

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

# **ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΧΟΙΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ  
Α.Μ 7220**

**Επιβλέπων Καθηγητής: ΜΠΑΤΣΟΥΛΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**Πάτρα 2020**

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το παρόν τεύχος αποτελεί τη Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και αναφέρεται στην μελέτη της μηχανικής των σιδηροδρομικών συστημάτων. Η μελέτη αυτή, γίνεται με την αξιοποίηση επιστημονικών δεδομένων και την ανάλυση αυτών.

Γίνεται σύντομη περιγραφή του σιδηρόδρομου, δίνοντας τον ορισμό και το τρόπο λειτουργίας του. Αναλύεται το τροχαίο υλικό του συρμού και τα μέρη τα οποία το αποτελούν. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας του σιδηροδρομικού συστήματος. Έπειτα γίνεται μελέτη της μηχανικής των σιδηροδρομικών συστημάτων. Αναφέρονται και υπολογίζονται οι δυνάμεις και οι τάσεις που ασκούνται στο σύστημα. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας στη κόπωση για το συγκεκριμένο σύστημα. Ακολούθως, παρουσιάζονται οι φθορές και τα είδη αυτών που δημιουργούνται στα κύρια μέρη του σιδηροδρομικού υλικού. Στη συνέχεια αναλύεται το σημαντικότερο πρόβλημα των συρμών που είναι ο εκτροχιασμός τους. Τέλος αναφέρονται οι τρόποι συντήρησης του τροχαίου υλικού και της σιδηροτροχιάς.

Συγκεκριμένα, το θέμα αναπτύσσεται σε πέντε Κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται η περιγραφή και η λειτουργία του σιδηροδρόμου. Επιπλέον αναφέρεται η προϊστορία και η εξέλιξή του.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο αναλύεται το τροχαίο υλικό του συρμού και περιγράφονται με λεπτομέρεια τα βασικά μέρη που το αποτελούν. Στη συνέχεια περιγράφεται η σιδηροδρομική γραμμή και αναλύονται τα βασικά στοιχεία της σιδηροδρομικής επιδομής. Έπειτα αναλύονται τα βασικά στοιχεία και ο ρόλος της σιδηροτροχιάς. Τέλος δίνεται ο ορισμός και η λειτουργία του σιδηροδρομικού συστήματος σε ευθεία και καμπύλη διαδρομή.

Στο τρίτο Κεφάλαιο μελετάται η μηχανική των σιδηροδρομικών συστημάτων. Αναφέρονται οι δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την επαφή και τη λειτουργία του συστήματος. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη αναφορά στο φαινόμενο κόπωσης, η οποία αποτελεί και την κύρια αιτία αστοχίας των υλικών του συστήματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η εφαρμογή της μηχανικής σε σιδηροδρομικό σύστημα. Υπολογίζονται οι δυνάμεις και οι τάσεις επαφής των δύο σωμάτων με στόχο τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας μέσω της σχέσης του Soderberg.

Το πέμπτο Κεφάλαιο αναφέρεται στη φθορά που δημιουργείται στα βασικά μέρη του τροχαίου υλικού και της σιδηροτροχιάς. Στη συνέχεια περιγράφεται το φαινόμενο του εκτροχιασμού του συρμού που αποτελεί το σημαντικότερο πρόβλημα στη μεταφορά του. Τέλος, παρουσιάζεται η συντήρηση των τμημάτων του τροχαίου υλικού και της σιδηροτροχιάς. Περιγράφεται ο τρόπος και τα στάδια συντήρησης που έχουν στόχο την σωστή και ασφαλή λειτουργία του συρμού.

Η πτυχιακή εργασία έγινε στο εργαστήριο Μηχανικής Υλικών Μηχανών (ΜΥΜ) υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Νικολάου Μπατσούλα, τον οποίο ευχαριστώ πολύ για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της Εργασίας.

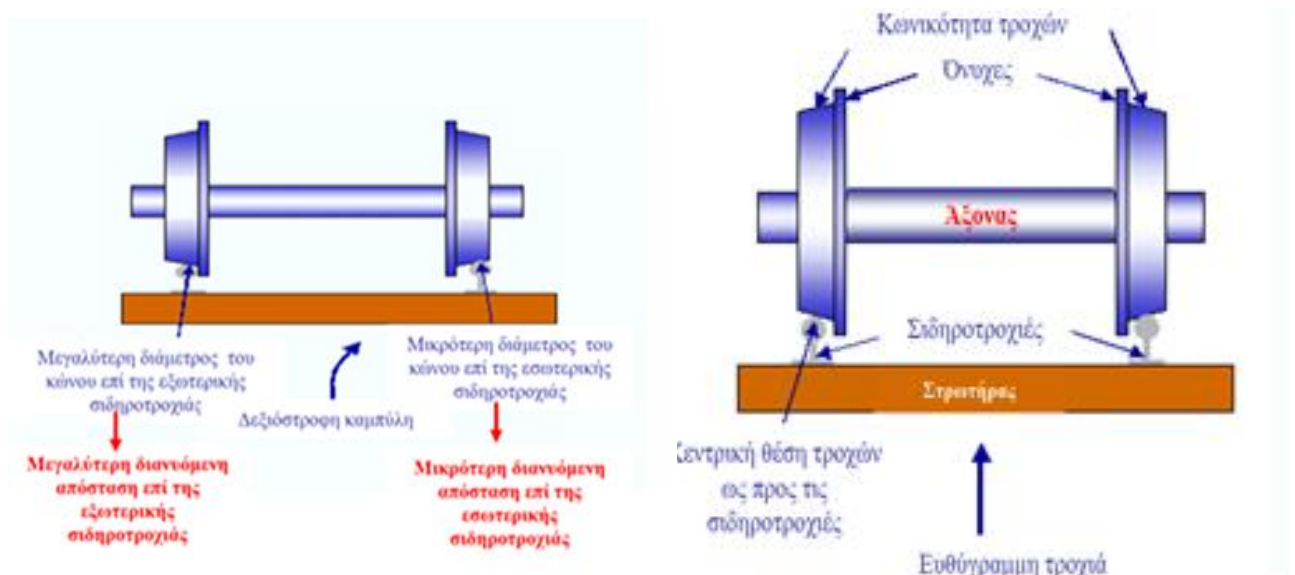
# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	i
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	iii
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 Πρώιμοι Σιδηρόδρομοι .....	2
1.2 Η Εποχή των Σιδηροδρόμων .....	2
2.ΤΡΟΧΑΙΟ ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	4
2.1 Κατηγορίες τροχαίου υλικού .....	4
2.2 Βασικά μέρη τροχαίου υλικού.....	8
2.3 Φορείο.....	9
2.4 Τροχί.....	21
2.5 Σιδηροτροχιές .....	23
2.6 Κίνηση σε ευθυγραμμία.....	32
2.7 Κίνηση σε καμπύλες.....	34
3.ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	36
3.1 Δυναμική ανάλυση πλαισίου .....	36
3.2 Δυναμική ανάλυση διεπαφής τροχού-σιδηροτροχιάς .....	38
3.3 Κόπωση .....	51
3.4 Τάσεις επαφών .....	63
4.ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	65
5.ΦΘΟΡΑ & ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ .....	75
5.1 Φθορά .....	75
5.2 Διεπαφή τροχού - σιδηροτροχιά.....	76
5.3 Εκτροχιασμός.....	82
5.4 Συντήρηση .....	85
6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	95
7.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	97

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σιδηρόδρομος καλείται το σύστημα μεταφοράς επιβατών και εμπορευμάτων με την βοήθεια τροχοφόρων οχημάτων ειδικά κατασκευασμένων για να κυλούν επί σιδηροτροχιών (Σχ.1.1). Κινείται ηλεκτρικά ή μηχανικά μέσω χαλύβδινων τροχών σε αποκλειστικά δικό του διάδρομο κυκλοφορίας. Αποτελεί χερσαίο μέσο μαζικής μεταφοράς το οποίο εξυπηρετεί μετακινήσεις όλων των αποστάσεων, σε οποιοδήποτε περιβάλλον (αστικό, προαστιακό, περιφερειακό, υπεραστικό). [1]

Η λειτουργία του σιδηρόδρομου βασίζεται στην αρχή ότι οι τροχοί, οποίοι κινούνται επί των σιδηροτροχιών έχουν πολύ μικρή τριβή κύλισης και απαιτούν μικρή κινητήρια δύναμη για να μετακινήσουν ένα βαρύ φορτίο. Το χαρακτηριστικό αυτό της ελεύθερης κύλισης παρέχει στους σιδηροδρόμους σχέση ισχύος περίπου ενός ίππου ανά μικτό ελκόμενο τόνο. Τα αντίστοιχα οδικά μέσα μεταφοράς φορτίων (φορηγά μετά ρυμουλκούμενου) απαιτούν ισχύ περίπου δέκα ίππων ανά μικτό ελκόμενο τόνο. Οι σιδηρόδρομοι παρέχουν επίσης, σε σχέση με τα αντίστοιχα οδικά μέσα, πλεονέκτημα όσον αφορά την οικονομία καυσίμων και την παραγωγικότητα της εργασίας.



Σχ. 1.1 Σιδηροδρομικό Σύστημα [1]

## 1.1 Πρώιμοι Σιδηρόδρομοι

Σιδηρόδρομοι κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά σε Ευρωπαϊκά ορυχεία τον 16ο αιώνα. Ένα εκ των πρώτων ήταν αυτό του Leberthal στην Αλσατία, περί το 1550. Οι σιδηρόδρομοι ορυχείων στη Βρετανία χρονολογούνται από το 1604.

Στην αρχή των σιδηροδρόμων, υιοθετήθηκαν οχήματα με τροχούς φέροντες όνυχες, οι οποίοι κρατούν τα οχήματα επί της γραμμής και τα καθιστούν αυτοκαθοδηγούμενα. Τα πρώτα σιδηροδρομικά οχήματα είχαν όνυχες είτε στο εσωτερικό είτε στο εξωτερικό τμήμα των τροχών. Στα σύγχρονα οχήματα οι όνυχες βρίσκονται στο εσωτερικό των τροχών.

Τα πρώτα σιδηροδρομικά οχήματα ορυχείων έλκονταν από ανθρώπους ή άλογα. Ύστερα το 1804 έκανε την εμφάνιση της στην Ουαλία η ατμομηχανή (stream locomotive) με την οποία κινήθηκε ο σύγχρονος σιδηρόδρομος. Οι πρώτες ατμάμαξες αντιμετώπισαν προβλήματα λόγω της αδυναμίας των σιδηροτροχιών και την αναξιοπιστία των μηχανικών μερών τους. Μέσω βελτιστοποίησης των υλικών και των σχεδιασμό των γραμμών καθώς και η εξέλιξη της τεχνολογίας που ενσωματώθηκαν από μηχανικούς όπως ο Στέφενσον κατέστησαν ταχέως τους σιδηροδρόμους απολύτως πρακτικούς.

Το Σεπτέμβριο του 1825, ο σιδηρόδρομος Στακτόν και Ντάρλινγκτον (Stockton and Darlington Railway), ήταν ο πρώτος που μετέφερε τόσο εμπορεύματα όσο και επιβάτες. Ακολούθησε ο σιδηρόδρομος του Λίβερπουλ και Μάντσεστερ (Liverpool and Manchester Railway) το 1830, ο οποίος, με την εισαγωγή της ατμομηχανής "Rocket", που κατασκευάστηκε από τον Stephenson και τον γιο του Robert, μπορεί να θεωρηθεί αφητηρία της εποχής των σιδηροδρόμων. Περί το 1841 στη Βρετανία υπήρχαν ήδη σε λειτουργία περισσότερα από 1.300 μίλια σιδηροδρομικής γραμμής.

## 1.2 Η Εποχή των Σιδηροδρόμων

Οι σιδηρόδρομοι αναπτύχθηκαν γρήγορα στη διάρκεια του 19ου αιώνα και κατέστησαν παγκοσμίως τη δύναμη της οικονομικής και κοινωνικής ζωής των εθνών. Επίσης επέβαλαν πολλούς τεχνολογικούς νεωτερισμούς.

Αρχικά όλες οι κινητήριες μονάδες χρησιμοποιούσαν για τη κίνηση τους ατμό. Όμως, περί το 1900 ηλεκτροκίνητες κινητήριες μονάδες χρησιμοποιήθηκαν σε ειδικές

υπηρεσίες. Περί τα μέσα του 20ου αιώνα οι δηζελο-ηλεκτρικές κινητήριες μονάδες (diesel-electric locomotives) είχαν αντικαταστήσει τις ατμοκίνητες στα περισσότερα σιδηροδρομικά δίκτυα. Μια ποικιλία σιδηροδρομικών οχημάτων κατασκευάστηκε για τη μεταφορά επιβατών και εμπορευμάτων.

Οι σιδηρόδρομοι ωρίμασαν στις αρχές του 20ού αιώνα, όπου οι σιδηροδρομικοί συρμοί μετέφεραν το μεγαλύτερο μέρος των φορτίων και των επιβατών στις βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες παγκοσμίως.

## 2. ΤΡΟΧΑΙΟ ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Με τον όρο σιδηροδρομικό τροχαίο υλικό νοούνται όλα τα οχήματα, έλκοντα και ελκόμενα, που κινούνται πάνω στις σιδηροτροχιές και συμβάλλουν άμεσα ή έμμεσα τις σιδηροδρομικές μεταφορές.

Τα έλκοντα οχήματα κινούνται αυτόνομα διότι διαθέτουν κινητήρες. Τα οχήματα αυτά διακρίνονται σε:

- κινητήρια οχήματα πορείας, συμβάλουν στην έλξη των ελκόμενων οχημάτων
- απλές ή αυτόνομες αυτοκινητάμαξες, επιτρέπουν συγχρόνως τη μεταφορά περιορισμένου σχετικά αριθμού επιβατών
- μηχανές ελιγμών χρησιμεύουν για ελιγμούς

Τα κινητήρια οχήματα πορείας ανάλογα με την πηγή ενέργειας με την οποία κινούνται κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες: ατμάμαξες, νηζελάμαξες, ηλεκτράμαξες, αεριοστροβιλάμαξες.

Τα ελκόμενα (ή φερόμενα) οχήματα δε διαθέτουν αυτόνομη κίνηση. Εξυπηρετούν τη μεταφορά προσώπων ή αγαθών. Κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με τη λειτουργικότητά τους:

- Επιβατικά οχήματα (ή επιβατάμαξες)
- Εμπορικά οχήματα
- Φορηγά οχήματα

### 2.1 Κατηγορίες τροχαίου υλικού

#### Έλκοντα οχήματα

##### **Ατμάμαξες**

Η ατμάμαξα μεταφέρει νερό για τη παραγωγή ατμού η οποία γίνεται με τη καύση του άνθρακα , ξύλου ή πετρελαίου. Το νερό με το καύσιμο καίγονται σε ειδικό



χώρο το θάλαμο καύσης, έτσι παράγεται θερμική ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε δυναμική ενέργεια στον ατμό του ατμολέβητα. Η δυναμική ενέργεια του ατμού με τη σειρά της μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια στα έμβολα τα οποία δίνουν κίνηση στους τροχούς (Σχ. 2.1).



Σχ. 1.1 Ατμάμαξα[2]

## Ντηζελάμαξες

Η ντηζελάμαξα για την κίνηση της διαθέτει τρία βασικά στοιχεία που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, αυτά είναι ένας ντηζελοκινητήρας, μια γεννήτρια και ένας ηλεκτρικός κινητήρας. Στους κυλίνδρους του ντηζελοκινητήρα καίγεται μείγμα πετρελαίου και αέρα το οποίο παράγει καυσαέρια. Τα καυσαέρια δίνουν κίνηση στα έμβολα της μηχανής και έτσι παράγεται στον άξονα της μηχανής περιστροφική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή μεταδίδεται στη γεννήτρια η οποία με τη σειρά της επάγει τάση με την οποία τροφοδοτεί τον ηλεκτρικό κινητήρα. Ο ηλεκτρικός κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια της γεννήτριας σε μηχανική και έτσι δίνει κίνηση στους τροχούς (Σχ. 2.2).



Σχ. 2.2 Ντηζελάμαξα[2]

## Αεριοστροβιλάμαξες

Μέσω ενός αεριοστροβιλοκινητήρα πραγματοποιείται εκτόνωση υπέρθερμων και υπό πίεση καυσαερίων. Τα καυσαέρια αυτά δημιουργούνται σε ένα ειδικό θάλαμο καύσης, όπου κατά προγραμματισμένα χρονικά διαστήματα διοχετεύεται αέρας με υψηλή πίεση ενώ παράλληλα εκτοξεύεται και το καύσιμο.

## Ηλεκτράμαξες

Η μεταφορά και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω εναέριων καλωδίων είτε με τρίτη σιδηροτροχιά που βρίσκεται στις τρέχουσες ράγες. Τα εναέρια αυτά συστήματα χρειάζονται τουλάχιστον ένα συλλέκτη που συνδέεται με την αμαξοστοιχία ώστε να τροφοδοτούνται οι ηλεκτρικοί κινητήρες οι οποίοι κινούν τους τροχούς (Σχ. 2.3).



Σχ. 2.3 Ηλεκτράμαξα[2]

## Ελκόμενα οχήματα

### Επιβατικά

Επιβατικά ελκόμενα οχήματα νοούνται τα οχήματα που έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για την μεταφορά του επιβατικού κοινού χωρίς τη χρήση αυτόνομης

έλξης. Οι κατηγορίες επιβατικών σιδηροδρομικών οχημάτων συνήθως καθορίζονται ανάλογα με την εσωτερική διαμόρφωση αυτών και την εκάστοτε χρήση του χώρου (**Σχ. 2.4**). Οι συνηθέστερες κατηγορίες είναι αυτές που αφορούν:

- αμιγώς θέσεις καθήμενων
- εστιατόριο-κυλικείο
- κλίνες

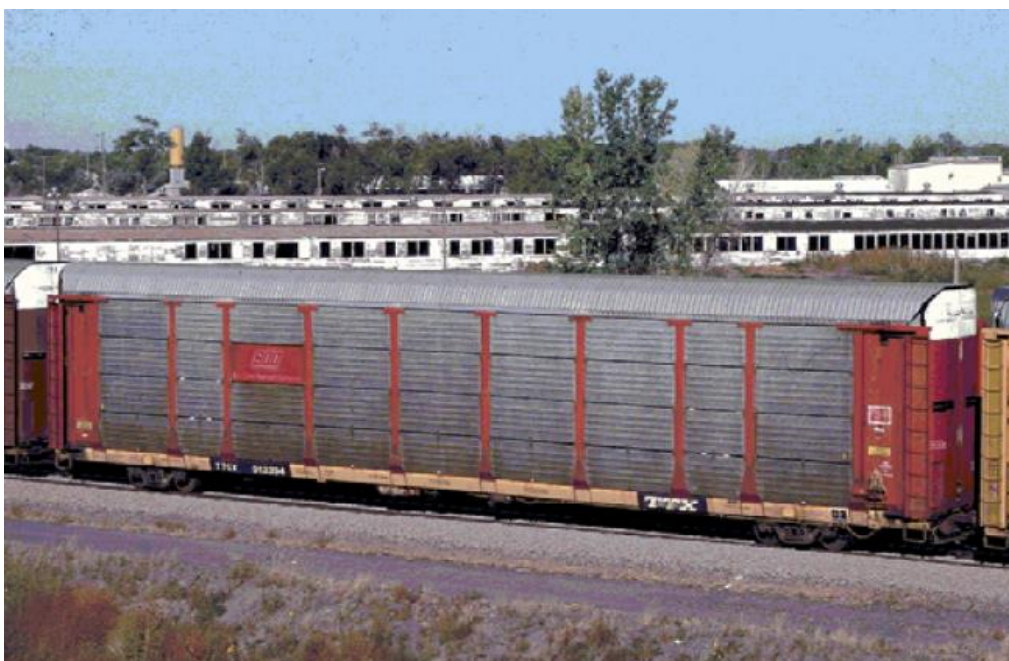


**Σχ. 2.4** Επιβατικό όχημα[2]

## **Εμπορικά**

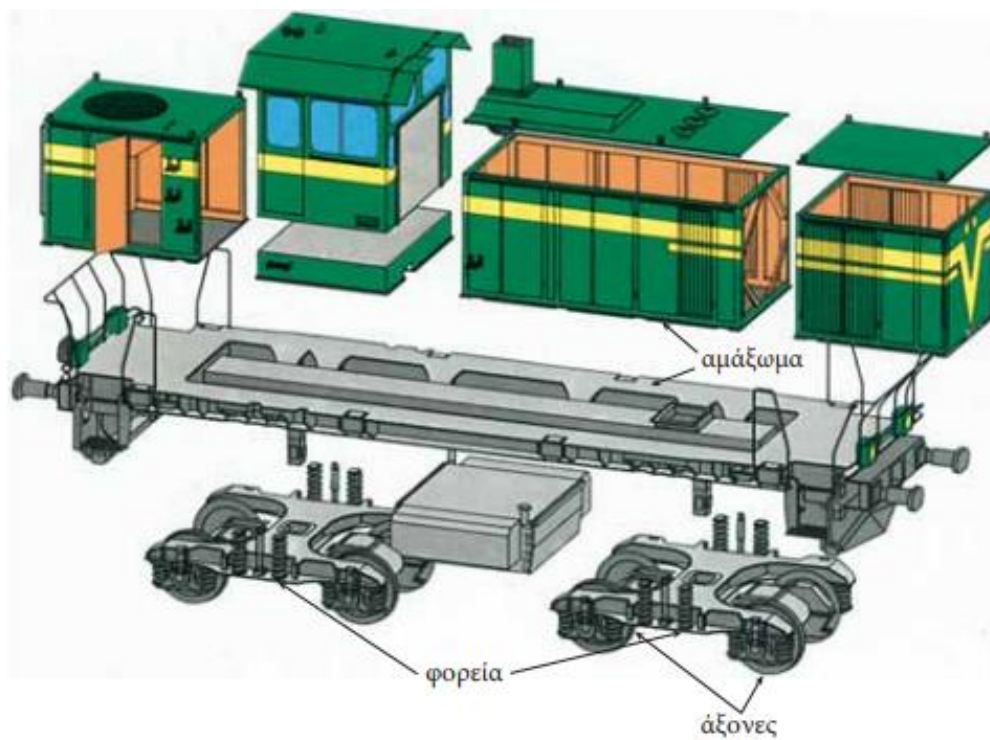
Εμπορικά οχήματα νοούνται όσα έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί με στόχο την ασφαλή μεταφορά εμπορευματικών αγαθών (**Σχ. 2.5**). Χωρίζονται στα:

- κλειστά
- ανοιχτά με παρειές
- ανοιχτά χωρίς παρειές
- ειδικά ( μεταφορά ζώων, δεξαμενές, ψυγεία κ.τ.λ)



Σχ. 2.5 Εμπορικό όχημα[2]

## 2.2 Βασικά μέρη τροχαίου υλικού



Σχ. 2.6 Βασικά μέρη σιδηροδρομικού οχήματος[3]

Κάθε σιδηροδρομικό όχημα, ελκόμενο ή έλκον, αποτελείται από τρία βασικά μέρη (Σχ. 2.6):

- Το αμάξωμα (ή κιβώτιο)
- Τα φορεία
- Τους άξονες

## **Αμάξωμα ή κιβώτιο**

Το αμάξωμα είναι το τμήμα του οχήματος που βρίσκεται πάνω στο φορείο. Σε αυτό ταξιδεύουν οι επιβάτες ή μεταφέρονται τα εμπορεύματα ή βρίσκονται τα συστήματα έλξης και το τμήμα οδήγησης. [4]

## **Φορεία**

Τα φορεία αποτελούν τμήμα του σιδηροδρομικού οχήματος τα οποία συγκρατούν το αμάξωμα. Αυτά χρησιμοποιούνται για τη κίνηση του οχήματος λόγω ότι περιέχουν τους τροχούς οι οποίοι συμβάλουν στη μεταφορά του πάνω στις σιδηροτροχιές. Επίσης απαρτίζονται από διάφορα μέρη που συμβάλουν στην ομαλή οδήγηση και λειτουργία της αμαξοστοιχίας.

## **Άξονες**

Οι άξονες είναι τα μέρη που συνδέουν τους τροχούς και συμβάλουν στην μεταβίβαση των φορτίων στις σιδηροτροχιές και βοηθούν στην ομαλή οδήγηση σε ευθείες και καμπύλες γραμμές.

## **2.3 Φορείο**

Τα φορεία εξασφαλίζουν την ευσταθή κύλιση του οχήματος και αποτελούν βάση για τα αμαξώματα μεταβιβάζουν τα κατακόρυφα φορτία μέσω των τροχοφόρων αξόνων στην σιδηροτροχιά. Επιπλέον, διαθέτουν συνήθως κατακόρυφους και

οριζόντιους μηχανισμούς αναρτήσεων με σκοπό να περιορίζουν τις ταλαντώσεις του οχήματος ώστε να παρέχεται καλύτερο επίπεδο μετακίνησης στους επιβάτες.

Τα πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενα φορεία σε έλκοντα και ελκόμενα οχήματα ονομάζονται κανονικά ή συμβατικά. Τα φορεία διαθέτουν δύο τροχοφόρους άξονες οι τροχοί των οποίων είναι άκαμπτα συνδεδεμένοι μεταξύ τους με συνέπεια να κινούνται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα. Το πλαίσιο του φορείου συνδέεται με το αμάξωμα μέσω πείρου και με τους άξονες των τροχών με σύστημα ελατηρίων και αποσβεστήρων απορροφώντας τους κραδασμούς και στις δύο διευθύνσεις.

Τα φορεία ανάλογα με την ανάρτηση χωρίζονται σε αρθρωτά και μη. Αν και τα πρώτα προσφέρουν μεγαλύτερη άνεση έχουν επικρατήσει τα μη αρθρωτά λόγω της απλότητας της δομής τους και της ευκολίας συντήρησής τους. Έτσι, σε ένα συρμό συνήθως το πρώτο αμάξωμα στο πίσω μέρος καθώς και το τελευταίο στο μπροστινό του τμήμα στηρίζονται σε ένα αρθρωτό φορείο ενώ στις υπόλοιπες θέσεις και εξολοκλήρου στα ενδιάμεσα αμαξώματα τοποθετούνται μη αρθρωτά φορεία.

Ανάλογα με την δυνατότητα προσαρμογής των τροχών στις οριζοντιογραφικές καμπύλες τα φορεία διακρίνονται σε καθοδηγούμενων αξόνων και μη. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν εκείνα που επιτρέπουν την σχετική κίνηση του τροχού με το σώμα του φορείου με αποτέλεσμα την προσαρμογή των τροχοφόρων αξόνων στην καμπύλη σε ακτινική θέση. Αντίθετα, το σώμα των φορείων μη καθοδηγούμενων αξόνων είναι άκαμπτα συνδεδεμένο με τους άξονες εξαναγκάζοντας τους τροχούς σε υποακτινική ή υπερακτινική θέση στα καμπύλα τόξα. Η κατηγορία αυτή είναι η πλέον διαδεδομένη ενώ τα φορεία καθοδηγούμενων αξόνων χρησιμοποιούνται μόνο σε ελάχιστα τρένα υψηλών ταχυτήτων. [3]

## **Ο ρόλος και η σκοπιμότητα ύπαρξης των φορείων**

Η ύπαρξη του φορείου καθίσταται απαραίτητη λόγω του μήκους των οχημάτων καθώς η ευκολία της εγγραφής ενός σιδηροδρομικού οχήματος στις στροφές εξαρτάται άμεσα από το μήκος του.

Το μήκος του αμαξώματος στα έλκοντα οχήματα είναι μεγάλο διότι περιέχουν τους κινητήρες και τον μηχανολογικό εξοπλισμό. Τα ελκόμενα οχήματα αρχικά είχαν μικρό σχετικά μήκος και η εγγραφή τους στα καμπύλα τμήματα της οριζοντιογραφίας εξασφαλιζόταν μέσω δύο ή τριών μεμονωμένων αξόνων που συνδέονταν απ' ευθείας με το αμάξωμα. Με την ανάπτυξη των σιδηροδρομικών μεταφορών το μήκος των

οχημάτων αυξήθηκε με σκοπό την αύξηση της χωρητικότητας τους . Υπό τις συνθήκες αυτές η τεχνική των μεμονωμένων αξόνων δε μπορούσε πλέον να εξασφαλίσει την εγγραφή των οχημάτων. Η εγγραφή των οχημάτων επιτελείται ουσιαστικά μέσω των φορείων (μμήκος διακονικού < 4,0 m) ενώ το αμάξωμα ακολουθεί την κίνηση των φορείων [4]

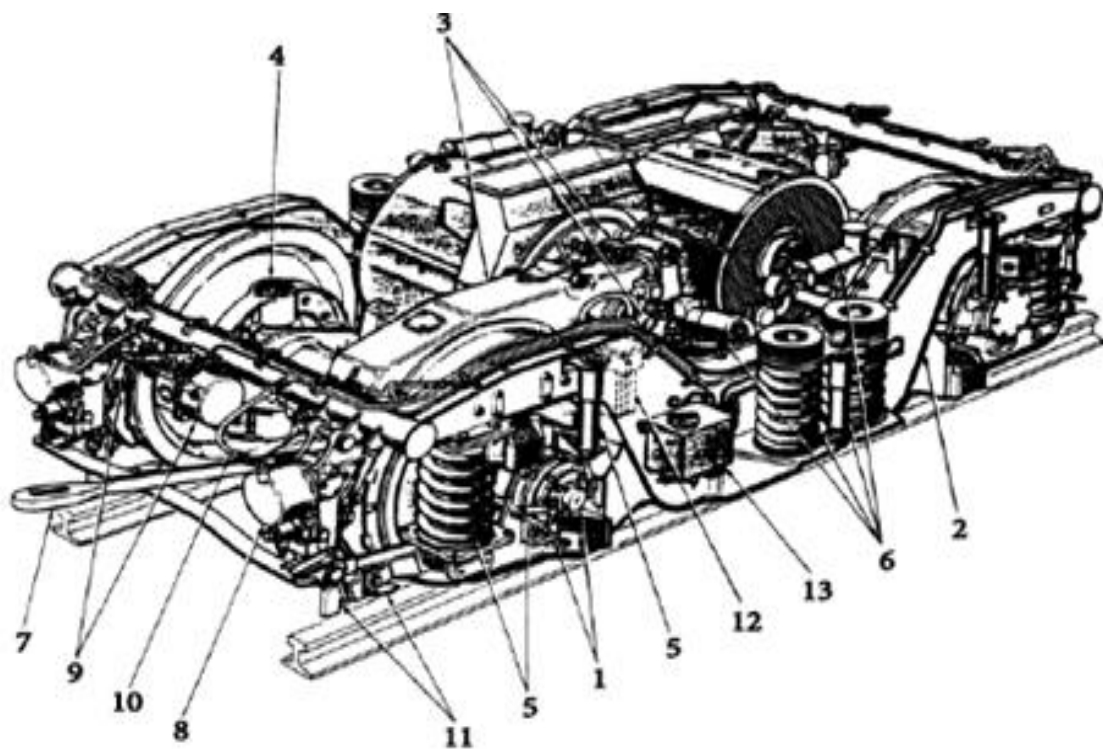
Τα σύγχρονα ελκόμενα οχήματα διαθέτουν συνήθως δύο φορεία. Κάθε φορείο μπορεί να έχει δύο άξονες (διαξονικό φορείο) ή τρεις άξονες (τριαξονικό φορείο).

Τα φορεία πρέπει να:

- επιτρέπουν την ομαλή εγγραφή των αξόνων στις καμπύλες
- βοηθούν στην καλύτερη μετάδοση των φορτίων από το αμάξωμα στις σιδηροτροχιές
- παρέχουν ευστάθεια των οχημάτων στις ευθυγραμμίες (ανάπτυξη μεγάλων ταχυτήτων)
- να ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις από τη μετάδοση των γεωμετρικών σφαλμάτων γραμμής και φθορών των σιδηροτροχιών στη συμπεριφορά του τροχαίου υλικού
- παρέχουν δυναμική άνεση στους επιβάτες και κατά τις τρεις διευθύνσεις
- έχουν σχετικά χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης

### **Τα βασικά μέρη ενός φορείου**

Τα φορεία ποικίλουν σε σχήμα , μέγεθος και στην πιο σύνθετη μορφή τους αποτελούν κινητήριο τροχό σε μια ηλεκτρική ή ντιζελομηχανή. Υποβάλλεται σε σοβαρές καταπονήσεις και κραδασμούς. Αναλυτικά τα μέρη που απαρτίζουν το φορείο είναι :



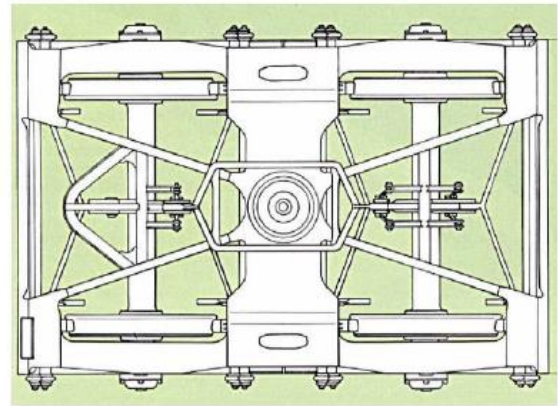
- |                          |  |
|--------------------------|--|
| 1. άξονας – λιποκιβώτιο  | 8. πέδη αέρος                              |
| 2. πλαίσιο φορείου       | 9. πέδη ακινησίας                          |
| 3. μειωτήρας             | 10. σωλήνας πέδης                          |
| 4. μετάδοση κίνησης      | 11. συσκευή διασποράς άμμου<br>λιθοδιώκτης |
| 5. πρωτεύουσα ανάρτηση   | 12. ψήκτρα επαφής                          |
| 6. δευτερεύουσα ανάρτηση | 13. λιπαντήρας όνυχα τροχού                |
| 7. μοχλός έλξης          |  |

Σχ. 2.7 Βασικά μέρη φορείου[4]

## Πλαίσιο φορείου

Το πλαίσιο(σασί) περιλαμβάνει δυο πλευρικές διαμήκεις δοκούς οι οποίες συνδέονται με δύο εγκάρσιες δοκούς .Στο πλαίσιο στηρίζονται διάφορα εξαρτήματα όπως : στηρίξεις των ηλεκτροκινητήρων , αρθρώσεις του συστήματος πέδης και διατάξεις έδρασης του αμαξώματος (Σχ. 2.8).





**Σχ. 2.8 Πλαίσιο φορείου[4]**

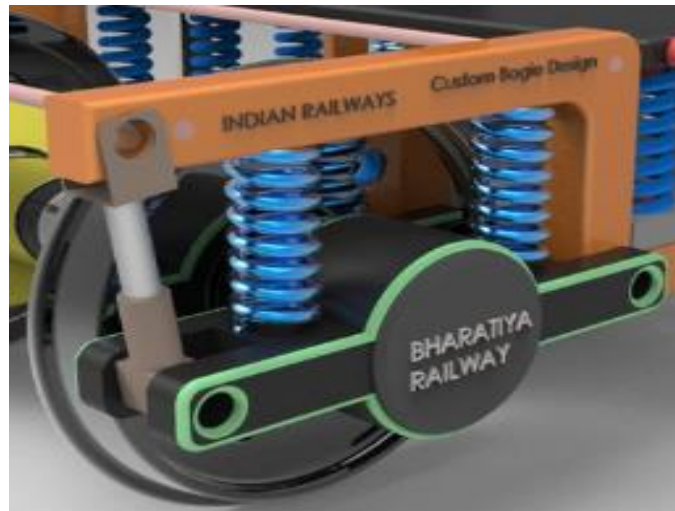
Τα κύρια μέρη του πλαισίου ενός φορείου είναι :

- Είτε επίπεδοι διαμήκεις δοκοί με παχύ έλασμα , οι οποίες συνδέονται με μια κεντρική δοκό από έλασμα αναδιπλούμενο και ηλεκτροσυγκολλούμενο. Η σύνδεση των διαμηκών δοκών επί της εγκάρσιας δοκού υλοποιείται με ηλεκτροσυγκόλληση και ήλωση. Η εγκάρσια δοκός, η οποία έχει την μορφή κιβωτίου, φέρει την διάταξη άρθρωσης και έδρασης του αμαξώματος (στροφέας).
- Είτε επίπεδες διαμήκεις δοκοί συνδεόμενες με μια κεντρική εγκάρσια δοκό (με στροφέα) και δυο ακραίες εγκάρσιες δοκούς.
- Είτε διαμήκεις και εγκάρσιες δοκοί, από έλασμα αναδιπλούμενο, ηλεκτροσυγκολλούμενο και ενισχυμένο με πτερύγια.
- Είτε λεπτά ελάσματα αναδιπλωμένα και ηλεκτροσυγκολλημένα με τρόπο ώστε να δίνεται στις διαμήκεις και εγκάρσιες δοκούς η μορφή δοκών τετραγωνικής διατομής.

### **Ανάρτηση φορείου – άξονα**

Η σύνδεση φορείου - άξονα η οποία ονομάζεται πρωτεύουσα αιώρηση γίνεται με πολλούς τρόπους. Η σύνδεση έχει ως στόχο το πλαίσιο του φορτίου να εδράζεται στα λιποκιβώτια των αξόνων. Ο ρόλος της πρωτεύουσας αιώρησης είναι να απορροφήσει τις κρούσεις , τις ταλαντώσεις και γενικά τις ανωμαλίες της επιφάνειας

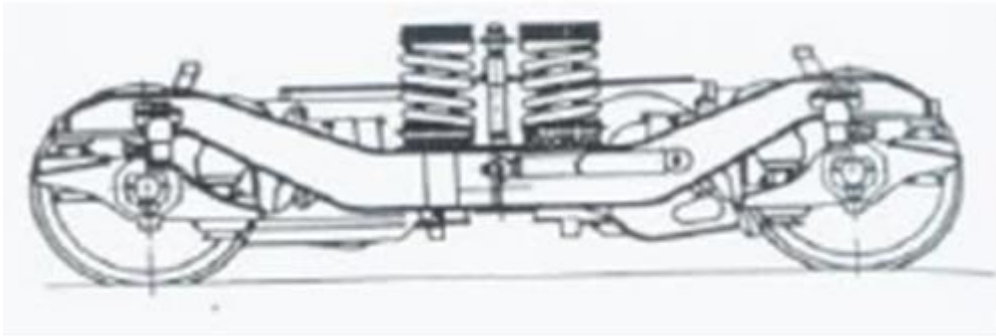
κύλισης καθώς και να συμβάλλει στη σωστή κατανομή του φορτίου στους άξονες του οχήματος. Η ανάρτηση φορείου-άξονα είναι υπεύθυνη για την ευστάθεια του οχήματος τόσο σε ευθεία όσο και σε καμπύλη διαδρομή. Τα ελατήρια που χρησιμοποιούνται ανάλογα με το βαθμό ευκαμψίας τους διακρίνονται σε σπειροειδή, ελικοειδή και φυλλοειδή ελατήρια. Στα διαξονικά φορεία η συνηθισμένη διάταξη είναι 4 ελατήρια σε κάθε άξονα δηλαδή 2 ελατήρια σε κάθε τροχό σε συμμετρική διάταξη (Σχ. 2.9).



Σχ. 2.9 Ανάρτηση φορείου – άξονα

## Ανάρτηση φορείου – αμαξώματος

Στην ανάρτηση φορείου – αμαξώματος ή δευτερεύουσα αιώρηση όπως καλείται η κεντρική εγκάρσια δοκός του φορείου φέρει μια κυλινδρική υποδοχή στην οποία προσαρμόζεται ο στροφέας της άρθρωσης και η έδραση του αμαξώματος. Ο στροφέας στηρίζεται σε μια εγκάρσια δοκό στο πλαίσιο του αμαξώματος. Στις δυο πλευρές του στροφέα δυο πλάκες ολισθήσεως μπορούν να ακουμπήσουν στις πλάκες τριβής του φορείου για να περιορίσουν τις ταλαντώσεις του αμαξώματος. Στην ανάρτηση φορείου-αμαξώματος αρχικά χρησιμοποιήθηκαν φυλλοειδή ελατήρια ενώ σήμερα χρησιμοποιούνται αερόσουσες. Σκοπός της δευτερεύουσας αιώρησης είναι η εκτέλεση περιστροφής ώστε να αντεπεξέλθει το αμάξωμα στις καμπύλες της διαδρομής, καθώς και η εξασφάλιση δυναμικής άνεσης στους επιβάτες (Σχ. 2.10).



Σχ. 2.10 Ανάρτηση φορείου – αμαξώματος

## Άξονες -Τροχοί

Τα δύο κύρια μέρη του φορείου είναι ο σιδηροδρομικός άξονας και οι τροχοί. Οι άξονες και οι τροχοί απεικονίζονται από κάτω και θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια (Σχ. 2.11).



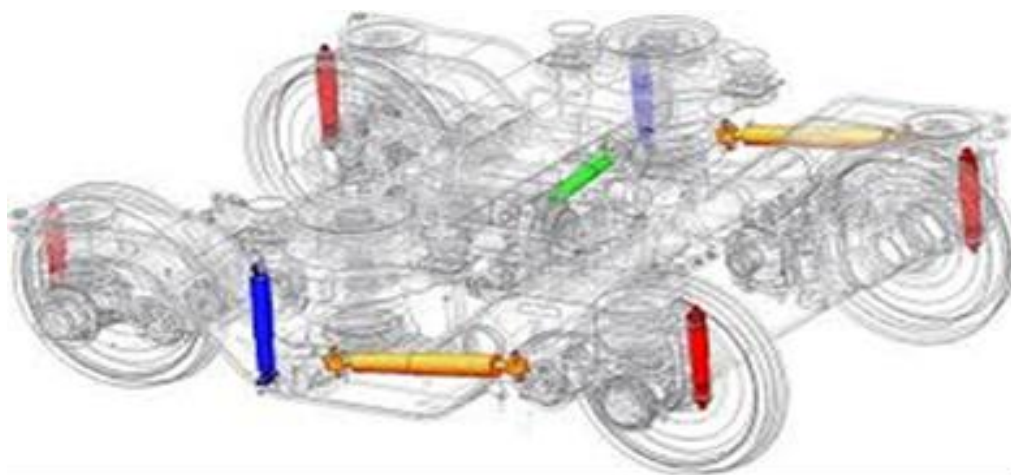
Σχ. 2.11 Τροχοφόρος Άξονας

## Αποσβεστήρες

Οι αποσβεστήρες είναι ένας μηχανισμός ο οποίος μας επιτρέπει να ελέγξουμε μια ταλάντωση. Ο αποσβεστήρας είναι αποτέλεσμα της απαίτησης για υψηλές ταχύτητες των οχημάτων καθώς και για τη κατακόρυφη δυναμική άνεση των επιβατών. Έτσι κατασκευάστηκαν οχήματα με κατακόρυφες αιωρήσεις οι οποίες είναι

εύκαμπτες και έχουν μικρότερη ενσωματωμένη τριβή. Το εσωτερικό ενός αποσβεστήρα απαρτίζεται από ένα έμβολο και μια ράβδο που εργάζονται μέσα σε έναν κύλινδρο γεμάτος λάδι. Η σωληνοειδή θήκη του αποσβεστήρα αποτελεί δεξαμενή λαδιού και προστατεύει τα στοιχεία. Σε έναν αποσβεστήρα η αντίσταση εξασφαλίζεται με ένα σύστημα βαλβίδων οι οποίες μετατοπίζουν το λάδι από το ένα μέρος του αποσβεστήρα στο άλλο. Αυτές τις βαλβίδες μπορούμε να τις ρυθμίσουμε ώστε να έχουμε την απόσβεση που επιθυμούμε. Σήμερα τα σύγχρονα φορεία δεν φέρουν φυλλοειδή ελατήρια στη δευτερεύουσα ανάρτηση που είχαν δυνατότητα απόσβεσης αλλά ελικοειδή και έτσι χρησιμοποιούνται αποσβεστήρες (αμορτισέρ). Τα σιδηροδρομικά οχήματα χρησιμοποιούν τηλεσκοπικούς υδραυλικούς αποσβεστήρες. Οι αποσβεστήρες ενός σιδηροδρομικού οχήματος διακρίνονται σε **(Σχ. 2.12)**:

- Κατακόρυφοι αποσβεστήρες πρωτεύουσας ανάρτησης (κόκκινο χρώμα)
- Κατακόρυφοι αποσβεστήρες δευτερεύουσας ανάρτησης (μπλε χρώμα)
- Διαμήκεις αποσβεστήρες δευτερεύουσας ανάρτησης (κίτρινο χρώμα)
- Αποσβεστήρες παρέκκλισης φορείου αμαξώματος (πράσινο χρώμα)



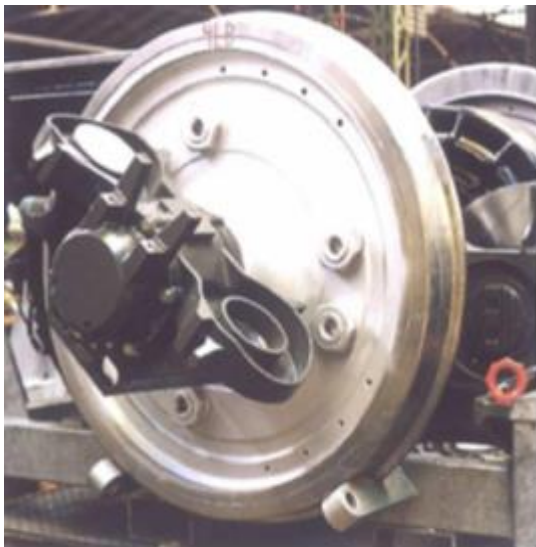
**Σχ. 2.12** Είδη αποσβεστήρων

## Λιποκιβώτια

Τα λιποκιβώτια είναι εξαρτήματα του μηχανισμού κύλισης τα οποία συνδέουν τους τροχοφόρους άξονες με το όχημα **(Σχ. 2.13)**. Αυτά επιτρέπουν στους εν κινήσει

άξονες να υποβαστάζουν το βάρος του οχήματος και να μεταδίδουν τη κίνηση από τους κινητήριους άξονες στο όχημα. Το λιποκιβώτιο είναι κατασκευασμένο από χυτοχάλυβα και απαρτίζεται από το σώμα , τη διάταξη λίπανσης , τη διάταξη στεγανοποίησης και από τον τριβέα κύλισης ή ολίσθησης .Το σώμα του λιποκιβωτίου είναι ένα κοίλο εξάρτημα το οποίο περιέχει τον τριβέα κύλισης ή ολίσθησης και τον στροφέα του τροχοφόρου άξονα .Η σύνδεση γίνεται μεταξύ στροφεών του άξονα και λιποκιβωτίου . Οι τύποι των λιποκιβωτίων είναι :

- Λιποκιβώτια με τριβέα ολίσθησης (κουζινέτο)
- Λιποκιβώτια με τριβέα κύλισης (ρουλεμάν)
- Λιποκιβώτια με ψήκτρα
- Λιποκιβώτια με βαρελοειδή ρουλεμάν
- Λιποκιβώτια με κυλινδρικό ρουλεμάν
- Λιποκιβώτια με κωνικά ρουλεμάν



Σχ. 2.13 (α) Λιποκιβώτιο (β) Λιποκιβώτιο με τριβέα κύλισης

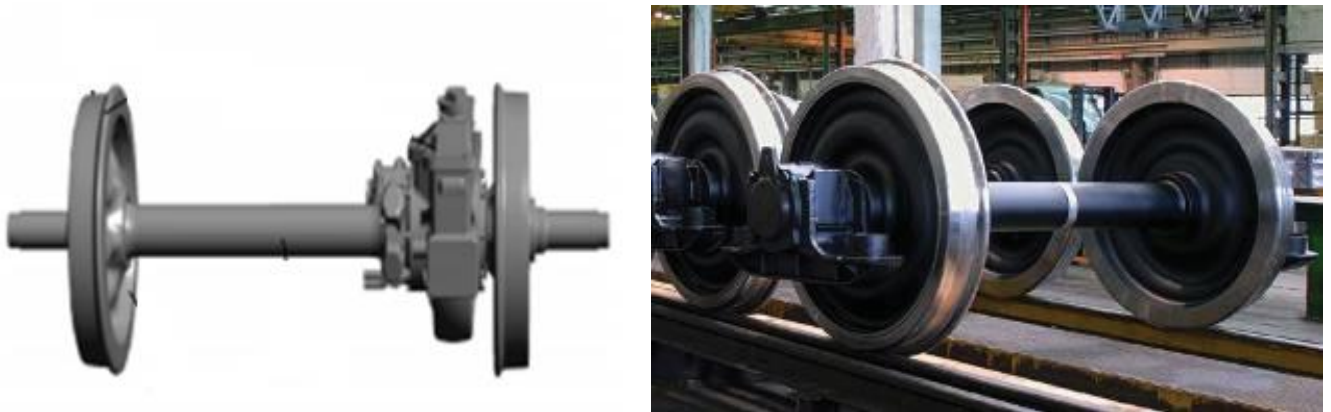
## Σιδηροδρομικοί Άξονες

Οι σιδηροδρομικοί τροχοφόροι άξονες αποτελούνται από τη κυλινδρική ράβδο(σώμα - άξονα) , τους δύο τροχούς που συνδέονται άκαμπτα με το τη ράβδο με αποτέλεσμα οι τροχοί να περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  που

περιστρέφεται η ράβδος και τα δύο λιποκιβώτια τα οποία περιέχουν τα έδρανα (ρουλεμάν ) που εδράζεται ο άξονας. Το σύστημα «τροχοί-σώμα άξονα» καλείται συμβατικός ή κλασικός σιδηροδρομικός άξονας και κυλίνεται επί δύο παράλληλων σιδηροτροχιών που βρίσκονται σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Ο άξονας μεταβιβάζει τα φορτία του αμαξώματος στην σιδηροτροχιά και συμβάλει στην ομαλή κύλιση του οχήματος πάνω σε αυτές τόσο στις ευθείες όσο και στις καμπύλες.

Οι σιδηροδρομικοί τροχοφόροι άξονες διακρίνονται σε:

- Κινητήριους (Σχ. 2.14 (α))
- Φερόμενους άξονες(μη κινητήριους) (Σχ. 2.14 (β))



Σχ. 2.14 (α) Κινητήριος άξονας (β) Φερόμενος άξονας

Οι κινητήριοι άξονες παίρνουν κίνηση μέσω της κινητήριας μονάδας. Οι άξονες αυτοί συνδέονται με τον κινητήρα μέσω οδοντωτών τροχών και έτσι μεταδίδεται η κίνηση από τον κινητήρα σε αυτούς. Κατά τη περιστροφή τους συμπαρασύρουν τους φερόμενους άξονες οι οποίοι είναι ακίνητοι διότι δεν συνδέονται με τον κινητήρα και έτσι κινούν το όχημα και κατ' επέκταση όλη την αμαξοστοιχία.

Τέτοιοι άξονες υπάρχουν:

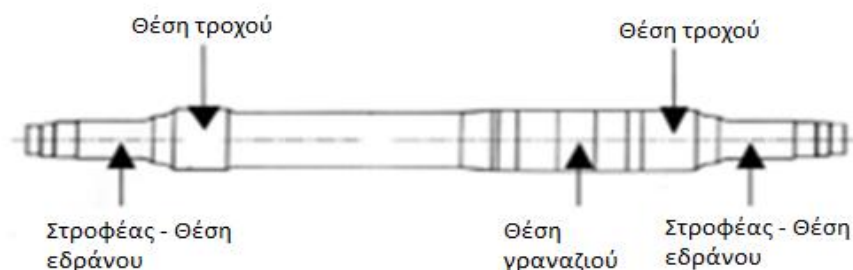
- Συνεζευγμένοι δηλαδή παίρνουν κίνηση από μια πηγή και ενεργούν όλοι μαζί ή ανά δυο.
- Μη συνεζευγμένοι που ενεργεί ο καθένας μόνος του.

## Ρόλος του σιδηροδρομικού άξονα

- υποβαστάζουν το βάρος του οχήματος
- καθοδηγούν με τη βοήθεια των φορέων το όχημα,
- υλοποιούν την κύλιση επί των σιδηροτροχιών
- μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια που τους δίνεται σε κινητική.

Το μέγεθος και η μορφή του άξονα εξαρτάται από τον κατασκευαστή και την λειτουργικότητα του δικτύου. Πιο αναλυτικά, σε κάθε σιδηροδρομικός τροχοφόρος άξονας διακρίνουμε τα παρακάτω τμήματα (**Σχ. 2.15**):

- Το σώμα του άξονα
- Την επιφάνεια σφήνωσης των τροχών
- Τους στροφείς ή τις επιφάνειες κύλισης
- Τις επιφάνειες στεγανότητας
- Τις κεφαλές ή τα άκρα του άξονα
- Τις πόντες ή τα κέντρα του άξονα



**Σχ. 2.15** Τμήματα σιδηροδρομικού άξονα

## Σώμα άξονα

Σώμα άξονα ονομάζουμε το κυλινδρικό ενδιάμεσο τμήμα. Η ποιότητα κατεργασίας είναι μέτρια. Στους κινητήριους άξονες εκτός αυτών που αναφέραμε μέχρι τώρα υπάρχουν η επιφάνεια στήριξης του οδοντωτού τροχού αν πρόκειται για κωνική οδόντωση ή η επιφάνεια σφήνωσης αν πρόκειται για κυλινδρικό οδοντωτό τροχό και τέλος οι αύλακες αποφορτίσεως. Οι αύλακες αυτοί βοηθούν ώστε να αποφεύγονται στα

σημεία αυτά τυχόν ριγματώσεις. Σε όλους τους άξονες υπάρχουν διαμετρικές διαφορές, τις διαφορές αυτές των διαμέτρων τις ενώνουμε με ένα τόξο κύκλου πολύ λεπτής κατεργασίας που το ονομάζουμε ενωτική καμπύλη. Σκοπός της καμπύλης αυτής είναι η αποφυγή δημιουργίας ριγματώσεων.

## **Επιφάνεια σφήνωσης των τροχών**

Οι επιφάνειες σφήνωσης είναι κυλινδρικά τμήματα του άξονα, λεπτής και επιμελούς κατεργασίας και έχουν σκοπό να υποδεχτούν τους τροχούς. Σε ελάχιστες περιπτώσεις μπορεί να είναι ελαφρώς κωνικά ή να φέρουν περιφερειακό διαμήκη οδόντα (πολύσφηνο).

## **Στροφείς**

Οι στροφείς είναι τα κυλινδρικά τμήματα του άξονα που προορίζονται να υποδεχτούν τα έδρανα ολίσθησης (κουζινέτα) ή τα έδρανα κύλισης (ρουλεμάν). Η επιφάνεια των στροφών πρέπει να κατεργάζεται με μεγάλη επιμέλεια και υψηλή ποιότητα ανοχών.

## **Επιφάνειες στεγανοποίησης**

Οι επιφάνειες στεγανοποίησης βρίσκονται μεταξύ στροφέα και επιφάνειας σφήνωσης, είναι λεπτής κατεργασίας και φέρουν τα διάφορα στεγανοποιητικά υλικά των λιποκιβωτίων. Μπορεί όμως στα σημεία αυτά να τοποθετηθεί δίσκος ειδικής μορφής που τον ονομάζουμε Λαβύρινθο.

## **Διαφορές μεταξύ παλαιών και σύγχρονων τροχοφόρων αξόνων**

Οι σημαντικότερες διαφορές μεταξύ παλαιών και σύγχρονων τροχοφόρων αξόνων μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- χρήση εδράνων κύλισης
- χρήση πέδησης πέλματος που περιορίζεται σε φορτηγά βαγόνια
- βελτίωση της συμπεριφοράς τριβής των θέσεων με επικάλυψη.



- βελτίωση της συμπεριφοράς στην κόπωση σε ελεύθερες επιφάνειες με ψυχρή έλαση.
- ελαφρύτερος σχεδιασμός χάρη στην υιοθέτηση κοίλου άξονα.
- καλύτερη ικανότητα επιθεώρησης από την UT με "τεστ οπής (boretest) "
- μείωση του εκπεμπόμενου θορύβου κύλισης
- προστασία άξονα από προσκρούσεις έρματος

## 2.4 Τροχοί

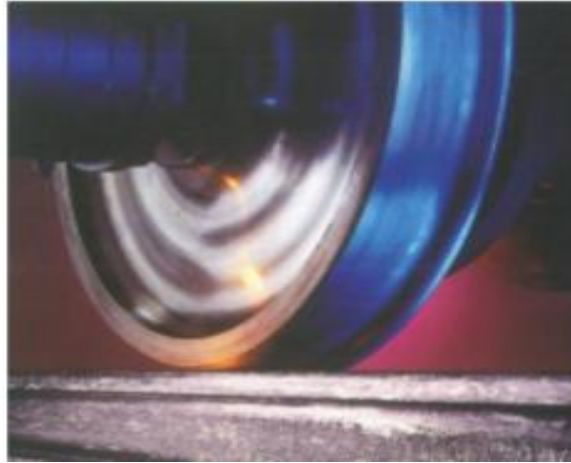
Ο τροχός αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τμήματα της αμαξοστοιχίας διότι βοηθάει μέσω της κύλισης του επί τις σιδηροτροχιές στη μετακίνηση της. Ο τροχός όπως αναφέραμε είναι προσαρμοσμένος στον άξονα μέσω του οποίου περιστρέφεται ώστε να μετακινήσει τον συρμό. Οι τροχοί δεν περιορίζονται μόνο στην κύλιση επί του σιδηροδρομικού άξονα αλλά αποσκοπούν στην εξασφάλιση της κίνησης πάνω στις σιδηροτροχιές περιορίζοντας τη φθορά του ίδιου του τροχού και της γραμμής. Οι στόχοι αυτοί έχουν συντελέσει στην διαμόρφωση της ιδιαίτερης γεωμετρίας των σιδηροδρομικών τροχών. [4]

### Δομή τροχού

Η περιμετρική επιφάνεια του τροχού χωρίζεται σε δύο τμήματα (**Σχ. 2.16**):

- Όνυχα
- Επιφάνεια κύλισης (προφίλ ή επίσωτρο)

Ο όνυχας του τροχού ονομάζεται το τμήμα της εσωτερικής επιφάνεια προς τη σιδηροτροχιά , αποτελεί μια περιφερειακή προεξοχή .Ο όνυχας εμποδίζει την έξοδο του τροχού από τη γραμμή. Στην ουσία χάρη στον όνυχα ο συρμός δεν χρειάζεται τιμόνι για την οδήγηση του διότι ο όνυχας σφηνώνει τους τροχούς στις σιδηροτροχιές και έτσι ο συρμός ακολουθεί τη πορεία των σιδηροτροχιών. Επίσης υποβοηθά τους σιδηροδρομικούς άξονες κατά τη διέλευση των οχημάτων από τους σχηματισμούς γραμμής (π.χ διασταυρώσεις).



**Σχ. 2.16 Σιδηροδρομικός τροχός**

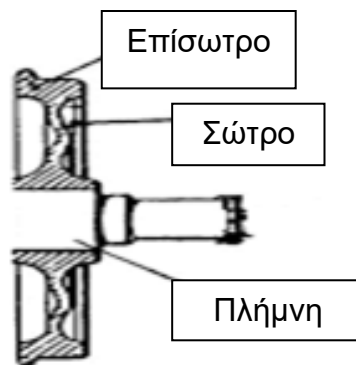
Η επιφάνεια κύλισης (προφίλ) είναι το εξωτερικό τμήμα του τροχού και η μορφή της είναι κωνική ώστε να υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής του μεγέθους της περιμέτρου κύλισης ανάλογα με τις οριζοντιογραφικές ανάγκες.

Οι τροχοί διακρίνονται σε δυο κατηγορίες σε ολόσωμους και διαιρούμενους. Οι ολόσωμοι αποτελούν ένα εξάρτημα από χάλυβα ενώ ο διαιρούμενοι αποτελούνται από σώστρο και επίσωτρο (προφίλ) . Οι ολόσωμοι έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους διαιρούμενους παρόλα αυτά έχουν μεγαλύτερο κόστος διότι όταν φθαρούν αντικαθίστανται ολόκληροι οι τροχοί. Οι διαιρούμενοι χρησιμοποιούνται ευρέως διότι είναι πιο οικονομικοί και ευνοούνται σε χαμηλές ταχύτητες.

Οι τροχοί αποτελούνται (**Σχ. 2.17**):

- Πλήμνη είναι το κεντρικό τμήμα το οποίο στο κέντρο έχει μια οπή στην οποία εκτελείται η συναρμογή τροχού-άξονα.
- Σώστρο είναι το περιφερειακό τμήμα
- Επίσωτρο (προφίλ) είναι στεφάνη από χάλυβα που στερεώνεται επί των σώστρων και διακρίνεται από μεγάλη αντοχή.

Στους ολόσωμους τροχούς η πλήμνη ,το σώστρο και το επίσωτρο αποτελούν ενιαίο κομμάτι αντίθετα στους διαιρούμενους η πλήμνη και το σώστρο είναι ενιαίο τμήμα πάνω στο οποίο στηρίζεται το επίσωτρο.



Σχ. 2.17 Μέρη σιδηροδρομικού τροχού

## 2.5 Σιδηροτροχιές

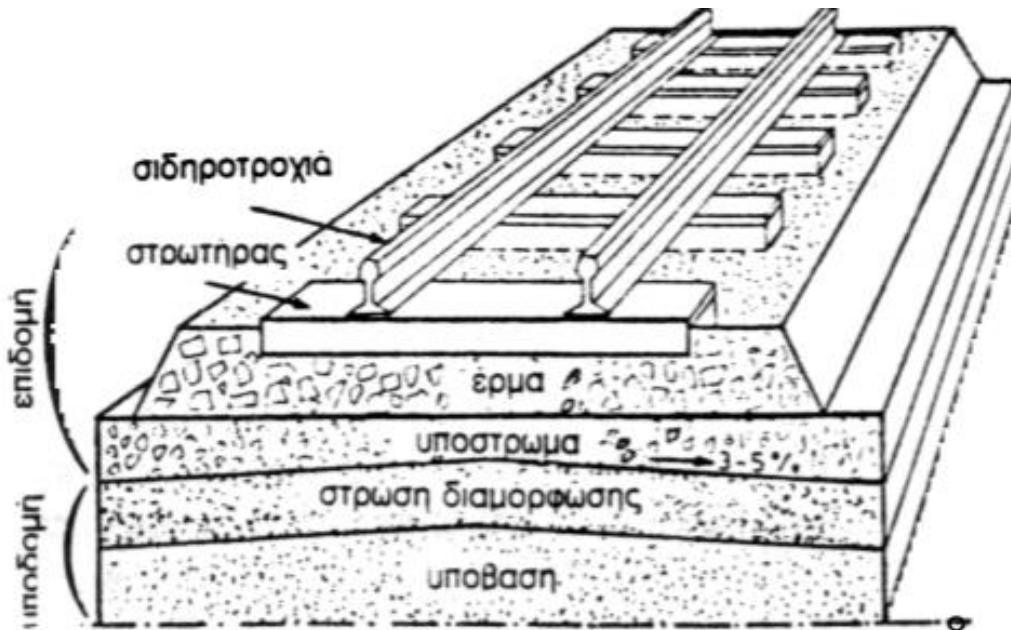
### Σιδηροδρομική γραμμή

Με τον όρο σιδηροδρομική υποδομή νοείται η σιδηροδρομική οδός μεταφοράς ή αλλιώς σιδηροδρομική γραμμή και το σύνολο των τεχνικών έργων και εγκαταστάσεων που εξασφαλίζουν την κυκλοφορία των συρμών.

Η σιδηροδρομική γραμμή αποτελείται από μια σειρά στοιχείων και υλικών διαφορετικών ελαστικότητων που μεταφέρουν τα στατικά και δυναμικά φορτία της κυκλοφορίας στο έδαφος θεμελίωσης. Η γραμμή διακρίνεται στην επιδομή και στην υποδομή. Η επιδομή της γραμμής αποτελείται από τις σιδηροτροχιές, τους στρωτήρες, τους συνδέσμους, τα ελαστικά υποθέματα, το έρμα και το υπόστρωμα έρματος. Η υπόβαση και η στρώση διαμόρφωσης αποτελούν την υποδομή της γραμμής (Σχ. 2.18).

Το ανώτερο τμήμα της επιδομής που περιλαμβάνει τις σιδηροτροχιές, τους στρωτήρες, τους συνδέσμους και τα υλικά σύνδεσης σιδηροτροχιών -στρωτήρων καλείται «εσχάρα γραμμής». Το κατώτερο τμήμα της επιδομής που περιλαμβάνει το έρμα και τις υποκείμενες στρώσεις του, καλείται «έδραση» της γραμμής.

Στα τεχνικά έργα περιλαμβάνονται οι σήραγγες και τα υπόγεια τμήματα γραμμής κατασκευασμένα με τη μέθοδο «cut and cover», οι γέφυρες, οι ανισόπεδες διαβάσεις, τα συστήματα αποστράγγισης (στραγγιστήρια, ανοικτές τάφροι), οι τοίχοι και τα έργα αντιστήριξης των εδαφών, οι αμυντικές στοές, οι οχετοί, τα ηχοπετάσματα, οι περιφράξεις κλπ.



Σχ. 2.18 Σιδηροδρομική Γραμμή[5]

Οι εγκαταστάσεις διακρίνονται σε:

- εγκαταστάσεις γραμμής: ισόπεδες σιδηροδρομικές διαβάσεις ,εγκαταστάσεις ηλεκτροκίνησης, σηματοδότησης, τηλεπικοινωνιών
- λειτουργικές εγκαταστάσεις: σταθμοί, μηχανοστάσια επισκευής και συντήρησης οχημάτων, αμαξοστάσια, εγκαταστάσεις καθαρισμού οχημάτων, λοιπές κτιριακές εγκαταστάσεις (κτίρια διοίκησης, αποθηκευτικοί χώροι κλπ.)

## Υλικά Επιδομής

### Σιδηροτροχιές

Οι σιδηροτροχιές αποτελούν τον δρόμο κυκλοφορίας του συρμού και συμβάλλουν στη μεταφορά των φορτίων της κυκλοφορίας στο έδαφος.

### Στρωτήρες

Οι στρωτήρες είναι διαδοκίδες (μικρή δοκοί) τοποθετημένες εγκάρσια ως προς τον άξονα της γραμμής, με σκοπό να εδράζονται σε αυτές οι σιδηροτροχιές, να

διατηρούν την απόσταση μεταξύ των σιδηροτροχιών σταθερή, να διανέμουν τις τάσεις στο έρμα, να μειώνουν τις ταλαντώσεις των σιδηροτροχιών και τέλος να μειώνουν την ηχορύπανση. Οι στρωτήρες διακρίνονται σε :

- Στρωτήρες σκυροδέματος



Σχ. 2.19 Στρωτήρες σκυροδέματος[5]

- Ξύλινους στρωτήρες



Σχ. 2.20 Ξύλινοι στρωτήρες[5]

- Μεταλλικοί στρωτήρες



Σχ. 2.21 Μεταλλικοί στρωτήρες[5]

## Σύνδεσμοι

Οι σύνδεσμοι αποκαλούνται όλα εκείνα τα υλικά, που έχουν σαν λειτουργία τους τη σύνδεση της σιδηροτροχιάς με τον στρωτήρα.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν :

- οι σύνδεσμοι, ήλοι, ελικωτά για τη σύνδεση σιδηροτροχιάς - στρωτήρα (**Σχ. 2.22 (α)**)
- οι αμφιδέτες για τη σύνδεση μεταξύ σιδηροτροχιών (**Σχ. 2.22 (β)**)
- αντιερπυστικά ή αντιοδευτικά πτερύγια εγκάρσιας αντίστασης



Σχ. 2.22 (α) Σύνδεση σιδηροτροχιάς – στρωτήρα (β) Αμφιδέτης σιδηροτροχιάς[5]

## Έρμα ή σκύρο

Είναι η στρώση της επιδομής που βρίσκεται κάτω από του στρωτήρες και αποτελείται συνήθως από θραυστά σκύρα και κατ' εξαίρεση από αμμοχάλικο, φερτές ύλες και σκωρία υψικαμίνου. Το έρμα καταλαμβάνει και το διάστημα μεταξύ των στρωτήρων καθώς ένα τμήμα πέραν των κεφαλών των στρωτήρων (**Σχ. 2.23**).



Σχ. 2.23 Έρμα γραμμής

## Μέρη σιδηροτροχιάς

Η σιδηροτροχιά αποτελείται από τρία (3) κύρια μέρη (**Σχ. 2.24**) [6]:

### 1. Την κεφαλή

Η κεφαλή της σιδηροτροχιάς αποτελεί το ανώτερο τμήμα της διατομής της και περιέχει την επιφάνεια κύλισης και τις εσωτερικές και εξωτερικές παρειές που διαμορφώνονται με κατάλληλη κλίση. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κεφαλής είναι:

- το πλάτος,
- το ύψος,
- η ακτίνα καμπυλότητας και
- η κλίση των παρειών της κεφαλής.

## 2. Το κορμό

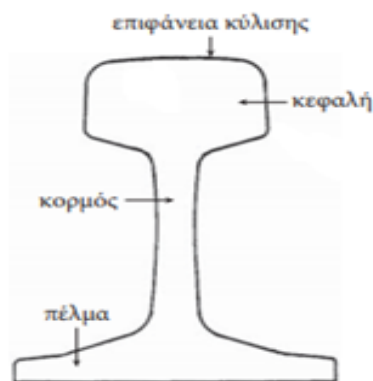
Το τμήμα της σιδηροτροχιάς που συνδέει την κεφαλή της με το πέλμα ονομάζεται κορμός. Ο κορμός αποτελείται από τον κυρίως κορμό, που αποκαλείται και ψυχή, τις επιφάνειες έδρασης του αμφιδέτη και τις επιφάνειες σύνδεσης με την κεφαλή και το πέλμα. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κορμού είναι:

- το πάχος,
- ο τύπος συναρμογής με την κεφαλή και το πέλμα και
- η κλίση της επιφάνειας επαφής με τον αμφιδέτη.

## 3. Το πέλμα

Το πέλμα αποτελεί το κατώτερο τμήμα της διατομής της σιδηροτροχιάς και περιλαμβάνει την επιφάνεια έδρασης επί των στρωτήρων και τα πτερύγια. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πέλματος είναι:

- το πλάτος,
- το πάχος και το σχήμα του πέλματος.



Σχ. 2.24 Μέρη σιδηροτροχιάς



## **Βασικά χαρακτηριστικά των σιδηροτροχιών**

Τα βασικά χαρακτηριστικά των σιδηροτροχιών είναι:

- i. το υλικό κατασκευής,
- ii. το μήκος,
- iii. το βάρος και
- iv. η διάρκεια ζωής.

### **Υλικό κατασκευής**

Οι σιδηροτροχιές κατασκευάζονται από χυτοχάλυβα και παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό (700 - 1100 Μpa). Η παραγωγή τους παρακολουθείται συστηματικά και υπόκειται σε αυστηρότατες προδιαγραφές προτυποποίησης. Σε ορισμένη ποσότητα παραγόμενων σιδηροτροχιών λαμβάνεται δειγματοληπτικός έλεγχος στο χάλυβα τους ως προς τη περιεκτικότητά τους σε άνθρακα η οποία πρέπει να είναι μεταξύ 0,4%- 0,8%, ενώ η περιεκτικότητά τους σε φώσφορο πρέπει να είναι 0,5%. Όταν η ποσότητα σε φώσφορο και άνθρακα ξεπεράσει τα επιτρεπτά όρια η σιδηροτροχιά γίνεται εύθραυστη.

Μια ποικιλία προτύπων καθορίζει με ακρίβεια τη σύσταση, τις μηχανικές ιδιότητες και τα άλλα χαρακτηριστικά των χαλύβων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σιδηροτροχιών. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι ποιότητες χάλυβα που χρησιμοποιούνται συνήθως σε Ευρώπη και Αμερική.

Στην Ευρώπη, σύμφωνα με το πρότυπο UIC, οι σιδηροτροχιές κατηγοριοποιούνται ανάλογα με της αντοχής τους σε εφελκυσμό σε τέσσερις (4) κατηγορίες: 700, 900A, 900B και 1100. Η ονομασία κάθε κατηγορίας δηλώνει και την αντίστοιχη αντοχή. Παρακάτω παρουσιάζονται οι σιδηροτροχιές σύμφωνα με το πρότυπο UIC.

Τύπος Χάλυβα	Αντοχή σε Εφελκυσμό	Χημική Σύνθεση			
		%C	%Si	%Mn	%P %S
900A	900	0,60-0,80	0,10-0,50	0,8-0,13	≤0,04
900B	900	0,55-0,75	0,10-0,50	1,3-1,7	≤0,04
700	700	0,40-0,60	0,05-0,35	0,8-1,25	≤0,05

**Πίνακας 2.1 Χημική σύνθεση χαλύβων σιδηροτροχιάς[6]**

## Το μήκος της σιδηροτροχιάς

Η βιομηχανία μπορεί να παράγει σιδηροτροχιές μήκους έως 120 m. Οι περιορισμοί όμως που προκύπτουν από τη μεταφορά τους περιορίζει το μήκος του τελικού προϊόντος. Στα περισσότερα έργα χρησιμοποιούνται σιδηροτροχιές με τυποποιημένα μήκη 18 m, 24 m, και 36 m. Σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιείται μήκος 60 m.

## Το βάρος των σιδηροτροχιών

Το βάρος των σιδηροτροχιών εξαρτάται από τον τύπο τους και εκφράζεται σε κιλά ανά τρέχον μέτρο (kg/m). Στην Ευρώπη σήμερα χρησιμοποιούνται σιδηροτροχιές των οποίων το βάρος κυμαίνεται μεταξύ 49-60 kg/m. Ειδικότερα στη Δυτική Ευρώπη τείνουν να καθιερωθούν οι διατομές που προτείνει η U.I.C. (UIC 50, 54, 60 kg/m). Αντίθετα, στις Η.Π.Α. και στις χώρες της πρώην Σοβιετικής Ένωσης όπου τα αξονικά φορτία είναι μεγαλύτερα, χρησιμοποιούνται βαρύτερες σιδηροτροχιές (65 ή 70 kg/m).

## Η διάρκεια ζωής των σιδηροτροχιών

Η διάρκεια ζωής των σιδηροτροχιών κυμαίνεται από 20 έως 25 έτη. Η βελτιστοποίηση της διάρκειας ζωής της σιδηροτροχιάς είναι ένα όχι τόσο τεχνικό αλλά τεχνικοοικονομικό πρόβλημα. Η συντήρηση της είναι δαπανηρή και για αυτό το λόγο είναι καλύτερη η αντικατάστασή της πριν την εξάντληση των μηχανικών αντοχών της. Η βέλτιστη ζωή της κυμαίνεται από το σημείο K που αντιστοιχεί στο ελάχιστο των δαπανών.

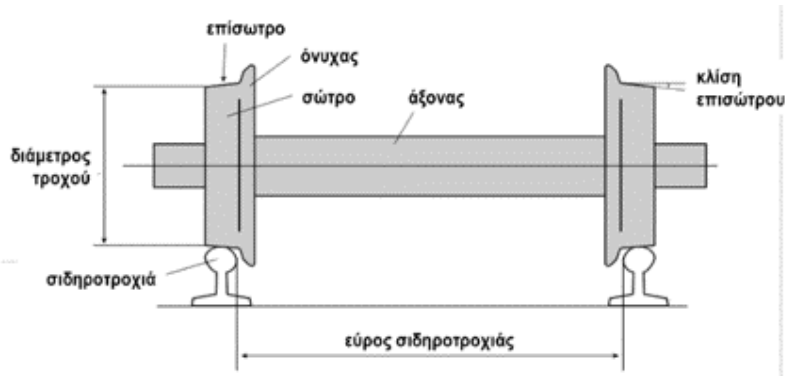
## Ο ρόλος των σιδηροτροχιών

Οι σιδηροτροχιές αποτελούν ένα από τα βασικότερα στοιχεία για την εξασφάλιση της μεταφοράς των συρμών. Έτσι κατανοούμε ότι ο ρόλος των σιδηροτροχιών είναι πολύ σημαντικός. Οι σιδηροτροχιές:

1. μεταφέρουν και κατανέμουν τα φορτία κυκλοφορίας, μέσω των στρωτήρων και του έρματος, στο έδαφος θεμελίωσης
2. αποτελούν την επιφάνεια επί της οποίας κυλίνουν οι τροχοί
3. να στηρίζουν και καθοδηγούν πλευρικά τους τροχούς του οχήματος, όταν χρειάζεται.

Οι σιδηροτροχιές καταπονούνται από διάφορες δυνάμεις όπως στατικά και δυναμικά φορτία για αυτό κατασκευάζονται με συγκεκριμένες προδιαγραφές ώστε να παρουσιάζουν :

- υψηλή αντοχή έναντι φθοράς,
- υψηλή αντοχή έναντι θλίψης,
- υψηλή αντοχή έναντι εφελκυσμού,
- υψηλή αντοχή έναντι κόπωσης,
- υψηλό όριο διαρροής και σκληρότητας,
- υψηλή αντοχή έναντι ψαθυρής θραύσης,
- υψηλή συγκολλησιμότητα,
- υψηλό βαθμό καθαρότητας,
- καλή ποιότητα επιφάνειας,
- ομαλότητα,
- τήρηση των διαστάσεων των τυπικών διατομών και
- χαμηλές τιμές παραμενουσών τάσεων εξαιτίας της κατασκευής.



**Σχ. 2.25 Περιγραμματα τα κύρια μέρη του σιδηροδρομικού συστήματος[6]**

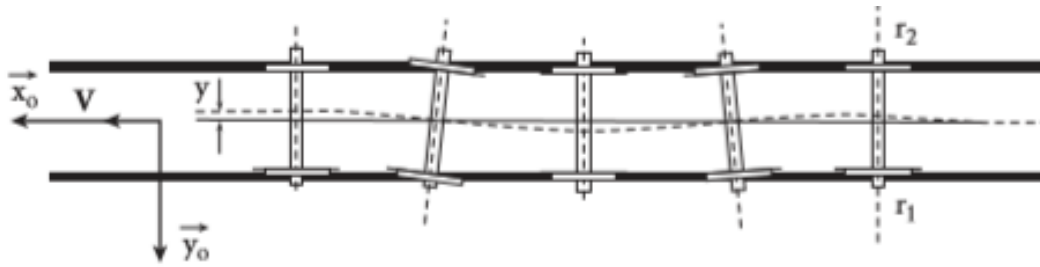
## Λειτουργία του σιδηροδρομικού συστήματος

Σιδηροδρομικό σύστημα εννοούμε την επαφή και την αλληλεπίδραση του τροχού και της σιδηροτροχιάς. Η επιφάνεια επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς είναι ελλειπτική. Κατά την κύλιση των τροχών αναπτύσσονται στην επιφάνεια επαφής ελαστικές δυνάμεις (δυνάμεις ψευδο-ολίσθησης, βαρύτητας), οι οποίες κάτω από ομαλές συνθήκες κυκλοφορίας (καλή ποιότητα γραμμής, επιτρεπόμενα όρια ταχύτητας, τροχαίο υλικό σε καλή κατάσταση), εξασφαλίζουν την ευστάθεια και την καθοδήγηση των οχημάτων στα ευθύγραμμα και στα καμπύλα τμήματα της γραμμής. Η γένεση των δυνάμεων αυτών οφείλεται [4]:

1. στην ειδική κατατομή των τροχών (προφίλ),
2. στην άκαμπτη σύνδεση των τροχών,
3. στη γεωμετρία της άνω εξωτερικής επιφάνειας της κεφαλής της σιδηροτροχιάς,
4. σε φαινόμενα ψευδο-ολίσθησης.

### **2.6 Κίνηση σε ευθυγραμμία**

Θεωρούμε ένα συμβατικό σιδηροδρομικό άξονα κεντρωμένο στη γραμμή, που κινείται με σταθερή ταχύτητα  $V$  σε ευθυγραμμία. Αν για κάποιο λόγο (σφάλματα γραμμής, ασυμμετρία τροχών κλπ.) ο άξονας μετατοπιστεί εγκάρσια ως προς τη θέση αρχικής ισορροπίας, τότε οι δύο τροχοί λόγω της κατατομής τους κυλίνουν με διαφορετικές ακτίνες ( $r_1 \neq r_2$ ) (**Σχ. 2.26**).



Σχ. 2.26 Κίνηση σιδηροδρομικού συστήματος σε ευθυγραμμία[4]

Στην περίπτωση του Σχήματος θα ισχύει  $r_2 > r_0 > r_1$  (όπου  $r_0$  η ακτίνα κύλισης των δύο τροχών στη θέση αρχικής ισορροπίας). Λόγω της στερεάς σύνδεσης των τροχών με το σώμα του άξονα οι δύο τροχοί έχουν την ίδια γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  και συνεπώς θα ισχύει:  $\omega r_2 > \omega r_0 > \omega r_1 \Rightarrow V_2 > V > V_1$  ( $V_1, V_2$ : σχετικές ταχύτητες των δύο τροχών).

Ο τροχός ο οποίος κινείται με μεγαλύτερη σχετική ταχύτητα (τροχός 2) θα περάσει μπροστά από τον άλλο (τροχός 1) και λόγω της στερεάς σύνδεσης των τροχών θα προκαλέσει στροφή του άξονα ως προς τον εγκάρσιο άξονα  $y_0$ .

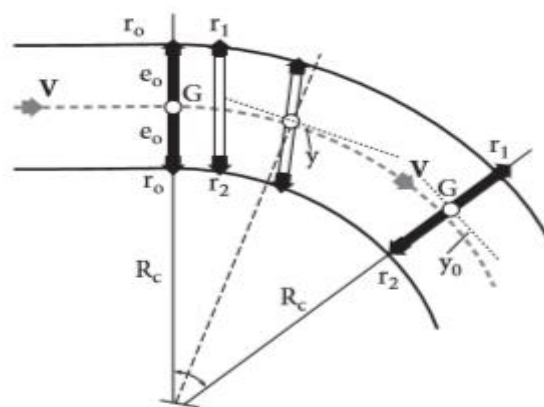
Λόγω της ταυτόχρονης κύλισης του σιδηροδρομικού άξονα προς τα εμπρός, η ακτίνα κύλισης  $r_1$  του τροχού 1 συνεχώς μεγαλώνει, ενώ η ακτίνα κύλισης  $r_2$  του τροχού 2 συνεχώς μικραίνει. Όταν συμβεί  $r_1 > r_2$  ο τροχός 1 αρχίζει να περνά μπροστά από τον τροχό 2 και το φαινόμενο επαναλαμβάνεται.

Η κίνηση αυτή του συμβατικού σιδηροδρομικού άξονα είναι γνωστή ως οφιοειδής ή λοξοειδής κίνηση (hunting). Στην πραγματικότητα η κίνηση ενός σιδηροδρομικού άξονα και ιδίως ενός πλήρους οχήματος (αμάξωμα + φορεία) είναι πιο σύνθετη. Λόγω της ταυτόχρονης κίνησης του άξονα με σταθερή ταχύτητα  $V$ , όταν η διεύθυνση κύλισης των τροχών δε συμπίπτει με τη διεύθυνση μετατόπισης του οχήματος, δημιουργούνται στην επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς δυνάμεις τριβής (δυνάμεις ψευδοολίσθησης), οι οποίες αλλοιώνουν την περιγραφείσα παραπάνω κινηματική συμπεριφορά και προσδίδουν στον άξονα δυναμική συμπεριφορά. Στις πολύ μικρές ταχύτητες, ο φυσικός αυτός μηχανισμός εξασφαλίζει την ευστάθεια των οχημάτων. Στις μεγάλες όμως ταχύτητες δημιουργούνται ταλαντώσεις μεγάλου εύρους και η κίνηση γίνεται ασταθής. Στην περίπτωση αυτή η ευστάθεια των οχημάτων εξασφαλίζεται χάρις στη διαμήκη ελαστική σύνδεση φορείων – αξόνων (πρωτεύουσα ανάρτηση) η οποία περιορίζει το εύρος των ταλαντώσεων. Στην περίπτωση που οι εγκάρσιες μετατοπίσεις των τροχών υπερβούν το προβλεπόμενο διάκενο μεταξύ εσωτερικής παρειάς σιδηροτροχιάς – εξωτερικής

παρειάς τροχού, η διατήρηση της κύλισης των τροχών επί των σιδηροτροχιών εξασφαλίζεται από την παρουσία των ονύχων. Αρχικά οι τροχοί των σιδηροδρομικών οχημάτων κατασκευάζονταν με δύο όνυχες (εσωτερικός και εξωτερικός). Η παρουσία και των δύο ονύχων αποδείχθηκε ότι είναι περιττή. Η μελέτη της κίνησης του άξονα οδήγησε στην κατάργηση του ενός από τους δύο όνυχες και συγκεκριμένα του εξωτερικού έτσι ώστε κατά τη λοξοειδή κίνηση του άξονα να αποφεύγεται η επαφή με την εξωτερική παρειά των σιδηροτροχιών.

## 2.7 Κίνηση σε καμπύλες

Ο άξονας κατά την είσοδό του στην καμπύλη μετατοπίζεται κατά « $y$ » προς το εξωτερικό της (Σχ. 2.27).



Σχ. 2.27 Κίνηση σιδηροδρομικού συστήματος σε καμπύλη[4]

Λόγω της κωνικής κατατομής των τροχών η αρχική ακτίνα κύλισης  $r_0$  των δύο τροχών μεταβάλλεται σε  $r_1$  και  $r_2$  για τον εξωτερικό και τον εσωτερικό τροχό αντίστοιχα. Η ακτίνα κύλισης του εξωτερικού τροχού είναι μεγαλύτερη. Ισχύει δηλαδή η ανισότητα  $r_1 > r_2$  και κατ' επέκταση  $V_1 > V_2$  (όπου  $V_1, V_2$  : σχετικές ταχύτητες των δύο τροχών). Λόγω της στερεάς σύνδεσης των τροχών ο άξονας τείνει να στρίψει μόνος του προς το εσωτερικό της καμπύλης αναζητώντας, μετατοπιζόμενος κατά  $y_0$ , μια αξονική τοποθέτηση μέσα στην καμπύλη (οι δύο τροχοί διανύουν άνισα διαστήματα). Όπως και στην περίπτωση της κίνησης σε ευθυγραμμία, όταν η εγκάρσια μετατόπιση του άξονα υπερβεί το υπάρχον διάκενο «σ» μεταξύ εσωτερικής παρειάς σιδηροτροχιάς – εξωτερικής παρειάς όνυχα, η διατήρηση της κύλισης των τροχών επί των σιδηροτροχιών εξασφαλίζεται με την παρουσία των ονύχων. Η κίνηση που

περιγράφηκε παραπάνω αφορά σε έναν μεμονωμένο άξονα. Η εγγραφή των σιδηροδρομικών φορέων είναι πιο σύνθετη και η τοποθέτηση των αξόνων επηρεάζεται από τις κινήσεις των φορέων και του αμαξώματος. Ωστόσο, ο μηχανισμός εγγραφής των αξόνων παραμένει ο ίδιος. Το παραπάνω σύστημα από τη γένεση του σιδηροδρόμου (1825) μέχρι σήμερα, αποτελεί τη βασική διάταξη που υλοποιεί το φυσικό μηχανισμό καθοδήγησης των σιδηροδρομικών οχημάτων στις ευθυγραμμίες και στις στροφές. Τα σιδηροδρομικά οχήματα, σε αντίθεση με τα άλλα μέσα μεταφοράς, δεν απαιτούν για την καθοδήγησή τους ανθρώπινη επέμβαση (χειρισμό τιμονιού) ή πολύπλοκους μηχανισμούς.

### 3. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Στα σιδηροδρομικά συστήματα καταπονούνται από διάφορα φορτία τα οποία έχουν σαν αποτέλεσμα την αστοχία των υλικών από τα οποία αποτελούνται και τον εκτροχιασμό ή τη μη σωστή λειτουργία του συρμού. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε τα φορτία που δέχονται κάθε τμήμα των συστημάτων ξεχωριστά και τη μηχανική συμπεριφορά τους. Τα κύρια τμήμα στα οποία ασκούνται οι δυνάμεις είναι :

- πλαίσιο του φορείου
- σιδηροδρομικός άξονας
- τροχοί - σιδηροτροχιές

#### 3.1 Δυναμική ανάλυση πλαισίου

Το πλαίσιο του φορείου αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μέρη του φορείου διότι πάνω του στηρίζεται το αμάξωμα. Αυτό δέχεται ένα πλήθος από φορτία τα οποία μειώνουν την αντοχή του και συνεπώς τη διάρκεια ζωής του. Τα φορτία του πλαισίου του φορείου υπολογίζονται από το UIC 615, τα οποία περιλαμβάνουν κατακόρυφα φορτία, εγκάρσια φορτία, διαμήκη φορτία από το σώμα του αμαξώματος και δυναμικά φορτία από δόνηση κινητήρων ή κιβωτίων ταχυτήτων (**Σχ. 3.1**) [21].

Τα κατακόρυφα φορτία είναι

$$F_z = \frac{g}{2 \cdot n \cdot b} (m_{all} - n_b \cdot m_b) \quad (3.1)$$

Τα δυναμικά κατακόρυφα φορτία είναι

$$F_{zq1} = F_{zq2} = \pm a \cdot F_z \quad (3.2)$$

$$F_{zd1} = F_{zd2} = \pm \beta \cdot F_z \quad (3.3)$$



Τα εγκάρσια φορτία από το αμάξωμα είναι

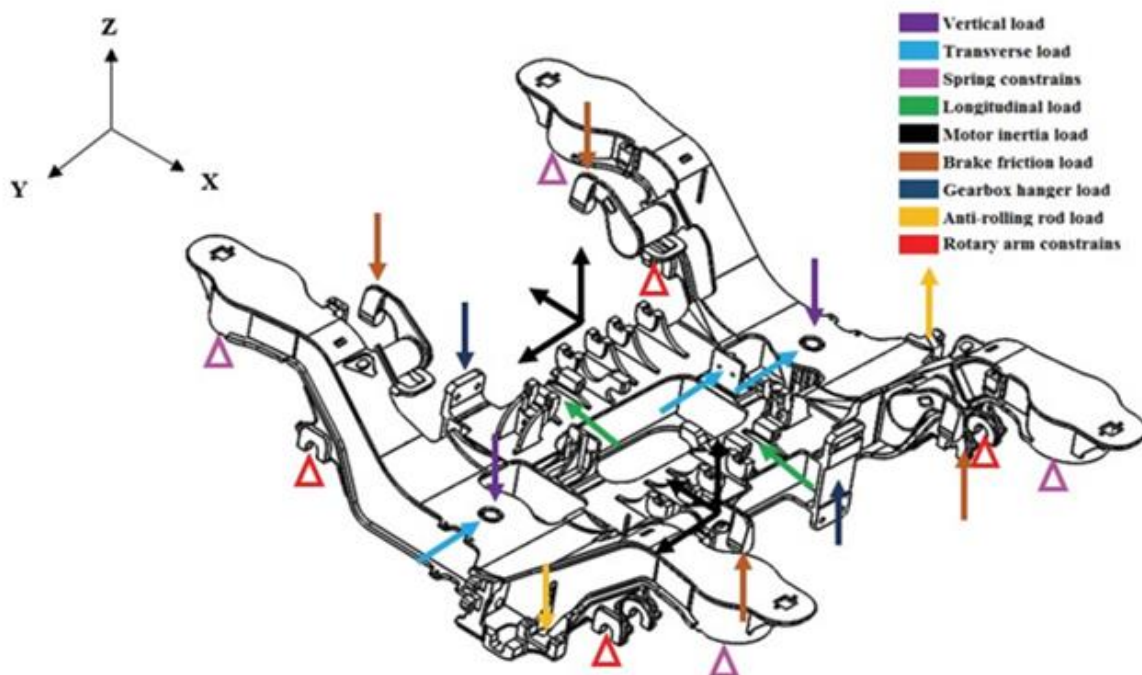
$$F_{yg} = 0.25 \cdot (F_z + 0,5 \cdot m_b \cdot g) \quad (3.4)$$

Τα δυναμικά φορτία από το αμάξωμα είναι

$$F_{yd} = 0.25 \cdot (F_z + 0,5 \cdot m_b \cdot g) \quad (3.5)$$

Τα δυναμικά διαμήκη φορτία από το αμάξωμα είναι

$$F_{xd} = 0.1 \cdot (F_z + 0,5 \cdot m_b \cdot g) \quad (3.6)$$



Σχ. 3.1 Δυναμική Ανάλυση Πλαισίου

Όπου  $g$  είναι η επιτάχυνση βαρύτητας, ίση με  $9,81 \text{ m / s}^2$ ,  $n_b$  είναι ο αριθμός των φορέων σε ένα όχημα,  $m_{all}$  είναι το βάρος του οχήματος,  $m_b$  είναι το βάρος ενός φορείου, ενώ  $\alpha = 0,1$ ,  $\beta = 0,2$ .

## 3.2 Δυναμική ανάλυση διεπαφής τροχού-σιδηροτροχιάς

Στη σιδηροδρομική γραμμή ασκούνται φορτία τα οποία διακρίνονται σε εγκάρσια , διαμήκη και κατακόρυφα. Οι εγκάρσιες δυνάμεις και οι διαμήκεις δυνάμεις, που επενεργούν στο σιδηρόδρομο, δημιουργούνται είτε από την αλληλεπίδραση τροχού – σιδηροτροχιάς (εσωτερικές δυνάμεις), είτε από εξωτερικούς παράγοντες του συστήματος (εξωτερικές δυνάμεις). Η επίδραση των δυνάμεων αυτών είναι σημαντική για τη κίνηση , την ευστάθεια και γενικά την ασφάλεια των οχημάτων. Ο συνδυασμός των τριών ειδών δυνάμεων δημιουργούν καταπονήσεις οι οποίες επηρεάζουν το σχεδιασμό , τη λειτουργία και τη συντήρηση της γραμμής. [7]

Τα κατακόρυφα φορτία ασκούνται αρχικά στην επιφάνεια κύλισης των σιδηροτροχιών και στη συνέχεια, μέσω των διαφόρων ελαστικών στοιχείων της σιδηροδρομικής οδού μεταφοράς, μεταδίδονται μέχρι την υπόβαση. Κατά τη μετάδοσή τους, το εμβαδόν της επιφάνειας εφαρμογής των εσωτερικών δυνάμεων μεγαλώνει, ενώ συγχρόνως η αναπτυσσόμενη τάση μειώνεται.

Τα εγκάρσια φορτία μεταβιβάζονται από τους τροχούς αρχικά στις σιδηροτροχιές, είτε μόνον μέσω της επιφάνειας κύλισης των σιδηροτροχιών (όταν δεν υπάρχει επαφή ονύχων τροχών-εσωτερικών παρειών σιδηροτροχιών), είτε μέσω και των ονύχων των τροχών (όταν υπάρχει επαφή). Στη συνέχεια τα φορτία μεταδίδονται μέσω των υπολοίπων στοιχείων της εσχάρας γραμμής (ελαστικό υπόθεμα, σύνδεσμοι, στρωτήρες) στην έδραση της γραμμής.

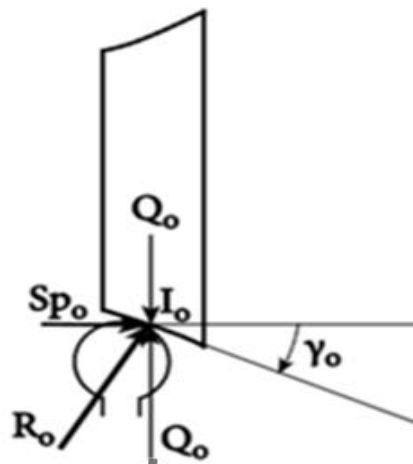
Τα διαμήκη φορτία ασκούνται αρχικά στην επιφάνεια κύλισης των σιδηροτροχιών και στη συνέχεια, όπως και τα εγκάρσια φορτία, μεταδίδονται στην έδραση της γραμμής. Κατανέμονται σε πολύ περισσότερους στρωτήρες από ότι τα κατακόρυφα φορτία.

### Εγκάρσιες δυνάμεις

#### **Δυναμη βαρύτητας $S_p$**

Η δύναμη βαρύτητας αποτελεί εσωτερική δύναμη και ασκείται στον κάθε τροχό του σιδηροδρομικού οχήματος σαν αντίδραση της σιδηροτροχιάς. Αναλυτικά:

Το επίπεδο επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς λόγω της κωνικότητας των τροχών, σχηματίζει γωνία  $\gamma_0$  με το οριζόντιο επίπεδο (**Σχ. 3.2**). Με δεδομένο τα παραπάνω σε κάθε τροχό, στο σημείο επαφής τροχού - σιδηροτροχιάς, η αντίδραση  $R_0$  αναλύεται σε δύο συνιστώσες  $Q_0$  και  $Sp_0$  (**Σχ. 3.2**). Η  $Q_0$  εξουδετερώνεται από το βάρος ανά τροχό. Η εγκάρσια συνιστώσα  $Sp_0$  που παραμένει ονομάζεται δύναμη βαρύτητας ή επαναφοράς. Οφείλεται αποκλειστικά στην κωνικότητα των τροχών και τείνει να ωθήσει τον τροχό προς το εσωτερικό της γραμμής. Θεωρείται δύναμη δυναμική και έχει μέτρο ίσο με  $Q_0 \epsilon \gamma_0$ , όπου  $\gamma_0$  η γωνία που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο, το εφαπτόμενο επίπεδο στο σημείο επαφής  $I_0$ .



**Σχ. 3.2 Δύναμη βαρύτητας  $Sp_0$  στο επίπεδο του ενός τροχού[7]**

$$Sp = \frac{(2 \cdot Q_0 \cdot y)}{(R - R')} \quad (3.7)$$

όπου

$Sp$  η δύναμη βαρύτητας

$Q_0$  φορτίο τροχών

$y$  εγκάρσια μετατόπιση

$R$  ακτίνα καμπυλότητας του επισώτρου των τροχών

$R'$  ακτίνα καμπυλότητας της σιδηροτροχιάς

## **Δυνάμεις ψευδοολίσθησης**

Εγκάρσιες δυνάμεις ψευδοολίσθησης  $T_1, T_2$

Οι εγκάρσιες δυνάμεις ψευδοολίσθησης είναι εσωτερικές δυνάμεις και οφείλονται στο φαινόμενο της εγκάρσιας ψευδοολίσθησης (**Σχ. 3.3**). Θεωρούμε ένα τροχό ο οποίος κυλιέται επί της σιδηροτροχιάς υπό την επίδραση μιας ελκτικής δύναμης  $F_\varepsilon$ . Στο κέντρο C του τροχού ασκείται συγχρόνως μια εξωτερική εγκάρσια δύναμη  $F_y$ . Υπό την επίδραση της δύναμης  $F_y$  ο τροχός χωρίς να χάνει την επαφή του με τη σιδηροτροχιά παραμορφώνεται και ταυτόχρονα η διεύθυνση κύλισης σχηματίζει μια γωνία  $\alpha$  με τη διεύθυνση μετατόπισης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται εγκάρσια ψευδοολίσθηση. Η γωνία  $\alpha$  καλείται "γωνία παρέκκλισης". Η διαφορά  $V_{acty} - V_{roly} = g_y$  ονομάζεται αντίστοιχα εγκάρσια ταχύτητα ολίσθησης ενώ το πηλίκο:

$$\frac{(V_{acty} - V_{roly})}{V_{acty}} = \frac{g_y}{V} = V_y \quad (3.8)$$

καλείται εγκάρσια μειωμένη ολίσθηση. Όπου  $V_{acty}$  η ταχύτητα μετατόπισης μετρούμενη επί τη σιδηροτροχιά και  $V_{roly}$  η ταχύτητα κύλισης του τροχού μετρούμενη επί το τροχό.

Στην επιφάνεια επαφής τροχού - σιδηροτροχιάς δρα μια εγκάρσια δύναμη  $T$  η οποία ονομάζεται εγκάρσια δύναμη ψευδοολίσθησης και δίνεται από τη σχέση:

$$T = -F_y \cdot V_y \quad (3.9)$$

όπου  $f_y$  : συντελεστής εγκάρσιας ψευδοολίσθησης.

Αναλυτικά

Στις ευθείες ισχύουν οι σχέσεις:

$$T_1 = -c_{22} [x \dot{y}'/V - \alpha] - c_{23} [\alpha'/V - \gamma_0/r_0 - \gamma_e y/R \gamma_0 r_0] \quad (3.10)$$

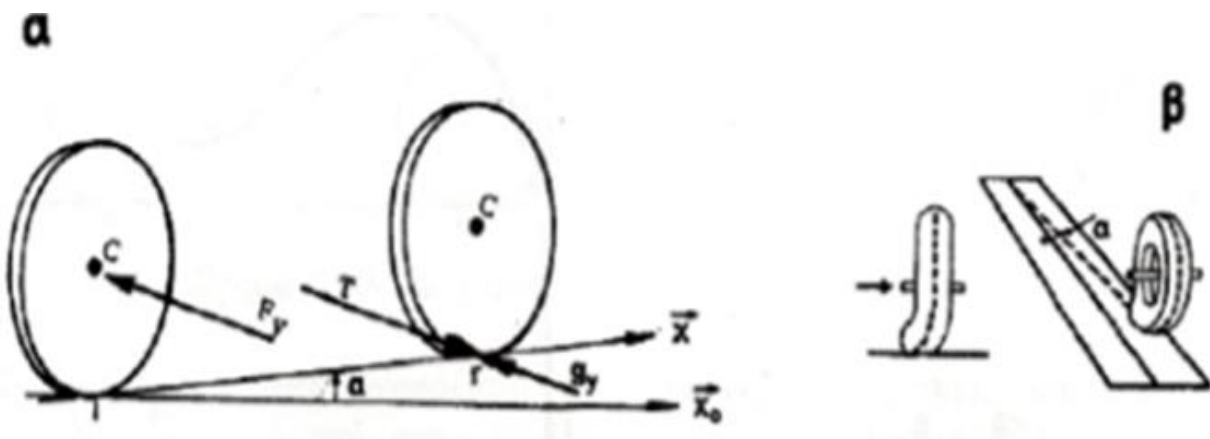
$$T_2 = -c_{22} [x \dot{y}'/V - \alpha] - c_{23} [\alpha'/V + \gamma_0/r_0 - \gamma_e y/R \gamma_0 r_0] \quad (3.11)$$

Στις στροφές ισχύουν οι σχέσεις:

$$T_1 = -c_{22} [x y' / V - \alpha] - c_{23} [\alpha' / V - 1/Rc - \gamma_0 / r_0 - \gamma_e y / R \gamma_0 r_0] \quad (3.12)$$

$$T_2 = -c_{22} [x y' / V - \alpha] - c_{23} [\alpha' / V - 1/Rc + \gamma_0 / r_0 - \gamma_e y / R \gamma_0 r_0] \quad (3.13)$$

Όπου  $C_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) είναι οι συντελεστές ψευδοολίσθησης που εξαρτώνται από τις διαστάσεις της ελλειπτικής επιφάνειας επαφής των τροχών με τις σιδηροτροχιές.

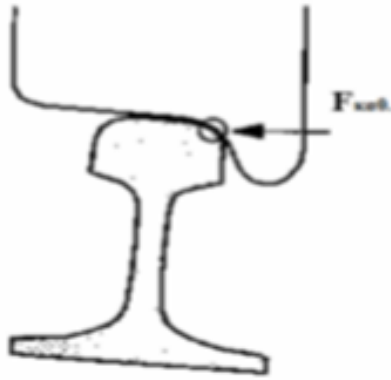


Σχ. 3.3 Φαινόμενο εγκάρσιας ψευδοολίσθησης[7]

### Δύναμη καθοδήγησης $F_{καθ}$ .

Η δύναμη καθοδήγησης αποτελεί εσωτερική δύναμη και ανήκει στις δυναμικές δυνάμεις. Όταν η εγκάρσια μετατόπιση  $y$  ενός σιδηροδρομικού άξονα γίνει ίση με το διάκενο  $\sigma$  όνυχα τροχού – σιδηροτροχιάς, τότε η εξωτερική παρειά των ονύχων των τροχών έρχεται σε επαφή με την εσωτερική παρειά των σιδηροτροχιών. [7]

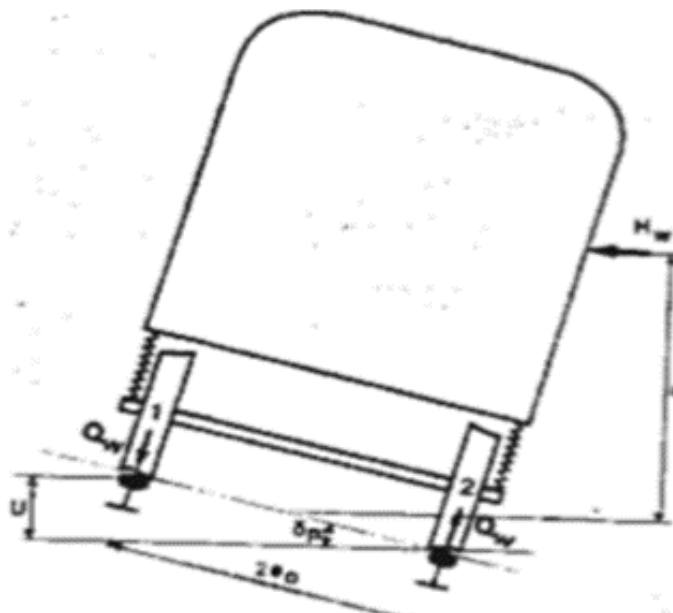
Στην επιφάνεια επαφής ασκούνται εγκάρσια δυναμικά φορτία, που ονομάζονται δυνάμεις καθοδήγησης  $F_{καθ}$ . Ο υπολογισμός των δυνάμεων καθοδήγησης μπορεί να γίνει είτε πρακτικά (δυναμόμετρα), είτε θεωρητικά (μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της δυναμικής συμπεριφοράς των οχημάτων, γραφικές μέθοδοι, κλπ) (Σχ. 3.4).



Σχ. 3.4 Δύναμη καθοδήγησης[7]

### Δύναμη πλευρικού ανέμου $H_w$

Στην περίπτωση που φυσούν πλευρικοί άνεμοι ασκείται στο αμάξωμα και μεταβιβάζεται στη συνέχεια μέσω των αξόνων, στην επιφάνεια κύλισης των σιδηροτροχιών μια εγκάρσια δύναμη  $H_w$ . Η δύναμη αυτή είναι εξωτερική και η φορά της εξαρτάται από τη διεύθυνση του ανέμου. Ενεργεί θεωρητικά στο κέντρο βάρους της πλευρικής επιφάνειας του αμαξώματος (Σχ. 3.5).



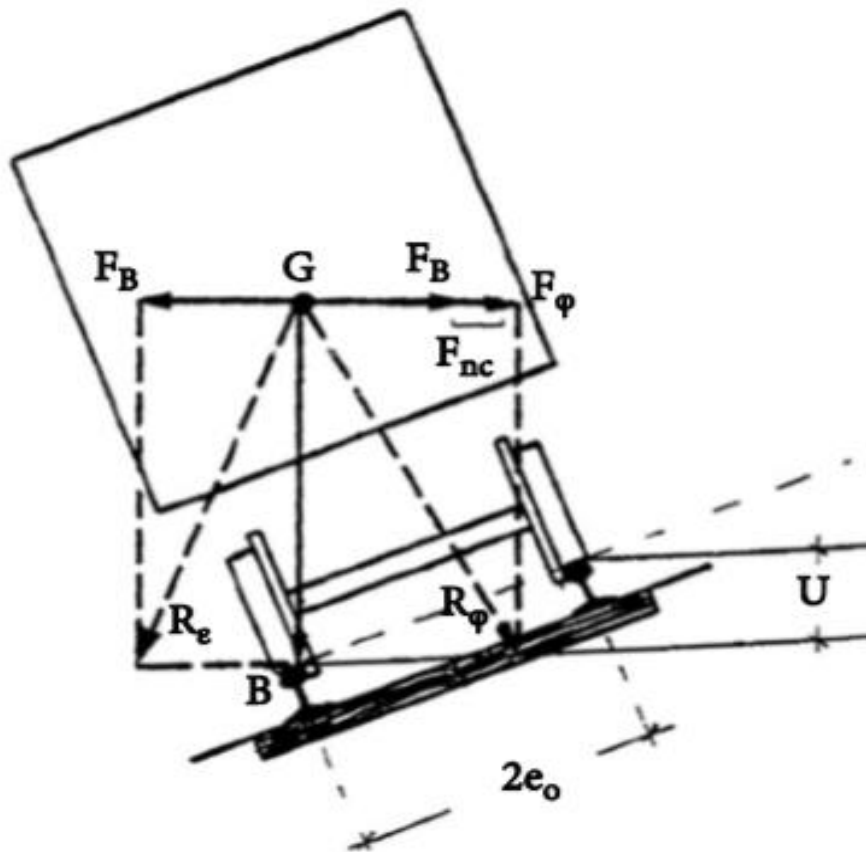
Σχ. 3.5 Δύναμη πλευρικού ανέμου[7]

$$H_w = \rho \cdot V^2 \cdot A \sin^2 \theta \quad (3.14)$$

Όπου  $\rho$  πυκνότητα αέρα,  $V$  ταχύτητα ανέμου,  $A$  επιφάνεια αμαξώματος,  $\theta$  γωνία πρόσκρουσης.

### Παραμένουσα φυγόκεντρη δύναμη $F_{nc}$

Η παραμένουσα φυγόκεντρη δύναμη  $F_{nc}$  θεωρείται ημιστατική δύναμη και ασκείται στα οχήματα όταν κινούνται σε οριζοντιογραφική καμπύλη. Κατά την κίνηση ενός συρμού σε καμπύλο τμήμα γραμμής ακτίνας  $R_c$  με ανεπάρκεια υπερύψωσης  $U$  ασκείται μία παραμένουσα φυγόκεντρη δύναμη. Η αύξηση της ταχύτητας  $V$  του οχήματος, καθώς και η μείωση της ακτίνας καμπυλότητας  $R_c$  και της υπερύψωσης  $U$ , συμβάλλουν στην αύξηση της παραμένουσας φυγόκεντρης επιτάχυνσης (**Σχ. 3.6**).



Σχ. 3.6 Φυγόκεντρη δύναμη[7]

$$F_{nc} = \frac{Q}{g} \cdot \left( \frac{V^2}{R_c} - \frac{g \cdot U}{2 \cdot e_0} \right) = \frac{Q \cdot I}{2 \cdot e_0} \quad (3.15)$$

όπου  $Q$  φορτίο κατ' άξονα,  $g$  επιτάχυνση της βαρύτητας,  $V$  ταχύτητα,  $R_c$  ακτίνα καμπυλότητας,  $U$  υπερύψωση,  $e_0$  εύρος γραμμής.

## Δυνάμεις λόγω ταλαντώσεων του οχήματος $P_{dyn}$

Τα δυναμικά αυτά εγκάρσια φορτία προέρχονται από αιτίες ανάλογες των κατακόρυφων δυναμικών φορτίων και προσδίδουν επιπλέον εγκάρσιες επιταχύνσεις στα διάφορα μέρη του οχήματος. Η άρση των γεωμετρικών σφαλμάτων γραμμής και η λείανση των σιδηροτροχιών αποτελούν μέτρα για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

## Συνολική εγκάρσια δύναμη ΣΥ

Η συνολική εγκάρσια δύναμη που ασκείται από τον κάθε τροχό στη σιδηροτροχιά ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα όλων των επιμέρους εγκάρσιων δυνάμεων. Για να γίνει κατανοητή η προέλευση και η λειτουργία της δύναμης καθοδήγησης, χρειάζεται να γίνει αναφορά σε κάποιες βασικές συνθήκες που την επηρεάζουν, όπως ο τρόπος επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς, αλλά και το πώς μεταφέρονται τα φορτία από τον τροχό στη σιδηροτροχιά.

## Τρόποι επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς

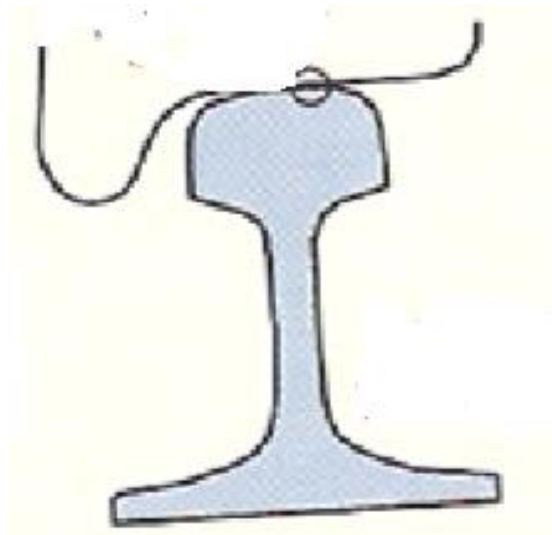
α) Διπλή επαφή : Στη περίπτωση αυτή κατά την κίνηση του οχήματος σε καμπύλη, η επαφή τροχού – σιδηροτροχιάς γίνεται σε δυο σημεία. Αυτό συμβαίνει διότι όταν το όχημα κινείται σε καμπύλη ο σιδηροδρομικός άξονας (και κατ'επέκταση το ζεύγος των τροχών του) δεν έχει την ελευθερία να τοποθετηθεί ακτινικά (**Σχ. 3.7**) [7].



Σχ. 3.7 Διπλή επαφή τροχού - σιδηροτροχιάς



β) Απλή επαφή : Μετά από ορισμένη φθορά του τροχού, η επαφή τροχού – εξωτερικής σιδηροτροχιάς γίνεται απλή (επαφή σε ένα σημείο) .Στην περίπτωση αυτή, το φορτίο του τροχού και η συνολική εγκάρσια δύναμη δρουν στο ίδιο σημείο ενώ αναπτύσσεται και πάλι μια δύναμη τριβής σαν αντίδραση στην ολίσθηση του τροχού προς το εσωτερικό της γραμμής (Σχ. 3.8).



Σχ. 3.8 Απλή επαφή τροχού- σιδηροτροχιά[7]

Η συνολική εγκάρσια δύναμη που ασκείται από τον τροχό στην εξωτερική σιδηροτροχιά είναι ( στην περίπτωση που το όχημα κινείται σε καμπύλη ):

$$\Sigma Y = \pm(T_1 + T_2) \pm F_{καθ} \pm F_{nc} \pm H_w \pm P_{δυν} \pm S_p \quad (3.16)$$

όπου :

$F_{καθ}$  : η δύναμη καθοδήγησης

$F_{nc}$  : η παραμένουσας φυγόκεντρης δύναμης

$H_w$  : η εγκάρσια δύναμη λόγω πλευρικού ανέμου

$P_{δυν}$  : η εγκάρσια δύναμη λόγω ταλαντώσεων του οχήματος

Στην περίπτωση που δεν λαμβάνει χώρα επαφή όνυχα τροχού- σιδηροτροχιάς λείπει ο όρος της δύναμης καθοδήγησης  $F_{καθ}$ . Στην περίπτωση που δεν υπάρχει πλευρικός άνεμος λείπει ο όρος  $F_w$ .

## Διαμήκη δυνάμεις

### Δυνάμεις θερμοκρασιακών μεταβολών $N_{\Delta t}$

Σε κάθε μεταβολή της θερμοκρασίας οι σιδηροτροχιές παρουσιάζουν τάση αύξησης ή μείωσης του μήκους τους κατά μια ποσότητα  $\Delta l$ :

$$\Delta l = \alpha t \Delta t l_0 \quad (3.17)$$

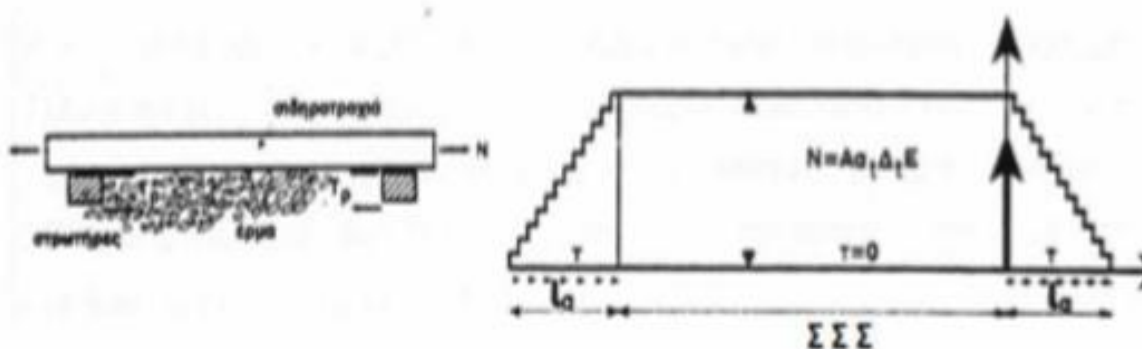
Όπου  $\Delta l$ : η μεταβολή του μήκους σε mm (συστολή ή διαστολή)  
 $\alpha t$ : ο δείκτης θερμικής διαστολής χάλυβα (σε  $\text{grad}^{-1}$ )  
 $\Delta t$ : η μεταβολή θερμοκρασίας σε  $^{\circ}\text{C}$  (αύξηση ή μείωση)  
 $l_0$ : το αρχικό μήκος σιδηροτροχιάς σε mm

Στη μετατόπιση αυτή αντιτίθενται οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται μεταξύ σιδηροτροχιών - στρωτήρων και στρωτήρων - έρματος. Στην περίπτωση συνεχώς συγκολλημένων σιδηροτροχιών ( Σ.Σ.Σ.) η μετατόπιση  $\Delta l$  εμποδίζεται και επί της σιδηροτροχιάς ασκείται αξονικά ζεύγος θλιπτικών ή εφελκυστικών δυνάμεων  $N_{\Delta t}$ .

$$N_{\Delta t} = \frac{E \cdot A \cdot \Delta l}{l_0} = E \cdot A \cdot \alpha t \cdot \Delta t \quad (3.18)$$

Όπου  $A$ : η εγκάρσια διατομή της σιδηροτροχιάς  
 $E$ : το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

Οι δυνάμεις αυτές ονομάζονται δυνάμεις θερμοκρασιακών μεταβολών και θεωρούνται στατικές επιπονήσεις (**Σχ. 3.9**). Η τιμή τους παραμένει σταθερή σε όλο σχεδόν το μήκος της συγκολλημένης σιδηροτροχιάς. Από μια απόσταση  $l_a$  από τα άκρα της Σ.Σ.Σ. (ζώνη εκτόνωσης) η τιμή της δύναμης  $N_{\Delta t}$  μειώνεται σταδιακά μέχρις ότου μηδενιστεί στα δύο άκρα της σιδηροτροχιάς.



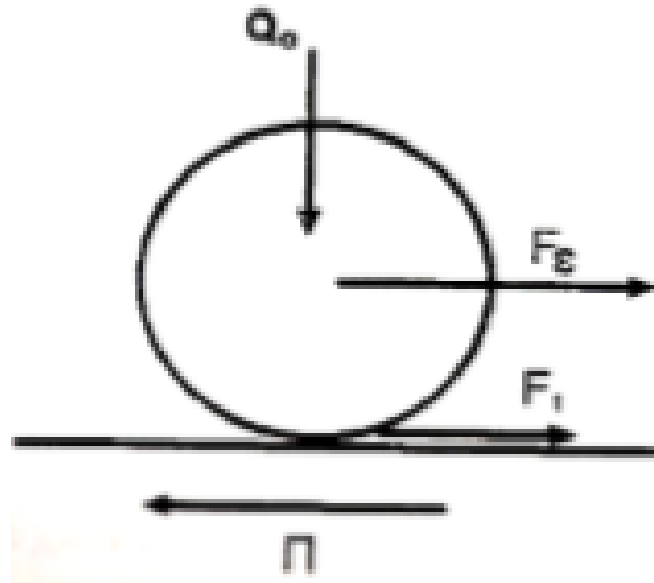
Σχ. 3.9 Δύναμη θερμικών μεταβολών[7]

### Δύναμη έλξης επισώτρων $F_t$

Ένας συρμός περιέχει ένα τουλάχιστον κινητήριο όχημα που έλκει τα υπόλοιπα (ελκόμενα) οχήματα. Σε περίπτωση μεγάλων κατά μήκος κλίσεων ή για μεγαλύτερες επιδόσεις σε ταχύτητα και μεταφερόμενο φορτίο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο κινητήρια οχήματα (διπλή έλξη) που τοποθετούνται συνήθως στην αρχή και στο τέλος του συρμού. Οι κινητήρες ελκόντων οχημάτων (ένας ή περισσότεροι) δίνουν κίνηση στους κινητήριους άξονες. Η μετάδοση της κίνησης γίνεται μέσω μηχανικών και υδραυλικών ή ηλεκτρικών συστημάτων.

Η ισχύς των κινητήρων διακρίνεται σε ονομαστική και ωφέλιμη. Η ονομαστική ισχύς είναι η αρχικά παρεχόμενη ισχύς όπως προδιαγράφεται από τον κατασκευαστή του κινητήρα και ένα μέρος της χάνεται κατά τη μετάδοση της κίνησης από τον άξονα του κινητήρα στα επίσωτρα των τροχών. Η ωφέλιμη ισχύς είναι αυτή που πραγματικά διατίθεται για την κίνηση των κινητηρίων μονάδων και του όλου συρμού. Η ωφέλιμη ισχύς ( $P_t$ ) εκφράζεται σε ίππους (HP, CV) ή κιλοβάτ (KW) ( $1 \text{ HP} = 0,736 \text{ KW}$ ).

Η δύναμη που προέρχεται από την ωφέλιμη ισχύ της κινητήριας μονάδας και ενεργεί στα επίσωτρα των τροχών, ονομάζεται ελκτική δύναμη επισώτρων ( $F_t$ ). Η δύναμη που ενεργεί στο επίπεδο των αξόνων ονομάζεται δύναμη έλξης ή ελκτική δύναμη ( $F_e$ ) (Σχ. 3.10).



Σχ. 3.10 Δύναμη έλξης

Η δύναμη έλξης στα επίσωτρα δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται με την ταχύτητα της κινητήριας μονάδας και γενικά ελαττώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα. Ισχύει η σχέση :

$$F_t = \frac{P}{V} \quad (3.19)$$

όπου  $P$  ωφέλιμη ισχύ  
 $V$  ταχύτητα

### Δύναμη πρόσφυσης $\Pi$

Η δύναμη πρόσφυσης  $\Pi$  αποτελεί την αντίδραση της δύναμης έλξης των κινητήρων. Η επιφάνεια εφαρμογής των δυνάμεων είναι η ελλειπτική επιφάνεια επαφής επισώτρου τροχών – σιδηροτροχιά.

Η σχέση που εκφράζει τη δύναμη πρόσφυσης είναι :

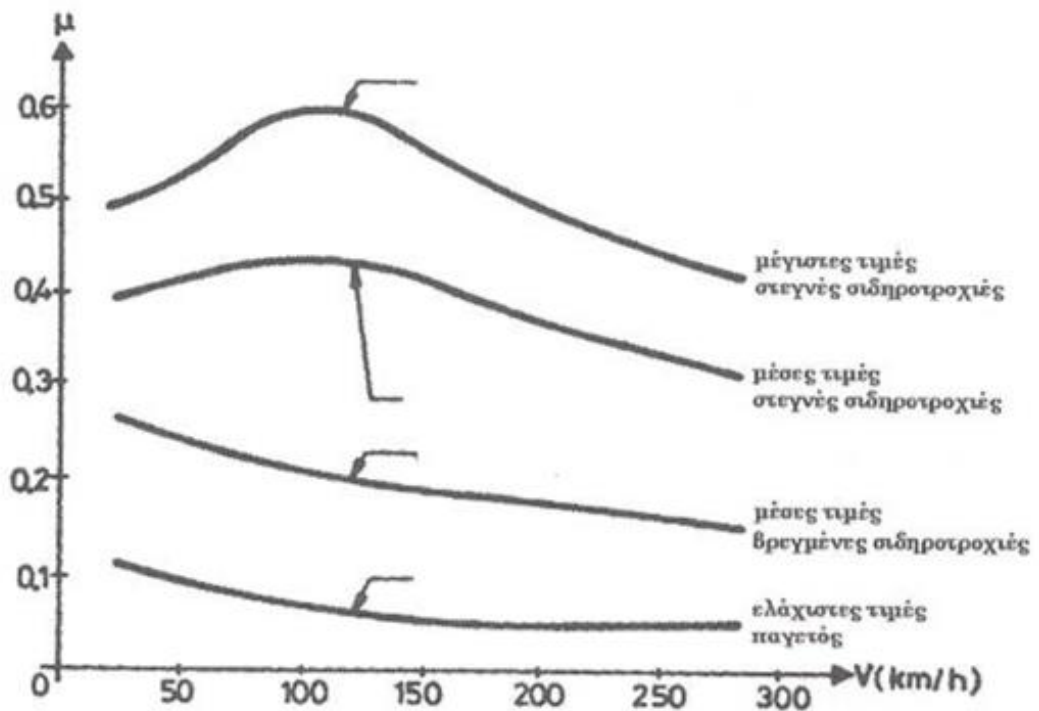
$$\Pi = Q \cdot \mu \quad (3.20)$$

όπου :  $Q$  : κατακόρυφο βάρος κινητήριου τροχού (daN)  
 $\mu$  : συντελεστής πρόσφυσης

Ο συντελεστής πρόσφυσης υπολογίζεται από τη σχέση των Curtious-Kniffler:

$$\mu = \frac{7.5}{(V+44)} + 0,161 \quad (3.21)$$

Επίσης μπορούμε να τον λάβουμε από το διάγραμμα (Σχ. 3.11) ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες.



Σχ. 3.11 Διάγραμμα συντελεστή πρόσφυσης[7]

Οι δυνάμεις έλξης στα επίσωτρα και πρόσφυσης συνδυάζονται μεταξύ τους με στόχο την έλξη του συρμού. Τα στοιχεία από τα οποία εξαρτάται η έλξη του συρμού που ονομάζονται ελκτικά στοιχεία και είναι τα εξής :

- η συνολική αντίσταση του συρμού  $W$  (την υπολογίζει η υπηρεσία έλξης/ εκμετάλλευσης του σιδηροδρομικού οργανισμού)
- η ισχύς του κινητήρα ή των κινητήρων (τη δίδει ο προμηθευτής)
- η δύναμη έλξης  $F_t$  που αναπτύσσεται στα επίσωτρα των κινητήριων τροχών (τη δίδει ο προμηθευτής υπό μορφή διαγράμματος)

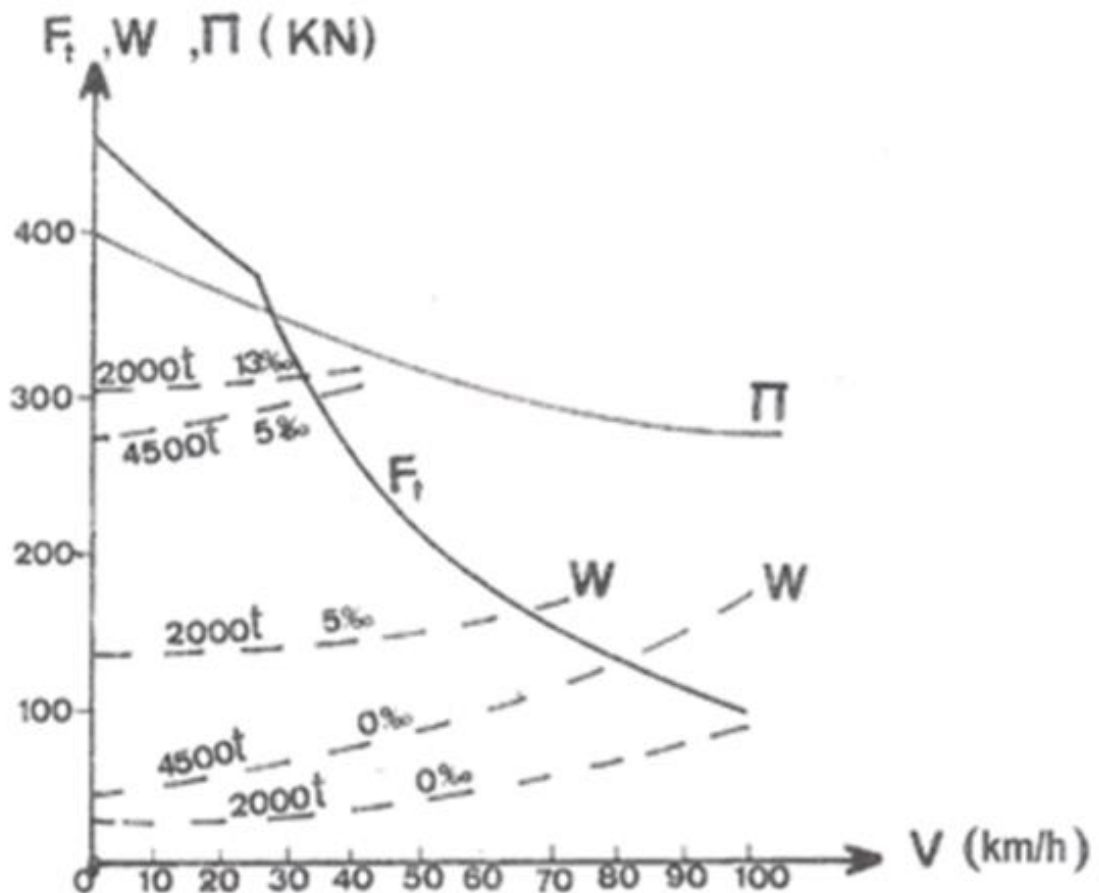
- η δύναμη πρόσφυσης  $\Pi$  που αναπτύσσεται στην επιφάνεια επαφής τροχούσιδηροτροχιάς των κινητήριων τροχών (υπολογίζεται εμπειρικά/πειραματικά)

Η βασική σχέση που πρέπει να ισχύει κάθε στιγμή για να εξασφαλιστεί η κίνηση του συρμού και η οποία αποτελεί τη συνθήκη έλξης συρμού είναι η ακόλουθη:

Δύναμη πρόσφυσης > Δύναμη έλξης επισώτρων > Συνολική αντίσταση συρμού

$$(\Pi > F_t > W)$$

Τα παραπάνω ελκτικά στοιχεία προσδιορίζονται ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα σε ένα διάγραμμα ( $F_t$ - $V$ ). Παρακάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα για ένα είδος κινητήρα (Σχ. 3.12).



Σχ. 3.12 Διάγραμμα  $F_t - V$ ,  $W - V$ ,  $\Pi - V$ [7]

### 3.3 Κόπωση

Τα σιδηροδρομικά συστήματα καταπονούνται σε κόπωση. Ο Wöhler ήταν ο πρώτος που μελέτησε το φαινόμενο και το εντόπισε για πρώτη φορά στους σιδηροδρόμους.

Κόπωση είναι η καταπόνηση που εμφανίζεται σε ένα υλικό, όταν ασκούνται σε αυτό δυναμικές και επαναλαμβανόμενες τάσεις, η οποία μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα υποβολής της, οδηγεί σε αστοχία του υλικού. Οι τάσεις που επιδρούν ονομάζονται τάσης κοπώσεως. Η κόπωση εμφανίζεται σε επίπεδα τάσεων σημαντικά χαμηλότερα από την αντοχή σε εφελκυσμό ή την αντοχή διαρροής σε στατική φόρτιση. Η καταπόνηση αυτή συμβάλλει στο 90% της αστοχίας των μεταλλικών υλικών. Ταυτόχρονα, είναι καταστρεπτική και εσωτερική, ενώ εμφανίζεται χωρίς προειδοποίηση.

Η αστοχία σε κόπωση είναι περίπου όμοια με την ψαθυρή αστοχία ακόμη και στα συνήθως όλκιμα μέταλλα, διότι υποβάλλεται σε πολύ μικρή ή και καθόλου πλαστική παραμόρφωση που σχετίζεται με την αστοχία. Η διαδικασία γίνεται αντιληπτή με το σχηματισμό και τη διάδοση ρωγμών και η επιφάνεια θραύσης είναι συνήθως κάθετη στη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης εφελκυστικής τάσης.

Παράγοντες που προκαλούν αστοχία στην κόπωση:

Υπάρχουν τρεις βασικοί παράγοντες

- 1) Μέγιστη τάση εφελκυσμού αρκετά υψηλή τιμή.
- 2) Μεγάλη ποσότητα ή διακύμανση της εφαρμοζόμενης τάσης.
- 3) Ένας αρκετά μεγάλος αριθμός κύκλων της εφαρμοζόμενης τάσης.

Άλλοι πρόσθετοι παράγοντες είναι

- Συγκέντρωση τάσης
- Διάβρωση
- Θερμοκρασία
- Υπερφόρτωση
- Μεταλλουργική δομή

## Κατηγορίες κύκλων φόρτισης

Η κόπωση διακρίνεται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το είδος των τάσεων και με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης των καταπονήσεων που υφίστανται ένα υλικό, στην Πολυκυκλική και στην Ολιγοκυκλική κόπωση.

Στην πολυκυκλική κόπωση (High Cycle fatigue – HCF), το υλικό υποβάλλεται σε έναν μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία του ( $N > 10^4$ ). Καθώς οι τιμές των τάσεων που ασκούνται είναι ελαστικές, το υλικό δεν υφίσταται πλαστικές παραμορφώσεις.

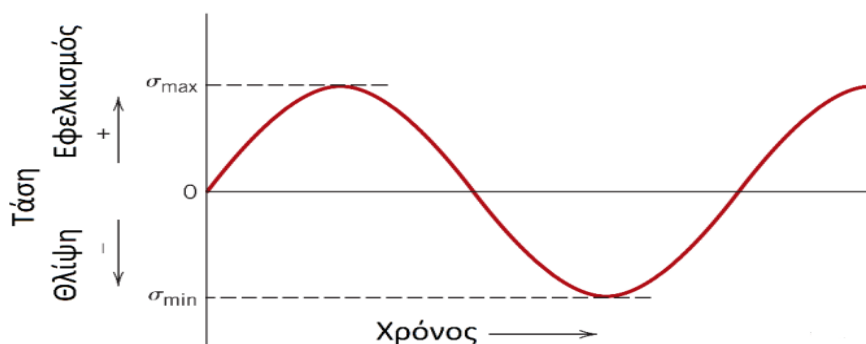
Στην Ολιγοκυκλική κόπωση (Low Cycle fatigue – LCF), το υλικό δέχεται τάσεις μεγαλύτερες από το όριο διαρροής του, με συνέπεια το υλικό να υφίσταται ένα ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης σε κάθε κύκλο φόρτισης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, την μείωση κατά πολύ του αριθμού των κύκλων φόρτισης του υλικού μέχρι την αστοχία του ( $N < 10^4$ ).

## Κυκλικές τάσεις

Η τάση που εφαρμόζεται μπορεί να είναι αξονική (εφελκυσμό - θλίψη), καμπτική ή στρεπτική. Οι τύποι των κυμαινόμενων τάσεων είναι τρεις :

### 1. Η αναστρεφόμενη κυκλική τάση

Στην αναστρεφόμενη κυκλική τάση, η εναλλασσόμενη τάση μεταβάλλεται από μία μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{max}$ ) σε μία μέγιστη θλιπτική τάση ( $\sigma_{min}$ ) ίσου μεγέθους, όπου  $\sigma_{max} > 0$  και  $\sigma_{min} < 0$  (**Σχ. 3.13**).



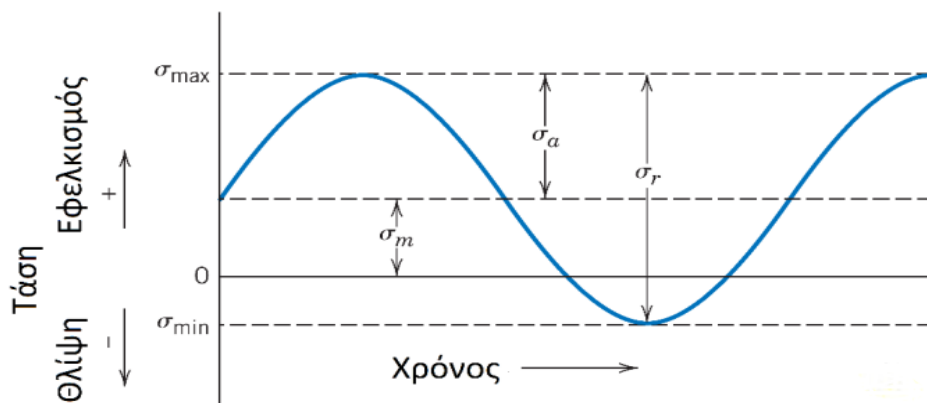
**Σχ. 3.13** Αναστρεφόμενη κυκλική τάση



## 2. Η επαναλαμβανόμενη κυκλική τάση

Στην επαναλαμβανόμενη κυκλική τάση, η μέγιστη και η ελάχιστη τάση δεν είναι συμμετρικές ως προς το επίπεδο μηδενικής τάσης, δηλαδή  $\sigma_{\max} \neq \sigma_{\min}$  (**Σχ. 3.14**). Σε αυτό το τύπο κυκλικής τάσης, οι τιμές των  $\sigma_{\max}$  και  $\sigma_{\min}$  μπορεί να είναι :

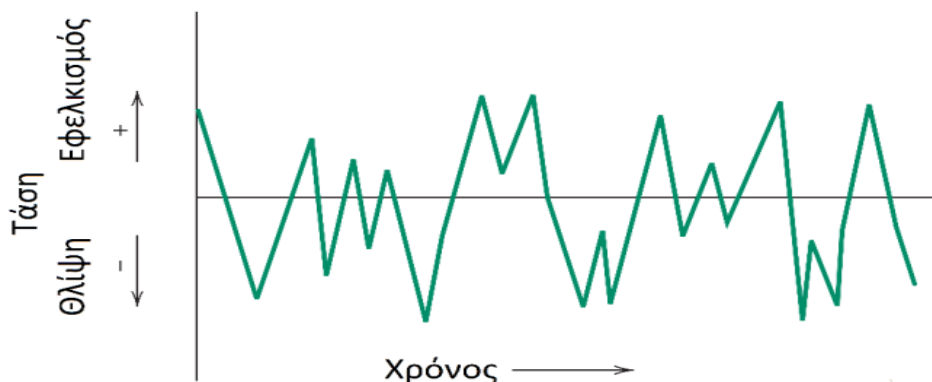
- $\sigma_{\max} > 0$  και  $\sigma_{\min} > 0$ , δηλαδή εφελκυστικές
- $\sigma_{\max} < 0$  και  $\sigma_{\min} < 0$ , δηλαδή θλιπτικές
- $\sigma_{\max} > 0$  και  $\sigma_{\min} < 0$ , δηλαδή  $\sigma_{\max}$  εφελκυστική και  $\sigma_{\min}$  θλιπτική



**Σχ. 3.14** Επαναλαμβανόμενη κυκλική τάση

## 3. Ο τυχαίος κύκλος τάσης

Ο τυχαίος κύκλος τάσης συναντάται πιο συχνά στην πράξη. Στην περίπτωση του τυχαίου κύκλου τάσης, το επίπεδο της τάσης μπορεί να μεταβάλλεται τυχαία ως προς το πλάτος και τη συχνότητα (**Σχ. 3.15**).



**Σχ. 3.15** Τυχαίος κύκλος τάσης

## Χαρακτηριστικά κυκλικών τάσεων

Οι παράμετροι των κυμαινόμενων κυκλικών τάσεων είναι οι εξής:

- Η μέγιστη τιμή της τάσης  $\sigma_{max}$
- Η ελάχιστη τιμή της τάσης  $\sigma_{min}$
- Το εύρος των τάσεων  $\Delta\sigma$  ή  $\sigma_r$ , που ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ  $\sigma_{max}$  και  $\sigma_{min}$ . Δίνεται από τη σχέση :

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (3.22)$$

- Η μέση τάση  $\sigma_m$ , που ορίζεται ως η μέση τιμή της μέγιστης  $\sigma_{max}$  και ελάχιστης τάσης  $\sigma_{min}$ . Δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2} \quad (3.23)$$

- Το πλάτος τάσης  $\sigma_a$ , που ισούται με το μισό του εύρους της τάσης  $\Delta\sigma$ . Δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (3.24)$$

- Ο λόγος τάσεων R, ο οποίος ισούται με τον λόγο της ελάχιστης προς την μέγιστη τάση:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (3.25)$$

- Η αναλογία εύρους τάσεων A, που ισούται με τον λόγο του πλάτους τάσης προς την μέση τάση:

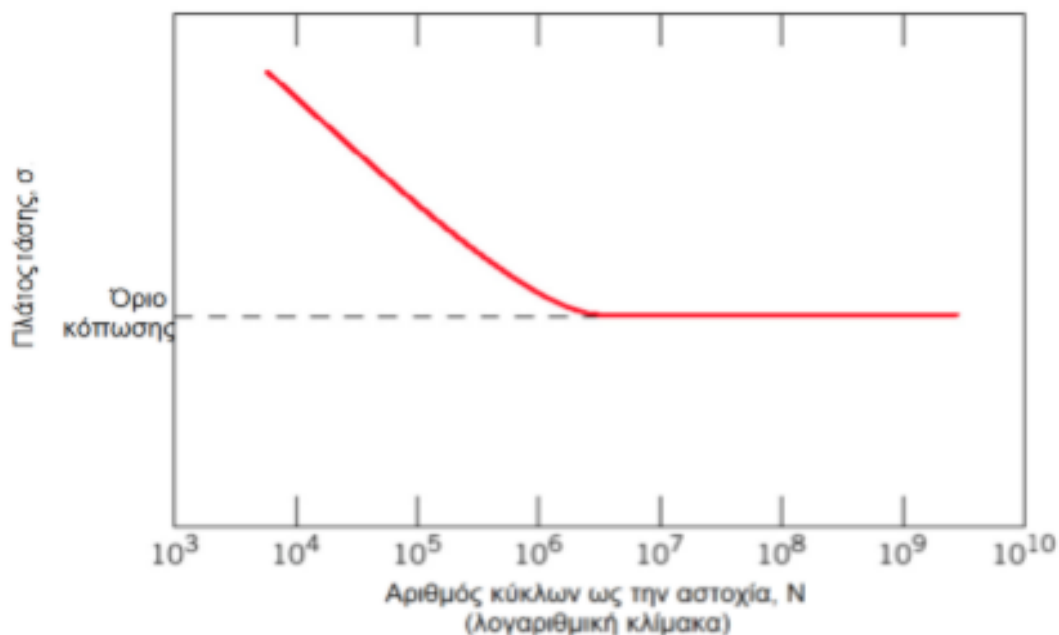
$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} \quad (3.26)$$

## Η καμπύλη S-N

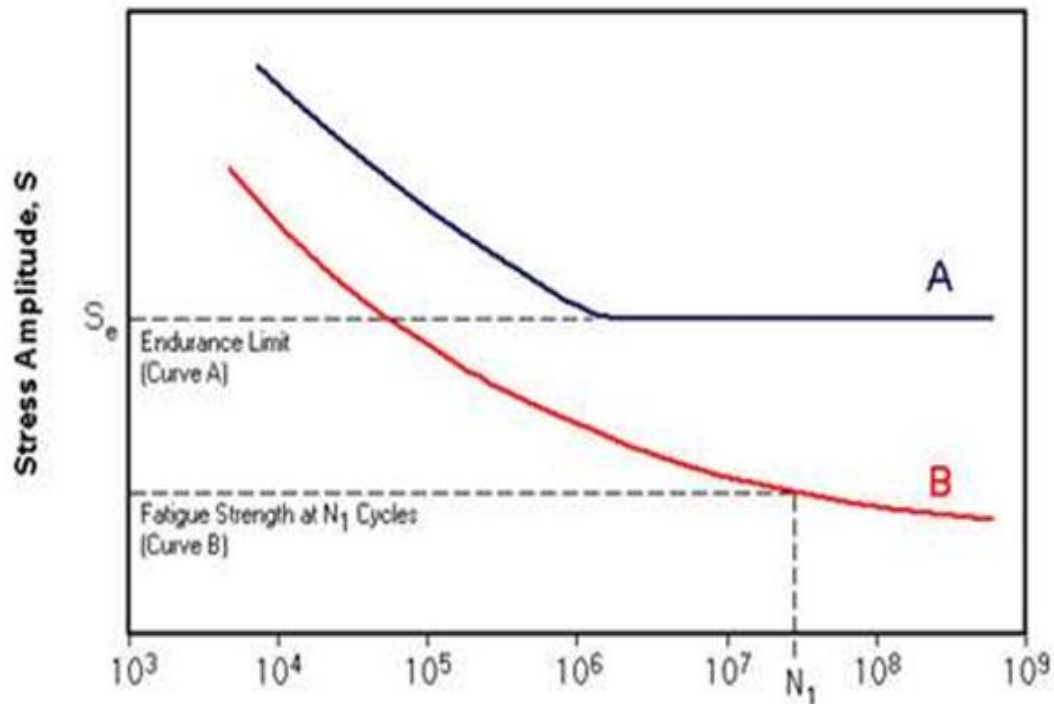
Η καμπύλη S-N ή αλλιώς καμπύλη Wohler είναι μια γραφική παράσταση μιας εναλλασσόμενης τάσης σε σχέση με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης έως την αστοχία για ένα δεδομένο υλικό. Τυπικά , τόσο η καταπόνηση όσο και ο αριθμός των κύκλων φόρτισης εφαρμόζονται σε λογαριθμικές κλίμακες (**Σχ. 3.16**).

Το όριο κόπωσης  $\sigma_A$  αποτελεί τη τάση η οποία αντιστοιχεί στο οριζόντιο τμήμα της καμπύλης. Το όριο κόπωσης είναι η μέγιστη τιμή της κυμαινόμενης τάσης που δεν θα προκαλέσει αστοχία για ουσιαστικά άπειρο αριθμό κύκλων φόρτισης(καμπύλη A). Σε πολλούς χάλυβες το όριο κόπωσης κυμαίνεται μεταξύ του 35% και 60% της αντοχής σε εφελκυσμό.

Υπάρχουν όμως υλικά όπως , τα περισσότερα μη σιδηρούχα κράματα (π.χ χαλκός , αλουμίνιο) τα οποία δεν εμφανίζουν όριο κόπωσης με αυτήν την έννοια η καμπύλη S-N συνεχίζει την πτωτική της τάση καθώς αυξάνονται οι τιμές του N. Με αυτόν τον τρόπο, η κόπωση θα εμφανισθεί τελικά ανεξάρτητα από το μέγεθος της τάσης (καμπύλη B). Στα υλικά αυτά, η απόκριση σε κόπωση αναφέρεται ως αντοχή σε κόπωση, που ορίζεται ως το επίπεδο της τάσης στο οποίο δεν εμφανίζεται αστοχία για κάποιον συγκεκριμένο αριθμό κύκλων (π.χ.  $10^7$  κύκλοι) (**Σχ. 3.17**).



**Σχ. 3.16** Το πλάτος ( $\sigma$ ) συνάρτηση του λογαρίθμου των κύκλων (N) ως την αστοχία από κόπωση για υλικό που παρουσιάζει όριο κόπωσης[9]

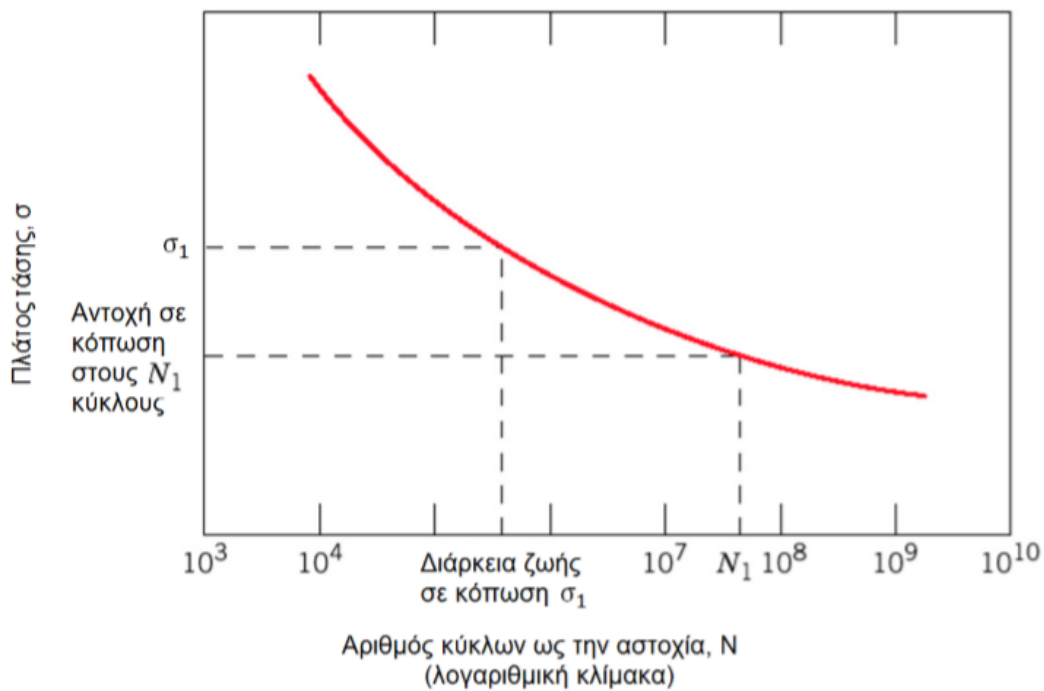


Σχ. 3.17 Διάγραμμα S - N για σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα

Ένα άλλος σημαντικός παράγοντας που καθορίζει τη συμπεριφορά των υλικών σε κόπωση είναι η διάρκεια ζωής σε κόπωση  $N_f$ , που είναι ο αριθμός των κύκλων που προκαλεί αστοχία σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο τάσης, όπως προκύπτει από το διάγραμμα S-N (Σχ. 3.18).

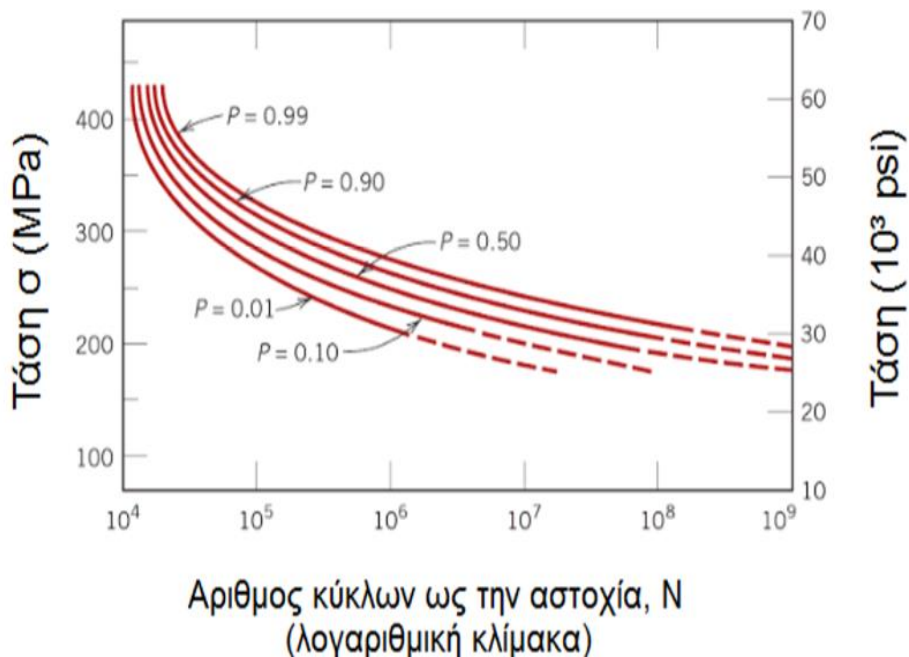
Η διάρκεια ζωής σε κόπωση δέχεται μια σημαντική διασπορά των δεδομένων της κόπωσης, δηλαδή μια διακύμανση της μετρούμενης τιμής του N, για ένα αριθμό δοκιμών που εξετάστηκαν στο ίδιο επίπεδο τάσης. Αυτό οδηγεί σε σημαντικές σχεδιαστικές αβεβαιότητες, όταν η διάρκεια ζωής σε κόπωση ή και το όριο κόπωσης (ή αντοχή) βρίσκονται υπό μελέτη. Η διασπορά στα αποτελέσματα είναι συνέπεια της ευαισθησίας της κόπωσης σε μία σειρά παραμέτρων της δοκιμής και του υλικού που είναι αδύνατον να ελεγχθούν με ακρίβεια. Στις παραμέτρους αυτές περιλαμβάνονται :

- η κατασκευή του δοκιμίου
- η προετοιμασία της επιφάνειας
- οι μεταλλουργικές μεταβλητές
- η ευθυγράμμιση του δοκιμίου στην πειραματική διάταξη
- η μέση τάση
- η συχνότητα



**Σχ. 3.18** Το πλάτος ( $\sigma$ ) συνάρτηση του λογαρίθμου των κύκλων ( $N$ ) ως την αστοχία από κόπωση για υλικό που δεν παρουσιάζει όριο κόπωσης[9]

Διάφορες τεχνικές της στατιστικής έχουν αναπτυχθεί για να προσδιορίζουν την διάρκεια ζωής σε κόπωση και το όριο κόπωσης με όρους πιθανοτήτων. Ένας συμβατικός τρόπος για την αναπαράσταση δεδομένων που έχουν επεξεργασθεί με αυτόν τον τρόπο είναι μέσω καμπυλών σταθερής πιθανότητας (**Σχ. 3.19**).



**Σχ. 3.19** Καμπύλες S - N της πιθανότητας αστοχίας σε κόπωση[9]

## Έναρξη και διάδοση ρωγμών

Η αστοχία σε κόπωση χαρακτηρίζεται από τρία βήματα :

1) Έναρξη ρωγμής, όπου μία μικρή ρωγμή δημιουργείται σε κάποιο σημείο, όπου έχουμε μεγάλη συγκέντρωση τάσης

2) Διάδοση της ρωγμής, όπου η ρωγμή προχωράει αυξανόμενη με κάθε κύκλο τάσης

3) Τελική αστοχία, η οποία εμφανίζεται πολύ γρήγορα όταν η διαδιδόμενη ρωγμή αποκτήσει ένα κρίσιμο μέγεθος.

Η διάρκεια ζωής σε κόπωση  $N_f$  υπολογίζεται από τη σχέση :

$$N_f = N_i + N_p \quad (3.27)$$

Όπου ,

$N_i$  αριθμός κύκλων μέχρι την έναρξη της ρωγμής

$N_p$  αριθμός κύκλων για την διάδοση της ρωγμής

Θέσεις στις οποίες δημιουργούνται οι ρωγμές:

- επιφανειακές αμυχές
- αιχμηρές ταινίες - κλείδες
- νηματοειδές διαμορφώσεις
- μικρές κοιλότητες

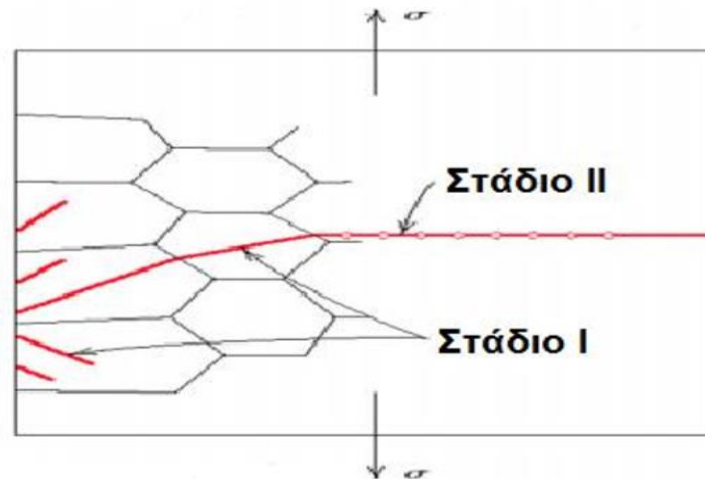
## **Στάδια διάδοσης ρωγμών**

Στάδιο I χαρακτηρίζεται από :

- πολύ αργός ρυθμός
- κατά μήκος κρυσταλλογραφικών επιπέδων υψηλής διατμητικής τάσης
- επιφάνεια κόπωσης επίπεδη, χωρίς ιδιαίτερα χαρακτηριστικά

Στάδιο II χαρακτηρίζεται από :

- ο ρυθμός επέκτασης της ρωγμής αυξάνει δραματικά
- αλλαγή στην διεύθυνση διάδοσης σε μια νέα, σχεδόν κάθετη στην εφαρμοζόμενη εφελκυστική τάση



Σχ. 3.20 Στάδια διάδοσης ρωγμών

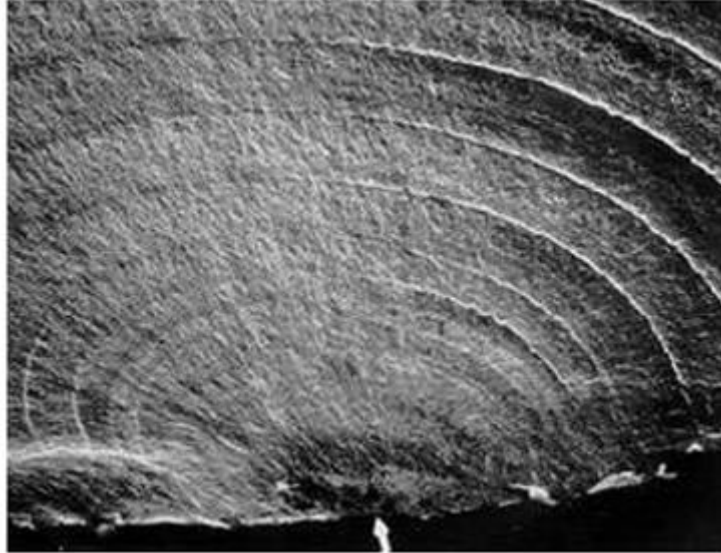
### Επιφάνεια θραύσης υλικού

Ένα τμήμα της επιφάνεια θραύσης έχει λεία μορφή που οφείλεται στη τριβή των επιφανειών του ρήγματος μεταξύ τους , καθώς αυτό προωθείται σταδιακά κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Αντίθετα , ένα μικρό τμήμα της επιφάνειας , το οποίο αντιστοιχεί στο τελικό στάδιο της θραύσης , έχει ανώμαλη εμφάνιση και οφείλεται στη γρήγορη τελική προώθηση του ρήγματος με όλκιμο τρόπο μέσα στο υλικό , καθώς η μειωμένη διατομή του υλικού που έχει απομείνει δεν μπορεί να αντέξει πλέον τα επιβαλλόμενα φορτία (Σχ. 3.21).



Σχ. 3.21 Περιγραφή επιφάνειας θραύσης

Επίσης μια επιφάνεια αστοχίας του υλικού στη κόπωση έχει γραμμώσεις αυτές έχουν συνήθως σχήμα τόξων από ομόκεντρους κύκλους , το κέντρο των οποίων υποδεικνύει το σημείο όπου βρισκόταν το αρχικό ρήγμα. Η απόσταση μεταξύ των ρωγμών παρέχει μια καλή εκτίμηση για τη ταχύτητα προώθησης του ρήγματος εντός του υλικού (**Σχ. 3.22**).



**Σχ. 3.22** Γραμμώσεις κόπωσης σε επιφάνεια θραύσης[8]

Η επιφάνεια θραύσης αποτελείται από δύο τύπους ιχνών :

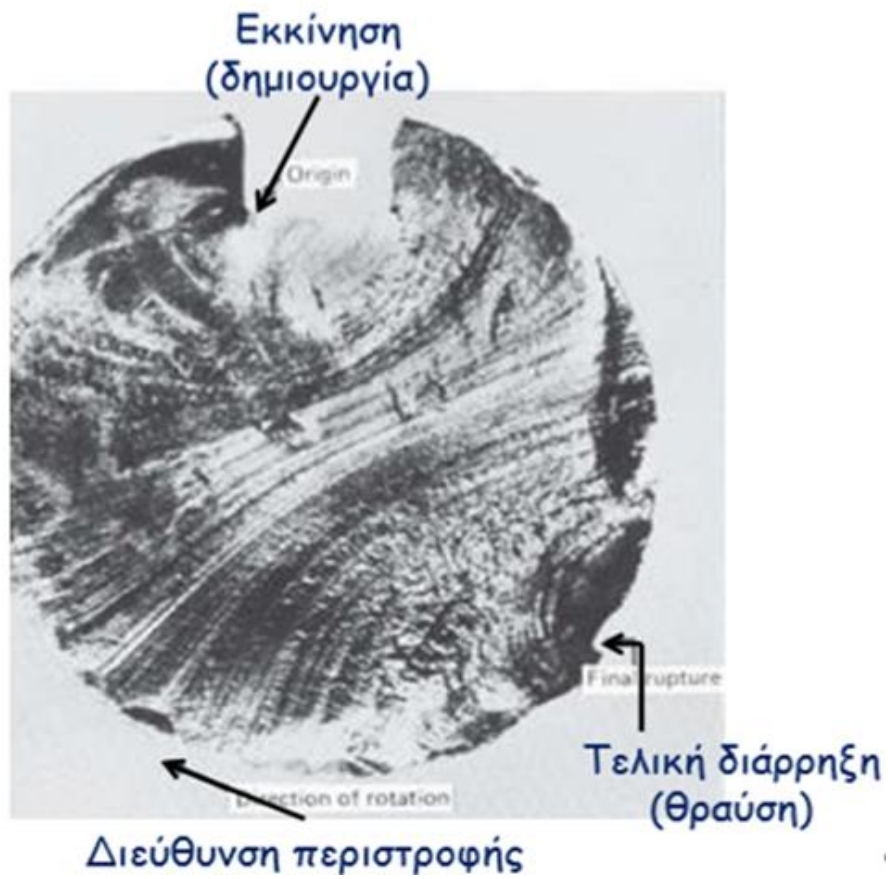
1. κυματοειδείς πτυχώσεις η οστρακοειδείς ραβδώσεις (beachmarks) (**Σχ. 3.23**)

Έχουν μακροσκοπικές διαστάσεις και παρατηρούνται δια γυμνού οφθαλμό. Συναντώνται σε εξαρτήματα στα οποία οι εξωτερικές τάσεις δεν είναι συνεχής κατά τη διάρκεια της διάδοσης της ρωγμής (π.χ. εξαρτήματα μηχανής που λειτουργεί μία βάρδια ανά ημέρα). Κάθε ζώνη κυματοειδών πτυχώσεων αντιστοιχεί σε μια χρονική περίοδο κατά την οποία σημειώθηκε αύξηση της ρωγμής.

2. μικρο-ραβδώσεις (striations) (**Σχ. 3.24**)

Έχουν μικροσκοπικές διαστάσεις . Κάθε μικρο-ράβδωση αναπαριστά την απόσταση κατά την οποία αναπτύχθηκε το μέτωπο της ρωγμής κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης. Το πλάτος των μικρο-ραβδώσεων αυξάνει καθώς αυξάνει το εύρος της τάσης.





Σχ. 3.23 Επιφάνεια θραύσης με κυματοειδή αυλακώσεις[9]



Σχ. 3.24 Επιφάνεια θραύσης με μικρο-ραβδώσεις[9]

Στην γρήγορη αστοχία δεν εμφανίζονται κυματοειδείς πτυχώσεις και μικρό – ραβδώσεις . Η γρήγορη αστοχία μπορεί να είναι είτε όλκιμη είτε ψαθυρή (Σχ. 3.25).



Σχ. 3.25 Γρήγορη αστοχία από κόπωση[9]

### Κανόνες κόπωσης

Ο κανόνας Goodman ισχύει σε περίπτωση όπου η εφαρμοζόμενη μέση τάση είναι διαφορετική από το μηδέν. Τότε είναι απαραίτητο να υπολογιστεί ένα ανάλογο πλάτος τάσης που θα έχει τους ίδιους κύκλους κόπωσης για την αστοχία με την πραγματική καταπόνηση με μέση τάση  $\sigma_m$  και πλάτος τάσης  $\sigma_a$ . Για αυτόν τον σκοπό, για να υπολογίσουμε αυτό το ανάλογο πλάτος τάσης  $\sigma_f$ , χρησιμοποιείται ο κανόνας του Goodman, ο οποίος είναι :

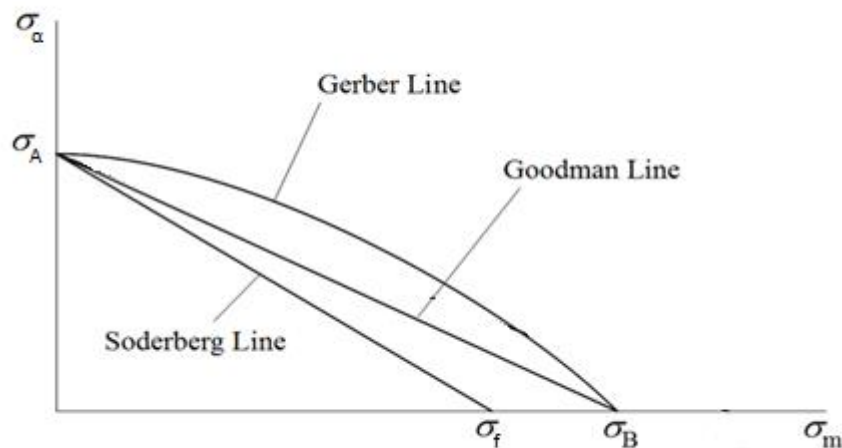
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \frac{\sigma_m}{\sigma_B} = 1 \quad (3.28)$$

όπου  $\sigma_a$  είναι το πραγματικό πλάτος τάσης,  $\sigma_m$  η πραγματική μέση τάση,  $\sigma_f$  το ισοδύναμο πλάτος τάσης που επιφέρει τους ίδιους κύκλους αστοχίας μέχρι την θραύση και  $\sigma_B$  είναι το όριο θραύσης του υλικού σε εφελκυσμό. Ο κανόνας αυτός είναι εμπειρικός και δεν εφαρμόζεται με επιτυχία σε όλες τις περιπτώσεις για κόπωση σε βηματικές συνθήκες κατεύθυνσης (μεταβλητό πλάτος).

Ένας επιπλέον χρήσιμος κανόνας κόπωσης είναι το κριτήριο του Soderberg. Με το κριτήριο του Soderberg μπορούμε να εντοπίσουμε εάν ένα υλικό βρίσκεται στη ζώνη ασφαλείας, δηλαδή ότι θα αστοχήσει σε πολύ μεγάλο αριθμό κύκλων κόπωσης. Για να βρίσκεται το υλικό στη ζώνη ασφαλείας πρέπει ο συντελεστής ασφαλείας  $n$  να είναι ίσος ή μεγαλύτερος του 1. Η σχέση που εκφράζει το κριτήριο του Soderberg είναι :

$$\frac{\sigma_a}{\frac{\sigma_f}{K} - \sigma_m} = \frac{\sigma_A}{\sigma_f} \quad (3.29)$$

Όπου,  $\sigma_a$  το πλάτος τάσεων,  $\sigma_f$  το όριο διαρροής του υλικού,  $\sigma_m$  η μέση τάση,  $\sigma_A$  το όριο κόπωσης του υλικού και  $K$  ο συντελεστής ασφαλείας.



Σχ. 3.26 Γραμμή soderberg

### 3.4 Τάσεις επαφών

Οι τάσεις επαφών hertz είναι πιέσεις που αναπτύσσονται μεταξύ δύο σωμάτων τα οποία έρχονται σε επαφή.[10] Υπάρχουν τρεις κατηγορίες επαφών :

- Επαφή μεταξύ σφαιρών
- Επαφή μεταξύ κυλίνδρων

- Επαφή σφαίρας ή κυλίνδρου με επίπεδη επιφάνεια

Για την επαφή κύλινδρο επίπεδο οι τύποι που χρησιμοποιούνται είναι:

Ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας  $E'$

$$\frac{1}{E'} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (3.30)$$

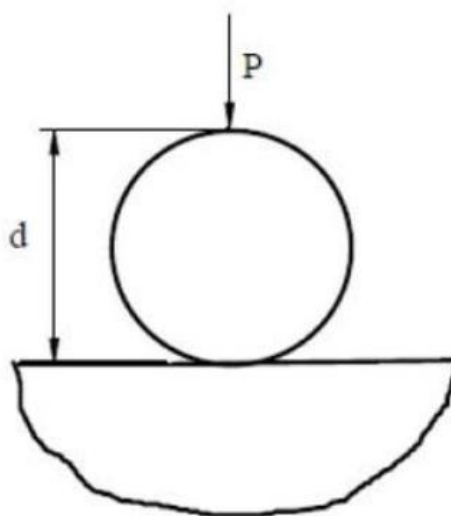
Όπου  $\nu$  ο λόγος Poisson και  $E$  το μέτρο ελαστικότητας

Μέγιστη και ελάχιστη τάση

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{\pi} \cdot \left( \frac{6 \cdot Q_{\max} \cdot E'^2}{R^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.31)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{1}{\pi} \cdot \left( \frac{6 \cdot Q_{\min} \cdot E'^2}{R^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.32)$$

Όπου  $Q_{\max}$  μέγιστο φορτίο,  $Q_{\min}$  ελάχιστο φορτίο και  $R$  η ακτίνα του κυλίνδρου.



Σχ. 3.27 Τάση Hertz κύλινδρο - επίπεδο

## 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Η εφαρμογή θα γίνει στο σιδηροδρομικό σύστημα (τροχός – σιδηροτροχιά) για ένα συρμό ,οποίος έλκεται από νηζελοηλεκτράμαξα κατασκευής ADTRANZ Σειράς 220. Πιο συγκεκριμένα θα υπολογιστεί η καταπόνηση στο σύστημα (τροχός – σιδηροτροχιά) και θα προβλεφθεί η διάρκεια ζωής και η ασφάλειά του. Ομοίως υπολογίζονται και για τα υπόλοιπα βαγόνια του συρμού.

### Τεχνικά χαρακτηριστικά

Εύρος γραμμής	$2e_0 = 1500 \text{ mm}$
Μήκος αμαξώματος	$l = 19400 \text{ mm}$
Πλάτος αμαξώματος	$w = 2950 \text{ mm}$
Συνολικό βάρος	$M = 80 \text{ t}$
Βάρος κατά άξονα	$m = 20 \text{ t}$
Μέγιστη ταχύτητα	$V_{\max} = 160 \text{ km/h}$
Ισχύ κινητήρα	$P = 1050 \text{ kw}$
Μέγιστη δύναμη πέδησης	$F_{\text{πεδ}} = 160 \text{ kN}$
Διάμετρος τροχού	$D = 1250 \text{ mm}$
Μέγιστη Δύναμη έλξης	$F_t = 260 \text{ kN}$
Για εμπορικούς συρμούς βάρους 340 t	$V = 60 \text{ km/h}$

Πίνακας 4.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Βαγονιού



Σχ. 4.1 Ντηζελοηλεκτράμαξα ADTRANZ[2]



Σχ. 4.2 Συρμός ελκόμενος με ADTRANZ

Κωνικότητα τροχών	$\gamma_e = 0,20$
Ακτίνα καμπυλότητας	$R_c = 500 \text{ m}$
Αρχική κωνικότητα τροχών	$\gamma_0 = 0,025$
Διάκενο όνυχα – σιδηροτροχιά	$y = 10 \text{ mm}$
Ακτίνα καμπυλότητας κεφαλής σιδηροτροχιάς	$R' = 0,30 \text{ m}$

Πίνακας 4.2 Στοιχεία τροχού – σιδηροτροχιάς[11,12]

Χάλυβας Τροχού	Μέτρο Ελαστικότητας	Λόγος Poisson	Όριο όριο διαροής	Όριο Αντοχής σε Κόπωση	Όριο Θραύσης
R7	E=210 GPa	v=0,3	$\sigma_f = 1170$ MPa	$\sigma_A = 470$ MPa	$\sigma_B = 1385$ MPa

Πίνακας 4.3 Υλικά Τροχού

Χάλυβας Σιδηροτροχιάς	Μέτρο Ελαστικότητας	Λόγος Poisson	Όριο διαρροής	Όριο Αντοχής σε Κόπωση	Όριο Θραύσης
UIC 900 A	E=210 GPa	v=0,3	$\sigma_f = 1200$ MPa	$\sigma_A = 515$ MPa	$\sigma_B = 1475$ MPa

Πίνακας 4.4 Υλικά Σιδηροτροχιάς [13]

### Υπολογισμός Δυνάμεων

- Συνολικό φορτίο

$$B = M \cdot g = 80000 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 784,8 \text{ kN}$$

- Φορτίο κατά άξονα

$$B_{\alpha\xi} = m \cdot g = 20000 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 196,2 \text{ kN}$$

- Φορτίο κάθε τροχού

$$Q = \frac{B_{\alpha\xi}}{2} = \frac{196,2 \text{ kN}}{2} = 98,1 \text{ kN}$$

## Εγκάρσιες Δυνάμεις

- Δύναμη βαρύτητας  $S_p$

Αρχικά , για τον υπολογισμό της δύναμης βαρύτητας  $S_p$  υπολογίζουμε την ακτίνα καμπυλότητας του τροχού . Η σχέση που εκφράζει την ακτίνα καμπυλότητας του τροχού είναι :

$$R = \frac{R' \cdot \gamma_e}{\gamma_e - \gamma_o} = \frac{0,3m \cdot 0,20}{0,20 - 0,025} = 0,34m$$

$$S_p = \frac{(2 \cdot Q_o \cdot y)}{(R - R')} = \frac{(2 \cdot 98,1kN \cdot 10mm)}{(340mm - 300mm)} = 49kN$$

- Φυγόκεντρος δύναμη  $F_{nc}$

$$F_{nc} = \frac{Q_{\alpha\xi}}{g} \cdot \left( \frac{V^2}{R_c} - \frac{g \cdot U}{2 \cdot e_o} \right) = \frac{196,2kN^2}{9,81 \frac{m}{s^2}} \cdot \left( \frac{16,6^2 \frac{m^2}{s^2}}{500m} - \frac{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,05m}{2 \cdot 1,5m} \right)$$
$$= 8kN$$

Όπου ταχύτητα:  $V=60 \text{ km/h} = 16,6 \text{ m/s}$

Η υπερύψωση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$U = \frac{7,12V^2}{R_c} = \frac{7,12 \cdot 60^2 \frac{km}{h}}{500m} = 0,05m$$

## Διαμήκη Δυνάμεις

- Δύναμη Έλξης  $F_t$

$$F_t = \frac{P}{V} = \frac{2100kw}{16,6m/s} = 126,5kN$$

Όπου

ισχύ :  $P = 2100 \text{ kw}$  ( 2 κινητήριες μονάδες)

ταχύτητα:  $V=16,6 \text{ m/s}$



- Δυνάμεις πρόσφυσης Π

$$\Pi = Q \cdot \mu$$

Το συντελεστή πρόσφυσης  $\mu$  θα τον λάβουμε από το **Σχ 3.11** για μέσες τιμές στεγνής σιδηροτροχιάς. Ο συντελεστής πρόσφυσης  $\mu$  σύμφωνα με το διάγραμμα είναι 0,4.

$$\Pi = 4 \cdot (98,1\text{kN} \cdot 0,4) = 156,96\text{kN} \text{ (4 κινητήριои τροχοί)}$$

- Δύναμη θερμικών μεταβολών

$$N_{\Delta t} = E \cdot A \cdot \alpha t \cdot \Delta t$$

Στοιχεία σιδηροτροχιάς UIC 50

Μέτρο ελαστικότητας :  $E = 2,1 \cdot 10^3 \frac{\text{t}}{\text{cm}^2}$

Διαφορά θερμοκρασίας :  $\Delta t = 40^\circ\text{C}$

Συντελεστής θερμοκρασίας :  $\alpha t = 1,2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$

Διατομή:  $A = 63,93\text{cm}^2$

Άρα η δύναμη θερμικών μεταβολών είναι :

$$N_{\Delta t} = 2,1 \cdot 10^3 \frac{\text{t}}{\text{cm}^2} \cdot 63,93\text{cm}^2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}} \cdot 40^\circ\text{C} = 6,4\text{t}$$

- Δύναμη ανέμου  $H_w$

$$H_w = \rho \cdot V^2 \cdot A \sin^2 \theta$$

Αρχικά , μετατρέπεται η ταχύτητα του ανέμου από μποφόρ σε m/s.

$$V = 0,836 \cdot B^{\frac{3}{2}} = 19 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Όπου  $B = 8$  μποφόρ

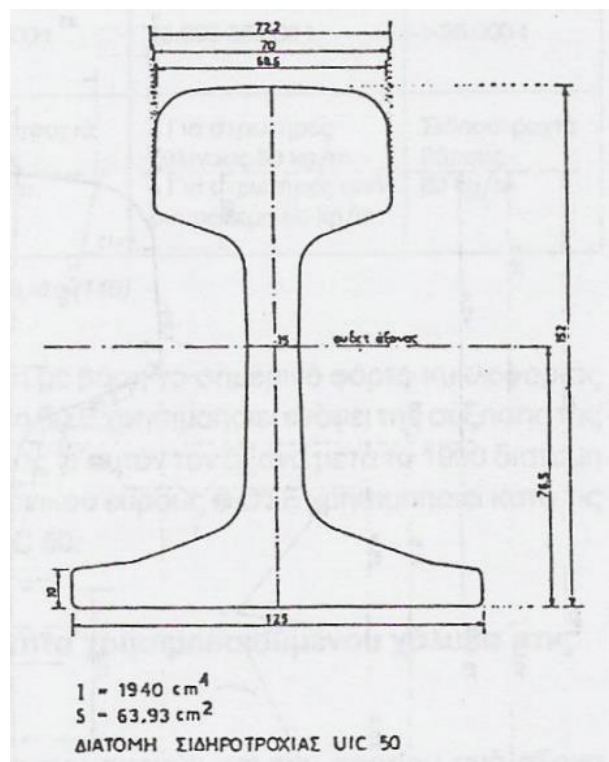
Στη συνέχεια υπολογίζεται η επιφάνεια  $A$  που συγκρούει ο άνεμος .

$$A = L \cdot h = 4,26\text{m} \cdot 19,4\text{m} = 82,644\text{m}^2$$

Όπου  $L$  μήκος και  $h$  ύψος του βαγονιού.

Η πυκνότητα του αέρα είναι  $\rho = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  και η γωνία  $\theta = 30^\circ$ . Επομένως από τον τύπο υπολογίζεται η δύναμη του ανέμου :

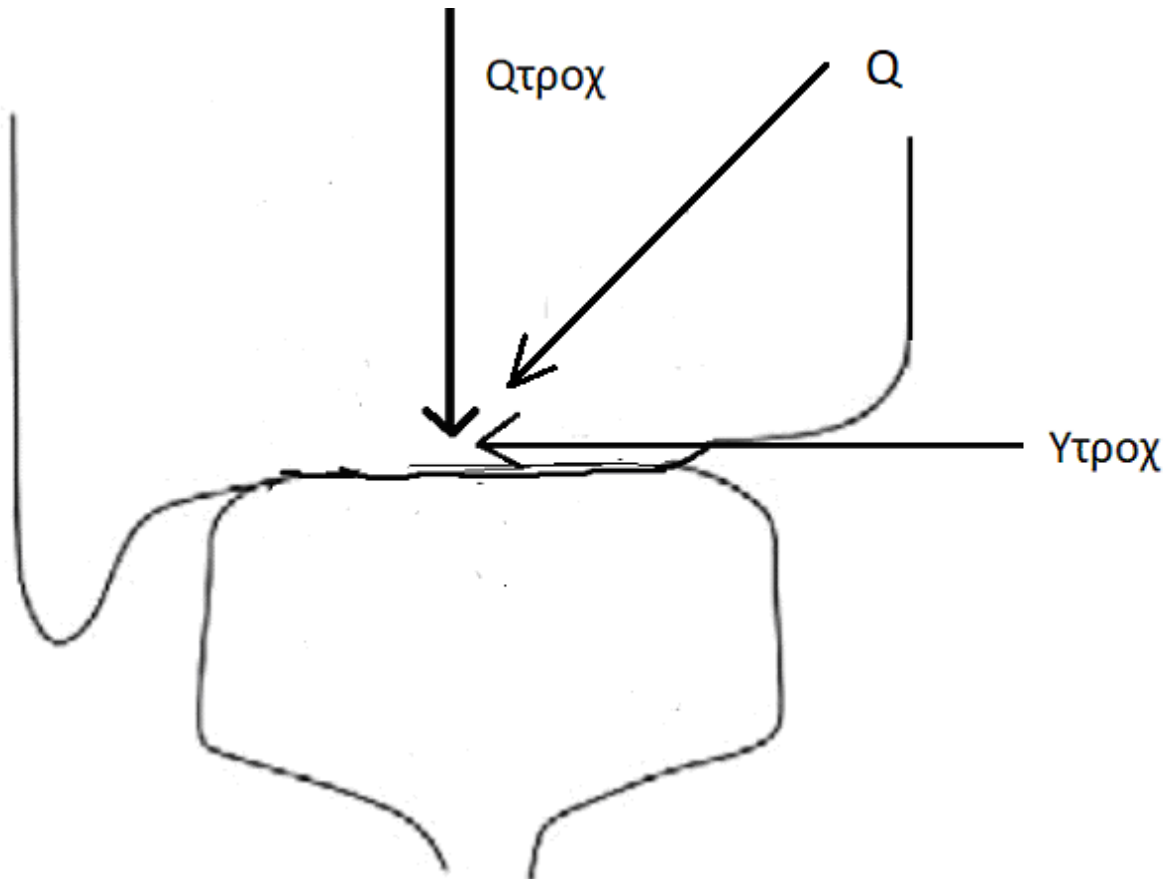
$$H_w = \rho \cdot V^2 \cdot A \sin^2 \theta = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 19^2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 82,644\text{m}^2 \cdot \sin^2 30^\circ = 8,9\text{kN}$$



Σχ. 4.3 Διατομή Σιδηροτροχιάς UIC 50

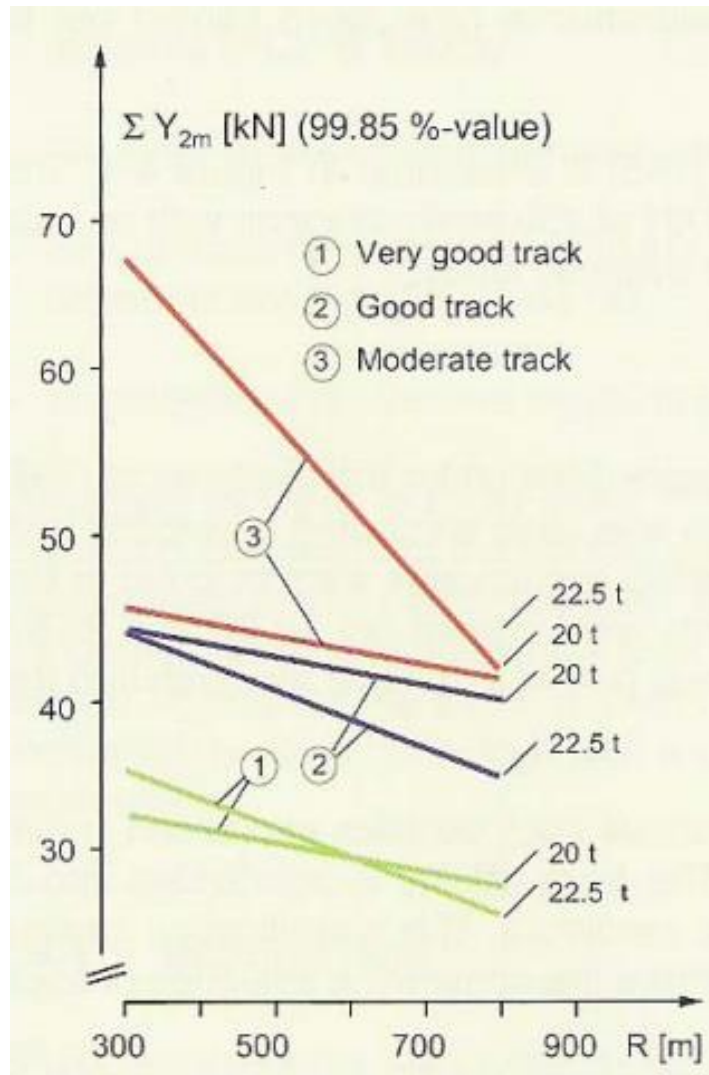
## Υπολογισμός τάσεων επαφής Hertz

Στη περίπτωση της επαφής τροχού σιδηροτροχιάς η κατηγορία επαφής είναι κυλίνδρου – επιπέδου. Για να υπολογίσουμε τις τάσεις πρώτα υπολογίζουμε τα φορτία που ασκούνται στον τροχό (Σχ. 4.4).



Σχ. 4.4 Φορτία τροχού

Το φορτίο  $Q$  του τροχού το έχουμε υπολογίσει παραπάνω ,  $Q_{\text{τροχ}}=89,1\text{kN}$ . Για τον υπολογισμό της εγκάρσιας δύναμης  $\Upsilon$  που ασκείται στο τροχό χρησιμοποιούμε το διάγραμμα παρακάτω .



Σχ. 4.5 Εγκάρσιες δυνάμεις τροχού σε σιδηροτροχιά σε καμπύλες[7]

Από το Σχ 4.5 λαμβάνουμε δύο τιμές συνολικής εγκάρσιας δύναμης ΣΥ, διότι είναι μεταβαλλόμενη δύναμη. Για  $R_c = 500m$  έχουμε  $\Sigma Y_{max} = 35 \text{ kN}$  και  $\Sigma Y_{min} = 30 \text{ kN}$ . Το βαγόνι απαρτίζεται από 8 κινητήριους τροχούς, επομένως η εγκάρσια δύναμη του ενός τροχού υπολογίζεται :

$$Y = \frac{\Sigma Y}{8} \quad (4.1)$$

άρα η μέγιστη και η ελάχιστη εγκάρσια δύναμη που ασκείται στο τροχό είναι :

$$Y_{\max} = \frac{\Sigma Y}{8} = \frac{60\text{kN}}{8} = 7,5\text{kN}$$

$$Y_{\max} = \frac{\Sigma Y}{8} = \frac{30\text{kN}}{8} = 3,75\text{kN}$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η συνισταμένη δύναμη των δυνάμεων :

Μέγιστη συνισταμένη δύναμη

$$Q_{\max} = \sqrt{Q^2 + Y_{\max}^2} = \sqrt{89,1^2 + 7,5^2} = 98,4\text{kN} \quad (4.2)$$

Ελάχιστη συνισταμένη δύναμη

$$Q_{\min} = \sqrt{Q^2 + Y_{\min}^2} = \sqrt{89,1^2 + 3,75^2} = 98,2\text{kN} \quad (4.3)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας με σκοπό τον υπολογισμό των τάσεων .

$$\frac{1}{E'} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} = \frac{1 - 0,3^2}{210\text{GPa}} + \frac{1 - 0,3^2}{210\text{GPa}} = 125\text{GPa}$$

Έπειτα υπολογίζεται η μέγιστη και ελάχιστη τάση με τη χρήση της σχέσης του Hertz:

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{\pi} \cdot \left( \frac{6 \cdot Q_{\max} \cdot E'^2}{R^2} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{1}{\pi} \cdot \left( \frac{6 \cdot 89400\text{N} \cdot (125 \cdot 10^9)^2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^4}}{0,625^2 \text{mm}^2} \right)^{\frac{1}{3}} =$$

865MPa

$$\sigma_{\min} = \frac{1}{\pi} \cdot \left( \frac{6 \cdot Q_{\min} \cdot E'^2}{R^2} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{1}{\pi} \cdot \left( \frac{6 \cdot 89200\text{N} \cdot (125 \cdot 10^9)^2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^4}}{0,625^2 \text{mm}^2} \right)^{\frac{1}{3}} =$$

863MPa

## Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας

Για να υπολογίσουμε τον συντελεστή ασφαλείας  $K$  ώστε να συμπεράνουμε ότι το σύστημα βρίσκεται στην ασφαλή ζώνη, δηλαδή ότι θα αστοχήσει μετά από πολλούς κύκλους φόρτισης υπολογίζεται το πλάτος και η μέση τάση των παραπάνω υπολογισμένων τάσεων. Το πλάτος των τάσεων υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{2} = \frac{865 - 863}{2} = 1\text{MPa}$$

Η μέση τάση υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}{2} = \frac{865 + 863}{2} = 864\text{MPa}$$

Τέλος, υπολογίζεται μέσω της σχέσης του Soderberg ο συντελεστής ασφαλείας. Για τον τροχό ο συντελεστής ασφαλείας είναι:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{\alpha}}{\frac{\sigma_f}{K} - \sigma_m} &= \frac{\sigma_A}{\sigma_f} \Rightarrow K = \frac{\sigma_A \cdot \sigma_f}{\sigma_{\alpha} \cdot \sigma_f + \sigma_A \cdot \sigma_m} \\ &= \frac{470\text{MPa} \cdot 1170\text{MPa}}{1\text{MPa} \cdot 1170\text{MPa} + 470\text{MPa} \cdot 864\text{MPa}} = 1,4 \end{aligned}$$

Για τη σιδηροτροχιά ο συντελεστής ασφαλείας είναι :

$$K = \frac{\sigma_A \cdot \sigma_f}{\sigma_{\alpha} \cdot \sigma_f + \sigma_A \cdot \sigma_m} = \frac{515\text{MPa} \cdot 1200\text{MPa}}{1\text{MPa} \cdot 1200\text{MPa} + 515\text{MPa} \cdot 864\text{MPa}} = 1,5$$

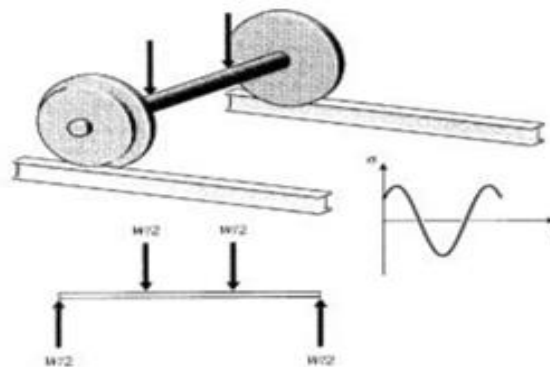
Άρα συμπεραίνουμε ότι το σιδηροδρομικό σύστημα είναι εντός της ζώνης ασφαλείας αφού  $K > 1$ .

## 5. ΦΘΟΡΑ & ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

### 5.1 Φθορά

#### Άξονες

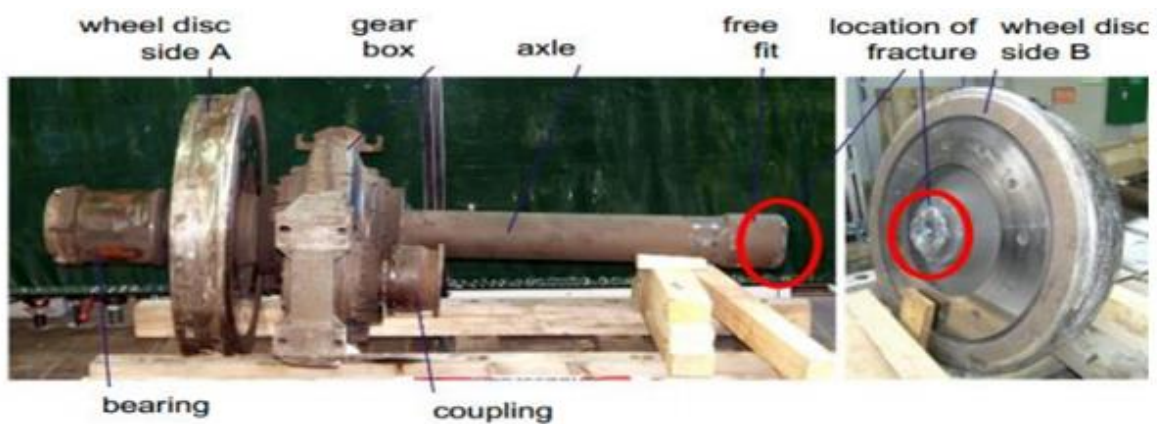
Η κόπωση είναι ένα είδος καταπόνησης που καταλήγει σε καταστροφή του υλικού που βρίσκεται υπό κυκλικό φορτίο ή επαναλαμβανόμενη τάση. Η κόπωση αποτελεί τη κύρια διαδικασία που έχει ως αποτέλεσμα τη δομική αποδόμηση και αστοχία των αξόνων. Οι σιδηροδρομικοί άξονες λειτουργούν συνήθως σε διάρκεια ζωής 30 ετών ή περισσότερο, η οποία αντιστοιχεί σε πολύ μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης της τάξης των  $10^9$ . Ένας σιδηροδρομικός άξονας είναι ουσιαστικά μια δοκός σε κάμψη τεσσάρων σημείων, η οποία παράγει μια τάση θλίψης κατά μήκος της άνω επιφάνειας και μία τάση εφελκυσμού κατά μήκος της κάτω επιφάνειας. Αφού ο άξονας έχει περιστραφεί μισή στροφή, το κάτω μέρος γίνεται πάνω και αντίστροφα, έτσι ώστε οι τάσεις σε μια συγκεκριμένη περιοχή της επιφάνειας του υλικού να μεταβάλλονται από την τάνυση (εφελκυσμό) έως την συμπίεση (θλίψη) και πάλι πίσω. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως πλήρης αντίστροφη φόρτιση κόπωσης (Σχ. 5.1). Η τυπική όψη ενός σπασμένου άξονα λόγω της κόπωσης του υλικού είναι κυλινδρική, με επίπεδη, σχετικά ομαλή επιφάνεια θραύσης, με ή χωρίς χείλη διατμήσεως και με γενικά οριζόντια σημάδια (Σχ. 5.2)[14].



Σχ. 5.1 Κόπωση σιδηροδρομικού άξονα[14]

Παράγοντες που προκαλούν αστοχία στην κόπωση:

- Μέγιστη τάση εφελκυσμού αρκετά υψηλή τιμή.
- Μεγάλη ποσότητα ή διακύμανση της εφαρμοζόμενης τάσης.
- Ένας αρκετά μεγάλος αριθμός κύκλων της εφαρμοζόμενης τάσης.
- Συγκέντρωση τάσης
- Διάβρωση
- Θερμοκρασία
- Υπερφόρτωση
- Μεταλλουργική δομή



Σχ. 5.2 Αστοχία σιδηροδρομικού άξονα[14]

## 5.2 Διεπαφή τροχού - σιδηροτροχιά

### Τροχός

Ο τροχός κυλίνει με την περιμετρική επιφάνειά του επί του άνω τμήματος της κεφαλής της σιδηροτροχιάς (ΑΚΣ) και οδηγείται στις καμπύλες από την εσωτερική παρειά των σιδηροτροχιών μέσω του όνυχα. Ο τροχός και η κεφαλή της σιδηροτροχιάς πρέπει να εναρμονίζονται ως προς τη μορφή τους στην περιοχή επαφής. Η επιφάνεια κύλισης των τροχών (επίσωτρο) τόσο των μηχανών έλξης όσο και των εκλυόμενων οχημάτων, έχει ενιαία διατομή. [15]

Η φθορά τροχού περιλαμβάνει οποιαδήποτε βλάβη προκύψει στην επιφάνεια κύλισης των σιδηροδρομικών τροχών, συμπεριλαμβανομένου και της απώλειας



υλικού. Αυτή μπορεί να προκληθεί από την επίδραση της φθοράς λόγω τριβής, την κόπωση εξ επαφής κατά την κύλιση και, σε μικρότερο βαθμό, από τη μετατόπιση υλικού εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης. Η φθορά της διατομής των τροχών είναι ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα που επηρεάζουν το κόστος και τις επιδόσεις των σιδηροδρομικών συστημάτων μεταφοράς. Από την πρώτη εμφάνιση των σιδηροδρόμων, η διατομή των τροχών είχε διαμορφωθεί έτσι ώστε να αυξάνεται η αντοχή και να μειώνεται η φθορά, καθώς και να εξασφαλίζεται η ασφάλεια και η απόδοση του οχήματος. Η φθορά μεταβάλλει τη διατομή του τροχού σε σχέση με την πρότυπη μορφή που ορίστηκε από τον κατασκευαστή με αποτέλεσμα την επίδραση στη δυναμική των οχημάτων. Επομένως, δημιουργούνται μεγάλες αποκλίσεις από την πρότυπη διατομή, οι οποίες αντιμετωπίζονται με τόννευση του τροχού, ώστε η αλλοιωμένη διατομή να επανέλθει στην αρχική της μορφή. Είναι προφανές, ότι ο αριθμός των δυνατών επαναλήψεων της τόννευσης για ένα τροχό είναι περιορισμένος, καθώς ορίζεται από τον κατασκευαστή τελική ωφέλιμη διάμετρος του τροχού. Όταν επιτευχθεί το όριο, ο τροχός πρέπει να αντικατασταθεί. Η τόννευση και η αντικατάσταση του τροχού έχουν πολύ μεγάλες επιπτώσεις στα κόστη συντήρησης και ως εκ τούτου διεξάγεται μεγάλος αριθμός ερευνών για την μείωση του προβλήματος και την επιβράδυνση της εξέλιξης της φθοράς.

## **Είδη φθοράς τροχού-σιδηροτροχιάς**

Η διεπαφή τροχού-σιδηροτροχιάς δημιουργεί σοβαρές καταπονήσεις τόσο στον τροχό όσο και στη σιδηροτροχιά. Η περιοχή επαφής αλλάζει όταν εμφανίζεται φθορά στον σύστημα( τροχό – σιδηροτροχιά). Οι μηχανισμοί που επενεργούν κατά τη κύλιση αναπτύσσουν στο σύστημα κατακόρυφες και οριζόντιες δυνάμεις, οι οποίες προκαλούν διατμητικές τάσεις στην επιφάνεια επαφής του πέλματος του τροχού καθώς και στην επιφάνεια κύλισης της σιδηροτροχιάς. Παράλληλα προκαλείται διαμήκη και πλευρική ολίσθηση, με αποτέλεσμα το υλικό να δέχεται εκτός από μηχανική καταπόνηση και θερμική.

Τα είδη των φθορών που δέχεται το σύστημα κατά την λειτουργία του μπορεί να αναλυθεί μέσω της αλληλεπίδρασης των μηχανισμών φθοράς. Οι μηχανισμοί είναι:

- τριβή
- πλαστικής παραμόρφωσης,
- κόπωσης του σημείου επαφής του τροχού
- θερμικής καταπόνησης που επηρεάζουν τα υλικά του τροχού και της σιδηροτροχιάς.

Αναλυτικά:

### Πλαστική παραμόρφωση

Στη διεπαφή τροχού-σιδηροτροχιάς αναπτύσσονται τάσεις οι οποίες προκαλούν πλαστική παραμόρφωση κοντά στην επιφάνεια μικροδομής των υλικών του τροχού και της σιδηροτροχιάς. Η πλαστική παραμόρφωση είναι ανάλογη με το μέγεθος των διαμηκών και πλευρικών δυνάμεων που ασκούνται στη διεπαφή τροχού – σιδηροτροχιάς. Η έκταση της πλαστικής παραμόρφωσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του οχήματος και το βάθος της είναι ανάλογο της σύνθεσης των υλικών της σιδηροτροχιάς και του τροχού (**Σχ. 5.3**).



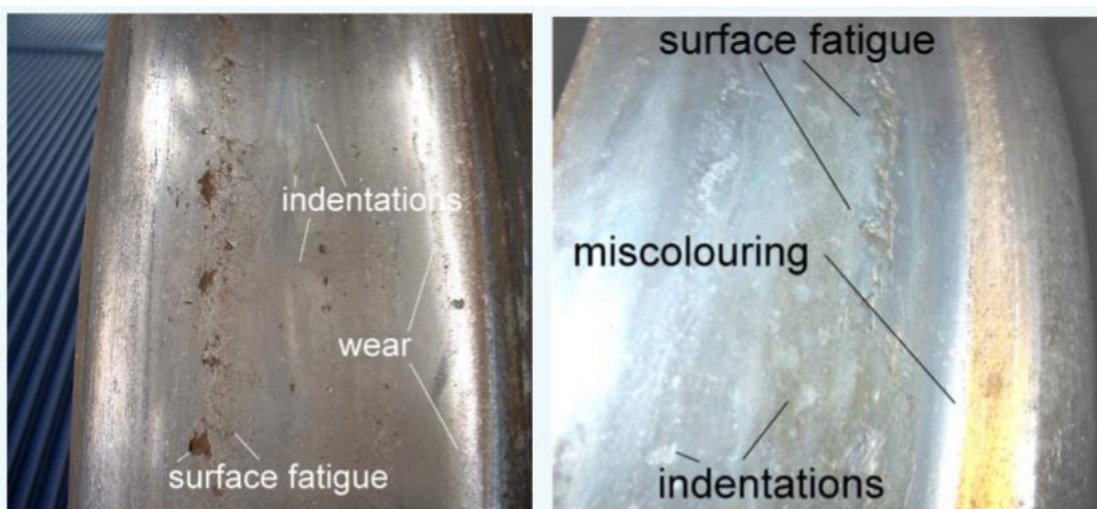
**Σχ. 5.3** Πλαστική παραμόρφωση σιδηροδρομικού τροχού[15]

## Φθορά λόγω τριβής

Η φθορά λόγω τριβής αφορά στην αφαίρεση υλικού λόγω καταπόνησης του. Η εμφάνιση της γίνεται αντιληπτή διότι ο τροχός έχει κοίλη φθαρμένη επιφάνεια στο πέλμα του και στη γωνία αναφοράς.

## Κόπωση εξ επαφής κατά την κύλιση

Η κόπωση εξ επαφής κατά την κύλιση (Rolling Contact Fatigue -RCF) δημιουργείται λόγω της συνεχούς παραμόρφωσης της μικροδομής στην επιφάνεια του πέλματος του τροχού και της επιφάνειας κύλισης της σιδηροτροχιάς, ιδιαίτερα στη γωνία αναφοράς. Η καταπόνηση αυτή οδηγεί στο σχηματισμό ρωγμών που μπορεί να καταλήξουν σε θρυμματισμό ή αποφλοίωση του υλικού. Η μορφή των ρωγμών περιλαμβάνει μία ζώνη από συνεχόμενες παράλληλες ρωγμές που εμφανίζονται τόσο στον τροχό όσο και στη σιδηροτροχιά. Η θέση στην οποία εμφανίζονται οι ρωγμές εξαρτάται από τη γεωμετρία της διεπαφής τροχού-σιδηροτροχιάς. Η εμφάνισή τους γίνεται κυρίως στη γωνία αναφοράς της σιδηροτροχιάς και στο πέλμα του τροχού, σε αποστάσεις περίπου 50mm και 90-100mm από την εσωτερική πλευρά του τροχού. Όταν αυτές οι ρωγμές εμφανίζονται στους τροχούς, ονομάζονται ρωγμές μορφής «ψαροκόκαλου», ενώ όταν εμφανίζονται στη σιδηροτροχιά, αναφέρονται ως «σημάδια κεφαλής» (Σχ. 5.4).

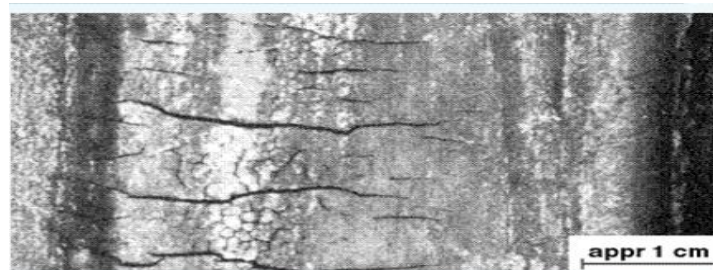


Σχ. 5.4 Φθορά σιδηροδρομικού τροχού λόγω κόπωσης εξ επαφής[15]

## Θερμική καταπόνηση

Η επιβολή πολύ μεγάλων δυνάμεων στην διεπαφή τροχού-σιδηροτροχιάς οδηγεί στην ανάπτυξη μεγάλων πιέσεων που προκαλούν απότομη τοπική αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού (που ακολουθείται από ταχεία επαναφορά στην αρχική θερμοκρασία). Οι πολύ υψηλές πιέσεις μπορεί να προκληθούν είτε από απότομη πέδηση, είτε από υπερβολική ολίσθηση του τροχού, κατά την επιτάχυνση ή κατά την επιβράδυνση. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό του λεγόμενου «λευκού στρώματος», στην μικροδομή των επιφανειών του τροχού και της σιδηροτροχιάς.

Η απότομη αύξηση και υποβάθμιση της θερμοκρασίας προκαλεί θερμική κόπωση σε περιοχές που έχουν υπέσσει ήδη βλάβη, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται βαθιές ρωγμές και θρυματισμός (Σχ. 5.5). Το φαινόμενο του θρυματισμού συναντάται κυρίως σε τροχούς σε σχέση με τις σιδηροτροχίες, και πιο συχνά σε αυτούς που έχουν μηχανισμό πέδης, όπου η θερμοκρασία μεταβάλεται συνεχώς διότι έχουν μικρότερη επιφάνεια τροχού (Σχ. 5.6).



Σχ. 5.5 Ρωγμές λόγω θερμικής κόπωσης του τροχού[15]

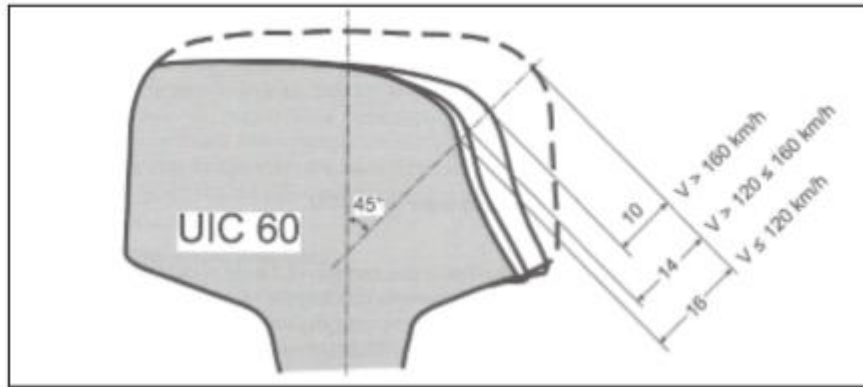


Σχ. 5.6 Φθορά λόγω θερμικής καταπόνησης[15]

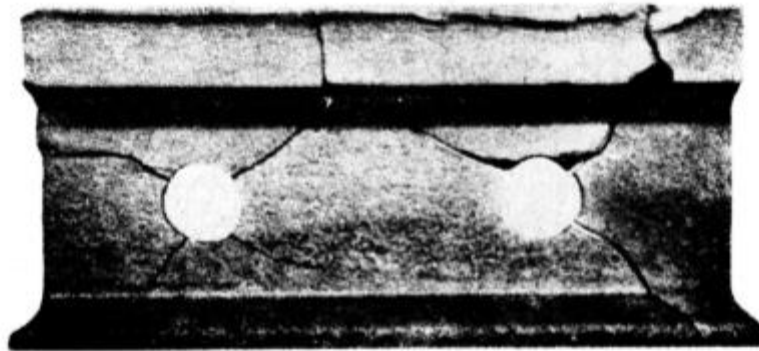
## Σιδηροτροχιές

Οι φθορές του παρουσιάζουν οι σιδηροτροχιές είναι οι ακόλουθες [16]:

- **Φθορά στα άκρα τους** από τις κρούσεις των τροχών στους αρμούς .
- **Φθορά στην επιφάνεια κύλισης** από τη συνεχή τριβή των τροχών κατά την κύλιση του επί της σιδηροτροχιάς. Η φθορά αυτή προκαλεί μείωση της αντοχής και αύξηση της αντίστασης στην κύλιση διότι εξασφαλίζεται η αρχική καμπύλωση που έχει η επιφάνεια της . Συνήθως η μορφή της είναι ανομοιόμορφη και ονομάζεται κυματοειδής φθορά λόγω των ταλαντώσεων των ελατηρίων των αναρτήσεων του οχήματος που αυξομειώνουν τη πίεση και συνεπώς τη φθορά τριβής των τροχών των οχημάτων στη σιδηροτροχιά.
- **Πλάγια φθορά** , η φθορά στην εσωτερική κατακόρυφη πορεία τους ,κυρίως στις καμπύλες μικρής ακτίνας στην εξωτερική τροχιά. Η πλάγια φθορά εκτός από τη μείωση της αντοχής της σιδηροτροχιάς αυξάνει τον κίνδυνο των εκτροχιασμών **(Σχ. 5.7)**.
- **Σύνθλιψη της επάνω επιφάνειας της κεφαλής** παρουσιάζεται κυρίως στην εσωτερική τροχιά των καμπυλών και προκαλεί άνοιγμα στη γραμμή.
- **Φθορά από ολίσθηση** των τροχών συναντάται σε ανηφορικές διαδρομές όπου το φορτίο που μεταφέρει η αμαξοστοιχία είναι μεγάλο με αποτέλεσμα να δυσκολεύεται να κινηθεί έτσι οι κινητήριοι τροχοί περιστρέφονται χωρίς να προχωρούν και προκαλούν τοπικές φθορές και αποφλοιώσεις της κεφαλής της σιδηροτροχιάς.
- **Φθορά από οξείδωση** παρουσιάζεται στις επιφάνειες συνδέσμων με το πέλμα της σιδηροτροχιάς ή του πέλματος της με την πλάκα εδράσεως ή το μεταλικό στρωτήρα.Προκαλεί χαλάρωση στη σύσφιξη της σιδηροτροχιάς.
- **Ρωγμές στις οπές αμφιδέσεως** Οι σιδηροτροχιές στα άκρα τους έχουν οπές τη στερέωση των αμφιδετών. Οι οπές αυτές αποτελούν το αίτιο και την αφετηρία της δημιουργίας ρωγμών. Όταν οι ρωγμές επεκταθούν, δημιουργούν κίνδυνο και επιβάλλουν αποκοπή της κεφαλής **(Σχ. 5.8)**.



Σχ. 5.7 Πλάγια φθορά σιδηροτροχιάς[16]



Σχ. 5.8 Ρωγμές στις σπές του αμφιδέτη[16]

### 5.3 Εκτροχιασμός

Το φαινόμενο του εκτροχιασμού είναι ένα από τα κύρια φαινόμενα που πλήττουν τον σιδηρόδρομο εδώ και πάρα πολλά χρόνια. Ο εκτροχιασμό αποτελεί την οριστική απώλεια επαφής της επιφάνειας κύλισης ενός τουλάχιστον τροχού του οχήματος με την επιφάνεια κύλισης της κεφαλής της σιδηροτροχιάς. Οι συρμοί όταν εκτροχιάζονται προκαλούν σοβαρές επιπτώσεις όπως υλικές ζημίες, απώλεια εισοδημάτων στους σιδηροδρομικούς οργανισμούς και θάνατο (Σχ. 5.9) [17].



Σχ. 5.9 Εκτροχιασμός συρμού[17]

### Είδη εκτροχιασμού

- Εκτροχιασμός λόγω εγκάρσιας μετατόπισης της γραμμής.
- Εκτροχιασμός λόγω ανατροπής του οχήματος.
- Εκτροχιασμός λόγω αναρρίχησης των τροχών επί της σιδηροτροχιάς και υπερπήδηση της σιδηροτροχιάς.

### **Αίτια εκτροχιασμού**

#### **Ενδογενή αίτια :**

- Υπερβολική ταχύτητα συρμού
- Μεγάλες ασκούμενες δυνάμεις
- Κακή κατάσταση και σχεδιασμός τροχαίου υλικού
- Κακή υποδομή και ποιότητα γραμμής
- Ελαττωματική χάραξη
- Παλαιότητα υλικών

## **Εξωγενή αίτια :**

- Λάθος ρύθμιση αλλαγών
- Δυσμενείς καιρικές συνθήκες
- Σύγκρουση οχημάτων

Στις περισσότερες περιπτώσεις ο εκτροχιασμός συνδέεται με όλες τις παραπάνω αιτίες και για αυτό αποτελεί ένα πολύπλοκο φαινόμενο τόσο στη μελέτη του όσο και στον τρόπο αντιμετώπισής του.

**Εκτροχιασμός με μετατόπιση της γραμμής**

Στην περίπτωση αυτή, σε τμήμα της γραμμής, μετατοπίζεται υπό την επίδραση σημαντικών εγκάρσιων δυνάμεων η εσχάρα γραμμής (σιδηροτροχιές + στρωτήρες) με αποτέλεσμα τον εκτροχιασμό ενός ή περισσότερων οχημάτων του συρμού. Αυτή η μορφή εκτροχιασμού οφείλεται αποκλειστικά σε ενδογενή αίτια και αποτελεί την πιο συνήθη περίπτωση εκτροχίασης.

**Εκτροχιασμός λόγω ανατροπής του οχήματος**

Κατά την κίνηση ή τη στάθμευση ενός σιδηροδρομικού οχήματος στα καμπύλα τμήματα της οριζοντιογραφίας μπορεί να συμβεί, υπό ορισμένες συνθήκες, ανατροπή του οχήματος. Η ανατροπή μπορεί να γίνει προς το εξωτερικό ή το εσωτερικό της καμπύλης.

**Εκτροχιασμός με αναρρίχηση των τροχών**

Στην πράξη εκτροχιασμός με αναρρίχηση του τροχού συμβαίνει όταν η προβολή της συνισταμένης όλων των δυνάμεων, πάνω στον άξονα  $yy$  (άξονας δύναμης εκτροχίασης) έχει φορά προς τα άνω και ο χρόνος επενέργειας της αρκεί για να υπερπηδηθεί η σιδηροτροχιά.

## **Αξιολόγηση παραμέτρων τροχού/σιδηροτροχιάς**

Η αξιολόγηση των παραμέτρων τροχού/σιδηροτροχιάς πραγματοποιείται έτσι ώστε να μπορούν να προβλεφθούν οι κίνδυνοι εκτροχιασμού που είναι το αποτέλεσμα της κακής επαφής μεταξύ του τροχού και της σιδηροτροχιάς.

Οι παράμετροι επαφής που μπορούν να επηρεάσουν έναν εκτροχιασμό, περιλαμβάνουν:



- Γωνία επαφής όνυχα τροχού και πλάτος όνυχα τροχού (σχετιζόμενα με την αναρρίχηση του όνυχα)
- Ακτίνα καμπυλότητας στο οριζοντιογραφικό τμήμα γραμμής (σχετίζεται με την αναρρίχηση του όνυχα)
- Ισοδύναμη κωνικότητα (σχετίζεται με την εγκάρσια συμπεριφορά του οχήματος σε ευθυγραμμία)
- Σημαντική φθορά του όνυχα του τροχού και του πλάτους των τροχών μπορεί να αυξήσει τις εγκάρσιες μετατοπίσεις των αξόνων και να δυσχεραίνει την ικανότητα εγγραφής των φορέων στις στροφές.

## 5.4 Συντήρηση

Η Συντήρηση αποτελεί μια δραστηριότητα του σιδηροδρομικού συστήματος καθώς αφορά τις τρεις συνιστώσες του, τη σιδηροδρομική υποδομή, το τροχαίο υλικό και τη σιδηροδρομική εκμετάλλευση. [18]

Ως συντήρηση του σιδηροδρομικού τροχαίου υλικού θεωρούμε το σύνολο των προγραμμάτων και μεθόδων που με το μικρότερο δυνατό κόστος έχουν ως στόχο:

- την επιδιόρθωση καθώς και την πρόβλεψη πιθανών βλαβών του τροχαίου υλικού
- τη διατήρηση της καλής λειτουργίας του
- την αύξηση της αξιοπιστίας και της διαθεσιμότητας του τροχαίου υλικού

Για την επίτευξη των στόχων αυτών χρειάζεται η βέλτιστη αξιοποίηση του ανθρωπίνου δυναμικού, του μηχανολογικού εξοπλισμού και η συγκέντρωση πληροφοριών.

Κάθε τροχαίο υλικό όσο εξελιγμένο και αν είναι δεν μπορεί να λειτουργεί και να αποδίδει στο επίπεδο που είναι σχεδιασμένο χωρίς συντήρηση. Η συντήρηση αποσκοπεί τη συνεχή βελτίωση και λειτουργία του με χαμηλό κόστος και με καλύτερη ποιότητα σύμφωνα με τις προδιαγραφές του εκάστοτε κατασκευαστή.

Μέσω της συντήρησης επιτυγχάνεται:

- Μείωση της ποιοτική υποβάθμιση του τροχαίου υλικού
- Μείωση στις βλάβες και αύξηση της αξιοπιστία
- Αύξηση της διάρκεια ζωής του τροχαίου υλικού
- Αύξηση της ασφάλειας
- Μείωση στην κατανάλωση ενέργειας
- Αύξηση στη δυναμική άνεση των επιβατών
- Μείωση των ανταλλακτικών

### **Συντήρηση φορείων**

Συντήρηση του φορείου είναι η πρόληψη των ατελειών με προσεκτική παρακολούθηση της κατάστασης του εξοπλισμού του και του ρυθμού φθοράς του προγραμματίζοντας έγκαιρες δράσεις.

Υπάρχουν οι εξής κατηγορίες συντήρησης:

- Προγραμματισμένη ή προληπτική συντήρηση που επικεντρώνεται σε πρόγραμμα που καθορίζεται κυρίως από τις συστάσεις των κατασκευαστών.
- Διορθωτική συντήρηση που είναι πάντα απαραίτητη και γίνεται μετά από την αστοχία ενός εξαρτήματος φορείου. Ένας χαμηλός ρυθμός αστοχιών είναι μια ένδειξη για μια καλά προσαρμοσμένη σχεδιασμένη διαδικασία συντήρησης. Στα πλαίσια της διορθωτικής συντήρησης περιλαμβάνεται και η αντικατάσταση των τροχών του φορείου όταν εξαντληθούν τα όρια τórνευσής τους.

Απαραίτητη εργασία στη συντήρηση και επιθεώρηση των οχημάτων σε κάθε στάδιο συντήρησης είναι ο έλεγχος της επιφάνειας κύλισης (προφίλ) του τροχού λόγω της φθοράς του από την κύλιση επί των σιδηροτροχιών με στόχο τη διαπίστωση απόκλισης της από τον αρχικό σχεδιασμό. Η διόρθωση του προφίλ του τροχού γίνεται με την κατεργασία του σε ειδικό μηχάνημα που λέγεται υποδαπέδιος τórνος **(Σχ. 5.10)** [4].



Σχ. 5.10 Υποδαπέδιος τόννος (α)[4]

### Βασικές εργασίες συντήρησης

- Έλεγχος τροχών
- Συντήρηση, ρυθμίσεις και έλεγχο των επιπέδων του λαδιού στο κιβώτιο ταχυτήτων
- Έλεγχο και ρυθμίσεις στο σύστημα των φρένων
- Έλεγχο και ρυθμίσεις στα αμορτισέρ
- Αντικατάσταση χαλασμένων παραθύρων
- Συντήρηση/αντικατάσταση των θυρών του οχήματος
- Αντικατάσταση /επισκευή χειρολαβών
- Συντήρηση - καθαρισμό φίλτρων των συστημάτων θέρμανσης/κλιματισμού
- Συντήρηση των συστημάτων επικοινωνιών
- Αντικατάσταση λαμπτήρων φωτισμού
- Έλεγχοι στη λειτουργία της καμπίνας του οδηγού
- Συντήρηση μετατροπέων/ μετασχηματιστών
- Συντήρηση συσσωρευτών
- Αλλαγή των λαδιών στα λιποκιβώτια των φορέων



Σχ. 5.11 α) Υποδαπέδιο τόννος β) Μηχανοστάσιο

## Δοκιμές φορέων & τροχών

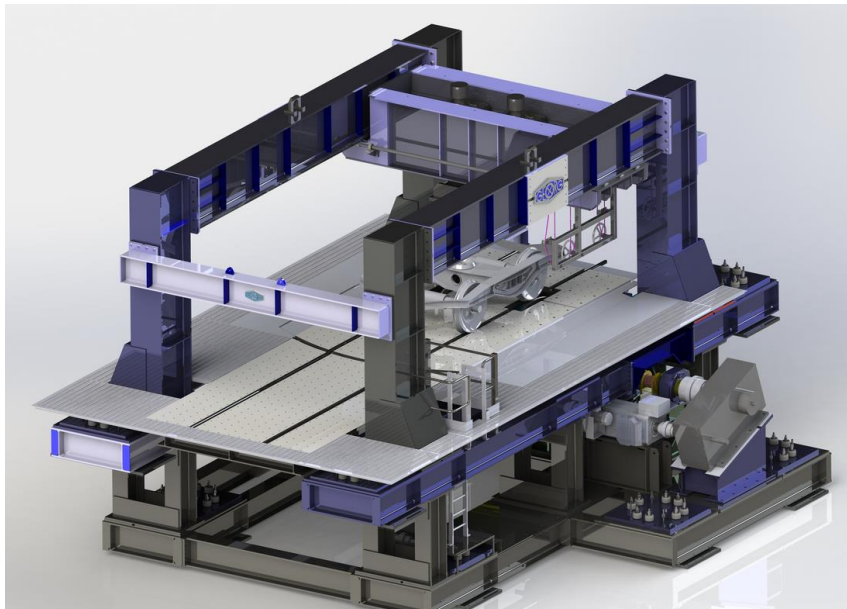
Σκοπός των στατικών δοκιμών είναι η εξακρίβωση της ικανότητας των πλαισίων των φορέων να αντέχουν σε φορτία που υφίστανται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Οι στατικές δοκιμές υποδιαιρούνται σε τέσσερις ομάδες:

- **Στατικές δοκιμές σε εξαιρετικά φορτία:** Ο σκοπός των δοκιμών αυτών είναι να βεβαιωθούμε ότι δεν υπάρχει κανένας κίνδυνος διατήρησης μόνιμης παραμόρφωσης στα πλαίσια των φορέων από την επίδραση μέγιστων φορτίων που ασκούνται κατά τη διάρκεια της πραγματικής λειτουργίας τους.
- **Στατικές δοκιμές προσομοίωσης των κυρίων δυνάμεων που εφαρμόζονται στα φορεία στην κανονική λειτουργία τους κάτω από το αμάξωμα:** Αυτές οι δοκιμές γίνονται για να εξακριβωθεί η απουσία οποιουδήποτε κινδύνου τοπικών ρωγμών κόπωσης που συμβαίνουν κάτω από την συνδυασμένη επίδραση κυρίων δυνάμεων που παράγονται κατά τη διάρκεια πραγματικής τους λειτουργίας (κατακόρυφη, εγκάρσια, στρέψη γραμμής).
- **Στατικές δοκιμές προσομοίωσης των ιδιαίτερων δυνάμεων που εφαρμόζονται στα φορεία στην κανονική λειτουργία τους κάτω από το αμάξωμα:** Αυτές οι δοκιμές γίνονται για να εξακριβωθεί η απουσία οποιουδήποτε κινδύνου τοπικών ρωγμών κόπωσης που συμβαίνουν υπό την

επίδραση επαναλαμβανόμενων δυνάμεων που παράγονται από τα στοιχεία του φορείου (σταθεροποιητές, αμορτισέρ, φρένα, κλπ.) και διαμήκεις δυνάμεις που οφείλονται στην ολίσθηση κατά την κίνηση σε καμπύλες μικρής ακτίνας.

- **Δοκιμές κόπωσης** : Οι δοκιμές αυτές προορίζονται να εξακριβώσουν την αντοχή του πλαισίου του φορείου και την ανίχνευση τυχόν κρυμμένων αδύνατων σημείων (κυρίως σε μέρη όπου συσκευές-μετρητές δεν μπορούν να τοποθετηθούν) και να αξιολογήσουν το περιθώριο ασφάλειας.

Όλες οι δοκιμές αυτές πρέπει να πραγματοποιούνται για κάθε νέο φορείο. Όταν ένα φορείο έχει ήδη δοκιμαστεί, αλλά είναι φτιαγμένο από έναν άλλο κατασκευαστή ή σύμφωνα με μια νέα διαδικασία κατασκευής, τότε θα εκτελούνται μόνον οι δοκιμές κόπωσης (**Σχ. 5.12**).



**Σχ. 5.12 Δοκιμαστική εξέδρα φορείων**

Οι τέσσερις παραπάνω επιβάλλεται να γίνουν προκειμένου:

- να βελτιστοποιηθεί η δομή του πλαισίου φορείου
- να συμπληρωθούν οι πληροφορίες που λαμβάνονται από τους αναλυτικούς υπολογισμούς
- να βεβαιωθούμε ότι τα πλαίσια των φορείων αντέχουν στα πραγματικά φορτία χωρίς να υποστούν μόνιμη παραμόρφωση ή ρήγματα που δεν συμβιβάζονται με την απαιτούμενη ασφάλεια μεταφοράς και το χαμηλό κόστος συντήρησης.

Οι στατικές δοκιμές πρέπει να προηγούνται των δοκιμών κόπωσης.

- Για τα στατικά τεστ συνιστάται η δοκιμή πλήρους φορείου μαζί με τους μηχανισμούς ανάρτησης.
- Οι δοκιμές κόπωσης αφορούν πλαίσια φορείων, πάνω στα οποία είναι συνδεδεμένοι όλοι οι μηχανισμοί τους.
- Η δοκιμή κόπωσης ελέγχει εάν ο σχεδιασμός του φορείου είναι σωστός και αν θα πρέπει να αναμένονται ρωγμές κατά τη λειτουργία. Επιπλέον εγγυάται ότι ένας νέος κατασκευαστής μπορεί να κατασκευάζει ασφαλή φορεία.
- Τα αποτελέσματα των δοκιμών λαμβάνονται από μετρητές αντοχής τοποθετημένους, στα σημαντικότερα μέρη του φορείου (αλλαγές τμημάτων, σημεία συγκολλήσεων, κ.λ.π).
- Εφόσον κατά τη διάρκεια των πρώτων δυο τεστ κόπωσης εμφανιστούν ρωγμές λόγω κατασκευαστικής αμέλειας. Θα συνεχιστεί η δοκιμή με ένα διαφορετικό πλαίσιο.
- Ο αριθμός των κύκλων δοκιμής κόπωσης επιλέγεται κατάλληλα ώστε να προσομοιώνει τη τριαντάχρονη ζωή ενός φορείου με 200.000 χλμ/έτος.

## **Δοκιμές και έλεγχοι των τροχών κατά την παραλαβή**

Οι χαλύβδινοι ολόσωμοι τροχοί σιδηροδρομικών οχημάτων κατά την παραλαβή τους θα πρέπει να καλύπτουν πλήρως όλες τις απαιτήσεις του προτύπου UIC 812-3. Ειδικότερα πρέπει να γίνονται δειγματοληπτικά οι παρακάτω έλεγχοι :

- Διαστασιολογικός έλεγχος. Μέτρηση των διαστάσεων όπως ορίζονται στα σχέδια των τροχών και έλεγχος τιμών σύμφωνα με τα προβλεπόμενα όρια των σχεδίων.
- Έλεγχος υπερήχων. Η εξέταση με τους υπερήχους είναι αυτόματη. Εξέταση με το χέρι είναι αποδεκτή μόνο σε εκείνες τις περιπτώσεις που η εξέταση με την αυτόματη μέθοδο παρουσιάζει αμφιβολίες ερμηνείας σφάλματος ή κατόπιν απαιτήσεως του επιθεωρητού του πελάτη. Ο κατασκευαστής θα υποβάλει με το σχέδιο κατασκευής και ελέγχων και πλήρη περιγραφή της μεθόδου ελέγχου με υπερήχους προς έγκριση από τον πελάτη.
- Έλεγχος επιφανειακής σκληρότητας.

- Ζυγοστάθμιση - Έλεγχος ροπών από αζυγοστάθμιτη μάζα.
- Μακρογραφική εξέταση.(Μέθοδος Baumann ) Εξέταση δειγματοληπτικά σε δοκίμιο τροχών με την μέθοδο Βευιπει111 σύμφωνα με τα οριζόμενα στο UIC 812-3 Η κατανομή του θείου στην τομή του τροχού πρέπει να είναι ομοιόμορφη και η ποσότητα του χαμηλή εντός των ορίων.
- Μικροσκοπική εξέταση.
- Πραγματοποίηση μικροσκοπικής εξέτασης δειγματοληπτικά σε δοκίμιο τροχών η οποία πρέπει να παρουσιάζει εικόνα ομοιογενής μικροδομής , με κόκκους μεσης διάστασης.
- Χημική ανάλυση.
- Μηχανικές ιδιότητες.
- Δοκιμή σκληρότητας στην τομή του τροχού. Πραγματοποίηση δοκιμή σκληρότητας στα σημεία που προσδιορίζονται από το UIC 812-3.
- Έλεγχος δυσθραυστότητας. Πέραν των ελέγχων που ορίζονται στο UIC 812-3 , απαιτείται συνήθως έλεγχος δυσθραυστότητας, σε δοκίμια των τροχών σύμφωνα με τις οδηγίες του ERRI 169RP8.
- Έλεγχος πιστοποιητικών χυτηρίου - περιεκτικότητα H2.
- Αντιδιαβρωτική προστασία.

## **Συντήρηση Γραμμής**

Συντήρηση γραμμής νοείται το σύνολο των διαδικασιών που απαιτούνται για τη συντήρησή της προκειμένου να διασφαλισθούν τα πρότυπα της ασφάλειας και της ποιότητας πάντα σε συνάρτηση με την ελαχιστοποίηση του κόστους. Η συντήρηση και η ανακαίνιση σχεδιάζονται ανάλογα, λαμβάνοντας πάντα υπόψη τις τοπικές συνθήκες και βασιζόμενες πάνω σε μια συνισταμένη δεδομένων ελέγχου από μετρητικά συστήματα, οπτική παρατήρηση και χρηματοοικονομικά δεδομένα. Κάθε γραμμή, όπως και κάθε κατασκευή, έχει ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ζωής κατά τη διάρκεια της οποίας απαιτούνται εργασίες συντήρησης για να εξασφαλισθούν όπως προηγουμένως αναφέρθηκε τα ελάχιστα πρότυπα της ποιότητας και ασφάλειας (Σχ. 5.13).

Η συντήρηση γραμμής η οποία γίνεται κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής μιας γραμμής μπορεί να διακριθεί σε:

- γεωμετρία της σιδηροτροχιάς
- γεωμετρία της επιδομής της γραμμής
- έρμα (σκύρο)
- τεχνικά έργα
- ισόπεδες διαβάσεις
- διάφορα

Η συντήρηση της γραμμής πρέπει να είναι τέτοια ώστε για μια ορισμένη ταχύτητα να βρίσκονται μέσα σε αποδεκτά όρια, με όσο γίνεται μικρότερες δαπάνες, οι εξής δύο βασικές συνιστώσες:

- ασφάλεια κατά την κίνηση
- άνεση του επιβάτη

Οι παραπάνω συνιστώσες εξαρτώνται από δύο θεμελιακά διαφορετικές οικογένειες παραμέτρων:

- γεωμετρικές αφενός, των οποίων η εξέλιξη είναι συνήθως επανορθώσιμη
- μηχανικές αφετέρου, των οποίων η μείωση των αντοχών στην πλειονότητα των περιπτώσεων δεν μπορεί να επανορθωθεί παρά μόνο με αντικατάσταση (σιδηροτροχίες, σύνδεσμοι, στρωτήρες, συγκολλήσεις, κ.λπ.).

Η συντήρηση της γραμμής βασίζεται στη συνεχή επιθεώρηση της.. Κατά τις περιοδικές επιθεωρήσεις ελέγχονται:

- Η καλή σύσφιξη και φθορά των συνδέσμων
- Η οριζοντιογραφική και υψομετρική θέση της γραμμής
- Η διατήρηση του πλάτους της γραμμής
- Η διατήρηση των διακένων μεταξύ των σιδηροτροχιών
- Η φθορά στρωτήρων, σιδηροτροχιών και αμφιδετών





Σχ. 5.13 Μηχανή συντήρησης σιδηροτροχιάς[19]

### Συντήρηση τροχοφόρου άξονα

Η τυπική δομή του κύκλου συντήρησης ενός τροχοφόρου άξονα αποτελείται κυρίως από τρεις φάσεις:

- τακτικοί έλεγχοι κατά τη λειτουργία του με σκοπό την αναζήτηση ανωμαλίας του προφίλ , τραπεζοειδών επιφανειών , ελαττωμάτων RCF ή / και υπερθέρμανσης των εδράνων.
- επαναπροσδιορισμός των τροχών με τόνους σε εργαστήρια "πρώτου επιπέδου" (που συνήθως βρίσκονται σε μεγάλα αμαξοστάσια και εκτίνονται σε μια ύπαιθρο) (Σχ. 5.14).
- αποστολή ολόκληρου του τροχοφόρου άξονα σε εργαστήριο "δεύτερου επιπέδου" (είτε ανήκει στην επιχείρηση χειρισμού αμαξοστοιχιών είτε σε εξωτερικό μηχανοστάσιο) για την πλήρη αναθεώρηση όταν η φθορά φθάσει στο μέγιστο επίπεδο (δηλαδή οι τροχοί δεν μπορούν να επαναπροσδιοριστούν) τα ελαττώματα δεν μπορούν να διορθωθούν (π.χ. πολύ μεγάλες επιφάνειες τροχών) ή απλώς και μόνο επειδή το καθορισμένο διάστημα (χρόνος) ή διάρκεια ζωής (km) που εκτελείται από το σύνολο τροχών έχει φτάσει στο όριο που υποδεικνύεται στο σχέδιο συντήρησης.

Τα εργαστήρια του δεύτερου επιπέδου αποσυναρμολογούν τα λιποκιβώτια , τα έδρανα και τους τροχούς από τον άξονα και στη συνέχεια εκτελούν τις δοκιμές στον

άξονα. Οι καινούριοι τροχοί τοποθετούνται σύμφωνα με μία από τις πρακτικές (συμπύεση ή συρρίκνωση) και στη συνέχεια στρέφονται με συμβατικούς τóρνους.

Είναι προφανές ότι αυτό το πρόγραμμα συντήρησης λειτουργεί καλά, αλλά αναγκάζει τη μετακίνηση βαρέων και χύδην αξόνων σε εξειδικευμένα εργαστήρια όπου απαιτούνται ακριβά εργαλεία και εξοπλισμός (φούρνοι θέρμανσης / υδραυλικές πρέσες, μεγάλοι τóρνοι). Η συντήρηση των τροχοφόρων αξόνων είναι δαπανηρή, χρονοβόρα, πολύπλοκη. [20]



Σχ. 5.14 Τόρνος επισκευής τροχών[20]

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη πτυχιακή εργασία μελετήθηκε η μηχανική των σιδηροδρομικών συστημάτων. Όπως αναφέρθηκε ο σιδηρόδρομος αποτελεί το μέσο μεταφοράς του οποίου τα οχήματα κινούνται πάνω στις σιδηροτροχιές.

Τα οχήματα διακρίνονται σε ελκόμενα και έλκοντα. Τα ελκόμενα χρησιμοποιούνται για να έλκουν τα έλκοντα με τη χρήση κινητήριων μονάδων. Ανάλογα με τις κινητήρια μονάδα διακρίνονται σε ντηζελάμαξες, ηλεκτράμαξες, ατμάμαξες και αεριστροβιλάμαξες. Τα οχήματα του σιδηροδρόμου αποτελούν το τροχαίο υλικό του. Το τροχαίο υλικό αποτελείται από τρία τμήματα: το αμάξωμα, το φορείο και τον άξονα. Το αμάξωμα αποτελεί το τμήμα στο οποίο μεταφέρονται οι επιβάτες και τα εμπορεύματα. Το φορείο αποτελεί το μέσο κίνησης διότι σε αυτό στηρίζεται η κίνηση του συρμού. Τα βασικά μέρη του είναι το πλαίσιο, οι αναρτήσεις, οι αποσβεστήρες, τα λιποκιβώτια και οι άξονες. Ο άξονα αποτελεί το τμήμα το οποίο μεταδίδει τη κίνηση στους τροχούς και μεταβιβάζει μέσω αυτών τα φορτία που ασκούνται στο συρμό.

Η σιδηροτροχιά αποτελεί το τμήμα της γραμμής πάνω στο οποίο κινούνται τα σιδηροδρομικά οχήματα. Ο ρόλος της ύπαρξή της είναι η μεταφορά και κατανομή των φορτίων κυκλοφορίας στο έδαφος θεμελίωσης. Επιπλέον, συμβάλλουν στη στήριξη και καθοδήγηση των τροχών. Τα βασικά της μέρη είναι η κεφαλή, ο κορμός και το πέλμα.

Με τον όρο σιδηροδρομικό σύστημα νοείται η αλληλεπίδραση και η επαφή μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς. Η μηχανική των σιδηροδρομικών συστημάτων εκφράζει τις δυνάμεις που δρουν στο σύστημα και τις επιπτώσεις τους. Οι δυνάμεις που δρουν στο σιδηροδρομικό σύστημα (τροχό – σιδηροτροχιά) διακρίνονται σε εγκάρσιες και διαμήκεις. Αυτές έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσεων επαφής. Οι τάσεις επαφής είναι μεταβαλλόμενες με το χρόνο με αποτέλεσμα να δημιουργούν κόπωση στην επιφάνεια τόσο του τροχού όσο και της σιδηροτροχιάς.

Στη παρούσα εργασία υπολογίστηκαν οι δυνάμεις οι οποίες ασκούνται στο σύστημα. Στη συνέχεια μέσω δεδομένων και γραφικών παραστάσεων υπολογίστηκε η συνολική δύναμη που δρα στο σύστημα. Αφού υπολογίστηκε, στη συνέχεια υπολογίστηκαν η μέγιστη και η ελάχιστη τάση επαφής. Από της τάσεις αυτές

υπολογίστηκαν η μέση τάση και το πλάτος τάσης κατά τη κόπωση του συστήματος. Τέλος με τη χρήση του κανόνα του Soderberg υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας  $K$  με στόχο να γίνει κατανοητό αν το σύστημα θα αντέξει σε λίγους ή πολλούς κύκλους φόρτισης  $N$ . Στη συγκεκριμένη εφαρμογή το σύστημα αντέχει σε υψηλούς κύκλους φόρτισης.

Οι δυνάμεις που δρουν στο σύστημα και οι τάσεις που αναπτύσσονται δημιουργούν φθορά στο τροχαίο υλικό και στις σιδηροτροχιές. Τα κύρια τμήματα του τροχαίου υλικού που φθείρονται είναι ο τροχός και ο σιδηροδρομικός άξονας. Ένα άλλο τμήμα το οποίο φθείρεται είναι η σιδηροτροχιά. Η φθορά έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία των υλικών των τμημάτων αυτών. Λόγο της φθοράς ο σιδηρόδρομος αντιμετωπίζει το πρόβλημα του εκτροχιασμού. Ο εκτροχιασμός εκφράζει την οριστική απώλεια επαφής του τροχού με την σιδηροτροχιά. Τα αποτελέσματα του εκτροχιασμού είναι η καταστροφή περιουσιών και η απώλεια ανθρώπων.

Τέλος, ο εκτροχιασμός και η φθορά αντιμετωπίζεται με την συντήρηση των τμημάτων που καταπονούνται κατά τη λειτουργία του συρμού. Το φορείο ελέγχεται σε μια δοκιμαστική εξέδρα για να είναι κατάλληλο για κυκλοφορία. Οι τροχοί και οι άξονες όταν φθείρονται συνήθως επιδιορθώνονται με τη χρήση υποδαπέδιων τόνων. Οι σιδηροτροχιές επισκευάζονται μέσω μηχανημάτων και παρακολουθούνται τακτικά για την ασφαλή μεταφορά

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1.Ι.ΜΑΧΑΙΡΙΩΤΗΣ,

Πειραματική μέτρηση φθοράς σε σύστημα τροχού-σιδηροτροχιάς του Αττικού Μετρό Α.Ε για διαφορετικές συνθήκες τριβής , Διπλωματική Εργασία , Παν. Θεσ. Βόλος 2017

2. <https://en.wikipedia.org/wiki/Locomotive>

3.Μ.ΠΑΠΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ,

Διερεύνηση εγγραφής φορέων και περικυτώματος οχημάτων αστικών σιδηροδρόμων σε θέσεις μεγάλης οριζοντιογραφικής καμπυλότητα, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π , Αθήνα 2018

4.Ε.ΧΡΟΝΗΣ,

Βασικές αρχές σχεδιασμού και επιλογής φορέων σιδηροδρομικών οχημάτων – τεχνολογική εξέλιξη και έρευνα αγοράς, Διπλωματική Εργασία, Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη 2011

5.Θ.ΚΑΡΑΒΑΚΗΣ,

Διερεύνηση του δείκτη αντίδρασης εδάφους μέσω μετρήσεων βύθισης της σιδηροτροχιάς σε νέο τμήμα γραμμής του Ο.Σ.Ε στο Σ.Σ.ΛΙΑΝΟΚΛΑΔΙΟΥ, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π, Αθήνα 2017

6.Δ.ΠΑΧΟΥΜΗ,

Επιλογή τύπου σιδηροτροχιών με βάση τη λειτουργικότητα του και τις ειδικές συνθήκες και στοιχεία του σιδηροδρομικού συστήματος , Μεταπτυχιακή Διατριβή, Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη 2013

7.Μ.ΚΑΡΤΣΑΚΛΗ,

Εγκάρσιες και διαμήκεις δυνάμεις ασκούμενες στη σιδηροδρομική γραμμή – προβλήματα και αντιμετώπιση , Διπλωματική Εργασία, Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη 2008

8.Δ.ΔΙΑΚΑΤΟΣ, Ι.ΖΑΡΟΓΙΑΝΝΗΣ,

Κόπωση συνθέτων υλικών και κατασκευών , Πτυχιακή Εργασία , Τμήμα  
Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕΙ ΔΥΤ ΕΛ, Πάτρα 2018

9.W. D. CALLISTER,

Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2004

10.N. ΜΠΑΤΣΟΥΛΑΣ,

Τριβολογία, Εκδόσεις ΤΕΙ, Πάτρα 2017

11.Χ.ΠΥΡΓΙΔΗΣ,

Συστήματα σιδηροδρομικών μεταφορών,2 έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη  
2015

12.Χ.ΠΥΡΓΙΔΗΣ,

Εγγραφή σιδηροδρομικών φορέων νέας τεχνολογίας σε καμπύλες, Τεχνικά Χρονικά,  
13 (1993), 109-134

13.M.BANNASCH

Materials used for wheels Rolling stock, Technical Centre, Research, Germany 2008

14.MR. HABTAMU TKUBET,

Analysis of Fatigue Failure on Motor Powered Train, Μεταπτυχιακή Διατριβή,  
Ιαπωνία 2017

15.M.ΑΝΔΡΟΥΛΑΚΗ,

Διερεύνηση θεμάτων φθοράς και αποκατάστασή της επιφάνειας κύλισης  
σιδηροδρομικών τροχών, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π, Αθήνα 2013

16.Γ.ΔΟΚΟΥΜΕΤΖΙΔΗ,Δ. ΚΟΥΣΙΟΥ,Α. ΜΑΛΑΣΠΙΝΑ,

Συγκοινωνιακά έργα σιδηρόδρομοι - αερολιμένες, Ίδρυμα Ευγενίδου Αθήνα 1997

17.Α.ΣΤΡΟΥΜΠΟΥΛΗΣ,

Εκτροχιασμός σιδηροδρομικών οχημάτων – καταγραφής , ανάλυση και αξιολόγηση  
των μεθόδων ελέγχου σε εκτροχιασμό ,Διπλωματική Εργασία, Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη  
2015

18.Π. ΚΑΛΟΔΗΜΙΔΗΣ,

Συντήρηση τροχαίου υλικού σιδηροδρομικών συστημάτων στην Ελλάδα,  
Διπλωματική Εργασία, Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη 2014

19.Κ. ΓΙΑΝΝΑΚΟΣ,

Επιλεγμένα θέματα σιδηροδρομικής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών  
Μηχανικών 2009-2010

20.Α.ΒΡΑΚΚΙΑΛΙ,

Railway Wheelsets, International Journal of Railway Technology,5 (2016), 23-52