



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
UNIVERSITY of the PELOPONNESE

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΛΑΗΤΙΚΟΥ
ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΓΙΑ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗ**



ΦΟΙΤΗΤΗΣ: Ηλίας Λάγιος (Α.Μ:19059)

ΕΙΒΛΕΠΩΝ Καθηγητής : Γεώργιος Γιαννόπουλος
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2026

- Εγκρίθηκε από την τριμελή Εξεταστική Επιτροπή
- A) Γιαννόπουλος Γεώργιος, Εντεταλμένος Διδάσκων
 - B) Διαμαντάκος Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής
 - Γ) Τσίρκας Σωτήριος, Επίκουρος Καθηγητής


ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο υπογράφων Λάγιος Ηλίας του Παναγιώτη, με αριθμό μητρώου 19059 φοιτητής του Τμήματος Μηχανολόγων της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα



Ημερομηνία: 19/2/2026

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Διπλωματική Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και αναφέρεται στον γενετικό σχεδιασμό πλανητικού μηχανισμού για 3D εκτύπωση.

Στην αρχή μελετάται το θεωρητικό υπόβαθρο του μηχανισμού. Στην συνέχεια ο σχεδιασμός, η αφαίρεση υλικού και η βελτιστοποιημένη λύση. Τέλος η εκτύπωση του πλανητικού μηχανισμού.

Η παρούσα εργασία είναι αφιερωμένη στην οικογένεια μου, που με στήριξαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Γιαννόπουλο Γεώργιο, που μου εμπιστεύτηκε την παρούσα διπλωματική εργασία, για τις πολύτιμες συμβουλές του και την στήριξή του.

Λάγιος Ηλίας
Φεβρουάριος 2026

Περίληψη

Ο γενετικός σχεδιασμός πλανητικού συστήματος γραναζιών αποτελεί μια καινοτόμο προσέγγιση στη βελτιστοποίηση μηχανικών εξαρτημάτων, αξιοποιώντας τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης και εξελικτικούς αλγορίθμους. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αποδοτικού πλανητικού μηχανισμού με τη χρήση του λογισμικού Autodesk Fusion 360, συνδυάζοντας γενετικούς αλγορίθμους και παραμετρικό σχεδιασμό, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η αντοχή, η απόδοση και το βάρος του συστήματος.

Στην εργασία αναλύεται η θεωρητική βάση των πλανητικών μηχανισμών, η λειτουργία τους και οι βιομηχανικές εφαρμογές τους, καθώς και η συμβολή των γενετικών αλγορίθμων στη σχεδίαση και βελτιστοποίηση μηχανικών συστημάτων. Επιπλέον, γίνεται πρακτική εφαρμογή μέσω Autodesk Fusion 360, όπου υλοποιείται η δημιουργία μοντέλου, η εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων και η αξιολόγηση του τελικού σχεδίου μέσω ανάλυσης προσομοίωσης (Finite Element Analysis - FEA) και μελετών δυναμικής κίνησης.

Η μελέτη ολοκληρώνεται με τον έλεγχο μέσω της εφαρμογής Ansys και με την προετοιμασία του μοντέλου για τρισδιάστατη εκτύπωση. Εξετάζεται το κατάλληλο υλικό εκτύπωσης (πλαστικό υψηλής αντοχής), οι βέλτιστες ρυθμίσεις εκτύπωσης, καθώς και η δοκιμαστική εκτύπωση και αξιολόγηση του αποτελέσματος. Μέσα από συγκριτική ανάλυση διαφορετικών σχεδιαστικών παραμέτρων, προτείνεται ένα βελτιστοποιημένο πλανητικό σύστημα γραναζιών, κατάλληλο για εφαρμογές στη ρομποτική, τη μηχανολογία και τη βιομηχανία.

Η εργασία καταλήγει σε συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της μεθόδου γενετικού σχεδιασμού και τις δυνατότητες περαιτέρω βελτιστοποίησης με τη χρήση προηγμένων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης.

Λέξεις -Κλειδιά: Πλανητικός μηχανισμός, Γρανάζια (Κεντρικό, Περιφερειακά, Δακτυλιοειδές) ,Γενετικός αλγόριθμος , Fusion 360, Ansys, Γεωμετρία μηχανισμού ,3D εκτύπωση

Abstract

The genetic design of a planetary gear system is an innovative approach to the optimization of mechanical components, utilizing artificial intelligence techniques and evolutionary algorithms. The purpose of this work is to develop an efficient planetary mechanism using Autodesk Fusion 360, combining genetic algorithms and parametric design, in order to optimize the strength, performance and weight of the system.

The work analyzes the theoretical basis of planetary mechanisms, their operation and their industrial applications, as well as the contribution of genetic algorithms to the design and optimization of mechanical systems. Además, a practical application is made through Autodesk Fusion 360, where the creation of a model, the application of genetic algorithms and the evaluation of the final design through simulation analysis (Finite Element Analysis - FEA) and dynamic motion studies are implemented.

The study concludes with a check through Ansys and with the preparation of the model for 3D printing. The appropriate printing material (high-strength plastic), the optimal printing settings, as well as the test printing and evaluation of the result are examined. Through a comparative analysis of different design parameters, an optimized planetary gear system is proposed, suitable for applications in robotics, mechanical engineering and industry.

Keywords: Planetary mechanism, Gears (Central, Peripheral, Ring), Genetic algorithm, Fusion 360, Mechanism geometry, Ansys, 3D printing

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	iv
Περίληψη	v
Abstract.....	vi
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1.1. Γενικό πλαίσιο	9
1.2 Σκοπός της έρευνας	11
1.3 Παρουσίαση δομής της εργασίας.....	13
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	16
2.1 Αρχές λειτουργίας πλανητικών μηχανισμών	16
2.1.1 Μηχανική ανάλυση γραναζιών	18
2.1.2 Μηχανισμός επαφής	23
2.1.3 Γεωμετρία γραναζιών και τάσεις στο δόντι του γραναζιού	28
2.1.4 Σχεδιασμός του πλανητικού συστήματος γραναζιών	32
2.2 Γενετικός αλγόριθμος και σχεδιασμός.....	34
2.2.1 Γενετικοί αλγόριθμοι και άλλες μορφές βελτιστοποίησης	38
2.2.2 Πλεονεκτήματα Γενετικών Αλγορίθμων	41
2.2.3 Μειονεκτήματα γενετικών αλγορίθμων	44
2.2.4 Εφαρμογές των γενετικών αλγορίθμων.....	45
2.3 Επισκόπηση λογισμικού Autodesk Fusion 360 και γενετικού σχεδιασμού.....	48
2.3.1 Ολοκληρωμένη Πλατφόρμα CAD/CAM/CAE.....	48
2.3.2 Cloud-Based Συνεργασία	51
2.3.3 Γεννητικός σχεδιασμός (Generative Design).....	52
2.3.4 Μηχανολογική προσομοίωση.....	53
2.3.5 Εργαλεία CAM και Παραγωγής	54
2.3.6 Παραμετρικός σχεδιασμός.....	55
3.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	57
3.1 Στόχοι απαιτήσεις-Συλλογή δεδομένων	57
3.2 Παραμετρικός Σχεδιασμός στο Fusion 360	58
3.3 Εφαρμογή Generative Design	58
3.4 Προετοιμασία για Τρισδιάστατη Εκτύπωση	59
4.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΤΟ FUSION 360	61
4.1 Δημιουργία στοιχείων πλανητικού μηχανισμού	61
4.2 ΠΛΑΝΗΤΕΣ (PLANETS)	63
4.3 ΗΛΙΟΣ (SUN)	65
4.4 ΔΑΧΤΥΛΙΔΙ (RING)	68
4.5 ΦΟΡΕΑΣ (CARRIER)	71
5. ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΛΑΝΗΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ.....	73
5.1 Γενετικός Σχεδιασμός στο Autodesk Fusion	73
5.2 Αρχικός σχεδιασμός πλανητικού μηχανισμού στο Autodesk Fusion και στόχοι βελτιστοποίησής του	75
5.3 Γενετική βελτιστοποίηση σχεδιασμού πλανητικών γραναζιών.....	78
5.4 Γενετική βελτιστοποίηση σχεδιασμού γραναζιού ήλιου	82

5.5	Γενετική βελτιστοποίηση σχεδιασμού φορέα πλανητών	84
5.6	Τελικός βελτιστοποιημένος σχεδιασμός συναρμολογημένου πλανητικού μηχανισμού	87
6.	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΧΙΚΟΥ ΚΑΙ ΓΕΝΕΤΙΚΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ANSYS.....	89
6.1.	Γεωμετρία και διακριτοποίηση.....	90
6.2.	Συνοριακές συνθήκες.....	94
6.3.	Αριθμητική Επίλυση	97
6.4.	Αριθμητικά Αποτέλεσμα	99
6.4.1	Συνολικός Πλανητικός Μηχανισμός.....	99
6.4.2	Φορέας πλανητών (Planet Carrier)	105
6.4.3	Πλανήτες (<i>Planets</i>).....	107
6.4.4	Ήλιος (Sun)	110
6.4.5	Δακτυλιοειδές γρανάζι (Ring gear)	112
6.5.	Συνοπτική σύγκριση σχεδιασμού πριν και μετά την γενετική βελτιστοποίηση.....	114
7.	ΑΠΟ ΤΟΝ ΓΕΝΕΤΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΑΝΗΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ	117
7.1	Υιοθετούμενος εκτυπωτής και ρυθμίσεις εκτύπωσης.....	117
7.2	Τρισδιάστατη εκτύπωση επιμέρους εξαρτημάτων	120
7.3.	Συναρμολόγηση και αξιολόγηση γενετικά βελτιστοποιημένου πλανητικού μηχανισμού	127
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	130
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	133

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικό πλαίσιο

Το πλανητικό γρανάζι όπως φαίνεται και στο [Σχήμα 1.1](#) είναι ένας τύπος επικυκλικού συστήματος γραναζιών που αποτελείται από οδοντωτούς τροχούς. Στο πλανητικό γρανάζι (γνωστό και ως επικυκλικό γρανάζι), ένα κεντρικό γρανάζι, που ονομάζεται ηλιακό γρανάζι, χρησιμεύει ως είσοδος και οδηγός του συστήματος. Τρία ή περισσότερα «καθοδηγούμενα» γρανάζια (αναφέρονται ως πλανήτες) περιστρέφονται γύρω από τον ήλιο μέσα σε ένα πλανητικό κιβώτιο ταχυτήτων. Τέλος, οι πλανήτες εμπλέκονται με ένα δακτυλιοειδές γρανάζι από το εσωτερικό, το οποίο δημιουργεί έναν εσωτερικό σχεδιασμό οδοντωτών τροχών. Επειδή τα γρανάζια του πλανήτη είναι ομοιόμορφα κατανομημένα γύρω από τον ήλιο, τα συστήματα με πλανητικά γρανάζια είναι γνωστό ότι είναι εξαιρετικά ανθεκτικοί μηχανισμοί. Ένα άλλο πλεονέκτημα ενός πλανητικού γραναζιού είναι ότι είναι εύκολο να μετατραπεί σε διαφορετική αναλογία αλλάζοντας απλώς τον φορέα και τον ήλιο.[1]



Σχήμα1.1: Πλανητικό σύστημα γραναζιών (<https://www.regalrexnord.com>)

Ένα πλανητικό σετ ταχυτήτων χρησιμοποιεί οδοντωτούς τροχούς που κινούνται ο ένας απέναντι από το άλλο μέσα στο ίδιο επίπεδο. Ενώ οι οδοντωτοί τροχοί είναι ένας βασικός τύπος εργαλείου από άποψη μηχανικής, δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιούν ειδικές γωνίες ή τομές όπως γρανάζια λοξότμησης ή ψαροκόκαλου, είναι πολύπλοκα στο σχεδιασμό του σχήματος των δοντιών. Ανάλογα με την εφαρμογή, ο σχεδιασμός των δοντιών είναι αυτός που θα καθορίσει το σημείο επαφής τους, που στη συνέχεια καθορίζει τη διαθέσιμη ισχύ, τη ροπή και το δυναμικό ταχύτητας των γραναζιών.

Τα σχέδια πλανητικών γραναζιών γενικά έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των κιβωτίων ταχυτήτων αυτοκινήτων, κινητήρες κίνησης τροχών, βιομηχανικές εφαρμογές μεταφοράς και άλλες

Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται σε:

- Βιομηχανική Ρομποτική: Οι πλανητικοί μηχανισμοί χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικούς ρομποτικούς βραχίονες για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας και ελέγχου κίνησης. Επιτρέπουν τη μετάδοση υψηλής ροπής σε συμπαγείς διαστάσεις, καθιστώντας τους ιδανικούς για εφαρμογές που απαιτούν ακρίβεια και αξιοπιστία. [2]
- Βιομηχανικές Εφαρμογές: Στη βιομηχανία, οι πλανητικοί μηχανισμοί χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, όπως:
 1. Αυτοκινητοβιομηχανία: Για τη μετάδοση κίνησης σε αυτόματα κιβώτια ταχυτήτων.
 2. Αεροδιαστημική: Σε συστήματα προσγείωσης και άλλες εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία.
 3. Βιομηχανικός Αυτοματισμός: Σε μηχανές που απαιτούν ακριβή έλεγχο κίνησης και υψηλή ροπή.

Στην πραγματικότητα, ακόμη και μια φαινομενικά απλή εφαρμογή όπως ένα ποδήλατο χρησιμοποιεί πλανητικά γρανάζια για να τροφοδοτήσει τον μηχανισμό αλλαγής ταχυτήτων. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σύστημα μετάδοσης κίνησης μεταξύ κινητήρων εσωτερικής καύσης ή να συνδεθούν με ηλεκτροκινητήρες.

1.2 Σκοπός της έρευνας

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι ο γενετικός σχεδιασμός ενός πλανητικού συστήματος με την χρήση του λογισμικού Autodesk Fusion 360 και την προετοιμασία του για τρισδιάστατη εκτύπωση.

Ο γενετικός αλγόριθμος είναι μια μέθοδος βελτιστοποίησης που βασίζεται στη μηχανική της φυσικής γενετικής και της φυσικής επιλογής. Ο γενετικός αλγόριθμος μιμείται την αρχή της φυσικής γενετικής και της φυσικής επιλογής για να αποτελέσει διαδικασίες αναζήτησης και βελτιστοποίησης. Χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό και την εύρεση της σχεδόν βέλτιστης λύσης σε σύντομο χρονικό διάστημα. Σε έναν γενετικό αλγόριθμο η αναπαράσταση γίνεται με διαφορετική κάθε φορά μεταβλητή. Αναπτύσσεται ως εργαλείο σε διαφορετικές διεργασίες για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων που τις διέπουν, για την επίλυση πολλαπλών προβλημάτων σε εφαρμογές της επιστήμης των υλικών και της κατασκευής στον τομέα της μηχανολογίας. Ο γενετικός αλγόριθμος είναι ένας αλγόριθμος πολλαπλών διαδρομών που έχει στόχο πολλά σημεία παράλληλα, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα τοπικής ελάχιστης παγίδευσης και επιλύοντας προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων.[3]

Ο γενετικός σχεδιασμός πλανητικών συστημάτων γранаζιών αναφέρεται στη χρήση γενετικών αλγορίθμων για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας αυτών των μηχανισμών. Οι γενετικοί αλγόριθμοι, εμπνευσμένοι από τις αρχές της φυσικής εξέλιξης, χρησιμοποιούνται για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπως ο σχεδιασμός μηχανικών συστημάτων.

Μέσω της προσομοίωσης διαδικασιών όπως η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη, οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να βελτιστοποιήσουν παραμέτρους όπως: αναλογία μετάδοσης, αποδοτικότητα, μηχανική αντοχή ,μείωση θορύβου και κραδασμών.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει την κατασκευή σύνθετων γεωμετριών που μπορεί να είναι δύσκολο ή αδύνατο να παραχθούν με παραδοσιακές μεθόδους. Για την επιτυχή εκτύπωση πλανητικών γραναζιών, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα εξής:

- **Επιλογή Υλικού:** Τα υλικά πρέπει να έχουν τις κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες για να αντέχουν τα φορτία και τη φθορά.
- **Ανοχές και Ακρίβεια:** Ο σχεδιασμός πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις ανοχές της εκτυπωτικής διαδικασίας για να εξασφαλιστεί η σωστή συναρμολόγηση και λειτουργία.
- **Μετα-Επεξεργασία:** Ενδέχεται να απαιτείται επιπλέον επεξεργασία, όπως λείανση ή θερμική κατεργασία, για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος.[4]

Συνδυάζοντας τις τεχνικές του γενετικού σχεδιασμού με τις δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης, θα υπάρχει δυνατότητα να δημιουργηθούν πλανητικά συστήματα γραναζιών που είναι βελτιστοποιημένα για συγκεκριμένες εφαρμογές, προσφέροντας υψηλή απόδοση και προσαρμοστικότητα.

Ένα ισχυρό λογισμικό σχεδίασης είναι το Autodesk Fusion 360 , το οποίο παρέχει εργαλεία για γενετικό σχεδιασμό, ανάλυση, και προετοιμασία για τρισδιάστατη εκτύπωση.

Οι δυνατότητες του λογισμικού αφορούν: [5]

- Γενετικό Σχεδιασμό:
 1. Το Fusion 360 διαθέτει εργαλείο που χρησιμοποιεί αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης για τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας ενός συστήματος γραναζιών.
 2. Βασίζεται σε κριτήρια απόδοσης, όπως αντοχή, βάρος, κόστος υλικού και διαδικασία κατασκευής.
 3. Επιτρέπει την αυτόματη δημιουργία βέλτιστων σχεδίων για πλανητικούς μηχανισμούς, εξοικονομώντας χρόνο και μειώνοντας το ανθρώπινο λάθος

➤ Σχεδίαση Γραναζιών και Μηχανισμών:

- 1) Διαθέτει εργαλεία δημιουργίας γραναζιών.
- 2) Υποστηρίζει παραμετρικό σχεδιασμό, επιτρέποντας εύκολες τροποποιήσεις στις διαστάσεις των γραναζιών.
- 3) Μπορεί να δημιουργήσει συναρμολογήσεις πλανητικών συστημάτων και να ελέγξει την κίνηση των γραναζιών σε πραγματικό χρόνο.

➤ Δυναμική Ανάλυση & Προσομοίωση:

- 1) Περιλαμβάνει Finite Element Analysis (FEA) για την προσομοίωση της δομικής αντοχής των γραναζιών.
- 2) Υποστηρίζει κινηματική ανάλυση (Motion Study) για τη μελέτη της κίνησης και της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πλανητικών γραναζιών.
- 3) Επιτρέπει τον έλεγχο φθοράς και καταπόνησης λόγω της επαφής των γραναζιών υπό φορτίο.

➤ Προετοιμασία για Τρισδιάστατη Εκτύπωση:[6]

- 1) Το Fusion 360 προσφέρει εργαλεία , ώστε να προετοιμάσει αρχεία για τρισδιάστατη εκτύπωση.
- 2) Υποστηρίζει την εύκολη μεταφορά των σχεδίων σε 3D εκτυπωτές.
- 3) Παρέχει βελτιστοποίηση τοπολογίας, διασφαλίζοντας ότι τα μέρη είναι ελαφριά αλλά ανθεκτικά για εκτύπωση.

1.3 Παρουσίαση δομής της εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελείται από 8 ενότητες.

Στην **πρώτη ενότητα** περιγράφεται συνοπτικά ο σκοπός της εργασίας με αναφορά της θεωρητικής βάσης των πλανητικών μηχανισμών ,της λειτουργίας και των εφαρμογών τους. Μέσω του λογισμικού Autodesk Fusion 360 δημιουργείται μοντέλο γενετικού αλγορίθμου για τρισδιάστατη εκτύπωση

πλαστικού υλικού υψηλής αντοχής. Μετά από συγκριτική ανάλυση σχεδιαστικών παραμέτρων προτείνεται ο βελτιστοποιημένος πλανητικός μηχανισμός και παρουσιάζονται συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητά του.

Στην **δεύτερη ενότητα** περιγράφεται η σημασία του πλανητικού συστήματος γραναζιών, με εφαρμογές στη βιομηχανία, ρομποτική, αυτοκινητοβιομηχανία, μηχανολογία και γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματα των πλανητικών μηχανισμών (υψηλή απόδοση, συμπαγής σχεδίαση, ομαλή λειτουργία). Επισημαίνεται η σημασία των γενετικών αλγορίθμων στην βελτιστοποίηση της γεωμετρίας και των ιδιοτήτων των γραναζιών. Ο σκοπός της έρευνας αναφέρεται στην παρουσίαση της χρήσης γενετικών αλγορίθμων στον σχεδιασμό πλανητικών γραναζιών, στην βελτιστοποίησή τους μέσω Autodesk Fusion 360 και στην υλοποίηση και προετοιμασία τους για 3D εκτύπωση.

- Πλανητικά γρανάζια – Λειτουργία και χαρακτηριστικά.
- Δομή και αρχές λειτουργίας των πλανητικών γραναζιών-μηχανική ανάλυση.
- Αναλογία μετάδοσης και απόδοση.
- Υλικά και τεχνικές κατασκευής.
- Γενετικοί αλγόριθμοι στη μηχανική σχεδίαση.
- Τι είναι οι γενετικοί αλγόριθμοι.
- Βασικά βήματα γενετικής βελτιστοποίησης (mutation, crossover, selection).
- Εφαρμογή στον σχεδιασμό γραναζιών.
- Autodesk Fusion 360 και οι δυνατότητές του.
- Παραμετρικός σχεδιασμός.
- Γενετικός σχεδιασμός (Generative Design).
- Ανάλυση προσομοίωσης και δυναμικής.

Στην **τρίτη ενότητα** αναπτύσσεται μεθοδολογία σχεδιασμού. Αυτή αφορά:

- Δημιουργία μοντέλου πλανητικού μηχανισμού.
- Χρήση εργαλείων στο Fusion 360.

- Παραμετρικός σχεδιασμός των γραναζιών.
- Ορισμός αρχικών προδιαγραφών.

- Εφαρμογή γενετικών αλγορίθμων για βελτιστοποίηση.
- Ορισμός στόχων βελτιστοποίησης (μείωση βάρους, αύξηση αντοχής, μέγιστη απόδοση).
- Εκτέλεση Γενετικού Σχεδιασμού στο Fusion 360.
- Αξιολόγηση διαφορετικών σχεδιαστικών λύσεων.

- Προσομοίωση και δυναμική ανάλυση.
- Motion Study: Προσομοίωση κίνησης για επιβεβαίωση της λειτουργίας.
- Finite Element Analysis (FEA): Ανάλυση αντοχής και καταπόνησης.
- Σύγκριση διαφορετικών σχεδίων για επιλογή της βέλτιστης λύσης.

Στην **τέταρτη ενότητα** εφαρμόζεται στην πράξη η μεθοδολογία του σχεδιασμού, καθώς περιγράφεται επακριβώς η πειραματική διαδικασία. Σχεδιάζονται τα μέρη του πλανητικού μηχανισμού ξεχωριστά πριν την βελτιστοποίησή τους.

Στην **πέμπτη ενότητα** περιγράφεται η διαδικασία του γενετικού σχεδιασμού των στοιχείων του πλανητικού μηχανισμού καθώς και το τελικό συναρμολογημένο αποτέλεσμα.

Στην **έκτη ενότητα** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στο πρόγραμμα Ansys, όπου εκεί γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων του αρχικού σχεδιασμού με την βελτιστοποιημένη λύση τόσο σε κάθε εξάρτημα ξεχωριστά όσο και στο συναρμολογημένο μηχανισμό.

Στην **έβδομη ενότητα** αναφέρεται η διαδικασία εκτύπωσης και οι ρυθμίσεις της, καθώς και τα στοιχεία που εκτυπώνονται αναλυτικά.

Στην **όγδοη ενότητα** γίνονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Οι πλανητικοί μηχανισμοί είναι συστήματα μετάδοσης κίνησης που αποτελούνται από έναν κεντρικό γρανάζι (ήλιο), ένα ή περισσότερα περιφερειακά γρανάζια (πλανήτες) που περιστρέφονται γύρω από τον ήλιο, και έναν εξωτερικό δακτύλιο (στεφάνη) με εσωτερικά δόντια. Αυτή η διάταξη επιτρέπει τη μετάδοση ισχύος με συμπαγή σχεδιασμό και υψηλή απόδοση.

2.1 Αρχές λειτουργίας πλανητικών μηχανισμών

Μεταξύ όλων των στοιχείων των μηχανών μετάδοσης ισχύος, τα γρανάζια είναι το πιο σημαντικό μηχανικό στοιχείο [8]. Τα γρανάζια έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως η αεροναυπηγική, το αυτοκίνητο, τα μηχανήματα, οι ανεμογεννήτριες, τα παιδικά παιχνίδια και οι οικιακές ηλεκτρικές συσκευές [9]. Το απλούστερο από όλα τα γρανάζια είναι οι οδοντωτοί τροχοί που προσφέρουν σημαντική ακρίβεια και υψηλή απόδοση στην μετάδοση ισχύος [10].

Ο πλανητικός μηχανισμός είναι μια μορφή που έχει δομή κιβωτίου ταχυτήτων που αποτελείται από τέσσερα στοιχεία:

Ήλιος (Sun Gear): Το κεντρικό γρανάζι που μπορεί να λειτουργεί ως είσοδος ή έξοδος της κίνησης.

Πλανήτες (Planet Gears): Γρανάζια που περιστρέφονται γύρω από τον ήλιο και ταυτόχρονα περιστρέφονται γύρω από τον άξονά τους.

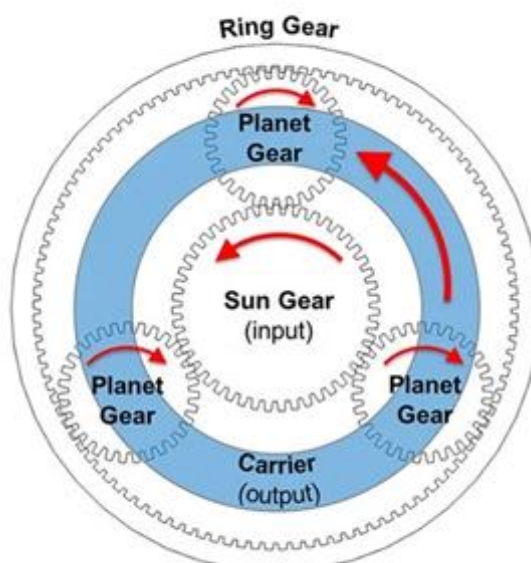
Στεφάνη (Ring Gear): Γρανάζι με εσωτερικά δόντια που περιβάλλει τους πλανήτες.

Το γρανάζι του ήλιου βρίσκεται πάντα στο κέντρο και μεταδίδει τη ροπή σε γρανάζια πλανητών που περιφέρονται γύρω από το γρανάζι του ήλιου. Τα πλανητικά γρανάζια είναι τοποθετημένα σε ένα βραχίονα ή φορέα (που περιβάλλεται από το δακτυλιοειδές γρανάζι) που στερεώνει τους πλανήτες σε τροχιά μεταξύ τους [11]. Τα πλανητικά γρανάζια βρίσκονται σε πολλές

παραλλαγές και διατάξεις προκειμένου να ανταποκρίνονται σε ένα ευρύ φάσμα αναλογιών ταχύτητας σύμφωνα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε σχεδιασμού. Ένα στοιχείο της διαμόρφωσης του πλανητικού γρναζιού είναι σταθερό και τα άλλα στοιχεία περιστρέφονται σύμφωνα με τα μέλη εισόδου και εξόδου. Διαφορετικές διαμορφώσεις μπορούν εύκολα να ληφθούν με την αναδιάταξη του μέλους εισόδου, του εξωτερικού μέλους και του σταθερού μέλους όπως φαίνεται στο [Σχήμα 2.1](#)

Τα πλανητικά κιβώτια ταχυτήτων έχουν ποικίλη εφαρμογή σε διαφορετικά μηχανικά συστήματα, όπως βιομηχανικά συστήματα μετάδοσης κίνησης, στροφέα, αυτοκίνητα, ανεμογεννήτριες κ.λπ., όπου μπορούν να προσφέρουν συμπαγείς διαστάσεις, λιγότερο θόρυβο, υψηλή σχέση μετάδοσης και υψηλότερους λόγους ροπής-βάρους, ειδικά σε σύγκριση με τα τυπικά γρναζία παράλληλου άξονα.

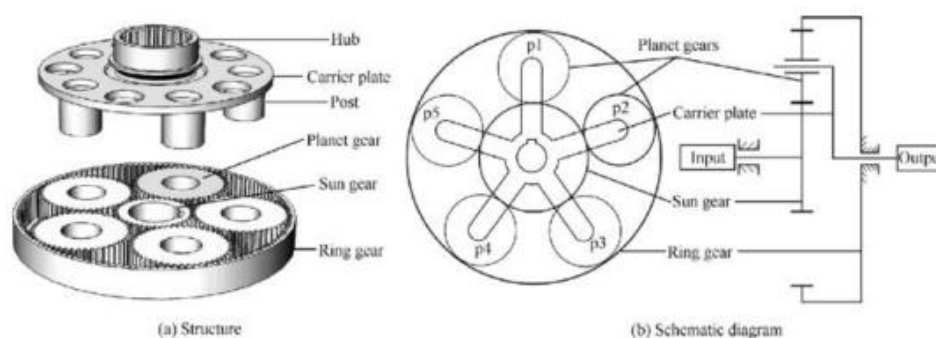
Οι πλανητικοί μηχανισμοί χρησιμοποιούνται κυρίως με στόχο την επίτευξη μεγάλων σχέσεων μετάδοσης με μικρές απώλειες και αρκετά μικρό όγκο και βάρος. Συνεπώς, ο λόγος της χρήσης τους είναι αυτή ακριβώς η ικανότητα διαχείρισης μεγάλων σχέσεων μείωσης ή αύξησης στροφών χωρίς ο όγκος του μηχανισμού να αυξάνει πολύ. Ένα άλλο πλεονέκτημα των πλανητικών μηχανισμών είναι η μείωση των καταπονήσεων που δέχονται οι εδράσεις τους, καθώς έχουν την ιδιότητα να αλληλοαναιρούν τις δυνάμεις που ασκούνται στους τροχούς τους [12]



Σχήμα 2.1: Τρόπος μετάδοσης κίνησης ενός πλανητικού συστήματος γρναζιών(<https://www.regalrexnord.com>)

2.1.1 Μηχανική ανάλυση γρاناζιών

Όπως αναφέρθηκε τα πλανητικά γρανάζια έχουν ένα ευρύ φάσμα χρήσης καθώς παρέχουν συμπαγή σχεδιασμό, ικανό να μεταδίδει υψηλές ροπές και να επιτυγχάνει υψηλές σχέσεις μετάδοσης. Ένα σύστημα πλανητικού γραναζιού αποτελείται από έναν ηλιακό γρανάζι, ένα σύνολο πλανητών και ένα δακτυλιοειδές γρανάζι. Η διάταξη ενός τυπικού συστήματος φαίνεται στο [Σχήμα 2.2](#). Η εικόνα δείχνει την πιο κοινή διαμόρφωση όπου ο ήλιος ενεργεί ως είσοδος και ο φορέας του πλανήτη ως η έξοδος, με αποτέλεσμα τον υψηλότερο λόγο μετάδοσης.[13]



Σχήμα 2.2: Δομή και σχηματικό διάγραμμα πλανητικού συστήματος γρاناζιών(<https://www.researchgate>)

Από τη θεωρία γνωρίζουμε για τη συσχέτιση Γωνιακής Ταχύτητας, Ακτίνας και Αριθμού Δοντιών ενός γραναζιού:

Η σχέση μεταξύ της γωνιακής ταχύτητας (n), της ακτίνας (r) και του αριθμού των δοντιών (z) ενός γραναζιού ακολουθεί τις βασικές αρχές της μηχανικής μετάδοσης κίνησης.

➤ Σχέση Μεταξύ Γωνιακής Ταχύτητας και Αριθμού Δοντιών

Σε ένα σύστημα δύο γραναζιών που εμπλέκονται, η σχέση των γωνιακών ταχυτήτων τους (n_1, n_2) δίνεται από την [εξίσωση 2.1](#):

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1}$$

(2.1)

όπου:

z_1, z_2 = αριθμός δοντιών του πρώτου και του δεύτερου γραναζιού,

n_1, n_2 γωνιακές ταχύτητες του πρώτου και δεύτερου γραναζιού.

Όσο περισσότερα δόντια έχει ένα γρανάζι, τόσο μικρότερη η γωνιακή του ταχύτητα, εφόσον συνδέεται με μικρότερο γρανάζι.

➤ Σχέση Μεταξύ Γωνιακής Ταχύτητας και Ακτίνας

Η γραμμική ταχύτητα (v) στην περιφέρεια ενός γραναζιού φαίνεται από την [εξίσωση 2.2](#)

$$V = n r \quad (2.2)$$

όπου:

r = ακτίνα του γραναζιού,

n = γωνιακή ταχύτητα.

Σύμφωνα με την [εξίσωση 2.3](#) για δύο γρανάζια που εμπλέκονται, η γραμμική ταχύτητα πρέπει να είναι ίδια στο σημείο επαφής τους:

$$n_1 r_1 = n_2 r_2$$

(2.3)

Όσο μεγαλύτερη η ακτίνα ενός γραναζιού, τόσο μικρότερη η γωνιακή του ταχύτητα για την ίδια γραμμική ταχύτητα.

➤ Συνδυασμός των Σχέσεων: Αριθμός Δοντιών και Ακτίνα

Η ακτίνα ενός γραναζιού σχετίζεται με τον αριθμό των δοντιών του μέσω του βήματος (module, m), το οποίο είναι η αναλογία:

$$r = \frac{m z}{2}$$

(2.4)

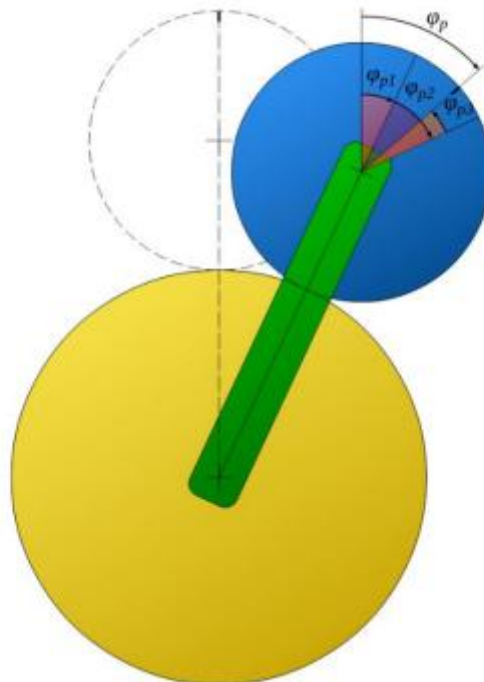
Έτσι, αν συνδυάσουμε τις [εξισώσεις \(2.1\), \(2.2\), \(2.3\), \(2.4\)](#) :

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{r_2}{r_1}$$

(2.5)

Η σχέση μετάδοσης καθορίζεται τόσο από τον αριθμό των δοντιών όσο και από την ακτίνα του γραναζιού.

Η σχέση μετάδοσης για ένα πλανητικό σύστημα μετάδοσης εξαρτάται από τη διαμόρφωση του συστήματος καθώς και από τα μεμονωμένα γρανάζια. Το **Σχήμα 2.3** απεικονίζει την κίνηση των πλανητών που περιγράφεται από τις εξισώσεις (2.6) , (2.7) , (2.8), (2.9), (2.10),(2.11)



Σχήμα 2.3 : Υπέρθυση κινήσεων(<https://www.tec-science.com>)

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι πλανήτες περιστρέφονται γύρω από τον ήλιο λόγω της περιστροφής του φορέα:

$$\varphi_{p1} = \varphi_c$$

$$(2.6)$$

Οι πλανήτες περιστρέφονται γύρω από τον άξονά τους λόγω της περιστροφής του φορέα:

$$\varphi_{p2} = \frac{\varphi_c r_s}{r_p}$$

$$(2.7)$$

Όπου r_p και r_s είναι η ακτίνα του πλανήτη και του ήλιου αντίστοιχα.

Και οι πλανήτες περιστρέφονται γύρω από τον άξονά τους λόγω της περιστροφής του ήλιου:

$$\varphi_{p3} = - \frac{\varphi_s r_s}{r_p}$$

$$(2.8)$$

Δίνει μέσω υπερτοποθέτησης των μεμονωμένων κινήσεων:

$$\Phi_p = \varphi_c + \frac{\varphi_c r_s}{r_p} - \frac{\varphi_s r_s}{r_p}$$

$$(2.9)$$

Η οποία μπορεί να γραφτεί ως:

$n_p r$

$$n_p r_p = n_c (r_p + r_s) - n_s r_s$$

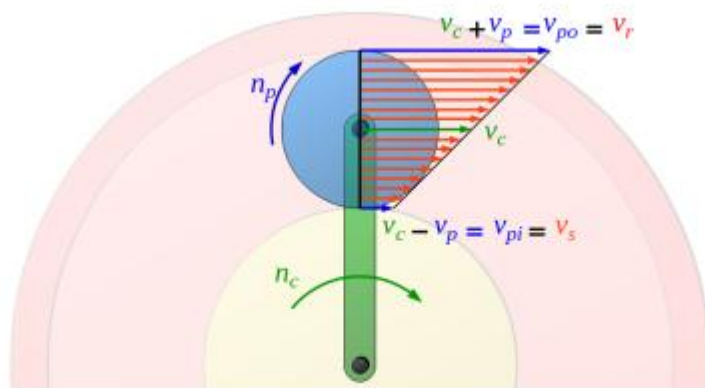
$$(2.10)$$

Όπου n_p , n_c και n_s είναι η γωνιακή ταχύτητα του πλανήτη, του φορέα και του ήλιου.

Δίνεται ότι $\varphi=2\pi nt$, όπου t ο χρόνος . Ή με τον αριθμό των δοντιών ως

$$n_p z_p = n_c (z_p + z_s) - n_s z_s \quad (2.11)$$

Η σχέση μεταξύ των ταχυτήτων V_r, V_p, V_c και V_s του γραναζιού περιγράφεται στην **Σχήμα 2.4** και καθορίζεται από τις εξισώσεις (2.12) , (2.13).



Σχήμα 2.4: Κατανομή ταχύτητας στο περιστρεφόμενο πλανητικό γρανάζι με κινούμενο φορέα(<https://www.tec-science.com>)

$$V_r = V_p + V_c \quad (2.12)$$

$$V_s = V_c - V_p \quad (2.13)$$

Τελικά η ταχύτητα των πλανητών διαμορφώνεται ως:

$$n_p r_p = (n_r r_r - n_s r_s) \frac{r_c}{2} \quad (2.14)$$

Η περιφερειακή ταχύτητα δίνεται από τη σχέση $V=2\pi nr$.

Ο συνδυασμός των εξισώσεων (2.10) και (2.14) δίνει:

$$n_r r_r = n_c (r_r + r_s) - n_s r_s \quad (2.15)$$

Ή

$$n_r z_r = n_c (z_r + z_s) - n_s z_s \quad (2.16)$$

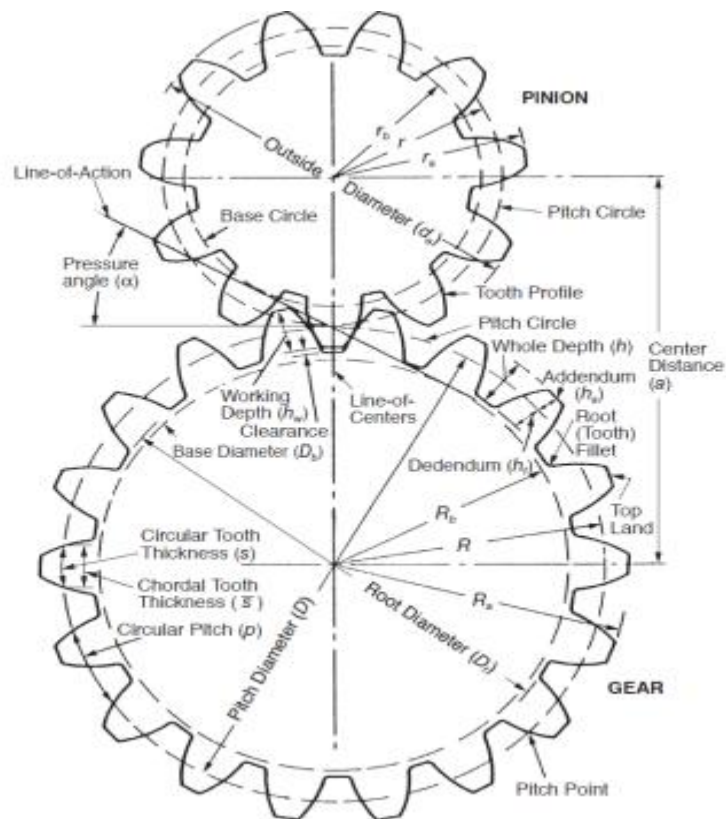
Για διαμόρφωση όπου ο δακτύλιος είναι σταθερός, η εξίσωση (2.16) δίνει τη σχέση μετάδοσης ως:

$$\frac{n_s}{n_c} = i = \frac{z_r + z_s}{z_s} = 1 + \frac{z_r}{z_s}$$

(2.17)

2.1.2 Μηχανισμός επαφής

Υπάρχουν πολλές συντομογραφίες και σημειώσεις για τον προσδιορισμό των διαφορετικών τμημάτων ενός γραναζιού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5



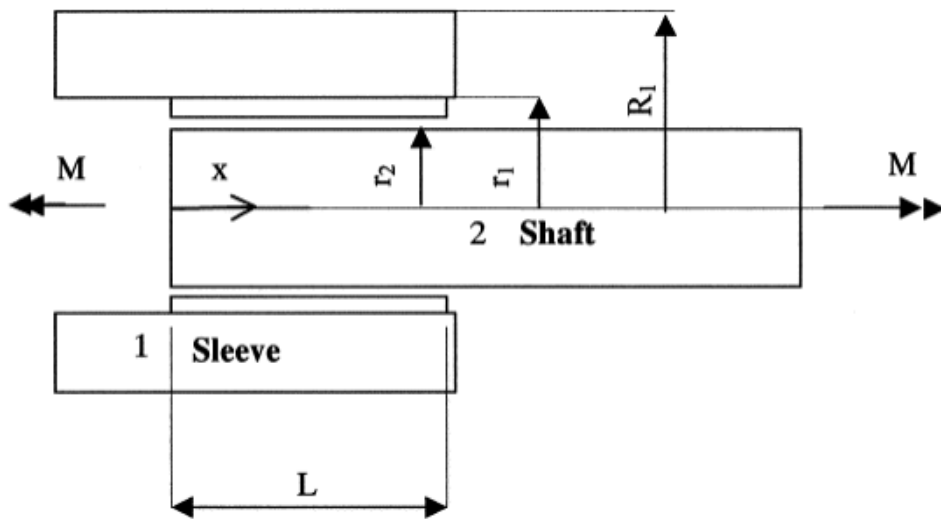
Σχήμα 2.5: Βασική γεωμετρία γραναζιών (Stock Drive Products/Sterling Instrument) (<https://www.engineersedge.com/>)

Η ροπή μεταφέρεται από το ένα γρανάζι στο άλλο μέσω της επαφής με τα δόντια. Ανάλογα με τη γεωμετρία του δοντιού, μπορεί να προκύψουν διαφορετικές τιμές ολίσθησης. Η ολίσθηση οδηγεί σε φθορά και επομένως είναι σημαντικό να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα ολίσθησης στην επαφή. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για την ελαχιστοποίηση της ολίσθησης είναι η καμπυλότητα του δοντιού, η οποία συνήθως ακολουθεί μια ελικοειδή λειτουργία. Ένα ελικοειδές προφίλ διασφαλίζει ότι το διάνυσμα δύναμης (Σχήμα 2.5) είναι κάθετο σε κάθε σημείο της επιφάνειας κατά μήκος της διαδρομής επαφής. Το Σχήμα (2.6) δείχνει πώς δημιουργείται το ελικοειδές προφίλ ανάλογα με το μέγεθος του δοντιού.



Σχήμα 2.6: Ελικοειδές προφίλ κατά την επαφή δόντι με δόντι

Λόγω της κατασκευής και της ελαστικότητας, θα υπάρχει πάντα κάποια λανθασμένη ευθυγράμμιση του ελικοειδούς προφίλ και παραμόρφωση της επιφάνειας του δοντιού, που οδηγεί σε φθορά και κόπωση. Η κακή ευθυγράμμιση μεταξύ των δοντιών επαφής συμβαίνει λόγω συστροφής και κάμψης των εσωτερικών εξαρτημάτων του κιβωτίου ταχυτήτων, όπως οι άξονες, οι φορείς και το περίβλημα. Η κακή ευθυγράμμιση οδηγεί σε μη συμμετρική κατανομή τάσεων σε όλη την επιφάνεια του δοντιού του γρανάζιου και σε συγκεντρώσεις τάσεων, οι οποίες μπορούν να εξηγηθούν με τη μελέτη της σφήνας της σύνδεσης που φαίνεται στο Σχήμα (2.7).



Σχήμα 2.7: Σχηματική παρουσίαση ζεύξης (Tjernberg 2001)

Το Σχήμα (2.7) δείχνει μια σύνδεση spline μεταξύ ενός χιτωνίου και ενός άξονα όπου η ροπή M μεταφέρεται από το χιτώνιο στον άξονα. Για κάθε προσαύξηση, το x , η $M_2(x)$ μεταφέρεται στον άξονα και η $M_1(x)$ στο χιτώνιο (2.19).

Όπου

$$M_1(x) + M_2(x) = M \quad (2.18)$$

Η μεταφορά ροπής ανά μονάδα μήκους, $m(x)$, μπορεί σύμφωνα με τον Tjernberg (2001) να διατυπωθεί ως:

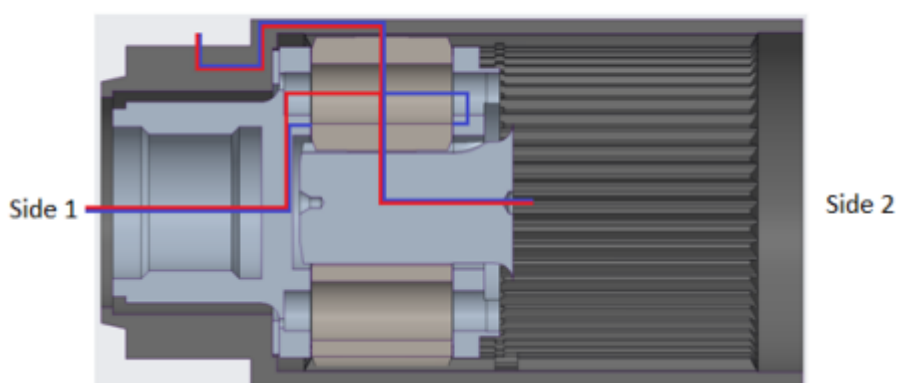
$$m(x) = c_\theta (\theta_1(x) - \theta_2(x)) \quad (2.19)$$

Όπου c_θ είναι η στρεπτική ακαμψία ανά μονάδα μήκους και $\theta_1(x)$ και $\theta_2(x)$ είναι οι γωνίες συστροφής του χιτωνίου και του άξονα στη θέση x .

Η λύση για τη μεταφορά ροπής $m(x)$ παρουσιάζεται στο Tjernberg (2001). Η επίλυση της εξίσωσης με οριακές συνθήκες $M_2(0) = 0$ και $M_2(L) = M$ δίνει μια μη γραμμική μεταφορά ροπής, η οποία με τη σειρά της παράγει επίσης μια ανομοιόμορφη κατανομή τάσης, η οποία σύμφωνα με τον Tjernberg (2001), ακόμη και για άξονες που είναι τέλεια ευθυγραμμισμένοι, μπορεί να οδηγήσει

σε μέγιστα φορτία επαφής που είναι αρκετές φορές υψηλότερα από το μέσο φορτίο.

Αυτό δείχνει τη σημασία των μικρογεωμετρικών τροποποιήσεων ακόμη και για συνθήκες όπου δεν υπάρχει εξωτερική κακή ευθυγράμμιση. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό το φαινόμενο, παράλληλα με τις αλυσίδες ανοχής και τις ελαστικές παραμορφώσεις συμπεραίνουμε ότι δεν μπορούν να παραβλεφθούν οι κακές ευθυγραμμίσεις εντός του κιβωτίου ταχυτήτων .



Σχήμα 2.8: Μεταφορά ροπής από φορέα σε περίβλημα και από φορέα σε ήλιο

Η ανίχνευση της μεταφοράς ροπής του φορέα όπως στη σύνδεση spline, δείχνει ότι το ίδιο πρόβλημα υπάρχει και στο πλανητικό κιβώτιο ταχυτήτων, και η μετάδοση ροπής από τον φορέα στον ήλιο είναι παρόμοια με την μεταφορά ροπής από την πλευρά 1 στην πλευρά 2. Αυτό φαίνεται στο [Σχήμα \(2.8\)](#) που δείχνει τη μεταφορά ροπής στο σύστημα, όπου η πλευρά 1 είναι αριστερά και η πλευρά 2 είναι δεξιά.

Ωστόσο, για τη μεταφορά από φορέα σε περίβλημα, η ροπή μεταφέρεται από την πλευρά 1 στην πλευρά 1. Αυτό αναγκάζει τη ζώνη επαφής να πλησιάσει την πλευρά 1 καθώς η είσοδος και η έξοδος ροπής βρίσκονται τώρα στην ίδια πλευρά του δοντιού του γραναζιού. Για έναν φορέα μονής όψης, αυτό μπορεί να αποδειχθεί πολύ προβληματικό καθώς οι πλανήτες υποστηρίζονται μόνο από τη μία πλευρά. Ένας φορέας διπλής όψης θα το αποτρέψει σε κάποιο βαθμό αυτό καθώς οι πλανήτες στηρίζονται και στις δύο πλευρές.

Ένας συμβατικός φορέας πλανητών μπορεί να απλοποιηθεί μοντελοποιώντας το σύστημα ως ένα σύνολο στρεπτικών δυσκαμψιών σύμφωνα με τη θεωρία στρέψης του Saint-Venant [Τα στατικά ισοδύναμα συστήματα, επιφέρουν τις ίδιες τάσεις και παραμορφώσεις σε ικανοποιητική απόσταση από το σημείο εφαρμογής τους] (εξίσωση (2.20)):

$$c_{\theta} = \frac{T L}{\theta} = G K \quad (2.20)$$

Όπου T είναι η εφαρμοζόμενη ροπή, L είναι η απόσταση από την εφαρμοζόμενη ροπή και θ είναι η γωνία περιστροφής. Εναλλακτικά, η εξίσωση μπορεί να γραφτεί σαν γινόμενο του G ως μονάδα διάτμησης υλικού και του K ως πολική ροπή αδράνειας.

Η ακαμψία στην πλευρά 1 και πλευρά 2 μπορεί να γραφτεί ως:

$$c_{\theta 1} = c_{\theta s 1} + c_{\theta w} \quad (2.21)$$

$$c_{\theta 2} = c_{\theta s 1} + c_{\theta w} + c_{\theta l} \quad (2.22)$$

Όπου $c_{\theta 1}$ είναι η ακαμψία στρέψης της υποδοχής εργαλείου, $c_{\theta w}$ είναι η ακαμψία στρέψης του φέροντος τοιχώματος και $c_{\theta l}$ είναι η ακαμψία στρέψης των στηριγμάτων του φορέα κατά την σύνδεση της πλευρά 1 και της πλευράς 2. Δεδομένου ότι τα στηρίγματα που δημιουργούν τον φορέα του πλανήτη προσαρτώνται απευθείας στην πλευρά 1, το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο στρεπτικών ελατηρίων σε σειρά. Η επανεγγραφή της εξίσωσης (2.20) δίνει τη γωνία περιστροφής για την πλευρά 1 :

$$\theta_1 = \frac{T_1 L_s}{G K_s} + \frac{T_1 (L_w - L_s)}{G K_w} \quad (2.23)$$

Και η γωνία περιστροφής για την πλευρά 2 δίνεται από τη σχέση:

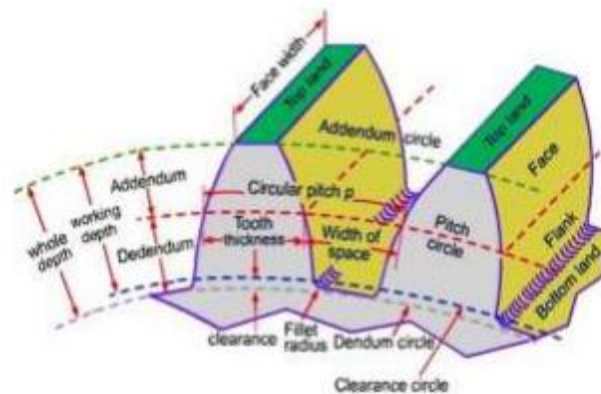
$$\theta_2 = \theta_1 + \frac{T_2 (L_b - L_w - L_s)}{G K_b} \quad (2.24)$$

Όπου T_2 είναι η ροπή που ενεργεί στην πλευρά 2 και T_1 είναι η πλήρης ροπή που ενεργεί στην πλευρά 1, καθώς η T_2 μεταφέρεται μέσω της πλευράς 1 στην υποδοχή του εργαλείου.

Απλοποιώντας περαιτέρω το σύστημα υποθέτοντας ότι η δύναμη επαφής μεταξύ των δοντιών δρα στο μέσο των πλανητών, οδηγεί σε ίση κατανομή μεταξύ των πλευρών 1 και 2 ως $T_1 = 2T_2$. Αυτό δείχνει ότι η ομοιόμορφη πίεση επαφής δεν είναι δυνατή με αυτόν τον σχεδιασμό, καθώς αυτό απαιτεί $\theta_1 = \theta_2$.

2.1.3 Γεωμετρία γραναζιών και τάσεις στο δόντι του γραναζιού

Σύμφωνα με τη γεωμετρία του προφίλ ενός γραναζιού, οι βασικές διαστάσεις ενός γραναζιού παρουσιάζονται στην εικόνα (10).



Σχήμα 2.9: Γεωμετρία γραναζιού(<https://gateandiesmechanical.wordpress.com>)

Το μέγεθος του γραναζιού είναι μία από τις πιο σημαντικές μεταβλητές στη βελτιστοποίηση σχεδιασμού του συνόλου των γραναζιών που χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές [16].

Τα μεγέθη που ενδιαφέρουν είναι:

$$\text{Διάμετρος κύκλου βήματος} \quad d_p = m * z \quad (2.25)$$

$$\text{Προσθήκη (Addendum)} \quad h_a = m \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} &\text{Ακτινική απόσταση μεταξύ του κύκλου ή της γραμμής βήματος και του κύκλου} \\ &\text{ή της γραμμής της ρίζας (Dedendum)} \quad h_f = 1,157 m \quad (2.27) \end{aligned}$$

$$\text{Διάστημα} \quad C = 0,157 m \quad (2.28)$$

Όπου m είναι η μονάδα μέτρησης

Σε πλανητικό σύστημα γραναζιών (που αποτελείται από τον ήλιο, τον πλανήτη και τον δακτύλιο) ορίζουμε

z_s = Αριθμός δοντιών στο γρανάζι ηλίου

z_p = Αριθμός δοντιών στο πλανητικό γρανάζι

z_r = Αριθμός δοντιών στο δακτυλιοειδές γρανάζι

Οι τρεις τύποι γραναζιών πρέπει να έχουν την ίδια μονάδα μέτρησης m για να συνδυαστούν σωστά

$$d_{p-r} = 2 * d_{p-p} + d_{p-s}$$

(2.29)

$$d_{r-s} = d_{p-s} - 2 * h_f$$

$$d_{r-p} = d_{p-p} - 2 * h_f$$

$$d_{r-r} = d_{p-r} + 2 * h_f$$

$$d_{o-s} = d_{p-s} + 2 * h_a$$

$$d_{o-p} = d_{p-p} + 2 * h_a$$

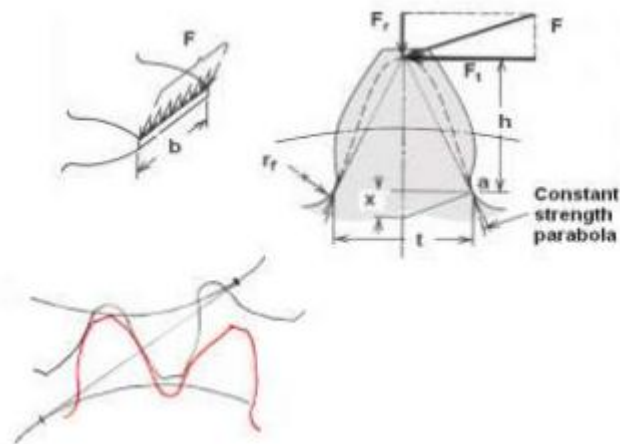
$$d_{i-r} = d_{p-r} - 2 * h_a$$

Όπου d_p η διάμετρος του βήματος, d_r η διάμετρος της ρίζας, d_o η εξωτερική διάμετρος και d_i η εσωτερική διάμετρος.

Οι δείκτες s , p και r χρησιμοποιούνται για τον ήλιο, τον πλανήτη και τον δακτυλιοειδές γρανάζι αντίστοιχα.

Τα γρανάζια στα κιβώτια ταχυτήτων μερικές φορές έχουν μικρή διάρκεια ζωής λόγω φθοράς και θραύσης από επαναλαμβανόμενα φορτία κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας [17], οι δύο κύριες καταστάσεις αστοχίας για τα γρανάζια [18] (όπως φαίνεται στο [Σχήμα \(2.10\)](#)) είναι:

1. Σπάσιμο δοντιών - από υπερβολική πίεση κάμψης, και
2. Επιφανειακή διάβρωση/Φθορά - από υπερβολική πίεση επαφής



Σχήμα 2.10: Καταπονήσεις κάμψης και επιφανειακής διάβρωσης στο δόντι του γραναζιού(<https://www.ques10.com>)

Για τον υπολογισμό των τάσεων ορίζουμε:

- Y_j Τροποποιημένος παράγοντας Lewis
- K_s Συντελεστής μεγέθους
- K_a Συντελεστής εφαρμογής
- K_B Συντελεστής πάχους στεφάνης
- K_f Συντελεστής συγκέντρωσης κόπωσης
- N_{in} Ταχύτητα εισόδου (στροφές /λεπτό)
- K_o Συντελεστής προώθησης ισχύος
- K_m Συντελεστής κατανομής φορτίου
- K_v Συντελεστής δυναμικότητας
- C_p Συντελεστής ελαστικότητας
- P_{in} Ισχύς εισόδου κινητήρα (KW)
- ρ Πυκνότητα του υλικού του γραναζιού
- m Μονάδα μέτρησης

Η τάση κάμψης παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό του γραναζιού όπου το μέγεθος του ελέγχεται από την ονομαστική κάμψη και τη συγκέντρωση τάσης λόγω του γεωμετρικού σχήματος. Η τάση κάμψης σχετίζεται έμμεσα με τις αλλαγές σχήματος που γίνονται στο κοπτικό εργαλείο [19].

$$\sigma_b = \frac{F_t}{b \cdot m \cdot Y_j} * K_s * K_a * K_v * K_B * K_f \quad (2.30)$$

Όπου F_t είναι η εφαπτομενική δύναμη που ενεργεί στην άκρη του δοντιού του γραναζιού, το Y_j είναι περίπου 0,34 .

$$K_v = \frac{50}{50 + \sqrt{V}} \quad (2.31)$$

Η γραμμική ταχύτητα V ([εξίσωση 2.32](#)) έχει μονάδες ft/min και ορίζεται ως

$$V = \frac{\pi * d_{p-s} * N_{in}}{60} \quad (2.32)$$

$$\sigma_c = \sigma_p \sqrt{\frac{F_t}{b * d_{p-s} * I} * K_o * K_s * K_m * K_v} \quad (2.33)$$

(2.34)

$$C_p = \sqrt{\frac{1}{\pi * \left[\frac{1 - (\mu_s)^2}{E_s} + \frac{1 - (\mu_p)^2}{E_p} \right]}}$$

Τα μ_s και μ_p είναι οι συντελεστές τριβής και για τα γρανάζια του ήλιου και του πλανήτη (όταν αποτελούνται από το ίδιο υλικό).

Τα E_s και E_p είναι συντελεστές ελαστικότητας για τα γρανάζια του ήλιου όσο και για τον πλανήτη αντίστοιχα (όταν αποτελούνται από το ίδιο υλικό).

2.1.4 Σχεδιασμός του πλανητικού συστήματος γραναζιών

Για τον υπολογισμό της συνολικής μάζας M του πλανητικού γραναζιού, πρέπει να υπολογιστούν αρχικά οι μάζες του ηλιακού γραναζιού, των πλανητικών γραναζιών και του δακτυλιοειδούς γραναζιού (M_s , M_p και M_r) [20]. Αρχικά υπολογίζεται η επιφάνεια A και ο όγκος V

Ήλιος (Sun Gear)

$$A_s = \frac{\pi}{4} (d_{r-s}^2 - d_{i-s}^2) + \left[0,5 * \frac{\pi}{4} (d_{o-s}^2 - d_{r-s}^2) \right]$$

(2.35)

$$M_s = V_s * \rho = A_s * b * \rho$$

Πλανήτες (Planet Gears)

$$A_p = \frac{\pi}{4} (d_{r-p}^2 - d_{i-p}^2) + \left[0,5 * \frac{\pi}{4} (d_{o-p}^2 - d_{r-p}^2) \right]$$

(2.36)

$$M_p = V_p * \rho = A_p * b * \rho$$

Στεφάνη (Ring Gear)

$$A_r = \frac{\pi}{4} (d_{o-r}^2 - d_{r-r}^2) + \left[0,5 * \frac{\pi}{4} (d_{r-r}^2 - d_{i-r}^2) \right]$$

(2.37)

$$M_r = V_r * \rho = A_r * b * \rho$$

Η ολική μάζα είναι

$$M_{ολ} = M_s + M_p + M_r \quad (2.38)$$

Σε ένα πλανητικό κιβώτιο ταχυτήτων, η σχέση μετάδοσης εξαρτάται από τη διάταξη των τριών βασικών στοιχείων [Ήλιος (Sun Gear), πλανητικά γρανάζια (Planet Gears)

στεφάνη (Ring Gear)] και από το ποιο από αυτά παραμένει σταθερό, ποιο είναι η είσοδος και ποιο η έξοδος.

Η γενική σχέση που συνδέει τις γωνιακές ταχύτητες των στοιχείων δίνεται από:

$$\frac{n_r - n_c}{n_s - n_c} = - \frac{z_s}{z_R} \quad (2.39)$$

όπου:

- n_s : γωνιακή ταχύτητα του ήλιου
- n_r : γωνιακή ταχύτητα της στεφάνης
- n_c : γωνιακή ταχύτητα του φορέα
- Z_s : αριθμός δοντιών του ήλιου
- Z_R : αριθμός δοντιών της στεφάνης

1. Στεφάνη σταθερή ($n_r=0$):

Αν ο ήλιος είναι η είσοδος και ο φορέας η έξοδος, έχουμε από την [εξίσωση 2.39](#):

$$\frac{-n_c}{n_s - n_c} = - \frac{z_s}{z_R}$$

Άρα

$$\frac{n_s}{n_c} = 1 + \frac{z_R}{z_s}$$

Δηλαδή, ο λόγος μετάδοσης (η αναλογία μείωσης) είναι:

$$u = 1 + \frac{Z_R}{Z_S}$$

2. Ήλιος σταθερός ($n_s=0$):

Σε αυτή την περίπτωση, ο φορέας λειτουργεί ως είσοδος και η στεφάνη ως έξοδος από την [εξίσωση 2.39](#) έχουμε :

$$\frac{n_r - n_c}{-n_c} = -\frac{Z_S}{Z_R}$$

Άρα

$$\frac{n_r}{n_c} = 1 + \frac{Z_S}{Z_R}$$

ο λόγος μετάδοσης καθορίζεται από το

$$u = 1 + \frac{Z_S}{Z_R}$$

3. Φορέας σταθερός ($n_c=0$):

Όταν ο φορέας είναι σταθερός, τα γρανάζια (ή ο ήλιος και η στεφάνη) περιστρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις με αναλογία από την [εξίσωση 2.39](#) έχουμε :

$$\frac{n_r}{n_s} = -\frac{Z_S}{Z_R}$$

Το αρνητικό πρόσημο υποδεικνύει αντίστροφη φορά κίνησης.

2.2 Γενετικός αλγόριθμος και σχεδιασμός

Ο γενετικός αλγόριθμος είναι ένας τύπος αλγορίθμου βελτιστοποίησης, που σημαίνει ότι χρησιμοποιείται για την εύρεση της βέλτιστης λύσης σε ένα δεδομένο υπολογιστικό πρόβλημα που μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί μια συγκεκριμένη λειτουργία. Οι γενετικοί αλγόριθμοι αντιπροσωπεύουν έναν κλάδο του πεδίου μελέτης που ονομάζεται εξελικτικός υπολογισμός, στο ότι μιμούνται τις βιολογικές διαδικασίες αναπαραγωγής και φυσικής επιλογής για

να προσδιορίσουν τις «καταλληλότερες» λύσεις [21]. Όπως και στην εξέλιξη, πολλές από τις διαδικασίες του γενετικού αλγορίθμου είναι τυχαίες, ωστόσο αυτή η τεχνική βελτιστοποίησης επιτρέπει σε κάποιον να ορίσει το επίπεδο τυχαιοποίησης και το επίπεδο ελέγχου. Αυτοί οι αλγόριθμοι είναι πολύ πιο ισχυροί και αποτελεσματικοί από τους αλγόριθμους τυχαίας αναζήτησης και εξαντλητικής αναζήτησης [22], αλλά δεν απαιτούν επιπλέον πληροφορίες για το δεδομένο πρόβλημα. Αυτό το χαρακτηριστικό τους επιτρέπει να βρίσκουν λύσεις σε προβλήματα που άλλες μέθοδοι βελτιστοποίησης δεν μπορούν να χειριστούν λόγω έλλειψης συνέχειας, παραγώγων, γραμμικότητας ή άλλων χαρακτηριστικών.

Δεδομένου ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν σχεδιαστεί για να προσομοιώνουν μια βιολογική διαδικασία, μεγάλο μέρος της σχετικής ορολογίας δανείζεται από τη βιολογία. Ωστόσο, οι οντότητες στις οποίες αναφέρεται αυτή η ορολογία στους γενετικούς αλγόριθμους είναι πολύ απλούστερες από τις βιολογικές αντίστοιχες τους [23]. Τα βασικά στοιχεία που είναι κοινά σε όλους σχεδόν τους γενετικούς αλγόριθμους είναι:

- Μια λειτουργία φυσικής κατάστασης για βελτιστοποίηση
- Πληθυσμός χρωμοσωμάτων
- Επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα αναπαραχθούν
- Διασταυρώσεις για την παραγωγή χρωμοσωμάτων επόμενης γενιάς
- Τυχαία μετάλλαξη χρωμοσωμάτων νέας γενιάς

Η συνάρτηση καταλληλότητας είναι η συνάρτηση που προσπαθεί να βελτιστοποιήσει ο αλγόριθμος. Η λέξη "καταλληλότητα" προέρχεται από την εξελικτική θεωρία. Χρησιμοποιείται εδώ επειδή οι δοκιμές συνάρτησης καταλληλότητας και ποσοτικοποιούν πόσο «κατάλληλη» είναι κάθε πιθανή λύση. Η συνάρτηση φυσικής κατάστασης είναι ένα από τα πιο κεντρικά μέρη του αλγορίθμου.

Ο όρος χρωμόσωμα αναφέρεται σε μια αριθμητική τιμή ή τιμές που αντιπροσωπεύουν μια υποψήφια λύση στο πρόβλημα που προσπαθεί να λύσει ο γενετικός αλγόριθμος [23]. Κάθε υποψήφια λύση κωδικοποιείται ως ένας πίνακας τιμών παραμέτρων, μια διαδικασία που βρίσκεται επίσης και σε άλλους αλγόριθμους βελτιστοποίησης [24].

Εάν ένα πρόβλημα έχει διαστάσεις $N_{\text{παρ}}$ (παράμετροι) τότε συνήθως κάθε χρωμόσωμα κωδικοποιείται από έναν πίνακα στοιχείων $N_{\text{παρ}}$

$$\text{χρωμόσωμα} = [p_1, p_2, \dots, p_{N_{\text{παρ}}}]$$

όπου κάθε p_i είναι μια συγκεκριμένη τιμή της i παραμέτρου [24]. Εναπόκειται στον δημιουργό του γενετικού αλγόριθμου να επινοήσει πώς να μεταφράσει το χώρο δειγμάτων των υποψήφιων λύσεων σε χρωμοσώματα. Μια προσέγγιση είναι να μετατρέψουμε κάθε τιμή παραμέτρου σε μια συμβολοσειρά bit (αλληλουχία 1 και 0), στη συνέχεια να συνδέσουμε τις παραμέτρους από άκρο σε άκρο όπως τα γονίδια σε μια αλυσίδα DNA για να δημιουργήσουμε τα χρωμοσώματα [23].

Ένας γενετικός αλγόριθμος ξεκινά με μια τυχαία επιλεγμένη συλλογή χρωμοσωμάτων, η οποία χρησιμεύει ως η πρώτη γενιά (αρχικός πληθυσμός). Στη συνέχεια, κάθε χρωμόσωμα στον πληθυσμό αξιολογείται από τη συνάρτηση καταλληλότητας για να ελεγχθεί πόσο καλά λύνει το πρόβλημα.

Ο τελεστής επιλογής επιλέγει μερικά από τα χρωμοσώματα για αναπαραγωγή με βάση την κατανομή πιθανοτήτων που ορίζει ο χρήστης. Όσο πιο κατάλληλο είναι ένα χρωμόσωμα, τόσο πιο μεγάλη πιθανότητα έχει να επιλεγεί. Ο τελεστής επιλογής επιλέγει χρωμοσώματα με αντικατάσταση, επομένως το ίδιο χρωμόσωμα μπορεί να επιλεγεί περισσότερες από μία φορές. Ο χειριστής διασταύρωσης μοιάζει με τη βιολογική διασταύρωση και ανασυνδυασμό των χρωμοσωμάτων στην κυτταρική μείωση. Αυτός ο τελεστής ανταλλάσσει μια υποακολουθία δύο επιλεγμένων χρωμοσωμάτων, για να δημιουργήσει δύο απογόνους.

Ο τελεστής μετάλλαξης αναστρέφει τυχαία μεμονωμένα bits στα νέα χρωμοσώματα (μετατρέποντας το 0 σε 1 και αντίστροφα). Συνήθως η μετάλλαξη συμβαίνει με πολύ μικρή πιθανότητα, όπως 0,001. Ορισμένοι αλγόριθμοι εφαρμόζουν τον τελεστή μετάλλαξης πριν από τους τελεστές επιλογής και διασταύρωσης. Σε πρώτη άποψη ο τελεστής της μετάλλαξης μπορεί να φαίνεται περιττός. Στην πραγματικότητα, παίζει σημαντικό ρόλο, ακόμα κι αν είναι δευτερεύον σε σχέση με αυτά της επιλογής και της διασταύρωσης. Η επιλογή και η διασταύρωση διατηρούν τις γενετικές

πληροφορίες των πιο προσαρμοσμένων χρωμοσωμάτων αλλά αυτά τα χρωμοσώματα είναι μόνο πλέον κατάλληλα σε σχέση με την τρέχουσα γενιά. Αυτό μπορεί να προκαλέσει τη σύγκλιση του αλγόριθμου πολύ γρήγορα και να χάσει «δυσνητικά χρήσιμο γενετικό υλικό (1 ή 0 σε συγκεκριμένες τοποθεσίες)». Με άλλα λόγια, ο αλγόριθμος μπορεί να κολλήσει σε ένα τοπικό βέλτιστο πριν βρει το άριστο βέλτιστο [25]. Ο τελεστής μετάλλαξης βοηθά στην προστασία από αυτό το πρόβλημα διατηρώντας αφενός την ποικιλομορφία στον πληθυσμό, αλλά μπορεί επίσης να κάνει τον αλγόριθμο να συγκλίνει πιο αργά.

Συνήθως η διαδικασία επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης συνεχίζεται έως ότου ο αριθμός των απογόνων είναι ίδιος με τον αρχικό πληθυσμό, έτσι ώστε η δεύτερη γενιά να αποτελείται εξ ολοκλήρου από νέους απογόνους και η πρώτη γενιά να αντικατασταθεί πλήρως.

Η δεύτερη γενιά ελέγχεται από τη λειτουργία φυσικής κατάστασης και ο κύκλος επαναλαμβάνεται. Είναι κοινή πρακτική να καταγράφεται το χρωμόσωμα με την υψηλότερη καταλληλότητα (μαζί με την καταλληλότητά του) από κάθε γενιά ή το «καλύτερο μέχρι στιγμής» χρωμόσωμα .

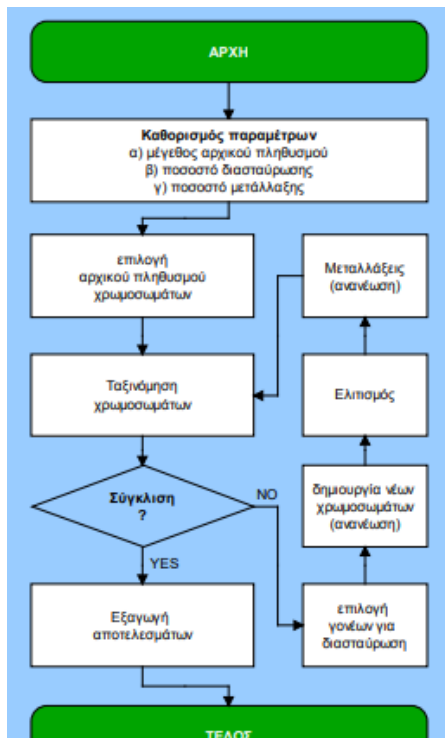
Οι γενετικοί αλγόριθμοι επαναλαμβάνονται έως ότου η τιμή καταλληλότητας του «καλύτερου μέχρι τώρα» χρωμοσώματος σταθεροποιηθεί και δεν αλλάζει για πολλές γενιές. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει σε λύσεις. Η όλη διαδικασία των επαναλήψεων ονομάζεται εκτέλεση. Στο τέλος κάθε εκτέλεσης υπάρχει συνήθως τουλάχιστον ένα χρωμόσωμα που είναι μια πολύ κατάλληλη λύση στο αρχικό πρόβλημα. Ανάλογα με το πώς γράφεται ο αλγόριθμος, αυτό θα μπορούσε να είναι το πιο κατάλληλο από όλα τα «καλύτερα μέχρι στιγμής» χρωμοσώματα ή το πιο κατάλληλο της τελικής γενιάς.

Η «απόδοση» ενός γενετικού αλγορίθμου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση των λύσεων στα χρωμοσώματα και από το «ιδιαιτέρο κριτήριο επιτυχίας» ή από το τι πραγματικά μετρά η συνάρτηση καταλληλότητας [26]. Άλλες σημαντικές λεπτομέρειες είναι η πιθανότητα διασταύρωσης, η πιθανότητα μετάλλαξης, το μέγεθος του πληθυσμού και ο αριθμός των επαναλήψεων. Αυτές οι τιμές μπορούν να προσαρμοστούν μετά την αξιολόγηση της απόδοσης του αλγορίθμου σε μερικές δοκιμαστικές εκτελέσεις.

2.2.1 Γενετικοί αλγόριθμοι και άλλες μορφές βελτιστοποίησης

Η αρχή πίσω από την υλοποίηση ενός ΓΑ είναι απλή: μιμείται τη γενετική και τη φυσική επιλογή μέσω ενός προγράμματος. Οι παράμετροι του προβλήματος κωδικοποιούνται σαν μια γραμμική δομή δεδομένων παρόμοια με μια αλυσίδα DNA, ένα διάνυσμα ή συμβολοσειρά. Αρκετές φορές όταν το πρόβλημα είναι πολυδιάστατο μπορεί να γίνει και χρήση του [Σχήματος 2.11](#).

Σε αντίθεση με τις άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης, η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να είναι οτιδήποτε μπορεί να υπολογιστεί από ένα κομπιούτερ. Οπότε, δεν υπάρχουν σαφείς μαθηματικοί περιορισμοί για τις ιδιότητες που πρέπει να έχει η αντικειμενική συνάρτηση.



Σχήμα 2.11: Βελτιστοποίηση με γενετικούς αλγόριθμους (ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΣΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΜΠΑΛΤΖΟΓΛΟΥ Δ. ΕΛΕΝΗ ,ΕΜΠ, 2020)

Κύρια Κριτήρια Ταξινόμησης των Αλγορίθμων Βελτιστοποίησης [27]

Τα κύρια κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης είναι:

- Συνεχείς/Διακριτοί:

Υπάρχει σαφής διαφορά μεταξύ διακριτών και συνεχών προβλημάτων και το πώς αυτά επιλύονται. Ως εκ τούτου, παρατηρούμε ότι μερικές φορές οι συνεχείς μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την επίλυση εγγενώς διακριτών προβλημάτων και αντίστροφα.

- Με περιορισμούς/Χωρίς περιορισμούς:

Ορισμένες μέθοδοι λαμβάνουν υπόψη περιορισμούς στις μεταβλητές, ενώ άλλες όχι.

- Ακολουθιακοί/Παράλληλοι:

Οι παράλληλοι αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται συνήθως για την επιτάχυνση της επεξεργασίας. Σε πολλές περιπτώσεις, είναι πιο αποτελεσματικοί όταν τρέχουν σε πολλούς επεξεργαστές ταυτόχρονα αντί διαδοχικά. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν υπάρχει μεγάλη πιθανότητα κάθε μεμονωμένης εκτέλεσης αναζήτησης να κολλήσει σε ένα τοπικό ακρότατο.

Εκτός από την παραπάνω ταξινόμηση, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης μπορούν να διακριθούν ως εξής:

- Ντετερμινιστικές - Μη ντετερμινιστικές μέθοδοι:

Ορισμένες μέθοδοι βασίζονται σε συγκεκριμένους κανόνες που οδηγούν πάντα στο ίδιο αποτέλεσμα, ενώ άλλες ενσωματώνουν στοχαστικά στοιχεία.

➤ Τοπικές-Ολικές μέθοδοι:

Χρησιμοποιώντας τους όρους της ενέργειας και της εντροπίας, η τοπική αναζήτηση αντιστοιχεί στην έννοια της εντροπίας, ενώ η ολική βελτιστοποίηση εξαρτάται ουσιαστικά από την καταλληλότητα, δηλαδή το ενεργειακό τοπίο.

Οι κύριες διαφορές των γενετικών αλγορίθμων (ΓΑ) από τις παραπάνω τεχνικές βελτιστοποίησης είναι:

➤ Κωδικοποίηση των Παραμέτρων:

Οι ΓΑ λειτουργούν με κωδικοποιημένες εκδοχές των παραμέτρων του προβλήματος, αντί να εργάζονται απευθείας με τις παράμετροι αυτές. Δηλαδή, οι ΓΑ δουλεύουν με ένα κωδικοποιημένο σετ λύσεων και όχι με την ίδια τη λύση του προβλήματος.

➤ Αναζήτηση σε Πληθυσμό Λύσεων:

Σχεδόν όλες οι συμβατικές τεχνικές βελτιστοποίησης αναζητούν τη λύση ξεκινώντας από ένα μόνο σημείο, ενώ οι ΓΑ λειτουργούν σε ολόκληρο τον πληθυσμό σημείων. Αυτό βελτιώνει τις πιθανότητες εύρεσης του ολικού μεγίστου/ελάχιστου και βοηθά στην αποφυγή του εγκλωβισμού σε τοπικά ακρότατα.

➤ Χρήση της Συνάρτησης Καταλληλότητας:

Οι ΓΑ χρησιμοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση (fitness function) για τον υπολογισμό της λύσης, χωρίς να βασίζονται σε παράγωγους. Ως αποτέλεσμα, μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε είδος προβλήματος βελτιστοποίησης, είτε αυτό είναι συνεχές είτε διακριτό. Το βασικό σημείο είναι να προσδιοριστεί και να καθοριστεί μια κατάλληλη διαδικασία κωδικοποίησης του προβλήματος.

- Οι γενετικοί αλγόριθμοι λειτουργούν με βάση πιθανοτικές μεταβάσεις, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους συνεχούς βελτιστοποίησης, όπου οι μεταβάσεις πραγματοποιούνται σύμφωνα με ντετερμινιστικούς κανόνες. Με άλλα λόγια, οι ΓΑ δεν εφαρμόζουν προκαθορισμένους ντετερμινιστικούς κανόνες, αλλά βασίζονται σε πιθανοτικά μοντέλα για την εξερεύνηση του χώρου λύσεων.

2.2.2 Πλεονεκτήματα Γενετικών Αλγορίθμων

- Γρήγορη και Αξιόπιστη Επίλυση Δύσκολων Προβλημάτων

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ) είναι ιδιαίτερα αποδοτικοί στην επίλυση προβλημάτων που παρουσιάζουν πολλές δύσκολα προσδιορισμένες λύσεις. Τόσο η θεωρία όσο και οι εφαρμογές δείχνουν πως συναρτήσεις με μεγάλες διακυμάνσεις, που δυσκολεύουν άλλες μεθόδους στην εύρεση ακροτάτων, δεν αποτελούν πρόβλημα για τους ΓΑ.

- Εύκολη Ενσωμάτωση με Υπάρχοντα Μοντέλα και Συστήματα

Οι ΓΑ μπορούν να συνυπάρξουν προσθετικά με τα υπάρχοντα μοντέλα χωρίς να απαιτείται η πλήρης επανασχεδίασή τους. Συνεργάζονται άμεσα με τον υπάρχοντα κώδικα, χρησιμοποιώντας μόνο τις πληροφορίες της διαδικασίας ή της συνάρτησης που πρόκειται να βελτιστοποιηθούν, χωρίς να επηρεάζουν τη συνολική δομή του συστήματος.

- Ευκολία Επέκτασης και Εξελίξεων

Οι ΓΑ είναι σχεδιασμένοι να προσαρμόζονται εύκολα σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή. Σε πολλές εφαρμογές έχουν τροποποιηθεί λειτουργίες που δεν είναι απαραίτητα δανεισμένες από τη φύση, αλλά έχουν σχεδιαστεί ώστε να βελτιώνουν την απόδοση του

συστήματος. Παραλλαγές στο βασικό σχήμα τους δεν είναι απλώς χρήσιμες, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις απαραίτητες για την επίτευξη βέλτιστης λειτουργίας.

➤ Συμμετοχή σε Υβριδικές Μεθόδους

Παρά την ισχυρή τους απόδοση, υπάρχουν περιπτώσεις όπου άλλες εξειδικευμένες μέθοδοι μπορεί να είναι πιο αποδοτικές για συγκεκριμένα προβλήματα.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι ΓΑ μπορούν να ενσωματωθούν σε υβριδικά σχήματα, συνδυασμένοι με άλλες μεθόδους, για να αξιοποιήσουν τα πλεονεκτήματά τους και να επιτύχουν ακόμη καλύτερα αποτελέσματα.

➤ Ευρεία Εφαρμογή σε Πολλαπλά Πεδία

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (ΓΑ) εφαρμόζονται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο. Το βασικό πλεονέκτημα τους είναι η ελευθερία στην επιλογή των κριτηρίων που καθορίζουν τη διαδικασία επιλογής μέσα στο τεχνικό περιβάλλον. Έτσι, οι ΓΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τομείς όπως η οικονομία, ο σχεδιασμός μηχανών, η επίλυση μαθηματικών εξισώσεων, η εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων και πολλοί άλλοι.

➤ Απαλλαγή από Περιορισμούς στις Συναρτήσεις

Οι ΓΑ δεν απαιτούν συγκεκριμένους περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται. Ενώ οι παραδοσιακές μέθοδοι συνεχούς βελτιστοποίησης απαιτούν την ύπαρξη παραγώγων, τη συνέχεια και άλλες ιδιότητες (π.χ. μη "θορυβώδεις" συναρτήσεις), αυτές οι ιδιότητες δεν είναι απαραίτητες για τους ΓΑ. Αυτό τους καθιστά κατάλληλους για ένα πολύ ευρύ φάσμα προβλημάτων.

➤ Ανεξαρτησία από το Περιεχόμενο της Πληροφορίας

Οι ΓΑ "επικοινωνούν" με το περιβάλλον τους αποκλειστικά μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης (fitness function). Η επιτυχία τους εξαρτάται μόνο από αυτή τη συνάρτηση, ανεξάρτητα από τη σημασία του προβλήματος ή του πληροφοριακού περιεχομένου. Σε περίπτωση που οι ΓΑ αποτυγχάνουν να βρουν λύση, η αιτία είναι συνήθως η φύση του χώρου αναζήτησης και όχι το περιεχόμενο των δεδομένων.

➤ Ενσωμάτωση του Στοιχείου του Παραλληλισμού

Ένα από τα φυσικά χαρακτηριστικά των ΓΑ είναι η δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλου αριθμού λύσεων ταυτόχρονα. Κάθε άτομο του πληθυσμού θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων – έχει υπολογιστεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις, 10 άτομα μπορούν να αντιπροσωπεύσουν περίπου 1000 λύσεις. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει στους ΓΑ να καλύπτουν μεγάλα διαστήματα αναζήτησης σε μικρό χρόνο.

➤ Συνδυασμός Εξερεύνησης και Εκμετάλλευσης

Οι ΓΑ επιτυγχάνουν ταυτόχρονα την εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και την εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας. Σε αντίθεση με τις μεθόδους που χρησιμοποιούν μόνο τυχαίο ψάξιμο (καλή εξερεύνηση) ή μόνο hill-climbing (καλή εκμετάλλευση), οι ΓΑ επιτυγχάνουν τον βέλτιστο συνδυασμό και των δύο. Αυτό τους καθιστά ιδιαίτερα αποδοτικούς και ελκυστικούς για την επίλυση προβλημάτων

➤ Δυνατότητα Παράλληλης Υλοποίησης

Οι ΓΑ επιτρέπουν εύκολη υλοποίηση σε παράλληλα συστήματα, εκμεταλλευόμενοι τα πλεονεκτήματα των σύγχρονων παράλληλων μηχανών. Η δυνατότητα αυτή ενισχύει σημαντικά την απόδοσή τους, καθώς μπορούν να διανείμουν τον υπολογιστικό φόρτο σε πολλούς επεξεργαστές, κάτι που σπάνια συναντάται σε ανταγωνιστικές μεθόδους βελτιστοποίησης.

2.2.3 Μειονεκτήματα γενετικών αλγορίθμων

Παρά τη μεγάλη τους χρησιμότητα σε πολλές εφαρμογές της καθημερινής ζωής, οι ΓΑ έχουν και κάποια σοβαρά μειονεκτήματα, τα οποία θα μπορούσαν να σταθούν εμπόδιο στην ολοένα και μεγαλύτερη εξάπλωση αυτής της τεχνολογίας. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι τα εξής:

- Προβλήματα Εξοικείωσης με τη Γενετική

Κατανόηση των Γενετικών Αλγορίθμων (ΓΑ):

Δεν απαιτούνται εξειδικευμένες γνώσεις γενετικής ή βιολογίας.

Οι ΓΑ μιμούνται, με έναν αφαιρετικό τρόπο, ορισμένες διαδικασίες που παρατηρούνται στη φύση, χωρίς να χρειάζεται λεπτομερής κατανόηση της βιολογικής λειτουργίας τους.

Οι όροι που χρησιμοποιούνται είναι δανεισμένοι από τη Βιολογία, προκειμένου να διευκολύνουν την εισαγωγή και κατανόηση του θέματος, χωρίς να απαιτείται περαιτέρω παραπομπή σε άγνωστα επιστημονικά πεδία.

Εξέλιξη των ΓΑ:

Η εξέλιξη των ΓΑ δεν συνδέεται απαραίτητα με την εξέλιξη των βιολογικών θεωριών.

Το αρχικό μοντέλο αντλείται από τη φύση, αλλά η εφαρμογή του στα τεχνικά συστήματα έχει υποστεί πολλές διαφοροποιήσεις και προσαρμογές, με στόχο πάντα τη βελτίωση της απόδοσης.

- Το Πρόβλημα του Χρόνου

Υπολογιστικός Χρόνος:

Ο μεγάλος αριθμός αξιολογήσεων καταλληλότητας (fitness evaluations) και η πιθανή πολυπλοκότητα της συνάρτησης αποτίμησης απαιτούν σημαντικό

υπολογιστικό χρόνο, καθώς η συνάρτηση υπολογίζεται για κάθε χρωμόσωμα σε κάθε γενιά.

- Η Αδυναμία Παροχής Εγγυήσεων για την Εύρεση της Βέλτιστης Λύσης

Μη Εγγυημένη Βέλτιστη Λύση:

Συχνά δεν υπάρχει βεβαιότητα ότι ο ΓΑ θα παράγει την απόλυτα καλύτερη δυνατή λύση στο εκάστοτε πρόβλημα, γεγονός που αποτελεί ένα από τα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου.

2.2.4 Εφαρμογές των γενετικών αλγορίθμων

Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν αποδειχθεί ικανοί να επιλύουν μεγάλα και πολύπλοκα προβλήματα, στα οποία άλλες μέθοδοι αντιμετωπίζουν δυσκολίες. Συγκεκριμένα:

- Μεγάλης Κλίμακας Συνδυαστικά Προβλήματα Βελτιστοποίησης:

Οι ΓΑ είναι αποτελεσματικοί στην επίλυση προβλημάτων που περιέχουν πολλαπλές πιθανές λύσεις, πολλές από τις οποίες αντιπροσωπεύουν τοπικά ακρότατα.

- Εκτιμήσεις Πραγματικών Παραμέτρων:

Σε πολύπλοκους χώρους αναζήτησης, όπου παρουσιάζονται πολλαπλά τοπικά ακρότατα, οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να εντοπίσουν αποτελεσματικά τις βέλτιστες λύσεις.

Αυτός είναι ο κύριος λόγος που ολοένα και περισσότεροι επιστήμονες και μηχανικοί επιλέγουν τους γενετικούς αλγόριθμους για την επίλυση προβλημάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές αντιπροσωπευτικές εφαρμογές των ΓΑ:

Εφαρμογές σε μεγάλης κλίμακας προβλήματα βελτιστοποίησης.

Εκτιμήσεις και παραμετροποίηση πολύπλοκων συστημάτων.

Επίλυση συνδυαστικών προβλημάτων που χαρακτηρίζονται από πολλαπλά τοπικά ακρότατα.

➤ Εύρεση Μέγιστης Τιμής Αριθμητικών Συναρτήσεων

Η εύρεση του μέγιστου μιας συνάρτησης αποτελεί μία από τις πιο καλά μελετημένες εφαρμογές των γενετικών αλγορίθμων.

Η εύρεση του μέγιστου σε συναρτήσεις πολλών μεταβλητών, οι οποίες παρουσιάζουν ασυνέχειες, θόρυβο και άλλες δυσκολίες, δεν είναι καθόλου εύκολη υπόθεση.

Το σημαντικό πλεονέκτημα που προσφέρουν οι γενετικοί αλγόριθμοι σε αυτά τα προβλήματα είναι ότι η συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function) είναι δεδομένη. Αυτό επιτρέπει στους ΓΑ να αξιολογούν αποτελεσματικά κάθε πιθανή λύση και να οδηγούν στην εύρεση του μέγιστου της συνάρτησης.

➤ Επεξεργασία Εικόνων

Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση προτύπων σε ψηφιοποιημένες εικόνες. Μέσω αυτής της διαδικασίας, μπορούν να εντοπίσουν ακμές, επιφάνειες και αντικείμενα, προσφέροντας έτσι τη βάση για εφαρμογές ψηφιακής όρασης.

➤ Σχεδίαση

Οι γενετικοί αλγόριθμοι εφαρμόζονται στη σχεδίαση κατασκευών και εξαρτημάτων, όπως γέφυρες και μηχανολογικά εξαρτήματα. Σε αυτή τη διαδικασία, ο στόχος μπορεί να είναι τόσο η εύρεση μιας λύσης όσο και η βελτιστοποίηση της. Οι ΓΑ δοκιμάζουν διάφορους συνδυασμούς και ιδέες που ο ανθρώπινος νους δε θα εξετάσει παραδοσιακά, προσφέροντας ενίοτε πρωτότυπα αποτελέσματα.

➤ Μηχανική Μάθηση

Στα συστήματα μηχανικής μάθησης, οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για την ανακάλυψη κανόνων if...then... Η πιο γνωστή εφαρμογή είναι στα συστήματα κατηγοριοποίησης (classified systems), αλλά έχουν επίσης εφαρμοστεί σε παιχνίδια, επίλυση λαβυρίθων, καθώς και σε πολιτικές και οικονομικές αναλύσεις.

➤ Συνδυαστική Βελτιστοποίηση

Η συνδυαστική βελτιστοποίηση αφορά την κατανομή πόρων σε δραστηριότητες με σκοπό τη μεγιστοποίηση του οφέλους ή την ελάττωση του κόστους. Αυτά τα προβλήματα χαρακτηρίζονται από μια συνδυαστική έκρηξη του χώρου αναζήτησης, καθιστώντας αδύνατη την εξέταση όλων των υποψήφιων λύσεων.

Γίνεται φανερό ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν εφαρμοστεί σε πληθώρα προβλημάτων της Τεχνητής Νοημοσύνης, ιδίως σε προβλήματα βελτιστοποίησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα αποτελέσματα ήταν εξαιρετικά, ενώ σε άλλες παρουσιάστηκαν και περιορισμοί ή απογοητευτικές επιδόσεις, ανάλογα με τη φύση και τις απαιτήσεις του κάθε προβλήματος.

Συνοπτικά οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται στα παρακάτω:

Επεξεργασία εικόνων

Ψηφιακά συστήματα VLSI

Πρόβλεψη των τρισδιάστατων δομών των πρωτεϊνών

Τεχνολογίες laser

Ιατρική

Ανάλυση χρονοσειρών

Τροχιές διαστημικών σκαφών

Αεροναυπηγική

Τεχνολογία υγρών κρυστάλλων

Φυσική στερεάς κατάστασης

Ρομποτική

Δίκτυα ύδρευσης □

Έλεγχος □

Τεχνολογία λογισμικού □

Σχεδιασμός συστημάτων τεχνικής νοημοσύνης.

2.3 Επισκόπηση λογισμικού Autodesk Fusion 360 και γενετικού σχεδιασμού

Το Autodesk Fusion 360 είναι ένα ολοκληρωμένο, cloud-based λογισμικό CAD/CAM/CAE που έχει σχεδιαστεί για τη διαχείριση ολόκληρης της διαδικασίας σχεδιασμού και κατασκευής προϊόντων [28]. Παρακάτω παρουσιάζεται μια αναλυτική περιγραφή του λογισμικού με βασικά χαρακτηριστικά και βιβλιογραφικές αναφορές:

2.3.1 Ολοκληρωμένη Πλατφόρμα CAD/CAM/CAE

Το Autodesk Fusion 360 είναι μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα CAD/CAM/CAE που προσφέρει μια ενιαία λύση για το σχεδιασμό, την προσομοίωση και την παραγωγή. Συγκεκριμένα:

➤ CAD – Σχεδίαση (Computer-Aided Design)

Επιτρέπει τη δημιουργία λεπτομερών 3D μοντέλων με τη χρήση παραμέτρων που διευκολύνουν τις τροποποιήσεις. Παρέχει ένα πλήρες σετ εργαλείων για την κατασκευή, το σκαλισμό (διαδικασία διαμόρφωσης ή "κατασκευής" της μορφής ενός αντικειμένου, είτε αυτή πραγματοποιείται χειροκίνητα είτε ψηφιακά, χρησιμοποιώντας λογισμικά ψηφιακής σκαλιστικής . Σε περιβάλλοντα CAD, ο σκαλισμός μπορεί να σημαίνει την αρχική δημιουργία ή το "χαράγμα" ενός 3D μοντέλου με έμφαση στην απεικόνιση λεπτομερειών και στην απόδοση της επιφάνειας) και την τροποποίηση μοντέλων, με υποστήριξη για πλάνα, επιφάνειες και στερεά μοντέλα. Η cloud-based φύση του Fusion 360 επιτρέπει

την κοινή χρήση και συνεργασία σε πραγματικό χρόνο, διευκολύνοντας την ομαδική εργασία και την παρακολούθηση των αλλαγών.

➤ CAM – Κατασκευή (Computer-Aided Manufacturing)

Τα "ενσωματωμένα εργαλεία CAM" αναφέρονται σε εκείνα τα εργαλεία που συνδυάζονται άμεσα μέσα σε ένα ολοκληρωμένο λογισμικό CAD/CAM, επιτρέποντας την εύκολη μετάβαση από το σχέδιο (CAD) στην παραγωγή (CAM) χωρίς να χρειάζεται η χρήση ξεχωριστών εφαρμογών μειώνοντας το ανθρώπινο λάθος και βελτιώνοντας την ακρίβεια .

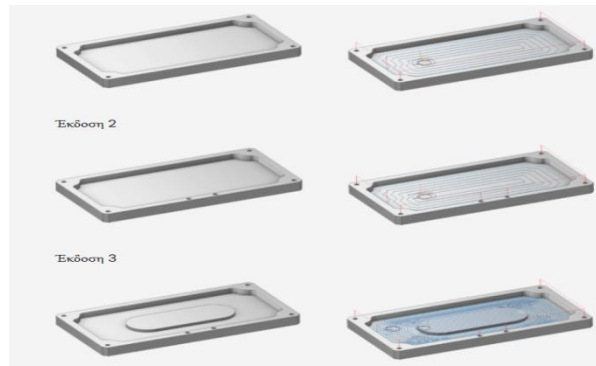
Μέσα σε μια ενιαία πλατφόρμα, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει 3D μοντέλα, να προγραμματίσει και να προσομοιώσει τη διαδικασία κοπής (toolpath generation) και να εξάγει τα απαιτούμενα δεδομένα για τη CNC μηχανολογία. Αυτή η ενοποίηση εξοικονομεί χρόνο και μειώνει τα σφάλματα που μπορεί να προκύψουν από τη μεταφορά αρχείων μεταξύ διαφορετικών λογισμικών.

Τα ενσωματωμένα εργαλεία CAM διαθέτουν λειτουργίες για τη βελτιστοποίηση του εργαλείου κοπής, όπως αυτόματη δημιουργία εργαλείων κοπής, προσομοίωση της διαδικασίας κοπής, και ανίχνευση συγκρούσεων, ώστε να διασφαλίζεται η ακρίβεια και η αποδοτικότητα της παραγωγής.

Μέσω των ενσωματωμένων εργαλείων, ο χρήστης μπορεί να προσομοιώσει τη διαδικασία κατασκευής, εντοπίζοντας πιθανά προβλήματα όπως συγκρούσεις ή ανεπιθύμητη παράγοντες κοπής πριν από την πραγματική παραγωγή. Αυτό βοηθά στη μείωση του κόστους και του χρόνου παραγωγής.

Χρησιμοποιεί εργαλεία κοπής (π.χ., δρεπάνια, τρυπάνια) για την αφαίρεση υλικού από ένα ακατέργαστο υλικό (π.χ., μέταλλο, πλαστικό) ώστε να δημιουργηθεί το τελικό προϊόν .Οι διαδικασίες αυτές επιτρέπουν την παραγωγή πολύπλοκων γεωμετριών και υψηλή ακρίβεια, καθώς ο υπολογιστής καθοδηγεί την κίνηση των μηχανημάτων με βάση το ψηφιακό μοντέλο.

Μέσω τεχνολογιών όπως FDM (Fused Deposition Modeling), SLA (Stereolithography) και SLS (Selective Laser Sintering), το αντικείμενο κατασκευάζεται στρώση προς στρώση. Επιτρέπει την κατασκευή πολύπλοκων δομών που δεν μπορούν να παραχθούν εύκολα με τις παραδοσιακές μεθόδους κοπής, με μικρότερο απόβλητο υλικού και δυνατότητα παραγωγής σε μικρές ποσότητες ή εξατομικευμένα αντικείμενα.



Σχήμα 2.12: Τροποποίηση σχεδίων με χρήση λογισμικού CAD/CAM(Mitchell, M. (1996). An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge: MIT Press.)

➤ CAE – Προσομοίωση (Computer-Aided Engineering)

Το Fusion 360 επιτρέπει τη διεξαγωγή αναλύσεων FEA για την αξιολόγηση της δομικής αντοχής και της συμπεριφοράς των σχεδίων υπό φορτία.

Η Finite Element Analysis (FEA) είναι μια αριθμητική μέθοδος επίλυσης πολύπλοκων προβλημάτων μηχανικής, η οποία βασίζεται στη διαίρεση ενός σύνθετου συστήματος σε μικρότερα, απλούστερα κομμάτια που ονομάζονται "finite elements". Κάθε στοιχείο συνδέεται με τα γειτονικά του μέσω κοινών ορίων, και οι εξισώσεις που περιγράφουν τη φυσική συμπεριφορά (π.χ. δομικές τάσεις, παραμορφώσεις, θερμικές μεταβολές) επιλύονται για κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα συνδυάζονται ώστε να παραχθεί μια πλήρης εικόνα της συμπεριφοράς του συστήματος ως ολότητας.

Η δυνατότητα αυτή μπορεί να αντιμετωπίσει σύνθετες γεωμετρίες και διαφορετικούς τύπους φορτίων. Έχει την ευελιξία προσομοίωσης πολλών διαφορετικών φυσικών φαινομένων (δομική ανάλυση, θερμική ανάλυση, ρευστοδυναμική, κλπ.) και βοηθά με τον εντοπισμό αδύναμων σημείων στη βελτιστοποίηση του σχεδίου πριν την κατασκευή, μειώνοντας το κόστος και τον χρόνο παραγωγής.

Επιτρέπει την προσομοίωση δυναμικών συμπεριφορών, όπως κίνηση, δονήσεις και θερμικές μεταβολές, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα πριν την κατασκευή. Έτσι οι χρήστες μπορούν να εντοπίσουν αδύναμα σημεία και να βελτιστοποιήσουν τα σχέδια τους για καλύτερη απόδοση.

2.3.2 Cloud-Based Συνεργασία

Το Autodesk Fusion 360 αποτελεί μια cloud-based πλατφόρμα CAD/CAM/CAE που διακρίνεται για την ικανότητά του να διευκολύνει τη συνεργασία μεταξύ των χρηστών μέσω του cloud [28].

Όλα τα σχέδια και τα αρχεία αποθηκεύονται στο cloud, επιτρέποντας στους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε αυτά από οποιοδήποτε σημείο και οποιαδήποτε συσκευή με σύνδεση στο διαδίκτυο. Οι αλλαγές αποθηκεύονται αυτόματα, εξασφαλίζοντας ότι οι συνεργάτες εργάζονται πάντα στην πιο ενημερωμένη έκδοση του σχεδίου.



Σχήμα 2.13: Το Fusion 360 συγκεντρώνει CAD, CAM, CAE σε ένα εύκολα προσβάσιμο πακέτο CAD (Computer-Aided Design) cloud. (<https://upperedge.com>)

Το Fusion 360 επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να εργάζονται ταυτόχρονα στο ίδιο project, βλέποντας τις αλλαγές ο ένας του άλλου σε πραγματικό χρόνο. Αυτό διευκολύνει την άμεση ανταλλαγή ιδεών και την ταχεία επίλυση προβλημάτων. Η παρακολούθηση των αλλαγών μέσω ενσωματωμένων εργαλείων διαχείρισης εκδόσεων επιτρέπει στους χρήστες να επανέλθουν σε προηγούμενες εκδόσεις εάν απαιτηθεί, ενισχύοντας την αξιοπιστία και τη διαφάνεια της διαδικασίας σχεδιασμού.

Μέσα από το Fusion 360, οι χρήστες μπορούν να διαχειρίζονται όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος – από το αρχικό σχεδιασμό, μέσω της προσομοίωσης, έως την προετοιμασία για την παραγωγή – σε ένα ενιαίο περιβάλλον. Η ενσωμάτωση αυτών των λειτουργιών στο cloud επιτρέπει την ομαλή συνεργασία και την εύκολη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διαφορετικών τμημάτων και ειδικοτήτων. Η cloud-based πλατφόρμα διευκολύνει τον διαμοιρασμό εργασιών, την ανάθεση ρόλων και την παρακολούθηση της προόδου, πράγμα που βελτιώνει την ομαδική εργασία και επιταχύνει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

2.3.3 Γεννητικός σχεδιασμός (Generative Design)

Ο γεννητικός σχεδιασμός αποτελεί μια επαναστατική προσέγγιση στο σχεδιασμό, όπου ο υπολογιστής χρησιμοποιεί εξελικτικούς ή γενετικούς αλγόριθμους για να δημιουργήσει και να βελτιστοποιήσει λύσεις βάσει προκαθορισμένων περιορισμών και στόχων. Το Autodesk Fusion 360 ενσωματώνει αυτή τη διαδικασία, επιτρέποντας στους χρήστες να διερευνήσουν έναν ευρύ χώρο λύσεων και να επιλέξουν εκείνες που ικανοποιούν καλύτερα τα κριτήρια απόδοσης και κατασκευής [21].

Ο σχεδιαστής ορίζει τους περιορισμούς (π.χ. μέγεθος, βάρος, αντοχή, υλικό) και τους στόχους που θέλει να επιτύχει. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος εξερευνά έναν τεράστιο χώρο πιθανών λύσεων και παράγει πολλές εναλλακτικές επιλογές που πληρούν αυτά τα κριτήρια.

Χρησιμοποιούνται τεχνικές εμπνευσμένες από τη βιολογία – όπως η φυσική επιλογή, η μετάλλαξη και ο ανασυνδυασμός – για να εξελιχθούν οι λύσεις από

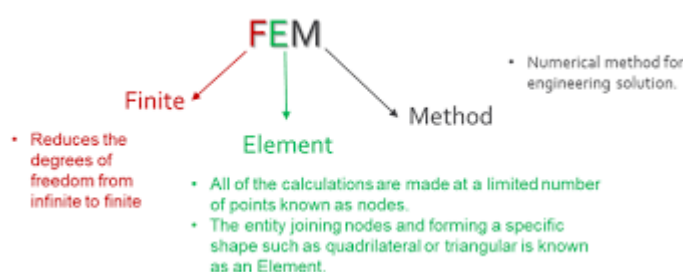
μια αρχική τυχαία συλλογή (πληθυσμός) σε έναν πληθυσμό λύσεων υψηλής καταλληλότητας.

Η διαδικασία του γεννητικού σχεδιασμού στο Autodesk Fusion 360 επιτρέπει στους μηχανικούς να αξιοποιήσουν τις εξελικτικές τεχνικές για την αυτόματη δημιουργία και βελτιστοποίηση σχεδίων. Μέσω της ενσωμάτωσης των εργαλείων αυτών στο cloud, το Fusion 360 προσφέρει ευρεία διερεύνηση του σχεδιαστικού χώρου, αυτοματοποίηση των υπολογισμών και των επαναληπτικών διαδικασιών, δυνατότητα συνεργασίας σε πραγματικό χρόνο και ολοκληρωμένη διαχείριση του κύκλου ζωής του προϊόντος.

2.3.4 Μηχανολογική προσομοίωση

Το Autodesk Fusion 360 διαθέτει ολοκληρωμένα εργαλεία μηχανολογικής προσομοίωσης που επιτρέπουν στους χρήστες να αναλύσουν την απόδοση και τη συμπεριφορά των σχεδίων τους πριν από την κατασκευή.

Επιτρέπει τη δημιουργία λεπτομερούς δικτύωσης (mesh) του μοντέλου, διασπώντας το σε μικρά στοιχεία (finite elements)[29] για την εφαρμογή των εξισώσεων μηχανικής (Σχήμα 2.14). Οι χρήστες μπορούν να ορίσουν φορτία (όπως δυνάμεις, πίεση, θερμικά φορτία) και συνθήκες ορίου (π.χ. σταθερή, κινητική) στο μοντέλο, ώστε να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του υπό πραγματικές συνθήκες. Η ανάλυση βοηθά στον εντοπισμό αδύναμων σημείων, την αξιολόγηση των τάσεων και των παραμορφώσεων, καθώς και στη βελτιστοποίηση του σχεδίου για υψηλότερη αντοχή και απόδοση.



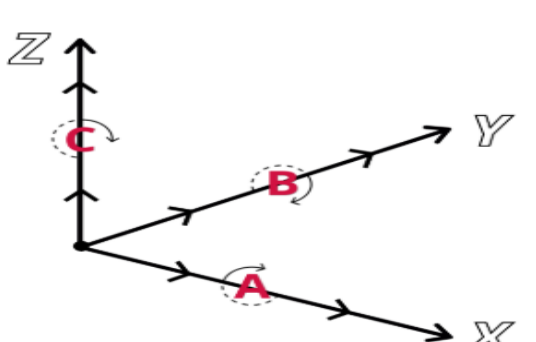
Σχήμα 2.14: Ανάλυση μικρών στοιχείων(<https://www.graspengineering.com>)

Το Fusion 360 επιτρέπει την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των μηχανικών συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τις κινήσεις, τις δονήσεις και τη συμπεριφορά υπό μεταβαλλόμενα φορτία. Μέσω της δυναμικής προσομοίωσης, μπορεί να αξιολογηθεί η ενεργειακή κατανάλωση και να βελτιστοποιηθούν οι κινήσεις του συστήματος για αποτελεσματικότερη λειτουργία.

Το λογισμικό επιτρέπει την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς, όπως η διάδοση θερμότητας και οι θερμικές παραμορφώσεις, βοηθώντας στη βελτιστοποίηση του σχεδίου σε εφαρμογές όπου οι θερμικές επιδράσεις είναι κρίσιμες. Μέσω της θερμικής προσομοίωσης, μπορούν να εντοπιστούν περιοχές που υφίστανται υπερθέρμανση ή ανεπαρκή ψύξη, ώστε να γίνουν οι απαραίτητες προσαρμογές.

2.3.5 Εργαλεία CAM και Παραγωγής

Στην ενότητα CAM και Παραγωγής, το Fusion 360 παρέχει εργαλεία για την προετοιμασία και τον προγραμματισμό της παραγωγής, εξασφαλίζοντας ομαλή μετάβαση από το ψηφιακό μοντέλο στην πραγματική κατασκευή [30]. Επιτρέπει την αυτόματη δημιουργία εργαλείων κοπής (toolpaths) για CNC μηχανές. Οι χρήστες ορίζουν τις παραμέτρους κοπής (όπως ταχύτητα, βάθος κοπής, τύπος εργαλείου) και το σύστημα υπολογίζει τα βέλτιστα μονοπάτια για την κατασκευή του εξαρτήματος. Υποστηρίζονται διάφορες διαδικασίες κοπής όπως 3-axis, 4-axis και 5-axis machining (Σχήμα 2.15). Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει την παραγωγή πολύπλοκων γεωμετριών με υψηλή ακρίβεια.



Σχήμα 2.15: 3-axis, 4-axis και 5-axis machining(<https://www.mastercam.com>)

Η ενσωματωμένη προσομοίωση CAM επιτρέπει την οπτικοποίηση των toolpaths και τον έλεγχο πιθανών συγκρούσεων ή σφαλμάτων πριν από την πραγματική κατασκευή. Αυτό συμβάλλει στη μείωση του χρόνου παραγωγής και στην αποφυγή λαθών.

Το Fusion 360 παρέχει εργαλεία για την εξαγωγή μοντέλων σε μορφές αρχείων όπως .stl και .obj, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εκτύπωση μέσω 3D εκτυπωτών. Επιπλέον, το λογισμικό διαθέτει δυνατότητες slicing που βοηθούν στη μετατροπή του 3D μοντέλου σε στρώσεις, προσαρμόζοντας παραμέτρους όπως το layer height, το infill και τη χρήση υποστηρίξεων. Μέσω των εργαλείων CAM, οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν ολοκληρωμένα προγράμματα παραγωγής που μετατρέπουν το ψηφιακό σχέδιο σε εντολές για μηχανές CNC ή 3D εκτυπωτές, εξασφαλίζοντας ομαλή μετάβαση από τον ψηφιακό σχεδιασμό στην πραγματική κατασκευή. Υποστηρίζει την υβριδική παραγωγή, όπου μπορούν να συνδυαστούν τεχνικές αφαιρετικής (subtractive) και προσθετικής (additive) κατασκευής για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας και βελτιστοποίησης της διαδικασίας παραγωγής.

Η αυτοματοποίηση των εργαλείων CAM μειώνει το χρόνο παραγωγής και τον αριθμό των δοκιμών, ενώ η προσομοίωση επιτρέπει τον εντοπισμό και την διόρθωση προβλημάτων πριν από την κατασκευή. Έτσι εξασφαλίζεται υψηλότερη ακρίβεια στην κατασκευή και σε βελτιστοποίηση των διαδικασιών κοπής και εκτύπωσης.

2.3.6 Παραμετρικός σχεδιασμός

Ο παραμετρικός σχεδιασμός αποτελεί μια προσέγγιση στο CAD που βασίζεται στον ορισμό μεταβλητών (παραμέτρων) και σχέσεων μεταξύ τους, οι οποίες καθορίζουν το τελικό μοντέλο. Στο Fusion 360, αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στους σχεδιαστές να δημιουργούν δυναμικά μοντέλα που

προσαρμόζονται αυτόματα όταν αλλάζουν οι τιμές των παραμέτρων ή οι περιορισμοί[28].

Ορίζονται οι βασικές διαστάσεις και ιδιότητες (όπως μήκη, διαστάσεις, γωνίες, υλικά) ως μεταβλητές. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να τροποποιηθούν εύκολα, και το μοντέλο αναπροσαρμόζεται αυτόματα. Μέσω της καθορισμένης μαθηματικής σχέσης μεταξύ των παραμέτρων, δημιουργούνται σχέσεις που εξασφαλίζουν την ορθότητα του μοντέλου.

Ο παραμετρικός σχεδιασμός επιτρέπει την εύκολη παραμετροποίηση και αναπροσαρμογή των σχεδίων, καθιστώντας το ιδανικό για επαναληπτικό σχεδιασμό και βελτιστοποίηση προϊόντων. Οι αλλαγές μπορούν να γίνουν σε ένα μόνο σημείο, επηρεάζοντας ολόκληρο το μοντέλο, κάτι που εξοικονομεί χρόνο και μειώνει την ανάγκη για χειροκίνητες τροποποιήσεις.

Λειτουργική διαδικασία που ακολουθείται:

4. Καθορισμός Βασικών Παραμέτρων:

Οι χρήστες ξεκινούν ορίζοντας μεταβλητές που καθορίζουν τις βασικές διαστάσεις και ιδιότητες του σχεδίου.

5. Εφαρμογή Σχέσεων και Περιορισμών:

Εφαρμόζονται μαθηματικές σχέσεις που εξασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία του μοντέλου, όπως σχέσεις αναλογίας, συμμετρία ή άλλοι γεωμετρικοί περιορισμοί.

6. Δημιουργία και Ενημέρωση Μοντέλου:

Με βάση τις ορισμένες παραμέτρους και τους περιορισμούς, το μοντέλο δημιουργείται και, όταν οι τιμές των παραμέτρων αλλάζουν, το μοντέλο αναπροσαρμόζεται αυτόματα.

7. Προσομοίωση και Βελτιστοποίηση:

Οι χρήστες μπορούν να προσομοιάσουν τη συμπεριφορά του μοντέλου και να πραγματοποιήσουν βελτιστοποιήσεις, π.χ., μέσω ενσωματωμένων εργαλείων προσομοίωσης (FEA) για δομικές ή θερμικές αναλύσεις.

Ο παραμετρικός σχεδιασμός στο Autodesk Fusion 360 παρέχει μια ευέλικτη και δυναμική προσέγγιση για τη δημιουργία και βελτιστοποίηση μοντέλων. Μέσω της παραμετροποίησης, των σχέσεων και των περιορισμών, τα σχέδια

προσαρμόζονται αυτόματα στις αλλαγές, εξοικονομώντας χρόνο και βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα του σχεδιασμού. Η ενσωμάτωση αυτής της λειτουργίας με το cloud επιτρέπει τη συνεργατική εργασία και την ευκολία στην ενημέρωση του μοντέλου σε πραγματικό χρόνο, καθιστώντας το Fusion 360 ένα από τα πλέον καινοτόμα εργαλεία στη σύγχρονη μηχανολογική σχεδίαση.

3.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογική προσέγγιση για τον γενετικό σχεδιασμό ενός πλανητικού μηχανισμού με τη χρήση του Autodesk Fusion 360 και την προετοιμασία για 3D εκτύπωση περιλαμβάνει μια σειρά από βήματα: από τον αρχικό ορισμό των παραμέτρων και των περιορισμών, μέσω της εφαρμογής του generative design για την παραγωγή πολλαπλών λύσεων, μέχρι την επιλογή της βέλτιστης λύσης και την προετοιμασία του μοντέλου για εκτύπωση. Αυτή η διαδικασία εξασφαλίζει την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων με αποτελεσματικότητα, αξιοποιώντας τις εξελικτικές τεχνικές και τις δυνατότητες του cloud-based Fusion 360.

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν έχουν ως ακολούθως:

3.1 Στόχοι απαιτήσεις-Συλλογή δεδομένων

Ορίστηκαν οι βασικές λειτουργίες και μηχανολογικές απαιτήσεις του πλανητικού μηχανισμού (σχέσεις μετάδοσης, φορτία, διαστάσεις). Ακολούθως προσδιορίστηκαν τα κριτήρια για τον γενετικό σχεδιασμό (ελαχιστοποίηση βάρους, μέγιστη αντοχή, βέλτιστη κατανομή φορτίων). Συγκεντρώθηκαν οι απαραίτητες τεχνικές προδιαγραφές και οι αρχικές παράμετροι. Τέλος προετοιμάστηκε ένα αρχικό παραμετρικό μοντέλο στο Fusion 360.

3.2 Παραμετρικός Σχεδιασμός στο Fusion 360

Δημιουργήθηκε ένα παραμετρικό μοντέλο, όπου ορίζονται οι βασικές μεταβλητές (αριθμός δοντιών, διαστάσεις, αποστάσεις μεταξύ των γραναζιών). Καθορίστηκαν μαθηματικές σχέσεις και περιορισμοί (ορισμός σχέσεων μεταξύ του ήλιου, των πλανητών και της στεφάνης) ώστε το μοντέλο να αναπροσαρμόζεται αυτόματα όταν αλλάζουν οι τιμές. Εκτελέστηκαν αρχικές προσομοιώσεις για τον έλεγχο της λειτουργικότητας του μοντέλου (π.χ. κίνηση, μεταδόσεις, κατανομές φορτίων). Εφαρμόστηκε γενετικός αλγόριθμος για την αναζήτηση βέλτιστων παραμέτρων, χρησιμοποιώντας το ενσωματωμένο περιβάλλον generative design του Fusion 360.

3.3 Εφαρμογή Generative Design

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αξιοποιούνται για τη βελτίωση της γεωμετρίας και της αντοχής ενός πλανητικού μηχανισμού για 3D εκτύπωση σε πλαστικό υψηλής αντοχής με την εξής μεθοδολογία:

- Ορίζεται ένα παραμετρικό μοντέλο στο Fusion 360, όπου οι κρίσιμες παράμετροι (π.χ. αριθμός δοντιών, διαστάσεις γραναζιών, διαστήματα) καθορίζονται ως μεταβλητές. Οι σχέσεις μεταξύ των στοιχείων του πλανητικού μηχανισμού θέτουν τους περιορισμούς, ώστε το μοντέλο να παραμένει λειτουργικό και ισορροπημένο.
- Καθορίζεται μια συνάρτηση καταλληλότητας που αξιολογεί κάθε πιθανή λύση βάσει κριτηρίων όπως η κατανομή των φορτίων και η ελαχιστοποίηση τάσεων κάμψης (μέσω FEA προσομοίωσης), η συνολική γεωμετρία που εξασφαλίζει ομαλή λειτουργία και σωστή συναρμογή των γραναζιών, η προσαρμοστικότητα του μοντέλου στις απαιτήσεις της διαδικασίας 3D εκτύπωσης σε πλαστικό υψηλής αντοχής.
- Δημιουργείται ένας αρχικός πληθυσμός λύσεων (χρωμοσώματα) με τυχαία τιμές για τις παραμέτρους. Μέσω διαδικασιών επιλογής, διασταύρωσης και

μετάλλαξης, ο αλγόριθμος εξελίσσει τον πληθυσμό ώστε οι λύσεις που πλησιάζουν περισσότερο τον στόχο (βάσει της fitness function) να επιβιώνουν και να αναπαράγονται. Με επαναληπτικές γενιές, ο χώρος σχεδιασμού εξερευνάται ευρέως, παράγοντας λύσεις που βελτιώνουν τη γεωμετρία και την αντοχή του μηχανισμού.

- Οι λύσεις που παράγονται ενσωματώνονται στο περιβάλλον του Fusion 360, όπου πραγματοποιούνται προσομοιώσεις (π.χ. FEA για δομική ανάλυση) για να αξιολογηθεί η συμπεριφορά τους υπό φορτία. Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, επιλέγεται η βέλτιστη λύση για την τελική προετοιμασία.

3.4 Προετοιμασία για Τρισδιάστατη Εκτύπωση

Μετατρέπεται το επιλεγμένο μοντέλο σε μορφή αρχείου κατάλληλη για 3D εκτύπωση. Ορίζονται οι ρυθμίσεις εκτύπωσης (layer height, infill, υποστηρίξεις) για βέλτιστη ποιότητα και λειτουργικότητα του τελικού αντικειμένου. Γίνεται προσομοίωση της διαδικασίας εκτύπωσης για την εντοπισμό πιθανών προβλημάτων. Στην συνέχεια εφαρμόζονται δοκιμαστικές εκτυπώσεις για την αξιολόγηση της λειτουργικότητας και της ακρίβειας του αντικειμένου και τέλος γίνονται προσαρμογές στο μοντέλο με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών [31].

Η προετοιμασία για την 3D εκτύπωση αναλυτικά περιλαμβάνει:

- Επιλογή του κατάλληλου υλικού: Το πλαστικό υψηλής αντοχής που επιλέγεται προσφέρει υψηλή αντοχή, ευκαμψία και μηχανική σταθερότητα. Τα κριτήρια επιλογής του εστιάζουν στις μηχανικές του ιδιότητες (Αντοχή, ελαστικότητα, υψηλό σημείο θραύσης), στην συμπεριφορά του σε μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες και την σταθερότητα που διατηρεί κατά την θερμική επεξεργασία και την δυνατότητα επεξεργασίας για τη συγκεκριμένη μέθοδο εκτύπωσης

- Ρυθμίσεις κατά την εκτύπωση: Επιλογή μικρών στρώσεων (π.χ. 0.1 mm) για υψηλότερη ανάλυση, παρόλο που αυξάνει τον χρόνο εκτύπωσης. Η σωστή ρύθμιση του infill εξασφαλίζει την απαιτούμενη αντοχή χωρίς υπερβολική χρήση υλικού. Ρυθμίσεις που επιδρούν στην πρόσφυση μεταξύ των στρώσεων και στη συνολική ποιότητα του τελικού αντικειμένου. Η σωστή τοποθέτηση υποστηρίξεων είναι κρίσιμη για την αποφυγή παραμορφώσεων (warping) σε πολύπλοκες γεωμετρίες.

Κατά την εκτύπωση ενδέχεται να απαιτείται αντιμετώπιση προκλήσεων όπως η παραμόρφωση του υλικού δηλαδή στρέβλωση του τελικού αντικειμένου κατά την εκτύπωση. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει κυρίως λόγω των θερμικών διαφορών κατά την ψύξη των στρώσεων που εκτυπώνονται. Καθώς οι θερμοκρασίες μεταβάλλονται, το υλικό ψύχεται και συστέλλεται, οδηγώντας σε μη ομοιόμορφη συστολή μεταξύ των στρώσεων. Αν η πρώτη στρώση δεν προσκολληθεί σωστά στην επιφάνεια εκτύπωσης, μπορεί να δημιουργηθούν διαχωρισμοί ή στρέβλωση. Επίσης ορισμένα υλικά, , είναι πιο επιρρεπή σε παραμόρφωση σε σύγκριση με άλλα.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η ακρίβεια του τελικού προϊόντος και το αντικείμενο να αποκλίνει από το επιθυμητό σχέδιο .Επίσης σε εφαρμογές όπου η ακρίβεια είναι κρίσιμη, η παραμόρφωση μπορεί να καταστήσει το αντικείμενο μη λειτουργικό.

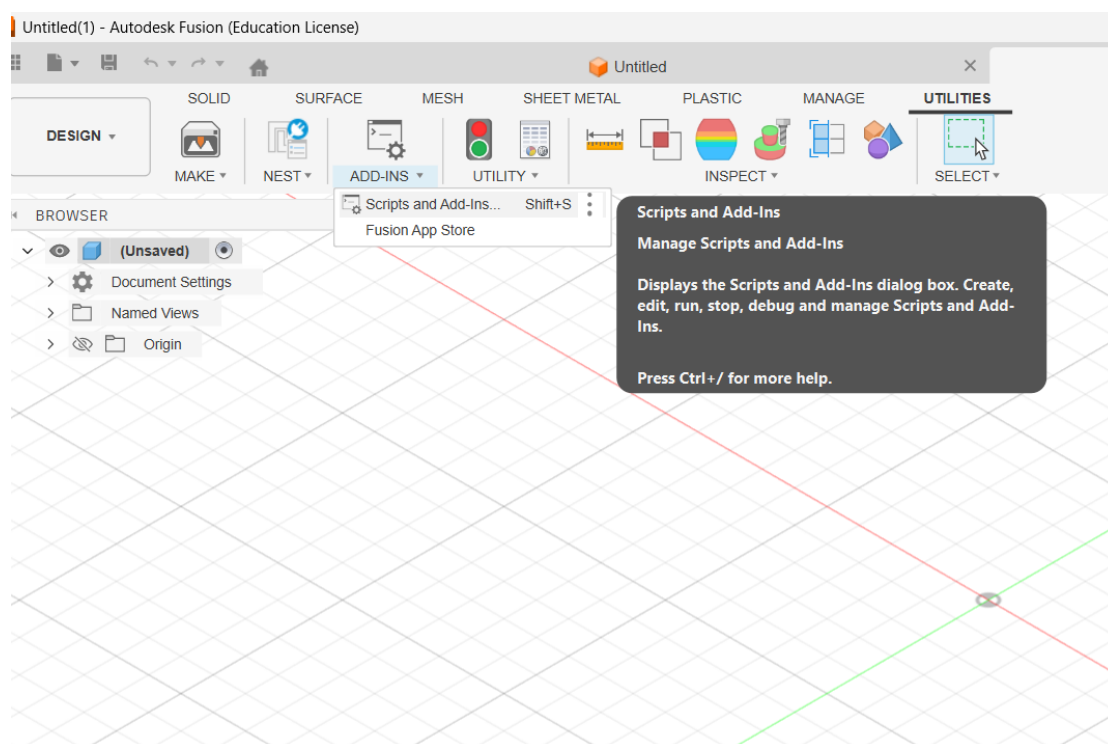
Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι προκλήσεις κατά την εκτύπωση είναι σκόπιμο να λαμβάνονται μέτρα όπως η ρύθμιση της θερμοκρασίας του εκτυπωτικού κρεβατιού δεδομένου ότι η ζεστή επιφάνεια εκτύπωσης βοηθά στη μείωση της θερμικής διαφοράς. Επίσης σκόπιμο είναι να επιλέγονται υλικά που έχουν χαμηλότερη θερμική συστολή. Τέλος πρέπει να εφαρμόζονται επιφανειακές επεξεργασίες (π.χ., χρήση κόλλας ή ειδικών ρυθμίσεων bed adhesion) για την καλύτερη πρόσφυση της πρώτης στρώσης.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΤΟ FUSION 360

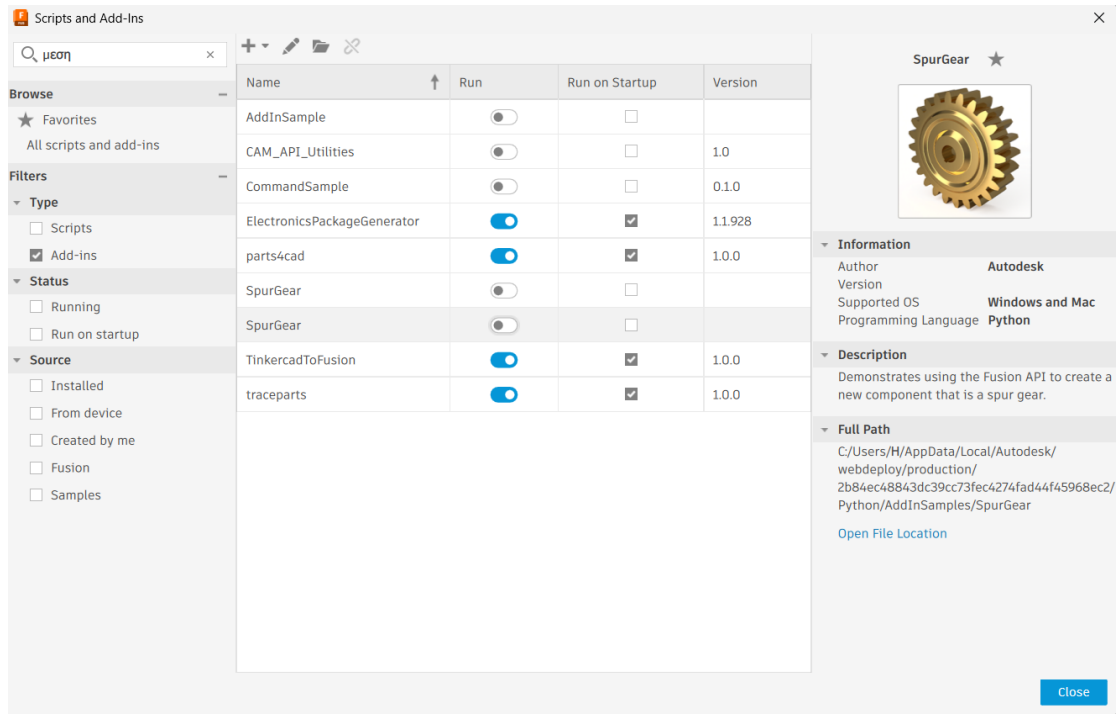
4.1 Δημιουργία στοιχείων πλανητικού μηχανισμού

Η δημιουργία γραναζιών στο Fusion 360 είναι μία διαδικασία που διευκολύνεται αρκετά λόγω του προγράμματος αυτού, καθώς στην εργαλειοθήκη του υπάρχει εντολή ενεργοποίησης γραναζιών (Σχήματα 4.1, 4.2). Χρειάζεται όμως η γνώση των τιμών των γραναζιών για να δηλωθούν όπως φαίνεται στις παρακάτω σχήματα για το καθένα ξεχωριστά. Αυτό που προαναφέρθηκε ισχύει για τους **πλανήτες** και τον **ήλιο**, όχι όμως για το **δαχτυλίδι** και ο **φορέας** αφού εκεί η προεργασία για το τελικό αποτέλεσμα διαφέρει. Αναλυτικότερα :

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΡΑΝΑΖΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΡΓΑΛΕΙΟΘΗΚΗ :

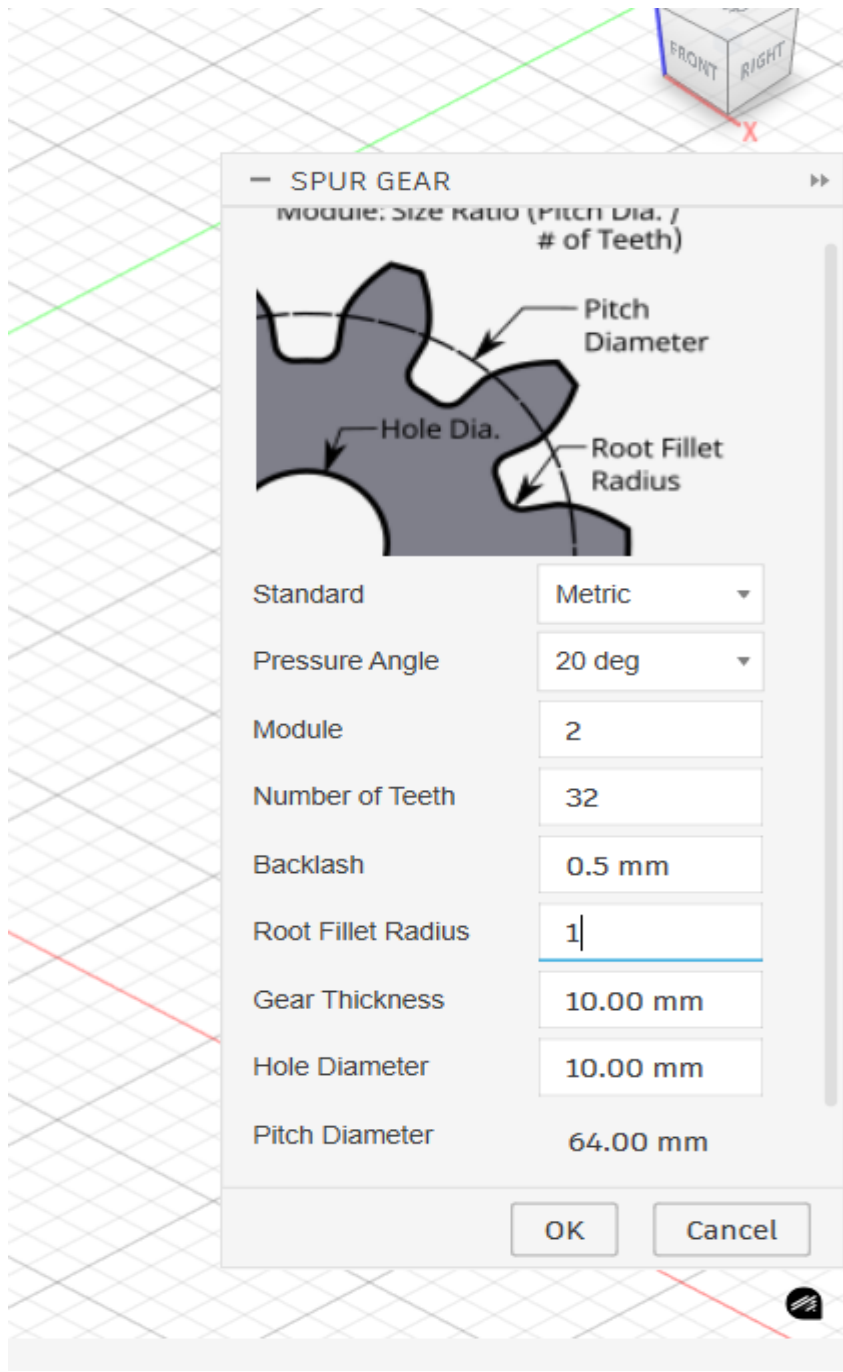


Σχήμα 4.1:εισαγωγή γραναζιών στο πρόγραμμα(Fusion 360)



Σχήμα 4.2: ενεργοποίηση γραναζιών(Fusion 360)

4.2 ΠΛΑΝΗΤΕΣ (PLANETS)



Σχήμα 4.3: τιμές πλανητών(Fusion 360)

Από το Σχήμα 4.3 λαμβάνονται τα εξής δεδομένα:

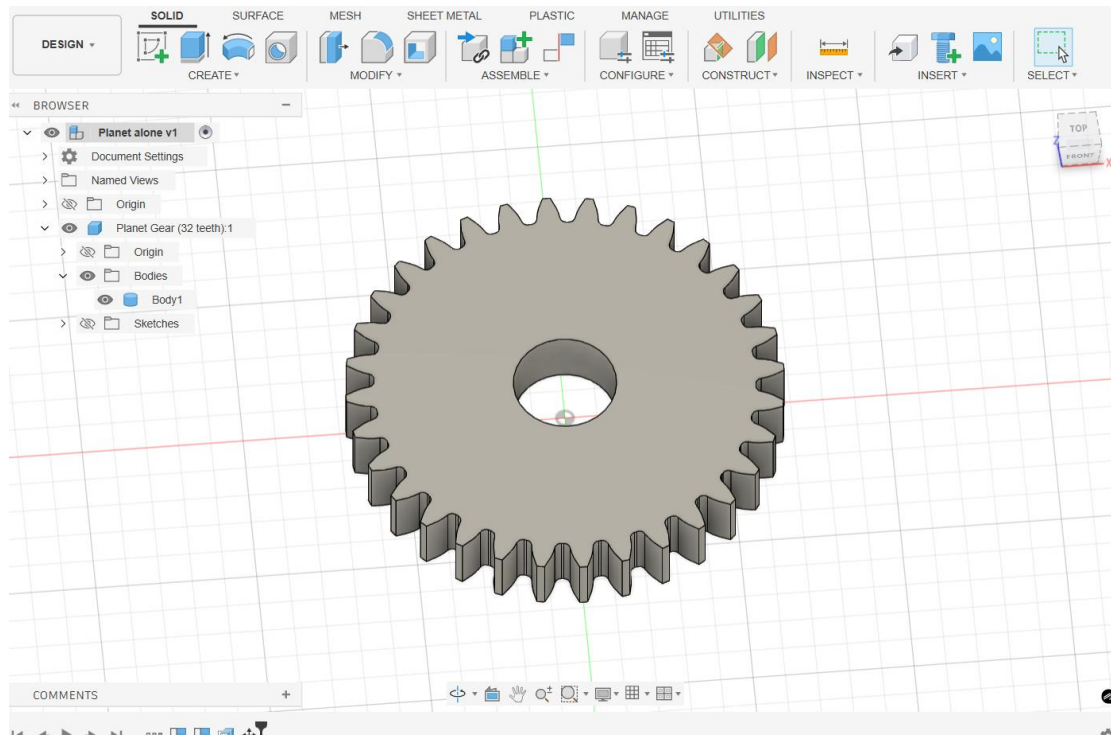
- Η γωνία που τα δόντια έρχονται σε επαφή είναι 20°, καθώς είναι η πιο συνήθης τιμή για τα δόντια που έρχονται σε επαφή με πιο ομαλή λειτουργία.
- Το module καθορίζει το μέγεθος των δοντιών και βγαίνει από την διαίρεση της διαμέτρου του γραναζιού με τον αριθμό δοντιών

$$\text{Module} = \text{diameter} / \text{number of teeth} = 64 / 32 = 2$$

Μάλιστα για τις εκτυπώσεις σχεδίων σε 3D printer είναι η καταλληλότερη τιμή.

- Ο αριθμός των δοντιών ορίστηκαν στα 32 για να εξασφαλιστεί η καλή και η συνεχής λειτουργία με λιγότερους κραδασμούς.
- Το backflash είναι το κενό ανάμεσα σε 2 δόντια που έρχονται σε επαφή και χρησιμοποιείται για την ομαλή λειτουργία και την αποφυγή μπλοκαρισμάτων.
- Όσον αφορά το root fillet, είναι η ακτίνα καμπύλης της βάσης του δοντιού και αποσκοπεί στον περιορισμό των τάσεων.
- Τέλος δηλώνεται το πάχος του γραναζιού και τη διάμετρο της τρύπας στα 10 χιλιοστά.

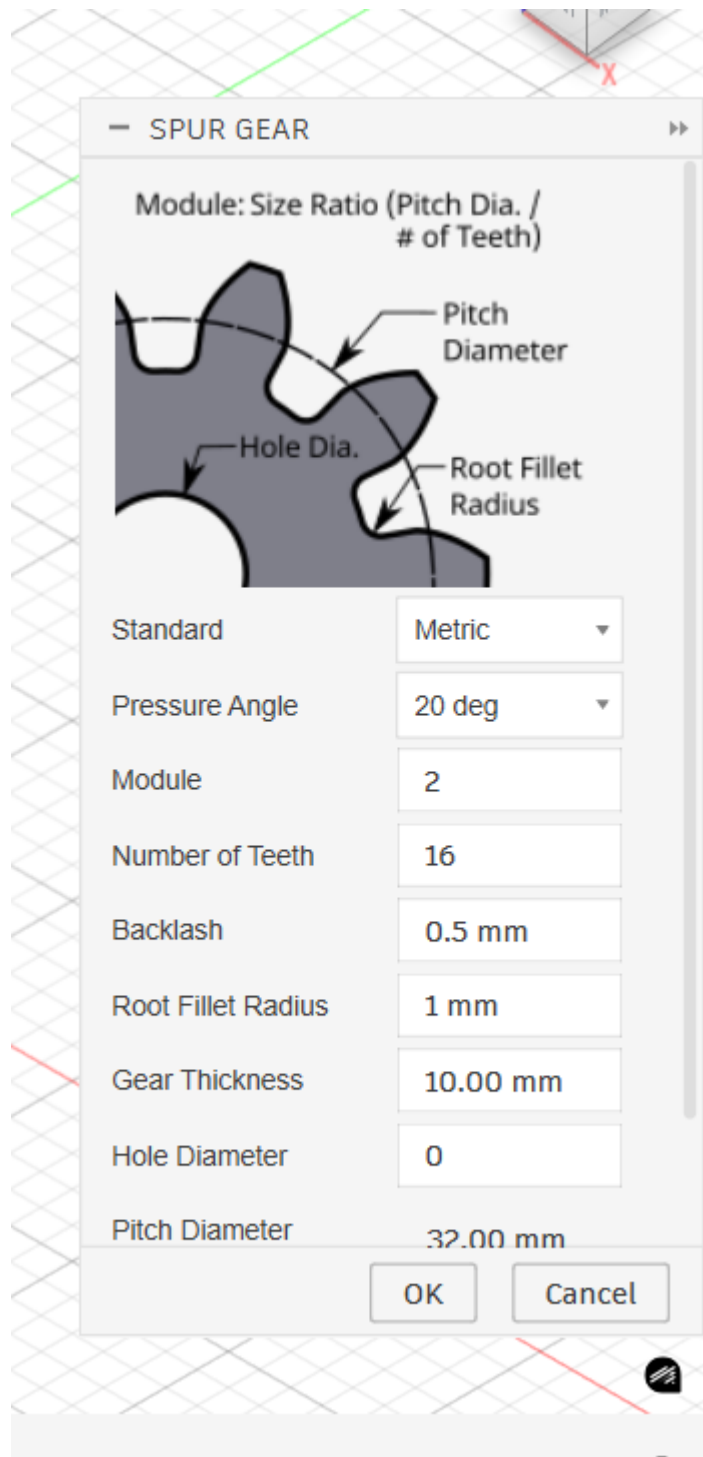
Τελικό Αποτέλεσμα (Σχήμα 4.4) :



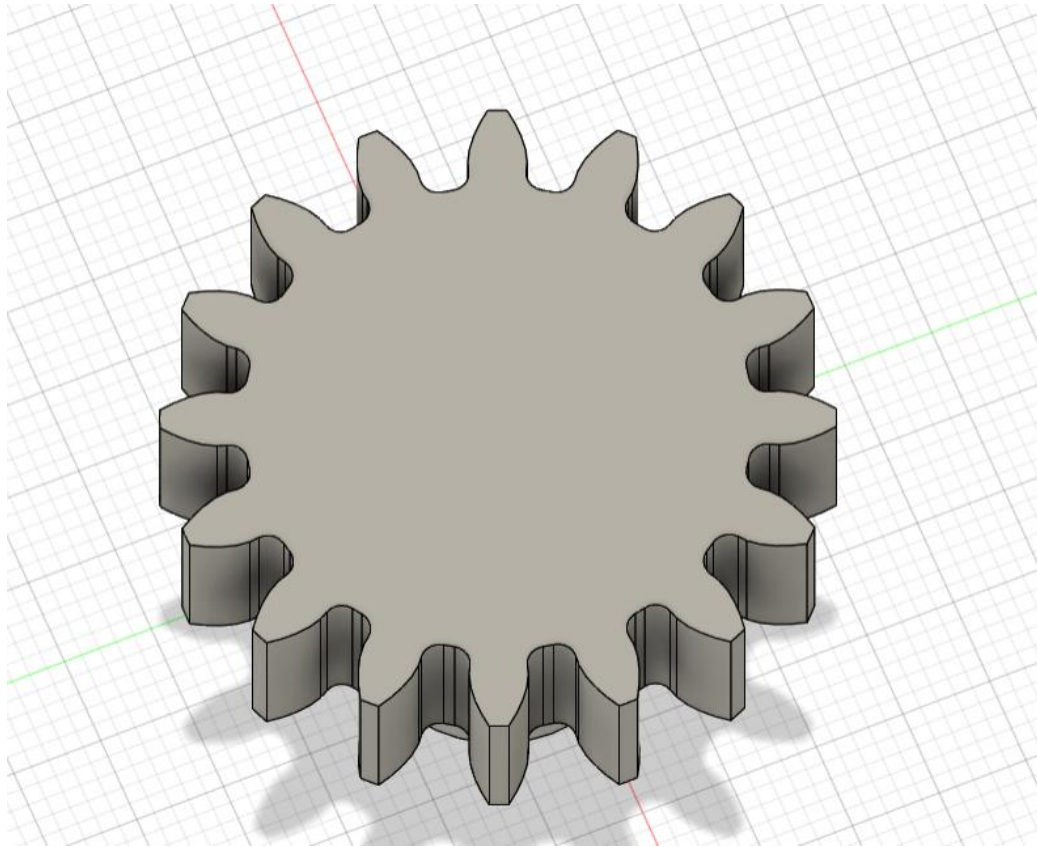
Σχήμα4.4: πλανήτης(Fusion 360)

4.3 ΗΛΙΟΣ (SUN)

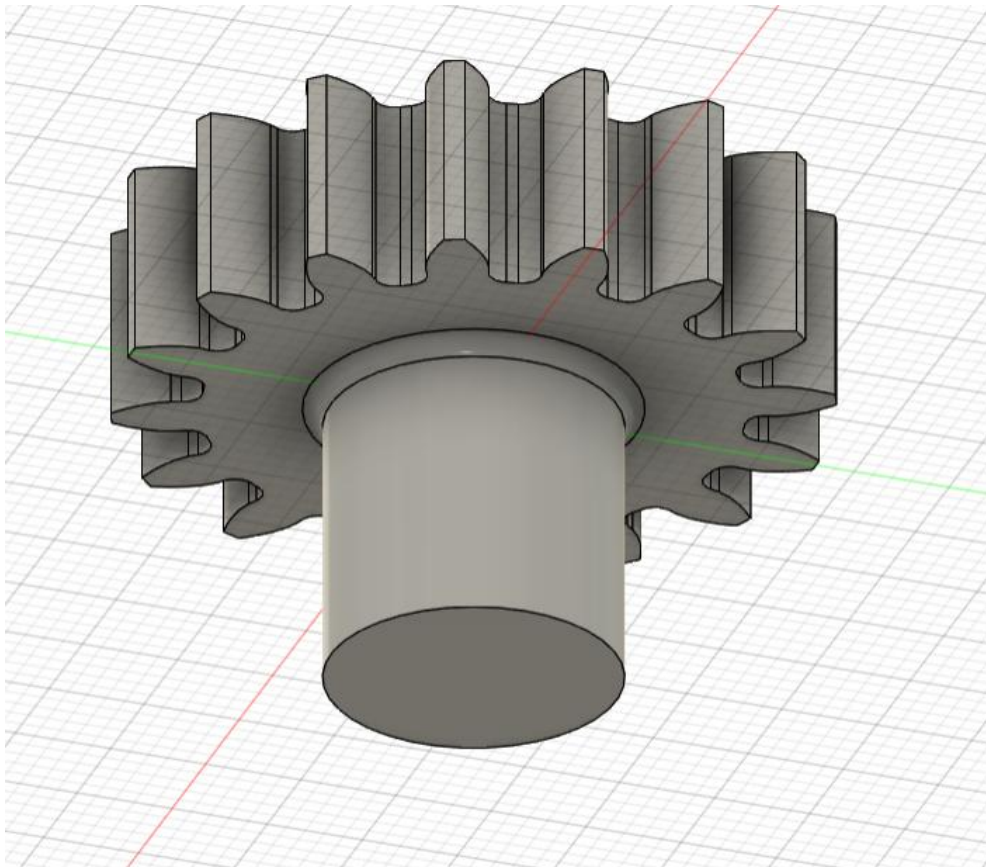
Κατά τον ίδιο τρόπο (Σχήμα 4.5) δημιουργείται και ο ήλιος (Σχήμα 4.6) με τις μόνες βασικές διαφορές να είναι ο αριθμός των δοντιών που είναι 16 και ότι στο κέντρο δεν υπάρχει τρύπα αλλά είναι συμπαγής, καθώς είναι σε επαφή με άξονα για την μεταφορά της κίνησης (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.5 : τιμές ήλιου (Fusion 360)



Σχήμα 4.6 : Ήλιος (Fusion 360)

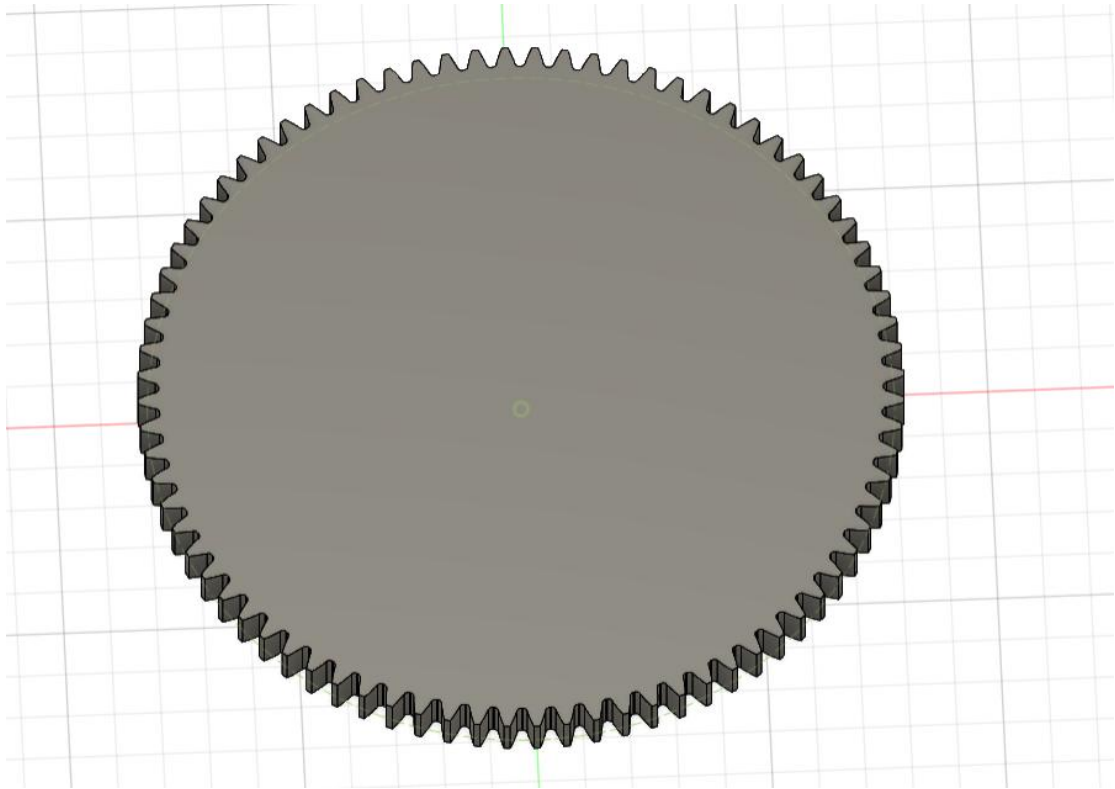


Σχήμα 4.7 : άξονας μεταφοράς ροπής(Fusion 360)

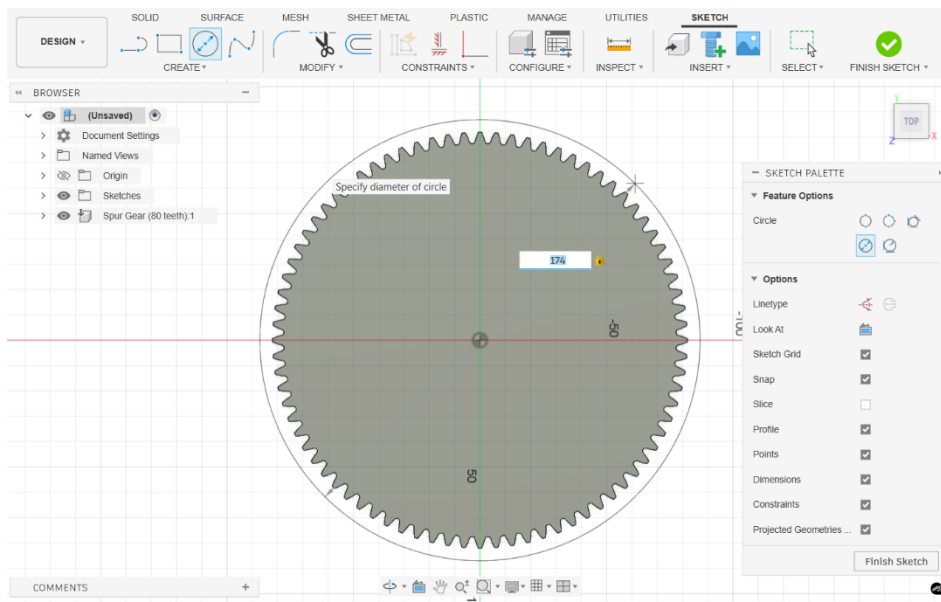
Ο άξονας αυτός δημιουργείται με τον σχεδιασμό ενός κύκλου 15 mm στην κάτω επιφάνεια του ήλιου (Σχήμα 4.7) και με την εντολή extrude επεκτείνεται κατά 15mm, δίνοντάς του έτσι μια τρισδιάστατη μορφή. Τέλος <<φιλετάρεται>>, στο σημείο επαφής με την επιφάνεια του ήλιου, κατά 1mm για την μείωση των τάσεων.

4.4 ΔΑΧΤΥΛΙΔΙ (RING)

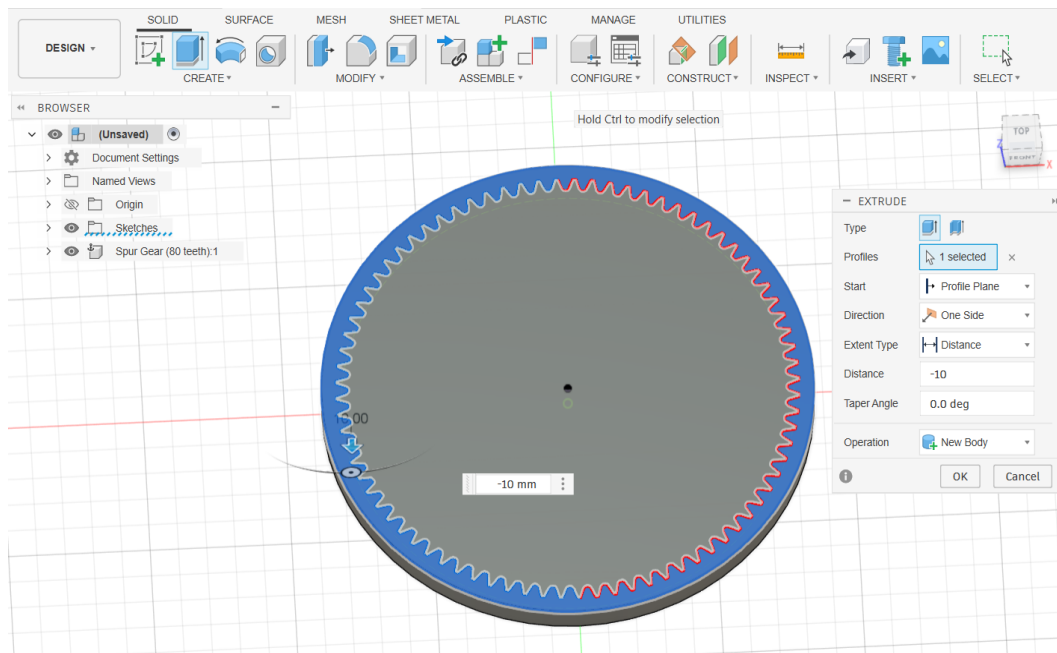
Σε αυτή την περίπτωση η διεργασία είναι λίγο αντίστροφη καθώς πρέπει τα δόντια να είναι στο εσωτερικό σε αντίθεση με τα γρανάζια. Έτσι δημιουργείται με τον ίδιο τρόπο ένα γρανάζι με ίδιες ιδιότητες και συμπαγές, όμως θα έχει 80 δόντια και δεν θα είναι αυτό το τελικό σχήμα (Σχήμα 4.8). Εν αντίθεσή θα σχεδιαστεί στο <<πρόσωπο>> του γραναζιού ένας μεγαλύτερος κύκλος κατά 10 mm και στη συνέχεια θα το προεκταθεί κατά 10 mm (Σχήμα 4.9), όσο δηλαδή και το πάχος του γραναζιού, ως ένα νέο σώμα και θα αφαιρεθεί το αρχικό(Σχήματα 4.10,4.11). Τα παρακάτω σχήματα θα διευκολύνουν στην καλύτερη κατανόηση της διεργασίας μέχρι το τελικό αποτέλεσμα (Σχήμα 4.12) :



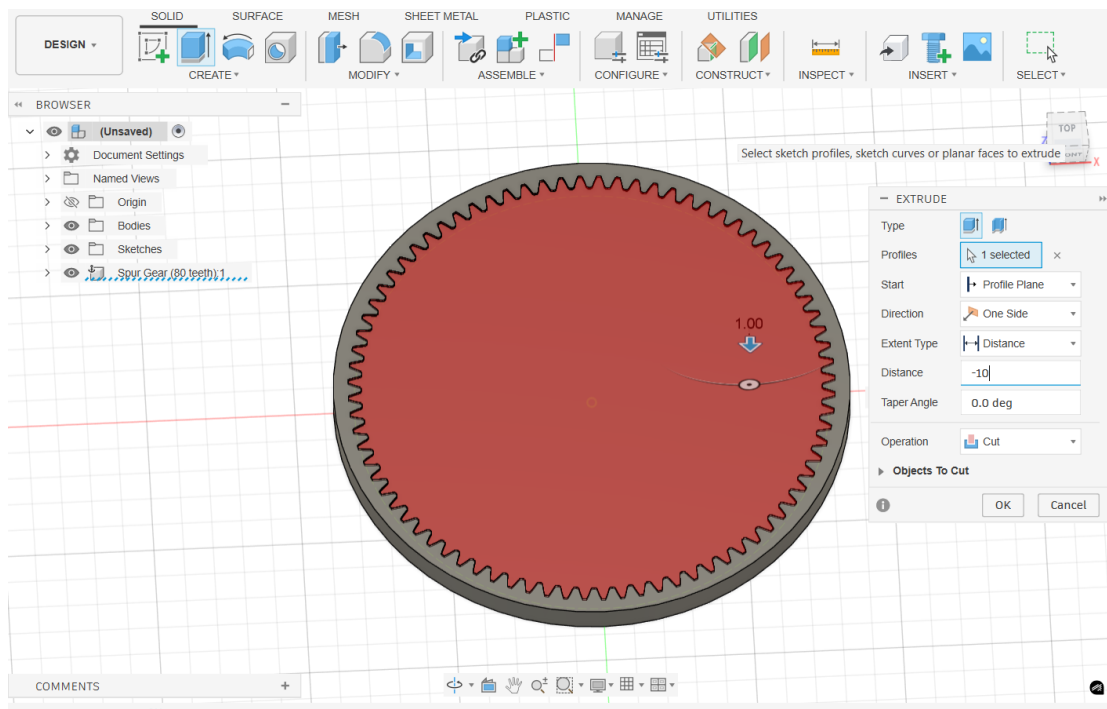
Σχήμα 4.8 : γρανάζι 80 δοντιών (Fusion 360)



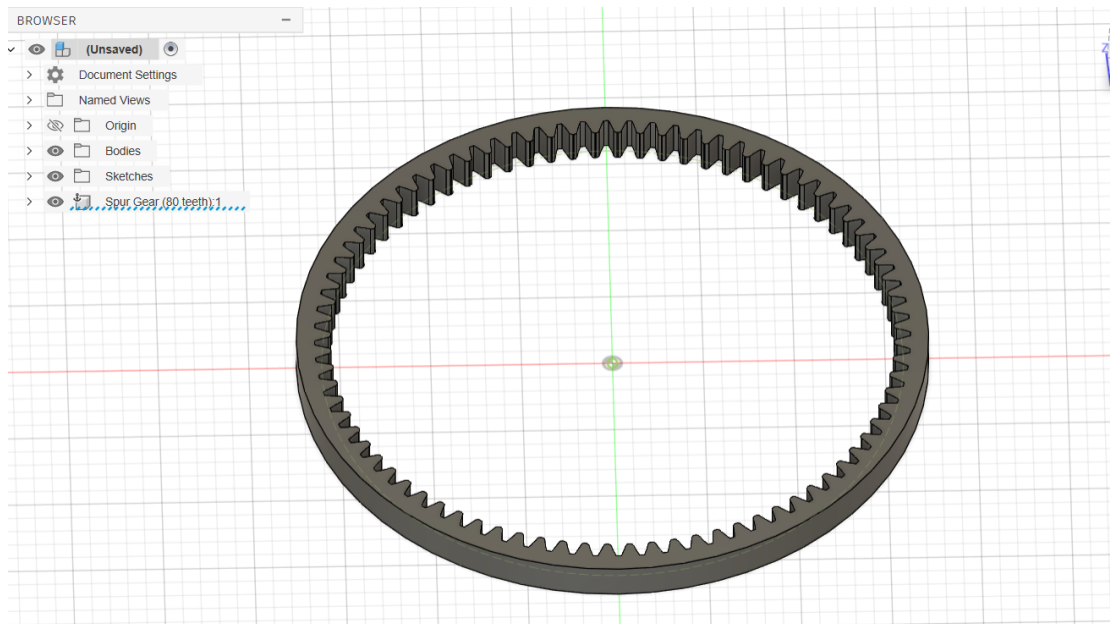
Σχήμα 4.9: Σχεδιασμός δακτυλιδιού (Fusion 360)



Σχήμα 4.10: new body δακτυλιδιού (Fusion 360)



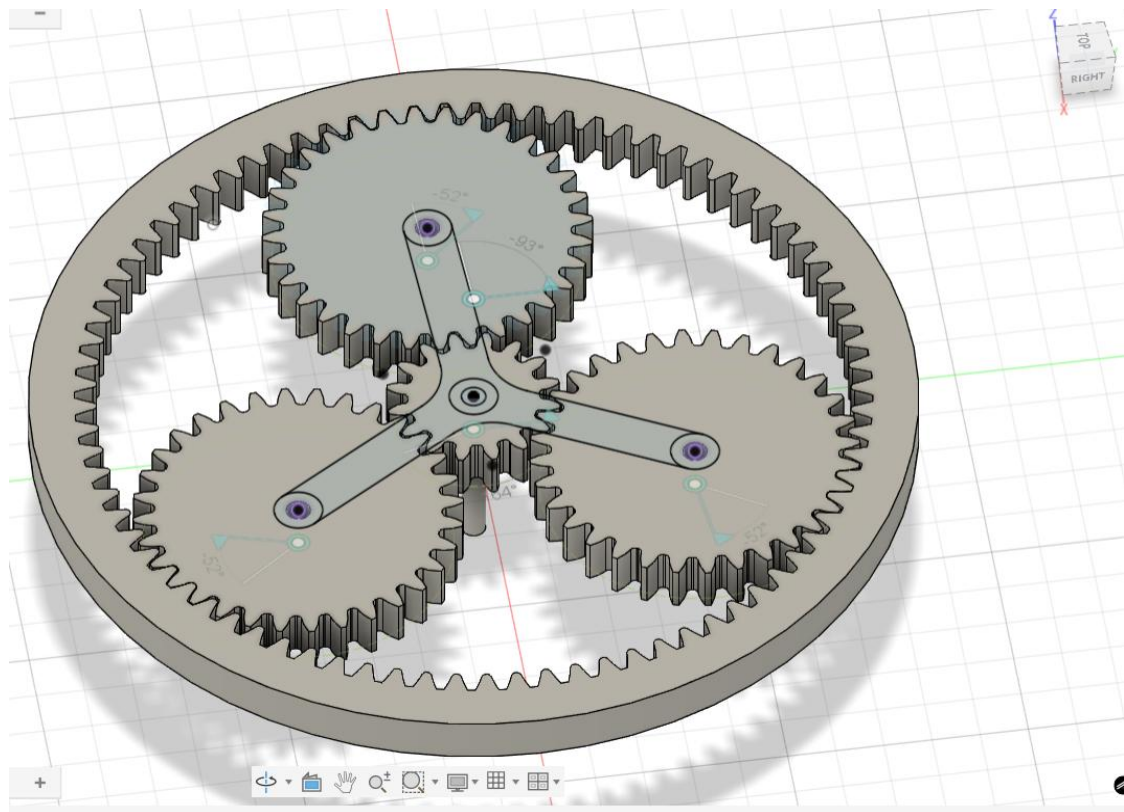
Σχήμα 4.11: αφαίρεση γραναζιού (Fusion 360)



Σχήμα 4.12: δακτυλίδι (Fusion 360)

4.5 ΦΟΡΕΑΣ (CARRIER)

Για τον σχεδιασμό του φορέα ([Σχήμα 4.14](#)) θα χρησιμοποιηθούν σαν σημεία αναφοράς οι πλανήτες και ο ήλιος (Βλέπε [Σχήμα 4.13](#)). Κατά αυτόν τον τρόπο θα είναι ιδανικό και θα εφαρμόζει απευθείας στο σχήμα. Έτσι ξεκινάει η τοποθέτηση του δακτυλιδιού, των πλανητών και του ήλιου σε αυτά τα σημεία που θα είναι και το τελικό αποτέλεσμα και δημιουργείται ένα νέο σκίτσο πάνω στο πρόσωπό τους. Πιο συγκεκριμένα:

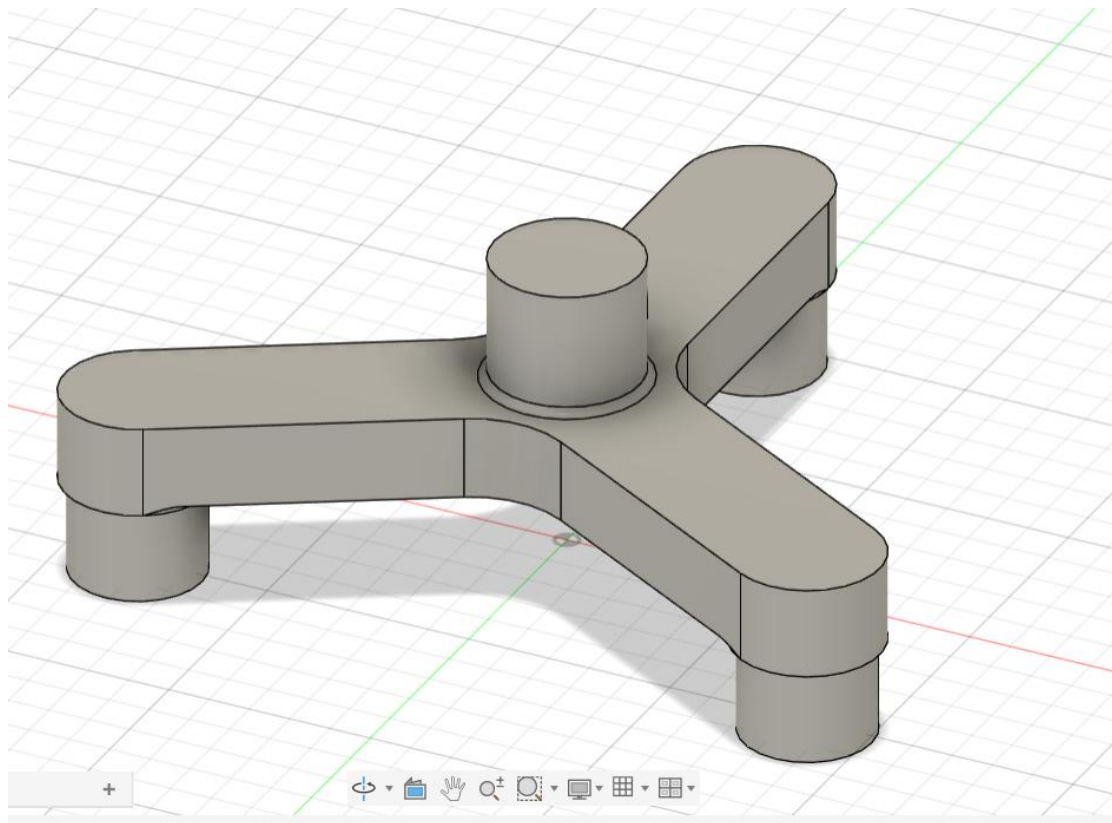


Σχήμα 4.13: σχεδιασμός φορέα (Fusion 360)

Αφού σχεδιαστούν οι κύκλοι ακριβώς στις τρύπες των πλανητών και στη συνέχεια έρθουν οι ευθείες, θα πρέπει να τις οριστούν ως εφαπτόμενες στους κύκλους και να <<φιλεταριστούν>> κατά 12 mm στα σημεία που τέμνονται οι ευθείες.

Στη συνέχεια με την βοήθεια της εντολής extrude δημιουργείται ο φορέας με πάχος 10 mm. Παράλληλα γίνεται extrude κατά 11.5 mm για την δημιουργία των <<πείρων>> , ώστε να μπουν μέσα στις τρύπες των πλανητών. Μάλιστα για να αποφευχθούν τυχόν τριβές ακολουθείται η εντολή offset, με αποτέλεσμα την ανύψωση του φορέα κατά 0.5 mm από την επιφάνεια των γραναζιών.

Ακόμα δημιουργείται κι ένας κύκλος διαμέτρου 18 mm στο κέντρο του φορέα και με την εντολή extrude υψώνεται κατά 15 mm για να μπορέσει να μεταφερθεί η κίνηση. Τέλος γίνεται ένα <<φιλετάρισμα>> του 1 mm ανάμεσα στον νέο πείρο και τον φορέα ([Σχήμα 4.14](#)).



Σχήμα 4.14 : φορέας (Fusion 360)

5. ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΛΑΝΗΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ

5.1 Γενετικός Σχεδιασμός στο Autodesk Fusion

Ο γενετικός σχεδιασμός (Generative Design) που παρέχεται από το λογισμικό Autodesk Fusion 360 αποτελεί μια σύγχρονη υπολογιστική μέθοδο βελτιστοποίησης γεωμετρίας μηχανολογικών εξαρτημάτων. Η βασική φιλοσοφία της μεθόδου διαφοροποιείται από τον κλασικό σχεδιασμό, καθώς ο μηχανικός δεν καθορίζει απευθείας την τελική μορφή του εξαρτήματος, αλλά ορίζει τις λειτουργικές απαιτήσεις, τους περιορισμούς και τις συνθήκες φόρτισης. Στη συνέχεια, το λογισμικό, αξιοποιώντας εξελικτικού τύπου

αλγορίθμους και αριθμητική ανάλυση, παράγει πλήθος εναλλακτικών γεωμετρικών λύσεων, οι οποίες ικανοποιούν τα τεθέντα κριτήρια.

Η διαδικασία γενετικού σχεδιασμού στο Fusion 360 ξεκινά με τον καθορισμό της αρχικής γεωμετρίας (starting geometry) και του διαθέσιμου σχεδιαστικού χώρου (design space). Η αρχική γεωμετρία ορίζει τον μέγιστο διαθέσιμο όγκο μέσα στον οποίο επιτρέπεται να αναπτυχθεί το τελικό εξάρτημα και λειτουργεί ως άνω όριο υλικού. Δεν αντιπροσωπεύει απαραίτητα την τελική μορφή, αλλά το σχεδιαστικό πεδίο στο οποίο ο αλγόριθμος μπορεί να προσθέσει ή να αφαιρέσει υλικό. Στην περίπτωση του πλανητικού μηχανισμού, η αρχική γεωμετρία περιλαμβάνει τον διαθέσιμο χώρο γύρω από τα γρανάζια, τις περιοχές στήριξης και τις ζώνες σύνδεσης με τα υπόλοιπα μηχανικά μέρη. Παράλληλα, καθορίζονται οι περιοχές απαγόρευσης (obstacle geometry), οι οποίες αποτελούν γεωμετρικά στοιχεία στα οποία δεν επιτρέπεται η δημιουργία υλικού. Οι περιοχές αυτές εξασφαλίζουν τη σωστή λειτουργία του μηχανισμού, αποτρέποντας ανεπιθύμητες επαφές ή παρεμποδίσεις της κίνησης. Στον πλανητικό μηχανισμό, ως περιοχές απαγόρευσης ορίζονται οι ζώνες εμπλοκής των δοντιών, οι χώροι περιστροφής των πλανητικών γραναζιών και οι άξονες κίνησης, ώστε να διασφαλίζεται η ελεύθερη και ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Ιδιαίτερη σημασία στον γενετικό σχεδιασμό έχουν οι οριακές συνθήκες και τα φορτία (boundary conditions), τα οποία περιγράφουν τον τρόπο στήριξης και φόρτισης του εξαρτήματος κατά τη λειτουργία του. Στο Fusion 360, οι οριακές συνθήκες εισάγονται με τρόπο αντίστοιχο της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, περιλαμβάνοντας πακτώσεις, αρθρώσεις, εφαρμοζόμενες δυνάμεις και ροπές. Με τον τρόπο αυτό, κάθε παραγόμενη γεωμετρική λύση αξιολογείται υπό ρεαλιστικές μηχανικές συνθήκες, που αντιστοιχούν στη πραγματική λειτουργία του πλανητικού μηχανισμού.

Επιπλέον, καθορίζονται τα διατηρούμενα σώματα (preserve bodies), δηλαδή γεωμετρικές περιοχές οι οποίες δεν επιτρέπεται να τροποποιηθούν από τον γενετικό αλγόριθμο. Τα διατηρούμενα σώματα περιλαμβάνουν κρίσιμες επιφάνειες επαφής, οπές συναρμολόγησης και περιοχές μετάδοσης φορτίου. Στην παρούσα εργασία, ως διατηρούμενα σώματα ορίζονται τα δόντια των γραναζιών, οι επιφάνειες έδρασης των αξόνων και οι περιοχές σύνδεσης

με τον φορέα, ώστε να διατηρείται η λειτουργική ακρίβεια και η συμβατότητα με τη συναρμολόγηση του μηχανισμού.

Από μαθηματική άποψη, ο γενετικός σχεδιασμός στο Fusion 360 βασίζεται στη διατύπωση προβλημάτων βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων. Στόχοι όπως η ελαχιστοποίηση της μάζας, η μεγιστοποίηση της ακαμψίας και ο περιορισμός των μέγιστων τάσεων επιδιώκονται ταυτόχρονα, υπό γεωμετρικούς και λειτουργικούς περιορισμούς. Οι γεωμετρικές λύσεις εξελίσσονται μέσω διαδικασιών επιλογής, μετάλλαξης και ανασυνδυασμού, ενώ κάθε υποψήφια λύση αξιολογείται αριθμητικά με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Ο συνδυασμός εξελικτικών αλγορίθμων, τοπολογικής βελτιστοποίησης και αριθμητικής ανάλυσης επιτρέπει στο λογισμικό να καταλήγει σε μη συμβατικές, αλλά μηχανολογικά αποδοτικές γεωμετρίες, οι οποίες είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για κατασκευή με τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής.

Στο [Σχήμα 5.1](#) παρουσιάζεται η αρχική γεωμετρική διάταξη του πλανητικού μηχανισμού, η οποία χρησιμοποιείται ως βάση για την εφαρμογή του γενετικού σχεδιασμού. Ο μηχανισμός αποτελείται από το κεντρικό γρανάζι ήλιο (sun gear), τα πλανητικά γρανάζια (planet gears), το δακτυλιοειδές γρανάζι – στεφάνη (ring gear) και τον φορέα πλανητών (planet carrier), τα οποία συνεργάζονται για τη μετάδοση της ροπής και την κατανομή των φορτίων.[34]

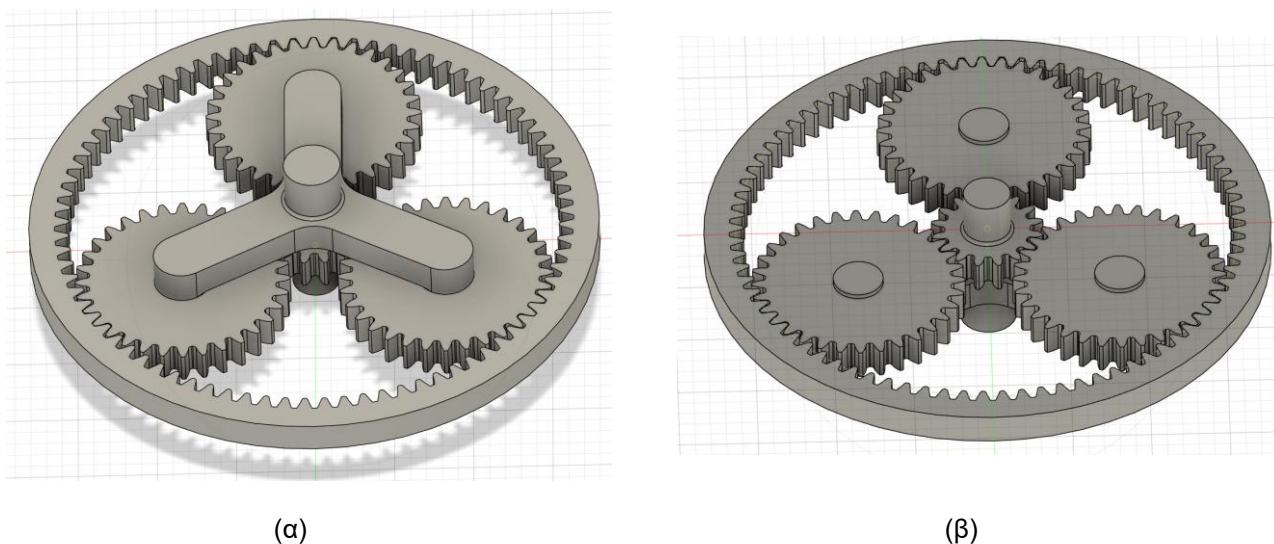
5.2 Αρχικός σχεδιασμός πλανητικού μηχανισμού στο Autodesk Fusion και στόχοι βελτιστοποίησής του

Στην απεικόνιση [\(α\) του Σχήματος 5.1](#) παρουσιάζεται ο πλανητικός μηχανισμός σε άνω όψη, όπου είναι εμφανής η γεωμετρία του φορέα πλανητών και η σχέση του με τα πλανητικά γρανάζια και το κεντρικό γρανάζι ήλιο. Η άνω όψη επιτρέπει την κατανόηση της λειτουργικής σύνδεσης των επιμέρους στοιχείων και της κατανομής τους στον χώρο.

Στην απεικόνιση [\(β\)](#) του ίδιου σχήματος παρουσιάζεται ο πλανητικός μηχανισμός σε κάτω όψη, χωρίς τον φορέα πλανητών, προκειμένου να είναι πλήρως ορατά όλα τα γρανάζια του συστήματος. Η κάτω όψη επιλέχθηκε ώστε

να αποδοθεί με σαφήνεια η γεωμετρική διάταξη του κεντρικού γριναζιού ήλιου, των πλανητικών γριναζιών και της στεφάνης, καθώς και η μεταξύ τους εμπλοκή.

Η συνδυαστική παρουσίαση άνω και κάτω όψης στο [Σχήμα 5.1](#) διευκολύνει την πλήρη κατανόηση της δομής του πλανητικού μηχανισμού και αποτελεί το σημείο αναφοράς για τον ορισμό της αρχικής γεωμετρίας (starting geometry), των διατηρούμενων σωμάτων (preserve bodies) και των περιοχών απαγόρευσης (obstacle geometry) κατά τη διαδικασία γενετικού σχεδιασμού στο Autodesk Fusion 360. [35]



Σχήμα 5.1: Πλανητικός μηχανισμός γριναζιών. (α) Άνω όψη πλήρους συναρμολόγησης με φορέα πλανητών (planet carrier), κεντρικό γριναζί ήλιο (sun gear), πλανητικά γριναζία (planet gears) και δακτυλιοειδές γριναζί – στεφάνη (ring gear). (β) Κάτω όψη του μηχανισμού χωρίς τον φορέα, για πλήρη απεικόνιση της διάταξης των γριναζιών. (Fusion 360)

Πρέπει να αναφερθεί ότι η γενετική βελτιστοποίηση του σχεδιασμού πραγματοποιήθηκε με κύριο στόχο τη μείωση της μάζας κάθε επιμέρους εξαρτήματος του πλανητικού μηχανισμού πλην του δακτυλιοειδούς γριναζιού (στεφάνης), ενώ ταυτόχρονα επιδιώχθηκε η διατήρηση του συντελεστή ασφάλειας σε επίπεδα όσο το δυνατόν πιο κοντά στον συντελεστή ασφάλειας που παρουσίαζε το αρχικό, μη βελτιστοποιημένο εξάρτημα, υπό τις ίδιες συνθήκες φόρτισης. Με τον τρόπο αυτό, η διαδικασία γενετικού σχεδιασμού δεν επικεντρώθηκε αποκλειστικά στην αφαίρεση υλικού, αλλά στη βέλτιστη

ανακατανομή του, ώστε να διατηρείται η απαιτούμενη μηχανική αντοχή και λειτουργική αξιοπιστία.

Στο σημείο αυτό αξίζει να τονισθεί ότι το δακτυλιοειδές γρανάτζι αποτελεί το εξωτερικό και δομικά πιο άκαμπτο στοιχείο του πλανητικού μηχανισμού, καθώς φέρει την εσωτερική οδόντωση και δέχεται ταυτόχρονα φορτίσεις από όλα τα πλανητικά γρανάτζια. Για τον λόγο αυτό, δεν εφαρμόστηκε γενετική βελτιστοποίηση με στόχο τη μείωση της μάζας του, καθώς η αφαίρεση υλικού θα μπορούσε να οδηγήσει σε αυξημένες παραμορφώσεις και υποβάθμιση της ακρίβειας εμπλοκής. Η ανάλυση περιορίστηκε στον έλεγχο της μηχανικής επάρκειας του αρχικού σχεδιασμού μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, ώστε να διασφαλιστεί η διατήρηση υψηλής ακαμψίας και αξιόπιστης λειτουργίας του πλανητικού μηχανισμού. Η εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια της στεφάνης θεωρήθηκε πακτωμένη

Για την ανάλυση του αρχικού σχεδιασμού και τη διαδικασία γενετικής βελτιστοποίησης, θεωρήθηκε ως υλικό κατασκευής το πολυμερές PLA (Polylactic Acid), το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές προσθετικής κατασκευής λόγω της καλής κατεργασιμότητας, της σταθερότητας διαστάσεων και της επαρκούς μηχανικής αντοχής του για λειτουργικά πρωτότυπα και ελαφρές μηχανολογικές εφαρμογές. Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και στον γενετικό σχεδιασμό παρουσιάζονται στον [Πίνακα 5.1](#) και αντιστοιχούν σε αντιπροσωπευτικές τιμές για PLA κατασκευασμένο με τεχνολογίες Additive Manufacturing.

Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν ώστε να αποτυπώνουν ρεαλιστικά τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού σε ελαστική περιοχή, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες της προσθετικής κατασκευής, όπως η ανισοτροπία λόγω στρωματικής απόθεσης υλικού. Η χρήση αντιπροσωπευτικών ιδιοτήτων επιτρέπει την αξιόπιστη σύγκριση μεταξύ του αρχικού και του γενετικά βελτιστοποιημένου σχεδιασμού, διασφαλίζοντας ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης αντανακλούν πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και κατασκευής.[34],[36]

Πίνακας 5.1: Μηχανικές ιδιότητες υλικού PLA για προσθετική κατασκευή που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις και στον γενετικό σχεδιασμό.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΑΔΑ
<i>Πυκνότητα</i>	1250	kg/m ³
<i>Μέτρο Ελαστικότητας (Young)</i>	3,45	GPa
<i>Λόγος Poisson</i>	0,39	-
<i>Μέτρο Διάτμησης</i>	1,241	GPa
<i>Όριο Διαρροής σε Εφελκυσμό</i>	54,1	MPa
<i>Μέγιστη Αντοχή σε Εφελκυσμό</i>	59,2	MPa

Κατά τη διαδικασία γενετικού σχεδιασμού στο Autodesk Fusion, ορίστηκε ρητά ο τρόπος κατασκευής των εξαρτημάτων ως προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing). Ο καθορισμός του τρόπου κατασκευής επέβαλε στο λογισμικό συγκεκριμένους κατασκευαστικούς περιορισμούς, όπως ο προσανατολισμός εκτύπωσης και οι ελάχιστες επιτρεπτές γωνίες χωρίς υποστηρίγματα, οι οποίοι λήφθηκαν υπόψη κατά τη δημιουργία των βελτιστοποιημένων γεωμετριών. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίστηκε ότι οι προκύπτουσες λύσεις του γενετικού σχεδιασμού είναι όχι μόνο μηχανολογικά αποδοτικές, αλλά και ρεαλιστικά κατασκευάσιμες με τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής.

5.3 Γενετική βελτιστοποίηση σχεδιασμού πλανητικών γρاناζιών

Η γενετική βελτιστοποίηση των πλανητικών γρاناζιών πραγματοποιήθηκε με κύριο στόχο τη μείωση της μάζας του εξαρτήματος, διατηρώντας ταυτόχρονα τον συντελεστή ασφάλειας σε επίπεδα όσο το δυνατόν πιο κοντά σε αυτά του αρχικού, μη βελτιστοποιημένου σχεδιασμού, υπό τις ίδιες συνθήκες φόρτισης. Η προσέγγιση αυτή επιλέχθηκε ώστε η

ελάφρυνση του εξαρτήματος να μην οδηγεί σε υποβάθμιση της μηχανικής αντοχής και της λειτουργικής αξιοπιστίας του πλανητικού μηχανισμού.

Για τον υπολογισμό των φορτίσεων που εφαρμόστηκαν κατά τη διαδικασία γενετικής βελτιστοποίησης, θεωρήθηκε ροπή εισόδου στο γρανάζι ήλιου ίση με:

$$T_{in} = 5000 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (5.1)$$

Η τιμή αυτή επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτική λειτουργική ροπή, ώστε να παραμένει εντός της ελαστικής περιοχής του υλικού και να μην προσεγγίζεται το όριο διαρροής.

Όλα τα εμπλεκόμενα γρανάζια έχουν module $m = 2$ και γωνία επαφής μεταξύ των δοντιών $\varphi = 20^\circ$. Το γρανάζι ήλιος έχει $z_s = 16$ δόντια και module $m = 2$ και επομένως η διάμετρος του αρχικού του κύκλου είναι:

$$d_s = m \cdot z_s = 2 \cdot 16 \text{ mm} = 32 \text{ mm} \quad (5.2)$$

Συνεπώς η ακτίνα του ήλιου είναι:

$$r_s = d_s/2 = 16 \text{ mm} \quad (5.3)$$

Στον υπό μελέτη πλανητικό μηχανισμό ο ήλιος έρχεται σε επαφή με τρεις πλανήτες. Αν $n_p = 3$ είναι ο αριθμός των πλανητών, τότε η εφαπτομενική δύναμη επαφής μεταξύ γραναζιού ήλιου και του κάθε πλανήτη είναι:

$$F_t = \frac{1}{n_p} \frac{T_{in}}{r_s} = \frac{1}{3} \frac{5000 \text{ N} \cdot \text{mm}}{16 \text{ mm}} = 104,2 \text{ N} \quad (5.4)$$

Η ακτινική συνιστώσα προκύπτει από τη γωνία επαφής των γραναζιών $\varphi = 20^\circ$:

$$F_r = F_t \cdot \tan(\varphi) = 104,2 \text{ N} \cdot \tan(20^\circ) = 37,9 \text{ N}$$

(5.5)

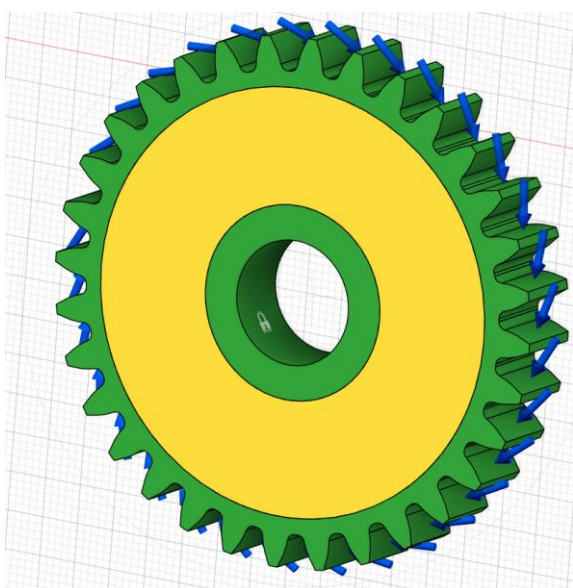
Η συνισταμένη δύναμη λόγω της επαφής θα είναι:

$$F_{\text{επαφ}} = \sqrt{(F_t)^2 + (F_r)^2} = 110,9 \text{ N}$$

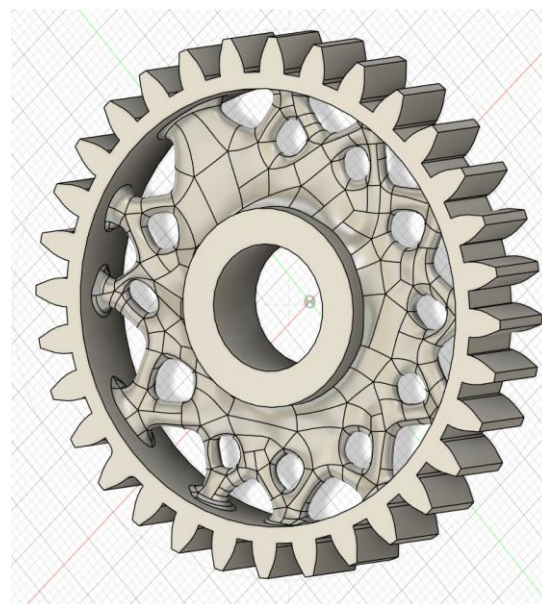
(5.6)

Στο [Σχήμα 5.2](#) παρουσιάζεται η διαμόρφωση του προβλήματος γενετικού σχεδιασμού καθώς και το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Στην [απεικόνιση \(α\)](#) φαίνεται η αρχική γεωμετρική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο Autodesk Fusion. Με πράσινο χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές που ορίστηκαν ως παραμένουσα γεωμετρία (preserve bodies), οι οποίες περιλαμβάνουν τα δόντια του γραναζιού και τις κρίσιμες επιφάνειες επαφής. Με κίτρινο χρώμα απεικονίζεται ο όγκος από τον οποίο επιτρέπεται η αφαίρεση υλικού κατά τη διαδικασία γενετικού σχεδιασμού. Η οπή του πλανητικού γραναζιού θεωρήθηκε πακτωμένη, προσομοιώνοντας τη σύνδεσή του με τον άξονα περιστροφής. Η δύναμη επαφής $F_{\text{επαφ}} = 110,9 \text{ N}$ δεν εφαρμόστηκε σε ένα μόνο δόντι, αλλά επιβλήθηκε σε όλα τα δόντια του πλανητικού γραναζιού υπό κατάλληλη γωνία επαφής $\varphi = 20^\circ$, ώστε να αναπαρασταθεί η διαδοχική εμπλοκή κατά την περιστροφή. Η επιλογή αυτή αντανακλά την πραγματική λειτουργία του μηχανισμού, καθώς το πλανητικό γρανάτζι περιστρέφεται και κάθε δόντι συμμετέχει διαδοχικά στη μετάδοση της ροπής. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ορθότερη αναπαράσταση της κατανομής των τάσεων και αποφεύγεται η τεχνητή συγκέντρωση φορτίου σε μεμονωμένες περιοχές. Παράλληλα, στο εσωτερικό της οπής του πλανητικού γραναζιού δηλώθηκε πάκτωση, προσομοιώνοντας τη σύνδεσή του με τον άξονα περιστροφής. Ο ορισμός της πάκτωσης αποτέλεσε βασική οριακή συνθήκη της ανάλυσης, διασφαλίζοντας ρεαλιστική αναπαράσταση της στήριξης του γραναζιού κατά τη λειτουργία του μηχανισμού.

Στην απεικόνιση (β) του Σχήματος 5.2 παρουσιάζεται η γεωμετρία του πλανητικού γραναζιού μετά την ολοκλήρωση της γενετικής βελτιστοποίησης. Παρατηρείται η ανάπτυξη οργανικών μορφών και εσωτερικών κοιλοτήτων στο σώμα του γραναζιού, οι οποίες οδηγούν σε σημαντική μείωση της μάζας του εξαρτήματος, ενώ παράλληλα διατηρείται ο συντελεστής ασφάλειας σε επίπεδα συγκρίσιμα με εκείνα του αρχικού σχεδιασμού. Η προκύπτουσα γεωμετρία είναι χαρακτηριστική λύση γενετικού σχεδιασμού και είναι εφικτή προς κατασκευή μέσω τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής.[34],[35]



(α)



(β)

Σχήμα 5.2: Γενετική βελτιστοποίηση πλανητικού γραναζιού. (α) Ορισμός γεωμετρίας, περιοχών αφαίρεσης υλικού και οριακών συνθηκών. (β) Τελική γεωμετρία μετά τη διαδικασία γενετικού σχεδιασμού. (Fusion 360)

Οι φορτίσεις που χρησιμοποιήθηκαν στον γενετικό σχεδιασμό αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας του πλανητικού μηχανισμού και εφαρμόστηκαν με τον ίδιο τρόπο τόσο στο αρχικό όσο και στο βελτιστοποιημένο μοντέλο. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων βασίστηκε στον συντελεστή ασφάλειας που προέκυψε από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, διασφαλίζοντας ότι η μείωση του βάρους δεν οδηγεί σε ανεπιθύμητη

αύξηση των τάσεων ή σε υποβάθμιση της δομικής ακεραιότητας των εξαρτημάτων.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την επίτευξη ενός ισορροπημένου σχεδιασμού, όπου η ελάφρυνση των εξαρτημάτων επιτυγχάνεται χωρίς ουσιαστική απώλεια σε αντοχή, καθιστώντας τα γενετικά βελτιστοποιημένα μέρη κατάλληλα για πραγματική κατασκευαστική και λειτουργική εφαρμογή.

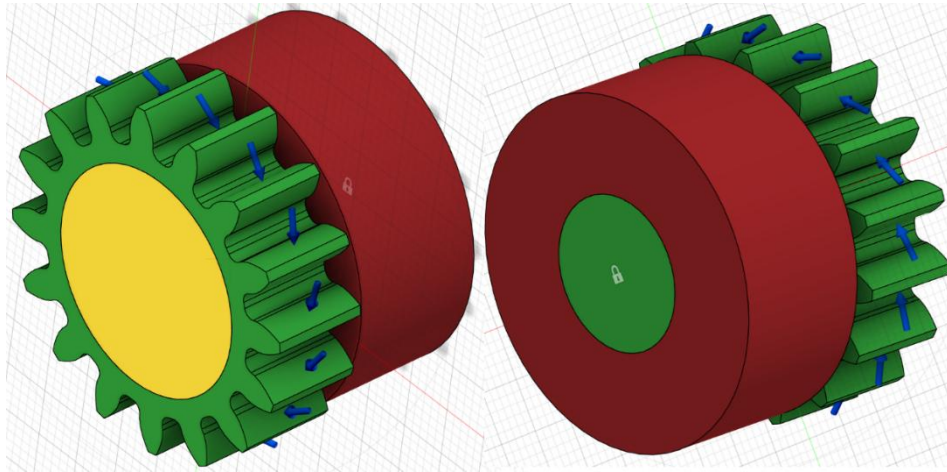
5.4 Γενετική βελτιστοποίηση σχεδιασμού γραναζιού ήλιου

Στο [Σχήμα 5.3](#) παρουσιάζεται η διαμόρφωση του προβλήματος γενετικής βελτιστοποίησης για το κεντρικό γρανάζι ήλιου. Στην [απεικόνιση \(α\)](#) αποδίδεται η αρχική γεωμετρία του γραναζιού με τον ορισμό των γεωμετρικών περιορισμών και των οριακών συνθηκών. Οι περιοχές που επισημαίνονται με κόκκινο χρώμα ορίστηκαν ώστε να διατηρηθεί σταθερή η διάμετρος του άξονα, εξασφαλίζοντας τη συμβατότητα με τη συναρμολόγηση. Επιπλέον, στην ακραία διατομή του άξονα δηλώθηκε πάκτωση, προσομοιώνοντας τη στερεή στήριξη του γραναζιού κατά τη λειτουργία του πλανητικού μηχανισμού.

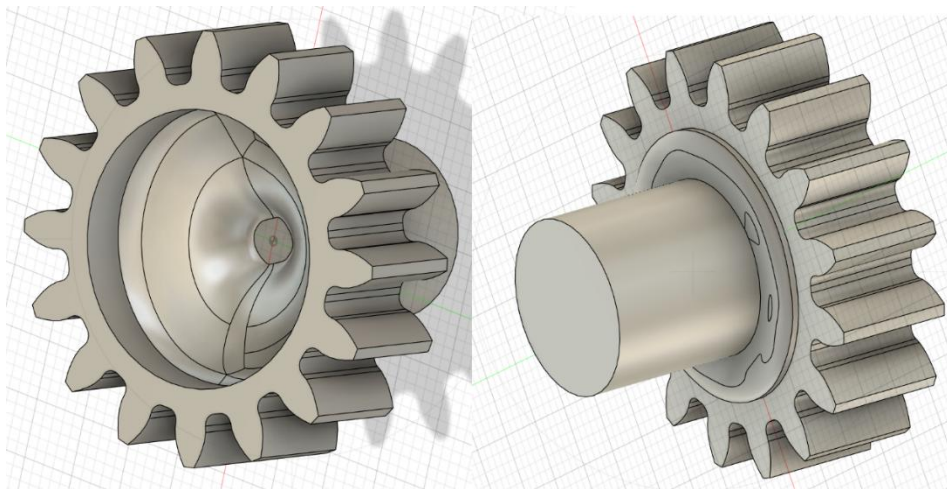
Στην πραγματική λειτουργία του μηχανισμού, το γρανάζι ήλιος δέχεται δυνάμεις επαφής από τα τρία πλανητικά γρανάζια. Ωστόσο, κατά τη διαμόρφωση του προβλήματος γενετικού σχεδιασμού, οι δυνάμεις αυτές εφαρμόστηκαν σε όλα τα δόντια του γραναζιού, με ίσο μέτρο σε σχέση με τις δυνάμεις που ασκούνται στα πλανητικά γρανάζια, ώστε να αναπαρασταθεί η διαδοχική εμπλοκή κατά την περιστροφή. Η δύναμη επαφής $F_{\text{επαφ}} = 110,9 \text{ N}$ επιβλήθηκε σε κάθε υπό γωνία $\varphi = 20^\circ$, σύμφωνα με τους προηγούμενους υπολογισμούς. Η επιλογή της εφαρμογής δύναμης επαφής σε όλα τα δόντια του γραναζιού ήλιου επιτρέπει την ορθότερη αναπαράσταση της περιστροφικής λειτουργίας του κατά τη διαδικασία γενετικής βελτιστοποίησης και οδηγεί σε ρεαλιστικότερη αφαίρεση υλικού.

Στην [απεικόνιση \(β\) του Σχήματος 5.3](#) παρουσιάζεται η τελική γεωμετρία του γραναζιού ήλιου μετά την ολοκλήρωση της γενετικής βελτιστοποίησης. Για πληρέστερη κατανόηση της γεωμετρίας, το γρανάζι απεικονίζεται τόσο από

εμπρόσθια όσο και από οπίσθια όψη, ώστε να είναι εμφανής η συνολική μορφή του εξαρτήματος και η κατανομή του υλικού μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.[35]



(α)



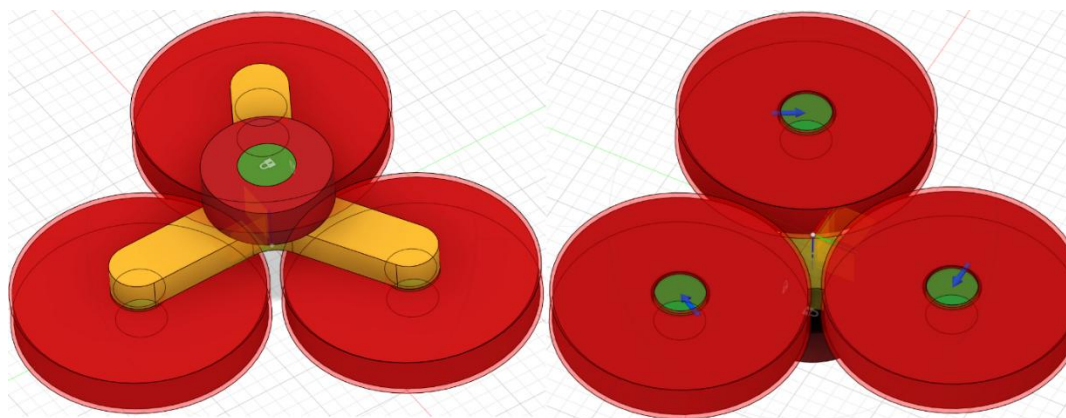
(β)

Σχήμα 5.3: Γενετική βελτιστοποίηση γρναζιού ήλιου. (α) Ορισμός γεωμετρικών περιορισμών, οριακών συνθηκών και εφαρμοζόμενων δυνάμεων. (β) Τελική γεωμετρία μετά τη διαδικασία γενετικού σχεδιασμού, σε εμπρόσθια και οπίσθια όψη. (Fusion 360)

5.5 Γενετική βελτιστοποίηση σχεδιασμού φορέα πλανητών

Ο φορέας πλανητών αποτελεί κρίσιμο δομικό στοιχείο του πλανητικού μηχανισμού, καθώς μεταφέρει τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στα πλανητικά γρανάζια προς τον άξονα εξόδου. Για τον λόγο αυτό, η γενετική βελτιστοποίηση του φορέα πραγματοποιήθηκε με ιδιαίτερη έμφαση στη σωστή αναπαράσταση των φορτίσεων και των οριακών συνθηκών λειτουργίας, ώστε τα αποτελέσματα να είναι μηχανολογικά ρεαλιστικά και αντιπροσωπευτικά της πραγματικής λειτουργίας του μηχανισμού.

Στο [Σχήμα 5.4](#) παρουσιάζεται η διαμόρφωση του προβλήματος γενετικού σχεδιασμού καθώς και το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Στην [απεικόνιση \(α\)](#) αποδίδεται η αρχική γεωμετρία του φορέα πλανητών με τον ορισμό των περιοχών περιορισμού και των φορτίσεων. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές εμποδίων (obstacle regions), στις οποίες δεν επιτρέπεται η δημιουργία υλικού, και οι οποίες αντιστοιχούν στους τρεις πείρους στήριξης των πλανητικών γραναζιών καθώς και στον κεντρικό άξονα. Οι περιοχές που απεικονίζονται με πράσινο χρώμα ορίστηκαν ως παραμένονσα γεωμετρία (preserve bodies), ώστε να διατηρηθούν κρίσιμες διαστάσεις συναρμολόγησης, ενώ με κίτρινο χρώμα απεικονίζεται ο όγκος από τον οποίο επιτρέπεται η αφαίρεση υλικού κατά τη διαδικασία γενετικού σχεδιασμού.[35]



(α)



(β)

Σχήμα 5.4: Γενετική βελτιστοποίηση φορέα πλανητών. (α) Ορισμός περιοχών εμποδίων, παραμένουσας γεωμετρίας, πάκτωσης και εφαρμοζόμενων επαπτομενικών δυνάμεων στους πείρους, σε άνω και κάτω όψη. (β) Τελική γεωμετρία φορέα πλανητών μετά τη διαδικασία γενετικού σχεδιασμού. (Fusion 360)

Στην ακραία διατομή του κεντρικού άξονα του φορέα δηλώθηκε πάκτωση, προσομοιώνοντας τη σύνδεσή του με τον άξονα εξόδου του μηχανισμού. Η συγκεκριμένη οριακή συνθήκη εξασφαλίζει ρεαλιστική αναπαράσταση της λειτουργίας του φορέα κατά τη μετάδοση της ροπής και επιτρέπει την ανάπτυξη των αντίστοιχων μηχανικών τάσεων στο σώμα του εξαρτήματος.

Οι φορτίσεις που εφαρμόστηκαν στους πείρους του φορέα προέκυψαν από τη θεωρητική ανάλυση της μετάδοσης ροπής στον πλανητικό μηχανισμό. Θεωρήθηκε πακτωμένη η στεφάνη (ring gear), είσοδος ροπής στον ήλιο και έξοδος τον φορέα πλανητών

Για πλανητικό μηχανισμό με πακτωμένη στεφάνη ισχύει ότι η ροπή που μεταδίδεται στον φορέα T_c είναι ίση με τη ροπή εξόδου T_{out} ή οποία εξαρτάται από τον λόγο αριθμού δοντιών στεφάνης z_r προς αριθμό δοντιών ήλιου z_s ως εξής:

$$T_c = T_{out} = T_{in} \left(1 + \frac{z_r}{z_s} \right) \quad (5.7)$$

Για τα δεδομένα του υπό μελέτη μηχανισμού, η ροπή στον φορέα προκύπτει:

$$T_c = 5000 \text{ N} \cdot \text{mm} \left(1 + \frac{80}{16}\right) = 30000 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

(5.8)

Η ροπή αυτή μεταφέρεται στον φορέα μέσω των πλανητικών γραναζιών και αναπαρίσταται αριθμητικά στη γενετική προσομοίωση μέσω της εφαρμογής εφαπτομενικών δυνάμεων στους πείρους του φορέα. Οι πείροι βρίσκονται σε ακτίνα $R_c = 48 \text{ mm}$ από τον κεντρικό άξονα του φορέα και είναι τρεις, συμμετρικά κατανομημένοι. Η ροπή που αναπτύσσεται στον φορέα ισούται με το άθροισμα των ροπών που προκαλούν οι τρεις εφαπτομενικές δυνάμεις στους πείρους $F_{c,t}$, δηλαδή:

$$T_c = 3 \cdot R_c \cdot F_{c,t} \rightarrow F_{c,t} = \frac{T_c}{3 \cdot R_c} = \frac{30000 \text{ N} \cdot \text{mm}}{3 \cdot 48 \text{ mm}} = 208,3 \text{ N}$$

(5.9)

Η δύναμη αυτή εφαρμόστηκε ως εφαπτομενική δύναμη σε κάθε έναν από τους τρεις πείρους του φορέα κατά τη διαδικασία γενετικής βελτιστοποίησης, με ίδια φορά, ώστε να αναπαρασταθεί ισοδύναμα η μεταδιδόμενη ροπή από τον πλανητικό μηχανισμό. Η επιλογή της εφαρμογής ισοδύναμων εφαπτομενικών δυνάμεων αντί της άμεσης επιβολής ροπής κρίθηκε καταλληλότερη, καθώς επιτρέπει ακριβέστερη κατανομή των τάσεων στους βραχίονες του φορέα και διευκολύνει τη σύγκλιση της γενετικής προσομοίωσης στο Autodesk Fusion.

Στην **απεικόνιση (β) του Σχήματος 5.4** παρουσιάζεται η τελική γεωμετρία του φορέα πλανητών μετά την ολοκλήρωση της γενετικής βελτιστοποίησης. Η ανακατανομή του υλικού οδηγεί σε σημαντική μείωση της μάζας, διατηρώντας παράλληλα την απαιτούμενη ακαμψία και τον συντελεστή ασφάλειας, επιβεβαιώνοντας την καταλληλότητα του φορέα πλανητών για εφαρμογή γενετικού σχεδιασμού.[35]

5.6 Τελικός βελτιστοποιημένος σχεδιασμός συναρμολογημένου πλανητικού μηχανισμού

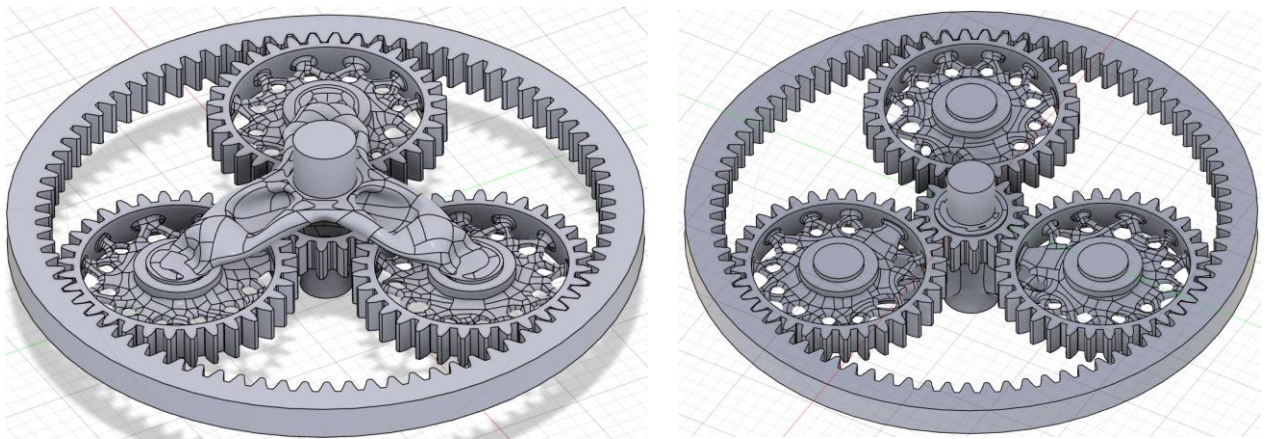
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ο τελικός βελτιστοποιημένος σχεδιασμός του συναρμολογημένου πλανητικού μηχανισμού, όπως προέκυψε από τη συνδυαστική εφαρμογή γενετικού σχεδιασμού στα επιμέρους εξαρτήματά του. Λόγω περιορισμών του λογισμικού Autodesk Fusion, δεν είναι εφικτή η άμεση εκτέλεση γενετικής βελτιστοποίησης σε πλήρως συναρμολογημένο μηχανισμό με κινηματική αλληλεπίδραση μεταξύ των επιμέρους μερών. Συγκεκριμένα, η διαδικασία generative design στο Fusion περιορίζεται σε στατικές αναλύσεις και δεν υποστηρίζει δυναμική ή κινηματική προσομοίωση της διαδοχικής εμπλοκής των γραναζιών κατά την περιστροφή του μηχανισμού.

Για τον λόγο αυτό, η γενετική βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο μεμονωμένων εξαρτημάτων (πλανητικά γρανάζια, γρανάζι ήλιου και φορέας πλανητών), με κατάλληλη επιλογή οριακών συνθηκών και φορτίσεων που αναπαριστούν ισοδύναμα τη λειτουργία του συναρμολογημένου μηχανισμού. Ειδικότερα, οι δυνάμεις επαφής δεν εφαρμόστηκαν τοπικά σε μεμονωμένα δόντια, αλλά επιβλήθηκαν ισοδύναμα σε όλα τα δόντια των γραναζιών, υπό τη σωστή γωνία επαφής, ώστε να αναπαρασταθεί αριθμητικά η διαδοχική εμπλοκή των δοντιών κατά την περιστροφή. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη ρεαλιστικότερη κατανομή των τάσεων και αποφεύγει την τεχνητή συγκέντρωση φορτίων που θα προέκυπτε από σημειακή ή μονοδοντική φόρτιση σε στατική ανάλυση.

Στο [Σχήμα 5.5](#) παρουσιάζεται η τελική συναρμολογημένη διάταξη του πλανητικού μηχανισμού, αποτελούμενη από τα γενετικά βελτιστοποιημένα πλανητικά γρανάζια, το γρανάζι ήλιου και τον φορέα πλανητών, σε συνδυασμό με το δακτυλιοειδές γρανάζι, το οποίο διατηρήθηκε στην αρχική του μορφή. Στην [απεικόνιση \(α\)](#) παρουσιάζεται η συναρμολόγηση με εμφανή τον γενετικά βελτιστοποιημένο φορέα πλανητών, ενώ στην [απεικόνιση \(β\)](#) αποδίδεται εναλλακτική όψη της συναρμολογημένης διάταξης, ώστε να είναι σαφής η γεωμετρική συμβατότητα και η σωστή εμπλοκή όλων των εξαρτημάτων.

Η τελική συναρμολογημένη γεωμετρία επιβεβαιώνει ότι, παρά την εκτεταμένη αφαίρεση υλικού στα επιμέρους εξαρτήματα, διατηρούνται οι

κρίσιμες διαστάσεις συναρμολόγησης, οι επιφάνειες έδρασης και οι ζώνες εμπλοκής των γραναζιών. Η συνολική μείωση μάζας επιτυγχάνεται χωρίς ουσιαστική υποβάθμιση της μηχανικής ακαμψίας και της λειτουργικής αξιοπιστίας του μηχανισμού, αποδεικνύοντας ότι η επιλεγμένη μεθοδολογία γενετικού σχεδιασμού, σε συνδυασμό με ισοδύναμες στατικές φορτίσεις, αποτελεί αξιόπιστη προσέγγιση για τη μελέτη και τον σχεδιασμό σύνθετων μηχανολογικών συστημάτων.[35]



(α)

(β)

Σχήμα 5.5: Τελικός βελτιστοποιημένος σχεδιασμός συναρμολογημένου πλανητικού μηχανισμού. (α) Συναρμολογημένη διάταξη με γενετικά βελτιστοποιημένα επιμέρους εξαρτήματα. (β) Εναλλακτική όψη της συναρμολογημένης διάταξης για την πληρέστερη απεικόνιση της γεωμετρικής συμβατότητας και της εμπλοκής των γραναζιών. (Fusion 360)

6. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΧΙΚΟΥ ΚΑΙ ΓΕΝΕΤΙΚΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ANSYS

Για τη διεξοδική και αξιόπιστη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των πλήρως συναρμολογημένων πλανητικών μηχανισμών, τόσο πριν όσο και μετά τη διαδικασία γενετικής βελτιστοποίησης, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση εξειδικευμένου λογισμικού αριθμητικής ανάλυσης. Παρότι το Autodesk Fusion παρέχει βασικές δυνατότητες προσομοίωσης μέσω του ενσωματωμένου περιβάλλοντος Simulation, οι δυνατότητες αυτές είναι περιορισμένες, ιδίως όσον αφορά τη μοντελοποίηση πολλαπλών επαφών, μη γραμμικής συμπεριφοράς υλικών, τριβής και σύνθετων αλληλεπιδράσεων μεταξύ συναρμολογημένων εξαρτημάτων.

Ειδικότερα, το περιβάλλον προσομοίωσης του Fusion προορίζεται κυρίως για προκαταρκτικές στατικές αναλύσεις με απλουστευμένες επαφές και δεν ενδείκνυται για την ακριβή μελέτη πολύπλοκων μηχανισμών, όπως ο πλανητικός μηχανισμός, όπου συνυπάρχουν πολλαπλά γρανάζια, επαφές δοντιών, φορτίσεις μέσω περιστροφής και μεταβαλλόμενες συνθήκες κατανομής τάσεων. Για τον λόγο αυτό, το Fusion χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για τη διαδικασία γενετικού σχεδιασμού και την παραγωγή των βελτιστοποιημένων γεωμετριών, και όχι για τη λεπτομερή αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς του συναρμολογημένου συστήματος.

Προκειμένου να επιτευχθεί αυξημένη ακρίβεια στην επίλυση των προβλημάτων επαφής και να ληφθούν αξιόπιστα αποτελέσματα τάσεων και παραμορφώσεων, επιλέχθηκε η χρήση του ANSYS Workbench, το οποίο αποτελεί καθιερωμένο εργαλείο υψηλής ακρίβειας για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων με επαφή και τριβή. Το ANSYS επιτρέπει τον αναλυτικό ορισμό επαφών μεταξύ των γραναζιών, την ακριβή εφαρμογή οριακών συνθηκών και τη σύγκριση διαφορετικών σχεδιαστικών λύσεων υπό πλήρως ελεγχόμενες συνθήκες.

Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η αριθμητική σύγκριση της μηχανικής συμπεριφοράς του αρχικού και του γενετικά βελτιστοποιημένου πλανητικού μηχανισμού, με έμφαση στην κατανομή των τάσεων, τις

παραμορφώσεις και τον συντελεστή ασφάλειας, υπό ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας. [37]

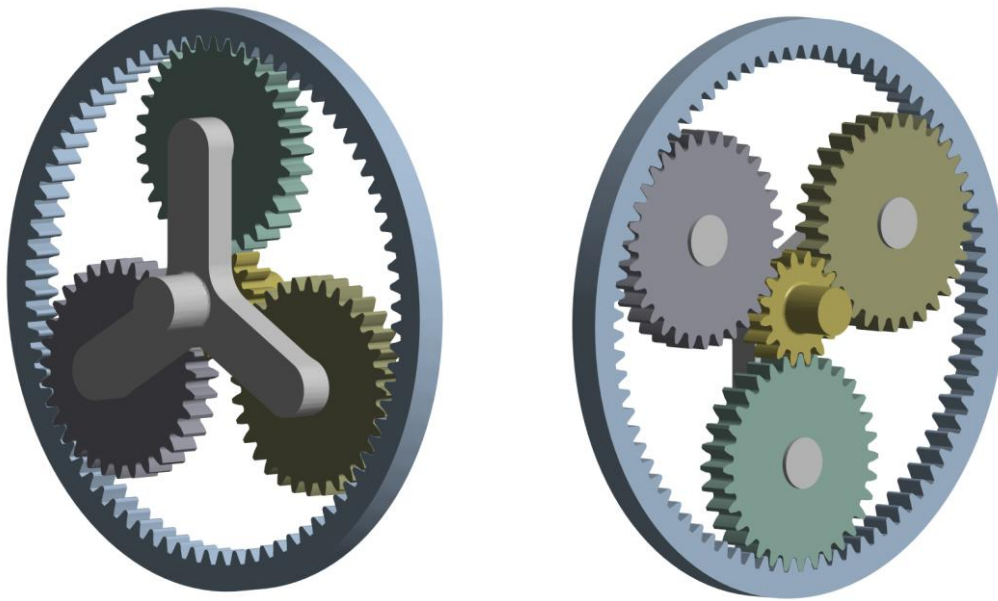
6.1. Γεωμετρία και διακριτοποίηση

Για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς του πλανητικού μηχανισμού με αυξημένη ακρίβεια, τα πλήρως συναρμολογημένα μοντέλα τόσο του αρχικού όσο και του γενετικά βελτιστοποιημένου σχεδιασμού εξήχθησαν από το Autodesk Fusion σε μορφή αρχείων STEP. Η επιλογή του συγκεκριμένου μορφότυπου έγινε ώστε να διατηρηθεί η γεωμετρική ακρίβεια, η τοπολογική πληροφορία των επιφανειών και οι σχέσεις μεταξύ των επιμέρους εξαρτημάτων κατά τη μεταφορά τους σε διαφορετικό υπολογιστικό περιβάλλον.

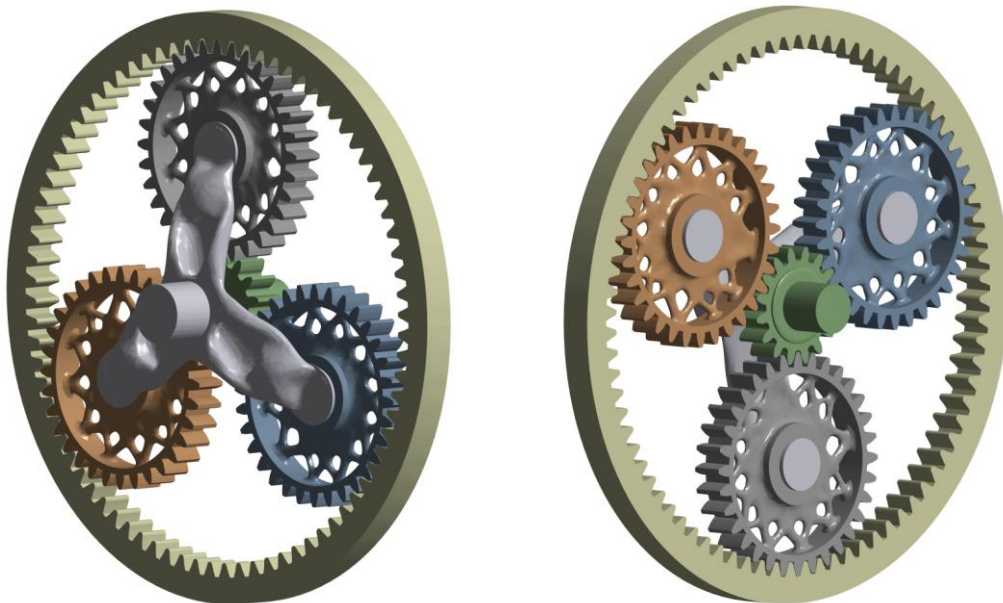
Στη συνέχεια, τα αρχεία STEP εισήχθησαν στο περιβάλλον CAD του ANSYS Workbench, όπου πραγματοποιήθηκε η προετοιμασία της γεωμετρίας για αριθμητική ανάλυση. Η προετοιμασία περιλάμβανε τον έλεγχο της γεωμετρικής συνέχειας, τον ορισμό των επιμέρους σωμάτων ως ξεχωριστών εξαρτημάτων συναρμολόγησης και τη διασφάλιση της σωστής χωρικής τοποθέτησης των γραναζιών, του φορέα πλανητών και της στεφάνης.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη διατήρηση της ίδιας γεωμετρικής διαμόρφωσης και των ίδιων σχέσεων συναρμολόγησης τόσο για τον αρχικό όσο και για τον γενετικά βελτιστοποιημένο μηχανισμό, ώστε να είναι δυνατή η άμεση και αντικειμενική σύγκριση των αποτελεσμάτων. Με τον τρόπο αυτό, οποιαδήποτε διαφοροποίηση στα πεδία τάσεων και παραμορφώσεων μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στις μεταβολές της γεωμετρίας που προέκυψαν από τη διαδικασία γενετικής βελτιστοποίησης και όχι σε διαφοροποιήσεις του μοντέλου. [36]

Στο [Σχήμα 6.1](#) παρουσιάζονται τα συναρμολογήματα του πλανητικού μηχανισμού όπως εισήχθησαν στο ANSYS, τόσο για τον αρχικό όσο και για τον γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό, σε διαφορετικές όψεις, ώστε να είναι εμφανής η συνολική γεωμετρική διάταξη και η μορφολογική διαφοροποίηση των επιμέρους εξαρτημάτων μετά τη βελτιστοποίηση.



(α)



(β)

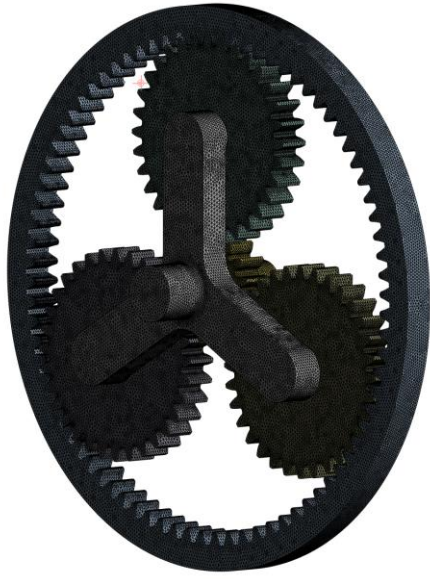
Σχήμα 6.1: Γεωμετρία πλανητικού μηχανισμού στο περιβάλλον ANSYS. (α) Αρχικός σχεδιασμός πλήρως συναρμολογημένου πλανητικού μηχανισμού, σε διαφορετικές όψεις. (β) Γενετικά βελτιστοποιημένος σχεδιασμός συναρμολογημένου πλανητικού μηχανισμού, όπως εισήχθη στο ANSYS για αριθμητική ανάλυση.(Ansys)

Για την αριθμητική ανάλυση των συναρμολογημάτων στο ANSYS χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων (Tetrahedrons), με αλγόριθμο δημιουργίας πλέγματος τύπου path conforming. Το πλέγμα δημιουργήθηκε με κοινές ρυθμίσεις και για τα δύο συναρμολογήματα, με προτίμηση φυσικής μη γραμμικής ανάλυσης (Nonlinear Mechanical) και μέγεθος στοιχείου ίσο με 1 mm, ώστε να εξασφαλιστεί συγκρίσιμη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

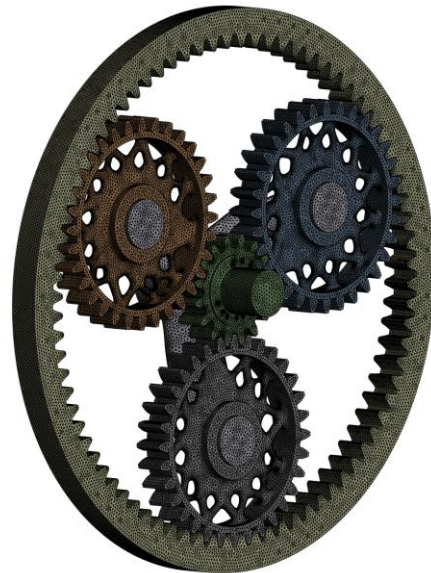
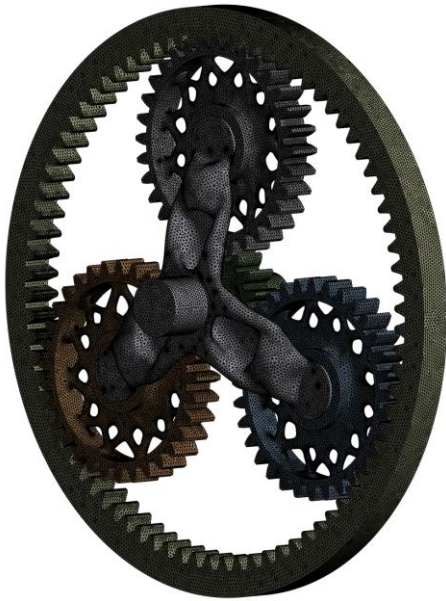
Για το αρχικό συναρμολογημένο πλανητικό μηχανισμό, το πλέγμα αποτελείται από 1587357 κόμβους και 1045468 στοιχεία, ενώ για το γενετικά βελτιστοποιημένο συναρμολογημένο μηχανισμό το πλέγμα αποτελείται από 1658188 κόμβους και 1067133 στοιχεία. Η ελαφρά αύξηση του πλήθους κόμβων και στοιχείων στην περίπτωση του βελτιστοποιημένου μοντέλου οφείλεται στην αυξημένη γεωμετρική πολυπλοκότητα που προκύπτει από τη διαδικασία γενετικής βελτιστοποίησης.

Η χρήση ίδιων παραμέτρων πλέγματος και συγκρίσιμης πυκνότητας διακριτοποίησης διασφαλίζει ότι οι διαφορές που παρατηρούνται στα αποτελέσματα της ανάλυσης αποδίδονται αποκλειστικά στη διαφοροποίηση της γεωμετρίας και όχι σε αριθμητικά φαινόμενα που σχετίζονται με το πλέγμα.

Στο [Σχήμα 6.2](#) παρουσιάζεται η διακριτοποίηση (mesh) των πλήρως συναρμολογημένων πλανητικών μηχανισμών στο περιβάλλον ANSYS, τόσο για τον αρχικό όσο και για τον γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό, όπως χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική ανάλυση. Στο σημείο αυτό αξίζει να τονισθεί ότι δεν πραγματοποιήθηκε μελέτη σύγκλισης πλέγματος (mesh convergence study), καθώς ο στόχος της ανάλυσης είναι η συγκριτική αξιολόγηση υπό ταυτόσημες αριθμητικές συνθήκες [36]



(α)



(β)

Σχήμα 6.2: Πλέγμα (mesh) συναρμολογημένου πλανητικού μηχανισμού στο ANSYS. (α) Αρχικός σχεδιασμός. (β) Γενετικά βελτιστοποιημένος σχεδιασμός.(Ansys)

6.2. Συνοριακές συνθήκες

Για την αριθμητική ανάλυση των συναρμολογημένων πλανητικών μηχανισμών στο ANSYS εφαρμόστηκαν συνοριακές συνθήκες που αναπαριστούν με ρεαλιστικό τρόπο τη λειτουργία του συστήματος, τόσο για τον αρχικό όσο και για τον γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό. Οι συνοριακές συνθήκες διατηρήθηκαν απολύτως ίδιες και στις δύο περιπτώσεις, ώστε η σύγκριση των αποτελεσμάτων να βασίζεται αποκλειστικά στη γεωμετρική διαφοροποίηση που προέκυψε από τη διαδικασία γενετικής βελτιστοποίησης.

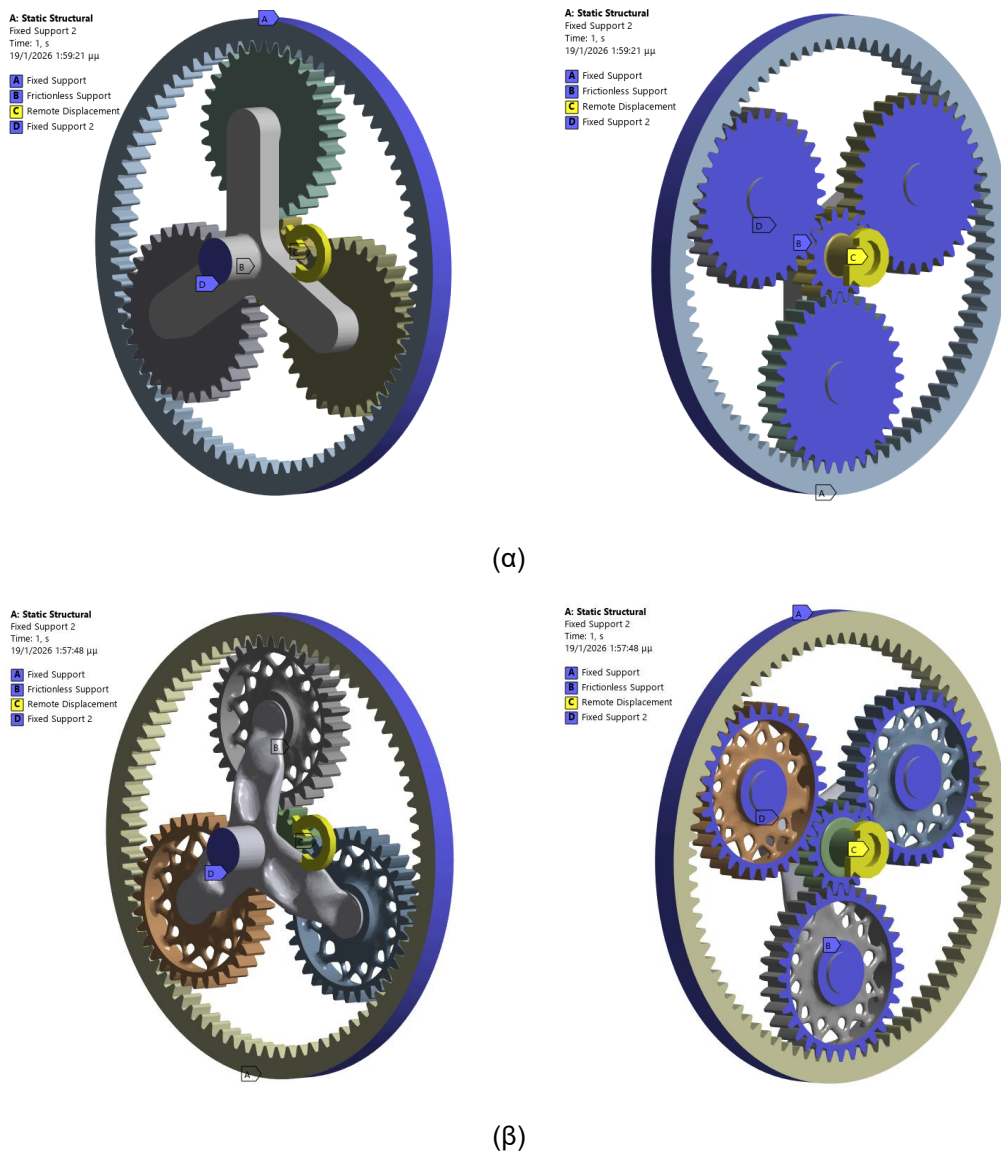
Η στεφάνη (δακτυλιοειδές γρανάζι) θεωρήθηκε πακτωμένη, προσομοιώνοντας την ακίνητη έδρασή της στο περίβλημα του μηχανισμού. Η πάκτωση αυτή αποτρέπει τόσο μεταφορικές όσο και στροφικές μετακινήσεις, εξασφαλίζοντας ότι η στεφάνη λειτουργεί ως σταθερό στοιχείο αναφοράς του πλανητικού συστήματος.

Η είσοδος της κίνησης στο σύστημα πραγματοποιήθηκε μέσω απομακρυσμένης μετατόπισης (remote displacement) στο γρανάζι ήλιο, με επιβολή γωνιακής μετατόπισης γύρω από τον άξονα z , ίση με $\text{rot}(z) = 6^\circ$. Η επιβολή της περιστροφικής μετατόπισης με τον τρόπο αυτό επιτρέπει αριθμητικά σταθερή εφαρμογή της φόρτισης και ομαλή ανάπτυξη των δυνάμεων επαφής μεταξύ των δοντιών των γραναζιών.

Ο φορέας πλανητών συνδέθηκε με τον άξονα εξόδου μέσω πάκτωσης στην αντίστοιχη επιφάνεια, προσομοιώνοντας τη στερεή σύνδεση του φορέα με το σύστημα μετάδοσης της ροπής. Η συγκεκριμένη οριακή συνθήκη επιτρέπει τη σωστή μεταφορά των φορτίσεων από τα πλανητικά γρανάζια προς τον άξονα εξόδου.

Στους άξονες των πλανητικών γραναζιών, καθώς και στις κατακόρυφες επίπεδες επιφάνειες των περιστρεφόμενων στοιχείων, εφαρμόστηκε στήριξη τύπου frictionless support. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την ελεύθερη περιστροφή των στοιχείων, ενώ ταυτόχρονα περιορίζει τις μεταφορικές κινήσεις κάθετα στις αντίστοιχες επιφάνειες. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η εμφάνιση φαινομένων ελεύθερου σώματος (free body motion) και διασφαλίζεται η αριθμητική σταθερότητα της επίλυσης, χωρίς να επιβάλλονται τεχνητοί περιορισμοί στην πραγματική κινηματική συμπεριφορά του μηχανισμού.

Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζονται οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στα συναρμολογήματα του πλανητικού μηχανισμού, τόσο για τον αρχικό όσο και για τον γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό, σε διαφορετικές όψεις, ώστε να είναι σαφής η χωρική κατανομή των πακτώσεων, των frictionless supports και της επιβαλλόμενης απομακρυσμένης μετατόπισης.



Σχήμα 6.3: Συνοριακές συνθήκες συναρμολογημένου πλανητικού μηχανισμού στο ANSYS για (α) τον αρχικό σχεδιασμό και (β) τον γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό. (Ansys)

Κατά την αριθμητική ανάλυση στο ANSYS ορίστηκαν ρητά οι επαφές μεταξύ των επιμέρους στοιχείων του πλανητικού μηχανισμού, ώστε να

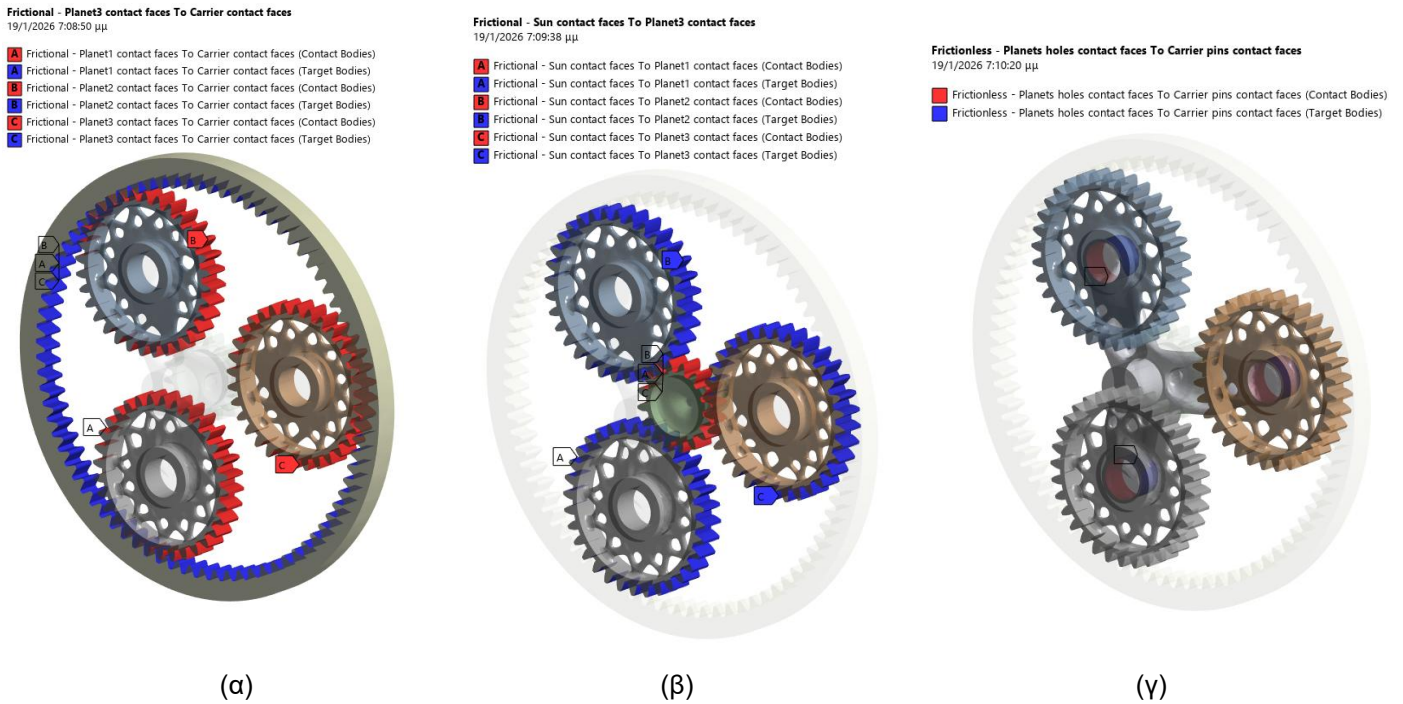
αποδοθεί με ρεαλιστικό τρόπο η μετάδοση φορτίων μέσω εμπλοκής και στήριξης. Οι επαφές μεταξύ των δοντιών των γραναζιών ορίστηκαν ως επαφές με τριβή (frictional contacts), με συντελεστή τριβής $\mu = 0.2$, τιμή αντιπροσωπευτική για πολυμερές υλικό τύπου PLA σε συνθήκες ξηρής επαφής.

Συγκεκριμένα, επαφές με τριβή ορίστηκαν μεταξύ των δοντιών των πλανητικών γραναζιών και της στεφάνης, καθώς και μεταξύ των δοντιών του γραναζιού ήλιου και των πλανητικών γραναζιών. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνεται υπόψη η ανάπτυξη εφαπτομενικών δυνάμεων λόγω τριβής κατά την εμπλοκή των δοντιών, γεγονός που επηρεάζει τόσο την κατανομή των τάσεων όσο και τη συνολική μηχανική συμπεριφορά του συστήματος.

Αντίθετα, οι επαφές μεταξύ των οπών των πλανητικών γραναζιών και των πείρων του φορέα ορίστηκαν ως επαφές χωρίς τριβή (frictionless contacts). Η επιλογή αυτή επιτρέπει την ελεύθερη περιστροφή των πλανητικών γραναζιών γύρω από τους πείρους στήριξης, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η ορθή μεταφορά των φορτίων προς τον φορέα, χωρίς την εισαγωγή τεχνητών ροπών λόγω τριβής στις στηρίξεις. Η επιλογή επαφών χωρίς τριβή (frictionless contacts) μεταξύ των οπών των πλανητικών γραναζιών και των πείρων του φορέα αιτιολογείται τόσο από φυσική όσο και από αριθμητική σκοπιά. Στην πραγματική λειτουργία πλανητικών μηχανισμών, οι επιφάνειες αυτές λειτουργούν υπό συνθήκες επαρκούς λίπανσης, με αποτέλεσμα ο συντελεστής τριβής να είναι ιδιαίτερα μικρός και η περιστροφή των πλανητικών γραναζιών γύρω από τους πείρους να πραγματοποιείται με ελάχιστες απώλειες. Υπό αυτή την παραδοχή, η προσέγγιση μηδενικής τριβής αποτελεί ικανοποιητική αναπαράσταση της πραγματικής μηχανικής συμπεριφοράς, επιτρέποντας την ελεύθερη περιστροφή χωρίς την εισαγωγή πρόσθετων ροπών αντίστασης. Παράλληλα, από αριθμητική άποψη, η χρήση frictionless επαφών στις στηρίξεις μειώνει τη μη γραμμικότητα του προβλήματος και βελτιώνει τη σύγκλιση της επίλυσης, διασφαλίζοντας ότι η κατανομή των τάσεων επηρεάζεται κυρίως από τη μετάδοση της ροπής μέσω των γραναζιών και όχι από δευτερεύοντα φαινόμενα τριβής στις στηρίξεις. [38],[39]

Στο [Σχήμα 6.4](#) παρουσιάζονται οι επαφές που ορίστηκαν στο μοντέλο του πλανητικού μηχανισμού, με διάκριση μεταξύ επαφών με τριβή και επαφών

χωρίς τριβή, για την πλήρη κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιμέρους στοιχείων κατά τη λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 6.4: Ορισμός επαφών στο συναρμολογημένο πλανητικό μηχανισμό στο ANSYS. (α) Επαφές με τριβή μεταξύ πλανητικών γραναζιών και στεφάνης (frictional, $\mu = 0.2$). (β) Επαφές με τριβή μεταξύ γραναζιού ήλιου και πλανητικών γραναζιών. (γ) Επαφές χωρίς τριβή μεταξύ οπών πλανητικών γραναζιών και πείρων φορέα (frictionless). (Ansys)

6.3. Αριθμητική Επίλυση

Κατά την αριθμητική ανάλυση στο ANSYS, η επίλυση πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον στατικής δομικής ανάλυσης (Static Structural), με ελεγχόμενη αυξητική εφαρμογή των φορτίσεων. Η επιβολή της περιστροφικής κίνησης στο γρανάτζι ήλιου υλοποιήθηκε μέσω απομακρυσμένης μετατόπισης (remote displacement), με επιβολή γωνιακής μετατόπισης γύρω από τον άξονα z (Rotation Z). Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιλέχθηκε ώστε να

προσομοιωθεί η είσοδος της ροπής στον πλανητικό μηχανισμό με αριθμητικά σταθερό τρόπο, αποφεύγοντας προβλήματα σύγκλισης που ενδέχεται να προκύψουν από την άμεση επιβολή ροπής.

Η ανάλυση ορίστηκε με ένα συνολικό βήμα επίλυσης (Number of Steps = 1), εντός του οποίου η φόρτιση εφαρμόστηκε αυξητικά μέσω είκοσι επιμέρους υποβημάτων (Number of Substeps = 20). Το συνολικό χρονικό διάστημα του βήματος ορίστηκε ίσο με 1 s (Step End Time = 1 s), ενώ η αυτόματη χρονική διακριτοποίηση απενεργοποιήθηκε (Auto Time Stepping = Off). Η επιλογή αυτή επιτρέπει τον πλήρη έλεγχο της αυξητικής εφαρμογής της φόρτισης και διασφαλίζει ομοιόμορφη κατανομή της γωνιακής μετατόπισης στα επιμέρους υποβήματα.

Η συνολική γωνιακή μετατόπιση που επιβλήθηκε στο γρανάζι ήλιου ήταν ίση με 6° και εφαρμόστηκε γραμμικά από 0° έως 6° κατά τη διάρκεια των είκοσι υποβημάτων επίλυσης. Η γραμμική αυτή αύξηση της γωνιακής μετατόπισης επιτρέπει τη σταδιακή ανάπτυξη των δυνάμεων επαφής μεταξύ των δοντιών των γραναζιών και αποτρέπει την εμφάνιση μη ρεαλιστικών αιχμών τάσεων, οι οποίες θα μπορούσαν να προκύψουν από απότομη επιβολή φορτίσεων.

Για τη διασφάλιση της αριθμητικής σταθερότητας της λύσης ενεργοποιήθηκε η επιλογή μεγάλων παραμορφώσεων (Large Deflection), ώστε να λαμβάνονται υπόψη γεωμετρικές μη γραμμικότητες λόγω σημαντικών μετατοπίσεων και στροφών των εξαρτημάτων. Παράλληλα, ενεργοποιήθηκαν τα ασθενή ελατήρια (Weak Springs), τα οποία χρησιμοποιούνται από το ANSYS για τη σταθεροποίηση του αριθμητικού μοντέλου σε συναρμολογήσεις με επαφές, χωρίς να επηρεάζουν ουσιαστικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Ο τύπος του επιλυτή ορίστηκε ως ελεγχόμενος από το πρόγραμμα (Program Controlled), επιτρέποντας στο λογισμικό να επιλέξει τον καταλληλότερο αλγόριθμο επίλυσης ανάλογα με τη φύση του προβλήματος.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε ως ψευδοστατική (quasi-static), χωρίς ενεργοποίηση αδρανειακών όρων (Inertia Relief = Off) και χωρίς ενεργοποίηση ψευδοστατικής επίλυσης (Quasi-Static Solution = Off), καθώς στόχος ήταν η σύγκριση της κατανομής τάσεων και παραμορφώσεων υπό ισοδύναμες στατικές συνθήκες φόρτισης. Οι ίδιες ακριβώς ρυθμίσεις επίλυσης, με ταυτόσημα βήματα, υποβήματα και συνοριακές συνθήκες, εφαρμόστηκαν τόσο

στον αρχικό όσο και στον γενετικά βελτιστοποιημένο πλανητικό μηχανισμό, εξασφαλίζοντας αντικειμενική και αξιόπιστη σύγκριση των αποτελεσμάτων. [39]

6.4. Αριθμητικά Αποτέλεσμα

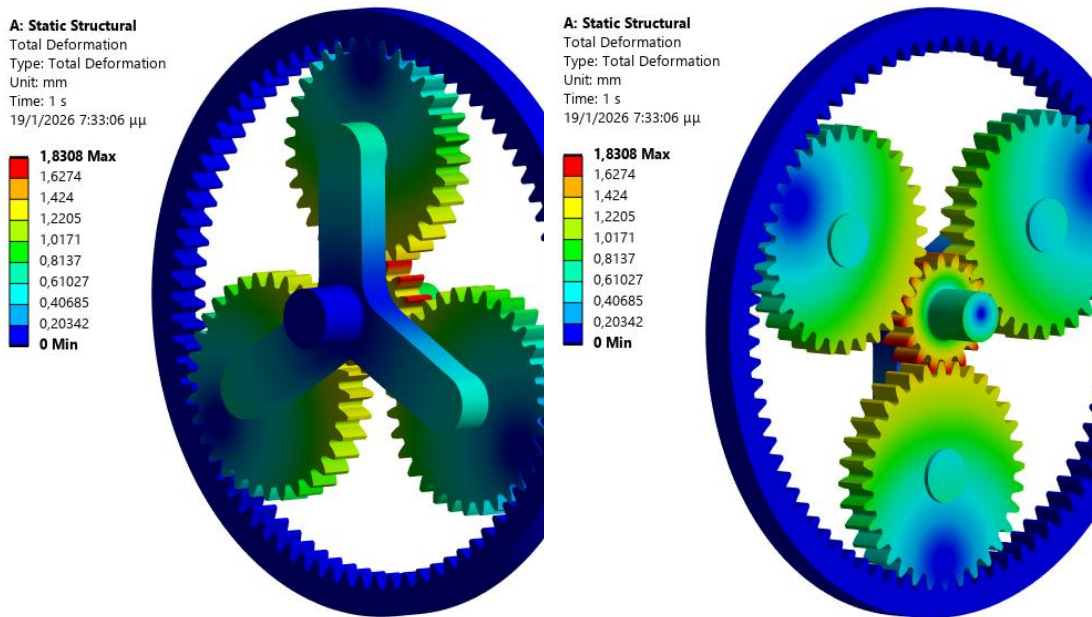
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στο ANSYS για τον αρχικό και τον γενετικά βελτιστοποιημένο πλανητικό μηχανισμό. Η σύγκριση βασίζεται σε ισοδύναμες συνθήκες φόρτισης, ίδιες συνοριακές συνθήκες και ταυτόσημες ρυθμίσεις επίλυσης, όπως περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, ώστε οι παρατηρούμενες διαφορές να αποδίδονται αποκλειστικά στη γεωμετρική διαφοροποίηση των εξαρτημάτων.

Η αξιολόγηση των δύο σχεδιασμών πραγματοποιείται με βάση την κατανομή των ισοδύναμων τάσεων von Mises, τις συνολικές μετατοπίσεις, καθώς και την κατανομή των φορτίων στα κρίσιμα δομικά στοιχεία του πλανητικού μηχανισμού. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον φορέα πλανητών, στα πλανητικά γρανάζια και στο γρανάζι ήλιο, καθώς τα στοιχεία αυτά υφίστανται τις υψηλότερες μηχανικές καταπονήσεις κατά τη λειτουργία του συστήματος.

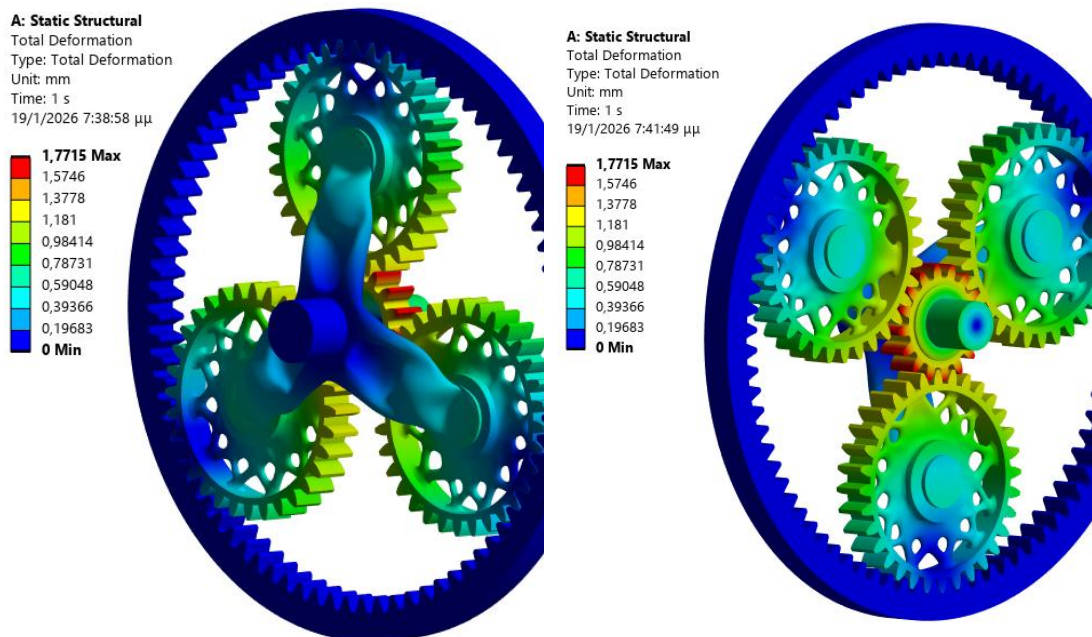
6.4.1 Συνολικός Πλανητικός Μηχανισμός

Στο [Σχήμα 6.5](#) παρουσιάζεται η κατανομή της συνολικής μετατόπισης (total deformation) στον συναρμολογημένο πλανητικό μηχανισμό, όπως προέκυψε από την αριθμητική ανάλυση στο ANSYS, για τον αρχικό και τον γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό. Στην περίπτωση του αρχικού σχεδιασμού ([Σχήμα 6.5α](#)), η μέγιστη μετατόπιση ανέρχεται σε 1,8308 mm, ενώ για τον γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό ([Σχήμα 6.5β](#)) η αντίστοιχη μέγιστη τιμή μειώνεται σε 1,7715 mm. Παρατηρείται ότι η κατανομή των μετατοπίσεων εμφανίζει παρόμοια χωρικά χαρακτηριστικά και στις δύο περιπτώσεις, με αυξημένες τιμές στα πλανητικά γρανάζια και στον φορέα πλανητών, γεγονός που υποδηλώνει ότι η γενετική βελτιστοποίηση δεν αλλοιώνει τη συνολική κινηματική συμπεριφορά του μηχανισμού. Η ελαφρά

μείωση της μέγιστης μετατόπισης στον βελτιστοποιημένο σχεδιασμό καταδεικνύει ότι η μείωση της μάζας επιτεύχθηκε χωρίς ουσιαστική υποβάθμιση της ακαμψίας του συναρμολογημένου συστήματος.



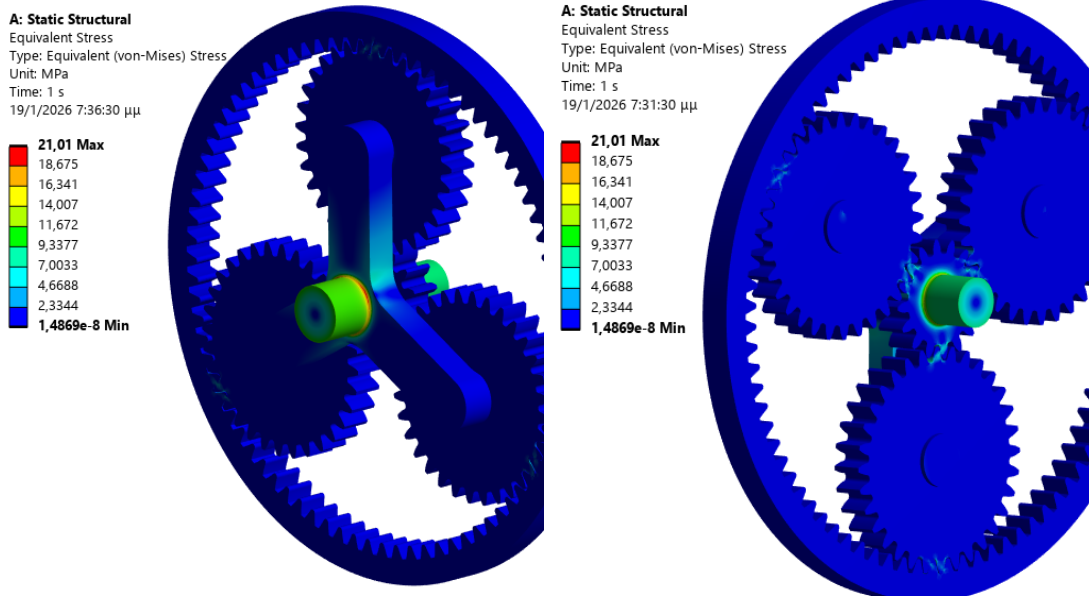
(α)



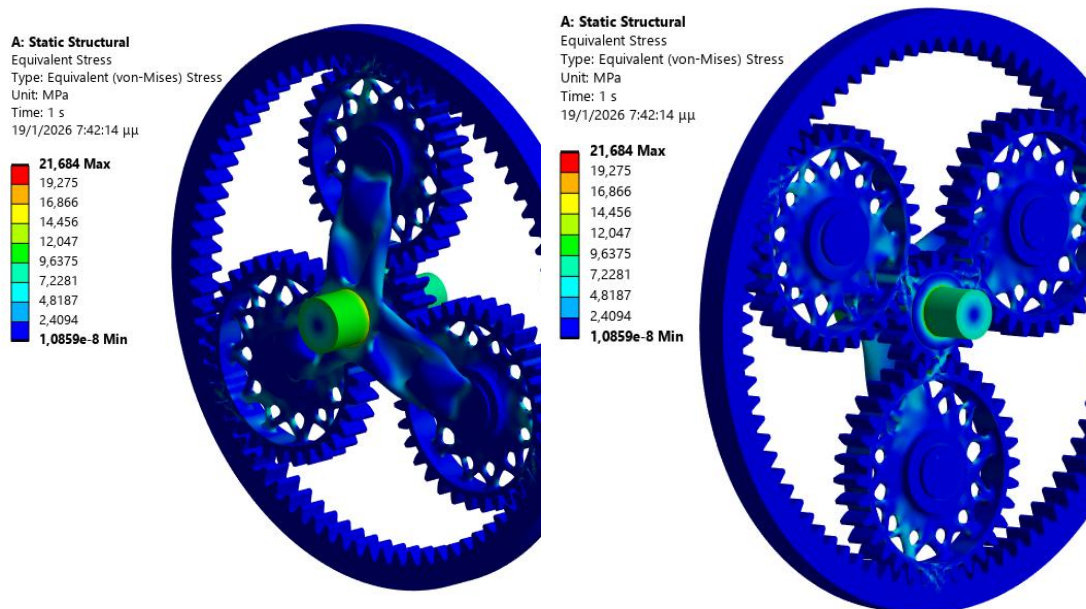
(β)

Σχήμα 6.5: Κατανομή συνολικής μετατόπισης (total deformation) στον συναρμολογημένο πλανητικό μηχανισμό από αριθμητική ανάλυση στο ANSYS. (α) Αρχικός σχεδιασμός με μέγιστη μετατόπιση 1,8308 mm. (β) Γενετικά βελτιστοποιημένος σχεδιασμός με μέγιστη μετατόπιση 1,7715 mm. Οι απεικονίσεις παρουσιάζονται σε δύο χαρακτηριστικές όψεις για πληρέστερη κατανόηση της χωρικής κατανομής των παραμορφώσεων. (Ansys)

Στο [Σχήμα 6.6](#) παρουσιάζεται η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων von Mises στον συναρμολογημένο πλανητικό μηχανισμό, όπως προέκυψε από την αριθμητική ανάλυση στο ANSYS, για τον αρχικό και τον γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό. Στην περίπτωση του αρχικού σχεδιασμού ([Σχήμα 6.6α](#)), η μέγιστη ισοδύναμη τάση ανέρχεται σε 21,01 MPa, ενώ για τον γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό ([Σχήμα 6.6β](#)) η αντίστοιχη μέγιστη τιμή διαμορφώνεται σε 21,684 MPa. Παρατηρείται ότι οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται κυρίως στις περιοχές σύνδεσης του φορέα πλανητών με τον κεντρικό άξονα και στις ζώνες εμπλοκής των γραναζιών, όπου αναπτύσσονται οι υψηλότερες δυνάμεις επαφής. Η σύγκριση των δύο σχεδιασμών δείχνει ότι, παρά τη σημαντική μείωση της μάζας στα γενετικά βελτιστοποιημένα εξαρτήματα, οι μέγιστες τάσεις παραμένουν σε παρόμοια επίπεδα με εκείνες του αρχικού σχεδιασμού και εντός της ελαστικής περιοχής του υλικού, γεγονός που υποδηλώνει ότι η γενετική βελτιστοποίηση δεν οδηγεί σε ανεπιθύμητη αύξηση των μηχανικών καταπονήσεων. [40]



(α)



(β)

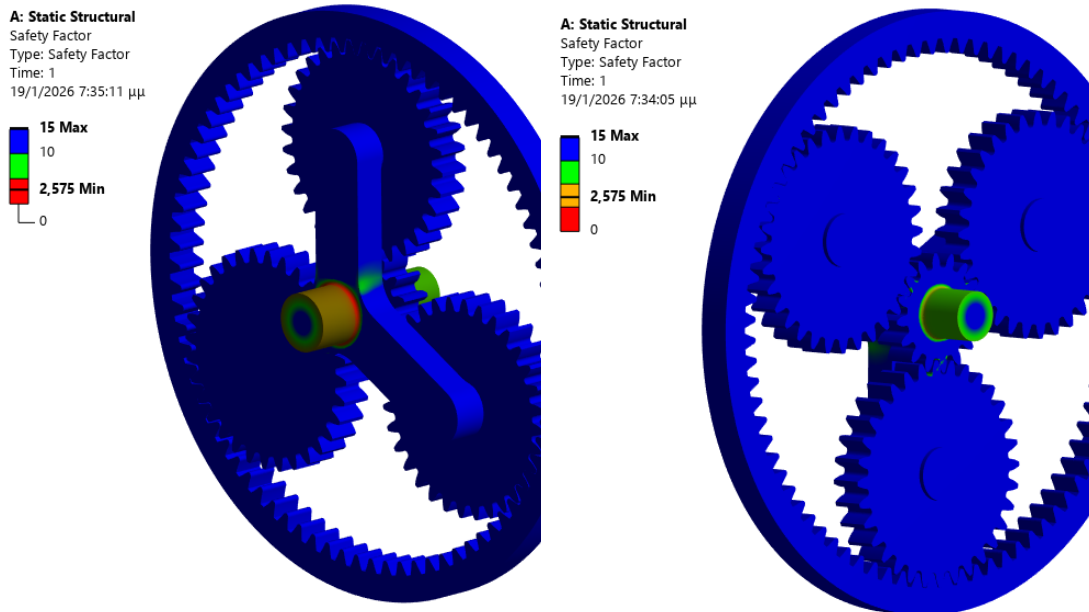
Σχήμα 6.6: Κατανομή ισοδύναμων τάσεων von Mises στον συναρμολογημένο πλανητικό μηχανισμό από αριθμητική ανάλυση στο ANSYS. (α) Αρχικός σχεδιασμός με μέγιστη

ισοδύναμη τάση 21,01 MPa. (β) Γενετικά βελτιστοποιημένος σχεδιασμός με μέγιστη ισοδύναμη τάση 21,684 MPa. Οι απεικονίσεις παρουσιάζονται σε δύο χαρακτηριστικές όψεις για πληρέστερη κατανόηση της χωρικής κατανομής των τάσεων. (Ansys)

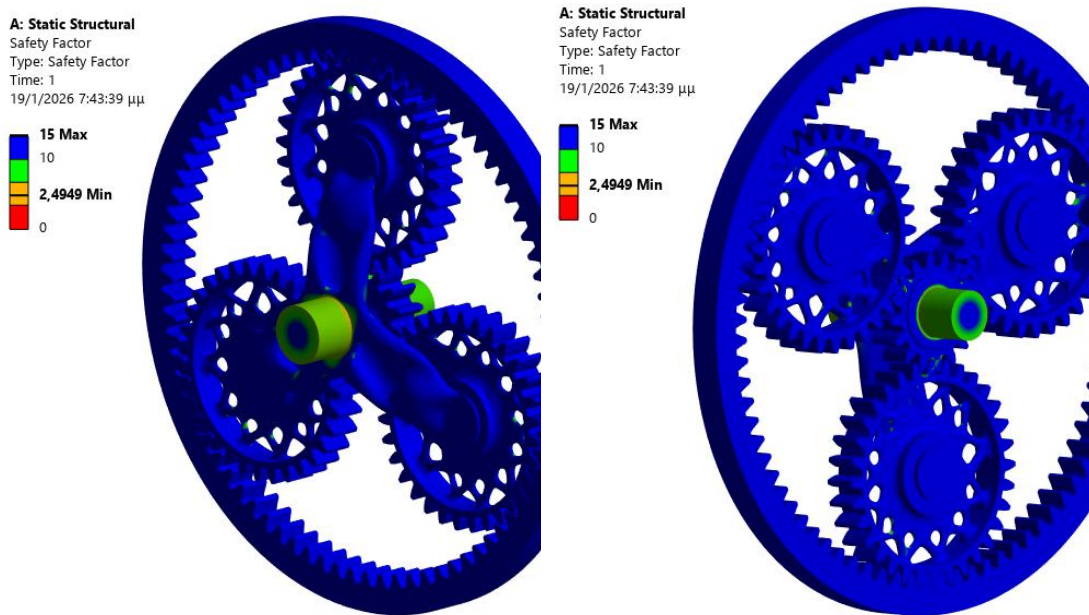
Στο [Σχήμα 6.7](#) παρουσιάζεται η κατανομή του συντελεστή ασφάλειας (safety factor) στον συναρμολογημένο πλανητικό μηχανισμό, όπως προέκυψε από τη στατική δομική ανάλυση στο ANSYS, τόσο για τον αρχικό όσο και για τον γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό. Ο συντελεστής ασφάλειας υπολογίζεται με βάση το κριτήριο von Mises και αναφέρεται άμεσα στο όριο διαρροής (yield strength) του υλικού PLA που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση. Ως εκ τούτου, οι περιοχές με χαμηλότερες τιμές συντελεστή ασφάλειας αντιστοιχούν σε περιοχές όπου οι αναπτυσσόμενες ισοδύναμες τάσεις προσεγγίζουν περισσότερο το όριο διαρροής του υλικού.[41]

Για τον αρχικό σχεδιασμό, η ελάχιστη τιμή του συντελεστή ασφάλειας προκύπτει ίση με 2,575, ενώ για τον γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό η αντίστοιχη ελάχιστη τιμή ανέρχεται σε 2,4949. Και στις δύο περιπτώσεις, οι ελάχιστες τιμές εντοπίζονται κυρίως στην περιοχή σύνδεσης του φορέα πλανητών με τον κεντρικό άξονα, όπου παρατηρείται συγκέντρωση φορτίων λόγω της μετάδοσης της ροπής. Παρά τη μικρή μείωση του ελάχιστου συντελεστή ασφάλειας στον γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό, οι τιμές παραμένουν σαφώς μεγαλύτερες της μονάδας και σημαντικά υψηλότερες από το κρίσιμο όριο διαρροής, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η λειτουργία του μηχανισμού λαμβάνει χώρα εξ ολοκλήρου εντός της ελαστικής περιοχής του υλικού.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων καταδεικνύει ότι η γενετική βελτιστοποίηση, αν και οδηγεί σε σημαντική μείωση της μάζας μέσω αφαίρεσης υλικού, δεν επιφέρει ουσιαστική υποβάθμιση της μηχανικής ασφάλειας του συστήματος. Αντιθέτως, η διατήρηση ικανοποιητικών τιμών συντελεστή ασφάλειας σε όλα τα κρίσιμα δομικά στοιχεία επιβεβαιώνει ότι ο γενετικά βελτιστοποιημένος πλανητικός μηχανισμός πληροί τις απαιτήσεις αντοχής και αξιοπιστίας υπό τις εξεταζόμενες συνθήκες φόρτισης.



(α)



(β)

Σχήμα 6.7: Κατανομή συντελεστή ασφάλειας (safety factor) στον συναρμολογημένο πλανητικό μηχανισμό από αριθμητική ανάλυση στο ANSYS. (α) Αρχικός σχεδιασμός με ελάχιστο συντελεστή ασφάλειας 2,575. (β) Γενετικά βελτιστοποιημένος σχεδιασμός με ελάχιστο συντελεστή ασφάλειας 2,4949. Οι τιμές υπολογίζονται σε σχέση με το όριο διαρροής του υλικού PLA και παρουσιάζονται σε δύο χαρακτηριστικές όψεις για πληρέστερη κατανόηση της χωρικής κατανομής. (Ansys)

6.4.2 Φορέας πλανητών (Planet Carrier)

Στην παρούσα υποενότητα εξετάζεται η μηχανική συμπεριφορά του φορέα πλανητών (carrier) πριν και μετά τη γενετική βελτιστοποίηση, μέσω αριθμητικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων στο ANSYS. Ο φορέας αποτελεί το πλέον καταπονούμενο δομικό στοιχείο του πλανητικού μηχανισμού, καθώς παραλαμβάνει τις επαπτομενικές δυνάμεις από τα πλανητικά γρανάζια και τις μεταφέρει στον άξονα εξόδου.

Στο [Σχήμα 6.8](#) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συνολικής μετατόπισης (total deformation) και των ισοδύναμων τάσεων von Mises για τον αρχικό και τον γενετικά βελτιστοποιημένο φορέα. Στις [απεικονίσεις \(α\) και \(β\)](#) παρουσιάζεται ο αρχικός σχεδιασμός, ενώ στις [απεικονίσεις \(γ\) και \(δ\)](#) ο γενετικά βελτιστοποιημένος. Οι μέγιστες μετατοπίσεις εντοπίζονται και στις δύο περιπτώσεις στα άκρα των βραχιόνων του φορέα, όπου εφαρμόζονται οι επαπτομενικές δυνάμεις από τα πλανητικά γρανάζια. Ο αρχικός φορέας εμφανίζει μέγιστη συνολική μετατόπιση ίση με 0,75537 mm, ενώ ο γενετικά βελτιστοποιημένος παρουσιάζει μειωμένη μέγιστη μετατόπιση ίση με 0,67366 mm, γεγονός που υποδηλώνει βελτιωμένη ακαμψία παρά τη σημαντική αφαίρεση υλικού.

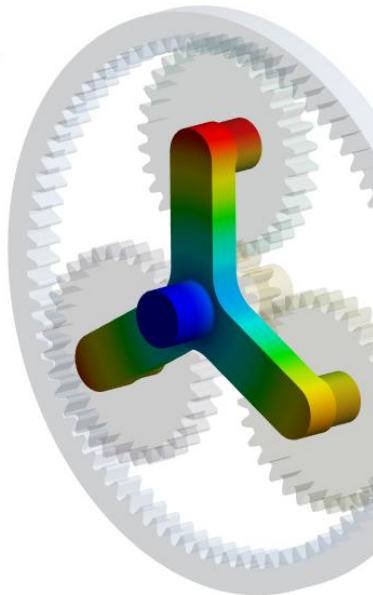
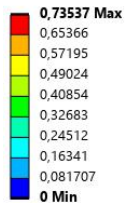
Η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων von Mises δείχνει ότι οι μέγιστες τάσεις συγκεντρώνονται κυρίως στην περιοχή σύνδεσης του φορέα με τον κεντρικό άξονα, καθώς και στις ρίζες των βραχιόνων. Για τον αρχικό σχεδιασμό, η μέγιστη ισοδύναμη τάση ανέρχεται σε 21,01 MPa, ενώ για τον γενετικά βελτιστοποιημένο φορέα η μέγιστη τάση μειώνεται στα 20,504 MPa. Και στις δύο περιπτώσεις, οι αναπτυσσόμενες τάσεις παραμένουν σημαντικά χαμηλότερες από το όριο διαρροής του υλικού PLA, επιβεβαιώνοντας ότι η λειτουργία του φορέα πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου εντός της ελαστικής περιοχής.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η σύγκριση της μάζας των δύο σχεδιασμών. Ο αρχικός φορέας έχει μάζα ίση με $5,0118 \times 10^{-2}$ kg, ενώ ο γενετικά βελτιστοποιημένος φορέας έχει μάζα $3,5356 \times 10^{-2}$ kg. Η μείωση μάζας ανέρχεται σε περίπου 29.5%, χωρίς αντίστοιχη επιδείνωση της μηχανικής

συμπεριφοράς. Αντιθέτως, παρατηρείται ταυτόχρονη μείωση τόσο της μέγιστης μετατόπισης όσο και της μέγιστης ισοδύναμης τάσης.

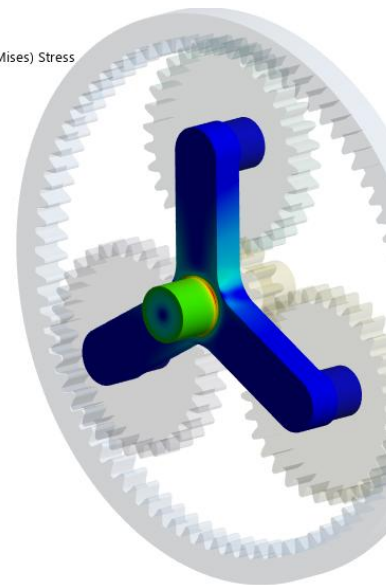
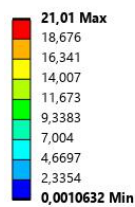
Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η γενετική βελτιστοποίηση του φορέα πλανητών οδήγησε σε έναν σαφώς ελαφρύτερο και ταυτόχρονα μηχανικά αποδοτικότερο σχεδιασμό. Η ανακατανομή του υλικού επιτρέπει τη διατήρηση της απαιτούμενης ακαμψίας και αντοχής, καθιστώντας τον γενετικά βελτιστοποιημένο φορέα κατάλληλο για εφαρμογές όπου η μείωση μάζας αποτελεί κρίσιμο σχεδιαστικό κριτήριο.

A: Static Structural
Total Deformation 2
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
19/1/2026 7:45:27 μμ

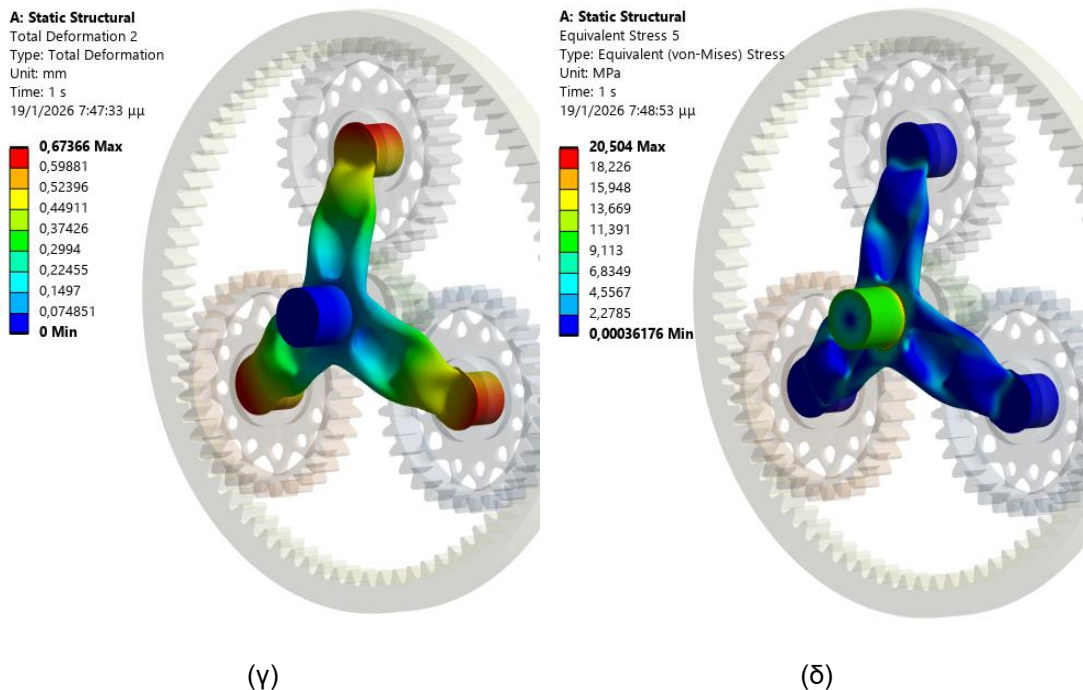


(α)

A: Static Structural
Equivalent Stress 6
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
19/1/2026 7:46:42 μμ



(β)



Σχήμα 6.8: Αριθμητικά αποτελέσματα για τον φορέα πλανητών από στατική δομική ανάλυση στο ANSYS. (α) Συνολική μετατόπιση αρχικού φορέα (μέγιστη τιμή 0,75337 mm). (β) Ισοδύναμες τάσεις von Mises αρχικού φορέα (μέγιστη τιμή 21,01 MPa). (γ) Συνολική μετατόπιση γενετικά βελτιστοποιημένου φορέα (μέγιστη τιμή 0.67366 mm). (δ) Ισοδύναμες τάσεις von Mises γενετικά βελτιστοποιημένου φορέα (μέγιστη τιμή 20,504 MPa). (Ansys)

6.4.3 Πλανήτες (Planets)

Στην παρούσα υποενοότητα εξετάζεται η μηχανική συμπεριφορά των πλανητικών γρاناζιών πριν και μετά τη γενετική βελτιστοποίηση, μέσω αριθμητικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων στο ANSYS. Τα πλανητικά γρανάζια αποτελούν κρίσιμα στοιχεία του μηχανισμού, καθώς βρίσκονται σε συνεχή εμπλοκή τόσο με το γρανάζι ήλιο όσο και με τη στεφάνη, παραλαμβάνοντας σημαντικές δυνάμεις επαφής κατά τη λειτουργία.

Στο [Σχήμα 6.9](#) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συνολικής μετατόπισης (total deformation) και των ισοδύναμων τάσεων von Mises για τους πλανήτες, τόσο για τον αρχικό όσο και για τον γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό. Στις απεικονίσεις (α) και (β) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον αρχικό σχεδιασμό, ενώ στις απεικονίσεις (γ) και (δ) για τον γενετικά βελτιστοποιημένο.

Για τον αρχικό σχεδιασμό, η μέγιστη συνολική μετατόπιση των πλανητικών γραναζιών ανέρχεται σε 1,4537 mm, με τις μέγιστες τιμές να εντοπίζονται στις περιοχές των δοντιών που βρίσκονται σε άμεση εμπλοκή. Στην περίπτωση του γενετικά βελτιστοποιημένου σχεδιασμού, η μέγιστη μετατόπιση μειώνεται σε 1,3656 mm, γεγονός που υποδηλώνει βελτιωμένη δυσκαμψία, παρά τη σημαντική αφαίρεση υλικού από το σώμα των γραναζιών.

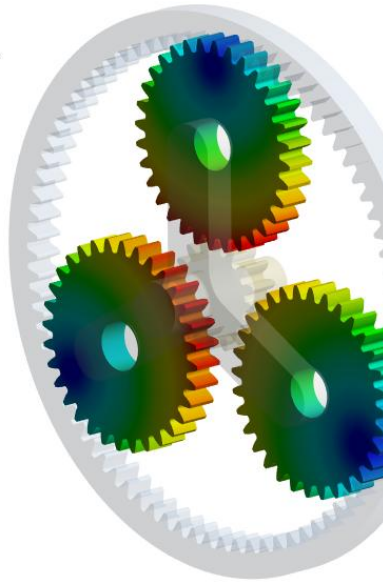
Αντίστοιχα, η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων von Mises δείχνει ότι για τον αρχικό σχεδιασμό η μέγιστη τάση φθάνει τα 8,3711 MPa, ενώ για τον γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό η μέγιστη τάση αυξάνεται στα 11,489 MPa. Η αύξηση αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς η αφαίρεση υλικού οδηγεί σε τοπική ενίσχυση των τάσεων. Παρ' όλα αυτά, οι μέγιστες τιμές παραμένουν σημαντικά χαμηλότερες από το όριο διαρροής του υλικού PLA, διασφαλίζοντας ότι η λειτουργία των πλανητικών γραναζιών πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου εντός της ελαστικής περιοχής.

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η σύγκριση της μάζας των πλανητών πριν και μετά τη βελτιστοποίηση. Ο αρχικός σχεδιασμός έχει μάζα $3,6933 \times 10^{-2}$ kg, ενώ ο γενετικά βελτιστοποιημένος σχεδιασμός έχει μάζα $1,6509 \times 10^{-2}$ kg, γεγονός που αντιστοιχεί σε μείωση μάζας της τάξης του 55%. Η σημαντική αυτή ελάφρυνση επιτυγχάνεται χωρίς απώλεια της δομικής ακεραιότητας των γραναζιών και χωρίς προσέγγιση του ορίου διαρροής του υλικού.

Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η γενετική βελτιστοποίηση των πλανητικών γραναζιών οδηγεί σε εξαρτήματα σημαντικά μειωμένου βάρους, με αποδεκτή αύξηση των τάσεων και βελτιωμένη δυσκαμψία. Η συμπεριφορά αυτή καθιστά τα γενετικά βελτιστοποιημένα πλανητικά γρανάζια κατάλληλα για εφαρμογές όπου η μείωση μάζας αποτελεί πρωτεύον σχεδιαστικό στόχο, χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η μηχανική αξιοπιστία του πλανητικού μηχανισμού.

A: Static Structural
Total Deformation 3
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
19/1/2026 7:49:37 μμ

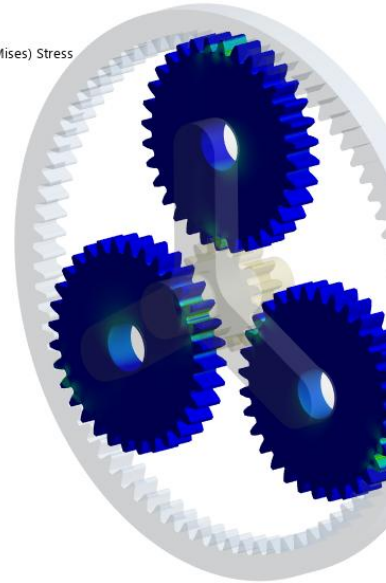
1,4537 Max
1,2923
1,1309
0,96958
0,80821
0,64684
0,48548
0,32411
0,16274
0,0013726 Min



(α)

A: Static Structural
Equivalent Stress 7
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
19/1/2026 7:51:26 μμ

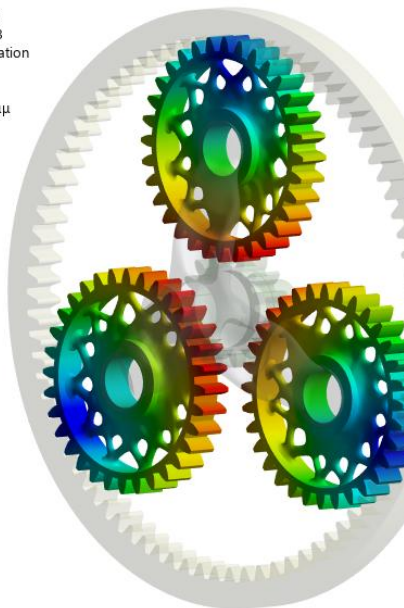
8,3711 Max
7,441
6,5109
5,5808
4,6507
3,7206
2,7905
1,8605
0,93036
0,00027643 Min



(β)

A: Static Structural
Total Deformation 3
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
19/1/2026 7:52:10 μμ

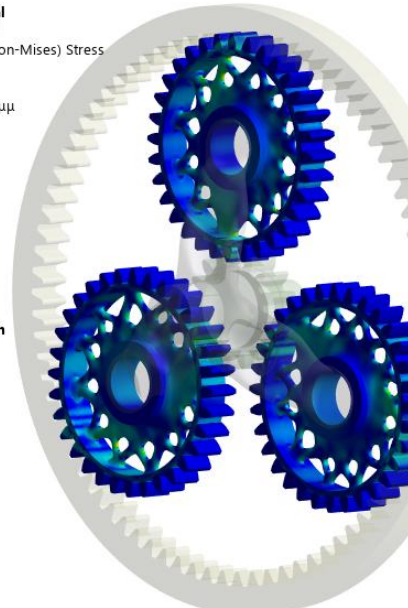
1,3656 Max
1,2146
1,0635
0,91248
0,76143
0,61038
0,45932
0,30827
0,15722
0,001613 Min



(γ)

A: Static Structural
Equivalent Stress 6
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
19/1/2026 7:53:04 μμ

11,489 Max
10,213
8,9364
7,66
6,3837
5,1073
3,8309
2,5546
1,2782
0,0018072 Min



(δ)

Σχήμα 6.9: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης για τα πλανητικά γρανάζια. (α) Συνολική μετατόπιση αρχικού σχεδιασμού με μέγιστη τιμή 1,4537 mm. (β) Ισοδύναμες τάσεις von Mises αρχικού σχεδιασμού με μέγιστη τιμή 8,3711 MPa. (γ) Συνολική μετατόπιση γενετικά βελτιστοποιημένου σχεδιασμού με μέγιστη τιμή 1,3656 mm. (δ) Ισοδύναμες τάσεις von Mises γενετικά βελτιστοποιημένου σχεδιασμού με μέγιστη τιμή 11,489 MPa. (Ansys)

6.4.4 Ήλιος (Sun)

Στην παρούσα υποενότητα εξετάζεται η μηχανική συμπεριφορά του κεντρικού γραναζιού ήλιου (sun gear) πριν και μετά τη γενετική βελτιστοποίηση, μέσω αριθμητικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων στο ANSYS. Το γρανάζι ήλιος αποτελεί το στοιχείο εισόδου του πλανητικού μηχανισμού και βρίσκεται σε συνεχή εμπλοκή με τα πλανητικά γρανάζια, δεχόμενο τις αντίστοιχες δυνάμεις επαφής κατά τη μετάδοση της ροπής.

Στο [Σχήμα 6.10](#) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συνολικής μετατόπισης (total deformation) και των ισοδύναμων τάσεων von Mises για τον ήλιο, τόσο για τον αρχικό όσο και για τον γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό. Στις απεικονίσεις (α) και (β) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον αρχικό σχεδιασμό, ενώ στις απεικονίσεις (γ) και (δ) τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τον γενετικά βελτιστοποιημένο.

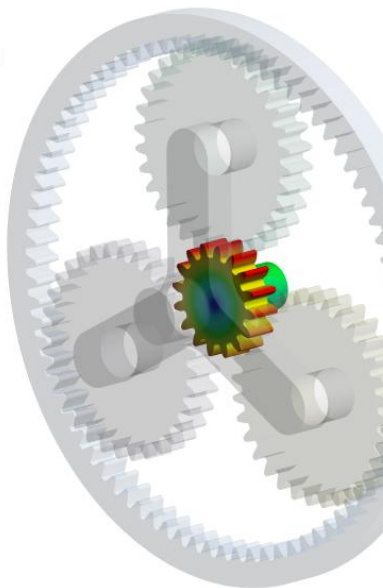
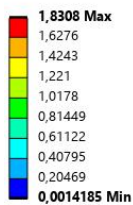
Για τον αρχικό σχεδιασμό, η μέγιστη συνολική μετατόπιση του γραναζιού ήλιου ανέρχεται σε 1,8308 mm, με τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται κυρίως στα δόντια που βρίσκονται σε άμεση εμπλοκή με τους πλανήτες. Στην περίπτωση του γενετικά βελτιστοποιημένου σχεδιασμού, η μέγιστη μετατόπιση μειώνεται σε 1,7715 mm, γεγονός που υποδηλώνει ελαφρώς βελτιωμένη δυσκαμψία του εξαρτήματος, παρά τη μείωση της μάζας του.

Η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων von Mises δείχνει ότι για τον αρχικό σχεδιασμό η μέγιστη τάση φθάνει τα 13,461 MPa, ενώ για τον γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό η μέγιστη τάση αυξάνεται στα 21,684 MPa. Η αύξηση αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς η γενετική βελτιστοποίηση οδηγεί σε αφαίρεση υλικού από περιοχές χαμηλής συμβολής στη φέρουσα ικανότητα, με αποτέλεσμα την ενίσχυση των τάσεων σε τοπικές περιοχές. Παρ' όλα αυτά, οι μέγιστες τιμές των τάσεων παραμένουν σημαντικά χαμηλότερες από το όριο διαρροής του υλικού PLA, διασφαλίζοντας ότι το γρανάζι ήλιος λειτουργεί εξ ολοκλήρου εντός της ελαστικής περιοχής.

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η σύγκριση της μάζας του γραναζιού ήλιου πριν και μετά τη βελτιστοποίηση. Ο αρχικός σχεδιασμός έχει μάζα $1,2925 \times 10^{-2}$ kg, ενώ ο γενετικά βελτιστοποιημένος σχεδιασμός έχει μάζα $1,0059 \times 10^{-2}$ kg, γεγονός που αντιστοιχεί σε μείωση μάζας της τάξης του 22,2%. Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται χωρίς απώλεια της δομικής ακεραιότητας του εξαρτήματος και χωρίς υπέρβαση των επιτρεπτών ορίων τάσεων.

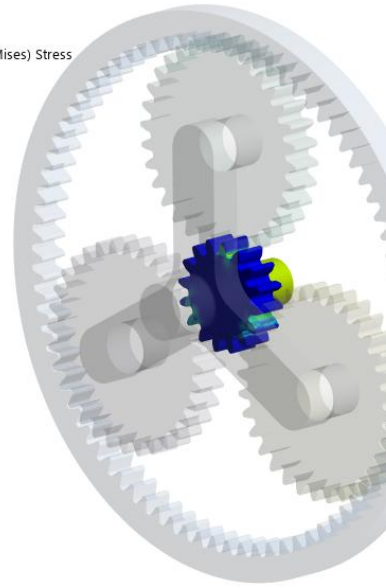
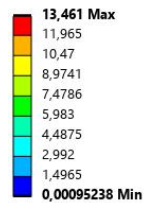
Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η γενετική βελτιστοποίηση του γραναζιού ήλιου οδηγεί σε ουσιαστική μείωση της μάζας, με αποδεκτή αύξηση των τοπικών τάσεων και ελαφρά βελτίωση της δυσκαμψίας. Ο γενετικά βελτιστοποιημένος ήλιος κρίνεται μηχανικά αξιόπιστος και κατάλληλος για εφαρμογές όπου η μείωση μάζας αποτελεί σημαντικό σχεδιαστικό στόχο, χωρίς να θίγεται η ασφαλής λειτουργία του πλανητικού μηχανισμού.

A: Static Structural
Total Deformation 4
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
19/1/2026 7:54:13 μμ



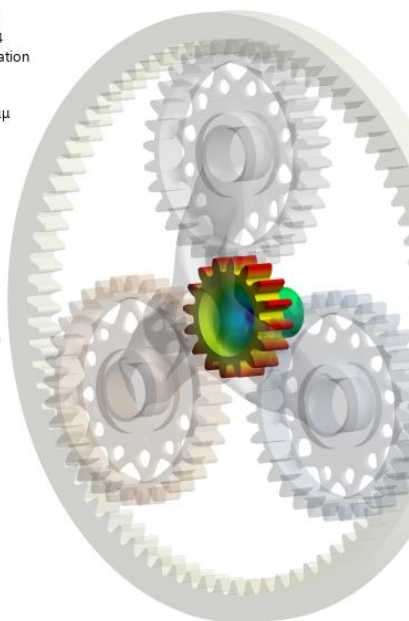
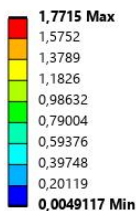
(α)

A: Static Structural
Equivalent Stress 8
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
19/1/2026 7:55:02 μμ

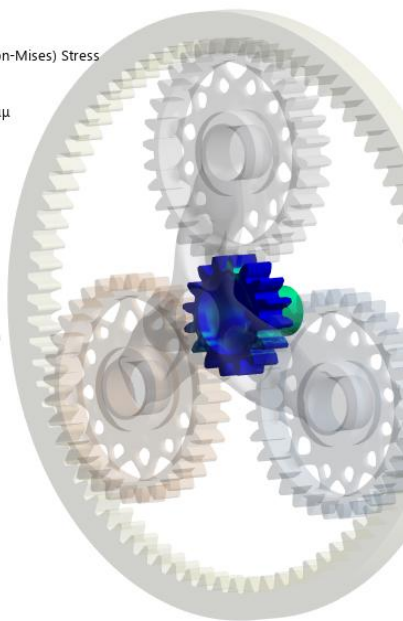
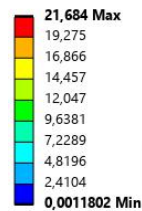


(β)

A: Static Structural
Total Deformation 4
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
19/1/2026 7:55:51 μμ



A: Static Structural
Equivalent Stress 7
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
19/1/2026 7:56:39 μμ



(γ)

(δ)

Σχήμα 6.10: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης για το γρανάζι ήλιο. (α) Συνολική μετατόπιση αρχικού σχεδιασμού με μέγιστη τιμή 1,8308 mm. (β) Ισοδύναμες τάσεις von Mises αρχικού σχεδιασμού με μέγιστη τιμή 13,461 MPa. (γ) Συνολική μετατόπιση γενετικά βελτιστοποιημένου σχεδιασμού με μέγιστη τιμή 1,7715 mm. (δ) Ισοδύναμες τάσεις von Mises γενετικά βελτιστοποιημένου σχεδιασμού με μέγιστη τιμή 21,684 MPa. (Ansys)

6.4.5 Δακτυλιοειδές γρανάζι (Ring gear)

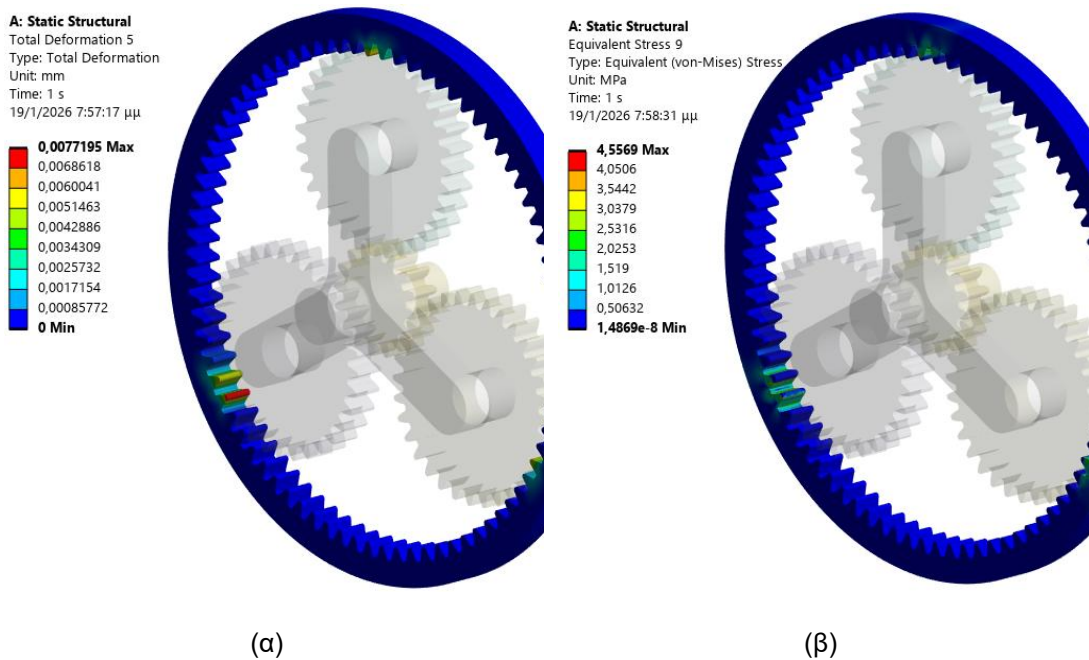
Στην παρούσα υποενότητα εξετάζεται η μηχανική συμπεριφορά του δακτυλιοειδούς γραναζιού (ring gear) του πλανητικού μηχανισμού μέσω αριθμητικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων στο ANSYS. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα επιμέρους εξαρτήματα, στο δακτυλιοειδές γρανάζι δεν εφαρμόστηκε γενετική βελτιστοποίηση, καθώς αποτελεί το εξωτερικό και δομικά πιο άκαμπτο στοιχείο της συναρμολόγησης και θεωρήθηκε πακτωμένο κατά τη λειτουργία του μηχανισμού. Για τον λόγο αυτό, η γεωμετρία και η μάζα του παραμένουν ίδιες τόσο στον αρχικό όσο και στον γενετικά βελτιστοποιημένο πλανητικό μηχανισμό.

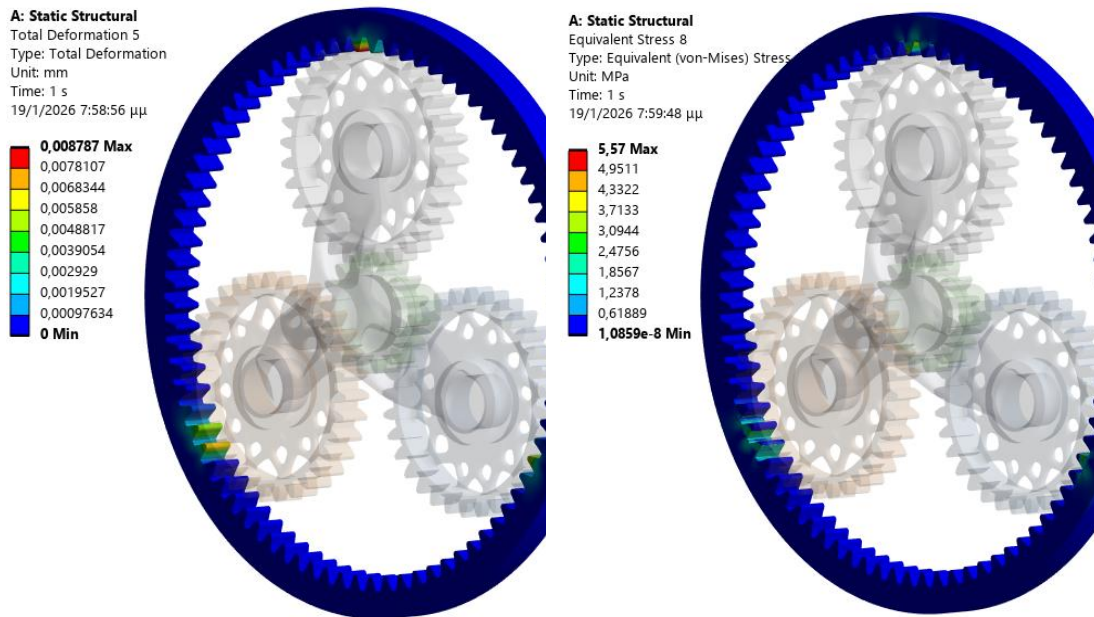
Στο [Σχήμα 6.11](#) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συνολικής μετατόπισης (total deformation) και των ισοδύναμων τάσεων von Mises για το δακτυλιοειδές γρανάζι, τόσο για το αρχικό όσο και για το γενετικά βελτιστοποιημένο συναρμολογημένο μοντέλο. Για τον αρχικό σχεδιασμό, η μέγιστη συνολική μετατόπιση του δακτυλιοειδούς γραναζιού ανέρχεται σε 0,00772 mm, ενώ για το γενετικά βελτιστοποιημένο συναρμολογημένο μοντέλο η αντίστοιχη τιμή είναι 0,00879 mm. Οι παραμορφώσεις αυτές είναι εξαιρετικά μικρές και εντοπίζονται τοπικά στην περιοχή εμπλοκής με τα πλανητικά γρανάζια, γεγονός που επιβεβαιώνει την υψηλή ακαμψία του στοιχείου λόγω της πακτωμένης στήριξης και της γεωμετρικής του μορφής.

Αντίστοιχα, η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων von Mises παρουσιάζει χαμηλές μέγιστες τιμές. Συγκεκριμένα, για το αρχικό συναρμολογημένο μοντέλο η μέγιστη ισοδύναμη τάση ανέρχεται σε 4,56 MPa, ενώ για το γενετικά βελτιστοποιημένο μοντέλο φθάνει τα 5,57 MPa. Και στις δύο περιπτώσεις, οι

αναπτυσσόμενες τάσεις παραμένουν σημαντικά χαμηλότερες από το όριο διαρροής του υλικού PLA, διασφαλίζοντας ότι το δακτυλιοειδές γρανάζι λειτουργεί αποκλειστικά εντός της ελαστικής περιοχής.

Η μάζα του δακτυλιοειδούς γραναζιού είναι ίση με $6,8302 \times 10^{-2}$ kg και παραμένει αμετάβλητη και στα δύο μοντέλα, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι οι μικρές διαφοροποιήσεις στις τιμές μετατόπισης και τάσεων οφείλονται αποκλειστικά στη διαφοροποίηση της δυσκαμψίας των υπόλοιπων εξαρτημάτων της συναρμολόγησης και όχι σε αλλαγές της γεωμετρίας του ίδιου του ring gear. Συνολικά, το δακτυλιοειδές γρανάζι παρουσιάζει αμελητέες παραμορφώσεις και χαμηλά επίπεδα τάσεων, λειτουργώντας ως άκαμπτο και αξιόπιστο δομικό στοιχείο του πλανητικού μηχανισμού.





(γ)

(δ)

Σχήμα 6.11: Κατανομή συνολικής μετατόπισης (total deformation) και ισοδύναμων τάσεων von Mises στο δακτυλιοειδές γρανάζι (ring gear) από αριθμητική ανάλυση στο ANSYS. (α), (β) Αρχικός συναρμολογημένος πλανητικός μηχανισμός. (γ), (δ) Γενετικά βελτιστοποιημένος συναρμολογημένος μηχανισμός. Το δακτυλιοειδές γρανάζι θεωρείται πακτωμένο και δεν έχει υποστεί γενετική βελτιστοποίηση. Η μάζα του παραμένει ίση με $6,8302 \times 10^{-2}$ kg και στις δύο περιπτώσεις. (Ansys)

6.5. Συνοπτική σύγκριση σχεδιασμού πριν και μετά την γενετική βελτιστοποίηση

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται συνοπτικά η σύγκριση της μηχανικής συμπεριφοράς του αρχικού και του γενετικά βελτιστοποιημένου πλανητικού μηχανισμού, όπως αυτή προέκυψε από τις αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων στο ANSYS. Η σύγκριση βασίζεται σε βασικά μεγέθη αξιολόγησης, όπως η μάζα των επιμέρους εξαρτημάτων, οι συνολικές μετατοπίσεις, οι ισοδύναμες τάσεις von Mises και ο συντελεστής ασφάλειας, υπό ταυτόσημες συνθήκες φόρτισης και οριακές συνθήκες.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η γενετική βελτιστοποίηση οδήγησε σε σημαντική μείωση της μάζας των κρίσιμων δομικών στοιχείων του πλανητικού μηχανισμού. Ειδικότερα, ο φορέας πλανητών, τα πλανητικά γρανάζια και το γρανάζι ήλιος παρουσιάζουν αισθητή ελάφρυνση, ενώ το δακτυλιοειδές γρανάζι διατηρεί αμετάβλητη γεωμετρία και μάζα, καθώς δεν

υπέστη γενετική βελτιστοποίηση και θεωρήθηκε πακτωμένο. Η συνολική μείωση μάζας της συναρμολόγησης επιτυγχάνεται χωρίς αντίστοιχη επιδείνωση της μηχανικής συμπεριφοράς.

Σε ό,τι αφορά τις συνολικές μετατοπίσεις, οι γενετικά βελτιστοποιημένες γεωμετρίες παρουσιάζουν τιμές συγκρίσιμες ή και ελαφρώς μειωμένες σε σχέση με τον αρχικό σχεδιασμό, γεγονός που υποδηλώνει ότι η ανακατανομή του υλικού πραγματοποιήθηκε με τρόπο που διατηρεί ή και βελτιώνει τη συνολική ακαμψία της κατασκευής. Οι μέγιστες μετατοπίσεις εντοπίζονται στα ίδια κρίσιμα σημεία και στις δύο περιπτώσεις, κυρίως στις περιοχές εφαρμογής φορτίων και στις συνδέσεις με τον κεντρικό άξονα.

Αντίστοιχα, η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων von Mises δείχνει ότι, παρότι σε ορισμένα εξαρτήματα παρατηρείται τοπική αύξηση των τάσεων μετά τη γενετική βελτιστοποίηση, οι μέγιστες τιμές παραμένουν σε όλες τις περιπτώσεις σημαντικά χαμηλότερες από το όριο διαρροής του υλικού PLA. Ως αποτέλεσμα, ο συντελεστής ασφάλειας διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα, επιβεβαιώνοντας ότι η λειτουργία του πλανητικού μηχανισμού πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου εντός της ελαστικής περιοχής.

Συνολικά, η σύγκριση καταδεικνύει ότι η γενετική βελτιστοποίηση επιτυγχάνει τον βασικό σχεδιαστικό στόχο της σημαντικής μείωσης μάζας, χωρίς να θυσιάζεται η δομική ακεραιότητα, η ακαμψία και η μηχανική αξιοπιστία του πλανητικού μηχανισμού. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη χρησιμότητα του γενετικού σχεδιασμού ως αποτελεσματικού εργαλείου για την ανάπτυξη ελαφρών και μηχανολογικά αποδοτικών κατασκευών, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με αξιόπιστη αριθμητική επαλήθευση σε περιβάλλον ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

Πίνακας 6.1: Συγκριτικός πίνακας μηχανικών μεγεθών επιμέρους εξαρτημάτων και συνολικής συναρμολόγησης του πλανητικού μηχανισμού πριν και μετά τη γενετική βελτιστοποίηση. Παρουσιάζονται οι μάζες ανά τεμάχιο και συνολικά, η ποσοστιαία μείωση μάζας, οι μέγιστες μετατοπίσεις, οι μέγιστες ισοδύναμες τάσεις von Mises και οι ελάχιστοι συντελεστές ασφάλειας, όπως προέκυψαν από αριθμητική ανάλυση στο ANSYS.

Εξάρτημα	Πλήθος	Μάζα/τεμ. (Αρχικό) [kg]	Μάζα/τεμ. (Βελτιστ.) [kg]	Συνολική μάζα (Αρχικό) [kg]	Συνολική μάζα (Βελτιστ.) [kg]	Μείωση μάζας [kg]	Μείωση μάζας [%]	Μέγ. μετατόπιση (Αρχικό) [mm]	Μέγ. μετατόπιση (Βελτιστ.) [mm]	Μέγ. τάση von Mises (Αρχικό) [MPa]	Μέγ. τάση von Mises (Βελτιστ.) [MPa]	Ελάχ. συντελεστής ασφαλείας (Αρχικό)	Ελάχ. συντελεστής ασφαλείας (Βελτιστ.)
Πλανητικά γρανάζια	3	0,037	0,017	0,111	0,050	0,061	55,3%	1,454	1,366	8,37	11,49		
Γρανάζι ήλιος	1	0,013	0,010	0,013	0,010	0,003	22,2%	1,831	1,772	13,46	21,68		
Φορέας πλανητών	1	0,050	0,035	0,050	0,035	0,015	29,5%	0,755	0,674	21,01	20,50		
Δακτυλιοειδές γρανάζι	1	0,068	0,068	0,068	0,068	0,000	0,00%	0,008	0,009	4,56	5,57		
Συναρμολ. Μηχανισμός	1			0,242	0,163	0,079	32,6%	1,831	1,772	21,01	21,68	2,58	2,49

Από τον Πίνακα 6.1 προκύπτει ότι η εφαρμογή της γενετικής βελτιστοποίησης οδήγησε σε σημαντική μείωση της μάζας των περισσότερων επιμέρους εξαρτημάτων του πλανητικού μηχανισμού, χωρίς να παρατηρείται υποβάθμιση της μηχανικής τους συμπεριφοράς. Η μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση μάζας καταγράφεται στα πλανητικά γρανάζια, όπου επιτυγχάνεται μείωση της τάξης του 55,3%, ενώ οι μέγιστες μετατοπίσεις μειώνονται ελαφρώς και οι αναπτυσσόμενες ισοδύναμες τάσεις von Mises παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα. Ο φορέας πλανητών παρουσιάζει επίσης αξιόλογη μείωση μάζας, ίση με 29,5%, συνοδευόμενη από ταυτόχρονη μείωση τόσο της μέγιστης μετατόπισης όσο και της μέγιστης τάσης, γεγονός που υποδηλώνει βελτίωση της ακαμψίας και της κατανομής των φορτίων. Το γρανάζι ήλιος εμφανίζει μικρότερη αλλά ουσιαστική μείωση μάζας (22,2%), με αύξηση των τάσεων λόγω της αφαίρεσης υλικού, οι οποίες ωστόσο παραμένουν σημαντικά χαμηλότερες από το όριο διαρροής του υλικού. Το δακτυλιοειδές γρανάζι δεν υπέστη γενετική βελτιστοποίηση, καθώς θεωρήθηκε πακτωμένο και λειτουργικά κρίσιμο, με αποτέλεσμα η μάζα και τα μηχανικά του μεγέθη να παραμένουν πρακτικά αμετάβλητα. Σε επίπεδο συνολικής συναρμολόγησης, η συνολική μάζα του μηχανισμού μειώνεται κατά 32,6%, ενώ οι μέγιστες

μετατοπίσεις και τάσεις παραμένουν συγκρίσιμες με αυτές του αρχικού σχεδιασμού και οι ελάχιστοι συντελεστές ασφάλειας παραμένουν άνω της μονάδας, επιβεβαιώνοντας τη μηχανική επάρκεια του γενετικά βελτιστοποιημένου πλανητικού μηχανισμού (Πίνακας 6.1).

7. ΑΠΟ ΤΟΝ ΓΕΝΕΤΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΑΝΗΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ

7.1 Υιοθετούμενος εκτυπωτής και ρυθμίσεις εκτύπωσης

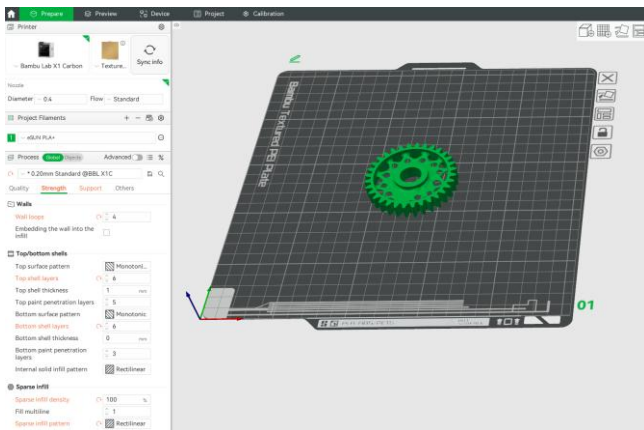
Για την κατασκευή των φυσικών πρωτοτύπων του αρχικού και του γενετικά βελτιστοποιημένου πλανητικού μηχανισμού χρησιμοποιήθηκε εκτυπωτής προσθετικής κατασκευής τύπου FDM (Fused Deposition Modeling), και συγκεκριμένα ο Bambu Lab X1 Carbon. Ο εκτυπωτής αυτός επιλέχθηκε λόγω της υψηλής ακρίβειας εκτύπωσης, της κλειστής και θερμαινόμενης θαλάμης κατασκευής, καθώς και της δυνατότητας σταθερής και επαναλήψιμης παραγωγής εξαρτημάτων με αυξημένες απαιτήσεις συναρμογής, όπως γρανάζια και φορείς πλανητών. Στο [Σχήμα 7.1](#) παρουσιάζεται ο εκτυπωτής Bambu Lab X1 Carbon που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.



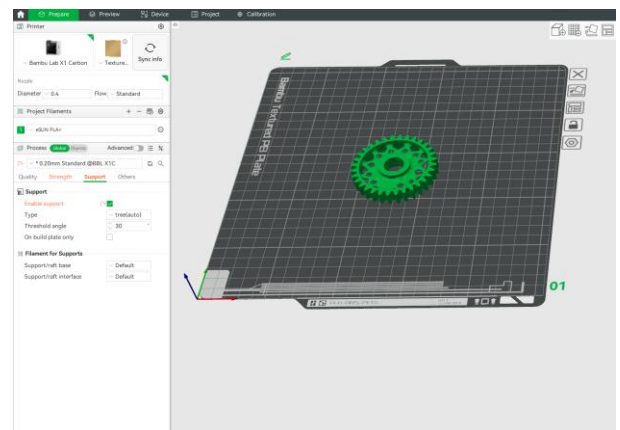
Σχήμα 7.1: Εκτυπωτής προσθετικής κατασκευής Bambu Lab X1 Carbon που χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση των εξαρτημάτων του πλανητικού μηχανισμού.

Ως υλικό εκτύπωσης επιλέχθηκε το πολυμερές PLA+ της εταιρείας eSUN (μαύρου χρώματος). Το συγκεκριμένο υλικό αποτελεί βελτιωμένη εκδοχή του συμβατικού PLA, παρουσιάζοντας αυξημένη αντοχή, βελτιωμένη συγκόλληση μεταξύ στρώσεων και καλύτερη επιφανειακή ποιότητα, χαρακτηριστικά που είναι ιδιαίτερα σημαντικά για την κατασκευή λειτουργικών μηχανολογικών εξαρτημάτων με λεπτομερή γεωμετρία. Η επιλογή του PLA+ eSUN κρίθηκε κατάλληλη για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, καθώς επιτρέπει την αξιόπιστη εκτύπωση γκρανιζών και δομικών στοιχείων, διατηρώντας ταυτόχρονα προβλέψιμη ελαστική συμπεριφορά, η οποία είναι συμβατή με τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. [42]

Οι ρυθμίσεις εκτύπωσης καθορίστηκαν μέσω του λογισμικού τεμαχισμού (slicer) του εκτυπωτή Bambu Lab X1 Carbon και παρουσιάζονται στο [Σχήμα 7.2](#). Στην [απεικόνιση \(α\)](#) του σχήματος φαίνονται οι ρυθμίσεις που σχετίζονται με τη μηχανική αντοχή και τη δομική ακεραιότητα των εκτυπωμένων εξαρτημάτων, ενώ στην [απεικόνιση \(β\)](#) παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις των υποστηρικτικών δομών.



(α)



(β)

Σχήμα 7.2: Ρυθμίσεις τεμαχισμού (slicer) για την εκτύπωση των εξαρτημάτων του πλανητικού μηχανισμού στον εκτυπωτή Bambu Lab X1 Carbon με υλικό PLA+ eSUN (μαύρο). (α) Ρυθμίσεις αντοχής και πλήρωσης. (β) Ρυθμίσεις υποστηρικτικών δομών. (Bambu Lab X1 Carbon)

Όσον αφορά τις ρυθμίσεις αντοχής (strength settings), επιλέχθηκε αυξημένος αριθμός περιμετρικών τοιχωμάτων (wall loops), ώστε να ενισχυθεί η ακαμψία των εξαρτημάτων και να περιοριστούν οι τοπικές παραμορφώσεις σε περιοχές υψηλής καταπόνησης, όπως οι ρίζες των δοντιών των γραναζιών και οι βραχίονες του φορέα πλανητών. Η πυκνότητα πλήρωσης (infill density) ρυθμίστηκε σε ενδιάμεσο επίπεδο, επιτυγχάνοντας έναν ισορροπημένο συμβιβασμό μεταξύ μηχανικής αντοχής, χρόνου εκτύπωσης και κατανάλωσης υλικού. Το μοτίβο πλήρωσης επιλέχθηκε ώστε να παρέχει σχεδόν ισοτροπική μηχανική συμπεριφορά στο εσωτερικό των εξαρτημάτων, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων πριν και μετά τη γενετική βελτιστοποίηση. Στην απεικόνιση (β) του Σχήματος 7.2 παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις των υποστηρικτικών δομών (support settings). Οι υποστηρίξεις ορίστηκαν ώστε να δημιουργούνται μόνο όπου είναι απολύτως απαραίτητο, κυρίως σε περιοχές με μεγάλες προεξοχές ή εσωτερικές κοιλότητες που προκύπτουν από τη γενετική βελτιστοποίηση. Η απόσταση επαφής μεταξύ των υποστηρίξεων και του εξαρτήματος ρυθμίστηκε κατάλληλα, ώστε να επιτρέπεται η εύκολη αφαίρεσή τους μετά την εκτύπωση, χωρίς να προκαλείται φθορά στις λειτουργικές επιφάνειες, στα δόντια των γραναζιών ή στις περιοχές συναρμογής. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίστηκε η γεωμετρική ακρίβεια και η καλή επιφανειακή ποιότητα των εκτυπωμένων εξαρτημάτων.

Ο συνδυασμός του επιλεγμένου εξοπλισμού, του υλικού PLA+ eSUN (μαύρο) και των ρυθμίσεων εκτύπωσης που παρουσιάζονται στο [Σχήμα 7.2](#) εξασφαλίζει ότι τα παραγόμενα πρωτότυπα είναι μηχανικά επαρκή, γεωμετρικά ακριβή και κατάλληλα για συναρμολόγηση και ποιοτική σύγκριση του αρχικού και του γενετικά βελτιστοποιημένου πλανητικού μηχανισμού. [43]

7.2 Τρισδιάστατη εκτύπωση επιμέρους εξαρτημάτων

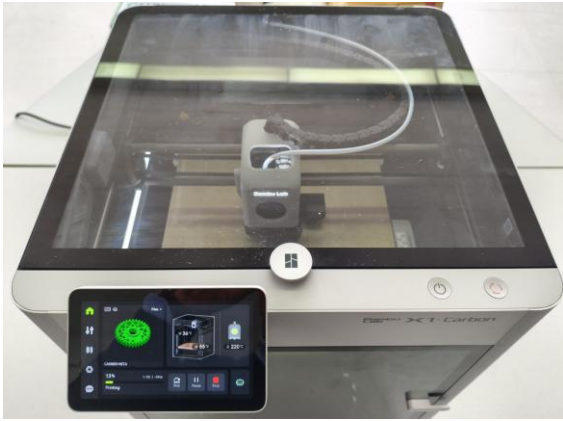
Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε η τρισδιάστατη εκτύπωση του γενετικά βελτιστοποιημένου πλανητικού γραναζιού, με σκοπό την πειραματική επιβεβαίωση της κατασκευασιμότητας της προκύπτουσας γεωμετρίας και την αξιολόγηση της ποιότητας εκτύπωσης. Η εκτύπωση υλοποιήθηκε με τον εκτυπωτή Bambu Lab X1 Carbon, χρησιμοποιώντας υλικό PLA+ eSUN μαύρου χρώματος, σύμφωνα με τις ρυθμίσεις που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Στο [Σχήμα 7.3\(α\)](#) παρουσιάζεται ο εκτυπωτής κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης. Η κλειστή κατασκευή του θαλάμου και το ελεγχόμενο θερμικό περιβάλλον συνέβαλαν στη σταθερότητα της διαδικασίας και στην αποφυγή ανεπιθύμητων παραμορφώσεων. Στο [Σχήμα 7.3\(β\)](#) απεικονίζεται το εκτυπωμένο γρανάτζι επάνω στην επιφάνεια εκτύπωσης αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, σε άνω όψη, πριν την αποκόλλησή του από το θερμαινόμενο τραπέζι.

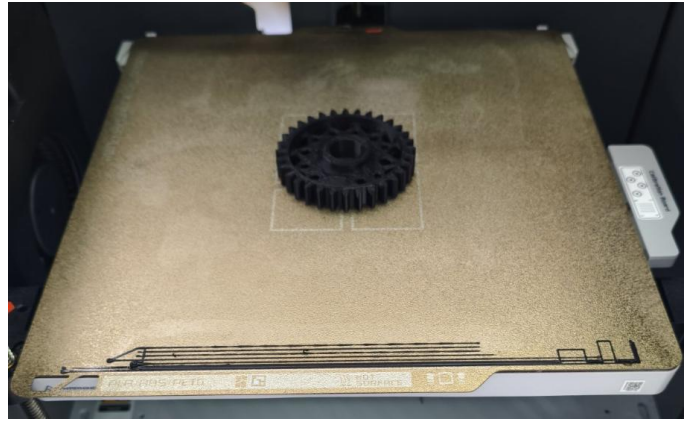
Στα [Σχήματα 7.3\(γ\)](#) και [7.3\(δ\)](#) παρουσιάζεται η τελική μορφή του γενετικά βελτιστοποιημένου πλανητικού γραναζιού σε άνω και κάτω όψη, αντίστοιχα. Είναι εμφανής η επιτυχής υλοποίηση των εσωτερικών κοιλοτήτων και της οργανικής γεωμετρίας που προέκυψε από τη διαδικασία γενετικού σχεδιασμού. Οι οδοντώσεις εμφανίζουν ικανοποιητική ακρίβεια, ενώ η ποιότητα επιφάνειας κρίνεται επαρκής για λειτουργική συναρμολόγηση χωρίς να απαιτείται περαιτέρω μηχανική κατεργασία.

Ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι η πολύπλοκη γεωμετρία του γενετικά βελτιστοποιημένου εξαρτήματος εκτυπώθηκε επιτυχώς με τεχνολογία FDM, χωρίς εμφάνιση αστοχιών ή σοβαρών ατελειών. Το αποτέλεσμα αυτό

επιβεβαιώνει ότι οι λύσεις που προκύπτουν από τη γενετική βελτιστοποίηση είναι όχι μόνο αριθμητικά αποδοτικές, αλλά και πρακτικά κατασκευάσιμες με εμπορικά διαθέσιμο εξοπλισμό προσθετικής κατασκευής. [43]



(α)



(β)



(γ)



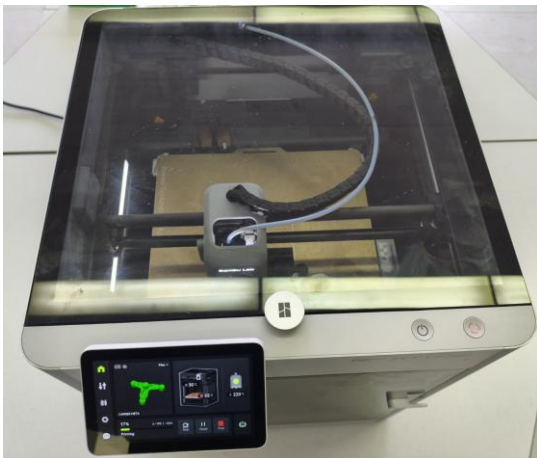
(δ)

Σχήμα 7.3: Τρισδιάστατη εκτύπωση γενετικά βελτιστοποιημένου πλανητικού γραναζιού με εκτυπωτή Bambu Lab X1 Carbon και υλικό PLA+ eSUN (μαύρο). (α) Ο εκτυπωτής κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. (β) Εκτυπωμένο γρανάκι επάνω στην επιφάνεια εκτύπωσης μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας (άνω όψη). (γ) Τελική μορφή γενετικά βελτιστοποιημένου γραναζιού σε άνω όψη. (δ) Τελική μορφή γενετικά βελτιστοποιημένου γραναζιού σε κάτω όψη. (Bambu Lab X1 Carbon)

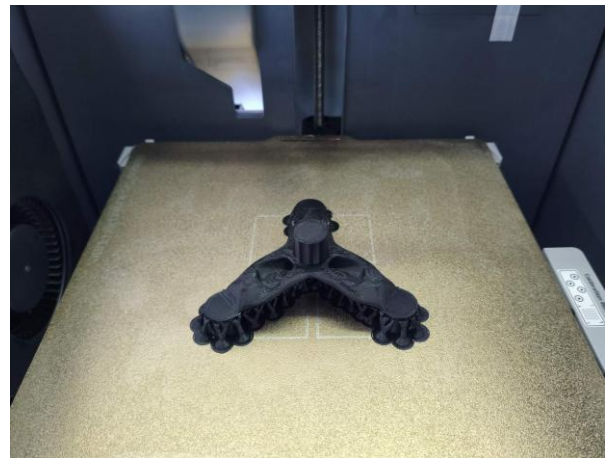
Σε συνέχεια της παρουσίασης της τρισδιάστατης εκτύπωσης του γενετικά βελτιστοποιημένου πλανητικού γραναζιού, παρουσιάζεται η εκτύπωση του φορέα πλανητών. Στο [Σχήμα 7.4\(α\)](#) απεικονίζεται η διαδικασία εκτύπωσης

του γενετικά βελτιστοποιημένου φορέα πλανητών, ενώ στο [Σχήμα 7.4\(β\)](#) παρουσιάζεται το εξάρτημα αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης στην επιφάνεια κατασκευής. Ο φορέας, παρά την ιδιαίτερα πολύπλοκη και οργανική γεωμετρία που προέκυψε από τη γενετική βελτιστοποίηση, εκτυπώθηκε επιτυχώς χωρίς εμφανείς αστοχίες ή παραμορφώσεις.

Στα [Σχήματα 7.4\(γ\)](#) και [7.4\(δ\)](#) παρουσιάζεται ο εκτυπωμένος φορέας πλανητών σε άνω και κάτω όψη αντίστοιχα. Η απεικόνιση αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση της τελικής κατανομής του υλικού, της ποιότητας της επιφανειακής υφής και της ακρίβειας στις περιοχές συναρμολόγησης, όπως οι οπές των πείρων και η περιοχή σύνδεσης με τον κεντρικό άξονα. Η ποιότητα εκτύπωσης κρίνεται ικανοποιητική, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρική πολυπλοκότητα του εξαρτήματος.



(α)



(β)



(γ)



(δ)

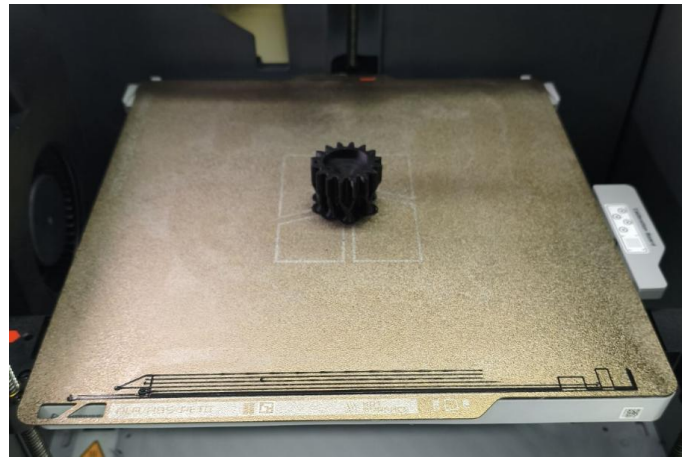
Σχήμα 7.4: Τρισδιάστατη εκτύπωση γενετικά βελτιστοποιημένου φορέα πλανητών. (α) Εκτυπωτής κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης. (β) Ολοκλήρωση εκτύπωσης του φορέα στην επιφάνεια κατασκευής. (γ) Άνω όψη εκτυπωμένου φορέα. (δ) Κάτω όψη εκτυπωμένου φορέα. (Bambu Lab X1 Carbon)

Αντίστοιχα, το γρανάζι ήλιος εκτυπώθηκε με επιτυχία, διατηρώντας τη γεωμετρική ακρίβεια των δοντιών και των κρίσιμων επιφανειών επαφής.

Στο [Σχήμα 7.5](#) παρουσιάζεται η τρισδιάστατη εκτύπωση του γενετικά βελτιστοποιημένου γραναζιού ήλιου (sun gear). Στην [απεικόνιση \(α\)](#) φαίνεται ο εκτυπωτής Bambu Lab X1 Carbon κατά τη διάρκεια της εκτυπωτικής διαδικασίας, ενώ στην [απεικόνιση \(β\)](#) παρουσιάζεται το γρανάζι ήλιου αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης επάνω στην επιφάνεια κατασκευής. Στις [απεικονίσεις \(γ\) και \(δ\)](#) παρουσιάζονται αντίστοιχα η άνω και η κάτω όψη του εκτυπωμένου εξαρτήματος, επιτρέποντας την αξιολόγηση της ποιότητας επιφάνειας και της ακρίβειας των οδοντώσεων. Παρατηρείται ότι τα δόντια του γραναζιού έχουν αποτυπωθεί με σαφήνεια και ομοιομορφία, χωρίς εμφανείς αστοχίες, παραμορφώσεις ή αποκολλήσεις υλικού. Ιδιαίτερα, οι κρίσιμες επιφάνειες επαφής και η κεντρική οπή εμφανίζουν καλή γεωμετρική πιστότητα, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η επιλεγμένη τεχνολογία προσθετικής κατασκευής και οι ρυθμίσεις εκτύπωσης είναι κατάλληλες για την κατασκευή λειτουργικών γραναζιών με αυξημένες απαιτήσεις ακρίβειας.



(α)



(β)



(γ)



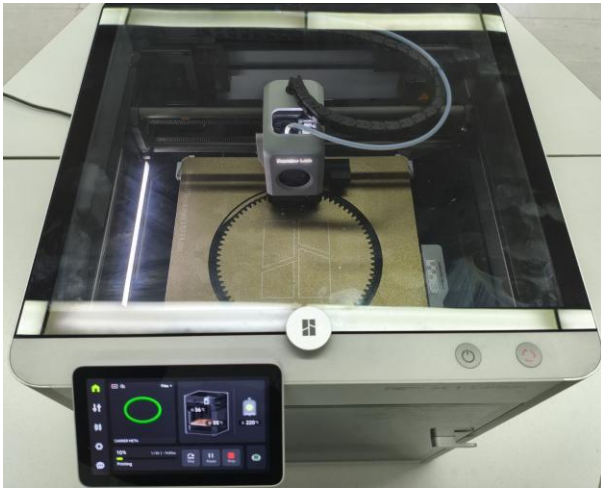
(δ)

Σχήμα 7.5: Τρισδιάστατη εκτύπωση γενετικά βελτιστοποιημένου γραναζιού ήλιου. (α) Εκτυπωτής κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης. (β) Ολοκλήρωση εκτύπωσης του γραναζιού ήλιου. (γ) Άνω όψη εκτυπωμένου γραναζιού ήλιου. (δ) Κάτω όψη γραναζιού ήλιου. (Bambu Lab X1 Carbon)

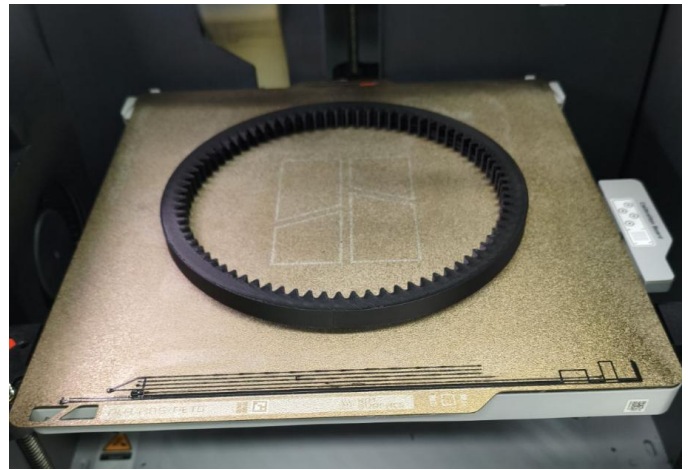
Η δακτυλοειδής στεφάνη, η οποία δεν υπέστη γενετική βελτιστοποίηση, εκτυπώθηκε ως ενιαίο και άκαμπτο δομικό στοιχείο, λειτουργώντας ως σταθερό περίβλημα του πλανητικού μηχανισμού.

Στο [Σχήμα 7.6](#) παρουσιάζεται η διαδικασία και το τελικό αποτέλεσμα της τρισδιάστατης εκτύπωσης της δακτυλοειδούς στεφάνης (ring gear) του πλανητικού μηχανισμού. Αρχικά, στην [απεικόνιση \(α\)](#) φαίνεται ο εκτυπωτής Bambu Lab X1 Carbon κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, ενώ στην [απεικόνιση](#)

(β) παρουσιάζεται η ολοκλήρωση της εκτύπωσης της στεφάνης επάνω στην επιφάνεια κατασκευής. Στις απεικονίσεις (γ) και (δ) παρουσιάζονται αντίστοιχα η άνω και η κάτω όψη του εκτυπωμένου εξαρτήματος, επιτρέποντας την αξιολόγηση της γεωμετρικής ακρίβειας, της ποιότητας επιφάνειας και της μορφολογίας των οδοντώσεων. Παρατηρείται ότι η εκτύπωση πραγματοποιήθηκε χωρίς εμφανείς αστοχίες, παραμορφώσεις ή αποκολλήσεις από την επιφάνεια κατασκευής, γεγονός που υποδηλώνει σωστή επιλογή προσανατολισμού και παραμέτρων εκτύπωσης. Η ομοιομορφία των δοντιών και η καλή αναπαραγωγή της εσωτερικής οδόντωσης επιβεβαιώνουν την καταλληλότητα της επιλεγμένης τεχνολογίας και του εκτυπωτικού εξοπλισμού για την κατασκευή λειτουργικών γранаζιών προσθετικής κατασκευής.



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 7.6: Τρισδιάστατη εκτύπωση δακτυλιοειδούς στεφάνης. (α) Εκτυπωτής κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης. (β) Ολοκλήρωση εκτύπωσης του φορέα στην επιφάνεια κατασκευής. (γ) Άνω όψη εκτυπωμένης δακτυλιοειδούς στεφάνης. (δ) Κάτω όψη δακτυλιοειδούς στεφάνης. (Bambu Lab X1 Carbon)

Συνολικά, η επιτυχής τρισδιάστατη εκτύπωση όλων των επιμέρους εξαρτημάτων επιβεβαιώνει την πρακτική κατασκευασιμότητα τόσο των αρχικών όσο και των γενετικά βελτιστοποιημένων γεωμετριών. Το σύνολο των εκτυπωμένων μερών είναι κατάλληλο για συναρμολόγηση, γεγονός που επιτρέπει τη μετάβαση στο επόμενο στάδιο της εργασίας, που αφορά την πλήρη συναρμολόγηση και αξιολόγηση του πλανητικού μηχανισμού.

7.3. Συναρμολόγηση και αξιολόγηση γενετικά βελτιστοποιημένου πλανητικού μηχανισμού

Η συναρμολόγηση του γενετικά βελτιστοποιημένου πλανητικού μηχανισμού πραγματοποιήθηκε χωρίς την εμφάνιση οποιωνδήποτε δυσκολιών, επιβεβαιώνοντας την ορθότητα τόσο του γεωμετρικού σχεδιασμού όσο και της επιλεγμένης στρατηγικής τρισδιάστατης εκτύπωσης. Όλα τα επιμέρους εξαρτήματα, δηλαδή τα πλανητικά γρανάζια, το γρανάζι ήλιος, ο φορέας πλανητών και το δακτυλιοειδές γρανάζι, τοποθετήθηκαν ομαλά στις προβλεπόμενες θέσεις τους, χωρίς να απαιτηθεί μεταγενέστερη κατεργασία ή διόρθωση διαστάσεων.

Οι ανοχές συναρμογής αποδείχθηκαν επαρκείς, επιτρέποντας την ελεύθερη περιστροφή των γραναζιών και την ομαλή συνεργασία τους. Κατά τη χειροκίνητη δοκιμή λειτουργίας, η κινηματική συμπεριφορά του μηχανισμού ήταν άριστη, με ομαλή μετάδοση της κίνησης από το γρανάζι ήλιο προς τα πλανητικά γρανάζια και τον φορέα, χωρίς εμφανή εμπλοκή, μπλοκάρισμα ή ανεπιθύμητες τριβές. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει ότι η γενετική βελτιστοποίηση, παρά τη σημαντική αφαίρεση υλικού, δεν επηρέασε αρνητικά τη λειτουργικότητα ούτε τη γεωμετρική ακρίβεια των κρίσιμων επιφανειών επαφής.

Για την πειραματική αξιολόγηση του βελτιστοποιημένου σχεδιασμού πραγματοποιήθηκαν ζυγίσεις όλων των εκτυπωμένων εξαρτημάτων, όπως παρουσιάζεται στο [Σχήμα 7.7](#). Οι μετρούμενες μάζες συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες αριθμητικές τιμές που είχαν προκύψει από το υπολογιστικό μοντέλο. Η σύγκριση αυτή συνοψίζεται στον [Πίνακα 7.3](#), όπου παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων. Οι μικρές αποκλίσεις που καταγράφονται αποδίδονται στη φύση της προσθετικής κατασκευής, στη δομή πλήρωσης (infill), στις παραμέτρους εκτύπωσης αλλά και στη θεωρούμενη τιμή πυκνότητας στα αριθμητικά μοντέλα.



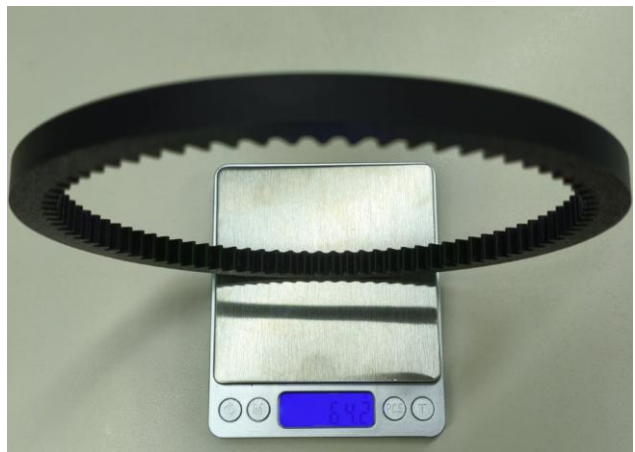
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 7.7: Πειραματική ζύγιση επιμέρους εξαρτημάτων του γενετικά βελτιστοποιημένου πλανητικού μηχανισμού. (α) Πλανητικό γρανάζι, (β) φορέας πλανητών, (γ) γρανάζι ήλιος, (δ) δακτυλιοειδές γρανάζι. Οι μετρούμενες μάζες χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα. (Bambu Lab X1 Carbon)

Η επιτυχής συναρμολόγηση του μηχανισμού παρουσιάζεται στο [Σχήμα 7.8](#), όπου απεικονίζονται η άνω και η κάτω όψη του συναρμολογημένου πλανητικού συστήματος. Παρατηρείται σωστή τοποθέτηση όλων των εξαρτημάτων και ομοιόμορφη γεωμετρική συμβατότητα, γεγονός που

επιβεβαιώνει τη δυνατότητα άμεσης μετάβασης από τον ψηφιακό, γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό σε λειτουργικά φυσικά πρωτότυπα.



(α)



(β)

Σχήμα 7.8: Συναρμολογημένος γενετικά βελτιστοποιημένος πλανητικός μηχανισμός. (α) Άνω όψη συναρμολογημένου μηχανισμού, (β) κάτω όψη. Παρατηρείται ομαλή τοποθέτηση όλων των εξαρτημάτων και σωστή συνεργασία των γραναζιών. (Bambu Lab X1 Carbon)

Πίνακας 7.1: Συγκριτικός πίνακας αριθμητικών και πειραματικών μαζών (γενετικά βελτιστοποιημένος σχεδιασμός).

Εξάρτημα	Πλήθος	Αριθμητική μάζα/τεμ. [g]	Πειραματική μάζα/τεμ. [g]	Απόκλιση [%]
<i>Πλανητικό γρανάζι</i>	3	16,51	15,4	6,7
<i>Γρανάζι ήλιος</i>	1	10,06	9,4	6,6
<i>Φορέας πλανητών</i>	1	35,36	33,4	5,5
<i>Δακτυλιοειδές γρανάζι</i>	1	68,3	64,2	6,0
<i>Σύνολο συναρμολόγησης</i>	–	163,24	154,4	5,4

Συνολικά, η άριστη κινηματική συμπεριφορά, η επιτυχής συναρμολόγηση και η συμφωνία πειραματικών–αριθμητικών βαρών αποδεικνύουν ότι ο γενετικά βελτιστοποιημένος πλανητικός μηχανισμός πληροί τόσο τα μηχανικά όσο και τα κατασκευαστικά κριτήρια, καθιστώντας τη μεθοδολογία κατάλληλη για εφαρμογές πραγματικού μηχανολογικού σχεδιασμού.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε ολοκληρωμένη μελέτη σχεδιασμού, γενετικής βελτιστοποίησης, αριθμητικής αξιολόγησης και πειραματικής επαλήθευσης ενός πλανητικού μηχανισμού γранаζιών, με έμφαση στη μείωση μάζας και στη διατήρηση της μηχανικής και λειτουργικής αξιοπιστίας. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε συνδύασε υπολογιστικά εργαλεία σύγχρονου μηχανολογικού σχεδιασμού με πειραματική επαλήθευση μέσω προσθετικής κατασκευής, καλύπτοντας ολόκληρη τη διαδρομή από τον ψηφιακό σχεδιασμό έως το φυσικό λειτουργικό πρωτότυπο.

Αρχικά, στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιήθηκε ο πλήρης παραμετρικός και κινηματικός σχεδιασμός του πλανητικού μηχανισμού στο περιβάλλον Autodesk Fusion. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στον ορισμό ρεαλιστικών κινηματικών σχέσεων, περιορισμών περιστροφής και σχέσεων εμπλοκής των γранаζιών, ώστε η προσομοίωση της μετάδοσης κίνησης να αντανακλά με ακρίβεια τη πραγματική λειτουργία του μηχανισμού. Η φάση αυτή αποτέλεσε κρίσιμο θεμέλιο για όλα τα επόμενα στάδια της εργασίας, καθώς διασφάλισε τη γεωμετρική συμβατότητα, τη σωστή κατανομή φορτίων και την ορθότητα των οριακών συνθηκών που χρησιμοποιήθηκαν τόσο στη γενετική βελτιστοποίηση όσο και στις αριθμητικές αναλύσεις.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε γενετικός σχεδιασμός (Generative Design) στα επιμέρους εξαρτήματα του μηχανισμού, δηλαδή στα πλανητικά γρανάζια, στο γρανάζι ήλιο και στον φορέα πλανητών, με στόχο τη μείωση της μάζας

μέσω ανακατανομής υλικού και όχι απλής αφαίρεσής του. Ο γενετικός σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε υπό ρεαλιστικές οριακές συνθήκες και ισοδύναμες φορτίσεις, οι οποίες προέκυψαν από τη θεωρητική ανάλυση της μετάδοσης ροπής στον πλανητικό μηχανισμό. Το δακτυλιοειδές γρανάζι δεν υποβλήθηκε σε γενετική βελτιστοποίηση, λόγω του δομικού του ρόλου και της ανάγκης διατήρησης υψηλής ακαμψίας.

Τα αποτελέσματα της γενετικής βελτιστοποίησης έδειξαν σημαντική μείωση μάζας στα επιμέρους εξαρτήματα, με χαρακτηριστικά ποσοστά μείωσης της τάξης του 55% για τα πλανητικά γρανάζια και περίπου 30% για τον φορέα πλανητών, χωρίς αντίστοιχη αύξηση των μηχανικών τάσεων. Οι παραγόμενες γεωμετρίες παρουσίασαν οργανικές μορφές και εσωτερικές κοιλότητες, απολύτως συμβατές με τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής.

Ακολούθως, στο Κεφάλαιο 6 πραγματοποιήθηκε λεπτομερής αριθμητική σύγκριση του αρχικού και του γενετικά βελτιστοποιημένου πλανητικού μηχανισμού με χρήση του ANSYS Workbench. Μέσω μη γραμμικής στατικής ανάλυσης με επαφές και τριβή, αξιολογήθηκαν οι συνολικές μετατοπίσεις, οι ισοδύναμες τάσεις von Mises και ο συντελεστής ασφάλειας του συναρμολογημένου μηχανισμού. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι, παρά τη σημαντική μείωση της μάζας, οι μέγιστες τάσεις παραμένουν εντός της ελαστικής περιοχής του υλικού PLA, ενώ οι συνολικές μετατοπίσεις παρουσιάζουν ελαφρά μείωση στον βελτιστοποιημένο σχεδιασμό, γεγονός που υποδηλώνει βελτιωμένη ακαμψία.

Στο Κεφάλαιο 7 πραγματοποιήθηκε η πειραματική επαλήθευση των αριθμητικών και σχεδιαστικών αποτελεσμάτων μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης όλων των επιμέρους εξαρτημάτων με χρήση εκτυπωτή Bambu Lab X1 Carbon. Η διαδικασία εκτύπωσης ολοκληρώθηκε επιτυχώς, χωρίς προβλήματα ακρίβειας ή κατασκευαστικής αστοχίας, επιβεβαιώνοντας την κατασκευασσιμότητα των γενετικά βελτιστοποιημένων γεωμετριών. Η συναρμολόγηση του μηχανισμού πραγματοποιήθηκε χωρίς ανάγκη μεταγενέστερης κατεργασίας, ενώ η κινηματική συμπεριφορά του συναρμολογημένου συστήματος κρίθηκε άψογη, με ομαλή μετάδοση της κίνησης και απουσία ανεπιθύμητων τριβών ή εμπλοκών.

Οι πειραματικές ζυγίσεις των εκτυπωμένων εξαρτημάτων έδειξαν πολύ καλή συμφωνία με τις αντίστοιχες αριθμητικές τιμές μάζας, με μικρές αποκλίσεις

που αποδίδονται στη φύση της προσθετικής κατασκευής και στις παραμέτρους εκτύπωσης. Η σύγκλιση αυτή ενισχύει την αξιοπιστία της αριθμητικής προσέγγισης και τεκμηριώνει τη δυνατότητα μετάβασης από τον ψηφιακό γενετικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό σε πραγματικά λειτουργικά πρωτότυπα.

Συνολικά, η παρούσα διπλωματική εργασία αποδεικνύει ότι ο συνδυασμός κινηματικά ορθού παραμετρικού σχεδιασμού, γενετικής βελτιστοποίησης, προχωρημένης αριθμητικής ανάλυσης και πειραματικής επαλήθευσης αποτελεί μια ολοκληρωμένη και αξιόπιστη μεθοδολογία σύγχρονου μηχανολογικού σχεδιασμού. Η μεθοδολογία αυτή είναι άμεσα εφαρμόσιμη σε πραγματικές μηχανολογικές εφαρμογές, ιδιαίτερα σε συστήματα μετάδοσης κίνησης όπου η μείωση μάζας, η αποδοτικότητα και η κατασκευασιμότητα αποτελούν κρίσιμα σχεδιαστικά κριτήρια.

Τέλος, αξίζει να επισημανθεί ότι η συνολική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν περιορίζεται αποκλειστικά σε πολυμερικά εξαρτήματα και εφαρμογές χαμηλής φόρτισης. Αντιθέτως, μπορεί να επεκταθεί και σε μεταλλικά εξαρτήματα μετάδοσης κίνησης που κατασκευάζονται με τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής, όπως Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM) ή Binder Jetting. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η γενετική βελτιστοποίηση μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανάπτυξη ελαφρύτερων και δομικά αποδοτικότερων γεωμετριών, ενώ η συνδυασμένη χρήση προχωρημένης αριθμητικής ανάλυσης και πειραματικής επαλήθευσης μπορεί να διασφαλίσει τη μηχανική αντοχή, την κόπωση και τη λειτουργική αξιοπιστία των εξαρτημάτων. Η προοπτική αυτή καθιστά τη μεθοδολογία ιδιαίτερα ελκυστική για βιομηχανικές εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων, όπου η μείωση μάζας και η αποδοτική μετάδοση ισχύος αποτελούν κρίσιμα σχεδιαστικά κριτήρια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Planetary Gear Trains ,Kiril Arnaudov and Dimitar Petkov Karaivanov ,2019
2. <https://www.regalrexnord.com/regal-rexnord-insights/what-is-a-planetary-gear>
3. Genetic Algorithm and its Applications to Mechanical Engineering: A Review
Author links open overlay pane I Ms. Trupti Bhoskar a, Mr. Omkar K. Kulkarni a, Mr. Ninad K. Kulkarni a, Ms. Sujata L. Patekar a, G.M. Kakandikar Dr. b, V.M. Nandedkar Dr. Pages 2624-2630
4. Μελέτη, σχεδιασμός και ανάπτυξη προϊόντος με έμφαση στην επιλογή υλικού και στις τεχνολογίες παραγωγής, περίπτωση οδοντωτού τροχού ,Καρκάνης Μανούσος, 2012
5. "Autodesk Fusion 360 - Generative Design for Engineers" – Autodesk e-Learning
6. "Designing Spur and Planetary Gears in Fusion 360" – YouTube tutorials by Autodesk
7. Kinematic and Structural Analysis of Planetary Gear Trains" –Engineering Research Papers
8. T. Schulze, C. Hartmann-Gerlach, and B. Schlecht, Calculation of Load Distribution in Planetary Gears for an Effective Gear Design Process, AGMA, Oct.2010.

9. John Argyris, Alfonso Fuentes, Faydor L. Litvin, Computerized Integrated Approach for Design and Stress Analysis of Spiral Bevel Gears, *Comput. Methods, Appl. Mech. Engrg.* 191 (2002), pp. 1057– 1095.
10. J. L. Litvin, Alfonso Fuentes, Daniele Vecchiato, and Ignacio Gonzalez-Perez, *New Design and Improvement of Planetary Gear Trains*, NASA/CR—2004-213101, July 2004
11. Hüseyin Filiza, S. Olgunera, and E. Evyapanb, "A Study on Optimization of Planetary Gear Trains", Special issue of the 3rd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering, Vol. 132, 2017
12. «Εκτίμηση Βαθμού Απόδοσης Πλανητικών Μηχανισμών Μετάδοσης Κίνησης με Υπολογιστικές Μεθόδους» Σταύρος Αθανασόπουλος ΕΜΠ 2017
13. *Planetary Gear Analysis – deformation induced misalignment and optimization* Martin Jonsson
14. Tjernberg. A. (2001). Load distribution in the axial direction in a spline coupling. *Engineering Failure Analysis* 8(6) p. 557-570.
15. Alfredsson, B. (ed.) (2014). *Handbok och formelsamling i hållfasthetslära*. Stockholm: Institutionen för hållfasthetslära, KTH.
16. Paridhi Rai and Asim Gopal Barman, "Design Optimization of Spur Gear using SA and RCGA", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018.
17. G Pardhiv and P Srinivas, "Material Selection for Optimum Design of Planetary Gear Train used in Automobile Gear Box", *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*, ISSN: 2455-3778, Volume 5, 2019

18. Hüseyin Filiza, S. Olgunera, and E. Evyapanb, "A Study on Optimization of Planetary Gear Trains", Special issue of the 3rd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering, Vol. 132, 2017.
19. Zanak Patel and Mihir Patel, "Design, Analysis and Optimization of a Planetary Gearbox: A Review", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181, 2016.
20. Multi-Objective Optimization of Planetary Gear Train Using Genetic Algorithm
September 2022
[Journal of International Society for Science and Engineerin](#)
21. Goldberg, D. E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Reading: Addison-Wesley
22. Kinnear, K. E. (1994). A Perspective on the Work in this Book. In K. E. Kinnear (Ed.), Advances in Genetic Programming (pp. 3-17). Cambridge: MIT Press
23. Mitchell, M. (1995). Genetic Algorithms: An Overview. Complexity, 1(1), 31-39.
24. Haupt, R. L., & Haupt, S. E. (1998). Practical Genetic Algorithms. New York: WileyInterscience.
25. Haupt, R. L., & Haupt, S. E. (2004). Practical Genetic Algorithms (2nd ed.). Hoboken: Wiley
26. Mitchell, M. (1996). An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge: MIT Press.

27. ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΣΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΜΠΑΛΤΖΟΓΛΟΥ Δ. ΕΛΕΝΗ ,ΕΜΠ, 2020
28. Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). Manufacturing Engineering and Technology. Pearson.
29. Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2002). Concepts and Applications of Finite Element Analysis. John Wiley & Sons.
30. Groover, M. P. (2015). Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. Prentice Hall.
31. Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., & Hui, D. (2018). Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges. Composites Part B: Engineering, 143, 172–196.
32. <https://www.twi-global.com>
33. <https://www.autodesk.com>
34. Fusion 360 (περιγραφή)
35. <https://www.ijraset.com>
36. <https://www.ansys.com>
37. <https://ansyshelp.ansys.com>
38. <https://www.mechead.com>
39. Ansys (περιγραφή)
40. <https://ansyshelp.ansys.com>
41. <https://bambulab.com>
42. <https://www.makerverse.com>