



**ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**Πτυχιακή Εργασία με Τίτλο:**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΑΤΡΑΚΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΣ  
ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΑΝΕΛΚΥΣΤΗΡΑ**



**ΤΣΙΜΠΛΟΚΟΥΚΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ-ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Α.Μ. : 35928**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΟΛΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ**

Δεκέμβριος 2016



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κο. Τσολάκη Αντώνιο για την ανάθεση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, για την πολύτιμη βοήθεια του στην εκπόνηση της πτυχιακής μου εργασίας αλλά και για τις γνώσεις που αποκόμισα από εκείνον. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την καθηγήτρια κα. Ψυλλάκη Πανδώρα και το προσωπικό του εργαστηρίου Τριβολογίας για την πρόσβαση μου σε εργαστηριακό εξοπλισμό, χωρίς τον οποίο θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.



## Πίνακας Περιεχομένων

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	- 14 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ &amp; ΑΞΟΝΕΣ</b> .....	- 16 -
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ - ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	- 16 -
1.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ .....	- 18 -
1.2.1 Ορισμός - Ιστορική Αναδρομή .....	- 18 -
1.2.2. Τύποι Ανελκυστήρων .....	- 19 -
1.2.3. Υδραυλικός Ανελκυστήρας .....	- 20 -
1.2.3.1 Κύρια μέρη εγκατάστασης υδραυλικών ανελκυστήρων .-	- 23 -
1.2.3.2 Κινητήριος μηχανισμός υδραυλικού ανελκυστήρα .....	- 24 -
1.2.3.2.1 Έμβολο και Κύλινδρος.....	- 24 -
1.2.3.2.2 Μονάδα ισχύος - Κινητήρας ισχύος.....	- 26 -
1.2.3.2.3 Συρματόσχοινα ανύψωσης - Τροχαλία τριβής .....	- 27 -
1.2.3.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Υδραυλικών Ανελκυστήρων .....	- 27 -
1.2.4. Μηχανικοί Ανελκυστήρες έλξης.....	- 27 -
1.2.4.1. Κύρια μέρη εγκατάστασης μηχανικών ανελκυστήρων ...-	- 28 -
1.2.4.2. Κινητήριος μηχανισμός μηχανικού ανελκυστήρα - Πίνακες τεχνικών χαρακτηριστικών μηχανικών ανελκυστήρων .....	- 29 -
1.2.4.2.1. Τροχαλία τριβής.....	- 30 -
1.2.4.2.2. Μειωτήρας στροφών .....	- 31 -
1.2.4.2.3. Ηλεκτρικός κινήτηρας.....	- 31 -
1.2.4.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Μηχανικών Ανελκυστήρων .....	- 32 -

1.3. ΑΞΟΝΕΣ - ΑΤΡΑΚΤΟΙ .....	32 -
1.3.1. Ορισμός - Γενικά Στοιχεία.....	33 -
1.3.2. Γεωμετρικά στοιχεία ατράκτων.....	33 -
1.3.3. Υλικά - Κατασκευή Αξόνων.....	35 -
1.3.4. Αντοχή Υλικών - Μηχανικές Καταπονήσεις.....	36 -
1.3.4.1. Μηχανικές Καταπονήσεις.....	36 -
1.3.4.1.1. Εφελκυσμός.....	39 -
1.3.4.1.2. Θλίψη.....	41 -
1.3.4.1.3. Διάτμηση.....	41 -
1.3.4.1.4. Κάμψη .....	42 -
1.3.4.1.5. Στρέψη.....	42 -
1.3.4.1.6. Λυγισμός .....	44 -
1.3.5. Αντοχή Χαλύβων.....	45 -
1.3.6. Αντοχή Αξόνων-Ατράκτων-Καταπονήσεις.....	45 -
1.3.7. Υπολογισμός σε Στρέψη και Κάμψη .....	46 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΑΣΤΟΧΙΑ ΑΤΡΑΚΤΩΝ.....</b>	<b>50 -</b>
2.1 Μηχανισμοί αστοχίας .....	50 -
2.1.1 Αστοχία λόγω υπερφόρτισης (Overload failure) .....	50 -
2.1.1.1. Όλκιμη και ψαθυρή αστοχία υπερφόρτισης.....	51 -
2.1.2 Αστοχία λόγω κόπωσης .....	54 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΛΙΚΟΥ .....</b>	<b>59 -</b>
3.1. Αστοχία - Ορισμοί.....	59 -
3.2 Ανάλυσης Αστοχίας Υλικού .....	59 -
3.3 Μεθοδολογία Ανάλυσης Αστοχίας Υλικού.....	61 -

3.3.1 Μεθοδολογία Ανάλυσης Αστοχίας Υλικού - Συλλογή Δεδομένων . -	
62 -	
3.3.2 Στάδια Ανάλυσης Αστοχίας Υλικού - Προκαταρκτική Εξέταση -	
Οπτική Εξέταση..... -	63 -
3.3.3. Στάδια Ανάλυσης Αστοχίας Υλικού - Επιλογή Μεθόδου..... -	64 -
3.3.3.1. Μικροσκοπική ανάλυση..... -	64 -
3.3.3.2. Μη καταστρεπτικές μέθοδοι ελέγχου..... -	67 -
3.3.3.3. Χημική Ανάλυση..... -	71 -
3.3.3.4. Μεταλλογραφική εξέταση..... -	72 -
3.3.3.5. Μηχανικές Δοκιμές..... -	74 -
3.3.4. Στάδια Ανάλυσης Αστοχίας Υλικού - 4ο Στάδιο: Αξιολόγηση	
Αποτελεσμάτων..... -	74 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ</b> ..... -	77 -
4.1 Γενικά..... -	77 -
4.2 Στοιχεία και Μέθοδοι..... -	77 -
4.2.1 Μεθοδολογία Ανάλυσης Αστοχίας Υλικού - Αστοχία Αξόνων..... -	78 -
4.2.2 Πειραματικό μέρος: Ανάλυση αστοχίας άξονα ατράκτου μηχανικού	
ανελκυστήρα..... -	79 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b> ..... -	81 -
5.1 Συλλογή πληροφοριών : 1ο Στάδιο Μεθοδολογίας Ανάλυσης	
Αστοχίας..... -	82 -
5.2 Μακροσκοπική εξέταση: 2ο Στάδιο Μεθοδολογίας Ανάλυσης	
Αστοχίας - Οπτική εξέταση..... -	84 -
5.3 Μικροσκοπική ανάλυση: 3ο Στάδιο Μεθοδολογίας Ανάλυσης	
Αστοχίας - Μη καταστρεπτικές μέθοδοι..... -	90 -
5.3.1 Περιγραφή διαδικασίας..... -	90 -

5.3.2 Αποτελέσματα .....	- 91 -
5.4 Ανάλυση τάσεων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method-FEM): 3 <sup>ο</sup> Στάδιο Μεθοδολογίας Ανάλυσης Αστοχίας.....	- 94 -
5.4.1 Περιγραφή διαδικασίας.....	- 95 -
5.4.1.1 Σχεδίαση τρισδιάστατου μοντέλου σε περιβάλλον CAD...-	95 -
5.4.1.2. Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων σημείων και καθορισμός οριακών συνθηκών φόρτισης.....	- 98 -
5.4.1.3. Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης.....	- 99 -
5.5 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων: 4 <sup>ο</sup> Στάδιο Μεθοδολογίας Ανάλυσης Αστοχίας.....	- 101 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ....</b>	<b>- 103 -</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>- 107 -</b>



## Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Υδραυλικός Ανελκυστήρας .....	- 21 -
Εικόνα 2: Σχηματικό Διάγραμμα Υδραυλικού Ανελκυστήρα.....	- 22 -
Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση υδραυλικού ανελκυστήρα.....	- 24 -
Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση εμβόλου κυλίνδρου .....	- 25 -
Εικόνα 5: Μονάδα ισχύος υδραυλικού ανελκυστήρα.....	- 26 -
Εικόνα 6: Βασικά μέρη ανελκυστήρα έλξης.....	- 29 -
Εικόνα 7: Κινητήριος μηχανισμός ανελκυστήρα έλξης.....	- 30 -
Εικόνα 8: τυπικό παράδειγμα ατράκτου.....	- 35 -
Εικόνα 9: Κάμψη.....	- 37 -
Εικόνα 10: Θλίψη.....	- 37 -
Εικόνα 11: Διάτμηση.....	- 37 -
Εικόνα 12:Διάτμηση.....	- 38 -
Εικόνα 13: Παραμόρφωση κυλίνδρου υπό στρέψη. Κάθε διατομή στρίβει σε σχέση με την επόμενη .....	- 38 -
Εικόνα 14:Πλευρικός-στρεπτικός λυγισμός δοκού I με την κάθετη δύναμη στο κέντρο: α) διαμήκης όψη, β) διατομή κοντά στη στήριξη, γ) διατομή στο κέντρο, με πλευρική-στρεπτικό λυγισμό.....	- 39 -
Εικόνα 15: Κατανομή των διατμητικών τάσεων σε συμπαγή κυκλική διατομή λόγω στρεπτικής ροπής.....	- 44 -
Εικόνα 16: τυπικές φορτίσεις σε μια ατράκτο .....	- 45 -
Εικόνα 17: διαφορές στην εμφάνιση της αστοχίας ψαθυρών και όλκιμων υλικών κυλινδρικής συμπαγούς διατομής για τρεις βασικούς μηχανισμούς φόρτισης (22) .....	- 51 -
Εικόνα 18:Όλκιμη θραύση με σχηματισμό λακακκιών εγκάρσια των κόκκων.....	- 52 -
Εικόνα 19:Χαρακτηριστικά σημάδια chevron σε ψαθυρή θραύση(practical plant).....	- 53 -

Εικόνα 20: ψαθυρή θραύση μέσω σχισίματος(α) και ενδοκοκκικά(β) παρατηρούμενη με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (33).....	- 54 -
Εικόνα 21: Χαρακτηριστικές καμπυλες χρονικής μεταβολής της επιβαλλόμενης τάσης (34).....	- 56 -
Εικόνα 22: Διάγραμμα S-N για χάλυβα AISI 1045 και αλουμίνιο 2014-T6 κατά ASTM - όριο κόπωσης (fatigue limit) .....	- 57 -
Εικόνα 23: Οπτικό μικροσκόπιο.....	- 64 -
Εικόνα 24: Ηλεκτρονικά Μικροσκόπια Σάρωσης (SEM) .....	- 65 -
Εικόνα 25: Ηλεκτρονικά Μικροσκόπια Διερχόμενης Δέσμης (TEM).....	- 66 -
Εικόνα 26: Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια (Magnetic-Particle Inspection) .....	- 67 -
Εικόνα 27: Έλεγχος με φθορίζοντα διεισδυτικά υγρά (Fluorescent-Penetrant Inspection) .....	- 68 -
Εικόνα 28: Ραδιογραφία ακτίνων X ή γ (X-ray/ γ-ray Radiography) .....	- 69 -
Εικόνα 29: Έλεγχος με υπέρηχους (Ultrasonic Inspection) .....	- 69 -
Εικόνα 30: Έλεγχος με δινορεύματα (Eddy Current Inspection) .....	- 70 -
Εικόνα 31 : Μεταλλογραφική εξέταση - Εξοπλισμός .....	- 72 -
Εικόνα 32 : Μεταλλογραφική εξέταση - Μέταλλο .....	- 73 -
Εικόνα 33: Διάταξη μετάδοσης ισχύος κινητήρα-ατέρμονα κοχλία.....	- 83 -
Εικόνα 34: Σχηματική απεικόνιση τυπικού ηλεκτροκινητήρα και ένδειξη της περιοχής όπου επήλθε η θραύση .....	- 84 -
Εικόνα 35: Εξεταζόμενο κομμάτι ατράκτου .....	- 85 -
Εικόνα 36: Επιφάνεια θραύσης ατράκτου .....	- 85 -
Εικόνα 37: Ενσωματωμένη σφήνα ατράκτου .....	- 86 -
Εικόνα 38: Οπτική ανάλυση επιφάνειας θραύσης ατράκτου - έναρξη ρωγμής - ψαθυρή και μη ψαθυρή περιοχή.....	- 87 -
Εικόνα 39: Επεξεργασία με photoshop των φωτογραφιών της επιφάνειας θραύσης.....	- 88 -

Εικόνα 40: Τυπικές επιφάνειες θραύσης για δείγματα εργαστηριακής δοκιμής που υποβάλλονται σε μια σειρά από διαφορετικές συνθήκες φόρτισης .....	- 89 -
Εικόνα 41: Επιφάνεια θραύσης - μικροσκοπική ανάλυση.....	- 90 -
Εικόνα 42: Απεικόνιση μικροδομής .....	- 91 -
Εικόνα 43: Απεικόνιση ρωγμής - μεγέθυνση.....	- 92 -
Εικόνα 44: Απεικόνιση ρωγμής - μεγέθυνση.....	- 92 -
Εικόνα 45: Αποκόλληση και προσκόλληση υλικού λόγω τριβής .....	- 93 -
Εικόνα 46: Ραβδώσεις υλικού - Αστοχία λόγω κόπωσης .....	- 93 -
Εικόνα 47: Ραβδώσεις υλικού - Αστοχία λόγω κόπωσης .....	- 94 -
Εικόνα 48: Τρισδιάστατο μοντέλο σε περιβάλλον CAD .....	- 95 -
Εικόνα 49: Τρισδιάστατο μοντέλο σε περιβάλλον CAD .....	- 96 -
Εικόνα 50: Τρισδιάστατο μοντέλο σε περιβάλλον CAD .....	- 96 -
Εικόνα 51: Τρισδιάστατο μοντέλο σε περιβάλλον CAD .....	- 97 -
Εικόνα 52: Απεικόνιση ολοκληρωμένου τρισδιάστατου μοντέλου .....	- 97 -
Εικόνα 53: Πάκτωση στο κομμάτι της ατράκτου που υπάρχει το έδρανο - τρισδιάστατη απεικόνιση .....	- 98 -
Εικόνα 54: Τρισδιάστατη απεικόνιση άτρακτου - Αναλυτικό πλέγμα (609.418 κόμβοι και 427.847 στοιχεία) για ακριβή αποτελέσματα .....	- 99 -
Εικόνα 55: Τρισδιάστατη απεικόνιση άτρακτου - Σημείο μεεγαλύτερης καταπόνησης - Περιφέρεια πραγματικής θραύσης .....	- 99 -
Εικόνα 56: Τρισδιάστατη απεικόνιση άτρακτου - Συντελεστής ασφαλείας στο σημείο καμπτικής δύναμης.....	- 100 -

## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: τυποποιημένες διαμέτροι ατράκτων κατά DIN 114 .....	- 34 -
Πίνακας 2: Μηχανικές ιδιότητες διάφορων χαλύβων.....	- 36 -

## Λίστα Εξισώσεων

Εξίσωση 1: Σχέση μετάδοσης μειωτήρα.....	- 31 -
Εξίσωση 2: Εξίσωση εφελκυστικής τάσης $\sigma$ .....	- 39 -
Εξίσωση 3: Εξίσωση ελαστικής παραμόρφωσης $\Delta L$ - Νόμος Hooke.....	- 40 -
Εξίσωση 4: εφελκυστική τάση $\sigma$ , σε περίπτωση όπου ο εφελκυσμός είναι εκκεντρός.....	- 40 -
Εξίσωση 5: θλιπτική τάση.....	- 41 -
Εξίσωση 6: Διατμητική τάση .....	- 42 -
Εξίσωση 7: Διατμητική τάση στην ελαστική περιοχή .....	- 43 -
Εξίσωση 8: Διατμητική τάση κυλινδρικού σώματος .....	- 43 -
Εξίσωση 9: Πολική Ροπή αδράνειας κυκλικής διατομής.....	- 43 -
Εξίσωση 10: Τύπος μέγιστης διατμητικής τάσης κυκλικής συμπαγούς διατομής.....	- 43 -
Εξίσωση 11: διάμετρος κυκλικής διατομής ατράκτου .....	- 46 -
Εξίσωση 12: εξωτερική διάμετρος ατράκτου με δακτυλιοειδή κυκλική διατομή .....	- 47 -
Εξίσωση 13: Τύπος υπολογισμού διατομής αξόνων που καταπονούνται σε κάμψη .....	- 47 -
Εξίσωση 14: Ισοδύναμη ροπή $M_n$ .....	- 48 -
Εξίσωση 15: Ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρος για άτρακτο με πλήρη κυκλική διατομή .....	- 48 -
Εξίσωση 16: Μέση τιμή τάσης $\sigma_m$ .....	- 55 -
Εξίσωση 17: Έυρος των τάσεων $\sigma_r$ .....	- 55 -
Εξίσωση 18: Πλάτος των τάσεων $\sigma_a$ .....	- 55 -
Εξίσωση 19: Λόγος των τάσεων $R$ .....	- 55 -

## Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1: Μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας υλικού - Στάδια .....	- 61 -
Σχήμα 2: Σχηματική αναπαράσταση μεθοδολογίας έρευνας .....	- 77 -



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία, εκπονήθηκε στο εργαστήριο "Στοιχεία Μηχανών" του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού δρύματος Πειραιά σε συνεργασία με το εργαστήριο τριβολογίας.

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι η ανάλυση των παραγόντων οι οποίοι οδηγούν σε αστοχία την άτρακτο ηλεκτροκινητήρα διατάξεως μετάδοσης ισχύος ηλεκτρικού ανελκυστήρα. Αρχικά παρατίθενται γενικά στοιχεία για τους ανελκυστήρες, στοιχεία που αφορούν την αστοχία των αξόνων και τις καταπονήσεις που υφίστανται. Στη συνέχεια αναλύεται η μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας υλικού, όπου συλλέγονται χρήσιμες πληροφορίες για την διεξαγωγή του πειραματικού μέρους.

Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται τέσσερα (4) κύρια στάδια στη μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας υλικού, τα οποία είναι 1) η συλλογή πληροφοριών για το υλικό που αστόχησε όπως συνθήκες παραγωγής, εγκατάστασης και λειτουργίας 2) οπτική εξέταση, δηλαδή μακροσκοπική εξέταση, φωτογράφιση και τήρηση αρχείων 3) επιλογή μεθόδου με βάση τα ευρήματα της οπτικής εξέτασης όπως μικροσκοπική εξέταση, μη καταστρεπτικές μέθοδοι ελέγχου, χημική ανάλυση, μεταλλογραφική ανάλυση, μηχανικές μέθοδοι και 4) εύρεση και ανάλυση αποτελεσμάτων. Η μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας υλικού έχει 3 στόχους, οι οποίοι είναι 1) ο καθορισμός της καταπόνησης 2) ο τρόπος αστοχίας υλικού 3) η αιτία αστοχίας υλικού. Συνθέτοντας και αναλύοντας τα αποτελέσματα αυτών των τριών στόχων, είναι δυνατό να προσδιοριστούν διορθωτικές ενέργειες.

Στο πειραματικό μέρος ακολουθείται η μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω και εφαρμόζεται στην περίπτωση της αστοχίας υλικού ατράκτου ηλεκτρικού κινητήρα. Μέσω εργαστηριακών πειραμάτων, υπολογιστικών προγραμμάτων και ανάλυση των πληροφοριών, παρατίθενται τα αποτελέσματα της αστοχίας ατράκτου ηλεκτρικού κινητήρα διατάξεως μετάδοσης ισχύος ηλεκτρικού ανελκυστήρα.

## **ABSTRACT**

This thesis was conducted at the "machine elements" lab for the department of Mechanical Engineering at the Technological Institute of Piraeus.

The aim of this thesis is the analysis of the factors that lead to a premature failure of an electric motor shaft of person elevator powertrain. At first, this study provides a theoretical background of elevators, shaft loads and the most common causes of shaft failures. The failure analysis methodology according to EU standards follows and is presented in detail.

Specifically, there are four (4) basic stages in the failure analysis methodology: 1) collection of background data and selection of samples, 2) preliminary examination of the part that failed (visual examination and record keeping), 3) selection of destructive and non-destructive tests based on the findings of preliminary examination and 4) synthesis and interpretation of the results. The purposes of a failure analysis are to determine 1) the loads, 2) the failure mechanism and 3) the root cause of the failure. Synthesizing and formulating the conclusions of these purposes with follow-up recommendations, can prevent future failures.

The methodology that previously described is applied at the experimental procedure for the failure analysis of an electric motor shaft of person elevator powertrain. Visual examination, non-destructive testing (stereoscopy, FEM analysis) as well as destructive tests (scanning electron microscopy) were carried out. The thesis opposes all the findings and results from each test and finally, the conclusions of the failure analysis of an electric motor shaft of person elevator powertrain are presented.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ & ΑΞΟΝΕΣ**

### **1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ - ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

Ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η εύρεση αποτελεσμάτων της αστοχίας ατράκτου ηλεκτρικού κινητήρα που χρησιμοποιούνταν για την μετάδοση ισχύος σε ηλεκτρικό ανελκυστήρα. Η ανάλυση αστοχίας υλικών αποτελεί ένα σημαντικό κλάδο για την παραγωγή και κατασκευή ανθεκτικών εγκαταστάσεων και κατασκευών, καθώς μέσω της ανάλυσης του τρόπου αστοχίας, των αιτιών αστοχίας και των καταπονήσεων που υφίσταται ένα υλικό που έχει αστοχήσει, μπορούν να προταθούν διορθωτικές ενέργειες, με αποτέλεσμα την κατασκευή πιο ανθεκτικών υλικών.

Αρχικά στο πρώτο κεφάλαιο παρατίθενται στοιχεία για τους ανελκυστήρες και συγκεκριμένα για τα μηχανικά τους μέρη. Επιπλέον γίνεται παράθεση πληροφοριών για τους άξονες, τα υλικά κατασκευής τους, τη γεωμετρία τους και τις καταπονήσεις που υφίστανται ώστε να γίνει συλλογή πληροφοριών για το υπόβαθρο των αξόνων. Παρουσιάζονται αναλυτικά οι κύριοι μηχανισμοί αστοχίας υλικού των αξόνων-ατράκτων καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε μηχανισμού, με σκοπό την τεκμηριωμένη ανάλυση των αποτελεσμάτων στο πειραματικό μέρος. Στη συνέχεια παρατίθενται πληροφορίες για τη μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας υλικού.



Η ανάλυση των αναπόφευκτων αποτυχιών που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της δοκιμής, της κατασκευής ή λειτουργίας είναι μια ουσιαστική διαδικασία της μηχανικής για τη συνεχή βελτίωση της αξιοπιστίας του προϊόντος. Σε αυτήν την πτυχιακή εργασία περιγράφονται οι γενικές διαδικασίες, οι τεχνικές καθώς και οι συνιστώσες που χρησιμοποιούνται στην έρευνα για την ανάλυση των μεταλλουργικών αποτυχιών που συμβαίνουν κατά την λειτουργία. Επιπλέον, γίνεται περιγραφή και ανάλυση των σταδίων της ανάλυσης αστοχίας υλικού και συζητώνται οι διάφοροι παράγοντες/αιτίες (περιβάλλον λειτουργίας, η συντήρηση, ο κακός σχεδιασμός, οι συνθήκες λειτουργίας ) που οδηγούν στην αστοχία του υλικού.

Όπως περιγράφεται και εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 2, η μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας υλικού έχει 3 στόχους, οι οποίοι είναι 1) ο καθορισμός της καταπόνησης 2) ο τρόπος αστοχίας υλικού 3) η αιτία αστοχίας υλικού. Συνθέτοντας και αναλύοντας τα αποτελέσματα αυτών των τριών στόχων, είναι δυνατό να προσδιοριστούν διορθωτικές ενέργειες καθώς και να επιτευχθεί βελτιστοποίηση του υλικού.

## **1.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ**

### **1.2.1 Ορισμός - Ιστορική Αναδρομή**

Ως ανελκυστήρας ορίζεται η μηχανική συσκευή - εγκατάσταση η οποία χρησιμοποιείται για την μεταφορά, σε διαφορετικά επίπεδα, επιβατών και εμπορευμάτων σε κάθετη κατεύθυνση σε ένα κτίριο.

Ο όρος ανελκυστήρας αφορά μία σύγχρονη μονάδα ανύψωσης η οποία περιλαμβάνει αυτόματες συσκευές ασφαλείας και διαφοροποιείται από τους πρώτους τύπους ανελκυστήρων, οι οποίοι αποτελούνταν από σχοινιά με γάντζο (1). Οι ανελκυστήρες αποτελούνται από το φρεάτιο, την καμπίνα, η οποία κινείται κατακόρυφα με την χρήση κατακόρυφων οδηγών μέσα στο φρεάτιο, το αντίβαρο για το βάρος της καμπίνας και ένα μηχανισμό για την παραγωγή και μετάδοση της κίνησης. Ένα πρώιμο σύστημα ανελκυστήρα εφευρέ ο Γάλλος Βελαγέ το 17ο αιώνα, ο οποίος λειτουργούσε με τη χρήση ενός αντίβαρου. Μετέπειτα στις αρχές του 18ου αιώνα κατασκευάστηκαν οι πρώτοι υδραυλικοί ανελκυστήρες και το 1835 ο πρώτος μηχανικός ανελκυστήρας στην Αγγλία, ο οποίος λειτούργησε ως πλατφόρμα για την ανάπτυξη των σημερινών ανελκυστήρων (2). Το 1850 κατασκευάστηκε στις ΗΠΑ ο πρώτος ανελκυστήρας, ο οποίος λειτουργούσε με ατμό. Ο συγκεκριμένος ανελκυστήρας αναπτύχθηκε περαιτέρω από τον αμερικανό εφευρέτη και κατασκευαστή Elisha Otis, ο οποίος παρουσίασε ένα σύστημα ανύψωσης με μηχανισμό ασφαλείας φορτίου (1). Το 1880, κατασκευάστηκε ο πρώτος ηλεκτρικός ανελκυστήρας στη Γερμανία από τον Werner Von Siemens (2).

### 1.2.2. Τύποι Ανελκυστήρων

Ο σχεδιασμός των μηχανικών και ηλεκτρονικών μερών ενός ανελκυστήρα διέπεται απο κάποιους κώδικες, ώστε να διασφαλίζεται πρωτίστως η ασφάλεια κατά την μεταφορά αλλά και γενικότερα να υπάρχει σωστή λειτουργία. Παρακάτω παραθέτονται οι ευρωπαϊκοί κανονισμοί που διέπουν τους ανελκυστήρες.

- Europe – EN 81 series (EN 81-1, EN 81-2, EN 81-28, EN 81-70, EN 12015, EN 12016, EN 13015, etc.)

converged in ISO 22559 series, "Safety requirements for lifts (elevators)":

Part 1: Global essential safety requirements (GESRs).

Part 2: Safety parameters meeting the global essential safety requirements (GESRs).

Part 3: Global conformity assessment procedures (GCAP) -- Prerequisites for certification of conformity of lift systems, lift components and lift functions

Part 4: Global conformity assessment procedures (GCAP) -- Certification and accreditation requirements

- ISO/TC 178 is the Technical Committee on Lifts, escalators and moving walks. (2)

Υπάρχει μία πληθώρα παραγόντων και συγκεκριμένα η χρήση, η αρχή λειτουργίας, η ταχύτητα και ο αριθμός ταχυτήτων οι οποίοι καθορίζουν τις κατηγορίες των ανελκυστήρων. Με βάση αυτούς τους παράγοντες, οι ανελκυστήρες διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

### Χρήση

Επιβατηγούς - μεταφορά προσώπων

Φορτηγούς - μεταφορά φορτίων

### **Αριθμός ταχυτήτων**

Ανελκυστήρας μίας ταχύτητας

Ανελκυστήρας πολλών ταχυτήτων

### **Ταχύτητα**

Ανελκυστήρες μικρής ταχύτητας

Ανελκυστήρες μέσης ταχύτητας

Ανελκυστήρες υψηλής ταχύτητας

### **Αρχή λειτουργίας**

Υδραυλικοί ανελκυστήρες

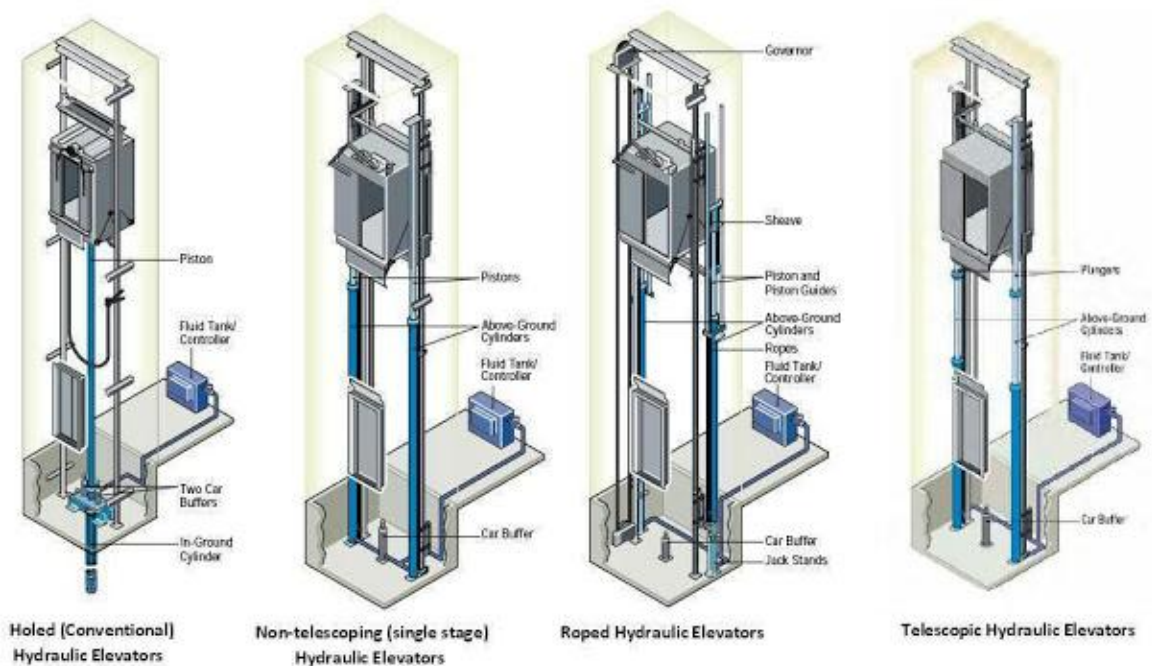
Ηλεκτροκίνητοι ανελκυστήρες έλξης

Μαγνητικοί ανελκυστήρες (3)

Μέχρι και σήμερα χρησιμοποιούνται δύο τύποι ανελκυστήρων στα κτίρια, ο υδραυλικός και ο μηχανικός ανελκυστήρας έλξης. Ο υδραυλικός ανελκυστήρας χρησιμοποιεί ως διάταξη μετάδοσης ισχύος μία ηλεκτροκίνητη αντλία η οποία μεταβιβάζει υδραυλικό ρευστό, δηλαδή λάδι, σε μία ανυψωτική μονάδα, δηλαδή ένα έμβολο- κύλινδρο. Αυτός ο τύπος υδραυλικής διάταξης τοποθετείται στο χαμηλότερο επίπεδο του κτιρίου. Οι υδραυλικοί ανελκυστήρες χρησιμοποιούνται συνήθως σε κτίρια, τα οποία έχουν χρήση κατοικίας. Ο δεύτερος τύπος διάταξης είναι ο ηλεκτροκίνητος ή αλλιώς μηχανικός ανελκυστήρας. Η διάταξη μετάδοσης ισχύος του μηχανικού ανελκυστήρα αποτελείται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα, έναν μειωτήρα στροφών και μία τροχαλία (4). Από την τροχαλία διέρχεται ένα σύστημα συρματόσχοινων, στη μία άκρη του οποίου βρίσκεται ο θάλαμος και στο άλλο τα αντίβαρα ταχυτήτων.

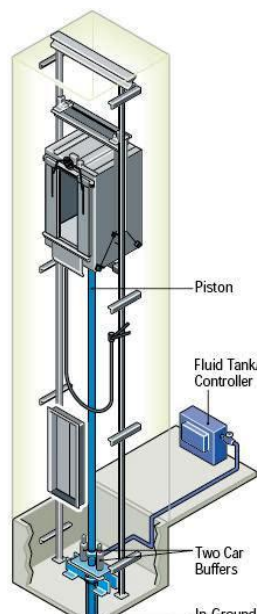
### **1.2.3. Υδραυλικός Ανελκυστήρας**

Το σύστημα του υδραυλικού ανελκυστήρα αποτελείται από μία πλατφόρμα η οποία λειτουργεί με ένα υδραυλικό έμβολο και έναν κινητήρα, ο οποίος μεταφέρει ρευστό στο έμβολο, το οποίο είναι τοποθετημένο μέσα σε έναν κύλινδρο. Ο κύλινδρος είναι συνδεδεμένος με ένα σύστημα άντλησης υγρού (5) (Σχήμα 1).



**Εικόνα 1: Υδραυλικός Ανελκυστήρας**

<http://3.bp.blogspot.com/-DN2duMoqSg8/T5FKmsa-F0I/AAAAAAAAABzY/HROA2CE3zU8/s640/hydarluic+elevators.JPG>



## **Εικόνα 2: Σχηματικό Διάγραμμα Υδραυλικού Ανελκυστήρα**

*Source: <http://www.elevatorbazaar.co.in/images/HYDRAULIC.JPG>*

Το υδραυλικό σύστημα αποτελείται από τρία μέρη, συγκεκριμένα από μία δεξαμενή ρευστού και αντλίες, τα οποία τροφοδοτούνται από έναν ηλεκτροκινητήρα.

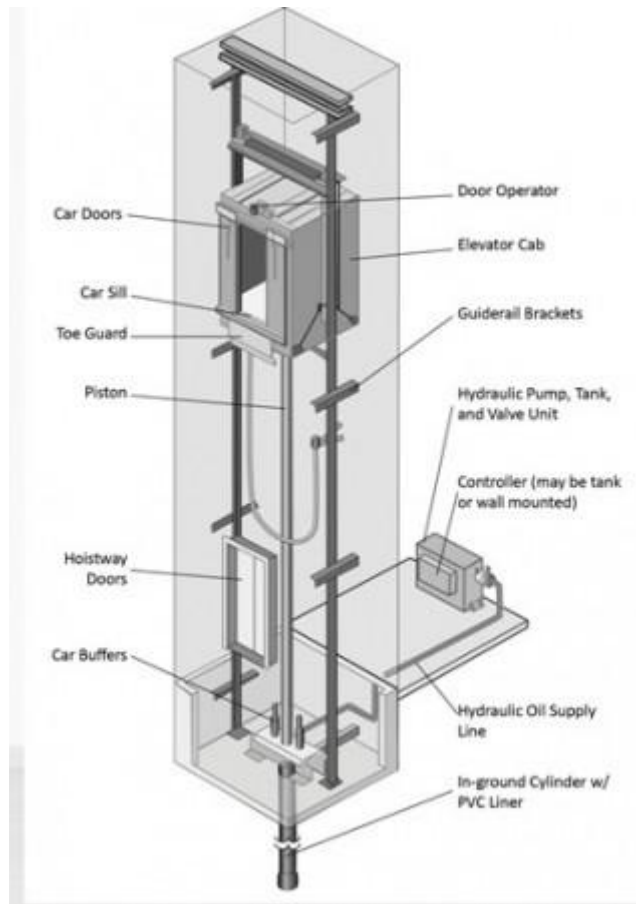
Το ρευστό οδηγείται με πίεση μέσω της αντλίας από την δεξαμενή σε μία σωλήνα και τελικά στον κύλινδρο. Όταν η βαλβίδα είναι ανοιχτή, αναπτύσσει το υγρό λόγω πίεσης χαμηλή αντίσταση και επιστρέφει κατα αυτόν τον τρόπο στο δοχείο υγρού. Αντίθετα, όταν η βαλβίδα είναι κλειστή, το υγρό που υφίσταται την πίεση, οδηγείται αναγκαστικά στον κύλινδρο. Όσο το υγρό συλλέγεται στον κύλινδρο, σπρώχνει το έμβολο προς τα επάνω ανυψώνοντας την πλατφόρμα του ανελκυστήρα (Σχήμα 2).

Όταν η πλατφόρμα του ανελκυστήρα προσεγγίσει το σωστό επίπεδο, το σύστημα ελέγχου στέλνει το μήνυμα στον ηλεκτροκινητήρα να κλείσει την αντλία βαθμιαία. Η απενεργοποίηση της αντλίας έχει ως αποτέλεσμα να μην ρέει περισσότερο υγρό μέσα στον κύλινδρο. Ωστόσο το υγρό που βρίσκεται ήδη στον κύλινδρο, δεν μπορεί να διαφύγει, δηλαδή εμποδίζεται η ροή του πίσω στην αντλία και έτσι η βαλβίδα παραμένει κλειστή. Το έμβολο στηρίζεται στο υγρό και η πλατφόρμα παραμένει σταθερή εκεί που σταμάτησε. Για να μετακινηθεί η πλατφόρμα προς τα χαμηλότερα επίπεδα, το σύστημα ελέγχου στέλνει ένα σήμα στη βαλβίδα, η οποία λειτουργεί ηλεκτρικά με ένα διακόπτη ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας. όταν η ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα ανοίξει, το υγρό που είναι συγκεντρωμένο στον κύλινδρο, εκρέει στο δοχείο υγρού. Το έμβολο κινείται προς τα κάτω λόγω του βάρους της πλατφόρμας, ωθεί το υγρό εντός της δεξαμενής και η ανυψωτική πλατφόρμα κινείται προς τα κάτω σταδιακά. Για να σταματήσει η πλατφόρμα σε χαμηλότερο επίπεδο επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία. Δηλαδή το σύστημα ελέγχου κλείνει πάλι την βαλβίδα (5).

### **1.2.3.1 Κύρια μέρη εγκατάστασης υδραυλικών ανελκυστήρων**

Η εγκατάσταση ενός υδραυλικού ανελκυστήρα αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη και βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά (Σχήμα 3):

- Φρεάτιο
- Μηχανοστάσιο
- Θάλαμος
- Οδηγοί
- Έμβολο-Κύλινδρος
- Σωλήνας τροφοδοσίας
- Μονάδα ισχύος



**Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση υδραυλικού ανελκυστήρα**

<http://www.robsonforensic.com/articles/elevator-anatomy-schematic-of-traction-hydraulic-elevator-systems>)

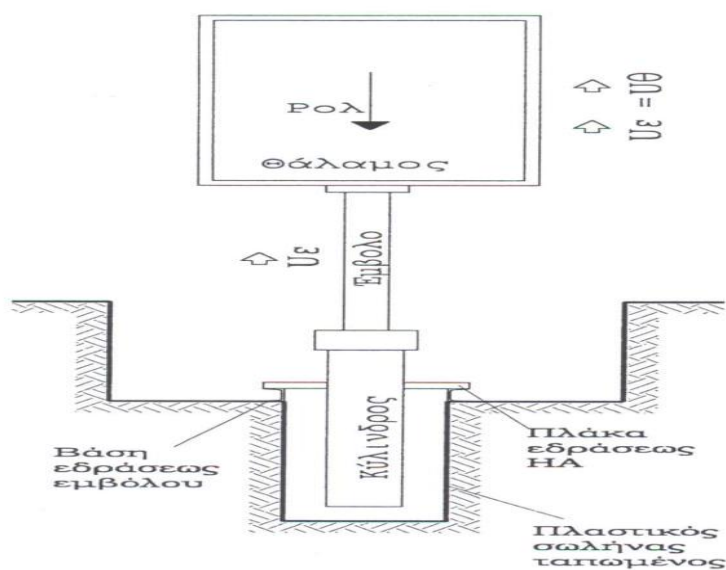
### **1.2.3.2 Κινητήριος μηχανισμός υδραυλικού ανελκυστήρα**

Ο κινητήριος μηχανισμός του υδραυλικού ανελκυστήρα αποτελείται από το έμβολο - κύλινδρο, τον σωλήνα τροφοδοσίας και την μονάδα ισχύος (6).

#### **1.2.3.2.1 Έμβολο και Κύλινδρος**



Το έμβολο κατασκευάζεται είτε σαν συμπαγής άξονας, είτε από χαλυβδοσωλήνα χωρίς ραφή, και φέρει ενισχυμένο τοίχωμα ώστε να αναπτύσσει ικανοποιητικές αντοχές υπό καταπόνηση. Για την ορθή λειτουργία των στεγανοποιητικών στοιχείων και των στοιχείων έδρασης, το έμβολο είναι τριγωνισμένο και ρεκτιφιαρισμένο 'ώστε να έχει απόλυτα λεία επιφάνεια. Το κάτω άκρο του πακτώνεται με σιδηρά φλάντζα και φέρει συγκολλημένο σιδερένιο δακτύλιο ώστε να μην μπορεί να διαφύγει από τον κύλινδρο.



**Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση εμβόλου κυλίνδρου**

(Πηγή : Περιγραφή τμημάτων υδραυλικού ανελκυστήρα και μελέτη ανελκυστήρα 10 ατόμων με 4 ενδιάμεσες στάσεις, Μανωλάκας Κυριάκος)

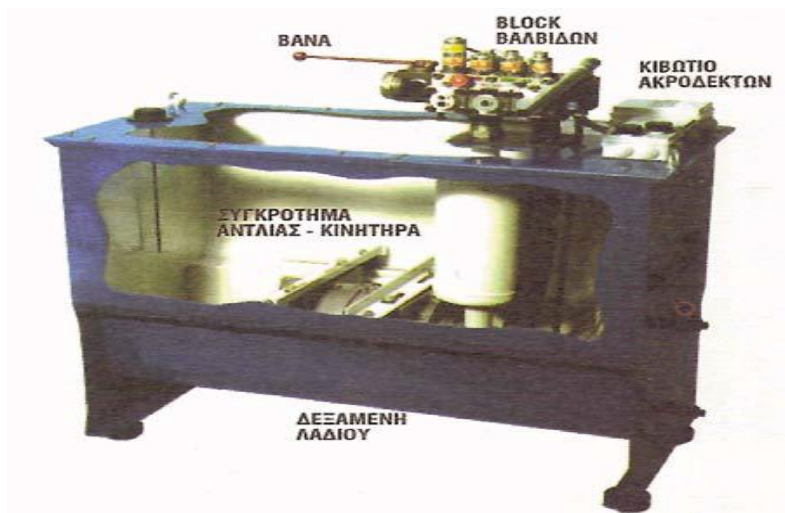
Ο κύλινδρος κατασκευάζεται από χαλυβδοσωλήνα χωρίς ραφή και έχει πάχος τέτοιο ώστε να διασφαλίζεται η αντοχή σε πίεση καθώς και σε λοιπές συνθήκες λειτουργίας. Το κάτω άκρο του κυλίνδρου είναι πακτωμένο με σιδηρά φλάντζα και το σχήμα του περιλαμβάνει μία προσαρμοσμένη κωνική προεξοχή η οποία διασφαλίζει το ορθό κεντράρισμα του εμβόλου μέσα στον κύλινδρο. Η στεγανότητα του κυλίνδρου επιτυγχάνεται με δύο ελαστικούς δακτυλίους. Ο ένας δακτύλιος αποτρέπει την διέλευση λαδιού από τον κύλινδρο προς τα έξω και ονομάζεται τσιμούχα και ο δεύτερος δακτύλιος ονομάζεται ξύστρα και αποτρέπει την είσοδο ξένων σωματιδίων στον κύλινδρο κατά την κάθοδο του εμβόλου. Ανάμεσα στον κύλινδρο και το έμβολο

υπάρχει διάκενο το οποίο διασφαλίζει την ορθή ροή του λαδιού. Στο σημείο τροφοδοσίας του κυλίνδρου είναι τοποθετημένη μία ειδική βαλβίδα ασφαλείας, η οποία λειτουργεί ως υδραυλική αρπαγή και ενεργοποιείται στην περίπτωση διαρροής στον σωλήνα τροφοδοσίας ή θραύσης καθώς και όταν υπάρχει υπέρβαση της ταχύτητας του θαλάμου κατά 0,3m/s της ονομαστικής ταχύτητας (3, 7).

#### 1.2.3.2.2 Μονάδα ισχύος - Κινητήρας ισχύος

Η μονάδα ισχύος αποτελείται από το δοχείο λαδιού, τη διάταξη κινητήρα-αντλίας, το μπλοκ βαλβίδων και από τα υπόλοιπα στοιχεία του υδραυλικού ελέγχου του ανελκυστήρα.

Ο κινητήρας ισχύος είναι συνήθως 3-φασικός για τάση 380V με συχνότητα 50Hz. Είναι συνήθως διπολικός με αριθμό στροφών 2750 ανά πρώτο λεπτό. Η ροπή εκκινήσεως πρέπει να είναι περίπου διπλάσια της ονομαστικής ροπής και η συνδεσμολογία εκκινήσεως έως 8,5kW είναι σε τρίγωνη διάταξη, ενώ αν η ισχύς είναι μεγαλύτερη τότε η διάταξη είναι μορφής αστέρα-τρίγωνο. (3)



**Εικόνα 5: Μονάδα ισχύος υδραυλικού ανελκυστήρα**

( Πηγή : Ανελκυστήρες, Εργαστήριο Ηλεκτρικής κίνησης, ΑΤΕΙ Πειραιά )

#### 1.2.3.2.3 Συρματόσχοινα ανύψωσης - Τροχαλία τριβής

Στην περίπτωση της έμμεσης ανάρτησης, τα συρματόσχοινα ανύψωσης λειτουργούν με την βοήθεια τροχαλιών. Ο ελάχιστος αριθμός των συρματόσχοινων που απαιτείται είναι δύο, και η ελάχιστη διάμετρος των συρματόσχοινων ανάρτησης είναι τα 6mm.

Η τροχαλία των συρματόσχοινων αποτελείται από δύο επιμέρους τροχαλίες, οι οποίες τοποθετούνται σε χαλύβδινο άξονα, ο οποίος εδράζεται σε ανεξάρτητα αυτολίπαντα έδρανα. Η στήριξη του χαλύβδινου άξονα επιτυγχάνεται με μία μεταλλική κατασκευή, η οποία είναι τοποθετημένη στην άνω απόληξη του εμβόλου.

#### **1.2.3.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Υδραυλικών Ανελκυστήρων**

Το πλεονέκτημα των υδραυλικών ανελκυστήρων είναι ότι πολλαπλασιάζουν την δύναμη της αντλίας, η οποία θεωρείται σχετικά αδύναμη, και δημιουργεί την απαιτούμενη δύναμη για να ανυψώσει τον ανελκυστήρα. Ωστόσο τα υδραυλικά συστήματα έχουν δύο κύρια μειονεκτήματα. Το κύριο μειονέκτημα είναι το μέγεθος του εξοπλισμού που απαιτείται. Για να μπορεί ο ανελκυστήρας να προσεγγίσει τα υψηλότερα επίπεδα, απαιτείται το έμβολο να είναι μεγαλύτερο και ο κύλινδρος λίγο μεγαλύτερος από το έμβολο. Δεδομένου ότι ο κύλινδρος πρέπει να τοποθετηθεί πιο χαμηλά από το φρεάτιο του ανελκυστήρα, όσο περισσότερους ορόφους έχει ένα κτίριο, τόσο μεγαλύτερος πρέπει να είναι ο κύλινδρος και το έμβολο, άρα τόσο βαθύτερα θα πρέπει να τοποθετηθεί ο κύλινδρος. Το δεύτερο μειονέκτημα των υδραυλικών ανελκυστήρων είναι ότι αυτή η διάταξη είναι αρκετά αναποτελεσματική. Απαιτείται πολύ ενέργεια συνήθως ώστε να μπορεί ο ανελκυστήρας να ανυψωθεί εκ νέου (5).

#### **1.2.4. Μηχανικοί Ανελκυστήρες έλξης**

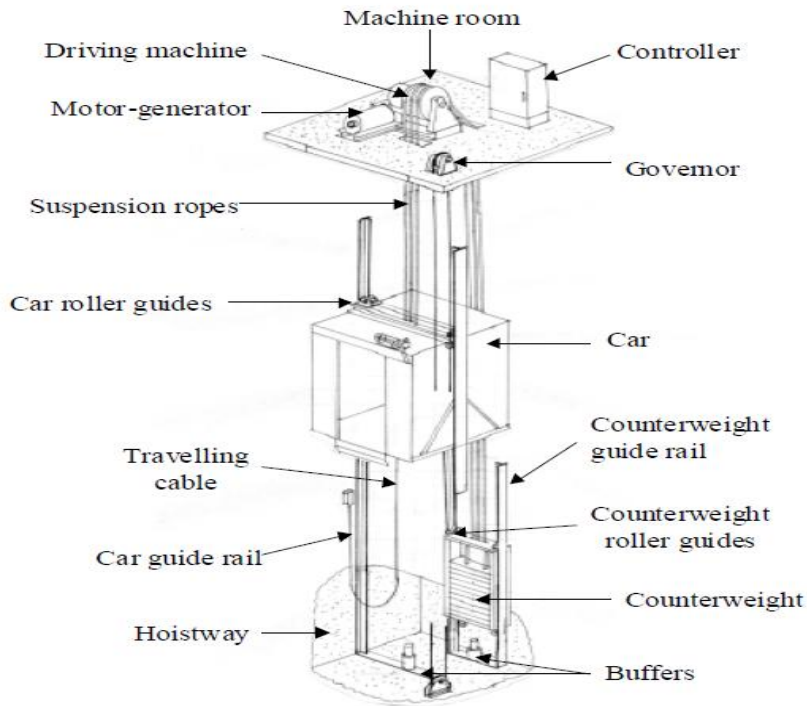
Ο μηχανικός ανελκυστήρας αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τύπο ανελκυστήρα. Στους μηχανικούς ανελκυστήρες, η κίνηση της καμπίνας επιτυγχάνεται μέσω συρματοσχοίων, τα οποία στην μία άκρη τους είναι συνδεδεμένα με την καμπίνα και στην άλλη με το αντίβαρο. Τα συρματοσχοίνα είναι τυλιγμένα σε μία τροχαλία τριβής που στρέφεται από ένα ηλεκτρικό κινητήρα. Η μεταφορά της ροπής στρέψης στην τροχαλία γίνεται είτε μέσω ενός μειωτήρα στροφών ή απευθείας από τον ηλεκτρικό κινητήρα, ανάλογα με τον τύπο του ανελκυστήρα.

Η χρήση του αντίβαρου στους μηχανικούς ανελκυστήρες αποσκοπεί στην εξοικονόμηση ενέργειας. Το βάρος του αντίβαρου πρέπει να είναι ίσο με το βάρος της καμπίνας συν το 50% του ωφέλιμου φορτίου. Έτσι, η δύναμη που χρειάζεται από τον κινητήρα για την κίνηση της καμπίνας είναι ίση με την διαφορά των φορτίων της καμπίνας και του αντίβαρου κάθε φορά.

#### ***1.2.4.1. Κύρια μέρη εγκατάστασης μηχανικών ανελκυστήρων***

Η εγκατάσταση ενός μηχανικού ανελκυστήρα έλξης αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη και τεχνικά χαρακτηριστικά.

- φρεάτιο
- μηχανοστάσιο-τροχαλιοστάσιο
- θάλαμος • αντίβαρο
- οδηγοί
- συρματοσχοίνο ανάρτησης
- τροχαλία τριβής
- κινητήρας
- προσκρουστήρες



**Εικόνα 6: Βασικά μέρη ανελκυστήρα έλξης**

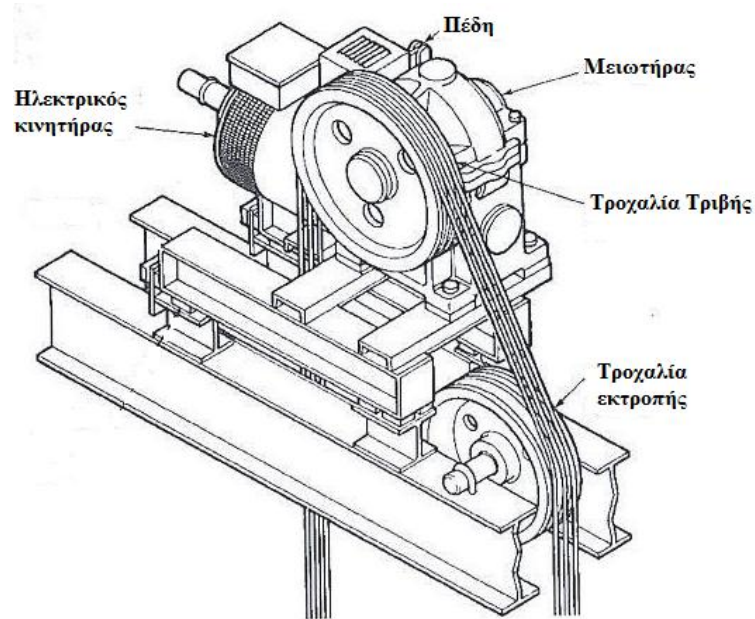
(Πηγή :  
[scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd10052004201201/unrestricted/01\\_Chapter1.pdf](http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd10052004201201/unrestricted/01_Chapter1.pdf))

#### **1.2.4.2. Κινητήριος μηχανισμός μηχανικού ανελκυστήρα - Πίνακες τεχνικών χαρακτηριστικών μηχανικών ανελκυστήρων**

Ο κινητήριος μηχανισμός του ανελκυστήρα αποτελείται από τα ακόλουθα εξαρτήματα:

- Την τροχαλία τριβής

- Το μειωτήρα στροφών
- Την πέδη (φρένο)
- Τον ηλεκτροκινητήρα



**Εικόνα 7: Κινητήριος μηχανισμός ανελκυστήρα έλξης**

(Πηγή : [www.electrical-knowhow.com](http://www.electrical-knowhow.com) )

#### 1.2.4.2.1. Τροχαλία τριβής

Η τροχαλία τριβής δημιουργεί δύναμη κίνησης από τον ηλεκτροκινητήρα, την οποία μεταδίδει, μέσω της τριβής που αναπτύσσεται, στα συρματόσχοινα ανάρτησης. Οι υψηλές τιμές του συντελεστή τριβής, που αναπτύσσονται μεταξύ του συρματόσχοινου ανάρτησης και των αυλακών της τροχαλίας, διασφαλίζει την λειτουργία της τροχαλίας τριβής. Η τροχαλία τριβής συνήθως κατασκευάζεται από χυτοσίδηρο. Για την ομαλή λειτουργία των συρματόσχοινων ανάρτησης, οι αυλακώσεις της τροχαλίας απαιτείται να είναι απολύτως όμοιες.

#### 1.2.4.2.2. Μειωτήρας στροφών

Ο μειωτήρας στροφών συνήθως είναι της μορφής ατέρμονα κοχλία-κορώνας. Ωστόσο στην πράξη χρησιμοποιούνται συνήθως απλής μορφής ατέρμονες κοχλίες. Ο μειωτήρας στροφών τοποθετείται ανάμεσα στον κινητήρα και την τροχαλία τριβής με σκοπό τη μείωση των στροφών του κινητήρα. Αυτό έχει ως συνέπεια την επίτευξη του επιθυμητού αριθμού στροφών της τροχαλίας τριβής. Ο λόγος των στροφών του κινητήρα προς τις στροφές της τροχαλίας τριβής είναι η σχέση μετάδοσης του μειωτήρα, συμβολίζεται με  $i$  και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$i = \frac{\text{στροφές κινητήρα}}{\text{στροφές τροχαλίας τριβής}}$$

Εξίσωση 1: Σχέση μετάδοσης μειωτήρα

#### 1.2.4.2.3. Ηλεκτρικός κινητήρας

Ο ηλεκτρικός κινητήρας τροφοδοτείται με ηλεκτρικό ρεύμα. Καθώς στρέφεται, κινεί διαμέσου του μειωτήρα στροφών, την τροχαλία τριβής, η οποία όπως εξηγήθηκε παραπάνω παρασύρει σε κίνηση τα συρματόσχοινα ανάρτησης.

Οι ηλεκτροκινητήρες διακρίνονται σε **συνεχούς ρεύματος ή DC motors** και σε **εναλλασσόμενου ρεύματος ή AC motors**. Οι ηλεκτροκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται επιμέρους στους ασύγχρονους ή αλλιώς επαγωγικούς κινητήρες και στους σύγχρονους κινητήρες (9)

Οι κινητήρες των ανελκυστήρων, λόγω της ιδιομορφίας των συνθηκών λειτουργίας τους, είναι σχεδιασμένοι για μη συνεχή λειτουργία. Η κατά το δυνατόν αθόρυβη λειτουργία του κινητήρα μπορεί να επιτευχθεί με την απόλυτη ζυγοστάθμιση των περιστρεφόμενων μαζών. Όσον αφορά την ισχύ του κινητήρα, επιλέγεται ισχύς

μεγαλύτερη κατά 20-25% της απαιτούμενης, ώστε ο ανελκυστήρας να λειτουργεί με φορτίο μικρότερο του κανονικού.

Η ροπή εκκίνησης του κινητήρα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια αυτής που παρουσιάζεται σε συνθήκες λειτουργίας με κανονικό φορτίο.

#### **1.2.4.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Μηχανικών Ανελκυστήρων**

Οι μηχανικοί ανελκυστήρες έλξης αποτελούν την πιο δημοφιλή επιλογή εγκατάστασης σε κτίρια με αυξημένες απαιτήσεις. Το βασικό πλεονέκτημα του είναι ότι μπορεί να παρέχει πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες από ένα υδραυλικό ανελκυστήρα (10). Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγαλύτερα ύψη, λόγω των υψηλών ταχυτήτων του και του περιορισμού των υδραυλικών ανελκυστήρων λόγω του εμβόλου. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των ανελκυστήρων έλξης είναι και η ομαλότερη μετάβαση των επιβατών. Στα θετικά των ανελκυστήρων έλξης προστίθεται και η μικρότερη κατανάλωση ενέργειας από τους υδραυλικούς ανελκυστήρες (11). Τέλος, οι ανελκυστήρες έλξης ανταπεξέρχονται σε μεγάλο αριθμό εκκινήσεων και αντέχουν σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (12).

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των ανελκυστήρων έλξης είναι το κόστος εγκατάστασης, το οποίο μπορεί να είναι 15%-25% μεγαλύτερο από των υδραυλικών ανελκυστήρων (10), όπως και το κόστος συντήρησης. Οι ανελκυστήρες έλξης επίσης χρειάζονται μεγαλύτερο χώρο για το μηχανοστάσιο και το φρεάτιο από τους υδραυλικούς ανελκυστήρες αν και, με την εξέλιξη της τεχνολογίας, έχουν αναπτυχθεί ανελκυστήρες έλξης χωρίς μηχανοστάσιο. Τέλος, στους περισσότερους ανελκυστήρες έλξης, οι δυνάμεις που ασκούνται καταπονούν τα μηχανολογικά μέρη και εξαρτήματα του, σε αντίθεση με τους υδραυλικούς που οι δυνάμεις μεταφέρονται στο έδαφος.

### **1.3. ΑΞΟΝΕΣ - ΑΤΡΑΚΤΟΙ**



### 1.3.1. Ορισμός - Γενικά Στοιχεία

Άξονες είναι τα στοιχεία εκείνα των μηχανών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την στην έδραση διαφόρων στοιχείων όπως τροχών, τροχαλιών κ.λ.π. (13). Είναι συνήθως κυκλικής διατομής είτε πλήρους είτε σωληνωτής, η οποία χρησιμοποιείται για να μεταφέρει ισχύ ή κίνηση (14). Οι άξονες δεν μεταφέρουν στρεπτικές ροπές. Καταπονούνται συνήθως σε κάμψη μέσω εγκάρσιων δυνάμεων και σπανιότερα σε εφελκυσμό ή θλίψη. Υπάρχουν δύο κατηγορίες αξόνων, οι σταθεροί ή ακίνητοι άξονες, στους οποίους εδράζονται στοιχεία που περιστρέφονται και οι περιστρεφόμενοι άξονες, οι οποίοι περιστρέφονται μαζί με τα στοιχεία που εδράζονται σε αυτούς. Οι σταθεροί άξονες δέχονται στατικό η επαναλαμβανόμενο φορτίο και αυτό τους καθιστά καλύτερους από άποψη φόρτισης. Αντίθετα οι περιστρεφόμενοι άξονες φορτίζονται με εναλλασσόμενα φορτία. Ωστόσο είναι προτιμότεροι από άποψη συντήρησης καθώς η προσέγγιση των εδράνων είναι ευκολότερη.

Άτρακτοι είναι τα στοιχεία μηχανών τα οποία από τη μία πλευρά χρησιμεύουν επίσης στην έδραση περιστρεφόμενων στοιχείων και από την άλλη πλευρά μεταφέρουν ροπές στρέψης. Οι άτρακτοι είναι πάντα περιστρεφόμενοι και η φόρτιση που δέχονται είναι σύνθετη και περιλαμβάνει στρεπτική ροπή, κάμψη και αξονικές δυνάμεις.

Οι άξονες και οι άτρακτοι έχουν κατά βάση κυλινδρικό σχήμα, αλλά διαφορετικές κατά το μήκος τους διαμέτρους (διαβαθμίσεις) και εγκοπές, οι οποίες εξυπηρετούν την στήριξη των συνεργαζόμενων στοιχείων (13).

### 1.3.2. Γεωμετρικά στοιχεία ατράκτων

Οι άτρακτοι έχουν συνήθως κυλινδρική γεωμετρία ,ανάλογα όμως την εφαρμογή που προορίζονται μπορεί να είναι τετράγωνοι ή να έχουν κάποιο ειδικό σχήμα (15). Μπορούν να είναι συμπαγείς ή κοίλοι (16) και έχουν διαφορετικές διαμέτρους κατά μήκος. Οι διαφορετικές διάμετροι (βήματα) διαμορφώνονται για την τοποθέτηση συνεργαζόμενων στοιχείων όπως έδρανα, οδοντοτοί τροχοί , τροχαλίες κτλ., (14)

τόσο για λόγους αντοχής όσο και για ευκολία στην συναρμολόγηση. Για την σωστή αξονική τοποθέτηση των συνεργαζόμενων στοιχείων σε μία άτρακτο, υπάρχουν διάφορες διαμορφώσεις όπως αυλακώσεις,εγκοπές κτλ (13). Μία άτρακτος μπορεί να έχει οπές με σπείρωμα, για την σύνδεση και στήριξη των συνεργαζόμενων στοιχείων με κοχλίες , ή σφηνόδρομους για την συνδεσή τους μέσω σφηνών. Ένα τυπικό παράδειγμα ατράκτου φαίνεται στην εικόνα 8.

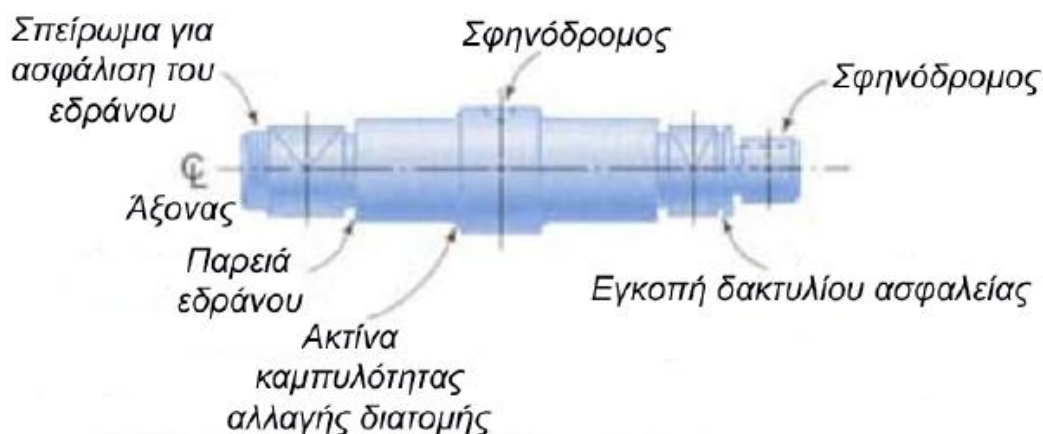
Οι διάμετροι των ατράκτων ήταν τυποποιημένες κατά DIN 114 και εξακολουθούν να κυκλοφορούν στο εμπόριο σε αυτές όπως φαίνεται στον πίνακα 1:

25	30	35	40	45	50	55	60
70	80	90	100	110	125	140	160

**Πίνακας 1: τυποποιημένες διάμετροι ατράκτων κατά DIN 114**

(πηγή : γενική μηχανολογία-στοιχεία μηχανών)

Από 140 mm μέχρι 500 mm οι διάμετροι αυξάνονται με βήμα 20 mm. Το μήκος των ατράκτων που κυκλοφορεί στο εμπόριο είναι 4,5,6,7 m (CHP-14).



## **Εικόνα 8: τυπικό παράδειγμα ατράκτου**

(πηγη : antoxiaxonon)

### **1.3.3. Υλικά - Κατασκευή Αξόνων**

Για τις πιο συνήθεις εφαρμογές (μειωτήρες, ανυψωτικές μηχανές κτλ.) οι άτρακτοι κατασκευάζονται από κοινούς χάλυβες σύμφωνα με το πρότυπο DIN 17100 (π.χ. St 37-2, St 44-2, St 50-2, St 60-2). Για ατράκτους που δέχονται μεγάλες καταπονήσεις (π.χ. σε οχήματα) χρησιμοποιούνται επιβελτιωμένοι χάλυβες ή κράματα με μεγαλύτερη αντοχή, οι οποίοι κατασκευάζονται κατά το πρότυπο DIN 17200 (π.χ. 25CrMo4, 18Mn6 κ.α.). Επιπρόσθετα σε συνθήκες με ιδιαίτερες απαιτήσεις (π.χ. διαβρωτικό περιβάλλον) χρησιμοποιούνται άλλα είδη χαλύβων, περισσότερο κατάλληλα ανάλογα με τις απαιτήσεις.

Ως πρώτη ύλη για περαιτέρω επεξεργασία χρησιμοποιείται χάλυβας με πλήρη ή δακτυλιοειδή διατομή. Το κόστος της κατεργασίας, που είναι κυρίως τórνευση, εξαρτάται από την αντοχή και τη σκληρότητα του βασικού υλικού. Για αυτόν τον λόγο η ποιότητα του χάλυβα που προκειται να χρησιμοποιηθεί, είναι σημαντικό να επιλέγεται με βάση τις φορτίσεις που θα δεχτεί ο άξονας ή η άτρακτος. Αυτό επίσης σημαίνει ότι οι υπολογισμοί θα πρέπει να γίνονται με σχετική ακρίβεια. (13).

Χαρακτηρισμός	Αντοχή εφελκυσμού N/mm <sup>2</sup>	Σκληρότητα Vickers	Όριο διαρκούς Αντοχής N/mm <sup>2</sup>	Όριο διαρκούς αντοχής σε στρέψη, N/mm <sup>2</sup>	
St 42-2	420...500 <sup>(1)</sup>	115 (450)*	220	150	180
St 50-2	500...600 <sup>(1)</sup>	135 (530)	260	180	210
St 60-2	600...720 <sup>(1)</sup>	165 (720)	300	210	230
St 70-2	700...850 <sup>(1)</sup>	190	340	240	260
C 22, Ck 22	500...650 <sup>(2)</sup>	150	280	190	250
C 35, Ck 35	590...740 <sup>(2)</sup>	140 (530)	330	230	300
C 15, Ck 45	670...820 <sup>(2)</sup>	170 (720)	370	260	340
25Cr, Mo 4	800...950 <sup>(2)</sup>	186 (610)	430	300	450
34Cr, 4	900...1100 <sup>(2)</sup>	229 (670)	480	330	550
C 15, Ck 15	500...650 <sup>(3)</sup>	140 (840)	260	180	210
16Mn Cr 5	800...1100 <sup>(3)</sup>	210 (840)	390	270	430

1 = Χάλυβας γενικής χρήσης  
2 = Χάλυβας βελτιωμένος  
3 = Ειδικός χάλυβας

\* σε παρένθεση το όριο επιφανειακής σκλήρυνσης

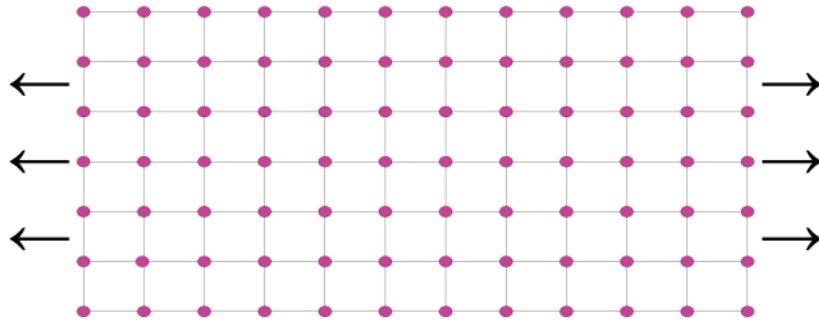
**Πίνακας 2: Μηχανικές ιδιότητες διάφορων χάλυβων**

(Πηγή : *antoxiaxonon*)

### 1.3.4. Αντοχή Υλικών - Μηχανικές Καταπονήσεις

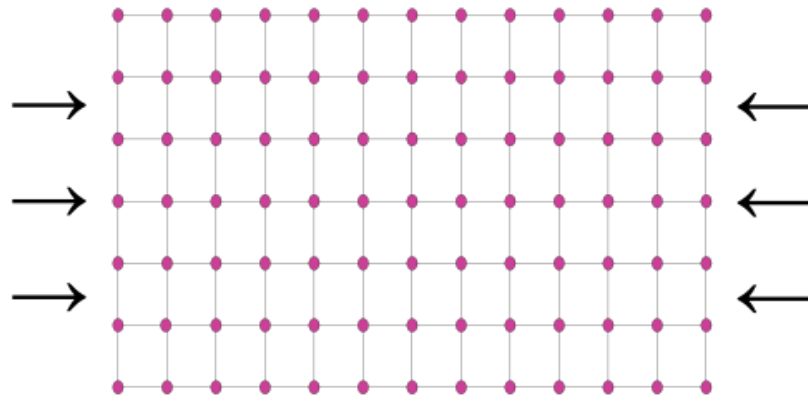
#### 1.3.4.1. Μηχανικές Καταπονήσεις

Τα υλικά υφίστανται μηχανικές καταπονήσεις. Ως μηχανική καταπόνηση ορίζεται η επίδραση δυνάμεων και ροπών, οι οποίες προκαλούν παραμορφώσεις σε ένα στερεό σώμα (17). Οι καταπονήσεις διακρίνονται σε έξι βασικές κατηγορίες, συγκεκριμένα σε εφελκυσμό, θλίψη, διάτμηση, κάμψη, στρέψη και λυγισμός (σχήμα 9 - 14). Οι σύνθετες καταπονήσεις αναλύονται ως συνδυασμός των απλών καταπονήσεων (18).



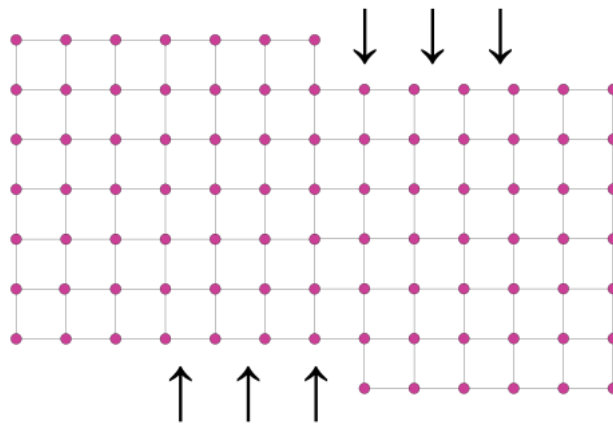
**Εικόνα 9: Κάμψη**

(Πηγή: [https://el.wikipedia.org/wiki/μηχανική\\_καταπόνηση](https://el.wikipedia.org/wiki/μηχανική_καταπόνηση))



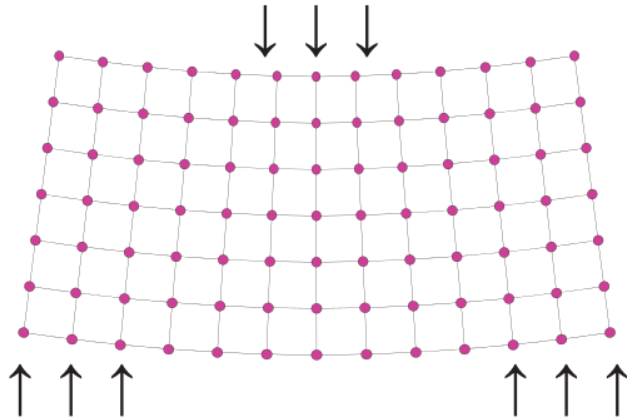
**Εικόνα 10: Θλίψη**

(Πηγή: [https://el.wikipedia.org/wiki/μηχανική\\_καταπόνηση](https://el.wikipedia.org/wiki/μηχανική_καταπόνηση))



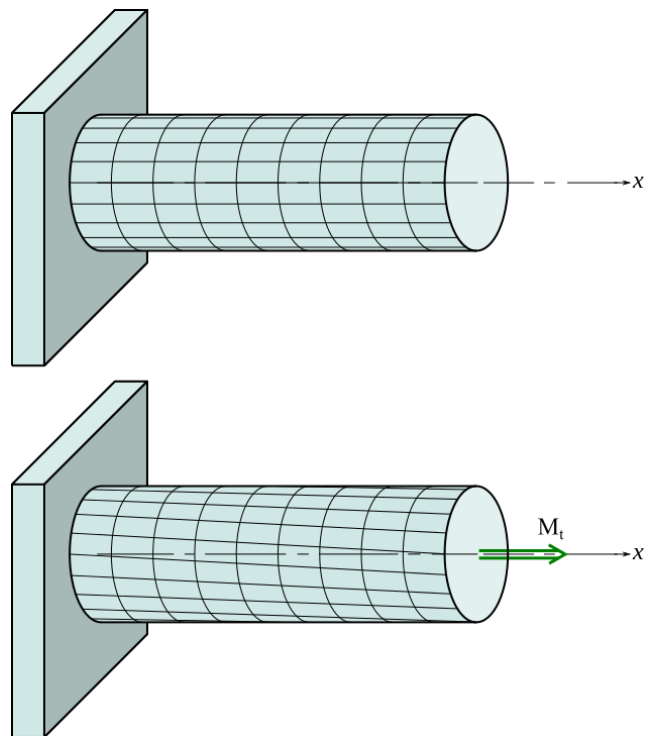
**Εικόνα 11: Διάτμηση**

(Πηγή: [https://el.wikipedia.org/wiki/μηχανική\\_καταπόνηση](https://el.wikipedia.org/wiki/μηχανική_καταπόνηση))



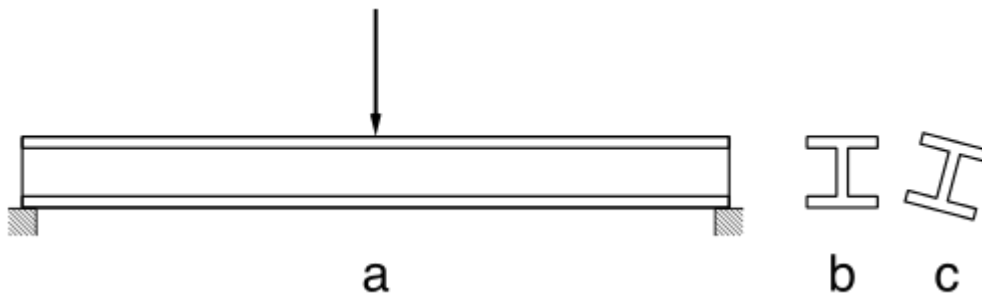
**Εικόνα 12: Διάτμηση**

(Πηγή: [https://el.wikipedia.org/wiki/μηχανική\\_καταπόνηση](https://el.wikipedia.org/wiki/μηχανική_καταπόνηση))



**Εικόνα 13: Παραμόρφωση κυλίνδρου υπό στρέψη. Κάθε διατομή στρίβει σε σχέση με την επόμενη**

(Πηγή: <https://el.wikipedia.org/wiki/Στρέψη>)



**Εικόνα 14:** Πλευρικός-στρεπτικός λυγισμός δοκού I με την κάθετη δύναμη στο κέντρο: α) διαμήκης όψη, β) διατομή κοντά στη στήριξη, γ) διατομή στο κέντρο, με πλευρική-στρεπτικό λυγισμό

(Πηγή: <https://el.wikipedia.org/wiki/Λυγισμός>)

#### 1.3.4.1.1. Εφελκυσμός

Ο εφελκυσμός είναι η μία μονοεντατική κατάσταση κατά την οποία ένα στερεό σώμα καταπονείται υπό την επίδραση δυνάμεων αντίθετης φοράς και η παραμόρφωση, η οποία υφίσταται το σώμα είναι η επιμήκυνση, η οποία συμβολίζεται ως  $\Delta l$ . Στην περίπτωση που η δύναμη ασκείται στο κέντρο βάρους της διατομής, ο εφελκυσμός ονομάζεται κεντρικός και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

με  $\sigma$  την εφελκυστική τάση,  $F$  την εξωτερική δύναμη και  $A$  το εμβαδόν της διατομής.

*Εξίσωση 2: Εξίσωση εφελκυστικής τάσης  $\sigma$*

Ωστόσο στην περίπτωση που η ύναμη δεν ασκείται ομοιόμορφα στα άκρα του σώματος, λόγω της αρχής του Saint, η κατανομή έπειτα από κάποιο μήκος γίνεται

ομοιόμορφη. Στις γραμμικές ελαστικές παραμορφώσεις η επιμήκυνση ενός σώματος δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση σύμφωνα με τον Νόμο του Hook:

$$\Delta L = \frac{\sigma}{E} L$$

όπου  $\sigma$  η εφελκυστική τάση,  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και  $L$  το αρχικό μήκος.

*Εξίσωση 3: Εξίσωση ελαστικής παραμόρφωσης  $\Delta L$  - Νόμος Hooke*

Ο νόμος του Hook ισχύει όταν η τάση δεν ξεπερνά την χαρακτηριστική τιμή του υλικού. Η υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής των ψαθυρών υλικών τα οδηγεί σε θράυση ενώ στα όλκιμα υλικά, όταν οι τάσεις ξεπεράσουν το όριο διαρροής προκαλείται πλαστική παραμόρφωση.

όταν η δύναμη δεν ασκείται στο κέντρο βάρους της διατομής, ο εφελκυσμός είναι έκκεντρος και η εφελκυστική τάση δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_M = \frac{F}{A} + \frac{F e}{I_z} y$$

όπου:

$I_z$ : Η ροπή αδράνειας ως προς τον κεντροβαρικό άξονα που είναι παράλληλος στον άξονα της κάμψης.

$y$ : απόσταση του σημείου με τάση  $\sigma$  από τον παραπάνω άξονα.

*Εξίσωση 4: εφελκυστική τάση  $\sigma$ , σε περίπτωση όπου ο εφελκυσμός είναι έκκεντρός*



#### 1.3.4.1.2. Θλίψη

Η θλίψη είναι μονοαξονική εντατική κατάσταση κατά την οποία ένα σώμα υφίσταται καταπόνηση από την άσκηση δυνάμεων αντίθετης φοράς, οι οποίες τείνουν να το συμπιέσουν.

Ισχύουν οι ίδιες αρχές για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης του σώματος. Ωστόσο όταν η θλίψη είναι έκκεντρη, η θλιπτική τάση δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_M = -\frac{F}{A} - \frac{F e}{I_z} y$$

όπου:

$I_z$ : Η ροπή αδράνειας ως προς τον κεντροβαρικό άξονα που είναι παράλληλος στον άξονα της κάμψης.

$y$ : απόσταση του σημείου με τάση  $\sigma$  από τον παραπάνω άξονα.

*Εξίσωση 5: θλιπτική τάση*

#### 1.3.4.1.3. Διάτμηση

Διάτμηση ονομάζεται η καταπόνηση που εμφανίζεται σε ένα σώμα όταν δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις ενεργούν κάθετα στον άξονα του. Η διατμητική τάση δίνεται από το πηλίκο της παράλληλης ή εφαπτομενικής δύναμης που εφαρμόζεται σε μία διατομή. Δίνεται από τον εξής τύπο:

$$\tau = F / A$$

όπου  $F$  η παράλληλη συνιστώσα της δύναμης εφαρμογής και  $A$  η επιφάνεια εφαρμογής.

#### *Εξίσωση 6: Διατμητική τάση*

##### 1.3.4.1.4. Κάμψη

Κάμψη είναι η παραμόρφωση που υφίσταται ένα σώμα ως αποτέλεσμα κάθετων δυνάμεων ή ροπών που ασκούνται στο σώμα. Το σώμα τείνει να καμπυλωθεί καθώς στη μία πλευρά του προκαλείται θλίψη και στην άλλη εφελκυσμός.

##### 1.3.4.1.5. Στρέψη

Η στρέψη προκαλείται σε ένα σώμα όταν ασκείται μία ροπή στον άξονα του, η οποία τείνει να το στρέψει ως προς τον διαμήκη άξονα του. Η στρεπτική ροπή δημιουργεί διατμητικές εσωτερικές τάσεις που καταπονούν το υλικό. Οι διατμητικές τάσεις ενεργούν πάνω στο επίπεδο κάθε εγκάρσιας διατομής του υλικού και το μέγεθος τους μεταβάλλεται γραμμικά με την απόσταση του σημείου που ενεργούν από το κέντρο. Η μέγιστη διατμητική τάση έτσι βρίσκεται στο σημείο που έχει την μέγιστη απόσταση από το κέντρο (δηλαδή στην επιφάνεια του) Για την ανάλυση στην στρέψη, υπάρχουν τρεις βασικές παραδοχές-υποθέσεις :

- Κάθε επίπεδη διατομή παραμένει επίπεδη και μετά την εφαρμογή της ροπής στρέψης
- Η σχετική στροφή μεταξύ δύο διατομών είναι ανάλογη της μεταξύ τους απόστασης
- Κάθε ακτίνα της διατομής παραμένει ευθεία και μετά την εφαρμογή της ροπής στρέψης

Στην γραμμική ελαστική περιοχή ισχύει ο νόμος του Hooke και οι διατμητικές τάσεις που καταπονούν το υλικό δίνονται από τον τύπο:

$$\tau = G \cdot \gamma$$

Όπου  $\gamma$  είναι η διατμητική παραμόρφωση και  $G$  το μέτρο διάτμησης (19)

*Εξίσωση 7: Διατμητική τάση στην ελαστική περιοχή*

Οι διατμητικές τάσεις στην συμπαγή διατομή κυλινδρικών σωμάτων δίνονται από τον τύπο :

$$\tau = \frac{M_T}{I} \cdot z \quad (\text{MPa})$$

Όπου  $M_T$  (Nmm) η ροπή στρέψης,  $I$  ( $\text{mm}^4$ ) η πολική ροπή αδράνειας κυκλικής διατομής και  $z$  (mm) η απόσταση του σημείου που ασκείται η τάση από το κέντρο του κύκλου.

*Εξίσωση 8: Διατμητική τάση κυλινδρικού σώματος*

Η πολική ροπή αδράνειας κυκλικής διατομής είναι :

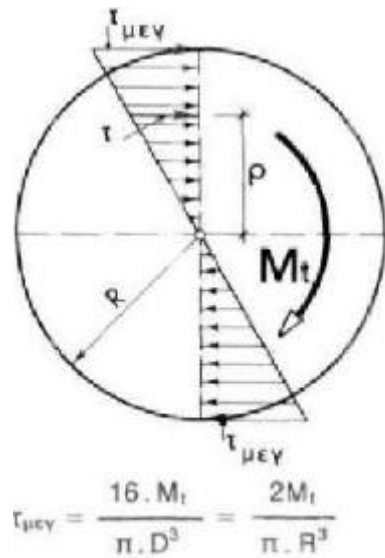
$$I = \frac{\pi \cdot D^4}{32}$$

*Εξίσωση 9: Πολική Ροπή αδράνειας κυκλικής διατομής*

Η μέγιστη διατμητική τάση σε κυκλική συμπαγής διατομή έτσι βρίσκεται από τον τύπο :

$$\tau_{max} = \frac{16 \cdot M_T}{\pi \cdot D^3}$$

*Εξίσωση 10: Τύπος μέγιστης διατμητικής τάσης κυκλικής συμπαγούς διατομής*



**Εικόνα 15: Κατανομή των διατμητικών τάσεων σε συμπαγή κυκλική διατομή λόγω στρεπτικής ροπής**

*(Πηγή : Γενική Μηχανολογία)*

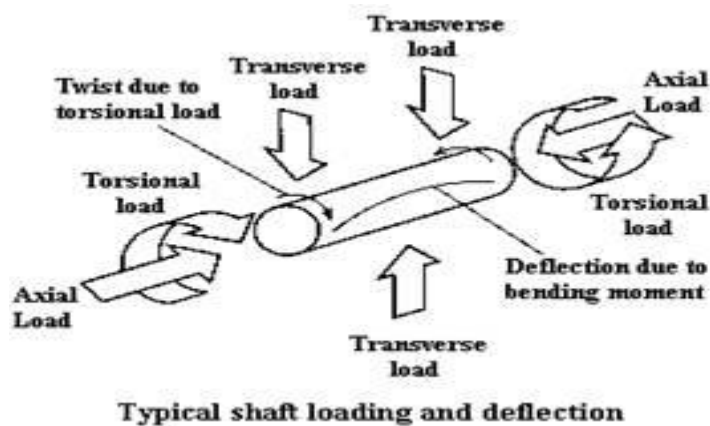
#### 1.3.4.1.6. Λυγισμός

Ως λυγισμός ορίζεται η αστοχία ενός παραμορφώσιμου στερεού, η οποία δεν οφείλεται στην υπέρβαση της αντοχής του υλικού αλλά στην απώλεια της ευστάθειας του. Η αστοχία από λυγισμό αποκαλείται επίσης αστοχία λόγω ελαστικής αστάθειας.

### 1.3.5. Αντοχή Χαλύβων

### 1.3.6. Αντοχή Αξόνων-Ατράκτων-Καταπονήσεις

Όπως προαναφέρθηκε οι άξονες και οι άτράκτοι είναι συνήθως κυκλικής διατομής και το χαρακτηριστικό που τους διαχωρίζει είναι, αν μεταφέρουν στρεπτική ροπή ή δύναμη σε άλλο κατασκευαστικό στοιχείο,ορίζονται ως άτράκτοι, ενώ αν όχι,σαν άξονες.Αυτό το χαρακτηριστικό σε συνάρτηση με τα στοιχεία που συνεργάζονται οι άξονες-άτράκτοι καθορίζει τις καταπονήσεις που δέχονται.Οι δύο βασικές καταπονήσεις που δέχονται οι άξονες-άτράκτοι είναι σε στρέψη και κάμψη και σπανιότερα,ανάλογα με την λειτουργία τους,σε εφελκυσμό ή θλίψη.Μία άτράκτος μπορεί να καταπονείται απο μία φόρτιση μόνο ή από συνδυασμό φορτίσεων.Στο Σχήμα 10 φαίνονται οι πιθανές φορτίσεις μιας ατράκτου.



**Εικόνα 16: τυπικές φορτίσεις σε μια ατράκτο**

*(beswarick 1994a)*

Οι άξονες,λόγω του ότι δεν μεταφέρουν στρεπτική ροπή,καταπονούνται μόνο σε κάμψη και σπانیως από αξονικά φορτία.Τα φορτία διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- 1) Στατικά φορτία
- 2) Δυναμικά (κυμαινόμενα) φορτία

Αν ο άξονας φορτίζεται σε δύο επίπεδα τότε η ανάλυση γίνεται ξεχωριστά στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο, και μετά συνθέτονται διανυσματικά. Σε κάθε σημείο του άξονα η συνισταμένη ροπή προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα των ροπών στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο (14).

### 1.3.7. Υπολογισμός σε Στρέψη και Κάμψη

**Άτρακτοι**, που καταπονούνται μόνο σε στρέψη (σπάνια περίπτωση).

Θεωρώντας ότι  $T$  είναι η στρεπτική ροπή στην διατομή υπολογισμού, τότε:

- για άτρακτο με πλήρη κυκλική διατομή:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T}{\pi \cdot \tau_{t,\varepsilon\pi}}}$$

όπου  $T$ [N·mm],  $\tau_{t,\varepsilon\pi}$ [N/mm<sup>2</sup>],  $d$ [mm]

*Εξίσωση 11: διάμετρος κυκλικής διατομής ατράκτου*

- για άτρακτο με δακτυλιοειδή κυκλική διατομή, με εξωτερική διάμετρο  $d_\alpha$  και

εσωτερική διάμετρο  $d_i$ , ώστε  $K = \frac{d_i}{d_\alpha}$ :

$$d_\alpha \geq \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T}{\pi \cdot (1 - K)^4 \cdot \tau_{t,\varepsilon\pi}}}$$

και  $d_i \leq K \cdot d_\alpha$

όπου  $T$ [N·mm],  $\tau_{t,\varepsilon\pi}$ [N/mm<sup>2</sup>],  $d_i$ [mm],  $d_\alpha$ [mm]

όπου  $\tau_{t,\varepsilon\pi}$  είναι η επιτρεπόμενη στρεπτική τάση, η οποία επιλέγεται ανάλογα με το

υλικό.

Εξίσωση 12: εξωτερική διάμετρος ατράκτου με δακτυλιοειδή κυκλική διατομή

**Άξονες που καταπονούνται σε κάμψη:**

θεωρώντας, ότι  $M_b$  είναι η καμπτική ροπή στην διατομή υπολογισμού τότε:

-για άξονα με πλήρη κυκλική διατομή:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_b}{\pi \cdot \sigma_{b,\varepsilon\pi}}}$$

Εξίσωση 13: Τύπος υπολογισμού διατομής αξόνων που καταπονούνται σε κάμψη

όπου  $M_b$ [N·mm],  $\sigma_{b,\varepsilon\pi}$ [N/mm<sup>2</sup>],  $d$ [mm]

- για άξονα με δακτυλιοειδή κυκλική διατομή, με εξωτερική διάμετρο  $d_\alpha$  και

εσωτερική διάμετρο  $d_i$ , ώστε  $K = \frac{d_i}{d_\alpha}$ :

$$d_\alpha \geq \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_b}{\pi \cdot (1 - K)^4 \cdot \sigma_{b,\varepsilon\pi}}}$$

και  $d_i \leq K \cdot d_\alpha$

όπου  $M_b$  [N·mm],  $\sigma_{b,\varepsilon\pi}$ [N/mm<sup>2</sup>],  $d_i$ [mm],  $d_\alpha$ [mm]

όπου  $\sigma_{b,\varepsilon\pi}$  είναι η επιτρεπόμενη καμπτική τάση, η οποία θα επιλεγεί ανάλογα με το υλικό.

**Άτρακτοι, που καταπονούνται σε κάμψη και στρέψη στην διατομή υπολογισμού**

Στην περίπτωση αυτή από την καμπτική ροπή  $b$   $M$  και από την στρεπτική ροπή  $T$

συντίθεται η ισοδύναμη ροπή  $r$   $M$  με την σχέση:

$$M_v = \sqrt{M_b^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2}$$

Εξίσωση 14: Ισοδύναμη ροπή  $M_v$

όπου  $M_v$  [N · mm],  $M_b$  [N · mm],  $T$  [N · mm],

και

$\alpha_0 \approx 0,75$  όταν η στρεπτική ροπή είναι στατική ή επαναλαμβανόμενη και η καμπτική ροπή εναλλασσόμενη.

$\alpha_0 \cong 1$  όταν η στρεπτική και καμπτική ροπή ανήκουν στην ίδια κατηγορία φόρτισης.

Η ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρος υπολογίζεται στη συνέχεια από:

- για άτρακτο με πλήρη κυκλική διατομή:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_v}{\pi \cdot \sigma_{b,\varepsilon\pi}}}$$

Εξίσωση 15: Ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρος για άτρακτο με πλήρη κυκλική διατομή

όπου  $M_v$  [N·mm],  $\sigma_{b,\varepsilon\pi}$  [N/mm<sup>2</sup>],  $d$  [mm]

- για άτρακτο με δακτυλιοειδή κυκλική διατομή, με εξωτερική διάμετρο  $d_\alpha$  και

εσωτερική διάμετρο  $d_i$ , ώστε  $K = \frac{d_i}{d_\alpha}$ :

$$d_\alpha \geq \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_v}{\pi \cdot (1 - K)^4 \cdot \sigma_{b,\varepsilon\pi}}}$$

και  $d_i \leq K \cdot d_\alpha$

όπου  $M_v$  [N·mm],  $\sigma_{b,\varepsilon\pi}$  [N/mm<sup>2</sup>],  $d_i$  [mm],  $d_\alpha$  [mm] (13)





## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΑΣΤΟΧΙΑ ΑΤΡΑΚΤΩΝ**

Οι άτρακτοι είναι απο τα κύρια μηχανολογικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία και χρησιμεύουν για την μεταφορά κίνησης και δυνάμεων σε άλλα στοιχεία όπως οδοντωτούς τροχούς,τροχαλίες,πτερωτές κτλ. και την έδραση αυτών.Ανάλογα με την εφαρμογή που χρησιμοποιείται δέχεται πολλές καταπονήσεις και συνηθέστερα (20) καταπονείται σε συνδυασμό εναλλασσόμενων στρεπτικών και καμπτικών φορτίων.Λόγω της ευρείας χρήσης των ατράκτων σε πολλές εφαρμογές, είναι συχνό φαινόμενο η αστοχία τους ,κάτι που έχει οδηγήσει την ερευνητική κοινότητα σε πολλές αναλύσεις ώστε να βρεθούν τα κύρια αίτια και οι μηχανισμοί αστοχίας των ατράκτων,για την κατανόηση και πρόληψη παρόμοιων αστοχιών.

Η αστοχία των ατράκτων μπορεί να οφείλεται σε πολλούς λόγους,όπως το περιβάλλον λειτουργίας,η συντήρηση,ο κακός σχεδιασμός,οι συνθήκες λειτουργίας κτλ. (21) αλλά οι μηχανισμοί αστοχίας μπορούν να προσδιοριστούν σε τέσσερις γενικές κατηγορίες (22), την αστοχία λόγω κόπωσης, αστοχία λόγω υπερφόρτισης , αστοχία λόγω διάβρωσης και την αστοχία λόγω φθοράς. Άλλες μελέτες (23, 24) περιλαμβάνουν και τους μηχανισμούς αστοχίας λόγω ερπυσμού και ψαθυρής θραύσης. Κάθε μηχανισμός έχει τα δικά του κύρια χαρακτηριστικά τα οποία εντοπίζονται σε μία ανάλυση αστοχίας και οδηγούν στον προσδιορισμό του.

### **2.1 Μηχανισμοί αστοχίας**

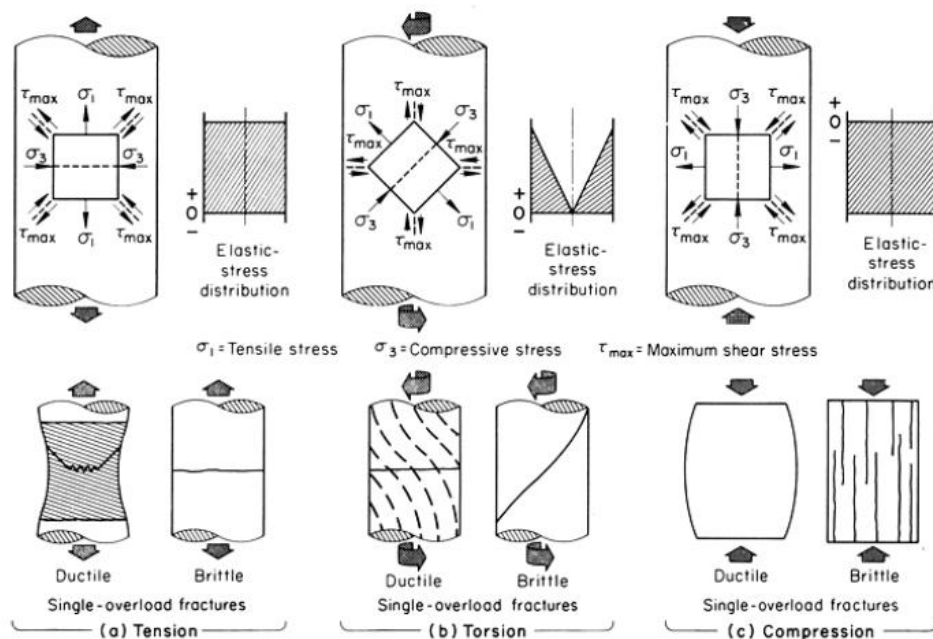
#### **2.1.1 Αστοχία λόγω υπερφόρτισης (Overload failure)**

Η αστοχία λόγω υπερφόρτισης εμφανίζεται όταν ένα επιβαλλόμενο φορτίο υπερβαίνει το αντίστοιχο όριο του υλικού που έχει οριστεί για ασφαλή λειτουργία (25). Επειδή πολλοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τα όρια που έχουν τεθεί κατά τον σχεδιασμό των ατράκτων,ένας πιο γενικός όρος είναι ότι , όταν οι τάσεις από το επιβαλλόμενο φορτίο υπερβαίνουν τις ιδιότητες του υλικού επέρχεται αστοχία λόγω υψηλού φορτίου,υπερβαίνοντας ή όχι τα όρια που τέθηκαν κατά τον σχεδιασμό (22).

Το υπερβαίνων επιβαλλόμενο φορτίο είναι μοναδικό, οδηγεί στην αστοχία και είναι μεγαλύτερο από όλα τα φορτία που ενήργησαν στο υλικό. Ο διαχωρισμός της αστοχίας λόγω υπερφόρτισης γίνεται σε δύο κατηγορίες, την όλκιμη αστοχία και την ψαθυρή αστοχία, λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών που εμφανίζει η επιφάνεια θραύσης ανάλογα με την φύση του υλικού (όλκιμο ή ψαθυρό) και το επιβαλλόμενο φορτίο. Παρακάτω συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά της αστοχίας λόγω υπερφόρτισης.

### 2.1.1.1. Όλκιμη και ψαθυρή αστοχία υπερφόρτισης

Η κύρια διαφορά της όλκιμης με την ψαθυρή αστοχία είναι η πλαστική παραμόρφωση του υλικού σε μακροσκοπική κλίμακα (26). Στην όλκιμη αστοχία υπάρχει σημαντική πλαστική παραμόρφωση πριν επέλθει η θραύση και ο άξονας που συμβαίνει η πλαστική παραμόρφωση είναι ο άξονας που ενεργεί το υπερβολικό φορτίο.



Εικόνα 17: διαφορές στην εμφάνιση της αστοχίας ψαθυρών και όλκιμων υλικών κυλινδρικής συμπαγούς διατομής για τρεις βασικούς μηχανισμούς φόρτισης (22)

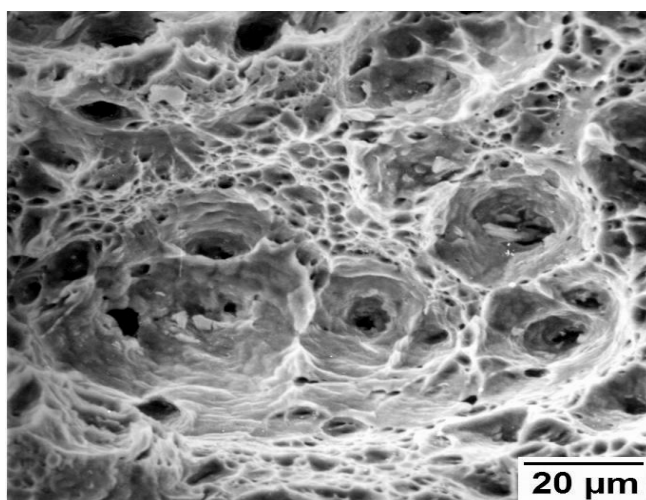
Στην ψαθυρή αστοχία αντίθετα, η πλαστική παραμόρφωση είναι ελάχιστη έως και μηδαμινή και η ρωγμή εξελίσσεται κάθετα στο επίπεδο που ασκείται το υπερβολικό φορτίο (27).

Ανάλογα λοιπόν με το επιβαλλόμενο φορτίο και την φύση του υλικού, η εμφάνιση της αστοχίας είναι διαφορετική. Επισημαίνεται ότι όλα τα υλικά δεν είναι ολοκληρωτικά όλκιμα ή ψαθυρά (28).

Όταν η υπερφόρτιση οφείλεται σε εφελκυστικό φορτίο, στα όλκιμα υλικά υπάρχει πλαστική παραμόρφωση που οδηγεί στην εμφάνιση λαιμού στο σημείο που επέρχεται η θραύση, ενώ στα ψαθυρά υλικά η πλαστική παραμόρφωση είναι ελάχιστη και η θραύση είναι σχεδόν ευθεία και κάθετη στο επίπεδο του επιβαλλόμενου φορτίου (Εικ. 17,a).

Όταν η υπερφόρτιση οφείλεται σε στρεπτικό φορτίο, η θραύση συνήθως επέρχεται στο εγκάρσιο διατμητικό επίπεδο στα όλκιμα υλικά και σε επίπεδο 45ο μοιρών από το επίπεδο της μέγιστης ορθής τάσης στα ψαθυρά υλικά (24) (Εικ. 17,b).

Στην περίπτωση που η υπερφόρτιση γίνεται με θλιπτικό φορτίο, τότε υπάρχει μεγάλη πλαστική παραμόρφωση στα όλκιμα υλικά που οδηγεί σε βαρελοειδή μορφή, ενώ σπάνια επέρχεται θραύση. Στα ψαθυρά υλικά δημιουργούνται σχισίματα στην εξωτερική διαμήκη επιφάνεια του υλικού (Εικ. 17,c).



**Εικόνα 18: Όλκιμη θραύση με σχηματισμό λακακκιών εγκάρσια των κόκκων**  
(*fractography of sintered*)

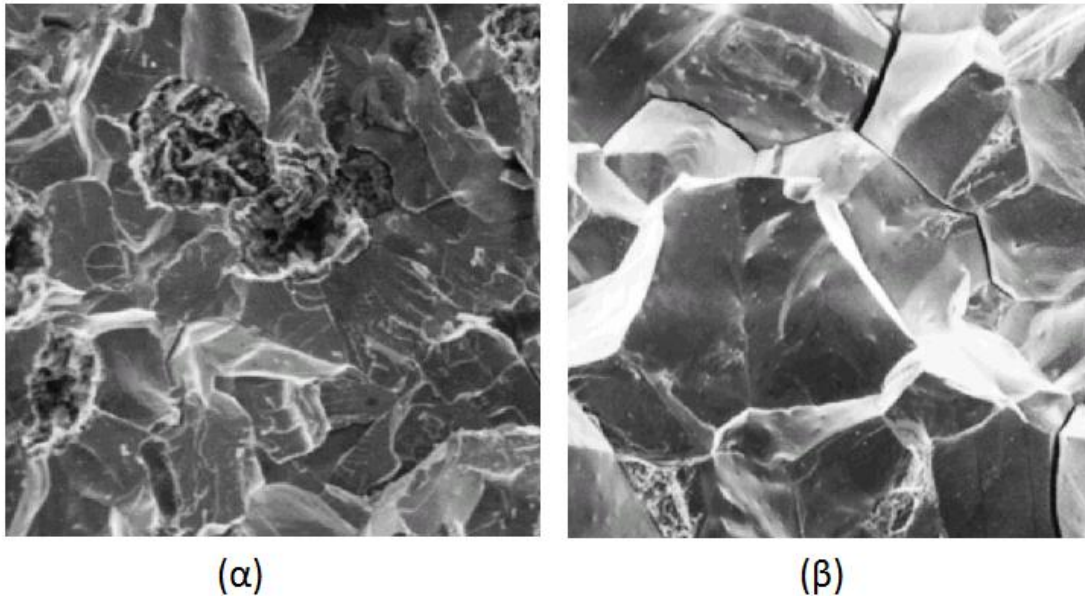
Σε μικροσκοπικό επίπεδο, η θραύση λόγω υπερφόρτισης στα όλκιμα υλικά επέρχεται από την δημιουργία και συνένωση μικροκενών λόγω της πλαστικής παραμόρφωση (26) που οδηγούν σε μία επιφάνεια θραύσης που έχει την μορφή λακακιών (Εικ.18) (24).

Στην ψαθυρή θραύση, ένα κύριο χαρακτηριστικό που εμφανίζεται συχνά και μπορεί να παρατηρηθεί μακροσκοπικά στην επιφάνεια θραύσης είναι τα σημάδια chevron(29-interpretation and significance). Τα σημάδια chevron είναι γραμμές στην επιφάνεια θραύσης σε σχηματισμό V και δείχνουν το αρχικό σημείο της αστοχίας (Εικ. 19) (21).



**Εικόνα 19:Χαρακτηριστικά σημάδια chevron σε ψαθυρή θραύση(practical plant)**

Σε μικροσκοπικό επίπεδο,η ψαθυρή θραύση διαδίδεται με δύο μηχανισμούς, είτε μέσω σχισίματος των κόκκων είτε ενδοκοκκικά ή και συνδυασμό των δύο (30). Στον μηχανισμό του σχισίματος των κόκκων,η θραύση ξεκινάει απο την δημιουργία μικρορωγμών στα άκρα μετατοπισμένων κόκκων (22) και διαδίδεται εγκάρσια των κόκκων διαχωρίζοντας τους σε συγκεκριμένα κρυσταλλογραφικά επίπεδα (30). Στον ενδοκοκκικό μηχανισμό, η θραύση διαδίδεται στα όρια των κόκκων, τα οποία μπορεί να έχουν αποδυναμωθεί για διάφορους λόγους (33).



**Εικόνα 20: ψαθυρή θραύση μέσω σχισίματος(α) και ενδοκοκκικά(β) παρατηρούμενη με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (33)**

Τέλος, υπάρχουν περιπτώσεις όπου ένα όγκιμο υλικό μπορεί να εμφανίσει ψαθυρή θραύση ή να υπαρχεί συνδυασμός όγκιμης και ψαθυρής θραύσης. Οι δύο βασικοί λόγοι για να συμβει αυτό είναι είτε ότι οι δυνάμεις ενήργησαν πολύ γρήγορα και ήταν τόσο μεγάλες που το υλικό δεν πρόλαβε να παραμορφωθεί, είτε τα χαρακτηριστικά του υλικού περιορίζονται για διάφορους λόγους και δεν μπορούν να δράσουν ως όγκιμα (27).

### **2.1.2 Αστοχία λόγω κόπωσης**

Κάθε κατασκευαστικό στοιχείο, σχεδιάζεται και κατασκευάζεται με απώτερο σκοπό,εφόσον λειτουργεί στα επιτρεπόμενα όρια, να μην αστοχήσει ποτέ.Ακόμα όμως και ένα τέλεια θεωρητικά κατασκευασμένο στοιχείο, υπό την επίδραση χρονικά μεταβαλλόμενων φορτίων, μετά από ένα χρονικό διάστημα θα αστοχήσει (31). Ο ορισμός της κόπωσης κατά ASTM είναι: "Η διαδικασία της περιοδικής τοπικά εντοπισμένης μόνιμης αλλαγής στην δομή ενός υλικού που υποβάλλεται σε συνθήκες που παράγουν κυμαινόμενες τάσεις και παραμορφώσεις σε σημείο ή σημεία και μπορεί να κορυφωθεί σε ρωγμές ή ολική θραύση μετά από ένα σημαντικό αριθμό

διακυμάνσεων" (32). Τα χρονικά μεταβαλλόμενα φορτία που οδηγούν στην κόπωση του υλικού, είναι μικρότερα από τα επιτρεπόμενα όρια του υλικού σε στατική φόρτιση (33), έτσι τα κατασκευαστικά στοιχεία κατά τον σχεδιασμό υπολογίζονται σε δυναμική καταπόνηση με μικρότερα όρια. Πολλοί μελετητές θεωρούν ότι το 80%-90% περίπου των μηχανικών αστοχιών οφείλονται σε κόπωση (27).

Στην περιοδικά μεταβαλλόμενη φόρτιση υπάρχει μία μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{max}$ ) και μία ελάχιστη θλιπτική τάση ( $\sigma_{min}$ ). Επειδή η μεταβολή των τάσεων μπορεί να διαφέρει στον χρόνο ή στο μέγεθος, τα χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν το είδος της μεταβαλλόμενης φόρτισης είναι, εκτός από την μέγιστη και ελάχιστη τάση, η μέση τιμή τάσης, το εύρος των τάσεων, το πλάτος των τάσεων και ο λόγος των τάσεων (33).

$$\text{Μέση τιμή τάσης : } \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

*Εξίσωση 16: Μέση τιμή τάσης  $\sigma_m$*

$$\text{Έυρος των τάσεων : } \sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

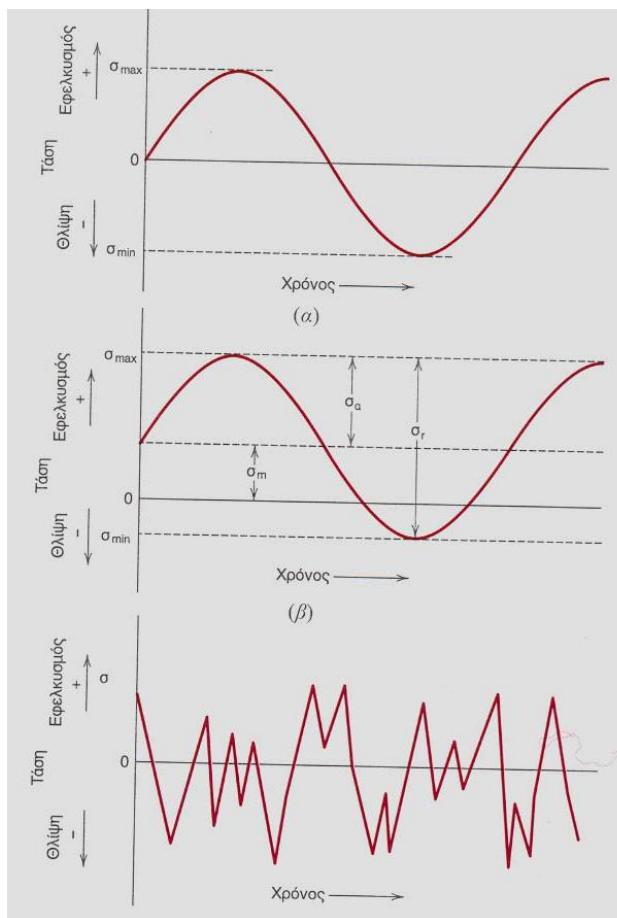
*Εξίσωση 17: Έυρος των τάσεων  $\sigma_r$*

$$\text{Πλάτος τάσεων : } \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

*Εξίσωση 18: Πλάτος των τάσεων  $\sigma_a$*

$$\text{Λόγος τάσεων : } R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

*Εξίσωση 19: Λόγος των τάσεων  $R$*



Εναλλασσόμενη κυκλική φόρτιση

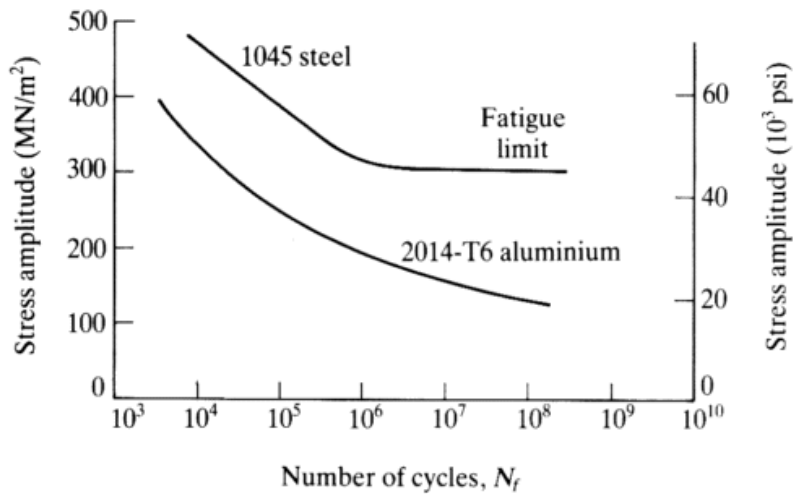
Ασύμμετρη επαναλαμβανόμενη φόρτιση

Τυχαία μεταβαλλόμενη φόρτιση

**Εικόνα 21: Χαρακτηριστικές καμπύλες χρονικής μεταβολής της επιβαλλόμενης τάσης (34)**

Η συμπεριφορά των υλικών σε κόπωση φαίνεται στις καμπύλες S-N ή καμπύλες Wöhler (Εικ. 22) (34). Αυτά είναι διαγράμματα του πλάτους μιας μεταβαλλόμενης τάσης συναρτήσει του αριθμού κύκλων φόρτισης για να επέλθει αστοχία σε λογαριθμική κλίμακα (35). Οι καμπύλες έχουν δημιουργηθεί από αποτελέσματα δοκιμών σε δείγματα διάφορων υλικών.





**Εικόνα 22: Διάγραμμα S-N για χάλυβα AISI 1045 και αλουμίνιο 2014-T6 κατά ASTM - όριο κόπωσης (fatigue limit)**

(*efunda.com*)

Από το σχήμα της εικόνας 22 προκύπτει το χαρακτηριστικό όριο κόπωσης (fatigue limit). Αυτό το όριο είναι εμφανή σε κάποιους χάλυβες και κράματα τιτανίου και δείχνει το μέγιστο πλάτος μεταβαλλόμενης τάσης, κάτω από το οποίο το υλικό θεωρητικά έχει άπειρη διάρκεια ζωής. Η διάρκεια ζωής στην κόπωση ενός υλικού ορίζεται ο αριθμός κύκλων που χρειάζεται για να αστοχήσει ένα υλικό σε συγκεκριμένο πλάτος μεταβαλλόμενης τάσης.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΛΙΚΟΥ

### 3.1. Αστοχία - Ορισμοί

Ο όρος αστοχία (failure) δηλώνει την απόκλιση του αποτελέσματος μίας πράξης από τον αρχικό στόχο που τέθηκε πριν την πραγματοποίησή της. Τα δομικά στοιχεία κατασκευών και τα στοιχεία μηχανών μπορεί να αποτύχουν στην εκτέλεση των λειτουργιών για τις οποίες χρησιμοποιούνται, δηλαδή μπορεί να υποστούν αστοχία (failure), με τρεις κυρίως τρόπους:

- i) Λόγω υπερβολικής ελαστικής παραμόρφωσης
- ii) Λόγω πλαστικής ροής ή υπερβολικής πλαστικής παραμόρφωσης
- iii) Λόγω θραύσης (36)

Η αξιολόγηση και ανάλυση αστοχίας υλικού στοχεύει στη διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας και στην αναγνώριση των αιτιών της αστοχίας, όπως:

- Λανθασμένος Σχεδιασμός
- Λανθασμένη χρήση των υλικών
- Κατασκευαστικά ελαττώματα
- Συνθήκες λειτουργίας

### 3.2 Ανάλυσης Αστοχίας Υλικού

Ανάλυση αστοχίας υλικού ορίζεται η διαδικασία της συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, ώστε να προσδιοριστεί κατά κύριο λόγο η αιτία της αστοχίας του υλικού και να αναπτυχθούν ενέργειες τέτοιες ώστε να μην επαναληφθει μελλοντικά μία παρόμοια κατάσταση. Η ανάλυση της αστοχίας των υλικών είναι μία σημαντική διαδικασία σε κάθε τομέα που περιλαμβάνει μηχανική ανάλυση των υλικών. Σε κάθε

περίπτωση, ο σκοπός είναι να προσδιοριστεί η αιτία της αστοχίας ώστε να μην επαναληφθεί αλλά για να βελτιωθεί η απόδοση του υλικού και κατ' επέκταση του εξαρτήματος ή της κατασκευής. Η ανάλυση της αστοχίας των υλικών έχει τρεις βασικούς στόχους:

- ✓ Να καθοριστεί η καταπόνηση
- ✓ Να καθοριστεί ο τρόπος της αστοχίας (Failure cause)
- ✓ Να καθοριστούν οι αιτίες που οδήγησαν στην αστοχία του υλικού (Root causes)

Ο τρόπος της αστοχίας καθορίζεται τόσο στο πεδίο όσο και στο εργαστήριο, χρησιμοποιώντας μεθόδους όπως fractography, μεταλλογραφία και μηχανικές δοκιμές. Η αιτία της αστοχίας προσδιορίζεται με εργαστηριακές δοκιμές σύμφωνα με στοιχεία που αφορούν το δείγμα, τις δυνάμεις που ασκήθηκαν και την καταπόνηση του δείγματος καθώς και με βάση άλλες συνθήκες περιβάλλοντος κάτω από τις οποίες έγινε η καταπόνηση. Η συγκριτική δειγματοληψία ή η επανάληψη της μεθόδου καταπόνησης ίσως να θεωρηθούν απαραίτητες ώστε να προσδιοριστεί η αιτία καταπόνησης. Η ανάλυση της αιτίας της καταπόνησης (Root failure cause) προσδιορίζεται μέσω της γνώσης των καταπονήσεων, την αιτία και τη συγκεκριμένη διαδικασία. Ο προσδιορισμός της αιτίας της αστοχίας του υλικού απαιτεί πλήρεις πληροφορίες για τον σχεδιασμό του εξαρτήματος, τη λειτουργία, τη συντήρησή του και τις συνθήκες λειτουργίας του (20)

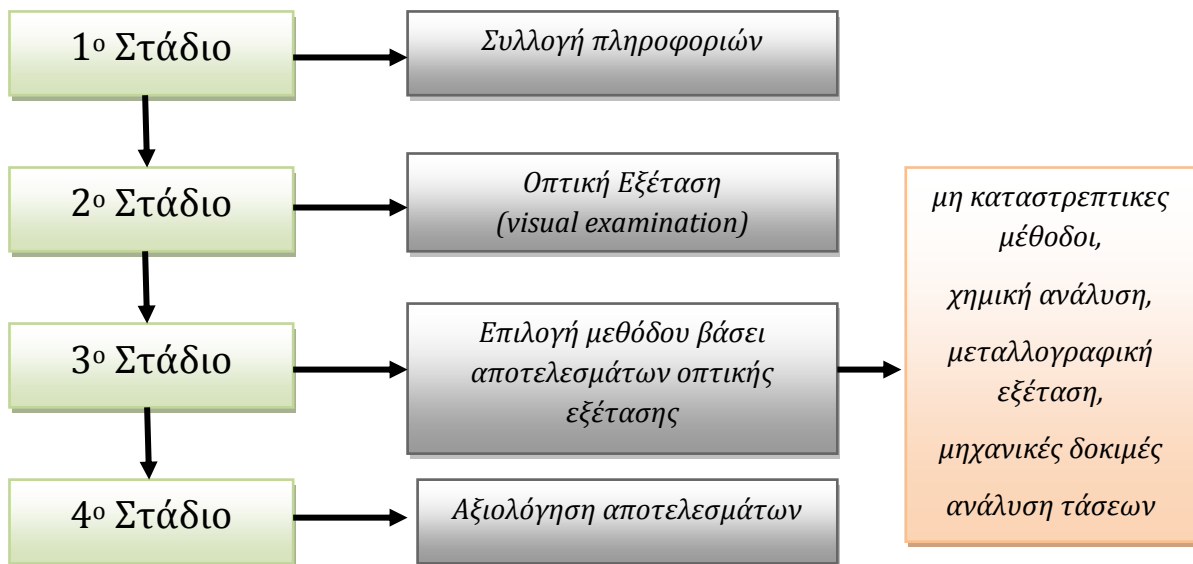
Όπως ο σχεδιασμός, έτσι και η ανάλυση αστοχίας του υλικού είναι μία πολυσύνθετη διαδικασία. Ο στόχος της ανάλυσης αστοχίας υλικού είναι να προσδιορίσει τόσο τον μηχανισμό αστοχίας όσο και την αιτία ή τις αιτίες κάτω από τις οποίες προκλήθηκε η αστοχία του υλικού. Η αιτία μπορεί να σχετίζεται με την κακή συντήρηση, με την μη ορθή εφαρμογή, τις ιδιότητες του υλικού ή την κατασκευή της εγκατάστασης (22).

### 3.3 Μεθοδολογία Ανάλυσης Αστοχίας Υλικού

Στην ανάλυση της αστοχίας ενός υλικού μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερα βασικά στάδια. Ο συνδυασμός αυτών των βημάτων αποτελεί την ολοκληρωμένη έρευνα και ανάλυση.

Το **πρώτο στάδιο** στην ανάλυση της αστοχίας του υλικού είναι η κατανόηση των συνθηκών κάτω από τις οποίες το εξάρτημα, κατασκευή ή εγκατάσταση λειτουργούσε. Η συλλογή των πληροφοριών πρέπει να περιλαμβάνει στοιχεία για την συντήρηση του εξοπλισμού, έρευνα του χώρου που βρισκόταν η εγκατάσταση και ίσως πληροφορίες από τον κατασκευη. Επίσης σε αυτό το στάδιο περιλαμβάνεται και η επιλογή των δειγμάτων.

Το **δεύτερο στάδιο** αφορά την οπτική εξέταση (visual examination) και την καταγραφή των φυσικών αποδεικτικών στοιχείων. Γίνεται δηλαδή μακροσκοπική εξέταση και τήρηση των αρχείων έπειτα από την καταγραφή.



Σχήμα 1: Μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας υλικού - Στάδια

Το **τρίτο στάδιο** περιλαμβάνει την επιλογή των περαιτέρω ενεργειών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της οπτικής εξέτασης και το υπόβαθρο των πληροφοριών που έχει συλλεχθεί έως αυτή τη στιγμή, πρέπει να αποφασιστούν επόμενες ενέργειες. Επόμενες ενέργειες μπορούν να θεωρηθούν οι ακόλουθες:

- Μη καταστρεπτικές Μέθοδοι Ελέγχου (Non-destructive testing (NDT))
- Χημική Ανάλυση (Chemical analysis)
- Μεταλλογραφική Εξέταση (Metallographic examination)
- Μηχανικές Δοκιμές (Mechanical Testing)
- Ανάλυση τάσεων (Stress Analysis)

Το **τελευταίο στάδιο** περιλαμβάνει την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων καθώς και συστάσεις. Οι συστάσεις είναι ένα πολύ σημαντικό μέρος καθώς μπορεί να υπάρξουν σοβαρά λάθη και περαιτέρω αστοχίες αν οι συστάσεις είναι λανθασμένες. Το σύστημα ή η διάταξη ίσως να πρέπει να ξανασχεδιαστεί ή να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά υλικά (37).

### **3.3.1 Μεθοδολογία Ανάλυσης Αστοχίας Υλικού - Συλλογή Δεδομένων**

Η έρευνα για την ανάλυση της αστοχίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη συλλογή δεδομένων. Είναι απαραίτητο να γίνει συλλογή πληροφοριών σχετικά με την αστοχία του υλικού, το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη δομή καθώς και αν είναι εφικτό της αλληλουχίας των γεγονότων που οδήγησαν στην αστοχία (38). Η συλλογή των δεδομένων θα πρέπει να περιλαμβάνει στοιχεία σχετικά με την παραγωγή και την κατασκευή του υπο επεξεργασία στοιχείου, τεχνικές προδιαγραφές, σχέδια και θα πρέπει να γίνει επεξεργασία όσο το δυνατόν περισσότερο των πτυχών σχεδιασμού του αστοχούντος υλικού. Επίσης η συλλογή δεδομένων θα πρέπει να περιλαμβάνει πληροφορίες κατασκευής, παραγωγής, μεταλλοτεχνίας, συγκόλλησης, ποιοτικού ελέγχου και προδιαγραφές προϊόντος.

Ωστόσο η διαθεσιμότητα ενός πλήρους ιστορικού εξαρτάται από το πόσο λεπτομερής ήταν η τήρηση των αρχείων πριν από την αστοχία. Μία πλήρης συλλογή

πληροφοριών θα έπρεπε να περιλαμβάνει φορτίσεις, τυχαία υπερφόρτωση, θερμοκρασικές αλλαγές και λειτουργία σε διαβρωτικό περιβάλλον. Ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι διαθέσιμα πλήρη αρχεία ή τέτοιου είδους πληροφορίες (22)

### **3.3.2 Στάδια Ανάλυσης Αστοχίας Υλικού - Προκαταρκτική Εξέταση - Οπτική Εξέταση**

Ο οπτικός έλεγχος βασίζεται στον προσδιορισμό συγκεκριμένων στοιχείων και εξαρτάται από τις γνώσεις και την εμπειρία του ερευνητή. Εργαλεία όπως μεγενθυντικοί φακοί, φωτογραφικές μηχανές, εργαλεία μέτρησης κλπ είναι συνήθως απαραίτητα. Επίσης ο φωτισμός παίζει σημαντικό ρόλο στην οπτική επαφή και θεωρείται ότι απαιτούνται τουλάχιστον 1,000 lux. Επιπλέον, ο χώρος εργασίας αλλά και το δείγμα πρέπει να έχουν καθαριστεί πριν την οπτική εξέταση και όλα τα όργανα ή ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται θα πρέπει να είναι σε καλή κατάσταση.

Η οπτική εξέταση είναι μία από τις πιο χρήσιμες εξετάσεις, δεδομένου ότι είναι οικονομική και δεν απαιτεί περίπλοκο εξοπλισμό. Η οπτική εξέταση του αστοχούντος δοκιμίου στην επιφάνεια θραύσης, μπορεί να δώσει πολλές πληροφορίες σχετικά με την προέλευση και τα αίτια της θραύσης του δοκιμίου όταν αυτό έχει υποστεί καταπονήσεις (39). Επιπρόσθετα μπορούν να εντοπιστούν αλλαγές στο χρώμα αλλά και στην υφή του επί επιθεώρηση δείγματος. Η επιθεώρηση είναι προτιμότερο να ξεκινάει με γυμνό μάτι και έπειτα να χρησιμοποιούνται βοηθητικά εργαλεία (22).

Κατά τη διάρκεια της προκαταρκτικής εξέτασης, χρησιμοποιούνται μεγενθυντικοί φακοί με μεγένθυση που κυμαίνεται από X1 έως X10 (39). Ένας μεγενθυντικός φακός και έπειτα η χρήση ενός μικροσκοπίου χαμηλής ισχύος μπορεί να προσδιορίσει λεπτομέρειες για την αστοχία του δοκιμίου (22). Κατά αυτό τον τρόπο, είναι δυνατόν να αναλυθούν πιθανές παραμορφώσεις, ρωγμές και άλλες ατέλειες στην περιοχή της θραύσης. Ποιοτικές οπτικές επιθεωρήσεις εκτελούνται στην περιοχή της θραύσης αλλά και στην λοιπή επιφάνεια του δείγματος όπου υπάρχουν σημάδια φθοράς όπως διάβρωση, απλή φθορά, κόπωση, κατασκευαστικές ατέλειες (39).

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει την γενική φωτογράφιση του δοκιμίου και την περιοχή της θραύσης, όπου μετέπειτα γίνεται εξέταση και αξιολόγηση των

φωτογραφιών. Είναι σημαντικό να υπάρχουν αρκετές φωτογραφίες του αστοχούντος δοκιμίου, οι οποίες πρέπει να αξιολογηθούν μεμονωμένα αλλά και σε σχέση με τις υπόλοιπες φωτογραφίες (22).

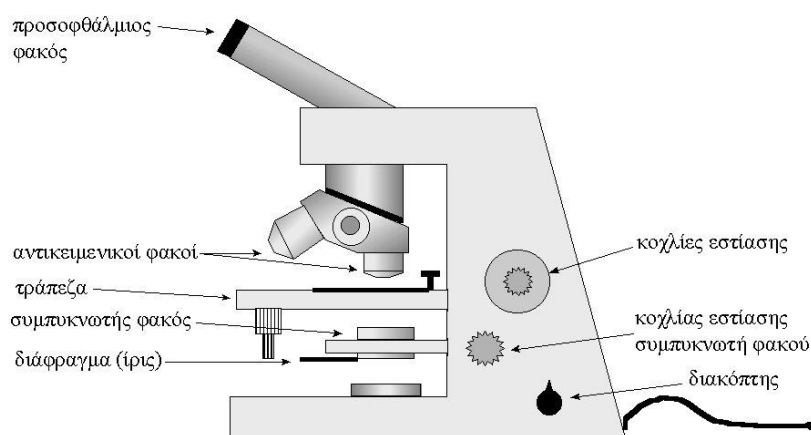
### 3.3.3. Στάδια Ανάλυσης Αστοχίας Υλικού - Επιλογή Μεθόδου

#### 3.3.3.1. Μικροσκοπική ανάλυση

Τα εξεταζόμενα δοκίμια προετοιμάζονται κατάλληλα (μεταλλογραφική προετοιμασία) μελετώνται μικροσκοπικά προκειμένου να προσδιοριστούν αλλοιώσεις της αρχικής μικροδομής, ύπαρξη μικροπόρων ή μικροεγκλεισμάτων μη ανιχνεύσιμων από τις τεχνικές μη καταστρεπτικού ελέγχου, οι οποίες είναι πιθανό να συνέβαλαν στην αστοχία του μεταλλικού εξαρτήματος. Η μικροσκοπική παρατήρηση των μεταλλικών δοκιμίων γίνεται με τη χρήση των ακόλουθων μικροσκοπίων:

#### 1. Οπτικά Μικροσκόπια

Στα οπτικά μικροσκόπια η μεγεθυμένη εικόνα της μικροδομής λαμβάνεται με ανάκλαση δέσμης ακτινοβολίας στην περιοχή του ορατού. Ωστόσο η διακριτική ικανότητα των οπτικών μικροσκοπίων είναι περιορισμένη, με αποτέλεσμα να επιτρέπεται η παρατήρηση σε κλίμακα ομάδας κόκκων του υλικού.



Εικόνα 23: Οπτικό μικροσκόπιο

<http://www.aua.gr/fasseas/Image169.jpg>

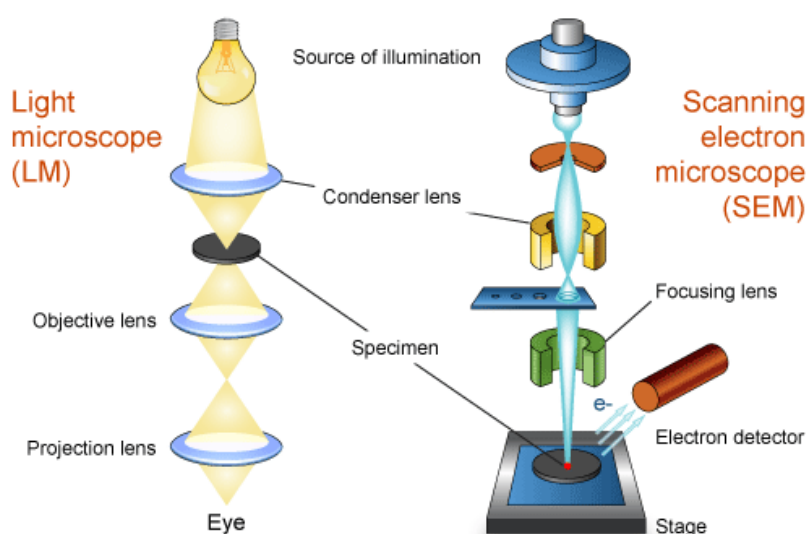


## 2. Ηλεκτρονικά Μικροσκόπια

Στα ηλεκτρονικά μικροσκόπια η μεγεθυμένη εικόνα της μικροδομής λαμβάνεται με τη χρήση δέσμης ηλεκτρονίων. Σε αυτή την κατηγορία υπάρχουν τα εξής μικροσκόπια:

### 2.1. Ηλεκτρονικά Μικροσκόπια Σάρωσης (Scanning Electron Microscopes, SEM)

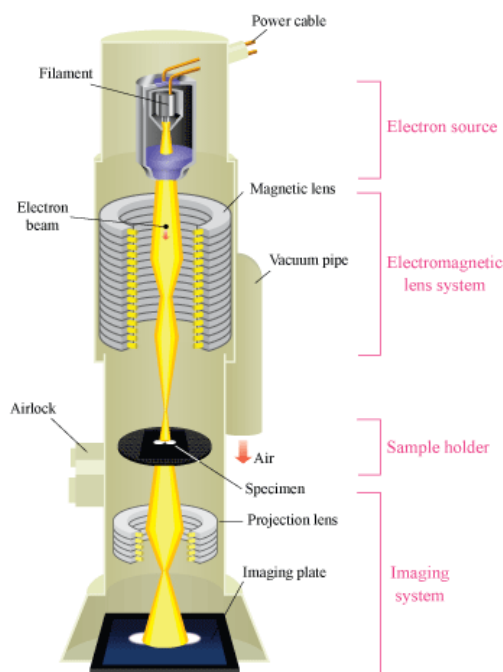
Σε αυτά τα μικροσκόπια η προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του υλικού προκαλώντας ελαστικές και ανελαστικές συγκρούσεις με τα άτομα του εξεταζόμενου υλικού. Τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια σάρωσης χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση αγωγίμων υλικών, αλλά και μονωτικών όπως κεραμικά και πολυμερή μετά από ειδική προετοιμασία της επιφάνειας. Με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης η παρατήρηση της μικροδομής και της τοπογραφίας επιφανειών θραύσης γίνεται σε επίπεδο ενός κόκκου υλικού, καθώς έχουν δυνατότητα μεγένθυσης έως και 250.000 φορές. Επιπρόσθετα, με τη χρήση κατάλληλων ανιχνευτών μπορεί να γίνει τοπική στοιχειακή μικροανάλυση, να βρεθεί δηλαδή η χημική σύσταση σε επιλεγμένες περιοχές του υλικού.



**Εικόνα 24: Ηλεκτρονικά Μικροσκόπια Σάρωσης (SEM)**

<http://www.ammrj.org.au/myscope/images/sem/sem-ve-lm.png>

## 2.2. Ηλεκτρονικά Μικροσκόπια Διερχόμενης Δέσμης (Transmission Electron Microscopes, TEM).



**Εικόνα 25: Ηλεκτρονικά Μικροσκόπια Διερχόμενης Δέσμης (TEM)**

[http://www.hk-phy.org/atomic\\_world/tem/images/fig04.gif](http://www.hk-phy.org/atomic_world/tem/images/fig04.gif)

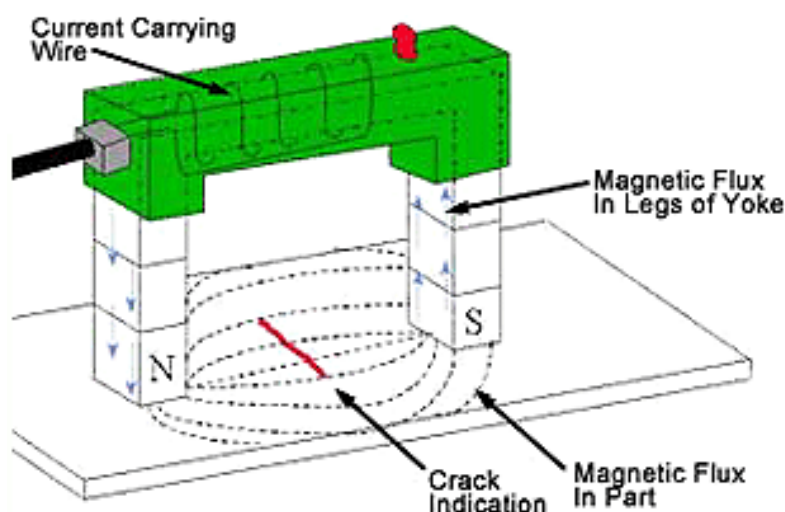
Στα ηλεκτρονικά μικροσκόπια διερχόμενης δέσμης η προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων διαπερνά δείγμα του εξεταζόμενου υλικού, μετά από προσεκτική του διαμόρφωση σε λεπτή τομή. Η εικόνα του υλικού σχηματίζεται μετά από σκέδαση των ηλεκτρονίων που ενισχύονται από αλλαγές στον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό. Τα σύγχρονα μικροσκόπια αυτής της κατηγορίας, έχουν δυνατότητα μεγένθυσης έως 1.000.000 φορές. Κατά συνέπεια επιτυγχάνεται παρατήρηση σε επίπεδο κρυσταλλικού πλέγματος και είναι εφικτός ο εντοπισμός ατελειών μικροδομής, όπως είναι οι διαταραχές (γραμμικές ατέλειες) ή τα σφάλματα επιστοιίβασης. Με κατάλληλους ανιχνευτές είναι επίσης δυνατή η αποτύπωση της κρυσταλλικής δομής του υλικού (34).

### 3.3.3.2. Μη καταστρεπτικές μέθοδοι ελέγχου

Οι μη καταστρεπτικές δοκιμές βοηθούν στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αστοχίας ενός μεταλλικού εξαρτήματος. Στα μεταλλικά εξαρτήματα υπάρχουν εσωτερικές δομικές ατέλειες, όπως πόροι ή υφιστάμενες υποεπιφανειακές ρωγμές. Για αυτό το λόγο οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι θεωρούνται πιο χρήσιμες καθώς δεν επηρεάζουν την γεωμετρία ή τις ιδιότητες του υλικού. Οι κυριότερες μη καταστρεπτικές μέθοδοι ελέγχου (ΜΚΕ) των μεταλλικών υλικών είναι οι εξής (34, 22):

- **Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια (Magnetic-Particle Inspection)**

Χρησιμοποιείται για την ανίχνευση επιφανειακών και ελαφρών ασυνεχειών σε σιδηρομαγνητικά υλικά όπως ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο καθώς και σε μερικά από τα κράματά τους. Εκτελείται με τα πρότυπα EN473 και ISO9712 (20).

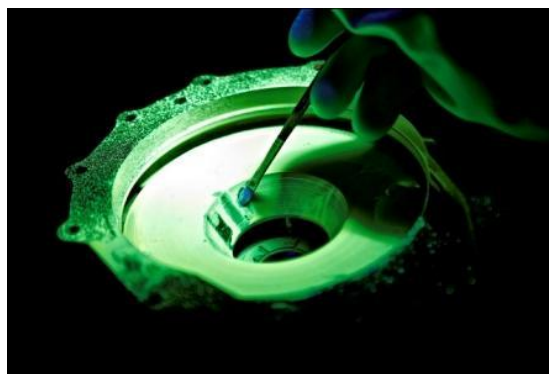


**Εικόνα 26: Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια (Magnetic-Particle Inspection)**

[http://www.ventureinspection.co.uk/files/7613/9342/2866/NDT\\_MPI.gif](http://www.ventureinspection.co.uk/files/7613/9342/2866/NDT_MPI.gif)

- **Έλεγχος με φθορίζοντα διεισδυτικά υγρά (Fluorescent-Penetrant Inspection)**

Ο έλεγχος με διεισδυτικά υγρά βασίζεται στο τριχοειδές φαινόμενο και είναι μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος δοκιμής που εκθέτει επιφανειακές ασυνέχειες για οπτική επιθεώρηση. Χρησιμοποιούνται είτε λαμπτήρες φθορισμού ή ορατές χρωστικές ουσίες. Η επιφάνεια προετοιμάζεται αρχικά και αφαιρείται οτιδήποτε θα μπορούσε να καλύψει ανωμαλίες στην επιφάνεια και στη συνέχεια το δείγμα ξηραίνεται. Έπειτα εφαρμόζεται στην επιφάνεια το διεισδυτικό υγρό εφαρμόζεται και όταν παρέλθει ο καθορισμένος χρόνος διείσδυσης αφαιρούνται οποιαδήποτε υπόλοιπα διεισδυτικού υγρού από την επιφάνεια του υλικού (20).



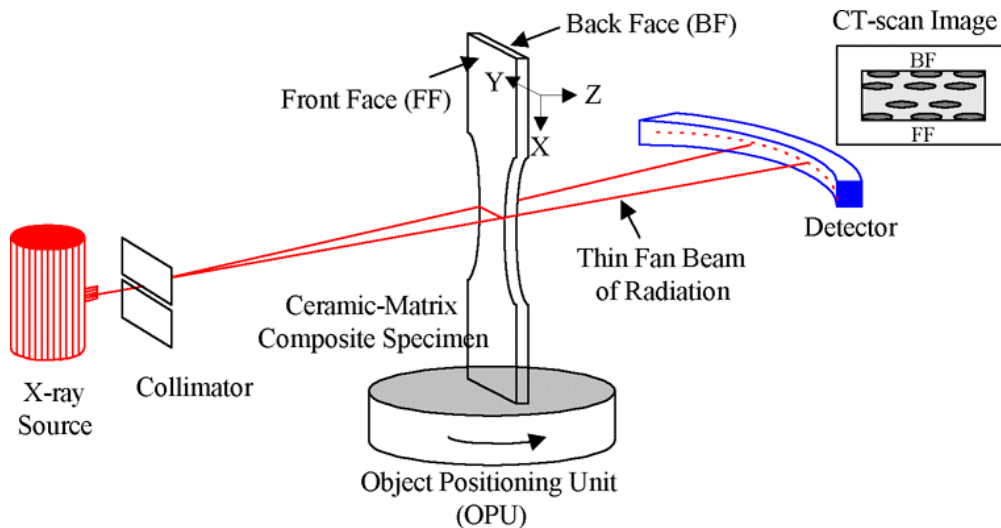
**Εικόνα 27: Έλεγχος με φθορίζοντα διεισδυτικά υγρά (Fluorescent-Penetrant Inspection)**

<http://psmndt.in/images/Penetrant.jpg>

[http://www.1source-aero.com/Uploads/EditorImages/Photo/\\_MG\\_0619\\_Resize.jpg](http://www.1source-aero.com/Uploads/EditorImages/Photo/_MG_0619_Resize.jpg)

- **Ραδιογραφία ακτίνων X ή γ (X-ray/ γ-ray Radiography)**

Στη δοκιμή της ραδιογραφίας ακτίνων χρησιμοποιείται ακτινοβολία η οποία διαπερνά το εξεταζόμενο υλικό. Οι πηγές ακτινοβολίας έχουν εξαιρετικά μικρά μήκη κύματος, από περίπου 1 / 10000α εκείνη του ορατού φωτός. Η ραδιογραφία εξαρτάται από το γεωμετρικό σχήμα του υλικού και καθώς και από τις πληροφορίες που απαιτούνται (20).

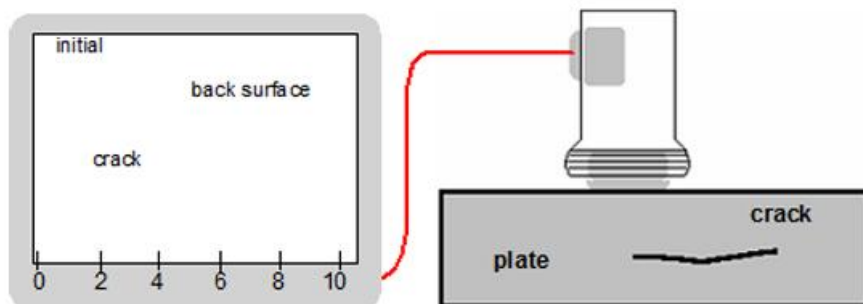


**Εικόνα 28: Ραδιογραφία ακτίνων X ή γ (X-ray/ γ-ray Radiography)**

<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9811/Kim/Kim-9811.fig.9a.lg.gif>

- **Ελεγχος με υπέρηχους (Ultrasonic Inspection)**

Στη δοκιμή υπερήχων πολύ μικρά υπερηχητικά παλμό-κύματα με συχνότητες που κυμαίνονται από 0,1 έως 15 MHz και περιστασιακά μέχρι 50 MHz μεταδίδονται σε υλικά για την ανίχνευση εσωτερικών ρωγμών ή για τον χαρακτηρισμό υλικών. Η δοκιμή υπερήχων εκτελείται συχνά σε υλικά όπως ο χάλυβας, άλλα μέταλλα και κράματα και μπορεί επίσης να εκτελεστεί σε υλικά όπως το σκυρόδεμα και το ξύλο αν και με μικρότερη ανάλυση (20).

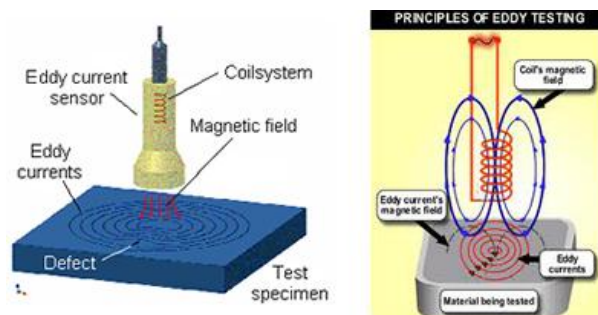


**Εικόνα 29: Ελεγχος με υπέρηχους (Ultrasonic Inspection)**

<http://www.energyworkforce.net/wp-content/uploads/ut1.jpg>

- **Ελεγχος με δινορεύματα (Eddy Current Inspection)**

Η ηλεκτρομαγνητική δοκιμή ή όπως καλείται συχνά Eddy Current Inspection είναι μία μη καταστρεπτική μέθοδος ελέγχου και αφορά τη διαδικασία της επαγωγής ηλεκτρικών ρεύματων ή μαγνητικών πεδίων ή και τα δύο, διαμέσου του εξεταζόμενου αντικειμένου παρατηρώντας την ηλεκτρομαγνητική απάντηση. Εάν η δοκιμή είναι σωστά ρυθμισμένη, το ελάττωμα στο εσωτερικό του αντικειμένου δοκιμής δημιουργεί μια μετρήσιμη ανταπόκριση (20).



**Εικόνα 30: Ελεγχος με δινορεύματα (Eddy Current Inspection)**

<http://www.magintegrity.com/images/courses3.png>

Με τη χρήση των μη καταστρεπτικών μεθόδων ελέγχου, ρωγμές, ασυνέχειες, απώλεια πάχους, ξένες ύλες, και προβλήματα του υλικού κάτω από την επιφάνεια μπορούν να καταγραφούν και να αξιολογηθούν. Οι Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι Ελέγχου δεν αντικαθιστούν τις Καταστροφικές Μεθόδους Ελέγχου αλλά πόλλες φορές οι Καταστροφικές Μέθοδοι Ελέγχου χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά. Κάθε μέθοδος ΜΚΕ έχει διαφορετικό βαθμό ακριβείας, ο οποίος όμως δε μπορεί να έχει την απόλυτη ακρίβεια ενός Καταστροφικού Ελέγχου. Ωστόσο οι ΜΚΕ είναι πολύ οικονομικότερες από τον καταστροφικό έλεγχο και το δοκίμιο παραμένει άθικτο και διαθέσιμο για περαιτέρω έλεγχο (**mix\_00696**).

### **3.3.3.3. Χημική Ανάλυση**

Με τη μέθοδο της χημικής ανάλυσης επιβεβαιώνεται η σύνθεση του υλικού. Ανάλογα με την περίπτωση πρέπει να γίνεται χημική ανάλυση στα υλικά επικάλυψης ή σε επιφανειακά κατάλοιπα (24).

Η τεχνική που χρησιμοποιείται συνήθως για τη χημική ανάλυση σε μελέτες αστοχίας μεταλλικών μερών είναι η φασματοσκοπία εκπομπής (emission spectroscopy), λόγω τόσο της ταχύτητας της όσο και της αξιοπιστίας της. Τα άτομα των στοιχείων του εξεταζόμενου υλικού διεγείρονται, συνήθως με τη δημιουργία πλάσματος, και στη φάση της αποδιέγερσής τους εκπέμπουν μια σειρά χαρακτηριστικών για κάθε στοιχείο ακτινοβολιών. Η παρουσία του είδους των στοιχείων (ποιοτική ανάλυση) ταυτοποιείται με την ανίχνευση των κύριων φασματικών γραμμών, ενώ η περιεκτικότητα των στοιχείων στο δείγμα (ποσοτική ανάλυση) προσδιορίζεται μετά από κατάλληλη μέτρηση της έντασής τους με τη χρήση προτυποποιημένων δειγμάτων του αντίστοιχου στοιχείου (34).

Η ποιοτική χημική ανάλυση προσδιορίζει με ακρίβεια την συγκέντρωση των στοιχείων στο υλικό. Υπάρχει μία ποικιλία τεχνικών ανάλυσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται για μεταλλικά στοιχεία. Αυτές οι μέθοδοι καθορίζουν τη σύνθεση του κράμματος, δηλαδή τις πρώτες ύλες και επαληθεύουν τη συμμόρφωση του δείγματος με συγκεκριμένες προδιαγραφές.

Η ποιοτική χημική ανάλυση μπορεί να γίνει με διάφορες τεχνικές όπως spark optical emission spectroscopy (Spark OES), coupled plasma spectroscopy, optical emission spectroscopy (ICP OES), x ray fluorescence spectroscopy (XRF), wet chemical analyses, combustion methods, and inert gas fusion (IG).

Η μέθοδος που επιλέγεται εξαρτάται από τον τύπο του δείγματος, την ποσότητα του υλικού που διατίθεται για ανάλυση, το επιθυμητό αποτέλεσμα καθώς και από οικονομικούς παράγοντες.

Ωστόσο οι περισσότερες από αυτές τις τεχνικές είναι καταστρεπτικές για το αρχικό δείγμα. Η μέθοδος XRF μπορεί να χρησιμοποιηθεί μη καταστρεπτικά και η Spark OES

μέθοδος μπορεί να προκαλέσει ελάχιστη βλάβη αν το μέγεθος του δοκιμίου επιτρέπει στο όργανο να εισχωρήσει χωρίς να κοπεί (24).

#### **3.3.3.4. Μεταλλογραφική εξέταση**

Οι μεταλλουργικές δοκιμές διεξάγονται για να επαληθεύσουν αν το μέρος που έχει αστοχήσει είναι το ίδιο με αυτό που είχε υπολογιστεί στη σχεδιαστική μελέτη. Αυτή η δοκιμή γίνεται με επιτόπου δοκιμές ή με μία λεπτομερή χημική ανάλυση. Έαν το αποτέλεσμα δείξει ότι το υλικό είναι το ίδιο με αυτό που είχε οριστεί από τις προδιαγραφές, τότε θα πρέπει να εξεταστεί αν η αστοχία οφείλεται σε κάποιο ελάττωμα του υλικού ή σε λάθος διαδικασίες παραγωγής ή κατασκευής. Αυτό εξετάζεται μέσω μίας μεταλλογραφικής εξέτασης ή μέσω μηχανικών δοκιμών.



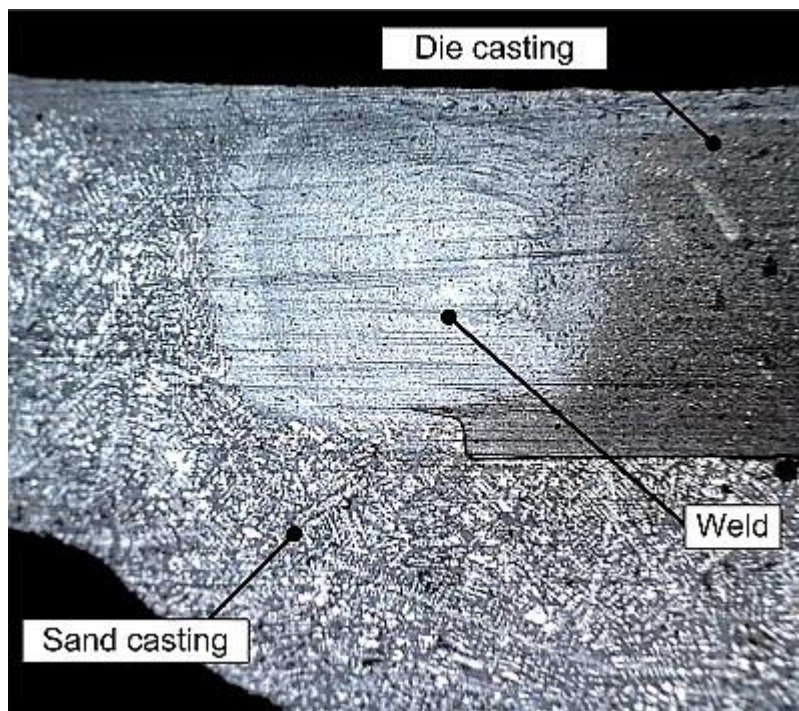
**Εικόνα 31 : Μεταλλογραφική εξέταση - Εξοπλισμός**

<http://www.exova.com/media/152711/defence-metallographic-examination.jpg>

Η μεταλλογραφική εξέταση επιλεγμένων δοκιμών τα οποία είναι ακριβώς πριν την αστοχία και είναι γυαλισμένα και χαραγμένα, μπορεί με τη βοήθεια ενός οπτικού μικροσκοπίου να δώσει μία πληθώρα πληροφοριών. Το υπόβαθρο πληροφοριών



σχετικά με τις συνθήκες παραγωγής του αστοχούντος υλικού, δηλαδή αν είναι χυτό, σφυρηλατό, πυρωμένο, συγγολημένο, προσδιορίζεται λαμβάνοντας υπόψιν χαρακτηριστικά ποιότητας, όπως μικροελαττώματα. Επιπλέον, ατέλειες του υλικού που προκαλούνται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας ή λόγω των συνθηκών λειτουργίας και περιβάλλοντος αξιολογούνται επίσης. Η ραφή, η εξανθράκωση, η ακατάλληλη θερμική επεξεργασία, η διακρυσταλλική διάβρωση, η οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες είναι κάποιες ανεπιθύμητες ενέργειες.



**Εικόνα 32 : Μεταλλογραφική εξέταση - Μέταλλο**

<http://www.utlth-ol.si/res?bin.svc=obj&bin.id=64BD16DE-42B4-40E8-90AF-8B5BF508EA1B&res.w=400&res.h=600>

Επιπρόσθετες πληροφορίες όπως το βάθος, το πάχος του επιχρίσματος, το μέγεθος του κόκκου και η σκληρότητα μετρούνται και συγκρίνονται με τις προδιαγραφές, αν αυτές υπάρχουν (24).

### **3.3.3.5. Μηχανικές Δοκιμές**

Η γνώση της συμπεριφοράς των υλικών σε διάφορες εξωτερικές καταπονήσεις είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στον κλάδο της βιομηχανίας. Η λάθος επιλογή υλικού για μία εφαρμογή μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία, που μπορεί να είναι καταστροφική σε οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο ή ακόμα χειρότερα σε θέματα ασφάλειας. Ως εκ τούτου, η επιλογή ενός υλικού γίνεται με βάση κάποια χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς του σε διάφορες καταπονήσεις. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι οι λεγόμενες ιδιότητες του υλικού. Οι ιδιότητες ενός υλικού προσδιορίζονται από την επιστημονική κοινότητα με διάφορες δοκιμές. Η συμπεριφορά ενός υλικού στις εξωτερικές φορτίσεις αποτυπώνεται από τις μηχανικές του ιδιότητες, οι οποίες προσδιορίζονται από τις μηχανικές δοκιμές.

Οι βασικές μηχανικές δοκιμές είναι :

- Μέτρηση σκληρότητας
- Δοκιμή εφελκυσμού
- δοκιμή κάμψης
- δοκιμή κρούσης (41).

### **3.3.4. Στάδια Ανάλυσης Αστοχίας Υλικού - 4ο Στάδιο: Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων**

Η συγκέντρωση όλων των στοιχείων οδηγεί στην παραγωγή συμπερασμάτων. Ωστόσο, προϋπόθεση για την παραγωγή ορθών συμπερασμάτων αποτελεί η ερευνητική / επαγγελματική εμπειρία.

Το τελευταίο στάδιο μπορεί να είναι ίσως και το δυσκολότερο, διότι κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων-μεθόδων, μπορεί ενδείξεις της έρευνας να οδηγήσουν σε συμπεράσματα που φαίνονται να είναι η αιτία, αλλά να είναι απλώς συνέπειες.

Ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι απλές, ωστόσο πολλές περιπτώσεις δεν θα είναι προφανείς, ακόμη και αν η αιτία αστοχίας και κάποιες πληροφορίες για το υλικό είναι γνωστές.

Αυτό το στάδιο είναι επίσης σημαντικό για τον λόγο ότι λάθος συστάσεις μπορεί να οδηγήσουν σε σοβαρές συνέπειες. Κάποιες φορές, ίσως το συμπέρασμα ή η σύσταση μπορεί να αφορά τον έλεγχο σε συχνότερα χρονικά διαστήματα (37).



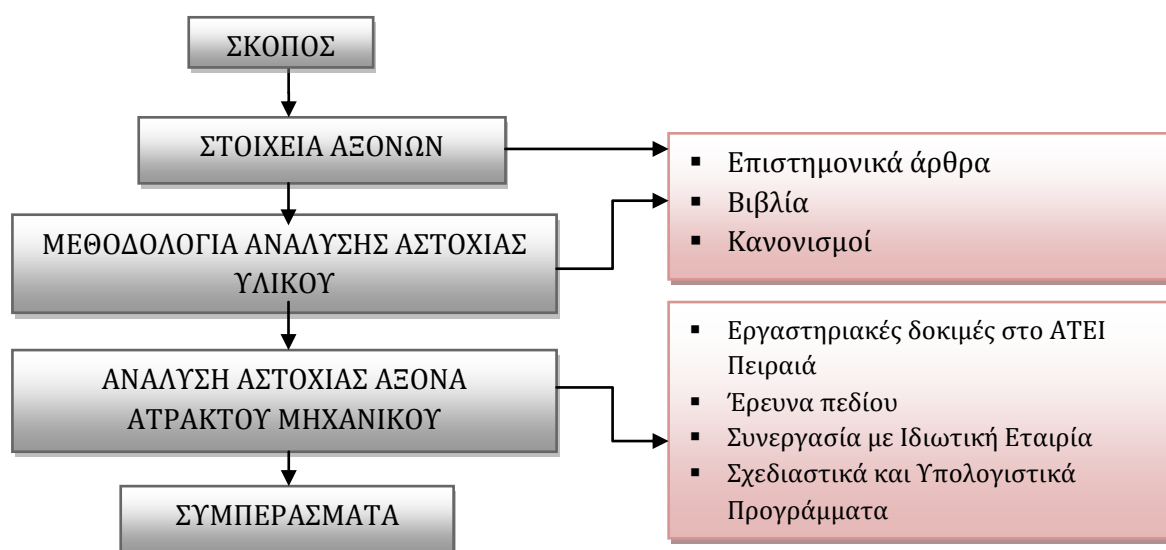
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

### 4.1 Γενικά

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι να αναλύσει τους παράγοντες που οδήγησαν στην αστοχία της ατράκτου ηλεκτρικού κινητήρα διάταξεως μετάδοσης ισχύος μηχανικού ανελκυστήρα. Αποτελείται από δύο κύρια μέρη. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για τους ανελκυστήρες, έπειτα πιο συγκεκριμένα αναλύονται παράγοντες αστοχίας αξόνων και στο κεφάλαιο 2 παραθέτονται στοιχεία για την μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας υλικού. Στο δεύτερο κύριο μέρος της εργασίας, η μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας υλικού εφαρμόζεται στην περίπτωση της ατράκτου ηλεκτρικού ανελκυστήρα.

### 4.2 Στοιχεία και Μέθοδοι

Μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης αναλύθηκε η μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας υλικού, η οποία περιλαμβάνει 4 κύρια στάδια.



Σχήμα 2: Σχηματική αναπαράσταση μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε

Παραθέτονται πληροφορίες για κάθε στάδιο και για κάθε μέθοδο που ακολουθείται συνήθως στην αστοχία ενός υλικού, όπως μη καταστρεπτικές μέθοδοι, μηχανικές δοκιμές, χημικοί ανάλυση, μικροσκοπική ανάλυση κλπ. Το παρακάτω σχηματικό διάγραμμα απεικονίζει τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας.

#### **4.2.1 Μεθοδολογία Ανάλυσης Αστοχίας Υλικού - Αστοχία Αξόνων**

Η συλλογή πληροφοριών για την αστοχία αξόνων αλλά και για την μεθοδολογία που ακολουθείται για την ανάλυση αστοχίας υλικού βασίστηκε στις εξής πηγές:

- ✓ *Επιστημονικά άρθρα*
- ✓ *Βιβλία*
- ✓ *Κανονισμοί*

Μέσω αυτών των πηγών συλλέχθηκαν στοιχεία για την ανάλυση αστοχίας αξόνων και την μεθοδολογία που πρέπει να ακολουθηθεί ώστε τα αποτελέσματα να είναι έγκυρα. Συγκεκριμένα αναλύονται τα εξής μέρη:

1ο Μέρος: Αστοχία αξόνων. Με τη συλλογή σχετικών στοιχείων, συλλέχθηκαν οι εξής πληροφορίες:

- Γεωμετρία, υλικά κατασκευής και αντοχή αξόνων
- Καταπονήσεις αξόνων και εξισώσεις επίλυσης καταπονήσεων

2ο Μέρος: Μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας υλικού

- Στόχοι μεθοδολογίας ανάλυσης αστοχίας υλικού (τρόπος, αίτια, καταπόνηση)
- Στάδια μεθοδολογίας που ακολουθούνται (συλλογή πληροφοριών, οπτική εξέταση, μέθοδος ανάλυσης, αποτελέσματα)
- Παράθεση μεθόδων για την ανάλυση της αστοχίας του υλικού και την εύρεση έγκυρων αποτελεσμάτων (μικροσκοπική ανάλυση, μη καταστρεπτικές μέθοδοι ελέγχου, χημική ανάλυση, μεταλλογραφική εξέταση, μηχανικές δοκιμές, stress analysis)

#### **4.2.2 Πειραματικό μέρος: Ανάλυση αστοχίας άξονα ατράκτου μηχανικού ανελκυστήρα**

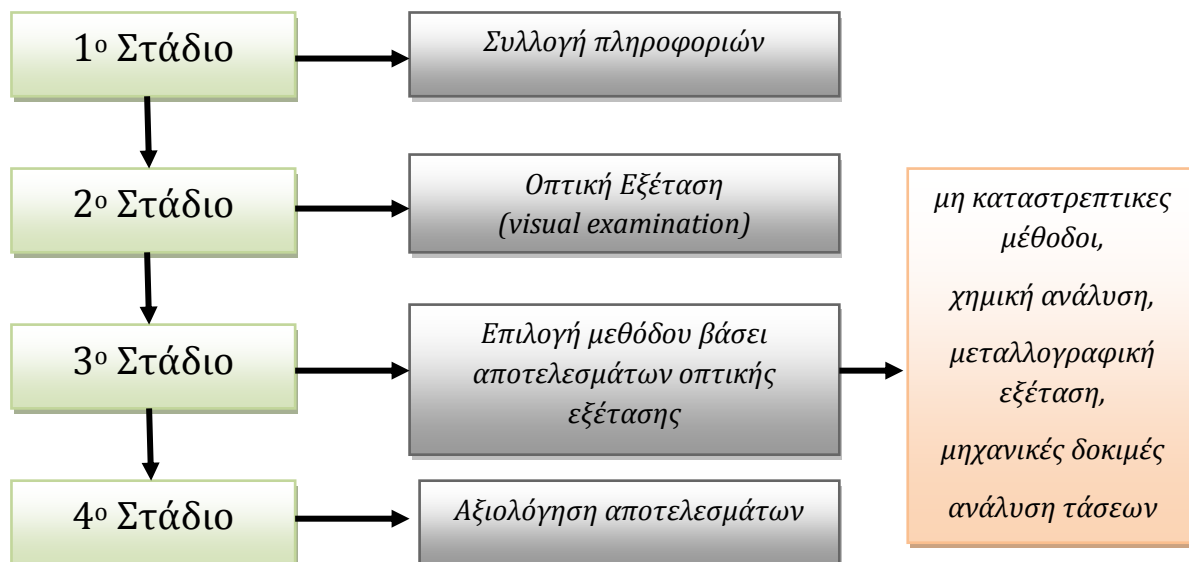
Στο πειραματικό μέρος, γίνεται η ανάλυση αστοχίας άξονα ατράκτου μηχανικού ανελκυστήρα. Εκτός από τις πληροφορίες που χρησιμοποιήθηκαν από το θεωρητικό μέρος της εργασίας για τη μεθοδολογία ανάλυσης υλικού αλλά και για τους άξονες, έγιναν εργαστηριακές δοκιμές και έρευνα πεδίου.

Πιο συγκεκριμένα αρχικά έγινε προσδιορισμός, διατήρηση, καθαρισμός των δειγμάτων και κατ' επέκταση η συλλογή του εξεταζόμενου δείγματος. Έπειτα ακολούθησε το δεύτερο στάδιο της μεθοδολογίας ανάλυσης αστοχίας υλικού, δηλαδή η οπτική εξέταση ή αλλιώς έγινε μακροσκοπική εξέταση και ανάλυση της επιφάνειας θραύσης. Το δείγμα στάλθηκε έπειτα σε εξωτερικό εργαστήριο για μικροσκοπική εξέταση και ανάλυση των επιφανειών θραύσης. Στη συνέχεια έγινε ανάλυση των τάσεων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ο άξονας σχεδιάστηκε με τα σχεδιαστικά προγράμματα Inventor και AutoCAD. Η συλλογή όλων των πληροφοριών οδήγησε στον προσδιορισμό του τύπου θραύσης καθώς και στα αποτελέσματα που αναλύονται στα κεφάλαια 5 και 6.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ



### Στάδια Ανάλυσης Αστοχίας Υλικού

- Συλλογή των δεδομένων
- Προκαταρκτική εξέταση του αστοχούντος στοιχείου
- Μη καταστρεπτικές δοκιμές
- Μηχανικές δοκιμές
- Επιλογή, Συντήρηση και καθαρισμός των δειγμάτων
- Μικροσκοπική εξέταση των δειγμάτων
- Προσδιορισμός του τύπου θραύσης
- Επεξεργασία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα
- Προτάσεις για διορθωτικές κινήσεις (42)

Αυτά τα προκαταρκτικά βήματα, ακολουθούνται έπειτα από την αξιολόγηση και εκτίμηση της ζημιάς που έχει υποστεί το υλικό καθώς και από τις συνθήκες που

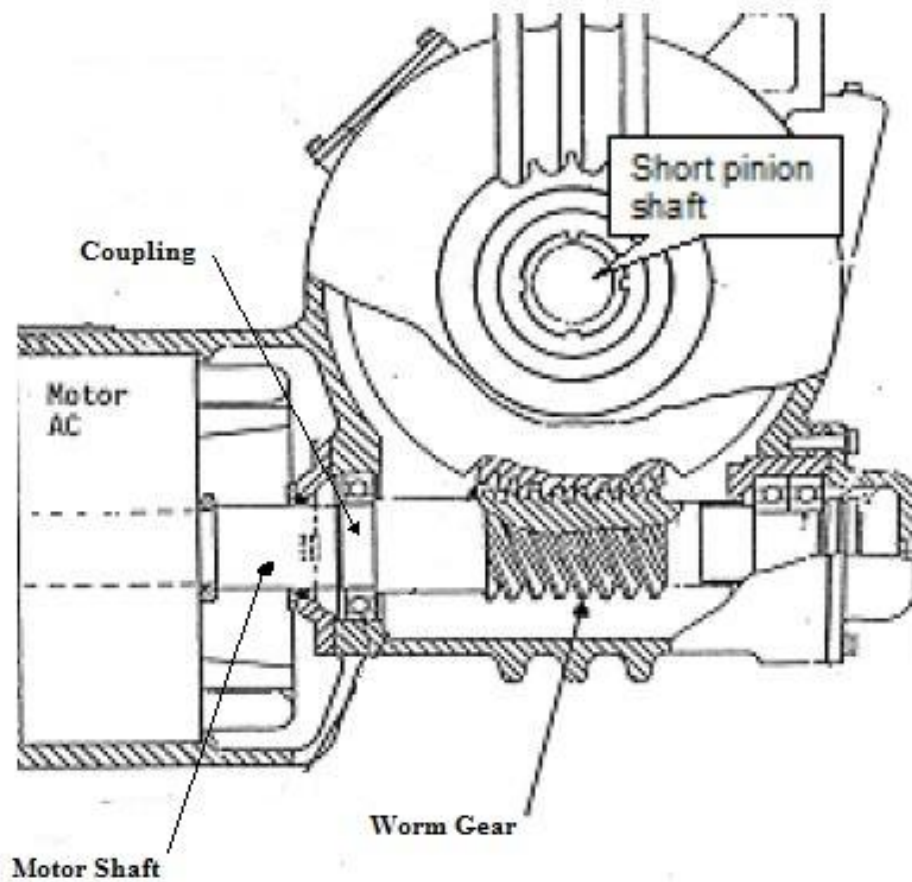
οδήγησαν στην αστοχία. Τα βήματα αυτά μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το αν είναι υπο διερεύνηση η θράυση, διάβρωση ή φθορά. Στην ανάλυση της αστοχίας ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- Επιλογή, προσδιορισμός, διατήρηση ή/και καθαρισμός των δειγμάτων.
- Μακροσκοπική εξέταση και ανάλυση (επιφάνειες θραύσης, περαιτέρω ή δευτερεύουσες ρωγμές, επιφάνεια του δείγματος).
- Μικροσκοπική εξέταση και ανάλυση των επιφανειών θραύσης.
- Stress analysis για τον προσδιορισμό της πραγματικής κατάστασης καταπόνησης του στοιχείου που αστόχησε
- Θραυστομηχανική ( fracture mechanics)
- Προσδιορισμός του τύπου θράυσης

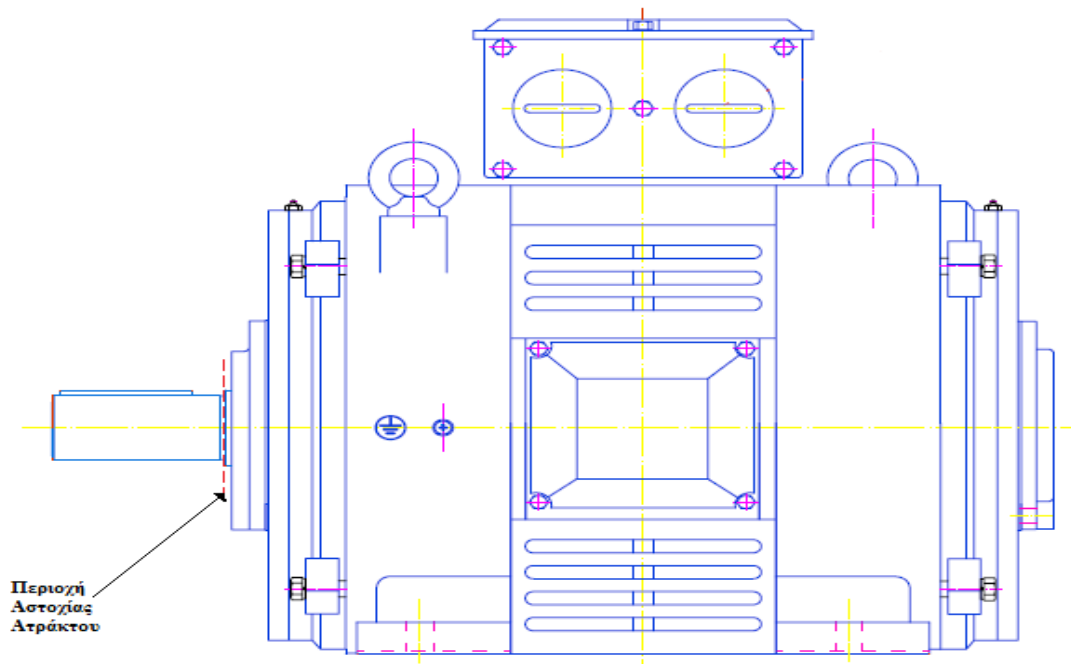
### 5.1 Συλλογή πληροφοριών : 1<sup>ο</sup> Στάδιο Μεθοδολογίας Ανάλυσης Αστοχίας

- ✓ Η άτρακτος που εξετάζεται ανήκει σε ηλεκτρικό κινητήρα που χρησιμοποιήθηκε σε διάταξη μετάδοσης ισχύος σε μηχανικό ανελκυστήρα έλξης.
- ✓ Ο ηλεκτρικός ανελκυστήρας χρησιμοποιείται σε πολυόροφο κτήριο γραφείων για την μεταφορά ατόμων.
- ✓ Ο θάλαμος του ανελκυστήρα κινείται με γραμμική ταχύτητα  $u=1,6\text{m/sec}$ .
- ✓ Η διάταξη μετάδοσης ισχύος του ανελκυστήρα αποτελείται από τον εξωτερικό άξονα του ηλεκτροκινητήρα, τον μειωτήρα στροφών τύπου ατέρμονα κοχλία-κορώνας δύο αρχών και την τροχαλία τριβής που μέσω των αυλακώσεων της μεταφέρει μέσω τριβής την ροπή στα συρματόσχοινα για την κίνηση του θαλάμου.
- ✓ Η διάμετρος του ατέρμονα κοχλία είναι  $d_{\text{ατερ.}}=70\text{mm}$  και η σχέση μείωσης στροφών του  $i=$  . Η διάμετρος της τροχαλίας τριβής είναι  $D=700\text{mm}$ .
- ✓ Ο ηλεκτροκινητήρας αποδίδει ισχύ  $P=15\text{KW}$  σε συχνότητα  $f=60\text{Hz}$  και η άτρακτος του περιστρέφεται με  $n=1200\text{rpm}$ . Η ροπή που μεταφέρει η εξωτερική άτρακτος είναι  $T=$  και το υλικό κατασκευής της είναι St37.
- ✓ Η άτρακτος αστόχησε μετά από περίπου 2-3 μήνες λειτουργίας.

- ✓ Η σύνδεση της ατράκτου με τον μειωτήρα στροφών γίνεται με ελαστικό σύνδεσμο μέσω σφηνών.
- ✓ Δεν ήταν δυνατό να συλλεχθούν στοιχεία για την συντήρηση και τις συνθήκες λειτουργίας κατά την θραύση της ατράκτου.



**Εικόνα 33: Διάταξη μετάδοσης ισχύος κινητήρα-ατέρμονα κοχλία**



**Εικόνα 34: Σχηματική απεικόνιση τυπικού ηλεκτροκινητήρα και ένδειξη της περιοχής όπου επήλθε η θραύση**

## **5.2 Μακροσκοπική εξέταση: 2<sup>ο</sup> Στάδιο Μεθοδολογίας Ανάλυσης Αστοχίας - Οπτική εξέταση**

Για την προκαταρκτική εξέταση της αστοχίας της ατράκτου αρχικά έγινε οπτική επιθεώρηση όλου του αστοχούντος κομματιού της ατράκτου και της επιφάνειας θραύσης χωρίς την βοήθεια κάποιου εξαρτήματος ή οργάνου. Η οπτική επιθεώρηση έλαβε μέρος στο εργαστήριο Τριβολογίας του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά. Παρατηρήθηκαν λεπτομερώς το σχήμα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ατράκτου, η ποιότητα των επιφανειών, η επιφάνεια θραύσης και οι κοντινές περιοχές σε αυτήν, για την ύπαρξη ρωγμών ή άλλων εμφανών σημαδιών που θα μπορούσαν να μας δώσουν στοιχεία για την αστοχία του αντικειμένου.

Στην συνέχεια τραβήχθηκαν φωτογραφίες με επαγγελματική μηχανή CANON από διάφορες γωνίες λήψης της επιφάνειας θραύσης, των στοιχείων και των διαμορφώσεων της ατράκτου και ολόκληρου του κομματιού για την αποτύπωση της γεωμετρίας του εξεταζόμενου κομματιού της ατράκτου και για την δημιουργία

αρχείου. Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται ολόκληρο το εξεταζόμενο κομμάτι της ατράκτου και με την βοήθεια του παχυμέτρου το μήκος της.



**Εικόνα 35: Εξεταζόμενο κομμάτι ατράκτου**

Στην εικόνα 35 αποτυπώνεται το μήκος της εξεταζόμενης ατράκτου το οποίο είναι  $L=110\text{mm}$ , η σφήνα της ατράκτου και οι διαμορφώσεις στα άκρα του.



**Εικόνα 36: Επιφάνεια θράυσης ατράκτου**

Η θραύση της ατράκτου επήλθε στο δεξιό μέρος της ,στην διαβάθμιση (αυλάκι) που έχει διαμορφωθεί για την μείωση των τάσεων. Η ρωγμή ξεκίνησε στην περιφέρεια της επιφάνειας θραύσης (εικόνα 36) στο τέλος του πλάτους της διαβάθμισης για την μείωση των τάσεων και εξελίχθηκε προς το κέντρο.

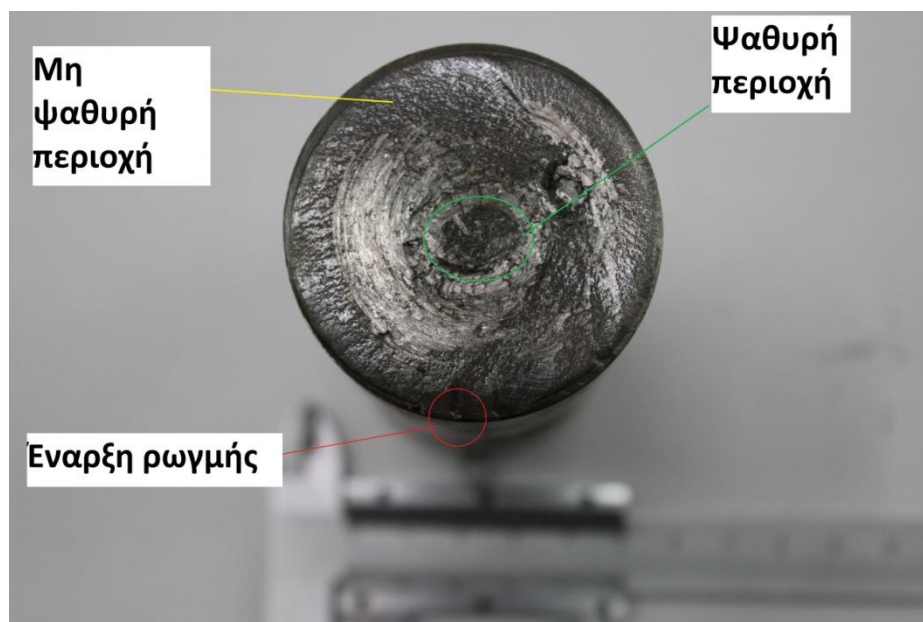
Στην εικόνα 37 παρουσιάζεται η ενσωματωμένη σφήνα της ατράκτου.Είναι εμφανής μία μικρή παραμόρφωση στην επιφάνεια της σφήνας, και στο ίδιο ύψος υπάρχουν σημάδια περιμετρικά στην επιφάνεια της ατράκτου.Η παραμόρφωση στην σφήνα και τα σημάδια στην άτρακτο πιθανόν να δημιουργήθηκαν λίγο πριν την θραύση της ατράκτου από την τριβή των επιφανειών με τον σύνδεσμο(κόμπλερ).



**Εικόνα 37:Ενσωματωμένη σφήνα ατράκτου**

Από την οπτική ανάλυση της επιφάνειας θραύσης (εικόνα 38) παρατηρούμε τρεις σημαντικές περιοχές σε αυτήν,την περιοχή έναρξης της ρωγμής η οποία έχει σημειωθεί με κόκκινο κύκλο,μία περιοχή όπου η επιφάνεια της θραύσης είναι πιο ομαλή και ομοιόμορφη και όχι ψαθυρή (περιοχή διάδοσης της ρωγμής) και επισημαίνεται με κίτρινη γραμμή και μία περιοχή στο κέντρο όπου η επιφάνεια θραύσης είναι τραχιά(ψαθυρή) και έχει σημειωθεί με πράσινο κύκλο. Αυτές οι τρεις περιοχές είναι χαρακτηριστικές της αστοχίας λόγω κόπωσης.

Η μη ψαθυρή περιοχή είναι εκείνη όπου η ρωγμή εξελίσσεται αργά λόγω κόπωσης ενώ η ψαθυρή περιοχή είναι αυτή όπου η διατομή είναι πλέον τόσο μικρή που δεν αντέχει το υλικό και αποκολλάται ακαριαία.



**Εικόνα 38: Οπτική ανάλυση επιφάνειας θραύσης ατράκτου - έναρξη ρωγμής - ψαθυρή και μη ψαθυρή περιοχή**

Για την καλύτερη αποτύπωση της επιφάνειας θραύσης χρησιμοποιήθηκε στερεοσκόπιο. Το στερεοσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε είναι το LW Scientific Z2 του εργαστηρίου τριβολογίας του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ.. Το συγκεκριμένο στερεοσκόπιο έχει την δυνατότητα μεγέθυνσης εύρους  $\times 0,7$ - $\times 4,5$ .

Για την ορθή αποτύπωση της επιφάνειας θραύσης τραβήχτηκαν πολλές φωτογραφίες σε μεγέθυνση  $\times 1,6$  που στην συνέχεια ενώθηκαν με την χρήση του προγράμματος Photoshop (Εικόνα 39).

Η αποτύπωση της επιφάνειας θραύσης με το στερεοσκόπιο (εικ. 39) έδωσε την ανεστραμμένη εικόνα αυτής λόγω της αντίστροφης ανάκλασης της στην κάμερα.



**Εικόνα 39: Επεξεργασία με photoshop των φωτογραφιών της επιφάνειας θραύσης**

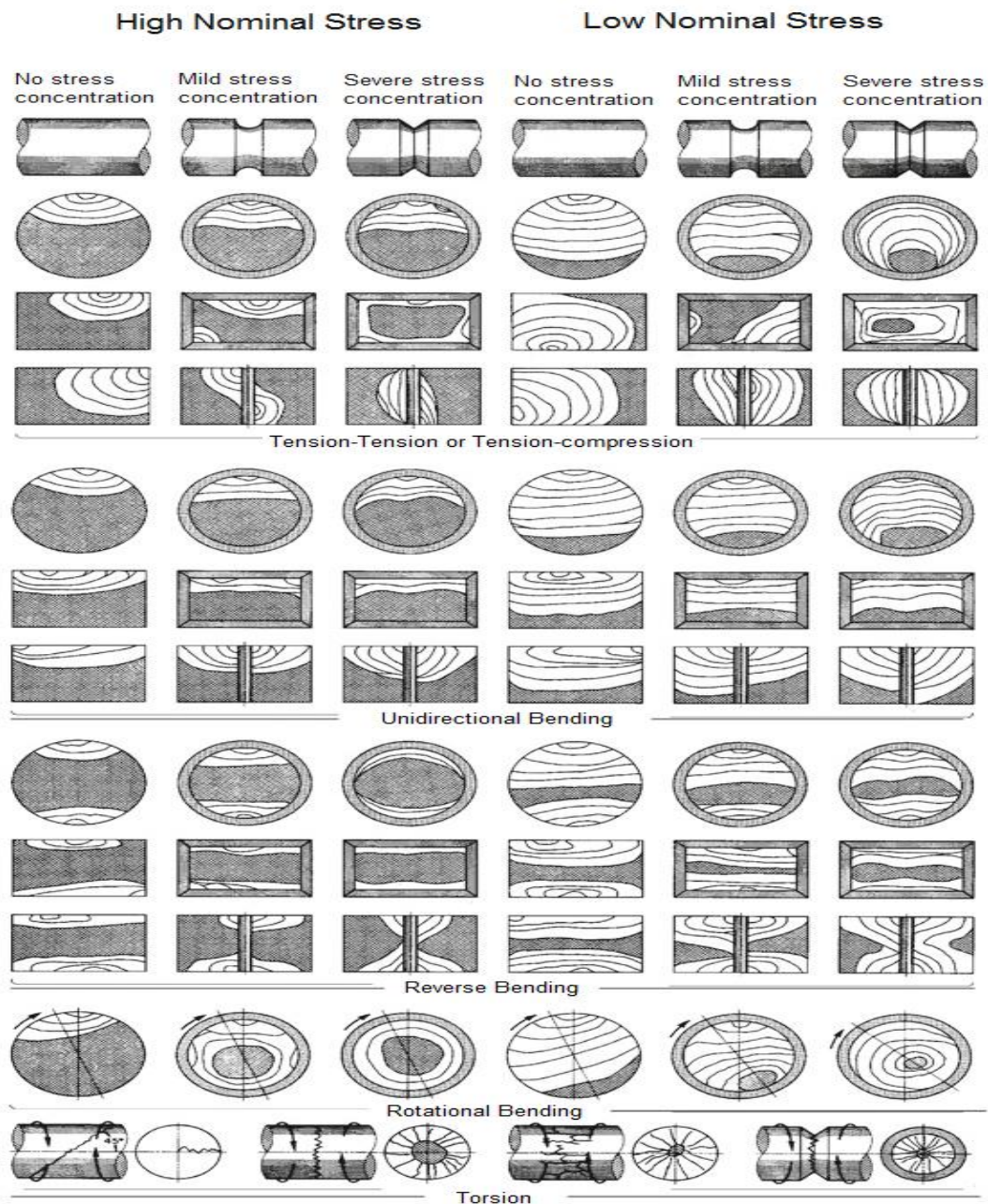
Στην εικόνα 39 φαίνονται ακόμα πιο καθαρά οι 3 περιοχές που προαναφερθήκαμε. Από την αποτύπωση της επιφάνειας θραύσης με το στερεοσκόπιο βγαίνουν επιπλέον συμπεράσματα. Παρατηρούνται αυλακώσεις αλλά και εξέχον υλικό που υποδεικνύει ότι υπάρχει αποκόλληση και προσκόλληση υλικού από την τριβή των δύο επιφανειών που αποσχίστηκαν. Αυτές οι αυλακώσεις έχουν αλλοιώσει την επιφάνεια και εν προκειμένου πιθανές ενδείξεις προσανατολισμού των τάσεων.

Το μικρό μέγεθος της περιοχής της ακαριαίας θραύσης υποδηλώνει ότι το φορτίο ήταν μικρό την στιγμή της θραύσης (42). Επιπρόσθετα, η θέση και το σχήμα της περιοχής ακαριαίας θραύσης μπορούν να μας δώσουν ενδείξεις των δυνάμεων που οδήγησαν στην θραύση της ατράκτου.

Η θέση της περιοχής ακαριαίας θραύσης στο κέντρο της επιφάνειας θραύσης, περικυκλωμένη από την μη ψαθυρή περιοχή διάδοσης της ρωγμής υποδηλώνει η αστοχία προήλθε από περιστροφική κάμψη.



Το οβάλ σχήμα της περιοχής ακαριαίας θραύσης μας δείχνει ότι πιθανόν η άτρακτος καταπονήθηκε και σε επίπεδη κάμψη. Στην εικόνα 40 φαίνονται τυπικές επιφάνειες θραύσης από δοκίμια για διάφορες καταπονήσεις.



**Εικόνα 40: Τυπικές επιφάνειες θραύσης για δείγματα εργαστηριακής δοκιμής που υποβάλλονται σε μια σειρά από διαφορετικές συνθήκες φόρτισης**

### **5.3 Μικροσκοπική ανάλυση: 3<sup>ο</sup> Στάδιο Μεθοδολογίας Ανάλυσης Αστοχίας - Μη καταστρεπτικές μέθοδοι**

Με την οπτική ανάλυση της επιφάνειας θραύσης, τόσο με γυμνό μάτι όσο και με το στερεοσκόπειο, οδηγηθήκαμε στο συμπέρασμα ότι ο πιθανότερος μηχανισμός αστοχίας της ατράκτου είναι η κόπωση. Ως εκ τούτου, θεωρήσαμε ότι δεν χρειάζεται να προβούμε σε άλλες μη καταστρεπτικές μεθόδους ή μηχανικές δοκιμές και το επόμενο βήμα στην ανάλυση αστοχίας να είναι η ανάλυση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι δυνατή η παρατήρηση της επιφάνειας θραύσης σε μεγάλη μεγέθυνση για τον εντοπισμό στοιχείων που θα οδηγήσουν στην εξακρίβωση του μηχανισμού αστοχίας.

#### **5.3.1 Περιγραφή διαδικασίας**

Η άτρακτος στάλθηκε στα εργαστήρια εξωτερικής εταιρείας λόγω έλλειψης ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης στα εργαστήρια του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά.

Αρχικά, σημαδεύτηκαν με μαρκαδόρο οι περιοχές που ξεχωρίζουν στην επιφάνεια θραύσης και μας ενδιαφέρουν προς εξέταση (Εικ. 41).



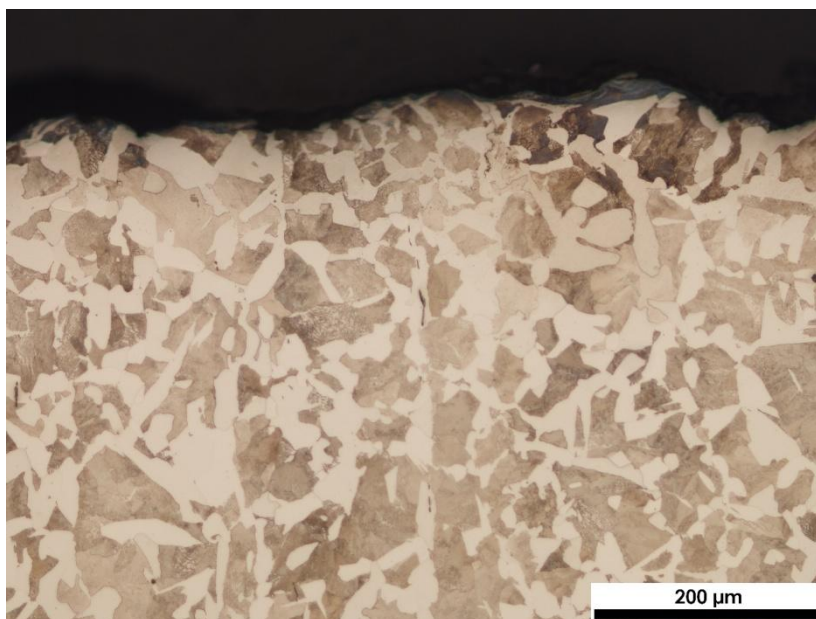
**Εικόνα 41: Επιφάνεια θραύσης - μικροσκοπική ανάλυση**

Για να γίνει η ανάλυση με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, η άτρακτος κόπηκε προσεχτικά σε κομμάτια με το κομμάτι που περιλαμβάνει την επιφάνεια θραύσης να επιλέγεται προς εξέταση.

Το εξεταζόμενο κομμάτι προετοιμάστηκε με στίλβωση και χημική προσβολή με NiTal 2% για να ακολουθήσει η ανάλυση με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Πάρθηκαν απεικονίσεις σε διάφορες μεγεθύνσεις για τον προσδιορισμό της μικροδομής, του μηχανισμού αστοχίας και την έναρξη και διάδοση της ρωγμής.

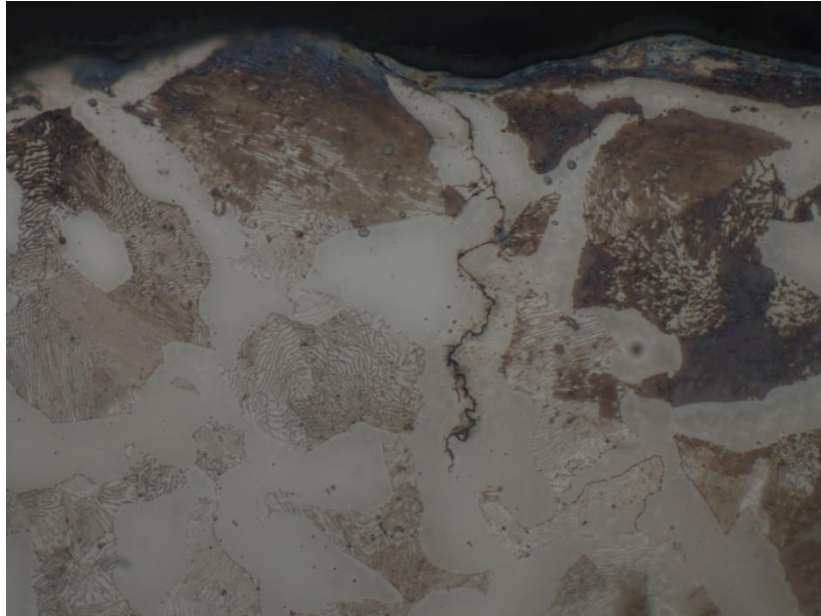
### **5.3.2 Αποτελέσματα**

Για την απεικόνιση της μικροδομής, χρησιμοποιήθηκε μεγέθυνση 20X στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Η μικροδομή του εξεταζόμενου κομματιού αποτελείται από φερρίτη και περλίτη και είναι η τυπική μικροδομή ανθρακούχου χάλυβα (εικ. 42).



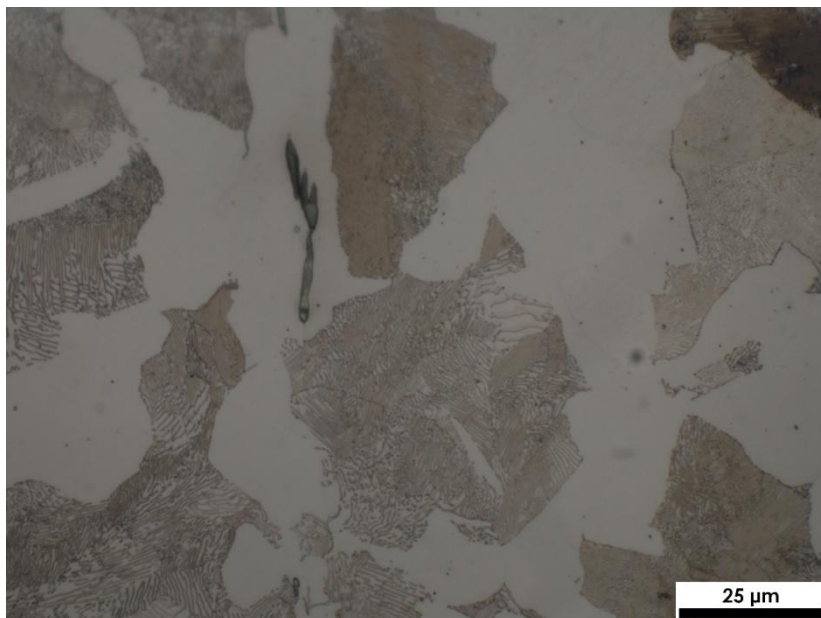
**Εικόνα 42: Απεικόνιση μικροδομής**

Η απεικόνιση της αρχικής ρωγμής που οδήγησε την άτρακτο σε θραύση έγινε σε μεγέθυνση 100X (εικ 43). Η ρωγμή αναπτύσσεται κάθετα και περιμετρικά των κόκκων.



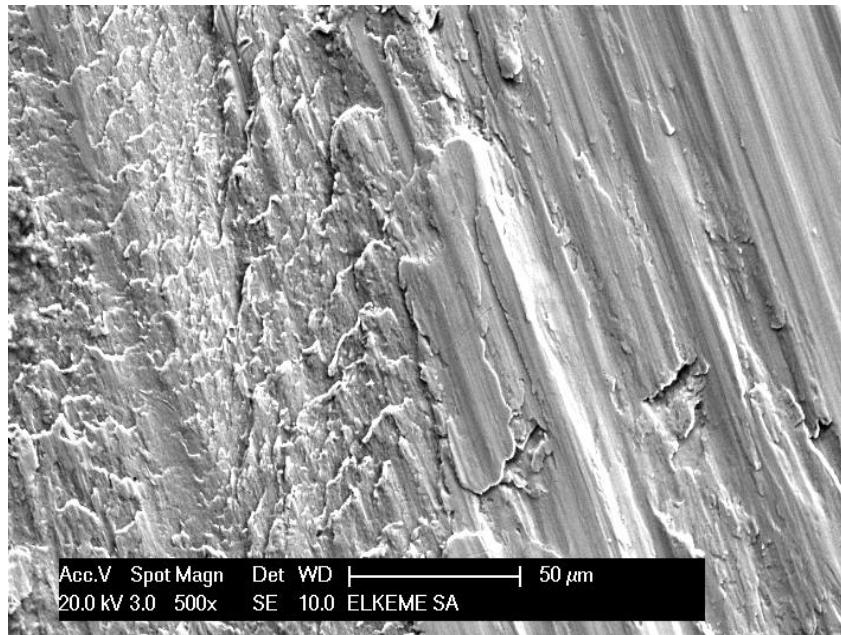
**Εικόνα 43: Απεικόνιση ρωγμής - μεγέθυνση**

Στην ίδια μεγέθυνση παρατηρούνται καλύτερα και κάποια εγκλείσματα στην μικροδομή της επιφάνειας θραύσης

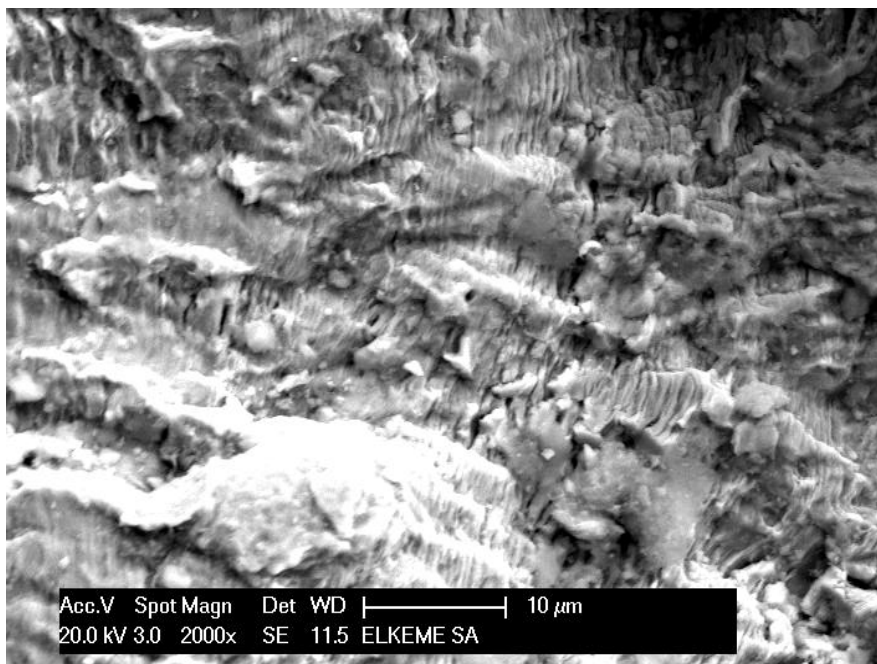


**Εικόνα 44: Απεικόνιση ρωγμής - μεγέθυνση**

Αφού εξετάστηκε η μικροδομή και η αρχική ρωγμή στην επιφάνεια θραύσης, χρησιμοποιήθηκαν μεγαλύτερες μεγεθύνσεις για τον προσδιορισμό του μηχανισμού αστοχίας. Στην εικόνα 45 φαίνεται η αποκόλληση και προσκόλληση υλικού λόγω τριβής.

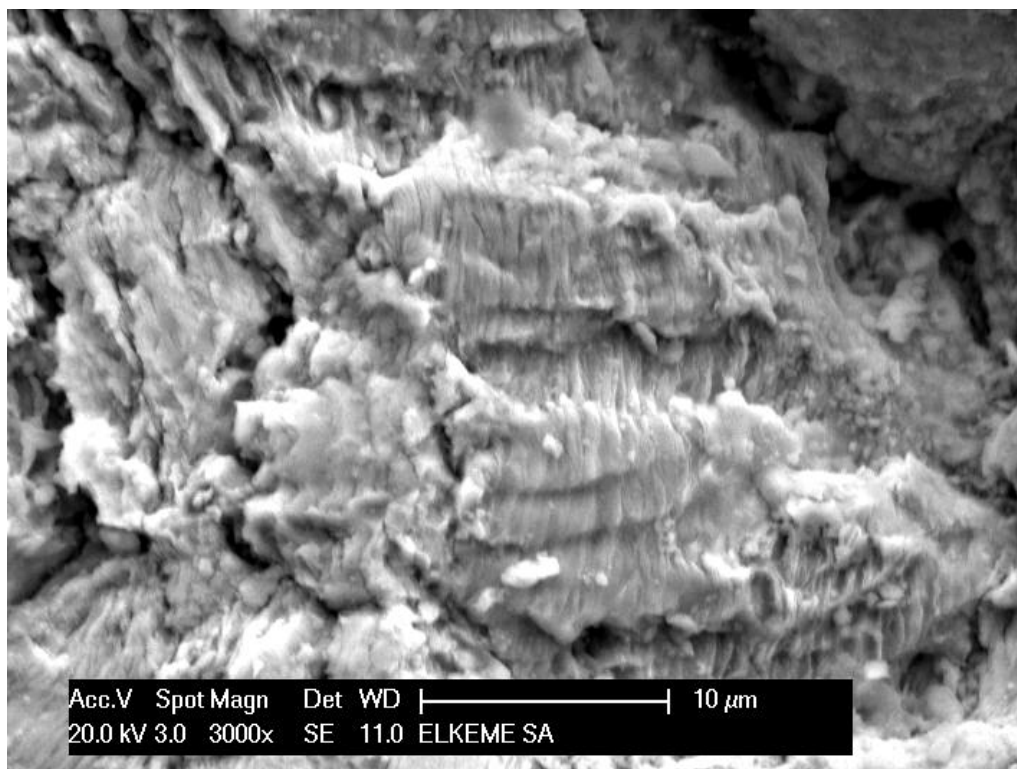


**Εικόνα 45: Αποκόλληση και προσκόλληση υλικού λόγω τριβής**



**Εικόνα 46: Ραβδώσεις υλικού - Αστοχία λόγω κόπωσης**

Στις εικόνες 46 και 47 φαίνονται οι ραβδώσεις που είναι το κύριο χαρακτηριστικό της αστοχίας λόγω κόπωσης.



**Εικόνα 47: Ραβδώσεις υλικού - Αστοχία λόγω κόπωσης**

#### **5.4 Ανάλυση τάσεων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method-FEM): 3<sup>ο</sup> Στάδιο Μεθοδολογίας Ανάλυσης Αστοχίας**

Για την εξακρίβωση των δυνάμεων και τάσεων που ενεργούσαν κατά την διάρκεια λειτουργίας της ατράκτου και οδήγησαν στην αστοχία, επόμενο βήμα στην ανάλυση αστοχίας είναι η ανάλυση τάσεων με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων γίνεται προσομοίωση της ατράκτου στον υπολογιστή και είναι δυνατή η απεικόνιση της συμπεριφοράς της σε διάφορες καταπονήσεις. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων αναλύεται περισσότερο στο θεωρητικό μέρος της ανάλυσης αστοχίας.

Η εξωτερική άτρακτος ενός ηλεκτροκινητήρα μετάφери την ροπή στρέψης του ηλεκτροκινητήρα στον ατέρμονα κοχλία ο οποίος με την σειρά του κινεί την τροχαλία

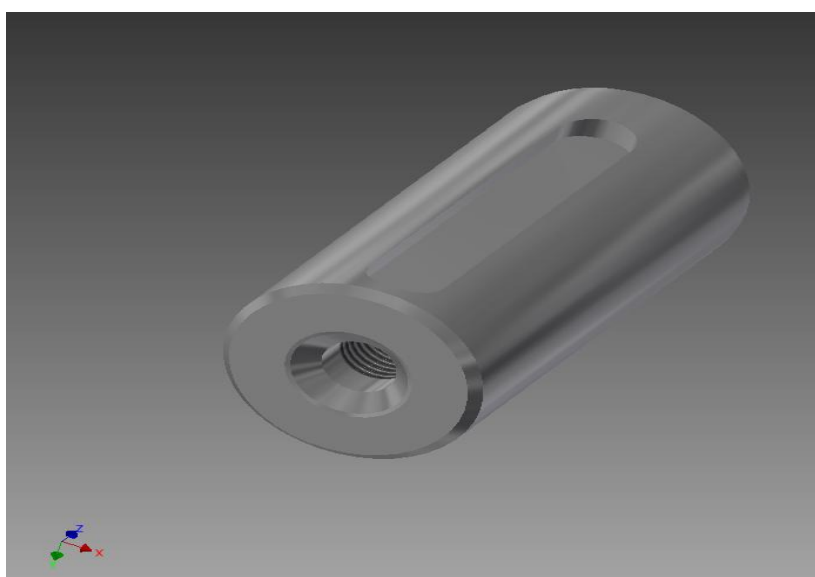
τριβής. Έτσι, οι μόνες δυνάμεις που καταπονούν την εξωτερική άτρακτο είναι η ροπή στρέψης του ηλεκτροκινητήρα και το βάρος του ελαστικού συνδέσμου που θεωρείται αμελητέο. Ο ηλεκτρικός κινητήρας, που αποδίδει 15 HP (Ίππους) σε συχνότητα 50 HZ, περιστρέφεται με 968 στροφές (RPM) και μεταφέρει ροπή 108 Nm.

Η ανάλυση της επιφάνειας θραύσης έδειξε ότι ο μηχανισμός αστοχίας είναι κόπωση από περιστροφική κάμψη. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θα δείξει ποσοτικά που καταπονείται η άτρακτος από την ροπή κάμψης λόγω κακής ευθυγράμμισης.

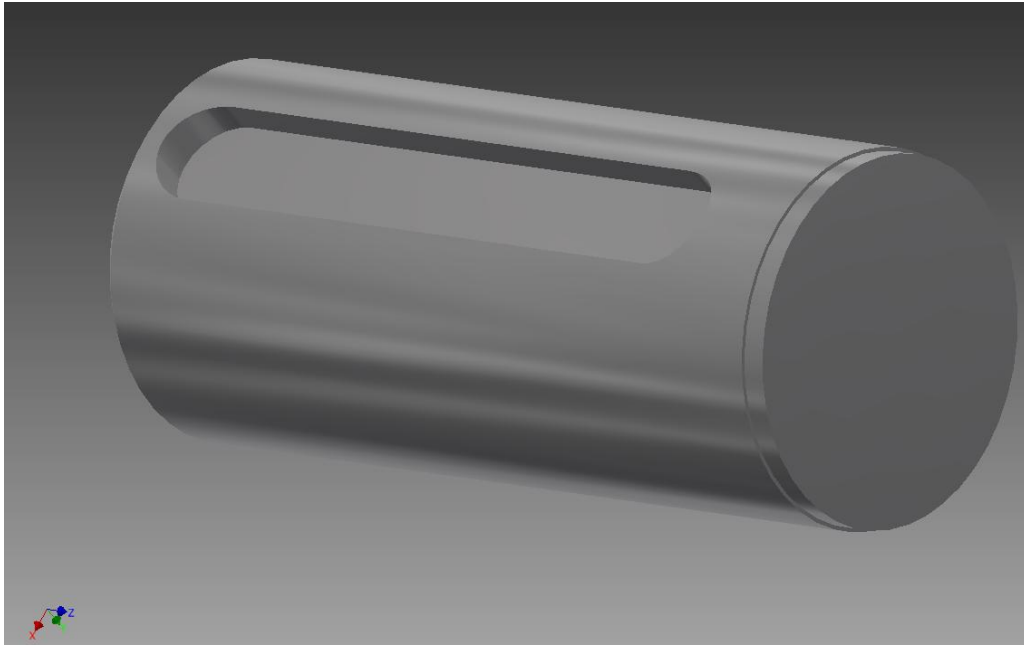
#### **5.4.1 Περιγραφή διαδικασίας**

##### **5.4.1.1 Σχεδίαση τρισδιάστατου μοντέλου σε περιβάλλον CAD**

Το πρώτο βήμα στην μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων είναι η δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου σε περιβάλλον CAD. Για την δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου της ατράκτου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Inventor Professional της Autodesk. Ένα ακριβές γεωμετρικό μοντέλο του εξεταζόμενου μέρους της ατράκτου που προήλθε από την θραύση δημιουργήθηκε (εικ. 48).

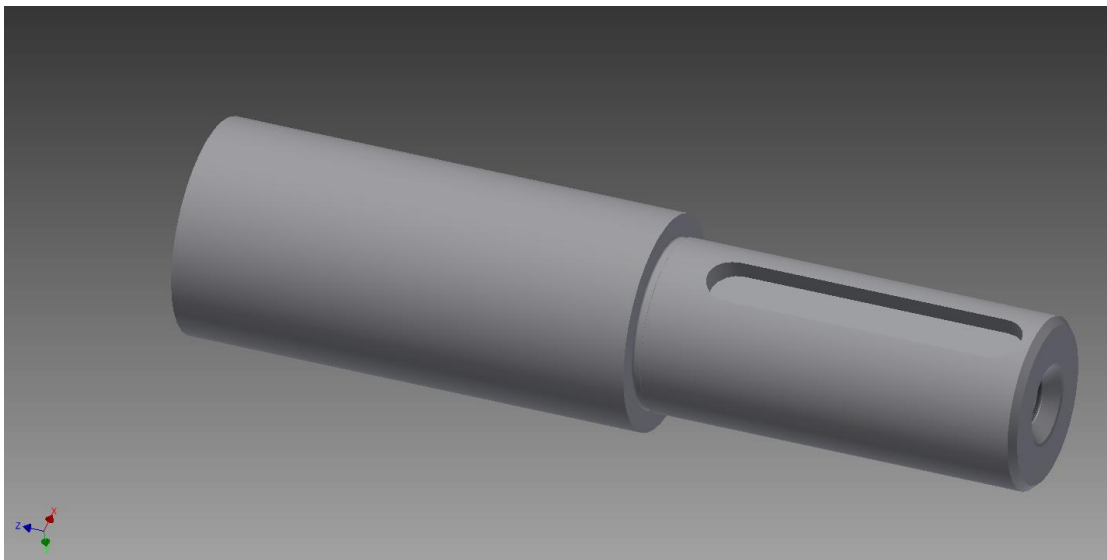


**Εικόνα 48: Τρισδιάστατο μοντέλο σε περιβάλλον CAD**



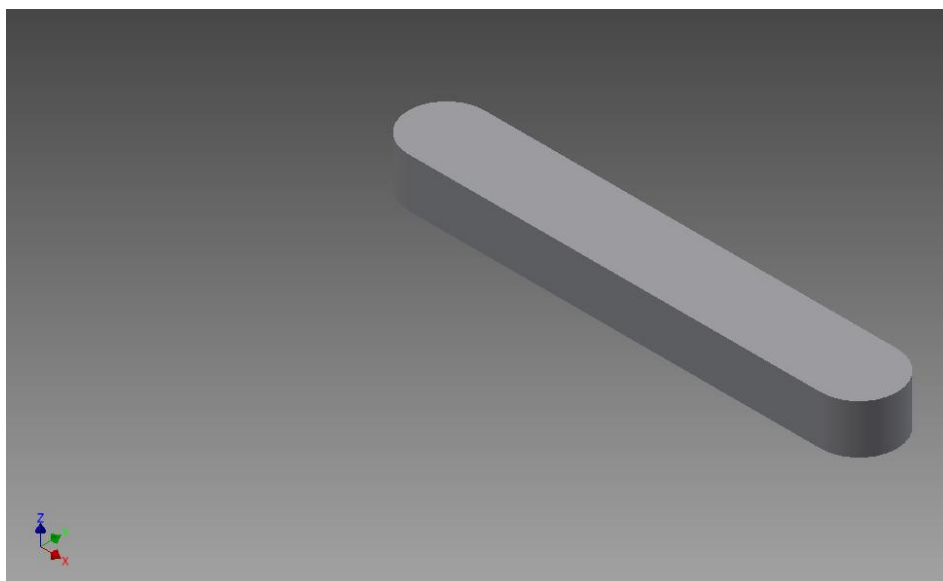
**Εικόνα 49:Τρισδιάστατο μοντέλο σε περιβάλλον CAD**

Η υπόλοιπη άτρακτος δεν σχεδιάστηκε παρά μόνον το κομμάτι που εδράζεται στο έδρανο με ακρίβεια μόνο στην εξωτερική διάμετρο (εικ 49)



**Εικόνα 50:Τρισδιάστατο μοντέλο σε περιβάλλον CAD**





**Εικόνα 51: Τρισδιάστατο μοντέλο σε περιβάλλον CAD**

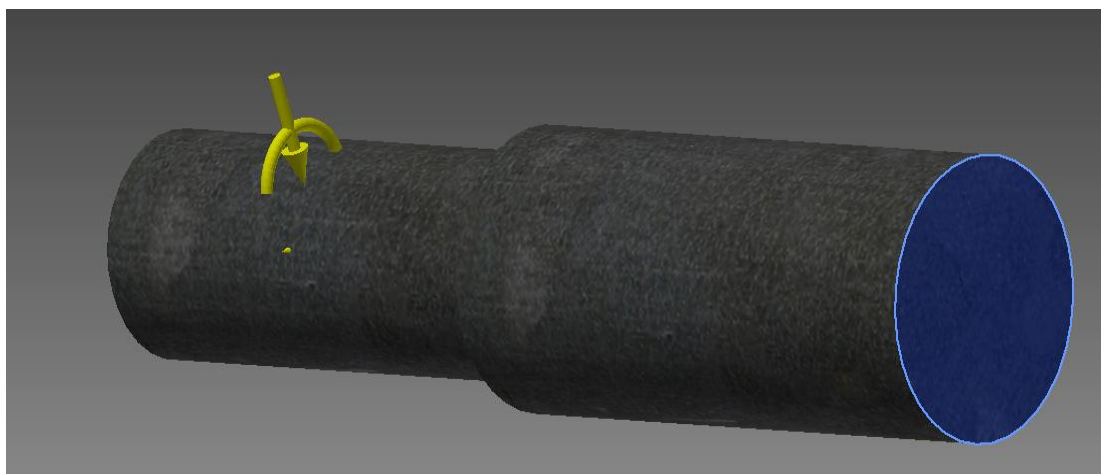
Το τρισδιάστατο μοντέλο της ατράκτου συνδέθηκε με την σφήνα. Τελευταίο βήμα στην σχεδίαση του μοντέλου είναι η εισαγωγή των φυσικών ιδιοτήτων της ατράκτου με την επιλογή υλικού κατασκευής. Το υλικό που επιλέχθηκε είναι το 1015 steel κατά AISI και το ολοκληρωμένο τρισδιάστατο μοντέλο φαίνεται στην εικόνα 52.



**Εικόνα 52: Απεικόνιση ολοκληρωμένου τρισδιάστατου μοντέλου**

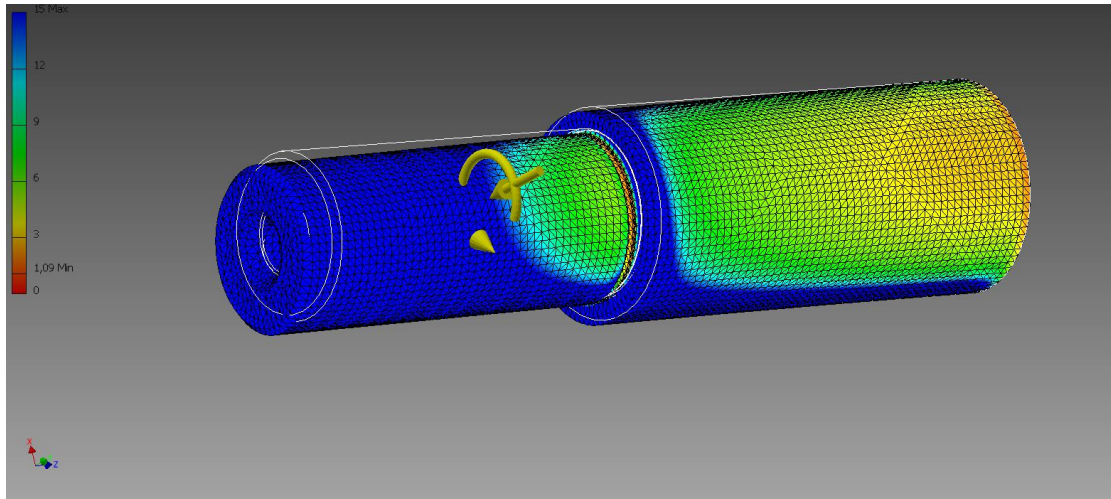
#### **5.4.1.2. Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων σημείων και καθορισμός οριακών συνθηκών φόρτισης.**

Στο τρισδιάστατο μοντέλο της ατράκτου που δημιουργήθηκε διενεργήθηκε στατική ανάλυση. Στο πίσω μέρος της ατράκτου χρησιμοποιήθηκε πάκτωση για να καθοριστούν οι οριακές συνθήκες και οι βαθμοί ελευθερίας (μπλέ επιφάνεια, εικόνα 53), ενώ στο μπροστινό μέρος ασκείται ροπή στρέψης μεγέθους 108 Nm και καμπτική δύναμη 15 KN. Το μέγεθος της καμπτικής δύναμης επιλέχθηκε τυχαία διότι ο σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι να μας δείξει σε πιο σημείο υπάρχει η μέγιστη καταπόνηση με τον συνδυασμό αυτών των δυνάμεων (εικ 53).



**Εικόνα 53: Πάκτωση στο κομμάτι της ατράκτου που υπάρχει το έδρανο - τρισδιάστατη απεικόνιση**

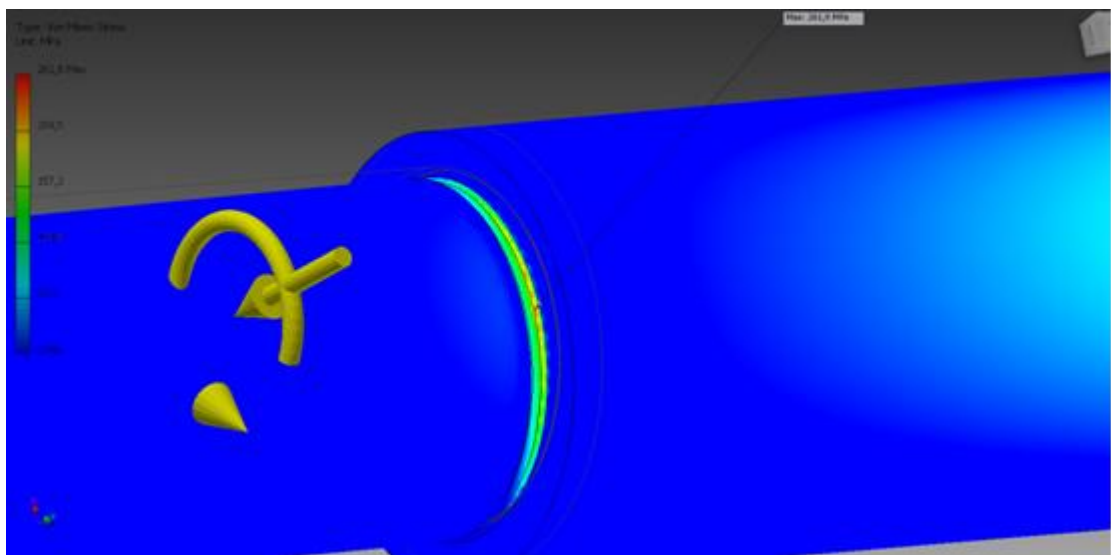
Δημιουργήθηκε αναλυτικό πλέγμα για ακριβή αποτελέσματα. Το πλέγμα αποτελείται από 609.418 κόμβους και 427.847 στοιχεία (εικόνα 54). Ο παράγοντας ταξινόμησης ορίστηκε στην ελάχιστη δυνατή τιμή για πιο ομοιόμορφο πλέγμα καθώς και συμπίκνωση πλέγματος στις κρίσιμες περιοχές αλλαγής διαμέτρου.



**Εικόνα 54: Τρισδιάστατη απεικόνιση άτρακτου - Αναλυτικό πλέγμα (609.418 κόμβοι και 427.847 στοιχεία) για ακριβή αποτελέσματα**

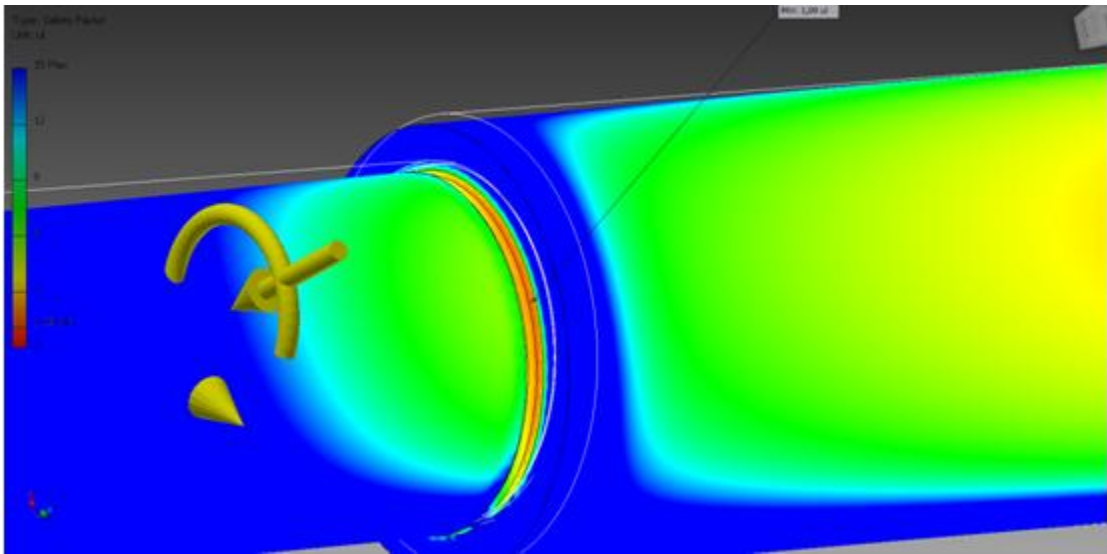
#### **5.4.1.3. Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης**

Τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης δείχνουν ότι το σημείο που δέχεται την μεγαλύτερη καταπόνηση βρίσκεται στην περιφέρεια όπου επήλθε και η πραγματική θραύση (εικόνα 55).



**Εικόνα 55: Τρισδιάστατη απεικόνιση άτρακτου - Σημείο μεγαλύτερης καταπόνησης - Περιφέρεια πραγματικής θραύσης**

Εφόσον πρόκειται για περιστροφική κάμψη, το σημείο όπου θα εμφανιστεί η αρχική ρωγμή μπορεί να είναι οποιοδήποτε σημείο της περιφέρειας. Με την καμπτική δύναμη 15 KN που εφαρμόστηκε, ο συντελεστής ασφαλείας στο συγκεκριμένο σημείο είναι 1,09 ul (εικόνα 56). Επειδή όμως στην πραγματικότητα πρόκειται για δυναμική καταπόνηση και ο μηχανισμός αστοχίας είναι η κόπωση, το μέγεθος της καμπτικής δύναμης που οδήγησε στην θραύση θα ήταν σαφώς μικρότερος.



**Εικόνα 56: Τρισδιάστατη απεικόνιση άτρακτου - Συντελεστής ασφαλείας στο σημείο καμπτικής δύναμης**

## 5.5 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων: 4<sup>ο</sup> Στάδιο Μεθοδολογίας Ανάλυσης Αστοχίας

Όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, το τελευταίο στάδιο της μεθοδολογίας ανάλυσης αστοχίας υλικού περιλαμβάνει την συγκέντρωση των στοιχείων για την διεξαγωγή συμπερασμάτων και την αξιολόγησή τους. Αναλύοντας τις αιτίες αστοχίας υλικού αλλά και τον τρόπο αστοχίας μπορεί να επιτευχθεί η παραγωγή ποιοτικότερων υλικών καθώς και η βελτιστοποίηση της αντοχής και κατ' επέκταση της συμπεριφοράς τους όταν υφίστανται καταπονήσεις.

Από την οπτική επιθεώρηση της επιφάνειας θραύσης οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι ο μηχανισμός αστοχίας είναι κόπωση από περιστροφική κάμψη. Η αστοχία επήλθε στην αλλαγή διαμέτρου στην αρχή του εξωτερικού άξονα του ηλεκτροκινητήρα, σημείο όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση τάσεων.

Στις απεικονίσεις με το μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης εμφανίζονται ραβδώσεις στην επιφάνεια θραύσης, το βασικό χαρακτηριστικό της αστοχίας λόγω κόπωσης. Έτσι, επιβεβαιώνεται η αρχική εκτίμηση για αστοχία λόγω κόπωσης. Η μικροδομή του υλικού δεν έδειξε κάποια ανωμαλία και είναι η χαρακτηριστική μικροδομή ανθρακούχου χάλυβα αποτελούμενη από φερρίτη και περλίτη.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μας έδειξε ότι η εφαρμόζοντας μία καμπτική ροπή στην άτρακτο, η μέγιστη τάση εμφανίζεται στο σημείο όπου επήλθε η θραύση. Εφόσον στην άτρακτο δεν υπάρχει κάποιο στοιχείο που να προσδίδει καμπτική ροπή, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η πιθανότερη αιτία που αστόχησε η άτρακτος είναι λόγω κακής ευθυγράμμισης.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασία ήταν η εύρεση των αποτελεσμάτων της αστοχίας ατράκτου ηλεκτρικού κινητήρα που χρησιμοποιούνταν για την μετάδοση ισχύος σε ηλεκτρικό ανελκυστήρα. Για την παραγωγή των αποτελεσμάτων-συμπερασμάτων της αστοχίας της ατράκτου, έγινε αρχικά βιβλιογραφική ανασκόπηση της ανάλυσης και μεθοδολογίας ανάλυσης αστοχίας υλικών. Στόχοι της ανάλυσης αστοχίας υλικών είναι ο καθορισμός της καταπόνησης, ο τρόπος αστοχίας και τέλος οι αιτίες αστοχίας υλικού. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των τριών αυτών στόχων μπορεί να συμβάλλει τόσο στον σχεδιασμό όσο και στην παραγωγή ανθεκτικότερων υλικών.

Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση προέκυψε ότι η ανάλυση αστοχίας των υλικών αποτελεί ένα σημαντικό κλάδο για την παραγωγή και κατασκευή ανθεκτικών υλικών και κατασκευών, καθώς μέσω της ανάλυσης του τρόπου αστοχίας, των αιτιών αστοχίας και των καταπονήσεων που υφίσταται ένα υλικό που έχει αστοχήσει, μπορούν να προταθούν διορθωτικές ενέργειες, με αποτέλεσμα την κατασκευή πιο ανθεκτικών υλικών.

Τα δομικά στοιχεία κατασκευών και τα στοιχεία μηχανών μπορεί να αποτύχουν στην εκτέλεση των λειτουργιών για τις οποίες χρησιμοποιούνται, με τρεις κυρίως τρόπους και συγκεκριμένα λόγω υπερβολικής ελαστικής παραμόρφωσης, λόγω πλαστικής ροής ή υπερβολικής πλαστικής παραμόρφωσης ή λόγω θραύσης. Η αξιολόγηση και ανάλυση αστοχίας υλικού στοχεύει στη διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας και στην αναγνώριση των αιτιών της αστοχίας, όπως λανθασμένος σχεδιασμός, κατασκευαστικά ελαττώματα, μη ορθές συνθήκες λειτουργίας, λανθασμένη χρήση υλικών κ.α.

Ως ανάλυση αστοχίας υλικού ορίζεται η διαδικασία της συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, ώστε να προσδιοριστεί κατά κύριο λόγο η αιτία της αστοχίας του υλικού και να αναπτυχθούν ενέργειες τέτοιες ώστε να μην επαναληφθεί μελλοντικά μία παρόμοια κατάσταση. Όπως προέκυψε από την βιβλιογραφία οι στόχοι της ανάλυσης της αστοχίας των υλικών είναι να καθοριστεί η καταπόνηση, να καθοριστεί ο τρόπος της αστοχίας και να καθοριστούν οι αιτίες που οδήγησαν στην αστοχία του υλικού. Συνθέτοντας και αναλύοντας τα αποτελέσματα αυτών των τριών στόχων, είναι

δυνατό να προσδιοριστούν διορθωτικές ενέργειες καθώς και να επιτευχθεί βελτιστοποίηση του υλικού.

Η ανάλυση της αστοχίας ενός υλικού διακρίνεται σε τέσσερα βασικά στάδια. Ο συνδυασμός αυτών των βημάτων αποτελεί την ολοκληρωμένη έρευνα και ανάλυση. Στο πρώτο στάδιο γίνεται συλλογή των πληροφοριών και συγκεκριμένα αφορά κατανόηση συνθηκών κάτω από τις οποίες το εξάρτημα, κατασκευή ή εγκατάση λειτουργούσε. Το δεύτερο στάδιο αφορά την οπτική εξέταση και την καταγραφή των φυσικών αποδεικτικών στοιχείων. Το τρίτο στάδιο περιλαμβάνει την επιλογή των περαιτέρω ενεργειών. Επόμενες ενέργειες μπορούν να θεωρηθούν οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι ελέγχου (Non-destructive testing (NDT)), η χημική ανάλυση (Chemical analysis), η μεταλλογραφική εξέταση (Metallographic examination), οι μηχανικές δοκιμές (Mechanical Testing) και η ανάλυση τάσεων (Stress Analysis). Το τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων καθώς και συστάσεις, οι οποίες αποτελούν στοιχεία - κλειδιά για την βελτιστοποίηση των μελλοντικών υλικών, που αυτός είναι και ο κύριος στόχος της μεθοδολογίας ανάλυσης αστοχίας υλικών.

Στο πειραματικό μέρος χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω. Η μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας εφαρμόστηκε σε άτρακτο ηλεκτροκινητήρα μετάδοσης ισχύος ηλεκτρικού ανελκυστήρα. Ακολουθώντας τα τέσσερα στάδια της μεθοδολογίας και συγκεκριμένα 1) την συλλογή πληροφοριών, 2) την οπτική εξέταση του δείγματος, 3) την μικροσκοπική ανάλυση της επιφάνειας θραύσης του δείγματος και την ανάλυση των αποτελεσμάτων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) προέκυψαν στο τελευταίο στάδιο, δηλαδή στο στάδιο της αξιολόγησης των συμπερασμάτων ο τρόπος αστοχίας, η αιτία αστοχίας και η καταπόνηση. Όπως προέκυψε και από την βιβλιογραφία, αυτοί είναι και οι βασικοί τρεις στόχοι της ανάλυσης αστοχίας των υλικών.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την αστοχία της ατράκτου, προέκυψε από την ανάλυση της επιφάνειας θραύσης ότι ο μηχανισμός αστοχίας είναι κόπωση από περιστροφική κάμψη. Η αστοχία επήλθε στην αλλαγή διαμέτρου στην αρχή του εξωτερικού άξονα του ηλεκτροκινητήρα, σημείο όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση τάσεων. Στις απεικονίσεις με το μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης εμφανίζονται ραβδώσεις στην επιφάνεια θραύσης, οι οποίες αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό της αστοχίας λόγω κόπωσης. Όσον αφορά την μικροδομή του υλικού, η οποία είναι η



χαρακτηριστική μικροδομή ανθρακούχου χάλυβα αποτελούμενη από φερρίτη και περλίτη, δεν υπήρξε ένδειξη κάποιας ανωμαλίας.

Τέλος, μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, προέκυψε ότι εφαρμόζοντας μία καμπτική ροπή στην άτρακτο, η μέγιστη τάση εμφανίζεται στο σημείο όπου επήλθε η θραύση. Εφόσον στην άτρακτο δεν υπάρχει κάποιο στοιχείο που να προσδίδει καμπτική ροπή, παράγεται το συμπέρασμα ότι η πιθανότερη αιτία που αστόχησε η άτρακτος είναι λόγω κακής ευθυγράμμισης.



## Βιβλιογραφία

1. Mohd Fauzi, Muhammad (2010). Comprehensive analysis of a light weight lift system
2. <https://en.wikipedia.org/wiki/Elevator>
3. Ανεγκυστήρες, Εργαστήριο Ηλεκτρικής κίνησης, ΑΤΕΙ Πειραιά
4. Walter T. Grondzik, Alison G. Kwok, Benjamin Stein, John S. Reynolds (2009). Mechanical and Electrical Equipment for Buildings, 11th Edition Building Systems for Interior Designers: Corky Binggeli, 2010
5. Corky Binggeli (2010). Building Systems for Interior Designers, 2nd Edition
6. [www.electrical-knowhow.com](http://www.electrical-knowhow.com)
7. <http://www.stafilidislifts.gr/embolo>
8. <http://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/elevator3.htm>
9. [https://el.wikipedia.org/wiki/Ηλεκτρικός\\_κινητήρας](https://el.wikipedia.org/wiki/Ηλεκτρικός_κινητήρας)
10. [www.platformliftco.co.uk](http://www.platformliftco.co.uk)
11. <https://www.scribd.com/document/187023250/Presentation-Elevator-101>
12. [galidis-elevators.gr](http://galidis-elevators.gr)
13. Νικόλαος Χονδράκης (2014). Στοιχεία μηχανών, βοηθητικές σημειώσεις
14. Παπαδόπουλος Χρήστος (2004). Διαλέξεις Στοιχείων Μηχανών ΙΙ, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.
15. <http://www.rmctet.com/lib/Resources/E-Books/Mech-auto>
16. IIT Kharagpur - NPTEL Online, Design of *Machine* Elements 1  
<http://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Machine%20design1/pdf/mod8les1.pdf>
17. Γρηγόρης Δανιήλ. «3. Αντοχή των υλικών - Θεωρία Ελαστικότητας - Είδη καταπονήσεων». Στοιχεία μηχανικής: Διδακτικές σημειώσεις. ΤΕΙ Λαμίας,
18. [https://el.wikipedia.org/wiki/μηχανική\\_καταπόνηση](https://el.wikipedia.org/wiki/μηχανική_καταπόνηση)
19. Shafts.  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/albores\\_b\\_mi/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/albores_b_mi/capitulo4.pdf)
20. Sumit P.Raut. A Review of Various Techniques Used for Shaft Failure Analysis.

21. Austin H. Bonnett. Root Cause AC Motor Failure Analysis with a Focus on Shaft Failures, IEEE
22. Practices in failure analysis. ASM Handbook Volume 11, Failure Analysis and Prevention (ASM International)
23. Austin h. Bonnett, “Cause, Analysis and Prevention of motor shaft failures”, IEEE. 1998
24. metallurgy of failure analysis a.k. das ,1997
25. ASM metals handbook 10th edition
26. Brett A. Miller. Overload failures, ,ASM Handbook Volume 11, Failure Analysis and Prevention (ASM International).
27. Neville Sachs. Practical Plant Failure Analysis: A Guide to Understanding Machinery Deterioration and Improving Equipment Reliability. 2007
28. [www.maintenancetechnology.com](http://www.maintenancetechnology.com)
29. Jeffrey W. Sowards. Interpretation and significance of reverse chevron-shaped markings on fracture surfaces of API X100 pipeline steels.
30. Donald J. Hulpi . Understanding How Components Fail, 3rd Edition,
31. Deepan Marudachalam M.G. Optimization of shaft design under fatigue loading using Goodman method. 2011.
32. Ali Fatemi - University of Toledo. Chapter 3–Micro/Macro Aspects  
[https://www.efatigue.com/training/Chapter\\_3.pdf](https://www.efatigue.com/training/Chapter_3.pdf)
33. MSE 2090: Introduction to Materials Science Chapter 8, Failure  
<http://people.virginia.edu/~lz2n/mse209/Chapter8.pdf>
34. Αστοχία υλικών και κριτήρια επιλογής τους για βιομηχανικές εφαρμογές. Δρ. Πανδώρα Ψυλλάκη
35. [https://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue\\_\(material\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(material))
36. Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών.  
[http://www.mie.uth.gr/ekp\\_yliko/mhx\\_symp\\_ylik\\_I.pdf](http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/mhx_symp_ylik_I.pdf)
37. Thomas Davidson. An Introduction to Failure Analysis for Metallurgical Engineers.  
<http://www.tms.org/Students/Winners/Davidson/Davidson.html>
38. General Procedure of Failure Analysis.  
<http://nptel.ac.in/courses/112107090/module8/lecture8/lecture8.pdf>
39. Jose Luis Otegui. Failure Analysis. Fundamentals and Applications in Mechanical Components. Springer Book.

<http://allaboutmetallurgy.com/wp/wp-content/uploads/2016/03/Failure-Analysis-by-Jose.pdf>

40. Harry Chandler,. ardness Testing, 2nd Edition, 06671G,ASM International. 1999
41. Κ. Μεντρέα. Ανάλυση αστοχίας εργαλείων.
42. Pietro Paolo milella (2012) morphological aspects of fatigue crack formation and growth.fatigue and corrosion in metals.pp73-108