ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837

ΠΜΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

«ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ V-8»

Σπουδαστής: Ασημακόπουλος Παναγιώτης

Υπ. Καθηγητής: Φατσής Αντώνιος

Περιεχόμενα:

1. *Εισαγωγή*
2. *Στόχοι*
3. *Ιστορική αναδρομή και ανάπτυξη του κινητήρα*
4. *Τύποι κινητήρων*
   - 4.1 *Σε σειρά*
   - 4.2 *Boxer*
   - 4.3 *Ακτινικοί*
   - 4.4 *Τύπου V*
5. *Βασικά εξαρτήματα κινητήρα*
   - 5.1 *Έμβολα*
   - 5.2 *Ελατήρια εμβόλου*
   - 5.3 *Διωστήρας*
   - 5.4 *Στροφαλοφόρος άξονας*
   - 5.5 *Εκκεντροφόρος άξονας*
6. *Επιλογή διαστάσεων των κύριων εξαρτημάτων του κινητήρα*
   - 6.1 *Μπλοκ κινητήρα*
   - 6.2 *Διάμετρος κυλίνδρου*
   - 6.3 *Κυλινδροκεφαλή*
   - 6.4 *Έμβολο*
   - 6.5 *Πείρος εμβόλου*
   - 6.6 *Ελατήρια εμβόλου*
   - 6.7 *Διωστήρας*
   - 6.8 *Στροφαλοφόρος άξονας*
   - 6.9 *Λοιπά εξαρτήματα του κινητήρα*
7. *3D Σχέδια*
8. *Έλεγχος στροφαλοφόρου άξονα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων*
9. *Συμπεράσματα*
10. *Βιβλιογραφία – Πηγές*

1. Εισαγωγή

Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης (Κ.Ε.Κ.) ή μηχανές εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ.) διαθέτουν πλούσια ιστορία όσον αφορά την ανάπτυξη τους, [2]. Ο μικρού μεγέθους, φιλικός, αλλά συνάμα ισχυρός και απροσδόκητα ήσυχος κινητήρας, που φαίνεται να γουργουρίζει κάτω από το καπό του οχήματος μας, δεν ήταν πάντα το «εξημερωμένο τέρας» που δείχνει να είναι σήμερα. Ήταν θορυβώδης, ογκώδης και, συνήθως, ιδιότροπος, ως προς τον χειρισμό και τη λειτουργία του . Για την ακρίβεια, ένας από τους πρώτους κινητήρες, σαν ιδέα - σύλληψη, δεν είχε καμία σχέση με τον κινητήρα που ξέρουμε σήμερα.

Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης έχει ορισθεί ως ένας κινητήρας, στον οποίο η χημική ενέργεια του καυσίμου απελευθερώνεται μέσα στον ή στους κυλίνδρους του και αναφλέγεται για την παραγωγή έργου, εν αντιθέσει με τον κινητήρα εξωτερικής καύσης, στον οποίο ένας ξεχωριστός καυστήρας απαιτείται για να κάψει το καύσιμο.

Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε στα τέλη του 1800. Είχε σημαντικό αντίκτυπο στην κοινωνία και θεωρείται μία από τις πιο σημαντικές εφευρέσεις των τελευταίων αιώνων. Υπήρξε η πηγή για την επιτυχή ανάπτυξη πολλών εμπορικών τεχνολογιών. Αυτός ο τύπος κινητήρα έχει αλλάξει την βιομηχανία μεταφορών, και όχι μόνο, οδηγώντας μας στην εφεύρεση αυτοκινήτων, φορτηγών και αεροπλάνων, ενώ με την χρήση του βελτιώθηκαν σημαντικά κατασκευές, όπως τα τραίνα, τα πλοία κ.α..

Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης μπορούν να διανέμουν δύναμη της τάξεως 0,01kW έως και πολλές χιλιάδες kW, αναλόγως με τον κυβισμό τους. Οι κύριες εφαρμογές είναι στα διάφορα οχήματα, επίγεια, θαλάσσια και εναέρια. Ως αποτέλεσμα αυτού, οι κινητήρες εσωτερικής καύσης έχουν γίνει η κυρίαρχη τεχνολογία μετακίνησης, σε αρκετούς τομείς. Για παράδειγμα, στο 1900, τα περισσότερα αυτοκίνητα ήταν ατμού ή ηλεκτρικά! όμως μετά το 1900, τα περισσότερα αυτοκίνητα λειτουργούσαν με κινητήρες βενζίνης. Από το έτος 2000, στις Ηνωμένες Πολιτείες μόνο, υπήρχαν περίπου 200 εκατομμύρια μηχανοκίνητα αυτοκίνητα, που κινούνταν με κινητήρες εσωτερικής καύσης. Στο 1900, ο κινητήρας ατμού χρησιμοποιούταν για την τροφοδοσία πλοίων και σιδηροδρομικών μηχανών. Στις μέρες μας, χρησιμοποιούνται δίχρονοι και τετράχρονοι κινητήρες. Πριν το 1950, τα αεροσκάφη βασίζονταν σχεδόν αποκλειστικά στους κινητήρες εμβόλων. Σήμερα, οι στροβιλοκινητήρες είναι ο σταθμός παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιείται σε μεγάλα αεροπλάνα και οι κινητήρες εμβόλων συνεχίζουν να κυριαρχούν στην αγορά μικρών επιπέδων. Η υιοθέτηση και η συνεχής χρήση του κινητήρα εσωτερικής καύσης σε διαφορετικές περιοχές εφαρμογής προέκυψε από το σχετικά χαμηλό κόστος του, την ευνοϊκή αναλογία ισχύος βάρους, την υψηλή απόδοση και τον σχετικά ήπιο και φιλικό τρόπο λειτουργίας του.

Τα εξαρτήματα ενός παλινδρομικού κινητήρα εσωτερικής καύσης (μπλοκ, έμβολα, στροφαλοφόρος άξονας, διωστήρας κ.α.) έχουν παραμείνει πρακτικά απαράλλαχτα από τα τέλη του 1800, όσον αφορά την λογική λειτουργίας. Ωστόσο, έχουμε σημαντικές αλλαγές στον σχεδιασμό για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του κινητήρα, προς την επιθυμητή, κάθε φορά, κατεύθυνση. Οι βασικές διαφορές ανάμεσα σε έναν σύγχρονο κινητήρα και σε έναν κινητήρα κατασκευασμένο 100 χρόνια πριν, είναι η θερμική απόδοση και το επίπεδο εκπομπών. Για αρκετά χρόνια, η έρευνα του κινητήρα εσωτερικής καύσης στόχευε στη βελτίωση της θερμικής απόδοσης και στη μείωση του θορύβου και των δονήσεων του, για πολιτική χρήση. Ωστόσο, έχουν γίνει έρευνες και μελέτες για την εξέλιξη των κινητήρων, σε

αναζήτηση μέγιστων αποδόσεων, χωρίς να είναι ως πρωταρχικοί στόχοι το χαμηλό κόστος, η εξοικονόμηση καυσίμου και η διάρκεια ζωής (για αγωνιστική χρήση ή επίτευξη διαφόρων ρεκόρ). Ως συνέπεια, η θερμική απόδοση έχει αυξηθεί από περίπου 10% σε τιμές έως και 50%, ίσως και περισσότερο. Από το 1970, με την αναγνώριση της σημασίας της ποιότητας του αέρα, υπήρξε επίσης πολλή δουλειά, αφιερωμένη στη μείωση των εκπομπών ρύπων. Προς το παρόν, οι απαιτήσεις ελέγχου εκπομπών είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στο σχεδιασμό και τη λειτουργία του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Προδιαγραφές που έχουν τεθεί από τους Παγκόσμιους Οργανισμούς, όσον αφορά τους ρύπους και τα επίπεδα θορύβου είναι οι βασικότεροι παράγοντες, με τους οποίους γίνεται η μελέτη και ο σχεδιασμός νέων κινητήρων, πάντα λαμβάνοντας υπόψη και την ανάγκη μείωσης της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αυτά ισχύουν για τους κινητήρες που προβλέπονται για πολιτική χρήση. Για ειδικές περιπτώσεις, όπως οι κινητήρες που σχεδιάζονται για αγώνες, σχεδιάζονται βάσει των κανονισμών της εκάστοτε διοργάνωσης και στοχεύουν κυρίως στη μέγιστη απόδοση.

2. Στόχοι

Ο σκοπός αυτής της διατριβής είναι η δημιουργία ενός εγχειριδίου, για τον σχεδιασμό ενός εμβολοφόρου κινητήρα εσωτερικής καύσης, η γνωριμία με τον ίδιο και τα επιμέρους εξαρτήματα του και τις πιθανές διατάξεις του. Έχει, επίσης, ως στόχο, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς, σχετικά με την κινηματική και τη δυναμική ανάλυση αυτού, την πλήρη διαστασιολόγηση των κυρίων εξαρτημάτων του σύμφωνα με τα αποτελέσματα από [1]. Θα σχεδιάσουμε έναν ατμοσφαιρικό κινητήρα εσωτερικής καύσης, διάταξης V8, εφοδιασμένο με flat plane crank, υψηλών επιδόσεων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό 3D σχεδιασμού SolidWorks. Ακόμα ένας σκοπός του έργου αυτού είναι να καθορίσει τα κατάλληλα υλικά για κάθε εξάρτημα του, στην παραπάνω εφαρμογή και, εν τέλει, και πάλι χρησιμοποιώντας το SolidWorks, να θέσουμε, τον στροφαλοφόρο άξονα που σχεδιάσαμε, υπό εξέταση, με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (F.E.A.), για να δούμε εάν αυτός μπορεί να ανταπεξέλθει στα φορτία που υπόκειται.

3. Ιστορική αναδρομή και ανάπτυξη του κινητήρα

Με βάση τις πληροφορίες [2], μια σύντομη περίληψη της ιστορίας του κινητήρα εσωτερικής καύσης περιλαμβάνει τα παρακάτω:

- **1680** – Ο Ολλανδός Φυσικός, Christian Huygens, σχεδίασε (αλλά δεν κατασκεύασε ποτέ) έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης, που επρόκειτο να τροφοδοτείται με πυρίτιδα.
- **1807** – Ο Francois Isaac de Rivaz, από την Σουηδία, εφηύρε ένα κινητήρα εσωτερικής καύσης, ο οποίος χρησιμοποιούσε ένα μείγμα από υδρογόνο και οξυγόνο ως καύσιμο. Σχεδίασε ένα αυτοκίνητο για τον κινητήρα του, το πρώτο αυτοκίνητο με κινητήρα εσωτερικής καύσης. Ωστόσο, αυτό υπήρξε ένα πολύ ανεπιτυχές σχέδιο.
- **1824** – Ο Άγγλος μηχανικός, Samuel Brown, προσάρμοσε έναν παλιό κινητήρα ατμού, ώστε να καίει αέριο και τον χρησιμοποίησε για να κινήσει ένα όχημα μέχρι το Shooter's Hill στο Λονδίνο.
- **1858** – Γεννημένος στο Βέλγιο, ο μηχανικός Jean Joseph Etienne Lenoir εφηύρε και κατοχύρωσε έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης, ηλεκτρικής ανάφλεξης με σπινθήρα, διπλής δράσης, που τροφοδοτείται από αέριο άνθρακα. Το 1863, ο Lenoir προσάρτησε έναν βελτιωμένο κινητήρα (χρησιμοποιώντας πετρέλαιο και ένα πρωτόγονο καρμπυρατέρ) σε ένα τρίτροχο βαγόνι και κατάφερε να ολοκληρώσει ένα ιστορικό οδικό ταξίδι πενήντα μιλίων.
- **1862** – Ο Alphonse Beau de Rochas, ένας Γάλλος πολιτικός μηχανικός, κατοχύρωσε, αλλά δεν κατασκεύασε, έναν τετράτροχο κινητήρα. (Κατοχύρωση στη Γαλλία, #52,593, 16 Ιανουαρίου 1862)
- **1864** – Ο Αυστριακός μηχανικός Siegfried Marcus κατασκεύασε έναν μονοκύλινδρο κινητήρα με ένα κακής ποιότητας και λειτουργίας καρμπυρατέρ και έβαλε τον κινητήρα του σε ένα κάρο, για να διανύσει μια βραχώδη απόσταση 500 ποδιών. Αρκετά χρόνια αργότερα, ο Marcus σχεδίασε ένα όχημα, το οποίο κατάφερε να επιτύχει ταχύτητα 10 μιλίων, ανά ώρα. Μάλιστα, μερικοί ιστορικοί το θεώρησαν πρόδρομο του σύγχρονου αυτοκινήτου, ως το πρώτο βενζινοκίνητο όχημα στον κόσμο.
- **1873** – Ο Αμερικανός μηχανικός George Brayton ανέπτυξε έναν ανεπιτυχή δίχρονο κινητήρα κηροζίνης (χρησιμοποίησε δύο εξωτερικούς κυλίνδρους άντλησης). Ωστόσο, θεωρήθηκε ο πρώτος ασφαλής και πρακτικός κινητήρας λαδιού.
- **1866** – 2 Γερμανοί μηχανικοί, ο Eugen Langen και ο Nikolaus August Otto, βελτίωσαν τα σχέδια του Lenoir και του de Rochas και ανακάλυψαν έναν πιο αποδοτικό κινητήρα βενζίνης.
- **1876** – Ο Nikolaus August Otto εφηύρε και αργότερα κατοχύρωσε έναν λειτουργικό τετράχρονο κινητήρα, γνωστό και ως “Otto cycle engine”
- **1876** – Ο πρώτος λειτουργικός δίχρονος κινητήρας εφευρέθηκε από τον Sir Dougald Clerk.
- **1883** – Ο Γάλλος μηχανικός Edouard Delamare-Debouteville κατασκεύασε έναν μονοκύλινδρο τετράχρονο κινητήρα, ο οποίος λειτουργούσε με καύσιμο σόμπας. Δεν είναι απολύτως βέβαιο ότι όντως κατασκεύασε ένα αυτοκίνητο, ωστόσο, τα σχέδια

του Delamare-Debouteville ήταν πολύ μπροστά για την εποχή του, πριν από των Daimler και Benz κατά κάποιο τρόπο.

- **1885** – Ο Gottlieb Daimler εφηύρε αυτό που συχνά αναγνωρίζεται ως το πρωτότυπο ενός μοντέρνου κινητήρα βενζίνης, με κάθετο κύλινδρο και με έγχυση βενζίνης, μέσω καρμπυρατέρ (κατοχυρώθηκε το 1887). Ο Daimler πρώτα κατασκεύασε ένα δίτροχο όχημα, το "Reitwagen", με αυτόν τον κινητήρα και έναν χρόνο μετά κατασκεύασε το πρώτο τετράτροχο μηχανοκίνητο όχημα στον κόσμο.
- **1886** - Στις 29 Ιανουαρίου, ο Karl Benz έλαβε το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας (DRP No. 37435) για ένα βενζινοκίνητο αυτοκίνητο.
- **1889** – Ο Daimler κατασκεύασε έναν βελτιωμένο τετράχρονο κινητήρα, με βαλβίδες σε σχήμα μανιταριού, και δύο κυλίνδρους με κλίση V.
- **1890** – Ο Wilhelm Maybach κατασκεύασε τον πρώτο τετρακύλινδρο, τετράχρονο κινητήρα.

4. Είδη κινητήρων εσωτερικής καύσης

Υπάρχουν 2 βασικοί κύκλοι, που χρησιμοποιούνται στους κινητήρες εσωτερικής καύσης, [2]: του Otto και του Diesel, οι οποίοι πήραν τα ονόματα τους από τους δημιουργούς τους. Οι κινητήρες που λειτουργούν με τον κύκλο του Otto έχουν ανάγκη έναν σπινθήρα για να έχουμε ανάφλεξη του καύσιμου μείγματος, ενώ, αντίθετα, στους κινητήρες που λειτουργούν με τον κύκλο του Diesel, το καύσιμο μείγμα αυταναφλέγεται, όταν εισέρχεται στον θάλαμο καύσης, λόγω της υψηλής συμπίεσης. Τόσο ο κύκλος του Otto, όσο και ο κύκλος του Diesel, μπορούν να λειτουργήσουν σε 2 ή 4 χρόνους.

Από την εφεύρεση του κινητήρα εσωτερικής καύσης και μετά, έχουν σχεδιαστεί και χρησιμοποιηθεί πολλές διαφορετικές γεωμετρίες, αριθμοί κυλίνδρων και κυβισμοί. Η επιλογή της διάταξης κάθε φορά εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και περιορισμούς, που έχουν να κάνουν με το ζύγισμα του κινητήρα και τον διαθέσιμο χώρο τοποθέτησης αυτού. Υπάρχουν 4 επικρατέστερες διατάξεις κινητήρων : α) σε σειρά, β) τύπου boxer (οριζοντίως τοποθετημένα έμβολα, αντίθετα), γ) ακτινικοί και δ) V.

4.1. Κινητήρες σε σειρά

Εικόνα 1. Τετρακύλινδρος εν σειρά κινητήρας εσωτερικής καύσης. [Πηγή: https://qph.fs.quoracdn.net/main-qimg-dd41c6426ee1cdaac1b6fc7824ff0530]

Ένας τετρακύλινδρος σε σειρά κινητήρας έχει και τους 4 κυλίνδρους του τοποθετημένους σε μια ευθεία γραμμή, κατά μήκος του μπλοκ του, [2]. Αυτοί μπορεί να είναι τοποθετημένοι κάθετα ή με κάποια κλίση, με όλα τα έμβολα να εδράζονται και να δίνουν κίνηση σε έναν στροφαλοφόρο άξονα. Ένας τετρακύλινδρος κινητήρας σε σειρά έχει τέλεια αρχική ισορροπία και μια μηχανική απλότητα, η οποία τον κάνει πολύ δημοφιλή για χρήση σε οικονομικά οχήματα. Παρ' όλα αυτά, παρά την απλότητα του, υποφέρει από δευτερεύουσες αστάθειες, οι οποίες προκαλούν μικρές δονήσεις. Αυτές οι δονήσεις χειροτερεύουν όσο το μέγεθος και η ισχύς του κινητήρα αυξάνονται. Γι' αυτό τον λόγο, οι πιο ισχυροί κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερα αυτοκίνητα – οχήματα χρησιμοποιούν πιο σύνθετες διατάξεις, με περισσότερους από 4 κυλίνδρους. Την σήμερον ημέρα, σχεδόν όλοι οι κατασκευαστές τετρακύλινδρων κινητήρων για οχήματα χρησιμοποιούν αυτή τη διάταξη, με τον τετρακύλινδρο boxer της Subaru να αποτελεί μια αξιοσημείωτη εξαίρεση, και, έτσι, ένας τετρακύλινδρος κινητήρας σχεδόν πάντα σημαίνει ότι είναι σε σειρά. Ο τετρακύλινδρος σε σειρά είναι η πιο συνηθισμένη επιλογή κινητήρα στα σύγχρονα αυτοκίνητα, με τον V6 να έρχεται δεύτερος. Τις τελευταίες δεκαετίες, ακολουθώντας τις προσπάθειες των κατασκευαστών για μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και κατ' επέκταση των ρύπων, σε συνδυασμό με την υψηλή τιμή των καυσίμων και την οικονομική κρίση, τα οχήματα που χρησιμοποιούν τετρακύλινδρους κινητήρες αυξήθηκαν από 30% σε 47%, την περίοδο 2005 έως 2008.

Οι κινητήρες σε σειρά είναι συνήθως 4 ή 6 κυλίνδρων και, γενικότερα, ένας κινητήρας αυτής της διάταξης θεωρείται πιο εύκολο να κατασκευαστεί από έναν αντίστοιχο boxer ή V, διότι το μπλοκ των κυλίνδρων και ο εκκεντροφόρος άξονας μπορούν να κατασκευαστούν μονοκόμματα και χρειαζόμαστε μόνο μια κυλινδροκεφαλή και έναν εκκεντροφόρο. Βέβαια, οι κινητήρες υψηλών επιδόσεων, που έχει επιλεχθεί η διάταξη σε σειρά, χρησιμοποιούν πάντα 2 εκκεντροφόρους επικεφαλής. Γενικότερα, οι κινητήρες σε σειρά έχουν μικρότερες εξωτερικές διαστάσεις και μπορούν να τοποθετηθούν στον εγκάρσιο ή στον διαμήκη άξονα. Η διάταξη αυτού του τύπου είναι απλούστερη από την αντίστοιχη σε V. Χρησιμοποιούν ένα ρουλεμάν υποστήριξης ανάμεσα σε κάθε έμβολο, σε αντίθεση με τους boxer και τους V κινητήρες, που έχουν ένα ρουλεμάν ανάμεσα σε κάθε ζεύγος εμβόλων. Ενώ οι εξακύλινδροι κινητήρες είναι αρκετά καλοζυγισμένοι, οι τετρακύλινδροι δεν είναι τόσο και έχουν πιο τραχιά λειτουργία, ειδικά σε σύγκριση με V κινητήρες 90 μοιρών και σε boxer τετρακύλινδρους.

Ένας τετρακύλινδρος κινητήρας σε σειρά βρίσκεται σε καλή ισορροπία, διότι τα έμβολα κινούνται σε ζευγάρια. Άρα, ένα ζεύγος εμβόλων κινείται προς τα πάνω, την ίδια στιγμή που το άλλο ζευγάρι κινείται προς τα κάτω, στην περίπτωση όπου η διάταξη του στροφαλοφόρου είναι 0-180-180-0 τότε η κίνηση τους είναι πανομοιότυπη. Όμως, η επιτάχυνση και επιβράδυνση του εμβόλου είναι μεγαλύτερη στο πάνω μισό της περιστροφής του στροφάλου, παρά στο κάτω μισό της περιστροφής, γιατί οι διωστήρες δεν έχουν άπειρο μήκος, με αποτέλεσμα μια μη ημιτονοειδή κίνηση. Ως εκ τούτου, τα δύο έμβολα πάντα επιταχύνουν γρηγορότερα προς μια κατεύθυνση, ενώ τα άλλα δύο επιταχύνουν αρκετά πιο αργά προς την άλλη κατεύθυνση, κάτι που μας οδηγεί σε μια δευτερεύουσα δυναμική αστάθεια, που δημιουργεί μια δόνηση, που αυξάνεται ανάλογα με την ταχύτητα του στροφαλοφόρου άξονα. Αυτή η αστάθεια είναι ανεκτή σε έναν μικρό, χαμηλού κυβισμού, χαμηλής ισχύος κινητήρα, αλλά οι δονήσεις χειροτερεύουν όσο αυξάνουμε σε μέγεθος και ισχύ.

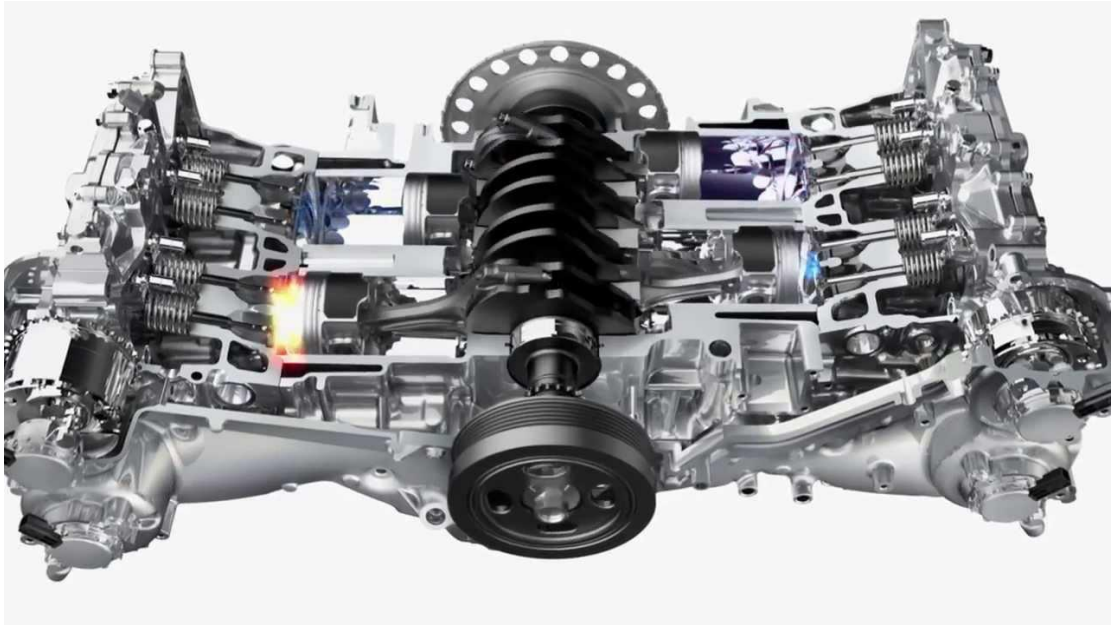
Ο λόγος για την μεγαλύτερη ταχύτητα εμβόλου, κατά την διάρκεια των 180 μοιρών περιστροφής από το μέσο της διαδρομής στο άνω νεκρό σημείο και πίσω στο μέσο της διαδρομής, είναι ότι ο διωστήρας έχει την ίδια κατεύθυνση με αυτό, ενώ, κατά την διάρκεια των 180 μοιρών περιστροφής, από τα μέσα της εκτόνωσης μέχρι και το κάτω νεκρό σημείο και πίσω, έχει την αντίθετη κατεύθυνση.

Οι τετρακύλινδροι κινητήρες, επίσης, έχουν ένα πρόβλημα ομαλότητας, γιατί ο ωφέλιμος χρόνος των εμβόλων δεν επικαλύπτεται από άλλο. Με τέσσερις κυλίνδρους και τέσσερις χρόνους να πρέπει να ολοκληρωθούν στον τετράχρονο κύκλο λειτουργίας, το κάθε έμβολο πρέπει να ολοκληρώσει τον ωφέλιμο χρόνο του και να έρθει σε ακινησία, προτού το επόμενο έμβολο μπει στον ωφέλιμο χρόνο και να έχει ως αποτέλεσμα την παύση ανάμεσα στον ωφέλιμο χρόνο και στην αδιάκοπη παροχή ισχύος. Σε κινητήρες με περισσότερους κυλίνδρους, οι ωφέλιμοι χρόνοι επικαλύπτονται, κάτι το οποίο δίνει μια πιο ομαλή παροχή ισχύος, λιγότερες δονήσεις, από ένα τετρακύλινδρο. Ως εκ τούτου, οι εξακύλινδροι και οκτακύλινδροι κινητήρες χρησιμοποιούνται περισσότερο σε πιο πολυτελή και ακριβά οχήματα. Όταν ένας σε σειρά κινητήρας είναι τοποθετημένος σε μια γωνία επί της καθέτου, αυτός λέγεται κινητήρας υπό κλίση (slant engine). Ο slant 6 της Chrysler χρησιμοποιούταν σε αρκετά μοντέλα του 1960 και 1970. Η Honda, επίσης, τοποθετεί, συχνά, τους εν σειρά τετρακύλινδρους και πεντακύλινδρους κινητήρες της, σε κλίση, όπως είναι το Honda S2000 και το Acura Vigor. Η SAAB χρησιμοποίησε πρώτη έναν τετρακύλινδρο σε σειρά κινητήρα, τοποθετημένο στις 45 μοίρες κλίσης, για το SAAB 99. Όμως, οι επόμενες εκδόσεις του κινητήρα ήταν με μικρότερη κλίση.

Δύο κύριοι λόγοι οδήγησαν στη πρόσφατη πτώση του εξακύλινδρου σε σειρά στις εφαρμογές του στην αυτοκινητοβιομηχανία. Πρώτον, οι άξονες ισορροπίας, τύπου Lanchester, μια παλιά ιδέα που επανάφερε η Mitsubishi στη δεκαετία του 1980 για να ξεπεραστεί η φυσική ανισορροπία του τετρακύλινδρου κινητήρα σε σειρά, που αστραπιαία υιοθετήθηκε και από πολλούς άλλους κατασκευαστές, έκαναν τον τετρακύλινδρο σε σειρά και τον V6 κινητήρα να λειτουργούν ομαλότερα. Η μεγαλύτερη ομαλότητα του εξακύλινδρου σε σειρά δεν είναι πλέον ένα τέτοιο πλεονέκτημα. Δεύτερον, η κατανάλωση καυσίμου έγινε σημαντικότερη, όσο τα αυτοκίνητα γίνονταν μικρότερα και καταλάμβαναν λιγότερο χώρο. Το μηχανοστάσιο από ένα μοντέρνο μικρό ή μεσαίο αυτοκίνητο, τυπικά σχεδιασμένο για έναν τετρακύλινδρο σε σειρά κινητήρα, τις περισσότερες φορές δεν έχει χώρο για να μπει ένας εξακύλινδρος σε σειρά, αλλά ένας V6 μπορεί να τοποθετηθεί με μικρές τροποποιήσεις.

Οι εξακύλινδροι σε σειρά κινητήρες χρησιμοποιούνται σε μερικά μοντέλα της BMW, Ford Αυστραλίας, Chevrolet, GMC, Toyota, Suzuki και Volvo.

4.2. Κινητήρες τύπου Boxer



Εικόνα 2. Τετρακύλινδρος κινητήρας εσωτερικής καύσης τύπου boxer. [Πηγή: https://www.youtube.com/watch?v=oLBXequ8y-c]

Ένας κινητήρας Boxer είναι ένας κινητήρας, στον οποίο οι δύο κυλινδροκεφαλές είναι σε αντίθετες πλευρές σε σχέση με τον στροφαλοφόρο άξονα, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα ένα οριζόντιο προφίλ, [2]. Η Subaru και η Porsche είναι δύο παραδείγματα αυτοκινητοβιομηχανιών που χρησιμοποιούν τέτοιους κινητήρες στα οχήματα τους. Οι κινητήρες τύπου boxer προσφέρουν χαμηλό κέντρο βάρους που έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη σταθερότητα και έλεγχο στην οδηγική συμπεριφορά. Είναι επίσης, πιο φαρδύς από άλλου τύπου κινητήρες, δημιουργώντας χωροταξικά προβλήματα στο μηχανοστάσιο με την τοποθέτηση αυτού στο εμπρός μέρος του αυτοκινήτου. Αυτός ο κινητήρας είναι διαδεδομένος σε εφαρμογές που αφορούν εναέρια οχήματα.

Τυπικά, αυτή η διάταξη έχει κυλίνδρους παραταγμένους σε δύο θέσεις, αριστερά και δεξιά του μονού στροφαλοφόρου άξονα και είναι γενικά γνωστοί ως Boxer.

Οι κινητήρες boxer πήραν το όνομά τους, εξαιτίας κάθε ζεύγους εμβόλων που κινείται ταυτόχρονα μέσα και έξω, αντί να εναλλάσσονται, όπως οι πυγμάχοι που δείχνουν ότι είναι έτοιμοι σπρώχνοντας τις γροθιές τους μεταξύ τους πριν από έναν αγώνα. Οι κινητήρες boxer έως οκτώ κυλίνδρους έχουν αποδειχθεί εξαιρετικά επιτυχημένοι στα αυτοκίνητα και έως έξι κυλίνδρους σε μοτοσικλέτες και εξακολουθούν να είναι δημοφιλείς για την κίνηση ελαφρών αεροσκαφών.

Οι κινητήρες boxer είναι μία από τις τρεις διατάξεις κυλίνδρων που έχουν φυσική δυναμική ισορροπία. Οι άλλες δύο είναι ο εν σειρά εξακύλινδρος και ο V12. Αυτοί οι κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν πολύ ομαλά όντας απαλλαγμένοι από μη ισορροπημένες δυνάμεις σε έναν τετράχρονο κύκλο λειτουργίας και δεν απαιτούν άξονα ισορροπίας ή αντίστροφα βάρη στον στροφαλοφόρο άξονα για να εξισορροπήσουν το βάρος

των παλινδρομικών εξαρτημάτων, τα οποία απαιτούνται σε άλλες διαμορφώσεις κινητήρα. Ωστόσο, στην περίπτωση κινητήρων boxer με λιγότερους από έξι κυλίνδρους, οι μη ισορροπημένες ροπές (μια παλινδρομική ροπή γνωστή και ως "rocking couple") είναι αναπόφευκτες λόγω του ότι οι "αντίθετοι" κύλινδροι είναι ελαφρώς εκτός του ιδίου άξονα μεταξύ τους.

Οι κινητήρες boxer τείνουν να είναι πιο θορυβώδεις από τους άλλους κοινούς κινητήρες τόσο για εγγενείς όσο και για άλλους λόγους. Το κροτάλισμα των βαλβίδων κάτω από το καπό δεν αποσβένεται από μεγάλα φίλτρα αέρα και άλλα εξαρτήματα. Οι κινητήρες boxer δεν χρειάζονται βάρη ισορροπίας στον στροφαλοφόρο άξονα, ο οποίος καταλήγει να είναι ελαφρύτερος και πιο γρήγορα επιταχυνόμενος, αλλά, στην πράξη, χρειάζονται ένα βολάν για να λειτουργούν ομαλά σε χαμηλές ταχύτητες και αυτό αναιρεί το πλεονέκτημά τους. Έχουν μια χαρακτηριστική ομαλότητα σε όλο το εύρος στροφών και προσφέρουν χαμηλό κέντρο βάρους.

4.3. Ακτινικοί κινητήρες

Εικόνα 3. Επτακύλινδρος ακτινικός κινητήρας εσωτερικής καύσης. [Πηγή : https://www.horizonhobby.com/dw/image/v2/BFBR_PRD/on/demandware.static/-/Sites-horizon-master/default/dw48d1ad16/Images/EVO/EVOE735_A0_JGLFTHA8.jpg?sw=800&sh=800&sm=fit]

Ο ακτινικός κινητήρας είναι μια διαμόρφωση κινητήρα εσωτερικής καύσης, παλινδρομικού τύπου, στην οποία οι κύλινδροι δείχνουν προς τα έξω από έναν κεντρικό στροφαλοφόρο άξονα, όπως οι ακτίνες ενός τροχού, [2]. Αυτή η διαμόρφωση χρησιμοποιούταν κατά κόρον σε κινητήρες μεγάλων αεροσκαφών, πριν αυτά ξεκινήσουν να χρησιμοποιούν στροβιλοκινητήρες (κινητήρας τύπου jet).

Σε έναν ακτινικό κινητήρα, τα έμβολα συνδέονται στον στροφαλοφόρο άξονα με ένα σύνθετης γεωμετρίας σύστημα εδράσεων των επιμέρους διωστήρων. Ένα έμβολο έχει ένα κύριο διωστήρα με άμεση προσάρτηση στον στροφαλοφόρο άξονα. Τα εναπομείναντα έμβολα έχουν τις συνδέσεις των διωστήρων τους σε δακτυλίους γύρω από την άκρη του κύριου διωστήρα. Οι τετράχρονοι ακτινικοί κινητήρες έχουν πάντοτε περίεργο αριθμό κυλίνδρων ανά σειρά, έτσι ώστε να έχουμε συνέπεια στην σειρά έναυσης, παρέχοντας ομαλή λειτουργία. Αυτό επιτυγχάνεται επειδή ο κινητήρας απαιτεί 2 περιστροφές του

στροφαλοφόρου άξονα για την ολοκλήρωση των 4 χρόνων της λειτουργίας του, που σημαίνει ότι η σειρά ανάφλεξης είναι 1,3,5,2,4 και πάλι στον κύλινδρο 1. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει πάντα ένα διάκενο δύο εμβόλων μεταξύ του εμβόλου που βρίσκεται στον ωφέλιμο χρόνο με το επόμενο έμβολο που θα βρεθεί στον ίδιο χρόνο. Εάν χρησιμοποιηθεί ένας ζυγός αριθμός κυλίνδρων, η σειρά ανάφλεξης θα ήταν κάτι σαν 1,3,5,2,4,6 που αφήνει ένα κενό τριών εμβόλων μεταξύ του εμβόλου στον ωφέλιμο χρόνο στην πρώτη περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα και μόνο ένα στην δεύτερη. Αυτό οδηγεί σε ασυνεπή σειρά έναυσης εντός του κινητήρα και δεν είναι ιδανικό.

Αρχικά οι ακτινικοί κινητήρες είχαν μια σειρά κυλίνδρων, αλλά καθώς τα μεγέθη των κινητήρων αυτών αυξήθηκαν, ήταν απαραίτητο να προστεθούν επιπλέον σειρές. Ο πρώτος γνωστός κινητήρας ακτινικής διαμόρφωσης που χρησιμοποίησε και δεύτερη σειρά εμβόλων ήταν το "Double Lambda" το 1912, ο οποίος είχε 14 κυλίνδρους σε δύο σειρές.

Ενώ οι περισσότεροι ακτινικοί κινητήρες έχουν παραχθεί για βενζίνη, υπήρξαν περιπτώσεις κινητήρων που χρησιμοποιούσαν πετρέλαιο. Το Bristol Phoenix του 1928-1932 δοκιμάστηκε με επιτυχία σε αεροσκάφη και η Nordberg Manufacturing Company των ΗΠΑ ανέπτυξε και παρήγαγε μια γκάμα μεγάλων κινητήρων πετρελαίου από τη δεκαετία του 1940.

Οι εταιρείες που κατασκευάζουν ακτινικούς κινητήρες σήμερα είναι οι Vedeneyen, Rotec Engineering, HCI Aviation και Verner Motors.

4.4. Κινητήρες τύπου V

Εικόνα 4. Σύνολο στροφαλοφόρου άξονα, διωστήρων και εμβόλων ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης τύπου V8 (Mercedes-AMG C63 '2018). [Πηγή : https://media.daimler.com/marsMediaSite/Thumbnail?oid=40752516&version=-2&thumbnailVersion=3]

Ο κινητήρας V διάταξης είναι μία κοινή διαμόρφωση για έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης. Οι κύλινδροι και τα έμβολα είναι ευθυγραμμισμένα σε δύο ξεχωριστά επίπεδα ή πλευρές, δηλαδή φαίνεται να είναι σαν το γράμμα "V" όταν κοιτάς κατά μήκος του στροφαλοφόρου άξονα, [2]. Η διαμόρφωση V μειώνει γενικά το συνολικό μήκος, το ύψος και το βάρος του κινητήρα σε σύγκριση με έναν αντίστοιχων κυλίνδρων σε σειρά κινητήρα.

Διάφορες περιεχόμενες γωνίες των κυλίνδρων σε διάταξη V, χρησιμοποιούνται σε διαφορετικούς κινητήρες ανάλογα με τον αριθμό των κυλίνδρων. Υπάρχουν γωνίες που λειτουργούν καλύτερα από άλλες, όσον αφορά την σταθερότητα (V 90 μοιρών), ενώ οι μικρότερες περιεχόμενες γωνίες οδηγούν σε μικρότερο συνολικό μέγεθος του κινητήρα, αλλά υποφέρουν από περισσότερους κραδασμούς. Οι πολύ στενές γωνίες ενός V κινητήρα συνδυάζουν μερικά από τα πλεονεκτήματα του ιδίου και ενός κινητήρα σε σειρά.

Από τους πιο συνηθισμένους κινητήρες V είναι οι V6. Πρόκειται για έναν κινητήρα με έξι κυλίνδρους, τοποθετημένους στον στροφαλοθάλαμο σε δύο πλευρές των τριών κυλίνδρων, με μια περιεχόμενη γωνία, και με τα έξι έμβολα να δίνουν κίνηση σε έναν κοινό στροφαλοφόρο άξονα. Είναι η δεύτερη πιο κοινή διαμόρφωση κινητήρα σε μοντέρνα αυτοκίνητα μετά τον τετρακύλινδρο εν σειρά κινητήρα.

Γίνεται όλο και πιο σύνηθες, καθώς ο χώρος του μηχανοστασίου μικραίνει στα σύγχρονα αυτοκίνητα, τη στιγμή που αυξάνονται οι απαιτήσεις ισχύος, να επιλέγεται ένας τύπου V κινητήρας και έχει αντικαταστήσει, σε μεγάλο βαθμό, κυρίως, τον εξακύλινδρο σε σειρά, ο οποίος είναι πολύ μακρύς, για να χωρέσει στο αντίστοιχο μηχανοστάσιο. Αν και είναι πιο περίπλοκος και όχι τόσο ομαλός όσο ο εξακύλινδρος εν σειρά, ο V6 είναι πιο άκαμπτος, παρ' όλο που ζυγίζει λιγότερο, μικρότερου μεγέθους και με αισθητά λιγότερες στρεπτικές δονήσεις του στροφαλοφόρου άξονα, όταν αναφερόμαστε σε κινητήρες αντίστοιχου κυβισμού. Ο κινητήρας V6 έχει υιοθετηθεί ευρέως για αυτοκίνητα μεσαίου μεγέθους και πολύ συχνά ως επιπλέον επιλογή κινητήρα σε οχήματα όπου ο τετρακύλινδρος εν σειρά είναι η βασική επιλογή ή ως βασική επιλογή σε οχήματα όπου ο V8 είναι προαιρετικός.

Η πιο αποτελεσματική γωνία κυλίνδρου για κινητήρες V6 είναι οι 60 μοίρες, ελαχιστοποιώντας το μέγεθος και τους κραδασμούς. Ενώ οι 60 μοιρών V6 κινητήρες δεν είναι τόσο ισορροπημένοι όσο οι εξακύλινδροι κινητήρες εν σειρά και οι εξακύλινδροι boxer, οι σύγχρονες τεχνικές για τη σχεδίαση και την τοποθέτηση κινητήρων έχουν συγκαλύψει σε μεγάλο βαθμό τις δονήσεις τους. Σε αντίθεση με τις περισσότερες άλλες γωνίες, οι κινητήρες 60 μοιρών V6 μπορούν να γίνουν αποδεκτά ομαλοί χωρίς την ανάγκη για χρήση αξόνων ισορροπίας.

Παράγονται επίσης κινητήρες 90 μοιρών V6, συνήθως ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίδια γραμμή παραγωγής, με την παραγωγή κινητήρων V8 (οι οποίοι συνήθως έχουν γωνία 90 μοιρών V). Παρόλο που είναι εύκολο να έχουμε έναν V6 90 μοιρών, απλά κόβοντας δύο κυλίνδρους από έναν V8 κινητήρα, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι φαρδύτερος και με περισσότερους κραδασμούς από έναν V6 60 μοιρών.

Οι 120 μοίρες θεωρούνται ως η φυσική γωνία για ένα V6 αφού οι κύλινδροι έχουν ανάφλεξη κάθε 120 μοίρες περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα. Η διάταξη των 120 μοιρών έχει ως αποτέλεσμα έναν κινητήρα, που είναι υπερβολικά φαρδύς για τα περισσότερα μηχανοστάσια της αυτοκινητοβιομηχανίας, αν όχι όλα, οπότε έχει εφαρμογές σε αγωνιστικά οχήματα, όπου αυτό χτίζεται γύρω από τον κινητήρα και όχι το αντίθετο. Επίσης, το μέγεθος των δονήσεων δεν θεωρείται σημαντικό.

Οι κινητήρες V8 90 μοιρών είναι ευρέως διαδεδομένοι στην αμερικανική αγορά, από την δεκαετία του 1960. Χρησιμοποιούνταν και χρησιμοποιούνται ακόμη κατά κόρον στα επονομαζόμενα "Muscle Cars" και ήταν, συνήθως, πολύ μεγάλου κυβισμού και υψηλών επιδόσεων, ειδικά συγκρινόμενοι με άλλους κινητήρες της εποχής τους. Βέβαια, αυτοί οι «παλαιάς κοπής» V8 90 μοιρών υπέφεραν από πολύ μεγάλες δονήσεις, διότι ο στροφαλοφόρος άξονας τους είχε κομβία ανά 90 μοίρες και, έτσι, κατά την λειτουργία του, δημιουργούσε πολύ ανόμοια σειρά έναυσης, ανάμεσα στις 2 πλευρές του V. Όταν, αργότερα, εξελίχθηκαν κινητήρες V8 90 μοιρών, με στροφαλοφόρο άξονα, τύπου flat plane, ο οποίος έχει τα κομβία του ανά 180 μοίρες, το γεγονός ότι τα έμβολα ταξίδευαν ανά ζεύγη, επέτρεψε όμοια διαστήματα ανάφλεξης στις 2 πλευρές του και, έτσι, οι αντιτιθέμενες δυνάμεις από αυτήν εξισορροπούσαν η μία την άλλη. Αυτό οδήγησε σε έναν κινητήρα, με πολύ ομαλή λειτουργία, παράγοντας υψηλή ισχύ. Υιοθετήθηκε, δε, από τις περισσότερες κατασκευάστριες εταιρείες "Super Cars" και "Hyper Cars" ανά τον κόσμο, κάτι το οποίο οδήγησε στην μεγάλη εξέλιξη τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η Ferrari, η οποία χρησιμοποιούσε σχεδόν αποκλειστικά κινητήρες V12, λόγω του τρόπου απόδοσης τους, για σπορ οχήματα, που είχαν ως σκοπό την χρήση σε πίστα, να αλλάξει σε V8 90 μοιρών, λόγω του μειωμένου βάρους και μεγέθους τους με τους αντίστοιχους V12 σε αυτές τις εφαρμογές.

Παρ’ όλα αυτά, για τα υπερπολυτελή, τύπου GT, οχήματα που παράγει, ο V12 παρέμεινε. Τα τελευταία χρόνια, ο V8 90 μοιρών με flat plane crank, υπερτροφοδοτούμενος ή ατμοσφαιρικός, έγινε η βασική επιλογή για sport, super και hyper cars ανά τον κόσμο.

5. Βασικά εξαρτήματα κινητήρα

Εικόνα 5. Στροφαλοφόρος άξονας, διωστήρες και έμβολα από τον τύπου V8 κινητήρα εσωτερικής καύσης του Mercedes E63 AMG BiTurbo by BRABUS. [Πηγή : https://cdn.filestackcontent.com/resize=w:500,h:375,f:clip,a:center/output=format:pjpg,q:75/rotate=deg:exif/jfyrcAfS9COopmR0jaIn]

5.1. Έμβολα

Εικόνα 6. Σύνολο στροφαλοφόρου άξονα, διωστήρα και εμβόλου από τον τύπου V8 flat plane crank κινητήρα εσωτερικής καύσης του Koenigsegg Agera RS. [Πηγή : https://www.koenigsegg.com/build128-the-koenigsegg-engine/]

Το έμβολο είναι ένα από τα κύρια μέρη του κινητήρα, [2]. Σκοπός του είναι να μεταφέρει την παραγόμενη δύναμη από την ανάφλεξη του καυσίμου μείγματος εντός του κυλίνδρου στον στροφαλοφόρο άξονα μέσω του διωστήρα.

Δεδομένου ότι το έμβολο είναι το κύριο παλινδρομικό μέρος ενός κινητήρα, η κίνησή του δημιουργεί μια ανισορροπία. Αυτή η ανισορροπία εκδηλώνεται γενικά ως δόνηση, η οποία αναγκάζει τον κινητήρα να είναι αισθητά σκληρός. Η τριβή μεταξύ των τοιχωμάτων του κυλίνδρου και των ελατηρίων του εμβόλου οδηγεί τελικά σε φθορά, μειώνοντας την διάρκεια ζωής του μηχανισμού.

Ο ήχος που παράγεται από έναν παλινδρομικό εμβολοφόρο κινητήρα μπορεί να είναι αβάστακτος για μερικούς και, ως εκ τούτου, οι περισσότεροι χρησιμοποιούν μηχανισμούς για την μείωση του. Για να μεταδοθεί η ενέργεια του εμβόλου στο στρόφαλο, αυτό συνδέεται με τον διωστήρα ο οποίος με την σειρά του συνδέεται με τον στροφαλοφόρο άξονα. Επειδή η γραμμική κίνηση του εμβόλου πρέπει να μετατραπεί σε περιστροφική κίνηση του στροφαλοφόρου άξονα, προκύπτει μηχανική απώλεια ενέργειας, ως συνέπεια. Συνολικά, αυτό οδηγεί σε μείωση της ωφέλιμης ενέργειας που παράγεται από την διαδικασία της καύσης. Η κίνηση του στροφαλοφόρου άξονα δεν είναι ομαλή, καθώς η ενέργεια που παρέχεται από το έμβολο δεν είναι συνεχής. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, οι κατασκευαστές τοποθετούν βολάν μεγάλου βάρους που καταπολεμούν την αδράνεια του στροφαλοφόρου άξονα. Οι άξονες ζυγοστάθμισης είναι επίσης τοποθετημένοι σε ορισμένους κινητήρες και μειώνουν την αστάθεια που δημιουργείται από την κίνηση των εμβόλων. Για την τροφοδοσία καυσίμου μείγματος και την αφαίρεση των καυσαερίων από τον κύλινδρο υπάρχει ανάγκη

βαλβίδων και εκκεντροφόρων. Κατά το άνοιγμα και το κλείσιμο των βαλβίδων, δημιουργούνται μηχανικοί θόρυβοι και κραδασμοί.

Τα έμβολα είναι συνήθως κατασκευασμένα από χυτό κράμα αλουμινίου, με σκοπό την εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα και το χαμηλό βάρος. Η θερμική αγωγιμότητα είναι η ικανότητα ενός υλικού να διαχειρίζεται και να μεταφέρει την θερμότητα. Το αλουμίνιο διαστέλλεται όταν θερμαίνεται και πρέπει να παρέχεται κατάλληλη απόσταση για να διατηρείται η ελεύθερη κίνηση του εμβόλου εντός του κυλίνδρου. Η παραπάνω από την αναγκαία απόσταση προκαλεί μείωση συμπίεσης, αυξημένο θόρυβο και απώλεια ισχύος, ενώ η πολύ στενή εφαρμογή μπορεί να προκαλέσει το κόλλημα του εμβόλου εντός του κυλίνδρου.

Τα χαρακτηριστικά του εμβόλου περιλαμβάνουν την κεφαλή του εμβόλου, την οπή του εμβόλου, τον πείρο του εμβόλου, τη «φούστα», τις εγκοπές για τα ελατήρια και τα ίδια τα ελατήρια. Η κεφαλή του εμβόλου είναι η άνω επιφάνεια (πλησιέστερα στην κυλινδροκεφαλή) του εμβόλου η οποία υπόκειται σε τεράστιες δυνάμεις και θερμότητα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του κινητήρα.

Η οπή του εμβόλου είναι μια διαμπερής τρύπα κατά μήκος αυτού κάθετα προς τη διαδρομή εμβόλου και εκεί τοποθετείται ο πείρος, με τις απαραίτητες ασφάλειες. Ο πείρος εμβόλου είναι ένας κοίλος άξονας που συνδέει το άνω άκρο του διωστήρα με το έμβολο. Η «φούστα» του εμβόλου είναι το τμήμα του εμβόλου που βρίσκεται πλησιέστερα στον στροφαλοφόρο άξονα που βοηθά στην ευθυγράμμιση του εμβόλου καθώς κινείται εντός του κυλίνδρου. Ορισμένες φούστες έχουν κομμένα προφίλ για να μειώσουν τη μάζα του εμβόλου και να παρέχουν την αναγκαία απόσταση για τα περιστρεφόμενα αντίβαρα του στροφαλοφόρου άξονα.

5.2. Ελατήρια εμβόλου

Εικόνα 7. Έμβολο τύπου υψηλής συμπίεσης και τα ελατήρια του. [Πηγή : https://www.hotrod.com/articles/hrdp-9808-piston-ring-science/]

Η εσοχή των ελατηρίων βρίσκεται γύρω από την περίμετρο του εμβόλου και χρησιμοποιείται για τη συγκράτηση αυτών, [2]. Οι εδράσεις των ελατηρίων είναι δύο παράλληλες επιφάνειες της εσοχής τους, που λειτουργούν ως επιφάνειες στεγανοποίησης, σε συνδυασμό με τα ελατήρια. Το ελατήριο του εμβόλου είναι ένας επεκτάσιμος διαχωρισμένος δακτύλιος που χρησιμοποιείται για την στεγανοποίηση μεταξύ του εμβόλου και του τοιχώματος του κυλίνδρου. Τα ελατήρια των εμβόλων είναι συνήθως κατασκευασμένα από χυτοσίδηρο. Ο χυτοσίδηρος διατηρεί την ακεραιότητα του αρχικού του σχήματος υπό θερμότητα, φορτίο και άλλες δυνάμεις. Τα ελατήρια του εμβόλου σφραγίζουν το θάλαμο καύσης, μεταφέρουν θερμότητα από το έμβολο στο τοίχωμα του κυλίνδρου και επιστρέφουν λάδι στο στροφαλοθάλαμο. Το μέγεθος και η διαμόρφωση των ελατηρίων του εμβόλου ποικίλλουν ανάλογα με το σχεδιασμό του κινητήρα και το υλικό του κυλίνδρου.

Τα ελατήρια εμβόλων που χρησιμοποιούνται συνήθως σε μικρούς κινητήρες περιλαμβάνουν το ελατήριο συμπίεσης, το ελατήριο απόξυσης και το ελατήριο λαδιού. Το ελατήριο συμπίεσης είναι αυτό που βρίσκεται στην εγκοπή πλησιέστερα στην κεφαλή του εμβόλου. Το ελατήριο συμπίεσης σφραγίζει τον θάλαμο καύσης από οποιαδήποτε διαρροή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας καύσης. Όταν το μείγμα αέρα-καυσίμου αναφλέγεται, εφαρμόζεται πίεση από τα αέρια καύσης στην κεφαλή του εμβόλου, αναγκάζοντας το έμβολο προς τον στροφαλοφόρο άξονα. Τα πεπιεσμένα αέρια ταξιδεύουν μέσω του κενού μεταξύ του τοιχώματος του κυλίνδρου και του εμβόλου, εντός της εγκοπής του ελατηρίου εμβόλου. Η

πίεση από την ανάφλεξη αναγκάζει το ελατήριο του εμβόλου να «τεντώσει» προς το τοίχωμα του κυλίνδρου, δημιουργώντας στεγανότητα. Η πίεση που ασκείται στο ελατήριο εμβόλου είναι περίπου ανάλογη με την πίεση που προκαλείται από την ανάφλεξη.

Το ελατήριο απόξυσης είναι αυτό το οποίο έχει κωνικό πρόσωπο που βρίσκεται στην δεύτερη από την κορυφή εγκοπή μεταξύ του ελατηρίου συμπίεσης και του ελατηρίου λαδιού. Αυτό χρησιμοποιείται για να σφραγίσει περαιτέρω το θάλαμο καύσης και να αφαιρέσει από το τοίχωμα του κυλίνδρου το περίσσιο λάδι. Τα αέρια της καύσης που ξεπερνούν το ελατήριο συμπίεσης σταματώνται από το ελατήριο απόξυσης.

Το ελατήριο λαδιού είναι αυτό που βρίσκεται στην εγκοπή πλησιέστερα στον στροφαλοθάλαμο. Αυτό έχει ως χρήση την αφαίρεση του περίσσιου λαδιού από τα τοιχώματα του κυλίνδρου κατά την κίνηση του εμβόλου. Το περίσσιο λάδι επιστρέφεται μέσω ανοιγμάτων του ελατηρίου στην ελαιολεκάνη, στο κάτω μέρος του κινητήρα. Οι δίχρονοι κινητήρες δεν απαιτούν ελατήρια λαδιού επειδή η λίπανση παρέχεται με ανάμιξη λαδιού στη βενζίνη και δεν απαιτείται δεξαμενή λαδιού.

Τα ελατήρια του εμβόλων σφραγίζουν το θάλαμο καύσης, μεταφέροντας θερμότητα στα τοιχώματα του κυλίνδρου και ελέγχοντας την κατανάλωση λαδιού. Αυτά σφραγίζουν τον θάλαμο καύσης μέσω έμφυτης και εφαρμοζόμενης πίεσης. Ενδογενής πίεση είναι η εσωτερική δύναμη ελατηρίου που εκτείνει το ελατήριο εμβόλου με βάση το σχεδιασμό και τις ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου υλικού. Η ενδογενής πίεση απαιτεί σημαντική δύναμη, για τη συμπίεση ενός ελατηρίου σε μικρότερη διάμετρο και, ως εκ τούτου, την τοποθέτηση του στο έμβολο και, εν συνεχεία, το σύνολο εντός του κυλίνδρου. Η ενδογενής πίεση καθορίζεται από το ασυμπίεστο ή ελεύθερο διάκενο του ελατηρίου. Το ελεύθερο διάκενο ελατηρίου είναι η απόσταση μεταξύ των δύο άκρων του σε ασυμπίεστη κατάσταση. Συνήθως, όσο μεγαλύτερο είναι το κενό αυτό, τόσο μεγαλύτερη δύναμη εφαρμόζει το ελατήριο όταν συμπιέζεται στην οπή του κυλίνδρου.

5.3. Διωστήρας

Εικόνα 8. Διωστήρες σύγχρονου σχεδιασμού για υψηλών επιδόσεων κινητήρες εσωτερικής καύσης. [Πηγή : https://cdn.shopify.com/s/files/1/1151/0688/products/supertech.rods2.jpg?v=1521783246]

Ο διωστήρας είναι ένας σημαντικός κρίκος ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης, [2]. Συνδέει το έμβολο με τον στροφαλοφόρο άξονα και είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά ισχύος από το έμβολο στον στροφαλοφόρο άξονα και, εν συνεχεία, στο κιβώτιο ταχυτήτων. Υπάρχουν διάφοροι τύποι υλικών και μέθοδοι παραγωγής που χρησιμοποιούνται στη δημιουργία διωστήρων. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι διωστήρων είναι από χάλυβα και αλουμίνιο. Ο πιο κοινός τύπος διαδικασιών κατασκευής είναι η χύτευση, η σφυρηλάτηση και η μεταλλουργία σε σκόνη.

Ο διωστήρας είναι η πιο κοινή αιτία καταστροφικής βλάβης του κινητήρα. Είναι φορτισμένος από δυνάμεις τεράστιου μεγέθους και είναι συχνά ο αποδέκτης ειδικής φροντίδας για να διασφαλίσει ότι δεν θα αποτύχει πρόωρα. Οι αιχμηρές άκρες υπόκεινται σε κατεργασία για να είναι όσο το δυνατόν λείες, σε μια προσπάθεια να μειωθεί η αύξηση της τάσης στον διωστήρα. Ο διωστήρας δέχεται επίσης σφυρηλάτηση ή επιφανειακή σκλήρυνση, για να αυξήσει την αντοχή της ενάντια στην δημιουργία ρωγμών. Στις περισσότερες εφαρμογές υψηλών επιδόσεων, ο διωστήρας είναι ζυγοσταθμισμένος, με μεγάλη ακρίβεια, και συνήθως κατασκευασμένος από κράματα τιτανίου, για να μειωθούν οι φθορές κατά την λειτουργία του.

Ο πιο κοινός διωστήρας που βρίσκεται στους κινητήρες οχημάτων παραγωγής είναι χυτός. Αυτός ο τύπος διωστήρα δημιουργείται χύνοντας λειωμένο χάλυβα σε καλούπι και, έπειτα, το τελικό προϊόν τίθεται σε περαιτέρω κατεργασία. Αυτός ο τύπος διωστήρα είναι αξιόπιστος για κινητήρες με χαμηλότερη ιπποδύναμη και είναι ο λιγότερο ακριβός στην κατασκευή. Ο χυτός διωστήρας έχει χρησιμοποιηθεί σε σχεδόν κάθε τύπο κινητήρα, από βενζίνη έως πετρέλαιο, με μεγάλη επιτυχία.

5.4. Στροφαλοφόρος άξονας

Εικόνα 9. Στροφαλοφόρος άξονας τύπου flat plane από κινητήρα εσωτερικής καύσης διάταξης V8. [Πηγή : https://steviescrazygarage.com/wp-content/uploads/2015/10/Shrink-FPP-Crank.jpg]

Ο στροφαλοφόρος άξονας είναι το εξάρτημα ενός κινητήρα που μετατρέπει την παλινδρομική γραμμική κίνηση του εμβόλου σε περιστροφική, [2]. Για να μετατρέψει την παλινδρομική κίνηση σε περιστροφική, ο στροφαλοφόρος άξονας έχει κομβία, των οποίων ο άξονας είναι μετατοπισμένος από αυτόν του στροφαλοφόρου, και εκεί συνδέεται το κάτω μέρος του διωστήρα.

Συνδέεται συνήθως με ένα βολάν, για να μειώσει το χαρακτηριστικό παλμού του τετράχρονου κύκλου και μερικές φορές ένα αντίβαρο στο αντίθετο άκρο, για να μειώσει τις δονήσεις στρέψης που προκαλούνται συχνά κατά το μήκος του στροφαλοφόρου άξονα από τους κυλίνδρους που εδράζονται στα άκρα του.

Ο στροφαλοφόρος άξονας του κινητήρα είναι κατασκευασμένος από πολύ βαρύ χυτοσίδηρο, στις περισσότερες περιπτώσεις και από χάλυβα σε κινητήρες υψηλότερης απόδοσης. Τα άκρα του στροφαλοφόρου άξονα πρέπει να είναι πολύ ανθεκτικά, έτσι ώστε να αντέχουν τις πρόσθετες καταπονήσεις από την μετάδοση ισχύος στο κιβώτιο ταχυτήτων και στο άλλο άκρο την μετάδοση της κίνησης στους εκκεντροφόρους άξονες. Ο στροφαλοφόρος άξονας, επίσης, φέρει αντίβαρα για την εξομάλυνση της περιστροφής του και, κατ' επέκταση, της ομαλότερης λειτουργίας του κινητήρα και φέρει οπές για την απαιτούμενη λίπανση στα σημεία συγκράτησης του και στα κομβία, όπου εδράζονται οι διωστήρες.

5.5. Εκκεντροφόρος άξονας

Εικόνα 10. Εκκεντροφόροι άξονες διαφόρων τύπων. [Πηγή : https://www.autotriti.gr/jpg/AUTOTRITI/390/NEWS/ekkentroforoi.jpg]

Ο εκκεντροφόρος άξονας καλείται από μερικούς «εγκέφαλος» του κινητήρα, [2]. Αυτό συμβαίνει επειδή ανοίγει και κλείνει τις βαλβίδες την κατάλληλη στιγμή κατά την περιστροφή του κινητήρα, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη ισχύς και η αποτελεσματική αποβολή των καυσαερίων και, γενικότερα, η ομαλή λειτουργία του κινητήρα. Οι εκκεντροφόροι επιτυγχάνουν το έργο τους μέσω έκκεντρων λοβών που ενεργοποιούν τα εξαρτήματα κίνησης της βαλβίδας. Ο εκκεντροφόρος κατασκευάζεται μονοκόμματα από ένα κομμάτι χάλυβα. Σε κινητήρες με έναν εκκεντροφόρο, υπάρχουν τα διπλάσια έκκεντρα από τους κυλίνδρους, συν ένα έκκεντρο για την ενεργοποίηση της αντλίας βενζίνης και ένα γρανάζι που δίνει κίνηση στον διανομέα ρεύματος. Τα δύο τελευταία δεν απαιτούνται σε πιο σύγχρονες εφαρμογές, όπου η λειτουργία της αντλίας και του διανομέα ρεύματος είναι καθαρά ηλεκτρική. Η κίνηση του εκκεντροφόρου άξονα γίνεται από τον στροφαλοφόρο άξονα, μέσω ιμάντα ή αλυσίδας και άλλες φορές μέσω μιας συστοιχίας γραναζιών. Ο εκκεντροφόρος άξονας έχει πάντα τις μισές στροφές από αυτές του στροφαλοφόρου άξονα, απαιτώντας δύο πλήρεις περιστροφές του στροφαλοφόρου άξονα για την ολοκλήρωση μιας περιστροφής του εκκεντροφόρου και την ολοκλήρωση ενός τετράχρονου κύκλου λειτουργίας. Ο εκκεντροφόρος χειρίζεται τα ζύγοθρα, που με τη σειρά τους δίνουν κίνηση στο υπόλοιπο σύστημα της βαλβίδας. Υπάρχουν διαφόρων ειδών μηχανισμοί για το άνοιγμα και το κλείσιμο των βαλβίδων, ο πιο συνηθισμένος εξ αυτών είναι ο εκκεντροφόρος μέσω του έκκεντρου να χειρίζεται το άνοιγμα αυτών, ενώ το κλείσιμο συνήθως επιτυγχάνεται με την χρήση ελατηρίου.

“Overlap” είναι η στιγμή κατά την οποία οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής είναι ταυτόχρονα ανοιχτές. Αυτό συμβαίνει στο τέλος του χρόνου εξαγωγής όταν κλείνει η

βαλβίδα εξαγωγής και ανοίγει η βαλβίδα εισαγωγής για την αρχή του νέου κύκλου. Στην ιδανική περίπτωση, η πίεση των καυσαερίων κατά την εξαγωγή τους «τραβάει» το μείγμα αέρα / καυσίμου από τη θύρα εισαγωγής στο θάλαμο καύσης για να επιτευχθεί αποτελεσματικότερη πλήρωση του κυλίνδρου. Ωστόσο, ένας κακώς σχεδιασμένος συνδυασμός έκκεντρου και θύρας μπορεί να προκαλέσει αναστροφή, όπου τα καυσαέρια ωθούν το δρόμο τους πέρα από τη βαλβίδα εισαγωγής έως τον αυλό εισαγωγής.

Αρκετοί παράγοντες επηρεάζουν το πόσο "overlap" είναι ιδανικό για τον εκάστοτε κινητήρα. Οι μικροί θάλαμοι καύσης συνήθως απαιτούν ελάχιστο overlap, όπως και οι κινητήρες που έχουν σχεδιαστεί για να μεγιστοποιούν τη ροπή χαμηλών στροφών. Οι περισσότεροι κινητήρες αγωνιστικής χρήσης εξαρτώνται από τις υψηλές στροφές ανά λεπτό για να επωφεληθούν από τις καλύτερες σχέσεις ταχυτήτων, οπότε περισσότερο overlap είναι συνήθως χρήσιμο. Όσο οι περιστροφές ανά λεπτό αυξάνονται, η βαλβίδα εισαγωγής είναι ανοιχτή για μικρότερο χρονικό διάστημα. Η ίδια ποσότητα αέρα και καυσίμου πρέπει να εισέλθει μέσα στο θάλαμο καύσης σε λιγότερο χρόνο και ο κινητήρας χρειάζεται όλη τη βοήθεια που μπορεί να πάρει για να το επιτύχει. Η αύξηση του overlap μπορεί να βοηθήσει εδώ.

Το σημείο όπου ανοίγει η βαλβίδα εισαγωγής είναι κρίσιμο για τη σωστή λειτουργία του κινητήρα, όπως και η επίτευξη της μέγιστης δυνατής διάρκειας, όπου παραμένει ανοιχτή. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό κριτήριο στην επιλογή του σχήματος των έκκεντρων του εκκεντροφόρου άξονα.

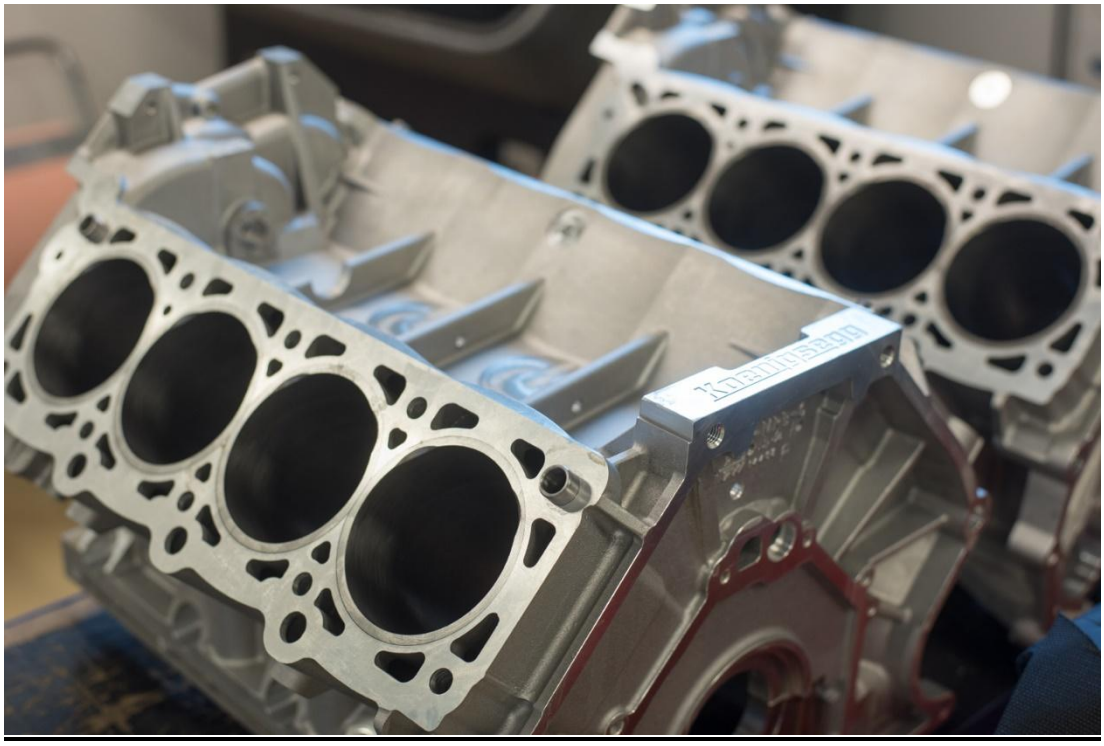
Εάν η βαλβίδα εισαγωγής ανοίξει πολύ νωρίς, τα καυσαέρια μπορούν να εξαναγκαστούν στην πολλαπλή εισαγωγής. Αυτό προκαλεί συσσώρευση αιθάλης στους αυλούς εισαγωγής, χαμηλή πίεση του κινητήρα και χαμηλή ισχύ. Εάν η βαλβίδα ανοίξει πολύ αργά, λιγότερο από το μείγμα καυσίμου / αέρα εισέρχεται στον θάλαμο καύσης και τα καυσαέρια δεν θα αφαιρεθούν αποτελεσματικά.

Εάν η βαλβίδα εξαγωγής κλείσει πολύ νωρίς, το επιθυμητό αποτέλεσμα απομάκρυνσης των καυσαερίων από το εσωτερικό του κυλίνδρου δεν θα είναι πλήρες και ορισμένα καυσαέρια μπορεί να παγιδευτούν στον κύλινδρο, έχοντας ως αποτέλεσμα κακή αναλογία του καυσίμου μίγματος που θα εισέλθει. Εάν η βαλβίδα κλείσει πολύ αργά, μια υπερβολική ποσότητα μίγματος καυσίμου / αέρα θα διαφύγει από την θύρα εξαγωγής και ο θάλαμος καύσης δεν θα είναι πλήρης καυσίμου μίγματος.

Το υλικό που κατασκευάζεται ο εκκεντροφόρος άξονας πρέπει να συνδυάζει έναν ισχυρό άξονα με σκληρά έκκεντρα. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό σήμερα είναι σφυρηλατημένος χυτοσίδηρος.

6. Επιλογή διαστάσεων των κύριων εξαρτημάτων του κινητήρα

6.1. Κορμός κινητήρα

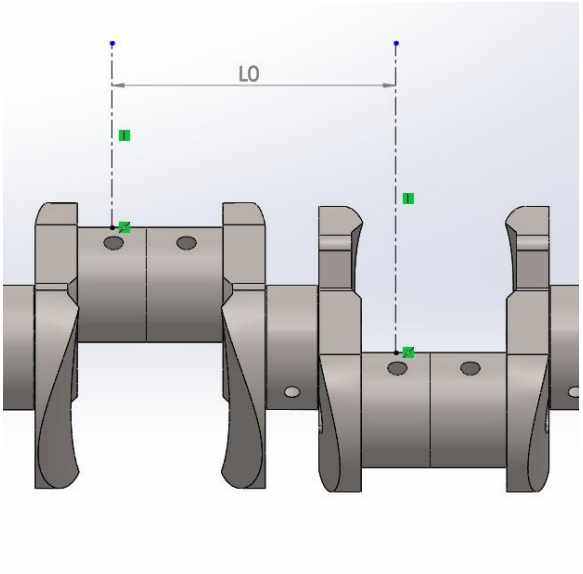


Εικόνα 11. Μπλοκ κινητήρα V8 90 μοιρών από το Koenigsegg Agera RS. [Πηγή : https://www.koenigsegg.com/build128-the-koenigsegg-engine/]

Στις περισσότερες μηχανές αυτοκινήτων, ο άνω στροφαλοθάλαμος κατασκευάζεται με τον κορμό των κυλίνδρων και ονομάζεται κορμός στροφαλοθάλαμου, [2]. Κατά τη λειτουργία του κινητήρα φέρει μεγάλα, δυναμικά και θερμικά φορτία. Ο υπολογισμός της αντοχής του στροφαλοθάλαμου είναι μια δύσκολη εργασία λόγω της περίπλοκης διαμόρφωσής του.

Το πάχος των χωρισμάτων και οι αυλοί ψύξης σε μπλοκ από χυτοσίδηρο κυμαίνεται από 4 έως 7 χιλιοστά, συνήθως, ενώ τα νεύρα και οι εξωτερικές πλευρές του άνω στροφαλοθάλαμου κυμαίνονται από 5 έως 8 χιλιοστά. Το πόσο ογκώδης θα είναι ένας κινητήρας καθορίζεται από τον λόγο L_0 / D, όπου L_0 είναι η απόσταση ανάμεσα στους άξονες δύο συνεχόμενων κυλίνδρων και όπου D είναι η διάμετρος του κυλίνδρου, [2].

$$L_0 / D = 148/88 \approx 1,68$$



6.2. Διάμετρος κυλίνδρου

Η διάμετρος του κυλίνδρου επιλέγεται από τον σχεδιαστή, ανάλογα την εφαρμογή του εκάστοτε κινητήρα, σύμφωνα με τη [2].

Σε περιπτώσεις αγωνιστικών οχημάτων, είθισται από την εκάστοτε διοργανώτρια αρχή να ορίζονται αυστηροί κανονισμοί για τον κυβισμό των κινητήρων και, κατ' επέκταση, η διάμετρος του κυλίνδρου είναι, είτε ορισμένη επακριβώς από τον κανονισμό, είτε ο σχεδιαστής έχει να επιλέξει από ένα πολύ μικρό εύρος πιθανών διαμέτρων.

Σε όλες τις άλλες εφαρμογές, η διάμετρος του κυλίνδρου επιλέγεται σύμφωνα με τις ανάγκες, τις οποίες πρόκειται να εξυπηρετήσει ο κινητήρας.

Για τον κινητήρα που θα σχεδιάσουμε, έχουμε επιλέξει :

D = 88mm

Η παραπάνω επιλογή έγινε αλλάζοντας λίγο, σύμφωνα με δικά μας κριτήρια, τις διαστάσεις που ορίζονται από τον κανονισμό της κατηγορίας GT3 του Παγκοσμίου Πρωταθλήματος Τουρισμού και, συγκεκριμένα, της Ferrari 458 Italia GT3 που αγωνιζόταν το διάστημα 2011 – 2014, [3]. Επιλέξαμε την παραπάνω κατηγορία και, εν συνεχεία, το παραπάνω όχημα διότι φέρει V8 flat plane crank 90 μοιρών, μη υπερτροφοδοτούμενο, όπως και ο κινητήρας που σκοπεύουμε να σχεδιάσουμε.

Ο υπολογισμός των τάσεων στον κύλινδρο γίνεται από την παρακάτω εξίσωση, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η διαφορά στην διασπορά των τάσεων στο χιτώνιο του κυλίνδρου.

$$\sigma_{on} = 0{,}5\ x\ p_g\ x\ \frac{D}{\delta} \leq \sigma_{on}^{don}\ \textit{[Πηγή : (2)]}$$

Όπου :

p_g = 7900000 Pa = 7,9 MPa μέγιστη πίεση αερίων *[Πηγή : (1)]*

δ = 0,008m πάχος κυλίνδρου *[Πηγή : (2)]*

D = 88mm = 0,088m διάμετρος του κυλίνδρου

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες τάσεις για χυτοσίδηρο (Cast Iron) είναι 60 MPa ενώ για το κράμα αλουμινίου A356.0 – T6 είναι 165 MPa. Το συγκεκριμένο κράμα αλουμινίου είναι πολύ δημοφιλές σε τέτοιου είδους κατασκευές.

➔ $\sigma_{on} = 0{,}5 \text{ x } p_g \text{ x } \frac{D}{\delta} = 0{,}5 \text{ x } 7{,}9 \text{ x } \frac{0{,}088}{0{,}008} = 0{,}5 \text{ x } 7{,}9 \text{ x } 11 = 43{,}45 \text{ MPa}$

➔ $\sigma_{on} = 43{,}45 \text{ MPa} \leq 60 \text{ MPa (Cast Iron)} \leq 165 \text{ MPa (A356.0} - \text{T6)}$

Ο έλεγχος είναι επιτυχής και για τα δύο υλικά.

Υπό την επίδραση της θερμότητας, στην εξωτερική και εσωτερική επιφάνεια του χιτωνίου του κυλίνδρου, αναπτύσσονται θερμοκρασιακές τάσεις, οι οποίες υπολογίζονται από την παρακάτω εξίσωση :

$$\sigma_t = \frac{\alpha \text{ x } E \text{ x } \Delta T}{(1-\mu)2}, MPa [\Pi\eta\gamma\acute{\eta} \ (2)]$$

Όπου :

α συντελεστής γραμμικής διαστολής

α = $11\text{x}10^6$ K^{-1} (Cast Iron), α = $23\text{x}10^6$ K^{-1} (A356.0 – T6)

E μέτρο ελαστικότητας

E = $1{,}0\text{x}10^5$ MPa (Cast Iron), E = 72400 MPa (A356.0 – T6)

ΔT = 100K διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας του χιτωνίου του κυλίνδρου

μ συντελεστής Poisson

μ = 0,25 (Cast Iron), μ = 0,33 (A356.0 – T6)

➔ $\sigma_t = \frac{11\text{x}10\text{^}-6 \text{ x } 1\text{x}10\text{^}5 \text{ x } 100}{(1-0{,}25)2} = 73{,}33 \ MPa$ (Cast Iron)

➔ $\sigma_t = \frac{23\text{x}10\text{^}-6 \text{ x } 72400 \text{ x } 100}{(1-0{,}33)2} = 124{,}27 \ MPa$ (A356.0 – T6)

Η συνολική πίεση που ασκείται από το θερμικό φορτίο και την πίεση των αερίων ισούται με :

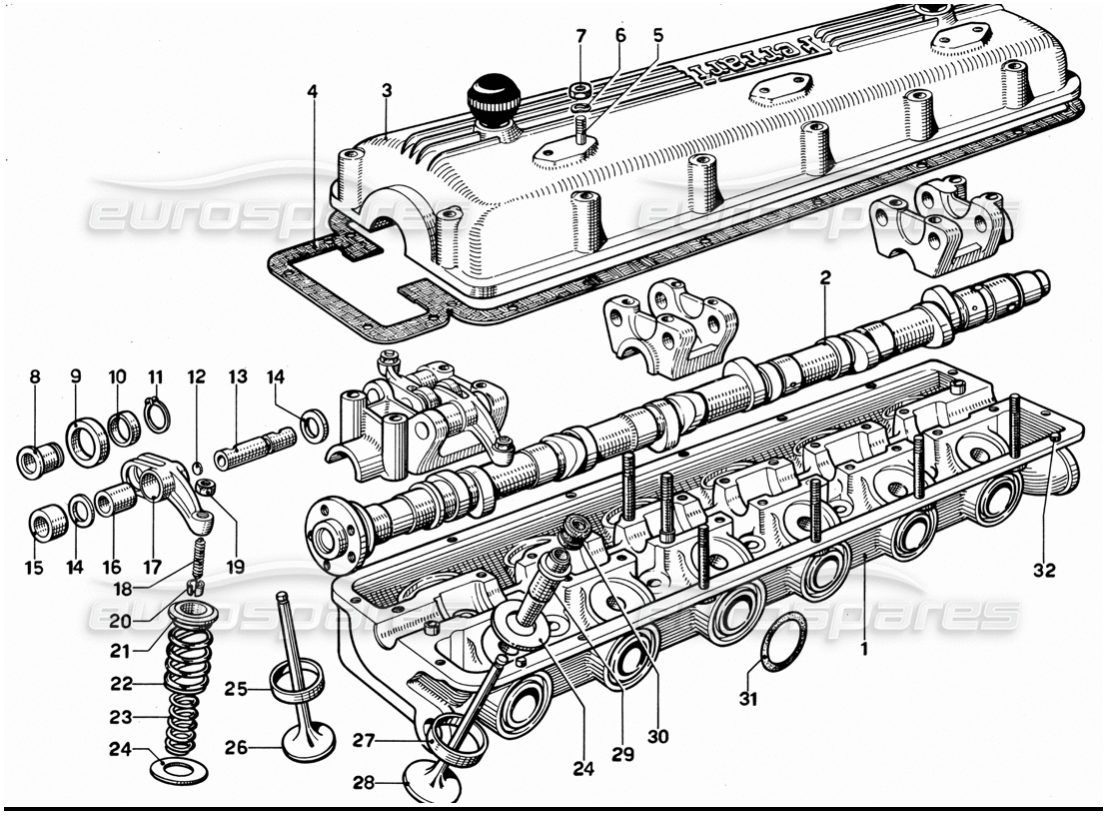
$$\sigma_\Sigma = \sigma_{on} + \sigma_t < \sigma_\Sigma^{don} \ [\ \pi\eta\gamma\acute{\eta} : (2)]$$

Για Cast Iron: $\sigma_\Sigma = \sigma_{on} + \sigma_t = 43{,}45 + 73{,}33 = 116{,}78 < \sigma_\Sigma^{don} = 130 MP\alpha$

Για (A356.0–T6): $\sigma_\Sigma = \sigma_{on} + \sigma_t = 43{,}45 + 124{,}27 = 167{,}72 < \sigma_\Sigma^{don} = 234 MP\alpha$

Οι έλεγχοι είναι επιτυχείς και για τα δύο υλικά.

6.3 Κυλινδροκεφαλή



Εικόνα 12. Κυλινδροκεφαλή ενός εν σειρά κινητήρα εσωτερικής καύσης και τα επιμέρους εξαρτήματα της. [Πηγή: https://www.eurospares.co.uk/images/pages/062/Large/062_005.gif]

Η κυλινδροκεφαλή είναι μηχανικά φορτισμένη από την μέγιστη πίεση των καυσαερίων, από την δύναμη, την οποία ασκούν οι σφιγμένες με πολλή ροπή βίδες, όπως επίσης υποφέρει από έντονες διαφορές θερμοκρασίας, [2]. Η σύνθετη γεωμετρία της δεν επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό των φορτίων, στα οποία υπόκειται κατά την λειτουργία του κινητήρα, και, γι' αυτό, η διαστασιολόγηση του πάχους της κυλινδροκεφαλής (ή κυλινδροκεφαλών) γίνεται σύμφωνα με υπάρχουσες εφαρμογές.

Για το ύψος της, H = (0,95 έως 1,20)D

Το πάχος δ, της κάτω επιφάνειας και το πάχος δ_p της περιοχής, στην οποία διατρέχει το ψυκτικό υγρό, για αλουμινένιες κυλινδροκεφαλές με εύρος D από 80 έως 150 χιλιοστά είναι :

$$\delta = 0{,}09D + 2$$

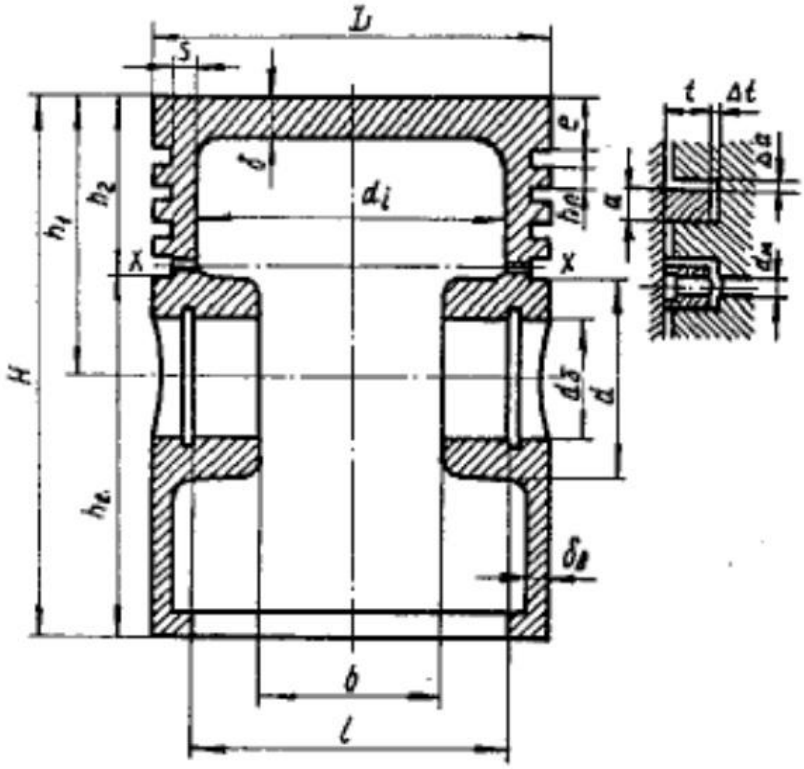
$$\delta_p = 0{,}03D + 4{,}2$$

Η ελάχιστη απόσταση ανάμεσα στα τοιχώματα του ψυκτικού υγρού δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 10mm και το πάχος των αυλών από 5mm. [Πηγή : (2)]

6.3. Έμβολο

Στον σχεδιασμό του εμβόλου, χρησιμοποιούνται παράμετροι, από ήδη υπάρχοντες κινητήρες ως στοιχεία, υπολογίζονται σε αντοχή, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν μεταβλητές μέθοδοι επίδρασης των φορτίων, [2].

Οι κύριες κατασκευαστικές διαστάσεις ενός εμβόλου έχουν ως εξής :



Εικόνα 13 Επεξήγηση των επιμέρους διαστάσεων του εμβόλου [2].

Πάχος της «κορώνας» του εμβόλου :

δ = (0,05 έως 0,10)D

Από σχέδιο δ = 16,5 mm, η αναλογία που προκύπτει είναι 0,1875 και αυτό συμβαίνει διότι ο σχεδιασμός που έχει μελετηθεί [2] είναι πλήρως ξεπερασμένος άρα και οι σχέσεις που έχουν προκύψει στην πλειοψηφία τους δεν θα ισχύουν, όπως θα παρατηρήσουμε και παρακάτω.

Ύψος του εμβόλου :

$H = (0,8 \text{ έως } 1,3)D$

Από σχέδιο H = 46,5 mm, η αναλογία που προκύπτει είναι 0,523. Ισχύει η ίδια αιτιολογία με το δ.

Απόσταση από την κορυφή έως τον άξονα του πείρου του εμβόλου :

$h_1 = (0,45 \text{ έως } 0,47)D$

Από σχέδιο h_1 = 31,5 mm, η αναλογία που προκύπτει είναι ≈ 0,358. Ισχύει η ίδια αιτιολογία με το δ.

Διάμετρος της έδρασης του πείρου του εμβόλου :

$d = (0,3 \text{ έως } 0,5)D$

Το συγκεκριμένο μέγεθος δεν υφίσταται στο σχεδιασμό μας.

Έδραση του διωστήρα :

$b = (0,3 \text{ έως } 0,5)D \rightarrow b = 0,432 \times 88 = 38mm$

Πάχος «φούστας» του εμβόλου :

$\delta_\beta = (1,5 \text{ έως } 4,5)mm$

Από σχέδιο δ_β = 5 mm. Ισχύει η ίδια αιτιολογία με το δ.

Πάχος στο ύψος των ελατηρίων :

$s = (0,03 \text{ έως } 0,8)D$

Το συγκεκριμένο μέγεθος δεν υφίσταται στο σχεδιασμό μας.

Απόσταση από την κορυφή έως το ελατήριο συμπίεσης :

$e = (0,06 \text{ έως } 0,12)D$

Το συγκεκριμένο μέγεθος δεν υφίσταται στο σχεδιασμό μας.

Απόσταση μεταξύ των ελατηρίων :

$h_n = (0,03 \text{ έως } 0,05)D \rightarrow h_n = 0,023 \times 88 = 2mm$

Αριθμός οπών για λίπανση :

$n_M = (6 \text{ έως } 12)$

Στο σχεδιασμό μας δεν έχει μελετηθεί η λίπανση αυτού.

Διάμετρος οπών για λίπανση :

$d_M = (0,03 \text{ έως } 0,05)d_\sigma$

Στο σχεδιασμό μας δεν έχει μελετηθεί η λίπανση αυτού.

Διάμετρος οπής για τον πείρο του εμβόλου :

d_σ = (0,22 έως 0,28)D ➔ d_σ = 0,27 x 88 = 24mm

Ύψος «φούστας» εμβόλου :

h_β = (0,6 έως 0,8)D

Από σχέδιο h_β = 32 mm, η αναλογία που προκύπτει είναι ≈ 0,363. Ισχύει η ίδια αιτιολογία με το δ.

<u>Έλεγχος τάσεων σύμφωνα με [2]:</u>

$$\sigma_{os} = \frac{M_{os}}{W_{os}} = p_{z,max}\,(\frac{r_i}{\delta})^2 \leq \sigma_{os}^{don}, MPa$$

$$r_i = \left[\frac{D}{2} - (s + t + \Delta t)\right], \varepsilon\sigma\omega\tau\varepsilon\rho\iota\kappa\acute{\eta}\ \alpha\kappa\tau\acute{\iota}\nu\alpha\ \tau\eta\varsigma\ "\kappa o\rho\acute{\omega}\nu\alpha\varsigma"\ \tau o\upsilon\ \varepsilon\mu\beta\acute{o}\lambda o\upsilon$$

Όπου :

D = 0,088m, διάμετρος εμβόλου

s = Δ.Υ. πάχος στο ύψος των ελατηρίων

t = Δ.Υ. ακτινικό πάχος των ελατηρίων

Δt = 0,0008m, ακτινική απόσταση ανάμεσα στα ελατήρια του εμβόλου και την εγκοπή αυτών

δ = 16,5 mm = 0,0165, πάχος της «κορώνας»

$p_{z,max} = p_g$ = 7,9 MPa, μέγιστη πίεση αερίων

σ_{on}^{don} = επιτρεπόμενη κάμψη της «κορώνας» του εμβόλου

$M_{os} = \frac{1}{3}\ x\ p_g\ x\ r_i^3\ , MN\ x\ m$ στιγμή κάμψης

$W_{os} = \frac{1}{3}\ x\ r_i\ x\ \delta^2, m^3$ στιγμή της αντίστασης

Ο έλεγχος των τάσεων με τις παραπάνω εξισώσεις δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί για το έμβολο το οποίο σχεδιάσαμε διότι ορισμένα από τα μεγέθη που απαιτούνται δεν υπάρχουν και γενικότερα οι παραπάνω τύποι έχουν δημιουργηθεί βασιζόμενοι στη γεωμετρία και τα μεγέθη με τα οποία ασχολήθηκε ο *Radoslav Plamenov Georgiev* στη μελέτη του [2].

Παρατήρηση : Τα παραπάνω μεγέθη αφορούν έναν σχεδιασμό εμβόλου, όπως της εικόνας, ο οποίος είναι ξεπερασμένος. Το σχέδιο που θα παρουσιάσουμε βασίζεται σε έναν υπερσύγχρονο σχεδιασμό εμβόλου υψηλής συμπίεσης, ατμοσφαιρικού κινητήρα, υψηλών επιδόσεων, από τον V4, που παρουσίασε η Ducati, εν έτει 2020. Συνεπώς, όπως θα δείτε και στις παρακάτω φωτογραφίες, κάποια από τα παραπάνω μεγέθη δεν υφίστανται πλέον.

Εικόνα 14. Έμβολα υψηλής συμπίεσης υπερσύγχρονου σχεδιασμού από την Ducati. [Πηγή : https://www.instagram.com/p/CFrssb9oNA7/?utm_medium=copy_link]

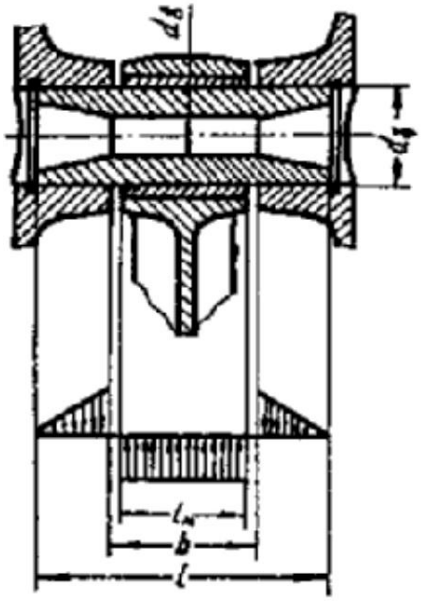
Εικόνα 15. Άνω όψη του εμβόλου υψηλής συμπίεσης υπερσύγχρονου σχεδιασμού από την Ducati. [Πηγή : https://www.instagram.com/p/CFzQ2ndIfLt/?utm_medium=copy_link]

6.4. Πείρος εμβόλου

Εικόνα 16. Πείροι εμβόλου διαφόρων τύπων και διαστάσεων. [Πηγή : https://blog.trendperform.com/hs-fs/hubfs/TREND/Tech/001-trend-wrist-pins-DLC-coated.jpg?width=941&height=627&name=001-trend-wrist-pins-DLC-coated.jpg]

Οι πείροι εμβόλου είναι πάντα κυλινδρικής μορφής. Διαφέρουν σε γεωμετρία, όσον αφορά την εσωτερική τους διαμόρφωση, αναλόγως των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτόν στην εκάστοτε εφαρμογή, [2]. Συνήθως, επιλέγεται ατσάλι ή κάποιο ισχυρότερο σε χαρακτηριστικά μέταλλο για την κατασκευή τους.

Οι παρακάτω σχέσεις για τις διαστάσεις του πείρου βασίζονται σε ήδη υπάρχουσες εφαρμογές.



Εικόνα 17. Επεξήγηση επιμέρους διαστάσεων του πείρου του εμβόλου [2].

Εξωτερική διάμετρος του πείρου του εμβόλου :

d_σ = (0,22 έως 0,28)D ➔ d_σ = 0,27 x 88 = 24mm

Εσωτερική διάμετρος του πείρου του εμβόλου :

d_β = (0,65 έως 0,75) d_σ

Από σχέδιο d_β = 6 mm, η αναλογία που προκύπτει είναι 0,25.

Μήκος του πείρου του εμβόλου :

l = (0,88 έως 0,93)D

Από σχέδιο l = 50 mm, η αναλογία που προκύπτει είναι ≈0,57.

Μήκος σημείου εδράσεως του διωστήρα :

l_M = (0,28 έως 0,38)D ➔ l_M = 0,43 x 88 = 38mm

6.5. Ελατήρια εμβόλου

Τα ελατήρια του εμβόλου, στους τετράχρονους κινητήρες εσωτερικής καύσης, είναι, συνήθως, τρία, [2]. Αυτά είναι το ελατήριο συμπίεσης, το ελατήριο συμπίεσης - απόξυσης και το ελατήριο λαδιού. Το περιβάλλον λειτουργίας τους χαρακτηρίζεται από υψηλές θερμοκρασίες και, γι' αυτό, πρέπει να έχουν μεγάλη ελαστικότητα, αντοχή και χαμηλό συντελεστή τριβής, σε σχέση με το εσωτερικό του κυλίνδρου. Κατασκευάζονται, συνήθως, από επιχρωμιωμένο σίδηρο, νικέλιο, χαλκό, τιτάνιο κ.α..

Οι κατασκευαστικές διαστάσεις αυτών θα επιλεχθούν σύμφωνα με υπάρχουσες εφαρμογές.

Εικόνα 18. Ελατήρια εμβόλου. [Πηγή : https://lh3.googleusercontent.com/proxy/CvFP7pDY8QiJW14xbLkuwXC0-RGtCJT6BG1BWPnp7GimUqNq-CK3FN9dRvzpiCpl7NY_0rlgfCmV-wPDKBbRmdfLpU2fp1OOKq20gtcTAI8Mm9l50lz6cMUn1UCSl0nB4F4h]

Ακτινικό πάχος των ελατηρίων συμπίεσης :

$t_y = (0{,}039 \text{ έως } 0{,}045)D$

Ακτινικό πάχος του ελατηρίου λαδιού :

$t_M = (0{,}038 \text{ έως } 0{,}043)D$

Ύψος των ελατηρίων :

$\alpha = (2 \text{ έως } 4)\text{mm}$

Άνοιγμα των ελατηρίων συμπίεσης :

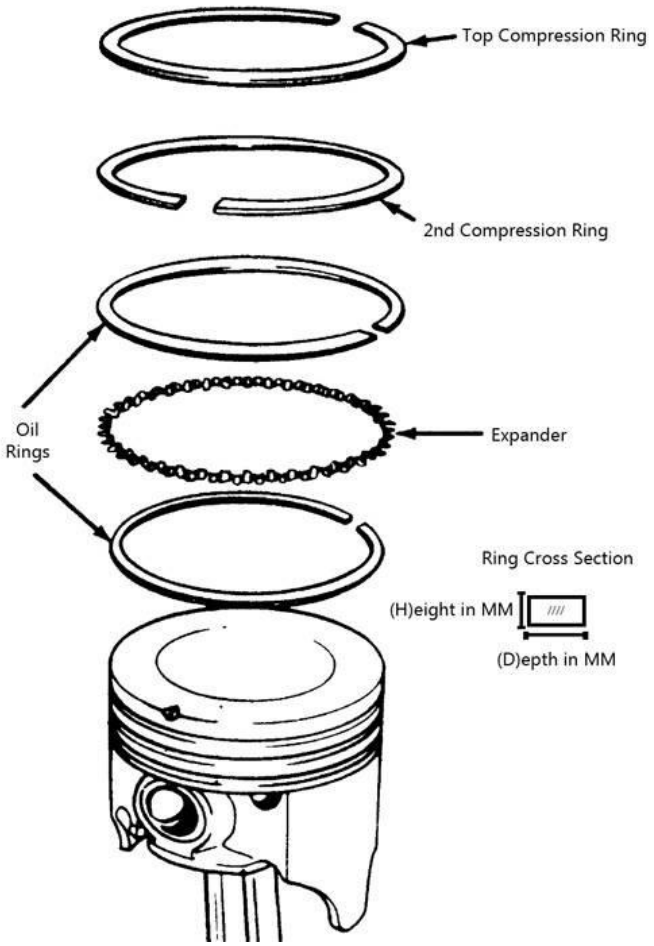
$\Delta t_y = (0{,}50 \text{ έως } 0{,}95)\text{mm}$

Άνοιγμα του ελατηρίου λαδιού :

$\Delta t_M = (0{,}50 \text{ έως } 0{,}95)\text{mm}$

Άνοιγμα των ελατηρίων σε ελεύθερη κατάσταση :

$A_0 = (2,4 \text{ έως } 4)t$

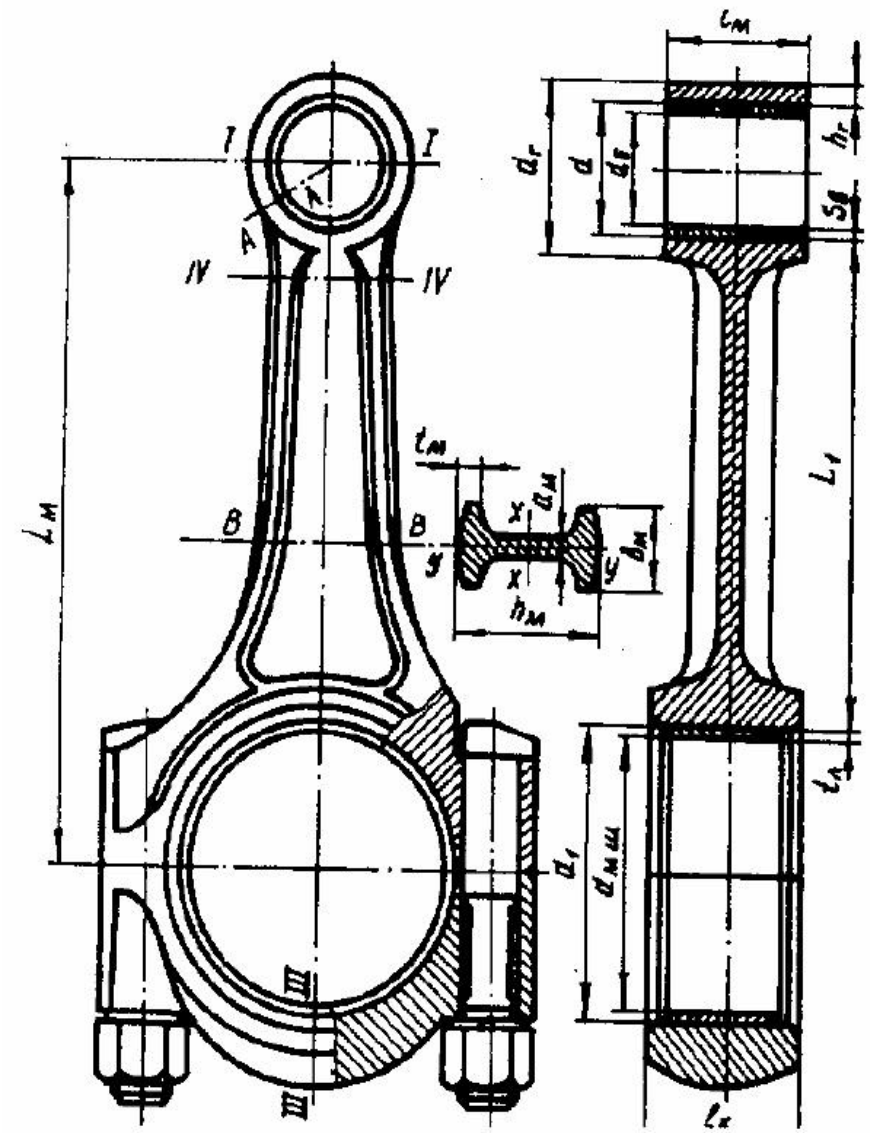


Εικόνα 19. Αναλυτικό σχήμα των ελατηρίων του εμβόλου. [Πηγή : https://qph.fs.quoracdn.net/main-qimg-9775967886f18a5c678558314d4c5d19]

6.6. Διωστήρας

Κατά την διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα, ο διωστήρας καταπονείται σε ένα μεγάλο εύρος διαφόρων δυνάμεων, [2]. Αυτός είναι και ο λόγος που κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα, τιτάνιο και άλλα υλικά, με υψηλή αντοχή στην κόπωση.

Η διαστασιολόγηση του διωστήρα θα γίνει σύμφωνα με υπάρχουσες εφαρμογές.



Εικόνα 20. Επεξήγηση των επιμέρους διαστάσεων του διωστήρα [2].

Εσωτερική διάμετρος του άνω σημείου έδρασης χωρίς δαχτυλίδι :

$d = d_\sigma$ ➔ $d = 24mm$

Εξωτερική διάμετρος του άνω σημείου έδρασης :

$d_s = (1,25 \text{ έως } 1,65)d_\sigma$

Από σχέδιο d_s = 34mm, οπότε η αναλογία που προκύπτει είναι ≈ 1,42.

Μήκος του άνω σημείου έδρασης :

l_M = (0,33 έως 0,45)D

Από σχέδιο l_M = 38mm, οπότε η αναλογία που προκύπτει είναι ≈ 0,43.

Ελάχιστο ακτινικό πάχος του άνω σημείου έδρασης :

h_s = (0,16 έως 0,27)d_σ

Από σχέδιο h_s = 5mm, οπότε η αναλογία που προκύπτει είναι ≈ 0,2.

Ελάχιστο πάχος κατατομής :

$h_{M,min}$ = (0,50 έως 0,55)d_s

Από σχέδιο $h_{M,min}$ = 34mm, οπότε η αναλογία που προκύπτει είναι ≈ 1,42.

Διάμετρος του κάτω σημείου έδρασης :

d_{Mu} = (0,56 έως 0,75)D

Από σχέδιο d_{Mu} = 60mm, οπότε η αναλογία που προκύπτει είναι ≈ 0,68.

Πάχος ελασμάτων έδρασης :

t_Λ = (0,03 έως 0,05) d_{Mu}

Δεν έχει σχεδιαστεί και υπολογιστεί.

Απόσταση ανάμεσα στις βίδες που συνδέουν το καβαλέτο με τον υπόλοιπο διωστήρα :

C = (1,30 έως 1,75) d_{Mu}

Από σχέδιο C = 75mm, οπότε η αναλογία που προκύπτει είναι ≈ 1,25.

Μήκος του κάτω σημείου έδρασης :

l_k = (0,45 έως 0,95) d_{Mu} ➔ Στην δική μας περίπτωση, $l_k = l_M$ = 38mm

Λοιπές διαστάσεις :

h_M = (1,2 έως 1,4) $h_{M,min}$

b_M = (0,50 έως 0,60) l_M

α_M = (2,5 έως 6,0)mm, συνήθως περίπου ίσο με t_M

Οι τρεις παραπάνω διαστάσεις δεν υφίστανται στο σχεδιασμό που πραγματοποιήσαμε.

Όταν ο κινητήρας βρίσκεται σε λειτουργία, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, ο διωστήρας καταπονείται σε διαφόρων μεγεθών και κατευθύνσεων τάσεις. Αυτός είναι ο λόγος που συνήθως κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα, με υψηλή αντίσταση στη κόπωση.

Εγώ επέλεξα το κράμα τιτανίου [Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si (SS)] με τα εξής χαρακτηριστικά :

$\sigma_B =$ **?**

$\sigma_S =$ **?**

$\sigma_{-1p} =$ **?**

$\beta_\sigma = \frac{\sigma_{-1p}}{\sigma_S}$

$K_\sigma = 1{,}2 + 1{,}8\ x\ 10^{-4}\ x\ (\sigma_B - 400)$

$\varepsilon_\sigma'' = 0{,}8$

Υπολογισμός αντοχής :

$P_{j,max} = 10^{-6}\ x\ (m_{d,sp} + m_{sM})\ x\ R\ x\ \omega_{nx,max}^2\ x\ (1+\lambda), MN$ [Πηγή : (2)]

Όπου :

$m_{\delta,sp}$ = μάζα του συνόλου του εμβόλου

m_{sM} = μάζα του άνω τμήματος

m_M = μάζα του διωστήρα

$\omega_{on,max} = \frac{\pi\ x\ n_{nx,max}}{30}$ = γωνιακή ταχύτητα περιστροφής

Υπολογισμοί μέγιστων εφελκυστικών τάσεων στο τμήμα I – I (άνω τμήμα):

$$\sigma_{on,max} = \frac{P_{j,max}}{2\ x\ l_M x\ h_{s,min}} = \text{[Πηγή (2)]}$$

Για το ίδιο τμήμα, επίσης, έχουμε, σύμφωνα με τη πηγή [2], :

$\alpha_{\sigma\sigma} = 11\ x\ 10^{-6} K^{-1}$ και $\alpha_M = 11\ x\ 10^{-6}\ K^{-1}$ είναι οι συντελεστές γραμμικής επέκτασης του πείρου του εμβόλου και του διωστήρα

ΔT = 100K θερμοκρασία λειτουργίας του τμήματος I – I και του χιτωνίου

$\Delta_t = d\ (a_{\sigma\sigma} - \alpha_M)\Delta T =$

$\Delta_\Sigma = \Delta + \Delta_t =$

μ = 0,3 συντελεστής Poisson

$E_M = 2{,}2\ x\ 10^5\ MPa$, $E_\sigma = 1{,}15\ x\ 10^{-5}\ MPa$ συντελεστές γραμμικής παραμόρφωσης του ατσαλιού

Η πίεση στις επιφάνειες επαφής, σύμφωνα με την πηγή [2], θα είναι :

$$p = \frac{\Delta_\Sigma}{d\left(\frac{\frac{d_s^2+d^2}{d_s^2-d^2}+\mu}{E_M}+\frac{\frac{d^2+d_\sigma^2}{d^2-d_\sigma^2}-\mu}{E_\sigma}\right)} =$$

Έλεγχοι με επιτρεπόμενη τάση τα 100 MPa :

Τάσεις στην εξωτερική επιφάνεια :

$$\sigma'_\alpha = p\ \frac{2d^2}{d_s^2-d^2} = \cdots = \cdots < \ \sigma_\alpha^{don} = 100MPa$$

Τάσεις στην εσωτερική επιφάνεια :

$$\sigma'_i = p\frac{d_s^2+d^2}{d_s^2-d^2} = \cdots = \cdots < \ \sigma_i^{don} = 100MPa$$

Υπολογισμοί τάσεων στο κάτω τμήμα III - III του διωστήρα :

Η αδρανειακή δύναμη $P_{j,oz}$ που ασκείται στο κάτω τμήμα του διωστήρα, σύμφωνα με την πηγή [1], είναι

$F = F_g + F_l$

$S = \frac{F}{\cos\beta}$

Η γωνία αιώρησης β είναι εκείνη που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της δύναμης S που προέρχεται από τον συνδυασμό δυνάμεων αερίων και αδρανειακών δυνάμεων (συνήθως αυτό είναι στις πρώτες 20-30 μοίρες μετά την ανάφλεξη).

Οι τάσεις στο τμήμα αυτό υπολογίζονται, σύμφωνα με την πηγή [2], βάσει:

$$\sigma_{os} = P_{j,oz}\left[\frac{0{,}023C}{\left(1+\frac{J_\pi}{J}\right)W} + \frac{0{,}4}{F+F_\pi}\right]\text{MPa}$$

Όπου :

C = …m μήκος ανάμεσα στις βίδες

$J = 1{,}105 \times 10^{-8}\ m^4$ ροπή αδράνειας της διατομής του καβαλέτου

$J_\pi = 0{,}0035 \times 10^{-8}\ m^4$ ροπή αδράνειας της διατομής του ρουλεμάν

$W = 1{,}8 \times 10^{-6}\ m^3$ ροπή αντίστασης της κάμψης του τμήματος III - III

$F = 4{,}59 \times 10^{-4}\ m^2$ περιοχή διατομής του καβαλέτου

$F_\pi = 0{,}69 \times 10^{-4}\ m^2$ περιοχή διατομής του ρουλεμάν

Θα πρέπει $\sigma_{os} < \sigma_{os}^{don} = 100MPa$

Εγκάρσιο βέλος κάμψης στο τμήμα ΙΙΙ – ΙΙΙ:

$$\delta = \frac{0{,}0024 P_{j,os}\ x\ C^3}{E(J + J_l)} = \ldots$$

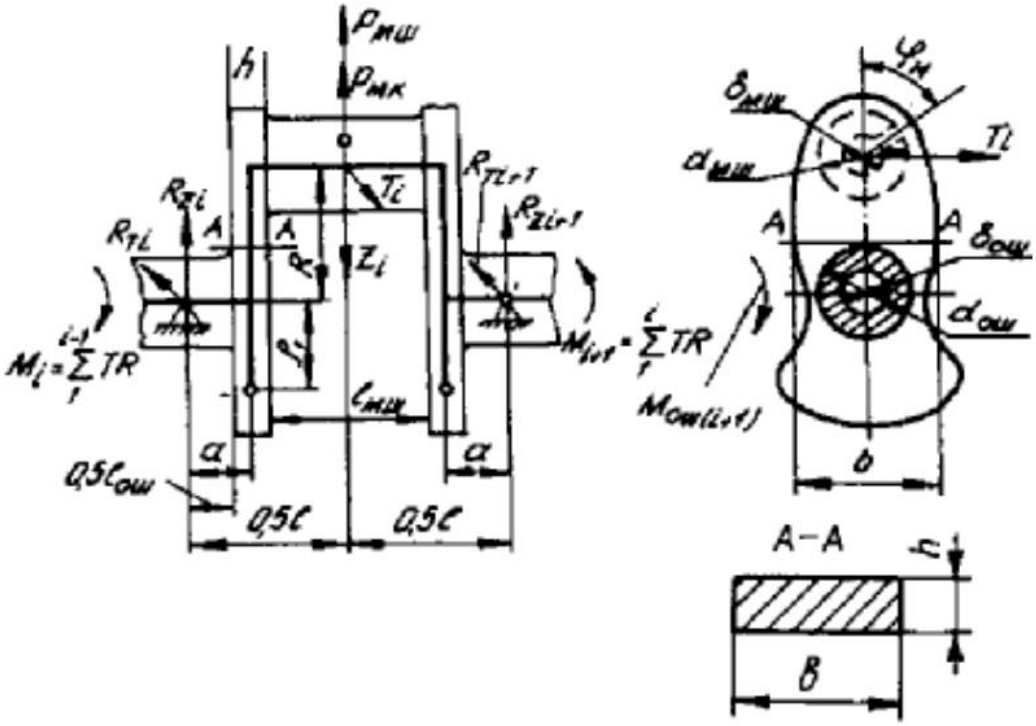
Όπου :

$J_l = J_\pi = 0{,}0035 \times 10^{-8}\ m^4$

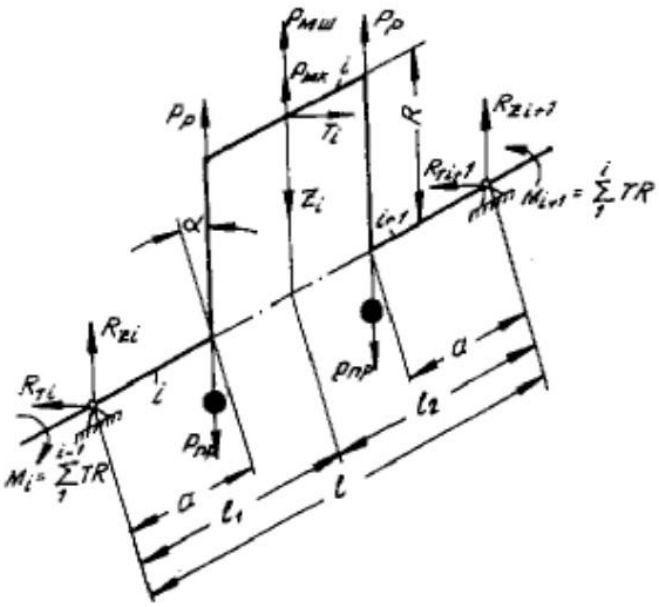
6.7. Στροφαλοφόρος άξονας

Ο στροφαλοφόρος άξονας ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης υπόκειται στις δυνάμεις που προέρχονται από την καύση του μείγματος, στις αδρανειακές δυνάμεις και στιγμές, οι οποίες είναι περιοδικές και διαφέρουν ανάλογα την γωνία στην οποία βρίσκεται, κατά την λειτουργία του κινητήρα, [2]. Αυτές οι καταπονήσεις περιλαμβάνουν ροπές στρέψεως, ροπές κάμψης, εφελκυστικές και θλιπτικές δυνάμεις και, γενικότερα, είναι μια σύνθετη μορφή καταπόνησης, που περιλαμβάνει πολλές δυνάμεις.

Για την διαστασιολόγηση του στροφαλοφόρου άξονα, χρησιμοποιούμε παραμέτρους, σύμφωνα με ήδη υπάρχουσες εφαρμογές.



Εικόνα 21. Επεξήγηση επιμέρους διαστάσεων στροφαλοφόρου άξονα [2]



Εικόνα 22. Επεξήγηση επιμέρους διαστάσεων στροφαλοφόρου άξονα [2]

Απόσταση ανάμεσα στις δύο βασικές (ακραίες) στηρίξεις του στροφάλου:

$l = (1{,}10 \text{ έως } 1{,}25)D$

Το l που προκύπτει από τον δικό μου σχεδιασμό δεν ακολουθεί την παραπάνω αναλογία και είναι 564mm. Που σημαίνει ότι έχουμε μια αναλογία ≈ 6.4 D. Πιθανότατα αυτό συμβαίνει διότι η παραπάνω αναλογία που προέρχεται από την πηγή [2] βασίζεται σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε παλαιότερης τεχνολογίας κινητήρες. Στους σύγχρονους ατμοσφαιρικούς κινητήρες υψηλών επιδόσεων συνηθίζεται να έχουμε υπερτετράγωνες διαστάσεις, συνεπώς και μεγάλη διάμετρο D.

Διάμετρος στροφάλου στις στηρίξεις :

$d_{ou} = (0{,}5 \text{ έως } 0{,}8)D \rightarrow d_{ou} = 0{,}738 \times 88 = 65\text{mm}$

Μήκος ακραίων στηρίξεων :

$l_{ou} = (0{,}5 \text{ έως } 0{,}6)\, d_{ou}$

Το l_{ou} που προκύπτει από το δικό μου σχεδιασμό είναι ίσο με 30mm. Συνεπώς η αναλογία είναι ≈ 0,46 d_{ou}.

Διάμετρος κομβίου εδράσεως του διωστήρα :

$d_{Mu} = (0{,}50 \text{ έως } 0{,}70)D \rightarrow d_{Mu} = 0{,}68 \times 88 = 60\text{mm}$

Μήκος των κομβίων του διωστήρα :

l_{Mu} = (0,45 έως 0,65) d_{Mu} , σε περίπτωση V κινητήρα, όπου δύο διωστήρες εδράζονται στο ίδιο κομβίο, διπλασιάζουμε το l_{Mu}

Έχουμε από σχέδιο l_{Mu} = 76 mm, κάτι που μας δίνει μια αναλογία ≈ 1,26 d_{Mu} το οποίο διαιρούμενο στα δύο έχει ως αποτέλεσμα ≈ 0,63 d_{Mu} που είναι μέσα στα επιθυμητά όρια.

Πάχος του στροφάλου :

h = (0,15 έως 0,35) d_{Mu}

Από σχεδιασμό h = 49 mm, προκύπτει αναλογία ≈ 0,82 d_{Mu} .

Ολικό πλάτος του στροφάλου :

b = (1,7 έως 2,9) d_{Mu}

Αυτό ισούται με 85,34 mm, βάσει του σχεδίου μου, δημιουργώντας μια αναλογία

≈ 1,42 d_{Mu} .

6.8. Λοιπά εξαρτήματα του κινητήρα

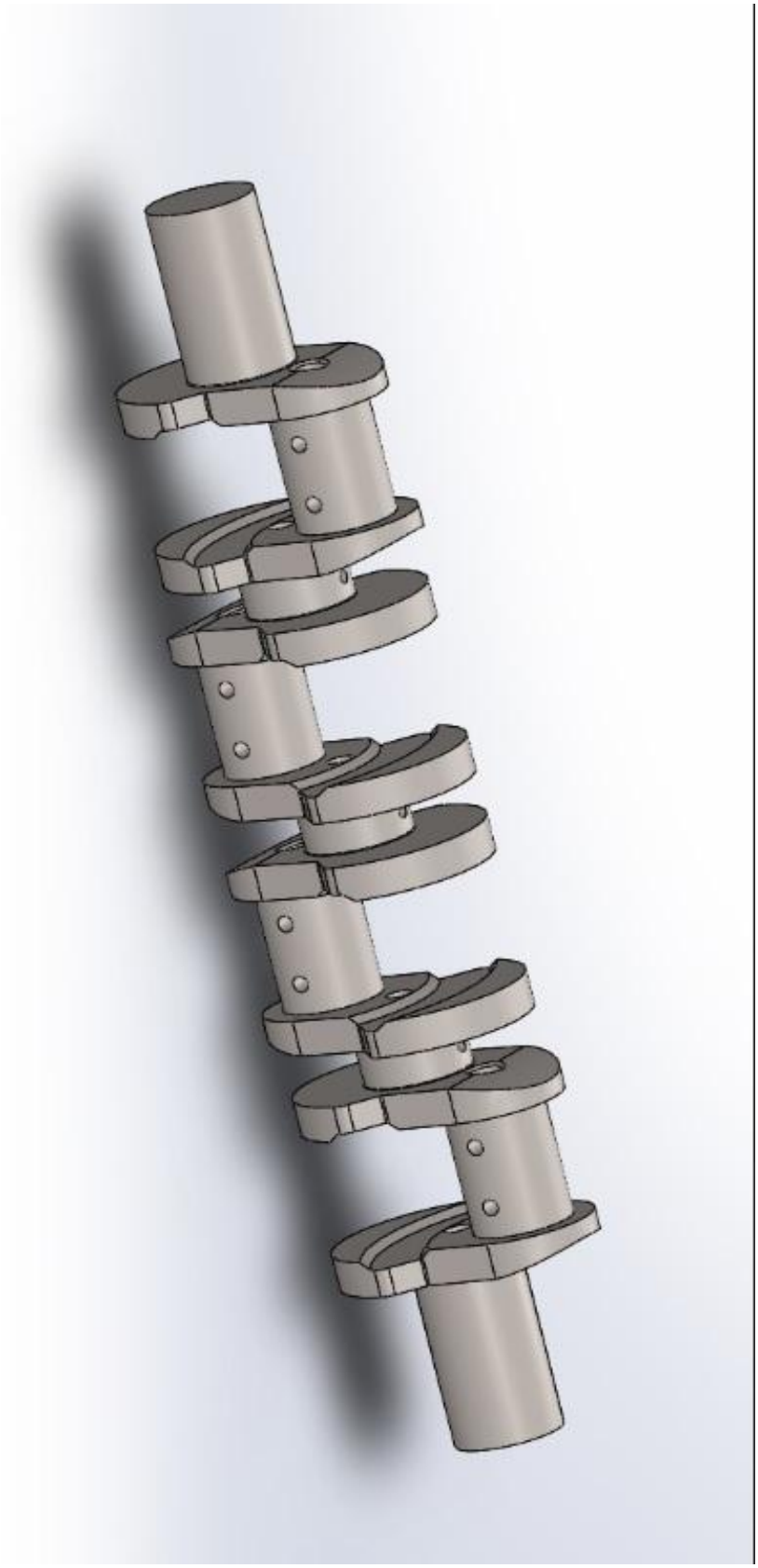
Εξαρτήματα, όπως οι εκκεντροφόροι άξονες (ένας ή παραπάνω, ανάλογα την διάταξη του κινητήρα και την εκάστοτε εφαρμογή), οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής, όπως και τα απαραίτητα εξαρτήματα για την λειτουργία τους (οδηγοί, ελατήρια, κοκοράκια), η ελαιολεκάνη ή, στην περίπτωση ξηρού κάρτερ, ο κάτω στροφαλοθάλαμος, και το σύστημα μετάδοσης της κίνησης στους εκκεντροφόρους, δεν ήταν αντικείμενα εκτενούς αναφοράς στην βασική πηγή [2], που χρησιμοποιήσαμε, για την σύνταξη αυτής της μελέτης. Συνεπώς, η διαστασιολόγηση τους, η επιλογή του πλήθους τους και η μέθοδος μετάδοσης της κίνησης είναι στην κρίση του εκάστοτε σχεδιαστή και των χαρακτηριστικών που θέλει να προσδώσει στην λειτουργία του κινητήρα.

Σε κινητήρες υψηλών επιδόσεων, συναντάμε, συνήθως, τουλάχιστον 4 βαλβίδες ανά κύλινδρο, 2 εκκεντροφόρους επικεφαλής (4 σε διατάξεις V) και το σύστημα μετάδοσης της κίνησης από τον στροφαλοφόρο άξονα προς τους εκκεντροφόρους άξονες αποτελείται από συστοιχία γραναζιών.

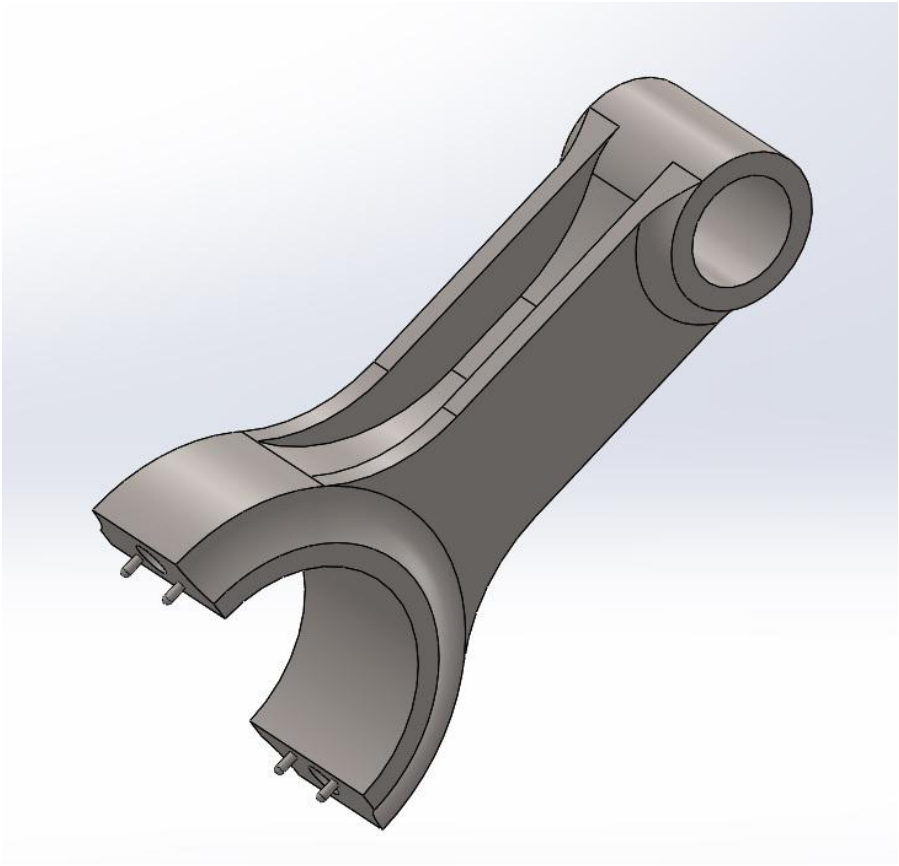
Εικόνα 23. Κιτ βελτίωσης του V8 κινητήρα εσωτερικής καύσης της Corvette Z06 αποτελούμενο από στροφαλοφόρο άξονα τύπου flat plane, βελτιωμένους διωστήρες και έμβολα υψηλής συμπίεσης. [Πηγή : https://gmauthority.com/blog/wp-content/uploads/2018/10/Flat-Plane-C6-Z06-For-Sale-04-1024x682.jpg]

<u>Σημείωση:</u> Στα σχέδια που υλοποιήσαμε, δεν έχουμε λάβει υπόψιν όλες τις παραπάνω παραμέτρους, που αναφέρονται στο κεφάλαιο 6, διότι αυτές βασίστηκαν για την δημιουργία τους σε παλαιότερης τεχνολογίας, γεωμετρίας και χαμηλών επιδόσεων εφαρμογές. Όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 6.6., για την σχεδίαση των εμβόλων, έτσι και για τα υπόλοιπα εξαρτήματα, βασιστήκαμε σε σύγχρονες κατασκευές, από κινητήρες τύπου V8 με flat plane crank, προσπαθώντας να αντιγράψουμε αυτού του είδους τις γεωμετρίες.

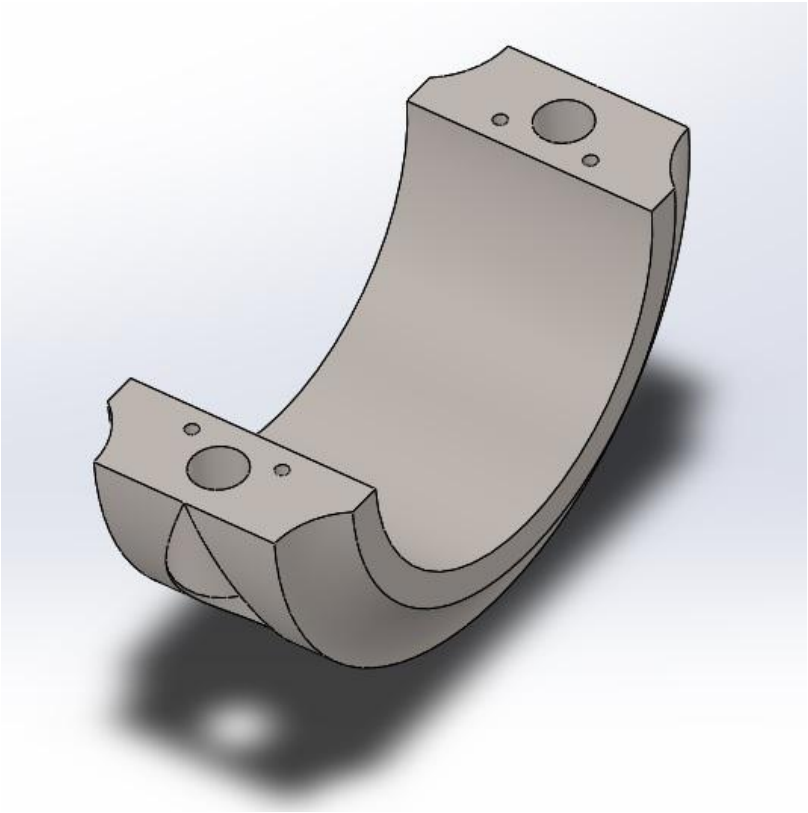
7. Τρισδιάστατα (3D) σχέδια



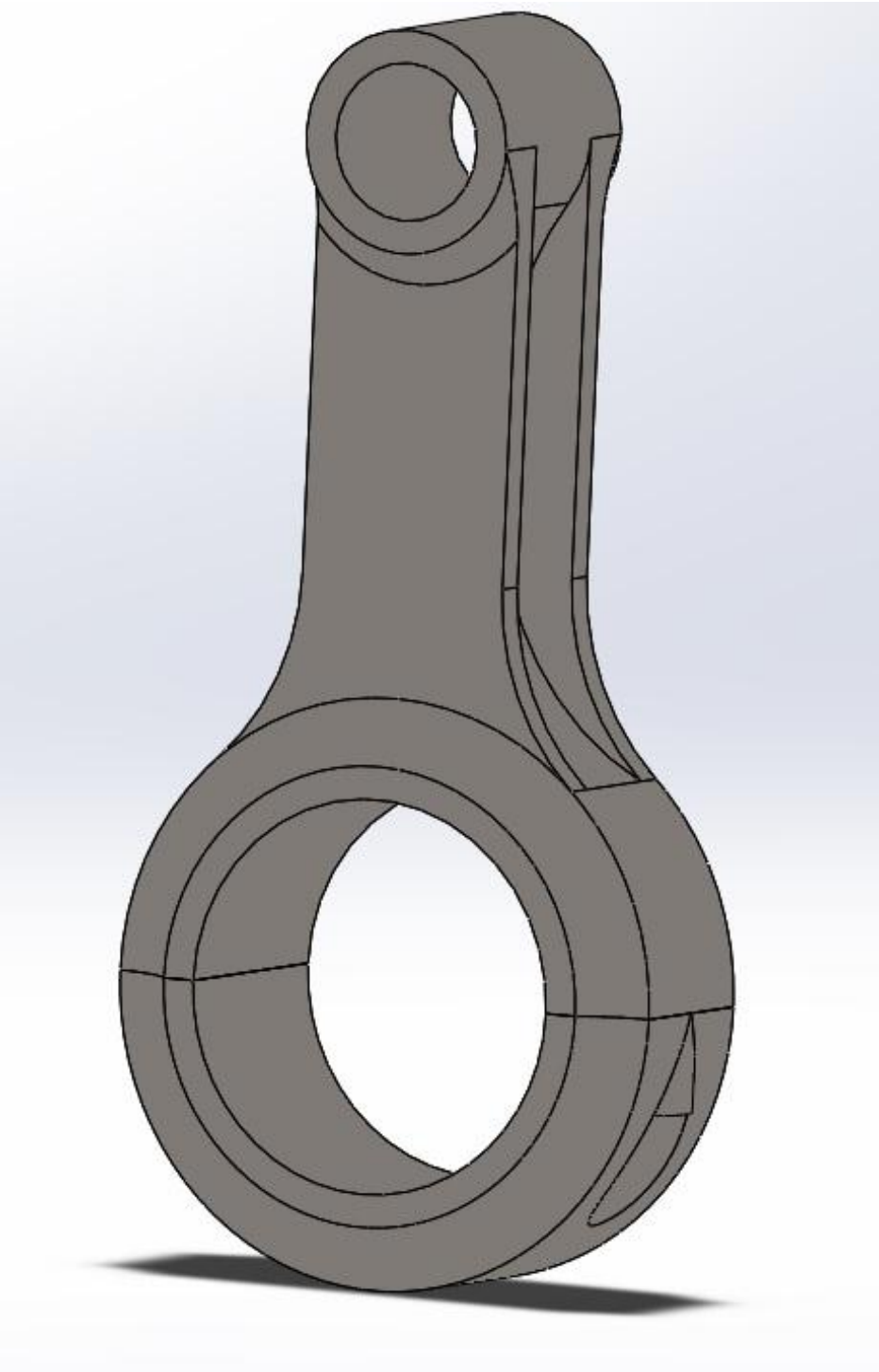
3D Σχέδιο 1. Στροφαλοφόρος άξονας τύπου flat plane.



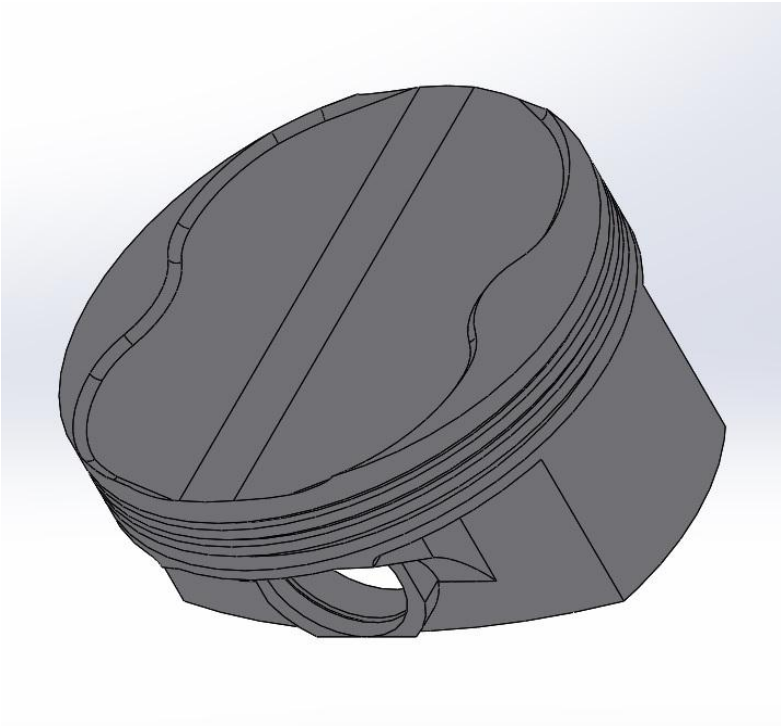
3D Σχέδιο 2. Άνω μέρος διωστήρα.



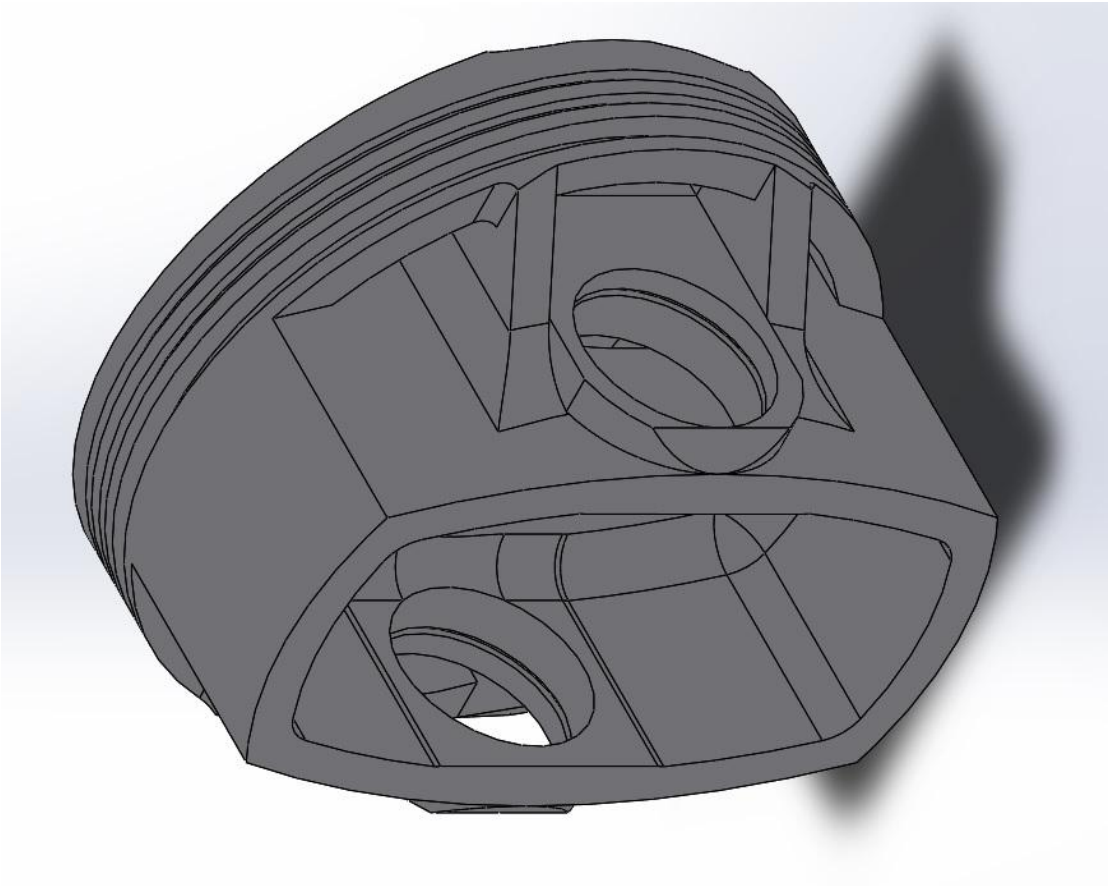
3D Σχέδιο 3. Κάτω μέρος διωστήρα.



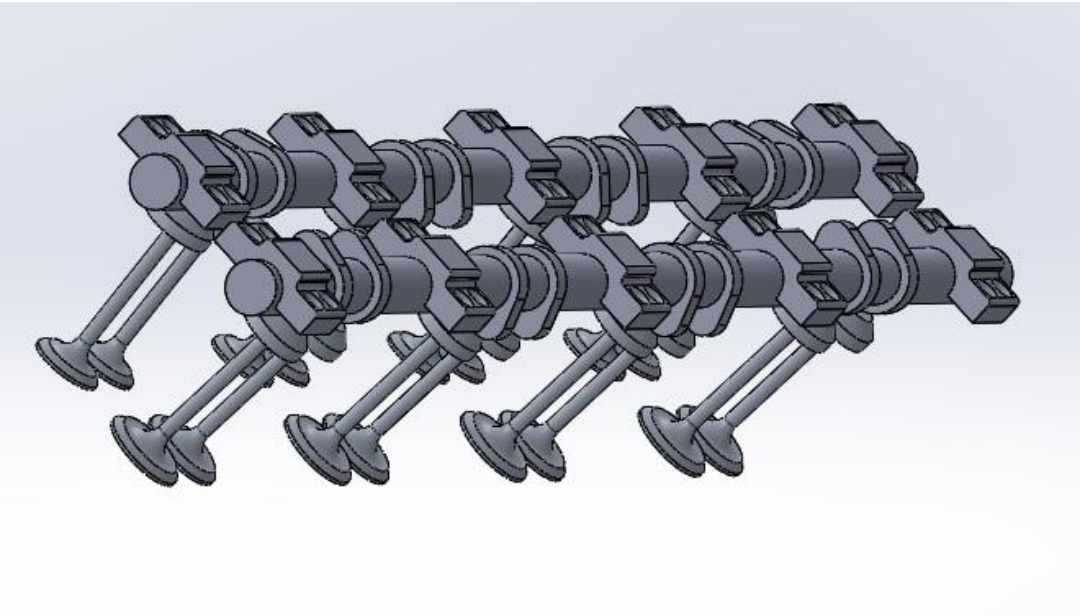
3D Σχέδιο 4. Διωστήρας.



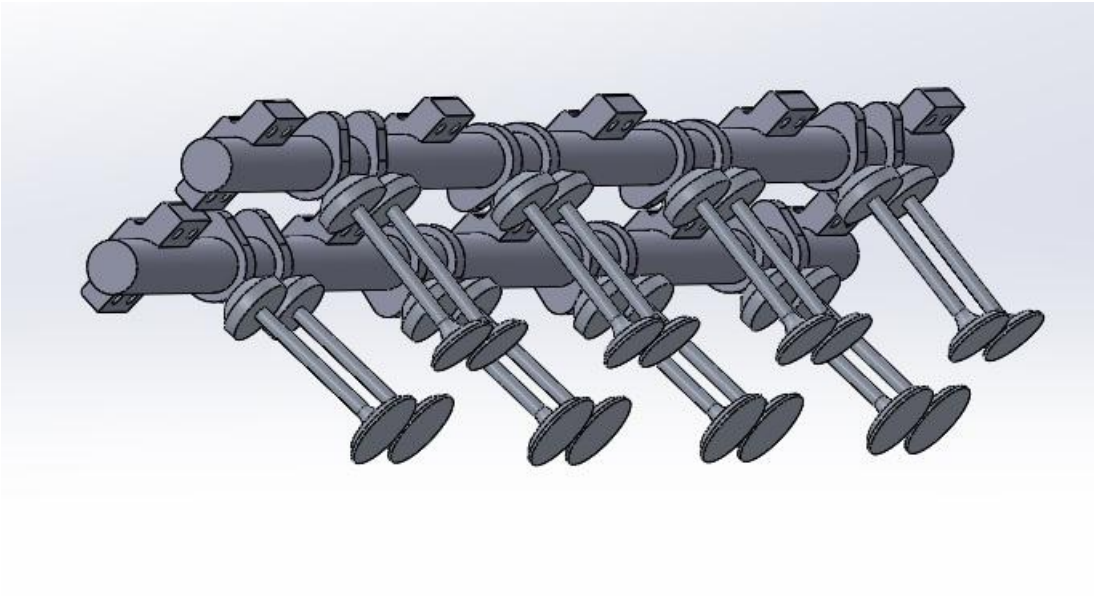
3D Σχέδιο 4. Έμβολο.



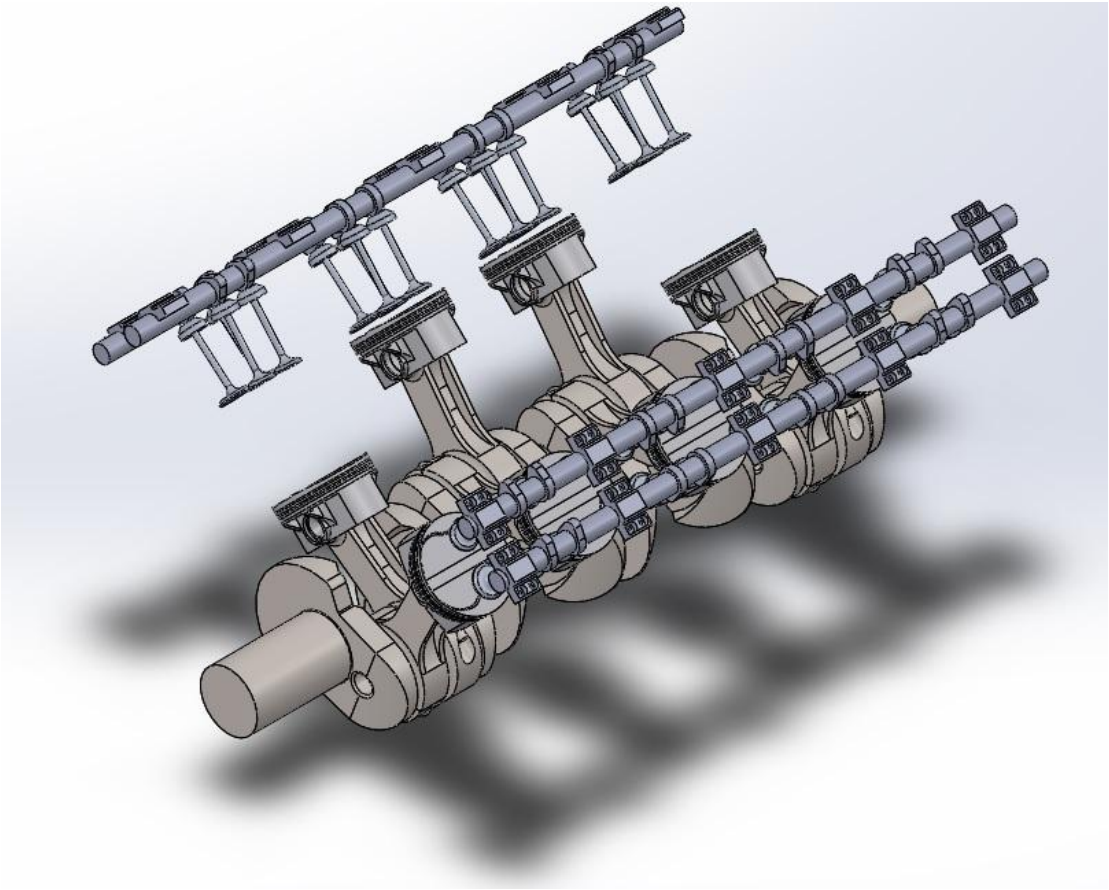
3D Σχέδιο 4. Έμβολο.



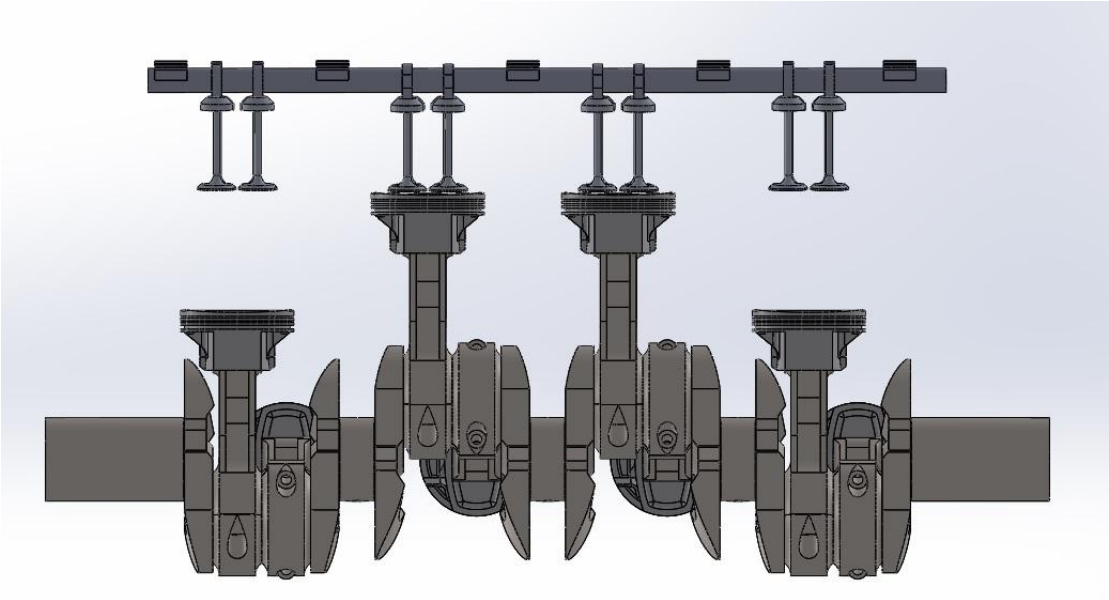
3D Σχέδιο 5. Εκκεντροφόροι άξονες και βαλβίδες.



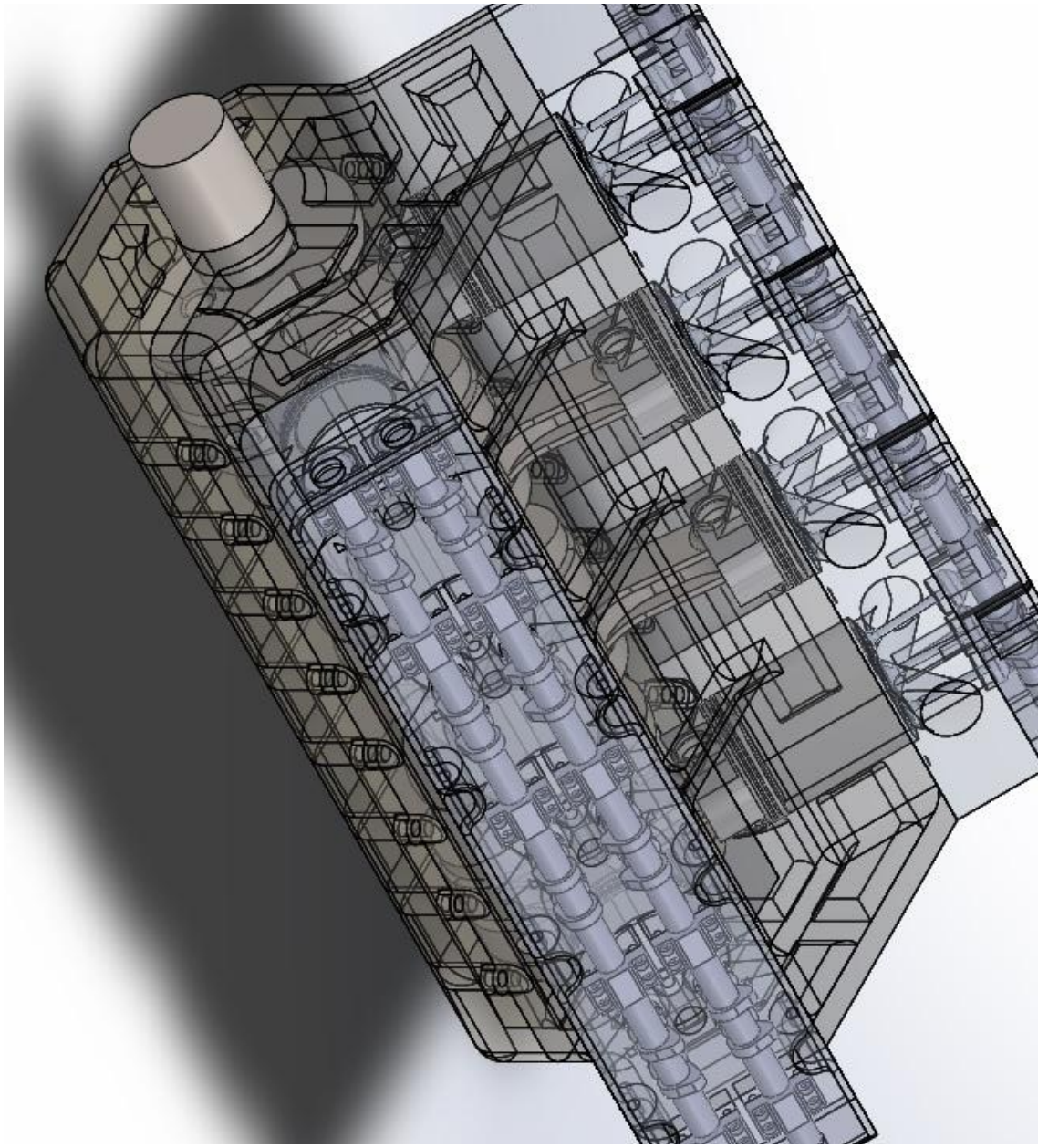
3D Σχέδιο 6. Εκκεντροφόροι άξονες και βαλβίδες.



3D Σχέδιο 7. Σύνολο κινουμένων μερών του κινητήρα.



3D Σχέδιο 8. Compact design .



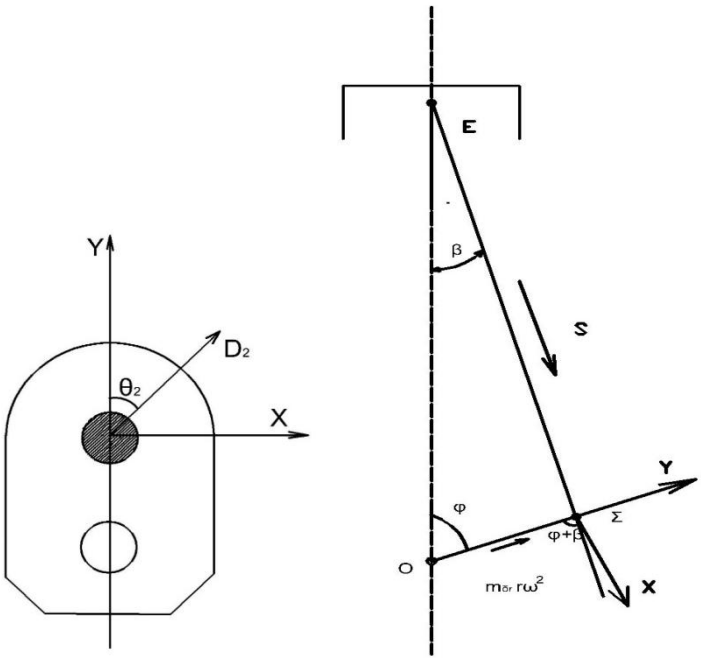
3D Σχέδιο 8. Πλήρης κινητήρας .

8. Έλεγχος στροφαλοφόρου άξονα με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Για να πραγματοποιήσουμε τον έλεγχο αυτόν θα πρέπει πρώτα να προσδιορίσουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στα κομβία του στροφαλοφόρου άξονα, στηριζόμενοι στους υπολογισμούς που έχουν γίνει στο [1]. Από τα παρακάτω σχήματα φαίνεται ότι η δύναμη που αναζητούμε είναι η D_2, η οποία αναλύεται σε D_{2x} και D_{2y} και υπολογίζονται ως εξής [4]:

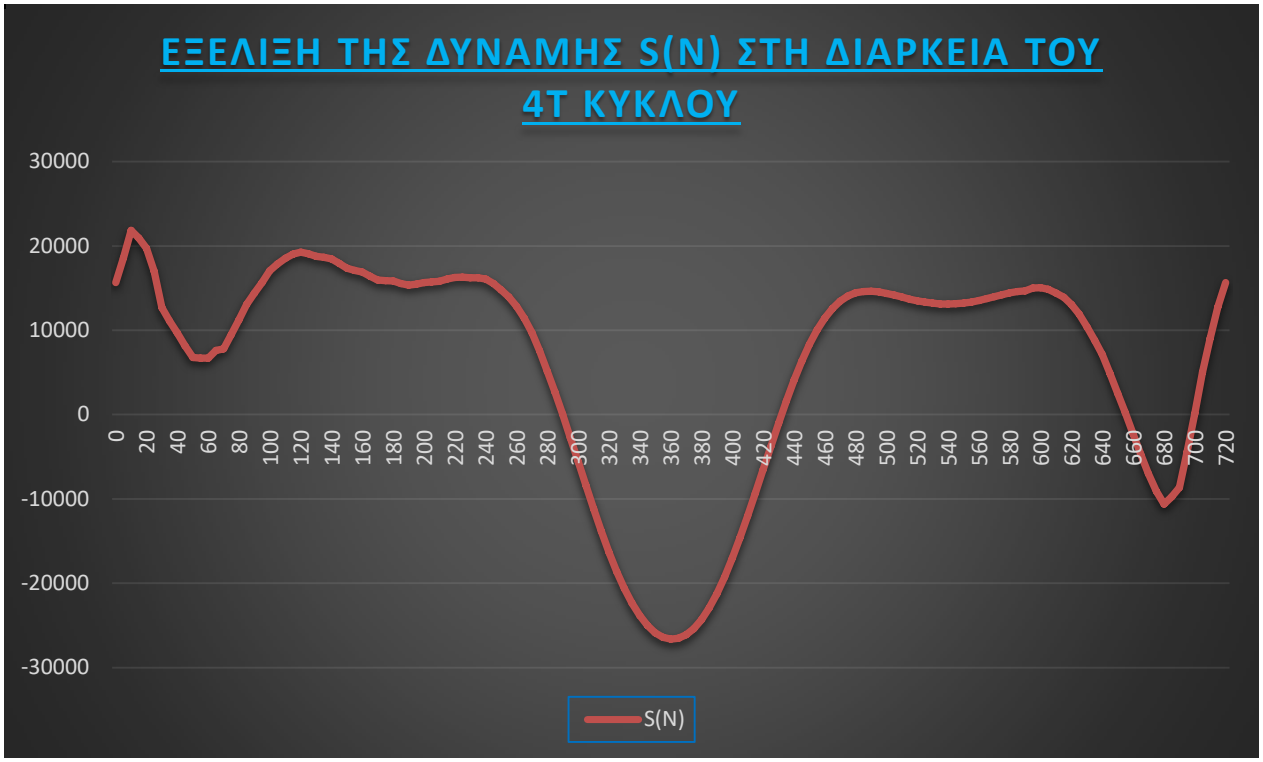
$$D_{2x} = T = \frac{F}{\cos\beta} \cdot \sin(\varphi + \beta) = S \cdot \sin(\varphi + \beta)$$

$$D_{2y} = -\frac{F}{\cos\beta} \cdot \cos(\varphi + \beta) + m_{\delta r} \cdot r \cdot \omega^2 = -R + m_{\delta r} \cdot r \cdot \omega^2$$



Εικόνα 24. Σχηματική απεικόνιση της δύναμης D_2. [4]

Δυστυχώς η D_2 δεν μπορεί να υπολογιστεί διότι οι εξισώσεις για τον υπολογισμό της βασίζονται σε διαφορετικό σύστημα αξόνων από αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο [1]. Για τον παραπάνω λόγο θα πραγματοποιήσουμε τον έλεγχο χρησιμοποιώντας την δύναμη S.

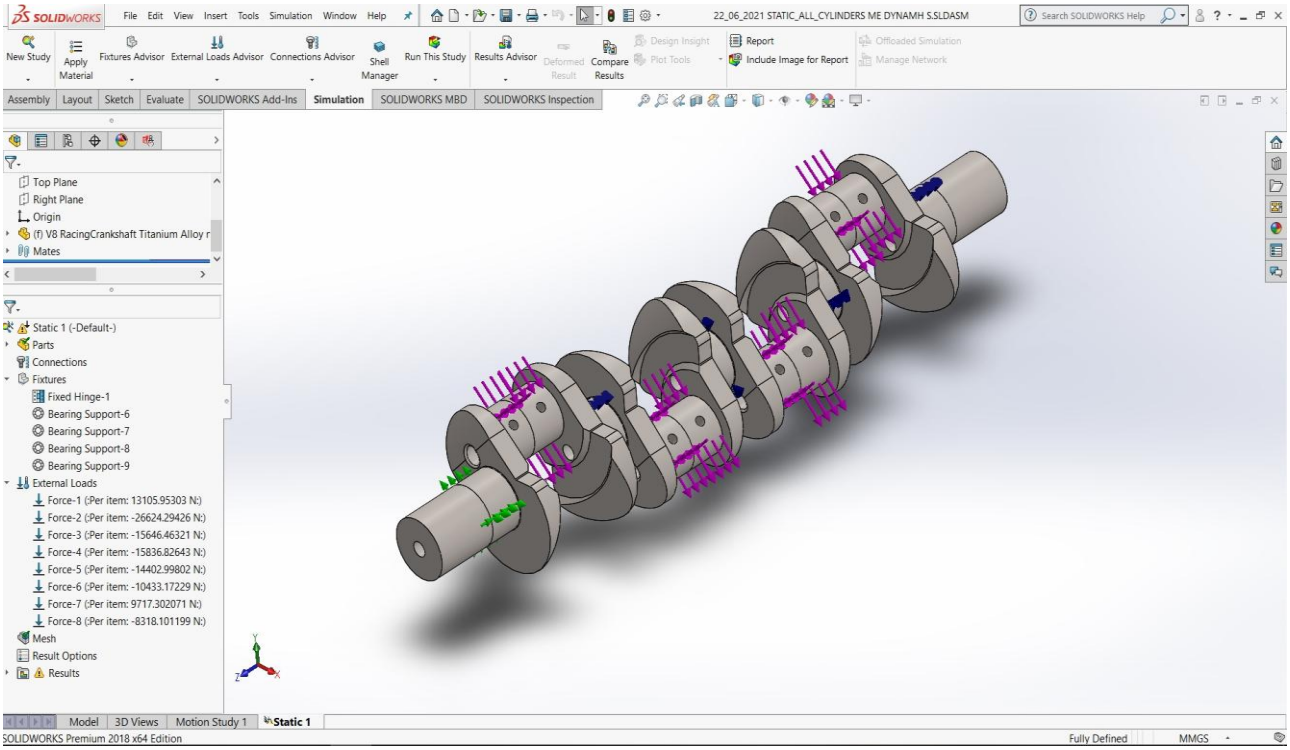


Η μέγιστη τιμή της S παρουσιάζεται στις 360° του κύκλου λειτουργίας και είναι -26624.29426N. Επομένως ο έλεγχος θα πραγματοποιηθεί με την ανωτέρω τιμή. Η δύναμη S ισούται με F/cosβ και ο πλήρης υπολογισμός της παρουσιάζεται στο αρχείο Excel που συνοδεύει την παρούσα μελέτη.

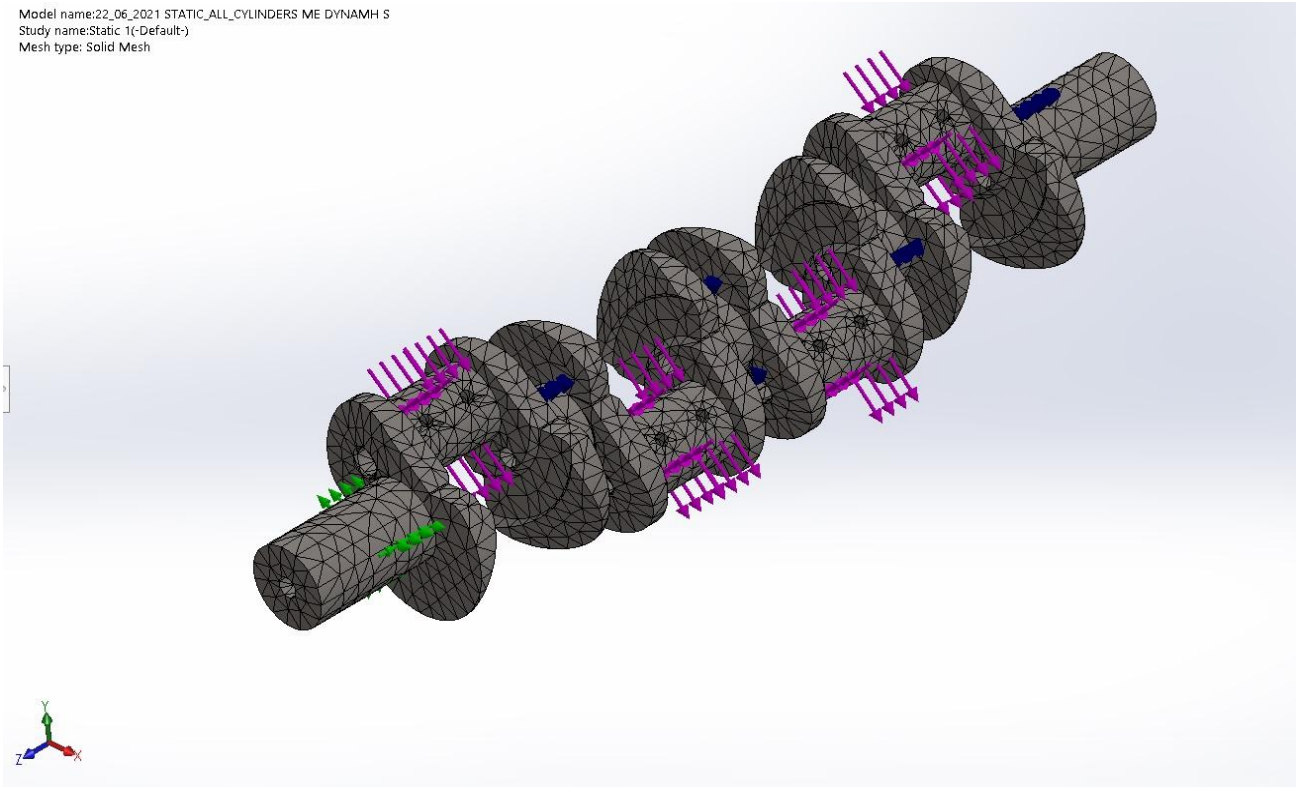
Από [1] γνωρίζουμε ότι η σειρά έναυσης είναι 1-8-3-6-4-5-2-7, επιλέγουμε να μελετήσουμε την στιγμή που ο πρώτος κύλινδρος αναφλέγεται. Αντίστοιχα προκύπτουν οι θέσεις των υπόλοιπων κυλίνδρων και η δύναμη S που αντιστοιχεί, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Κύλινδρος	Μοίρες 4Τ Κύκλου	S (N)	Κομβίο
1	360	-26624,29426	Α
2	540	13105,95303	Β
3	180	15836,82643	Γ
4	720 = 0	15646,46321	Δ
5	630	10433,17229	Α
6	90	14402,99802	Β
7	450	8318,101199	Γ
8	270	9717,302071	Δ

Τη στιγμή αυτή ο στροφαλοφόρος άξονας βρίσκεται στις 315°.



Εικόνα 25. Τρισδιάστατη απεικόνιση δυνάμεων και στηρίξεων στο στροφαλοφόρο άξονα.



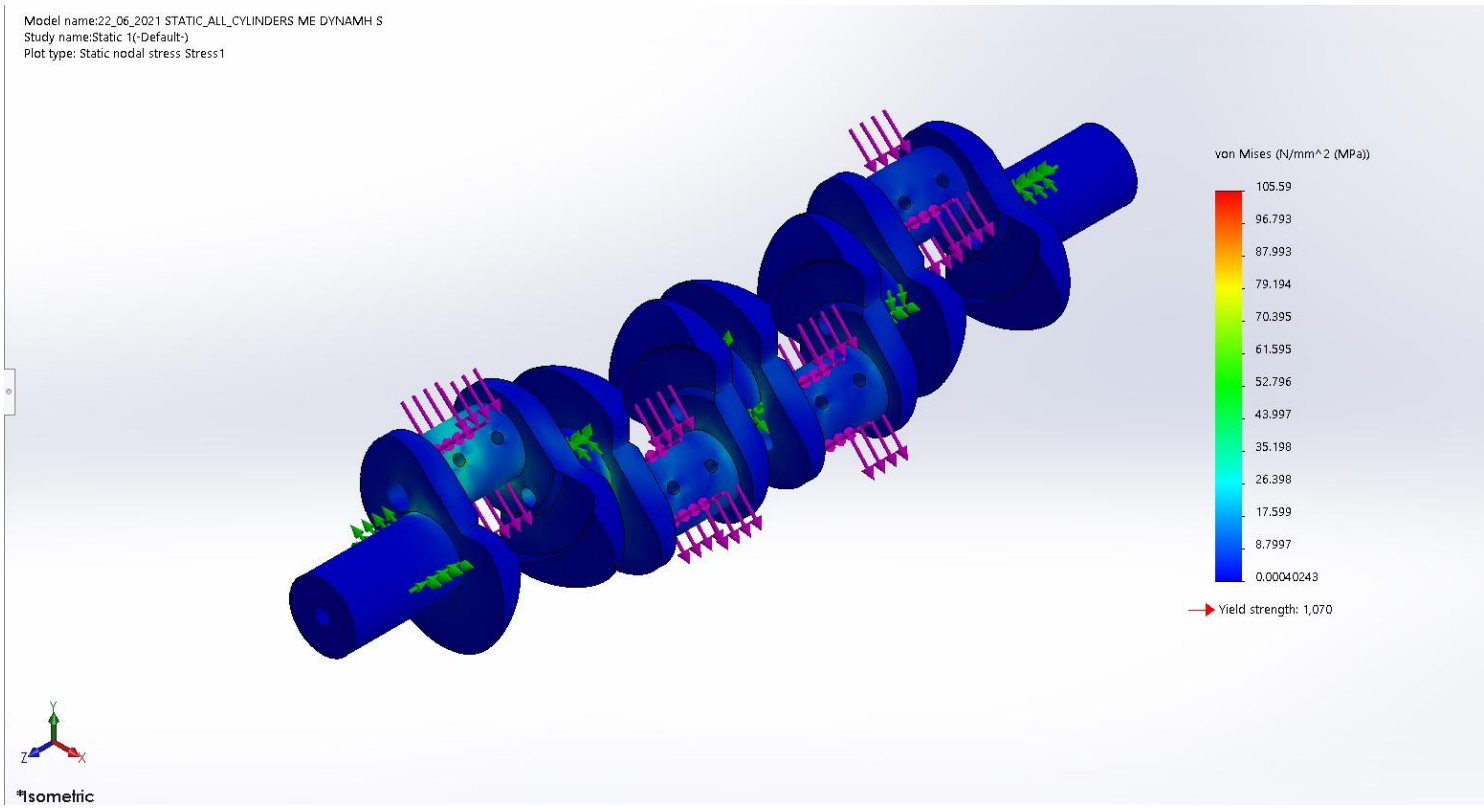
Εικόνα 26.Υπολογιστικό πλέγμα για επίλυση εξισώσεων με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

Στροφαλοφόρος άξονας από κράμα τιτανίου [Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si (SS)]

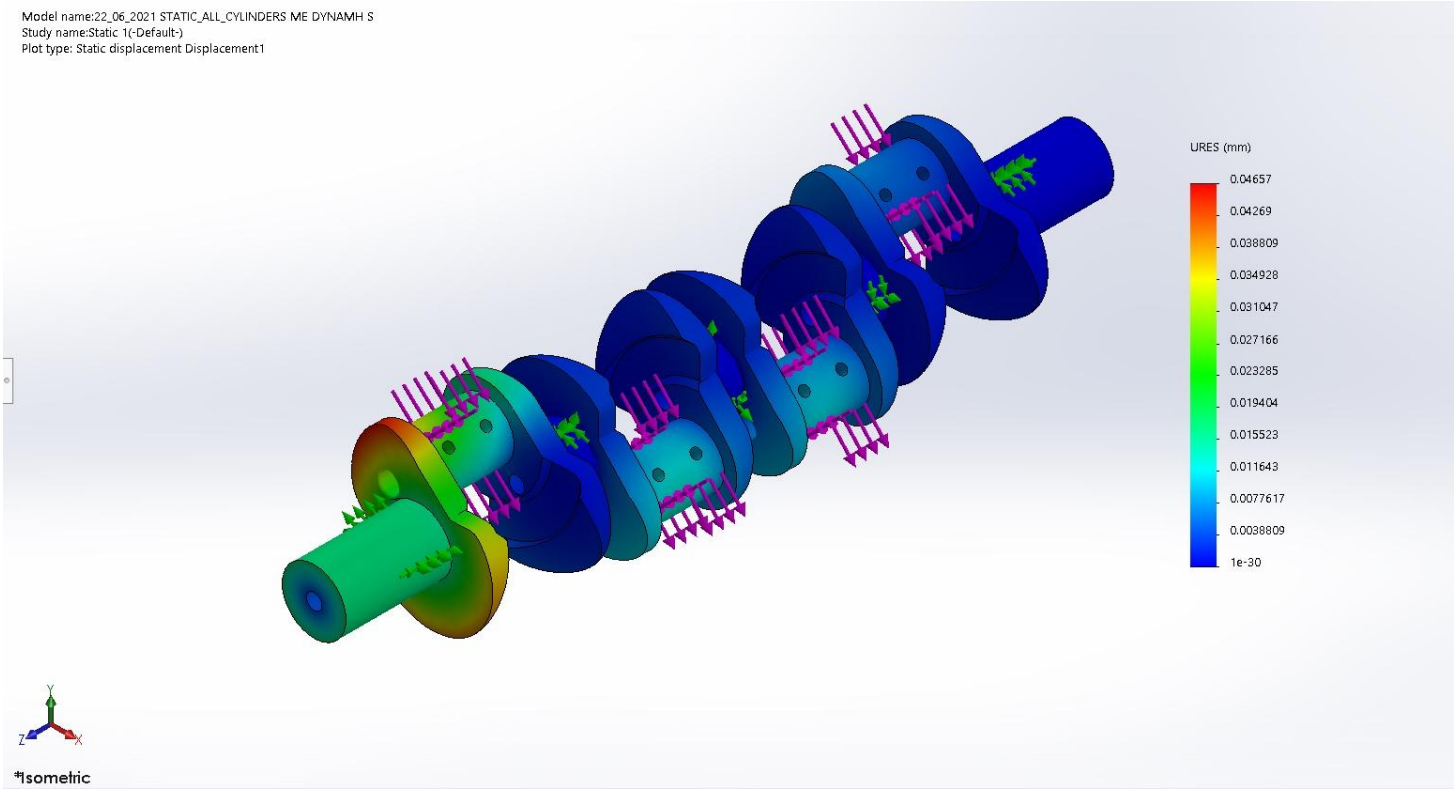
Property	Value	Units
Elastic Modulus	123000.0018	N/mm^2
Poisson's Ratio	0.33	N/A
Tensile Strength	1160.000029	N/mm^2
Yield Strength	1070.000004	N/mm^2
Tangent Modulus		N/mm^2
Thermal Expansion Coefficient	9e-06	/K
Mass Density	4650.0001	kg/m^3
Hardening Factor	0.85	N/A

Εικόνα 26: Χαρακτηριστικά κράματος [Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si (SS)] [πηγή: (Βιβλιοθήκη Υλικών SolidWorks)]

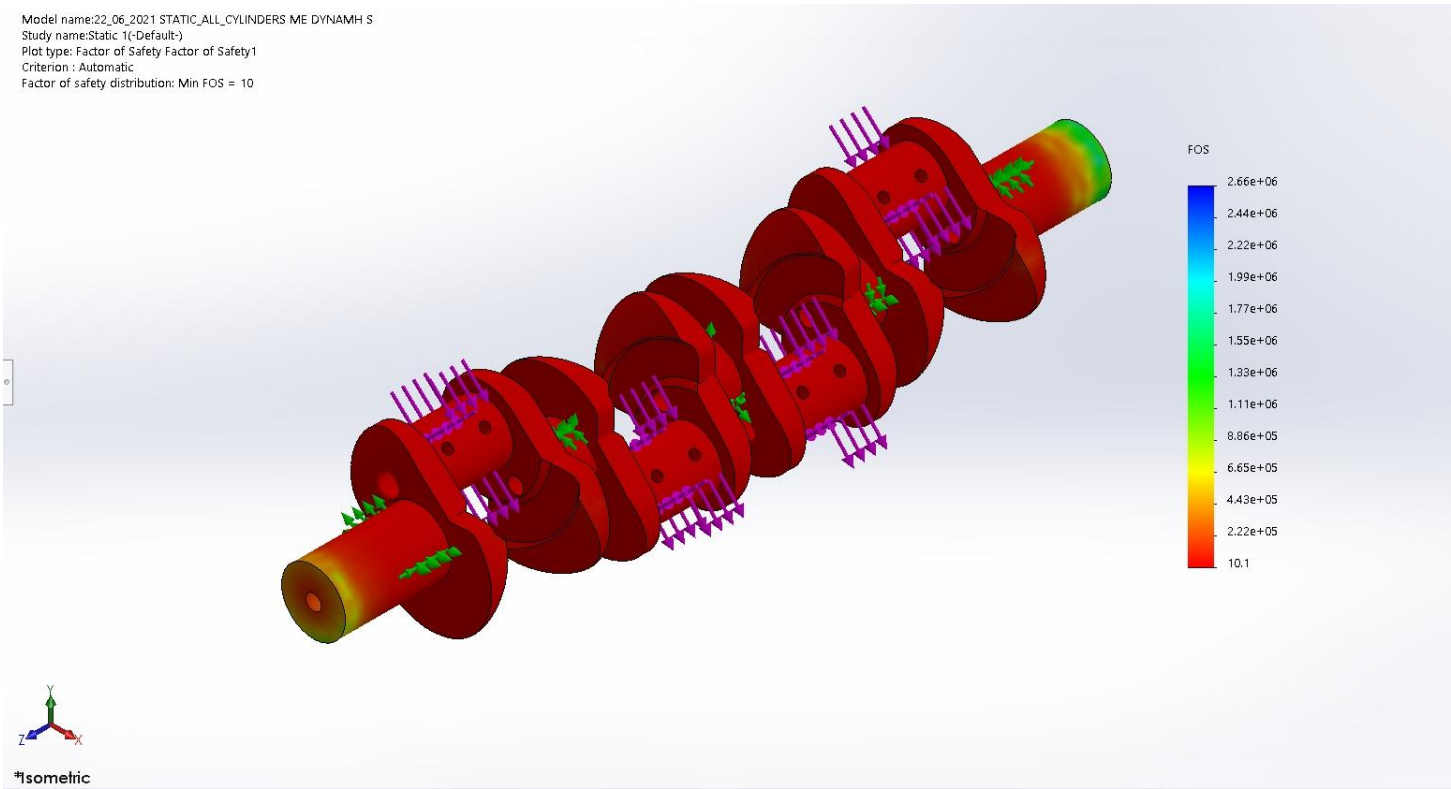
Έλεγχος τάσεων κατά Von Mises:



Βέλος κάμψης:



Συντελεστής Ασφαλείας:



Παρατηρούμε ότι όλοι οι παραπάνω έλεγχοι είναι επιτυχείς και ο στροφαλοφόρος άξονας που σχεδιάστηκε είναι κατάλληλος για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Από τον έλεγχο των τάσεων κατά Von Mises προκύπτει μέγιστη τιμή 105,59 N/mm^2 η οποία είναι μικρότερη από τη μέγιστη επιτρεπόμενη που είναι 1070 N/mm^2.

Στον έλεγχο για το βέλος κάμψης έχουμε μέγιστη μετατόπιση 0,4657 mm που είναι κ αυτό αποδεκτό με βάση την εμπειρία μας.

Τέλος ο έλεγχος του συντελεστή ασφαλείας μας δίνει ελάχιστη τιμή 2,66 που είναι μεγαλύτερή της μονάδας. Συνήθως ο συντελεστής ασφαλείας ορίζεται από κανονισμούς ανάλογα την χρήση για την οποία προορίζεται το υπό μελέτη αντικείμενο, στην περίπτωσή μας που έχει να κάνει με τις μέγιστες δυνατές επιδόσεις θεωρώ ότι το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η μικρότερη δυνατή τιμή άνω της μονάδας. Συνεπώς ότι η τιμή 2,66 είναι υπερβολική για την παρούσα εφαρμογή! , κάτι που σε πραγματικές συνθήκες θα μας έστελνε πίσω στο σχεδιασμό για αναδιαστασιολόγηση.

9. Συμπεράσματα

Καταλήγουμε ότι ο σχεδιασμός και η διαστασιολόγηση ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης είναι μια απαιτητική και πολύπλοκη διαδικασία ειδικά όσο οι ανάγκες και οι απαιτήσεις μας αυξάνονται. Πάντα θα ζητάμε περισσότερη ισχύ με μικρότερη κατανάλωση καυσίμου, λιγότερους ρύπους, λιγότερα κυβικά, λιγότερους κυλίνδρους και γενικότερα τον «τέλειο» κινητήρα αλλά μέχρι στιγμής το επίπεδο τεχνολογίας, εξέλιξης και γνώσης δεν μας το «επιτρέπει». Συνειδητοποιώ ότι ο ορθότερος τρόπος μελέτης ενός κινητήρα μπορεί να επιτευχθεί μόνο μετά από ακριβή προσδιορισμό των απαιτήσεων για την εκάστοτε εφαρμογή. Εάν ο κινητήρας που προκύπτει καλύπτει το εκατό τοις εκατό των αναγκών για τις οποίες δημιουργήθηκε τότε η μελέτη είναι πετυχημένη και ο κινητήρας είναι «τέλειος».
Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι μετά από έναν αιώνα και πλέον, έρευνας και εξέλιξης πάνω στην λειτουργία και τον σχεδιασμό των ΜΕΚ δεν έχει επιτευχθεί το «τέλειο» και αυτό μόνο συναρπαστικό θα μπορούσα να το χαρακτηρίσω!

10. Βιβλιογραφία – πηγές

1. *Konstantinos Tourkochoritis (2020), Design and Calculation V8 Engine*
2. *Radoslav Plamenov Georgiev (2011), "Design a four-cylinder Internal Combustion Engine"*

   2.1 *Colin R. Ferguson (1986), "Internal Combustion Engine Applied Thermosciences"*

   2.2 *John B. Heywood (1988), "Internal Combustion Engine Fundamentals"*

   2.3 *Richard Stone (1999), "Introduction to Internal Combustion Engines" (3rd edition)*

   2.4 *Charles Fayette Taylor (1985), "The Internal Combustion Engine in the Theory and Practice, Volume 1"*

   2.5 *Charles Fayette Taylor (1985), "The Internal Combustion Engine in the Theory and Practice, Volume 2"*

   2.6 *J. H. Weaving (1990), "Internal Combustion Engineering"*

   2.7 *Dimitrov L. (2001), "Principle of Mechanical Engineering Design"*

   2.8 *Rowland S. Benson (1979), "Internal Combustion Engines, Volume 2"*

   2.9 *Ricardo (1933), "The High-Speed Internal Combustion Engine"*

   2.10 *Lanchester (1914), "Engine Balancing"*

   2.11 *Root (1932), "Dynamics of Engine and Shaft"*

   2.12 *McVey (1955), "Materials in Engine Design"*

   2.13 *SAE (1957) SP-148 " Crankshaft and rods, bearings, pistons and piston rings"*

   2.14 *Holcombre (1955), "Piston Design"*

   2.15 *Timoshenko (1947), "Strength of Materials"*

   2.16 *Tayler (1933), "New data on Bending Moments in the Master Connecting-Rod"*

   2.17 *Bauer (1960), "Engine Blocks and their components"*

   2.18 *Black (1956), "Fundamentals of Gear Design and Manufactory"*
3. *Vehicle Technical Specifications, Ferrari 458 Italia GT3 2011-2013, GT Class, SCCA Pro Racing*
4. *ΜΕΚ ΙΙ , Εμβάθυνση στην κατασκευή και λειτουργία, Κ. Ρακόπουλος , Καθηγητής Ε.Μ. Πολυτεχνείου*