

**Παραμετρικός σχεδιασμός περιστροφικών  
εξαρτημάτων για εφαρμογή σε κατασκευές  
μέσω 3D εκτύπωσης**



**ΦΙΛΙΠΠΟΣ ΔΗΜΗΤΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΑΛΕΥΡΑΣ**

## Ευχαριστίες

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Παναγιώτη Αλευρά για την πολύτιμη καθοδήγηση, τις εύστοχες παρατηρήσεις και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, συμβάλλοντας καθοριστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αδιάκοπη στήριξη, την υπομονή και την αγάπη τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους φίλους μου για την ενθάρρυνση, τη συνεργασία και την παρουσία τους στις απαιτητικές στιγμές αυτής της προσπάθειας.

## Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο παραμετρικός σχεδιασμός ενός ρότορα και ενός στάτορα, οι οποίοι συνδέθηκαν σε επίπεδο συναρμολόγησης (assembly) με στόχο τη δημιουργία ενός πλήρως προσαρμοζόμενου συστήματος. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε βασίστηκε στην ανάπτυξη ευέλικτων μοντέλων CAD, τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα στον χρήστη να τροποποιεί βασικές γεωμετρικές και λειτουργικές παραμέτρους και να λαμβάνει άμεσα εξατομικευμένα σχέδια. Για την υλοποίηση της παραμετροποίησης αξιοποιήθηκε κώδικας σε iLogic, μέσω του οποίου καθορίστηκαν σχέσεις, περιορισμοί και κανόνες που διασφαλίζουν τη σωστή αλληλεξάρτηση των παραμέτρων. Παράλληλα, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε γραφικό περιβάλλον χρήστη, User Interface (UI) τόσο με εργαλεία του Inventor όσο και με εξωτερική σύνδεση σε υπολογιστικά φύλλα Excel, ώστε η παραμετροποίηση να είναι άμεση, κατανοητή και φιλική προς τον τελικό χρήστη. Η εργασία δεν περιορίστηκε στο θεωρητικό και ψηφιακό στάδιο, αλλά επεκτάθηκε και στην πρακτική επαλήθευση μέσω 3D εκτύπωσης. Εκτυπώθηκαν φυσικά πρωτότυπα εξαρτημάτων, τα οποία επέτρεψαν τον έλεγχο της γεωμετρικής ακρίβειας, της συναρμογής και της λειτουργικότητας του συστήματος.

## **Abstract**

The objective of this thesis is the parametric design of a rotor and a stator, which were integrated at the assembly level with the aim of creating a fully customizable system. The methodology followed was based on the development of flexible CAD models that allow the user to modify key geometric and functional parameters and immediately obtain tailored designs. Parametrization was implemented using iLogic code, through which relationships, constraints, and rules were defined to ensure the correct interdependence of parameters. In parallel, a graphical user interface (GUI) was designed and implemented both with Inventor's native tools and via an external connection to Excel spreadsheets, so that parameterization is direct, intuitive, and user-friendly. The work did not remain at the theoretical and digital stage but was extended to practical validation through 3D printing. Physical prototypes of components were fabricated, enabling verification of the system's geometric accuracy, fit, and functionality.

# Περιεχόμενα

Περιεχόμενα .....	v
<b>1. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ .....</b>	<b>8</b>
1.1. Σχεδιασμός στο χέρι .....	8
1.1.1. Ιστορική εξέλιξη του τεχνικού σχεδίου .....	8
1.1.2. Εργαλεία και μεθοδολογίες χειροκίνητου σχεδιασμού .....	8
1.2. Συστήματα CAD .....	9
1.2.1. Ιστορική εξέλιξη .....	9
1.2.2. Βασικές λειτουργίες και εργαλεία .....	10
1.3. Παραμετρικός σχεδιασμός .....	12
1.3.1. Ορισμός και χαρακτηριστικά .....	12
1.3.2. Οφέλη της παραμετρικής προσέγγισης .....	12
1.3.3. Εφαρμογές σε βιομηχανικό σχεδιασμό και κατασκευή .....	12
1.4. Περιστροφικά εξαρτήματα .....	13
1.4.1. Ορισμός και βασικές κατηγορίες .....	13
1.4.2. Ηλεκτρομαγνητικοί συγκομιστές ενέργειας με περιστροφικά εξαρτήματα .....	14
1.4.3. Σχεδιαστικές και κατασκευαστικές απαιτήσεις και περιορισμοί .....	15
1.5. Εκτύπωση 3D .....	15
1.5.1. Ιστορική εξέλιξη και αρχές 3D εκτύπωσης .....	15
1.5.2. Μέθοδοι 3D εκτύπωσης (FDM, SLA, SLS, κλπ) .....	16
1.5.3. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί σε μηχανολογικές εφαρμογές .....	21
1.5.4. Παραδείγματα εφαρμογών σε περιστροφικά εξαρτήματα .....	22
<b>2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>23</b>
2.1. Εισαγωγή .....	23
2.2. Παράμετροι στο Inventor .....	23
2.2.1. Παράμετροι διαστάσεων του 3D μοντέλου .....	23
2.2.2. Παράμετροι που εισάγονται μετά τη σχεδίαση .....	24
2.3. Τρόπος σχεδιασμού και ανάλυση παραμέτρων .....	26
2.3.1. Στάτορας .....	26
2.3.2. Ρότορας .....	29
2.4. Κατασκευή του UI .....	29
2.4.1. Εξαρτημένες παράμετροι και παράμετροι Boolean (με ονομασία «manual») .....	29

2.4.2. Παράμετροι με ονομασία «user» .....	31
2.4.3. Με excel .....	36
2.4.4. Με inventor .....	40
2.5. Περιορισμοί με iLogic .....	42
<b>3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>48</b>
3.1. Αποτελέσματα παραμετροποίησης.....	48
3.2. Εφαρμογή της μεθόδου παραμετροποίησης του 2 <sup>ου</sup> κεφαλαίου .....	51
3.2.1. Case study 1 <sup>ο</sup> .....	51
3.2.2. Case study 2 <sup>ο</sup> .....	55
<b>4. ΣΥΝΟΨΗ.....</b>	<b>58</b>
4.1. Συμπεράσματα.....	58
4.2. Μελλοντική μελέτη .....	58
<b>5. Παράρτημα Α .....</b>	<b>60</b>
5.1. Κώδικας περιορισμών για στάτορα του 2 <sup>ου</sup> κεφαλαίου.....	60
5.2. Κώδικας εξαρτημένων παραμέτρων στάτορα .....	60
5.3. Περιορισμοί ρότορα case study 1 <sup>ου</sup> .....	61
5.4. Κώδικας περιορισμών δίσκου πηνίων case study 1 <sup>ου</sup> .....	62
5.5. Κώδικας περιορισμών στάτορα case study 1 <sup>ου</sup> .....	62
5.6. Κώδικας περιορισμών στάτορα case study 2 <sup>ου</sup> .....	63
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>64</b>

## 1. Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την παραμετρική μοντελοποίηση και την αυτοματοποίηση σχεδίασης περιστροφικών εξαρτημάτων σε περιβάλλον CAD (Autodesk Inventor) με αξιοποίηση κανόνων iLogic και συμπληρωματική διασύνδεση με Excel. Κεντρική επιδίωξη είναι η μετάβαση από «στατικά» μοντέλα σε ευέλικτα, κανονιστικά πρότυπα που επιτρέπουν ταχεία εξερεύνηση εναλλακτικών διαμορφώσεων, ελαχιστοποίηση σφαλμάτων και άμεση ανατροφοδότηση στον χρήστη μέσω φιλικού UI. Η μεθοδολογία επαληθεύεται και στην πράξη με 3D εκτύπωση επιλεγμένου εξαρτήματος.

Στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός πρακτικού και επαναχρησιμοποιήσιμου πλαισίου παραμετροποίησης για περιστροφικά εξαρτήματα, ώστε ακόμη και μη έμπειροι χρήστες να μπορούν να εφαρμόσουν παραμετροποίηση. Ο στόχος θα επιτευχθεί με:

- Την ανάπτυξη παραμετροποιημένων μοντέλων ρότορα και στάτορα με συνεπή ονοματοδοσία και πίνακα παραμέτρων
  - Τη σύνταξη κανόνων/περιορισμών iLogic και ελέγχων εγκυρότητας, με συμπληρωματική διασύνδεση σε Excel
  - Τη δημιουργία φιλικού User Interface (UI) (iLogic Forms) για άμεση ρύθμιση παραμέτρων και οπτική ανατροφοδότηση
  - Την πειραματική επαλήθευση μέσω 3D εκτυπώσεων και αξιολόγηση ακρίβειας, ανοχών και συναρμογής.
- 
- Κεφάλαιο 1ο : Παρουσιάζονται βασικές έννοιες CAD και παραμετρικής μοντελοποίησης, οι κατηγορίες περιστροφικών εξαρτημάτων και τα κρίσιμα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά τους. Περιγράφονται συνοπτικά μέθοδοι 3D εκτύπωσης, πλεονεκτήματα–περιορισμοί και ζητήματα κατασκευασιμότητας.
  - Κεφάλαιο 2ο : Περιγράφεται το περιβάλλον Autodesk Inventor, ο πίνακας παραμέτρων, η διαμόρφωση σχέσεων και περιορισμών, καθώς και η συγγραφή κανόνων iLogic. Τεκμηριώνεται η διασύνδεση με Excel, ο διαχωρισμός σε εξαρτημένες και «παραμέτρους χρήστη», οι λογικές μεταβλητές και η σχεδίαση του iLogic Form (UI) με ελέγχους εγκυρότητας και άμεσο update.
  - Κεφάλαιο 3ο : Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε δύο case studies. Γίνεται ανασχεδιασμός με συνεπή ονοματοδοσία και ομαδοποίηση παραμέτρων, εισαγωγή περιορισμών, υλοποίηση και παρουσίαση των επιμέρους UI. Περιλαμβάνονται ενδεικτικές δοκιμές με σκόπιμες παραβιάσεις, τεκμηριώνονται τα προειδοποιητικά μηνύματα και ο μηχανισμός επαναφοράς.
  - Κεφάλαιο 4ο : Συνοψίζονται τα ευρήματα για την ευελιξία, την αξιοπιστία και την εργονομία της προτεινόμενης προσέγγισης. Διατυπώνονται συμπεράσματα (4.1) και προτάσεις για περαιτέρω εργασία (4.2), όπως διεύρυνση παραμέτρων ώστε να μεταβάλλεται και η μορφολογία, βελτιστοποίηση περιορισμών, παραμετροποίηση ρυθμίσεων 3D εκτύπωσης και διασύνδεση με υπολογιστικά εργαλεία ανάλυσης.

## 1. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ

### 1.1. Σχεδιασμός στο χέρι

#### 1.1.1. Ιστορική εξέλιξη του τεχνικού σχεδίου

Το τεχνικό σχέδιο αποτελεί θεμελιώδες μέσο επικοινωνίας στη μηχανική και στις κατασκευές, επιτρέποντας τη σαφή αποτύπωση και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ σχεδιαστών, μηχανικών και τεχνιτών. Η ιστορική του εξέλιξη συνδέεται άμεσα με τις τεχνολογικές και κοινωνικές ανάγκες κάθε εποχής.

Στην Αναγέννηση, ο Leonardo da Vinci, τα έτη 1452–1519 συνέβαλε σημαντικά στην ανάπτυξη της γραφικής αναπαράστασης. Μέσα από σκίτσα μηχανών, ανατομικών μελετών και αρχιτεκτονικών έργων, εισήγαγε νέες προσεγγίσεις στην τρισδιάστατη απεικόνιση με χρήση προοπτικής, σκιάσεων και λεπτομερών σχολίων. Οι μελέτες του αποτελούν πρώιμο δείγμα της σύνδεσης τέχνης και μηχανικής, προάγοντας την ιδέα του σχεδίου ως εργαλείο επιστημονικής τεκμηρίωσης[1].

Η ουσιαστική καθιέρωση του τεχνικού σχεδίου ως επιστημονικό εργαλείο ήρθε τον 18ο αιώνα με τον Γάλλο μαθηματικό και μηχανικό Gaspar Monge τα έτη 1746–1818. Ο Monge θεμελίωσε τη περιγραφική γεωμετρία, μια μεθοδολογία, η οποία επιτρέπει την ακριβή αποτύπωση τρισδιάστατων αντικειμένων σε δύο διαστάσεις. Το έργο του αποτέλεσε τη βάση για την τυποποίηση του τεχνικού σχεδίου και την καθιέρωσή του ως απαραίτητο εργαλείο στην εκπαίδευση των μηχανικών, καθώς και το κοινό γλωσσικό μέσο επικοινωνίας μεταξύ σχεδιαστή και κατασκευαστή [1].

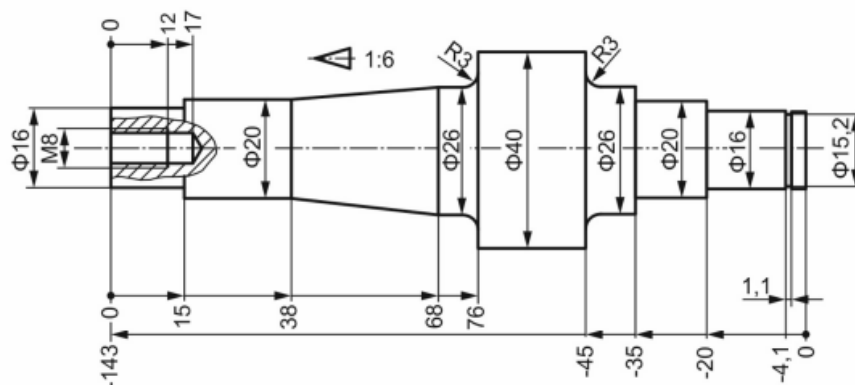
Στις αρχές του 20ού αιώνα, ο Alfredo Bensaude τη περίοδο 1856–1941, πρώτος διευθυντής του Instituto Superior Técnico στην Πορτογαλία, αναγνώρισε τη σημασία του τεχνικού σχεδίου ως βασική δεξιότητα των μηχανικών. Ενσωμάτωσε το μάθημα στις σπουδές μηχανικής, δίνοντας έμφαση τόσο στη θεωρία όσο και στην πρακτική εφαρμογή, μέσω ασκήσεων ελεύθερου σχεδίου και εκπαίδευσης σε εργαστήρια [1].

#### 1.1.2. Εργαλεία και μεθοδολογίες χειροκίνητου σχεδιασμού

Πριν από την ευρεία διάδοση των υπολογιστικών συστημάτων σχεδίασης, η παραγωγή τεχνικών και μηχανολογικών σχεδίων πραγματοποιούνταν αποκλειστικά με το χέρι, χρησιμοποιώντας ένα σύνολο εξειδικευμένων εργαλείων. Τα βασικότερα από αυτά είναι ο χάρακας και τα τρίγωνα για την κατασκευή ορθών και λοξών γραμμών, ο διαβήτης για κύκλους και τόξα, τα καμπυλόγραμμα για σύνθετες καμπύλες, καθώς και ο παράλληλος χάρακας ή ο πίνακας σχεδίασης στον οποίο εξασφαλιζόταν ακρίβεια και ευκολία στη χάραξη γραμμών. Επιπλέον, η χρήση μολυβιών διαφορετικής σκληρότητας, μελανιών και ειδικού χαρτιού Wattman επέτρεπαν τη διαφοροποίηση των γραμμών, ανάλογα με τον τύπο και τη σημασία τους.

Η διαδικασία του χειροκίνητου σχεδιασμού συνήθως διακρινόταν σε δύο στάδια. Το πρώτο ήταν το ελεύθερο σχέδιο (sketching), που αποσκοπούσε στη γρήγορη και πρόχειρη αποτύπωση ιδεών, χωρίς χρήση οργάνων. Το στάδιο αυτό θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς καλλιεργεί τη χωρική αντίληψη και τη δημιουργικότητα του μηχανικού. Το δεύτερο στάδιο ήταν το ακριβές μηχανολογικό σχέδιο, το οποίο εκτελούνταν με χρήση οργάνων και αυστηρών κανόνων. Εδώ δινόταν έμφαση στη σαφήνεια, στην ορθότητα των διαστάσεων και στην εφαρμογή διεθνών συμβάσεων, όπως οι διαφορετικοί τύποι γραμμών, τα πάχη, οι σημειώσεις και οι διαστάσεις.





Σχήμα 1. 1: Παράδειγμα μηχανολογικού σχεδίου ενός άξονα

Οι μεθοδολογίες διδασκαλίας του χειροκίνητου σχεδίου, ιδιαίτερα στα πολυτεχνεία του 19ου και 20ου αιώνα, περιλάμβαναν πρώτα ασκήσεις ελεύθερου σκίτσου και στη συνέχεια μετάβαση στο αυστηρό τεχνικό σχέδιο. Η πρακτική αυτή θεωρούνταν απαραίτητη για την απόκτηση ωριμότητας στην έκφραση και για την ανάπτυξη δεξιοτήτων, που επέτρεπαν στον μελλοντικό μηχανικό να κατανοήσει αλλά και να δημιουργήσει αποτελεσματικά μηχανολογικά σχέδια.

Παρά την εκτεταμένη χρήση των συστημάτων CAD σήμερα, οι παραδοσιακές μέθοδοι εξακολουθούν να διατηρούν εκπαιδευτική αξία. Η εξάσκηση στο χειροκίνητο σχέδιο προσφέρει βαθύτερη κατανόηση της γεωμετρίας και των αρχών της αναπαράστασης, λειτουργώντας ως θεμέλιο για την ορθή χρήση των σύγχρονων ψηφιακών εργαλείων.

## 1.2. Συστήματα CAD

### 1.2.1. Ιστορική εξέλιξη

Οι ρίζες του computer aided design (CAD) συνδέονται με την αεροναυπηγική και την αριθμητική κατεργασία (NC) της δεκαετίας του 1950. Στο MIT αναπτύχθηκε η γλώσσα APT (Automatically Programmed Tool) για τον προγραμματισμό εργαλειομηχανών CNC, θέτοντας τις βάσεις για τη μετέπειτα σύζευξη του CAD με το computer aided manufacturing (CAM) και την ψηφιακή περιγραφή γεωμετρίας και πορείας εργαλείων [2], [3]. Το μεγάλο άλμα για τα συστήματα CAD ήρθε το 1963 με το Sketchpad του Ivan Sutherland, το πρώτο διαδραστικό γραφικό σύστημα με light pen και γεωμετρικούς περιορισμούς [4]. Την ίδια περίοδο οι εταιρείες GM και IBM παρουσίασαν το DAC-1, ένα από τα πρώτα βιομηχανικά CAD συστήματα για την αυτοκινητοβιομηχανία. Παράλληλα, στην αυτοκινητοβιομηχανία εισήχθησαν οι καμπύλες Bézier και ο αλγόριθμος του de Casteljau, καθιερώνοντας μαθηματικές αναπαραστάσεις που προσέφεραν μοντελοποίηση με ακρίβεια [5], [6].

Τη χρονική περίοδο 1970–1980, η αναπαράσταση πέρασε από wireframe (μέθοδος αναπαράστασης του μοντέλου μόνο με σημεία ακμές και καμπύλες, χωρίς όγκους και επιφάνειες) σε επιφάνειες B-splines (καμπύλες που μπορούσαν να μεταβληθούν σε μεμονωμένα σημεία χωρίς να επηρεάζεται το υπόλοιπο τους) και NURBS (εξέλιξη των B-splines, με τις οποίες έγινε δυνατή η αναπαράσταση κύκλων, ελλείψεων και κωνικών σχημάτων), ενώ μετέπειτα πέρασε σε στερεά μοντελοποίηση. Δύο θεμελιώδεις προσεγγίσεις εδραιώθηκαν, η CSG, η οποία πρόκειται για σύνθεση στερεών με λογικούς τελεστές και η B-rep, στην οποία ο ορισμός στερεού γινόταν από τα όριά του [7]. Η συστηματοποίηση αυτών των προσεγγίσεων οδήγησε στη διάδοση εμπορικών γεωμετρικών «πυρήνων» kernels, οι οποίοι ήταν βιβλιοθήκες που πραγματοποιούσαν όλες

τις γεωμετρικές πράξεις στο πρόγραμμα και έπειτα αποτέλεσαν τη μηχανή πίσω από πολλά εμπορικά CAD.

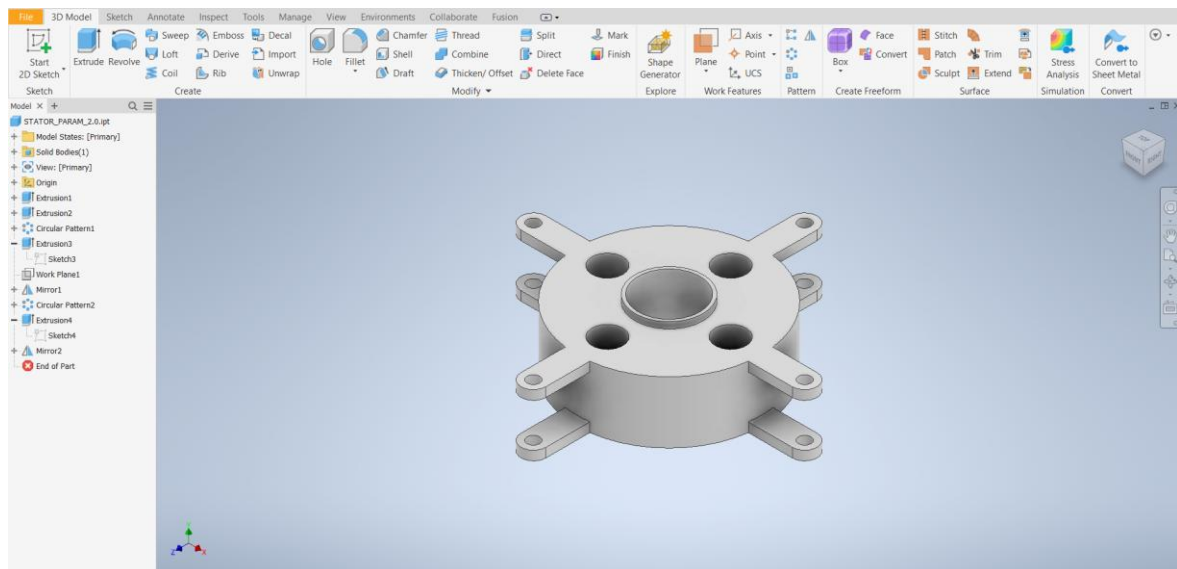
Κρίσιμη καινοτομία στα τέλη των 1980s ήταν μια feature-based παραμετρική μοντελοποίηση με το Pro/ENGINEER (1987), στο οποίο η δημιουργία του μοντέλου γινόταν με γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως τρύπες και σπειρώματα [8]. Παράλληλα, το AutoCAD (1982) δημοσίευε το CAD στους προσωπικούς υπολογιστές, ενώ το CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) μπήκε στο εμπόριο από την εταιρεία Dassault Systèmes, κυρίως στην αεροναυπηγική και την αυτοκινητοβιομηχανία για προχωρημένη μοντελοποίηση και συναρμολόγηση.

Από τα τέλη των 2000s εμφανίστηκε και το direct modeling, το οποίο ήταν χρήσιμο για γρήγορες αλλαγές. Με το direct modeling ο χρήστης μπορούσε να επέμβει κατευθείαν στη γεωμετρία του μοντέλου. Τη δεκαετία του 2010 ήρθε το cloud CAD με το οποίο έγινε δυνατή η συνεργατική επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο.

Σήμερα, το CAD συνδέεται στενά με βελτιστοποίηση τοπολογίας, η οποία είναι ουσιαστικά ένας χάρτης που περιγράφει το πως συνδέονται μεταξύ τους οι επιφάνειες, οι ακμές, οι καμπύλες ενός μοντέλου, ενώ ο σχεδιαστής ορίζει στόχους και περιορισμούς, για τους οποίους ο αλγόριθμος προτείνει ένα πλήθος λύσεων [9]. Για την προσθετική κατασκευή, πέρα από το STL (1987), καθιερώθηκαν το AMF (2011) και το 3MF (από 2015) που μεταφέρουν πληροφορίες για ένα 3D μοντέλο όπως υλικά, χρώμα και επιφάνειες lattice, οι οποίες μπορεί να είναι χρήσιμες για το γέμισμα του μοντέλου στην προσθετική κατασκευή [10], [11].

### **1.2.2. Βασικές λειτουργίες και εργαλεία**

Στα σύγχρονα συστήματα CAD το έργο οργανώνεται τυπικά σε τρεις βασικούς τύπους αρχείων: Part, Assembly και Drawing. Τα Part αρχεία περιέχουν την παραμετρική γεωμετρία του μεμονωμένου εξαρτήματος όπως γεωμετρικά χαρακτηριστικά, σκίσα και παραμέτρους υλικού, αποτελώντας το πρωτογενές δομικό στοιχείο του μοντέλου. Τα Assembly αρχεία συνθέτουν πολλά parts σε μια λειτουργική διάταξη μέσω σχέσεων σύζευξης και περιορισμών, επιτρέποντας έλεγχο παρεμβολών, διαδρομών κίνησης και διαχείριση παραλλαγών. Τέλος, τα Drawing αρχεία τεκμηριώνουν το μοντέλο μέσω 2D προβολών, τομών, διαστάσεων και ανοχών σύμφωνα με πρότυπα ISO ή ASME, και συχνά ενσωματώνουν πίνακα υλικών [12], [13].



Σχήμα 1. 2 Παράδειγμα περιβάλλοντος CAD

Οι βιβλιοθήκες τυποποιημένων εξαρτημάτων και υλικών αποτελούν βασική υποδομή του περιβάλλοντος CAD. Οι βιβλιοθήκες εξαρτημάτων όπως κοχλίες ISO/DIN και ρουλεμάν, μειώνουν τον χρόνο σχεδίασης, εξασφαλίζουν συμμόρφωση σε πρότυπα και ελαχιστοποιούν το ρίσκο λαθών γεωμετρίας ή κωδικοποίησης. Συχνά συνδέονται με καταλόγους προμηθευτών και με πεδία δεδομένων (κωδικός, υλικό, βάρος). Οι βιβλιοθήκες υλικών περιλαμβάνουν ιδιότητες όπως πυκνότητα, ελαστικά μέτρα, αντοχές και θερμικούς συντελεστές. Η ορθή ανάθεση υλικού στο Part είναι προϋπόθεση για αξιόπιστους υπολογισμούς ιδιοτήτων μάζας και σωστή συμπεριφορά σε προσομοιώσεις [13], [14].

Όπως προαναφέρθηκε στην συγκεκριμένη εργασία το παραμετρικό μοντέλο αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα Autodesk Inventor. Στο πρόγραμμα αυτό υπάρχει η δυνατότητα χρήσης του λογισμικού iLogic, το οποίο είναι ένα εργαλείο CAD για εισαγωγή κανόνων και περιορισμών οι οποίοι βασίζονται σε παραμέτρους (rules-driven design).

Οι κανόνες γράφονται με κώδικα, δηλαδή Visual Basic (VB)-τύπου συντακτικό και εφαρμόζονται τοπικά στο αρχείο Part, assembly ή drawing, αυτοματοποιώντας επαναλαμβανόμενα βήματα και τυποποιώντας διαδικασίες σχεδίασης. Το Visual Basic συντακτικό προϋποθέτει χρήση λέξεων-κλειδιά και συγκεκριμένη δομή εντολών η οποία έχει τους εξής παράγοντες:

- Έλεγχος συνθήκης και λούπες: εντολές όπως for, if ... end if, do while.
- Τελεστές:
  1. Εκχώρησης: =
  2. Σύγκρισης: =, <, >, <= και >=
  3. Λογικοί: and, or και not
- Μη ευαισθησία στα κεφαλαία γράμματα. Η γραφή δεσμευμένων λέξεων είτε με μικρά είτε με κεφαλαία γράμματα δεν επηρεάζει διαφορετικά τον κώδικα.
- Τύποι μεταβλητών και παραμέτρων: χωρίζονται στις αριθμητικές, οι οποίες μπορεί να είναι ακέραιες (integer) ή κινητής υποδιαστολής (double), έπειτα σε λογικές (Boolean), οι οποίες μπορούν να πάρουν τιμές true ή false και τέλος είναι οι παράμετροι που περιέχουν μόνο κείμενο.

Έτσι, οι κανόνες χειρίζονται αριθμητικές, λογικές ή παραμέτρους κειμένου, με τις οποίες ενεργοποιούν ή απενεργοποιούν γεωμετρικά χαρακτηριστικά (features) και επιβάλλουν σχέσεις όπως εξαρτήσεις διαστάσεων, ελάχιστα πάχη, επιλογή πλήθους οπών κ.λπ. Ακόμη

με το iLogicForms ο χρήστης μπορεί να διαμορφώσει ένα User Interface (UI) προσαρμοσμένο στις δικές του ανάγκες και προτιμήσεις. Οι φόρμες (iLogicForms) παρέχουν απλό UI για να αλλάζουν ελεγχόμενα οι παράμετροι και να εκτελούνται κανόνες, χωρίς πρόσβαση στον πίνακα παραμέτρων. Ο επεξεργαστής φορμών υποστηρίζει προσθήκη και αναδιάταξη ελέγχων, χρήση εικόνων και ρύθμιση των ευρών των τιμών των παραμέτρων, ενώ υπάρχει και δυνατότητα για εκκίνηση προκαθορισμένων φορμών από κανόνες.

### **1.3. Παραμετρικός σχεδιασμός**

#### **1.3.1. Ορισμός και χαρακτηριστικά**

Παραμετρικός σχεδιασμός ονομάζεται η μεθοδολογία κατά την οποία η γεωμετρία, οι ιδιότητες και η συμπεριφορά ενός αντικειμένου ορίζονται μέσω παραμέτρων, σχέσεων και περιορισμών, αντί για σταθερές διαστάσεις [15]. Με αυτόν τον τρόπο το «σχέδιο» μετατρέπεται σε ένα σύνολο κανόνων και εξαρτήσεων που αποτυπώνουν την πρόθεση του σχεδιαστή και έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζουν το σχέδιο στις ανάγκες του κάθε χρήστη. Αλλαγές σε βασικές παραμέτρους όπως είναι η διάμετρος, το πάχος, οι γωνίες, οι ανοχές, το υλικό ή ακόμη και κανόνες κατασκευής διαδίδονται αυτόματα σε ολόκληρο το μοντέλο, παράγοντας έγκυρες παραλλαγές χωρίς να απαιτείται εκ νέου μοντελοποίηση [16].

#### **1.3.2. Οφέλη της παραμετρικής προσέγγισης**

Ο παραμετρικός σχεδιασμός αντιμετωπίζει τις αδυναμίες του κλασικού CAD. Με τη μεταβολή μιας παραμέτρου ενημερώνεται αυτόματα τη γεωμετρία εξαρτημάτων, οι συναρμολογήσεις και τα τεχνικά σχέδια, ενώ οι περιορισμοί διασφαλίζουν τη συνέπεια εφαρμογών, ευθυγραμμίσεων και ανοχών και αποτρέπουν «αδύνατες» διαμορφώσεις. Ακόμη δίνει τη δυνατότητα σχεδίασης και κατασκευής παρόμοιων μοντέλων, με μικρές παραλλαγές, πολύ γρήγορα και αποτελεσματικά χωρίς κόπο. Τέλος, η ρητή αποτύπωση της γνώσης στο μοντέλο, δηλαδή η αποθήκευση των περιορισμών, κάνει την επαναχρησιμοποίηση του μοντέλου πολύ εύκολη. Συνολικά, ο παραμετρικός σχεδιασμός μειώνει την επανεπεξεργασία και τα σφάλματα, αυξάνει την ταχύτητα ανάπτυξης μοντέλων και καθιστά τα σχέδια ανθεκτικότερα σε μεταβολές απαιτήσεων.

#### **1.3.3. Εφαρμογές σε βιομηχανικό σχεδιασμό και κατασκευή**

Στην πράξη, ο παραμετρικός σχεδιασμός υλοποιείται με προγράμματα CAD και με scripting languages όπως είναι η API, η Python, η OpenSCAD και η VBA. Η μεθοδολογία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές προσθετικής κατασκευής, όπου παραμετρικές δομές πλέγματος, τοπολογική βελτιστοποίηση και κανόνες για ελάχιστα πάχη ή υποστηρίξεις ενσωματώνονται απευθείας στο μοντέλο. Για περιστροφικά εξαρτήματα, η παραμετροποίηση διευκολύνει την ελεγχόμενη μεταβολή αδρανειακών ροπών, την ισοζύγηση μάζας, τις κρίσιμες ταχύτητες και τα όρια αντοχής με βάση συναρτήσεις των διαστάσεων.

Οι Mermoz et al. [17] περιγράφουν μια επιχειρησιακή μεθοδολογία παραμετρικού σχεδιασμού για τους κύριους μειωτήρες ελικοπτέρων (MGB) με στόχο τη δραστική μείωση του χρόνου προμελέτης και μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε αλλαγές προδιαγραφών. Ως βασικό εργαλείο CAD χρησιμοποιήθηκε το CATIA V5, αλλά οι εξισώσεις και οι βασικές παράμετροι παρέμειναν αποθηκευμένες σε Excel ώστε να αλλάζουν εύκολα και να προστατεύεται η εταιρική γνώση. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένα “functional skeleton”, δηλαδή ένας σκελετός με άξονες, επίπεδα και βασικές καμπύλες και περιγράμματα που ορίζουν τις σχέσεις της γεωμετρίας. Όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα κουμπώνουν πάνω σ’

αυτόν τον σκελετό. Έτσι, όταν αλλάζει μια παράμετρος στο Excel, ο σκελετός ενημερώνεται και η αλλαγή διαδίδεται με ασφάλεια σε όλη τη συναρμολόγηση. Παράλληλα, υπάρχει βιβλιοθήκη παραμετρικών εξαρτημάτων (π.χ. ρουλεμάν, γρανάζια) για γρήγορη και συνεπή αντικατάσταση μεγεθών. Εν τέλει με τη συγκεκριμένη μέθοδο, ο χρόνος μελέτης του 3D μοντέλου μειώθηκε κατά 2 με 3 εβδομάδες.

Ο Barrios Hernandez [18] περιέγραψε τον παραμετρικό σχεδιασμό ως μια «συνταγή» βημάτων με την οποία παρήγαγε το μοντέλο αντί να αλλάζει απλώς διαστάσεις. Ξεκίνησε από κλειστές, μη αυτοτεμνόμενες καμπύλες, η μια καμπύλη περιστρεφόταν γύρω από κατακόρυφο άξονα προς μία κατεύθυνση ενώ η άλλη προς την αντίθετη κατεύθυνση, τις συνδύασε και πραγματοποίησε τις απαραίτητες τομές ώστε να προκύψει η τελική μορφή των κίωνων της Sagrada Familia. Αλλάζοντας τις αρχικές καμπύλες ή τις γωνίες, το μοντέλο αναδημιουργήθηκε αυτόματα σε νέες εκδόχές. Έτσι «συσκεύασε» την τεχνογνωσία σε μια διαδικασία με επαναληψιμότητα, μείωσε χειροκίνητες διορθώσεις και λάθη και επέτρεψε γρήγορη και ασφαλή διερεύνηση παραλλαγών πριν από τη λεπτομερή σχεδίαση και την παραγωγή.

## 1.4. Περιστροφικά εξαρτήματα

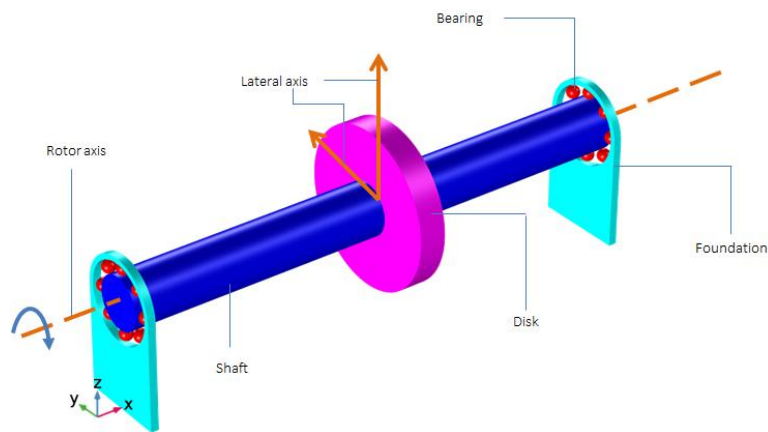
### 1.4.1. Ορισμός και βασικές κατηγορίες

Τα περιστροφικά εξαρτήματα αποτελούν μια βασική κατηγορία μηχανολογικών στοιχείων, των οποίων το κύριο χαρακτηριστικό είναι η περιστροφική κίνηση γύρω από έναν άξονα. Χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από συστήματα μετάδοσης ισχύος σε οχήματα έως εργαλειομηχανές και ενεργειακές διατάξεις. Ο ρόλος τους είναι θεμελιώδης, καθώς επιτρέπουν τη μεταφορά ροπής, την υποστήριξη φορτίων και τη μείωση των τριβών, ενώ η αξιοπιστία τους καθορίζει άμεσα την απόδοση και τη διάρκεια ζωής του συνολικού μηχανισμού [19].

Η κατηγοριοποίηση των βασικών περιστροφικών εξαρτημάτων γίνεται ανάλογα με την λειτουργία τους:

1. Άξονες και άτρακτοι, αποτελούν στοιχεία για τη μεταφορά ροπής και κίνησης. Χρησιμοποιούνται σε κινητήρες, κιβώτια ταχυτήτων και μηχανισμούς μετάδοσης
2. Τα ρουλεμάν ή αλλιώς έδρανα κύλισης, επιτρέπουν την ομαλή περιστροφή με ελαχιστοποίηση της τριβής και της φθοράς. Ανάλογα με τη μορφή τους, μπορεί να είναι κυλινδρικά, σφαιρικά ή κωνικά.
3. Γρανάζια τροχαλίες και οδοντωτοί τροχοί, είναι εξαρτήματα που μεταδίδουν κίνηση και ισχύ, καθορίζοντας τη σχέση μετάδοσης και την κατεύθυνση περιστροφής

Μια ειδική κατηγορία περιστροφικών εξαρτημάτων είναι τα συστήματα ρότορα, τα οποία αποτελούνται συνήθως από άξονες, δίσκους και έδρανα. Τα συστήματα αυτά είναι κρίσιμα σε εφαρμογές υψηλών στροφών, όπως οι αεριοστρόβιλοι, οι ηλεκτροκινητήρες και οι στροβιλοαντλίες. Εκτός από την αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η εφαρμογή τους στην παραγωγή ενέργειας, καθώς οι στρόβιλοι και οι γεννήτριες βασίζονται σε άξονες και ρουλεμάν υψηλής ακρίβειας για συνεχή λειτουργία σε ακραίες συνθήκες [19], [20].



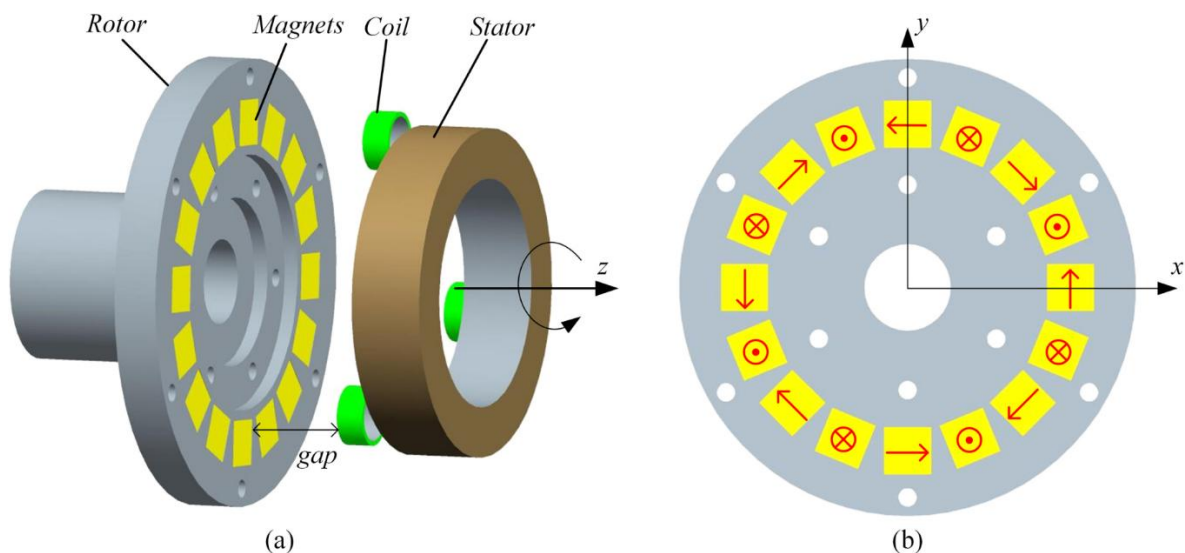
Σχήμα 1. 3: Ανάλυση εξαρτημάτων ενός απλού συστήματος ρότορα [21]

#### 1.4.2. Ηλεκτρομαγνητικοί συγκομιστές ενέργειας με περιστροφικά εξαρτήματα

Για να γεφυρωθεί η γενική ανάλυση των περιστροφικών εξαρτημάτων με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, δίνεται έμφαση στους ηλεκτρομαγνητικούς συγκομιστές ενέργειας ως ειδική και ιδιαίτερα κατάλληλη περίπτωση αξιοποίησης της περιστροφικής κίνησης. Τα δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά που αναλύθηκαν (άξονες, ρουλεμάν, ζεύγη μετάδοσης, περιορισμοί αντοχής–ακαμψίας–φθοράς, δυναμικές επιδράσεις) αποτελούν την βάση πάνω στην οποία ενσωματώνονται οι ηλεκτρομαγνητικοί συγκομιστές.

Οι ηλεκτρομαγνητικοί συγκομιστές ενέργειας βασίζονται στον νόμο του Faraday: όταν αλλάζει η μαγνητική ροή που διαπερνά ένα πηνίο, επάγεται τάση και δημιουργείται ρεύμα. Σχεδιαστικά, αυτό υλοποιείται συνήθως με μόνιμους μαγνήτες, συνήθως NdFeB σε έναν ρότορα ή σε μια ευθύγραμμη κινούμενη μάζα και με στάτορα που φέρει πηνία. Η σχετική κίνηση μαγνητών-πηνίων μετατρέπει την μηχανική ενέργεια (δόνηση, περιστροφή, μετάθεση) σε ηλεκτρική. Το πλεονέκτημα της ηλεκτρομαγνητικής μετατροπής είναι ότι λειτουργεί αποδοτικά σε χαμηλές συχνότητες (ταχύτητες, στροφές) σε ευρύ φάσμα διεγέρσεων και χωρίς την ανάγκη προφόρτισης ή στοιχείων υψηλής τάσης, ενώ κλιμακώνεται από μικρο-συσσκευές μέχρι μακροσκοπικές εφαρμογές [22].

Για υψηλή πυκνότητα ισχύος, συχνά χρησιμοποιούνται διατάξεις Halbach (κυκλική ή κυλινδρική «αλυσίδα» μαγνητών) που κατευθύνουν το πεδίο προς τη μία πλευρά, αυξάνοντας τη ροή στο διάκενο και άρα το  $d\Phi/dt$  στα πηνία. Αυτό έχει τεκμηριωθεί πειραματικά σε συστήματα περιστροφικής συλλογής ενέργειας με αυξημένη ογκομετρική πυκνότητα [23].



Σχήμα 1. 4: (a) περιστροφικός και ηλεκτρομαγνητικός συγκομιστής ενέργειας και (b) διάταξη Halbach [24]

#### 1.4.3. Σχεδιαστικές και κατασκευαστικές απαιτήσεις και περιορισμοί

Γενικά σχεδιασμός περιστροφικών εξαρτημάτων είναι μια πολυδιάστατη διαδικασία που συνδυάζει μηχανολογικές αρχές, επιλογή υλικών, δυναμικές φορτίσεις και τεχνολογικούς περιορισμούς. Η επιτυχής σχεδίαση δεν αποσκοπεί μόνο στη λειτουργικότητα, αλλά και στη μακροχρόνια αξιοπιστία, την ασφάλεια και την οικονομία κατασκευής [25].

Πιο συγκεκριμένα ο σχεδιασμός ενός περιστροφικού ηλεκτρομαγνητικού συγκομιστή (EM) ξεκινά από τη ζεύξη μηχανικής-ηλεκτρομαγνητισμού και ισορροπεί ανάμεσα σε αποδοτικότητα, αξιοπιστία και ενσωμάτωση σε άξονα και ρουλεμάν. Στον ηλεκτρομαγνητικό μετατροπέα, η διαθέσιμη ισχύς μεταβάλλεται με τη μεταβολή της μαγνητικής ροής στα πηνία (γεωμετρία, διάκενο και πλήθος σπειρών) και με την γωνιακή ταχύτητα. Συνεπώς απαιτούνται υψηλή μαγνητική πυκνότητα ροής στο διάκενο, μικρά διάκενα και σωστός συντονισμός διαστάσεων ρότορα-στάτορα. Διατάξεις Halbach αυξάνουν τον δεσμό ροής, αλλά περιορίζονται από κορεσμό, ανοχές κατασκευής και κόστος μαγνητών [23].

Για έναν ρότορα με πολύπολους μαγνήτες, το 3D μοντέλο οφείλει να εξασφαλίζει: (α) τυποποιημένες θήκες (τσέπες) μαγνητών με κατάλληλες ανοχές για κόλλα ή άλλον μηχανισμό ασφάλισης, (β) συνεχές μαγνητικό μονοπάτι χωρίς στενώματα που οδηγούν σε κορεσμό, και (γ) ακριβή οδήγηση της ροής προς το διάκενο. Στον στάτορα με τα πηνία απαιτείται επαρκής χώρος στα στηρίγματα, ώστε να μην χάνονται σπείρες και να τηρούνται οι ηλεκτρικές/θερμικές απαιτήσεις.

Οι ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις στις οποίες βασίζονται οι συγκομιστές αυτοί είναι εκ φύσεως μη-γραμμικές και ιδιαίτερα ευαίσθητες στις γεωμετρικές ανοχές και στην ακρίβεια της κατασκευής. Ως εκ τούτου, ο παραμετρικός σχεδιασμός για 3D εκτύπωση θα βοηθήσει στην πιο αποδοτική διερεύνηση των κατάλληλων συνθηκών κατασκευής των συγκομιστών.

### 1.5. Εκτύπωση 3D

#### 1.5.1. Ιστορική εξέλιξη και αρχές 3D εκτύπωσης

Η τρισδιάστατη εκτύπωση ή αλλιώς προσθετική κατασκευή αποτελεί μία σχετικά νέα αλλά ραγδαία εξελισσόμενη τεχνολογία, η οποία εισήγαγε μια διαφορετική λογική παραγωγής αντικειμένων: αντί να αφαιρείται υλικό από ένα αρχικό σώμα, όπως συμβαίνει στις παραδοσιακές αφαιρετικές μεθόδους, δηλαδή κατεργασίες όπως είναι η τόννευση ή το

φρεζάρισμα, το αντικείμενο κατασκευάζεται με διαδοχική εναπόθεση υλικού στρώση-στρώση έως ότου αποκτήσει την τελική του μορφή [26].

Η ιδέα της προσθετικής κατασκευής άρχισε να αναπτύσσεται στα τέλη της δεκαετίας του 1970, όμως το καθοριστικό βήμα που εδραίωσε την 3D εκτύπωση ως έμπιστη μέθοδο κατασκευής, έγινε το 1984 από τον Charles Hull, ο οποίος ανέπτυξε την τεχνολογία στερεολιθογραφίας (SLA), όπου υγρή ρητίνη στερεοποιείται μέσω υπεριώδους ακτινοβολίας. Το 1986 ίδρυσε την εταιρεία *3D Systems*, η οποία εμποριοποίησε τους πρώτους 3D εκτυπωτές της συγκεκριμένης μεθόδου. Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι προσθετικής κατασκευής, οι οποίες αναλύονται σε επόμενη υποενότητα [26], [27].

Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 2000 οι 3D εκτυπωτές ήταν ιδιαίτερα ακριβοί και χρησιμοποιούνταν κυρίως για βιομηχανική κατασκευή πρωτοτύπων. Το τοπίο άλλαξε δραστικά με την εμφάνιση έργων ανοιχτού κώδικα, όπως το RepRap project (2005, Πανεπιστήμιο Bath), το οποίο στόχευε στη δημιουργία ενός εκτυπωτή που θα μπορούσε να αναπαράγει τα δικά του εξαρτήματα. Η φιλοσοφία αυτή, οδήγησε στη ραγδαία μείωση του κόστους και στη διάδοση της τεχνολογίας σε ιδιώτες και μικρές επιχειρήσεις [27].

Είναι άξιο να σημειωθεί πως το 3D printing πέρασε από το στάδιο της βιομηχανικής χρήσης στο οικιακό και προσωπικό επίπεδο, ακολουθώντας μια πορεία ανάλογη με εκείνη των προσωπικών υπολογιστών τις δεκαετίες 1980–1990.

Εν κατακλείδι η ιστορική εξέλιξη της 3D εκτύπωσης δείχνει ότι από τις πρώτες πειραματικές εφαρμογές της δεκαετίας του 1980 έως και τη σημερινή διάδοσή της σε εκπαιδευτικούς, βιομηχανικούς και οικιακούς χώρους, η τεχνολογία αυτή αποτελεί έναν καταλύτη στη μετάβαση προς νέα μοντέλα παραγωγής περισσότερο ευέλικτα και προσαρμοσμένα στις ανάγκες του χρήστη.

#### **1.5.2. Μέθοδοι 3D εκτύπωσης (FDM, SLA, SLS, κλπ)**

Ανεξάρτητα από τη μέθοδο, η 3D εκτύπωση ακολουθεί την ίδια βασική ροή: δημιουργείται ένα τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο CAD, μετατρέπεται σε αρχείο πλεγμένης επιφάνειας ή αλλιώς mesh file, συνήθως STL, «τεμαχίζεται» (slicing) σε στρώσεις, και ο εκτυπωτής εκτελεί μια διαδρομή εργαλείου (toolpath/G-code) για να αποθέσει ή να στερεώσει υλικό στρώση-στρώση. Αν υπάρχουν προεξοχές, τότε χρησιμοποιείται υποστηρικτικό υλικό, ενώ συχνά απαιτείται περεταίρω επεξεργασία δηλαδή αφαίρεση υποστηρίγματος, καθαρισμός, τελική σκλήρυνση. Η δημιουργία του τελικού αντικειμένου γίνεται χωρίς να έχει πραγματοποιηθεί αφαίρεση υλικού ή η χρήση καλουπιού [28].

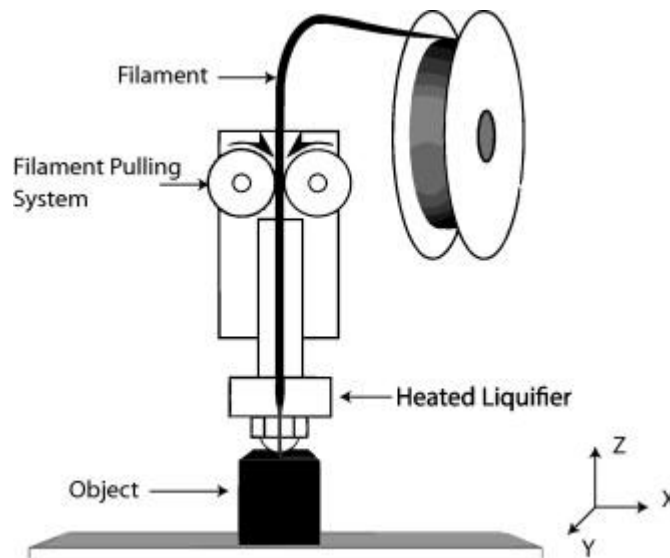
#### **Fused Deposition Modeling (FDM)**

Στην FDM τροφοδοτείται συνεχές νήμα (filament) θερμοπλαστικού πολυμερούς σε θερμαινόμενη κεφαλή, λιώνει τοπικά και εξωθείται από ακροφύσιο πάνω στην επιφάνεια κατασκευής, όπου ψύχεται και στερεοποιείται. Η εξώθηση συγχρονίζεται με την κίνηση της κεφαλής ώστε να «χτίζονται» γεωμετρίες γραμμή-γραμμή και στρώση-στρώση. Ένας γενικός κανόνας στην συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι πως το ύψος της στρώσης πρέπει να κυμαίνεται από 25% έως το 80% της διαμέτρου του ακροφυσίου. Η επιλογή μεγάλης στρώσης προσφέρει ταχύτητα αλλά μικρότερη ακρίβεια, ενώ η επιλογή μικρής στρώσης, προσφέρει πιο λεία επιφάνεια και περισσότερη λεπτομέρεια, κάνοντας όμως πιο αργή την διαδικασία. Είναι προφανές ότι η επιλογή μικρής στρώσης δεν έχει νόημα σε εκτυπωτές που δεν έχουν τη δυνατότητα να μετακινούν τη μύτη με την απαιτούμενη ταχύτητα και σταθερότητα [28], [29].



Εφόσον έχει τοποθετηθεί το νήμα στον εκτυπωτή και έχουν υπολογιστεί όλες οι παράμετροι της εκτύπωσης, μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία, η οποία αναλύεται ως εξής:

1. Γίνεται προθέρμανση του ακροφυσίου και περνάει λίγη ροή υλικού, προκειμένου να καθαριστεί από τυχόν υπολείμματα προηγούμενης εκτύπωσης, επίσης γίνεται προθέρμανση της κλίνης/επιφάνειας εκτύπωσης.
2. Το ακροφύσιο μετακινείται και απλώνει τη πρώτη στρώση, έτσι ελέγχεται η πρόσφυση καθώς και αν χρειάζονται ρυθμίσεις στον κατακόρυφο άξονα.
3. Η διαδικασία συνεχίζεται και διαμορφώνονται τα περιγράμματα, τα γεμίσματα και τα στηρίγματα του αντικειμένου, με μικρές παύσεις ώστε να γίνει ψύξη του υλικού όποτε χρειάζεται.
4. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία το αντικείμενο κρυώνει επάνω στην επιφάνεια εκτύπωσης και έπειτα αποκολλάται από αυτήν με χρήση κατάλληλου εργαλείου



Σχήμα 1. 5 Παράδειγμα της μεθόδου FDM [30].

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συχνότερα σε αυτή τη μέθοδο είναι θερμοπλαστικά όπως PLA, ABS και PP. Ακόμη Η θερμοκρασία ακροφυσίου/κλίνης, η ταχύτητα εκτύπωσης, το πάχος της κάθε στρώσης και ο προσανατολισμός εκτύπωσης, είναι σημαντικό να ρυθμιστούν σωστά διότι επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την πρόσφυση μεταξύ στρώσεων, την επιφανειακή ποιότητα και τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού αντικειμένου.

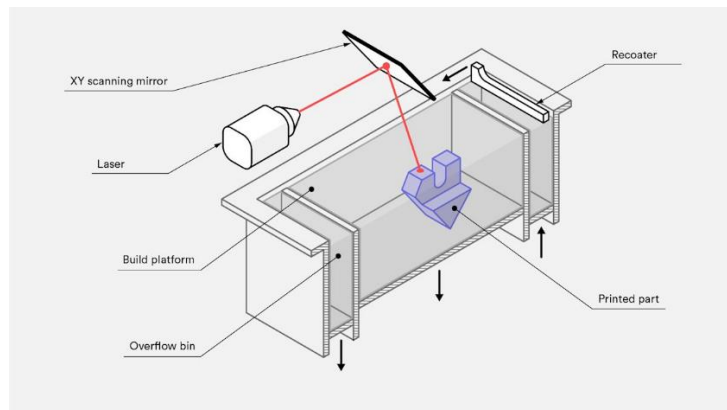
### Selective laser stinting (SLS)

Στην μέθοδο SLS, λεπτές στρώσεις σκόνης απλώνονται σε θερμαινόμενη κλίνη καθώς το λέιζερ σαρώνει κάθε στρώση και θερμαίνει τοπικά τα σωματίδια ώστε να κολλήσουν μεταξύ τους. Η υπολειπόμενη σκόνη λειτουργεί ως φυσικό υλικό στήριξης, οπότε δεν απαιτούνται υποστηρίξεις σε γεωμετρίες που προεξέχουν, όπως απαιτούνται στην FDM. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα πρώτα συστήματα δούλευαν με λέιζερ Nd:YAG 100 W και σκόνη ABS, ενώ σήμερα τα περισσότερα εμπορικά SLS για πολυμερή, χρησιμοποιούν CO<sub>2</sub> λέιζερ επειδή δίνουν υψηλή ισχύ με χαμηλότερο κόστος [28], [31], [32].

Πιο αναλυτικά, η διαδικασία έχει ως εξής :

1. Ο εκτυπωτής απλώνει μια λεπτή στρώση σκόνης και την ισοπεδώνει
2. Το λέιζερ ακολουθεί τη διαδρομή από το «τεμαχισμένο» CAD αρχείο και συντήκει τα σημεία της στρώσης που αντιστοιχούν στο κομμάτι.

3. Η πλατφόρμα κατεβαίνει όσο το ύψος στρώσης και έπειτα, γίνεται επανάληψη των δύο πρώτων βημάτων μέχρι να ολοκληρωθεί η εκτύπωση.
4. Μετά την εκτύπωση, το κομμάτι κρύνει μέσα στο «κουβούκλιο» της σκόνης, καθαρίζεται από την περισσευούμενη σκόνη και η διαδικασία τελειώνει. [28], [31]



Σχήμα 1. 6 Παράδειγμα εκτύπωσης SLS [33]

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για πολυμερή SLS, είναι κυρίως θερμοπλαστικές σκόνες. Τα εξαρτήματα βγαίνουν με μεγάλη διαστατική ακρίβεια, με λειτουργική μηχανική συμπεριφορά, και πιο «ματ/κοκκώδη» επιφάνεια, στην περίπτωση που απαιτείται βελτίωση της επιφάνειας αυτής, επιτυγχάνεται με ελαφριά επεξεργασία μετά την εκτύπωση. Η σκόνη που δεν συντήκεται ανακτάται και με σωστές πρακτικές, ξαναχρησιμοποιείται [28], [31].

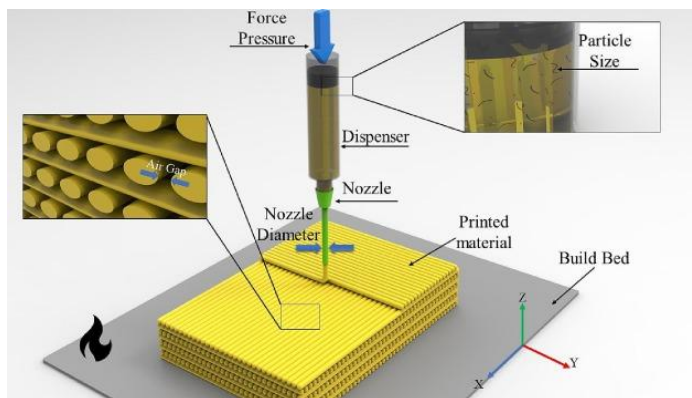
### Direct write

Η Direct Write είναι μια τεχνική προσθετικής κατασκευής στην οποία πραγματοποιείται συνεχής εξώθηση, χωρίς θερμική τήξη, ειδικού μελανιού, για το οποίο χρησιμοποιούνται ευρέως νανοσωματιδιακές πάστες, υδρογέλες, κολλοειδή διαλύματα ή πολυηλεκτρολυτικές συνθέσεις, μέσα από ακροφύσιο και «γράφεται» γραμμή-γραμμή, στρώση-στρώση, το τελικό αντικείμενο. Τα μελάνια αυτά είναι ιξωδοελαστικά, το οποίο σημαίνει ότι ρέουν όταν τους ασκηθεί πίεση και σταθεροποιούνται όταν σταματήσει η φόρτιση, έτσι διατηρούν το σχήμα τους και έχουν την δυνατότητα να στηρίζουν ακόμη και μικρά γεφυρώματα. Η μέθοδος direct-write, αλλιώς, ink- ή laser-writing, στοχεύει σε γρήγορη και ευέλικτη κατασκευή χωρίς ακριβό εξοπλισμό ή εργαλεία, με δυνατότητες ακρίβειας χαρακτηριστικών από 250  $\mu\text{m}$  έως 0,10  $\mu\text{m}$ , ανάλογα με το μελάνι, το ακροφύσιο και την κινηματική, κάτι που έχει ανοίξει εφαρμογές σε μικρορευστονική, φωτονικά συστήματα και βιοϋλικά[28], [32], [34].

Η διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου αναλυτικά έχει ως εξής:

1. Επιλέγεται υλικό με κατάλληλα χαρακτηριστικά ώστε το υλικό να ρέει στο ακροφύσιο αλλά να διατηρεί σχήμα μετά την απόθεση.
2. Το μελάνι φορτώνεται σε σύριγγα/δεξαμενή με κατάλληλο το ακροφύσιο. Η κίνηση γίνεται από ρομποτικό βραχίονα και η παροχή ελέγχεται με πίεση ή έμβολο, τα οποία είναι πλήρως συγχρονισμένα με την τροχιά και την κίνηση του ακροφυσίου.
3. Η κεφαλή ακολουθεί συντεταγμένες, ενώ ταυτόχρονα γίνεται ρύθμιση παροχής/πίεσης για σταθερό πλάτος ίνας.
4. Μόλις η εφαρμοζόμενη πίεση υπερβεί το yield stress, το μελάνι εξωθείται ως συνεχής ίνα και αποτίθεται πάνω στο υπόστρωμα. Με τη λήξη της διάτμησης ανακτάται ο ελαστικός χαρακτήρας του υλικού, δηλαδή το υλικό δεν απλώνει κι έτσι μπορεί να υποδεχθεί την επόμενη στρώση

5. Έπειτα γίνεται επανάληψη της διαδικασίας μέχρι την ολοκλήρωση της γεωμετρίας, όπου απαιτείται, UV post-cure, έκπλυση/αφαίρεση fugitive, ή θερμική κατεργασία [28], [32], [34].



Σχήμα 1. 7: Παράδειγμα μεθόδου Direct write [35].

Κρίσιμες παράμετροι για την καλή ποιότητα εκτύπωσης αποτελούν, αρχικά η διάμετρος του ακροφυσίου και η σταθερότητα της παροχής και της πίεσης, οι οποίες ελέγχουν το πλάτος της συνεχούς ίνας και την ομοιομορφία της διαδρομής. Εξίσου σημαντικό είναι ο συγχρονισμός κίνησης και παροχής, ώστε να εξασφαλίζεται συνεχής ίνα χωρίς διακοπές ή ανεπιθύμητη πάχυνση στις γωνίες. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει επίσης να δοθεί στην επιλογή υλικού προκειμένου αυτό να έχει τις κατάλληλες ιδιότητες, όσον αφορά τη ροή του από το ακροφύσιο αλλά άμεση διατήρηση σχήματος μετά την απόθεση. Οι ιδιότητες αυτές είναι το ιξώδες, η οριακή τάση διαρροής και ο ιξωδοελαστικός χαρακτήρας[28], [36].

### Stereolithography (SLA/DLP)

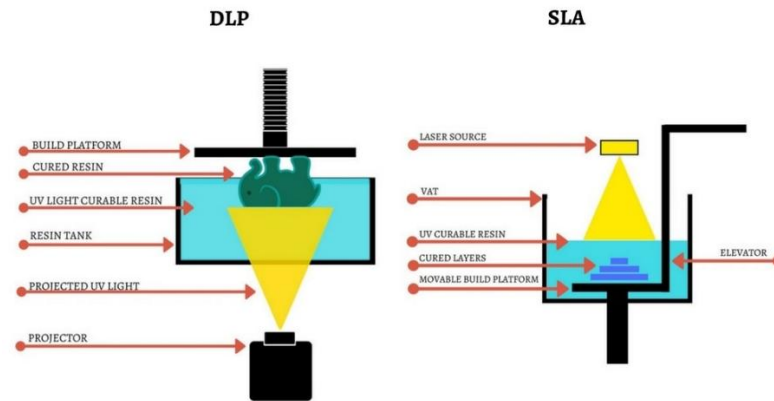
Η SLA είναι μέθοδος 3D εκτύπωσης όπου υγρή φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη στερεοποιείται στρώση-στρώση με φως (SLA) ή UV λέιζερ (DLP), σχηματίζοντας το αντικείμενο απευθείας από το CAD μοντέλο. Η σκλήρυνση μπορεί να γίνεται είτε με σάρωση λέιζερ, δηλαδή, έκθεση σημείο-προς-σημείο είτε με προβολή εικόνας, δηλαδή με μεθόδους που πολυμερίζουν ολόκληρη τη στρώση. Η SLA συναντάται τόσο σε διατάξεις top-down όσο και bottom-up. Απαιτούνται συνήθως υποστηρίγματα για προεξοχές της γεωμετρίας του αντικειμένου και τελική επεξεργασία (post-cure) για την πλήρη σταθεροποίηση του εκτυπωμένου προϊόντος. Η συγκεκριμένη μέθοδος ξεχωρίζει για την υψηλή διαστατική ακρίβεια και τη λεία επιφάνεια που προσφέρει [28], [37], [38].

Όπως προαναφέρθηκε, ιστορικά, η SLA είναι από τις πρώτες εμπορικές τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής και συνέβαλε καθοριστικά στο πέρασμα από την κλασική ταχεία παραγωγή πρωτοτύπων σε στοχευμένες βιομηχανικές χρήσεις. Στη συνέχεια εξελίχθηκε σε επιλογή για κλάδους με υψηλές απαιτήσεις λεπτομέρειας όπως οδοντιατρική, κοσμηματοποιία και μικρορευστονική, λόγω της ικανότητάς της να αποδίδει πολύ λεπτά χαρακτηριστικά και ομαλές επιφάνειες με μικρά πάχη στρώσης [26], [38], [39].

Εφόσον υπάρχει το STL αρχείο και έχει γίνει ο «τεμαχισμός» του αντικειμένου, η εκτύπωση είναι έτοιμη να ξεκινήσει, τα βήματα της διαδικασίας της μεθόδου, είτε DLP είτε SLA, έχουν ως εξής:

1. Η πλατφόρμα βύθισης τοποθετείται στο δοχείο ρητίνης και μηδενίζονται αποστάσεις πάχους στρώσης.
2. το UV-λέιζερ ή προβολέας «σκανάρει» την επιφάνεια της ρητίνης και πολυμερίζει την πρώτη στρώση σημειακά ή ολόκληρη την εικόνα.

3. Η πλατφόρμα μετακινείται κατά ένα πάχος στρώσης και η επιφάνεια ανανεώνεται με λεπτό φιλμ ρητίνης.
  4. επαναλαμβάνεται ο κύκλος των βημάτων 3 και 4 μέχρι να ολοκληρωθεί η γεωμετρία του τεμαχίου.
  5. Έπειτα ακολουθεί απομάκρυνση του κομματιού από την πλατφόρμα, πλύσιμο, συνήθως σε αλκοόλη, για να φύγει η αδρανής ρητίνη και αφαίρεση στηρίξεων.
- Η διαδικασία αυτή παραμένει περίπου ίδια είτε η εκτύπωση γίνει top-down είτε bottom-up [38], [39].



Σχήμα 1. 8 Παράδειγμα εκτύπωσης DPL και SLA [40].

Η SLA είναι από τις πιο ακριβείς μεθόδους σε συγκρίσεις με τις υπόλοιπες φυσικά οι τιμές ακρίβειας ποικίλλουν με τα υλικά και τις ρυθμίσεις. Παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα του αποτελέσματος είναι το πάχος στρώσης, η ταχύτητα σάρωσης και η δόση φωτός ή UV λείζερ.

### Material Jetting

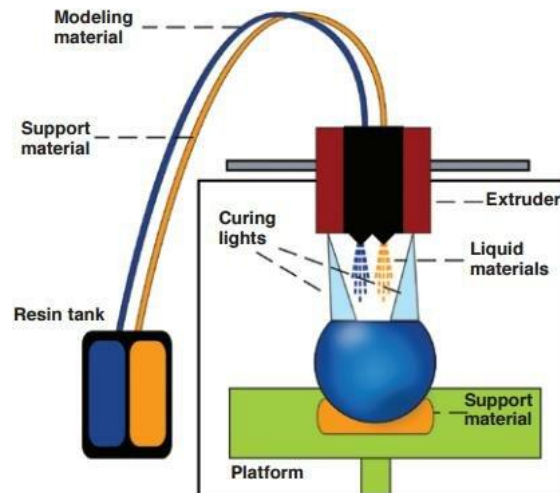
Η μέθοδος Material Jetting βασίζεται στην απόθεση υλικού σε μορφή μικροσκοπικών σταγονιδίων, με τρόπο παρόμοιο με την εκτύπωση inkjet. Οι σταγόνες εκτοξεύονται από κεφαλές εκτύπωσης σε προκαθορισμένα σημεία και στερεοποιούνται αμέσως, είτε με ψύξη, στην περίπτωση κεριών ή θερμοπλαστικών υλικών, είτε με φωτοπολυμερισμό μέσω υπεριώδους ακτινοβολίας, στην περίπτωση φωτοπολυμερών [28]. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται στρώση-στρώση μέχρι να δημιουργηθεί το τελικό τρισδιάστατο αντικείμενο.

Η τεχνολογία χαρακτηρίζεται από υψηλή ακρίβεια διαστάσεων, λεία επιφάνεια και δυνατότητα εκτύπωσης με διαφορετικά υλικά. Αυτό δίνει τη δυνατότητα παραγωγής αντικειμένων που συνδυάζουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες στο ίδιο κομμάτι όπως ελαστικά και άκαμπτα τμήματα. Τυπικά, τα πάχη στρώσεων μπορούν να φτάσουν έως και τα 16  $\mu\text{m}$ , προσφέροντας πολύ λεπτομερή αποτελέσματα [28], [41].

Η βασική διαδικασία του Material Jetting μπορεί να περιγραφεί συνοπτικά ως εξής:

1. Το αρχικό μοντέλο μετατρέπεται σε ψηφιακό αρχείο (συνήθως STL) και «τεμαχίζεται» σε λεπτές στρώσεις.
2. Το μηχάνημα εκτοξεύει υλικό σε μορφή σταγονιδίων από τις κεφαλές εκτύπωσης, ακολουθώντας το σχέδιο κάθε στρώσης.
3. Αμέσως μετά την απόθεση, γίνεται σκλήρυνση του υλικού μέσω UV φωτός.
4. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται στρώση-στρώση μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο.

Στο τέλος, αφαιρείται το υποστηρικτικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκτύπωση για να στηρίξει τα πιο σύνθετα σχήματα [41], [42].



Σχήμα 1. 9: Παράδειγμα μεθόδου material jetting [43].

Η μέθοδος MJ χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη λεπτομέρεια, όπως πρωτότυπα υψηλής ακρίβειας, ιατρικά και οδοντιατρικά μοντέλα, καλούπια για χυτεύσεις και εξαρτήματα παρουσίασης. Ωστόσο, παρουσιάζει και περιορισμούς, ο χρόνος εκτύπωσης είναι συνήθως μεγάλος λόγω του μικρού πάχους στρώσεων, το κόστος εξοπλισμού και υλικών είναι υψηλό, ενώ οι μηχανικές ιδιότητες όπως αντοχή σε καταπόνηση ή μακροχρόνια σταθερότητα είναι συχνά χαμηλότερες σε σχέση με άλλες μεθόδους όπως το SLS ή το FDM [28], [41], [42], [44].

### 1.5.3. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί σε μηχανολογικές εφαρμογές

Η αξιοποίηση προηγμένων μεθόδων και σύγχρονων τεχνικών κατασκευής όπως είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση, έχει ανοίξει νέους δρόμους στις μηχανολογικές εφαρμογές. Τα πλεονεκτήματα αφορούν κυρίως την ευελιξία στον σχεδιασμό, την ταχύτητα κατασκευής και τη δυνατότητα παραγωγής πολύπλοκων γεωμετριών που δύσκολα θα μπορούσαν να υλοποιηθούν με τις παραδοσιακές μεθόδους. Επιπλέον, μειώνεται η ανάγκη για πολλά στάδια κατασκευής, γεγονός το οποίο εκτός από χρόνο, εξοικονομεί και κόστος, ενώ ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα χρήσης μιας μεγάλης γκάμας υλικών. Στον χώρο της μηχανολογίας αυτό μεταφράζεται σε ελαφρύτερα εξαρτήματα, ενσωμάτωση πολλαπλών λειτουργιών σε ένα μόνο κομμάτι και προσαρμογή της κατασκευής στις ειδικές απαιτήσεις κάθε έργου.

Ωστόσο, η εφαρμογή των μεθόδων αυτών δεν έρχεται χωρίς περιορισμούς. Αρχικά, η ποιότητα και η ακρίβεια των κατασκευών εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους της διαδικασίας, κάτι που απαιτεί συνεχή έλεγχο και βελτιστοποίηση. Επίσης, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων δομών ενδέχεται να παρουσιάζουν ανομοιομορφίες, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τη χρήση τους σε κρίσιμα μηχανολογικά συστήματα όπου απαιτείται υψηλή αντοχή και αξιοπιστία. Σημαντικό ζήτημα αποτελεί και το κόστος των υλικών ή του εξοπλισμού, το οποίο σε ορισμένες περιπτώσεις παραμένει υψηλό σε σύγκριση με τις καθιερωμένες τεχνικές. Τέλος, υπάρχει περιορισμός στο μέγεθος των αντικειμένων που μπορούν να παραχθούν, ανάλογα με τις διαστάσεις του διαθέσιμου εξοπλισμού.

Στην αεροναυπηγική, για παράδειγμα, η NASA έχει αξιοποιήσει την τεχνολογία Fused Deposition Modeling (FDM) για την παραγωγή εξαρτημάτων στο ρόβερ που στάλθηκε στον Άρη. Τα θερμοπλαστικά υψηλής αντοχής που χρησιμοποιούνται σε αυτήν τη μέθοδο

καθιστούν τα εξαρτήματα ελαφρά αλλά αρκετά ανθεκτικά για ακραίες συνθήκες [45]. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, εταιρείες όπως η Ducati χρησιμοποιούν FDM για την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων, μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο εισαγωγής νέων προϊόντων στην αγορά [45]. Στον ακαδημαϊκό χώρο, η χρήση 3D εκτύπωσης σε έργα έρευνας και εκπαίδευσης δίνει τη δυνατότητα σε φοιτητές να αναπτύσσουν και να δοκιμάζουν πρωτότυπες ιδέες με χαμηλό κόστος, ενώ ταυτόχρονα ενισχύει τη δημιουργικότητα και την πρακτική κατανόηση μηχανολογικών αρχών [46].

Ταυτόχρονα, δεν λείπουν οι περιορισμοί. Για παράδειγμα, σε ορισμένα έργα φοιτητών διαπιστώθηκε ότι εξαρτήματα από ABS παρουσίασαν θερμικές αστοχίες λόγω υποτίμησης της αντοχής στην υψηλή θερμοκρασία. Επιπλέον, σε τεχνολογίες όπως η στερεολιθογραφία (SLA) απαιτείται υψηλό κόστος αρχικού εξοπλισμού και υλικών, ενώ σε μεθόδους όπως το Selective Laser Sintering (SLS) χρειάζεται εκτενής μετακατεργασία για να επιτευχθεί η επιθυμητή επιφάνεια και ακρίβεια [46], [47].

Συνολικά, τα πλεονεκτήματα υπερτερούν στις εφαρμογές όπου ζητούμενο είναι η καινοτομία στον σχεδιασμό, η μείωση βάρους ή η εξατομίκευση εξαρτημάτων, ενώ οι περιορισμοί υπενθυμίζουν ότι απαιτείται προσεκτική επιλογή της μεθόδου ανάλογα με τις ανάγκες κάθε μηχανολογικής εφαρμογής.

#### **1.5.4. Παραδείγματα εφαρμογών σε περιστροφικά εξαρτήματα**

Η χρήση της προσθετικής κατασκευής σε περιστροφικά εξαρτήματα αποτελεί πεδίο με ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς συνδυάζει απαιτήσεις υψηλής μηχανικής αντοχής με την ανάγκη για γεωμετρική ακρίβεια και μείωση βάρους.

Πριν αναφερθούν συγκεκριμένα παραδείγματα είναι άξιο να σημειωθεί πως ένα σημαντικό πρόβλημα που εμφανίζεται κατά την εκτύπωση λεπτότοιχων περιστροφικών εξαρτημάτων είναι το “stair-stepping effect”, δηλαδή η δημιουργία βαθμίδων στις επιφάνειες λόγω της στρωματικής διαδικασίας εκτύπωσης. Για την αντιμετώπιση αυτού, ο Liu (2024) πρότεινε τον σχεδιασμό ενός καινοτόμου 3D printer με περιστρεφόμενη θερμαινόμενη πλατφόρμα. Ο εκτυπωτής αυτός διαθέτει δυνατότητα κίνησης της κεφαλής στις τρεις κλασικές διευθύνσεις (X, Y, Z), ενώ ταυτόχρονα η επιφάνεια εκτύπωσης περιστρέφεται. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται σημαντικά η ανομοιομορφία στην απόθεση υλικού και βελτιώνεται η ακρίβεια σε λεπτότοιχα περιστροφικά τμήματα, όπως δίσκοι ή κυλινδρικά περιβλήματα [48].

Η μελέτη των Subramani et al. (2024) εξέτασε τη χρήση ινών άνθρακα ενισχυμένου PEEK (CF-PEEK) για την κατασκευή πτερωτών αντλιών. Μέσω βελτιστοποίησης παραμέτρων, όπως πυκνότητα πλήρωσης (infill) 70%, πάχος στρώσης 0,15 mm και θερμοκρασία εξώθησης 445 °C, επιτεύχθηκαν υψηλές μηχανικές αντοχές και βελτιωμένα χαρακτηριστικά κόπωσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι παραγόμενες πτερωτές παρουσίασαν αντοχή σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής και αυξημένη αξιοπιστία σε συνθήκες έντονης μηχανικής καταπόνησης [49].

Σε επίπεδο ευρύτερων εφαρμογών, η εργασία του Kiljunen (2022) έδειξε ότι η προσθετική κατασκευή σε περιστροφικά μηχανήματα, όπως στροβίλους, αντλίες και ηλεκτρικούς κινητήρες, μπορεί να επιφέρει βελτίωση απόδοσης μέσω νέων γεωμετριών, όπως εσωτερικά κανάλια ψύξης. Στους στροβίλους, π.χ., η δυνατότητα δημιουργίας εσωτερικών αγωγών ψύξης βελτιώνει σημαντικά την απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες. Στις αντλίες, η AM έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή κλειστών πτερωτών με πολύπλοκη γεωμετρία, ενώ στους ηλεκτροκινητήρες έχει εφαρμοστεί σε νέους τύπους μαγνητών με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες [50].



## 2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

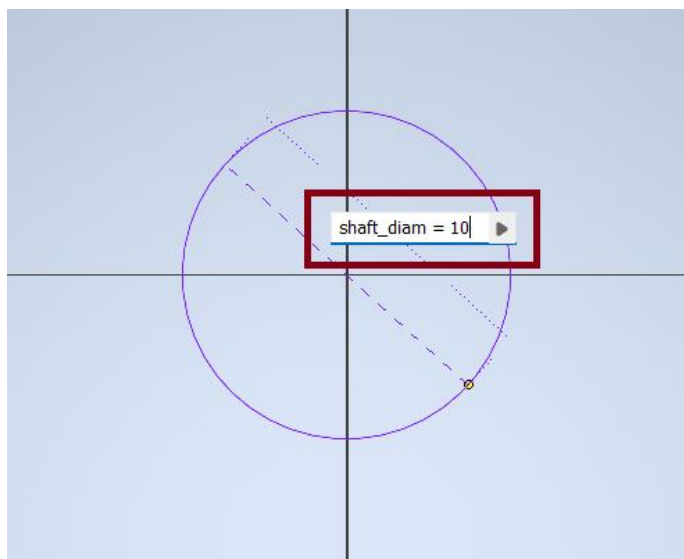
### 2.1. Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε ο σχεδιασμός, η παραμετροποίηση και ο αυτοματισμός της μοντελοποίησης των περιστροφικών εξαρτημάτων που αναλύονται παρακάτω, με αξιοποίηση συνδυαστικά των εργαλείων Autodesk Inventor και iLogic. Η προσέγγιση οργανώθηκε ως εξής: το γεωμετρικό μοντέλο αναπτύχθηκε στο Autodesk Inventor, ενώ οι κανόνες σχεδίασης και η εσωτερική λογική συμπεριφοράς του μοντέλου ενσωματώθηκαν με iLogic. Επίσης το User Interface (UI) διαμορφώθηκε σε πρώτο στάδιο στο excel και έπειτα έγινε χρήση του iLogicForms, ώστε η μεταβολή των παραμέτρων να γίνεται γρηγορότερα, πιο κατανοητά και με χρήση ενός μόνο αρχείου.

### 2.2. Παράμετροι στο Inventor

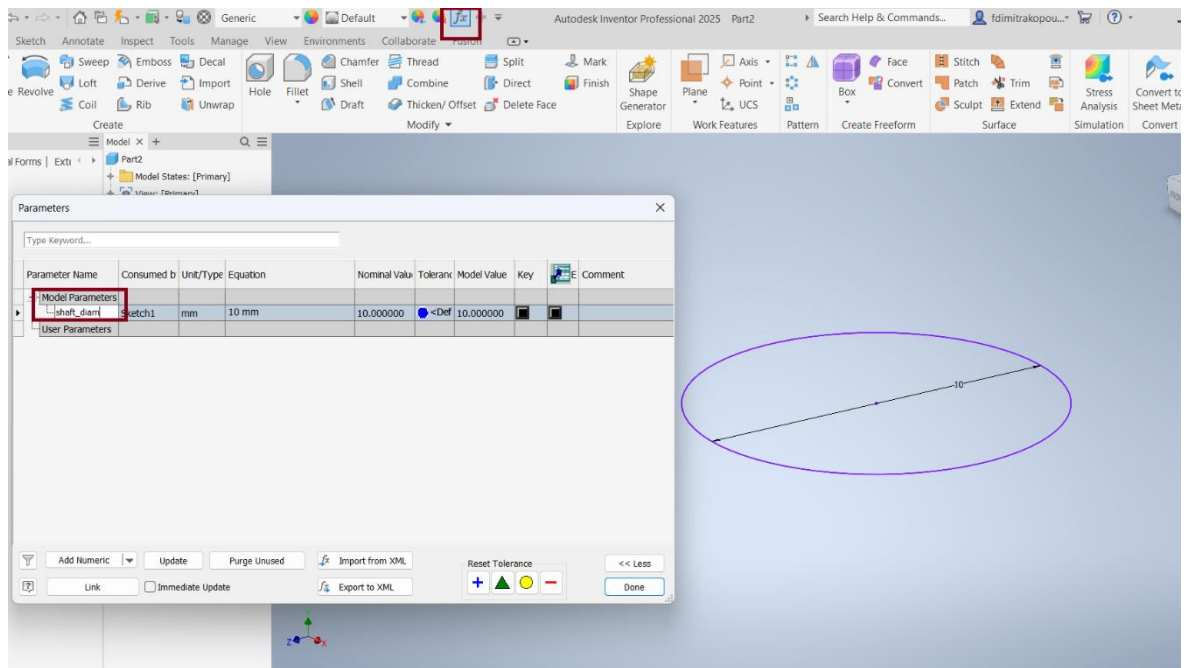
#### 2.2.1. Παράμετροι διαστάσεων του 3D μοντέλου

Κατά τη σχεδίαση ενός 3D μοντέλου στο Autodesk Inventor, κάθε εκχωρούμενη διάσταση αποθηκεύεται ως παράμετρος με προεπιλεγμένη ονοματοδοσία τύπου d1, για την πρώτη διάσταση, d2, για τη δεύτερη, d3, κ.ο.κ. Σε μοντέλα με πολλές παραμέτρους, ιδίως όταν προβλέπονται μεταγενέστερες τροποποιήσεις, η ονοματοδοσία αυτή δεν είναι λειτουργική, καθώς δεν είναι σαφές ποιο γεωμετρικό χαρακτηριστικό ελέγχει κάθε παράμετρος. Για τον λόγο αυτό, οι παράμετροι μετονομάστηκαν σε περιγραφικές ονομασίες, που αντανακλούν το αντίστοιχο χαρακτηριστικό. Αυτή η κατηγορία παραμέτρων ονομάζεται Model parameters και μπορούν να αλλάξουν, είτε κατευθείαν στη σχεδίαση, είτε αργότερα από το εικονίδιο parameters όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 και στο σχήμα 2.2



Σχήμα 2. 1 Ονομασία παραμέτρου κατά τη σχεδίαση

Η πρακτική μετονομασίας των παραμέτρων τη στιγμή της εισαγωγής της διάστασης είναι η πλέον αποτελεσματική. Το όνομα αποδίδεται άμεσα και τεκμηριωμένα, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα σφάλματος ή σύγχυσης κατά τον μεταγενέστερο εντοπισμό τους από το παράθυρο Parameters (όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2). Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγονται λανθασμένες αντιστοιχίσεις και επιταχύνεται η μετέπειτα παραμετροποίηση.



Σχήμα 2. 2 Ονομασία παραμέτρου από το εικονίδιο Parameters

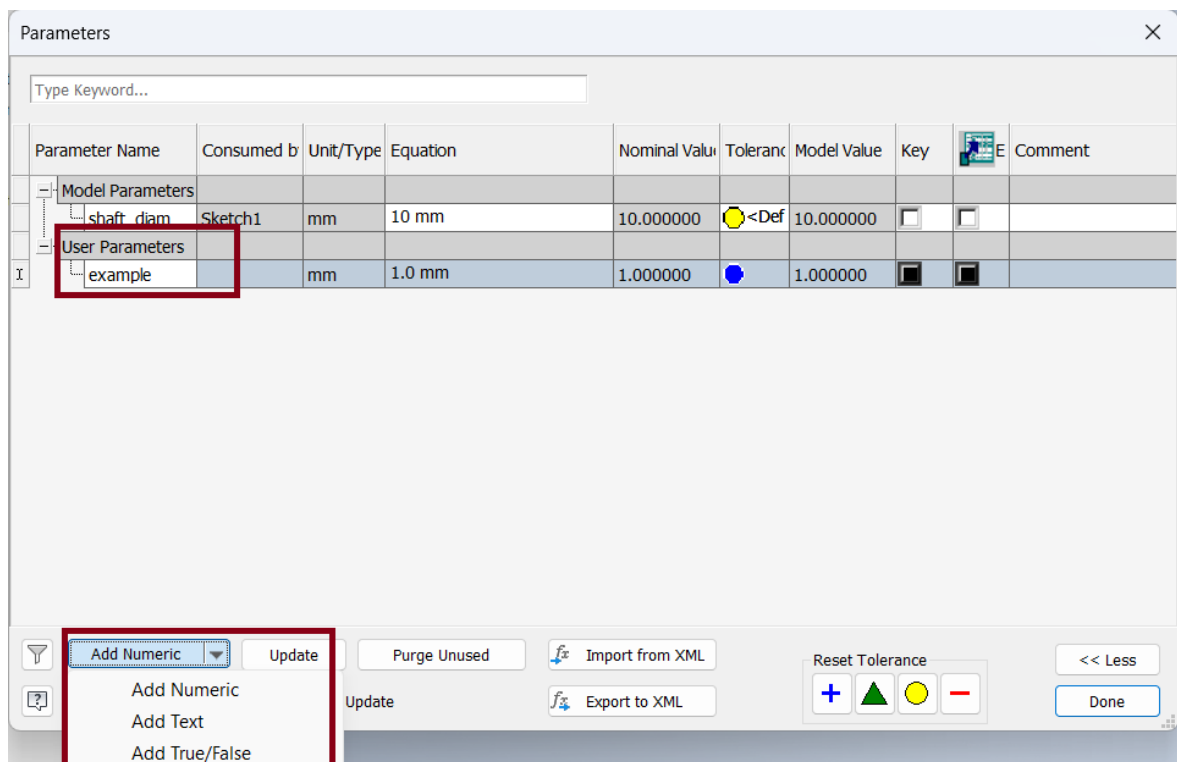
### 2.2.2. Παράμετροι που εισάγονται μετά τη σχεδίαση

Η δεύτερη κατηγορία αφορά τις παραμέτρους που εισάγονται μετά τη γεωμετρική σχεδίαση και ονομάζονται User Parameters. Πρόκειται για βοηθητικές μεταβλητές που δημιουργούνται από το παράθυρο Parameters (όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.3](#)) και μπορούν να είναι τριών τύπων:

- αριθμητικές (Numeric), με ή χωρίς μονάδες, κατάλληλες για διαστάσεις και πλήθη,
- λογικές (Boolean), με τιμές TRUE/FALSE, ιδανικές για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση εξαρτημένων σχέσεων (π.χ. τα manual flags για χειροκίνητη τιμή) και
- κειμένου (Text ή String), χρήσιμες για ετικέτες ή κωδικούς που βελτιώνουν την τεκμηρίωση.

Ο σκοπός της εισαγωγής των παραμέτρων αυτών, είναι αφενός να διευκολύνουν την ορθή εκχώρηση τιμών μέσω του UI, αφετέρου να βοηθήσουν στην υλοποίηση των περιορισμών.





Σχήμα 2. 3 Προσθήκη παραμέτρων στο user parameter

Για την καλύτερη κατανόηση των παραμέτρων, που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα, δημιουργήθηκε ο πίνακας 2.1.

Παράμετροι	
Model parameters	User parameters
➤ Ανεξάρτητες παράμετροι	➤ old (numeric)
➤ Εξαρτημένες παράμετροι	➤ user (numeric)
	➤ manual (bool)

Πίνακας 2. 1 Πίνακας κατανόησης παραμέτρων

Παρόλο που η ανάλυση αυτών των παραμέτρων γίνεται αναλυτικά στη συνέχεια του κειμένου, συνοπτικά η χρήση τους έχει ως εξής:

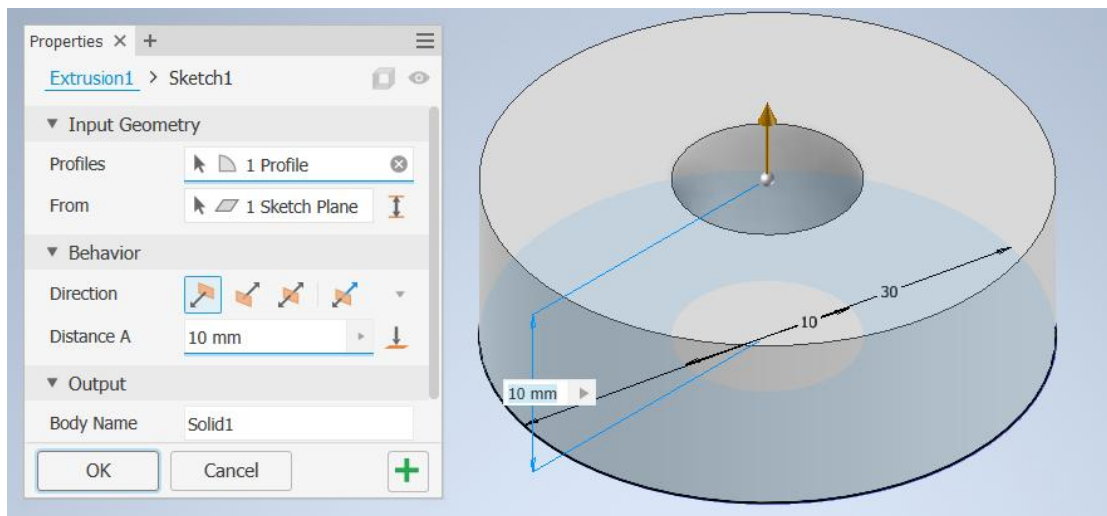
- Ανεξάρτητες: δεν εξαρτώνται από καμία άλλη παράμετρο
- Εξαρτημένες: εξαρτώνται από άλλες παραμέτρους με μαθηματικές σχέσεις
- Οι λέξεις «old», «user» και «manual», δεν είναι τίποτα άλλο από απλές ονομασίες που δηλώνουν τη χρήση της κάθε παραμέτρου τύπου user

## 2.3. Τρόπος σχεδιασμού και ανάλυση παραμέτρων

### 2.3.1. Στάτορας

Η μελέτη του σχεδιασμού του στάτορα χωρίζεται σε τέσσερα στάδια και είναι σημαντική για την κατανόηση των παραμέτρων, που χρησιμοποιήθηκαν στο σχέδιο αλλά και για τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάστηκε το UI, το οποίο αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο. Στη διαδικασία σχεδιασμού εκχωρούνται μόνο οι Model parameters και συγκεκριμένα, αρχικά, ορίζονται όλες ως ανεξάρτητες.

Σε πρώτο στάδιο δημιουργήθηκε η βάση του στάτορα, πιο συγκεκριμένα, ο κύλινδρος, στον οποίο θα σχεδιαστούν τα πηνία και οι οπές των μαγνητών.

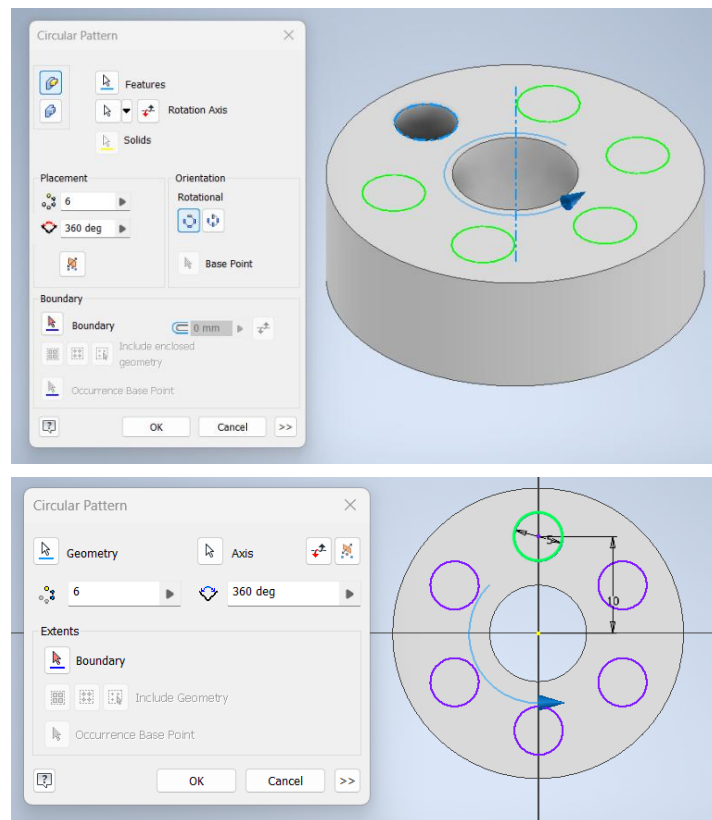


Σχήμα 2. 4: Βάση του στάτορα

Εισάγονται οι διαστάσεις της μεγάλης και της μικρής διαμέτρου του κυλίνδρου που φαίνεται στην εικόνα 1.7, καθώς και το ύψος του. Προκειμένου να είναι εφικτή και βιώσιμη η διαδικασία κατασκευής του UI και η τοποθέτηση των περιορισμών, οι παράμετροι των διαστάσεων αυτών ονομάστηκαν ως εξής

1. *shaft\_diam*: η παράμετρος για την διάμετρο από την οποία πρόκειται να περάσει ο άξονας (μικρή διάμετρος).
2. *total\_diam*: Η συνολική διάμετρος του στάτορα (χωρίς τις στηρίξεις πηνίων).
3. *stator\_height*: το ύψος του στάτορα.

Στο επόμενο στάδιο σχεδιάστηκαν οι οπές των μαγνητών. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, προκειμένου να μπορεί να μεταβληθεί χωρίς επιπλοκές ο αριθμός των οπών των μαγνητών ή οποιοδήποτε χαρακτηριστικού που θα χρησιμοποιηθεί σε εντολή κυκλικού μοτίβου (circular pattern), πρέπει στην εντολή να χρησιμοποιηθεί το ίδιο το χαρακτηριστικό (π.χ. οπή) και όχι το σχέδιο του, παρόλο που κάτι τέτοιο θα ήταν χρήσιμο σε περιπτώσεις που η παράμετρος θα έμενε σταθερή. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 2.5

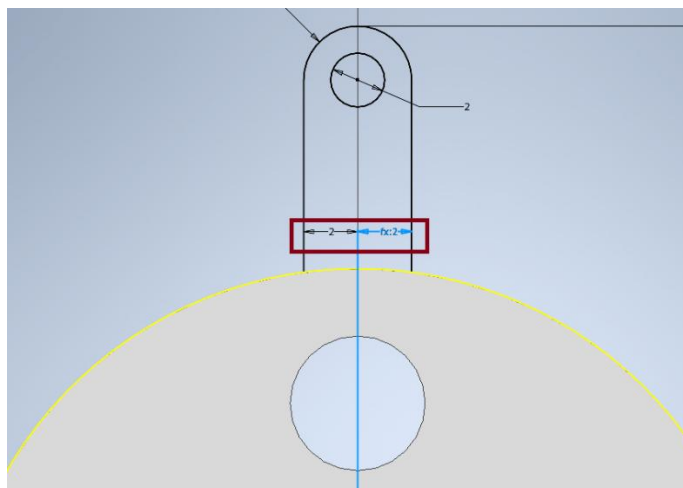


Σχήμα 2. 5 Αναπαράσταση κατάλληλης (πάνω) και μη κατάλληλης χρήσης της εντολής *circular pattern*.

Έτσι, οι παράμετροι που εισήχθησαν στο σχέδιο μετά το δεύτερο στάδιο είναι οι εξής:

4. *magnet\_width*: η διάμετρος των οπών των μαγνητών.
5. *magnet\_dist\_c*: η απόσταση του κέντρου των οπών των μαγνητών από το κέντρο της διαμέτρου του άξονα (*shaft\_diam*).
6. *magnet\_angle*: η γωνία που σχηματίζουν, το κέντρο των οπών των μαγνητών με τον οριζόντιο άξονα
7. *magnet\_depth* : το βάθος των οπών μαγνητών
8. *numb\_magnets*: αριθμός των οπών των μαγνητών

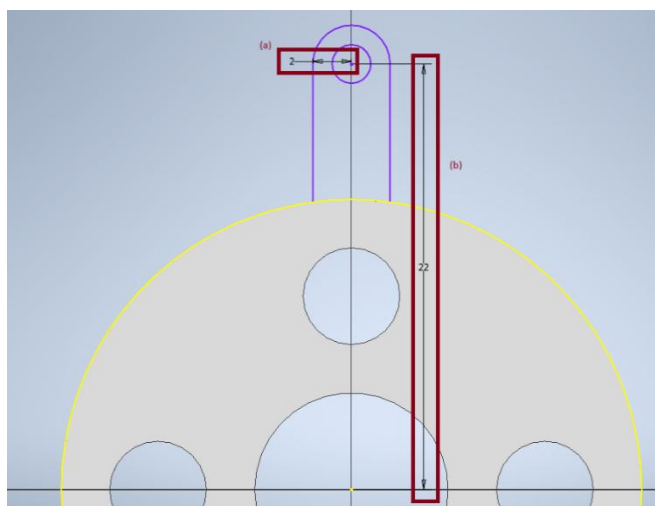
Έπειτα σχεδιάστηκαν οι στηρίξεις των πηνίων, μια διαδικασία σχετικά μεγαλύτερης πολυπλοκότητας, καθώς εμπλέκονται περισσότερες παράμετροι. Αρχικά είναι προφανές ότι χρησιμοποιήθηκε η εντολή *circular pattern* για την διαμόρφωση των στηριγμάτων γύρω από την εξωτερική διάμετρο του στάτορα, επομένως ισχύει ο κανόνας που προαναφέρθηκε (σχήμα 2.5). Προκειμένου το στήριγμα του πηνίου να είναι συμμετρικό ως προς τον κατακόρυφο άξονα, για όποια τιμή πάρει το πλάτος (του στηρίγματος), ορίστηκε πρώτα η διάσταση της άκρης του στηρίγματος με τον κατακόρυφο άξονα ενώ η άλλη μισή ορίστηκε να είναι ίση με αυτή. Έτσι η παράμετρος *coil\_supp\_width* εκφράζει πρακτικά το μισό πλάτος.



Σχήμα 2. 6: Αναπαράσταση διαστάσεων για συμμετρικό πλάτος στηρίγματος πηνίου

Επομένως οι νέες παράμετροι που επηρεάζουν τα στηρίγματα των πηνίων είναι οι εξής:

9. *coil\_supp\_width*: το πλάτος στηριγμάτων των πηνίων.
10. *coil\_length*: το μήκος των στηριγμάτων από το κέντρο της εσωτερικής διαμέτρου (*shaft\_diam*).
11. *coil\_fillet*: η καμπύλη στο επάνω μέρος των στηριγμάτων των πηνίων.
12. *coil\_supp\_thickness*: το πάχος των στηριγμάτων.
13. *numb\_coils*: ο αριθμός των στηριγμάτων.
14. *coil\_span\_angle*: το τόξο του κύκλου, στο οποίο απλώνεται το circular pattern των στηριγμάτων.
15. *inner\_coil\_supp\_width*: εσωτερική διάμετρος της οπής στο πάνω μέρος των στηριγμάτων των πηνίων.
16. *inner\_coil\_supp\_dist\_edge*: απόσταση του κέντρου του κύκλου της οπής στο επάνω μέρος των στηριγμάτων, από την πλάγια ακμή των στηριγμάτων.
17. *inner\_coil\_supp\_dist\_c*: απόσταση του κέντρου του κύκλου της οπής στο επάνω μέρος των στηριγμάτων, από το κέντρο.



Σχήμα 2. 7: Αναπαράσταση των παραμέτρων *inner\_coil\_supp\_dist\_edge* (a) και *inner\_coil\_supp\_dist\_c* (b)

Σε τελευταίο στάδιο σχεδιάστηκε η πατούρα τις οποίας οι παράμετροι είναι οι εξής:

18. *step\_diam*: η διάμετρος της πατούρας.
19. *step\_offset*: το πόσο προεξέχει η πατούρα.

Έτσι ολοκληρώνεται ο σχεδιασμός και το μοντέλο του στάτορα με συνολικά 19 παραμέτρους. Όλες οι παράμετροι που εκχωρούνται στη διαδικασία σχεδίασης ορίζονται ως ανεξάρτητες (πχ. *shaft\_diam* = 10 mm). Στο επόμενο υποκεφάλαιο αναλύεται πως μερικές από αυτές μετατρέπονται σε εξαρτημένες και γιατί.

### 2.3.2. Ρότορας

Η διαδικασία σχεδιασμού του ρότορα ήταν πιο απλή από αυτή του στάτορα, διότι δεν έχει πολύπλοκα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Ο σχεδιασμός χωρίζεται σε τρία στάδια, τα οποία είναι η δημιουργία του κύριου στερεού σώματος του ρότορα, το οποίο είναι ένας κυκλικός δίσκος, έπειτα η διαμόρφωση των οπών των μαγνητών και τέλος η πατούρα στο εσωτερικό της εσωτερικής διαμέτρου. Το κυκλικό μοτίβο χρησιμοποιήθηκε με ίδια λογική, με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στον σχεδιασμό του στάτορα. Οι παράμετροι έχουν ως εξής :

1. *shaft\_diam* : η διάμετρος από την οποία περνάει ο άξονας.
2. *total\_diam*: η συνολική διάμετρος του ρότορα.
3. *rotor\_height*: το ύψος του ρότορα.
4. *magnet\_width*: η διάμετρος των οπών των μαγνητών του ρότορα.
5. *magnet\_dist\_edge*: η απόσταση του κέντρου των οπών των μαγνητών από το κέντρο της διαμέτρου του άξονα (*shaft\_diam*).
6. *numb\_magnets*: αριθμός οπών μαγνητών.
7. *thread\_width*: διάμετρος οπών, στις οποίες εισέρχεται κοχλίας.
8. *thread\_dist\_edge*: απόσταση οπής κοχλίας από την άκρη.
9. *numb\_thread\_holes*: αριθμός οπών, στις οποίες εισέρχεται κοχλίας.
10. *step*: διάμετρος της πατούρας.
11. *bell\_bearing\_step*: πάχος της πατούρας για να ακουμπήσει το ρουλεμάν.

## 2.4. Κατασκευή του UI

Η επαφή του χρήστη με το UI ενός παραμετρικού 3D μοντέλου λειτουργεί ως γέφυρα ανάμεσα στη γεωμετρική πολυπλοκότητα και στον χρήστη. Στόχος της είναι να καταστήσει τις βασικές παραμέτρους του μοντέλου κατανοητές, ασφαλείς στη χρήση και εύκολα τροποποιήσιμες, μειώνοντας τα λάθη και επιταχύνοντας τον κύκλο σχεδίασης-επαλήθευσης. Με ένα προσεκτικά δομημένο UI, ο χρήστης μπορεί να ορίζει απαιτήσεις στις διαστάσεις του μοντέλου και να λαμβάνει άμεσα, συνεπή αποτελέσματα.

Πριν την ανάλυση του UI, είναι σημαντικό να σημειωθεί πως στα παρακάτω υποκεφάλαια αναλύεται μόνο ο στάτορας καθώς έχει μεγαλύτερη γεωμετρική πολυπλοκότητα και ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία για την τοποθέτηση περιορισμών αλλά και την δημιουργία του UI του ρότορα.

### 2.4.1. Εξαρτημένες παράμετροι και παράμετροι Boolean (με ονομασία «manual»)

Αναφέρθηκε προηγουμένως πως κατά τη διαδικασία σχεδίασης όλες οι παράμετροι (Model parameters) ορίζονται αρχικά σαν ανεξάρτητες. Σε αυτή την υποενότητα αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο δημιουργήθηκαν αλλά και ο λόγος ύπαρξής τους. Στο 3D μοντέλο εισήχθησαν εξαρτημένες παράμετροι ώστε να παρέχονται ενδεικτικές, προκαθορισμένες τιμές. Με τον τρόπο αυτό ο χρήστης διαθέτει ένα σαφές σημείο αναφοράς για την προσαρμογή του σχεδίου, ιδίως όταν δεν υπάρχουν εκ των προτέρων συγκεκριμένες διαστάσεις. Παράλληλα, η χρήση εξαρτημένων τιμών μειώνει σημαντικά την πιθανότητα παραβίασης των περιορισμών. Με βάση αυτά τα δύο κριτήρια επιλέχθηκαν οι εξής παράμετροι για να μετατραπούν σε εξαρτημένες:

1.  $total\_diam = 3 * shaft\_diam$
2.  $magnet\_dist\_c = shaft\_diam$
3.  $magnet\_depth = stator\_height$

4.  $inner\_coil\_supp\_dist\_c = userCoilLength - \left(\frac{inner\_coil\_supp\_width}{2}\right) - \left(\frac{coil\_supp\_width}{2}\right)$
5.  $inner\_coil\_supp\_dist\_edge = coil\_supp\_width$
6.  $coil\_fillet = coil\_supp\_width$

Οι σχέσεις διαμορφώθηκαν ενδεικτικά, ώστε ο νέος χρήστης να διαθέτει σαφές σημείο αναφοράς, ενώ παράλληλα προλαμβάνονται πολλά γεωμετρικά σφάλματα που ελέγχονται από τους περιορισμούς του σχεδίου, οι οποίοι αναλύονται στη συνέχεια.

Ωστόσο, ενδέχεται ο χρήστης να επιθυμεί να εκχωρήσει διαφορετική τιμή σε μια διάσταση από την προκαθορισμένη εξαρτημένη τιμή. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητο να υιοθετηθεί μια λύση, που διατηρεί τα πλεονεκτήματα των εξαρτημένων παραμέτρων (καθοδήγηση και συμμόρφωση με τους περιορισμούς), επιτρέποντας ταυτόχρονα την ευέλικτη τροποποίησή τους, όταν αυτό απαιτείται.

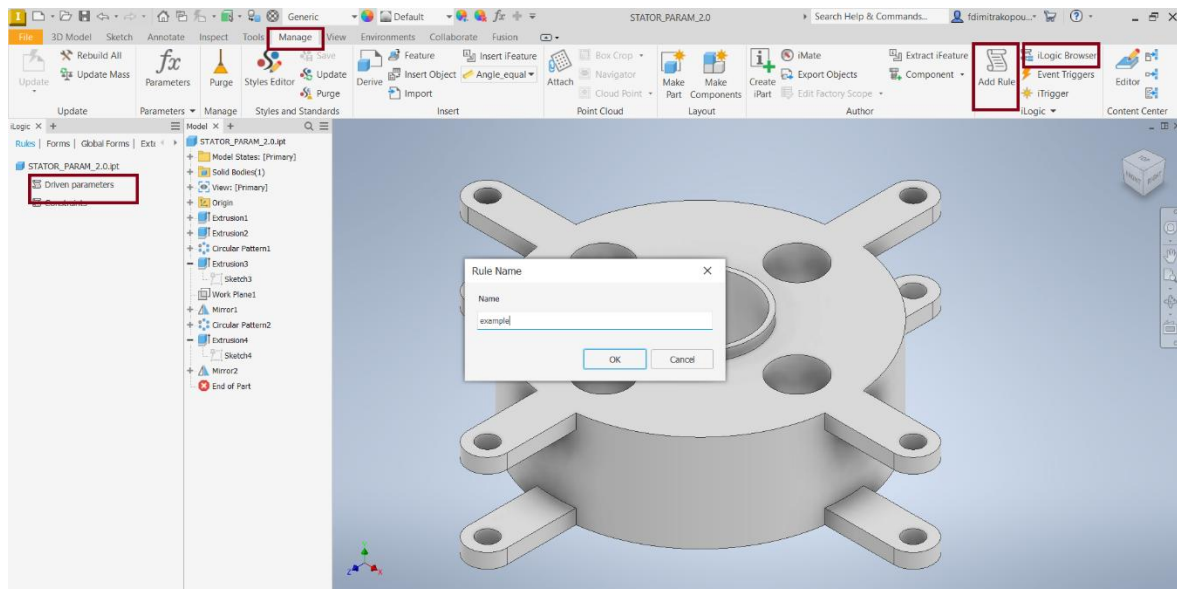
Για την αντιμετώπιση του παραπάνω ζητήματος προστέθηκαν στο User parameters (πίνακας 2.1 και σχήμα 2.3) έξι βοηθητικές λογικές μεταβλητές (Boolean):

1. *manualTotalDiam*
2. *manualMagnetDistC*
3. *manualMagnetDepth*
4. *manualInnerCoilSuppDistC*
5. *manualInnerCoilSuppDistE*
6. *manualCoilFillet*

Ο ρόλος τους είναι να καθορίζουν αν μια παράμετρος παραμένει εξαρτημένη (δηλαδή καθορίζεται από τη σχέση της με άλλες μεταβλητές) ή αν επιτρέπεται να οριστεί χειροκίνητα από τον χρήστη. Συγκεκριμένα, όταν μία από τις παραπάνω μεταβλητές έχει τιμή «False», ενεργοποιείται η αντίστοιχη εξαρτημένη σχέση και η τιμή της παραμέτρου προκύπτει αυτόματα. Αντιθέτως, όταν λάβει τιμή «True», η εξάρτηση απενεργοποιείται και ο χρήστης δύναται να τροποποιήσει την παράμετρο κατά βούληση. Η εναλλαγή αυτή μεταξύ TRUE και FALSE πραγματοποιείται από το UI, το οποίο εξηγείται σε επόμενες ενότητες.

Στην περίπτωση που ο χρήστης έχει επιλέξει να βάλει μια τιμή χειροκίνητα, τότε αυτή η παράμετρος επιστρέφει στην αρχική ανεξάρτητη κατάσταση της και ελέγχεται από τους περιορισμούς που έχει το σχέδιο.

Η εισαγωγή των εξαρτημένων μεταβλητών στο πρόγραμμα γίνεται μέσω ενός κανόνα (iLogic rule) στον οποίο γράφεται κώδικας ο οποίος παρατίθεται στο (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α, 5.2). Ο κανόνας προστέθηκε πατώντας το εικονίδιο «Add rule», στο «Manage» tab, στο interface του inventor και ονομάστηκε «Driven parameters». Η πρόσβαση σε αυτόν τον κανόνα μετά την αρχικοποίηση του είναι δυνατή από το εικονίδιο «iLogic browser». Τα στάδια της διαδικασίας φαίνονται στο σχήμα 2.8.



Σχήμα 2. 8 Στάδια πρόσβασης σε iLogic rules

Για να είναι εφικτή η εναλλαγή μεταξύ «εξαρτημένης» και «χειροκίνητης» τιμής, είναι σκόπιμο όλες οι εξαρτημένες παράμετροι να ορίζονται μέσω iLogic rules και όχι ως εξισώσεις και μαθηματικές σχέσεις κατά το στάδιο της γεωμετρικής μοντελοποίησης. Αν μια παράμετρος έχει δηλωθεί ως εξαρτημένη εξαρχής μέσα στο σκίτσο, τότε απαιτείται η προσθήκη μίας επιπλέον αριθμητικής μεταβλητής που θα αποθηκεύει την επιθυμητή τιμή του χρήστη, όταν η αντίστοιχη μεταβλητή τύπου «manual» είναι «True», (αυτός είναι και ο λόγος που αρχικά ορίζονται ως ανεξάρτητες).

#### 2.4.2. Παράμετροι με ονομασία «user»

Κατά το στάδιο της γεωμετρικής μοντελοποίησης, ορισμένες παράμετροι διαμορφώθηκαν έτσι ώστε να διασφαλίζουν συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως η συμμετρία, οι απαιτούμενες αποστάσεις και η ορθή ευθυγράμμιση επιμέρους στοιχείων. Αυτές οι ειδικές περιπτώσεις παραμέτρων είναι οι εξής:

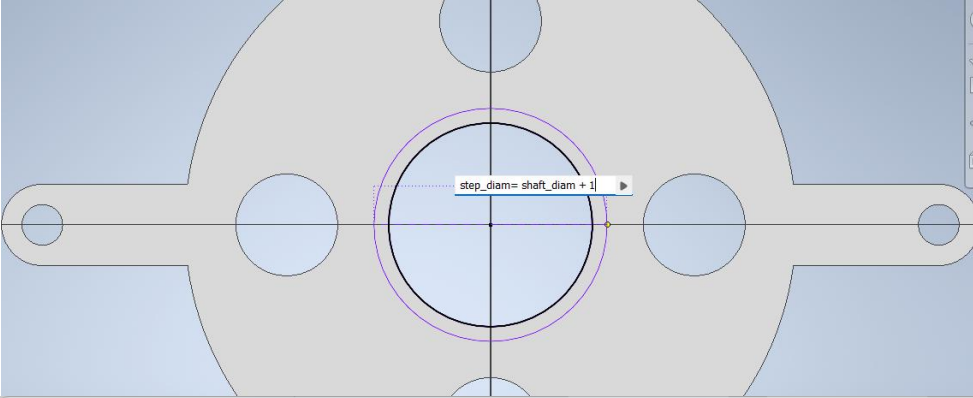
(α) Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, προκειμένου να είναι συμμετρικά τα στηρίγματα των πηνίων διαστασιοποιήθηκε πρώτα η μία πλευρά του κατακόρυφου άξονα ενώ η άλλη πλευρά ορίστηκε να είναι πάντα ίση με την αντίστοιχη μισή της (σχήμα 2.6). Έτσι η παράμετρος *coil\_supp\_width* ελέγχει και δείχνει το μισό πλάτος του στηρίγματος, επομένως η τιμή της παραμέτρου μπορεί να δημιουργήσει σύγχυση στον χρήστη. Για αυτό, στο User parameters (σχήμα 2.3 και πίνακας 2.1), έγινε εισαγωγή της αριθμητικής παραμέτρου *userCoilSuppWidth*. Στην παράμετρο αυτή ο χρήστης εκχωρεί (από το UI) το επιθυμητό συνολικό πλάτος των στηριγμάτων των πηνίων και μέσω της σχέσης:  $coil\_supp\_width = \frac{userCoilSuppWidth}{2}$ , λαμβάνει το επιθυμητό αποτέλεσμα χωρίς να υπάρξει μπέρδεμα.

Parameter Name	Consumed by	Unit/Type	Equation
numb_magnets	Circular Pattern1	ul	4 ul
d10	Circular Pattern1	deg	360 deg
coil_supp_width	d13, Sketch3	mm	userCoilSuppWidth / 2 ul
d13	Sketch3	mm	coil_supp_width
coil_length	Sketch3	mm	( total_diam / 2 ul ) + userCoilLength
coil_fillet	Sketch3	mm	2 mm
coil_supp_thickness	Extrusion3	mm	1.5 mm
d18	Extrusion3	deg	0.00 deg
d19	Work Plane1	mm	-stator_height / 2 ul
numb_coils	Circular Pattern2	ul	4 ul
coil_supp_span_angle	Circular Pattern2	deg	360 deg
step_diam	Sketch4	mm	shaft_diam + userStepDiam
d24	Sketch4	mm	shaft_diam
step_offset	Extrusion4	mm	1 mm
d26	Extrusion4	deg	0.00 deg
inner_coil_supp_width	Sketch3	mm	2 mm
inner_coil_supp_dist_e...	Sketch3	mm	2 mm
inner_coil_supp_dist_c	Sketch3	mm	( total_diam / 2 ul ) + userInnerCoilSuppDistC
User Parameters			
userStepDiam	step_diam	mm	1 mm
userCoilSuppWidth	coil_supp_width	mm	4 mm
manualTotalDiam		True/False	False
manualMagnetDepth		True/False	False
manualMagnetDistC		True/False	False
userCoilLength	coil_length	mm	9 mm
oldMagnetDistC		mm	10 mm
oldMagnetWidth		mm	5 mm
oldShaftDiam		mm	10 mm
olduserStepDiam		mm	1 mm
oldTotalDiam		mm	30 mm
oldNumbCoils		mm	4 mm
olduserCoilSuppWidth		mm	4 mm
userInnerCoilSuppDistC	inner_coil_supp_dist_c	mm	7 mm
manualCoilFillet		True/False	False

Σχήμα 2. 9: Εισαγωγή παραμέτρου userStepDiam

(β) Στην περίπτωση της πατούρας, το πρόβλημα ήταν πως η αύξηση της τιμής του *shaft\_diam* σε μεγαλύτερη διάμετρο από αυτή της πατούρας, προκαλούσε γεωμετρικό σφάλμα στο σχέδιο. Μια γρήγορη και αποτελεσματική λύση σε αυτό το ζήτημα ήταν να οριστεί η διάμετρος της πατούρας ως συνάρτηση του *shaft\_diam*. Αυτή η μέθοδος εφαρμόστηκε με τη σχέση:  $step\_diam = shaft\_diam + 1mm$ . Ωστόσο αυτή η σχέση δημιουργούσε εξάρτηση μεταξύ των δύο παραμέτρων. Αντί να εισαχθεί ακόμη μια λογική μεταβλητή με ονομασία «manual» στο User parameters, η οποία θα ενεργοποιούσε/ απενεργοποιούσε την συγκεκριμένη εξάρτηση, εισάχθηκε μια παράμετρος με ονομασία «user», η *userStepDiam*. Έτσι η σχέση έγινε:  $step\_diam = shaft\_diam + userStepDiam$ . Με αυτόν τον τρόπο, στο UI ο χρήστης ρυθμίζει μόνο την *userStepDiam* (δηλαδή το περιθώριο της πατούρας ως προς τον άξονα), εξασφαλίζοντας ότι αποφεύγονται γεωμετρικά σφάλματα (η πατούρα παραμένει πάντα μεγαλύτερη από τον άξονα).





The top part of the image shows a technical drawing of a mechanical part with a central circular feature. A dimension line indicates a diameter, with a tooltip showing the equation:  $step\_diam = shaft\_diam + 1$ .

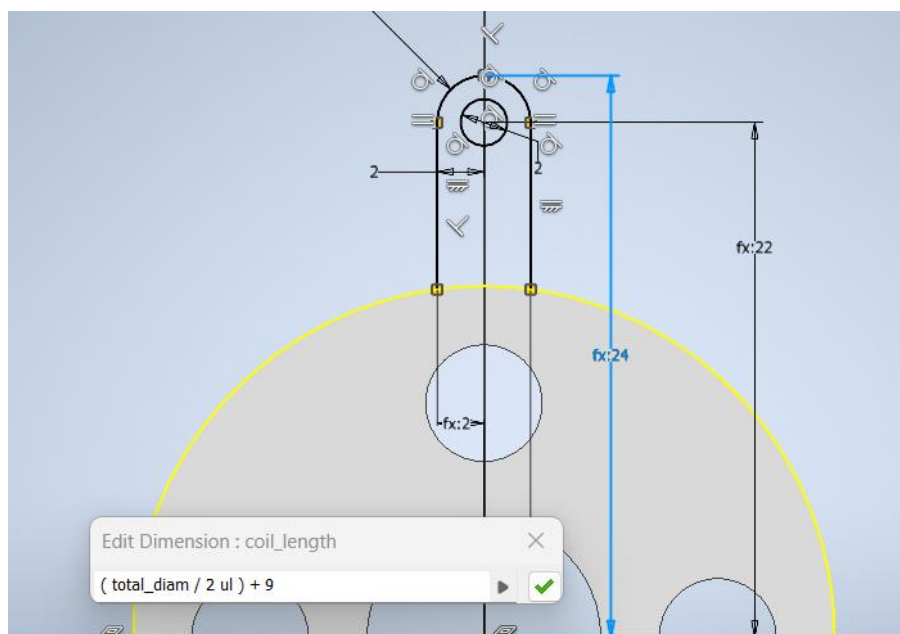
The bottom part of the image shows the 'Parameters' table in Inventor. The table has four columns: Parameter Name, Consumed by, Unit/Type, and Equation.

Parameter Name	Consumed by	Unit/Type	Equation
d10	Circular Pattern1	deg	360 deg
coil_supp_width	d13, Sketch3	mm	userCoilSuppWidth / 2 ul
d13	Sketch3	mm	coil_supp_width
coil_length	Sketch3	mm	( total_diam / 2 ul ) + userCoilLength
coil_fillet	Sketch3	mm	2 mm
coil_supp_thickness	Extrusion3	mm	1.5 mm
d18	Extrusion3	deg	0.00 deg
d19	Work Plane1	mm	-stator_height / 2 ul
numb_coils	Circular Pattern2	ul	4 ul
coil_supp_span_angle	Circular Pattern2	deg	360 deg
step_diam	Sketch4	mm	shaft_diam + userStepDiam
d24	Sketch4	mm	shaft_diam
step_offset	Extrusion4	mm	1 mm
d26	Extrusion4	deg	0.00 deg
inner_coil_supp_width	Sketch3	mm	2 mm
inner_coil_supp_dist_e...	Sketch3	mm	2 mm
inner_coil_supp_dist_c	Sketch3	mm	inner_coil_supp_width is consumed by Sketch3 / 2 ul ) + userInnerCoilSuppDistC
<b>User Parameters</b>			
userStepDiam	step_diam	mm	1 mm
userCoilSuppWidth	coil_supp_width	mm	4 mm
manualTotalDiam		True/False	False
manualMagnetDepth		True/False	False
manualMagnetDistC		True/False	False
userCoilLength	coil_length	mm	9 mm
oldMagnetDistC		mm	10 mm
oldMagnetWidth		mm	5 mm
oldShaftDiam		mm	10 mm
olduserStepDiam		mm	1 mm
oldTotalDiam		mm	30 mm
oldNumbCoils		mm	4 mm
olduserCoilSuppWidth		mm	4 mm
userInnerCoilSuppDistC	inner_coil_supp_dist_c	mm	7 mm
manualCoilFillet		True/False	False
manualInnerCoilSuppDi...		True/False	False
manualInnerCoilSuppDi...		True/False	False

Σχήμα 2. 10: Πάνω: αρχικός ορισμός της παραμέτρου  $step\_diam$ , κάτω: εισαγωγή  $userStepDiam$  στο παράθυρο «Parameters» του inventor

(γ) Η Τρίτη περίπτωση είναι όμοια με την προηγούμενη, όμως έχει να κάνει με το μήκος των στηριγμάτων των πηνίων. Προκειμένου τα στηρίγματα να ξεκινούν από την άκρη του στάτορα, ανεξάρτητα από την συνολική ακτίνα του στάτορα ( $\frac{total\_diam}{2}$ ), η παράμετρος  $coil\_length$  αρχικά ορίστηκε από τη σχέση  $coil\_length = \left(\frac{total\_diam}{2}\right) + 9mm$ . Έπειτα στο

User parameters εισήχθη η παράμετρος *userCoilLength* και η σχέση τροποποιήθηκε κατά τον γνωστό τρόπο:  $coil\_length = \left(\frac{total\_diam}{2}\right) + userCoilLength$ . Έτσι ο χρήστης ρυθμίζει μόνο τη παράμετρο *userCoilLength* από το UI, διασφαλίζοντας ότι το μήκος των στηριγμάτων ξεκινάει πάντα από το τέλος της ακτίνας του στάτορα.

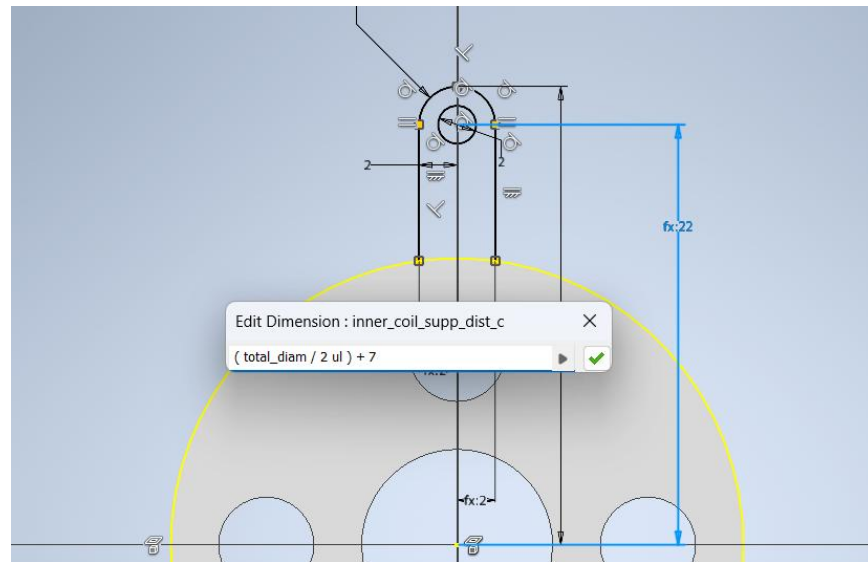


The top part of the image shows a CAD sketch of a mechanical component. A dimension line is highlighted in blue, indicating the length of a coil support. A dialog box titled "Edit Dimension : coil\_length" is open, showing the equation  $(total\_diam / 2) + 9$ . Below the sketch is a table listing parameters and their definitions.

Parameter Name	Consumed by	Unit/Type	Equation
magnet_dist_c	Sketch2	mm	10 mm
magnet_angle	Sketch2	deg	90 deg
magnet_depth	Extrusion2	mm	10 mm
d8	Extrusion2	deg	0.00 deg
numb_magnets	Circular Pattern1	ul	4 ul
d10	Circular Pattern1	deg	360 deg
coil_supp_width	d13, Sketch3	mm	userCoilSuppWidth / 2 ul
d13	Sketch3	mm	coil_supp_width
coil_length	Sketch3	mm	$(total\_diam / 2) + userCoilLength$
coil_nlet	Sketch3	mm	2 mm
coil_supp_thickness	Extrusion3	mm	1.5 mm
d18	Extrusion3	deg	0.00 deg
d19	Work Plane1	mm	-stator_height / 2 ul
numb_coils	Circular Pattern2	ul	4 ul
coil_supp_span_angle	Circular Pattern2	deg	360 deg
step_diam	Sketch4	mm	shaft_diam + userStepDiam
d24	Sketch4	mm	shaft_diam
step_offset	Extrusion4	mm	1 mm
d26	Extrusion4	deg	0.00 deg
inner_coil_supp_width	Sketch3	mm	2 mm
inner_coil_supp_dist_e...	Sketch3	mm	2 mm
inner_coil_supp_dist_c	Sketch3	mm	$(total\_diam / 2) + userInnerCoilSuppDistC$
<b>User Parameters</b>			
userStepDiam	step_diam	mm	1 mm
userCoilSuppWidth	coil_supp_width	mm	4 mm
manualTotalDiam		True/False	False
manualMagnetDepth		True/False	False
manualMagnetDistC		True/False	False
userCoilLength	coil_length	mm	9 mm
oldMagnetDistC		mm	10 mm
oldMagnetWidth		mm	5 mm
oldShaftDiam		mm	10 mm
olduserStepDiam		mm	1 mm
oldTotalDiam		mm	30 mm
oldNumbCoils		mm	4 mm

Σχήμα 2. 11: Πάνω: αρχικός ορισμός της παραμέτρου *coil\_length*, κάτω: εισαγωγή *userCoilLength* στο παράθυρο «Parameters» του inventor

(δ) Η τελευταία περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε παράμετρος με ονομασία «user» είναι η παράμετρος *inner\_coil\_supp\_dist\_c*. Πρόκειται για περίπου την ίδια κατάσταση με την προηγούμενη, με μόνη διαφορά ότι είναι για την απόσταση της οπής των στηριγμάτων των πηνίων. Αρχικά η παράμετρος ορίστηκε:  $inner\_coil\_supp\_dist\_c = \left(\frac{total\_diam}{2}\right) + 7mm$  και έπειτα τροποποιήθηκε με τη παράμετρο *userInnerCoilSuppDistC* ως εξής :  $inner\_coil\_supp\_dist\_c = \left(\frac{total\_diam}{2}\right) + userInnerCoilSuppDistC$ .



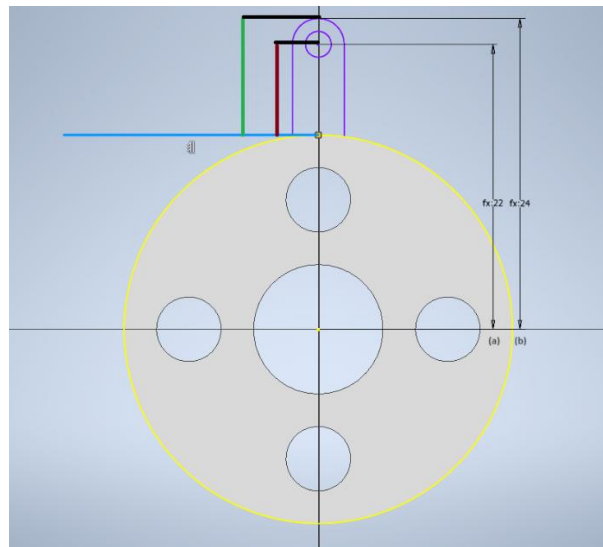
Parameter Name	Consumed by	Unit/Type	Equation
d13	Sketch3	mm	coil_supp_width
coil_length	Sketch3	mm	( total_diam / 2 ul ) + userCoilLength
coil_fillet	Sketch3	mm	2 mm
coil_supp_thickness	Extrusion3	mm	1.5 mm
d18	Extrusion3	deg	0.00 deg
d19	Work Plane1	mm	-stator_height / 2 ul
numb_coils	Circular Pattern2	ul	4 ul
coil_supp_span_angle	Circular Pattern2	deg	360 deg
step_diam	Sketch4	mm	shaft_diam + userStepDiam
d24	Sketch4	mm	shaft_diam
step_offset	Extrusion4	mm	1 mm
d26	Extrusion4	deg	0.00 deg
inner_coil_supp_width	Sketch3	mm	2 mm
inner_coil_supp_dist_e...	Sketch3	mm	2 mm
inner_coil_supp_dist_c	Sketch3	mm	( total_diam / 2 ul ) + userInnerCoilSuppDistC
<b>User Parameters</b>			
userStepDiam	step_diam	mm	1 mm
userCoilSuppWidth	coil_supp_width	mm	4 mm
manualTotalDiam		True/False	False
manualMagnetDepth		True/False	False
manualMagnetDistC		True/False	False
userCoilLength	coil_length	mm	9 mm
oldMagnetDistC		mm	10 mm
oldMagnetWidth		mm	5 mm
oldShaftDiam		mm	10 mm
olduserStepDiam		mm	1 mm
oldTotalDiam		mm	30 mm
oldNumbCoils		mm	4 mm
olduserCoilSuppWidth		mm	4 mm
userInnerCoilSuppDistC	inner_coil_supp_dist_c	mm	7 mm
manualCoilFillet		True/False	False
manualInnerCoilSuppDi...		True/False	False
manualInnerCoilSuppDi...		True/False	False
oldNumbMagnets		mm	4 mm

Σχήμα 2. 12: Πάνω : αρχικός ορισμός της παραμέτρου *inner\_coil\_supp\_dist\_c*, κάτω: εισαγωγή της παραμέτρου *userInnerCoilSuppDistC* στο παράθυρο «Parameters» του inventor

Άρα οι μεταβλητές με ονομασία «user» που προστέθηκαν στο User parameters είναι οι εξής:

1. *userCoilSuppWidth*
2. *userStepDiam*
3. *userCoilLength*
4. *userInnerCoilSuppDistC*

Για καλύτερη κατανόηση των 2 και 3 παρατίθεται το σχήμα 2.13



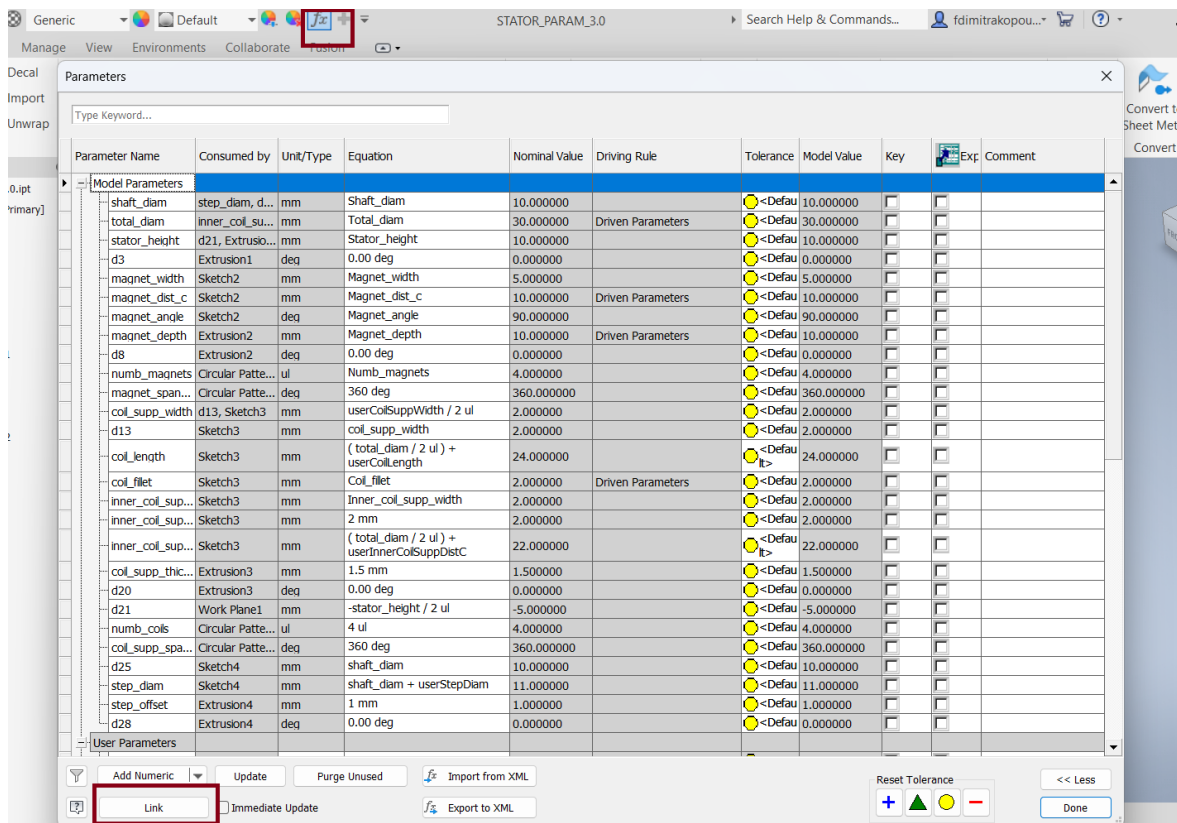
Σχήμα 2. 13: (a): *inner\_coil\_supp\_dist\_c*, (b): *coil\_length*, Κόκκινο: *userInnerCoilDistC*, Πράσινο: *userCoilLength*.

Οι αριθμητικές παράμετροι «user» που εισάγονται στο User parameters, σε πολλές περιπτώσεις μπορούν να δώσουν σύντομη λύση σε προβλήματα όπως τα παραπάνω. Το όνομα τους αποσκοπεί στο ότι χρησιμοποιούνται από τον χρήστη μέσω του UI για να αποδοθεί η σωστή τιμή σε μια διάσταση που πέφτει στις παραπάνω περιπτώσεις.

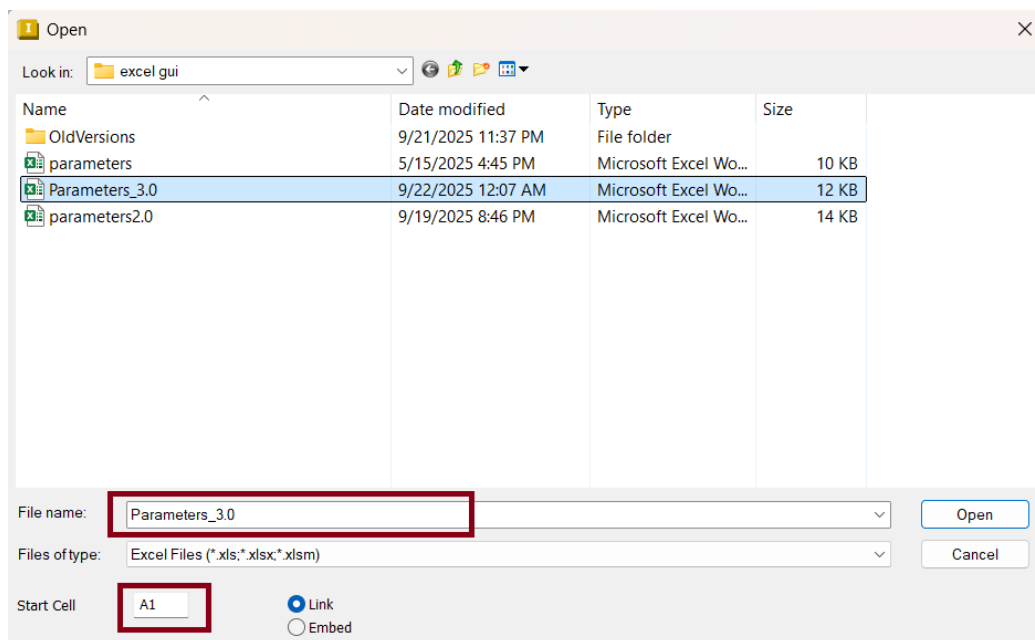
#### 2.4.3. Με excel

Η σύνδεση Inventor–Excel επιτρέπει την κεντρική διαχείριση διαστάσεων, ανοχών και λοιπών μεταβλητών (π.χ. πλήθος στοιχείων, πάχη, αποστάσεις) μέσω υπολογιστικών φύλλων. Το Excel λειτουργεί ως ένα UI, με ονοματισμένα κελιά, από τα οποία το Inventor αντλεί τιμές. Προϋποθέσεις αποτελούν ο σαφής ορισμός των παραμέτρων στο περιβάλλον του Inventor (τύπος και μονάδες), η ύπαρξη ενός ενιαίου πίνακα Named Ranges στο Excel με τα ονόματα των παραμέτρων, καθώς και μια σταθερή και προβλέψιμη διαδρομή αποθήκευσης του αρχείου.

Η διαδικασία υλοποιείται ως εξής: αρχικά, οι παράμετροι που έχουν οριστεί πρέπει να έχουν σαφή, μοναδικά ονόματα και σωστές μονάδες. Στη συνέχεια διαμορφώνεται στο Excel ένας πίνακας τιμών (π.χ. στήλες Name, Value, Units) και σε κάθε κελί τιμής ορίζεται Named Range με όνομα αντίστοιχο της παραμέτρου στο Inventor. Η σύνδεση πραγματοποιείται από το παράθυρο Parameters με την επιλογή Link, μέσω της οποίας επιλέγεται το αρχείο Excel και το κελί από το οποίο ξεκινάνε οι παράμετροι.



Σχήμα 2. 14: Link παραμέτρων στο παράθυρο «Parameters» του inventor



Σχήμα 2. 15: Επιλογή αρχείου excel

Έπειτα στο Inventor συνδέονται στο equation τα Named Ranges και δημιουργούνται οι αντιστοιχίσεις, ώστε οι παράμετροι να τροφοδοτούνται από το Excel. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην εναρμόνιση των μονάδων.

Parameters										
Type Keyword...										
Parameter Name	Consumed by	Unit/Type	Equation	Nominal Value	Driving Rule	Tolerance	Model Value	Key	Ex	Comment
manualInner...		True/False	True					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
manualInner...		True/False	True					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C:\Users\User\D...										
Shaft_diam		mm	10 mm	10.000000		⚡	10.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Total_diam		mm	30 mm	30.000000		⚡	30.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Stator_height		mm	10 mm	10.000000		⚡	10.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Magnet_width		mm	5 mm	5.000000		⚡	5.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Magnet_dist_c		mm	10 mm	10.000000		⚡	10.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Magnet_angle		deg	90 deg	90.000000		⚡	90.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Magnet_depth		mm	10 mm	10.000000		⚡	10.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Numb_magn...		ul	4 ul	4.000000		⚡	4.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
UserCoilSupp...		mm	4 mm	4.000000		⚡	4.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
UserCoilLength		mm	9 mm	9.000000		⚡	9.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Coil_fillet		mm	2 mm	2.000000		⚡	2.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Coil_supp_th...		mm	1.5 mm	1.500000		⚡	1.500000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Numb_coils		ul	4 ul	4.000000		⚡	4.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Coil_supp_s...		deg	360 deg	360.000000		⚡	360.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Inner_coil_s...		mm	2 mm	2.000000		⚡	2.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
UserInnerCoil...		mm	7 mm	7.000000		⚡	7.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Inner_coil_s...		mm	2 mm	2.000000		⚡	2.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
UserStepDiam		mm	1 mm	1.000000		⚡	1.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Step_offset		mm	1 mm	1.000000		⚡	1.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

⚙	Add Numeric	Update	Purge Unused	Import from XML	Reset Tolerance	<< Less
🔗	Link	<input type="checkbox"/> Immediate Update	Export to XML	+	⬆	⬇
					⬆	Done

Parameters										
Type Keyword...										
Parameter Name	Consumed by	Unit/Type	Equation	Nominal Value	Driving Rule	Tolerance	Model Value	Key	Ex	Comment
Model Parameters										
shaft_diam	step_diam, ...	mm	Shaft_diam	10.000000		⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
total_diam	inner_coil_s...	mm	Total_diam	30.000000	Driven Parameters	⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
stator_height	d21, Extrusi...	mm	Stator_height	10.000000		⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d3	Extrusion1	deg	0.00 deg	0.000000		⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
magnet_width	Sketch2	mm	Magnet_width	5.000000		⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
magnet_dist_c	Sketch2	mm	Magnet_dist_c	10.000000	Driven Parameters	⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
magnet_angle	Sketch2	deg	Magnet_angle	90.000000		⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
magnet_depth	Extrusion2	mm	Magnet_depth	10.000000	Driven Parameters	⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d8	Extrusion2	deg	0.00 deg	0.000000		⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
numb_magn...	Circular Patt...	ul	Numb_magnets	4.000000		⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
magnet_spa...	Circular Patt...	deg	360 deg	360.000000		⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
coil_supp_wl...	d13, Sketch3	mm	userCoilSuppWidth / 2 ul	2.000000		⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d13	Sketch3	mm	coil_supp_width	2.000000		⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
coil_length	Sketch3	mm	( total_diam / 2 ul ) + userCoilLength	24.000000		⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
coil_fillet	Sketch3	mm	Coil_fillet	2.000000	Driven Parameters	⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
inner_coil_su...	Sketch3	mm	Inner_coil_supp_width	2.000000		⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
inner_coil_su...	Sketch3	mm	2 mm	2.000000		⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
inner_coil_su...	Sketch3	mm	( total_diam / 2 ul ) + userInnerCoilSuppDistC	22.000000		⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
coil_supp_thi...	Extrusion3	mm	1.5 mm	1.500000		⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d20	Extrusion3	deg	0.00 deg	0.000000		⚡	<Defa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

⚙	Add Numeric	Update	Purge Unused	Import from XML	Reset Tolerance	<< Less
🔗	Link	<input type="checkbox"/> Immediate Update	Export to XML	+	⬆	⬇
					⬆	Done

Σχήμα 2. 16:Αντιστοίχιση παραμέτρων στο inventor

Ο πίνακας παραμέτρων στο Excel μπορεί να διαμορφωθεί σύμφωνα με τις εκάστοτε ανάγκες και προτιμήσεις, υπό την προϋπόθεση ότι παραμένει λειτουργικός και εύκολα κατανοητός. Ιδίως για τη σύνδεση με το Autodesk Inventor, τα κελιά που αντιστοιχούν στις παραμέτρους πρέπει, όπως έχει ήδη αναφερθεί να είναι κατακόρυφα στοιχισμένα, ώστε να αναγνωρίζονται και να αναγιγνώσκονται ορθά κατά τη διαδικασία εισαγωγής και αντιστοίχισης.

	Name	Value	Units
Features	Shaft_diam	10	mm
	Total_diam	30	mm
	ManualTotalDiam	TRUE	
	Stator_height	10	mm
Magnets	Magnet_width	5	mm
	Magnet_dist_c	10	mm
	ManualMagnetDistC	TRUE	
	Magnet_angle	90	deg
	Magnet_depth	10	mm
	ManualMagnetDepth	TRUE	
	Numb_magnets	4	ul
Coils	UserCoilSuppWidth	4	mm
	UserCoilLength	9	mm
	Coil_fillet	2	mm
	ManualCoilFillet	TRUE	
	Coil_supp_thickness	1.5	mm
	Numb_coils	4	ul
	Coil_supp_span_angle	360	deg
	Inner_coil_supp_width	2	mm
	UserInnerCoilSuppDistC	7	mm
	ManualuserInnerCoilSuppDistC	TRUE	
	Inner_coil_supp_dist_edge	2	mm
	ManualCoilSuppDistE	TRUE	
Step	UserStepDiam	1	mm
	Step_offset	1	mm

Πίνακας 2. 2: Πίνακας παραμέτρων στο Excel

Οι λογικές παράμετροι (Boolean) μπορούν να γραφτούν είτε με checkbox είτε με τις δεσμευμένες λέξεις TRUE και FALSE. Προαιρετικά εφαρμόζονται κανόνες Data Validation στο Excel για πρόληψη προβλημάτων στην αντιστοίχιση των λογικών παραμέτρων.

Ως μειονέκτημα της προσέγγισης μέσω Excel μπορεί να επισημανθεί ότι η παραμετροποίηση βασίζεται σε δύο διακριτά αρχεία (το υπολογιστικό φύλλο και το μοντέλο του Inventor). Κατά συνέπεια, κάθε αλλαγή τιμής στο Excel απαιτεί αποθήκευση του φύλλου

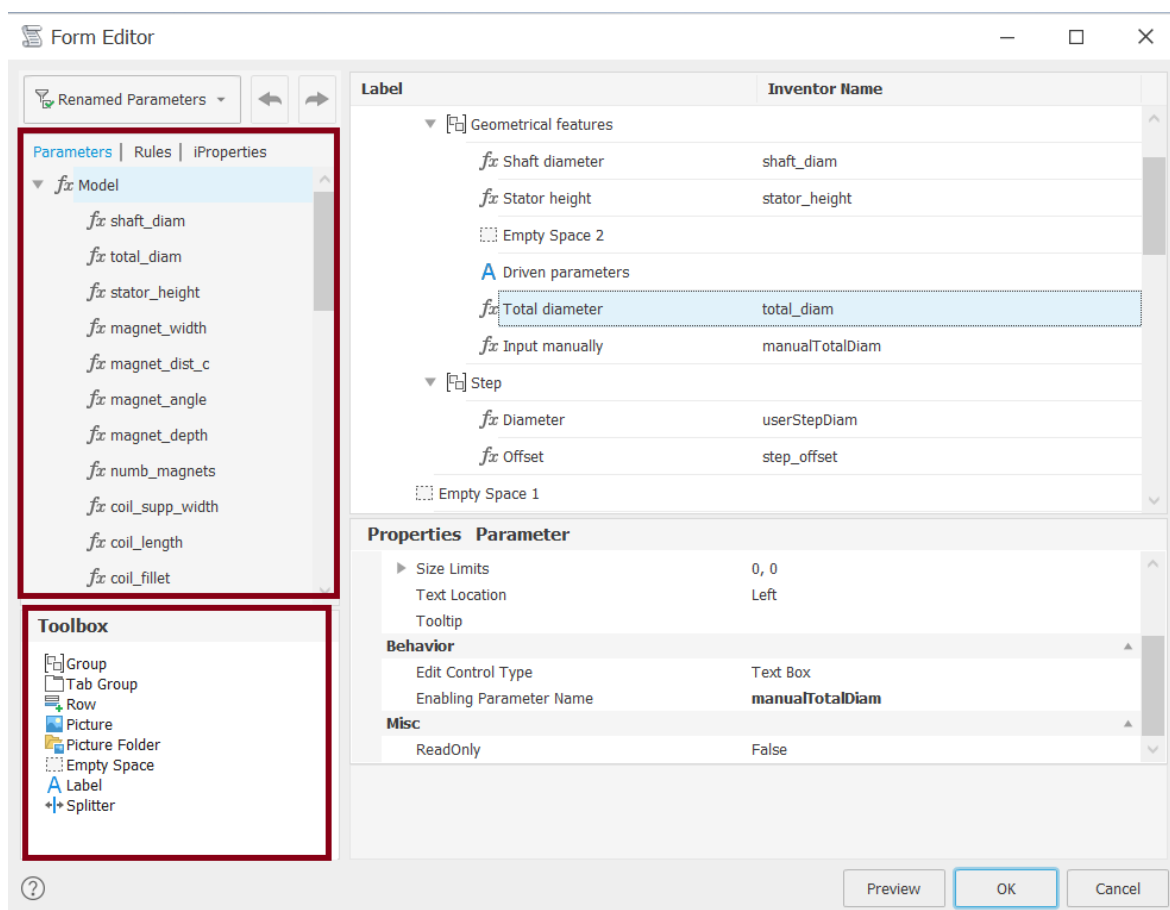


και στη συνέχεια χειροκίνητη ανανέωση (Update) στο Inventor, ώστε να ενημερωθεί το μοντέλο. Με άλλα λόγια, οι μεταβολές δεν αποτυπώνονται άμεσα σε πραγματικό χρόνο.

#### 2.4.4. Με inventor

Μέσω των iLogic Forms υλοποιήθηκε ένα φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον (UI), το οποίο ανοίγει εντός του Autodesk Inventor και εφαρμόζει άμεσα τις αλλαγές στις παραμέτρους του μοντέλου. Η λογική σχεδίασης ήταν να προσφερθεί ένα συνεκτικό, ευανάγνωστο και άμεσα λειτουργικό πάνελ ελέγχου που εξαλείφει την ανάγκη εναλλαγής μεταξύ εξωτερικών αρχείων και του περιβάλλοντος μοντελοποίησης.

Η πρόσβαση στον Form Editor του Inventor γίνεται μέσω της επιλογής Add Form. Με το άνοιγμα του editor εμφανίζονται όλες οι παράμετροι που έχουν οριστεί κατά τη μοντελοποίηση, καθώς στο Toolbox τα διαθέσιμα στοιχεία διεπαφής που μπορούν να προστεθούν στο Display του UI (π.χ. αριθμητικά πεδία, λίστες επιλογών, checkboxes, εικόνες, ομάδες/καρτέλες). Η τοποθέτηση των κατάλληλων στοιχείων έγινε με drag and drop, αντιστοιχίστηκαν στις επιθυμητές παραμέτρους, ρυθμίστηκαν ετικέτες, μονάδες, και ομαδοποιήσεις, και στη συνέχεια αποθηκεύτηκε το Form ώστε να ενσωματωθεί στο περιβάλλον εργασίας του μοντέλου.

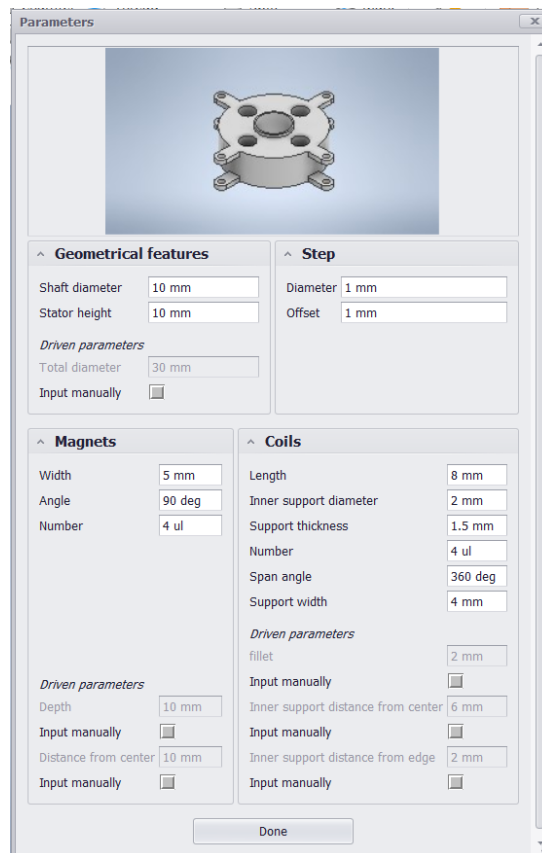


Σχήμα 2. 17: Form Editor στο inventor

Η κατασκευή του UI ακολούθησε τα ακόλουθα βήματα: αρχικά, στο παράθυρο iLogic Forms προστέθηκε κατάλληλη εικόνα/εμβληματικό στιγμιότυπο του εξαρτήματος, ώστε να είναι σαφές σε ποιο Part εργάζεται ο χρήστης. Στη συνέχεια, οι παράμετροι ομαδοποιήθηκαν θεματικά (π.χ. «Γεωμετρικές Διαστάσεις», «Μαγνήτες», «Πηνία», «Πατούρα») και τοποθετήθηκαν σε λογική σειρά. Για κάθε παράμετρο επιλέχθηκε ο κατάλληλος τύπος χειριστήριου: αριθμητικά πεδία και checkboxes για τις λογικές (Boolean) μεταβλητές τύπου



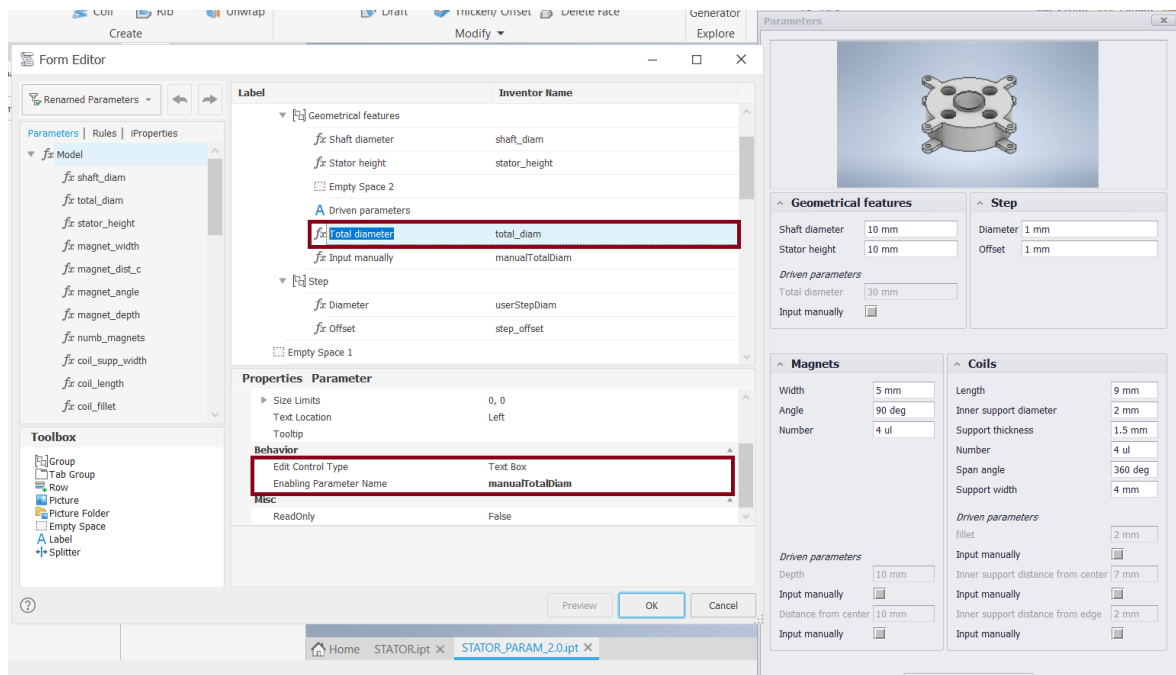
manual. Προστέθηκαν ευανάγνωστες ετικέτες (labels), μονάδες μέτρησης και σύντομα βοηθητικά κείμενα-υποδείξεις (tooltips) για να διευκρινίζεται ο ρόλος κάθε πεδίου και οι τυχόν περιορισμοί. Τέλος, δηλώθηκαν ενέργειες OnChange για άμεσο Update του μοντέλου σε κάθε τροποποίηση, διασφαλίζοντας ότι ο χρήστης βλέπει την επίδραση της ρύθμισης του σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 2. 18 Το Ui που δημιουργήθηκε στο inventor

Για την ορθή λειτουργία των checkboxes, δηλαδή, την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της χειροκίνητης τιμής των εξαρτημένων παραμέτρων, τοποθετήθηκαν σε στρατηγικές θέσεις, ακριβώς κάτω από κάθε σχετική παράμετρο στο UI, και συνδέθηκαν λογικά με την αντίστοιχη μεταβλητή τύπου manual. Η σύνδεση πραγματοποιήθηκε δεσμεύοντας την εκάστοτε εξαρτημένη παράμετρο με την αντίστοιχη λογική μεταβλητή στο «Enabling parameter name», όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.15](#). Θεωρητικά, η ίδια λειτουργία θα μπορούσε να επιτευχθεί με μία ενιαία Boolean μεταβλητή που θα άνοιγε/έκλεινε τη χειροκίνητη εκχώρηση για όλες τις εξαρτημένες παραμέτρους ταυτόχρονα. Ωστόσο, μια τέτοια υλοποίηση θα αφαιρούσε από τον χρήστη τη δυνατότητα στοχευμένης ρύθμισης για μεμονωμένες. Παραμέτρους. Η επιλογή ξεχωριστού checkbox ανά παράμετρο διασφαλίζει

λεπτομερή έλεγχο, καλύτερη εργονομία και μεγαλύτερη ευελιξία στη διαμόρφωση του μοντέλου.



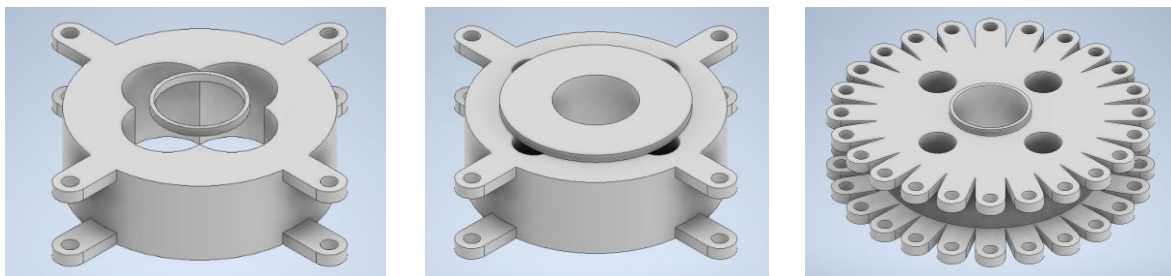
Σχήμα 2. 19: Σύνδεση λογικών παραμέτρων στο Inventor

Με τον τρόπο αυτό, το iLogic Form λειτουργεί ως ενιαία «κονσόλα» παραμετροποίησης καθώς ενσωματώνει οπτική αναγνώριση του εξαρτήματος, οργανωμένη παρουσίαση των παραμέτρων, ασφαλή εισαγωγή τιμών σύμφωνα με τους σχεδιαστικούς περιορισμούς και άμεση ανανέωση της γεωμετρίας.

Η λειτουργικότητα και το εύρος δυνατοτήτων του UI θα αξιολογηθούν στο επόμενο κεφάλαιο, μέσα από δοκιμές χρήσης και αντιπροσωπευτικά παραδείγματα. Παράλληλα, θα ελεγχθεί στην πράξη η αποτελεσματικότητα των περιορισμών που αναπτύχθηκαν ανωτέρω, ώστε να επιβεβαιωθεί η ορθή συμπεριφορά τους και να εντοπιστούν τυχόν πεδία βελτίωσης.

## 2.5. Περιορισμοί με iLogic

Οι περιορισμοί αποτελούν τον βασικό μηχανισμό με τον οποίο το 3D μοντέλο καθοδηγεί τον χρήστη σε έγκυρες τροποποιήσεις. Χωρίς σαφείς περιορισμούς, το μοντέλο μετατρέπεται σε ένα σύνολο απομονωμένων διαστάσεων που επιτρέπουν τυχαίες αλλαγές. Με κατάλληλους περιορισμούς, μετατρέπεται σε σύστημα κανόνων που αποτρέπει τις αδύνατες ή μη ρεαλιστικές διαμορφώσεις. Παρακάτω φαίνονται κάποιες αστοχίες που θα μπορούσαν να συμβούν σε οποιονδήποτε χρήστη υπό την απουσία περιορισμών.



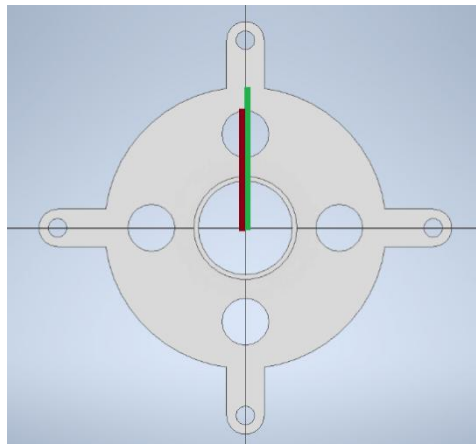
Σχήμα 2. 20: Αριστερά: οι οπές μαγνητών τέμνονται με την οπή του άξονα, δεξιά: περισσότερα στηρίγματα πηνίων από όσα χωράνε στην περίμετρο του στάτορα, μέση: διάμετρος πατούρας τέμνεται με τις οπές μαγνητών

Η εισαγωγή περιορισμών γίνεται μέσω κανόνα (iLogic rule), η εισαγωγή κανόνων γίνεται σύμφωνα με την υποενότητα 2.4.1 και το σχήμα 2.8. Εφόσον λοιπόν προστέθηκε ο κανόνας και ονομάστηκε «Constraints» γράφτηκε κατάλληλος κώδικας για την υλοποίηση των περιορισμών, ο οποίος παρατίθεται στο Παράρτημα Α (5.1).

Συνολικά οι περιορισμοί που τέθηκαν για το μοντέλο του στάτορα ήταν 4. Αυτοί οι περιορισμοί κάλυψαν σχετικά ικανοποιητικά τις πιθανές αστοχίες ενός χρήστη. Ο πρώτος περιορισμός που εισήχθη, με τις παραμέτρους που ορίστηκαν σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, είναι ο εξής:

$$magnet\_dist\_c + \left(\frac{magnet\_width}{2}\right) < \left(\frac{total\_diam}{2}\right)$$

δηλαδή η απόσταση του κέντρου των οπών συν την ακτίνα των οπών των μαγνητών να μην είναι μεγαλύτερη από την συνολική ακτίνα του στάτορα στην παρακάτω εικόνα φαίνονται με σαφήνεια οι δύο αποστάσεις του περιορισμού.



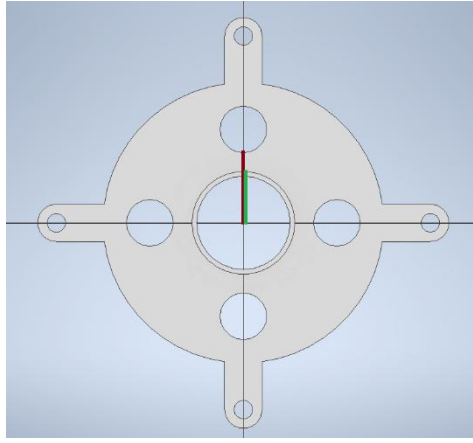
Σχήμα 2. 21 Κόκκινο:  $magnet\_dist\_c + ((magnet\_width)/2)$  και πράσινο:  $((total\_diam)/2)$

Οι παράμετροι που επηρεάζει αυτός ο περιορισμός είναι η  $magnet\_dist\_c$ , η  $magnet\_width$  και η  $total\_diam$ .

Έπειτα χρειάστηκε και ένας περιορισμός για την αντίστοιχη αστοχία αλλά με την εσωτερική διάμετρο ή αλλιώς τη διάμετρο του άξονα. Επομένως με τις κατάλληλες παραμέτρους συντίθεται ο επόμενος κανόνας:

$$magnet\_dist\_c - \left(\frac{magnet\_width}{2}\right) > \left(\frac{step\_diam}{2}\right)$$

δηλαδή η απόσταση των οπών των μαγνητών μείον την ακτίνα τους, πρακτικά η απόσταση από το κέντρο το εξαρτήματος μέχρι την αρχή της οπής, να μην είναι μικρότερη από την ακτίνα της πατούρας ή οποία μετρείται επίσης από το κέντρο του εξαρτήματος. Οι παράμετροι που επηρεάζονται σε αυτή τη περίπτωση είναι η  $magnet\_dist\_c$ , η  $magnet\_width$  και η  $step\_diam$ .



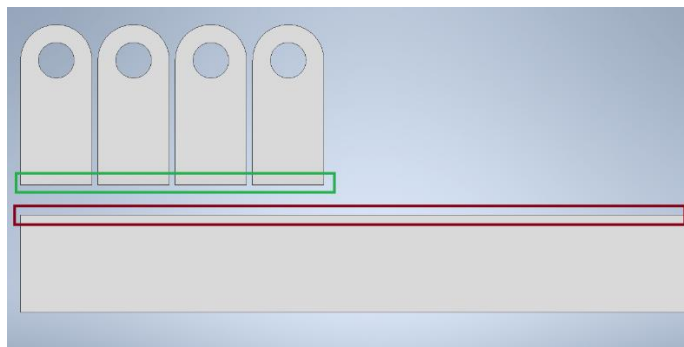
Σχήμα 2. 22: Κόκκινο:  $magnet\_dist\_c - (magnet\_width / 2)$  και πράσινο:  $step\_diam / 2$ .

Οι επόμενοι δύο περιορισμοί είναι παρόμοιοι, το μόνο που αλλάζει είναι το γεωμετρικό χαρακτηριστικό στο οποίο αναφέρονται. Ο ένας πρόκειται για το πλήθος των στηριγμάτων των πηνίων σε σχέση με την περίμετρο του στάτορα, ενώ ο άλλος έχει να κάνει με το πλήθος των μαγνητών σε σχέση με την περίμετρο στην οποία είναι κατανομημένοι. Έτσι οι περιορισμοί είναι:

$$numb\_coils \cdot userCoilSuppWidth < \left( \frac{total\_diam}{2} \right) \cdot 2 \cdot \pi$$

$$numb\_magnets \cdot magnet\_width < magnet\_dist\_c \cdot 2 \cdot \pi$$

Η μεταβλητή  $userCoilSuppWidth$  δεν έχει οριστεί ακόμα, παρόλα αυτά εκφράζει το συνολικό πλάτος του στηρίγματος των πηνίων. Γεωμετρικά ο περιορισμός σημαίνει ότι η συνολική απόσταση των πλατών των στηριγμάτων των πηνίων πρέπει να είναι μικρότερη από την συνολική απόσταση της περιμέτρου του στάτορα, γνωρίζοντας πως η περιμετρος κύκλου δίνεται από τη σχέση:  $2 \cdot \pi \cdot r$ , όπου  $r$  είναι η ακτίνα του στάτορα  $\left( \frac{total\_diam}{2} \right)$ . Για καλύτερη κατανόηση μπορούν οι αποστάσεις αυτές να θεωρηθούν μια ευθεία γραμμή



Σχήμα 2. 23: Απεικόνιση αποστάσεων σε ευθεία γραμμή. Πράσινο:  $numb\_coils \cdot userCoilSuppWidth$  και κόκκινο:  $((total\_diam)/2)$

Η ίδια ερμηνεία μπορεί να αποδοθεί στον δεύτερο περιορισμό με μόνη διαφορά ότι η ακτίνα  $r$  είναι η απόσταση του κέντρου των μαγνητών ( $magnet\_dist\_c$ ) από το κέντρο της οπής του άξονα και ότι πρόκειται για τους μαγνήτες, όχι τα πηνία. Οι περιορισμοί αυτοί περιέχουν τις παραμέτρους  $numb\_coils$ ,  $userCoilSuppWidth$ ,  $total\_diam$ ,  $numb\_magnets$ ,  $magnet\_width$  και  $magnet\_dist\_c$ . Επίσης να σημειωθεί πως στο παραπάνω κείμενο οι ανισότητες των περιορισμών γράφτηκαν έτσι ώστε να δηλώνουν τι πρέπει να συμβαίνει. Για

παράδειγμα, τα πηνία δεν πρέπει να είναι περισσότερα από όσα χωράνε στη διάμετρο του στάτορα, ο αντίστοιχος περιορισμός είναι:

$$\text{numb\_coils} \cdot \text{userCoilSuppWidth} < \left( \frac{\text{total\_diam}}{2} \right) \cdot 2 \cdot \pi$$

η ανισότητα εκφράζει τι πρέπει να ισχύει. Όμως όταν εισαχθεί ως συνθήκη (if...end if) στο iLogic rule θα πρέπει να γραφτεί με την ανισότητα να κοιτάει από την άλλη μεριά, προκειμένου ο κανόνας να συμβαίνει όταν οι περιορισμοί έχουν παραβιαστεί.

Αφού ορίστηκαν οι περιορισμοί, διαμορφώθηκε στο iLogic ένα προειδοποιητικό μήνυμα το οποίο ενημερώνει τον χρήστη για την αστοχία σε περίπτωση παραβίασης κάποιου περιορισμού και τον καθοδηγεί στο που μπορεί οφείλεται το λάθος. Εκτός από το μήνυμα, για να αποφεύγονται λανθασμένες τιμές που εισάγει ο χρήστης, υλοποιήθηκε ένας απλός μηχανισμός για τη επαναφορά των τελευταίων έγκυρων τιμών. Προστέθηκαν οι οκτώ βοηθητικές, αριθμητικές μεταβλητές:

1. *oldShaftDiam*
2. *oldTotalDiam*
3. *oldMagnetWidth*
4. *oldMagnetDistC*
5. *oldNumbMagnets*
6. *oldNumbCoils*
7. *olduserStepDiam*
8. *olduserCoilSuppWidth*

Κάθε φορά που ο χρήστης αλλάζει μια παράμετρο, το iLogic ελέγχει αν η νέα τιμή ικανοποιεί τους περιορισμούς. Αν η τιμή είναι έγκυρη, καταχωρίζεται κανονικά και αποθηκεύεται και στην αντίστοιχη μεταβλητή «old». Αν η τιμή είναι εκτός ορίων, η παράμετρος δεν γίνεται αποδεκτή και επανέρχεται αμέσως στην τιμή της αντίστοιχης «old», δηλαδή στην αμέσως προηγούμενη σωστή τιμή. Κατά την αρχικοποίηση, οι μεταβλητές «old» ορίστηκαν ίσες με τις αρχικές τιμές των παραμέτρων τους, ώστε από την αρχή να υπάρχει αποθηκευμένη μια έγκυρη τιμή για ασφαλή επαναφορά. Επιπλέον, όπως έχει ήδη παρουσιαστεί σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, οι παράμετροι τύπου «user» ορίζονται και τεκμηριώνονται αναλυτικότερα στην επόμενη ενότητα.

Παρατηρήθηκε ότι ορισμένες μεταβλητές συμμετέχουν σε περισσότερους από έναν περιορισμούς. Για να αποφευχθούν διπλοελέγχοι και συγκρούσεις στις τιμές τους, όλοι οι έλεγχοι περιορισμών συγκεντρώθηκαν σε μία ενιαία συνθήκη. Αν γίνονταν σε ξεχωριστές συνθήκες, η ίδια παράμετρος (που επηρεάζεται από πολλούς περιορισμούς) θα έπρεπε να ελέγχεται και να ενημερώνεται πολλαπλές φορές, με κίνδυνο να αποθηκεύονται λανθασμένες ή ασυνεπείς τιμές.

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται συνολικά οι παράμετροι (του στάτορα) που αναλύθηκαν σε ολόκληρο το κεφάλαιο 2.

Model Parameters		
Όνομα	Είδος	Τύπος
shaft_diam	Ανεξάρτητη	Αριθμητική
total_diam	Εξαρτημένη	Αριθμητική
stator_height	Εξαρτημένη	Αριθμητική
magnet_width	Ανεξάρτητη	Αριθμητική
magnet_dist_c	Εξαρτημένη	Αριθμητική
magnet_angle	Ανεξάρτητη	Αριθμητική
magnet_depth	Εξαρτημένη	Αριθμητική
numb_magnets	Ανεξάρτητη	Αριθμητική
coil_supp_width	Ανεξάρτητη	Αριθμητική
coil_length	Εξαρτημένη	Αριθμητική
coil_fillet	Εξαρτημένη	Αριθμητική
coil_supp_thickness	Ανεξάρτητη	Αριθμητική
numb_coils	Ανεξάρτητη	Αριθμητική
coil_span_angle	Ανεξάρτητη	Αριθμητική
inner_coil_supp_width	Ανεξάρτητη	Αριθμητική
inner_coil_supp_dist_edge	Εξαρτημένη	Αριθμητική
inner_coil_supp_dist_c	Εξαρτημένη	Αριθμητική
step_diam	Εξαρτημένη	Αριθμητική
step_offset	Ανεξάρτητη	Αριθμητική

Πίνακας 2. 3 Παράμετροι του Model parameters

Όνομα	Είδος	Τύπος
oldShaftDiam	-	Αριθμητική
oldTotalDiam	-	Αριθμητική
oldMagnetWidth	-	Αριθμητική
oldMagnetDistC	-	Αριθμητική
oldNumbMagnets	-	Αριθμητική
oldNumbCoils	-	Αριθμητική
oldStepDiam	-	Αριθμητική
oldCoilSuppWidth	-	Αριθμητική
userStepDiam	Ανεξάρτητη	Αριθμητική

userCoilSuppWidth	Ανεξάρτητη	Αριθμητική
userCoilLength	Ανεξάρτητη	Αριθμητική
userInnerCoilSuppDistC	Ανεξάρτητη	Αριθμητική
manualTotalDiam	-	Λογική
manualMagnetDistC	-	Λογική
manualMagnetDepth	-	Λογική
manualInnerCoilSuppDistE	-	Λογική
manualInnerCoilSuppDistC	-	Λογική
manualCoilFillet	-	Λογική

*Πίνακας 2. 4 Παράμετροι του User parameters*

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

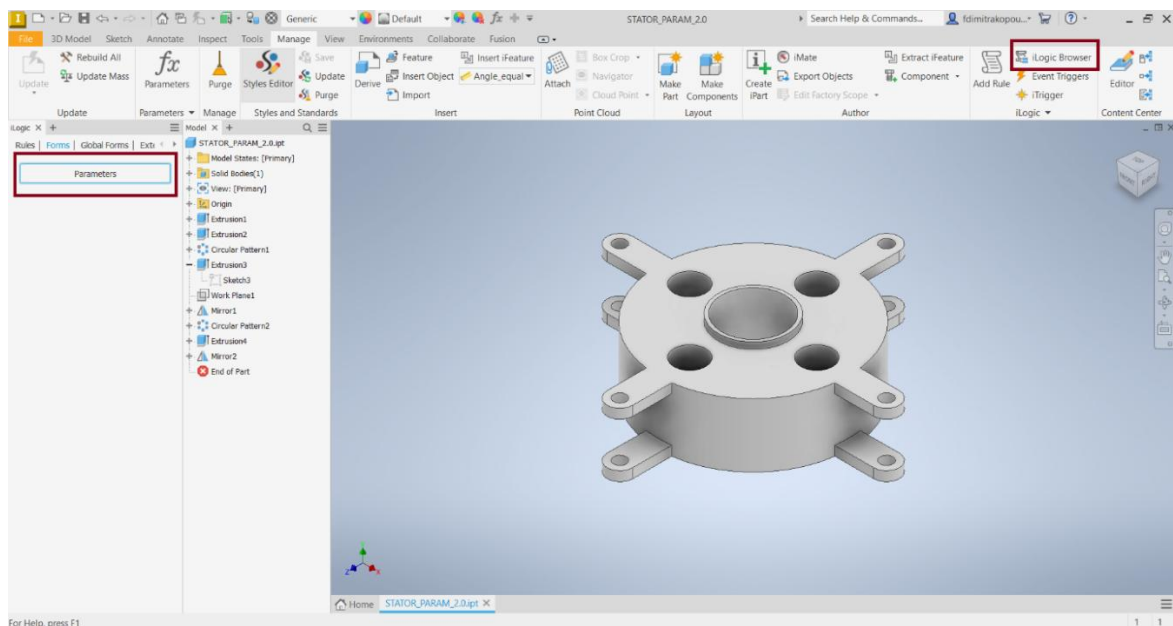
#### 3.1. Αποτελέσματα παραμετροποίησης

Τα αποτελέσματα της παραμετροποίησης αξιολογήθηκαν μέσω στοχευμένων δοκιμών στο iLogic UI του Inventor. Συγκεκριμένα, τροποποιήθηκαν συστηματικά οι τιμές των παραμέτρων, τόσο εντός επιτρεπτών ορίων όσο και σκόπιμα εκτός αυτών, ώστε να διερευνηθούν οι δυνατότητες του UI και να επαληθευθεί η ορθή λειτουργία των σχεδιαστικών περιορισμών (μηνύματα προειδοποίησης, επαναφορά σε έγκυρες τιμές, κ.λπ.). Η διαδικασία αυτή επέτρεψε τη διαπίστωση της συνολικής ευρωστίας και της εργονομίας του συστήματος παραμετροποίησης.

Να σημειωθεί ότι όλες οι εκτυπώσεις έγιναν με τα ίδια χαρακτηριστικά :

- Μέθοδος εκτύπωσης: FDM.
- Υλικό νήματος: PLA 1.75 mm.
- Διάμετρος ακροφυσίου: 0.4 mm.
- Ύψος στρώσης: 0.20 mm.
- Θερμοκρασία ακροφυσίου: 200–205 °C.
- Τραπέζιου εκτύπωσης: 60 °C.
- Infill: 25% .
- Ταχύτητες εκτύπωσης: 45 mm/s για τα περιγράμματα, 70 mm/s για το γέμισμα (infill), 160 mm/s για την ελεύθερη κίνηση.
- Υποστηρίγματα: μόνο όπου χρειάζεται.
- Προσανατολισμός στο τραπέζι: Με τη μεγαλύτερη επίπεδη επιφάνεια προς τα κάτω, Brim 5–8 mm.
- Λογισμικό τεμαχισμού (slicer): PrusaSlicer.
- Χρόνος εκτύπωσης: 2 – 3 ώρες.

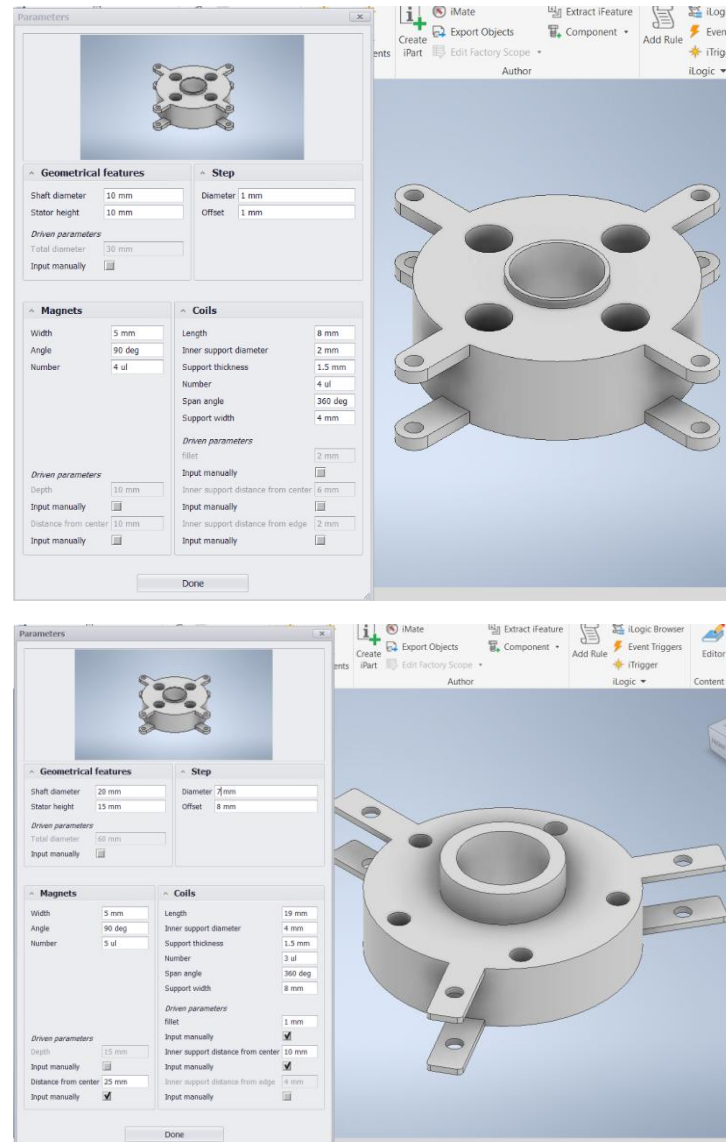
Η πρόσβαση του χρήστη στο UI είναι ιδιαίτερα απλή. Η διαδικασία ενεργοποίησής του παρουσιάζεται συνοπτικά στο σχήμα 3.1, ώστε να καταδεικνύονται με σαφήνεια τα απαιτούμενα βήματα ανοίγματος και χρήσης.



Σχήμα 3. 1: Απεικόνιση βημάτων ανοίγματος του UI στο περιβάλλον του inventor

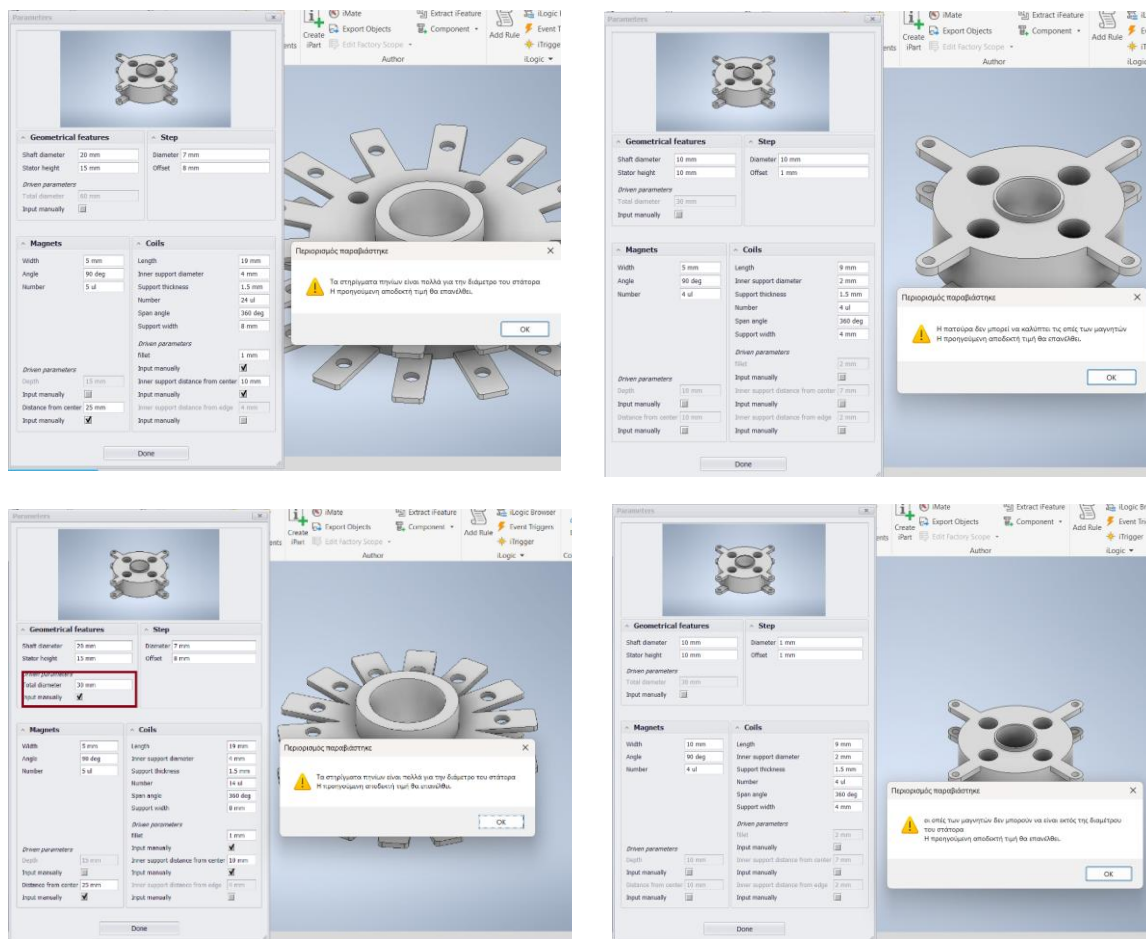


Λαμβάνοντας ως σημείο αναφοράς την αρχική διαμόρφωση του στάτορα (όπως αποτυπώνεται στο σχήμα 3.1), οι μεταβολές στο σχέδιο διακρίνονται εύκολα. Παράλληλα, τεκμηριώνεται η ορθή λειτουργία των checkboxes που ελέγχουν τις εξαρτημένες παραμέτρους, καθώς ορισμένα εμφανίζονται ενεργά στο στιγμιότυπο οθόνης. Με την απενεργοποίηση ενός checkbox (αφαίρεση της επιλογής), η αντίστοιχη παράμετρος παύει να δέχεται χειροκίνητη τιμή και επανέρχεται αυτομάτως στην προκαθορισμένη, εξαρτημένη σχέση της.



Σχήμα 3. 2: Πάνω: αρχική κατάσταση στάτορα, Κάτω τροποποιήσεις στάτορα

Στη συνέχεια εισήχθησαν σκόπιμα τιμές εκτός των επιτρεπτών ορίων, με στόχο τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας των περιορισμών και την επιβεβαίωση των αντίστοιχων μηχανισμών προειδοποίησης και ανάκτησης έγκυρων τιμών.



Σχήμα 3. 3: Παραδείγματα εκχώρησης μη αποδεκτών τιμών και παραβίαση περιορισμών

Όπως τεκμηριώνεται στο σχήμα 3.3, εισήχθησαν σκόπιμα μη αποδεκτές τιμές ώστε να ελεγχθεί ο μηχανισμός επικύρωσης. Σε όλες τις περιπτώσεις ενεργοποιήθηκε το προειδοποιητικό μήνυμα και η αντίστοιχη παράμετρος επανήλθε αυτόματα στην τελευταία έγκυρη τιμή.

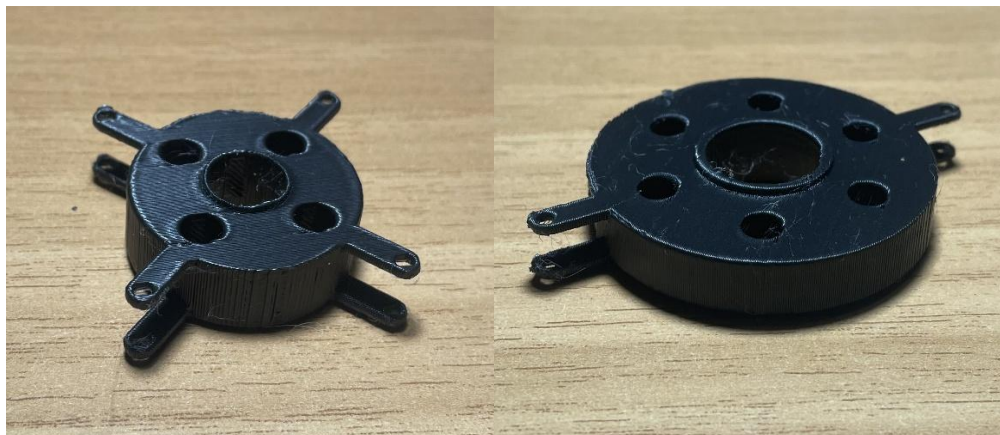
Ειδικότερα, αυξήθηκε υπέρμετρα ο αριθμός των στηριγμάτων πηνίων, με αποτέλεσμα να εμφανιστεί μήνυμα ότι «τα στηρίγματα πηνίων είναι πολλά για τη διάμετρο του στάτορα» και να γίνει ανάκτηση της προηγούμενης τιμής.

τροποποιήθηκε χειροκίνητα η ολική διάμετρος, δημιουργώντας ασυμβατότητα με τον υφιστάμενο αριθμό στηριγμάτων, ο έλεγχος ανέδειξε εκ νέου ότι «τα στηρίγματα πηνίων είναι πολλά για τη διάμετρο του στάτορα» και επανάφερε την παράμετρο. Αυξήθηκε το πλάτος των μαγνητών πέραν των επιτρεπτών ορίων, οπότε εμφανίστηκε μήνυμα ότι «οι οπές των μαγνητών δεν μπορούν να είναι εκτός της διαμέτρου του στάτορα» και η τιμή ακυρώθηκε.

Τα παραπάνω παραδείγματα επιβεβαιώνουν ότι το σύστημα περιορισμών και ο μηχανισμός «τελευταίας έγκυρης τιμής» λειτουργούν ορθά, αποτρέποντας γεωμετρικά μη εφικτές ρυθμίσεις και διατηρώντας τη συνοχή του μοντέλου.

Για τη 3D εκτύπωση, οι ρυθμίσεις (π.χ. infill, ταχύτητα, θερμοκρασίες, προσανατολισμός, υποστηρίγματα) προσαρμόζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του τεμαχίου. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν δύο εκτυπώσεις του στάτορα: (α) μία με τις βασικές παραμέτρους στην αρχική διαμόρφωση του

μοντέλου και (β) μία με τροποποιημένες παραμέτρους, όπως αυτές προέκυψαν από την παραμετρική διερεύνηση. Μετά την αφαίρεση των υποστηρίγμάτων—ιδίως στην περιοχή των στηριγμάτων των πηνίων—και τα δύο δείγματα αξιολογήθηκαν ως προς την κατασκευασιμότητα και τη γεωμετρική συνέπεια. Τα αποτελέσματα των δύο εκτυπώσεων παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα.



Σχήμα 3. 4 Αριστερά: βασική μορφή στάτορα, δεξιά: αλλαγμένη γεωμετρία στάτορα

Η σύγκριση των δύο δειγμάτων καταδεικνύει ότι οι παραμετρικές μεταβολές αποτυπώνονται αξιόπιστα στο φυσικό αντικείμενο, ενώ οι κατάλληλες επιλογές ρυθμίσεων εκτύπωσης (ιδίως ως προς τα υποστηρίγματα και το infill) συμβάλλουν στη διατήρηση της διαστασιακής ακρίβειας και της μηχανικής ακεραιότητας των λεπτών γεωμετρικών στοιχείων.

### 3.2. Εφαρμογή της μεθόδου παραμετροποίησης του 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου

Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο εφαρμόστηκε για την παραμετροποίηση των περιστροφικών εξαρτημάτων ενός συστήματος ρότορα και την αυτοματοποίηση της διαδικασίας σχεδιασμού τους. Επιπλέον, όπως και στην προηγούμενη ενότητα, πραγματοποιήθηκε 3D εκτύπωση ενός εκ των εξαρτημάτων του κάθε case study, με στόχο την πειραματική επαλήθευση και τεκμηρίωση της ευελιξίας του παραμετρικού σχεδιασμού ως προς την κατασκευή. Η υλοποίηση στο φυσικό αντικείμενο επέτρεψε την αξιολόγηση της κατασκευασιμότητας, των ανοχών και της συναρμογής, επιβεβαιώνοντας ότι οι παραμετρικές μεταβολές μεταφράζονται αξιόπιστα από το ψηφιακό μοντέλο στη διαδικασία παραγωγής.

Στις επόμενες υποενότητες αναλύονται τα case studies:

- Case study 1<sup>ο</sup> : σχεδιασμός παραμετροποίησης και 3D εκτύπωση εξαρτημάτων ενός συγκομιστή κραδασμικής ενέργειας ο οποίος βασίζεται σε φυσικό εκκρεμές.
- Case study 2<sup>ο</sup> : σχεδιασμός παραμετροποίησης και 3D εκτύπωση στάτορα ενός μη γραμμικού συγκομιστή ενέργειας.

#### 3.2.1. Case study 1<sup>ο</sup>

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την εφαρμογή της μεθοδολογίας του δεύτερου κεφαλαίου είναι:

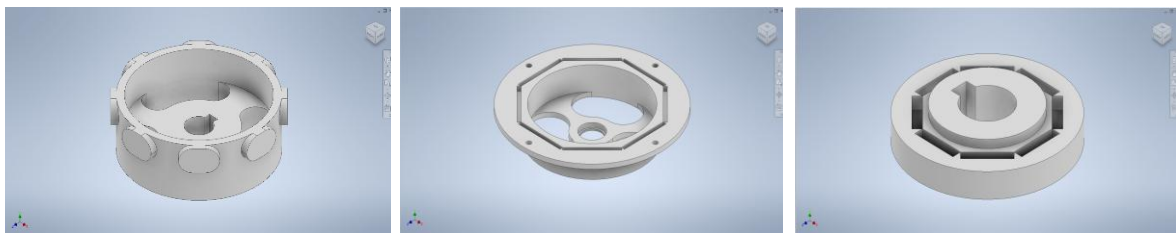
- Βήμα 1<sup>ο</sup> : ανασχεδιασμός και ορισμός ανεξάρτητων παραμέτρων στο Model parameters
- Βήμα 2<sup>ο</sup> : ορισμός παραμέτρων στο User parameters («user», «manual» και «old»)
- Βήμα 3<sup>ο</sup> : Κατασκευή του UI μέσω iLogic forms
- Βήμα 4<sup>ο</sup> : Ορισμός περιορισμών μέσω iLogic rules
- Βήμα 5<sup>ο</sup> : Επαλήθευση ορθής λειτουργίας περιορισμών και UI

- Βήμα 6° : 3D εκτύπωση

Τα περιστροφικά εξαρτήματα αυτού του συστήματος ήταν τα εξής:

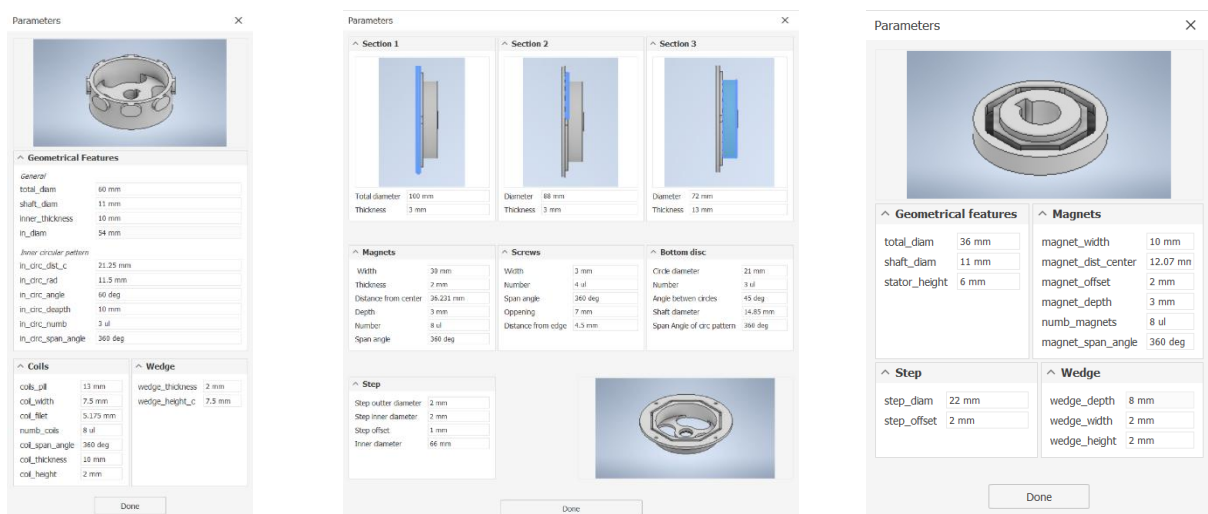
1. Ένας δίσκος στον οποίο θα τυλιχτούν τα πηνία
2. Ένας ρότορας
3. Ένας στάτορας

Παρότι υπήρχαν ήδη αρχεία Part για καθένα από τα αντικείμενα, κρίθηκε αναγκαίος ο εκ νέου σχεδιασμός τους, ώστε (α) να υποστηριχθεί ομαλά η ανάπτυξη του UI μέσω iLogic και (β) να ελαχιστοποιηθούν σφάλματα στον ορισμό και τη διαχείριση των παραμέτρων. Ο επανασχεδιασμός επέτρεψε την καθιέρωση συνεπούς παραμετροποίησης (σαφείς ονομασίες, εξαρτήσεις και περιορισμοί), διευκολύνοντας την ασφαλή αυτοματοποίηση του μοντέλου.



Σχήμα 3. 5: 3D μοντέλα των εξαρτημάτων. Αριστερά: δίσκος πηνίων, μέση: ρότορας και δεξιά: στάτορας

Για τον δίσκο περιέλιξης των πηνίων ορίστηκαν συνολικά δεκαεννέα τροποποιήσιμες παράμετροι, οι οποίες ομαδοποιήθηκαν βάσει λειτουργίας και γεωμετρίας (π.χ. παράμετροι για τα στηρίγματα των πηνίων, για τον κυκλικό δίσκο βάσης, για τον σφηνόδρομο κ.ά.). Για αυτές τις παραμέτρους εισήχθησαν οι κατάλληλοι περιορισμοί, ώστε να διασφαλίζεται η γεωμετρική συνέπεια και η κατασκευασιμότητα. Ο στάτορας ακολούθησε αντίστοιχη διαδικασία, με δεκατέσσερις παραμέτρους, με απλούστερη ωστόσο μορφολογία. Αντιθέτως, ο ρότορας παρουσίαζε τη μεγαλύτερη γεωμετρική πολυπλοκότητα καθώς χρειάστηκαν είκοσι έξι παράμετροι, γι' αυτό και διαχωρίστηκε σε τρεις σαφώς διακριτές ενότητες (sections), οι οποίες αποτυπώνονται ευκρινώς και στο αντίστοιχο UI, διευκολύνοντας την πλοήγηση και την στοχευμένη παραμετροποίηση. Τα UI των τριών εξαρτημάτων παρουσιάζονται στο σχήμα 3.6.



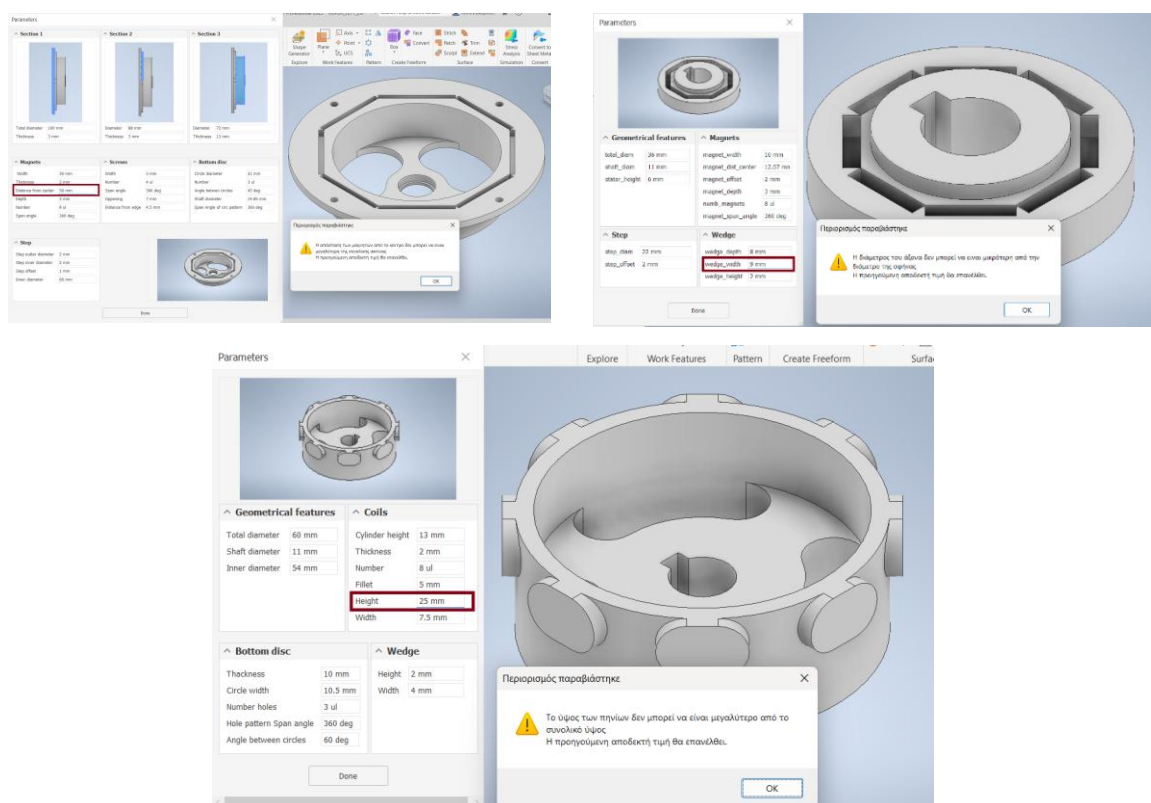
Σχήμα 3. 6 :Αριστερά: UI δίσκου πηνίων, μέση: UI ρότορας, αριστερά: UI στατορας



Για την πληρέστερη κατανόηση των εξαρτημάτων παρατίθεται συνοπτική ανάλυση των κύριων γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους:

- (α) Δίσκος πηνίων: διαθέτει κυκλικό μοτίβο στη βάση, κεντρική οπή άξονα με σφηνόδρομο, ενώ η περιέλιξη των πηνίων πραγματοποιείται στις κυκλικές προεξοχές του άνω τμήματος.
- (β) Ρότορας: παρουσιάζει αντίστοιχο κυκλικό μοτίβο στη βάση, στο παχύτερο τμήμα του φέρει ορθογωνικές οπές που λειτουργούν ως θέσεις μαγνητών. Δεν περιλαμβάνει οπή σφηνόδρομου, αλλά διαθέτει οπές διέλευσης κοχλιών στο άνω μέρος για τη στερέωση.
- (γ) Στάτορας: φέρει οπές μαγνητών παρόμοιας λογικής με τον ρότορα, καθώς και κεντρική οπή άξονα με σφηνόδρομο.

Παρατίθενται παραδείγματα λειτουργίας των περιορισμών και του UI των μοντέλων, όμοια με την προηγούμενη ενότητα.



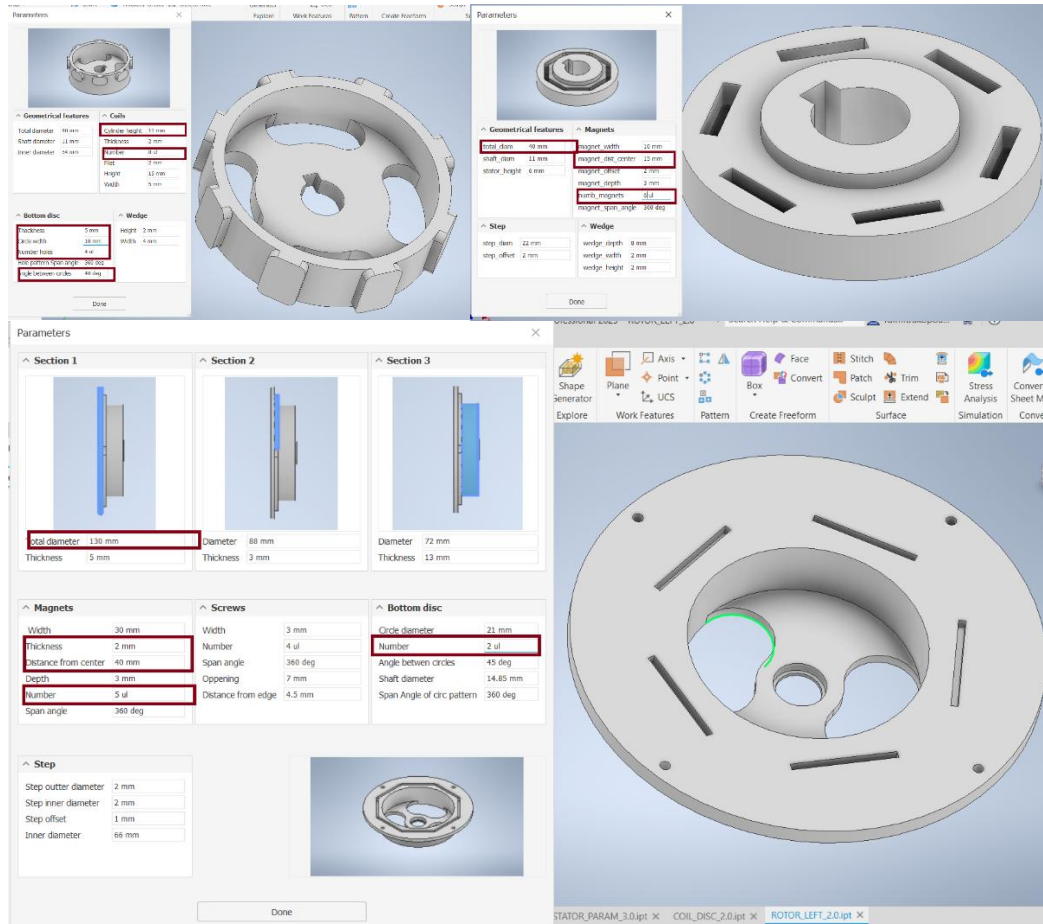
Σχήμα 3. 7: Παραδείγματα χρήσης του UI και εφαρμογή περιορισμών στα εξαρτήματα

Στην πάνω αριστερά εικόνα (σχήμα 3.7) της παραπάνω εικόνας φαίνεται πως η ακτινική απόσταση των μαγνητών από το κέντρο, ορίστηκε μεγαλύτερη από τη συνολική ακτίνα του εξαρτήματος. Ο περιορισμός διασφαλίζει ότι τα κέντρα των οπών μαγνητών παραμένουν εντός του ωφέλιμου δακτυλίου (εντός περιγράμματος), αποφεύγοντας έξοδο εκτός γεωμετρίας ή ανεπαρκές πάχος τοιχώματος.

Στην πάνω δεξιά εικόνα (σχήμα 3.7) της παραπάνω εικόνας παρατηρείται ότι το πλάτος του σφηνοδρόμου καθιστά τη διατομή της σφήνας ουσιαστικά μεγαλύτερη από τη διάμετρο του άξονα. Ο περιορισμός επιβάλλει ότι οι διαστάσεις της σφήνας είναι υποδεέστερες της διαμέτρου άξονα, ώστε να εξασφαλίζεται ορθή συναρμογή και επαρκής αντοχή του άξονα στην περιοχή εγκοπής.

Στην κάτω εικόνα της παραπάνω εικόνας (σχήμα 3.7) φαίνεται ότι το επιλεγμένο ύψος των πηνίων υπερβαίνει το συνολικό διαθέσιμο ύψος του εξαρτήματος. Ο περιορισμός αποτρέπει

γεωμετρική διεύθυνση και επικάλυψη και διασφαλίζει κατασκευασσιμότητα, επιβάλλοντας ότι το τοπικό ύψος στοιχείων δεν μπορεί να υπερβαίνει το συνολικό ύψος του τεμαχίου. Περιορισμοί σαν και αυτούς που δείχνουν τα παραδείγματα έχουν τοποθετηθεί και για τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων. Η σωστή λειτουργία των UI, φαίνεται στο σχήμα 3.8 στο οποίο φαίνονται οι αλλαγμένες γεωμετρίες των τριών εξαρτημάτων, θεωρώντας αρχική κατάσταση αυτή στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3. 8 Διαδορικές γεωμετρίες των: πάνω αριστερά: δίσκος πηνίων, πάνω δεξιά: στάτορας και κάτω: ρότορας

Τέλος, πραγματοποιήθηκε 3D εκτύπωση του στάτορα με τις ρυθμίσεις που παρατίθενται στην αρχή του κεφαλαίου προκειμένου να αξιολογηθούν στην πράξη η ορθότητα της παραμετροποίησης και η κατασκευασσιμότητα του μοντέλου.



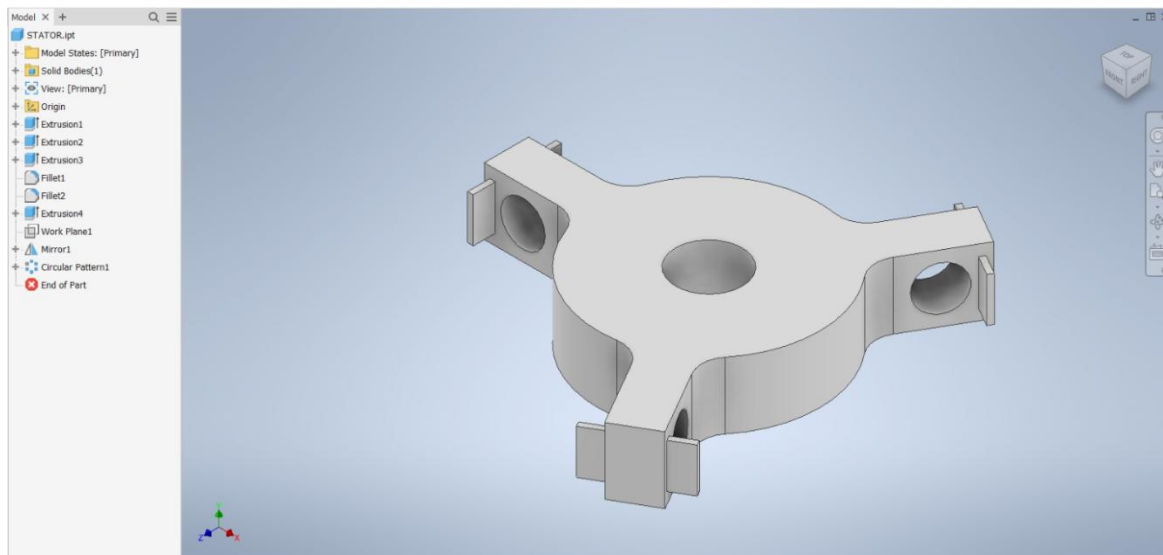
Σχήμα 3. 9: Αριστερά: βασική μορφή στάτορα, δεξιά: αλλαγμένη γεωμετρία στάτορα

### 3.2.2. Case study 2°

Τα βήματα εφαρμογής της μεθοδολογίας είναι ίδια με αυτά που ακολουθήθηκαν για το προηγούμενο case study:

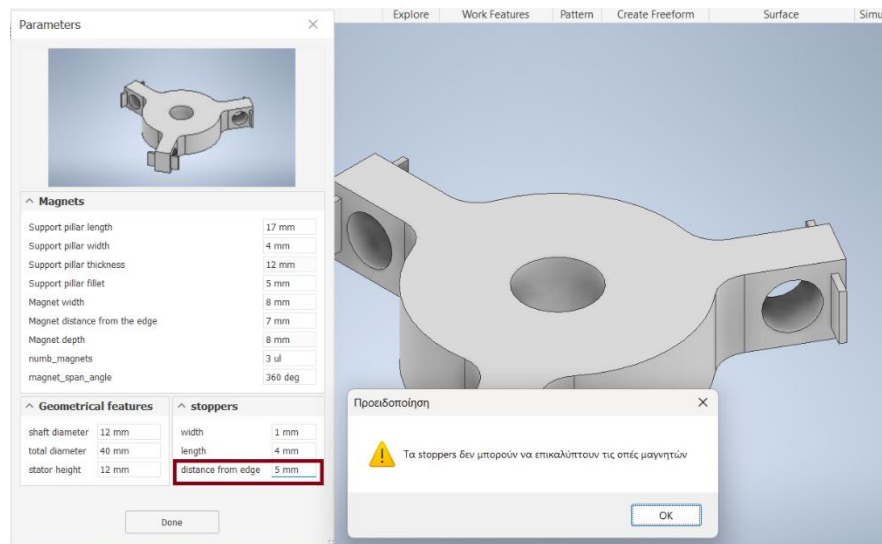
- Βήμα 1° : ανασχεδιασμός και ορισμός ανεξάρτητων παραμέτρων στο Model parameters
- Βήμα 2° : ορισμός παραμέτρων στο User parameters («user», «manual» και «old»)
- Βήμα 3° : Κατασκευή του UI μέσω iLogic forms
- Βήμα 4° : Ορισμός περιορισμών μέσω iLogic rules
- Βήμα 5° : Επαλήθευση ορθής λειτουργίας περιορισμών και UI
- Βήμα 6° : 3D εκτύπωση

Στην παρούσα περίπτωση παραμετροποιήθηκε το εξάρτημα του στάτορα. Το μοντέλο είχε την γνωστή επεξεργασία καθώς, ανασχεδιάστηκε κατάλληλα, ώστε να διαθέτει σαφώς ορισμένες και συνεπείς παραμέτρους και να υποστηρίζει τη διαμόρφωση ενός λειτουργικού iLogic UI. Ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, ο στάτορας περιλαμβάνει κεντρική οπή άξονα και περιμετρικές προεξοχές, καθεμία από τις οποίες φέρει οπή υποδοχής μαγνήτη. Στα άκρα των προεξοχών ενσωματώνονται επιπλέον στοπ (stoppers) για τον περιορισμό της περιστροφής. Τα ανωτέρω στοιχεία αποτυπώνονται και στο σχήμα 3.10.



Σχήμα 3. 10: 3D μοντέλο στάτορα

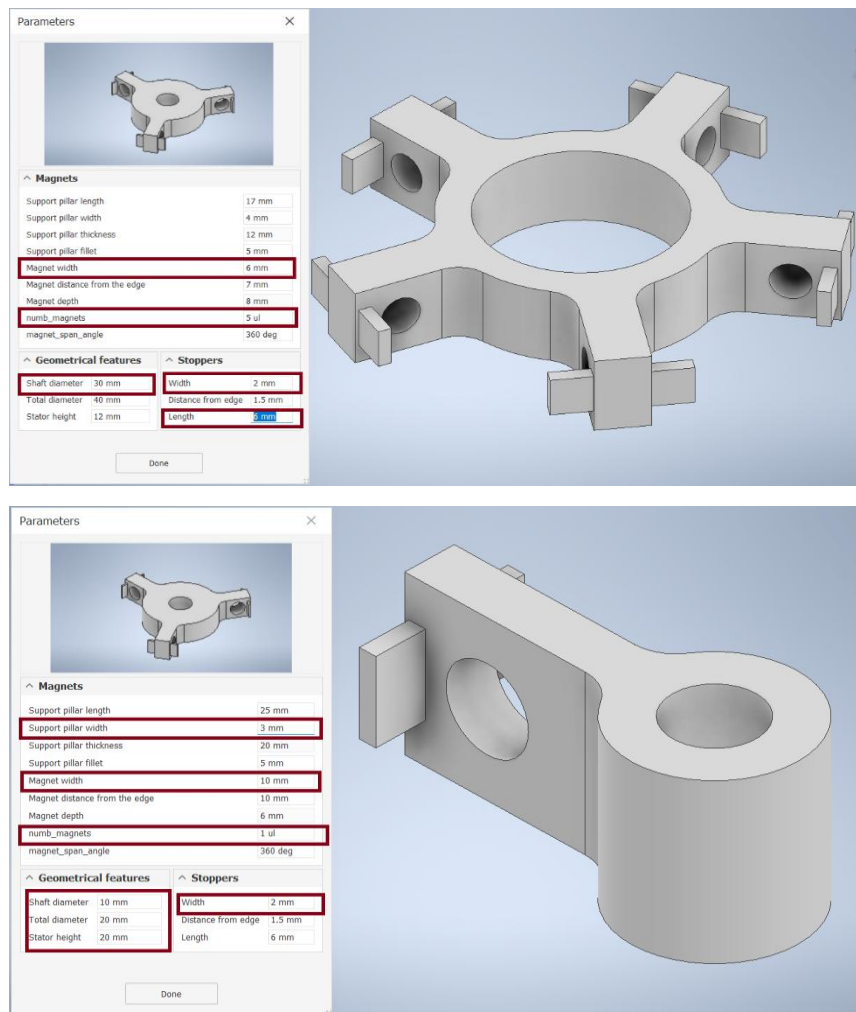
Στο σχήμα 3.11 απεικονίζεται έλεγχος σύγκρουσης μεταξύ των stoppers και των οπών μαγνητών του στάτορα. Κατά τη ρύθμιση της παραμέτρου distance from edge το σύστημα εντοπίζει ότι η νέα θέση των stoppers οδηγεί σε επικάλυψη με τις οπές μαγνητών και εμφανίζει προειδοποίηση: «Τα stoppers δεν μπορούν να επικαλύπτουν τις οπές μαγνητών». Ο κανόνας αυτός επιβάλλει ελάχιστη απόσταση ασφαλείας μεταξύ των στοιχείων, αποτρέποντας γεωμετρικές ασυμβατότητες και προβλήματα κατασκευής. Σύμφωνα με τη γενική λογική των περιορισμών που έχουν τεθεί, η μη αποδεκτή τιμή απορρίπτεται και η παράμετρος επανέρχεται στην τελευταία έγκυρη ρύθμιση, διατηρώντας τη συνοχή του μοντέλου.



Σχήμα 3. 11: Παραβίαση περιορισμού των stoppers

Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζονται εναλλακτικές γεωμετρίες του στάτορα που προέκυψαν ταχύτατα, μέσω της παραμετρικής διαμόρφωσης. Ενδεικτικά, στην αριστερή περίπτωση το εξάρτημα έχει προσαρμοστεί για σύστημα με πέντε μαγνήτες και αυξημένη διάμετρο άξονα. Στη δεξιά περίπτωση, αντιθέτως, ο άξονας έχει μικρή διάμετρο, ο στάτορας φέρει έναν μόνο μαγνήτη και η συνολική διάμετρος είναι σημαντικά μικρότερη. Και στις δύο περιπτώσεις, η σύγκριση γίνεται ως προς την αρχική κατάσταση του εξαρτήματος. Η ευελιξία του σχεδιασμού καθίσταται εμφανής καθώς δύο σαφώς διαφορετικές διαμορφώσεις παράχθηκαν εύκολα, χωρίς σφάλματα, με πλήρη συμμόρφωση στους περιορισμούς.





Σχήμα 3. 12 Διαφορετικές γεωμετρίες του στάτορα που προκύπτουν από αλλαγή παραμέτρων από το UI

Κατά την 3D εκτύπωση του τεμαχίου απαιτήθηκαν ελάχιστα υποστηρίγματα, καθώς οι προεξοχές του παρουσιάζουν απλή γεωμετρία. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας, μετά και την αφαίρεση των υποστηριγμάτων, παρουσιάζονται στο [σχήμα 3.13](#).



Σχήμα 3. 13 Αριστερά: βασική μορφή στάτορα, δεξιά: αλλαγμένη γεωμετρία στάτορα

## 4. ΣΥΝΟΨΗ

### 4.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκε, παραμετροποιήθηκε και αυτοματοποιήθηκε η μοντελοποίηση περιστροφικών εξαρτημάτων (δίσκος πηνίων, ρότορας, στάτορας) στο Autodesk Inventor με αξιοποίηση iLogic. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε απέδειξε ότι η μετατροπή ενός κλασικού CAD μοντέλου σε σύστημα κανόνων και σχέσεων αυξάνει θεαματικά την ευελιξία, την αξιοπιστία και την επαναχρησιμοποίησή του. Η ενσωμάτωση σαφώς ορισμένων παραμέτρων, εξαρτήσεων και περιορισμών οδήγησε σε σχέδια ανθεκτικά στις αλλαγές, με συνεπή γεωμετρία και μειωμένο κίνδυνο λαθών κατά τη χρήση. Καίριο αποτέλεσμα αποτελεί η διάκριση ανάμεσα σε εξαρτημένες παραμέτρους οι οποίες προσφέρουν ενδεικτικές, ασφαλείς προεπιλογές και σε «παραμέτρους χρήστη» (user), οι οποίες επιτρέπουν ελεγχόμενη χειροκίνητη παρέμβαση. Ο μηχανισμός εναλλαγής μέσω λογικών μεταβλητών (Boolean) κατέστησε δυνατή την άμεση μετάβαση από αυτόματο σε χειροκίνητο ορισμό όπου απαιτείται, χωρίς να διακυβεύεται η συνοχή των περιορισμών. Παράλληλα, ο μηχανισμός «τελευταίας έγκυρης τιμής» αποδείχθηκε αποτελεσματικός καθώς, κάθε παραβίαση περιορισμού εντοπίζεται εγκαίρως, ενημερώνει τον χρήστη με σαφές προειδοποιητικό μήνυμα και επαναφέρει την τιμή στην πλέον πρόσφατη αποδεκτή κατάσταση, αποτρέποντας την εξάπλωση σφαλμάτων στο μοντέλο.

Ως προς τα εργαλεία UI, συγκρίθηκαν δύο προσεγγίσεις διαχείρισης παραμέτρων: (α) φύλλο Excel με ονοματισμένα κελιά (Named Ranges) και (β) ενσωματωμένες φόρμες iLogic (iLogic Forms). Το Excel λειτούργησε ως κεντρικός πίνακας τιμών, χρήσιμος για τυποποίηση και αρχειοθέτηση παραμετρικών σεναρίων, όμως η ανάγκη αποθήκευσης στο Excel και χειροκίνητης ανανέωσης στο Inventor καθυστέρησε τη ροή εργασίας. Αντίθετα, το UI που κατασκευάστηκε με iLogic Forms προσέφερε άμεση οπτική ανατροφοδότηση εντός του περιβάλλοντος μοντελοποίησης, καλύτερη εργονομία και φυσική ομαδοποίηση παραμέτρων ανά λειτουργική ενότητα. Συνεπώς, για τον καθημερινό σχεδιασμό προκρίνεται η χρήση iLogic Forms, ενώ το Excel παραμένει χρήσιμο ως αποθετήριο σεναρίων, πρότυπων τιμών και ανταλλαγής δεδομένων.

Εν τέλει, η προτεινόμενη διαδικασία, συνιστά ένα συνεκτικό πλαίσιο παραμετρικού σχεδιασμού για περιστροφικά εξαρτήματα. Το πλαίσιο αυτό μπορεί να επεκταθεί σε πιο σύνθετες συναρμολογήσεις, να συνδεθεί με βιβλιοθήκες έτοιμων υποσυστημάτων και να ενσωματωθεί με εργαλεία βελτιστοποίησης και CAM, ανοίγοντας τον δρόμο για ταχύτερο, ασφαλέστερο και περισσότερο τεκμηριωμένο κύκλο σχεδίασης και παραγωγής.

### 4.2. Μελλοντική μελέτη

Η παρούσα εργασία θέτει ένα λειτουργικό πλαίσιο παραμετρικού σχεδιασμού, ωστόσο υπάρχουν σαφή περιθώρια διεύρυνσης:

Προτείνεται η εισαγωγή περισσότερων και ιεραρχικά οργανωμένων παραμέτρων όπως εναλλακτικές τοπολογίες στηριγμάτων ή οπών, διαφοροποιημένα μοτίβα, πολλαπλές εκδοχές σφηνοδρόμου. Στόχος είναι το σχέδιο να μεταβάλλει όχι μόνο διαστάσεις αλλά και μορφολογία, επιτρέποντας τη δημιουργία τελείως διαφορετικών εξαρτημάτων από το ίδιο πρότυπο.

Απαιτείται περαιτέρω βελτιστοποίηση των κανόνων, ώστε να μειωθούν ψευδώς θετικά/αρνητικά, να ενοποιηθούν επικαλυπτόμενοι έλεγχοι και να βελτιωθεί η καθοδήγηση του χρήστη με σαφέστερα μηνύματα και προτεινόμενα εύρη διόρθωσης. Χρήσιμη θα ήταν

η υιοθέτηση μονάδων ελέγχου για iLogic rules, καταγραφή συμβάντων και αυτόματος έλεγχος ορίων πριν από κάθε ενημέρωση.

Προτείνεται επίσης η ενσωμάτωση βασικών παραμέτρων εκτύπωσης όπως υλικό, ύψος στρώσης, infill, μοτίβο, υποστηρίγματα, προσανατολισμός, είτε στο ίδιο UI είτε μέσω σύνδεσης με το slicer, με στόχο: (i) τυποποίηση ρυθμίσεων ανά γεωμετρική διαμόρφωση, (ii) γρήγορη σύγκριση ποιότητας, χρόνου και κόστους.

Συνολικά, η μελλοντική μελέτη στοχεύει σε ένα πιο ευέλικτο και ανθεκτικό σύστημα, όπου η γεωμετρία, οι περιορισμοί, οι ρυθμίσεις εκτύπωσης και η αξιολόγηση απόδοσης συνδέονται σε μια ενιαία, τεκμηριωμένη σχεδίαση.

## 5. Παράρτημα Α

### 5.1. Κώδικας περιορισμών για στάτορα του 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου

```
'SYNTHIKES
If magnet_dist_c + (magnet_width / 2) > (total_diam / 2) Or magnet_dist_c
- (magnet_width / 2) < (step_diam / 2) Or numb_coils * userCoilSuppWidth
> (total_diam / 2) * 2 * PI Or numb_magnets * magnet_width >
magnet_dist_c*2*PI Then

    MessageBox.Show("Η πατούρα δεν μπορεί να καλύπτει τις οπές των
μαγνητών" & vbCrLf &
    "Η προηγούμενη αποδεκτή τιμή θα επανέλθει.", _
    "Περιορισμός παραβιάστηκε", MessageBoxButtons.OK,
    MessageBoxIcon.Warning)

'ENHMERWSH TIMWN
    magnet_dist_c = oldMagnetDistC
    magnet_width = oldMagnetWidth
    shaft_diam = oldShaftDiam
    userStepDiam = olduserStepDiam
    total_diam = oldTotalDiam
    numb_coils = oldNumbCoils
    userCoilSuppWidth = olduserCoilSuppWidth
    numb_magnets = oldNumbMagnets

'EPISTROFH STIS PALIES TIMES SE PERIPTWSH LATHOUS
Else
    oldMagnetDistC = magnet_dist_c
    oldMagnetWidth = magnet_width
    oldShaftDiam = shaft_diam
    olduserStepDiam = userStepDiam
    oldTotalDiam = total_diam
    oldNumbCoils = numb_coils
    olduserCoilSuppWidth = userCoilSuppWidth
    oldNumbMagnets = numb_magnets

End If
InventorVb.DocumentUpdate()
```

### 5.2. Κώδικας εξαρτημένων παραμέτρων στάτορα

```
'Εξωτερική διάμετρος
If manualTotalDiam= False Then
    total_diam = 3 * shaft_diam
End If

'Απόσταση μαγνητών απο κέντρο
If manualMagnetDistC = False Then
    magnet_dist_c = shaft_diam
End If

'Βάθος μαγνητών
If manualMagnetDepth= False Then
    magnet_depth= stator_height
End If

'coil fillet
If manualCoilFillet = False Then
    coil_fillet = coil_supp_width
End If

'inner coil dist center
```

```

If manualInnerCoilSuppDistC = False Then
    userInnerCoilSuppDistC = userCoilLength - (inner_coil_supp_width
/ 2) - (coil_supp_width / 2)
End If

'inner coil dist edge
If manualInnerCoilSuppDistE = False Then
    inner_coil_supp_dist_edge = coil_supp_width
End If

InventorVb.DocumentUpdate()

```

### 5.3. Περιορισμοί ρότορα case study 1<sup>ου</sup>

```

'SYNTHIKI
If screw_hole_dist_c - (screw_hole_width / 2) < magnet_dist_c +
magnet_thickness Or magnet_dist_c < (inner_diam/2) Or (shaft_diam / 2) +
user_step_up > (inner_diam / 2) - in_circ_diam Then
    MessageBox.Show("Οι οπές τέμνονται" & vbNewLine & "Η προηγούμενη
αποδεκτή τιμή θα επανέλθει.", _
    "Περιορισμός παραβιάστηκε", MessageBoxButtons.OK,
    MessageBoxIcon.Warning)

'ENHERWSH TIMWN
    total_diam = oldTotalDiam
    magnet_dist_c = oldMagnetDistC
    user_screw_dist_e = oldScrewHoleDistE
    inner_diam = oldInnerDiam
    shaft_diam = oldShaftDiam
    Exit Sub

'EPANAFORA PALIWN TIMWN SE PERIPTVSH LATHOUS
Else
    oldTotalDiam = total_diam
    oldMagnetDistC = magnet_dist_c
    oldScrewHoleDistE = user_screw_dist_e
    oldInnerDiam = inner_diam
    oldShaftDiam = shaft_diam

End If

'ELEGXOS SYNTHIKIS
If (section_3_diam / 2) > (section_2_diam / 2) - (screw_hole_width / 2)
Then
    MessageBox.Show("Η διάμετρος του Section 3 δεν μπορεί να είναι
μεγαλύτερη από τη διάμετρο στο Section 2" & vbNewLine & "Η προηγούμενη
αποδεκτή τιμή θα επανέλθει.", _
    "Περιορισμός παραβιάστηκε", MessageBoxButtons.OK,
    MessageBoxIcon.Warning)

'ENHERWSH TIMWN
    section_3_diam = oldSection3Diam
    section_2_diam = oldSection2Diam

'EPANAFORA PALIWN TIMWN SE PERIPTVSH LATHOUS
Else
    oldSection3Diam = section_3_diam
    oldSection2Diam = section_2_diam

```

End If

InventorVb.DocumentUpdate()

#### 5.4. Κώδικας περιορισμών δίσκου πηνίων case study 1<sup>ου</sup>

```
If (shaft_diam / 2) + userWedgeHeight > (inner_diam / 2) - in_circ_width  
Then  
    MessageBox.Show("Οι οπές τέμνονται" & vbCrLf & "Η προηγούμενη  
αποδεκτή τιμή θα επανέλθει.", _  
    "Περιορισμός παραβιάστηκε", MessageBoxButtons.OK,  
    MessageBoxIcon.Warning)
```

```
' ENHMERWSH TIMWN  
    shaft_diam = oldShaftDiam  
    inner_diam = oldInnerDiam  
    userWedgeHeight = oldWedgeHeight  
    in_circ_width = oldInCircDiam  
    userWedgeWidth = oldWedgeWidth  
  
' EPISTROFH STIS PALIES TIMES SE PERIPTWSH LATHOUS  
Else  
    oldShaftDiam = shaft_diam  
    oldInnerDiam = inner_diam  
    oldWedgeHeight = userWedgeHeight  
    oldInCircDiam = in_circ_width  
    oldWedgeWidth = userWedgeWidth  
End If
```

```
' SYNTHIKI  
If coil_height > bottom_disc_thickness + coil_supp_cylinder_height Then  
    MessageBox.Show("Το ύψος των πηνίων δεν μπορεί να είναι  
μεγαλύτερο από το συνολικό ύψος" & vbCrLf & "Η προηγούμενη αποδεκτή  
τιμή θα επανέλθει.", _  
    "Περιορισμός παραβιάστηκε", MessageBoxButtons.OK,  
    MessageBoxIcon.Warning)
```

```
' ENHMERWSH TIMWN  
    coil_height = oldCoilHeight  
    bottom_disc_thickness = oldBottomDiscThickness  
    coil_supp_cylinder_height = oldCylinderHeight  
' EPISTROFH STIS PALIES TIMES SE PERIPTWSH LATHOUS  
Else  
    oldCoilHeight = coil_height  
    oldBottomDiscThickness = bottom_disc_thickness  
    oldCylinderHeight = coil_supp_cylinder_height  
End If  
InventorVb.DocumentUpdate()
```

#### 5.5. Κώδικας περιορισμών στάτορα case study 1<sup>ου</sup>

```
' SYNTHIKI  
If magnet_dist_center + magnet_offset > (total_diam / 2) - 1 Or  
magnet_dist_center < (step_diam/2) Then  
    MessageBox.Show("Η απόσταση των μαγνητών από το κέντρο δεν  
μπορεί να είναι μεγαλύτερη της συνολικής διαμέτρου ή της εσωτερικής  
διαμέτρου" & vbCrLf & "Η προηγούμενη αποδεκτή τιμή θα επανέλθει.", _  
    "Περιορισμός παραβιάστηκε", MessageBoxButtons.OK,  
    MessageBoxIcon.Warning)
```

```
' ENHMERWSH TIMWN  
    magnet_dist_center = oldMagnetDistCenter  
    step_diam = oldStepDiam
```

```

        magnet_offset = oldMagnetOffset
    Exit Sub

'EPISTROFH STIS PALIES TIMES SE PERIPTVSH PARAVIASHS
Else
    oldMagnetDistCenter = magnet_dist_center
    oldStepDiam = step_diam
    oldMagnetOffset = magnet_offset
End If

'SYNTHIKI
If 2 * wedge_width > shaft_diam Or (shaft_diam / 2) + wedge_height >
(step_diam / 2) Then
    MessageBox.Show("Η διάμετρος του άξονα δεν μπορεί να είναι
μικρότερη από την διάμετρο της σφήνας" & vbCrLf & "Η προηγούμενη
αποδεκτή τιμή θα επανέλθει.", _
    "Περιορισμός παραβιάστηκε", MessageBoxButtons.OK,
    MessageBoxIcon.Warning)

'ENHMERWSH TIMWN
    shaft_diam = oldShaftDiam
    wedge_width = oldWedgeWidth
    wedge_height = oldWedgeHeight

'EPISTROFH STIS PALIES TIMES SE PERIPTVSH LATHOUS
Else
    oldShaftDiam = shaft_diam
    oldWedgeWidth = wedge_width
    oldWedgeHeight = wedge_height
End If
InventorVb.DocumentUpdate()

```

## 5.6. Κώδικας περιορισμών στάτορα case study 2<sup>ο</sup>

```

Dim maxShaftDiam As Double = total_diam

If shaft_diam >= maxShaftDiam Or magnet_dist_edge - (magnet_width/2) <
stopper_dist_edge + (stopper_width/2) Or magnet_width*numb_magnets >
(total_diam/2) *2*PI Then
    MessageBox.Show("Η διάσταση της διαμέτρου της οπής του άξονα
πρέπει να είναι μικρότερη της εξωτερικής διαμέτρου" & minShaftDiam & " έως
" & maxShaftDiam & " mm. ", "Προειδοποίηση", MessageBoxButtons.OK,
    MessageBoxIcon.Warning)

    shaft_diam = oldShaftDiam
    total_diam = oldTotalDiam
    magnet_width = oldMagnetWidth
    magnet_dist_edge = oldMagnetDistE
    stopper_width = oldStopperWidth
    stopper_dist_edge = oldStopperDistE
    numb_magnets = oldNumbMagnets

Else
    oldShaftDiam = shaft_diam
    oldTotalDiam = total_diam
    oldMagnetWidth = magnet_width
    oldMagnetDistE = magnet_dist_edge
    oldStopperWidth = stopper_width
    oldStopperDistE = stopper_dist_edge
    oldNumbMagnets = numb_magnets
Exit Sub

End If
InventorVb.DocumentUpdate()

```

## Βιβλιογραφία

- [1] A. Z. Sampaio, “Historical Evolution of Technical Drawing in Engineering,” in *2018 3rd International Conference of the Portuguese Society for Engineering Education (CISPEE)*, Aveiro: IEEE, June 2018, pp. 1–9. doi: 10.1109/CISPEE.2018.8593496.
- [2] D. T. Ross, “Origins of the APT language for automatically programmed tools,” in *History of programming languages*, R. L. Wexelblat, Ed., New York, NY, USA: ACM, 1978, pp. 279–338. doi: 10.1145/800025.1198374.
- [3] J. L. Encarnação, R. Lindner, and E. G. Schlechtendahl, “History and Basic Components of CAD,” in *Computer Aided Design: Fundamentals and System Architectures*, J. L. Encarnação, R. Lindner, and E. G. Schlechtendahl, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer, 1990, pp. 7–112. doi: 10.1007/978-3-642-84054-8\_2.
- [4] I. E. Sutherland, “Sketch pad a man-machine graphical communication system,” in *Proceedings of the SHARE design automation workshop on - DAC '64*, Not Known: ACM Press, 1964, p. 6.329-6.346. doi: 10.1145/800265.810742.
- [5] L. Piegl and W. Tiller, “B-spline Curves and Surfaces,” in *The NURBS Book*, L. Piegl and W. Tiller, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer, 1997, pp. 81–116. doi: 10.1007/978-3-642-59223-2\_3.
- [6] G. E. Farin, *Curves and Surfaces for CAGD: A Practical Guide*. Morgan Kaufmann, 2002.
- [7] A. G. Requicha, “Representations for Rigid Solids: Theory, Methods, and Systems,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 12, no. 4, pp. 437–464, Dec. 1980, doi: 10.1145/356827.356833.
- [8] J. J. Shah and M. Mäntylä, *Parametric and Feature-Based CAD/CAM: Concepts, Techniques, and Applications*. John Wiley & Sons, 1995.
- [9] M. P. Bendsøe and N. Kikuchi, “Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method,” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 71, no. 2, pp. 197–224, Nov. 1988, doi: 10.1016/0045-7825(88)90086-2.
- [10] A. Kentli, *Truss and Frames: Recent Advances and New Perspectives*. BoD – Books on Demand, 2020.
- [11] A. Martínez-García, M. Monzón, and R. Paz, “Chapter 12 - Standards for additive manufacturing technologies: structure and impact,” in *Additive Manufacturing*, J. Pou, A. Riveiro, and J. P. Davim, Eds., in Handbooks in Advanced Manufacturing. , Elsevier, 2021, pp. 395–408. doi: 10.1016/B978-0-12-818411-0.00013-6.
- [12] B. F. Robertson and D. F. Radcliffe, “Impact of CAD tools on creative problem solving in engineering design,” *Comput.-Aided Des.*, vol. 41, no. 3, pp. 136–146, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.cad.2008.06.007.
- [13] I. Zeid, *CAD/Cam Theory and Practice*, 1st ed. McGraw-Hill Higher Education, 1991.
- [14] J. A. Jeyaraj, A. Perez, A. Zayed, A. G. Mullins, and A. E. Tejada-Martinez, “Computational Fluid Dynamics Modeling of Concrete Flows in Drilled Shafts,” *Fluids*, vol. 9, no. 1, p. 13, Jan. 2024, doi: 10.3390/fluids9010013.
- [15] S. Myung and S. Han, “Knowledge-based parametric design of mechanical products based on configuration design method,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 21, no. 2, pp. 99–107, Aug. 2001, doi: 10.1016/S0957-4174(01)00030-6.
- [16] Y. Zhou *et al.*, “Parametric modeling method for integrated design and manufacturing of radial compressor impeller,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 112, no. 3, pp. 1007–1021, Jan. 2021, doi: 10.1007/s00170-020-06331-5.
- [17] E. Mermoz, J. M. Linares, and A. Bernard, “Benefits and limitations of parametric design implementation in helicopter gearbox design phase,” *CIRP Ann.*, vol. 60, no. 1, pp. 199–202, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.cirp.2011.03.095.
- [18] C. R. Barrios Hernandez, “Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi,” *Des. Stud.*, vol. 27, no. 3, pp. 309–324, May 2006, doi: 10.1016/j.destud.2005.11.006.
- [19] R. G. (Richard G. Budynas, “Shigley’s mechanical engineering design”.
- [20] R. Tiwari, *Rotor Systems: Analysis and Identification*. Boca Raton: CRC Press, 2017. doi: 10.1201/9781315230962.



- [21] "Predicting the Stability of Rotor Systems with the COMSOL® Software," COMSOL. Accessed: Sept. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/blogs/predicting-the-stability-of-rotor-systems-with-the-comsol-software>
- [22] L. Zuo, B. Scully, J. Shestani, and Y. Zhou, "Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions," *Smart Mater. Struct.*, vol. 19, no. 4, p. 045003, Oct. 2010, doi: 10.1088/0964-1726/19/4/045003.
- [23] B. Maamer, F. Tounsi, S. Kaziz, N. Jaziri, and A. Boughamoura, "A Halbach cylinder-based system for energy harvesting from rotational motion with high power density," *Sens. Actuators Phys.*, vol. 337, p. 113428, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.sna.2022.113428.
- [24] Y. Zhang, J. Cao, W.-H. Liao, L. Zhao, and J. Lin, "Theoretical modeling and experimental verification of circular Halbach electromagnetic energy harvesters for performance enhancement," *Smart Mater. Struct.*, vol. 27, no. 9, p. 095019, Dec. 2018, doi: 10.1088/1361-665X/aad710.
- [25] G. E. Morales-Espejel and A. Gabelli, "Rolling bearing performance rating parameters: Review and engineering assessment," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 234, no. 15, pp. 3064–3077, Aug. 2020, doi: 10.1177/0954406220911395.
- [26] A. Savini and G. G. Savini, "A short history of 3D printing, a technological revolution just started," in *2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON)*, Tel-Aviv, Israel: IEEE, Aug. 2015, pp. 1–8. doi: 10.1109/HISTELCON.2015.7307314.
- [27] J. Horvath, "A Brief History of 3D Printing," in *Mastering 3D Printing*, Berkeley, CA: Apress, 2014, pp. 3–10. doi: 10.1007/978-1-4842-0025-4\_1.
- [28] R. H. Awad, S. A. Habash, and C. J. Hansen, "Chapter 2 - 3D Printing Methods," in *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*, S. J. Al'Aref, B. Mosadegh, S. Dunham, and J. K. Min, Eds., Boston: Academic Press, 2018, pp. 11–32. doi: 10.1016/B978-0-12-803917-5.00002-X.
- [29] R. B. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, Ubaidillah, and Z. Arifin, "A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters," *Open Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 639–649, Jan. 2021, doi: 10.1515/eng-2021-0063.
- [30] O. S. Carneiro, A. F. Silva, and R. Gomes, "Fused deposition modeling with polypropylene," *Mater. Des.*, vol. 83, pp. 768–776, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.053.
- [31] A. Awad, F. Fina, A. Goyanes, S. Gaisford, and A. W. Basit, "3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering," *Int. J. Pharm.*, vol. 586, p. 119594, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.ijpharm.2020.119594.
- [32] Q. Fu, E. Saiz, and A. P. Tomsia, "Direct ink writing of highly porous and strong glass scaffolds for load-bearing bone defects repair and regeneration," *Acta Biomater.*, vol. 7, no. 10, pp. 3547–3554, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.actbio.2011.06.030.
- [33] "What is SLS 3D printing? A guide to selective laser sintering | Protolabs Network." Accessed: Sept. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/>
- [34] J. A. Lewis and G. M. Gratson, "Direct writing in three dimensions," *Mater. Today*, vol. 7, no. 7, pp. 32–39, July 2004, doi: 10.1016/S1369-7021(04)00344-X.
- [35] "Direct Ink Writing - an overview | ScienceDirect Topics." Accessed: Sept. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/direct-ink-writing>
- [36] J. O. Hardin, T. J. Ober, A. D. Valentine, and J. A. Lewis, "Microfluidic Printheads for Multimaterial 3D Printing of Viscoelastic Inks," *Adv. Mater.*, vol. 27, no. 21, pp. 3279–3284, June 2015, doi: 10.1002/adma.201500222.
- [37] M. Ntousia and I. Fudos, "3D Printing Technologies & Applications: An Overview," in *Proceedings of CAD'19*, CAD Solutions LLC, June 2019, pp. 243–248. doi: 10.14733/cadconfP.2019.243-248.
- [38] "Application of Stereolithography Based 3D Printing Technology in Investment Casting." Accessed: Sept. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-666X/11/10/946>

- [39]X. L. Ma, "Research on Application of SLA Technology in the 3D Printing Technology," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 401–403, pp. 938–941, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.401-403.938.
- [40]"The Difference Between DLP And SLA 3D Printing Technology | Manufactur3D." Accessed: Sept. 16, 2025. [Online]. Available: <https://manufactur3dmag.com/difference-dlp-sla/>
- [41]O. Gülcan, K. Günaydın, and A. Tamer, "The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review," *Polymers*, vol. 13, no. 16, p. 2829, Jan. 2021, doi: 10.3390/polym13162829.
- [42]H. Yang *et al.*, "Performance evaluation of ProJet multi-material jetting 3D printer," *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 12, no. 1, pp. 95–103, Jan. 2017, doi: 10.1080/17452759.2016.1242915.
- [43]Engineeringbro, "Material Jetting 3d printing comprehensive guide." Accessed: Sept. 17, 2025. [Online]. Available: <https://engineeringbro.com/material-jetting-3d-printing/>
- [44]K. Piłczyńska, "Chapter 8 - Material jetting," in *Polymers for 3D Printing*, J. Izdebska-Podsiadły, Ed., in *Plastics Design Library*, William Andrew Publishing, 2022, pp. 91–103. doi: 10.1016/B978-0-12-818311-3.00022-7.
- [45]A. Ramya, "3D PRINTING TECHNOLOGIES IN VARIOUS APPLICATIONS".
- [46]F. F. Pieterse and A. L. Nel, "The advantages of 3D printing in undergraduate mechanical engineering research," in *2016 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, Apr. 2016, pp. 25–31. doi: 10.1109/EDUCON.2016.7474526.
- [47]A. Jandyal, I. Chaturvedi, I. Wazir, A. Raina, and M. I. Ul Haq, "3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0," *Sustain. Oper. Comput.*, vol. 3, pp. 33–42, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.susoc.2021.09.004.
- [48]S. Liu, "Structural design of a novel rotary platform 3D printer," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2798, no. 1, p. 012023, Apr. 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2798/1/012023.
- [49]R. Subramani, P. Vijayakumar, M. A. Rusho, A. Kumar, K. V. Shankar, and A. K. Thirugnanasambandam, "Selection and Optimization of Carbon-Reinforced Polyether Ether Ketone Process Parameters in 3D Printing—A Rotating Component Application," *Polymers*, vol. 16, no. 10, p. 1443, Jan. 2024, doi: 10.3390/polym16101443.
- [50]R. Kiljunen and D. E. Sikanen, "Bachelor's Program in Mechanical engineering, Bachelor's thesis," 2022.