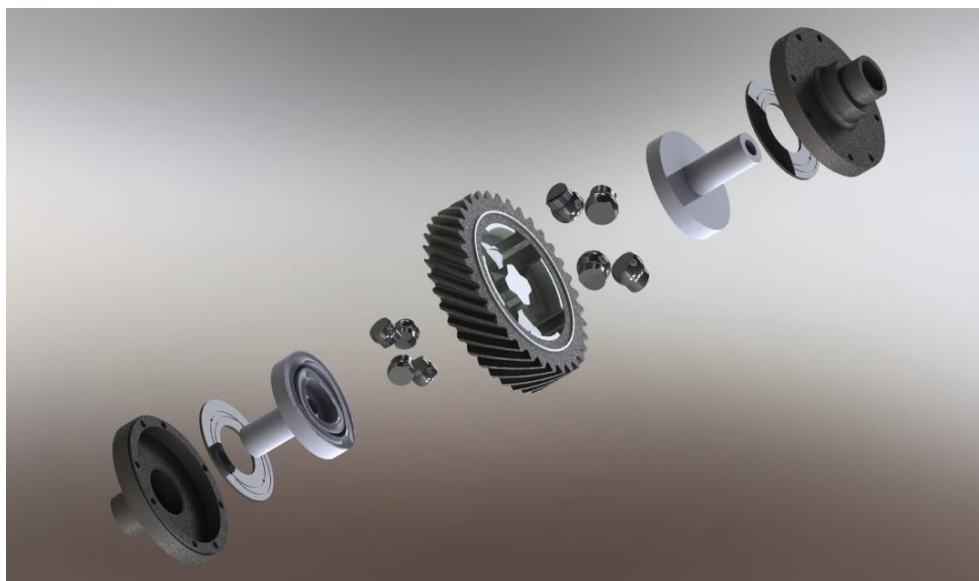




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

**Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός Ένσφαιρου
Διαφορικού και Ανάλυση με τη Μέθοδο των
Πεπερασμένων Στοιχείων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
ΓΕΩΡΓΙΑΔΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ



Επιβλέπων Καθηγητής : Χρ. Προβατίδης

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός Ένσφαιρου
Διαφορικού και Ανάλυση με τη Μέθοδο των
Πεπερασμένων Στοιχείων

(Υπογραφή)

.....

ΓΕΩΡΓΙΑΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Σπουδαστής Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

© 2011 – All rights reserved

Ευχαριστίες

Αισθάνομαι την βαθιά υποχρέωση να ευχαριστήσω θερμά τους ακολούθως αναφερομένους, διότι χωρίς την ουσιαστική συνεισφορά τους δεν θα ήταν δυνατή η αποτελεσματική υλοποίηση της Διπλωματικής μου Εργασίας, ούτε θα είχα αποκομίσει τον πλούτο γνώσεων που κατά την προσωπική μου εκτίμηση, αποτελούν σημαντικότερη προστιθέμενη αξία στο συνολικό εκπαιδευτικό έργο της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ :

- Κο. Χριστόφορο Προβατίδη, Καθηγητή Ε.Μ.Π., καταρχήν για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της εργασίας αλλά κυρίως για την πολύτιμη καθοδήγηση του στην υλοποίηση του Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού καθώς και για τις καίριες συμβουλές και λεπτομερείς επισημάνσεις του κατά την εκπόνηση της ΔΕ. Ευγνωμονώ επίσης τον κο Καθηγητή γιατί με αφορμή την ΔΕ, με καθοδήγησε πολλές φορές με την ανάπτυξη γόνιμου προβληματισμού και δημιουργικού διαλόγου σε ευρύτερα θέματα του γνωστικού τομέα της Μηχανολογίας συμβάλλοντας δραστικά με τον τρόπο αυτό, στην διεύρυνση των οριζόντων ενός φοιτητή-μηχανικού, στην Μηχανολογική σκέψη.
- Κο. Θεόδωρο Τσιριγγάκη, για την παραχώρηση του ένσφαιρου διαφορικού, τις σοφές συμβουλές που μου έδωσε σχετικά με την λειτουργία και τη δομή του αλλά και την συμβολή του σε σχετικά θέματα πρακτικής θεώρησης Μηχανικού.
- Κο. Γιώργο Καϊσαρλή, Διδάκτορα Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη συνδρομή του στην υλοποίηση της εργασίας και για τις εξαιρετικές συμβουλές-υποδείξεις του σε θέματα Μέτρησης Συντεταγμένων και Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού.

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως αντικείμενο τον Αντίστροφο Μηχανολογικό Σχεδιασμό Ένσφαιρου Διαφορικού και την Ανάλυσή του με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Ο Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός (**ΑΜΣ**) αποτελεί μια ολοκληρωμένη τεχνολογική προσέγγιση, η οποία αποσκοπεί εν προκειμένω στην αποτύπωση και την ψηφιακή τρισδιάστατη αναπαράσταση φυσικών μορφών και αντικειμένων σε υπολογιστικό περιβάλλον.

Εφαρμόζοντας λοιπόν τις συστηματικές μεθόδους του ΑΜΣ αντλούνται τα απαραίτητα τεχνικά δεδομένα που περιγράφουν πλήρως το ένσφαιρο διαφορικό, ώστε τελικά να δημιουργηθεί τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο, ικανό να αποδώσει με αξιοσημείωτη ακρίβεια τη μορφή και τη λειτουργικότητα του ένσφαιρου διαφορικού σε περιβάλλον CAD.

Ο ρόλος που διαδραματίζει ο Μηχανολόγος Μηχανικός στην αποτελεσματική εφαρμογή του ΑΜΣ είναι μείζονος σημασίας, καθώς οι σύνθετες τεχνικές του ΑΜΣ απαιτούν την εξειδικευμένη γνώση, οξεία αντίληψη και κρίση του Μηχανικού.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το ένσφαιρο διαφορικό αποτέλεσε αφετηρία για την εφαρμογή των συστηματοποιημένων μηχανολογικών τεχνικών του ΑΜΣ. Το υπόψη ένσφαιρο διαφορικό επινοήθηκε από τον Έλληνα μηχανουργό, κ.Τσιριγγάκη, ο οποίος εμπνευσμένος από το "Μηχανισμό των Αντικυθήρων" κατασκεύασε και παρουσίασε το πρωτότυπο διαφορικό το 1980. Σταδιακά το διαφορικό αυτό κατοχυρώθηκε νομικά ως δημιουργήμα του κ.Τσιριγγάκη και αποτέλεσε πατέντα σε περισσότερες από 12 χώρες.

Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ακολουθήθηκε η εξής προσέγγιση:

Αρχικά παρουσιάζεται συστηματικά η έννοια του διαφορικού, γίνεται ιστορική αναδρομή της εξέλιξης του και περιγράφονται η δομή και τα εξαρτήματά του. Σύντομη αναφορά γίνεται στα διαφορικά περιορισμένης ολίσθησης και στο διαφορικό τύπου «Μπλοκέ». Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της δομής και του τρόπου λειτουργίας του ένσφαιρου διαφορικού του κ.Τσιριγγάκη.

Εν συνεχεία διευκρινίζεται η έννοια του Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού, αναλύεται εκτενώς σε στάδια, παρουσιάζονται τα πεδία εφαρμογής του και συγκρίνεται με τον συμβατικό Μηχανολογικό Σχεδιασμό.

Ακολούθως αναλύεται η διαδικασία αποσυναρμολόγησης του διαφορικού με στόχο τη λήψη των απαραίτητων μετρήσεων. Γίνεται εισαγωγή στη δομή, λειτουργία και χρήση των Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων (CMM) και παρουσιάζεται η μεθοδολογία λήψης μετρήσεων των εξαρτημάτων του ένσφαιρου διαφορικού στη CMM του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και Αντιστρόφου Σχεδιασμού της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.. Επιπροσθέτως αναλύεται η δομή και η λειτουργία των Τρισδιάστατων Σαρωτών (3D Scanners) και πραγματοποιούνται οι επιπρόσθετες μετρήσεις στον Τρισδιάστατο Σαρωτή του Εργαστηρίου.

Αξιοποιώντας τις παραπάνω μετρήσεις, δημιουργείται σε περιβάλλον 3D CAD (SolidWorks) η

πιστή τρισδιάστατη αποτύπωση του ένσφαιρου διαφορικού του κ. Τσιριγγάκη καθώς και ένα δεύτερο παραμετρικό μοντέλο αυτού.

Με βάση τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν πραγματοποιείται η στατική και κινηματική ανάλυση του ένσφαιρου διαφορικού σε υπολογιστικό περιβάλλον, με χρήση των προγραμμάτων SolidWorks Simulation και SolidWorks Motion αντίστοιχα.

Η Διπλωματική Εργασία ολοκληρώνεται με την εκτενή παρουσίαση των συμπερασμάτων και προτείνονται πιθανές κατευθύνσεις για τη μελλοντική συνέχιση της έρευνας στον τομέα του ένσφαιρου διαφορικού.

Συμπληρωματικά πραγματοποιούνται Βιβλιογραφικές Αναφορές καθώς και ένα Παράρτημα που περιλαμβάνει απλοποιημένα μοντέλα προσέγγισης συνθετότερων φαινομένων, τα οποία εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του ένσφαιρου διαφορικού.

Abstract

The object of this thesis is Inverse Engineering of Gearless Differential and its Finite Element Analysis (FEA).

Inverse Engineering (Reverse Engineering, RE) constitutes a comprehensive technological approach the object of which is to copy and represent in digital three dimensional (3D) form structures and forms of figures and objects within a computing environment.

By applying systematically RE planning one is able to acquire the necessary technical data which fully describe the gearless differential so that a 3D model can be ultimately created which can efficiently and with remarkable precision depict the shape and function of gearless differential within a CAD environment.

The engineer's role in the effective application of RE is of major importance since the complex mechanics of RE require special know-how, sharp perception and judgment from the side of the mechanical engineer.

The starting point in the present thesis was the gearless differential on the application of the systematized technological techniques of RE. The above mentioned gearless differential was devised by Mr. Tsiriggakis, a Greek engineer, who inspired by the Antikythera mechanism, constructed and displayed the gearless differential in 1980. Gradually this device was recognized legally and earned a patent in 12 countries.

For the execution of this thesis the following process was adopted:

Initially the meaning of gearless differential is presented in a systematic way while there is a historical reference to it and a description of its structure and components. There is also a brief reference to the limited slip differential and the locking differential. Then an analytic description of the structure and the function of Mr. Tsiriggaki's gearless differential is provided.

Following that the concept of RE is illustrated with extensive analysis of its stages and with the presentation of its application fields. Alongside runs a comparison with the conventional Engineering planning scheme.

What follows is the process of disassembling the gearless differential so that the necessary measurements are taken. An introduction to the structure, function and use of the Coordinate Measuring Machine (CMM) is given. Additionally the methodology and process of how to take measurements of the spare parts of gearless differential at the CMM of the Laboratory of Rapid Prototyping and Reverse Engineering in the school of Mechanical Engineering NTUA. Further than this the structure and function of the 3D scanners is analyzed and additional measurements are taken at the 3d scanner of the Laboratory.

Taking full advantage of the above mentioned measurements, a faithful 3D replica of Mr Tsiriggaki's gearless differential is delivered alongside a second parametric model of it.

Based on the models created and with the help of the SolidWorks simulation and SolidWorks Motion programs, we achieve a static and motion analysis of gearless differential respectively in a computer environment.

The thesis concludes with the extensive presentation of the deductions and possible directions are indicated for future furthering of research on the area of gearless differential.

Alongside the project bibliographical references are made and an appendix is provided that includes simplified models for approaching more complex phenomena which come up during the operation of gearless differential.

Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή.....	11
1.1 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας.....	11
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	15
1.3 Δομή και Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας.....	15
2. Το Διαφορικό.....	17
2.1 Ορισμός και Χρήση του Διαφορικού.....	17
2.2 Ιστορική Αναδρομή.....	18
2.3. Αρχή της Διαφόρισης της Κίνησης - Ένα απλό Μηχανικό Ανάλογο.....	18
2.4 Το Συμβατικό Ανοικτού Τύπου Διαφορικό.....	20
2.4.1 Εισαγωγή στο Συμβατικό Διαφορικό.....	20
2.4.2 Λειτουργική Περιγραφή του Συμβατικού Διαφορικού.....	21
2.4.3 Κυρίαρχο Πρόβλημα Συμβατικού Ανοικτού Τύπου Διαφορικού: Απώλεια Πρόσφυσης.....	25
2.5 Διαφορικά Περιορισμένης Ολίσθησης.....	27
2.5.1 Εισαγωγή στα Διαφορικά Περιορισμένης Ολίσθησης.....	27
2.5.2 Διαφορικά Περιορισμένης Ολίσθησης με Πολύδισκους Συμπλέκτες.....	28
2.5.3 Διαφορικά Περιορισμένης Ολίσθησης με Ατέρμονες Οδοντωτούς Τροχούς τύπου Torsen.....	29
2.6. Διαφορικό τύπου “Μπλοκέ”.....	30
2.7. Ένσφαιρο διαφορικό Τσιριγγάκη.....	31
2.7.1. Σύντομο Ιστορικό Σημείωμα.....	31
2.7.2 Συγκεντρωτικά Στοιχεία Ένσφαιρου Διαφορικού Τσιριγγάκη.....	32
2.7.3 Λεπτομερής περιγραφή ένσφαιρου διαφορικού Τσιριγγάκη.....	33
2.7.4.Μηχανολογικές αρχές του ένσφαιρου διαφορικού Τσιριγγάκη.....	38
2.7.5 Η βάση της εφεύρεσης του Τσιριγγάκη.....	39
2.7.6 Λειτουργία ένσφαιρου διαφορικού Τσιριγγάκη.....	41
2.7.7. Ανάλυση του υπόψη μηχανικού συστήματος.....	42
2.7.8 Εμφανιζόμενες Δυνάμεις στο Ένσφαιρο Διαφορικό.....	43
3.Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός.....	45
3.1 Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός, Ορισμοί και Αντικείμενο.....	45
3.2 Εξέλιξη και σημερινά δεδομένα.....	46
3.3 Ο Ρόλος του Μηχανολόγου Μηχανικού στον ΑΜΣ.....	47
3.4 Πεδία Εφαρμογής ΑΜΣ.....	48
3.5 Στάδια ΑΜΣ.....	49

3.6 Διάγραμμα ροής ΑΜΣ.....	50
3.7 Σύγκριση Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού με Μηχανολογικό Σχεδιασμό.....	52
4. Τριδιάσταση Ψηφιακή Σάρωση(3d Scanning) Εξαρτημάτων Ένσφαιρου Διαφορικού...	54
4.1. Το Ένσφαιρο Διαφορικό.....	54
4.2. Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων (CMM)	58
4.2.1. Εισαγωγή στη CMM	58
4.2.2.Κύριο Σώμα της CMM.....	59
4.2.3. Αισθητήρες	61
4.2.4. Σύστημα ελέγχου, συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων	62
4.2.5. Διαδικασία Μετρήσεων στη CMM	62
4.2.6. CMM Εργαστηρίου ΤΚΠ-Ε&ΑΣ Ε.Μ.Π.....	63
4.3.Διεξαγωγή μετρήσεων στη CMM	63
4.4.Τριδιάστατος Σαρωτής (3D Scanner)	72
4.4.1.Εισαγωγή στον Τριδιάστατο Σαρωτή	72
4.4.2. Τριδιάστατος Σαρωτής και Λογισμικό Εργαστηρίου ΤΚΠ-Ε&ΑΣ Ε.Μ.Π.....	74
4.5.Διαδικασία Σάρωσης Πλανήτη	76
5.Τριδιάστατη Μοντελοποίηση Ένσφαιρου Διαφορικού σε Περιβάλλον CAD.....	82
5.1.Πιστή Αποτύπωση Ένσφαιρου Διαφορικού στο περιβάλλον του SolidWorks	82
5.2.Δημιουργία Παραμετρικού Μοντέλου Ένσφαιρου Διαφορικού στο περιβάλλον του SolidWorks	96
6. Στατική και Δυναμική Ανάλυση Ένσφαιρου Διαφορικού.....	118
6.1 Βασικές Αρχές Ανάλυσης Ένσφαιρου Διαφορικού	118
6.2 Στατική Ανάλυση Ένσφαιρου Διαφορικού.....	121
6.3 Κινηματική Ανάλυση Ένσφαιρου Διαφορικού.....	138
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ και ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	155
7.1 Συμπεράσματα.....	155
7.2 Μελλοντική Εργασία.....	156
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	158
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	160

Συμβολισμοί & Συντομογραφίες

- ΔΕ Διπλωματική Εργασία
- 3D Τρισδιάστατος
- CAD Computer Aided Design
- CAM Computer Aided Manufacturing
- CAE Computer Aided Engineering
- CNC Computer Numerical Control
- FEA Finite Element Analysis
- ΜΜΣ Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων (CMM)
- ΑΜΣ Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός
- ΤΚΠ&ΑΣ (Εργαστήριο) Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Αντιστρόφου Σχεδιασμού

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπό της διπλωματικής εργασίας (ΔΕ) αποτελεί ο Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός του ένσφαιρου διαφορικού, χωρίς οδοντωτούς τροχούς, του κ.Τσιριγγάκη. Συνεπώς οι δύο βασικοί άξονες γύρω από τις οποίες δομείται η ΔΕ είναι:

- ***Ο Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός***

Ως Αντίστροφο Μηχανολογικό Σχεδιασμό (ΑΜΣ) ορίζουμε τη διαδικασία αντιγραφής/αναπαραγωγής ενός αντικειμένου, λειτουργικά και διαστασιολογικά, με την εκ' του φυσικού εξέταση και μέτρηση υπάρχοντων εξαρτημάτων με στόχο την ανάπτυξη των τεχνικών δεδομένων που αφορούν στο σύνολο των φυσικών και υλικών του χαρακτηριστικών.

Ο ΑΜΣ αποτελεί κατά συνέπεια ένα ολοκληρωμένο τεχνολογικό εργαλείο για την αποτύπωση και την ψηφιακή τρισδιάστατη αναπαράσταση φυσικών μορφών και αντικειμένων. Θεμελιώδες στάδιό του αποτελεί η συλλογή συνόλου δεδομένων από το ζητούμενο αντικείμενο, τα οποία θα επιτρέψουν την αναπαραγωγή, τεκμηρίωση, έλεγχο και ανασχεδιασμό των αντικειμένων αυτών. Γίνεται κατά συνέπεια αντιληπτό πως ο ΑΜΣ δεν περιορίζεται μόνο στο σχεδιασμό έχοντας και άλλες εξίσου σύνθετες και σημαντικές προεκτάσεις. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από αυτόν δεν είναι απλά ένα αντίγραφο ενός φυσικού αντικειμένου, αλλά αφορά στο σύνολο των τεχνολογικών παραμέτρων που αυτό ενσωματώνει.

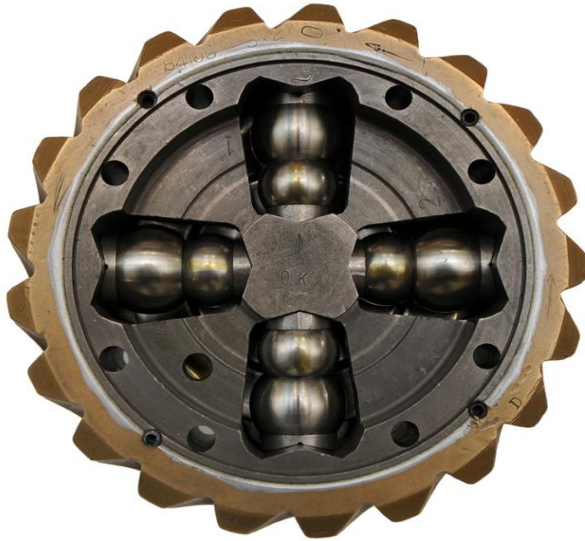
Αξίζει επίσης να αναφέρουμε πως κατά τον ΑΜΣ βρίσκει εφαρμογή πληθώρα σύγχρονων τεχνικών και τεχνολογιών όπως π.χ. η Τρισδιάστατη Σάρωση (3D Scanning), το CAD (Computer-Aided Design), το CAE (Computer-Aided Engineering), το RP/RT (Rapid Prototyping/Rapid Tooling), το CAM (Computer-Aided Manufacturing), CNC Machines (Computer Numerical Control) κ.α. Ανάλυση των παραπάνω όρων ακολουθεί στο κεφάλαιο 3 της ΔΕ.

- ***Το ένσφαιρο διαφορικό του κ.Τσιριγγάκη***

Η κατασκευή και η παρουσίαση του πρωτότυπου ένσφαιρο διαφορικού του κ.Τσιριγγάκη χρονολογείται το 1980. Σταδιακά το διαφορικό αυτό κατοχυρώθηκε νομικά ως δημιούργημα του κ.Τσιριγγάκη και αποτέλεσε πατέντα σε περισσότερες από 12 χώρες.

Το διαφορικό του Τσιριγγάκη έχει όλες τις ιδιότητες του συμβατικού διαφορικού καθώς και άλλες επιπρόσθετες. Ακόμη είναι σημαντικά απλούστερο στην κατασκευή του.

Κυρίαρχο στοιχείο, στο οποίο στηρίζει την πρωτοτυπία- καινοτομία του αποτελεί η αντικατάσταση των οδοντωτών τροχών των συμβατικών διαφορικών με ημιτονοειδή κεκλιμένα επίπεδα (έκκεντρης τροχιάς) και σφαιρικά στοιχεία κύλισης. Κατά συνέπεια ο κυρίαρχο τμήμα του μηχανισμού αποτελείται από δύο ημιτονοειδή κεκλιμένα επίπεδα, ομόκεντρα τοποθετημένα τα οποία αντικαθιστούν τους οδοντωτούς τροχούς-πλανήτες του συμβατικού διαφορικού, καθώς και από τέσσερα σετ σφαιρικών στοιχείων κύλισης, τα οποία με τη σειρά τους αντικαθιστούν τους οδοντωτούς τροχούς-δορυφόρους του συμβατικού διαφορικού.



Εικ.1.1 Ένσφαιρο διαφορικό κ.Τσιριγγάκη
(Πηγή: [http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/GD032\(640x640\).jpg](http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/GD032(640x640).jpg))

Η αρχή λειτουργίας του ένσφαιρου διαφορικού του κ.Τσιριγγάκη μπορεί να συνοψιστεί σε μία φράση: Στο ένσφαιρο διαφορικό, η κατανομή ισχύος ανάμεσα στα ημιαξόνια ρυθμίζεται από τους δορυφόρους-σφαιρικά στοιχεία κύλισης, μέσω των πλανητών-ημιτονοειδών κεκλιμένων επιπέδων πάνω στα οποία εδράζονται και κυλίνονται.

Το διαφορικό αυτό έχει περάσει από πολλές διαδικασίες ελέγχου έχοντας παράλληλα χρησιμοποιηθεί σε συμβατικό επιβατικό όχημα για πάνω από 40.000 χλμ. και κάτω από διαφορετικές συνθήκες.

Περαιτέρω ανάλυση για τον ΑΜΣ και το ένσφαιρο διαφορικό του κ.Τσιριγγάκη μπορεί να αναζητηθεί στα κεφάλαια 3 και 2 της ΔΕ αντίστοιχα.

Στα πλαίσια της ΔΕ τα στάδια που ακολουθούνται για την εφαρμογή του ΑΜΣ στο ένσφαιρο διαφορικό είναι τα παρακάτω:

i. Αποσυναμολόγηση του ένσφαιρου διαφορικού στο προσωπικό εργαστήριο του κ.Τσιριγγάκη.

Με την ουσιαστική βοήθεια και την παρακίνηση του ίδιου του δημιουργού του ένσφαιρου διαφορικού, προχωρήσαμε στην αποσυναμολόγηση του συνολικού μηχανισμού, έτσι ώστε να καθίσταται εφικτό το επόμενο στάδιο του ΑΜΣ, δηλαδή η λήψη μετρήσεων των εξαρτημάτων του διαφορικού.

Αξίζει ακόμη να πραγματοποιηθεί ειδική μνεία στον κ.Τσιριγγάκη και στα εφόδια που μας παρείχε υλικά και μη, για την μελέτη του ένσφαιρου διαφορικού. Η επικοινωνία μας με το δημιουργό του διαφορικού αποτέλεσε κομβικό σημείο για τη μελέτη του ένσφαιρου διαφορικού και κατά συνέπεια την εξέλιξη της ΔΕ, καθώς πέραν της πληθώρας των εμπειριών και πληροφοριών που δεδομένα μας προσέφερε, αποτέλεσε το έναυσμα για την περαιτέρω ενασχόλησή μας με το ένσφαιρο διαφορικό.

ii. Λήψη μετρήσεων ένσφαιρου διαφορικού.

Έχοντας στην κατοχή μας, μετά από ευγενική προσφορά του κ.Τσιριγγάκη, δείγμα του διαφορικού και έχοντας παράλληλα ολοκληρώσει τη διαδικασία αποσυναμολόγησης προβαίνουμε στη διεξαγωγή μετρήσεων (CMM Measurements, 3D Scanning) και τη γενικότερη συλλογή πληροφοριών, απαραίτητων για τη δημιουργία τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων (3D CAD Models).

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και Αντιστρόφου Σχεδιασμού της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. με τη καθοριστική και καίρια συμβολή του κ.Καϊσαρλή, Επιστημονικού Συνεργάτη Ε.Μ.Π.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν:

- Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων (CMM) με το αντίστοιχο μετρητικό λογισμικό της (PC-DMIS)
- Faro Arm Laser Scanner σε συνδυασμό με το Λογισμικό ψηφιακής αποτύπωσης Geomagic Studio

Η χρήση του κατάλληλου εξοπλισμού για τη διεξαγωγή των απαραίτητων μετρήσεων αποτελεί θεμέλιο λίθο του ΑΜΣ.

Εκτενής ανάλυση του εξοπλισμού και της διαδικασίας μέτρησης ακολουθεί στη στο κεφάλαιο 5 της ΔΕ.

iii. Δημιουργία τρισδιάστατου CAD μοντέλου του ένσφαιρου διαφορικού.

Μετά και το πέρας της διαδικασίας λήψης μετρήσεων και της τρισδιάστατης σάρωσης των εξαρτημάτων του ένσφαιρου διαφορικού και έχοντας κατά συνέπεια διαθέσιμες τις απαραίτητες πληροφορίες, προβαίνουμε στη δημιουργία τρισδιάστατων CAD μοντέλων των εξαρτημάτων του διαφορικού και εν συνεχεία στην σύνθεσή τους για την επίτευξη του τελικού συναρμολογημένου συνόλου. Το σύνολο αυτό αποτελεί την πιστή τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση του πρότυπου ένσφαιρου διαφορικού του κ.Τσιριγγάκη.

Εν συνεχεία προβαίνουμε σε εκ νέου παραμετρικό σχεδιασμό του διαφορικού στηριζόμενοι σε συγκεκριμένες μεταβλητές σχεδίασης, η σημασία και η προέλευση των οποίων θα αναλυθεί εκτενώς στη συνέχεια της ΔΕ. Το παραμέτρικό αυτό μοντέλο καθιστά εφικτή την ταχεία μεταβολή των διαστάσεων του μοντέλου, στοιχείο απαραίτητο για τη διεξαγωγή περαιτέρω έρευνας.

Το λογισμικό με το οποίο πραγματοποιείται η παραπάνω διαδικασία είναι το SolidWorks 2011, ένα ολοκληρωμένο σχεδιαστικό (3D CAD) πακέτα μοντελοποίησης, το οποίο υποστηρίζεται από το λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows και έχει αναπτυχθεί από την εταιρία Dassault Systèmes SolidWorks Corp. Το SolidWorks χρησιμοποιείται σήμερα από περισσότερους από 1,3 εκ. μηχανικούς και σχεδιαστές και περισσότερες από 130.000 εταιρίες και βιομηχανίες ανά τον κόσμο.

iv. Στατική και κινηματική ανάλυση του διαφορικού σε υπολογιστικό περιβάλλον.

Μετά και την υλοποίηση του πιστού τρισδιάστατου μοντέλου, καθώς και του αντίστοιχου παραμετρικού μοντέλου του ένσφαιρου διαφορικού προβαίνουμε στην στατική και κινηματική ανάλυση του διαφορικού. Η στατική ανάλυση θα πραγματοποιηθεί κάτω από το μέγιστο πιθανό φορτίο του διαφορικού και συνεπώς κάτω από τη μέγιστη δυνατή καταπόνηση που μπορεί να εμφανιστεί.

Με άξονα τις μέγιστες εμφανιζόμενες δυνάμεις-φορτία που λάβαμε ως αποτέλεσμα, προβαίνουμε στην κινηματική προσομοίωση του διαφορικού. Θέτουμε δηλαδή ως συνθήκη τη συνεχή λειτουργία του διαφορικού στο μέγιστο πιθανό φορτίο.

Η προσέγγιση της στατικής και κινηματικής ανάλυσης κατά συνέπεια στηρίζεται στις δυσμενέστερες πιθανά εμφανιζόμενες περιπτώσεις (worst case scenarios), αποτελώντας έτσι

μια υπερσυντηρητική προσέγγιση.

Τα εργαλεία του SolidWorks που χρησιμοποιήθηκαν για τη στατική και κινηματική ανάλυση είναι αντίστοιχα:

- Το **SolidWorks Simulation**, το οποίο αποτελεί ένα εργαλείο για την επικύρωση του μηχανολογικού σχεδιασμού. Το εργαλείο αυτό αναδεικνύει στους μηχανικούς τη συμπεριφορά του σχεδιασμένου αντικείμενου στο φυσικό περιβάλλον για το οποίο προορίζεται. Συνεπώς με την πλατφόρμα του SolidWorks Simulation μπορεί να εξεταστεί η συμπεριφορά του σχεδιασμένου αντικείμενου κάτω από την επίδραση δυναμικών και θερμικών φορτίων, να ευρεθεί η ιδιοσυχνότητα του κ.α.
- Το **SolidWorks Motion**, που αποτελεί ένα εικονικό εργαλείο πρωτοτυποποίησης, το οποίο παρέχει δυνατότητες προσομοίωσης της κίνησης ενός μηχανισμού, ελέγχοντας με τον τρόπο αυτόν την ομαλή και επιδιωκόμενη λειτουργία του.

Τα αποτελέσματα της στατικής και της κινηματικής ανάλυσης αναδεικνύουν τα όρια αντοχής-λειτουργίας του ένσφαιρου διαφορικού χωρίς οδοντωτούς τροχούς του κ.Τσιγγάκη και δίνουν το έναυσμα για περαιτέρω έρευνα, ανάλυση και βελτιστοποίηση του διαφορικού.

Αναζητώντας το ζήτημα- πρόβλημα που αποτέλεσε τη γενεσιουργό αιτία της μελέτης του ένσφαιρου διαφορικού και κατά συνέπεια της ΔΕ, καταλήγουμε στην ανάγκη που υπήρξε για δημιουργία του τρισδιάστατου CAD μοντέλου.

Το ένσφαιρο διαφορικό χωρίς γρανάζια κατασκευάστηκε από τον κ.Τσιριγγάκη στο εργαστήριό του με χρήση συμβατικών και όχι CNC (Computer Numerical Control) εργαλειομηχανών (τόρνοι, φρέζες κλπ.) και κατά συνέπεια η ύπαρξη τρισδιάστατων CAD σχεδίων δεν ήταν απαραίτητη. Η δημιουργία τους άλλωστε με τα τότε υπάρχοντα μέσα και υπολογιστικά εργαλεία θα ήταν, αν όχι ανέφικτη, μια ιδιαίτερα επίπονη διαδικασία.

Με την πάροδο όμως των χρόνων προέκυψε η ανάγκη δημιουργίας του τρισδιάστατου CAD μοντέλου του ένσφαιρου διαφορικού καθώς:

- Η ύπαρξη του τρισδιάστατου μοντέλου σε ηλεκτρονικά αρχεία- βιβλιοθήκες ήταν πια απαραίτητη καθώς η τρισδιάστατη σχεδίαση αποτελεί σήμερα αναπόσπαστο κομμάτι της δημιουργίας πάσης φύσεως μηχανισμών και εξαρτημάτων.
- Η ύπαρξη του τρισδιάστατου μοντέλου θα καθιστούσε εφικτή την περαιτέρω έρευνα, μελέτη και βελτίωση-βελτιστοποίηση του ένσφαιρου διαφορικού σε υπολογιστικό περιβάλλον, αξιοποιώντας στο μέγιστο δυνατό βαθμό τα σύγχρονα μέσα και εργαλεία.

Οι παραπάνω ανάγκες εντοπίστηκαν από τον κ. Προβατίδη, Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., ο οποίος καταπιάνστηκε επί συναπτά έτη με την επιστημονική τεκμηρίωση και ανάλυση του ένσφαιρου διαφορικού, αποτελώντας θεμέλιο λίθο στην εξελικτική πορεία αυτού.

Με τη σύμφωνη γνώμη, την παρότρυνση και την ουσιαστική βοήθεια των κ. Προβατίδη και κ.Τσιριγγάκη, αναλάβαμε τη δημιουργία των τρισδιάστατων CAD μοντέλων και τη γενικότερη μελέτη σε υπολογιστικό περιβάλλον του ένσφαιρου διαφορικού, στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ. Με την εκπόνηση λοιπόν αυτής καλύπτουμε υπαρκτές ανάγκες και παράλληλα ερχόμαστε σε επαφή με σύνθετους μηχανισμούς, σύγχρονες τεχνικές ,τεχνολογικά-υπολογιστικά εργαλεία και κυρίως με προσωπικότητες του μηχανολογικού χώρου, οι οποίες προάγουν τη σκέψη μας και οξύνουν τη μηχανολογική μας αντίληψη.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να πραγματοποιηθεί σε τέσσερα συγγράμματα, τα οποία αποτέλεσαν βασική πηγή γνώσης για την πραγματοποίηση και συγγραφή της ΔΕ.

1. ***C.G. Provatidis, A Critical Presentation of "Tsiriggakis' Gearless Differential", Mobility & Vehicles Mechanics., Vol. 29, No.4, 2003, pp. 25-46***

Στο δημοσιευμένο αυτό σύγγραμμα καθίσταται σαφής η δομή και λειτουργία και οι προοπτικές χρήσης του ένσφαιρου διαφορικού του κ.Τσιριγγάκη.

2. ***United States Patent, , Differential Gear, Tsiriggakis, Patent Number: 4.509.388, Patent Date: Apr.9 1985***

Στο σύγγραμμα κατοχύρωσης της πατέντας παρουσιάζονται συνοπτικά και περιεκτικά τα κυριότερα στοιχεία του ένσφαιρου διαφορικού του κ.Τσιριγγάκη.

3. ***Συμβολή στην ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού, Γ. Καϊσαρλής, ΕΜΠ, 2006.***

Στη δημοσιευμένη αυτή διδακτορική διατριβή καθίσταται σαφής η συμβολή και η γενικότερη σημασία των Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων

4. ***SolidWorks 2011 Training Guide, David Pancoast***

Ο επίσημος οδηγός του SolidWorks 2011 δημοσιευμένος από την κατασκευάστρια εταιρία Dassault Systemes SolidWorks Corp. αποτέλεσε χρήσιμο εργαλείο κατανόησης των εντολών και της γενικότερης λειτουργίας του προγράμματος αυτού.

1.3 Δομή και Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μία σύντομη περιγραφή του Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού του ένσφαιρου διαφορικού του κ. Τσιριγγάκη, του σκοπού της ΔΕ, των βασικών σταδίων που ακολουθήθηκαν σ' αυτήν καθώς και βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Στο Κεφάλαιο 2 ορίζεται η έννοια του διαφορικού, γίνεται ιστορική αναδρομή της εξέλιξης του, περιγράφεται η λειτουργία του με ένα απλό μηχανικό ανάλογο και παρουσιάζεται η δομή και τα εξαρτήματά του. Γίνεται σύντομη αναφορά στα διαφορικά περιορισμένης ολισθήσης και στο διαφορικό τύπου «Μπλοκέ» και αναλυτική περιγραφή της δομής και του τρόπου λειτουργίας του ένσφαιρου διαφορικού του κ.Τσιριγγάκη

Στο Κεφάλαιο 3 ορίζεται η έννοια του Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού, αναλύεται σε στάδια, παρουσιάζονται τα πεδία εφαρμογής του και συγκρίνεται με τον Μηχανολογικό Σχεδιασμό.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται η διαδικασία αποσυναρμολόγησης του διαφορικού με στόχο τη λήψη των απαραίτητων μετρήσεων. Ακολούθως γίνεται εισαγωγή στη δομή, λειτουργία και χρήση των Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων (CMM) και παρουσιάζεται η μεθοδολογία λήψης μετρήσεων των εξαρτημάτων του ένσφαιρου διαφορικού στη CMM του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και Αντιστρόφου Σχεδιασμού της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.. Εν συνεχεία αναλύεται η δομή και η λειτουργία των Τρισδιάστατων Σαρωτών (3D Scanners) και πραγματοποιούνται οι επιπρόσθετες μετρήσεις στον Τρισδιάστατο Σαρωτή του Εργαστηρίου.

Στο Κεφάλαιο 5 δημιουργείται σε περιβάλλον 3D CAD (SolidWorks) η πιστή τρισδιάστατη αποτύπωση του ένσφαιρου διαφορικού του κ. Τσιριγγάκη καθώς και ένα δεύτερο παραμετρικό μοντέλο αυτού.

Στο Κεφάλαιο 6 πραγματοποιείται με βάση τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν, η στατική και κινηματική ανάλυση του ένσφαιρου διαφορικού σε υπολογιστικό περιβάλλον, με χρήση των

προγραμμάτων SolidWorks Simulation και SolidWorks Motion αντίστοιχα.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται εκτενώς τα συμπεράσματα της ΔΕ και προτείνονται πιθανές κατευθύνσεις για τη μελλοντική συνέχιση της έρευνας στον τομέα του ένσφαιρου διαφορικού. Η ΔΕ ολοκληρώνεται με τις Βιβλιογραφικές Αναφορές καθώς και με ένα Παράρτημα που περιλαμβάνει απλοποιημένα μοντέλα συνθετότερων φαινομένων, τα οποία εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του ένσφαιρου διαφορικού.

2. Το Διαφορικό

2.1 Ορισμός και Χρήση του Διαφορικού

Το διαφορικό είναι ένας μηχανισμός που στηρίζει συνήθως τη λειτουργία του σε οδοντωτούς τροχούς και είναι προορισμένος να μεταδίδει ροπή και περιστροφή. Βάση της λειτουργίας του αποτελούν τρεις άξονες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται με τους παρακάτω δύο τρόπους:

1. Ο ένας άξονες λειτουργεί ως είσοδος και οι άλλοι δύο ως έξοδος (τυπική λειτουργία διαφορικού αυτοκινήτου).
2. Δύο άξονες συνδυάζονται ως είσοδοι και ο τρίτος αποτελεί την έξοδο (άθροισμα, διαφορά ή μέσο όρο των εισόδων).

Στα πλαίσια της ΔΕ θα καταπιαστούμε κατά κύριο λόγο με τη μελέτη διαφορικών που βρίσκουν εφαρμογή στο χώρο των οχημάτων. Η πρωταρχικές λειτουργίες που εκτελεί το διαφορικό σε αυτοκίνητα και άλλα τροχοφόρα οχήματα, είναι η μεταφορά της περιστροφικής κίνησης από τον κινητήριο άξονα στους άξονες των κινητήριων τροχών, καθώς και η δυνατότητα που προσφέρει σε κάθε έναν από τους κινητήριους τροχούς να περιστρέφονται με διαφορετικές ταχύτητες.

Οι τροχοί του οχήματος περιστρέφονται με διαφορετικές ταχύτητες, κατά κύριο λόγο όταν αυτό στρίβει ή συναντά ανωμαλίες στο οδόστρωμα . Το διαφορικό μεταδίδει τελικώς την κίνηση στους τροχούς, επιτρέποντάς τους παράλληλα την περιστροφή με διαφορετικές ταχύτητες. Στα οχήματα χωρίς διαφορικό οι δύο κινητήριοι τροχοί είναι υποχρεωμένοι να περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα, συνδεδεμένοι συνήθως με ένα κοινό άξονα, ο οποίος παραλαμβάνει την κίνηση από τον κινητήρα του οχήματος.

Αν λοιπόν οι εσωτερικοί και οι εξωτερικοί τροχοί ενός αυτοκινήτου στρέφονταν από τον κινητήρα με την ίδια ταχύτητα, τότε το όχημα δεν θα μπορούσε να στρίψει ακολουθώντας καμπύλη πορεία χωρίς σημαντικές τριβές στα λάστιχά του, στην επαφή τους με το οδόστρωμα. Αντίστοιχα προβλήματα εμφανίζονται όχι μόνο στις στροφές αλλά και στην ίδια την ευθεία, όταν κάποιος από τους κινητήριους τροχούς συναντήσει σαμαράκι ή λακκούβα. Καθώς αυτός δεν θα έχει τη δυνατότητα να διαφοροποιήσει τις στροφές του από τον απέναντί του (προκειμένου να διανύσει τη μεγαλύτερη απόσταση που του επιβάλλει η επιφάνειας της ανωμαλίας), ολόκληρο το όχημα θα υποστεί μία αποσταθεροποιητική φόρτιση, η οποία εκδηλώνεται ως τάση εκτροπή του οχήματος από την πορεία του, αν δεν απορροφηθεί ελαστικά από τη μάζα του.

Συνεπώς δίχως τη χρήση διαφορικό ένα όχημα μπορεί να περιέλθει σε δύσκολες και απρόβλεπτες καταστάσεις, επιφέροντας παράλληλα βλάβη στα ελαστικά και στο οδόστρωμα, υψηλή φόρτιση ή ακόμη και πιθανή αστοχία του σε ολόκληρο το σύστημα μετάδοσης.

Μετά και από την ανάλυση που προηγήθηκε μπορούμε πια να ορίσουμε το διαφορικό του αυτοκινήτου ως το μηχανισμό που επιτρέπει τη μετάδοση ισόποσης ροπής στρέψης στους τροχούς ενός άξονα, φροντίζοντας, καθένας από αυτούς, να παραλαμβάνει το ποσοστό ρυθμού περιστροφής που του αναλογεί, λαμβάνοντας υπ' όψη την απόσταση που κάθε τροχός πρέπει να διανύσει.

2.2 Ιστορική Αναδρομή

Υπάρχουν πολλές εκδοχές για την εφεύρεση του διαφορικού, οι οποίες και εξετάζονται. Μια εξ αυτών είναι και η εμφάνιση ενός τύπου διαφορικού με γρανάζια στο μηχανισμό των Αντικυθήρων. Ο μηχανισμός αυτός ανακαλύφθηκε σε αρχαίο ναυάγιο κοντά στο νησί των Αντικυθήρων, χρονολογείται στα 150-100 π.Χ. και είχε κατά πάσα πιθανότητα χρήση αστρολάβου.

Παρόλα αυτά η εξακριβομένη χρήση του διαφορικού παρατηρείται στις παρακάτω χρονολογίες-ορόσημα:

- 1720 : Ο Joseph Williamson χρησιμοποιεί ένα διαφορικό σύστημα σε ρολόι.
- 1810 : Ο Rudolph Ackermann της Γερμανίας εφευρίσκει ένα σύστημα διεύθυνσης με τέσσερις τροχούς για τις μεταφορές, πρόγονο του σημερινού διαφορικού.
- 1827 : Το σύγχρονο διαφορικό αυτοκινήτου κατοχυρώνεται με ευρεσιτεχνία από τον ωρολογοποιό Onésiphore Pecqueur (1792-1852) στη Γαλλία για χρήση σε όχημα ατμού.
- 1832 : Ο Richard Roberts από την Αγγλία εφευρίσκει ένα ιδιότυπο διαφορικό για βαρέως τύπου οχήματα ατμού.
- 1876 : Ο James Starley από το Coventry της Αγγλίας εφευρίσκει το αλυσοκίνητο διαφορικό για χρήση σε ποδήλατα, εφεύρεση που αργότερα χρησιμοποιήθηκε στο αυτοκίνητο από τον Karl Benz.
- 1897 : Η πρώτη χρήση του διαφορικού από ένα Αυστραλιανό αυτοκίνητο ατμού του David Shearer.
- 1913 : Η Packard κατασκευάζει το ελικοειδές γραναζωτό διαφορικό, το οποίο μειώνει σημαντικά τα επίπεδα καταπονήσεων και θορύβου κατά τη λειτουργία του διαφορικού.
- 1926 : Η Packard κατασκευάζει το υποειδές διαφορικό, το οποίο επιτρέπει τη μεταφορά του κινητήριου άξονα χαμηλότερα στο όχημα, λύνοντας σοβαρά ζητήματα εργονομίας που προέκυπταν στο εσωτερικού του οχήματος.



Εικ.2.1 Άξονας μετάδοσης της κίνησης στο εσωτερικού του οχήματος

- 1958 : Ο Vernon Gleasman δημιουργεί το Torsen διαφορικό, είδος διαφορικού περιορισμένης ολίσθησης που στηρίζεται μονάχα στα οδοντωτούς τροχούς και όχι στο συνδυασμό αυτών με δίσκους όπως στα συμβατικά διαφορικά περιορισμένης ολίσθησης.

2.3. Αρχή της Διαφόρισης της Κίνησης - Ένα απλό Μηχανικό Ανάλογο

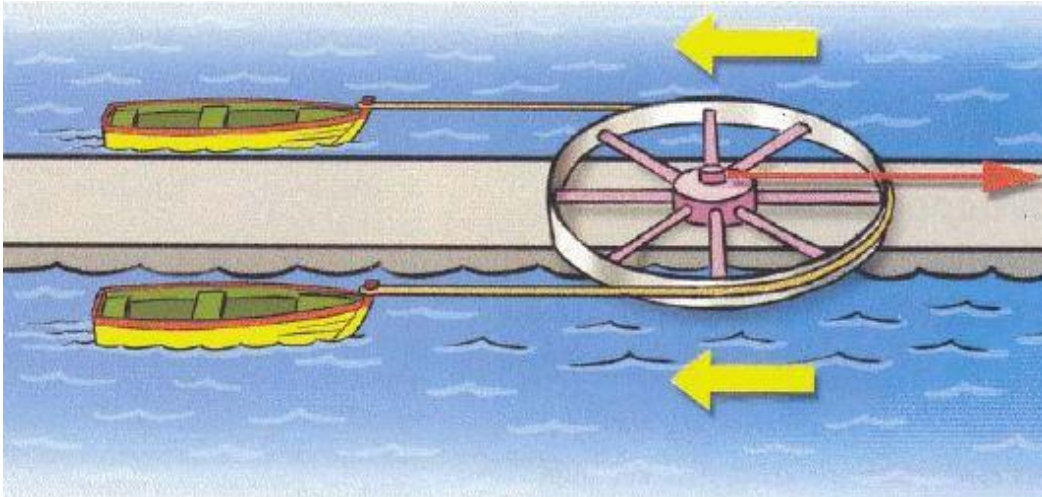
Η αρχή λειτουργίας του διαφορικού μπορεί να περιγραφεί με ένα απλό μηχανικό ανάλογο.

Δύο βάρκες βρίσκονται μέσα σε δύο παράλληλα κανάλια με νερό, το οποίο κινείται αντίθετα από την πορεία που έχουν οι βάρκες και η ταχύτητα της ροής του μπορεί να αυξομειώνεται

κατά βούληση.

Οι δύο βάρκες πρέπει να μετακινηθούν, αντίθετα προς το ρεύμα, από ένα και μόνο μέσο ρυμούλκησης, το οποίο βασίζεται σε ένα σχοινί τυλιγόμενο γύρω από μία τροχαλία, η οποία με τη σειρά της μετακινείται από έναν ελκτικό μηχανισμό που βρίσκεται επί της προβλήτας.

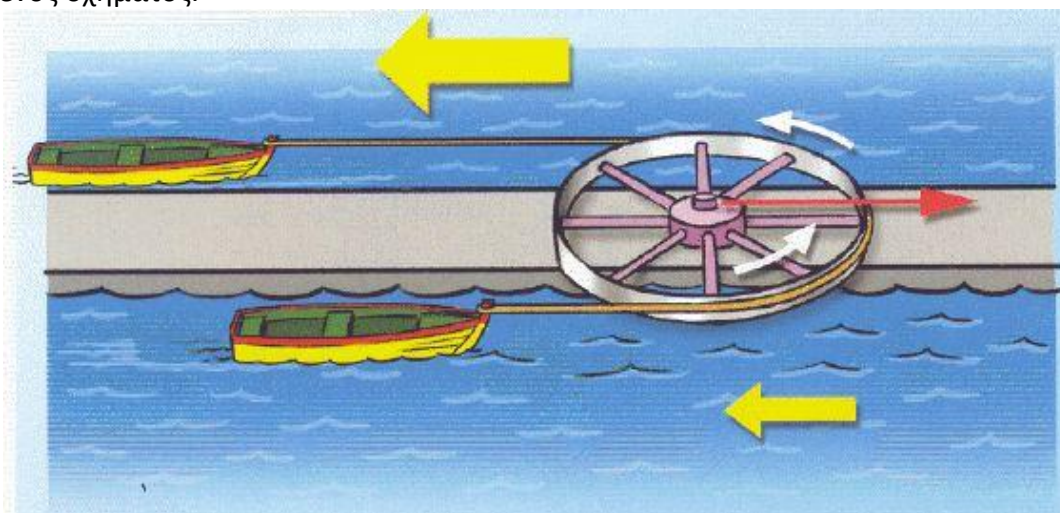
Σε περίπτωση που οι δύο βάρκες έχουν την ίδια ακριβώς αντίσταση στο νερό, η συρόμενη τροχαλία που τις έλκει, κινείται αποκλειστικά ευθύγραμμα χωρίς να περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της. Συνεπώς δεν υφίσταται διαφόριση.



Εικ.2.2 Απουσία διαφόρισης κατά την εμφάνιση ίσων αντιστάσεων νερού (Πηγή: R&D, Έκδοση: Mototech SA)

Αντίθετα σε περίπτωση που οι δύο βάρκες παρουσιάζουν διαφορετική αντίσταση στο νερό, η μία από την άλλη, τότε η συρόμενη τροχαλία έλκει ταχύτερα τη βάρκα με τη μικρότερη αντίσταση. Επειδή το μήκος του σχοινιού που συνδέει τις δύο βάρκες είναι σταθερό σε μήκος, ό,τι χάνει σε δρόμο η μία βάρκα θα προπορεύεται της άλλης εκμεταλλευόμενη την περιστροφή της τροχαλίας γύρω από τον άξονά της. Η τάση του νήματος, με την οποία έλκονται οι βάρκες από την πλώρη τους, είναι ίση με τη δύναμη που ασκείται στη βάρκα με τη μικρότερη αντίσταση.

Πάνω σε αυτές ακριβώς τις αρχές βασίζεται και η λειτουργία του συμβατικού διαφορικού ενός οχήματος.



Εικ.2.3 Φαινόμενο διαφόρισης κατά την εμφάνιση διαφορετικών αντιστάσεων νερού (Πηγή: R&D, Έκδοση: Mototech SA)

Αναλύοντας τα φαινόμενα που διαδραματίζονται όταν η τροχαλία κινείται προς τα δεξιά γίνεται αντιληπτό πως:

- Οι βάρκες έλκονται με την ίδια ακριβώς δύναμη, ανεξαρτήτως του πόση αντίσταση συναντά, καθεμιά, στην κίνησή της. Η τάση του νήματος αποτελεί την ελκτική δύναμη.
- Παρόλο που οι δύο βάρκες έλκονται με την ίδια δύναμη, καθεμία εξ αυτών μπορεί να κινηθεί με ξεχωριστή ταχύτητα, ανάλογα με την αντίσταση που συναντά από το νερό. Παρατηρώντας την Εικ.2.3 αντιλαμβανόμαστε πως η βάρκα που βρίσκεται στο κανάλι με τη μεγαλύτερη αντίσταση κινηθεί βραδύτερα από τη βάρκα που βρίσκεται στο άλλο κανάλι.
- Λόγω σταθερού μήκους του νήματος, η απόσταση κατά την οποία θα προπορευτεί η μια βάρκα θα είναι ίση με την απόσταση κατά την οποία έπεται η άλλη. Κατά τη διαφοροποίηση της απόστασης των βαρκών, η τροχαλία θα περιστραφεί γύρω από τον άξονά της κατά μέτρο ίσο με την διαφορά απόστασης των βαρκών.
- Οι δύο βάρκες έλκονται με την ίδια δύναμη, η οποία είναι ίση με την αντίδραση που ασκεί στο νήμα η βάρκα, η οποία συναντά τη μικρότερη αντίσταση στο νερό. Αν μία από τις δύο βάρκες έχει μηδενική αντίσταση, τότε είναι ανέφικτο το νήμα να ασκήσει τάση στις δύο βάρκες.
- Καθώς η ισχύς είναι το γινόμενο της δύναμης επί την ταχύτητα, η ισχύς που απορροφά κάθε βάρκα για την κίνησή της είναι ανάλογη της ταχύτητάς της και μόνο. Αν μία από τις βάρκες έχει μηδενική αντίσταση, τότε δεν μπορεί να μεταφερθεί ισχύς από τον ελκτικό μηχανισμό σε καμία από τις δύο βάρκες.

Τελικά μπορούμε για την αρχή λειτουργίας του διαφορικού να εξάγουμε το παρακάτω κυρίαρχο συμπέρασμα:

Ενώ η έλξη από τον κινητήριο κεντρικό μηχανισμό μπορεί να συνεχίζεται αμείωτη, οι δύο βάρκες συνδέονται μεταξύ τους με τρόπο τέτοιο, που τους επιτρέπει να διαμορφώσουν το ποσοστό ισχύος που δέχεται η κάθε μία τους σύμφωνα με τις εκάστοτε εξωτερικές συνθήκες. Συνεπώς ακόμα κι αν σταματούσε η έλξη από τον κεντρικό μηχανισμό, οι δύο βάρκες θα συνέχιζαν να προσαρμόζουν την κίνησή τους ως προς τη ροή του ρεύματος. Η βάρκα εκείνη που θα οπισθοχωρούσε πρώτη, θα εξανάγκαζε, μέσω του νήματος, την άλλη να κινηθεί σε αντίθετη φορά, κόντρα στο ρεύμα.

Ύστερα από τη διαπίστωση ότι όλες οι ιδιότητες που προαναφέραμε ισχύουν για τη συγκεκριμένη συνδεσμολογία, μπορούμε τεκμηριωμένα να ισχυριστούμε ότι η σύνδεση των δύο λέμβων με την ελκόμενη τροχαλία δεν είναι τίποτε άλλο από ένα διαφορικό.

2.4 Το Συμβατικό Ανοικτού Τύπου Διαφορικό

2.4.1 Εισαγωγή στο Συμβατικό Διαφορικό

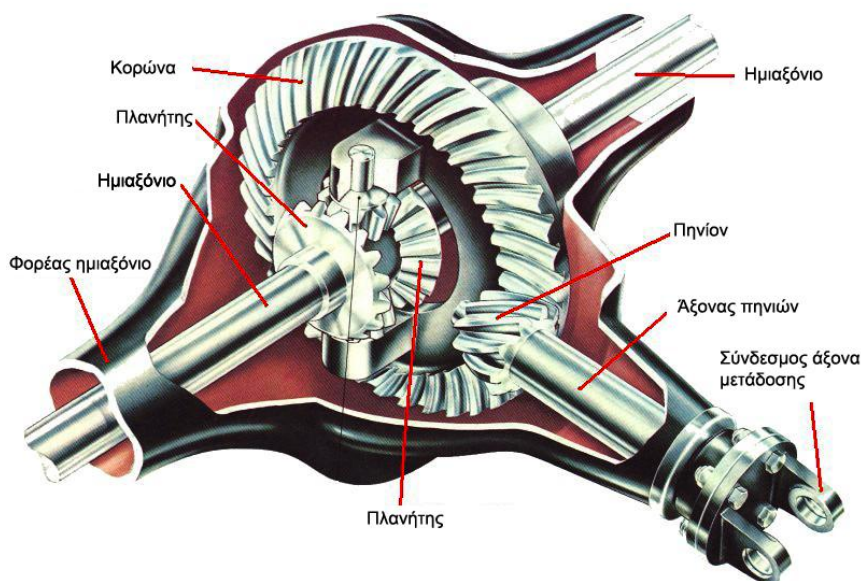
Όπως αναφέρουμε Διαφορικό είναι ο μηχανισμός που σκοπό έχει να μεταδίδει την κίνηση στους κινητήριους τροχούς και να τους επιτρέπει να περιστρέφονται με διαφορετικές γωνιακές ταχύτητες.

Κατά συνέπεια ως σύστημα μετάδοσης το διαφορικό έχει σκοπό:

- να μεταφέρει την περιστροφική κίνηση του κινητήρα, στους κινητήριους τροχούς.
- να δίνει διαφορετική περιστροφική ταχύτητα σε κάθε κινητήριο τροχό, όταν αυτό απαιτείται.
- να μεταβάλλει τις στροφές και την ροπή που παρέχει ο κινητήρας (ως προέκταση του μειωτήρα), ώστε οι κινητήριοι τροχοί να παίρνουν την απαιτούμενη ελκτική δύναμη για να μπορέσουν να αντιμετωπίζουν τις διάφορες αντιστάσεις κίνησης του οχήματος.
- να προσφέρει τη δυνατότητα αναστροφής κίνησης των τροχών για την οπίσθια πορεία του οχήματος.
- να προσφέρει τη δυνατότητα της αλλαγής της κατεύθυνσης της κινήσεως από ευθύγραμμη σε εγκάρσια έτσι ώστε αυτή να φθάνει στους τροχούς.

Επιγραμματικά τα εξαρτήματα ενός συμβατικού διαφορικού ανοικτού τύπου είναι τα παρακάτω:

- Κεντρικός άξονας μετάδοσης της κίνησης
- Κορώνα
- Φορέας των δορυφόρων
- Άξονας δορυφόρων
- Πλανήτες
- Δορυφόροι
- Έξοδος προς τροχούς/Ημιαξόνια



Εικ.2.2. Εξαρτήματα διαφορικού (Πηγή: <http://www.motorera.com/dictionary/pics/d/differential.jpg>)

2.4.2 Λειτουργική Περιγραφή του Συμβατικού Διαφορικού

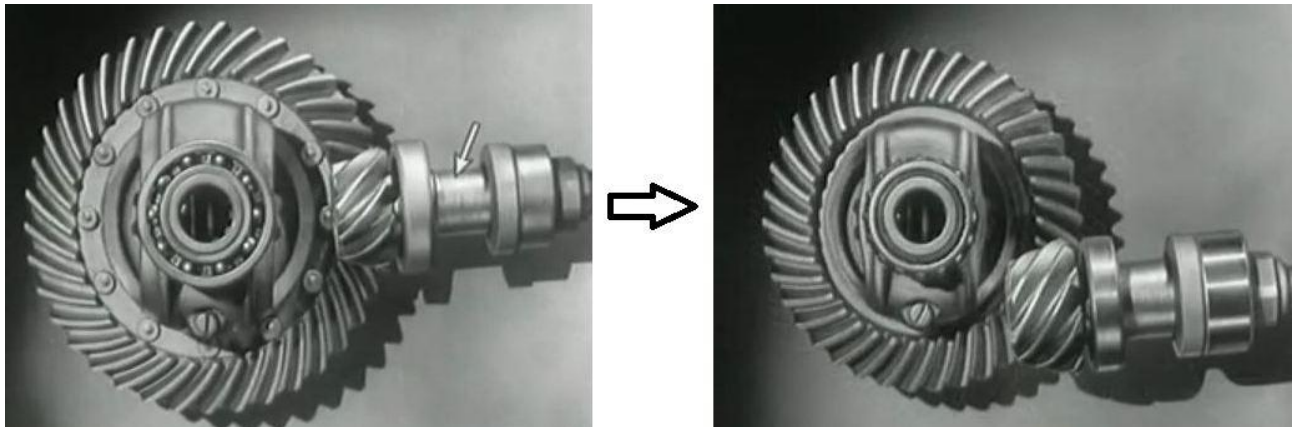
Η ακόλουθη περιγραφή του αφορά το συμβατικό με ανοιχτό διαφορικό οπισθοκίνητου οχήματος.

Η ροπή τροφοδοτείται από τον κινητήρα, μέσω του συστήματος μεταδόσεως. Το σύστημα

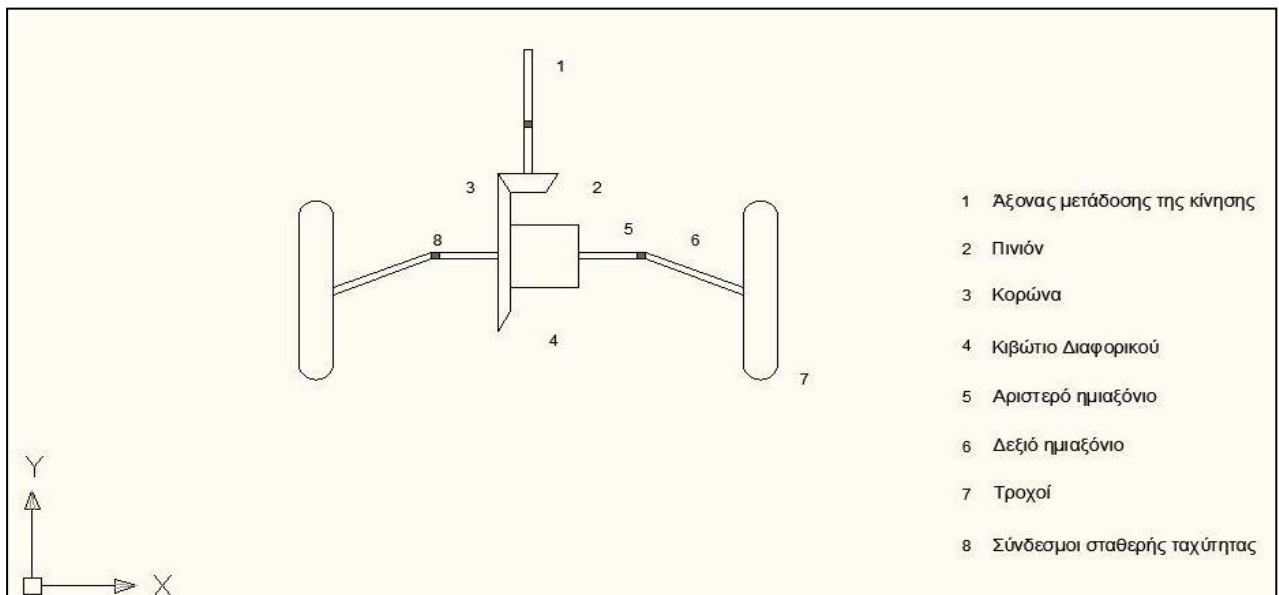
μετάδοσης συνδέεται με τον κινητήριο άξονα, ο οποίος με τη σειρά του συνδέεται στο πέρας του με έναν υποειδή οδοντωτό τροχό (πινιόν), που βρίσκεται εντός του περιβλήματος του διαφορικού.

Το πινιόν με τη σειρά δίνει κίνηση σ' ένα μεγάλο οδοντωτό τροχό, το μεγαλύτερο γρανάζι του διαφορικού, που ονομάζεται κορώνα και βρίσκεται στην αρχή του ενός από τα δύο ημιαξόνια. Έτσι έχουμε έναν υποπολλαπλασιασμό στη μετάδοση της κίνησης προς τους τροχούς.

Αξίζει ακόμη να σημειωθεί πως το πινιόν συνδέεται με την κορώνα του διαφορικού, έχοντας και αυτό τις περισσότερες φορές υποειδή διαμόρφωση με σκοπό τη χαμηλότερη τοποθέτηση του άξονα μετάδοσης της κίνησης, επιτυγχάνοντας τη μείωση του ύψους του κέντρου βάρους το οχήματος (στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό για τη δυναμική συμπεριφορά του οχήματος), και την επίλυση σοβαρών ζητημάτων εργονομίας που προέκυπταν στο εσωτερικού/θάλαμο επιβατών του οχήματος.



Εικ.2.3. Μετατόπιση άξονα μέσω υποειδούς διαμόρφωσης πινιόν



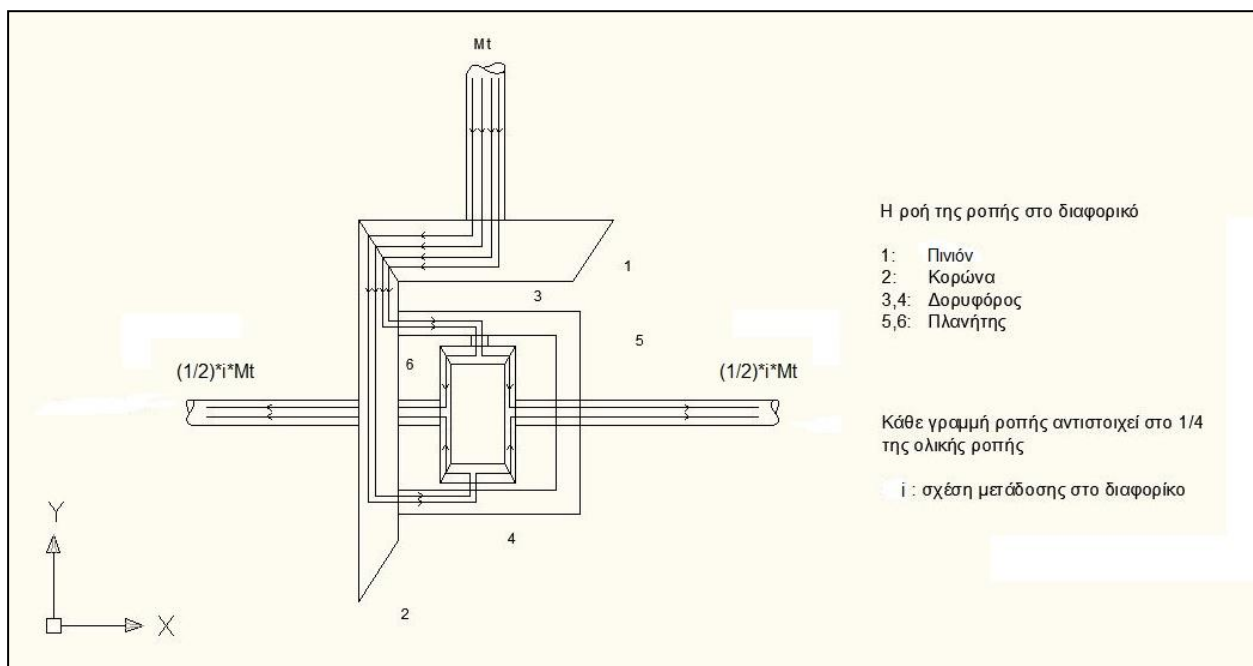
Εικ.2.4. Δισδιάστατη απεικόνιση πίσω άξονα οχήματος

Η κορώνα είναι συνδεδεμένη με το φορέα του διαφορικού, ο οποίος περικλείει τους πλανήτες και τους δορυφόρους του διαφορικού, δημιουργώντας ένα σύμπλεγμα από τέσσερις αντίθετους κωνικούς τροχούς σε κάθετα ανά δύο επίπεδα. Συνεπώς κάθε κωνικός τροχός εμπλέκεται με τους δύο γείτονες και περιστρέφεται αντίθετα από τον τρίτο, με τον οποίον δεν

εμπλέκεται.

Οι πλανήτες έχουν κωνική μορφή και είναι ικανοί να μεταφέρουν μεγάλα ποσά ροπής με τις, κατά το δυνατόν, μικρότερες τριβές και απώλειες. Είναι τοποθετημένοι ομοαξονικά της κορώνας και συνδέονται με τα ημιαξόνια, τα οποία είναι υπεύθυνα για την κίνηση των τροχών του οχήματος. Ακόμη οι δύο πλανήτες βρίσκονται σε σύζευξη μεταξύ τους και με την κορώνα, μέσω δύο άλλων οδοντωτών τροχών, των δορυφόρων.

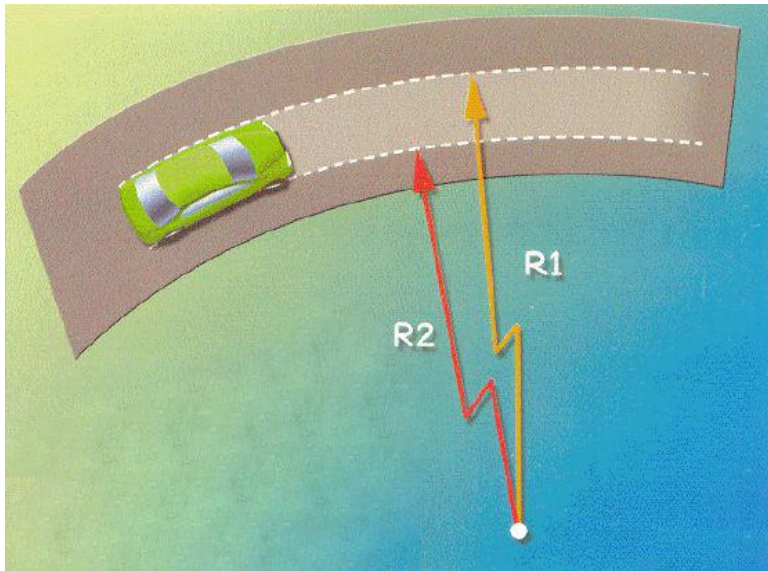
Οι δορυφόροι είναι ευθυγραμμισμένα σε έναν κάθετο άξονα ο οποίος αλλάζει προσανατολισμό με την περιστροφή της κορώνας, ακολουθώντας την κίνησή της. Αξίζει να σημειωθεί πως τα παλαιότερα διαφορικά είχαν μονάχα έναν δορυφόρο και παρουσίαζαν κατά συνέπεια μικρότερες αντοχές και μεγαλύτερα επίπεδα θορύβου κατά τη λειτουργία τους.



Εικ.2.5. Δισδιάστατη απεικόνιση συμαβτικού διαφορικού ανοικτού τύπου

Κατά την περιστροφή του φορέα των δορυφόρων του διαφορικού, ο συνεχώς μεταβαλλόμενος προσανατολισμός του άξονα των πλανητών, μετατρέπει την κίνηση της κορώνας, σε κίνηση των πλανητών. Καθώς όμως δεν περιορίζεται η σχετική κίνηση/περιστροφή δορυφόρων, οι πλανήτες είναι εφικτό να περιστρέφονται αντίθετα μεταξύ τους ή και σε σχέση με την κορώνα, υπό την επίδραση πάντα της ίδιας δύναμης.

Όταν το αυτοκίνητο κινείται στην ευθεία, η αντίσταση που παρουσιάζουν οι δύο τροχοί στην κίνηση είναι η ίδια. Έτσι η κορώνα με την περιστροφή της παρασύρει σε περιστροφή ολόκληρο το σύστημα και οι δύο τροχοί κινούνται με την ίδια ταχύτητα. Όταν όμως το αυτοκίνητο στρίβει, ο εξωτερικός τροχός πρέπει μέσα στο ίδιο χρονικό διάστημα να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση. Ο εσωτερικός τροχός, που έχει να διανύσει μικρότερη απόσταση περιστρέφεται πιο αργά και παρουσιάζει έτσι αντίσταση στην τάση του εξωτερικού να τον συμπαρασύρει στον ίδιο ρυθμό περιστροφής. Έτσι, αφού η κορώνα ισομοιράζει τη ροπή στα δύο ημιαξόνια, αυτά περιστρέφονται με διαφορετικές ταχύτητες μεταξύ τους, κάτι που γίνεται δυνατό χάρη στη σύνδεσή τους μέσω γραναζιών, των δορυφόρων, που αρχίζουν στο σημείο αυτό να περιστρέφονται με αντίθετη φορά μεταξύ τους, επιτρέποντας την σχετική κίνηση των πλανητών.

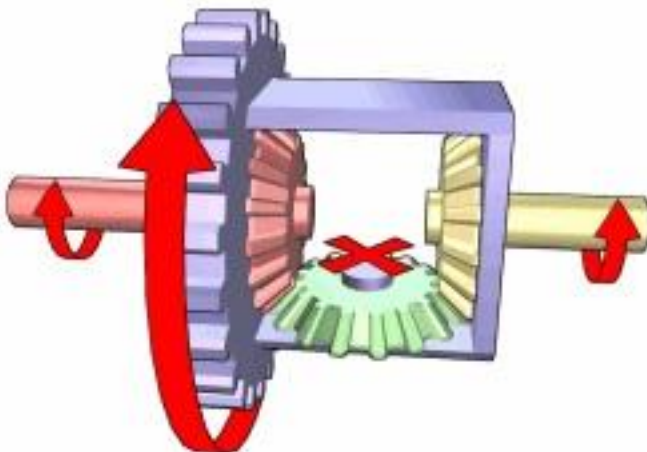


Εικ.2.6 Στροφή οχήματος (Πηγή: R&D, Έκδοση: Mototech SA)

Οι πλανήτες και κατά συνέπεια τα ημιαξόνια μπορούν να περιστρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις σε σχέση με την κορώνα .

Η περιστροφή της κορώνας αποτελεί κατά κανόνα το μέσο όρο των περιστροφών των πλανητών. Όταν το όχημα κινείται σε ευθεία γραμμή, δεν θα υπάρχει διαφορά στο πλανητικό σύστημα των οδοντωτών τροχών εκτός από έκτακτες περιπτώσεις, όπου εμφανίζονται ανωμαλίες στο οδόστρωμα αναγκάζοντας τον έναν εκ των δύο κινητήριων τροχών να διαγράψει μεγαλύτερο τόξο.

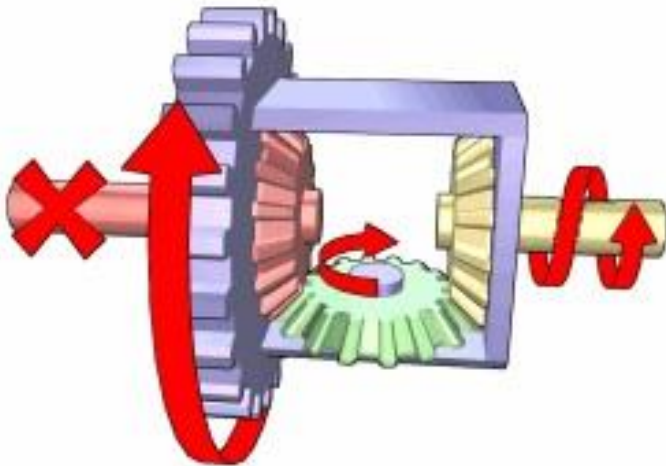
Στην περίπτωση που το όχημα κινείται ευθεία δίχως να συναντήσει κάποια ανωμαλία στο οδόστρωμα, το συμβατικό διαφορικό ανοικτού τύπου δεν πραγματοποιεί διαφόριση και ουσιαστικά λειτουργεί μονάχα σαν στοιχείο μετάδοσης της κίνησης. Η ροπή εισόδου εφαρμόζεται μέσω του πινιόν στην κορώνα (μπλε), η οποία περιστρέφει ολόκληρο τον φορέα του διαφορικού (μπλε). Ο φορέας είναι συνδεδεμένος με δύο πλανήτες (κόκκινο και κίτρινο) μέσω ενός δορυφόρου (πράσινο), δημιουργώντας ένα συμβατικό πλανητικό σύστημα οδοντωτών τροχών. Η ροπή μεταφέρεται στους πλανήτες, μέσω του δορυφόρου, ο οποίος περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του φορέα, περιστρέφοντας με τη σειρά τους πλανήτες. Εάν η αντίσταση σε δύο τροχούς είναι ίση, ο δορυφόρος περιστρέφεται μονάχα ως κομμάτι του φορέα και όχι γύρω από τον άξονά του και κατά συνέπεια οι δύο τροχοί περιστρέφονται της ίδιες στροφές/ρυθμό.



Εικ.2.7 Λειτουργία διαφορικού σε ευθεία πορεία δίχως εμφάνιση διαφόρισης

(Πηγή: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/61/Differential_free.png)

Εάν ο αριστερός τροχός και κατά συνέπεια και το αριστερό ημιαξόνιο και ο πλανήτης συναντούν αντίσταση, ο δορυφόρος (πράσινο) περιστρέφεται όχι μόνο ως μέρος του φορέα αλλά και γύρω από τον άξονά του, δίνοντας τη δυνατότητα στον αριστερό πλανήτη να επιβραδύνει και στον δεξιό πλανήτη να επιταχύνει, με τον ίδιο πάντα ρυθμό.



Εικ.2.8 Λειτουργία διαφορικού κατά την διαφόριση

(Πηγή: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5a/Differential_locked-2.png)

Συνοψίζοντας η λειτουργία του διαφορικού διέπεται από τις παρακάτω αρχές:

- Η έλξη του κινητήρα ασκείται μέσω της κορώνας στο φορέα του δορυφόρου και κατά συνέπεια στο δορυφόρο, ο οποίος, με τη σειρά του, έλκει τους πλανήτες προς την ίδια κατεύθυνση.
- Αν ο ένας πλανήτης συρθεί προς την μία κατεύθυνση, με ακινητοποιημένο το δορυφόρο, ο άλλος θα κινηθεί αντίθετα.
- Αν η τριάδα δορυφόρου και πλανητών κινείται προς τα μπροστά με ταχύτητα V και για οποιοδήποτε λόγο, ο ένας οδοντωτός κανόνας χάνει ένα μέρος " v " από την ταχύτητά του (η οποία θα γίνει τώρα $V-v$), ο άλλος οδοντωτός κανόνας θα κινηθεί ταχύτερα προς τα μπροστά (με ταχύτητα $V+v$), εφόσον ο δορυφόρος θα συνεχίσει να έχει ταχύτητα V .

2.4.3 Κυρίαρχο Πρόβλημα Συμβατικού Ανοικτού Τύπου Διαφορικού: Απώλεια Πρόσφυσης

Αρχικά ορίζουμε την πρόσφυση ως το μέγιστο ποσό της ροπής που μπορεί να υφίσταται μεταξύ των ελαστικών και της επιφάνειας του οδοστρώματος, προτού ο κινητήριο τροχός σταματήσει να κυλιέται και αρχίσει να ολισθαίνει.

Η βασική ανεπιθύμητη παρενέργεια από ένα συμβατικό διαφορικό είναι ότι μπορεί να περιορίσει την πρόσφυση ακόμη και κάτω από όχι ιδιαίτερα απαιτητικές συνθήκες. Το ποσό της πρόσφυσης που απαιτείται για την εκκίνηση του οχήματος μια οποιαδήποτε στιγμή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το φορτίο του οχήματος εκείνη τη στιγμή (πρακτικά το βάρος του οχήματος), το συντελεστή τριβής μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος (συνεπώς

την κατάσταση του οδοστρώματος και τις καιρικές συνθήκες), την κλίση του δρόμου κ.α.

Η ροπή που ασκείται σε κάθε κινητήριο τροχό είναι συνδυασμός της λειτουργίας του κινητήρα, του συστήματος μετάδοσης και των αξόνων μετάδοσης της κίνησης. Έτσι εφαρμόζεται στους κινητήριους τροχούς μια περιστρεφόμενη δύναμη ικανή να υπερνικήσει την αντίσταση που προκύπτει από την πρόσφυση μεταξύ τροχών και οδοστρώματος. Σε χαμηλότερες σχέσεις μετάδοσης και κατά συνέπεια σε χαμηλότερες ταχύτητες, το φορτίο μπορεί να είναι εξαιρετικά υψηλό, το σύστημα μετάδοσης μπορεί να παρέχει όσο υψηλά επίπεδα ροπής επιθυμούμε. Κατά συνέπεια τον κυρίαρχο περιοριστικό παράγοντα μετάδοσης της κίνησης αποτελεί η πρόσφυση σε κάθε έναν τροχό.

Συγκεκριμένα όταν το αυτοκίνητο κινείται πάνω στη στροφή, οι τροχοί αναπτύσσουν κάτω από την επίδραση των δυνάμεων της κίνησης ένα ζεύγος ροπών αντίθετων μεταξύ τους, καθώς ο εσωτερικός τροχός, έχοντας να διανύσει μικρότερη διαδρομή τείνει να επιβραδυνθεί, ενώ ο εξωτερικός το αντίθετο.

Καθώς τα δύο ημιαξόνια έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται με διαφορετική ταχύτητα μεταξύ τους, οι δύο αντίθετες ροπές που εμφανίζονται δημιουργούν ως αποτέλεσμα τη ζητούμενη αυτή διαφορά ταχύτητας.

Στην περίπτωση που το αυτοκίνητο κινείται στην ευθεία, αλλά οι δύο τροχοί του βρεθούν σε επιφάνειες με διαφορετική πρόσφυση/συντελεστή τριβής, το φαινόμενο είναι διαφορετικό, αλλά το αποτέλεσμα το ίδιο. Εδώ υπάρχει μόνο η ροπή που ασκεί ο κινητήρας στους τροχούς, η οποία κατανέμεται ακριβώς στο ήμισυ σε κάθε τροχό, η αντίσταση όμως που συναντάει ο κάθε τροχός κατά την κίνησή του είναι διαφορετική, λόγω της διαφορετικής τριβής. Έτσι, ο τροχός με τη μικρότερη πρόσφυση κινείται με τη μεγαλύτερη ταχύτητα, κάτι που είναι δυνατό ακριβώς λόγω της δυνατότητας που προσφέρει το διαφορικό στα δύο ημιαξόνια να περιστρέφονται με διαφορετικές ταχύτητες.

Σε πολλές όμως περιπτώσεις, επειδή από την αρχή κατασκευής του συμβατικού διαφορικού το μισό του αθροίσματος των ταχυτήτων περιστροφής των δύο ημιαξονίων ισούται με την κινητήρια ταχύτητα του συνόλου του άξονα, είναι πιθανό ο ένας τροχός να μένει ακίνητος κι ο άλλος να περιστρέφεται με ταχύτητα διπλάσια της κινητήριας, με τελική συνέπεια την ακινητοποίηση του οχήματος. Συνεπώς το θεμελιώδες χαρακτηριστικό του συμβατικού ανοικτού τύπου διαφορικού, να ισοκατανέμει τη ροπή σε κάθε πλευρά, μπορεί να περιορίσει τη μέγιστη ροπή που μπορεί να ασκηθεί στους κινητήριους τροχούς.

Τυπικό παράδειγμα της εμφάνισης των προαναφερθέντων φαινομένων αποτελεί ένα οπισθοκίνητο όχημα, του οποίου ο ένας κινητήριος τροχός βρίσκεται στην άσφαλτο έχοντας υψηλά αποθέματα πρόσφυσης, ενώ αντίθετα ο άλλος βρίσκεται σε ολισθηρό πάγο, έχοντας ελάχιστα αποθέματα πρόσφυσης. Η ροπή που απαιτείται για να ολισθήσει ο τροχός στην παγωμένη επιφάνεια είναι ελάχιστη και καθώς το διαφορικό ισοκατανέμει τη ροπή σε κάθε πλευρά, η μέγιστη ροπή που μπορεί να εφαρμοστεί στον τροχό που βρίσκεται στην άσφαλτο χωρίς να εμφανιστεί το φαινόμενο της ολίσθησης, περιορίζεται από τον τροχό που βρίσκεται στην παγωμένη επιφάνεια.

Ανάλογα με το φορτίο, κλίση, κ.α., το όχημα απαιτεί ένα ορισμένο ποσό της ροπής που εφαρμόζεται στους κινητήριους τροχούς για την κύλισή τους χωρίς να εμφανιστεί το φαινόμενο της ολίσθησης με όλες τις αρνητικές επιδράσεις που θα αυτό θα είχε στη συμπεριφορά του οχήματος.

Τελικά συμπεραίνουμε πως:

- Ένα συμβατικό ανοικτού τύπου διαφορικό περιορίζει τη μέγιστη συνολική ροπή, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί στους δύο κινητήριους τροχούς, στο διπλάσιο της ροπής που μπορεί να εφαρμοστεί στον τροχό με τη χαμηλότερη πρόσφυση.
- Αν η ροπή που μπορεί να ασκηθεί στον έναν τροχό είναι χαμηλότερη από την ελάχιστη απαιτούμενη ροπή, υπερβαίνοντας το όριο της πρόσφυσης τότε το όχημα αδυνατεί να

κινηθεί και ο/οι τροχοί εμφανίζουν φαινόμενα ολίσθησης/σπιναρίσματος.

2.5 Διαφορικά Περιορισμένης Ολίσθησης

2.5.1 Εισαγωγή στα Διαφορικά Περιορισμένης Ολίσθησης

Όπως αναλύσαμε παραπάνω, θεμελιώδες και εκ κατασκευής πρόβλημα του ανοικτού τύπου διαφορικού είναι η ιδιότητά του να επιτρέπει στον ένα κινητήριο τροχό να μένει ακίνητος, ενώ αντίθετα ο άλλος να περιστρέφεται με ταχύτητα διπλάσια της κινητήριας και τελικώς να ακινητοποιείται το αυτοκίνητο.

Το φαινόμενο αυτό θα μπορούσε να αποφευχθεί, αν στο διαφορικό υπήρχε μια αντεπίστροφη μετάδοση κίνησης. Κατά αυτόν τον τρόπο οι ροπές που ασκούν οι τροχοί θα μπορούσαν να μεταδώσουν κίνηση στους δορυφόρους και να κάνουν τα ημιαξόνια να στρέφονται με διαφορετική ταχύτητα (περίπτωση κίνησης στις στροφές), ενώ παράλληλα οι δορυφόροι δεν θα ήταν εφικτό να αναγκάσουν τους πλανήτες να περιστραφούν με διαφορετική ταχύτητα (περίπτωση κίνησης στην ευθεία σε επιφάνειες με διαφορετική τριβή για τον κάθε τροχό).

Η κίνηση αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση των διαφορικών περιορισμένης ολίσθησης (Limited Slip Differential, ΔΠΟ). Συνοπτικά τα ΔΠΟ παρουσιάζουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Σε ευθεία με ομοιόμορφο οδόστρωμα, όπου ο συντελεστής τριβής είναι παντού ο ίδιος, η ροπή κατανέμεται ακριβώς στη μέση σε καθένα από τους δύο τροχούς, που περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα.
- Κατά την κίνηση των τροχών σε επιφάνειες με διαφορετικό συντελεστή τριβής, το διαφορικό και τα ημιαξόνια συμπεριφέρονται σαν ένας ενιαίος άξονας και περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα περιστροφής, ενώ ο τροχός που κινείται στην λιγότερο ολισθηρή επιφάνεια δέχεται το μεγαλύτερο μέρος της ροπής.
- Σε στροφές η ροπή κατανέμεται εξίσου στους δύο τροχούς, ενώ το διαφορικό επιτρέπει στον εξωτερικό τροχό να περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα από τον εσωτερικό. Εδώ δηλαδή, το ΔΠΟ συμπεριφέρεται ακριβώς όπως ένα συμβατικό διαφορικό.
- Σε στροφές, όπου οι δύο τροχοί κινούνται σε επιφάνειες με διαφορετική τριβή, το ΔΠΟ διαφοροποιείται από το συμβατικό ανοικτού τύπου διαφορικό. Έτσι, ενώ επιτρέπει στους δύο τροχούς να κινούνται με διαφορετική ταχύτητα, δεν κατανέμει εξίσου τη ροπή, αλλά μεταδίδει περισσότερη στον τροχό με την καλύτερη πρόσφυση.
- Τέλος, κατά την κίνηση στην ευθεία, σε δρόμο με σημαντική πλάγια κλίση, όπου οι δύο τροχοί περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα, αλλά αυτός που βρίσκεται χαμηλότερα έχει μεγαλύτερη πρόσφυση (λόγω στήριξης μεγαλύτερου μέρους του βάρους του αυτοκινήτου εξαιτίας της κλίσης), ο τελευταίος δέχεται και μεγαλύτερο μέρος της ροπής.

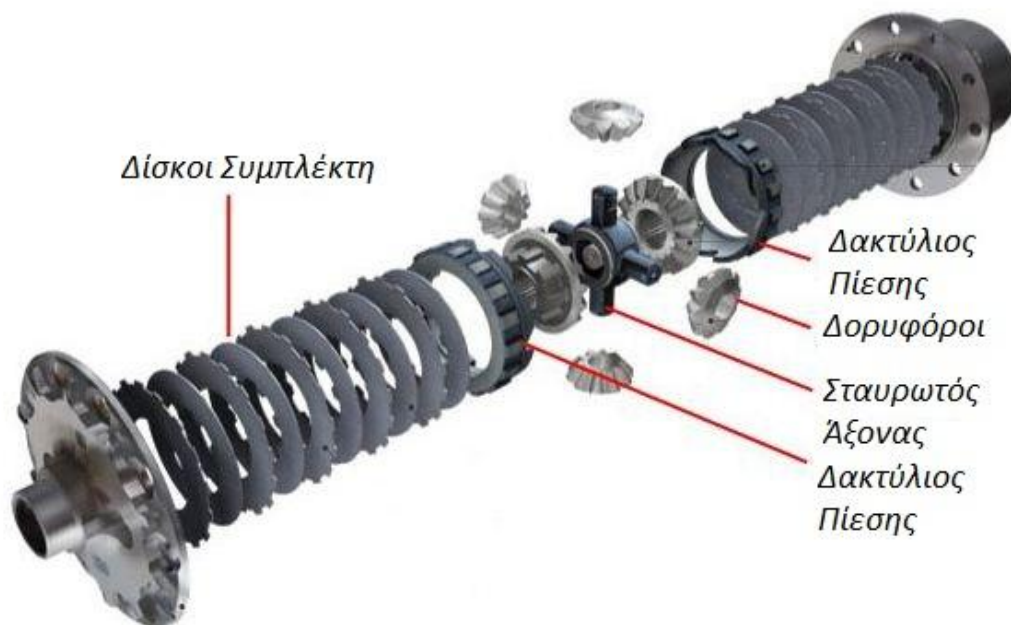
Κατά συνέπεια τα κύρια πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση ΔΠΟ είναι:

- Περιορισμός ολίσθησης των τροχών σε στροφές με μεγάλες ταχύτητες.
- Διάθεση ισχύος στους τροχούς ομοιόμορφα, σε περιπτώσεις όπου προσφέρεται η μεγαλύτερη ισχύς στο τελικό σύστημα μετάδοσης.
- Ομοιόμορφη πρόσφυση και καλύτερος έλεγχος του οχήματος κατά την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση.
- Σε συνθήκες ομαλής οδήγησης το όχημα συμπεριφέρεται άρτια (όπως με το συμβατικό διαφορικό).

2.5.2 Διαφορικά Περιορισμένης Ολίσθησης με Πολύδισκους Συμπλέκτες

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά των ΔΠΟ μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση πολύδισκων συμπλεκτών, οι οποίοι αποτελούνται από πληθώρα δίσκων, οι μισοί εκ των οποίων είναι συζευγμένοι στο ένα εκ των δύο ημιαξονίων και οι υπόλοιποι στον φορέα των δορυφόρων. Οι πολύδισκοι συμπλέκτες μπορούν ακόμη να τοποθετηθούν σε ένα ή και στα δύο ημιαξόνια. Στην πρώτη περίπτωση, το έτερο ημιαξόνιο ενώνεται με το συμπλεκόμενο μέσω των δορυφόρων. Εάν το συμπλεκόμενο ημιαξόνιο άτρακτος δεν κινείται σχετικά προς τον φορέα των δορυφόρων, τότε και το έτερο ημιαξόνιο δεν κινείται. Επομένως αμφότερα τα ημιαξόνια παραμένουν «κλειδωμένα».

Οι δορυφόροι εδράζονται στον σταυρωτό άξονα, ο οποίος στηρίζεται σε γωνιακές εγκοπές που σχηματίζουν έκκεντρα κεκλιμένα επίπεδα (η στήριξη αυτή γίνεται σαφής αν παρατηρήσουμε την Εικ.2.9.) . Τα κεκλιμένα αυτά επίπεδα δεν είναι απαραίτητα συμμετρικά. Στην περίπτωση που υφίσταται συμμετρία το ΔΠΟ ονομάζεται αμφίδρομο, ενώ αντίθετα όταν η μια πλευρά των κεκλιμένων επιπέδων είναι κάθετη (έχοντας κατά συνέπεια «πριονωτή» διαμόρφωση) το ΔΠΟ ονομάζεται μονόδρομο. Στην σπάνια περίπτωση, όπου και οι δύο πλευρές βρίσκονται υπό κλίση και είναι ταυτόχρονα ασύμμετρες το ΔΠΟ ονομάζεται «ενάμιση δρόμου».



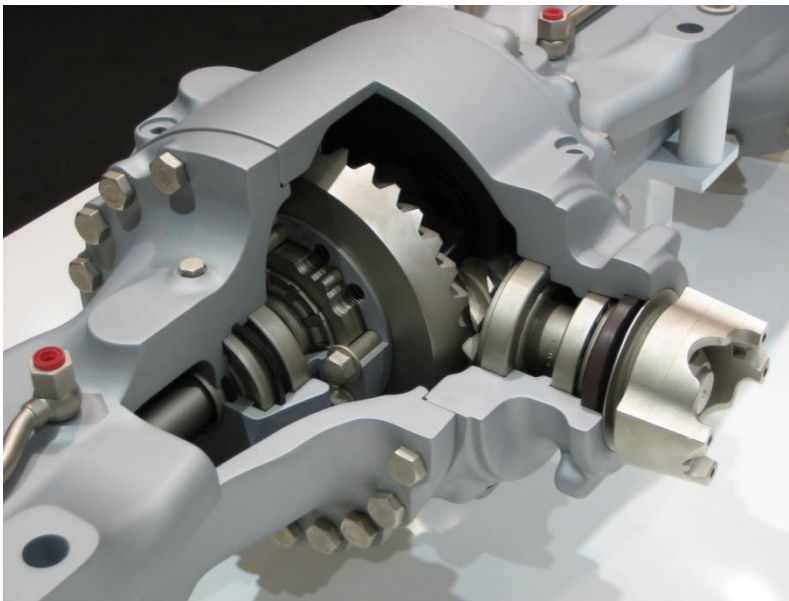
Εικ.2.9 Δομή διαφορικού περιορισμένης ολίσθησης με πολύδισκους συμπλέκτες
(Πηγή:<http://img268.imageshack.us/img268/4065/lsd015xh.jpg>)

Η αρχή λειτουργίας του ΔΠΟ με πολύδισκους συμπλέκτες είναι η παρακάτω:

Καθώς η εισερχόμενη ροπή του άξονα μετάδοσης της κίνησης τείνει να περιστρέψει το διαφορικό, οι εσωτερικοί δακτύλιοι πίεσης συμπιέζονται αξονικά, μέσω του σταυρωτού άξονα, καθώς αυτός επιχειρεί να υπερβεί το κεκλιμένο επίπεδο, ασκώντας με τη σειρά του πίεση στους πολύδισκους συμπλέκτες. Όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση που ασκείται στους πολύδισκους συμπλέκτες, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο βαθμός σύζευξης των κινητήριων τροχών.

Βασικό μειονέκτημα των ΔΠΟ σε σύγκριση με τα συμβατικά διαφορικά είναι το κόστος κατασκευής και συντήρησής του. Αξίζει να σημειωθεί πως η συντήρηση του ΔΠΟ απαιτεί αλλαγή των λιπαντικών του σε τακτική βάση (καθώς αυτά ρυπαίνονται με μεταλλικά σωματίδια) καθώς και αλλαγή των δίσκων.

Συγκεκριμένα συγκρίνοντας την αλλαγή των λιπαντικών του ΔΠΟ με αυτήν ενός συμβατικού διαφορικού, παρατηρούμε πως στην περίπτωση του ΔΠΟ η αλλαγή οφείλει να πραγματοποιείται κάθε 100.000 χλμ., ενώ αντίθετα στα συμβατικά διαφορικά τα λιπαντικά μπορούν να παραμείνουν δίχως να αλλαχτούν για αρκετές εκατοντάδες χιλιάδες χλμ.



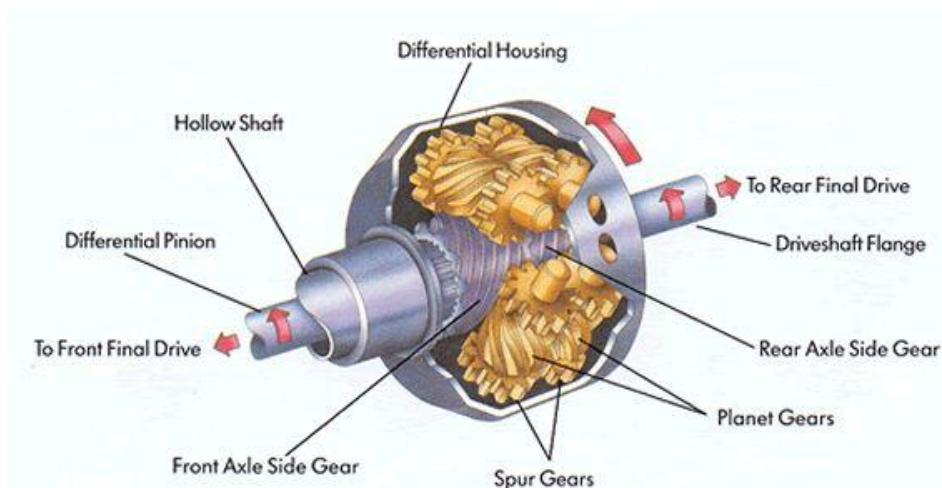
Εικ.2.10 Διαφορικό περιορισμένης ολίσθησης της εταιρίας ZF, όπου γίνεται εμφανής η χρήση πολύδισκων συμπλεκτών (Πηγή:http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/16/Bauma_2007_ZF_Loader_Axle_MT-L3075_2.jpg)

2.5.3 Διαφορικά Περιορισμένης Ολίσθησης με Ατέρμονες Οδοντωτούς Τροχούς τύπου Torsen

Το ΔΠΟ τύπου Τόρσεν χρησιμοποιούν τον πιο γνωστό και πιο απλό μηχανισμό αντεπιστροφής μετάδοσης της κίνησης, δηλαδή το συνδυασμό γραναζιού - ατέρμονα κοχλία. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνουν τη ζητούμενη αντεπίστροφη μετάδοση κίνησης, ώστε οι ροπές που ασκούν οι τροχοί να μπορούν να μεταδώσουν κίνηση στους δορυφόρους και να κάνουν τα ημιαξόνια να στρέφονται με διαφορετική ταχύτητα, χωρίς όμως οι ίδιοι όμως οι δορυφόροι να μπορούν να αναγκάσουν τους πλανήτες να περιστραφούν με διαφορετική ταχύτητα.

Τα ημιαξόνια καταλήγουν σ' έναν ατέρμονα κοχλία το καθένα, αντί σε γρανάζια όπως στο συμβατικό διαφορικό. Οι δορυφόροι με τη σειρά τους είναι, όπως και στο συμβατικό διαφορικό, οδοντωτοί τροχοί, των οποίων τα άκρα αποτελούνται από κοινά γρανάζια ευθείας οδόντωσης, ενώ το μέσο τους από ελικοειδές γρανάζι.

Έτσι, οι πλανήτες μπορούν να κινήσουν τα γρανάζια - δορυφόρους, ενώ αντίθετα οι τελευταίοι δεν μπορούν να κινήσουν τους κοχλίες, ασκώντας απλώς σ' αυτούς μια δύναμη παράλληλη προς το ημιαξόνιο, τείνοντας να τους κινήσουν σε ευθεία γραμμή, πράγμα αδύνατο, καθώς τα ημιαξόνια είναι ακίνητα και μπορούν να πραγματοποιήσουν μονάχα περιστροφική κίνηση.



Εικ.2.11 Δομή διαφορικού τύπου Torsen (Πηγή:http://www.langleyvw.ca/tech/img/torsen_diff_580.GIF)

Κατά την κίνηση του οχήματος παρατηρούνται τα παρακάτω φαινόμενα:

- Κατά την κίνηση του οχήματος σε ευθεία με ομαλό οδόστρωμα η λειτουργία του διαφορικού τύπου Torsen προσομοιάζει τη λειτουργία ενός συμβατικού ανοικτού τύπου διαφορικού. Έτσι το πινιόν δίνει κίνηση στην κορώνα, η οποία με την σειρά της περιστρέφει όλο το σύνολο του διαφορικού με την ίδια ταχύτητα, παρασύροντας με την περιστροφή της τους δορυφόρους και αυτοί με τη σειρά τους σαν ενιαίο σύνολο τους πλανήτες και τα ημιαξόνια.
- Κατά τη στροφή του οχήματος, επί παραδείγματι αριστερή, λόγω του ζεύγους αντίθετων ροπών, οι οποίες ασκούνται από τους τροχούς στα δύο ημιαξόνια, ο αριστερός τροχός, που είναι ο εσωτερικός, επιβραδύνεται και ασκεί παράλληλα μία ροπή της ίδιας φοράς στον κοχλία του ημιαξονίου του (τείνει δηλαδή να τον επιβραδύνει). Ο κοχλίας με τη σειρά του αρχίζει να κινεί το γρανάζι - δορυφόρο με το οποίο είναι συνδεδεμένος. Στη δεξιά πλευρά συμβαίνουν τα ακριβώς αντίθετα, καθώς ο τροχός επιταχύνει, ασκεί μία ροπή επιτάχυνσης στον κοχλία του κι αυτό γυρίζει το αντίστοιχο γρανάζι - δορυφόρο του, με φορά αντίθετη από του γραναζιού του αριστερού τροχού. Επειδή τα δύο γρανάζια συνδέονται, μπορούν να περιστρέφονται μόνο με αντίθετη φορά μεταξύ τους και τελικά οι δύο τροχοί περιστρέφονται με διαφορετική ταχύτητα μεταξύ τους, όπως στο συμβατικό διαφορικό.

Βασικό μειονέκτημα των διαφορικών τύπου Torsen σε σύγκριση με τα συμβατικά διαφορικό είναι το κόστος κατασκευής, το μέγεθος και το βάρος τους. Βασική αιτία των μειονεκτημάτων αυτών είναι η ανάγκη του Torsen να τοποθετείται εντός ενός περιβλήματος μεγαλύτερης αντοχής, ικανού να παραλαμβάνει τις εγκάρσιες αντιδράσεις των κοχλιών.

2.6. Διαφορικό τύπου “Μπλοκέ”

Τα διαφορικά τύπου “μπλοκέ” διαφέρουν ως προς την αρχή λειτουργίας από τα απλά διαφορικά ανοικτού τύπου απλού διαφορικού, η οποία συνίσταται στην εξομάλυνση των στροφών των κινητήριων τροχών. Το μπλοκέ διαφορικό χρησιμοποιεί φραγή (μπλοκάρισμα) στην εξομάλυνση έτσι ώστε κάθε τροχός να παραλάβει το ποσοστό της ροπής που είναι ικανός να μεταφέρει. Σ' ένα διαφορικό τύπου “μπλοκέ” παρέχεται μεγαλύτερη ροπή στον τροχό που έχει τη μεγαλύτερη πρόσφυση με το έδαφος, σε αντίθεση με το απλό διαφορικό όπου το

σύστημα δορυφόρων-πλανητών μεταφέρει ισόποσα τη ροπή στρέψης στους κινητήριους τροχούς.

Δομικά ένα διαφορικό τύπου “μπλοκέ” δεν διαφέρει σημαντικά από ένα απλό ανοικτού τύπου. Τα εξαρτήματα που το διαφοροποιούν είναι το ελατήριο και οι δίσκοι σύμπλεξης.



Εικ.2.12. Διαφορικό τύπου “μπλοκέ” σε τομή
(Πηγή:http://www.syntheticoilnlubes.com/images/limited_slip_diff.jpg)

Το ελατήριο ασκεί μια δύναμη πιέζοντας τους πλανήτες μέσω των δίσκων σύμπλεξης. Όταν ο ένας από τους δύο τροχούς αρχίζει να περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα τότε οι δίσκοι σύμπλεξης πιέζονται μεταξύ υπό την επίδραση του ελατηρίου και μπλοκάρει το διαφορικό. Όταν μπλοκάρει το διαφορικό τότε μεταφέρεται στον τροχό με την μεγαλύτερη πρόσφυση η μέγιστη ροπή που μπορεί να παραλάβει.

Κατά συνέπεια στα διαφορικά τύπου “μπλοκέ” η ροπή δε μεταφέρεται ισόποσα στους τροχούς αλλά καθορίζεται από την πρόσφυση που έχει ο κάθε κινητήριος τροχός ή στην περίπτωση του κεντρικού διαφορικού από την πρόσφυση που έχει ο κάθε κινητήριος άξονας.

Η λειτουργία του αυτή προσομοιάζει αυτήν ενός διαφορικού περιορισμένης ολίσθησης. Η διαφορά ενός μπλοκέ διαφορικού με ένα περιορισμένης ολίσθησης είναι ότι το μεν πρώτο παρέχει μόνιμο ποσοστό εμπλοκής στους πίσω τροχούς ενώ ένα περιορισμένης ολίσθησης μεταβάλλει το ποσοστό ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις.

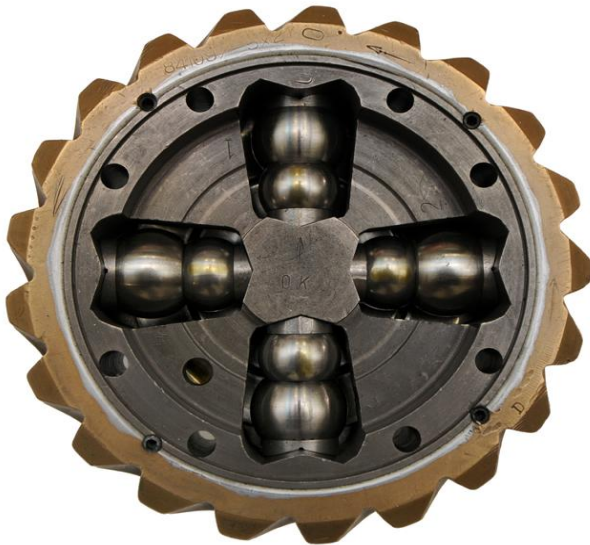
Βασικό μειονέκτημα των διαφορικών τύπου “μπλοκέ” σε σύγκριση με τα συμβατικά διαφορικά είναι η πολυπλοκότητα που παρουσιάζουν, το ελαφρά αυξημένο κόστος κατασκευής και κυρίως το βάρος και οι υψηλές φθορές που παρουσιάζουν κατά τη χρήση τους, απαιτώντας κατά συνέπεια συχνότερη συντήρηση.

2.7. Ένσφαιρο διαφορικό Τσιριγγάκη

2.7.1. Σύντομο Ιστορικό Σημείωμα

Στην παρούσα ΔΕ ασχολούμαστε με τη μελέτη του ένσφαιρου διαφορικού του κ. Θεόδωρου Τσιριγγάκη. Με απόλυτο σεβασμό προς τον δημιουργό της κατασκευής αυτής προβαίνουμε σε

μια σύντομη ιστορική αναφορά της δημιουργίας και της εξέλιξης του διαφορικού.



Εικ.2.13. Ένσφαιρο Διαφορικό Τσιριγκάκη
(Πηγή: [http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/GD032\(640x640\).jpg](http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/GD032(640x640).jpg))

Η σύλληψη που οδήγησε στην κατασκευή και την παρουσίαση του πρωτότυπου διαφορικού του κ. Τσιριγκάκη το 1980 ήταν μια μακρά διαδικασία, η οποία διήρκεσε πάνω από δώδεκα έτη. Το 1981 το διαφορικό κατοχυρώθηκε και νομικά ως δημιούργημα του κ. Τσιριγκάκη καθώς ήταν παντενταρισμένο σε δώδεκα διαφορετικές χώρες. Η εφεύρεση αυτή έλαβε την υψηλότερη διάκριση “Grand Prix du Jury” στη Διεθνή Έκθεση Καινοτομιών EUREKA 1983, η οποία έλαβε χώρα στις 3-11 Δεκεμβρίου στις Βρυξέλλες, και στην οποία συμμετείχαν περισσότεροι από 160 εφευρέτες από ολόκληρο τον κόσμο.

Από εκείνη την εποχή πολλοί πειραματικοί έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν στο διαφορικό υπό την εποπτεία της ΠΥΡΚΑΛ Α.Ε.. Το διαφορικό λειτούργησε κάτω από όλες τις πιθανές συνθήκες οδοστρώματος για περισσότερα από 15.000 χλμ. όπου παρατηρήθηκαν όσα επιστημονικά-θεωρητικά είχαν αποδειχθεί αλλά και νέα αξιοσημείωτα στοιχεία. Ένα δεύτερο πρωτότυπο διαφορικό με ελάχιστες διαφορές, σε σύγκριση με το πρώτο, ελέγχθηκε για πάνω από 25.000 χλμ. . Σήμερα και τα δύο αυτά πρωτότυπα διαφορικά βρίσκονται σε εξαιρετική κατάσταση. [1]

2.7.2 Συγκεντρωτικά Στοιχεία Ένσφαιρου Διαφορικού Τσιριγκάκη

Η εφεύρεση αποτελεί ένα νέο διαφορικό μηχανισμό (differential gear), που επιτυγχάνει εξισορρόπηση ταχύτητας μεταξύ δύο αξόνων, χρησιμοποιώντας την **αρχή του κεκλιμένου επιπέδου** (inclined plane). Οι δύο άξονες μπορούν επί παραδείγματι, να αποτελούν άξονες δύο κινητήριων τροχών ενός αυτοκινήτου ή ενός ερπυστριοφόρου οχήματος. Συνεπώς ο μηχανισμός αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται τα συμβατικά διαφορικά.

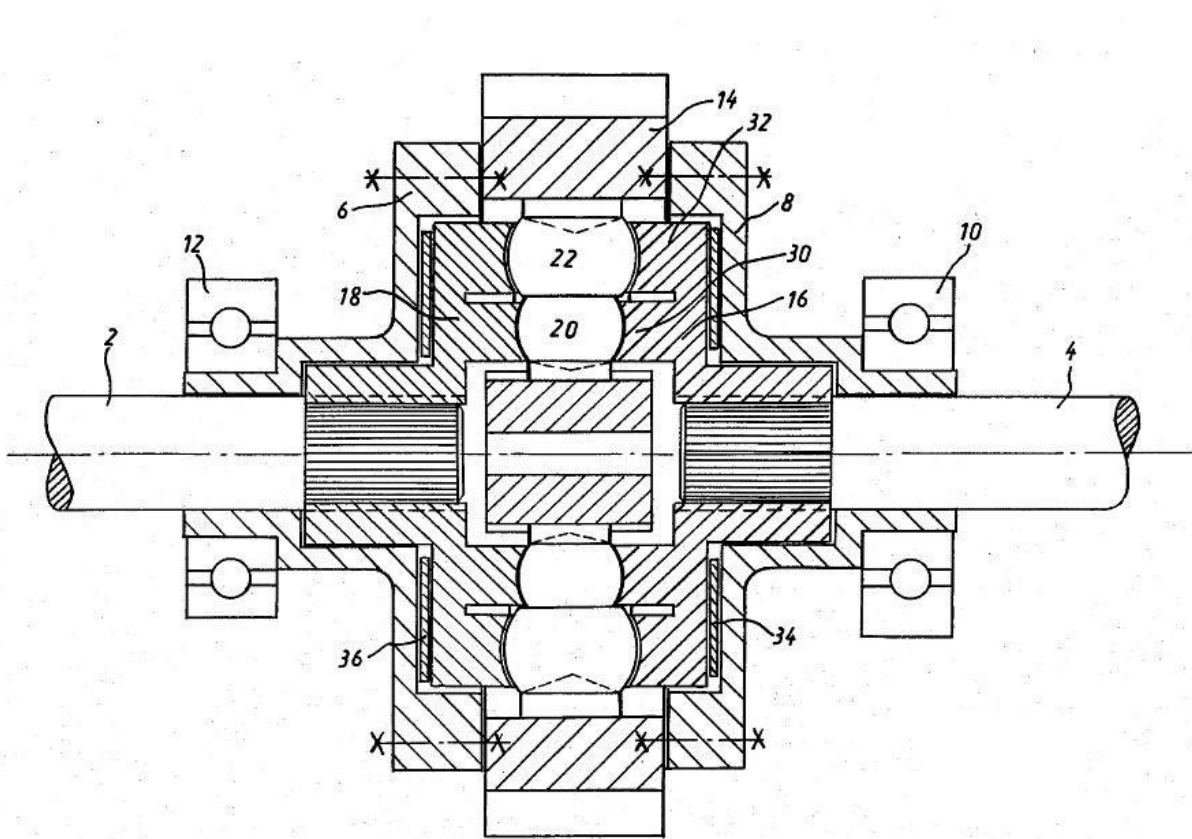
Σε σύγκριση με τα συμβατικά διαφορικά, ο διαφορικός μηχανισμός της υπόψη εφεύρεσης είναι πολύ πιο συμπαγής ως προς τον σχεδιασμό του (compact design) και είναι πιο εύκολο να τεθεί σε γραμμή παραγωγής, με μικρότερο κόστος ανά μονάδα προϊόντος. Οι τριβές στο εσωτερικό του διαφορικού μηχανισμού είναι μειωμένες και συνεπώς έχουμε αυξημένη αντοχή (durability) και ιδιαίτερως αθόρυβη λειτουργία (quiet operation).

Όταν χρησιμοποιείται σε όχημα κινούμενο επί ευθείας πορείας και σε στεγνό οδόστρωμα, λειτουργεί ακριβώς όπως ένα συμβατικό διαφορικό, του οποίου η ισχύς ισοκατανέμεται σε

όλους τους τροχούς. Επίσης όταν το αυτοκίνητο κινείται επί καμπύλου στεγνού δρόμου, το ένσφαιρο διαφορικό, συμπεριφέρεται σαν ένα συμβατικό, ανοικτού τύπου διαφορικό που εξαναγκάζει τον εξωτερικό τροχό να διαγράψει μεγαλύτερη απόσταση από τον εσωτερικό τροχό. Ωστόσο, αν ο ένας τροχός δεν συναντά την αναμενόμενη αντίσταση-πρόσφυση και βρίσκεται π.χ. σε παγετό επί του οδοστρώματος ενώ ο άλλος τροχός συναντάει φυσιολογική αντίσταση, τότε το συμβατικό διαφορικό αστοχεί, αφού ο ένας τροχός γυρίζει με διπλάσια ταχύτητα, ενώ ο άλλος τροχός παραμένει ακίνητος. Αντίθετα με την εφαρμογή του ένσφαιρου διαφορικού οι δύο τροχοί μπορούν να περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα κι έτσι το όχημα μπορεί να οδηγηθεί αποτελεσματικά, παρά τις κακές συνθήκες του οδοστρώματος.

2.7.3 Λεπτομερής περιγραφή ένσφαιρου διαφορικού Τσιριγγάκη

Ακολουθεί παράδειγμα με τέσσερις δορυφόρους (rolling members) ανά πλανήτη (cam track disc). Αξίζει να σημειωθεί πως είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν, με τις κατάλληλες τροποποιήσεις, λιγότεροι ή περισσότεροι δορυφόροι ανά πλανήτη.



Εικ.2.14 Ένσφαιρο διαφορικό σε τομή

Στην Εικόνα 2.14, εμφανίζονται οι δύο άξονες 2, 4 να οδηγούνται από το διαφορικό. Οι περιστροφικές κινήσεις των αξόνων αυτών, εξισορροποούνται όπως και στην περίπτωση του συμβατικού διαφορικού.

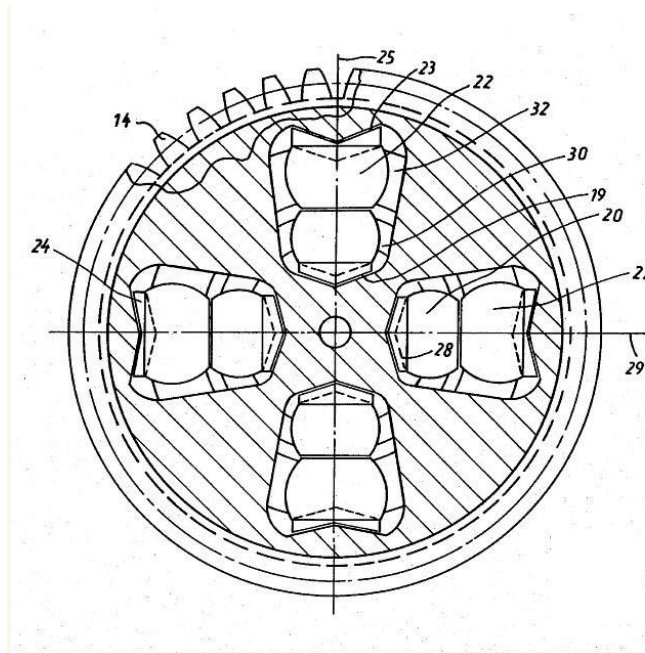
Οι άξονες 2, 4 εκτείνονται αντιστοίχως από τα δύο ημιχιτώνια-καπάκια ασφαλείας 6, 8 του διαφορικού. Με την βοήθεια των ρουλεμάν 10, 12 τα υπόψη ημιχιτώνια με την σειρά τους, ενσωματώνονται μέσα σε άλλο εξωτερικό περίβλημα, το οποίο δεν εμφανίζεται στην εικόνα.

Τα καπάκια ασφαλείας 6, 8 βρίσκονται σε σφιχτή συναρμογή με το σύστημα μετάδοσης της

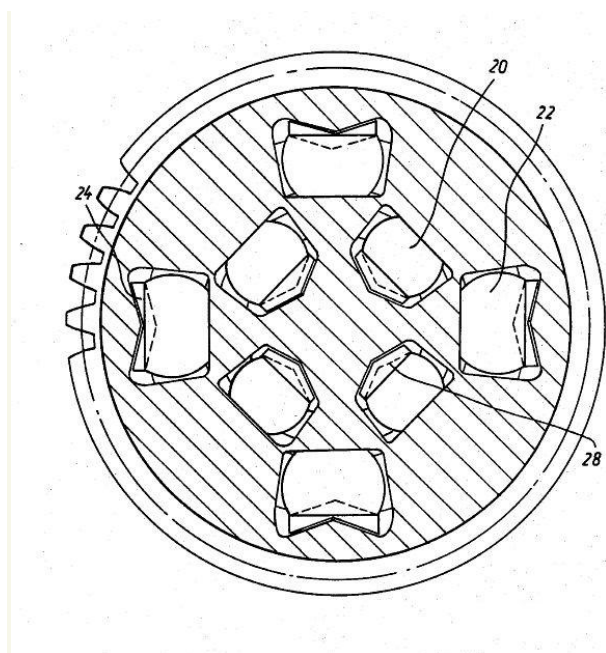
κίνησης μέσω του συσσωματώματος κορώνας-φορέα των δορυφόρων 14 και τοιουτοτρόπως, η περιστροφική κίνηση από τον κινητήρα, μεταφέρεται στο περίβλημα του διαφορικού.

Στο εσωτερικό πέρας των αξόνων 2, 4 παρατηρούμε τις οδοντωτές αυλακώσεις-πολύσφηνα δια των οποίων συνδέονται οι άξονες στο κέντρο των πλανητικών δίσκων 16, 18. Θα μπορούσαν ακόμη να χρησιμοποιηθούν και άλλοι τύποι συνδέσεων.

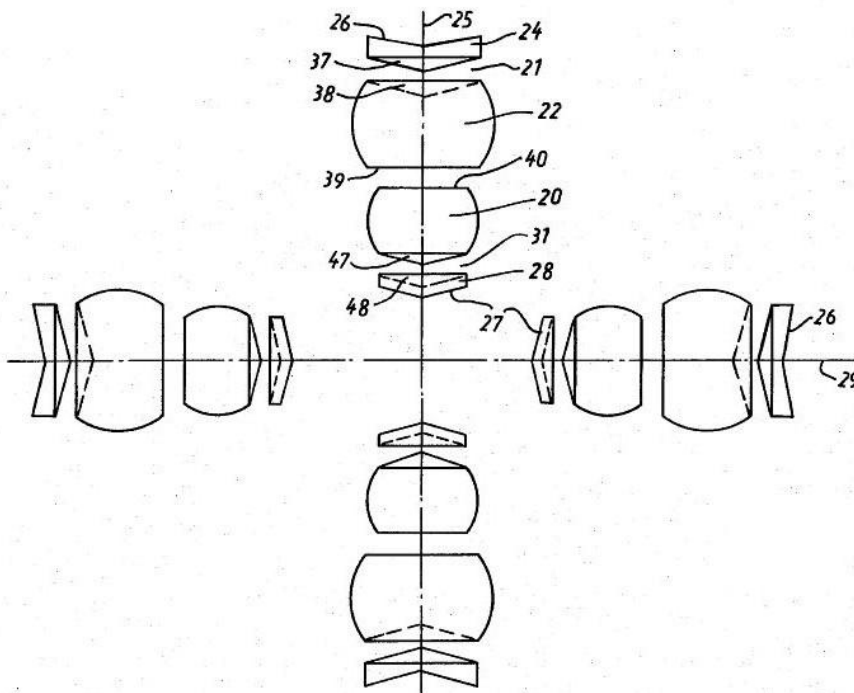
Οι δίσκοι των πλανητών, παρουσιάζουν έκαστος, από μία εσωτερική επιφάνεια 30 κι από μία εξωτερική 32, η οποία αντικρίζει τον αντίστοιχο άξονα. Οι δίσκοι παρουσιάζουν κοίλο σχεδιασμό ώστε να μπορούν να συγκρατούν τους δορυφόρους που θα περιγραφούν αργότερα. Φαίνεται επίσης σαφώς ότι οι υπόψη πλανήτες έχουν συναρμολογηθεί ομόκεντρα ως προς τους αντίστοιχους άξονες.



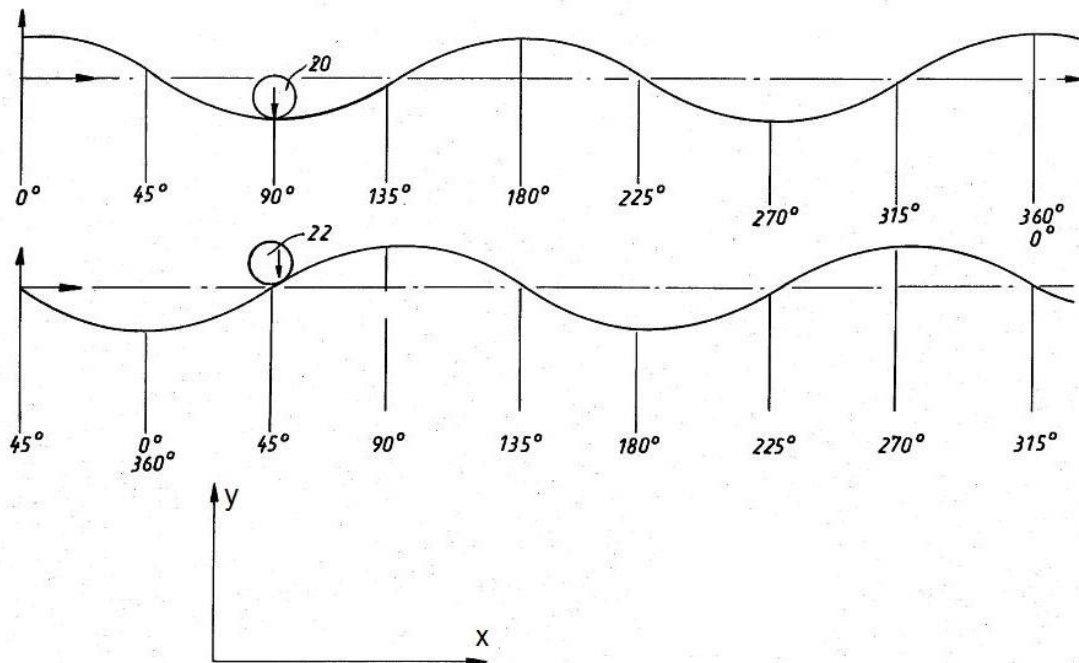
Εικ.2.15 Εγκάρσια τομή κεντρικού επιπέδου ένσφαιρου διαφορικού



Εικ.2.16 Εγκάρσια τομή κεντρικού επιπέδου ένσφαιρου διαφορικού εναλλακτικού σχεδιασμού.



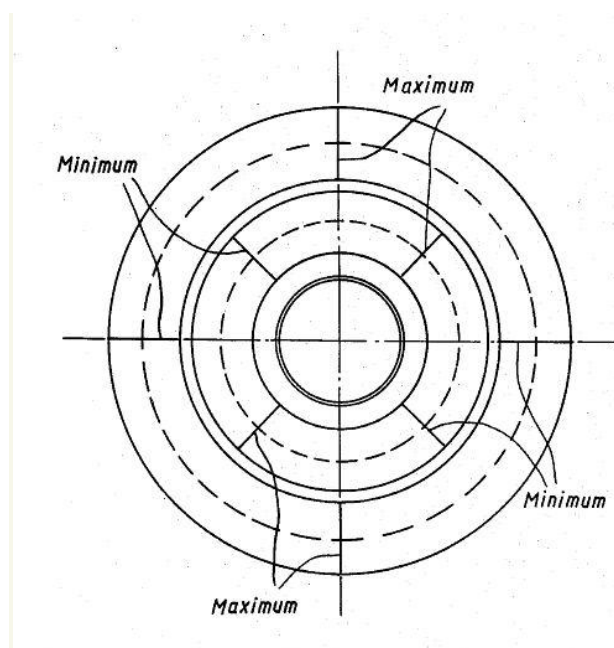
Εικ.2.17 Ανάπτυγμα δορυφόρων



Εικ.2.18 Γράφημα πλανητικής διαδρομής ενός από τους δύο πανομοιότυπους πλανητικούς δίσκους του διαφορικού

Στην Εικόνα 2.18 παρουσιάζεται γράφημα της πλανητικής διαδρομής ενός από τους δύο

πανομοιότυπους πλανητικούς δίσκους του διαφορικού. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, κάθε πλανητική διαδρομή παρουσιάζει μεταβλητό ύψος ως προς την κατεύθυνση του άξονα, όπως ακριβώς γίνεται και με τις διαδοχικές ημιτονοειδείς καμπύλες που καλύπτουν κατά 360° την περιφέρεια του κάθε πλανητικού δίσκου.



Εικ.2.19 Κάτοψη πλανήτη

Η εσωτερική πλανητική διαδρομή ευρίσκεται εκ σχεδιασμού σε διαφορά φάσεως 45° σε σύγκριση με την εξωτερική πλανητική διαδρομή. Αυτό συμβαίνει όταν ο πλανήτης περιστρέφεται στον άξονα του. Εναλλακτικά, θα ήταν επίσης πιθανό να ρυθμίσουμε έτσι τους πλανήτες, ώστε να μη βρίσκονται σε μετατόπιση φάσεως. Στην περίπτωση αυτή όμως οι συνεργαζόμενοι εσωτερικοί και εξωτερικοί δορυφόροι πρέπει να είναι μετατοπισμένοι κατά 45° ο καθένας έναντι του άλλου. Ένας τέτοιος εναλλακτικός σχεδιασμός παρουσιάζεται στις εικόνες 2.16 και 2.20.

Αξίζει ακόμη να επισημάνουμε πως παρατηρώντας την Εικόνα 2.14 αντιλαμβανόμαστε πως οι δύο πλανήτες 16, 18 βρίσκονται αντιμέτωποι ενώ ο χώρος ανάμεσα τους καταλαμβάνεται από τους μικρούς και/ή μεγάλους δορυφόρους. Στη διάταξη αυτή, οι δορυφόροι- σώματα κύλισης έχουν βαρελοειδές σχήμα και οι αντιμέτωπες επιφάνειές τους 39, 40 βρίσκονται σε παραλληλία και ανάμεσα τους παρεμβάλλεται διαχωριστής που εξασφαλίζει τη χαμηλή τριβή μεταξύ των επιφανειών αυτών.

Οι δορυφόροι μπορούν να περιστρέφονται γύρω από τον άξονά τους και ταυτόχρονα να μετακινούνται κατά κάθετη κατεύθυνση ως προς το επίπεδο της βάσης του πλανήτη. Η κίνηση στηρίζει τις αρχές της στην κίνηση ενός συμβατικού ένσφαιρου εδράνου κυλίσεως, αλλά διαφοροποιείται από αυτήν λόγω της ημιτονοειδούς επιφάνειας του πλανήτη. Οι δορυφόροι στηρίζονται στο φορέα τους 14 μέσω κατάλληλων σωμάτων έδρασης 24, 28. Τα σώματα αυτά έδρασης είναι κατά τέτοιον τρόπο σχεδιασμένα ώστε να μην αφαιρούν κανέναν από τους προαναφερθέντες βαθμούς ελευθερίας των δορυφόρων.

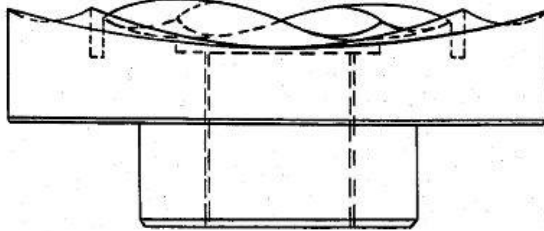
Η σύνδεση δορυφόρων-εδράσεων γίνεται κατανοητή παρατηρώντας την Εικόνα 2.17.

Ο μεγάλος δορυφόρος 22 στηρίζεται στο συσσωμάτωμα κορώνας-φορέα δορυφόρων 14 από την κατάλληλα διαμορφωμένη έδραση-οδηγό 24, η οποία και του επιτρέπει να ολισθαίνει. Ο μικρός δορυφόρος 22 διαθέτει θηλυκή κωνικότητα 38, στην οποία εισχωρεί ο αρσενικός κώνος 37 της έδρασης- οδηγού 24, ο οποίος με την σειρά του στηρίζεται μέσω της επιφάνειας 26 V-

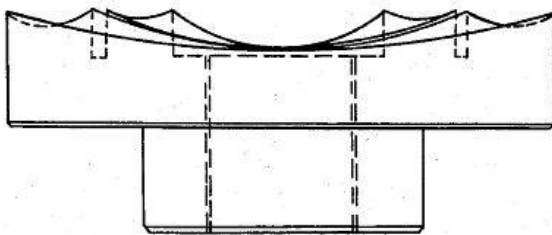
μορφής στο φορέα των δορυφόρων.

Αντίστοιχα ο μικρός δορυφόρος 20 στηρίζεται στο συσσωμάτωμα κορώνας-φορέα δορυφόρων 14 από ένα αναλόγως διαμορφωμένο οδηγό 28 που επιτρέπει την ολίσθηση. Ο μικρός δορυφόρος 20 διαθέτει αρσενικό κώνο 47 ο οποίος εισχωρεί στην αντίστοιχη κωνική εσοχή του οδηγού 28 ο οποίος με την σειρά του στηρίζεται στο στοιχείο 27 V-μορφής στο φορέα των δορυφόρων.

Αξίζει ακόμη να επισημάνουμε πως μεταξύ των συνεργαζόμενων επιφανειών υφίστανται οι απαραίτητες συνθήκες λίπανσης που εξασφαλίζουν την κίνηση των εξαρτημάτων του διαφορικού με τις ελάχιστες τριβές.



Εικ.2.20 Πλάγια όψη πλανήτη



Εικ.2.21 Πλάγια όψη εναλλακτικού σχεδίου πλανήτη

Η έδραση και η ολίσθηση των περιστρεφόμενων μερών μπορούν να εξασφαλιστούν μέσω και άλλων, διαφορετικού τύπου οδηγών αλλά και επίσης τα στοιχεία V-μορφής, στο κέντρο της πλήμνης και οι λοιπές συναρμογές μπορούν να αντικατασταθούν με άλλα δομικά στοιχεία που λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο.

Η ανωτέρω περιγραφείσα συναρμογή των δορυφόρων 20 και 22 εξασφαλίζει την ανεξάρτητη κίνηση τους πάνω-κάτω ως προς το επίπεδο του της Εικόνας 2.15., σύμφωνα με την κίνηση των πλανητών (στην Εικόνα 2.18 γίνονται εμφανείς οι τροχιές των πλανητών).

Αξίζει επίσης να τονιστεί ότι τα στοιχεία 24 και 28, όπως αποτυπώνεται ευκρινώς στην Εικόνα 2.15, αποτρέπουν τους δορυφόρους 20, 22 να αλλάξουν την μεταξύ τους σχέση.

Όταν ο κινητήρας τίθεται σε λειτουργία και περιστρέψει το συσσωμάτωμα κορώνας-φορέα 14, οι μικροί και μεγάλοι δορυφόροι 20, 22 που είναι τοποθετημένοι σταυρωτά στον πλανητικό δίσκο αναγκάζονται σε κυκλική κίνηση. Δεδομένου ότι η εσωτερική και εξωτερική πλανητική διαδρομή 30 ή/και 32 έχουν διαφορετικά ύψη ως προς τον άξονα και βρίσκονται σε διαφορά φάσεως 45° είναι αναμενόμενο να παραλάβουν την ίδια οδήγηση από τους άξονες 2,4 εφόσον αυτοί συναντήσουν την ίδια αντίσταση, όπως δηλαδή θα συνέβαινε με παρόμοιο τρόπο και

στο συμβατικό διαφορικό. Μόλις όμως ο εσωτερικός τροχός του κινούμενου οχήματος εξαιτίας μιας στροφής, διαγράφει συντομότερη διαδρομή σε σύγκριση με τον εξωτερικό τροχό, λαμβάνει χώρα μια εξισορροπητική κίνηση μεταξύ των δύο πλανητών του ένσφαιρου διαφορικού. Η κατανομή ισχύος μεταξύ των αξόνων 2, 4 συμβαίνει εξαιτίας της αξονικής κίνησης των μικρών ή/και μεγάλων δορυφόρων 20, 22 (Εικόνα 2.15), και φέρονται επί των πλανητικών δίσκων 32, 30 εν είδει κεκλιμένων επιπέδων. Αυτή η αρχή της εξισορρόπησης κίνησης μεταξύ των αξόνων 2, 4 μπορεί να εφαρμοστεί σε πλείστες όσες εφαρμογές.

Μια ολική θεώρηση του εσωτερικού του διαφορικού Τσιριγγάκη παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.22 όπου τα μισά κινητά μέρη είναι τοποθετημένα προς επιθεώρηση. [1]



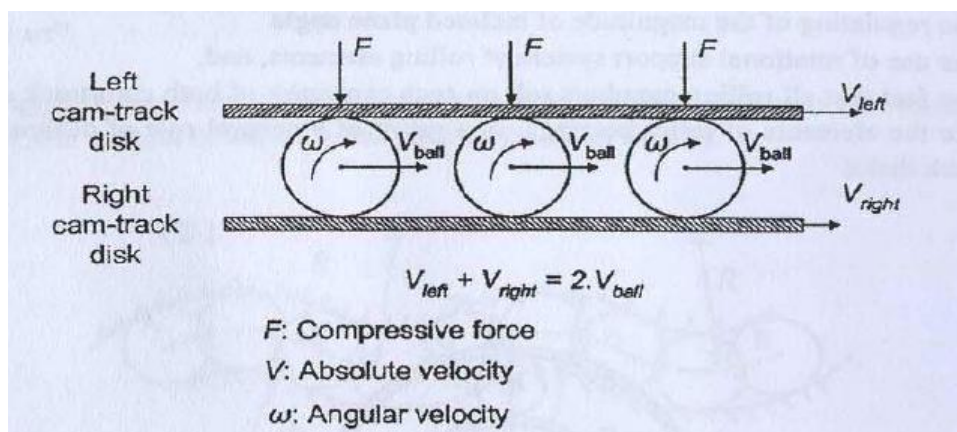
Εικ.2.22 Εξαρτήματα ένσφαιρου διαφορικού
(Πηγή:[http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/GearlessDifferential028\(640x470\).jpg](http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/GearlessDifferential028(640x470).jpg))

2.7.4.Μηχανολογικές αρχές του ένσφαιρου διαφορικού Τσιριγγάκη

Στην Εικόνα 2.23 παρουσιάζεται η βασική αρχή λειτουργίας του ένσφαιρου διαφορικού. Κάθε σφαίρα έχει δύο βαθμούς ελευθερίας – έναν ευθύγραμμο εκφραζόμενο μέσω της ταχύτητας V_{ball} και έναν περιστροφικό. Συνεπώς ισχύει:

$$V_{left} + V_{right} = 2 V_{ball}$$

Τούτο, αποτελεί την κλασική εξίσωση ενός διαφορικού.



Εικ.2.23 Η βασική σύλληψη του ένσφαιρου διαφορικού

Τα δύο ορθογώνια παραλληλεπίπεδα παίζουν το ρόλο των πλανητών ως “ξετυλιγμένοι” δακτύλιοι και αντίστοιχα οι σφαίρες παίζουν το ρόλο των σωμάτων κύλισης-δορυφόρων.

Επισημαίνουμε πως η παραπάνω αρχή λειτουργίας στηρίζεται στην ύπαρξη μιας εξωτερικά επιβαλλόμενης δύναμης προέντασης, η οποία είναι απαραίτητη για να καταστεί δυνατή η μετάδοση της ισχύος μέσω μικρών επιφανειών Hertz. Συνεπώς για τη λειτουργία της διαφόρισης είναι απαραίτητη η εμφάνιση κατάλληλης δύναμης που να δημιουργεί συνθήκες επαφής πρόσφυσης μεταξύ των εξαρτημάτων μεταφοράς ισχύος.

Στην περίπτωση ενός συμβατικού ρουλεμάν, όπως αυτού της Εικόνας 2.24a, είναι προφανές ότι: $V_{out} + V_{in} = 2V_{ball}$

Εάν περιορίσουμε την κίνηση των σφαιρών ώστε $V_{ball} = 0$, τότε:

$$V_{out} + V_{in} = 0$$

ή

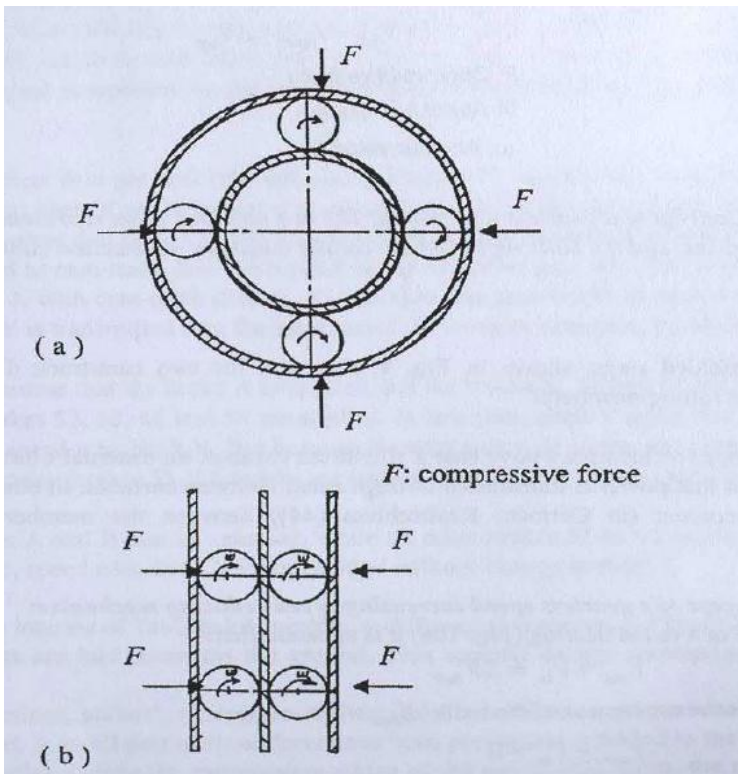
$$\omega_1/\omega_2 = r_2/r_1$$

Η επανάληψη της παραπάνω μονοβηματικής διαδικασίας οδηγεί στα πολλαπλά βήματα ενός πλανητικού συστήματος. Επισημαίνεται ότι σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητο να γίνει προσυμπίεση. Με άλλα λόγια, ο προτεινόμενος μηχανισμός χαρακτηρίζεται από επαφή πρόσφυσης.

2.7.5 Η βάση της εφεύρεσης του Τσιριγγάκη

Το πρόβλημα διαπίστωσης της ανάγκης για εξωτερικές δυνάμεις συμπίεσης πηγάζει από την ίδια την αρχή των κεκλιμένων επίπεδων. Ο κ. Τσιριγγάκης με την εφεύρεσή του συνδύασε αποτελεσματικά τα δεδομένα αυτά με τους εξής τρόπους:

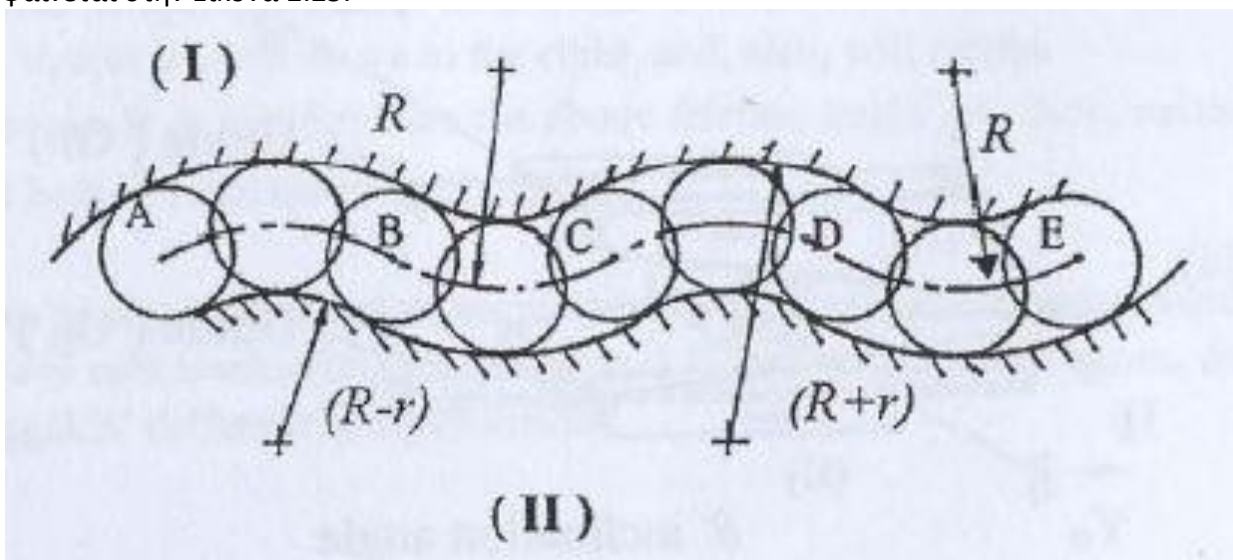
- Με την ρύθμιση της γωνίας του κεκλιμένου επίπεδου
- Με την υποστήριξη περιστρεφόμενου συστήματος κινούμενων μερών και
- Με το γεγονός ότι όλα τα κινούμενα μέρη (δορυφόροι) κυλίνουν σε κάθε πλανητική διαδρομή των πλανητικών δίσκων ακριβώς όπως τα στοιχεία κύλισης των ρουλεμάν.



Εικ.2.24 (α) Μονού θήματος και (β) πολλαπλού θήματος ένσφαιρος μηχανισμός αύξησης ταχύτητας / ελάττωσης ταχύτητα

Ο τρόπος σύλληψης και κατασκευής των καμπυλών στο διαφορικό Τσιριγγάκη, διαφέρει από παλαιότερες αντίστοιχες ευρεσιτεχνίες και χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι η μορφή των κεκλιμένων επίπεδων έχει μια ιδιαίτερη συμμετρία χάρη στην οποία και σε συνδυασμό με τα άλλα μέρη του διαφορικού, επιτυγχάνεται μια ιδανική συνέργεια μεταξύ των πλανητικών δίσκων και των δορυφόρων.

Τα τεχνικά πλεονεκτήματα (δύναμη, αποδοτικότητα, ανθεκτικότητα, κλπ.) δεν παρουσιάζονται ούτε παρατηρούνται σε άλλες ευρεσιτεχνίες, στις οποίες η αρχή των «κεκλιμένων επίπεδων» έχει προσαρμοστεί και χρησιμοποιείται με διαφορετικό τρόπο από εκείνο του κ. Τσιριγγάκη. Είναι σαφές ότι το πειραματικό μοντέλο Τσιριγγάκη έχει, για κάθε πλανητικό δίσκο, δυο ίχνη διαδρομών, ένα εσωτερικό κι ένα εξωτερικό το περίγραμμα των οποίων σχεδιάστηκε και φαίνεται στην Εικόνα 2.25.



Εικ.2.25 Σχέδιο πλανητικών διαδρομών του διαφορικού Τσιριγγάκη : (I) αριστερός πλανήτης, (II) δεξιός πλανήτης

Ο τρόπος της κατασκευής του διαφορικού είχε ως εξής:

Κατασκεύασε ένα καλούπι με δύο καμπύλες διαφορετικών ακτινών (εξωτερική και εσωτερική), οι οποίες, αν αναπτυχθούν, έχουν το ABCDE σχήμα, όπου το E συμπίπτει με το σημείο A. Τα μέρη AB, BC, CD και DE επιλέχθηκαν έτσι ώστε να αποτελούν ίσα τόξα ενός κύκλου με ίδια ακτίνα R. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μια μοναδική εφαπτομένη γραμμή στη διασταύρωση των σημείων A, B, C και D.

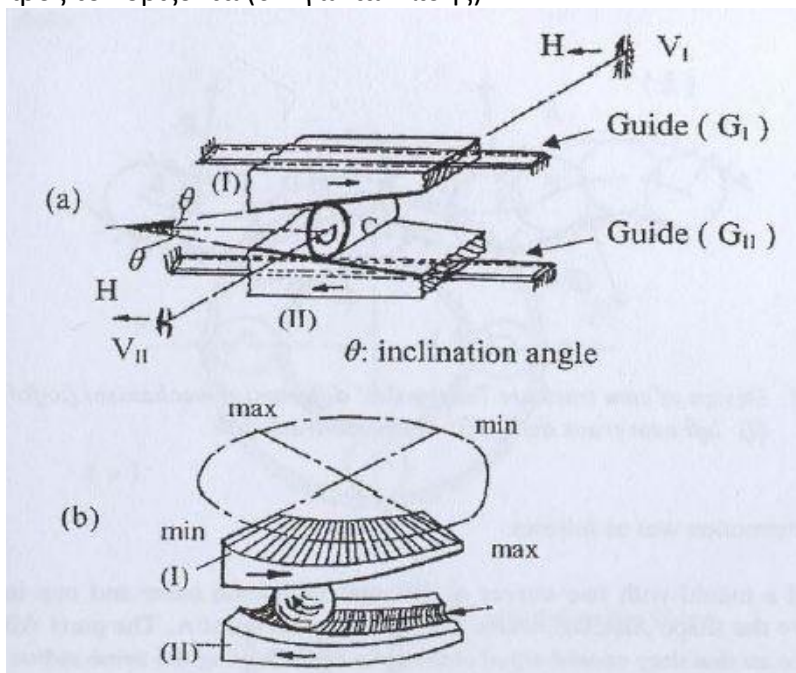
Στην συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε παντογράφος του οποίου το ένα άκρο ακολούθησε στο ίχνος διαδρομής του πλανήτη του καλουπιού και το άλλο (με κίνηση σε πανομοιότυπη καμπύλη) είχε το κέντρο μάζας ενός σφαιρικού κόπτη με ακτίνα r, ίση με αυτή των δορυφόρων 22, 20 (Εικόνα 2.14) για την εξωτερική και εσωτερική καμπύλη, αντίστοιχα. Οι δύο αυτές αναπτυσσόμενες καμπύλες είναι συμμετρικές ως προς το σημείο C (μέσο σημείο του αναπτύγματος). Είναι εύκολο να καταλάβουμε ότι τα μέρη (I) και (II) συνεργάζονται μεταξύ τους μέσω της κύλισης και χωρίς καθόλου ολίσθηση. Οι καμπύλες αποτελούνται από διαδοχικά περιφερειακά τόξα-καμάρες (R+R) και (R-r). Με άλλα λόγια, οι δύο αντίθετες πλανητικές διαδρομές (I) και (II), αντίστοιχα, παράγονται ως οι περικλείουσες (envelopes) των διαδοχικών θέσεων σφαίρας με ακτίνα r, της οποίας το κέντρο ακολουθεί την περιοδική καμπύλη ABCDE.

Βεβαίως, ο ανωτέρω σχεδιασμός δεν είναι περιοριστικός, δεδομένου ότι η πλήρης κίνηση των σφαιρών μεταξύ των καμπυλών των πλανητών, σε ανάπτυξη, θα μπορούσε να επιτευχθεί και μέσω ενός εναλλακτικού σχεδιασμού αντιθέτων συζευγμένων καμπυλών.[1]

2.7.6 Λειτουργία ένσφαιρου διαφορικού Τσιριγγάκη

Κατ' αρχάς, θεωρούμε τον μονοδιάστατο ισοδύναμο μηχανισμό, ο οποίος λαμβάνεται με την "κοπή" και "ανάπτυξη" των πλανητών σε δύο γειτονικές θέσεις. Τα δύο σώματα (I), (II), Εικόνα 2.26) είναι παράλληλα με τους σταθερούς οδηγούς, το σώμα (I) στον οδηγό G_I και το σώμα (II) στον οδηγό G_{II} .

Οι εσωτερικές πλευρές των δύο απέναντι φορέων (I) και (II) έχουν ίσες και αντίθετες κλίσεις ως προς τον οριζοντα ($\theta = \gamma$ γωνία κλίσης).



Εικ.2.26 Σχηματοποίηση του διαφορικού χρησιμοποιώντας (a) ισοδύναμο μιας διάστασης και (b) ενός τετάρτου του μηχανισμού (μπορούμε να παρατηρήσουμε τα μέγιστα και ελάχιστα των πλανητικών τροχιών-διαδρομών).

Μεταξύ των κεκλιμένων επιπέδων, υπάρχει ο κύλινδρος C , του οποίου ο άξονας έστω συνδεόμενος με τους «κάθετους» οδηγούς V_I και V_{II} . Με τον τρόπο αυτό, ο κύλινδρος μπορεί να περιστραφεί ανεβαίνοντας και κατεβαίνοντας, αλλά δεν μπορεί να κινηθεί προς τα δεξιά ή τα αριστερά, όπως κάνουν τα σώματα-κεκλιμένα επίπεδα (I) και (II). Καθώς πιέζουμε το σώμα (II) σύμφωνα με τη φορά του βέλους (προς τα αριστερά), ο κύλινδρος C θα περιστραφεί εξαιτίας τις εξαναγκασμένης δορυφορικής του σχέσης με το σώμα-κεκλιμένο επίπεδο (II). Παράλληλα, ο άξονας του, θα μετατοπισθεί καθοδικά μεταξύ των οδηγών V_I και V_{II} . Όμως, για να επιτευχθεί αυτό, το σώμα-κεκλιμένο επίπεδο (I) πρέπει να κινηθεί προς τα δεξιά, σύμφωνα με την κατεύθυνση του βέλους. Έτσι, ο κύλινδρος C κινείται «υπό» το σώμα-κεκλιμένο επίπεδο (I), ωθώντας το σε κίνηση αντίθετου κατεύθυνσης ως προς το σώμα-κεκλιμένο επίπεδο (II). Έτσι, με αυτό τον απλό μηχανισμό, έχει επιτευχθεί αντίθετη κίνηση από εκείνη του σώματος (II), δηλαδή, καθώς ωθούμε το σώμα-κεκλιμένο επίπεδο (II) προς τα αριστερά, παρατηρούμε το σώμα-κεκλιμένο επίπεδο (I) να μετατοπίζεται προς τα δεξιά και τον κύλινδρο C να πηγαίνει προς τα κάτω ενώ συγχρόνως περιστρέφεται με πλήρη κύλιση.

Ας σκεφτούμε το εξής πείραμα. Ξεκινώντας από μια ακίνητη θέση, μετακινούμε τους οδηγούς V_I και V_{II} προς τα δεξιά.

Προφανώς ο κύλινδρος C θα κινηθεί, επίσης προς τα δεξιά και θα πιέσει ισοδύναμα τα σώματα-κεκλιμένα επίπεδα (I) και (II), μετακινώντας τα προς τα δεξιά.

Εάν, όμως, ανακόψουμε την κίνηση του σώματος-κεκλιμένου επιπέδου (II) και μετακινήσουμε τους οδηγούς V_I και V_{II} προς τα δεξιά, τότε υπάρχουν δυο πιθανότητες, ανάλογα με τον γωνία κλίσης θ :

α) Εάν η γωνία θ είναι μεγαλύτερη από τη γωνία τριβής ρ (συντελεστής τριβής $\mu = \tan\theta$) μεταξύ του σώματος-κεκλιμένου επιπέδου (I) και του οδηγού G_{II} , τότε το σώμα (I) κινείται με διπλή ταχύτητα από εκείνη του κυλίνδρου C . Στην περίπτωση αυτή ο κύλινδρος C μετακινείται προς τα κάτω με την υποστήριξη των οδηγών V_I και V_{II} , που κινούνται προς τα δεξιά, και επίσης, περιστρέφεται.

β) Εάν η γωνία θ είναι μικρότερη από τη πιο πάνω γωνία τριβής ρ τότε, ούτε ο κύλινδρος C ούτε το σώμα (I) μπορούν να κινηθούν.

Η Εικόνα 2.26b παρουσιάζει μια περιμετρική διάταξη της προηγούμενης «μονοδιάστατης ιδέας». Εάν θεωρήσουμε κυματοειδείς διαδρομές, αντί των ευθειακών, τότε αποδίδεται ευκρινώς στην Εικόνα 2.26b η ιδέα του διαφορικού Τσιριγγάκη.

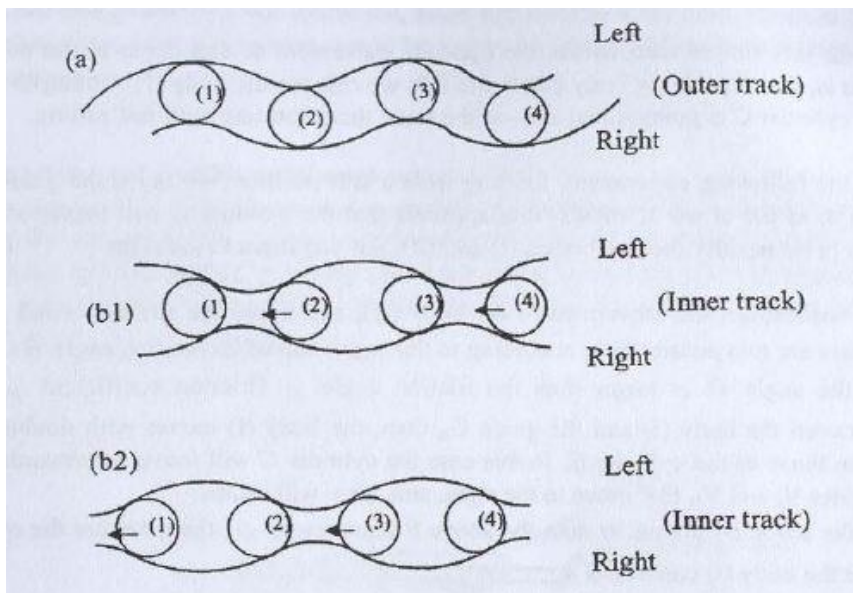
2.7.7. Ανάλυση του υπόψη μηχανικού συστήματος .

Στην Εικόνα 2.27, μπορούμε να δούμε την αρχική θέση των δορυφόρων (εξωτερικές και εσωτερικές διαδρομές), καθώς κυλίνουν στις αντίστοιχες επιφάνειες και των δύο πλανητών.

Στην Εικόνα 2.27a εμφανίζεται μια θέση “νεκρού σημείου” για την εξωτερική διαδρομή του πλανήτη, ενώ στην Εικόνα 2.27b1 φαίνεται η αντίστοιχη θέση για την εσωτερική διαδρομή του πλανήτη (με διάταξη δορυφόρων, αυτήν της Εικόνας 2.15). Η αντίστοιχη θέση για τη διάταξη δορυφόρων της Εικόνας 2.16 φαίνεται στην Εικόνα 2.27b2.

Σε κάθε θέση και σε όλα τα σημεία επαφής, οι κλίσεις των εφαπτόμενων γραμμών (γωνίες επαφής) είναι για κάθε πλανητική διαδρομή ίδιες.

Εκτός αυτού, το άθροισμα των γωνιών επαφής και των δύο πλανητικών διαδρομών (εσωτερική και εξωτερική), έχουν μια σταθερή τιμή θ_m .



Εικ.2.27 Θέσεις των δορυφόρων στις εσωτερικές και εξωτερικές διαδρομές των πλανητικών δίσκων:

(a) Εξωτερική πλανητική διαδρομή στο “νεκρό σημείο”

(b1) Αντίστοιχη εσωτερική πλανητική διαδρομή

(b2) Αντίστοιχη εσωτερική πλανητική διαδρομή

2.7.8 Εμφανιζόμενες Δυνάμεις στο Ένσφαιρο Διαφορικό

Είναι εύκολο να κατανοηθεί, από την Εικόνα 2.27, ότι σε κάθε περίπτωση, μόνο οι μισοί δορυφόροι από κάθε πλανήτη λειτουργούν.

Για παράδειγμα, αν η ισχύς κατευθύνεται προς τα αριστερά της εσωτερικής διαδρομής του πλανήτη, τότε η μεταδιδόμενη ισχύς παρουσιάζεται μόνο στους δορυφόρους (2) και (4). Την ίδια στιγμή, στην εξωτερική πλανητική διαδρομή οι ενεργοί δορυφόροι (εκτός των νεκρών σημείων) είναι οι (1) και (3).

Μετά από μια περιστροφή 180 μοιρών των πλανητών (στον μηχανισμό των τεσσάρων στοιχείων) οι δορυφόροι που μεταφέρουν ισχύ αλλάζουν αμοιβαία ρόλους καθώς γίνεται η μεταφορά ισχύος.

Μια προκαταρκτική ανάλυση δυνάμεων έδειξε ότι το σύνολο του μηχανισμού μπορεί να προσομοιωθεί με δύο κεκλιμένα επίπεδα, των οποίων η γωνία θ ($\theta = \kappa * \theta_m$), με κ να εξαρτάται κυρίως από παραμέτρους διαστάσεων όπως οι ακτίνες και το πλάτος των κυματοειδών καμπύλων.

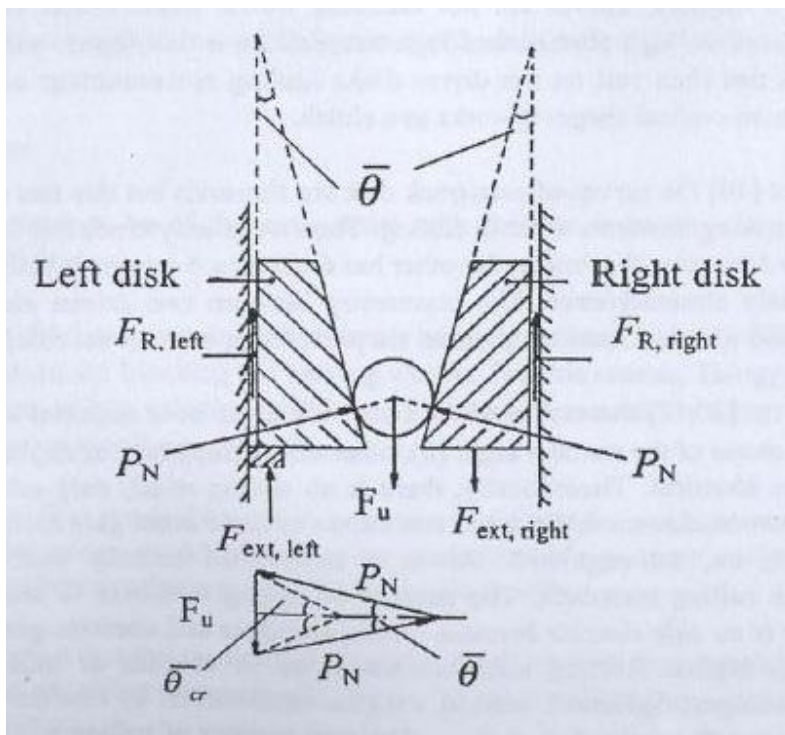
Αυτά τα κεκλιμένα επίπεδα συνεργάζονται μεταξύ τους μέσω ενός ισοδύναμου δορυφόρου, ο οποίος μεταδίδει την ισχύ μέσω της δύναμης F_u .

Αν εμποδιστεί το αριστερό κομμάτι του μηχανισμού να κινηθεί, διαπιστώνεται ότι υπάρχει μια κρίσιμη γωνία $\theta_{m-critical}$ και, κατά συνέπεια ισχύει:

$\theta = \kappa * \theta_{m-critical}$, όπου:

- Εάν $\theta > \theta_{m-critical}$ το δεξί μέρος κινείται προς τα κάτω, εκτός και αν ασκηθεί δύναμη αντιτιθέμενη στην F_u
- Εάν $\theta < \theta_{m-critical}$ το δεξί μέρος μένει ακίνητο ανεξάρτητα από το μέγεθος του πλάτους της δύναμης F_u . Μόνο αν ασκηθεί μια δύναμη προς τα κάτω (ομόρροπη της F_u) στο δεξί μέρος τότε αυτό μπορεί να κινηθεί προς τα κάτω

Από την ανωτέρω ανάλυση προκύπτει ότι το διαφορικό Τσιριγγάκη ανήκει στη δεύτερη κατηγορία. Η σχεδιαστική παράμετρος $\theta_{m-critical}$ δίδει στο διαφορικό Τσιριγγάκη σημαντικό τεχνολογικό πλεονέκτημα.[1]



Εικ.2.28 Ισοδύναμος μηχανισμός του διαφορικού, κατά μία διάσταση.

3. Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός

3.1 Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός, Ορισμοί και Αντικείμενο

Ως **Αντίστροφο Σχεδιασμό (Reverse Engineering)(ΑΣ)** ορίζουμε τη δημιουργία του συνόλου των τεχνολογικών προδιαγραφών και δεδομένων που περιγράφουν πλήρως ένα υπαρκτό αντικείμενο, προϊόν ή κατασκευή μέσω της ανάλυσης της δομής, της χρήσης και της λειτουργίας του όταν τα δεδομένα αυτά είναι ανύπαρκτα, ελλιπή, παρωχημένα ή μη διαθέσιμα [3].

Οι ρίζες του ΑΣ μπορούν να αναζητηθούν πίσω στους αρχαίους χρόνους, όπου ο άνθρωπος ερεύνησε μεθοδικά διαφόρων τύπων στοιχεία/συστήματα αναζητώντας τα χαρακτηριστικά, τις πάσης φύσεως ιδιότητες και τον τρόπο λειτουργίας τους.

Στη σημερινή εποχή η έννοια του ΑΣ χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο από ένα ευρύ φάσμα τεχνολογικών και φυσικών επιστημών (μηχανολογία, ηλεκτρολογία, ηλεκτρονική, τεχνολογία λογισμικού, χημεία, βιολογία, φαρμακευτική κ.α.) ώστε να καλυφθεί μια πρακτική, άμεση και πολλές φορές αναπόφευκτη ανάγκη για περιγραφή αντικείμενων σχετικών με την κάθε μία εξ αυτών.

Τέτοια αντικείμενα αποτελούν συχνά μια πρωτότυπη μηχανολογική κατασκευή, ένα μηχανολογικό εξάρτημα, ένα πειραματικό μοντέλο, μια ηλεκτρονική πλακέτα, ένα λογισμικό Η/Υ, ένα σύνθετο υλικό, ένα φαρμακευτικό σκεύασμα κ.α.

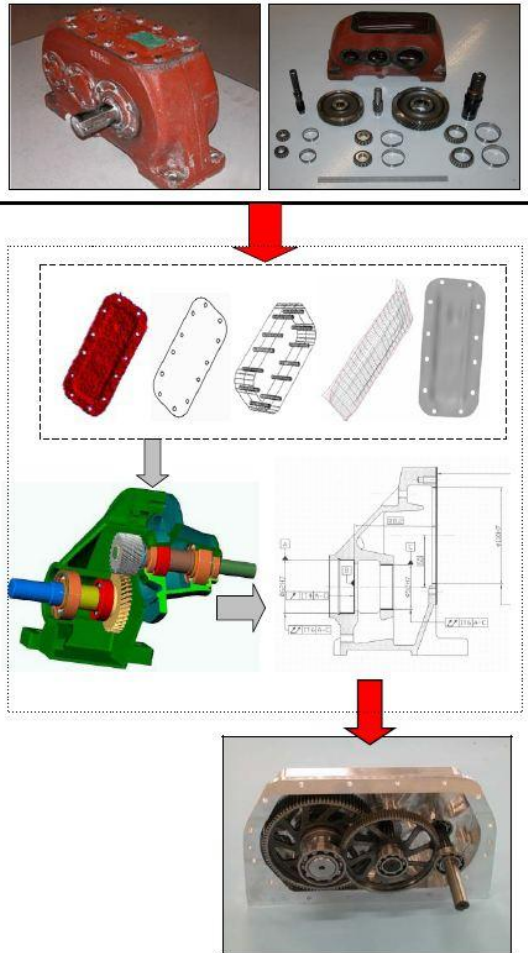
Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως πολλές σύγχρονες μηχανές/μηχανισμοί εφευρέθηκαν με πηγή έμπνευσης την ίδια τη φύση στηριζόμενοι στις τεχνικές του ΑΣ. Χαρακτηριστικότερο παράδειγμα αποτελεί το αεροπλάνο. Το πρώτο αυτοκινούμενο αεροπλάνο των αδελφών Ράιτ στηρίχθηκε στην παρατήρηση και στη μίμηση της κίνησης των πτηνών.

Στη διπλωματική αυτή εργασία εφαρμόζουμε συστηματικές μεθόδους του Αντίστροφου Σχεδιασμού στο επιστημονικό αντικείμενο του Κατασκευαστή Μηχανολόγου Μηχανικού ώστε να αντλήσουμε τα απαραίτητα τεχνικά δεδομένα που περιγράφουν πλήρως μια πρωτότυπη μηχανολογική κατασκευή, δηλαδή το ένσφαιρο διαφορικό.

Από αυτή τη σκοπιά λοιπόν ο ΑΣ συγκεκριμενοποιείται στον Αντίστροφο Μηχανολογικό Σχεδιασμό.

Ως **Αντίστροφο Μηχανολογικό Σχεδιασμό (ΑΜΣ)** ορίζουμε τη διαδικασία αντιγραφής/αναπαραγωγής ενός αντικειμένου, λειτουργικά και διαστασιολογικά, με την εξέταση και ανάλυση υπαρχόντων εξαρτημάτων, η οποία έχει στόχο την ανάπτυξη των τεχνικών δεδομένων που αφορούν στο σύνολο των φυσικών και υλικών του χαρακτηριστικών.

Ο ΑΜΣ αποτελεί συνεπώς το κύριο τεχνολογικό εργαλείο για την αποτύπωση και την ψηφιακή τρισδιάστατη αναπαράσταση φυσικών μορφών μαζί με το σύνολο των δεδομένων που θα επιτρέψουν την αναπαραγωγή, τεκμηρίωση, έλεγχο και ανασχεδιασμό των προϊόντων στα οποία αυτές ανήκουν.



Σχ.3.1 ΑΜΣ Κιβωτίου Ταχυτήτων

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές πως ο ΑΜΣ δεν περιορίζεται μόνο στο σχεδιασμό. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από αυτόν δεν είναι απλά ένα αντίγραφο ενός φυσικού αντικείμενο, αλλά αφορά στο σύνολο των τεχνολογικών παραμέτρων που αυτό ενσωματώνει. Για το σκοπό αυτό, ο ΑΜΣ ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία απευθύνεται, περιλαμβάνει ένα αριθμό διαφορετικών τεχνολογιών και διακεκριμένων δραστηριοτήτων όπως π.χ. ψηφιακή αποτύπωση επιφανειών, μετρήσεις διαστάσεων, διαχείριση και μαθηματική επεξεργασία νέφους σημείων, μοντελοποίηση σε περιβάλλον CAD(Computer-Aided Design), διαπίστωση ιδιοτήτων υλικού κι επιφανειακών/ θερμικών κατεργασιών, λειτουργική ανάλυση συναρμολογημένων συνόλων, διαστασιολογική και γεωμετρική ανάλυση των επί μέρους εξαρτημάτων κ.α

3.2 Εξέλιξη και σημερινά δεδομένα

Οι εφαρμογές ΑΜΣ αφορούν στη μεγάλη πλειοψηφία τους στην κάλυψη υπαρκτών και άμεσων τεχνολογικών αναγκών. Τόσο οι ανάγκες τέτοιου είδους, όσο και η ίδια η αντιμετώπισή τους με διάφορα μέσα και τρόπους είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τη γέννηση και την εξέλιξη

της τεχνολογίας. Αυτό που στις τελευταίες δεκαετίες του προηγούμενου αιώνα ονομάστηκε ΑΜΣ είναι μια πρακτική που λόγω ανάγκης εφαρμόζονταν ανέκαθεν και που ιστορικά μπορεί να εντοπιστεί σε όλη την ιστορική πορεία της βιομηχανικής εποχής. Παρ' όλα αυτά, η σύγχρονη, συστηματική κι επιστημονική προσέγγιση της διαδικασίας του ΑΜΣ διαφοροποιείται κατά κύριο λόγο στα εξής σημεία:

- I. Ο ΑΜΣ γίνεται πλέον με άλλες απαιτήσεις, σε εντελώς διαφορετική βάση. Η αντιγραφή-αναπαραγωγή του δείγματος ενός υπαρκτού αντικειμένου με ξεπερασμένα μέσα (παντογράφος, ο τόννος αντιγραφής κ.α.) αποκλείει ουσιαστικά την επιστημονική τεκμηρίωσή του, τον ανασχεδιασμό-βελτιστοποίησή του, την παραγωγή και τον έλεγχο του με χρήση των σύγχρονων μέσων και δυνατοτήτων που οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές προσφέρουν, καθώς προαπαιτούμενο για αυτήν αποτελεί η αναγνώριση των τεχνικών του δεδομένων του δείγματος και η τρισδιάστατη ψηφιακή μοντελοποίησή του.
- II. Τα μέσα με τα οποία πραγματοποιείται ο ΑΜΣ διαφέρουν, καθώς η πρόοδος που παρατηρείται στις σύγχρονες τεχνολογίες (φορητών ψηφιοποιητές, μηχανές σάρωσης και μέτρησης υψηλής ακρίβειας, μηχανές ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων κ.α.) σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα υπολογιστικά εργαλεία και την υπολογιστική ισχύ που έχουν γίνει προσιτά και διαθέσιμα, έχουν σηματοδοτήσει μια νέα εποχή στον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζονται οι εφαρμογές ΑΜΣ από πλευράς απαιτήσεων χρόνου, ακρίβειας, κόστους και αξιοπιστίας.
- III. Ο ΑΜΣ γίνεται πλέον σε πολύ μεγαλύτερη έκταση, σε νέες περιοχές (π.χ. τεκμηρίωση αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος), σε πολύ πιο περίπλοκες εφαρμογές (π.χ. βιοϊατρικές), στις οποίες η εμπειρική αντιμετώπιση χωρίς την επιστημονική τεκμηρίωση είναι από μόνη της ανεπαρκής.

3.3 Ο Ρόλος του Μηχανολόγου Μηχανικού στον ΑΜΣ

Ο ρόλος που διαδραματίζει ο Μηχανολόγος Μηχανικός στην εφαρμογή του ΑΜΣ είναι μείζονος σημασίας καθώς οι τεχνικές του ΑΜΣ, η ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνολογιών ψηφιακής αποτύπωσης τόσο με επαφή (π.χ. μηχανών μέτρησης συντεταγμένων κ.α.) όσο και χωρίς επαφή (π.χ. σαρωτές 3D laser κ.α), η δημιουργία ενός τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου που αποδίδει με υψηλή ακρίβεια τη μορφή ενός φυσικού αντικειμένου σε περιβάλλον CAD αποτελούν σύγχρονες και ιδιαίτερα σημαντικές περιοχές δραστηριότητάς του. Με στόχο την επίλυση προβλημάτων που εμφανίζονται στο βιομηχανικό και κατασκευαστικό περιβάλλον οι παραπάνω περιοχές εδώ και αρκετές δεκαετίες αποτελούν αντικείμενο μελέτης που εντάσσεται και στο επιστημονικό πεδίο του Μηχανολόγου Μηχανικού. Η τρέχουσα έρευνα σε διεθνές επίπεδο επιδιώκει οι διεργασίες του ΑΜΣ υλοποιούμενες σε περιβάλλον CAD να επιτυγχάνουν υψηλή ακρίβεια αποτύπωσης γεωμετρίας και διαστάσεων και να εξασφαλίζουν προϋποθέσεις περαιτέρω αξιοποίησης των αποτελεσμάτων τους, όπως ανάλυση κατασκευής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis), βελτιστοποίηση της

κατασκευής ως προς κάποιες παραμέτρους κ.α.

3.4 Πεδία Εφαρμογής ΑΜΣ

Τα πεδία εφαρμογής του ΑΜΣ προκύπτουν από πραγματικές ανάγκες, οι οποίες και αποτελούν αφετηρία του. Τέτοιες ανάγκες είναι [3]:

- Μεταφορά κατασκευαστικών πληροφοριών από πειραματικά μοντέλα ή ανταγωνιστικά προϊόντα.
- Αναθεώρηση/ τροποποίηση/ βελτίωση υφιστάμενων κατασκευών/ μηχανών λόγω αλλαγών των αρχικών απαιτήσεων/δεδομένων.
- Αποτύπωση τροποποιήσεων/ επεμβάσεων που προέκυψαν από λειτουργικές, πειραματικές, κ.α. δοκιμές, από φθορές και βλάβες κανονικής ή αντικανονικής χρήσης κ.α.
- Αποτύπωση χειροποίητων πρωτοτύπων/ μοντέλων.
- Αποτύπωση τροποποιήσεων/ επεμβάσεων που προέκυψαν κατά την παραγωγική διαδικασία π.χ. παραμορφώσεις λόγω συγκόλλησης.
- Αποτύπωση τροποποιήσεων που προέκυψαν μετά τη συναρμολόγηση.
- Εφαρμογή τεχνολογιών CAD/CAM/CAE σε αντικείμενα πολιτιστικού ενδιαφέροντος, π.χ. αντίγραφα αρχαίων γλυπτών ή αντικειμένων.
- Βιοϊατρικές εφαρμογές.
- Κατασκευή ανταλλακτικών που δεν διατίθενται πλέον από τον αρχικό κατασκευαστή του μηχανήματος.
- Άμεση επείγουσα αντικατάσταση εξαρτήματος που έχει αστοχήσει, π.χ. βιομηχανική παραγωγή, πλοία κ.α.
- Άρση της αποκλειστικότητας από τον μοναδικό προμηθευτή

Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να πραγματοποιηθεί στο θέμα της συμβολής του ΑΜΣ στην ανταγωνιστικότητα. Εταιρίες ή ακόμη και χώρες όπως η Ελλάδα, η οποίες κατ' εσχόλην εισάγουν μηχανολογικό εξοπλισμό, που θεωρείται συχνά από τον αρχικό κατασκευαστή παρωχημένος, αλλά παραμένει σε χρήση πέραν του προβλεπόμενου ορίου διάρκειας ζωής του (π.χ βιομηχανικός εξοπλισμός, αμυντικά συστήματα κ.α.) έχουν τη δυνατότητα με την εφαρμογή πεδίων του ΑΜΣ και την παράλληλη ανάπτυξη επιστημονικά συγκροτημένης μεθοδολογίας, να κατασκευάσουν το δικό τους σύγχρονο εξοπλισμό, αναπτύσσοντας τη δική του τεχνολογία/τεχνογνωσία.

Ακόμη αξίζει να επισημανθεί πως στον αντίποδα των παραπάνω πεδίων εφαρμογής υφίστανται και ορισμένα 'απαγορευμένα' πεδία στα οποία ο ΑΜΣ δεν πρέπει να βρίσκει εφαρμογή. Οι περιπτώσεις αυτές οριοθετούνται τις περισσότερες φορές από κώδικες ηθικής που αναφέρονται στην προστασία της πνευματικής ιδιοκτησίας, του βιομηχανικού απορρήτου κ.α. Πέρα όμως από την ηθική διάσταση, ο ουσιαστικός καθορισμός των περιοχών αυτών προκύπτει από την εκάστοτε ισχύουσα εθνική και διεθνή νομοθεσία που αφορά στον τρόπο και τη διάρκεια της κατοχύρωσης δικαιωμάτων ευρεσιτεχνίας, πνευματικής ιδιοκτησίας κ.λ.π.

3.5 Στάδια ΑΜΣ

Τα στάδια και οι επιμέρους φάσεις που είναι απαραίτητες κατά τον ΑΜΣ εξαρτώνται κυρίως από τις ιδιαιτερότητες και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Στη γενική περίπτωση όπου αντικείμενο του ΑΜΣ είναι ένα συναρμολογημένο σύνολο εξαρτημάτων πιθανά στάδια είναι τα εξής [3]:

- I. *Λειτουργική / Οικονομικοτεχνική Ανάλυση.* Περιλαμβάνει τη συλλογή και την αξιολόγηση της διαθέσιμης τεκμηρίωσης και των πληροφοριών σχετικά με την κατασκευή που αποτελεί αντικείμενο ΑΜΣ, τον καθορισμό των ζητούμενων τεχνικών δεδομένων και των απαιτούμενων δοκιμών, την εκπόνηση χρονοδιαγράμματος, την αρχική εκτίμηση κόστους κ.α.
- II. *Διαδικασία Αποσυναρμολόγησης* των επιμέρους υποσυνόλων, κατά την οποία γίνεται έλεγχος, παρατήρηση, δοκιμές και αρχικές μετρήσεις παραμέτρων που αφορούν στη λειτουργία τους, αναγνώριση των εξαρτημάτων που τα αποτελούν, και καθορισμός των απαιτούμενων τεχνικών δεδομένων.
- III. *Σχέδιο διαχείρισης και καταγραφή* για τον καθορισμό μιας ορθολογικής πορείας των αναγκαιών εργασιών, την αποφυγή επαναλήψεων, καθυστερήσεων, παραλήψεων, την επανεκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου κ.λ.π.
- IV. *Ανάλυση εξαρτημάτων* κατά την οποία μέσα από επιμέρους διαδικασίες όπως η διαστασιολογική και γεωμετρική ανάλυση των εξαρτημάτων, η ανάλυση υλικών, η αναγνώριση και ανάλυση ηλεκτρικών ή / και ηλεκτρολογικών χαρακτηριστικών κ.α. καθορίζονται τα τεχνικά δεδομένα στα οποία βασίζονται οι επόμενες φάσεις.
- V. *Εκπόνηση Κατασκευαστικών Σχεδίων* στα οποία με βάση των τα τεχνικά δεδομένα που προέκυψαν καθορίζεται το πλήρες σύνολο των παραμέτρων που απαιτούνται για την ανακατασκευή των εξαρτημάτων όπως π.χ. ανοχές και συναρμογές, υλικά, ποιότητα επιφανειών, επικαλύψεις κι επιφανειακές κατεργασίες, απαιτούμενοι έλεγχοι και δοκιμές κλπ. Στο στάδιο αυτό εντάσσεται ο ανασχεδιασμός και η ενδεχόμενη εισαγωγή βελτιώσεων ή αλλαγών στον αρχικό σχεδιασμό.
- VI. *Ποιοτικός Έλεγχος* ο οποίος αφορά στην πληρότητα και τη συμμόρφωση με τα πρότυπα και τις απαιτήσεις των κατασκευαστικών σχεδίων του προηγούμενου σταδίου αλλά και στην κατασκευή πρωτοτύπων και τη διεξαγωγή σχετικών ελέγχων και δοκιμών.
- VII. *Επισκόπηση/ επανεξέταση της προτιθέμενης παραγωγής* με στόχο την τελική εκτίμηση των οικονομικών μεγεθών και παραμέτρων της δοκιμαστικής παραγωγής, την

αξιολόγηση προσφορών από υποψήφιους κατασκευαστές του αντικειμένου, τη λήψη αποφάσεων του τύπου «κατασκευή ή αγορά» κ.λ.π.

- VIII. *Δοκιμαστική Παραγωγή* στην οποία συμπεριλαμβάνονται η κατασκευή, ο ποιοτικός έλεγχος των εξαρτημάτων, η συναρμολόγηση, ο έλεγχος και οι δοκιμές λειτουργίας των συναρμολογημένων συνόλων, ο έλεγχος της συμμόρφωσης τους με τις αρχικές απαιτήσεις και προδιαγραφές κ.λ.π.
- IX. *Οριστικοποίηση του Συνόλου Τεχνικών Δεδομένων* που αποτελεί το τελευταίο στάδιο και την κατάληξη της διαδικασίας του ΑΜΣ με την οριστική αποδοχή των εξαρτημάτων και των συναρμολογημένων συνόλων που προέκυψαν από τη δοκιμαστική παραγωγή.

3.6 Διάγραμμα ροής ΑΜΣ

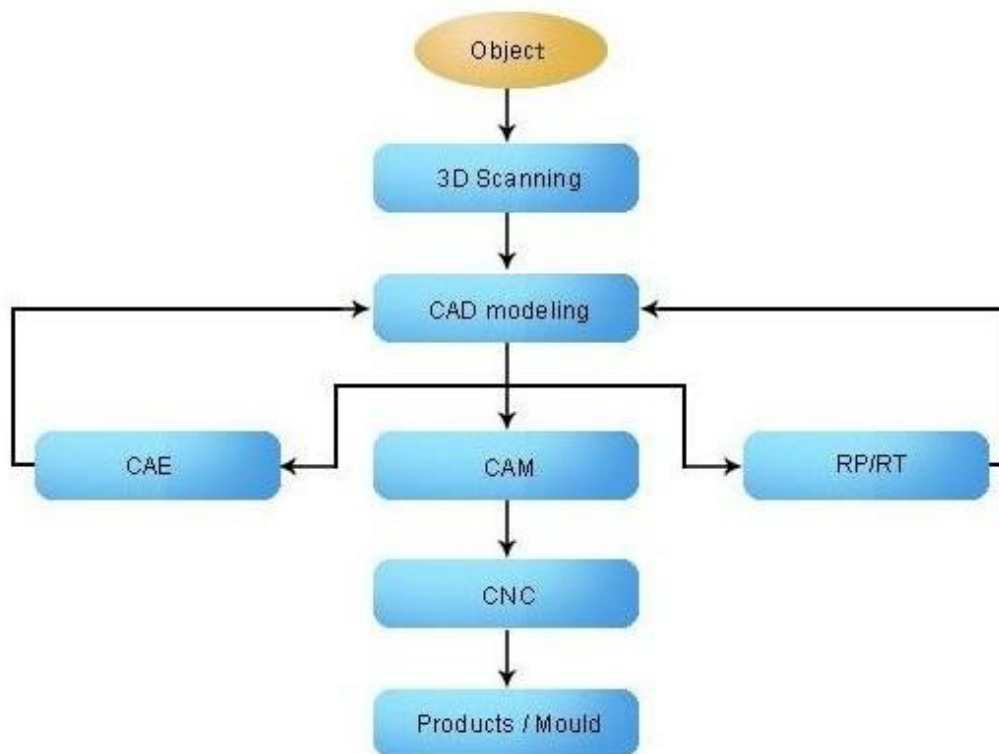
Αρχικά εισάγουμε έννοιες ,οι οποίες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την εφαρμογή του ΑΜΣ στο σύγχρονο τεχνολογικό περιβάλλον και εν συνεχεία παρουσιάζουμε ένα τυπικό διάγραμμα ροής του ΑΜΣ, στο οποίο γίνεται σαφής ο τρόπος με τον υλοποιούνται τα προαναφερθέντα στάδια με τη χρήση των σύγχρονων τεχνολογικών μέσων.

- I. *Object*: Το προς ΑΜΣ αντικείμενο.
- II. *3D Scanning*: Ψηφιακή αποτύπωση φυσικού αντικειμένου με στόχο τη συλλογή πληροφοριών, απαραίτητων για τη δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου, σχετικών με το σχήμα και την εμφάνισή του (π.χ. χρώμα). (εκτενέστερη ανάλυση του 3d Scanning και των μεθόδων του θα γίνει στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας).
- III. *CAD (Computer-Aided Design) modeling*: Μοντελοποίηση του αντικειμένου με τη βοήθεια υπολογιστή. Πραγματοποιείται συνήθως σε τυποποιημένα σχεδιαστικά πακέτα (π.χ. Solid-Works , Inventor, Pro Engineer, Catia κ.α.) αξιοποιώντας τις πληροφορίες που αντλήθηκαν από το 3d Scanning.
- IV. *CAE (Computer-Aided Engineering)*: Μηχανολογικός σχεδιασμός εξ ολοκλήρου με τη βοήθεια υπολογιστή. Περιλαμβάνει την ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων, την κινηματική ανάλυση, τη θερμική ανάλυση, την υπολογιστική δυναμική των ρευστών (CFD Computational Fluid Dynamics), τη βελτιστοποίηση κ.α.
- V. *RP/RT (Rapid Prototyping/Rapid Tooling)*: Ταχεία πρωτοτυποποίηση (αντικειμένου/καλουπιού προς δημιουργία αντικειμένου). Αποτελεί την αυτόματη κατασκευή φυσικών τρισδιάστατων αντικειμένων με την τεχνολογία additive manufacturing

(προσθετική παρασκευή) και υλοποιείται συνηθέστερα σε 3d Printers (τρισεδιάστατους εκτυπωτές).

- VI. *CAM (Computer-Aided Manufacturing)*: Έλεγχος των εργαλειομηχανών και του συναφούς εξοπλισμού για την κατασκευή-επεξεργασία τεμαχίων με τη χρήση λογισμικού ηλεκτρονικών υπολογιστών.
- VII. *CNC (Computer Numerical Control)*: Έλεγχος-Αυτοματοποίηση των κέντρων κατεργασιών με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών.
- VIII. *Product/Mould (Προϊόν/Καλούπι)*: Παραγωγή του τελικού ανασχεδιασμένου, σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία, προϊόντος ή καλουπιού.

Διάγραμμα Ροής Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού



Εικ.3.2 Διάγραμμα Ροής ΑΜΣ (Πηγή: <http://www.digitalmanu.com/images/lcte.jpg>)

Στα πλαίσια της διπλωματικής μας εργασίας ασχολούμαστε με τα 4 πρώτα στάδια(Object,3D Scanning, CAD modeling, CAE) του ΑΜΣ όπως αυτά αναλύθηκαν παραπάνω. Έχοντας λοιπόν το πρότυπο ένσφαιρο διαφορικό στα χέρια μας προβαίνουμε σε 3d Scanning του εξαρτημάτων που το αποτελούν και αναπαράγοντας τις επιφάνειες και τις δομές των εξαρτημάτων αυτών, στο περιβάλλον του SolidWorks 2011, δημιουργούμε το ζητούμενο τρισεδιάστατο μοντέλο. Τέλος πραγματοποιούμε στατική και κινηματική ανάλυση του διαφορικού αποσκοπώντας

μελλοντικά στη βελτιστοποίηση και την ταχεία πρωτοτυποποίηση του. Κάθε ένα από τα βήματα τα οποία έγιναν θα αναλυθεί διεξοδικά στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας.

3.7 Σύγκριση Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού με Μηχανολογικό Σχεδιασμό

Ο Μηχανολογικός Σχεδιασμός (ΜΣ) είναι μια διαδικασία επινόησης ενός συστήματος, ενός στοιχείου ή μια διαδικασία ικανοποίησης μηχανολογικών προκλήσεων και κάλυψης επιθυμητών αναγκών. Επικεντρώνεται στη δημιουργικότητα και αυθεντικότητα. Αντίθετως, ο ΑΜΣ εστιάζεται στην αξιολόγηση και ανάλυση της επαναδημιουργίας πρότυπων κομματιών, συμπληρώνοντας τα πιθανώς εμφανιζόμενα κενά, υιοθετώντας παράλληλα μηχανολογικά αποδεκτές λύσεις.

Ο ΑΜΣ αποτελεί μια τυπική εφαρμογή για μηχανικούς οι οποίοι χρειάζονται να αντιγράψουν ή να επιδιορθώσουν ένα φθαρμένο εξάρτημα, δεδομένου ότι οι απαραίτητες εργοστασιακές πληροφορίες του εξαρτήματος αυτού δεν είναι διαθέσιμες. Οι τεχνικές του ΑΜΣ μπορούν ακόμη να εφαρμοστούν σε νέους σχεδιασμούς παλιών κομματιών. Ο ΑΜΣ αποτελεί δηλαδή μια διαδικασία επανεφεύρεσης, η οποία ακολουθεί αντίστροφη πορεία (από έτοιμο προϊόν πίσω στις ρίζες του). Αντίθετα ο ΜΣ χαρακτηρίζεται ως ένας εξαρχής δημιουργικός τομέας.

Κατά τον ΑΜΣ ένα υπάρχον και πιθανώς φθαρμένο εξάρτημα μετρίεται και αναλύεται με την κατάλληλη μεθοδολογία, ώστε να μπορεί να επαναδημιουργηθεί ένα τυπικό μηχανολογικό σχέδιο για μελλοντική παραγωγή. Στο ΜΣ αντίθετα, το σχέδιο πρώτα παράγεται από μια αρχική ιδέα ή καινοτομία και το στάδιο της παραγωγής έπεται. Το πρώτο μέρος του ΑΜΣ είναι η διεξαγωγή μετρήσεων και αναπαραγωγή δεδομένων ενός υπάρχον κομματιού. Τέτοιου είδους συγκεντρωμένες πληροφορίες αναλύονται και ερμηνεύονται. Κατά τη διαδικασία ανάκτησης πληροφοριών, ο μηχανικός θα πρέπει να αποσπάσει ει δυνατόν περισσότερες σχετικές πληροφορίες, συμπεριλαμβάνοντας τα διαθέσιμα τεχνικά δεδομένα και σχέδια.

Είναι επίσης σημαντικό να αναγνωρίσει τα πεδία που παρουσιάζουν ελλείψεις πληροφορίες κατά το δυνατόν συντομότερα. Ένας επιτυχημένος ΑΜΣ απαιτεί υψηλή εξοικείωση και γνώση του αντικειμένου στο οποίο εφαρμόζεται.

Παρόλο που ο πρωταρχικός στόχος του ΑΜΣ είναι να μιμηθεί ή και να αντιγράψει το πρότυπο αντικείμενο, τις περισσότερες φορές αυτό δεν συμβαίνει. Τα δυο αντικείμενα είναι βέβαια άμεσα συγκρίσιμα χωρίς όμως να είναι πιθανό να έχουν υιοθετηθεί οι ίδιες διαστασιολογικές ακρίβειες και διαδικασίες παραγωγής. Παρόλα αυτά το αντικείμενο του ΑΜΣ οφείλει να προσεγγίζει το πρότυπο στον κατά το δυνατό μεγαλύτερο βαθμό και ει δυνατόν να παρουσιάζει ορισμένα βελτιωμένα χαρακτηριστικά.

Κάτω από ορισμένες καταστάσεις ο ΑΜΣ αποτελεί μια από τις ελάχιστες εναλλακτικές του μηχανικού για να εκπληρώσει ένα στόχο. Για παράδειγμα όταν τα σχεδιαστικά δεδομένα του πρότυπου αντικειμένου δεν είναι διαθέσιμα και το αντικείμενο αυτό απαιτεί διόρθωση, οι συμβατικές τεχνικές του ΜΣ είναι άσκοπο να εφαρμοστούν.

Μια ακόμη σημαντική διαφορά μεταξύ του ΜΣ και του ΑΜΣ είναι τα οικονομικά κίνητρα της κάθε εφαρμογής. Ο ΜΣ αναπτύσσει ένα καινοτόμο ή ένα βελτιωμένο προϊόν, του οποίου η ανταπόκριση στην αγορά δεν είναι επουδενί βέβαιη. Αντίθετα για το προϊόν του ΑΜΣ γνωρίζουμε εκ των προτέρων το βαθμό αποδοχής του από την αγορά και αυτός είναι συχνά που καθορίζει το προϊόν στο οποίο θα εφαρμοστεί ο ΑΜΣ. Πρόκληση κατά τον ΑΜΣ είναι η παραγωγή προϊόντος βελτιωμένου και με χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με το πρότυπο.

Τέλος οι δυσκολίες που εμφανίζονται κατά τον ΑΜΣ διαφέρουν από τις αντίστοιχες του ΜΣ. Οι πιθανότερες δυσκολίες κατά τον ΑΜΣ είναι:

- Οι απαραίτητες πληροφορίες για τον ΑΜΣ του προτύπου να έχουν χαθεί ή να μην είναι διαθέσιμες.
- Τα δεδομένα να μεταβληθούν κατά τη διάρκεια του ΑΜΣ.
- Οι πληροφορίες σχετικά με τα ενδιάμεσα στάδια επεξεργασίας του προτύπου είναι πιθανό να έχουν χαθεί κατά τη δημιουργία του τελικού προϊόντος.

Συμπερασματικά αντιλαμβανόμαστε πως ο ΑΜΣ δεν αποτελεί απλή διαδικασία αντιγραφής ενός πρότυπου αντικειμένου, καθώς ακόμη και αν αυτό ήταν το αποκλειστικό ζητούμενο, δεν θα ήταν τεχνικά και τεχνολογικά εφικτό.

Στόχος του ΑΜΣ είναι συνεπώς η επαναδημιουργία ενός αντικειμένου, με χαρακτηριστικά που προσεγγίζουν στο μέγιστο βαθμό το πρότυπο, βασιζόμενοι στην ανάλυση και στην εφαρμογή μηχανολογικών τεχνικών επί του προτύπου.

Ο ΑΜΣ στηρίζεται σε επιστημονικά δεδομένα για να αναπαράγει ένα αντικείμενο. Η επιλογή των κατάλληλων δεδομένων με μηχανολογικά κριτήρια είναι μια επίπονη διαδικασία η οποία έχει δεσπύζουσα σημασία κατά τον ΑΜΣ.

4. Τριδιάσταση Ψηφιακή Σάρωση(3d Scanning) Εξαρτημάτων Ένσφαιρου Διαφορικού

4.1.Το Ένσφαιρο Διαφορικό

Το αντικείμενο στο οποίο εφαρμόζουμε τις τεχνικές/μεθόδους του ΑΜΣ και κατ' επέκταση τις τεχνικές λήψεις μετρήσεων/τριδιάστατης σάρωσης, είναι το πρότυπο ένσφαιρο διαφορικό. Έχοντας στην κατοχή μας, μετά από ευγενική προσφορά του κ.Τσιριγγάκη, δείγμα του διαφορικού προχωράμε στην αποσυναρμολόγησή του με στόχο τη διεξαγωγή μετρήσεων (CMM Measurements, 3D Scanning) και τη γενικότερη συλλογή πληροφοριών, απαραίτητων για τη δημιουργία τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων (3D CAD Models).

Τα εξαρτήματα του διαφορικού έχουν πλήρως αναλυθεί στο εισαγωγικό μέρος της διπλωματικής μας εργασίας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο δείγμα του διαφορικού είχε προσαρμοστεί σε επιβατικό όχημα και είχε δοκιμαστεί σε πολλές συνθήκες πρόσφυσης για περισσότερα από 40.000 χλμ.

Παρακάτω παρουσιάζουμε φωτογραφικό υλικό από το ένσφαιρο διαφορικό, τη διαδικασία αποσυναρμολόγησής του και την τελική του τοποθέτηση στον πάγκο της Μηχανής Μέτρησης Συντεταγμένων (CMM) για τη διεξαγωγή των απαραίτητων μετρήσεων.



Εικ.4.1 Πλήρες Ένσφαιρο Διαφορικό

(Πηγή:[http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/GearlessDifferential020\(640x592\).jpg](http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/GearlessDifferential020(640x592).jpg))



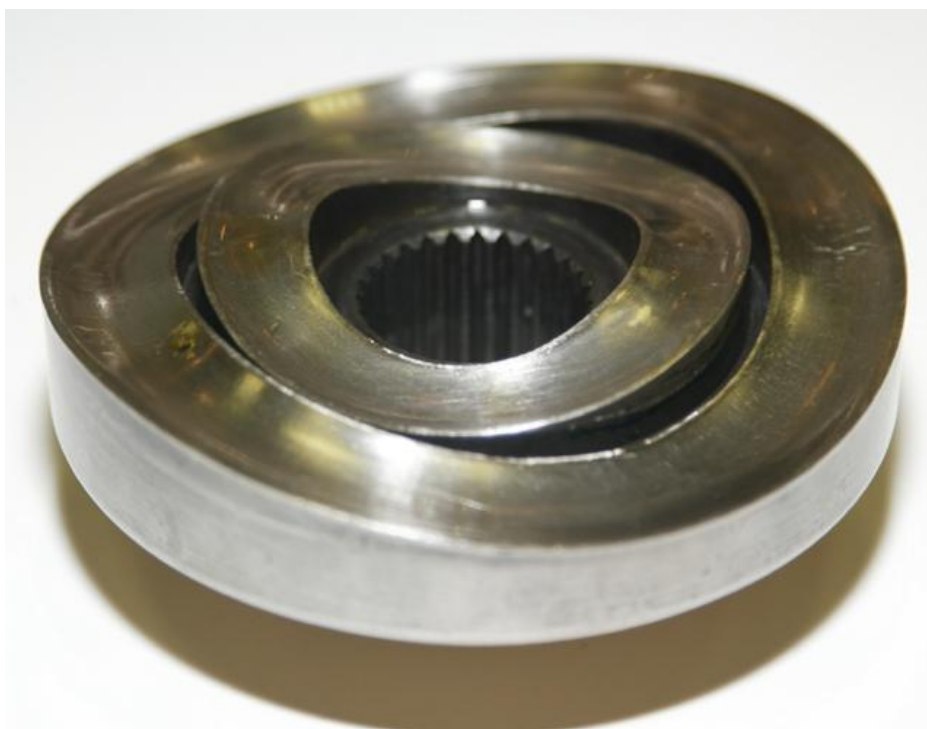
Εικ.4.2 Πλήρες Ένσφαιρο Διαφορικό
(Πηγή:[http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/GearlessDifferential026\(640x686\).jpg](http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/GearlessDifferential026(640x686).jpg))



Εικ.4.3 Αφαίρεση Καπακιού Ασφαλείας Διαφορικού
(Πηγή:[http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/GearlessDifferential027\(640x428\).jpg](http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/GearlessDifferential027(640x428).jpg))



Εικ.4.4 Αφαίρεση Πλανήτη Διαφορικού
(Πηγή:[http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/GearlessDifferential028\(640x470\).jpg](http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/GearlessDifferential028(640x470).jpg))



Εικ.4.5 Πλανήτης Διαφορικού (Πηγή:[http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/SinglePlanet001\(640x495\).jpg](http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/SinglePlanet001(640x495).jpg))



Εικ.4.6 Σετ Δορυφόρων Διαφορικού (Πηγή:[http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/PairOfSatellites005\(640x402\).jpg](http://www.tsiriggakis.gr/Images/GD/PairOfSatellites005(640x402).jpg))



Εικ.4.7 Εξαρτήματα Διαφορικού τοποθετημένα στη Μηχανή Μέτρησης Συντεγμένων (CMM) (Πηγή: Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων - Αντίστροφου Σχεδιασμού)

Αξίζει να επισημάνουμε πως θεμελιώδες στάδιο του ΑΜΣ του ένσφαιρου διαφορικού αποτελεί η Τρισδιάστατη Ψηφιακή Σάρωση του (3d Scanning) με στόχο τη συλλογή πληροφοριών/

τεχνικών δεδομένων, οι οποίες μετά από επεξεργασία σε κατάλληλο λογισμικό, μας δίνουν τα απαραίτητα στοιχεία για τη δημιουργία του τρισδιάστατου CAD μοντέλου.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και Αντιστρόφου Σχεδιασμού της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν:

- Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων τύπου γέφυρας (BT-CMM), Mistral 070705 της DEA – B&S σε συνδυασμό με το μετρητικό λογισμικό PC-DMIS (v.43 MR1).
- Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων τύπου αρθρωτού βραχίονα (AA-CMM), FARO PLATINUM ARM συνεργαζόμενος με laser camera FARO LASER LINE PROBE και υποστηριζόμενος από το Λογισμικό ψηφιακής αποτύπωσης Geomagic Studio

Η χρήση του κατάλληλου εξοπλισμού για τη διεξαγωγή των απαραίτητων μετρήσεων αποτελεί θεμέλιο λίθο του ΑΜΣ.

Εκτενής ανάλυση του εξοπλισμού και της διαδικασίας μέτρησης ακολουθεί στη συνέχεια της ΔΕ.

4.2. Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων (CMM)

4.2.1. Εισαγωγή στη CMM

Οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων είναι ηλεκτρομηχανικά όργανα μέτρησης, τα οποία μετρούν τις συντεταγμένες των στοιχείων επιφάνειας (surface elements) του προς μέτρηση τεμαχίου. Ο όρος Μετρολογία Συντεταγμένων αναφέρεται στη διαδικασία μέτρησης με χρήση μηχανής, η οποία αποτυπώνει τη μετρούμενη διάσταση σε σύστημα συντεταγμένων (καρτεσιανές, πολικές και σφαιρικές). Ουσιαστικά οι μετρούμενες διαστάσεις αποτυπώνονται στο σύστημα ως σημεία, ευθείες ή επίπεδα.

Ιστορικά η πρώτη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων κατασκευάστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1950, από την εταιρία Ferranti LTD στη Σκωτία. Η μηχανή αρχικά κατασκευάστηκε ως βοηθητικό εργαλείο για τον αριθμητικό έλεγχο (numerical control-NC), δηλαδή τον αυτόματο έλεγχο μιας διεργασίας που εκτελείται από μια συσκευή, η οποία κάνει χρήση αριθμητικών δεδομένων, συνήθως εισαγόμενων κατά την εξέλιξη της διεργασίας και είχε δυνατότητα μέτρησης μόνο σε δύο άξονες (X-Y).

Επιγραμματικά τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν είναι [7]:

- I. κυρίως σώμα της μηχανής (machine body)
- II. ο αισθητήρας (probe)
- III. σύστημα ελέγχου, συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων



Εικ.4.8 Ολοκληρωμένο σύστημα μέτρησης με CMM. Διακρίνεται το κυρίως σώμα, αλλά και ο υπόλοιπος εξοπλισμός. (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)

4.2.2.Κύριο Σώμα της CMM

Συγκεκριμένα το κύριο σώμα της μηχανής αποτελείται από την τράπεζα μέτρησης (table), τη στήλη (column) ή τη γέφυρα (bridge) ή το ικρίωμα (gantry), ανάλογα με τον τύπο της μηχανής, και το βραχίονα (ram). Τα παραπάνω συνήθως βρίσκονται πάνω σε βάση από χάλυβα ή γρανίτη. Επίσης στο κυρίως σώμα τοποθετούνται οι κλίμακες μέτρησης (scales), το σύστημα κίνησης (transmission) και οι μεταλλάκτες μετατόπισης (displacement transducers), ο μηχανισμός δηλαδή που μετατρέπει τη μετατόπιση σε αλλαγή τάσης (π.χ. LVDT).

➤ Βάση μηχανής

Η βάση συνήθως κατασκευάζεται από χάλυβα. Στη βάση μπορούν να τοποθετηθούν οι κλίμακες μέτρησης, το σύστημα κίνησης, ή και άλλα συστήματα (π.χ. αισθητήρας θερμοκρασίας). Πάνω από τη βάση τοποθετείται η τράπεζα μέτρησης.



Εικ.4.9 Βάση από χάλυβα, που χρησιμοποιείται στη συναρμολόγηση της DEA CMM. (Measureur, 2009)

➤ Τράπεζα μέτρησης

Η τράπεζα μέτρησης αρχικά κατασκευαζόταν από χάλυβα. Καθώς όμως τα μέταλλα

οξειδώνονται, ενώ λόγω των πολυάριθμων επαφών, αλλά και λόγω εξάσκησης δυνάμεων, κάμπτονται, τελικά το υλικό που προτιμάται για την κατασκευή της τράπεζας (τουλάχιστον της επιφάνειας εργασίας) είναι ο γρανίτης.



Εικ.4.10 Τράπεζα από γρανίτη, της εταιρείας DEA, τοποθετημένη πάνω στη βάση. (Measureur, 2009)

➤ Στήλη / Γέφυρα / Ικρίωμα

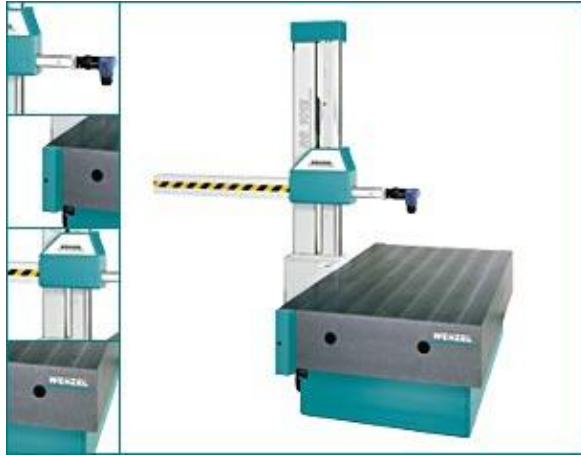
Μπορούν να είναι κινητά ή ακίνητα, ανάλογα με τον τύπο της μηχανής. Λειτουργικά έχουν τον ίδιο ρόλο και διαφέρουν μόνο ως προς τη μορφή τους, που προσφέρει κάποια πλεονεκτήματα, ανάλογα με τις απαιτήσεις της μέτρησης (σταθερότητα, όγκος μηχανής, ευελιξία). Πάνω τους στηρίζεται ο βραχίονας.



Εικ.4.11 CMM τύπου γέφυρας και ικρίωματος αντίστοιχα

➤ Βραχίονας

Ο βραχίονας κατασκευάζεται συνήθως από κράματα αλουμινίου ή από κεραμικά υλικά. Μπορεί να είναι τοποθετημένος κάθετα ή οριζόντια. Υπάρχουν επίσης αρθρωτοί χειροκίνητοι βραχίονες (articulated arms), που χρησιμοποιούνται σε φορητές CMM. Στην άκρη του βραχίονα τοποθετείται η κεφαλή-υποδοχέας του αισθητήρα.



Εικ.4.12 CMM τύπου στήλης με οριζόντιο βραχίονα.

Η κίνηση της CMM στους άξονες γίνεται με χρήση σερβοκινητήρων. Οι μεταλλάκτες μετατόπισης είναι τοποθετημένοι πάνω σε γραμμικές κλίμακες, ώστε να μετατρέπεται η μετατόπιση των αξόνων σε αλλαγή τάσης.

4.2.3. Αισθητήρες

Το βασικότερο εξάρτημα της CMM, πάνω στο οποίο στηρίζεται η διαδικασία διεξαγωγής μετρήσεων είναι ο αισθητήρας. Κατά συνέπεια ο τύπος και η τεχνολογία που χρησιμοποιεί καθορίζουν άμεσα το αποτέλεσμα. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία τύπων και μορφών επαφών. Οι αισθητήρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο γενικές κατηγορίες:

1. αισθητήρες με επαφή (contact probes)
2. αισθητήρες χωρίς επαφή (non contact probes)

Οι αισθητήρες επαφής αποτελούν τον πιο κοινό τύπο αισθητήρα. Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους διαχωρίζονται σε *αισθητήρες στιγμιαίας επαφής (touch trigger probe)* και *αισθητήρες συνεχούς επαφής (scan probe-αισθητήρας σάρωσης)*. Οι αισθητήρες επαφής αποτελούνται από τρία στοιχεία: το *σώμα (body)*, τον *στυλίσκο (stylus)* και τον *επαφέα (sensor)*. Το σώμα αποτελείται από το *στέλεχος* και το *προσάρτημα (module)*, το οποίο αλλάζει ανάλογα με το είδος της μέτρησης και τους επαφείς (τύπος, μήκος, κ.α.). Ανάμεσα στο προσάρτημα και το στυλίσκο του επαφέα υπάρχει ο *σύνδεσμος στήριξης επαφέα (stylus holder)*. Κάθε μοντέλο των παραπάνω προσφέρει κάποια πλεονεκτήματα ανάλογα με την εφαρμογή. Σε συγκεκριμένο σώμα είναι δυνατό να προστεθούν περισσότεροι στυλίσκοι, ενώ κάθε στυλίσκος μπορεί να φέρει διαφορετικό επαφέα. Έτσι, ανάλογα με τις απαιτήσεις της μέτρησης, μπορεί να επιλεγθεί ο κατάλληλος αισθητήρας (πάχος σώματος, μήκος στυλίσκου, διάμετρος επαφέα, κ.α.).



Εικ.4.13 Σχέδιο αισθητήρα επαφής στο οποίο αναγράφονται τα βασικά στοιχεία του. (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)

Ένας βασικός περιορισμός των αισθητήρων επαφής έναντι αυτών χωρίς επαφή είναι η δύναμη που ασκεί ο αισθητήρας στο τεμάχιο, στο σημείο επαφής. Σε εύκαμπτα εύθραυστα στοιχεία απαιτείται η χρήση αισθητήρα χωρίς επαφή.

Οι αισθητήρες χωρίς επαφή χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι αισθητήρες επαφής. Ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιούν διαχωρίζονται σε αισθητήρες laser (laser probes) και τηλεοπτικούς αισθητήρες (video probes). Οι αισθητήρες αυτοί ξεφεύγουν από τα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αυτής και συνεπώς δεν θα προβούμε σε περαιτέρω ανάλυσή τους.

4.2.4. Σύστημα ελέγχου, συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων

Το σύστημα ελέγχου, συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων περιλαμβάνει όλα τα εργαλεία για την πραγματοποίηση των παραπάνω διαδικασιών. Κάθε μηχανή CMM διαθέτει χειριστήριο ελέγχου, με το οποίο ο χειριστής μπορεί να μετακινεί τον αισθητήρα, να παίρνει χειροκίνητα τις συντεταγμένες των μετρούμενων σημείων, να ορίζει τον αλγόριθμο που θα ακολουθήσει η CMM σε αυτοματοποιημένη διαδικασία, να ρυθμίζει τον αισθητήρα με χρήση της πρότυπης σφαίρας, κ.α. Επίσης, κάθε μηχανή CMM συνοδεύεται από μηχανήμα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων. Αυτό αποτελείται από έναν ειδικό αναλογο-ψηφιακό μετατροπέα ή πιο απλά ελεγκτή (controller), ώστε να μετατρέπεται η μεταβολή τάσης σε ψηφιακό σήμα, και από ένα σύστημα επεξεργασίας των δεδομένων, το οποίο συνήθως είναι κοινός επιτραπέζιος υπολογιστής, στον οποίο είναι εγκατεστημένο το εξειδικευμένο λογισμικό για τη χρήση της CMM.

Απαραίτητα για τη διεξαγωγή μετρήσεων είναι τα αντίστοιχα λογισμικά, πραγματοποιώντας τη ζεύξη CMM-ηλεκτρονικού υπολογιστή. Υπάρχουν δύο γενικότεροι τύποι λογισμικών για CMM.

1. Σύστημα Μέτρησης Υποβοηθούμενο από Υπολογιστή (Computer Aided Measurement-CAM), το οποίο απαιτεί από το χρήστη να φέρει χειροκίνητα τον αισθητήρα στα σημεία που θα μετρηθούν.
2. Σύστημα Άμεσου Ελέγχου από Υπολογιστή (Direct Computer Control), το οποίο προσφέρει τη δυνατότητα χρήσης αυτοματοποιημένων αλγόριθμων, όπου το λογισμικό, αφού καθοριστούν οι βασικές μεταβλητές της μέτρησης (σχήμα τεμαχίου, ονομαστικό μέγεθος, ή έστω το αρχικό σημείο της μέτρησης), πραγματοποιεί τη μέτρηση αυτόματα.

4.2.5. Διαδικασία Μετρήσεων στη CMM

Αφού καθοριστούν οι απαραίτητες μεταβλητές ο αισθητήρας διατρέχει την επιφάνεια του

προς μέτρηση κομματιού. Η σχετική μετατόπιση της βάσης του αισθητήρα ως προς το σύστημα αναφοράς, το οποίο έχει προκαθοριστεί, αντιστοιχεί σε μεταβολή τάσης. Για κάθε σημείο επαφής του αισθητήρα με το τεμάχιο καταγράφονται οι συντεταγμένες ως προς το σύστημα αναφοράς και η μετατόπιση μετατρέπεται σε μεταβολή τάσης μέσω των μεταλλακτών μετατόπισης. Στη συνέχεια τα δεδομένα στέλνονται στη μηχανή συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων. Έτσι τελικά αποτυπώνονται γραφικά τα σημεία στο χώρο, οπότε ουσιαστικά αποτυπώνεται και το σχήμα του μετρούμενου τεμαχίου. Επίσης με τη χρήση του λογισμικού μπορεί να γίνει ανάλυση και επεξεργασία των τιμών, όπως προαναφέρθηκε, ώστε να εξαχθούν τα επιθυμητά συμπεράσματα ή να εξαχθούν αρχεία ικανά για επεξεργασία σε περιβάλλον CAD.

4.2.6. CMM Εργαστηρίου ΤΚΠ-Ε&ΑΣ Ε.Μ.Π.

Η CMM του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και Αντιστρόφου Σχεδιασμού της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. είναι η Mistral 070705 (s/n 00808) του οίκου DEA – Brown & Sharpe Inc., τύπου γέφυρας με τράπεζα από γρανίτη και στηρίζεται στις αρχές λειτουργίας που αναφέρθηκαν παραπάνω. Για την καταγραφή των σημείων επαφής χρησιμοποιήθηκε η αυτόματη (motorized) κεφαλή τύπου PH10M (s/n L96618) του οίκου Renishaw Ltd. σε συνδυασμό με εργαλείο αποτελούμενο από στέλεχος τύπου TP200 (s/n Z85454) του οίκου Renishaw Ltd.

Το λογισμικό που υποστηρίζει την διεξαγωγή των μετρητικών εργασιών είναι το PC-DMIS (Wilcox Associates). Πρόκειται για ένα DCC λογισμικό, το οποίο προσφέρει παράλληλα τη δυνατότητα της χειροκίνητης μέτρησης, πολλές αυτοματοποιημένες λειτουργίες (σάρωση ανοιχτού ή κλειστού βρόχου, σάρωση κύκλου κ.α.), καθώς επίσης και πολλά χρήσιμα εργαλεία κατά την επεξεργασία των μετρήσεων (αντιστοίχιση νέφους σημείων σε γεωμετρικό σχήμα κ.α.). Με λίγα λόγια το λογισμικό PC-DMIS είναι σε θέση να προσφέρει εύκολο και γρήγορο καθορισμό της διαδικασίας μέτρησης (για απλές εφαρμογές μετρήσεων), όσο και πλήρη παραμετροποίηση της διαδικασίας και των παραγόντων της μέτρησης, για χρήση σε πολύπλοκα εξαρτήματα.

Αξίζει τέλος να επισημανθεί πως ο εργαστηριακός χώρος διεξαγωγής των μετρήσεων θερμοκρασιακά σταθερός και ελεγχόμενος από πλευράς δονήσεων, υγρασίας, σκόνης και λοιπούς παράγοντες που επηρεάζουν την διευρυμένη αβεβαιότητα των μετρητικών αποτελεσμάτων.

4.3. Διεξαγωγή μετρήσεων στη CMM

Ακολουθώντας τη διαδικασία μέτρησης των εξαρτημάτων του διαφορικού, όπως αυτή περιγράφηκε παραπάνω, οδηγηθήκαμε στην καταγραφή τρισδιάστατων συντεταγμένων πολλών μεμονωμένων σημείων που ανήκουν στην επιφάνεια του εκάστοτε εξαρτήματος. Αυτά τα μεμονωμένα τρισδιάστατα σημεία αποτελούν το πρωτογενές προϊόν της τρισδιάστατης ψηφιοποίησης και είναι γνωστά ως νέφος σημείων (point cloud). Το νέφος σημείων με τη σειρά του εισαγόμενο στο περιβάλλον του SolidWorks συμβάλλει ουσιαστικά στη δημιουργία του CAD μοντέλου με τεχνικές που θα αναλυθούν στη συνέχεια της ΔΕ. Η εισαγωγή του νέφους σημείων στο SolidWorks γίνεται με τη βοήθεια του μετρητικού λογισμικού PC-DMIS της CMM και σε μορφή αρχείων .igs, ένας τύπος αρχείου καθ' όλα αποδεκτός από τις CAD πλατφόρμες.



Εικ.4.14 Εξαρτήματα Διαφορικού τοποθετημένα στη Τράπεζα Μέτρησης της CMM



Εικ.4.15 Αποσυναμολόγηση πλανητών από τις εδράσεις τους και προετοιμασία προς μέτρηση



Εικ.4.16 Λήψη μετρήσεων στον 1^ο δορυφόρο/σώμα κύλισης



Εικ.4.17 Λήψη μετρήσεων στον 2^ο δορυφόρο/σώμα κύλισης



Εικ.4.18 Λήψη μετρήσεων στον πλανήτη

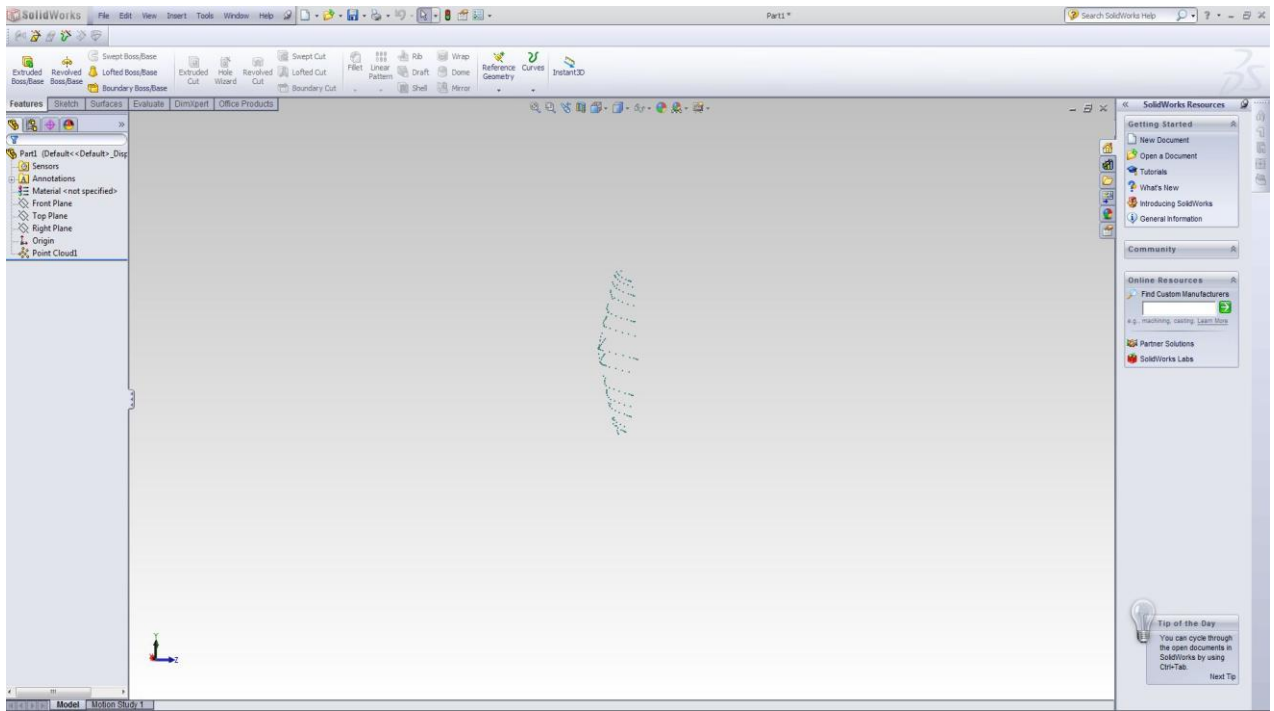


Εικ.4.19 Λήψη μετρήσεων στον φορέα των δορυφόρων (housing)

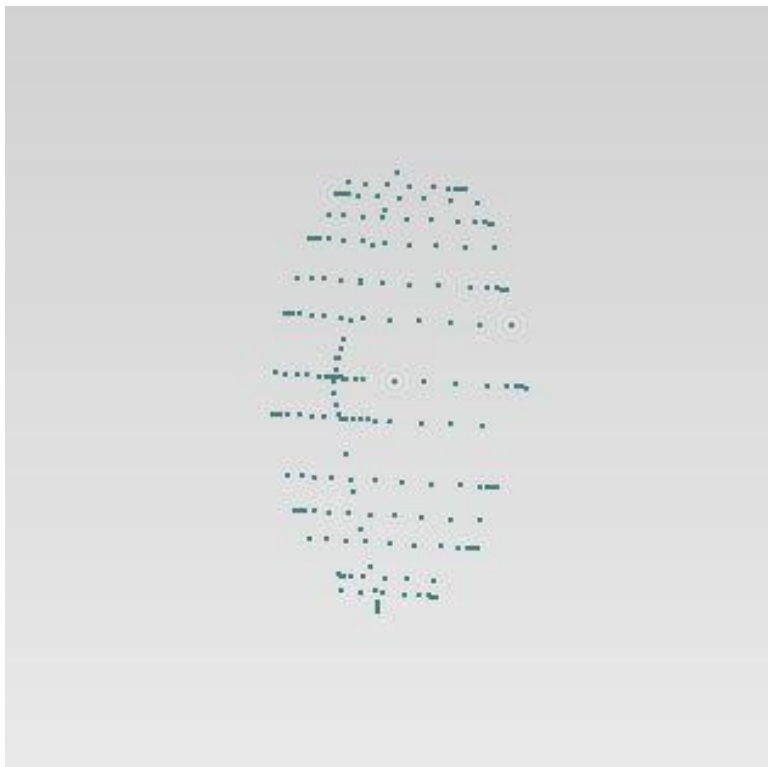
Μετά το πέρας των μετρήσεων και με τη συμβολή του λογισμικού PC-DMIS της CMM είμαστε σε θέση να εισάγουμε στο SolidWorks τα αρχεία τύπου .igs, στα οποία και θα αποτυπώνεται το νέφος σημείων που συλλέξαμε.

Παράλληλα με το νέφος σημείων, σε όσα εξαρτήματα του διαφορικού αναγνωρίστηκαν συμβατικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά (design features), όπως κύλινδροι, επίπεδα, κώνοι κ.α., πραγματοποιήθηκαν με την χρήση της CMM μετρήσεις με στόχο να προσεγγιστούν οι ονομαστικές τιμές διαμέτρων, αποστάσεων και θέσεων. Ο απαραίτητος για την CAD μοντελοποίηση των εξαρτημάτων καθορισμός των παραπάνω, σύμφωνα με την διεθνή πρακτική στην βιομηχανική μετρολογία διαστάσεων, δεν προκύπτει από την επεξεργασία του νέφους σημείων αλλά δίδεται απευθείας, ως αποτέλεσμα επεξεργασίας των σημείων των αντίστοιχων features από το μετρητικό λογισμικό της CMM (PC-DMIS).

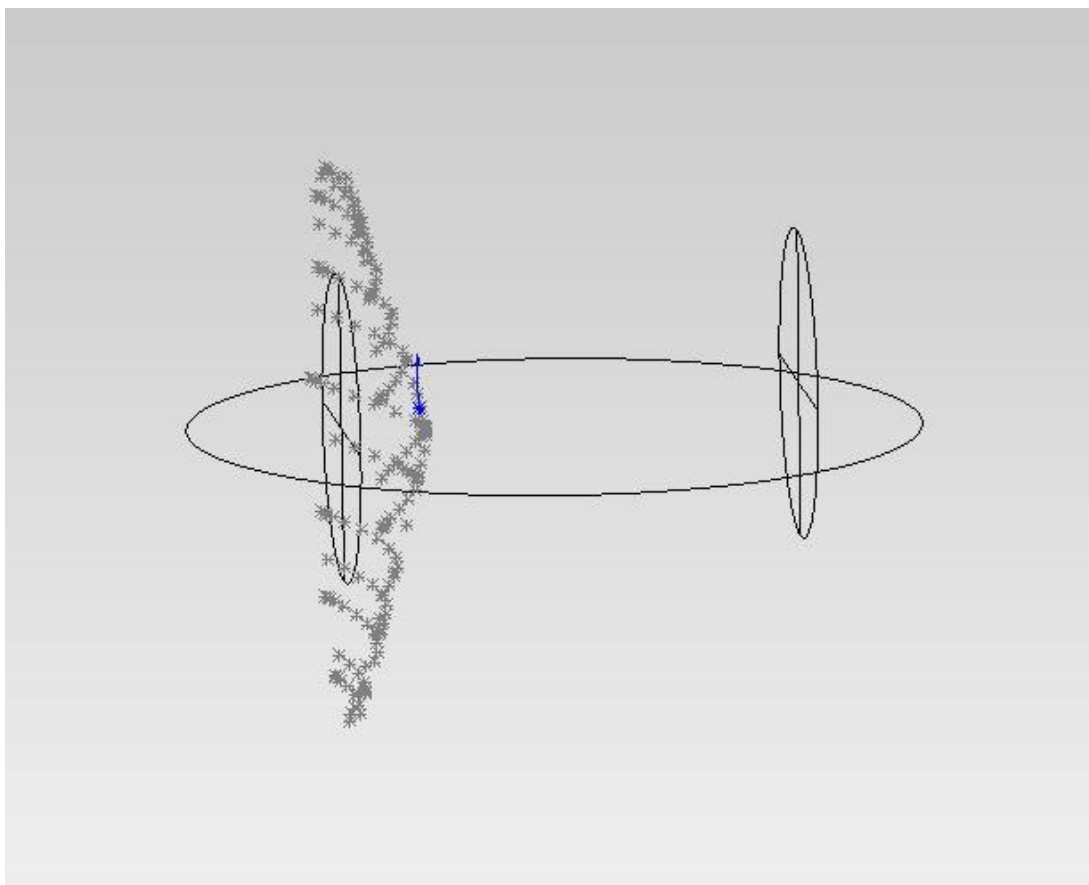
Κατά συνέπεια είμαστε έτοιμοι από τη σκοπιά της λήψης των μετρήσεων ώστε να προχωρήσουμε στη δημιουργία του τρισδιάστατου CAD μοντέλου.



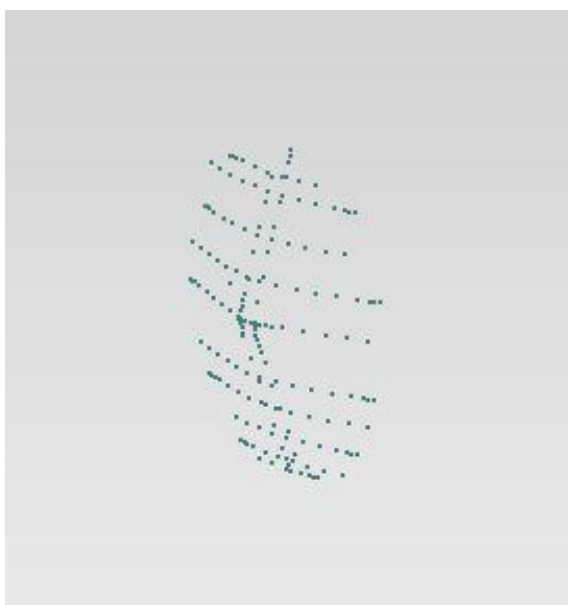
Εικ.4.20 Αποτύπωση νέφους σημείων 1^{ου} δορυφόρου (εσωτερική πλευρά) στο περιβάλλον του SolidWorks



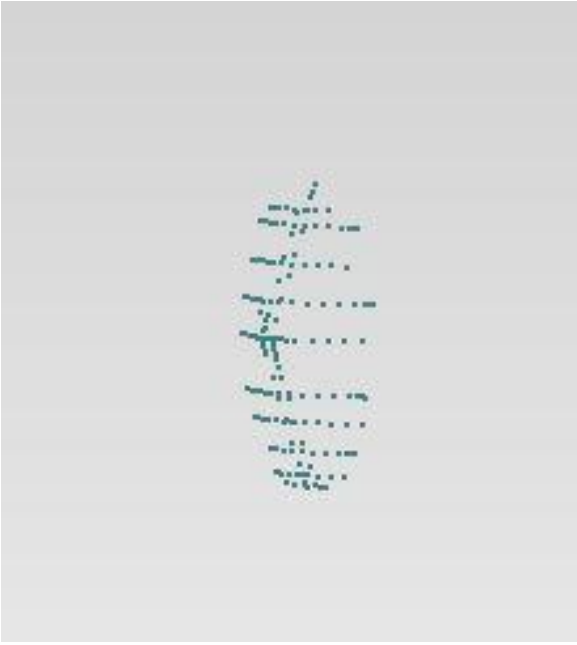
Εικ.4.21 Αποτύπωση νέφους σημείων 1^{ου} δορυφόρου (εξωτερική πλευρά)



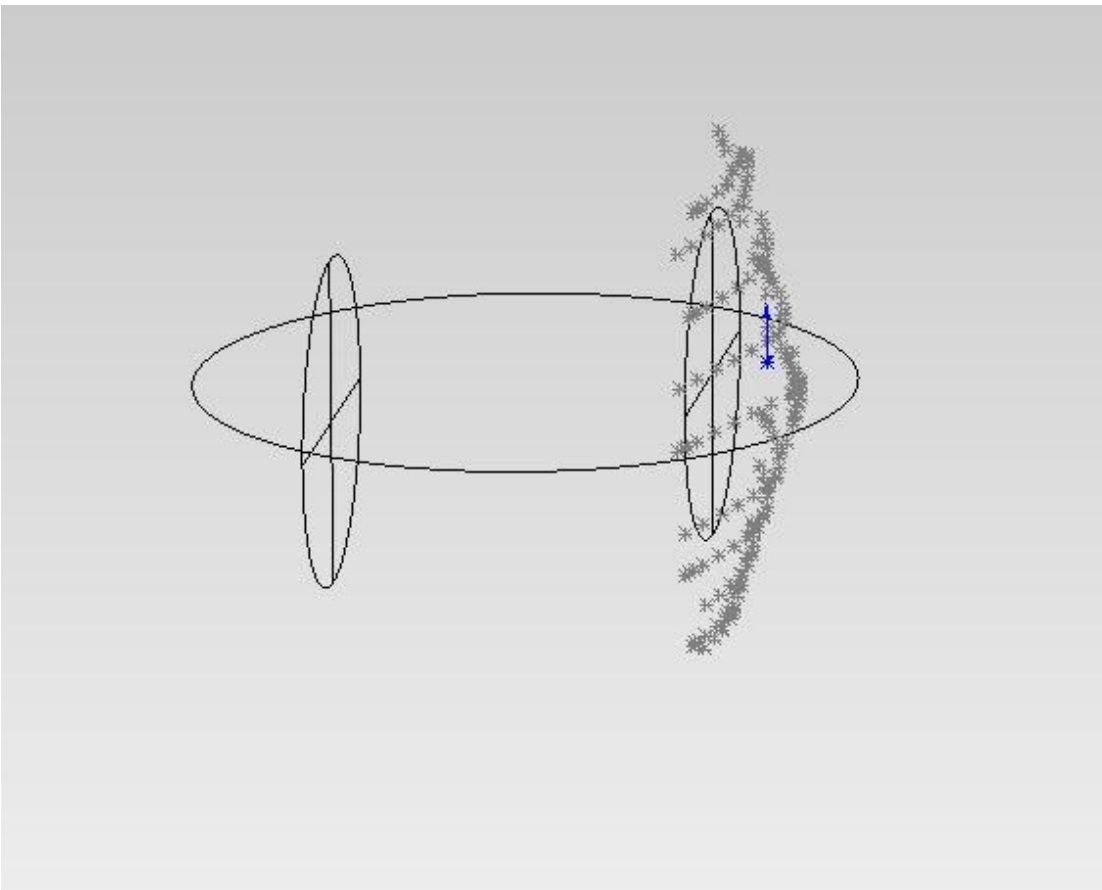
Εικ.4.22 Αποτύπωση νέφους σημείων, κέντρων και πλάτους 1^{ου} δορυφόρου



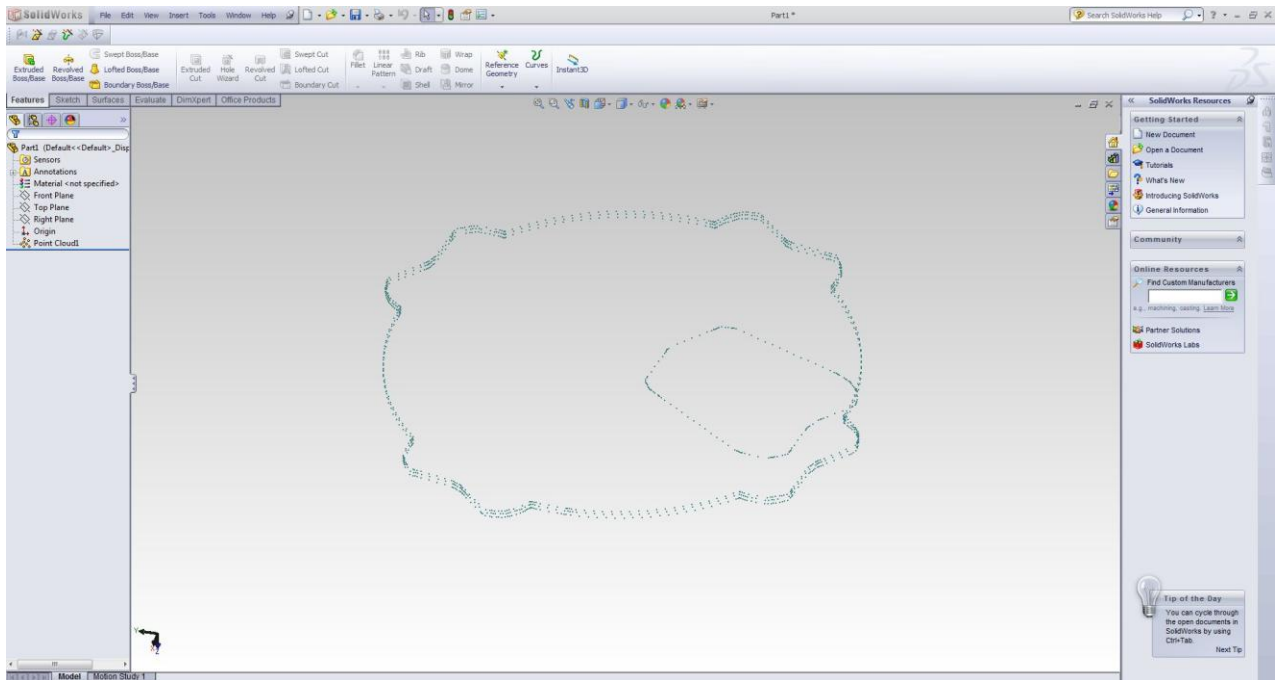
Εικ.4.23 Αποτύπωση νέφους σημείων 2^{ου} δορυφόρου (εσωτερική πλευρά)



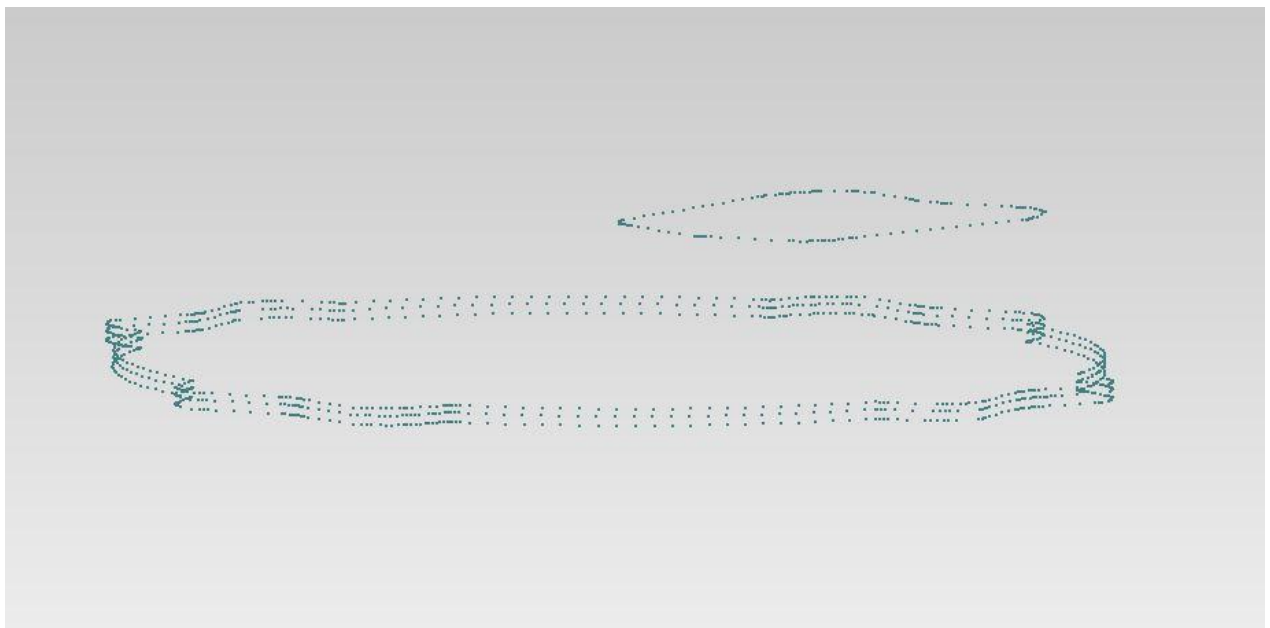
Εικ.4.24 Αποτύπωση νέφους σημείων 2^{ου} δορυφόρου (εξωτερική πλευρά)



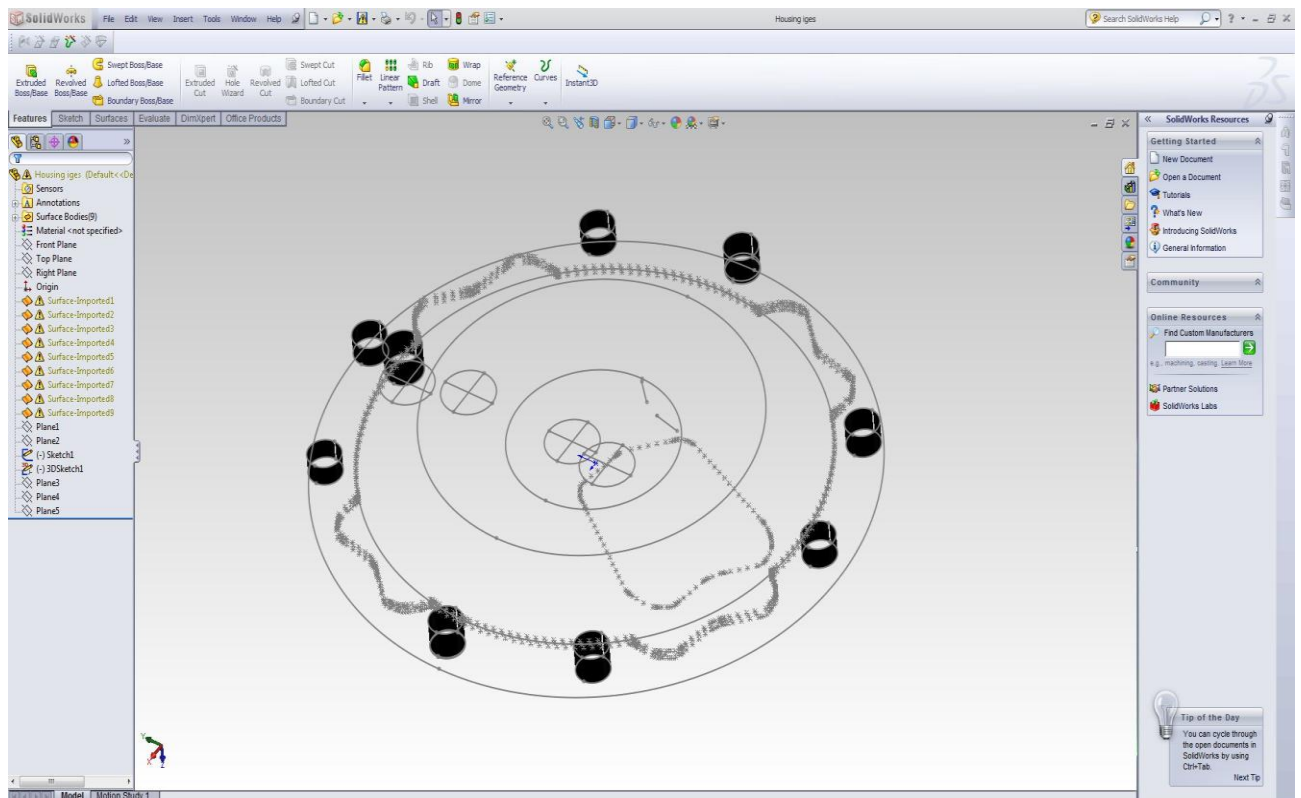
Εικ.4.25 Αποτύπωση νέφους σημείων, κέντρων και πλάτους 2^{ου} δορυφόρου



Εικ.4.26 Αποτύπωση νέφους σημείων του φορέα των δορυφόρων στο περιβάλλον του SolidWorks



Εικ.4.27 Αποτύπωση νέφους σημείων του φορέα των δορυφόρων



Εικ.4.28 Αποτύπωση νέφους σημείων, κέντρων και πάχους του φορέα των δορυφόρων στο περιβάλλον του SolidWorks

Στο σημείο αυτό αξίζει να ασχοληθούμε με τη λήψη μετρήσεων στον πλανήτη. Λαμβάνοντας ως μέτρηση ένα μικρό σχετικά αριθμό σημείων (περίπου 150 σημεία) δεν μπορούσαμε να αποδώσουμε σωστά τη μορφή της κυματοειδούς συνεργαζόμενης επιφάνειας. Σε μια τέτοια περίπτωση η απαιτούμενη πυκνότητα του νέφους σημείων είναι πολύ υψηλότερη από άλλες απλούστερες εφαρμογές, όπου οι μετρούμενες επιφάνειες δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες ιδιομορφίες, όπως π.χ. συνέβει με τους δορυφόρους. Μια πιθανή λύση θα ήταν η μέτρηση ικανού αριθμού σημείων με τη CMM, μια λύση όμως που θα ήταν χρονοβόρα και μη αποδοτική.

4.4.Τρισδιάστατος Σαρωτής (3D Scanner)

4.4.1.Εισαγωγή στον Τρισδιάστατο Σαρωτή

Αναζητώντας μια λύση κατάλληλη για τη συλλογή πυκνού νέφους σημείων του δορυφόρου ,οδηγούμαστε στην τρισδιάστατη σάρωση με το Faro Arm Laser Scanner, το οποίο και μπορεί να συλλέξει σε μικρό χρόνο τον απαιτούμενο αριθμό σημείων για τη δημιουργία του CAD μοντέλου του ένσφαιρου διαφορικού.

Οι τρισδιάστατοι σαρωτές ενδείκνυνται για εφαρμογές ψηφιακής αποτύπωσης/ ποιοτικού ελέγχου ελεύθερων/ μη συμβατικών επιφανειών (free form surfaces), ωστόσο η αμιγής και

μόνο συλλογή δεδομένων δεν είναι επαρκής, καθώς δεσπόζουσα σημασία κατέχει και η μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων. Ο χρόνος που απαιτείται άλλωστε για την παραπάνω επεξεργασία που οδηγεί στη δημιουργία ενός υψηλής πιστότητας τρισδιάστατου μοντέλου είναι κατά κανόνα πολύ μεγαλύτερος από τον χρόνο σάρωσης.

Γενικότερα ως Τρισδιάστατο Σαρωτή(3D Scanner) θα μπορούσαμε να ορίσουμε οποιαδήποτε συσκευή δύναται να συλλέξει τρισδιάστατες συντεταγμένες από μία δεδομένη περιοχή πάνω στην επιφάνεια ενός αντικειμένου, η οποία πληροί τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Ακολουθεί μια αυτοματοποιημένη διαδικασία που βασίζεται σε κάποιο πρότυπο.
- Πραγματοποιεί δειγματοληψία υψηλού ρυθμού (εκατοντάδες ή χιλιάδες σημεία ανά δευτερόλεπτο).
- Επιταχύνει τη διαδικασία, ώστε να πραγματοποιείται σε πραγματικό (σχεδόν) χρόνο.
- Δύναται ή και όχι να διακρίνει χρωματική πληροφορία της εκάστοτε επιφάνειας σε συνδυασμό με την τρισδιάστατη γεωμετρία της.

Ο τρόπος χρήσης μια τέτοιας συσκευής είναι:

- είτε σταθερός σε κάποια συγκεκριμένη θέση
- είτε πάνω σε κάποιον κλασικό, φωτογραφικού τύπου, τρίποδα
- είτε σε παρόμοιες μεταφερόμενες βάσεις
- είτε εν πτήση όταν πρόκειται για τοπογραφικές εφαρμογές

Η βασικότερη λειτουργία των συσκευών τρισδιάστατης σάρωσης είναι η ψηφιακή καταγραφή της γεωμετρίας κάποιου αντικειμένου. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται με πάρα πολλούς τρόπους, οι περισσότεροι από τους οποίους όμως έχουν σαν αποτέλεσμα την καταγραφή νέφους σημείων. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, τα σημεία αυτά είτε χρησιμοποιούνται ως έχουν, είτε γίνονται η πρώτη ύλη για την παραγωγή μιας μεγάλης σειράς δευτερογενή προϊόντων.

Στις περισσότερες εφαρμογές τρισδιάστατης απεικόνισης, όπως π.χ. η δημιουργία CAD μοντέλων, η οπτική πληροφορία που προσφέρει το νέφος σημείων από μόνο του συνήθως δεν επαρκεί, αφού αυτό που απεικονίζεται στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή είναι ένα υψηλό πλήθος σημείων και όχι μια επιφάνεια έτοιμη προς περαιτέρω επεξεργασία. Κατά συνέπεια στις περισσότερες εφαρμογές τρισδιάστατης απεικόνισης, γίνεται χρήση του τριγωνικού πλέγματος (triangular mesh), το οποίο είναι σε θέση να παρέχει στο χρήστη πολύ περισσότερη οπτική πληροφόρηση απ' ότι το νέφος σημείων, προσεγγίζοντας σε υψηλό βαθμό τη ζητούμενη επιφάνεια.

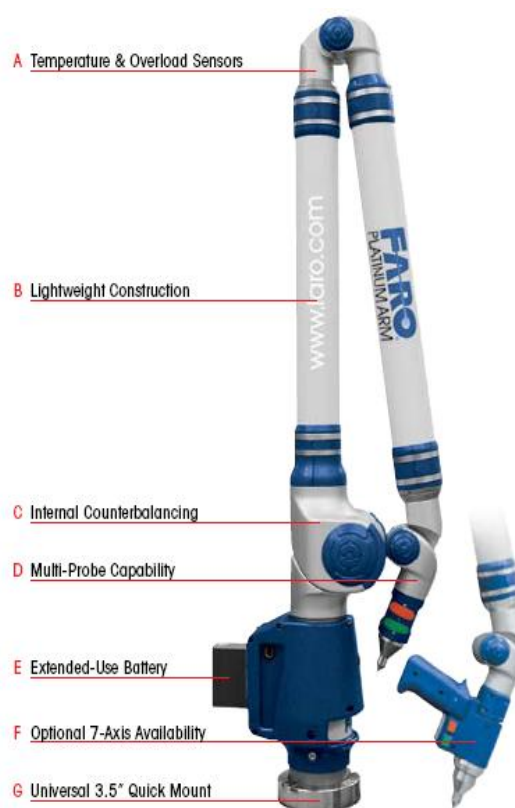
Το τριγωνικό αυτό πλέγμα είναι το βασικό παράγωγο του νέφους σημείων και προκύπτει από τη διαδικασία της τριγωνοποίησης, μιας αλγοριθμικής διαδικασίας, η οποία στηρίζεται στην αρχή της ένωσης όλων των τρισδιάστατων σημείων, που συλλέχθηκαν κατά τη σάρωση, με τα γειτονικά τους, σχηματίζοντας έτσι ένα πλέγμα τριγώνων, το οποίο περιγράφει τις επιφάνειες του ψηφιοποιημένου αντικειμένου.

Περαιτέρω ανάλυση της διαδικασίας του τρισδιάστατης σάρωσης και της τριγωνοποίησης ξεφεύγει από τα πλαίσια της ΔΕ.

4.4.2. Τρισδιάστατος Σαρωτής και Λογισμικό Εργαστηρίου ΤΚΠ-Ε&ΑΣ Ε.Μ.Π.

Ο Τρισδιάστατος Σαρωτής του εργαστηρίου είναι τύπου Αρθρωτού Βραχίονα, έχει δηλαδή ως βασικό τεχνικό χαρακτηριστικό του την ύπαρξη ενός αρθρωτού βραχίονα, ο οποίος στερεώνεται σε σταθερή βάση και αποτελείται συνήθως από τρία στελέχη. Στην άκρη του τελευταίου στελέχους βρίσκεται ο αισθητήρας λήψης σημείων (π.χ. ακίδα επαφής) ,κατά τρόπο όμοιο με αυτόν με συναντήσαμε στις συμβατικές ΜΜΣ τύπου γέφυρας.

Το μοντέλο του Σαρωτή είναι FARO PLATINUM ARM Model P083D και πρόκειται για έναν χειροκίνητο φορητό μετρητικό βραχίονα τελευταίας τεχνολογίας κατασκευασμένο από την εταιρία FARO Technologies Inc (έτος κατασκευής 2007) που διαθέτει 7 βαθμούς ελευθερίας και διάμετρο εργόσφαιρας 2,4 μέτρα. Οι βαθμοί ελευθερίας προκύπτουν από τις γωνίες που σχηματίζουν οι αρθρώσεις, καθώς και από την περιστροφή των στελεχών του βραχίονα.



Εικ.4.29 Ο Σαρωτής Faro Arm του Εργαστηρίου

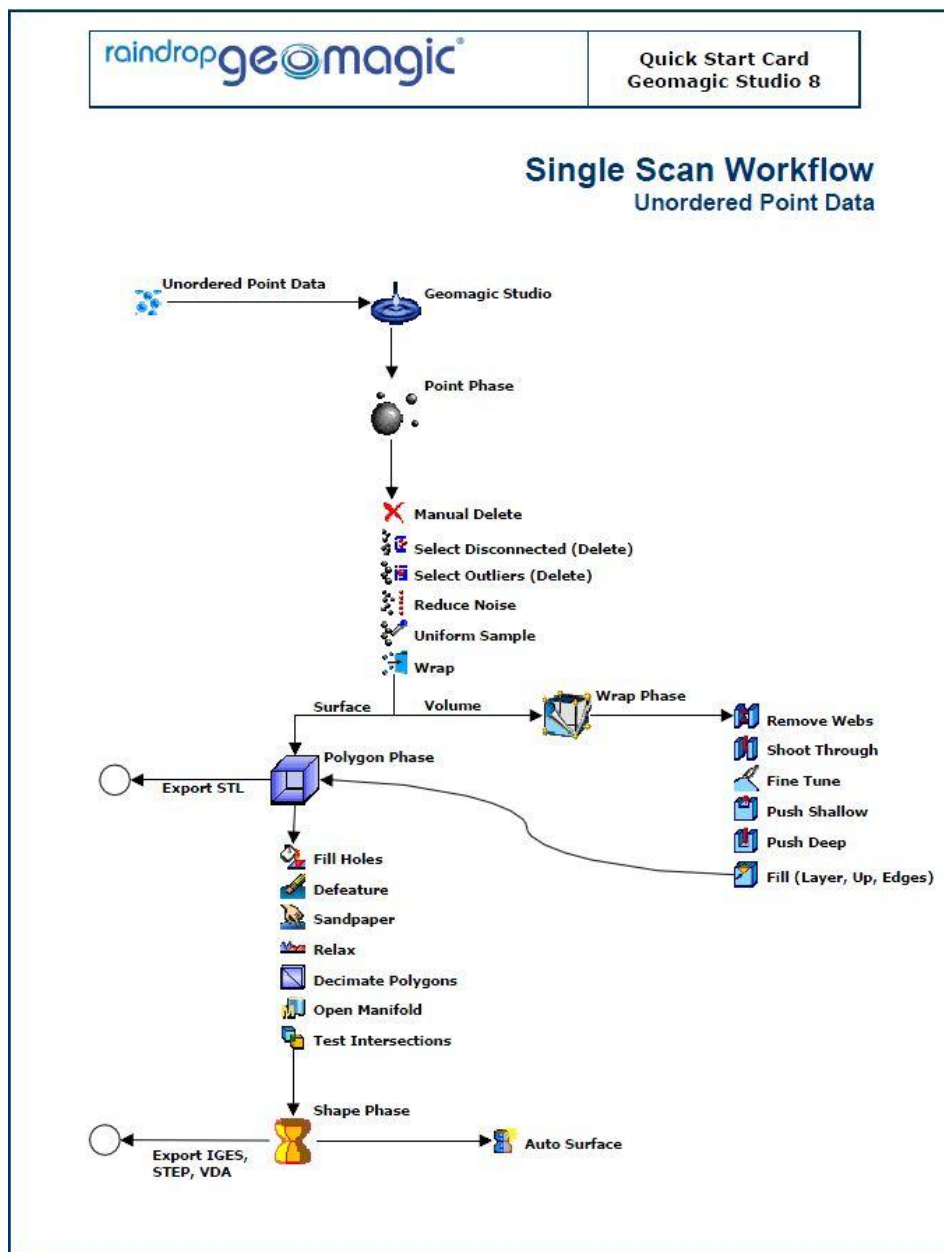
Επιπρόσθετα εκτός από τον μηχανικό αισθητήρα επαφής (ακίδα επαφής) το Faro Arm διαθέτει λέιζερ κάμερα προσαρτημένη στην απόληξη του βραχίονα για εφαρμογές αποτύπωσης αντικειμένων χωρίς επαφή όπως ο ποιοτικός/ μετροτεχνικός έλεγχος, αντιστροφος μηχανολογικός σχεδιασμός (reverse engineering), η τρισδιάστατη μοντελοποίηση (3-D modelling) και η αντιπαραβολή νέφους σημείων με ονομαστική γεωμετρία μοντέλου CAD.

Αυτό το κομβικό χαρακτηριστικό μάλιστα καθιστά το Faro Arm έναν Τρισδιάστατο Σαρωτή και όχι μια συμβατική ΜΜΣ-Αρθρωτού Βραχίονα.

Αξίζει ακόμη να επισημανθεί πως το Faro Arm επικοινωνεί μέσω θύρας USB με Η/Υ, στον οποίο είναι εγκατεστημένο κατάλληλο εξειδικευμένο λογισμικό για τη διεκπεραίωση των παραπάνω εργασιών. Σημειώνεται ότι τα δεδομένα της μέτρησης/ ψηφιακής αποτύπωσης αποθηκεύονται σε πραγματικό χρόνο στον Η/Υ.

Το Faro Arm υποστηρίζεται από το εξειδικευμένο λογισμικό Geomagic Studio v.9 της εταιρίας Raindrop. Το λογισμικό αυτό παρέχει υψηλής ποιότητας υπολογιστικά εργαλεία ψηφιακής αποτύπωσης, συλλογής νέφους σημείων καθώς και μετατροπής πολύπλοκων πολυγωνικών αντικειμένων σε ακριβή NURBS μοντέλα συμβατά με συστήματα CAD/ CAM / CAE/ RP (δυνατότητα εξαγωγής αρχείων τύπου igs, step, stl κ.α). Η κυρίαρχη θέση που κατέχει στη διεθνή αγορά το έχει ήδη καταξιώσει ως το κατεξοχήν χρησιμοποιούμενο υπολογιστικό εργαλείο για τέτοιου είδους εργασίες.

Παρακάτω παρουσιάζουμε ένα τυπικό διάγραμμα ροής εργασιών κατά την επεξεργασία νέφους σημείων που έχει προκύψει από μια μοναδική σάρωση:

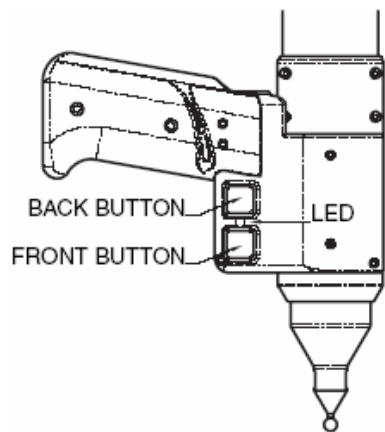


Εικ.4.30 Διάγραμμα ροής επεξεργασίας νέφους σημείων μοναδικής σάρωση

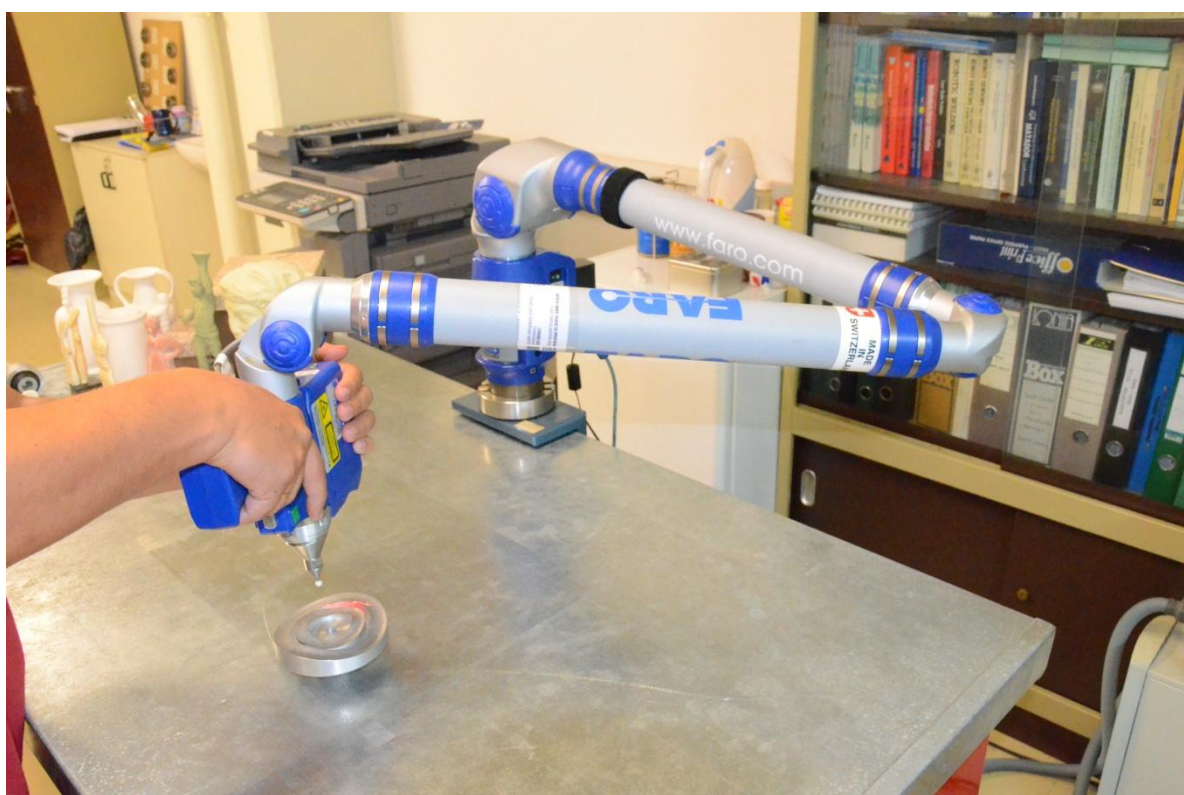
4.5. Διαδικασία Σάρωσης Πλανήτη

Η διαδικασία σάρωσης του πλανήτη με τη λέιζερ κάμερα του Faro Arm Scanner είναι η ακόλουθη:

Αρχικά τοποθετούμε τον πλανήτη μας στον πάγκο βαρέως τύπου προκειμένου να αποφευχθούν οι δονήσεις και προκληθεί θόρυβος ο οποίος δεν είναι εύκολο να αφαιρεθεί με ψηφιακή επεξεργασία. Μέσα από το λογισμικό μας ανατρέχουμε στο Faro-Plug-in το οποίο και χρησιμοποιούμε για να σαρώσουμε τις ζητούμενες επιφάνειες. Ακολούθως πατώντας το πράσινο κουμπί FRONT BUTTON ξεκινήσαμε την διαδικασία σάρωσης του αντικειμένου. Κινώντας την ακτίνα λέιζερ πάνω στην κυματοειδή επιφάνεια του πλανήτη σαρώνουμε όλες τις επιφάνειές του. Πατώντας το κόκκινο κουμπί BACK BUTTON σταματούσαμε προσωρινά τη σάρωση του πλανήτη αναζητώντας καλύτερη γωνία λήψης.



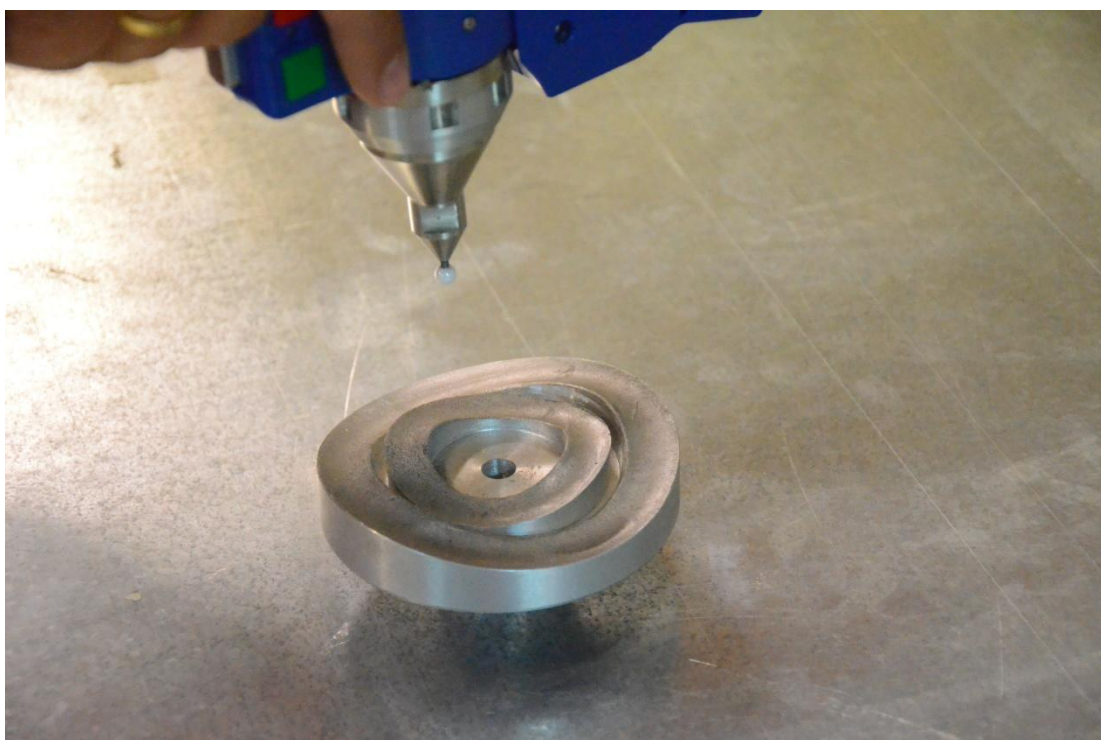
Εικ.4.31 Η λέιζερ κάμερα του Faro Arm



Εικ.4.32 Διαδικασία σάρωσης

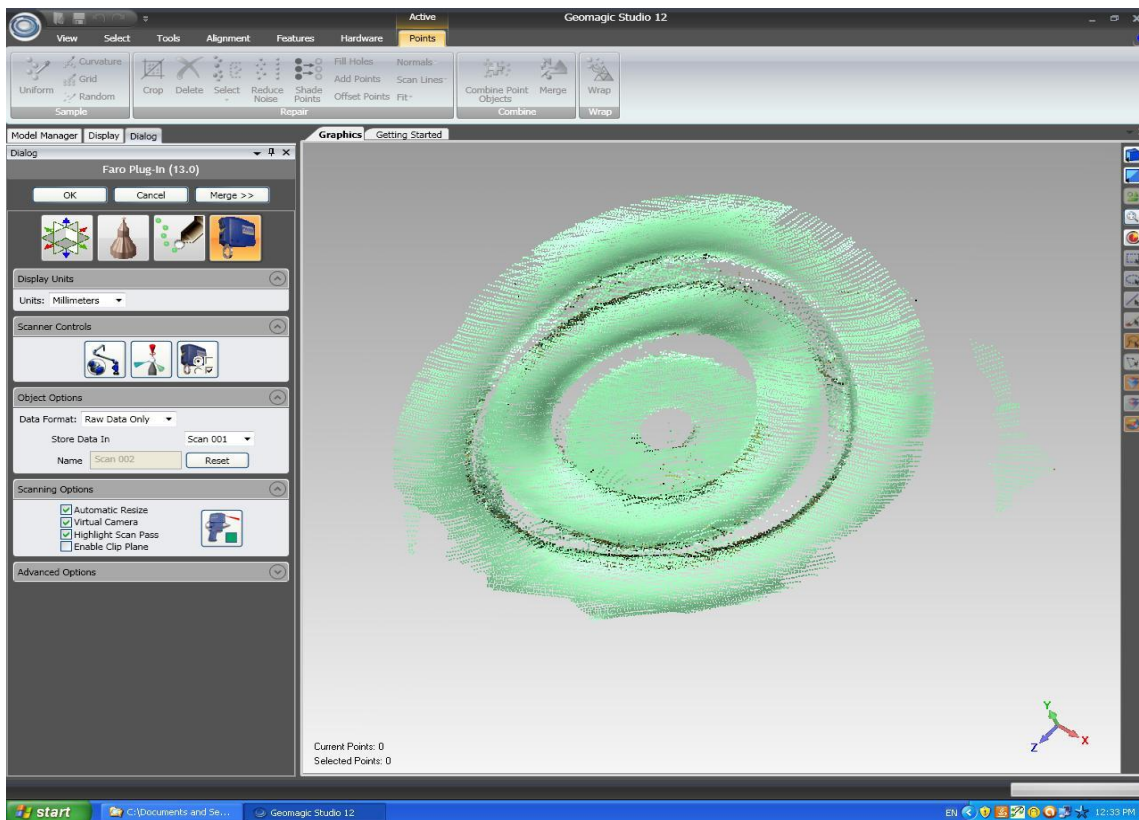


Εικ.4.33 Διαδικασία σάρωσης

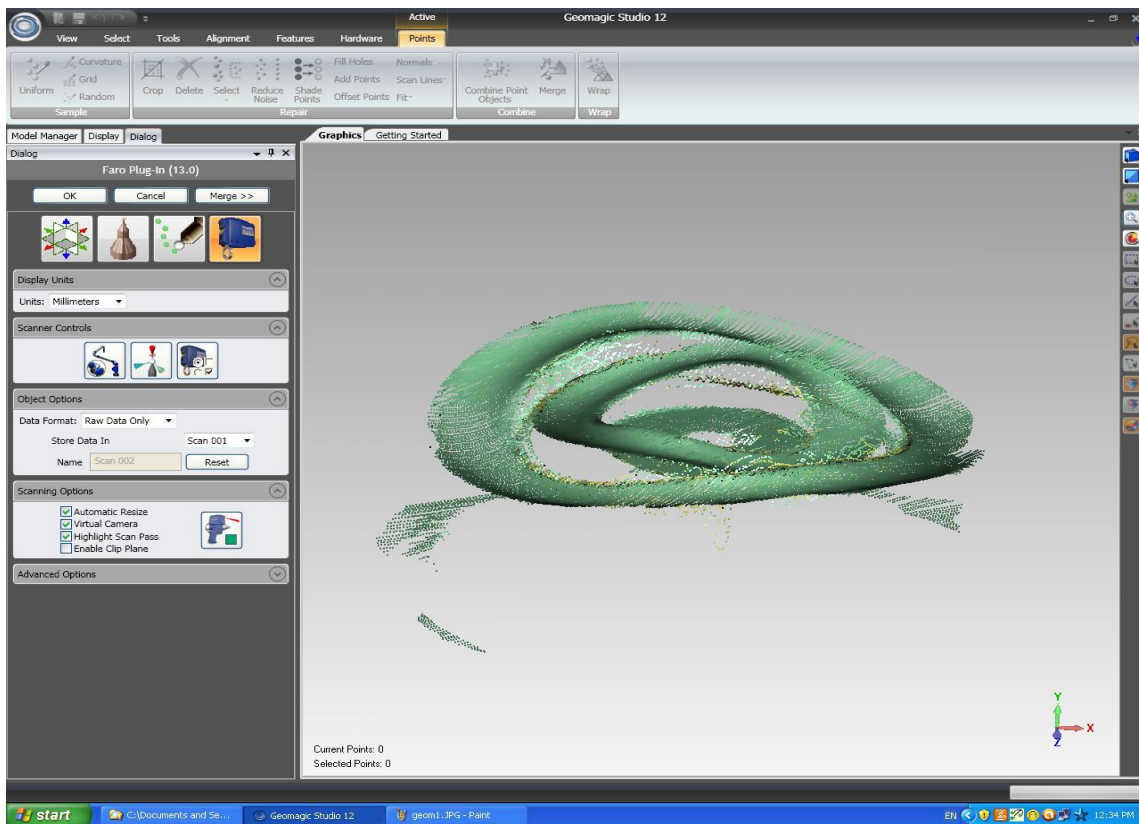


Εικ.4.34 Διαδικασία σάρωσης

Τα αποτελέσματα όπως αυτά αποτυπώθηκαν στο περιβάλλον του Geomagic δίχως περαιτέρω επεξεργασία (αφαίρεση θορύβου κλπ.) είναι τα παρακάτω:



Εικ.4.35 Αποτύπωση τρισδιάστατης σάρωσης στο περιβάλλον του Geomagic



Εικ.4.36 Αποτύπωση τρισδιάστατης σάρωσης στο περιβάλλον του Geomagic

Έχοντας λάβει το απαραίτητο νέφος σημείων με τη βοήθεια του Faro Arm Scanner μπορούμε

να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα που είναι η δημιουργία της ζητούμενης επιφάνειας μέσω τριγωνοποίησης αξιοποιώντας ει δυνατόν καταλληλότερα τα εργαλεία που μας προσφέρει το Geomagis.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η ψηφιακή αποτύπωση με τη μορφή νέφους σημείων της επιφάνειας ενός αντικειμένου με ένα σύστημα σάρωσης, όπως το Faro Arm Scanner, είναι μόνο η αρχή μιας ιδιαίτερα σύνθετης διαδικασίας. Τα βήματα που ακολουθούνται για την επεξεργασία του νέφους σημείων και η σειρά εργασιών από τη στιγμή της αποτύπωσης των δεδομένων έως την τρισδιάστατη παραμετρική CAD μοντελοποίηση είναι αυτά που παρουσιάζονται στο παραπάνω διάγραμμα ροής. Οι απαραίτητες φάσεις και τα επί μέρους βήματα της συνολικής διαδικασίας είναι επιγραμματικά τα εξής :

Φάση 1 -- Ψηφιακή αποτύπωση/παραγωγή νέφους σημείων

1. Προετοιμασία, τοποθέτηση και συγκράτηση εξαρτήματος
2. Ψηφιακή Σάρωση αντικειμένου με τη χρήση Faro Arm Scanner /λίζερ κάμερας

Φάση 2 -- Επεξεργασία / Διαχείριση νέφους σημείων

3. Σύνθεση/ ενοποίηση επιμέρους τμηματικών σαρώσεων (αν υπάρχουν)
4. Απομάκρυνση θορύβου / επικαλυπτόμενων σημείων
5. Ομογενοποίηση και συγχώνευση σημείων

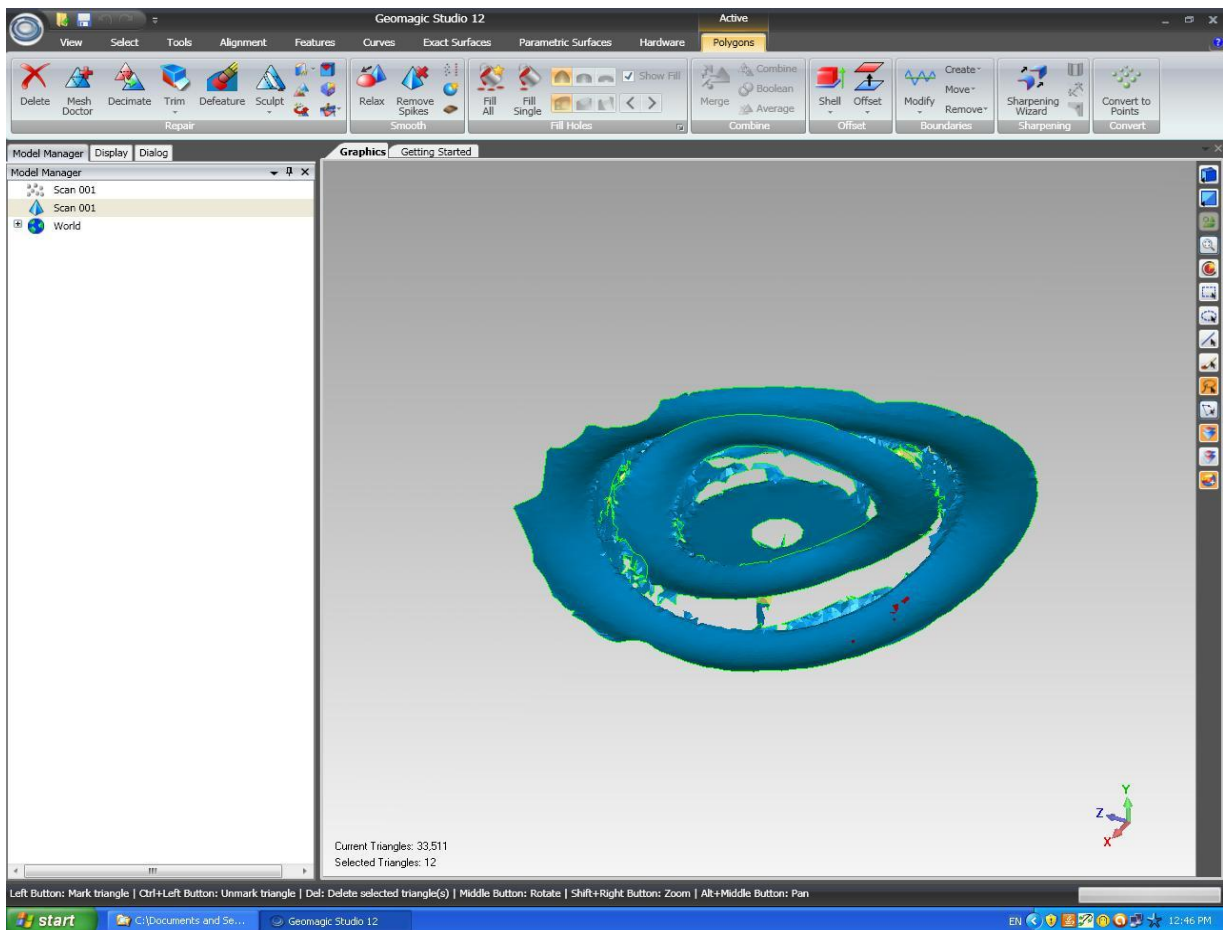
Φάση 3 -- Φάση πολυγώνων

6. Μετατροπή σημείων σε πολυγωνικό πλέγμα
7. Επεξεργασία ατελειών μοντέλου πολυγώνων

Φάση 4 – Δημιουργία CAD μοντέλου επιφανειών

8. Επεξεργασία - Κλείσιμο “water tight” του μοντέλου

Περαιτέρω αναφορά και ανάλυση των επιμέρους παραμέτρων που εμπλέκονται στις παραπάνω φάσεις και βήματα ξεφεύγει από τον σκοπό της παρούσας ΔΕ. Επισημαίνεται ότι η διαδικασία/αλληλουχία ενεργειών που ακλουθήσαμε στην περίπτωση του πλανήτη ήταν αυτή που παρουσιάζεται στο σχετικό διάγραμμα ροής. Οι εν λόγω εργασίες πραγματοποιήθηκαν υπό την άμεση επίβλεψη εξειδικευμένου προσωπικού του Εργαστηρίου ΤΚΠ-Ε&ΑΣ. Χαρακτηριστική μορφή των αποτελεσμάτων δίδεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικ.4.37 Αναδημιουργία επιφάνειας στο περιβάλλον του Geomagic

Ολοκληρώνοντας το τελευταίο αυτό βήμα της σάρωσης του πλανήτη και έχοντας όλα τις απαραίτητες πληροφορίες (μετρήσεις, νέφη σημείων και επιφάνειες) μπορούμε πια να προχωρήσουμε ανεμπόδιστα στη δημιουργία του 3D CAD μοντέλου του ένσφαιρου διαφορικού στο SolidWorks , δίχως να χρειαστεί να εμπλακούμε περαιτέρω με τη διαδικασία των μετρήσεων και της ψηφιακής αποτύπωσης .

5.Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση Ένσφαιρου Διαφορικού σε Περιβάλλον CAD

5.1.Πιστή Αποτύπωση Ένσφαιρου Διαφορικού στο περιβάλλον του SolidWorks

Έχοντας ολοκληρώσει επιτυχώς την διαδικασία μέτρησης και τρισδιάστατης σάρωσης των εξαρτημάτων του ένσφαιρου διαφορικού, και έχοντας κατά συνέπεια διαθέσιμες τις απαραίτητες πληροφορίες, διαστάσεις και νέφη σημείων, προβαίνουμε στη δημιουργία τρισδιάστατων CAD μοντέλων των εξαρτημάτων του διαφορικού. Επόμενο καίριο στάδιο της τρισδιάστατης αποτύπωσης του ένσφαιρου διαφορικού στην σύνθεση (**Assembling**) των επιμέρους αυτών εξαρτημάτων με σκοπό τη δημιουργία του τελικού συναρμολογημένου συνόλου. Το σύνολο αυτό αποτελεί την πιστή τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση του πρότυπου ένσφαιρου διαφορικού του κ.Τσιριγγάκη.

Τέλος, προβαίνουμε σε εκ νέου παραμετρικό σχεδιασμό του διαφορικού στηριζόμενοι σε συγκεκριμένες μεταβλητές σχεδίασης, η σημασία και η προέλευση των οποίων θα αναλυθεί εκτενώς στη συνέχεια της ΔΕ. Το παραμετρικό αυτό μοντέλο καθιστά εφικτή την ταχεία μεταβολή των διαστάσεων του μοντέλου, στοιχείο απαραίτητο για τη διεξαγωγή περαιτέρω έρευνας και την πιθανή διενέργεια βελτιστοποίησης του διαφορικού ως προς δεδομένες παραμέτρους τους.

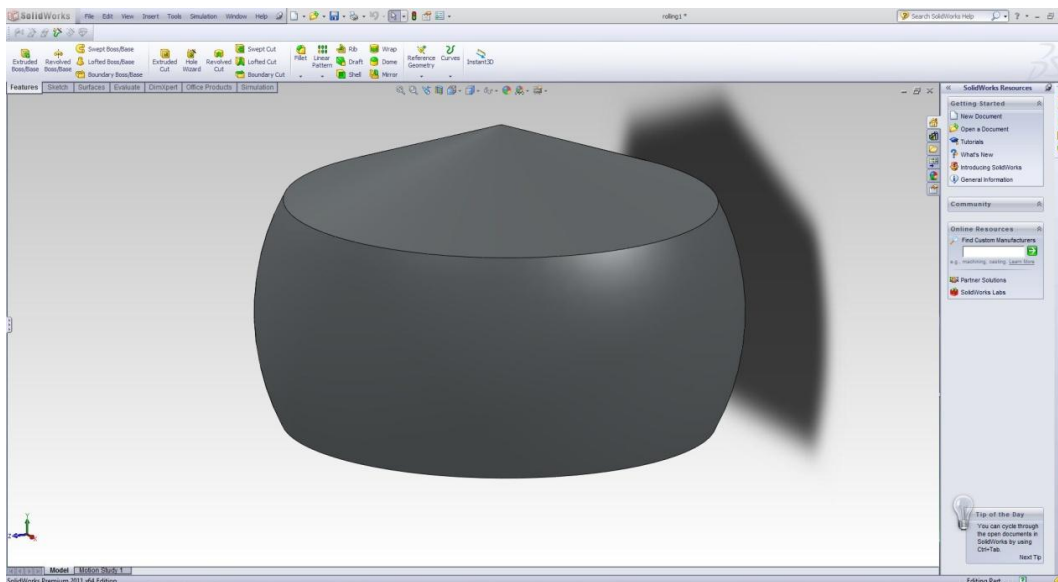
Το λογισμικό με το οποίο πραγματοποιείται η παραπάνω διαδικασία είναι το SolidWorks 2011, ένα ολοκληρωμένο σχεδιαστικό πακέτο το οποίο βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην σύγχρονη Βιομηχανία. Συγκεκριμένα το SolidWorks αποτελεί ένα πακέτο 3D CAD μοντελοποίησης, το οποίο υποστηρίζεται από το λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows και έχει αναπτυχθεί από την εταιρία Dassault Systèmes SolidWorks Corp., θυγατρική της Dassault Systèmes, S. A. Το SolidWorks χρησιμοποιείται σήμερα από περισσότερους από 1,3 εκ. μηχανικούς και σχεδιαστές και περισσότερες από 130.000 εταιρίες ανά τον κόσμο. Ιστορικά το SolidWorks εμφανίστηκε στη διεθνή αγορά το Δεκέμβριο του 1993 από τον Jon Hirschtick, οποίος με έδρα το Concord, Μασαχουσέτη, ΗΠΑ προσέλαβε μια ομάδα μηχανικών για την δημιουργία μιας εταιρείας, η οποία θα ανέπτυξε 3D CAD λογισμικό το οποίο ήταν εύκολο στη χρήση, προσιτό και ικανό να λειτουργήσει σε έναν συμβατικό προσωπικό υπολογιστή. Το 1997 η Dassault Systèmes, εταιρία γνωστή στο χώρο των λογισμικών μοντελοποίησης για το CATIA CAD λογισμικό της, απέκτησε την εταιρεία και σήμερα κατέχει το 100% των μετοχών της.

Πλατφόρμες που ενσωματώνει το πακέτο του SolidWorks είναι:

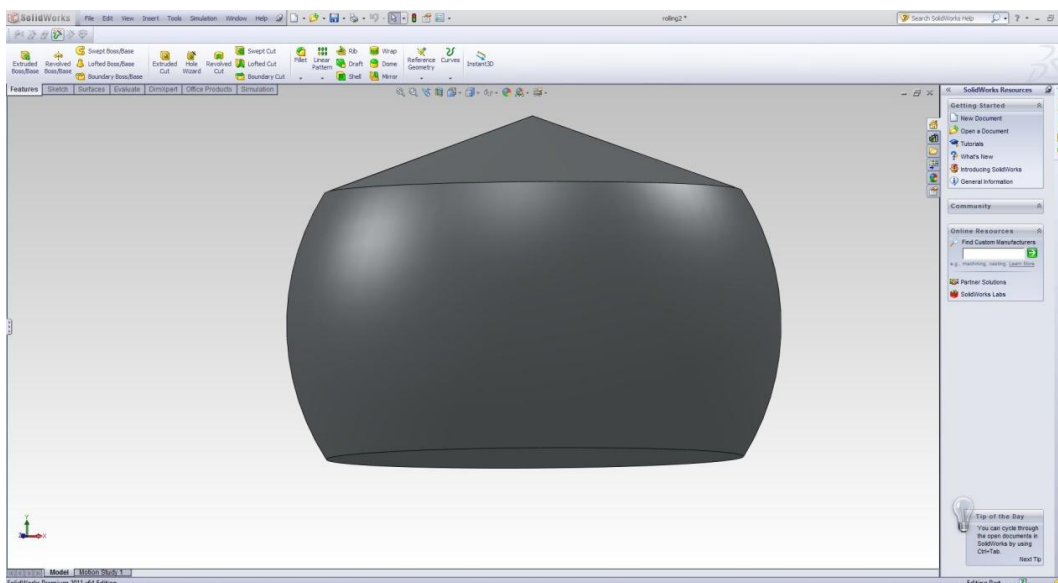
- Το **SolidWorks Simulation**, το οποίο αποτελεί ένα εργαλείο για την επικύρωση του μηχανολογικού σχεδιασμού. Το εργαλείο αυτό αναδεικνύει στους μηχανικούς τη συμπεριφορά του σχεδιασμένου αντικειμένου στο φυσικό περιβάλλον για το οποίο προορίζεται. Συνεπώς με την πλατφόρμα του SolidWorks Simulation μπορεί να μελετηθεί η συμπεριφορά του σχεδιασμένου αντικείμενο υπό την επίδραση δυναμικών και θερμικών φορτίων, να ευρεθεί η ιδιοσυχνότητά του κ.α.

- Το **SolidWorks Motion**, που αποτελεί ένα εικονικό εργαλείο πρωτοτυποποίησης, το οποίο παρέχει δυνατότητες προσομοίωσης της κίνησης ενός μηχανισμού, ελέγχοντας με τον τρόπο αυτόν την ομαλή και επιδιωκόμενη λειτουργία του
- Το **SolidWorks Flow Simulation**, το οποίο αποτελεί ένα είναι ένα πλήρες εικονικό εργαλείο προσομοίωσης της ροής ρευστού και της μεταφοράς θερμότητας, προσφέροντας τη δυνατότητα στους μηχανικούς να διεξάγουν δοκιμές σε εικονικά πρωτότυπα.

Τα πρώτα εξαρτήματα τα οποία αναπαράγουμε ψηφιακά είναι οι δορυφόροι/στοιχεία κύλισης του διαφορικού. Κομβικές μετρήσεις στον σχεδιασμό των δορυφόρων αποτέλεσε η εικονικότητα που εμφανίζεται στα άκρα τους. Το ζήτημα αυτό αντιμετωπίστηκε με τη βοήθεια του νέφους σημείων, από το οποίο δημιουργήθηκε η επιδιωκόμενη κωνική επιφάνεια. Έτσι, προσδώσαμε όγκο στην επιφάνεια αυτή (**Extrude**), στηριζόμενοι στις μετρήσεις που λάβαμε με το παχύμετρο, τόσο του πάχους όσο και της ακτίνας καμπυλότητας του δορυφόρου. Παρακάτω παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής.

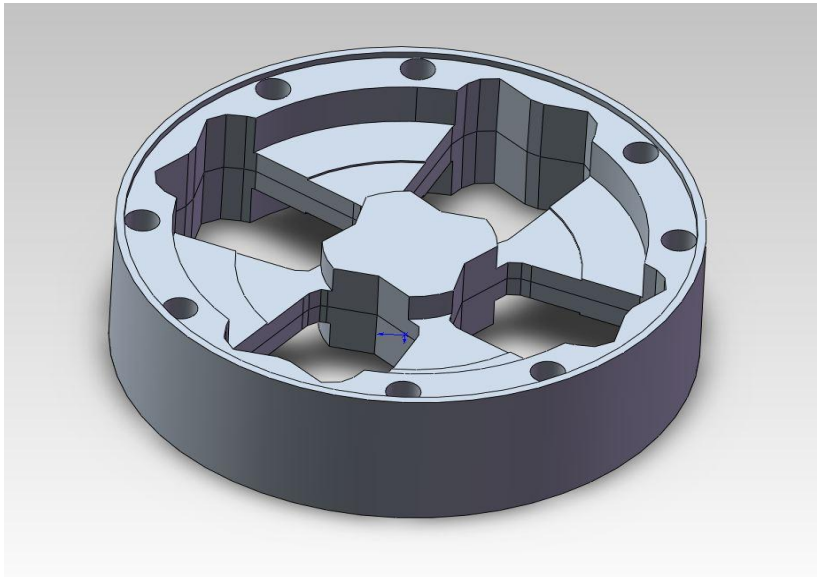


Εικ.5.1. Ο 1^{ος} δορυφόρος (ο μικρότερος εκ των δυο) στο περιβάλλον του SolidWorks



Εικ.5.2. Ο 2^{ος} δορυφόρος (ο μεγαλύτερος εκ των δυο) στο περιβάλλον του SolidWorks

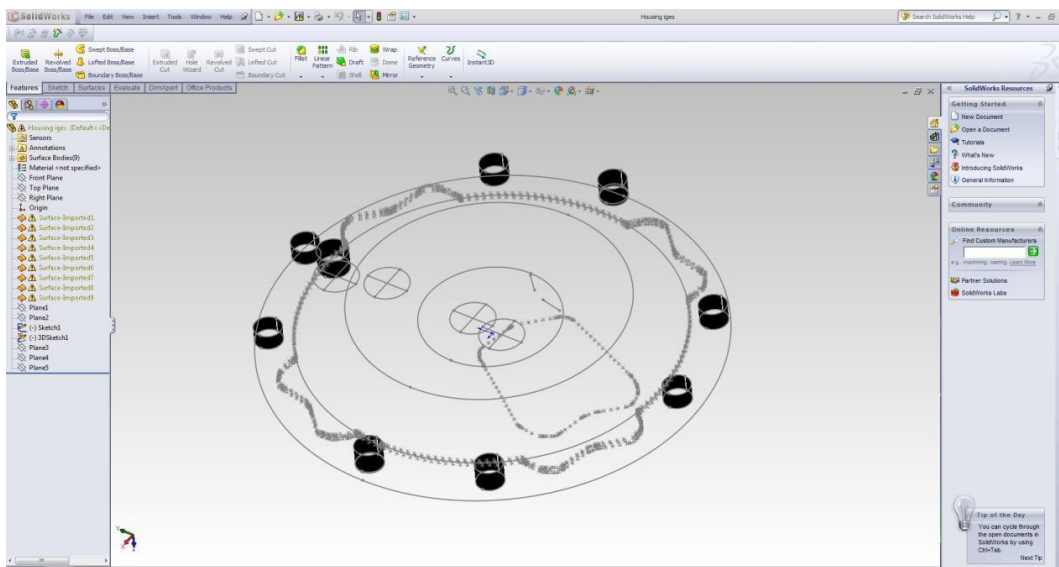
Το δεύτερο κομμάτι το οποίο δημιουργούμε είναι ο φορέας των δορυφόρων του διαφορικού (Housing). Αξιοποιώντας τις μετρήσεις που λάβαμε από την CMM, δημιουργούμε την άνω επιφάνεια του φορέα μαζί με τις κοιλότητες και τις οπές που παρουσιάζει. Εν συνέχεια, προσδίδουμε στην επιφάνεια το ήμισυ του μετρούμενου όγκου του φορέα, καθώς στις 3D CAD πλατφόρμες είναι σκόπιμο, σε συμμετρικά ή εξ αντανακλάσεως αντικείμενα (**Mirror**), το κύριο στάδιο της επεξεργασίας τους να πραγματοποιείται πριν αυτά λάβουν ολόκληρο τον όγκο τους. Στο τέλος της όλης διαδικασίας, προσδίδουμε το υπόλοιπο μισό του όγκου εξ αντανακλάσεως (**Mirror**).



Εικ.5.3. Ο φορέας των δορυφόρων του διαφορικού βάσει μετρήσεων CMM

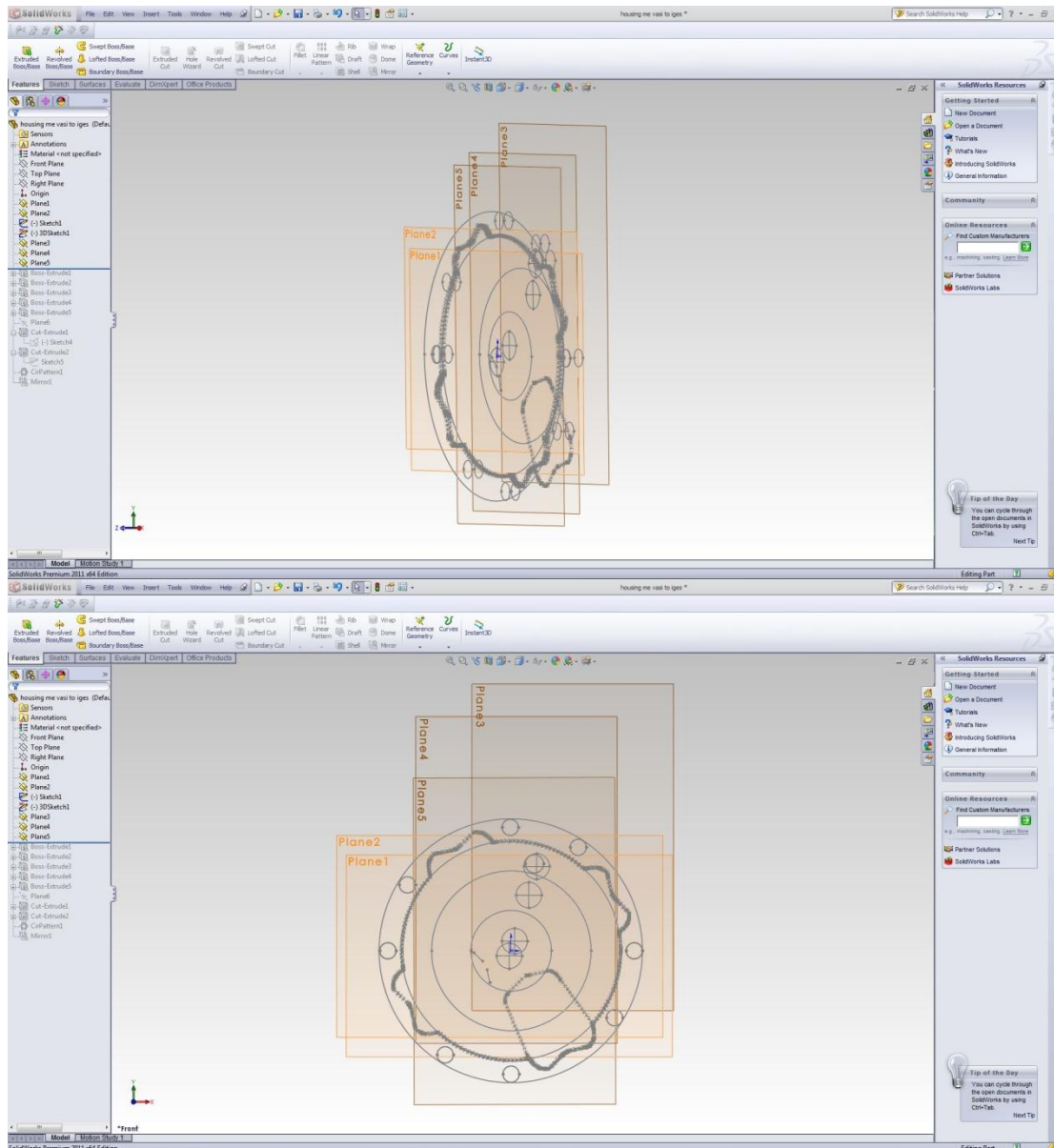
Λόγω του ιδιαίτερου ενδιαφέροντος που παρουσιάζει ο φορέας του διαφορικού, όσον αφορά την μέτρηση και τον σχεδιασμό του, παρουσιάζουμε, στη συνέχεια της ΔΕ, βήμα προς βήμα την διαδικασία δημιουργίας τους.

Η λογική σχεδίασης με την οποία θα προχωρήσουμε στην τρισδιάστατη ψηφιακή αναπαράσταση του φορέα των δορυφόρων είναι αυτή της δημιουργίας επιπέδων σχεδίασης με βάση τις μετρήσεις στην CMM και το αντίστοιχο νέφος σημείων. Αρχικά εισάγουμε στο περιβάλλον σχεδίασης του SolidWorks το νέφος σημείων του φορέα σε μορφή αρχείου .igs.



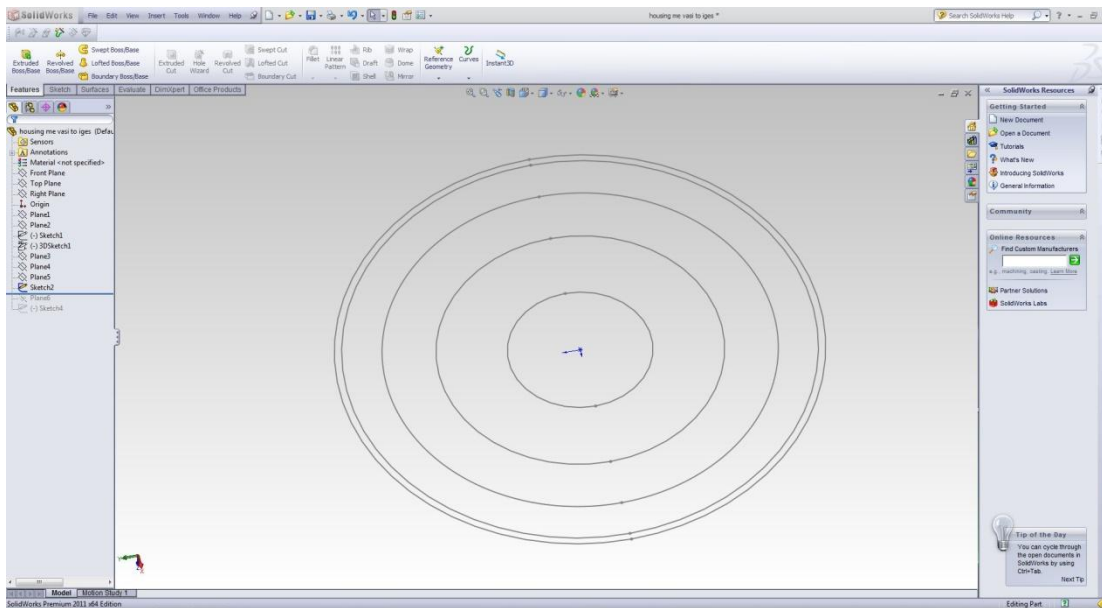
Εικ.5.4. Αποτύπωση νέφους σημείων φορέα στο περιβάλλον του SolidWorks

Εν συνεχεία, έχοντας ως άξονα το νέφος σημείων, ορίζουμε επίπεδα γύρω από το οριζόντιο επίπεδο συμμετρίας του φορέα. Τα επίπεδα αυτά θα αποτελέσουν το κάθε ένα ξεχωριστά και σε συνδυασμό με το οριζόντιο επίπεδο συμμετρίας, τα όρια της πρόσδοσης όγκου στο φορέα (άκρα **Extrude**).

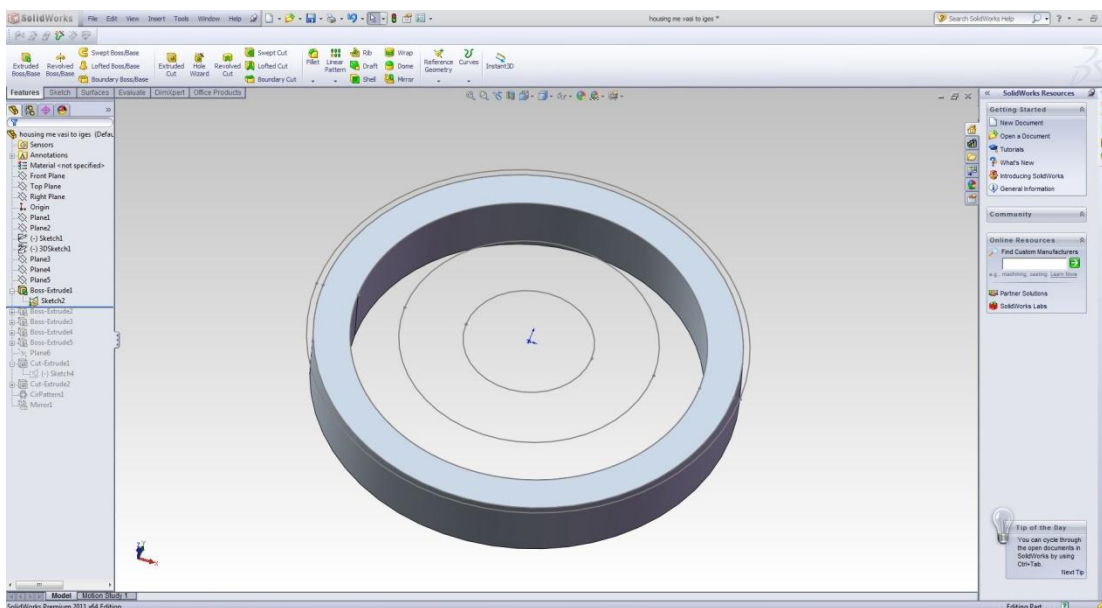


Εικ.5.5. Επίπεδα και νέφος σημείων φορέα στο περιβάλλον του SolidWorks .(σε τρισδιάστατη όψη και κάτοψη)

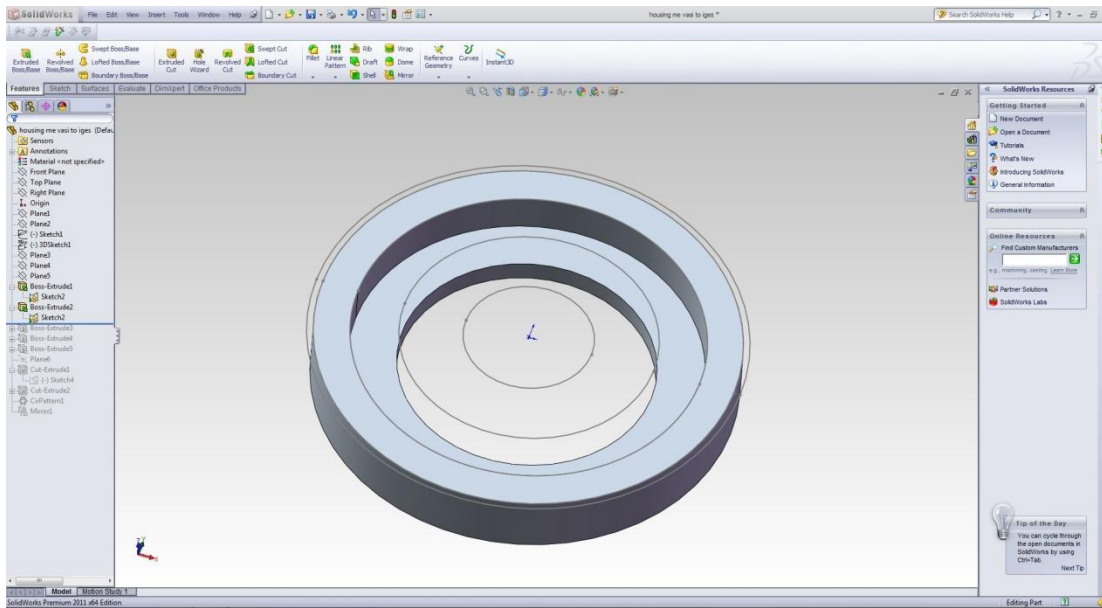
Στο επόμενο βήμα προβαίνουμε στη δισδιάστατη σχεδίαση (**2D Sketch**) των διαφορετικών επιπέδων του φορέα πάνω στο επίπεδο συμμετρίας του. Διογκώνουμε (**Extrude**) τον κάθε δακτύλιο ξεχωριστά κατά το επιθυμητό πάχος. Το πάχος αυτό έχει προσδιοριστεί από την απόσταση ανάμεσα στο επίπεδο συμμετρίας και στα παράλληλα επίπεδα που προέκυψαν από το νέφος σημείων.



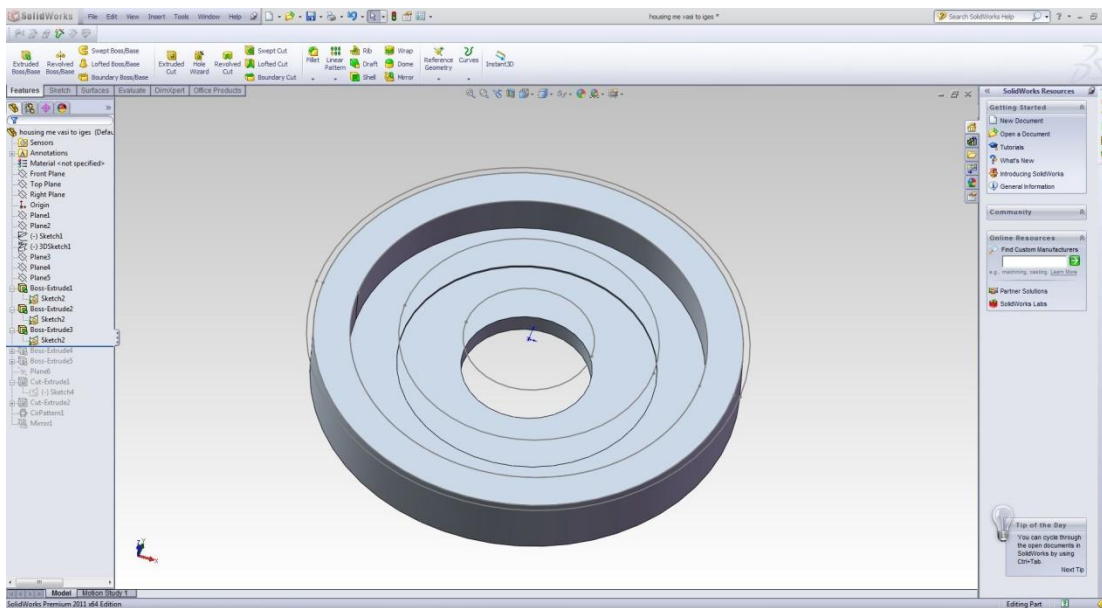
Εικ.5.6. Δακτύλιοι του φορέα των δορυφόρων του διαφορικού στο περιβάλλον του SolidWorks .



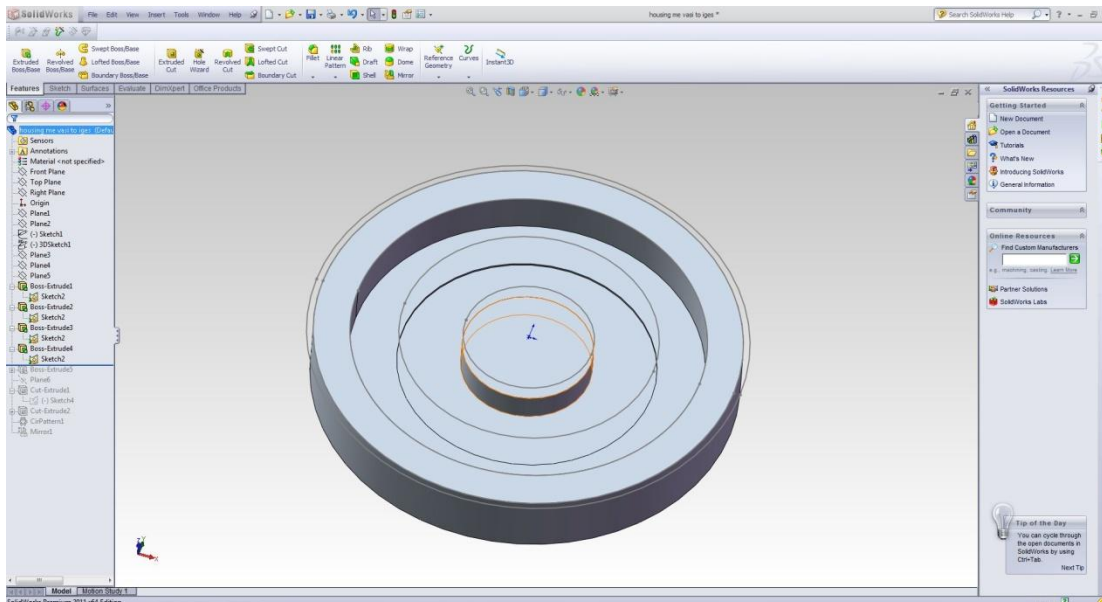
Εικ.5.7. Διόγκωση 1^{ου} δακτυλίου στο περιβάλλον του SolidWorks .



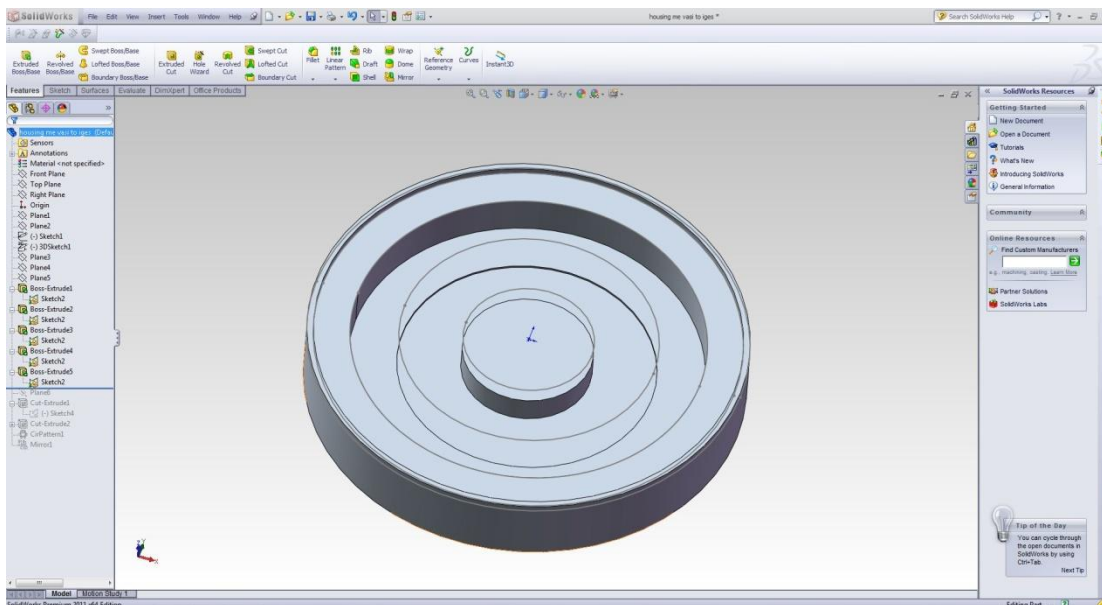
Εικ.5.8. Διόγκωση 2^{ου} δακτυλίου στο περιβάλλον του SolidWorks .



Εικ.5.9. Διόγκωση 3^{ου} δακτυλίου στο περιβάλλον του SolidWorks .

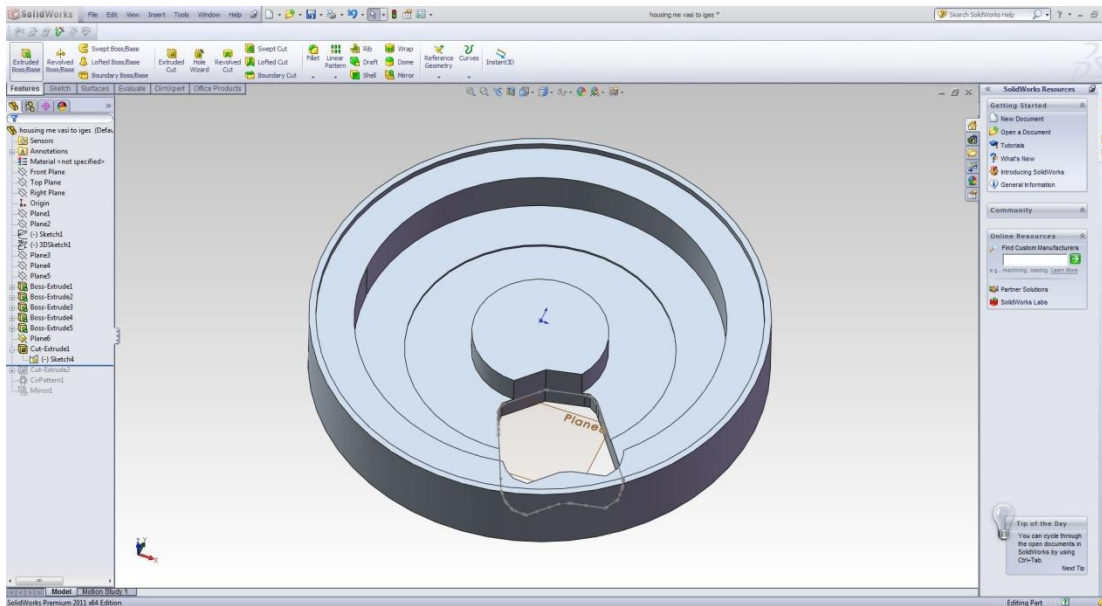


Εικ.5.10. Διόγκωση 4^{ου} δακτυλίου στο περιβάλλον του SolidWorks .



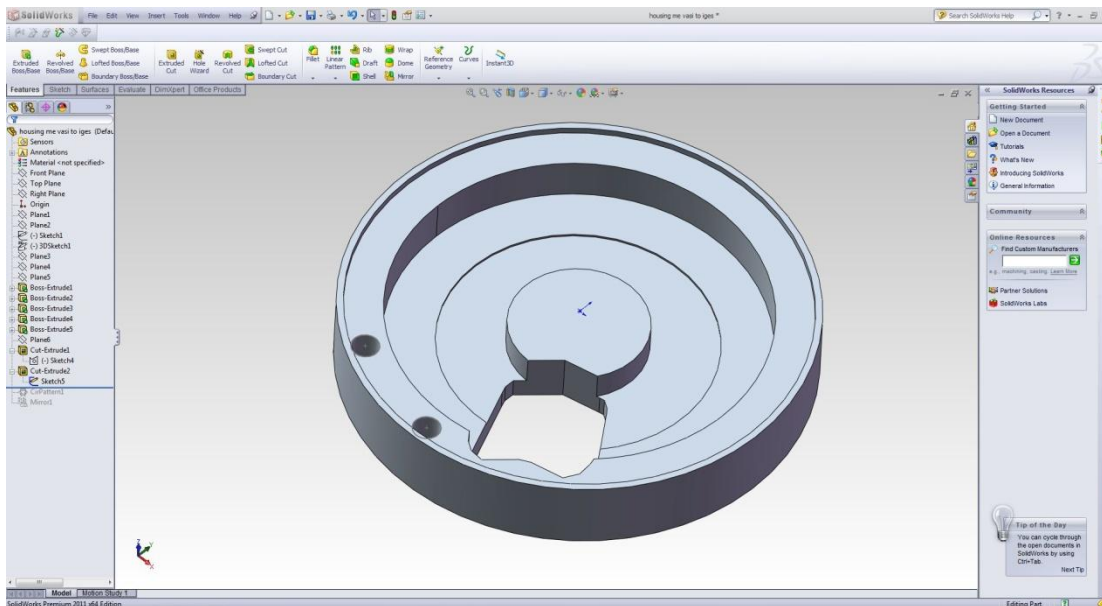
Εικ.5.11. Διόγκωση 5^{ου} δακτυλίου στο περιβάλλον του SolidWorks .

Στο επόμενο βήμα δημιουργούμε τους χώρους έδρασης των δορυφόρων στο φορέα. Αξιοποιώντας τη γεωμετρία που λάβαμε από τις μετρήσεις CMM προβαίνουμε στην αποκοπή (**Cut-Extrude**) του απαραίτητου όγκου του στερεού σώματος. Έτσι προκύπτει το παρακάτω αποτέλεσμα.



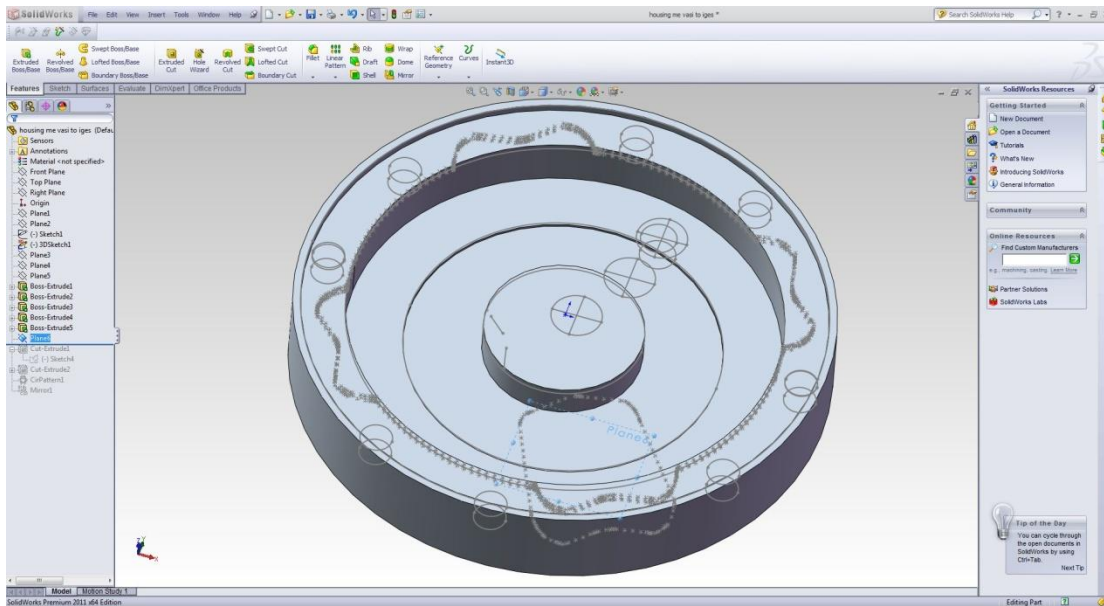
Εικ.5.12. Αποκοπή τμήματος του φορέα των δορυφόρων στο περιβάλλον του SolidWorks .

Εν συνεχεία, επαναχρησιμοποιώντας κατάλληλα το νέφος σημείων αποκόπτουμε (**Cut-Extrude**), δυο χαρακτηριστικές οπές στην περίμετρο του φορέα.



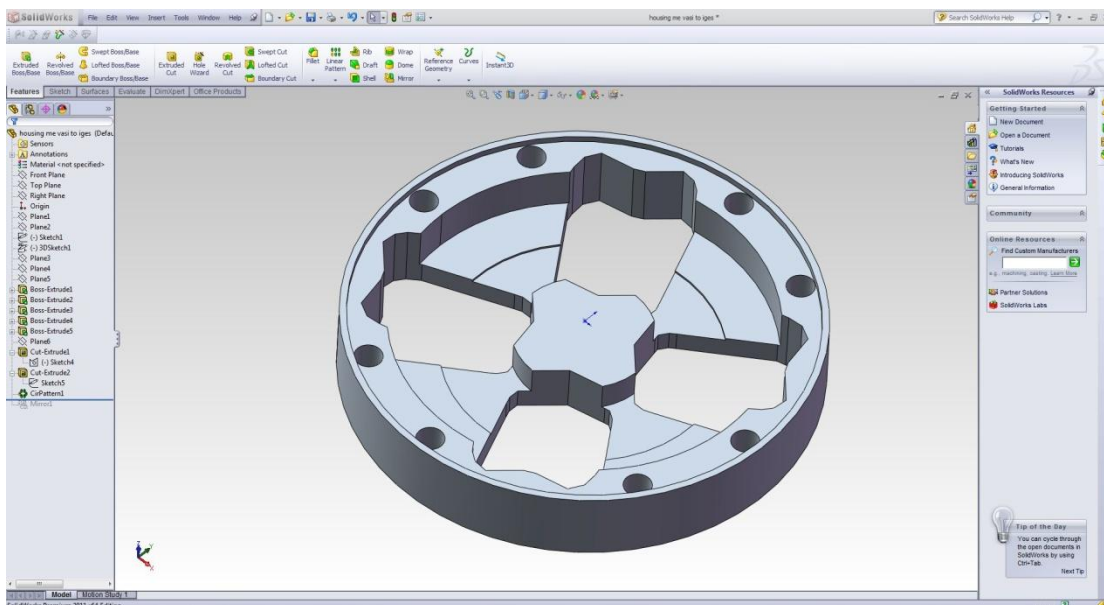
Εικ.5.13. Δημιουργία οπών στην περίμετρο του φορέα στο περιβάλλον του SolidWorks .

Σε αυτό ακριβώς το σημείο, προβαίνουμε σε μια παραδοχή της οποίας την ορθότητα και θα σχολιάσουμε. Παρατηρώντας την αποτύπωση του νέφους σημείων στους δακτυλίους του φορέα αντιλαμβανόμαστε την συμμετρία που υπάρχει στις οπές και στα τμήματα έδρασης των δορυφόρων.



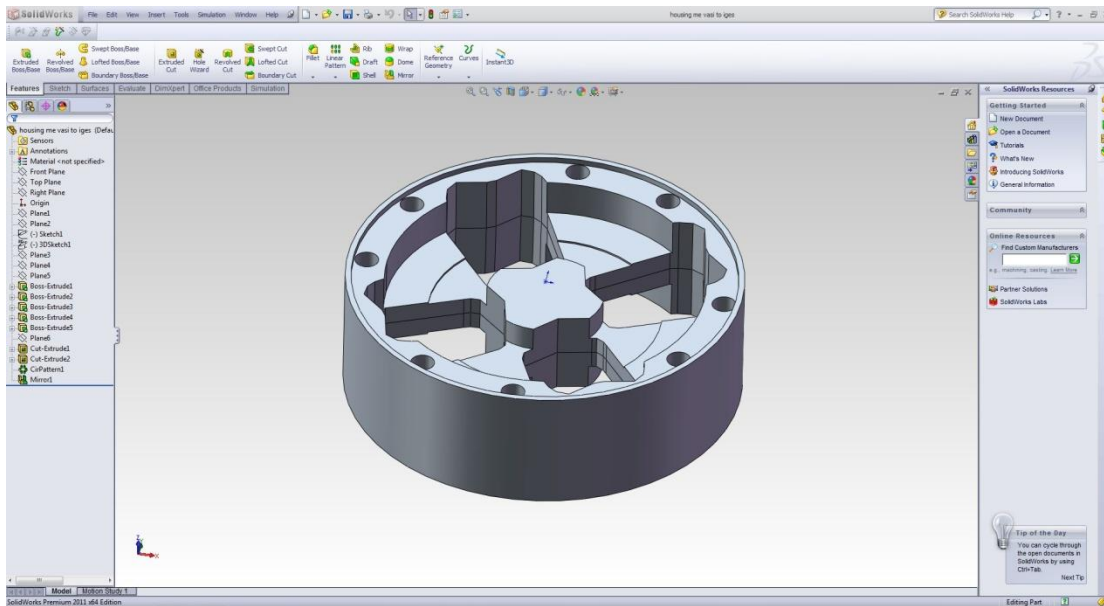
Εικ.5.14. Νέφος σημείων αποτυπωμένο στους δακτυλίους του φορέα στο περιβάλλον του SolidWorks .

Η απολύτως πιστή τρισδιάστατη αποτύπωση του φορέα των δορυφόρων του διαφορικού, θα απαιτούσε οι υπόλοιπες σπές καθώς και τα τμήματα έδρασης των δορυφόρων να δημιουργηθούν «χειρονακτικά» αξιοποιώντας το νέφος σημείων. Αντλαμβανόμενοι την συμμετρία που έχουν αυτά μεταξύ τους και με δεδομένο ότι οι αποκλίσεις που παρατηρούνται από αυτήν είναι ελάχιστες-αμελητέες, προβαίνουμε στην αυτοματοποιημένη εκ συμμετρίας δημιουργία τους (**circular pattern**).



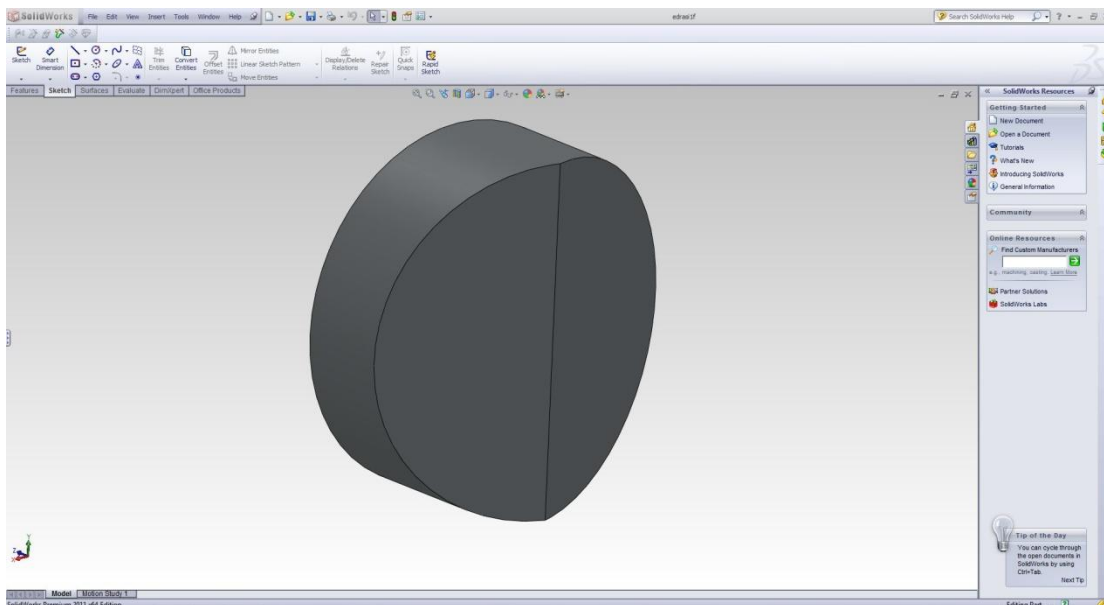
Εικ.5.15 Εκ συμμετρίας αναπαραγωγή σπών και τμημάτων έδρασης δορυφόρων στο περιβάλλον του SolidWorks .

Στο σημείο αυτό έχουμε ολοκληρώσει την ψηφιακή αναπαράσταση του ημίσεως του όγκου του φορέα των δορυφόρων του διαφορικού. Κατά συνέπεια, στο επόμενο βήμα προχωράμε στην αντανάκλαση (**Mirror**) του δημιουργηθέντος τμήματος του φορέα ως προς το οριζόντιο επίπεδο συμμετρίας του. Μετά και από αυτήν την ενέργεια καταλήξαμε στην ολοκλήρωση και την πιστή τρισδιάστατη αποτύπωση του φορέα.



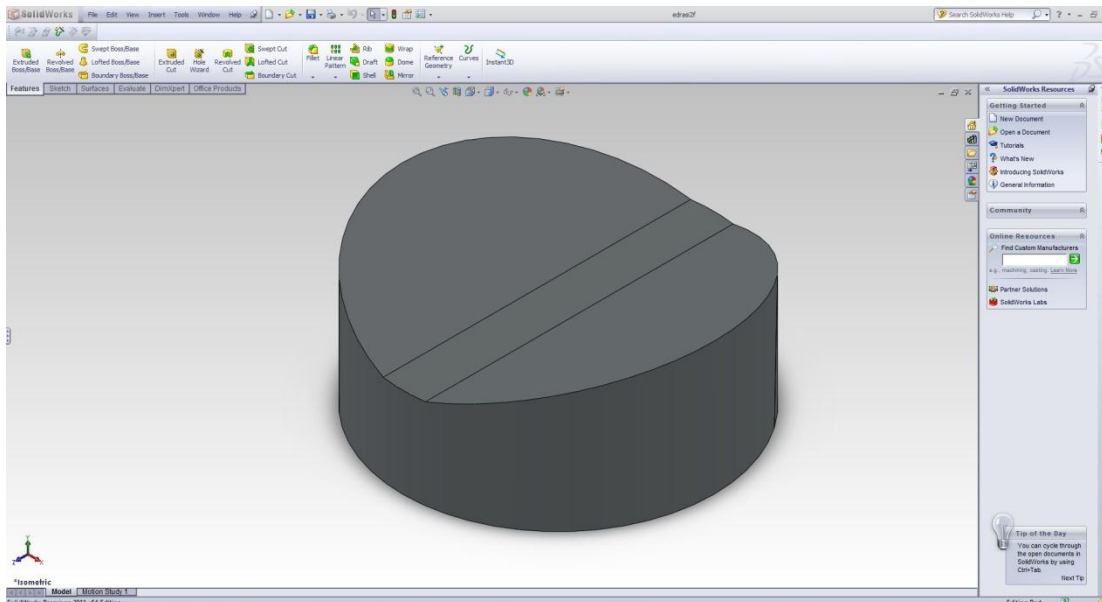
Εικ.5.16 Τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο του φορέα των δορυφόρων του διαφορικού στο περιβάλλον του SolidWorks .

Με άξονα τους δορυφόρους και τον φορέα προβαίνουμε στη σχεδίαση των εδράσεων των δορυφόρων. Η σχεδίαση αυτή δεν απαιτεί μετρήσεις με τη CMM, παρά μόνο λίγες τυπικές μετρήσεις με το ηλεκτρονικό παχύμετρο, καθώς λόγω της συνεργασίας τους με τα δύο προαναφερθέντα εξαρτήματα, οι διαστάσεις τους είναι πλήρως ορισμένες. Η ανάλυση του τρόπου σχεδίασής των εδράσεων δεν παρουσιάζει κάποια αξιοσημείωτη ιδιαιτερότητα και κατά συνέπεια θα πραγματοποιηθεί μόνο για το παραμετρικό μοντέλο, όπου η διαδικασία είναι σαφώς πολυπλοκότερη.



Εικ.5.17

Τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο του φορέα των δορυφόρων του διαφορικού στο περιβάλλον του SolidWorks .

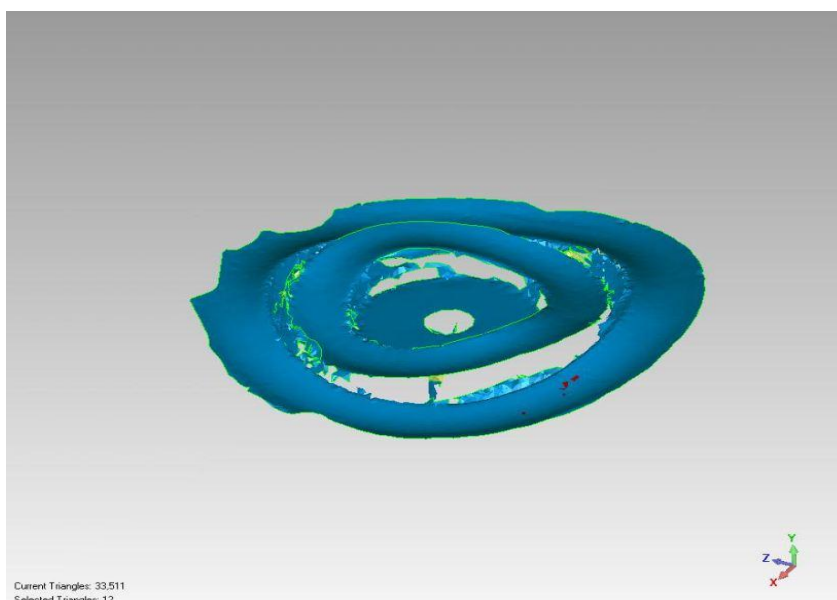


Εικ.5.18 Τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο του φορέα των δορυφόρων του διαφορικού στο περιβάλλον του SolidWorks.

Το επόμενο εξάρτημα του ένσφαιρου διαφορικού με το οποίο καταπιανόμαστε είναι οι πλανήτες οι οποίοι αποτελούν το πιο σύνθετο μέρος του διαφορικού από μορφολογική-γεωμετρική σκοπιά.

Για την δημιουργία των δορυφόρων ακολουθούμε τα παρακάτω στάδια.

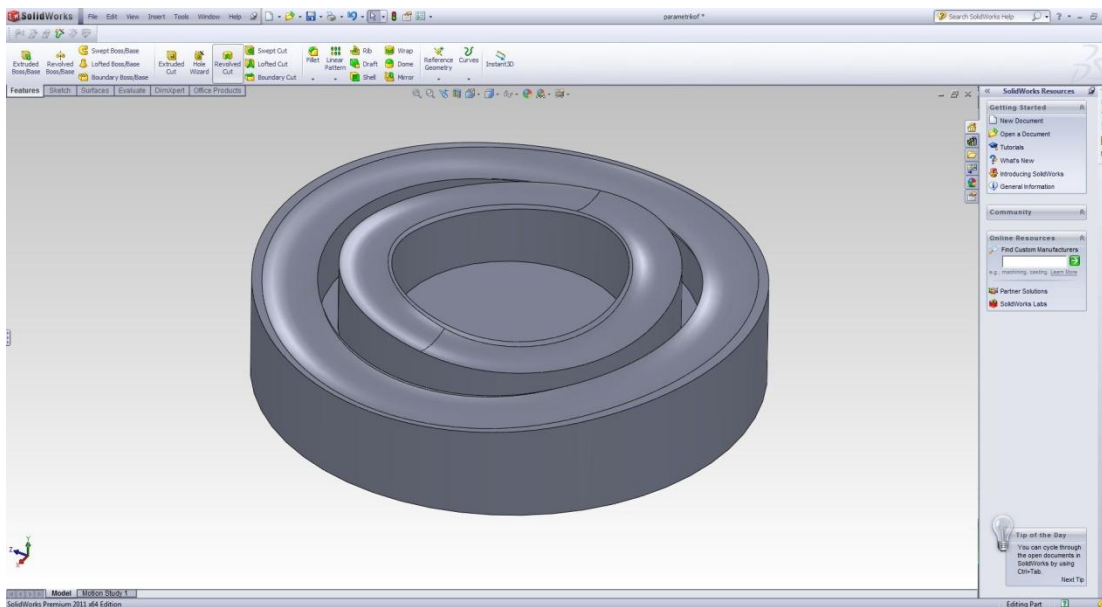
Αξιοποιώντας το νέφος σημείων που λάβαμε με την χρήση του 3D Scanner Faro Arm, δημιουργούμε την κυματοειδή επιφάνεια στο περιβάλλον του Geomagic και την εισάγουμε στο SolidWorks με σκοπό την περαιτέρω επεξεργασία του.



Εικ.5.19 Κυματοειδής επιφάνεια δημιουργημένη στο περιβάλλον του Geomagic.

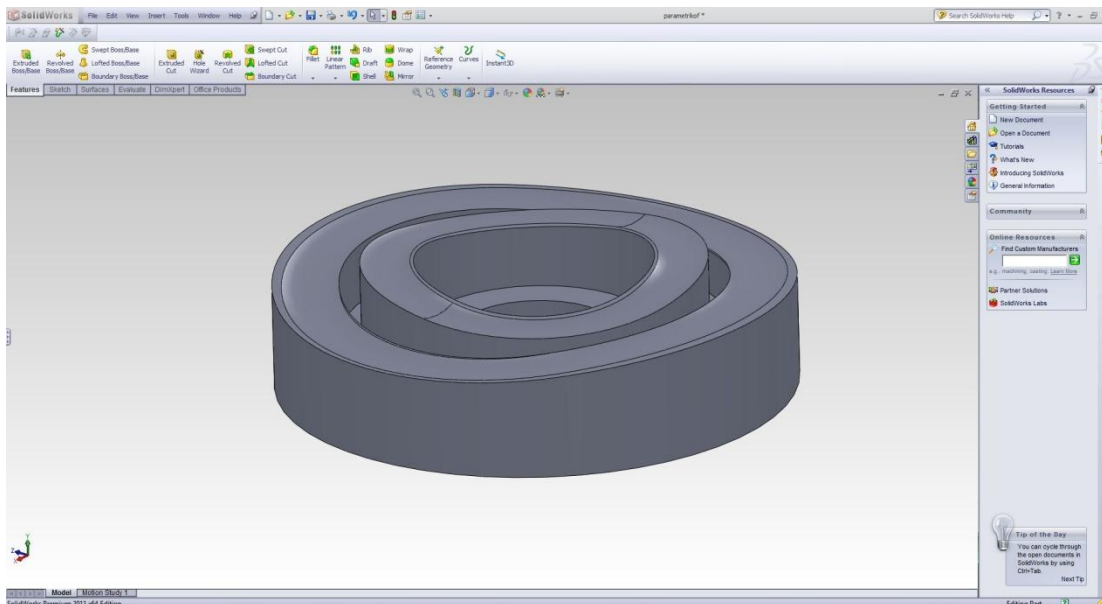
Στη συνέχεια αφαιρούμε τον περιφερειακό θόρυβο της επιφάνειας με εργαλεία του SolidWorks και διογκώνουμε τις επιφάνειες (**Extrude**) σύμφωνα με το πάχος του πρωτοτύπου

πού λάβαμε με μετρήσεις μέσω ηλεκτρονικού παχυμέτρου ακριβείας.



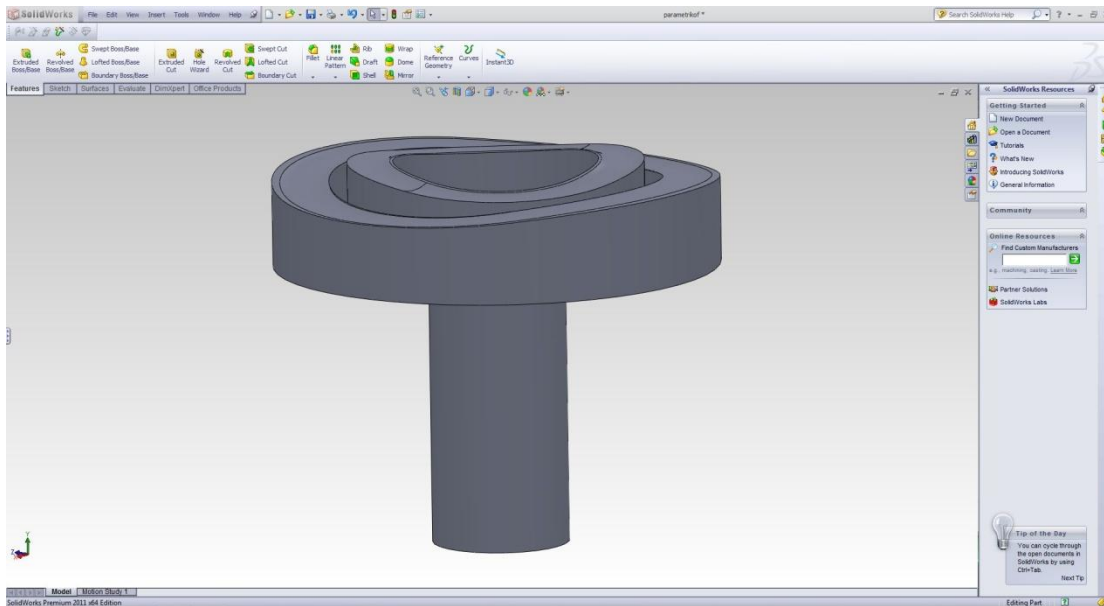
Εικ.5.20 Κύριο σώμα πλανήτη στο περιβάλλον του SolidWorks .

Στο επόμενο βήμα δημιουργούμε την κεντρική οπή στο κύριο σώμα του πλανήτη μέσω της εντολής αφαίρεσης στερεού όγκου (**Cut-Extrude**).



Εικ.5.21 Δημιουργία κεντρικής οπής στο κύριο σώμα πλανήτη στο περιβάλλον του SolidWorks .

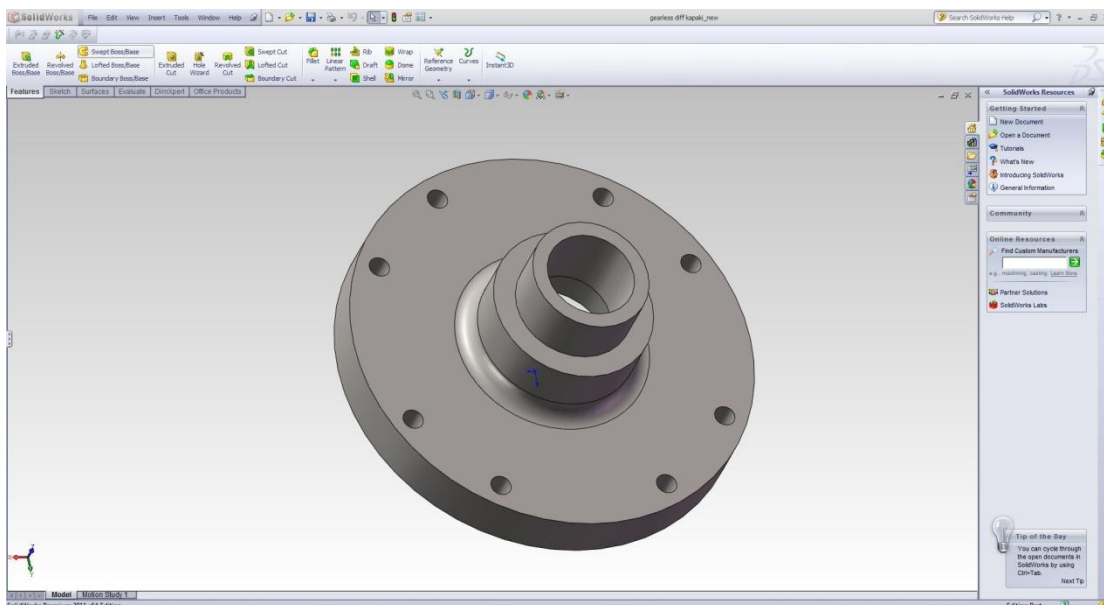
Στο επόμενο βήμα διογκώνουμε τον κυλινδρικό δακτύλιο του πλανήτη ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη συνεργασία του ένσφαιρου διαφορικού με τα ημιαξόνια.



Εικ.5.22 Προσθήκη στον πλανήτη δακτυλίου συνεργασίας με ημιαξόνια, στο περιβάλλον του SolidWorks .

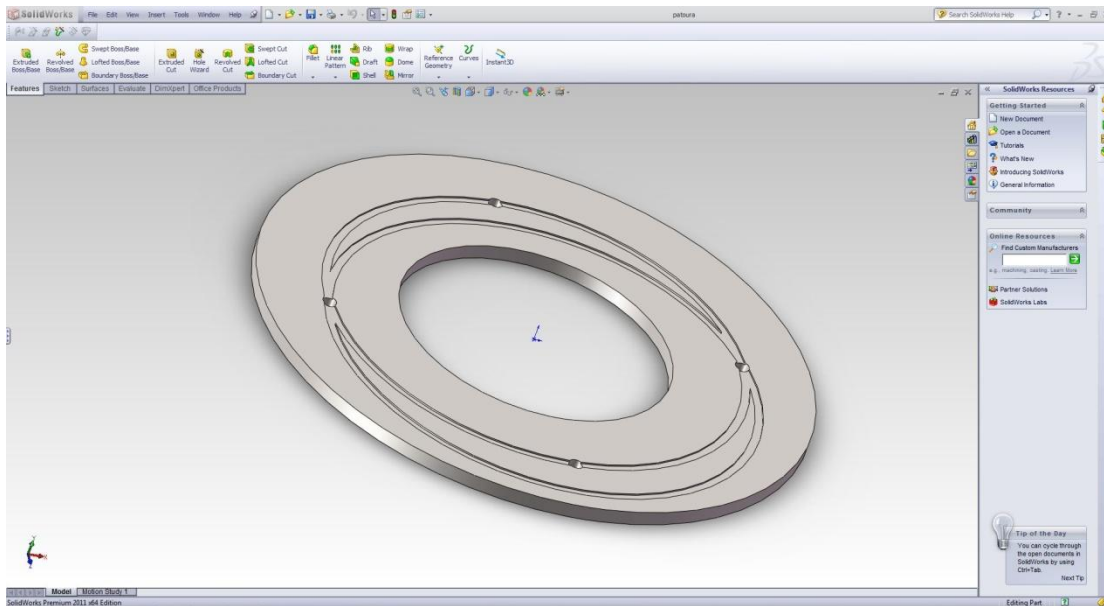
Έχοντας ολοκληρώσει το σχεδιασμό των δορυφόρων, του φορέα των δορυφόρων και των πλανητών, δημιουργούμε το καπάκι ασφαλείας του διαφορικού καθώς και το αξονικό έδρανο που είναι τοποθετημένο πάνω του.

Για το καπάκι ασφαλείας εκμεταλλευόμαστε το νέφος σημείων και γενικότερα τα δεδομένα που έχουνε λάβει από τον φορέα των δορυφόρων λόγω της μεταξύ τους σύνδεσης. Οι διαστάσεις που δεν προκύπτουν από την σύνδεση αυτή, μετρώνται με ηλεκτρονικό παχύμετρο ακριβείας.



Εικ 5.23 Καπάκι ασφαλείας διαφορικού στο περιβάλλον του SolidWorks .

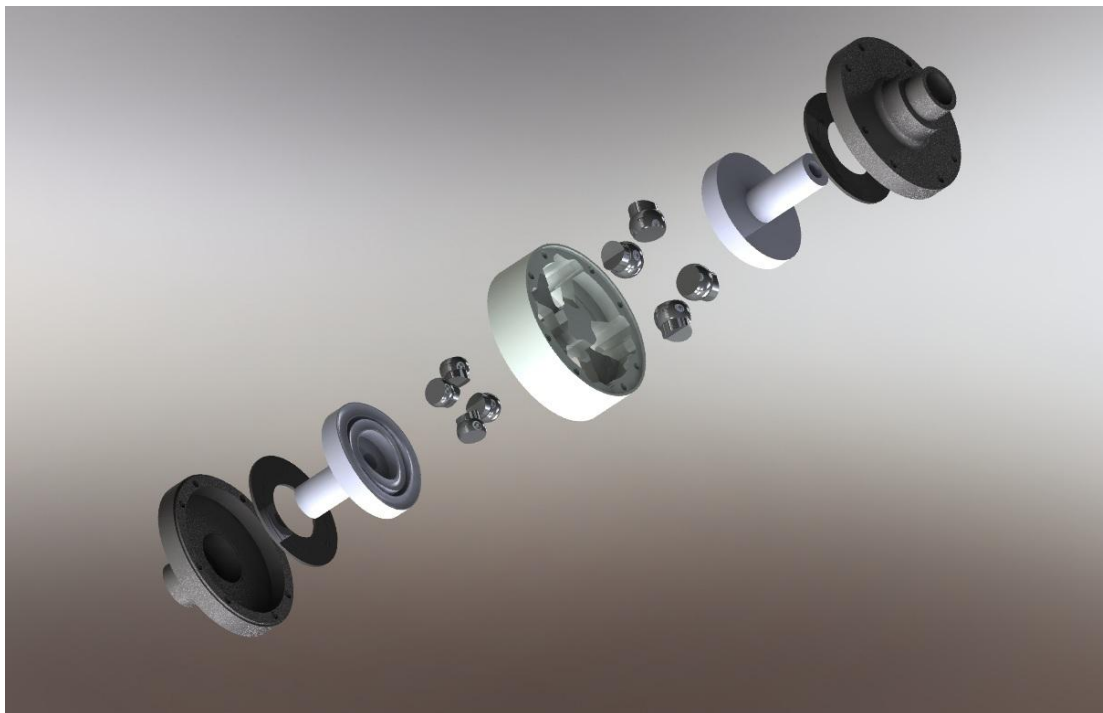
Τέλος σχεδιάζουμε το δακτύλιο τριβής (αξονικό έδρανο) βασιζόμενοι αποκλειστικά σε μετρήσεις που λάβαμε με το ηλεκτρονικό παχύμετρο καθώς θα ήταν ασύμφορο να προβούμε στην λήψη μετρήσεων στη CMM λόγω απλότητας του εξαρτήματος.



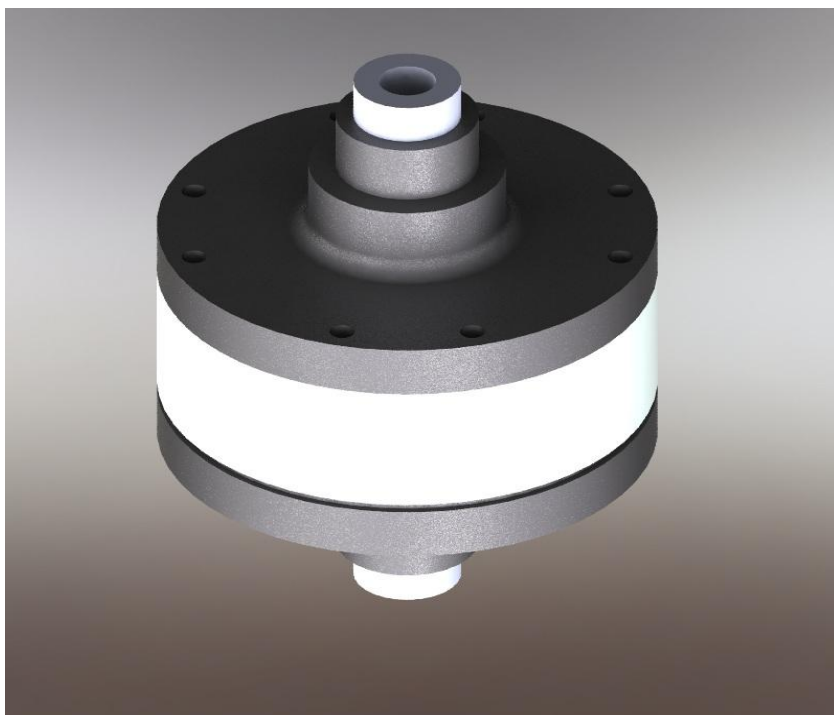
Εικ.5.24 Δακτύλιος τριβής στο περιβάλλον του SolidWorks .

Συνθέτοντας τα παραπάνω εξαρτήματα προκύπτει το τελικό συναρμολογημένο σύνολο-ένσφαιρο διαφορικό. Περαιτέρω ανάλυση της διαδικασίας σύνδεσης των εξαρτημάτων του διαφορικού έπεται στη συνέχεια της ΔΕ, καθώς οι τεχνικές που εφαρμόστηκαν στην περίπτωση της πιστής αποτύπωσης του ένφαιρου διαφορικού δεν διαφέρουν από τις αντίστοιχες στην περίπτωση του γενικευμένου παραμετρικού μοντέλου, η διαδικασία υλοποίησης του οποίου ακολουθεί.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι για την τελική απεικόνιση του συναρμολογημένου συνόλου, έγινε χρήση των εργαλείων φωτορεαλισμού (**Rendering Tools**) που προσφέρει το SolidWorks .



Εικ.5.25 Ανάπτυγμα ένσφαιρου διαφορικού



Εικ.5.26 Συναρμολογημένο ένσφαιρο διαφορικό.

5.2.Δημιουργία Παραμετρικού Μοντέλου Ένσφαιρου Διαφορικού στο περιβάλλον του SolidWorks

Επόμενο βήμα, στη διαδικασία μελέτης του διαφορικού, αποτελεί η δημιουργία ενός παραμετρικού τρισδιάστατου μοντέλου του διαφορικού στο περιβάλλον του SolidWorks . Πραγματοποιώντας το βήμα αυτό ξεπερνάμε τα όρια των διαδικασιών που επιτάσσει ο ΑΜΣ και υιοθετούμε τεχνικές του κατ' εξοχήν Μηχανολογικού Σχεδιασμού. Έτσι συνολικά η διαδικασία μελέτης του ένσφαιρου διαφορικού αποκτά έναν υβριδικό χαρακτήρα, ο οποίος αμφιταλαντεύεται ανάμεσα στον ΑΜΣ και το Μηχανολογικό Σχεδιασμό. Η περάτωση τέτοιου τύπου υβριδικών μελετών είναι όλο και συχνότερη στις μέρες καθώς οι ανάγκες για βελτιστοποίηση και γενικότερα για περαιτέρω έρευνα/εξειδικευμένη μελέτη του προς ΑΜΣ αντικείμενου καθιστούν την εφαρμογή των τεχνικών του Μηχανολογικού Σχεδιασμού κάτι παραπάνω από αναγκαία.

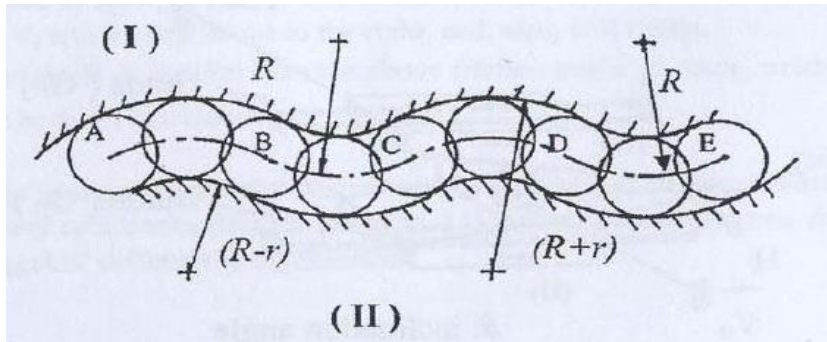
Προτού όμως αρχίσουμε να δημιουργούμε το παραμετρικό τρισδιάστατο μοντέλο οφείλουμε να προσδιορίσουμε ακριβώς αυτές τις παραμέτρους του διαφορικού, οι οποίες και θα αποτελέσουν τις μεταβλητές σχεδίασής του, εκείνες δηλαδή τις μεταβλητές που έχουν επιλεγεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να πληρούν συγκεκριμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά και να παράγουν αποδεκτή σχεδίαση.

Για να προσδιορίσουμε συνεπώς τις ζητούμενες μεταβλητές σχεδίασης ανατρέχουμε πίσω στην ανάλυση του ένσφαιρου διαφορικού του κ.Τσιριγκάκη που πραγματοποιήσαμε στο 2^ο κεφάλαιο της ΔΕ.

Στηριζόμενοι λοιπόν στην ανάλυση του διαφορικού που προηγήθηκε και εκμεταλλευόμενοι

την ομοιότητα της γεωμετρίας των 4 σετ δορυφόρων, παρατηρούμε την κατακόρυφη μετατόπιση του ενός σετ κατά την κίνηση των αντίστοιχων πλανητών.

Συμπεραίνουμε πως οι πιθανές μεταβλητές σχεδίασης είναι οι ακτίνες καμπυλότητας R_1, R_2 της μέσης ακτίνας των αντιδιαμετρικών πλανητών που συνεργάζονται με τον ίδιο δορυφόρο καθώς και οι ακτίνες r_1, r_2 των αντίστοιχων δορυφόρων. Τα μεγέθη R, r παρουσιάζονται παρακάτω σχηματικά για ένα εκ των δύο σετ δορυφόρων.



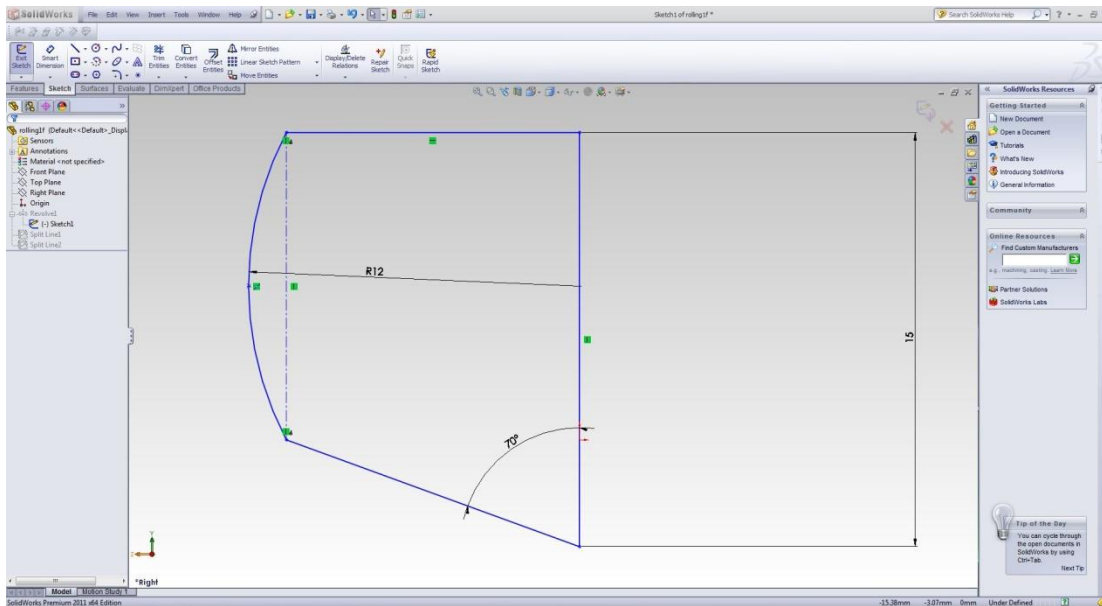
Εικ.5.27 Σχηματική αναπαράσταση χαρακτηριστικών ακτίνων. (Πηγή: A Critical presentation of "Tsiriggakis Gearless Differential", C.Provatidis)

Το επόμενο ζήτημα που εξετάζουμε είναι η ανεξαρτησία των προαναφερθέντων μεταβλητών μεταξύ τους. Αν θεωρήσουμε τις R_1, R_2 και r_2 ανεξάρτητες μεταβλητές, παρατηρούμε πως λόγω της συνεργασίας μεταξύ πλανητών και δορυφόρων η r_1 αποτελεί εξαρτημένη μεταβλητή. Κατά συνέπεια ορίζουμε τις R_1, R_2 και r_2 ως τις μεταβλητές σχεδίασης, βάση των οποίων σχεδιάζουμε το παραμετρικό μοντέλο του διαφορικού, ώστε να επιτευχθεί η επιδιωκόμενη σύνδεση και συνεργασία των εξαρτημάτων του.

Προτού αρχίσουμε την τρισδιάστατη παραμετρική σχεδίαση του ένσφαιρου διαφορικού θα ήταν σκόπιμο να αναφερθεί η εντελώς νέα σχεδιαστική-λογική που υιοθετούμε. Ενώ λοιπόν κατά την πιστή αποτύπωση του πρότυπου διαφορικού εργαστήκαμε με άξονα τα σύνθετα νέφη σημείων και τα πολλαπλά επίπεδα σχεδίασης, κατά τον παραμετρικό σχεδιασμό επιχειρούμε να προσεγγίσουμε τις ζητούμενες γεωμετρίες με τον κατά το δυνατόν απλούστερο τρόπο. Έτσι επιτυγχάνουμε τη δημιουργία απλούστερων μοντέλων με τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

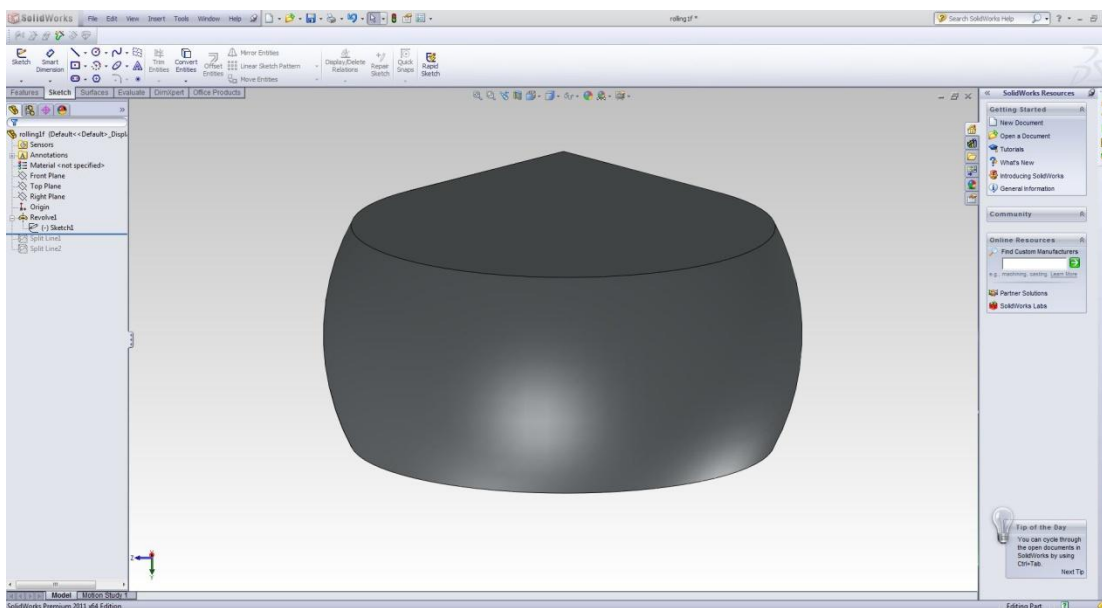
1. Μπορούν να γίνουν εύκολα κατανοητά από έναν μέσω χρήση του SolidWorks .
2. Μπορούν ευκολότερα να αναλυθούν και εν συνεχεία να επεξεργαστούν από έναν πεπειραμένο χρήστη του SolidWorks . Λόγω της παραμετρικής σχεδίασης και της απλής γεωμετρίας, είναι εφικτό για το χρήστη αυτό να μεταβάλλει το μέγεθος και άλλα χαρακτηριστικά του ένσφαιρου διαφορικού με το μικρότερο αριθμό εντολών.
3. Η διαδικασία πλεγματοποίησης τους είναι ταχύτερη.
4. Η διαδικασία προσομοίωσης στατικής και κινηματικής ανάλυσης υλοποιείται ταχύτερα.
5. Απαιτούν λιγότερη υπολογιστική ισχύ και μνήμη

Το πρώτο τρισδιάστατο παραμετρικό μοντέλο, το οποίο υλοποιούμε είναι αυτό του μικρότερου εκ των δυο δορυφόρων. Παρατηρώντας τη γεωμετρία του αντιλαμβανόμαστε πως πρόκειται για τεμάχιο το οποίο μπορεί να αναπαραχθεί εκ περιστροφής. Συνεπώς δημιουργούμε το κατάλληλο δισδιάστατο σχέδιο (**2D Sketch**), ικανό να μας δώσει τη ζητούμενη γεωμετρία.



Εικ.5.28 Δισδιάστατο σχέδιο για την αναπαραγωγή 1^{ου} δορυφόρου στο περιβάλλον του SolidWorks .

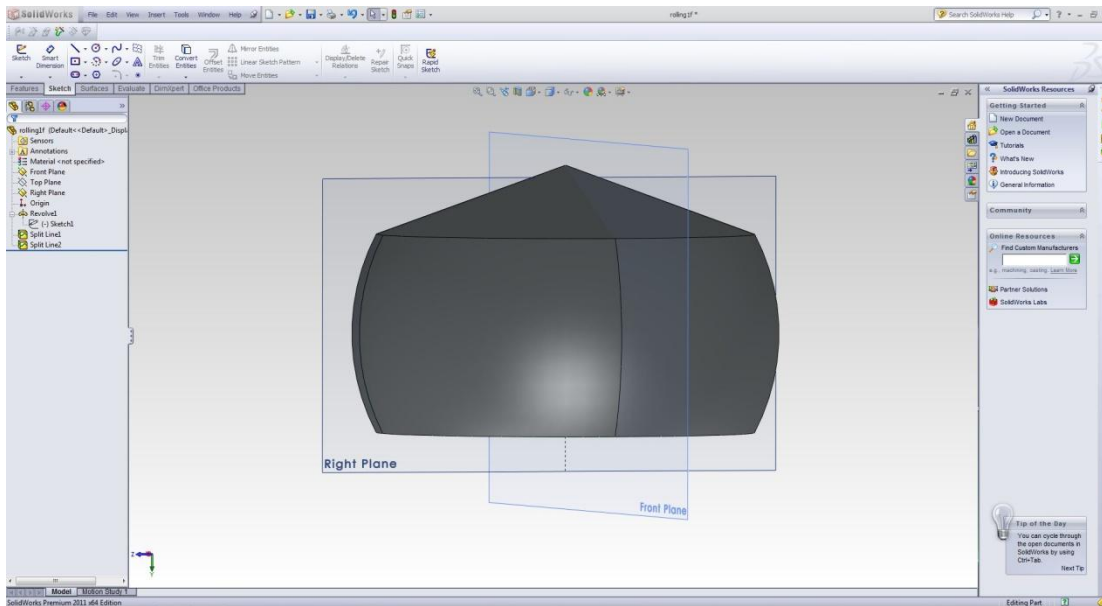
Περιστρέφοντας (**Revolve**) το δισδιάστατο αυτό σχέδιο γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του υλοποιούμε τη ζητούμενη γεωμετρία του δορυφόρου.



Εικ.5.29 Απεικόνιση 1^{ου} δορυφόρου στο περιβάλλον του SolidWorks .

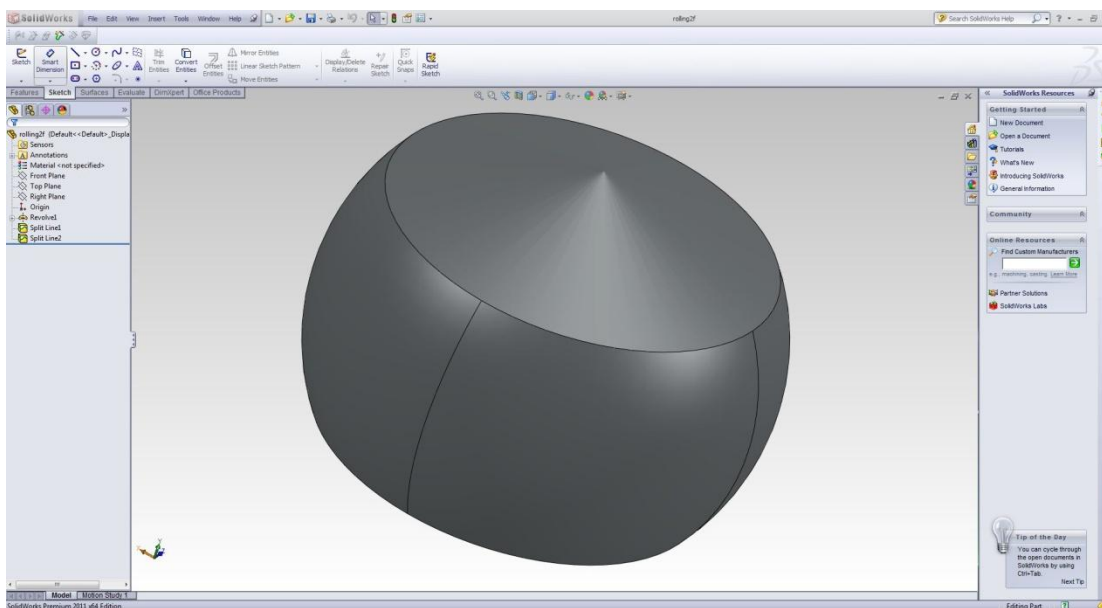
Παρατηρώντας το παραπάνω τρισδιάστατο σχέδιο του δορυφόρου αντιλαμβανόμαστε ότι η εξωτερική επιφάνεια κύλισης του είναι ενιαία. Το φαινόμενο αυτό δημιουργεί αρκετά προβλήματα στην πλεγματοποίηση και στη στατική ανάλυση του μοντέλου, π.χ. αν θέλαμε να ασκήσουμε ένα καταναμεμένο φορτίο στο άνω μισό της επιφάνειας κύλισης στο περιβάλλον του SolidWorks Simulation (πλατφόρμα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία ενταγμένη στο SolidWorks), αυτό θα ήταν ανέφικτο.

Για να επιλύσουμε τα παραπάνω ζητήματα, εκμεταλλευόμαστε τη συμμετρία του δορυφόρου και χρησιμοποιώντας δύο κατάλληλα επίπεδα στον καρτεσιανό χώρο δημιουργούμε τα επιδιωκόμενα «χωρίσματα» (**Split Lines**) στην εξωτερική επιφάνεια κύλισης, ώστε αυτή να είναι χωρισμένη σε τεταρτημόρια.



Εικ.5.30 Τομή εξωτερικής επιφάνειας κύλισης 1^{ου} δορυφόρου σε τεταρτημόρια, στο περιβάλλον του SolidWorks .

Ακολουθώντας ανάλογη διαδικασία δημιουργούμε τον 2^ο δορυφόρο, τον μεγαλύτερο εκ των δύο.



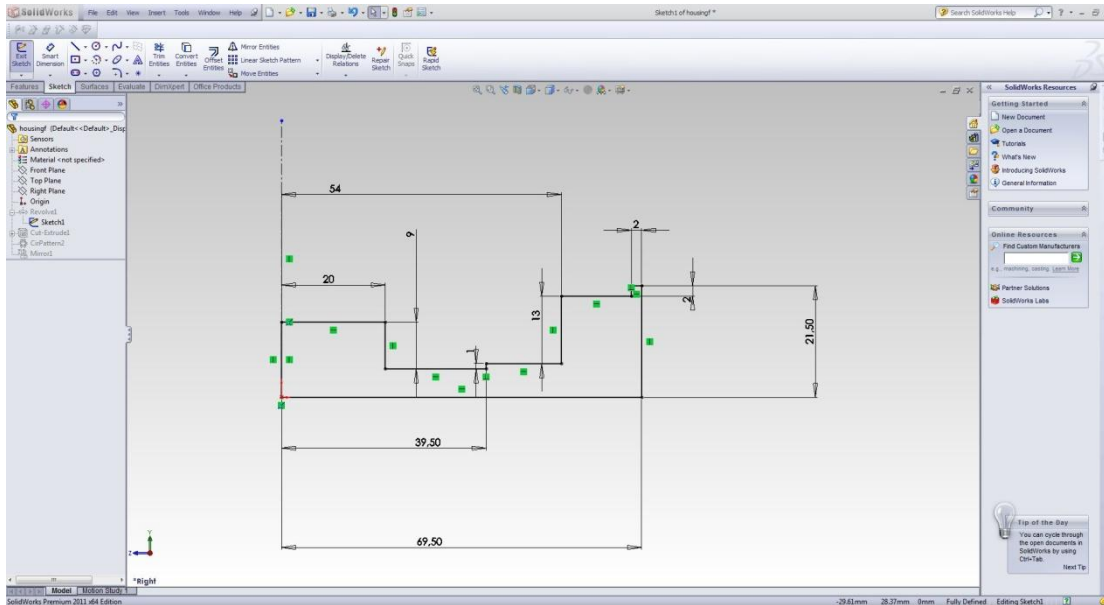
Εικ.5.31 Απεικόνιση 2^{ου} δορυφόρου στο περιβάλλον του SolidWorks .

Μετά το πέρας της σχεδίασης των δορυφόρων προχωράμε (όπως και στη διαδικασία πιστής αποτύπωσης του προτύπου) στη σχεδίαση του ήμισυ του φορέα τους, εκμεταλλευόμενοι τη συμμετρία του. Καθώς τα εξαρτήματα αυτά συνεργάζονται μεταξύ τους, οι εσωτερικές διαστάσεις του φορέα του δορυφόρων καθορίζονται εν πολλοίς από αυτούς. Όσον αφορά τις εξωτερικές του διαστάσεις, αυτές έχουν καθοριστεί με άξονα το πρότυπο διαφορικό και θα μπορούσαν να βελτιστοποιηθούν ως προς τη σχέση αντοχή-βάρος.

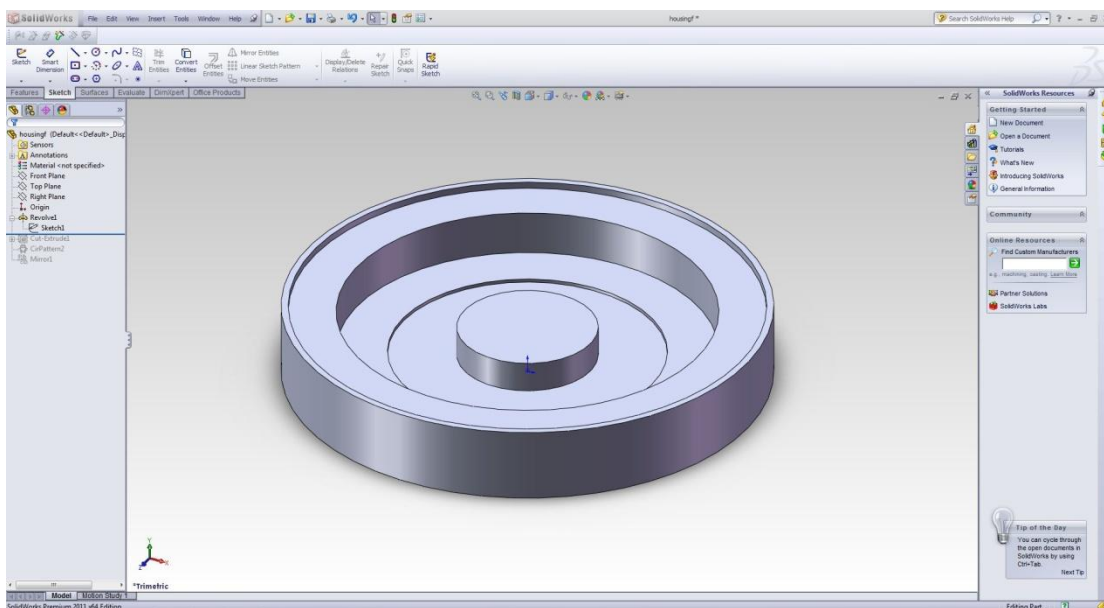
Παρατηρώντας τον φορέα των δορυφόρων αντιλαμβανόμαστε πως πρόκειται για εξάρτημα κατασκευασμένο εκ περιστροφής με ορισμένες ιδιαίτερες διαμορφώσεις, όπως εσοχές κλπ. Συνεπώς αντικαθιστούμε τη σύνθετη λογική σχεδίασης με επίπεδα και νέφη σημείων, με

απλούστερες.

Το πρώτο στάδιο της τρισδιάστατης απεικόνισης του μοντέλου του φορέα είναι η δημιουργία του (**2D Sketch**), το οποίο εκ περιστροφής (Revolve), γύρω από τον κατακόρυφο άξονά του, θα μας δώσει το κύριο σώμα του φορέα.



Εικ.5.32 Δισδιάστατο σχέδιο βάσης του φορέα στο περιβάλλον του SolidWorks .

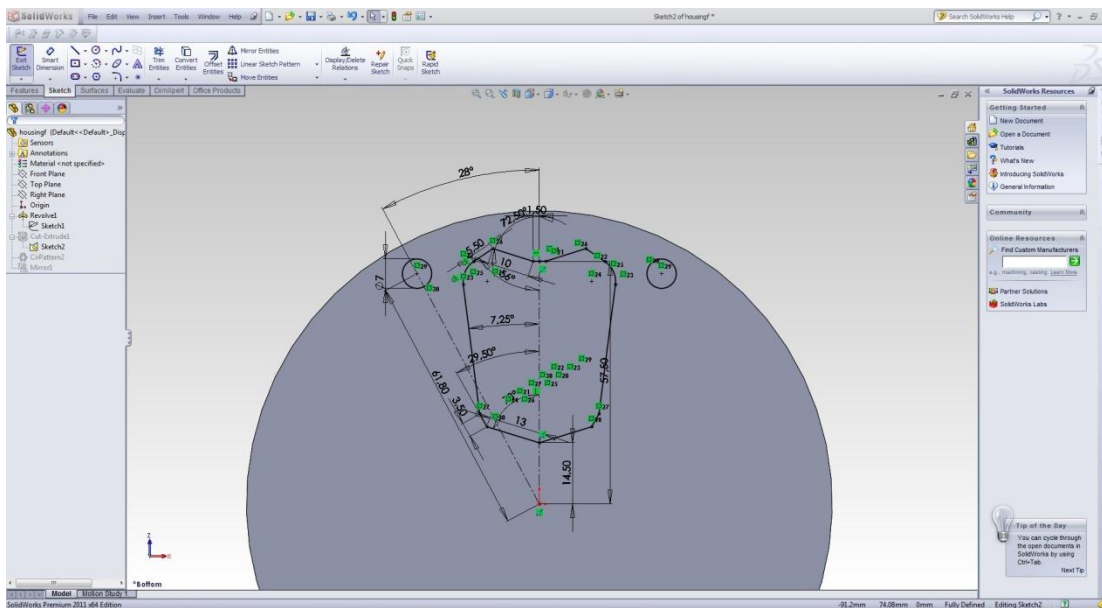


Εικ.5.33 Βάσης του φορέα στο περιβάλλον του SolidWorks .

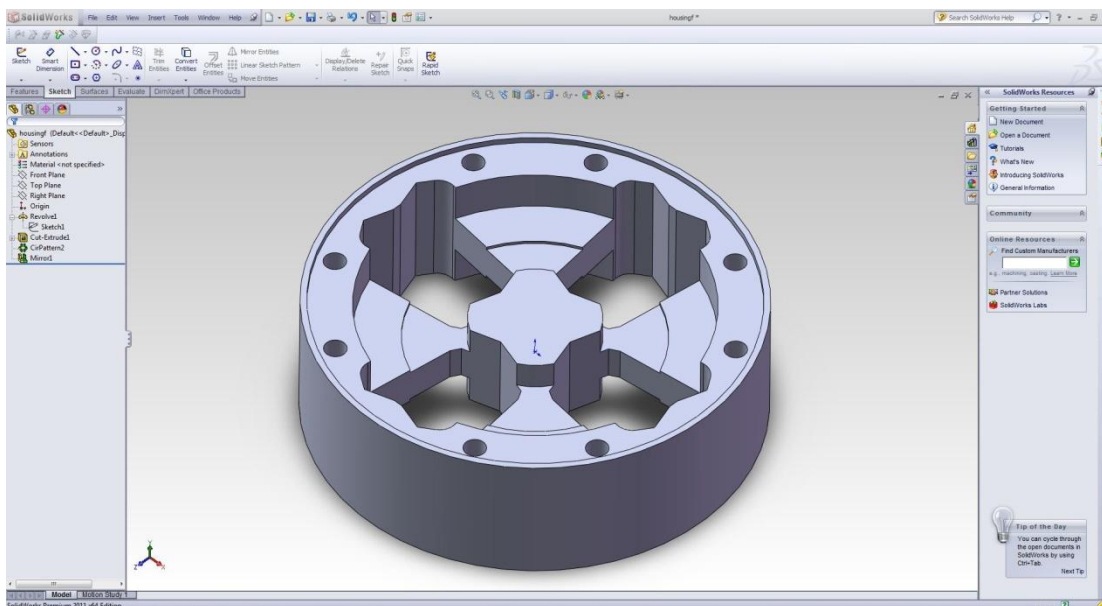
Εν συνεχεία δημιουργούμε το παραμετρικό δισδιάστατο σχέδιο της κοιλότητας και των οπών του φορέα των δορυφόρων και καταλήγουμε στην επιθυμητή γεωμετρία ακολουθώντας τα ίδια τελικά βήματα με τη διαδικασία πιστής αποτύπωσης του προτύπου. Τα τελικά αυτά βήματα είναι:

1. Αφαίρεση όγκου στερεού (**Cut Extrude**) στην κοιλότητα και στις οπές.
2. Κυκλική αναπαραγωγή (**Circular Pattern**) κοιλότητας και οπών

3. Δημιουργία φορέα εξ αντανακλάσεως (*Mirror*)



Εικ.5.34 Δισδιάστατο παραμετρικό σχέδιο κοιλότητας και οπών στο περιβάλλον του SolidWorks .



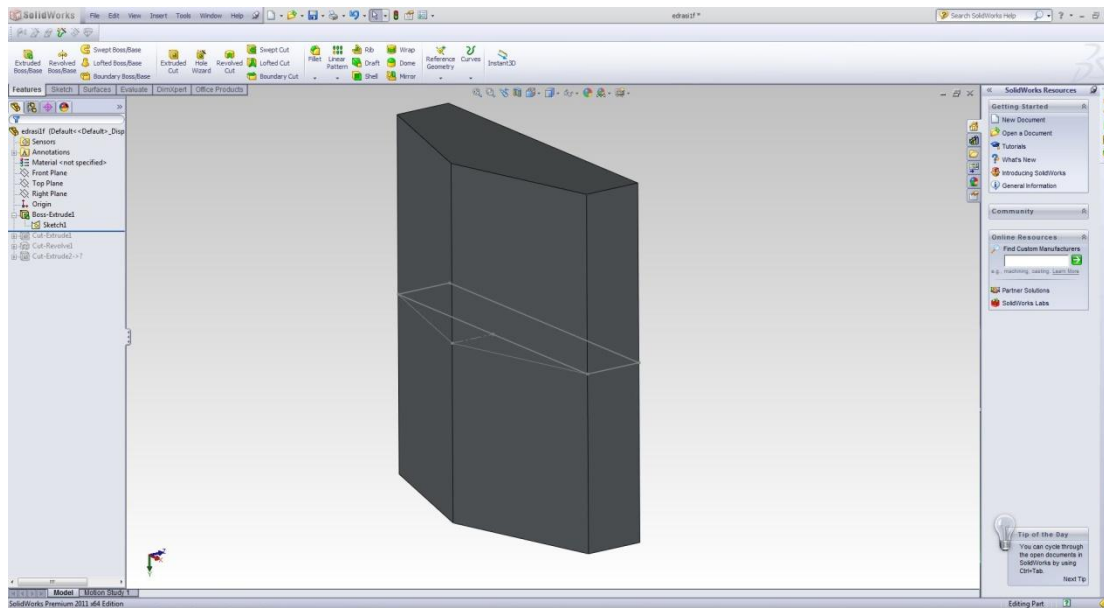
Εικ.5.35 Παραμετρικό μοντέλο φορέα των δορυφόρων στο περιβάλλον του SolidWorks .

Εν συνεχεία με άξονα τους δορυφόρους και τον φορέα προβαίνουμε στη σχεδίαση των εδράσεων των δορυφόρων. Οι εξωτερικές τους επιφάνειες και κατά συνέπεια τα δισδιάστατα σχέδια αυτών προκύπτουν σύμφωνα με τα αντίστοιχα σχέδια των συνεργαζόμενων εξαρτημάτων.

Όσον αφορά την έδραση του 1^{ου} δορυφόρου για τη δημιουργία της ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα:

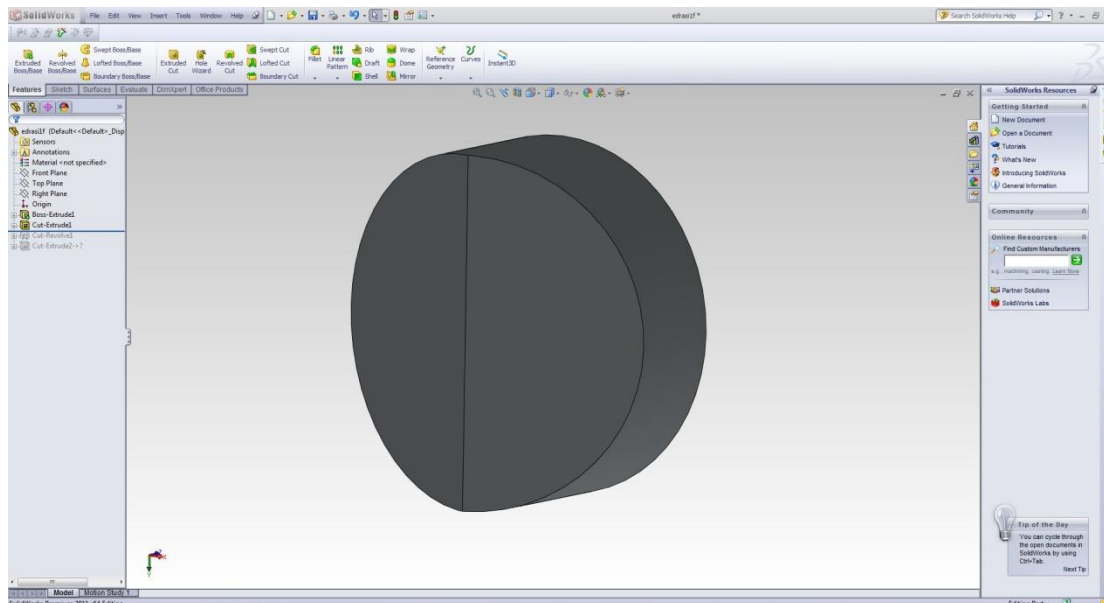
Αρχικά δημιουργούμε την επιφάνεια συνεργασία με το φορέα των δορυφόρων. Η ζητούμενη διαμόρφωση προκύπτει από το δισδιάστατο σχέδιο της συνεργαζόμενης επιφάνειας του φορέα. Με δεδομένο λοιπόν το σχέδιο αυτό προβαίνουμε στην αμφίπλευρη διόγκωσή του

(**Extrude 2 Directions**) λαμβάνοντας ως αποτέλεσμα την ζητούμενη επιφάνεια σε ορθογωνικές διαστάσεις. Το δισδιάστατο σχέδιο, στο οποίο βασίσαμε τη διόγκωση γίνεται εμφανές στην Εικ.6.35.



Εικ.5.36 Επιφάνεια συνεργασίας 1^{ης} έδρασης-φορέα δορυφόρων στο περιβάλλον του SolidWorks .

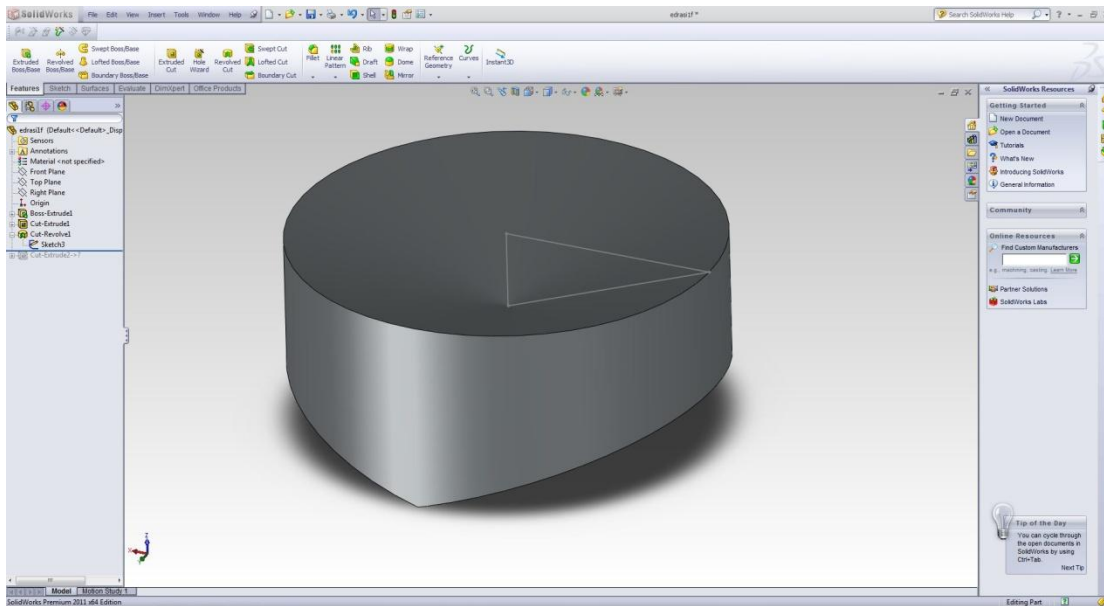
Αποκόπτοντας (**Cut Extrude**) τον απαραίτητο κυκλικό τομέα προκύπτουν οι κατάλληλες εξωτερικές διαστάσεις του φορέα.



Εικ.5.37 Κυκλικός τομέας 1^{ης} έδρασης στο περιβάλλον του SolidWorks .

Στη συνέχεια διαμορφώνουμε την πλευρά συνεργασία με το δορυφόρο. Για να επιτύχουμε τη ζητούμενη κωνικότητα εκμεταλλευόμαστε την επιφάνεια συνεργασίας έδρασης-δορυφόρου, χρησιμοποιώντας το ίδιο δισδιάστατο σχέδιο. Με βάση το σχέδιο αυτό πραγματοποιούμε μια εκ περιστροφής αφαίρεση όγκου (**Cut Revolve**) γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του δισδιάστατου σχεδίου και έτσι οδηγούμαστε στο τελικό επιδιωκόμενο αποτέλεσμα. Το

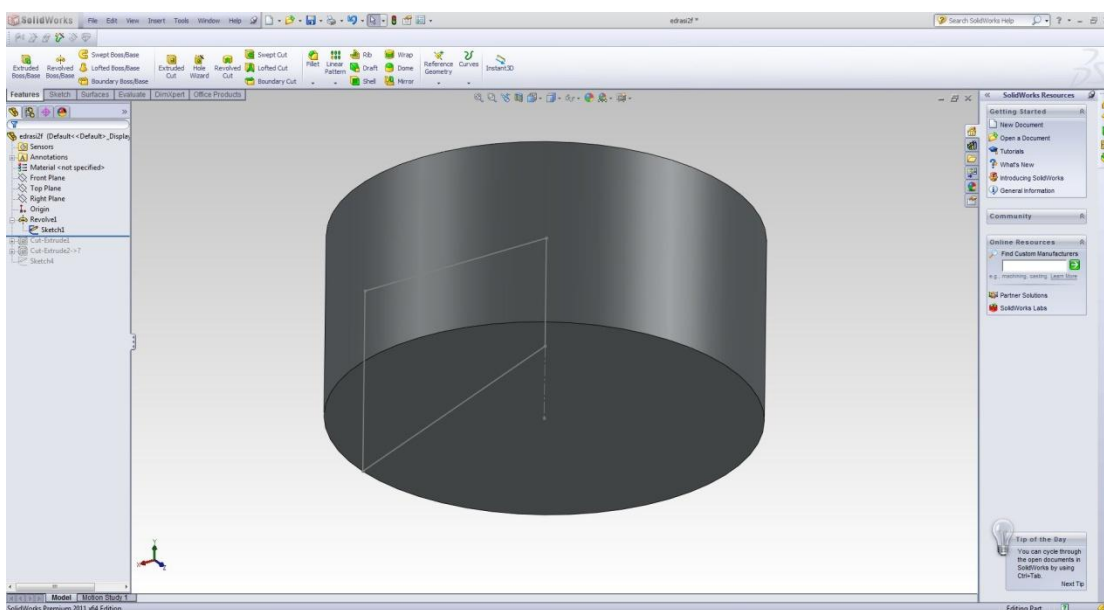
δισδιάστατο σχέδιο, στο οποίο βάσιμα την εκ περιστροφής αφαίρεση όγκου ,γίνεται εμφανές στην Εικ.6.37.



Εικ.5.38 Επιφάνεια συνεργασίας 1^{ης} έδρασης- 1^{ου} δορυφόρου στο περιβάλλον του SolidWorks .

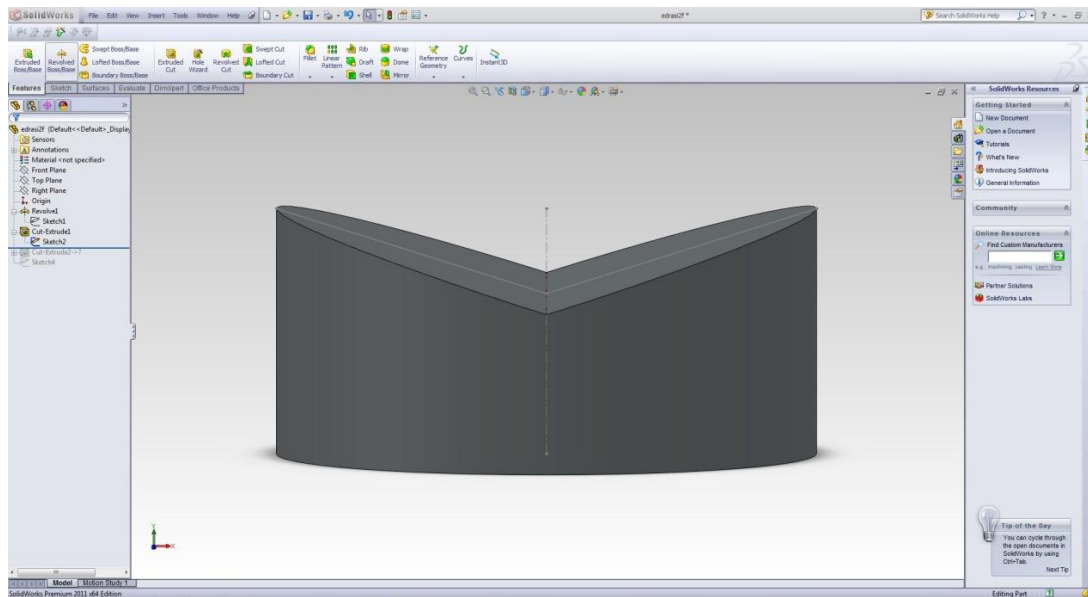
Όσον αφορά τη 2^η έδραση διατηρούμε την ίδια σχεδιαστική λογική, δηλαδή το να δημιουργήσουμε τις επιφάνειες συνεργασίας σύμφωνα με τα ήδη σχεδιασμένα συνεργαζόμενα εξαρτήματα. Αντίθετα αλλάζει η αλληλουχία των ενεργειών για τη δημιουργία της, καθώς είναι σκόπιμο η αλληλουχία αυτή να προσαρμόζεται κατά τέτοιον τρόπο σε κάθε επιδιωκόμενη γεωμετρία, ώστε ο τελικός αριθμός των εντολών/ενεργειών που πραγματοποιήσαμε να είναι ο ελάχιστος δυνατός.

Με τα παραπάνω ως βασική αρχή δημιουργούμε αρχικά την επιφάνεια συνεργασίας 2^{ης} έδρασης-2^{ου} δορυφόρου. Αξιοποιώντας το δισδιάστατο σχέδιο της συνεργαζόμενης επιφάνειας του δορυφόρου, δημιουργούμε το αντίστοιχο της έδρασης. Έτσι προσδίδοντας όγκο εκ περιστροφής (**Revolve**) στο σχέδιο αυτό επιτυγχάνουμε τη ζητούμενη κωνικότητα στην συνεργαζόμενη επιφάνεια της έδρασης με το δορυφόρο. Το δισδιάστατο σχέδιο, στο οποίο βάσιμα τη διόγκωση εκ περιστροφής γίνεται εμφανές στην Εικόνα 5.39.



Εικ.5.39 Επιφάνεια συνεργασίας 2^{ης} έδρασης- 2^{ου} δορυφόρου στο περιβάλλον του SolidWorks .

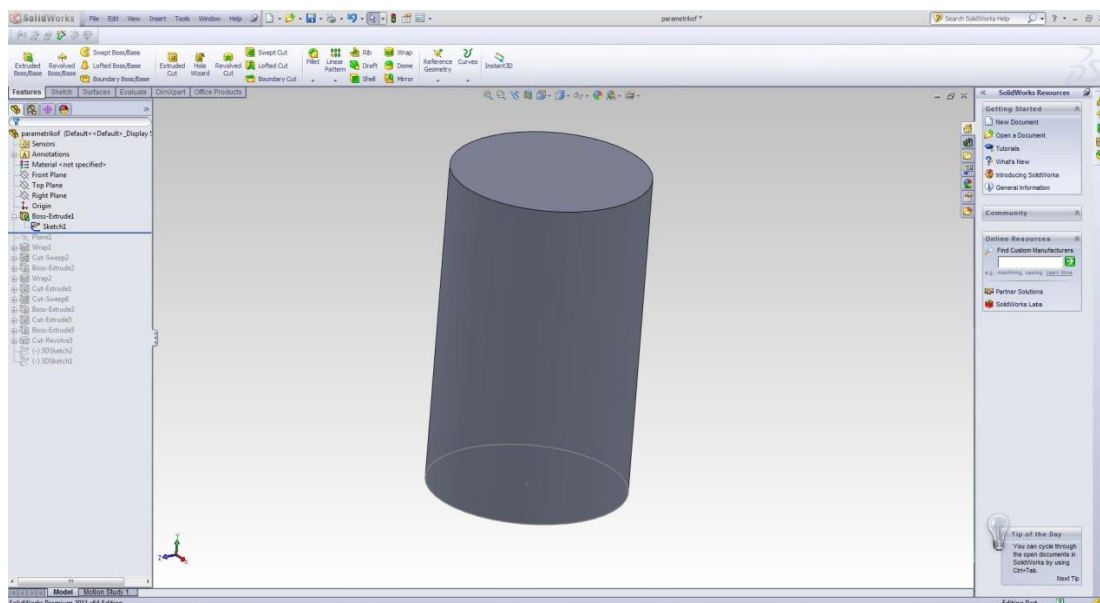
Αντίστοιχα αξιοποιώντας το δισδιάστατο σχέδιο της συνεργαζόμενης επιφάνειας του φορέα των δορυφόρων, δημιουργούμε το κατάλληλο δισδιάστατο σχέδιο στην έδραση και με άξονα αυτό προβαίνουμε στην αμφίπλευρη αποκοπή όγκου (**Cut Extrude 2 Directions**), προσδίδοντας στην έδραση την τελική, επιθυμητή της μορφή.



Εικ.5.40 Επιφάνεια συνεργασίας 2^{ης} έδρασης- φορέα δορυφόρων στο περιβάλλον του SolidWorks .

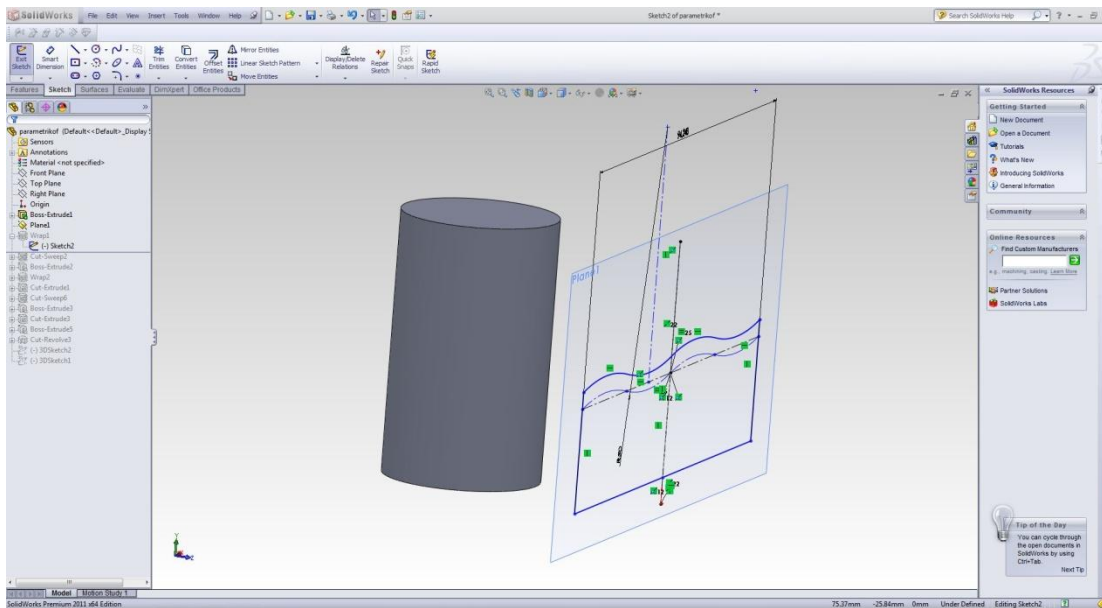
Ολοκληρώνοντας την σχεδίαση των εδράσεων, οδηγούμαστε στη σχεδίαση των πλανητών οι οποίοι αποτελούν κατά βάση ημιτονοειδή κεκλιμένα επίπεδα έκκεντρης τροχιάς. Λόγω της δυσκολίας της τρισδιάστατης-παραμετρικής αναπαραγωγής της επιφάνειας αυτής, καθώς και της σημασίας που αυτή διαδραματίζει κατά την συνεργασία με τους δορυφόρους(συνεπώς κατά την λειτουργία του διαφορικού), πραγματοποιείται ιδιαίτερη αναφορά και ανάλυση στο εξάρτημα αυτό.

Πρώτο βήμα της σχεδίασης του πλανήτη αποτελεί η δημιουργία ενός κύλινδρου ο οποίος και αποτελεί τον κύριο άξονα σχεδίασής του. Ο κύλινδρος αυτός δημιουργείται μέσω της διόγκωσης (**Extrude**) του κατάλληλου δισδιάστατου σχεδίου (**2D Sketch**).



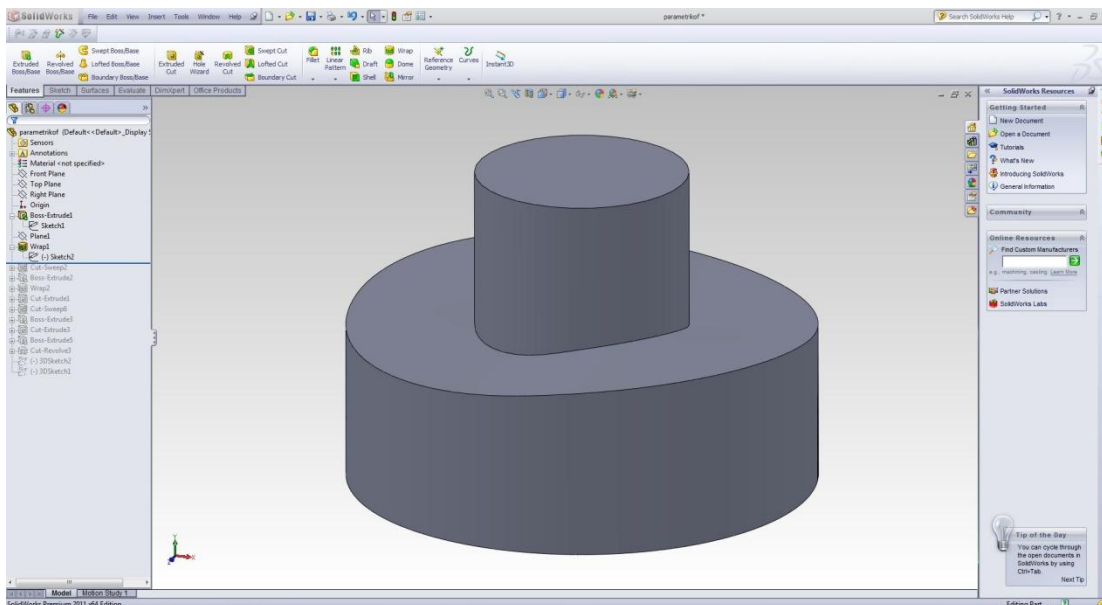
Εικ.5.41 Βάση πλανήτη στο περιβάλλον του SolidWorks .

Στη συνέχεια δημιουργούμε ένα νέο κατακόρυφο επίπεδο (**Insert Reference Geometry, Plane 1**) το οποίο βρίσκεται εκτός κυλίνδρου. Πάνω στο επίπεδο αυτό δημιουργούμε ένα παραμετρικό διδιάστατο σχέδιο το οποίο αποτελεί το ανάπτυγμα της εσωτερικής τροχιάς κύλισης του πλανήτη.



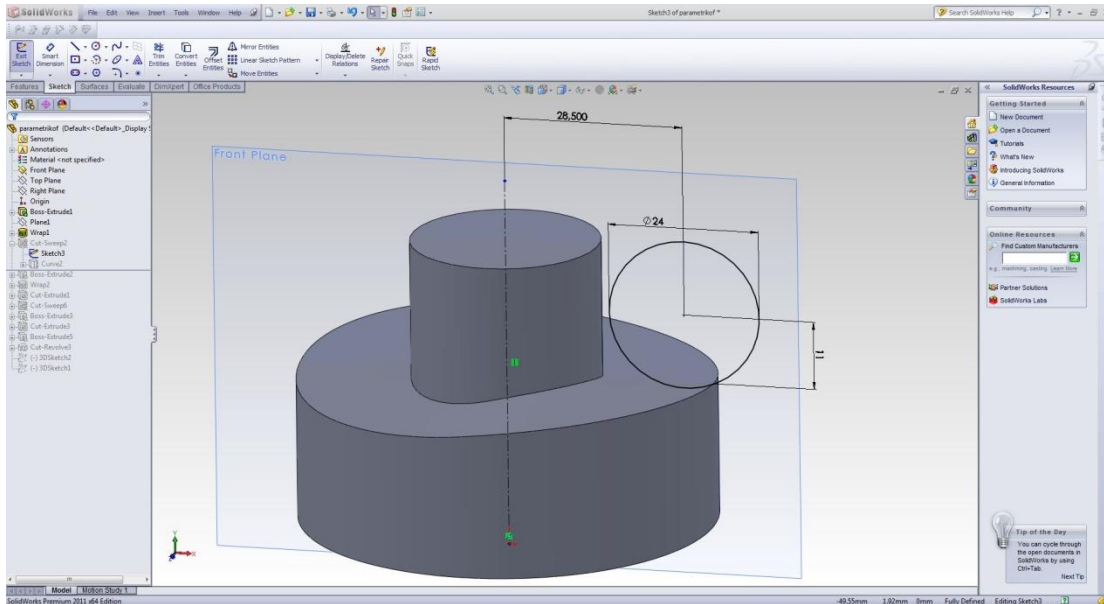
Εικ.5.42 Ανάπτυγμα της εσωτερικής τροχιάς κύλισης του πλανήτη στο περιβάλλον του SolidWorks .

«Τυλίγοντας» (**Wrap**) το ανάπτυγμα αυτό γύρω από τον ήδη υπάρχοντα κύλινδρο δημιουργούμε την πρώτη επιφάνεια κύλισης.

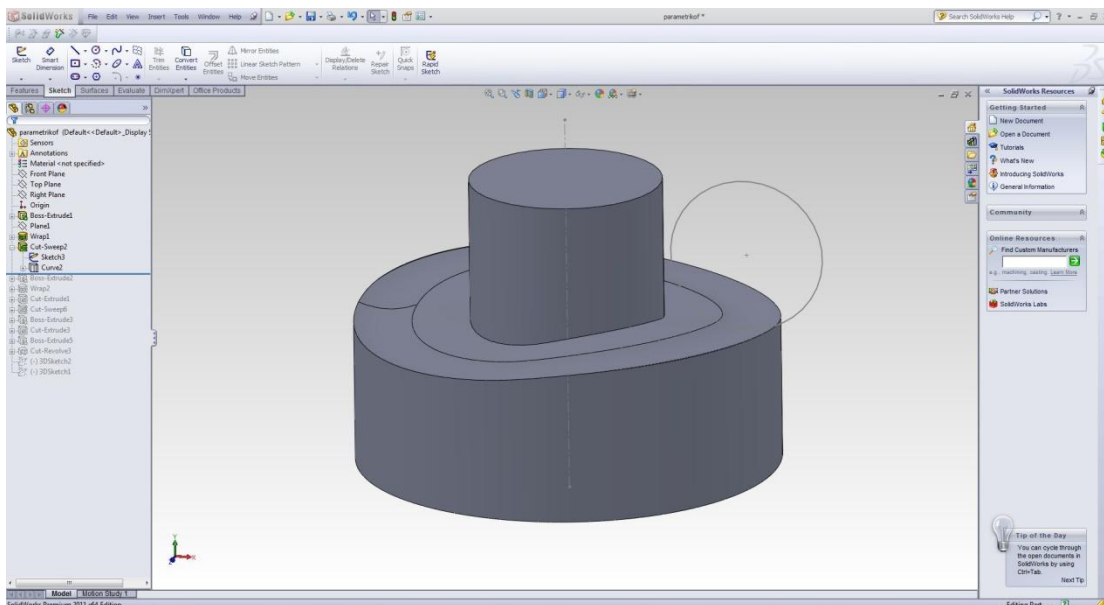


Εικ.5.43 Δημιουργία πρώτης επιφάνειας κύλισης στο περιβάλλον του SolidWorks .

Δημιουργούμε κατάλληλο διδιάστατο σχέδιο (**2D Sketch**) στο κάθετο επίπεδο συμμετρίας του κυλίνδρου (**Front Plane**) στο οποίο αποτυπώνεται ένας κύκλος διαμέτρου ίσης με αυτήν του αντίστοιχου δορυφόρου. Ο κύκλος αυτός έχει σχεδιαστεί πάνω στην επιφάνεια κύλισης του πλανήτη επί της οποίας κυλιέται ο πρώτος (μικρότερος) δορυφόρος, με τρόπο τέτοιο ώστε, όταν πραγματοποιηθεί η περιμετρική κοπή (**Cut Sweep**) να δημιουργηθεί η ζητούμενη κοιλότητα στην επιφάνεια κύλισης.

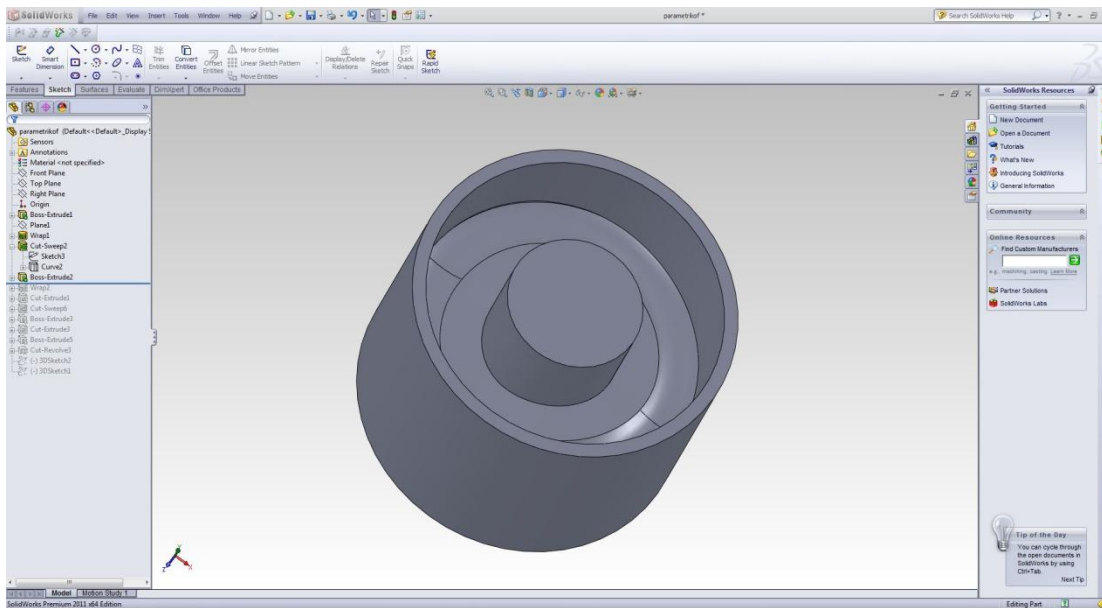


Εικ 5.44 Δισδιάστατο σχέδιο στην επιφάνεια κύλισης, στο περιβάλλον του SolidWorks .



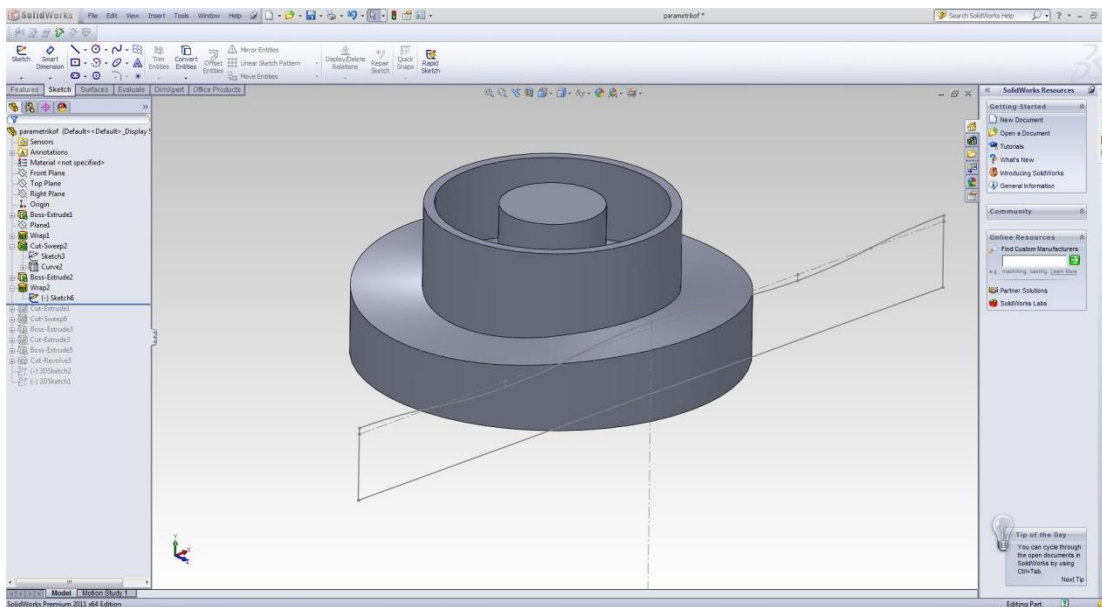
Εικ.5.45 Κοιλότητα επιφάνειας κύλισης, στο περιβάλλον του SolidWorks .

Διογκώνουμε (**Extrude**) δακτύλιο κατάλληλου πάχους ώστε να αποτελεί το κύριο διαχωριστικό ανάμεσα στις δυο επιφάνειες κύλισης (των πλανητών), επί των οποίων κυλινδρικοί οι δορυφόροι.



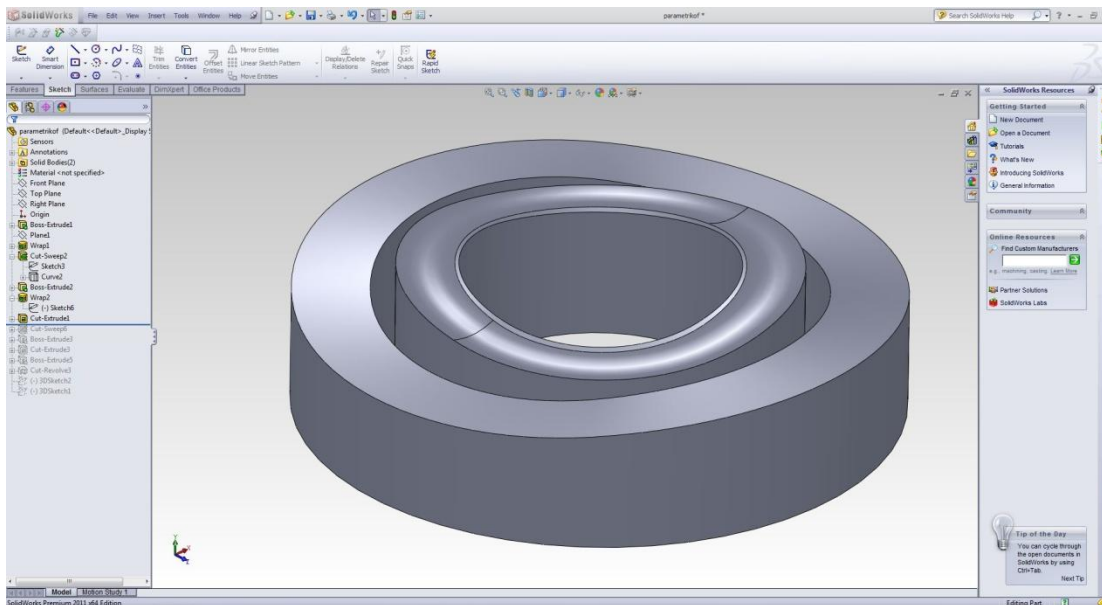
Εικ.5.46 Διόγκωση διαχωριστικού δακτυλίου, στο περιβάλλον του SolidWorks .

Με ανάλογο τρόπο κινούμαστε (**Extrude και Wrap**) και διαμορφώνουμε τη δεύτερη επιφάνεια κύλισης χωρίς όμως αυτή την φορά να έχουμε δημιουργήσει την απαραίτητη κοιλότητα.



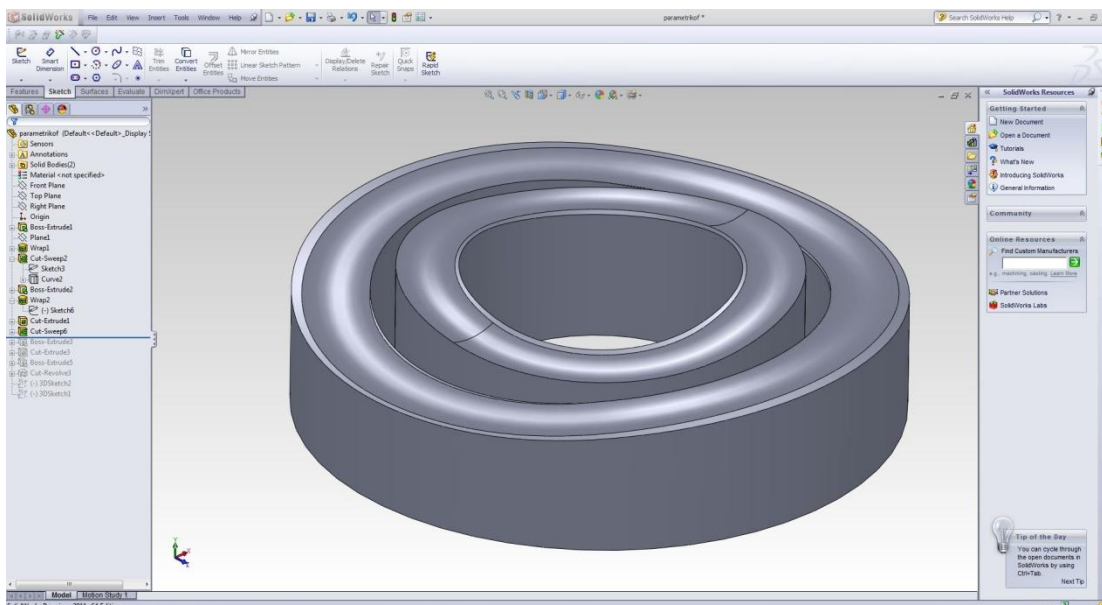
Εικ.5.47 Δεύτερη επιφάνεια κύλισης, στο περιβάλλον του SolidWorks .

Στο επόμενο βήμα αφαιρούμε το διαχωριστικό δακτύλιο ανάμεσα στις δύο επιφάνειες κύλισης, ο οποίος ήταν απαραίτητος για τη δημιουργία – «τύλιγμα» της δεύτερης επιφάνειας κύλισης.



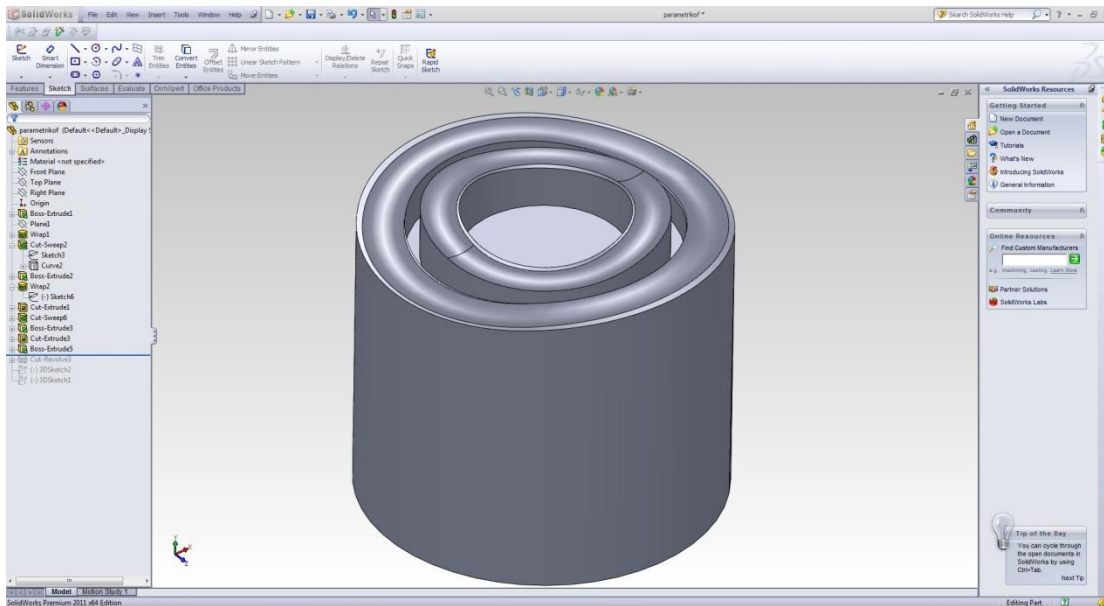
Εικ.5.48 Αποκοπή διαχωριστικών επιφανειών κύλισης, στο περιβάλλον του SolidWorks .

Σε απόλυτη αντιστοιχία με την πρώτη επιφάνεια κύλισης, δημιουργούμε στη δεύτερη επιφάνεια κύλισης κατάλληλο δισδιάστατο σχέδιο με το οποίο ως άξονα δημιουργούμε την ζητούμενη κοιλότητα στη δεύτερη επιφάνεια κύλισης.



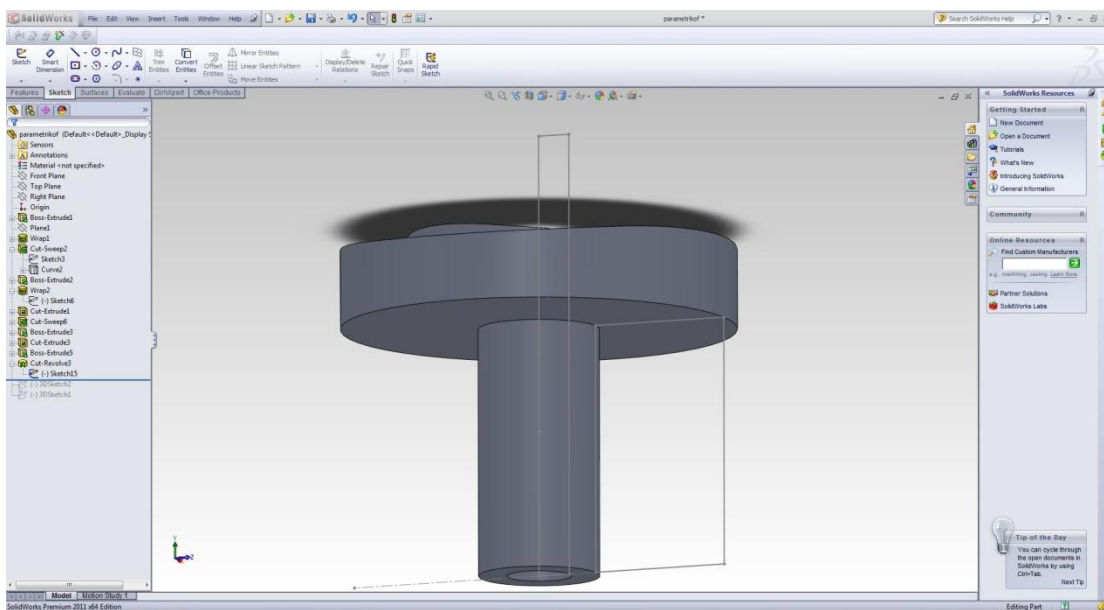
Εικ.5.49 Κοιλότητα στην δεύτερη επιφάνεια κύλισης, στο περιβάλλον του SolidWorks .

Στο σημείο αυτό το μοντέλο μας δεν αποτελεί ενιαίο στερεό σώμα καθώς συγκροτείται από δύο ανεξάρτητα μέλη. Για το λόγο αυτό, διογκώνουμε (**Extrude**) κατάλληλα σχεδιασμένο δισδιάστατο σχέδιο δημιουργώντας τη βάση του πλανήτη.



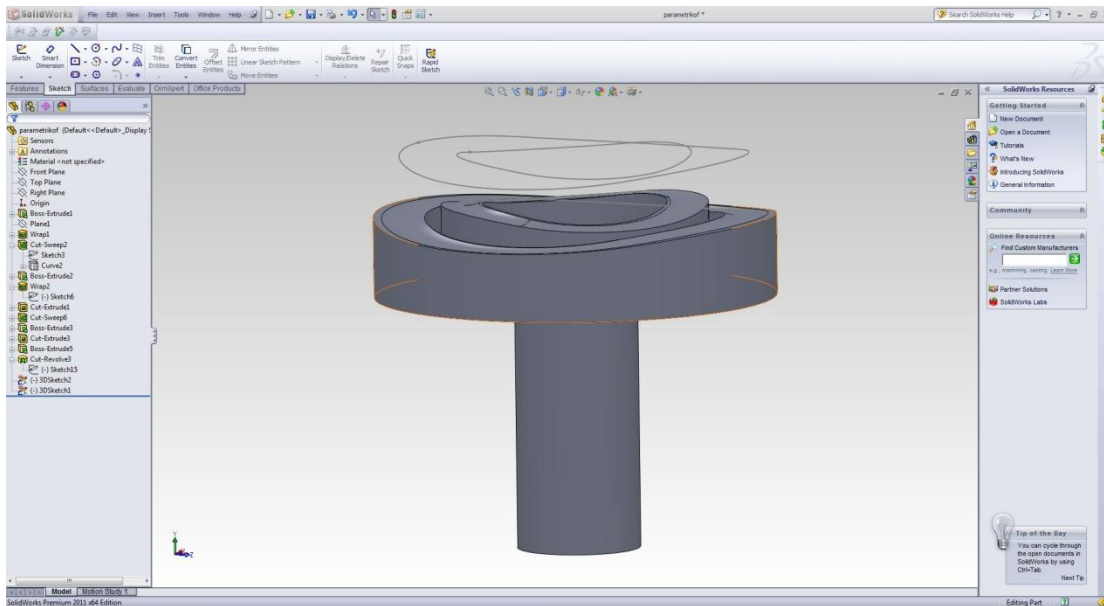
Εικ.5.50 Διόγκωση βάσης πλανήτη, στο περιβάλλον του SolidWorks .

Για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος προβαίνουμε στην δημιουργία δισδιάστατου σχεδίου, με βάση το οποίο πραγματοποιούμε εκ περιστροφής αφαίρεση όγκου (**Cut-Revolve**) στη βάση του πλανήτη. Άξονα της περιστροφής αποτελεί ο άξονας περιστροφής του πλανήτη.



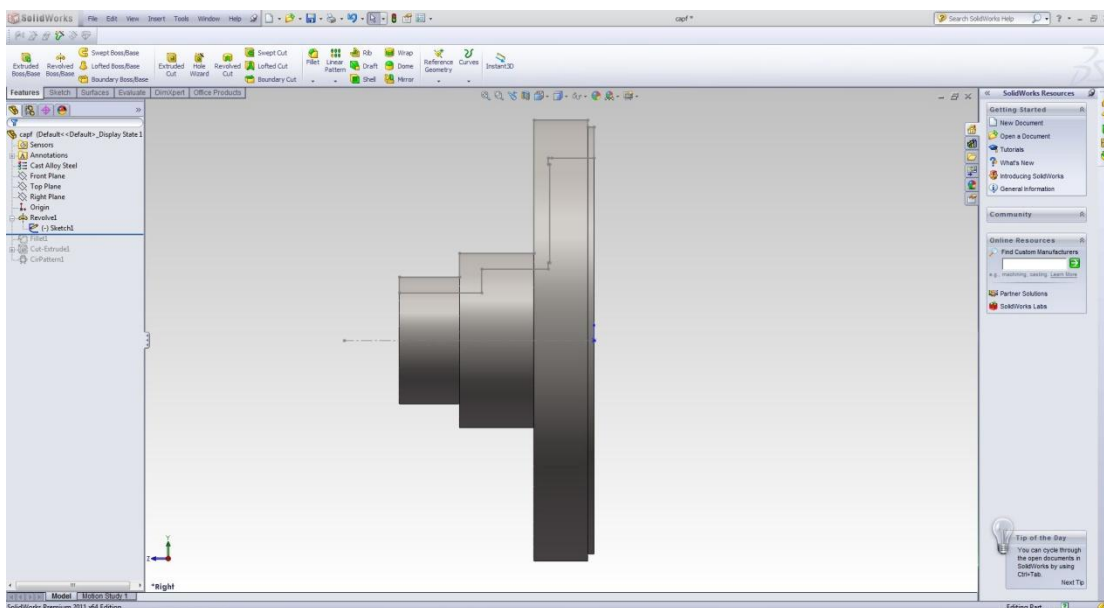
Εικ.5.51 Αφαίρεση όγκου βάσης του πλανήτη, στο περιβάλλον του SolidWorks .

Τελικό στάδιο της σχεδίασης του πλανήτη αποτελεί η τρισδιάστατη (**3D Sketch**) σχεδίαση των τροχιών κύλισης των δορυφόρων επί των πλανητών. Οι τροχιές αυτές σχεδιάζονται με άξονα τη μέση γραμμή της επιφάνειας κύλισης.



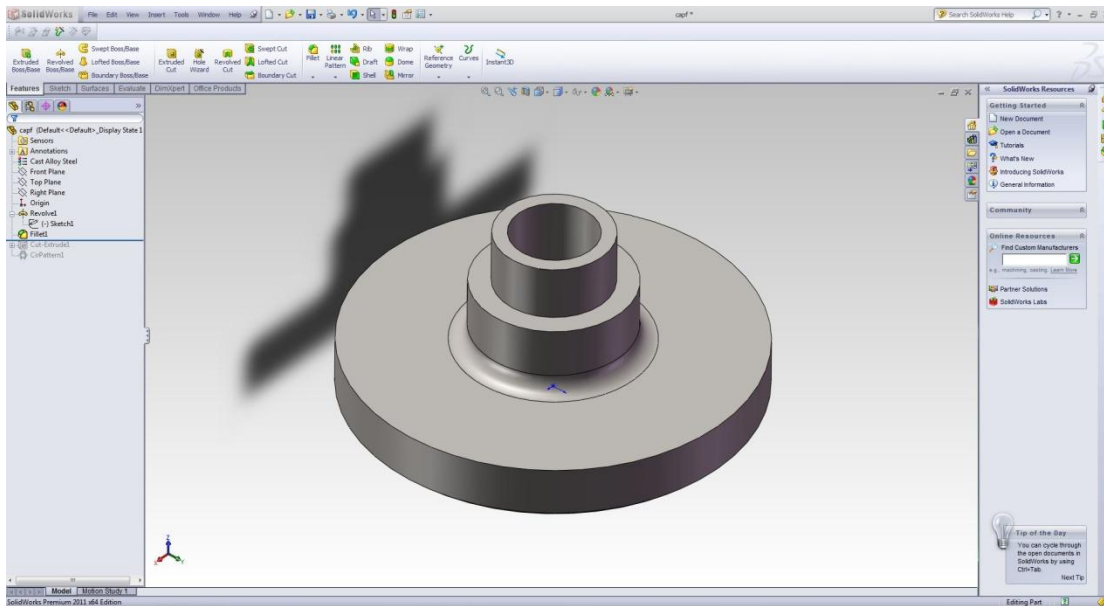
Εικ.5.52 Τροχιές κύλισης δορυφόρων επί πλανητών, στο περιβάλλον του SolidWorks .

Όσον αφορά το καπάκι ασφαλείας του διαφορικού, αξιοποιώντας την κυκλική συμμετρία του, θέτουμε ως βάση της σχεδίασής του τη διόγκωση εκ περιστροφής (**Revolve**) ενός κατάλληλου παραμετρικού δισδιάστατου σχεδίου. Έτσι προκύπτει το κυρίως σώμα του καπακιού ασφαλείας.



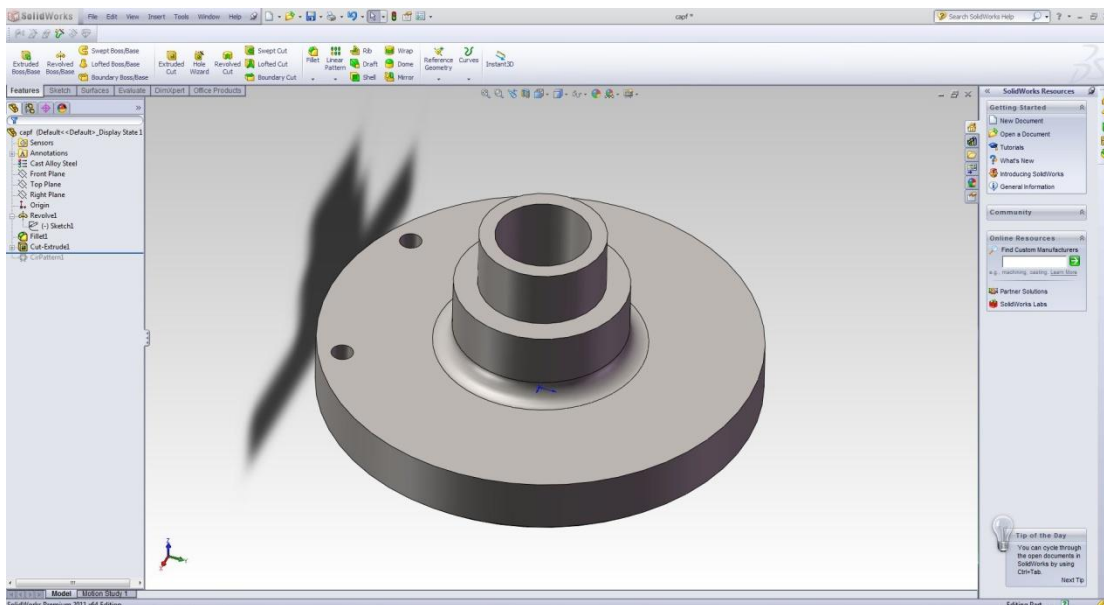
Εικ. 5.53 Σώμα καπακιού ασφαλείας εκ περιστροφής στο περιβάλλον του SolidWorks .

Κατόπιν ομαλοποιούμε (**Fillet**) την ακμή στην εξωτερική επιφάνεια του καπακιού ασφαλείας.



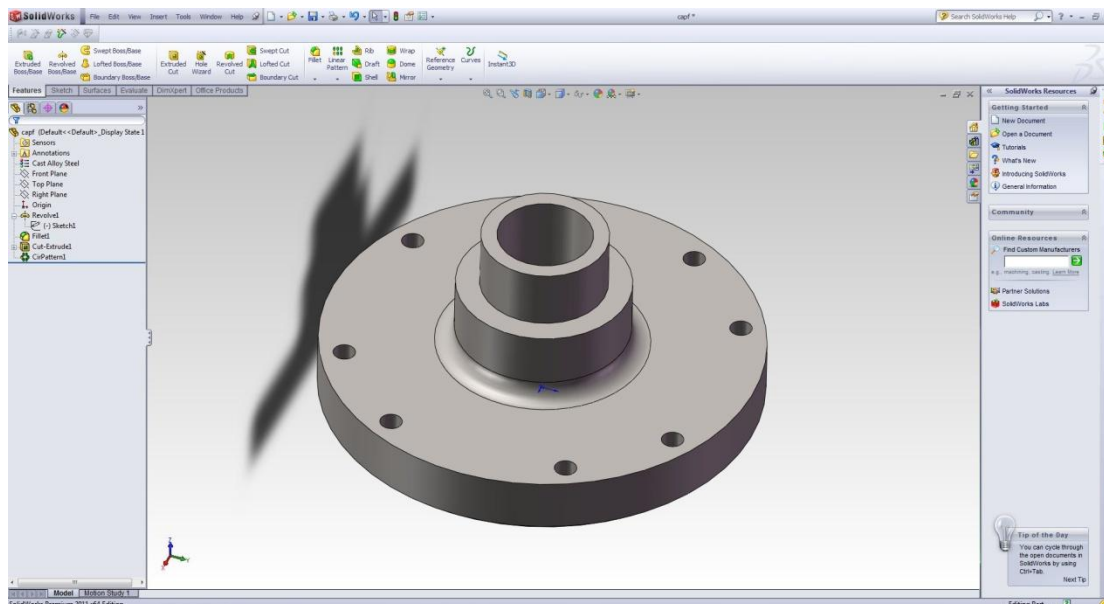
Εικ.5.54 Ομαλοποιημένη ακμή στην εξωτερική επιφάνεια του καπακιού ασφαλείας στο περιβάλλον του SolidWorks.

Εν συνεχεία δημιουργούμε δύο εκ των οπών, οι οποίες θα αποτελέσουν τη βάση της σύνδεσης του φορέα των δορυφόρων με τα καπάκια ασφαλείας.



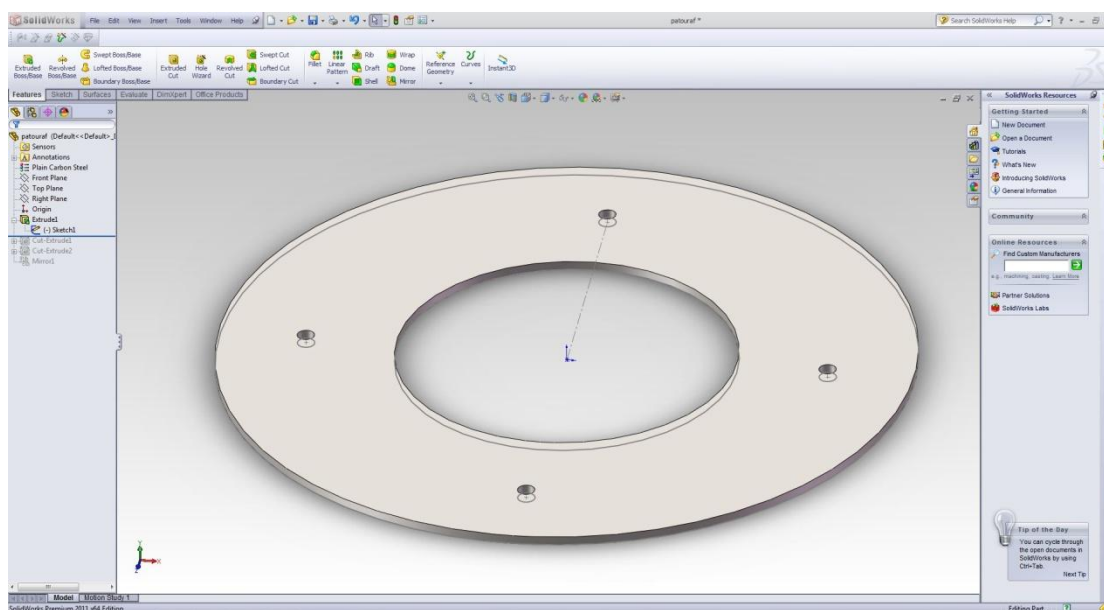
Εικ. 5.55 Οπές στην εξωτερική επιφάνεια του καπακιού ασφαλείας στο περιβάλλον του SolidWorks.

Αναπαράγοντας περιμετρικά (**Circular Pattern**) τις οπές αυτές επιτυγχάνουμε τελικά το επιθυμητό αποτέλεσμα.



Εικ. 5.56 Καπάκι ασφαλείας στο περιβάλλον του SolidWorks .

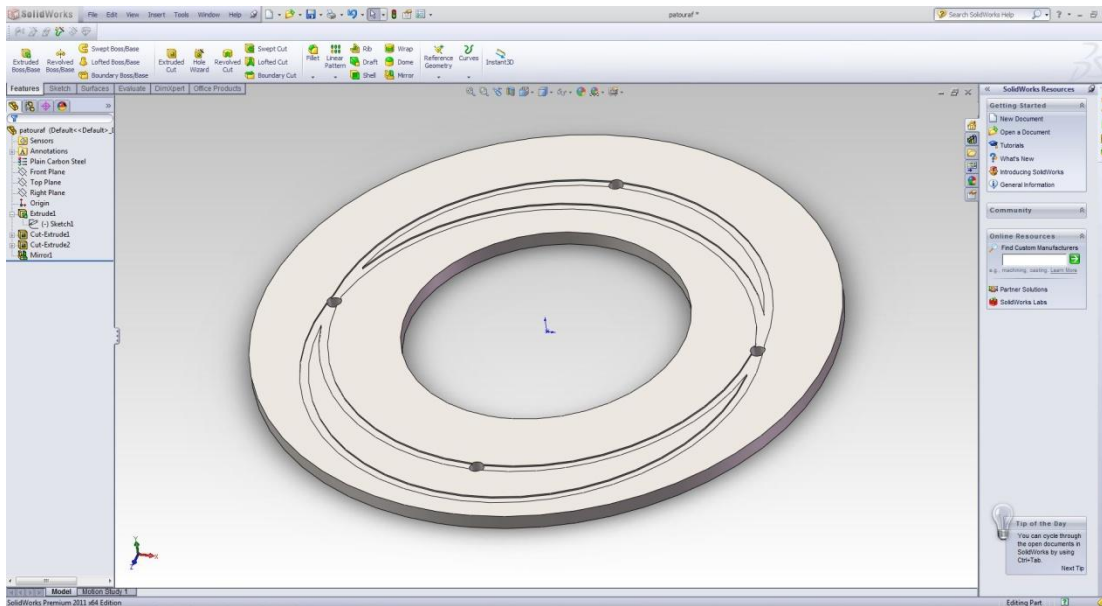
Για δημιουργία του δακτυλίου τριβής (αξονικό έδρανο) η διαδικασία που ακολουθούμε είναι σαφώς απλούστερη. Αρχικά δημιουργούμε τον δακτύλιο του εδράνου διογκώνοντας (**Extrude**) το κατάλληλο δισδιάστατο σχέδιο (**2D Sketch**). Το δισδιάστατο σχέδιο, στο οποίο βασίσαμε τη διόγκωση εκ περιστροφής γίνεται εμφανές στην Εικόνα 5.57.



Εικ.5.57 Κυρίως σώμα δακτυλίου τριβής στο περιβάλλον του SolidWorks .

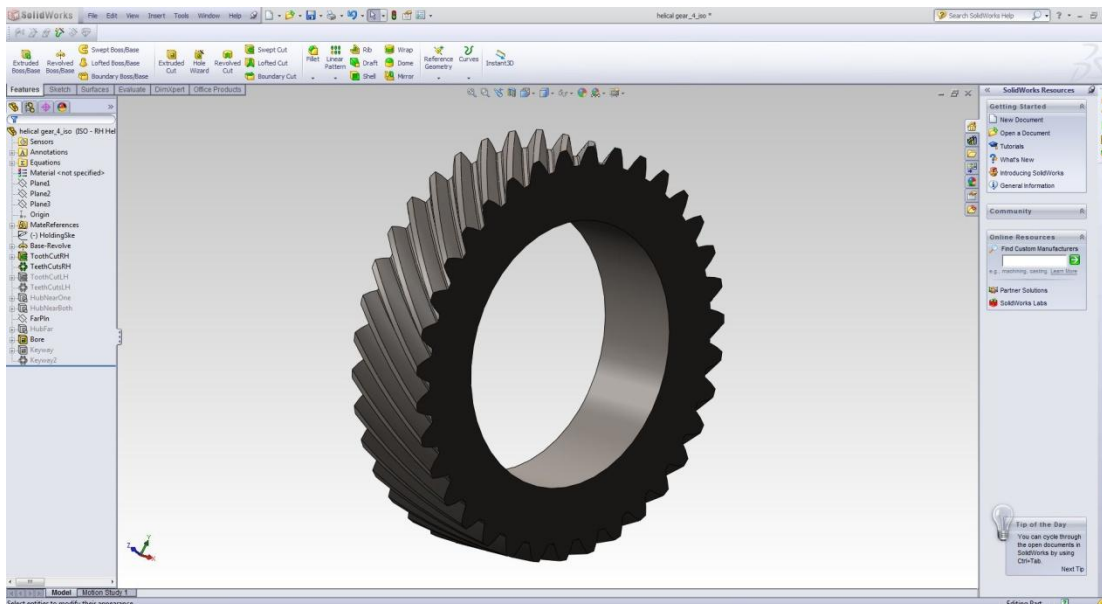
Αξίζει να επισημάνουμε πως με τη σχεδιαστική τεχνική που υιοθετήσαμε, συμπύξαμε τα δύο στάδια σε ένα. Η διόγκωση του δακτυλίου και εν συνεχεία η αφαίρεση όγκου για τη δημιουργία των οπών, αντικαταστάθηκαν από τη διόγκωση κατάλληλα διαμορφωμένου δισδιάστατου σχεδίου, το οποίο περιλάμβανε τις ζητούμενες οπές.

Αφαιρώντας (**Cut Extrude**) τον απαραίτητο όγκου στερεού καταλήγουμε στο επιθυμητό αποτέλεσμα.



Εικ.5.58 Δακτύλιος τριβής ένσφαιρου διαφορικού στο περιβάλλον του SolidWorks .

Τέλος για λόγους πληρότητας του μοντέλου μας εισάγουμε από τη διαδικτυακή βιβλιοθήκη του SolidWorks (<http://www.3dcontentcentral.com/>) μια κατάλληλα διαμορφωμένη κορώνα, η οποία είναι επιλεγμένη κατά τέτοιον τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή συναρμογή με το φορέα των δορυφόρων. Η κορώνα αυτή δεν θα συμπεριληφθεί στη στατική και δυναμική ανάλυση του διαφορικού και ο ρόλος της θα περιορίζεται στο οπτικό κομμάτι του παραμετρικού μοντέλου.

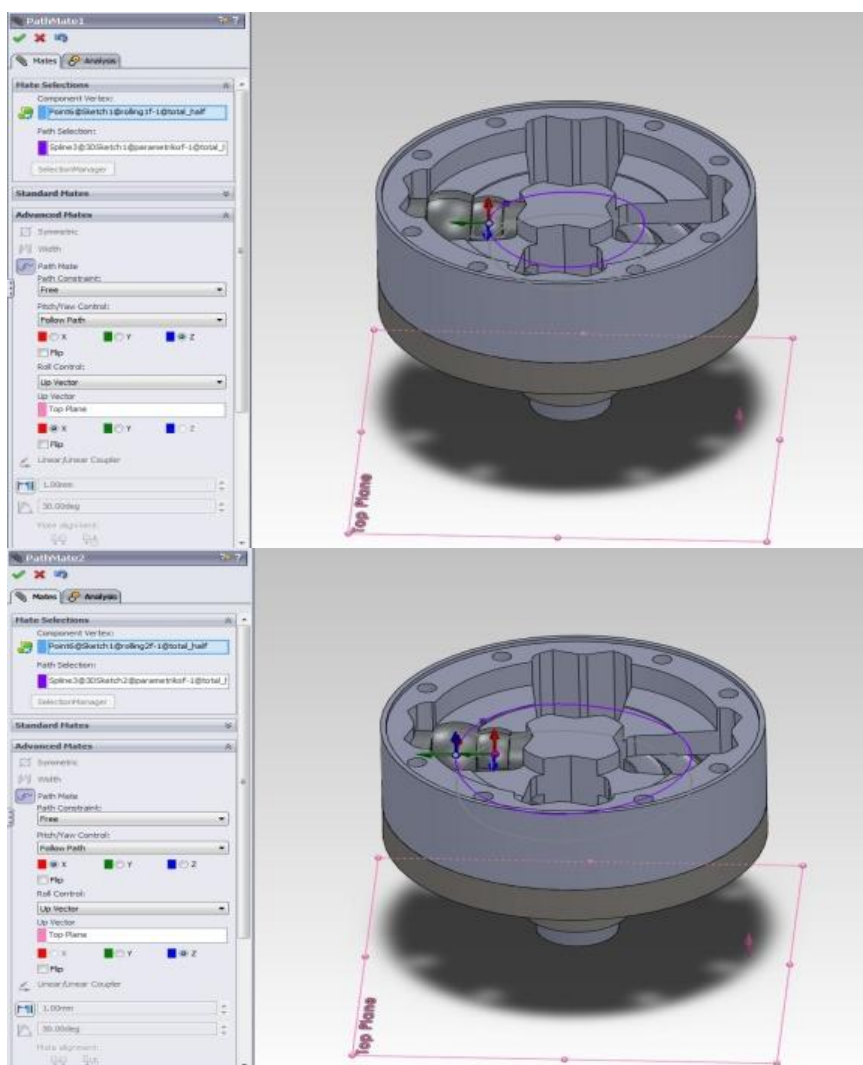


Εικ.5.59 Κορώνα διαφορικού στο περιβάλλον του SolidWorks .

Έχοντας δημιουργήσει όλα τα επιμέρους εξαρτήματα του ένσφαιρου διαφορικού σε παραμετρική βάση προχωράμε στη σύνθεση τους (**Assembling**) με στόχο τη δημιουργία του επιθυμητού συναρμολογημένου συνόλου. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται στο περιβάλλον του SolidWorks εισάγοντας όλα τα επιμέρους εξαρτήματα σε ένα τελικό

συγκεντρωτικό αρχείο. Το στοιχείο που θα προσδώσει στο διαφορικό την τελική του μορφή είναι ο ορισμός των κατάλληλων συνθηκών συνεργασίας-επαφής μεταξύ των εισαγόμενων εξαρτημάτων. Για την δημιουργία του τελικού συναρμολογημένου συνόλου ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα.

1. Εισάγουμε προς συναρμολόγηση τον φορέα των δορυφόρων του διαφορικού ο οποίος και αποτελεί άξονα όλης της διαδικασίας. Για τον λόγο αυτόν του στερούμε κάθε βαθμό ελευθερίας (**Fix**).
2. Εισάγουμε τον πρώτο δορυφόρο και το δεύτερο δορυφόρο.
3. Εισάγουμε τον έναν πλανήτη.
4. Απαιτούμε ο πρώτος και ο δεύτερος δορυφόρος να κυλίνουν επί της πρώτης και της δεύτερης επιφάνειας κύλισης αντίστοιχα (**Path Mate**). Τα κέντρα των δορυφόρων μπορούν να κινηθούν πάνω στις δυο τρισδιάστατες τροχιές που σχεδιάστηκαν κατά το τελευταίο στάδιο δημιουργίας του πλανήτη.

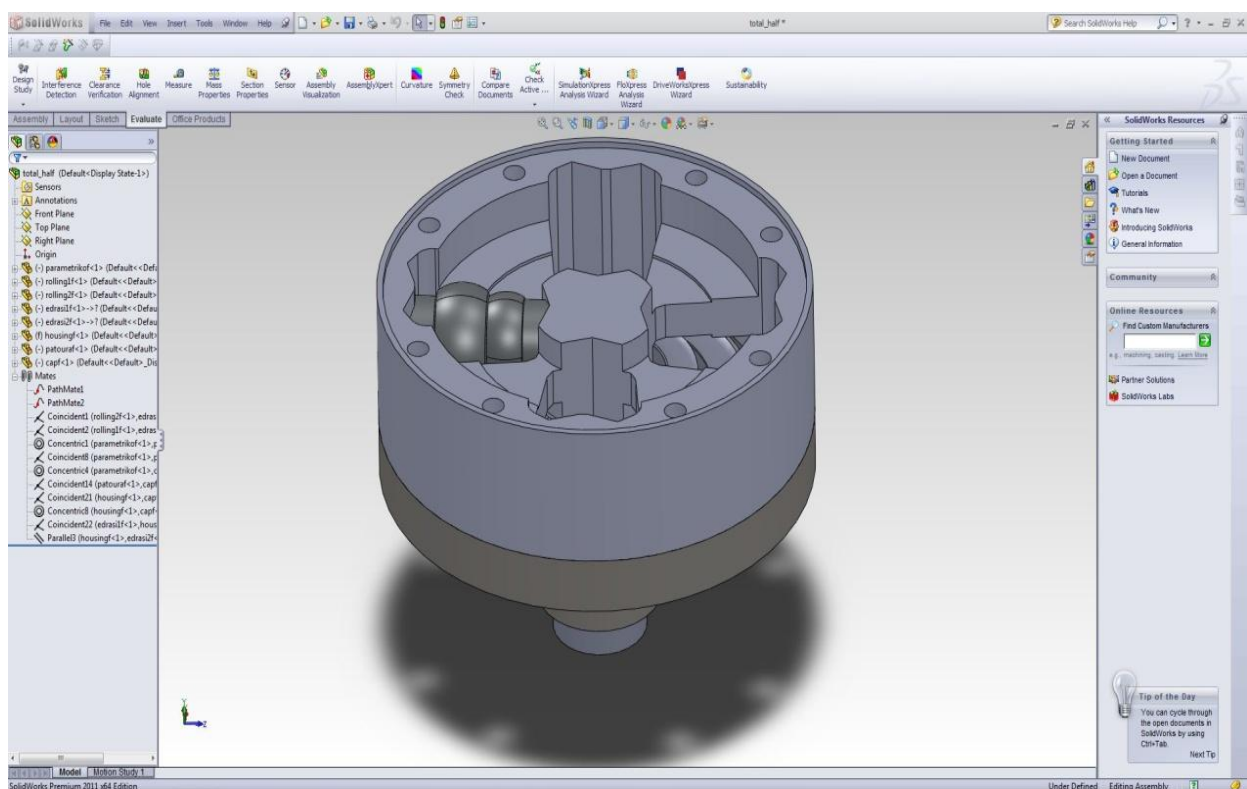


Εικ.5.60 Κύλιση δορυφόρων επί τροχιών, στο περιβάλλον του SolidWorks .

5. Εισάγουμε τις δύο εδράσεις και απαιτούμε οι επιφάνειες συνεργασίας τους με τους αντίστοιχους δορυφόρους να συμπίπτουν (**Coincident**).

6. Εισάγουμε προς συναρμολόγηση τον πλανήτη και το αξονικό έδρανο απαιτώντας να είναι ομόκεντρα (**Concentric**) και οι επιφάνειες συνεργασίας τους να συμπίπτουν (**Coincident**).
7. Εισάγουμε το καπάκι ασφαλείας του διαφορικού και απαιτούμε να είναι ομόκεντρο με τον πλανήτη.
8. Απαιτούμε οι επιφάνειες συνεργασίας αξονικού εδράνου και καπακίου ασφαλείας να συμπίπτουν (**Coincident**).
9. Απαιτούμε οι συνεργαζόμενες επιφάνειες του φορέα των δορυφόρων και του καπακίου ασφαλείας να συμπίπτουν (**Coincident**).
10. Απαιτούμε μία εκ των οπών του φορέα των δορυφόρων να είναι ομόκεντρη με κατάλληλη οπή του καπακίου ασφαλείας.
11. Απαιτούμε μία εκ των επιφανειών της έδρασης να συμπίπτει με τη συνεργαζόμενη της επιφάνεια του φορέα των δορυφόρων.
12. Απαιτούμε η επιφάνεια συνεργασίας της έτερης εδράσεως να είναι παράλληλη με την αντίστοιχη επιφάνεια του φορέα των δορυφόρων.

Στην παρακάτω εικόνα γίνεται σαφής η αλληλουχία των εντολών που εκτελέστηκαν με σκοπό την επίτευξη του συναρμολογημένου συνόλου.



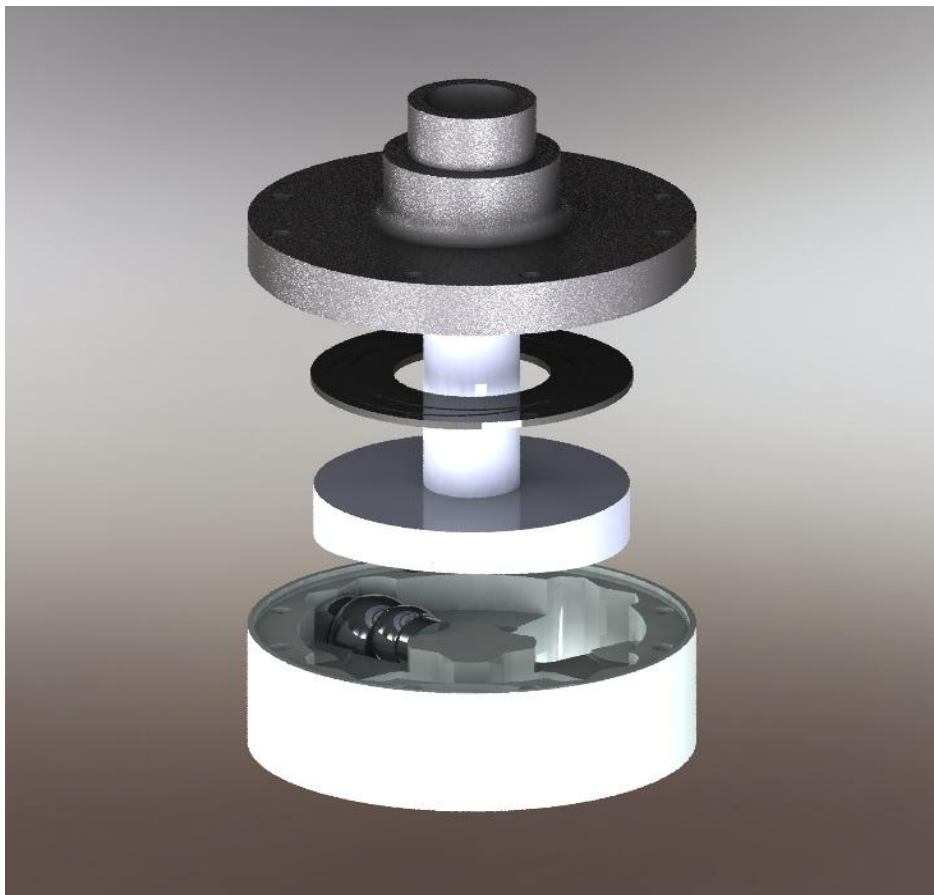
Εικ.5.61 Συναρμολόγηση ένσφαιρου διαφορικού, στο περιβάλλον του SolidWorks .

Έχοντας ως βάση το παραπάνω συναρμολογημένο σύνολο, η διαδικασία ολοκλήρωσης της συναρμολόγησης του πλήρους ένσφαιρου διαφορικού έχει πλέον απλοποιηθεί σημαντικά και πραγματοποιείται ακολουθώντας τις παρακάτω εντολές.

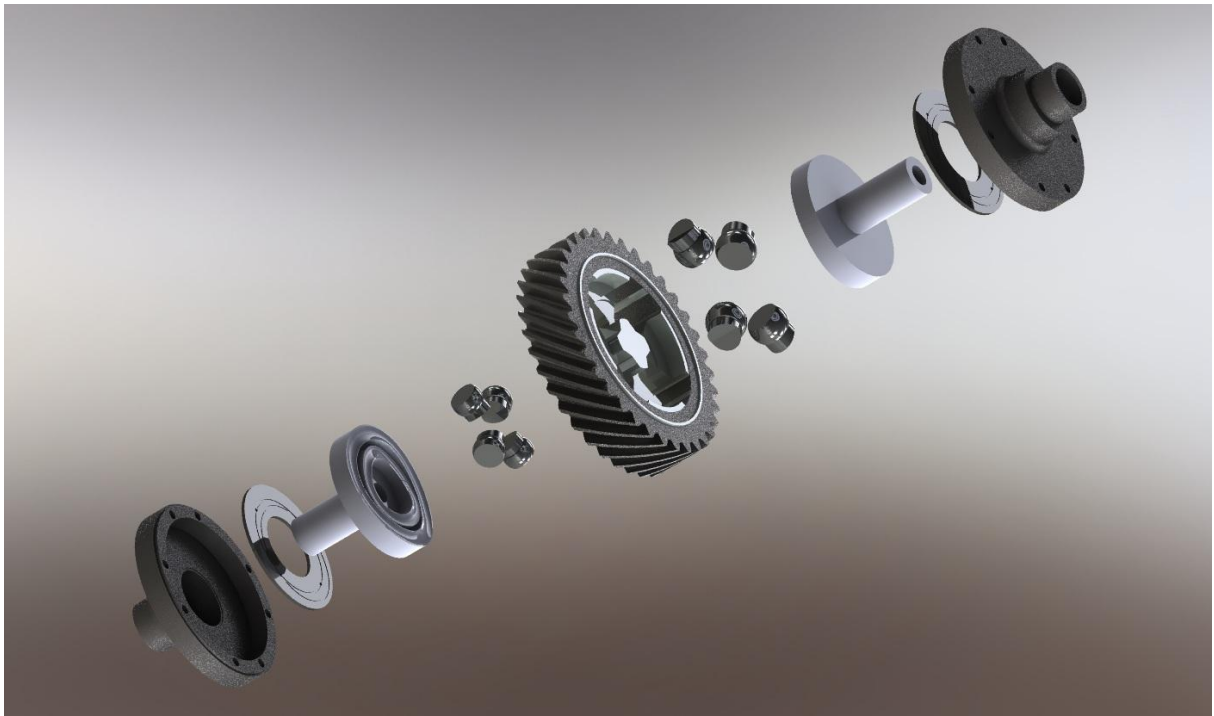
1. Εκ περιστροφής (**Circular Component Pattern**) αντιγραφή των 3 εναπομείναντων σετ δορυφόρων και εδράσεων.

2. Εξ αντανάκλασης αντιγραφή (**Mirror Components**) του πλανήτη, του αξονικού εδράνου και του καπακίου ασφαλείας, με επίπεδο αντανάκλασης το οριζόντιο επίπεδο συμμετρίας του φορέα των δορυφόρων.
3. Σύμπτωση (**Coincident**) των συνεργαζόμενων επιφανειών κορώνας-φορέα δορυφόρων.

Για λόγους πληρότητας ελέγχουμε με το κατάλληλο εργαλείο του SolidWorks (**Interference Detection**) αν παρατηρείται οποιασδήποτε μορφής διείσδυση μεταξύ των εξαρτημάτων του ένσφαιρου διαφορικού. Επιβεβαιώνοντας πως κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, προχωράμε στην φωτορεαλιστική αναπαράσταση του ένσφαιρου διαφορικού στο περιβάλλον Photoworks της πλατφόρμας του SolidWorks .



Εικ.5.62 Αρχικό συναρμολογημένο υποσύνολο ένσφαιρου διαφορικού, στο περιβάλλον του SolidWorks .



Εικ.5.63 Ανάπτυγμα ένσφαιρου διαφορικού, στο περιβάλλον του SolidWorks .



Εικ.5.64 Ένσφαιρο διαφορικό στο περιβάλλον του SolidWorks .

6. Στατική και Δυναμική Ανάλυση Ένσφαιρου Διαφορικού

6.1 Βασικές Αρχές Ανάλυσης Ένσφαιρου Διαφορικού

Έχοντας δημιουργήσει το τρισδιάστατο μοντέλο του ένσφαιρου διαφορικού στην πλατφόρμα του SolidWorks προχωράμε στη στατική και δυναμική ανάλυση του μοντέλου αυτού σε υπολογιστικό περιβάλλον.

Η ανάλυση αυτή πραγματοποιείται στις παρακάτω ενσωματωμένες πλατφόρμες του SolidWorks :

- Στο **SolidWorks Simulation**, το οποίο αποτελεί ένα εργαλείο για την επικύρωση του μηχανολογικού σχεδιασμού. Το εργαλείο αυτό αναδεικνύει στους μηχανικούς τη συμπεριφορά του σχεδιασμένου αντικείμενου στο φυσικό περιβάλλον για το οποίο προορίζεται. Συνεπώς με την πλατφόρμα του SolidWorks Simulation μπορεί να εξεταστεί η συμπεριφορά του σχεδιασμένου αντικείμενου κατά από την επίδραση δυναμικών και θερμικών φορτίων, να ευρεθεί η ιδιοσυχνότητά του κ.α.
- Στο **SolidWorks Motion**, που αποτελεί ένα εικονικό εργαλείο πρωτοτυποποίησης, το οποίο παρέχει δυνατότητες προσομοίωσης της κίνησης ενός μηχανισμού, ελέγχοντας με τον τρόπο αυτόν την ομαλή και επιδιωκόμενη λειτουργία του

Η στατική και η δυναμική ανάλυση λαμβάνουν χώρα στις πλατφόρμες 1,2 αντίστοιχα.

Πρώτου προβούμε στην ανάλυση του ένσφαιρου διαφορικού επισημαίνουμε ορισμένα στοιχεία της δομής και της λειτουργίας του ένσφαιρου διαφορικού, τα οποία αποτελούν τη βάση της δημιουργίας των οριακών συνθηκών και των συνθηκών φόρτισης.

Η ανάλυση του ένσφαιρου διαφορικού πραγματοποιείται για εφαρμογή του σε συμβατικό επιβατικό όχημα, για το οποίο ισχύει:

1. Μέγιστη ισχύς (N_{max}) του κινητήρα του οχήματος: 100PS στις 5800rpm
2. Μέγιστη ροπή (Md_{max}) του κινητήρα: 13,7 kpm =134,4 Nm στις 3000rpm

Στις 3000rpm για τη ροπή που μεταφέρεται στο πινιόν μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων ισχύει:

$$Mt = i_i * Md_{max}$$

όπου i_i η σχέση μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων

Για τη σχέση μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων i_i ισχύει:

i_1	3,30:1
i_2	2,42:1
i_3	1,61:1
i_4	1,34:1
i_5	1,00:1
όπισθεν	3,30:1

Κατά συνέπεια για τη μέγιστη ροπή που παραλαμβάνει το πινιόν , σε περίπτωση δίχως απώλειες (δυσμενέστερη δυνατή συνθήκη από τη σκοπιά του διαφορικού) ισχύει:

$$M_{t_{\max\text{ΠΙΝΙΟΝ}}} = i_1 * M_{d_{\max}} = 4521 \text{ krpm} = 443,5 \text{ Nm}$$

Για τις στροφές του πινιόν με πρώτη ταχύτητα ισχύει:

$$n_{\text{ΠΙΝΙΟΝ}} = 3000/3,3 = 909,1 \text{ rpm}$$

Αντίστοιχα για τις στροφές της κορώνας ισχύει:

$$n_{\text{ΚΟΡΩΝΑΣ}} = n_{\text{ΠΙΝΙΟΝ}} / i_{\text{ΔΙΑΦ}}$$

, όπου $i_{\text{ΔΙΑΦ}}$ ο λόγος μετάδοσης πινιόν-κορώνας, για τον οποίον ισχύει σε συνήθη οχήματα:
 $i_{\text{ΔΙΑΦ}} = 3,545$

$$\text{Συνεπώς } n_{\text{ΚΟΡΩΝΑΣ}} = 256,5 \text{ rpm}$$

Παράλληλα ισχύει σε περίπτωση δίχως απώλειες:

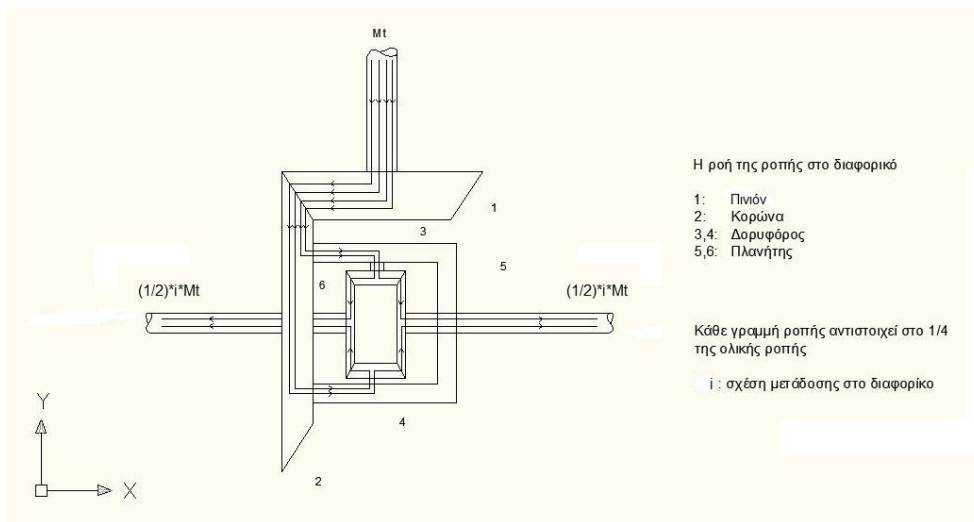
$$M_{t_{\max\text{ΚΟΡΩΝΑΣ}}} = i_{\text{ΔΙΑΦ}} * M_{t_{\max\text{ΠΙΝΙΟΝ}}} = 1572,2 \text{ Nm}$$

Τα παραπάνω μεγέθη είναι ταυτόσημα σε κάθε τύπου διαφορικό.

Από την ανάλυση του ένσφαιρου διαφορικού του κ. Τσιριγγάκη που έχει προηγηθεί στο Κεφάλαιο 2 μπορούμε να εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα, τα οποία και αποτελούν βασικό άξονα της μελέτης του μηχανισμού αυτού.

Κατά την κίνηση του οχήματος σε ευθύ ομαλό δρόμο η λειτουργία του ένσφαιρου διαφορικού δεν διαφέρει από αυτήν ενός συμβατικού καθώς η ροπή ισοκατανέμεται μεταξύ των ημιαξονίων και κατά συνέπεια μεταξύ των πλανητών.

Το ίδιο φαινόμενο όμως δεν συμβαίνει και κατά την κίνηση του οχήματος σε στροφή ή σε ανώμαλο οδόστρωμα. Εκεί το ένσφαιρο διαφορικό δύναται να κατανείμει τη ροπή μέχρι και σε αναλογίες που προσεγγίζουν το 80-20%, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες του οχήματος.



Εικ.6.1 Ροή ροπής σε συμβατικό διαφορικό

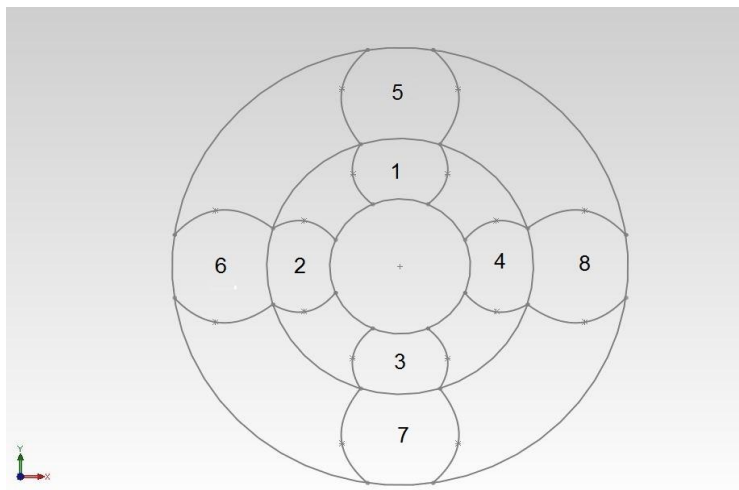
Το ίδιο φαινόμενο όμως δεν συμβαίνει και κατά την κίνηση του οχήματος σε στροφή ή σε ανώμαλο οδόστρωμα. Εκεί το ένσφαιρο διαφορικό δύναται να κατανείμει τη ροπή σε αναλογίες που προσεγγίζουν το 80-20%, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες του οχήματος.

Για την ισχύ της κορώνας, χωρίς την ύπαρξη μηχανικών απωλειών ισχύει:

$$N_{\text{ΚΟΡΩΝΑΣ}} = F_U * (d_{\text{ΠΙΝΙΟΝ}} / 2) * \eta_{\text{ΠΙΝΙΟΝ}}$$

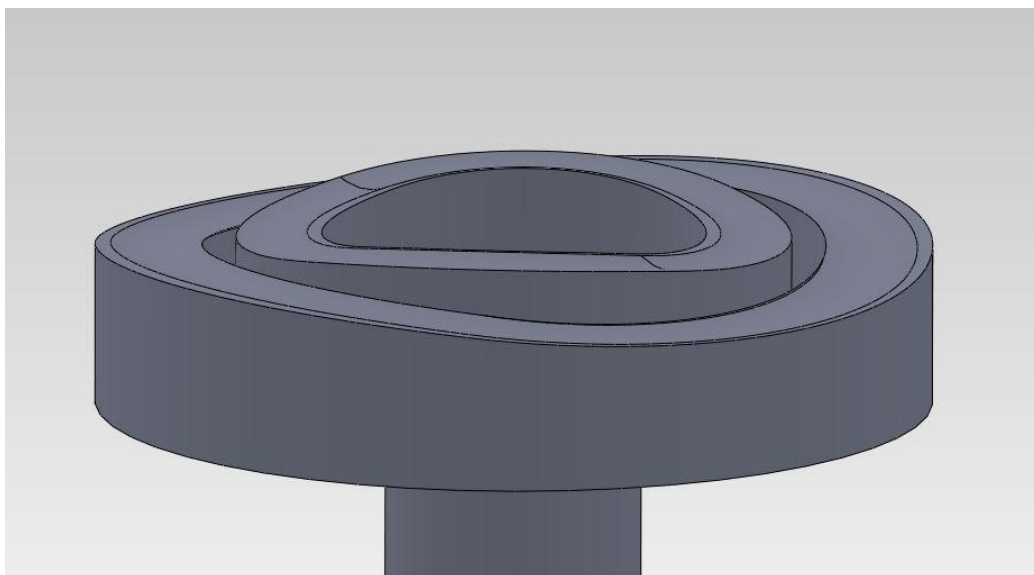
, όπου F_U η περιφερειακή δύναμη της κορώνας, η οποία εξαναγκάζει το διαφορικό σε κίνηση.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η αρίθμηση των δορυφόρων, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια της στατικής και δυναμικής ανάλυσης του ένσφαιρο διαφορικού.



Εικ.6.2 Αρίθμηση δορυφόρων ένσφαιρου διαφορικού

Επισημαίνουμε πως η διαφορά φάσης μεταξύ των δορυφόρων 1-2, 2-3 κ.ο.κ. είναι 90° . Η διαφορά φάσης μεταξύ των δορυφόρων 1-5, 2-6 κ.ο.κ. είναι 45° . Οι διαφορές αυτές προκύπτουν από τον ίδιο το σχεδιασμό των έκκεντρων κεκλιμένων επιπέδων των πλανητών, όπως αυτός αναλύθηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 2 της ΔΕ.



Εικ.6.3 Έκκεντρα κεκλιμένων επιπέδων των πλανητών

Ολοκληρώνοντας την περιγραφή των βασικών αρχών της διαδικασίας ανάλυσης του ένσφαιρου διαφορικού, προχωράμε αρχικά στην στατική ανάλυση, η οποία με τη σειρά της θα αποτελέσει τη βάση της αντίστοιχης κινηματικής.

6.2 Στατική Ανάλυση Ένσφαιρου Διαφορικού

Η μέθοδος που εφαρμόζουμε για τη στατική ανάλυση του ένσφαιρου διαφορικού είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων. Αυτή αποτελεί μια αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν τα διάφορα σύνθετα τεχνικά προβλήματα.

Για την άρτια εφαρμογή της Μέθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων απαιτούνται τα παρακάτω στάδια:

- I. Δημιουργία του τρισδιάστατου CAD μοντέλου του προς μελέτη αντικειμένου.
- II. Διαχωρισμός του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία, δημιουργία πλέγματος, επιλογή τρόπου επίλυσης και εισαγωγή οριακών συνθηκών. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με τα αποκαλούμενα preprocessor προγράμματα.
- III. Εισαγωγή των κατάλληλα διαμορφωμένων δεδομένων προς επίλυση σε πρόγραμμα solver, το οποίο με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων επιλύει το πρόβλημα.
- IV. Αποτύπωση των αποτελεσμάτων, μετά το πέρας της διαδικασίας επίλυσης, σε postprocessor πρόγραμμα.

Οι περισσότερες πλατφόρμες πεπερασμένων στοιχείων ενσωματώνουν πια τα στάδια 2-4 σε ένα ενιαίο πρόγραμμα. Παρόλα αυτά αυτόνομα υποπρογράμματα εκτελούν το κάθε στάδιο ξεχωριστά.

Σύγχρονες πλατφόρμες, όπως το SolidWorks, εκτεταμένη χρήση του οποίου πραγματοποιείται στην παρούσα ΔΕ, ενσωματώνουν και το 1^ο στάδιο σε ένα ενιαίο πρόγραμμα.

Η στατική ανάλυση του ένσφαιρου διαφορικού πραγματοποιείται στην πλατφόρμα πεπερασμένων στοιχείων SolidWorks Simulation, η οποία παρέχει απαραίτητα εργαλεία για τη μελέτη της συμπεριφοράς του ένσφαιρου διαφορικού υπό την επίδραση κατάλληλα επιλεγμένων φορτίων.

Η στατική μελέτη θα πραγματοποιηθεί για τις εξής συνθήκες κατανομής της ροπής στα δύο ημιαξόνια και κατά συνέπεια στους δύο πλανήτες:

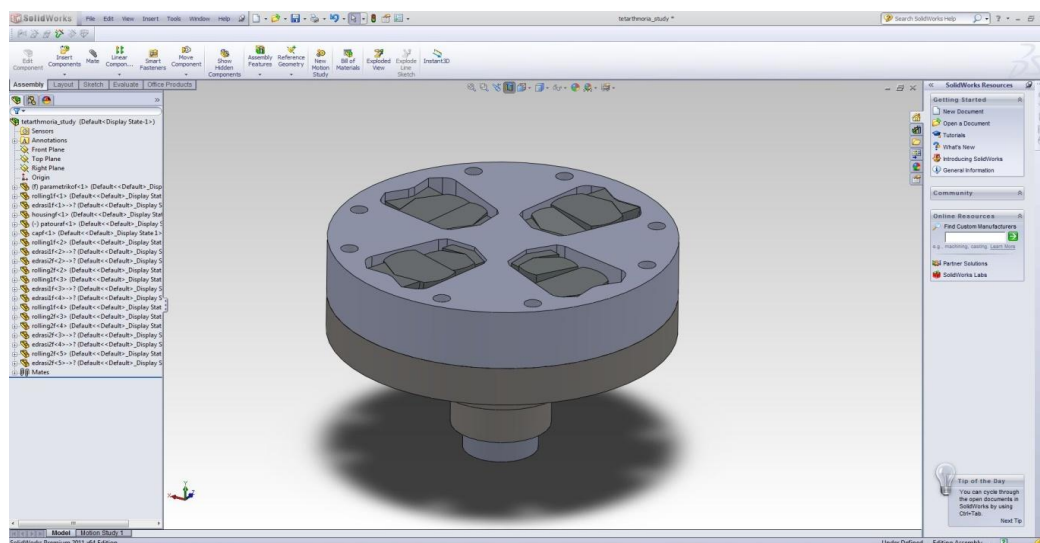
- 50-50 %
- 60-40 %
- 70-30 %
- 80-20 %

Ακολουθώντας τα προαναφερθέντα στάδια της εφαρμογής της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων πραγματοποιούμε στο τρισδιάστατο μοντέλο του διαφορικού τους παρακάτω αρχικούς ελέγχους:

1. Επιβεβαιώνουμε ,με χρήση του κατάλληλο εργαλείο του SolidWorks (**Interference Detection**), πως δεν παρατηρείται οποιασδήποτε μορφής διείσδυση μεταξύ των εξαρτημάτων του συναρμολογημένου ένσφαιρου διαφορικού. Αν κάτι τέτοιο συνέβαινε η δημιουργία πλέγματος για την περαιτέρω μελέτη του διαφορικού θα ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθεί.
2. Επιβεβαιώνουμε πως δεν υπάρχουν ανεπιθύμητα κενά (**Clearance Verification**) μεταξύ των συνεργαζόμενων εξαρτημάτων του διαφορικού. Σε αντίθετη περίπτωση τα αποτελέσματα της μελέτης θα ήταν πλασματικά.
3. Επιβεβαιώνουμε την ομοκεντρότητα μεταξύ των οπών (**Hole Alignment**) των εξαρτημάτων του διαφορικού.

Μετά και από τη διενέργεια των παραπάνω ελέγχων προχωράμε σε απλοποίηση του μοντέλου, με στόχο τη δημιουργία ενός απλούστερου μοντέλου, το οποίο θα είναι ευέλικτο εξοικονομεί υπολογιστική ισχύ ,αλλά παράλληλα θα προσεγγίζει τα φαινόμενα σε υψηλό βαθμό.

Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται απλά αν μελετήσουμε εκείνο το τμήμα του ένσφαιρου διαφορικού που παρουσιάζει τη μέγιστη καταπόνηση. Το μοντέλο συνεχίζει να υφίσταται ακέραιο καθ' όλη τη διαδικασία μελέτης, από την οποία όμως εξαιρείται το ήμισυ του ένσφαιρου διαφορικού που καταπονείται σε μικρότερο βαθμό. Έτσι εξετάζοντας τη δυσμενέστερη περίπτωση (worst case scenario method) εξάγουμε ασφαλή ,αλλά παράλληλα και συντηρητικά αποτελέσματα.

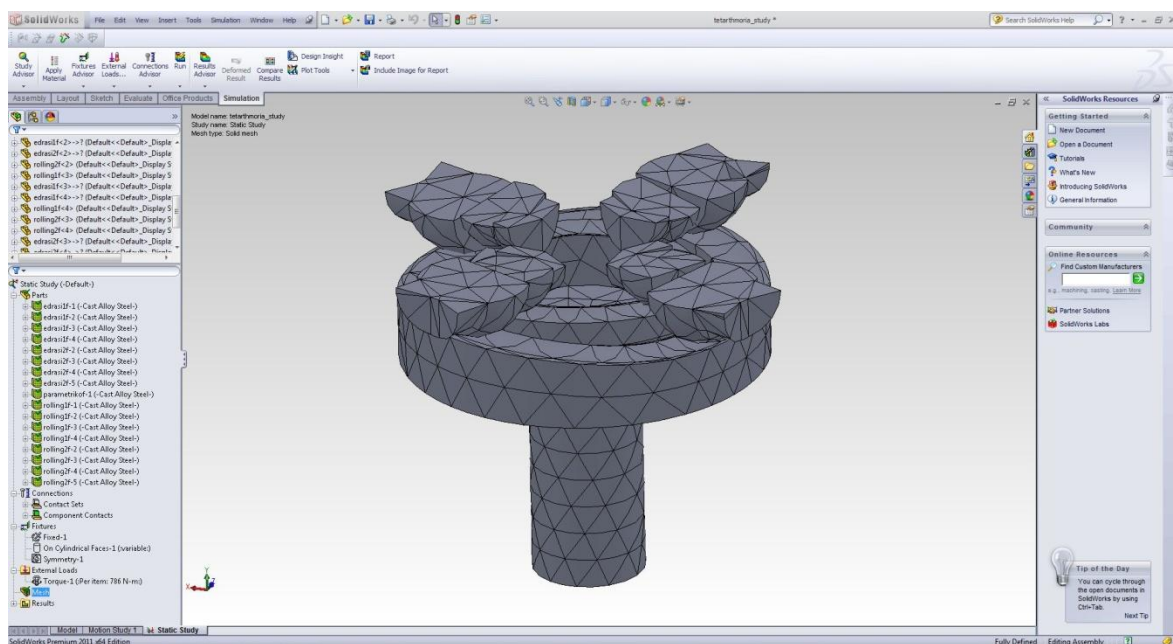


Εικ.6.4 Ημισυ ένσφαιρου διαφορικού προς στατική ανάλυση στο περιβάλλον του SolidWorks Simulation

Αξίζει ακόμη να επισημάνουμε πως καθώς το ένσφαιρο διαφορικό είναι ένας κατ' εξοχήν κινηματικός μηχανισμός, η στατική του ανάλυση έχει νόημα να μόνο για συγκεκριμένα στιγμιότυπα. Συγκεκριμένα στα στιγμιότυπα αυτά το διαφορικό τείνει να μεταβάλει την αναλογία ροπής στους δύο πλανήτες και συνεπώς η στατική μελέτη πραγματοποιείται για της παραπάνω οριακές αναλογίες.

Επόμενο στάδιο αποτελεί το preprocessing ,δηλαδή η δημιουργία πλέγματος, η επιλογή τρόπου επίλυσης και η εισαγωγή οριακών συνθηκών και φορτίσεων.

Όσον αφορά τη δημιουργία πλέγματος αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί στο περιβάλλον του SolidWorks Simulation είτε αυτόματα είτε με εκτεταμένο έλεγχο του χρήστη. Τα αποτελέσματα της αυτόματης πλεγματοποίησης παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικ.6.5 Αυτόματη πλεγματοποίηση στο περιβάλλον του SolidWorks Simulation

Παρατηρούμε πως το πλέγμα αυτό παρουσιάζει ικανοποιητική ομοιομορφία. Αυτή η ομοιομορφία οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη επιλογή μας να εργαστούμε με το ήμισυ του διαφορικού, καθώς η πλεγματοποίηση σε ημισφαιρικά σώματα προκύπτει σαφώς ομοιομορφότερη σε σχέση με τα αντίστοιχα σφαιρικά.

Παρόλα αυτά παρατηρούμε πως το πλέγμα δεν είναι αρκετά πυκνό, ιδιαίτερο στις κομβικές περιοχές εμφάνισης τάσεων, όπως π.χ. στην περιοχή γύρω από το σημείο επαφής δορυφόρων-πλανήτη.

Παραθέτουμε τον πίνακα στοιχείων της αυτόματης πλεγματοποίησης, όπως αυτός εξάγεται από το Simulation.

Mesh Details	
Study name	Static Study (-Default-)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Curvature based mesh
Jacobian points	4 points
Max Element Size	11.4206 mm
Min Element Size	2.28412 mm
Mesh quality	High
Total nodes	5179
Total elements	2541
Maximum Aspect Ratio	262.58
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	79.3
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	2.05
% of distorted elements (Jacobian)	0.0394
Remesh failed parts with incompatible mesh	Off
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:00:04
Computer name	GGEO-VAIO

Πιν.6.1 Αυτόματη πλεγματοποίηση

Για την επίτευξη της ζητούμενης πυκνότητας πλέγματος ιδιαίτερα σε εντοπισμένες περιοχές υψηλής σημασίας επιλέγουμε τη λύση του ελέγχου της πλεγματοποίησης (**Apply Mesh Control**).

Έτσι πυκνώνουμε το πλέγμα στις εξής περιοχές:

- I. επιφάνειες δορυφόρων
- II. κυματοειδής επιφάνειες πλανητών
- III. επιφάνεια βάσης πλανήτη

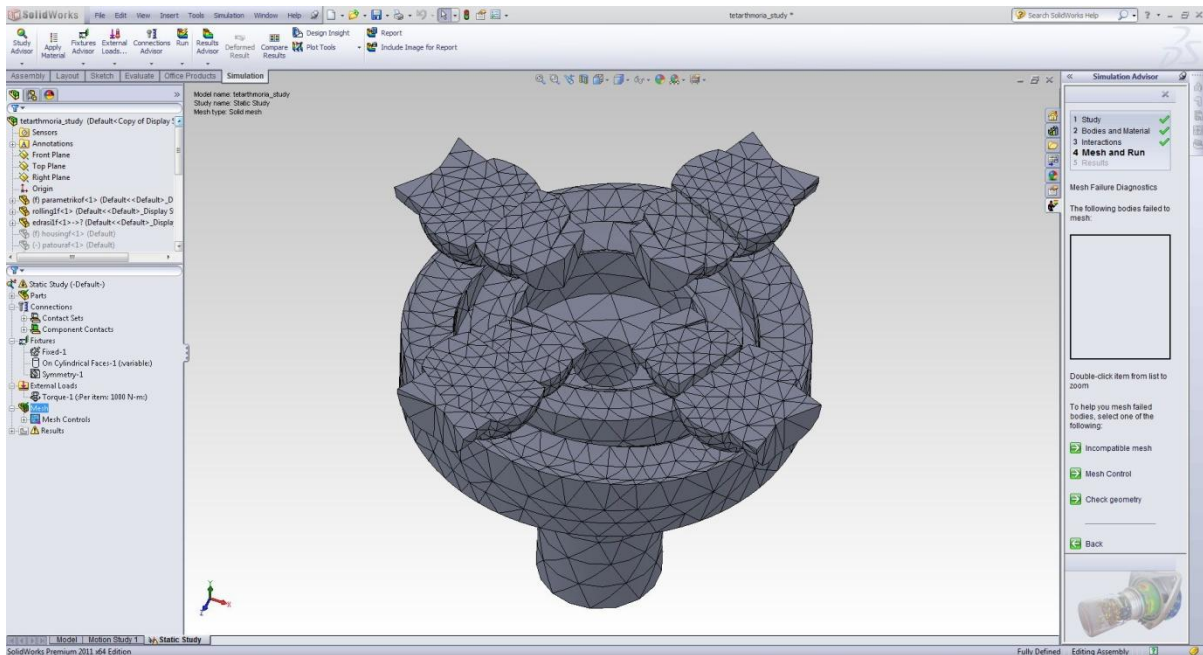
Ως γενικό μέγεθος στοιχείων (**Element Size**) επιλέγονται τα 10,85 mm ,για την περιοχή 1 τα 3,92mm και για τις περιοχες 2,3 τα 5,71 mm.

Παραθέτουμε επίσης τον πίνακα στοιχείων της “χειροκίνητης” πλεγματοποίησης, όπως αυτός εξάγεται από το Simulation.

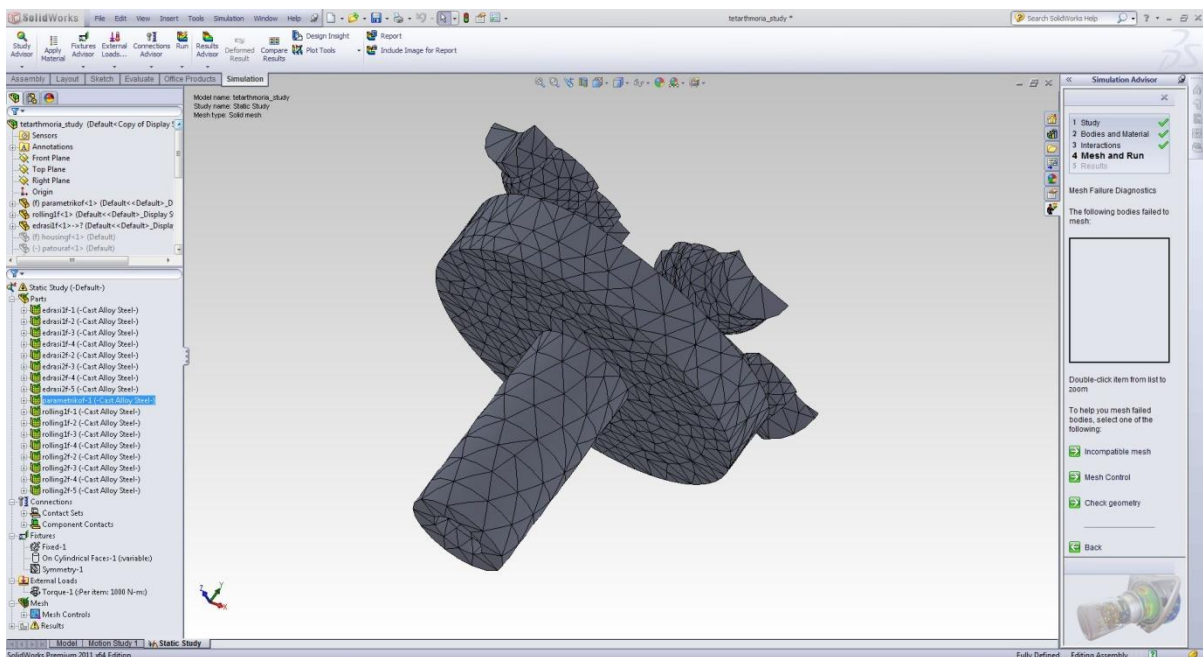
Mesh Details	
Study name	Static Study (-Default-)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Curvature based mesh
Jacobian points	4 points
Mesh Control	Defined
Max Element Size	10.8496 mm
Min Element Size	2.16992 mm
Mesh quality	High
Total nodes	17442
Total elements	9252
Maximum Aspect Ratio	120.54
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	92.3
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0.616
% of distorted elements (Jacobian)	0
Remesh failed parts with incompatible mesh	Off
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:00:01
Computer name	GGEO-VAIO

Πιν.6.2 Χειροκίνητη πλεγματοποίηση

Τα αποτελέσματα του ελέγχου της πλεγματοποίησης παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικ.6.6 Έλεγχος πλεγματοποίησης στο περιβάλλον του SolidWorks Simulation



Εικ.6.7 Έλεγχος πλεγματοποίησης στο περιβάλλον του SolidWorks Simulation

Ολοκληρώνοντας τη διαδικασία πλεγματοποίησης προχωράμε στον ορισμό δεδομένων του προβλήματος και οριακών συνθηκών- συνθηκών επαφής.

Βασικό δεδομένο που πρέπει να εισαχθεί για τη υλοποίηση κάθε μορφής ανάλυσης είναι το υλικό του ζητούμενου αντικειμένου. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέγουμε ως υλικό (**Apply Material**) έναν απλό χάλυβα (Cast Alloy Steel) που να προσομοιάζει σε ιδιότητες το υλικό του πρότυπου ένσφαιρου διαφορικού του κ.Τσιριγγάκη και να κινείται παράλληλα στη λογική της δυσμενέστερης δυνατής περίπτωσης (όχι κάποιο ενισχυμένο κράμα δηλαδή), η οποία αποτελεί βασική αρχή της παρούσας μελέτης.

Για λόγους πληρότητας παραθέτουμε τον πίνακα ιδιοτήτων του χάλυβα (Cast Alloy Steel), όπως αυτός εξάγεται από το Simulation.

Property	Value	Units
Elastic Modulus	1.9e+011	N/m ²
Poissons Ratio	0.26	N/A
Shear Modulus	7.8e+010	N/m ²
Density	7300	kg/m ³
Tensile Strength	448082500	N/m ²
Compressive Strength in X		N/m ²
Yield Strength	241275200	N/m ²
Thermal Expansion Coefficient	1.5e-005	/K
Thermal Conductivity	38	W/(m·K)
Specific Heat	440	J/(kg·K)

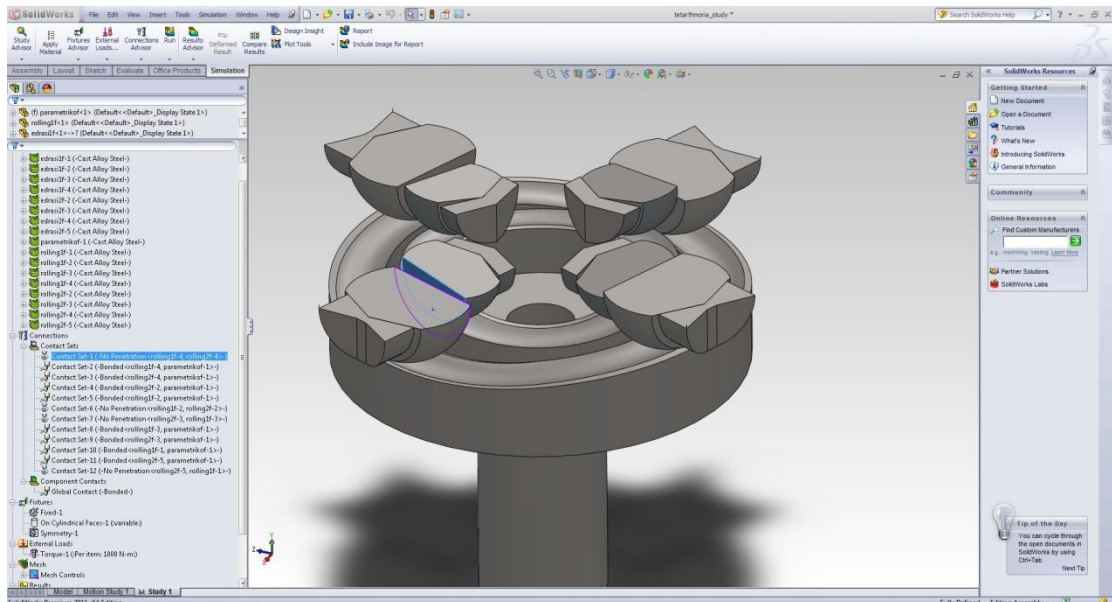
Πιν.6.3 Ιδιότητες χάλυβα

Όσον αφορά τις οριακές συνθήκες ορίζουμε αρχικά συνθήκες επαφής μεταξύ των συνεργαζόμενων εξαρτημάτων.

Ως αρχική και καθολική συνθήκη (**Global Contact**) ορίζουμε τη σύνδεση- “κόλληση” (**Bonded**) των εξαρτημάτων του ένσφαιρου διαφορικού μεταξύ τους.

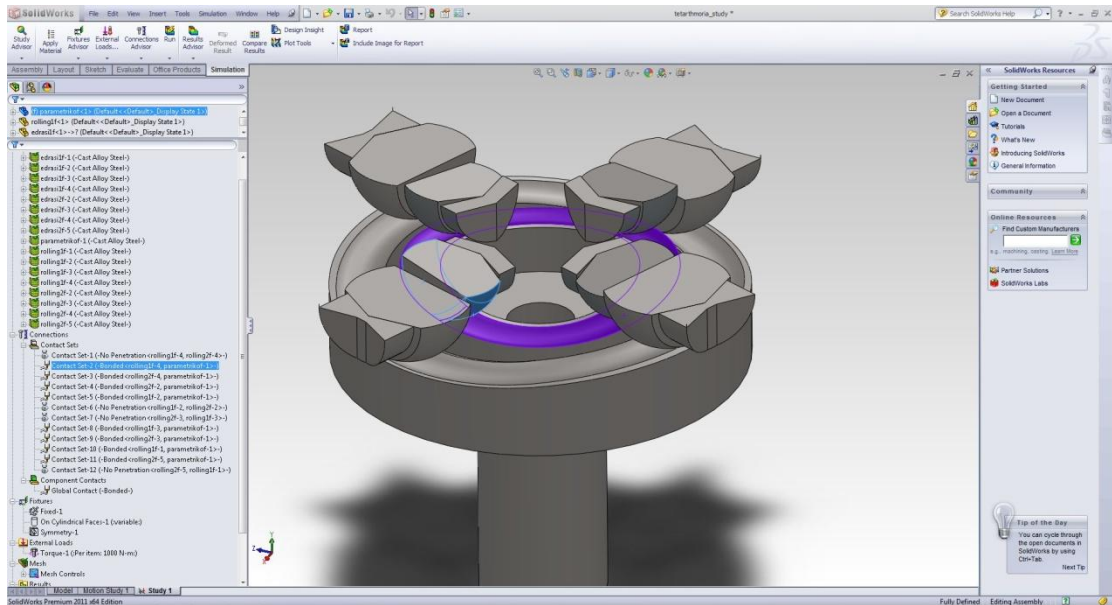
Στη συνέχεια ορίζουμε ξεχωριστές συνθήκες επαφής (**Contact Sets**) για κάποια εξ αυτών, οι οποίες υπερισχύουν των αρχικών καθολικών συνθηκών. Οι συνθήκες αυτές είναι οι εξής:

1. Συνθήκη απαγόρευσης της διείσδυσης (**No Penetration**) μεταξύ των γειτονικών παράλληλων επιφανειών των δορυφόρων. Η συνθήκη αυτή ορίζεται για όλα τα σετ δορυφόρων (1-5, 2-6, 3-7, 4-8) αντίστοιχα.



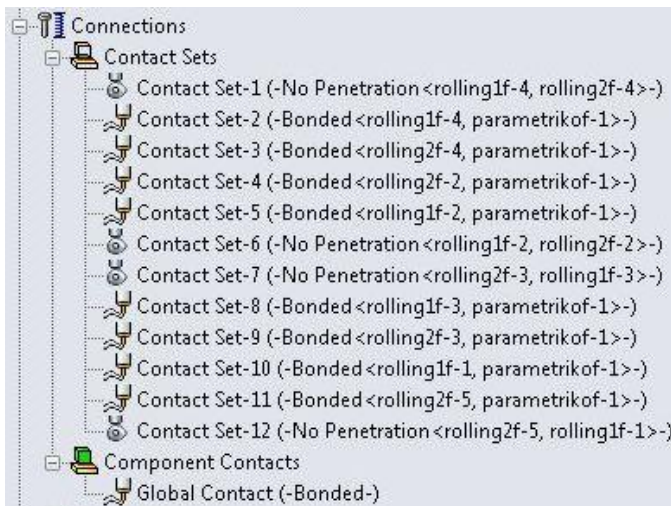
Εικ.6.8 Συνθήκη απαγόρευσης της διείσδυσης των δορυφόρων στο περιβάλλον του SolidWorks Simulation

2. Συνθήκη σύνδεσης (**Bonded**) μεταξύ των συνεργαζόμενων επιφανειών δορυφόρων-πλανητών. Η συνθήκη αυτή ορίζεται για όλες τις επιφάνειες συνεργασίας δορυφόρων-πλανητών.



Εικ.6.9 Συνθήκη σύνδεσης επιφανειών συνεργασίας δορυφόρων-πλανητών στο περιβάλλον του SolidWorks Simulation

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται μία προς μία οι συνθήκες επαφής μεταξύ των εξαρτημάτων του ένσφαιρου διαφορικού.

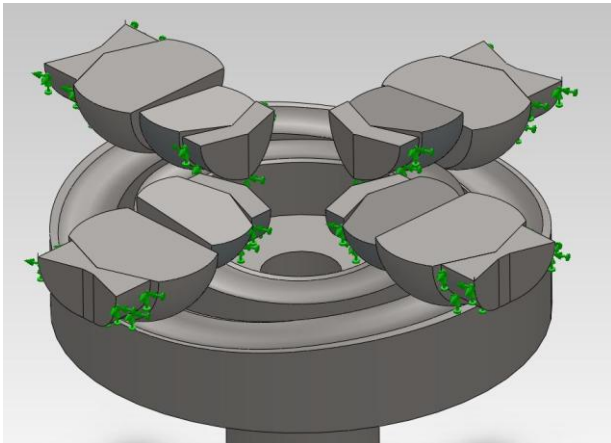


Εικ.6.9 Συνθήκες επαφής μεταξύ των εξαρτημάτων

Επόμενο βήμα στην προεργασία της στατικής ανάλυσης αποτελεί ο ορισμός των συνθηκών στήριξης του μοντέλου του διαφορικού, η οποίες θα δώσουν τη δυνατότητα της στατικής ανάλυσης του διαφορικού. Η ύπαρξή τους αποτελεί άλλωστε αναγκαία συνθήκη για την υλοποίηση κάθε μορφής στατικής ανάλυσης.

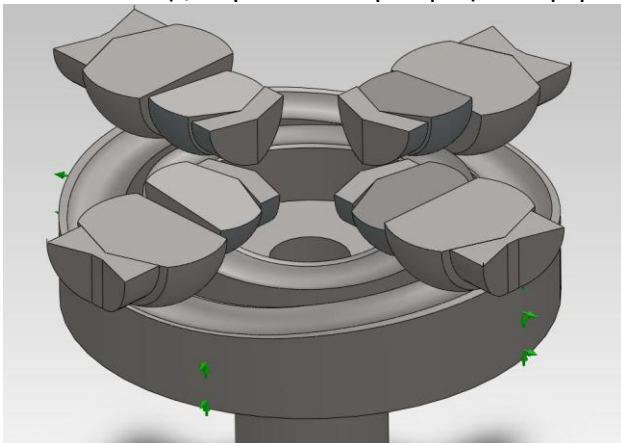
Οι συνθήκες στήριξης που επιλέγουμε είναι οι εξής:

1. Πάκτωση (**Fixed**) των εξωτερικών επιφανειών των εδράσεων.



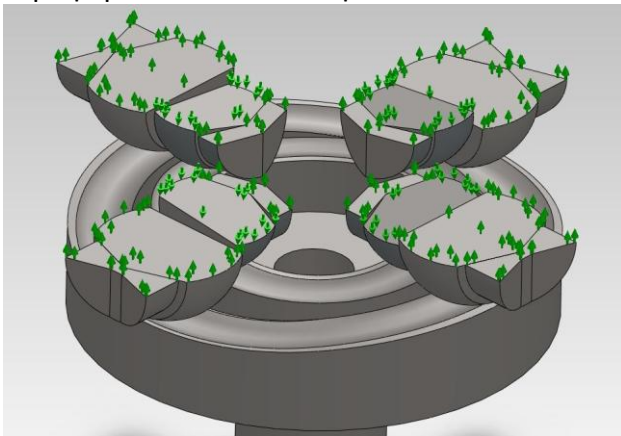
Εικ.6.10 Πακτωση εδράσεων

2. Περιορισμός κάθε βαθμού ελευθερίας της κυλινδρικής επιφάνειας του πλανήτη (**On Cylindrical Faces**), πέραν του περιστροφικού γύρω από τον άξονά του.



Εικ.6.11 Περιορισμός βαθμών ελευθερίας της κυλινδρικής επιφάνειας του πλανήτη

3. Εισαγωγή συνθηκών συμμετρίας (**Symmetry**) στις άνω τετμημένες επιφάνειες των δορυφόρων και των πλανητών.



Εικ.6.12 Συνθήκες συμμετρίας δορυφόρων και πλανητών

Ολοκληρώνοντας τον ορισμό των στηρίξεων ορίζουμε την επιθυμητή ροπή (**Torque**), η οποία θα ασκείται στην εσωτερική επιφάνεια της βάσης του πλανήτη, εκεί δηλαδή όπου θα βρισκόταν το ημιαξόνιο.

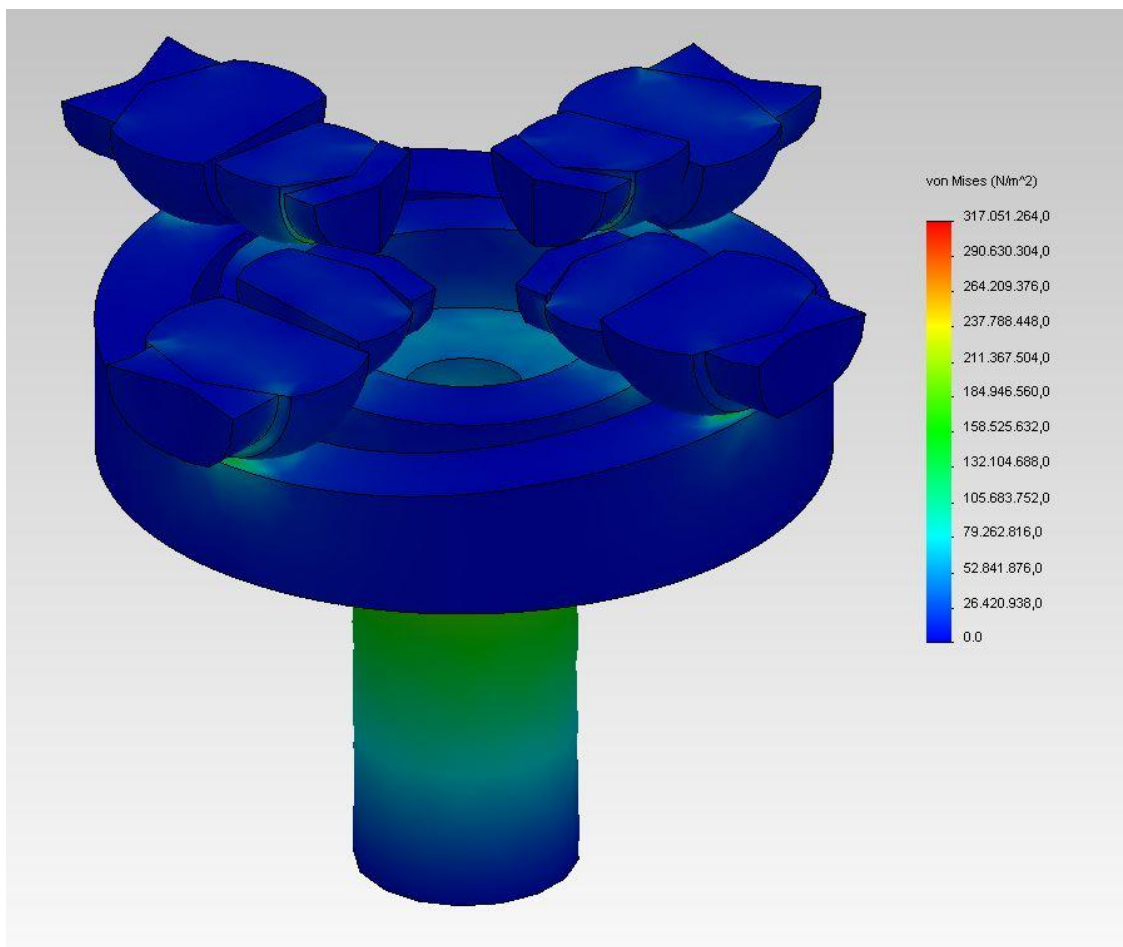
Το μέτρο της ροπής που ασκείται διαφέρει για τις διαφορετικές κατανομές της ροπής μεταξύ των ημιαξονίων. Κατά συνέπεια ισχύει για το μέτρο της ασκούμενης ροπής:

- 786,1 Nm για 50-50 %
- 943,3 Nm για 60-40 %
- 1100,5 Nm για 70-30 %
- 1415 Nm για 80-20 %

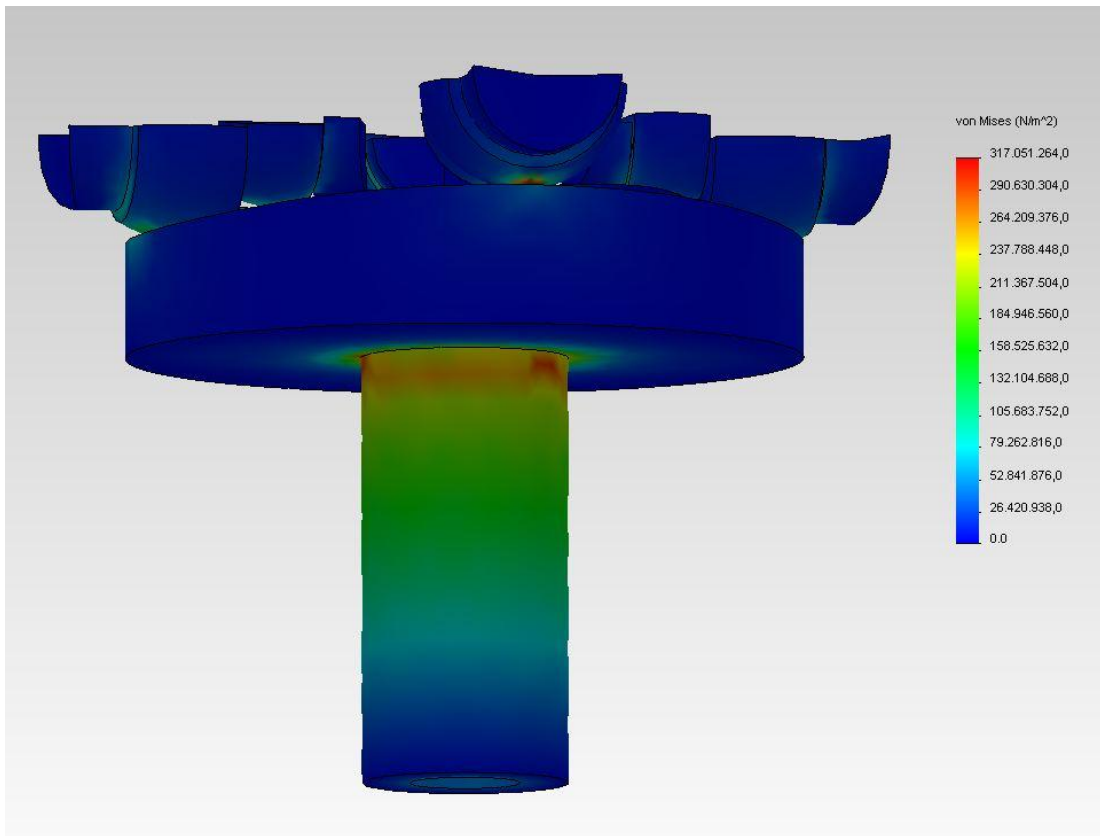
Ορίζουμε ως πρόγραμμα επίλυσης (solver) του μοντέλου το FFEPlus, το οποίο και προτείνεται από την πλατφόρμα SolidWorks Simulation. Επιλύοντας το μοντέλο για τα παραπάνω 4 σενάρια φόρτισης προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Σενάριο 1

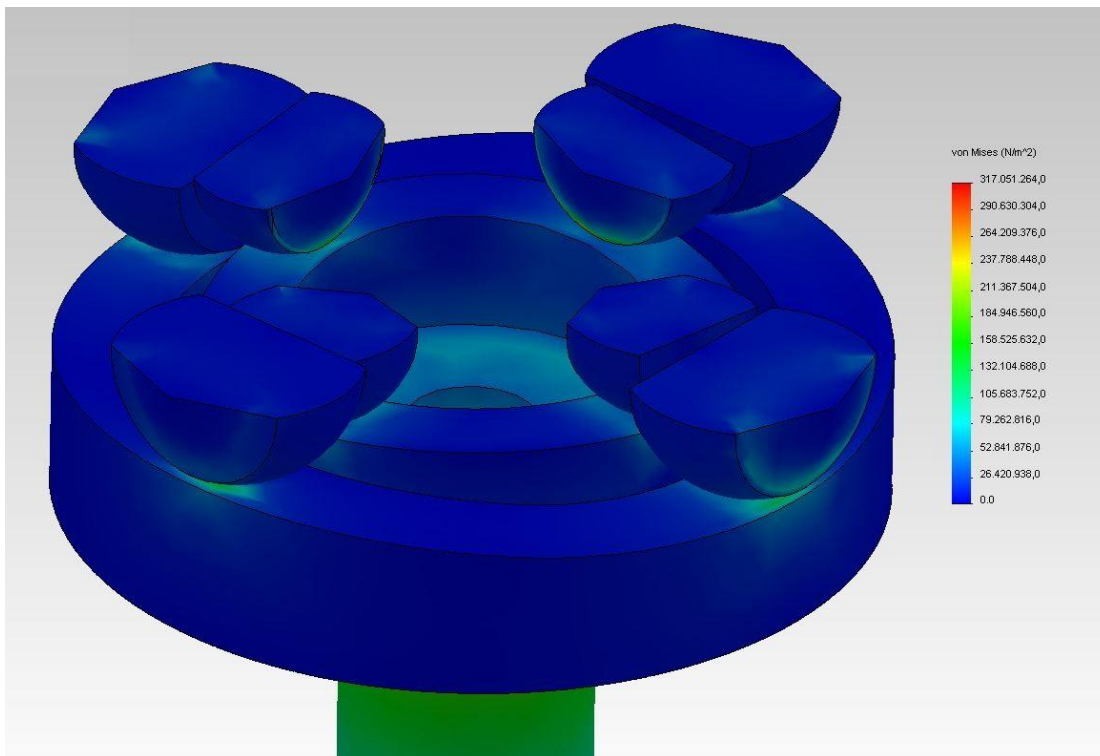
- Φόρτιση: 786,1 Nm
- Κατανομή ροπής: 50-50 %



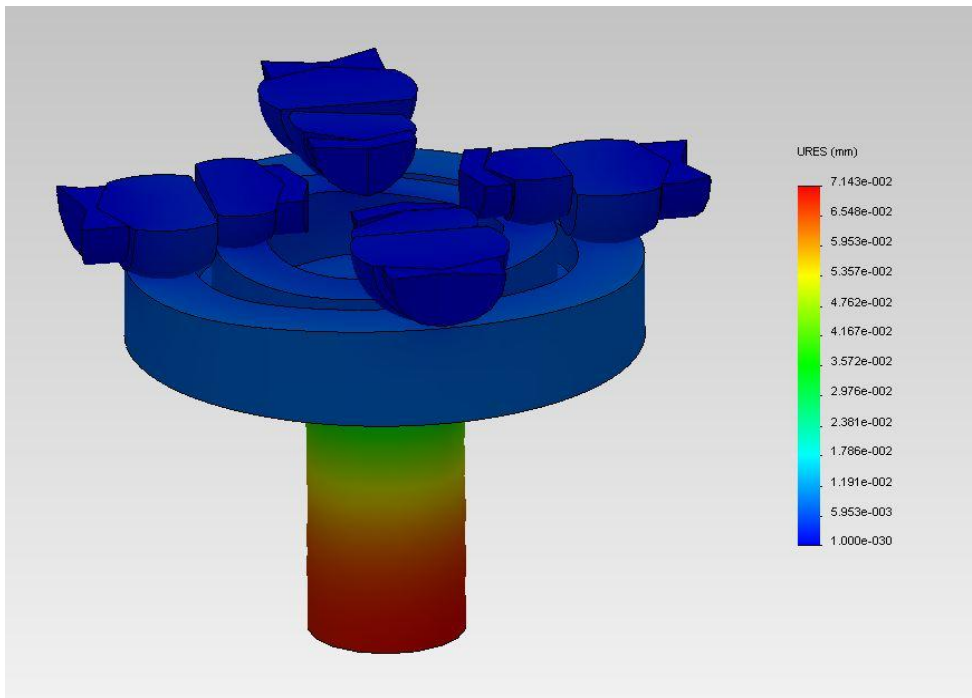
Εικ.6.13 Πεδίο τάσεων 1^{ου} σεναρίου φόρτισης



Εικ.6.14 Πεδίο τάσεων 1^{ου} σεναρίου φόρτισης



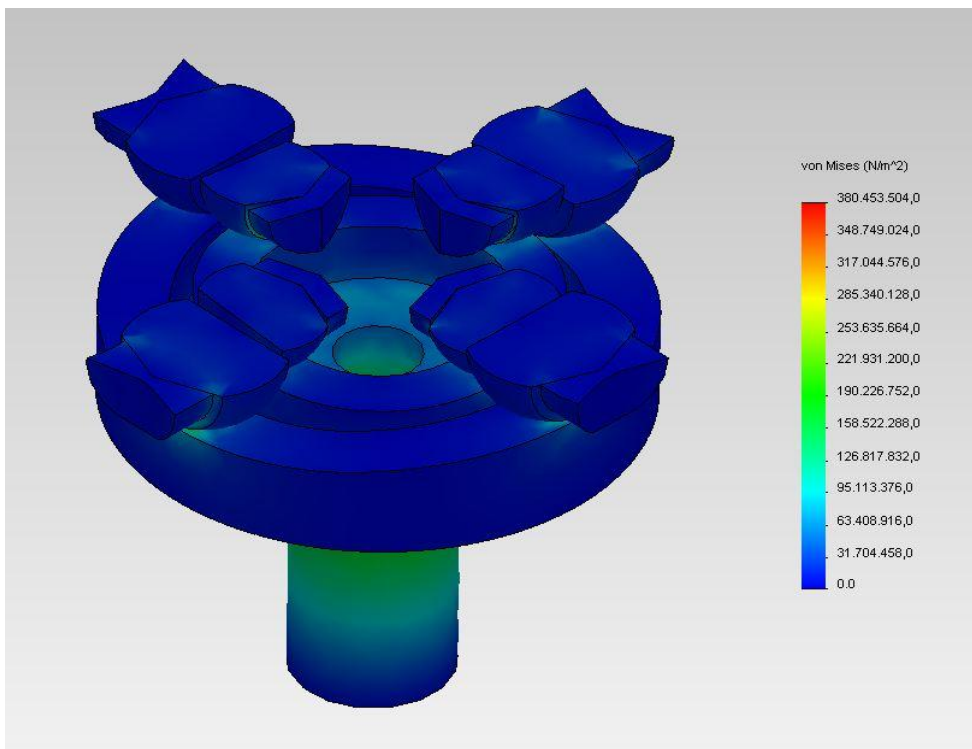
Εικ.6.15 Πεδίο τάσεων 1^{ου} σεναρίου φόρτισης



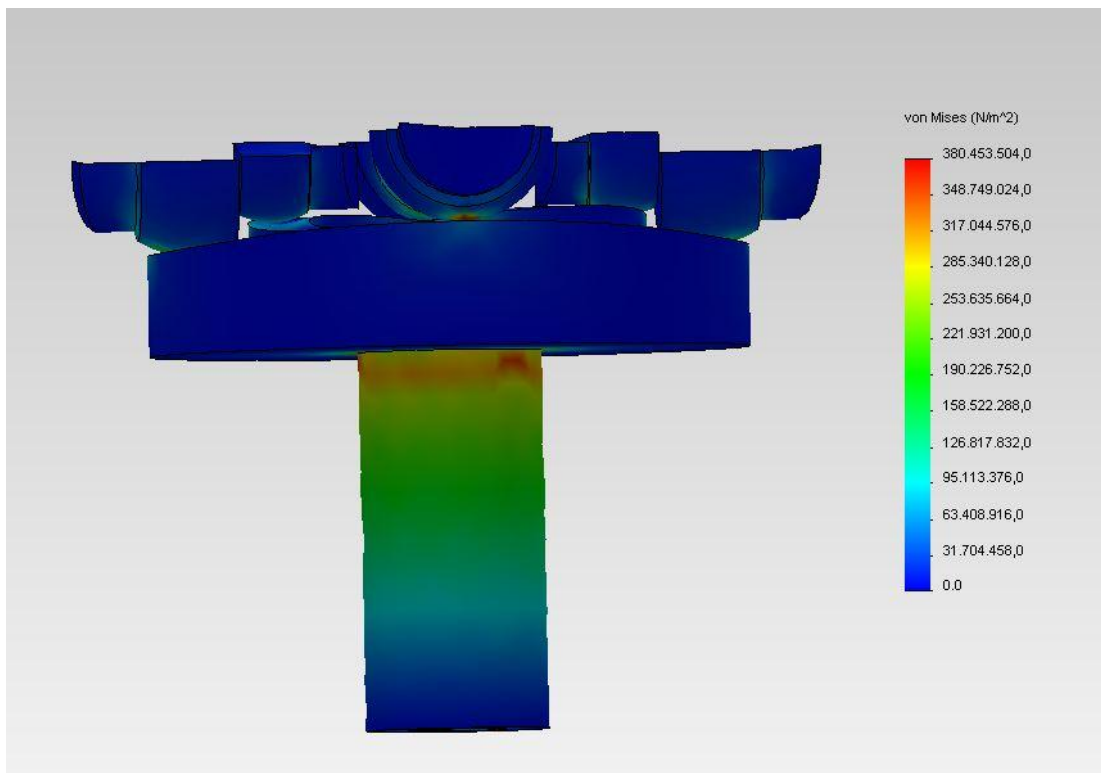
Εικ.6.16 Πεδίο παραμορφώσεων 1^{ου} σεναρίου φόρτισης

Σενάριο 2

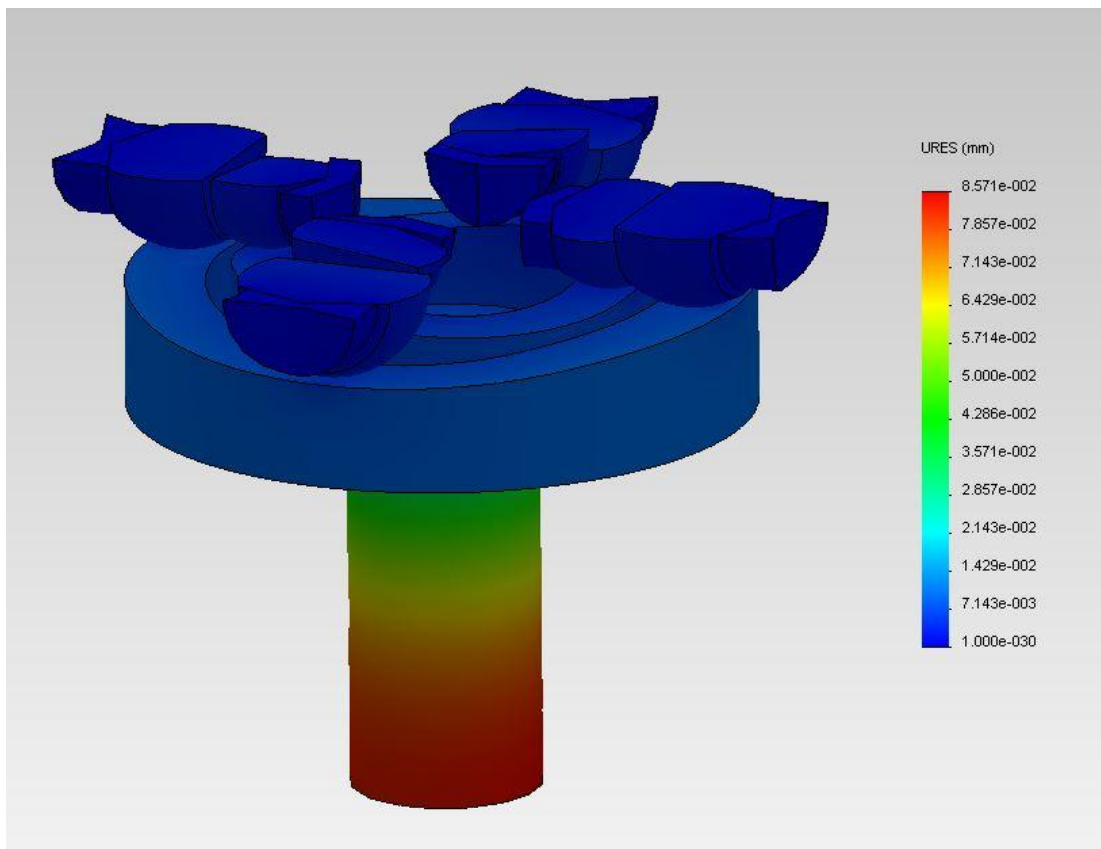
- Φόρτιση: 943,3 Nm
- Κατανομή ροπής: 60-40 %



Εικ.6.17 Πεδίο τάσεων 2^{ου} σεναρίου φόρτισης



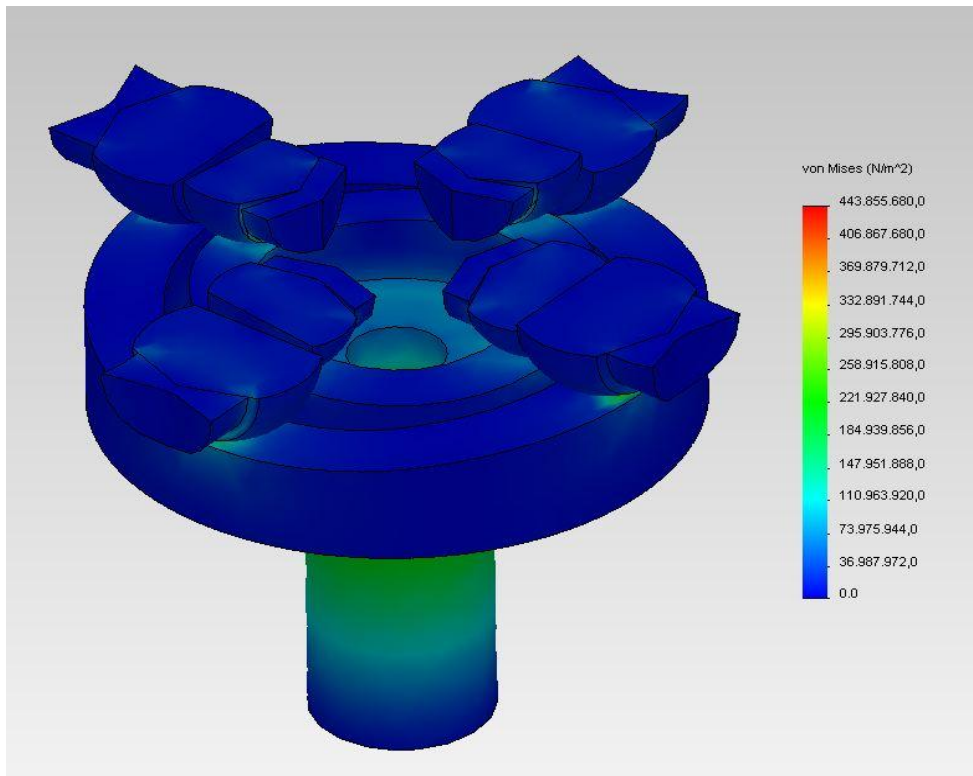
Εικ.6.18 Πεδίο τάσεων 2^{ου} σεναρίου φόρτιση



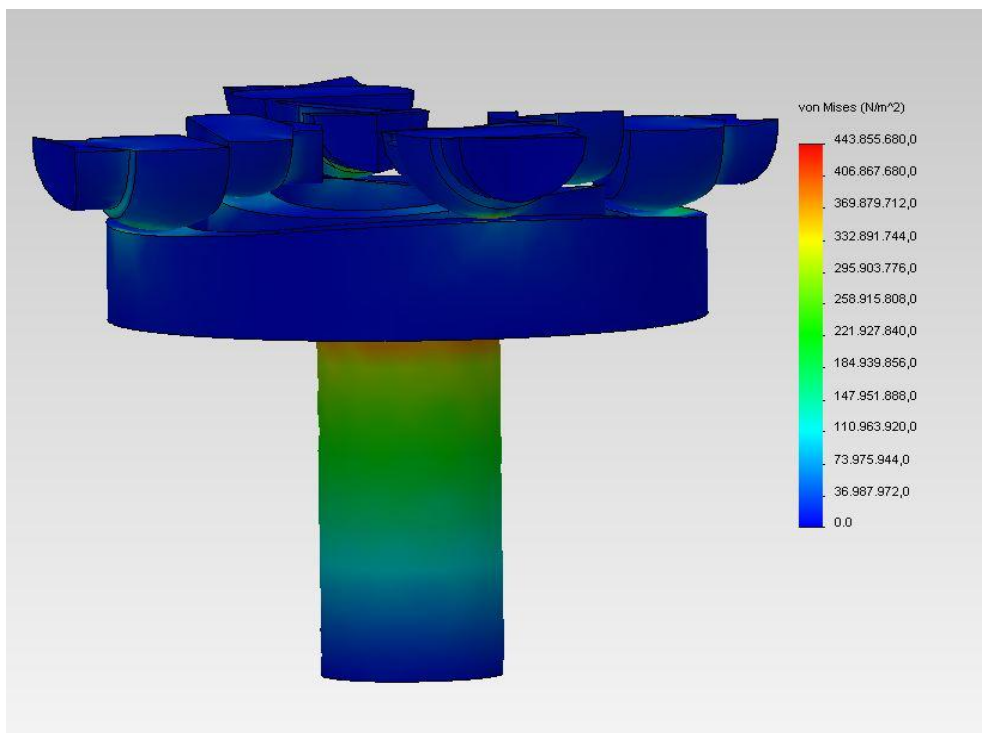
Εικ.6.19 Πεδίο παραμορφώσεων 2^{ου} σεναρίου φόρτισης

Σενάριο 3

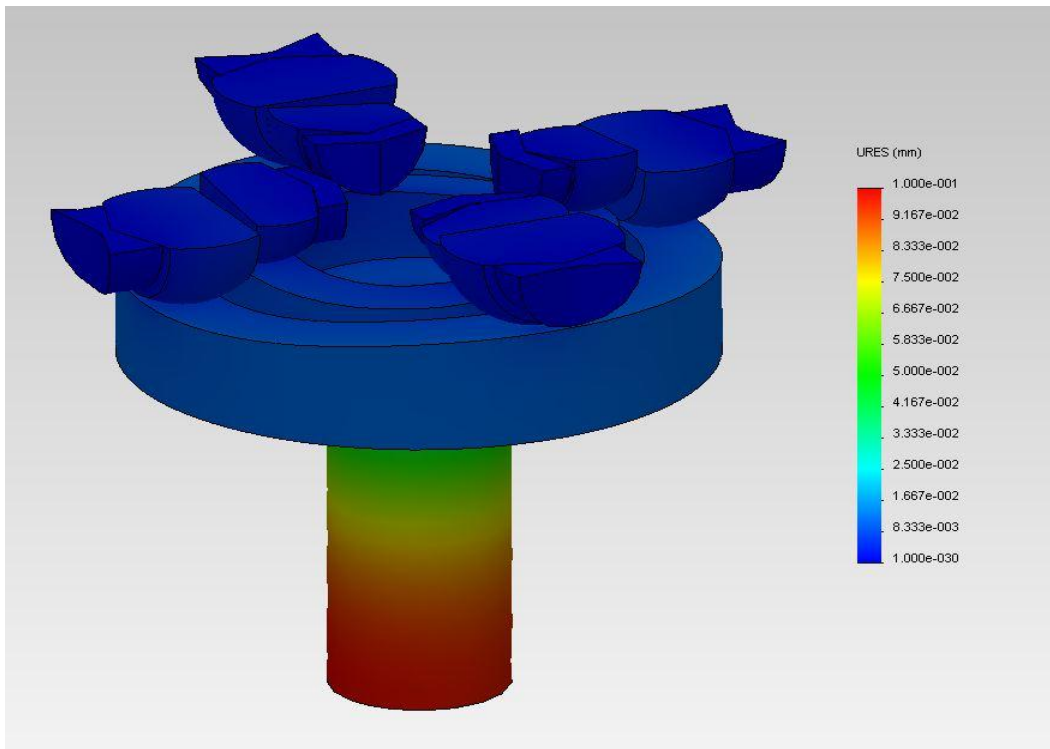
- Φόρτιση: 1100,5 Nm
- Κατανομή ροπής: 70-30 %



Εικ.6.20 Πεδίο τάσεων 3^{ου} σεναρίου φόρτισης



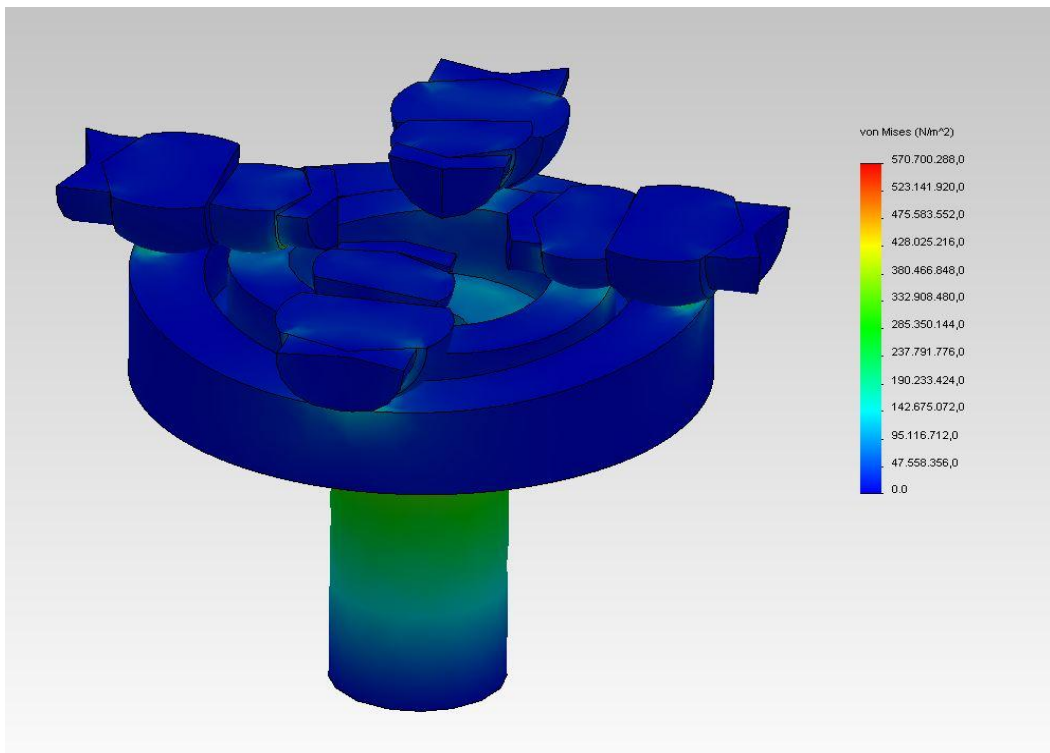
Εικ.6.21 Πεδίο τάσεων 3^{ου} σεναρίου φόρτισης



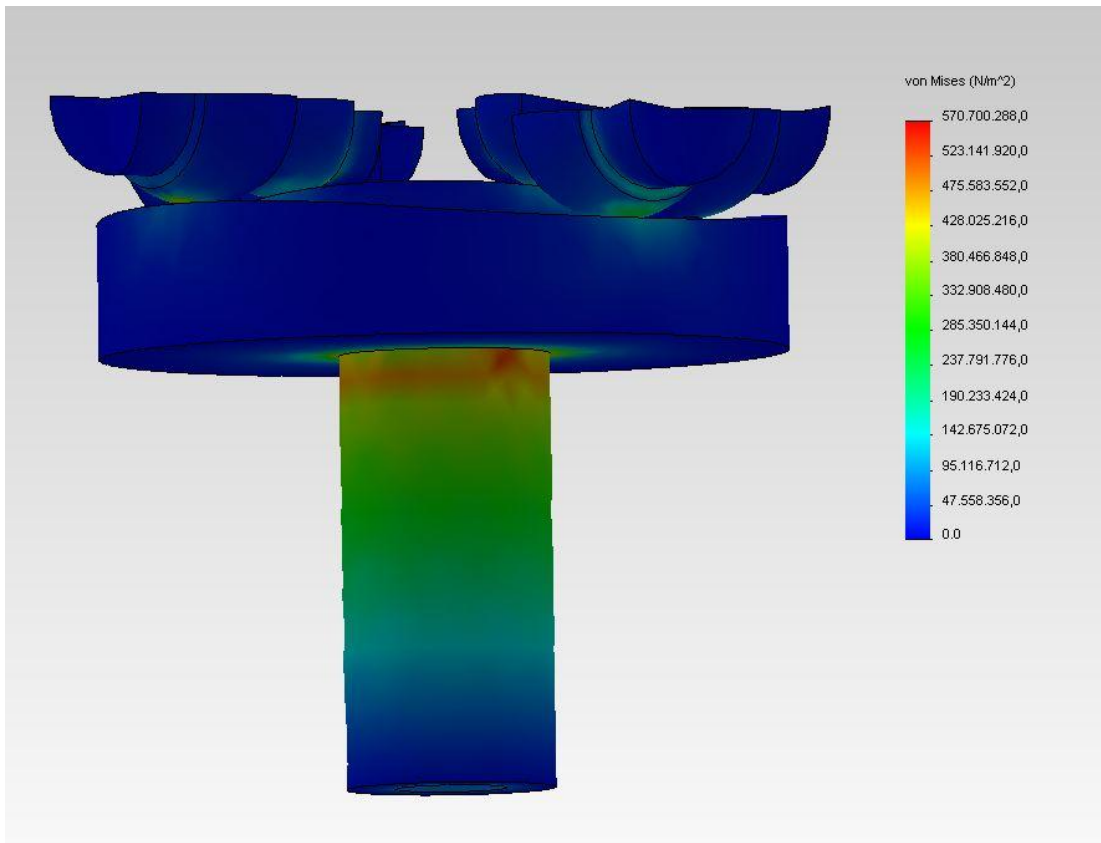
Εικ.6.22 Πεδίο παραμορφώσεων 3^{ου} σεναρίου φόρτισης

Σενάριο 4

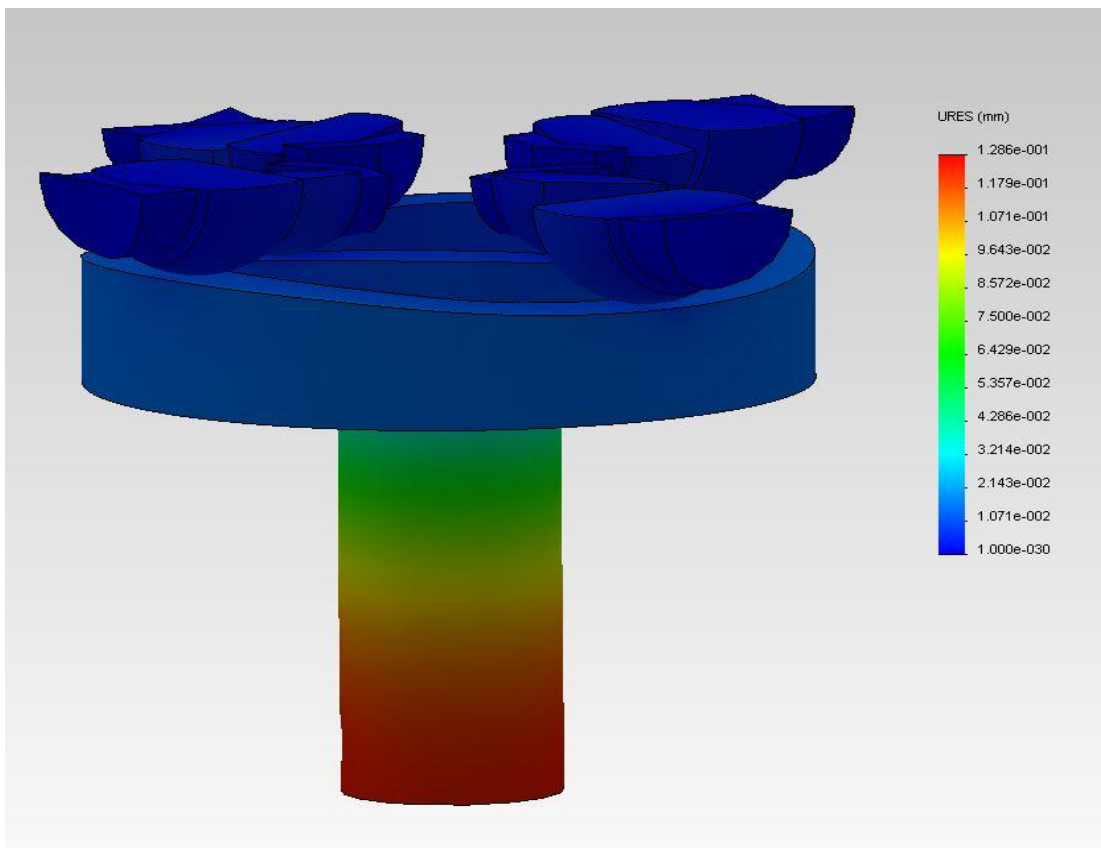
- Φόρτιση: 1415 Nm
- Κατανομή ροπής: 80-20 %



Εικ.6.23 Πεδίο τάσεων 4^{ου} σεναρίου φόρτισης



Εικ.6.24 Πεδίο τάσεων 4^{ου} σεναρίου φόρτισης



Εικ.6.25 Πεδίο παραμορφώσεων 4^{ου} σεναρίου φόρτισης

Οι απεικονίσεις των αποτελεσμάτων παρουσιάζουν:

1. Τις von Mises τάσεις ή ισοδύναμες ορθές τάσεις, οι οποίες αποτελούν μονόμετρο μέγεθος που υπολογίζεται από τον τανυστή των τάσεων. Διαρροή του υλικού εμφανίζεται όταν οι von Mises τάσεις ξεπεράσουν μια κρίσιμη τιμή που ονομάζεται όριο διαρροής.
2. Τις συνιστάμενες μετατοπίσεις

Παρατηρούμε πως οι μέγιστες von Mises τάσεις εμφανίζονται στις περιοχές που αναμενόταν να εμφανιστούν (εκεί όπου είχε πυκνωθεί το πλέγμα για την επίτευξη ακριβέστερων αποτελεσμάτων). Οι περιοχές αυτές είναι οι εξής:

1. Οι περιοχές του “λαιμού” της βάσης του πλανήτη. Η συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή αυτήν εμφανίζεται ,αφενός λόγω της συστροφής που τείνουν να δημιουργήσουν τα ημιαξόνια στον πλανήτη και αφετέρου λόγω της απότομης αλλαγής διατομών. Μια βελτιωμένη, από την σκοπιά των τάσεων, σχεδίαση θα μπορούσε να είναι η παρακάτω:

Συγκέντρωση Τάσεων



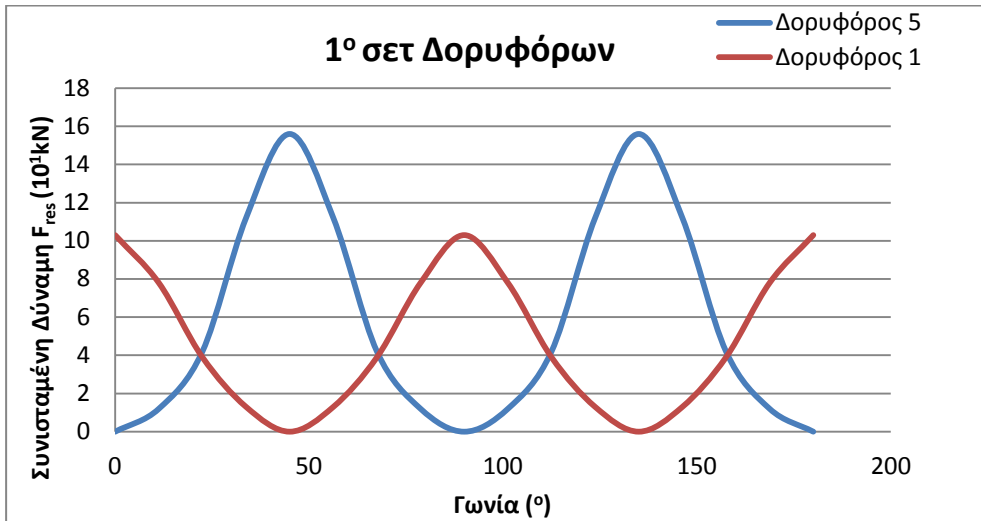
Εικ.6.26 Συγκέντρωση τάσεων

2. Οι περιοχές γύρω από τα σημεία επαφής δορυφόρων-πλανητών. Τα φορτία σε αυτές τις επιφάνειες είναι υψηλά καθώς η συνεργασία ολόκληρου του μηχανισμού του ένσφαιρου διαφορικού εντοπίζεται σε αυτές ακριβώς τις περιοχές.
3. Οι περιοχές γύρω από τις χαμηλότερες ακμές επαφής δορυφόρων-εδράσεων. Οι τάσεις που εμφανίζονται είναι υψηλές, καθώς αυτές οι ακμές στηρίζουν τη συνεργασία δορυφόρων-εδράσεων.

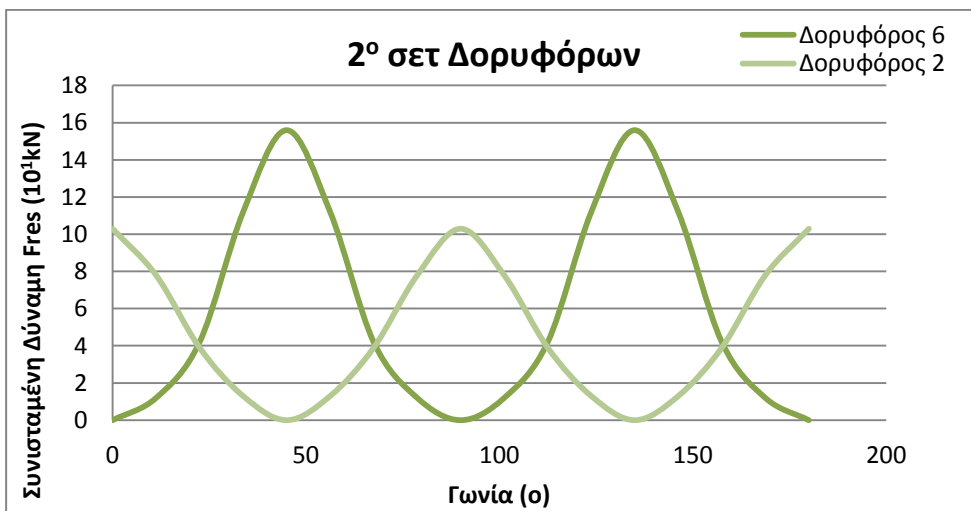
Οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται όπως είναι λογικό στα χαμηλότερα επίπεδα του “λαιμού” της βάσης του πλανήτη, λόγω της συστροφής που τείνουν να δημιουργήσουν τα ημιαξόνια στον πλανήτη.

Το σενάριο 4 αποτελεί το δυσμενέστερο σενάριο από την σκοπιά των τάσεων και των παραμορφώσεων. Στο σενάριο αυτό εξετάζουμε με τη βοήθεια του κατάλληλου εργαλείου του

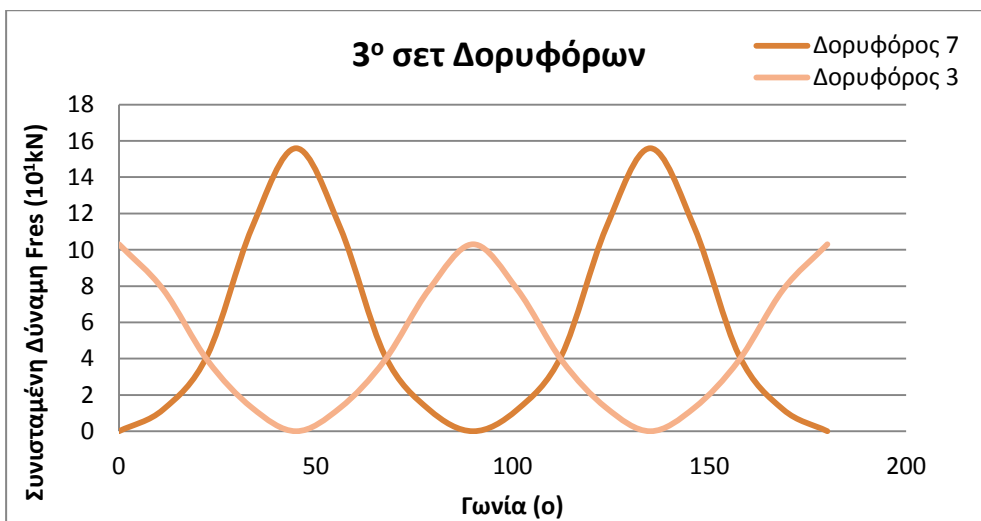
SolidWorks Simulation το μέτρο της συνισταμένης δύναμης αντίδρασης του επιπέδου επαφής (**Results Advisor, List Result Force, Reaction Force**) μεταξύ δορυφόρων και πλανητών.



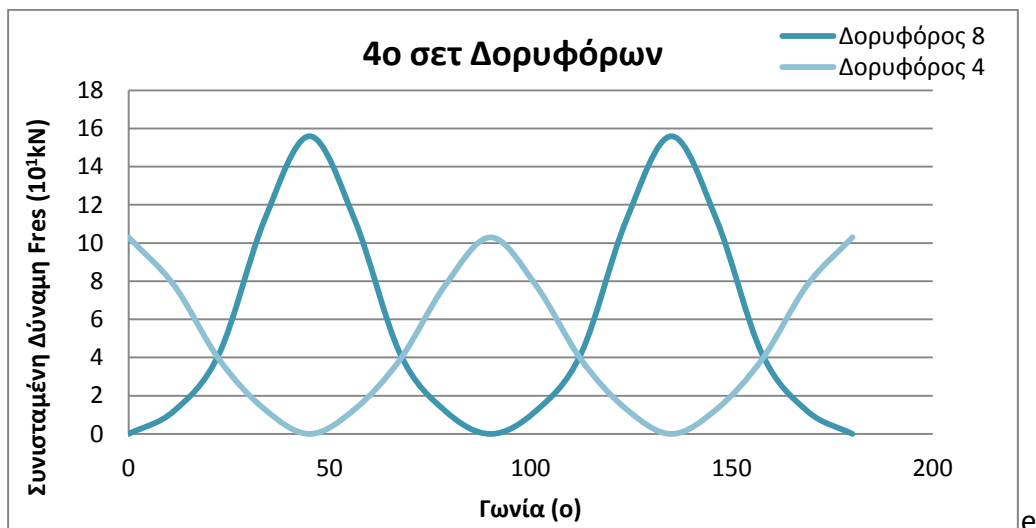
Εικ.6.27 Συνισταμένη δύναμη 1^{ου} σετ δορυφόρων



Εικ.6.28 Συνισταμένη δύναμη 2^{ου} σετ δορυφόρων



Εικ.6.29 Συνισταμένη δύναμη 3^{ου} σετ δορυφόρων



Εικ.6.30 Συνισταμένη δύναμη 4^{ου} σετ δορυφόρων

Τα προηγούμενα διαγράμματα έχουν δημιουργηθεί με παρεμβολή πολυωνύμου και εν συνεχεία ομαλοποίηση των καμπυλών, καθώς τα δεδομένα που προκύπτουν από τη στατική ανάλυση δεν επαρκούν για τη δημιουργία καμπυλών υψηλής ακρίβειας.

Παρατηρούμε πως η διαφορά φάσης μεταξύ των δυνάμεων των δορυφόρων 1-5, 2-6 κ.ο.κ. είναι 45° και μεταξύ των δυνάμεων των δορυφόρων 1-2, 2-3 κ.ο.κ. είναι 0° . Η μηδενική αυτή διαφορά φάσης προκύπτει (εν αντιθέση με τη σχεδιαστική διαφορά φάσης των 90°) λόγω της αποτύπωσης του μέτρου της συνισταμένης δύναμης στα διαγράμματα αυτά.

Οι μέγιστες συνιστώσες δυνάμεων F_x , F_y , F_z που εμφανίζονται είναι:

- $\text{Max } F_x = 0,000583 \text{ kN}$
- $\text{Max } F_y = 15,6 \text{ kN}$
- $\text{Max } F_z = 0,00127 \text{ kN}$

Υπό κανονικές συνθήκες οι F_x , F_z θα έπρεπε να είναι μηδενικές, καθώς η αντίδραση του επιπέδου έχει μόνα κάθετη συνιστώσα F_y . Αυτό όμως δεν συμβαίνει λόγω ανομοιομορφίας του πλέγματος, η οποία προκαλεί σχεδόν αμελητέα σχετική αστάθεια στο μοντέλο.

Μετά και από την ανάλυση αυτή μπορούμε να προχωρήσουμε στη δημιουργία του κινηματικού μοντέλου ανάλυσης, αξιοποιώντας κατάλληλα τα δεδομένα δυνάμεων αντίδρασης που εξάγαμε.

6.3 Κινηματική Ανάλυση Ένσφαιρου Διαφορικού

Για την κινηματική ανάλυση του ένσφαιρου διαφορικού χρησιμοποιούμε την πλατφόρμα SolidWorks Motion, η οποία παρέχει δυνατότητες προσομοίωσης της κίνησης ενός μηχανισμού, ελέγχοντας με τον τρόπο αυτόν την όμαλη και επιδιωκόμενη λειτουργία του. Παράλληλα ενσωματώνουμε στην πλατφόρμα αυτήν και το SolidWorks Simulation καθώς επιδιώκουμε την ταυτόχρονη ανάλυση του μοντέλου με πεπερασμένα στοιχεία.

Η κινηματική ανάλυση ολόκληρου του μοντέλου δεν θα είχε όμως ιδιαίτερο νόημα καθώς:

1. τα κινούμενα μέρη που αξίζει να μελετηθούν κινηματικά είναι οι δορυφόροι και οι πλανήτες.
2. το πλήρες μοντέλο του ένσφαιρου διαφορικού θα απαιτούσε εξαιρετικά υψηλή υπολογιστική ισχύ.
3. η πλεγματοποίηση του πλήρους μοντέλου θα ήταν σαφώς ανομοιορφότερη αυτής ενός κατάλληλου απλοποιημένου μοντέλου και κατά συνέπεια θα οδηγούμασταν σε λιγότερο ακρινή αποτελέσματα.

Για όλους αυτούς τους λόγους οδηγούμαστε στη δημιουργία δύο νέων απλοποιημένων μοντέλου. Το κάθε μοντέλο θα παρουσιάζει τη συνεργασία των δορυφόρων 1, 5 με τα αντίστοιχα αναπτύγματα των τροχιών του πλανήτη με τα οποία συνεργάζονται.

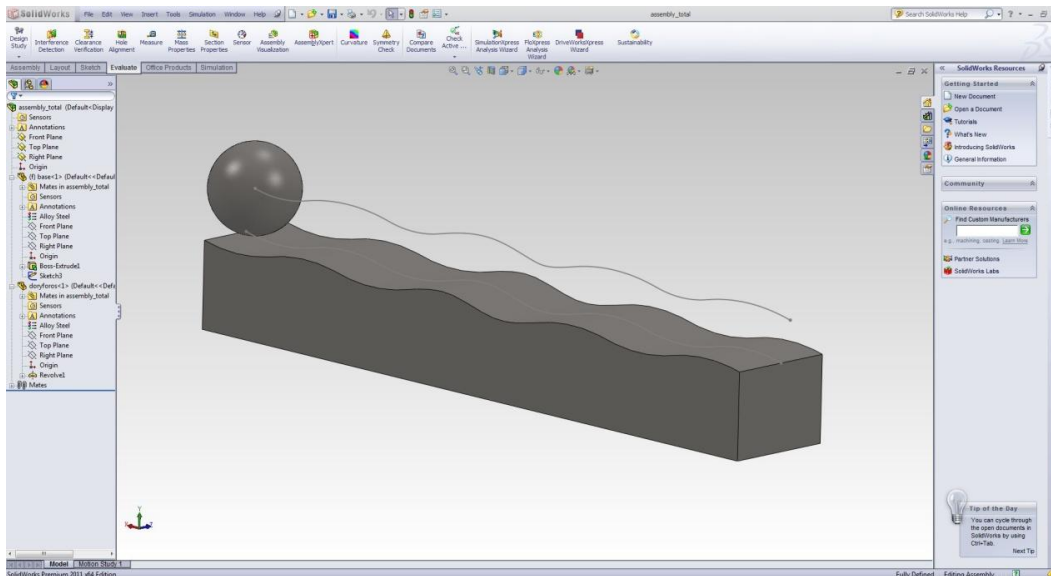
Για την επίτευξη ακόμη καλύτερης πλεγματοποίησης απλοποιούμε τη γεωμετρία των δορυφόρων παρουσιάζοντάς τους ως σφαίρες. Η απλοποίηση αυτή δεν επηρεάζει την ακρίβεια του μοντέλου, καθώς οι διαφορές σφαίρας-δορυφόρου εντοπίζονται μακριά από το σημείο συνεργασίας δορυφόρου- πλανήτη, η ευρύτερη περιοχή του οποίου αποτελεί την εστία εμφάνισης υψηλών τάσεων.

Η κινηματική ανάλυση του ένσφαιρου διαφορικού θα πραγματοποιηθεί μόνο για το δυσμενέστερο σενάριο φόρτισης, όπου η κατανομή του ροπής είναι 80-20 % στους δύο πλανήτες. Τα φορτία- συνισταμένες δυνάμεις που προέκυψαν από τη στατική ανάλυση θα εφαρμοστούν κατά την αντίστοιχη κινηματική. Αυτή η προσέγγιση καθιστά τη μελέτη μας συντηρητική, καθώς το ένσφαιρο διαφορικό επ' ουδενί δεν λειτουργεί επί μονίμου βάσεως στο μέγιστό του φορτίο. Παρόλα αυτά η κινηματική ανάλυση είναι απαραίτητη, καθώς μας αποδεικνύει τις δυνατότητες του ένσφαιρου διαφορικού.

Στηριζόμενοι στις προαναφερθείσες αρχές σχεδιασμού του μοντέλου και υλοποίησης της ανάλυσης, δημιουργούμε το πρώτο κινηματικό μοντέλο στο περιβάλλον του SolidWorks . Εν συνέχεια το εισάγουμε στο SolidWorks Motion με στόχο την υλοποίηση της ζητούμενης κινηματικής μελέτης.

Το μοντέλο αποτυπώνει την κύλιση-συνεργασία (**Path Mate**) του 1^{ου} δορυφόρου-σφαίρας με το αντίστοιχο ανάπτυγμα της επιφάνειας του πλανήτη. Το ανάπτυγμα αυτό έχει διπλασιαστεί κατά μήκος για λόγους οπτικής αποτύπωσης.

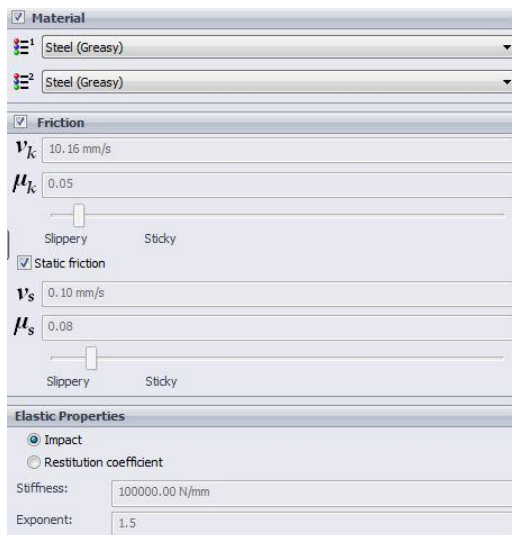
Λόγω περιοδικότητας της κίνησης, η μελέτη αυτή αντικατοπτρίζει τη λειτουργία των δορυφόρων 1,2,3 και 4.



Εικ.6.31 1^ο κινηματικό μοντέλο στο περιβάλλον του SolidWorks Motion

Βασικό στάδιο της υλοποίησης της κινηματικής ανάλυσης του 1^{ου} είναι ο ορισμός των συνθηκών κίνησης, των συνθηκών φόρτισης και των οριακών συνθηκών- συνθηκών επαφής του μοντέλου. Οι συνθήκες αυτές είναι οι εξής:

1. Μεταξύ της σφαίρας (δορυφόρου) και επιπέδου (πλανήτη) εφαρμόζεται μια δύναμη δράσης –αντίδρασης (**Action & reaction**). Το μέτρο της δύναμης αυτής καθορίζεται από τα δεδομένα που εξάγαμε από τη στατική ανάλυση για το συγκεκριμένο δορυφόρο. Εισάγοντας λοιπόν τα δεδομένα αυτά στο Solidworks Motion επιτυγχάνουμε την επιθυμητή φόρτιση.
2. Ορίζουμε συνθήκες επαφής μεταξύ σφαίρας και επιπέδου, επιλέγοντας κατάλληλους συντελεστές τριβής μεταξύ λιπαρών χαλύβδινων επιφανειών.



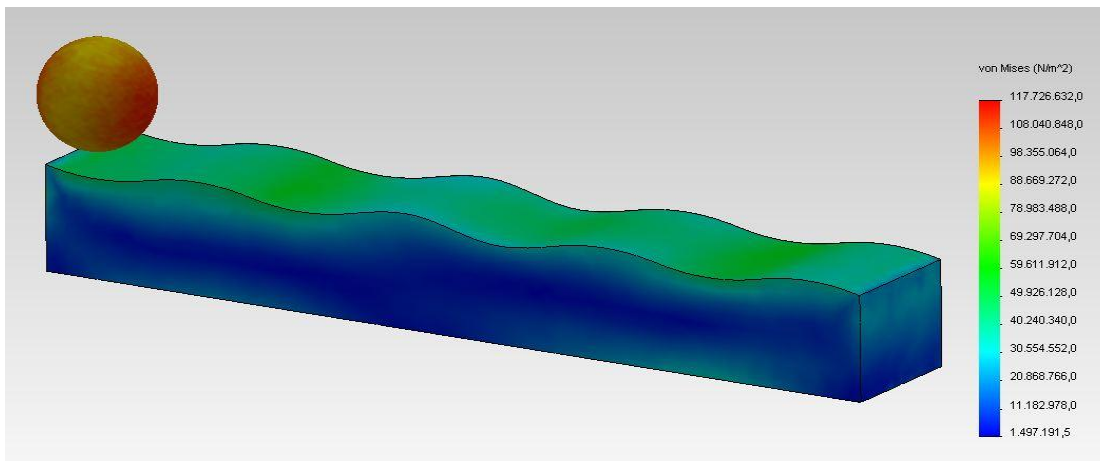
Εικ.6.32 Ορισμός συνθηκών επαφής στο περιβάλλον του SolidWorks Motion

3. Εισάγουμε εικονικό “κινητήρα” (**Path Mate Motor**), ο οποίος υλοποιεί την κίνηση της σφαίρας κατά την επιθυμητή σχεδιασμένη τροχιά. Επιλέγουμε σταθερή ταχύτητα

κίνησης (**Constant Speed**). Η γραμμική αυτή ταχύτητα προσεγγίζει τα 350 mm/s λόγω κατανομής της ροπής 80-20% και $n_{\text{ΚΟΡΩΝΑΣ}} = 256,5 \text{ rpm}$.

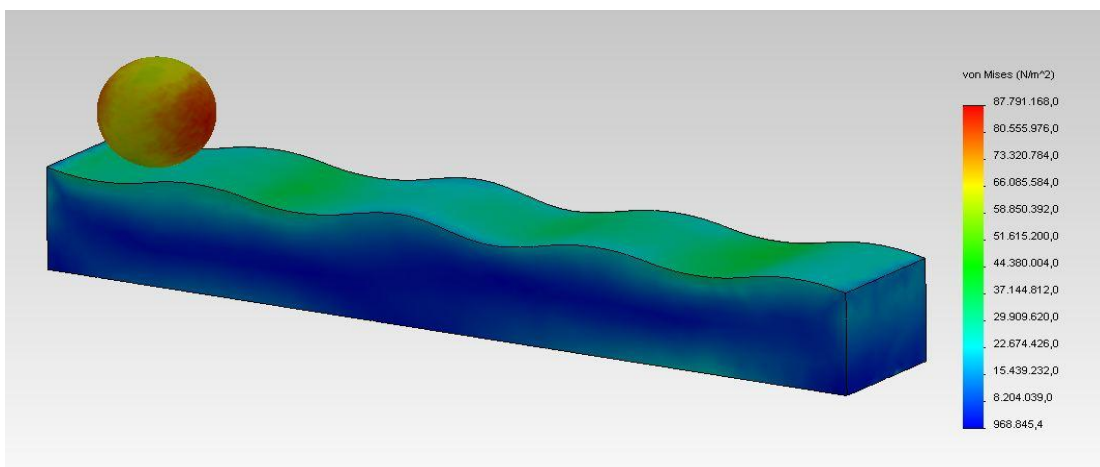
Μετά τον ορισμό των παραπάνω συνθηκών επιλέγουμε, μέσω του ενσωματωμένου (στο SolidWorks Motion) SolidWorks Simulation, αυτόματη πλεγματοποίηση. Τέτοιου τύπου πλεγματοποίηση ενδείκνυται στην προκειμένη περίπτωση λόγω της απλής γεωμετρίας του μοντέλου. Με το πέρας της δημιουργίας πλέγματος το κινηματικό μοντέλο εκτελείται και εξάγονται τα παρακάτω αποτελέσματα σε χαρακτηριστικά στιγμιότυπα:

0 sec



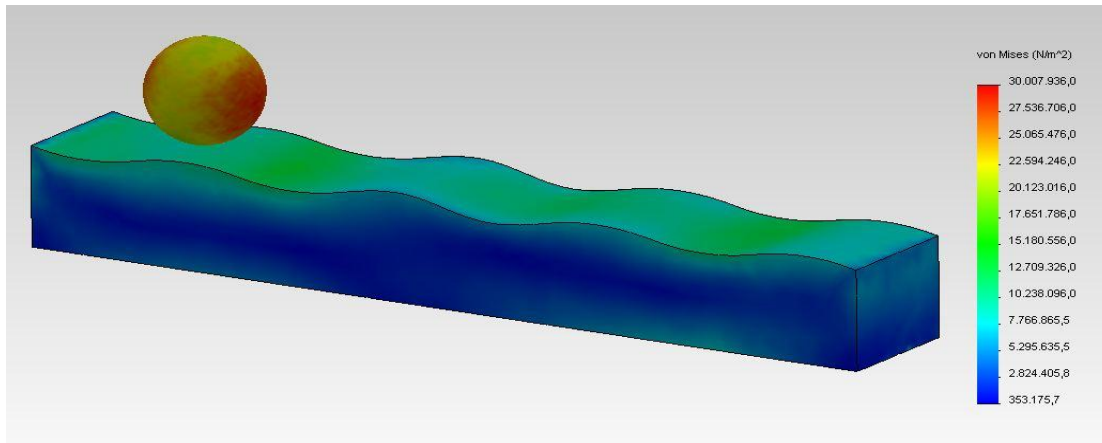
Εικ.6.33 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0 sec

0,05 sec

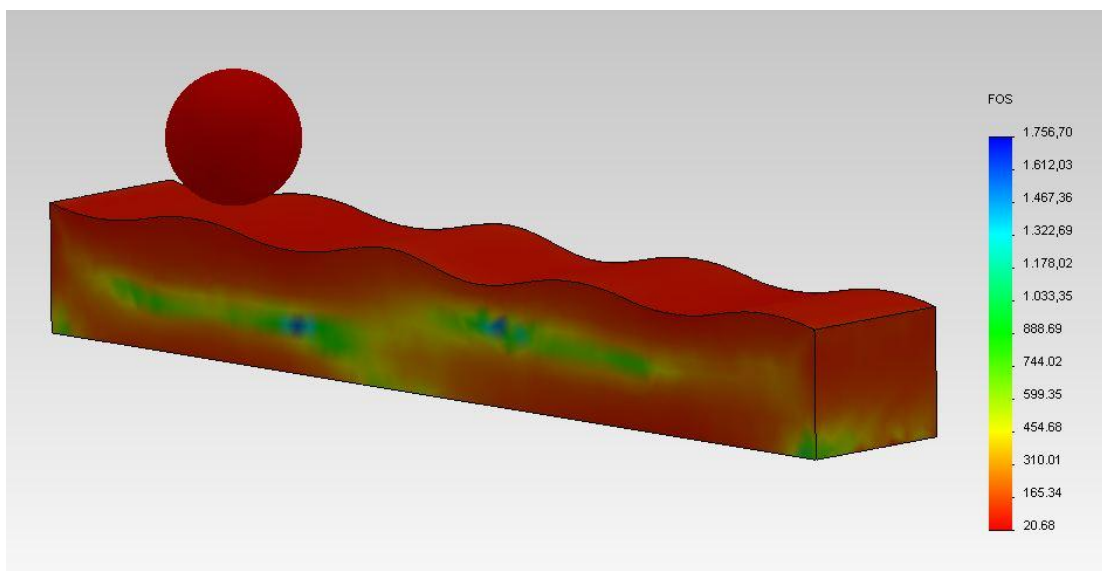


Εικ.6.34 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0,05 sec

0,1 sec

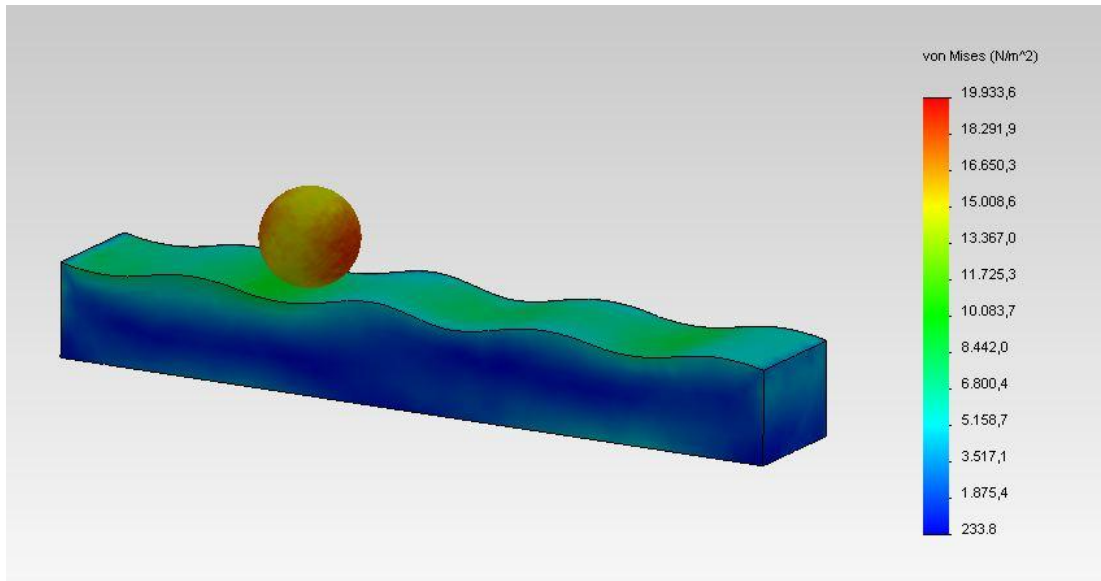


Εικ.6.35 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0,1 sec



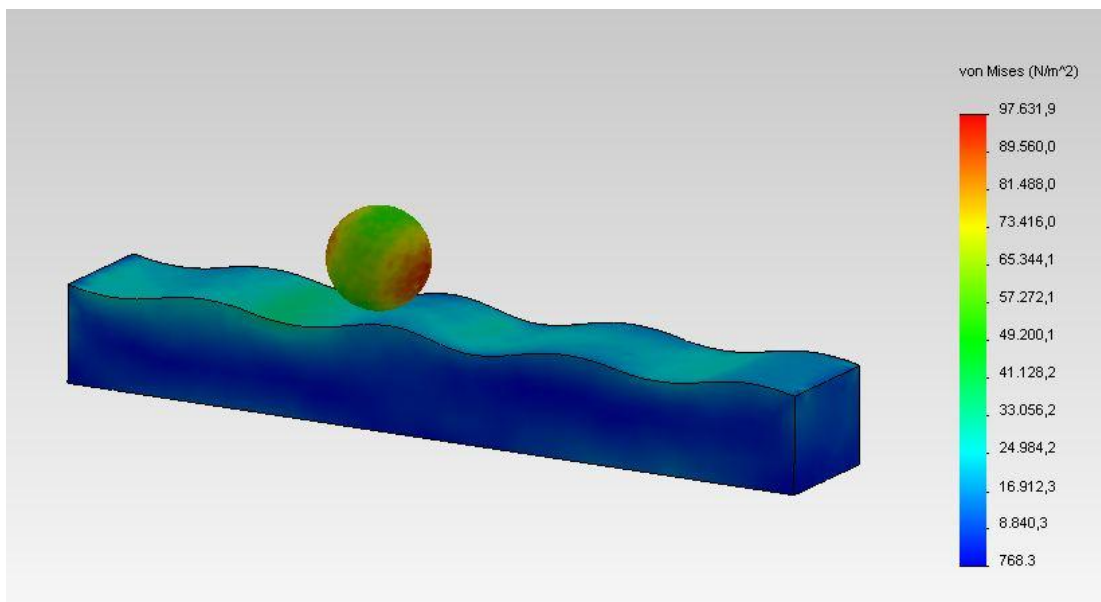
Εικ.6.36 Συντελεστής ασφαλείας μοντέλου στο στιγμιότυπο των 0,1 sec

0,15 sec

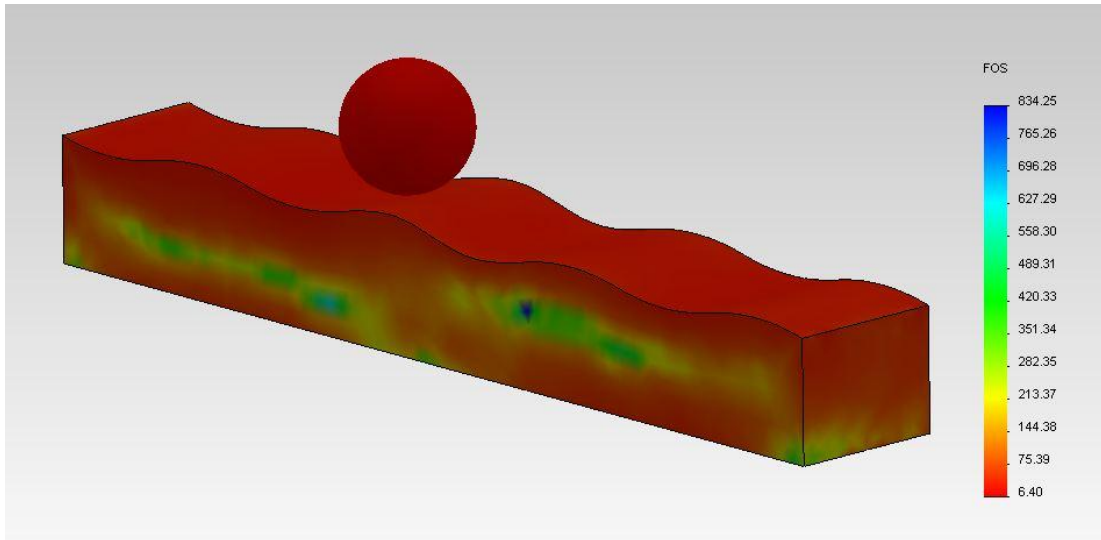


Εικ.6.37 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0,15 sec

0,2 sec

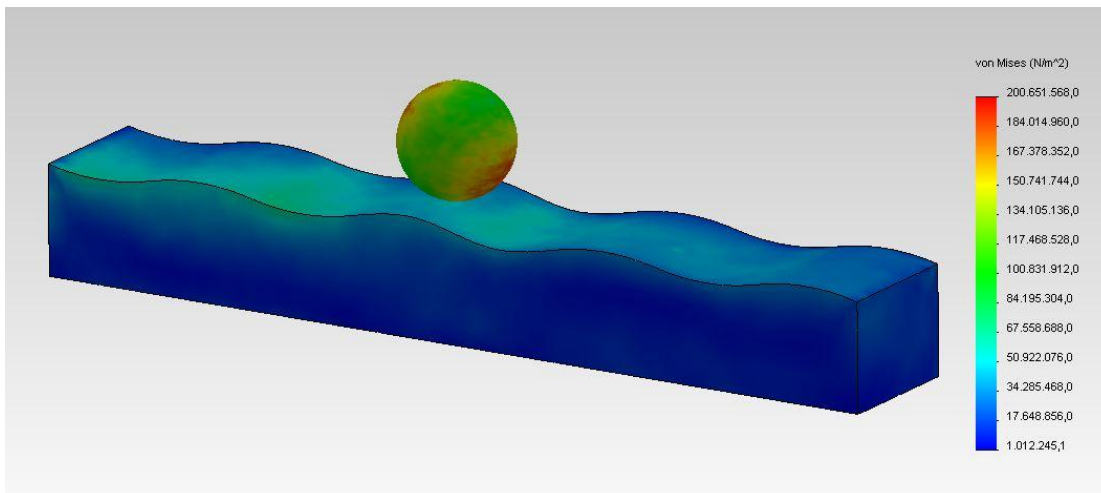


Εικ.6.38 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0,2 sec



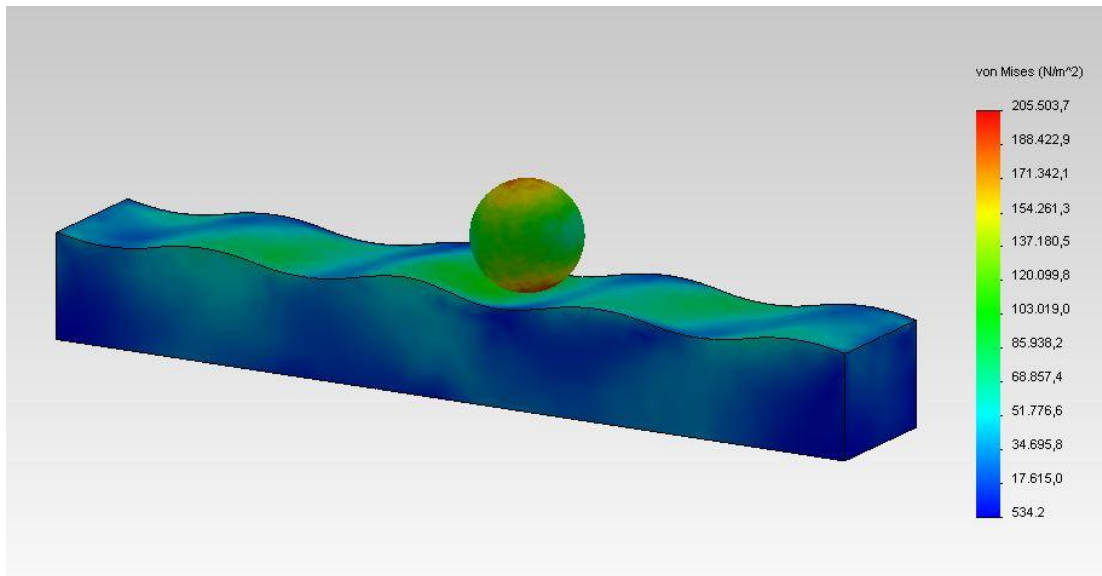
Εικ. 6.39 Συντελεστής ασφαλείας μοντέλου στο στιγμιότυπο των 0,2 sec

0,25 sec

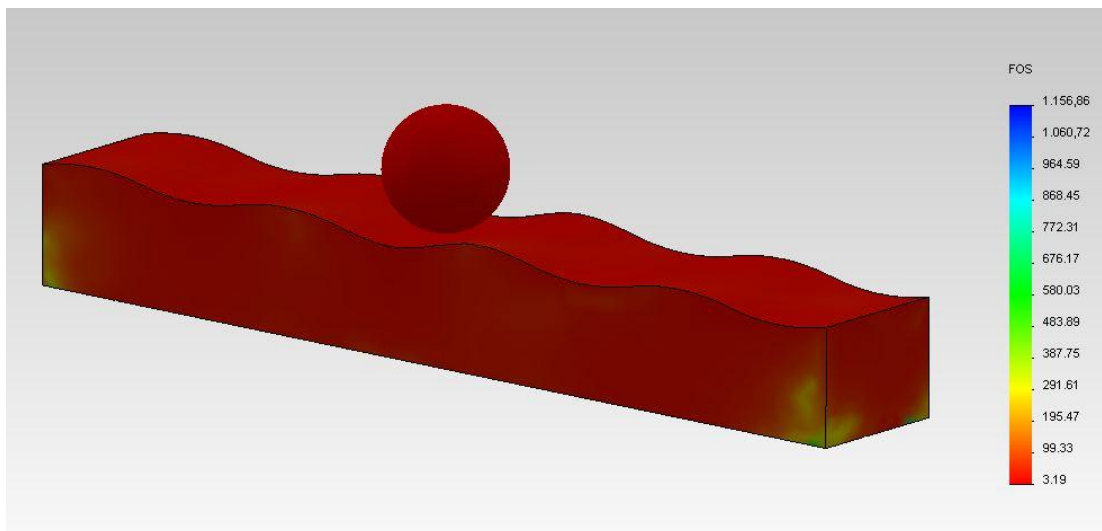


Εικ.6.40 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0,25 sec

0,3 sec

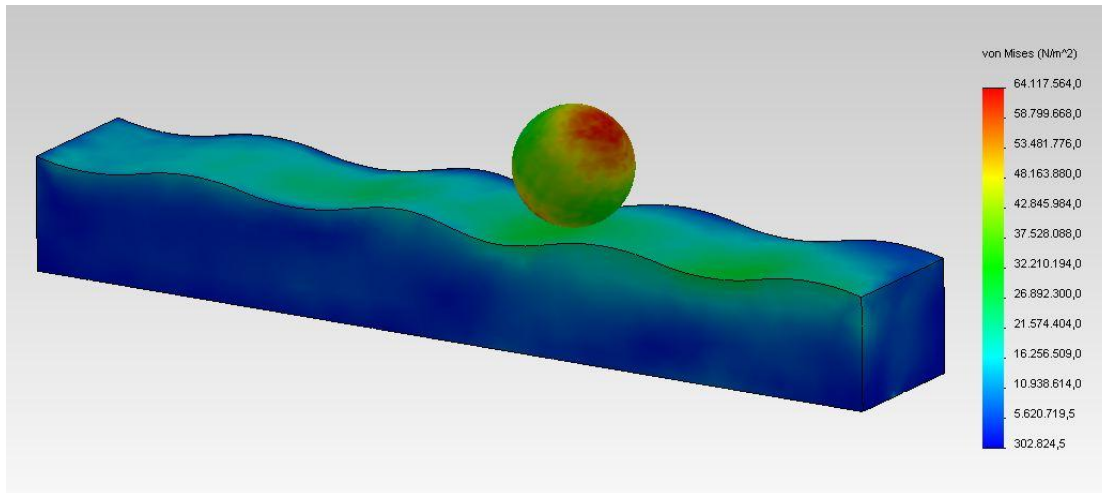


Εικ.6.41 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0,3 sec



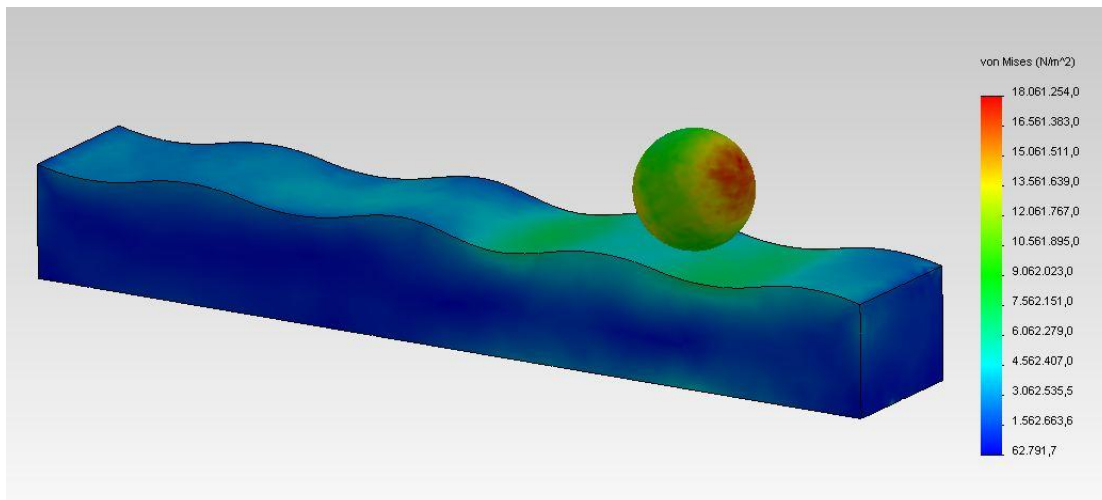
Εικ.6.42 Συντελεστής ασφαλείας μοντέλου στο στιγμιότυπο των 0,3 sec

0,35 sec



Εικ.6.43 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0,35 sec

0,4 sec

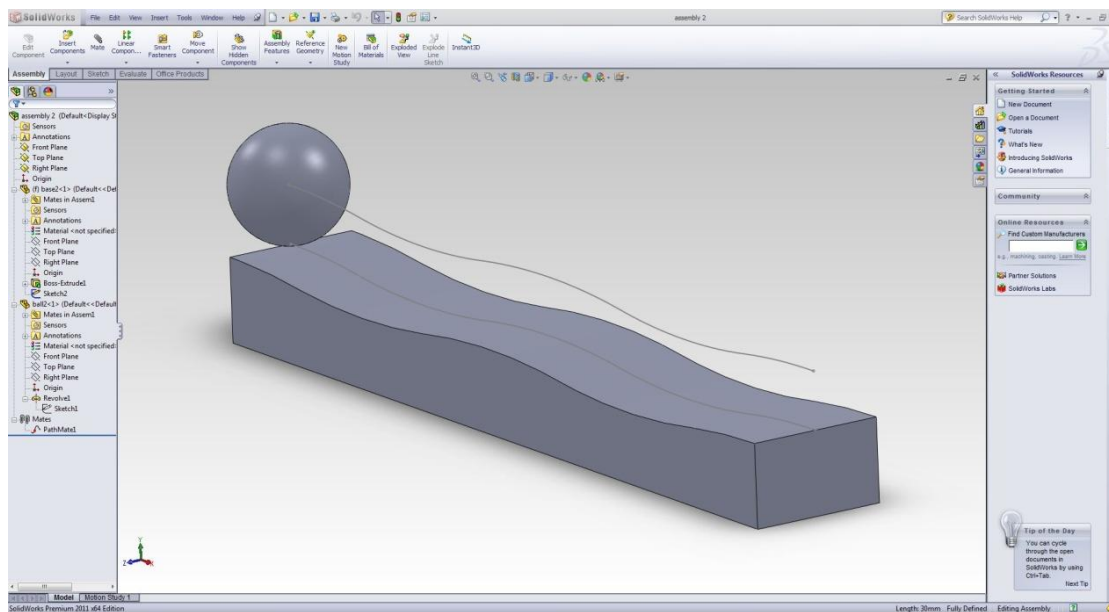


Εικ.6.44 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0,4 sec

Με ανάλογο τρόπο εργαζόμαστε και για τη δημιουργία του 2^{ου} κινηματικού μοντέλου.

Δημιουργούμε το δεύτερο κινηματικό μοντέλο στο περιβάλλον του SolidWorks . Εν συνεχεία το εισάγουμε στο SolidWorks Motion με στόχο την υλοποίηση της ζητούμενης κινηματικής μελέτης. Το μοντέλο αποτυπώνει την κύλιση-συνεργασία (**Path Mate**) του 5^{ου} δορυφόρου-σφαίρας με το αντίστοιχο ανάπτυγμα της επιφάνειας του πλανήτη.

Λόγω περιοδικότητας της κίνησης, η μελέτη αυτή αντικατοπτρίζει τη λειτουργία των δορυφόρων 5,6,7 και 8.



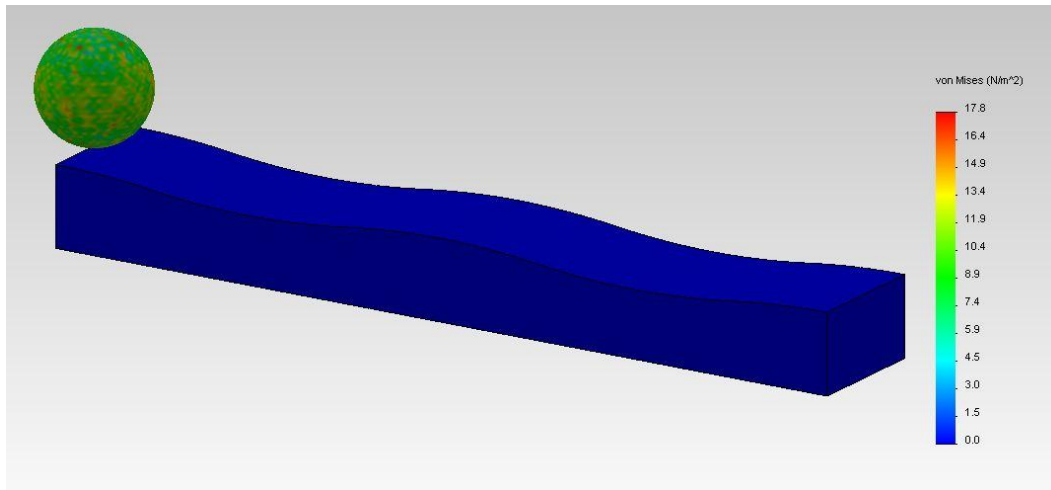
Εικ.6.45 2^ο κινηματικό μοντέλο στο περιβάλλον του SolidWorks Motion

Για την υλοποίηση του δεύτερου κινηματικού μοντέλου ορίζουμε ανάλογες συνθήκες με το πρώτο. Οι συνθήκες αυτές είναι οι εξής:

1. Μεταξύ της σφαίρας (δορυφόρου) και επιπέδου (πλανήτη) εφαρμόζεται μια δύναμης δράσης-αντίδρασης (**Action & reaction**), της οποίας το μέτρο καθορίζεται από τα δεδομένα που εξάγαμε από τη στατική ανάλυση. Εισάγοντας λοιπόν τα δεδομένα φόρτισης αυτά στο Solidworks Motion επιτυγχάνουμε την επιθυμητή φόρτιση.
2. Ορίζουμε συνθήκες επαφής μεταξύ σφαίρας και επιπέδου, όμοιες με του 1^{ου} κινηματικού μοντέλου.
3. Εισάγουμε εικονικό “κινητήρα” (**Path Mate Motor**), ο οποίος υλοποιεί την κίνηση της σφαίρας κατά την επιθυμητή σχεδιασμένη τροχιά. Επιλέγουμε σταθερή ταχύτητα κίνησης (**Constant Speed**). Η γραμμική αυτή ταχύτητα προσεγγίζει τα 400 mm/s (μεγαλύτερη από του 1^{ου} μοντέλου λόγω μεγαλύτερης ακτίνας τροχιάς) λόγω κατανομής ροπής 80-20% και $\eta_{\text{ΚΟΡΩΝΑΣ}} = 256,5 \text{ rpm}$.

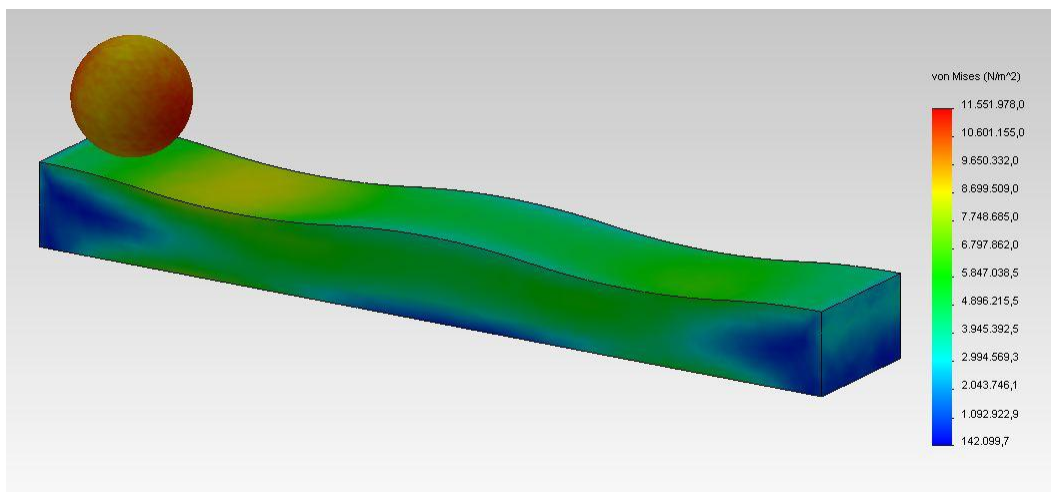
Μετά τον ορισμό των παραπάνω συνθηκών επιλέγουμε αυτόματη πλεγματοποίηση του κινηματικού μοντέλου, το οποίο εκτελείται, εξάγοντας τα παρακάτω αποτελέσματα σε χαρακτηριστικά στιγμιότυπα:

0 sec



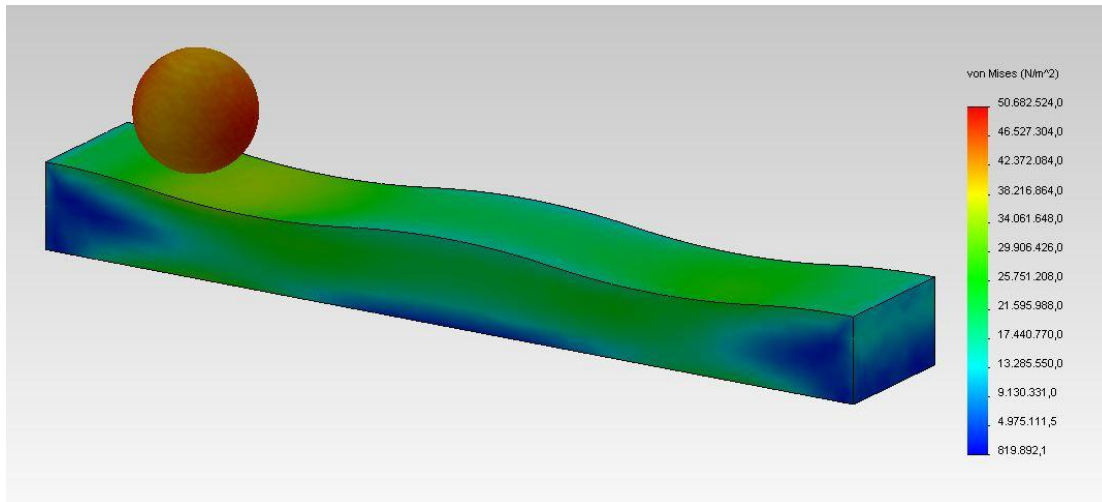
Εικ.6.46 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0 sec

0,05 sec

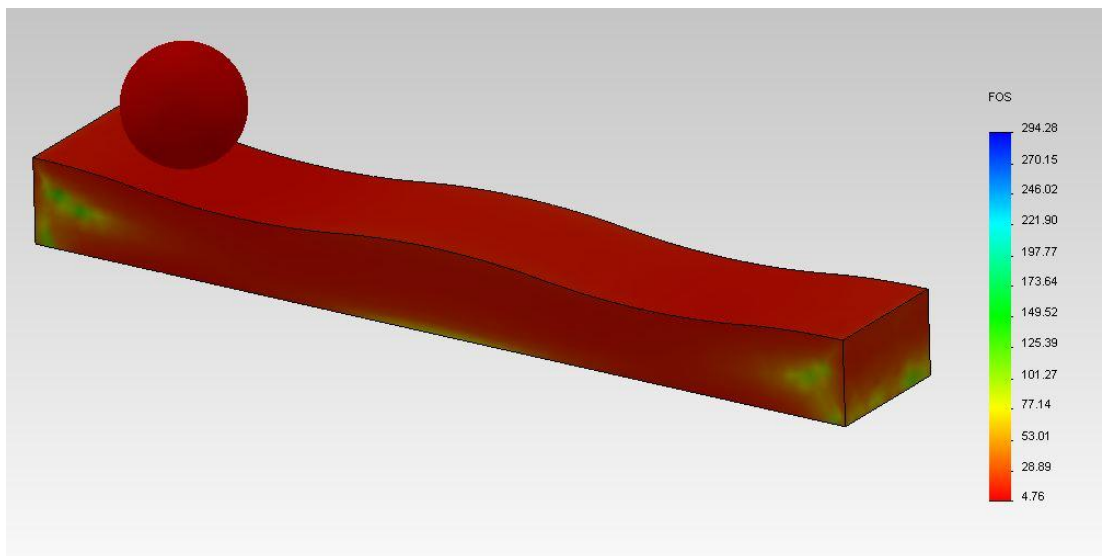


Εικ.6.47 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0,05 sec

0,1 sec

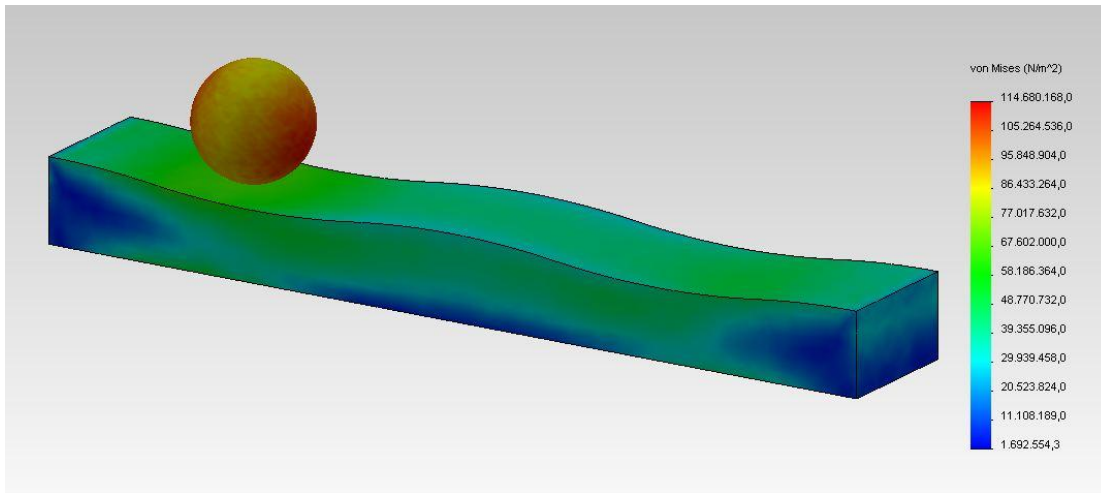


Εικ.6.48 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0,1 sec



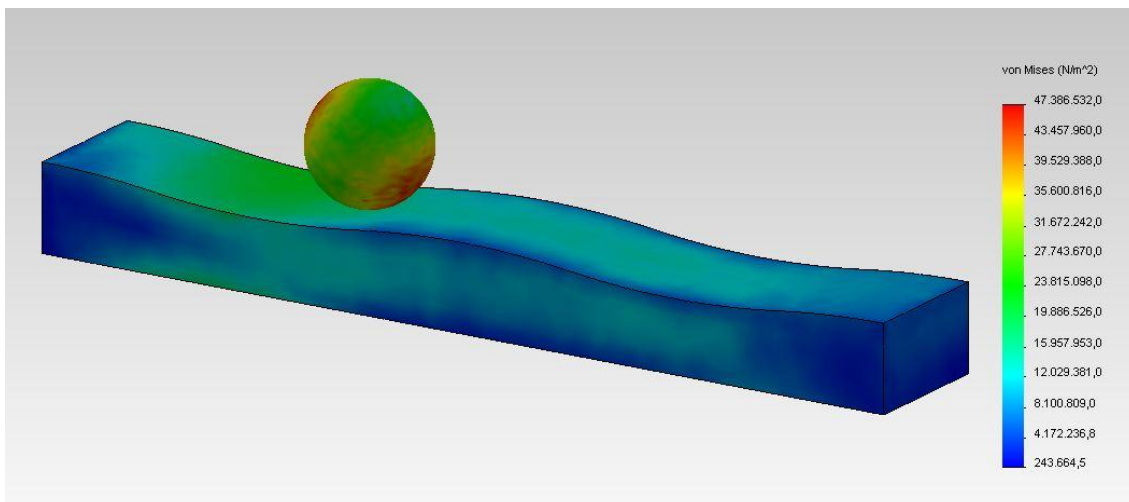
Εικ.6.49 Συντελεστής ασφαλείας μοντέλου στο στιγμιότυπο των 0,1 sec

0,15 sec

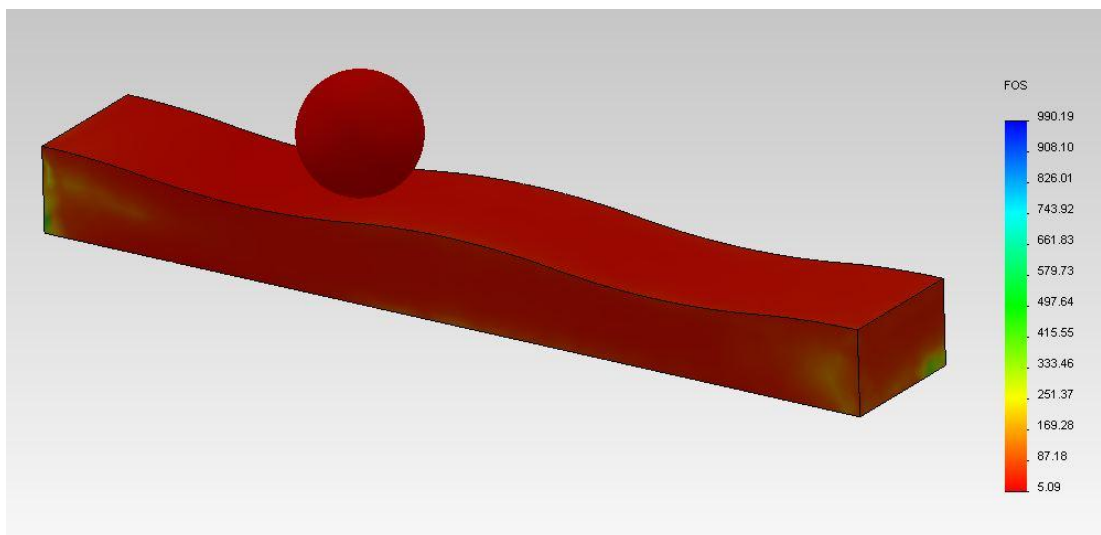


Εικ.6.50 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0,15 sec

0,2 sec

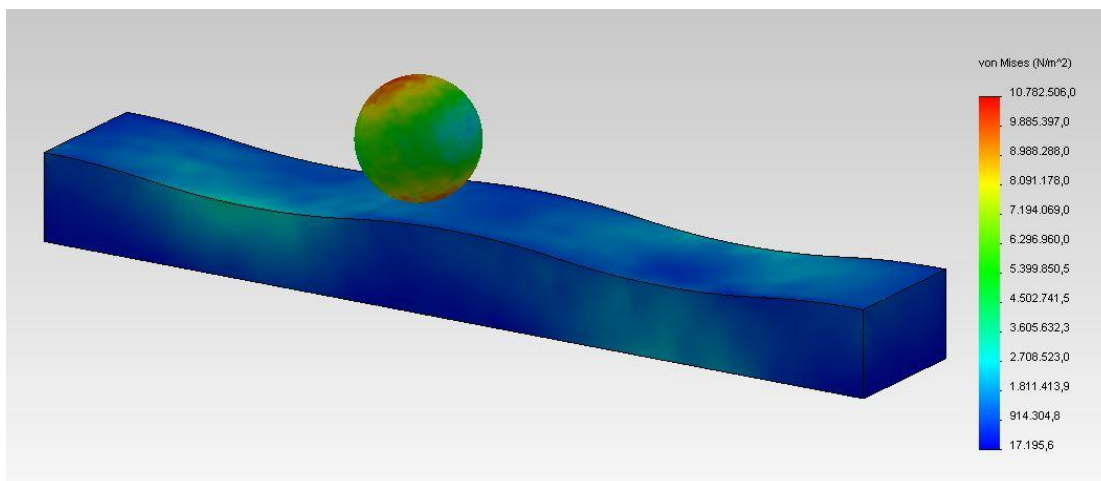


Εικ.6.51 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0,2 sec



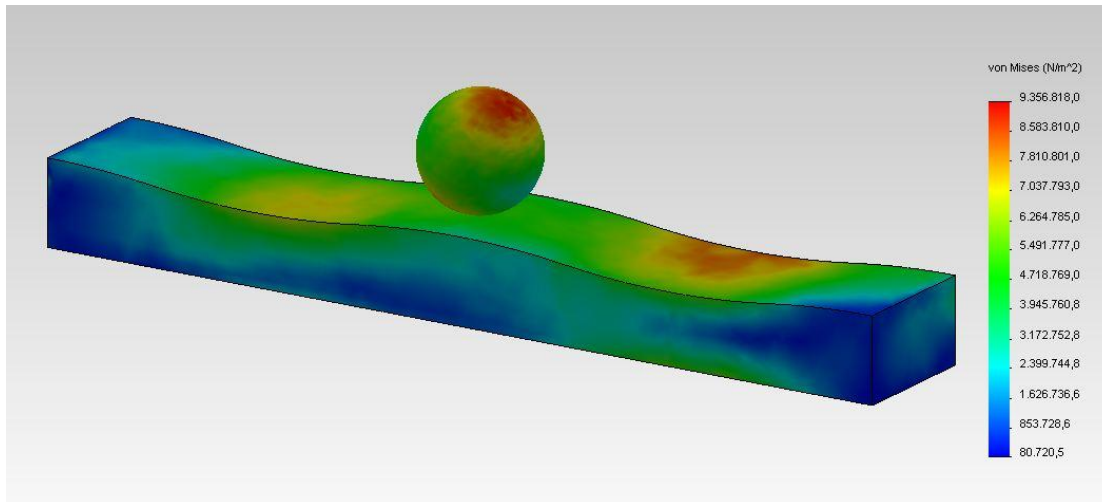
Εικ.6.52 Συντελεστής ασφαλείας μοντέλου στο στιγμιότυπο των 0,2 sec

0,25 sec

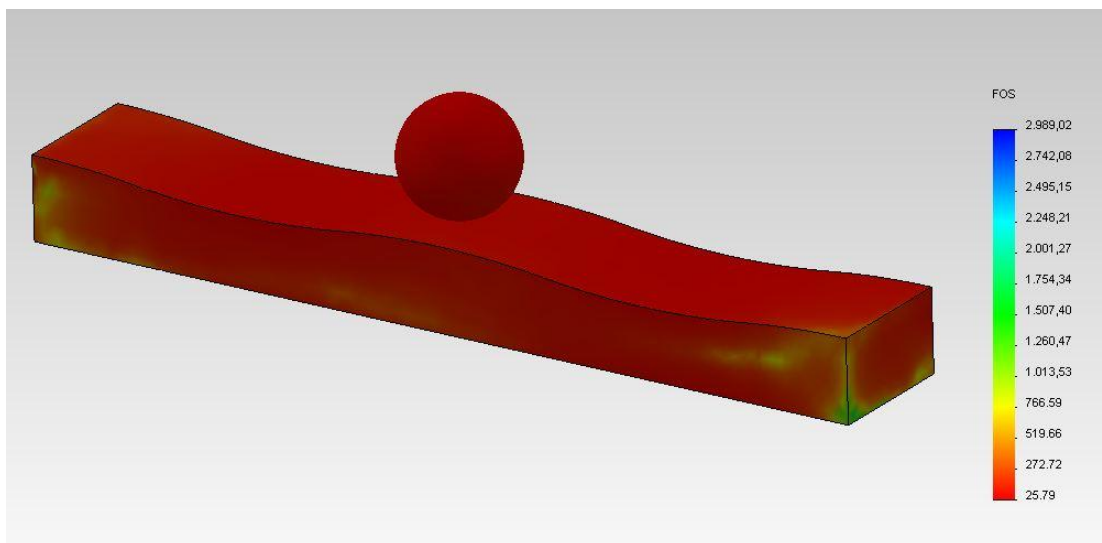


Εικ.6.53 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0,25 sec

0,3 sec

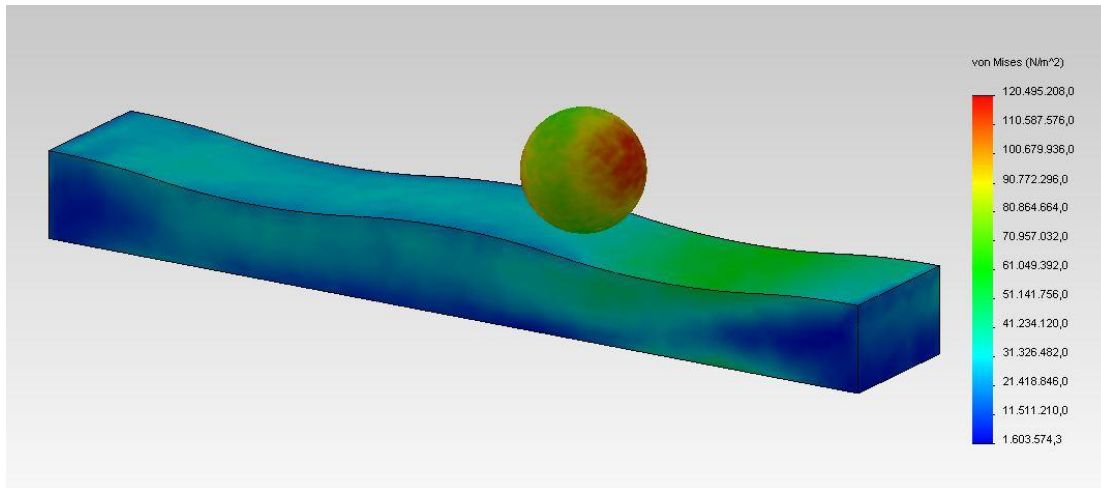


Εικ.6.54 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0,3 sec



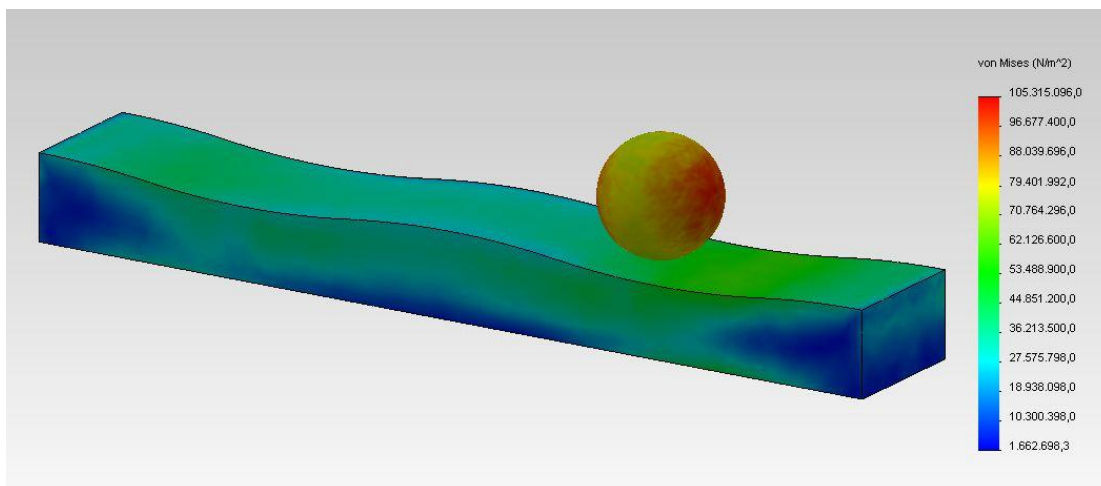
Εικ.6.55 Συντελεστής ασφαλείας μοντέλου στο στιγμιότυπο των 0,3 sec

0,35 sec



Εικ.6.56 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0,35 sec

0,4 sec



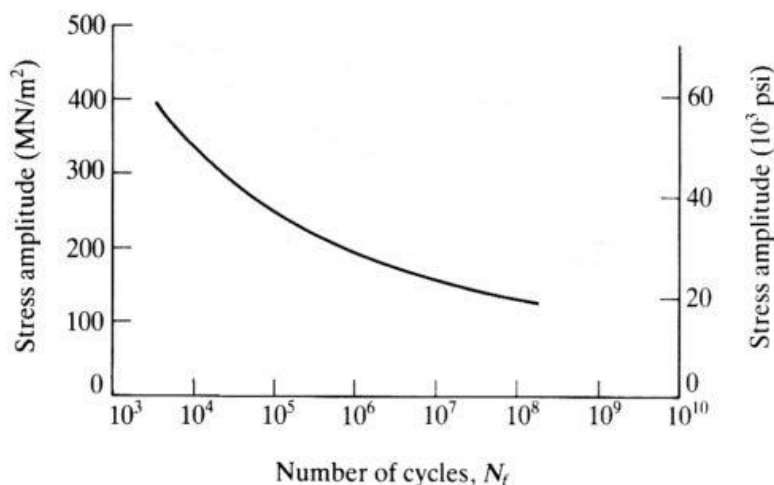
Εικ.6.57 Κινηματικό μοντέλο στο στιγμιότυπο των 0,4 sec

Με περαιτέρω επεξεργασία για την απεικόνιση (**Results Plot**) των αποτελεσμάτων των παραπάνω μοντέλων εξάγουμε τις εξής χαρακτηριστικές τιμές για τα εξαρτήματα του ένσφαιρου διαφορικού:

1. Ο συντελεστής ασφαλείας (Factor Of Safety) κυμαίνεται από 3,13 έως 29,66 με μέση τιμή 13,36 και οι χαμηλότερες τιμές να εντοπίζονται κατά της συνεργασία 1^{ου} δορυφόρου – πλανήτη.
2. Η εμφανιζόμενη von Mises τάση κυμαίνεται από 0 έως 238,67 MPa με μέση τιμή 98,57 MPa και οι υψηλότερες τιμές να εντοπίζονται κατά της συνεργασία 1^{ου} δορυφόρου – πλανήτη.

Για τις παραπάνω τιμές της τάσης αναζητούμε μέσω της καμπύλης s-N (Woehler) το όριο αντοχής- κοπώσεως των ευπαθέστερων εξαρτημάτων του ένσφαιρου διαφορικού. Η καμπύλη αυτή προσδιορίζει τις επαναλήψεις ημιτονοειδών φορτίσεων N σταθερού εύρους και μέσης τιμής που μπορεί να αντέξει ένα δοκίμιο μέχρι να καταστραφεί.

Τα ευπαθέστερα εξάρτημα του ένσφαιρου διαφορικού είναι οι δορυφόροι 1,2,3,4, οι οποίοι εμφανίζουν μέγιστη τάση 238,67 MPa.



Εικ.6.58 Διάγραμμα Woehler (Πηγή:Atlas of Fatigue Curves, Howard E. Boyer)

Η τάση αυτή, σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα s-N για χάλυβα τύπου IC 1020 (περιεκτικότητας 20% σε άνθρακα) αντιστοιχεί σε περίπου 10⁵ επαναλήψεις ημιτονοειδών φορτίσεων.

Κάθε περιστροφή του διαφορικού αντιστοιχεί σε περίπου 4 ημιτονοειδής φορτίσεις. Κάθε περιστροφή του διαφορικού αντιστοιχεί ακόμη σε περίπου 1,5 m απόσταση για ένα συμβατικό όχημα.

Σύμφωνα λοιπόν με την παραπάνω ανάλυση ένα όχημα μπορεί να κινηθεί για τουλάχιστον 37.500 χμλ προτού το διαφορικό εμφανίσει φαινόμενα κόπωσης. Η προσέγγιση αυτή δεν μπορεί να μας δώσει ακριβή δεδομένα παρά μόνον μια εκτίμηση της τάξης μεγέθους, λόγω των παραδοχών που έχουν γίνει. Επίσης δεν πρέπει να αμελούμε το γεγονός, πως η κινηματική ανάλυση αποτελεί μια εξαιρετικά συντηρητική μελέτη, καθώς το ένσφαιρο διαφορικό επ' ουδενί δεν λειτουργεί επί μονίμου βάσεως στο μέγιστό του φορτίο, όπως αρχικά υποθέσαμε κατά τον ορισμό των οριακών συνθηκών των κινηματικών μοντέλων.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ και ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

7.1 Συμπεράσματα

Η τρισδιάστατη ψηφιακή (3D CAD) αποτύπωση του ένσφαιρου διαφορικού του κ. Τσιριγγάκη αποτελεί πρόβλημα Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού, με έμφαση στη πιστή αποτύπωση της γεωμετρίας του, ιδιαίτερα στις συνεργαζόμενες επιφάνειες των εξαρτημάτων. Άλλωστε στη μεγάλη πλειοψηφία των εφαρμογών ΑΜΣ, απαιτήσεις γεωμετρικής ακρίβειας καθορίζονται σε εξαρτήματα που αποτελούν μέρος συναρμολογημένου μηχανολογικού συνόλου με δύο ή περισσότερα συνεργαζόμενα στοιχεία.

Συμπεραίνουμε κατά συνέπεια, πως η τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση ως πρόβλημα ΑΜΣ εντάσσεται στις δραστηριότητες του Μηχανολόγου Μηχανικού, εφόσον η εμπειρική γνώση παραχωρεί τη θέση της στα σύγχρονα τεχνολογικά μέσα ψηφιακής αποτύπωση και τον Μηχανολογικό Σχεδιασμό σε υπολογιστικό περιβάλλον.

Η ιδιαιτερότητα της παρούσας ΔΕ εντοπίζεται κατά τη δημιουργία του παραμετρικού μοντέλου του διαφορικού. Πραγματοποιώντας το βήμα αυτό ξεπερνάμε τα όρια των διαδικασιών που επιτάσσει ο ΑΜΣ και υιοθετούμε τεχνικές του κατ' εξοχήν Μηχανολογικού Σχεδιασμού. Συμπερασματικά αντιλαμβανόμαστε, πως η διαδικασία μελέτης του ένσφαιρου διαφορικού αποκτά έναν υβριδικό χαρακτήρα, ο οποίος αμφιταλαντεύεται ανάμεσα στον ΑΜΣ και το Μηχανολογικό Σχεδιασμό. Η περάτωση τέτοιου τύπου υβριδικών μελετών είναι όλο και συχνότερη στις μέρες καθώς οι ανάγκες για βελτιστοποίηση και γενικότερα για περαιτέρω έρευνα/εξειδικευμένη μελέτη του προς ΑΜΣ αντικειμένου καθιστούν την εφαρμογή των τεχνικών του Μηχανολογικού αναγκαία.

Χρήσιμα συμπεράσματα μπορούμε ακόμη να εξάγουμε από τη στατική και την κινηματική ανάλυση του ένσφαιρου διαφορικού.

Σύμφωνα λοιπόν με την ανάλυση αυτήν ένα όχημα, το οποίο φέρει το ένσφαιρο διαφορικό Τσιριγγάκη μπορεί να κινηθεί για τουλάχιστον 37.500 χλμ προτού το διαφορικό εμφανίσει φαινόμενα κόπωσης.

Η προσέγγιση αυτή δεν μπορεί να μας δώσει ακριβή δεδομένα παρά μόνον μια εκτίμηση της τάξης μεγέθους, λόγω των παραδοχών που έχουν γίνει κατά τον ορισμό των οριακών συνθηκών. Ακόμη δεν πρέπει να αμελείται το γεγονός, πως η στατική και κινηματική ανάλυση αποτελεί μια εξαιρετικά συντηρητική μελέτη, καθώς το ένσφαιρο διαφορικό επ' ουδενί δεν λειτουργεί επί μονίμου βάσεως στο μέγιστό του φορτίο, όπως αρχικά υποθέσαμε κατά τον ορισμό των οριακών συνθηκών των κινηματικών μοντέλων.

Η αρχική εκτίμηση ότι η παρούσα μελέτη αποτελεί μια συντηρητική προσέγγιση επιβεβαιώνεται και πειραματικά, καθώς το διαφορικό αυτό έχει περάσει από πολλές

διαδικασίες ελέγχου , έχοντας παράλληλα χρησιμοποιηθεί σε συμβατικό επιβατικό όχημα για πάνω από 40.000 χλμ. και κάτω από διαφορετικές συνθήκες.

Κατά συνέπεια μια διαφορετική προσέγγιση λιγότερο συντηρητική θα μπορούσε πιθανώς να εξάγει αντιπροσωπευτικότερα αποτελέσματα, όσον αφορά την αντοχή του διαφορικού. Αξίζει βέβαια να επισημάνουμε πως ακόμη και η συντηρητική αυτή προσέγγιση, αν είχε υλοποιηθεί σε μια πλατφόρμα πεπερασμένων στοιχείων, ικανή να δημιουργήσει ομοιομορφότερο πλέγμα, πιθανώς τα αποτελέσματα της μελέτης να προσέγγιζαν σε μεγαλύτερο βαθμό τα πειραματικά.

7.2 Μελλοντική Εργασία

Μελλοντική εργασία θα μπορούσα να πραγματοποιηθεί σε ζητήματα που αφορούν την ανάλυση του ένσφαιρου, την περαιτέρω μελέτη του καθώς και την πιθανή βελτιστοποίησή ως προς συγκεκριμένες μεταβλητές.

Όπως λοιπόν προαναφέραμε θα ήταν σκόπιμο σε πιθανή μελλοντική εργασία να πραγματοποιηθεί μια λιγότερο συντηρητική ανάλυση, ικανή να προσεγγίσει τα πραγματικά όρια αντοχής του ένσφαιρου διαφορικού Τσιριγγάκη, στηριζόμενη στην υπάρχουσα πιστή τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση του ένσφαιρου διαφορικού.

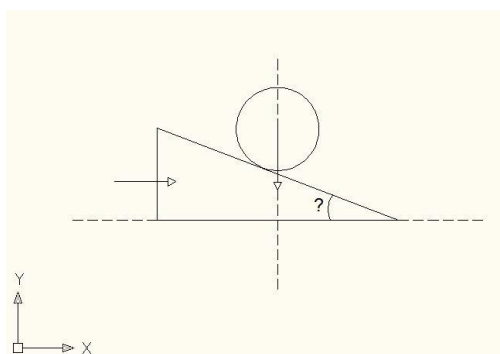
Περαιτέρω έρευνα θα ήταν σκόπιμο να πραγματοποιηθεί σε θέματα βελτιστοποίησης του ένσφαιρου διαφορικού, στηριζόμενη στο υπάρχον παραμετρικό μοντέλο του διαφορικού. Πιθανά θέματα βελτιστοποίησης αποτελούν:

1. Βελτιστοποίηση ως προς το βάρος
2. Βελτιστοποίηση ως προς τα σώματα κυλίσεως, με χρήση νέου τύπου σωμάτων π.χ. κυλινδρικών (γραμμική επαφή), πρισματικών (επαφή επιφανείας) κ.α.
3. Βελτιστοποίηση ως προς τη γωνία του κεκλιμένου επιπέδου

Η αρχή λειτουργίας του ένσφαιρου διαφορικού συνοψίζεται στην εξής φράση:

Στο Διαφορικό Χωρίς Γρανάζια, η κατανομή ισχύος ανάμεσα στα ημιαξόνια ρυθμίζεται από τους δορυφόρους-στοιχεία κυλίσεως, μέσω των πλανητών-κεκλιμένων επιπέδων, επί των οποίων εδράζονται και κυλίσουνται.

Σύμφωνα λοιπόν με την αρχή αυτήν οι δορυφόροι και τα κεκλιμένα επίπεδα των πλανητών βρίσκονται διαρκώς σε επαφή αλληλεπιδρώντας μεταξύ τους.

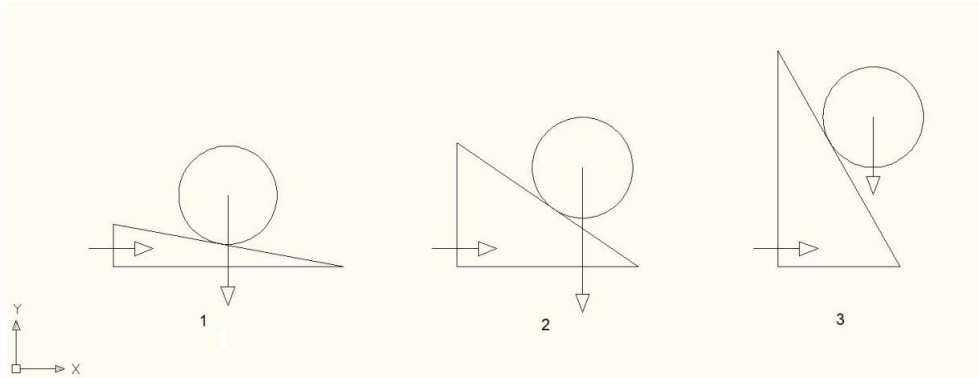


Εικ.7.1 Γωνία κεκλιμένου επιπέδου

Όπως παρουσιάζεται παραστατικά και στο παραπάνω σχήμα ο δορυφόρος ασκεί κατακόρυφη πίεση στο επίπεδο του πλανήτη, ωθώντας το προς τα αριστερά, καθώς ο μοναδικός βαθμός ελευθερίας του δορυφόρου είναι ο κατακόρυφος. Οι υπόλοιποι βαθμοί ελευθερίας του, περιορίζονται από τις αντίστοιχες εδράσεις.

Το κεκλιμένο επίπεδο με τη σειρά του τείνει να κινηθεί προς τα δεξιά, μετατοπίζοντας κατακόρυφα το δορυφόρο.

Το ρυθμιστικός παράγοντας των δύο αυτών φαινομένων αποτελεί κατά συνέπεια η γωνία κλίσης του επιπέδου.



Παρατηρώντας την ανωτέρω εικόνα μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα: Στην 1^η περίπτωση ο δορυφόρος δεν μπορεί να αντισταθεί, καθώς το κεκλιμένο επίπεδο, λειτουργώντας σαν σφήνα, εξαναγκάζει το δορυφόρο σε ανύψωση.

Στην 3^η περίπτωση ο δορυφόρος μετακινεί το κεκλιμένο επίπεδο προς τα αριστερά, χωρίς να συναντά υψηλή αντίσταση.

Στη 2^η όμως περίπτωση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί καμία διαισθητική προσέγγιση του φαινομένου.

Αξίζει να επισημάνουμε πως η γωνία κλίσης των ημιτονοειδών καμπύλων είναι διαφορετική σε κάθε σημείο τους. Κατά συνέπεια οι δορυφόροι δέχονται, σε κάθε νέα θέση τους, φορτία υπό νέα γωνία. Ακόμη το μέγεθος της γωνίας κλίσης επηρεάζει τη μετάδοση ισχύος μεταξύ δορυφόρου και πλανήτη.

Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν πως η επίδραση της γωνίας στη συμπεριφορά του ένσφαιρου διαφορικού είναι μείζονος σημασίας και θα ήταν σκόπιμο να μελετηθεί εκτενώς στα πλαίσια μελλοντικής εργασίας.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] C.G. Provatidis, *A critical presentation of Tsiriggakis' gearless differential (PDF)*, *Mobility & Vehicles Mechanics*, Vol. 29, No.4, 2003, pp. 25-46
- [2] Th. Tsiriggakis, *United States Patent, Differential Gear, Patent Number: 4.509.388, Patent Date: Apr.9 1985*
- [3] Γ. Καϊσαρλής, *Συμβολή στην ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, 2006.*
- [4] *SolidWorks 2011 Training Guide, David Pancoast*
- [5] *Matt Lombard, SolidWorks 2009 Bible, Wiley Publishing Inc.*
- [6] *W.Wang, Reverse Engineering - Technology of Reinvention, CRC, 2011*
- [7] Γ.Καϊσαρλής, Σ.Διπλάρης, Μ.Σφαντζικόπουλος, *Συμβολή των Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων στη μετρολογία Διαστάσεων: Σημερινή Πραγματικότητα και Προοπτικές.*
- [8] Γ. Καϊσαρλής, Σ. Διπλάρης, Μ. Σφαντζικόπουλος, *Πειραματική Μέθοδος Εκτίμησης της Αβεβαιότητας Μηχανών Μετρησης Συντεταγμένων σε Βιομηχανικό Περιβάλλον, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών*
- [9] *H. Kawamura, Unites States Patent, Limited Slip Differential, Patent Number: 5.030.185, Patent Date: Jul.9 1991*
- [10] *Fahy et al., United States Patent, Differential Gear Mechanism, Patent Number: 5.071.395, Patent Date: Dec.10 1991*
- [11] *Andries van Berkum StijnAben, Eindoverbrenging voor de FS racewagen, DCT2004.45*
- [12] *Yong Huh¹, Hyung-Ick Kim, In-Hwan Shin, Jae-Mean Koo, Chang-Sung Seok, A Study on the Differential Gearing Device with the Faculty of a Limited Slip Differential, School of Mechanical Engineering, Suwon, South Korea*
- [13] *J. Edward Pope, Rules of Thumb for Mechanical Engineers, Gulf Publishing*
- [14] *Gentcho Stainov, Theoretical Investigation of a Gearless Differential, Central Laboratory of Mechatronics and Instrumentation, 1113 Sofia*
- [15] *H.Dubbel- W.Beitz-K.H.Grote, Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer*

- [16] *Ρ.Γραικούση, Στοιχεία Μηχανών Ι- Στοιχεία συνδέσεως, Εκδόσεις Γιαχούδη*
- [17] *Ρ.Γραικούση, Στοιχεία Μηχανών ΙΙ- Στοιχεία περιστροφικής κινήσεως, Εκδόσεις Γιαχούδη*
- [18] *Howard E. Boyer, Atlas of Fatigue Curves, ASM International*
- [19] *William F. Milliken, Douglas L. Milliken, Maurice Olley, Chassis Design: Principles and Analysis [R-206], Feb 2002*
- [20] *<http://www.faro.com>*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΤΕΡΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

Έχοντας περάσει το στάδιο της πιστής αποτύπωσης του προτύπου διαφορικού, μέσω της διαδικασίας του ανάστροφου σχεδιασμού (reverse engineering) και της τρισδιάστατης σάρωσης (3D scanning), οδηγηθήκαμε στη σχεδίαση ενός παραμετρικού μοντέλου διαφορικού.

Σκοπός μας είναι η στατική και κινηματική ανάλυση του μοντέλου αυτού, από την οποία και θα μπορούμε να εξάγουμε χρήσιμα και ασφαλή συμπεράσματα για τη λειτουργία, την αντοχή και την αξιοπιστία του διαφορικού.

Για να είναι εφικτή η μοντελοποίηση αυτή, θα πρέπει πρώτα να μελετήσουμε πρωτογενώς τα εξής φαινόμενα:

1. κύλιση σφαίρας επί κυματοειδούς επιφανείας
2. την εμφάνιση πίεσης επιφανείας (Hertz) κατά την άσκηση κάθετου φορτίου σε σφαίρα, η οποία θα βρίσκεται σε επαφή με μια επίπεδη επιφάνεια
3. την κύλιση σφαίρας επί δύο επίπεδων πλακών

Ο συνδυασμός των τριών αυτών φαινομένων αποτελεί ένα πλήρες μοντέλο της κύλισης των δορυφόρων επί των πλανητών (βασικός τρόπος διαφόρισης στο διαφορικό με ένσφαιρους τριβής) και του επιπέδου των τάσεων που εμφανίζονται κατά την εξέλιξη της κίνησης αυτής.

Κρίθηκε σκόπιμο σε πρώτη φάση να διερευνηθούν τα παραπάνω απλά μοντέλα ώστε, να έρθουμε σε επαφή με τα κατάλληλα εργαλεία του υπολογιστικού πακέτου, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν εν συνεχεία στην μοντελοποίηση του σαφώς συνθετότερου διαφορικού.

Επιπρόσθετα, στα προαναφερθέντα μοντέλα μπορεί να ελεγχθεί η ορθότητα τους μέσω κατάλληλων υπολογισμών- εμπειρικών τύπων.

Κατά συνέπεια, μπορούμε να έχουμε μια αξιόπιστη και ασφαλή εκτίμηση του κατά πόσον είμαστε ικανοί να αποτυπώσουμε πιστά τα παραπάνω φαινόμενα στην υπολογιστική μας πλατφόρμα.

Η μελέτη αυτή γίνεται στο περιβάλλον του SolidWorks 2011.

1^ο Μοντέλο

Κύλιση σφαίρας επί κυματοειδούς επιφανείας

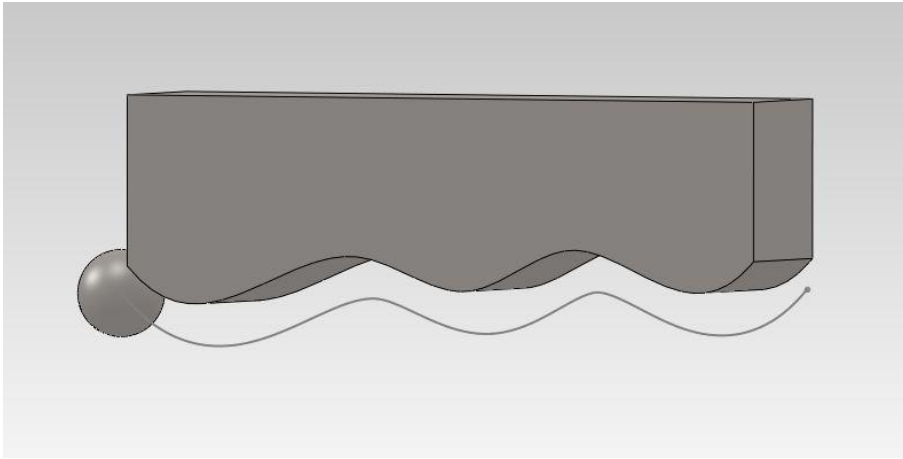
Το πρώτο απλό μοντέλο, το οποίο καλούμαστε να υλοποιήσουμε είναι αυτό της κύλισης σφαίρας επί κυματοειδούς επιφάνειας. Η κύλιση εξ ορισμού προϋποθέτει την ύπαρξη της στατικής τριβής μεταξύ των συνεργαζόμενων επιφανειών. Σε κάθε άλλη περίπτωση μιλάμε για ολίσθηση, κατά την οποία είτε δεν εμφανίζεται τριβή (ιδεατό μοντέλο) είτε εμφανίζεται η τριβή ολίσθησης.

Κατά συνέπεια η μελέτη μας θα πρέπει να πραγματοποιηθεί σε περισσότερα βήματα εξετάζοντας ξεχωριστά την κάθε περίπτωση.

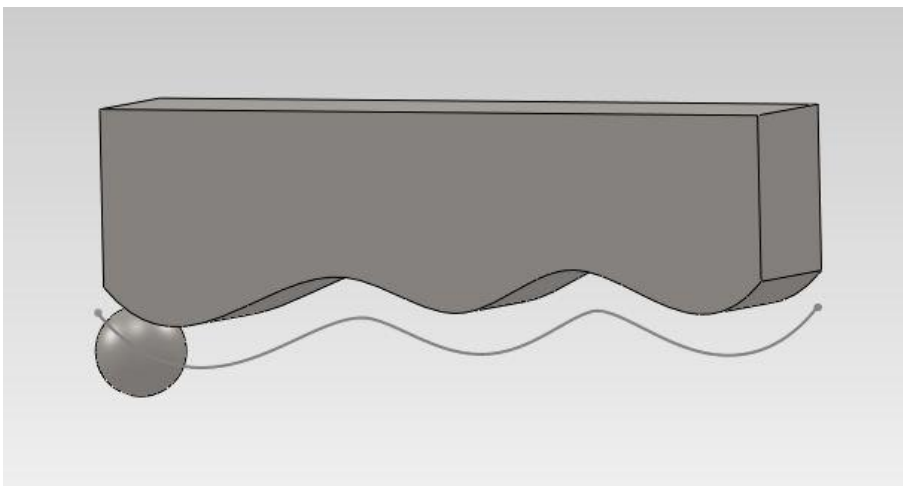
Αρχικά εξετάζουμε την κύλιση της σφαίρας επί κυματοειδούς επιφάνειας θεωρώντας συντελεστή τριβής 0,1, τιμή τυπική για συνεργασία μεταλλικών επιφανειών. Το κέντρο περιστροφής της σφαίρας κινείται πάνω στην προβολή της κυματοειδούς επιφάνειας, κατά ακτίνα r (όπου r η ακτίνα της σφαίρας).

Ορίζοντας ταχύτητα κύλισης 40mm/sec παραλαμβάνουμε τα παρακάτω στιγμιότυπα:

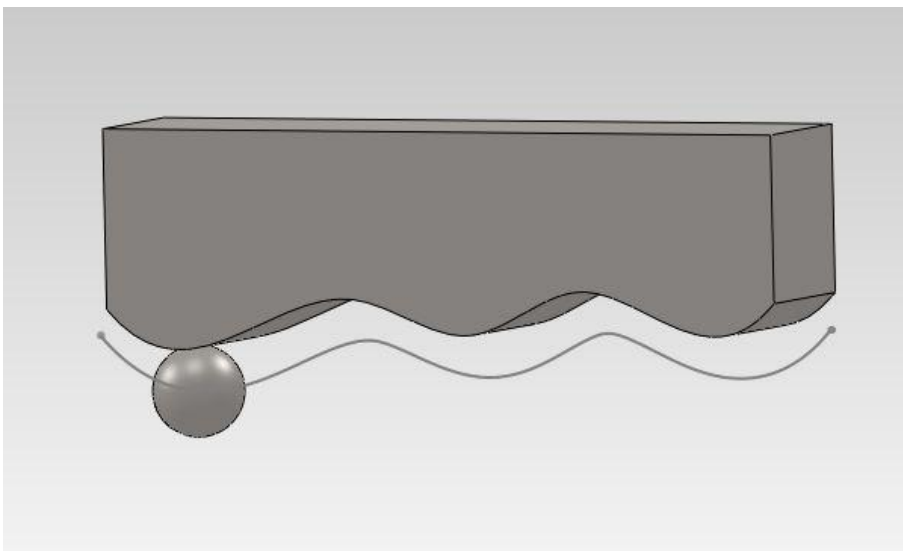
0 sec



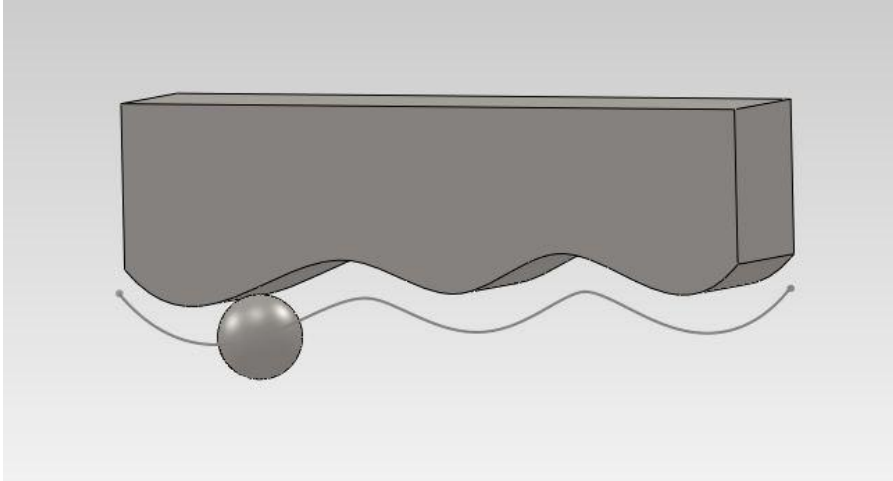
1 sec



2sec



3sec



Το επόμενο βήμα είναι να εξετάσουμε την περίπτωση της ιδανικής ολίσθησης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση πραγματοποιείται μεταφορική και όχι περιστροφική κίνηση.

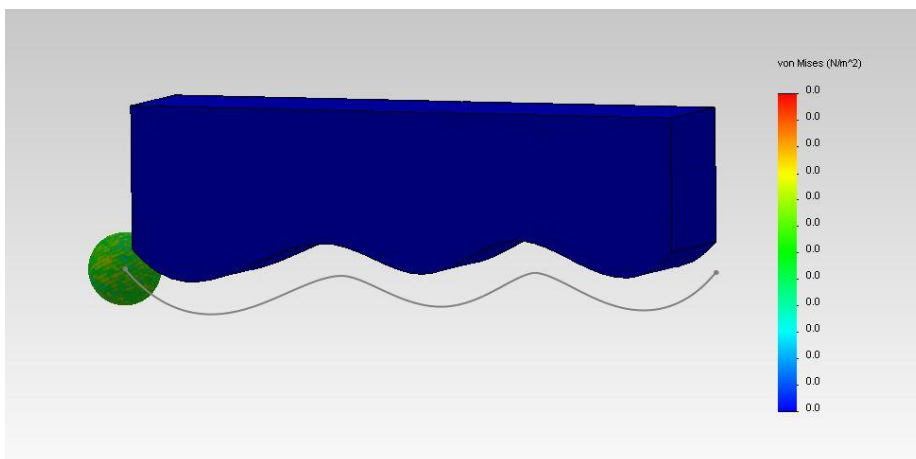
Επίσης λόγω του ότι η ολίσθηση είναι ιδανική δεν υπάρχουν δυνάμεις και κατά συνέπεια τάσεις μεταξύ των δύο σωμάτων. Σε αυτήν την περίπτωση συνεπώς αφαιρούμε κάθε επίδραση της κυματοειδούς επιφάνειας και αναγκάζουμε τη σφαίρα να κινηθεί πάνω στην προβολή της κυματοειδούς επιφάνειας, κατά ακτίνα r .

Το οπτικό αποτέλεσμα όσον αφορά τα στιγμιότυπα είναι το ίδιο. Παρατηρώντας όμως προσεκτικά βλέπουμε πως αυτή τη φορά η σφαίρα πραγματοποιεί μεταφορική κίνηση δίχως να περιστρέφεται.

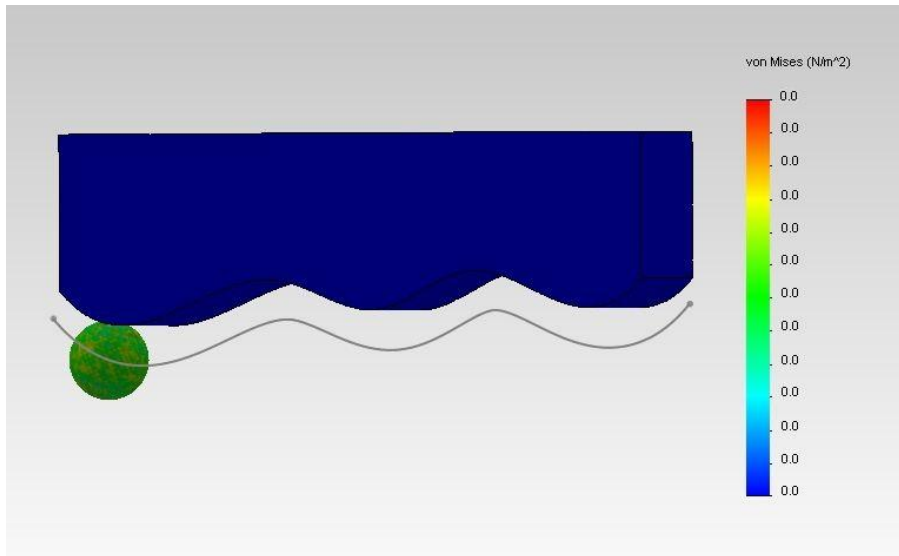
Για την επαλήθευση της οπτικής μας παρατήρησης εξετάζουμε την κίνηση με το εργαλείο Motion Analysis and Simulation του υπολογιστικού πακέτου SolidWorks 2011.

Λαμβάνουμε έτσι τα παρακάτω στιγμιότυπα ορίζοντας μεταφορική ταχύτητα 40mm/sec:

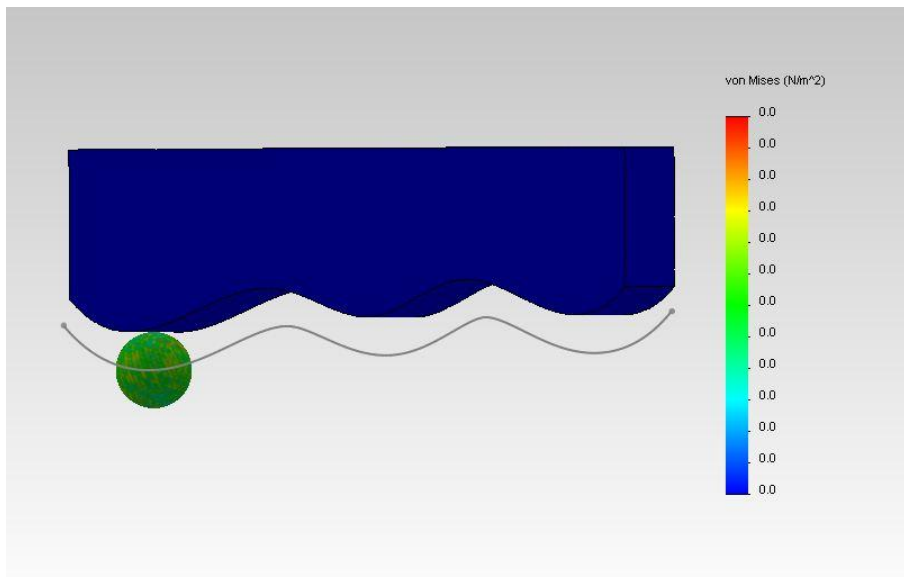
0 sec



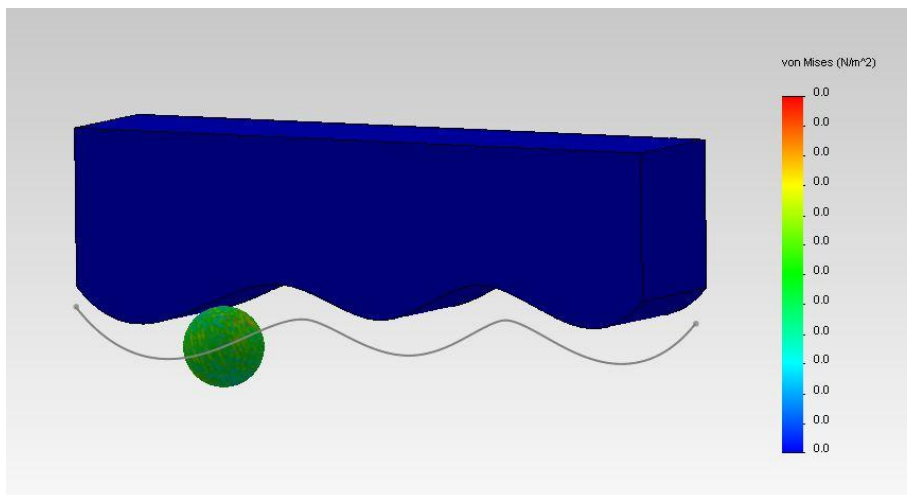
1 sec



2sec



3sec



Όπως αναμέναμε οι Von Mises τάσεις είναι μηδενικές, καθώς δεν υφίσταται καμίας φύσεως αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο σωμάτων.

2° Μοντέλο

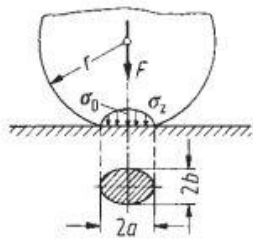
Εμφάνιση πίεσης επιφάνειας (Hertz) κατά την άσκηση κάθετου φορτίου σε σφαίρα, εβρισκόμενη σε επαφή με επίπεδη επιφάνεια

Ως πίεση Hertz ορίζουμε τη μέγιστη τάση, η οποία εμφανίζεται στη μέση της επιφάνειας επαφής δύο ελαστικών σωμάτων.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο θα εξετάσουμε το κατά πόσον μπορούμε με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων να προσεγγίσουμε το αποτέλεσμα που προκύπτει από τον εμπειρικό τύπο του Hertz κατά την άσκηση κάθετου φορτίου σε σφαίρα εβρισκόμενη σε σημειακή επαφή με επίπεδη επιφάνεια.

Αξίζει βέβαια να σημειωθεί πως η αρχικά σημειακή επαφή μετατρέπεται σε ζώνη-διεπιφάνεια επαφής της σφαίρας με την πακτωμένη επιφάνεια, λόγω της παραμόρφωσης που υφίσταται.

Σε πρώτη φάση υπολογίζουμε τη μέγιστη τάση η οποία εμφανίζεται κατά των άξονα z (σ_z) λόγω της κάθετης στην επιφάνεια δύναμης που ασκείται στη σφαίρα.



Για τη μέγιστη τάση ισχύει σύμφωνα με τον τύπο του Hertz:

$$\max \sigma_z = \sigma_0 = -\frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{1,5FE^2}{r^2(1-\nu^2)^2}}$$

,όπου

- E το μέτρο ελαστικότητας για το οποίο ισχύει $E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}$, με E_1 το μέτρο ελαστικότητας της σφαίρας και E_2 το μέτρο ελαστικότητας της επιφάνειας
- F η ασκούμενη δύναμη
- r η ακτίνα της σφαίρας
- ν ο λόγος του Poisson

Με τα παραπάνω δεδομένα για χαλύβδινη σφαίρα και επιφάνεια προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

	Σφαίρα	Επιφάνεια
Μετρο ελαστικότητας E (Gra)	210	210
Λόγος Poisson	0,28	0,28
Ακτίνα (mm)	40	∞
Φορτίο (N)	400	
Ενεργό μετρο ελαστικότητας E (Gra)	227,9	
Ενεργή ακτίνα επαφής r (mm)	20	
Πλάτος ημιαπαφής (mm)	0,47	
Ακαμψία επαφής (106 N/m)	107,63	
Μέση πίεση επαφής (Gra)	0,57	
Μέγιστη πίεση επαφής (Gra)	0,86	

Το επόμενο βήμα είναι να αναπτύξουμε το στατικό μοντέλο στο περιβάλλον του SolidWorks και με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων-ανάλυσης να επαληθεύσουμε την ορθότητά του συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που θα εξάγουμε με αυτά που έχουν προκύψει από τον τύπο του Hertz.

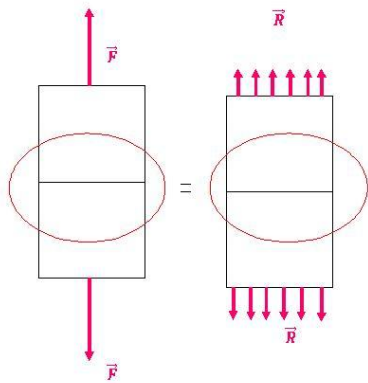
Κατά την ανάπτυξη του μοντέλου προκύπτουν ορισμένα σοβαρά ζητήματα- προβλήματα, τα οποία και πρέπει να ξεπεραστούν ώστε να κατασκευαστεί ένα μοντέλο αντιπροσωπευτικό του φαινομένου. Τα προβλήματα αυτά αξίζει να αναφερθούν καθώς η λύση τους προκύπτει από κατάλληλο συνδυασμό της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων και το εργαλείων που μας προσφέρει το υπολογιστικό μας πακέτο.

1^ο Πρόβλημα

Στους υπολογισμούς που έχουν πραγματοποιηθεί σύμφωνα με τον τύπο του Hertz η ασκούμενη δύναμη στη σφαίρα είναι σημειακή και ασκείται κάθετα στην επιφάνεια. Αντίθετα τα περισσότερα υπολογιστικά πακέτα (συμπεριλαμβανομένου και του SolidWorks) δεν αντιλαμβάνονται την άσκηση σημειακού φορτίου παρά μόνο κατανεμημένου.

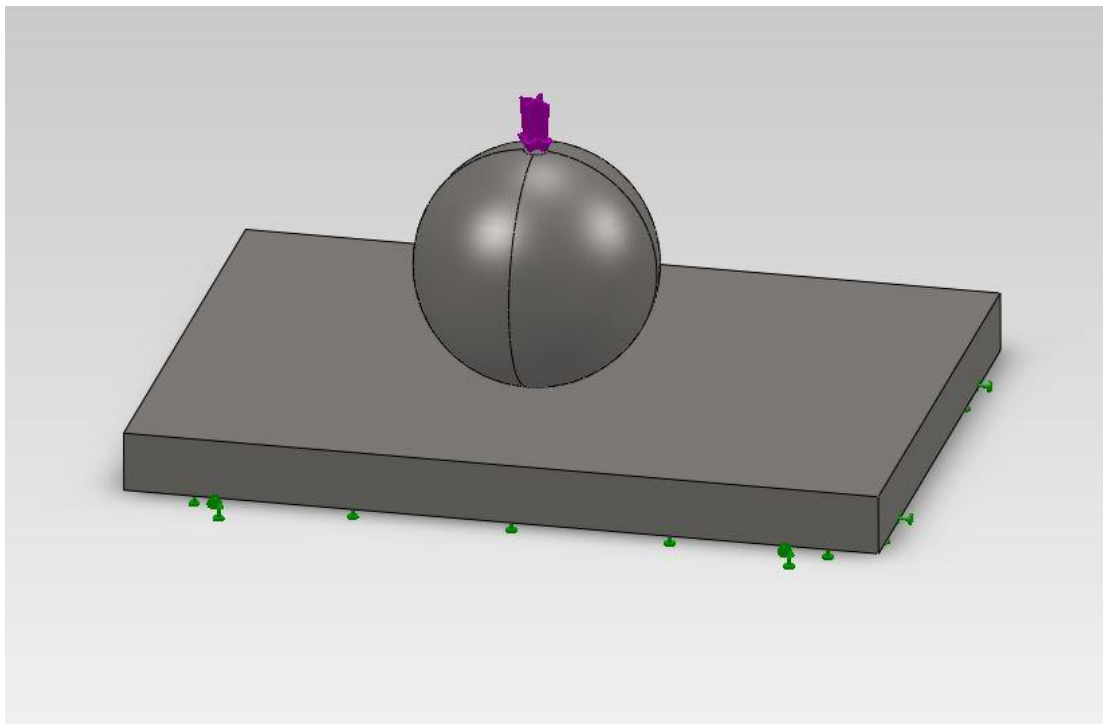
Η λύση προκύπτει από την αρχή του Saint Venant (Γάλλος Μηχανικός ασχολήθηκε κυρίως με τη θεωρία της ελαστικότητας). Συμφωνά λοιπόν με την αρχή αυτήν *‘Αν κάποια κατανομή δυνάμεων που δρα σε μια περιοχή της επιφάνειας ενός σώματος, αντικατασταθεί από μια διαφορετική κατανομή δυνάμεων, που δρα στην ίδια περιοχή του σώματος, και οι δυο κατανομές αυτές είναι στατικά ισοδύναμες, τότε οι επιδράσεις των δυο διαφορετικών κατανομών, πάνω σε τμήματα του σώματος απομακρυσμένα αρκετά από την περιοχή εφαρμογής των κατανομών, είναι ουσιαστικά ίδιες’*

Μια οπτική απεικόνιση του φαινομένου είναι η εξής:



Κατά συνέπεια αντιλαμβανόμαστε πως η ανομοιομορφία στην κατανομή των τάσεων μειώνεται σημαντικά όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή της. Έτσι αφού οι δύο κατανομές φορτίου είναι στατικά ισοδύναμες και δρουν στην ίδια περιοχή της σφαίρας τότε το αποτέλεσμα τους θα είναι ουσιαστικά το ίδιο.

Συνεπώς προκύπτει το παρακάτω μοντέλο:

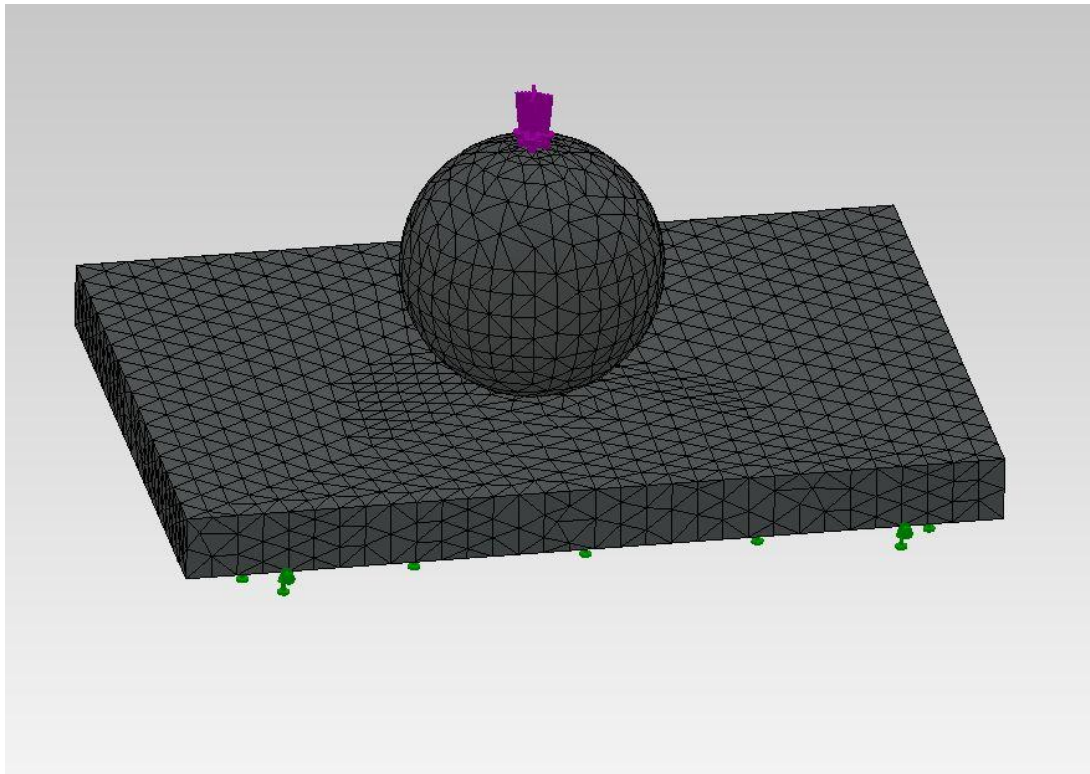


,όπου τα μωβ βέλη συμβολίζουν το κατανεμημένο φορτίο και τα πράσινα την πάκτωση στην κάτω πλευρά της επιφάνειας.

2^ο Πρόβλημα

Το 2^ο πρόβλημα παρουσιάζεται όταν δημιουργήσουμε το πλέγμα και προσπαθήσουμε να υπολογίσουμε τις τάσεις και τις μετατοπίσεις με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων. Παρατηρούμε ότι η προσομοίωση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί καθώς το μοντέλο παύει να είναι στατικό και παρατηρούνται ιδιαίτερα μεγάλες μετατοπίσεις (σχετικό μήνυμα επί της οθόνης μας ενημερώνει για το πρόβλημα αυτό).

Η πηγή του προβλήματος μπορεί να εντοπιστεί αν παρατηρήσουμε προσεκτικά το πλέγμα.



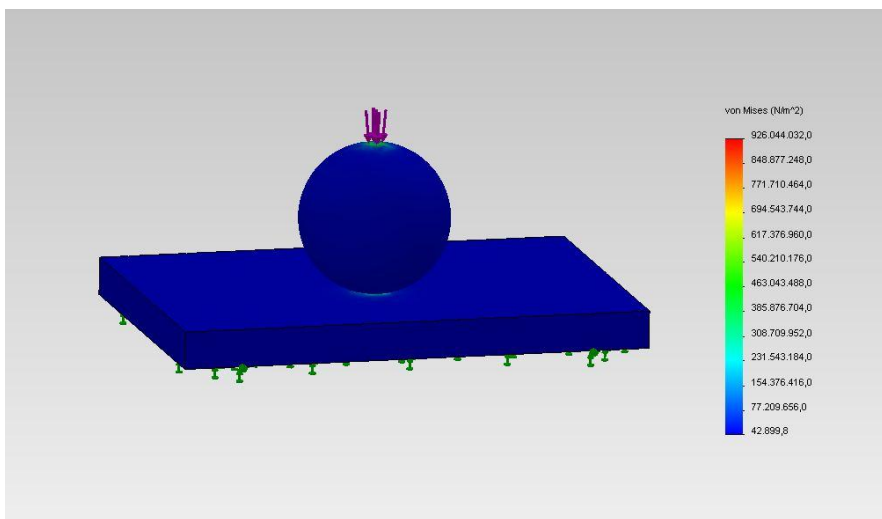
Το πλέγμα της σφαίρας δεν είναι απόλυτα ομοιόμορφο. Κατά συνέπεια η εφαρμογή της κατανεμημένης δυνάμεις δημιουργεί ροπές οι οποίες δεν αλληλοαναιρούνται, οδηγώντας τη σφαίρα στο να μετακινηθεί στο οριζόντιο επίπεδο.

Η λύση δίνεται με ένα εργαλείο της πλατφόρμας των πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιούμε ιδεατά μαλακά ελατήρια ώστε να σταθεροποιούμε τη σφαίρα (use soft springs to stabilize model) στην επιθυμητή-αρχική θέση της αναιρώντας πρακτικά τις ροπές που παρατηρούνται λόγω ασύμμετρου πλέγματος, χωρίς όμως να επηρεάζουμε το κατακόρυφο κατανεμημένο φορτίο.

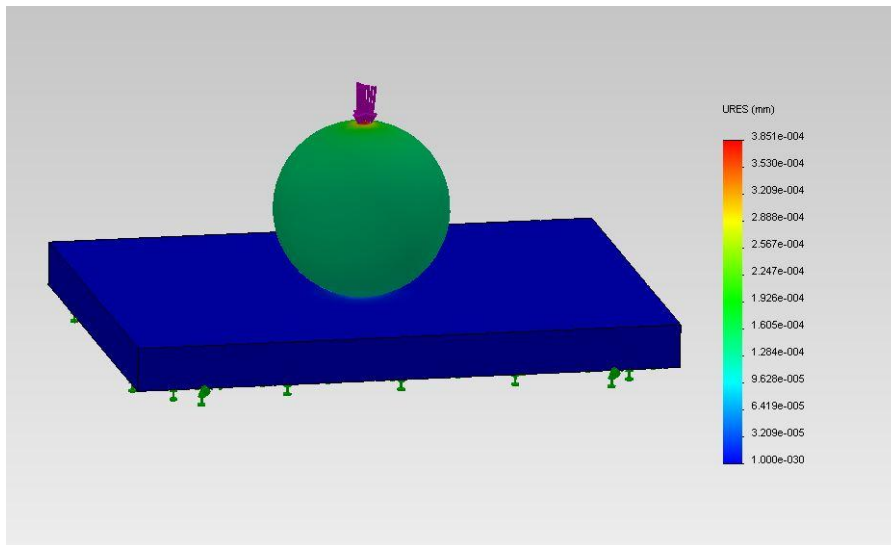
Αφού υπερκεράσαμε τα δύο παραπάνω προβλήματα προχωρήσαμε σε στατική ανάλυση του μοντέλο με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στην πλατφόρμα Simulation του SolidWorks 2011.

Μετά το πέρας της διαδικασίας προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Για τις τάσεις von Mises (τάσεις σύγκρισης) ισχύει:



Για τις μετατοπίσεις ισχύει:



Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τον εμπειρικό τύπο του Hertz και αυτών που προκύπτουν από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία η τάσεις von Mises δεν αρκούν.

Από την ανάλυση που έχουμε κάνει μπορούμε να εμφανίσουμε πινακοποιημένες τις τάσεις σ_z ανά κόμβο και να συγκρίνουμε τη μέγιστη και τη μέση εξ αυτών με τις αντίστοιχες από τον τύπο του Hertz.

Σε χαρακτηριστικούς κόμβους ισχύει:

Node	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	σ_z (N/mm ² (MPa))
5615	-118,59	97,9103	-101,356	-4,35052E+02
1049	-116,309	99,1359	-98,4712	-4,48439E+02
5446	-121,103	98,0603	-101,36	-4,52448E+02
1046	-116,309	99,1359	-101,529	-4,98856E+02
1045	-123,691	99,1359	-101,529	-5,00798E+02
2048	-121,414	99,2859	-98,5858	-6,87942E+02
2045	-118	99,2859	-100	-7,17785E+02
2047	-120	99,2859	-98	-7,74342E+02
2046	-118,586	99,2859	-98,5858	-8,06177E+02
2044	-118,586	99,2859	-101,414	-8,11979E+02
2042	-121,414	99,2859	-101,414	-8,21313E+02

Η μέγιστη κατά μέτρο τάση παρατηρείται στον κόμβο 2042 και είναι ίση με 0,8213 GPa.

Η μέγιστη τάση σύμφωνα με τον τύπο του Hertz είχε προκύψει ίση με 0,86 GPa

Η διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των δύο τάσεων είναι της τάξης του 4,7%.

Επίσης η μέση τάση που προέκυψε από την ανάλυση ισούται με 0,5488 GPa ενώ η αντίστοιχη από τον τύπο του Hertz 0,57 GPa.

Και εδώ παρατηρούμε μια διαφορά της τάξεως του 3,9%.

Πιθανές αιτίες των παραπάνω αποκλίσεων είναι το ασύμμετρο και όχι τόσο πυκνό πλέγμα, οι συνθήκες επαφής των δύο σωμάτων και η χρήση ιδεατών μαλακών ελατηρίων για τη σταθεροποίηση της σφαίρας.

3^ο Μοντέλο

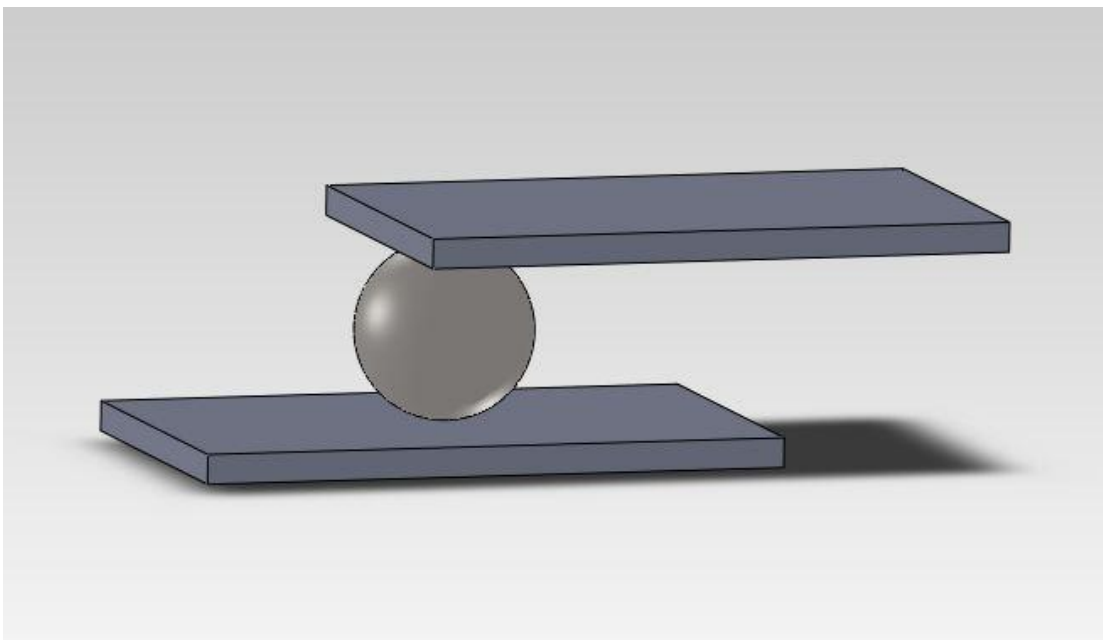
Κύλιση σφαίρας επί δύο επίπεδων πλακών

Με το 3^ο μοντέλο στόχος μας είναι να βεβαιωθούμε πως στο σχεδιαστικό-υπολογιστικό μας πακέτο (SolidWorks) μπορούμε να αποδώσουμε σωστα την κύλιση ενώ σώματος.

Ο έλεγχος αυτός γίνεται μέσω ενός απλού μοντέλου

Μια σφαίρα κυλιέται σε ακλόνητη επιφάνεια. Αντιδιαμετρικά της επιφάνειας αυτής βρίσκεται μια δεύτερη επιφάνεια, στην οποία επιτρέπουμε να κινηθεί μονάχα παραλληλα σε σχέση με την πρώτη. Η ύπαρξη στατικής τριβής είναι αυτή που καθιστά δυνατή την κύλιση.

Σύμφωνα λοιπόν με τη μηχανική του στερεού σώματος αν η σφαίρα κυλιέται χωρίς να ολισθαίνει με ταχύτητα v , το σημείο επαφής της με την ακλόνητη αποτελεί τον πόλο περιστροφής της και έχει μηδενική ταχύτητα ($v=0$). Αντίθετα το σημείο επαφής της σφαίρας με την άνω επιφάνεια θα έχει ταχύτητα $2v$. Κατά συνέπεια την ίδια ταχύτητα θα πρέπει να έχει και η άνω επιφάνεια ώστε να πληροί τις συνθήκες που αρχικά ετέθησαν.



Κάνοντας προσομοίωση του παραπάνω προβλήματος στην πλατφόρμα κινηματικής ανάλυσης του πακέτου (SolidWorks Motion Analysis) παρατηρούμε ότι για δεδομένη στατική τριβή μεταξύ χαλύβδινων σωμάτων (συντελεστή τριβής 0,1) και ταχύτητα $v=40$ mm/sec (τυχαία επιλεγμένη) η κάτω επιφάνεια παραμένει ακλόνητη, ενώ η άνω επιφάνεια κινείται με ταχύτητα $2v=80$ mm/sec.

Συμπέρασμα

Η διαδικασία ανάλυσης ενός σύνθετου προβλήματος σε απλούστερα αποτελεί βασικό στοιχείο ώστε να είναι εφικτή η λύση του σύνθετου αυτού προβλήματος.

Έχοντας συνεπώς μελετήσει και αναλύσει τα παραπάνω τρία μοντέλα έχουμε πλέον εξοικειωθεί με τα εργαλεία που μας προσφέρει η σχεδιαστική-υπολογιστική πλατφόρμα SolidWorks 2011.

Συνεπώς έχει γίνει η κατάλληλη προεργασία και έχει ληφθεί η απαραίτητη εμπειρία ώστε να προχωρήσουμε στη μελέτη του συνθετότερου διαφορικού συνδυάζοντας τις γνώσεις που λάβαμε από τα 3 αυτά απλούστερα μοντέλα.