humanitarian action.» Deloitte Review, 1-8.
- [18] Chee Kai Chua, και Kah Fai Leong. 2016. 3D printing and additive manufacturing: Principles and applications. WSPC.
- [19] Daniel D. Frey, Paulien M. Herder, Ype Wijnia, Eswaran Subrahmanian, Konstantinos Katsikopoulos, και Don P. Clausing . 2008. «The Pugh Controlled Convergence method: model-based evaluation and implications for design theory.» Research in Engineering Design, 41-58.
- [20] Dassault Systemes. <https://www.3ds.com/make/solutions/blog/pros-and-cons-3d-printing>.

- [21] Deck Khong Tan, Mohammed Maniruzzaman, και Ali Nokho. 2018. «Advanced Pharmaceutical Applications of Hot-Melt Extrusion Coupled with Fused Deposition Modelling (FDM) 3D Printing for Personalised Drug Delivery.» *Pharmaceutics*, 10(4).
- [22] Donghua Zhao, Tianqi Li, Beijun Shen, Yicheng J, Weizhong Guo, και Feng Gao. 2020. «A multi-DOF rotary 3D printer: machine design, performance analysis and process planning of curved layer fused deposition modeling (CLFDM).» *Rapid Prototyping Journal*, 1079-1093.
- [23] Dongkeon Lee, Takashi Miyoshi, Yasuhiro Takaya, και Taeho Ha. 2006. «3D Micro fabrication of Photosensitive Resin Reinforced with Ceramic Nanoparticles Using LCD Microstereolithography.» *Journal of Laser Micro/Nano engineering Vol.1, No.2*.
- [24] Douglas, Ken. χ.χ. All3DP. <https://all3dp.com/2/3d-printer-heated-bed-advantages/>.
- [25] Dwamena, Michael. χ.χ. 3D Printerly. <https://3dprinterly.com/delta-vs-cartesian-3d-printer/#pros-and-cons-of-a-cartesian-3d-printer>.
- [26] Edoardo Idá, Federico Nanetti, και Giovanni Mottola. 2022. «An Alternative Parallel Mechanism for Horizontal Positioning of a Nozzle in an FDM 3D Printer.» *Machines*, 10(7).
- [27] «An Alternative Parallel Mechanism for Horizontal Positioning of a Nozzle in an FDM 3D Printer.» *Machines*, 10(7).
- [28] Erboz, Gizem. 2017. «How to Define Industry 4.0: The Main Pillars Of Industry 4.0.» *MANAGERIAL TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF ENTERPRISES IN GLOBALIZATION ERA*, 761-767.
- [29] Esha Mukherjee, Luke Malone, Edward Tackett, Bakeerathan Gunaratnam, και Gordon Grant. 2023. «Monitoring the Calibration of In-Office 3D Printers.» *Dentistry Journal*, 11(1).
- [30] Faris Dwi Mulyanto, Yuris Setyoadi, και Rifki Herman. 2022. «The Performance Analysis of The 3D Printer Corexy FDM Type With Area X=200 Y=200 Z=200 mm.» *Jurnal Teknik Mesin Mechanical Xplore*, 26-33.
- [31] Fina, Fabrizio, Simon Gaisford, και Abdul W. Basit . 2018. *3D Printing of Pharmaceuticals*. Springer.
- [32] 2017. *Finite element analysis using solidworks. Introduction to SOLIDWORKS*.
- [33] Gaskill, Melissa. χ.χ. NASA.gov. <https://www.nasa.gov/missions/station/solving-the-challenges-of-long-duration-space-flight-with-3d-printing/>.
- [34] Giraso Keza Monia Kabandana, Tao Zhang, και Chengpeng Chen. χ.χ. «Emerging 3D printing technologies and methodologies for microfluidic development.» *Analytical Methods*, 14(30), 2885-2906.
- [35] Griffey, Jason. 2014. ALA TechSource.
- [36] H. Bikas, P. Stavropoulos, και G. Chryssolouris. 2016. «Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review.» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.83, 389-405.
- [37] Hullette, Tobias. χ.χ. All3DP. <https://all3dp.com/2/direct-vs-bowden-extruder-technology-shootout/>.
- [38] All3DP. <https://all3dp.com/2/direct-vs-bowden-extruder-technology-shootout/>.
- [39] Jaemin Lee, Chanwoo Song, Inhwan Noh, Sangbyeong Song, και Yun-Seok Rhee. 2020. «Hot-Melt 3D Extrusion for the Fabrication of Customizable Modified-Release Solid Dosage Forms.» *Pharmaceutics*, 12(8).
- [40] Jeffrey M. Moore, Matthew A. Glaser, και Meredith D. Betterton. «Chiral self-sorting of active semiflexible filaments with intrinsic curvature.»
- [41] JLugo. <https://sites.nd.edu/jlugo/2012/09/24/pugh-method-how-to-decide-between-different-designs/>.
- [42] Kurowski, Paul M. 2013. *Engineering Analysis with SolidWorks Simulation*. Schhoff Development Corporation.
- [43] Lavecchia, Fulvio, Alessandro Pellegrini, και Luigi Maria Galantucci. 2022. «Comparative study on the properties of 17-4 PH stainless steel parts made by metal fused filament fabrication

process and atomic diffusion additive manufacturing.» *Rapid Prototyping Journal*, 29(2), 393-407.

- [44] Lütkemeyer, Martin. *χ.χ.* The 3DPrinter Bee. <https://the3dprinterbee.com/corexy-vs-hbot/>.
- [45] Mariano Jiménez, Luis Romero, Iris A. Domínguez, María del Mar Espinosa, και Manuel Domínguez. 2019. «Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects.» *Complexity in Manufacturing Processes and Systems*, 19 Φεβρουάριος.
- [46] May, Vicki. 2022. Protototal UK. <https://protototaluk.com/blog/advantages-and-disadvantages-of-3d-printing/>.
- [47] Protototal UK. <https://protototaluk.com/blog/advantages-and-disadvantages-of-3d-printing>.
- [48] Md. Hazrat Ali, Syuhei Kurokawa, και Essam Sheh. 2022. «Development of a large-scale multi-extrusion FDM printer, and its challenges.» *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 198-213.
- [49] Mirko Kariž, Daša Krapež Tomec, Sebastian Dahle, Manja Kitek Kuzman, Milan Šernek, και Jure Žigon. 2021. «Effect of Sanding and Plasma Treatment of 3D-Printed Parts on Bonding to Wood with PVAc Adhesive.» *Polymers*, 13(8).
- [50] MSc, Richard Vennix. WayBack. <https://web.archive.org/web/20120210194852/http://www.matbase.com/material/polymers/agro-based/polylactic-acid-pla/properties>.
- [51] N. Shahrubudin, T.C. Lee, και R. Ramlan. 2019. «An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications.» *Procedia Manufacturing*, 14 Αύγουστος: 1286-1296.
- [52] ND. <https://sites.nd.edu/jlugo/2012/09/24/pugh-method-how-to-decide-between-different-designs/>.
- [53] Nguyen, Tung. 2019. «Study, Design and Implementation of 3D Printe.»
- [54] Nosakhare Edoimioya, Keval S. Ramani, και Chinedum E. . 2021. «Software Compensation of Undesirable Racking Motion of H-frame 3D Printers using Filtered B-Splines.»
- [55] O'Connell, Jackson. All3DP. <https://all3dp.com/2/corexy-vs-cartesian-3d-printer-differences/>.
- [56] *χ.χ.* OpenBuilds ACRO. <https://openbuilds.com/builds/openbuilds-acro-system.5416/>.
- [57] Optics, Advanced. 2004. «TIE-31: Mechanical and thermal properties of optical glass.»
- [58] Orhan Gülcan, Kadir Günaydın, και Aykut Tamer. 2021. «The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review.» *Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing II*.
- [59] Pavel Stoklásek, Milan Navrátil, Martin Bednarik, Ivan Hudeč, και Dalibor Petrzela. 2018. «Flexural behaviour of ABS 3D printed parts on professional printer Stratasys Fortus 900mc.» *MATEC Web of Conferences*.
- [60] Peek, Sean. 2024. *Business News Daily*. <https://www.businessnewsdaily.com/6146-decision-matrix.html>.
- [61] Petrice M Cogswell, Matthew Rischall, Amy E. Alexander, Hunter J. Dickens, Giuseppe Lanzino, και Jonathan M. Morris. 2020. «Intracranial vasculature 3D printing: review of techniques and manufacturing processes to inform clinical practice.» *3D Printing in Medicine*, 6(1).
- [62] Rahmad Saputra, Budhi Iskandar, Vita Rumanti Kuriawati, Desrial Desrial, και Ari Purbayanto. 2023. «Material Selection of Collapsible Pot Hauler and Finite Element Analysis Simulation Applied to the Selected Material.» *Advances in Science and Technology Research Journal*, 17(2), 289-298.
- [63] Rauf, Sakandar, Hepi Hari Susapto, Kowther Kahin, Salwa Alshehri, Sherin Abdelrahman, Jordy Homing, Sultan Asad, και συν. 2021. «Self-assembling tetrameric peptides allow in situ 3D bioprinting under physiological conditions.» *Journal of Materials Chemistry B*, 1069-1081.

- [64] Redwood B., Schöffner F., και Garret B. 2017. The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications. Amsterdam, The Netherlands: 3D Hubs.
- [65] RepRap. 2020. RepRap. <https://reprap.org/wiki/CoreXY>.
- [66] Sagar Kailas Gawali, Narendra Kumar, και Prashant K. . 2020. «Investigations on the Development of Heated Build Platform for Additive Manufacturing of Large-Size Parts.» Springer.
- [67] Science Direct. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/decision-matrix>.
- [68] Sourabh Prashant Deshpande, Shrinivas Kulkarni, Sid Shah, και John Irwin. 2019. «Developing an open source, inexpensive, large-scale polar configuration 3D printer.» International Journal of Engineering Research & Innovation, 13-22.
- [69] Tague, Nancy R. 2024. THE QUALITY TOOLBOX.
- [70] The International Journal of Multiphysics, 15(3). «Multi-axis Fused Deposition Modeling using parallel manipulator integrated with a Cartesian 3D printer.»
- [71] The Welding Institute. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-3d-printing/pros-and-cons>.
- [72] Thomas J. Campbell, και James F. Jones. 2020. «Design and implementation of a low cost, modular, adaptable and open-source XYZ positioning system for neurophysiology.» HardwareX, 7.
- [73] Top3D Shop. <https://top3dshop.com/blog/3d-printer-kinematics-explained>.
- [74] Tuan D. Ngo, Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T.Q. Nguyen, και David Hui. 2018. «Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges.» Composites Part B: Engineering, 172-196.
- [75] Tully, Joshua J., και Gabriel N. Meloni. 2020. «A Scientist’s Guide to Buying a 3D Printer: How to Choose the Right Printer for Your Laboratory.» Analytical Chemistry, 14853-14860.
- [76] Valentin Romanov, Reichel Samuel, Alexander Jafek, Adam Frost, Bruce K. Gale, και Marzieh Chaharlang. 2018. «FDM 3D Printing of High-Pressure, Heat-Resistant, Transparent Microfluidic Devices.» Analytical Chemistry, 90(17), 10450-10456.
- [77] Vennix, Richard. WayBack. <https://web.archive.org/web/20120210194852/http://www.matbase.com/material/polymers/agro-based/polylactic-acid-pla/properties>.
- [78] Vinod G. Gokhare, και Dr. D. N. Raut . 2017. «A Review paper on 3D-Printing Aspects and Various Processes Used in the 3D-Printing.» International Journal of Engineering Research & Technology, 06 June: 953-958.
- [79] Vlastimil Chalupa, Michal Staněk, και Jiří Vanek. 2023. «Design of Dual-Head 3D Printer.» Manufacturing Technology, 23(2), 177-185.
- [80] Waleed Ahmed, Haleimah Alabdouli, Hend Alqaydi, Aya Mansour, Huda Al Khawaja, και Hamad Al Jassmi. 2020. «Open Source 3D Printer: A Case Study.» Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2995-3004.
- [81] XoMetry. <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/gantry-system/>.
- [82] Yihang Ma, Boyin Zhang, H. Sun, Dandan Liu, Yuhang Zhu, Qingsan Zhu, και Xiangji Liu. 2023. «The Dual Effect of 3D-Printed Biological Scaffolds Composed of Diverse Biomaterials in the Treatment of Bone Tumors.» International Journal of Nanomedicine, Volume 18, 293-305.
- [83] Yuan, Yeoh Xing. 2021. «DEVELOPMENT OF A SMALL SCALE COREXY TYPE 3D PRINTER.»
- [84] Yue Wang, Zhiyao Xu, Dingdi Wu, και Jiaming Bai . 2020. «Current Status and Prospects of Polymer Powder 3D Printing Technologies.» Advances in Additive Manufacturing.
- [85] Zhang, Ailing, και Yanxiang Li. 2023. «Thermal Conductivity of Aluminum Alloys—A Review.» Materials.

- [86] Αριστομένης, Εφραιμίδης. 2019. «Εφαρμογές της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης στη Βιομηχανία.»
Σύνδεσμος Βιομηχανιών Θεσσαλίας & Στερεάς Ελλάδος 1-19.
- [87] Αριστομένης, Εφραιμίδης. 2019. «Εφαρμογές της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης στη Βιομηχανία.»
Σύνδεσμος Βιομηχανιών Θεσσαλίας & Στερεάς Ελλάδος 1-19.
- [88] Πολύδωρας, Δρ. Σταμάτιος Ν. «Διαλέξεις "ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΙΚ/3D
Εκτύπωσης"» ΔΠΜΣ "Συστήματα Αυτοματισμού"-ΕΜΠ.