



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Επιλογή συνθηκών κατεργασίας στην τρισδιάστατη
εκτύπωση (FDM) πορωδών τεμαχίων με τη μέθοδο Taguchi**

Πρόδρομος Φιλιππίδης

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Χ. Βοσνιάκος

ΑΘΗΝΑ 2018

Περίληψη

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές κατεργασιών με πρόσθεση υλικού (Additive Manufacturing-AM), η πλέον διαδεδομένη εκ των οποίων είναι η μοντελοποίηση σύντηξης εναπόθεσης (FDM). Στη διαδικασία FDM, το υλικό νήματος τροφοδοσίας θερμαίνεται και τήκεται σε ημίρρευστη κατάσταση. Στη συνέχεια, το ημίρρευστο υλικό εξωθείται μέσω του άκρου της κεφαλής του ακροφυσίου. Η κεφαλή του ακροφυσίου κινείται κατακόρυφα και οριζόντια για να σχηματίσει το τρισδιάστατο αντικείμενο απευθείας από ψηφιακό μοντέλο CAD σε μορφή διαδοχικών στρώσεων που εναποτίθενται η μία πάνω στην άλλη.

Μέσω της διαδικασίας FDM μπορούν να κατασκευαστούν πορώδεις δομές (porous structures). Αυτές οι δομές είναι επαναλαμβανόμενες διατάξεις ενός μοναδιαίου κυττάρου (unit cell) σε μια ογκομετρική περιοχή. Οι πορώδεις δομές έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές μηχανικής συμπεριλαμβανομένων υπερελαφρών κατασκευών και συμβατικής ψύξης. Επίσης χρησιμοποιούνται εκτενώς ως βιοσυμβατά υλικά για ορθοπεδικά εμφυτεύματα και στη μηχανική ιστών (tissue engineering).

Η μέθοδος Taguchi που αποτελεί μια τεχνική Σχεδιασμού Πειραμάτων (Design of Experiments-DOE) έχει χρησιμοποιηθεί πάρα πολύ για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων κατεργασίας προϊόντων μέσω διεξοδικής πειραματικής έρευνας. Δεδομένου ότι η τεχνολογία AM επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους κατεργασίας, και επί του παρόντος έχει σχετικά υψηλό κόστος ανά τεμάχιο και είναι σχετικά αργή, το κόστος ενός πειράματος πλήρους παραγοντικής μεθόδου (full factorial) είναι αρκετά σημαντικό. Ο σχεδιασμός πειραμάτων με τη μέθοδο Taguchi μπορεί να απλοποιήσει σημαντικά τον πειραματικό σχεδιασμό.

Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται μια προσπάθεια αξιολόγησης της διαστασιακής ακρίβειας πορώδων δομών. Η διαστασιακή ακρίβεια αναφέρεται στην απόκλιση που παρατηρείται ανάμεσα στην επιθυμητές και πραγματικές τιμές των διαστάσεων των πόρων. Αφού επιλεγθούν οι παράγοντες που θα μελετηθούν καταστρώνεται το πείραμα μέσω της μεθόδου Taguchi και στη συνέχεια κατασκευάζονται τα δοκίμια. Έπειτα φωτογραφίζονται σε στερεοσκόπιο και γίνονται οι απαραίτητες μετρήσεις διαστάσεων με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού. Τέλος γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων χρησιμοποιώντας ανάλυση Taguchi και ANOVA.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων των μετρήσεων (ANOVA) έδειξαν ότι η ταχύτητα εκτύπωσης είναι ο παράγοντας που επηρεάζει περισσότερο τη κατεργασία FDM κατά μήκος της διεύθυνσης του X άξονα σε ποσοστό 59,28%. Η ταχύτητα εκτύπωσης είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας κατά μήκος του Y άξονα σε ποσοστό 72,63%. Το πάχος στρώσης παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο κατά μήκος του Z άξονα σε ποσοστό 45,79%, καθώς και το γεφύρωμα σε ποσοστό 72,06%. Για τη βελτιστοποίηση και των τεσσάρων κριτηρίων ποιότητας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Grey Taguchi, και από την ανάλυση προέκυψε ότι θέτοντας ίσα βάρη σε όλα τα χαρακτηριστικά ποιότητας, βέλτιστος είναι ο συνδυασμός: ποσότητα αναρρόφησης ινών 0,08, πάχος στρώσης 0,4 mm, θερμοκρασία 190° C και ταχύτητα εκτύπωσης 40mm/s. Προκύπτει επίσης ότι σημαντικότεροι παράγοντες είναι δύο: το πάχος στρώσης ακολουθούμενο από τη ταχύτητα εκτύπωσης. Η θερμοκρασία έχει μικρότερη σημασία, ενώ η ποσότητα αναρρόφησης ινών αμελητέα.

Abstract

There are a number of Additive Manufacturing (AM) techniques, the most widespread of which is Fused Deposition Modeling. (FDM). In the FDM process, the feed stock material is heated and melted in a semi-liquid state. Then, the semi-liquid material is extruded through the tip of the nozzle head. The nozzle head moves vertically and horizontally to form the three-dimensional object directly from a digital CAD model in the form of successive layers superimposed over one another.

Porous structures can be constructed through the FDM process. These structures are repeated units of a unit cell in a volumetric region. Porous structures have been used in engineering applications including ultra-light structures and conventional cooling. They are also extensively used as biocompatible materials for orthopedic implants and tissue engineering.

The Taguchi method, which is a Design of Experiments (DOE) technique, has been used extensively to optimize product process parameters through thorough experimental research. Since the AM technology is affected by many processing parameters, and currently has a relatively high cost per piece and is relatively slow, the cost of a full factorial experiment is quite important. Designing experiments using the Taguchi method can significantly simplify the experimental design.

In this paper an attempt is made to evaluate the dimensional accuracy of porous structures. Dimensional accuracy refers to the variance observed between the desired and actual values of the pore dimensions. After selecting the factors to be studied, the experiment is made by the Taguchi method and then the samples are made. They are then photographed in a stereoscope and the necessary dimensions measurements are made using the appropriate software. Finally the results of the measurements are analyzed using Taguchi and ANOVA.

The results obtained from the analysis of measurement data showed that printing speed is the factor most affected by FDM process along the X axis at 59.28%. Print speed is the most important factor along the Y axis at 72.63%. The layer thickness plays the most important role along the Z axis at 45.79% as well as the bridging at 72.06%. To optimize the four quality criteria, Grey Taguchi method was used, and analysis showed that equalizing weights in all the quality characteristics, the optimal combination is: destring/suck 0.08, layer thickness 0.4mm, temperature 190 ° C and print speed 40mm/s. It also emerges that two major factors are: layer thickness followed by print speed. Temperature is of less importance, while destring/suck is negligible.

Στους δικούς μου ανθρώπους

Πρόλογος

Οι κατεργασίες πρόσθεσης υλικού (Additive Manufacturing-AM), συμπεριλαμβανομένης της κατεργασίας Μοντελοποίησης Σύντηξης Εναπόθεσης (FDM), είναι απαραίτητο να παράγουν αντικείμενα υψηλής ποιότητας. Οι αυξανόμενες απαιτήσεις για υψηλότερη ποιότητα κατασκευασμένων εξαρτημάτων μέσω της κατεργασίας FDM, στη σύγχρονη μεταποιητική βιομηχανία, όπως τα ιατρικά εμφυτεύματα, οι τηλεπικοινωνίες, η ηλεκτρονική και η αεροδιαστημική απαιτούν ολοένα και υψηλότερα επίπεδα διαστασιακής ακρίβειας. Σε τέτοιες εφαρμογές, η διατήρηση της ακρίβειας των διαστάσεων με αυστηρές ανοχές θα διασφαλίσει τη σταθερότητα διαστάσεων και την επαναληψιμότητα του κατασκευασμένου εξαρτήματος.

Στο παρελθόν, η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού πορωδών δομών περιοριζόταν αυστηρά από τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής, όπως η χύτευση και η μορφοποίηση μεταλλικών ελασμάτων. Μόνο απλές τοπολογίες και δομές μπορούσαν να κατασκευαστούν σε μακροκλίμακα, χωρίς την πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των πορωδών δομών. Ωστόσο, η τεχνολογία AM παρέχει μια εναλλακτική προσέγγιση για την άμεση ή έμμεση κατασκευή των πολύπλοκων πορωδών δομών μέσω της μεθόδου layer by layer. Η πιο συνηθισμένη τεχνική για την κατασκευή τέτοιων δομών είναι τεχνολογία εξώθησης υλικού (material extrusion).

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Abstract	3
Πρόλογος.....	5
Περιεχόμενα	6
Κατάλογος Εικόνων.....	8
Κατάλογος Πινάκων.....	10
Κατάλογος Σχημάτων	11
1 Εισαγωγή.....	12
1.1 Σκοπός εργασίας.....	12
1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	12
1.3 Δομή εργασίας.....	14
2 Τεχνικές Κατεργασιών με Πρόσθεση Υλικού.....	15
2.1 Τεχνικές κατεργασιών με πρόσθεση υλικού (Additive Manufacturing).....	15
2.2 Κατηγορίες κατεργασιών με πρόσθεση υλικού	17
2.3 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις της τεχνολογίας AM.....	19
2.4 Υλικά για AM	20
2.5 Μέθοδος FDM (Fused Deposition Modeling).....	21
2.5.1 Αρχές λειτουργίας FDM	21
2.5.2 Παράμετροι κατεργασίας FDM.....	22
2.5.3 Υλικά που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο FDM.....	24
2.6 Εφαρμογές AM	25
2.7 Πορώδεις δομές.....	26
3 Σχεδιασμός Πειραμάτων (Design of Experiments).....	28
3.1 Παραγοντικός σχεδιασμός (Factorial Design).....	28
3.1.1 Πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός (Full factorial design)	28
3.1.2 Κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός (Fractional factorial design).....	29
3.2 Μέθοδος Taguchi.....	30
3.2.1 Ορθογώνιοι πίνακες Taguchi.....	32
3.2.2 Βαθμοί ελευθερίας.....	34
3.2.3 Signal to Noise Ratio (SNR).....	34
3.2.4 ANOVA.....	35

4 Πειράματα, Αποτελέσματα και Ανάλυση τους.....	36
4.1 Σχεδιασμός Πειραμάτων (DOE)	36
4.1.1 Προκαταρκτικό πείραμα (<i>Screening test</i>)	36
4.1.2 Κύριο πείραμα	41
4.2 Διεξαγωγή Πειραμάτων.....	43
4.2.1 Εξαγωγή <i>G-Code</i>	43
4.2.2 Διαδικασία εκτύπωσης	45
4.3 Συλλογή Δεδομένων	49
4.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων	54
4.4.1 Εισαγωγή δεδομένων στο <i>Minitab</i>	54
4.4.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων	58
4.4.3 Μέθοδος <i>Grey Taguchi</i>	65
4.4.4 Μοντέλο αλληλεπιδράσεων	70
5 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία.....	74
5.1 Συμπεράσματα	74
5.2 Βελτιώσεις.....	75
Βιβλιογραφία.....	77
Παράρτημα Ι.....	80
Παράρτημα ΙΙ.....	81

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 4-1: α) άνω όψη και β) πλάγια όψη δοκιμίων.....	38
Εικόνα 4-2: τρισδιάστατο συμπαγές μοντέλο.....	43
Εικόνα 4-3: φόρμα εισαγωγής δεδομένων του LattiSlicer.....	44
Εικόνα 4-4: εξαγόμενος G-Code που προκύπτει από το slicing.....	45
Εικόνα 4-5: α) πλάγια και β) μπροστινή όψη του CubeX™.....	45
Εικόνα 4-6: άξονες XYZ.....	46
Εικόνα 4-7: 3D filament (PLA).....	46
Εικόνα 4-8: ωρολογιακό μικρόμετρο.....	47
Εικόνα 4-9: οθόνη αφής CubeX™.....	47
Εικόνα 4-10: α) μπροστινή- Υ πλευρά και β) πλαϊνή όψη του δοκιμίου- X πλευρά.....	48
Εικόνα 4-11: το συνολικό πείραμα του πίνακα Taguchi.....	48
Εικόνα 4-12: α) το στερεομικροσκόπιο της αίθουσας μεταλλογραφίας.....	50
Εικόνα 4-13: Logitech Webcam Software.....	50
Εικόνα 4-14: α) και β) φωτογραφίες πόρων μέσω στερεομικροσκοπίου.....	51
Εικόνα 4-15: α) το περιβάλλον του ImageJ β) φόρμα εισαγωγής δεδομένων.....	52
Εικόνα 4-16: 6 συνολικές μετρήσεις σε κάθε άνοιγμα πόρου - 3 κάθετες και 3 οριζόντιες.....	53
Εικόνα 4-17: το περιβάλλον του Minitab.....	54
Εικόνα 4-18: πίνακας L_{18}	55
Εικόνα 4-19: γεφύρωμα μεταξύ δύο διαδοχικών στηλών.....	57
Εικόνα 4-20: πλήρως συμπληρωμένο φύλλο εργασίας με "smaller is better" δεδομένα.....	57
Εικόνα 4-21: Main Effects Plot for SN ratios (x - axis).....	58
Εικόνα 4-22: αποτελέσματα ANOVA.....	60
Εικόνα 4-23: Main Effects Plot for SN ratios (y - axis).....	62
Εικόνα 4-24: Main Effects Plot for SN ratios (z - axis).....	62
Εικόνα 4-25: Main Effects Plot for SN ratios (bridge SD).....	63

Εικόνα 4-26: Main Effects Plot for Means - Taguchi analysis.....	70
Εικόνα 4-27: αποτελέσματα ANOVA.....	70
Εικόνα 4-28: Interaction Plot for Means.....	73

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1: 7 Families of Additive Manufacturing.....	17
Πίνακας 2-2: πλεονεκτήματα και προκλήσεις της τεχνολογίας AM.....	19
Πίνακας 2-3: Υλικά ανά κατηγορία AM.....	20
Πίνακας 2-4: διάφοροι παράμετροι κατεργασιών μεθόδου FDM.....	22
Πίνακας 2-5: υλικά FDM και ιδιότητες τους.....	24
Πίνακας 2-6: ιδιότητες εφελκυσμού υλικών FDM.....	24
Πίνακας 2-7: εφαρμογές τεχνολογίας AM.....	25
Πίνακας 3-1: ορθογώνιος πίνακας $L_8(2^7)$	33
Πίνακας 3-2: Πρότυποι ορθογώνιοι πίνακες.....	33
Πίνακας 4-1: παράγοντες και επίπεδα που επιλέχθηκαν στο screening test.....	36
Πίνακας 4-2: ορθογώνιος πίνακας L_8 για το screening test.....	38
Πίνακας 4-3: αποτελέσματα ANOVA για το screening test.....	39
Πίνακας 4-4: βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων (screening test).....	40
Πίνακας 4-5: παράγοντες και επίπεδα του κανονικού πειράματος.....	41
Πίνακας 4-6: ορθογώνιος πίνακας L_{18} για το κύριο πείραμα.....	42
Πίνακας 4-7: συγκεντρωτικά στοιχεία της ανάλυσης (Taguchi - ANOVA).....	64
Πίνακας 4-8: δεδομένα SNR GRA.....	66
Πίνακας 4-9: Grey Relational Generation.....	67
Πίνακας 4-10: GRC.....	68
Πίνακας 4-11: ANOVA αλληλεπιδράσεων παραγόντων.....	72

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1: διαδικασία κατασκευής ενός φυσικού μοντέλου με τη μέθοδο FDM.....	21
Σχήμα 2-2: σχηματοποίηση διαφόρων παραμέτρων FDM.....	23
Σχήμα 3-1: διαδικασία σχεδιασμού Taguchi.....	31

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός εργασίας

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η αξιολόγηση της διαστασιακής ακρίβειας πορωδών τεμαχίων που εκτυπώνονται με τη μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης FDM (Fused Deposition Modeling). Η μέθοδος FDM είναι η πλέον διαδεδομένη από τις τεχνικές κατεργασιών με πρόσθεση υλικού (Additive Manufacturing - AM) μέχρι σήμερα. Στη μέθοδο αυτή, ένα θερμοπλαστικό υλικό εξωθείται μέσω ενός ακροφυσίου για το σχηματισμό στρώσεων, και η τελική γεωμετρία είναι το αποτέλεσμα διαδοχικών υπερτιθέμενων στρώσεων. Ωστόσο, είναι δύσκολο να επιτευχθεί επαρκής διαστασιακή ακρίβεια για ορισμένες εφαρμογές λόγω των χαρακτηριστικών της μεθόδου.

Η διαστασιακή ακρίβεια (dimensional accuracy) ενός εξαρτήματος ή αντικειμένου αναφέρεται στο βαθμό συμφωνίας μεταξύ της διάστασης του κατασκευασμένου προϊόντος και των σχεδιασμένων προδιαγραφών του. Είναι η πιο κρίσιμη πτυχή για να διασφαλιστεί η επαναληψιμότητα σε διαστάσεις των κατασκευασμένων εξαρτημάτων.

[1] Οι πορώδεις δομές (porous structures) ή πορώδη ικρίωματα (porous scaffolds) που κατασκευάζονται με τεχνικές AM, χρησιμοποιούνται κυρίως στην Μηχανική Ιστών (Tissue engineering) και δευτερευόντως σε διάφορες άλλες εφαρμογές. Η μηχανική ιστών στοχεύει στην αποκατάσταση ή την αναγέννηση ενός κατεστραμμένου ιστού συνδυάζοντας κύτταρα με τρισδιάστατα πορώδη ικρίωματα. [2]

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας προκειμένου να αξιολογηθεί η διαστασιακή ακρίβεια πορωδών τεμαχίων, κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο FDM πορώδεις δομές οι οποίες στη συνέχεια φωτογραφήθηκαν με τη βοήθεια στερεοσκοπίου. Έπειτα οι φωτογραφίες που συλλέχτηκαν, χρησιμοποιώντας ειδικό ηλεκτρονικό λογισμικό έτυχαν περαιτέρω επεξεργασίας ούτως ώστε να αξιολογηθεί η διαστασιακή ακρίβεια των πόρων. Για τον σχεδιασμό των πειραμάτων (design of experiments) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Taguchi η οποία ανήκει στη κατηγορία κλασματικού παραγοντικού σχεδιασμού (fractional factorial design). Για την ανάλυση των δεδομένων από τα αποτελέσματα των μετρήσεων που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκε ανάλυση Taguchi και ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) μέσω ειδικού στατιστικού λογισμικού.

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στα πλαίσια της δημιουργίας θεωρητικού υποβάθρου, ώστε να συνταχτεί η παρούσα εργασία, μελετήθηκαν αρκετές δημοσιεύσεις επιστημονικών ομάδων πάνω σε θέματα που αφορούν τη διαστασιακή ακρίβεια συμπαγών και πορωδών τεμαχίων που κατασκευάζονται με τη μέθοδο FDM. Η διαστασιακή ακρίβεια των αντικειμένων που κατασκευάζονται με τη μέθοδο αυτή, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από διάφορες παραμέτρους κατεργασίας. Ακόμη η μέθοδος αυτή, διέπεται από ένα σύνθετο μηχανισμό κατασκευής τεμαχίων, δημιουργώντας συχνά δυσκολίες στη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι αντικρουόμενες παράμετροι θα καθορίσουν την ποιότητα και την ακρίβεια των τεμαχίων. Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες από πολλούς ερευνητές για τη βελτίωση της ακρίβειας των εξαρτημάτων, της τελικής επιφάνειας, της αντοχής κλπ. με την κατάλληλη προσαρμογή των παραμέτρων κατεργασίας FDM. Οι περισσότερες

μελέτες αφορούσαν κυρίως συμπαγείς δομές μερικές από τις οποίες παραθέτονται παρακάτω:

Οι T. Nancharaiyah et al. [3] μελέτησαν την επίδραση των παραγόντων κατεργασίας FDM πάχους στρώσης, πλάτος μονοπατιού (road width), γωνία ράστερ (raster angle) και κενό αέρος στο επιφανειακό φινίρισμα και τη διαστασιακή ακρίβεια συμπαγών κυλινδρικών δοκιμίων.

Μια άλλη έρευνα που διεξήγαγαν οι Mohamed et al. [4] περιέγραφε μια μεθοδολογία για μια αποτελεσματική βελτιστοποίηση των παραμέτρων κατεργασίας FDM χρησιμοποιώντας κριτήριο I-βελτιστοποίησης. Ανέπτυξαν μαθηματικά μοντέλα για τη περιγραφή της σχέσης ανάμεσα στις παραμέτρους εισόδου και τη διαστασιακή ακρίβεια συμπαγών ορθογωνίων τεμαχίων.

Επίσης οι Sood et al. [5] διερεύνησαν την επίδραση πέντε παραγόντων και πιο συγκεκριμένα του πάχους στρώσης, του προσανατολισμού κατασκευής του δοκιμίου, της γωνίας ράστερ, του διακένου μεταξύ των γωνιών ράστερ (air gap) και του πλάτους ράστερ (raster width), με τρία επίπεδα για κάθε παράγοντα όπως και την αλληλεπίδραση του προσανατολισμού κατασκευής του δοκιμίου με τους υπόλοιπους παράγοντες στη διαστασιακή ακρίβεια συμπαγών τρισδιάστατων δοκιμίων που κατασκευάζονται με τη μέθοδο FDM.

Ακόμη οι Alsoufi et al. [6] παρουσίασαν μια πλατφόρμα έρευνας, η οποία χρησιμοποιείται για τη μελέτη της ποιότητας τραχύτητας επιφάνειας και τη διαστασιακή ακρίβεια συμπαγών κυβικών δοκιμίων που κατασκευάζονται από έναν προσωπικό/επιτραπέζιο αποδοτικό FDM 3D εκτυπωτή χρησιμοποιώντας διαφορετικά θερμοπλαστικά υλικά νήματος και ειδικά τα PLA, PLA+, ABS και ABS+.

Οι A. Peng et al. [7] χρησιμοποιούν μεθοδολογία επιφάνειας απόκρισης (Response Surface Methodology -RSM) σε συνδυασμό με ασαφές σύστημα συμπερασμάτων (Fuzzy Inference System-FIS) και γενετικούς αλγορίθμους για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων κατεργασίας FDM προκειμένου να επιτύχουν ελάχιστη διαστασιακή απόκλιση, παραμόρφωση κάμψης και χρόνο κατασκευής σε κυβικά συμπαγή δοκίμια.

Όσον αφορά τις πορώδεις δομές σημαντική δουλειά έχει γίνει από τους G. Dong et al.[8] οι οποίοι διεξήγαγαν δοκιμές συμπίεσης για τη διερεύνηση της μηχανικής απόδοσης πορωδών δοκιμίων που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο FDM με διαφορετικές παραμέτρους κατεργασίας βελτιστοποιημένων όσον αφορά τη διαστασιακή τους ακρίβεια.

Επίσης οι M.R. Ravari et al. [9] χρησιμοποιούν μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για να προβλέψουν την επίδραση της διακύμανσης στη διάμετρο των αντηρίδων (struts) στο ελαστικό μέτρο (modulus), καθώς και στη τάση καταπόνησης των κυψελοειδών πορωδών δομών κατασκευασμένων με τη μέθοδο FDM με τη χρήση τόσο ακτινών δέσμης όσο και στερεών πεπερασμένων στοιχείων.

Τέλος οι Parthasarathy et al. [10] σχεδίασαν μια διαδικασία για τη δημιουργία περιοδικών κυψελοειδών πορωδών δομών ειδικά για βιοϊατρικές εφαρμογές με τη μέθοδο EBM (Electron Beam Melting). Ένα από τα πρωταρχικά ενδιαφέροντα αυτής της μελέτης ήταν ο προσδιορισμός των διαστάσεων των μεμονωμένων δομικών στοιχείων και το βάρος των τελικών κομματιών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν 1% διαστασιακή απόκλιση από τον επιθυμητό σχεδιασμό.

1.3 Δομή εργασίας

Η συγκεκριμένη εργασία χωρίζεται σε πέντε κεφάλαια, το καθένα από τα οποία αποτελεί ξεχωριστή θεματική ενότητα, για την καλύτερη οργάνωση και ροή της. Τα τρία πρώτα κεφάλαια εισάγουν τον αναγνώστη στο θεωρητικό υπόβαθρο, το οποίο είναι απαραίτητο να αποκτηθεί ούτως ώστε να μπορέσει να κατανοήσει το περιεχόμενο του τετάρτου κεφαλαίου. Πιο συγκεκριμένα:

- Στο πρώτο κεφάλαιο, εξηγείται ο σκοπός της εργασίας και γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση της έρευνας όσον αφορά θέματα που σχετίζονται με διαστασιακή ακρίβεια τεμαχίων που κατασκευάζονται με τη μέθοδο FDM.
- Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στις τεχνικές κατεργασιών με πρόσθεση υλικού και ειδικότερα στη μέθοδο FDM.
- Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στο σχεδιασμό πειραμάτων αναλύοντας ειδικότερα τις αρχές της μεθοδολογίας Taguchi.
- Το τέταρτο κεφάλαιο περιγράφει αναλυτικά τη διαδικασία που ακολουθήθηκε στη παρούσα εργασία για να αξιολογηθεί η διαστασιακή ακρίβεια των πορωδών δομών παραθέτοντας και αναλύοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν.
- Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία καθώς και πιθανές μελλοντικές βελτιώσεις.

2 Τεχνικές Κατεργασιών με Πρόσθεση Υλικού

2.1 Τεχνικές κατεργασιών με πρόσθεση υλικού (Additive Manufacturing)

Οι τεχνικές κατεργασιών με πρόσθεση υλικού (*Additive Manufacturing - AM*) σύμφωνα με το πρότυπο ASTM Standard ορίζονται ως “οι διαδικασίες σύνδεσης υλικών για την παραγωγή αντικειμένων από δεδομένα τρισδιάστατου μοντέλου (3D), συνήθως στρώμα επί στρώματος, σε αντίθεση με τις μεθοδολογίες αφαιρετικής κατασκευής, όπως η παραδοσιακή μηχανική κατεργασία”.

Στην βιβλιογραφία οι τεχνικές κατεργασιών με πρόσθεση υλικού ή ο όρος “additive manufacturing” συναντάται με πολλά συνώνυμα όπως διαδικασίες πρόσθεσης υλικού, τεχνικές πρόσθεσης υλικού, τεχνικές παραγωγής πρόσθετης στρώσης, πολυστρωματική κατασκευή και κατασκευή ελεύθερης μορφής.[11] Οι διαδικασίες πρόσθεσης υλικού παράγουν φυσικά αντικείμενα από ψηφιακές πληροφορίες κομμάτι-κομμάτι, γραμμή-γραμμή, επιφάνεια-επιφάνεια, ή στρώση-στρώση. Αυτό καθορίζει ταυτόχρονα τη γεωμετρία του αντικειμένου και τις ιδιότητες του υλικού. Οι διαδικασίες AM τοποθετούν, δεσμεύουν και/ή μετασχηματίζουν τα ογκομετρικά πρωτόνια ή στοιχεία (voxels) πρώτης ύλης για τη κατασκευή του τελικού μέρους. [12] Μεταξύ της ποικιλίας προηγμένων αναδυομένων τεχνολογιών παραγωγής, η τεχνολογία AM ξεχωρίζει ως μία με τεράστιες δυνατότητες αλλαγής του κατασκευαστικού κλάδου αλλά και της κοινωνίας στο σύνολο της. [13] Η εξέλιξη της τεχνολογίας AM ήταν εκπληκτική τις τελευταίες τρεις δεκαετίες και έχει βιώσει διψήφια ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Η αγορά AM αναμένεται να αυξηθεί σε περισσότερο από 21 δις. δολάρια μέχρι το 2020.

Αυτή η ανάπτυξη κατέστη δυνατή με βελτιώσεις σε υλικά και τεχνολογίες AM και καθοδηγείται από τους παράγοντες της αγοράς που επιβάλλουν τη χρήση της, όπως η βραχύτερη ανάπτυξη του κύκλου προϊόντος, η αυξανόμενη ζήτηση για προσαρμοσμένα και εξατομικευμένα προϊόντα, η αυξημένη εστίαση και οι κανονισμοί σχετικά με τη βιωσιμότητα, το μειωμένο κατασκευαστικό κόστος και οι χρόνοι παράδοσης και η εισαγωγή νέων επιχειρηματικών μοντέλων. [12] Παρά τις μεγάλες ευκαιρίες για αυτή τη τεχνολογία, οι αβεβαιότητες και οι εικασίες για τις μελλοντικές εξελίξεις παραμένουν. Οι αλλαγές στην παραγωγή και η εμφάνιση νέων ανταγωνιστών είναι μόνο μερικοί από τους παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν σε αναταραχές σε πολλές βιομηχανίες. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχουν διαθέσιμες επιστημονικές μελέτες για την ανάπτυξη σεναρίων σχετικά με το μέλλον της τεχνολογίας AM.[14]

Σήμερα υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός τεχνολογιών που χρησιμοποιούν τις μεθόδους κατασκευής AM, και μερικές από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες περιλαμβάνουν τη στερεολιθογραφία (stereolithography - SL), τη μοντελοποίηση σύντηξης εναπόθεσης (fused deposition modeling - FDM), την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (selective laser sintering - SLS) και την εκτύπωση 3D (3D printing - 3DP). Δεδομένου ότι η ανάπτυξη πολλών από αυτές τις τεχνολογίες προέκυψε ταυτόχρονα, υφίστανται διάφορες ομοιότητες, καθώς και διακριτές διαφορές μεταξύ τους. Με περισσότερα από 20 χρόνια ιστορίας, η τεχνολογία AM εφαρμόστηκε αρχικά κυρίως για τη κατασκευή εννοιολογικών και λειτουργικών πρωτοτύπων, επίσης γνωστή ως Ταχεία Προτυποποίηση (Rapid Prototyping - RP). Αυτά τα πρωτότυπα χρησιμοποιήθηκαν πιο συχνά ως εργαλεία επικοινωνίας και επιθεώρησης, παράγοντας αρκετά φυσικά

μοντέλα σε σύντομο χρονικό διάστημα απευθείας από στερεά μοντέλα υπολογιστών βοηθώντας στη συντόμευση των φάσεων ανάπτυξης της παραγωγής.[11]

2.2 Κατηγορίες κατεργασιών με πρόσθεση υλικού

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM F2792 οι τεχνολογίες κατεργασιών με πρόσθεση υλικού έχουν κατηγοριοποιηθεί σε επτά κατηγορίες οι οποίες είναι οι εξής: [15]

Πίνακας 2-1: 7 Families of Additive Manufacturing

FAMILIES	VAT PHOTOPOLYMERIZATION	POWDER BED FUSION (PBF)	BINDER JETTING	MATERIAL JETTING
Εναλλακτικές Ονομασίες:	SLA TM - Stereolithography Apparatus DLP TM - Digital Light Processing 3SP TM -Scan, Spin, and Selectively Photocure CLIP TM - Continuous Liquid Interface Production	SLS TM - Selective Laser Sintering; DMLS TM - Direct Metal Laser Sintering; SLM TM - Selective Laser Melting; EBM TM - Electron Beam Melting; SHS TM - Selective Heat Sintering; MJF TM - Multi-Jet Fusion	3DP TM - 3D Printing ExOne Voxeljet	Polyjet TM SCP TM - Smooth Curvatures Printing MJM - Multi-Jet Modeling Projet TM
Περιγραφή:	Μια δεξαμενή υγρής φωτοπολυμερούς ρητίνης σκληρύνεται μέσω επιλεκτικής έκθεσης στο φως (μέσω λέιζερ ή προβολέα), η οποία στη συνέχεια αρχίζει τον πολυμερισμό και μετατρέπει τις εκτεθειμένες περιοχές σε συμπαγές μέρος.	Τα κονιοποιημένα υλικά ενοποιούνται επιλεκτικά με την τήξη χρησιμοποιώντας μια πηγή θερμότητας όπως μια δέσμη λέιζερ ή ηλεκτρονίων. Η σκόνη που περιβάλλει το ενοποιημένο μέρος ενεργεί ως υλικό υποστήριξης για προεξέχοντα χαρακτηριστικά.	Υγροί συνδετικοί παράγοντες εφαρμόζονται επιλεκτικά σε λεπτές στρώσεις κονιοποιημένου υλικού για τη δημιουργία μερών αποτελούμενα από στρώσεις. Τα μεταλλικά ή τα κεραμικά κονιοποιημένα μέρη τροφοδοτούνται σε κλίβανο μετά την εκτύπωση τους.	Σταγονίδια υλικού εναποτίθενται στρώση - στρώση για τη κατασκευή εξαρτημάτων. Οι κοινές ποικιλίες περιλαμβάνουν την εκτόξευση με μορφή πίδακα μιας φωτοσκληρυνόμενης ρητίνης και τη σκλήρυνση της με υπεριώδες φως, καθώς και εκτόξευση θερμικά τετηγμένων υλικών που στη συνέχεια στερεοποιούνται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος
Πλεονεκτήματα:	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλό επίπεδο ακρίβειας και πολυπλοκότητας Ομαλό φινίρισμα επιφάνειας Διατήρηση μεγάλων περιοχών κατασκευής 	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλό επίπεδο πολυπλοκότητας Η σκόνη δρα ως υποστηρικτικό υλικό Μεγάλη γκάμα υλικών 	<ul style="list-style-type: none"> Επιτρέπει πλήρη έγχρωμη εκτύπωση Υψηλή παραγωγικότητα Χρήση μεγάλου φάσματος υλικών 	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλό επίπεδο ακρίβειας Επιτρέπει πλήρες χρωματισμό εξαρτημάτων Επιτρέπει τη χρήση πολλαπλών υλικών σε ένα μόνο εξάρτημα
Τυπικά υλικά	Φωτοπολυμερικές ρητίνες που μπορούν να υποστούν επεξεργασία με υπεριώδη ακτινοβολία	Πλαστικά, μεταλλικές και κεραμικές σκόνες και άμμος	Κονιοποιημένα πλαστικά, μέταλλα, κεραμικά, γυαλί και άμμος	Φωτοπολυμερή, πολυμερή, κηροί

Πίνακας 2-1: 7 Families of Additive Manufacturing

FAMILIES	SHEET LAMINATION	MATERIAL EXTRUSION	DIRECTED ENERGY DEPOSITION	HYBRID
Εναλλακτικές Ονομασίες:	LOM - Laminated Object Manufacture SDL - Selective Deposition Lamination UAM - Ultrasonic Additive Manufacturing	FFF - Fused Filament Fabrication FDM™ - Fused Deposition Modeling	LMD - Laser Metal Deposition LENS™ - Laser Engineered Net Shaping DMD™ - Direct Metal Deposition (DM3D)	AMBIT™ - Created by Hybrid Manufacturing Technologies
Περιγραφή:	Φύλλα υλικού στοιβάζονται και ελασματοποιούνται μαζί για το σχηματισμό ενός αντικειμένου. Η μέθοδος ελασματοποίησης μπορεί να είναι συγκολλητικά ή χημικά (χαρτί/πλαστικά), υπερηχητική συγκόλληση ή συγκόλληση (μέταλλα). Οι περιττές περιοχές αποκόπτονται στρωματικά και αφαιρούνται μετά τη κατασκευή του αντικειμένου.	Εξώθηση υλικού μέσω ακροφυσίου ή ανοίγματος με μορφή κομματιών ή σφαιριδίων, τα οποία στη συνέχεια συνδυάζονται σε πολυστρωματικά μοντέλα. Οι κοινές ποικιλίες περιλαμβάνουν θερμαινόμενη θερμοπλαστική εξώθηση (παρόμοια με θερμοπίστολο κόλλας) και διανομή σύριγγας	Σκόνη ή σύρμα τροφοδοτείται σε μια δεξαμενή τήγματος η οποία έχει παραχθεί στην επιφάνεια του τμήματος που προσκολλάται στο υποκείμενο τμήμα ή σε στρώσεις χρησιμοποιώντας μια πηγή ενέργειας όπως μια ακτίνα λέιζερ ή δέσμη ηλεκτρονίων. Αυτό είναι ουσιαστικά μια μορφή αυτοματοποιημένης κατασκευαστικής συγκόλλησης	Η εναπόθεση μετάλλων με λέιζερ (μορφή DED) συνδυάζεται με CNC μηχανική κατεργασία, η οποία επιτρέπει τεχνολογίες Additive Manufacturing και Subtractive Machining να πραγματοποιούνται σε ένα μόνο μηχάνημα έτσι ώστε τα παραγόμενα μέρη να αξιοποιήσουν τα πλεονεκτήματα και των δύο διαδικασιών
Πλεονεκτήματα:	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλές ογκομετρικές τιμές δόμησης Σχετικά χαμηλό κόστος (μη-μέταλλα) Επιτρέπει συνδυασμούς μεταλλικών φύλλων συμπεριλαμβανομένων στοιχείων ενσωμάτωσης 	<ul style="list-style-type: none"> Φθινό και οικονομικό Επιτρέπει πολλαπλά χρώματα Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλον γραφείου Τα εξαρτήματα έχουν καλές δομικές ιδιότητες 	<ul style="list-style-type: none"> Δεν περιορίζεται από κατεύθυνση ή άξονα Αποτελεσματική για επισκευές και προσθήκη χαρακτηριστικών Πολλαπλά υλικά σε ένα μόνο εξάρτημα Υψηλότεροι ρυθμοί εναπόθεσης σε ένα μόνο σημείο 	<ul style="list-style-type: none"> Ομαλό φινίρισμα επιφάνειας και υψηλή παραγωγικότητα Ελευθερίες γεωμετρίας και υλικού DED Αυτόματη αφαίρεση υποστήριξης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, φινίρισμα και επιθεώρηση
Τυπικά υλικά	Χαρτί, Πλαστικά φύλλα και Μεταλλικά φύλλα/ Ταινίες	Θερμοπλαστικά Νήματα και Σφαιρίδια (FFF), Υγρά και Πολτοί (τύπου σύριγγας)	Μεταλλικό σύρμα και σκόνη με κεραμικά	Μεταλλική σκόνη και Σύρμα με Κεραμικά

2.3 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις της τεχνολογίας AM

Η υιοθέτηση της τεχνολογίας AM και άλλων προηγμένων τεχνολογιών κατασκευής φαίνεται να σημαίνει ένα μέλλον, στο οποίο οι αλυσίδες αξίας είναι συντομότερες, μικρότερες, περισσότερο τοπικού χαρακτήρα, πιο συνεργατικές και προσφέρουν σημαντικά οφέλη βιωσιμότητας. Η τεχνολογία AM μιμείται τις βιολογικές κατεργασίες, με τη δημιουργία προϊόντων στρώση - στρώση (layer by layer). Είναι εγγενώς λιγότερο δαπανηρή από τις παραδοσιακές αφαιρετικές μεθόδους παραγωγής και έχει τη δυνατότητα να αποσυνδέσει την κοινωνική και οικονομική δημιουργία αξίας από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των επιχειρηματικών δραστηριοτήτων.

Ωστόσο, παρά τα μελλοντικά οφέλη της τεχνολογίας AM, δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς από την άποψη της βιωσιμότητας. Παρόλο που θα μπορούσε να αποτελέσει παράγοντα προώθησης και βελτίωσης της βιομηχανικής βιωσιμότητας, οι συνέπειες της εφαρμογής της στο βιομηχανικό σύστημα θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ένα εναλλακτικό σενάριο, στο οποίο η λιγότερο αποδοτική τοπική παραγωγή, οι απαιτήσεις των πελατών για εξατομικευμένα αγαθά, και ένα υψηλότερο ποσοστό απαξίωσης προϊόντων (product obsolescence) συνδυάζονται για να επιφέρουν αυξημένη κατανάλωση πόρων. [13]

Ένας κατάλογος των σημερινών χαρακτηριστικών της τεχνολογίας AM παρέχεται στο Πίνακα 2-2, περιγράφοντας τόσο τα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους, όσο και τις προκλήσεις για την ανάπτυξη και την ευρύτερη υιοθέτηση της.

Πίνακας 2-2: πλεονεκτήματα και προκλήσεις της τεχνολογίας AM [13]

Πλεονεκτήματα	Προκλήσεις
<ul style="list-style-type: none">• Οι μικρές παρτίδες προσαρμοσμένων προϊόντων είναι οικονομικά ελκυστικότερες σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους μαζικής παραγωγής• Άμεση παραγωγή από μοντέλα 3D CAD σημαίνει ότι δεν απαιτούνται εργαλεία και καλούπια, επομένως δεν υπάρχει κόστος αλλαγής• Τα σχέδια με τη μορφή ψηφιακών αρχείων μπορούν εύκολα να μοιραστούν, διευκολύνοντας τη τροποποίηση και την προσαρμογή των εξαρτημάτων και προϊόντων• Η φύση της πρόσθεσης υλικού ως κατεργασία παρέχει εξοικονόμηση υλικού, όπως και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης αποβλήτου (δηλ. σκόνη, ρητίνη) που δεν χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της κατασκευής (περίπου 95 - 98% ανακύκλωση για μεταλλικά κονιάματα)• Είναι εφικτά προς κατασκευή νέες, σύνθετες δομές, όπως κλειστές δομές και κανάλια ελευθέρως μορφής αλλά και δικτυώματα• Τα τελικά προϊόντα έχουν πολύ χαμηλό πορώδες (porosity)• Η παραγγελία μειώνει τον κίνδυνο αποθέματος, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει τη ροή εσόδων καθώς τα αγαθά πληρώνονται πριν τη παραγωγή τους• Η διανομή επιτρέπει άμεση αλληλεπίδραση μεταξύ τοπικών καταναλωτών/πελατών και παραγωγών	<ul style="list-style-type: none">• Κόστος και ταχύτητα παραγωγής• Αλλαγή του τρόπου σκέψης και προσέγγισης των σχεδιαστών σχετικά με τη χρήση της τεχνολογίας AM• Αφαίρεση της αντίληψης ότι η τεχνολογία AM είναι μόνο για ταχεία παραγωγή πρωτοτύπων και όχι για άμεση κατασκευή εξαρτημάτων και προϊόντων• Ανάπτυξη και τυποποίηση νέων υλικών• Επικύρωση των μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων των υπάρχοντων υλικών και τεχνολογιών AM• Ανάπτυξη πολλαπλών υλικών και πολύχρωμων συστημάτων• Αυτοματοποίηση συστημάτων AM και σχεδιασμός διαδικασιών για τη βελτίωση της αποδοτικότητας κατασκευής• Η μετά - επεξεργασία είναι συχνά απαραίτητη. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην επίδραση βαθμίδωσης σκαλοπατιών που προκύπτει από τη σταδιακή τοποθέτηση μίας στρώσης πάνω στην άλλη, ή επειδή απαιτούνται στρώσεις φινιρίσματος• Τα υλικά υποστήριξης κατασκευής δεν μπορούν να ανακυκλωθούν, οπότε πρέπει να ελαχιστοποιούνται με καλό προσανατολισμό• Θέματα πνευματικής ιδιοκτησίας, ιδίως όσον αφορά τα πνευματικά δικαιώματα• Ελλείμματα σχεδιαστών και μηχανικών ειδικευμένων στην τεχνολογία AM• Μη γραμμική, τοπική συνεργασία με ακαθόριστους ρόλους και ευθύνες• Συνεχώς μεταβαλλόμενο σύνολο ανταγωνιστών

2.4 Υλικά για AM

Για οποιαδήποτε παραγωγική διαδικασία, συμπεριλαμβανομένων των κατεργασιών πρόσθεσης υλικού (AM), η πρώτη ύλη πρέπει να διαμορφωθεί σε κατάσταση συμβατή με την εν λόγω κατεργασία (π.χ. σκόνη, φύλλο, σύρμα, υγρό). Για παράδειγμα, στον πολυμερισμό δεξαμενής (vat polymerization) το υλικό τροφοδοσίας πρέπει να είναι ένα υγρό θερμοσκληρυνόμενο πλαστικό μονομερές, το οποίο θα διασταυρώνεται όταν εκτίθεται στην κατάλληλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Τέλος, το υλικό πρέπει να παρουσιάζει αποδεκτές ιδιότητες εξυπηρέτησης για να εκτελέσει με επιτυχία τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Για πιο αυστηρές εφαρμογές, τα εξαρτήματα AM υφίστανται μεταγενέστερη επεξεργασία με κάποιον τρόπο για τη βελτίωση της μικροδομής, τη μείωση του πορώδους και της τραχύτητας, το φινίρισμα της επιφάνειας και την ικανοποίηση των γεωμετρικών ανοχών.[16] Ο Πίνακας 2-3 αναφέρει τους ευρείς τύπους υλικών που χρησιμοποιούνται στη τεχνολογία AM, ανά κατηγορία κατεργασίας, με καταχωρήσεις εμπορικών υλικών.

Πίνακας 2-3: Υλικά ανά κατηγορία AM [16]

Current commercial materials directly processed by AM, by AM process category.

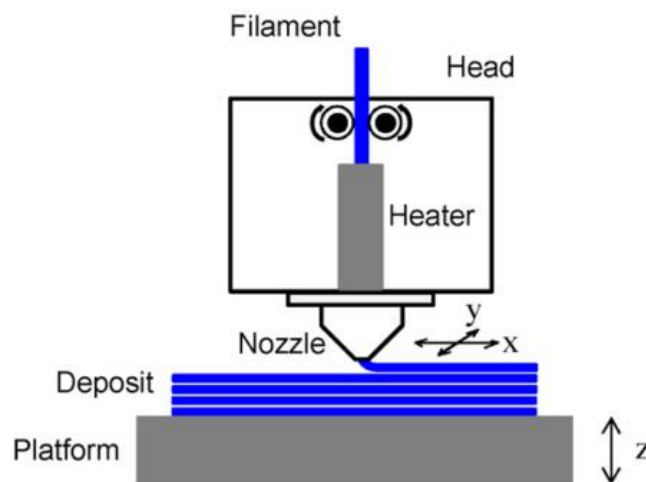
	Amorphous	Semi-crystalline	Thermoset	Material extrusion	Vat polymerization	Material jetting	Powder bed fusion	Binder jetting	Sheet lamination	Directed energy deposition
ABS [Acrylonitrile Butadiene Styrene]	X			X						
Polycarbonate	X			X						
PC/ABS Blend	X			X						
PLA [Polylactic Acid]	X			X						
Polyetherimide (PEI)	X			X						
Acrylics			X		X	X				
Acrylates			X		X	X				
Epoxies			X		X	X				
Polyamide (Nylon) 11 and 12		X					X			
Neat		X					X			
Glass filled		X					X			
Carbon filled		X					X			
Metal (Al) filled		X					X			
Polymer bound	X	X		X						
Polystyrene	X						X			
Polypropylene		X					X			
Polyester ("Flex")							X			
Polyetheretherkeytone (PEEK)		X		X			X			
Thermoplastic polyurethane (Elastomer)				X			X			
Chocolate		X		X						
Paper									X	
Aluminum alloys							X	X	X	X
Co-Cr alloys							X	X		X
Gold							X			
Nickel alloys							X	X		X
Silver							X			
Stainless steel							X	X	X	X
Titanium, commercial purity							X	X	X	X
Ti-6Al-4V							X	X	X	X
Tool steel							X	X		X

2.5 Μέθοδος FDM (Fused Deposition Modeling)

2.5.1 Αρχές λειτουργίας FDM

Η τεχνολογία FDM (Fused Deposition Modeling) ή αλλιώς FFF (Fused Filament Fabrication), είναι μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες AM που δημιουργήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και από τότε έχουν αναπτυχθεί αρκετές σειρές μηχανών όπως η FDM Titan, FDM Dimension, FDM Vantage, FDM Maxum, FDM 3000 και FDM Prodigy Plus.[17] Η τεχνολογία FDM η οποία στα ελληνικά αποδίδεται ως “Μοντελοποίηση Σύντηξης Εναπόθεσης” αναπτύχθηκε από την εταιρεία Stratasys και ανήκει στις τεχνολογίες AM οι οποίες επιτρέπουν την γρήγορη και καθαρή ανάπτυξη πρωτοτύπων και λειτουργικών εξαρτημάτων.[4]

Η μέθοδος FDM σχηματίζει τρισδιάστατα αντικείμενα από στερεά ή επιφανειακά μοντέλα, τα οποία έχουν δημιουργηθεί από υπολογιστή όπως μια τυπική διαδικασία Ταχείας Προτυποποίησης (Rapid Prototyping - RP). Τα μοντέλα μπορούν επίσης να προέρχονται από σαρώσεις τομογραφιών ηλεκτρονικών υπολογιστών, σαρώσεις απεικόνισης μαγνητικού συντονισμού, ή δεδομένα μοντέλων τα οποία δημιουργήθηκαν από ψηφιακά συστήματα 3D αντικειμένων. Η μέθοδος FDM χρησιμοποιεί έναν θερμοκρασιακά ελεγχόμενο μικρό εξωθητή (extruder) για να εξαναγκάσει ένα θερμοπλαστικό νήμα υλικού (πολυμερές) να αποτεθεί σε ημίρρευστη μορφή σε μία πλατφόρμα σε μια διαδικασία στρώσης με στρώση. Το νήμα εξωθείται μέσω δύο κυλίνδρων και λειτουργεί ως έμβολο για την κίνηση του ημίρρευστου πολυμερούς. Στο τέλος κάθε περατωμένης στρώσης, η πλατφόρμα βάσης κατεβαίνει και εναποτίθεται η επόμενη στρώση. Το σχεδιαζόμενο αντικείμενο κατασκευάζεται ως τρισδιάστατο εξάρτημα το οποίο βασίζεται μόνο στην ακριβή εναπόθεση λεπτών στρώσεων ημίρρευστου υλικού. Η διαδρομή εναπόθεσης (deposition path) και οι παράμετροι για κάθε στρώση προσδιορίζονται ανάλογα με το εκάστοτε υλικό που χρησιμοποιείται, τις συνθήκες κατασκευής, τις εφαρμογές του σχεδιαζόμενου αντικειμένου και τις προτιμήσεις του σχεδιαστή. [18]



Σχήμα 2-1: διαδικασία κατασκευής ενός φυσικού μοντέλου με τη μέθοδο FDM [19]

2.5.2 Παράμετροι κατεργασίας FDM

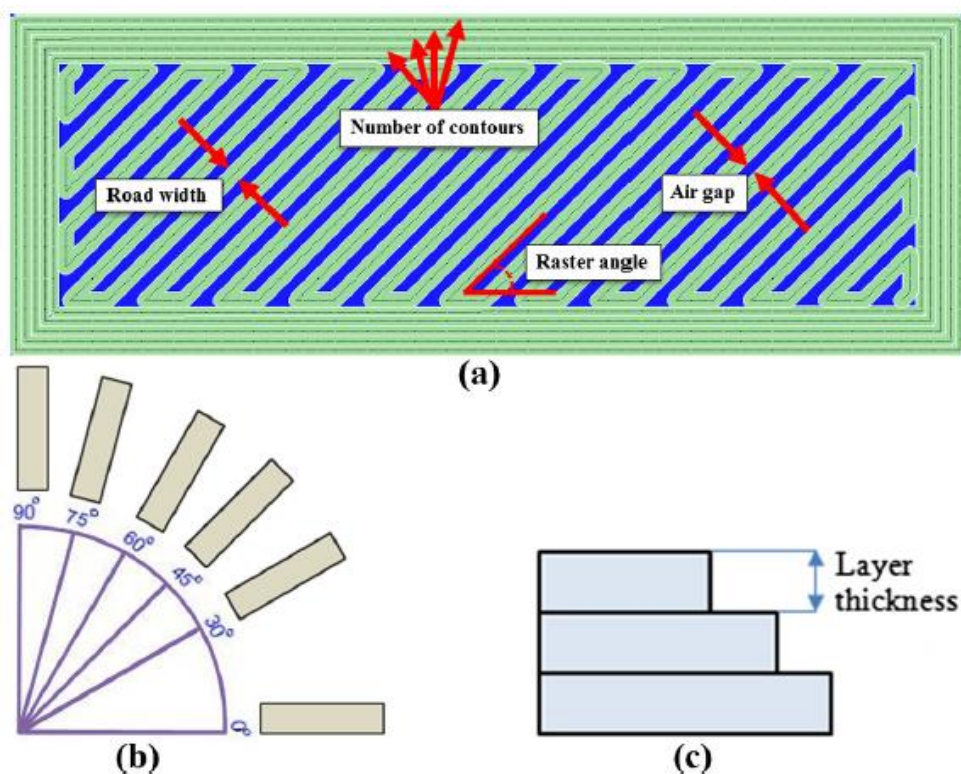
Η ποιότητα ενός τελικού εξαρτήματος που κατασκευάζεται με τη μέθοδο FDM εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις επιλεγμένες παραμέτρους κατεργασίας. Το κατασκευασμένο μέρος με τη μέθοδο FDM, πάσχει από διαστασιακή ανακρίβεια συγκριτικά με άλλες κατεργασίες πρόσθεσης υλικού όπως η μέθοδος SLS. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ποικιλίας των αλληλοσυγκρουόμενων παραμέτρων κατεργασίας που επηρεάζουν τη διαστασιακή ακρίβεια μεμονωμένα ή συλλογικά στις αλληλεπιδράσεις πολλών παραμέτρων/παραγόντων. Αυτή η διαδικασία διαθέτει ένα περίπλοκο μηχανισμό στη κατασκευή εξαρτημάτων, οι οποίοι παρουσιάζουν μεγάλη δυσκολία στη κατανόηση επαρκώς του τρόπου με τον οποίο, οι παράμετροι που εμπλέκονται καθορίζουν τη ποιότητα και τη διαστασιακή ακρίβεια. Ως εκ τούτου, η καθιέρωση αποτελεσματικής σχέσης μεταξύ παραμέτρων κατεργασίας και διαστασιακής ακρίβειας και ο καθορισμός των τελικών βέλτιστων ρυθμίσεων είναι ζωτικής σημασίας για τους σχεδιαστές, τους κατασκευαστές και τους μηχανικούς παραγωγής. [4]

Οι παράμετροι που μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των παραγόμενων εξαρτημάτων είναι η θερμοκρασία του ακροφυσίου (nozzle temperature), η ταχύτητα του ανεμιστήρα (fan speed), η ταχύτητα εκτύπωσης (print speed) και το ύψος της κάθε στρώσης (layer height). Το εύρος των παραμέτρων βρίσκεται στα όρια της κατασκευής, με αποτέλεσμα χαμηλή ποιότητα εξαρτημάτων. [8] Στον Πίνακα 2-4 περιγράφονται αναλυτικότερα οι παράμετροι που θα μελετηθούν σε επόμενο κεφάλαιο καθώς και κάποιες άλλοι παράμετροι που συναντώνται στη βιβλιογραφία.

Πίνακας 2-4: διάφοροι παράμετροι κατεργασιών μεθόδου FDM

Παράμετροι	Περιγραφή
1) Πάχος στρώσης (Layer thickness)	Αναφέρεται στο πάχος της στρώσης που υφίσταται επεξεργασία από το άκρο του ακροφυσίου. Εξαρτάται από το εκάστοτε υλικό και το μέγεθος του άκρου του ακροφυσίου
2) Θερμοκρασία ακροφυσίου (Nozzle temperature)	Η θερμοκρασία του άκρου του ακροφυσίου κατά τη διάρκεια εξώθησης υλικού. Μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με το εκάστοτε υλικό
3) Ταχύτητα ανεμιστήρα (Fan speed)	Οι περισσότεροι 3D εκτυπωτές έχουν ανεμιστήρες για τη ψύξη της περιοχής του ακροφυσίου. Η ταχύτητα του ανεμιστήρα μπορεί να ρυθμιστεί μεταξύ 0 και 100%.
4) Ταχύτητα εκτύπωσης (Print speed)	Η ταχύτητα με την οποία κινείται το ακροφύσιο κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Όσο μεγαλύτερη ταχύτητα τόσο χαμηλότερη η ποιότητα των τεμαχίων.
5) Κενό αέρος (Air gap)	Αναφέρεται στο κενό μεταξύ δύο διαγραμμμάτων στην ίδια στρώση
6) Γωνία κλίσης (Raster angle)	Αναφέρεται στη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του μοτίβου και του άξονα X στην αρχική στρώση. Κυμαίνεται τυπικά μεταξύ 0° και 90°

7) Προσανατολισμός κατασκευής (<i>Build orientation</i>)	Αναφέρεται στο τρόπο με τον οποίο το τεμάχιο είναι προσανατολισμένο στην πλατφόρμα κατασκευής ως προς τους τρεις άξονες
8) Αριθμός περιγραμμάτων (<i>Number of contours</i>)	Είναι ο αριθμός των περιγραμμάτων που έχουν κατασκευαστεί γύρω απ' όλες τις καμπύλες εξωτερικού και εσωτερικού τμήματος. Πρόσθετα περιγράμματα μπορεί να βελτιώσουν τα περιμετρικά τοιχώματα
9) Ρύθμιση ροής (<i>Flow adjust</i>)	Χρησιμοποιείται για αντιστάθμιση ροής.
10) <i>Destrिंग</i> (<i>Prime/Suck</i>)	Ο 3D εκτυπωτής προωθεί νήμα κατά την έναρξη της διαδικασίας εκτύπωσης και το αποσύρει όταν ολοκληρωθεί. Prime(mm): η ποσότητα του νήματος που τροφοδοτείται πριν την έναρξη της τρέχουσας διαδικασίας εκτύπωσης στρώματος. Η τιμή αυτής της παραμέτρου είναι ίση ή μεγαλύτερη με την επόμενη παράμετρο. Suck(mm): η ποσότητα του νήματος για αναρρόφηση όταν τελειώσει η εκτύπωση ενός στρώματος. Εάν ρυθμιστεί πολύ υψηλά υπάρχει κίνδυνος εμπλοκής του εξωθητήρα



Σχήμα 2-2: σχηματοποίηση διαφόρων παραμέτρων FDM [4]

2.5.3 Υλικά που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο FDM

Στην κατασκευαστική κοινότητα το πολύ-γαλακτικό οξύ (polylactic acid - PLA) είναι το πιο δημοφιλές υλικό εκτύπωσης 3D FFF και είναι διαθέσιμο για τη συντριπτική πλειοψηφία των προμηθευτών μηχανημάτων 3D εκτύπωσης. Το PLA έχει σχετικά χαμηλό σημείο τήξης (150°-160° C), το οποίο απαιτεί λιγότερη ενέργεια για εκτύπωση σε σχέση με άλλα υλικά, παρέχοντας ένα ξεχωριστό πλεονέκτημα για εφαρμογές πέραν των συμβατικών στον αναπτυσσόμενο κόσμο. Επιπλέον, το PLA έχει αποδειχθεί ότι είναι μια ασφαλέστερη εναλλακτική λύση από το ABS, το δεύτερο πιο δημοφιλές υλικό 3D εκτύπωσης σύμφωνα με τη διαθεσιμότητα τους. Οι μηχανικές ιδιότητες του 3D εκτυπωμένου PLA έχουν διερευνηθεί λεπτομερώς. Ωστόσο, υπάρχουν πολλά άλλα διαθέσιμα υλικά στην αγορά για χρήστες prosumer (producing consumer), όπως νάιλον, πολυανθρακικό (polycarbonate - PC), πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (high-density polyethylene - HDPE), πολυστυρένιο υψηλής αντοχής (high impact polystyrene - HIPS) και άλλα. Δεδομένου ότι νέες και προσιτές τεχνολογίες εκτύπωσης 3D συνεχίζουν να αναπτύσσονται, οι τύποι υλικών για τη μέθοδο FDM αναμένεται να αυξηθούν και να περιλαμβάνουν τη χρήση προσθέτων (δηλαδή ενισχυτικών παραγόντων). [20]

Για τη κατεργασία εξώθησης υλικού (material extrusion), προτιμώνται άμορφα θερμοπλαστικά, λόγω των χαρακτηριστικών τήξης τους. Αυτά τα πολυμερή, συμπεριλαμβανομένων των PLA και ABS, μαλακώνουν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών μέχρι τη λεγόμενη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (glass transition temperature), σχηματίζοντας ένα υλικό με υψηλό ιξώδες ιδανικό για εξώθηση υλικού μέσω ενός ακροφυσίου διαμέτρου 0,2 - 0,5 mm. [16]

Πίνακας 2-5: υλικά FDM και ιδιότητες τους [20]

3D printing materials, printing temperature and density of the filament.

Material Type	Printing Temperature (°C)	Density of filament (g/cm ³)
ABS	230	1.0311
HIPS	230	1.0280
Polycarbonate	250	1.1950
T-Glase	230	1.2767
Nylon	235	1.1277
SemiFlex	230	1.2216
Ninjaflex	230	1.1869

Πίνακας 2-6: ιδιότητες εφελκυσμού υλικών FDM [21]

Sample	Maximum Tensile Strength (MPa)	Young Modulus (MPa)	Elongation at maximum Tensile Strength (%)
PLA	67.0 ± 5.75	1150 ± 169	4.8 ± 0.2
PLA-TR-red	51.8 ± 1.76	1880 ± 213	3.8 ± 0.6
PLA-TR-blue	51.1 ± 1.04	1990 ± 242	3.4 ± 0.4
PLA-FT-yellow	55.8 ± 2.04	1940 ± 267	3.0 ± 0.1
PLA-FT-violet	60.9 ± 5.86	1640 ± 132	3.6 ± 0.4
PLA-luminescent	51.9 ± 6.73	711 ± 173	3.5 ± 0.6
PLA-CNT	54.1 ± 1.64	1100 ± 141	4.8 ± 0.2
PLA-CNT-ox1	53.8 ± 6.46	1050 ± 170	4.2 ± 1.6
PLA-CNT-ox2	57.9 ± 6.03	1046 ± 184	5.1 ± 0.9
PLA-CNT-ox3	51.8 ± 4.12	1100 ± 164	4.4 ± 0.8
TPU	11.5 ± 2.5	12.5 ± 6.82	435.3 ± 85.6
TPU-luminescent	10.9 ± 1.0	16.8 ± 3.14	404.2 ± 37.3
ABS	53.6±22.7	1210±1070	4.0±0.3
ABS-ZnO _{sup} -1	41.4 ± 1.0	1530 ± 166	3.5 ± 0.2
ABS-ZnO _{sup} -2	38.5 ± 1.1	1330 ± 59	3.4 ± 0.3
ABS-ZnO _{powder}	43.4±3.02	1230±299	3.5±0.3

2.6 Εφαρμογές AM

Από το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που χορηγήθηκε το 1986 και από τη πρώτη μηχανή εκτύπωσης 3D (βασισμένη στη στερεολιθογραφία) που κατασκευάστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 από την εταιρεία 3D Systems, η αγορά της βιομηχανίας AM αυξήθηκε σημαντικά κατά τη πρώτη δεκαετία (\$ 1 δις ΗΠΑ - 1997). Ταυτόχρονα, η τεχνολογία AM έχει μεταβεί από τη Ταχεία Προτυποποίηση σε λειτουργικά πρωτότυπα. Σήμερα, η τεχνολογία AM χρησιμοποιείται σε όλους τους βιομηχανικούς τομείς, από το διάστημα έως το παιχνίδι και τα τρόφιμα και αντιπροσωπεύει μια βιομηχανία πολλών δισεκατομμυρίων δολαρίων. [22] Στον Πίνακα 2-7 παρατίθενται ορισμένες από τις βασικές εφαρμογές της τεχνολογίας AM.

Πίνακας 2-7: εφαρμογές τεχνολογίας AM [22]

Αυτοκινητοβιομηχανία	<ul style="list-style-type: none">• Ενσωμάτωση πολλών τμημάτων σε ενιαίο σύνθετο τμήμα• Κατασκευή μέσω παραγωγής• Παραγωγή ανταλλακτικών και εξαρτημάτων• Γρήγορη τυποποίηση
Αεροναυπηγική/Αεροναυτική	<ul style="list-style-type: none">• Παραγωγή εξαρτημάτων σύνθετης γεωμετρίας• Έλεγχος πυκνότητας, μηχανικών ιδιοτήτων• Παραγωγή ελαφρύτερων εξαρτημάτων
Ιατρική/ Φαρμακευτική Βιομηχανία	<ul style="list-style-type: none">• Σχεδιασμός χειρουργικής επέμβασης με τη χρήση ακριβών ανατομικών μοντέλων που βασίζονται στην Υπολογιστική Τομογραφία (Computer Tomography - CT) ή στην μαγνητική Τομογραφία (Magnetic Resonance Imaging - MRI)• Ανάπτυξη ρυθμιζόμενων ορθοπεδικών εμφυτευμάτων και προσθετικών• Χρήση τυπωμένου προσομοιωμένου πτώματος για ιατρική εκπαίδευση στην ανατομία• Εκτύπωση βιοδιασπώμενων ζωντανών ιστών για δοκιμές κατά τη διάρκεια της φάσης ανάπτυξης του φαρμακευτικού προϊόντος
Αθλητική Βιομηχανία	<ul style="list-style-type: none">• Παραγωγή εξαρτημάτων σύνθετης γεωμετρίας• Δημιουργία προσαρμοσμένου προστατευτικού εξοπλισμού για καλύτερη εφαρμογή και χρήση• Δημιουργία πρωτότυπων πολλαπλών χρωμάτων και σύνθετων υλικών για δοκιμή προϊόντων
Κατασκευαστική Βιομηχανία	<ul style="list-style-type: none">• Κατασκευή σκυροδέματος με τεχνολογία AM για συμβατικά κτήρια• Νέος σχεδιασμός λειτουργικών σκυροδεμάτων όπως αυτο-καθαριζόμενο σκυρόδεμα, υψηλής απόδοσης σκυρόδεμα• Κατασκευή κτηρίων με χρήση υλικών που γειτνιάζουν• Κτήρια χωρίς τσιμέντο• Κτήριο χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας

2.7 Πορώδεις δομές

Οι πρόσφατες εξελίξεις στη τεχνολογία AM καθώς και σε άλλες κατασκευαστικές τεχνικές μεγάλης κλίμακας, έχουν επιτρέψει την παραγωγή πολυσύνθετων κατασκευών με υψηλή ακρίβεια και δυνατότητα ελέγχου σε κλίμακα μικρομέτρων.[23] Τέτοιες κατασκευές είναι οι πορώδεις δομές (porous structures) ή πορώδη ικρίωματα (porous scaffolds). Οι πορώδεις δομές που κατασκευάζονται με μεθόδους AM χρησιμοποιούνται κυρίως στην Μηχανική ιστών (Tissue engineering) και δευτερευόντως σε διάφορες άλλες εφαρμογές. Η μηχανική ιστών στοχεύει στην αποκατάσταση ή την αναγέννηση ενός κατεστραμμένου ιστού συνδυάζοντας κύτταρα με τρισδιάστατα πορώδη ικρίωματα.[2]

Την τελευταία δεκαετία, η μηχανική ιστών επωφελήθηκε από την ανάπτυξη τεχνικών AM, οι οποίες οδήγησαν στη παραγωγή πορωδών ικριωμάτων ελεύθερης μορφής (free form porous scaffolds) με προσαρμοσμένες αρχιτεκτονικές. Η πλειοψηφία των κατασκευαστικών προσεγγίσεων στοχεύουν στο σχεδιασμό της εσωτερικής γεωμετρίας της δομής με πλήρωση περιοδικής επανάληψης ενός τακτικού μοναδιαίου κυττάρου (unit cell). Τα πλεονεκτήματα αυτών των περιοδικών πορωδών δομών συνίστανται στην ευκολότερη μοντελοποίηση και κατασκευή τους, καθώς και στη δυνατότητα πρόβλεψης των δομικών ιδιοτήτων τους.[24]

Τα ικρίωματα πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να παρουσιάζουν μεγάλο πορώδες (porosity), τα οποία όχι μόνο πρέπει να έχουν πόρους αρκετά μεγάλους για την καλύτερη κατανομή των κυττάρων, αλλά πρέπει επίσης να παρουσιάζουν διασυνδέσεις για να επιτρέπεται η μετανάστευση των κυττάρων μεταξύ διαφορετικών πόρων. Το πορώδες (porosity) είναι η ποσοτικοποίηση των κενών χώρων μέσα σε ένα υλικό. Τα πορώδη των υλικών μεγάλης πυκνότητας ταξινομούνται σε τρεις διαφορετικούς τύπους σύμφωνα με τον IUPAC: μικροπόροι (<2nm), μεσοπόροι (2-50 nm) και μακροπόροι (>50 nm). Παρόλα αυτά, για τη μηχανική ιστών ως μικροπόροι θεωρούνται όσοι έχουν μέγεθος μικρότερο από 50 μικρόμετρα (μm) και μακροπόροι όσοι έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από 50 μικρόμετρα.[25]

Η μέτρηση του πορώδους είναι πολύ σημαντική στην ανάπτυξη συνθετικών μοσχευμάτων ιστών. Στην ανάλυση του πορώδους, τα υλικά γενικά χαρακτηρίζονται με βάση το μέσο πορώδες (mean porosity), τη διάμετρο του μεγέθους του πόρου και τη συνολική επιφάνεια των πόρων. Οι πόροι μπορούν να χωριστούν σε τρεις διαφορετικούς τύπους: διαμέσου πόροι (through pores), τυφλοί πόροι (blind pores) και κλειστοί πόροι (closed pores). Ανάλογα με την αναλυτική μέθοδο που χρησιμοποιείται μπορούν να επιτευχθούν διαφορετικά είδη πληροφοριών.[26] Για την μέτρηση του πορώδους και του μεγέθους του πόρου σε ικρίωματα χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Το συνολικό πορώδες (Total porosity-Π) μετράται μέσω βαρυμετρίας (gravimetry) σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Pi = 1 - \rho_{scaffold} / \rho_{material}$$

όπου $\rho_{material}$ είναι η πυκνότητα του υλικού με το οποίο κατασκευάστηκε το ικρίωμα και $\rho_{scaffold}$ είναι η φαινόμενη πυκνότητα του ικριώματος, που μετράται διαιρώντας το βάρος με τον όγκο του ικριώματος. Η ποροσιμετρία διείσδυσης υδραργύρου (mercury intrusion porosimetry) είναι μια ακόμη μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση τόσο του πορώδους όσο και των μεγεθών των πόρων. Τα ικρίωματα τοποθετούνται σε διεισδυτικό μετρητή (penetrometer) και εγχύονται με υδράργυρο

υπό αυξανόμενη πίεση. Καθώς η πίεση (P) αυξάνεται, η ακτίνα των πόρων (r) που μπορούν να γεμίσουν μειώνεται σύμφωνα με την εξίσωση Washburn:

$$P = 2\sigma\cos\theta/r$$

όπου σ είναι η επιφανειακή τάση του υδραργύρου και θ η γωνία επαφής.[27].

Τα ικριώματα για τη μηχανική ιστών ως επί το πλείστον κατασκευάζονται από πολυμερή, κεραμικά ή συνδυασμό τους (σύνθετα υλικά). Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο πόρων έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές τεχνικές όπως η έκπλυση πορογόνου (porogen leaching) και ο διαχωρισμός φάσεων/ ξήρανση με ψύξη. Ωστόσο, οι τεχνικές AM προσφέρουν υψηλότερο βαθμό ελέγχου όσον αφορά την αρχιτεκτονική των ικριωμάτων καθώς και περισσότερα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεθόδους AM. [28]

3. Σχεδιασμός Πειραμάτων (Design of Experiments)

3.1 Παραγοντικός σχεδιασμός (Factorial Design)

Η τεχνική καθορισμού και διερεύνησης όλων των πιθανών συνθηκών σε ένα πείραμα που περιλαμβάνει πολλαπλούς παράγοντες είναι γνωστή ως *Σχεδιασμός πειραμάτων (Design of experiments - DOE)*. Στην βιβλιογραφία, αυτή η τεχνική αναφέρεται ως *παραγοντικός Σχεδιασμός (factorial Design)*. Οι έννοιες του σχεδιασμού πειραμάτων έχουν χρησιμοποιηθεί από την εργασία του Ronald A. Fisher για γεωργικούς πειραματισμούς. Ο Fisher σχεδίασε με επιτυχία πειράματα για τον προσδιορισμό της βέλτιστης επεξεργασίας της γης για τη γεωργία προκειμένου να επιτύχει μέγιστη απόδοση παραγωγής. Στη βιβλιογραφία, αναφέρονται πολλές εφαρμογές αυτής της προσέγγισης, ιδίως στο τομέα των χημικών και φαρμακευτικών προϊόντων. [29]

Προκειμένου να αναπτυχθεί οποιαδήποτε διαδικασία κάθε είδους, πρέπει να μελετηθεί ένας αριθμός παραγόντων. Αλλά η μελέτη του κάθε παράγοντα είναι αρκετά κουραστική και χρονοβόρα. Έτσι ένας παραγοντικός σχεδιασμός μπορεί να ελαχιστοποιήσει τις παραπάνω δυσκολίες, βελτιστοποιώντας όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη διαδικασία συλλογικά σε μια στιγμή. Ο παραγοντικός σχεδιασμός χρησιμοποιείται για τη μείωση του συνολικού αριθμού των πειραμάτων για να επιτευχθεί η καλύτερη συνολική βελτιστοποίηση της διαδικασίας. Ο σχεδιασμός καθορίζει την επίδραση του κάθε παράγοντα στην απόκριση, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο η επίδραση του κάθε παράγοντα ποικίλει ανάλογα με τη μεταβολή του επιπέδου των άλλων παραγόντων. Οι επιδράσεις αλληλεπίδρασης διαφόρων παραγόντων θα μπορούσαν να επιτευχθούν μόνο με το σχεδιασμό πειραμάτων. [30]

Ο παραγοντικός σχεδιασμός, ο οποίος περιλαμβάνει την αλλαγή όλων των παραγόντων από το ένα πείραμα στο επόμενο, επιλέγεται προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση των διάφορων παραγόντων. Οι παραγοντικοί σχεδιασμοί χρησιμοποιούνται ευρέως για τη διερεύνηση των επιδράσεων των πειραματικών παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ αυτών των παραγόντων. Η αλληλεπίδραση σημαίνει πως το αποτέλεσμα ενός παράγοντα ποικίλει ανάλογα με το επίπεδο των άλλων παραγόντων σε μια απόκριση. Στα πλεονεκτήματα των παραγοντικών πειραμάτων περιλαμβάνονται το σχετικά χαμηλό κόστος, ο μειωμένος αριθμός πειραμάτων και οι αυξημένες δυνατότητες αξιολόγησης των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραγόντων/μεταβλητών. [31] Ο παραγοντικός σχεδιασμός μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο κατηγορίες: α) *πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός (Full factorial design)* και β) *κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός (Fractional factorial design)*.

3.1.1 Πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός (Full factorial design)

Σε έναν πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό, εξετάζεται κάθε συνδυασμός κάθε επιπέδου παράγοντα. Για παράδειγμα, ο αριθμός των εκτελέσεων/επαναλήψεων για έναν πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό τριών επιπέδων είναι $a \times b \times c$, υποδεικνύοντας ότι ο πρώτος παράγοντας εξετάζεται σε a επίπεδα, ο δεύτερος παράγοντας σε b επίπεδα, ενώ ο τρίτος παράγοντας σε c επίπεδα. Ο αριθμός των εκτελέσεων/επαναλήψεων για έναν πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό n παραγόντων, ο καθένας με a επίπεδα ισούται με a^n . Ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός είναι ο σχεδιασμός δύο επιπέδων, ο οποίος συμβολίζεται ως 2^n όταν υπάρχουν n παράγοντες. Μερικές

φορές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα κατάλληλο πολυωνυμικό μοντέλο για την περιγραφή των επιδράσεων των παραγόντων που μελετήθηκαν σε μια απόκριση και στη συνέχεια να βελτιστοποιήσει την απόκριση εφόσον είναι απαραίτητο. Ο αριθμός των επαναλήψεων για έναν πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό αυξάνει γεωμετρικά καθώς αυξάνεται ο αριθμός των παραγόντων. Σε πολλές περιπτώσεις, όταν πρέπει να μελετηθούν οι επιδράσεις ενός μεγάλου αριθμού παραγόντων ταυτόχρονα, απαιτείται ένας πολύ μεγάλος αριθμός επαναλήψεων. Γενικά, αυτό θα αποτελέσει ένα μεγαλύτερο πείραμα το οποίο δεν είναι οικονομικά και πρακτικά εφικτό.

3.1.2 Κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός (Fractional factorial design)

Όταν ο αριθμός των επαναλήψεων για έναν πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό είναι σχετικά μεγάλος, οι επιθυμητές πληροφορίες μπορούν συχνά να ληφθούν εκτελώντας μόνο ένα κλάσμα (fraction) του πλήρους παραγοντικού σχεδιασμού, ο οποίος συχνά αναφέρεται ως κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός. Με άλλα λόγια, ο κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός παρέχει μια εναλλακτική λύση όταν ο αριθμός των επαναλήψεων για έναν πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό είναι πολύ μεγάλος για να είναι εφικτός. Με αυτόν τον σχεδιασμό, οι επιδράσεις ορισμένων παραγόντων σε μια απόκριση μπορούν να μελετηθούν υπό μια οικονομική και πρακτική κατάσταση. Ο σχεδιασμός Taguchi (Taguchi design), ο σχεδιασμός Plackett-Burman (Plackett-Burman design), ο κεντρικός σύνθετος σχεδιασμός (central composite design) και ο σχεδιασμός Box-Behnken (Box-Behnken design) ανήκουν στη κατηγορία του κλασματικού παραγοντικού σχεδιασμού. [32]

3.2 Μέθοδος Taguchi

Η μέθοδος σχεδιασμού Taguchi η οποία αναπτύχθηκε από τον Δρ. Genichi Taguchi, είναι ένα σύνολο μεθοδολογιών με τις οποίες έχει ληφθεί υπόψη στο στάδιο του σχεδιασμού η εγγενής μεταβλητότητα των υλικών και των διαδικασιών παραγωγής. Η εφαρμογή αυτής της τεχνικής είχε γίνει ευρέως διαδεδομένη σε πολλές αμερικανικές και ευρωπαϊκές βιομηχανίες μετά τη δεκαετία του 1980. [33]

Ο Taguchi ορίζει τη ποιότητα ενός προϊόντος, από την άποψη της απώλειας της οποίας μεταβιβάζει το προϊόν στην κοινωνία από τη στιγμή που αποστέλλεται στον πελάτη. Ορισμένες από τις απώλειες αυτές οφείλονται σε απόκλιση του λειτουργικού χαρακτηριστικού του προϊόντος από την επιθυμητή τιμή-στόχο και ονομάζονται απώλειες λόγω λειτουργικής διακύμανσης. Οι ανεξέλεγκτοι παράγοντες που προκαλούν την απόκλιση των λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός προϊόντος από τις τιμές-στόχους ονομάζονται παράγοντες θορύβου (*noise factors*). Οι παράγοντες θορύβου μπορούν να ταξινομηθούν ως εξωτερικοί παράγοντες (π.χ. θερμοκρασία και ανθρώπινα λάθη χειρισμού), κατασκευαστικές ατέλειες (π.χ. μεταβολές των παραμέτρων των προϊόντων από μονάδα σε μονάδα) και αλλοιώσεις του προϊόντος. Ο γενικός στόχος του ποιοτικού ελέγχου είναι η παραγωγή προϊόντων τα οποία είναι εύρωστα αναφορικά με όλους τους παράγοντες θορύβου. [34]

Η μέθοδος Taguchi είναι μια τεχνική σχεδιασμού πειραμάτων, η οποία είναι χρήσιμη στη μείωση του αριθμού των πειραμάτων δραματικά, χρησιμοποιώντας ορθογώνιους πίνακες και επίσης προσπαθώντας να ελαχιστοποιήσει τις επιδράσεις των παραγόντων εκτός ελέγχου. Η βασική φιλοσοφία της μεθόδου Taguchi είναι να εξασφαλίσει τη ποιότητα στη φάση σχεδιασμού. Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η μείωση του χρόνου διεξαγωγής πειραμάτων, η μείωση του κόστους και η διαπίστωση σημαντικών παραγόντων σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Το σημαντικότερο στάδιο στο σχεδιασμό ενός πειράματος έγκειται στην επιλογή των παραγόντων ελέγχου (*control factors*). Πρέπει να συμπεριληφθούν όσο το δυνατόν περισσότεροι παράγοντες για να είναι δυνατός ο εντοπισμός μη σημαντικών μεταβλητών σε πρώιμο στάδιο. [35]

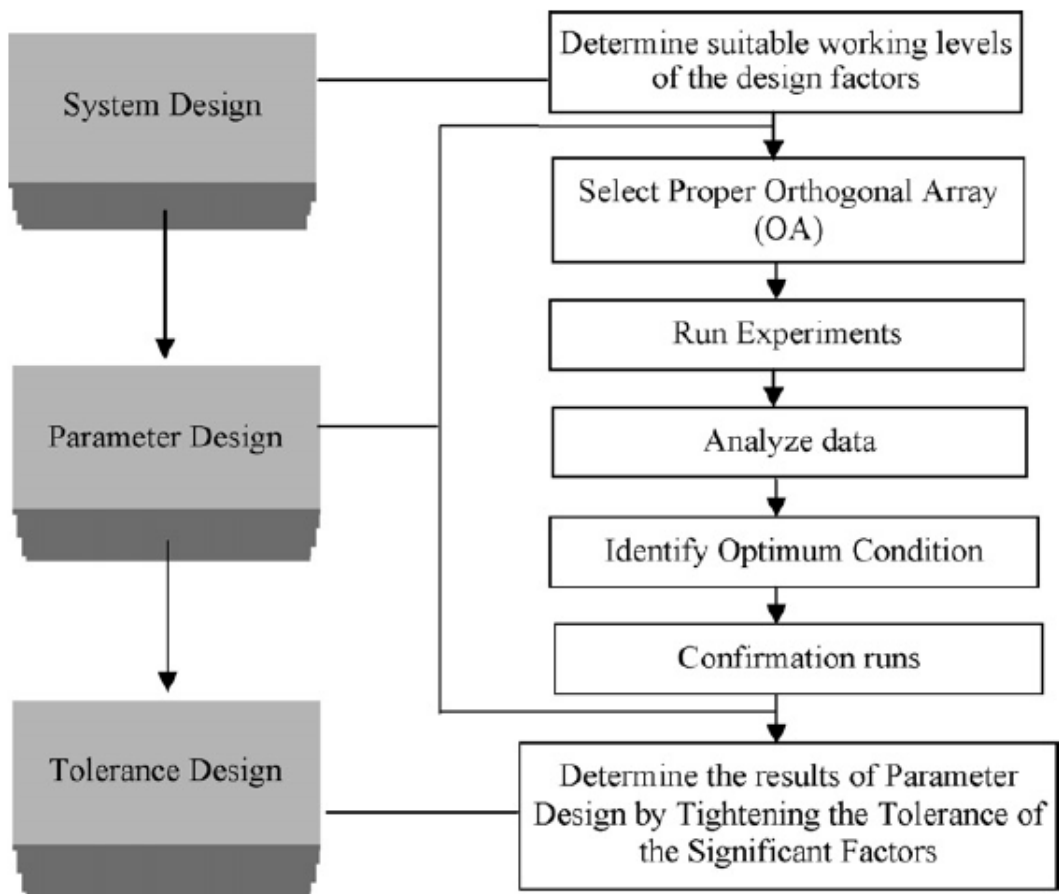
Ο Taguchi παρουσιάζει τη προσέγγιση του, χρησιμοποιώντας πειραματικό σχεδιασμό για:

- το σχεδιασμό προϊόντων/διαδικασιών έτσι ώστε να υπάρχει ανθεκτικότητα στις περιβαλλοντικές συνθήκες
- το σχεδιασμό και την ανάπτυξη προϊόντων/διαδικασιών έτσι ώστε να υπάρχει ευρωστία ως προς τη μεταβλητότητα των συνιστωσών μερών
- την ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων γύρω από μια τιμή-στόχο (*target value*)

Η φιλοσοφία του Taguchi είναι ευρέως εφαρμόσιμη θεωρώντας τρία στάδια στην ανάπτυξη των διαδικασιών:

- σχεδιασμός συστήματος (*system design*)
- σχεδιασμός παραμέτρων (*parameter design*)
- σχεδιασμός ανοχών (*tolerance design*)

Στο σχεδιασμό του συστήματος, ο μηχανικός χρησιμοποιεί επιστημονικές και μηχανικές αρχές για να καθορίσει τη βασική διαμόρφωση. Στο στάδιο σχεδιασμού παραμέτρων, προσδιορίζονται συγκεκριμένες τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος. Συνήθως, ο στόχος είναι να καθοριστούν οι ονομαστικές τιμές για αυτές τις παραμέτρους, με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της μεταβλητότητας προερχόμενη από ανεξέλεγκτες μεταβλητές (μεταβλητές θορύβου). Ο σχεδιασμός ανοχών χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των καλύτερων ανοχών των παραμέτρων. Ο Taguchi συνιστά να χρησιμοποιούνται στατιστικές πειραματικές μέθοδοι για να βοηθήσουν στη βελτίωση της ποιότητας, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού παραμέτρων και ανοχών. [36]



Σχήμα 3-1: διαδικασία σχεδιασμού Taguchi [33]

3.2.1 Ορθογώνιοι πίνακες Taguchi

Ο Δρ. Taguchi χρησιμοποίησε ένα ειδικό σύνολο ορθογωνίων πινάκων (Orthogonal arrays - OA) για να παρουσιάσει τα πειράματά του. Η χρήση Λατινικών τετραγωνικών ορθογωνίων πινάκων για σχεδιασμό πειραμάτων χρονολογείται από τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Συνδυάζοντας τα Λατινικά ορθογώνια τετράγωνα με ένα μοναδικό τρόπο, ο Taguchi κατασκεύασε ένα νέο σύνολο τυπικών Ορθογωνίων Πινάκων που χρησιμοποιούνται σε διάφορες πειραματικές καταστάσεις. [29]

Οι ορθογώνιοι πίνακες προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα. Πρώτον, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τέτοιου είδους πειράματα ισχύουν σε ολόκληρη τη πειραματική περιοχή και καλύπτονται από τους παράγοντες ελέγχου και τις ρυθμίσεις τους. Δεύτερον, υπάρχει μεγάλη εξοικονόμηση στη πειραματική προσπάθεια. Τρίτον, η ανάλυση των δεδομένων είναι πολύ εύκολη και τέταρτον, μπορεί να ανιχνεύσει αναχώρηση από το πρόσθετο μοντέλο. Η διαδικασία προσαρμογής ενός ορθογωνίου πίνακα σε ένα συγκεκριμένο έργο έχει γίνει ιδιαίτερα εύκολη με τη βοήθεια ενός γραφικού εργαλείου που ονομάζεται *γραμμικό γράφημα (linear graph)*, το οποίο αναπτύχθηκε από τον Taguchi για την αναπαράσταση αλληλεπιδράσεων μεταξύ ζευγών στηλών σε ορθογώνιους πίνακες. [37]

Υπάρχουν τρεις τύποι ορθογωνίων πινάκων, εκείνοι που ασχολούνται με παράγοντες δύο επιπέδων, εκείνοι που ασχολούνται με παράγοντες τριών επιπέδων και εκείνοι που ασχολούνται με παράγοντες μικτού επιπέδου (mixed level factors). Η επιλογή του κατάλληλου ορθογωνίου πίνακα βασίζεται στα ακόλουθα κριτήρια: ο αριθμός των παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων που μας ενδιαφέρουν και η επιθυμητή πειραματική ανάλυση ή οι περιορισμοί κόστους. Οι πρώτοι δύο τύποι καθορίζουν το μικρότερο ορθογώνιο πίνακα που είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί, ενώ ο τρίτος τύπος δίνει τη δυνατότητα να διεξαχθεί ένα μεγαλύτερο πείραμα με μεγαλύτερη ανάλυση. Η ανάλυση μπορεί να κυμαίνεται από 1 (μικρότερη) έως 4 (μεγαλύτερη) υποδεικνύοντας τη σαφήνεια με την οποία κάθε επιμέρους επίδραση παραγόντων και αλληλεπιδράσεων μπορεί να αξιολογηθεί σε ένα πείραμα. [38]

Ένας κοινός ορθογώνιος πίνακας για παράγοντες δύο επιπέδων παρουσιάζεται στον Πίνακα 3-1. Αυτός ο πίνακας, που χαρακτηρίζεται από το σύμβολο L_8 ή (L-8), χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό πειραμάτων που περιλαμβάνουν έως και επτά παράγοντες δύο επιπέδων. Ο πίνακας έχει οκτώ σειρές και επτά στήλες. Κάθε σειρά αναπαριστά μια δοκιμαστική συνθήκη με επίπεδα παραγόντων που υποδεικνύονται από τους αριθμούς στη σειρά. Οι κατακόρυφες στήλες (A - G) αντιστοιχούν στους παράγοντες που προσδιορίζονται στη μελέτη. Οι στήλες όλων των ορθογωνίων πινάκων είναι ισορροπημένες με δύο τρόπους. Πρώτον, οι στήλες είναι ισορροπημένες εσωτερικά τους έτσι ώστε όλες να έχουν ίσο αριθμό επιπέδων του κάθε παράγοντα. Δεύτερον, οι στήλες είναι ισορροπημένες μεταξύ οποιωνδήποτε δύο στηλών έτσι ώστε συνολικά να αποτελούν ίσο αριθμό πιθανών συνδυασμών. [29]

Πίνακας 3-1: Ορθογώνιος πίνακας L_8 (2^7)

TRIAL	FACTOR						
	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Ο Taguchi έχει δημιουργήσει 18 βασικούς ορθογώνιους πίνακες που ονομάζονται *πρότυποι ορθογώνιοι πίνακες (standard orthogonal arrays)* οι περισσότεροι από τους οποίους μπορούν να βρεθούν και σε ελαφρώς διαφοροποιημένες μορφές.

Πίνακας 3-2: Πρότυποι Ορθογώνιοι πίνακες [37]

Orthogonal Array*	Number of Rows	Maximum Number of Factors	Maximum Number of Columns at These Levels			
			2	3	4	5
L_4	4	3	3	-	-	-
L_8	8	7	7	-	-	-
L_9	9	4	-	4	-	-
L_{12}	12	11	11	-	-	-
L_{16}	16	15	15	-	-	-
L'_{16}	16	5	-	-	5	-
L_{18}	18	8	1	7	-	-
L_{25}	25	6	-	-	-	6
L_{27}	27	13	-	13	-	-
L_{32}	32	31	31	-	-	-
L'_{32}	32	10	1	-	9	-
L_{36}	36	23	11	12	-	-
L'_{36}	36	16	3	13	-	-
L_{50}	50	12	1	-	-	11
L_{54}	54	26	1	25	-	-
L_{64}	64	63	63	-	-	-
L'_{64}	64	21	-	-	21	-
L_{81}	81	40	-	40	-	-

* 2-level arrays: $L_4, L_8, L_{12}, L_{16}, L_{32}, L_{64}$

3-level arrays: L_9, L_{27}, L_{81}

Mixed 2- and 3-level arrays: $L_{18}, L_{36}, L'_{36}, L_{54}$

3.2.2 Βαθμοί ελευθερίας

Για την επιλογή του κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα Taguchi για τα πειράματα, πρέπει να υπολογιστούν οι συνολικοί *βαθμοί ελευθερίας* (*degrees of freedom - DOF*). Οι βαθμοί ελευθερίας ορίζονται ως ο αριθμός των συγκρίσεων μεταξύ των παραμέτρων σχεδιασμού οι οποίοι είναι αναγκαίοι να γίνουν, ούτως ώστε να προσδιοριστεί ποιό επίπεδο είναι καλύτερο και συγκεκριμένα πόσο καλύτερο είναι. [39] Γενικά, ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας που σχετίζονται με έναν παράγοντα ισούται με έναν μικρότερο από τον αριθμό των επιπέδων για αυτόν τον παράγοντα. [37] Για παράδειγμα, μια παράμετρος σχεδιασμού τριών επιπέδων μετράει για δύο βαθμούς ελευθερίας (DOF). Οι βαθμοί ελευθερίας που συνδέονται με την αλληλεπίδραση μεταξύ δύο παραμέτρων σχεδιασμού δίνονται από το γινόμενο των βαθμών ελευθερίας για τις δύο παραμέτρους σχεδιασμού. Μετά τον υπολογισμό των απαιτούμενων βαθμών ελευθερίας, το επόμενο βήμα είναι η επιλογή του κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα σύμφωνα με τον Πίνακα 3-2 προκειμένου να ταιριάζει στο συγκεκριμένο πείραμα. [39]

Ο αριθμός των σειρών ενός ορθογώνιου πίνακα αντιπροσωπεύει τον αριθμό των πειραμάτων. Προκειμένου ένας πίνακας να μπορεί να επιλεγεί, ο αριθμός των σειρών πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσος με τους βαθμούς ελευθερίας που απαιτούνται στη μελέτη περίπτωσης. Ο αριθμός των στηλών ενός πίνακα αντιπροσωπεύει το μέγιστο αριθμό παραγόντων που μπορούν να μελετηθούν χρησιμοποιώντας τον συγκεκριμένο πίνακα. Επιπλέον, για να χρησιμοποιήσουμε απευθείας έναν Πρότυπο Ορθογώνιο πίνακα, πρέπει να είμαστε σε θέση να ταιριάζουμε τον αριθμό των επιπέδων των παραγόντων με τον αριθμό των επιπέδων των στηλών στο πίνακα. Συνήθως η διεξαγωγή πειραμάτων είναι ακριβή, επομένως για αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε τον μικρότερο δυνατό πίνακα που πληροί τις απαιτήσεις του πειράματος. [37]

3.2.3 Signal to Noise Ratio (SNR)

Η μεταβολή των χαρακτηριστικών ποιότητας ενός προϊόντος που αποτελεί αντικείμενο έρευνας ως απόκριση (*response*) σε έναν παράγοντα που εισάγεται στον πειραματικό σχεδιασμό είναι το “σήμα” (*signal*) του επιθυμητού αποτελέσματος. Ωστόσο, όταν διεξάγεται ένα πείραμα, υπάρχουν πολλοί εξωτερικοί και εσωτερικοί παράγοντες οι οποίοι δεν έχουν σχεδιαστεί στο πείραμα αλλά επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Αυτοί οι ανεξέλεγκτοι παράγοντες ονομάζονται παράγοντες “θορύβου” και η επίδραση τους στο αποτέλεσμα του χαρακτηριστικού ποιότητας που εξετάζεται ονομάζεται “θόρυβος”. Η έννοια του λόγου σήματος προς θόρυβο (*S/N*) προέρχεται από τον τομέα της ηλεκτρολογίας. Ο Taguchi εφάρμοσε αποτελεσματικά αυτή την έννοια για να καθορίσει τη βέλτιστη κατάσταση από τα πειράματα.

Ο στόχος οποιουδήποτε πειράματος είναι να προσδιοριστεί πάντα ο υψηλότερος δυνατός λόγος *S/N* για το αποτέλεσμα. Μια υψηλή τιμή του λόγου *S/N* υποδηλώνει ότι το σήμα είναι πολύ μεγαλύτερο από τις τυχαίες επιδράσεις των παραγόντων θορύβου. Ο σχεδιασμός του προϊόντος/διαδικασίας σύμφωνα με τον υψηλότερο λόγο *S/N* αποδίδει πάντα τη βέλτιστη ποιότητα με την ελάχιστη διακύμανση. [29] Οι λόγοι *S/N* μετασχηματίζουν αρκετές επαναλήψεις σε μία τιμή, η οποία υποδεικνύει τη ποσότητα της διακύμανσης που υπάρχει και τη μετατόπιση της μέσης απόκρισης προκειμένου να εντοπιστούν οι παράγοντες ελέγχου που μπορούν να μειώσουν τις διακυμάνσεις και να

βελτιώσουν τη ποιότητα. [40] Υπάρχουν τρεις κατηγορίες χαρακτηριστικών ποιότητας για την ανάλυση του λόγου S/N:

- όσο μικρότερο τόσο καλύτερο (smaller the better)

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \left(\sum y^2 \right)$$

- όσο μεγαλύτερο τόσο καλύτερο (larger the better)

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \left(\sum \frac{1}{y^2} \right)$$

- το ονομαστικό είναι το καλύτερο (nominal is best)

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{\bar{y}^2}{s_y^2} \right)$$

όπου \bar{y} ο μέσος όρος των παρατηρήσεων, s_y^2 η διακύμανση του y , n ο αριθμός των παρατηρήσεων και y τα παρατηρούμενα δεδομένα ή ο κάθε τύπος χαρακτηριστικού. Η απόκλιση μεταξύ πειραματικών και επιθυμητών τιμών ορίζεται ως συνάρτηση απώλειας (loss function). Η συνάρτηση απώλειας μετατρέπεται περαιτέρω σε λόγο S/N. [41]

3.2.4 ANOVA

Η ανάλυση διακύμανσης (Analysis of Variance - ANOVA) είναι η στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο για την ερμηνεία πειραματικών δεδομένων. Εφαρμόζεται στα αποτελέσματα των πειραμάτων για τον προσδιορισμό της ποσοστιαίας % συμβολής κάθε παραμέτρου. Η ανάλυση ANOVA ανιχνεύει διαφορές στη μέση απόδοση των ομάδων των αντικειμένων που εξετάζονται, αναλύοντας τη συνολική μεταβολή στις πηγές της. Ο κύριος στόχος της ANOVA είναι να εξαγάγει από τα αποτελέσματα τη μεταβολή που προκαλεί ο κάθε παράγοντας σε σχέση με τη συνολική μεταβολή που παρατηρείται στο αποτέλεσμα. Επίσης χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της σημαντικότητας (significance) όλων των κύριων παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων τους, συγκρίνοντας το μέσο τετράγωνο με μία εκτίμηση των πειραματικών σφαλμάτων σε συγκεκριμένα επίπεδα εμπιστοσύνης (confidence levels). Τα σχεδιαγράμματα που αναπαριστούν τις κύριες επιδράσεις (main effects plots) επιτρέπουν τον προσδιορισμό του επιπέδου του κάθε παράγοντα που παρέχει την ελάχιστη τιμή απόκρισης. Μέσω της ανάλυσης διακύμανσης και του ποσοστού επιρροής του κάθε παράγοντα μπορεί να αποφασιστεί ποιοί από αυτούς μπορούν να απομακρυνθούν από το πείραμα. Το αποτέλεσμα είναι λιγότεροι παράγοντες προς μελέτη και μείωση του συνολικού χρόνου και κόστους εκτέλεσης του πειράματος. [41], [42]

4 Πειράματα, Αποτελέσματα και Ανάλυση τους

Ο σκοπός του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στη συγκεκριμένη πειραματική έρευνα προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι της παρούσης διπλωματικής. Πιο συγκεκριμένα το θέμα της διπλωματικής αναφέρεται στη μελέτη της ποιότητας πορωδών τεμαχίων κατασκευασμένων με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Fused Filament Fabrication - FFF). Για την καλύτερη περιγραφή και κατανόηση των στόχων της συγκεκριμένης έρευνας κρίθηκε σκόπιμο η μεθοδολογία να διαχωριστεί σε τέσσερις επιμέρους υποενότητες ή φάσεις όπου θα επεξηγούνται εκτενέστερα οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν σε όλη την πορεία της διπλωματικής. Παρακάτω αναφέρονται οι τέσσερις φάσεις:

Φάση 1η: Σχεδιασμός Πειραμάτων (Design of Experiments - DOE)

Φάση 2η: Διεξαγωγή Πειραμάτων

Φάση 3η: Διαδικασία Συλλογής Δεδομένων

Φάση 4η: Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια του κεφαλαίου περιγράφονται αναλυτικά οι επιμέρους φάσεις.

4.1 Σχεδιασμός Πειραμάτων (DOE)

4.1.1 Προκαταρκτικό πείραμα (Screening test)

Για τον σχεδιασμό πειραμάτων για την κατασκευή των πορωδών τεμαχίων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Taguchi που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3. Επειδή οι παράγοντες προς μελέτη όσον αφορά την τρισδιάστατη εκτύπωση είναι αρκετοί κρίθηκε αναγκαίο αρχικά να γίνει ένα προπαρασκευαστικό πείραμα (screening test) προκειμένου στο τελικό πείραμα να συμπεριληφθούν οι παράγοντες ελέγχου (control factors) και τα επίπεδα των παραγόντων (levels) τα οποία βελτιστοποιούν το τελικό αποτέλεσμα το οποίο είναι η καλύτερη διαστασιακή ακρίβεια των πορωδών τεμαχίων. Οι παράγοντες και τα επίπεδα των παραγόντων που εξετάστηκαν στο αρχικό πείραμα (Πίνακας 4-1) φαίνονται παρακάτω.

Πίνακας 4-1: παράγοντες και επίπεδα που επιλέχθηκαν στο screening test

Factor	Level	
	1	2
A. Fan/Cool (loops%-inside%)	50 - 50	100 - 100
B. Temperature (°C)	190	240
C. Flow Adjust (tweak)	0.9	1.3
D. Layer Thickness (mm)	0.1	0.4
E. Destrting (suck)	0.05	0.08
F. Nozzle speed (mm/s)	10	45

Κατά τη διαδικασία της αξιολόγησης των επιπέδων των παραγόντων, ένα συχνό φαινόμενο είναι η επιλογή επιπέδων σχετικά κοντά στα αρχικά επίπεδα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ανησυχίας του ατόμου που διεξάγει το πείραμα ότι θα παραχθεί ένας μεγάλος αριθμός μη ικανοποιητικών προϊόντων κατά τη διάρκεια του πειράματος. Εντούτοις η παραγωγή μη ικανοποιητικών προϊόντων σε αυτό το στάδιο, είναι στη πραγματικότητα ιδιαίτερα ωφέλιμο γεγονός καθώς αναδεικνύει την περιοχή των επιπέδων των παραγόντων που θα πρέπει να αποφευχθούν.

Επίσης, κατά την επιλογή επιπέδων που έχουν μεγάλο εύρος ανάμεσα τους, αυξάνεται η πιθανότητα καταγραφής της μη γραμμικότητας της σχέσης ανάμεσα στους παράγοντες ελέγχου και τους παράγοντες θορύβου (noise factors) και ως εκ τούτου της εύρεσης των επιπέδων των παραγόντων ελέγχου που ελαχιστοποιούν την ευαισθησία στο θόρυβο (noise). Ως παράγοντες θορύβου θεωρούνται όλοι οι παράγοντες των οποίων τα επίπεδα δεν μπορούν να ελεγχθούν, είναι δύσκολο να ελεγχθούν ή ο έλεγχος τους είναι δαπανηρός κατά τη φάση της διαδικασίας κατασκευής. Επιπλέον, όταν τα επίπεδα έχουν μεγάλο εύρος ανάμεσα τους, οι επιδράσεις των παραγόντων είναι μεγάλες σε σύγκριση με τα πειραματικά σφάλματα. Ως αποτέλεσμα, οι επιδράσεις του παραγόντων μπορούν να εντοπιστούν χωρίς πολλές επαναλήψεις.[37] Έτσι τα επίπεδα των παραγόντων στο συγκεκριμένο πείραμα επιλέχθηκαν ώστε να προσεγγίζουν τις οριακές συνθήκες της διαδικασίας εκτύπωσης όπως η θερμοκρασία και η ταχύτητα με την οποία κινείται το ακροφύσιο.

Στη συνέχεια έγινε επιλογή του κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα Taguchi ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για να φιλοξενήσει το screening test. Το πρώτο βήμα στη κατασκευή ενός ορθογώνιου πίνακα για να ταιριάζει σε μια συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης (case study) είναι ο υπολογισμός των συνολικών βαθμών ελευθερίας (degrees of freedom - DOF) που αναφέρονται στον ελάχιστο αριθμό πειραμάτων που πρέπει να εκτελεστούν προκειμένου να μελετηθούν όλοι οι επιλεγμένοι παράγοντες. Ένας βαθμός ελευθερίας συνδέεται με το συνολικό μέσο ανεξάρτητα από τον αριθμό των παραγόντων ελέγχου που πρέπει να μελετηθούν. *Γενικά, ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας που σχετίζονται με έναν παράγοντα είναι ίσος με έναν μικρότερο από τον αριθμό των επιπέδων για τον παράγοντα αυτό.*[37] Στο συγκεκριμένο πείραμα ο αριθμός των παραγόντων που εξετάστηκαν είναι έξι (6) με δύο (2) επίπεδα ο κάθε παράγοντας. Άρα συνολικά έχουμε $6 \times (2 - 1) + 1 = 7$ βαθμούς ελευθερίας. Έτσι, πρέπει να διεξαχθούν τουλάχιστον 7 ξεχωριστά πειράματα ούτως ώστε να είναι δυνατό να υπολογιστούν οι επιδράσεις του κάθε παράγοντα. Για το λόγο αυτό για το συγκεκριμένο πείραμα επιλέγεται ο ορθογώνιος πίνακας L_8 καθώς ο αμέσως μικρότερος είναι ο L_4 και ο αμέσως μεγαλύτερος ο L_9 ο οποίος χρησιμοποιείται για παράγοντες τριών επιπέδων.

Πίνακας 4-2: ορθογώνιος πίνακας L_8 για το screening test

Factor \ Run	A	B	C	D	E	F
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2
4	1	2	2	2	2	1
5	2	1	2	1	2	1
6	2	1	2	2	1	2
7	2	2	1	1	2	2
8	2	2	1	2	1	1

Το γεωμετρικό μοντέλο δημιουργήθηκε με το λογισμικό περιβάλλον του SolidWorks με κυβική γεωμετρία με εξωτερικές διαστάσεις 15mm x 15mm x 10mm και μέγεθος πόρου 5mm και στις τρεις διευθύνσεις. Τα δεδομένα για το κάθε ξεχωριστό πείραμα του ορθογώνιου πίνακα εισάγονται από το χρήστη στη αντίστοιχη φόρμα που εμφανίζεται. Ο χρόνος που χρειάστηκε για να ολοκληρωθεί το κάθε δοκίμιο κυμαινόταν ανάμεσα σε 40 και 70 λεπτά ανάλογα με τις συνθήκες εκτύπωσης. Είναι προφανές ότι τα δοκίμια με τον ελάχιστο χρόνο ολοκλήρωσης είναι αυτά που εκτυπώνονταν με την μικρότερη ταχύτητα εκτύπωσης, δηλαδή όταν η ταχύτητα του ακροφυσίου είναι 10mm/s και το πάχος στρώσης υλικού 0,1mm. Κατά τη διάρκεια της τρισδιάστατης εκτύπωσης υπήρξαν περιπτώσεις όπου έπρεπε να διακοπεί η λειτουργία καθώς το ακροφύσιο τύπωνε στον "αέρα" ή είχε παρασύρει μαζί του κομμάτια του δοκιμίου. Υπήρξε ακόμη και περίπτωση ολοσχερούς καταστροφής του δοκιμίου. Σε αυτές τις περιπτώσεις γινόταν εμφανές με ποιούς συνδυασμούς επιπέδων παραμέτρων ήταν αδύνατη η εκτύπωση και ως εκ τούτου τι θα έπρεπε να αποφευχθεί στο κανονικό πείραμα.



Εικόνα 4-1: α) άνω όψη και β) πλάγια όψη των δοκιμίων

Από τα συνολικά οκτώ ανεξάρτητα πειράματα που διεξήχθησαν μόνο τα τρία κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές του αρχικού μοντέλου κυβικής γεωμετρίας και συγκεκριμένα τα δοκίμια 2, 3 και 6 ενώ τα δοκίμια 4, 7 και 8 κατασκευάστηκαν ατελώς όπως φαίνεται και στη παραπάνω Εικόνα. Η κατασκευή των δοκιμών 1 και 5 ήταν ανεπιτυχής, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο συνδυασμός των συγκεκριμένων επιπέδων των παραγόντων δεν ενδείκνυται για την κατασκευή πορωδών τεμαχίων.

Στη συνέχεια, προκειμένου να αξιολογηθεί η διαστασιακή ακρίβεια των πόρων κρίθηκε αναγκαίο να βρεθεί μια μέθοδος η οποία να μας παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα και να μην είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα. Γι' αυτό το λόγο όλα τα δοκίμια φωτογραφήθηκαν απ' όλες τις πλευρές με τη βοήθεια στερεοσκοπίου τύπου Leica MZ6. Έπειτα οι φωτογραφίες αποθηκεύτηκαν ηλεκτρονικά ούτως ώστε να μπορέσουν να τύχουν περαιτέρω επεξεργασίας. Το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για το σκοπό αυτό, δηλαδή για τη μέτρηση των διαστάσεων των πόρων των δοκιμών ονομάζεται ImageJ και είναι ένα πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνας βασισμένο σε γλώσσα Java. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο λήψης φωτογραφιών και μετρήσεων των δοκιμών θα αναφερθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων έγινε με το στατιστικό πακέτο Minitab όπου χρησιμοποιήθηκε ανάλυση Taguchi και ανάλυση διακύμανσης (ANOVA). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων που διεξάχθηκαν ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων που προκύπτει είναι ο $A_1B_1C_1D_2E_2F_2$ και αναφέρεται στο δεύτερο πείραμα του πίνακα Taguchi. Το βέλτιστο επίπεδο για κάθε παράγοντα είναι το επίπεδο που δίνει την υψηλότερη τιμή του η . Το η ονομάζεται λόγος σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio - SNR). Το SNR εκφράζει τη διασπορά γύρω από μια τιμή στόχο. Όσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία, τόσο μικρότερη είναι η διασπορά.[29] Οι αναλύσεις που διεξήχθησαν αλλά και η αναλογία SNR θα συζητηθούν εκτενέστερα στη παράγραφο 4.4. Συνοπτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης ANOVA που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3.

Πίνακας 4-3: αποτελέσματα ANOVA για το screening test

Factor	Contribution (%)
<i>A. Fan/Cool</i>	1,70
<i>B. Temperature</i>	11,74
<i>C. Flow Adjust</i>	0,83
<i>D. Layer Thickness</i>	30,15
<i>E. Destrting</i>	4,52
<i>F. Nozzle Speed</i>	51,06
Total	100%

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η ταχύτητα με την οποία κινείται το ακροφύσιο(Nozzle speed) έχει την μεγαλύτερη επίδραση στη διαδικασία εκτύπωσης με ποσοστό 51,06%. Το πάχος στρώσης υλικού (Layer Thickness) έχει την αμέσως μεγαλύτερη επίδραση στη διαστασιακή ακρίβεια των πόρων που εκτυπώνονται με ποσοστό 30,15%. Η θερμοκρασία (Temperature) έχει μέτρια επίδραση με ποσοστό 11,74% και ακολουθεί το Destrting με μια μικρή επίδραση της τάξης του 4,52%. Η ταχύτητα των ανεμιστήρων(Fan/Cool) και η ρύθμιση ροής (Flow Adjust), έχουν σχεδόν αμελητέα επίδραση στη συνολική διαδικασία εκτύπωσης. Ο βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων παραγόντων φαίνεται στον Πίνακα 4-4.

Πίνακας 4-4: βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων (screening test)

Factor	Level	Value
A. Fan/Cool (loops% -inside%)	1	50 - 50
B. Temperature (°C)	1	190
C. Flow Adjust (tweak)	1	0.9
D. Layer Thickness	2 (mm)	0.4
E. Destrting	2	0.08
F. Nozzle Speed	2 (mm/s)	45

4.1.2 Κύριο πείραμα

Το προκαταρκτικό πείραμα (screening test), διεξήχθη προκειμένου να υπάρξει καλύτερη κατανόηση του φαινομένου και των αδυναμιών της μεθόδου της τρισδιάστατης εκτύπωσης (μέθοδος FFF). Καθώς δεν υπήρχε προηγούμενη γνώση σχετικά με την συμπεριφορά του εκτυπωτή όσον αφορά τις ακραίες τιμές που λαμβάνουν οι παράμετροι λειτουργίας του, για την κατασκευή πορωδών δομών, ήταν απαραίτητη η διεξαγωγή ενός αρχικού πειράματος που θα προσδιόριζε τις βέλτιστες περιοχές, μέσα στις οποίες θα μπορούσαν να κατασκευαστούν πορώδη τεμάχια με ικανοποιητικές διαστάσεις και ανοχές. Αφού καταστρώθηκε το προκαταρκτικό πείραμα, έγινε η ανάλυση των μετρήσεων που προέκυψαν από τις φωτογραφίες που συλλέχτηκαν, και βρέθηκε ότι από τις αρχικές έξι παραμέτρους που είχαν επιλεγεί, οι πιο σημαντικές που επηρέαζαν τη λειτουργία της εκτύπωσης ήταν οι εξής τέσσερις με σειρά προτεραιότητας: 1) ταχύτητα εκτύπωσης (Nozzle speed), 2) πάχος στρώσης υλικού (Layer Thickness), 3) θερμοκρασία εκτύπωσης (temperature), 4) Destrिंग με ποσοστά 51,06%, 30,15%, 11,74% και 4,52% αντίστοιχα.

Επομένως έτσι γίνεται αντιληπτό ότι αυτοί οι τέσσερις παράγοντες θα χρησιμοποιηθούν για να ενσωματωθούν στο νέο κύριο πείραμα που θα διεξαχθεί. Εφόσον οι τέσσερις από τους έξι παράγοντες που μελετήθηκαν αρχικά συνεισφέρουν σημαντικά στο τελικό αποτέλεσμα, επιλέξαμε να τους ενσωματώσουμε στο κύριο πείραμα, ενώ οι υπόλοιποι δύο οι οποίοι έχουν σχεδόν μηδενική επίδραση στη διαδικασία εκτύπωσης δεν επιλέχθηκαν προς μελέτη. Όσον αφορά τα επίπεδα των παραγόντων, είναι πολύ σημαντικό να επιλεγθούν έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι αποκλίσεις από τις διαστάσεις που δίνονται μέσω του γεωμετρικού μοντέλου. Σε αντίθεση με το προκαταρκτικό πείραμα, που επιλέχθηκαν επίπεδα τα οποία είχαν μεγάλο εύρος, στο κυρίως πείραμα ο στόχος είναι οι τιμές των επιπέδων να βρίσκονται κοντά στα βέλτιστα επίπεδα των παραγόντων της προκαταρκτικής ανάλυσης, με σχετικά μικρό εύρος, ούτως ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι η καλύτερη διαστασιακή ακρίβεια των πορωδών τεμαχίων. Στο αρχικό πείραμα εξετάστηκαν δύο επίπεδα σε κάθε παράγοντα, ενώ στο κανονικό πείραμα εξετάζονται τρία επίπεδα σε κάθε παράγοντα πλην ενός με δύο επίπεδα. Ο Πίνακας 4-5 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τους παράγοντες και τα επίπεδα που επιλέγονται για τον σχεδιασμό του πειράματος που εξυπηρετεί τους σκοπούς της παρούσης διπλωματικής.

Πίνακας 4-5: παράγοντες και επίπεδα του κανονικού πειράματος

Factor	Levels*		
	1	2	3
A. Destrिंग (suck)	0.08*	0.10	-
B. Layer Thickness (mm)	0.20	0.25	0.40*
C. Temperature (°C)	190*	200	210
D. Nozzle speed (mm/s)	35	40	45*

* Βέλτιστα επίπεδα του screening test

Έχοντας αποφασιστεί ποιοι παράγοντες θα ενσωματωθούν στο κύριο πείραμα, η επιλογή των τιμών των επιπέδων των παραγόντων έγινε έτσι ώστε να συμπεριληφθούν τα βέλτιστα επίπεδα του προκαταρκτικού πειράματος πλην των νέων τιμών που ορίστηκαν. Αξίζει να αναφερθεί ότι επιλέχθηκαν δύο επίπεδα για το *Destring* καθώς κρίθηκε ότι η επιλογή ακόμη ενός επιπέδου δεν θα άλλαζε τα αποτελέσματα με στατιστικά σημαντικό τρόπο.

Στη συνέχεια πρέπει να γίνει η κατάλληλη επιλογή του ορθογώνιου πίνακα Taguchi που θα στεγάσει το κύριο πείραμα. Αρχικά υπολογίζονται οι βαθμοί ελευθερίας του συγκεκριμένου πειράματος, προκειμένου να αποφανθούμε ποιοί πίνακες θα μπορούσαν να ήταν κατάλληλοι. Έχουμε τέσσερις παράγοντες, ένας εκ των οποίων έχει δύο επίπεδα και οι υπόλοιποι από τρία επίπεδα ο καθένας. Άρα συνολικά $1 \times (2 - 1) + 3 \times (3 - 1) + 1 = 8$ βαθμοί ελευθερίας (DOF). Συνεπώς, χρειάζεται να διεξαχθούν τουλάχιστον 8 ξεχωριστά πειράματα για να μπορέσουν να υπολογιστούν οι επιδράσεις του κάθε παράγοντα. Επειδή όμως έχουμε σχεδιασμό μεικτού επιπέδου (mixed level design), δηλαδή μείξη παραγόντων με διαφορετικά επίπεδα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλοι πίνακες Taguchi για μεικτό σχεδιασμό. Τέτοιοι πίνακες είναι ο L_{18} , L_{36} , L'_{36} και ο L_{54} . Επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε τον πίνακα L_{18} επειδή είναι ο μικρότερος πίνακας που μπορεί να φιλοξενήσει το κύριο πείραμα μας. Επιπλέον έχουμε $18 - 8 = 10$ βαθμούς ελευθερίας (DOF) πλεόνασμα, οι οποίοι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για τον υπολογισμό πιθανών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραγόντων.

Πίνακας 4-6: ορθογώνιος πίνακας L_{18} για το κύριο πείραμα

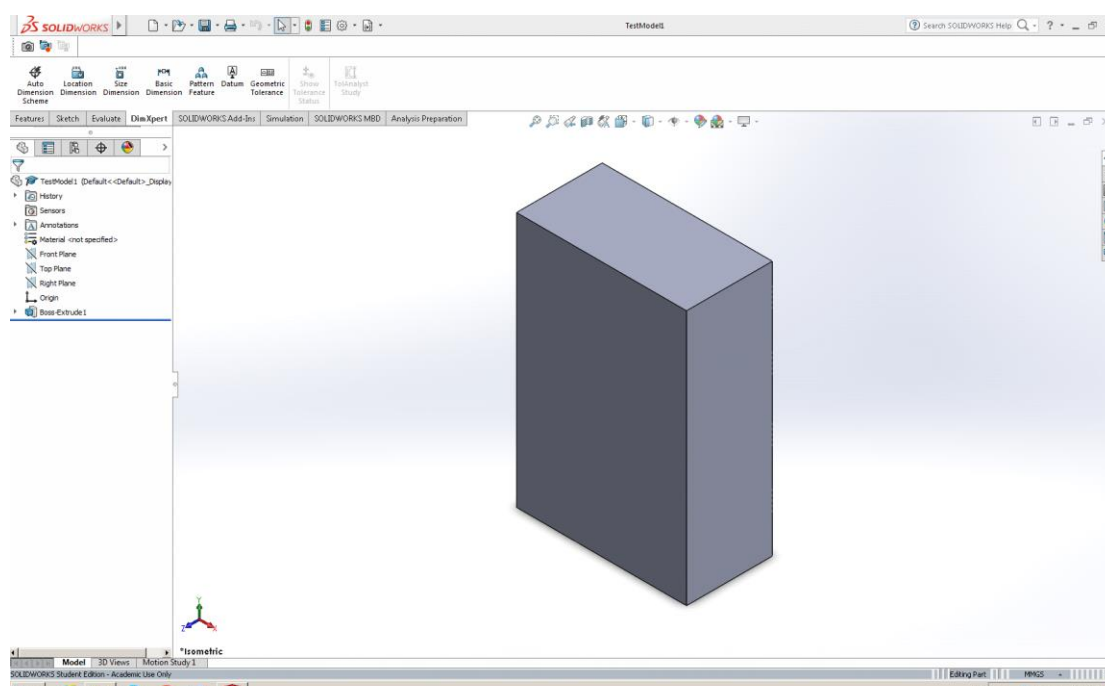
FACTOR Run	DESTRING	LAYER THICKNESS	TEMPERATURE	NOZZLE SPEED
	A	B	C	D
1	0,08	0,2	190	35
2	0,08	0,2	200	40
3	0,08	0,2	210	45
4	0,08	0,25	190	35
5	0,08	0,25	200	40
6	0,08	0,25	210	45
7	0,08	0,4	190	40
8	0,08	0,4	200	45
9	0,08	0,4	210	35
10	0,1	0,2	190	45
11	0,1	0,2	200	35
12	0,1	0,2	210	40
13	0,1	0,25	190	40
14	0,1	0,25	200	45
15	0,1	0,25	210	35
16	0,1	0,4	190	45
17	0,1	0,4	200	35
18	0,1	0,4	210	40

* Fixed Factors 1) Fan/Cool = 50% 2) Flow Tweak = 0.9 3) Prime = 0.05 (είχε οριστεί στο προκαταρκτικό πείραμα)

4.2 Διεξαγωγή Πειραμάτων

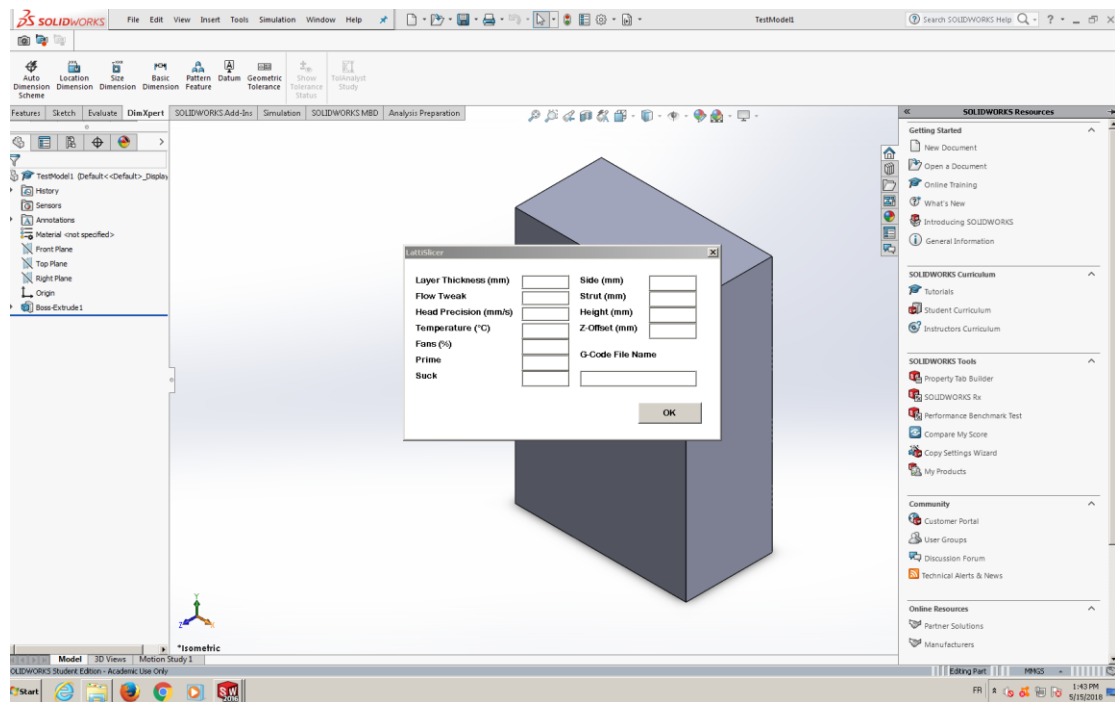
4.2.1 Εξαγωγή G-Code

Το επόμενο βήμα μετά τον σχεδιασμό πειραμάτων είναι η κατασκευή των δοκιμών στον εκτυπωτή. Πριν όμως δοθεί η εντολή για τρισδιάστατη εκτύπωση προηγούνται κάποια βήματα, τα οποία είναι απαραίτητα, προκειμένου να δημιουργηθεί ο πηγαίος κώδικας (source code) τον οποίο θα "διαβάζει" ο επεξεργαστής του 3D εκτυπωτή, και θα δημιουργεί τη τροχιά την οποία θα ακολουθήσει το εργαλείο (tool path), το οποίο σε αυτή τη περίπτωση είναι το ακροφύσιο του εκτυπωτή. Αρχικά δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του λογισμικού SolidWorks το τρισδιάστατο συμπαγές μοντέλο πορώδους δομής με διαστάσεις 20 mm x 30 mm x 10 mm το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για να εξαχθεί ο κώδικας σε γλώσσα μηχανής (G-code).



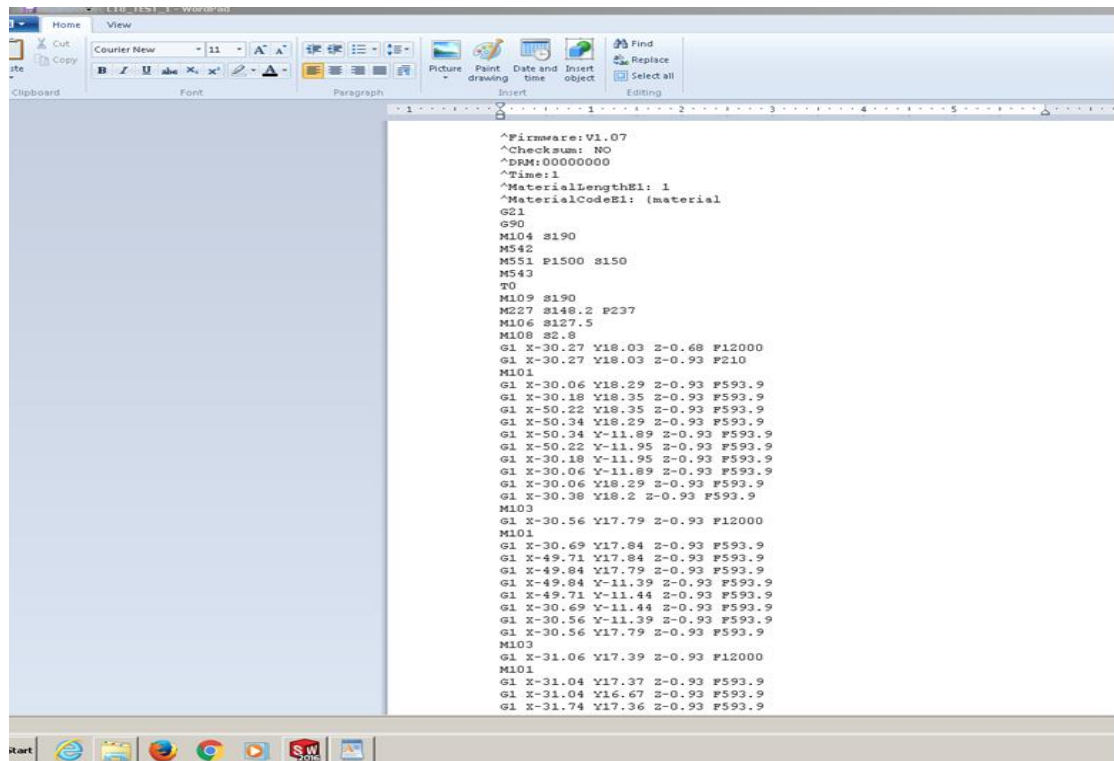
Εικόνα 4-2: τρισδιάστατο συμπαγές μοντέλο

Η δημιουργία του αντικειμένου κατά στρώματα προϋποθέτει τον τεμαχισμό (slicing) του τρισδιάστατου μοντέλου (3D) σε στρώσεις δύο διαστάσεων (2D). Ο τεμαχισμός του μοντέλου γίνεται με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού, το οποίο μεταφράζει τη γεωμετρία (όρια και εσωτερικό) της κάθε στρώσης σε εντολές G-Code.[43] Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το *SolidWorks LattiSlicer*. Ο χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί ο τεμαχισμός του αντικειμένου κυμαίνεται μεταξύ πέντε και δεκαπέντε λεπτών, ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων που εισάγονται από τον χρήστη στη φόρμα εισαγωγής η οποία εμφανίζεται, επιλέγοντας την μακροεντολή για την καταχώρηση δεδομένων πριν την έναρξη του τεμαχισμού.



Εικόνα 4-3: φόρμα εισαγωγής δεδομένων του LattiSlicer

Σε καθεμιά από τις δεκαοκτώ ξεχωριστές εκτελέσεις του πίνακα Taguchi θα χρειαστεί να επαναληφθεί η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων στη φόρμα του LattiSlicer με διαφορετικές όμως τιμές των παραμέτρων έτσι όπως ορίζονται από τον πίνακα. Τα στοιχεία τα οποία κάθε φορά συμπληρώνονται αυτούσια είναι οι μεταβλητές, οι οποίες δεν επιλέχθηκαν στη μελέτη του κύριου πειράματος αλλά εξετάστηκαν στο screening test και είναι οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές των παραμέτρων “Flow Tweak”, “Fans” και “Prime” στα αντίστοιχα πεδία της πρώτης στήλης, παραμένουν σταθερές σε κάθε εκτέλεση του πειράματος. Στη δεύτερη στήλη οι τιμές των παραμέτρων “Side”, “Strut” και “Height” αναφέρονται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πόρου ή αλλιώς μοναδιαίου κυττάρου (unit cell) και είναι σταθερά σε κάθε επανάληψη του πειράματος και ίσα με 10, 2 και 10 mm αντίστοιχα. Η τιμή του πεδίου “Z-Offset” αναφέρεται στην αντιστάθμιση, δηλαδή στη κάθετη απόσταση μεταξύ του ακροφυσίου του εκτυπωτή και της επιφάνειας εκτύπωσης της πρώτης στρώσης (αρχή συστήματος συντεταγμένων), ρυθμίζεται δε χειροκίνητα και σταθερά στη τιμή - 1.03 mm. Στο τελευταίο πεδίο της φόρμας, ο χρήστης καταχωρεί το όνομα του αρχείου που δημιουργείται (αρχείο.bfb) και τον φάκελο προορισμού αποθήκευσης. Στη συνέχεια πατάει “OK” και το πρόγραμμα αρχίζει την διαδικασία τεμαχισμού (slicing), δημιουργώντας τον G κώδικα που θα “διαβάσει” ο εκτυπωτής.

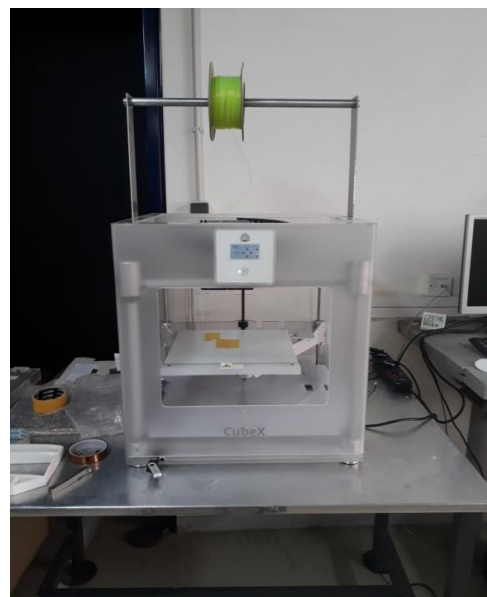
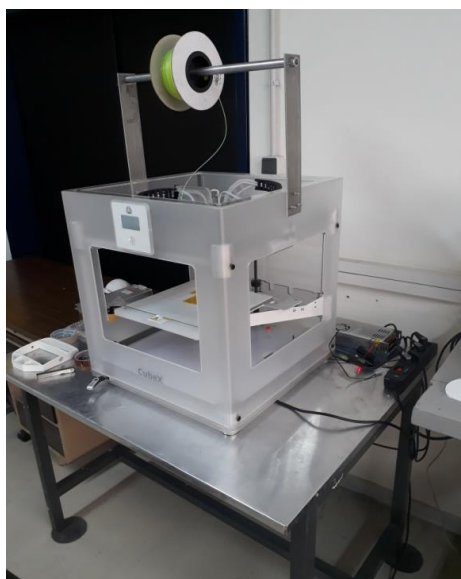


```
^Firmware: V1.07
^Checksum: NO
^DRM: 00000000
^Time: 1
^MaterialLengthE1: 1
^MaterialCodeE1: (material
G21
G90
M104 S190
M542
M551 P1500 S150
M543
T0
M109 S190
M227 S148.2 P237
M106 S127.5
M108 S2.8
G1 X-30.27 Y18.03 Z-0.68 F12000
G1 X-30.27 Y18.03 Z-0.93 F210
M101
G1 X-30.06 Y18.29 Z-0.93 F593.9
G1 X-30.18 Y18.35 Z-0.93 F593.9
G1 X-50.22 Y18.35 Z-0.93 F593.9
G1 X-50.34 Y18.29 Z-0.93 F593.9
G1 X-50.34 Y-11.89 Z-0.93 F593.9
G1 X-50.22 Y-11.95 Z-0.93 F593.9
G1 X-30.18 Y-11.95 Z-0.93 F593.9
G1 X-30.06 Y-11.89 Z-0.93 F593.9
G1 X-30.06 Y18.29 Z-0.93 F593.9
G1 X-30.38 Y18.2 Z-0.93 F593.9
M103
G1 X-30.56 Y17.79 Z-0.93 F12000
M101
G1 X-30.69 Y17.84 Z-0.93 F593.9
G1 X-49.71 Y17.84 Z-0.93 F593.9
G1 X-49.84 Y17.79 Z-0.93 F593.9
G1 X-49.84 Y-11.39 Z-0.93 F593.9
G1 X-49.71 Y-11.44 Z-0.93 F593.9
G1 X-30.69 Y-11.44 Z-0.93 F593.9
G1 X-30.56 Y-11.39 Z-0.93 F593.9
G1 X-30.56 Y17.79 Z-0.93 F593.9
M103
G1 X-31.06 Y17.39 Z-0.93 F12000
M101
G1 X-31.04 Y17.37 Z-0.93 F593.9
G1 X-31.04 Y16.67 Z-0.93 F593.9
G1 X-31.74 Y17.36 Z-0.93 F593.9
```

Εικόνα 4-4: εξαγόμενος G-Code που προκύπτει από το slicing

4.2.2 Διαδικασία εκτύπωσης

Αφού έχει εξαχθεί ο G-κώδικας, ο οποίος περιγράφει την διαδρομή που θα ακολουθηθεί προκειμένου να κατασκευαστεί το δοκίμιο, πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες για την αρχικοποίηση του εκτυπωτή, πριν αρχίσει η διαδικασία εκτύπωσης. Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμών είναι ο CubeX™ της εταιρείας 3D Systems ο οποίος βρίσκεται στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ.

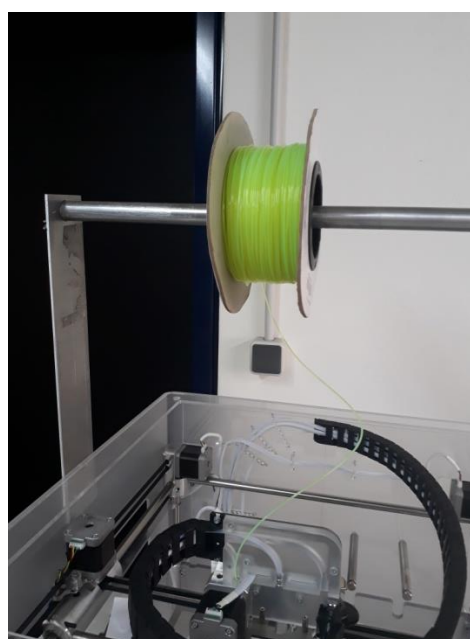


Εικόνα 4-5: α) πλάγια και β) μπροστινή όψη του CubeX™

Στην Εικόνα 4-5 διακρίνεται η επιφάνεια εκτύπωσης (print table) πάνω στην οποία κατασκευάζονται τα δοκίμια και η οθόνη αφής μέσω της οποίας επικοινωνεί ο χρήστης με τον εκτυπωτή. Η τράπεζα εκτύπωσης μετακινείται μόνο κατά τη διεύθυνση του άξονα Z με θετική φορά προς τα κάτω, ενώ ο μηχανισμός στον οποίο είναι ενσωματωμένο το ακροφύσιο μετακινείται κατά τις διευθύνσεις του άξονα X και Y, με θετική φορά από μπροστά προς τα πίσω και από δεξιά προς τα αριστερά για τον άξονα X και Y αντίστοιχα. Το υλικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμίων είναι το PLA με διάμετρο σύρματος 1.75 mm, τυλιγμένο σε καρούλι το οποίο είναι τοποθετημένο στο άνω μέρος του εκτυπωτή. Επίσης στην Εικόνα 4-5 κάτω αριστερά φαίνεται η υποδοχή στην οποία τοποθετείται το USB stick για τη μεταφορά των αρχείων. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του CubeX™ παρατίθενται στο παράρτημα Ι.



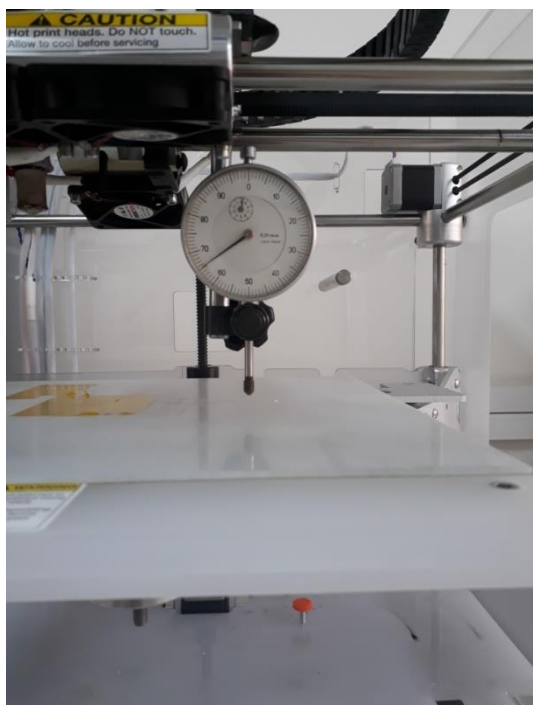
Εικόνα 4-6: άξονες X Y Z



Εικόνα 4-7: 3D filament (PLA)

Τα δοκίμια που θα κατασκευαστούν θέλουμε να βρίσκονται όσο γίνεται εγγύτερα στις επιθυμητές διαστάσεις και γι αυτό το λόγο γίνεται έλεγχος της οριζοντίωσης της επιφάνειας εκτύπωσης. Όσο πιο οριζόντια είναι η τράπεζα εκτύπωσης τόσο καλύτερη διαστασιακή ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί κατά τη διάρκεια κατασκευής των δοκιμίων. Χρησιμοποιήθηκε γι' αυτήν την μέτρηση ωρολογιακό μικρόμετρο που μπορεί να μετρήσει αποκλίσεις της τάξης του εκατοστού του χιλιοστού (0,01 mm). Για το συγκεκριμένο πείραμα η μέγιστη ακρίβεια που επιτεύχθη ήταν $\pm 0,05\text{mm}$, που θεωρείται ικανοποιητική, δεδομένης της εγγενούς μη επιπεδότητας της τράπεζας εκτύπωσης. Ένας άλλος παράγοντας που μπορούσε να ελεγχθεί όσον αφορά την κατασκευαστική ακρίβεια του εκτυπωτή, ήταν η ρύθμιση του "Z GAP". Το "Z GAP" αναφέρεται στην απόσταση μεταξύ της επιφάνειας εκτύπωσης και του άκρου του ακροφυσίου κατά τη διάρκεια του πρώτου στρώματος εκτύπωσης. Για μεγαλύτερη

ακρίβεια η ρύθμιση του “Z GAP” έγινε με τη βοήθεια filler πάχους 1,03 mm ή 0,040 inch. Χρησιμοποιήθηκε επίσης ειδική θερμοανθεκτική ταινία (karton tape), στην επιφάνεια εκτύπωσης των δοκιμών, καθώς και προστατευτική στρώση εκτύπωσης 0,2 mm η οποία ήταν ενσωματωμένη στον G κώδικα για την απορρόφηση ελαφρών εκδορών που είχαν δημιουργηθεί στην τράπεζα από τη συχνή της χρήση. Με τους προαναφερόμενους τρόπους έγινε συστηματική προσπάθεια για μείωση των αποκλίσεων που οφείλονταν σε εξωτερικούς παράγοντες, και ως εκ τούτου, αύξηση της αξιοπιστίας του πειράματος. Οι ενέργειες αυτές επαναλαμβάνονταν σε όλη τη διάρκεια του πειράματος.

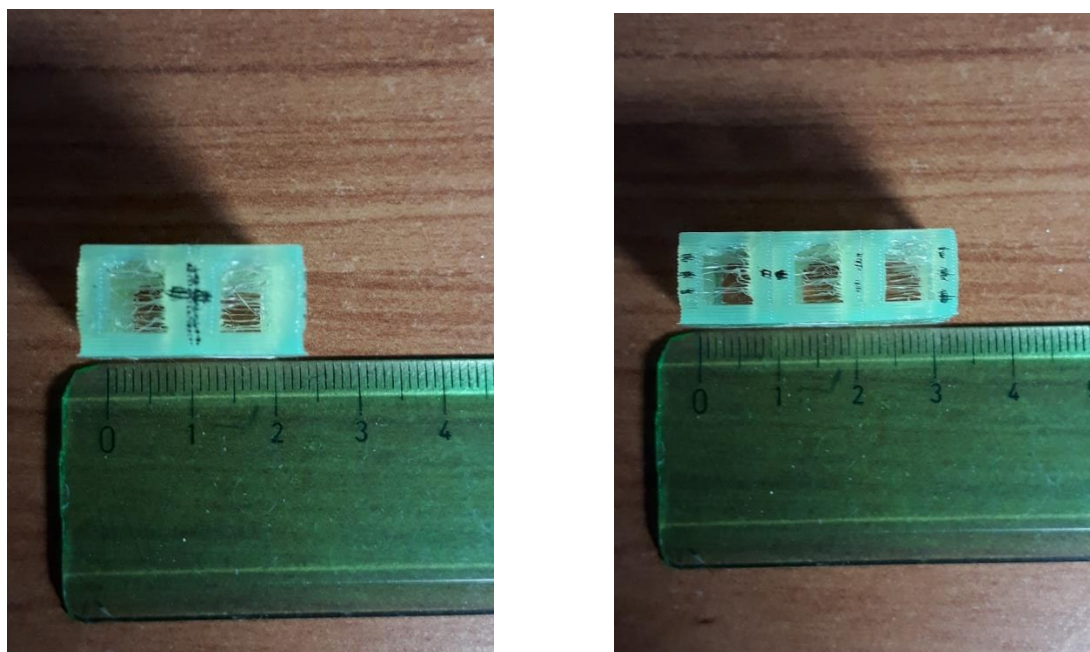


Εικόνα 4-8: ωρολογιακό μικρόμετρο

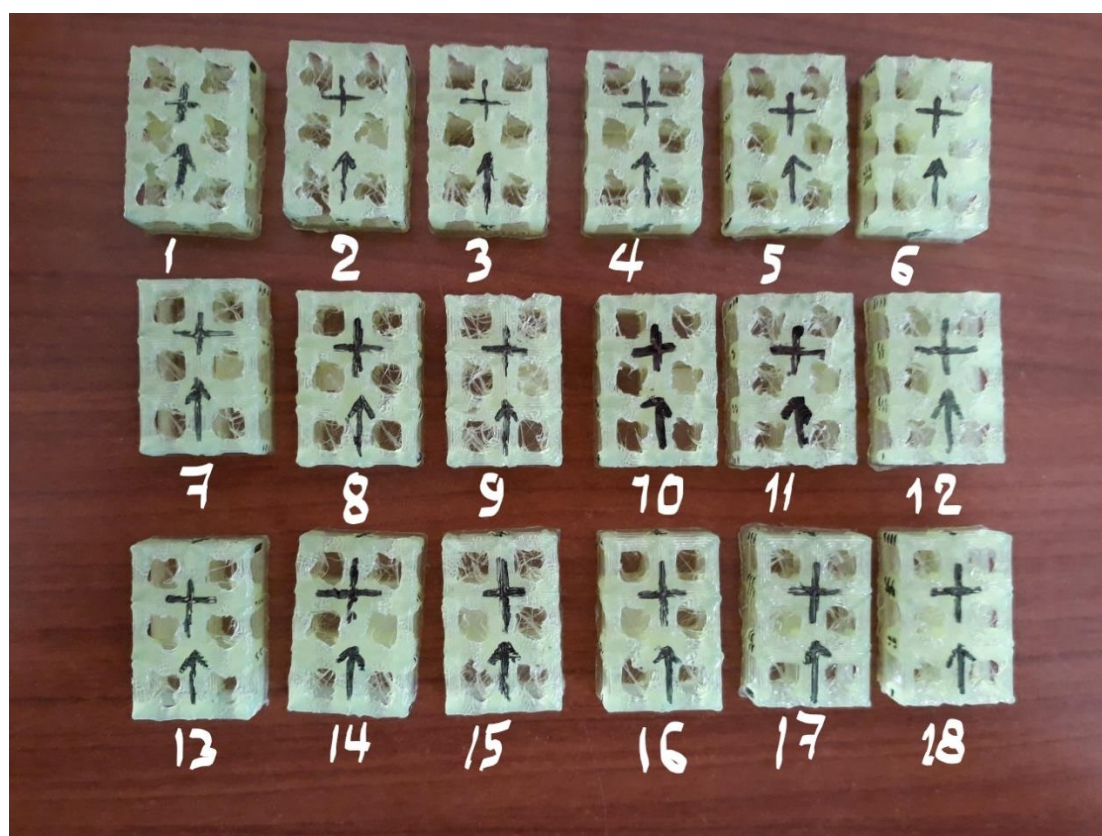


Εικόνα 4-9: οθόνη αφής CubeX™

Εφόσον έχει μετρηθεί η επιπεδότητα της επιφάνειας εκτύπωσης και ρυθμιστεί το “Z GAP” κατάλληλα, μεταφέρεται το αρχείο του G κώδικα που δημιουργήθηκε στη υποδοχή του εκτυπωτή μέσω του USB stick. Με το εικονίδιο “PRINT” στο μενού της οθόνης επιλέγουμε το αρχείο που θέλουμε να εκτυπώσουμε. Σε κάθε εκτέλεση του πειράματος, ο χρόνος εκτύπωσης ποικίλλει ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων από 30 λεπτά έως 45 λεπτά. Τα δοκίμια με τον μικρότερο χρόνο εκτύπωσης είναι αυτά που συνδυάζουν μεγάλο πάχος στρώσης και υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης. Αντίστοιχα, με τον μεγαλύτερο χρόνο εκτύπωσης είναι αυτά που συνδυάζουν μικρό πάχος στρώσης και χαμηλή ταχύτητα εκτύπωσης. Μετά το τέλος της εκτύπωσης αφαιρείται προσεκτικά το δοκίμιο που κατασκευάστηκε με τη βοήθεια ειδικής σπάτουλας, και καθαρίζεται η επιφάνεια εκτύπωσης από τυχόν υπολείμματα που έχουν απομείνει. Στη συνέχεια επαναλαμβάνονται οι ίδιες διαδικασίες που προαναφέρθηκαν για το επόμενο δοκίμιο προς κατασκευή.



Εικόνα 4-10: α) μπροστινή -Υ πλευρά και β) πλαϊνή όψη του δοκιμίου - X πλευρά



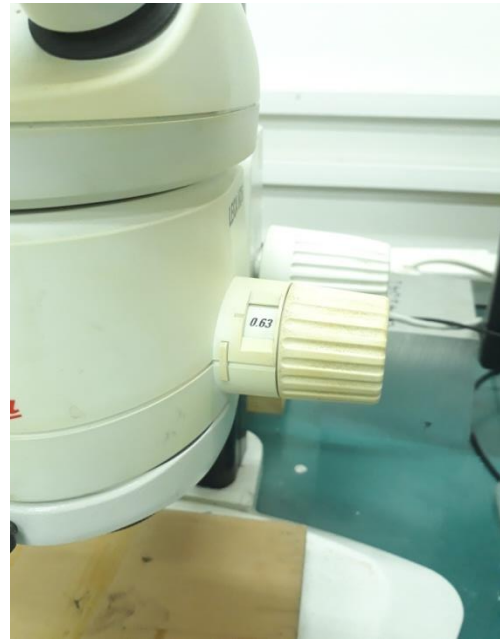
Εικόνα 4-11: το συνολικό πείραμα του πίνακα Taguchi

4.3 Συλλογή Δεδομένων

Η επόμενη φάση μετά την διεξαγωγή του συνολικού πειράματος είναι η απόκτηση πληροφοριών σχετικά με τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν. Αρχικά έπρεπε να οριστεί μια διαδικασία, μέσω της οποίας θα υπήρχε πρόσβαση σε αξιόπιστα και έγκυρα δεδομένα, και στη συνέχεια ένας αξιόπιστος τρόπος μέτρησης αυτών των δεδομένων. Η μέθοδος η οποία προτάθηκε αρχικά ήταν αυτή του 3D scanning. Η 3D σάρωση με λέιζερ (3D laser scanning) είναι μια ανέπαφη μη καταστροφική τεχνολογία, που καταγράφει ψηφιακά το σχήμα των φυσικών αντικειμένων, χρησιμοποιώντας μια γραμμή φωτός λέιζερ. Οι 3D σαρωτές λέιζερ δημιουργούν “σύννεφα σημείων” δεδομένων από την επιφάνεια ενός αντικειμένου. Με άλλα λόγια, η τρισδιάστατη σάρωση με λέιζερ είναι ένας τρόπος για την καταγραφή του ακριβούς μεγέθους και σχήματος του φυσικού αντικειμένου ως μια ψηφιακή τρισδιάστατη αναπαράσταση. [1]

Εντούτοις, εξαιτίας του μικρού μεγέθους των πόρων, ήταν δύσκολη η ακριβής καταγραφή των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών λόγω μειωμένης ευκρίνειας, και επομένως η συλλογή πληροφοριών δεν ήταν ιδιαίτερα αξιόπιστη. Εξαιτίας του συγκεκριμένου περιορισμού, η μέθοδος της τρισδιάστατης σάρωσης απορρίφθηκε εκ των υστέρων. Η επόμενη μέθοδος που προτάθηκε αφορούσε την φωτογράφιση των δοκιμίων. Η φωτογράφιση μπορούσε να γίνει ή με φωτογραφική μηχανή D-SLR υψηλής ανάλυσης είτε μέσω κάμερας τηλεδιάσκεψης υψηλής ευκρίνειας (HD webcam) η οποία ήταν κατάλληλα προσαρμοσμένη στο άνω μέρος του προσοφθάλμιου φακού στερεό-μικροσκοπίου. Αμφότεροι οι τρόποι φωτογράφισης παρείχαν ικανοποιητική και αξιόπιστη συλλογή δεδομένων. Παρόλα αυτά, για λόγους χρηστικότητας και χρόνου εκμάθησης των συγκεκριμένων εργαλείων, επιλέχθηκε η μέθοδος φωτογράφισης του στερεό-μικροσκοπίου.

Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι, όπως σε κάθε μέτρηση ενσωματώνεται ένα σφάλμα λόγω ανθρώπινης φύσης, έτσι και στη συγκεκριμένη μέθοδο ενσωματώθηκε ένα μικρό σφάλμα μέτρησης χρήστη, το οποίο όμως δεν αλλοιώνει την αξιοπιστία της μεθόδου μέτρησης. Το στερεό-μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο MZ6 της εταιρείας Leica, το οποίο βρίσκεται στην αίθουσα μεταλλογραφίας του Εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών του ΕΜΠ. Επιπλέον, η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε είναι η HD Webcam C270 της εταιρείας Logitech με εστιακή απόσταση 4.0mm και μέγιστη ανάλυση 3 megapixel.



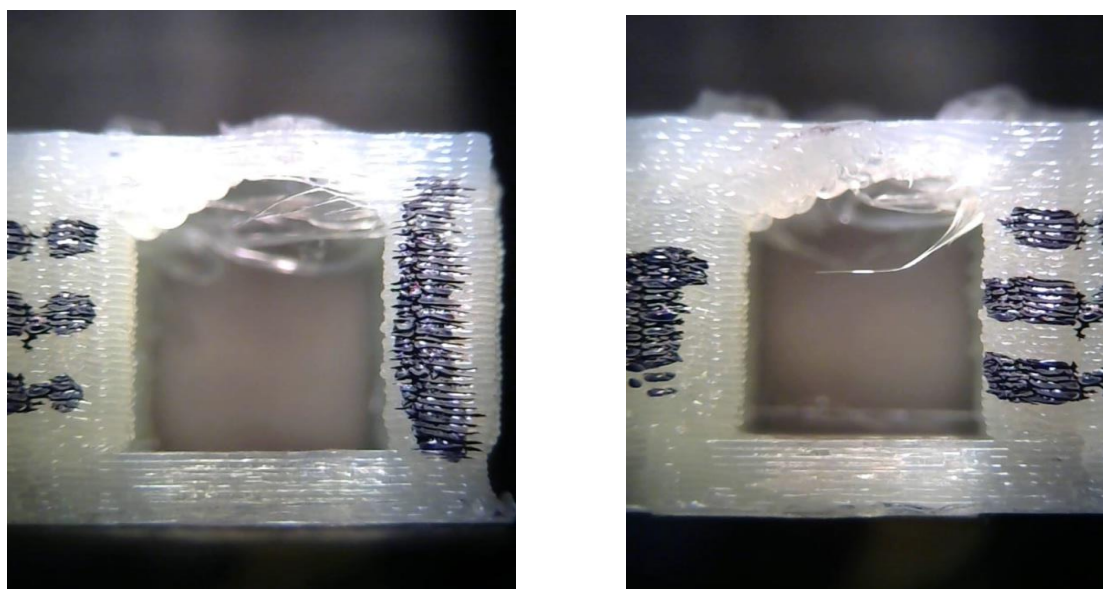
Εικόνα 4-12: α) το στερεομικροσκόπιο της αίθουσας μεταλλογραφίας β) επιλογάς μεγέθυνσης

Η web κάμερα είναι τοποθετημένη στο άνω μέρος του προσοφθάλμιου φακού, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-12 και συνδέεται με καλώδιο σε Η/Υ, έτσι ώστε η εικόνα του προς φωτογράφιση αντικειμένου να προβάλλεται απευθείας στην οθόνη του υπολογιστή προς διευκόλυνση του χρήστη χωρίς να παραμορφώνεται η εικόνα του μικροσκοπίου. Η λήψη φωτογραφιών γίνεται μέσω του ειδικού εγκατεστημένου λογισμικού της κάμερας, και ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει την ανάλυση της φωτογραφίας που επιθυμεί. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η ανάλυση των 3 megapixel, δηλαδή η μέγιστη ανάλυση της web κάμερας.



Εικόνα 4-13: Logitech Webcam Software

Προκειμένου να συλλεχθούν τα κατάλληλα δεδομένα, τα δοκίμια φωτογραφήθηκαν πλευρικός και στις τρεις διευθύνσεις, ούτως ώστε να υπάρξει η δυνατότητα καταγραφής των διαστάσεων των πόρων συνολικά. Δεδομένου ότι το κάθε δοκίμιο αποτελείται από έξι πόρους, και ο κάθε πόρος μετρείται και στις τρεις διαστάσεις, γίνεται αντιληπτό ότι για την αποφυγή σύγχυσης μεταξύ των πόρων, καθώς έχουν πανομοιότυπο σχήμα, έπρεπε να υπάρξει ένας τρόπος διαφοροποίησης τους. Γι' αυτόν τον λόγο το κάθε δοκίμιο πριν φωτογραφηθεί, μαρκαρίστηκε παραπλευρώς με διαφορετικά σημάδια, ούτως ώστε να μπορεί να ξεχωρίζει. Ο σωστός φωτισμός των πόρων διαδραμάτισε επίσης σημαντικό ρόλο στη φωτογράφιση τους. Για τον φωτισμό του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε επιτραπέζια λάμπα η οποία έχει δυνατότητα περιστροφής γύρω από άξονα. Όταν οι ακτίνες του φωτός προσέπιπταν με κλίση 45 μοιρών στην επιφάνεια του δοκιμίου, υπήρχε καλύτερος διαχωρισμός μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού του πόρου. Έτσι, συνεπώς και πιο αξιόπιστη συλλογή δεδομένων σχετικά με τη διαστασιακή τους ακρίβεια.



Εικόνα 4-14: α) και β) φωτογραφίες πόρων μέσω στερεομικροσκοπίου

Πρέπει να αναφερθεί ότι το ιδανικό σχήμα των πόρων είναι ορθογώνιο ενώ στις φωτογραφίες φαίνεται ότι το πάνω μέρος σχηματίζει μια καμάρα. Αυτό συμβαίνει λόγω της δυσκολίας της μεθόδου FDM για εναπόθεση υλικού στον αέρα χωρίς υποστήριγμα. Επίσης, στις φωτογραφίες φαίνονται και κάποιες ενδιάμεσες ίνες υλικού που δημιουργούνται εξαιτίας της μετακίνησης του ακροφυσίου χωρίς να έχει επέλθει στερεοποίηση του τηγμένου θερμοπλαστικού υλικού στο άκρο του.

Για την μέτρηση των διαστάσεων από τη φωτογράφιση των δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *ImageJ*. Όπως έχει προαναφερθεί, το *ImageJ* είναι ένα πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνας (image processing program) το οποίο έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα Java. Σχεδιάστηκε με ανοιχτή αρχιτεκτονική που παρέχει επεκτασιμότητα μέσω Java plug-in και εγγράψιμων μακροεντολών. Εκτελείται είτε ως διαδικτυακό applet, είτε ως εφαρμογή με δυνατότητα λήψης σε οποιονδήποτε υπολογιστή με εικονική μηχανή Java 1.4 ή νεότερη έκδοση. Μπορεί να εμφανίζει, να επεξεργάζεται, να αναλύει και να αποθηκεύει εικόνες των 8, των 16 και των 32 bit και να διαβάζει πολλές μορφές εικόνας (image formats). [2] Στη περίπτωση της μέτρησης

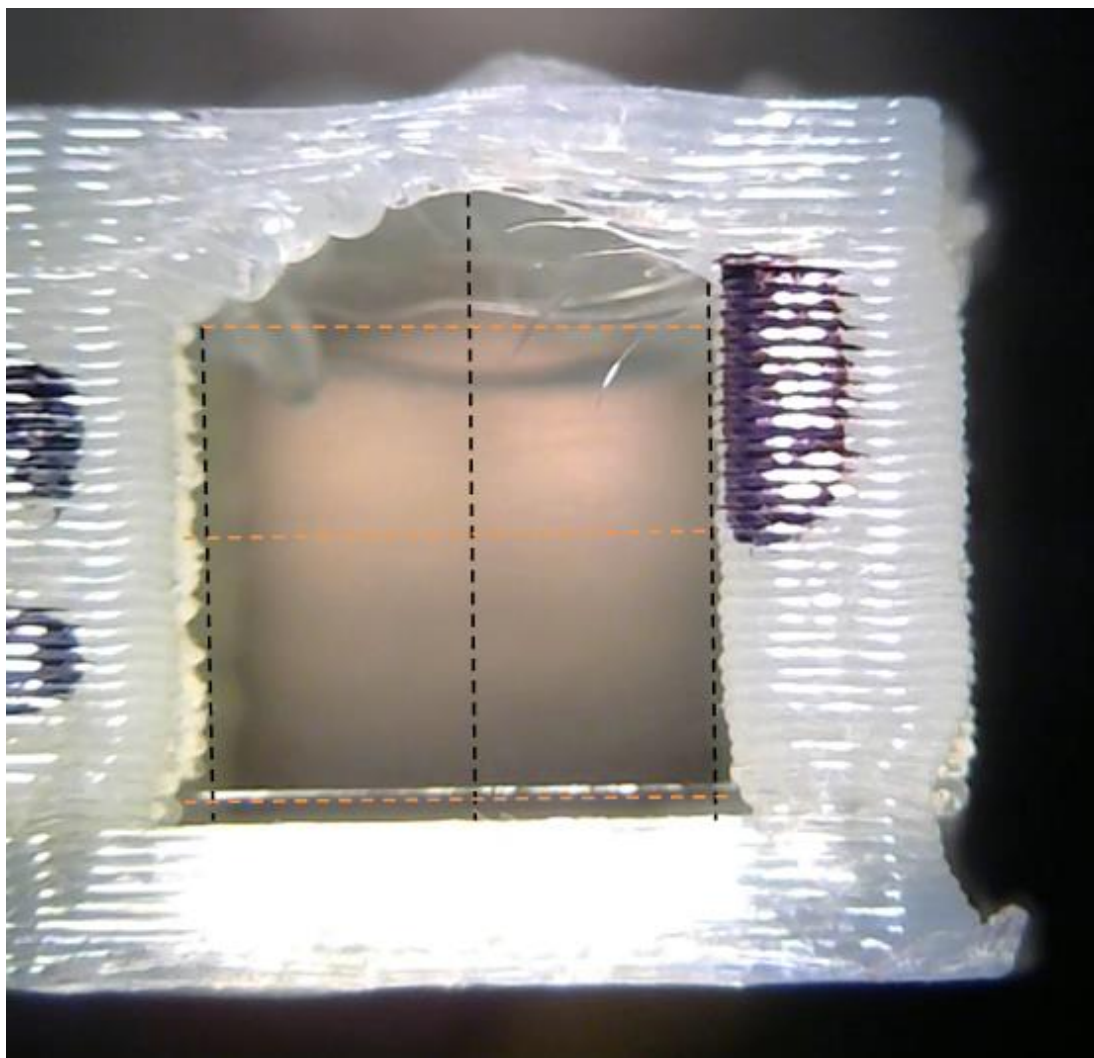
των διαστάσεων των πόρων, γίνεται μέτρηση του αριθμού των pixels μιας γνωστής απόστασης που θέλουμε να υπολογιστεί σε μια φωτογραφία. Στη συνέχεια, το πρόγραμμα αυτόματα κάνει την μετατροπή σε pixels ανά μονάδα μήκους. Έτσι σε κάθε νέα διάσταση που χρειάζεται να μετρηθεί, αντιστοιχίζεται ο αριθμός των pixels με την κλίμακα που έχει αποθηκευτεί και γίνεται ο υπολογισμός της. Κάθε φορά που μετρείται μια διάσταση σε μια φωτογραφία, η κλίμακα που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι η ίδια, αλλιώς το αποτέλεσμα της μέτρησης θα είναι λανθασμένο. Για τη μέτρηση της γνωστής απόστασης χρησιμοποιήθηκαν πρότυπα πλακίδια ελέγχου Johansson και συγκεκριμένα πλακίδιο διάστασης 12 χιλιοστών (mm). Η κλίμακα η οποία αποθηκεύτηκε και με την οποία έγινε η μέτρηση όλων των δοκιμών είναι 138 pixels/mm.



Εικόνα 4-15: α) το περιβάλλον του ImageJ β) φόρμα εισαγωγής δεδομένων

Αρχικά ανοίγουμε το περιβάλλον του ImageJ το οποίο αποτελείται μόνο από τη γραμμή εργαλείων και κάποια εικονίδια επιλογής που εκτελούν βασικές λειτουργίες του προγράμματος. Στη συνέχεια επιλέγουμε την εικόνα που θέλουμε να επεξεργαστούμε από το μενού File. Αφού εισάγουμε την φωτογραφία, επιλέγουμε το πέμπτο εικονίδιο στη σειρά όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-15 και χαράσσουμε μια ευθεία γραμμή που εκτείνεται από τη μία ακμή του πλακιδίου Johansson έως την άλλη. Έπειτα, από το μενού Analyze επιλέγουμε Set Scale και ανοίγει η φόρμα εισαγωγής δεδομένων που φαίνεται στην Εικόνα 4-15β. Το πεδίο “Known distance” αναφέρεται στο μήκος της γραμμής που έχουμε χαράξει και είναι το μήκος του πλακιδίου Johansson, δηλαδή 12 mm. Την τιμή του πεδίου “Pixel aspect ratio” η οποία είναι προεπιλεγμένη και ίση με τη μονάδα δεν την αλλάζουμε, ενώ στο πεδίο “Unit of length” πληκτρολογούμε τη μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιούμε, δηλαδή τα χιλιοστά (mm). Τέλος επιλέγουμε το πλαίσιο “Global” για να δηλωθεί στο πρόγραμμα ότι θα χρησιμοποιηθεί η υπάρχουσα κλίμακα σε όλες τις μετρήσεις και πατάμε “OK”.

Μόλις τελειώσει αυτή η διαδικασία, ανοίγουμε την φωτογραφία που θέλουμε, επιλέγουμε τη διάσταση του πόρου την οποία θέλουμε να μετρήσουμε. Μέσω του εικονιδίου *Straight*, και από το μενού Analyze > Measure ανοίγει ένα νέο παράθυρο με όνομα Results το οποίο εμφανίζει το αποτέλεσμα της μέτρησης. Το τελικό αποτέλεσμα της μέτρησης των διαστάσεων κάθε πόρου προκύπτει από το μέσο όρο τριών ξεχωριστών μετρήσεων. Μία μέτρηση γίνεται στο κέντρο κάθε πόρου και δύο μετρήσεις στα άκρα του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-16. Το κάθε δοκίμιο έχει συνολικά δέκα ανοίγματα τα οποία μετρώνται όλα ανεξαιρέτως. Επομένως έγιναν $18 \times 10 = 180$ μετρήσεις για όλα τα δοκίμια. Τα αποτελέσματα της μέτρησης της διάστασης κάθε πόρου καθώς και η τυπική απόκλιση που έχουν οι μετρήσεις μεταξύ τους, αποθηκεύεται σε φύλλο του Excel με διαφορετικό όνομα για να ξεχωρίζουν. Το σύνολο των μετρήσεων και στις τρεις διευθύνσεις για όλα τα δοκίμια παρατίθεται στο παράρτημα II.

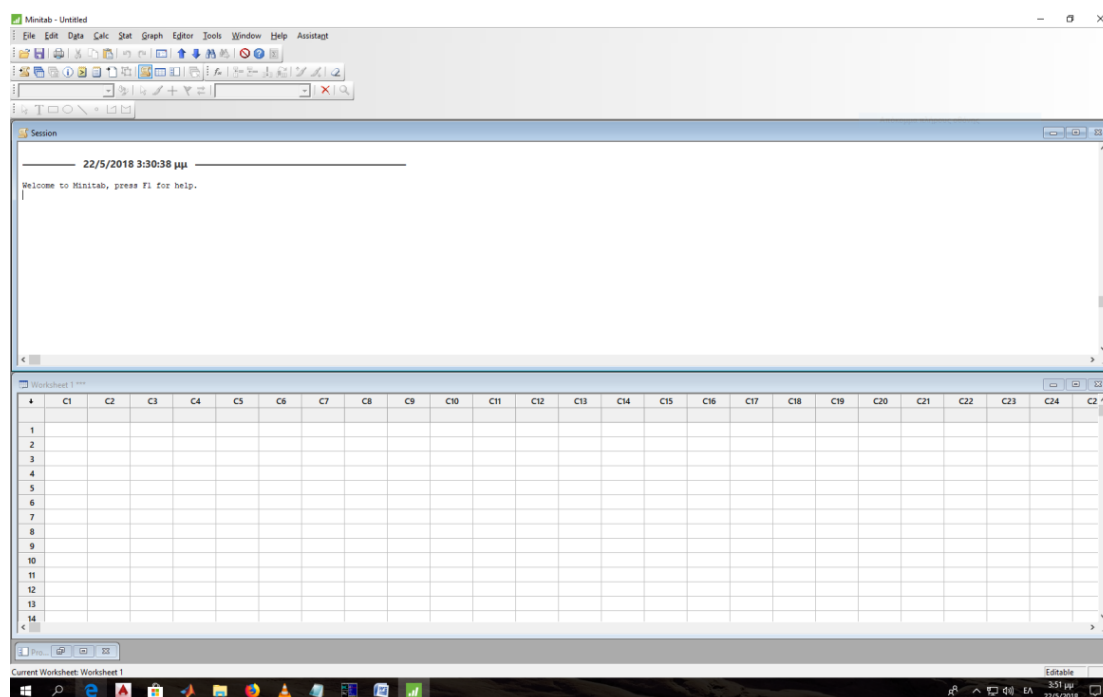


Εικόνα 4-16: 6 συνολικές μετρήσεις σε κάθε άνοιγμα πόρου- 3 κάθετες και 3 οριζόντιες

4.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

4.4.1 Εισαγωγή δεδομένων στο Minitab

Η επόμενη και τελευταία φάση μετά τη συλλογή δεδομένων είναι η ανάλυση τους, ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη διαστασιακή ακρίβεια των πορωδών δομών και τον τρόπο λειτουργίας του τρισδιάστατου εκτυπωτή. Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις συγκεκριμένες αναλύσεις είναι το Minitab. Το Minitab είναι ένα στατιστικό πακέτο, το οποίο αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο της Πενσυλβανίας (Pennsylvania State University) το 1972. Το Minitab αυτοματοποιεί τους υπολογισμούς και τη δημιουργία γραφημάτων, επιτρέποντας στον χρήστη να εστιάσει περισσότερο στην ανάλυση των δεδομένων και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.[3] Το συγκεκριμένο στατιστικό πακέτο επιλέχθηκε διότι αφενός, ενσωματώνει λειτουργίες όπως σχεδιασμό πειραμάτων (DOE) και ανάλυση Taguchi και ANOVA (Analysis of Variance) που χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στις αναλύσεις που διεξήχθησαν, και αφετέρου διαθέτει ένα εύχρηστο και χρηστό-κεντρικό περιβάλλον.



Εικόνα 4-17: το περιβάλλον του Minitab

Από προεπιλογή, το Minitab ανοίγει με δύο παράθυρα ορατά και ένα παράθυρο ελαχιστοποιημένο. Το πρώτο παράθυρο ονομάζεται “Session window”. Σε αυτό το παράθυρο εμφανίζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε μορφή κειμένου και εισάγονται εντολές συνεδρίας (session commands) στη Γραμμή εντολών (Command Line) αντί να χρησιμοποιηθούν τα μενού του Minitab. Το δεύτερο παράθυρο είναι το φύλλο εργασίας (worksheet), το οποίο είναι παρόμοιο με ένα υπολογιστικό φύλλο (spreadsheet) στο Excel. Στο φύλλο εργασίας γίνεται η εισαγωγή και η οργάνωση των δεδομένων και μπορούν να ανοιχθούν περισσότερα από ένα φύλλα εργασίας. Το τρίτο παράθυρο που ονομάζεται “Project Manager”, είναι ελαχιστοποιημένο κάτω από το φύλλο εργασίας.

Πριν γίνει η εισαγωγή των δεδομένων των μετρήσεων δημιουργούμε τον ορθογώνιο πίνακα Taguchi που επιλέχθηκε για το πείραμα, ο οποίος στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο πίνακας L_{18} . Για να δημιουργηθεί ο πίνακας, από το μενού του Minitab επιλέγουμε Stat > DOE > Taguchi > Create Taguchi Design. Στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε “Mixed Level Design” και στο πεδίο “Number of factors” επιλέγουμε τον αριθμό 4, όσοι είναι δηλαδή και οι παράγοντες του πειράματος που εξετάστηκαν. Ύστερα, επιλέγουμε “Designs” και στο παράθυρο που ανοίγει διαλέγουμε τον πίνακα L_{18} που αποτελείται από έναν παράγοντα δύο επιπέδων και τρεις παράγοντες τριών επιπέδων ($2^1, 3^3$). Στη συνέχεια πατώντας διαδοχικά OK δημιουργείται ο πίνακας που θέλουμε. Στις στήλες C1 - C4 πληκτρολογούμε τα ονόματα των παραγόντων που μελετήσαμε διαδοχικά όπως τους έχουμε μελετήσει, προκειμένου στις αναλύσεις που θα γίνουν να μην συγχέονται μεταξύ τους. Στο παράθυρο “Session” αναφέρονται όλες οι πληροφορίες του πίνακα που δημιουργήθηκε όπως ο αριθμός των παραγόντων, των επιπέδων τους και των συνολικών επαναλήψεων του πειράματος.

23/5/2018 1:16:54 μμ
 Welcome to Minitab, press F1 for help.

Taguchi Design
 Taguchi Orthogonal Array Design
 L18(2¹ 3³)
 Factors: 4
 Runs: 18
 Columns of L18(2¹ 3³) Array
 1 2 3 4

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22
1	1	1	1	1																		
2	1	1	1	2																		
3	1	1	1	3																		
4	1	1	2	1																		
5	1	1	2	2																		
6	1	1	2	3																		
7	1	1	3	1																		
8	1	1	3	2																		
9	1	1	3	3																		
10	2	1	1	1																		
11	2	1	1	2																		
12	2	1	1	3																		
13	2	1	2	1																		
14	2	1	2	2																		
15	2	1	2	3																		
16	2	1	3	1																		

Εικόνα 4-18: πίνακας L_{18}

Σύμφωνα με τη θεωρία του Taguchi, κάθε μετρήσιμο χαρακτηριστικό ενός προϊόντος το οποίο αναφέρεται ως χαρακτηριστικό ποιότητας, χρησιμοποιείται για να εκφράσει πόσο καλά το προϊόν επιτελεί μια συγκεκριμένη λειτουργία. Ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο μετράται η ποιότητα ενός προϊόντος - με ένα μόνο κριτήριο ή με συνδυασμό πολλαπλών κριτηρίων, η μέτρηση θα διαθέτει ένα από τα ακόλουθα τρία χαρακτηριστικά υποδεικνύοντας την κατεύθυνση των περισσότερων επιθυμητών αποτελεσμάτων: [29]

- το μεγαλύτερο είναι καλύτερο (bigger is better)
- το μικρότερο είναι καλύτερο (smaller is better)
- το ονομαστικό είναι καλύτερο (nominal is best)

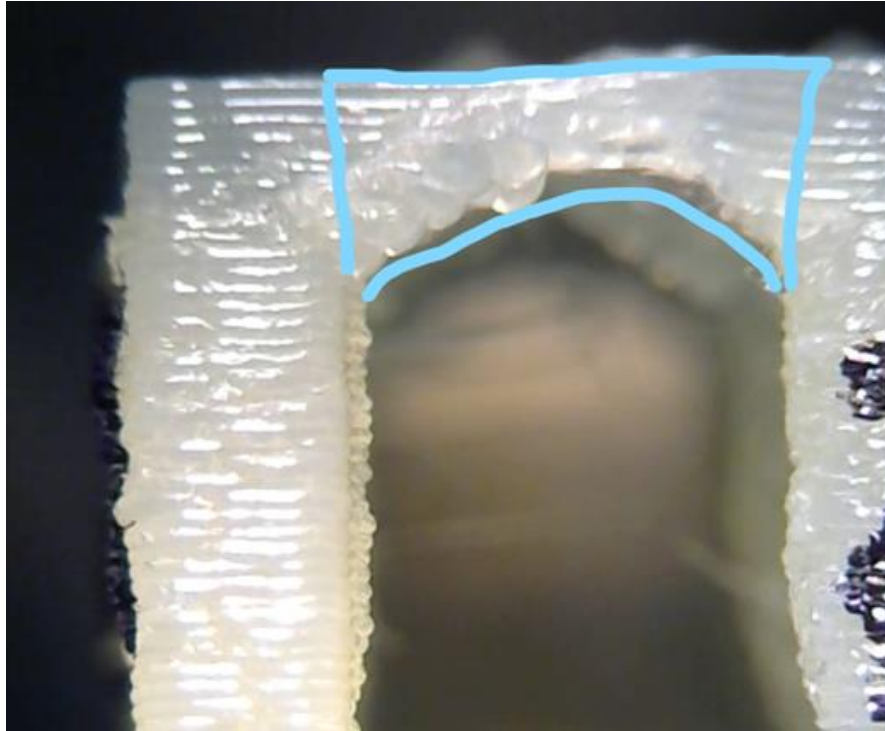
Σύμφωνα με το χαρακτηριστικό που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε, επιλέγουμε ένα από τα τρία κριτήρια ποιότητας. Τα δεδομένα που συλλέχτηκαν από τις μετρήσεις αναφέρονται στις ονομαστικές τιμές (nominal values) των διαστάσεων των πόρων, οι οποίες είναι 5 mm στην οριζόντια διεύθυνση (x και y άξονας) και 6 mm στη κάθετη διεύθυνση (z άξονας). Οι μετρήσεις που συλλέχτηκαν είναι επιθυμητό να βρίσκονται όσο το δυνατόν εγγύτερα στις διαστάσεις του γεωμετρικού μοντέλου του SolidWorks, δηλαδή 5 και 6 mm στην οριζόντια και κάθετη διεύθυνση αντίστοιχα.

Παρόλα αυτά, επειδή ο τύπος που χρησιμοποιείται στο Minitab, θεωρεί ως ονομαστική τιμή (nominal value) τον μέσο όρο όλων των μετρήσεων ο οποίος είναι πιθανό να αποκλίνει από την ονομαστική τιμή της διάστασης του γεωμετρικού μοντέλου, στη συγκεκριμένη ανάλυση γίνεται χρήση του “smaller is better” χαρακτηριστικού. Η μετατροπή των ονομαστικών τιμών σε αποκλίσεις από τις ονομαστικές τιμές του μοντέλου γίνεται με τη βοήθεια ενός υπολογιστικού φύλλου στο Excel οι οποίες προκύπτουν από την αφαίρεση των μετρήσεων που συλλέχτηκαν από την ονομαστική τιμή του γεωμετρικού μοντέλου σε απόλυτες τιμές. Για παράδειγμα, αν η τιμή μίας μέτρησης της διάστασης ενός πόρου στον οριζόντιο άξονα είναι 4,940 mm τότε η αντίστοιχη τιμή απόκλισης είναι $|4,940 - 5| = 0,06$. Αντίστοιχα αν η τιμή μιας μέτρησης στον κάθετο άξονα είναι 6,353 mm τότε η τιμή απόκλισης είναι $|6,353 - 6| = 0,353$. Μετά την μετατροπή όλων των ονομαστικών τιμών σε αποκλίσεις από τις ονομαστικές τιμές, εισάγονται αρχικά όλες οι μετρήσεις που αφορούν όλους τους άξονες στο φύλλο εργασίας του Minitab για να συνεχιστεί περαιτέρω η ανάλυση τους.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό ποιότητας διαστασιακής ακρίβειας που ενσωματώθηκε στην ανάλυση αφορά το “γεφύρωμα” (bridge) μεταξύ δύο πόρων, δηλαδή τη λωρίδα στερεοποιημένου υλικού που ενώνει δύο διαδοχικές στήλες. Είναι επιθυμητό αυτή η λωρίδα να έχει όσο το δυνατόν μικρότερη κλίση. Όσο μικρότερο το “γεφύρωμα” αυτό, τόσο μικρότερη η τυπική απόκλιση των διαδοχικών μετρήσεων του πόρου και συνεπώς μεγαλύτερη διαστασιακή ακρίβεια. Γι' αυτό το λόγο, και αυτό το χαρακτηριστικό ποιότητας αναφέρεται στην ανάλυση “smaller is better”. Ο μαθηματικός τύπος που συνδέεται με τη “smaller is better” ανάλυση είναι ο εξής:

$$-10 \times \log_{10}(\text{sum}(Y^2)/n)$$

όπου Y η κάθε μεμονωμένη μέτρηση που αφορά ένα χαρακτηριστικό και n ο αριθμός των συνολικών μετρήσεων του χαρακτηριστικού αυτού. Για παράδειγμα, όσον αφορά τη κάθετη διεύθυνση, για κάθε δοκίμιο υπάρχουν δέκα μεμονωμένες μετρήσεις, επομένως $\sum_{i=1}^{10} Y_i^2 / n$ όπου $n = 10$. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ανάλυση “smaller is better” υπερτερεί της ανάλυσης “nominal is best” υπό την έννοια ότι η πρώτη θεωρεί ως βέλτιστη τιμή, αυτή που βρίσκεται εγγύτερα στις πραγματικές διαστάσεις του μοντέλου, έναντι της δεύτερης που θεωρεί ως βέλτιστη τιμή, αυτή του μέσου όρου των μετρήσεων, η οποία ενδέχεται όμως να μην είναι η επιθυμητή.



Εικόνα 4-19: γεφύρωμα μεταξύ δύο διαδοχικών στηλών

Minitab - Untitled

File Edit Data Calc Stat Graph Editor Tools Window Help Assistant

23/5/2018 1:16:54 μμ

Welcome to Minitab, press F1 for help.

Taguchi Design

Taguchi Orthogonal Array Design

L18 (2¹³ 3³)

Factors: 4

Runs: 18

Columns of L18 (2¹³ 3³) Array

DESTRI	LAYER THICKNESS	TEMPER	NOZZLE	ΠΛΕΥΡΑ Χ	ΠΛΕΥΡΑ Υ	ΠΛΕΥΡΑ Ζ	BRIDGE SD
1	1	1	1	0.713	0.379	0.506	0.535
2	1	1	2	0.275	0.215	0.357	0.144
3	1	1	3	0.144	0.062	0.209	0.004
4	1	2	1	0.565	0.235	0.423	0.412
5	1	2	2	0.226	0.105	0.045	0.149
6	1	2	3	0.018	0.135	0.018	0.198
7	1	3	1	0.027	0.065	0.005	0.071
8	1	3	2	0.038	0.147	0.201	0.054
9	1	3	3	0.334	0.082	0.224	0.405
10	2	1	1	0.109	0.115	0.153	0.071
11	2	1	2	0.482	0.290	0.350	0.383
12	2	1	3	0.249	0.474	0.342	0.145
13	2	2	1	0.305	0.109	0.373	0.241
14	2	2	2	0.113	0.085	0.197	0.135
15	2	2	3	0.597	0.473	0.417	0.497
16	2	3	1	0.025	0.183	0.021	0.035
17	2	3	2	0.293	0.225	0.049	0.361
18	2	3	3	0.208	0.060	0.260	0.248

Worksheet 1 ***

Current Worksheet: Worksheet 1

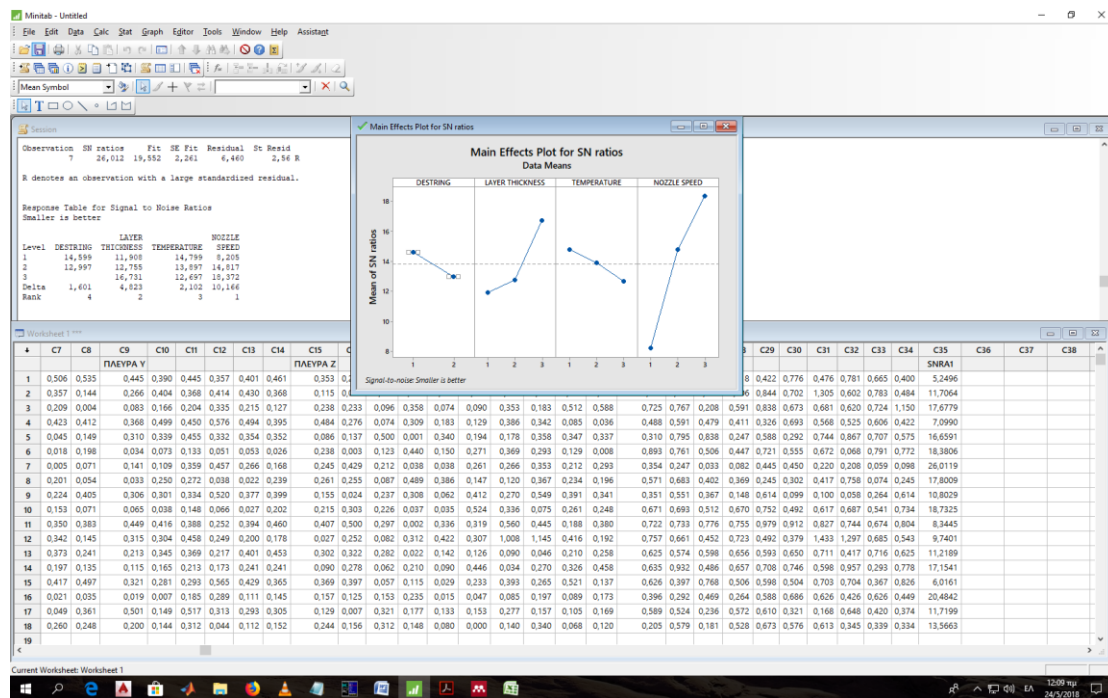
15:38 μμ 23/5/2018

Εικόνα 4-20: πλήρως συμπληρωμένο φύλλο εργασίας με “smaller is better” δεδομένα

Εφόσον ο πίνακας έχει πλήρως συμπληρωθεί με όλες τις μετρήσεις για όλα τα χαρακτηριστικά ποιότητας που έχουν επιλεγεί για βελτιστοποίηση, τα οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι οι διαστάσεις των πόρων στους τρεις άξονες και οι τυπικές αποκλίσεις των “γεφυρωμάτων”, το επόμενο βήμα είναι η ανάλυση αυτών των δεδομένων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα απαραίτητα βήματα που απαιτούνται για την ανάλυση των μετρήσεων στον χ άξονα. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τα υπόλοιπα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Για λόγους συντομίας όμως, θα παρουσιαστούν μόνο τα αποτελέσματα των αναλύσεων, καθώς τα βήματα επαναλαμβάνονται αυτούσια.

4.4.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Από το μενού εργαλείων του Minitab επιλέγουμε Stat > DOE > Taguchi > Analyze Taguchi Design. Στη συνέχεια στο παράθυρο που εμφανίζεται, από την αριστερή στήλη επιλέγουμε τα δεδομένα που βρίσκονται στις 4 πρώτες γραμμές από “C5 ΠΛΕΥΡΑ Χ” έως C8, τα δεδομένα δηλαδή που αφορούν στον χ άξονα και πατάμε “Select” ώστε να εμφανιστούν στο διπλανό πλαίσιο “Response data”. Στο παράθυρο που εμφανίζεται πατώντας “Graphs” επιλέγουμε μόνο το πρώτο πλαίσιο “Signal to Noise ratios”. Αντίστοιχα στο παράθυρο που εμφανίζεται πατώντας “Analysis” επιλέγουμε και στις δύο στήλες “Signal to Noise ratios” και πατάμε OK. Έπειτα, στο παράθυρο που εμφανίζεται πατώντας “Options” επιλέγουμε την τέταρτη κουκκίδα “Smaller is better” εφόσον τα δεδομένα μας έχουν τροποποιηθεί έτσι. Στο παράθυρο που εμφανίζεται πατώντας “Storage” επιλέγουμε “Signal to Noise ratios”. Στη συνέχεια πατώντας διαδοχικά OK εμφανίζεται το παράθυρο “Main Effects Plot for SN ratios”.



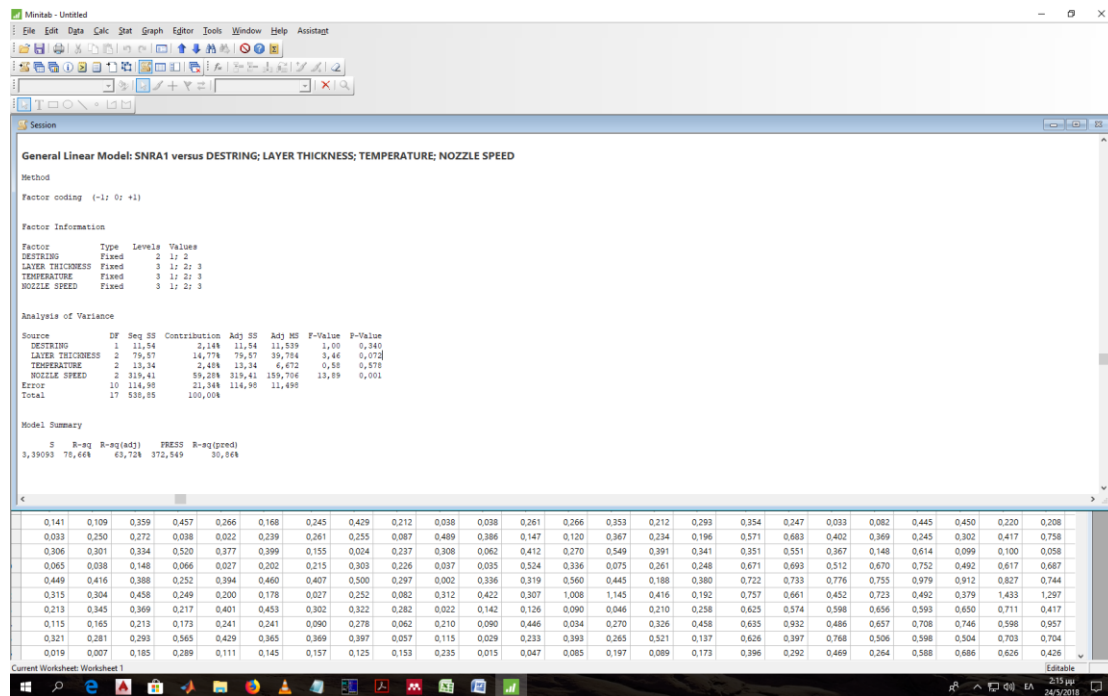
Εικόνα 4-21: Main Effects Plot for SN ratios (x-axis)

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (S/N ratio), μετρά την ευαισθησία του χαρακτηριστικού ποιότητας που διερευνάται με ελεγχόμενο τρόπο στους παράγοντες επηρεασμού (παράγοντες θορύβου) που δεν ελέγχονται. Ο στόχος οποιουδήποτε πειράματος, είναι πάντα να προσδιοριστεί ο υψηλότερος δυνατός λόγος S/N για το αποτέλεσμα. Μια υψηλή τιμή του S/N υποδηλώνει ότι το σήμα είναι πολύ μεγαλύτερο από τις τυχαίες επιδράσεις των παραγόντων θορύβου. Ο σχεδιασμός του προϊόντος ή η διαδικασία επεξεργασίας που είναι σύμφωνη με τον υψηλότερο λόγο S/N αποδίδει πάντα τη βέλτιστη ποιότητα με ελάχιστη διακύμανση. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, από την άποψη της ποιότητας, υπάρχουν τρεις τυπικές κατηγορίες ποιοτικών χαρακτηριστικών: 1) το μικρότερο είναι το καλύτερο (smaller is better), 2) το ονομαστικό είναι το καλύτερο (nominal is best) και 3) το μεγαλύτερο είναι καλύτερο (bigger is better).

Η ανάλυση S/N έχει σχεδιαστεί για τη μέτρηση ποιοτικών χαρακτηριστικών. Η μετατροπή ενός συνόλου παρατηρήσεων σε ένα μόνο αριθμό, την αναλογία S/N πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Αρχικά, υπολογίζεται η μέση τετραγωνική απόκλιση (Mean Square Deviation - MSD) του συνόλου. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο λόγος S/N από το MSD από την εξίσωση: $S/N = -10 \log_{10}(MSD)$. Προκειμένου ο λόγος S/N να είναι μεγάλος, το MSD πρέπει να έχει μια τιμή η οποία είναι μικρή.[29]

- Για το ποιοτικό χαρακτηριστικό “smaller is better” : $MSD = (Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_N^2)/N$
- Για το ποιοτικό χαρακτηριστικό “nominal is best” όπου $Y_0 = \text{nominal}$ ή τιμή στόχος (target value): $MSD = ((Y_1 - Y_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 + \dots + (Y_N - Y_0)^2)/N$
- Για το ποιοτικό χαρακτηριστικό “bigger is better” $MSD = (\frac{1}{Y_1^2} + \frac{1}{Y_2^2} + \dots + \frac{1}{Y_N^2})/N$

Από την Εικόνα 4-21 παρατηρούμε ότι ο βέλτιστος συνδυασμός παραγόντων είναι αυτός που έχει τις υψηλότερες τιμές SNR, δηλαδή οι κουκκίδες στο διάγραμμα που βρίσκονται υψηλότερα σε σχέση με τις υπόλοιπες σε κάθε παράγοντα. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα ο βέλτιστος συνδυασμός παραγόντων φαίνεται να είναι ο [1,3,1,3], ο οποίος όμως δεν υπάρχει στο πίνακα. Επίσης παρατηρώντας τη νέα στήλη που δημιουργείται με όνομα “SNRA1”, βλέπουμε ότι η υψηλότερη τιμή SNR είναι 26,01 dB η οποία αντιστοιχεί στο πείραμα με αριθμό 7. Στη συνέχεια διεξάγουμε ανάλυση διακύμανσης (ANOVA), για να διαπιστώσουμε την επίδραση που έχει ο κάθε παράγοντας στο συνολικό πείραμα. Από το μενού επιλέγουμε Stat > ANOVA > General Linear Model > Fit General Linear Model και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε στην αριστερή στήλη “SNRA1” και πατάμε “Select” ώστε να εμφανιστεί στο πλαίσιο “Responses”. Στη συνέχεια, επιλέγουμε όλους τους παράγοντες του πειράματος και αφού ενεργοποιήσουμε το πλαίσιο “Factors” πατάμε “Select” για να εμφανιστούν σε αυτό. Έπειτα, στο παράθυρο που εμφανίζεται πατώντας “Results” στο πλαίσιο “Display of results” επιλέγουμε “Expanded tables” και στη συνέχεια πατάμε διαδοχικά OK. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ANOVA εμφανίζονται στο παράθυρο “Session”. Στη συνέχεια ακολουθεί η ερμηνεία των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 4-22: αποτελέσματα ANOVA

Στην Εικόνα 4-22 φαίνεται ο πίνακας με τα αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) δίνοντας ως “response data” το SNRA1 των μετρήσεων του χ άξονα. Αρχικά παρατηρούμε στον πίνακα ότι ο κάθε παράγοντας που εξετάστηκε στο πείραμα, αναφέρεται ως “source” επομένως στη συνέχεια της ανάλυσης ο κάθε παράγοντας θα αναφέρεται έτσι. Τα πιο βασικά στοιχεία για την ερμηνεία του πίνακα είναι η στήλη “Contribution”, “F- value”, “P-value” και από το “Model Summary” το “R-square”.

R² (R- square): Είναι το ποσοστό επί τοις εκατό (%) της απόκλισης στην απόκριση που εξηγείται από το μοντέλο. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του R², τόσο καλύτερα το μοντέλο ταιριάζει με τα δεδομένα. Το R² κυμαίνεται πάντα μεταξύ 0% και 100%. Στο “Model Summary” η τιμή του R² είναι 78.66%, μια σχετικά υψηλή τιμή η οποία σημαίνει ότι σχεδόν το 78.66% της μεταβλητότητας του μοντέλου εξηγείται από όλους τους παράγοντες. Το υπόλοιπο ποσοστό το οποίο είναι 21.34%, μία σχετικά υψηλή τιμή, αναφέρεται στο σφάλμα (error) του μοντέλου και είναι η μεταβλητότητα η οποία δεν μπορεί να εξηγηθεί από το δεδομένο μοντέλο. Γενικά το σφάλμα όσο μικρότερο είναι, τόσο το καλύτερο και ιδανικά μικρότερο από 10%. [4]

Contribution: Εμφανίζει το ποσοστό που κάθε παράγοντας (source) στον πίνακα ANOVA συνεισφέρει στο συνολικό διαδοχικό άθροισμα τετραγώνων (Seq SS). Υψηλότερα ποσοστά υποδεικνύουν ότι ο παράγοντας συνεισφέρει περισσότερο στην απόκριση της απόκρισης. Στον πίνακα ANOVA, το ποσοστό συνεισφοράς του παράγοντα “Destring” είναι 2.14%, του παράγοντα “Layer Thickness” 14.77%, του παράγοντα “Temperature” 2.48% ,του παράγοντα “Nozzle Speed” 59.28% και το ποσοστό συνεισφοράς του σφάλματος “Error” 21.34%. [4]

F-value: Στη βιβλιογραφία, η τιμή F (F-value) είναι ο λόγος του μέσου τετραγώνου λόγω ενός παράγοντα και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Μια μεγάλη τιμή F σημαίνει ότι η επίδραση αυτού του παράγοντα είναι μεγάλη σε σύγκριση με τη διακύμανση του σφάλματος. Επίσης, όσο μεγαλύτερη η τιμή, τόσο πιο σημαντικός είναι αυτός ο παράγοντας να επηρεάζει την απόκριση της διαδικασίας. Έτσι, οι τιμές F μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταξινόμηση των παραγόντων. Μια τιμή F μικρότερη από τη μονάδα σημαίνει ότι η επίδραση του παράγοντα είναι μικρότερη από το σφάλμα του μοντέλου. Μια τιμή F μεγαλύτερη από δύο σημαίνει ότι ο παράγοντας δεν είναι αρκετά μικρός, ενώ μεγαλύτερη από τέσσερα σημαίνει ότι η επίδραση του παράγοντα είναι αρκετά μεγάλη. [37] Στον πίνακα ANOVA οι τιμές F για τους παράγοντες με σειρά κατάταξης της επίδρασης τους από την μεγαλύτερη στην μικρότερη είναι “Nozzle speed” με τιμή F 13.89, “Layer Thickness” με 3.46, “Destring” με 1.00 και “Temperature” με 0.58 αντίστοιχα.

P-value: Η τιμή P (P-value) είναι μια πιθανότητα που μετράει την ένδειξη κατά της μηδενικής υπόθεσης (null hypothesis). Οι χαμηλότερες πιθανότητες παρέχουν ισχυρότερη ένδειξη κατά της μηδενικής υπόθεσης. Για να προσδιοριστεί εάν η σχέση μεταξύ της απόκρισης και κάθε όρου στο μοντέλο είναι στατιστικά σημαντική, συγκρίνεται η τιμή P του όρου με το επίπεδο σημαντικότητας για την αξιολόγηση της μηδενικής υπόθεσης. Η μηδενική υπόθεση ισχυρίζεται ότι δεν υπάρχει σχέση μεταξύ του όρου και της απόκρισης. Συνήθως, ένα επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$ λειτουργεί καλά. Ένα επίπεδο σημαντικότητας 0.05 υποδεικνύει κίνδυνο 5% για να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει σχέση, ενώ στη πραγματικότητα δεν υφίσταται.

P-value ≤ 0.05 : Η σχέση είναι στατιστικά σημαντική

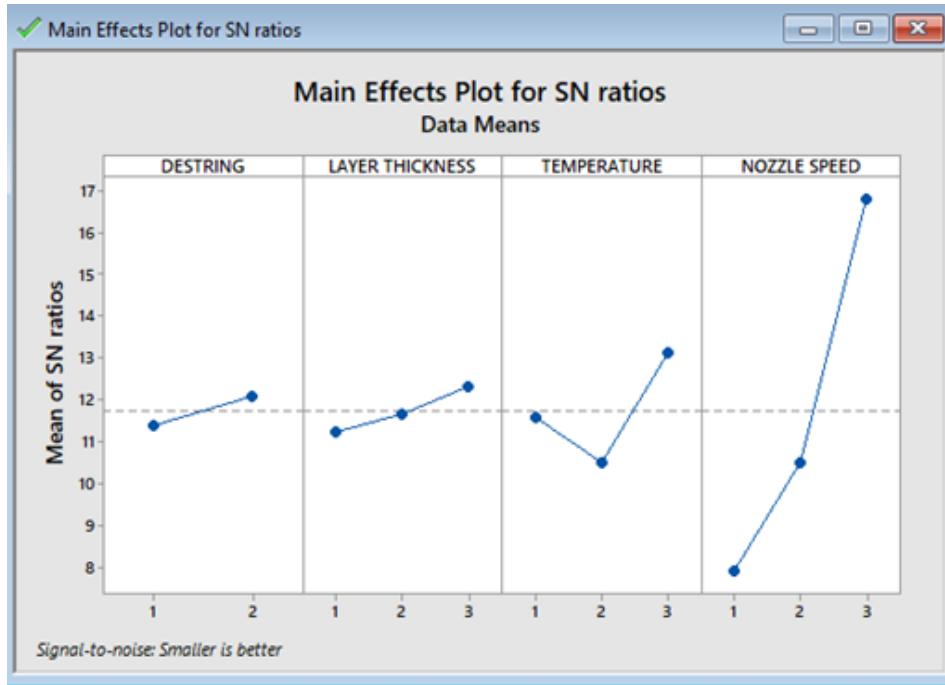
Εάν η τιμή p είναι μικρότερη ή ίση με το επίπεδο σημαντικότητας, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ της μεταβλητής απόκρισης και του όρου.

P-value > 0.05 : Η σχέση δεν είναι στατιστικά σημαντική

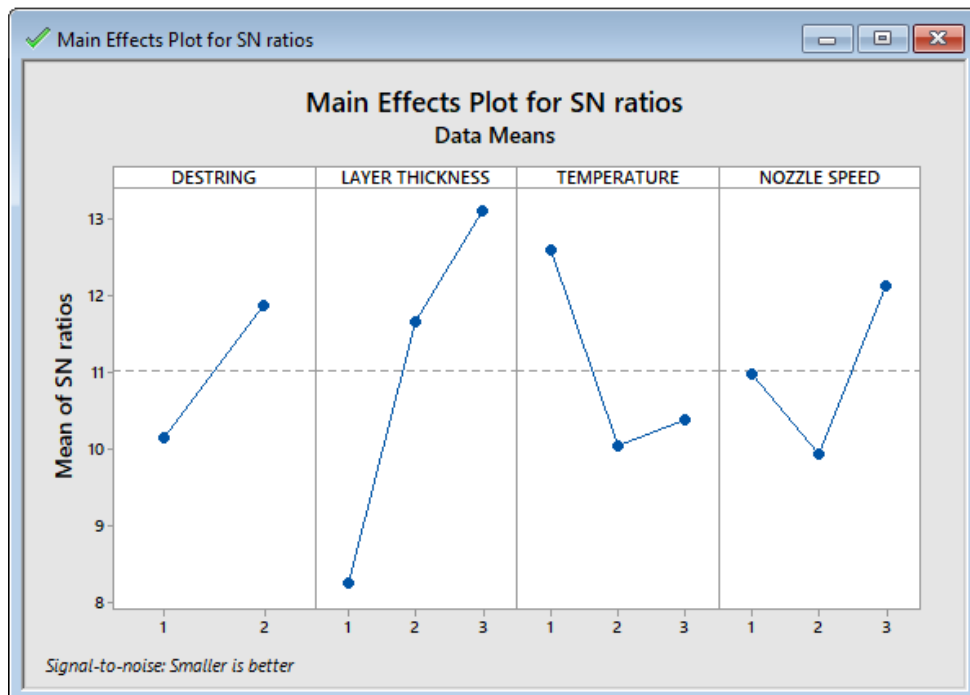
Εάν η τιμή p είναι μεγαλύτερη από το επίπεδο σημαντικότητας, δεν μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ της μεταβλητής απόκρισης και του όρου. Μπορεί να γίνει επανατοποθέτηση του μοντέλου χωρίς τον όρο.

Στον πίνακα ANOVA η τιμή P του παράγοντα “Nozzle speed” είναι $0.001 < 0.05$ και επομένως συμπεραίνουμε ότι ο παράγοντας είναι στατιστικά σημαντικός. Οι υπόλοιποι παράγοντες έχουν τιμές $P > 0.05$ επομένως συμπεραίνουμε ότι δεν είναι στατιστικά σημαντικοί. [4]

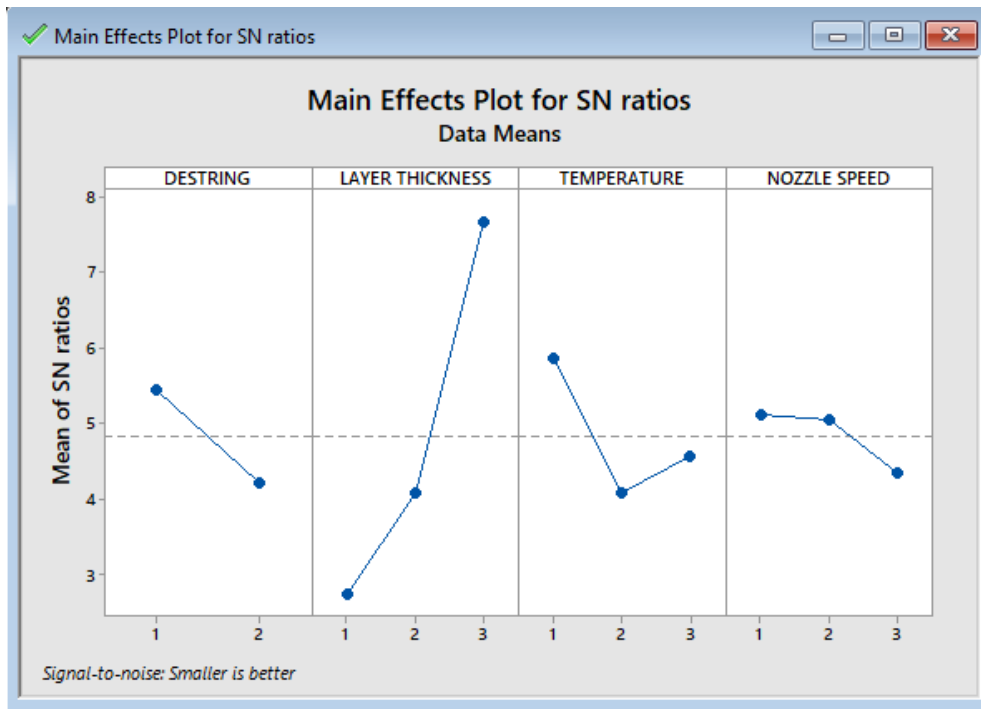
Στις Εικόνες 4-23 έως 4-25 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των επιδράσεων των παραγόντων για τον y άξονα, τον z άξονα και την τυπική απόκλιση του “γεφυρώματος” αντίστοιχα.



Εικόνα 4-23: Main Effects Plot for SN ratios (y-axis)



Εικόνα 4-24: Main Effects Plot for SN ratios (z-axis)



Εικόνα 4-25: Main Effects Plot for SN ratios (bridge SD)

Πίνακας 4-7: συγκεντρωτικά στοιχεία της ανάλυσης (Taguchi - ANOVA)

	X axis				Y axis				Z axis				Bridge SD			
Factor/Source	Contribution	F-value	P-value	MAX SNR	Contribution	F-value	P-value	MAX SNR	Contribution	F-value	P-value	MAX SNR	Contribution	F-value	P-value	MAX SNR
A. Destring	2.14%	1.00	.340	26.01	0.61%	0.31	.591	22.97	8.15%	3.54	.089	16.87	6.24%	6.04	.034	11.55
B. Layer Thickness	14.77%	3.46	.072		1.00%	0.26	.780		45.79%	9.94	.004		72.06%	34.86	.000	
C. Temperature	2.48%	0.58	.578		6.08%	1.54	.261		14.05%	3.05	.092		9.35%	4.52	.040	
D. Nozzle Speed	59.28%	13.89	.001		72.63%	18.45	.000		8.96%	1.95	.193		2.01%	0.97	.412	
Error	21.34%	Optimum combination			19.69%	Optimum combination			23.04%	Optimum combination			10.34%	Optimum combination		
Total	100%	(1,3,1,3)			100%	(2,3,3,3)			100%	(2,3,1,3) run 16			100%	(1,3,1,1)		
R² (R-square)	78.66%				80.31%				76.96%				89.66%			

4.4.3 Μέθοδος Grey Taguchi

Στο συγκεκριμένο πείραμα εξετάστηκαν τέσσερα ποιοτικά χαρακτηριστικά - διαστασιακή ακρίβεια στον x, y, z άξονα και η τυπική απόκλιση των “γεφυρωμάτων” - με στόχο οι αποκλίσεις των διαστάσεων των πόρων των δοκιμίων από το γεωμετρικό μοντέλο να ελαχιστοποιηθούν, ταυτόχρονα με τη ρύθμιση ενός επιπέδου παράγοντα. Η μέθοδος Taguchi μπορεί να βελτιστοποιήσει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά μέσω του καθορισμού των παραμέτρων σχεδιασμού, και μπορεί να μειώσει την ευαισθησία της απόδοσης του συστήματος σε πηγές διακυμάνσεων ενός μόνου χαρακτηριστικού. Εάν για την ίδια διαδικασία εξετάζονται ταυτόχρονα περισσότερα από ένα χαρακτηριστικά, η μέθοδος μπορεί να μην δώσει μοναδικούς βέλτιστους συνδυασμούς παραμέτρων.[44]

Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται η μέθοδος Grey Taguchi, η οποία συνδυάζει το σύνολο χαρακτηριστικών απόδοσης (στόχους) σε μία μόνο τιμή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως το μοναδικό χαρακτηριστικό στα προβλήματα βελτιστοποίησης. Αυτή η μέθοδος παρέχει προσεγγίσεις για ανάλυση και αφηρημένη μοντελοποίηση συστημάτων για τα οποία η πληροφορία είναι περιορισμένη, ατελής και χαρακτηρίζεται από τυχαία αβεβαιότητα. Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, τα χαρακτηριστικά εισόδου (χαρακτηριστικά απόδοσης), πρέπει να πληρούν τρεις προϋποθέσεις για τη συγκρισιμότητα των διαφόρων σειρών: 1) η διαφορά μεταξύ των μέγιστων και των ελάχιστων τιμών εισόδου (input values) που λαμβάνεται απ' όλα τα δεδομένα είναι μικρότερη από μια τάξη μεγέθους δύο, 2) όλα τα χαρακτηριστικά είναι του ίδιου τύπου και 3) όλα τα χαρακτηριστικά έχουν την ίδια κλίμακα μέτρησης, και αν είναι ποσοτικά έχουν την ίδια μονάδα ή δεν έχουν καμία μονάδα μέτρησης. Εάν δεν πληρούνται οι προϋποθέσεις αυτές, γίνεται κανονικοποίηση των δεδομένων. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται σχεσιακή παραγωγή Grey (Grey relational generation-GRA)[5].

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην διαδικασία αυτή, είναι οι λόγοι SNR που προέκυψαν μέσω της εξίσωσης $S/N = -10 \log_{10}(MSD)$ όπου $MSD = (Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_N^2)/N$ για το ποιοτικό χαρακτηριστικό “smaller is better” για τα τέσσερα χαρακτηριστικά ποιότητας που εξετάστηκαν.

Πίνακας 4-8: δεδομένα SNR GRA

	X	Y	Z	Bridge SD
Run	SNRA1	SNRA2	SNRA3	SNRA4
1	5,25	7,57	10,63	3,95
2	11,71	8,43	3,77	2,26
3	17,68	13,79	9,88	2,71
4	7,10	6,58	11,33	5,66
5	16,66	8,87	10,84	3,92
6	18,38	22,97	12,22	3,63
7	26,01	11,07	11,64	11,55
8	17,80	14,85	11,01	6,87
9	10,80	8,40	10,03	8,45
10	18,73	19,12	11,46	3,84
11	8,34	7,98	8,51	1,97
12	9,74	10,50	5,26	1,79
13	11,22	9,25	13,65	4,13
14	17,15	14,13	11,36	3,04
15	6,02	8,22	10,55	4,19
16	20,48	15,98	16,88	5,99
17	11,72	8,66	14,77	6,49
18	13,57	14,87	14,39	6,59

Επειδή τα χαρακτηριστικά εισόδου (Πίνακας 4-8) πληρούν μόνο το δεύτερο κριτήριο, δηλαδή είναι δεδομένα του ίδιου τύπου γίνεται κανονικοποίηση τους. Εφόσον αναφερόμαστε σε λόγους SNR, ο μαθηματικός τύπος που χρησιμοποιήθηκε για την κανονικοποίηση τους αναφέρεται σε "larger is better" χαρακτηριστικά και είναι ο εξής:

$$X_{ij} = \frac{y_{ij}-b_j}{a_j-b_j}; \quad i = 1,2,\dots,m; j = 1,2,\dots,n \text{ όπου: [5]}$$

m : εναλλακτικές, n : χαρακτηριστικά, y_{ij} : τιμή του χαρακτηριστικού j της εναλλακτικής i
 $a_j = \text{Max} \{y_{ij}, i = 1,2, \dots, m\}$; $b_j = \text{Min}\{y_{ij}, i = 1,2, \dots, m\}$;

Πίνακας 4-9: Grey Relational Generation

	X	Y	Z	Bridge SD
Run	SNRA1	SNRA2	SNRA3	SNRA4
1	0,000	0,061	0,523	0,221
2	0,311	0,113	0,000	0,048
3	0,599	0,440	0,466	0,094
4	0,089	0,000	0,577	0,397
5	0,550	0,140	0,540	0,218
6	0,632	1,000	0,645	0,188
7	1,000	0,274	0,600	1,000
8	0,605	0,504	0,552	0,520
9	0,267	0,111	0,478	0,682
10	0,649	0,765	0,587	0,210
11	0,149	0,085	0,362	0,018
12	0,216	0,239	0,114	0,000
13	0,288	0,163	0,754	0,240
14	0,573	0,460	0,579	0,128
15	0,037	0,100	0,518	0,245
16	0,734	0,573	1,000	0,431
17	0,312	0,127	0,840	0,481
18	0,401	0,505	0,810	0,491

Η απόδοση της εναλλακτικής i είναι η καλύτερη επιλογή για το χαρακτηριστικό j εάν η τιμή GRA X_{ij} είναι μονάδα ή πλησιάζει την μονάδα. Έτσι, για να συγκριθεί η ακολουθία συγκρισιμότητας, χρησιμοποιείται μια ακολουθία αναφοράς $X_0 = \{x_{0j}: x_{0j} = 1 \text{ για } j = 1, 2, \dots, n\}$. Η ακολουθία συγκρισιμότητας είναι μια σειρά εναλλακτικών λύσεων i ($X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ij}, \dots, X_{in}$). Γι' αυτό υπολογίζεται ο συντελεστής σχέσης grey (grey relational coefficient) που συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα γ .

$$\gamma(X_{0j}, X_{ij}) = \frac{\Delta_{min} + \xi \Delta_{max}}{\Delta_{ij} + \xi \Delta_{min}} \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\text{όπου } \Delta_{ij} = |x_{0j} - X_{ij}|$$

$$\Delta_{min} = \text{Min}\{\Delta_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n\}$$

$$\Delta_{max} = \text{Max}\{\Delta_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n\}$$

και ο συντελεστής διάκρισης (distinguishing coefficient) συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα $\xi \in [0, 1]$.

Ο σκοπός του συντελεστή διάκρισης είναι να επεκτείνει ή να συμπιέσει το εύρος του συντελεστή σχέσης grey. Ο διακριτικός συντελεστής μπορεί να επιλεγεί με βάση τη κρίση του ατόμου που λαμβάνει τις αποφάσεις και διαφορετικοί συντελεστές διάκρισης συνήθως παρέχουν διαφορετικά αποτελέσματα στο GRA. Η ανάλυση ευαισθησίας για διαφορετικούς συντελεστές διάκρισης δείχνει ότι ο αντίκτυπος της διακύμανσης τους στον συντελεστή grey είναι πολύ μικρός. Όλα αυτά οδήγησαν στα ίδια επίπεδα βέλτιστου παράγοντα.[5] Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο συντελεστής διάκρισης

επιλέχθηκε $\xi = 0.5$. Μετά τον υπολογισμό του συντελεστή σχέσης grey, ο σχεσιακός βαθμός grey (C) μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$\Gamma(x_0, X_i) = \sum_{j=1}^n W_j \gamma(x_{0j}, X_{ij}); \quad i = 1, 2, \dots, m$$

όπου W_j το βάρος του χαρακτηριστικού j το οποίο εξαρτάται συνήθως από την κρίση του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων ή τη δομή του προτεινόμενου προβλήματος.[5] Επιπλέον $\sum_{j=1}^n W_j = 1$. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, επιλέγονται ίσα βάρη για όλα τα χαρακτηριστικά, δηλαδή 0.25 για το κάθε ένα από τα τέσσερα χαρακτηριστικά. Ο σχεσιακός βαθμός grey υποδεικνύει το βαθμό ομοιότητας μεταξύ της ακολουθίας αναφοράς και της ακολουθίας συγκρισιμότητας. Εάν μια ακολουθία συγκρισιμότητας για μια εναλλακτική λύση λαμβάνει τον υψηλότερο σχεσιακό βαθμό grey, θα είναι περισσότερο παρόμοια με την ακολουθία αναφοράς και αυτή η εναλλακτική λύση θα ήταν η καλύτερη επιλογή. Έτσι, η μεγιστοποίηση του σχεσιακού βαθμού grey δίνει τα βέλτιστα επίπεδα παράγοντα.[5]

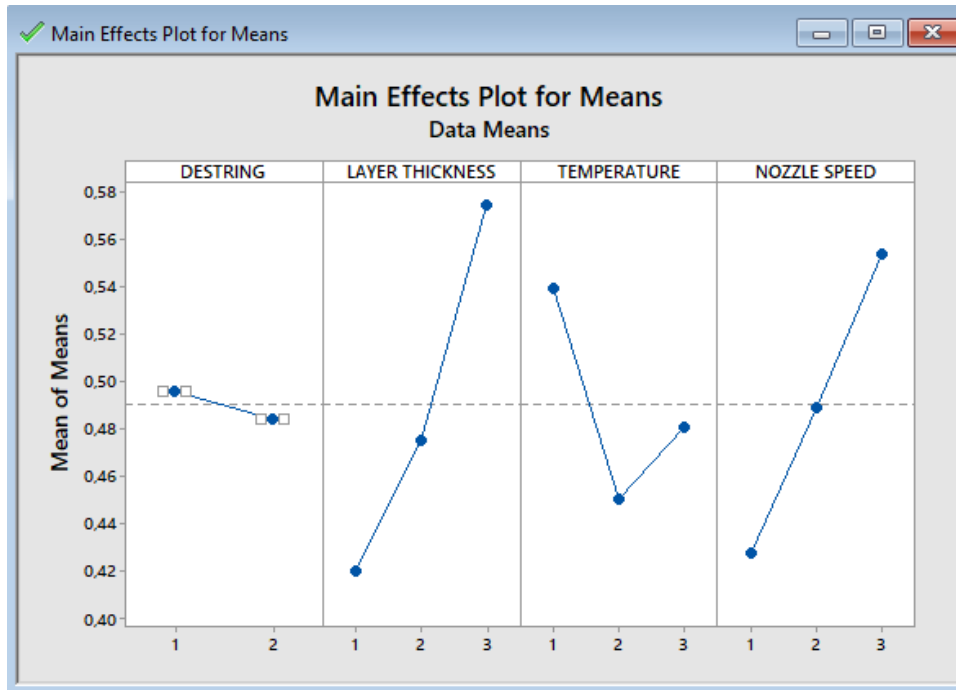
Πίνακας 4-10: GRC

	<i>Grey Relational Coefficient</i>				
	0,25	0,25	0,25	0,25	
	X	Y	Z	Bridge SD	
Run	SNRA1	SNRA2	SNRA3	SNRA4	GRC
1	0,333	0,347	0,512	0,391	0,396
2	0,421	0,360	0,333	0,344	0,365
3	0,555	0,472	0,484	0,356	0,466
4	0,354	0,333	0,542	0,453	0,421
5	0,526	0,368	0,521	0,390	0,451
6	0,576	1,000	0,584	0,381	0,635
7	1,000	0,408	0,556	1,000	0,741
8	0,558	0,502	0,528	0,510	0,525
9	0,406	0,360	0,489	0,611	0,466
10	0,588	0,680	0,547	0,388	0,551
11	0,370	0,353	0,439	0,337	0,375
12	0,389	0,397	0,361	0,333	0,370
13	0,412	0,374	0,670	0,397	0,463
14	0,540	0,481	0,543	0,365	0,482
15	0,342	0,357	0,509	0,399	0,402
16	0,653	0,540	1,000	0,468	0,665
17	0,421	0,364	0,757	0,491	0,508
18	0,455	0,503	0,725	0,496	0,545

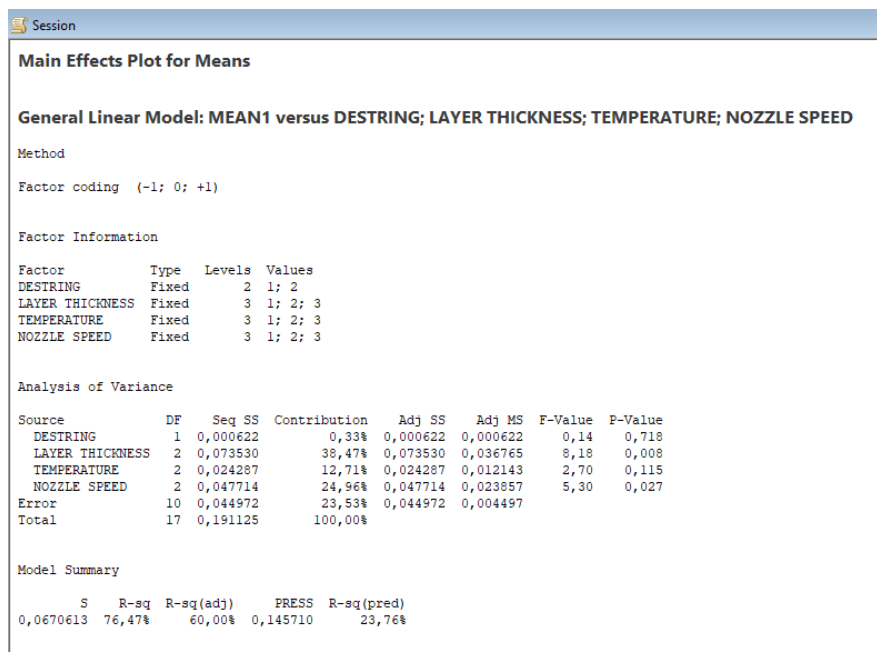
Παρατηρώντας τον Πίνακα 4-10 και πιο συγκεκριμένα τη στήλη *GRC* φαίνεται ότι θέτοντας ισοβαρή κριτήρια για όλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του δοκίμιου, αυτό με την υψηλότερη τιμή του *GRC* είναι το δοκίμιο 7 με $GRC = 0.741$. Αν θέσουμε διαφορετικά βάρη στα κριτήρια αλλάζει και η στήλη *GRC*. Για παράδειγμα αν θέσουμε βάρη 0,33 στα κριτήρια x , y , z και 0 στο κριτήριο “bridge SD” αντίστοιχα, τότε το δοκίμιο με την υψηλότερη τιμή *GRC* είναι το δοκίμιο 16.

4.4.4 Μοντέλο αλληλεπιδράσεων

Στη συνέχεια διεξάγουμε ανάλυση Taguchi και ANOVA με το Minitab επιλέγοντας ανάλυση “Larger is better” εφόσον η υψηλότερη τιμή GRC δίνει το βέλτιστο αποτέλεσμα.



Εικόνα 4-26: Main Effects Plot for Means -Taguchi analysis



Εικόνα 4-27: αποτελέσματα ANOVA

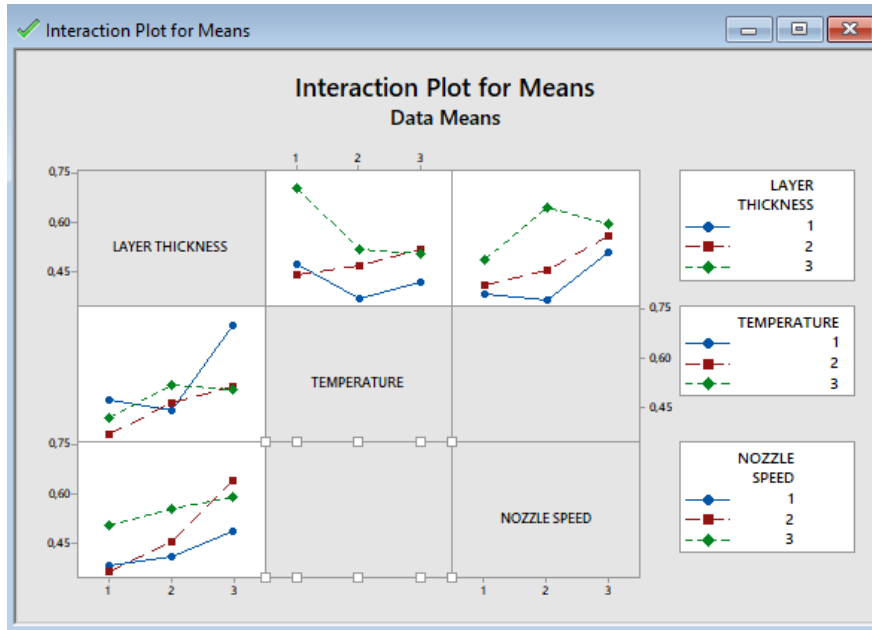
Από την ανάλυση Taguchi φαίνεται ότι ο βέλτιστος συνδυασμός είναι ο (1,3,1,3), ο οποίος όμως δεν υπάρχει στον πίνακα. Ο συνδυασμός (1,3,1,2) δηλαδή το δοκίμιο 7 έχει την υψηλότερη τιμή SNR η οποία ισούται με -2,60 dB. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης ANOVA στο Σχήμα 4-26 παρατηρούμε ότι το σφάλμα του μοντέλου είναι 23,53% μια σχετικά υψηλή τιμή. Γι' αυτό το λόγο, το συγκεκριμένο μοντέλο δεν μας καλύπτει επαρκώς, και ενδέχεται να υπάρχουν κάποιες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων, οι οποίες αν συμπεριληφθούν στο μοντέλο θα δώσουν χαμηλότερη τιμή σφάλματος. Από το Σχήμα 4-26, οι παράγοντες οι οποίοι αξίζει να μελετηθούν σε σχέση με άλλους παράγοντες είναι αυτοί με την υψηλότερη τιμή του Contribution, δηλαδή οι παράγοντες "Layer Thickness", "Temperature" και "Nozzle Speed" με ποσοστά συνεισφοράς 38,47%, 12,71% και 24,96% αντίστοιχα. Επειδή κάθε παράγοντας έχει δύο βαθμούς ελευθερίας (DOF), η κάθε αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των παραγόντων έχει $2 \times 2 = 4$ DOF. Ο πίνακας Taguchi όμως που έχει επιλεγεί για το πείραμα είναι ο L_{18} ο οποίος έχει δεσμεύσει 8 DOF, άρα περισσεύουν $18 - 8 = 10$ DOF με τους οποίους μπορούμε να μελετήσουμε έως δύο αλληλεπιδράσεις ταυτόχρονα εφόσον συνολικά καταλαμβάνουν $2 \times 4 = 8$ DOF.

Οι πιθανοί συνδυασμοί που μπορούν να δημιουργηθούν μεταξύ των παραγόντων είναι οι εξής τρεις: 1) "Layer Thickness" X "Nozzle Speed" 2) "Layer Thickness" X "Temperature" και 3) "Temperature" X "Nozzle Speed". Αρχικά λαμβάνονται οι συνδυασμοί αλληλεπιδράσεων 1 και 3 και στη συνέχεια οι συνδυασμοί 1 και 2. Για να εισάγουμε αλληλεπιδράσεις στην ανάλυση Taguchi επιλέγουμε Stat > DOE > Taguchi > Analyze Taguchi Design > Terms και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε από την αριστερή στήλη τους παράγοντες που θέλουμε να συμπεριληφθούν στην ανάλυση. Στη συνέχεια για την ανάλυση ANOVA επιλέγουμε Stat > ANOVA > General Linear Model > Fit General Linear Model > Model και στο παράθυρο που εμφανίζεται εισάγουμε από την στήλη άνω αριστερά έχοντας κρατημένο το πλήκτρο Ctrl τις αλληλεπιδράσεις που επιθυμούμε στην ανάλυση μας. Ο Πίνακας 4-11 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των αναλύσεων που διεξήχθησαν.

Πίνακας 4-11: ANOVA αλληλεπιδράσεων παραγόντων

Χωρίς αλληλεπίδραση		Συνδυασμός 1		Συνδυασμός 2	
Factor/Source	Contribution	Factor/Source	Contribution	Factor/Source	Contribution
A. Destring	0,33%	A. Destring	0,33%	A. Destring	0,33%
B. Layer Thickness	38,47%	B. Layer Thickness	38,47%	B. Layer Thickness	38,47%
C. Temperature	12,71%	C. Temperature	12,71%	C. Temperature	12,71%
D. Nozzle Speed	24,96%	D. Nozzle Speed	24,96%	D. Nozzle Speed	24,96%
-	-	Layer Thickness X Nozzle Speed	9,81%	Layer Thickness X Nozzle Speed	10,39%
-	-	Temperature X Nozzle Speed	11,31%	Layer Thickness X Temperature	10,79%
Error	23,53%		2,40%		2,35%
Total	100%		100%		100%
R² (R-square)	76,47%		97,60%		97,65%

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης ANOVA φαίνεται ότι ο Συνδυασμός 2 δίνει τη μικρότερη τιμή σφάλματος της τάξης του 2.35% η οποία είναι πολύ χαμηλή σε σχέση με το σφάλμα του μοντέλου χωρίς τις αλληλεπιδράσεις. Επίσης παρατηρούμε ότι τα ποσοστά συνεισφοράς των παραγόντων σε κάθε περίπτωση παραμένουν ως έχουν, ενώ μεταξύ των συνδυασμών 1 και 2 παρατηρούνται μικρές διαφοροποιήσεις όσον αφορά τα ποσοστά συνεισφοράς των αλληλεπιδράσεων στο συνολικό μοντέλο. Με την ενσωμάτωση των αλληλεπιδράσεων στο μοντέλο μας, φάνηκε ότι ήταν αναγκαίο να μελετηθούν καθώς το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί σε αρκετά υψηλό βαθμό. Πιο συγκεκριμένα το 97.65% της μεταβλητότητας του μοντέλου κατά μέγιστο βαθμό στο συνδυασμό 2 μπορεί να εξηγηθεί από όλους τους παράγοντες και τις αλληλεπιδράσεις τους.



Εικόνα 4-28: Interaction Plot for Means

Το γράφημα αυτό μας πληροφορεί για την αλληλεπίδραση μεταξύ του επιπέδου 3 του παράγοντα “Layer Thickness” και του επιπέδου 2 του παράγοντα “Nozzle Speed” κοιτώντας το ανώτατο σημείο του κάτω αριστερά γραφήματος. Την ίδια πληροφορία λαμβάνουμε όταν παρατηρούμε το άνω δεξιά γράφημα καθώς τα γραφήματα είναι συμμετρικά. Επίσης το γράφημα το οποίο βρίσκεται στο κέντρο πάνω μας πληροφορεί ότι υφίσταται αλληλεπίδραση μεταξύ του επιπέδου 1 του παράγοντα “Temperature” και του επιπέδου 3 του παράγοντα “Nozzle Speed”, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 4-26.

Οι εξισώσεις οι οποίες υπολογίζουν τη τιμή του SNR για τους βέλτιστους συνδυασμούς επιπέδων παραγόντων είναι οι εξής:

$$Y_{opt} = \bar{Y} + (A_1 - \bar{Y}) + (B_3 - \bar{Y}) + (C_1 - \bar{Y}) + (D_3 - \bar{Y}) = 0,694 \text{ dB} \quad (1)$$

$$\hat{Y}_{opt} = \bar{Y} + (A_1 - \bar{Y}) + (B_3 D_2 - \bar{Y}) + (C_1 - \bar{Y}) = 0,697 \text{ dB} \quad (2)$$

\bar{Y} = μέσος όρος της στήλης Mean και $X_i = \text{Mean}$ του επιπέδου i του παράγοντα X

όπου η (1) υπολογίζει το βέλτιστο SNR της ανάλυσης το οποίο είναι το (1,3,1,3) και η (2) το βέλτιστο SNR συμπεριλαμβανομένης της αλληλεπίδρασης $B_3 D_2$. Βλέπουμε ότι το υψηλότερο SNR είναι αυτό της εξίσωσης (2) με τιμή 0,697 dB έναντι μικρού προβαδίσματος, και με βάση την αλληλεπίδραση αυτή το βέλτιστο αποτέλεσμα μεταβάλλεται στο (1,3,1,2) το οποίο είναι το δοκίμιο 7 αντί του (1,3,1,3) το οποίο φαίνεται στο γράφημα αλληλεπιδράσεων στην Εικόνα 4-28.

5 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Η μέθοδος FDM είναι μια σύνθετη κατεργασία που παρουσιάζει μεγάλη δυσκολία στον καθορισμό των βέλτιστων παραμέτρων για την καλύτερη ποιότητα του αντικειμένου προς κατασκευή. Λόγω της παρουσίας μεγάλου αριθμού αντικρουόμενων παραμέτρων και αλληλεπιδράσεων πολλαπλών παραγόντων, η βέλτιστη ρύθμιση των παραμέτρων της κατεργασίας, η οποία απαιτείται για την επίτευξη μεγαλύτερης διαστασιακής ακρίβειας του κατασκευασμένου τεμαχίου είναι δύσκολη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εφαρμόζοντας την τεχνική βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων (multi-objective optimization). Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την αντιμετώπιση του προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων. Στη συγκεκριμένη εργασία υιοθετείται η μέθοδος Grey Taguchi (Grey Taguchi Method) για την επίτευξη του βέλτιστου επιπέδου των παραμέτρων κατεργασίας.

Οι παράγοντες που επιλέχθηκαν για μελέτη είναι α) πάχος στρώσης (layer thickness), β) θερμοκρασία εκτύπωσης (temperature), γ) ποσότητα αναρρόφησης ινών (destring/suck) και δ) ταχύτητα εκτύπωσης (nozzle speed). Ο κάθε παράγοντας εξετάστηκε σε τρία επίπεδα πλην του παράγοντα destring ο οποίος εξετάστηκε σε δύο επίπεδα. Ο πίνακας Taguchi που χρησιμοποιήθηκε για να φιλοξενήσει το πείραμα είναι ο ορθογώνιος πίνακας L_{18} ο οποίος είναι πίνακας μικτού επιπέδου (mixed level array). Μετά την διεξαγωγή των πειραμάτων τα πορώδη τεμάχια που κατασκευάστηκαν, φωτογραφήθηκαν μέσω στερεοσκοπίου, προκειμένου οι φωτογραφίες να τύχουν περαιτέρω επεξεργασίας για τη αξιολόγηση της διαστασιακής ακρίβειας του τεμαχίου με κατάλληλο λογισμικό.

Το βασικό ζητούμενο αυτής της εργασίας είναι η διαστασιακή αξιολόγηση των πόρων των δοκιμίων που εκτυπώνονται με τη μέθοδο FDM. Για αυτό το λόγο μετρήθηκαν οι διαστάσεις όλων των πόρων των δοκιμίων κατά μήκος του X, Y και Z άξονα. Επιπλέον ένα ακόμα χαρακτηριστικό ποιότητας διαστασιακής ακρίβειας που ενσωματώθηκε στην ανάλυση είναι το γεφύρωμα (bridge) μεταξύ δύο πόρων, δηλαδή η λωρίδα στερεοποιημένου υλικού που ενώνει δύο διαδοχικές στήλες. Αυτά τα τέσσερα χαρακτηριστικά ποιότητας είναι επιθυμητό να έχουν όσο γίνεται μικρότερη απόκλιση από τις ονομαστικές τους τιμές στο τρισδιάστατο μοντέλο CAD. Έτσι χρησιμοποιήθηκε ανάλυση Taguchi "smaller the better" χαρακτηριστικού ποιότητας.

5.1 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων των μετρήσεων (ANOVA) έδειξαν ότι η ταχύτητα εκτύπωσης είναι ο παράγοντας που επηρεάζει περισσότερο τη κατεργασία FDM κατά μήκος της διεύθυνσης του X άξονα σε ποσοστό 59,28%. Η ταχύτητα εκτύπωσης είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας κατά μήκος του Y άξονα σε ποσοστό 72,63%. Το πάχος στρώσης παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο κατά μήκος του Z άξονα σε ποσοστό 45,79%, καθώς και το γεφύρωμα σε ποσοστό 72,06%.

Ένα ακόμη άτυπο χαρακτηριστικό ποιότητας των τεμαχίων, το οποίο όμως δεν συμπεριλήφθηκε στην ανάλυση καθώς ήταν δύσκολη η μέτρηση του ήταν η ποσότητα των ινών τις οποίες άφηνε το ακροφύσιο μέσα στο εσωτερικό των πόρων του δοκιμίου. Μέσω παρατήρησης δια γυμνού οφθαλμού, προέκυψε ότι η ποσότητα των ινών στο

εσωτερικό των πόρων ελαχιστοποιούνταν όταν η θερμοκρασία του ακροφυσίου ρυθμιζόταν στους 190°C το οποίο είναι το πρώτο επίπεδο αυτού του παράγοντα. Αυτό φαίνεται λογικό, καθώς όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία του υλικού εκτύπωσης τόσο πιο γρήγορη είναι η ψύξη του και επομένως λιγότερη η εναπόθεση του στο εσωτερικό των πόρων.

Ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων που προέκυψε από την ανάλυση Taguchi, για την ελαχιστοποίηση της απόκλισης των διαστάσεων κατά μήκος του X άξονα είναι ποσότητα αναρρόφησης ινών 0,08, πάχος στρώσης 0,40mm, θερμοκρασία 190° C και ταχύτητα εκτύπωσης 45 mm/s. Αντίστοιχα, κατά μήκος του Y άξονα είναι: ποσότητα αναρρόφησης ινών 0,1, πάχος στρώσης 0,40 mm, θερμοκρασία 210° C και ταχύτητα εκτύπωσης 45 mm/s, και για τον Z άξονα είναι : 0,1-0,40mm-190° C- 45 mm/s. Για την ελαχιστοποίηση του γεφυρώματος οι βέλτιστες συνθήκες είναι: 0,08-0,40mm-190° C- 35 mm/s. Το συνολικό σφάλμα του στατιστικού μοντέλου για τη διαστασιακή απόκλιση αρχικά ήταν σχετικά υψηλό, δηλαδή για τον X άξονα 21,34%, για τον Y άξονα 19,69%, και για τον Z άξονα 23,04%, ενώ για το γεφύρωμα είναι πιο αποδεκτό, δηλαδή 10,34%. Για αυτό το λόγο στη συνέχεια της ανάλυσης εξετάστηκαν και κάποιες αλληλεπιδράσεις μεταξύ παραγόντων.

Προκειμένου να βελτιστοποιήσουμε και τα τέσσερα κριτήρια ποιότητας ταυτόχρονα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ανάλυσης Grey Taguchi. Από την ανάλυση προέκυψε ότι θέτοντας ίσα βάρη σε όλα τα χαρακτηριστικά ποιότητας, βέλτιστος είναι ο συνδυασμός: ποσότητα αναρρόφησης ινών 0,08, πάχος στρώσης 0,4mm, θερμοκρασία 190° C και ταχύτητα εκτύπωσης 40mm/s. Προκύπτει επίσης ότι οι σημαντικότεροι παράγοντες είναι δύο: το πάχος στρώσης ακολουθούμενο από τη ταχύτητα εκτύπωσης. Η θερμοκρασία έχει μικρότερη σημασία, ενώ η ποσότητα αναρρόφησης ινών αμελητέα. Το σφάλμα του μοντέλου παρέμενε υψηλό (23,53%) και γι' αυτό συμπεριλαμβανουμε και κάποιες αλληλεπιδράσεις. Μετά την εισαγωγή των αλληλεπιδράσεων το σφάλμα του μοντέλου μειώνεται κατακόρυφα σε αμελητέα τιμή. Συνεπώς, η εισαγωγή αλληλεπιδράσεων ερμηνεύει σε ικανοποιητικό βαθμό το μοντέλο μας.

Τελικά, η μελέτη των αποτελεσμάτων δείχνει ότι υπάρχει ένας αριθμός αντικρουόμενων ανεξάρτητων συνθηκών κατεργασίας ή και αλληλεπιδράσεων παραγόντων που μπορεί να επηρεάσουν την διαστασιακή ακρίβεια του κατασκευαζόμενου τεμαχίου. Κάποιοι από αυτούς έχουν μεγαλύτερη επίδραση σε σύγκριση με άλλους και κάποιοι ελάχιστη. Αντί να ληφθούν υπόψη οι ρυθμίσεις παραγόντων με αυθαίρετο τρόπο, προτείνεται να βασίζεται η διαδικασία κατασκευής στις βέλτιστες ρυθμίσεις που επιτυγχάνονται μέσω δομημένης μεθοδολογίας.

5.2 Βελτιώσεις

Η μέθοδος FDM χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή απλών και μικρών αντικειμένων με συμμετρική εσωτερική αρχιτεκτονική. Παρόλο που η διαστασιακή ακρίβεια μπορεί να μετρηθεί από τις εξωτερικές διαστάσεις, το κρίσιμο εσωτερικό μέρος των κατασκευασμένων πορωδών αντικειμένων δεν έχει μελετηθεί σε βάθος μέχρι τώρα. Έτσι η βασικότερη βελτίωση που θα μπορούσε να γίνει θα αφορούσε την αξιολόγηση της διαστασιακής ακρίβειας στο εσωτερικό μέρος των πορωδών δομών. Εδώ υφίσταται ο προβληματισμός της εύρεσης κατάλληλης μεθοδολογίας, η οποία θα δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα μετρήσεων στο εσωτερικό των πόρων χωρίς όμως να

καταστρέφει το δοκίμιο. Σε αυτήν την έρευνα, τα δοκίμια αποτελούνται από μονές αντηρίδες (single struts), οι οποίες αποτελούν το δομικό στοιχείο των κατασκευασμένων πορώδων δομών. Με βάση τα δομικά στοιχεία, υπάρχουν τρεις τύποι αντηρίδων (υποστηριγμάτων) που χρησιμοποιούνται σε πορώδεις δομές: οριζόντιες, κάθετες και κεκλιμένες. Οι κάθετες αντηρίδες μπορούν να θεωρηθούν ως ειδική περίπτωση των κεκλιμένων αντηρίδων με κλίση 90° . Λόγω της έλλειψης έρευνας σχετικά με την επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας FDM σε πορώδεις δομές με κεκλιμένες αντηρίδες, δεν υπάρχουν κατευθυντήριες γραμμές για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων για τη κατασκευή τέτοιων δομών. Επομένως είναι αναγκαία η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των παραμέτρων κατεργασίας και της ποιότητας κατασκευής για τη βελτίωση της κατασκευαστικής ικανότητας. Τέλος, λαμβάνοντας επίσης υπόψη και άλλες παραμέτρους και με τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της κατεργασίας FDM, μπορεί να επεκταθεί η παρούσα εργασία. Πέραν της διαστασιακής αξιολόγησης ως ποιοτικό χαρακτηριστικό, μπορούν επίσης να ληφθούν υπόψη η ποιότητα επιφάνειας, οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες, ο χρόνος παραγωγής και το κόστος.

Βιβλιογραφία

Άρθρα

- [1] A. Farzadi, V. Waran, M. Solati-Hashjin, Z. A. A. Rahman, M. Asadi, and N. A. A. Osman, "Effect of layer printing delay on mechanical properties and dimensional accuracy of 3D printed porous prototypes in bone tissue engineering," *Ceram. Int.*, vol. 41, no. 7, pp. 8320–8330, 2015.
- [2] J. M. Sobral, S. G. Caridade, R. A. Sousa, J. F. Mano, and R. L. Reis, "Three-dimensional plotted scaffolds with controlled pore size gradients: Effect of scaffold geometry on mechanical performance and cell seeding efficiency," *Acta Biomater.*, vol. 7, no. 3, pp. 1009–1018, 2011.
- [3] T. N. D. R. Raju and V. R. Raju, "An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components," *Int. J. Emerg. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 106–111, 2010.
- [4] O. A. Mohamed, S. H. Masood, and J. L. Bhowmik, "Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 81, pp. 174–196, 2016.
- [5] A. K. Sood, R. K. Ohdar, and S. S. Mahapatra, "Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 10, pp. 4243–4252, 2009.
- [6] M. S. Alsoufi and A. E. Elsayed, "Surface Roughness Quality and Dimensional Accuracy—A Comprehensive Analysis of 100% Infill Printed Parts Fabricated by a Personal/Desktop Cost-Effective FDM 3D Printer," *Mater. Sci. Appl.*, vol. 09, no. 01, pp. 11–40, 2018.
- [7] A. Peng, X. Xiao, and R. Yue, "Process parameter optimization for fused deposition modeling using response surface methodology combined with fuzzy inference system," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 73, no. 1–4, pp. 87–100, 2014.
- [8] G. Dong, G. Wijaya, Y. Tang, and Y. F. Zhao, "Optimizing process parameters of fused deposition modeling by Taguchi method for the fabrication of lattice structures," *Addit. Manuf.*, vol. 19, pp. 62–72, 2018.
- [9] M. R. Karamooz Ravari, M. Kadkhodaei, M. Badrossamay, and R. Rezaei, "Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 88, pp. 154–161, 2014.
- [10] J. Parthasarathy, B. Starly, and S. Raman, "A design for the additive manufacture of functionally graded porous structures with tailored mechanical properties for biomedical applications," *J. Manuf. Process.*, vol. 13, no. 2, pp. 160–170, 2011.
- [11] S. Mellor, L. Hao, and D. Zhang, "Additive manufacturing: A framework for implementation," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 149, pp. 194–201, 2014.
- [12] M. K. Thompson *et al.*, "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 2, pp. 737–760, 2016.
- [13] S. Ford and M. Despeisse, "Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges," *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 1573–1587, 2016.
- [14] R. Jiang, R. Kleer, and F. T. Piller, "Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 117, pp. 84–97, 2017.

- [15] ASTM, "7 Families of Additive Manufacturing (ASTM F2792)," pp. 1–2, 2015.
- [16] D. Bourell *et al.*, "Materials for additive manufacturing," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 2, pp. 659–681, 2017.
- [17] S. Singh, S. Ramakrishna, and R. Singh, "Material issues in additive manufacturing: A review," *J. Manuf. Process.*, vol. 25, pp. 185–200, 2017.
- [18] I. Zein, D. W. Hutmacher, K. C. Tan, and S. H. Teoh, "Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications," *Biomaterials*, vol. 23, no. 4, pp. 1169–1185, 2002.
- [19] D. Ahn, J. H. Kweon, S. Kwon, J. Song, and S. Lee, "Representation of surface roughness in fused deposition modeling," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 15–16, pp. 5593–5600, 2009.
- [20] N. G. Tanikella, B. Wittbrodt, and J. M. Pearce, "Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing," *Addit. Manuf.*, vol. 15, pp. 40–47, 2017.
- [21] M. A. León-Cabezas, A. Martínez-García, and F. J. Varela-Gandía, "Innovative functionalized monofilaments for 3D printing using fused deposition modeling for the toy industry," *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 738–745, 2017.
- [22] S. A. M. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O'Donoghue, and C. Charitidis, "Additive manufacturing: Scientific and technological challenges, market uptake and opportunities," *Mater. Today*, vol. 21, no. 1, pp. 22–37, 2017.
- [23] S. Amin Yavari *et al.*, "Relationship between unit cell type and porosity and the fatigue behavior of selective laser melted meta-biomaterials," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 43, pp. 91–100, 2015.
- [24] S. M. Giannitelli, D. Accoto, M. Trombetta, and A. Rainer, "Current trends in the design of scaffolds for computer-aided tissue engineering," *Acta Biomater.*, vol. 10, no. 2, pp. 580–594, 2014.
- [25] R. A. Perez and G. Mestres, "Role of pore size and morphology in musculo-skeletal tissue regeneration," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 61, pp. 922–939, 2016.
- [26] H. Seitz *et al.*, "Comparing Different Porosity Measurement Methods for Characterisation of 3D Printed Bone Replacement Scaffolds 3D Printing of Porous Ceramic Scaffolds for Bone Tissue Engineering View project Comparing Different Porosity Measurement Methods for Characteri," vol. 1, pp. 1609–1610, 2005.
- [27] V. Karageorgiou and D. Kaplan, "Porosity of 3D biomaterial scaffolds and osteogenesis," *Biomaterials*, vol. 26, no. 27, pp. 5474–5491, 2005.
- [28] F. P. W. Melchels, M. A. N. Domingos, T. J. Klein, J. Malda, P. J. Bartolo, and D. W. Hutmacher, "Additive manufacturing of tissues and organs," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 8, pp. 1079–1104, 2012.
- [29] R. K. Roy, *Taguchi method*, vol. 2, no. 2. 2016.
- [30] R. Gottipati and S. Mishra, "Process optimization of adsorption of Cr(VI) on activated carbons prepared from plant precursors by a two-level full factorial design," *Chem. Eng. J.*, vol. 160, no. 1, pp. 99–107, 2010.
- [31] D. Bingol, N. Tekin, and M. Alkan, "Brilliant Yellow dye adsorption onto sepiolite using a full factorial design," *Appl. Clay Sci.*, vol. 50, no. 3, pp. 315–321, 2010.
- [32] J. Wang and W. Wan, "Experimental design methods for fermentative hydrogen production: A review," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 235–244, 2009.

- [33] J. Z. Zhang, J. C. Chen, and E. D. Kirby, "Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 184, no. 1–3, pp. 233–239, 2007.
- [34] J. A. Ghani, I. A. Choudhury, and H. H. Hassan, "Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 145, no. 1, pp. 84–92, 2004.
- [35] I. Asiltürk and H. Akkuş, "Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 44, no. 9, pp. 1697–1704, 2011.
- [36] G. P. Syrcos, "Die casting process optimization using Taguchi methods," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 135, no. 1, pp. 68–74, 2002.
- [37] M. S. Phadke, *Engineering Using Robust Design*. 1989.
- [38] P. . Benardos and G. . Vosniakos, "Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 18, no. 5, pp. 343–354, 2002.
- [39] W. H. Yang and Y. S. Tarn, "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 84, no. 1–3, pp. 122–129, 1998.
- [40] N. Masmiaati and A. A. D. Sarhan, "Optimizing cutting parameters in inclined end milling for minimum surface residual stress - Taguchi approach," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 60, pp. 267–275, 2015.
- [41] M. Tutar, H. Aydin, C. Yuce, N. Yavuz, and A. Bayram, "The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array," *Mater. Des.*, vol. 63, pp. 789–797, 2014.
- [42] C. Camposeco-Negrete, "Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA," *J. Clean. Prod.*, vol. 53, pp. 195–203, 2013.
- [43] Δ. Προγραμμα and Μ. Σπουδων, "Εθνικο μετσοβιο πολυτεχνειο," 2014.
- [44] R. Surace, L. A. C. De Filippis, A. D. Ludovico, and G. Boghetich, "Application of Taguchi method for the multi-objective optimization of aluminium foam manufacturing parameters," *Int. J. Mater. Form.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–5, 2010.

Διαδίκτυο

- [1] <https://www.laserdesign.com/what-is-3d-scanning>
- [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/ImageJ>
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/Minitab>
- [4] <http://support.minitab.com/en-us/minitab-express/1/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/how-to/one-way-anova/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/#r-sq>

Παράρτημα I

CubeX® 3D Printer tech specs

[CUBEX REPLACEMENT PARTS +](#)[COMPARE 3D PRINTERS +](#)

Weight & dimensions

CubeX® dimensions: without cartridge	515mm (w) x 515mm (l) x 598mm (h) (20 1/4" x 20 1/4" x 23 1/2" inches)
CubeX® weight: CubeX Single head print	36kg (79 Lbs.)
CubeX® weight: CubeX Double head print	37kg (81.5 Lbs.)
CubeX® weight: CubeX Triple head print	38kg (84 Lbs.)
Maximum Build Size CubeX Single head print	275mm (w) x 275mm (l) x 201mm (h) (10.75" x 10.75" x 9.5" inches)
Maximum Build Size CubeX Double head print	230mm (w) x 275mm (l) x 201mm (h) (9" x 10.75" x 9.5" inches)
Maximum Build Size CubeX Triple head print	185mm (w) x 275mm (l) x 201mm (h) (7.3" x 10.75" x 9.5" inches)
CubeX® weight: CubeX Triple head print	38kg (84 Lbs.)

Z axis resolution

CubeX Single head print Double head print Triple head print	0.125mm (0.005" / 125 microns)
--	--------------------------------

Print tolerance

CubeX Single head print Double head print Triple head print	<ul style="list-style-type: none">• x and y axis +/- 1% of object dimension or +/- 0.2mm (0.008" / 200 microns) whichever is greater• z axis +/- half the processed z resolution• Shrinkage and warpage can occur on models and is purely geometry dependent.
--	---

Print speed extruded volume

CubeX Single head print Double head print Triple head print	Maximum 15mm ³ (0.26in ³) per second print and polymer dependent
--	---

Power requirements

CubeX Single head print Double head print Triple head print	110 - 240v AC
--	---------------

Παράρτημα ΙΙ

ΔΟΚΙΜΙΑ	ΠΛΕΥΡΑ Χ				ΠΛΕΥΡΑ Υ							ΠΛΕΥΡΑ Ζ								
1	5,713	5,379	5,506	5,535	5,445	5,39	5,445	5,357	5,401	5,461	6,353	6,276	6,353	6,194	6,118	6,101	6,101	6,451	6,173	6,49
2	5,275	5,215	5,357	5,144	5,266	5,404	5,368	5,414	5,43	5,368	6,115	5,948	6,413	6,528	6,397	6,282	7,305	7,146	6,572	6,39
3	5,144	5,062	5,209	4,996	5,083	5,166	5,204	5,335	5,215	5,127	6,238	6,233	6,096	6,358	5,926	5,91	6,353	6,183	6,512	6,588
4	5,565	5,335	5,423	5,412	5,368	5,499	5,45	5,576	5,494	5,395	6,484	6,276	6,074	6,309	6,183	6,129	6,386	6,342	6,085	6,036
5	5,226	5,105	5,045	5,149	5,31	5,339	5,455	5,332	5,354	5,352	6,086	6,137	6,5	5,999	6,34	6,194	6,178	6,358	6,347	6,337
6	5,018	4,865	5,018	5,198	5,034	5,073	5,133	5,051	4,947	4,974	6,238	6,003	6,123	5,56	6,15	5,729	6,369	5,707	6,129	5,992
7	5,027	4,935	5,005	5,071	5,141	5,109	5,359	5,457	5,266	5,168	6,245	6,429	6,212	5,962	6,038	5,739	6,266	6,353	6,212	6,293
8	5,038	4,853	4,799	4,946	4,967	4,75	5,272	4,962	4,978	4,761	5,739	6,255	6,087	6,489	6,386	5,853	6,12	5,633	6,234	6,196
9	5,334	5,082	5,224	5,405	5,306	5,301	5,334	5,52	5,377	5,399	6,155	6,024	6,237	6,308	6,062	6,412	6,27	6,549	6,391	6,341
10	5,109	4,885	5,153	5,071	5,065	5,038	5,148	4,934	5,027	5,202	6,215	6,303	6,226	5,963	6,035	5,476	6,336	5,925	5,739	6,248
11	5,482	5,29	5,35	5,383	5,449	5,416	5,388	5,252	5,394	5,46	6,407	6,5	6,297	6,002	6,336	6,319	6,56	6,445	6,188	6,38
12	5,249	5,474	5,342	5,145	5,315	5,304	5,458	5,249	5,2	5,178	6,027	6,252	6,082	6,312	6,422	6,307	7,008	7,145	6,416	6,192
13	5,305	5,109	5,373	5,241	5,213	5,345	5,369	5,217	5,401	5,453	6,302	6,322	6,282	5,978	5,858	6,126	6,09	6,046	6,21	6,258
14	5,113	5,085	5,197	4,865	4,885	5,165	5,213	5,173	5,241	5,241	6,09	6,278	5,938	6,21	6,09	6,446	6,034	6,27	6,326	6,458
15	5,597	5,473	5,417	5,497	5,321	5,281	5,293	5,565	5,429	5,365	6,369	6,397	6,057	5,885	6,029	6,233	6,393	6,265	6,521	6,137
16	5,025	4,817	5,021	4,965	4,981	4,983	5,185	5,289	4,889	5,145	6,157	6,125	6,153	5,765	5,985	5,953	6,085	6,197	6,089	6,173
17	5,293	5,225	5,049	5,361	5,501	5,149	5,517	5,313	5,293	5,305	6,129	5,993	6,321	6,177	6,133	6,153	6,277	6,157	6,105	6,169
18	5,208	4,94	4,74	5,248	5,2	4,856	5,312	5,044	5,112	4,848	5,756	5,844	6,312	5,852	6,08	6	5,86	5,86	5,932	5,88

SD										
0,616	0,6	0,897	0,518	0,422	0,776	0,476	0,781	0,665	0,4	
0,696	0,444	0,882	0,606	0,844	0,702	1,305	0,602	0,783	0,484	
0,725	0,767	0,208	0,591	0,838	0,673	0,681	0,62	0,724	1,15	
0,488	0,591	0,479	0,411	0,326	0,693	0,568	0,525	0,606	0,422	
0,31	0,795	0,838	0,247	0,588	0,292	0,744	0,867	0,707	0,575	
0,893	0,761	0,506	0,447	0,721	0,555	0,672	0,068	0,791	0,772	
0,354	0,247	0,033	0,082	0,445	0,45	0,22	0,208	0,059	0,098	
0,571	0,683	0,402	0,369	0,245	0,302	0,417	0,758	0,074	0,245	
0,351	0,551	0,367	0,148	0,614	0,099	0,1	0,058	0,264	0,614	
0,671	0,693	0,512	0,67	0,752	0,492	0,617	0,687	0,541	0,734	
0,722	0,733	0,776	0,755	0,979	0,912	0,827	0,744	0,674	0,804	
0,757	0,661	0,452	0,723	0,492	0,379	1,433	1,297	0,685	0,543	
0,625	0,574	0,598	0,656	0,593	0,65	0,711	0,417	0,716	0,625	
0,635	0,932	0,486	0,657	0,708	0,746	0,598	0,957	0,293	0,778	
0,626	0,397	0,768	0,506	0,598	0,504	0,703	0,704	0,367	0,826	
0,396	0,292	0,469	0,264	0,588	0,686	0,626	0,426	0,626	0,449	
0,589	0,524	0,236	0,572	0,61	0,321	0,168	0,648	0,42	0,374	
0,205	0,579	0,181	0,528	0,673	0,576	0,613	0,345	0,339	0,334	